



建筑及空调风机的

工程设计、使用与维修

李海松◎主 编

赵晓燕 闫秋会 石雪松◎副主编

JIANZHU JI KONGTIAO FENGJI DE
GONGCHENG SHEJI SHIYONG YU WEIXIU



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

建筑及空调风机的工程 设计、使用与维修

主 编 李海松
副主编 赵晓燕 闫秋会 石雪松



机械工业出版社

本书共有 12 章, 全面系统地介绍了建筑及空调通风机设计、使用、维修及测试等方面的知识。内容包括基础理论; 风机的结构型式, 相似理论在通风机中的应用, 风机的振动与强度, 通风机的管网设计, 通风机噪声, 风机的安装、运行与维修, 风机试验, 建筑通风、空调风机的型号及性能参数, 建筑通风、空调规范, 建筑通风、空调工程设计范例等。本书还提供了一些具有实用价值的图表。

本书可供从事通风机设计、使用与维护、测试等方面的工程技术人员使用, 也可供大专院校相关专业师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

建筑及空调风机的工程设计、使用与维修/李海松
主编. —北京: 机械工业出版社, 2014. 6
ISBN 978 - 7 - 111 - 46543 - 0

I. ①建… II. ①李… III. ①房屋通风机 - 设计②房屋通风机 - 使用方法③房屋通风机 - 维修 IV.
①TU834. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 086469 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 沈 红 责任编辑: 沈 红 蒋有彩

版式设计: 霍永明 责任校对: 李锦莉

封面设计: 陈 沛 责任印制: 刘 岚

北京京丰印刷厂印刷

2014 年 8 月第 1 版·第 1 次印刷

169mm × 239mm · 21.75 印张 · 474 千字

0 001—3 000 册

标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 46543 - 0

定价: 58.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010) 68326294

机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010) 88379649

机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010) 88379203

策划编辑电话: (010) 88379778

封面无防伪标均为盗版

编 委 会

主任：石雪松

编委：李海松 闫秋会 赵晓燕 钟 浩
徐常武 朱晓农 冯成戈 唐秀文

前 言

随着人民生活水平的提高，制冷及空调用通风机也向着高效、低噪声、小型化等方向发展。近年来，随着国家对综合能耗进一步加强节能管理的要求日益严格，制冷及空调通风用通风机将会更加注意高效率。在用户正确合理选用、使用、安装、调试及维护方面也需要更多基本常识和知识。

本书共有 12 章，全面系统地介绍了通风机设计、使用、维护及测试等方面的知识。其内容包括离心通风机的基础理论知识、风机的结构型式，相似理论在通风机中的应用，风机的振动与强度，管网设计，噪声、安装、运行与维修，风机试验，建筑通风、空调风机的型号及性能参数，建筑通风、空调规范，建筑通风、空调工程设计规范等。

本书编写分工情况如下：第 1 章、第 2 章、第 7 章由西安电力高等专科学校赵晓燕副教授编写；第 3 章、第 5 章、第 10 章由中国通用机械工业协会副秘书长、风机分会秘书长石雪松编写；第 4 章、第 11 章、第 12 章由西安建筑科技大学闫秋会教授编写；第 6 章、第 8 章、第 9 章由西安电力高等专科学校李海松副教授编写。全书由原中国通用机械工业协会风机分会秘书长、沈阳鼓风机研究所副所长钟浩、徐常武主审，由徐常武做了本书的整理工作。本书编写前期曾得到合肥通用研究所朱晓农等同志的帮助，本书的出版得到了佛山市南海九洲普惠风机有限公司的大力支持，这里一并表示感谢。

本书可供从事通风机设计、使用与维护、测试及实际运行等方面的工程技术人员参考。由于我们的水平有限、经验不足，书中难免存在缺点和错误，希望读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第 1 章 基础知识	1
1.1 气体的主要状态参数	1
1.2 理想气体的状态方程	2
1.3 连续性方程	3
1.4 伯努利方程	4
1.5 欧拉方程	7
1.6 能量损失	11
1.7 混合气体和湿空气	14
1.8 可压缩性的概念	19
第 2 章 一元流动理论和基本概念	22
2.1 研究流体流动的方法	22
2.2 迹线与流线	23
2.3 一元流动、二元流动及三元流动	24
第 3 章 相似理论在通风机中的应用	26
3.1 通风机的相似原理	26
3.2 通风机性能的相似换算	30
3.3 比转数	32
3.4 通风机的其他系数	34
3.5 相似设计	39
3.6 通风机的性能曲线	41
第 4 章 常用风机的结构型式	48
4.1 常用风机的分类	48
4.2 一般建筑、通风、空调用离心风机结构	50
4.3 一般建筑、通风、空调用轴流风机结构	52
第 5 章 风机的安装、运行及维修	58
5.1 风机的安装	58
5.2 风机的运行	64
5.3 风机的维修	70
5.4 常见故障分析	74
第 6 章 通风机管网设计	76
6.1 管道设计的基本知识	76
6.2 通风机管网及管网特性	79

6.3	串联管网和并联管网的特性	82
6.4	通风机在管网中的工作	84
6.5	管道的沿程压力损失	88
6.6	管道的局部压力损失	131
第7章	风机的振动与强度	176
7.1	风机振动机理	176
7.2	风机振动故障分析	182
7.3	风机减振措施	185
7.4	风机振动测量技术	194
7.5	通风机叶轮的强度计算	210
7.6	主轴的强度计算	221
第8章	通风机噪声	224
8.1	声波和噪声	224
8.2	声强与声强级	225
8.3	声压与声压级	227
8.4	声压级的合成	229
8.5	声功率与声功率级	230
8.6	倍频程和1/3倍频程	232
8.7	噪声的评价	233
8.8	通风机噪声产生的原因	235
8.9	通风机声功率级和比声功率级	236
8.10	通风机噪声和性能的关系	239
8.11	通风机的噪声频谱	240
8.12	通风机的噪声特性	242
8.13	通风机噪声测量仪器	245
8.14	通风机噪声的测定	249
8.15	通风机的噪声控制	252
第9章	风机试验	258
9.1	风机试验的分类及目的	258
9.2	常用仪器仪表及测定方法	259
9.3	国内外通风机产品试验标准	263
9.4	通风机空气动力性能试验装置	264
9.5	流量测定方法及计算公式	268
9.6	标准风道的阻力件及其损失计算方法	270
9.7	试验数据处理计算框图	271
第10章	常用建筑和空调风机的型号及性能参数	272
10.1	建筑通风换气用风机的选用	272
10.2	消防排烟用风机的选用	283
10.3	空调风机的选用	290

10.4 厨房抽油烟风机的选用	297
10.5 管道加压风机的选用	298
10.6 厂房通风换气风机的选用	307
第 11 章 建筑通风和空调规范	311
11.1 建筑通风设计规范	311
11.2 建筑消排烟设计规范	316
11.3 建筑空调设计规范	320
第 12 章 建筑通风和空调工程设计范例	329
12.1 风机选型注意事项	329
12.2 工程设计实例	333
参考文献	337

第1章 基础知识

通风机是用于输送气体的机械，是把原动机的机械能转变为气体能量的机械。

1.1 气体的主要状态参数

用以描述气体状态特征的物理量称为状态参数。其中压力、温度、比体积称为气体的基本状态参数，也是其最主要的状态参数。

1. 压力

垂直作用于容器壁单位面积上的力，称为压力，也称压强，常用符号 p 表示。

$$p = \frac{F}{A} \quad (1-1)$$

式中， F 为垂直作用于整个容器壁的力 (N)； A 为 F 力作用的容器壁的总面积 (m^2)。

根据分子运动论的观点，压力是由于大量气体分子撞击容器内壁的结果。压力的单位为帕斯卡 (简称帕) 用符号 Pa 表示。工程中因帕的单位太小，常用兆帕 (MPa) 为单位， $1\text{MPa} = 10^6\text{Pa}$ 。

现有的通风机，工程中还有使用非法定计量单位，例如： mmH_2O 或 kgf/m^2 (工程中近似认为 $1\text{mmH}_2\text{O} = 1\text{kgf}/\text{m}^2$)、 mmHg 、 bar 、 atm 、 at 等作为压力单位，它们之间的单位换算见表 1-1。

表 1-1 压力单位换算

帕斯卡 (Pa)	巴 (bar)	标准大气压 (atm)	工程大气压 (at)	毫米汞柱 (mmHg)	毫米水柱 (mmH ₂ O)
1	1×10^{-5}	9.869×10^{-6}	1.02×10^{-5}	7.5×10^{-3}	1.02×10^{-1}
1×10^{-5}	1	9.869×10^{-1}	1.02	7.5×10^2	1.02×10^4
1.013×10^5	1.013	1	1.033	760	1.033×10^4
9.806×10^4	9.809×10^{-1}	9.6787×10^{-1}	1	735.559	1×10^4
133.322	133.322×10^{-5}	1.316×10^{-3}	1.36×10^{-3}	1	13.595
9.806	9.806×10^{-5}	9.678×10^{-5}	1×10^{-4}	735.559×10^{-2}	1

压力的测量常用弹簧管压力表或 U 形管压力计，后者用于测量微小压力。压力计所读出的压力数值是测量处气体的真实压力 (绝对压力) 与外界大气压力的差值，称为表压或相对压力，用符号 p_g 表示。测量处气体的真实压力，即绝对压力，用符号 p 表示，它们之间的关系可表示为

$$p = p_g + p_a \quad (1-2)$$

式中, p_a 为外界大气压力。

如测量处气体的绝对压力低于大气压力, 则称该处具有真空, 或处于负压状态。真空常用符号 p_v 表示, 则

$$p_v = p_a - p \quad (1-3)$$

注意: 只有绝对压力才能代表气体的状态参数。

2. 温度

宏观上, 温度是描述气体在平衡状况时冷热程度的物理量。若有热量从一物体传给另一物体, 即表明它们的温度不同。微观上, 温度是大量分子热运动强烈程度的量度, 温度与分子运动动能之间的关系为

$$\frac{1}{2}mc^2 = BT \quad (1-4)$$

式中, $\frac{1}{2}mc^2$ 为分子平移运动的动能, 其中 m 是一个分子的质量, c^2 为分子平移运动的均方根速度; B 为比例常数; T 为气体的热力学温度。

当 T 为零时, 显然速度 c 就是零, 故绝对零度就是分子停止运动的温度。热力学温度用符号 T 表示, 单位是开尔文 (简称开), 以符号 K 表示。热力学温度单位开尔文是水的三相点 (纯水、纯冰和水蒸气平衡共存的状态点) 温度的 $1/273.16$ 。

摄氏温度用符号 t 表示, 单位为摄氏度, 以符号 $^{\circ}\text{C}$ 表示。它们之间的换算关系为

$$T = 273 + t \quad (1-5)$$

显然, 两种温度的每一温度间隔的大小完全一致, 这样不论采用哪一种温度, 其差值相同, 即 $\Delta T = \Delta t$ 。

3. 比体积和密度

比体积是指单位质量的气体所占有的体积, 用符号 v 表示, 单位为 m^3/kg 。比体积是表示气体内部分子疏密程度的状态参数, 比体积越大, 气体内部分子之间的距离就越大, 气体内部分子越稀疏。

比体积的倒数称为密度, 用符号 ρ 表示, 是指单位体积的物质所具有的质量, 单位为 kg/m^3 。

国家标准规定, 当风机的进口状态的压力为 101325Pa (760mmHg), 温度为 20°C , 相对湿度为 50% 的湿空气状态, 称为标准进气状态。

1.2 理想气体的状态方程

1. 理想气体与实际气体

自然界中存在的气体称为实际气体。其分子具有一定的体积, 相互之间具有作用力。实际气体的性质复杂, 很难找出其分子运动的规律, 故为了简化分析计算, 提出了理想气体的概念。

理想气体是一种实际上不存在的假想气体，它的分子是弹性的、不占体积的质点，分子之间没有相互作用力。这种气体性质简单，便于用简单的数学关系式进行分析计算。

通风机中的气体一般都可以按理想气体进行分析和计算，并能保证满意的精确度。

2. 理想气体状态方程

当理想气体处于任一平衡状态时，三个基本状态参数 p 、 v 、 T 之间的数学关系式为

$$pv = RT \quad (1-6)$$

式中， p 为气体的绝对压力 (Pa)； v 为气体的比体积 (m^3/kg)； R 为气体常数 [$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]； T 为气体的热力学温度 (K)。

气体常数 R 仅取决于气体的种类，与气体所处的状态无关。也就是说，对于同一种气体，不论在什么状态下，气体常数 R 的值恒为常数，而不同种类的气体， R 值则不同。

式 (1-6) 称为理想气体的状态方程，它简单地反映了平衡状态下理想气体基本状态参数之间的具体函数关系。

式 (1-6) 是对 1kg 气体而言的。

对于任何理想气体，只要摩尔质量 M (kg/mol) 已知，就可以用式 (1-7) 计算其气体常数 R [$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]：

$$R = \frac{8.314}{M} \quad (1-7)$$

对于 $m\text{kg}$ 的气体，其状态方程可写为

$$pv = mRT \quad (1-8)$$

若一定量的气体，其状态发生了变化，则

$$\frac{p_1 v_1}{T_1} = \frac{p_2 v_2}{T_2} \quad (1-9)$$

式 (1-6)、式 (1-8)、式 (1-9) 是理想气体状态方程式的不同表达形式。

3. 理想气体的过程方程

气体在与其周围外界发生能量传递和转化时，其状态将发生变化，即由开始状态，经过一系列的中间状态变化到最终状态。其整个变化过程，称为气体的热力过程。开始的状态称为初态，终了时的状态称为终态，其状态参数之间的关系可表示为：

$$p_1 v_1^m = p_2 v_2^m = \text{常数} \quad (1-10)$$

式中， m 为多变指数。

式 (1-10) 称为过程方程。其特例有：① $m = 0$ ，则 $p = \text{常数}$ ，称为定压过程；② $m = 1$ ，则 $pv = \text{常数}$ ，称为等温过程；③ $m = k$ ，则 $pv^k = \text{常数}$ ，称为绝热过程， k 为等熵指数，对于空气， $k = 1.4$ ；④ $m = \infty$ ，则 $v = \text{常数}$ ，称为定容过程。

1.3 连续性方程

连续方程式是在质量守恒定律的基础上建立起来的，可表述为：单位时间内流入控

制体的气体质量与流出控制体的气体质量相等，且等于常数。连续性方程式普遍适用于任何工质的稳定而连续的流动。

设有一任意流道（见图 1-1），流道中截面 1-1 的截面积为 A_1 (m^2)，气体流经此处时的比体积为 v_1 (m^3/kg)，流速为 c_1 (m/s)。则单位时间内流过 1-1 截面的质量，即质量流量 q_{m1} 为

$$q_{m1} = \frac{A_1 c_1}{v_1}$$

同理，流过 2-2 截面的质量流量为：

$$q_{m2} = \frac{A_2 c_2}{v_2}$$

根据能量守恒定律，各截面的质量流量应相等，即

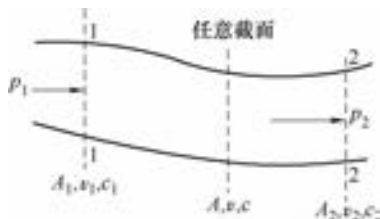


图 1-1 通过流道的一维稳定流动

$$q_m = \frac{A_1 c_1}{v_1} = \frac{A_2 c_2}{v_2} = \frac{Ac}{v} = \text{常数} \quad (1-11)$$

式中， q_m 为质量流量 (kg/s)。

式 (1-11) 即为稳定流动的连续性方程式。它给出了流速、截面积与比体积之间的关系。这个关系式是计算管道截面积和流量的基本公式。

在通风机中，由于气体压力较小，压力变化也较小，气体在流动中可近似认为其密度不变，式 (1-11) 可简化为

$$q_v = A_1 c_1 = A_2 c_2 = \text{常数} \quad (1-11a)$$

式中， q_v 为体积流量 (m^3/s)。

式 (1-11a) 是不可压缩流体的连续性方程式。它说明不可压缩流体在流动过程中，不仅质量流量保持不变，而且体积流量也保持不变，其流体的速度与横截面积成反比。江面窄处水流速度大，江面宽处水流缓慢的现象，正是体现连续性方程的道理。

【例题 1】 已知某通风管道的进口直径为 40cm，速度为 20m/s，出气口的面积为 $40 \times 24 \text{cm}^2$ 。求出气口的速度。

解：对于通风管道，可采用不可压缩流体的连续性方程求解： $A_1 c_1 = A_2 c_2$ ，则 $c_2 =$

$$\frac{c_1 A_1}{A_2}。由于 A_1 = \frac{\pi}{4} d_1^2，所以 c_2 = 20 \times \frac{\frac{\pi}{4} \times 40^2}{40 \times 24} \text{m/s} = 26.2 \text{m/s}$$

1.4 伯努利方程

同质量守恒一样，能量守恒是流体流动必须遵循的又一普遍规律。伯努利方程反映了流体流动的能量守恒规律。此方程是管道计算的核心方程式。

1. 伯努利方程的表达式

(1) 理想流体沿同一微元流束（也就是沿流线）的表达式

$$z + \frac{p}{\rho g} + \frac{u^2}{2g} = \text{常数} \quad (1-12)$$

若 1、2 两点为同一条流线（或微元流束）上的任意两点，则

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} \quad (1-12a)$$

式中， z_1 、 z_2 为 1、2 两点距离位置基准面的高度（m）； p_1 、 p_2 为 1、2 两点处气体的压力（Pa）； u_1 、 u_2 为 1、2 两点处气体的流速（m/s）。

式（1-12a）适用于理想的不可压缩流体。

在通风机中，因气体的密度较小，由气体位置变化引起的位能相对压力能及动能可以忽略不计，故式（1-11）可变为

$$\frac{p}{\rho} + \frac{u^2}{2} = \text{常数} \quad (1-12b)$$

（2）粘性流体微元流束的伯努利方程 对于实际流体，由于存在粘滞性，运动时产生内摩擦力，单位质量的流体，由 1-1 断面流至 2-2 断面，必须克服内摩擦阻力而做功，同时要消耗机械能为代价（变为热能等耗散掉），因此实际流体的机械能沿流程并不守恒，而是沿程不断减少，即

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} > z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g}$$

如将 1-1、2-2 断面间的机械能损失以 h_w' 表示，则得出实际流体微元流束的伯努利方程式为

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} + h_w' \quad (1-13)$$

（3）粘性流体一元总流的伯努利方程 式（1-13）是微元流束伯努利方程式，而总流是由无限个微元流束组成的，对微元流束进行积分即可得出实际流体总流的伯努利方程式，即

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 c_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 c_2^2}{2g} + h_w \quad (1-14)$$

式中， α 为动能修正系数，其大小取决于有效截面上的流速分布规律，通常近似地认为 $\alpha \approx 1.0$ ； h_w 为两断面之间流体的能量损失（m）； c_1 、 c_2 为 1-1、2-2 断面处气体的平均流速（m/s）。

式（1-14）可简化为

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{c_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + \frac{c_2^2}{2} + gh_w \quad (1-14a)$$

（4）有能量输入时的伯努利方程 前面各方程式是在没有外功（能量）加入的情况下得出的。在通风机中，是通过旋转的叶轮把原动机的机械能变成气体的能量。设风机传递给单位质量的气体的能量为 H ，单位为 m，则风机出、进口气体总能量之差就是叶轮对气体所做的功，即

$$H = \frac{p_2 - p_1}{\rho g} + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2g} + h_w \quad (1-15)$$

式(1-15)表明,叶轮给单位体积的气体所做的总功用于提高气体的静压能、动能,并克服各种损失。此时,风机叶轮对气体所做的有效功为

$$P_e = \frac{\rho g q_v H}{1000}$$

式中, P_e 为风机的有效功率(kW); q_v 为风机通过的体积流量(m^3/s)。

2. 伯努利方程的应用举例

(1) 静力学基本方程 这是伯努利方程的特例。当流体处于静止状态时,速度为零,流动损失也为零,则

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} = \text{常数} \quad (1-16)$$

式(1-16)称为静力学基本方程式,用于解决静止液体静压力的测量、计算问题。

(2) 皮托管 要测量管道中流体的速度,可采用皮托管来进行。

图1-2所示为皮托管示意图。它是由光滑黄铜管或不锈钢管经过精密加工制成。皮托管正对着气流方向的测孔所测得的是气流的全压;皮托管侧孔所测得的是气流的静压。皮托管上的全压或静压小管与U形管的一端相连,而U形管另一端通大气,测得的即为全压(表压)或静压(表压)。将皮托管的全压及静压小管分别与U形管的两端相连时,测得的是动压。

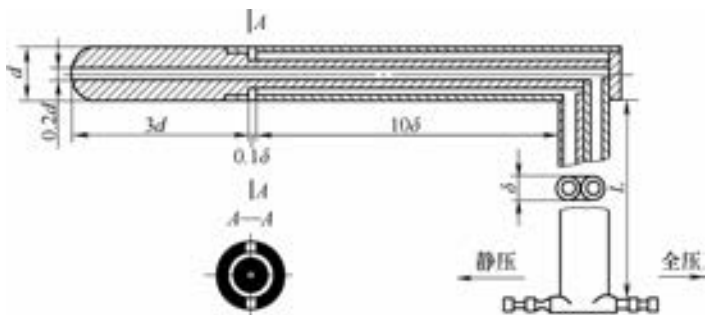


图1-2 皮托管

用上述方法测得风道某截面的动压 p_d 后,应用伯努利方程,用式(1-17)计算气流速度:

$$c = \sqrt{\frac{2}{\rho} p_d} \quad (1-17)$$

式中, c 为气流速度(m/s); p_d 为气体的动压(Pa); ρ 为气体的密度(kg/m^3)。

图1-3所示为测风机进气集流器的流量。

将伯努利方程应用于0-0和1-1截面上。0-0截面为大气,故其压力(表压) $p_0 = 0$, 且速度 $c_0 = 0$ 。

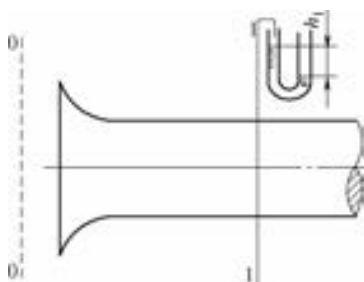


图1-3 测风机进气集流器的流量

故有

$$0 + 0 = \frac{p_1}{\rho} + \frac{c_1^2}{2} \quad \text{或} \quad c_1 = \sqrt{2 \left| \frac{-p_1}{\rho} \right|}$$

集流器流量为

$$q_{v1} = A_1 \varphi c_1 = A_1 \varphi \sqrt{2 \left| \frac{-p_1}{\rho} \right|} \quad (1-18)$$

$$p_1 = -\rho' gh$$

式中, φ 为流量系数, 对圆弧形集流器 $\varphi = 0.99$, 对锥形集流器 $\varphi = 0.96$; p_1 为压力其值为负值; ρ' 为 U 形管中工作流体的密度。

1.5 欧拉方程

1. 流体在叶轮内的运动及速度三角形

流体在叶轮中除作旋转运动外, 同时还从叶轮进口向出口流动, 因此流体在叶轮中的运动是一种复合运动。图 1-4 示出流体在叶轮内运动的圆周速度、相对速度和绝对速度。

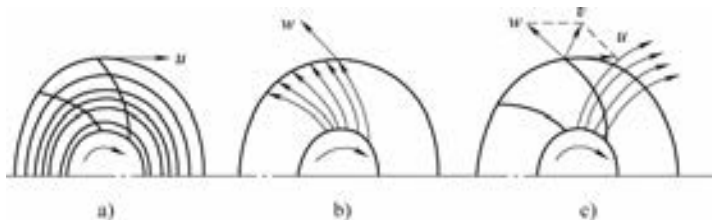


图 1-4 流体在叶轮内运动的圆周速度、相对速度和绝对速度
a) 圆周速度 b) 相对速度 c) 绝对速度

当叶轮带动流体作旋转运动时, 流体具有圆周运动 (牵连运动), 见图 1-4a。其运动速度称为圆周速度, 用符号 u 表示, 其方向与圆周切线方向一致, 大小与所在半径及转速有关。

流体沿叶轮流道的运动, 称相对运动, 见图 1-4b, 其运动速度称相对速度, 符号 w 表示, 其方向为叶片的切线方向、大小与流量及流道形状有关。

流体相对静止机壳的运动, 称绝对运动, 见图 1-4c, 其运动速度称绝对速度, 用符号 v 表示。它是以上两个速度的向量和, 即

$$v = u + w \quad (1-19)$$

由这三个速度矢量组成的矢量图, 称为速度三角形, 见图 1-5。图中, v_u 为绝对速度在圆周方向的分

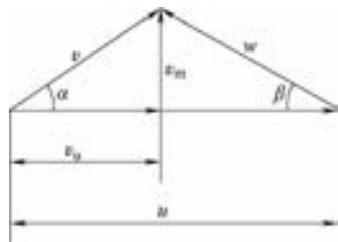


图 1-5 速度三角形

量,称为圆周分速度; v_m 为绝对速度在轴向的分量,称为轴向速度; α 是绝对速度与圆周速度之间的夹角,称为绝对速度角; β 是相对速度与圆周速度反方向的夹角,称为流动角。

通常将叶片切线与圆周速度反方向之间的夹角,称为叶片安装角,用 β_a 表示。当流体沿叶片切线运动时, $\beta = \beta_a$ 。

叶轮叶片进、出口处的圆周分速度为

$$v_{1u} = v_1 \cos\alpha_1 \quad v_{2u} = v_2 \cos\alpha_2$$

叶轮进、出口的轴向速度为

$$v_{1m} = v_1 \sin\alpha_1 \quad v_{2m} = v_2 \sin\alpha_2$$

速度三角形一般只需已知三个条件就可画出。根据风机的设计参数,可以求出 u 、 v_m 和 β 角。

(1) 求圆周速度 u (m/s)

$$u = \frac{\pi D n}{60} \quad (1-20)$$

式中, D 为叶轮直径(计算点的直径) (m); n 为叶轮转速 (r/min)。

(2) 求轴向速度 v_m (m/s)

$$v_m = \frac{q_{VT}}{A} = \frac{q_V}{A\eta_V} \quad (1-21)$$

式中, q_{VT} 为理论流量 (m^3/s); q_V 为实际流量 (m^3/s); η_V 为容积效率 (%); A 为有效截面积(与轴向速度 v_m 垂直的面积) (m^2)。

考虑到有效截面积被叶片厚度占去一部分,此时

$$v_m = \frac{q_V}{\pi D b \eta_V \psi} \quad (1-22)$$

$$\psi = 1 - \frac{z\sigma}{\pi D}$$

式中, ψ 为排挤系数; z 为叶片数; σ 为圆周方向的叶片长度; b 为叶片宽度。

(3) 求相对速度 w 的方向或 β 角 当叶片无限多时,相对速度 w 的方向应与叶片表面相切, β 与叶片安装角 β_a 相等。 β_a 在设计时是根据经验数值选取的。

求出 u 、 v_m 及 β 后,即可按比例画出速度三角形。

2. 能量方程式(欧拉方程)

能量方程式是建立流体通过旋转叶轮时,获得能量的定量关系式。此方程式是欧拉在 1756 年首先推导出来的,所以又称欧拉方程。

叶轮对气体做功的计算是一个十分重要的问题,为了研究方便,先做几点假设。

(1) 假设

1) 理想叶轮。叶片数目无限多,叶片厚度无限薄。流体质点严格沿叶片型线流动,即流线与叶片的型线重合。因此可以认为沿圆周各点的速度相等,即气流是轴向对称的。

2) 流体为理想、不可压缩流体。通风机工作时无能量损失, 则原动机加到风机轴上的能量, 等于被输送气体所获得的能量; 另外, 因通风机升压较小, 则进、出口的气体密度可视为不变, 当做不可压缩流体看待。

3) 气体在做稳定流动。

(2) 能量方程的表达式 已知原动机传给风机轴的功率 (即轴功率) $P(W)$ 为

$$P = M\omega$$

式中, M 为通风机叶轮轴的力矩 ($N \cdot m$); ω 为通风机叶轮的旋转角速度 ($1/s$)。

假定通风机的体积流量为 q_{VT} (m^3/s), 通风机的全压为 $p_{T\infty}$ (Pa), 则气体获得的功率 $P(W)$ 为

$$P = q_{VT}p_{T\infty}$$

说明: 凡符号下标为“ ∞ ”者, 均表示叶片数为无穷多叶轮的参数。

根据上述假设, 加给通风机叶轮上的能量全部传给气体, 并无任何损失, 则无限多叶片的理论压力为

$$p_{T\infty} = \frac{M\omega}{q_{VT}}$$

根据动量矩定律: 单位时间内由叶轮出口流出的气体动量对轴线的动量矩, 与叶片入口处流入的气体动量对轴线的动量矩之差, 等于加给气体的外力对同一轴线的力矩之和, 从而可得:

$$P = q_{VT}p_{T\infty} = q_{VT}\rho(R_2v_{2u\infty} - R_1v_{1u\infty})\omega = q_{VT}\rho(u_2v_{2u\infty} - u_1v_{1u\infty})$$

式中, R_1 为叶片入口处半径 (m); R_2 为叶片出口处半径 (m)。

$$p_{T\infty} = \rho(u_2v_{2u\infty} - u_1v_{1u\infty}) \quad (1-23)$$

式 (1-23) 即为能量方程的表达式。式中, 凡符号下标有“ ∞ ”者, 均表示叶片数为无穷多叶轮的参数。

当气流的绝对速度沿半径方向进入叶片时, 即 $v_{1u\infty} = 0$, 则

$$p_{T\infty} = \rho u_2 v_{2u\infty}$$

如果通风机叶轮入口前有导流器, 则可用改变导叶角度的方法, 以改变式 (1-23) 中的 $v_{1u\infty}$ 的大小和方向, 从而改变风机的压力。

式 (1-23) 可变换为另一形式。由叶片进、出口处的速度三角形, 得

$$w_{2\infty}^2 = v_{2\infty}^2 + u_2^2 - 2u_2v_{2\infty}\cos\alpha_{2\infty}$$

$$w_{1\infty}^2 = v_{1\infty}^2 + u_1^2 - 2u_1v_{1\infty}\cos\alpha_{1\infty}$$

而 $v_{2\infty}\cos\alpha_{2\infty} = v_{2u\infty}$, $v_{1\infty}\cos\alpha_{1\infty} = v_{1u\infty}$, 则

$$u_2v_{2u\infty} = \frac{1}{2}(v_{2\infty}^2 + u_2^2 - w_{2\infty}^2)$$

$$u_1v_{1u\infty} = \frac{1}{2}(v_{1\infty}^2 + u_1^2 - w_{1\infty}^2)$$

代入式 (1-23) 后, 得

$$p_{T\infty} = \frac{\rho}{2}(v_{2\infty}^2 - v_{1\infty}^2) + \frac{\rho}{2}(u_2^2 - u_1^2) + \frac{\rho}{2}(w_1^2 - w_2^2) \quad (1-24)$$

式 (1-24) 即为能量方程的另一种表达式。

式 (1-24) 右边的第一项, 表示气体经过叶轮后动压的增高, 用 $p_{d\infty}$ 表示; 第二项和第三项之和, 表示静压的增高, 用 $p_{st\infty}$ 表示, 则

$$p_{T\infty} = p_{d\infty} + p_{st\infty} \quad (1-25)$$

叶轮中气体静压的增高值与全压的增高值之比, 称作反作用度, 用 Ω 表示, 则

$$\Omega = \frac{u_2^2 - u_1^2 + w_{1\infty}^2 - w_{2\infty}^2}{2(u_2 v_{2u\infty} - u_1 v_{1u\infty})} \quad (1-26)$$

反作用度的大小表征气体在叶轮中获得的静压值的大小。反作用度越大, 气体在叶轮中获得的静压越大, 而其叶轮出口动压越小, 对提高风机效率有利。

(3) 能量方程式的修正 实际情况下, 叶轮叶片数有限, 流体具有粘性, 因而实际应用时, 应对式 (1-23) 进行修正。

实践证明, 当理想流体在有限叶片叶轮内流动时, 气体流经叶道除了相对流动之外, 还存在轴向涡流。由于轴向涡流的存在, 使气流在叶轮出口处的相对速度产生偏离, 而不是沿叶片该点切线方向流出, 即出口气流角 β_2 小于叶片出口安装角 β_{2a} 。故有限叶片数时气体的 $v_{2u} < v_{2u\infty}$, 则有限叶片数叶轮的理论压力为

$$p_T = K p_{T\infty} \quad (1-27)$$

式中, K 为环流系数。

关于环流系数 K 大小的确定, 目前通风机中大多采用经验或半经验公式计算。常用的公式有斯陀道拉近似公式和爱克公式。

1) 斯陀道拉近似公式。对于后弯式叶片, K 为

$$K = 1 - \frac{u_2 \pi \sin \beta_{2a}}{z \left(u_2 - \frac{q_v}{\pi D_2 b_2 \tan \beta_{2a}} \right)} \quad (1-28)$$

此方法未考虑叶片的曲率。后向叶片的曲率半径比较大, 故采用式 (1-28) 计算较为有效; 当叶片较长, 叶片数目较多时, 用式 (1-28) 计算比较准确。

对于径向叶片, K 为

$$K = 1 - \frac{\pi}{2} \quad (1-29)$$

2) 爱克公式。对前后盘平行的叶轮, K 为

$$K = \frac{1}{1 + \sin \beta_{2a} \frac{\pi}{z \left[1 - \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 \right]}} \quad (1-30)$$

试验结果表明, 当 $30^\circ < \beta_{2a} < 50^\circ$ 时, 式 (1-30) 计算结果较正确。

当 $\beta_{2a} = 20^\circ \sim 45^\circ$ 时, K 按式 (1-31) 计算:

$$K = \frac{1}{0.9 + 3.7 \frac{\beta_{2a}}{90} + \frac{1}{z \left[1 - \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 \right]}} \quad (1-31)$$

对于前弯叶片， K 为

$$K = \frac{1}{1.5 + 1.1 \frac{\beta_{2a}}{90} + \frac{1}{z \left[1 - \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 \right]}} \quad (1-32)$$

大量的试验说明， $\beta_{2a} = 20^\circ \sim 170^\circ$ 时用式(1-32)计算为好。

当考虑流体粘性的影响时，由于粘性流体在叶轮中流动时，有流动阻力，使风机的全压降低，此时，风机实际的全压为

$$p = p_T \eta_h = K \eta_h p_{T\infty} \quad (1-33)$$

式中， η_h 为流动效率。

1.6 能量损失

实际流体在流动过程中要产生摩擦阻力。为了克服摩擦阻力以维持流动，流体中将有一部分机械能不可逆地损失掉。流动过程中的能量损失称为阻力损失。按照形成的原因，可分为沿程阻力损失和局部阻力损失两种。

由于流体本身具有粘性，流体内部及流体与固体凹凸不平的边界之间存在相对运动，有内摩擦力产生，通常称为流动阻力。摩擦产生的热量加热流体及所接触的物体，并通过固体边界散失到外界环境中去，这就是通常说的流动阻力产生的机械能损失。由于流体的粘性使各流层之间以及流体与固体边界之间产生的阻力，称为沿程阻力。沿程阻力引起的能量损失，称为沿程阻力损失，简称沿程损失，用符号 h_f 表示。沿程损失存在于整个流程中，除了与路程的长短有关外，还与流动的状态和固体边界的凹凸不平程度有关。

流体在流过固体边界急剧变化的区域时，能量损失主要集中在该区域及其附近，比如管道转弯、管道直径变化、管道阀门半开节流等。由于这些局部区域的突然变化引起的阻力，称为局部阻力。局部阻力引起的能量损失，称为局部阻力损失，简称局部损失，用符号 h_j 表示。局部损失与局部管件的结构形式有关，不同的结构变化引起的损失原因和损失大小是不一样的。

管道中的能量损失都是由均直管道中的沿程损失和各种形式的局部损失组成的，因此，管道某两断面之间的能量损失就可以表示为

$$h_w = \sum h_f + \sum h_j \quad (1-34)$$

阻力损失在管道系统的相关计算中是一个非常重要的参数。它的大小关系到工程管道系统的投资、设计、安装。

1. 流体流动的两种状态——层流与紊流

1883年,英国物理学家雷诺进行了见图1-6的实验。箱中水位恒定的水通过玻璃管B流出,流速的大小可以由装在玻璃管末端的阀门C来控制。水箱上部容器D中装有与水密度相近的着色液体,通过细管E沿玻璃管的轴线流出。

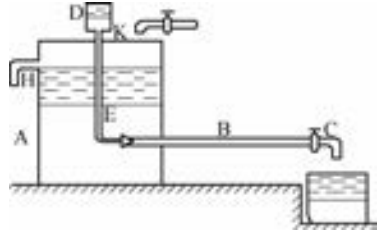


图1-6 雷诺实验装置

通过实验发现,在流速较小时,着色液体在玻璃管中呈现为一根直线,不与周围的液体相混杂。在此情况下,流体呈现一种有秩序的分层流动,称为层流。

当开大阀门,使流体流速增大到一定值时,着色液体就开始动荡发生弯曲,此时为一种临界状态。继续增大流速,着色液体发生扩散而与周围的液体相混杂。此时,流体质点在运动中不断地互相混杂,呈现出一种杂乱无章的流动,称为紊流。

2. 雷诺数 Re

层流和紊流这两种流动状态的形成,与流体的粘性系数 μ 、密度 ρ 、管道的特征尺寸为直径 d ,以及特征速度为管内的平均流速 c 等有关。根据量纲理论,上述诸参数可以组成一个量纲一的量:

$$Re = \frac{cd\rho}{\mu} = \frac{cd}{\nu} \quad (1-35)$$

式中, ν 为流体的运动粘滞系数(m^2/s), $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ 。

此量纲为1的量称为雷诺数。从雷诺实验可知,当流体做层流流动时,在 μ 、 ρ 和 d 不变的情况下,流速减少,意味着 Re 数减少,此时粘性力起着重要的作用。当流体做紊流流动时,流速的增大意味着 Re 数的增大,此时粘性力起的作用就相对地较小。流体流动从层流转变成紊流,可以理解为流体的运动丧失了稳定性。当流体流动受到外界扰动时,在某种情况下这种扰动会因流体内部粘性力对运动的阻尼作用而衰减,在另一种情况下则会继续扩展而使流动丧失其稳定性。因此,流动状态的变化取决于扰动和粘性力的抗衡程度,而 Re 数则是判别流动型态的准则数。

将流态转变时的流速称为临界流速,由层流向紊流转变和由紊流向层流转变时的临界流速是不同的,前者较大,称上临界流速,以 c'_{cr} 表示;后者较小,称下临界流速,以 c_{cr} 表示。

对应以上两个临界流速的雷诺数分别如下:

下临界雷诺数
$$Re_{cr} = \frac{c_{cr}d}{\nu}$$

上临界雷诺数
$$Re'_{cr} = \frac{c'_{cr} d}{\nu}$$

实际上水流总是受到各种因素的扰动，过渡状态的层流极不稳定，一受扰动，很容易变成紊流；而扰动又是经常发生的，因而下临界雷诺数（简称临界雷诺数）具有判别流态的实用价值。

实验证明，对于圆管， $Re_{cr} = 2300$ 。当 $Re \leq 2300$ 时，流动是层流； $Re > 2300$ 时，流动是紊流。

在通风机中，由于气流速度较大，大多数都是紊流状态。

3. 能量损失的计算

(1) 沿程损失的计算 气体在横断面不变的管道内流动时，沿程损失 h_f (m) 可按式 (1-36) 计算：

$$h_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{c^2}{2g} \quad (1-36)$$

沿程压力损失 Δp_m (Pa) 为

$$\Delta p_m = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho c^2}{2} \quad (1-37)$$

式中， Δp_m 为管道的沿程压力损失 (Pa)； λ 为沿程（摩擦）阻力系数； c 为管道内气体的平均流速 (m/s)； ρ 为气体的密度 (kg/m^3)； l 为管道的长度 (m)； d 为管道的直径 (m)。

对于非圆形管道，
$$d = 4R_s = \frac{A}{\chi} \quad (1-38)$$

式中， R_s 为管道的水力半径 (m)； A 为管道横断面面积 (m^2)； χ 为湿周，即横断面的周长 (m)。

沿程压力损失也可表示为

$$\Delta p_m = \lambda \frac{l}{4R_s} \frac{\rho c^2}{2} \quad (1-39)$$

而单位长度的沿程损失，通常称为比摩阻，用符号 p_m 表示。从式 (1-39) 可得出比摩阻 p_m (Pa/m) 为

$$p_m = \lambda \frac{1}{4R_s} \frac{\rho c^2}{2}$$

(2) 沿程阻力系数 对于大多数通风和空调系统中的管道，空气的流动处于紊流状态。其沿程阻力系数取决于雷诺数和管道内表面的相对粗糙度。

圆管道的沿程阻力系数可按式 (1-40) 计算：

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left(\frac{K}{3.71D} + \frac{2.51}{Re \sqrt{\lambda}} \right) \quad (1-40)$$

式中, K 为管道内表面的平均绝对粗糙度 (m); D 为管道内径 (m), 对于非圆形管道, $D = 4R_s$ 。

从式(1-40)可以看出, 当所设计的管道横断面尺寸和所输送的气体温度确定后, 沿程阻力系数取决于管道内气体的流速和管道内表面的相对粗糙度。

对于长、宽分别为 a 和 b 的矩形管道为

$$D = \frac{2ab}{(a+b)} \quad (1-41)$$

沿程阻力系数可按式(1-42)计算:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left(\frac{K}{3.71 \frac{2ab}{a+b}} + \frac{2.51}{Re \sqrt{\lambda}} \right) \quad (1-42)$$

1.7 混合气体和湿空气

1. 混合气体

通风机输送的气体往往不是单一成分, 而是由多种气体组成的混合物, 如空气, 还有烟气等。组成混合气体的各单一气体称为混合气体的组元, 当各组元均为理想气体时, 由它们所组成的混合气体也必定是理想气体, 因此, 前述理想气体热力性质的分析, 均适用于理想气体的混合物。

(1) 分压力定律和分容积定律 处于平衡状态下的理想气体混合物, 内部各处温度均匀一致, 因而每一组元的温度都相等, 都等于混合气体的温度。同样, 由于处于平衡状态, 每一组元的分子都均匀地分布在混合物的容器中, 即各组元所占的容积都相等, 都等于混合物的容积。

1) 分压力和道尔顿分压力定律。在容器中, 每一组元的分子都会对容器壁撞击而产生一定的压力, 各组元在理想气体混合物的温度下单独占据混合物所占据的容积 V 时, 产生的压力称为该组元的分压力, 用 p_i 表示, 见图 1-7。

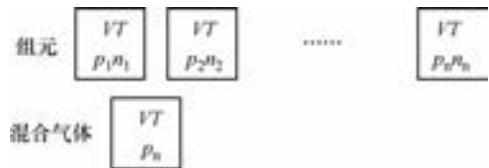


图 1-7 分压力

各组元气体分子的热运动不应该存在其他组元分子而受到影响, 应与各组元单独占据混合物所占体积的热运动一样。理想气体混合物的压力是各组元分子撞击器

壁而产生的。实验证明, 理想气体混合物的压力 p , 等于各组元的分压力 p_i 之和, 称为道尔顿分压力定律。即

$$p = p_1 + p_2 + \cdots + p_n = \sum_{i=1}^n p_i \quad (1-43)$$

2) 分体积和分体积定律。所谓分体积, 是指各组元处于混合物的温度和压力下,

单独存在时所占据的体积，用 V_i 表示，如图 1-8 所示。

实验证明，理想气体混合物的体积 V ，等于各组元的分体积 V_i 之和，称为亚美格分体积定律。即

$$V = V_1 + V_2 + \cdots + V_n = \sum_{i=1}^n V_i \quad (1-44)$$

实际上，理想气体混合物中各组元都充满了整个体积，所谓分体积，只是假想将各组元在混合气体的温度和压力下，分别集中于各自所占据的体积内，以便于用体积来表示各组元气体数量的多少。

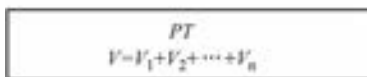


图 1-8 分体积

(2) 理想气体混合物的成分 理想气体混合物的性质取决于各组元的性质和数量。混合气体中某组元的量与混合气体总量之比，称为混合气体中该组元的含量。由于采用不同的物量单位，混合气体各组元的含量有不同的表示方法。

1) 质量分数 w_i 。在理想气体混合物中，各组元的质量 m_i 与混合物总质量 m 之比，称为该组元的质量分数，符号为 w_i ，即

$$w_i = \frac{m_i}{m} \quad (1-45)$$

因为
$$m = m_1 + m_2 + \cdots + m_n = \sum_{i=1}^n m_i$$

因此
$$w_1 + w_2 + \cdots + w_n = \sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad (1-46)$$

2) 体积分数 φ_i 。理想气体混合物中，某组元的体积 V_i 与混合物总体积 V 之比，称为该组元的体积分数。记为 φ_i 。即

$$\varphi_i = \frac{V_i}{V} \quad (1-47)$$

根据分体积定律，有

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \cdots + \varphi_n = \sum_{i=1}^n \varphi_i = 1 \quad (1-48)$$

3) 摩尔分数 x_i

理想气体混合物中，某组元的物质的量 n_i 与混合物总物质量 n 之比，称为该组元的摩尔分数。符号为 x_i ，即

$$x_i = \frac{n_i}{n} \quad (1-49)$$

因为
$$n = n_1 + n_2 + \cdots + n_n = \sum_{i=1}^n n_i$$

$$\text{所以} \quad x_1 + x_2 + \cdots + x_n = \sum_{i=1}^n x_i = 1 \quad (1-50)$$

经证明, 各含量之间的换算关系如下:

体积分数与摩尔分数在数值上相等。即

$$\varphi_i = x_i \quad (1-51)$$

质量分数与体积分数 (或摩尔分数) 的换算关系为

$$w_i = x_i \frac{M_i}{M} = \varphi_i \frac{M_i}{M} \quad (1-52)$$

式中, M_i 、 M 为某组元气体、混合气体的摩尔质量。

(3) 折合摩尔质量与折合气体常数 气体常数取决于气体的摩尔质量。为了便于计算, 取混合物的总质量 m 与混合物的总物质的量 n 之比为混合物的摩尔质量, 称为折合摩尔质量或平均摩尔质量。即

$$M = \frac{m}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n n_i M_i}{n} = \sum_{i=1}^n x_i M_i = \sum_{i=1}^n \varphi_i M_i \quad (1-53)$$

即混合气体的折合摩尔质量等于各组元的摩尔质量与它们的体积分数 (或摩尔分数) 乘积的总合。

求出理想气体混合物的折合千摩尔质量后, 即可求出混合气体的折合气体常数 R [$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$] 为

$$R = \frac{8.314}{M}$$

(4) 混合气体的比热容 确定混合气体比热容的依据是能量守恒定律, 即在加热过程中, 一定数量的混合气体温度升高 1°C 所需要的热量, 应等于各组元气体温度升高 1°C 所需热量的总合。故混合气体的比热容为

$$c = \sum_{i=1}^n w_i c_i \quad (1-54)$$

即混合气体的比热容, 等于各组元气体的比热容与其质量分数的乘积之和。

同样, 混合气体的摩尔热容和摩尔定容热容分别为

$$C_m = \sum_{i=1}^n x_i C_{mi} \quad (1-55)$$

$$C_{V,m} = \sum_{i=1}^n \varphi_i C_{Vi,m} \quad (1-56)$$

2. 湿空气

(1) 湿空气和干空气 地球表面及江、河、湖、海总会不断有水蒸发变为蒸汽, 散布于空气中, 使空气里含有水蒸气, 把含有水蒸气的空气称为湿空气。人类就生活在湿空气中。不含水蒸气的空气称为干空气。湿空气可以看成是干空气和水蒸气的混合物。干空气可以按理想气体来对待。湿空气中的水蒸气一般含量很少, 分压力很低, 大

多处于过热状态，故它的比容很大，即分子间的间距很大，可以作为理想气体来对待。因此，湿空气可当作理想气体来处理。

根据道尔顿分压力定律，干空气分压力与水蒸气分压力之和为湿空气的压力，即大气压力。

$$P_b = P_{\text{干}} + P_{\text{汽}} \quad (1-57)$$

湿空气与单纯气体组成的混合物的不同之处在于，单纯气体混合物的各组元是恒定不变的，而湿空气中的水蒸气含量则常常随温度的变化而发生变化。

(2) 未饱和湿空气和饱和湿空气 根据湿空气中水蒸气所处的状态不同，可以将湿空气分为未饱和湿空气和饱和湿空气。

1) 未饱和湿空气。若湿空气中的水蒸气处于过热蒸汽状态，称这种状态下的湿空气为未饱和湿空气。此时水蒸气的分压力低于当时温度所对应的饱和压力，水蒸气的含量还没有达到最大值。此时的湿空气具有吸湿能力，它能容纳更多的水蒸气。自然界中的空气大多处于未饱和湿空气状态。通常水蒸气的分压力只有 2666 ~ 4000Pa (20 ~ 30mmHg)，与其对应的水蒸气饱和温度也很低，远低于当时的湿空气温度，故湿空气中的水蒸气大多处于过热蒸汽状态。

2) 饱和湿空气。如果保持湿空气的温度不变，而增加其中水蒸气的含量，则水蒸气的分压力随之增加。当湿空气中水蒸气的分压力达到了当时温度所对应的饱和压力时，水蒸气达到饱和状态。这种由饱和水蒸气和干空气组成的湿空气，称为饱和湿空气。饱和湿空气中水蒸气的含量已达到最大限度，不再具有吸湿能力。

(3) 露点 如果保持未饱和湿空气中水蒸气的含量不变，分压力不变，而降低湿空气的温度，当温度降低到水蒸气分压力所对应的饱和温度时，水蒸气也达到饱和状态。此时若再冷却，湿空气中的水蒸气就会凝结，以水滴形式从湿空气中分离出来，这种现象称为结露。在夏末秋初的早晨，经常可以在植物叶面等物体表面看到露珠，就是这个缘故。开始结露的温度称为露点。所谓露点就是湿空气中水蒸气分压力所对应的饱和温度。

显然，湿空气中水蒸气的含量越多，其分压力越高，所对应的饱和温度（即露点）也越高；反之，湿空气中水蒸气含量越少，则其分压力越低，露点也越低。如果露点低于 0℃，水蒸气就直接凝结成霜。因而露点的测量可以预报是否有霜冻出现。

露点是湿空气中的一个重要参数。露点温度的高低可以说明湿空气的潮湿程度。在湿空气温度一定的条件下，露点温度越高，说明湿空气中水蒸气的分压力越高，水蒸气的含量越高，湿空气越潮湿；反之，湿空气越干燥。

(4) 绝对湿度与相对湿度 为了表示湿空气中水蒸气含量的多少，引进湿度的概念。所谓湿度，是指湿空气中所含水蒸气的分量多少。

1) 绝对湿度。1m³ 的湿空气中所含有的水蒸气的质量，称为湿空气的绝对湿度。绝对湿度在数值上等于在湿空气的温度下和水蒸气的分压力下水蒸气的密度 ρ_v ，单位为 kg/m³。若保持湿空气的压力和温度不变，空气中水蒸气的含量越多，分压力越大，则绝对湿度越大。当水蒸气的分压力达到当时温度所对应的饱和压力时，绝对湿度为最

大。即

$$\rho_v = \rho'' = \rho_{\max}$$

绝对湿度虽然反映了湿空气中实际所含水蒸气质量的多少，但不能直接反映出湿空气中的水蒸气是饱和状态还是过热状态，即不能反映出湿空气是饱和湿空气还是未饱和湿空气，以及未饱和湿空气偏离饱和状态的程度。所以说，绝对湿度的大小不能完全说明湿空气的潮湿程度和吸湿能力。

2) 相对湿度。通常用相对湿度来表示湿空气吸湿能力的大小。相对湿度是湿空气的绝对湿度和同温度下可能达到的最大绝对湿度的比值，用符号 φ 表示。同温度下最大绝对湿度也就是同温度下饱和湿空气的绝对湿度，即饱和蒸汽的密度 ρ'' 。故有

$$\varphi = \frac{\rho_{\text{汽}}}{\rho''} \quad (1-58)$$

从式 (1-58) 可以看出，通常情况下，相对湿度的值介于 0 ~ 1 之间，它反映了湿空气中水蒸气含量接近饱和的程度。其值越小，表示湿空气中水蒸气的状态离饱和状态越远，湿空气的吸湿能力越弱。干空气的相对湿度为 0，具有最大的吸湿能力；饱和湿空气的相对湿度为 1，没有吸湿能力。

由于湿空气中的水蒸气可以看做是理想气体，由理想气体的状态方程，得

$$\varphi = \frac{\rho_{\text{汽}}}{\rho''} = \frac{p_{\text{汽}}}{p_s} \quad (1-59)$$

式中， p_s 为湿空气温度下水蒸气的最大分压力，即湿空气温度下水蒸气的饱和压力。

相对湿度比绝对湿度更有实用价值。当空气的绝对湿度不变时，若温度不同，体现出来的干湿程度就不同。如果温度较高，则该温度所对应的水蒸气的饱和压力就高，这时的湿空气离饱和状态就越远，相对湿度就越小，具有较强的吸湿能力；如果温度较低，则此温度所对应的水蒸气的饱和压力就低，离饱和状态就越近，相对湿度就越大，就会感到阴冷潮湿。例如：冬季室内开放暖气就会感到干燥；夏季人们往往感到炎热的中午空气干燥，而深夜则空气潮湿。所以相对湿度能更好地表明湿空气的干湿程度。

(5) 含湿量 1kg 的干空气中含有水蒸气的质量称为含湿量，用符号 x 表示，单位为 kg/kg (干空气)

$$x = \frac{m_w}{m_d} = \frac{\rho''}{\rho_{\text{干}}} \quad (1-60)$$

式中， m_w 、 m_d 为水蒸气、干空气的质量。

经推导得

$$x = 0.622 \frac{\varphi p_s}{p_b - \varphi p_s} \quad (1-61)$$

相对湿度和湿空气压力可以测定或给定，空气中饱和水蒸气分压力 p_s 与温度有关可查表 1-2。

表 1-2 空气中饱和水蒸气压力 p_s 与温度的关系

温度/°C	饱和压力 p_s/Pa	温度/°C	饱和压力 p_s/Pa	温度/°C	饱和压力 p_s/Pa
-16	175.5	17	1930	35	5620
-14	207	18	2070	36	5950
-12	243	19	2196	37	6285
-10	287	20	2334	38	6630
-8	334	21	2490	39	7010
-6	38905	22	2650	40	7380
-4	452	23	2815	41	7800
-2	525	24	2990	42	8200
0	610	25	3180	43	8650
2	704	26	3365	44	9120
4	812	27	3560	45	9600
6	931	28	3782	50	12180
8	1070	29	4000	55	15800
10	1226	30	4240	60	19900
10	1400	31	4490	70	31200
14	1600	32	4760	80	47400
15	1705	33	5030	90	70500
16	1825	34	5330	100	101325

(6) 湿空气的气体常数 湿空气是干空气与水蒸气的混合物，可以当作理想气体来处理，故可按上面讲述的求混合气体常数的公式计算。湿空气的气体常数 R [J/(kg·K)] 为

$$R = \frac{287.1 + 461.6x}{1 + x} \quad (1-62)$$

(7) 湿空气的密度 已知湿空气的气体常数后，其密度 ρ (kg/m³) 可按下式求出：

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (1-63)$$

1.8 可压缩性的概念

当气体压力低，压力变化很小时，其密度或比体积均可认为是不变的，这种气体象水一样，可以当作不可压缩流体来处理。但是，当叶轮速度高，气体所受压力变化增大时，则相应的密度变化也随着增加，这时就要考虑气体的压缩性。

1. 声速的概念

声音传播的速度叫声速。声音在不同介质中传播速度是不同的。用耳朵贴近铁轨可以先听到远方火车的响声，这表明声音在铁轨中的传播速度比在空气中快。这里仅讨论声音在气体中的传播速度。

从物理学角度，声速是一种微弱扰动波的传播速度，如火车的机械运动激动了空气质点的微小移动，从而引起空气压力及密度的微小变化，这种变化必将影响邻近一层空气，这样一层一层地将火车机械运动对空气的扰动传递下去，最后传到我们的耳朵。

由物理学得知，若声音振动引起气体压力变化为 dp ，密度变化为 $d\rho$ ，则声速 c 可按式 (1-64) 计算：

$$c = \sqrt{\frac{dp}{d\rho}} \quad (1-64)$$

通常可将此传播过程看做是定熵过程，在压力为 p 、密度为 ρ 的介质中，声速的计算式如下：

$$c = \sqrt{k \frac{p}{\rho}} = \sqrt{kRT} \quad (1-65)$$

对于空气，空气的比热比 $k = 1.4$ ， $R = 287 \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ，则有

$$c = \sqrt{1.4 \times 287T} \approx 20 \sqrt{T} \quad (1-65a)$$

或者以标准状态 $T = 273 \text{K}$ 的声速为准，任意温度 t 下的声速为

$$c = 331.68 \sqrt{\frac{273+t}{273}} \quad (1-65b)$$

表 1-3 为干空气在不同温度下的声速。

表 1-3 干空气的声速

温度/°C	0	10	20	30	40	50
声速/(m/s)	332	338	344	349	355	361

进一步分析还可看出，声速 c 与气体的压缩性有一定的联系。在相同的压力变化 dp 作用下，压缩性大的气体，其体积变化也较大，相对应的气体密度也发生较大变化，也就是说，声速 c 会比较小；相反，压缩性小的气体，其声速 c 则比较大。因此可以用声速来表示气体压缩性的大小。

总之，声速是气体动力学中一个最基本的参数，它与气体的状态、压缩性等有密切的关系，压缩性越小、温度越高的气体，其声音传播速度越大。

2. 马赫数与气体的压缩性

马赫数是指气体的流动速度 v 与声速 c 的比值，用符号 Ma 表示，即

$$Ma = \frac{v}{c} \quad (1-66)$$

马赫数是一个量纲一的参数，常用来衡量气体流动的快慢。根据马赫数的大小，通

常将气体流动分为以下三种不同的类型：

- 1) 当 $Ma < 1$ ，即 $v < c$ ，称为亚声速流动。
- 2) 当 $Ma = 1$ ，即 $v = c$ ，称为声速流动。
- 3) 当 $Ma > 1$ ，即 $v > c$ ，称为超声速流动。

马赫数的另一个特征，即反映气体的压缩量。压缩量 s 是指气体密度的相对变化量，一般用气体的密度变化量 $d\rho$ 与变化后气体的密度 $\rho + d\rho$ 之比来表示，即

$$s = \frac{d\rho}{\rho + d\rho}$$

经推导可得

$$Ma = s$$

由此可见，气体的压缩量大小，不仅与声速有关，还与气体的速度有关。即使压缩性大的气体，如果其流动速度较低或者是静置状态，即气体的马赫数较小，气体的压缩量仍然较小或者为零；反之压缩性小的气体，如果其流动速度较高，即马赫数较大，则气体的压缩量也会比较大。

虽然气体的压缩性比较大，但对于静止气体或低速流动的气体，一般其压缩量都比较小，在工程上往往予以忽略。但高速气流压缩量比较大，而且对气体其他运动参数产生影响，所以必须予以考虑。

在通风机中，若气流速度低于 100m/s ，即 $Ma \leq 0.3$ ，可以忽略压缩性地影响，视为不可压缩气体流动；而在 $Ma > 0.2$ 时，就需要考虑气体密度变化的影响，将气流视为可压缩气体的流动。

第 2 章 一元流动理论和基本概念

在工程中，气体流动大多是复杂的三元流动。这类问题有的至今未曾得到解决，因而实际上往往对某些问题作为一元流动来处理，即流动参数仅是一个坐标的函数。这种处理方法对管道流动，通风机械通道内流动等问题，都有一定的实际意义。

2.1 研究流体流动的方法

研究流体流动的方法有拉格朗日法和欧拉法两种。

1. 拉格朗日法

拉格朗日法也叫随体法，它承袭了理论力学中研究质点运动的方法为跟踪法，将它引进到流体力学中来研究流体质点的运动。这种方法是跟踪每一个流体质点来寻求流体运动规律的。

按照拉格朗日法，运动的任意流体质点在空间的位置 (x, y, z) 是该点的起始坐标 (a, b, c) 与时间 t 的函数，即

$$\left. \begin{aligned} x &= x(a, b, c, t) \\ y &= y(a, b, c, t) \\ z &= z(a, b, c, t) \end{aligned} \right\} \quad (2-1)$$

对于某一确定的流体质点，起始坐标 (a, b, c) 分别为常数，任意时刻该点在空间的位置将仅仅是时间 t 的函数，式 (2-1) 就是该点的运动轨迹方程式。对于不同的流体质点，起始坐标 (a, b, c) 是不同的，其运动轨迹方程也是不一样的。根据这种方法，建立轨迹方程后，将其对时间求一阶导数就能够得到速度，对时间求二阶导数就可以确定加速度，从而掌握整个流体的运动规律。

2. 欧拉法

欧拉法也叫局部法，它不是追踪每个流体质点，而是研究流场中的每个坐标点，即空间几何点处的运动流体的物理参数随时间的变化规律。也就是说，欧拉方法是将整个流场用三维的网络分成无数的小区域（空间点），在每个点上测试记录一个流体质点通过时的速度、加速度以及压力、密度等。汇集同一时刻所有空间点的记录值，即可描绘出这一时刻流场的动态；再把各时刻的动态连续地综合起来，就可描绘出整个流场的全部运动状态。

在欧拉法中，流体质点从什么地方开始运动，又会经过哪里，到达什么位置，都没有给予直接的解答，它只确定流体质点的运动参数随时间及空间位置的变化关系。因此，流场中流体质点的速度 U 及其在直角坐标系中的分量 u, v, w ，均可以表示为空间坐标 (x, y, z) 和时间 t 的函数，即

$$U = U(x, y, z, t) \quad (2-2)$$

写成投影式为

$$\begin{aligned} u &= u(x, y, z, t) \\ v &= v(x, y, z, t) \\ w &= w(x, y, z, t) \end{aligned} \quad (2-3)$$

同理, 其他物理参数也可以表示为

$$\begin{aligned} p &= p(x, y, z, t) \\ \rho &= \rho(x, y, z, t) \end{aligned} \quad (2-4)$$

在以上各式中, 将 x, y, z 视为自变量 (通常称为欧拉变数), t 作为参变量。对某一时刻, 这些函数表示速度、压力、密度在流场空间的分布规律。若对于某一特定点 (该点坐标 x, y, z 是某定值), 这些函数又反映出在该点处速度、压力、密度随时间变化的规律。

根据连续性假设, 可知这些函数都是空间坐标 (x, y, z) 和时间 t 的连续可微函数。将速度函数对时间求全导, 即得加速度。

2.2 迹线与流线

1. 迹线

迹线是指流场中某一质点运动的轨迹。例如在流动的水面上撒一片木屑, 木屑随水流漂流的途径就是某一水点的运动轨迹, 也就是迹线。流场中所有的流体质点都有自己的迹线。迹线是流体运动的一种几何表示, 可以用它来直观、形象地分析流体的运动, 清楚地看出质点的运动情况。迹线的研究是属于拉格朗日法的内容。

2. 流线

(1) 定义 流线是某一瞬时在场中所作的一条曲线。在这条曲线上, 各流体质点的速度方向都与该曲线相切, 因此流线是同一时刻、不同流体质点所组成的曲线, 如图 2-1 所示。流线能够形象地给出流场的流动状态。

通过流线, 可以清楚地看出某时刻流场中各点的速度方向; 由流线的密集程度, 也可以判定出速度的大小。

流线的引入是欧拉法的研究特点。例如在流动水面上同时撒一大片木屑, 这时可看到这些木屑将连成若干条曲线, 每一条曲线表示在同一瞬时各水点的流动方向线就是流线。



图 2-1 流线

(2) 流线的基本特性

1) 在定常流动时, 因为流场中各流体质点的速度不随时间变化, 所以通过同一点的流线形状始终保持不变, 因此流线和迹线相重合; 而在非定常流动时, 一般流线要随时间变化, 故流线和迹线不相重合。

2) 通过某一空间点在给定瞬间只能有一条流线, 一般情况流线不能相交和分支。否则在同一空间点上, 流体质点将同时有几个不同的流动方向。只有在流场中速度为零

或无穷大的那些点，流线可以相交。这是因为在这些点上，不会出现在同一点上存在不同流动方向的问题。速度为零的点称为驻点，速度为无穷大的点称为奇点。

3) 流线不能突然折转，它是一条光滑的连续曲线。

4) 流线密集的地方，表示流场中该处的流速较大；稀疏的地方，表示该处的流速较小。

(3) 流线图 一条条流线组成流线图，它可以形象地表示整个流体的运动情况。图 2-2 所示为水槽中纸屑流动的流线图，可以形象地观察流线图的特征。



图 2-2 流线图

从图中看出，流线分布的疏密度与流体横断面积的大小有关。横断面积小的地方流线密，流速大；横断面积大的地方流线疏，流速小。因此，流线的疏密度也反映了流速的大小：流线密，流速大；流线疏，流速小。

流线的形状和固体边界的形状有关。离边界越近，边界对流体质点的影响越大，流线形状越接近于边界的形状。在边界形状急剧变化的地方，由于惯性的作用，边界附近的流体质点不可能沿着边界流动，流线将与边界脱离，并在主流和边界之间形成漩涡区。

2.3 一元流动、二元流动及三元流动

流体在空间的流动可以说都是三元流动，运动参数是空间三个坐标的函数。例如在直角坐标系中，如果速度、压力等参数是 x 、 y 、 z 三个坐标的函数，便称这种流动为三元流动，流场为三元流场。三个坐标的函数对其求解比较复杂。如果能选择合适的坐标系，或者忽略次要的流动，将其在某一个或两个主要方向上的流动参数作为研究对象，这就将一个空间的三元流动简化为二元流动或一元流动，使得数学解析大为简化。显然，坐标变量数目越少，问题越简单。因此对于工程技术中的问题，在保证一定精度的条件下，尽可能将三元流动简化为二元流动，甚至一元流动来求近似解。

流场的运动参数只是两个坐标的函数时称为二元流动。平面流动的流场是二元流动。实际流体由于具有粘性，故其流动至少是二元流动，例如图 2-3a 所示圆管内的水流，由于水的粘性的影响，靠近管壁的流速低于中部的流速，即管道中的流速随管道的半径和流动方向的位移而变化，所以是二元流动。

流体的流动参数只是一个坐标的函数，称为一元流场。见图 2-3b，理想流体在圆管内的流动，因不具有粘性，沿半径方向流速没有变化，故是一元流动。若实际流体的

粘性很小，可以忽略，以管横截面上的平均流速来描述管内流动，即将二元流动化为一元流动求解。

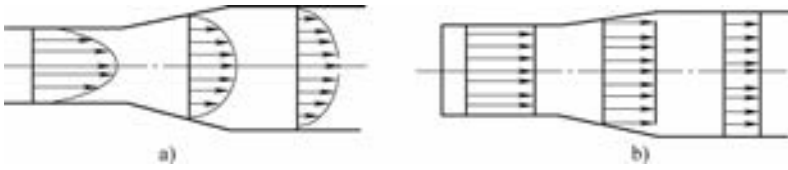


图 2-3 圆管内流动

a) 二元流动 b) 一元流动

第3章 相似理论在通风机中的应用

相似理论的应用在许多科学领域中，在通风机的设计、研究、使用等方面也起着十分重要的作用。它主要解决以下问题：

1) 模型实验。为了减少制造费用和试验费用，将原型风机缩小为模型，进行模化试验以验证其性能是否达到要求。

2) 相似设计。根据试验研究出来的性能良好、运行可靠的通风机模型，来设计与模型相似的新通风机；性能相似换算是用于试验条件不同于设计条件时，将试验条件下的性能利用相似原理换算到设计条件下的性能。

3) 性能换算。在改变转速、叶轮几何尺寸及气体密度时，进行性能参数的相似换算。

3.1 通风机的相似原理

两个通风机相似，是指叶轮与气体的能量传递过程及气体在通风机内流动过程相似，或者说它们在任一对应点的同名物理量之比保持常数，这些常数叫相似常数（或比例常数）。本节讨论通风机的相似条件及相似定律。

1. 相似条件

根据相似理论，要保证气体流动过程相似必须满足几何相似、运动相似、动力相似。

(1) 几何相似 这是指模型（以下标“M”表示模型）与实物的几何形状相同，对应的线性长度比为一定值，对应角度相等。

$$\frac{D_0}{D_{0M}} = \frac{b_1}{b_{1M}} = \frac{b_2}{b_{2M}} = \frac{D_2}{D_{2M}} = m_1 \quad (3-1)$$
$$\beta_2 = \beta_{2M}, \beta_1 = \beta_{1M}, Z = Z_M$$

对应面积之比为线性长度比的平方，如离心通风机叶轮出口面积比：

$$\frac{A_2}{A_{2M}} = \frac{\pi D_2 b_2}{\pi D_{2M} b_{2M}} = \frac{D_2 b_2}{D_{2M} b_{2M}} = m_1^2 \quad (3-1a)$$

严格来说，几何相似还应保证流道表面的粗糙度、叶片厚度，以及叶轮与机壳的间隙相似。对于通风机，这些尺寸的相似与否对通风机性能影响不大，故一般不予考虑。

(2) 运动相似 当流体流经几何相似的模型与实物时，其对应点的速度方向相同，比值保持常数，称为运动相似。

$$\frac{c_1}{c_{1M}} = \frac{u_1}{u_{1M}} = \frac{w}{w_M} = m_0 \quad (3-2)$$

即对应点的速度三角形相似，对应气流角相等， $\beta_1 = \beta_{1M}$ 、 $\beta_2 = \beta_{2M}$ 、 $\alpha_1 = \alpha_{1M}$ 。几何相似是运动相似的先决条件。

(3) 动力相似 这是指作用于运动相似的流体各对应点的同类力方向相同，大小之比等于常数。对于通风机内的流体，作用于流体上的力主要有惯性力 F_I ，粘性力 F_R 、总压力 p 及重力 G 。使这四种力都满足相似，十分困难，由牛顿定律：三力中只要有两力成比例则第三力必成比例。因此，一般只要保证起主导作用的两种力相似即可。

$$Re = \frac{lc}{l_M c_M} = Re_M \quad (3-3)$$

模型与实物的雷诺数相等，保证了粘性力的相似。

又因
$$\frac{F_I}{F_{IM}} = \frac{p}{p_M}$$

故有
$$\frac{\rho l^2 c^2}{\rho_M l_M^2 c_M^2} = \frac{p l^2}{p_M l_M^2}$$

经变换后得
$$Eu = \frac{p}{\rho c^2} = \frac{p_M}{\rho_M c_M^2} = Eu_M \quad (3-4)$$

Eu 为欧拉数，它表示压力与惯性力之比。模型与实物的欧拉数相等保证了压力相似。

在气体流动中不计重力的作用，又因气体的压力低，而且变化又小，故也可以不考虑弹性力的影响，即不考虑气体的可压缩性。若保证了内摩擦力、压力相似也就使外力相似。又因外力与内摩擦力、压力组成封闭的力三角形，而运动相似必然要求外力方向相同，大小成比例，所以只要 Re 数对应相等，即内摩擦力成比例，且方向相同，在力三角形中，其中两边成比例方向对应相同，两个力三角形必然相似，则代表压力的一边就一定成比例，故欧拉数相等，在流动动力相似时也随着满足，因此通风机的动力相似就是雷诺数相等。

根据气体流动的气动热力过程及能量传递过程的相似要求，两个通风机的气流过程相似条件可归结如下：几何相似、叶片进口的速度三角形相似、雷诺数相等。下面将证明只要满足上述相似条件，两个通风机一定是相似的。

2. 通风机量纲一的参数

(1) 压力系数 \bar{p} ，由于两个通风机相似，对应点的速度三角形相似，欧拉数相等。设 1、2 分别为通风机的进、出口截面，由欧拉数相等可得

$$\frac{p_1}{\rho c_1^2} = \frac{p_{1M}}{\rho_M c_{1M}^2} \quad \frac{p_2}{\rho c_2^2} = \frac{p_{2M}}{\rho_M c_{2M}^2}$$

经变换后得
$$\frac{p_2}{p_{2M}} = \frac{\rho c_2^2}{\rho_M c_{2M}^2} \quad \frac{p_1}{p_{1M}} = \frac{\rho c_1^2}{\rho_M c_{1M}^2}$$

因运动相似，则
$$\frac{c_1}{c_{1M}} = \frac{c_2}{c_{2M}} = \frac{u_2}{u_{2M}}$$

又因

$$\frac{p_1}{p_{1M}} \frac{p_2}{p_{2M}} = \frac{p_2 - p_1}{p_{2M} - p_{1M}} = \frac{\Delta p}{\Delta p_m}$$

式中, Δp 、 Δp_m 为实物和模型进、出截面的静压差。

$$\frac{\Delta p}{\rho u_2^2} = \frac{\Delta p_m}{\rho_M u_{2M}^2} \quad (3-5)$$

对应点上的动压也成比例, 即

$$\frac{p_d}{p_{dM}} = \frac{\frac{\rho}{2} c^2}{\frac{\rho_M}{2} c_M^2} = \frac{\rho c^2}{\rho_M c_m^2} = \frac{\rho u_2^2}{\rho_M u_{2M}^2} \frac{p_d}{\rho u_2^2} = \frac{p_{dM}}{\rho_M u_{2M}^2}$$

最后得出进、出全压之差, 即通风机的全压关系为

$$\bar{p} = \frac{p}{\rho u_2^2} = \frac{P_M}{\rho_M u_{2M}^2} = p_M \quad (3-6)$$

\bar{p} 为通风机的全压系数。同理, 静压系数为

$$\bar{p}_{st} = \frac{p_{st}}{\rho u_2^2} = \frac{P_{stM}}{\rho_M u_{2M}^2} = \bar{p}_{stM} \quad (3-6a)$$

两个相似通风机的全压系数 \bar{p} 、静压系数 \bar{p}_{st} 分别相等。

对于轴流通风机, 同样有 $\bar{p} = p/\rho u_1^2$, $\bar{p}_{st} = p_{st}/\rho u_1^2$ (u_1 是叶片外缘的周速), 分别与模型的 \bar{p}_M 、 \bar{p}_{stM} 相等的关系。

(2) 流量系数 \bar{q}_V , 对于离心通风机, 由流量公式可知:

$$q_V = \pi D_1 b_1 c_1 \quad q_{VM} = \pi D_{1M} b_{1M} c_{1M}$$

$$\frac{q_V}{q_{VM}} = \frac{\pi D_1 b_1 c_1}{\pi D_{1M} b_{1M} c_{1M}} = \frac{D_1}{D_{1M}} \frac{b_1}{b_{1M}} \frac{c_1}{c_{1M}}$$

由几何相似, 得

$$\frac{D_1}{D_{1M}} = \frac{b_1}{b_{1M}} = \frac{D_2}{D_{2M}}$$

因运动相似, 则

$$\frac{c_1}{c_{1M}} = \frac{u_1}{u_{1M}} = \frac{u_2}{u_{2M}}$$

最后得

$$\frac{q_V}{q_{VM}} = \frac{D_2^2 u_2}{D_{2M}^2 u_{2M}}$$

$$\bar{q}_V = \frac{q_V}{\frac{\pi}{4} D_2^2 u_2} = \frac{q_{VM}}{\frac{\pi}{4} D_{2M}^2 u_{2M}} = \bar{q}_{VM} \quad (3-7)$$

对于轴流通风机, 其流量系数有以下两种形式:

$$\bar{q}_V = \frac{q_V}{\frac{\pi}{4} D_1^2 u_1} \quad (3-7a)$$

$$\bar{q}_v = \frac{q_v}{\frac{\pi}{4}(D_t^2 - d^2)u_t} = \frac{q_v}{\frac{\pi}{4}D_t^2 \left[1 - \left(\frac{d}{D_t} \right)^2 \right] u_t} \quad (3-7b)$$

式中, D_t 、 d 为叶片外径、轮毂直径。

我国流量系数的计算, 多数采用式 (3-7a)。

(3) 功率系数 \bar{P} , 通风机的轴功率 P 的计算公式为

$$P = \frac{P_e}{\eta} = \frac{pq_v}{1000\eta}$$

式中, P 为通风机的全压功率 (kW); P_e 为通风机的有效功率, $P_e = \frac{q_v P}{1000}$; p 、 q_v 为通风机的全压及流量。

采用全压系数 \bar{p} 及流量系数 \bar{q}_v 时, 则

$$P = \frac{\bar{p}\rho u_2^2 \bar{q}_v D_2^2 u_2}{1000\eta} = \frac{\pi}{4}\rho D_2^2 u_2^3 \frac{\bar{p}\bar{q}_v}{1000\eta}$$

$$\frac{P}{P_M} = \frac{\frac{\pi}{4}\rho D_2^2 u_2^3 \frac{\bar{p}\bar{q}_v}{1000\eta}}{\frac{\pi}{4}\rho D_{2M}^2 u_{2M}^3 \frac{\bar{p}_M \bar{q}_{vM}}{1000\eta_M}}$$

因为两通风机相似, $\bar{p} = \bar{p}_M$ 、 $\bar{q}_v = \bar{q}_{vM}$ 、 $\eta = \eta_M$, 故上式变为

$$\frac{1000P}{1000P_M} = \frac{\frac{\pi}{4}\rho D_2^2 u_2^3}{\frac{\pi}{4}\rho_M D_{2M}^2 u_{2M}^3} \quad (3-8)$$

$$\bar{p} = \frac{1000p}{\frac{\pi}{4}\rho D_2^2 u_2^3} = \frac{1000p_M}{\frac{\pi}{4}\rho_M D_{2M}^2 u_{2M}^3} = \bar{p}_M$$

可见两通风机相似, 它们的功率系数也是相等的。另外 \bar{P} 还可以写成与 \bar{p} 、 \bar{q}_v 关系:

$$P = \frac{\pi}{4}\rho D_2^2 u_2^3 \frac{\bar{p}\bar{q}_v}{1000\eta}$$

$$\bar{P} = \frac{1000P}{\frac{\pi}{4}\rho D_2^2 u_2^3} = \frac{\bar{p}\bar{q}_v}{\eta} \quad (3-9)$$

(4) 量纲一的参数意义 将 $u_2 = \pi D_2 n / 60$ 的关系式, 代入式 (3-6)、式 (3-7) 及式 (3-8), 则得

$$p = \bar{p}\rho u_2^2 = \rho \left(\frac{\pi}{60} \right)^2 D_2^2 n^2 = 0.00274 \bar{p}\rho D_2^2 n^2 \quad (3-10)$$

$$q_v = \bar{q}_v \frac{\pi}{4} D_2^2 u_2 = \bar{q}_v \frac{\pi}{4} D_2^2 \frac{\pi D_2 n}{60} = 0.04108 \bar{q}_v D_2^3 n \quad (3-11)$$

$$P = \bar{P} \frac{\pi}{4} D_2^2 \rho u_2^3 / 1000 = 1.127 \times 10^{-7} \bar{P} \rho D_2^5 n^3 \quad (3-12)$$

由式(3-10)、式(3-11)及式(3-12)可以看出：在相同的转速 n 及直径 D_2 下输送相同的工质时，压力 p 与压力系数 \bar{p} 成正比；流量 q_v 与流量系数 \bar{q}_v 成正比；功率 P 与功率系数 \bar{P} 成比例。对各种不同的通风机来说，压力系数 \bar{p} 越大，则压力越大；流量系数 \bar{q}_v 越大，则流量越大；功率系数 \bar{P} 越大，则功率也就越大。因此可以说通风机的量纲一的参数 \bar{p} 、 \bar{q}_v 、 \bar{P} 分别是衡量各种不同类型通风机的压力 p 、流量 q_v 及功率 P 大小的特征值。

3.2 通风机性能的相似换算

两个通风机相似时，它们的量纲一的参数 \bar{p} 、 \bar{q}_v 、 \bar{P} 、 η 都是相等的。两个相似的风机，在转速、尺寸及气体密度 ρ 发生变化时，它们之间的流量 q_v 、压力 p 及功率 P 等特性有什么关系呢？本节将利用相似原理来解决相似通风机的性能换算问题，简称性能的相似换算。

1. 压力换算公式

根据式(3-10)，实物与模型的压力分别为

$$p = 0.00274 \bar{p} \rho D_2^2 n^2$$

$$p_M = 0.00274 \bar{p}_M \rho_M D_{2M}^2 n_M^2$$

因为

$$\bar{p} = \bar{p}_M$$

所以

$$\frac{p}{p_M} = \frac{\rho}{\rho_M} \left(\frac{D_2}{D_{2M}} \right)^2 \left(\frac{n}{n_M} \right)^2 \quad (3-13)$$

2. 流量换算公式

根据式(3-11)，实物与模型的流量分别为

$$q = 0.04108 \bar{q}_v D_2^3 n$$

$$q_{VM} = 0.04108 \bar{q}_{vM} D_{2M}^3 n_M$$

因为

$$\bar{q}_v = \bar{q}_{vM}$$

所以

$$\frac{q_v}{q_{vM}} = \left(\frac{D_2}{D_{2M}} \right)^3 \cdot \frac{n}{n_M} \quad (3-14)$$

3. 功率换算公式

根据式(3-12)，实物与模型的功率分别为

$$P = 1.127 \times 10^{-7} \bar{P} D_2^5 n^3$$

$$P_M = 1.127 \times 10^{-7} \bar{P}_M D_{2M}^5 n_M^3$$

因为

$$\bar{P} = \bar{P}_M$$

所以

$$\frac{P}{P_M} = \frac{\rho}{\rho_M} \left(\frac{D_2}{D_{2M}} \right)^5 \cdot \left(\frac{n}{n_M} \right)^3 \quad (3-15)$$

在特殊情况下,如同一台通风机(即 $D_2 = D_{2M}$)仅转速或气体密度发生变化时,或者同系列中不同机号(即 $D_2 \neq D_{2M}$)输送同一气体($\rho = \rho_M$)时等,上述换算公式,式(3-13)、式(3-14)式(3-15)就可以简化。表3-1列出相似通风机在换算条件下的性能换算公式。

表3-1 相似通风机在换算条件下性能换算公式

换算条件	$D_2 \neq D_{2M}$ $n \neq n_M$ $\rho \neq \rho_M$	$D_2 = D_{2M}$ $n = n_M$ $\rho \neq \rho_M$	$D_2 = D_{2M}$ $n \neq n_M$ $\rho = \rho_M$	$D_2 \neq D_{2M}$ $n = n_M$ $\rho = \rho_M$
压力换算	$\frac{p}{p_M} = \frac{\rho}{\rho_M} \left(\frac{D_2}{D_{2M}} \right)^2 \left(\frac{n}{n_M} \right)^2$	$\frac{p}{p_M} = \frac{\rho}{\rho_M}$	$\frac{p}{p_M} = \left(\frac{n}{n_M} \right)^2$	$\frac{p}{p_M} = \left(\frac{D_2}{D_{2M}} \right)^2$
流量换算	$\frac{q_V}{q_{VM}} = \left(\frac{D_2}{D_{2M}} \right)^3 \cdot \frac{n}{n_M}$	$q_V = q_{VM}$	$\frac{q_V}{q_{VM}} = \frac{n}{n_M}$	$\frac{q_V}{q_{VM}} = \left(\frac{D_2}{D_{2M}} \right)^3$
功率换算	$\frac{P}{P_M} = \frac{\rho}{\rho_M} \left(\frac{D_2}{D_{2M}} \right)^5 \cdot \left(\frac{n}{n_M} \right)^3$	$\frac{P}{P_M} = \frac{\rho}{\rho_M}$	$\frac{P}{P_M} = \left(\frac{n}{n_M} \right)^3$	$\frac{P}{P_M} = \left(\frac{D_2}{D_{2M}} \right)^5$
效率换算	$\eta = \eta_M$			

另外,对于同一种气体的密度 ρ 之比,根据状态方程有: $\frac{\rho}{\rho_M} = \frac{p}{p_M} \frac{T_M}{T}$ 。

【例题1】 已知:某离心通风机在标准进口状态下, $q_V = 49400 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $p = 3009 \text{ Pa}$ 、 $n = 1450 \text{ r/min}$ 、 $P = 52 \text{ kW}$ 。求:当1) $n = 960 \text{ r/min}$; 2) $D_2 = 1.2 D_{2M}$; 3) $t = 200^\circ \text{ C}$ 、 $p = 750 \text{ mmHg}$ 时,其性能参数 p 、 q_V 、 P ?

解: 根据换算条件,按性能参数换算公式,得

1) $n = 960 \text{ r/min}$ 时:

$$p = p_M \left(\frac{n}{n_M} \right)^2 = 3009 \times \left(\frac{960}{1450} \right)^2 \text{ Pa} = 1332 \text{ Pa}$$

$$q_V = q_{VM} \left(\frac{n}{n_M} \right) = 49400 \times \frac{960}{1450} \text{ m}^3/\text{h} = 32600 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$P = P_M \left(\frac{n}{n_M} \right)^3 = 52 \times \left(\frac{960}{1450} \right)^3 \text{ kW} = 15.1 \text{ kW}$$

2) $D_2 = 1.2 D_{2M}$ 时:

$$p = p_M \left(\frac{D_2}{D_{2M}} \right)^2 = 3009 \times 1.2^2 \text{ Pa} = 4332 \text{ Pa}$$

$$q_V = q_{VM} \left(\frac{D_2}{D_{2M}} \right)^3 = 49400 \times 1.2^3 \text{ m}^3/\text{h} = 85400 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$P = P_M \left(\frac{D_2}{D_{2M}} \right)^5 = 52 \times 1.2^5 \text{ kW} = 129 \text{ kW}$$

3) $t = 200^\circ\text{C}$, $p = 750 \text{ mmHg}$ 时:

在标准状态: $t = 20^\circ\text{C}$, $p = 760 \text{ mmHg}$ 时, 所得密度比为

$$\frac{\rho}{\rho_M} = \frac{p}{p_M} \cdot \frac{T_M}{T} = \frac{750}{760} \times \frac{273 + 20}{273 + 200} = 0.612$$

则

$$p = \frac{\rho}{\rho_M} \cdot p_M = 0.612 \times 3009 \text{ Pa} = 1838 \text{ Pa}$$

$$q_V = q_{VM} = 49400 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$P = \frac{\rho}{\rho_M} \cdot P_M = 0.612 \times 52 = 31.8 \text{ kW}$$

3.3 比转数

为了反映通风机的性能, 除了用压力系数 \bar{p} 、流量系数 \bar{q}_v 、功率系数 \bar{P} 以外, 还采用比转数 n_s 来表明不同类型通风机其主要性能参数流量、压力、转数之间的综合特性。

1. 比转数公式的推导

两相似通风机的压力、流量关系由式 (3-13) 及式 (3-14) 表示为

$$\frac{p}{p_M} = \frac{\rho}{\rho_M} \left(\frac{D_2}{D_{2M}} \right)^2 \left(\frac{n}{n_M} \right)^2 \quad \frac{q_V}{q_{VM}} = \left(\frac{D_2}{D_{2M}} \right)^3 \frac{n}{n_M}$$

经变换后得

$$\frac{D_{2M}}{D_2} = \left(\frac{p_M}{p} \frac{\rho}{\rho_M} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{n}{n_M} \quad \frac{n}{n_M} = \left(\frac{D_{2M}}{D_2} \right)^3 \frac{q_V}{q_{VM}}$$

消去上两式中 $\frac{D_{2M}}{D_2}$, 并经整理得

$$\begin{aligned} \frac{n}{n_M} &= \left(\frac{p_M}{p} \frac{\rho}{\rho_M} \right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{n}{n_M} \right)^3 \frac{q_V}{q_{VM}} & (3-16) \\ n \frac{q_V^{\frac{1}{2}}}{\left(\frac{p}{\rho} \right)^{\frac{3}{4}}} &= n_M \frac{q_{VM}^{\frac{1}{2}}}{\left(\frac{p_M}{\rho_M} \right)^{\frac{3}{4}}} \end{aligned}$$

当两个相似通风机的进口状态相同, 或都是标准状态, 即 $\rho = \rho_M$ 时, 则

$$n \frac{q_V^{\frac{1}{2}}}{p^{\frac{3}{4}}} = n_M \frac{q_{VM}^{\frac{1}{2}}}{p_M^{\frac{3}{4}}}$$

令

$$n_s = n \frac{q_V^{\frac{1}{2}}}{p^{\frac{3}{4}}} \quad (3-17)$$

n_s 称为通风机的比转数。两个相似的通风机, 它们的比转数必然相等。

比转数公式 (3-17) 是一种简化形式 (即 $\rho = \rho_M$)，其计算结果是量纲一的参数。

我国以前的通风机比转数计算是用工程单位制，而本书统一用国际单位制 (SI)，故其比转数值比按工程单位制的值小 $1/5.54$ (即 $9.807^{\frac{3}{4}}$)，为便于对照，本书以后用括号 () 注出 m-kfg-s 制的比转数大小。

对于同一台通风机，在不同的工况点 (p 、 q_v 不同)，对应着不同的比转数。为了能表达各种类型的通风机特性，便于进行分析比较，一般是把通风机全压效率最高点的比转数作为该通风机的比转数值。

特别需要指出的是：在相似条件下，两个通风机的比转数是相等的。但是，反过来，比转数相等的通风机就不一定相似。例如，我国生产的 7-5.25 (7-29) 型通风机比转数是 5.25，6-5.41 (6-30) 型通风机的比转数为 5.41，两种通风机的比转数近似相等，但它们的几何形状却完全不相似。故比转数决不是相似条件，它们的相等是相似通风机的必然结果。

当进口状态是非标准或气体种类不同时，比转数的计算要考虑气体密度的变化。标准状态气体的密度为 1.2kg/m^3 则比转数为

$$n_s = n \frac{q_v^{\frac{1}{2}}}{\left(\frac{1.2}{\rho} p\right)^{\frac{3}{4}}} \quad (3-18)$$

比转数可以用量纲一的参数 \bar{p} 、 \bar{q}_v 来表示：

$$n_s = n \frac{q_v^{\frac{1}{2}}}{p^{\frac{3}{4}}} = \frac{60u_2}{\pi D_2} \frac{\left(\bar{q}_v \frac{\pi}{4} D_2^2 u_2\right)^{\frac{1}{2}}}{(\bar{p}\rho u_2^2)^{\frac{3}{4}}} = \frac{30q_v^{\frac{1}{2}}}{\pi^{\frac{1}{2}} \rho^{\frac{3}{4}} \bar{p}^{\frac{3}{4}}} \quad (3-19)$$

对于标准进口状态， $\rho = 1.2\text{kg/m}^3$ ，则比转数为

$$n_s = 14.8 \frac{q_v^{\frac{1}{2}}}{\bar{p}^{\frac{3}{4}}} \quad (3-20)$$

在离心通风机中，有时采用双面进气形式，以扩大流量范围。轴流通风机采用双级形式，以提高升压，而一般的比转数公式是按单级单面进气计算的。对于单级双面进气、两级串联的通风机，其比转数的计算公式如下：

1) 单级双面进气的通风机比转数计算

$$n_s = n \frac{(2q_v)^{\frac{1}{2}}}{p^{\frac{3}{4}}} = n \frac{1.414q_v^{\frac{1}{2}}}{p^{\frac{3}{4}}} = 1.414n_s$$

式中， q_v 为单级单吸入通风机模型的流量 (m^3/s)； p 为单级单吸入通风机模型的全压 (Pa)； n_s 为单级单吸入通风机模型的比转数。

2) 两级串联通风机的比转数计算

$$n_s = n \frac{q_v^{\frac{1}{2}}}{(2p)^{\frac{3}{4}}} = 2^{-\frac{3}{4}} n_s = 0.595n_s$$

2. 比转数的应用

(1) 用比转数划分通风机的类型 比转数 n_s 与通风机流量的平方根成正比, 与全压的 $3/4$ 次方成反比, 即比转数 n_s 大, 反映通风机的流量大, 压力低; 反之, 比转数小, 则流量小, 压力高。显然前者适合轴流式, 后者适合离心式。故一般可用比转数的大小来划分通风机的类型。例如:

- 1) $n_s = 2.7 \sim 12$ (15 ~ 65), 采用前弯型离心通风机。
- 2) $n_s = 3.6 \sim 16.6$ (20 ~ 90), 采用后弯型离心通风机。
- 3) $n_s > 16.6 \sim 17.6$ (90 ~ 95), 采用单级双进气或并联离心通风机。
- 4) $n_s = 18 \sim 36$ (100 ~ 200), 采用轴流通风机。
- 5) 若 $n_s < 1.8 \sim 2.7$ (10 ~ 15), 可采用罗茨鼓风机或其他回转式风机。

在设计参数给定时, 可先计算比转数, 再根据比转数的大小来决定采用哪种类型的通风机 (离心式、轴流式或回转式)。

(2) 比转数的大小可以反映叶轮的几何形状 比转数是压力系数 \bar{P} 及流量系数 \bar{q}_V 的函数。一般在同一类型的通风机中, 比转数 n_s 越大, 流量系数越大, 叶轮的出口宽度 b_2 与其直径 D_2 之比就越大, 即叶轮的出口相对宽度 b_2/D_2 大; 比转数 n_s 越小, 流量系数越小, 叶轮的出口宽度与其直径 D_2 之比就越小。

(3) 比转数可用于通风机的相似设计 相似设计是根据两个相似的通风机, 其比转数 n_s 必然相等的原理进行设计的方法。详细内容见 3.5 节。

由于比转数具有重要的特征及实用意义, 目前我国的离心通风机常用比转数来命名。

3.4 通风机的其他系数

1. 直径系数 δ

设一轴流通风机, 它的外径为 D_2 , 出口截面直径为 D_e , 出口速度为 c_e , 见图 3-1。假定另有一个与它相似的通风机, 该风机可以产生与前者相同的流量及压力, 其流量系数 $\bar{q}_V = 1$, 压力系数 $\bar{p} = \frac{1}{2}$, 故称这个风机为模型风机。

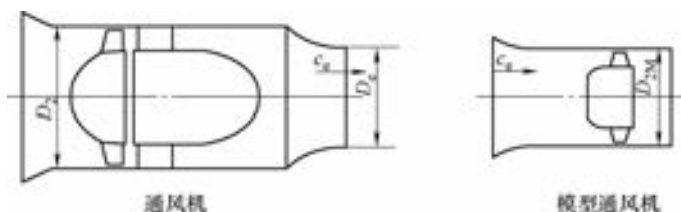


图 3-1 通风机与模型通风机

原通风机的压力为 $p = \bar{p}\rho u_2^2 = \frac{\rho}{2}c_e^2$,

$$\text{则} \quad c_e = \sqrt{2\bar{p}u_2} \quad (3-21)$$

$$\text{原通风机的流量为 } q_V = \bar{q}_V \frac{\pi}{4} D_2^2 u_2 = \frac{\pi}{4} D_e^2 c_e,$$

$$\text{则} \quad D_e = D_2 \sqrt{\frac{q_V}{\bar{q}_V} \frac{u_2}{c_e}} = D_2 \sqrt{\frac{\bar{q}_V}{\sqrt{2\bar{p}}}} \quad (3-22)$$

而模型通风机的全压、流量分别为

$$p_M = \bar{p}\rho u_{2M}^2 = \frac{1}{2}\rho u_{2M}^2 \quad \left(\bar{p} = \frac{1}{2}\right)$$

$$q_M = \bar{q}_V \frac{\pi}{4} D_{2M}^2 u_{2M} = \frac{\pi}{4} D_{2M}^2 u_{2M} \quad (\bar{q}_V = 1)$$

因为

$$p = p_M$$

所以

$$c_e = u_{2M}$$

又因为

$$q_V = q_{VM}$$

所以

$$D_{2M} = D_e$$

即模型通风机的直径等于原通风机的出口截面直径,由式(3-22)得

$$\frac{D_2}{D_{2M}} = \frac{D_2}{D_e} = \frac{(2\bar{p})^{\frac{1}{4}}}{\bar{q}_V^{\frac{1}{2}}} = 1.189 \frac{\bar{p}^{\frac{1}{4}}}{\bar{q}_V^{\frac{1}{2}}}$$

$$\text{令} \quad \delta = \frac{D_2}{D_{2M}} = 1.189 \frac{\bar{p}^{\frac{1}{4}}}{\bar{q}_V^{\frac{1}{2}}} \quad (3-23)$$

δ 称为直径系数,它是原风机叶轮直径 D_2 与模型风机 ($\bar{q}_V = 1, \bar{p} = \frac{1}{2}$) 叶轮直径 D_{2M} 之比。

2. 转速系数 σ

由于

$$u_{2M} = c_e = \sqrt{2\bar{p}u_2}$$

得

$$\frac{n}{n_M} = \frac{D_{2M}}{D_2} \frac{1}{\sqrt{2\bar{p}}}$$

将式(3-23)的关系代入,得

$$\frac{n}{n_M} = \frac{\bar{q}_V^{\frac{1}{2}}}{1.189\bar{p}^{\frac{1}{4}}} \frac{1}{\sqrt{2\bar{p}}} = 0.595 \frac{\bar{q}_V^{\frac{1}{2}}}{\bar{p}^{\frac{3}{4}}}$$

令

$$\sigma = \frac{n}{n_M} = 0.595 \frac{\bar{q}_V^{\frac{1}{2}}}{\bar{p}^{\frac{3}{4}}} \quad (3-24)$$

σ 称为转速系数,它是原风机转速与模型风机转速的比值。

比较式(3-24)和式(3-18),则有

$$n_s = 24.87\sigma \quad (3-25)$$

由此可见，转速系数 σ 与比转数 n_s 成正比。转速系数 σ 与比转数一样，它反映了通风机转速的高低。

由式 (3-23) 和式 (3-24) 得出流量系数 \bar{q}_v ，压力系数 \bar{p} 与 δ 、 σ 的关系：

$$\bar{p} = \frac{1}{2\delta^2\sigma^2} \quad (3-26)$$

$$\bar{q}_v = \frac{1}{\sigma\delta^3} \quad (3-27)$$

图 3-2 给出了各种通风机的 δ 和 σ 值。效率曲线是各种通风机的最高效率。设计通风机时也可以采用此图来选择最合适的风机形式。设计点必须选择在 δ 曲线上，如果离开此曲线，就不能获得最高效率。例如，模型叶轮 ($\bar{q}_v = 1, \bar{p} = \frac{1}{2}$) 它位于 δ 曲线的下面，它的效率不高，故图 3-2 也称最佳曲线，在产生相同流量、压力时，可采用不同形式的风机。

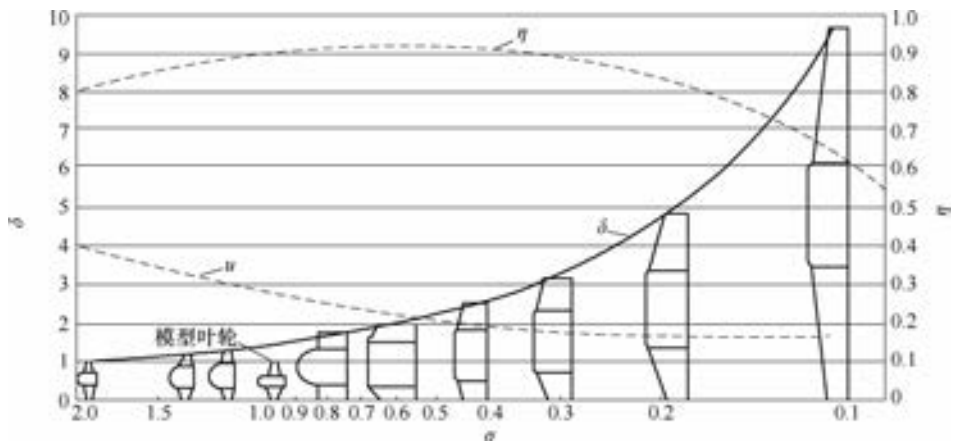












图 3-2 各种通风机的 δ 、 σ 值

表 3-2 列出各种类型通风机的叶轮形式与参数。

表 3-2 通风机的叶轮形式与参数

叶轮形式	\bar{q}_v	\bar{p}	$n_s = 14.8\bar{q}_v^{\frac{1}{2}}\bar{p}^{-\frac{3}{4}}$	$\sigma = \frac{n_s}{24.78}$	δ
	0.00185	0.55	1	0.04	24.4
	0.03	0.55	4.04	0.162	5.92
	0.13	0.50	9	0.361	2.72
	0.2	0.30	16.35	0.657	1.965

(续)

叶轮形式	\bar{q}_v	\bar{p}	$n_s = 14.8 \bar{q}_v^{\frac{1}{2}} \bar{p}^{-\frac{3}{4}}$	$\sigma = \frac{n_s}{24.78}$	δ
	0.3	0.375	16.9	0.68	1.70
	0.3	0.35	17.8	0.715	1.62
	0.3	0.25	22.9	0.924	1.535
	0.1 ~ 0.2	0.03 ~ 0.05	44.2 ~ 92	1.78 ~ 3.7	1.10 ~ 1.78
	1	1.0 ~ 1.5	10.9 ~ 14.8	0.438 ~ 0.592	1.19 ~ 1.32
	1	1 ~ 2	8.7 ~ 14.8	0.35 ~ 0.60	1.14 ~ 1.19

3. 等积孔

为了评价通风机的运行特性，有时使用等积孔的概念，尤其是矿井通风机，经常使用此概念。

假设通风机的排气口为一薄壁小孔，此孔通过的流量 q_v 、压力降 Δp ，分别为通风机的流量、全压，那么通过小孔的速度 c_0 用下式确定：

$$c_0 = \varphi \sqrt{2 \frac{\Delta p}{\rho}}$$

流量为

$$q_v = c_0 A = A \varphi \sqrt{2 \frac{\Delta p}{\rho}}$$

式中， q_v 为通过小孔的流量 (m^3/s)； Δp 为通过小孔的压力降 (Pa)； ρ 为气流密度 (kg/m^3)； φ 为流量修正系数，一般取 $\varphi = 0.65$ ； A 为小孔的面积。

在标准状态下， $\rho = 1.2 \text{ kg}/\text{m}^3$ ，取 $\varphi = 0.65$ ，则

$$A = 1.19 \frac{q_v}{\sqrt{\Delta p}} \quad (3-28)$$

在矿井采用的抽出式通风机系统中，通风机出口都装有扩散器， Δp 可以认为就是通风机的全压 p ，故式 (3-28) 可写为

$$A = 1.19 \frac{q_v}{\sqrt{p}} \quad (3-29)$$

把 q_v 、 p 用流量系数 \bar{q}_v 、压力系数 \bar{p} 的关系代入，则

$$A = 1.19 \frac{\bar{q}_v \frac{\pi}{4} D_2^2 u_2}{\sqrt{\Delta p \rho u_2^2}} = 0.856 \frac{\bar{q}_v D_2^2}{\sqrt{p}}$$

$$\text{令} \quad \bar{A} = \frac{\bar{q}_v}{\sqrt{\bar{p}}}$$

\bar{A} 称为等积孔系数。

$$\text{则} \quad A = 0.856 \bar{A} D_2^2 \quad (3-30)$$

$$D_2 = 1.166 \sqrt{\frac{A}{\bar{A}}} \quad (3-31)$$

显然，若已知通风机的流量 q_v 、压力 p ，可由式 (3-29) 计算小孔面积 A ；再根据通风机最高效率点的 \bar{p} 、 \bar{q}_v 求得等积孔系数 \bar{A} ；最后由式 (3-31) 确定合理的叶轮直径。

4. 周速系数 $\bar{\varphi}$

如前所述，通风机的全压可用出口截面的动压表示。设 c_e 为通风机的最大自由排出速度， c_e 表征了风机的特性及空气的动力性能，这样通风机的全压可表示为

$$p = \frac{\rho}{2} c_e^2 = \bar{p} \rho u_2^2 \quad (3-32)$$

$$\bar{\varphi} = \frac{u_2}{c_e} = \frac{1}{\sqrt{2\bar{p}}}$$

$\bar{\varphi}$ 称为周速系数，它反映在一定的压力下，叶轮圆周速度的大小，在讨论通风机的噪声及耐磨性时常常用到它。图 3-3 示出不同型式通风机在获得相同压力时圆周速度的大小。

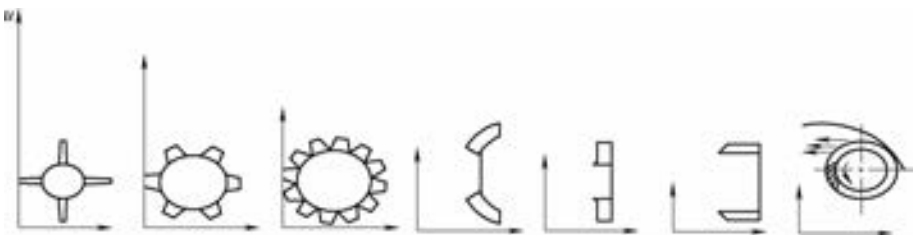


图 3-3 各种通风机在产生相同压力时周速 u 的大小

3.5 相似设计

1. 相似设计原理

所谓相似设计是根据两个相似的通风机，其比转数 n_s 必然相等的原理进行设计的方法。如果用户已给定设计参数：流量 q_V 、全压 p 、工质等，首先计算出比转数的大小；然后在已有经过试验或长期运行考验的性能良好的通风机中，选择一个比转数相同或者接近的通风机作为模型机器；再将模型机器的几何尺寸按比例放大或缩小得到新机器的几何尺寸。

2. 设计步骤

(1) 将非标准状态下的参数进行换算 根据用户给定的流量、压力、气体状态，将它换算为标准进口状态下 ($p = 101325 \text{ Pa}$, $T = 293 \text{ K}$, $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$) 的流量及全压。

(2) 比转数的确定 可分为以下几种情况确定比转数：

1) 首先选取转速，如果通风机与电动机为直联传动，则通风机的转速只能根据电动机的转速选取；由选取的转数 n 及换算好的流量 q_V 、全压 p 来计算比转数 n_s ；最后找出比转数相等或接近的模型通风机。

2) 先选择模型通风机，由模型通风机的比转数 n_s 及换算好的流量 q_V 、全压 p 计算出所需要的转速。

3) 当遇到的比转数过小而又不能用回转式风机时，或者比转数过大而又不能用轴流式风机时，可用单级或双级离心通风机，以及单级或双级轴流风机，其比转数分别按式 (3-20) 和式 (3-19) 计算。

(3) 找出最高效率点的参数 确定比转数后，根据模型的性能曲线，找到最高效率点的压力系数 \bar{p} 、流量系数 \bar{q}_V 、全压效率 η 值。

(4) 确定圆周速度 由 p 、 \bar{p} 及 ρ 值，根据式 (3-6) 计算圆周速度 $u_2 = \sqrt{\frac{p}{\rho \bar{p}}}$ 。

(5) 确定几何比例常数 m_l 由圆周速度 u_2 及转速 n ，可求得叶轮外径 D_2 (或 D_l) 为

$$D_2 = \frac{60u_2}{\pi n}$$

设模型通风机的叶轮外径为 D_{2M} ，则实物与模型的几何比例 m_l 按下式计算： $m_l = \frac{D_2}{D_{2M}}$ 。将模型通风机的几何尺寸乘以 m_l ，就得到实物通风机的几何尺寸。已知 D_2 后也可以根据该系列风机的空气动力学略图 (见本章 3.6 节)，确定新机器的尺寸。

(6) 进行通风机的结构设计，并验算零部件的强度。

(7) Re 修正 当实物通风机的雷诺数与模型通风机雷诺数相差两倍以上时，可按

近似式 (3-33) 对实物通风机的全压进行修正:

$$p' = p + \left(1 - \sqrt[4]{\frac{1}{m_1^2 m_n}}\right) K \left(\frac{\eta_m \eta_v}{\eta_i} - 1\right) p \quad (3-33)$$

式中, p 为不考虑 Re 影响时, 由相似换算得到的实物通风机全压; p' 为考虑 Re 影响时实物通风机的全压; m_1 为实物通风机与模型通风机的直径比; m_n 为实物通风机与模型通风机的转速比; η_i 为模型通风机的内效率; η_v 为模型通风机的容积效率, 反映泄漏损失; η_m 为模型的轮盘摩擦效率, 反映轮阻损失的大小; K 为系数, 在 $K = 0.3 \sim 0.6$, 后弯形叶轮 K 比前弯形大, 高比转数风机 K 比低比转数的大。

用相似设计法设计通风机的方法比较简单、可靠, 在新通风机的设计过程中, 不需要重新进行性能试验, 而且风机能在满足设计要求的高效率区运行。因此相似设计在通风机设计中被广泛采用。

【例题 2】 已知进口状态 $p_j = 720\text{mmHg}$, $t = 50^\circ\text{C}$, 流量 $q'_v = 49400\text{m}^3/\text{h}$, 全压 $p = 264\text{mmH}_2\text{O}$ 。

设计锅炉配用的通风机。

解: 1) $p' = 9.807 \times 264\text{Pa} = 2589\text{Pa}$

将流量、全压换算为进口状态:

$$q_v = q'_v = 49400\text{m}^3/\text{h} = 13.72\text{m}^3/\text{s}$$

$$p = p' \frac{\rho}{\rho'} = p' \frac{p}{p_j} \cdot \frac{T_j}{T} = 2589 \times \frac{760}{720} \times \frac{272 + 50}{273 + 20} \text{Pa} = 3011\text{Pa}$$

2) 如果选用 4-13.2 (4-73) 通风机, 转速 n 取 $1450\text{r}/\text{min}$, 其比转数为

$$n_s = 1450 \times \frac{13.72^{\frac{1}{2}}}{3011^{\frac{3}{4}}} = 13.2$$

由 4-13.2 型通风机的性能曲线求得: $\bar{p} = 0.437$ 、 $\bar{q}_v = 0.23$ 、 $\eta = 0.93$, 便可计算 u_2 、 D_2 及功率 P 。

$$u_2 = \sqrt{\frac{p}{\rho \bar{p}}} = \sqrt{\frac{3011}{1.2 \times 0.437}} \text{m/s} = 75.9\text{m/s}$$

$$D_2 = \frac{60u_2}{\rho n} = \frac{60 \times 75.9}{1.2 \times 1450} \text{m} = 1\text{m}$$

或

$$D_2 = \sqrt{\frac{4q_v}{\bar{q}_v \pi u_2}} = \sqrt{\frac{4 \times 13.72}{0.23 \times 3.14 \times 75.9}} \text{m} = 1\text{m}$$

$$P = \frac{q_v p}{1000 \eta} = \frac{13.72 \times 3011}{1000 \times 0.93} \text{kW} = 44.4\text{kW}$$

3) 如果选用 9-6.32 (9-35) 型通风机, 转速取 695r/min, 则

$$n_s = 695 \times \frac{\sqrt{13.72}}{3011^{\frac{3}{4}}} = 6.32$$

9-6.32 型通风机的量纲一的参数 $\bar{p} = 0.845$ 、 $\bar{q}_V = 0.14$ 、 $\eta = 0.68$, 则

$$u_2 = \sqrt{\frac{3011}{1.2 \times 0.845}} \text{m/s} = 54.6 \text{m/s}$$

$$D_2 = \frac{60u_2}{\pi n} = \frac{60 \times 54.6}{3.14 \times 695} \text{m} = 1.5 \text{m}$$

或者

$$D = \sqrt{\frac{4 \times 13.72}{3.14 \times 54.6 \times 0.14}} \text{m} = 1.508 \text{m}$$

$$P = \frac{3011 \times 13.72}{1000 \times 0.68} \text{kW} = 60.6 \text{kW}$$

4) 对于所提出的设计参数 $p = 3011 \text{Pa}$ 、 $q_V = 13.72 \text{m}^3/\text{s}$, 选用 4-13.2 型或 9-6.32 型离心通风机都可以满足要求。但是选用不同形式的通风机各有其特点: 4-13.2 型的效率高, 耗功小, 机器的尺寸小; 9-6.32 型通风机的转速低。作为方案选择阶段, 还可以多选符合要求类型的通风机进行全面比较, 最后在满足主要矛盾的前提下确定通风机的类型。

3.6 通风机的性能曲线

通风机在设计、制造的过程中, 由模型试验、产品试制到成批生产, 需要经过多次的性能试验, 并作出不同的性能曲线, 以满足制造厂及使用部门的需要。性能曲线主要有以下几种: 量纲一的性能曲线; 有量纲的性能曲线; 系列产品综合性能曲线; 系列产品对数坐标曲线。

1. 有量纲的性能曲线

通风机的主要性能参数是流量 q_V 、压力 p 或静压 p_{st} 、转速 n 、效率 η 。它们之间的关系用曲线表示, 称为性能曲线, 如图 3-4 所示。这是某一通风机在一定转速下 $p-q_V$ 、 $\eta-q_V$ 、 $P-q_V$ 的关系曲线。关于 $p-q_V$ 曲线的形状在第 2 章已作过详细说明。 $\eta-q_V$ 曲线是马鞍形, 在设计流量附近效率最高, 流量过小或过大时, 由于冲击损失的增大使效率下降。功率 P 与 p 、 q_V 、 η 有关, 流量开始增加时, 功率也随之增大, 而流量不断增加时, 由于效率的下降及压力的减小, 功率也有所

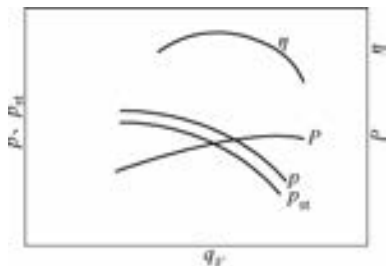


图 3-4 通风机有量纲的性能曲线

降低。

当转速变化时, 根据以下关系确定性能曲线:

$$\frac{q_v}{q_{v1}} = \frac{n}{n_1} \quad \frac{p}{p_1} = \left(\frac{n}{n_1}\right)^2 \quad \frac{P}{P_1} = \left(\frac{n}{n_1}\right)^3$$

一般新产品初步性能试验时, 可做出这种有量纲的性能曲线, 以验证产品性能是否达到设计要求。

2. 量纲一的性能曲线

通风机主要量纲一的性能参数是 \bar{p} 、 \bar{q}_v 、 \bar{P} 、 η 。它们之间的关系用曲线表示, 称作量纲一的性能曲线, 图 3-5 所示的 \bar{p} - \bar{q}_v 、 η - \bar{q}_v 、 \bar{P} - \bar{q}_v 曲线。

同一系列的通风机 (即用相似方法设计的几何形状相似而大小不同的通风机), 其相应点的 \bar{P} 、 \bar{q}_v 、 \bar{P} 、 η 都相同, 故量纲一的性能曲线代表着一个系列通风的性能, 用起来比较简便, 并且便于比较不同的通风机模型。

量纲一的性能曲线可以直接由试验求得, 或者由有量纲的曲线计算而得。

3. 通风机的空气动力学略图

在通风机的一个系列产品中, 由于不同机号的通风机都是按相似方法设计的, 故它们量纲一的性能曲线是相同的, 几何形状相似。若以叶轮外径 D_2 为特性尺寸, 则有

$$\begin{aligned} \left(\frac{b_2}{D_2}\right)_I &= \left(\frac{b_2}{D_2}\right)_{II} = \cdots = \left(\frac{b_2}{D_2}\right)_i \\ \left(\frac{D_1}{D_2}\right)_I &= \left(\frac{D_1}{D_2}\right)_{II} = \cdots = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)_i \\ \left(\frac{b_1}{D_2}\right)_I &= \left(\frac{b_1}{D_2}\right)_{II} = \cdots = \left(\frac{b_1}{D_2}\right)_i \end{aligned}$$

即所有尺寸与叶轮外径 D_2 的比值, 在一个系列中都对应相等。因此, 为了便于进行系列的相似设计, 通风机流道部分以叶轮外径 D_2 作为 100, 求出各部分相对 D_2 的尺寸, 并用此尺寸绘制通风机的几何图形 (图 3-6a), 通风机量纲一的性能曲线 (图 3-6b) 加上这个用相对 D_2 尺寸绘制的风机几何图形见图 3-6a, 称为空气动力学略图或空气动力学简图。用此图大大简化了相似设计。由比转数选定系列后, 可根据该系列量纲一的性能曲线, 找到压力系数 \bar{p} , 再由 p 、 \bar{p} 及 ρ 求得 u_2 及 D_2 。有了叶轮 D_2 尺寸, 通流部分的其他尺寸可由空气动力学略图的相对尺寸求得。

4. 系列产品的综合性能曲线

把一个系列产品的性能参数全压、流量、转速 (或叶轮的圆周速度)、蜗壳出口速

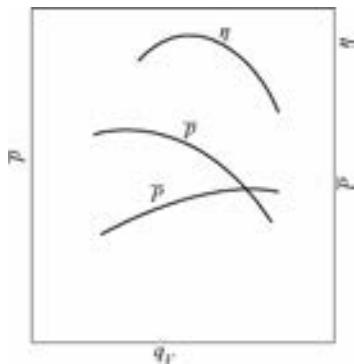


图 3-5 通风机量纲一的性能曲线

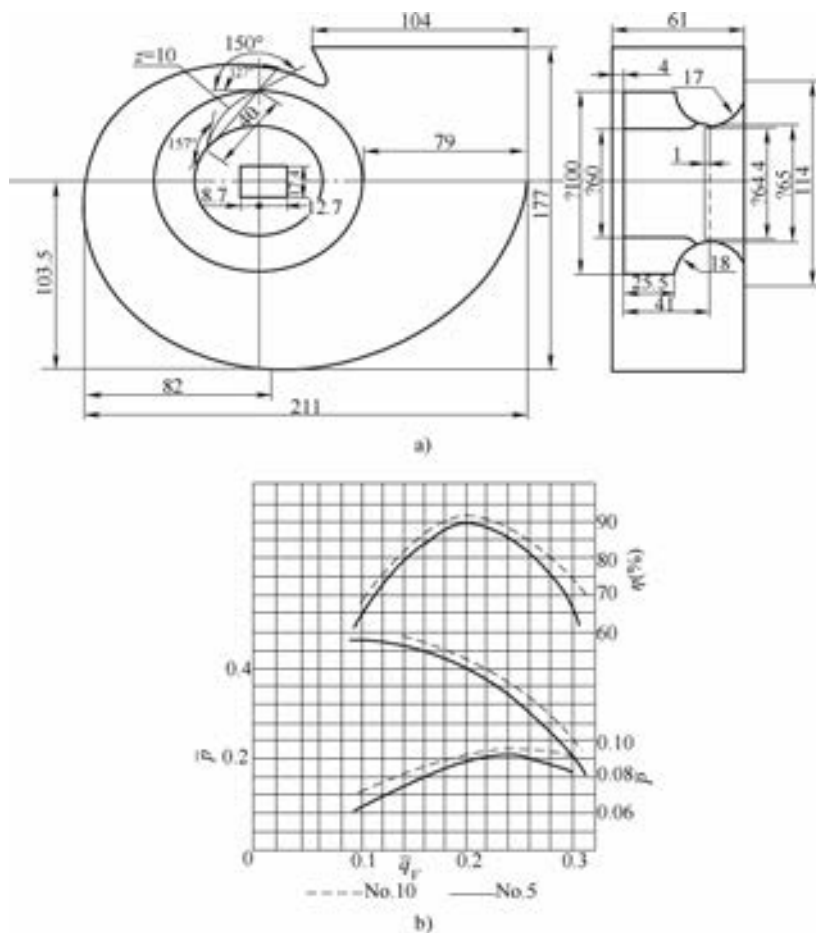


图 3-6 T4-13.2 (T4-72) 型通风机空气动力学略图
a) 通风机的几何图形 b) 通风机量纲一的性能曲线

度、效率和叶轮直径等相互关系综合在一起的曲线，称为综合性能曲线。见图 3-7 所示的系列产品综合性能曲线，是以蜗壳的出口速度 c_α 为横坐标，以全压、流量为纵坐标绘制而成。说明如下：

设 A_α 为蜗壳的出口面积，每个机号（对应着一个叶轮直径）的流量为

$$q_v = A_\alpha c_\alpha$$

在同一机号中 A_α 是定值，故流量与 c_α 成比例，即 $q_v \propto c_\alpha$ 是直线关系。 c_α 相同时，不同机号的流量不同，机号大（即叶轮直径 D_2 大、整个机器尺寸大），蜗壳面积 A_α 大，则流量也大。

全压与 c_α 的关系按相似理论换算。

因 $p = \bar{p} \rho u_2^2$ ，在系列产品中 \bar{p} 为定值，当气体密度 ρ 一定时，有 $p \propto u_2^2$ 。

$$\text{又因 } c_\alpha = \frac{q_v}{A_\alpha} = \frac{\bar{q}_v \frac{\pi}{4} D_2^2 u_2}{A_\alpha} = \bar{q}_v \frac{\pi D_2^2}{4A_\alpha} u_2$$

在系列产品中 \bar{q}_v 也是定值，叶轮直径 D_2 与 A_α 的比值也是一定的，故 $c_\alpha \propto u_2$ 即有 $p \propto c_\alpha^2$ 。因此等效率时，压力线为一条抛物线。

不同圆周速度下的压力曲线，常用机号 No.（叶轮 D_2 用分米表示的数）与转速 n 的乘积 B 表示，即

$$B = \text{No.} \cdot n = 10D_2 \times \frac{60u_2}{\pi D_2} = 191u_2$$

5. 系列产品对数坐标曲线

对数坐标曲线是把标准进口状态下，对应于量纲一的性能曲线上一个工况点的所有同系列通风机的叶轮直径 D_2 、转速 n 、圆周速度 u_2 ，以及相应的流量 q_v 全压 p 功率 P 全部表示出来，即对数坐标曲线表示了同系列通风机的主要参数 n 、 u_2 、 q_v 、 p 及 P 等之间的关系。

这种曲线可供使用部门方便地选择所需要的通风机。制造厂商可以用这种曲线合理地确定该型号系列产品的性能型谱，即确定机号和转速，为方便标准化、通用化、系列化创造了一定的条件。

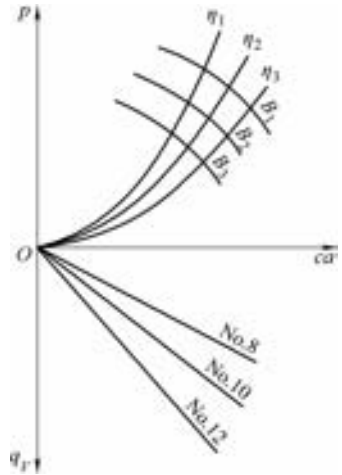


图 3-7 系列产品的综合性能曲线

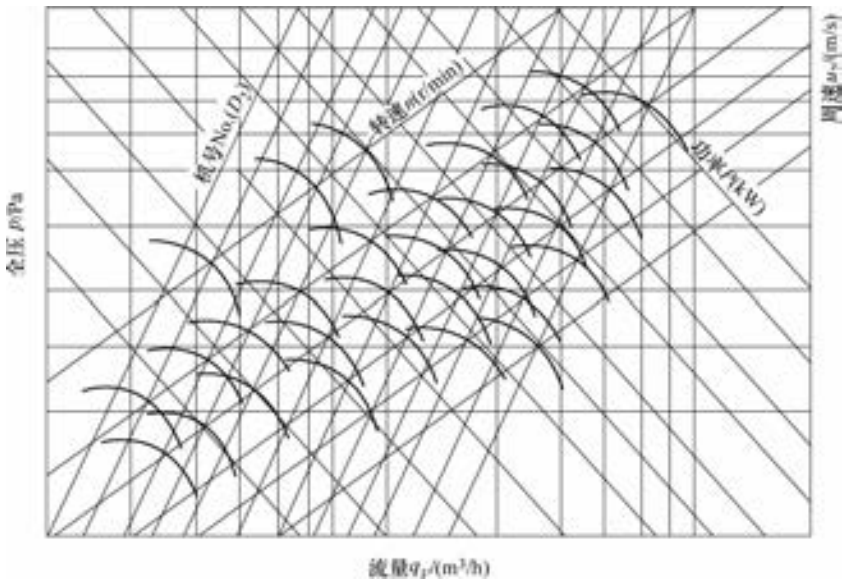


图 3-8 离心通风机的对数坐标曲线

(1) 对数坐标曲线的原理 在对数坐标曲线中, 以流量 q_v 为横坐标, 全压 p 为纵坐标, 故等流量线、等压线及等圆周速度线都是平行于坐标轴线的。图 3-8 所示为离心通风机的对数坐标曲线。

1) 等转速线、等直径线、等功率线的斜率。由流量公式 $q_v = 0.04108 \bar{q}_v D_2^3 n$ 得

$$D_2 = 2.9 q_v^{1/3} / n^{1/3} \bar{q}_v^{1/3} \quad (3-34)$$

$$n = 24.4 q_v / D_2^3 \bar{q}_v \quad (3-35)$$

由全压公式 (在标准状态下, $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$) 为

$$p = \bar{\rho} \rho u_2^2$$

$$p = 1.2 \bar{p} \left(\frac{\pi D_2 n}{60} \right)^2 \quad (3-36)$$

将式 (3-34) 代入式 (3-36), 得

$$p = 3.286 \times 10^{-3} \bar{p} \left(2.9 q_v^{1/3} n^{-1/3} \bar{q}_v^{-1/3} \right)^2 n^2$$

$$= 27.6 \times 10^{-3} \bar{p} \bar{q}_v^{-2/3} n^{4/3} q_v^{2/3}$$

令 $c_1 = 27.6 \times 10^{-3} \bar{p} \bar{q}_v^{-2/3}$, 对于同系列的相似工况, \bar{p} 及 \bar{q}_v 都是相等的, 故 c_1 为常数, 则 $p = c_1 n^{4/3} q_v^{2/3}$ 。两边取对数后, 得

$$\lg p = \lg c_1 + \frac{4}{3} \lg n + \frac{2}{3} \lg q_v \quad (3-37)$$

当转速 n 为常数时, 则式 (3-37) 为一次线性方程, 直线的斜率 α_1 为 $\alpha_1 = \cot \frac{2}{3} = 33.7^\circ$, 即等转速线与流量 q_v 坐标夹角为 33.7° , 见图 3-9。

若将式 (3-35) 代入式 (3-36), 得

$$p = 3.286 \times 10^{-3} \bar{p} D_2^2 (24.4 q_v / D_2^3 \bar{q}_v)^2 = 1.95 \bar{p} \bar{q}_v^{-2} D_2^{-4} q_v^2$$

令 $c_2 = 1.95 \bar{p} \bar{q}_v^{-2}$ 则有 $p = c_2 D_2^{-4} q_v^2$ 。两边取对数, 得

$$\lg p = \lg c_2 - 4 \lg D_2 + 2 \lg q_v \quad (3-38)$$

显然, 当 D_2 为常数时, 式 (3-38) 仍为线性方程, 直线斜率 α_2 为

$$\alpha_2 = \cot 2 = 63.5^\circ$$

即等直径线与流量 q_v 坐标夹角为 63.5° , 见图 3-9

已知轴功率 $P = \frac{pq_v}{1000\eta}$, 两边取对数后, 得

$$\lg P = \lg p + \lg 1000\eta - \lg q_v \quad (3-39)$$

当功率为常数时, 式 (3-39) 也是线性方程, 直线斜率为 α_3 为

$$\alpha_3 = \cot(-1) = 135^\circ$$

即等功率线与流量坐标夹角为 135° , 见图 3-9。等功率线只是近似的, 因为各条性能曲线上全压效率并不相同, 不同机号的传动方式不同, 故机械效率也不同。

2) 各参数坐标长度的比例关系。以流量坐标 m_Q 为基准, 压力坐标 $m_p = m_Q$ 。

① 转速坐标长度 m_n 与流量坐标长度 m_Q 关系。式 (3-37) 为

力方程，分别换算成有量纲的流量、压力，再将它们表示在对数坐标内，并圆滑连接起来；然后将此段曲线用样板（因同系列内所有机号的压力曲线形状相同）分别以所有直径 D_2 线与 n 线的交点为基准，画出所有性能曲线。

5) 根据最大允许的圆周速度，计算出最高效率点的压力，此最高压力线即为最大圆周速度线；通过机号与最高转速直线交点，画与横坐标平行的圆周速度线，以它与右侧纵坐标的交点为基准，按 $m_u = m_Q$ 的长度比例关系画出 u_2 线。

6) 功率 P 的修正。 A 点的效率是最高的，而 A_i 的效率均比 A 点效率低，那么 A_i 点的功率 P_{A_i} 可按式修正： $P_{A_i} = P'_A \cdot \frac{\eta_A}{\eta_{A_i}}$

$$P_{A_i} = P'_A \cdot \frac{\eta_A}{\eta_{A_i}}$$

式中， P'_A 为用 A 点的功率坐标，按 A_i 点查出的值； η_A 为 A 点效率，即最高效率； η_{A_i} 为 A_i 点的效率。

7) 如果系列产品的机号太多，图线幅度过大，则可将小机号的 D_2 线与大机号的 D_2 线重叠。例如 No. 20 与 No. 10、No. 16 与 No. 18 分别重叠，但在等直径 D_2 线上要注明重叠的两个机号。为了保证重叠机号的全压 p ，圆周速度 u_2 不变，在 $D_{\max} = 2D_{\min}$ 时，它们的流量、功率、转速之间的关系推导如下：

$$\text{因} \quad \frac{p_{\max}}{p_{\min}} = \left(\frac{D_{\max}}{D_{\min}}\right)^2 \left(\frac{n_{\max}}{n_{\min}}\right)^2 = 2^2 \left(\frac{n_{\max}}{n_{\min}}\right)^2 = 1$$

$$\text{故} \quad \frac{n_{\max}}{n_{\min}} = \frac{1}{2} \quad n_{\max} = \frac{1}{2}n_{\min}$$

$$\text{又因} \quad \frac{q_{V_{\max}}}{q_{V_{\min}}} = \left(\frac{D_{\max}}{D_{\min}}\right)^3 \left(\frac{n_{\max}}{n_{\min}}\right) = 2^3 \times \frac{1}{2} = 4$$

$$\text{则} \quad q_{V_{\max}} = 4q_{V_{\min}}$$

$$\text{又由} \quad P = \frac{pq_V}{1000\eta}$$

$$\text{得} \quad P_{\max} = 4P_{\min}$$

因此机号重叠时，除压力坐标不变外，其他的参数，如流量、转速、功率线都要分别重叠，应注明所需参数，见图 3-10。

8) 在一个系列中，由于几何形状不完全相似，如叶片厚度，间隙不成比例，还有雷诺数的影响，小机号通风机量纲一的性能曲线不同于大机号。这时若将它们仍用一个对数坐标曲线表示，会引起很大的误差。为此，可采取分组的方法绘制对数坐标性能曲线，如 No. 5 以下为一组，No. 5 以上为一组。

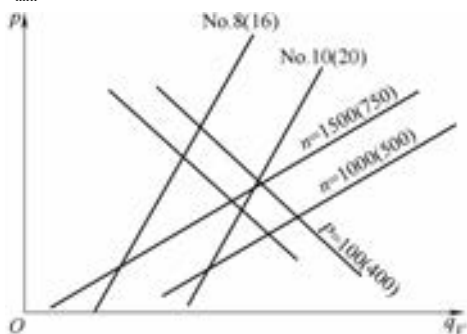


图 3-10 机号重叠的对数坐标示意图

第 4 章 常用风机的结构型式

4.1 常用风机的分类

1. 风机按工作时产生的压力大小分类：

- (1) 通风机 风机产生的全压 $p < 15\text{kPa}$ 。
- (2) 鼓风机 风机产生的全压在 $15 \sim 340\text{kPa}$ 。
- (3) 压缩机 风机产生的全压 $p > 340\text{kPa}$ 。

2. 通风机按工作时产生的压力大小（在大气压为 101.3kPa ，气温为 20°C 的标准状态下）分类

- (1) 低压离心通风机 通风机的全压 $p < 1\text{kPa}$ 。
- (2) 中压离心通风机 通风机的全压 $p = 1 \sim 3\text{kPa}$ 。
- (3) 高压离心通风机 通风机的全压 $p = 3 \sim 15\text{kPa}$ 。
- (4) 低压轴流通风机 通风机的全压 $p \leq 500\text{Pa}$ 。
- (5) 高压轴流通风机 通风机的全压 $p > 500\text{Pa}$ ，但 $p < 15\text{kPa}$ 。

3. 泵与风机按工作原理分类

(1) 叶片式 叶片式风机都有叶轮，叶轮上均匀布置着叶片。叶片式风机又分为离心式、轴流式及混流式三类。

1) 离心式。流体轴向进入叶轮后，主要沿径向流动，高速旋转的叶轮对流体做功，提高流体的压力能与动能。图 4-1 所示为离心风机。一般离心风机使用最广泛。

根据增压值的大小，离心风机可分为以下三类：

- ① 低压风机。增压值小于 1000Pa 。
- ② 中压风机。增压值 $1000 \sim 3000\text{Pa}$ 。
- ③ 高压风机。增压值大于 3000Pa 。

我国生产各种用途的风机，在风机名称前冠以用途名称，见表 4-1。

日常通风换气用的中低压通风机是 T4-72 型及 T4-79 型。下面对型号举例说明。

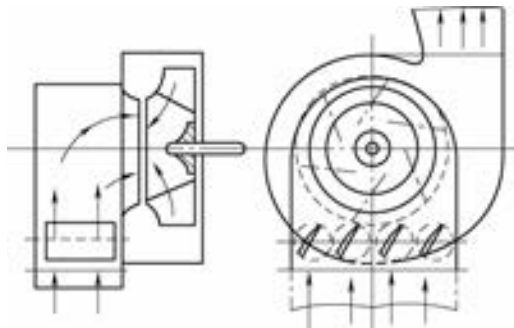


图 4-1 离心风机

T4-72-11No 8C 右旋 90° ：T 为一般通风换气用离心通风机，可省略；4 为全压系数乘 10 后的整数值；72 为风机的比转数为 72；1 为风机的进风型式是单侧吸风，如是双侧吸风用 0 表示；1 为通风机的设计顺序为第一次设计，第二次用 2 表示；No8 为机号

为第8号,表示叶轮外径 $D_2 = 800\text{mm}$;C为传动方式是C式,带传动;右旋为叶轮旋转方向是顺时针; 90° 为出风口位置是垂直向上的。

表 4-1 通风机的用途名称、汉语及汉语拼音拼音字头

用途名称	代 号		
	汉 语	汉 语 拼 音	拼音字头(代号)
排尘通风	排尘	CHEN	C
输送煤粉	煤粉	MEI	M
防腐蚀	防腐	FU	F
工业炉吹风	工业炉	LU	L
锅炉引风	引风	YIN	Y
锅炉通风	锅炉	GUO	G
耐高温	耐温	WEN	W
防爆炸	防爆	BAO	B
一般通风换气	通风	TONG	T

排尘离心通风机,用于排送含有灰尘的空气,例如砂轮磨粒、锯屑、刨花及气力输送等。常用的有C6-46、C4-73系列风机,其中符号C是排尘通风的代号。

煤粉离心通风机用于热电厂输送煤粉用,常用的有M7-29系列。其中M是煤粉吹送的代号。

锅炉离心通风机用于热电站和其他工业蒸汽锅炉送风及排烟。用于送风的称通风机,如G4-73,其中G是锅炉通风的代号。用于排烟的称引风机,如Y4-73,其中Y是锅炉引风的代号。

防爆离心风机用于排送易燃易爆气体,例如石油、化工等气体。此类风机的叶轮与机壳大多用有色金属材料,如铝等。目前生产的防爆离心通风机有B4-72,其中B是防爆气体通风换气的代号。

2) 轴流式。流体轴向进入叶轮后,近似地在圆柱形表面上沿轴线方向流动,并借旋转叶轮上的叶片产生升力来输送,同时提高其能量。轴流风机所输送流体的流量比离心式大,但扬程(全压)要比离心式低。图4-2所示为双级轴流风机。

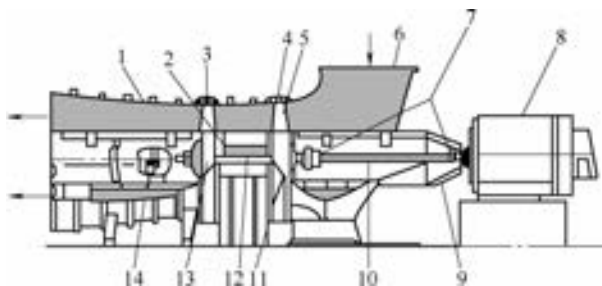


图 4-2 双级轴流风机

- 1—扩压器 2、5—叶片 3、4—叶轮的外壳 6—进气箱 7—联轴器 8—电动机
9—联轴器护罩 10—中间轴 11、13—轮毂 12—主轴承 14—动叶调节机构

轴流风机大多用做大容量锅炉送、引风机，适宜用于需要流量大、扬程（全压）低的场合。

3) 混流式。流体进入叶轮后，流动的方向处于轴流式和离心式之间，近似沿锥面流动。混流风机的性能介于离心式与轴流式之间。其流量大于离心式但小于轴流式；扬程（全压）大于轴流式而小于离心式。

按照动叶片的调节方式，混流风机可分为动叶不可调节、动叶半调节及动叶全调节等三种型式。动叶不可调混流风机的动叶片与轮毂铸成一体或固定连接；动叶半调节则在需要改变工况时，停止风机运行拆出定位销，转动动叶片角度；动叶全调节的混流风机是通过液压或机械调节机构，在不停风机的情况下调节动叶片的角度。

(2) 容积式 容积风机可分为往复式和回转式。往复风机主要有活塞式、柱塞式等类型。回转式风机主要有罗茨鼓风机及压缩机等类型。图4-3所示为罗茨鼓风机。它是依靠两个两叶或三叶的转子做相反方向的旋转，达到传递能量于气体并增高其压力的目的。

(3) 其他类型 这类风机是指除叶片式和容积式以外的风机。

目前定型生产的各种类型风机的使用范围是相当广泛的。其中叶片风机中的离心种类的风机，工作区间最广，产品种类、型号、规格也最多。

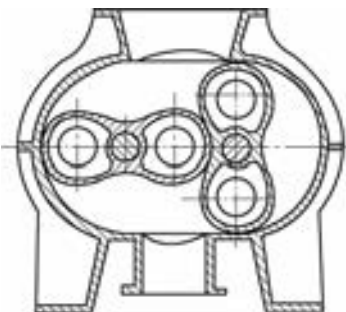


图 4-3 罗茨鼓风机

4.2 一般建筑、通风、空调用离心风机结构

离心风机的工作原理与离心泵的工作原理基本相同。当叶轮随轴旋转时，叶片间的气体也随叶轮旋转而获得离心力，气体被甩出叶轮。被甩出的气体挤入机壳，于是机壳内的气体压强增高，被导向出口排出。气体被甩出后，叶轮中心处压强降低，外界气体从风机的吸入口通过叶轮前盘中央的孔口吸入。吸入口有集气作用，可以直接从大气中吸气，使气流以最小的压头损失均匀流入机内。

图4-4为离心风机主要结构分解图。下面介绍其主要结构。

1. 吸入口

吸入口有集气作用，可以直接从大气中吸气，使气流以最小的压头损失均匀流入机内。风机的吸入口主要有三种形式：如图4-5a是圆筒形吸入口，制作简单，压头损失较大；图4-5b是圆锥形吸入口，制作较简单，压

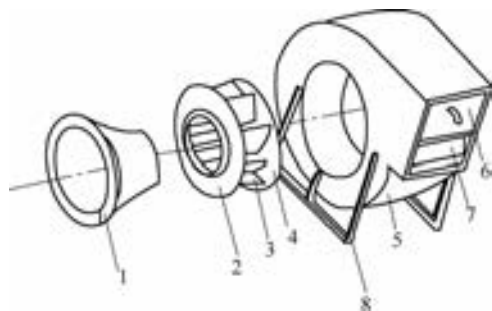


图 4-4 离心风机主要结构分解图

1—吸入口 2—叶轮前盘 3—叶片 4—后盘 5—机壳
6—出口 7—截流板（风舌） 8—支架

头损失较小；图 4-5c 是圆弧形吸入口，压头损失小，但制作较困难。

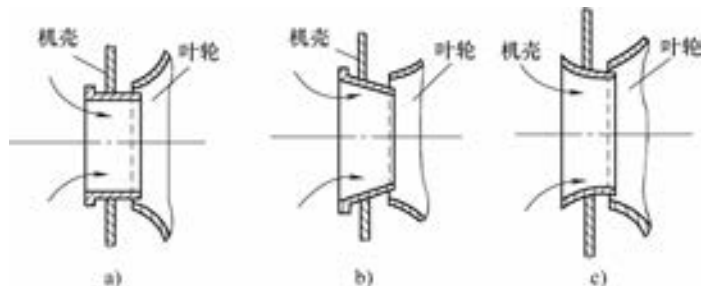


图 4-5 离心风机吸入口型式

a) 圆筒形吸入口 b) 圆锥形吸入口 c) 圆弧形吸入口

2. 叶轮

叶轮由叶片和连接叶片的前盘、后盘组成；叶轮的后盘与轴相连。叶轮可分为图 4-6 所示的三种不同的叶形。

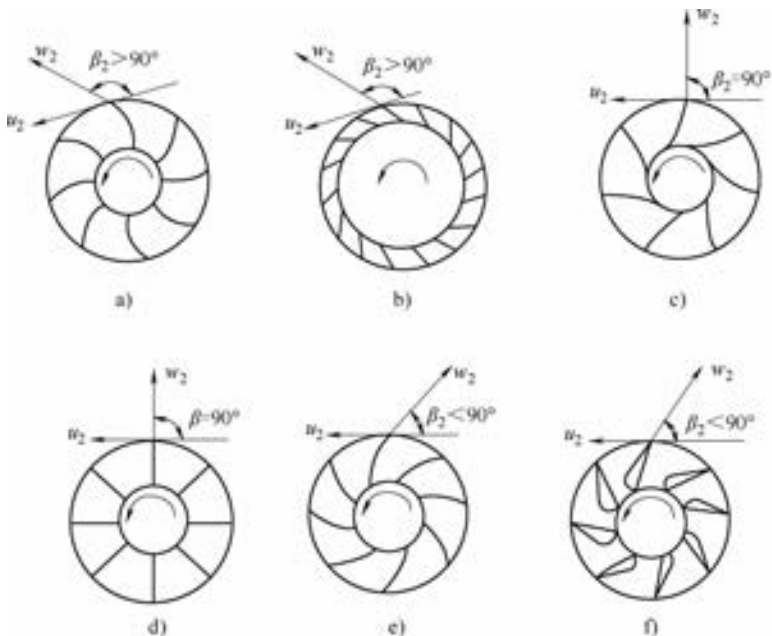


图 4-6 离心风机叶轮形式

a) 薄板前向叶轮 b) 多叶前向叶轮 c) 曲线形径向叶轮 d) 直线形径向叶轮
e) 薄板后向叶轮 f) 中空机翼形后向叶轮

(1) 前向叶形叶轮 叶片出口安装角度 $\beta > 90^\circ$ ，叶片出口方向和叶轮旋转方向相同。前向叶形叶轮有薄板前向叶轮见图 4-6a；多叶前向叶轮见图 4-6b。多叶式流道很短，而出口宽度较宽。

(2) 径向叶形叶轮 叶片出口安装角度 $\beta = 90^\circ$ ，叶片出口是径向方向。径向叶形叶轮分为直线形径向叶轮（见图 4-6d）和曲线形径向叶轮（见图 4-6c）两种，前者制作简单，而损失较大；后者则反之。

(3) 后向叶形叶轮 叶片出口安装角度 $\beta < 90^\circ$ ，叶片出口方向与叶轮旋转方向相反。后向叶形的叶轮有薄板后向叶轮，见图 4-6e；还有空气动力性能好的中空机翼形后向叶轮，见图 4-6f，其整机效率可达 $\eta = 90\%$ 。

3. 机壳

中压和低压离心风机的机壳一般是用钢板制成的蜗壳状箱体。它是用来收集来自叶轮的气体。由于蜗壳截面积逐渐扩大，气体的部分动能转化为压能，最后使气体平顺地沿旋转方向被引至风机出口。

4. 支承和传动

我国离心风机的传动方式共分六种，即 A、B、C、D、E、F 型，见图 4-7 和表 4-2。

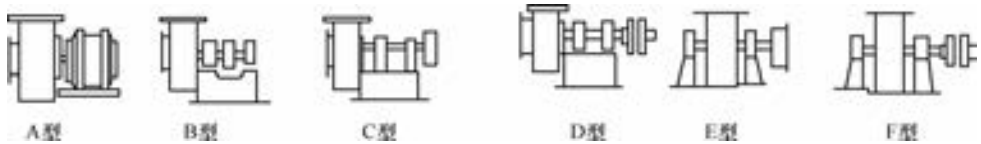


图 4-7 离心风机六种传动方式

表 4-2 离心风机的六种传动方式

代 号	A 型	B 型	C 型	D 型	E 型	F 型
支承方式	无轴承	悬臂支承	悬臂支承	悬臂支承	双轴承支承	双轴承支承
传动方式	电动机直联传动	带轮在轴承中间	带轮在轴承外侧	联轴器传动	带轮在轴承外侧	联轴器传动

A 型叶轮直接安装在电动机加长轴上，是电动机直联传动；B、C、E 型为间接的带传动，这种传动方式便于改变风机转速，有利于调节；D、F 型为联轴器的直接传动，风机与电动机转速相同。

A、B、C、D 型的机轴不伸到叶轮中去，称为悬臂支承，叶轮中的气体流动阻力较小，便于维修；E、F 型轴承分布于叶轮两侧，机轴穿过机壳，运行较平稳，大多用于较大型风机。

4.3 一般建筑、通风、空调用轴流风机结构

1. 轴流风机的特点

轴流风机和离心风机同属于叶片式风机，所不同的是，轴流风机的比转数高于离心式的比转数。轴流风机的基本特点是流量大、扬程（全压）低。

轴流风机的基本结构型式如图 4-8 所示, 主要由叶轮、导叶、吸入装置及压出装置等构成。按动叶片和导叶是否可在工作位置绕自身轴转动, 轴流风机又分为动叶可调式、静叶可调及固定叶片式等结构型式。



图 4-8 轴流风机的基本结构型式

1—进气箱 2—外壳 3—动叶片 4—导叶 5—动叶调节机构 6—扩压器
7—导流器 8—轴 9—轴承 10—联轴器

在实际工程应用中, 动叶可调轴流风机具有以下特点:

1) 与相同容量的离心风机相比较, 轴流风机结构比较紧凑, 外形尺寸小, 重量轻。例如: 与同容量的离心风机相比, 轴流风机的空间尺寸可减少 30%; 600MW 负压燃煤机组如果采用轴流式送风机, 其重量可比离心式减轻 30t, 引风机可减轻 35t。

2) 动叶可调轴流风机的变工况经济性能好。对于动叶可调轴流风机, 由于其动叶片装置角可以随着负荷的变化需要而改变, 既可调节流量, 又可保持风机在高效区运行。在低负荷时, 动叶可调轴流风机的耗功低于导流器调节机翼形离心风机, 其变工况经济性好。

3) 动叶可调轴流风机的转子结构较复杂, 转动部件多, 制造、安装精度要求高, 维护工作量大。随着轴流风机设计制造技术的不断完善, 其动叶调节机构的可靠性也在不断提高, 将减少维护工作量。

4) 轴流风机噪声大, 可达 110 ~ 130dB (A), 而离心风机的噪声一般为 90 ~ 110dB (A)。

由于动叶可调轴流风机具有以上特点, 因而它的应用范围将随火力发电厂单机容量的增大而逐步扩大。目前, 国外大型火电站普遍采用轴流风机作为锅炉的送、引风机。我国 300MW 及以上火力发电机组的送、引风机一般都采用轴流风机。

2. 轴流风机的主要部件和结构

(1) 轴流风机的主要部件

1) 叶轮。叶轮是用来对流体做功提高流体能量的部件, 是轴流风机最重要的部件之一。其结构和强度要求比较高。叶轮主要由叶片和轮毂组成。图 4-9 示出轴流风机的叶轮。叶轮尺寸、结构和叶片叶形对风机的性能有着重要的影响。

2) 导叶。导叶的作用是确定流体通过叶轮前或叶轮后的流动方向, 使流体以最小的损失获得最大的能量。对于后导叶还有将旋转运动的动能转换为压力能的作用。前导叶若做成可转动的, 还可提高轴流风机的变工况运行的经济性。

导叶叶型有机翼型和圆弧平板型。导叶高度与动叶要相适应, 安装在叶轮前或叶轮

后的定子上。导叶与动叶之间的间隙对风机的效率有一定影响，间隙过大影响风机的效率，而间隙又不能太小，否则动静之间将产生摩擦和碰撞。

3) 轴流风机的集流器。集流器的作用主要是保证流体以最小的损失、均匀分布的压力和速度进入风机的叶轮。集流器安装在轴流风机叶轮入口。

轴流风机的集流器见图 4-10，轴流风机集流器入口一般有进气箱。进气箱的形状应使气流平顺地进入集流器，使集流器进口气流有均匀的速度场与压力场。

4) 扩压器。扩压器的作用是将流体的动能部分地转换为压力能。扩压器见图 4-11，它的结构型式有筒形和锥形。从扩压功能上看，它有内扩、外扩和内外同时扩展几种型式。其扩散角度要避免流体的边界层分离，以保证扩压器内流动损失最小、扩压效果好。扩散角度取在 5°~20°范围，大多数情况下可在 7°~9°范围内选取。

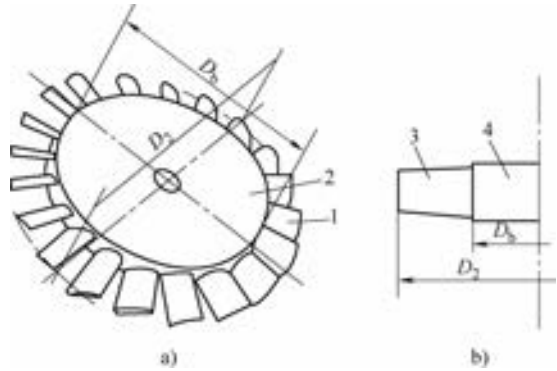


图 4-9 轴流风机的叶轮

a) 叶轮 b) 叶轮尺寸
1、3—叶片 2、4—轮毂

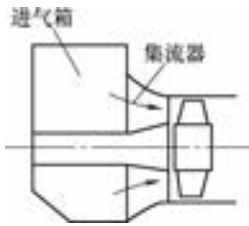


图 4-10 轴流风机集流器

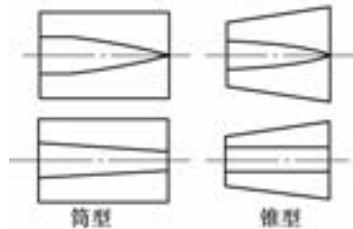


图 4-11 扩压器

(2) 轴流风机的结构 风机整体结构分转子和定子两部分。转子由主轴、叶轮等构成；定子由进气箱、集流器、机壳及扩压器构成。有的还有动叶调节机构。

ASN 型轴流风机如图 4-12 所示，其主轴与电动机轴之间用挠性联轴器连接。这种联轴器尺寸小，可自动对中心。定子主要由进气箱、机壳、扩压器和轴承箱等构成。机壳是刚性较强的双层壳体。进气箱入口和扩散器出口均设挠性连接，可以吸收热膨胀、隔振，并避免硬性传动。扩压器呈扩散筒状，与风道之间进行软连接。检修时将扩压器沿导轨推入风道，见图 4-12 的右下图，把叶轮暴露出来，可直接对叶轮进行检修，十

分方便。主轴承采用滚柱轴承并带有焊接轴承箱，可承受转子全部的径向和轴向载荷。主轴、轴承箱和用于动叶调节的液压缸全部位于风机芯筒内，整个转子除了叶片和轮毂表面外，其余全部与气流隔绝。此外，该风机还设有失速探针（图 4-13）和轴承温度监测仪表。

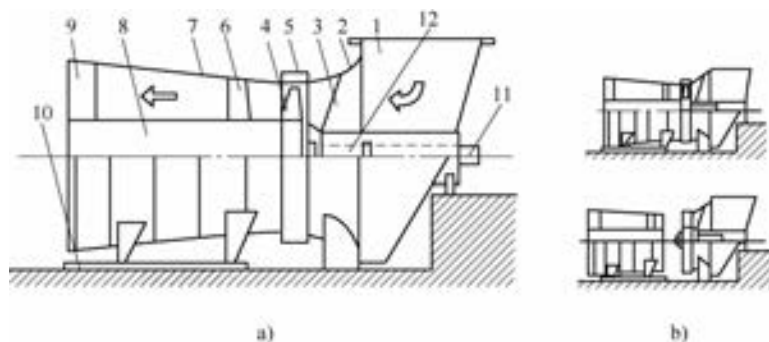


图 4-12 ASN 型轴流风机

a) 整体结构 b) 扩压器沿导轨推入风道

- 1—进气箱 2—集流器 3—前导叶 4—动叶片 5—机壳 6—后导叶 7—扩压器
8—内芯筒 9—扩压器的支撑叶片 10—导轨 11—主轴 12—轴承箱

TLT 型轴流风机整体结构特点：机壳以水平中分面为界分上下两部分，主轴采用挠性联轴器，可以补偿与电动机轴之间由于安装和运行中引起的径向、轴向和水平方向的偏差，而对转矩的传递则呈刚性。同时还设有挠性进气、排气膨胀节，可以补偿热膨胀和进气、排气管道的安装误差，并隔绝振动。

火力发电厂中用的轴流送风机大多为卧式布置，而轴流引风机除卧式布置外，也可以立式布置在烟囱中。立式布置有如下优点：烟道布置方便、弯道少、压力损失小；因布置在烟囱中，机壳不需要包覆隔音层；占地面积小。

图 4-14 示出轴流风机叶轮及动叶调节机构。

轴流风机叶轮主要由轮毂和叶片组成。ASN 型风机叶轮轮毂采用球墨铸铁铸成，轮毂上装有 17~30 枚叶片，而且叶片长度根据需要可有 21 种选择。叶片是由高强度铸铝合金制成的机翼型扭曲叶片，强度高、重量轻。

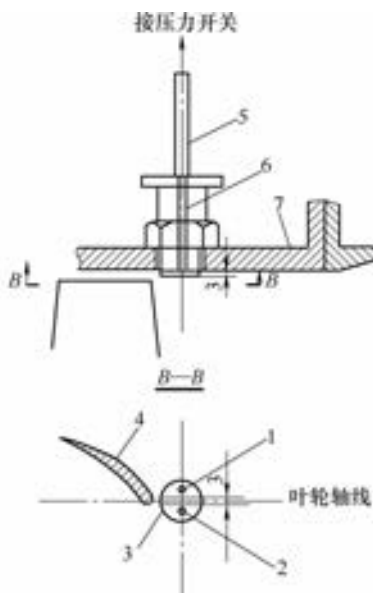


图 4-13 失速探针

- 1、2—测压孔 3—隔片 4—叶片
5、6—测压管 7—机壳

叶片前缘装有不锈钢镀铬耐磨鼻，一经磨损可随时更换。叶片与球推力轴承支撑的叶片轴相连接，使叶片沿叶轮径向定位并可绕叶片轴转动。叶柄上装有叶片平衡重（图 4-14 的序号 11），平衡重的作用是在叶轮旋转时平衡叶片产生的关闭力矩，以减轻调节机构的负担。关闭力矩是指叶片质量分布在扭曲的空间平面上，叶轮旋转时所产生的使叶片安装角减小的力矩。平衡锤刚好产生一个与关闭力矩相反的力矩，起到力矩平衡的作用。

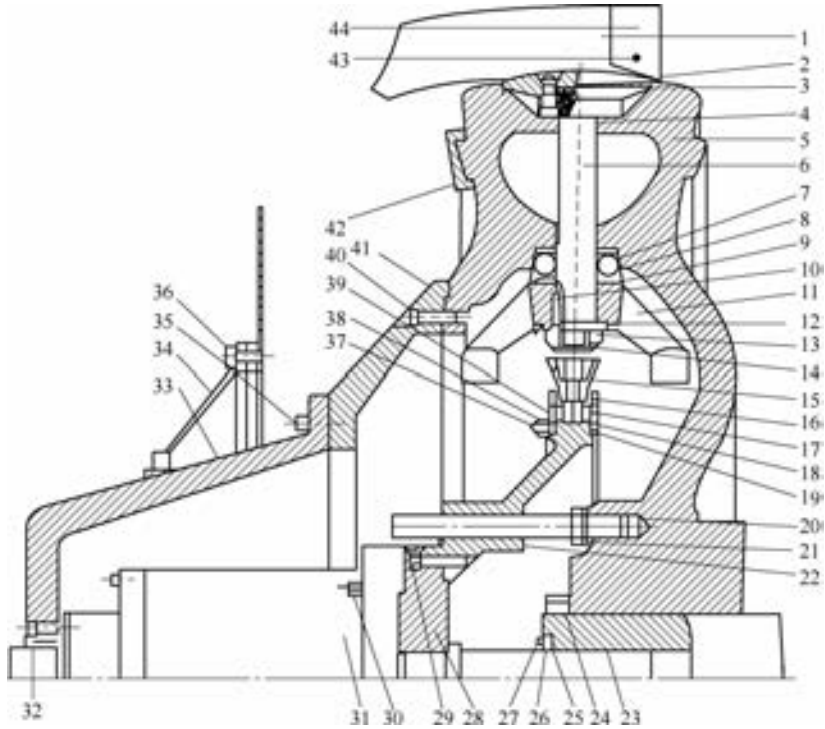


图 4-14 轴流风机叶轮及动叶调节机构

- 1—叶片 2—叶片螺钉 3—聚四氟乙烯密封垫 4—衬套 5—轮毂 6—叶柄 7—推力轴承 8—紧环
- 9—衬套 10—键 11—平衡重 12、25—垫圈 13、15、24—锁紧螺母 14—弹簧垫圈 16—销
- 17—滑片 18—锁紧环 19、39—导环 20—衬圈 21—导柱 22—调节圆盘 23—衬套
- 26—环 27、29、30、32、35、36、40、43—螺钉 28—支撑轴颈 31—液压缸
- 33—支撑轴盖 34—圆盘 37—螺栓 38—螺母 41—轮壳盖 42—平衡块 44—耐磨鼻

FAF 型风机叶轮为焊接结构，这种叶轮比起铸造轮毂可承受较大的离心应力，因而可以提高转速，缩小风机尺寸。叶片用耐腐蚀、高强度、高精度的螺钉与叶柄连接。在叶片上还装有导向轴承。导向轴承一般为径向推力滚动轴承，主要承受叶片的调节剪切力。

叶柄轴承是动叶可调轴流风机的关键部件之一。它必须保证叶片在调节范围内能转动自如，因此叶柄轴承的尺寸、润滑和密封的设计特别重要。同时，叶柄轴承对润滑油和润滑脂质量要求也比较高，要求在高温、高离心力作用下，仍能保持长期的润滑效果。叶根密封对于轴流风机的安全运行十分重要。FAF型轴流风机采用两个活塞环和一个迷宫式油脂密封片，密封叶柄穿过轮毂外圈处的间隙。ASN型轴流风机叶根密封采用密封空气系统，防止灰尘进入轮毂。

第 5 章 风机的安装、运行及维修

5.1 风机的安装

1. 通风机的机组安装

(1) 通风机安装步骤

1) 清扫基础混凝土表面，按表 5-1 检查基础是否合乎精度要求。

2) 将通风机座放到基础上，在基础表面和底座底面之间插上垫铁。通过调整垫铁的厚度，使安装的设备达到设计水平度和标高；增加设备的稳定性和便于二次灌浆。注意垫铁要放置在地脚螺栓的两侧，若只垫螺栓一侧，则应按地脚螺栓的螺距选用大一号的垫铁。

表 5-1 通风机基础允许偏差

偏差名称	偏差值/mm	偏差名称	偏差值/mm
基础坐标仪(纵、横中心线)	±20	中心距(根、顶部测量)	±2
基础各不同平面的标高	0, -20	预留的地脚螺栓孔:	
基础平面外形尺寸	±20	中心位置	±10
凸台平面外形尺寸	-20	深度	±20
凹穴尺寸	+20	孔壁的垂直度	0
基础平面水平度(全长)	10	预埋地脚螺栓的埋设件:	
基础竖向偏差(全高)	20	标高	10
预埋的地脚螺栓:		中心位置	±5
标高(顶端)	+20,0	水平度	5

斜垫铁必须成对使用，垫铁的表面必须平整。每组垫铁数一般不超过 3~4 块，厚垫铁放在下层，而最薄的应夹在中间，以免产生翘曲变形，同一组垫铁放置必须整齐。设备调整好水平和方位，再将每组垫铁焊接固定好。在调整水平过程中，应结合地脚螺栓同时进行。

3) 地脚螺栓埋入基础上的预留孔，复校其方位精度是否准确；然后将机身底座和基础混凝土间的间隙灌入足够的灰浆，以形成混凝土结构件。地脚螺栓的预留孔的孔口大小按螺栓直径而定。对螺距为 20~30mm 的螺栓，预留孔的口子应为 100mm × 100mm，相应孔底是 110mm × 110mm；对直径大于 30mm 的地脚螺栓，预留孔的口子是

200mm×200mm，其相应孔底是220mm×220mm。以上两种的孔深由螺栓长度规范决定。孔的纵切面是梯形即可。

4) 灰浆的配方比，大多用400号水泥配1比2~3的砂。应特别注意收缩性、龟裂及施工有关规范。待灰浆充分硬化后，才能拧紧地脚螺栓的螺母。

5) 在大型通风机中，机壳与底座是分开的，机壳本身也往往分成几部分。此时，应先将机体底座、轴承座按上述方法安装后，按照下机壳、转子、上机壳的顺序，边调整定子和转子间的间隙边组装。组装前，应搞清楚重要部位是否有毛刺、卷边、变形等。组装时注意不弄脏、不撞击研合面，精心施工。

6) 安装建筑设施用通风机时，应将通风机安装于带防振橡胶或防振弹簧等的防振材料上。防振材料应以通风机整机的重心位置为中心进行布置。采用防振材料虽可防止基础上的振动，但通风机本身的振动却略有增加。为此，通风机与管路的连接，应采用帆布或橡胶制成的挠性接头。

7) 通风机安装于楼板、平台时，应做好如下工作：①直接设置通风机的楼板或平台，应采用现浇钢筋混凝土板，板厚不宜小于80mm，不宜采用冷轧钢筋。②厂房梁的跨度不宜大于6m。③通风机所产生的水平惯性力应作用在结构刚度较强的方向上。④不应把干扰大于3000N的通风机直接安装在楼板上，应由梁来支撑。⑤要求干扰频率与楼板自振频率相差不小于30%，以避免产生共振而增加楼层结构振动。⑥楼板、平台严禁采用悬臂结构。

(2) 离心通风机的安装程序和形式

1) 大、中型通风机的轴和电动机轴是分开的，安装时一般可按下列程序进行安装：①把机壳、轴承座吊放在基础上，穿上地脚螺栓，摆正机壳，暂不固定。②将叶轮穿入机壳，装好机壳侧盖板，再将电动机吊放在基础上。③安装调整带轮。用吊线法调整带轮较简便。将铅锤线挂在轮外侧，在轮外侧的正上方选定一点，用塞尺测量此点与铅锤线之间的间隙 a ；再将轮转动180°，将此点位于正下方，再用塞尺测量此点与铅锤线间的间隙 a_1 ，使 $a = a_1$ 。④轴承座的校正、校平。校正可用大平尺按中心线量取平行线进行检查，偏斜可用撬杠拨正；校平用水平仪进行，把水平仪放在主轴上或带轮上检查，使轴承座的纵向水平度不应小于0.1/1000；把水平仪放在轴承座的水平中分面上检查，使轴承座的横向水平不应小于0.2/1000。因为轴承座要当作机壳、电动机的校正校平标准，所以轴承座的轴心不能低于机壳中心，联轴器的轴心不能低于电动机中心。轴承座校正校平以后，最好先灌浆进行固定。⑤通风机叶轮按联轴器校正中心，机壳以叶轮为标准进行校平、校正。要求机壳的壁面和叶轮后盘或中盘平面平行，平行精度符合图样设计要求，机壳轴孔中心和叶轮中心重合。

2) 离心通风机的安装形式。安装在墙上和柱上的通风机，一般只限于A式传动通风机采用钢结构支架，其安装形式如图5-1所示。A式通风机在墙上安装的形式如图5-2所示。A式通风机在柱上安装的四形式见图5-3。安装支架一般采用角钢制作的三角架，其结构型式见图5-4和图5-5所示。A式通风机在钢筋混凝土柱上和钢柱上的安装支架如图5-6和图5-7所示。

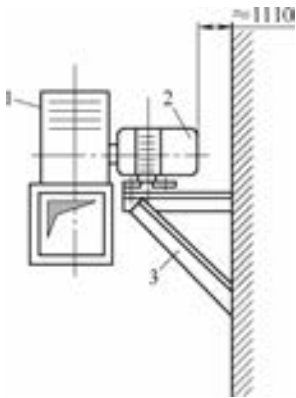


图 5-1 A 式通风机在墙上、柱上的安装
1—通风机 2—电动机 3—安装支架

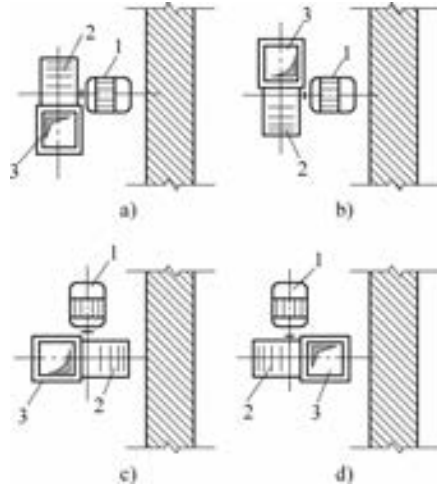


图 5-2 A 式通风机在墙上安装的形式
a) 卧式，出口方向右 0° b) 卧式，出口方向左 180°
c) 立式，出口方向左 180° d) 立式，出口方向右 0°
1—电动机 2—通风机 3—出风口

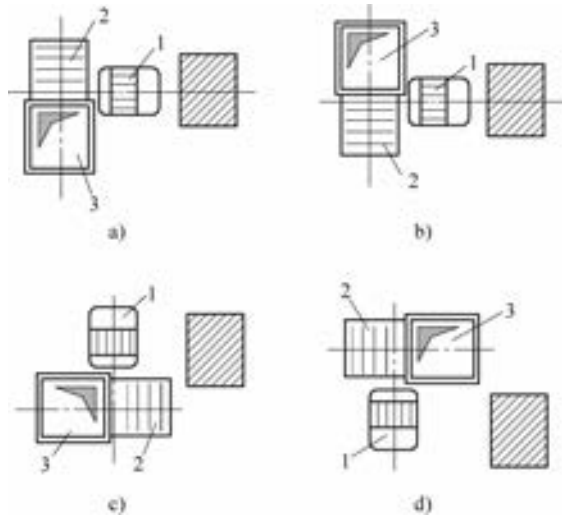


图 5-3 A 式通风机在柱上安装的四种形式
a) 卧式，出口方向右 0° b) 卧式，出口方向左 180°
c) 立式，出口方向左 180° d) 立式，出口方向左 90°
1—电动机 2—通风机 3—出风口

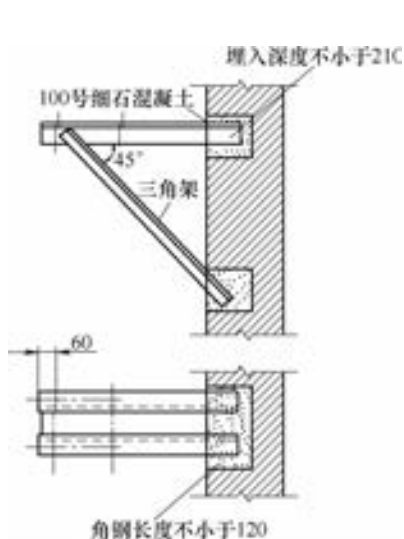


图 5-4 A 式通风机在砖墙上的安装支架

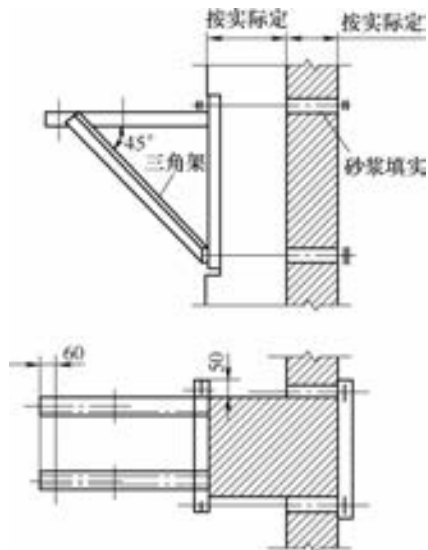


图 5-5 A 式通风机在砖柱上的安装支架

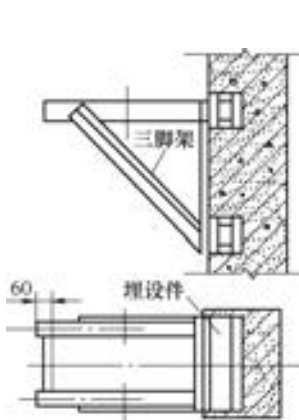


图 5-6 A 式通风机在钢筋混凝土上的安装支架

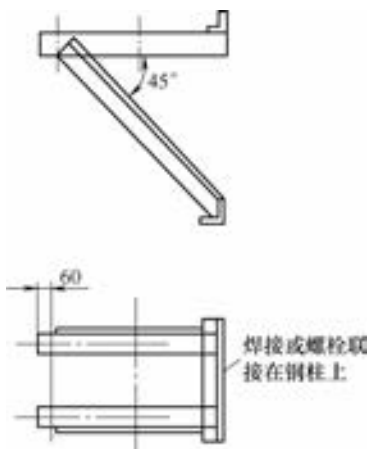


图 5-7 A 式通风机在钢柱上的安装支架

(3) 轴流风机的安装 轴流通风机除有与离心通风机相同的安装形式外，它还可以在墙内或管道内安装，也可卧式或立式安装。其他安装形式如图 5-8 至图 5-14 所示。

2. 动叶可调轴流风机安装注意事项

- 1) 叶片根部无损伤，检查叶片上螺母应无松动，可调叶片的安装角度应符合要求。
- 2) 立式机组应清洗变速箱、齿轮组或蜗杆副。
- 3) 整体出厂机组的安装宜直接放置在基础上，用成对斜垫铁调平。水平度和垂直度在底座和风筒上测量，其误差应不超过 1/1000。

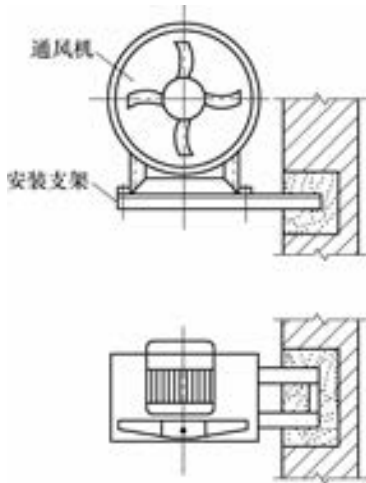


图 5-8 轴流通风机墙上安装

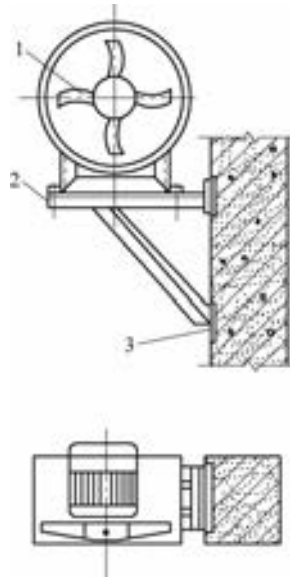


图 5-9 轴流通风机柱上安装
1—通风机 2—安装支架 3—埋设件

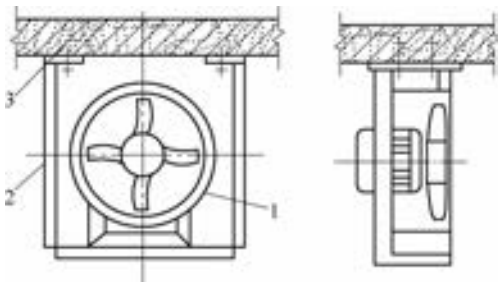


图 5-10 轴流通风机楼板下安装
1—通风机 2—安装支架 3—预埋螺栓

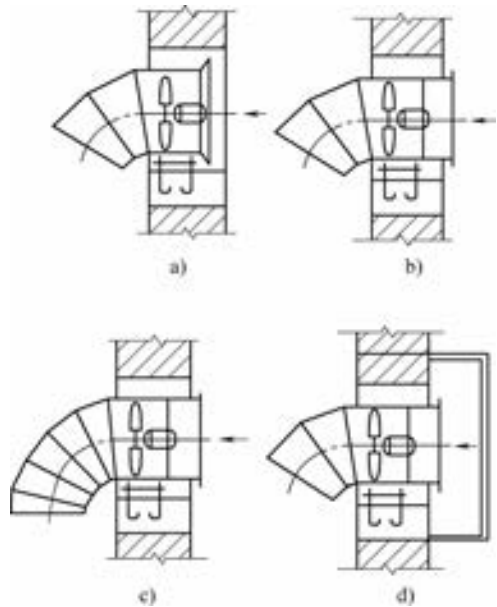


图 5-11 轴流通风机墙内安装
a) 出风侧装有出风弯管 b) 进风侧连接短管及盖 (以便关闭) c) 出风侧装有遮光出风弯管 d) 进风侧墙装有防寒装置

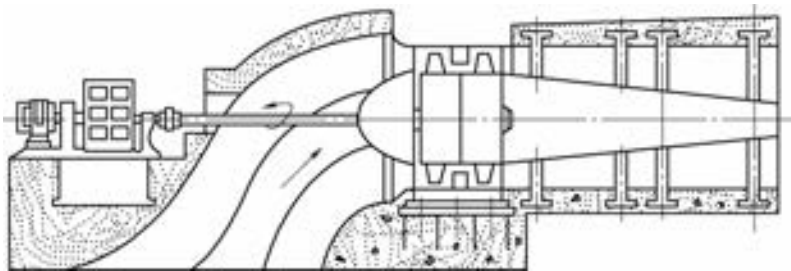


图 5-12 K66 型矿井轴流通风机安装

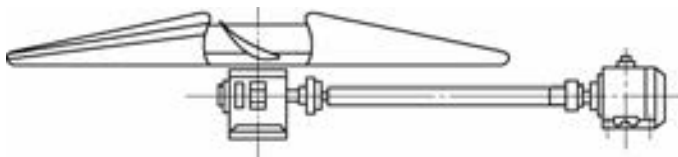


图 5-13 L130 II 型轴流通风机安装

4) 解体出厂的机组组装时应符合下列要求: ①垂直剖分机组应将主体风筒上部和转子拆下, 并将主体风筒下部、轴承座和底座等在基础上组装后再调平。②垂直剖分机组应将进气室安放在基础上, 用成对斜铁调平, 再安装轴承座。轴承座与底座上平面均匀接触, 将主轴装入轴承中, 将划针固定在主轴轴头上。以进气室密封圈为基准, 测量主轴和进气室的同轴度, 允差应不超过 2mm; 再依次安装叶轮、机壳、扩压器等部件。③水平剖分机组和垂直剖分机组的纵、横向水平度误差, 均应不超过 0.1/1000; 测量时, 应在主轴和轴承中分面上测量; 对左右分开式轴承座的风机, 两轴承孔与主轴颈的同轴度应不大于 $\phi 0.1\text{mm}$ 。④立式机组的水平度误差应不超过 0.2/1000, 在轮毂上测量; 对具有减速器的立式机组, 水平度误差不超过 0.1/1000, 在减速器加工面上测量。⑤叶片应按随机文件的规定进行复查和校正, 各叶片和安装角度偏差不得超过 $\pm 2^\circ$, 并应锁紧固定叶片的螺母。拆装叶片应按标记对号入座, 更换叶片应按随机文件的规定执行。⑥动叶片在关闭位置与机壳间的径向间隙应符合随机文件规定。无规定时, 其间隙的算术平均值为转子直径的 0.001 ~ 0.002 倍。最小间隙应不小于转子直径的 0.001 倍。

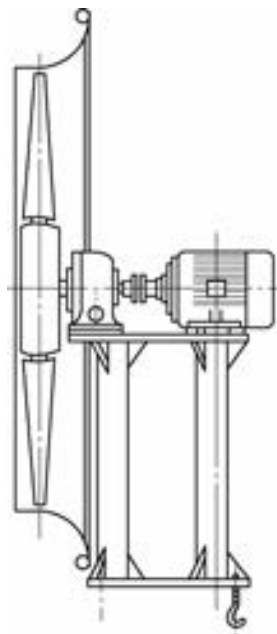


图 5-14 L30A 型轴流通风机安装

5) 电动机轴与风机轴找正时应符合下列要求: ①无中间传动轴的机组的同轴度允差为径向位移应不超过 0.05mm, 两轴线倾斜应不超过 0.2/1000。②具有中间传动轴的

机组找正时应符合下列要求：a. 计算并留出中间轴的热膨胀量，使机组在运行状态下的电动机转子位于电动机所要求的磁力中心位置上。b. 同轴度找正只需同时转动轴系，测量中间轴两端每对半联轴器两端面之间的间隙差。其差值应不超过图 5-15 的规定。

6) 应在静态下检验可调叶片及其调节装置的调节功能、调节角度范围、安全限位的可靠性和角度指示的可靠性。同时应检验各供油系统、液压控制系统的严密性，不应有泄漏。

7) 进气室、扩压器与机壳之间，进气室、扩压器与前后风筒之间的连接应对中、贴平。各部分的连接不得使机壳（主风筒）产生叶顶间隙改变而变形。

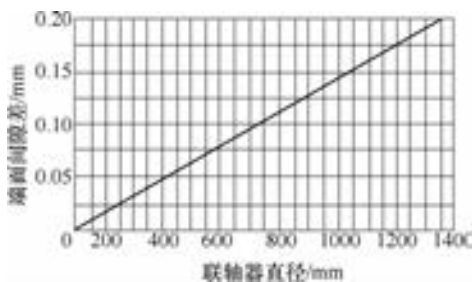


图 5-15 半联轴器两端面间隙差

5.2 风机的运行

1. 启动

风机启动前应进行仔细检查：检查轴承是否有润滑油和轴承冷却水，是否畅通无阻；对联轴器及防护装置、地脚螺钉等部件必须仔细查看；检查风机吸入侧和压出侧挡板或导流器的位置。离心风机启动时，入口挡板与出口挡板应全部关闭，待启动达到额定转速后，再逐渐开启挡板，将其调到所需的位置，以避免电动机再启动时负荷过大而被烧毁的危险。

风机每次大、小修后，要进行试运行：启动风机后应先检查叶轮的转向是否正确，有无摩擦或碰撞，振动是否在允许范围内。若无异常现象，连续试运行 2~3h，检查轴承发热程度，当一切正常后，便可正式投入运行。

由于高炉引风机或高温通风机，是按输送气体介质的温度（200℃或更高温度）来计算所需功率和选配电动机的，和常温下同容量的通风机相比功率小很多，对这类通风机的启动更要特别注意。因为在通风机启动前，气体介质的温度很难达到要求的工作温度，有时甚至需要通风机在常温下启动后，才能加热。在这种情况下，对于离心风机，除将风门全闭启动以外，还要注意电动机的超载情况。如果通风机工作时的气体温度和通风机启动时的气体温度相差很大，是否能够直接启动，需按当时实际情况决定，以避免电动机烧毁的危险。

2. 运行

在正常运行中，首先是监视风机的电流，它是风机负荷及一些异常事故预报的标志；其次要经常检查风机轴承的润滑油、冷却水是否畅通，轴瓦温度、轴承振动是否正常，以及有无摩擦的声音等。

通风机厂家对轴承的温度有明确的规定。滚动轴承的温升一般不允许超过 40℃，滚动轴承的表面温度不允许超过 70℃。实践证明，滚动轴承正常工作时，无论是轴承

温升或轴承表面温度，在常温下工作都不会很高。如果轴承温升达到 40°C ，或轴承表面温度达到 70°C 时，说明滚动轴承内部已经有了毛病，应停机检查；如继续运行，可能引起事故。此外，在运行监视中，还应考虑到用温度计测量时，存在所测出的轴承表现温度比轴承内部的实际温度要低 $5\sim 10^{\circ}\text{C}$ 的测量误差的影响。

3. 风机运行中的几个问题

(1) 风机的振动 这是运行中常见的故障，严重时将危及风机的安全运行，甚至会影响到整个机组的正常运行。随着机组容量的日趋大型化，其振动问题变得尤为突出。鉴于引起风机振动原因的复杂性及易于察觉的特点，通常将风机的振动分为机械原因引起的振动、流体流动引起的振动，以及由原动机引起的振动三类。

1) 机械原因引起的振动。

①转子质量不平衡引起的振动。在现场发现的风机的振动原因中，属于转子质量不平衡的振动占多数。其特征是振幅不随机组负荷大小而变化，而是与该风机转速的高低有关，振动频率和转速一致。造成转子质量不平衡的原因很多，例如运行中叶轮叶片的局部腐蚀或磨损；叶片表面不均匀积灰或附着物（如铁锈）；风机叶片局部磨穿进入飞灰；轴与密封圈发生强烈的摩擦，产生局部高温使轴弯曲；叶轮上的平衡块重量与位置不对，或位置移动，或检修后未找平衡等，均会产生剧烈振动。为了保证转子质量平衡，对高转速风机必须分别进行静、动平衡试验。

②转子中心不正引起的振动。如果风机联轴器不同心，结合面平行度达不到安装要求（机械加工精度差或安装不符合要求），就会使联轴器间隙随轴旋转而忽大忽小，因而发生和质量不平衡一样的周期性强迫振动。其频率和转速成倍数关系，振幅随风机轴与电动机轴的偏心距大小而变化。造成转子中心不正的主要原因是：风机安装或检修后找中心不正；设计或布置管路不合理，其管路本身重量或膨胀推力使轴心错位；以及轴承架刚性不好或轴承磨损等。

③转子的临界转速引起的振动。当转子的转速逐渐增加并接近风机转子的固有振动频率时，风机就会猛烈地振动起来，转速低于或高于这一转速时，就能平稳地工作。通常把风机发生这种振动时的转速称为临界转速。风机的工作转速不能与临界转速相重合、相接近或成倍数，否则将发生共振现象而使风机遭到破坏。

风机的工作转速低于第一临界转速的轴称为刚性轴，高于第一临界转速的轴称为柔性轴。风机的轴大多采用刚性轴，以利扩大调速范围。

④动静部件之间的摩擦引起振动。若使转动部分与静止部分接触发生摩擦，则摩擦力作用方向与轴旋转方向相反，对转轴有阻碍作用，有时使轴剧烈偏转而产生振动。这种振动是自激振动，与转速无关，其频率等于转子的临界速度。

⑤基础不良或地脚螺钉松动。基础下沉，基础或机座的刚度不够或安装不牢固等，均会引起振动。例如风机基础混凝土底座打得不够坚实，其地脚螺钉安装不牢固，则其基础的固有频率与某些不平衡激振力频率相重合时，就有可能产生共振。解决的方法是加固基础，紧固地脚螺钉。

2) 流体流动引起的振动。

①旋转脱流引起振动。风机进入不稳定工况区运行，其叶片上将产生旋转脱流，可能使叶片发生共振，造成叶片疲劳断裂。现以轴流式风机为例说明旋转脱流及其引起的振动。当风机处于正常工况运行时，冲角等于零或小于临界冲角，而绕翼型的气流保持其流线形状，如图 5-16a 所示。当气流与叶片形成正冲角时，随着冲角的增大，在叶片后缘点附近产生涡流，而且气流开始从上表面分离。当冲角超过某一临界值时，气流在叶片背部的流动遭到破坏，升力减小，阻力却急剧增加，如图 5-16b 所示。这种现象称为“脱流”或“失速”。如果脱流现象发生在风机的叶道内，则脱流将对叶道造成阻塞，使叶道内的阻力增大，同时风压也随之而迅速降低。

风机的叶片由于加工及安装等原因，不可能有完全相同的形状和安装角，同时流体的来流流向也不会完全均匀，因此，当运行工况变化而使流动方向发生偏离时，在各个叶片进口的冲角就不可能完全相同。随着流量的减小，如果某一叶片进口处的冲角达到临界值时，就首先在该叶片上发生脱流，而不会所有叶片都同时发生脱流。在图 5-17 中，假设在叶道 2 首先由于脱流而出现气流阻塞现象，叶道受阻塞后，通过的流量减少，在该叶道前形成低速停滞区，于是原来进入叶道 2 的气流只能分流进入叶道 1 和叶道 3；这两股分流来的气流又与原来进入叶道 1 和叶道 3 的气流汇合，从而改变了原来进入叶道 1 和叶道 3 的气流方向，使流入叶道 1 的气流冲角减小，而流入叶道 3 的冲角增大；因此，分流的结果将使叶道 1 下部叶片的绕流情况有所改善，脱流的可能性减小，甚至消失；而叶道 3 下部叶片却因冲角增大而促使其发生脱流。叶道 3 内发生脱流后又形成阻塞，使叶道 3 前的气流发生分流，其结果又促使叶道 4 内发生脱流和阻塞。这种现象继续进行下去，使脱流现象所造成的阻塞区沿着与叶轮旋转相反的方向移动。实验表明，脱流传播的相对速度 ω' 小于叶轮本身旋转角速度 ω 。因此，在绝对运动中，可以观察到脱流区以 $(\omega - \omega')$ 的速度旋转，方向与叶轮转向相同。此种现象称之为旋转脱流或旋转失速。

风机进入不稳定工况区运行，叶轮内将产生一个到数个旋转脱流区。叶片依次经过脱流区要受到交变应力的作用，这种交变应力会使叶片产生疲劳。叶片每经过一次脱流区，将受到一次激振力的作用。此激振力的作用频率与旋转脱流的转速及脱流区的数目成正比。如果这一激振力的作用频率与叶片的固有频率成整数倍关系，或者等于或接近

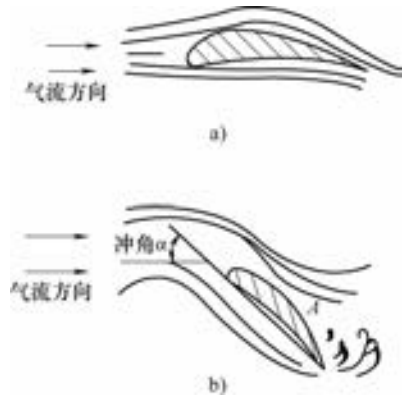


图 5-16 叶片的正常工况和脱流工况
a) 正常工况运转 b) 运行工况变化

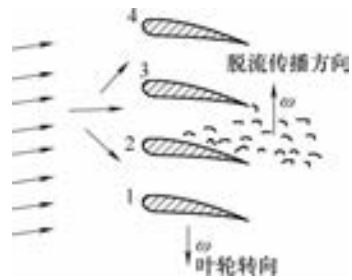


图 5-17 动叶中旋转脱流的形成
1~4—叶道编号

于叶片的固有频率，叶片将发生共振。此时，叶片的动应力显著增加，甚至可达到数十倍以上，使叶片产生断裂。一旦有一个叶片疲劳断裂，就有可能将全部叶片打断。因此，应尽量避免风机在不稳定工况区运行。

②喘振。若具有驼峰形性能曲线的风机在不稳定区域内运行，而管路系统中的容量又很大时，则风机的流量、压头和轴功率会在瞬间内发生很大的周期性波动，引起剧烈的振动和噪声，这种现象称为喘振或飞动现象。现以风机为例说明喘振产生的原因。

当风机在图 5-18 所示的大容量管路系统中运行，且工况点落在图 5-19 所示的风机全压性能曲线最高点 K 左边的区域时，将出现不稳定运行。具体分析如下：当风机启动后，如果用户所需的流量为 q_{VA} ，此时风机与管路系统处于能量平衡状态，相应的运行工况点为 A，风机运行是稳定的。当用户所需要的流量逐渐减少，即运行工况点由 A 沿全压性能曲线向左上方移动至 K 点时，风机运行仍然是稳定的，其中 K 点为临界点。当用户所需要的流量继续减少为 q_{VM} 时，风机所产生的全压将小于管路系统的压头，因为管路系统容量较大，在此瞬间管路系统中的压头仍保持不变，而风机的全压已降低，于是，风机完全停止向管路系统输送气体，并且为了保持风机的全压与管路的压头相平衡，风机的运行工况点便由 K 点迅速跳到第二象限内的 C 点，此时，气体开始倒流而出现负流量。由于倒流，管路系统中的压头迅速下降，风机的运行工况点则沿其全压性能曲线由 C 点降至 D 点；如果管路系统中的压头下降到风机零流量下的压强，风机又重新开始输出流量，为了使风机的全压与管路系统中的压头相平衡，风机就不可能继续维持在 D 点运行，而是迅速地由 D 点跳到 E 点；若管路系统的流量需求仍为 q_{VM} ，则此时风机所提供的全压远小于管路系统所需相应流量下的压头，因此，风机的运行工况点将由 E 点滑向 K 点；此后，风机的运行将会周而复始地按 E、K、C、D、E 各点重复循环；而其运行工况点始终落不到 M 点上，这种不稳定的运行工况称为喘振现象。

防止喘振的措施如下：a. 使风机的流量恒大于 q_{VM} 。如果系统中所需要的流量小于 q_{VK} ，可装设再循环管或自动排出阀门，使风机的排出流量恒大于 q_{VK} 。b. 如果管路性能曲线不通过坐标原点，改变风机的转速，也可得到稳定的运行工况；通过风机各种转速下性能曲线中最高全压点的相似抛物线，将风机的性能曲线分割为两部分，右边为稳定工况区，左边为不稳定工况区。c. 轴流风机可采用动叶调节。当系统需要的流量减小

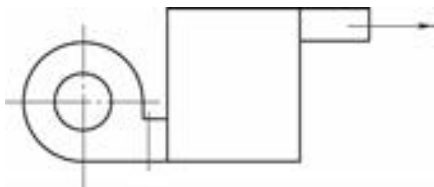


图 5-18 风机在大容量管路系统中运行

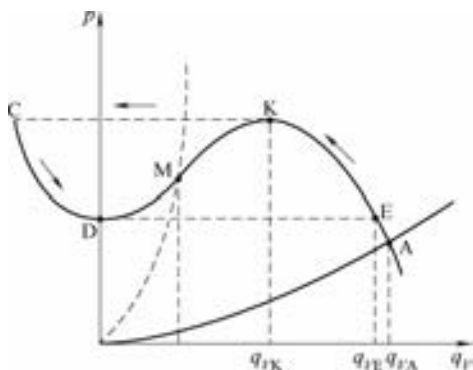


图 5-19 喘振现象

时,则减小其动叶安装角,性能曲线下移,临界点向左下方移动,输出流量也相应变小。d. 最根本的措施是尽量避免采用具有驼峰形性能曲线的风机,而应采用性能曲线平直向下倾斜的风机。

上述介绍的旋转脱流与喘振现象是两种不同的概念。旋转脱流是叶片结构特性造成的一种流体动力现象,它的一些基本特性,例如脱流区的旋转速度、脱流的起始点、消失点等,都有它自己的规律,不受风机管路系统的容量和形状的影响。

喘振是风机性能与管路系统耦合后振荡特性的一种表现形式。它的振幅、频率等基本特性受风机管路系统容量的支配;其流量、全压和轴功率的波动是由不稳定工况区造成的。但是,试验研究表明,喘振现象总是与叶道内气流的旋转脱流密切相关,而冲角的增大也与流量的减小有关。所以在出现喘振的不稳定工况区内,必定会出现旋转脱流。

3) 原动机引起的振动。驱动风机的各种原动机由于本身的特点,也会产生振动。若风机由小汽轮机驱动,则汽轮机作为流体动力机械本身也有各种振动问题,详见有关汽轮机振动方面的资料。若风机由电动机驱动,则电动机也会因电磁力引起振动,具体可归纳如下:

①磁场不平衡引起的振动。风机运行中,当电动机一相绕组突然发生断路时,即电动机各相电源磁场不平衡时,定子受到变化的电磁力的作用而振动。此时电动机还会继续转动,其他两相电流增大,电动机发出嗡嗡声,其振动频率为转速乘以极数。若这种振动与定子机架频率相同,则会产生强烈的振动。此外,由于电源电压不稳、转子在定子的偏心和气隙不均匀等原因都会发生由于磁场不平衡而引起的振动。

②笼型电动机转子笼条断裂引起的振动。在笼型电动机转子的笼条或端环断裂时,如果断裂的笼条超过整个转子槽数的1/7,电动机会发出嗡嗡声,机身会剧烈振动;此时若加上负荷,电动机转速会降低,转子发热,断裂处可能产生火花,电动机不能安全运转,甚至会突然停下来。

③电动机铁心硅钢片过松而引起的振动。电动机铁心硅钢片叠合过松会引起电动机振动,同时产生噪声。

不同振动频率时产生振动的可能原因汇总于表5-2。

表5-2 产生振动的可能原因

振动频率	问题类型	可能原因
0% ~ 40% 工作转速	油膜共振,摩擦引起的涡动,轴承松动,密封松动,轴承损坏,轴承支承共振,壳体变形,不良的收缩配合,扭转临界振动	见注1
40% ~ 60% 工作转速	转速的涡动,油膜共振,轴承磨损,支承共振,联轴器损坏,不良的收缩配合,轴承支承共振,转子摩擦(轴向),密封摩擦,扭转临界振动	见注1
60% ~ 100% 工作转速	轴承松动,密封松动,不良的收缩配合,扭转临界振动	见注1和2
工作转速	不平衡,横向临界振动	见注3
2倍工作转速	不对中心,联轴器松动,密封装置摩擦,壳体变形,轴承损坏,支承共振,推力轴承损坏	见注1,2,3

(续)

振动频率	问题类型	可能原因
n 倍工作转速	叶片(叶轮叶片或导叶叶片)频率、压强脉动,不对中心,壳体变形,密封摩擦,齿轮装置不精密	见注3和4
频率非常高	轴摩擦,密封、轴承、齿轮不精密,轴承抖动,不良的收缩配合	见注3和4
非同步频率 > 工作转速	管路振动,基础共振,壳体共振,压强脉动,阀振动,噪声,轴摩擦,汽蚀	见注5

- 注: 1. 有关轴承的振动问题。低稳定型轴承, 过大的轴承间隙, 轴瓦松动, 油内有杂质, 油性(粘度, 温度)不良, 因空气或流程液使油起泡, 润滑不良, 轴承损坏。
2. 有关密封装置问题。间隙过大, 护圈松动, 间隙太紧, 密封磨损。
3. 有关机组设计问题。临界转速, 连接套松动, 热梯度(温差), 轴不同心, 支座强度不够, 支座或支座共振, 壳体变形, 推力轴承或平衡盘缺陷、不平衡, 联轴器不平衡, 轴弯曲, 不良的收缩配合。
4. 有关系统的问题。扭转临界振动, 支座共振, 基础共振, 不对中心, 管路载荷过大, 齿轮啮合不精确或磨损, 管路机械共振。
5. 有关系统流动问题。脉动、涡流, 管壳共振, 流动面积不足, NPSH 不足, 声音共振, 汽蚀。

(2) 风机的磨损 火力发电厂的引风机设置在除尘器之后, 但由于除尘器并不能把烟气中全部固体微粒除去, 因此剩余的固体微粒将随烟气一起进入引风机。这些剩余的固体微粒经常冲击叶片和机壳表面、引起引风机磨损, 同时也会沉积在引风机叶片上。由于磨损和积灰是不均匀的, 从而破坏了风机的动、静平衡, 引起风机振动, 甚至迫使锅炉停止运行。与引风机比较, 制粉系统中的排粉风机的工作条件更差, 其磨损也更为严重。

1) 风机的磨损部位及影响因素。风机叶片形式对磨损的程度、部位有直接影响。表 5-3 列出叶片形式与叶片耐磨程度的关系。从表 5-3 中可以看出, 从耐磨角度考虑, 排尘风机以采用径向直板叶片为宜。

表 5-3 叶片形式与磨损的关系

叶片形式	径向直板叶片	径向出口叶片	平板加厚叶片	空心翼形叶片
耐磨程度	高	中上	中	中下

用于引风机和排粉风机时的后向式机翼形风机磨损情况如图 5-20 所示。其严重磨损部位在靠近后盘一侧的出口端和叶片头部。叶片头部磨损后, 叶片空腔中极易进煤灰, 从而破坏了转子的动、静平衡而引起振动。后向式直板叶片引风机的磨损部位在叶片出口靠中盘一侧, 其磨损补焊部位见图 5-21 所示。

风机输送气体中所含微粒的硬度、形状和大小对磨损的程度有直接影响。风机的磨损是由微粒对金属的撞击和擦伤两种作用构

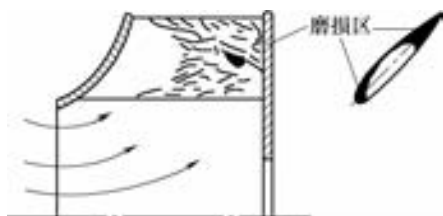


图 5-20 后向式机翼形叶片磨损情况

成的。在大量微粒的连续打击下，金属表面逐渐形成一个塑性变形的薄层而被破坏脱落。坚硬微粒的影响如同铁刀在工件上挫削一样，因此微粒硬度越高，风机中的流道壁面铁磨损得就越快。微粒对流道部件的磨损不仅取决于流道部件的硬度，而且还与微粒的几何形状和大小有关。具有棱锥或其他刀尖凸出表面形状的微粒，要比具有球形表面的微粒对金属的磨损更严重。

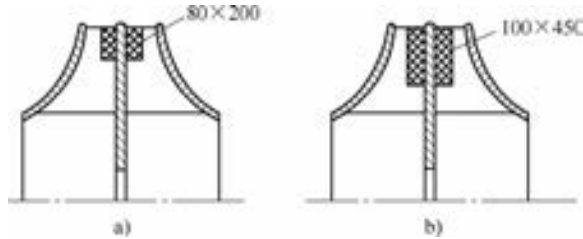


图 5-21 后向式直板叶片磨损补焊部位

a) 第一次补焊 b) 第二次补焊

风机的磨损速度随磨损部件材料的硬度增加而减小，但是耐磨性不仅取决于它的硬度，而且还与它的成分有关。例如经热处理的各种不同成分的钢，虽然具有相同的硬度，但却有不同的耐磨性。碳钢通过淬火提高硬度，对耐磨性也有所提高，但是不成正比。如 40 钢淬火后，其硬度由 168HV 增加到 730HV；尽管硬度增加了 3.5 倍，但其耐磨性却仅增加 69%。由此可见，要提高材料的耐磨性，既要提高材料硬度，也要选用耐磨材料。

此外，有关资料表明：排粉风机的实际使用寿命（与磨损密切相关），与输送气体中所含微粒的含量成正比，与圆周速度的三次方成正比。

2) 降磨措施。引风机和排粉风机的磨损影响锅炉的安全运行，因此，在风机设计制造和使用中应采取降磨措施，以提高其使用寿命。可采用的措施主要有以下几种：①在风机叶片容易磨损部位，用等离子喷镀一定厚度的硬质合金层，或堆焊硬质合金，例如高碳铬锰钢等硬质合金。②叶片渗碳是提高材料表面硬度，减轻磨损的一个有效措施。渗碳使金属表面而形成硬而耐磨的碳化铁层，同时保持钢材内部柔韧性。例如某电厂对引风机叶片进行渗碳处理后，叶片表面硬度可达到洛氏硬度 50 以上，磨损速度由过去每月 1mm 减小到 0.1mm，使用寿命延长 10 倍。③选择合理的叶形以减少积灰和振动。④风机机壳可采用铸石作为防磨衬板，其耐磨性比金属衬板高几倍，甚至几十倍。

除上述方法外，对除尘器加强日常维护和管理，以提高除尘效率；对锅炉加强燃烧调整，改善煤粉细度，降低飞灰可燃物，以及降低风机转速等，都会延长风机的使用寿命。

5.3 风机的维修

1. 通风机的维修保养

(1) 通风机的检修 检修分为运行中的检修和停车检修。检修形式和检修周期，

根据通风机的用途、与设备配套的运行条件、重要性、可靠性等的不同，存在着相当大的差异，故应确定适宜的检修周期。无论哪种通风机，最好至少一年进行一次定期检修。

(2) 通常进行的定期检修分为每日、每周、每月、每3个月、每半年、每年检修一次等几种。其中，检修结果也是确定下次检修周期的重要资料和依据。

(3) 通风机安装使用后每台都应建立保养档案，以此为基础进行定期检修。保养档案上应注明通风机及其原动机的保养符号、主要规格、制造厂名、进货日期等主要项目，同时还应记入每次定期维修保养时的检修记录。

2. 通风机的定期维护和检查

通风机应定期进行下列维护和检查工作：

1) 风机连续运行3~6个月，进行一次滚动轴承的检查。检查滚柱和滚道表面的接触情况及内圈配合的松紧度。

2) 风机连续运转3~6个月，更换一次润滑脂，以装满轴承空间的2/3为宜。

3) 风机定期维护保养，消除风机内部的灰尘、污垢等。

4) 检查各种仪表的准确度和灵敏度。

5) 对于未使用的备用风机，或停机时间过长的风机，应定期将转子旋转 120° ~ 180° ，以免主轴弯曲。

3. 通风机检修的基本项目

通风机检修工作项目取决于它们的形式和损坏程度、工作条件及其他一些因素。但是，各种不同形式通风机对下面所列的一些基本项目，应注意进行检修。

1) 清理与检修机壳，如有漏气之处，必须堵漏。

2) 机壳有内衬板，必须更换已磨损的衬板，或焊补与更换部分衬板。

3) 检查主轴是否弯曲和轴颈是否磨损或划伤。弯曲少的要校直，弯曲大的必须更换。

4) 修理转子，补焊叶片，必要时更换损坏的叶轮或叶片；引、排粉尘及烟气的耐磨通风机，需用耐磨焊条焊补叶片。

5) 检查与清理轴承，或重新浇铸滑动轴承的巴氏合金，或者更换滚动轴承。

6) 清理并检查轴承的水冷却系统，积水管有堵塞或破裂现象，要清理或检修好。

7) 检查联轴器的装配情况或更换，修理联轴器的弹性连接装置及其销孔。

8) 检查联轴器是否对正通风机与电动机的中心。

9) 检修轴的防护装置。

10) 清理、检修风机的调节门及其调节机构。

11) 检查带轮的装配情况或更换。

12) 检查电动机、启动开关等电器设备有无损坏并检修好。

13) 检查地基有无损坏并补修好。

14) 重新涂刷风机外壳的防护油漆。

15) 通风机检修后，需做运转试验。

4. 离心风机叶轮检修方法和精度要求

1) 更换新叶片材料应与原叶片材料一致。剪切叶片时, 叶片出口端的边缘应与新叶片的钢板压延纹路方向一致。叶片最好用成形坯压成。如果用锤周敲成, 应注意要保持叶片表面光滑。表面弯曲半径大小应与原叶片一致。对铆接叶轮的叶片翻边有困难时, 可根据具体情况改为焊接叶片, 必须要保证焊接质量。

2) 装配叶轮上的叶片时, 应先将叶片逐过程, 将质量最小的叶片放在叶轮圆盘的对称位置上, 减少叶轮的不平衡度。安装叶轮的一般技术要求见表 5-4, 叶轮的平衡精度, 参看有关规定。

表 5-4 叶轮精度一般要求

误差名称		偏差不大于
叶轮叶片安装角度允差	入口角 $\beta_1/(\circ)$	$\pm 1^\circ$
	出口角 $\beta_2/(\circ)$	$\pm 1^\circ$
叶片垂直度允差 δ_1/mm		$1.01B^{①}$
叶轮上任意两相邻叶片间弦长允差 δ_2/mm		$0.1\sqrt{D}^{②}$

① B 为叶片最大宽度 (mm)。

② D 为叶轮外圆直径 (mm)。

3) 离心风机检修中, 在装配转子时, 要严格达到表 5-5 中规定的技术要求。新制成的或检修的带轮、叶轮, 在装入轴前, 应作静平衡校正, 以减少转子的动不平衡度。通风机的叶轮与轴一般用过渡配合, 最好改为锥形轴头, 便于拆卸。装配时, 一般用压力机或大锤垫铜块打入, 最好用加热法装配。

表 5-5 转子装配的技术要求

误差部位	误差名称	符号	允差/mm \leq	误差部位	误差名称	符号	允差/mm \leq
叶轮的外缘	径向跳动 端面跳动	a_1	$0.07\sqrt{D}$	叶轮的外缘两侧	径向跳动 端面跳动	b_1	$0.1\sqrt{D}$
联轴器的外缘		a_2	0.05	联轴器的外缘端面		b_2	0.05
主轴的轴承轴		a_3	0.01	推力盘的推力		b_3	0.01

注: D 为叶轮的最大外缘直径。

5. 检修风机的滑动轴承

轴承损坏时, 除更换新轴承外, 还应检查其润滑情况及其他原因。如果出现轴衬合金与轴衬的脱壳面积大于半个轴衬面积的 20%, 或轴衬合金表面的磨损、擦伤、剥落与熔化等情况时, 大于轴衬接触面的 25% 时, 应重新浇铸轴承合金, 低于上述数值时可予以衬焊。如果出现裂纹或破损时, 必须重新浇铸。衬焊巴合金时必须与轴衬上的旧巴氏合金牌号完全相同。

6. 联轴器的检修

离心风机的联轴器, 通常采用准橡胶弹性圈柱销联轴器。弹性圈容易磨损, 如果磨

损过多，应更换。如果无橡胶圈时，也可用皮革圈代替。皮革圈的制法：将优质皮革制成比销钉外径稍大的圆圈，套在销钉上压紧，并在砂轮上磨到规定的尺寸。更换弹性圈时，应将联轴器上的全部弹性圈同时换掉，并将重量相等或接近的销钉装入对称的位置，否则会使销钉受力不均，转子平衡精度受到破坏，从而使转动情况变坏。

联轴器两轴的同轴度允许偏差见表 5-6。

表 5-6 联轴器的同轴度允许偏差

联轴器的最大外径/mm	两轴同心度允许偏差	
	径向位移/mm	倾 斜 度
< 300	0.1	0.8/1000
> 300 ~ 800	0.2	1.2/1000

7. 风机常用的密封种类及检修程序

(1) 风机用的密封种类 常用的密封种类及用途见表 5-7。

表 5-7 常用密封种类及用途

密封种类		名 称	用 途
封气装置	机械封气装置	迷宫式	通风形式
		胀圈式	用于小型整体机壳
	联合封气装置	气封油封式	用于输送空气及不易爆炸气体
封油装置		迷宫式	用于滑动轴承
		毛圈式	用于滚动轴承

(2) 常用迷宫式气封更换和修刮程序

1) 将软铝板按半密封圈尺寸切割，镶入密封槽内。镶入后密封圈应平直，根部应夹紧，不能有弯曲和松动现象；然后经过车床加工，留出 0.1 ~ 0.5mm 的刮研余量。

2) 将下半密封圈体沿榫口滑入下半机壳内。

3) 在转子密封套上的与密封圈对应的位置上，用尖铲铲出凸齿（凸齿高度应小于密封间隙），然后压住密封体两端面，用力扳动转子，使转子朝着凸齿刃口方向转动，由凸齿刃口将密封圈的尖棱割掉。

4) 将上半密封体合在下半密封体上，对正位置用力压住；然后扳动转子，使转子凸齿对着上下密封进行切割。扳动转子时，如发现人力扳不动，可在上半和下半两密封体的任一端接触面之间，放入若干层纸垫，每转一圈抽出一部分纸垫，直到全部纸垫抽出。转子转动最后一圈后，再用压铅丝的方法测量密封圈间隙，直到密封圈达到所要求的间隙为止。

5) 取出上半和下半密封体，用刮刀刮出密封圈的坡口，其斜度为 20°，坡口尖端保持 0.2mm 宽，不宜过大或过小。注意斜坡口的尖端朝向压力较高这一侧，如果弄反了会影响密封圈的效果。

6) 将上半密封圈固定在机壳内。

5.4 常见故障分析

风机在运行中发生故障的原因很多, 部位也不同, 既可能发生在管路系统, 也可能发生在风机本身, 还可能发生在原动机, 以及风机和原动机的连接部位。风机故障与制造安装工艺、检修水平、运行操作和维护方法是否合乎要求等因素密切相关。风机在运行中如发生故障, 应仔细地分析原因, 及时消除。风机运行中常见的故障、产生原因及消除方法见表 5-8。

表 5-8 风机运行中常见的故障、产生原因及消除方法

常见故障	产生原因	消除方法
转速符合要求, 压力过高, 流量减小	1) 气体成分改变, 气体温度过低或气体含有固体杂质, 使气体密度增大 2) 出气管道或风门被烟灰或杂物堵塞 3) 进气管道、风门或网罩被烟灰或杂物堵塞 4) 出口管道破裂或法兰不严 5) 叶轮入口间隙过大或叶片严重磨损 6) 筒易导向器装反 7) 风机选择时, 全压不足	1) 提高气体温度, 降低气体密度 2) 消除堵塞 3) 消除堵塞 4) 修补管道, 紧固法兰 5) 调整叶轮进出口间隙或更换叶轮 6) 重装导向器 7) 改变风机转速, 进行风机性能调节, 不能调节时, 需重选风机
转速符合要求, 压力偏低, 流量增大	1) 气体温度过高, 气体密度减小 2) 进风管道破裂或法兰不严	1) 降低气体温度 2) 修补管道, 紧固法兰
风机出口压力降低	1) 管道性能曲线改变 (如堵塞、泄漏等), 风机工作点改变 2) 风机制造质量不良, 或风机严重磨损 3) 风机转速低 4) 风机在不稳定区工作	1) 调整管道性能曲线 (减少阻力, 消除泄漏), 改变风机工作点 2) 检修风机 3) 提高风机转速 4) 调整风机工作区
密封圈磨损或损坏	1) 密封圈与轴套不同心, 在正常工作中磨损 2) 机壳变形, 使密封圈一侧磨损 3) 密封进入硬质杂物, 如金属、焊渣等 4) 转子振动过大, 其径向振幅之半大于密封径向间隙	1) 调整密封圈与轴套同心 2) 消除机壳变形 3) 消除杂物, 修整或更换密封圈 4) 消除机组振动, 修整或更换密封圈
振动	详见 5.6 节	详见 5.6 节

(续)

常见故障	产生原因	消除方法
轴承温度升高	1) 润滑油质量不良、变质，油量过少或过多，油内含有杂质 2) 轴承箱盖与座的连接螺栓拧紧力过大或过小 3) 冷却水过少或中断 4) 油箱内油面下降，低于最低油位	1) 调整油量或更换润滑油 2) 调整螺栓拧紧力 3) 检查冷却水系统 4) 立即加油，使油面升高
机壳过热	在阀门关闭的情况下，风机运转时间过长	停机，待冷却后再开风机

第 6 章 通风机管网设计

6.1 管道设计的基本知识

1. 管道设计的基本内容

通风管道的设计应在保证使用效果的前提下，使其初投资和运行费用最低；并且，还应该和建筑设计部门密切配合，做到协调和美观。

管道设计的基本任务如下：

1) 确定管道的位置及选择管道的尺寸。管道的形状有圆形、矩形，以及配合建筑空间要求而确定的其他形状；管道的尺寸应按我国制定的“通风管道定型化”的规定确定。

2) 计算管道的压力损失，以供选择风机。管道的压力损失就是空气在管道中流动的压力损失，它等于沿程（摩擦）压力损失和局部压力损失之和。

3) 送、吸风口的选择和计算。

2. 管道的统一规格

圆形和矩形管道及其配件规格列于表 6-1 至表 6-10。

表 6-1 圆形通风管道规格

(单位：mm)

外径 <i>D</i>	钢板制风管		塑料制风管		外径 <i>D</i>	钢板制风管		塑料制风管	
	外径允许偏差	壁厚	外径允许偏差	壁厚		外径允许偏差	壁厚	外径允许偏差	壁厚
100	±1	0.5	±1	3.0	500	±1	0.75	±1	4.0
120					560				
140					630				
160					700				
180					800				
200		900			1.0	±1.5			
220		1000							
250		1120							
280		1250							
320		1400							
360	0.75	4.0	4.0	1600	±1	1.2 ~ 1.5	6.0		
400				1800					
450				2000					

表 6-2 矩形通风管道规格

(单位: mm)

外边长 ($a \times b$)	钢板制管道		塑料制管道		外边长 ($a \times b$)	钢板制管道		塑料制管道					
	外边长 允许偏差	壁厚	外边长 允许偏差	壁厚		外边长 允许偏差	壁厚	外边长 允许偏差	壁厚				
120 × 120	-2	0.5	-2	3.0	630 × 500	-2	1.0	-3	5.0				
160 × 120					630 × 630								
160 × 160					800 × 320								
200 × 120					800 × 400								
200 × 160					800 × 500								
200 × 200					800 × 630								
250 × 120		800 × 800											
250 × 160		1000 × 320											
250 × 200		1000 × 400											
250 × 250		1000 × 500											
320 × 160		1000 × 630											
320 × 200		1000 × 800											
320 × 250		1000 × 1000											
320 × 320		1250 × 400											
400 × 200		1250 × 500											
400 × 250		1250 × 630											
400 × 320		1250 × 800											
400 × 400		1250 × 1000											
500 × 200		4.0		0.75	-2		4.0		1600 × 500	-2	1.2	-3	6.0
500 × 250									1600 × 630				
500 × 320	1600 × 800												
500 × 400	1600 × 1000												
500 × 500	1600 × 1250												
630 × 250	2000 × 800												
630 × 320	5.0	1.0	-3			2000 × 1000	-2	1.2	-3		8.0		
630 × 400						2000 × 1250							

表 6-3 矩形管道法兰

(单位: mm)

矩形管道大边长	≤630	800 ~ 1250	1600 ~ 2000
法兰用料规格	25 × 3	30 × 4	40 × 4

表 6-4 圆形管道法兰

(单位: mm)

圆形管道直径	法兰用料规格		圆形管道直径	法兰用料规格	
	扁钢	角钢		扁钢	角钢
≤140	20 × 4	—	530 ~ 1250	—	30 × 4
150 ~ 280	25 × 4	—	1320 ~ 2000	—	40 × 4
300 ~ 500	—	25 × 3			

表 6-5 硬聚氯乙烯板圆形法兰

(单位: mm)

管道直径	法兰用料规格	管道直径	法兰用料规格
100 ~ 180	35 × 6	900 ~ 1400	45 × 12
200 ~ 400	35 × 8	1600	50 × 15
450 ~ 500	35 × 10	1800 ~ 2000	60 × 15
560 ~ 800	40 × 10		

表 6-6 硬聚氯乙烯板矩形法兰

(单位: mm)

管道大边长	法兰用料规格	管道大边长	法兰用料规格
120 ~ 160	35 × 6	1000 ~ 1250	45 × 12
200 ~ 400	35 × 8	1600	50 × 15
500	35 × 10	2000	60 × 18
630 ~ 800	40 × 10		

表 6-7 不锈钢板管道

(单位: mm)

圆形管道直径或矩形管道大边长	不锈钢板厚度
100 ~ 500	0.5
500 ~ 1120	0.75
1250 ~ 2000	1.00

表 6-8 不锈钢法兰

(单位: mm)

圆形管道直径或矩形管道大边长	法兰用料规格
≤280	25 × 4
320 ~ 560	30 × 4
630 ~ 1000	35 × 6
1120 ~ 2000	40 × 8

表 6-9 铝板管道

(单位: mm)

圆形管道直径或矩形管道大边长	铝板厚度
100 ~ 320	1.0
360 ~ 630	1.5
700 ~ 2000	2.0

表 6-10 铝法兰

(单位: mm)

圆形管道直径或矩形管道大边长	法兰用料规格	
	扁铝	角铝
≤280	30 × 6	30 × 4
320 ~ 560	35 × 8	35 × 4
630 ~ 1000	40 × 10	—
1120 ~ 2000	40 × 12	—

3. 管道设计的注意事项

设计通风管道时，应考虑以下因素：

1) 建筑提供的布置管道的空间，通风房间送、吸风口的布置，以及气流组织情况。可用做管道的材料种类较多。大多数采用钢板制作，有时也采用铝板或不锈钢板制作。对于有防腐要求的场所，往往采用塑料板或玻璃钢制作。利用建筑空间兼作管道时，则多数采用混凝土或砖砌管道。

管道的形状很多。圆形管道的强度大、耗用材料少，但占用空间大，一般不易布置得美观，大多采用暗装管道。矩形管道易布置，弯头及三通均比圆形管道的小，可用于明装或暗装在吊顶内，故采用较为普遍。有时为了利用建筑空间，管道也可做成三角形或多边形。

2) 管道设计中既要考虑便于施工，又要求保证严密不漏。整个系统的漏损要小，只有这样，才能保证末端风口有足够的风量。

3) 为了减少通过管道壁的吸热和散热，必要时应考虑对管道做保温处理。

4) 管道的初投资和运行费用要低。

5) 噪声值应保持在允许的范围内。通风系统除设置必要的消声器外，还要求管道内的风速控制在一定的范围内。管道内的风速见表6-11。表中建议的风速既考虑到系统的运行费用，也考虑到不要因风速太大而对周围环境产生干扰。

6) 风量的平衡。管道设计中对管道内空气流动过程中的压力损失，应进行详细计算，以确保各支环路间的压力损失差值小于15%。当通过调整管道断面仍无法达到上述要求时，宜装设调节装置。若各支环路间的压力损失差值较大，则风量无法按设计值达到平衡，也无法达到设计要求状态。

表6-11 管道内的风速 (单位: m/s)

管道部位	钢板和塑料管道	砖和混凝土管道
干管	6~14	4~12
支管	2~8	2~6

6.2 通风机管网及管网特性

通风机一般都是与管网联在一起进行工作的。也有不连接管网的，例如安装在墙壁上的排风扇等。

所谓管网是指与通风机连接在一起的、气流流经的通风管道，包括隧道、井巷、峒室房间，以及管道上的阀门、除尘器、消声器等附件的总称。

图6-1是通风机在管网中工作的示意图。安装在通风机进风口前的管网叫做进口管网，安装在通风机出风口后的管网叫做出口管网。根据工作情况的不同，有的通风机只有进口管网，有的通风机只有出口管网。如果进、出风口都有管网，称为联合管网。

工作场所可以在通风机的进风口以前，也可以在通风机的出风口以后。如果通风机

只有进口管网而无出口管网,则可以把通风机的出风口定义为排气口;如果通风机有出口管网,且出口管网直接通向大气,则把出口管网的出口定义为排气口;如果通风机的出口接有工作场所,气体经工作场所排向大气,则把工作场所的出口定义为排气口。

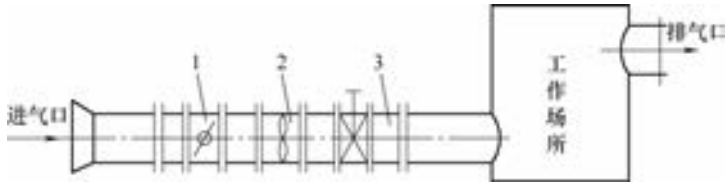


图 6-1 通风机在管网中工作的示意图

1—进口管网 2—通风机 3—出口管网

通风机在管网中工作时,首先要克服管网的阻力;其次还要维持工作场所所需要的工作压力;同时还要保持在排气口有一定的排气速度。管网阻力及工作场所的工作压力,都是需要通风机克服的静压力;排气口的排气速度,则需要通风机克服动压。它们对于通风机本身来说都是一种损失。因此管网的总损失如下:

$$R = R_j + R_c + \Delta p_g + \frac{\rho}{2} v_d^2 \quad (6-1)$$

式中, R 为管网总损失 (Pa); R_j 为进口管网静阻力 (Pa); R_c 为出口管网静阻力 (Pa); Δp_g 为工作场所的工作压力 (Pa); ρ 为气体的密度 (kg/m^3); v_d 为排气口的气流速度 (m/s); $\frac{\rho}{2} v_d^2$ 为排气口的动压 (Pa)。

式 (6-1) 反映了管网的损失特性,故称为管网特性方程。

管网静阻力是一种静压损失,所以无论是进口管网静阻力还是出口管网静阻力,均只计及它的绝对值。管网静阻力又是由管网中各部件的静阻力所决定的,因此式 (6-1) 又可写成:

$$R = \sum_{i=1}^n \delta R_i + \Delta p_g + \frac{\rho}{2} v_d^2 = p_{\text{TF}} \quad (6-2)$$

式中, δR_i 为管网中各部件的静阻力 (Pa); p_{TF} 为通风机全压 (Pa)。

如果工作场所的工作压力为恒定值,不随风量的改变而改变,则式 (6-2) 所表示的特性为广义的管网特性。

事实上在许多情况下,工作场所的工作压力也是由工作场所的静阻力所决定,它随风量的改变而改变。如果把工作场所当作管网的一部分,一并计算其静阻力,则式 (6-2) 中 Δp_g 一项不存在,于是该式所表示的管网特性即为狭义的管网特性。

狭义的管网特性方程为

$$R = \sum_{i=1}^n \delta R_i + \frac{\rho}{2} v_a^2 + p_{\text{TF}}$$

众所周知,管网中各部件静阻力的大小与其阻力系数成正比,与所通过的气流平均速度的平方成正比,而气流平均速度又是由风量和流通面积所决定的。因此,对于认为

介质是不可压缩的通风系统而言，上式可写成：

$$R = \sum_{i=1}^n \xi_i \frac{\rho_i}{2} \left(\frac{q_{vj}}{A_i} \right)^2 + \frac{\rho_i}{2} \left(\frac{q_{vj}}{A_d} \right)^2 = Kq_{vj} = p_{\text{F}} \quad (6-3)$$

式中， ξ_i 为各部件的静阻力系数； ρ_i 为通风系统进口的气体密度； q_{vj} 为风量； A_i 为各部件的流通面积； A_d 为排气口面积； K 为管网特性系数。

当管网一定（除指管网系统、管内径、管长不变外，尚指阀门开度、管内壁相对粗糙度、风道中障碍物等均不变）时，式中 K 就是一个定值。管网改变后 K 值也随之而变。 K 值表征了管网的特性，称为“管网特性系数”。

很显然，式（6-3）是一条二次抛物线。把它用图形表示出来，就是通风机的管网特性曲线。 K 值越大则曲线越陡，说明管网的阻力损失也越大。反之亦然。同时还必须指出， K 值是一个有量纲的量，其数值随压力、风量、气体密度、流通面积等所采用的量纲不同而不同。图 6-2 为广义的管网特性曲线。图 6-3 为狭义的管网特性曲线。

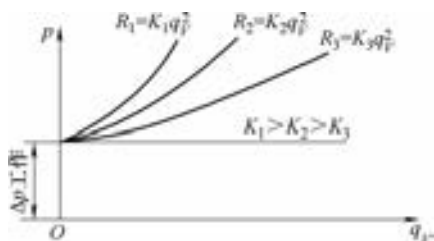


图 6-2 广义的管网特性曲线

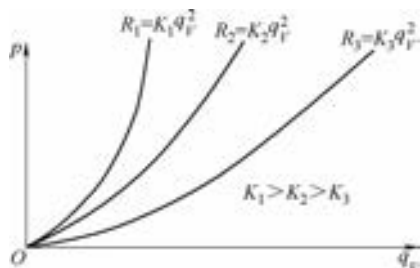


图 6-3 狭义的管网特性曲线

在大多数通风系统中，对工作场所的工作压力没有特殊要求，它也不是恒定值，通常把工作场所看成是管网的一部分，一并计算其静阻力，或者根本不计算，这样的管网就构成狭义的管网。今后除特殊指明外，提到的管网及管网特性都是指狭义的管网及管网特性。

通过对通风系统管网中各部件静阻力的计算，就可得到当某一特定的风量通过该系统时，管网的总静阻力，加上该风量下该系统排气口的动压，就得到该管网的总损失 R ，于是按照式（6-3）就可计算出该管网的特性系数 $K = R/q_v^2$ 。有了管网特性系数值，就可计算出任意风量下管网的总损失，在一定比例尺的 q_v-R 平面坐标图上，找出这样的对应点，把这些点光滑地连接起来，就得到该管网的特性曲线。

用户应制作管网特性曲线作为选用通风机的依据。通风机在某一风量下所能达到的全压 p_{F} ，应等于该风量下管网的总损失 R ，这样通风机才能稳定地工作。

常常遇到这样的情况：用户已经有了现成的管网而不知道管网的特性，而要查找资料重新计算管网特性却十分麻烦又不太精确，因而无法绘制管网特性曲线。这时可以任意找来一台通风机安装在系统中运行，测出当时通风机的风量 q_v 和全压 p_{F} ，则该系统在该风量下的管网总阻力 R 就等于风机的全压 p_{F} 。有了 R 与 q_v 的对应关系，就可按照上述过程求出管网特性系数 K ，并绘出管网特性曲线。

管网阻力是一种压力损失，因此在设计管网时应尽量减小管网阻力，这对于节能

源、降低消耗大有好处。

6.3 串联管网和并联管网的特性

1. 串联管网

串联管网可以看成是一个由若干分段组成的整体管网。先分别计算出各段的管网阻力，然后相加在一起，即得出串联管网总的管网阻力。

由于在串联管网中通过的风量是相同的，因此在同一风量下串联管网的总阻力应该是各分段阻力之和。按照这一原则，将各分段的管网阻力特性曲线叠加在一起，即得到串联管网的合成阻力特性曲线。

图 6-4 示出三段管网串联的阻力特性。串联后的合成管网阻力特性曲线 \bar{R} ，正是按照当 q_v 等于常数时，有

$$\bar{R} = R_1 + R_2 + R_3$$

这一原则叠加而成的。这里需要指出的是，其中 R_1 、 R_2 不含有排气动压损失，仅是各自的静阻力，只有 R_3 除自身的静阻力损失外还含有排气口的动压损失。

由式 (6-3) 可以导出，串联管网的当量面积 A_{eq} 与各分管段的当量面积 \bar{A}_i 的关系如下：

$$\frac{1}{A_{eq}^2} = \frac{1}{A_{eq1}^2} + \frac{1}{A_{eq2}^2} + \cdots + \frac{1}{A_{eqi}^2} \quad (6-4)$$

式中， A_{eq} 为合成管网的当量面积； $A_{eq1} \sim A_{eqi}$ 为 1 ~ i 各分管段的当量面积。

2. 并联管网

对于并联管网，管网两端的压差必然相等，即并联管网各分段的静阻力必然相等，否则将失去平衡。而在同一压差下通过管网总的风量则是各分管段的风量之和。

图 6-5 示出三段管网并联的阻力特性。对于 Δp 等于常数时，有

$$q_v = q_{v1} + q_{v2} + q_{v3}$$

这一原则，三个分管段管网特性曲线 R_1 、 R_2 、 R_3 叠加后，即得并联管网的合成阻力特性曲线 \bar{R} 。

由式 (6-3) 可以导出并联管网的合成阻力与各分管段的阻力的关系如下：

$$\frac{1}{\sqrt{\bar{R}}} = \frac{1}{\sqrt{R_1}} + \frac{1}{\sqrt{R_2}} + \cdots + \frac{1}{\sqrt{R_i}} \quad (6-5)$$

式中， \bar{R} 为合成管网的阻力； $R_1 \sim R_i$ 为 1 ~ i 各分管段的阻力。

并联管网的当量面积 A_{eq} 与各分管段的当量面积 A_{eqi} 的关系如下：

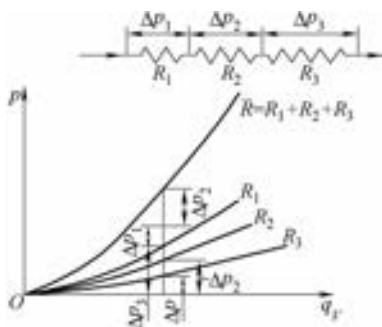


图 6-4 三段管网串联的阻力特性

$$A_{eq} = A_{eq1} + A_{eq2} + \dots + A_{eqi}$$

需要指出的是，若各分管段的阻力损失仅为静阻力而不含排气动压损失，则合成后的阻力损失也仅为静阻力损失，加上排气动压损失才为总阻力损失。若分管段的阻力损失含有排气动压损失，则合成后即得总阻力损失。

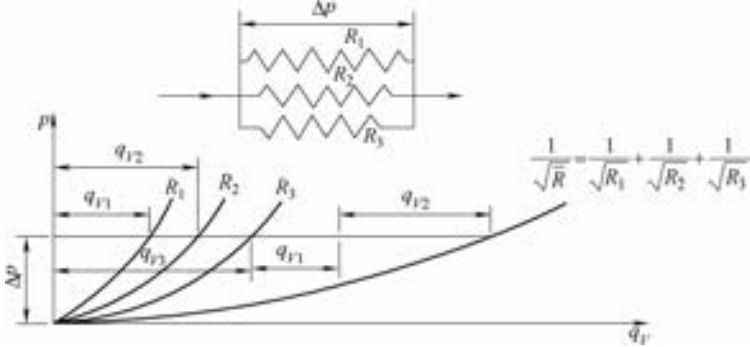


图 6-5 三段管网并联的阻力特性

在设计并联管网时，应尽量做到各并联支管的阻力平衡，其差值一般应不超过以下指标：一般排气系统 $\leq 15\%$ ，除尘系统 $\leq 10\%$ 。

3. 复合管网

对于由并联管网与串联管网组成的复合管网，管网总阻力可按上述方法逐步合成。

图 6-6 示出复合管网的阻力特性。 R_1 和 R_2 并联后与 R_3 串联，然后再与由 R_4 、 R_5 、 R_6 、 R_7 组成的并联管网串联的情况。先把 R_1 、 R_2 并联合成为 \bar{R} ，把 R_4 、 R_5 、 R_6 、 R_7 并联合成为 $\bar{\bar{R}}$ ，然后再将 \bar{R} 、 R_3 、 $\bar{\bar{R}}$ 串联合成，即可得到整体复合管网的合成阻力特性曲线 $\bar{\bar{\bar{R}}}$ 。

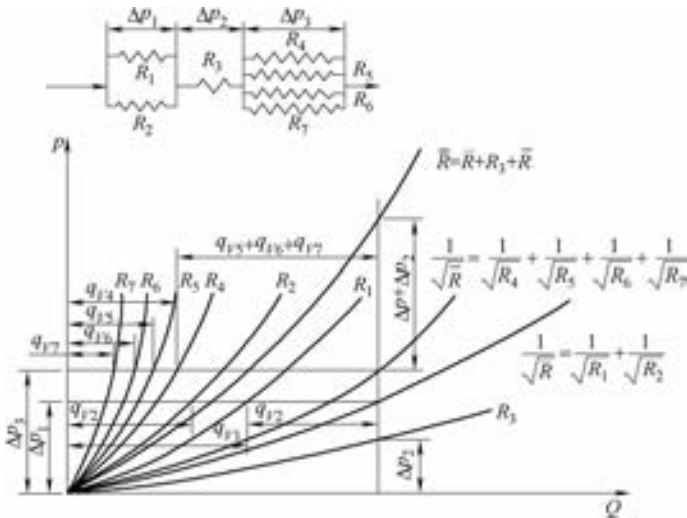


图 6-6 复合管网的阻力特性

6.4 通风机在管网中的工作

1. 通风机的运行工况

通风机在管网中工作时，产生一定的风量和一定的压力。通风机所产生的风量必定等于管网中通过的风量（这里没有考虑管网的漏风量），所产生的压力必须与管网系统的阻力损失相等，这样才能达到压力平衡，保证通风机连续稳定地工作。通风机稳定工作的点，称为运行工况点。它是通风机特性曲线与管网特性曲线的交点，见图 6-7 所示。对于隧道、井巷等大排气口的管网，由于排气，动压很小，往往只绘制管网的静阻力特性曲线，此时要求通风机产生的静压力足以克服管网的静阻力，则通风机的静压特性曲线与管网的静阻力特性曲线的交点才是运行工况点。通风机只有在运行工况点运行时，通风机所产生的风量和风压才能与管网中所要求的风量和风压保持一致（达到平衡）。通风机特性曲线和管网特性曲线确定之后，这一点也就自然确定了，其对应的各种参数也相应地确定了。通风机特性曲线或管网特性曲线改变，运行工况点也随之改变。

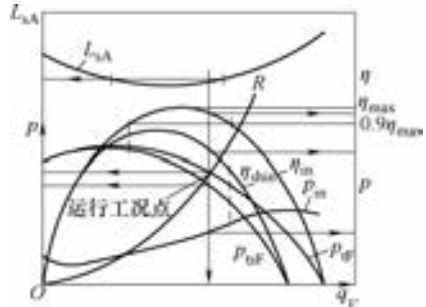


图 6-7 通风机的运行情况

下面进一步探讨在带有进口节流的管网中，节流后通风机的运行工况如何变化。带有进口节流的通风系统，实际上相当于是一个带有进口管网阻力可变的通风系统。

下面结合图 6-8 来进行分析。出口管网阻力损失特性曲线通过计算可以绘出，见图 6-8 中 R_{out} 。在进口节流阀各种开度下的进口管网阻力损失特性曲线，通过实验或计算也可绘出，见图 6-8 中 R_{00} 、 R_{01} 、 R_{02} 、 R_{03} 。其中， R_{00} 为节流阀全开时的进口管网特性曲线， $R_{01} \sim R_{03}$ 为节流阀开度逐渐减小后的进口管网特性曲线。由于风机进口管网阻力越大，则风机进口负压越大，故进口管网特性曲线画在横坐标轴的下面。然而，进口管网阻力与出口管网阻力合成时取其绝对值相加，故合成后的总管网特性曲线仍画在横坐标轴的上面， $\overline{R_{out} + R_{00}} \sim \overline{R_{out} + R_{03}}$ 即为出口管网与相应的节流阀开度下进口管网合成后的总的管网特性曲线。

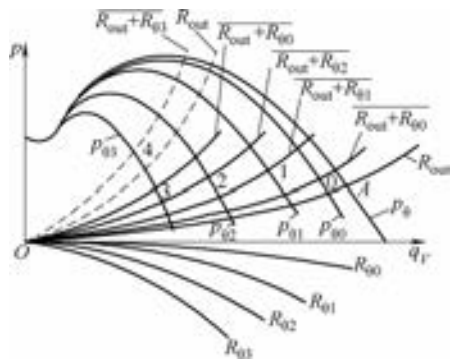


图 6-8 进口节流后通风机的运行情况

至于通风机的压力特性曲线，由于进口截流后通风机进口绝对压力降低，进气密度减小，致使通风机的做功能力下降，通风机的压力特性曲线 p 将随进口节流阀的开度成

对应的变化,如 p_{00} 对应 R_{00} 、 p_{01} 对应 p_{01} …。如前所述,通风机的运行工况点在风机特性曲线与管网特性曲线的交点上。因此,进口节流后的运行工况点分别在对应的A、0、1、2、3各点上。

上面讨论的是出口管网阻力不变的情况。如果出口管网阻力也可变,例如出口管网特性曲线由 R_{out} 变到 R'_{out} (由于出口管道上的闸阀关小,或化铁炉鼓风时炉中料层突然加厚,或熔化过快),此时若通风机进口没有装管网,则通风机的运行工况点将由A点移到B点;如果装有进口管网,且节流阀的开度为 θ_3 ,则通风机的运行工况点必然由3点移到4点。同理,只要绘出 $\overline{R'_{out} + R_{00}}$ 、 $\overline{R'_{out} + R_{01}}$ 、 $\overline{R'_{out} + R_{02}}$ 等各条合成的管网特性曲线,则相对应的运行工况点就都能找到。

2. 通风机的稳定和非稳定工作区

通风机并不是在任何工况点都能稳定地工作的,这是由通风机的特性所决定的。图6-9示出通风机的稳定和非稳定工作。图中,通风机的压力特性曲线有一个峰值点D,即在此峰值点的风量下,风机的压力达到最大值,大于或小于这一风量时,风机的压力就要下降。

如果通风机的运行工况点在通风机压力特性曲线峰值点D的右侧(即压力特性曲线的下降段),例如图6-9中通风机特性曲线与管网特性曲线 R_1 的交点B。此时若管网受到干扰,管网中阻力突然升高 Δp ,则管网中通过的风量将会减少 Δq_v ,这相当于管网特性曲线突然由 R_1 移至只 R'_1 。为了适应管网中突然变化了的情况,通风机立即进入B'点运行,输出的风量随之减少 Δq_v 。从通风机特性曲线看,通风机输出风量减少 Δq_v 时,风压随之升高 Δp ,这与管网的变化是一致的。当干扰消失后,管网特性恢复到原来状态,通风机又立即回到B点工作。因为在这一区间工作时,通风机的工作状态能自动地与管网的工作状态保持平衡,稳定地工作,所以把这一区间叫做通风机的稳定工作区。

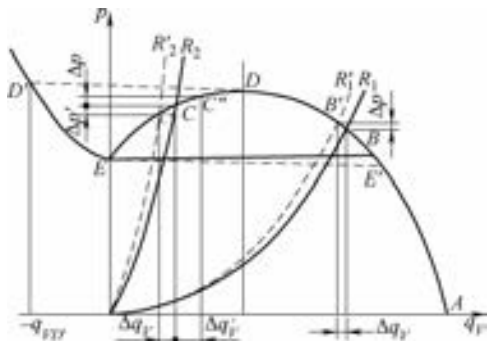


图6-9 通风机的稳定和非稳定工作

如果通风机的运行工况点在通风机压力特性曲线峰值点D的左侧(即压力特性曲线的上升段),例如图6-9中通风机特性曲线与管网特性曲线 R_2 的交点C。此时若管网受到干扰,管网中阻力突然升高 Δp ,则管网中通过的风量将会减少 Δq_v ,这相当于管网特性曲线突然由 R_2 移至 R'_2 。为了适应管网中突然变化了的情况,通风机要么在C'点工作,输出的风量也相应减少 Δq_v ;要么在C''点工作,产生的压力也相应提高 Δp 。然而这两点都不是通风机特性曲线与管网特性曲线的交点,通风机不可能在这两点工作。因为当通风机在C'点工作时,虽然输出的风量减少了 Δq_v ,适应了管网的输送能力,但产生的压力不但没有提高,反而降低了 $\Delta p'$ 。这样的风压不但不足以克服管网阻力,使得减少后的风量也输送不出去。若风机在C''点工作,虽然产生的压力提高了 Δp ,但输出

的风量不但没有减少,反而增加了 $\Delta q'_v$ 。这样大的风量在管网中显然是通不过的。因为当这样大的风量通过管网 R_2 或 R'_2 时,将遇到非常大的阻力,且远远大于通风机所产生的压力。基于上述原因,通风机无论输出多少风量都不能从管网中输送出去。非但如此,在管网阻力大于通风机产生的压力的情况下,管网中的一部分风量反而要向通风机内部倒流,使通风机进入负流量下略高于 D 点压力的 D' 点进行工作。当通风机进入负流量下进行工作后,管网中的风量迅速排出,在某一瞬间管网中气体停止流动,管网中的阻力在此瞬间降至为零,于是通风机有转向 A 点工作的趋势。当然并非立即跳到 A 点工作,而是首先由负流量下的 D' 工况点,逐渐移至零流量下的 E 点工作;然后突然跳到略低于该点压力的 E' 点工作,以 $p_{E'}$ 的压力输出 $q_{VE'}$ 的风量,又出现通风机输出的风量大于管网所能排出的风量、管网阻力大于通风机产生的压力的情况。于是通风机在持续运行的过程中尽量减少输出的风量、提高产生的压力,沿着通风机压力特性曲线上升;然而即使到达曲线的峰值点 D ,仍不能适应管网的要求,于是通风机只好又回到 D' 点工作。这样,通风机的工作状态就会出现 $E'DD'E-E'DD'E$ 循环。这样的循环一经出现,便周而复始不可收拾。这样的工作状态当然是不稳定的,所以把通风机压力特性曲线峰值点左侧的区域,叫做通风机的非稳定工作区。把出现一会儿由通风机输出风量、一会儿风量由管网中向通风机内部倒流的现象,叫做“喘振”(有的文献上称为“飞动”)。

然而并非通风机在非稳定工作区工作时,必然立即发生喘振,例如当通风机特性曲线峰值左侧的曲线段较平坦(曲线上升段的斜率较小)、运行工况点离峰值点较近、管网特性曲线的斜率较小,且管网中干扰能量较小、压力波动不大时,通风机适当减小输气量后,能使管网中的压力得到恢复,通风机又回到原工况点工作,虽不稳定,但不致于喘振。只有当通风机特性曲线峰值左侧的曲线段较陡(曲线上升段的斜率较大)、运行工况点离峰值点较远(离零流量较近)时,通风机才开始发生喘振,这点叫做“喘振点”。风量小于喘振点的区域叫做“喘振区”。喘振点通过实验可以测出,一般轴流通风机比离心通风机容易发生喘振;高压通风机比低压通风机容易发生喘振。喘振现象发生后,通风机运行的声音发生突变,风量和风压急剧地波动,机器及管网强烈地振动。如果不立即停机或采取其他人为措施消除,将会造成机器严重破坏。故选用通风机时必须注意,应尽量避免在非稳定区工作,且绝对禁止在喘振区工作。

3. 防止喘振的方法

(1) 放空法 如果用户需要的风量小于或等于通风机喘振点的风量,这样通风机就会在喘振区运行,这是不允许的。如果在风机的排气管道上增设一个旁通管道,让通风机始终在大风量下在稳定工作区运行,让所需要的风量通过主管道送往工作场所,而把多余的风量经过旁通管道排放掉,这样就防止通风机在喘振区运行。这是最简单的防喘振方法,但最不经济。在旁通管道上一般装有控制阀(放空阀),控制排放风量和主管道上的送风量。对于贵重气体或有害气体,不宜放空时,可将旁通管与通风机的进风口连接,让这部分多余的风量流回通风机的进口,使其在通风机内部循环。

图 6-10 示出用放空法防止喘振原理。这是一台通风机后接一个主管网和并联一个

旁通管网的情况。主管网为由一段阻力特性为 R_1 的管道和一个恒定阻力 R_2 （如一个恒压液槽）串联组成，旁通管网的阻力特性为 R_3 。主管网的合成阻力特性曲线为 $\bar{R} = R_1 + R_2$ ；主管网与旁通管网的合成阻力特性曲线为 $\overline{\bar{R}}$ 。当主管网单独投入工作时，通风机在 A 点运行（假定这点接近喘振点）；当旁通管网单独投入工作时，通风机在 B 点运行；主管网与旁通管网同时投入工作后，通风机在 C 点运行，这一点在通风机的稳定工作区，通风机可以安全稳定地工作。这时通风机输出的风量为 q_{1C} ，通过主管网的风量仅为 q_{11} ，而多余的风量 q_{12} 则经过旁通管放空了。

(2) 增速节流法 提高通风机转速以后，其压力特性曲线的变化见图 6-11。这组特性曲线的峰值都在一条通过 O 点的二次抛物线上。如果管网特性曲线 R_1 也是一条通过 O 点的二次抛物线，则原先就在非稳定区工作的，提高转速后它仍在非稳定区工作。但是如果管网特性曲线 R_2 是一条不通过 O 点的广义管网特性曲线（即在管网中存在有恒定静阻力的部分），这时从图中可以看出，在管网特性曲线不变的情况下，转速为 n_1 时通风机在喘振点附近工作，转速提高到 n_3 时通风机就可进入到稳定区工作了，只是这时通过管网的风量要比原先的大许多。

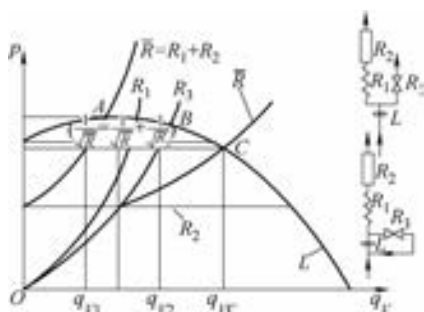


图 6-10 用放空法防止喘振原理

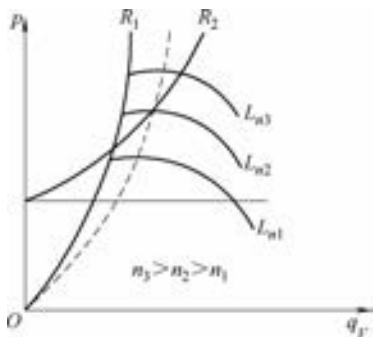


图 6-11 提高风机的转速避免喘振

如上所述，当管网特性曲线是一条通过 O 点的二次抛物线时，单纯提高通风机转速无法避免喘振。但是如图 6-12 所示，提高通风机转速以后再加以进口节流措施，就可避免喘振了，而且还能保证通过管网的风量和风压保持不变。例如图中的 A 点，当通风机转速为 n_1 时，它在通风机特性曲线的喘振附近；当通风机转速提高到 n_2 再加以进口节流以后，它就在该节流后通风机特性曲线的稳定工作区了。

4. 通风机的最佳工作区

通风机的最佳工作区是指通风机的既稳定又经济的工作区域，如图 6-7 中的水平粗实线段所示。一般取通风机最高效率的 90% ~ 95% 范围内的区域作为最佳工作区。通风机性能表上给出的工况点

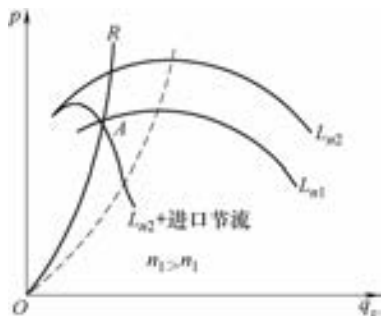


图 6-12 用增速节流法防止喘振

都在最佳工作区。用户按照性能表上给出的性能选用通风机将万无一失。

6.5 管道的沿程压力损失

由于空气本身有黏滞性，而且与管壁间有摩擦，因而沿程将产生阻力。这部分阻力称为沿程阻力或摩擦阻力。克服沿程阻力引起的能量损失，称为沿程压力损失或摩擦压力损失，一般简称为沿程损失或摩擦损失。

1. 沿程损失的计算

空气在横断面不变的管道内流动时，沿程压力损失可按式 (6-6) 计算：

$$\Delta p_m = \lambda \frac{1}{4R_s} \frac{v^2 \rho l}{2} \quad (6-6)$$

$$R_s = \frac{A}{P}$$

式中， Δp_m 为管道的沿程压力损失 (Pa)； λ 为摩擦阻力系数； v 为管道内空气的平均流速 (m/s)； ρ 为空气的密度 (kg/m^3)； l 为管道的长度 (m)； R_s 为管道的水力半径 (m)； A 为管道的过流断面积 (m^2)； P 为湿周，即管道的周长 (m)。

2. 单位长度摩擦损失的计算

(1) 单位长度摩擦损失 此摩擦损失也称为比摩阻，用符号 p_m 表示。从式 (6-6) 可得出：

$$p_m = \lambda \frac{1}{4R_s} \frac{v^2 \rho}{2} \quad (6-7)$$

按管道水力半径的计算式，对于圆形管道：

$$R_s = \frac{D}{4}$$

$$p_{mf} = \frac{\lambda}{D} \frac{v^2 \rho}{2} \quad (6-8)$$

对于矩形管道：

$$R_s = \frac{ab}{2(a+b)}$$

$$p_{mf} = \frac{\lambda}{\frac{2ab}{a+b}} \times \frac{v^2 \rho}{2} \quad (6-9)$$

式中， p_m 为单位长度摩擦损失 (Pa/m)； p_{mf} 为圆形管道单位长度的摩擦损失 (Pa/m)； p_{mf} 为矩形管道单位长度的摩擦损失 (Pa/m)； D 为圆形管道的内径 (m)； a 为矩形管

道长边的内边长 (m); b 为矩形管道短边的内边长 (m); $\frac{2ab}{a+b}$ 为矩形管道的流速当量直径 (m)。

对于其他形状的管道,也可按类似的方法先求出水力半径 R_s ,再计算单位长度摩擦损失。

(2) 摩擦阻力系数 对大部分通风和空调系统中的管道,空气的流动处于紊流状态,主要是在紊流过渡区。其摩擦阻力系数取决于雷诺数和管道内表面的相对粗糙度。圆管道的摩擦阻力系数可按式(6-10)计算:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -21g \left(\frac{K}{3.71D} + \frac{2.51}{Re \sqrt{\lambda}} \right) \quad (6-10)$$

式中, K 为管道内表面的绝对粗糙度 (m); K/D 为相对粗糙度; Re 为雷诺数。

$$Re = \frac{vD}{\nu} \quad (6-11)$$

式中, ν 为管道内的流体即空气的运动粘度 (m^2/m)。

从式(6-10)可以看出,当所设计的管道的断面尺寸和所输送的空气温度确定后,摩擦阻力系数取决于管道内空气的流速和管道内表面粗糙度。

式(6-11)是通过大量的工业管道试验后,归结出的适用于工业管道的半经验公式。它不仅适用于湍流过渡区,而且也可以用于整个湍流的三个阻力区,即光滑区、过渡区和粗糙区。此公式也可用于非圆形管道,式中的 D 代表管道的当量直径。试验表明,对矩形、方形和三角形断面,使用当量直径所获得的试验数据结果,和圆管是很接近的。但对长缝形和星形断面,其差别就较大。

对于矩形管道,流速当量直径可按式(6-12)计算:

$$D = \frac{2ab}{a+b} \quad (6-12)$$

摩擦阻力系数可按式(6-13)计算:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -21g \left(\frac{K}{3.71 \frac{2ab}{a+b}} + \frac{2.51}{Re \sqrt{\lambda}} \right) \quad (6-13)$$

3. 摩擦损失计算图表

(1) 圆形管道 按式(6-10),根据已知的风量和管道直径,利用电子计算机进行迭代计算,可以求出其摩擦阻力系数,再按式(6-8)进行计算,就可求出圆管道的单位长度摩擦损失 p_{mf} 。为了方便计算,给出图6-13 钢板管道的摩擦损失计算图和表6-12 钢板圆形通风管道计算表。图和表制作的具体条件如下:钢板管道,绝对粗糙度 $K = 0.15mm$,标准状态空气,温度 $t = 20^\circ C$,密度 $\rho = 1.204kg/m^3$,运动粘度 $\nu = 15.06 \times$

$10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ ，标准大气压力 $p = 101.3 \text{kPa}$ 。

图 6-13 的纵坐标为风量，单位为 dm^3/s ；横坐标为比摩阻，即单位长度管道的摩擦损失，单位为 Pa/m 。图中的阴影低速部分是推荐采取的风速和比摩阻区域。风速或比摩阻太小时，初投资高；风速或比摩阻太大时，则运行费高，两者均不经济。

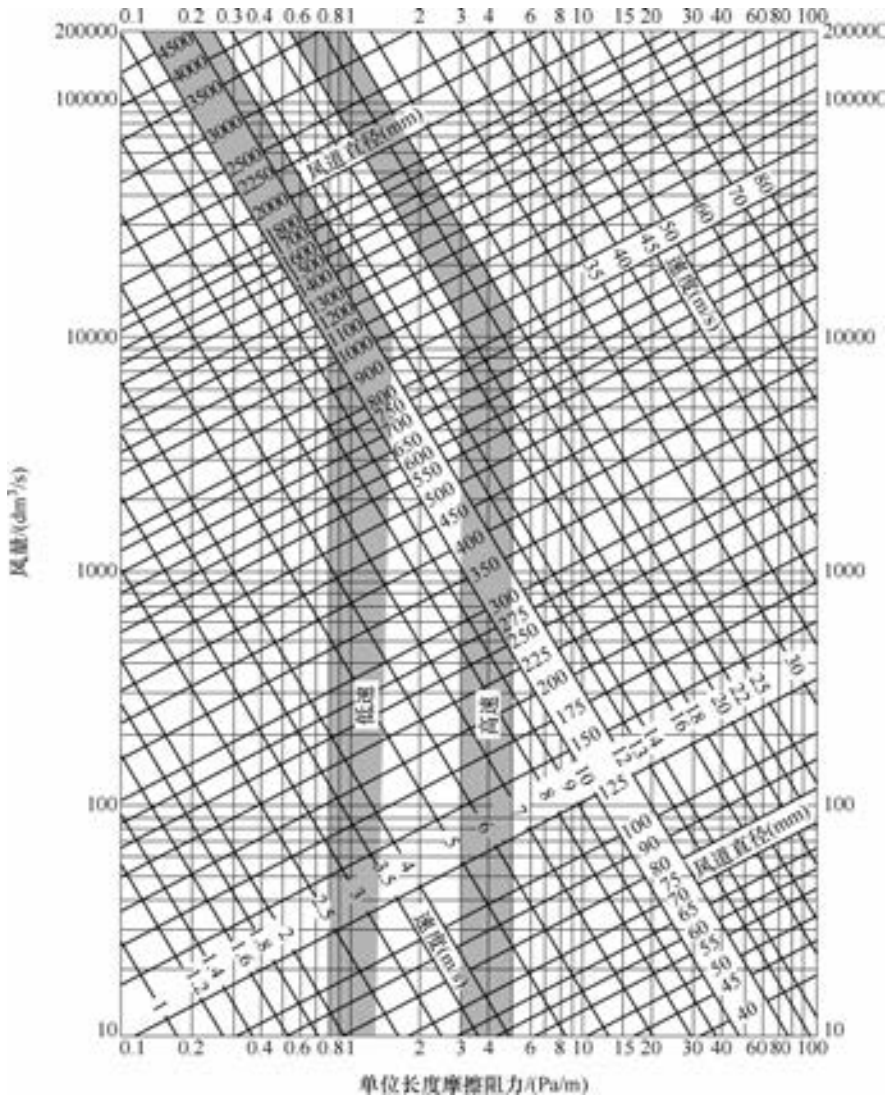


图 6-13 钢板管道的摩擦损失计算用图

表 6-12 钢板圆形通风管道计算用表

动压 /Pa	风速 /(m /s)	外径 D /mm												
		100	120	140	160	180	200	220	250	280	320	360	400	450
0.602	1.0	28	40	55	71	91	112	135	175	219	287	363	449	569
		0.222	0.175	0.143	0.121	0.104	0.091	0.081	0.069	0.059	0.050	0.043	0.038	0.033
0.728	1.1	30	44	60	79	100	123	148	192	241	316	400	494	626
		0.262	0.207	0.170	0.143	0.123	0.108	0.096	0.081	0.070	0.060	0.051	0.045	0.039
0.867	1.2	33	48	66	86	109	134	162	210	263	344	436	539	682
		0.306	0.241	0.198	0.167	0.144	0.126	0.112	0.095	0.082	0.070	0.060	0.053	0.045
1.017	1.3	36	52	71	93	118	146	175	227	285	373	472	584	739
		0.352	0.278	0.228	0.192	0.166	0.145	0.129	0.110	0.095	0.080	0.069	0.061	0.052
1.180	1.4	39	56	76	100	127	157	189	244	307	402	509	629	796
		0.402	0.318	0.261	0.220	0.189	0.165	0.147	0.125	0.109	0.092	0.079	0.069	0.060
1.355	1.5	42	60	82	107	136	168	202	262	329	430	545	674	853
		0.454	0.359	0.295	0.249	0.214	0.187	0.166	0.142	0.123	0.104	0.090	0.079	0.068
1.541	1.6	44	64	87	114	145	179	216	279	351	459	581	718	910
		0.510	0.403	0.331	0.279	0.240	0.210	0.187	0.159	0.138	0.117	0.101	0.088	0.076
1.740	1.7	47	68	93	122	154	190	229	297	373	488	618	763	967
		0.568	0.449	0.369	0.311	0.268	0.235	0.209	0.178	0.154	0.130	0.113	0.099	0.085
1.950	1.8	50	72	98	129	163	202	243	314	395	516	654	808	1024
		0.630	0.498	0.409	0.345	0.297	0.260	0.231	0.197	0.171	0.145	0.125	0.109	0.095
2.173	1.9	53	76	104	136	172	213	256	332	417	545	690	853	1081
		0.694	0.549	0.451	0.380	0.327	0.287	0.255	0.217	0.188	0.159	0.138	0.121	0.104
2.408	2.0	55	80	109	143	181	224	270	349	439	574	727	898	1137
		0.761	0.602	0.494	0.417	0.359	0.315	0.280	0.238	0.207	0.175	0.151	0.133	0.115
2.655	2.1	58	84	115	150	190	235	283	367	461	602	763	943	1194
		0.831	0.657	0.540	0.456	0.392	0.344	0.306	0.260	0.226	0.191	0.165	0.145	0.125
2.914	2.2	61	88	120	157	199	246	297	384	482	631	799	988	1251
		0.903	0.715	0.587	0.496	0.427	0.374	0.333	0.283	0.246	0.208	0.180	0.158	0.136
3.185	2.3	64	92	126	164	208	258	310	402	504	660	836	1033	1308
		0.979	0.775	0.636	0.537	0.463	0.405	0.361	0.307	0.267	0.226	0.195	0.171	0.148
3.468	2.4	67	96	131	172	217	269	324	419	526	688	872	1078	1365
		1.057	0.837	0.688	0.580	0.500	0.438	0.390	0.332	0.288	0.244	0.211	0.185	0.160
3.763	2.5	69	100	137	179	226	280	337	437	548	717	908	1123	1422
		1.138	0.901	0.741	0.625	0.539	0.472	0.420	0.358	0.310	0.263	0.227	0.199	0.172
4.070	2.6	72	104	142	186	236	291	351	454	570	746	945	1167	1479
		1.222	0.968	0.795	0.672	0.579	0.507	0.451	0.384	0.334	0.283	0.244	0.211	0.185
4.389	2.7	75	108	147	193	245	302	364	471	592	774	981	1212	1536
		1.309	1.037	0.852	0.719	0.620	0.543	0.483	0.412	0.357	0.303	0.262	0.230	0.199
4.720	2.8	78	112	153	200	254	314	378	489	614	803	1017	1257	1592
		1.399	1.108	0.910	0.769	0.663	0.580	0.517	0.440	0.382	0.324	0.280	0.246	0.212
5.063	2.9	80	116	153	207	263	325	391	506	636	832	1054	1302	1649
		1.491	1.181	0.971	0.820	0.707	0.619	0.551	0.469	0.408	0.345	0.298	0.262	0.227
5.418	3.0	83	120	164	214	272	336	405	524	658	860	1090	1347	1706
		1.586	1.256	1.033	0.872	0.752	0.659	0.586	0.500	0.434	0.367	0.318	0.279	0.241
5.785	3.1	86	124	169	222	281	347	418	541	680	889	1127	1392	1763
		1.684	1.334	1.097	0.926	0.799	0.700	0.623	0.531	0.461	0.390	0.337	0.296	0.256
6.164	3.2	89	128	175	229	290	358	432	559	702	918	1163	1437	1820
		1.785	1.414	1.162	0.982	0.846	0.742	0.660	0.563	0.488	0.414	0.358	0.314	0.272
6.556	3.3	91	132	180	236	299	369	445	576	724	947	1199	1482	1877
		1.888	1.496	1.230	1.039	0.896	0.785	0.699	0.595	0.517	0.438	0.379	0.332	0.288
6.959	3.4	94	136	180	243	308	381	459	594	746	975	1236	1527	1934
		1.994	1.580	1.299	1.098	0.946	0.829	0.738	0.629	0.546	0.463	0.400	0.351	0.304

(续)

动压 /Pa	风速 /(m /s)	外径 D /mm												
		500	560	630	700	800	900	1000	1120	1250	1400	1600	1800	2000
0.602	1.0	703	880	1115	1378	1801	2280	2816	3534	4297	5518	7211	9130	11276
		0.029	0.025	0.022	0.019	0.016	0.014	0.012	0.011	0.009	0.008	0.007	0.006	0.005
0.728	1.1	773	968	1227	1515	1981	2008	3098	3887	4836	6070	7932	10043	12403
		0.034	0.030	0.026	0.022	0.019	0.017	0.015	0.013	0.011	0.010	0.008	0.007	0.006
0.867	1.2	843	1056	1338	1053	2161	2736	3279	4241	5276	6622	8653	10956	13531
		0.040	0.035	0.030	0.026	0.022	0.019	0.017	0.015	0.013	0.011	0.010	0.008	0.007
1.017	1.3	913	1144	1450	1791	2341	2964	3661	4594	5716	7173	9374	11869	14659
		0.046	0.040	0.035	0.030	0.026	0.022	0.020	0.017	0.015	0.013	0.011	0.010	0.008
1.180	1.4	984	1233	1561	1929	2521	3192	3943	4948	6155	7725	10096	12783	15786
		0.053	0.046	0.040	0.035	0.030	0.026	0.022	0.020	0.017	0.015	0.013	0.011	0.010
1.355	1.5	1054	1321	1673	2066	2701	3420	4224	5301	6595	8277	10817	13696	16914
		0.060	0.052	0.045	0.039	0.033	0.029	0.025	0.022	0.019	0.017	0.014	0.013	0.011
1.541	1.6	1124	1409	1784	2204	2881	3648	4506	5655	7035	8829	11538	14609	18041
		0.067	0.058	0.050	0.044	0.038	0.033	0.029	0.025	0.022	0.019	0.016	0.014	0.012
1.740	1.7	1194	1497	1396	2342	3061	3876	4787	6008	7474	9381	12259	15522	19169
		0.075	0.065	0.056	0.050	0.042	0.036	0.032	0.028	0.024	0.021	0.018	0.016	0.014
1.950	1.8	1265	1585	2007	2480	3241	4104	5069	6361	7914	9832	12980	16435	20296
		0.083	0.072	0.063	0.055	0.047	0.040	0.036	0.031	0.027	0.024	0.020	0.017	0.015
2.173	1.9	1335	1673	2119	2617	3421	4332	5351	6715	8354	10484	13701	17343	21424
		0.092	0.080	0.069	0.061	0.052	0.045	0.039	0.034	0.030	0.026	0.022	0.019	0.017
2.408	2.0	1405	1761	2230	2755	3601	4560	5632	7068	8793	11036	14422	18261	22552
		0.101	0.088	0.076	0.067	0.057	0.049	0.043	0.038	0.033	0.029	0.024	0.021	0.019
2.655	2.1	1476	1849	2342	2893	3781	4788	5914	7422	9233	11588	15143	19174	23679
		0.110	0.096	0.083	0.073	0.062	0.054	0.047	0.041	0.036	0.031	0.027	0.023	0.020
2.914	2.2	1546	1937	2453	3031	3961	5016	6195	7775	9673	12140	15864	20087	24807
		0.120	0.104	0.090	0.079	0.067	0.058	0.051	0.045	0.039	0.034	0.029	0.025	0.022
3.185	2.3	1616	2025	2565	3168	4141	5244	6477	8128	10112	12692	16586	21000	25934
		0.130	0.113	0.098	0.086	0.073	0.063	0.056	0.049	0.043	0.037	0.032	0.027	0.024
3.468	2.4	1686	2113	2676	3306	4321	5472	6759	8482	10552	13243	17307	21913	27062
		0.141	0.122	0.106	0.093	0.079	0.069	0.060	0.053	0.046	0.040	0.034	0.030	0.026
3.763	2.5	1757	2201	2788	3444	4501	5700	7040	8835	10992	13795	18028	22826	28190
		0.151	0.132	0.114	0.100	0.085	0.074	0.065	0.057	0.050	0.043	0.037	0.032	0.028
4.070	2.6	1827	2289	2899	3582	4581	5928	7322	9189	11431	14347	18749	23739	29317
		0.163	0.142	0.123	0.108	0.092	0.079	0.070	0.061	0.053	0.047	0.040	0.034	0.030
4.389	2.7	1897	2377	3011	3719	4861	6156	7604	9542	11871	14899	19470	24652	30445
		0.174	0.152	0.132	0.116	0.098	0.085	0.075	0.065	0.057	0.050	0.043	0.037	0.033
4.720	2.8	1967	2465	3122	3857	5041	6384	7885	9895	12311	15451	20191	25565	31572
		0.187	0.163	0.141	0.124	0.105	0.091	0.080	0.070	0.061	0.053	0.046	0.040	0.035
5.063	2.9	2038	2553	3234	3995	5222	6612	8167	10249	12750	16002	20912	26478	32700
		0.199	0.173	0.150	0.132	0.112	0.097	0.086	0.075	0.065	0.057	0.049	0.042	0.037
5.418	3.0	2108	2641	3345	4133	5402	6840	8448	10602	13190	16554	21633	27391	33827
		0.212	0.185	0.160	0.140	0.119	0.103	0.091	0.079	0.070	0.061	0.052	0.045	0.040
5.785	3.1	2178	2729	3457	4270	5582	7068	8730	10956	13680	17106	22354	28304	34955
		0.225	0.196	0.170	0.149	0.127	0.110	0.097	0.084	0.074	0.065	0.055	0.048	0.042
6.164	3.2	2248	2817	3568	4408	5762	7296	9012	11309	14069	17658	23076	29217	36083
		0.239	0.208	0.180	0.158	0.135	0.117	0.103	0.090	0.078	0.068	0.058	0.051	0.045
6.556	3.3	2319	2905	3680	4546	5942	7524	9293	11662	14509	18210	23797	30130	37210
		0.253	0.220	0.191	0.168	0.142	0.123	0.109	0.095	0.083	0.072	0.062	0.054	0.047
6.959	3.4	2389	2993	3791	4684	6122	7752	9575	12016	14949	18761	24518	31043	38338
		0.267	0.233	0.201	0.177	0.151	0.131	0.115	0.100	0.088	0.077	0.065	0.057	0.050

(续)

动压 /Pa	风速 /(m /s)	外经 D/mm												
		100	120	140	160	180	200	220	250	280	320	360	400	450
7.375	3.5	97	140	191	250	317	392	472	611	768	1004	1272	1572	1991
		2.103	1.666	1.370	1.158	0.998	0.875	0.779	0.664	0.576	0.488	0.422	0.371	0.321
7.802	3.6	100	144	197	257	326	403	486	629	789	1033	1308	1616	2047
		2.215	1.755	1.443	1.219	1.051	0.921	0.820	0.699	0.607	0.514	0.445	0.390	0.338
0.241	3.7	103	148	202	264	335	414	499	646	811	1061	1345	1661	2104
		2.329	1.846	1.518	1.283	1.106	0.969	0.863	0.735	0.639	0.541	0.468	0.411	0.355
8.693	3.8	105	152	208	272	344	425	513	663	833	1090	1381	1706	2161
		2.446	1.939	1.595	1.347	1.162	1.018	0.906	0.773	0.671	0.569	0.492	0.432	0.373
9.156	3.9	108	156	213	279	353	437	526	681	855	1119	1417	1751	2218
		2.566	2.034	1.673	1.413	1.219	1.068	0.951	0.811	0.704	0.597	0.516	0.453	0.392
9.632	4.0	111	160	219	286	362	448	540	698	877	1147	1454	1790	2275
		2.689	2.131	1.753	1.481	1.277	1.149	0.997	0.850	0.738	0.625	0.541	0.475	0.411
10.120	4.1	114	164	224	293	371	459	553	716	899	1176	1490	1841	2332
		2.814	2.231	1.835	1.550	1.337	1.172	1.043	0.889	0.772	0.655	0.566	0.497	0.430
10.619	4.2	116	168	229	300	380	470	567	733	921	1205	1526	1886	2389
		2.942	2.332	1.918	1.621	1.398	1.225	1.091	0.930	0.808	0.685	0.592	0.520	0.450
11.131	4.3	119	172	235	307	390	481	580	751	943	1233	1563	1931	2446
		3.073	2.436	2.004	1.693	1.461	1.280	1.140	0.972	0.844	0.715	0.618	0.543	0.470
11.655	4.4	122	176	240	315	399	493	594	768	965	1262	1599	1976	2502
		3.207	2.542	2.091	1.767	1.524	1.336	1.189	1.014	0.881	0.747	0.645	0.567	0.491
12.191	4.5	125	180	246	322	408	504	607	786	987	1291	1635	2021	2559
		3.343	2.650	2.180	1.842	1.589	1.393	1.240	1.057	0.918	0.778	0.673	0.591	0.512
12.738	4.6	127	184	251	329	417	515	621	803	1009	1319	1672	2065	2616
		3.482	2.760	2.271	1.919	1.655	1.451	1.292	1.102	0.957	0.811	0.701	0.616	0.533
13.298	4.7	130	188	257	336	426	526	634	821	1031	1348	1708	2110	2673
		3.623	2.873	2.364	1.997	1.723	1.510	1.345	1.147	0.996	0.844	0.730	0.641	0.555
13.870	4.8	133	192	262	343	435	537	648	838	1053	1377	1744	2155	2730
		3.768	2.987	2.458	2.077	1.792	1.571	1.398	1.192	1.036	0.878	0.759	0.667	0.577
14.454	4.9	136	196	268	350	444	549	661	856	1075	1405	1781	2200	2787
		3.915	3.104	2.554	2.159	1.862	1.632	1.453	1.239	1.077	0.912	0.789	0.693	0.600
15.050	5.0	139	200	273	357	453	560	675	873	1097	1434	1817	2245	2844
		4.065	3.223	2.652	2.241	1.933	1.659	1.509	1.287	1.118	0.948	0.819	0.720	0.623
15.058	5.1	141	204	279	365	462	571	688	890	1118	1463	1853	2290	2901
		4.217	3.344	2.751	2.326	2.006	1.759	1.566	1.335	1.160	0.983	0.850	0.747	0.646
16.278	5.2	144	208	284	372	471	582	702	908	1140	1491	1890	2335	2957
		4.372	3.467	2.853	2.411	2.080	1.823	1.624	1.335	1.203	1.020	0.882	0.775	0.670
16.910	5.3	147	212	290	379	480	593	715	925	1162	1520	1926	2380	3014
		4.530	3.592	2.956	2.499	2.153	1.889	1.683	1.435	1.247	1.057	0.914	0.803	0.695
17.554	5.4	150	216	295	386	489	605	729	943	1184	1549	1962	2425	3071
		4.691	3.720	3.061	2.587	2.232	1.957	1.742	1.486	1.291	1.094	0.946	0.831	0.720
18.211	5.5	152	220	300	393	498	616	742	960	1206	1578	1999	2470	3128
		4.854	3.850	3.168	2.678	2.310	2.025	1.803	1.538	1.336	1.133	0.980	0.860	0.745
18.879	5.6	155	224	306	400	507	627	756	978	1228	1606	2035	2514	3185
		5.020	3.981	3.276	2.769	2.389	2.094	1.865	1.591	1.382	1.172	1.013	0.890	0.770
19.559	5.7	158	228	311	407	516	638	769	995	1250	1635	2071	2559	3242
		5.189	4.115	3.386	2.863	2.470	2.165	1.928	1.644	1.429	1.211	1.047	0.920	0.796
20.251	5.8	161	232	317	415	525	649	783	1013	1272	1664	2108	2604	3299
		5.360	4.251	3.499	2.957	2.551	2.237	1.992	1.699	1.476	1.251	1.082	0.961	0.823
20.956	5.9	163	236	322	422	535	661	796	1030	1294	1692	2144	2649	3256
		5.534	4.380	3.612	3.054	2.635	2.310	2.057	1.754	1.524	1.292	1.118	0.982	0.850

(续)

动压 /Pa	风速 /(m /s)	外径 D /mm												
		500	560	630	700	800	900	1000	1120	1250	1400	1600	1800	2000
7.375	3.5	2459	3081	3903	4821	6302	7980	9856	12369	15388	19313	25239	31956	39465
		0.282	0.245	0.213	0.187	0.159	0.138	0.121	0.106	0.098	0.081	0.069	0.060	0.053
7.802	3.6	2529	3169	4014	4959	6482	8208	10138	12723	15828	19865	25960	32869	40593
		0.297	0.259	0.224	0.197	0.167	0.145	0.128	0.111	0.098	0.085	0.073	0.063	0.056
8.241	3.7	2600	3257	4126	5097	6662	8436	10420	13076	16268	20417	26681	33782	41721
		0.312	0.272	0.236	0.207	0.176	0.153	0.134	0.117	0.103	0.090	0.076	0.066	0.059
8.693	3.8	2670	3345	4237	5235	6842	8664	10701	13429	16707	20969	27402	34695	42848
		0.328	0.286	0.248	0.218	0.185	0.161	0.141	0.123	0.108	0.094	0.080	0.070	0.062
9.156	3.9	2740	3433	4349	5372	7022	8892	10983	13783	17147	21520	28123	35608	43976
		0.344	0.300	0.260	0.229	0.194	0.169	0.148	0.129	0.113	0.099	0.084	0.073	0.065
9.632	4.0	2810	3521	4460	5510	7202	9120	11265	14136	17587	22072	28844	36521	45103
		0.361	0.315	0.272	0.240	0.204	0.177	0.156	0.136	0.119	0.104	0.088	0.077	0.068
10.120	4.1	2881	3609	4572	5648	7382	9348	11546	14490	18026	22624	29566	37435	46231
		0.378	0.329	0.285	0.251	0.213	0.185	0.163	0.142	0.125	0.109	0.093	0.080	0.071
10.619	4.2	2951	3698	4683	5786	7562	9576	11828	14843	18466	23176	30287	38348	47358
		0.395	0.345	0.298	0.262	0.223	0.193	0.170	0.149	0.130	0.114	0.097	0.084	0.074
11.131	4.3	3021	3786	4795	5923	7742	9804	12109	15197	18906	23728	31008	39261	48486
		0.413	0.360	0.312	0.274	0.233	0.202	0.178	0.155	0.136	0.119	0.101	0.088	0.078
11.655	4.4	3092	3874	4906	6061	7922	10032	12391	15550	19345	24279	31729	40174	49614
		0.431	0.376	0.325	0.286	0.243	0.211	0.186	0.162	0.142	0.124	0.106	0.092	0.081
12.191	4.5	3162	3962	5018	6199	8102	10260	12673	15903	19785	24831	32450	41087	50741
		0.450	0.392	0.339	0.299	0.254	0.220	0.194	0.169	0.148	0.129	0.110	0.096	0.084
12.738	4.6	3232	4050	5129	6337	8282	10488	12954	16257	20225	25388	33171	42000	51869
		0.468	0.408	0.354	0.311	0.265	0.229	0.202	0.176	0.155	0.135	0.115	0.100	0.088
13.298	4.7	3302	4138	5241	6474	8462	10716	13236	16610	20664	25935	33892	42913	52996
		0.488	0.425	0.368	0.324	0.275	0.239	0.210	0.183	0.161	0.140	0.120	0.104	0.092
13.870	4.8	3373	4226	5352	6612	8643	10944	13517	16964	21104	26487	34613	43826	54124
		0.507	0.442	0.383	0.337	0.287	0.248	0.219	0.191	0.167	0.146	0.124	0.108	0.095
14.454	4.9	3443	4314	5464	6750	8823	11172	13799	17317	21544	27038	35334	44739	55252
		0.527	0.460	0.398	0.350	0.298	0.258	0.227	0.198	0.174	0.152	0.129	0.112	0.099
15.050	5.0	3513	4402	5575	6888	9003	11400	14081	17670	21983	27590	36056	45652	56379
		0.548	0.477	0.413	0.364	0.309	0.268	0.236	0.206	0.181	0.158	0.134	0.117	0.103
15.658	5.1	3583	4490	5787	7025	9183	11628	14362	18024	22423	28142	36777	46565	57507
		0.568	0.495	0.429	0.377	0.321	0.278	0.245	0.214	0.188	0.164	0.139	0.121	0.107
16.278	5.2	3654	4578	5798	7163	9363	11856	14644	18377	22863	28694	37498	47478	58634
		0.589	0.514	0.445	0.391	0.333	0.289	0.254	0.222	0.195	0.170	0.145	0.126	0.111
16.910	5.3	3724	4666	5910	7301	9543	12084	14926	18731	23302	29246	38219	48391	59762
		0.611	0.532	0.461	0.406	0.345	0.299	0.263	0.230	0.202	0.176	0.150	0.130	0.115
17.554	5.4	3794	4754	6022	7439	9723	12312	15207	19084	23742	29797	38940	49304	60889
		0.633	0.551	0.478	0.420	0.357	0.310	0.273	0.238	0.209	0.182	0.155	0.135	0.119
18.211	5.5	3864	4842	6133	7576	9903	12540	15489	19437	24182	30349	39661	50217	62017
		0.655	0.571	0.494	0.435	0.370	0.321	0.283	0.246	0.216	0.189	0.161	0.140	0.123
18.879	5.6	3935	4930	6245	7714	10083	12768	15770	19791	24621	30901	40382	51130	63145
		0.677	0.590	0.511	0.450	0.383	0.332	0.292	0.255	0.224	0.195	0.166	0.144	0.127
19.559	5.7	4005	5018	6356	7852	10263	12996	16052	20144	25061	31453	41103	52043	64272
		0.700	0.610	0.529	0.465	0.396	0.343	0.302	0.264	0.231	0.202	0.172	0.149	0.132
20.251	5.8	4075	5106	6468	7990	10443	13224	16334	20498	25501	32005	41824	52956	65400
		0.723	0.631	0.546	0.481	0.409	0.355	0.312	0.272	0.239	0.209	0.178	0.154	0.136
20.956	5.9	4145	5194	6579	8127	10623	13452	16615	20851	25940	32556	42546	53869	66527
		0.747	0.651	0.564	0.496	0.422	0.366	0.322	0.281	0.247	0.215	0.184	0.159	0.141

(续)

动压 /Pa	风速 /(m /s)	外径 D/mm												
		100	120	140	160	180	200	220	250	280	320	360	400	450
21.672	6.0	166	240	328	429	544	672	810	1048	1316	1721	2180	2694	3412
		5.711	4.530	3.728	3.151	2.719	2.384	2.123	1.810	1.573	1.334	1.153	1.013	0.877
22.400	6.1	169	244	333	436	553	683	823	1065	1338	1750	2217	2739	3469
		5.890	4.672	3.845	3.251	2.805	2.459	2.190	1.868	1.623	1.376	1.190	1.045	0.905
23.141	6.2	172	248	339	443	562	694	837	1083	1360	1778	2253	2784	3526
		6.073	4.817	3.964	3.351	2.891	2.535	2.258	1.926	1.673	1.418	1.227	1.078	0.933
23.893	6.3	175	252	344	450	571	705	850	1100	1382	1807	2289	2829	3583
		6.257	4.963	4.085	3.453	2.980	2.612	2.326	1.984	1.724	1.462	1.264	1.111	0.961
24.658	6.4	177	256	350	457	580	717	864	1117	1404	1836	2326	2874	3640
		6.445	5.112	4.208	3.557	3.069	2.691	2.396	2.044	1.776	1.506	1.302	1.144	0.990
25.435	6.5	180	260	355	465	589	728	877	1135	1425	1864	2362	2919	3697
		6.635	5.263	4.332	3.662	3.160	2.770	2.467	2.105	1.829	1.550	1.341	1.178	1.020
26.223	6.6	183	264	361	472	598	739	891	1152	1447	1893	2398	2963	3754
		6.828	5.416	4.458	3.769	3.252	2.851	2.539	2.166	1.882	1.596	1.380	1.213	1.050
27.024	6.7	186	268	366	479	607	750	904	1170	1469	1922	2435	3008	3811
		7.023	5.571	4.586	3.877	3.345	2.933	2.612	2.228	1.936	1.642	1.420	1.247	1.080
27.836	6.8	188	272	371	486	616	761	918	1187	1491	1950	2471	3053	3867
		7.222	5.729	4.715	3.987	3.440	3.016	2.686	2.291	1.991	1.688	1.460	1.283	1.110
28.661	6.9	191	276	377	493	625	773	931	1205	1513	1979	2507	3098	3924
		7.423	5.888	4.847	4.098	3.536	3.100	2.761	2.355	2.047	1.735	1.501	1.319	1.142
29.498	7.0	194	280	382	500	634	784	945	1222	1535	2008	2544	3143	3981
		7.626	6.050	4.980	4.210	3.633	3.185	2.837	2.420	2.103	1.783	1.542	1.355	1.173
30.347	7.1	197	284	388	508	643	795	958	1240	1557	2036	2580	3188	4038
		7.832	6.214	5.115	4.324	3.731	3.272	2.914	2.486	2.160	1.831	1.584	1.392	1.205
31.208	7.2	200	288	393	515	652	806	972	1257	1579	2065	2616	3233	4095
		8.041	6.380	5.251	4.440	3.831	3.359	2.992	2.552	2.218	1.880	1.627	1.429	1.237
32.081	7.3	202	292	399	522	661	817	985	1275	1601	2094	2653	3278	4152
		8.253	6.548	5.390	4.557	3.932	3.448	3.071	2.620	2.276	1.930	1.670	1.467	1.270
32.966	7.4	205	296	404	529	670	829	999	1292	1623	2122	2689	3323	4209
		8.467	6.718	5.530	4.676	4.035	3.538	3.151	2.688	2.336	1.980	1.713	1.505	1.303
33.863	7.5	208	300	410	536	679	840	1012	1310	1645	2151	2725	3368	4266
		8.684	6.890	5.672	4.796	4.138	3.628	3.232	2.757	2.396	2.031	1.757	1.544	1.337
34.772	7.6	211	304	415	543	689	851	1026	1327	1667	2180	2762	3412	4322
		8.904	7.064	5.815	4.917	4.243	3.720	3.314	2.827	2.456	2.083	1.802	1.583	1.371
35.693	7.7	213	308	421	550	698	862	1039	1344	1689	2209	2798	3457	4379
		9.126	7.241	5.961	5.040	4.349	3.813	3.397	2.898	2.518	2.135	1.847	1.623	1.405
36.626	7.8	216	312	426	558	707	873	1053	1362	1711	2237	2834	3502	4436
		9.351	7.419	6.108	5.104	4.457	3.908	3.481	2.969	2.580	2.188	1.893	1.663	1.440
37.571	7.9	219	316	432	565	716	885	1066	1379	1732	2266	2871	3547	4493
		9.579	7.600	6.257	5.290	4.565	4.003	3.566	3.042	2.643	2.241	1.939	1.704	1.475
38.528	8.0	222	320	437	572	725	896	1080	1397	1754	2295	2907	3592	4550
		9.809	7.783	6.407	5.418	4.675	4.099	3.651	3.115	2.707	2.296	1.986	1.745	1.511
39.497	8.1	224	324	442	579	734	907	1093	1414	1776	2323	2943	3637	4607
		10.042	7.968	6.560	5.547	4.787	4.197	3.738	3.189	2.772	2.350	2.033	1.786	1.547
40.478	8.2	227	328	448	586	743	918	1107	1432	1798	2352	2980	3682	4664
		10.278	8.155	6.714	5.677	4.899	4.296	3.826	3.264	2.837	2.406	2.081	1.829	1.583
41.472	8.3	230	332	453	593	752	929	1120	1449	1820	2381	3016	3727	4721
		10.516	8.344	6.869	5.809	5.013	4.396	3.915	3.340	2.903	2.462	2.129	1.871	1.620
42.477	8.4	233	336	459	600	761	941	1134	1467	1842	2409	3052	3772	4777
		10.758	8.536	7.027	5.942	5.128	4.497	4.005	3.417	2.969	2.518	2.178	1.914	1.657

(续)

动压 /Pa	风速 /(m /s)	外径 D /mm												
		500	560	630	700	800	900	1000	1120	1250	1400	1600	1800	2000
21.672	6.0	4216	5282	6691	8265	10803	13680	16897	21204	26380	33108	43267	54782	67655
		0.771	0.672	0.582	0.512	0.436	0.378	0.333	0.290	0.255	0.222	0.189	0.165	0.145
22.400	6.1	4286	5370	6802	8403	10983	13908	17178	21558	26820	33060	43988	55695	68783
		0.795	0.693	0.601	0.529	0.450	0.390	0.343	0.300	0.260	0.229	0.195	0.170	0.150
23.141	6.2	4356	5458	6914	8541	11163	14136	17460	21911	27259	34212	44709	56608	69910
		0.820	0.715	0.620	0.545	0.464	0.402	0.354	0.309	0.271	0.237	0.202	0.175	0.154
23.893	6.3	4427	5546	7025	8678	11343	14364	17742	22265	27699	34764	45430	57521	71038
		0.845	0.737	0.638	0.562	0.478	0.414	0.365	0.318	0.279	0.244	0.208	0.181	0.159
24.658	6.4	4497	5634	7137	8816	11523	14592	18023	22618	28139	35315	46151	58434	72165
		0.871	0.759	0.658	0.579	0.492	0.427	0.376	0.328	0.288	0.251	0.214	0.186	0.164
25.435	6.5	4567	5722	7248	8954	11703	14820	18305	22971	28578	35867	46872	59347	73293
		0.897	0.782	0.677	0.596	0.507	0.440	0.387	0.338	0.296	0.259	0.220	0.192	0.169
26.223	6.6	4637	5810	7360	9092	11883	15048	18586	23325	29018	36419	47593	60260	74420
		0.923	0.805	0.697	0.613	0.522	0.453	0.399	0.348	0.305	0.266	0.227	0.197	0.174
27.024	6.7	4708	5898	7471	9229	12063	15276	18868	23678	29458	36971	48314	61174	75548
		0.949	0.828	0.717	0.631	0.537	0.466	0.410	0.358	0.314	0.274	0.233	0.203	0.179
27.836	6.8	4778	5986	7583	9367	12244	15504	19150	24032	29897	37523	49036	62087	76676
		0.976	0.851	0.738	0.649	0.552	0.479	0.422	0.368	0.323	0.282	0.240	0.209	0.184
28.661	6.9	4848	6074	7694	9505	12424	15732	19431	24385	30337	38075	49757	63000	77803
		1.004	0.875	0.758	0.667	0.568	0.492	0.434	0.378	0.332	0.290	0.247	0.214	0.189
29.498	7.0	4918	6163	7806	9643	12604	15960	19713	24739	30777	38026	50478	63913	78931
		1.031	0.899	0.779	0.686	0.583	0.506	0.445	0.389	0.341	0.298	0.254	0.220	0.194
30.347	7.1	4989	6251	7917	9781	12784	16188	19995	25092	31216	39178	51199	64826	80058
		1.059	0.924	0.800	0.704	0.599	0.520	0.458	0.399	0.350	0.306	0.261	0.226	0.200
31.208	7.2	5059	6339	8029	9918	12964	16416	20276	25445	31656	39730	51920	65739	81186
		1.088	0.948	0.822	0.723	0.615	0.534	0.470	0.410	0.360	0.314	0.268	0.233	0.205
32.081	7.3	5129	6427	8140	10056	13144	16644	20558	25799	32096	40282	52641	66652	82314
		1.117	0.974	0.844	0.742	0.631	0.548	0.482	0.421	0.369	0.322	0.275	0.239	0.211
32.966	7.4	5199	6515	8252	10194	13324	16872	20839	26152	32535	40834	53362	67565	83441
		1.146	0.999	0.866	0.762	0.648	0.562	0.495	0.432	0.379	0.331	0.282	0.245	0.216
33.863	7.5	5270	6603	8363	10332	13504	17100	21121	26506	32975	41385	54083	68478	84569
		1.175	1.025	0.888	0.781	0.665	0.577	0.508	0.443	0.389	0.339	0.289	0.251	0.222
34.772	7.6	5340	6691	8475	10469	13684	17328	21403	26859	33415	41937	54804	69391	85696
		1.205	1.051	0.910	0.801	0.682	0.591	0.521	0.454	0.399	0.348	0.297	0.258	0.227
35.693	7.7	5410	6779	8586	10607	13864	17556	21684	27212	33854	42489	55526	70304	86824
		1.235	1.077	0.933	0.821	0.699	0.606	0.534	0.466	0.409	0.357	0.304	0.264	0.233
36.626	7.8	5480	6867	8698	10745	14044	17784	21966	27566	34294	43041	56247	71217	87951
		1.266	1.104	0.956	0.842	0.716	0.621	0.547	0.477	0.419	0.366	0.312	0.271	0.239
37.571	7.9	5551	6955	8809	10883	14224	18012	22247	27919	34734	43593	56968	72130	89079
		1.297	1.131	0.980	0.862	0.734	0.636	0.560	0.489	0.429	0.375	0.319	0.277	0.245
38.528	8.0	5621	7043	8921	11020	14404	18240	22529	28273	35173	44144	57089	73043	90207
		1.328	1.158	1.004	0.883	0.751	0.652	0.574	0.501	0.439	0.384	0.327	0.284	0.251
39.497	8.1	5691	7131	9032	11158	14584	18468	22811	28626	35613	44696	58410	73956	91334
		1.360	1.186	1.028	0.904	0.769	0.667	0.588	0.513	0.450	0.393	0.335	0.291	0.257
40.478	8.2	5762	7219	9144	11296	14764	18696	23092	28979	36053	45248	59131	74869	92462
		1.392	1.214	1.052	0.926	0.787	0.683	0.602	0.525	0.461	0.402	0.343	0.298	0.263
41.472	8.3	5832	7307	9255	11434	14944	18924	23374	29333	36492	45800	59852	75782	93589
		1.424	1.242	1.076	0.947	0.806	0.699	0.616	0.537	0.471	0.411	0.351	0.305	0.269
42.477	8.4	5902	7395	9367	11571	15124	19152	23656	29686	36932	46352	60573	76695	94717
		1.457	1.271	1.101	0.969	0.824	0.715	0.630	0.550	0.482	0.421	0.359	0.312	0.275

(续)

动压 /Pa	风速 /(m /s)	外经 D/mm												
		100	120	140	160	180	200	220	250	280	320	360	400	450
43.495	8.5	236	340	464	608	770	952	1147	1484	1864	2438	3089	3817	4834
		11.001	8.729	7.186	6.077	5.244	4.599	4.096	3.495	3.037	2.575	2.228	1.958	1.695
44.524	8.6	238	344	470	615	779	963	1161	1502	1886	2467	3125	3861	4891
		11.248	8.925	7.348	6.213	5.362	4.702	4.188	3.573	3.105	2.633	2.278	2.002	1.733
45.565	8.7	241	348	475	622	788	974	1174	1519	1908	2495	3161	3906	4948
		11.497	9.122	7.510	6.351	5.481	4.806	4.281	3.652	3.174	2.692	2.329	2.046	1.772
46.619	8.8	244	352	481	629	797	985	1188	1536	1930	2524	3198	3951	5005
		11.748	9.322	7.675	6.490	5.601	4.912	4.375	3.732	3.244	2.751	2.380	2.091	1.810
47.684	8.9	247	356	486	636	806	997	1201	1554	1952	2553	3234	3996	5062
		12.003	9.524	7.841	6.631	5.723	5.018	4.470	3.813	3.314	2.811	2.431	2.137	1.850
48.762	9.0	249	360	492	643	815	1008	1215	1571	1974	2581	3270	4041	5119
		12.260	9.728	8.009	6.773	5.845	5.126	4.566	3.895	3.385	2.871	2.484	2.183	1.890
49.852	9.1	252	364	497	650	824	1019	1228	1589	1996	2610	3307	4086	5176
		12.519	9.935	8.179	6.917	5.969	5.235	4.663	3.978	3.457	2.932	2.537	2.229	1.930
50.953	9.2	255	368	503	658	833	1030	1242	1606	2018	2639	3343	4131	5232
		12.782	10.143	8.351	7.062	6.095	5.344	4.761	4.062	3.530	2.994	2.590	2.276	1.970
52.067	9.3	258	372	508	665	843	1041	1255	1624	2040	2667	3380	4176	5289
		13.047	10.353	8.524	7.209	6.221	5.455	4.860	4.146	3.603	3.056	2.644	2.323	2.011
53.193	9.4	260	376	514	672	852	1053	1269	1641	2061	2696	3416	4221	5346
		13.315	10.566	8.699	7.357	6.349	5.568	4.959	4.231	3.677	3.119	2.698	2.371	2.053
54.331	9.5	263	380	519	679	861	1064	1282	1659	2083	2725	3452	4266	5403
		13.585	10.780	8.876	7.506	6.478	5.681	5.060	4.317	3.752	3.182	2.753	2.419	2.095
55.480	9.6	266	384	524	686	870	1075	1296	1676	2105	2753	3489	4310	5460
		13.858	10.997	9.055	7.657	6.609	5.795	5.162	4.404	3.828	3.246	2.809	2.468	2.137
56.642	9.7	269	388	530	693	879	1086	1309	1694	2127	2782	3525	4355	5517
		14.134	11.216	9.235	7.810	6.740	5.911	5.265	4.492	3.904	3.311	2.865	2.517	2.180
57.816	9.8	272	392	535	701	888	1097	1323	1711	2149	2811	3561	4400	5574
		14.412	11.437	9.417	7.964	6.873	6.027	5.369	4.581	3.981	3.377	2.921	2.567	2.223
59.002	9.9	274	396	541	708	897	1108	1336	1729	2171	2840	3598	4445	5631
		14.693	11.660	9.601	8.119	7.007	6.145	5.474	4.670	4.059	3.443	2.978	2.617	2.266
60.200	10.0	277	400	546	715	906	1120	1350	1746	2193	2868	3634	4490	5687
		14.977	11.885	9.786	8.276	7.143	6.264	5.580	4.761	4.138	3.509	3.036	2.668	2.310
61.410	10.1	280	404	552	722	915	1131	1363	1763	2215	2897	3670	4535	5744
		15.263	12.113	9.973	8.435	7.280	6.384	5.687	4.852	4.217	3.577	3.094	2.719	2.354
62.632	10.2	283	408	557	729	924	1142	1377	1781	2237	2926	3707	4580	5801
		15.552	12.342	10.162	8.594	7.418	6.505	5.795	4.944	4.297	3.644	3.153	2.771	2.399
63.866	10.3	285	412	563	736	933	1153	1390	1798	2259	2954	3743	4625	5858
		15.844	12.574	10.353	8.756	7.557	6.627	5.904	5.037	4.378	3.713	3.212	2.823	2.444
65.112	10.4	288	416	568	743	947	1164	1404	1816	2281	2983	3779	4670	5915
		16.138	12.808	10.546	8.919	7.671	6.750	6.013	5.131	4.459	3.782	3.272	2.876	2.490
66.371	10.5	291	420	574	751	951	1176	1417	1833	2303	3012	3816	4715	5972
		16.435	13.043	10.740	9.083	7.839	6.875	6.124	5.225	4.542	3.852	3.333	2.929	2.536
67.641	10.6	294	424	579	758	960	1187	1431	1851	2325	3040	3852	4759	6029
		16.735	13.281	10.936	9.249	7.982	7.000	6.236	5.321	4.625	3.922	3.393	2.982	2.582
68.923	10.7	297	428	585	765	969	1198	1444	1868	2347	3069	3896	4804	6086
		17.037	13.521	11.134	9.418	8.127	7.127	6.349	5.417	4.708	3.993	3.451	3.036	2.629
70.217	10.8	299	432	590	772	978	1209	1458	1886	2368	3098	3925	4849	6142
		17.342	13.764	11.333	9.585	8.273	7.255	6.463	5.514	4.793	4.065	3.517	3.091	2.676
71.524	10.9	302	436	595	779	987	1220	1471	1903	2390	3126	3961	4894	6199
		17.650	14.008	11.534	9.755	8.419	7.384	6.578	5.612	4.878	4.137	3.580	3.146	2.724

(续)

动压 /Pa	风速 /(m /s)	外径 D /mm												
		500	560	630	700	800	900	1000	1120	1250	1400	1600	1800	2000
43.495	8.5	5972	7483	9478	11709	15304	19380	23937	30040	37372	46903	61294	77608	95845
		1.490	1.300	1.126	0.991	0.843	0.731	0.644	0.562	0.493	0.431	0.367	0.319	0.281
44.524	8.6	6043	7571	9590	11847	15484	19608	24219	30393	37811	47455	62016	78521	96972
		1.524	1.329	1.151	1.013	0.862	0.748	0.659	0.575	0.504	0.440	0.375	0.326	0.288
45.565	8.7	6113	7659	9701	11985	15665	19836	24500	30746	38251	48007	62737	79434	98100
		1.558	1.358	1.177	1.036	0.881	0.764	0.673	0.588	0.516	0.450	0.384	0.333	0.294
46.619	8.8	6183	7747	9813	12122	15845	20064	24782	31100	38691	48559	63458	80347	99227
		1.592	1.388	1.203	1.059	0.901	0.781	0.688	0.601	0.527	0.460	0.392	0.341	0.301
47.684	8.9	6253	7835	9924	12260	16025	20292	25064	31453	39130	49111	64179	81260	100355
		1.627	1.418	1.229	1.082	0.920	0.798	0.703	0.614	0.538	0.470	0.401	0.348	0.307
48.762	9.0	6324	7923	10036	12398	16205	20520	25345	31807	39570	49662	64900	82173	101482
		1.662	1.449	1.256	1.105	0.940	0.816	0.718	0.627	0.550	0.480	0.409	0.356	0.314
49.852	9.1	6394	8011	10147	12536	16385	20748	25627	32160	40010	50106	65621	83086	102610
		1.697	1.480	1.282	1.128	0.960	0.833	0.734	0.640	0.562	0.491	0.418	0.363	0.320
50.953	9.2	6464	8099	10259	12673	16565	20976	25908	32514	40449	50766	66342	83999	103738
		1.733	1.511	1.309	1.152	0.980	0.850	0.749	0.654	0.574	0.501	0.427	0.371	0.327
52.067	9.3	6534	8187	10370	12811	16745	21204	26190	32867	40889	51318	67063	84912	104865
		1.769	1.542	1.337	1.176	1.001	0.868	0.765	0.667	0.580	0.511	0.436	0.379	0.334
51.193	9.4	6605	8275	10482	12940	16925	21433	26472	33220	41329	51870	67784	85820	105993
		1.805	1.574	1.364	1.201	1.021	0.886	0.780	0.681	0.598	0.522	0.445	0.386	0.341
54.330	9.5	6675	8353	10593	13087	17105	21661	26753	33574	41769	52421	68506	86739	107120
		1.842	1.606	1.392	1.225	1.042	0.904	0.796	0.695	0.610	0.532	0.454	0.394	0.348
55.480	9.6	6745	8451	10705	13224	17285	21889	27035	33927	42208	52973	69227	87652	108248
		1.879	1.639	1.420	1.250	1.063	0.922	0.813	0.709	0.622	0.543	0.463	0.402	0.355
56.642	9.7	6815	8540	10816	13362	17465	22117	27317	34281	42648	53525	69948	88565	109376
		1.917	1.671	1.448	1.275	1.085	0.941	0.829	0.723	0.635	0.554	0.472	0.410	0.362
57.810	9.8	6886	8628	10928	13500	17645	22345	27598	34634	43088	54077	70669	89478	110503
		1.954	1.704	1.477	1.300	1.106	0.959	0.845	0.738	0.647	0.565	0.482	0.419	0.369
59.002	9.9	6955	8716	11039	13638	17825	22573	27880	34987	43527	54629	71390	90391	111631
		1.993	1.738	1.506	1.325	1.128	0.978	0.862	0.752	0.660	0.576	0.491	0.427	0.376
60.200	10.0	7026	8804	11151	13775	18005	22801	28161	35341	43967	55180	72111	91304	112758
		2.031	1.771	1.535	1.351	1.150	0.997	0.878	0.767	0.673	0.587	0.501	0.435	0.384
61.410	10.1	7096	8892	11262	13913	18185	23029	28443	35694	44407	55732	72832	92217	113886
		2.070	1.805	1.565	1.377	1.172	1.016	0.895	0.781	0.686	0.599	0.510	0.443	0.391
62.632	10.2	7167	8980	11374	14051	18365	23257	28725	36048	44846	56284	73553	93130	115013
		2.110	1.840	1.594	1.403	1.194	1.036	0.912	0.796	0.699	0.610	0.520	0.452	0.399
63.866	10.3	7237	9068	11485	14189	18545	23485	29006	36401	45286	56836	74274	94043	116141
		2.149	1.874	1.624	1.430	1.216	1.055	0.930	0.811	0.712	0.621	0.530	0.460	0.406
65.112	10.4	7307	9156	11597	14326	18725	23713	29288	36754	45726	57388	74996	94956	117269
		2.189	1.909	1.655	1.456	1.239	1.075	0.947	0.826	0.725	0.633	0.540	0.469	0.414
66.371	10.5	7378	9244	11708	14464	18905	23941	29569	37108	46165	57939	75717	95869	118396
		2.230	1.945	1.685	1.483	1.262	1.095	0.964	0.842	0.739	0.645	0.550	0.478	0.421
67.641	10.6	7448	9332	11820	14602	19086	24169	29851	37461	46605	58491	76438	96782	119524
		2.271	1.980	1.716	1.510	1.285	1.115	0.982	0.857	0.752	0.657	0.560	0.486	0.429
68.923	10.7	7518	9420	11932	14740	19266	24397	30133	37815	47045	59043	77159	97695	120651
		2.312	2.016	1.747	1.538	1.308	1.135	1.000	0.873	0.766	0.669	0.570	0.495	0.437
70.217	10.8	7588	9508	12043	14877	19446	24625	30414	38168	47484	59595	77880	98608	121779
		2.353	2.052	1.779	1.565	1.332	1.156	1.018	0.888	0.779	0.681	0.580	0.504	0.445
71.524	10.9	7659	9596	12155	15015	19626	24853	30696	38521	47924	60147	78601	99521	122907
		2.395	2.089	1.810	1.593	1.356	1.176	1.036	0.904	0.793	0.693	0.591	0.513	0.453

(续)

动压 /Pa	风速 /(m/s)	外径 D/mm												上行是风量/(m^3/h) 下行是单位长度摩擦阻力/(Pa/m)	
		100	120	140	160	180	200	220	250	280	320	360	400	450	
72.842	11.0	305	440	601	786	997	1232	1485	1921	2412	3155	3997	4939	6256	
		17.960	14.254	11.737	9.927	8.568	7.514	6.693	5.711	4.964	4.210	3.643	3.201	2.772	
74.172	11.1	308	444	606	793	1006	1243	1498	1938	2434	3184	4034	4984	6313	
		18.273	14.503	11.942	10.100	8.717	7.645	6.810	5.811	5.051	4.284	3.706	3.257	2.820	
75.515	11.2	310	448	612	801	1015	1254	1512	1956	2456	3212	4070	5029	6370	
		18.589	14.753	12.148	10.274	8.888	7.777	6.928	5.911	5.138	4.358	3.770	3.314	2.869	
76.869	11.3	313	452	617	808	1024	1265	1525	1973	2478	3241	4106	5074	6427	
		18.907	15.006	12.356	10.450	9.020	7.910	7.047	6.013	5.226	4.433	3.835	3.370	2.918	
78.236	11.4	316	456	623	815	1033	1276	1539	1990	2500	3270	4143	5119	6484	
		19.228	15.261	12.566	10.628	9.173	8.045	7.167	6.115	5.315	4.508	3.900	3.428	2.968	
79.615	11.5	319	460	628	822	1042	1288	1552	2008	2522	3298	4179	5164	6541	
		19.552	15.518	12.778	10.807	9.328	8.180	7.288	6.218	5.405	4.584	3.966	3.486	3.018	
81.005	11.6	321	464	634	829	1051	1299	1566	2025	2544	3327	4215	5208	6597	
		19.878	15.777	12.991	10.988	9.484	8.317	7.409	6.322	5.495	4.661	4.033	3.544	3.069	
82.408	11.7	324	468	639	836	1060	1310	1579	2043	2566	3356	4252	5253	6654	
		20.207	16.038	13.206	11.170	9.641	8.455	7.532	6.427	5.586	4.738	4.099	3.603	3.120	
83.822	11.8	327	472	645	843	1069	1321	1593	2060	2588	3384	4288	5298	6711	
		20.539	16.301	13.423	11.353	9.799	8.594	7.656	6.533	5.678	4.816	4.167	3.662	3.171	
85.249	11.9	330	476	650	851	1078	1332	1606	2078	2610	3413	4324	5343	6768	
		20.873	16.567	13.642	11.538	9.959	8.734	7.781	6.639	5.771	4.895	4.235	3.722	3.223	
86.688	12.0	333	480	656	858	1087	1344	1620	2095	2632	3442	4361	5388	6825	
		21.210	16.834	13.862	11.724	10.120	8.875	7.906	6.746	5.864	4.974	4.303	3.782	3.275	
88.139	12.1	335	484	661	865	1096	1355	1633	2113	2654	3471	4397	5433	6882	
		21.549	17.104	14.084	11.912	10.282	9.017	8.033	6.855	5.958	5.054	4.372	3.843	3.327	
89.602	12.2	338	488	666	872	1105	1366	1647	2130	2675	3499	4433	5478	6939	
		21.892	17.375	14.308	12.102	10.445	9.161	8.161	6.964	6.053	5.134	4.442	3.904	3.380	
91.077	12.3	341	492	672	879	1114	1377	1660	2148	2697	3528	4470	5523	6996	
		22.236	17.649	14.534	12.292	10.610	9.305	8.290	7.074	6.148	5.215	4.512	3.965	3.434	
92.564	12.4	344	496	677	886	1123	1388	1674	2165	2719	3557	4506	5568	7052	
		22.584	17.925	14.761	12.485	10.776	9.451	8.419	7.184	6.245	5.297	4.583	4.028	3.487	
94.063	12.5	346	500	683	894	1132	1400	1687	2183	2741	3585	4542	5613	7109	
		22.934	18.203	14.990	12.678	10.943	9.598	8.550	7.296	6.342	5.379	4.654	4.090	3.542	
95.574	12.6	349	504	688	901	1141	1411	1701	2200	2763	3614	4579	5657	7166	
		23.287	18.483	15.221	12.874	11.112	9.745	8.682	7.408	6.439	5.462	4.726	4.153	3.596	
97.097	12.7	352	508	694	908	1151	1422	1714	2217	2785	3643	4615	5702	7223	
		23.643	18.766	15.453	13.070	11.282	9.894	8.815	7.522	6.538	5.545	4.798	4.217	3.651	
98.632	12.8	355	513	699	915	1160	1433	1728	2235	2807	3671	4651	5747	7280	
		24.001	19.050	15.687	13.269	11.453	10.044	8.948	7.636	6.637	5.630	4.871	4.281	3.707	
100.179	12.9	357	517	705	922	1169	1444	1741	2252	2829	3700	4688	5792	7337	
		24.362	19.337	15.923	13.468	11.625	10.196	9.083	7.751	6.737	5.714	4.944	4.345	3.763	
101.738	13.0	360	521	710	929	1178	1456	1756	2270	2851	3729	4724	5837	7394	
		24.725	19.625	16.161	13.669	11.799	10.348	9.219	7.866	6.838	5.800	5.018	4.410	3.819	
103.309	13.1	363	525	716	936	1187	1467	1768	2287	2873	3757	4760	5882	7451	
		25.091	19.916	16.401	13.872	11.974	10.501	9.355	7.983	6.939	5.886	5.093	4.476	3.876	
104.892	13.2	366	529	721	944	1196	1478	1782	2305	2895	3786	4797	5927	7507	
		25.460	20.209	16.642	14.076	12.150	10.656	9.493	8.101	7.041	5.970	5.168	4.542	3.933	
106.488	13.3	369	533	727	951	1205	1489	1795	2322	2917	3815	4833	5972	7564	
		25.832	20.504	16.885	14.281	12.327	10.812	9.632	8.219	7.144	6.060	5.243	4.608	3.990	
108.095	13.4	371	537	732	958	1214	1500	1809	2340	2939	3843	4869	6017	7621	
		26.206	20.801	17.129	14.488	12.506	10.968	9.772	8.338	7.248	6.148	5.319	4.675	4.048	

(续)

动压 /Pa	风速 /(m /s)	外径 D /mm												
		500	560	630	700	800	900	1000	1120	1250	1400	1600	1800	2000
72.842	11.0	7729	9684	12266	15153	19806	25081	30977	38875	48364	60698	79322	100434	124034
		2.437	2.126	1.842	1.621	1.380	1.197	1.054	0.920	0.807	0.705	0.601	0.522	0.461
74.172	11.1	7799	9772	12378	15291	19986	25309	31259	39228	48803	61250	80043	101347	125162
		2.480	2.163	1.874	1.650	1.404	1.218	1.073	0.936	0.822	0.717	0.612	0.531	0.469
75.515	11.2	7869	9860	12489	15428	20166	25537	31541	39582	49243	61802	80764	102260	126289
		2.523	2.200	1.907	1.678	1.428	1.239	1.091	0.952	0.836	0.730	0.622	0.541	0.477
76.869	11.3	7940	9948	12601	15566	20346	25765	31822	39935	49683	62354	81486	103173	127417
		2.566	2.238	1.940	1.707	1.453	1.260	1.110	0.969	0.850	0.742	0.633	0.550	0.485
78.236	11.4	8010	10036	12712	15704	20526	25993	32104	40288	50122	62906	82207	104086	128544
		2.610	2.276	1.973	1.736	1.477	1.282	1.129	0.985	0.865	0.755	0.644	0.559	0.493
79.615	11.5	8080	10124	12824	15842	20706	26221	32386	40642	50562	63458	82928	104999	129672
		2.654	2.315	2.006	1.766	1.502	1.303	1.148	1.002	0.879	0.768	0.655	0.569	0.502
81.005	11.6	8150	10212	12935	15979	20886	26440	32667	40995	51002	64009	83649	105912	130800
		2.699	2.353	2.040	1.795	1.528	1.325	1.167	1.019	0.894	0.781	0.665	0.578	0.510
82.408	11.7	8221	10300	13047	16117	21066	26677	32949	41349	51441	64561	84370	106825	131927
		2.743	2.393	2.074	1.825	1.553	1.347	1.187	1.036	0.909	0.794	0.677	0.588	0.519
83.822	11.8	8291	10388	13158	16255	21246	26905	33230	41702	51881	65113	85091	107738	133055
		2.788	2.432	2.108	1.855	1.578	1.369	1.206	1.053	0.924	0.807	0.688	0.598	0.527
85.249	11.9	8361	10476	13270	16393	21426	27133	33512	42056	52321	65665	85812	108651	134182
		2.834	2.472	2.142	1.885	1.604	1.392	1.226	1.070	0.939	0.820	0.699	0.607	0.536
86.688	12.0	8431	10564	13381	16530	21606	27361	33794	42409	52760	66217	86533	109564	135310
		2.880	2.512	2.177	1.916	1.630	1.414	1.246	1.087	0.954	0.833	0.710	0.617	0.545
88.139	12.1	8502	10652	13493	16668	21786	27589	34075	42762	53200	66768	87254	110478	136438
		2.926	2.552	2.212	1.947	1.656	1.437	1.266	1.105	0.970	0.847	0.722	0.627	0.553
89.602	12.2	8572	10740	13604	16806	21966	27817	34357	43116	53640	67320	87976	111391	137565
		2.973	2.593	2.247	1.978	1.683	1.460	1.286	1.122	0.985	0.860	0.733	0.637	0.562
91.077	12.3	8642	10828	13716	16944	22146	28045	34638	43469	54079	67872	88697	112304	138693
		3.020	2.634	2.283	2.009	1.709	1.483	1.306	1.140	1.001	0.874	0.745	0.647	0.571
92.564	12.4	8713	10916	13827	17081	22326	28273	34920	43823	54519	68424	89418	113217	139820
		3.067	2.675	2.318	2.040	1.736	1.506	1.327	1.158	1.016	0.887	0.757	0.657	0.580
94.063	12.5	8783	11005	13939	17219	22507	28501	35202	44176	54959	68976	90139	114130	140948
		3.115	2.716	2.354	2.072	1.763	1.530	1.348	1.176	1.032	0.901	0.768	0.668	0.589
95.574	12.6	8853	11093	14050	17357	22687	28729	35483	44529	55398	69527	90860	115043	142075
		3.163	2.758	2.391	2.104	1.791	1.553	1.368	1.194	1.048	0.915	0.780	0.678	0.598
97.097	12.7	8923	11181	14162	17495	22867	28957	35765	44883	55838	70079	91581	115956	143203
		3.211	2.801	2.427	2.136	1.818	1.577	1.389	1.213	1.064	0.929	0.792	0.688	0.607
98.632	12.8	8994	11269	14273	17632	23047	29185	36047	45236	56278	70631	92302	116869	144331
		3.260	2.843	2.464	2.169	1.846	1.601	1.411	1.231	1.080	0.943	0.804	0.699	0.617
100.179	12.9	9064	11357	14385	17770	23227	29413	36328	45590	56717	71183	93023	117782	145458
		3.309	2.886	2.501	2.202	1.873	1.625	1.432	1.250	1.097	0.957	0.816	0.709	0.626
101.738	13.0	9134	11445	14496	17908	23407	29641	36610	45943	57157	71735	93744	118695	146586
		3.359	2.929	2.539	2.235	1.901	1.650	1.453	1.268	1.113	0.972	0.829	0.720	0.635
103.309	13.1	9204	11533	14608	18046	23587	29869	36891	46296	57597	72286	94466	119608	147713
		3.408	2.973	2.576	2.268	1.930	1.674	1.475	1.287	1.130	0.986	0.841	0.731	0.645
104.892	13.2	9275	11621	14719	18183	23767	30097	37173	46650	58036	72838	95187	120521	148841
		3.459	3.017	2.614	2.301	1.958	1.699	1.497	1.306	1.146	1.001	0.853	0.742	0.654
106.488	13.3	9345	11709	14831	18321	23947	30325	37455	47003	58476	73390	95908	121434	149969
		3.509	3.061	2.653	2.335	1.987	1.724	1.519	1.325	1.163	1.016	0.866	0.752	0.664
108.095	13.4	9415	11797	14942	18459	24127	30553	37736	47357	58916	73942	96629	122347	151096
		3.560	3.105	2.691	2.369	2.016	1.749	1.541	1.345	1.180	1.030	0.878	0.763	0.673

(续)

动压 /Pa	风速 /(m /s)	外径 D /mm												
		100	120	140	160	180	200	220	250	280	320	360	400	450
109.715	13.5	374	541	737	965	1223	1512	1822	2357	2961	3872	4906	6062	7678
		26.582	21.100	17.376	14.697	12.686	11.126	9.912	8.458	7.352	6.236	5.396	4.742	4.107
111.346	13.6	377	545	743	972	1232	1523	1836	2375	2983	3901	4942	6106	7735
		26.962	21.401	17.624	14.907	12.867	11.285	10.054	8.579	7.457	6.325	5.473	4.810	4.165
112.989	13.7	380	549	748	979	1241	1534	1849	2392	3004	3929	4978	6151	7792
		27.344	21.704	17.874	15.118	13.050	11.445	10.197	8.701	7.563	6.415	5.551	4.879	4.224
114.645	13.8	382	553	754	986	1250	1545	1863	2409	3026	3958	5015	6196	7849
		27.729	22.010	18.125	15.331	13.234	11.606	10.340	8.824	7.670	6.506	5.629	4.947	4.284
116.312	13.9	385	557	759	994	1259	1556	1876	2427	3048	3987	5051	6241	7906
		28.116	22.318	18.379	15.545	13.419	11.769	10.485	8.947	7.777	6.597	5.708	5.017	4.344
117.992	14.0	388	561	765	1001	1268	1568	1890	2444	3070	4015	5087	6286	7962
		28.506	22.627	18.634	15.761	13.605	11.932	10.630	9.071	7.885	6.688	5.787	5.086	4.404
119.684	14.1	391	565	770	1008	1277	1579	1903	2462	3092	4044	5124	6331	8019
		28.899	22.939	18.891	15.979	13.792	12.097	10.777	9.196	7.994	6.781	5.867	5.157	4.465
121.387	14.2	394	569	776	1015	1286	1590	1917	2479	3114	4073	5160	6376	8076
		29.294	23.253	19.149	16.197	13.981	12.262	10.925	9.322	8.103	6.874	5.948	5.227	4.526
123.103	14.3	396	573	781	1022	1295	1601	1930	2497	3136	4102	5196	6421	8133
		29.692	23.569	19.410	16.418	14.171	12.429	11.073	9.449	8.214	6.967	6.029	5.298	4.588
124.831	14.4	399	577	787	1029	1305	1612	1944	2514	3158	4130	5233	6466	8190
		30.093	23.887	19.672	16.639	14.363	12.597	11.223	9.577	8.325	7.061	6.110	5.370	4.650
126.571	14.5	402	581	792	1036	1314	1624	1957	2532	3180	4159	5269	6511	8247
		30.496	24.207	19.935	16.862	14.556	12.766	11.373	9.705	8.436	7.156	6.192	5.442	4.713
128.322	14.6	405	585	798	1044	1323	1635	1971	2549	3202	4188	5305	6555	8304
		30.902	24.530	20.201	17.087	14.749	12.936	11.525	9.835	8.549	7.252	6.275	5.515	4.775
130.086	14.7	407	589	803	1051	1332	1646	1984	2567	3224	4216	5342	6600	8361
		31.311	24.854	20.468	17.313	14.945	13.107	11.678	9.965	8.662	7.348	6.358	5.588	4.839
131.862	14.8	410	593	809	1058	1341	1657	1998	2584	3246	4245	5378	6645	8417
		31.722	25.181	20.737	17.541	15.141	13.280	11.831	10.096	8.776	7.444	6.441	5.661	4.902
133.650	14.9	416	597	814	1065	1350	1668	2011	2602	3268	4274	5414	6690	8474
		32.136	25.509	21.008	17.770	15.339	13.453	11.986	10.228	8.891	7.542	6.526	5.735	4.966
135.450	15.0	416	601	819	1072	1359	1680	2025	2619	3290	4302	5451	6735	8531
		32.553	25.840	21.280	18.000	15.538	13.628	12.141	10.361	9.006	7.640	6.610	5.810	5.031
137.262	15.1	418	605	825	1079	1368	1691	2038	2636	3311	4331	5487	6780	8588
		32.972	26.173	21.555	18.232	15.738	13.803	12.298	10.494	9.122	7.738	6.696	5.885	5.096
139.086	15.2	421	609	830	1087	1377	1702	2052	2654	3333	4360	5523	6825	8645
		33.394	26.508	21.831	18.466	15.940	13.980	12.455	10.629	9.239	7.837	6.781	5.960	5.161
140.922	15.3	424	613	836	1094	1386	1713	2065	2671	3355	4388	5560	6870	8702
		33.818	26.845	22.108	18.701	16.142	14.158	12.614	10.764	9.357	7.937	6.868	6.036	5.227
142.770	15.4	427	617	841	1101	1395	1724	2079	2689	3377	4417	5596	6915	8759
		34.245	27.184	22.388	18.937	16.347	14.337	12.773	10.900	9.475	8.037	6.955	6.113	5.293
144.631	15.5	430	621	847	1108	1404	1736	2092	2706	3399	4446	5633	6960	8816
		34.675	27.526	22.669	19.175	16.552	14.517	12.934	11.037	9.594	8.138	7.042	6.189	5.360
146.503	15.6	432	625	852	1115	1413	1747	2106	2724	3421	4474	5669	7004	8872
		35.108	27.869	22.952	19.414	16.759	14.699	13.095	11.175	9.714	8.240	7.130	6.267	5.427
148.387	15.7	435	629	858	1122	1422	1758	2119	2741	3443	4503	5705	7049	8929
		35.543	28.214	23.236	19.655	16.966	14.881	13.258	11.314	9.835	8.342	7.219	6.345	5.494
150.283	15.8	438	633	863	1129	1431	1769	2133	2759	3465	4532	5742	7094	8986
		35.981	28.562	23.523	19.897	17.176	15.064	13.421	11.453	9.956	8.445	7.308	6.423	5.562
152.192	15.9	441	637	869	1137	1440	1780	2146	2776	3487	4560	5778	7139	9043
		36.421	28.912	23.811	20.141	17.386	15.249	13.586	11.594	10.078	8.549	7.397	6.502	5.630

(续)

动压 /Pa	风速 /(m /s)	外径 D /mm												
		500	560	630	700	800	900	1000	1120	1250	1400	1600	1800	2000
109.715	13.5	9485	11885	15054	18597	24307	30781	38018	47710	59355	74494	97350	123260	152224
		3.611	3.150	2.730	2.403	2.045	1.774	1.563	1.364	1.197	1.045	0.891	0.774	0.683
111.346	13.6	9556	11973	15165	18735	24487	31009	38299	48063	59795	75045	98071	124173	153351
		3.663	3.195	2.769	2.437	2.074	1.799	1.585	1.384	1.214	1.060	0.904	0.785	0.693
112.989	13.7	9626	12061	15277	18872	24667	31237	38581	48417	60235	75597	98792	125086	154479
		3.715	3.240	2.808	2.472	2.104	1.825	1.608	1.403	1.231	1.075	0.917	0.797	0.703
114.645	13.8	9696	12149	15388	19010	24847	31465	38863	48770	60674	76149	99513	125999	155606
		3.768	3.286	2.848	2.507	2.133	1.851	1.630	1.423	1.249	1.090	0.930	0.808	0.713
116.312	13.9	9766	12237	15500	19148	25027	31693	39144	49124	61114	76701	100234	126912	156734
		3.820	3.332	2.888	2.542	2.163	1.877	1.653	1.443	1.266	1.106	0.943	0.810	0.723
117.992	14.0	9837	12325	15611	19286	25207	31921	39426	49477	61554	77253	100956	127825	157862
		3.873	3.378	2.928	2.577	2.193	1.903	1.676	1.463	1.284	1.121	0.956	0.831	0.733
119.684	14.1	9907	12413	15723	19423	25387	32149	39708	49830	61993	77804	101677	128738	158989
		3.927	3.425	2.969	2.613	2.223	1.929	1.699	1.483	1.302	1.137	0.969	0.842	0.743
121.387	14.2	9977	12501	15834	19561	25567	32377	39989	50184	62433	78356	102398	129651	160117
		3.981	3.472	3.009	2.649	2.254	1.956	1.723	1.504	1.320	1.152	0.982	0.854	0.753
123.103	14.3	10048	12589	15946	19699	25747	32605	40271	50537	62873	78908	103119	130564	161244
		4.035	3.519	3.050	2.685	2.285	1.982	1.746	1.524	1.338	1.168	0.996	0.865	0.763
124.831	14.4	10118	12677	16057	19837	25928	32833	40552	50891	63312	79460	103840	131477	162372
		4.090	3.567	3.092	2.721	2.316	2.009	1.770	1.545	1.356	1.184	1.009	0.877	0.774
126.571	14.5	10188	12765	16169	19974	26108	33061	40834	51244	63752	80012	104561	132390	163500
		4.145	3.615	3.133	2.758	2.347	2.036	1.794	1.566	1.374	1.200	1.023	0.889	0.784
128.322	14.6	10258	12853	16280	20112	26288	33287	41116	51598	64192	80563	105282	133303	164627
		4.200	3.663	3.175	2.795	2.378	2.063	1.818	1.586	1.392	1.216	1.036	0.901	0.795
130.086	14.7	10329	12941	16392	20250	26468	33517	41397	51951	64631	81115	106003	134216	165755
		4.255	3.712	3.217	2.832	2.410	2.091	1.842	1.608	1.411	1.232	1.050	0.913	0.805
131.862	14.8	10399	13029	16503	20388	26648	33745	41679	52304	65071	81667	106724	135130	166882
		4.312	3.761	3.259	2.869	2.441	2.118	1.866	1.629	1.429	1.248	1.064	0.925	0.816
133.650	14.9	10469	13117	16615	20525	26828	33973	41960	52658	65511	82219	107446	136043	168010
		4.368	3.810	3.302	2.906	2.473	2.146	1.890	1.650	1.448	1.264	1.078	0.937	0.827
135.450	15.0	10539	13205	16726	20663	27008	34201	42242	53011	65950	82771	108167	136956	169137
		4.425	3.859	3.345	2.944	2.505	2.174	1.915	1.671	1.467	1.281	1.092	0.949	0.837
137.262	15.1	10610	13293	16838	20801	27188	34429	42524	53365	66390	83322	108888	137869	170265
		4.482	3.909	3.388	2.982	2.538	2.202	1.940	1.693	1.486	1.297	1.106	0.961	0.848
139.086	15.2	10680	13381	16949	20939	27368	34657	42805	53718	66830	83874	109606	138782	171393
		4.539	3.959	3.432	3.020	2.570	2.230	1.965	1.715	1.505	1.314	1.120	0.974	0.859
140.922	15.3	10750	13470	17061	21076	27548	34885	43087	54071	67269	84426	110330	139695	172520
		4.597	4.010	3.475	3.059	2.603	2.259	1.990	1.737	1.524	1.331	1.135	0.986	0.870
142.770	15.4	10820	13558	17172	21214	27728	35113	43368	54425	67709	84978	111051	140608	173648
		4.655	4.060	3.519	3.098	2.636	2.287	2.015	1.759	1.543	1.348	1.149	0.999	0.881
144.631	15.5	10891	13646	17284	21352	27908	35341	43650	54778	68149	85530	111772	141521	174775
		4.714	4.111	3.564	3.137	2.669	2.316	2.040	1.781	1.563	1.365	1.163	1.014	0.882
146.503	15.6	10961	13734	17395	21490	28088	35569	43932	55132	68588	86081	112493	142434	175922
		4.773	4.163	3.608	3.176	2.703	2.345	2.066	1.803	1.582	1.382	1.178	1.024	—
148.387	15.7	11031	13822	17507	21627	28268	35797	44213	55485	69028	86633	113214	143347	—
		4.832	4.215	3.653	3.215	2.736	2.374	2.092	1.826	1.602	1.399	1.193	1.037	—
150.283	15.8	11101	13910	17618	21765	28448	36025	44495	55838	69468	87185	113936	144260	—
		4.892	4.267	3.698	3.255	2.770	2.403	2.117	1.848	1.622	1.416	1.207	1.049	—
152.192	15.9	11172	13998	17730	21903	28628	36253	44777	56192	69907	87737	114657	145173	—
		4.952	4.319	3.743	3.295	2.804	2.433	2.143	1.871	1.642	1.434	1.222	1.062	—

(续)

动压 /Pa	风速 /(m /s)	外径 D/mm												
		100	120	140	160	180	200	220	250	280	320	360	400	450
154.112	16.0	443	641	874	1144	1450	1792	2160	2794	3509	4589	5814	7184	9100
		36.864	29.264	24.101	20.386	17.598	15.435	13.751	11.735	10.201	8.653	7.487	6.581	5.699
156.044	16.1	446	645	880	1151	1459	1803	2173	2811	3531	4618	5851	7229	9157
		37.310	29.618	24.392	20.633	17.811	15.621	13.918	11.877	10.324	8.758	7.578	6.661	5.768
157.989	16.2	449	649	885	1158	1468	1814	2187	2829	3553	4647	5887	7274	9214
		37.759	29.974	24.685	20.881	18.025	15.809	14.085	12.020	10.448	8.863	7.669	6.741	5.837
159.945	16.3	452	653	890	1165	1477	1825	2200	2846	3575	4675	5923	7319	9271
		38.210	30.332	24.980	21.130	18.240	15.998	14.253	12.164	10.573	8.969	7.761	6.821	5.907
161.914	16.4	454	657	896	1172	1486	1836	2214	2863	3597	4704	5960	7364	9327
		38.663	30.692	25.277	21.382	18.457	16.189	14.423	12.308	10.699	9.076	7.853	6.903	5.977
163.895	16.5	457	661	901	1179	1495	1847	2227	2881	3618	4733	5996	7409	9384
		39.120	31.055	25.576	21.634	18.675	16.380	14.593	12.454	10.826	9.183	7.946	6.984	6.048
165.887	16.6	460	665	907	1187	1504	1859	2241	2898	3640	4761	6032	7453	9441
		39.579	31.419	25.876	21.888	18.894	16.572	14.765	12.600	10.953	9.291	8.040	7.066	6.119
167.892	16.7	463	669	912	1194	1513	1870	2254	2916	3662	4790	6069	7498	9498
		40.041	31.786	26.178	22.144	19.115	16.766	14.937	12.747	11.081	9.400	8.134	7.149	6.191
169.908	16.8	466	673	918	1201	1522	1881	2268	2933	3684	4819	6105	7543	9555
		40.505	32.154	26.482	22.400	19.337	16.960	15.110	12.895	11.209	9.509	8.228	7.232	6.263
171.937	16.9	468	677	923	1208	1531	1892	2281	2951	3706	4847	6141	7588	9612
		40.972	32.525	26.787	22.659	19.560	17.156	15.285	13.044	11.339	9.619	8.323	7.315	6.335
173.978	17.0	471	681	929	1215	1540	1903	2295	2968	3728	4876	6178	7633	9669
		41.442	32.898	27.094	22.919	19.784	17.353	15.460	13.193	11.469	9.729	8.419	7.399	6.408
176.031	17.1	474	685	934	1222	1549	1915	2308	2986	3750	4905	6214	7678	9726
		41.914	33.273	27.403	23.180	20.010	17.551	15.637	13.344	11.600	9.840	8.515	7.484	6.481
178.096	17.2	477	689	940	1229	1558	1926	2322	3003	3772	4933	6250	7723	9783
		42.389	33.650	27.714	23.443	20.237	17.750	15.814	13.495	11.731	9.952	8.611	7.569	6.554
180.173	17.3	479	693	945	1237	1567	1937	2335	3021	3794	4962	6287	7768	9839
		42.867	34.029	28.026	23.707	20.465	17.950	15.992	13.648	11.864	10.064	8.708	7.654	6.628
182.262	17.4	482	697	951	1244	1576	1948	2349	3038	3316	4991	6323	7813	9896
		43.347	32.411	28.340	23.973	20.694	18.151	16.172	13.801	11.997	10.177	8.806	7.740	6.703
184.363	17.5	485	701	956	1251	1585	1959	2362	3056	3838	5019	6359	7858	9953
		43.830	34.794	28.656	24.240	20.925	18.353	16.352	13.955	12.131	10.290	8.904	7.826	6.777
186.476	17.6	488	705	961	1258	1594	1971	2376	3073	3860	5048	6396	7902	10010
		44.315	35.180	28.974	24.509	21.157	18.557	16.533	14.109	12.265	10.404	9.003	7.913	6.853
188.601	17.7	490	709	967	1265	1604	1982	2389	3090	3882	5077	6432	7947	10067
		44.803	35.567	29.293	24.779	21.390	18.762	16.716	14.265	12.400	10.519	9.103	8.000	6.928
190.738	17.8	493	713	972	1272	1613	1993	2403	3108	3904	5105	6468	7992	10124
		45.294	35.957	29.614	25.051	21.625	18.967	16.899	14.421	12.536	10.635	9.202	8.088	7.004
192.887	17.9	496	717	978	1279	1622	2004	2416	3125	3926	5134	6505	8037	10181
		45.788	36.349	29.937	25.324	21.861	19.174	17.083	14.579	12.673	10.751	9.303	8.177	7.081
195.048	18.0	499	721	983	1287	1631	2015	2430	3143	3947	5163	6541	8082	10237
		46.284	36.743	30.261	25.598	22.098	19.382	17.268	14.737	12.811	10.867	9.404	8.265	7.158
197.221	18.1	502	725	989	1294	1640	2027	2443	3160	3969	5191	6577	8127	10294
		46.783	37.139	30.588	25.874	22.336	19.591	17.455	14.896	12.949	10.985	9.505	8.354	7.235
199.406	18.2	504	729	994	1301	1649	2038	2457	3178	3991	5220	6614	8172	10351
		47.284	37.537	30.916	26.152	22.575	19.801	17.642	15.056	13.088	11.102	9.607	8.444	7.313
201.604	18.3	507	733	1000	1308	1658	2049	2470	3195	4013	5249	6650	8217	10408
		47.789	37.938	31.245	26.431	22.816	20.012	17.830	15.216	13.227	11.221	9.710	8.534	7.391
203.813	18.4	510	737	1005	1315	1667	2060	2484	3213	4035	5278	6686	8262	10465
		48.295	38.340	31.577	26.711	23.058	20.225	18.019	15.378	13.368	11.340	9.813	8.625	7.469

(续)

动压 /Pa	风速 /(m /s)	外径 D /mm												
		500	560	630	700	800	900	1000	1120	1250	1400	1600	1800	2000
154.112	16.0	11242	14086	17842	22041	28808	36481	45058	56545	70347	88289	115378	146086	180413
		5.012	4.372	3.789	3.335	2.838	2.463	2.169	1.894	1.662	1.451	1.237	1.075	0.949
156.044	16.1	11312	14174	17953	22178	28988	36709	45340	56899	70787	88841	116099	146999	181541
		5.073	4.425	3.835	3.376	2.873	2.492	2.196	1.917	1.682	1.469	1.252	1.088	0.960
157.989	16.2	11383	14262	18065	22316	29168	36937	45621	57252	71226	89392	116820	147912	182668
		5.134	4.478	3.881	3.416	2.907	2.522	2.222	1.940	1.702	1.486	1.267	1.101	0.972
159.945	16.3	11453	14350	18176	22454	29348	37165	45903	57605	71666	89944	117541	148825	183796
		5.195	4.531	3.928	3.457	2.942	2.553	2.249	1.963	1.723	1.504	1.282	1.115	0.983
161.914	16.4	11523	14438	18288	22592	29529	37393	46185	57959	72106	90496	118262	149738	184924
		5.257	4.585	3.974	3.498	2.977	2.583	2.276	1.986	1.743	1.522	1.298	1.128	0.995
163.895	16.5	11593	14526	18399	22729	29709	37621	46466	58312	72545	91048	118983	150651	186051
		5.319	4.640	4.021	3.540	3.012	2.614	2.303	2.010	1.764	1.540	1.313	1.141	1.007
165.887	16.6	11664	14614	18511	22867	29889	37849	46748	58666	72985	91600	119704	151564	187179
		5.382	4.694	4.069	3.581	3.048	2.644	2.330	2.033	1.784	1.558	1.329	1.155	1.019
167.892	16.7	11734	14702	18622	23005	30069	38077	47029	59019	73425	92151	120426	152477	188306
		5.445	4.749	4.116	3.623	3.083	2.675	2.357	2.057	1.805	1.576	1.344	1.168	1.031
169.908	16.8	11804	14790	18734	23143	30249	38305	47311	59372	73864	92703	121147	153390	189434
		5.508	4.804	4.164	3.665	3.119	2.706	2.384	2.081	1.826	1.595	1.360	1.182	1.043
171.937	16.9	11874	14878	18845	23280	30429	38533	47593	59726	74304	93255	121868	154303	190562
		5.572	4.860	4.212	3.708	3.155	2.738	2.412	2.105	1.847	1.613	1.375	1.195	1.055
173.978	17.0	11945	14966	18957	23418	30609	38761	47874	60079	74744	93807	122589	155216	191689
		5.635	4.915	4.261	3.750	3.191	2.769	2.440	2.129	1.869	1.632	1.391	1.209	1.067
176.031	17.1	12015	15054	19068	23556	30789	38989	48156	60433	75183	94359	123310	156129	192817
		5.700	4.972	4.309	3.793	3.228	2.801	2.467	2.154	1.890	1.650	1.407	1.223	1.079
178.096	17.2	12085	15142	19180	23694	30969	39217	48438	60786	75623	94910	124031	157042	193944
		5.765	5.028	4.358	3.836	3.265	2.833	2.496	2.178	1.912	1.669	1.423	1.237	1.091
180.173	17.3	12155	15230	19291	23831	31149	39445	48719	61140	76063	95462	124752	157955	195072
		5.830	5.085	4.407	3.879	3.301	2.865	2.524	2.203	1.933	1.688	1.439	1.251	1.104
182.262	17.4	12226	15318	19403	23969	31329	39673	49001	61493	76502	96014	125473	158868	196199
		5.895	5.142	4.457	3.923	3.339	2.897	2.552	2.228	1.955	1.707	1.455	1.265	1.116
184.363	17.5	12296	15406	19514	24107	31509	39901	49282	61846	76942	96566	126194	159782	197327
		5.961	5.199	4.507	3.967	3.376	2.929	2.581	2.252	1.977	1.726	1.472	1.279	1.128
186.476	17.6	12366	15494	19626	24245	31689	40129	49564	62200	77382	97118	126916	160695	198455
		6.027	5.257	4.557	4.011	3.413	2.962	2.609	2.277	1.999	1.745	1.488	1.293	1.141
188.601	17.7	12436	15582	19737	24382	31869	40357	49846	62553	77821	97669	127637	161608	199582
		6.093	5.315	4.607	4.055	3.451	2.994	2.638	2.303	2.021	1.765	1.505	1.308	1.154
190.738	17.8	12507	15670	19849	24520	32049	40585	50127	62907	78261	98221	128358	162521	200710
		6.160	5.373	4.657	4.100	3.489	3.027	2.667	2.328	2.043	1.784	1.521	1.322	1.166
192.887	17.9	12577	15758	19960	24658	32229	40813	50409	63260	78701	98773	129079	163434	201837
		6.228	5.432	4.708	4.144	3.527	3.060	2.696	2.353	2.065	1.803	1.538	1.336	1.179
195.048	18.0	12647	15846	20072	24796	32409	41041	50690	63613	79140	99325	129800	164347	202965
		6.295	5.491	4.759	4.189	3.565	3.094	2.725	2.379	2.088	1.823	1.554	1.351	1.192
197.221	18.1	12717	15935	20183	24933	32589	41269	50972	63967	79580	99877	130521	165260	204093
		6.363	5.550	4.811	4.235	3.604	3.127	2.755	2.405	2.110	1.843	1.571	1.366	1.205
199.406	18.2	12788	16023	20295	25071	32769	41497	51254	64320	80020	100428	131242	166173	205220
		6.431	5.610	4.863	4.280	3.642	3.161	2.784	2.430	2.133	1.862	1.588	1.380	1.218
201.604	18.3	12858	16111	20406	25209	32950	41725	51535	64674	80459	100980	131963	167086	206348
		6.500	5.670	4.914	4.326	3.681	3.194	2.814	2.456	2.156	1.882	1.605	1.395	1.231
203.813	18.4	12928	16199	20518	25347	33130	41953	51817	65027	80899	101532	132684	167999	207475
		6.569	5.730	4.967	4.372	3.721	3.228	2.844	2.482	2.179	1.902	1.622	1.410	1.244

(续)

动压 /Pa	风速 /(m/s)	外径 D/mm												
		100	120	140	160	180	200	220	250	280	320	360	400	450
206.035	18.5	513	741	1011	1322	1676	2071	2497	3230	4057	5306	6723	8307	10522
		48.805	38.744	31.910	26.993	23.302	20.438	18.210	15.540	13.509	11.460	9.917	8.716	7.548
208.268	18.6	515	745	1016	1330	1685	2083	2511	3248	4079	5335	6759	8351	10579
		49.317	39.151	32.245	27.276	23.546	20.653	18.401	15.703	13.651	11.580	10.021	8.808	7.627
210.513	18.7	518	749	1022	1337	1694	2094	2524	3265	4101	5364	6795	8396	10636
		49.832	39.560	32.582	27.561	23.792	20.869	18.593	15.867	13.793	11.701	10.125	8.900	7.707
212.771	18.8	521	753	1027	1344	1703	2105	2538	3282	4123	5392	6832	8441	10692
		50.349	39.971	32.920	27.848	24.040	21.085	18.786	16.032	13.937	11.823	10.231	8.992	7.787
215.040	18.9	524	757	1032	1351	1712	2116	2551	3300	4145	5421	6868	8486	10749
		50.869	40.383	33.260	28.135	24.288	21.303	18.980	16.198	14.081	11.945	10.337	9.085	7.868
217.322	19.0	527	761	1038	1358	1721	2127	2565	3317	4167	5450	6904	8531	10806
		51.392	40.798	33.602	28.425	24.538	21.522	19.176	16.365	14.226	12.068	10.443	9.179	7.949
219.616	19.1	529	765	1043	1365	1730	2139	2578	3335	4189	5478	6941	8576	10863
		51.917	41.216	33.946	28.715	24.789	21.743	19.372	16.532	14.371	12.191	10.550	9.273	8.030
221.921	19.2	532	769	1049	1372	1739	2150	2592	3352	4211	5507	6977	8621	10920
		52.445	41.635	34.291	29.007	25.041	21.964	19.569	16.700	14.518	12.316	10.657	9.367	8.112
224.239	19.3	535	773	1054	1380	1748	2161	2605	3370	4233	5536	7013	8666	10977
		52.976	42.056	34.638	29.301	25.294	22.186	19.767	16.869	14.665	12.440	10.765	9.462	8.194
226.569	19.4	538	777	1060	1387	1758	2172	2619	3387	4254	5564	7050	8711	11034
		53.509	42.480	34.987	29.596	25.549	22.410	19.966	17.039	14.812	12.566	10.874	9.557	8.277
228.911	19.5	540	781	1065	1394	1767	2183	2632	3405	4276	5593	7086	8756	11091
		54.045	42.905	35.337	29.893	25.805	22.634	20.166	17.210	14.961	12.692	10.983	9.653	8.360
231.264	19.6	543	785	1071	1401	1776	2195	2646	3422	4298	5622	7122	8800	11147
		54.584	43.333	35.690	30.191	26.063	22.860	20.367	17.382	15.110	12.818	11.092	9.749	8.443
233.630	19.7	546	789	1076	1408	1785	2206	2659	3440	4320	5650	7159	8845	11204
		55.125	43.763	36.044	30.490	26.321	23.087	20.570	17.554	15.260	12.946	11.202	9.846	8.527
236.008	19.8	549	793	1082	1415	1794	2217	2673	3457	4342	5679	7195	8890	11261
		55.669	44.194	36.399	30.791	26.581	23.315	20.773	17.728	15.411	13.073	11.313	9.944	8.611
238.398	19.9	551	797	1087	1422	1803	2228	2686	3475	4364	5708	7231	8935	11318
		56.215	44.628	36.757	31.094	26.842	23.544	20.977	17.902	15.562	13.202	11.424	10.041	8.696
240.800	20.0	554	801	1093	1430	1812	2239	2700	3492	4386	5736	7268	8980	11375
		56.764	45.065	37.116	31.398	27.104	23.774	21.182	18.077	15.714	13.331	11.536	10.140	8.781

动压 /Pa	风速 /(m/s)	外径 D/mm												
		500	560	630	700	800	900	1000	1120	1250	1400	1600	1800	2000
206.035	18.5	12999	16287	20629	25484	33310	42181	52098	65380	81339	102084	133406	168912	208603
		6.639	5.790	5.019	4.418	3.760	3.262	2.874	2.509	2.202	1.923	1.639	1.425	1.257
208.268	18.6	13069	16375	20741	25622	33490	42409	52380	65734	81778	102636	134127	169825	209730
		6.708	5.851	5.072	4.464	3.799	3.297	2.904	2.535	2.225	1.943	1.657	1.440	1.270
210.513	18.7	13139	16463	20852	25760	33670	42637	52662	66087	82218	103187	134848	170738	210858
		6.778	5.913	5.125	4.511	3.839	3.331	2.935	2.562	2.248	1.963	1.674	1.455	1.283
212.771	18.8	13209	16551	20964	25898	33850	42865	52943	66441	82658	103739	135569	171651	211986
		6.849	5.974	5.178	4.558	3.879	3.366	2.965	2.588	2.271	1.983	1.691	1.470	1.297
215.040	18.9	13280	16639	21075	26035	34030	43093	53225	66794	83097	104291	136290	172564	213113
		6.920	6.036	5.232	4.605	3.919	3.401	2.996	2.615	2.295	2.004	1.709	1.485	1.310
217.322	19.0	13350	16727	21187	26173	34210	43321	53507	67147	83537	104843	137011	173477	214241
		6.991	6.098	5.286	4.653	3.960	3.436	3.027	2.642	2.319	2.025	1.726	1.500	1.324

(续)

动压 /Pa	风速 /(m /s)	外径 D /mm												
		500	560	630	700	800	900	1000	1120	1250	1400	1600	1800	2000
219.616	19.1	13420	16815	21298	26311	34390	43549	53788	67501	83977	105395	137732	174390	215368
		7.063	6.160	5.340	4.700	4.000	3.471	3.058	2.669	2.342	2.045	1.744	1.516	1.337
221.921	19.2	13490	16903	21410	26449	34570	43777	54070	67854	84416	105946	138453	175303	216496
		7.135	6.223	5.394	4.748	3.041	3.506	3.089	2.696	2.366	2.066	1.762	1.531	1.351
224.239	19.3	13561	16991	21521	26586	34750	44005	54351	68208	84856	106498	139174	176216	217024
		7.207	6.286	5.449	4.796	4.082	3.542	3.120	2.724	2.390	2.087	1.780	1.547	1.365
226.569	19.4	13631	17079	21633	26724	34930	44233	54633	68561	85296	107050	139896	177129	218751
		7.279	6.350	5.504	4.845	4.123	3.577	3.152	2.751	2.414	2.108	1.798	1.562	1.378
228.911	19.5	13701	17167	21744	26862	35110	44461	54915	68914	85735	107602	140617	178042	219879
		7.353	6.413	5.559	4.893	4.164	3.613	3.183	2.779	2.439	2.129	1.816	1.578	1.392
231.264	19.6	13771	17255	21856	27000	35290	44689	55196	69268	86175	108154	141338	178995	221006
		7.426	6.477	5.615	4.942	4.206	3.649	3.215	2.806	2.463	2.151	1.834	1.594	1.406
233.630	19.7	13842	17343	21967	27137	35470	44917	55478	69621	86615	108705	142059	179748	222134
		7.500	6.542	5.670	4.991	4.248	3.686	3.247	2.834	2.487	2.172	1.852	1.610	1.420
236.008	19.8	13912	17431	22079	27275	35650	45145	55759	69975	87054	109257	142780	180781	223261
		7.574	6.606	5.726	5.040	4.290	3.722	3.279	2.862	2.512	2.194	1.870	1.626	1.434
238.398	19.9	13982	17519	22190	27413	35830	45373	56041	70328	87494	109809	143501	181694	224389
		7.648	6.671	5.783	5.090	4.332	3.759	3.312	2.891	2.537	2.215	1.889	1.642	1.448
240.800	20.0	14052	17607	22302	27551	36010	45601	56323	70682	87934	110361	144222	182607	225517
		7.723	6.736	5.839	5.140	4.374	3.796	3.344	2.919	2.562	2.237	1.907	1.658	1.463

表 6-12 的风速从 1.0m/s 算到 20.0m/s, 按每 0.1m/s 为一格进行计算, 管道的直径采用表 6-12 给出的外径 D 值。

表中的风量按式 (6-14) 计算:

$$q_v = 3600 \frac{\pi D^2}{4} v \quad (6-14)$$

式中, q_v 为风量 (m^3/h); D 为管道外径 (m)。

【例题 1】 已知钢板制圆风道, 风量为 $4500\text{m}^3/\text{h}$, 直径为 400mm。求其单位长度的摩擦损失。

解: 1) 通过查图 6-13 求得。

$$\text{风量 } q_v = 4500\text{m}^3/\text{h} = 4500 \times \frac{1000}{3600} \text{dm}^3/\text{s} = 1250\text{dm}^3/\text{s}$$

由纵坐标上找到 $1250\text{dm}^3/\text{s}$ 的点, 画平行于横坐标的直线, 与管道直径 400mm 的斜线相交, 从交点垂直往下, 在横坐标上查到其单位摩擦损失 $p_{mr} = 2.7\text{Pa}/\text{m}$ 。

从交点处也可得出风速 = $10.02\text{m}/\text{s}$ 。

2) 通过查表 6-12 求得。

从表 6-12 中, 按管道直径 400mm 和风量为 $4500\text{m}^3/\text{h}$, 可查得

$$q_v = 4490\text{m}^3/\text{h} \text{ 时}$$

$$p_{mr} = 2.668\text{Pa}/\text{m} \quad v = 10\text{m}/\text{s}$$

$$q_v = 4535\text{m}^3/\text{h} \text{ 时}$$

$$p_{mr} = 2.719 \text{ Pa/m} \quad v = 10.1 \text{ m/s}$$

利用内插法，可求得 $q_v = 4500 \text{ m}^3/\text{h}$ 时，

$$p_{mr} = 2.679 \text{ Pa/m} \approx 2.7 \text{ Pa/m}$$

$$v = 10.022 \text{ m/s} \approx 10.02 \text{ m/s}$$

(2) 矩形管道 按式 (6-10) 和式 (6-9)，同样可以计算出矩形管道的摩擦阻力系数和单位长度摩擦损失 p_{mf} 。为了方便计算，给出表 6-13 钢板矩形通风管道计算用表。制表条件同表 6-12。

表 6-13 钢板矩形通风管道计算用表

动压 /Pa	风速 /(m/s)	外边长 (a/mm × b/mm)												
		上行是风量/ (m ³ /h) 下行是单位长度摩擦阻力/ (Pa/m)												
		120 × 120	160 × 120	160 × 160	200 × 120	200 × 160	200 × 200	250 × 120	250 × 160	250 × 200	250 × 250	320 × 160	320 × 200	320 × 250
0.602	1.0	50	67	90	84	113	141	105	140	176	221	180	226	283
		0.177	0.149	0.122	0.132	0.106	0.091	0.120	0.095	0.080	0.069	0.085	0.070	0.059
0.867	1.2	60	81	108	101	135	169	126	168	211	265	216	271	339
		0.244	0.205	0.168	0.183	0.147	0.126	0.166	0.131	0.111	0.095	0.117	0.097	0.082
1.180	1.4	70	94	126	118	158	198	147	196	246	309	252	316	396
		0.321	0.270	0.221	0.241	0.194	0.166	0.219	0.173	0.146	0.126	0.154	0.128	0.109
1.541	1.6	80	107	144	135	180	226	168	225	282	353	288	361	453
		0.407	0.343	0.281	0.306	0.246	0.212	0.278	0.219	0.186	0.160	0.196	0.163	0.138
1.950	1.8	90	121	162	151	203	254	188	253	317	397	324	406	509
		0.503	0.424	0.348	0.378	0.304	0.262	0.344	0.271	0.230	0.198	0.242	0.202	0.171
2.408	2.0	100	134	180	168	225	282	209	281	352	441	360	451	566
		0.608	0.512	0.420	0.457	0.368	0.317	0.416	0.328	0.278	0.239	0.293	0.244	0.207
2.914	2.2	110	148	198	185	248	310	230	309	387	485	396	497	622
		0.722	0.609	0.500	0.543	0.437	0.376	0.494	0.390	0.330	0.285	0.348	0.291	0.246
3.468	2.4	120	161	216	202	270	339	251	337	422	529	432	542	679
		0.846	0.713	0.585	0.636	0.512	0.441	0.579	0.457	0.387	0.334	0.408	0.340	0.289
4.070	2.6	130	175	234	219	293	367	272	365	458	573	468	587	736
		0.978	0.824	0.677	0.736	0.592	0.510	0.670	0.528	0.448	0.336	0.472	0.394	0.334
4.720	2.8	140	188	252	236	315	395	293	393	493	617	504	632	792
		1.119	0.944	0.775	0.842	0.678	0.584	0.767	0.605	0.513	0.442	0.541	0.451	0.383
5.418	3.0	150	201	270	252	338	423	314	421	528	662	540	677	849
		1.270	1.070	0.879	0.955	0.769	0.663	0.870	0.687	0.582	0.502	0.614	0.512	0.434
6.164	3.2	160	215	288	269	360	452	335	449	563	706	576	722	905
		1.429	1.205	0.990	1.075	0.866	0.746	0.979	0.773	0.656	0.565	0.691	0.577	0.489
6.959	3.4	170	228	306	286	383	480	356	477	598	750	612	768	962
		1.597	1.347	1.106	1.202	0.968	0.834	1.095	0.864	0.733	0.632	0.773	0.645	0.547
7.802	3.6	180	242	324	303	405	508	377	505	634	794	648	813	1018
		1.774	1.496	1.229	1.335	1.076	0.927	1.216	0.960	0.815	0.703	0.859	0.717	0.608
8.693	3.8	190	255	342	320	428	536	398	533	669	838	684	858	1075
		1.960	1.653	1.358	1.475	1.189	1.024	1.344	1.061	0.900	0.776	0.949	0.792	0.672
9.632	4.0	201	268	359	336	450	565	419	561	704	882	720	903	1132
		2.154	1.817	1.493	1.622	1.307	1.126	1.477	1.167	0.990	0.854	1.044	0.871	0.739

(续)

动压 /Pa	风速 /(m /s)	外边长 (a/mm × b/mm)												
		上行是风量/ (m ³ /h)						下行是单位长度摩擦阻力/ (Pa/m)						
		120 × 120	160 × 120	160 × 160	200 × 120	200 × 160	200 × 200	250 × 120	250 × 160	250 × 200	250 × 250	320 × 160	320 × 200	320 × 250
10.619	4.2	211	282	377	353	473	593	440	589	739	926	756	948	1188
		2.357	1.988	1.634	1.775	1.430	1.233	1.617	1.277	1.084	0.935	1.142	0.954	0.809
11.655	4.4	221	295	395	370	496	621	461	617	774	970	792	993	1245
		2.569	2.167	1.781	1.935	1.559	1.344	1.762	1.392	1.181	1.019	1.245	1.040	0.882
12.738	4.6	231	309	413	387	518	649	482	646	809	1014	828	1038	1301
		2.790	2.353	1.934	2.102	1.694	1.460	1.914	1.512	1.283	1.107	1.353	1.129	0.958
13.870	4.8	241	322	431	404	541	677	503	674	845	1059	864	1084	1358
		3.019	2.547	2.094	2.275	1.833	1.580	2.072	1.637	1.389	1.198	1.464	1.223	1.037
15.050	5.0	251	336	449	421	563	706	523	702	880	1103	900	1129	1414
		3.257	2.748	2.259	2.454	1.978	1.705	2.235	1.766	1.499	1.293	1.580	1.319	1.120
16.278	5.2	261	349	467	437	586	734	544	730	915	1147	936	1174	1471
		3.504	2.956	2.430	2.640	2.128	1.835	2.405	1.900	1.613	1.392	1.700	1.420	1.205
17.554	5.4	271	362	485	454	608	762	565	758	950	1191	972	1219	1528
		3.760	3.172	2.608	2.833	2.284	1.969	2.580	2.039	1.731	1.493	1.824	1.524	1.293
18.879	5.6	281	376	503	471	631	790	586	786	985	1235	1008	1264	1584
		4.024	3.395	2.791	3.032	2.444	2.108	2.762	2.183	1.853	1.599	1.953	1.631	1.384
20.251	5.8	291	389	521	488	653	819	607	814	1021	1279	1044	1309	1641
		4.297	3.625	2.981	3.238	2.610	2.251	2.949	2.331	1.979	1.707	2.086	1.742	1.478
21.672	6.0	301	403	539	505	676	847	628	842	1056	1323	1080	1354	1697
		4.578	3.863	3.176	3.450	2.782	2.399	3.143	2.484	2.109	1.820	2.222	1.856	1.575
23.141	6.2	311	416	557	521	698	875	649	870	1091	1367	1116	1400	1754
		4.868	4.108	3.378	3.669	2.958	2.551	3.342	2.642	2.242	1.935	2.364	1.974	1.676
24.658	6.4	321	430	575	538	721	903	670	898	1126	1411	1152	1445	1811
		5.167	4.360	3.585	3.894	3.140	2.708	3.547	2.804	2.380	2.054	2.509	2.096	1.779
26.223	6.6	331	443	593	555	743	931	691	926	1161	1455	1188	1490	1867
		5.474	4.620	3.799	4.126	3.327	2.869	3.759	2.971	2.522	2.177	2.658	2.221	1.885
27.836	6.8	341	456	611	572	766	960	712	954	1197	1500	1224	1535	1924
		5.790	4.886	4.018	4.364	3.519	3.035	3.976	3.143	2.668	2.303	2.812	2.349	1.994
29.498	7.0	351	470	629	589	788	988	733	982	1232	1544	1260	1580	1980
		6.114	5.160	4.244	4.609	3.717	3.205	4.199	3.319	2.818	2.432	2.970	2.481	2.106
31.208	7.2	361	483	647	606	811	1016	754	1010	1267	1588	1296	1625	2037
		6.447	5.443	4.475	4.861	3.919	3.380	4.428	3.500	2.972	2.565	3.132	2.617	2.221
32.966	7.4	371	497	665	622	833	1044	775	1038	1302	1632	1332	1670	2093
		6.789	5.730	4.712	5.118	4.127	3.560	4.663	3.686	3.130	2.701	3.299	2.756	2.339
34.772	7.6	381	510	683	639	856	1073	796	1067	1337	1676	1368	1716	2150
		7.139	6.026	4.956	5.383	4.341	3.744	4.904	2.877	3.291	2.841	3.469	2.898	2.460
36.626	7.8	391	524	701	656	878	1101	817	1095	1373	1720	1404	1761	2207
		7.498	6.329	5.205	5.653	4.559	3.932	5.150	4.072	3.457	2.984	3.644	3.044	2.584
38.528	8.0	401	537	719	673	901	1129	838	1123	1408	1764	1440	1806	2263
		7.866	6.639	5.461	5.931	4.783	4.125	5.403	4.272	3.627	3.131	3.823	3.194	2.711

(续)

动压 /Pa	风速 /(m /s)	外边长 (a/mm × b/mm)												
		上行是风量/ (m ³ /h) 下行是单位长度摩擦阻力/ (Pa/m)												
		120 × 120	160 × 120	160 × 160	200 × 120	200 × 160	200 × 200	250 × 120	250 × 160	250 × 200	250 × 250	320 × 160	320 × 200	320 × 250
40.478	8.2	411	550	737	690	924	1157	858	1151	1443	1808	1476	1851	2320
		8.242	6.957	5.722	6.214	5.012	4.323	5.662	4.476	3.801	3.281	4.006	3.347	2.841
42.477	8.4	421	564	755	707	946	1186	879	1179	1478	1852	1512	1896	2376
		8.627	7.281	5.989	6.505	5.246	4.525	5.926	4.686	3.978	3.434	4.193	3.503	2.974
44.524	8.6	431	577	773	723	969	1214	900	1207	1513	1896	1548	1941	2433
		9.020	7.613	6.262	6.801	5.485	4.731	6.196	4.899	4.160	3.591	4.385	3.663	3.110
46.619	8.8	441	591	791	740	991	1242	921	1235	1549	1941	1584	1987	2489
		9.422	7.958	6.541	7.104	5.730	4.942	6.473	5.118	4.346	3.751	4.580	3.827	3.249
48.762	9.0	451	604	809	757	1014	1270	942	1263	1584	1985	1620	2032	2546
		9.832	8.299	6.827	7.414	5.980	5.158	6.755	5.341	4.535	3.915	4.780	3.994	3.390
50.953	9.2	461	617	827	774	1036	1298	963	1291	1619	2029	1656	2077	2603
		10.251	8.653	7.118	7.730	6.235	5.378	7.043	5.569	4.729	4.082	4.984	4.164	3.535
53.193	9.4	471	631	845	791	1059	1327	984	1319	1654	2073	1692	2122	2659
		10.678	9.014	7.415	8.053	6.495	5.602	7.337	5.801	4.926	4.252	5.192	4.338	3.683
55.480	9.6	481	644	863	807	1081	1355	1005	1347	1689	2117	1728	2167	2716
		11.114	9.382	7.718	8.382	6.760	5.831	7.636	6.039	5.128	4.426	5.404	4.516	3.834
57.816	9.8	491	658	881	824	1104	1383	1026	1375	1725	2161	1764	2212	2772
		11.559	9.757	8.027	8.717	7.031	6.065	7.942	6.280	5.333	4.604	5.621	4.697	3.987
60.200	10.0	501	671	899	841	1126	1411	1047	1403	1760	2205	1800	2257	2829
		12.012	10.140	8.341	9.059	7.307	6.303	8.254	6.527	5.543	4.785	5.841	4.881	4.144
62.632	10.2	511	685	917	858	1149	1440	1068	1431	1795	2249	1836	2303	2886
		12.474	10.530	8.662	9.407	7.588	6.546	8.571	6.778	5.756	4.969	6.066	5.069	4.303
65.112	10.4	521	698	935	875	1171	1468	1089	1459	1830	2293	1872	2348	2942
		12.944	10.927	8.989	9.762	7.874	6.793	8.894	7.034	5.973	5.156	6.295	5.260	4.466
67.641	10.6	531	711	953	892	1194	1496	1110	1488	1865	2338	1908	2393	2999
		13.423	11.331	9.322	10.123	8.166	7.044	9.224	7.294	6.194	5.347	6.528	5.455	4.631
70.217	10.8	541	725	971	908	1216	1524	1131	1516	1901	2382	1944	2438	3055
		13.910	11.743	9.660	10.491	8.463	7.300	9.559	7.559	6.420	5.542	6.166	5.654	4.800
72.842	11.0	551	738	989	925	1239	1552	1152	1544	1936	2426	1980	2483	3112
		14.406	12.162	10.005	10.865	8.765	7.561	9.900	7.829	6.649	5.740	7.007	5.855	4.971
75.515	11.2	561	752	1007	942	1261	1581	1173	1572	1971	2470	2016	2528	3168
		14.910	12.587	10.355	11.246	9.072	7.826	10.246	8.104	6.882	5.941	7.253	6.061	5.146
78.230	11.4	571	765	1025	959	1284	1609	1193	1600	2006	2514	2052	2573	3225
		15.423	13.021	10.712	11.633	9.384	8.095	10.599	8.383	7.119	6.146	7.502	6.270	5.323
81.005	11.6	581	779	1042	976	1306	1637	1214	1628	2041	2558	2088	2619	3282
		15.945	13.461	11.074	12.026	9.702	8.369	10.958	8.666	7.360	6.354	7.756	6.482	5.503
82.822	11.8	591	792	1060	993	1329	1665	1235	1656	2076	2602	2124	2664	3338
		16.475	13.909	11.443	12.426	10.024	8.648	11.322	8.955	7.605	6.565	8.015	6.698	6.686
86.688	12.0	602	805	1078	1009	1351	1694	1256	1684	2112	2646	2160	2709	3395
		17.013	14.363	11.817	12.833	10.352	8.931	11.692	9.248	7.854	6.780	8.277	6.917	5.873

(续)

动压 /Pa	风速 /(m /s)	外边长 (a/mm × b/mm)												
		上行是风量/ (m ³ /h) 下行是单位长度摩擦阻力/ (Pa/m)												
		120 × 120	160 × 120	160 × 160	200 × 120	200 × 160	200 × 200	250 × 120	250 × 160	250 × 200	250 × 250	320 × 160	320 × 200	320 × 250
89.602	12.2	612	819	1096	1026	1374	1722	1277	1712	2147	2690	2196	2754	3451
		17.560	14.825	12.197	13.245	10.685	9.218	12.069	9.545	8.106	6.998	8.543	7.140	6.062
92.564	12.4	622	832	1114	1043	1397	1750	1298	1740	2182	2734	2232	2799	3508
		18.116	15.295	12.583	13.665	11.024	9.510	12.451	9.847	8.363	7.220	8.814	7.366	6.254
95.574	12.6	632	846	1132	1060	1419	1778	1319	1768	2217	2779	2268	2844	3564
		18.680	15.771	12.975	14.090	11.367	9.806	12.839	10.154	8.624	7.445	9.089	7.595	6.449
98.632	12.8	642	859	1150	1077	1442	1807	1340	1796	2252	2823	2304	2890	3621
		19.253	16.255	13.373	14.523	11.716	10.107	13.232	10.466	8.889	7.674	9.367	7.828	6.647
101.738	13.0	652	873	1168	1093	1464	1835	1361	1824	2288	2867	2340	2935	3678
		19.834	16.745	13.777	14.961	12.070	10.413	13.632	10.782	9.157	7.906	9.651	8.065	6.848
104.892	13.2	662	886	1186	1110	1487	1863	1382	1852	2323	2911	2376	2980	3734
		20.423	17.243	14.187	15.406	12.429	10.723	14.038	11.103	9.430	8.141	9.938	8.305	7.052
108.095	13.4	672	899	1204	1127	1509	1891	1403	1880	2358	2955	2412	3025	3791
		21.022	17.749	14.603	15.858	12.793	11.037	14.449	11.429	9.706	8.380	10.229	8.549	7.259
111.346	13.6	682	913	1222	1144	1532	1919	1424	1909	2393	2999	2448	3070	3847
		21.628	18.261	15.024	16.315	13.163	11.356	14.866	11.759	9.987	8.622	10.525	8.796	7.468
114.645	13.8	692	926	1240	1161	1554	1948	1445	1937	2428	3043	2484	3115	3904
		22.244	18.781	15.452	16.780	13.537	11.679	15.289	12.093	10.271	8.867	10.824	9.046	7.681
117.992	14.0	702	948	1258	1178	1577	1976	1466	1965	2464	3087	2520	3160	3960
		22.868	19.307	15.885	17.251	13.917	12.007	15.718	12.433	10.559	9.116	11.128	9.300	7.897
121.387	14.2	712	953	1276	1194	1599	2004	1487	1993	2499	3131	2556	3206	4017
		23.500	19.841	16.325	17.728	14.302	12.339	16.153	12.777	10.852	9.369	11.436	9.558	8.115
124.831	14.4	722	967	1294	1211	1622	2032	1508	2021	2534	3176	2592	3251	4074
		24.141	20.383	16.770	18.211	14.693	12.676	16.594	13.126	11.148	9.625	11.748	9.819	8.337
128.322	14.6	732	980	1312	1228	1644	2061	1529	2049	2569	3220	2628	3296	4130
		24.790	20.931	17.222	18.701	15.088	13.017	17.040	13.479	11.448	9.884	12.065	10.083	8.562
131.862	14.8	742	993	1330	1245	1667	2089	1549	2077	2604	3264	2664	3341	4187
		25.448	21.487	17.679	19.198	15.489	13.363	17.493	13.837	11.752	10.146	12.385	10.351	8.789
135.450	15.0	752	1007	1348	1262	1689	2117	1570	2105	2640	3308	2700	3386	4243
		26.115	22.049	18.142	19.701	15.895	13.713	17.951	14.199	12.060	10.412	12.710	10.622	9.019
139.086	15.2	762	1020	1366	1278	1712	2145	1591	2133	2675	3352	2736	3431	4300
		26.790	22.619	18.611	20.210	16.306	14.068	18.415	14.567	12.372	10.682	13.038	10.897	9.253
142.770	15.4	772	1034	1384	1295	1734	2173	1612	2161	2710	3396	2772	3476	4357
		27.473	23.197	19.086	20.726	16.722	14.427	18.885	14.939	12.688	10.954	13.371	11.175	9.489
140.503	15.6	782	1047	1402	1312	1757	2202	1633	2189	2745	3440	2808	3522	4413
		28.165	23.781	19.567	21.248	17.143	14.790	19.361	15.315	13.008	11.231	13.708	11.457	9.728
150.283	15.8	792	1060	1420	1329	1779	2230	1654	2217	2780	3484	2844	3567	4470
		28.866	24.372	20.054	21.777	17.570	15.159	19.843	15.696	13.331	11.510	14.049	11.742	9.971

(续)

动压 /Pa	风速 /(m /s)	外边长 (a/mm × b/mm)												
		上行是风量/ (m ³ /h) 下行是单位长度摩擦阻力/ (Pa/m)												
		120 × 120	160 × 120	160 × 160	200 × 120	200 × 160	200 × 200	250 × 120	250 × 160	250 × 200	250 × 250	320 × 160	320 × 200	320 × 250
154.112	16.0	802	1074	1438	1346	1802	2258	1675	2245	2816	3528	2880	3612	4526
		29.575	24.971	20.547	22.312	18.002	15.531	20.331	16.082	13.659	11.793	14.395	12.031	10.216
157.989	16.2	812	1087	1456	1363	1824	2286	1696	2273	2851	3572	2916	3657	4583
		30.292	25.577	21.045	22.853	18.439	15.908	20.824	16.472	13.991	12.080	14.744	12.323	10.464
161.914	16.4	822	1101	1474	1379	1847	2315	1717	2301	2886	3617	2952	3702	4639
		31.018	26.190	21.550	23.401	18.881	16.290	21.323	16.867	14.326	12.369	15.098	12.619	10.715
165.887	16.6	832	1114	1492	1396	1870	2343	1738	2330	2921	3661	2988	3747	4696
		31.753	26.811	22.060	23.956	19.328	16.676	21.822	17.267	14.666	12.663	15.456	12.918	10.969
169.908	16.8	842	1128	1510	1413	1892	2371	1759	2358	2956	3705	3024	3792	4753
		32.496	27.438	22.577	24.516	19.781	17.066	22.339	17.671	15.009	12.959	15.818	13.220	11.226
173.978	17.0	852	1141	1528	1430	1915	2399	1780	2386	2992	3749	3060	3838	4809
		33.247	28.073	23.099	25.084	20.238	17.461	22.856	18.080	15.357	13.259	16.184	13.526	11.486
178.096	17.2	862	1154	1546	1447	1937	2428	1801	2414	3027	3793	3096	3883	4866
		34.008	28.715	23.628	25.657	20.701	17.861	23.379	18.494	15.708	13.563	16.554	13.836	11.749
182.262	17.4	872	1168	1564	1464	1960	2456	1822	2442	3062	3837	3132	3928	4922
		34.776	29.364	24.162	26.237	21.169	18.265	23.908	18.912	16.063	13.869	16.928	14.149	12.015
186.476	17.6	882	1181	1582	1480	1982	2484	1843	2470	3097	3881	3168	3973	4979
		35.553	30.020	24.702	26.824	21.643	18.673	24.442	19.335	16.423	14.179	17.307	14.465	12.283
190.738	17.8	892	1195	1600	1497	2005	2512	1864	2498	3132	3925	3204	4018	5035
		36.339	30.684	25.248	27.417	22.121	19.086	24.982	19.763	16.786	14.493	17.690	14.785	12.555
195.048	18.0	902	1208	1618	1514	2027	2540	1884	2526	3168	3969	3240	4063	5092
		37.133	31.354	25.800	28.016	22.605	19.503	25.529	20.195	17.153	14.810	18.076	15.109	12.830
199.406	18.2	912	1222	1636	1531	2050	2569	1905	2554	3203	4014	3276	4109	5149
		37.936	32.032	26.358	28.622	23.094	19.925	26.081	20.632	17.524	15.130	18.467	15.435	13.107
203.813	18.4	922	1235	1654	1548	2072	2597	1926	2582	3238	4058	3312	4154	5205
		38.747	32.717	26.921	29.234	23.588	20.351	26.638	21.073	17.899	15.454	18.863	15.766	13.388
208.268	18.6	932	1248	1672	1564	2095	2625	1947	2610	3273	4102	3348	4199	5262
		39.567	33.410	27.491	29.852	24.087	20.782	27.202	21.519	18.278	15.781	19.262	16.099	13.671
212.771	18.8	942	1262	1690	1581	2117	2653	1968	2638	3308	4146	3384	4244	5318
		40.395	34.109	28.067	30.477	24.591	21.217	27.772	21.970	18.661	16.112	19.665	16.437	13.958
217.322	19.0	952	1275	1708	1598	2140	2682	1989	2666	3343	4190	3420	4289	5375
		41.232	34.816	28.648	31.109	25.101	21.657	28.347	22.425	19.047	16.446	20.073	16.777	14.247
221.921	19.2	962	1289	1726	1615	2162	2710	2010	2694	3379	4234	3456	4334	5432
		42.077	35.530	29.236	31.747	25.616	22.101	28.928	22.885	19.438	16.783	20.485	17.122	14.539
226.569	19.4	972	1302	1743	1632	2185	2738	2031	2722	3414	4278	3492	4379	5488
		42.931	36.251	29.829	32.391	26.136	22.550	29.516	23.349	19.833	17.124	20.900	17.469	14.834
231.264	19.6	982	1316	1761	1649	2207	2766	2052	2751	3449	4322	3528	4425	5545
		43.793	36.979	30.428	33.042	26.661	23.003	30.109	23.819	20.231	17.468	21.320	17.820	15.133
236.008	19.8	993	1329	1779	1665	2230	2794	2073	2779	3484	4366	3564	4470	5601
		44.664	37.714	31.034	33.699	27.191	23.460	30.707	24.292	20.634	17.816	21.745	18.175	15.434
240.800	20.0	1003	1342	1797	1682	2252	2823	2094	2807	3519	4410	3600	4515	5658
		45.543	38.457	31.645	34.362	27.727	23.923	31.312	24.771	21.040	18.167	22.173	18.533	15.738

(续)

动压 /Pa	风速 /(m /s)	外边长 (a/mm × b/mm)												
		上行是风量/ (m ³ /h) 下行是单位长度摩擦阻力/ (Pa/m)												
		320 × 320	400 × 200	400 × 250	400 × 320	400 × 400	500 × 200	500 × 250	500 × 320	500 × 400	500 × 500	630 × 250	630 × 320	630 × 400
0.602	1.0	363	283	354	454	569	354	443	569	712	891	558	716	896
		0.050	0.064	0.053	0.044	0.038	0.058	0.048	0.039	0.033	0.029	0.044	0.035	0.030
0.867	1.2	435	339	425	545	683	424	532	682	854	1069	669	859	1075
		0.070	0.088	0.073	0.061	0.053	0.081	0.066	0.054	0.046	0.040	0.061	0.049	0.041
1.180	1.4	508	396	496	636	796	495	621	796	997	1247	781	1002	1255
		0.092	0.116	0.097	0.081	0.070	0.106	0.088	0.072	0.061	0.053	0.080	0.065	0.054
1.541	1.6	581	452	567	727	910	566	709	910	1139	1426	892	1145	1434
		0.117	0.148	0.123	0.103	0.089	0.135	0.111	0.092	0.078	0.067	0.102	0.083	0.069
1.950	1.8	653	509	638	818	1024	637	798	1024	1281	1604	1004	1288	1613
		0.145	0.183	0.152	0.127	0.110	0.168	0.138	0.113	0.096	0.083	0.127	0.102	0.086
2.408	2.0	726	565	708	909	1138	707	887	1137	1424	1782	1115	1431	1792
		0.176	0.221	0.185	0.154	0.133	0.203	0.167	0.137	0.117	0.101	0.153	0.124	0.104
2.914	2.2	798	622	779	1000	1251	778	975	1251	1566	1960	1227	1574	1971
		0.209	0.263	0.220	0.183	0.158	0.241	0.199	0.163	0.139	0.120	0.182	0.147	0.124
3.468	2.4	871	678	850	1090	1365	849	1064	1365	1709	2138	1338	1717	2151
		0.245	0.308	0.257	0.215	0.186	0.283	0.233	0.191	0.163	0.141	0.214	0.173	0.145
4.070	2.6	944	735	921	1181	1479	920	1153	1478	1851	2317	1450	1860	2330
		0.284	0.357	0.298	0.249	0.215	0.327	0.270	0.222	0.189	0.163	0.248	0.200	0.168
4.720	2.8	1016	791	992	1272	1593	990	1241	1592	1993	2495	1561	2003	2509
		0.325	0.409	0.341	0.285	0.246	0.375	0.309	0.254	0.216	0.187	0.284	0.229	0.192
5.418	3.0	1089	848	1063	1363	1706	1061	1330	1706	2136	2673	1673	2147	2688
		0.369	0.464	0.388	0.324	0.280	0.426	0.351	0.288	0.246	0.212	0.322	0.261	0.218
6.164	3.2	1161	904	1133	1454	1820	1132	1418	1820	2278	2851	1784	2290	2868
		0.415	0.522	0.436	0.364	0.315	0.479	0.395	0.325	0.277	0.239	0.363	0.293	0.246
6.959	3.4	1234	961	1204	1545	1934	1203	1507	1933	2421	3029	1896	2433	3047
		0.465	0.584	0.488	0.408	0.352	0.536	0.442	0.362	0.309	0.268	0.406	0.328	0.275
7.802	3.6	1306	1017	1275	1636	2048	1273	1596	2047	2563	3208	2007	2576	3226
		0.516	0.649	0.542	0.453	0.392	0.596	0.491	0.404	0.344	0.298	0.451	0.365	0.306
8.693	3.8	1379	1074	1346	1727	2162	1344	1684	2161	2705	3386	2119	2719	3405
		0.571	0.717	0.600	0.501	0.433	0.659	0.543	0.447	0.380	0.329	0.499	0.403	0.338
9.632	4.0	1452	1130	1417	1817	2275	1415	1773	2275	2848	3564	2230	2862	3584
		0.628	0.789	0.659	0.551	0.476	0.724	0.597	0.491	0.418	0.362	0.548	0.444	0.372
10.619	4.2	1524	1187	1488	1908	2389	1486	1862	2388	2990	3742	2342	3005	3764
		0.687	0.863	0.722	0.603	0.521	0.793	0.654	0.538	0.458	0.396	0.600	0.486	0.408
11.655	4.4	1597	1244	1558	1999	2503	1556	1950	2502	3132	3920	2453	3148	3943
		0.749	0.941	0.787	0.658	0.569	0.865	0.713	0.586	0.500	0.432	0.655	0.530	0.445
12.738	4.6	1669	1300	1629	2090	2617	1627	2039	2616	3275	4099	2565	3291	4122
		0.814	1.023	0.855	0.715	0.618	0.939	0.775	0.637	0.543	0.470	0.711	0.576	0.483

(续)

动压 /Pa	风速 /(m/s)	外边长 (a/mm × b/mm)												上行是风量/ (m ³ /h)		
														下行是单位长度摩擦阻力/ (Pa/m)		
		320 × 320	400 × 200	400 × 250	400 × 320	400 × 400	500 × 200	500 × 250	500 × 320	500 × 400	500 × 500	630 × 250	630 × 320	630 × 400		
13.870	4.8	1742	1357	1700	2181	2730	1698	2128	2729	3417	4277	2676	3435	4301		
		0.881	1.107	0.926	0.774	0.669	1.017	0.839	0.690	0.588	0.508	0.770	0.623	0.523		
15.050	5.0	1815	1413	1771	2272	2844	1769	2216	2843	3560	4455	2788	3578	4481		
		0.951	1.195	0.999	0.835	0.722	1.097	0.905	0.745	0.634	0.549	0.831	0.673	0.565		
16.278	5.2	1887	1470	1842	2363	2958	1839	2305	2957	3702	4633	2899	3721	4660		
		1.024	1.286	1.075	0.899	0.777	1.181	0.974	0.801	0.683	0.591	0.894	0.724	0.608		
17.554	5.4	1960	1526	1913	2453	3072	1910	2394	3071	3844	4812	3011	3864	4839		
		1.099	1.380	1.154	0.964	0.834	1.267	1.046	0.860	0.733	0.634	0.960	0.777	0.652		
18.879	5.6	2032	1583	1983	2544	3185	1981	2482	3184	3987	4990	3122	4007	5018		
		1.176	1.477	1.235	1.033	0.893	1.356	1.119	0.921	0.784	0.679	1.028	0.832	0.698		
20.251	5.8	2105	1639	2054	2635	3299	2052	2571	3298	4129	5168	3234	4150	5197		
		1.256	1.577	1.319	1.103	0.954	1.449	1.196	0.983	0.838	0.725	1.098	0.889	0.746		
21.672	6.0	2177	1696	2125	2726	3413	2122	2660	3412	4272	5346	3345	4293	5377		
		1.339	1.681	1.406	1.175	1.016	1.544	1.274	1.048	0.893	0.773	1.170	0.947	0.795		
23.141	6.2	2250	1752	2196	2817	3527	2193	2748	3526	4414	5524	3457	4436	5556		
		1.424	1.788	1.496	1.250	1.081	1.642	1.355	1.115	0.950	0.822	1.244	1.008	0.846		
24.658	6.4	2323	1809	2267	2908	3640	2264	2837	3639	4556	5703	3568	4579	5735		
		1.512	1.898	1.588	1.327	1.148	1.743	1.439	1.184	1.003	0.873	1.321	1.070	0.898		
26.223	6.6	2395	1865	2338	2999	3754	2335	2926	3753	4699	5881	3680	4723	5914		
		1.602	2.011	1.682	1.406	1.216	1.847	1.525	1.254	1.069	0.925	1.400	1.134	0.951		
27.836	6.8	2468	1922	2408	3090	3868	2405	3014	3867	4841	6059	3791	4866	6094		
		1.695	2.128	1.780	1.488	1.287	1.954	1.613	1.327	1.131	0.979	1.481	1.199	1.007		
29.498	7.0	2540	1978	2479	3180	3982	2476	3103	3980	4983	6237	3903	5009	6273		
		1.790	2.247	1.880	1.572	1.359	2.064	1.704	1.402	1.194	1.034	1.564	1.267	1.063		
31.208	7.2	2613	2035	2550	3271	4096	2547	3192	4094	5126	6415	4014	5152	6452		
		1.888	2.370	1.983	1.658	1.434	2.177	1.797	1.478	1.260	1.090	1.650	1.336	1.121		
32.966	7.4	2685	2091	2621	3362	4209	2618	3280	4208	5268	6594	4126	5295	6631		
		1.988	2.496	2.088	1.746	1.510	2.292	1.892	1.557	1.327	1.148	1.737	1.407	1.181		
34.772	7.6	2758	2148	2692	3453	4323	2688	3369	4322	5411	6772	4237	5438	6810		
		2.091	2.625	2.196	1.836	1.588	2.411	1.990	1.638	1.395	1.208	1.827	1.480	1.242		
36.626	7.8	2831	2204	2763	3544	4437	2759	3458	4435	5553	6950	4349	5581	6990		
		2.196	2.757	2.307	1.929	1.668	2.533	2.091	1.720	1.466	1.269	1.920	1.555	1.305		
38.528	8.0	2903	2261	2833	3635	4551	2830	3546	4549	5695	7128	4460	5724	7169		
		2.304	2.893	2.420	2.024	1.750	2.657	2.193	1.805	1.538	1.331	2.014	1.631	1.369		
40.478	8.2	2976	2318	2904	3726	4664	2901	3635	4663	5838	7306	4572	5867	7348		
		2.415	3.031	2.536	2.121	1.834	2.784	2.298	1.891	1.612	1.395	2.111	1.710	1.435		
42.477	8.4	3048	2374	2975	3816	4778	2971	3723	4777	5980	7485	4683	6010	7527		
		2.528	3.173	2.655	2.220	1.920	2.915	2.406	1.980	1.687	1.461	2.209	1.790	1.502		

(续)

动压 /Pa	风速 /(m /s)	外边长 (a/mm × b/mm)												
		320 × 320	400 × 200	400 × 250	400 × 320	400 × 400	500 × 200	500 × 250	500 × 320	500 × 400	500 × 500	630 × 250	630 × 320	630 × 400
44.524	8.6	3121	2431	3046	3907	4892	3042	3812	4890	6123	7663	4795	6154	7707
		2.643	3.318	2.776	2.321	2.008	3.048	2.516	2.071	1.765	1.528	2.310	1.871	1.571
46.619	8.8	3194	2487	3117	3998	5006	3113	3901	5004	6265	7841	4906	6297	7886
		2.762	3.466	2.900	2.425	2.098	3.184	2.628	2.163	1.843	1.596	2.414	1.955	1.641
48.762	9.0	3266	2544	3188	4089	5119	3184	3989	5118	6407	8019	5018	6440	8065
		2.882	3.617	3.027	2.531	2.189	3.323	2.743	2.258	1.924	1.666	2.519	2.040	1.713
50.953	9.2	3339	2600	3258	4180	5233	3254	4078	5232	6550	8197	5129	6583	8244
		3.005	3.772	3.156	2.639	2.283	3.465	2.860	2.354	2.006	1.737	2.627	2.128	1.786
53.193	9.4	3411	2657	3329	4271	5347	3325	4167	5345	6692	8376	5241	6726	8423
		3.131	3.930	3.288	2.749	2.378	3.610	2.980	2.452	2.090	1.809	2.736	2.217	1.861
55.480	9.6	3484	2713	3400	4362	5461	3396	4255	5459	6834	8554	5352	6869	8603
		3.259	4.090	3.423	2.862	2.476	3.757	3.102	2.553	2.176	1.884	2.848	2.307	1.937
57.816	9.8	3556	2770	3471	4453	5574	3466	4344	5573	6977	8732	5464	7012	8782
		3.390	4.254	3.560	2.977	2.575	3.908	3.226	2.655	2.263	1.959	2.963	2.400	2.015
60.200	10.0	3629	2826	3542	4543	5688	3537	4433	5686	7119	8910	5575	7155	8961
		3.523	4.421	3.700	3.094	2.676	4.061	3.353	2.760	2.352	2.036	3.079	2.494	2.094
62.632	10.2	3702	2883	3613	4634	5802	3608	4521	5800	7262	9088	5687	7298	9140
		3.659	4.592	3.842	3.213	2.779	4.218	3.482	2.866	2.443	2.115	3.198	2.591	2.175
65.112	10.4	3774	2939	3683	4725	5916	3679	4610	5914	7404	9267	5798	7442	9320
		3.797	4.765	3.987	3.334	2.884	4.377	3.614	2.974	2.535	2.195	3.319	2.688	2.257
67.641	10.6	3847	2996	3754	4816	6030	3749	4699	6028	7546	9445	5910	7585	9499
		3.937	4.941	4.135	3.458	2.991	4.539	3.748	3.085	2.629	2.276	3.442	2.788	2.341
70.217	10.8	3919	3052	3825	4907	6143	3820	4787	6141	7689	9623	6021	7728	9678
		4.081	5.121	4.286	3.584	3.100	4.704	3.884	3.197	2.725	2.359	3.567	2.890	2.426
72.842	11.0	3992	3109	3896	4998	6257	3891	4876	6255	7831	9801	6133	7871	9857
		4.226	5.304	4.439	3.712	3.211	4.872	4.023	3.311	2.822	2.443	3.694	2.993	2.513
75.515	11.2	4065	3165	3967	5089	6371	3962	4965	6369	7974	9979	6244	8014	10036
		4.375	5.490	4.594	3.842	3.324	5.043	4.164	3.427	2.921	2.529	3.824	3.098	2.601
78.236	11.4	4137	3222	4038	5180	6485	4032	5053	6483	8116	10158	6356	8157	10216
		4.525	5.679	4.753	3.975	3.438	5.217	4.308	3.546	3.022	2.616	3.956	3.205	2.691
81.005	11.6	4210	3278	4108	5270	6598	4103	5142	6596	8258	10336	6467	8300	10395
		4.679	5.872	4.914	4.109	3.555	5.394	4.453	3.666	3.124	2.705	4.090	3.313	2.782
83.822	11.8	4282	3335	4179	5361	6712	4174	5231	6710	8401	10514	6579	8443	10574
		4.835	6.067	5.077	4.246	3.673	5.573	4.602	3.788	3.228	2.795	4.226	3.424	2.875
86.688	12.0	4355	3391	4250	5452	6826	4245	5319	6824	8543	10692	6690	8586	10753
		4.993	6.266	5.244	4.385	3.794	5.756	4.753	3.912	3.334	2.887	4.364	3.536	2.969
89.602	12.2	4427	3448	4321	5543	6940	4315	5408	6937	8685	10870	6802	8729	10933
		5.154	6.467	5.413	4.526	3.916	5.941	4.906	4.038	3.442	2.980	4.505	3.650	3.065

(续)

动压 /Pa	风速 /(m /s)	外边长 (a/mm × b/mm)												
		上行是风量/(m ³ /h)						下行是单位长度摩擦阻力/(Pa/m)						
		320 × 320	400 × 200	400 × 250	400 × 320	400 × 400	500 × 200	500 × 250	500 × 320	500 × 400	500 × 500	630 × 250	630 × 320	630 × 400
92.564	12.4	4500	3505	4392	5634	7053	4386	5497	7051	8828	11049	6913	8873	11112
		5.317	6.672	5.584	4.670	4.040	6.129	5.061	4.166	3.551	3.074	4.648	3.766	3.162
95.574	12.6	4573	3561	4463	5725	7167	4457	5585	7165	8970	11227	7025	9016	11291
		5.483	6.880	5.758	4.816	4.166	6.321	5.219	4.296	3.662	3.170	4.793	3.883	3.260
98.632	12.8	4645	3618	4533	5816	7281	4528	5674	7279	9113	11405	7136	9159	11470
		5.651	7.092	5.935	4.963	4.294	6.515	5.379	4.428	3.774	3.268	4.940	4.003	3.361
101.738	13.0	4718	3674	4604	5906	7395	4598	5763	7392	9255	11583	7248	9302	11649
		5.822	7.306	6.115	5.114	4.424	6.712	5.542	4.562	3.888	3.367	5.089	4.124	3.462
104.892	13.2	4790	3731	4675	5997	7508	4669	5851	7506	9397	11761	7359	9445	11829
		5.996	7.523	6.297	5.266	4.556	6.911	5.707	4.698	4.004	3.467	5.241	4.246	3.565
108.095	13.4	4863	3787	4746	6088	7622	4740	5940	7620	9540	11940	7471	9588	12008
		6.171	7.744	6.481	5.420	4.689	7.114	5.874	4.836	4.122	3.569	5.395	4.371	3.670
111.346	13.6	4935	3844	4817	6179	7736	4811	6029	7734	9682	12118	7582	9731	12187
		6.350	7.968	6.669	5.577	4.825	7.320	6.044	4.975	4.241	3.672	5.551	4.498	3.776
114.645	13.8	5008	3900	4888	6270	7850	4881	6117	7847	9825	12296	7694	9874	12366
		6.531	8.195	6.859	5.736	4.963	7.528	6.216	5.117	4.362	3.777	5.799	4.626	3.884
117.992	14.0	5081	3957	4958	6361	7964	4952	6206	7961	9967	12474	7805	10017	12546
		6.714	8.425	7.051	5.897	5.102	7.740	6.391	5.261	4.484	3.883	5.869	4.756	3.993
121.387	14.2	5153	4013	5029	6452	8077	5023	6294	8075	10109	12653	7917	10161	12725
		6.900	8.658	7.247	6.060	5.243	7.954	6.568	5.407	4.609	3.991	6.032	4.887	4.104
124.831	14.4	5226	4070	5100	6543	8191	5094	6383	8188	10252	12831	8028	10304	12904
		7.089	8.895	7.444	6.226	5.386	8.171	6.747	5.554	4.735	4.100	6.197	5.021	4.216
128.322	14.6	5298	4126	5171	6633	8305	5164	6472	8302	10394	13009	8140	10447	13083
		7.280	9.134	7.645	6.394	5.532	8.391	6.929	5.704	4.862	4.210	6.364	5.156	4.330
131.862	14.8	5371	4183	5242	6724	8419	5235	6560	8416	10536	13187	8251	10590	13262
		7.473	9.377	7.848	6.564	5.679	8.614	7.113	5.856	4.991	4.322	6.533	5.293	4.445
135.450	15.0	5444	4239	5313	6815	8532	5306	6649	8530	10679	13365	8363	10733	13442
		7.669	9.623	8.054	6.736	5.828	8.840	7.300	6.009	5.122	4.435	6.704	5.432	4.561
139.086	15.2	5516	4296	5383	6906	8646	5377	6738	8643	10821	13544	8474	10876	13621
		7.867	9.872	8.262	6.910	5.979	9.069	7.489	6.165	5.255	4.550	6.878	5.573	4.679
142.770	15.4	5589	4352	5454	6997	8760	5447	6826	8757	10964	13722	8586	11019	13800
		8.068	10.124	8.473	7.087	6.131	9.300	7.680	6.322	5.389	4.667	7.053	5.715	4.799
146.503	15.6	5661	4409	5525	7088	8874	5518	6915	8871	11106	13900	8693	11162	13979
		8.272	10.379	8.687	7.265	6.286	9.535	7.874	6.482	5.525	4.784	7.231	5.859	4.920
150.283	15.8	5734	4465	5596	7179	8987	5589	7004	8985	11248	14078	8809	11305	14159
		8.478	10.637	8.903	7.446	6.443	9.772	8.070	6.643	5.663	4.904	7.411	6.005	5.043
154.112	16.0	5806	4522	5667	7269	9101	5660	7092	9098	11391	14256	8920	11449	14338
		8.686	10.899	9.122	7.630	6.601	10.013	8.268	6.807	5.802	5.024	7.594	6.153	5.167

(续)

动压 /Pa	风速 /(m /s)	外边长 (a/mm × b/mm)												
		上行是风量/ (m ³ /h) 下行是单位长度摩擦阻力/ (Pa/m)												
		320 × 320	400 × 200	400 × 250	400 × 320	400 × 400	500 × 200	500 × 250	500 × 320	500 × 400	500 × 500	630 × 250	630 × 320	630 × 400
157.989	16.2	5879	4578	5738	7360	9215	5730	7181	9212	11533	14435	9032	11592	14517
		8.897	11.164	9.344	7.815	6.761	10.256	8.469	6.972	5.943	5.146	7.778	6.303	5.292
161.914	16.4	5952	4635	5808	7451	9329	5801	7270	9326	11676	14613	9143	11735	14696
		9.111	11.431	9.568	8.002	6.924	10.502	8.673	7.139	6.086	5.270	7.965	6.454	5.419
165.887	16.6	6024	4692	5879	7542	9442	5872	7358	9439	11818	14791	9255	11878	14875
		9.327	11.702	9.795	8.192	7.088	10.751	8.878	7.309	6.230	5.395	8.154	6.607	5.548
169.908	16.8	6097	4748	5950	7633	9556	5943	7447	9553	11960	14969	9366	12021	15055
		9.545	11.977	10.024	8.384	7.254	11.003	9.086	7.480	6.376	5.521	8.345	6.762	5.678
173.978	17.0	6169	4805	6021	7724	9670	6013	7536	9667	12103	15147	9478	12164	15234
		9.766	12.254	10.257	8.578	7.422	11.258	9.297	7.653	6.524	5.649	8.538	6.918	5.809
178.096	17.2	6242	4861	6092	7815	9784	6084	7624	9781	12245	15326	9589	12307	15413
		9.990	12.534	10.491	8.775	7.592	11.515	9.509	7.828	6.673	5.779	8.733	7.077	5.942
182.262	17.4	6315	4918	6163	7906	9898	6155	7713	9894	12387	15504	9701	12450	15592
		10.216	12.818	10.729	8.973	7.764	11.776	9.725	8.006	6.824	5.909	8.931	7.237	6.077
186.476	17.6	6387	4974	6233	7996	10011	6226	7802	10008	12530	15682	9812	12593	15772
		10.445	13.104	10.969	9.174	7.937	12.039	9.942	8.185	6.977	6.042	9.131	7.399	6.213
190.738	17.8	6460	5031	6304	8087	10125	6296	7890	10122	12672	15860	9924	12736	15951
		10.676	13.394	11.211	9.377	8.113	12.305	10.162	8.366	7.131	6.175	9.333	7.563	6.351
195.048	18.0	6532	5087	6375	8178	10239	6367	7979	10236	12815	16038	10036	12880	16130
		10.909	13.687	11.457	9.582	8.291	12.575	10.384	8.549	7.288	6.311	9.537	7.728	6.489
199.406	18.2	6605	5144	6446	8269	10353	6438	8068	10349	12957	16217	10147	13023	16309
		11.145	13.983	11.704	9.790	8.470	12.847	10.609	8.734	7.445	6.447	9.743	7.895	6.630
203.813	18.4	6677	5200	6517	8360	10466	6508	8156	10463	13099	16395	10259	13166	16488
		11.384	14.283	11.955	9.999	8.651	13.122	10.836	8.921	7.605	6.585	9.952	8.064	6.772
208.268	18.6	6750	5257	6588	8451	10580	6579	8245	10577	13242	16573	10370	13309	16668
		11.625	14.585	12.208	10.211	8.835	13.398	11.066	9.110	7.766	6.725	10.163	8.235	6.915
212.771	18.8	6823	5313	6658	8542	10694	6650	8334	10690	13384	16751	10482	13452	16847
		11.868	14.891	12.464	10.425	9.020	13.680	11.298	9.301	7.929	6.866	10.376	8.408	7.060
217.322	19.0	6895	5370	6729	8633	10808	6721	8422	10804	13527	16929	10593	13595	17026
		12.115	15.199	12.722	10.641	9.207	13.964	11.532	9.494	8.093	7.008	10.591	8.582	7.207
221.921	19.2	6968	5426	6800	8723	10921	6791	8511	10918	13669	17108	10705	13738	17205
		12.363	15.511	12.983	10.859	9.396	14.250	11.768	9.688	8.259	7.152	10.808	8.758	7.355
226.569	19.4	7040	5483	6871	8814	11035	6862	8599	11032	13811	17286	10816	13881	17385
		12.614	15.826	13.247	11.080	9.587	14.540	12.007	9.885	8.427	7.297	11.028	8.936	7.504
231.264	19.6	7113	5539	6942	8905	11149	6933	8688	11145	13954	17464	10928	14024	17564
		12.868	16.144	13.513	11.303	9.779	14.832	12.249	10.084	8.596	7.444	11.249	9.116	7.655
236.008	19.8	7185	5596	7013	8996	11263	7004	8777	11259	14096	17642	11039	14168	17743
		13.124	16.465	13.782	11.528	9.974	15.127	12.493	10.285	8.767	7.592	11.473	9.297	7.807
240.800	20.0	7258	5652	7083	9087	11376	7074	8865	11373	14238	17820	11151	14311	17922
		13.382	16.790	14.054	11.755	10.171	15.425	12.739	10.487	8.940	7.742	11.699	9.481	7.961

(续)

动压 /Pa	风速 /(m /s)	外边长 (a/mm × b/mm)												上行是风量/ (m ³ /h)	
														下行是单位长度摩擦阻力/ (Pa/m)	
		630 × 500	630 × 630	800 × 320	800 × 400	800 × 500	800 × 630	800 × 800	1000 × 320	1000 × 400	1000 × 500	1000 × 630	1000 × 800	1000 × 1000	
0.602	1.0	1122	1415	910	1139	1426	1799	2287	1138	1425	1784	2250	2861	3578	
		0.025	0.022	0.032	0.027	0.022	0.019	0.016	0.030	0.024	0.020	0.017	0.014	0.012	
0.867	1.2	1346	1698	1091	1367	1711	2159	2744	1365	1710	2141	2701	3433	4294	
		0.035	0.030	0.045	0.037	0.031	0.026	0.022	0.042	0.034	0.028	0.023	0.020	0.017	
1.180	1.4	1571	1981	1273	1595	1996	2519	3201	1593	1995	2497	3151	4005	5010	
		0.046	0.040	0.059	0.049	0.041	0.035	0.030	0.055	0.045	0.037	0.031	0.026	0.023	
1.541	1.6	1795	2264	1455	1823	2282	2878	3659	1820	2280	2854	3601	4577	5725	
		0.059	0.051	0.075	0.062	0.052	0.044	0.038	0.070	0.057	0.047	0.039	0.033	0.029	
1.950	1.8	2019	2547	1637	2050	2567	3238	4116	2048	2565	3211	4051	5149	6441	
		0.073	0.063	0.093	0.077	0.065	0.055	0.047	0.087	0.071	0.059	0.049	0.041	0.036	
2.408	2.0	2244	2831	1819	2278	2852	3598	4574	2276	2850	3568	4501	5721	7157	
		0.088	0.076	0.113	0.093	0.078	0.066	0.057	0.105	0.086	0.071	0.059	0.050	0.043	
2.914	2.2	2468	3114	2001	2506	3137	3958	5031	2503	3135	3924	4951	6293	7873	
		0.105	0.090	0.135	0.111	0.093	0.079	0.068	0.125	0.102	0.084	0.070	0.059	0.051	
3.468	2.4	2692	3397	2183	2734	3422	4318	5488	2731	3420	4281	5401	6865	8588	
		0.123	0.106	0.158	0.130	0.109	0.092	0.079	0.147	0.120	0.099	0.083	0.070	0.060	
4.070	2.6	2917	3680	2365	2962	3708	4677	5946	2958	3705	4638	5851	7438	9304	
		0.143	0.123	0.183	0.151	0.127	0.107	0.092	0.170	0.139	0.115	0.096	0.081	0.070	
4.720	2.8	3141	3963	2547	3189	3993	5037	6403	3186	3990	4995	6301	8010	10020	
		0.164	0.141	0.209	0.173	0.145	0.123	0.105	0.195	0.159	0.132	0.110	0.093	0.080	
5.418	3.0	3365	4246	2729	3417	4278	5397	6860	3413	4275	5351	6751	8582	10735	
		0.186	0.160	0.238	0.197	0.165	0.140	0.120	0.221	0.181	0.149	0.125	0.105	0.091	
6.164	3.2	3590	4529	2911	3645	4563	5757	7318	3641	4560	5708	7201	9154	11451	
		0.210	0.180	0.268	0.221	0.186	0.157	0.135	0.249	0.204	0.168	0.141	0.119	0.103	
6.959	3.4	3814	4812	3092	3873	4848	6117	7775	3868	4845	6065	7651	9726	12167	
		0.234	0.202	0.300	0.248	0.208	0.176	0.151	0.279	0.228	0.188	0.157	0.133	0.115	
7.802	3.6	4039	5095	3274	4101	5134	6476	8232	4096	5130	6422	8102	10298	12882	
		0.261	0.224	0.333	0.275	0.231	0.196	0.168	0.310	0.253	0.210	0.175	0.148	0.128	
8.693	3.8	4263	5378	3456	4328	5419	6836	8690	4324	5415	6779	8552	10870	13598	
		0.288	0.248	0.368	0.305	0.255	0.216	0.185	0.343	0.280	0.232	0.193	0.163	0.141	
9.632	4.0	4487	5661	3638	4556	5704	7196	9147	4551	5700	7135	9002	11442	14314	
		0.317	0.273	0.405	0.335	0.281	0.238	0.204	0.377	0.306	0.255	0.213	0.180	0.156	
10.619	4.2	4712	5944	3820	4784	5989	7556	9604	4779	5985	7492	9452	12014	15029	
		0.347	0.299	0.444	0.367	0.308	0.261	0.224	0.413	0.337	0.279	0.233	0.197	0.171	
11.655	4.4	4936	6227	4002	5012	6274	7916	10062	5006	6270	7849	9902	12587	15745	
		0.379	0.326	0.484	0.400	0.336	0.284	0.244	0.450	0.368	0.305	0.254	0.215	0.186	
12.738	4.6	5160	6510	4184	5240	6560	8275	10519	5234	6555	8206	10352	13159	16461	
		0.411	0.354	0.526	0.435	0.365	0.309	0.265	0.489	0.400	0.331	0.276	0.233	0.202	

(续)

动压 /Pa	风速 /(m /s)	外边长 (a/mm × b/mm)										上行是风量/ (m ³ /h) 下行是单位长度摩擦阻力/ (Pa/m)			
		630 × 500	630 × 630	800 × 320	800 × 400	800 × 500	800 × 630	800 × 800	1000 × 320	1000 × 400	1000 × 500	1000 × 630	1000 × 800	1000 × 1000	
		13. 870	4. 8	5385	6793	4366	5468	6845	8635	10976	5461	6840	8562	10802	13731
		0. 446	0. 384	0. 569	0. 471	0. 395	0. 335	0. 287	0. 530	0. 433	0. 358	0. 299	0. 253	0. 219	
15. 050	5. 0	5609	7076	4548	5695	7130	8995	11434	5689	7125	8919	11252	14303	17892	
		0. 481	0. 414	0. 614	0. 508	0. 426	0. 361	0. 310	0. 572	0. 467	0. 387	0. 323	0. 273	0. 236	
16. 278	5. 2	5834	7359	4730	5923	7415	9355	11891	5916	7410	9276	11702	14875	18608	
		0. 518	0. 446	0. 661	0. 547	0. 459	0. 389	0. 333	0. 615	0. 503	0. 416	0. 348	0. 293	0. 255	
17. 554	5. 4	6058	7642	4911	6151	7700	9715	12348	6144	7695	9633	12152	15447	19324	
		0. 556	0. 479	0. 710	0. 587	0. 493	0. 417	0. 358	0. 661	0. 540	0. 447	0. 373	0. 315	0. 273	
18. 879	5. 6	6282	7925	5093	6379	7986	10074	12806	6372	7980	9989	12602	16019	20039	
		0. 595	0. 512	0. 760	0. 629	0. 527	0. 447	0. 383	0. 707	0. 578	0. 479	0. 400	0. 337	0. 293	
20. 251	5. 8	6507	8209	5275	6607	8271	10434	13263	6599	8264	10346	13052	16591	20755	
		0. 636	0. 547	0. 812	0. 671	0. 563	0. 477	0. 409	0. 755	0. 617	0. 511	0. 427	0. 360	0. 313	
21. 672	6. 0	6731	8492	5457	6834	8556	10794	13721	6827	8549	10703	13503	17164	21471	
		0. 677	0. 584	0. 865	0. 716	0. 601	0. 509	0. 436	0. 805	0. 658	0. 545	0. 455	1. 384	0. 333	
23. 141	6. 2	6955	8775	5639	7062	8841	11154	14178	7054	8834	11060	13953	17736	22186	
		0. 721	0. 621	0. 920	0. 761	0. 639	0. 541	0. 464	0. 857	0. 700	0. 580	0. 484	0. 409	0. 355	
24. 658	6. 4	7180	9058	5821	7290	9126	11514	14635	7282	9119	11417	14403	18308	22902	
		0. 765	0. 659	0. 977	0. 808	0. 678	0. 575	0. 493	0. 909	0. 743	0. 616	0. 514	0. 434	0. 376	
26. 223	6. 6	7404	9341	6003	7518	9412	11873	15093	7509	9404	11773	14853	18880	23618	
		0. 811	0. 698	1. 035	0. 857	0. 719	0. 609	0. 523	0. 964	0. 788	0. 652	0. 545	0. 460	0. 399	
27. 836	6. 8	7628	9624	6185	7746	9697	12233	15550	7737	9689	12130	15303	19452	24333	
		0. 858	0. 739	1. 095	0. 906	0. 761	0. 645	0. 553	1. 020	0. 833	0. 690	0. 577	0. 487	0. 422	
29. 498	7. 0	7853	9907	6367	7974	9982	12593	16007	7964	9974	12487	15753	20024	25049	
		0. 906	0. 781	1. 157	0. 957	0. 804	0. 681	0. 584	1. 077	0. 880	0. 729	0. 609	0. 514	0. 446	
31. 208	7. 2	8077	10190	6549	8201	10267	12953	16465	8192	10259	12844	16203	20596	25765	
		0. 956	0. 823	1. 220	1. 010	0. 848	0. 718	0. 616	1. 136	0. 928	0. 769	0. 642	0. 542	0. 470	
32. 966	7. 4	8302	10473	6731	8429	10552	13313	16922	8420	10544	13200	16653	21168	26480	
		1. 007	0. 867	1. 285	1. 063	0. 893	0. 757	0. 649	1. 196	0. 978	0. 810	0. 677	0. 571	0. 496	
34. 772	7. 6	8526	10756	6912	8657	10838	13672	17379	8647	10829	13557	17103	21741	27196	
		1. 059	0. 912	1. 352	1. 119	0. 939	0. 796	0. 683	1. 258	1. 029	0. 852	0. 712	0. 601	0. 521	
36. 626	7. 8	8750	11039	7094	8885	11123	14032	17837	8875	11114	13914	17553	22313	27912	
		1. 112	0. 958	1. 420	1. 175	0. 986	0. 836	0. 717	1. 322	1. 081	0. 895	0. 748	0. 631	0. 548	
38. 528	8. 0	8975	11322	7276	9113	11408	14392	18294	9102	11399	14271	18003	22885	28627	
		1. 167	1. 006	1. 490	1. 233	1. 035	0. 877	0. 752	1. 387	1. 134	0. 939	0. 785	0. 662	0. 575	
40. 478	8. 2	9199	11605	7458	9340	11693	14752	18751	9330	11684	14627	18454	23457	29343	
		1. 223	1. 054	1. 561	1. 292	1. 085	0. 919	0. 789	1. 454	1. 188	0. 984	0. 822	0. 694	0. 602	
42. 477	8. 4	9423	11888	7640	9568	11978	15112	19209	9557	11969	14984	18904	24029	30059	
		1. 280	1. 103	1. 635	1. 353	1. 136	0. 963	0. 826	1. 522	1. 244	1. 031	0. 861	0. 727	0. 631	

(续)

动压 /Pa	风速 /(m/s)	外边长 (a/mm × b/mm)										上行是风量/ (m ³ /h) 下行是单位长度摩擦阻力/ (Pa/m)			
		630 × 500	630 × 630	800 × 320	800 × 400	800 × 500	800 × 630	800 × 800	1000 × 320	1000 × 400	1000 × 500	1000 × 630	1000 × 800	1000 × 1000	
		44. 524	8. 6	9648 1. 339	12171 1. 154	7822 1. 709	9796 1. 414	12264 1. 188	15471 1. 007	19666 0. 863	9785 1. 591	12254 1. 301	15341 1. 078	19354 0. 900	24601 0. 760
46. 619	8. 8	9872 1. 399	12454 1. 205	8004 1. 786	10024 1. 478	12549 1. 241	15831 1. 052	20123 0. 902	10012 1. 662	12539 1. 359	15698 1. 126	19804 0. 941	25173 0. 794	31490 0. 689	
48. 762	9. 0	10096 1. 460	12737 1. 258	8186 1. 864	10252 1. 542	12834 1. 295	16191 1. 098	20581 0. 942	10240 1. 735	12824 1. 418	16054 1. 175	20254 0. 982	25745 0. 829	32206 0. 719	
50. 953	9. 2	10321 1. 523	13020 1. 312	8368 1. 943	10479 1. 608	13119 1. 350	16551 1. 145	21038 0. 982	10468 1. 809	13109 1. 479	16411 1. 225	20704 1. 024	26317 0. 864	32922 0. 750	
53. 193	9. 4	10545 1. 586	13303 1. 367	8550 2. 025	10707 1. 676	13404 1. 407	16910 1. 193	21495 1. 023	10695 1. 885	13394 1. 541	16768 1. 277	21154 1. 067	26890 0. 901	33637 0. 781	
55. 480	9. 6	10770 1. 651	13587 1. 423	8732 2. 108	10935 1. 744	13690 1. 464	17270 1. 241	21953 1. 065	10923 1. 962	13679 1. 604	17125 1. 329	21604 1. 110	27462 0. 938	34353 0. 813	
57. 816	9. 8	10994 1. 718	13870 1. 480	8913 2. 192	11163 1. 814	13975 1. 523	17630 1. 291	22410 1. 108	11150 2. 041	13964 1. 669	17482 1. 382	22054 1. 155	28034 0. 975	35069 0. 846	
60. 200	10. 0	11218 1. 785	14153 1. 538	9095 2. 278	11391 1. 886	14260 1. 583	17990 1. 342	22868 1. 151	11378 2. 121	14249 1. 734	17838 1. 437	22504 1. 200	28606 1. 014	35784 0. 880	
62. 632	10. 2	11443 1. 854	14436 1. 597	9277 2. 366	11619 1. 958	14545 1. 644	18350 1. 394	23325 1. 196	11605 2. 203	14534 1. 801	18195 1. 492	22954 1. 247	29178 1. 053	36500 0. 913	
65. 112	10. 4	11667 1. 924	14719 1. 658	9459 2. 456	11846 2. 032	14830 1. 706	18709 1. 447	23782 1. 241	11833 2. 286	14819 1. 869	18552 1. 549	23404 1. 294	29750 1. 093	37216 0. 948	
67. 641	10. 6	11891 1. 995	15002 1. 719	9641 2. 547	12074 2. 108	15116 1. 770	19069 1. 500	24240 1. 287	12060 2. 371	15104 1. 939	18909 1. 606	23855 1. 342	30322 1. 133	37931 0. 983	
70. 217	10. 8	12116 2. 068	15285 1. 782	9823 2. 640	12302 2. 185	15401 1. 834	19429 1. 555	24697 1. 334	12288 2. 457	15389 2. 009	19265 1. 665	24305 1. 391	30894 1. 175	38647 1. 019	
72. 842	11. 0	12340 2. 142	15568 1. 846	10005 2. 734	12530 2. 263	15686 1. 900	19789 1. 611	25154 1. 382	12516 2. 545	15674 2. 081	19622 1. 724	24755 1. 441	31467 1. 217	39363 1. 056	
75. 515	11. 2	12564 2. 217	15851 1. 911	10187 2. 830	12758 2. 342	15971 1. 967	20149 1. 667	25612 1. 430	12743 2. 635	15959 2. 154	19979 1. 785	25205 1. 491	32039 1. 259	40078 1. 093	
78. 236	11. 4	12789 2. 294	16134 1. 977	10369 2. 928	12985 2. 423	16256 2. 034	20508 1. 725	26069 1. 480	12971 2. 726	16244 2. 228	20336 1. 846	25655 1. 543	32611 1. 303	40794 1. 130	
81. 005	11. 6	13013 2. 372	16417 2. 044	10551 3. 027	13213 2. 505	16542 2. 103	20868 1. 783	26526 1. 530	13198 2. 818	16529 2. 304	20692 1. 909	26105 1. 595	33183 1. 347	41510 1. 169	
83. 822	11. 8	13238 2. 451	16700 2. 112	10733 3. 128	13441 2. 589	16827 2. 174	21228 1. 843	26984 1. 581	13426 2. 912	16814 2. 381	21049 1. 973	26555 1. 648	33755 1. 392	42226 1. 208	
86. 688	12. 0	13462 2. 531	16983 2. 181	10914 3. 230	13669 2. 673	17112 2. 245	21588 1. 903	27441 1. 633	13653 3. 007	17099 2. 459	21406 2. 037	27005 1. 702	34327 1. 438	42941 1. 247	
89. 602	12. 2	13686 2. 613	17266 2. 251	11096 3. 334	13897 2. 760	17397 2. 317	21948 1. 965	27898 1. 685	13881 3. 104	17384 2. 538	21763 2. 103	27455 1. 757	34899 1. 484	43657 1. 288	

(续)

动压 /Pa	风速 /(m /s)	外边长 (a/mm × b/mm)										上行是风量/ (m ³ /h) 下行是单位长度摩擦阻力/ (Pa/m)			
		630 × 500	630 × 630	800 × 320	800 × 400	800 × 500	800 × 630	800 × 800	1000 × 320	1000 × 400	1000 × 500	1000 × 630	1000 × 800	1000 × 1000	
		92.564	12.4	13911	17549	11278	14124	17682	22307	28356	14103	17669	22120	27905	35471
		2.695	2.323	3.440	2.847	2.391	2.027	1.739	3.203	2.619	2.170	1.813	1.531	1.329	
95.574	12.6	14135	17832	11460	14352	17968	22667	28813	14336	17954	22476	28355	36043	45088	
		2.780	2.395	3.547	2.936	2.465	2.090	1.793	3.303	2.700	2.238	1.870	1.579	1.370	
98.632	12.8	14359	18115	11642	14580	18253	23027	29270	14564	18239	22833	28805	36616	45804	
		2.865	2.469	3.656	3.026	2.541	2.154	1.848	3.404	2.783	2.306	1.927	1.628	1.412	
101.738	13.0	14584	18398	11824	14808	18538	23387	29728	14791	18524	23190	29256	37188	46520	
		2.952	2.544	3.767	3.118	2.618	2.220	1.904	3.507	2.868	2.376	1.986	1.677	1.455	
104.892	13.2	14808	18681	12006	15036	18823	23747	30185	15019	18809	23547	29706	37760	47235	
		3.040	2.620	3.879	3.211	2.696	2.286	1.961	3.612	2.953	2.447	2.045	1.727	1.498	
108.095	13.4	15033	18965	12188	15264	19108	24106	30642	15246	19094	23903	30156	38332	47951	
		3.129	2.696	3.993	3.305	2.775	2.353	2.019	3.718	3.040	2.519	2.105	1.778	1.542	
111.346	13.6	15257	19248	12370	15491	19393	24466	31100	15474	19379	24260	30606	38904	48667	
		3.220	2.774	4.109	3.401	2.856	2.421	2.077	3.825	3.128	2.592	2.166	1.829	1.587	
114.645	13.8	15481	19531	12552	15719	19679	24826	31557	15701	19664	24617	31056	39476	49382	
		3.311	2.854	4.226	3.498	2.937	2.490	2.136	3.934	3.217	2.666	2.227	1.881	1.632	
117.992	14.0	15706	19814	12734	15947	19964	25186	32015	15929	19949	24974	31506	40048	50098	
		3.404	2.934	4.344	3.596	3.020	2.560	2.196	4.045	3.307	2.741	2.290	1.924	1.678	
121.387	14.2	15930	20097	12915	16175	20249	25546	32472	16156	20234	25330	31956	40620	50814	
		3.499	3.015	4.465	3.696	3.103	2.631	2.257	4.157	3.399	2.817	2.354	1.988	1.725	
124.831	14.4	16154	20380	13097	16403	20534	25905	32929	16384	20519	25687	32406	41193	51529	
		3.594	3.098	4.587	3.797	3.188	2.703	2.319	4.270	3.492	2.894	2.418	2.042	1.772	
128.322	14.6	16379	20663	13279	16630	20819	26265	33387	16612	20804	26044	32856	41765	52245	
		3.691	3.181	4.710	3.899	3.274	2.776	2.382	4.386	3.586	2.972	2.483	2.097	1.820	
131.862	14.8	16603	20946	13461	16858	21105	26625	33844	16839	21089	26401	33306	42337	52961	
		3.789	3.266	4.836	4.003	3.361	2.850	2.445	4.502	3.681	3.051	2.549	2.153	1.868	
135.450	15.0	16827	21229	13643	17086	21390	26985	34301	17067	21374	26757	33756	42909	53676	
		3.889	3.351	4.962	4.108	3.449	2.925	2.509	4.620	3.778	3.131	2.616	2.210	1.917	
139.086	15.2	17052	21512	13825	17314	21675	27345	34759	17294	21659	27114	34207	43481	54392	
		3.990	3.438	5.091	4.214	3.539	3.000	2.574	4.740	3.876	3.212	2.684	2.267	1.967	
142.770	15.4	17276	21795	14007	17542	21960	27704	35216	17522	21944	27471	34657	44053	55108	
		4.092	3.526	5.221	4.322	3.629	3.077	2.640	4.861	3.975	3.294	2.753	2.325	2.017	
146.503	15.6	17501	22078	14189	17770	22245	28064	35673	17749	22229	27828	35107	44625	55824	
		4.195	3.615	5.353	4.431	3.721	3.155	2.707	4.984	4.075	3.377	2.822	2.384	2.068	
150.283	15.8	17725	22361	14371	17997	22531	28424	36131	17977	22514	28185	35557	45197	56539	
		4.299	3.705	5.486	4.541	3.814	3.233	2.774	5.108	4.177	3.461	2.892	2.443	2.120	
154.112	16.0	17949	22644	14553	18225	22816	28784	36588	18204	22799	28541	36007	45769	57255	
		4.405	3.796	5.621	4.653	3.907	3.313	2.842	5.234	4.280	3.547	2.964	2.503	2.172	

(续)

动压 /Pa	风速 /(m /s)	外边长 (a/mm × b/mm)												上行是风量/ (m ³ /h)	
														下行是单位长度摩擦阻力/ (Pa/m)	
		630 × 500	630 × 630	800 × 320	800 × 400	800 × 500	800 × 630	800 × 800	1000 × 320	1000 × 400	1000 × 500	1000 × 630	1000 × 800	1000 × 1000	
157.989	16.2	18174	22927	14734	18453	23101	29144	37045	18432	23084	28898	36457	46343	57971	
		4.512	3.889	5.758	4.766	4.002	3.394	2.912	5.361	4.384	3.633	3.036	2.564	2.225	
161.914	16.4	18398	23210	14916	18681	23386	29503	37503	18660	23369	29255	36907	46914	58686	
		4.621	3.982	5.896	4.880	4.099	3.475	2.982	5.489	4.489	3.720	3.109	2.626	2.278	
165.887	16.6	18622	23493	15098	18909	23671	29863	37960	18887	23654	29612	37357	47486	59402	
		4.730	4.077	6.036	4.996	4.196	3.558	3.052	5.620	4.595	3.808	3.182	2.688	2.332	
169.908	16.8	18847	23776	15280	19136	23957	30223	38417	19115	23939	29968	37807	48058	60118	
		4.841	4.172	6.177	5.113	4.294	3.641	3.124	5.751	4.703	3.898	3.257	2.751	2.387	
173.978	17.0	19071	24059	15462	19364	24242	30583	38875	19342	24224	30325	38257	48630	60833	
		4.953	4.269	6.320	5.232	4.394	3.725	3.196	5.885	4.812	3.988	3.332	2.815	2.443	
178.096	17.2	19295	24343	15644	19592	24527	30943	39332	19570	24508	30682	38707	49202	61549	
		5.067	4.367	6.465	5.352	4.494	3.811	3.270	6.019	4.922	4.079	3.409	2.879	2.499	
182.262	17.4	19520	24626	15826	19820	24812	31302	39789	19797	24793	31039	39157	49774	62265	
		5.181	4.465	6.611	5.473	4.596	3.897	3.344	6.156	5.034	4.172	3.486	2.945	2.555	
186.476	17.6	19744	24909	16008	20048	25097	31662	40247	20025	25078	31395	39608	50346	62980	
		5.297	4.565	6.759	5.595	4.699	3.984	3.418	6.293	5.146	4.265	3.564	3.010	2.612	
190.738	17.8	19969	25192	16196	20275	25383	32022	40704	20252	25363	31752	40058	50919	63696	
		5.415	4.666	6.909	5.719	4.803	4.072	3.494	6.433	5.260	4.360	3.643	3.077	2.670	
195.048	18.0	20193	25475	16372	20503	25668	32382	41162	20480	25648	32109	40508	51491	64412	
		5.533	4.769	7.060	5.844	4.908	4.162	3.571	6.573	5.376	4.455	3.723	3.145	2.729	
199.406	18.2	20417	25758	16554	20731	25953	32742	41619	20708	25933	32466	40958	52063	65127	
		5.653	4.872	7.213	5.971	5.014	4.252	3.648	6.716	5.492	4.551	3.803	3.213	2.788	
203.813	18.4	20642	26041	16735	20959	26238	33101	42076	20935	26218	32823	41408	52635	65843	
		5.774	4.976	7.367	6.099	5.122	4.343	3.726	6.860	5.610	4.649	3.885	3.281	2.848	
208.268	18.6	20866	26324	16917	21187	26523	33461	42534	21163	26503	33179	41858	53207	66559	
		5.896	5.082	7.523	6.228	5.230	4.435	3.805	7.005	5.728	4.747	3.967	3.351	2.908	
212.771	18.8	21090	26607	17099	21415	26809	33821	42991	21390	26788	33536	42308	53779	67275	
		6.020	5.188	7.681	6.359	5.340	4.528	3.885	7.152	5.848	4.847	4.050	3.421	2.969	
217.322	19.0	21315	26890	17281	21642	27094	34181	43448	21618	27073	33893	42758	54351	67990	
		6.145	5.296	7.840	6.490	5.451	4.622	3.966	7.300	5.970	4.948	4.134	3.492	3.030	
221.921	19.2	21539	27173	17463	21870	27379	34541	43906	21845	27358	34250	43208	54923	68706	
		6.271	5.405	8.001	6.624	5.563	4.717	4.047	7.450	6.092	5.049	4.219	3.564	3.093	
226.560	19.4	21763	27456	17645	22098	27664	34900	44363	22073	27643	34606	43658	54495	69422	
		6.398	5.514	8.164	6.758	5.676	4.813	4.129	7.601	6.216	5.152	4.305	3.636	3.156	
231.264	19.6	21988	27739	17827	22326	27949	35260	44820	22300	27928	34963	44108	56068	70137	
		6.527	5.625	8.328	6.894	5.790	4.909	4.212	7.754	6.341	5.255	4.392	3.710	3.219	
236.008	19.8	22212	28022	18009	22554	28235	35620	45278	22528	28214	35320	44558	56640	70853	
		6.657	5.737	8.494	7.031	5.905	5.007	4.296	7.909	6.467	5.360	4.479	3.784	3.283	
240.800	20.0	22437	28305	18191	22781	28520	35980	45735	22756	28498	35677	45009	57212	71569	
		6.788	5.850	8.661	7.170	6.022	5.106	4.381	8.064	6.595	5.466	4.568	3.858	3.348	

(续)

动压 /Pa	风速 /(m /s)	外边长 (a/mm × b/mm)												上行是风量/ (m ³ /h)		
														下行是单位长度摩擦阻力/ (Pa/m)		
		1250 × 400	1250 × 500	1250 × 630	1250 × 800	1250 × 1000	1600 × 500	1600 × 630	1600 × 800	1600 × 1000	1600 × 1250	2000 × 800	2000 × 1000	2000 × 1250		
0.602	1.0	1780	2229	2812	3575	4473	2854	3602	4579	5728	7165	5726	7163	8960		
		0.023	0.019	0.015	0.013	0.011	0.017	0.014	0.011	0.009	0.008	0.010	0.009	0.007		
0.867	1.2	2136	2674	3374	4290	5367	3425	4322	5494	6874	8598	6871	8596	10752		
		0.032	0.026	0.021	0.018	0.015	0.024	0.019	0.016	0.013	0.011	0.014	0.012	0.010		
1.180	1.4	2492	3120	3937	5005	6262	3996	5042	6410	8020	10031	8016	10029	12544		
		0.042	0.034	0.028	0.023	0.020	0.031	0.026	0.021	0.017	0.015	0.019	0.016	0.013		
1.541	1.6	2848	3566	4499	5720	7156	4567	5762	7326	9165	11464	9161	11461	14336		
		0.053	0.043	0.036	0.030	0.025	0.040	0.033	0.027	0.022	0.019	0.024	0.020	0.017		
1.950	1.8	3204	4012	5062	6435	8051	5138	6483	8242	10311	12897	10306	12894	16128		
		0.066	0.054	0.044	0.037	0.031	0.050	0.040	0.033	0.028	0.024	0.030	0.025	0.021		
2.408	2.0	3560	4457	5624	7150	8945	5709	7203	9157	11456	14330	11452	14327	17921		
		0.080	0.065	0.054	0.045	0.038	0.060	0.049	0.040	0.034	0.029	0.037	0.030	0.026		
2.914	2.2	3916	4903	6186	7865	9840	6280	7923	10073	12602	15763	12597	15759	19713		
		0.095	0.078	0.064	0.053	0.045	0.072	0.058	0.048	0.040	0.034	0.044	0.036	0.031		
3.468	2.4	4272	5349	6749	8580	10734	6850	8644	10989	13748	17196	13742	17192	21505		
		0.112	0.091	0.075	0.062	0.053	0.084	0.068	0.056	0.047	0.040	0.051	0.043	0.036		
4.070	2.6	4628	5791	7311	9295	11629	7421	9364	11905	14893	18629	14887	18625	23297		
		0.129	0.106	0.087	0.072	0.062	0.098	0.079	0.065	0.054	0.046	0.060	0.049	0.042		
4.720	2.8	4984	6240	7874	10010	12523	7992	10084	12820	16039	20062	16032	20057	25089		
		0.148	0.121	0.100	0.083	0.071	0.112	0.091	0.074	0.062	0.053	0.068	0.057	0.048		
5.418	3.0	5340	6686	8436	10725	13418	8563	10805	13736	17185	21495	17177	21490	26881		
		0.168	0.138	0.113	0.094	0.080	0.127	0.103	0.084	0.071	0.061	0.078	0.064	0.054		
6.164	3.2	5696	7132	8998	11440	14312	9134	11525	14652	18330	22929	18322	22923	28673		
		0.190	0.155	0.128	0.106	0.091	0.143	0.116	0.095	0.080	0.068	0.088	0.073	0.061		
6.959	3.4	6051	7577	9561	12155	15207	9705	12245	15567	19476	24362	19468	24355	30465		
		0.212	0.173	0.143	0.119	0.101	0.160	0.130	0.106	0.090	0.076	0.098	0.081	0.068		
7.802	3.6	6407	8023	10123	12870	16101	10276	12966	16483	20622	25795	20613	25788	32257		
		0.236	0.193	0.159	0.132	0.113	0.178	0.145	0.118	0.100	0.085	0.109	0.090	0.076		
8.693	3.8	6763	8469	10686	13585	16996	10846	13686	17399	21767	27228	21758	27221	34049		
		0.261	0.213	0.176	0.146	0.125	0.197	0.160	0.131	0.110	0.094	0.121	0.100	0.084		
9.632	4.0	7119	8914	11248	14300	17890	11417	14406	18315	22913	28661	22903	28653	35841		
		0.287	0.235	0.193	0.161	0.137	0.217	0.176	0.144	0.121	0.104	0.133	0.110	0.093		
10.619	4.2	7475	9360	11811	15015	18785	11988	15126	19230	24059	30094	24048	30086	37633		
		0.314	0.257	0.212	0.176	0.150	0.238	0.193	0.158	0.133	0.113	0.145	0.121	0.102		
11.655	4.4	7831	9806	12373	15730	19679	12559	15847	20146	25204	31527	25193	31519	39425		
		0.343	0.280	0.231	0.192	0.164	0.259	0.211	0.172	0.145	0.124	0.159	0.132	0.111		
12.738	4.6	8187	10252	12935	16445	20574	13130	16567	21062	26350	32960	26339	32951	41217		
		0.373	0.305	0.251	0.208	0.178	0.282	0.229	0.187	0.158	0.134	0.172	0.143	0.120		

(续)

动压 /Pa	风速 /(m /s)	外边长 (a/mm × b/mm)												上行是风量/ (m ³ /h)		
														下行是单位长度摩擦阻力/ (Pa/m)		
		1250 × 400	1250 × 500	1250 × 630	1250 × 800	1250 × 1000	1600 × 500	1600 × 630	1600 × 800	1600 × 1000	1600 × 1250	2000 × 800	2000 × 1000	2000 × 1250		
13. 870	4. 8	8543	10697	13498	17160	21468	13701	17287	21978	27495	34393	27484	34384	43009		
		0. 403	0. 330	0. 272	0. 226	0. 193	0. 305	0. 248	0. 203	0. 171	0. 146	0. 187	0. 155	0. 130		
15. 050	5. 0	8899	11143	14060	17875	22363	14272	18008	22893	28641	35826	28629	35817	44801		
		0. 435	0. 356	0. 293	0. 244	0. 208	0. 329	0. 267	0. 219	0. 184	0. 157	0. 201	0. 167	0. 141		
16. 278	5. 2	9255	11589	14623	18590	23257	14843	18728	23809	29787	37259	29774	37249	46593		
		0. 469	0. 383	0. 316	0. 262	0. 224	0. 355	0. 288	0. 236	0. 198	0. 169	0. 217	0. 180	0. 152		
17. 554	5. 4	9611	12035	15185	19305	24152	15413	19448	24725	30932	38692	30919	38682	48385		
		0. 503	0. 411	0. 339	0. 282	0. 241	0. 381	0. 309	0. 253	0. 213	0. 182	0. 233	0. 193	0. 163		
18. 879	5. 6	9967	12480	15747	20020	25046	15984	20169	25641	32078	40125	32064	40115	50177		
		0. 539	0. 441	0. 363	0. 302	0. 258	0. 408	0. 331	0. 271	0. 228	0. 195	0. 249	0. 207	0. 174		
20. 251	5. 8	10323	12926	16310	20735	25941	16555	20889	26556	33224	41558	33200	41547	51970		
		0. 575	0. 471	0. 388	0. 322	0. 275	0. 435	0. 354	0. 289	0. 244	0. 208	0. 266	0. 221	0. 186		
21. 672	6. 0	10679	13372	16872	21450	26835	17126	21609	27472	34369	42991	34355	42980	53762		
		0. 613	0. 502	0. 413	0. 344	0. 294	0. 464	0. 377	0. 309	0. 260	0. 222	0. 284	0. 236	0. 199		
23. 141	6. 2	11035	13817	17435	22165	27730	17697	22330	28388	35515	44424	35500	44413	55554		
		0. 652	0. 534	0. 440	0. 366	0. 312	0. 494	0. 401	0. 328	0. 276	0. 236	0. 302	0. 251	0. 211		
24. 658	6. 4	11391	14263	17997	22880	28624	18268	23050	29303	36661	45857	36645	45845	57346		
		0. 693	0. 567	0. 467	0. 388	0. 332	0. 524	0. 426	0. 349	0. 293	0. 251	0. 321	0. 267	0. 224		
26. 223	6. 6	11747	14709	18559	23595	29519	18839	23770	30219	37806	47290	37790	47278	59138		
		0. 734	0. 601	0. 495	0. 411	0. 352	0. 556	0. 451	0. 369	0. 311	0. 266	0. 340	0. 283	0. 238		
27. 836	6. 8	12103	15155	19122	24310	30413	19409	24491	31135	38952	48723	38935	48711	60930		
		0. 777	0. 635	0. 523	0. 435	0. 372	0. 588	0. 478	0. 391	0. 329	0. 281	0. 360	0. 299	0. 252		
29. 498	7. 0	12459	15600	19684	25025	31308	19980	25211	32051	40098	50156	40080	50143	62722		
		0. 821	0. 671	0. 553	0. 460	0. 393	0. 621	0. 504	0. 413	0. 348	0. 297	0. 380	0. 316	0. 266		
31. 208	7. 2	12815	16046	20247	25740	32202	20551	25931	32966	41243	51589	41226	51576	64514		
		0. 865	0. 708	0. 583	0. 485	0. 415	0. 655	0. 532	0. 436	0. 367	0. 313	0. 401	0. 333	0. 281		
32. 966	7. 4	13171	16402	20809	26455	33097	21122	26651	33882	42389	53022	42371	53009	66306		
		0. 912	0. 746	0. 614	0. 511	0. 437	0. 690	0. 561	0. 459	0. 386	0. 330	0. 422	0. 351	0. 296		
34. 772	7. 6	13527	16938	21371	27170	33991	21693	27372	34798	43534	54455	43516	54441	68098		
		0. 959	0. 784	0. 646	0. 537	0. 459	0. 726	0. 590	0. 483	0. 406	0. 347	0. 444	0. 369	0. 311		
36. 626	7. 8	13883	17383	21934	27885	34886	22264	28092	35714	44680	55888	44661	55874	69890		
		1. 007	0. 824	0. 679	0. 565	0. 483	0. 762	0. 619	0. 507	0. 427	0. 365	0. 467	0. 388	0. 327		
38. 528	8. 0	14239	17829	22496	28600	35780	22835	28812	36629	45826	57321	45806	57307	71682		
		1. 057	0. 865	0. 712	0. 592	0. 506	0. 800	0. 650	0. 532	0. 448	0. 383	0. 490	0. 407	0. 343		
40. 478	8. 2	14595	18275	23059	29315	36675	23406	29533	37545	46971	58754	46951	58739	73474		
		1. 108	0. 906	0. 747	0. 621	0. 531	0. 838	0. 681	0. 558	0. 470	0. 401	0. 513	0. 427	0. 359		
42. 477	8. 4	14951	18720	23621	30030	37569	23976	30253	38461	48117	60187	48096	60172	75266		
		1. 160	0. 949	0. 782	0. 650	0. 556	0. 878	0. 713	0. 584	0. 492	0. 420	0. 538	0. 447	0. 376		

(续)

动压 /Pa	风速 /(m /s)	外边长 (a/mm × b/mm)												上行是风量/ (m ³ /h)		
														下行是单位长度摩擦阻力/ (Pa/m)		
		1250 × 400	1250 × 500	1250 × 630	1250 × 800	1250 × 1000	1600 × 500	1600 × 630	1600 × 800	1600 × 1000	1600 × 1250	2000 × 800	2000 × 1000	2000 × 1250		
44.524	8.6	15307	19166	24183	30745	38464	24547	30973	39377	49263	61620	49242	61605	77058		
		1.213	0.992	0.817	0.680	0.581	0.918	0.746	0.611	0.514	0.439	0.562	0.467	0.393		
46.619	8.8	15663	19612	24746	31460	39358	25118	31694	40292	50408	63053	50387	63037	78850		
		1.267	1.037	0.854	0.710	0.607	0.959	0.779	0.638	0.537	0.459	0.587	0.488	0.411		
48.762	9.0	16019	20058	25308	32175	40253	25689	32414	41208	51554	64486	51532	64470	80642		
		1.322	1.082	0.891	0.741	0.634	1.001	0.813	0.666	0.561	0.479	0.613	0.509	0.429		
50.953	9.2	16375	20503	25871	32890	41147	26260	33134	42124	52700	65919	52677	65903	82434		
		1.379	1.128	0.930	0.773	0.661	1.044	0.848	0.695	0.585	0.499	0.639	0.531	0.448		
53.193	9.4	16731	20949	26433	33605	42042	26831	33855	43039	53845	67352	53822	67335	84226		
		1.437	1.176	0.969	0.806	0.689	1.088	0.884	0.724	0.609	0.520	0.666	0.554	0.466		
55.480	9.6	17087	21395	26995	34320	42936	27402	34575	43955	54991	68786	54967	68768	86019		
		1.495	1.224	1.008	0.839	0.717	1.132	0.920	0.753	0.634	0.542	0.694	0.576	0.485		
57.816	9.8	17442	21840	27558	35035	43831	27973	35295	44871	56137	70219	56113	70201	87811		
		1.555	1.273	1.049	0.872	0.746	1.178	0.957	0.784	0.660	0.564	0.721	0.599	0.505		
60.200	10.0	17798	22286	28120	35749	44725	28543	36015	45787	57282	71652	57258	71633	89603		
		1.617	1.323	1.090	0.907	0.775	1.224	0.995	0.815	0.686	0.586	0.750	0.623	0.525		
62.632	10.2	18154	22732	28683	36464	45620	29114	36736	46702	58428	73085	58403	73066	91395		
		1.679	1.374	1.132	0.942	0.805	1.271	1.033	0.846	0.712	0.608	0.779	0.647	0.545		
65.112	10.4	18510	23178	29245	37179	46514	29685	37456	47618	59573	74518	59548	74499	93187		
		1.742	1.426	1.175	0.977	0.836	1.319	1.072	0.878	0.739	0.631	0.808	0.672	0.566		
67.641	10.6	18866	23623	29808	37894	47409	30256	38176	48534	60719	75951	60693	75931	94979		
		1.807	1.479	1.219	1.014	0.867	1.368	1.112	0.911	0.767	0.655	0.838	0.697	0.587		
70.217	10.8	19222	24069	30370	38609	48303	30827	38897	49450	61865	77384	61838	77364	96771		
		1.873	1.533	1.263	1.051	0.898	1.418	1.152	0.944	0.795	0.679	0.869	0.722	0.608		
72.842	11.0	19578	24515	30932	39324	49198	31398	39617	50363	63010	78817	62983	78797	98563		
		1.940	1.588	1.308	1.088	0.930	1.469	1.194	0.978	0.823	0.703	0.900	0.748	0.630		
75.515	11.2	19934	24961	31495	40039	50092	31969	40337	51281	64156	80250	64129	80229	100355		
		2.008	1.643	1.354	1.126	0.963	1.520	1.236	1.012	0.852	0.728	0.932	0.774	0.652		
78.236	11.4	20290	25406	32057	40754	50987	32539	41058	52197	65302	81683	65274	81662	102147		
		2.077	1.700	1.401	1.165	0.996	1.573	1.278	1.047	0.881	0.753	0.964	0.801	0.675		
81.005	11.6	20646	25852	32620	41469	51881	33110	41778	53113	66447	83116	66419	83095	103939		
		2.148	1.758	1.449	1.205	1.030	1.626	1.322	1.082	0.911	0.779	0.997	0.828	0.698		
83.822	11.8	21002	26298	33182	42184	52776	33681	42498	54028	67593	84549	67564	84527	105731		
		2.219	1.816	1.497	1.245	1.065	1.681	1.366	1.119	0.942	0.805	1.030	0.856	0.721		
86.688	12.0	21358	26743	33744	42899	53670	34252	43219	54944	68739	85982	68709	85960	107523		
		2.292	1.876	1.546	1.286	1.100	1.736	1.411	1.155	0.973	0.831	1.064	0.884	0.745		
89.602	12.2	21714	27189	34307	43614	54565	34823	43939	55860	69884	87415	69854	87393	109315		
		2.366	1.937	1.596	1.327	1.135	1.792	1.456	1.193	1.004	0.858	1.098	0.912	0.769		

(续)

动压 /Pa	风速 /(m /s)	外边长 (a/mm × b/mm)												上行是风量/ (m ³ /h) 下行是单位长度摩擦阻力/ (Pa/m)			
		1250 ×	1250 ×	1250 ×	1250 ×	1250 ×	1600 ×	1600 ×	1600 ×	1600 ×	1600 ×	2000 ×	2000 ×	2000 ×			
		400	500	630	800	1000	500	630	800	1000	1250	800	1000	1250			
92.564	12.4	22070	27635	34869	44329	55459	35394	44659	56775	71030	88848	71000	88825	111107			
		2.441	1.998	1.646	1.370	1.171	1.849	1.502	1.230	1.036	0.885	1.133	0.941	0.793			
95.574	12.6	22426	28081	35432	45044	56354	35965	45379	57691	72176	90281	72145	90258	112899			
		2.517	2.060	1.698	1.412	1.208	1.906	1.549	1.269	1.068	0.913	1.168	0.971	0.818			
98.632	12.8	22782	28526	35994	45759	57248	36536	46100	58607	73321	91714	73290	91691	114691			
		2.595	2.124	1.750	1.456	1.245	1.965	1.597	1.308	1.101	0.941	1.204	1.001	0.843			
101.738	13.0	23138	28972	36556	46474	58143	37106	46820	59523	74467	93147	74435	93123	116483			
		2.673	2.188	1.803	1.500	1.283	2.024	1.645	1.348	1.135	0.969	1.241	1.031	0.869			
104.892	13.2	23494	29418	37119	47189	59037	37677	47540	60438	75612	94580	75580	94556	118275			
		2.753	2.253	1.857	1.545	1.321	2.085	1.694	1.388	1.168	0.998	1.278	1.062	0.895			
108.095	13.4	23850	29864	37681	47904	59932	38248	48261	61354	76758	96013	76725	95989	120068			
		2.834	2.319	1.911	1.590	1.360	2.146	1.744	1.429	1.203	1.028	1.315	1.093	0.921			
111.346	13.6	24206	30309	38244	48619	60826	38819	48981	62270	77904	97446	77870	97421	121860			
		2.916	2.387	1.967	1.636	1.399	2.208	1.795	1.470	1.238	1.057	1.353	1.125	0.948			
114.645	13.8	24562	30755	38806	49334	61721	39390	49701	63186	79049	98879	79016	98854	123652			
		2.999	2.455	2.023	1.683	1.439	2.271	1.846	1.512	1.273	1.088	1.392	1.157	0.975			
117.992	14.0	24918	31201	39368	50049	62615	39961	50422	64101	80195	100312	80161	100287	125444			
		3.083	2.524	2.080	1.730	1.479	2.335	1.898	1.554	1.309	1.118	1.431	1.189	1.002			
121.387	14.2	25274	31646	39931	50764	63510	40532	51142	65017	81341	101745	81306	101719	127236			
		3.169	2.594	2.137	1.778	1.520	2.400	1.950	1.598	1.345	1.149	1.471	1.222	1.030			
124.831	14.4	25630	32092	40493	51479	64404	41102	51862	65933	82486	103178	82451	103152	129028			
		3.255	2.665	2.196	1.827	1.562	2.465	2.004	1.641	1.382	1.181	1.511	1.256	1.058			
128.322	14.6	25986	32538	41056	52194	65299	41673	52583	66849	83632	104611	83596	104584	130820			
		3.343	2.736	2.255	1.876	1.604	2.532	2.058	1.685	1.419	1.212	1.552	1.290	1.087			
131.862	14.8	26342	32984	41618	52909	66193	42244	53303	67764	84778	106044	84741	106017	132612			
		3.432	2.809	2.315	1.926	1.647	2.599	2.113	1.730	1.457	1.245	1.593	1.324	1.116			
135.450	15.0	26698	33429	42180	53624	67088	42815	54023	68680	85923	107477	85887	107450	134404			
		3.522	2.883	2.376	1.977	1.690	2.667	2.168	1.776	1.495	1.277	1.635	1.359	1.145			
139.086	15.2	27054	33875	42743	54339	67982	43386	54744	69596	87069	108910	87032	108882	136196			
		3.613	2.958	2.437	2.028	1.734	2.736	2.224	1.822	1.534	1.311	1.677	1.394	1.175			
142.770	15.4	27410	34321	43305	55054	68877	43957	55464	70511	88215	110343	88177	110315	137988			
		3.706	3.033	2.500	2.080	1.778	2.806	2.281	1.868	1.573	1.344	1.720	1.430	1.205			
146.503	15.6	27766	34766	43868	55769	69771	44528	56184	71427	89360	111776	89322	111748	139780			
		3.799	3.110	2.563	2.132	1.823	2.877	2.339	1.916	1.613	1.378	1.764	1.466	1.235			
150.283	15.8	28122	35212	44430	56484	70666	45099	56904	72343	90506	113209	90467	113180	141572			
		3.894	3.187	2.627	2.185	1.869	2.949	2.397	1.963	1.653	1.412	1.808	1.502	1.266			
154.112	16.0	28478	35658	44992	57199	71560	45669	57625	73259	91651	114643	91612	114613	143364			
		3.990	3.266	2.691	2.239	1.915	3.022	2.456	2.012	1.694	1.447	1.852	1.539	1.297			

(续)

动压 /Pa	风速 /(m /s)	外边长 (a/mm × b/mm)												上行是风量/(m ³ /h) 下行是单位长度摩擦阻力/(Pa/m)			
		1250 ×	1250 ×	1250 ×	1250 ×	1250 ×	1600 ×	1600 ×	1600 ×	1600 ×	1600 ×	2000 ×	2000 ×	2000 ×			
		400	500	630	800	1000	500	630	800	1000	1250	800	1000	1250			
157.989	16.2	28833	36104	45555	57914	72455	46240	58345	74174	92797	116076	92757	116046	145156			
		4.087	3.345	2.757	2.294	1.961	3.095	2.516	2.061	1.735	1.482	1.897	1.577	1.329			
161.914	16.4	29189	36549	46117	58629	73349	46811	59065	75090	93943	117509	93903	117478	146948			
		4.185	3.426	2.823	2.349	2.008	3.169	2.576	2.110	1.777	1.518	1.943	1.615	1.361			
165.887	16.6	29545	36995	46680	59344	74244	47382	59786	76006	95088	118942	95048	118911	148740			
		4.284	3.507	2.890	2.404	2.056	3.245	2.637	2.160	1.819	1.554	1.989	1.653	1.393			
169.908	16.8	29901	37441	47242	60059	75138	47953	60506	76922	96234	120375	96193	120344	150532			
		4.385	3.589	2.958	2.461	2.104	3.321	2.699	2.211	1.862	1.591	2.036	1.692	1.426			
173.978	17.0	30257	37887	47805	60774	76033	48524	61226	77837	97380	121808	97338	121776	152324			
		4.486	3.672	3.027	2.518	2.153	3.398	2.762	2.262	1.905	1.628	2.083	1.731	1.459			
178.096	17.2	30613	38332	48367	61489	76927	49095	61947	78753	98525	123241	98483	123209	154116			
		4.589	3.756	3.096	2.576	2.203	3.476	2.825	2.314	1.948	1.665	2.131	1.771	1.492			
182.262	17.4	30969	38778	48929	62204	77822	49665	62667	79669	99671	124674	99628	124642	155909			
		4.693	3.841	3.166	2.634	2.252	3.554	2.889	2.360	1.993	1.703	2.179	1.811	1.526			
186.476	17.6	31325	39224	49492	62919	78716	50236	63387	80585	100817	126107	100774	126074	157701			
		4.798	3.927	3.237	2.693	2.303	3.634	2.954	2.419	2.037	1.741	2.228	1.851	1.560			
190.738	17.8	31681	39669	50054	63634	79611	50807	64108	81500	101962	127540	101919	127507	159493			
		4.904	4.014	3.309	2.753	2.354	3.714	3.019	2.473	2.082	1.779	2.277	1.892	1.595			
195.048	18.0	32037	40115	50617	64349	80505	51378	64828	82416	103108	128973	103064	128940	161285			
		5.012	4.102	3.381	2.813	2.405	3.796	3.085	2.527	2.128	1.818	2.327	1.934	1.630			
199.406	18.2	32393	40561	51179	65064	81400	51949	65548	83332	104254	130406	104209	130372	163077			
		5.120	4.191	3.454	2.874	2.458	3.878	3.152	2.582	2.174	1.858	2.377	1.976	1.665			
203.813	18.4	32749	41007	51741	65779	82294	52520	66268	84247	105399	131839	105354	131805	164869			
		5.230	4.281	3.528	2.935	2.510	3.961	3.220	2.637	2.221	1.897	2.428	2.018	1.701			
208.268	18.6	33105	41452	52304	66494	83189	53091	66989	85163	106545	133272	106499	133238	166661			
		5.341	4.372	3.603	2.998	2.563	4.045	3.288	2.693	2.268	1.938	2.480	2.061	1.737			
212.771	18.8	33461	41898	52866	67209	84083	53662	67709	86079	107690	134705	107644	134670	168453			
		5.452	4.463	3.679	3.060	2.617	4.130	3.357	2.750	2.315	1.978	2.532	2.104	1.773			
217.322	19.0	33817	42344	53429	67924	84978	54232	68429	86995	108836	136138	108790	136103	170245			
		5.566	4.556	3.755	3.124	2.672	4.215	3.427	2.807	2.363	2.019	2.584	2.148	1.810			
221.921	19.2	34173	42790	53991	68639	85872	54803	69150	87910	109982	137571	109935	137536	172037			
		5.680	4.649	3.832	3.188	2.726	4.302	3.497	2.864	2.412	2.061	2.637	2.192	1.847			
226.569	19.4	34529	43235	54553	69354	86767	55374	69870	88826	111127	139004	111080	138968	172829			
		5.795	4.744	3.910	3.253	2.782	4.389	3.568	2.923	2.461	2.103	2.691	2.236	1.885			
231.264	19.6	34885	43681	55116	70069	87661	55945	70590	89742	112273	140437	112225	140401	175621			
		5.912	4.839	3.989	3.318	2.838	4.478	3.640	2.982	2.511	2.145	2.745	2.282	1.923			
236.008	19.8	35241	44127	55678	70784	88556	56516	71311	90658	113419	141870	113370	141834	177413			
		6.030	4.936	4.068	3.385	2.894	4.567	3.712	3.041	2.561	2.188	2.800	2.327	1.961			
240.800	20.0	35597	44572	56241	71499	89450	57087	72031	91573	114564	143303	114515	143266	179205			
		6.148	5.033	4.148	3.451	2.951	4.657	3.785	3.101	2.611	2.231	2.855	2.373	2.000			

表 6-13 的风速从 1.0m/s 算到 20.0m/s。为了减少表格的篇幅，按每 0.2m/s 为一格进行计算。矩形管道的断面尺寸采用表 6-13 的值。

表中的风量按式 (6-15) 计算：

$$q_v = 3600abv \quad (6-15)$$

式中， a 和 b 分别为矩形管道长边和短边的内边长，制表时的取值为管道的外边长减去外边长允许偏差的一半，再减去壁厚值。

可利用图 6-13 来求矩形管道的单位长度摩擦损失。知道管道断面尺寸后，要先求出其当量直径。矩形管道的流速当量直径，可按式 (6-12) 计算。

矩形管道的流量当量直径按式 (6-16) 计算：

$$D_L = 1.265 \sqrt[5]{\frac{a^3 b^3}{a+b}} \quad (6-16)$$

利用风速和流速当量直径，或风量和流量当量直径，可从图 6-13 中查出单位长度摩擦损失。

【例题 2】 已知风量为 $9000\text{m}^3/\text{h}$ ，矩形管道的外边尺寸为 $630\text{mm} \times 400\text{mm}$ 。试求该管道的单位长度摩擦损失。

解： 求解可用以下三个方法。

1) 利用表 6-13，查矩形管道截面 $a \times b = 630\text{mm} \times 400\text{mm}$ ，当风量 $Q = 8961\text{m}^3/\text{h}$ 时，得

$$v = 10\text{m/s} \quad p_{mf} = 2.094\text{Pa/m}$$

当风量 $Q = 9140\text{m}^3/\text{h}$ 时，得

$$v = 10.2\text{m/s} \quad p_{mf} = 2.175\text{Pa/m}$$

则风量 $Q = 9000\text{m}^3/\text{h}$ 时，用内插法得

$$v = 10.001 \approx 10\text{m/s} \quad p_{mf} = 2.112\text{Pa/m}$$

2) 求出流速 v 为

$$v = \frac{Q}{3600ab} = \frac{9000}{3600 \times 0.63 \times 0.4} \text{m/s} \approx 10\text{m/s}$$

求出流速当量直径 D_V 为

$$D_V = \frac{2ab}{a+b} = \frac{2 \times 0.63 \times 0.4}{0.63 + 0.4} \text{m} = 0.489\text{m} \approx 0.5\text{m}$$

利用图 6-13，从 $v = 10\text{m/s}$ 和 $D = 500\text{mm}$ 两条斜线的交点，向下作垂直线，交于横坐标点的数值，就是单位长度摩擦损失，即 $p_{mf} = 2.1\text{Pa/m}$

3) 风量 $Q = 9000\text{m}^3/\text{h} = 9000 \times \frac{1000}{3600} \text{dm}^3/\text{s} = 2500\text{dm}^3/\text{s}$

流量当量直径为

$$D_L = 1.265 \sqrt[5]{\frac{a^3 b^3}{a+b}} = 1.265 \sqrt[5]{\frac{0.63^3 \times 0.4^3}{0.63 + 0.4}} \text{m} = 0.55\text{m} = 550\text{mm}$$

从图 6-13 纵坐标上查出风量为 $2500\text{dm}^3/\text{s}$ 的点,画平行横坐标的直线和 $D = 550\text{mm}$ 的斜线相交,查得 $v = 10\text{m}/\text{s}$ 。从交点向下画垂线,与横坐标的交点就可查得 $p_{mf} = 2.1\text{Pa}/\text{m}$ 。

4. 摩擦压力损失的修正

图 6-13、表 6-12 和表 6-13 均是按钢板制管道,管道内表面的绝对粗糙度 $K = 0.15\text{mm}$ 和标准状态空气,在标准大气压的条件下编制的。当条件改变时,仍可用上述图表,但对查出的值要进行修正。

(1) 绝对粗糙度的修正 管道可用各种材料制作,如钢板、铝板、塑料板、玻璃钢,混凝土和砖等。各种管道内表面的绝对粗糙度均不相同,有的相差很大。表 6-14 列出了部分管道内表面的平均绝对粗糙度。

表 6-14 管道内表面的平均绝对粗糙度

管道材料	平均绝对粗糙度/mm	管道材料	平均绝对粗糙度/mm
薄钢板、镀锌薄钢板	0.15	矿渣混凝土板	1.5
塑料板	0.01 ~ 0.03	混凝土板	1.0 ~ 3.0
铝板	0.03	表面光滑的砖管道	3.0 ~ 4.0
刚性玻璃纤维	0.90	墙内砖砌管道	5.0 ~ 10.0
胶合板、木板	1.0	铁丝网抹灰管道	10.0 ~ 15.0
矿渣石膏板	1.0	竹管道	0.8 ~ 1.2

当管道内表面的平均绝对粗糙度不同时,仍可利用图 6-13 和表 6-12、表 6-13,但对所查得的单位长度摩擦损失值要进行修正,即应乘以管道粗糙度的修正系数 ε 值:

$$p'_m = \varepsilon p_m \quad (6-17)$$

式中, p'_m 为实际使用条件下的单位长度摩擦损失 (Pa/m); p_m 为从线算图和计算表中查得的单位长度摩擦损失值 (Pa/m)。

ε 值可从图 6-14 查到。图 6-14a 为粗糙管道, $K = 3.0\text{mm}$; 图 6-14b 为中等粗糙管道, $K = 0.9\text{mm}$; 图 6-14c 为中等光滑管道, $K = 0.09\text{mm}$; 图 6-14d 为光滑管道, $K = 0.03\text{mm}$ 。

(2) 海拔和温度的修正系数 从管道的摩擦损失计算式中可以看出,管道的单位长度摩擦损失 p_m 与空气的密度及运动粘度有关。空气的密度是温度的函数,同时也受海拔的影响。而运动粘度又取决于温度和大气压力(海拔)。图 6-15 给出随温度和海拔变化的修正系数 ε_t 和 ε_h 。

所以,使用条件下管道的实际单位长度摩擦损失可按式 (6-18) 计算:

$$p'_m = \varepsilon_t \varepsilon_h p_m \quad (6-18)$$

修正系数分别按式 (6-19)、式 (6-20) 计算:

$$\varepsilon_t = \left(\frac{293}{t' + 273} \right)^{0.825} \quad (6-19)$$

$$\varepsilon_h = \left(\frac{p'}{101.3} \right)^{0.9} \quad (6-20)$$

式中, t' 为管道中空气的实际温度 ($^{\circ}\text{C}$); p' 为实际的大气压力 (kPa)。

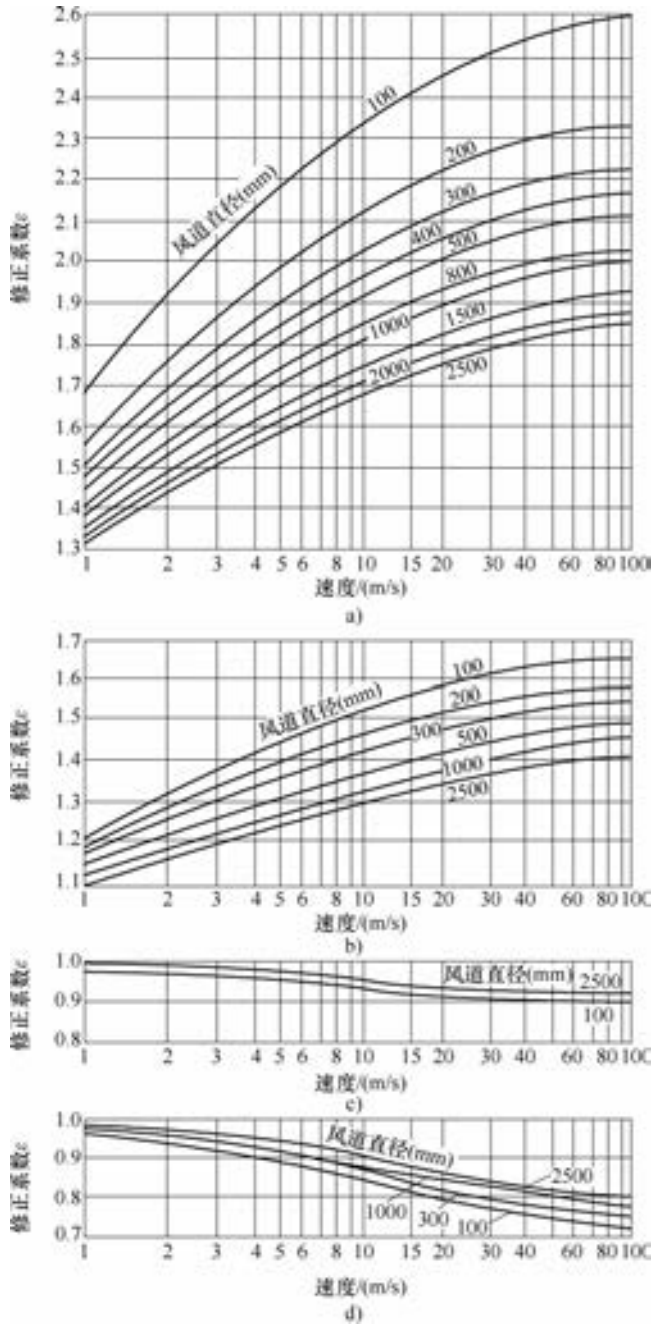


图 6-14 管道粗糙度的修正系数

- a) 粗糙管 $K=3.0\text{mm}$ b) 中等粗糙管 $K=0.9\text{mm}$
 c) 中等光滑管 $K=0.09\text{mm}$ d) 光滑管 $K=0.03\text{mm}$

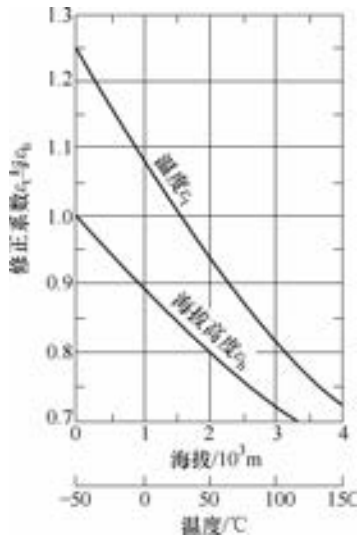


图 6-15 海拔和温度对摩擦损失的修正系数

5. 摩擦损失计算的简化公式

表 6-12 和表 6-13 是按式 (6-10) 确定管道的摩擦阻力系数的。式 (6-10) 是隐函数形式，利用计算机通过迭代运算是可以求解的，但是比较麻烦和费时，为此在表 6-15 中给出了一组简化计算公式。图 6-16 是按简化公式绘制的钢板管道的摩擦损失计算图。

表 6-15 管道摩擦阻力系数及单位长度摩擦损失的简化计算公式

序 号	管道材料	摩擦阻力系数 λ	适用条件
		单位长度摩擦损失 $p_m / (\text{Pa/m})$	
1	薄钢板 ($K=0.15\text{mm}$)	$\lambda = 0.0175D^{-0.21}v^{-0.075}$	$D = 0.2 \sim 2.0\text{m}$ $v = 5 \sim 30\text{m/s}$
		$p_m = 1.05 \times 10^{-2} D^{-1.21} v^{1.925}$	
2	塑料板 ($K=0.01\text{mm}$)	$\lambda = 0.0188D^{-0.19}v^{-0.167}$	$D = 0.2 \sim 2.0\text{m}$ $v = 3 \sim 20\text{m/s}$
		$p_m = 1.13 \times 10^{-2} D^{-1.19} v^{1.833}$	
3	光滑混凝土 ($K=1.0\text{mm}$)	$\lambda = 0.02165D^{-0.235}v^{-0.03}$	$D = 0.5 \sim 2.0\text{m}$ $v = 3 \sim 12\text{m/s}$
		$p_m = 1.30 \times 10^{-2} D^{-1.235} v^{1.97}$	
4	光滑砖管道 ($K=3.0\text{mm}$)	$\lambda = 0.0272D^{-0.232}v^{-0.01}$	$D = 0.5 \sim 2.0\text{m}$ $v = 3 \sim 12\text{m/s}$
		$p_m = 1.63 \times 10^{-2} D^{-1.282} v^{1.99}$	

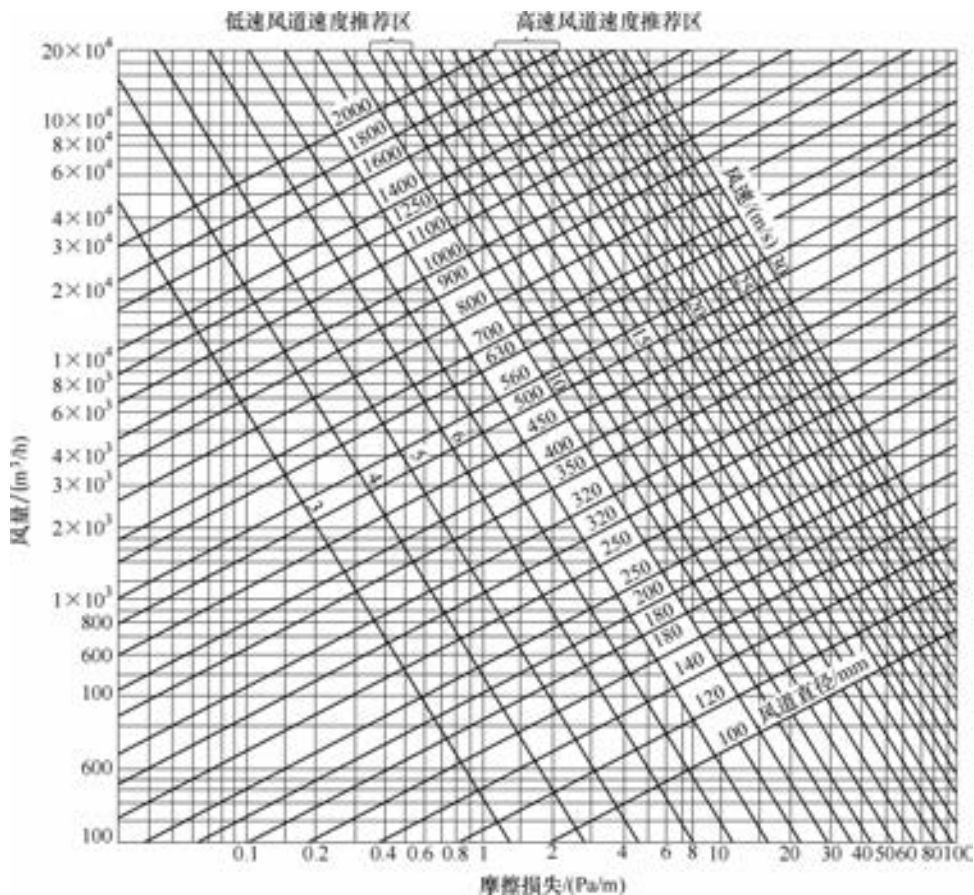


图 6-16 钢板管道的摩擦损失计算图（按简化计算公式绘制）

6.6 管道的局部压力损失

1. 局部损失

当空气流经管道中的管件及设备时，由于在边界急剧改变的区域将出现旋涡区和速度的重新分布，从而使流动阻力大大增加，这种阻力称为局部阻力。克服局部阻力而引起的能量损失，一般称为局部压力损失，简称局部损失。局部损失可按式（6-21）计算：

$$\Delta p_j = \xi \frac{v^2 \rho}{2} \quad (6-21)$$

式中， Δp_j 为局部压力损失（Pa）； ξ 为局部阻力系数。

在通风系统中，局部阻力所造成的能量损失经常占很大的比例，在计算中必须予以重视。局部阻力的种类繁多，形体各异，各种管件边壁变化又比较复杂，所以大多数局部损失只能按实验得来的经验公式和系数进行计算，本节综合有关资料，给出七大类 85 种管件的局部阻力系数。

为了适应计算机辅助设计的需要，给出了部分管件的局部阻力系数的函数拟合公式。由于两者是取自不同的资料，测定时的条件不尽相同，有些公式的计算值和表给出的数值相差较大，不过一般公式的计算值和表上的给出的值的平均误差不超过 5% ~ 6%。拟合的局部阻力系数计算公式中，所对应的动压如下：三通均对应于支管动压；排出口对应于排风前风道的动压；其余的全部对应于管件下游风道中的动压。

严格地说，在管件处所造成的能量损失仅仅占局部损失的一部分，另一部分能量是在管件下游一定长度的管段上消耗掉的。而且除出风口这类管件外，局部阻力均发生在一段具有一定长度的管道上，因而无法和沿程损失分开。为了计算和分析上的方便，通常都是假定局部阻力集中在管件的一个断面上，并包含了它的摩擦阻力。所以本节局部阻力系数符号采用 ξ 表示。

2. 部分管件的局部阻力系数

选用这里所给出的局部阻力系数时，遇到以下几种情况时必须进行修正：

(1) 对于不等于 90° 的弯头 要乘以系数 ε_θ 。表 6-16 列出非 90° 弯头修正值 ε_θ 。

表 6-16 非 90° 弯头修正值

$\theta/(\circ)$	0	20	30	45	60	75	90	110	130	150	180
ε_θ	0	0.31	0.45	0.60	0.78	0.90	1.0	1.13	1.20	1.28	1.40

(2) 对于在管件处带有网格的管件 其局部阻力系数应按式 (6-22) 进行计算：

$$\xi_0 = \xi'_0 + \frac{\xi_s}{(A_1/A_0)^2} \quad (6-22)$$

式中， ξ_0 为断面 0 处的管件和网格的综合局部阻力系数； ξ'_0 为断面 0 处的管件的局部阻力系数； ξ_s 为网格的局部阻力系数； A_1 为网格所在的断面 1 处的面积 (m^2)； A_0 为断面 0 处的面积 (m^2)。

对于断面面积不变的管件， $A_1 = A_0$ ，则式 (6-22) 可以简化为式 (6-23)：

$$\xi_0 = \xi'_0 + \xi_s \quad (6-23)$$

(3) 当雷诺数较小时 应按表 6-17 进行修正。

表 6-17 雷诺数修正值

$Re \times 10^4$	1	2	3	4	6	8	10	≥ 14
ε_{Re}	1.40	1.26	1.19	1.14	1.09	1.06	1.04	1.0

1) 管件 A。进风口的局部阻力系数见表 6-18 至表 6-24，相应的图见图 6-17 1a ~ 7a。

①A-1 安装在墙上的管道 (图 6-17 的 1a)。

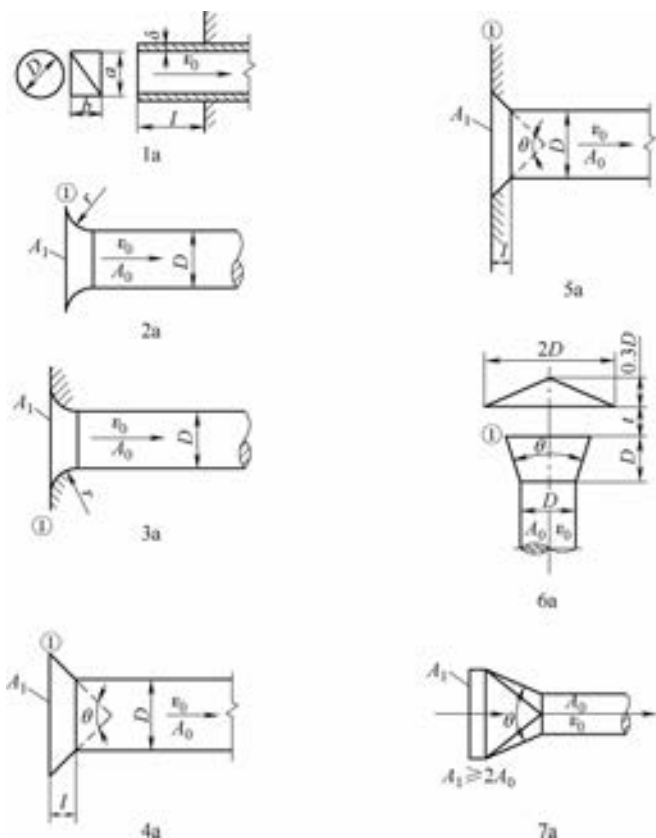


图 6-17 进风口的局部阻力系数用简图

表 6-18 进风口的局部阻力系数（一）

δ/D	L/D						
	0	0.002	0.01	0.05	0.2	0.5	≥ 1.0
	局部阻力系数 ξ_0						
≈ 0	0.50	0.57	0.68	0.80	0.92	1.0	1.0
0.02	0.50	0.51	0.52	0.55	0.66	0.72	0.72
≥ 0.05	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50

矩形管道时 D 为流速当量直径。当这种管件的入口处装有网格时，要进行修正：

边壁较薄， $\delta/D \leq 0.05$ 时 $\xi_0 = 1 + \xi_s$

边壁较厚， $\delta/D > 0.05$ 时 $\xi_0 = \xi'_0 + \xi_s$

式中， ξ'_0 为管件的局部阻力系数； ξ_s 为网格的局部阻力系数。

②A-2 不在端墙上的光滑渐缩喇叭口（图 6-17 的 2a）。

表 6-19 进风口的局部阻力系数 (二)

r/D	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.08	0.10	0.12	0.16	≥ 0.20
ξ_0	1.0	0.87	0.74	0.61	0.51	0.40	0.32	0.20	0.15	0.10	0.06	0.03

当断面①处有网格时,按式(6-22)修正。

③A-3 安装在端墙上带光滑渐缩的喇叭口(图 6-17 的 3a)。

表 6-20 进风口的局部阻力系数 (三)

r/D	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.08	0.10	0.12	0.16	> 0.20
ξ_0	0.50	0.43	0.36	0.31	0.26	0.22	0.20	0.15	0.12	0.09	0.06	0.03

当断面①处有网格时,按式(6-22)修正。

④A-4 不安在端墙上的锥形渐缩喇叭口(图 6-17 的 4a)。

表 6-21 进风口的局部阻力系数 (四)

$\frac{l}{D}$	$\theta/ (^{\circ})$								
	0	10	20	30	40	60	100	140	180
	ξ_0								
0.025	1.0	0.96	0.93	0.90	0.86	0.80	0.69	0.59	0.50
0.05	1.0	0.93	0.86	0.80	0.75	0.67	0.58	0.53	0.50
0.10	1.0	0.80	0.67	0.55	0.48	0.41	0.41	0.44	0.50
0.25	1.0	0.68	0.45	0.30	0.22	0.17	0.22	0.34	0.50
0.60	1.0	0.46	0.27	0.18	0.14	0.13	0.21	0.33	0.50
1.0	1.0	0.32	0.20	0.14	0.11	0.10	0.18	0.30	0.50

当断面①处有网格时,按式(6-22)修正。

拟合公式为

$$\xi_0 = 1 - \frac{\theta}{360} - 0.0013\theta^{0.3} (180 - \theta)^{1.1} \left(\frac{l}{D}\right)^B;$$

当 $l/D < 0.05$ 时 $B = 0.5$

当 $l/D \geq 0.05$ 时 $B = 0.025 \frac{D}{l}$

⑤A-5 安在端墙上的锥形渐缩喇叭口(图 6-17 的 5a)。

当断面①处有网格时,按式(6-22)修正。

拟合公式: $\xi_0 = 0.5 - 6.5 \times 10^{-5} \theta^{0.6} (180 - \theta)^{1.25} \left(10 \frac{l}{D}\right)^B$

当 $l/D \leq 0.1$ 时 $B = 0.7$

当 $l/D > 0.1$ 时 $B = 0.1$

表 6-22 进风口的局部阻力系数 (五)

$\frac{l}{D}$	$\theta / (^{\circ})$								
	0	10	20	30	40	60	100	140	180
	ξ_0								
0.025	0.50	0.47	0.45	0.43	0.41	0.40	0.42	0.45	0.50
0.05	0.50	0.45	0.41	0.36	0.33	0.30	0.35	0.42	0.50
0.075	0.50	0.42	0.35	0.30	0.26	0.23	0.30	0.40	0.50
0.10	0.50	0.39	0.32	0.25	0.22	0.18	0.27	0.38	0.50
0.15	0.50	0.37	0.27	0.20	0.16	0.15	0.25	0.37	0.50
0.60	0.50	0.27	0.18	0.13	0.11	0.12	0.23	0.36	0.50

⑥A-6 罩形进风口 (图 6-17 的 6a)。

表 6-23 进风口的局部阻力系数 (六)

$\theta / (^{\circ})$	l/D								
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	≥ 0.9
	ξ								
0	2.6	1.8	1.5	1.4	1.3	1.2	1.2	1.1	1.1
15	1.3	0.77	0.60	0.48	0.41	0.30	0.29	0.28	0.25

当断面①处有网格时,按式(6-22)修正。

⑦A-7 带或不带凸边的渐缩型罩子 (图 6-17 的 7a)。

表 6-24 进风口的局部阻力系数 (七)

圆形罩										
$\theta / (^{\circ})$	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180
ξ_0	1.0	0.11	0.06	0.09	0.14	0.18	0.27	0.32	0.43	0.50
矩形罩										
$\theta / (^{\circ})$	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180
ξ_0	1.0	0.19	0.13	0.16	0.21	0.27	0.33	0.43	0.53	0.62

注:对于矩形罩, θ 系指大角。

2) 管件 B。出风口的局部阻力系数见表 6-25 ~ 表 6-32,相应的图见图 6-18。

①B-1 直管出风口 (图 6-18 的 16) 的局部阻力系数为

$$\xi_0 = 1.0$$

当出口断面处有网格时,按式(6-23)修正。

②B-2 风道与墙面平,气流沿墙面流动的出风口 (图 6-18 的 2b),当出口处有网格时,按式(6-23)修正。

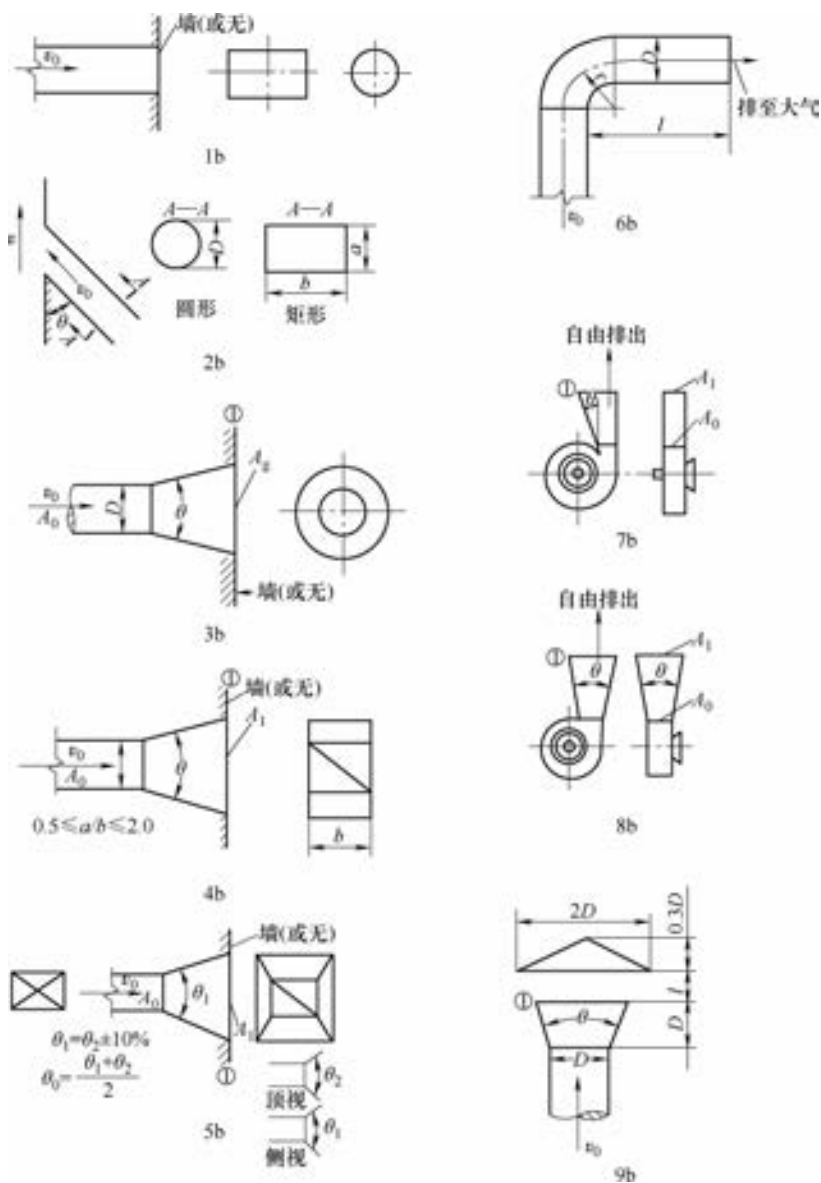


图 6-18 出风口的局部阻力系数用简图

表 6-25 出风口的局部阻力系数 (一)

圆 管 道						
$\theta/ (^{\circ})$	v/v_0					
	0	0.5	1.0	1.5	2.0	
	ξ_0					
30 ~ 45	1.0	1.0	1.1	1.3	1.6	
60	1.0	0.90	1.1	1.4	1.6	
90	1.0	0.80	0.95	1.4	1.7	
120	1.0	0.80	0.95	1.3	1.7	
150	1.0	0.82	0.83	1.0	1.3	
矩形管道						
a/b	$\theta/ (^{\circ})$	v/v_0				
		0	0.5	1.0	1.5	2.0
		ξ_0				
0.1 ~ 0.2	30 ~ 90	1.0	0.95	1.2	1.5	1.8
	120	1.0	0.92	1.1	1.4	1.9
	150	1.0	0.75	0.95	1.4	1.8
0.5 ~ 2.0	30 ~ 45	1.0	1.0	1.1	1.3	1.6
	60	1.0	0.90	1.1	1.4	1.6
	90	1.0	0.80	0.95	1.4	1.7
	120	1.0	0.80	0.95	1.3	1.7
	150	1.0	0.82	0.83	1.0	1.3
5 ~ 10	45	1.0	0.92	0.93	1.1	1.3
	60	1.0	0.87	0.87	1.0	1.3
	90	1.0	0.82	0.80	0.97	1.2
	120	1.0	0.80	0.76	0.90	0.98

③B-3 锥形出风口，圆管道（图 6-18 的 3b），当断面①处带有网格时，按式（6-22）修正。

当 $\theta = 14^{\circ} \sim 45^{\circ}$ ， $\frac{A_1}{A_0} = 2 \sim 6$ 时

$$\xi_0 = 1 - 0.037 (45 - \theta)^{0.8} \left(\frac{A_1}{A_0}\right)^{0.2}$$

表 6-26 出风口的局部阻力系数 (二)

A_1/A_0	$\theta/ (^{\circ})$						
	14	16	20	30	45	60	≥ 90
	ξ_0						
2	0.33	0.36	0.44	0.74	0.97	0.99	1.0
4	0.24	0.28	0.36	0.54	0.94	1.0	1.0
6	0.22	0.25	0.32	0.49	0.94	0.98	1.0
10	0.19	0.23	0.30	0.50	0.94	0.72	1.0
16	0.17	0.20	0.27	0.49	0.94	1.0	1.0

④B-4 矩形平面扩散出风口（图 6-18 的 4b），当断面①处带有网格时，按式（6-22）修正。

$$\text{当 } \theta = 14^\circ \sim 45^\circ, \frac{A_1}{A_0} = 2 \sim 6 \text{ 时}$$

$$\xi_0 = 0.005\theta \left[1.26 - 0.045 \left(\frac{A_1}{A_0} \right) \right] \left(\frac{A_1}{A_0} \right)^{0.73}$$

表 6-27 出风口的局部阻力系数（三）

A_1/A_0	$\theta / (^\circ)$					
	14	20	30	45	60	≥ 90
	ξ_0					
2	0.37	0.38	0.50	0.75	0.90	1.1
4	0.25	0.37	0.57	0.82	1.0	1.1
6	0.28	0.47	0.64	0.87	1.0	1.1

⑤B-5 矩形锥形扩散出风口（靠墙或不靠墙）（图 6-18 的 5b），当断面①处带有网格时，按式（6-22）修正。

表 6-28 出风口的局部阻力系数（四）

A_1/A_0	$\theta_0 / (^\circ)$					
	10	14	20	30	45	≥ 60
	ξ_0					
2	0.44	0.58	0.70	0.86	1.0	1.1
4	0.31	0.48	0.61	0.76	0.94	1.1
6	0.29	0.47	0.62	0.74	0.94	1.1
10	0.26	0.45	0.60	0.73	0.89	1.0

⑥B-6 通过 90°弯头排至大气的出风口（图 6-18 的 6b）。

表 6-29 出风口的局部阻力系数（五）

矩形管道										
$\frac{r}{b}$	l/b									
	0	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	6.0	8.0	12.0
	ξ_0									
0.5	3.0	3.1	3.2	3.0	2.7	2.4	2.2	2.1	2.1	2.0
0.75	2.2	2.2	2.1	1.8	1.7	1.6	1.6	1.5	1.5	1.5
1.0	1.8	1.5	1.4	1.4	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2
1.5	1.5	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
2.5	1.2	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
圆形管道 ($r/D = 1.0$)										
l/D		0.9				1.3				
ξ_0		1.5				1.4				

当出口处带有网格时，按式(6-22)修正。

⑦B-7 不接管道，风机出口为不对称的扩散出风口(图6-18的7b)。

表 6-30 出风口的局部阻力系数(六)

$\theta/ (^{\circ})$	A_1/A_0					
	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
	ξ_0					
10	0.51	0.34	0.25	0.21	0.18	0.17
15	0.54	0.36	0.27	0.24	0.22	0.20
20	0.55	0.38	0.31	0.27	0.25	0.24
25	0.59	0.43	0.37	0.35	0.33	0.33
30	0.63	0.50	0.46	0.44	0.43	0.42
35	0.65	0.56	0.53	0.52	0.51	0.50

当断面①处带有网格时，按式(6-22)修正。

⑧B-8 不接管道，风机出口为锥形扩散(图6-18的8b)

表 6-31 出风口的局部阻力系数(七)

$\theta/ (^{\circ})$	A_1/A_0					
	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
	ξ_0					
10	0.54	0.42	0.37	0.34	0.32	0.31
15	0.67	0.58	0.53	0.51	0.50	0.51
20	0.75	0.67	0.65	0.64	0.64	0.65
25	0.80	0.74	0.72	0.70	0.70	0.72
30	0.85	0.78	0.76	0.75	0.75	0.76

当断面①带有网格时，按式(6-22)修正。

⑨B-9 排气罩(图6-18的9b)。

表 6-32 出风口的局部阻力系数(八)

$\theta/ (^{\circ})$	ξ_0									
	l/D									
	0.1	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.5	0.6	0.8	1.0
0	4.0	2.3	1.9	1.6	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0	1.0
15	2.6	1.2	1.0	0.80	0.70	0.65	0.60	0.60	0.60	0.60

若断面①处带有网格时，按式(6-22)修正。其拟合公式如下：

$$\text{当 } l/D < 0.5, \theta = 0^{\circ} \text{ 时 } \quad \xi_0 = 0.61 \left(\frac{l}{D} \right)^{0.8} + 0.06$$

当 $l/D < 0.5$, $\theta = 15^\circ$ 时 $\xi_0 = 0.27 \left(\frac{l}{D} \right)^{-0.94}$

3) 管件 C。弯头的局部阻力系数见表 6-33 至表 6-49, 相应图见图 6-19。

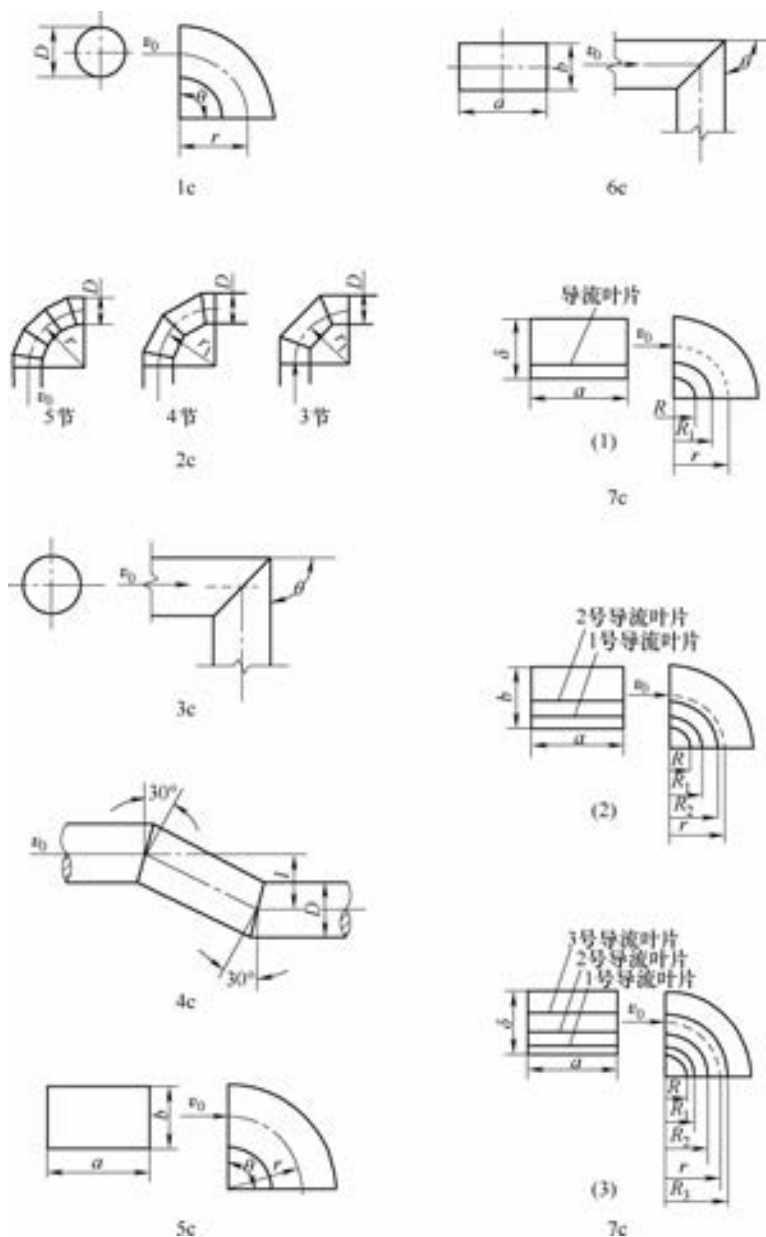


图 6-19 弯头的局部阻力系数用简图

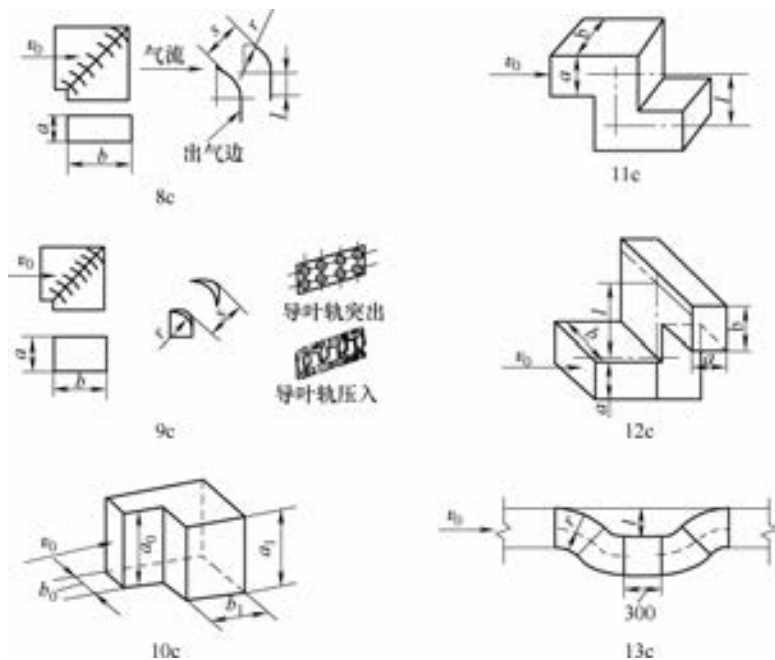


图 6-19 弯头的局部阻力系数用简图 (续)

①C-1 90°圆形弯头 (图 6-19 的 1c)。

表 6-33 弯头的局部阻力系数 (一)

r/D	0.5	0.75	1.0	1.5	2.0	2.5
ξ'_0	0.71	0.33	0.22	0.15	0.13	0.12

注: 表中 ξ'_0 为 90°弯头时的局部阻力系数, 当弯头不是 90°时, 则要乘上修正系数 ϵ_0 , 其值见表 6-16。

②C-2 3、4、5 节 90°圆弯头 (图 6-19 的 2c)。

表 6-34 弯头的局部阻力系数 (二)

节 数	ξ_0				
	r/D				
	0.5	0.75	1.0	1.5	2.0
5	—	0.46	0.33	0.24	0.19
4	—	0.50	0.37	0.27	0.24
3	0.98	0.54	0.42	0.34	0.33

其拟合公式如下:

90°分节圆弯头 ($r/D=0.75 \sim 2.0$, 节数 $P=3 \sim 5$ 时):

$$\xi_0 = 0.55 \left(\frac{D}{r} \right)^{0.5} - 0.04P$$

小于 90° 的分节圆弯头:

$$\xi_0 = \left[0.55 \left(\frac{D}{r} \right)^{0.5} - 0.16 \right] \left(\frac{\theta}{90} \right)^{0.75}$$

③C-3 圆管道斜接弯头 (图 6-19 的 3c)。

表 6-35 弯头的局部阻力系数 (三)

θ (度)	20	30	45	60	75	90
ξ_0'	0.08	0.16	0.34	0.55	0.81	1.2

ξ_0' 为雷诺数 $Re \geq 14 \times 10^4$ 时的局部阻力系数, 当 $Re < 14 \times 10^4$ 时

$$\xi_0 = \varepsilon_{Re} \xi_0'$$

ε_{Re} 值见表 6-17。

其拟合公式为

$$\xi_0' = 0.0004\theta^{1.77}$$

④C-4 $30^\circ Z$ 形圆管道弯头 (图 6-19 的 4c)。

表 6-36 弯头的局部阻力系数 (四)

l/D	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
ξ_0'	0	0.15	0.15	0.16	0.16	0.16	0.16

$$\xi_0 = \varepsilon_{Re} \xi_0'$$

ε_{Re} 见表 6-17。

⑤C-5 矩形管道不带导叶的弧形弯头 (图 6-19 的 5c)。

表 6-37 弯头的局部阻力系数 (五)

r/b	a/b										
	0.25	0.5	0.75	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	8.0
	ξ_0'										
0.5	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0	1.0	1.1	1.1	1.2	1.2
0.75	0.57	0.52	0.48	0.44	0.40	0.39	0.39	0.40	0.42	0.43	0.44
1.0	0.27	0.25	0.23	0.21	0.19	0.18	0.18	0.19	0.20	0.27	0.21
1.5	0.22	0.20	0.19	0.17	0.15	0.14	0.14	0.15	0.16	0.17	0.17
2.0	0.20	0.18	0.16	0.15	0.14	0.13	0.13	0.14	0.14	0.15	0.15
r/b	$Re \times 10^4$										
	1	2	3	4	6	8	10	14	≥ 20		
	ε_{Re}'										
0.5	1.40	1.26	1.19	1.4	1.09	1.06	1.04	1.0	1.0		
≥ 0.75	2.0	1.77	1.64	1.56	1.46	1.38	1.30	1.15	1.0		

$$\xi_0 = \varepsilon_\theta \varepsilon_{Re}' \xi_0'$$

ε_θ 值见表 6-16。

$a/b = 0.25 \sim 3.0$, $r/b = 0.5 \sim 2.0$ 时的拟合公式如下:

$$\text{当 } r/b \geq 1 \text{ 时} \quad \xi'_0 = 0.1 \left(\frac{a}{b} \right)^{0.15} \left[\left(\frac{b}{r} \right)^{3.3} + 1.4 \right]$$

$$\text{当 } r/b < 1 \text{ 时} \quad \xi'_0 = 0.1 \left(\frac{a}{b} \right)^{0.15} \left[\left(\frac{b}{r} \right)^{3.3} + 1.4 \right] \left(1 - 0.12 \frac{r}{b} \right)$$

⑥C-6 矩形管道斜接弯头 (图 6-19 的 6c)。

表 6-38 弯头的局部阻力系数 (六)

$\theta/ (^{\circ})$	a/b										
	0.25	0.5	0.75	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	8.0
	ξ_0										
20	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05
30	0.18	0.17	0.17	0.16	0.15	0.15	0.13	0.13	0.12	0.12	0.11
45	0.38	0.37	0.36	0.34	0.33	0.31	0.28	0.27	0.26	0.25	0.24
60	0.60	0.59	0.57	0.55	0.52	0.49	0.46	0.43	0.41	0.39	0.38
75	0.89	0.87	0.84	0.81	0.77	0.73	0.67	0.63	0.61	0.58	0.57
90	1.3	1.3	1.2	1.2	1.1	1.1	0.98	0.92	0.89	0.85	0.83

雷诺数的修正见表 6-17。

其拟合公式为

$$\xi_0 = 0.0004\theta^{1.77} \left(\frac{a}{b} \right)^{-0.12}$$

⑦C-7 矩形管道带导流叶片光滑弯曲的弯头 (图 6-19 的 7c)。

a) 一个导流叶片:

$$\xi_0 = \varepsilon_{\theta} \xi'_0 \quad R_1 = R/CR$$

式中, R 为弯头的内半径 (m); R_1 为导流叶片的弯曲半径 (m); CR 为弯曲比值; ε_{θ} 为非 90° 弯头修正系数, 见表 6-16。

表 6-39 弯头的局部阻力系数 (七)

R/b	r/b	CR	a/b										
			0.25	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0
			ξ'_0										
0.05	0.55	0.218	0.52	0.40	0.43	0.49	0.55	0.66	0.75	0.84	0.93	1.0	1.1
0.10	0.60	0.302	0.36	0.27	0.25	0.28	0.30	0.35	0.39	0.42	0.46	0.49	0.52
0.15	0.65	0.361	0.28	0.21	0.18	0.19	0.20	0.22	0.25	0.26	0.28	0.30	0.32
0.20	0.70	0.408	0.22	0.16	0.14	0.14	0.15	0.16	0.17	0.18	0.19	0.20	0.21
0.25	0.75	0.447	0.18	0.13	0.11	0.11	0.11	0.12	0.13	0.14	0.14	0.15	0.15
0.30	0.80	0.480	0.15	0.11	0.09	0.09	0.09	0.09	0.10	0.10	0.11	0.11	0.12
0.35	0.85	0.509	0.13	0.09	0.08	0.07	0.07	0.08	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09
0.40	0.90	0.535	0.11	0.08	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07
0.45	0.95	0.557	0.10	0.07	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06
0.50	1.00	0.577	0.09	0.06	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05

⑧C-8 矩形管道斜接弯头带单层导流叶片 (图 6-19 的 8c)。

表 6-42 弯头的局部阻力系数 (十)

编 号	相关尺寸/mm			
	r	s	l	ξ_0
1	50	40	20	0.12
2	110	60	0	0.15
3	110	80	40	0.18

⑨C-9 矩形管道斜接弯头带双层导流叶片 (图 6-19 的 9c)。

表 6-43 弯头的局部阻力系数 (十一)

编 号	相关尺寸		速度 (m/s)				备 注
	r	s	5	10	15	20	
	ξ_0						
1	2.0	1.5	0.27	0.22	0.19	0.17	导叶轨突出
2	2.0	1.5	0.33	0.29	0.26	0.23	导叶轨压入
3	2.0	2.13	0.38	0.31	0.27	0.24	导叶轨突出
4	4.5	3.25	0.26	0.21	0.18	0.16	导叶轨突出

⑩C-10 缩小或扩大的弯头, 矩形管道 (图 6-19 的 10c)。

表 6-44 弯头的局部阻力系数 (十二)

$\frac{a_0}{b_0}$	b_1/b_0					
	0.6	0.8	1.2	1.4	1.6	2.0
	ξ'_0					
0.25	1.8	1.4	1.1	1.1	1.1	1.1
1.0	1.7	1.4	1.0	0.95	0.90	0.84
4.0	1.5	1.1	0.81	0.76	0.72	0.66
∞	1.5	1.0	0.69	0.63	0.60	0.55

$$\xi_0 = \varepsilon_{Re} \xi'_0$$

ε_{Re} 见表 6-17。 ξ'_0 见表 6-44。

⑪C-11 矩形管道 90°Z 形弯头 (图 6-19 的 11c)。

表 6-45 弯头的局部阻力系数 (十三)

l/a	0	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
ξ'_0	0	0.62	0.90	1.6	2.6	3.6	4.0	4.2	4.2	4.2
l/a	2.4	2.8	3.2	4.0	5.0	6.0	7.0	9.0	10.0	∞
ξ'_0	3.7	3.3	3.2	3.1	2.9	2.8	2.7	2.6	2.5	2.3

$$\xi_0 = \varepsilon_{Re} \xi'_0$$

ε_{Re} 见表 6-17。

当 $b/a = 1$ 时, ξ'_0 值查表 6-45。

当 $b/a \neq 1$ 时, 应乘以修正系数 ε 。 ε 值可查表 6-46。

表 6-46 修正系数 ε 值

b/a	0.25	0.50	0.75	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0
ε	1.10	1.07	1.04	1.0	0.95	0.90	0.83	0.78

⑫C-12 矩形管道不在同一平面的 2 个 90° 弯头合在一起 (图 6-19 的 12c)。

表 6-47 弯头的局部阻力系数 (十四)

l/b	0	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
ξ'_0	1.2	2.4	2.9	3.3	3.4	3.4	3.4	3.3	3.2	3.1
l/b	2.4	2.8	3.2	4.0	5.0	6.0	7.0	9.0	10.0	∞
ξ'_0	3.2	3.2	3.2	3.0	2.9	2.8	2.7	2.5	2.4	2.3

$$\xi_0 = \varepsilon_{Re} \xi'_0$$

ε_{Re} 见表 6-17。

当 $a = b$ 时, ξ'_0 查表 6-47。

当 $a \neq b$ 时, 要乘以修正系数 ε 。 ε 值可查表 6-48。

表 6-48 修正系数 ε 值

a/b	0.25	0.50	0.75	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	6.0	8.0
ε	1.10	1.07	1.04	1.0	0.95	0.90	0.83	0.78	0.72	0.70

⑬C-13 绕过一个突出物而布置的矩形管道 4 个 45° 弧形弯头 (图 6-19 的 13c)。当 $b/a = 4$ 、 $r/a = 1.5$ 、 $l = 1.5a$ 时, ξ_0 查表 6-49。

表 6-49 弯头的局部阻力系数 (十五)

v_0 (m/s)	4	6	8	10	12
ξ_0	0.18	0.22	0.24	0.25	0.26

4) 管件 D 渐扩变径管 (扩散管) 的局部阻力系数见表 6-50 至表 6-57, 相应图见图 6-20。

①D-1 圆管道锥形扩散管 (图 6-20 的 1d)。

在 $\theta = 16^\circ \sim 180^\circ$, $\frac{A_1}{A_0} = 2 \sim 10$ 范围内, 其拟合公式如下:

当 $\theta < 40^\circ$ 时

$$\xi_0 = 0.021 \left(\frac{A_0}{A_1} \right)^2 \left(1 - \frac{A_0}{A_1} \right)^{1.1}$$

当 $\theta > 40^\circ$ 时 $\xi_0 = 0.95 \left(\frac{A_1}{A_0} \right)^2 \left(1 - \frac{A_0}{A_1} \right)^{1.5}$

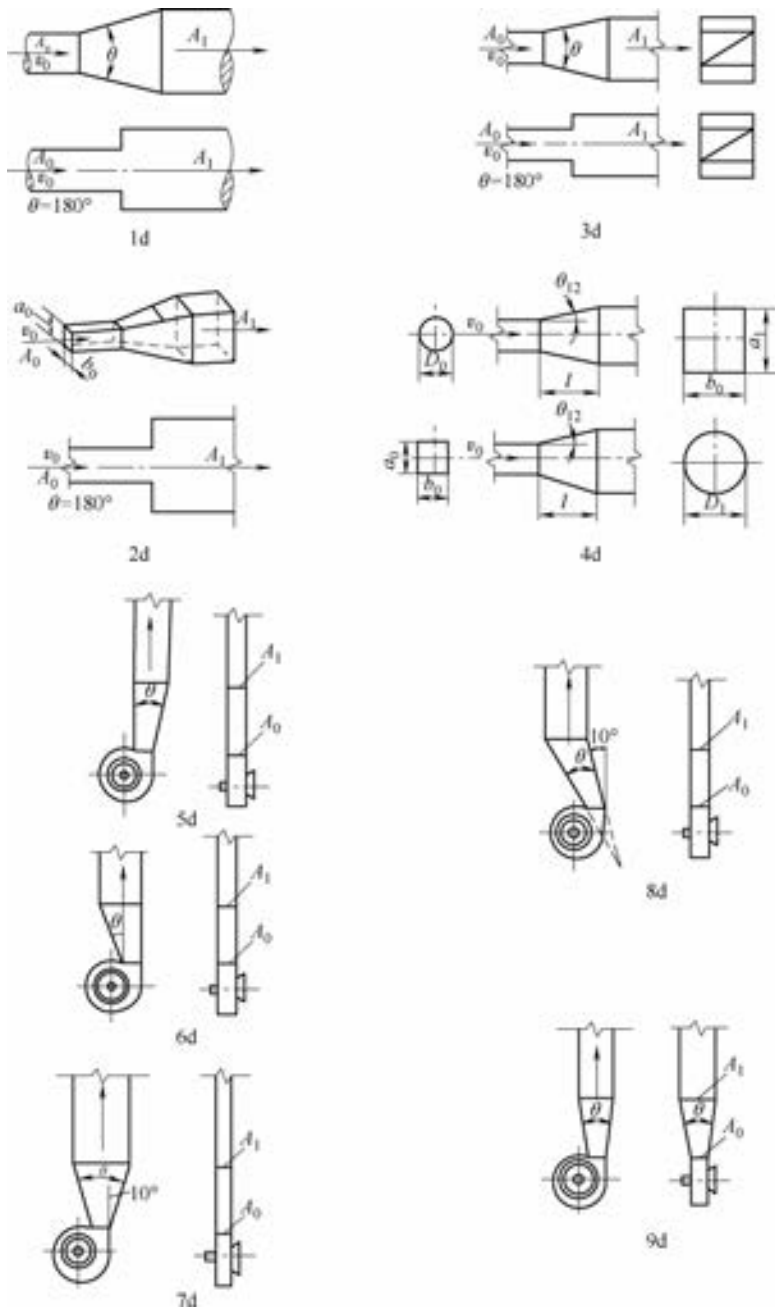


图 6-20 渐扩变径管（扩散管）的局部阻力系数用简图

表 6-50 扩散管的局部阻力系数 (一)

Re	A_1/A_0	$\theta/ (^{\circ})$							
		16	20	30	45	60	90	120	180
		ξ_0							
0.5×10^5	2	0.14	0.19	0.32	0.33	0.33	0.32	0.31	0.30
	4	0.23	0.30	0.46	0.61	0.68	0.64	0.63	0.62
	6	0.27	0.33	0.48	0.66	0.77	0.74	0.73	0.72
	10	0.29	0.38	0.59	0.76	0.80	0.83	0.84	0.83
	≥ 16	0.31	0.38	0.60	0.84	0.88	0.88	0.88	0.88
2×10^5	2	0.07	0.12	0.23	0.28	0.27	0.27	0.27	0.26
	4	0.15	0.18	0.36	0.55	0.59	0.59	0.57	0.57
	6	0.19	0.28	0.44	0.90	0.70	0.71	0.71	0.69
	10	0.20	0.24	0.43	0.76	0.80	0.81	0.81	0.81
	≥ 16	0.21	0.28	0.52	0.76	0.87	0.87	0.87	0.87
$\geq 6 \times 10^5$	2	0.05	0.07	0.12	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27
	4	0.17	0.24	0.38	0.51	0.56	0.58	0.58	0.57
	6	0.16	0.29	0.46	0.60	0.69	0.71	0.70	0.70
	10	0.21	0.33	0.52	0.60	0.76	0.83	0.84	0.83
	≥ 16	0.21	0.34	0.56	0.72	0.79	0.85	0.87	0.89

②D-2 矩形管道金字塔形扩散管 (图 6-20 的 2d)。

表 6-51 扩散管的局部阻力系数 (二)

A_1/A_0	$\theta/ (^{\circ})$							
	16	20	30	45	60	90	120	180
	ξ_0							
2	0.18	0.22	0.25	0.29	0.31	0.32	0.33	0.30
4	0.36	0.43	0.50	0.56	0.61	0.63	0.63	0.63
6	0.42	0.47	0.58	0.68	0.72	0.76	0.76	0.75
≥ 10	0.42	0.49	0.59	0.70	0.80	0.87	0.85	0.86

其拟合公式如下:

当 $\theta < 40^{\circ}$, $\frac{A_1}{A_0} = 2 \sim 6$ 时

$$\xi_0 = 0.18\theta^{0.58} \left(\frac{A_1}{A_0}\right)^2 \left[1 - \left(\frac{A_0}{A_1}\right)^{0.35}\right]$$

当 $\theta \geq 40^{\circ}$, $\frac{A_1}{A_0} = 2 \sim 6$ 时

$$\xi_0 = 0.98 \left(\frac{A_1}{A_0} \right)^2 \left(1 - \frac{A_0}{A_1} \right)^{1.65}$$

③D-3 矩形管道平面扩散管 (图 6-20 的 3d)。

表 6-52 扩散管的局部阻力系数 (三)

A_1/A_0	$\theta / (^\circ)$						
	14	20	30	45	60	90	180
	ξ_0						
2	0.09	0.12	0.20	0.34	0.37	0.38	0.35
4	0.16	0.25	0.42	0.60	0.68	0.70	0.66
6	0.19	0.30	0.48	0.65	0.76	0.83	0.80

当 $\theta < 45^\circ$ 时

$$\xi_0 = 0.07\theta^{0.7} \left(\frac{A_1}{A_0} \right)^2 \left(1 - \frac{A_0}{A_1} \right)^{1.4}$$

当 $\theta \geq 45^\circ$ 时

$$\xi_0 = 1.07 \left(\frac{A_1}{A_0} \right)^2 \left(1 - \frac{A_0}{A_1} \right)^{1.5}$$

④D-4 天圆地方 (图 6-20 的 4d)。按下述办法求出当量角 θ ，然后从管件 D-2 的表 6-51 中查出 ξ_0 值。

a) 从圆形变至矩形:

$$\tan(\theta/2) = (1.13 \sqrt{a_1 b_1} - D_0) / 2l$$

b) 从矩形变至圆形:

$$\tan(\theta/2) = (D_1 - 1.13 \sqrt{a_0 b_0}) / 2l$$

⑤D-5 风机出口接管道的平面对称扩散管 (图 6-20 的 5d)。

表 6-53 扩散管的局部阻力系数 (四)

$\theta / (^\circ)$	A_1/A_0					
	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
	ξ_0					
10	0.05	0.07	0.09	0.10	0.11	0.11
15	0.06	0.09	0.11	0.13	0.13	0.14
20	0.07	0.10	0.13	0.15	0.16	0.16
25	0.08	0.13	0.16	0.19	0.21	0.23
30	0.16	0.24	0.29	0.32	0.34	0.35
35	0.24	0.34	0.39	0.44	0.48	0.50

其拟合公式如下:

当 $\theta \leq 22.5^\circ$ 时

$$\xi_0 = 0.05\theta^{0.5} \left(\frac{A_1}{A_0} \right)^2 \left(1 - \frac{A_0}{A_1} \right)^{1.1}$$

当 $\theta > 22.5^\circ$ 时

$$\xi_0 = 0.05\theta^{0.5} \left(\frac{A_1}{A_0} \right)^2 \left(1 - \frac{A_0}{A_1} \right)^{1.1} (0.03\theta^{1.3} - 0.74)$$

⑦D-6 风机出口接管道的平面不对称扩散管 (图 6-20 的 6d)。

表 6-54 扩散管的局部阻力系数 (五)

$\theta / (^\circ)$	A_1/A_0					
	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
	ξ_0					
10	0.08	0.09	0.10	0.10	0.11	0.11
15	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15
20	0.12	0.14	0.15	0.16	0.17	0.18
25	0.15	0.18	0.21	0.23	0.25	0.26
30	0.18	0.25	0.30	0.33	0.35	0.35
35	0.21	0.31	0.38	0.41	0.43	0.44

其拟合公式如下:

当 $\theta \leq 20^\circ$ 时

$$\xi_0 = 0.038\theta^{0.55} \left(\frac{A_1}{A_0} \right)^2 \left(1 - \frac{A_0}{A_1} \right)^{0.55}$$

当 $\theta > 20^\circ$ 时

$$\xi_0 = 0.197 \left(\frac{A_1}{A_0} \right)^2 \left(1 - \frac{A_0}{A_1} \right)^{0.55} + 0.005 (\theta - 20) \left(\frac{A_1}{A_0} \right)^3$$

⑦D-7 风机出口接管道的表面对称扩散管 (图 6-20 的 7d)。

表 6-55 扩散管的局部阻力系数 (六)

$\theta / (^\circ)$	A_1/A_0					
	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
	ξ_0					
10	0.05	0.08	0.11	0.13	0.13	0.14
15	0.06	0.10	0.12	0.14	0.15	0.15
20	0.07	0.11	0.14	0.15	0.16	0.16
25	0.09	0.14	0.18	0.20	0.21	0.22
30	0.13	0.18	0.23	0.26	0.28	0.29
35	0.15	0.23	0.28	0.33	0.35	0.36

⑧D-8 风机出口接管道的表面不对称扩散管 (图 6-20 的 8d)。

表 6-56 扩散管的局部阻力系数 (七)

$\theta / (^{\circ})$	A_1/A_0					
	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
	ξ_0					
10	0.11	0.13	0.14	0.14	0.14	0.14
15	0.13	0.15	0.16	0.17	0.18	0.18
20	0.19	0.22	0.24	0.26	0.28	0.30
25	0.29	0.32	0.35	0.37	0.39	0.40
30	0.36	0.42	0.46	0.49	0.51	0.51
35	0.44	0.54	0.61	0.64	0.66	0.66

⑨D-9 风机出口接管道的锥形扩散管 (图 6-20 的 9d)。

表 6-57 扩散管的局部阻力系数 (八)

$\theta / (^{\circ})$	A_1/A_0					
	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
	ξ_0					
10	0.10	0.18	0.21	0.23	0.24	0.25
15	0.23	0.33	0.38	0.40	0.42	0.44
20	0.31	0.43	0.48	0.53	0.56	0.58
25	0.36	0.49	0.55	0.58	0.62	0.64
30	0.42	0.53	0.59	0.64	0.67	0.69

其拟合公式如下:

当 $\frac{A_1}{A_0} < 2$ 时

$$\xi_0 = 0.0441 \theta^{0.2} (\theta - 7.5)^{0.46} \left(\frac{A_1}{A_0} \right)^{2.4}$$

当 $\frac{A_1}{A_0} \geq 2$ 时

$$\xi_0 = 0.098 (\theta - 7.5)^{0.46} \left(\frac{A_1}{A_0} \right)^{2.4}$$

5) 管件 E 渐缩变径管 (渐缩管) 的局部阻力系数见表 6-58 至表 6-61, 相应图见图 6-21。

①E-1 圆管道和矩形管道的渐缩管 (图 6-21 的 1e)。

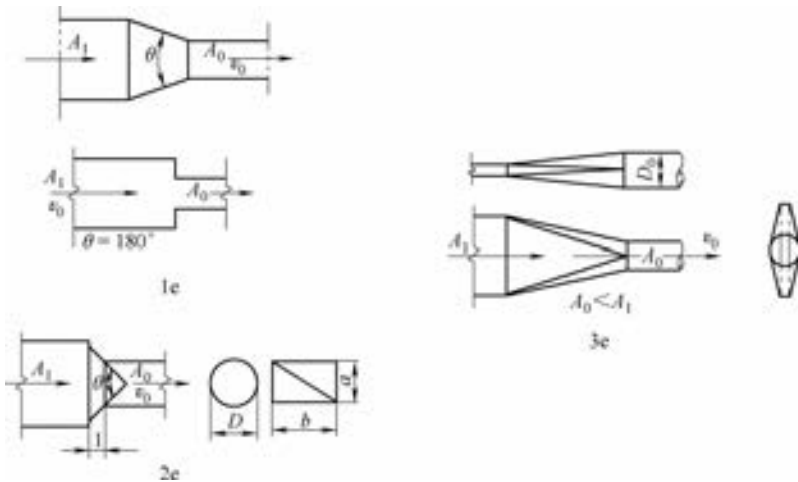


图 6-21 渐缩变径管的局部阻力系数用简图

表 6-58 渐缩管的局部阻力系数（一）

A_1/A_0	$\theta / (^\circ)$						
	10	15 ~ 40	50 ~ 60	90	120	150	180
	ξ_0						
2	0.05	0.05	0.06	0.12	0.18	0.24	0.26
4	0.05	0.04	0.07	0.17	0.27	0.35	0.41
6	0.05	0.04	0.07	0.18	0.28	0.36	0.42
10	0.05	0.05	0.08	0.19	0.29	0.37	0.43

对圆管道渐缩管，当 $\theta > 50^\circ$ ， $\frac{A_1}{A_0} = 2 \sim 6$ 时，其拟合公式如下：

$$\xi_0 = 0.0014\theta^{1.15} \left(1 - \frac{A_1}{A_0}\right)$$

②E-2 圆管道和矩形管道锥形渐缩管（图 6-21 的 2e）。

a) 圆管道锥形渐缩管。

表 6-59 渐缩管的局部阻力系数（二）

l/D	$\theta / (^\circ)$								
	0	10	20	30	40	60	100	140	180
	ξ'_0								
0.025	0.50	0.47	0.45	0.43	0.41	0.40	0.42	0.45	0.50
0.05	0.50	0.45	0.41	0.36	0.33	0.30	0.35	0.42	0.50
0.075	0.50	0.42	0.35	0.30	0.26	0.23	0.30	0.40	0.50
0.10	0.50	0.39	0.32	0.25	0.22	0.18	0.27	0.38	0.50
0.15	0.50	0.37	0.27	0.20	0.16	0.15	0.25	0.37	0.50
0.60	0.50	0.27	0.18	0.13	0.11	0.12	0.23	0.36	0.50

b) 矩形管道锥形渐缩管。

表 6-60 渐缩管局部阻力系数 (三)

A_0/A_1	0	0.2	0.4	0.6	0.8	0.9	1.0
s	1.0	0.85	0.68	0.50	0.30	0.18	0

③E-3 扁管渐缩成圆形 (图 6-21 的 3e)。

表 6-61 渐缩管局部阻力系数 (四)

$Re \times 10^4$	1	2	4	6	8	10	20	≥ 40
ξ_0	0.27	0.25	0.20	0.17	0.14	0.11	0.04	0

6) 管件 F 三通局部阻力系数见表 6-62 至表 6-100, 相应的图见图 6-22。

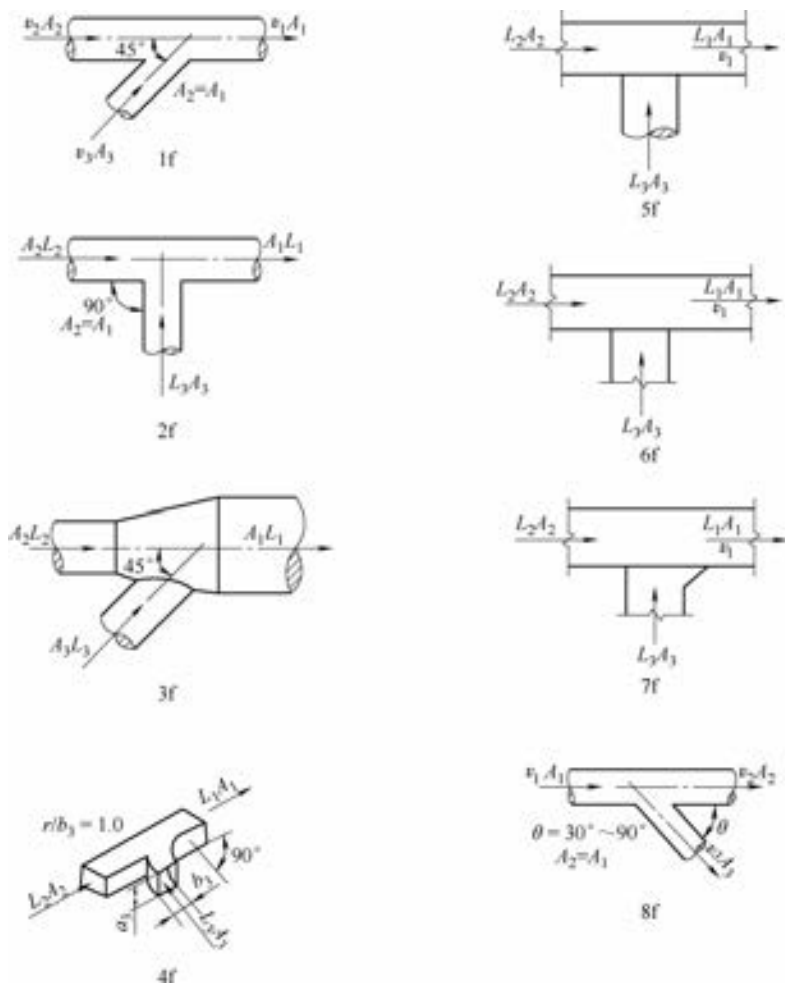


图 6-22 三通的局部阻力用简图

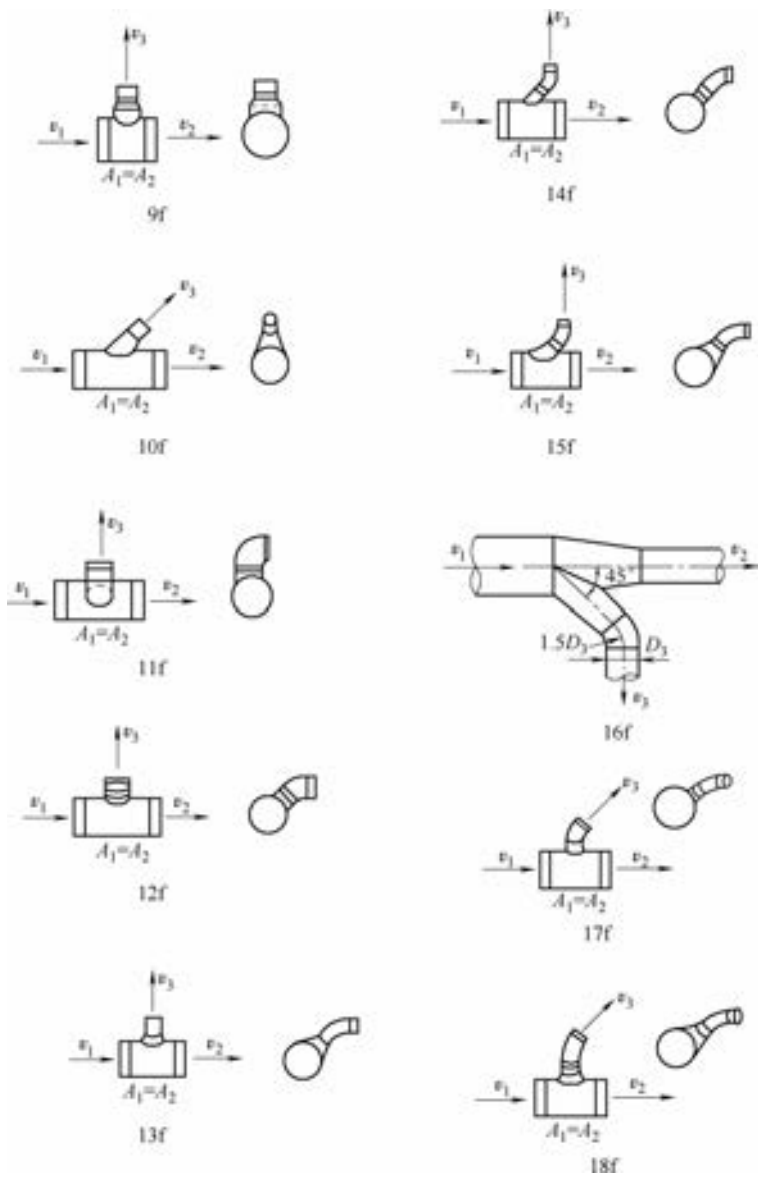


图 6-22 三通局部阻力用简图 (续一)

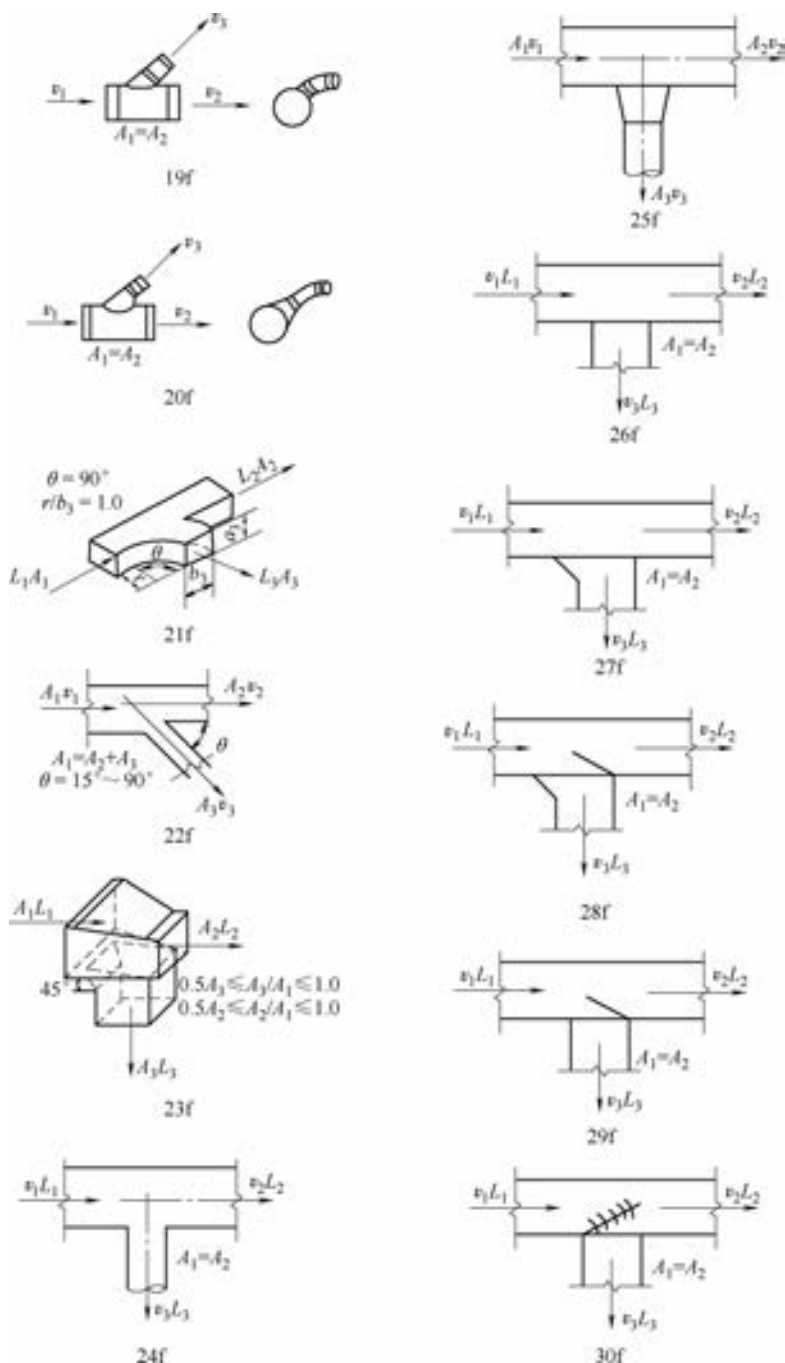


图 6-22 三通局部阻力用简图 (续二)

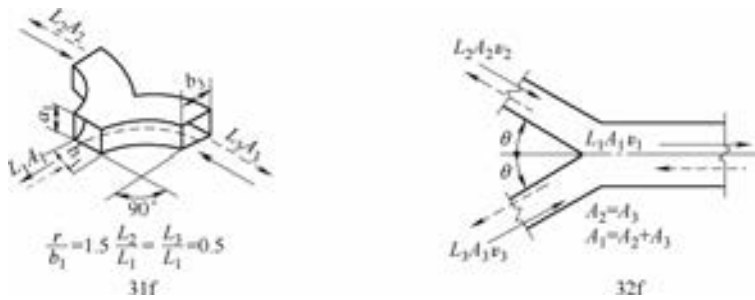


图 6-22 三通局部阻力用简图 (续三)

①F-1 圆管道 Y 形合流三通 (图 6-22 的 1f)。

表 6-62 三通的局部阻力系数 (一)

支 通 道							
$\frac{v_3}{v_1}$	A_3/A_1						
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.6	0.8	1.0
	ξ_{13}						
0.4	-0.56	-0.44	-0.35	-0.28	-0.15	-0.04	0.05
0.5	-0.48	-0.37	-0.28	-0.21	-0.09	0.02	0.11
0.6	-0.38	-0.27	-0.19	-0.12	0	0.10	0.18
0.7	-0.26	-0.16	-0.08	-0.01	0.10	0.20	0.28
0.8	-0.21	-0.02	0.05	0.12	0.23	0.32	0.40
0.9	0.04	0.13	0.21	0.27	0.37	0.46	0.53
1.0	0.22	0.31	0.38	0.44	0.53	0.62	0.69
1.5	1.4	1.5	1.5	1.6	1.7	1.7	1.8
2.0	3.1	3.2	3.2	3.2	3.3	3.3	3.3
2.5	5.3	5.3	5.3	5.4	5.4	5.4	5.4
3.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0

主 通 道							
$\frac{v_2}{v_1}$	A_3/A_1						
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.6	0.8	1.0
	ξ_{12}						
0.1	-8.6	-4.1	-2.5	-1.7	-0.97	-0.58	-0.34
0.2	-6.7	-3.1	-1.9	-1.3	-0.67	-0.36	-0.18
0.3	-5.0	-2.2	-1.3	-0.88	-0.42	-0.19	-0.05
0.4	-3.5	-1.5	-0.88	-0.55	-0.21	-0.05	0.05
0.5	-2.3	-0.95	-0.51	-0.28	-0.06	0.06	0.13
0.6	-1.3	-0.50	-0.22	-0.09	0.05	0.12	0.17
0.7	-0.63	-0.18	-0.03	0.04	0.12	0.16	0.18
0.8	-0.18	0.01	0.07	0.10	0.13	0.15	0.17
0.9	0.03	0.07	0.08	0.09	0.10	0.11	0.13
1.0	-0.01	0	0	0.10	0.02	0.04	0.05

②F-2 圆管道 T 形合流三通 (图 6-22 的 2f)。

表 6-63 三通的局部阻力系数 (二)

支 通 道											
L_3/L_1	A_3/A_1										
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.6	0.8	1.0				
	ξ_{13}										
0	-1.0	-1.0	-1.0	-0.90	-0.90	-0.90	-0.90				
0.1	0.40	-3.7	-0.51	-0.46	-0.50	-0.51	-0.52				
0.2	3.8	0.72	0.17	-0.02	-0.14	-0.18	-0.24				
0.3	9.2	2.3	1.0	0.44	0.21	0.11	-0.08				
0.4	16	4.3	2.1	0.94	0.54	0.40	0.32				
0.5	26	6.8	3.2	1.1	0.66	0.49	0.42				
0.6	37	9.7	4.7	1.6	0.92	0.69	0.57				
0.7	43	13	6.3	2.1	1.2	0.88	0.72				
0.8	65	17	7.9	2.7	1.5	1.1	0.86				
0.9	82	21	9.7	3.4	1.8	1.2	0.99				
1.0	101	26	12	4.0	2.1	1.4	1.1				
主 通 道											
L_3/L_1	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
ξ_{12}	0	0.16	0.27	0.38	0.46	0.53	0.57	0.59	0.60	0.59	0.55

③F-3 圆管道锥形合流三通 (图 6-22 的 3f)。

表 6-64 三通的局部阻力系数 (三)

支 通 道											
$\frac{A_2}{A_1}$	$\frac{A_3}{A_1}$	L_3/L_2									
		0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
		ξ_{13}									
0.3	0.2	-2.4	-0.01	2.0	3.8	5.3	6.6	7.8	8.9	9.8	11
	0.3	-2.8	-1.2	0.12	1.1	1.9	2.6	3.2	3.7	4.2	4.6
0.4	0.2	-1.2	0.93	2.8	4.5	5.9	7.2	8.4	9.5	10	11
	0.3	-1.6	-0.27	0.81	1.7	2.4	3.0	3.6	4.1	4.5	4.9
	0.4	-1.8	-0.72	0.07	0.66	1.1	1.5	1.8	2.1	2.3	2.5
0.5	0.2	-0.46	1.5	3.3	4.9	6.4	7.7	8.8	9.9	11	12
	0.3	-0.94	0.25	1.2	2.0	2.7	3.3	3.8	4.2	4.7	5.0
	0.4	-1.1	-0.24	0.42	0.92	1.3	1.6	1.9	2.1	2.3	2.5
	0.5	-1.2	-0.38	0.18	0.58	0.88	1.1	1.3	1.5	1.6	1.7
0.6	0.2	-0.55	1.3	3.1	4.7	6.1	7.4	8.6	9.6	11	12
	0.3	-1.1	0	0.88	1.6	2.3	2.8	3.3	3.7	4.1	4.5
	0.4	-1.2	-0.48	0.10	0.54	0.89	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
	0.5	-1.3	-0.62	-0.14	0.21	0.47	0.68	0.85	0.99	1.1	1.2
	0.6	-1.3	-0.69	-0.26	0.04	0.26	0.42	0.57	0.66	0.75	0.82

(续)

支 通 道

$\frac{A_2}{A_1}$	$\frac{A_3}{A_1}$	L_3/L_2									
		0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
		ξ_{13}									
0.8	0.2	0.06	1.8	3.5	5.1	6.5	7.8	8.9	10	11	12
	0.3	-0.52	0.35	1.1	1.7	2.3	2.8	3.2	3.6	3.9	4.2
	0.4	-0.67	-0.05	0.43	0.80	1.1	1.4	1.6	1.8	1.9	2.1
	0.6	-0.75	-0.27	0.05	0.28	0.45	0.58	0.68	0.76	0.83	0.88
	0.7	-0.77	-0.31	-0.02	0.18	0.32	0.43	0.50	0.56	0.61	0.65
	0.8	-0.78	-0.34	-0.07	0.12	0.24	0.33	0.39	0.44	0.47	0.50
1.0	0.2	0.40	2.1	3.7	5.2	6.6	7.8	9.0	11	11	12
	0.3	-0.21	0.54	1.2	1.8	2.3	2.7	3.1	3.7	3.7	4.0
	0.4	-0.33	0.21	0.62	0.96	1.2	1.5	1.7	2.0	2.0	2.1
	0.5	-0.38	0.05	0.37	0.60	0.79	0.93	1.1	1.2	1.2	1.3
	0.6	-0.41	-0.02	0.23	0.42	0.55	0.66	0.73	0.80	0.85	0.89
	0.8	-0.44	-0.10	0.11	0.24	0.33	0.39	0.43	0.46	0.47	0.48
	1.0	-0.46	-0.14	0.05	0.16	0.23	0.27	0.29	0.30	0.30	0.29

主 通 道

$\frac{A_2}{A_1}$	$\frac{A_3}{A_1}$	L_3/L_2									
		0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
		ξ_{12}									
0.3	0.2	5.3	-0.01	2.0	1.1	0.34	-0.20	-0.61	-0.93	-1.2	-1.4
	0.3	5.4	3.7	2.5	1.6	1.0	0.53	0.16	-0.14	-0.38	-0.58
0.4	0.2	1.9	1.1	0.46	-0.07	-0.49	-0.83	-1.1	-1.3	-1.5	-1.7
	0.3	2.0	1.4	0.81	0.42	0.08	-0.20	-0.43	-0.62	-0.78	-0.92
	0.4	2.0	1.5	1.0	0.68	0.39	0.16	-0.04	-0.21	-0.35	-0.47
0.5	0.2	0.77	0.34	-0.09	-0.48	-0.81	-1.1	1.3	-1.5	-1.7	-1.8
	0.3	0.85	0.56	0.25	-0.03	-0.27	-0.48	-0.67	-0.82	-0.96	-1.1
	0.4	0.88	0.66	0.43	0.21	0.02	-0.15	-0.30	-0.42	-0.54	-0.64
	0.5	0.91	0.73	0.54	0.36	0.21	0.06	-0.06	-0.17	-0.26	-0.35
0.6	0.2	0.30	0	-0.34	-0.67	-0.96	-1.2	-1.4	-1.6	-1.8	-1.9
	0.3	0.37	0.21	-0.02	-0.24	-0.44	-0.63	-0.79	-0.93	-1.1	-1.2
	0.4	0.40	0.31	0.16	-0.1	-0.16	-0.30	-0.43	-0.54	-0.64	-0.73
	0.5	0.43	0.37	0.26	0.14	0.02	-0.09	-0.20	-0.29	-0.37	-0.45
	0.6	0.44	0.41	0.33	0.24	0.14	0.05	-0.03	-0.11	-0.18	-0.25
0.8	0.2	-0.06	-0.27	-0.57	-0.86	-1.1	-1.4	-1.6	-1.7	-1.9	-2.0
	0.3	0	-0.08	-0.25	-0.43	-0.62	-0.78	-0.93	-1.1	-1.2	-1.3
	0.4	0.04	0.02	-0.08	-0.21	-0.34	-0.46	-0.57	-0.67	-0.77	-0.85
	0.5	0.06	0.08	0.02	-0.06	-0.16	-0.25	-0.34	-0.42	-0.50	-0.57

(续)

主 通 道											
$\frac{A_2}{A_1}$	$\frac{A_3}{A_1}$	L_3/L_2									
		0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
		ξ_{12}									
0.8	0.6	0.07	0.12	0.09	0.03	-0.04	-0.11	-0.18	-0.25	-0.31	-0.37
	0.7	0.08	0.15	0.14	0.10	0.05	-0.01	-0.07	-0.12	-0.17	-0.22
	0.8	0.09	0.17	0.18	0.16	0.11	0.07	0.02	-0.02	-0.07	-0.11
1.0	0.2	-0.19	-0.39	-0.67	-0.96	-1.2	-1.5	-1.6	-1.8	-2.0	-2.1
	0.3	-0.12	-0.19	-0.35	-0.54	-0.71	-0.87	-1.0	-1.2	-1.3	-1.4
	0.4	-0.09	-0.10	-0.19	-0.31	-0.43	-0.55	-0.66	-0.77	-0.86	-0.94
	0.5	-0.07	-0.04	-0.09	-0.17	-0.26	-0.35	-0.44	-0.52	-0.59	-0.66
	0.6	-0.06	0	-0.02	-0.07	-0.14	-0.21	-0.28	-0.34	-0.40	-0.46
	0.8	-0.04	0.06	0.07	0.05	0.02	-0.03	-0.07	-0.12	-0.16	-0.20
	1.0	-0.03	0.09	0.13	0.13	0.11	0.08	0.06	0.03	-0.01	-0.03

④F-4 矩形管道 Y 形合流三通 (图 6-22 的 4f)。

表 6-65 三通的局部阻力系数 (四)

支 通 道											
$\frac{A_3}{A_2}$	$\frac{A_3}{A_1}$	L_3/L_1									
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	
		ξ_{13}									
0.25	0.25	-0.50	0	0.50	1.2	2.2	3.7	5.8	8.4	11	
0.33	0.25	-1.2	-0.40	0.40	1.6	3.0	4.8	6.8	8.9	11	
0.5	0.5	-0.50	-0.20	0	0.25	0.45	0.70	1.0	1.5	2.0	
0.67	0.5	-1.0	-0.60	-0.20	0.10	0.30	0.60	1.0	1.5	2.0	
1.0	0.5	-2.2	-1.5	-0.95	-0.50	0	0.40	0.80	1.3	1.9	
1.0	1.0	-0.60	-0.30	-0.10	-0.04	0.13	0.21	0.29	0.36	0.42	
1.33	1.0	-1.2	-0.80	-0.40	-0.20	0	0.16	0.24	0.32	0.38	
2.0	1.0	-2.1	-1.4	-0.90	-0.50	-0.20	0	0.20	0.25	0.30	

主 通 道											
$\frac{A_2}{A_1}$	$\frac{A_3}{A_1}$	L_3/L_1									
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	
		ξ_{12}									
0.75	0.25	0.30	0.30	0.20	-0.10	-0.45	-0.92	-1.5	-2.0	-2.6	
1.0	0.5	0.17	0.16	0.10	0	-0.08	-0.18	-0.27	-0.37	-0.46	
0.75	0.5	0.27	0.35	0.32	0.25	0.12	-0.03	-0.23	-0.42	-0.58	
0.5	0.5	1.2	1.1	0.90	0.65	0.35	0	-0.40	-0.80	-1.3	
1.0	1.0	0.18	0.24	0.27	0.26	0.23	0.18	0.10	0	-0.12	
0.75	1.0	0.75	0.36	0.38	0.35	0.27	0.18	0.05	-0.08	-0.22	
0.5	1.0	0.80	0.87	0.80	0.68	0.55	0.40	0.25	0.08	-0.10	

当 $A_1 = A_2$, $A_3/A_1 = 0.5 \sim 1.0$, $L_3/L_1 = 0.1 \sim 0.9$ 时

$$\text{主通道 } \xi_{12} = 0.27 \left(\frac{A_3}{A_1} \right)^{0.7} - 1.3 \left[\frac{L_3}{L_1} - 0.35 \left(\frac{A_3}{A_1} \right)^2 \right] \left(\frac{A_3}{A_1} \right)^{0.16} \left(\frac{L_1 A_2}{L_2 A_1} \right)^2$$

$$\text{支通道 } \xi_{13} = \left\{ 3 \left(\frac{L_s}{L_1} \right) - 1 + 4.5 \left(\frac{A_1}{A_3} \right) \left(\frac{L_3}{L_1} \right)^{2.5} \left[\left(\frac{A_1}{A_3} \right)^{0.5} - 1.41 \right] \right\} \left(\frac{L_1 A_3}{L_3 A_1} \right)^2$$

⑤F-5 T形合流三通，圆形支管道到矩形主管道（图 6-22 的 6f）。

表 6-66 三通的截面积比

A_3/A_2	A_2/A_1	A_3/A_1
0.5	1.0	0.5

表 6-67 三通的局部阻力系数（五）

v_1 / (m/s)	L_3/L_1									
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
	支 通 道 ξ_{13}									
<6	-0.63	-0.55	0.13	0.23	0.78	1.30	1.93	3.10	4.88	5.60
>6	-0.49	-0.21	0.23	0.60	1.27	2.06	2.75	3.70	4.93	5.95

注：主通道的 ξ_{12} 见管件 F-2 的表 6-63。

⑥F-6 矩形管道合流三通（图 6-22 的图 6f）。

表 6-68 三通的截面积比

A_3/A_2	A_2/A_1	A_3/A_1
0.5	1.0	0.5

表 6-69 三通的局部阻力系数（六）

v_1 / (m/s)	支 通 道									
	L_3/L_1									
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
ξ_{13}										
<6	-0.75	-0.53	-0.03	0.33	1.03	1.10	2.15	2.93	4.18	4.78
>6	-0.69	-0.21	-0.23	0.67	1.17	1.66	2.67	3.36	3.93	5.13

注：主通道的局部阻力系数 ξ_{12} 见管件 F-2 的表 6-63。

⑦F-7 矩形管道 45° 接入的合流 T 形三通（图 6-22 的 7f）。

表 6-70 三通的截面积比

A_3/A_2	A_2/A_1	A_3/A_1
0.5	1.0	0.5

表 6-71 三通的局部阻力系数 (七)

v_1 / (m/s)	L_3/L_1									
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
	支通道 ξ_{13}									
<6	-0.83	-0.68	-0.30	0.28	0.55	1.03	1.50	1.93	2.50	3.03
>6	-0.72	-0.52	-0.23	0.34	0.76	1.14	1.83	2.01	2.90	3.63

注：主通道 ξ_{12} 见管件 F-2 的表 6-63。

⑧F-8 圆管道 Y 形分流三通 (图 6-22 的 8f)。

表 6-72 三通的局部阻力系数 (八)

v_2/v_1	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1.0
主通道 ξ_{12}	0.35	0.28	0.22	0.17	0.13	0.09	0.06	0.02	0

其拟合公式如下：

$$\text{主通道} \quad \xi_{12} = 0.35 \left(\frac{L_1 A_2}{L_2 A_1} - 1 \right)^2$$

$$\text{对支通道, 假设 } c = \frac{L_3 A_1}{L_1 A_3}:$$

$$\text{当 } \theta = 45^\circ \text{ 时} \quad \xi_{13} = [0.4 + (c - 0.81)^2] / c^2$$

$$\text{当 } \theta = 90^\circ \text{ 时} \quad \xi_{13} = 0.5 + \frac{1}{c_2}$$

当 θ 为其他值时, 分为两种情况:

$$c < \cos\theta \text{ 时} \quad \xi_{13} = [\sin^2\theta + (\cos\theta - c)^2] / c$$

$$c \geq \cos\theta \text{ 时} \quad \xi_{13} = [\sin^2\theta + 0.5c(c - \cos\theta)] / c^2$$

a) $\theta = 30^\circ$ 。

表 6-73 三通支通道的局部阻力系数 (九)

A_3/A_1	L_3/L_1								
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
	支通道 ξ_{13}								
0.8	0.75	0.55	0.40	0.28	0.21	0.16	0.15	0.16	0.19
0.7	0.72	0.51	0.36	0.25	0.18	0.15	0.16	0.20	0.26
0.6	0.69	0.46	0.31	0.21	0.17	0.16	0.20	0.28	0.39
0.5	0.65	0.41	0.26	0.19	0.18	0.22	0.32	0.47	0.67
0.4	0.59	0.33	0.21	0.20	0.27	0.40	0.62	0.92	1.3
0.3	0.55	0.28	0.24	0.38	0.76	1.3	2.0	—	—
0.2	0.40	0.26	0.58	1.3	2.5	—	—	—	—
0.1	0.28	1.5	—	—	—	—	—	—	—

⑨F-9 圆管道 T 形 90°锥形分流三通 (图 6-22 的 9f)。

表 6-77 三通的局部阻力系数 (十三)

v_3/v_1	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
支通道 ξ_{13}	1.0	0.85	0.74	0.62	0.52	0.42	0.36	0.32	0.32	0.37	0.52

注: 主通道 ξ_{12} 见管件 F-8 的表 6-72。

⑩F-10 圆管道 T 形 45°锥形分流三通 (图 6-22 的 10f)。

表 6-78 三通的局部阻力系数 (十四)

v_3/v_1	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
支通道 ξ_{13}	1.0	0.84	0.61	0.41	0.27	0.17	0.12	0.12	0.14	0.18	0.27

注: 主通道的局部阻力系数 ξ_{12} 见管件 F-8 的表 6-72。

⑪F-11 圆管道 T 形 90°分流三通, 转 90°接 90°弯头, 支通道和主通道夹角为 90° (图 6-22 的 11f)。

表 6-79 三通的局部阻力系数 (十五)

v_3/v_1	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
支通道 ξ_{13}	1.0	1.03	1.08	1.18	1.33	1.56	1.86	2.2	2.6	3.0	3.4

注: 主通道 ξ_{12} 见管件 F-8 的表 6-72。

⑫F-12 圆管道 T 形分流三通, 转 45°带 45°弯头, 支通道 90°接至主通道 (图 6-22 的 12f)。

表 6-80 三通的局部阻力系数 (十六)

v_3/v_1	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
支通道 ξ_{13}	1.0	1.32	1.51	1.60	1.65	1.74	1.87	2.0	2.2	2.5	2.7

注: 主通道 ξ_{12} 见管件 F-8 的表 6-72。

⑬F-13 圆管道 T 形 90°锥形分流三通, 转 45°接 45°弯头, 支通道 90°接自主管道 (图 6-22 的 13f)。

表 6-81 三通的局部阻力系数 (十七)

v_3/v_1	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
支通道 ξ_{13}	1.0	0.94	0.88	0.84	0.80	0.82	0.84	0.87	0.90	0.95	1.02

注: 主通道 ξ_{12} 见管件 F-8 的表 6-72。

⑭F-14 圆管道 45°T 形分流三通, 转 45°接 60°接头, 支管道 90°接自主管道 (图 6-22 的 14f)。

表 6-82 三通的局部阻力系数 (十八)

v_3/v_1	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
支通道 ξ_{13}	1.0	0.88	0.77	0.68	0.65	0.69	0.73	0.88	1.14	1.54	2.2

注: 主通道 ξ_{12} 见管件 F-8 的表 6-72。

⑮F-15 圆管道 45°锥形分流三通, 转 45°接 60°弯头, 支管道 90°接自主管道 (图

6-22 的 16f)。

表 6-83 三通的局部阻力系数 (十九)

v_3/v_1	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
支通道 ξ_{13}	1.0	0.82	0.63	0.52	0.45	0.42	0.41	0.40	0.41	0.45	0.56

注: 主管道 ξ_{12} 同管件 F-8 的表 6-72。

⑩F-16 T形 45°分流三通, 支通道和主通道为锥形, 支通道带 45°弯头, 支通道和主通道夹角为 90° (图 6-22 的 16f)。

表 6-84 三通的局部阻力系数 (廿)

支 通 道											
v_3/v_1	0.2	0.4	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2		
ξ_{13}	0.76	0.60	0.52	0.50	0.51	0.52	0.56	0.6	0.68		
v_3/v_1	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0		
ξ_{13}	0.86	1.1	1.4	1.8	2.2	2.6	3.1	3.7	4.2		
主 通 道											
v_2/v_1	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	
ξ_{12}	0.14	0.06	0.05	0.09	0.18	0.30	0.46	0.64	0.84	1.0	

⑪F-17 圆管道 90°分流三通, 转 45°接 60°弯头, 支通道和主通道夹角为 45° (图 6-22 的 17f)。

表 6-85 三通的局部阻力系数 (廿一)

v_3/v_1	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
支通道 ξ_{13}	1.0	0.06	0.15	1.29	1.45	1.65	1.89	2.2	2.5	2.9	3.3

注: 主通道 ξ_{12} 见管件 F-8 的表 6-72。

⑫F-18 圆管道 90°T形锥形三通, 转 45°带 60°弯头, 主通道和支通道夹角为 45° (图 6-22 的 18f)。

表 6-86 三通的局部阻力系数 (廿二)

v_3/v_1	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
支通道 ξ_{13}	1.0	0.95	0.90	0.86	0.81	0.79	0.79	0.81	0.86	0.96	1.10

注: 主通道 ξ_{12} 见管件 F-8 的表 6-72。

⑬F-19 圆管道 45°T形分流三通, 转 45°接 30°弯头, 支通道和主通道夹角为 45° (图 6-22 的 19f)。

表 6-87 三通的局部阻力系数 (廿三)

v_3/v_1	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
支通道 ξ_{13}	1.0	0.84	0.72	0.62	0.54	0.50	0.56	0.71	0.92	1.22	1.66

注: 主通道 ξ_{12} 见管件 F-8 的表 6-72。

⑳F-20 圆管道 T 形 90°锥形分流三通，转 45°接 30°弯头，支通道和主通道夹角为 45°（图 6-22 的 20f）。

表 6-88 三通的局部阻力系数（廿四）

v_3/v_1	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
支通道 ξ_{13}	1.0	0.93	0.71	0.55	0.44	0.42	0.42	0.44	0.47	0.54	0.62

注：主通道 ξ_{12} 见管件 F-8 的表 6-72。

㉑F-21 矩形管道 Y 形分流三通（图 6-22 的 21f）。

表 6-89 三通的局部阻力系数（廿五）

$\frac{A_3}{A_2}$	$\frac{A_3}{A_1}$	L_3/L_1								
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
		支通道 ξ_{13}								
0.25	0.25	0.55	0.50	0.60	0.85	1.2	1.8	3.1	4.4	6.0
0.33	0.25	0.35	0.35	0.50	0.80	1.3	2.0	2.8	3.8	5.0
0.5	0.5	0.62	0.48	0.40	0.40	0.48	0.60	0.78	1.1	1.5
0.67	0.5	0.52	0.40	0.32	0.30	0.34	0.44	0.62	0.92	1.4
1.0	0.5	0.44	0.38	0.38	0.41	0.52	0.68	0.92	1.2	1.6
1.0	1.0	0.67	0.55	0.46	0.37	0.32	0.29	0.29	0.30	0.37
1.33	1.0	0.70	0.60	0.51	0.42	0.34	0.28	0.26	0.26	0.29
2.0	1.0	0.60	0.52	0.43	0.33	0.24	0.17	0.15	0.17	0.21
$\frac{A_3}{A_2}$	$\frac{A_3}{A_1}$	L_3/L_1								
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
		主通道 ξ_{12}								
0.25	0.25	-0.01	-0.03	-0.01	0.05	0.13	0.21	0.29	0.38	0.46
0.33	0.25	0.08	0	-0.02	-0.01	0.02	0.08	0.16	0.24	0.34
0.5	0.5	-0.03	-0.06	-0.05	0	0.06	0.12	0.19	0.27	0.35
0.67	0.5	0.04	-0.02	-0.04	-0.03	-0.01	0.04	0.12	0.23	0.37
1.0	0.5	0.72	0.48	0.28	0.13	0.05	0.04	0.09	0.18	0.30
1.0	1.0	-0.02	-0.04	-0.04	-0.01	0.06	0.13	0.22	0.30	0.38
1.33	1.0	0.10	0.01	-0.03	-0.03	-0.01	0.03	0.10	0.20	0.30
2.0	1.0	0.62	0.38	0.23	0.13	0.08	0.05	0.06	0.10	0.20

当 $A_1 = A_2$ 时

$$\text{主通道 } \xi_{12} = \left[-0.05 + 0.77 \left(0.15 - \frac{L_3}{L_1} \right)^2 + 0.12 \left(\frac{L_3}{L_1} \right) \left(0.5 \frac{A_1}{A_3} - 1 \right)^2 \right] \left(\frac{L_1 A_2}{L_2 A_1} \right)^2$$

$$\text{支通道 } \xi_{13} = \left[0.29 \left(2 - \frac{A_3}{A_1} \right)^{0.9} + \left(0.7 \frac{A_3}{A_1} - \frac{L_3}{L_1} \right)^2 \left(\frac{A_1}{A_3} \right)^{1.6} \right] \left(\frac{A_3 L_1}{A_1 L_3} \right)^2$$

㉒F-22 矩形管道 Y 形分流三通（图 6-22 的 22f）。

表 6-90 三通的局部阻力系数 (廿六)

θ (度)	v_3/v_1												
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
	支通道 ξ_{13}												
15	0.81	0.65	0.51	0.38	0.28	0.20	0.11	0.06	0.14	0.30	0.51	0.76	1.0
30	0.84	0.69	0.56	0.44	0.34	0.26	0.19	0.15	0.15	0.30	0.51	0.76	1.0
45	0.87	0.74	0.63	0.54	0.45	0.38	0.29	0.24	0.23	0.30	0.51	0.76	1.0
60	0.90	0.82	0.79	0.66	0.59	0.53	0.43	0.36	0.33	0.39	0.51	0.76	1.0
90	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
$\theta/(\circ)$	15~60						90						
$\frac{v_2}{v_1}$	A_2/A_1												
	0~1.0	0~0.4	0.5	0.6	0.7	≥ 0.8							
	主通道 ξ_{12}												
0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0							
0.1	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81							
0.2	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64							
0.3	0.50	0.50	0.52	0.52	0.50	0.50							
0.4	0.36	0.36	0.40	0.38	0.37	0.36							
0.5	0.25	0.25	0.30	0.28	0.27	0.25							
0.6	0.16	0.16	0.23	0.20	0.18	0.16							
0.8	0.04	0.04	0.17	0.10	0.07	0.04							
1.0	0	0	0.20	0.10	0.05	0							
1.2	0.07	0.07	0.36	0.21	0.14	0.07							
1.4	0.39	0.39	0.79	0.59	0.39	—							
1.6	0.90	0.90	1.4	1.2	—	—							
1.8	1.8	1.8	2.5	—	—	—							
2.0	3.2	3.2	4.0	—	—	—							

②F-23 T形分流三通，主通道为锥形和支通道45°斜口接出（图6-22的23f）。

表 6-91 三通的局部阻力系数 (廿七)

支 通 道											
L_3/L_1	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
ξ_{13}	1.4	1.2	0.96	0.82	0.68	0.56	0.49	0.47	0.48	0.50	0.54
主 通 道											
L_2/L_1	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
ξ_{12}	0.22	0.21	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.22	0.25	0.35	0.53

㉔F-24 T形三通, 矩形主通道至圆形支通道 (图 6-22 的 24f)。

表 6-92 三通的局部阻力系数 (廿八)

v_3/v_1	L_3/L_1								
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
	支通道 ξ_{13}								
0.2	1.00	—	—	—	—	—	—	—	—
0.4	0.01	1.07	—	—	—	—	—	—	—
0.6	1.14	1.10	1.08	—	—	—	—	—	—
0.8	1.18	1.31	1.12	1.13	—	—	—	—	—
1.0	1.30	1.38	1.20	1.23	1.26	—	—	—	—
1.2	1.46	1.58	1.45	1.31	1.39	1.48	—	—	—
1.4	1.70	1.82	1.65	1.51	1.56	1.64	1.71	—	—
1.6	1.93	2.06	2.00	1.85	1.70	1.76	1.80	1.88	—
1.8	2.06	2.17	2.20	2.13	2.06	1.98	1.99	2.00	2.07

注: 主通道 ξ_{12} 见管件 F-8 的表 6-72。

㉕F-25 T形分流三通, 矩形主通道至圆形支通道 (图 6-22 的 25f)。

表 6-93 三通的局部阻力系数 (廿九)

v_3/v_1	0.40	0.50	0.75	1.0	1.3	1.5
支通道 ξ_{13}	0.80	0.83	0.90	1.0	1.1	1.4

注: 主通道 ξ_{12} 见管件 F-8 的表 6-72。

㉖F-26 T形分流三通, 矩形主通道、支通道 (图 6-22 的 26f)。

表 6-94 三通的局部阻力系数 (卅)

v_3/v_1	L_3/L_1								
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
	支通道 ξ_{13}								
0.2	1.03	—	—	—	—	—	—	—	—
0.4	1.04	1.01	—	—	—	—	—	—	—
0.6	1.11	1.03	1.05	—	—	—	—	—	—
0.8	1.16	1.21	1.17	1.12	—	—	—	—	—
1.0	1.38	1.40	1.30	1.36	1.27	—	—	—	—
1.2	1.52	1.61	1.68	1.91	1.47	1.66	—	—	—
1.4	1.79	2.01	1.90	2.31	2.28	2.20	1.95	—	—
1.6	2.07	2.28	2.13	2.71	2.99	2.81	2.09	2.20	—
1.8	2.32	2.54	2.64	3.09	3.72	3.48	2.21	2.29	2.57

注: 主通道 ξ_{12} 见管件 F-8 的表 6-72。

⑳F-27 T形分流三通，矩形主通道、支通道，45°斜接（图6-22的27f）。

表 6-95 三通的局部阻力系数（卅一）

v_3/v_1	L_3/L_1								
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
	支通道 ξ_{13}								
0.2	0.91	—	—	—	—	—	—	—	—
0.4	0.81	0.79	—	—	—	—	—	—	—
0.6	0.77	0.72	0.70	—	—	—	—	—	—
0.8	0.78	0.73	0.69	0.66	—	—	—	—	—
1.0	0.78	0.98	0.85	0.79	0.74	—	—	—	—
1.2	0.90	1.11	1.16	1.23	1.03	0.86	—	—	—
1.4	1.19	1.22	1.26	1.29	1.54	1.25	0.92	—	—
1.6	1.35	1.42	1.55	1.59	1.63	1.50	1.31	1.09	—
1.8	1.44	1.50	1.75	1.74	1.72	2.24	1.53	1.40	1.17

注：主通道 ξ_{12} 见管件 F-8 的表 6-72。

㉑F-28 T形分流三通，矩形主通道和支通道，45°斜接并带阀门（图6-22的28f）。

表 6-96 三通的局部阻力系数（卅二）

v_3/v_1	L_3/L_1								
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
	支通道 ξ_{13}								
0.2	0.61	—	—	—	—	—	—	—	—
0.4	0.46	0.61	—	—	—	—	—	—	—
0.6	0.43	0.50	0.54	—	—	—	—	—	—
0.8	0.39	0.43	0.62	0.53	—	—	—	—	—
1.0	0.34	0.57	0.77	0.73	0.68	—	—	—	—
1.2	0.37	0.64	0.85	0.98	1.07	0.83	—	—	—
1.4	0.57	0.71	1.04	1.16	1.54	1.36	1.18	—	—
1.6	0.89	1.08	1.28	1.30	1.69	2.09	1.81	1.47	—
1.8	1.33	1.34	2.04	1.78	1.90	2.40	2.77	2.23	1.92
主 通 道									
v_3/v_1	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8
ξ_{12}	0.03	0.04	0.07	0.12	0.13	0.14	0.27	0.30	0.25

㉒F-29 T形分流三通，矩形主通道和支通道并带阀门（图6-22的29f）。

表 6-97 三通的局部阻力系数 (卅三)

v_3/v_1	L_3/L_1								
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
	支通道 ξ_{13}								
0.2	0.58	—	—	—	—	—	—	—	—
0.4	0.67	0.64	—	—	—	—	—	—	—
0.6	0.78	0.76	0.75	—	—	—	—	—	—
0.8	0.88	0.98	0.81	1.01	—	—	—	—	—
1.0	1.12	1.05	1.08	1.18	1.29	—	—	—	—
1.2	1.49	1.48	1.40	1.51	1.70	1.91	—	—	—
1.4	2.10	2.21	2.25	2.29	2.32	2.48	2.53	—	—
1.6	2.72	3.30	2.84	3.09	3.30	3.19	3.29	3.16	—
1.8	3.42	4.58	3.65	3.92	4.20	4.15	4.14	4.10	4.05

注：主通道 ξ_{12} 见管件 F-28 的表 6-96。

②F-30 矩形管道 T 形分流三通带分流板 (图 6-22 的 20f)。

表 6-98 三通的局部阻力系数 (卅四)

v_3/v_1	L_3/L_1								
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
	支通道 ξ_{13}								
0.2	0.60	—	—	—	—	—	—	—	—
0.4	0.62	0.69	—	—	—	—	—	—	—
0.6	0.74	0.80	0.82	—	—	—	—	—	—
0.8	0.99	1.10	0.95	0.90	—	—	—	—	—
1.0	1.48	1.12	1.41	1.24	1.21	—	—	—	—
1.2	1.91	1.33	1.43	1.52	1.55	1.64	—	—	—
1.4	2.47	1.67	1.70	2.04	1.86	1.98	2.47	—	—
1.6	3.17	2.40	2.33	2.53	2.31	2.51	3.13	3.25	—
1.8	3.85	3.37	2.89	3.23	3.09	3.03	3.30	3.74	4.11

注：主通道 ξ_{12} 见管件 F-28 的表 6-96。

③F-31 矩形管道 Y 形对称三通 (图 6-22 的 31f)

表 6-99 三通的局部阻力系数 (卅五)

合流 (→)			分流 (←)		
A_2/A_1 或 A_3/A_1	0.50	1.0	A_2/A_1 或 A_3/A_1	0.50	1.0
ξ_{12} 或 ξ_{13}	0.23	0.07	ξ_{12} 或 ξ_{13}	0.30	0.25

其拟合公式如下：

$$\text{对合流三通} \quad \xi_{12} \text{ 或 } \xi_{13} = 0.29 \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^{0.3}$$

$$\text{对分流三通} \quad \xi_{12} \text{ 或 } \xi_{13} = \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^{1.7}$$

②F-32 矩形或圆形管道 Y 形三通 (图 6-22 的 32f)。

表 6-100 三通的局部阻力系数 (卅六)

合流 (→)													
$\theta_2 = \theta_3$ (度)	L_2/L_1 或 L_3/L_1												
	0	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.0		
	ξ_{12} 或 ξ_{13}												
15	-2.6	-1.9	-1.3	-0.77	-0.30	0.10	0.41	0.67	0.85	0.97	1.0		
30	-2.1	-1.5	-1.0	-0.53	-0.10	0.28	0.69	0.91	1.1	1.4	1.6		
45	-1.3	-0.93	-0.55	-0.16	0.20	0.56	0.92	1.3	1.6	2.0	2.3		
分流 (←)													
$\theta_2 = \theta_3$ (度)	L_2/L_1 或 L_3/L_1												
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
	ξ_{12} 或 ξ_{13}												
15	0.81	0.65	0.51	0.38	0.28	0.20	0.11	0.06	0.14	0.30	0.51	0.76	1.0
30	0.84	0.69	0.56	0.44	0.34	0.26	0.19	0.15	0.15	0.30	0.51	0.76	1.0
45	0.87	0.74	0.63	0.54	0.45	0.38	0.29	0.24	0.23	0.30	0.51	0.76	1.0
60	0.90	0.82	0.79	0.66	0.59	0.53	0.43	0.36	0.33	0.39	0.51	0.76	1.0
90	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

$$\text{设} \quad c = \left(\frac{L_2}{L_1} \right)^2 \left(\frac{A_1}{A_2} \right) \cos \theta_2 + \left(\frac{L_3}{L_1} \right)^2 \left(\frac{A_1}{A_3} \right) \cos \theta_3$$

其拟合公式如下：

当 $c > 1$ 时

$$\xi_{12} \text{ 或 } \xi_{13} = 1 - (2c - 1) \left(\frac{L_1 A_2}{L_2 A_1} \right)^2$$

当 $c \leq 1$ 时

$$\xi_{12} \text{ 或 } \xi_{13} = 1 - (c^2 + 0.5c - 0.5) \left(\frac{L_1 A_2}{L_2 A_1} \right)^2$$

7) 管件 G 阻挡物的局部阻力系数见表 6-101 至表 6-112, 相应的图见图 6-23。

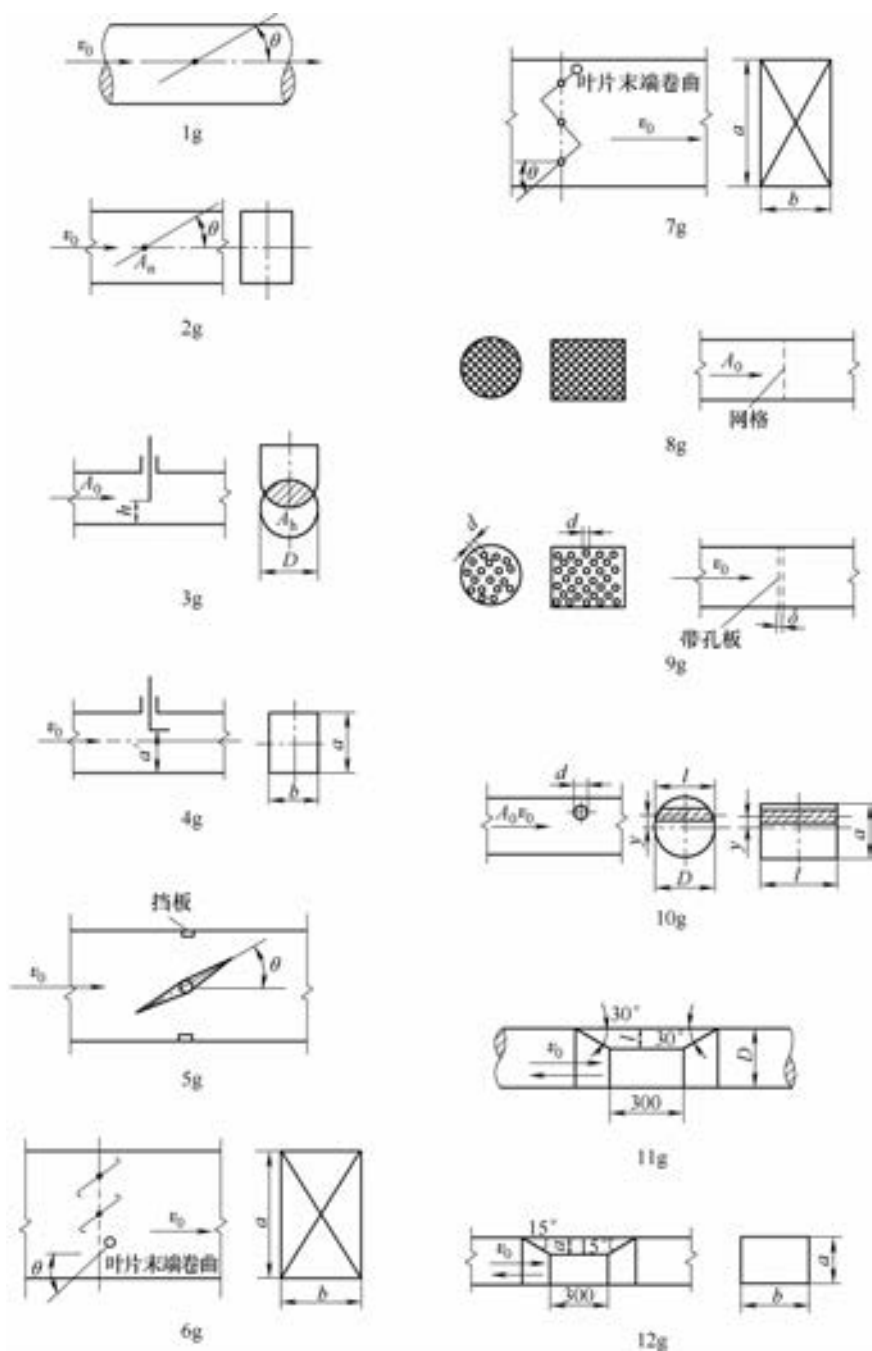


图 6-23 阻挡物的局部阻力系数用简图

①G-1 圆形蝶阀 (图 6-23 的 1g)。

表 6-101 阻挡物的局部阻力系数 (一)

$\theta/(\circ)$	0	10	20	30	40	50	60
ξ_0	0.20	0.52	1.5	4.5	11	29	108

其拟合公式如下:

$$\xi_0 = 0.2e^{0.1\theta}$$

②G-2 矩形蝶阀 (图 6-23 的 2g)。

表 6-102 阻挡物的局部阻力系数 (二)

$\theta/(\circ)$	0	10	20	30	40	50	60
ξ_0	0.04	0.33	1.2	3.3	9.0	26	70

其拟合公式如下:

$$\xi_0 = 0.131e^{0.105\theta}$$

③G-3 圆形插板阀 (图 6-23 的 3g)。

表 6-103 阻挡物的局部阻力系数 (三)

h/D	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
A_h/A_0	0.25	0.38	0.50	0.61	0.71	0.81	0.90	0.96
ξ_0	35	10	4.6	2.1	0.98	0.44	0.17	0.06

其拟合公式如下:

当 $h/D > 0.4$ 时

$$\xi_0 = 400e^{-12.5\left(\frac{h}{D}\right)} + 1.9$$

当 $h/D \leq 0.4$ 时

$$\xi_0 = 105e^{-7.8\left(\frac{h}{D}\right)} - 0.033$$

④G-4 矩形插板阀 (图 6-23 的 4g)。

表 6-104 阻挡物的局部阻力系数 (四)

a/b	a'/a						
	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
	ξ_0						
0.5	14	6.9	3.3	1.7	0.83	0.32	0.09
1.0	19	8.8	4.5	2.4	1.2	0.55	0.17
1.5	20	9.1	4.7	2.7	1.2	0.47	0.11
2.0	18	8.8	4.5	2.3	1.1	0.51	0.13

其拟合公式如下:

当 $a/b < 1$ 时

$$\xi_0 = [132e^{-6.6\left(\frac{a'}{a}\right)} - 0.2] \left(\frac{a}{b}\right)^{0.4}$$

当 $a/b \geq 1$ 时

$$\xi_0 = 132e^{-6.6\left(\frac{a'}{a}\right)} - 0.2$$

⑤G-5 矩形管道流线型叶片蝶阀 (图 6-23 的 5g)。

表 6-105 阻挡物的局部阻力系数 (五)

$\theta/ (^{\circ})$	0	10	20	30	40	50	60
ξ_0	0.50	0.65	1.6	4.0	9.4	24	67

其拟合公式如下:

$$\xi_0 = 0.5e^{0.08\theta} - 0.045\theta$$

⑥G-6 矩形管道平行式多叶阀 (图 6-23 的 6g)。

表 6-106 阻挡物的局部阻力系数 (六)

$\frac{l}{s}$	$\theta/ (^{\circ})$								
	80	70	60	50	40	30	20	10	0
	ξ_0								
0.3	116	32	14	9.0	5.0	2.3	1.4	0.79	0.52
0.4	152	38	16	9.0	6.0	2.4	1.5	0.85	0.52
0.5	188	45	18	9.0	6.0	2.4	1.5	0.92	0.52
0.6	245	45	21	9.0	5.4	2.4	1.5	0.92	0.52
0.8	284	55	22	9.0	5.4	2.5	1.5	0.92	0.52
1.0	361	65	24	10	5.4	2.6	1.6	1.0	0.52
1.5	576	102	28	10	5.4	2.7	1.6	1.0	0.52

$$\frac{l}{s} = \frac{nb}{2(a+b)}$$

式中, l 为合计的阀门叶片总长度 (mm); s 为管道的周长 (mm); n 为阀门叶片的数量; b 为平行于叶片轴的管道尺寸 (mm)。

⑦G-7 矩形管道对开式多叶阀 (图 6-23 的 7g)。

表 6-107 阻挡物的局部阻力系数 (七)

$\frac{l}{s}$	$\theta/ (^{\circ})$								
	80	70	60	50	40	30	20	10	0
	ξ_0								
0.3	807	284	73	21	9.0	4.1	2.1	0.85	0.52
0.4	915	332	100	28	11	5.0	2.2	0.92	0.52
0.5	1045	377	122	33	13	5.4	2.3	1.0	0.52
0.6	1121	411	148	38	14	6.0	2.3	1.0	0.52
0.8	1299	495	188	54	18	6.6	2.4	1.1	0.52
1.0	1521	547	245	65	21	7.3	2.7	1.2	0.52
1.5	1654	677	361	107	28	9.0	3.2	1.4	0.52

l 、 s 的说明见管件 G-6 的表 6-106。

其拟合公式如下：

当 $\theta \leq 25^\circ$ 时

$$\xi_0 = 0.52 + 0.01 \left(\frac{l}{s} \right)^{0.36} \theta^{1.8}$$

当 $\theta = 25^\circ \sim 55^\circ$ 时

$$\xi_0 = 0.01 \left(\frac{l}{s} \right)^{[0.36 + 0.015(\theta - 20)]} \theta^{[1.8 + 0.014(\theta - 20)]}$$

当 $\theta = 55^\circ \sim 80^\circ$ 时

$$\xi_0 = 0.98 \times 10^{-9} \theta^{6.4} \left(\frac{l}{s} \right)^{(2 - 0.019\theta)}$$

⑧G-8 管道中安有网格的矩形和圆形管道（图 6-23 的 8g）。

表 6-108 阻挡物的局部阻力系数（八）

n	0.30	0.40	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.90	1.0
ξ_0	6.2	3.0	1.7	1.3	0.97	0.75	0.58	0.44	0.32	0.14	0

$$n = \frac{A_{0r}}{A_0}$$

式中， n 为网格的过风面积比； A_{0r} 为网格的全部可流通面积（ mm^2 ）； A_0 为管道面积（ mm^2 ）。

⑨G-9 矩形和圆形管道中的较厚的带孔板（图 6-23 的 9g）。

$$\delta/d \geq 0.015 \quad A_{0r} = \pi d^2/4 \quad n = \Sigma A_{0r}/A_0$$

式中， A_0 为管道面积（ mm^2 ）； A_{0r} 为小孔面积（ mm^2 ）； d 为孔洞的直径（ mm ）； n 为板的过风面积比； δ 为板的厚度（ mm ）。

表 6-109 阻挡物的局部阻力系数（九）

δ/d	n									
	0.20	0.25	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	
	ξ_0									
0.015	52	30	18	8.2	4.0	2.0	0.97	0.42	0.13	
0.2	48	28	17	7.7	3.8	1.9	0.91	0.40	0.13	
0.4	46	27	17	7.4	3.6	1.8	0.88	0.39	0.13	
0.6	42	24	15	6.6	3.2	1.6	0.80	0.36	0.13	

⑩G-10 矩形和圆形管道中有光滑的圆柱体（图 6-23 的 10g）。

$$A'/A_0 < 0.3 \quad A' = dl \quad \xi_0 = \varepsilon \xi'_0$$

表 6-110 阻挡物的局部阻力系数 (十)

Re'	A'/A_0			
	0.05	0.10	0.15	0.20
	ξ'_0			
0.1	3.9	8.4	14	19
0.5	1.5	3.2	5.2	7.1
1	0.66	1.4	2.3	3.2
5	0.30	0.64	1.1	1.4
10	0.17	0.38	0.62	0.84
50	0.11	0.24	0.38	0.52
100	0.10	0.21	0.35	0.47
$(0.5 \sim 200) \times 10^3$	0.07	0.15	0.24	0.33
3×10^5	0.07	0.16	0.26	0.35
4×10^5	0.05	0.11	0.19	0.25
5×10^5	0.04	0.09	0.14	0.19
$(6 \sim 10) \times 10^5$	0.02	0.05	0.07	0.10

当圆柱体不在管道中心线时, 应乘以修正系数 ε 。 ε 值可查表 6-111。

表 6-111 修正系数 ε 值

$y/D, y/a$	0	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40
ε	1.0	0.97	0.93	0.89	0.84	0.79	0.74	0.67	0.58

注: y 为圆柱体中心线到管道中心线的距离。

①G-11 圆管道压低以避免阻挡物 (图 6-23 的 11g)。

$$l/D = 0.33 \quad \xi_0 = 0.24$$

②G-12 矩形管道压低以避免阻挡物 (图 6-23 的 12g)。

表 6-112 阻挡物的局部阻力系数 (十一)

b/a	a'/a			
	0.125	0.15	0.25	0.30
	ξ_0			
1.0	0.26	0.30	0.33	0.35
4.0	0.10	0.14	0.22	0.30

有关各种管件的局部阻力系数, 国内外学者发表了不少文献, 也提供了大量数据, 本节推荐了一批适用的局部阻力系数, 供读者选用。有兴趣的读者可参考其他资料进行计算、分析和比较。

第 7 章 风机的振动与强度

7.1 风机振动机理

通风机的振动问题主要是转子的振动，特别是由于通风机转速的不断提高，转子的振动问题越显得突出，引起了人们的高度重视。造成转子振动的原因是复杂的，因而引起转子的振动也是复杂的。从振动形式上分，有横向振动（常称弯曲振动）、扭转振动及轴向振动，有时几种振动同时发生；从振动频率来说，可能同时包含着从低频到高频相当多的频率成分。经验说明发生最多的、危害最大的是横向振动，这是因为通风机在运转中，对转子的径向干扰力比较多，产生其他振动形式的干扰力较少，一般力量也较弱。因此转子的横向振动成为最主要的研究课题。

1. 单圆盘转子的振动

(1) 无阻尼自由振动 图 7-1 所示为对称单圆盘转子。假设圆盘质量为 m ，位于两支承中间，并且轴很细，其质量相对圆盘来说甚小，可以略去不计。这样整个转子的质量 m 集中在圆盘中心 s 点上，成为一个最简单的对称单圆盘转子。以跨距中点 O 为原点，取直角坐标系 xOz 。

设轴中点处的刚性系数为 K （使轴产生单位长度的位移所需的力）。此转子在受到扰动后，就要以 O_1O_2 线为平衡位置发生自由振动。由惯性力与弹性力相平衡，得运动微分方程式为

$$m\ddot{x} + Kx = 0$$

令

$$\omega_k^2 = \frac{K}{m}$$

则有

$$\ddot{x} + \omega^2 x = 0$$

此方程的解为

$$x = A\cos(\omega_k t + \varphi) \tag{7-1}$$

式中 A 为振幅，由初始扰动而定； ω_k 为自由振动圆频率（1/s）； t 为振动时间； φ 为初相位，由初始扰动而定。

这是一种周期性的简谐振动，其振动周期 T 为

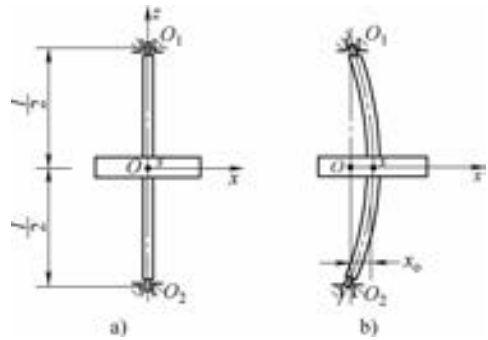


图 7-1 对称单圆盘转子

a) 原始状态 b) 受扰动后产生的自由振动

$$T = \frac{2\pi}{\omega_k}$$

振动频率 f 为

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega_k}{2\pi}$$

振动相位主要在两个或多个同频率的变化量进行时间先后的比较时有意义。式(7-1)表示了圆盘在振动中位移随时间的变化规律, 如将位移对时间 t 求一阶、二阶导数, 就分别得到振动的速度和加速度:

$$\dot{x}(t) = \omega_k A \cos\left(\omega_k t + \varphi + \frac{\pi}{2}\right)$$

$$\ddot{x}(t) = \omega_k^2 A \cos(\omega_k t + \varphi + \pi)$$

可见, 简谐振动时的速度与加速度也是同频率的简谐振动, 但其相位则分别比位移超前 $\frac{\pi}{2}$ 及 π 。

从上面所得的自由振动规律中可以看到, 振幅和初相位可以随着初始条件的变化而变化, 但自由振动的频率与初始条件无关。不管系统受到怎样的初始扰动, 不管振动的振幅大小, 自由振动的频率不变, 只与系统本身的质量和刚度有关, 或者说只取决于系统本身的结构参数, 是系统本身的固有振动特性, 因此称为固有频率。对转子而言即为临界转速。

(2) 无阻尼受迫振动 转子在周期性变化的外力(干扰力)的作用下, 所发生的振动称为受迫振动。形成干扰力的原因有很多, 这里只讨论一种特定的情况, 即转子在不平衡离心力作用下的强迫振动。

设前面讨论的转子, 其重心 G 偏离转动轴线, 与几何中心 s 点不重合, 偏心距为 e , 见图 7-2。当转子以角速度 ω 转动时, 在转子上就产生了不平衡离心力 $m\omega^2$, 这就是作用于转子上的干扰力。此力迫使轴产生弯曲, 使 s 点或者说使整个转子围绕其平衡位置 $\overline{o_1 o_2}$ 运动, 这种运动称为涡动, 也称弓状回转。这种运动与一根不转动的轴做横向弯曲振动是两种不同的物理现象。横向弯曲振动在轴内产生交变应力;

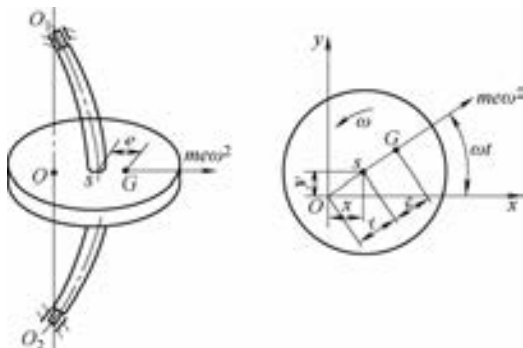


图 7-2 单圆盘转子

弓状回转时轴内不产生交变应力。但是, 使转子产生振动, 以及对轴承产生交变作用力, 从而造成机组的振动, 两者都是一样的, 因此对这两种运动形态, 工程上常常不加区别。

以 o 点为原点, 在圆盘平面上建立直角坐标系 $x-y$ 。离心力随转子以角速度 ω 旋转, 设在瞬时 t , 它在坐标轴 x 、 y 方向的分量分别为

$$F_x = m\omega^2 \cos\omega t$$

$$F_y = m\omega^2 \sin\omega t$$

显然, F_x 、 F_y 必迫使转子在 x 、 y 方向做周期性运动。

在振动过程中, 惯性力、弹性力和不平衡离心力三者相平衡。在 x 方向为

$$m\ddot{x} + K_x x = m\omega^2 \cos\omega t \quad (7-2)$$

这就是 s 点在 x 方向上的运动微分方程式, 是一个二阶线性非齐次微分方程。它的解可以写成如下形式:

$$x = C_1 \cos\omega t + C_2 \sin\omega t + A \cos\omega t \quad (7-3)$$

其中, 前两项是对应的齐次方程 $m\ddot{x} + K_x x = 0$ 的解, 即方程通解, 相当于无外力作用时自由振动的解(即由初始扰动造成的); 最后一项是方程的特解, 由不平衡离心力引起的。由于实际转子总有阻尼存在, 因此前两项会很快消失, 最后只剩下最后一项特解部分。下面着重讨论特解部分, 探讨由不平衡离心力引起的转子涡动规律。

将 $x = A \cos\omega t$ 形式的特解代入式(7-2), 得

$$A = \frac{m\omega^2}{K_x - m\omega^2}$$

$$\text{因而} \quad x = \frac{m\omega^2}{K_x - m\omega^2} \cos\omega t \quad (7-4)$$

可见在 F_x 作用下, s 点将在 x 方向上作简谐振动, 它的频率与 F_x 的频率是相同的。就是说转子在不平衡离心力这一激振力的作用下, 发生同频率的振动, 振幅与激振力大小、转子的质量、刚度及转速等有关。

同理, 在 F_y 作用下, 在 y 方向的运动微分方程为

$$m\ddot{y} + K_y y = m\omega^2 \sin\omega t \quad (7-5)$$

其特解为

$$y = \frac{m\omega^2}{K_y - m\omega^2} \sin\omega t \quad (7-6)$$

如果转子及轴承在各个方面的刚度是相同的, 因而 $K_x = K_y = K$, 那么 s 点在 x 、 y 两个方向的运动规律可表示为

$$x = \frac{m\omega^2}{K - m\omega^2} \cos\omega t \quad y = \frac{m\omega^2}{K - m\omega^2} \sin\omega t$$

显然 s 点的涡动轨迹为一个圆, 圆心在坐标原点 o , 半径为

$$R = \sqrt{x^2 + y^2} = \frac{m\omega^2}{K - m\omega^2} \quad (7-7)$$

对于实际转子, 由于轴承刚度的各向异性, 即 $K_x \neq K_y$, 因此涡动轨迹为一椭圆, 正像在用示波器观察转子涡动轴心轨迹时所看到的那样。

可见, 实际上转子的运动状态是由两种运动合成: 一种是转子绕其本身轴线的运动, 设角速度为 ω , 称为自转; 另一种是整个转子轴线绕其平衡位置的转动, 称为涡

动, 或称为公转, 设其涡动角速度为 Ω 。当 $\omega = \Omega$, 且方向一致, 称为同步正运动, 是工程上最常见的一种; 如果 $\omega = \Omega$, 但方向相反, 称为同步反运动, 在风机的实际运行中也有发生。当 $\omega \neq \Omega$, 且方向一致, 称为异步正运动; 反向时, 称为异步反运动。

(3) 阻尼对不平衡振动的影响

1) 阻尼。通常在转子运动时, 存在着各种各样阻尼运动的阻力, 称为阻尼。阻尼能对转子振动起衰减和抑制作用。常见的阻尼有以下几种: ①转子运动时与周围介质之间的摩擦阻尼。这种阻尼力的大小, 在比较微小的振动时, 与振动速度成正比, 即阻尼力可表示为 $C\dot{x}$, 通常 C 为常数, 这类阻尼称为线性阻尼。②滑动轴承中的油膜阻尼。③材料的内阻尼。④转子各零部件连接处、配合处可能形成的内摩擦阻尼。

上述各种阻尼中, 对转子振动影响最大, 因而也是对转子稳定运转影响最大的是轴承油膜阻尼。

2) 阻尼系数。阻尼一般很复杂, 这给研究转子运动带来困难。但在振动速度较小, 阻尼作用较小时, 工程上可用能量相当的办法, 把各种阻尼简化成相当的线性阻尼, 即把阻尼力仍表达为 $C\dot{x}$, C 为常数, 称为线性阻尼系数。

由于阻尼作用的大小, 不仅与阻尼系数大小有关, 而且与系统其他参数的相对关系有关, 因此工程上通常引用相对阻尼系数:

$$\zeta = \frac{C}{2\sqrt{mK}} = \frac{C}{2m\omega_k} \quad (7-8)$$

式(7-8)的分母是所谓临界阻尼系数。相对阻尼系数也称阻尼比, 是一个量纲一的参数。

3) 阻尼对转子不平衡振动的影响。在有阻尼的情况下, 单圆盘转子的不平衡振动, 可以抽象为见图 7-3 的单圆盘转子振动力学模型。此时的运动微分方程式为

$$m\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = me\omega^2 \cos\omega t \quad (7-9)$$

引用阻尼比 ζ , 则式(7-9)可改写为

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_k\dot{x} + \omega_k^2 x = e\omega^2 \cos\omega t \quad (7-10)$$

方程解的通解部分, 就是运动初始时由于扰动引起的自由振动。它将由于阻尼的存在而很快消失, 因此这里只研究特解部分, 即稳态的不平衡强迫振动。

设特解形式为 $x = A\cos(\omega t - \varphi)$, 代入方程, 可求出 A 值和 φ 值如下:

$$A = \frac{e \frac{\omega^2}{\omega_k^2}}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_k^2}\right)^2 + \left(2\zeta \frac{\omega}{\omega_k}\right)^2}} \quad (7-11)$$

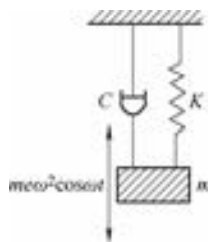


图 7-3 单圆盘转子振动力学模型

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{2\zeta\omega_k\omega}{\omega_k^2 - \omega^2} = \tan^{-1} \frac{2\zeta \frac{\omega}{\omega_k}}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_k^2}} \quad (7-12)$$

式中， A 为振幅； φ 为初相位角； ω_k 为转子无阻尼时的固有圆频率。

可见，振幅及相位都与转速及阻尼比有关，在不同的阻尼比下，可以画出不同的 $\frac{A}{e}$ - $\frac{\omega}{\omega_k}$ 曲线及 $\varphi - \frac{\omega}{\omega_k}$ 曲线。前者称为振动的振幅-频率特性曲线，简称幅频曲线，见图 7-4。后者称为振动的相位-频率特性曲线，简称相频曲线，见图 7-5。

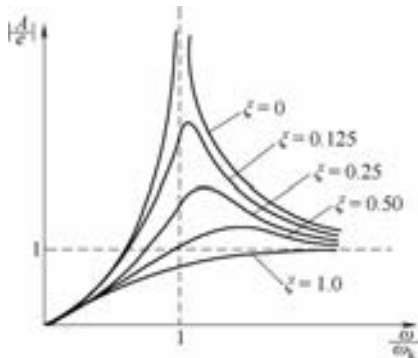


图 7-4 振幅-频率特性曲线

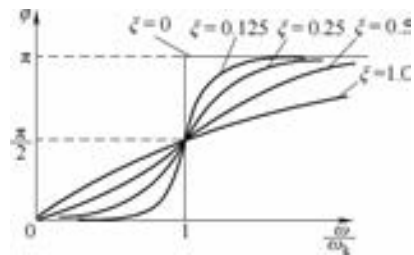


图 7-5 相位-频率特性曲线

2. 多圆盘转子的振动

在讨论单圆盘转子的振动中，是假定转子的质量集中在圆盘上，而略去了轴的质量。这样，只用一个独立坐标就可以完全描述转子在某个方向的运动，因此称为单自由度系统。在实际中，当转子只有一个叶轮而轴又较细时，就可以这样处理。但是，当不满足这个条件，就不能处理成单自由度系统，而必须处理成多自由度系统。其简化的力学模型就是有多个集中质量(由叶轮、轴套及轴段等简化而来)。相邻集中质量间，由无质量的弹性轴段连接，各轴段的刚度就是原来轴段的实际刚度。因为连接轴段是有弹性的，因此集中质量受力运动后，相互之间必有相对位移。这样要描述集中质量在转子横向振动过程中的任意瞬时位置，每个集中质量都需要一个独立坐标系。如果描述三个集中质量的横向运动，就要三个独立坐标，称为三自由度系统；假如系统有 N 个集中质量，就需要 N 个独立坐标来确定各质点的瞬时位置，故称为 N 自由度系统。

(1) 二自由度转子系统的自由振动 见图 7-6，转子的质量都集中在 1 和 2 两点，每点质量都等于 m_0 ，转子两端支承在相同的短轴承上，轴为均匀等直径轴，截面惯性矩为 I ，弹性模量为 E ，轴长为 l ，两集中质量分别位于距两端轴承 $\frac{l}{4}$ 处。

为了研究转子的横向弯曲振动,即图示在 y 方向的振动,取二集中质量在 y 方向的坐标为 $y_1(t)$ 、 $y_2(t)$,这两个坐标随时间变化的规律,就是整个转子在 y 方向的振动规律。

由于转子作无阻尼的自由振动,因此振动中仍然是惯性与弹性力相平衡,设 1 和 2 两点的振动位移分别为 y_1 、 y_2 ,则可列出振动微分方程组为

$$\begin{cases} -m\ddot{y}_1 a_{11} - m\ddot{y}_2 a_{12} = y_1 \\ -m\ddot{y}_1 a_{21} - m\ddot{y}_2 a_{22} = y_2 \end{cases} \quad (7-13)$$

式中, a_{ij} 是影响系数。其物理意义是:在 j 点作用有单位力时引起的 i 点的位移,比如 a_{11} 就是在 1 点作用有单位力时引起的 1 点的位移。可见式(7-13)本质上是惯性力与弹性力之间的平衡。

对图 7-6 所示的转子,可以求得

$$a_{11} = a_{22} = \frac{3}{256} \frac{l^3}{EI} \quad a_{12} = a_{21} = \frac{7}{768} \frac{l^3}{EI}$$

要发生振动,表示式(7-13)的解存在,此时就可将式(7-13)整理成式(7-14):

$$m^2(a_{11}a_{22} - a_{12}^2)\omega^4 - m(a_{11} + a_{22})\omega^2 + 1 = 0 \quad (7-14)$$

因此该转子发生自由振动的频率值,必定是上面方程的根。解频率方程,可得到两个频率值:

$$\omega_{k1} = \sqrt{\frac{48EI}{ml^3}} \quad \omega_{k2} = \sqrt{\frac{384EI}{ml^3}}$$

可见对二自由度系统,存在着两个固有频率,即两个临界转速。以大小排列, ω_{k1} 称为第一阶固有频率, ω_{k2} 称为第二阶固有频率。

3. 二自由度转子系统在不平衡作用下的强迫振动

在图 7-6 所示的转子中,假定圆盘 1 有偏心 e ,圆盘 2 没有偏心,那么当转子以角速度 ω 旋转时,在圆盘 1 上就形成离心力 $me\omega^2$ 。该力在 y 方向的分量为 $me\omega^2 \cos\omega t$ 。可列出运动微分方程组如下:

$$\begin{cases} -m\ddot{y}_1 a_{11} - m\ddot{y}_2 a_{12} + me\omega^2 \cos\omega t a_{11} = y_1 \\ -m\ddot{y}_1 a_{21} - m\ddot{y}_2 a_{22} + me\omega^2 \cos\omega t a_{21} = y_2 \end{cases}$$

可解得两圆盘的振幅为

$$\begin{cases} A_1 = \frac{F_1(1 - ma_{22}\omega^2) + F_2 ma_{12}\omega^2}{m^2(a_{11}a_{22} - a_{12}^2)(\omega^2 - \omega_{k1}^2)(\omega^2 - \omega_{k2}^2)} \\ A_2 = \frac{F_1 ma_{12}\omega^2 + F_2(1 - ma_{11}\omega^2)}{m^2(a_{11}a_{22} - a_{12}^2)(\omega^2 - \omega_{k1}^2)(\omega^2 - \omega_{k2}^2)} \end{cases}$$

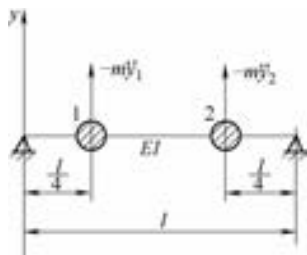


图 7-6 二自由度转子

式中, $F_1 = me a_{11} \omega^2$, $F_2 = me a_{21} \omega^2$, 而 ω_{k1} 、 ω_{k2} 就是转子的第一阶、第二阶临界转速(固有频率)。

从上式可以看出, 当 ω 与 ω_{k1} 或 ω_{k2} 接近时, 振幅 A_1 、 A_2 将趋于无穷大, 这就是共振现象。

7.2 风机振动故障分析

1. 临界转速

(1) 转子在临界转速附近运行的原因 转子在临界转速附近运行, 即在共振转速区运行, 由于必然存在的残余不平衡, 以及在运行中可能产生的新的不平衡, 所以要出现共振。一般来说振动比较剧烈, 因此在设计中要求工作转速离开临界转速一定的范围。造成转子在临界转速附近运行的主要原因如下:

1) 在设计中, 由于临界转速计算不准, 因而易使工作转速落入共振转速区。

2) 对于电动机驱动的通风机, 在运行中由于电网频率波动太大, 可能迫使转子进入共振转速区。

3) 对于柔性转子, 启动过程中, 在临界转速附近停留, 特别是多级通风机, 其扭转振动的临界转速多而密, 有时难免在某个临界转速附近停留。如果出现由于装配中的疏忽大意, 造成了扭转振动的条件, 发生大的振动情况。

4) 临界转速与轴承系统的约束条件有着密切关系, 当轴承间隙留得很小时, 油膜就被挤压得很硬, 刚性较大, 临界转速有所提高, 反之则有所降低。油的粘度也有影响。

(2) 振动特点 在临界转速附近运行时, 转子振动有如下特点:

1) 振动有一个敏感区, 这就是共振转速区。转速进入这个范围, 转子就产生剧烈振动; 离开这个转速区, 剧烈振动消失, 但不具有像油膜震荡那样的突发性。

2) 如通过示波器观察, 会发现转子的振动波形为相当光滑而有规律的正弦波。因为在一般情况下, 在临界转速区不平衡振动起主导作用, 而其他的激振力引起的振动相对来说处于相当次要的地位, 所占比例甚小, 因而对波形影响也很小。

3) 振动频率与转子转速频率相同, 涡动方向与转向相同。

(3) 关于在共振转速区运行问题 长期以来, 共振转速区被视为禁区, 工作转速是绝对不允许落入共振转速区的。但在实际运行中发现, 转子并不是一定不能在共振转速区运行的, 在转子平衡得非常好的条件下, 仍然是可以运行的。事实上有些通风机, 要在运行中完全避开临界转速是不可能的。例如: 受各方面条件的限制, 转子结构很难改变, 即使工作转速离临界转速很近, 但也无法调开, 转子被迫设计在临界转速附近运行。

为了使转子能在临界转速附近运行, 共振振幅必须限制在允许的范围之内。在设计中要求转子有较高的动平衡精度, 并且要进行不平衡响应计算; 转子在正式投入运行前, 还要进行不敏感性试验。当这些都满足了要求之后, 转子可以投入运行。

2. 不平衡

(1) 转子不平衡的原因 转子在投入运行前,总是要作动平衡的试验。平衡得好,在离开共振转速区运行是没有问题的,甚至可以在共振转速区运行。但是由于种种原因,转子由于不平衡而造成过大的振动,在各种振动原因中仍然最为常见。造成转子存在过大不平衡主要有以下一些原因:①动平衡作得不好,因而使转子动平衡精度太低。②由于某种原因造成转子弯曲过大。③在运行中产生新的不平衡。这方面的原因很多,例如:转子上某些零件由于过盈不够而产生松动,这往往是由制造厂计算错误造成的;由于长期运行而使某些紧固件松动或者脱落;叶轮等部件的腐蚀冲刷等。由于工作介质中杂质的磨损等。由于强度或振动方面的原因,使轮盘或叶片局部破碎脱落等造成不平衡。

(2) 振动特点

1) 由于不平衡离心力与转速平方成正比,因此随着转速的升高振动加剧,振幅基本上与转速平方成正比。在接近共振后,振幅将增加得更快,产生剧烈振动。不平衡量较大时,柔性转子将无法通过第一临界转速。

2) 振动频率与转速频率相同,涡动方向与转向相同。

3) 振动波形为比较光滑、比较规则的正弦波。

4) 在某些情况下,不平衡离心力还可能激发起高次谐波共振。其频谱图特点是:除了占主要地位的转速频率成分外,还有比较明显的二倍频、三倍频、四倍频等高频成分,形成“圣诞树”型频谱图。

3. 喘振

在通风机运行中,喘振是最恶劣、最危险的工况。喘振是具有驼峰型性能曲线的风机,在不稳定区域内工作,而系统中的容量又很大时,则风机的流量、压头和功率会在瞬间内发生很大的周期性的波动,引起剧烈的振动和噪声。喘振是风机性能与管道装置耦合后振荡特性的一种表现形式,其振幅、频率受风机管道系统容量的支配,其流量、压力、功率的波动又是不稳定工况区造成的。

喘振会引起机组强烈的低频振动。在通风机的各种振动当中,由于喘振而出现的振动最易判断,因为它具有以下明显的特点:①进、出口的流量和压力都出现大幅度的波动。②原动机的功率发生大幅度的变化。③具有可怕的低沉的吼叫声,气体倒流时逆止阀时开、时关的撞击声。④机体发生剧烈的振动。

4. 旋转脱离

当气流冲角达到临界值附近时,气流会离开叶片凸面,发生边界层分离,从而产生大量区域的涡流,造成风机风压下降。旋转脱离主要发生在轴流式风机中;在离心式风机的叶轮及扩压器中,由于流量减少,同样也会出现旋转脱离。

(1) 产生原因

1) 多级通风机上的某些不足之处、级间匹配不佳,使得某一级或某几级体积流量减少,较多地偏离了设计工况点。

2) 由于流量减少。

- 3) 由于某些原因造成的气流通道阻塞不畅。
- 4) 由于级间密封损坏, 发生较大的级间气体泄漏。
- 5) 由于叶轮出口与扩压器入口间的较严重的不对中。

旋转脱离工况通常不是在所有级中同时发生。一般在转速低于正常转速时, 易在前面级首先发生。因为在低转速下, 各级的压缩比下降, 使得越是后面级的气体密度, 相对设计工况来说显得越小, 因而体积流量变大, 这就迫使前面级进一步减小流量, 易首先出现旋转脱离。反之, 当转速高于设计转速时, 则易首先在后面级出现旋转脱离。因为由于前面级的压比增大, 后面级的体积流量会变得更小。由于设计中的某些不足, 使前面级的实际能力高于设计能力, 也容易使得后面级易出现旋转脱离工况。

(2) 旋转脱离引起的振动的特征

- 1) 振动部位常在风机的进风箱和出口风道。
- 2) 振动大多发生在进口百叶式调节挡板、后弯叶片的风机上。
- 3) 挡板开度在 0% ~ 30% 时发生强烈振动, 开度超过 30% 时降至正常值。
- 4) 旋转脱离出现时, 风机流量、压力产生强烈的脉动。

5. 转子对中不良

由于转子对中不良, 也可能引起机组的较大振动。造成对中不良的原因如下: ①由于装配中对中没有找好。②由于运行中热膨胀等原因, 使对中情况受较大破坏。③由于机组管道应力过大, 或基础不均匀下沉等原因, 导致对中破坏。

6. 动、静部分之间碰摩

动、静部分之间碰摩有: 集流器出口与叶轮进口碰摩; 叶轮与机壳碰摩; 主轴与密封装置之间碰摩。其振动特征如下: 振动不稳定; 振动是自激振动与转速无关; 摩擦严重时会发生反向涡动。

7. 轴承装配不良的振动

如果轴颈或轴肩台加工不良, 轴颈弯曲, 轴承安装倾斜, 轴承内圈装配后造成与轴心线不重合, 使轴承每转一圈产生一次交变的轴向力作用, 滚动轴承的固定圆螺母松动等, 都可能造成局部振动。其振动特征如下: 振动值以轴向为最大; 振动频率与旋转频率相等。

8. 滚动轴承表面损坏

滚动轴承由于制造质量差、润滑不良、异物进入、与轴承箱的间隙不合标准等, 会出现磨损、锈蚀、脱皮剥落、碎裂而造成损坏后, 滚珠相互撞击而产生的高频冲击振动将传给轴承座。把加速度传感器放在轴承座上, 即可监测到高频冲击振动信号。这种振动稳定性很差, 与负荷无关, 振动的振幅在水平、垂直、轴向三个方向均有可能最大。振动的精密诊断要借助频谱分析。运用频谱分析可以准确判断轴承损坏的准确位置和损坏程度。

9. 联轴器异常

联轴器安装不正, 风机和电动机轴不同心, 风机与电动机轴在找正时, 未考虑运行时轴向位移的补偿量, 这些都会引起风机、电动机振动。其振动特征如下: ①振动为不

定性的，随负荷变化剧烈，空转时轻，满载时大，振动稳定性较好。②轴心偏差越大，振动越大。③电动机单独运行，振动消失。④如果径向振动大则为两轴心线平行，轴向振动大则为两轴心线相交。

7.3 风机减振措施

1. 常用减振装置

减振装置大体上分为以下四类：①利用减振装置对振动系统的阻尼，消耗振动能量的阻尼减振器，简称阻振器。②利用装置中相对运动的元件间的摩擦力对振动系统做功，消耗振动能量的摩擦减振器。③利用装置中辅助质量的动力对减振系统做功，消耗振动能量的动力减振器。④利用装置中的自由质量反复冲击振动体，消耗振动能量的冲击减振器。

在设计、使用减振器时，不仅要考虑其减振效果，而且要考虑体积、重量、结构、使用维护，以及经济成本等各方面的因素。

(1) 阻振器 阻振器与振动体相连接，直接增加系统的阻尼，把动能变为热能而起减振作用。每振动周期内消耗的能量越大，减振效果越好。可采取以下措施提高减振效果：①提高阻振器的阻尼力。②把阻振器安装在与振动体相对运动最大的位置。③阻振器的结构尺寸应具有足够的散热能力。

(2) 固体摩擦减振器

典型的固体摩擦减振器结构见图 7-7。由于飞轮 4 有较大的惯性不能随同轴系一起振动，飞轮 4 与毂盘 1 之间产生相对运动，以及伴随的摩擦力矩，从而把振动能量转换成热能，起到减振作用。减振效果主要与飞轮的转动惯量和摩擦力矩的大小有关。在设计和使用时，应根据激振力矩和允许振幅的大小，选取飞轮的最佳转动惯量和最佳摩擦力矩。若作用在扭振系统上的激振力矩为 $M_j \sin \omega t$ ，安装减振器的允许振幅为 $[\theta]$ ，则按以下步骤计算减振器的各项参数。

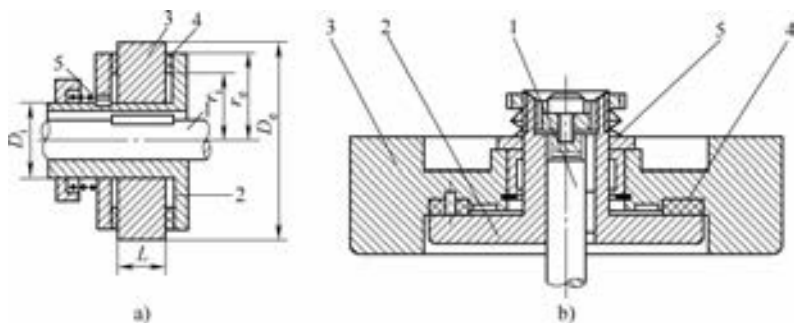


图 7-7 固体摩擦减振器结构

1—毂盘 2—扭振轴 3—摩擦盘 4—飞轮 5—弹簧

1) 计算飞轮的最佳转动惯量为

$$I = \frac{\pi^2 M_j}{4\omega_j^2 [\theta]} \quad (7-15)$$

2) 确定飞轮的几何尺寸。

$$I = 10\gamma \left(\frac{L}{D_e}\right) D_e^5 \left[1 - \left(\frac{D_i}{D_e}\right)^4\right] \quad (7-16)$$

先根据减振器的安装位置的要求, 选取 $\frac{D_i}{D_e}$, $\frac{L}{D_e}$; 再根据飞轮材料的密度 γ , 及式(7-15)算出的 I , 按式(7-16)确定飞轮尺寸。

3) 计算最佳摩擦力矩为

$$M_{op} = 1.1 M_j \quad (7-17)$$

4) 确定摩擦盘的尺寸和材料, 计算最佳弹簧压力为

$$p_{op} = \frac{3}{4} \frac{M_{op}}{\mu} \frac{r_e^2 - r_i^2}{r_e^3 - r_i^3} \quad (7-18)$$

先根据结构要求及飞轮的尺寸, 选取摩擦盘尺寸 r_e 、 r_i ; 由选取的摩擦盘材料确定摩擦因数 μ ; 再按式(7-18)计算 p_{op} , 根据 p_{op} 确定弹簧的尺寸, 要求实际的弹簧压力在 p_{op} 的 $\pm 33\%$ 以内。

5) 计算每一振动周期中减振器消耗的功最大值 W_{max} 及功率 P_{max} :

$$W_{max} = \frac{1}{4} I \omega^2 [\theta]^2 \quad (7-19)$$

$$P_{max} = \frac{1}{2\pi} \frac{\omega}{735.5} W_{max} \quad (7-20)$$

式中, W 为每振动周期消耗的功, 用以确定减振器的减振效果; P 为消耗的功率, 用以校验其散热能力。

6) 校核对其他激振力矩 M'_j 的减振效果。

$$\theta' = \frac{2\pi M_{op}^2}{I\omega^2 \sqrt{16M_{op}^2 - \pi^2 M_j'^2}} \quad (7-21)$$

θ' 应小于允许振幅 $[\theta]$, 才能满足设计要求。若达不到此要求, 需改进设计。

(3) 动力减振器

1) 动力减振器的工作原理。图 7-8 示出动力减振器的两个应用实例及其动力学模型。图中 m_1 和 k_1 分别为主振系统简化后的等效质量和刚度, m_2 、 k_2 和 c_2 分别为动力减振器的质量(简称辅助质量)、刚度和阻尼系数。

当主振系统振动时, 附加的动力减振器系统也随着振动。利用减振器的动力作用, 使其加到主系统上的力(或力矩)与激振力(或力矩)的方向相反, 大小相近, 以致作用在主系统上的力(或力矩)互相抵消, 达到抑制主系统振动的目的。

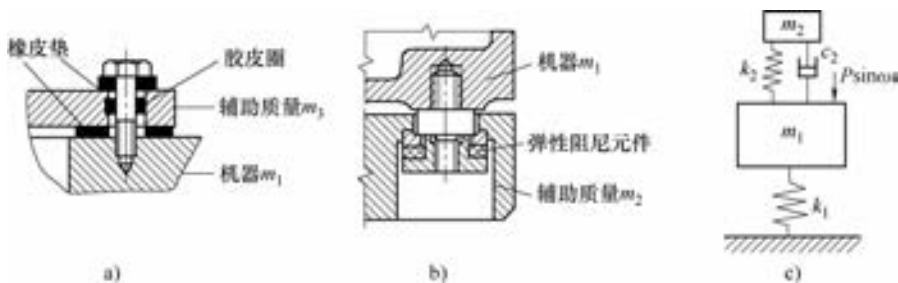


图 7-8 有阻尼动力减振器的示意图及其动力学模型

a)、b) 动力减振器的应用 c) 动力学模型

动力减振器视辅助质量加到主系统上的方式不同, 有下列类型: ①辅助质量与主质量之间既有弹性元件又有阻尼元件的有阻尼动力减振器。②辅助质量与主质量之间只有弹性元件的无阻尼动力减振器。③辅助质量与主质量之间只有阻尼元件的摩擦减振器。④辅助质量与主质量之间没有元件相联, 只是辅助质量可以在主质量上能产生摆动的摆动式减振器。

从图 7-8 中的动力学模型看出, 在主系统上附加了减振器, 单自由度系统变为二自由度系统, 根据其运动方程, 可求得主质量和辅助质量的振幅相对静变位的比值。

$$\left(\frac{A_1}{\delta_{st}}\right)^2 = \frac{(\alpha^2 - \lambda^2)^2 + (2\zeta_2\alpha\lambda)^2}{[(1 - \lambda^2)(\alpha^2 - \lambda^2) - \mu\lambda^2\alpha^2]^2 + (2\zeta_2\alpha\lambda)^2(1 - \lambda^2 - \mu\lambda^2)^2} \quad (7-22a)$$

$$\left(\frac{A_2}{\delta_{st}}\right)^2 = \frac{\alpha^4 + (2\zeta_2\alpha\lambda)^2}{[(1 - \lambda^2)(\alpha^2 - \lambda^2) - \mu\lambda^2\alpha^2]^2 + (2\zeta_2\alpha\lambda)^2(1 - \lambda^2 - \mu\lambda^2)^2} \quad (7-22b)$$

式中 A_1 、 A_2 为主质量、辅助质量的振幅; δ_{st} 为主系统在与激振力幅 P 相等的静力作用下产生的静变位, $\delta_{st} = \frac{P}{K_1}$; α 为减振器与主系统固有频率之比, $\alpha = \frac{\omega_{n2}}{\omega_{n1}}$; ω_{n1} 为主系统的固有频率, $\omega_{n1} = \sqrt{\frac{K_1}{m_1}}$; ω_{n2} 为减振器的固有频率, $\omega_{n2} = \sqrt{\frac{K_2}{m_2}}$; λ 为激振频率与主系统固有频率之比, $\lambda = \frac{\omega}{\omega_{n1}}$; μ 为辅助质量与主质量之比, $\mu = \frac{m_2}{m_1}$; ζ 为减振器的阻尼比, $\zeta_2 = \frac{c_2}{2\sqrt{K_2m_2}}$ 。

式(7-22a)中, A_1/δ_{st} 与 λ 的关系曲线见图 7-9。利用以上关系, 即可求出减振器的各参数。

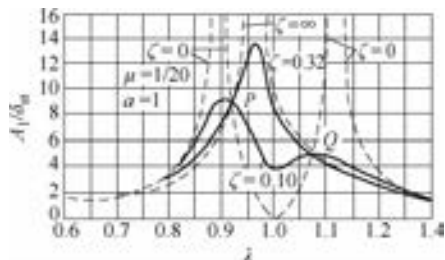


图 7-9 A_1/δ_{st} 与 λ 的关系曲线

2) 无阻尼动力减振器。对于无阻尼动力减振器, 没有阻尼元件, 则 $\zeta_2 = 0$, 式(7-22)变为

$$\frac{A_1}{\delta_{st}} = \frac{\alpha^2 - \lambda^2}{(1 - \lambda^2)(\alpha^2 - \lambda^2) - \mu\lambda^2\alpha^2} \quad (7-23a)$$

$$\frac{A_2}{\delta_{st}} = \frac{\alpha^2}{(1 - \lambda^2)(\alpha^2 - \lambda^2) - \mu\lambda^2\alpha^2} \quad (7-23b)$$

从式(7-23a)看出, 当 $\alpha = \lambda$ 时, $A_1 = 0$, 即主振系统的振幅为零, 起到减振作用。在设计无阻尼动力减振器时, 应综合考虑以下问题来解决其参数。

①减振器应消除主振系统的共振振幅, 即令减振器的固有频率 ω_{n2} , 等于主振系统的固有频率 ω_{n1} , 此时式(7-23)中的 $\alpha = 1$ 。为使 $A_1 = 0$, 则 $\alpha = \lambda = 1$ 。

②扩大减振器的减振频带。由图 7-9 中虚线看出, 按上面计算出的减振器, 即 $\lambda = 1$, 虽消除了主振系统的共振振幅, 但在原共振点附近的 λ_1 和 λ_2 处又出现了两个新的共振点。一旦激振频率 ω 偏离减振器的固有频率 ω_{n2} , 主系统的振幅 A_1 不等于零, 甚至产生共振。为此, 要注意扩大减振频带。 λ_1 和 λ_2 为

$$\left. \begin{aligned} \lambda_1^2 &= \left(1 + \frac{\mu}{2}\right) - \sqrt{\mu + \frac{\mu^2}{4}} \\ \lambda_2^2 &= \left(1 + \frac{\mu}{2}\right) + \sqrt{\mu + \frac{\mu^2}{4}} \end{aligned} \right\} \quad (7-24)$$

可见, λ_1 和 λ_2 只与质量比 μ 有关, 它们之间的关系曲线见图 7-10。

为了使主系统能够安全运转在远离新共振点范围内, 要求这两个临界频率相距较远。一般要求 $\mu > 0.1$ 。对于激振频率稳定的振源, 例如定速运转机械, μ 可取小些。若主系统上还作用有其他不同频率的激振力, 还需校核这些激振力是否会在新的共振点处发生共振。

③使减振器振幅 A_2 能满足结构要求, 由式(7-23b)看出, 若 $\alpha = 1$, 可能导致 A_2 过大, 使辅助质量 m_2 在减振器内的活动空间不够。为此, 应调整 m_2 与 k_2 的比例, 并相应的增加 m_2 。

由以上介绍可知, 无阻尼动力减振器结构简单、元件少、减振效果好; 但会出现新的共振点, 减振频率范围窄, 适用于激振频率变化不大的情况。

3) 有阻尼动力减振器。这是在动力减振器中加入适当的阻尼, 除动力作用外, 还利用阻尼消耗振动能量。这样减振效果更好, 而且还使频带加宽, 具有更广的适用范围。有阻尼动力减振器与主系统的相对振幅 A_1/δ_{st} 的数学表达式见式(7-22a), 与此相应的 A_1/δ_{st} 随 λ 的变化曲线, 见图 7-11。由图可以看出, 不同阻尼比 ζ 的所有曲线都经过

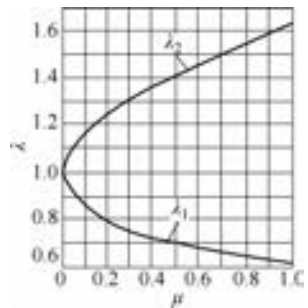


图 7-10 λ_1 、 λ_2 与 μ 的关系曲线

P 、 Q 两点，因此，这两点的位置与阻尼无关。在设计有阻尼动力减振器时，应特别注意以下两个问题。

①保证减振器在整个频率范围内都有较好的减振效果。为此，应使 P 、 Q 两点的纵坐标相等，而且成为幅频响应曲线的最高点，见图 7-11。按式 (7-25) 选择最佳阻尼比，按式 (7-26) 选择最佳频率比，即可达到要求。

$$\zeta_{op}^2 = \frac{3\mu}{8(1+\mu)^2} \quad (7-25)$$

$$\alpha_{op} = \frac{1}{1+\mu} \quad (7-26)$$

②保证减振效果达到预定要求，应使最佳参数情况下 P 、 Q 两点的纵坐标小到允许振幅之内。最佳参数情况下 P 、 Q 两点的纵横坐标的表达式为

$$\left(\frac{A_1}{\delta_{st}}\right)_P = \left(\frac{A_1}{\delta_{st}}\right)_Q = \sqrt{1 + \frac{2}{\mu}} \quad (7-27)$$

$$\lambda_{P,Q}^2 = \left(\frac{\omega}{\omega_{nl}}\right)^2 = \frac{1}{1+\mu} \left(1 \mp \sqrt{\frac{2}{2+\mu}}\right) \quad (7-28)$$

由式 (7-28) 可以看出，增加质量比 μ ，主系统的振幅 A_1 将减小，减振效果提高，但会导致系统的重量增加。因此，应注意把主系统中的某些部件作为辅助质量，既提高减振效果，又不增加系统的质量。

4) 主振系统的阻尼对动力减振效果的影响。在阻

尼比 $\zeta_1 = \frac{c_1}{2\sqrt{m_1k_1}}$ 不可忽略的主振系统上安装有阻尼动

力减振器，其动力学模型见图 7-12。根据其运动方程，仍可推出与式 (7-22) 相似的 A_1/δ_{st} 的数学表达式。但绘制出 A_1/δ_{st} 与 λ 的关系曲线，不再有图 7-11 所示的公共点 P 、 Q 。因此，根据这些曲线族的两个峰值推导出的最佳参数 α_{op} 、 ζ_{op} 的解析式过于复杂，没有实用价值。

一般用数值分析式确定 α_{op} 和 ζ_{op} 。表 7-1 列出若干组质量比 μ 和阻尼比 ζ_1 的原始条件下，有阻尼动力减振器的最佳频率比 α_{op} 、最佳阻尼比 ζ_{op} 及相应的最佳振幅比 A_1/δ_{st} 。

表 7-1 有阻尼动力减振器(主振系统有粘性阻尼)的最佳参数

μ	ζ_1	α_{op}	ζ_{op}	A_1/δ_{st}
0.01	0	0.9901	0.061	14.18
	0.01	0.9886	0.062	11.37
	0.02	0.9869	0.064	9.46

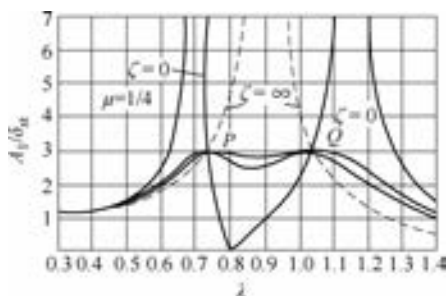


图 7-11 最佳参数情况下 A_1/δ_{st} 与 λ 的关系曲线

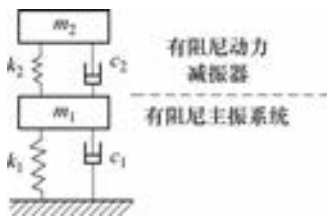


图 7-12 有阻尼动力减振器动力学模型

(续)

μ	ζ_1	α_{op}	ζ_{op}	A_1/δ_{s1}
0.01	0.05	0.9807	0.068	6.251
	0.10	0.9663	0.073	3.967
0.10	0	0.9091	0.185	4.583
	0.01	0.9051	0.187	4.270
	0.02	0.9009	0.188	3.991
	0.05	0.8875	0.193	3.337
	0.10	0.8619	0.199	2.622
1.0	0	0.50	0.448	1.732
	0.01	0.494	0.448	1.714
	0.02	0.484	0.449	1.683
	0.05	0.473	0.454	1.600
	0.10	0.466	0.495	1.482

5) 随机振动的动力减振器。随机激振具有连续频谱密度函数, 即激振频率含有各种成分, 包括主振系统固有频率。为了提高减振效果, 应将动力减振器的固有频率选择在主振系统固有频率附近。按此原理推导出来动力减振器的最佳频率比 α_{op} 和最佳阻尼比 ζ_{op} 如下:

$$\alpha_{op} = \frac{\sqrt{1 + \frac{\mu}{2}}}{1 + \mu} \quad (7-29)$$

$$\zeta_{op} = \left[\frac{\mu \left(1 + \frac{3\mu}{4} \right)}{4(1 + \mu) \left(1 + \frac{\mu}{2} \right)} \right]^{1/2} \quad (7-30)$$

与 α_{op} 、 ζ_{op} 相对应的主质量最小位移方差为

$$(\sigma_1^2)_{\min} = \frac{2\pi S_0 \omega_{n1}}{k_1^2} \left[\frac{1 + \frac{3}{4}\mu}{\mu(1 + \mu)} \right]^{1/2} \quad (7-31)$$

式中, μ 为质量比; S_0 为随机激振的频谱密度; ω_{n1} 为主振系统的固有频率; k_1 为主振系统刚度。

2. 隔振原理及隔振设计

采用振动隔离技术控制振动的传递, 是消除振动危害的重要途径之一。

(1) 隔振的分类

1) 主动隔振。对于本身是振源的设备, 为了减小它对周围的影响, 使用隔振器将

它与基础隔离开，减小设备传到基础的力，称为主动隔振，也称为积极隔振，见图 7-13a。

2) 被动隔振。对于允许振动很小需要防振的设备，为了减少周围振源对它的影响，使用隔振器将它与基础隔离开，减小基础传到设备的振动，称为被动隔振，也称为消极隔振，如图 7-13b 所示。

主动隔振和被动隔振具有相同的隔振原理，都是把需要隔振的设备安装在可以消耗和储存能量的弹性装置(隔振器)上，使大部分振动为隔振器所吸收，减轻振源对隔振对象的作用。

(2) 隔振系统的特性

1) 绝对传递率 η_A 。在主动隔振系统中，绝对传递率为传到基础上的力 F_T 与激振力 F_0 之比，即 $\eta_A = \frac{F_T}{F_0}$ 。在被动隔振

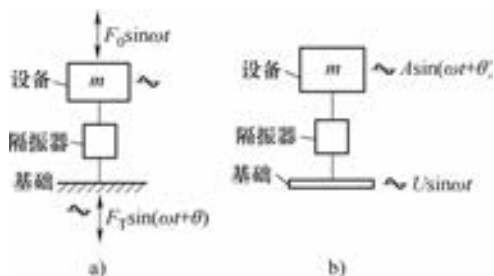


图 7-13 单自由度隔振系统

a) 主动隔振 b) 被动隔振

系统里，绝对传递率为设备的振幅 A 与基础振幅 U 之比，即 $\eta_A = \frac{A}{U}$ 。 η_A 为经过隔振后力或振动量的减小程度， $\eta_A < 1$ 才有隔振效果。而且， η_A 越小，隔振效果越好。 η_A 也称隔振系数。

2) 相对传递率 η_R 。在被动隔振系统里，相对传递率为被隔振设备相对于基础的位移 δ_0 与基础位移幅值 U 之比，即 $\eta_R = \frac{\delta_0}{U}$ 。 δ_0 影响隔振效果，是隔振器要求的最小间隙。

3) 运动相应 β 。在主动隔振系统中，设备的位移振幅 A 与静变位 A_{st} 之比，称为运动相应，即 $\beta = \frac{A}{A_{st}}$ ，由于 $A_{st} = \frac{F_0}{K}$ ，所以 $\beta = \frac{AK}{F_0}$ 。为了保证设备在隔振过程中具有足够的活动空间，隔振器具有的间隙应大于设备的位移振幅 A 。运动相应也称为动力放大系数。

(3) 隔振设计步骤

1) 通过计算、测量、对比，或调查统计等方面工作，确定被隔设备的原始数据。包括：设备及安装台座的尺寸、重量、重心和中心主惯轴的位置，以及振源的大小、方向、频率或频谱。

2) 根据隔振的具体要求，主动隔振时允许传递到基础上的力，被动隔振时设备允许的振幅，计算隔振系统的绝对传递率 η_A ，相对传递率 η_R 及运动相应 β 。再根据 η_A 或 η_R 计算隔振系统的频率比 λ ，由 $\lambda = \frac{\omega}{\omega_n}$ 计算系统的固有频率 ω_n 。或者初选 $\lambda = 2.5 \sim$

5.0, 再验算 η_A 或 η_R 。如果在设备上作用着几个振源, 在计算 λ 时, 应取激振频率 ω 的最小值。对于多自由度系统, 应取系统的最高固有频率, 以保证各个激振频率和固有频率都能满足 $\lambda = 2.5 \sim 5.0$ 的要求。

3) 根据隔振系统所需的固有频率, 计算隔振器的刚度。对多自由度隔振系统, 可先估计隔振器的刚度, 再验算固有频率。

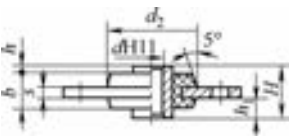
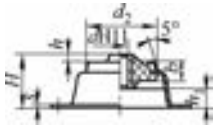
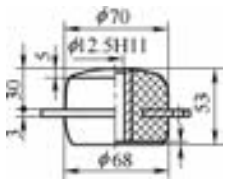
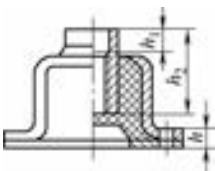
4) 计算主动隔振时设备传递给基础的力, 或被动隔振时设备的振幅, 核算是否满足隔振要求。如果不能满足要求, 可适当增加底座的质量, 进一步降低重心位置, 或改变隔振器的参数。

5) 同时考虑隔振效果和设备启、停过程中通过共振区的振幅两方面的要求, 决定隔振器的阻尼。

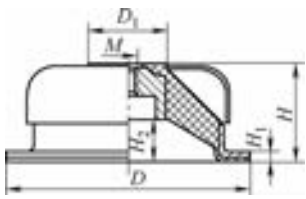
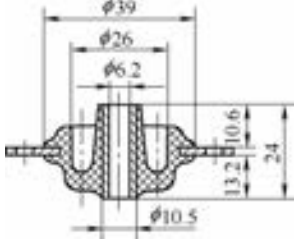
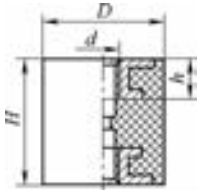
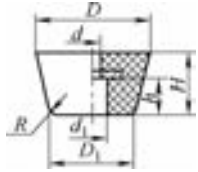
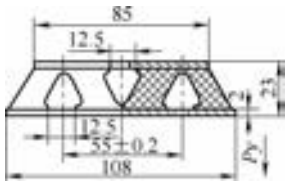

6) 根据隔振器要求的刚度和阻尼, 选择隔振器的类型, 进行隔振器的尺寸计算和结构设计。

(4) 常用隔振器及隔振材料 表 7-2 列出常用隔振器的类型和主要特性。表 7-3 列出了决定隔振性能的隔振材料, 供自行设计隔振装置时使用。

表 7-2 常用隔振器的类型和主要特性

序号	类型	代 号	简 图	主要特性
1	平板形	JP		额定载荷为 4.41 ~ 153.2N, 结构紧凑, 连接方便。竖直方向的固有频率为 13.5 ~ 15Hz, 水平方向的固有频率为 30 ~ 35Hz
2	碗形	JW		
3	加固形	JG		能承受高达 323.4 ~ 980N 的载荷, 当隔振器橡胶损坏时, 能防止设备与基础脱开。可用于支承在水平、倾斜和竖直基础上的设备。其中 JF-A 形能耐油, JF-B 形允许在润滑油、柴油和海水长期浸泡下工作, 适用环境温度为 5 ~ 70℃
4	封闭形	JF (JF-A) (JF-B)		

(续)

序号	类型	代号	简图	主要特性
5	剪切形	JJQ		刚度小, 阻尼大, 支承稳定, 额定载荷为 98 ~ 1176N
6	三向等刚度形	JPQ		三个方向刚度相等, 竖直方向固有频率为 7 ~ 12Hz, 水平方向固有频率为 8 ~ 12.5Hz, 额定载荷为 980 ~ 9800N
7	支柱形	JZ		水平方向固有频率为 6 ~ 7Hz, 竖直方向固有频率为 11 ~ 13Hz。大多用于水平方向的隔振
8	支脚形	JJ		结构简单、成本低, 额定载荷为 98 ~ 588N
9	框架形	JK		额定载荷为 147 ~ 245.3N。用于无线电设备的整机振动与冲击的隔离
10	球形	JQ		水平和竖直方向固有频率相近, 平均为 11 ~ 12Hz。应力分布均匀, 额定载荷为 19.6 ~ 78.5N

(续)

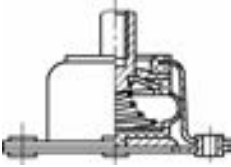
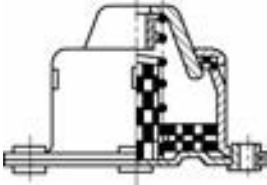
序号	类型	代号	简图	主要特性
11	空气阻尼形	JQZ		可通过改变孔径来调节阻尼系数, 只能承受竖向载荷, 额定载荷为 39.2 ~ 147.15N
12	金属网阻尼形	JWL		性能稳定, 不会老化。用于环境恶劣的场合, 能承受较大的线性过载, 额定载荷为 14.7 ~ 147.15N

表 7-3 常用隔振材料

材料名称	特性	应用	注意事项
橡胶制品	承载能力低, 阻尼系数为 0.15 ~ 0.3, 弹性变形大, 有蠕变效应。可做成各种形式, 能自由地选取三个方向的刚度	多用于主动隔振。载荷较大时做成承压式, 载荷较小时做成承剪式。与金属弹簧配合使用, 隔离高频振动效果好	承压式应保证橡胶自由地向四周膨胀; 相对变形量应控制在 10% ~ 20%; 承剪式的截面应设计成菱形; 橡胶应避免日晒和油、水侵蚀; 不宜受拉
金属弹簧	承载能力高, 弹性变形量大, 阻尼系数为 0.01。水平刚度比竖直刚度小, 易晃动	用于被动隔振及大激振力设备的主动隔振。由于易晃动, 不宜用于精密设备的隔振	当需要较大阻尼时, 可增加阻尼器, 或用阻尼较大的材料(如橡胶)联合使用
软木	承载能力小、质轻, 有一定弹性, 阻尼系数为 0.08 ~ 0.12, 有蠕变效应	用于主动隔振, 或和橡胶、金属弹簧联合作辅助隔振器	应力控制在 10N/cm ² 左右, 要防止软木向四周自由膨胀。软木上应加涂料, 防止吸水 and 吸油
毛毡	阻尼大, 在干、湿反复作用下易变硬, 丧失弹性	用于冲击的隔离	厚度一般为 0.65 ~ 7.6cm
其他材料	木屑、玻璃纤维、黄沙等不定型的隔振材料	用于冲击的隔离, 地板与设备的被动隔离	这些隔振材料要放置于适当的容器之内

7.4 风机振动测量技术

振动测试主要包括基本内容如下:

1) 振动量的测量。测量振动体在选定点上位移、速度、加速度的大小；振动体的时间历程、频率、相位、频谱、激振力等。

2) 系统特征参数的测试。系统的刚度、阻尼、固有频率、振型、动态响应特征等。

3) 机械结构或部件的动力强度试验。对机械进行模拟环境条件的振动或冲击试验，以检验产品的耐振寿命、性能的稳定性，以及设计、制造、安装的合理性等。

4) 运行机械的振动监测。对机械在线监测，随时测取振动信息，诊断故障，及时作出保证机械正常运行的措施。

为了满足振动测量和试验的要求，一个完整的测试系统一般由传感器、信号的中间变换装置、信号分析设备，以及信号的显示、记录设备组成。一件完整的测试工作应包括：对被测对象振动的初步估计；测试系统的设计和组成；测试系统的标定；测试数据的取用、分析和存储。通用的机械振动测试系统的框图见图 7-14。

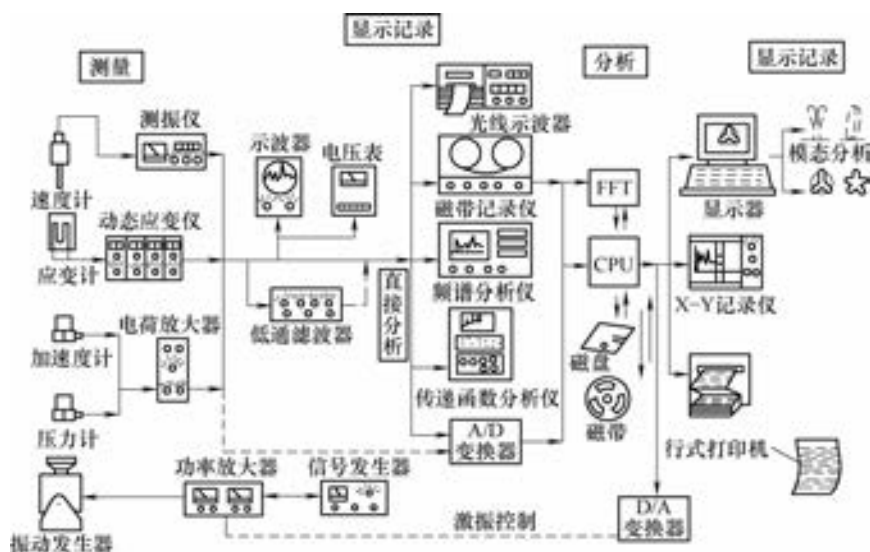


图 7-14 通用机械振动测试系统框图

1. 振动的测量

(1) 振动测量方法的分类 按传感器与振动体的联接状态分为接触式与非接触式；按测量方法的力学原理分为相对式与惯性式；按振动信号的转换方式分为电测法、机械测振法及光测法，见表 7-4。

表 7-4 振动测量方法的分类

测量方法名称	简介	优缺点及应用
电测法	将被测的振动量转换成电量或电参数，再用电量测试仪器进行测定	灵敏度高，频率范围和动态线性范围宽，便于分析和遥测；但易受电磁场干扰。这是目前广泛应用的方法

(续)

测量方法名称	简介	优缺点及应用
机械测振法	利用杠杆原理将振动量放大后直接记录下来	抗干扰能力强，频率范围和动态线性范围窄。测振时会给振动体加一定的负载，影响测量结果。主要用于低频、大振幅振动及扭振的测量
光测法	利用光杠杆原理、读数显微镜、光波干涉原理、激光多普勒效应等进行测量	测量精度高、速度快、不受电磁场干扰。适用于对质量小和不易安装传感器的构件作非接触测量。在精密测量和传感器、测振仪器标定中用得较多

(2) 周期振动的测量

1) 典型的电测系统。图 7-15 为电测法测振的典型测振系统框图。振动体的振动量经发电型传感器转换为电荷、电流或电动势的信号，再经前置放大器、微积分电路，即可进入显示、记录和分析仪器；振动量经电参数型传感器，转换为电阻、电感或电容信号，再经调制器、解调器及微积分电路，即可进入显示、记录和分析仪器。为了对各振动量(位移、速度、加速度)都能测量，测量仪内大多包含有微分和积分电路。

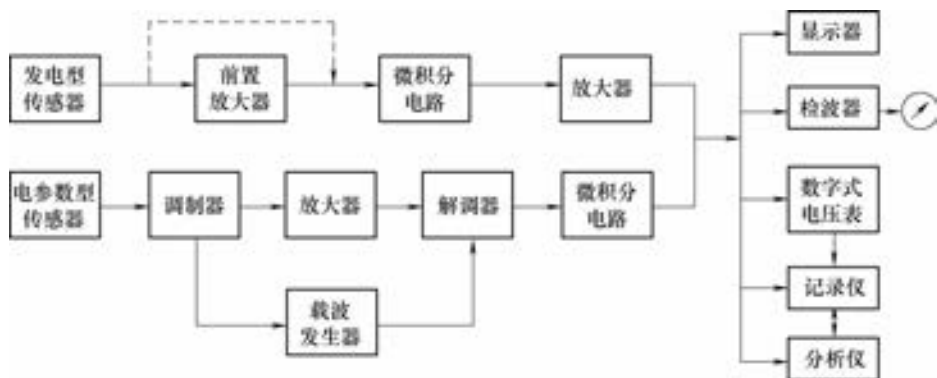


图 7-15 电测法测振的典型测振系统框图

在测量复杂振动时，应采用真实均方根(有效值)检测仪表，即具有平方律线路的检测指示表，周期振动测量还常要求峰值检测指示。

2) 振幅的测量：①测试仪测振幅。把振动信号输入测试仪，直接读出位移、速度或加速度的幅值。②电压表测振幅。把振动信号输入电压表，根据电压值和测量系统的电压灵敏度的大小，计算出振幅。③光学法测振幅。用激光作光源的干涉仪，或用全自摄影技术测振幅。④信号波形测振幅。把已记录或显示的振动波形的幅值，乘以响应的灵敏度(对测量系统标定得到)，计算出振幅。⑤百分表测振幅。用百分表或千分表固定在不动的参考点上作直接测量，可得位移振幅的峰值。⑥视觉滞留作用测振幅。用读数显微镜观测振动体的标志线，因人眼视觉的滞留作用，标志线形成标志带，从而直接读出位移振幅的峰值。或直接观测振动体上的楔形标志，因物体停留在两最大位移位置

的时间最长,从而可观测出稳定的正弦振动位移的峰值。

3) 频率的测量。测量周期振动频率有以下几种常用方法:①用振动波形与时标对比测振动频率。在记录振动量的时间历程时,输入一个适当的时标,用时标与波形进行比较,即可确定振动频率。此方法误差较大,但可测随时间变化的频率,也可测两个以上随时间变化的频率。②用数字频率计测振动频率。将振动信号输入数字频率计,可直接读出频率值。此法适用、方便,振动波形也不限于正弦波;但要求被测频率比较稳定。③用李莎如(Lissajou)图形测振动频率。将被测振动信号和信号发生器的信号,分别输入阴极射线示波器的 x 轴和 y 轴上;逐渐调节信号发生器的频率,当出现李莎如图形时,即可根据图形和发生器的频率确定振动频率。④闪光测振动频率。用闪光灯照射振动体,由小到大的调节闪光频率;当第一次看到振动体好像静止或缓慢移动时,则闪光频率就等于或近似于振动频率;以后多次出现这种状态时,闪光频率的最小公倍数,即为振动频率。⑤用频谱分析仪测振动频率。周期振动信号输入频谱分析仪,可直接测量出信号中包括的各次谐波的频率。

4) 相位的测量。稳定的周期性振动的相位,可以用双线示波器、闪光灯、伏特表示相位指示仪、相位计等仪器,将振动信号与基准信号比较来确定;也可在记录纸上比较振动信号和基准信号的时间历程来测定。对于非周期性的振动,则需用相位计和记录仪、传递函数分析仪等记录其相位变化。

5) 激振力的测量。激振力可用压电式或电阻式测力传感器测量,也可通过测量振动体的加速度并加以换算间接测量。对已标定的激振器,可通过测量使用时的电参数或机械参数,间接测定其激振力。

(3) 冲击的测量

1) 测试量。对冲击的测试量主要是冲击的时间历程;冲击峰值;冲击持续时间;冲击傅里叶谱及冲击响应谱。

2) 冲击测量的特点和对仪器的要求。理论上冲击过程含有从零到无穷大的频谱分量,要求测量系统具有较宽的频率范围,才能少失真地反映冲击的波形和参数。图7-16示出一般冲击测量仪器所测的频率范围,以及相应的传感器、放大器和记录仪的类型。由于冲击的频谱宽,为了消除传感器本身的高次谐波,通常在测量系统中,设置抗频低通滤波器,其最低频率在图7-16中也可查到。

由于冲击作用的急剧变化,可能使测量系统出现明显的非线性和过载情况。因此,要求冲击测量系统具有较高的动态线性范围,指示仪表具有较高的峰值因素(峰值与有效值之比)。

3) 典型的冲击测量系统。图7-17为冲击测量系统框图。目前用得最多的是压电晶体传感器和电荷放大器(或前置高阻抗放大器)组成的测量系统。这种系统具有较宽的频率响应范围。如果冲击加速度小于 $50g$,以及冲击持续时间大于 $5ms$,也可使用低频特性较好的、由张丝式电阻传感器和动态电阻应变仪组成的测量系统。系统中的低通滤波器用于消除传感器的高次谐波。用不同仪器对冲击波形及参数进行显示、记录或拍摄。

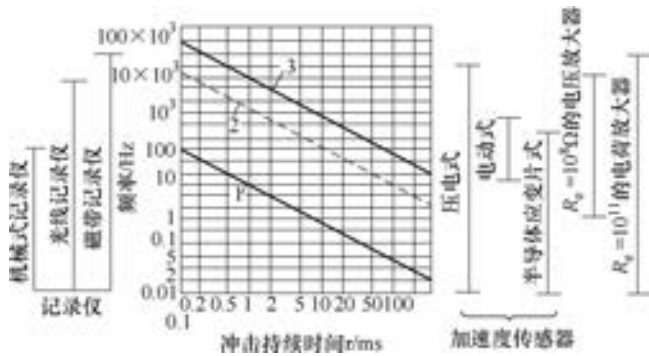


图 7-16 一般冲击测量仪器所测的频率范围

1—下限截止频率 2—低通滤波器的最低频率 3—上限截止频率

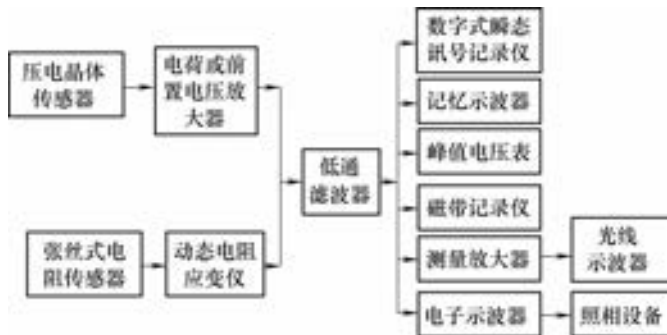


图 7-17 冲击测量系统框图

4) 随机振动的测量：①测量量。对于随机振动，主要是测量其均方根值或均方值、功率谱密度(均方谱密度)，同时也观察其瞬时加速度峰值的最大值。有时则要求测量其平均值、自相关函数、互相关函数及幅值分布概率密度(分析结构疲劳强度时)，以及传递函数和相干函数(分析结构的动态性能时)等。②测量系统及其对仪器的要求。随机振动的测量系统框图见图 7-18。测量系统的频率范围视测量对象情况而定，常用的三种测量系统的频率范围见表 7-5。

为了防止测量和记录信号中大的振幅被消波，宜选用合适的仪器动态范围。对于高斯随机振动，宜以其三倍有效值为选择仪器的动态范围的依据。为了有效地利用记录仪器的动态范围，应要求记录信号具有合适的电平。为了有效地提高信号的记录信噪比，应在记录仪器之前设置适当的滤波器，以滤除信号中的噪声。

当采用磁带记录仪记录随机振动信号时，应根据所测信号主要频率的预计值，合适地选择记录仪的记录速度。由于随机振动的特性是以其统计特性来表示，因此分析时，必须取记录有足够长的一段时间历程。所取的这段记录历程称为采样长度。一般情况下，采样长度要在 2s 以上，高频成分多时可取短些，反之取长些。为了得到可靠的结

果和满足观察分析的需要,实际记录时间要数倍于采样长度,所以记录仪器必须有足够的容量。为了保证测量记录的成功,特别是注意防止过截溢出,测量系统大多有监视设备,包括真实均方根值仪表,或电子示波器,或光线示波器。按随机振动的平稳情况,有时还需多次重复地进行记录,以便取记录函数集的平均值。

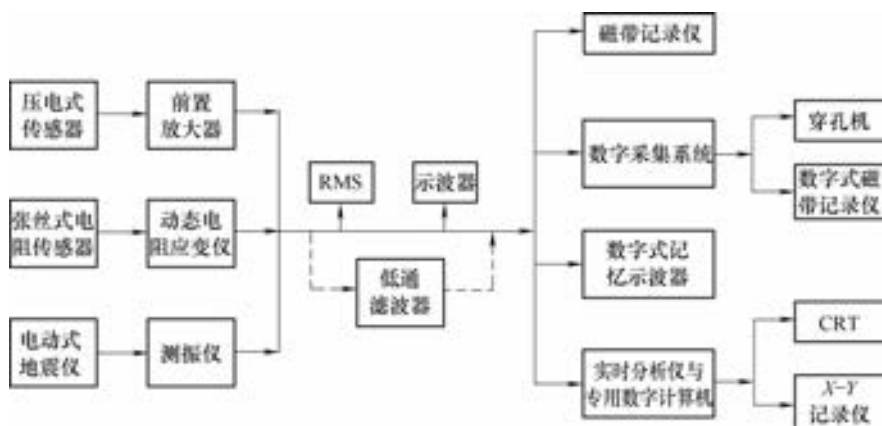


图 7-18 随机振动测量系统框图

表 7-5 测量系统的频率范围

测量系统	频率范围/Hz
压电式传感器、前置放大器系统、电压放大器 电荷放大器	2 ~ 10 ⁴ 0.3 ~ 2 × 10 ⁴
张丝式电阻传感器、动态应变仪系统	0 ~ 500(1000)
电动式地震仪 测振仪系统	0.5 ~ 50 1 ~ 100

2. 机械动力学系统振动特性的测试

振动特性包括系统的固有特性(固有频率、振型、阻尼比)和动力响应特性。可以单项测试,也可各项同时测试;可在现场实测,也可在实验室进行更详细的试验分析和作模型试验。

(1) 固有频率的测试

1) 敲击法。敲击试件,使试件产生能够进行测量的自由振动,记录下自由振动的时程与标尺比较,便可算出试件的固有频率。设备简单、方便迅速,但只能测出试件少数低阶固有频率。

2) 共振法。对试件进行频率扫描激振,记下频率响应曲线,即可定出各阶谐振点及固有频率。

3) 谱分析法。对试件进行随机激振或瞬态激振,获取振动信号,经过信号分析仪得到功率谱或幅值谱,由谱图中的尖峰分量确定固有频率。

4) 试验模态分析法。对试件进行正弦、随机或瞬态激振, 获取试件传递函数数据。使用频域数字曲线拟合法或时域数字拟合法, 对系统动力学模型进行优化识别, 快速而准确地同时将系统的固有频率、阻尼比和振型一起测识出来。这种方法得到的固有频率十分准确, 并且还可以识别出频率十分接近的密集模态, 排除虚假峰值频率。

(2) 振型的测定 振型的测定常与固有频率的测定同时进行。根据结构的形状、尺寸选用以下方法。

1) 探针法。激振试件, 使它处于谐振状态, 然后用探针依次接触试件上各点来探测节线位置, 找出节线后即可定出振型。

2) 沙型法。在平板的试件表面洒上细砂粒; 激振试件, 使它处于谐振状态, 砂粒将逐渐移动和集中到节线附近, 显示出节线的位置和形状, 从而定出振型。

3) 传感器测定法。在试件上选择数量足够的测振点, 并定出各点的坐标。激振试件, 使他处于谐振状态, 用传感器和测振仪测出各点的振幅(或加速度)和相位, 即可绘出其振型。此法适用于测定复杂、大型及刚度较大的构件或机器。测试时注意传感器的附加质量不会对试件原来的振动状态有较大的影响, 并注意其他振型的影响, 应选用多点激振的方式。

4) 谱分析法。对被测试件各测振点振动位移响应数据进行幅值谱、功率谱和互谱分析。幅值谱可以给出各个测振点在各频率点上相应的幅值大小; 互谱则可建立起各测振点间的相互关系, 从而确定各阶振型。

5) 试验模态分析法。如前所述, 试验模态分析法既可测固有频率, 又可测阻尼比及振型等各模态参数, 是当前准确、快速、方便和实用范围广的方法。在一些具有模态分析功能的现代振动信号处理系统上, 所分析的振型结果, 可直接在荧光屏幕上进行立体振型动态活化显示, 并绘图输出。

6) 激光全息照相法。有时间平均法, 频闪法和实时法三种。时间平均法操作简单, 用得较多, 其光路布置见图 7-19。它的原理与静止物体立体全息照相的不同点是: 物体在全息干板曝光过程中作稳定的简谐振动, 故得到物体的时间平均全息图。当这种全息图再现时, 物体的全息照片上有明暗相间的干涉条纹, 这种条纹图就是物体的振型图。

由于曝光时间较长, 试件振动必须稳定, 不应受其他振动的干扰, 故试验必须在防振台上进行, 一般激振设备都不适用。常用压电元件激振法, 即将压电片粘贴在试件易激起振动的部位, 由音频信号发生器和功率放

大器激振。此法适用于高频情况, 激振频率由数百 Hz 到数万 Hz; 但在低频情况下, 压电片阻抗太大, 不易与功率放大器匹配, 不宜采用。

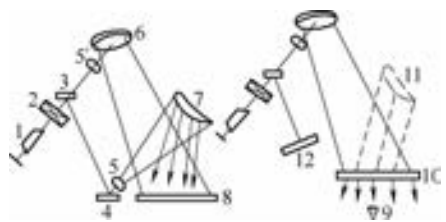


图 7-19 激光全息照相的光路布置

- 1—氦-氖激光管 2—快门 3—分光镜
4—平面反射镜 5、5'—扩散镜(显微镜物镜) 6—球面反射镜 7—物体(叶片)
8—全息干板 9—观察点 10—全息照像 11—物体的全息像
12—不透明挡板

(3) 阻尼比的测定 除了上述试验模态分析方法外,常用的还有以下方法:

1) 自由振动法。激振试件进行自由振动,将其振动衰减波记录下来(见图 7-20),量取第一个波的峰值 A_0 及随后第 n 个波的峰值 A_n ,按下式计算出阻尼比 ζ 。

$$\zeta = \frac{\delta}{\sqrt{4\pi^2 + \delta^2}} \quad (7-32)$$

其中

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{A_0}{A_n}$$

当 $\zeta \leq 0.1$ 时

$$\zeta = \frac{\delta}{2\pi} = \frac{1}{2\pi n} \ln \frac{A_0}{A_n} \quad (7-33)$$

2) 受迫振动法。对试件进行频率扫描激振,记录其各阶共振峰附近的波形(见图 7-21),当阻尼比 ζ 较小($\zeta \leq 0.1$)时,按下式计算其阻尼比:

$$\zeta = \frac{f_2 - f_1}{2f_n} \quad (7-34)$$

式中, f_n 为共振频率,共振振幅为 A_0 ; f_1 、 f_2 为振幅为 $0.707A_0$ 时的频率。

若相邻两共振峰靠得很近,则用试验模态分析法可获得较准确的结果。



图 7-20 自由振动衰减波

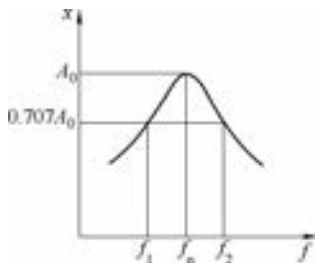


图 7-21 共振波形

(4) 动力响应特性的测试 对机械动力系统施加激振力(输入),测量出系统的振动响应(输出),对系统进行以下分析计算:已知输入和输出,识别出系统的固有特性(固有频率、振型、阻尼比、刚度、质量);已知输入和固有特性,计算出系统的动力响应;已知输出和固有特性,识别出系统的输入特性。

通常用输入和输出之间的关系-传递函数,来描述系统的动力响应特性,其测试过程如下:①在选定坐标点和所需频率范围内,对测试对象施加一定类型(简谐、瞬态或随机激振)和量级的激振力。②测量激振力和所需坐标点的振动响应,或测量输入、输出的互谱及自谱密度函数。③对测得的激振力和响应信号,或互谱及自谱密度函数进行分析处理,求出对应各激振频率的传递函数数据。④将测得的传递函数数据,根据需要以各种图形(如幅频、相频或幅相特性图),或数据的形式进行记录而输出。

图 7-22 为典型的模拟式传递函数测试系统框图,图 7-23 为典型的数字式传递函数测试系统框图。

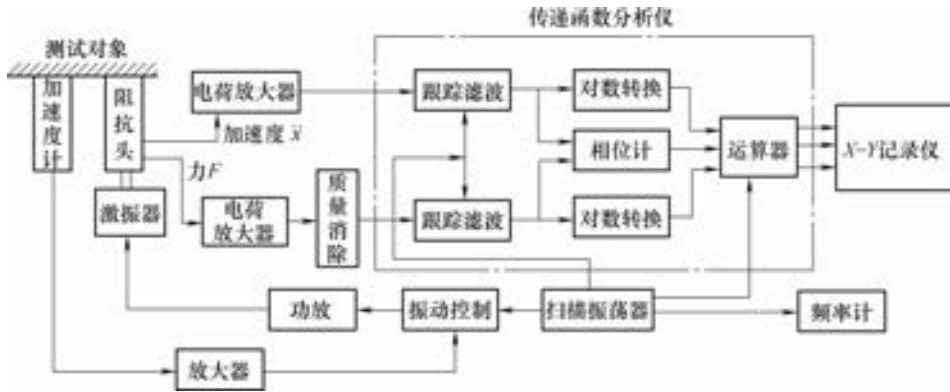


图 7-22 典型的模拟式传递函数测试系统框图

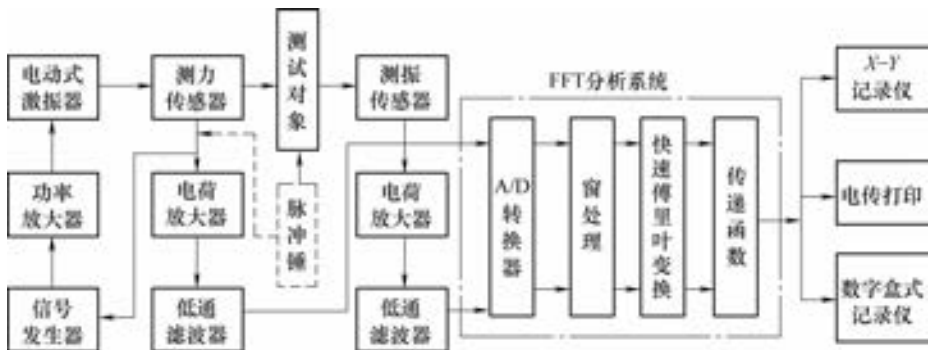


图 7-23 典型的数字式传递函数测试系统框图

(5) 模型试验 对于大型复杂的机器，宜利用模型试验来确定其振动特性。特别是在设计新产品时，通过模型试验，可以验证理论分析是否正确，获得设计所需的资料，模型可制成机械模型或电模型。

机械模型用得较多的是几何相似的模型，即模型的各尺寸与实物的相应尺寸都成一定比例。

以 δ 表示实物某参数与模型同一参数的比例系数，设 $\delta_A = \frac{A_p}{A_m}$ ， $\delta_l = \frac{l_p}{l_m}$ ， $\delta_F = \frac{F_p}{F_m}$ ， $\delta_\omega = \frac{\omega_p}{\omega_m}$ ， $\delta_E = \frac{E_p}{E_m}$ ， $\delta_\rho = \frac{\rho_p}{\rho_m}$ ， $\delta_I = \frac{I_p}{I_m}$ ， $\delta_\mu = \frac{\mu_p}{\mu_m}$ ， $\delta_\zeta = \frac{\zeta_p}{\zeta_m}$ ，…分别代表实物与模型的振幅比，尺寸比，激振力比，频率比，材料弹性模量比，材料密度比，截面惯性矩比，泊桑比的比例系数，阻尼比的比例系数，……。

其中，下标 p 代表实物，下标 m 代表模型。弯曲振动时，考虑动刚度相似和几何相似的准则，得

$$\left. \begin{aligned} \delta_A &= \delta_1 \\ \delta_F &= \delta_E \delta_1^2 \\ \delta_\omega &= \frac{1}{\delta_1} \sqrt{\frac{\delta_E}{\delta_p}} \\ \delta_\mu &= 1 \\ \delta_l &= \delta_1^4 \\ \delta_t &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (7-35)$$

扭转振动时, F 代表激振力矩, A 代表角振幅, 并把弹性模量 E 换成剪切弹性模量 G , 截面惯性矩 I 换成极惯性矩 I_p , 仍可使用式 (7-35) 为其相似准则。如果实物与模型的材料不同, 其泊桑比不同, 即 $\delta_\mu \neq 1$, 则需修改式中的 δ_F 和 δ_ω 为

$$\left. \begin{aligned} \delta_F &= \delta_E \delta_1^2 \frac{1 + \mu_m}{1 + \mu_p} \\ \delta_\omega &= \frac{1}{\delta_1} \sqrt{\frac{\delta_E}{\delta_p} \frac{1 + \mu_m}{1 + \mu_p}} \end{aligned} \right\} \quad (7-36)$$

通常都希望模型比实物小, 即 $\delta_1 > 1$, 故模型的固有频率比实物的固有频率高出几倍甚至几十倍。如果给试验带来困难时, 则放弃几何相似, 而采用其他相似条件, 例如采用运动相似。此时模拟条件应在理论分析的基础上按相似理论求出。

对于多自由度系统, 其运动相似的模拟条件是: 模型与实际系统各相应参数间的比例相同, 即

- 1) 模型的各质量与实际系统的相应质量之比相同, 质量的比例系数为 δ_m 。
- 2) 模型中各质量处的刚度与实际系统中相应处的刚度之比相同, 刚度的比例系数为 δ_k 。
- 3) 模型与实际系统的阻尼情况相同。当不考虑阻尼时, 实际系统与模型的固有频率之比 δ_ω 为

$$\delta_\omega = \frac{\omega_p}{\omega_m} = \sqrt{\frac{\delta_k}{\delta_m}} \quad (7-37)$$

3. 动力强度试验

为了检验产品的耐振寿命和性能的稳定性的稳定性, 发现可能引起破坏或失灵的薄弱环节, 可以通过现场试验获得。但是试验时间长, 不容易查明其破坏原因。因此, 通常使用环境模拟试验, 即将实物在模拟实际使用环境的振动、冲击条件下进行考核试验, 这就是动力强度试验。

一般可将环境条件分为周期性振动、随机振动和瞬态振动(冲击)三种。根据需要依次进行试验, 或只进行一种试验, 或一次试验同时模拟两种、三种环境条件。试验规范, 通用产品按部颁条例规定, 特殊产品由使用、设计和研制单位规定。

(1) 周期性振动试验 对试件进行稳态简谐激振, 测出其破坏或失灵的时间(耐振寿命), 或测出规定时间内其动态响应(性能的稳定性)。通常用以下三种方法。

1) 耐共振试验。试验在被测试对象的共振频率下进行。由于设备或其零部件的破坏一般是由共振引起的, 因此使用共振试验来检查其疲劳强度。但是, 复杂设备的共振点不易全部发现, 可能会漏掉一些共振频率, 而且试验中必须随时注意频率的微小变化。因此还应采用另一种试验方法进行补充。

2) 耐扫频试验。在一定频率范围内, 按规定的振动量(位移或加速度)缓慢地连续改变振动频率, 对产品进行试验。环境的模拟方法, 根据对试件进行大量测振的实际数据, 绘出振幅-频率图或加速度-频率图, 然后用一条包括 95% 数据点的包线作为稳态振动条件。试验时应保持振幅或振动加速度为某一规定值, 缓慢地由低频到高频扫描。如果扫描太快, 被试产品的响应可能跟不上, 达不到稳定振动的峰值。试验可在规定的时间内作一定或多次扫描完成。

3) 耐预定频率试验。对于只在某一个或某几个经常工作频率的被试对象, 则可在这些预定频率下进行试验, 即耐预定频率试验。

为了缩短耐振寿命的试验时间, 常采用短时间加大强度(即加大振动量)的试验来代替长期寿命试验。加大的强度, 即强化系数应根据对设备和零部件的振动响应特性、疲劳强度的分析及累积疲劳损伤的概念来考虑。

(2) 随机振动试验 人为地产生一个随机过程(伪随机过程), 实现随机振动的模拟, 对被测试件进行动力强度试验。随机振动的模拟, 可以由实测记录的典型振动时间历程, 通过专门设备在振动台上重现, 以进行实验室试验; 但更常用的方法是以其加速度功率谱密度, 来确定作为频率函数的振动量级分布, 作出谱图, 进行谱形模拟。如果已确定环境条件为平稳随机过程, 可采用比实际条件更高的振动量级进行试验, 以缩短试验时间。

(3) 冲击试验 冲击环境的模拟, 可以人为地产生瞬态激振信号来实现, 也可以根据实测记录用电动振动台、谱形或波形模拟激振控制设备(自动控制均衡/分析器)来重现。冲击寿命试验同样也是根据累积疲劳损伤的概念, 选取适当的强化系数, 以缩短试验时间。

4. 测试装置

完成以上测量和试验的装置, 通常分为传感器、中间变换装置、记录与显示装置、激振设备, 以及数据分析和处理装置。有的将以上部分装置合为一种仪器。

(1) 传感器 这是将被测的振动信息转换为便于传递、变换处理和保存的信息, 且不受观察者直接影响的装置。不同的测试方法(机、电、光)需要不同的传感器。下面介绍广泛使用的电测法中的传感器。

1) 电测法的常用传感器。电测法传感器分为发电型和电参数变化型两大类。

①发电型。将机械振动量(位移、速度、加速度)的变化, 转换成电量(电压、电流、电荷)的变化。其中有压电式、电动式、和电磁式, 由振动加速度或速度的变化, 产生电荷或电动势。

②电参数变化型。将机械振动量的变化,转换成电参数(电阻、电容、电感)的变化。其中有振动时,传感器的电参数分别改变的电阻式、电容式和电感式。

2) 传感器的选用原则

①灵敏度。在量程范围内,保证信噪比足够大的条件下,灵敏度越大越好。用于单向矢量测量时,要求其他矢量的灵敏度越小越好;用于二维或三维矢量测量时,要求交叉灵敏度越小越好。

②响应特性。在所测频率范围内,保持信号不失真,响应的延迟时间越短越好。

③线性。保证非线性误差在允许范围内。

④稳定性。在使用时间内,能抵抗环境的干扰,保持输出特性不变化。

⑤精确度。同时考虑测试精度的要求及传感器的经济性,选择合适的精确度。对定性分析,要求重复精确度高;对定量分析,要求量值精确度高。

⑥测试方式。对运动部件及难以接触的振动体的测量,选用非接触式传感器。

⑦其他。结构简单、体积小、重量轻、价格便宜、易于维修和更换等。

(2) 中间转换装置 其作用是将传感器输出的信号进行放大、滤波、运算…,最后能驱动显示仪表、记录仪器、控制器或输入电子计算机作数据处理等。其中,有将传感器的高输出阻抗转换为低输出阻抗,将传感器输出的微弱信号放大,将传感器输出的电荷信号转换为电压信号的前置放大器、测量放大器;只使特定频率成分的测试信号顺利通过的滤波器;实现模数转换(A/D)及数模转换(D/A)的模拟数字转换器;将信号进行微分或积分的微积分线路;将电阻、电感、电容信号转换为电压或电流信号的电桥;以及将缓变信号经过调制变为频率适当的交流信号,利用交流放大器放大,再经过解调恢复为原来的缓变信号的调制与解调等。

(3) 记录及显示仪器 在测试系统中,使用记录与显示仪器,对测试结果进行直接观察分析,或保存测试结果供后继仪器进行分析处理。

记录仪器可以记录一个物理量随时间变化的函数关系,也可记录两个物理量之间的函数关系。有显性记录和隐性记录;模拟信号记录和数字信号记录;有笔式记录和磁带记录等。

(4) 激振设备及简便的激振方法 在进行机械系统的振动特性参数和动力强度测试时,或对测振传感器和仪器进行校准时,需要对试件进行激振。激振时,除采用有正式产品的激振设备外,还可采用一些简便的激振方法。

激振设备是对试件施加一定频率的某种预定的激振力(激振器),或对试件提供一定频率、振幅(振动台),激起试件振动的装置。通常由信号发生器、功率放大器和激振执行机构组成。常用的激振设备有机械类的直接作用式、反作用式和共振式的振动台(激振器);机械类的单次、多次冲击台;电动式的振动台(激振器)和多点激振设备;电-液式振动台(激振器);定振级自动频率扫描的自动振动台;冲击和随机振动模拟用电-液或电动式激振系统;磁吸式激振器等。

简单的激振方法有适用于小型、薄壁试件的压电晶片片激振法;适用于高频校准振动台和超声波激振器的磁致伸缩激振法;适用于轻型薄壁试件的高声强激振法;适用于

特殊试验的爆炸法；适用于高能级的特殊环境实验的枪炮弹冲击法；以及方法最简便，需要设备少的敲击法等。

(5) 测试装置的校准及标定 为了保证测试结果的准确性和可靠性，在下列情况中必须对测试设备的技术性能(灵敏度、动态线性范围、频率响应特性等)进行校准和标定。

1) 传感器和测量仪器在出厂前或经修理后，必须按其技术指标进行全面的、严格的校准和标定。

2) 使用一段时间或搁置较长的时间后，都需重新进行校准。此时，一般只校准其灵敏度和频率响应特性。

3) 在进行重要和大型试验前，或在进行特殊试验前，常需进行现场标定，并根据需要进行某些特性的校准。例如：振级变化大时，校准动态线性范围；高温实验时，校准温度的影响。

测试装置校准及标定的常用方法有：适用于计量单位和测振仪器制造厂的绝对法；常为仪器使用单位采用的相对比较法；常用作测量前现场校准的重力加速度法；适用于计量、研究和制造单位的互易法；适用于一般使用、研究和制造单位的共振梁法和扭转校准法；以及摆锤式、落体式、落球式、气枪(炮)及火炮式的冲击校准法。

5. 信号分析及数据处理

振动测试中，经测试系统得到的描述振动物理量的数据，一般称为信号。它们中包括有用信号和受外界干扰或仪器自身产生的没有用的信号(称为噪声信号)。无论哪一种噪声都是有害的，有时甚至会将有用的信号完全淹没。因此，有必要对振动测试所得的原始数据进行处理，排除噪声信号，提取有用信息。

根据不同的使用目的，可以把一个有用信号，定义成多个时间函数或频率的函数。因此，有必要对这些函数，即信号进行计算和分析。

对测试所得的模拟信号，可以进行直接处理，即模拟信号分析。也可以使用电子计算机进行数字信号分析。前者设备简单，后者精度高、速度快。根据仪器设备的条件及原始数据的状态进行选择。采用计算机技术进行分析处理是今后发展的方向。

(1) 信号的时域分析 振动的幅值表示振动量的大小，反映振动的强度。幅值有不同的描述量，时域分析就是把一个信号的幅值，或几个信号幅值的相互关系，定义为多个不同的时间函数或参数。对这些函数进行计算和分析，称为幅值分析。

用 $x(t)$ 表示某一确定性信号，在幅值域内可定义以下函数。

1) 峰值。最大峰值描述信号的最大值。峰值在局部范围内为极大值(对应于正峰值)或极小值(对应于负峰值)。对于周期信号，峰值一定会重复出现；对于非周期信号，峰值至少有一个。

2) 幅值。专用于描述正弦信号(简谐振动)的峰值。由于各种周期信号或非周期信号可以表示为无穷多个正弦信号分量之和，所以这些信号的峰值，不与其中某个正弦信号的幅值相等。

3) 平均值。用以描述信号的稳定分量，定义如下：

对于周期信号

$$\mu_x = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt$$

对于非周期信号

$$\mu_x = \lim_{T \rightarrow 0} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt$$

式中, T 为周期信号的周期, 对于非周期信号, T 趋于无穷大。

以后凡是再提到 T 的场合, 均照此处理, 不再区分周期与非周期信号。

4) 均方值。用于描述信号的能量, 定义如下:

$$\psi_x^2 = \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt$$

5) 均方根值。均方值的正平方根, 定义如下:

$$\psi_x = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} = x_{\text{rms}}$$

6) 有效值。专用于描述正弦信号的均方根值, 是正弦信号峰值及幅值的 $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 。

在正弦交流电路中, 用电压有效值乘以电流有效值, 求出电路中的功率。在机械系统的等效电路中, 相当于简谐振动激振力的有效值, 乘以振动速度的有效值, 得机械振动的功率。

7) 绝对平均值。用于实测电路中计算均方根值。采用模拟电路, 往往很难求出周期信号的均方根值。使用中常采用整流电路得到信号的绝对平均值; 再通过正弦信号均方根值与绝对平均值之间的关系, 计算出均方根值。绝对平均值的定义如下:

$$x_{\text{abs}} = \frac{1}{T} \int_0^T |x(t)| dt$$

对于正弦信号, $\frac{x_{\text{rms}}}{x_{\text{abs}}} = 1.11$, 对于方波信号, $\frac{x_{\text{rms}}}{x_{\text{abs}}} = 1$ 。

8) 方差。用于描述信号的波动分量, 定义如下:

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{T} \int_0^T (x(t) - \mu_x)^2 dt = \psi_x^2 - \mu_x^2$$

9) 标准差。方差的正平方根, 定义如下:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (x(t) - \mu_x)^2 dt}$$

10) 概率密度函数。用以描述信号沿幅值域的分布状态, 取各种函数的概率以了解信号的大小。概率密度函数是随机振动瞬时值出现于某一单位幅值区间的概率。当统计出随机变量 $x(t)$ 的大小在 x 与 $x + \Delta x$ 之间的 n 个样本时, 其概率的定义如下:

$$P_{\text{rab}} \{x \leq x(t) \leq x + \Delta x\} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{n}{N}$$

概率密度函数的定义如下：

$$P(x, t) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{P_{\text{rab}} \{x \leq x(t) \leq x + \Delta x\}}{\Delta x}$$

11) 概率分布函数。取各种值的分布以了解信号的大小。瞬时值小于或等于某 x 值的概率，称为概率分布函数。其定义如下：

$$P(x, t) = P_{\text{rab}} \{x(t) \leq x\}$$

对其求导数，可得概率密度函数，即

$$P(x, t) = \frac{\partial P(x, t)}{\partial x}$$

12) 自相关函数。用以描述信号自身的相似程度，其定义如下：

$$R_{xx}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)x(\tau + t) dt$$

或

$$R_{xx}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)x(t + \tau) d\tau$$

13) 互相关函数。用以描述两个信号之间的相似程度或相关性。用 $x(t)$ 表示某确定性信号， $y(t)$ 表示另一确定性信号，则互相关函数的定义如下：

$$R_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)y(\tau + t) dt$$

或

$$R_{xy}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)y(t + \tau) d\tau$$

若互相关函数中出现峰值，则表示这两个信号是相似的，其中一个信号在时间上滞后了峰值所在的时差值；若互相关函数中几乎处处为零，则表示这两个信号互不相关。

(2) 信号的频域分析 把周期信号展开为傅里叶级数，或对非周期信号进行傅里叶变换，使信号成为频率的函数，即把时域内的振动信号 $x(t)$ ，变换为频域内的振动信号 $x(f)$ 。对频率函数进行计算和分析就是频域分析，也称为频谱分析。

为了了解信号的频率结构(即信号中各频率分量所占的比例)，用以发现信号产生的原因，或采取相应的措施加以控制，可以对这些频率函数进行直接分析。

在频域分析中，常采用以下函数。

1) 自功率谱密度函数。用以表示信号能量的频率结构，其定义如下：

$$S_{xx}(f) = \overline{X(f)X(f)}$$

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt$$

式中, $X(f)$ 为信号 $x(t)$ 的傅里叶变换; $\bar{X}(f)$ 为 $X(f)$ 的共轭函数。

2) 互功率谱密度函数。用以表示两个信号能量之间的频率结构关系, 其定义如下:

$$S_{xy}(f) = \bar{X}(f)Y(f)$$

$$Y(f) = \int_{-\infty}^{\infty} y(t)e^{-i2\pi ft} dt$$

式中, $Y(f)$ 为非周期信号 $y(t)$ 的傅里叶变换。

3) 相干函数。用以表示两个信号的相干程度, 其定义如下:

$$\gamma_{xy}^2(f) = \frac{|S_{xy}(f)|^2}{S_{xx}(f)S_{yy}(f)} \quad (0 \leq \gamma_{xy}^2 \leq 1)$$

式中, $S_{xx}(f)$ 、 $S_{yy}(f)$ 为信号 $x(t)$ 和 $y(t)$ 的自功率谱密度函数; $S_{xy}(f)$ 为 $x(t)$ 和 $y(t)$ 的互功率谱密度函数。

若 $x(t)$ 为输入信号, $y(t)$ 为输出信号, 当求出的相干函数 $\gamma_{xy}^2(f) = 0$ 时, 表示输出信号与输入信号不相干, 即在输出信号中没有输入信号的作用, 而完全被噪声信号所代替。当 $\gamma_{xy}^2(f) = 1$ 时, 表示输出信号与输入信号完全相干, 没有受噪声信号的影响。

(3) 模拟信号分析

1) 模拟信号相关分析。把同一信号送入改变滞后时间, 就可得相关函数随时间变化关系的模拟相关分析仪的两个输入端, 得到的输出即为自相关函数。把不同信号送入其两个输入端, 就得互相关函数。

2) 模拟信号的自功率谱分析。可使用以下多种仪器:

①等百分比带宽邻接式谱分析仪。它由一组中心频率不同, 但增益相同的带通滤波器组成。每个滤波器占据一定带宽, 彼此邻接覆盖整个频率范围。使被分析的信号依次(串行分析)或同时(并行分析)进入不同滤波器, 输出后取其均方(根)值, 记录或显示的结果, 即为自功率谱密度函数。

②外差式谱分析仪。它由扫频信号发生器和恒定带宽滤波器组成。扫频信号发生器连续改变扫描频率 ω 发出的扫频信号为 $A\sin(\Omega + \omega)t$, 令其与含有噪声信号 $f(t)$ 的被分析信号 $X\sin(\omega t + \varphi) + f(t)$, 在分析仪内相乘为

$$A\sin(\Omega + \omega)t [X\sin(\omega t + \varphi) + f(t)] = \frac{1}{2}AX\cos(\Omega t - \varphi) - \frac{1}{2}AX\cos((\Omega + 2\omega)t + \varphi) + A\sin(\Omega + \omega)t f(t)$$

从式中可看到, 只有其第一项能通过中心频率为 Ω 的恒定带宽滤波器。随着扫描频率 ω 的连续变化, 被分析信号中其频率与扫频信号相差为 Ω 的成分, 连续通过滤波器并产生输出, 取其均方(根)值, 即得自功率谱密度函数。

③相关积分式谱分析仪。它由参考信号发生器和积分平均器组成。参考信号发生器发出频率 ω 连续变化的参考信号为 $A\sin\omega t$, 令其与被测信号相乘为

$$A\sin\omega t [X\sin(\omega t + \varphi) + f(t)] = \frac{1}{2}AX\cos\varphi + \frac{1}{2}AX\cos(2\omega t + \varphi) + A\sin\omega t f(t)$$

经积分平均器后, 只有式中第一项直流分量 $\frac{1}{2}AX\cos\varphi$ 输出。经过运算后, 可得被分析信号的幅值及其与参考信号间的相位差。

3) 模拟信号的互功率谱分析。使用互功率谱密度分析仪进行分析。它综合了外差式和相关积分式谱分析仪的优点, 把被分析的两个信号 $x(t)$ 和 $y(t)$ 分别送进分析仪的两个输入端, 各自与扫频信号发生器的扫频信号相乘, 按外差式原理得两路滤波信号; 再按相关积分式原理, 令两路滤波信号相乘后积分, 平均得互功率谱密度函数的实部; 令其中一路相移 90° (正弦信号变为余弦信号) 后与另一路相乘, 经积分平均后得互功率谱密度函数的虚部。

(4) 数字信号分析 由于数字信号分析具有各种优势, 目前已形成有完全替代模拟分析的可能。数字信号分析可以用软件在通用计算机上进行, 也可采用分析速度更快、分辨能力更高、功能更广的专用数据处理机进行。一般都要对信号进行模拟/数字(A/D)变换和快速傅里叶变换(FFT), 再计算出各种函数。具体的步骤如下:

1) 信号的预处理。包括对调制信号进行解调; 滤出高频噪声; 使信号中的幅值与A/D转换器的动态范围适应; 以及隔离信号中的直流分量等。

2) 采样和量化。使用A/D转换器对连续的时间信号, 在时间上等间隔的采样和幅值上量化, 即把连续变化的振动模拟量用同一系列数字量来表示。每个数字之间的间隔 T_s , 每个数字的大小与相应的模拟量相当。

3) 确定分析信号的长度和数据点数。采样间隔 T_s 确定以后, 根据处理要求和计算机的容量, 选定数据点数 N , 则分析信号的长度为 $T = NT_s$ 。

4) 选择窗函数。信号的历程理论上无限的, 需要将其截断来处理。截断就是将无限长的信号乘以有限宽的窗函数, 根据需要可以选择矩形等窗函数。

5) 对各段时间序列进行FFT运算。模拟信号经过时域采样和用窗函数截断以后, 得到有限长的时间序列, 对其进行快速傅里叶变换(FFT); 并根据需要, 按照基于FFT的各种运算公式, 进行运算, 从而得到相关、相干、频率响应、功率谱密度等各种函数, 以及单边谱、双边谱、声强谱、倒频谱、消除谱等各种谱, 还可进行复时域分析。

7.5 通风机叶轮的强度计算

1. 离心通风机叶轮强度计算

(1) 离心通风机叶轮的结构 离心通风机的叶轮主要由叶片、前盘、后盘、轮盘等部件组成。其中, 除轮盘用铸铁或铸钢制成外, 其他部件一般都是由钢板制成。叶片有平板、圆弧、中空机翼型等形状; 前盘有平的、圆锥的、圆弧的等形状; 后盘则是平的圆盘。

前、后盘与叶片的连接一般采用焊接, 或者由铆钉铆接。后盘与轮盘连接一般都采用铆钉铆接。图7-24为各种不同结构形式叶轮简图。

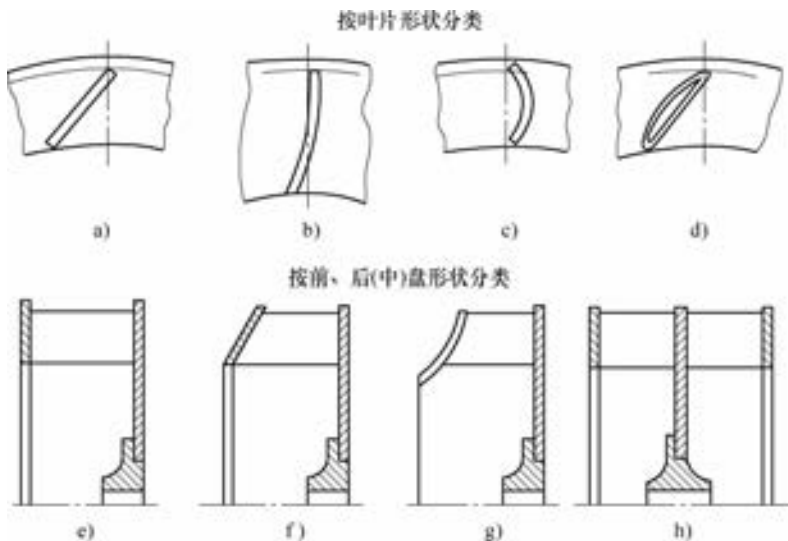


图 7-24 各种不同结构形式叶轮简图

- a) 平板叶片 b) 圆弧窄叶片 c) 圆弧宽叶片 d) 中空(机翼型)叶片 e) 平行盘叶轮
f) 圆锥前盘叶轮 g) 圆弧前盘叶轮 h) 具有中盘的叶轮

(2) 轮盘强度的计算 轮盘旋转时产生离心力, 在该力作用下使轮盘截面产生拉伸应力。如果最大拉伸应力超过材料的许用值 $[\sigma]$, 则轮盘被拉断, 不能工作, 造成事故。为了保证轮盘工作安全可靠, 应校核其安全强度, 即计算出轮盘危险截面处的最大拉伸应力 σ_{\max} (Pa), 使其满足

$$\sigma_{\max} = \frac{\sigma_s}{K} \leq [\sigma]$$

式中, σ_s 为材料的屈服极限 (Pa); K 为安全系数, 取 $K \geq 2$ 。

1) 轮盘形状和尺寸对应力的影响:

①等厚薄圆环的旋转应力。图 7-25 示出等厚薄圆环以角速度 ω 绕轴旋转。现在研究由于离心力作用下引起的应力。在薄圆环上取一微元体, 其两个子午面夹角为 $d\alpha$, 截面积为 $A = b\delta$, 平均直径为 d , 微元体质量为 $dm = \frac{d}{2}(d\alpha)b\delta\rho$ 。旋转的微元体上作用力有:

作用在截面上的切向力由下式计算:

$$F_T = \sigma_t b \delta$$

离心力为

$$F = \frac{d}{2}(d\alpha)b\delta\rho \frac{d}{2}\omega^2 \quad (7-38)$$

由图 7-25 中的力三角形表示这些力的平衡,

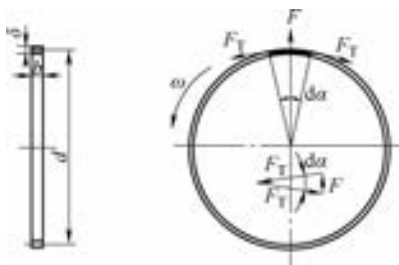


图 7-25 等厚薄圆环以角速度 ω 绕轴旋转

则

$$F = F_T d\alpha$$

或

$$F_T = \frac{dp}{d\alpha}$$

则

$$\sigma_t = \rho u^2 \tag{7-39}$$

式中， σ_t 为薄圆环的离心拉伸应力(Pa)； u 为薄圆环平均直径处的圆周速度(m/s)； ρ 为材料的密度(kg/m³)。

由式(7-39)可见，等厚薄圆环的旋转应力与材料密度成正比，与圆环的平均直径处的圆周速度平方成正比。

②圆环径向尺寸对应力的影响。图 7-26 示出两个外径相同、内径不同的圆环，各以相同的转速 n 旋转。这两个圆环中的应力将是不同的。从式(7-39)可知：平均直径 D 大，其平均直径处的圆周速度也大，则应力 σ_t 也就大。同理，当外径 D_2 相同时，若内径 D_1 大，则平均直径 D 大，应力 σ_t 也大。反之，内径 D_1 小，则平均直径 D 小，应力 σ_t 也就小。

将 D_1 与 D_2 的比值称为镗孔度 ε 。当镗孔度 ε 大，则应力 σ_t 大。所以要尽可能减少镗孔度 ε 。对大圆环应特别注意减少镗孔度 ε ，以降低应力。

③圆环轴向尺寸对应力的影响。图 7-27 示出三种不同轴向尺寸的圆环。其中，内径处的厚度 b_1 都相同。对于锥形和双曲线圆环，其外径处的厚度 b'_2 也相同。设在同一转速下，分析哪种圆环应力大？

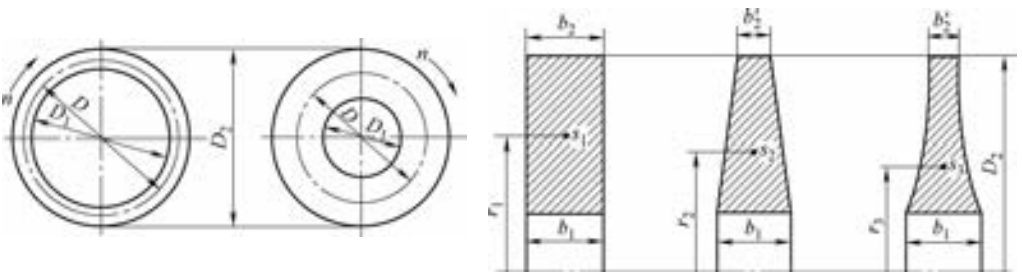


图 7-26 两个外径相同、内径不同的圆环

等厚圆环 锥形圆环 双曲线形圆环

图 7-27 三种不同轴向尺寸的圆环

不难看出，等厚圆环截面重心 s_1 离轴线最远，比锥形和双曲线形圆环的圆周速度大，故等厚度圆环的应力最大，锥形和双曲线形圆环的应力依次减少。由此可知，应力与轴向尺寸有关。 b_2 与 b_1 的比值称为厚度比 z ，当厚度比 $z = b_2/b_1$ 小，则应力 σ_t 小。

总的来说，圆环尺寸和形状对应力的影响，都与截面重心处的圆周速度的平方有关。因此在相同材料时，设计轮盘形状应尽量使截面重心处的圆周速度最小。也就是要使截面重心尽量降低。

2) 轮盘应力计算基本公式。计算轮盘应力，先不考虑前盘、后盘、叶片等的相互影响，不论前盘、后盘形状如何，均按自由旋转等厚度圆盘处理。

①等厚度轮盘应力计算基本公式:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{1}{8} \rho \omega^2 (3 + \mu) \left(r_2^2 + r_1^2 - \frac{r_2^2 r_1^2}{r^2} - r^2 \right) \\ \sigma_t &= \frac{1}{8} \rho \omega^2 (3 + \mu) \left(r_2^2 + r_1^2 + \frac{r_2^2 r_1^2}{r^2} - \frac{1 + 3\mu}{3 + \mu} r^2 \right) \end{aligned} \right\} \quad (7-40)$$

式中, σ_r 为轮盘任意半径上的应力; μ 为泊桑比。

等厚度轮盘以等角速度 ω 旋转时, 由式(7-40)可以计算出任意半径上的应力。其应力分布如图 7-28 所示。从图中所示应力分布中, 可得出一个重要结论: 最大的切向应力发生在内径处。

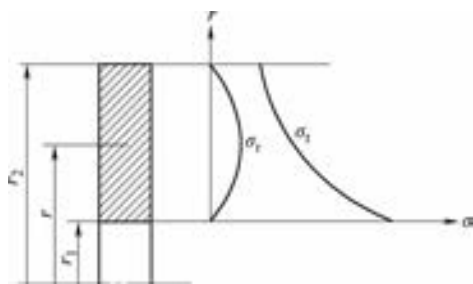


图 7-28 等厚度轮盘的应力分布

②不考虑叶片的影响时, 轮盘内径处的切向应力:

当 $r = r_1$ 时, 由式(7-40)得

$$\sigma_{t1} = \frac{1}{4} \rho \omega^2 r_2^2 (3 + \mu) \left[1 + \frac{r_1^2}{r_2^2} \left(\frac{1 - \mu}{3 + \mu} \right) \right] \quad (7-41)$$

或

$$\sigma_{t1} = \rho u_2^2 \frac{3 + \mu}{4} \left[1 + \frac{1 - \mu}{3 + \mu} \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 \right] \quad (7-41a)$$

式中, ρ 为轮盘材料的密度 (kg/m^3), 钢材 $\rho = 7.85 \times 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$; u 为轮盘外径处圆周速度 (m/s); μ 为材料的泊桑比, 钢材 $\mu = 0.3$; $\frac{D_1}{D_2}$ 为轮盘内、外径的比值。

将 ρ 、 μ 等数值代入(7-41a), 得

$$\sigma_{t1} = 6500 u_2^2 \left[1 + 0.212 \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 \right] \quad (7-42)$$

③考虑叶片的影响时, 轮盘内径处的切向应力。前面考虑的是光轮盘由于离心力引起的应力计算。现在考虑叶片的离心力时, 会使轮盘中的应力增加, 即轮盘总应力为光轮盘与由于叶片而产生的附加应力之和, 即

$$\sigma_t = \sigma_{t1} + \sigma_{t2} \quad (7-43)$$

若光轮盘的离心力为 F_1 , 而叶片的离心力为 F'_2 , 则

$$\sigma_{t2} = \sigma_{t1} \frac{F'_2}{F_1} \quad (7-44)$$

其中, 轮盘自身质量的离心力 F_1 (N) 为

$$F_1 = \frac{b \rho \omega^2}{12} (D_2^3 - D_1^3) \quad (7-45)$$

$$\text{或} \quad F_1 = \frac{4b\rho u_2^2 D_2 [1 - (D_1/D_2)^3]}{12} \quad (7-45a)$$

式中, ρ 为轮盘材料的密度(kg/m^3), 钢材 $\rho = 7.85 \times 10^3 \text{kg}/\text{m}^3$; b 为轮盘厚度(m); ω 为叶轮旋转的角速度($1/\text{s}$); D_1 、 D_2 为轮盘的内、外径(m)。

叶片的离心力 F_2' 为 $\frac{1}{2}$ 叶片数的单个叶片离心力在法线方向的投影之和, 即

$$F_2' = \frac{F_2 z K}{\pi} \quad (7-46)$$

式中, z 为叶片数, 对双吸入风机, 取单侧叶片数; K 为分配系数, 对前盘取 $K = 0.5$, 对后盘取 $K = 1$; F_2 为一个叶片产生的离心力(N), $F_2 = mR\omega^2$; m 为一个叶片的质量(kg); R 为每个叶片重心到叶轮中心距离(m); ω 为叶轮旋转的角速度($1/\text{s}$)。

通过式(7-45a)和式(7-46)计算出 F_1 和 F_2' 后, 即可按式(7-44)计算出 σ_{i2} , 再由式(7-43)求得轮盘内径 D_1 处的总应力 σ_1 。

(3) 叶片强度的计算 离心通风机和轴流通风机的叶片, 主要受本身离心力所产生的弯曲应力和拉应力。根据不同叶型, 求出叶片的最大应力 σ_{\max} , 然后进行强度校核:

$$\sigma_{\max} \leq [\sigma]$$

式中, $[\sigma]$ 为许用应力(Pa)。

叶片与前、后盘的连接, 一般采用焊接或铆接结构。计算叶片强度时, 假定叶片为一简支梁, 如图 7-29a 所示; 或是一固定梁, 如图 7-29b 所示, 叶片因旋转产生的离心力假定为在梁上均匀分布载荷。

根据假定条件, 简支梁承受均布载荷时, 最大弯矩产生在梁的中央, 即 $\frac{b}{2}$ 处, 且最大弯矩为

$$M_{\max} = \frac{qb^2}{8}$$

式中, q 为均布载荷在梁的单位长度上的重量(N/m)。

固定梁受均布载荷时, 最大弯矩发生在梁的两端, 且最大弯矩为

$$M_{\max} = \frac{qb^2}{12}$$

叶片的最大弯曲应力为

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W} \quad (7-47)$$

式中, W 为抗弯截面模数(m^3)。

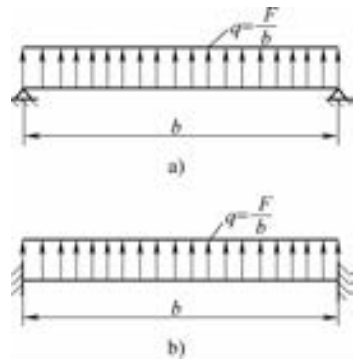


图 7-29 叶片受力的简化图

1) 平板叶片的强度计算。图 7-30 所示的叶轮，配有安装角为 β 的直叶片。

假定叶片重心在 O 点，当叶轮以角速度 ω 旋转时，单个叶片所产生的离心力为

$$F = \rho \omega^2 b l \delta R$$

式中， ρ 为叶片材料的密度 (kg/m^3)，钢材 $\rho = 7.85 \times 10^3 \text{kg}/\text{m}^3$ ； b 为叶片平均宽度 (m)； ω 为叶轮旋转的角速度 ($1/\text{s}$)； l 为叶片长度 (m)； δ 为叶片厚度 (m)； R 为叶轮中心至叶片重心的半径 (m)。

将离心力分解成沿叶片的法向力 F_1 和切向力 F_2 ，在 F_1 和 F_2 的作用下，在相应方向发生弯曲。由于 F_2 方向的叶片抗弯截面模数较大，相应 F_2 引起的弯曲应力较小，可以忽略不计。而只计算由 F_1 引起的弯曲应力。

由图 7-30 可知 $F_1 = F \cos \beta$

则叶片的荷重集度为

$$q = \frac{F_1}{b} = \frac{F}{b} \cos \beta$$

叶片的抗弯截面模数为

$$W = \frac{l \delta^2}{6}$$

若按简支梁计算，则叶片最大弯矩为

$$M_{\max} = \frac{1}{8} q b^2$$

叶片最大弯曲应力为

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W} = \frac{3}{4\delta} \rho b^2 R \omega^2 \cos \beta \quad (7-48)$$

若按固定梁计算，则叶片最大弯矩为

$$M_{\max} = \frac{1}{12} q b^2$$

叶片最大弯曲应力为

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W} = \frac{1}{2\delta} \rho b^2 R \omega^2 \cos \beta \quad (7-49)$$

或

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W} = \frac{43.0}{\delta} b^2 R n^2 \cos \beta \quad (7-49a)$$

式中， n 为叶轮的转速 (r/min)。

2) 圆弧叶片的强度计算。

① 圆弧窄叶片。这种叶片的特点是叶片的径向尺寸大于叶轮的轴向尺寸。计算时，

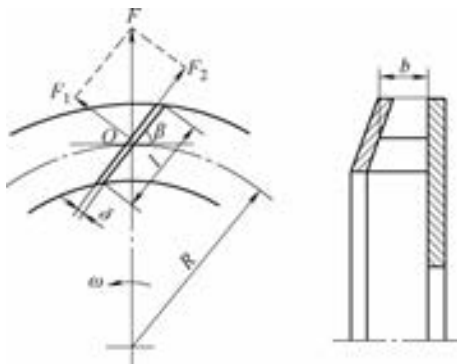


图 7-30 平板直叶片受力分析

假设在叶片上沿轴向截取长度为 l ，宽度为 b 的一个小窄条，将这个小窄条看作是承受均布载荷的梁，叶片重心近似在叶片工作面的 O 点上，如图 7-31 所示。显然，这小窄条就相当于一个平板叶片，其计算与平板直叶片相同，可根据叶片与前、后盘的连接是铆接结构或焊接结构，按简支梁或固定梁采用式(7-48)，或式(7-49)，式(7-49a)计算。

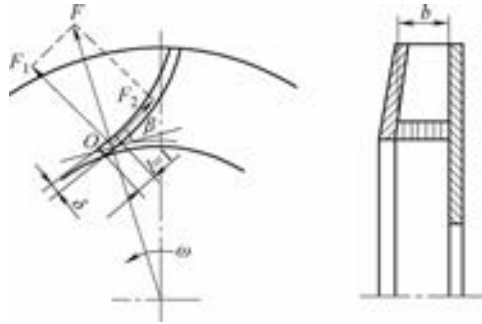


图 7-31 圆弧窄叶片受力分析

由以上计算公式可知，最大弯曲应力与 $Rb^2 \cos\beta$ 成正比；而 $Rb^2 \cos\beta$ 值随截取小窄条位置不同而不同。因此在强度计算时，应视具体情况选定危险截面位置，例如叶片进口处，使计算出的弯曲应力为最大值，或取几个不同位置进行验算，而取其较大者。

② 圆弧宽叶片。这种叶片如图 7-32 所示，其特点是叶片的径向尺寸小于叶轮的轴向尺寸。此时分力 F_2 引起的弯曲应力不能忽略，在强度计算时，把整个叶片看成承受均布载荷的梁。

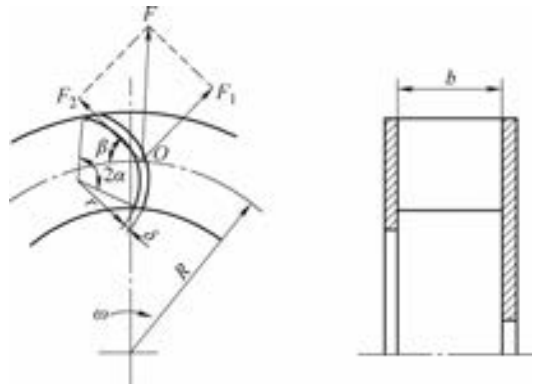


图 7-32 圆弧宽叶片受力分析

单个叶片产生的离心力为

$$F = \rho r 2\alpha \delta b \omega^2 R$$

式中， r 为叶片圆弧半径(m)； 2α 为叶片圆弧所对中心角(rad)。

假定叶片重心在其工作面 o 点上，将离心力 F 分解为法向 F_1 和切向分力 F_2 ，则

$$F_1 = F \cos\beta \quad F_2 = F \sin\beta$$

当将叶片看作承受均布载荷的简支梁时，因 F_1 和 F_2 的作用，使叶片产生的最大弯矩为

$$M_{1\max} = \frac{1}{8} F_1 b \quad M_{2\max} = \frac{1}{8} F_2 b$$

当将叶片看作承受均布载荷的固定梁时，因 F_1 和 F_2 的作用，使叶片产生的最大弯矩为

$$M_{1\max} = \frac{1}{12} F_1 b \quad M_{2\max} = \frac{1}{12} F_2 b$$

这时，可用下式求出叶片相应的抗弯截面模数：

$$W_1 = r^2 \delta k_1 \quad W_2 = r^2 \delta k_2$$

式中， k_1 、 k_2 为系数，其值可根据角度 α 的大小，查表 7-6。

表 7-6 系数 k_1 、 k_2 值

$\alpha/(\circ)$	k_1	k_2	$\alpha/(\circ)$	k_1	k_2
25	0.0109	0.126	46	0.0668	0.422
26	0.0124	0.137	47	0.0714	0.440
27	0.0138	0.147	48	0.0761	0.458
28	0.0154	0.158	49	0.0810	0.478
29	0.0171	0.169	50	0.0859	0.497
30	0.0189	0.181	51	0.0910	0.516
31	0.0212	0.194	52	0.0960	0.536
32	0.0230	0.206	53	0.102	0.555
33	0.0247	0.219	54	0.107	0.578
34	0.0274	0.231	55	0.113	0.599
35	0.0293	0.246	56	0.120	0.620
36	0.0318	0.260	57	0.126	0.641
37	0.0357	0.274	58	0.133	0.664
38	0.0383	0.289	59	0.140	0.685
39	0.0410	0.304	60	0.147	0.710
40	0.0444	0.320	61	0.154	0.733
41	0.0483	0.336	62	0.162	0.757
42	0.0514	0.353	63	0.169	0.780
43	0.0541	0.369	64	0.177	0.805
44	0.0584	0.387	65	0.184	0.829
45	0.0619	0.404	66	0.193	0.855

因 F_1 和 F_2 的作用, 使叶片产生的最大弯曲应力分别为

$$\sigma_{1\max} = \frac{M_1}{W_1} \quad \sigma_{2\max} = \frac{M_2}{W_2}$$

总的叶片最大弯曲应力为

$$\sigma_{\max} = \sigma_{1\max} + \sigma_{2\max}$$

3) 机翼形叶片的强度计算。一般机翼形叶片的工作面是弧形。除小型叶片以外, 一般用钢板做成空心。为了增加叶片刚性, 经常在叶片内部加设加强筋板。但在强度计算时, 可不考虑筋板对强度的有利影响, 把整个叶片看作承受均布载荷的梁。当叶片以角速度 ω 旋转时, 单个叶片因本身重量产生的离心力为

$$F = mR\omega^2$$

机翼形叶片见图 7-33。将叶片形状近似按椭圆形考虑, 叶片的重心就是椭圆形的形心 o 。通过 O 点将叶片离心力分解为沿叶片的法向力 F_1 和切向力 F_2 。显然, 离心力 F 方向的抗弯截面模数较大。其强度计算方法与平板直叶片类似, 仅计算 F_1 所产生的弯

曲应力。

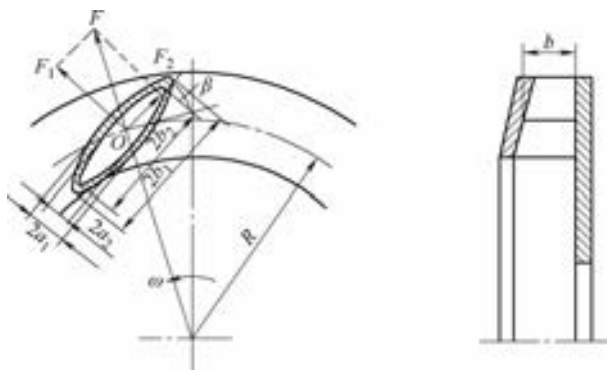


图 7-33 机翼形叶片受力分析

由图 7-33 可知：

$$F_1 = F \cos \beta = mR\omega^2 \cos \beta \quad (7-50)$$

式中， m 为单个叶片的质量(kg)； R 为叶片重心至叶轮中心的距离(m)； β 为半径 R 处叶片的安装角。

叶片的抗弯模数 W_1 可由下式求出：

$$W_1 = \frac{\pi(a_1^3 b_1 - a_2^3 b_2)}{4a_1}$$

按固定梁计算时，叶片的最大弯矩为

$$M_{1\max} = \frac{F_1 b}{12} = \frac{F b \cos \beta}{12}$$

按简支梁计算时，叶片的最大弯矩为

$$M_{1\max} = \frac{F_1 b}{8} = \frac{F b \cos \beta}{8}$$

叶片最大弯曲应力为

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{1\max}}{W_1}$$

(4) 铆钉的强度计算

1) 叶片与前、后(中)盘连接铆钉的最大切应力。当叶轮旋转时，叶片与前、后(中)盘连接的铆钉承受叶片离心力。在计算时，假设叶片与前、后(中)盘连接铆钉承受叶片离心力的 50%，而叶片与后盘的连接铆钉承受叶片离心力的 100%。

铆钉的切应力为

$$\tau = \frac{KF}{\frac{\pi}{4}d^2 z} \quad (7-51)$$

式中， F 为单个叶片的离心力(N)； d 为铆钉直径(m)； z 为铆钉数量； K 为分配系数，

对前盘 $K=0.5$ ，对后盘 $K=1.0$ 。

2) 后盘与轮毂连接铆钉的切应力。当叶轮在转速为 n 、功率为 P 的情况下工作时，其扭矩为

$$M_n = 9550 \frac{P}{n}$$

式中， n 为叶轮转数 (r/min)； N 为风机所需功率 (kW)。

则铆钉的切应力为

$$\tau = \frac{M_n}{R \frac{\pi}{4} d^2 z} = 12200 \frac{P}{R d^2 z n} \quad (7-52)$$

式中， R 为后盘与轮毂连接铆钉所在的圆半径 (m)； z 为铆钉数量； d 为铆钉直径 (m)。

(5) 轮毂 (轴盘) 材料选用的计算 轴盘在选择材料时，可根据轴盘最大直径 d 处的圆周速度 u_i 来确定。图 7-34 为轴盘示意图，其圆周速度 u_i 的计算式为

$$u_i = \frac{\pi n d}{60}$$

式中， d 为轮毂最大直径 (m)； n 为叶轮转速 (r/min)。

当 u_i 小于 30m/s 时，可选用一般铸铁，如 HT250；当 u_i 大于 30m/s 小于 40m/s 时，可选用较高级的铸铁，如 HT350；当 u_i 大于 40m/s 时，应选用铸铁，如 ZG230-450，也可选用经热处理后韧性较高的墨球铸铁，如 QT450-10。

2. 轴流通风机叶片强度计算

(1) 叶片根部拉伸应力的计算 轴流通风机的叶轮在旋转时，叶片上受到离心力和气流流动压力。前者造成拉伸，后者导致弯曲。在扭曲叶片中，离心力也会造成弯曲。离心力和由它所引起的应力在叶片顶端为零，向叶根逐步增大，到叶片根部时达到最大值。作用在叶片上的总离心力 F_c 见图 7-35，其计算式如下：

$$F_c = m \omega^2 r_c \quad (7-53)$$

式中， m 为叶片质量 (kg)； r_c 为叶片重心至叶轮中心的距离 (m)； ω 为叶轮旋转角速度 (1/s)。

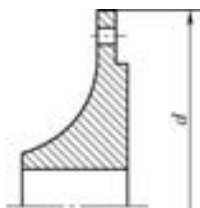


图 7-34 轴盘示意图

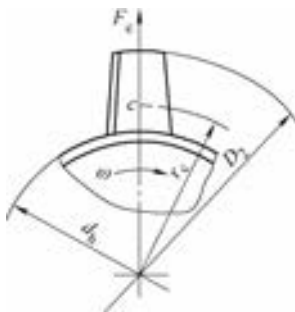


图 7-35 轴流通风机叶片拉伸计算图

叶片根部的拉伸应力为

$$\sigma_c = \frac{F_c}{A} \quad (7-54)$$

式中, A 为对于叶片焊接在轮毂上的叶轮, A 为焊缝面积, 对于叶片通过叶柄固定在轮毂上的叶轮, A 指叶柄的横截面积(m^2)。

(2) 最大弯曲应力的计算 气流流动压力引起的荷载力 F_h 可以分解为切向力 F_u 和轴向力 F_z , 如图 7-36 所示。计算时, 假设荷载力作用在叶片平均半径的位置上。

切向力 F_u 决定于传动功率、叶片数和叶片平均半径处的圆周速度, 其计算式如下:

$$F_u = \frac{1000P}{zu_m} \quad (7-55)$$

式中, P 为轴功率(kW); z 为叶片数; u_m 为叶片平均半径处的圆周速度(m/s)。

轴向力 F_z 决定于叶轮产生的静压差、叶片长度和叶片平均半径圆周上的节距, 其计算式如下:

$$F_z = \Delta F_{st} l t \quad (7-56)$$

式中, ΔF_{st} 为叶轮产生的静压差(Pa); l 为叶片全长(m); t 为叶片平均半径圆周上的节距(m)。

荷载力 F_h 等于切向力 F_u 和轴向力 F_z 的合力, 即

$$F_h = \sqrt{F_u^2 + F_z^2}$$

为了求得气流荷载力 F_h 引起的弯矩, 先要根据叶轮图确定叶片根部截面的法线与圆周切线之间的夹角 θ_h , 以及荷载力 F_h 与圆周切线之夹角 θ_p 。

在叶片长度 l 方向上受到的扭矩为

$$M_h = F_h \cdot \frac{1}{2} \cos(\theta_h + \theta_p) \quad (7-57)$$

最大弯曲应力 σ_h 出现在叶片根部, 其值为

$$\sigma_h = \frac{M_h}{W} \quad (7-58)$$

式中, W 为叶片根部截面的抗弯模数(m^3)。

叶片根部总的应力为拉伸应力和弯曲应力之和, 即

$$\sigma_y = \sigma_c + \sigma_h$$

(3) 强度校验 强度校验是根据安全系数 n 来判定。当安全系数 n 满足下式时, 强度符合要求, 即

$$n = \frac{\sigma_s}{\sigma_y} \geq [n] \quad (7-59)$$

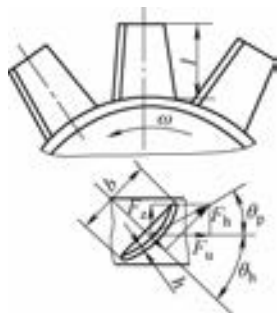


图 7-36 轴流通风机叶片上的气流荷载力

式中, σ_s 为屈服强度(Pa); σ_y 为叶片根部总的应力(Pa); $[n]$ 为许用安全系数, 取 $[n] = 5$ 。

7.6 主轴的强度计算

1. 计算准则

通风机主轴的工作能力首先要满足强度要求。一般先采用类比法初步估计轴的直径; 再根据轴的结构工艺要求进行结构设计, 定出轴的形状、尺寸; 然后进行强度验算。

通风机的轴在运转中受径向力、轴向力的作用, 同时还受转矩的作用, 处于复合应力状态。必须按照具体情况, 分别求出主轴承受的最大弯矩和转矩; 然后求出两者所引起的合成应力 σ_n 。其计算准则为

$$\sigma_n \leq [\sigma] \quad (7-60)$$

式中, $[\sigma]$ 为轴的许用应力(Pa)。

2. 轴的最大弯矩

(1) 叶轮重量与其不平衡力 叶轮经过平衡以后, 仍有允许的残余不平衡重量。此重量造成叶轮重心与主轴旋转中心线有一定的距离。此距离一般为 $1.0 \times 10^{-5} \sim 1.5 \times 10^{-5} \text{m}$ 。为了安全起见, 计算时取 $2.0 \times 10^{-5} \text{m}$ 。由于叶轮重心与主轴旋转中心线不一致, 产生的不平衡力 F_1 为

$$F_1 = 2.0 \times 10^{-5} \omega^2 m_1 = \left(\frac{n}{2135} \right)^2 m_1 \quad (7-61)$$

式中 ω 为叶轮旋转角速度(1/s); n 为叶轮最大转速(r/min); m_1 为叶轮质量(kg)。

叶轮重量与其不平衡力之和 G_1 为

$$G_1 = m_1 g + F_1 = \left[g + \left(\frac{n}{2135} \right)^2 \right] m_1 \quad (7-62)$$

(2) 带轮重量与带拉力之和 当离心通风机用 V 带传动时, 带拉力 F_2 为

$$F_2 = \frac{28653P}{nD} \quad (7-63)$$

式中, n 为主轴最大转速(r/min); P 为通风机最大需用功率(kW); D 为带轮节圆直径(m)。

带轮重量与带拉力之和 G_2 为

$$G_2 = m_2 g + F_2 = m_2 g + \frac{28653P}{nD} \quad (7-64)$$

式中, m_2 为带轮质量(kg)。

(3) 轴的最大弯矩 通风机一般采用的传动方式, 除电动机直联传动的 A 式外, 其他传动方式如图 7-37 所示。轴流通风机计算与离心通风机中对应的传动方式计算相似。

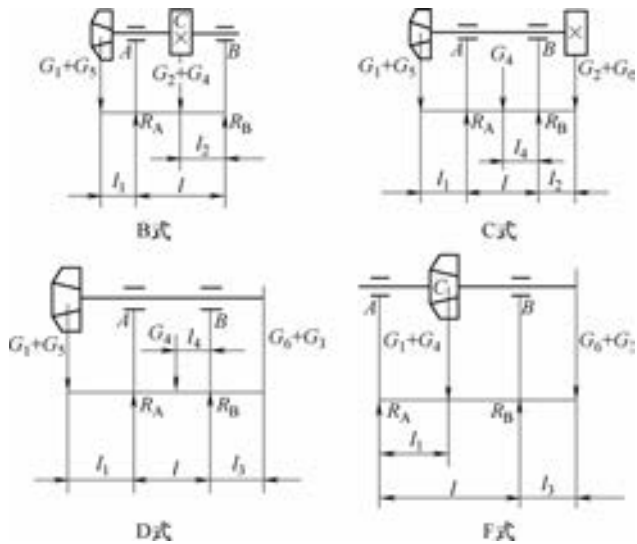


图 7-37 离心风机传动方式示意图

图 7-37 中, A 和 B 两个支点的反作用力为 F_{RA} 、 F_{RB} , A、B、C 处的弯矩为 M_A 、 M_B 和 M_C 。下面分别介绍各种型式的反作用力和弯矩的计算公式。

1) 对于 B 式, 反作用力和弯矩的计算公式如下:

$$F_{RA} = \frac{(G_1 + G_5)(l + l_1) + (G_2 + G_4)l_2}{l}$$

$$F_{RB} = G_1 + G_2 + G_4 + G_5 - F_{RA}$$

$$M_A = (G_1 + G_5)l_1$$

$$M_C = R_B l_2$$

2) 对于 C 式, 反作用力和弯矩的计算公式如下:

$$F_{RA} = \frac{(G_1 + G_5)(l + l_1) + G_4 l_4 - (G_2 + G_6)l_2}{l}$$

$$F_{RB} = G_1 + G_2 + G_4 + G_5 + G_6 - F_{RA}$$

$$M_A = (G_1 + G_5)l_1$$

$$M_B = (G_2 + G_6)l_2$$

3) 对于 D 式, 反作用力和弯矩的计算公式如下:

$$F_{RA} = \frac{(G_1 + G_5)(l + l_1) + G_4 l_4 - (G_3 + G_6)l_3}{l}$$

$$F_{RB} = G_1 + G_3 + G_4 + G_5 + G_6 - F_{RA}$$

$$M_A = (G_1 + G_5)l_1$$

$$M_B = (G_3 + G_6)l_3$$

4) 对于 F 式, 反作用力和弯矩的计算公式如下:

$$F_{RA} = \frac{(G_1 + G_4)(l - l_1) - (G_3 + G_6)l_3}{l}$$

$$F_{RB} = G_1 + G_3 + G_4 + G_6 - F_{RA}$$

$$M_C = F_{RA}l_1$$

$$M_B = (G_3 + G_6)l_3$$

式中, G_3 为联轴器重量(N); G_4 为两支撑间轴的重量(N); G_5 为悬臂轴, 叶轮端轴的重量(N); G_6 为悬臂轴, 带轮或联轴器端轴的重量(N); l 为两支撑间轴的跨距(m); l_1 为支撑点 A 至叶轮重心的距离(m); l_2 为支撑点 B 至带轮重心的距离(m); l_3 为支撑点 B 至联轴器重心的距离(m); l_4 为支撑点 B 至支撑间轴重心的距离(m);

在计算轴的最大弯曲应力时, 应从 M_A 、 M_B 和 M_C 中取最大弯矩 M_{\max} 。

3. 轴的转矩和复合应力

(1) 轴的转矩 M_n (N·m) 计算 可按下式计算:

$$M_n = 9551 \frac{P}{n}$$

式中, P 为通风机的功率(kW); n 为叶轮的转速(r/min)。

(2) 复合应力的计算 主轴受弯矩和转矩联合作用时, 如图 7-38 所示, 复合应力应为扭转剪应力与最大弯曲应力的合应力, 计算方法如下:

1) 扭转剪应力 τ (Pa) 为

$$\tau = \frac{M_n}{W_1} = \frac{M_n}{\frac{\pi}{16}d^3} = \frac{M_n}{0.2d^3} \quad (7-65)$$

式中, d 为安装叶轮处的轴径(m)。

2) 最大弯曲应力 σ_w (Pa) 为

$$\sigma_w = \frac{M_{\max}}{W_1} = \frac{M_{\max}}{\frac{\pi}{32}d^3} = \frac{M_{\max}}{0.1d^3} \quad (7-66)$$

3) 轴的最大复合应力 σ_{\max} (Pa)

$$\sigma_{\max} = \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} = \sqrt{\left(\frac{M_{\max}}{0.1d^3}\right)^2 + \left(\frac{2M_n}{0.2d^3}\right)^2} = \frac{\sqrt{M_{\max}^2 + M_n^2}}{0.1d^3} \quad (7-67)$$

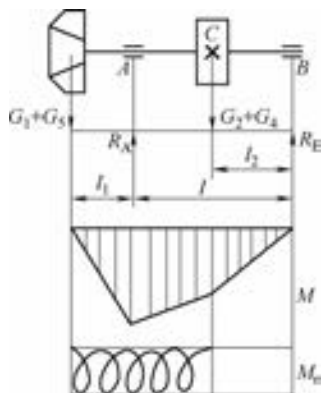


图 7-38 主轴受力分析

第 8 章 通风机噪声

8.1 声波和噪声

1. 声波的传播速度

声波是在弹性媒质中传播的一种机械波。众所周知，声波在空气中的传播可以认为按绝热过程变化：

$$p/\rho^k = \text{常数} \quad (8-1)$$

$$dp/d\rho = \text{常数} \times \kappa \rho^{\kappa-1} = \kappa p/\rho$$

理想气体：

$$p/\rho = RT$$

所以声速 c (m/s) 表示为

$$c = \sqrt{dp/d\rho} = \sqrt{\kappa RT} \quad (8-2)$$

式中， R 为气体常数 [J/(kg·K)]； κ 为等熵指数。

从式(8-2)可以看出，声音是随温度变化。0℃时空气的声速为 331.5m/s。当温度为 t ℃时，空气声速 c (m/s)按式(8-3)计算：

$$c = 331.5 + 0.61t \quad (8-3)$$

2. 声波的频率和波长

空气分子的运动，即声波的压力变化见图 8-1，可以用正弦曲线来描述。图中，声压从 c_1 经过某一时间到达 c_4 ，以后呈周期变化。若一周期所需的时间为 T ，则 1s 内振动的次数即为频率，其值为

$$f = 1/T \quad (8-4)$$

波线上一个完整的声波长度，即在一个周期中传播的距离，称为波长，用 λ 表示。波长 λ ，声速 c ，频率 f 是声波的三个基本声学量。其相互关系如下：

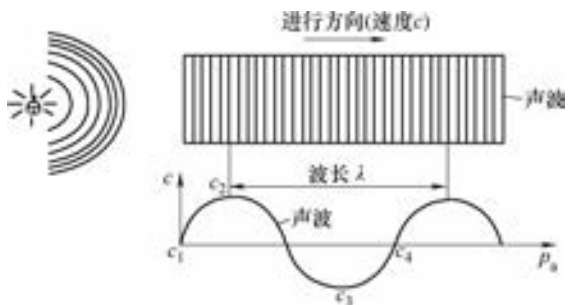


图 8-1 正弦声波

$$\lambda = c/f \quad (8-5)$$

从式(8-5)可以看出，波长 λ 与频率 f 成反比。也就是说，声音的频率高，波长就短，反之亦然。

声波的频率可以有高低不同,一定频率范围的声波作用于人耳就会产生声音的感觉。常温空气下,人耳能够引起声音感觉的频率是 20~20000Hz 的范围,此频率下的声波称为可闻声。频率超过 20000Hz 的称为超声波;频率低于 20Hz 的声波称为次声波。通常所说的声波一般是指可闻声。这种性质就是频率特性。常温空气下的频率与波长的关系见表 8-1。

表 8-1 频率与波长关系

频率/Hz	20	50	100	200	500	1000	2000	5000	10000	20000
波长/m	17	6.8	3.4	1.7	0.68	0.34	0.17	0.068	0.0034	0.0017

3. 声波的反射和吸收

当声波遇到障碍物时,如果障碍物大于声波波长,声波将被反射并在障碍物后形成一个声影区,见图 8-2。噪声控制中,利用声波反射原理,可以达到隔声的目的。当声波遇到障碍物时,一部分被反射,一部分向障碍物内部传播,由于摩擦阻尼,声能将转化为热。因此,声波每反射一次,就有部分声能被吸收,声能将逐渐衰减,这种现象称为声的吸收。实验指出,不同媒质对声波的吸收是不同的。一般选用多孔性物质作为吸声材料。声波进入孔隙,声能由于粘滞阻力及细小纤维的振动而转化为热量,从而可以达到吸声目的。

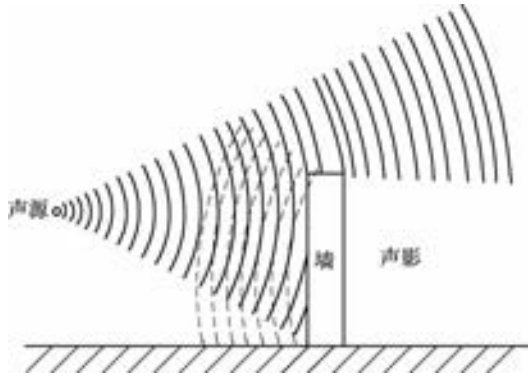


图 8-2 声的反射

声波在室内传播时,即使声源停止发声,由于声波在室内多次反射和吸收,声波会继续在室内存留一段时间,这种现象称为混响。

噪声的控制,除了根本上控制噪声源外,主要就是利用声波的反射和吸收。

4. 噪声

所谓噪声,就是人所不需要的声音的总称。空气动力性噪声,是由气体的冲击、涡流等原因,使气体产生振动所引起的气体脉动声。噪声是声波的一种强烈传播形式,因此具有声波的一切特性。

噪声控制具有重大的社会意义和经济意义,近年来,已经发展成为一门新兴的学科。

8.2 声强与声强级

声波在弹性媒质中的传播过程,也就是能的传播过程。某一点的声强,是指该点在

单位时间内通过垂直于声传播方向的单位面积上声波的能量。

设想在媒质中密度为 ρ 、面积为 A 的单位体积流体，当某一平面波以声速 c 通过它时，使得该单位体积流体获得动能和弹性位能。声波的能量等于这两种能量之和，即为媒质中该单位体积流体所获得的总能量。

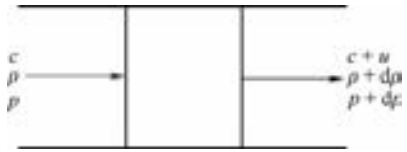


图 8-3 声波前后的流动

图 8-3 所示，根据连续条件有：

$$\rho A c = (\rho + d\rho) A (c + u)$$

声波传播速度 c 比流体质点本身的移动速度 u 大得多，将上式展开并忽略 $d\rho \cdot u$ 后，声速 c 可写成

$$c = -\frac{\rho}{d\rho} u \quad (8-6)$$

弹性力所做的功，即单位体积流体的弹性位能为

$$E_p = -p \frac{dV}{V} = p \frac{d\rho}{\rho}$$

由式(8-2)知： $d\rho = \frac{d\rho}{c^2}$ ，代入上式后，得

$$E_p = \frac{p}{\rho c^2} d\rho = \frac{1}{2} \frac{(d\rho)^2}{\rho c^2} \quad (8-7)$$

单位体积流体具有的动能如下：

$$E_k = \frac{\rho}{2} u^2 = \frac{c^2}{2} \frac{(d\rho)^2}{\rho} = \frac{1}{2} \frac{(d\rho)^2}{\rho c^2} \quad (8-8)$$

媒质中单位体积流体所获得的总能量如下：

$$E = E_p + E_k = \frac{(d\rho)^2}{\rho c^2} \quad (8-9)$$

由于声波以声速 c 传播，故单位时间内通过垂直于声传播方向的单位面积上声的能量为

$$I = E c = \frac{(d\rho)^2}{\rho c} \quad (8-10)$$

式中， I 为声强 (W/m^2)； ρ 为媒质密度 (kg/m^3)； $d\rho$ 为声压 (Pa)。

正常人耳引起听觉的声强为 $10^{-12} \text{W}/\text{m}^2$ (称为听阈声强)，引起人耳听觉疼痛的声强是 $10 \text{W}/\text{m}^2$ (称为痛阈声强)。从痛阈到听阈，声强比值达 10^{13} 倍，数值过大，极不方便。况且声音的强弱只有相对意义，所以声强绝对值实际上是不怎么经常用的。为了方便起见，选用正常人耳的听阈声强值作为基准声强，并用对数表示，则 L_I (dB) 为：

$$L_I = 10 \lg \frac{I}{I_0} \quad (8-11)$$

式中, L_I 为声强级(dB); I_0 为基准声强(W/m^2), $I_0 = 10^{-12} \text{W}/\text{m}^2$ (听阈声强), 这样基准声强下的听阈声就是零分贝。

8.3 声压与声压级

1. 声压和大气压

声波是一种传播在媒质中的疏密纵波。由于声波的存在与传播, 引起大气压发生变化, 这个压力的变化量就称为声压, 量的符号为 p , 单位是 Pa。

在稳定流动中, 若考虑有一体积为 V 的微元气体, 该微元体积在没有声波作用时, 压力为 p , 密度为 ρ 。当在声波作用下, 压力变为 $p + dp$, 密度为 $\rho + d\rho$, 由式(8-1)可得

$$\frac{p + dp}{p} = \left(\frac{\rho + d\rho}{\rho} \right)^\kappa$$

若密度的变化 $d\rho/\rho$ 以 s 来表示, 将 $s = d\rho/\rho$ 称为压缩率, 则上式可以写成

$$\frac{p + dp}{p} = (1 + s)^\kappa \approx 1 + \kappa s \quad (8-12)$$

所以声压 dp 与大气压 p 的关系可以表示为

$$dp = \kappa s p \quad (8-13)$$

式(8-13)说明, 声压的瞬时值近似等于当时的大气压 p 和 κs 的乘积。

2. 声压随时间的变化

单位质量的微元体积 V , 当按绝热过程变化时, 则

$$pV^\kappa = \text{常数} \quad (8-14)$$

将式(8-14)微分, 得 $dp/p = -\kappa dV/V$

设 $dp = \rho$, $dV = v$ 于是上式为

$$\rho/p = -\kappa v/V \quad (8-15)$$

将式(8-15)对时间 t 微分, 则声压对时间的变化为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\kappa \frac{p}{V} \frac{\partial v}{\partial t} \quad (8-16)$$

若微元气体 $ABCD$ 如图 8-4 所示, 当声波沿 x 方向传播时, 设单位面积 AB 面上的位移为 ξ , 由于声波的作用, 则 CD 面上的位移变为 $\xi + \Delta\xi$, 于是微元气体的体积变化量 v 为

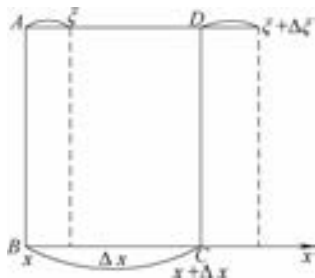


图 8-4 微元气体 $ABCD$

$$v = (\xi + \Delta\xi) - \xi = \frac{\partial\xi}{\partial x}\Delta x$$

设微元气体的单位体积 $V = \Delta x$ ，则有

$$v = \frac{\partial\xi}{\partial x}V \quad (8-17)$$

因声波作用，媒质质点的振动速度 u 为

$$u = \frac{\partial\xi}{\partial t} \quad (8-18)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = V \frac{\partial u}{\partial x} \quad (8-19)$$

将式(8-19)代入式(8-16)，最后得到声压随时间变化的关系式如下：

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\kappa p \frac{\partial u}{\partial x} \quad (8-20)$$

3. 声压的有效值

从上面介绍可知，声压在某一时刻的瞬时值是随时间而变化的。一周期内声压的最大瞬时值称为极大值或幅值。一般是采用声压的有效值。所谓的声压有效值 p_e ，是指一周期内声压变化的均方根平均值，即

$$p_e = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2 dt} \quad (8-21)$$

对于正弦声波，当声压极大值为 p_m ，则其声压有效值 p_e 为

$$p_e = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p_m^2 \sin^2 \omega t dt} = \frac{p_m}{\sqrt{2}} \quad (8-22)$$

式中， ω 为角频率(1/s)， $\omega = 2\pi f$ 。

当频率不同，而声压有效值分别为 p_1, p_2, \dots ，其合成声压有效值为

$$p_e = \sqrt{p_1^2 + p_2^2 + \dots} \quad (8-23)$$

4. 声压级

前面已叙及，声的能量可以用声强级表示。但由于声强的直接测量比较困难，通常是测出声压。从式(8-10)可知，声强与声压的平方成正比，所以可以用声压来表示声音的强弱，或能量可以用声压级度量，即

$$L_p = 10 \lg \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \lg \frac{p}{p_0} \quad (8-24)$$

式中， L_p 为声压级(dB)； p 为声压(Pa)； p_0 为基准声压，它是频率为 1000Hz 的听阈声压值， $p_0 = 2 \times 10^{-5}$ Pa。

8.4 声压级的合成

普通的环境大多是数个声源同时发声的场合。当数个声源机器同时工作时,其合成声压级要按对数法则进行运算,即按能量叠加规律进行运算(图8-5和图8-6)。

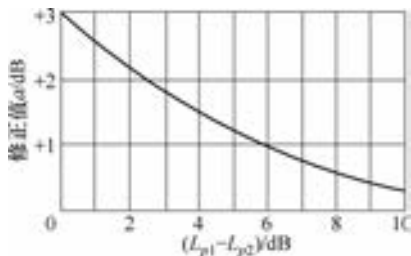


图8-5 声的合成

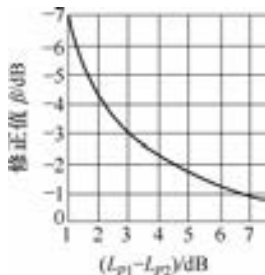


图8-6 环境噪声的修正

现有两个经过测量的声源机器,其声压级分别为 L_{p1} 、 L_{p2} ,若 $L_{p1} > L_{p2}$,则合成声压级按式(8-25)计算:

$$L_p = L_{p1} + a = L_{p1} + 10 \lg \left(1 + \frac{1}{10^{\frac{L_{p1} - L_{p2}}{10}}} \right) \quad (8-25)$$

若求声压级的差时,可按式(8-26)计算:

$$L_p = L_{p1} + \beta = L_{p1} + 10 \lg \left(1 - \frac{1}{10^{\frac{L_{p1} - L_{p2}}{10}}} \right) \quad (8-26)$$

【例题1】 现有两台通风机,单独运行时测得各自的声压级分别为85dB和83dB。求它们同时工作时的声压级。

【解】 按照式(8-25)计算声压级:

$$\begin{aligned} L_p &= L_{p1} + 10 \lg \left(1 + \frac{1}{10^{\frac{L_{p1} - L_{p2}}{10}}} \right) = 85 + 10 \lg \left(1 + \frac{1}{10^{\frac{85 - 83}{10}}} \right) \\ &= 85 + 10 \lg \left(1 + \frac{1}{10^{0.2}} \right) = 85 + 10 \lg \left(1 + \frac{1}{1.58} \right) \\ &= 85 + 10 \lg (1 + 0.63) = 85 + 2.1 = 8.71 \approx 87 \text{ dB} \end{aligned}$$

【例题2】 两台通风机同时工作时的声压级为90dB。之后,其中一台因故障停止运转,声压级变成85dB。求该停止运行的通风机的声压级。

解: 按照式(8-26)进行计算:

$$\begin{aligned}
 L_p &= L_{p1} + 10 \lg \left(1 - \frac{1}{10^{\frac{L_{p1}-L_{p2}}{10}}} \right) = 90 + 10 \lg \left(1 - \frac{1}{10^{\frac{90-85}{10}}} \right) \\
 &= 90 + 10 \lg \left(1 - \frac{1}{10^{0.5}} \right) = 90 + 10 \lg \left(1 - \frac{1}{3.16} \right) \\
 &= 90 + 10 \lg (1 - 0.31) = 90 + 10 \lg (0.69) = 90 + 10 \lg \frac{6.9}{10} \\
 &= 90 + 10 (\lg 6.9 - \lg 10) = 90 + 10 (0.84 - 1) \\
 &= 88.4 \approx 88 \text{ dB}
 \end{aligned}$$

n 个相同声压级的通风机，其合成声压级 L_p (dB) 由下式计算：

$$L_p = L_{p1} + 10 \lg n \quad (8-27)$$

下面将通风机台数 n 与噪声增加值 $10 \lg n$ 的关系作成表 8-2，计算时可直接查表即可，使计算简化。

表 8-2 n 与 $10 \lg n$ 的关系

通风机台数 n /台	2	3	4	5	6	7	8	9	10
噪声增加值 $10 \lg n$ /dB	3	5	6	7	8	8	9	10	10

【例题 3】 有一台通风机单独运转时的声压级是 80dB。求当 2 台、4 台通风机同时工作时的声压级。

解：2 台运转时，查表 8-2， $10 \lg 2 = 3$ ，代入式 (8-27)，得

$$L_p = 80 + 10 \lg 2 = (80 + 3) \text{ dB} = 83 \text{ dB}$$

4 台运转时，查表 8-2， $10 \lg 4 = 6$ ，代入式 (8-27)，得

$$L_p = 80 + 10 \lg 4 = (80 + 6) \text{ dB} = 86 \text{ dB}$$

8.5 声功率与声功率级

声波作为一种波动形式，它必然伴随着能量的传播。声传播的空间称为声场。对于一定的声场来说，声波的能量是恒定的，并可以用声功率和声功率级表示。

声功率就是声源在单位时间内所辐射出来的声波总能量，用符号 W 表示，单位是瓦 (W)。

与声强一样，声功率也可用级表示：

$$L_w = 10 \lg \frac{W}{W_0} \quad (8-28)$$

式中， L_w 为声功率级 (dB)； W_0 为基准声功率， $W_0 = 10^{-12} \text{ W}$ 。

声压、声强、声功率与对应级的换算见表 8-3。前面已经介绍，声功率级与声场有关。对于一定的声场而言，声功率级由该声场中所测定的平均声压级计算而得。作为声

功率级的测量方法，可以分为自由声场法、扩散声场法、半扩散声场法及置换法四种方法。

表 8-3 声压、声强、声功率与对应级的换算

各种级 /dB	声压 /Pa	声强 /(W/m ²)	声功率 /W	各种级 /dB	声压 /Pa	声强 /(W/m ²)	声功率 /W
120	20	1	1	50	0.0063	10 ⁻⁷	10 ⁻⁷
110	6.3	10 ⁻¹	10 ⁻¹	40	0.002	10 ⁻⁸	10 ⁻⁸
100	2	10 ⁻²	10 ⁻²	30	0.00063	10 ⁻⁹	10 ⁻⁹
90	0.63	10 ⁻³	10 ⁻³	20	0.0002	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹⁰
80	0.2	10 ⁻⁴	10 ⁻⁴	10	0.000063	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹
70	0.063	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	0	0.00002	10 ⁻¹²	10 ⁻¹²
60	0.02	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶				

1. 自由声场法

这是在周围无反射面、反射体的球面及半球面的室外，或无回声室内的测量方法。声源声功率级计算分为自由声场法和半自由声场法。

(1) 自由声场法（自由球面）

$$L_w = L_p + 20 \lg r + 11 \quad (8-29)$$

(2) 半自由声场法（半球面）

$$L_w = L_p + 20 \lg r + 8 \quad (8-30)$$

式中， L_p 为测定的平均声压级（dB）； r 为声源中心到测点的距离（m）。

对于球面状传播的点声源，声压级与距离的平方成反比例的衰减，即

$$L_{p2} = L_{p1} - 10 \lg \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 \quad (8-31)$$

即距离增加 10 倍，声压级仅衰减 20dB。例如：距离通风机 1.5m 处测得的声压级为 100dB；15m 处测得的声压级为 80dB；150m 处的声压级则为 60dB。

2. 扩散声场法（混响室法）

这是在具有反射性壁面且任何地点的声压级一定的混响室内的测量方法。若在距声源和壁面为 1m 以上的数个点，所测得的平均声压级为 L_p ，则声源声功率级可以表示为

$$L_w = L_p + 10 \lg V - 10 \lg T - 14 \quad (8-32)$$

式中， V 为室容积（m³）； T 为室内的混响时间（s）。

对于充分扩散的声场，如房间常数为 R ，这时声功率级 L_w （dB）可用下式计算：

$$L_w = L_p + 10 \lg R - 6$$

$$R = \frac{\alpha A}{1 - \alpha} \quad (8-33)$$

式中， α 为室内平均吸声系数 $\alpha = 0 \sim 1.0$ ； A 为室内表面积（m²）。

3. 半扩散声场法

这是介于自由声场和扩散声场的在一般室内的测量方法。声源声功率级 L_w (dB) 计算公式如下:

$$L_w = L_p - 10 \lg \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) \quad (8-34)$$

式中, Q 为声源的指向性系数, 它与声源的位置有关, 其大小可用图 8-7 确定。

4. 置换法 (标准声源法)

这是用一标准声源进行比较测量的方法。所测声源声功率级 L_w (dB) 计算如下:

$$L_w = L_{w0} + (L_p - L_{p0}) \quad (8-35)$$

式中, L_p 为所测得声源数个测点的平均声压级 (dB); L_{p0} 为标准声源工作时, 在同样测点所测得的平均声压级 (dB); L_{w0} 为标准声源的声功率级 (dB)。

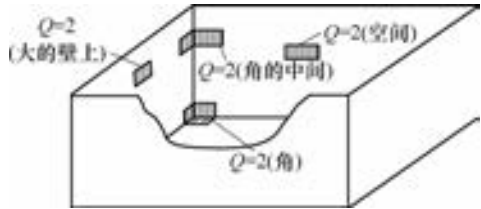


图 8-7 指向性系数 Q

8.6 倍频程和 1/3 倍频程

从声波的频率特性知道, 通常所说的声波, 一般指的是频率为 20 ~ 20000Hz 范围内的可闻波, 其频率有 1000 倍的变化范围。为了测量方便, 往往将这个宽广的频率范围分成若干个小的频段, 即通常所说的频段或频程。频带的编号用每段的中心频率来划分。在噪声测量中最常用的是倍频程和 1/3 倍频程。

1. 倍频程

倍频程是指两个相邻频率之比为 2:1 所确定的频程。若 f_1 为频带的下限频率, f_2 频带的上限截止频率, 则中心频率 f 表示为

$$f = \sqrt{f_1 f_2} = \frac{f}{\sqrt{2}} = \sqrt{2} f_1$$

其中

$$f_2 = 2f_1$$

国际 IEC 规格所规定的常用倍频程见表 8-4。

表 8-4 倍频程

IEC 规格	频带号	1	2	3	4	5	6	7	8
	中心频率/Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
	频率范围/Hz	45	90	180	355	710	1400	2800	5600

2. 1/3 倍频程

为了获得更详细的频谱特性, 则可采用 1/3 倍频程。1/3 倍频程就是将一个倍频程再划分为三段, 其中心频率和频率范围见表 8-5。

表 8-5 1/3 倍频率

频率号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
中心频率/Hz	50	63	80	100	125	160	200	250	310	400	500	630	800	
频率范围/Hz	45	56	71	90	112	140	180	224	280	355	450	560	710	900
频率号	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24			
中心频率/Hz	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000			
频率范围/Hz	900	1120	1400	1800	2240	2800	3550	4500	5600	7100	9000	11200		

8.7 噪声的评价

1. 噪声级

声压级相同而频率不同的声音作用于人耳，人们感觉的声音大小是不相同的。也就是说，声音的大小（响度）是由人们的听觉决定的，即响度是人们对声音强弱的主观度量。

像声压级一样，响度也用响度级 L_N 来表示。即以 1000Hz 的纯音作为基准声音，用 1000Hz 纯音的声压级作为该频率下声的响度级，单位为方（phon）。

英国 Robinson 和 Radson 对不同频率的纯音进行听感试验，得出一组等响曲线，见图 8-8。

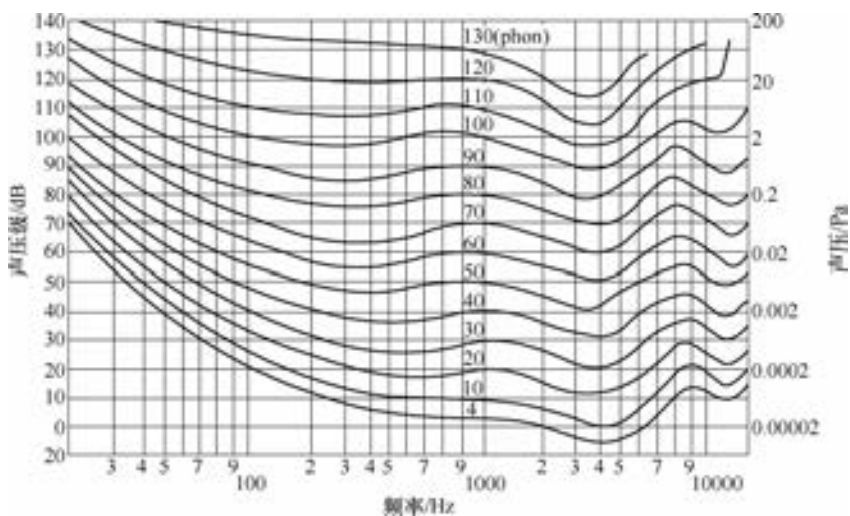


图 8-8 等响曲线

等响曲线中，任一条曲线相当于频率和声压级不同但响度级相同的声音。最下面的一条曲线是听阈线，最上面的曲线是痛阈线。听阈线和痛阈线之间是正常人耳的全部可听声音。在噪声测量仪——声级计中，为了使接受的声音按不同程度滤波，根据等响曲

线，一般设置计权网络 A、B、C 特性。

图 8-9 所示的声级计计权网络特性中，A 声级是相当于人耳对 40 方纯音的响度级。它使接受的声音通过时，在低频段（500Hz 以下）不敏感并有较大的衰减，而在高频段则比较敏感，这恰与正常人耳的感觉一致。所以在噪声测量中，往往都 A 计权网络测得的声压级代表噪声的级，称为 A 声级，记作 L_A 。

图 8-9 中，B 声级是相当于等响曲线 70 方纯音的响度级。当接收的声音通过时，在低频段有一定的衰减。该声级一般少用。

图 8-9 中，C 声级是相当于 100 方纯音的响度级。它的特性平坦，并且按 C 特性所得到的噪声级，大约和声压级一致，所以在噪声测量中，若测定声压级时，往往采用 C 特性；如测定噪声级时，一般采用 A 特性和 C 特性同时进行测定。测量时为了掌握噪声特性，也就是说，噪声的成分主要是高频还是低频，可以用 A 声级和 C 声级之差来判断。即当 A 声级和 C 声级之差大时，则该噪声成分是以 1000Hz 以下的低频为主；两者之差小时，可以认为该噪声是以 1000Hz 以上的高频为主成分。

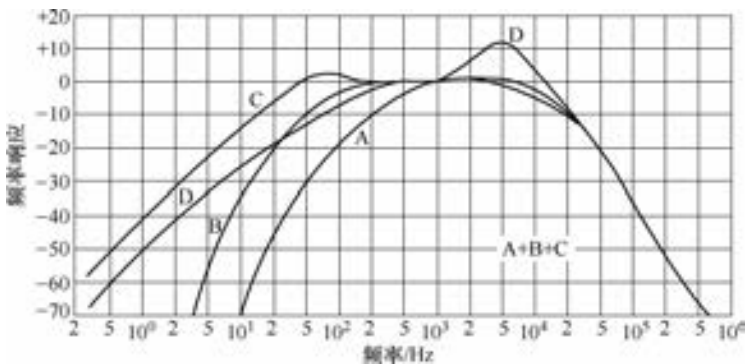


图 8-9 声级计计权网络特性

近年来为了测量飞机的感觉噪声级，在精密声级计中又增加了一个 D 声级特性。

图 8-9 所示为声级计 A、B、C、D 特性。声级计所测得的噪声级称为总噪声级。总噪声级 $SL(A)$ 的大小近似地反应了人耳对噪声响度级的感觉，所以一般用来作为评价噪声的允许标准。

2. 噪声估价数 NR

国际标准化机构 (ISO) 1961 年建议用噪声评价数 NR 作为评定听觉的噪声允许标准。其定义为

$$NR = \frac{l_p - a}{b}$$

式中， L_p 为倍频带声压级 (dB)； a 、 b 为常数，其值可查表 8-6。

当给出噪声允许值 N 后，可按式计算每个频带的允许声压级：

$$L_p = a + bN \quad (8-36)$$

表 8-6 a 和 b 常数值

倍频程中心频率/Hz	a /dB	b /dB	倍频程中心频率/Hz	a /dB	b /dB
63	35.5	0.790	1000	0	1.000
125	22.0	0.870	2000	-3.5	1.015
250	12.0	0.930	4000	-6.1	1.025
500	4.8	0.974	8000	-8.0	1.030

噪声估价曲线见图 8-10。

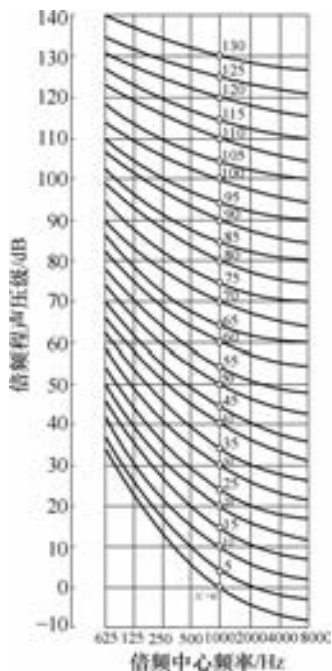


图 8-10 噪声估价曲线

总声级 L_s (A) 与噪声估价数 N 可按式 (8-37) 近似计算:

$$N = L_s(A - 5) \quad (8-37)$$

当 $N > 85$ dB, 则听力就将受到损伤和妨碍。

8.8 通风机噪声产生的原因

通风机的噪声一般比较大。其噪声产生的原因归纳起来有以下三个方面: ①因空气动力所产生的噪声。②由于机械振动所产生的噪声。③空气动力与机械振动两者相互作用所产生的噪声。

无论是通风机还是别的任何机器，了解并掌握产生其噪声的噪声源，乃是噪声控制的最根本而且最有效的方法。

1. 空气动力性噪声

(1) 冲击噪声 叶轮高速旋转时，叶片作周期性运动，空气质点受到周期性力的作用，冲击压力波以声速传播所产生的噪声。

这种噪声随着叶片几何形状和尺寸的不同，噪声强度也不同。若叶轮每秒钟的旋转速度为 n ，当叶片数为 z 时，其基本频率 f_c 由下式计算：

$$f_c = nz \quad (8-38)$$

压力越高，叶轮圆周速度越大，噪声则越大。

(2) 涡流噪声 叶轮高速旋转时，因气体边界层分离而产生的涡流所引起的噪声，称为涡流噪声。涡流噪声的频率按下式计算：

$$f = K \frac{v}{D} \quad (8-39)$$

式中， K 为常数， $K = 1.05 \sim 0.22$ ； v 为叶片相对气体的速度（m/s）； D 为叶片在气体进口方向的宽度（m）。

由于涡流无规则的运动，时而生长，时而衰减，于是使得涡流噪声具有宽广的频率范围。

2. 机械振动性噪声

回转体的不平衡及轴承磨损、破坏等原因所产生的振动，必然伴随有噪声。当叶片刚性不足时，由于气流作用使叶片振动也会产生噪声，称为机械振动性噪声。

3. 两者相互作用产生的噪声

叶片旋转引起自身的振动通过管道传递，往往在管道弯曲部发生冲击和涡流，造成加振使噪声增大；特别是当气流压力声波频率和管道自然振动频率一致时，将发生强烈共振，噪声突然增大，严重时致使机器破坏。此外，通风机的主轴通过电动机、齿轮增速装置或者带传动时，也会引起振动而产生二次噪声。

通风机噪声从声源特性来说，属于偶极子源辐射噪声（或称双源辐射噪声）。指向性图形为 8 字形，在轴向声波较强烈，而与轴垂直的方向声波作用较弱。声源特性见图 8-11。

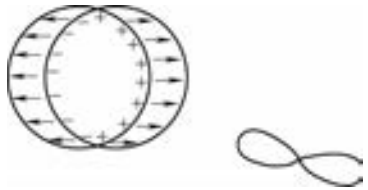


图 8-11 声源特性

8.9 通风机声功率级和比声功率级

1. 通风机声功率级

我们已经介绍，声的能量和声压的平方成比例。所以通风机的声功率级与通风机压力的平方成比例地变化。对于一定形式的通风机来说，气体通过通风机后产生的压力是一定的，这样通风机的声功率级将随着流量的增减而变化。可以推知，当声压一定时，

声的能量将与声的通流面积成比例。

通风机声功率级 L_w 的计算式，可以采用 L. L. Beranek 所提出的公式：

$$L_w = 38 + 10 \lg q_v + 20 \lg p \quad (8-40)$$

式中， q_v 为流量 (m^3/s)； p 为全压 (Pa)。

在通风机噪声控制和测试中，其声功率级往往采用式 (8-41) 计算，

$$L_w = L_p + 10 \lg A \quad (8-41)$$

式中， L_p 为测点上测得的平均声压级 (dB)； A 为风筒截面积 (m^2)。

当考虑空气温度和大气压对声功率级的影响时，式 (8-41) 可写成：

$$L_w = L_p + 10 \lg A + 10 \lg \left(\frac{1.01325 \times 10^5}{p_a} \sqrt{\frac{T}{273}} \right) \quad (8-42)$$

式中， p_a 为大气压力 (Pa)； T 为空气热力学温度 (K)。

如果利用图 8-12 至图 8-14 所示的声功率级的图线，则可很方便地算出最高频率点的声功率级的大小。

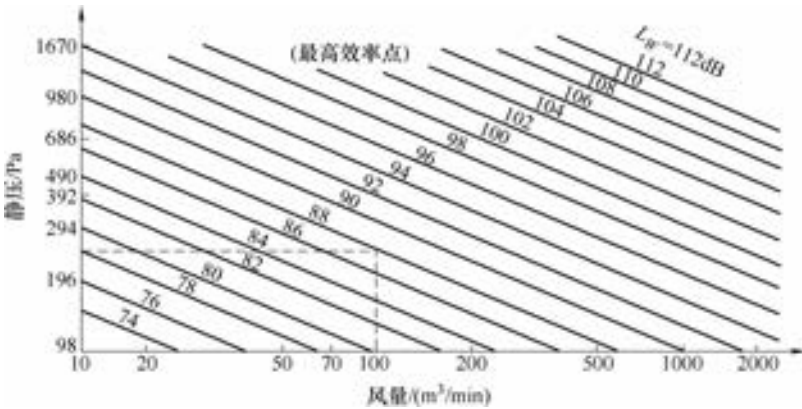


图 8-12 多翼通风机声功率级

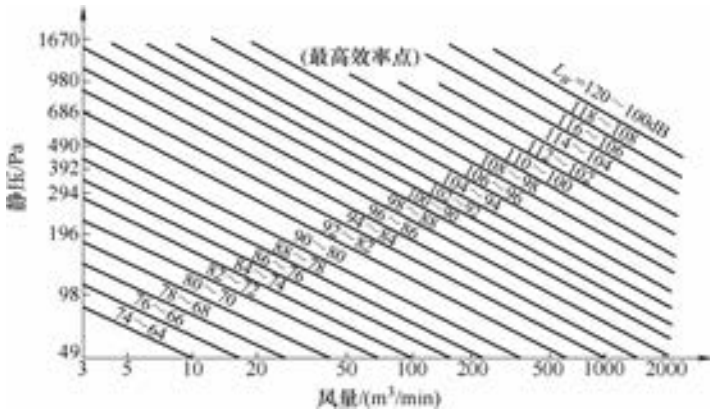


图 8-13 轴流通风机声功率级

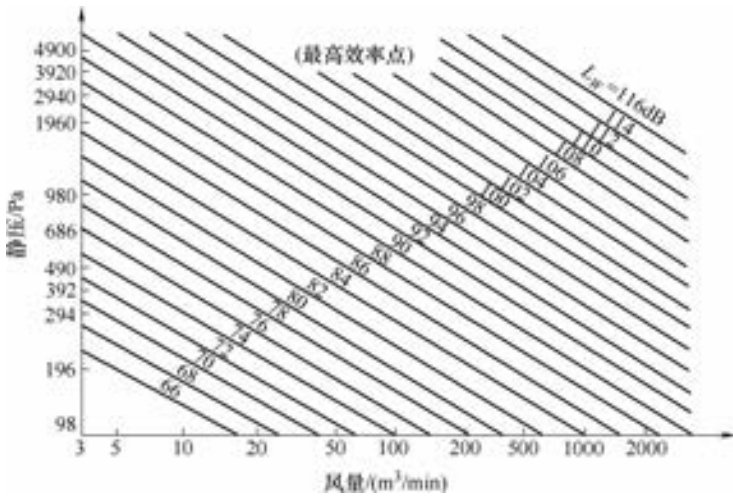


图 8-14 离心通风机声功率级

理论分析和试验研究表明，通风机声源的声功率与叶轮速度的6次方、叶轮直径的平方成正比，即

$$W \propto \rho \xi D_2^2 \frac{u^6}{c^3} = \rho \xi D_2^2 Ma^3$$

式中， ρ 为气体密度； ξ 为阻力系数； D_2 为叶轮直径； u 为叶轮周速； Ma 为马赫数。

图 8-15 示出不同截面旋转叶片噪声与圆周速度的关系。由图可见，试验结果与上式较好地吻合。

2. 通风机的比声功率级

如同比转数可以代表比例设计的系列通风机叶轮性能一样，比声功率级也可用来表示相似通风机在单位风量（ $1\text{m}^3/\text{s}$ ）和单位静压（ $1\text{mmH}_2\text{O}$ ）下运转所产生的噪声声功率级。

通风机的比声功率级 L_{W_s} 可用式（8-43）表示：

$$L_{W_s} = L_W - 10 \lg (q_v p_{st}^2) \quad (8-43)$$

式中， p_{st} 为静压（ mmH_2O ）； q_v 为流量（ m^3/s ）。

表 8-7 列有通风机比声功率级。

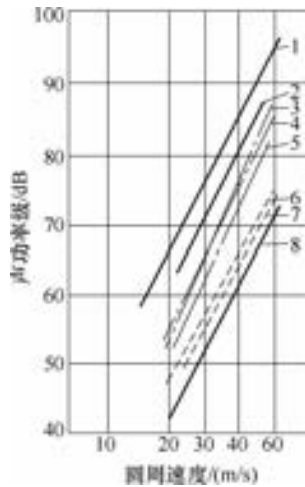


图 8-15 不同截面的旋转叶片噪声与圆周速度的关系

1— $W = \text{常数} \times u^6$ 2~7—不同形式的叶片

8— $W = \text{常数} \times u^{5.5}$

表 8-7 通风机比声功率级

通 风 机 型 号											
4-62			QDG			HDG			4-72		
\bar{q}_V	L_{Ws}	η	\bar{q}_V	L_{Ws}	η	\bar{q}_V	L_{Ws}	η	\bar{q}_V	L_{Ws}	η
0.05	34	0.5	0.1	27	0.68	0.12	35	0.78	0.05	40	0.60
0.1	24	0.68	0.14	23	0.77	0.16	34	0.82	0.10	32	0.70
0.14	23	0.73	0.18	22	0.84	0.20	26	0.85	0.15	22.5	0.81
0.18	25	0.72	0.20	22	0.86	0.25	21	0.87	0.20	19	0.91
0.22	28	0.65	0.24	23	0.86	0.30	23	0.85	0.25	21	0.87
0.26	35	0.60	0.28	28	0.75	0.35	28	0.74	0.30	21	0.76

注： \bar{q}_V —流量系数； η —全压效率。

8.10 通风机噪声和性能的关系

相似理论告诉我们，通风机流量、静压、所需功率具有如下关系：

流量 \propto (尺寸比)³ \times (转速比)

静压 \propto (尺寸比)² \times (转速比)²

所需功率 \propto (尺寸比)⁵ \times (转速比)³

也就是说，尺寸不同，转速相同的两个相似通风机，其流量与尺寸的立方、压力与尺寸的平方、所需功率与尺寸的 5 次方成正比；反之，如果尺寸相同转速不同时，流量、压力、所需功率则分别与转速的 1 次方、2 次方、3 次方成比例。通风机的性能与尺寸、转速的这种相互关系，就是通常说的通风机的比例法则。

Madoson 和 Graham 提出的噪声法则。表 8-8 列出噪声法则和比例法则中的公式。

表 8-8 噪声法则和比例法则中的公式

噪 声 法 则	比 例 法 则
$L_{p1} = L_{p2} + 70 \lg \frac{D_2}{D_1} + 50 \lg \frac{n_2}{n_1} \quad (1-1)$	$\left. \begin{aligned} q_{v2} &= q_{v1} \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2 \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \\ p_2 &= p_1 \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2 \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 \frac{\rho_2}{\rho_1} \\ P_2 &= P_1 \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^5 \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^3 \frac{\rho_2}{\rho_1} \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$
$L_{p2} = L_{p1} + 20 \lg \frac{D_2}{D_1} + 25 \lg \frac{p_2}{p_1} \quad (2-1)$	$\left. \begin{aligned} q_{v2} &= q_{v1} \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{1/2} \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^{1/2} \\ n_2 &= n_1 \left(\frac{D_2}{D_1} \right) \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{1/2} \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^{1/2} \\ P_2 &= P_1 \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{3/2} \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (2-2)$

(续)

噪 声 法 则	比 例 法 则
$L_{p2} = L_{p1} - 80 \lg \frac{D_2}{D_1} + 50 \lg \frac{q_{v2}}{q_{v1}} \quad (3-1)$	$\left. \begin{aligned} n_2 &= n_1 \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^3 \frac{q_{v2}}{q_{v1}} \\ p_2 &= p_1 \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^4 \left(\frac{q_{v2}}{q_{v1}} \right)^2 \frac{\rho_2}{\rho_1} \\ P_2 &= P_1 \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^4 \left(\frac{q_{v2}}{q_{v1}} \right)^3 \frac{\rho_2}{\rho_1} \end{aligned} \right\} \quad (3-2)$
$L_{p2} = L_{p1} - 13.3 \lg \frac{D_2}{D_1} + 16.6 \lg \frac{P_2}{P_1} \quad (4-1)$	$\left. \begin{aligned} q_{v2} &= q_{v1} \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^{4/3} \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{1/3} \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^{1/3} \\ p_2 &= p_1 \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^{4/3} \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{2/3} \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^{1/3} \\ n_2 &= n_1 \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^{5/3} \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{1/3} \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^{1/3} \end{aligned} \right\} \quad (4-2)$
$L_{p2} = L_{p1} + 10 \lg \frac{q_{v2}}{q_{v1}} + 20 \lg \frac{P_2}{P_1} \quad (5-1)$	$\left. \begin{aligned} D_2 &= D_1 \left(\frac{q_{v2}}{q_{v1}} \right)^{1/2} \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{1/4} \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^{1/4} \\ n_2 &= n_1 \left(\frac{q_{v1}}{q_{v2}} \right)^{1/2} \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{3/4} \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^{3/4} \\ P_2 &= P_1 \left(\frac{q_{v2}}{q_{v1}} \right) \frac{\rho_2}{\rho_1} \end{aligned} \right\} \quad (5-2)$

【例题 8-4】今有直径为 1m 的通风机，风量 $q_v = 5 \text{ m}^3/\text{s}$ ，风压 $p_1 = 490 \text{ Pa}$ ，功率 $W_1 = 2.94 \text{ kW}$ ，转速 $n_1 = 700 \text{ r/min}$ ，声压级 $L_p = 90 \text{ dB}$ 。求直径为 1.5m，在转速 1000r/min 下，此通风机的性能和噪声值。

解：因 D ， n 为独立变数，所以按表 8-11 的式 (1-1) 和式 (2-1) 计算：

$$q_{v2} (\text{m}^3/\text{s}) = 5 \times \left(\frac{1.5}{1} \right)^3 \times \left(\frac{1000}{700} \right) = 24$$

$$p_2 (\text{Pa}) = 490 \times \left(\frac{1.5}{1} \right)^2 \times \left(\frac{1000}{700} \right)^2 = 2250$$

$$L_{p2} (\text{dB}) = 90 + 70 \lg \left(\frac{1.5}{1} \right) + 50 \lg \frac{1000}{700} = 90 + 20 = 110$$

8.11 通风机的噪声频谱

在通风机的噪声控制中，如果不知道噪声级和噪声频谱，就无法进行消声器的设计。通风机的噪声频谱是指声压级或声功率级随着频率（倍频带）的变化关系。

为了获得噪声级和频谱特性，用测量仪器现场测定当然是最准确的方法，但由于某些原因，不能得到实测数值时，可由下式求得通风机的声功率级 L_w ：

$$L_w = L_{ws} + 10 \lg(Qp_{st}^2) \quad (8-44)$$

而通风机各频带声功率级则由下式计算：

$$L_{wi} = L_w + \Delta L_w \quad (8-45)$$

式中， L_{wi} 为频带声功率级 (dB)； ΔL_w 为各频带声功率级的修正值 (dB)。

表 8-9 列出我国三种通风机的 ΔL_w 值。

表 8-9 我国三种通风机的 ΔL_w 值

通风机形式	中心频率/Hz							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
	ΔL_w /dB							
离心通风机	-3	-7	-11	-15	-19	-23	-27	-31
多翼通风机	-2	-8	-14	-20	-26	-32	-38	-44
轴流通风机	-9	-7	-6	-6	-7	-10	-13	-17

L. L. Beranek 提出了离心和轴流通风机的声功率级特性曲线，见图 8-16。由图可见，轴流通风机的频谱特性曲线比较平坦，仅在低频和高频段有所降低；离心通风机的频谱特性比较陡斜，声功率级在低频段较高，随着频率的增加，大约以 5dB/倍频程的斜率下降。

图 8-17 为 4-72-11 系列离心通风机的噪声频谱 (最高频率点)。图中实线为平均噪声级频谱曲线，虚线为其变化范围。

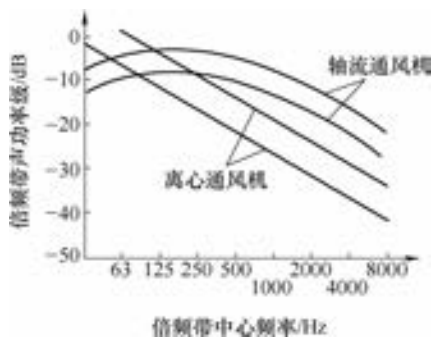


图 8-16 声功率级特性曲线

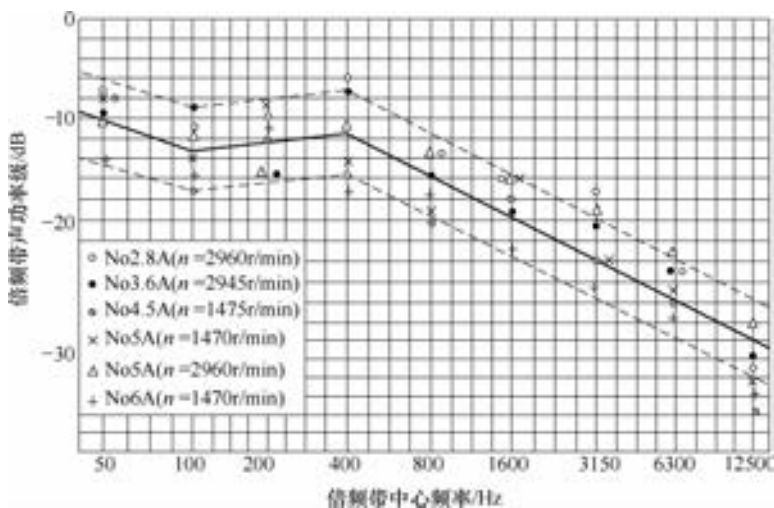


图 8-17 4-72-11 系列离心通风机噪声频谱

8.12 通风机的噪声特性

1. 离心通风机的噪声特性

(1) 后弯叶轮 众所周知，后弯叶片与前弯叶片比较，叶片流道长，气体流动均匀，不易产生涡流，故涡流噪声较小。

以通风机流量系数 \bar{q}_v 为横轴，声压级 L_p 和比声功率级 L_{Ws} 为纵轴的变化关系曲线，称为通风机的噪声特性。

图 8-18 示出后弯式离心通风机的噪声特性和性能关系曲线。从图中可以看出，在最高效率点，通风机噪声最小，随着风量的增加噪声逐渐增大。在最高效率点实测的频率特性如图 8-19 所示。

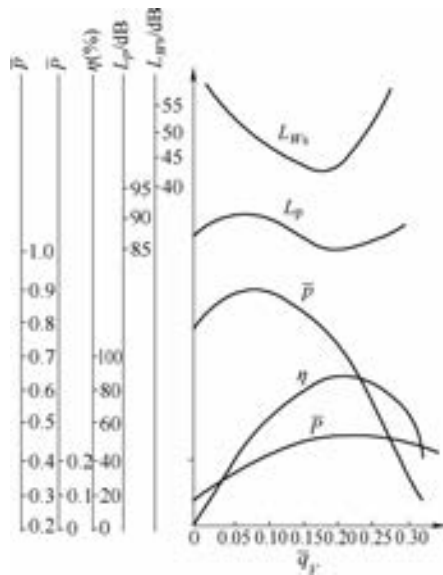


图 8-18 后弯式离心通风机的噪声特性和性能的关系

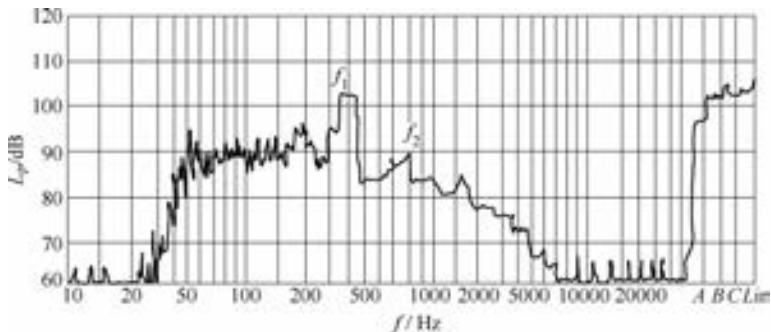


图 8-19 离心通风机噪声频率特性

(2) 多翼叶轮 图 8-20 示出多翼通风机的噪声特性。从图中可以看出，声压级 L_p 在压力线 \bar{p} 的谷部最高。这是由于谷部涡流加剧，致使噪声变大。在最高频率点附近，声压级 L_p 和比声功率级 L_{ws} 几乎不变化，随着风量增加，声压级和比声功率级略有增大的趋势。

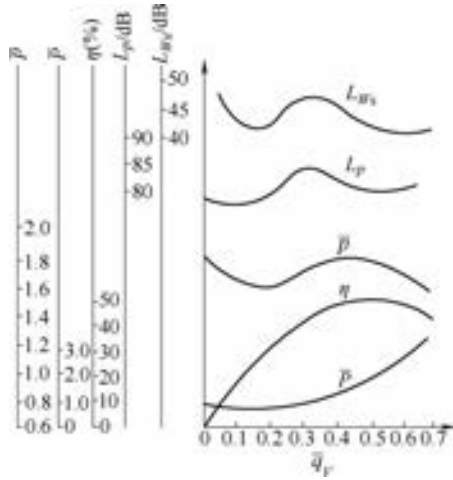


图 8-20 多翼通风机噪声特性和性能的关系

由于前弯叶片通道短，气体流过叶片槽道时容易产生涡流现象，故多翼通风机涡流噪声大。这一点从图 8-21 所示的频率特性中可以看出，在 100Hz 附近的低频范围内，声压级明显增大。

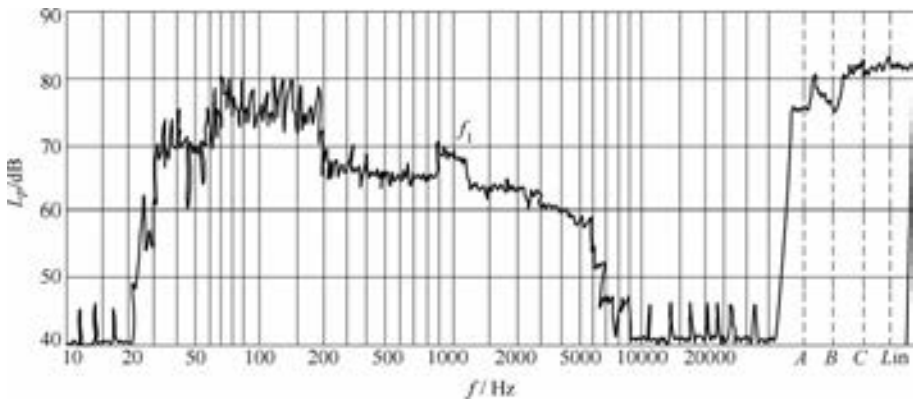


图 8-21 多翼通风机噪声频率特性

2. 轴流通风机的噪声特性

图 8-22 为轴流通风机的噪声特性和性能的关系。由图可知，轴流通风机的噪声特

性与多翼通风机有些类似。也就是说，在压力线的谷部，声压级 L_p 和比声功率级 L_{wi} 最大。这是由于翼形旋转失速，使气流分离产生激烈的旋涡流动所致。

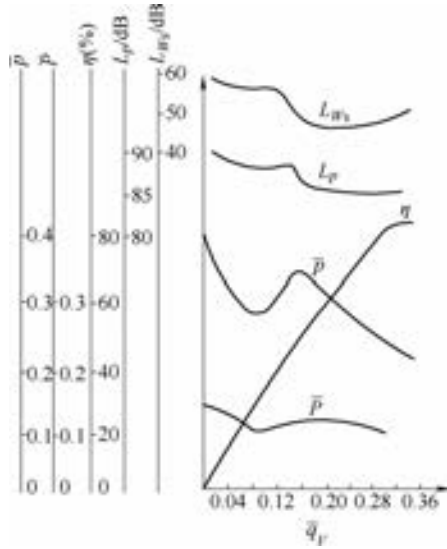


图 8-22 轴流通风机的噪声特性和性能的关系

轴流通风机由于效率高，圆周速度大，一般用于大流量场合。同一风量下，轴流通风机的圆周速度约为离心风机圆周速度的两倍。而噪声随着周速的增加成比例增大，所以轴流通风机的噪声要比离心风机大些。

图 8-23 示出轴流通风机的噪声频率特性。图 8-24 示出我国生产的 4-72 系列离心通风机的噪声特性曲线。

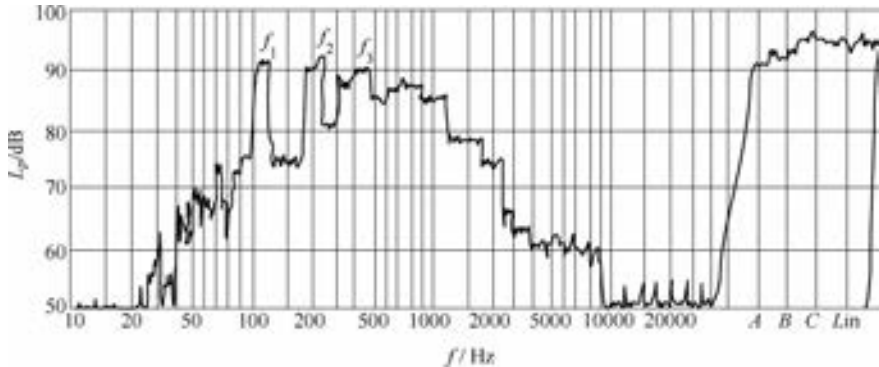


图 8-23 轴流通风机的噪声频率特性

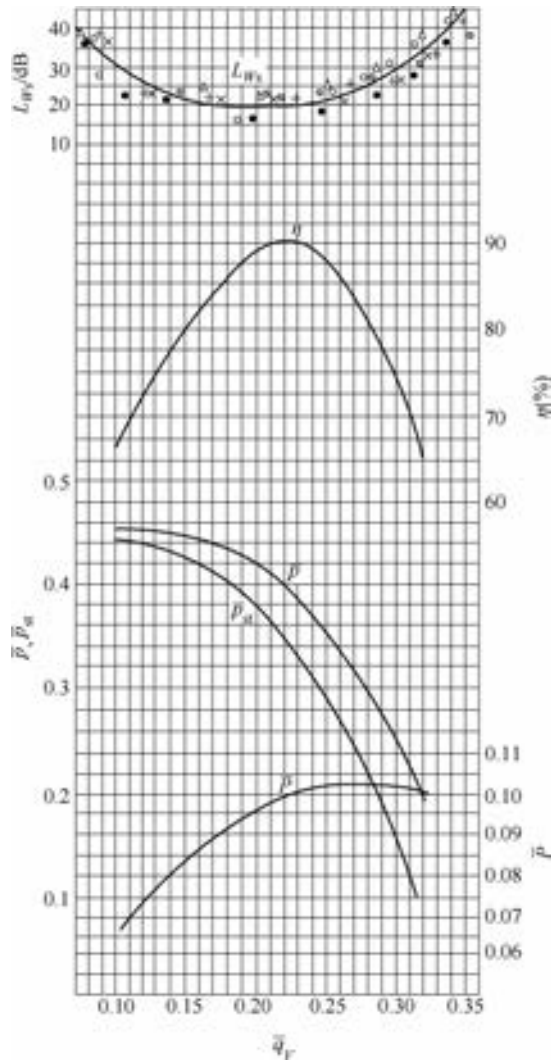


图 8-24 4-72 系列离心通风机的噪声特性曲线

○—No. 2. 8A ($n=2960$) ●—No. 3. 6A ($n=2945$) ⊙—No. 4. 5A ($n=1475$)
 ×—No. 5A ($n=1470$) △—No. 5A ($n=2960$) +—No. 6A ($n=1470$)

8.13 通风机噪声测量仪器

通风机的噪声测量主要采用声级计、频率分析器及声级记录仪。下面分别予以介绍。

1. 声级计

声级计是通风机噪声测量中最常用的一种测量仪器。它不仅可以单独用来测量噪声级，如果和频率分析器或滤波器配合，还可用来进行频谱分析。

根据频率范围和计权网络特性的不同，声级计可分为以下几种。

(1) 普通声级计 频率范围为 31.5 ~ 8000Hz，例如国产 SJ-1 型普通声级计（北京无线电二厂）。

(2) 精密声级计 频率范围为 20 ~ 12500Hz。例如：国产 DSY-2S 型精密声级计（江西红声器材厂）；丹麦 2203 型精密声级计（BNK 公司）等。

(3) 冲击声级计 测量冲击噪声级。PN 声级计（D 特性声级计）用于测量飞机的感觉噪声级。

通风机噪声测量中，主要采用精密声级计和普通声级计。

2. 声级计的工作原理与组成

声级计的组成如图 8-25 所示。声级计的工作原理如下：噪声源的声压信号通过传声器（话筒）转换成电压信号，经放大器放大并通过计权网络补偿，在指示计上显示出 dB 值的大小。

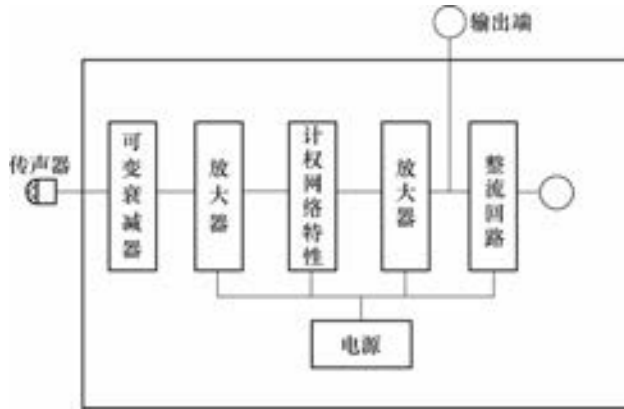


图 8-25 声级计的组成

传声器是声电转换元件。它具有一个薄膜的振动片，当声压变动时，薄膜片振动，通过转换器将薄膜片的机械振动信号变成电压信号传入放大器。根据转换器的不同，传声器分为以下三种。

(1) 压电式传声器 它又称晶体话筒。它是靠具有压电性质的晶体变形而引起电压输出的转换器。其优点是灵敏度较高、结构简单、价格便宜；它的最大缺点是输出性能不稳定。

(2) 电动式传声器 它又称动圈话筒。它是由导体在磁场中运动而产生电压输出的转换器。电动式传声器体积较大，低频时频率响应不平坦，但能在高温下工作。

上面两种传声器一般用于普通声级计。

(3) 电容式传声器 图 8-26 为电容式传声器。如图所示，振动膜板 3 和固定背板 2 相对设置。如果在振动膜板与背板之间加上一直流电压，两者之间便保持一个不变的充电状态。在声压作用下振动膜板 3 振动时，因与固定背板 2 的距离变动，使电容发生变

化；电容的变化使极板之间不断产生和声压相应的充放电电压信号传入放大器。在固定背板2上开有很多小孔，因空气的粘性有着一定的衰减作用，避免共振点的峰值发生。

电容式传声器灵敏度高，在很宽的频率范围内频率响应平直，输出性能稳定，往往用于精密声级计。但电容式传声器成本高，要求稳定的直流偏压，以及必须有前置放大器。

三种传声器的频率特性如图8-27所示。

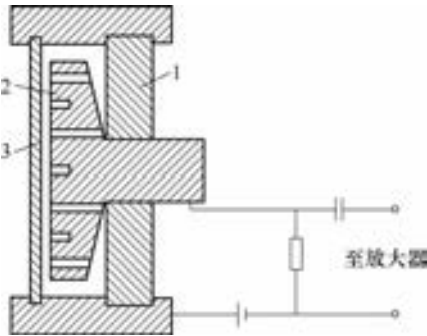


图 8-26 电容式传声器

1—绝缘体 2—固定背板 3—振动膜板

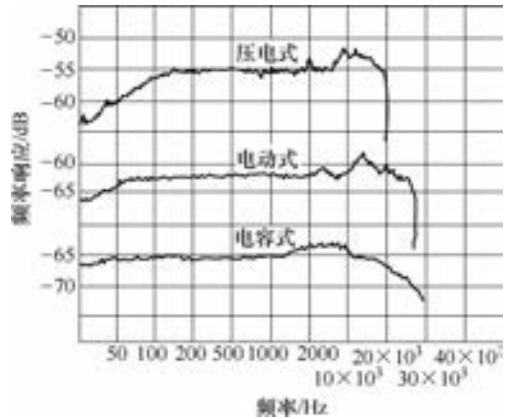


图 8-27 三种传声器的频率特性

声级计一般具有 A、B、C 三种计权网络特性。在通风机噪声测量中，常用 A 声级或 C 声级频率计权网络特性。声级计的频率计权网络特性见图 8-9。声级计的衰减器要求每声级衰减 10dB，放大器要求增益高、放大特性平坦及高的稳定性。

3. 频率分析器

通风机噪声控制和测量中，往往要用频率分析器进行噪声的频谱分析，研究声压计随频率的变化，并找出最大声压级所在的频率范围。目前用得最多的是倍频程分析器，图 8-28 示出倍频程分析器的原理。如图所示，根据倍频程中心频率的不同，并列地设置很多过滤器；从传声器输入的频率信号，逐次切换开关，分别接通各频带过滤器；经放大器通过指示计和记录仪，现实频率声压级大小及频谱分析。

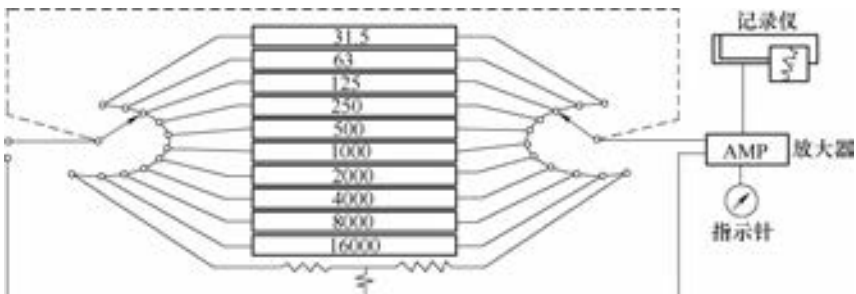


图 8-28 频率分析器的原理图

如果要得到更详细的频谱分析，可以采用 1/3 倍频程分析器。图 8-29 示出倍频程和 1/3 倍频程分析器的衰减特性。

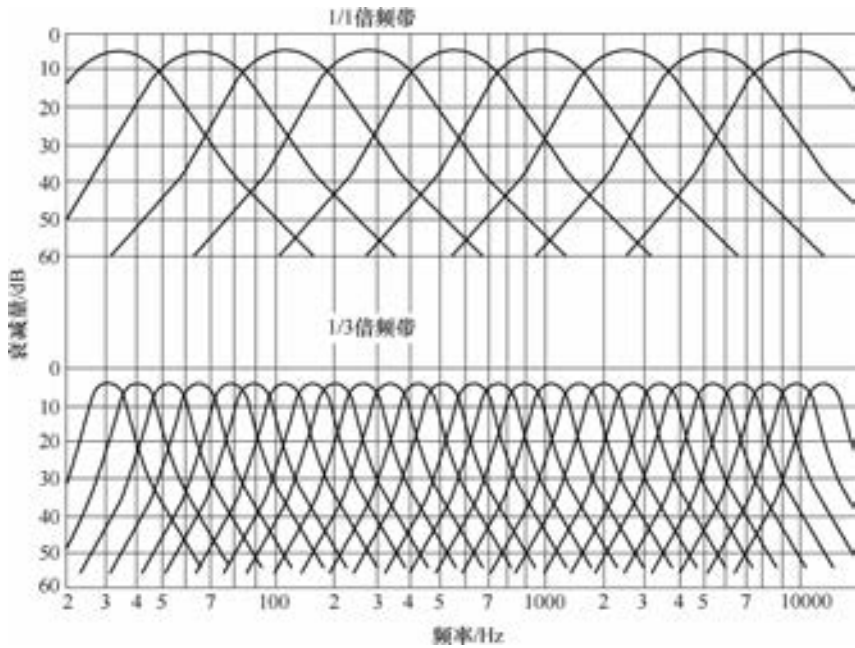


图 8-29 衰减特性

近年来，不少通风机制造厂，将传声放大器或声级计与滤波器装置成一种频谱仪，不仅用来作为噪声级的测量，同时还可以进行噪声频谱分析。

4. 声级记录仪

进行通风机噪声测量时，其噪声级几乎时时刻刻都在变化。为此，一般将声级计与声级记录仪连用，或频率分析器与声级自动记录仪连用，可以方便地测量声级的变化情况和进行频谱分析。如果把记录仪和振动计连用，也可以进行振动测量。

声级记录仪分为电流式、伺服式及动圈式三种。其中伺服式声级记录仪用的最广，图 8-30 为伺服式声级自动记录仪的工作原理图。

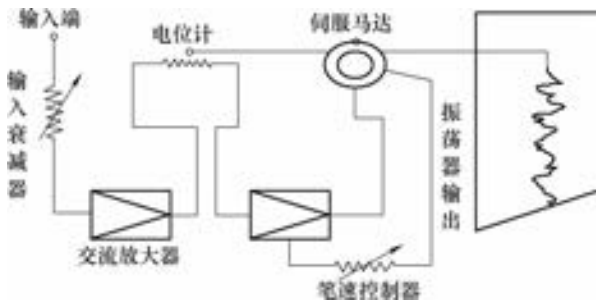


图 8-30 伺服式记录仪原理图

8.14 通风机噪声的测定

通风机的噪声测定是指在室内进行通风机空气动力性能试验时,在不同流量下测定其频带声压级和总声级值,然后换算成相应的声功率级和比声功率级,并作出比声功率级和声压级与流量系数的噪声特性曲线,以及相对总声功率级的频带声功率级与频率关系的噪声频谱特性曲线。

目前我国通风机的噪声测定采用管口法和出口管道法两种方法。管口法为单台通风机出厂试验的噪声测定法;出口管道法为系列通风机的噪声性能试验法。

1. 管口法测定

(1) 环境条件及测试装置

1) 通风机不运转时的环境噪声,其总声压级和各频带声压级,均比通风机运转时的声压级至少低 10dB。

2) 通风机进出气口及周围不要放置障碍物。

3) 噪声测点布置如图 8-31 所示。

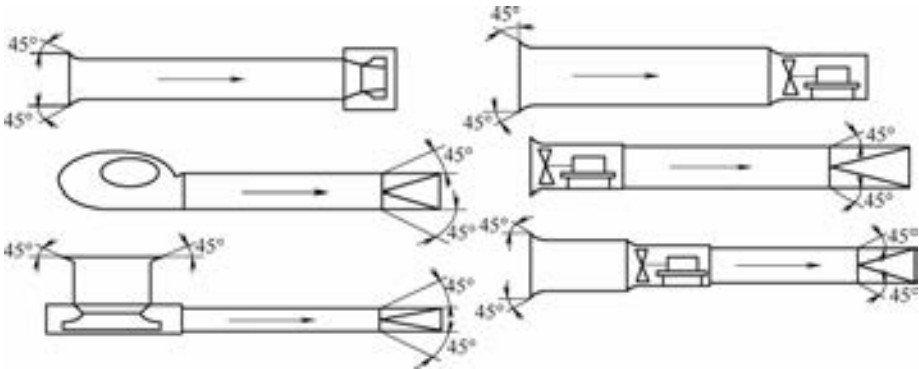


图 8-31 噪声测点布置

测点布置时注意如下:①传声器距风筒中心线的距离应等于风筒直径 D (当 $D \leq 1\text{m}$) 或 1.5m (当 $D = 1\text{m}$ 时),其高度等于风筒中心线高度。②传声器应尽量面向噪声源。③传声器不要离电动机、墙壁和地面太近,以减少电动机和壁面反射声对测试的干扰而影响测量不准确。④测试仪器采用经计量校验的精密声级计和倍频程分析器,或由电容传声器、频谱仪和声级记录仪组成的测量装置。

测试装置组成见图 8-32。传声器前应加防风罩,以防止风的噪声影响测量结果。传声器

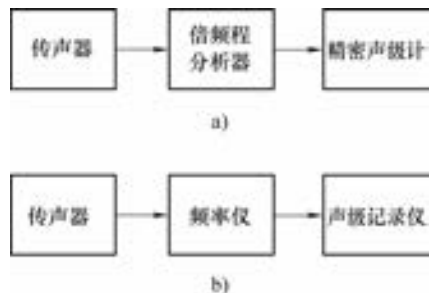


图 8-32 测试装置的组成

后应加延接软杆或延伸电缆，以避免人体靠近传声器而影响测量精度。

有的国家在通风机噪声测量规范中，已规定只在通风机前或出口中心 45° 方向测量一个点作为噪声测定值，并在反吸入侧周围离机壳表面和电动机等 1m 处测量一点作为噪声参考值。

(2) 测量方法 通风机噪声的测定，是在通风机工作状态或近似工作状态下测量其进气口及周围的噪声。当不能在通风机进气口测量时，可在试验风筒的进气口测定。通风机噪声大小，原则上采用总声级 L_{sc} 表示。

测试时，在通风机空气动力性能试验不同工况下，测量其八个倍频带声压级的大小，每种工况点测量 2~3 次，取其读数的平均值。

为了对所测量的数值进行分析，测量时要认真记录各频带声压级和总声压级的大小，并详细记录环境噪声级及频谱。测试房间大小、墙壁饰面吸声情况，测试房间温度和大气压等。

(3) 计算及曲线绘制 通风机噪声的测定，在通风机规定转速和流量下进行。当试验转速 n_2 和规定转速 n_1 不同时，声压级按下式换算：

$$L_{p1} = L_{p2} + 50 \lg \frac{n_1}{n_2} \quad (8-46)$$

式中， L_{p1} 为换算到 n_1 时的声压级 (dB)； L_{p2} 为在转速 n_2 下运转时的声压级 (dB)； $50 \lg \frac{n_1}{n_2}$ 为因转速变化的修正值 (dB)。

将不同流量系数 \bar{q}_v 下测得的声压级和各倍频带中心频率 f 下测得的频带声压级，绘制成通风机噪声特性曲线 $L_p - \bar{q}_v$ 和噪声频谱曲线 $L_p - f$ 。

2. 出口管道法测定

(1) 测试装置 图 8-33 为测试装置示意图。如图所示，通风机出口与风筒之间应加帆布等挠性接头，以防止固定声的传播。在通风机和风筒的全部安装过程中，应采取有效的防振措施。各部尺寸见图 8-33。由此可见，试验管路较长，如 50cm 直径的通风机，则大约需要 5m 长的试验风筒。

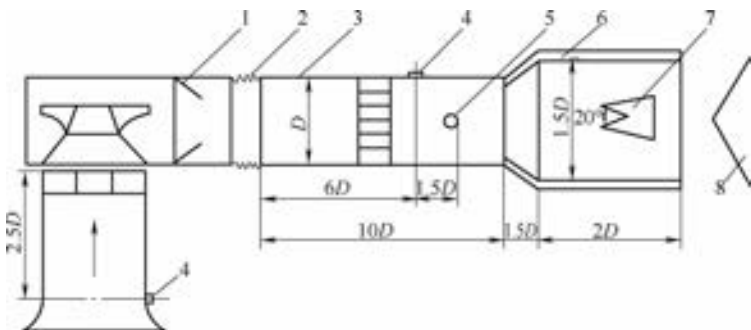


图 8-33 测试装置示意图

1—大小口接头 2—帆布接头 3—风筒 4—静压压力计 5—传声器
6—吸声材料 7—消声尖劈 8—节流门

风筒末端必须是无反射声的消声末端。为此在消声筒壁贴有 2.5cm 厚的聚氨脂泡沫塑料等吸声材料，并设有吸声尖劈。吸声尖劈内填充超细玻璃棉，密度为 40kg/m^3 左右，外包玻璃布或塑料窗纱。

为了防止自然风的影响，传声器应加鼻状锥或放风罩。有无鼻状锥或放风罩对声压级的影响见图 8-34。

测试用仪器的配合关系见图 8-35。当无记录仪时，可用频谱仪或倍频分析器直接读数。测试时的环境噪声总声压级及各频带声压级，应分别比风筒内测点上通风机的相应声压级低 10dB。

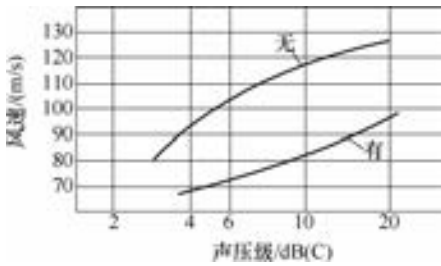


图 8-34 有无鼻状锥和放风罩对声压级的影响

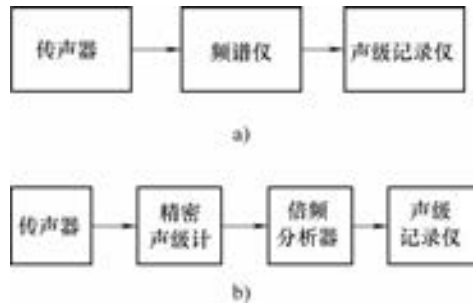


图 8-35 测试仪器的组成

当通风机运行时，风筒外的总声压级及各频带声压级应比风筒内测点上相应的声压级低 8dB。为此最好将通风机进气风筒与出气风筒分置在两个房间；或砌一个简单的隔墙作为管壁隔声处理；或进风管内涂贴吸声材料；或加厚消声末端内壁吸声材料的厚度。

(2) 测试方法 在通风机空气动力性能试验的不同工况下，测量其总声级，声压级及八个倍频带声压级数值，声源不稳定时取其测定平均值。也就是说，当风筒截面上声场比较均匀时，允许只测量风筒中心点的数值，若风筒截面上声场显著不稳定时，应在风筒截面上、下、左、右测 3~5 点，取其平均值。

为了使比声功率曲线较客观地反映该系列通风机的噪声特性，除对模拟通风机进行多次测试外，还应再选三个品种和三种转速进行测量。

(3) 计算及曲线绘制 通风机在不同工况点的总声功率级和各频带声功率级，按式 (8-41) 或式 (8-42) 确定，即

$$L_w = L_p + 10 \lg A$$

或

$$L_w = L_p + 10 \lg A + 10 \lg \left(\frac{1.01325 \times 10^5}{P_a} \sqrt{\frac{T}{273}} \right)$$

通风机的比声功率级由式 (8-43) 确定：

$$L_{ws} = L_w - 10 \lg (q_v p_{st}^2)$$

将不同流量系数 \bar{q}_v 下的比声功率级绘制成 $L_{ws} - \bar{q}_v$ 通风机噪声特性曲线，或频带声功率级和频率的噪声频谱特性曲线。

为了直观起见，有时作出通风机及管道周围的噪声分布曲线，见图 8-36。

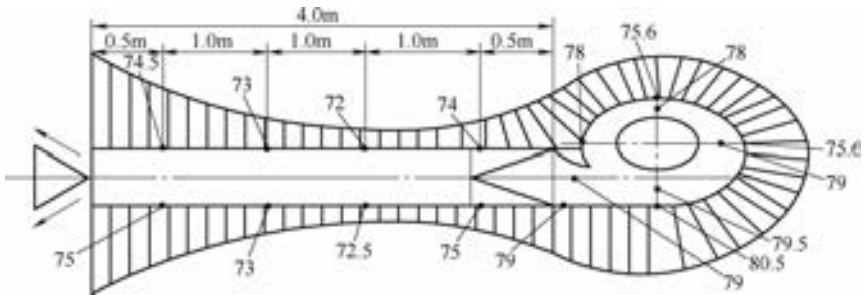


图 8-36 噪声分布曲线

8.15 通风机的噪声控制

通风机噪声控制设计的决定因素是多方面的。一般可以这样考虑：首先由叶轮转速和叶片数，确定通风机的基本频率；然后再分别确定通风机进口或出口，以及机壳、管道、电动机等各处声源声功率级的大小，从而得到通风机声源的总声功率级。

根据允许的噪声值（或要求值），由接收器（噪声接受者或噪声敏感设备）所在环境的噪声级，确定各部声源的减噪量。据此考虑适当的措施，设计通风机的噪声控制技术。

1. 通风机噪声减噪量的确定

(1) 通风机基本频率的确定 通风机的基本频率按式 (8-38) 确定。如果转速 $n = 1750\text{r/min}$ ，叶片数 $z = 9$ 时，通风机的基本频率 f_c 为

$$f_c = \frac{zn}{60} = \frac{9 \times 1750}{60} \text{Hz} = 263 \text{Hz}$$

(2) 各处声功率级 L_w 的决定

1) 进气口（或排气口）的 L_w 。在通风机进气口或排气口，其噪声级最大。通风机进气口（或排气口）的声功率级 L_w 按式 (8-47) 计算：

$$L_w = L_p + 10 \lg 2\pi r^2 \quad (8-47)$$

如果在离进气口中心 1.5m 处，测得的声压级 $L_p = 92\text{dB}$ ，则声功率级 L_w 为

$$L_w = 92 + 10 \lg 2\pi \times 1.5^2 = (92 + 11) \text{dB} = 103 \text{dB}$$

2) 机壳处的 L_{wc} 。通风机机壳处的声功率级 L_{wc} 由式 (8-48) 计算：

$$L_{wc} = L_p + 10 \lg A \quad (8-48)$$

如果机壳表面积 $A = 70\text{m}^2$ ，在 1m 处测得的声压级 $L_p = 83\text{dB}$ ，这时 L_{wc} 为

$$L_{wc} = 83 + 10 \lg 70 = (83 + 18) \text{dB} = 101 \text{dB}$$

3) 管道的 L_{wD} 。通风机管道（或风筒）声功率级 L_{wD} 为

$$L_{wD} = L_p + 10 \lg A$$

如果通风机风筒截面积 $A = 42\text{m}^2$ ，离风筒表面 1m 处测得的 $L_p = 84\text{dB}$ ，则 L_{wD} 为

$$L_{WD} = 84 + 10 \lg 42 = (84 + 16) \text{ dB} = 100 \text{ dB}$$

4) 电动机的 L_{WM} 。电动机的声功率级 L_{WM} 为

$$L_{WM} = L_p + 10 \lg A$$

如果电动机的表面积 $A = 2 \text{ m}^2$ ，在 1 m 处处测得的 $L_p = 83 \text{ dB}$ ，这时 L_{WM} 为

$$L_{WM} = 83 + 10 \lg 2 = (83 + 3) \text{ dB} = 86 \text{ dB}$$

(3) 通风机总声功率级的确定 通风机声源的总声功率级由进气口或排气口、机壳、管道、电动机等处的声功率级的合成，其合成总声功率级 L_W (dB) 按下式计算：

$$L_W = 10 \lg (10^{L_{w1}/10} + 10^{L_{w2}/10} + \dots + 10^{L_{wn}/10}) \quad (8-49)$$

将前面各项计算结果代入，则得声源总声功率级为

$$\begin{aligned} L_W &= 10 \lg (10^{103/10} + 10^{101/10} + 10^{100/10} + 10^{86/10}) \\ &= 10 \lg (10^{10.3} + 10^{10.1} + 10^{10} + 10^{8.6}) \\ &= 10 \lg \{ 10^{10} (10^{0.3} + 10^{0.1} + 1 + 10^{-1.4}) \} \\ &= 10 \lg \{ 10^{10} \times 4.3 \} = 1.6 \end{aligned}$$

(4) 确定各声源处至接收器的衰减量 前面已介绍，声源随着距离的增大将成比例地衰减。从各声源到接收器的减噪量，即接收器的声压级 L_p 按式 (8-50) 计算：

$$L_p = L_W - 10 \lg 2 \pi r^2 \quad (8-50)$$

如从声源到接收器的距离为 60 m 时，各声源的减噪量按式 (8-50) 计算结果见表 8-10。

表 8-10 各声源衰减量的计算结果

声源	L_W/dB	减噪量/dB	接收器声压级 L_p/dB
进气口 (出气口)	103	43	60
机壳	101	43	58
管道	100	43	57
电动机	86	43	43

(5) 接收器的总声压级 L_p 的确定 接收器的总声压级 L_p 等于各声源作用于接收器声压级的合成，即

$$L_p = 10 \lg (10^{L_{p1}/10} + 10^{L_{p2}/10} + \dots + 10^{L_{pn}/10}) \quad (8-51)$$

将表 8-9 接收器声压级代入式 (8-51)，得

$$\begin{aligned} L_p &= 10 \lg (10^{60/10} + 10^{58/10} + 10^{57/10} + 10^{43/10}) \\ &= 10 \lg (10^6 + 10^{5.8} + 10^{5.7} + 10^{4.3}) \\ &= 10 \lg \{ 10^6 (1 + 10^{-0.2} + 10^{-0.3} + 10^{-1.7}) \} = 64 \end{aligned}$$

(6) 确定各声源处的减噪量 如果允许噪声值为 50 dB ，则必需的减噪量为

$$\text{必需的减噪量} = \text{接收器总声压级} - \text{允许噪声量} = (64 - 50) \text{ dB} = 14 \text{ dB}$$

这时各部声源的减噪量，可以按下面公式计算：

$$\text{各部声源的减噪量} = L_p - \text{必需的减噪量} - \lg n \quad (8-52)$$

式中， n 为各部声源个数。

将上面计算结果代入式 (8-52) 计算, 得

各部声源的减噪量 = $(64 - 14 - 10\lg 4)$ dB = 44 dB

于是各部声源必需的减噪量如下:

进气口(或出气口) 减噪量 = $(60 - 44)$ dB = 16 dB

机壳 减噪量 = $(58 - 44)$ dB = 14 dB

管道 减噪量 = $(57 - 44)$ dB = 13 dB

(7) 根据必需的减噪量, 考虑消声计划, 进行噪声控制的设计

2. 通风机噪声控制的一般原理

通风机的噪声控制有各种各样的方法, 归结起来有下列三类方法: 降低声源的噪声; 传输路径的噪声控制; 接收器的防护措施。

通风机的噪声控制, 采用哪种方法或哪几种方法的组合, 取决于必需的减噪量, 以及经济上和运用上的综合考虑。

(1) 通风机声源的噪声控制 通风机噪声控制的最根本的办法, 就是使声源的噪声降低。声源的噪声控制方法如下:

1) 降低声源的激发力: ①减少因空气动力产生的冲击和涡流噪声。②提高叶轮及转轴的动平衡精度, 以减少因不平衡所产生的噪声。③提供良好的润滑以减少摩擦力。④声源的隔振可以有效地减少激发力。

2) 降低系统中噪声辐射部件对激发力的响应: ①改变共振构件的固有频率。当激发力的频率相当或接近于某构件的固有频率时, 将激起构件的强烈共振及由此产生的激烈噪声。②采用阻尼材料以增加能量损耗, 减少噪声的辐射。

3) 正确地安装、合理地使用和维护保养, 防止异常噪声发生。

(2) 传输路径的噪声控制

1) 声源的隔声。在噪声源周围或接收器四周, 使用设计得当的隔声罩, 让声源密闭, 防止或减少噪声源向外传播。

2) 声的吸收。利用声的吸收原理, 采用良好的吸声材料, 使噪声在传输途中不断地衰减。

3) 声的反射。利用声的反射原理, 采用不连续结构, 使声能量反射给声源, 即所谓的阻抗失配, 阻挡噪声的传播。

(3) 接收器的防护措施 所谓接收器, 可能是一个人或人的集合, 或者是噪声敏感设备。在噪声过高的环境下, 可以采用某些防护工具, 例如耳塞, 耳罩, 或设置隔声室, 使噪声控制在允许水平, 防止噪声的伤害。

3. 通风机噪声控制方法

根据上述降噪原理, 下面介绍几种通风机噪声控制的主要方法。

(1) 设计性能良好的通风机, 防止或减少本身噪声源的发生 为了降低噪声激励, 在通风机设计时, 应事先考虑减少通风机声源噪声的因素。为此在气动性能上要尽量减少气流冲击和附面层分离现象, 以避免或减少冲击噪声和涡流噪声的发生。设计时要避免通流部分尖锐突出和急剧转弯。合理选择通风机的转速大小, 这是因为通风机的噪声

与转速是6次方比例关系。要十分注意控制叶轮与蜗舌处的间隙大小，因为试验研究和实践证明，间隙 x 的大小对通风机噪声影响较大。图8-37为叶轮与蜗舌间隙 x 和噪声关系的试验曲线。结果表明，间隙太小，噪声将增加较快。

对于压力不高的离心通风机，可以设计成如图8-38所示的低噪声通风机。该通风机具有较大的蜗室，叶轮出口的高速气流一进入蜗室，速度便很快降低；同时叶轮进口和轮盘为曲面状，可以使气流均匀地流动，防止紊流的发生。这种通风机与同性能的一般通风机比较，噪声下降15方左右。

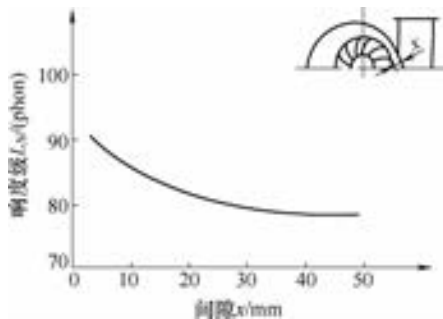


图 8-37 叶轮与蜗舌处间隙对噪声的影响

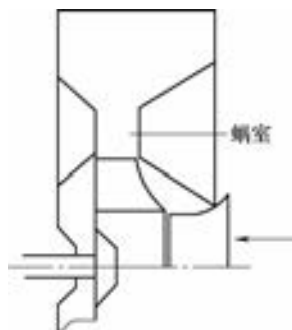


图 8-38 低噪声通风机

此外，尽量提高叶轮及主轴的动平衡精度，保持良好的润滑条件，增加机壳刚性，提高其固有频率等，也可有效地减少噪声源的激发力，减少噪声的发生。

目前，通风机噪声源的控制，特别是风压高的大容量通风机，乃是一个比较困难和有待解决的问题。

(2) 消声器 由于通风机在进气口和排气口的噪声最大。为此在通风机进、排气口处设计和安装消声器，使通风机进、排气口的声辐射噪声减至最小，可以有效地降低噪声。

由于通风机噪声频带比较宽广，而且允许的压力损失也小，所以一般很少采用膨胀式和共振式消声器，往往使用吸声式消声器来减低通风机的噪声。图8-39为吸声式消声器的结构示意图。在截面 A_1 的消声管壁上开设很多小孔，周围填充多孔性吸声材料。当声波通过消声管时，声能被吸收，达到噪声衰减。噪声衰减性能与吸声材料的密度、

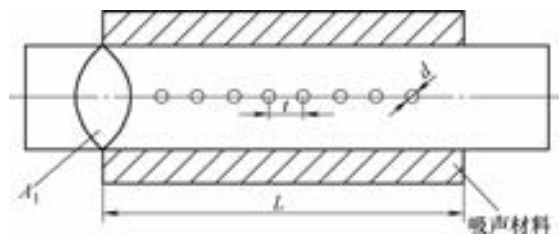


图 8-39 吸声式消声器结构示意图

厚度、小孔的直径 d ，以及开口度 $\left(\frac{\pi d^2}{4t^2}\right)$ 有关。其中 t 为孔与孔之间的距离（或周节）。这种消声器和其他形式的消声器不同，它在宽广的频率范围内具有良好的衰减特性，特别是对高频具有较大的衰减量。图 8-40 为频率开口度的不同与减噪量的关系。这种消声器，可以把它作为一般的吸声管来考虑，减噪量 L_T 可以采用 Sabine 公式计算：

$$L_T = K_1 \frac{P}{A_1} L \tag{8-53}$$

式中， K_1 为吸声率 a 决定的常数； P 为吸声材料的周长（m）； A_1 为消声管的截面积（ m^2 ）； L 为壳体长度（m）。

式（8-53）说明，减噪量主要取决于壳体长度 L 和填充于内表面的吸声材料的吸声率。图 8-40 示出频率与减噪量的关系。图 8-41 示出消声器的安装及通风机噪声的传播。

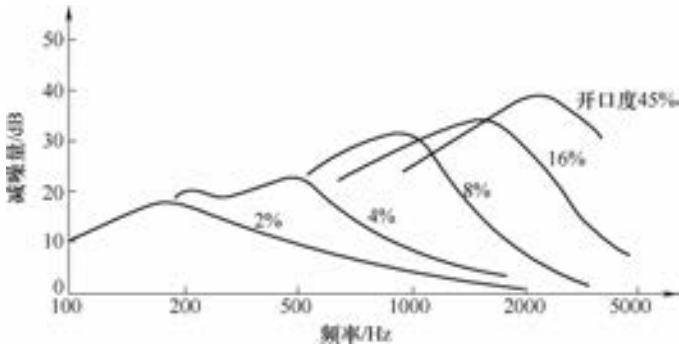


图 8-40 频率与减噪量的关系

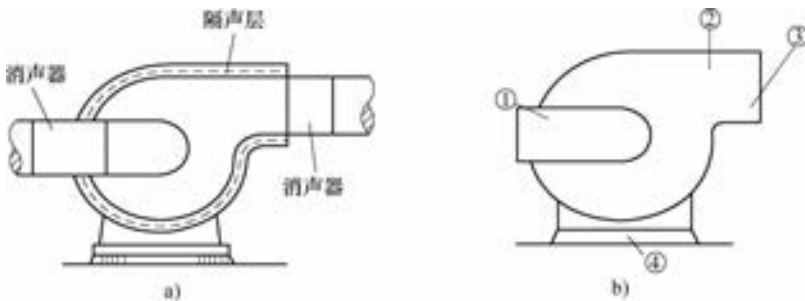


图 8-41 消声器安装及通风机噪声传播

a) 消声器安装 b) 噪声传播路径
① ~ ④—噪声传播路径

图 8-42 示出通风机进气管前设置消声器。带有过滤网的迷宫式消声器的用例。

(3) 通风机出口管道的消声 在通风机管道出口设置吸声板如图 8-43 所示。这样可以使噪声级有效地得以降低。同样在图 8-44 所示的通风机进口设置吸声板，也有良好的消声效果。

(4) 设置隔声间(室) 现在, 为了防止或降低通风机噪声的传播, 出现将通风机放置在具有吸声性能的隔声间内。这时为了能够进气, 需放置吸气口及管道, 于是就会产生噪声的穿透。为此, 应在进气口设置消声器, 使噪声衰减。

(5) 防声罩 通风机噪声的控制, 除了重视通风机本身及其管道系统的消声控制外, 电动机产生的噪声也不可忽视。为了减少电动机的噪声, 合理地选择电动机功率是很重要的。因为不必要的功率增加, 增大了噪声。为了尽量降低电动机噪声, 往往采用内表面贴有吸声材料的防声罩, 阻止噪声的向外扩散。图8-41a就是在通风机机壳内表面贴有吸声材料的隔声层的例子。

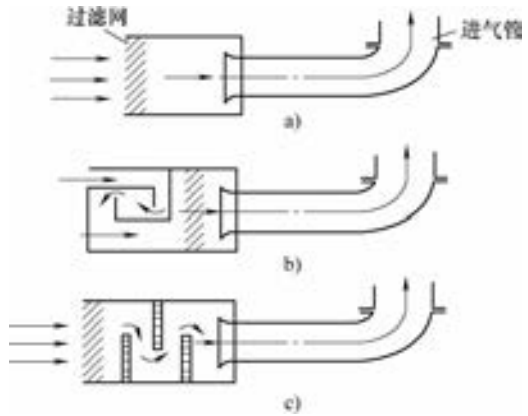


图8-42 通风机进气管前设置消声器

a) 带有过滤网的消声器

b)、c) 带有过滤网的迷宫式消声器

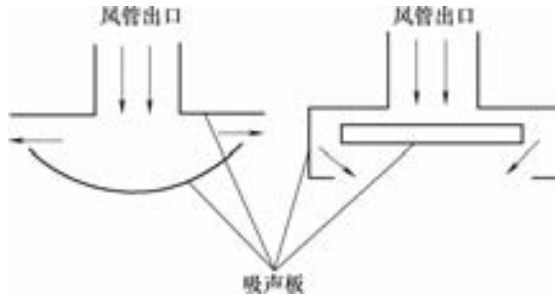


图8-43 风管出口设置吸声板

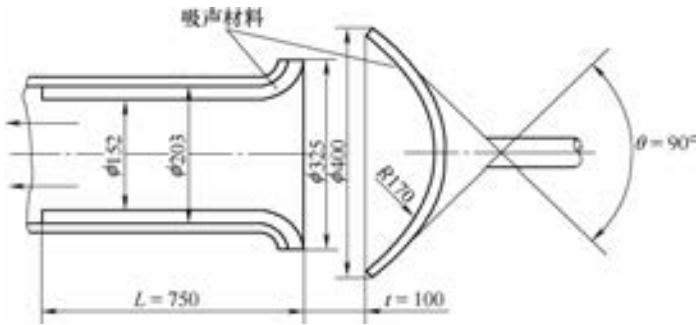


图8-44 通风机进口设置吸声板

第9章 风机试验

9.1 风机试验的分类及目的

1. 气动性能试验

(1) 模型级性能试验 为了研究风机各通流元件的损失机理和各通流元件形状对气动性能的影响,需要进行模型的试验研究,以获得实际的气动性能数据和特性曲线。通过试验获得的优秀模型是风机模化设计的基础,这些优秀模型可用于新产品的开发。

(2) 产品的性能试验 为了获得产品的气动性能,取得特性曲线,要进行气动性能试验。另外,为了校验新产品气动性能是否达到设计要求;检查出厂的风机性能是否达到样本数据要求;检查改造后的风机是否达到性能指标;对没有标牌的风机,为了确定其性能也需要进行气动性能试验。总之,产品的性能试验就是为确定风机性能,获得特性曲线,指导风机可靠运行。

产品性能试验可在试验室内进行,也可在风机运行现场进行。主要取决于风机的尺寸大小和试验型式。按照 GB/T 1236—2000 标准的推荐,当风机叶轮直径大于 800mm 时,可在现场进行性能试验。

2. 噪声试验

为了准确评价风机噪声水平,需对风机所产生的噪声进行试验。试验按照 GB/T 2888《风机和罗茨鼓风机噪声测量方法》相关内容进行。一般在进行风机性能试验的同时,进行噪声测量,获得噪声特性曲线和频谱特性,以便进行合理的消声处理。

3. 强度试验

为了保证通风机安全可靠运转,对其主要零部件,例如叶轮等进行强度试验。

超速试验是对叶轮强度进行检验的试验。超速试验应按 JB/T Q328《通风机叶轮超速试验方法》进行。

4. 机械运转试验

为了保证通风机稳定可靠运转,要对通风机进行机械运转试验。试验按照 JB1416 和 JB/T Q334 标准相关内容进行,要测定通风机轴承的振动与温升。

需测定通风机的均方根振动速度。一般应采用频率范围为 10 ~ 500Hz,速度范围为 1 ~ 10mm/s 的接触式测振仪表。常采用集成电路设计的电子振动测定仪与电压传感器,配合使用测机械振动加速度、速度和位移量。输出电压正比于机械振动量,由表读数。常采用 DZ-80 型振动测定仪,或丹麦 BK 公司 4370-2511 测振仪表。

9.2 常用仪器仪表及测定方法

1. 测定压力的仪表及测定方法

(1) 大气压力测定仪表 测量大气压力常采用空盒气压表（如 DYM₃ 型）、标准水银气压表（如 DYB₁ 型）。标准水银气压表是根据大气压力与真空中水银柱压力相平衡的原理制成。它还可作为空盒气压表的标定仪表使用。

(2) 气体压力测定仪表

1) U 型管液柱压力计。图 9-1 所示为 U 型管液柱压力计。它是由一根内径均匀、断面相等的直玻璃管弯成 U 形，或用两根内径相同的直玻璃管，利用一弯管（或橡胶管）相连构成。其玻璃管内径为 6 ~ 10mm。玻璃管固定在特制的木板上或木盒内。玻璃管上或在木板上有刻度。玻璃管内可装水、酒精或水银等，应根据所测气体压力大小而决定采用何种液体。因为纯水的密度为 1000kg/m³，为了计算方便常采用纯水作为管内液体。

读数时应注意方法。如图 9-2 所示，不同的工作液体，眼睛平视的位置是不同的。液面读数精度为 ±0.5%，测量范围一般为 10 ~ 2000mm。

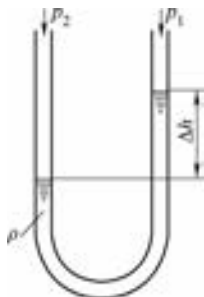


图 9-1 U 型管液柱压力计

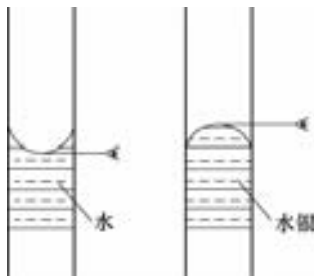


图 9-2 读数方法

2) 微压计。微压计适用于测量微小压力，测量准确。图 9-3 为倾斜式微压计。倾斜系数 i 为

$$i = \sin\beta = \frac{h}{L} \quad (9-1)$$

式中 h ——垂直细管的水面移动距离；

L ——在相同压力下，倾斜管的水面沿倾斜尺移动的距离。

图 9-4 为补偿式微压计。其读数以 0.01mm 来计数，观察误差在 0.2Pa 以内。测量范围在 0 ~ 2500Pa。

测量正压时，橡胶管接于带正号（+）的接头上，一般位于补偿式微压计的上部；测负压时，橡胶管接于带负号（-）的接头上。测量压差时，应将带正号（+）的接头接于高压，带负号的接头接于低压。

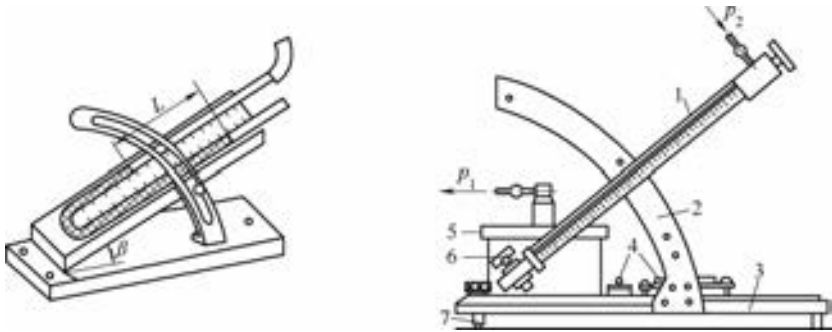


图 9-3 倾斜式微压计

1—玻璃管 2—斜度滑轨 3—底盘 4—水平仪 5—液体桶 6—阻尼阀 7—调节螺栓

2. 测定温度的仪表及测定方法

空气的温度有干温度和湿温度两种。测量这两种温度时，可以采用机械通风式干湿球温度计，如 XX 型。也可采用普通干湿球温度计，但应将其挂在测量室内通风处，通过湿球温度计的空气流速至少为 3m/s，应用清水保持湿润。

由于空气的温度经常变化，所以在试验过程中应经常记录大气温度，以便正确地计算当时的空气密度。

3. 测定湿度的仪表及测定方法

湿度的测量可以通过测量干、湿球温度后，再在相对湿度图上查出空气的相对湿度，或者用湿度测量仪直接测出相对湿度。

4. 测定功率的仪表及测定方法

(1) 电气测量法测定轴功率

1) 用三相功率表直接测出电动机的输入功率 P_w 。电动机的输出功率 P_m (kW) 用下式计算：

$$P_m = \eta_m P_w \quad (9-2)$$

式中， η_m 为电动机效率。

2) 用两个单相功率表测出电动机的输入功率 P_w ，电动机的输出功率 P_m 的计算与式 (9-2) 相同。

3) 用电压表、电流表、功率因数表测出相应数据后，按下式计算电动机输出功率 P_m ：

$$P_m = \frac{\sqrt{3}EI\cos\phi\eta_m}{1000} \quad (9-3)$$

式中， E 为电压表度数 (V)； I 为电流表读数 (A)； $\cos\phi$ 为功率因数。

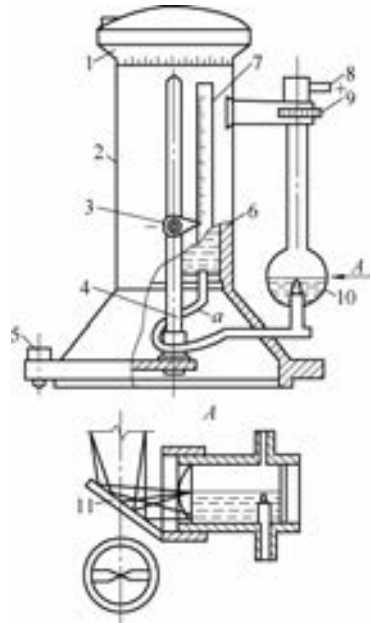


图 9-4 补偿式微压计

1—刻度圆盘 2—外壳 3、8—接口
4—螺杆 5—调节螺钉 6—平衡器
7—刻度尺 9—小圆盘 10—观察器
11—反射镜

4) 校准的电动机。直接驱动的电动机, 输出功率要按制造厂和用户均可接受的效率校准进行测定。电动机应负载运转足够的时间, 以保持其在正常操作温度下进行运转。电源的电压、频率范围如下: 电压 $\pm 6\%$; 频率 $\pm 1\%$ 。

(2) 转矩转速传感器和配套的二次仪表测轴功率 转矩转速传感器与转矩转速二次仪表或转矩转速功率仪配套使用, 测定通风机轴功率。转矩转速传感器见图 9-5。

采用转矩测量仪测量功率时应符合以下要求:

- ①转矩仪的误差不得超过 2.0%, 精度为 $\pm 0.2\%$ 。
- ②试验时的转矩超过转矩传感器 1/3 量程时, 不得使用该转矩传感器测量功率。
- ③安装转矩传感器时, 应保证其与被测风机轴同心连接, 联轴器必须经过动平衡校正, 传感器与基础应固定, 以避免振动所引起的测量误差。

5. 测定转速的仪表及测定方法

测量风机转速的仪表及方法很多, 目前常用的是光电转速传感器和转速数字显示仪。这两种仪表精度高、误差很小, 但转速数字显示仪必须与转矩转速传感器配套使用, 因此操作复杂。机械转速表测量误差大些。

(1) 光电转速传感器 使用光电转速传感器测量转速时, 要在被测量旋转轴的表面上涂上黑白相间的条纹各 z 条。而后使光电转速传感器照射有条纹的轴表面。光敏管受到每秒 $\frac{\pi z}{60}$ 次交变的光线照射, 显示出的转速计算如下:

$$n = \frac{60x}{zt} \quad (9-4)$$

式中, n 为轴转速 (r/min); x 为白条纹反射在数字显示仪上的数字; t 为测量控制时间 (s); z 为轴上光亮条纹数。

(2) 手持式光电数字转速表 在被测旋转轴的表面上贴上反射标记纸; 然后按下电源开关, 将投光器射出的红色光线对准贴在轴上的反射标记纸。转速表与旋转轴反射面的距离在 50 ~ 150mm 为宜。

转速表每一秒以数字显示一次转速, 因此使用时所显示的数字跳动很快, 待数字稳定时的数字即为所测转速。该表有储存显示的功能。当手指离开电源开关时, 显示数字就自动地被记忆储存。此后, 按下储存功能按钮, 则可再现测量值。

(3) 转矩转速测量仪 数字式转矩转速测量仪有 ZJYW1 等形式, 是测量转矩和转速的高精度直读数字式的电子仪器。它可以同时测出被测机的转矩、转速或功率。有储存打印功能。该仪器需与传感器配套使用, 且每次测量前需根据传感器的型号、环境温度、测量范围进行开关设定和系统调零。

5. 数据采集常用仪表

数据采集常用仪表见表 9-1 和表 9-2。

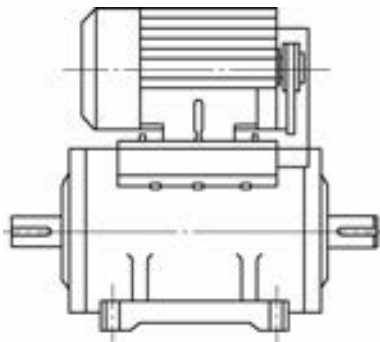


图 9-5 转矩转速传感器

表 9-1 数据采集常用仪表 (一)

序号	名称	量 程	精度	输出信号
1	大气压力变送器	90 ~ 120kPa	0.1%	4 ~ 20mA
2	温度变送器	-50 ~ 100℃	±0.5%	4 ~ 20mA
3	相对湿度传感器	0% ~ 100%	0.2%	4 ~ 20mA
4	压差变送器	0.5kPa、1kPa、2kPa、5kPa、10kPa	0.25%	4 ~ 20mA
5	电量测量仪			
6	扭矩仪	10N·m、20N·m、50N·m、100N·m	1.0%	RS232 接口
7	噪声计		±0.5dB	RS232 接口
8	数据采集器			
9	通讯转换器			
10	数字调节器			
11	信号转换器			
12	采样电阻			
13	光电转换器			
14	光缆传感器			

表 9-2 数据采集常用仪表 (二)

序号	名称	型 号	精度要求	生产厂家	
1	微压变送器	EJA110A-DLS5A-20NC	±0.25%	横河	
2	微压变送器	EJA110A-DLS5A-20NC	±0.5%	横河	
3	大气压力传感变送器	MPM480-E-22-B1-C1A	±0.15%	横河	
4	变 送 器	转速传感变送器	SZGB-5.6	永胜	
5		功率传感变送器	PCE-20	永胜	
6		频率传感变送器	MFP 系列	永胜	
7		电流传感变送器	CCC-30B	永胜	
8		电压传感变送器	VCC-30B	永胜	
9	流量变送器	EJA110A-DLS5A-20NC	±0.25%	横河	
10	温度传感 变送器	铂电阻	PT100	0.5 级	上电二厂
		数显表	XMB5026	4 ~ 20mA 输出	上电二厂
11	温湿度变送器	HMP141A	±3% RH 在 25℃	上电二厂	
12	噪声取样传感器				
13	噪声信号前置放大器				
14	数据采集器	HP34970A + HP34901A + PCI-GPIB		英国	
15	24V 高精密度电源			上海	
16	调节器			日本	

6. 仪器仪表的标定

所有试验用仪器仪表必须经过国家计量部门认可的鉴定机构进行标定。一般一年标

定一次。

9.3 国内外通风机产品试验标准

1. GB/T 1236 《工业通风机 用标准化风道进行性能试验》

GB/T 1236—2000 年标准，于 2001 年 4 月 1 日起正式取代 1985 年版标准。新版标准等同采用了 ISO5801 标准，是一个覆盖面很宽的风机性能试验标准。

2000 版标准规定了通风机单位质量功的上限为 25000J/kg，平均密度为 1.2kg/m^3 时，通风机压力升 30000 Pa。适用于除专门为空气循环（如屋顶风扇和台扇）而设计的风扇之外的各种形式的工业通风机性能的测定。该标准规定了四种安装形式：A 为自由进口，自由出口；B 为自由进口，管道出口；C 为管道进口，自由出口；D 为管道进口，管道出口。

2. GB/T 10178 《通风机现场试验》

该标准于 1988 年颁布，主要用于那些大尺寸、特殊结构及大功率等，不适合在试验室内进行性能试验的风机性能考核。

3. GB/T 2888 《风机和罗茨鼓风机噪声测量方法》

该标准最新版于 1991 年颁布。取代 1982 年版标准。标准规定了 A 声压级的噪声测量方法，同时也规定了声功率级的噪声测量方法。

1) A 声级测量场所要求。应尽量选用除地面外无反射条件的场所，且被测机处于运转状态；测点至声源点间的距离 1 倍和 2 倍标准长度时，其 A 声级的差值应不小于 5dB (A)。

2) 自由声场法声功率级测量场所要求。

3) 邻近声场法声功率级测量场所要求。

4. AMCA 210 《风机性能试验室评价方法》

AMCA 是 Air Movement and Control Association, Inc. 的英文缩写，该协会到 2002 年止，共制定了 9 个与风机性能试验及噪声试验有关的标准。该协会除了制定标准外，还进行风机性能评价试验工作。其所作的风机性能及噪声评价在国际上享有很高的声誉。

AMCA 210 最新版于 1999 年颁布。虽然该标准的推荐的试验装置不如 GB/T 1236—2000 多，但简单明了，特别适合作为空调风机性能评价的标准。所推荐的试验装置与 GB/T 1236—2000 吻合。

随着市场竞争的激烈化和国际化，在国内市场上，有些业主逐渐地要求其配套风机需进行 AMCA 210 的评价。另一方面，随着我国加入 WTO，国内风机产品打入国际市场，也需要影响力更强的风机性能评价标准。

5. AMCA 300 《风机噪声试验方法 混响室法》

这是为了响应如何精确和可靠地对风机设备最小声功率级作出评价的需求。初稿由 AMCA P158NB Sound Test Code Committee 编写。他是基于 ASHRAE 标准 36—62 和实际情况而编制的。在 1962 年 2 月，作为推荐标准首次发表。在 1965 年 1 月，该标准中所

使用的基准声功率作了改变,从 10^{-13} W 变为 10^{-12} W。1967 年 1 月,进行了第三次修订。1974 年又进行了少量编辑修改,定为 AMCA301。

1996 年版为最新版。该标准建立了风机声功率级的决定方法。

9.4 通风机空气动力性能试验装置

1. 性能试验装置分类

这里所述的性能试验装置,是指在试验室内建造的装置。通风机空气动力性能试验装置,按类别分为风管式和风室式两种;按试验形式分为进气试验装置、出气试验装置及进出气试验装置。所谓进气试验即被试风机进口接有试验风管,出口为自由出口;出气试验即被试风机进口为自由进口,出口接有试验风管;进出气试验即被试风机的进、出口均接有试验风管。

2. 试验装置的选择原则

为了真实地反映被测风机的性能,所选择的试验装置应尽可能地与风机实际使用情况相一致。

3. 风管式试验装置

(1) 试验装置图

1) 进气试验装置示意图见图 9-6 至图 9-8。

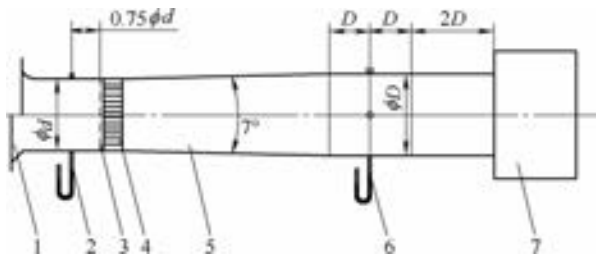


图 9-6 进气试验装置示意图 (一)

1—进口 90° 圆弧喷嘴或锥形喷嘴 2、6—压力计 3—整流网 4—标准格栅 5—锥形管 7—试验风机

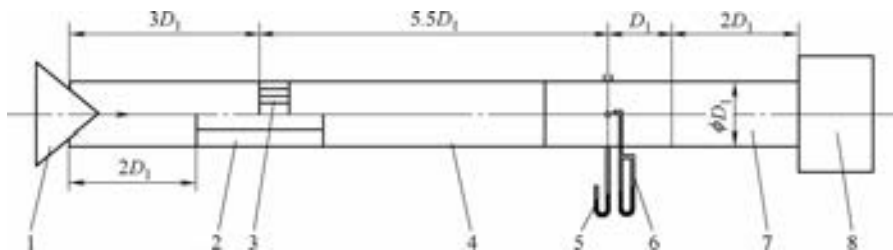


图 9-7 进气试验装置示意图 (二)

1—节流器 2—星形整流栅 3—标准格栅 4—试验风管 5—静压测压计
6—流量压差计 7—进口过渡接管 8—试验风机

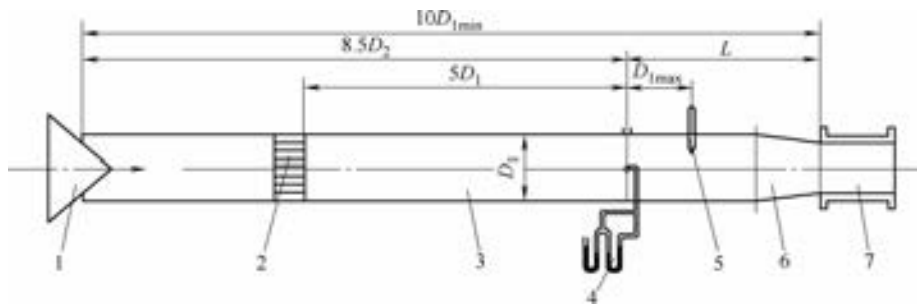


图 9-8 进气试验装置示意图 (三)

1—节流器 2—标准格栅 3—试验风管 4—皮托管测压计 5—温度计
6—进口过渡接管 7—试验风机

2) 出气试验装置示意图见图 9-9 和图 9-10。

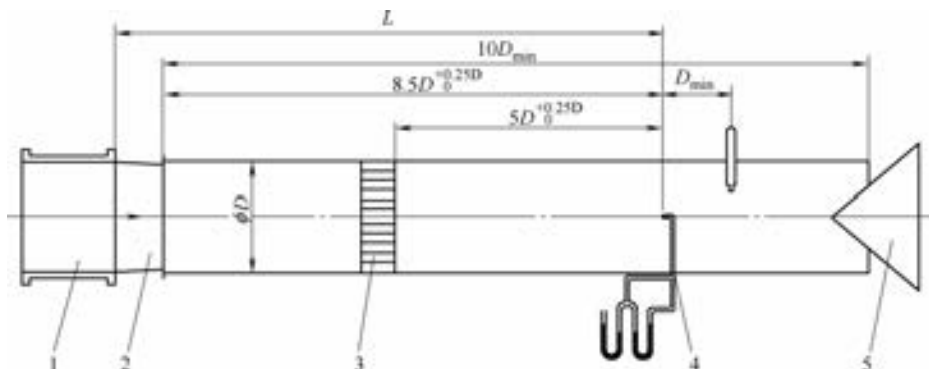


图 9-9 出气试验装置示意图 (一)

1—试验风机 2—过渡风管 3—标准格栅 4—皮托管（压力计） 5—节流器

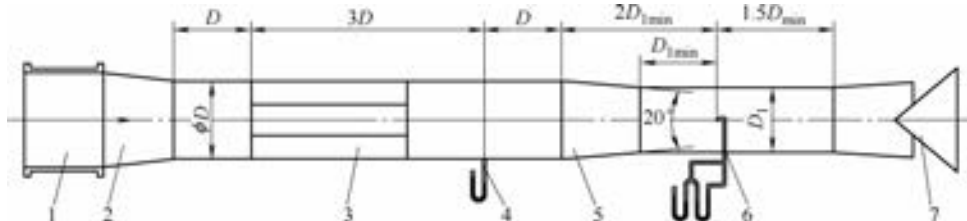


图 9-10 出气试验装置示意图 (二)

1—试验风机 2—过渡风管 3—星形整流栅 4—压力计 5—变径管
6—皮托管（压力计） 7—节流器

(2) 风管基本要求

1) 风管式试验装置的进气和出气测试管路截面积，应分别与通风机进气口和出气口法兰内孔的面积相同。不同时应采用锥形管连接。

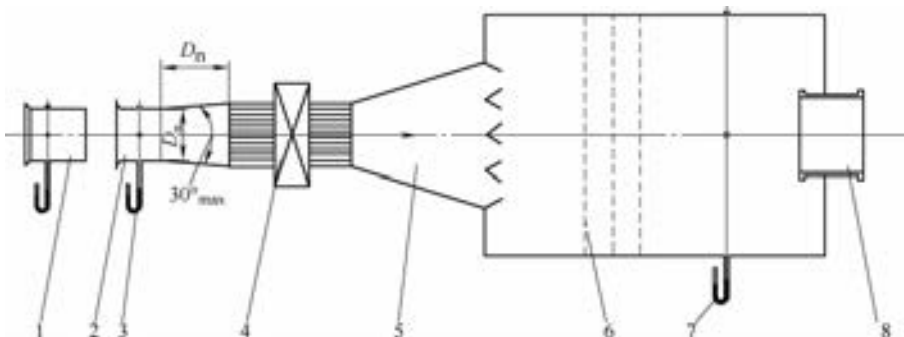


图9-12 进气风室试验装置示意图（二）

1—锥形喷嘴 2—90°圆弧喷嘴 3、7—压力计 4—辅助风机 5—过渡接头 6—均流网 8—试验风机

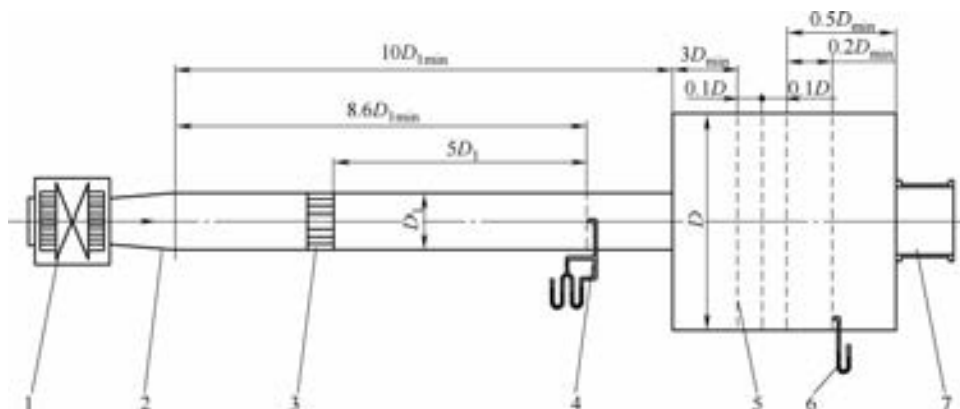


图9-13 进气风室试验装置示意图（三）

1—辅助风机 2—过渡接头 3—标准整流格栅 4—皮托管（压力计）
5—均流网 6—压力计 7—试验风机

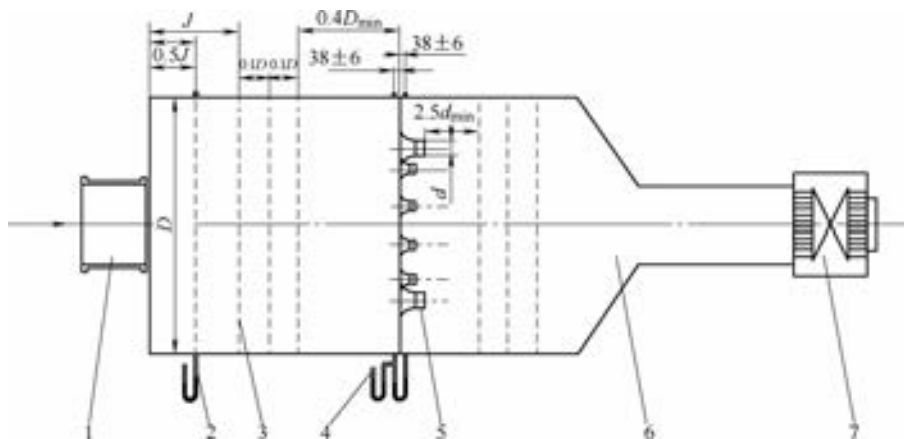


图9-14 出气风室试验装置示意图（一）

1—试验风机 2、4—压力计 3—均流网 5—喷嘴 6—过渡接头 7—辅助风机

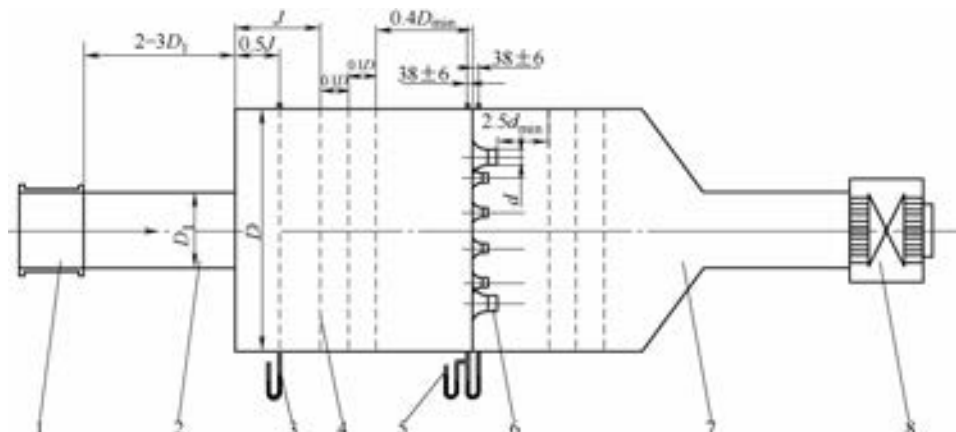


图 9-15 出气风室试验装置示意图 (二)

1—试验风机 2—短管 3、5—压力计 4—均流网 6—喷嘴 7—过渡接头 8—辅助风机

1) 风室截面尺寸: ①风室内最大气流速度应小于等于 2m/s 。②试验风机的形式。进气风室的横截面是风机进口喉部面积的 5 倍; 试验风机为离心风机时, 出气风室的横截面至少应是风机出口或出风管面积的 9 倍; 试验风机为轴流风机时, 出气风室的横截面至少应是风机出口或出风管面积的 16 倍。

如果采用风室内多喷嘴测定流量, 还应考虑以下问题: 喷嘴空间布置。即每个喷嘴的中心线距风室壁至少为 1.5 倍喷嘴喉部直径。在同时使用中任意两个喷嘴中心之间的最小距离, 为最大喷嘴喉部直径的 3 倍。

2) 风室长度尺寸: ①考虑试验风机的型式。②试验风机进口 (出口) 当量直径。对于离心风机, 图 9-9 中尺寸 L 至少应为风机等效出口直径的 1 倍; 对于轴流风机, 至少应为风机等效出口直径的 2 倍。除此之外, 还应考虑增加人孔带来的尺寸的增加。

(3) 多喷嘴要求 通过喷嘴的速度应控制在 $15 \sim 35\text{m/s}$ 范围内。

9.5 流量测定方法及计算公式

1. ISO 文丘里喷嘴测定流量

使用 ISO 文丘里喷嘴测定流量, 只能在开式 (自由) 进口条件下使用。质量流量计算公式如下:

$$q_m = \alpha \varepsilon \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2 \Delta p \rho_u} \quad (9-5)$$

式中, α 为流量系数; ε 为膨胀系数, 与压比有关; ρ_u 为喷嘴上游密度。

在下列限制内流量系数 α 与雷诺数无关, 只与直径比 β 有关: ①直径比 $\beta = d/D$, $0 \leq \beta \leq 0.67$ 。②喉径 $d \geq 0.05\text{m}$ 。③喉部雷诺数 $Re_d = \frac{4q_m}{\pi \mu d} \geq 10^5$

$$\alpha = \frac{0.985 - 0.196\beta^{4.5}}{(1 - \beta^4)^{0.5}}$$

2. 1/4 椭圆喷嘴测定流量

使用 1/4 椭圆喷嘴测定流量，只能在开式（自由）进口条件下使用。质量流量计算公式见式（9-5）。

3. 进口 90° 圆弧喷嘴测定流量

进口 90° 圆弧喷嘴测定流量，只能在开式（自由）进口条件下使用。质量流量计算公式见式（9-5）。

$$q_m = \alpha \varepsilon \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2 \Delta p \rho_u}$$

式中， α 为流量系数； ε 为膨胀系数； ρ_u 为喷嘴上游密度。

对于 $10^5 \leq Re_d \leq 10^7$ 和 $d \geq 50\text{mm}$ ， $\alpha = 1 - 0.004 \sqrt{\frac{10^6}{Re_d}}$ 。

对于 $k = 1.4$ 和 $\Delta p \leq 2000\text{Pa}$ ， $\varepsilon = 1 - 0.55 \frac{\Delta p}{p_a}$ 。

4. 进口锥形喷嘴测定流量

(1) 适合条件 只能在开式（自由）进口条件下使用。但 $Re_d < 20000$ 时不应采用锥形喷嘴。

(2) 流量计算公式 质量流量由下式计算：

$$q_m = \alpha \varepsilon \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2 \Delta p \rho_u}$$

式中， α_ε 为复合系数，其取决于雷诺数 Re_d ，也可按下式粗略取值：

对于 $d \leq 0.5\text{m}$ ： $m = 0.01107$ ， $c = 0.8824$ ，则 $\alpha \varepsilon_{\max} = 0.94$ 。

对于 $0.5\text{m} < d < 2\text{m}$ ： $m = 0.00963 + 0.04783d + 0.05533d^2$ ， $c = 0.9715 - 0.2058d + 0.05533d^2$ ，则 $\alpha \varepsilon_{\max} = 0.9131 + 0.0623d - 0.01567d^2$ 。

对于 $d \geq 2\text{m}$ ： $m = 0.03459$ ， $c = 0.7812$ ，则 $\alpha \varepsilon_{\max} = 0.975$ 。

5. 皮托管测定流量

(1) 适合条件 适合管道内测定流量，且风管内的流速应在 $3/d < v \leq 85\text{m/s}$ 范围。 d 为滞止压力测孔的直径。

(2) 常用型式 NPL 型（具有椭圆头部）；CETIAT 型；DLR 型；AMCA 型。

(3) 流量计算公式 质量流量由下式计算：

$$q_m = \alpha \varepsilon \frac{\pi D_x^2}{4} \sqrt{2 \Delta p_m \rho_x}$$

式中，下标 x 表示皮托管所在测量平面。其膨胀系数按下式计算：

$$\varepsilon = \left[1 - \frac{1}{2k} \frac{\Delta p_m}{p_x} + \frac{k+1}{6k^2} \left(\frac{\Delta p_m}{p_x} \right)^2 \right]^{0.5}$$

流量系数 α 取决于雷诺数，可查表 9-3。

表 9-3 雷诺数的流量系数 α

Re_{D_x}	3×10^4	10^5	3×10^5	10^6	3×10^6
α	0.986	0.988	0.990	0.991	0.992

雷诺数为

$$Re_{D_x} = \frac{\rho_x v_{mx} D_x}{\mu} \approx 71 \times 10^3 \frac{q_m}{D_x}$$

9.6 标准风道的阻力件及其损失计算方法

风管式试验装置中，常用的阻力件有星形整流栅和标准整流格栅。它们的用途是整流、防止涡流、缩短试验风管的长度。

1. 星形整流栅

(1) 星形整流栅如图 9-16 所示。它由 8 个等距配置的径向叶片组成，叶片厚度小于 $0.007D$ 。整流栅的长度为 $2D \pm 1\%$ ， D 为风管直径。安装时注意，叶片与压力壁测孔间的夹角为 22.5° 。

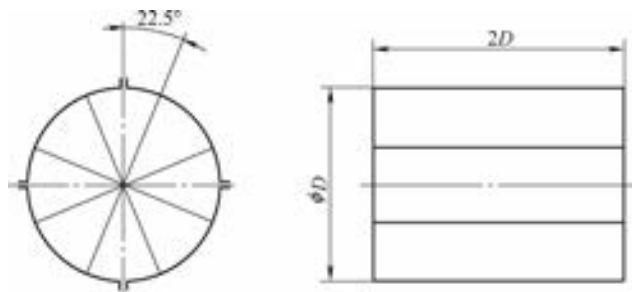


图 9-16 星形整流栅

(2) 星形整流栅的损失计算 星形整流栅的损失系数按下式计算：

$$\xi = 0.95 (Re_D)^{-0.12} \quad (9-6)$$

压力损失按下式计算：

$$\Delta p = \xi \frac{\rho v^2}{2} F_M \quad (9-7)$$

式中， Re_D 为风管内雷诺数； ρ 为风管内气体密度 (kg/m^3)； v 为风管内平均风速 (m/s)； F_M 为马赫系数，当马赫数 Ma 小于 0.15 时， $F_M = 1.006$ 。

2. 标准整流格栅

1) 图 9-17 所示的标准整流格栅的尺寸及形状应符合下述规定：①整流格栅的节距 t 应取试验管路内径 D 的 0.075 倍。②整流格栅的轴向长度 L 为试验管路内径 D 的 0.45 倍。③加工整流格栅的板厚 $e \leq 0.005D$ 。

2) 标准整流格栅的损失计算。损失系数计算如下：

$$\xi = 0.14 (Re_D)^{-0.17} \frac{L_e}{D_h} \quad (9-8)$$

$$\frac{L_e}{D_h} = \frac{15.04}{\left[1 - 26.65 \frac{e}{D_h} + 184.6 \left(\frac{e}{D_h} \right)^2 \right]^{1.83}}$$

压力损失计算：

$$\Delta p = \xi \frac{\rho v^2}{2} F_M \quad (9-9)$$

式中， Re_D 为风管内雷诺数； D_h 为风管的水力直径（m）； L_e 为整流栅的当量长度； e 为整流栅板材厚度； ρ 为风管内气体密度（ kg/m^3 ）； v 为风管内平均风速（ m/s ）； F_M 为马赫系数，当马赫数 Ma 小于 0.15 时， $F_M = 1.006$ 。

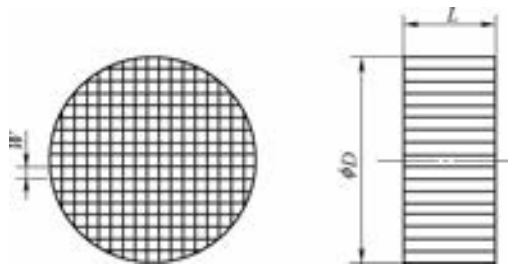


图 9-17 标准整流格栅

9.7 试验数据处理计算框图

1. 进气试验

进气试验又称 C 型试验。试验中测量数据如下：①转速 n 。②输入功率 P_a 、 P_o 或 P_e 。③流量计压差 Δp 。④流量计上游压力 p_{e6} 。⑤进口静压 p_{est1} 。⑥环境参数主要有大气压 p_a 、靠近风管进口的环境温度 t_a 、干球温度 t_d 和湿球温度 t_w 。

2. 出气试验

出气试验又称 B 型试验。试验中测量数据如下：①转速 n 。②输入功率 P_a 、 P_o 或 P_e 。③流量计压差 Δp 。④流量计上游压力 p_{e6} 。⑤出口静压 p_{est} 。⑥出风管或风室内温度 t_6 。⑦环境参数主要有大气压 p_a 、靠近风机进口的环境温度 t_a 、干球温度 t_d 和湿球温度 t_w 。

3. 进出气联合试验

进出气试验又称 D 型试验。试验中测量数据如下：①转速 n 。②输入功率 P_a 、 P_o 或 P_e 。③流量计压差 Δp 。④流量计上游压力 p_{e6} 。⑤进口静压 p_{est1} 。⑥出口静压 p_{est2} 。⑦出风管或风室内温度 t_6 。⑧环境参数主要有大气压 p_a ，靠近风机进口的环境温度 t_a ，干球温度 t_d 和湿球温度 t_w 。

第 10 章 常用建筑和空调风机的型号及性能参数

10.1 建筑通风换气用风机的选用

建筑通风换气用通风机有以下几种类型：①4-72 型离心通风机；②4-2 × 79 型双进风离心通风机；③CF 多翼形离心通风机；④11-62 (A/E 式) 多翼形离心通风机；⑤DF 多翼形离心通风机；⑥SWF 型混流通风机；⑦HL3-2A、HLF-6 型混流通风机；⑧GF 型导管式换气风机等。

下面分别介绍这些产品的特点、用途、外形图及性能参数。

1. 4-72 型离心通风机

此系列风机具有高效率、低噪声、压力曲线平稳、使用范围广等特点。主要用于厂矿企业、体育馆、歌剧院、地下室、大小宾馆、酒楼、商场及大型建筑的室内通风换气，降温除尘；也可以与其他各类机械设备配套作气体循环使用。输送的介质为空气和其他不自燃、对人体无害、无腐蚀性气体。B4-72 采用防爆电动机，可作为易燃、挥发性气体的通风换气用。气体温度 $\leq 80^{\circ}\text{C}$ ，气体内不允许有黏性物质、尘土及固体杂质 $\leq 150\text{mg}/\text{m}^3$ 。

4-72 型离心通风机有 A 式 (图 10-1)、B 式 (图 10-2)、C 式 (图 10-3)。它们的性能参数分别见表 10-1、表 10-2 及表 10-3。



图 10-1 4-72 型 A 式离心通风机



图 10-2 4-72B 式离心通风机



图 10-3 4-72C 式离心通风机

表 10-1 4-72 型 A 式离心通风机的性能参数

机号	功率/kW	转速/(r/min)	流量/(m^3/h)	全压/Pa
2.5A	0.75	2800	1223 ~ 1981	855 ~ 482
2.8A	1.5	2800	1131 ~ 2356	994 ~ 606

(续)

机号	功率/kW	转速/(r/min)	流量/(m ³ /h)	全压/Pa
3.2A	2.2	2800	1688 ~ 3517	1300 ~ 792
	1.1	1400	844 ~ 1758	324 ~ 198
3.6A	3	2900	2664 ~ 5268	1578 ~ 989
	1.1	1400	1332 ~ 2634	393 ~ 247
4A	5.5	2900	4012 ~ 7419	2014 ~ 1320
	1.1	1400	2006 ~ 3700	501 ~ 329
4.5A	7.5	2900	5712 ~ 10562	2554 ~ 1673
	1.1	1400	2856 ~ 5281	634 ~ 416
5A	15	2930	7728 ~ 15455	3187 ~ 2019
	2.2	1420	3864 ~ 7728	790 ~ 502
5.6A	22	2930	10122 ~ 25736	4152 ~ 2330
	3	1420	5009 ~ 12736	1017 ~ 570
6A	4	1450	6677 ~ 13353	1139 ~ 724
	1.5	960	4420 ~ 8841	498 ~ 317
7A	11	1450	10602 ~ 21204	1550 ~ 984

表 10-2 4-72 型 B 式离心通风机的性能参数

机号	功率/kW	转速/(r/min)	流量/(m ³ /h)	全压/Pa
16B	132	900	102810 ~ 111930	3157 ~ 3115
	160	900	121040 ~ 143910	2990 ~ 2497
	110	800	91392 ~ 127920	2489 ~ 1969
	75	710	81110 ~ 113520	1957 ~ 1549
	55	630	71971 ~ 100730	1538 ~ 1218
	37	560	63974 ~ 89544	1214 ~ 961
	30	500	57120 ~ 79950	967 ~ 766
	18.5	450	51408 ~ 71955	783 ~ 620
	15	400	45696 ~ 63960	618 ~ 490
	11	355	40555 ~ 56764	487 ~ 386
20B	7.5	315	35985 ~ 50368	383 ~ 303
	200	710	158410 ~ 221730	3069 ~ 2427
	132	630	140560 ~ 165480	2411 ~ 2284
	160	630	176150 ~ 196750	2172 ~ 1908
	90	560	124950 ~ 147100	1902 ~ 1801
	110	560	156580 ~ 174890	1714 ~ 1505
	75	500	111560 ~ 156150	1514 ~ 1199

(续)

机号	功率/kW	转速/(r/min)	流量/(m ³ /h)	全压/Pa
20B	55	450	100400 ~ 140530	1225 ~ 970
	37	400	89250 ~ 124920	967 ~ 766
	30	355	79209 ~ 110860	761 ~ 603
	22	315	70284 ~ 98376	599 ~ 475
	15	280	62475 ~ 87445	473 ~ 375
	11	250	55781 ~ 78076	377 ~ 299

表 10-3 4-72 型 C 式离心通风机系列的性能参数

机号	功率/kW	转速/(r/min)	流量/(m ³ /h)	全压/Pa
6C	15	2240	10314 ~ 20628	2734 ~ 1733
	11	2000	9209 ~ 18418	2176 ~ 1380
	7.5	1800	8288 ~ 16576	1760 ~ 1116
	5.5	1600	7367 ~ 14734	1389 ~ 881
	3	1250	5756 ~ 11511	846 ~ 537
	2.2	1000	4605 ~ 9209	541 ~ 344
	1.1	800	3684 ~ 7367	346 ~ 220
7C	18.5	1800	13161 ~ 26322	2395 ~ 1519
	15	1600	11698 ~ 23397	1890 ~ 1199
	11	1450	10602 ~ 21204	1553 ~ 984
	7.5	1250	9140 ~ 18279	1151 ~ 731
	5.5	1120	8189 ~ 16378	924 ~ 586
	4	1000	7312 ~ 14623	736 ~ 468
8C	37	1800	28105 ~ 36427	2920 ~ 2302
	30	1800	19646 ~ 25240	3143 ~ 3032
	22	1600	17463 ~ 22435	2478 ~ 2390
	11	1250	13643 ~ 25297	1507 ~ 1106
	7.5	1120	12224 ~ 15705	1209 ~ 1166
	5.5	1000	10914 ~ 14022	963 ~ 929
	5.5	900	14052 ~ 18213	725 ~ 572
	3	800	8732 ~ 16190	615 ~ 452
10C	2.2	710	7749 ~ 11085	485 ~ 450
	37	1250	34863 ~ 48797	2373 ~ 1877
	30	1120	31237 ~ 43722	1902 ~ 1505
	18.5	1000	27890 ~ 39038	1514 ~ 1199
	15	900	25101 ~ 35134	1225 ~ 970
	11	800	22312 ~ 31230	967 ~ 766
	7.5	710	19802 ~ 27717	761 ~ 603
	5.5	630	17571 ~ 24594	599 ~ 475

(续)

机号	功率/kW	转速/(r/min)	流量/(m ³ /h)	全压/Pa
12C	75	1120	53978 ~ 75552	2746 ~ 2172
	55	1000	63953 ~ 67457	1859 ~ 1729
	37	900	43375 ~ 60712	1767 ~ 1399
	30	800	38556 ~ 53966	1395 ~ 1104
	18.5	710	34218 ~ 47895	1097 ~ 869
	15	630	30362 ~ 42498	863 ~ 684
	11	560	31774 ~ 37776	646 ~ 540
	7.5	500	24097 ~ 33728	543 ~ 430
14C	110	1000	76535 ~ 107124	2985 ~ 2361
	75	900	68881 ~ 96412	2412 ~ 1908
	55	800	61228 ~ 85699	1903 ~ 1506
	37	710	54340 ~ 76058	1497 ~ 1185
	30	630	48217 ~ 67488	1177 ~ 932
	18.5	560	42859 ~ 59990	929 ~ 736
	15	500	38267 ~ 53562	741 ~ 587
	11	450	34441 ~ 48206	599 ~ 474
	7.5	400	30614 ~ 42850	474 ~ 375
5.5	355	27170 ~ 38029	372 ~ 295	

2. 4-2 × 79 型 E 式双进风离心通风机

4-2 × 79 型 E 式双进风离心通风机可用于一般工厂及大型建筑物、空调机组、高层建筑的室内通风换气，既可输入气体，也可输出气体，输送气体为空气和其他不自燃、对人体无害、无腐蚀性气体。气体内不许有黏性物质，所含的尘土及硬质颗粒物 $\leq 150\text{mg}/\text{m}^3$ ，气体温度不得超过 80°C 。

图 10-4 为 4-2 × 79 型 E 式双进风型离心通风机的外形。其性能参数见表 10-4。



图 10-4 4-2 × 79 型 E 式双进风型离心通风机

表 10-4 4-2 × 79 型 E 式双进风离心通风机的性能参数

机号	功率/kW	转速/(r/min)	流量/(m ³ /h)	全压/Pa
5E	2.2	1200	6380 ~ 11640	618 ~ 412
	4	1350	7980 ~ 13340	774 ~ 480
	5.5	1550	9620 ~ 15320	1010 ~ 647
	7.5	1800	9850 ~ 17160	1382 ~ 941
	11	2000	13600 ~ 18820	1607 ~ 1206

(续)

机号	功率/kW	转速/(r/min)	流量/(m ³ /h)	全压/Pa
6E	5.5	1200	10990 ~ 20070	882 ~ 588
	11	1400	12890 ~ 23490	1215 ~ 814
	11	1500	13660 ~ 24550	1392 ~ 990
	15	1650	15190 ~ 27000	1676 ~ 1186
	18.5	1800	16760 ~ 29820	1990 ~ 1362
7E	7.5	900	14000 ~ 27180	627 ~ 473
	11	1000	15570 ~ 30240	774 ~ 461
	11	1120	17370 ~ 33840	970 ~ 549
	15	1250	19470 ~ 37710	1206 ~ 716
	30	1600	24930 ~ 48330	1970 ~ 1166
8E	11	900	19360 ~ 37600	785 ~ 471
	15	1000	21520 ~ 41680	971 ~ 579
	22	1120	24080 ~ 46720	1226 ~ 697
	30	1270	23760 ~ 52960	1570 ~ 932
9E	11	740	22664 ~ 44019	671 ~ 403
	15	800	24502 ~ 47588	784 ~ 471
	18.5	910	27871 ~ 54131	1015 ~ 609
	30	1060	32465 ~ 63054	1377 ~ 826
	37	1150	35222 ~ 68407	1621 ~ 973
10E	11	580	34320 ~ 56600	520 ~ 353
	15	660	39000 ~ 64400	667 ~ 461
	18.5	740	43800 ~ 72200	843 ~ 579
	30	830	49100 ~ 81000	1059 ~ 726
	37	940	55700 ~ 91800	1363 ~ 932
12E	15	520	53300 ~ 87800	603 ~ 402
	22	580	59400 ~ 97800	755 ~ 510
	37	680	69700 ~ 114800	1040 ~ 696
	55	740	75800 ~ 124800	1216 ~ 824
14E	18.5	420	68100 ~ 112400	530 ~ 363
	30	520	84400 ~ 139000	814 ~ 549
	75	660	110600 ~ 181800	1402 ~ 951
	90	740	120200 ~ 117800	1657 ~ 1128
16E	30	370	89600 ~ 148400	539 ~ 373
	55	470	113800 ~ 188000	873 ~ 520
	90	580	140600 ~ 231800	1334 ~ 902
	132	660	160200 ~ 263800	1726 ~ 1177

(续)

机号	功率/kW	转速/(r/min)	流量/(m ³ /h)	全压/Pa
18E	40	360	124200 ~ 205000	647 ~ 431
	75	420	145000 ~ 239000	883 ~ 598
	132	520	179800 ~ 296200	1363 ~ 932
	160	580	200400 ~ 330200	1687 ~ 1147
20E	55	330	156600 ~ 257200	677 ~ 461
	90	420	199200 ~ 327400	1098 ~ 745
	132	470	222000 ~ 367000	1373 ~ 932
	200	520	246800 ~ 406000	1677 ~ 1138

3. CF 多翼形离心通风机

此机采用离心式结构，具有耗电少、风量大、噪声低、美观坚固耐用等优点。它广泛应用于厨房、宾馆酒楼、厂矿企业及公共场所等通风换气和抽油烟之用。

图 10-5 为 CF 多翼形离心通风机外形。其性能参数见表 10-5。

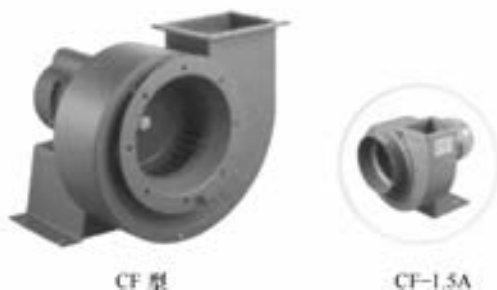


图 10-5 CF 多翼形离心通风机外形

表 10-5 CF 多翼形离心通风机的性能参数

机号	功率/kW	电压/V	转速/(r/min)	流量/(m ³ /h)	全压/Pa	A 声级/dB
1.5A	0.37	220/380	2800	830 ~ 1080	790 ~ 748	≤72
2A	1.1	220/380	2800	1248 ~ 2258	1150 ~ 839	≤78
	0.37	220/380	1400	650 ~ 1125	248 ~ 210	≤62
2.5A	2.2	220/380	2800	748 ~ 2617	1542 ~ 1296	≤83
	0.75	220/380	1400	1400 ~ 2300	377 ~ 320	≤65
	0.55	220/380	1400	1500 ~ 2200	367 ~ 312	≤65
3A	1.5	220/380	1400	2033 ~ 3500	800 ~ 715	≤70
	1.1	220/380	1400	1960 ~ 3300	810 ~ 750	≤69
	0.75	380	910	1300 ~ 2252	350 ~ 315	≤65
3.5A	3	380	1420	3233 ~ 5000	1050 ~ 800	≤73
	2.2	220/380	1420	3000 ~ 4800	1032 ~ 900	≤70
	1.1	380	910	2300 ~ 3150	460 ~ 385	≤62

(续)

机号	功率 /kW	电压 /V	转速 /(r/min)	流量 /(m ³ /h)	全压 /Pa	A 声级 /dB
4A	4	380	1450	4000 ~ 6500	1300 ~ 980	≤80
	1.1	380	910	2500 ~ 4200	600 ~ 520	≤72
4.5A	3	380	960	4500 ~ 6500	764 ~ 630	≤72

4. 11-62 (A/E 式) 多翼形离心通风机

(1) 11-62A 式多翼形离心通风机 这是一种高效率、低转速、低噪声离心风机。它是由先进的空气动力的叶轮结构, 对数螺旋形机壳, 并具有结构新颖紧凑、振动小、使用时调节方便等特点。它用于空调机组、大小宾馆、酒楼通风换气或抽油烟; 也可作为一般建筑物室内外通风换气之用。输送的介质为空气或其他不自燃的, 对人体无害的气体, 介质中不含粘性物质, 气体温度 $\leq 80^{\circ}\text{C}$, 尘土及固体杂质 $\leq 150\text{mg}/\text{m}^3$ 。



图 10-6 11-62A 式多翼形离心通风机

图 10-6 为 11-62A 式多翼形离心通风机外形。其性能参数见表 10-6。

表 10-6 11-62A 式多翼形离心通风机的性能参数

机号	功率 /kW	电压 /V	转速 /(r/min)	流量 /(m ³ /h)	全压 /Pa	A 声级 /dB
2.8A	0.75	220/380	1400	1370 ~ 2760	480 ~ 345	≤67
3A	0.75	380	910	1408 ~ 2850	300 ~ 260	≤63
	1.5	220/380	1420	2150 ~ 4270	654 ~ 535	≤73
	2.2	220/380	1420	2200 ~ 4400	650 ~ 520	≤74
3.5A	1.1	380	910	3200 ~ 5080	438 ~ 367	≤69
	3	380	1450	5075 ~ 8065	1000 ~ 840	≤78
4A	2.2	380	960	4860 ~ 7807	684 ~ 586	≤70
	3	380	960	5742 ~ 8830	670 ~ 520	≤73
5A	4	380	960	6175 ~ 9220	896 ~ 837	≤76
	5.5	380	960	7342 ~ 11120	880 ~ 837	≤78
4.5A	3	380	960	8127 ~ 10051	1167 ~ 1090	≤74
	4	380	960	8857 ~ 13021	1147 ~ 1018	≤77
6A	7.5	380	960	9820 ~ 16894	1200 ~ 990	≤83
6.5A	11	380	970	10800 ~ 21000	1270 ~ 1100	≤85
7A	11	380	730	12053 ~ 21330	1080 ~ 950	≤82

(2) 11-62E 式多翼形离心通风机 它是在 11-62-A 式传动基础上改进的新型产品。它具有比 A 式风量更大、噪声更低、结构牢固、设计新颖美观等特点。它是现代宾馆、酒楼及空调机组理想配套设备,也可作为输入气体或输出气体之用。输送的介质为空气或其他不自燃的、对人体无害的气体,气体中不含粘性物质,气体温度 $\leq 80^{\circ}\text{C}$ 。



图 10-7 为 11-62E 式多翼形离心通风机外形。其性能参数见表 10-7。

表 10-7 11-62E 式多翼形离心通风机的性能参数

机号	功率/kW	转速/(r/min)	流量/(m^3/h)	全压/Pa	A 声级/dB
3E	1.5	1420	1959 ~ 4162	469 ~ 584	≤ 74
3.5E	1.1	960	2648 ~ 4303	353 ~ 265	≤ 70
	3	1420	3917 ~ 6365	772 ~ 582	≤ 79
4E	2.2	850	3984 ~ 7703	394 ~ 276	≤ 72
	3	960	4500 ~ 8700	502 ~ 352	≤ 74
5E	4	820	4841 ~ 8542	628 ~ 560	≤ 78
	5.5	960	5667 ~ 10000	861 ~ 767	≤ 81
6E	7.5	720	7000 ~ 16000	749 ~ 413	≤ 80
6.5E	7.5	650	8035 ~ 18364	716 ~ 395	≤ 81
	11	720	8900 ~ 20342	879 ~ 485	≤ 83
7E	11	650	10035 ~ 22937	830 ~ 458	≤ 83
	15	720	11116 ~ 25407	1019 ~ 562	≤ 85
7.5E	11	600	13846 ~ 23077	924 ~ 507	≤ 83
	15	650	15000 ~ 25000	1085 ~ 595	≤ 85
8E	15	560	12923 ~ 28000	894 ~ 700	≤ 84
	18.5	610	14077 ~ 30500	1061 ~ 831	≤ 86
	30	720	16616 ~ 36000	1478 ~ 1158	≤ 89

5. DF 多翼形离心通风机

DF 多翼形离心通系列为单进风形式,采用零部件模具成型,叶轮采用多翼形离心设计,整机具有外形美观、体积小、噪声低、风量大、全压高、运行稳定等优良特点。广泛应用于通风换气领域,也适用于机械设备配套使用。输送含尘量及固体杂质 $\leq 100\text{mg}/\text{m}^3$ 的非易燃易爆、低腐蚀气体,其温度应不大于 60°C 。



图 10-8 为 DF 多翼形离心通风机外形。其性能参数见表 10-8。

图 10-8 DF 多翼形离心通风机

表 10-8 DF 多翼形离心通风机的性能参数

机号	型号	功率/kW	流量/(m ³ /h)	全压/Pa	A 声级/dB
1.4 号	13-46	0.085	216 ~ 350	280 ~ 172	≤63

6. SWF 型混流通风机

此系列风机广泛应用在工矿企业、宾馆、酒楼、博物馆、体育馆、空调、纺织、船舶、民用建筑等空调工程的通风换气，最适合于管道加压、送风和排风及高层建筑、一般建筑的通风换气之用。输送不含易燃、易爆、腐蚀性气体，输送介质温度 ≤ 80℃，含尘量及固体杂质 ≤ 150mg/m³。

图 10-9 为 SWF 型混流通风机外形。其性能参数见表 10-9。



图 10-9 SWF 型混流通风机

表 10-9 SWF 型混流通风机的性能特性

机号	功率/kW	转速/(r/min)	流量/(m ³ /h)	全压/Pa
SWF-I-3.5A	0.25	1400	2045 ~ 2640	142 ~ 128
SWF-I-4A	0.37	1400	3053 ~ 3916	186 ~ 168
SWF-I-4.5A	0.55	1400	3392 ~ 4352	230 ~ 207
SWF-I-5A	1.1	1400	5252 ~ 7433	300 ~ 220
SWF-I-6A	1.5	1400	8121 ~ 10000	325 ~ 200
SWF-I-6.5A	2.2	1450	10325 ~ 12714	381 ~ 235
SWF-I-7A	3	1420	11780 ~ 15889	470 ~ 329
SWF-I-8A	4	960	18636 ~ 25467	382 ~ 193
SWF-I-8.5A	5.5	960	22353 ~ 30546	431 ~ 218
SWF-I-9A	5.5	960	27174 ~ 34206	430 ~ 282
SWF-I-10A	7.5	960	36916 ~ 44054	371 ~ 288
SWF-I-11A	11	960	43572 ~ 48729	370 ~ 310
SWF-I-12A	15	730	57226 ~ 64292	498 ~ 429
SWF-I-13A	15	730	63699 ~ 71565	508 ~ 441
SWF-II-3.5A	2.2	2850	4145 ~ 5599	970 ~ 920
SWF-II-4A	4	2850	7681 ~ 8358	1266 ~ 1198
SWF-II-4.5A	5.5	2850	7315 ~ 9937	1218 ~ 918
SWF-II-5A	5.5	2850	11058 ~ 13422	1273 ~ 973
SWF-II-6A	5.5	1450	11146 ~ 14099	821 ~ 722
SWF-II-6.5A	11	1450	14171 ~ 17925	964 ~ 848
SWF-II-7A	11	1450	17699 ~ 22388	1118 ~ 983
SWF-II-8A	7.5	960	17492 ~ 22126	640 ~ 563

(续)

机号	功率/kW	转速/(r/min)	流量/(m ³ /h)	全压/Pa
SWF-II-8.5A	11	960	20981 ~ 26539	723 ~ 636
SWF-II-9A	11	960	24905 ~ 31503	810 ~ 712
SWF-II-10A	18.5	960	34163 ~ 43214	1000 ~ 879
SWF-II-11A	18.5	960	45471 ~ 57518	1150 ~ 1011
SWF-II-12A	22	960	62058 ~ 68359	1184 ~ 1025
SWF-II-13A	30	960	76280 ~ 84386	1200 ~ 1030

7. HL3-2A 和 HLF-6 型混流通风机

HL3-2A 和 HLF-6 系列低噪声节能混流风机, 是介于轴流式和离心通风机之间的一种新型风机。它设计新颖、结构紧凑、体积小、体重轻, 具有离心风机高的压力, 轴流风机大的流量, 效率高、节能、噪声低、安装方便等特点。它可替代 2000Pa 以下的中、低压离心风机, 广泛用于工业、民用建筑通风除尘等。

图 10-10 为 HL3-2A 型和 HLF-6 型混流通风机外形。它们的性能参数见表 10-10。

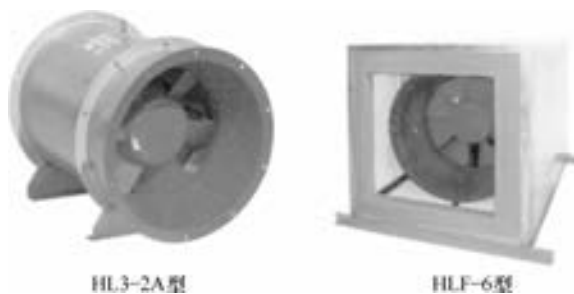


图 10-10 HL3-2A 型和 HLF-6 型混流通风机

表 10-10 HL3-2A 型和 HLF-6 型混流通风机的性能参数

机号	功率/kW	电压/V	转速/(r/min)	流量/(m ³ /h)	全压/Pa
5	2.2	380	1420	9091 ~ 5361	402 ~ 554
	0.75	380	910	5966 ~ 3549	176 ~ 243
6	5.5	380	1450	15571 ~ 9264	578 ~ 798
	1.5	380	960	10309 ~ 6133	253 ~ 350
7	0.75	380	720	7732 ~ 4600	142 ~ 197
	11	380	1450	24726 ~ 14710	787 ~ 1086
7	3	380	960	16370 ~ 9340	345 ~ 476
	1.5	380	720	12278 ~ 7306	194 ~ 268

(续)

机号	功率/kW	电压/V	转速/(r/min)	流量/(m ³ /h)	全压/Pa
8	18.5	380	1450	36908 ~ 21959	1028 ~ 1419
	5.5	380	960	24436 ~ 14538	451 ~ 622
	2.2	380	720	18327 ~ 10904	235 ~ 350
9	30	380	1470	52551 ~ 31266	1301 ~ 1796
	11	380	960	34793 ~ 20700	570 ~ 787
	4	380	720	26094 ~ 14789	320 ~ 443
10	55	380	1480	72087 ~ 42888	1606 ~ 2217
	15	380	970	47726 ~ 28395	704 ~ 972
	7.5	380	720	35795 ~ 21296	396 ~ 547
11	22	380	970	63524 ~ 37792	478 ~ 661
	11	380	730	47643 ~ 28344	513 ~ 303
12	37	380	980	82472 ~ 49064	1013 ~ 1399
	15	380	730	61854 ~ 36798	570 ~ 787
13	55	380	980	104866 ~ 62380	1188 ~ 1642
	22	380	730	78642 ~ 46785	668 ~ 923
14	90	380	990	130963 ~ 77912	1378 ~ 1905
	37	380	740	98222 ~ 58434	775 ~ 1071

8. GF 型导管式换气风机

GF 系列导管换气风机是目前我国吸收国外先进技术的基础上研发的新产品。此风机零部件采用模具成型；叶轮采用多翼形离心式技术特殊设计制作；整机具有外形美观、体积小、噪声低、风量大、重量轻、运行稳定等优良特点。它能有效地进行空气调节与控制，广泛用于宾馆酒店、百货商场、娱乐场所及民用住宅通风换气。输送场所应不含易燃、易爆、腐蚀性气体，温度不应大于 60℃。

图 10-11 为 GF 型导管式换气风机外形。其性能参数见表 10-11。



图 10-11 GF 型导管式换气风机

表 10-11 GF 型导管制式换气风机的性能参数

机号	功率 /kW	电压 /V	转速 /(r/min)	流量 /(m ³ /h)	全压 /Pa	A 声级 /dB	管道尺寸 /mm
GF100-2	35	220	2300	280	70	≤62	φ100 × φ100
GF100-4	17	220	1250	153	60	≤43	φ100 × φ100
GF120-4	33	220	1100	317	50	≤43	φ150 × φ150
GF120-2	90	220	2200	633	112	≤65	φ150 × φ150
GF150-4	80	220	1380	481	142	≤50	φ150 × φ150
	59	220	1100	412	132	≤48	φ150 × φ150
GF150-6	50	220	960	334	130	≤47	φ150 × φ150
	42	220	800	280	118	≤41	φ150 × φ150
GF190-4	200	220	1410	935	139	≤63	φ200 × φ200
	160	220	1100	729	120	≤61	φ200 × φ200
GF190-6	130	220	960	636	112	≤49	φ200 × φ200
	115	220	800	530	103	≤48	φ200 × φ200
GF210-4	330	220	1400	1253	167	≤65	φ200 × φ200
	290	220	1100	985	145	≤63	φ200 × φ200
GF210-6	230	220	960	860	135	≤50	φ200 × φ200
	200	220	800	716	125	≤49	φ200 × φ200

10.2 消防排烟用风机的选用

1. HTF 型消防排烟轴流风机

此风机用于有消防要求的建筑物，例如地铁、隧道、体育馆、高层建筑、地下商场、车间、烘箱等场合的消防排烟和通风换气。一般采用双速电动机，平时低速运行作通风换气用，一旦发生火灾，会通过电控系统自动切换成高速运行，在半小时内迅速排除烟气，使火场内人员安全撤离，保护国家和人民的生命财产安全。输送空气和其他不自燃，对钢材无腐蚀性气体。气体内不允许有黏性物质，所含的尘土及硬质颗粒物不大于 150mg/m³，作为通风换气时进气温度不得超过 80℃；作为消防用时，烟气温度在 280℃ 时能连续运行 30min 以上。HTF 型消防排烟轴流风机有 A、B、C 三种型式。

(1) HTFA 型消防排烟轴流风机 图 10-12 为 HTFA 型消防排烟轴流风机外形。其性能参数见表 10-12。



图 10-12 HTF (A) 型消防排烟轴流风机

表 10-12 HTFA 型消防排烟轴流风机的性能参数

HTFA-I 型消防轴流单速系列						
机号	功率/kW	转速/(r/min)	流量/(m ³ /h)	全压/Pa	静压/Pa	A 声级/dB
4	1.5	2800	3800 ~ 5500	450 ~ 300	412 ~ 220	≤79
4.5	2.2	2800	6120 ~ 8500	670 ~ 410	607 ~ 289	≤84
5	3	2900	6817 ~ 9824	752 ~ 510	700 ~ 403	≤86
5.5	4	2900	10900 ~ 15200	900 ~ 530	834 ~ 410	≤86
6	5.5	2900	13197 ~ 16090	760 ~ 510	666 ~ 370	≤86
6.5	5.5	1450	15300 ~ 21500	680 ~ 425	570 ~ 300	≤86
7	7.5	1450	18908 ~ 24380	728 ~ 610	622 ~ 434	≤88
8	7.5	1450	26012 ~ 31421	723 ~ 600	605 ~ 428	≤89
9	11	1450	27613 ~ 33510	840 ~ 562	757 ~ 439	≤90
10	11	1450	35000 ~ 45679	770 ~ 630	682 ~ 480	≤90
11	15	1450	48500 ~ 51552	690 ~ 580	574 ~ 449	≤92
12	18.5	970	57748 ~ 62763	740 ~ 624	632 ~ 486	≤93
13	18.5	970	56031 ~ 74708	807 ~ 600	727 ~ 458	≤94
15	22	970	76041 ~ 93800	819 ~ 623	736 ~ 496	≤95

HTFA-II 型消防轴流双速系列						
机号	功率/kW	转速/(r/min)	流量/(m ³ /h)	全压/Pa	静压/Pa	A 声级/dB
5	3/2.4	2900	6817 ~ 9824	752 ~ 510	700 ~ 403	≤80
		1450	3410 ~ 4912	188 ~ 127	175 ~ 100	≤75
6	5.5/4.5	2900	13197 ~ 16090	760 ~ 510	666 ~ 370	≤86
		1450	6599 ~ 8045	190 ~ 127	166 ~ 92	≤75
7	8/6.5	1450	18908 ~ 24380	728 ~ 610	622 ~ 434	≤88
		960	12518 ~ 16141	319 ~ 267	273 ~ 190	≤80
8	8/6.5	1450	26012 ~ 31421	723 ~ 600	605 ~ 428	≤89
		960	17222 ~ 20800	317 ~ 263	265 ~ 188	≤80
9	11/9	1450	27613 ~ 33510	840 ~ 562	757 ~ 439	≤90
		960	18216 ~ 22186	368 ~ 246	332 ~ 192	≤81
10	11/9	1450	35000 ~ 45679	770 ~ 630	682 ~ 480	≤90
		960	24019 ~ 30255	338 ~ 276	296 ~ 210	≤80
11	16/13	1450	48500 ~ 51552	690 ~ 580	574 ~ 449	≤92
		960	36375 ~ 38664	387 ~ 326	322 ~ 252	≤83
12	17/12	960	55651 ~ 62763	740 ~ 624	632 ~ 486	≤93
		720	43311 ~ 47072	416 ~ 351	355 ~ 273	≤83
13	17/12	960	56031 ~ 74708	807 ~ 600	727 ~ 458	≤94
		720	42023 ~ 56031	454 ~ 338	409 ~ 258	≤84
15	20/15	960	76041 ~ 93800	819 ~ 623	736 ~ 496	≤95
		720	57031 ~ 70350	461 ~ 350	414 ~ 279	≤85

(续)

HTFA-III 型消防轴流低转速系列						
机号	功率/kW	转速/(r/min)	流量/(m ³ /h)	全压/Pa	静压/Pa	A 声级/dB
4	0.55	1400	1970 ~ 2700	150 ~ 90	134 ~ 55	≤71
4.5	0.75	1400	3060 ~ 4250	168 ~ 103	152 ~ 73	≤74
5	1.1	1400	3410 ~ 4912	188 ~ 127	175 ~ 100	≤77
6	1.5	1400	6599 ~ 8045	190 ~ 127	166 ~ 92	≤78
7	3	960	12518 ~ 16141	319 ~ 267	273 ~ 190	≤84
8	3	960	17222 ~ 20800	317 ~ 263	265 ~ 188	≤84
9	4	960	18216 ~ 22186	368 ~ 246	332 ~ 192	≤85
10	5.5	960	24019 ~ 30255	338 ~ 276	296 ~ 210	≤86
11	5.5	960	36375 ~ 38664	387 ~ 326	322 ~ 252	≤87
12	11	730	43311 ~ 47072	416 ~ 351	355 ~ 273	≤89
13	11	730	42023 ~ 56031	454 ~ 338	409 ~ 258	≤91
15	15	730	57031 ~ 70350	461 ~ 350	414 ~ 279	≤92

(2) HTFB 型消防排烟轴流风机 图 10-13 为 HTFB 型消防排烟轴流风机外形。其性能参数见表 10-13。



图 10-13 HTFB 型消防排烟轴流风机

表 10-13 HTFB 型消防排烟轴流风机性能参数

HTFB-I 型消防斜流单速系列					
机号	功率/kW	转速/(r/min)	流量/(m ³ /h)	全压/Pa	A 声级/dB
3	2.2	2800	4070 ~ 5305	915 ~ 710	≤73
4	4	2900	5430 ~ 7860	1143 ~ 910	≤78
4.5	5.5	2900	5880 ~ 9250	1247 ~ 910	≤80
5	5.5	2900	7360 ~ 13000	1250 ~ 805	≤83
6	7.5	2900	15600 ~ 20840	916 ~ 776	≤85
7	11	1450	19680 ~ 25700	1018 ~ 878	≤82
8	15	1450	28320 ~ 37821	978 ~ 866	≤89

(续)

HTFB-I 型消防斜流单速系列

机号	功率/kW	转速/(r/min)	流量/(m ³ /h)	全压/Pa	A 声级/dB
9	18.5	1450	36547 ~ 44398	978 ~ 895	≤90
10	22	1450	40750 ~ 54081	1134 ~ 949	≤91
11	30	1470	48530 ~ 60123	1128 ~ 870	≤92
12	30	980	46034 ~ 70231	1100 ~ 850	≤93
13	30	980	56845 ~ 89536	986 ~ 680	≤94
15	37	980	60438 ~ 116420	1150 ~ 650	≤95

HTFB-II 型消防斜流双速系列

机号	功率/kW	转速/(r/min)	流量/(m ³ /h)	全压/Pa	A 声级/dB
5	5.5/4.5	2900	7360 ~ 13000	1250 ~ 805	≤83
		1450	3680 ~ 6500	313 ~ 201	≤75
6	11/9	2900	15600 ~ 20840	916 ~ 776	≤85
		1450	7800 ~ 10420	229 ~ 194	≤76
7	11/9	1450	19680 ~ 25700	1018 ~ 878	≤82
		960	13029 ~ 17015	644 ~ 385	≤73
8	16/13	1450	28320 ~ 37810	978 ~ 866	≤89
		960	18750 ~ 25030	429 ~ 380	≤79
9	16/13	1450	36547 ~ 44398	978 ~ 895	≤90
		960	24196 ~ 29395	429 ~ 392	≤80
10	28/22	1450	40750 ~ 54081	1134 ~ 949	≤91
		960	26979 ~ 35805	479 ~ 415	≤81
11	28/22	1450	48530 ~ 60123	1128 ~ 870	≤92
		960	36398 ~ 45092	494 ~ 381	≤82
12	30/15	960	46034 ~ 70231	1100 ~ 850	≤93
		720	34526 ~ 52670	619 ~ 478	≤83
13	30/15	960	56845 ~ 89536	986 ~ 680	≤94
		720	42637 ~ 67152	555 ~ 383	≤83
15	37/18	960	60743 ~ 116420	1150 ~ 650	≤95
		720	45328 ~ 87315	647 ~ 366	≤87

2. HTFC 型消防排烟柜式风机

HTFC 型 DT 柜式低噪声离心通风机广泛应用于宾馆、体育馆、学校、酒楼、影剧院、礼堂、高级民用住宅和工矿企业等消防及通风的场合；还可以配套于中央空调系统和环保净化系统。电动机外置式为消防通风兼用，电动机内置式为通风用。输送空气和其他不自燃、对人体无害、无腐蚀性气体。气体内不允许有黏性物质，所含的尘土及硬质颗粒物不大于 150mg/m³。HTFC 型风机作通风换气时，进气温度不得超过 80℃；HTFC 型风机作消防用时，烟气温度在 280℃ 情况下能连续运行 30min 以上。

(1) HTFC- I 型单速 DT 柜式离心通风机 它的外形见图 10-14。柜式风机进出口位置见图 10-15。HTFC- I 型单速 DT 柜式离心通风机的性能参数见表 10-14。



图 10-14 HTFC- I 型单速 DT 柜式离心通风机

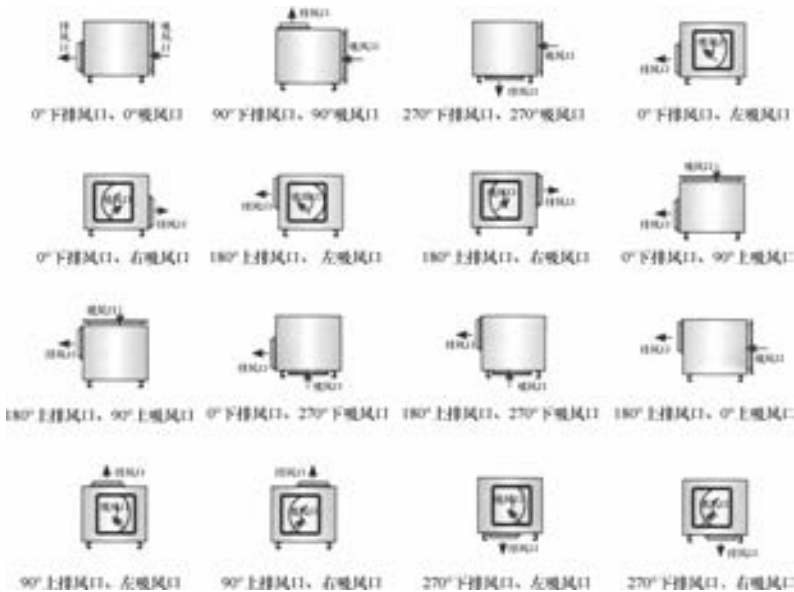


图 10-15 柜式风机排风口、吸风口位置

表 10-14 HTFC- I 型单速 DT 柜式离心通风机性能参数

机号	功率/kW	转速/(r/min)	流量/(m ³ /h)	全压/Pa	静压/Pa	A 声级/dB
9in	0.55	1000	1590 ~ 2676	141 ~ 86	125 ~ 40	≤66
	0.75	1200	1790 ~ 3010	178 ~ 110	157 ~ 52	≤67
	1.1	1400	2386 ~ 4014	317 ~ 195	280 ~ 91	≤69

(续)

机号	功率/kW	转速/(r/min)	流量/(m ³ /h)	全压/Pa	静压/Pa	A 声级/dB
10in	1.5	1600	2784 ~ 4683	432 ~ 266	382 ~ 125	≤71
	0.75	1000	2238 ~ 3760	177 ~ 108	154 ~ 44	≤67
	1.1	1200	2514 ~ 4230	224 ~ 138	196 ~ 58	≤68
	1.5	1500	3352 ~ 5640	398 ~ 245	348 ~ 102	≤70
	2.2	1630	3911 ~ 6580	542 ~ 334	473 ~ 139	≤72
12in	1.1	1000	3771 ~ 6344	251 ~ 154	218 ~ 61	≤68
	1.5	1100	4243 ~ 7137	318 ~ 196	276 ~ 78	≤69
	2.2	1200	5657 ~ 9516	565 ~ 348	491 ~ 139	≤71
	3	1400	6600 ~ 11102	769 ~ 474	668 ~ 189	≤73
15in	1.5	670	4607 ~ 7749	196 ~ 121	169 ~ 44	≤69
	2.2	750	5528 ~ 9298	282 ~ 174	243 ~ 64	≤70
	3	850	6526 ~ 10977	393 ~ 242	339 ~ 88	≤72
	4	930	6910 ~ 11623	441 ~ 272	380 ~ 99	≤73
18in	2.2	600	7733 ~ 13007	284 ~ 176	246 ~ 68	≤70
	3	720	9279 ~ 15608	408 ~ 253	353 ~ 98	≤71
	4	800	10310 ~ 17342	504 ~ 312	436 ~ 120	≤72
	5.5	830	10697 ~ 17993	543 ~ 336	470 ~ 130	≤74
20in	3	560	9196 ~ 15469	290 ~ 200	256 ~ 105	≤71
	4	610	10017 ~ 16850	345 ~ 237	305 ~ 124	≤72
	5.5	720	11824 ~ 19889	480 ~ 330	424 ~ 173	≤74
	7.5	800	13137 ~ 22098	593 ~ 407	524 ~ 213	≤75
22in	4	600	14026 ~ 23590	422 ~ 273	372 ~ 132	≤72
	5.5	650	15195 ~ 25556	495 ~ 320	436 ~ 154	≤73
	7.5	720	16831 ~ 28308	607 ~ 393	535 ~ 190	≤75
	11	800	18701 ~ 31453	750 ~ 485	661 ~ 233	≤77
2.5in	5.5	520	16896 ~ 28416	373 ~ 219	326 ~ 86	≤73
	7.5	580	18845 ~ 31694	464 ~ 272	406 ~ 107	≤74
	11	650	21120 ~ 35520	583 ~ 342	510 ~ 134	≤76
	15	720	23394 ~ 39345	715 ~ 419	625 ~ 164	≤78
28in	7.5	500	21224 ~ 35696	438 ~ 297	388 ~ 155	≤74
	11	560	23771 ~ 39980	549 ~ 375	486 ~ 179	≤76
	15	600	25469 ~ 42836	630 ~ 430	558 ~ 226	≤77
	18.5	650	27591 ~ 46405	739 ~ 505	654 ~ 265	≤79
	22	720	30562 ~ 51403	907 ~ 619	803 ~ 325	≤80

(续)

机号	功率/kW	转速/(r/min)	流量/(m ³ /h)	全压/Pa	静压/Pa	A 声级/dB
30in	11	520	27958 ~ 47022	551 ~ 341	486 ~ 157	≤75
	15	560	30108 ~ 50639	639 ~ 395	563 ~ 181	≤77
	18.5	580	31183 ~ 53563	685 ~ 424	604 ~ 185	≤79
	22	610	32796 ~ 55160	758 ~ 469	668 ~ 215	≤81
	30	650	34947 ~ 58777	860 ~ 532	758 ~ 244	≤82
33in	11	400	27840 ~ 45800	424 ~ 290	341 ~ 115	≤76
	15	450	31320 ~ 51530	545 ~ 367	431 ~ 146	≤77
	18.5	500	34800 ~ 57260	680 ~ 453	533 ~ 180	≤79
	22	550	38280 ~ 62980	822 ~ 548	644 ~ 218	≤81
	30	600	41760 ~ 68700	970 ~ 652	767 ~ 259	≤83
36in	15	350	31490 ~ 51810	396 ~ 264	309 ~ 103	≤78
	18.5	400	35990 ~ 59210	518 ~ 344	405 ~ 134	≤79
	22	450	40490 ~ 66610	654 ~ 436	512 ~ 169	≤81
	30	500	44990 ~ 74010	808 ~ 538	632 ~ 209	≤82
	37	550	49490 ~ 81420	970 ~ 651	864 ~ 253	≤84
	45	580	51280 ~ 85855	1086 ~ 723	850 ~ 281	≤85

(2) HTFC-II 型双速 DT 柜式离心通风机 它的外形见图 10-16。HTFC-II 型双速 DT 柜式离心通风机的性能参数见表 10-15。

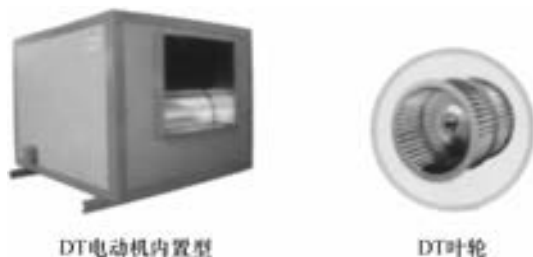


图 10-16 HTFC-II 型双速 DT 柜式离心通风机

表 10-15 HTFC-II 型双速 DT 柜式离心通风机性能参数

机号	功率/kW	转速/(r/min)	流量/(m ³ /h)	全压/Pa
12in	6/4P	800/1200	3771 ~ 6344	251 ~ 154
	1.5/2.2		5657 ~ 9516	565 ~ 348
	6/4P	920/1400	4337 ~ 7295	332 ~ 204
	3/4		6600 ~ 11102	769 ~ 474

(续)

机号	功率/kW	转速/(r/min)	流量/(m ³ /h)	全压/Pa
15in	6/4P	700/1050	5374 ~ 9039	266 ~ 164
	4/5.5		8061 ~ 13559	599 ~ 370
	6/4P	800/1200	6142 ~ 10331	348 ~ 214
	6.5/8		9213 ~ 15497	784 ~ 483
18in	6/4P	600/900	7733 ~ 13007	284 ~ 176
	4/5.5		11598 ~ 19509	637 ~ 394
	6/4P	700/1050	9021 ~ 15174	385 ~ 239
	6.5/8		13531 ~ 22761	867 ~ 538
20in	6/4P	530/800	8703 ~ 14639	259 ~ 161
	6.5/8		13137 ~ 22098	591 ~ 368
	6/4P	600/900	9852 ~ 16573	331 ~ 206
	6.5/8		14779 ~ 24860	746 ~ 463
22in	6/4P	530/800	12389 ~ 20837	329 ~ 204
	6.5/8		18701 ~ 31453	750 ~ 466
	6/4P	600/900	14026 ~ 23590	422 ~ 262
	9/11		21039 ~ 35385	949 ~ 589
25in	6/4P	480/720	15596 ~ 26230	301 ~ 186
	13/16		23394 ~ 39345	678 ~ 419
	6/4P	530/800	17220 ~ 28962	367 ~ 227
	18.5/22		25993 ~ 43716	837 ~ 518
28in	6/4P	480/720	21041 ~ 34268	388 ~ 240
	18.5/22		30562 ~ 51403	875 ~ 542
	6/4P	530/800	22496 ~ 37838	474 ~ 293
	22/28		33957 ~ 57114	1080 ~ 669
30in	6/4P	500/650	26882 ~ 45213	508 ~ 314
	22/28		34947 ~ 58777	860 ~ 532
	6/4P	540/720	29032 ~ 48829	593 ~ 366
	26/32		38710 ~ 65106	1055 ~ 652

10.3 空调风机的选用

常用的空调风机有以下几种：①BF型低噪声风机箱；②DKT型空调风机；③KTS型多翼形离心通风机；④环保空调。

1. BF型低噪声风机箱

BF系列风机箱是专为满足不同工况运行要求的送风排气设备，根据季节变化及运行工况调节所需风量，节省能耗，并可同时向多方向的管道送风。具有运行平稳、噪声低、体积小、重量轻、外形美观、维护保养方便等优点。广泛应用于工业生产、民用建

筑、商业娱乐、文教卫生等行业的空调工程系统的送风和排风。

风机箱也可根据要求通过电源调压或电源变频来调节风量、风压、配置电控箱后可远程控制。风机箱配套的风机采用外转子电动机驱动，双进风结构，卧式为水平进出风，立式为水平进风垂直上出风。采用全金属可拆框架和外贴隔热吸声面板，安装灵活方便，供 102 种规格选择。可根据用户要求在进风口装设能起滤尘作用的空气过滤网，或加设初中效过滤段可用作净化风机箱。



图 10-17 BF-I 型低噪声风机箱

图 10-17 为 BF-I 型低噪声风机箱外形。表 10-16 列出 BF-I 型低噪声风机箱的性能参数。

表 10-16 BF-I 型低噪声风机箱的性能参数

机号	功率/kW	流量/(m ³ /h)	全压/Pa	静压/Pa
BF-I -No2.0	0.18-4P	852 ~ 1532	227 ~ 208	217 ~ 176
	0.25-4P	1066 ~ 2348	251 ~ 245	213 ~ 182
	0.32-4P	1568 ~ 3010	266 ~ 245	219 ~ 145
	0.12-6P	931 ~ 1759	110 ~ 102	92 ~ 60
	0.18-6P	1350 ~ 2501	114 ~ 91	94 ~ 40
BF-I -No2.25	0.32-4P	1304 ~ 2090	327 ~ 320	312 ~ 282
	0.45-4P	2159 ~ 3426	320 ~ 301	260 ~ 209
	0.55-4P	2387 ~ 3976	305 ~ 254	243 ~ 151
	0.18-6P	1642 ~ 2548	160 ~ 147	137 ~ 92
	0.25-6P	1905 ~ 3107	142 ~ 110	107 ~ 50
BF-I -No2.5	0.55-4P	1373 ~ 2577	449 ~ 470	433 ~ 427
	0.8-4P	2265 ~ 4302	455 ~ 502	415 ~ 380
	0.25-6P	1576 ~ 2770	220 ~ 250	200 ~ 198
BF-I -No2.8	1.1-4P	2463 ~ 4598	398 ~ 452	367 ~ 344
	1.5-4P	3504 ~ 5866	500 ~ 422	438 ~ 258
	0.37-6P	2363 ~ 3863	241 ~ 231	213 ~ 156
	0.55-6P	2925 ~ 4450	270 ~ 194	226 ~ 127
BF-I -No3.0	1.5-4P	3071 ~ 5520	682 ~ 750	642 ~ 649
	0.55-6P	2033 ~ 4225	298 ~ 336	285 ~ 274
BF-I -No3.15	1.8-4P	3041 ~ 5565	744 ~ 836	711 ~ 741
	2.2-4P	4343 ~ 6820	820 ~ 839	749 ~ 699
	0.8-6P	2875 ~ 5408	359 ~ 353	328 ~ 265
BF-I -No3.55	3.0-4P	4087 ~ 8165	952 ~ 979	915 ~ 847
	4.0-4P	7424 ~ 10913	976 ~ 938	852 ~ 703
	0.8-6P	2803 ~ 5620	407 ~ 451	388 ~ 407

(续)

机号	功率/kW	流量/(m ³ /h)	全压/Pa	静压/Pa
BF- I -No3.55	1.5-6P	4002 ~ 8633	459 ~ 418	418 ~ 271
	0.55-8P	3301 ~ 5646	257 ~ 248	230 ~ 185
BF- I -No4.0	1.5-6P	3080 ~ 6380	552 ~ 605	539 ~ 555
	1.8-6P	5088 ~ 7526	576 ~ 656	538 ~ 587
	2.2-6P	6842 ~ 9130	632 ~ 665	568 ~ 550
	1.1-8P	4812 ~ 6847	355 ~ 374	319 ~ 309
BF- I -No4.5	4.0-6P	8437 ~ 13617	805 ~ 868	744 ~ 708
	5.5-6P	11750 ~ 18520	841 ~ 869	722 ~ 539
	7.5-6P	13710 ~ 21500	867 ~ 881	705 ~ 483
	2.2-8P	9033 ~ 13350	462 ~ 502	410 ~ 309
BF- I -No5.0	6.0-6P	11441 ~ 20500	887 ~ 950	822 ~ 812
	7.5-6P	13845 ~ 23433	938 ~ 974	841 ~ 762
	4.0-8P	11883 ~ 18349	593 ~ 625	494 ~ 412

2. DKT 型空调风机

DKT 系列适用于工矿企业、宾馆、大型商场等建筑设施的各种大小规格的空调箱、风机柜式空调机组、中央空调机组及各种净化设备。它具有通用性强、效率高、噪声低、风量大等特点。输送不自燃、无腐蚀性气体，气体含尘量和其他固体的含量 $\leq 100\text{mg}/\text{m}^3$ ，温度在 $-20 \sim 80^\circ\text{C}$ 。

图 10-18 为 DKT 型空调风机外形。其性能参数见表 10-17。



图 10-18 DKT 型空调风机

表 10-17 DKT 型空调风机的性能参数

机号	功率/kW	流量/(m ³ /h)	全压/Pa	静压/Pa
2.0A	0.18-4P	852 ~ 1532	227 ~ 208	217 ~ 176
	0.25-4P	1066 ~ 2348	251 ~ 245	213 ~ 182
	0.32-4P	1568 ~ 3010	266 ~ 245	219 ~ 145
	0.12-6P	931 ~ 1759	110 ~ 102	92 ~ 60
	0.18-6P	1350 ~ 2501	114 ~ 91	94 ~ 40
2.25A	0.32-4P	1304 ~ 2090	327 ~ 320	312 ~ 282
	0.45-4P	2159 ~ 3426	320 ~ 301	260 ~ 209
	0.55-4P	2387 ~ 3976	305 ~ 254	243 ~ 151
	0.18-6P	1642 ~ 2548	160 ~ 147	137 ~ 92
	0.25-6P	1905 ~ 3107	142 ~ 110	107 ~ 50

(续)

机号	功率/kW	流量/(m ³ /h)	全压/Pa	静压/Pa
2.5A	0.55-4P	1373 ~ 2577	449 ~ 470	433 ~ 427
	0.8-4P	2265 ~ 4302	455 ~ 502	415 ~ 380
	0.25-6P	1576 ~ 2770	220 ~ 250	200 ~ 198
2.8A	1.1-4P	2463 ~ 4598	398 ~ 452	367 ~ 344
	1.5-4P	3504 ~ 5866	500 ~ 422	438 ~ 258
	0.37-6P	2363 ~ 3863	241 ~ 231	213 ~ 156
	0.55-6P	2925 ~ 4450	270 ~ 194	226 ~ 127
3.0A	1.5-4P	3071 ~ 5520	682 ~ 750	642 ~ 649
	0.55-6P	2033 ~ 4225	298 ~ 336	285 ~ 274
3.15A	1.8-4P	3041 ~ 5565	744 ~ 836	711 ~ 741
	2.2-4P	4343 ~ 6820	820 ~ 839	749 ~ 699
	0.8-6P	2875 ~ 5408	359 ~ 353	328 ~ 265
3.55A	3.0-4P	4087 ~ 8165	952 ~ 979	915 ~ 847
	4.0-4P	7424 ~ 10913	976 ~ 938	852 ~ 703
	0.8-6P	2803 ~ 5620	407 ~ 451	388 ~ 407
	1.5-6P	4002 ~ 8633	459 ~ 418	418 ~ 271
	0.55-8P	3301 ~ 5646	257 ~ 248	230 ~ 185
4.0A	1.5-6P	3080 ~ 6380	552 ~ 605	539 ~ 555
	1.8-6P	5088 ~ 7526	576 ~ 656	538 ~ 587
	2.2-6P	6842 ~ 9130	632 ~ 665	568 ~ 550
	1.1-8P	4812 ~ 6847	355 ~ 374	319 ~ 309
4.5A	4.0-6P	8437 ~ 13617	805 ~ 868	744 ~ 708
	5.5-6P	11750 ~ 18520	841 ~ 869	722 ~ 539
	7.5-6P	13710 ~ 21500	867 ~ 881	705 ~ 483
	2.2-8P	9033 ~ 13350	462 ~ 502	410 ~ 309
5.0A	6.0-6P	11441 ~ 20500	887 ~ 950	822 ~ 812
	7.5-6P	13845 ~ 23433	938 ~ 974	841 ~ 762
	4.0-8P	11883 ~ 18349	593 ~ 625	494 ~ 412

3. KTS 型多翼形离心通风机

KTS 系列广泛使用于宾馆、体育馆、学校、酒楼、影剧院、礼堂、高级民用住宅及工矿企业等消防和通风的场合；还可以配套于中央空调系统和环保净化系统。输送空气和其他不自燃、对人体无害、无腐蚀性气体。气体内不允许有黏性物质，所含的尘土及硬质颗粒物不大于 150mg/m³。通风换气时进气温度不得超过 80℃。

图 10-19 为 KTS 型多翼形离心通风机外形。表 10-18 列出 KTS 型多翼形离心通风机系列的性能参数。

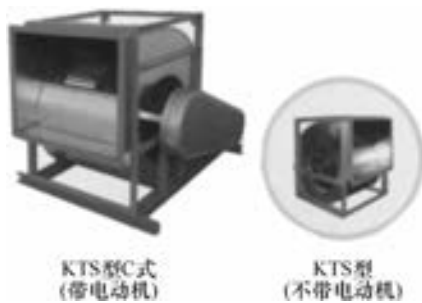


图 10-19 KTS 型多翼形离心通风机

表 10-18 KTS 型多翼形离心通风机系列的性能参数

机号	功率/kW	转速/(r/min)	流量/(m ³ /h)	全压/Pa
9in	0.37	1000	1200 ~ 3200	220 ~ 160
	0.55	1200	1440 ~ 3840	320 ~ 230
	0.75	1400	1680 ~ 4480	431 ~ 331
	1.1	1600	1920 ~ 5120	563 ~ 410
10in	0.55	1000	1650 ~ 4400	270 ~ 198
	0.75	1200	1980 ~ 5280	390 ~ 285
	1.5	1400	2310 ~ 6160	529 ~ 388
	2.2	1600	2705 ~ 7045	695 ~ 506
12in	0.75	900	2505 ~ 6895	328 ~ 238
	1.1	1000	2980 ~ 7660	405 ~ 292
	2.2	1200	3576 ~ 9192	583 ~ 425
	3	1400	4300 ~ 10720	805 ~ 578
15in	1.1	720	4590 ~ 10018	296 ~ 220
	1.5	800	5100 ~ 11132	366 ~ 270
	2.2	900	5737 ~ 12523	463 ~ 341
	3	1000	6375 ~ 13915	571 ~ 421
18in	2.2	650	6896 ~ 15609	348 ~ 256
	3	720	7638 ~ 17290	427 ~ 314
	4	800	8487 ~ 19211	527 ~ 389
	5.5	850	9018 ~ 20412	596 ~ 438
20in	4	650	9460 ~ 21411	430 ~ 315
	5.5	720	10478 ~ 23717	528 ~ 387
	7.5	800	11643 ~ 26352	655 ~ 478
	11	850	12371 ~ 28000	736 ~ 540
22in	5.5	650	12200 ~ 28500	515 ~ 382
	7.5	720	13500 ~ 31500	635 ~ 471
	11	800	15000 ~ 35000	780 ~ 580
	15	850	16500 ~ 37500	895 ~ 654

(续)

机号	功率/kW	转速/(r/min)	流量/(m ³ /h)	全压/Pa
25in	5.5	560	17200 ~ 31845	480 ~ 375
	7.5	600	19185 ~ 35515	600 ~ 462
	11	650	21500 ~ 39800	750 ~ 580
	15	720	23815 ~ 44089	920 ~ 712
28in	11	560	22400 ~ 41090	680 ~ 538
	15	600	24000 ~ 44000	780 ~ 620
	18.5	650	26000 ~ 47666	892 ~ 718
	22	720	28500 ~ 52850	1120 ~ 865
30in	11	520	25566 ~ 46941	678 ~ 538
	15	560	27533 ~ 50552	776 ~ 621
	18.5	600	33250 ~ 55163	895 ~ 715
	22	650	31958 ~ 58676	1050 ~ 836
33in	15	500	32145 ~ 54733	741 ~ 605
	22	550	35360 ~ 60206	897 ~ 726
	30	600	38575 ~ 65680	1068 ~ 865
	37	630	40503 ~ 68964	1180 ~ 953
36in	15	450	32145 ~ 54733	741 ~ 605
	30	500	43760 ~ 71110	882 ~ 726
	37	550	48136 ~ 78221	1068 ~ 878
	45	580	50761 ~ 82487	1186 ~ 976

4. 环保空调

环保空调分为轴流机型、变频轴流机型、离心机型、移动式轴流机型、移动式离心机型、中央节能轴流机型、不锈钢机型，可满足用户不同的使用要求。

产品适用于开敞式及半开敞式环境使用。室外空气经过滤、降温后向室内大量的输送，将室内高温、气味、粉尘和混浊闷热的空气排出室外，同时达到换气、降温及增加空气含氧量等多种效果，室内就形成了冷空气不断流通的舒适工作空间，特别适用于高温、人群密集、空气混浊及环境污染的场所使用。环保空调适用于：

- 1) 人流密集场所：超级商场、学校教室、网吧、游戏机房。
- 2) 空气混浊公共场所：医院、地下停车场、车站。
- 3) 高温高污染场所：酒店厨房、注塑厂、制衣厂、鞋厂、印刷厂、橡胶厂、皮革厂、五金冲压车间、玻璃厂、电镀厂、电子厂、食品加工厂。
- 4) 配套涂装设备：无尘喷漆房。
- 5) 配套农业设施：温室大棚、禽畜养殖大棚。
- 6) 配合中央空调设施，提供处理鲜风。



(1) 轴流机型环保空调 图 10-20 示出轴流机型环

图 10-20 轴流机型环保空调

保空调。其性能参数见表 10-19。

表 10-19 轴流机型环保空调性能参数

机号	最大风量 /(m ³ /h)	最大风压 /Pa	A 声级 /dB	电压(V)/ 频率(Hz)	功率 /kW	适用容积 /m ³	送风距离 /m
ZX-15(下出风)	15000	150	≤72	380/50	0.75	100~150	25
ZC-15(侧出风)	15000	150	≤72	380/50	0.75	100~150	25
ZS-15(上出风)	15000	150	≤72	380/50	0.75	100~150	25
ZX-18(下出风)	18000	180	≤76	380/50	1.1	100~150	25
ZC-18(侧出风)	18000	180	≤76	380/50	1.1	100~150	25
ZS-18(上出风)	18000	180	≤76	380/50	1.1	100~150	25
ZX-23(下出风)	23000	210	≤79	380/50	1.5	100~200	25
ZC-23(侧出风)	23000	210	≤79	380/50	1.5	100~200	25
ZS-23(上出风)	23000	210	≤79	380/50	1.5	100~200	25

(2) 移动式轴流机型环保空调 图 10-21 示出移动式轴流机型环保空调。其性能参数见表 10-20。



图 10-21 移动式轴流机型环保空调

表 10-20 移动式轴流型环保空调性能参数

机号	最大风量 /(m ³ /h)	最大风压 /Pa	A 声级 /dB	电压(V)/ 频率(Hz)	功率 /kW	适用容积 /m ³	送风距离 /m
Z-68Y	6800	45	≤55	220/50	0.18	20~50	8
Z-68Y3(大水箱)	6800	45	≤55	220/50	0.18	20~50	8
Z-80Y	8000	50	≤60	220/50	0.13	30~90	12
Z-80Y3(大水箱)	8000	50	≤60	220/50	0.13	30~90	12

(3) 离心机型环保空调 图 10-22 示出离心机型环保空调。其性能参数见表 10-21。



图 10-22 离心机型环保空调

表 10-21 离心机型环保空调性能参数

机号	最大风量 /(m ³ /h)	最大风压 /Pa	A 声级 /dB	电压(V)/ 频率(Hz)	功率 /kW	适用容积 /m ³	送风距离 /m
LX-18(下出风)	18000	280	≤83	380/50	1.5	100~150	25
LC-18(侧出风)	18000	280	≤83	380/50	1.5	100~150	25
LS-18(上出风)	18000	280	≤83	380/50	1.5	100~150	25
LX-25G(下出风)	25000	320	≤85	380/50	2.2	100~250	30
LC-25G(侧出风)	25000	320	≤85	380/50	2.2	100~250	30
LS-25G(上出风)	25000	320	≤85	380/50	2.2	100~250	30

(4) 移动式离心机型环保空调 其性能参数见表 10-22。

表 10-22 移动式离心机型环保空调性能参数

机号	最大风量 /(m ³ /h)	最大风压 /Pa	A 声级 /dB	电压(V)/ 频率(Hz)	功率 /kW	适用容积 /m ³	送风距离 /m
L-80Y	8000	60	≤65	220/50	0.38	30-60	12
L80Y3(大水箱)	8000	60	≤65	220/50	0.38	30-60	12

10.4 厨房抽油烟风机的选用

XBF 系列多翼低噪声厨房排烟离心式通风机是应用和吸收美国“LAV”牌叶轮的设计技术,采用 11-62 系列和 CF 系列多翼形叶片结构型式,并针对其叶轮在厨房排烟使用难于清洗油污,经过改良设计制造而成。

XBF 型 A 式多翼排烟离心通风机见图 10-23。其性能参数见表 10-23。



图 10-23 XBF 型 A 式多翼排烟离心通风机

表 10-23 XBF 型 A 式多翼排烟离心通风机的性能参数

机号	功率/kW	转速/(r/min)	流量/(m ³ /h)	全压/Pa	A 声级/dB
2.8A	0.75	1400	1375 ~ 2500	446 ~ 509	≤73
3A	0.75	910	1589 ~ 2648	281 ~ 270	≤78
	1.5	1400	2400 ~ 4000	640 ~ 615	≤68
3.5A	1.1	910	2814 ~ 4138	438 ~ 276	≤81
	3	1420	4250 ~ 6250	1000 ~ 630	≤72
4A	3	960	4250 ~ 8000	569 ~ 434	≤78
5A	4	960	6000 ~ 9500	971 ~ 992	≤83
	5.5	960	7000 ~ 12000	1002 ~ 788	≤85
6A	5.5	720	9000 ~ 13500	808 ~ 514	≤84
	11	960	12000 ~ 18000	1436 ~ 914	≤89
6.5A	7.5	720	9750 ~ 15750	939 ~ 738	≤84
	15	970	13000 ~ 21000	1669 ~ 1312	≤91
7A	11	720	14000 ~ 22000	1170 ~ 987	≤88

10.5 管道加压风机的选用

管道加压风机有以下几种类型：①GXF 型斜流通风机；②SF (G) 型管道轴流通风机；③GDF 型离心式管道风机；④T35 型轴流通风机；⑤HF 型轴流通风机；⑥POG 型动叶可调轴流通风机。

1. GXF 型斜流通风机

GXF 斜流风机为鼓形结构，其进出风口小的特点加快了气流的流速，压力系数高，同一般的轴流风机同样机号的情况下，其流量压力均大于一般轴流风机的流量、压力，所以特别适用由于管道安装空间较小的地方。此风机广泛应用于工矿企业、宾馆、博物馆、体育馆等场所管道加压、送风和排风及高层建筑，一般建筑的通风换气。输送气体

温度在 $-20 \sim 80^{\circ}\text{C}$ 之间, 灰尘 $\leq 100\text{mg}/\text{m}^3$ 。

图 10-24 为 GXF 型斜流通风机外形。其性能参数见表 10-24。



图 10-24 GXF 型斜流通风机

表 10-24 GXF 型斜流通风机的性能参数

机号	功率/kW	转速/(r/min)	流量/(m^3/h)	全压/Pa	A 声级/dB
3.0F	0.25	1400	864 ~ 2592	179 ~ 125	≤ 64
3.5S	0.18	910	908 ~ 2725	107 ~ 75	≤ 59
3.5F	0.37	1400	1372 ~ 4116	243 ~ 170	≤ 67
4.0S	0.25	910	1356 ~ 4068	139 ~ 97	≤ 67
4.0F	0.75	1400	2048 ~ 5163	318 ~ 222	≤ 76
4.5S	0.37	910	1931 ~ 4862	177 ~ 131	≤ 68
4.5F	1.10	1400	2916 ~ 5832	403 ~ 308	≤ 77
5.0S	0.75	910	2648 ~ 6676	218 ~ 152	≤ 71
5.0F	2.2	1420	4000 ~ 10084	498 ~ 347	≤ 80
6.0S	1.5	960	4576 ~ 11441	312 ~ 233	≤ 75
6.0F	5.5	1450	6912 ~ 17425	717 ~ 500	≤ 84
7.0S	3.0	960	7266 ~ 18168	427 ~ 318	≤ 77
8.0S	7.5	960	10846 ~ 21697	558 ~ 427	≤ 81

2. SF (G) 型管道轴流通风机

SF (G) 系列具有噪声低、风量大、耗电少、结构合理等特点。它的叶片是根据三元流理论而设计制造的, 是目前化工、轻工、民用建筑、高级宾馆等部门新选用的理想配套设备。此系列风机适用于工矿企业、车间仓库等场所作防暑降温、通风换气使用, 或用于一般工业管道加压、送风、排风和屋顶通风使用。按客户要求可提供 SF-I 型固定式岗位机及 SF-II 型可调式岗位机和 SF-III 型移动可调式岗位机。

图 10-25 为 SF (G) 型管道轴流通风机外形。其性能参数见表 12-25。

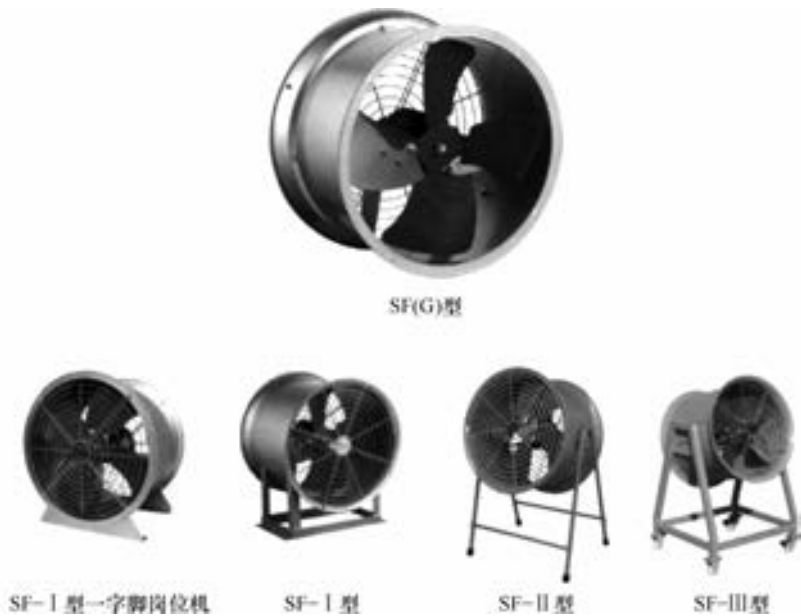


图 10-25 SF (G) 型管道轴流通风机

表 10-25 SF (G) 型管道轴流通风机的性能参数

机号	功率/kW	电压/V	转速/(r/min)	流量/(m ³ /h)	全压/Pa	A 声级/dB
2G-2	0.18	220	2800	600 ~ 940	80 ~ 60	≤58
2.5G-2	0.25	220	2800	1200 ~ 1740	168 ~ 126	≤59
2.5G-4	0.18	220/380	1400	790 ~ 1460	45 ~ 24	≤60
3G-2	0.37	380	2800	2025 ~ 3552	208 ~ 144	≤79
3G-4	0.25	220/380	1400	1000 ~ 2000	73 ~ 42	≤63
3.5G-2	0.55	380	2800	3740 ~ 5029	271 ~ 175	≤85
3.5G-4	0.37	220/380	1400	2000 ~ 3000	100 ~ 57	≤70
4G-2	0.90	380	2800	5000 ~ 8000	352 ~ 131	≤88
4G-4	0.55	220/380	1400	2675 ~ 5000	150 ~ 98	≤71
5G-2	1.50	380	2800	7103 ~ 9552	347 ~ 158	≤89
5G-2	2.20	380	2800	5219 ~ 9552	452 ~ 158	≤89
5G-4	0.75	220/380	1400	3835 ~ 8001	236 ~ 106	≤75
5G-4	1.50	380	1400	3694 ~ 8001	248 ~ 152	≤75
5G-6	0.55	380	910	1722 ~ 5090	110 ~ 46	≤70
5G-6	0.37	380	910	2449 ~ 5090	97 ~ 46	≤70
5.6G-4	1.5	380	1400	7000 ~ 12700	284 ~ 199	≤80
6G-2	3.0	380	2900	12131 ~ 16000	570 ~ 294	≤96
6G-2	4.0	380	2900	8500 ~ 16000	789 ~ 294	≤96

(续)

机号	功率/kW	电压/V	转速/(r/min)	流量/(m ³ /h)	全压/Pa	A 声级/dB
6G-4	2.2	220/380	1420	8291 ~ 15640	322 ~ 208	≤81
6G-6	1.1	380	910	3000 ~ 10635	177 ~ 119	≤71
7G-4	3.0	380	1420	14000 ~ 22000	236 ~ 137	≤84
7G-6	1.5	380	960	7023 ~ 13068	165 ~ 95	≤75
7G-8	1.1	380	720	5529 ~ 9618	89 ~ 54	≤78
8G-4	4.0	380	1450	13000 ~ 25000	482 ~ 175	≤89
8G-6	2.2	380	960	5875 ~ 16319	283 ~ 75	≤79
9G-4	5.5	380	1450	24828 ~ 34759	373 ~ 255	≤90
9G-6	3.0	380	960	13738 ~ 28130	230 ~ 167	≤87
10G-6	4.0	380	960	13235 ~ 33862	300 ~ 196	≤84
12G-6	5.5	380	960	18476 ~ 37662	431 ~ 186	≤90

3. GDF 型离心管道风机

此风机是在吸取国外先进技术的基础上加以改进，自主研发的新型产品，风机静压高、运转平稳、噪声低、安装尺寸小，方便安装，可直接与风管连接，广泛用于工业与民用建筑内的通风换气。输送空气和其他无腐蚀、无黏性物质对人体无害的气体，所含尘土及硬质颗粒物 $\leq 120\text{mg}/\text{m}^3$ ，气体温度范围 $-20 \sim 80^\circ\text{C}$ 。

图 10-26 示出 GDF 型离心管道风机。其性能参数见表 10-26。



图 10-26 GDF 型离心管道风机

表 10-26 GDF 型离心管道风机的性能参数

机号	功率 /kW	电压 /V	转速 /(r/min)	流量 /(m ³ /h)	全压 /Pa	A 声级 /dB
400 × 200-41	0.26	220	1200	560 ~ 1002	230 ~ 57	≤71.5
400 × 200-43	0.26	380	1300	652 ~ 1165	238 ~ 120	≤72.7

(续)

机号	功率 /kW	电压 /V	转速 /(r/min)	流量 /(m ³ /h)	全压 /Pa	A 声级 /dB
500 × 250-61	0.22	220	850	643 ~ 1134	142 ~ 118	≤65.5
500 × 250-41	0.45	220	1300	833 ~ 1650	332 ~ 200	≤75.5
500 × 250-43	0.63	380	1310	1015 ~ 1898	382 ~ 260	≤76.5
500 × 300-61	0.22	220	930	1207 ~ 2132	212 ~ 188	≤71.4
500 × 300-41	0.63	220	1250	1617 ~ 2857	400 ~ 340	≤79.5
500 × 300-43	1.00	380	1280	1818 ~ 3050	410 ~ 352	≤80.6
600 × 300-61	0.44	220	850	989 ~ 1988	238 ~ 158	≤71.5
600 × 300-63	0.44	380	900	1048 ~ 2109	242 ~ 161	≤73.5
600 × 300-41	1.00	220	1280	1610 ~ 2847	425 ~ 307	≤81.7
600 × 300-43	1.50	380	1300	1837 ~ 2967	477 ~ 317	≤83.6
600 × 350-61	0.64	220	850	2120 ~ 3020	334 ~ 283	≤73.5
600 × 350-63	0.92	380	870	2311 ~ 3286	351 ~ 302	≤73.6
600 × 350-41	1.70	220	1200	3166 ~ 4502	469 ~ 371	≤81.5
600 × 350-43	2.00	380	1250	3520 ~ 4750	509 ~ 406	≤83.4
700 × 400-83	1.15	380	690	2146 ~ 3831	230 ~ 142	≤73.7
700 × 400-63	1.50	380	910	3108 ~ 5679	387 ~ 242	≤79.6
700 × 400-43	3.70	380	1300	4009 ~ 7405	894 ~ 314	≤87.8
800 × 500-83	1.15	380	690	3496 ~ 6646	352 ~ 243	≤74.8
800 × 500-63	2.50	380	890	4234 ~ 7482	576 ~ 265	≤83.5
800 × 500-43	5.00	380	1390	6605 ~ 11672	1382 ~ 636	≤88.6
1000 × 500-83	1.60	380	690	3715 ~ 6924	332 ~ 283	≤79.4
1000 × 500-63	3.70	380	890	4755 ~ 8863	531 ~ 453	≤84.6

4. T35 型轴流通风机

此风机是 30K-4 型轴流风机的替代型产品。BT35 可用于作非腐蚀的含有易燃、易爆气体场合的通风换气；T35 可作为一般工厂、仓库、办公室、住宅内通风换气或加强暖气散热之用；T35 也可在较长的排气管道内间隔串联安装，以提高管道中的风压。输送气体无腐蚀性及其显著粉尘，介质温度 ≤80°C。

图 10-27 为 T35 型轴流通风机的外形。其性能参数见表 10-27。



图 10-27 T35 型轴流通风机

表 10-27 T35 型轴流通风机的性能参数

机号	功率/kW	转速/(r/min)	流量/(m ³ /h)	全压/Pa	叶片角度/(°)	A 声级/dB
2.8A	0.37	2800	2778	186	35°	≤75
	0.18	2800	2560	143	25°	≤72
3.15A	0.55	2800	4155	247	35°	≤79
	0.37	2800	3418	189	25°	≤76
	0.12	1400	2078	62	35°	≤64
	0.18	1400	2415	51	25°	≤63
3.55A	0.75	2800	5380	280	30°	≤82
	1.10	2800	5951	314	35°	≤83
	0.18	1400	2981	78	35°	≤68
	0.25	1400	3457	65	30°	≤67
4A	1.50	2800	7685	354	30°	≤85
	1.10	2800	6999	305	25°	≤83
	0.25	1400	4261	100	35°	≤73
	0.37	1400	4945	83	35°	≤71
4.5A	0.37	1400	6067	126	25°	≤75
	0.55	1400	6455	108	35°	≤74
5A	0.55	1400	7907	146	30°	≤78
	0.75	1400	8712	165	35°	≤79
	0.37	910	5768	72	35°	≤70
5.6A	0.75	1400	10168	163	25°	≤80
	1.10	1400	12239	206	35°	≤82
	0.37	910	8103	90	35°	≤73
6.3A	2.20	1420	17426	261	35°	≤86
	0.75	910	10472	101	30°	≤76
7.1A	2.20	1420	16501	251	20°	≤85
	1.10	910	16514	145	35°	≤81
7.5A	3.00	1420	19450	280	20°	≤87
8A	5.50	1450	29644	332	25°	≤90
	7.50	1450	35682	420	35°	≤93
	2.20	960	23624	184	35°	≤84
9A	3.00	960	30532	206	30°	≤86
	4.00	960	33937	233	35°	≤88
10A	4.00	960	38333	227	25°	≤88
	7.50	960	46141	288	35°	≤91
11.2A	7.50	960	53855	285	25°	≤92
	11.00	960	64825	361	35°	≤86

5. HF 型轴流通风机

HF-I 轴流风机和 HF-II 多翼形可调轴流风机具有比一般轴流风机风量大、风压高等特点，可广泛用于工业管道加压、厂矿企业、民用建筑等通风换气。HF-II 的叶片、轮毂采用 CAD 优化设计、叶形包络造型，由优质铝合金精密压铸而成，具有高强度和一定的耐腐能力，可适用于环境不含易燃易爆气体、腐蚀性气体，以及介质温度不超过 80℃ 中使用，风叶角度可任意调节。

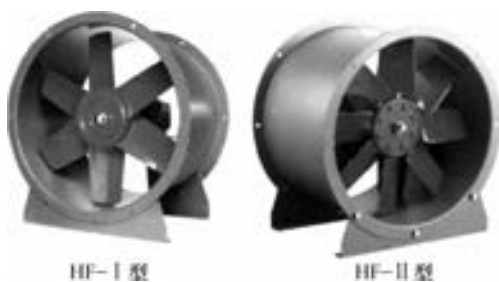


图 10-28 HF-I 型和 HF-II 型轴流通风机

图 10-28 示出 HF-I 型和 HF-II 型轴流通风机。其性能参数见表 10-28。

表 10-28 HF-I 型和 HF-II 型轴流通风机的性能参数

机号	功率/kW	转速/(r/min)	流量/(m ³ /h)	全压/Pa	A 声级/dB
HF-I-4A	0.75	1400	4500	65	≤70
	0.90	2800	9000	282	≤84
HF-I-5A	1.10	1400	5500	99	≤76
	1.50	2800	10700	197	≤85
HF-I-6A	2.20	1420	9500	162	≤87
	3.00	2900	18000	270	≤86
HF-II-15in	0.75	1400	4000	73	≤70
	1.50	2800	8000	323	≤87
HF-II-19in	1.50	1400	8713	177	≤80
	3.00	2900	14000	318	≤86
HF-II-24in	2.20	1420	16000	182	≤87
	4.00	1450	19000	300	≤89

6. POG 型动叶可调轴流通风机

POG 系列动叶可调轴流通风机广泛应用于石油的提炼、各种醇类生产喷漆、烘干、橡胶生产、食品加工、药物生产等有关工厂、车间工作室及仓库、地下室等场所作通风排气之用。此风机具有结构新颖、性能优越，具有风量大、风压高、高效节能、噪声低、可实现反向通风等特点。风机输送无腐蚀，无明显灰度气体。气体含尘土及硬质颗粒物不大于 150mg/m³。

图 10-29 为 POG 型动叶可调轴流通风机。其性能参数见表 10-29。



图 10-29 POG 型动叶可调轴流通风机

表 10-29 POG 型动叶可调轴流通风机的性能参数

机号	转速/(r/min)	功率/kW	可调叶片角度/ /(°)	流量/(m ³ /h)	全压/Pa	比 A 声级/ /dB
3.0A	2800	0.12	20	2184 ~ 1811	114 ~ 157	33
		0.25	25	2647 ~ 2136	131 ~ 166	33
		0.37	30	905 ~ 2290	165 ~ 205	32
		0.37	35	3148 ~ 2578	193 ~ 222	33
3.5A	2800	0.37	20	3467 ~ 2876	155 ~ 213	34
		0.55	25	4204 ~ 3392	224 ~ 285	34
		0.75	30	4613 ~ 3637	274 ~ 329	33
		0.75	35	4998 ~ 4094	321 ~ 356	34
	1400	0.09	25	2102 ~ 1696	72 ~ 100	31
		0.09	30	2307 ~ 1818	77 ~ 107	32
0.12		35	2499 ~ 2047	80 ~ 112	33	
4A	2800	1.10	20	5013 ~ 4054	270 ~ 380	34
		1.10	25	6080 ~ 4960	285 ~ 398	34
		1.50	30	7600 ~ 6150	305 ~ 428	33
		2.20	35	9350 ~ 7800	320 ~ 450	34
	1400	0.12	20	2500 ~ 2027	68 ~ 95	32
		0.18	25	3040 ~ 2480	72 ~ 100	31
		0.18	30	3800 ~ 3075	77 ~ 107	32
		0.25	35	4675 ~ 3900	80 ~ 112	33
5A	2800	1.50	15	9708 ~ 8216	220 ~ 350	34
		2.20	20	11233 ~ 9317	284 ~ 390	34
	1400	0.37	25	6809 ~ 5495	103 ~ 129	32
		0.55	30	7472 ~ 5891	126 ~ 152	32
		0.55	35	8096 ~ 6631	147 ~ 163	31
0.75	40	9240 ~ 7557	160 ~ 181	33		
6A	2900	3.00	15	15384 ~ 13502	330 ~ 515	34
		5.50	20	20103 ~ 16675	489 ~ 674	34
		7.50	25	24374 ~ 19668	706 ~ 893	33
	1450	0.75	20	10052 ~ 8338	122 ~ 168	32
		1.10	25	12187 ~ 9834	176 ~ 223	31
		1.50	30	13373 ~ 10543	216 ~ 259	32
2.20		35	14489 ~ 11867	253 ~ 281	33	

(续)

机号	转速/(r/min)	功率/kW	可调叶片角度 /(°)	流量/(m ³ /h)	全压/Pa	比 A 声级 /dB
7A	1450	2.20	25	17600 ~ 13300	229 ~ 260	34
		2.20	30	18800 ~ 14305	251 ~ 290	33
		3.00	35	21500 ~ 16145	297 ~ 370	33
	960	0.55	25	11652 ~ 8810	100 ~ 115	31
		0.75	30	12447 ~ 9470	111 ~ 133	32
		1.10	35	14234 ~ 10689	130 ~ 165	33
8A	1450	4.00	20	22750 ~ 18451	264 ~ 360	34
		5.50	25	26800 ~ 22798	360 ~ 421	34
		7.50	30	29626 ~ 24737	435 ~ 478	33
		11.00	35	32143 ~ 27313	517 ~ 580	33
	960	1.10	20	15062 ~ 12215	116 ~ 158	34
		1.50	25	17743 ~ 15095	160 ~ 185	34
		3.00	30	19615 ~ 16377	190 ~ 210	33
		3.00	35	21280 ~ 18083	226 ~ 255	33
9A	1450	5.50	20	33924 ~ 28140	275 ~ 380	34
		7.50	25	41131 ~ 33189	397 ~ 500	34
		11.00	30	45133 ~ 35581	487 ~ 584	33
		15.00	35	48900 ~ 40052	569 ~ 632	33
		15.00	40	55810 ~ 45619	617 ~ 696	34
	960	1.50	20	22460 ~ 18630	120 ~ 160	34
		2.20	25	27231 ~ 21974	174 ~ 220	34
		3.00	30	29881 ~ 23557	213 ~ 256	33
		5.50	35	32375 ~ 26517	249 ~ 277	33
		5.50	40	36950 ~ 30223	270 ~ 305	34
10A	1450	7.50	20	46535 ~ 38600	339 ~ 468	34
		11.00	25	56421 ~ 45527	490 ~ 620	34
		18.50	30	61911 ~ 48808	601 ~ 721	33
		22.00	35	67079 ~ 54941	703 ~ 781	33
	960	3.00	20	30809 ~ 25556	149 ~ 205	34
		4.00	25	37354 ~ 30142	215 ~ 271	34
		5.50	30	40988 ~ 32314	263 ~ 316	33
		7.50	35	44411 ~ 36375	308 ~ 342	33
		7.50	40	50686 ~ 41458	334 ~ 376	34

(续)

机号	转速/(r/min)	功率/kW	可调叶片角度/ /(°)	流量/(m ³ /h)	全压/Pa	比 A 声级/ /dB
11.2A	960	5.50	20	43285 ~ 35904	186 ~ 257	34
		7.50	25	52480 ~ 42347	269 ~ 340	34
		11.00	30	57587 ~ 45699	330 ~ 396	33
		11.00	35	62394 ~ 51104	386 ~ 429	33
12A	960	15.00	40	71211 ~ 58245	419 ~ 475	34
		7.50	20	53238 ~ 44161	214 ~ 295	34
		11.00	25	64549 ~ 52085	309 ~ 391	34
		15.00	30	70829 ~ 55839	379 ~ 455	33
		18.50	35	76742 ~ 62856	444 ~ 493	33
		22.00	40	87586 ~ 71639	481 ~ 542	34

10.6 厂房通风换气风机的选用

1. JS 型负压风机

此风机具有超低噪声、耗电少、风量大大、送风远、易于安装的特点。它是工业厂房、各类仓库、办公室、花卉温室、家禽舍房等场合防暑降温理想通风换气之理想选择。输送气体温度 $\leq 70^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度 $\leq 90\%$ ，含尘量及固体杂质 $\leq 100\text{mg}/\text{m}^3$ 的非易燃易爆、低腐蚀气体。

(1) JS-I 型负压风机 图 10-30 示出 JS-I 型负压风机。其性能参数见表 10-30。



图 10-30 JS-I 型负压风机

表 10-30 JS-I 型负压风机的性能参数

机号	功率/kW	电压/V	转速/(r/min)	流量/(m ³ /h)	A 声级/dB
JS-I-6	0.25	220/380	580	8500	≤ 71
JS-I-7	0.37	220/380	580	11000	≤ 72
JS-I-8	0.55	220/380	580	13000	≤ 73
JS-I-9	0.75	220/380	520	14500	≤ 74
JS-I-10	1.10	220/380	520	16000	≤ 75

(2) JS-II 方型负压风机 图 10-31 示出 JS-II 方形负压风机。某性能参数见表 10-31。



图 10-31 JS-II 方形负压风机

表 10-31 JS-II 方形负压风机的性能参数

JS-II 方形(A 式)负压风机						
机号	功率/kW	电压/V	转速/(r/min)	流量/(m ³ /h)	A 声级/dB	备注
JS-II-4A	0.35	220/380	1400	6200	≤73	分带百叶窗 型与前后网型
JS-II-5A	0.55	220/380	1400	8600	≤75	
JS-II-6A	0.25	220/380	720	17000	≤70	
JS-II-8A	0.4	220/380	520	23000	≤71	
JS-II-9A	0.55	220/380	520	27500	≤73	
JS-II-10A	0.55	220/380	460	32000	≤74	
JS-II-12A	0.75	220/380	460	37000	≤75	
JS-II-13A	1.10	220/380	460	44500	≤78	
JS-II 方形(C 式)负压风机						
机号	功率/kW	电压/V	转速/(r/min)	流量/(m ³ /h)	A 声级/dB	备注
JS-II-8C	0.55	220/380	520	23000	≤71	分带百叶窗 型与前后网型
JS-II-9C	0.75	220/380	520	27500	≤73	
JS-II-10C	0.75	220/380	460	32000	≤74	
JS-II-12C	1.10	220/380	460	37000	≤75	
JS-II-13C	1.10	220/380	460	44500	≤78	

2. FAD (S) 节能方形换气扇

FAD (S) 节能方形换气扇经过 CAD 优化设计, 具有节省电能的优点, 其耗电量比国家标准耗电量低; 风量大、噪声低。它被广泛应用于工业厂房、各类仓库、办公室、住宅等场所的通风换气。

图 10-32 示出 FAD (S) 节能方形换气扇。其性能参数见表 10-32。



图 10-32 FAD (S) 节能方形换气扇

表 10-32 FAD (S) 节能方形换气扇性能参数

机号	功率/W	电压/V	转速/(r/min)	流量/(m ³ /h)
FAD20-4	28	220	1400	780
FAD25-4	40	220	1400	840
FAD30-4	45	220	1400	1080
FAD35-4	75	220	1400	2280
FAD40-4	145	220	1400	2880
FAD50-4	350	220	1400	5700
FAS50-4	350	380	1400	5700

3. EB 节能型壁式通风机

EB 系列风机的叶片采用特殊扭曲弧度设计、机壳采用法兰翻边工艺，使风机具有噪声更低，风量更大等特点。风机性能优良、维修方便，广泛应用于仓库、车间及娱乐场所等通风换气之用。使用场所不含易燃易爆、腐蚀性气体，温度不超过 60°C。

图 10-33 示出 EB 节能型壁式通风机。其性能参数见表 10-33。



图 10-33 EB 节能型壁式通风机

表 10-33 EB 节能型壁式通风机的性能参数

机号	电压/V	功率/kW	转速/(r/min)	流量/(m ³ /h)	全压/Pa	A 声级/dB
EB-2A	220/380	0.06	1400	865	25	≤57
EB-2.5A	220/380	0.075	1400	1105	32	≤58
EB-3A	220/380	0.09	1400	1530	40	≤60
EB-3.5A	220/380	0.15	1400	2448	56	≤63
EB-4A	220/380	0.205	1400	3751	70	≤70
EB-5A	220/380	0.3	1400	5140	75	≤72
EB-6A	220/380	0.46	1400	7502	116	≤78

第 11 章 建筑通风和空调规范

为了在通风和空气调节设计中，贯彻国家现行的有关方针政策，以便为安全生产、改善生活的劳动条件，节约能源、保护环境、保证产品质量和提高劳动生产率提供必要的条件，特制订相关规范。以下规范适用于新建、扩建、改建的民用建筑和工业企业生产厂房，以及辅助建筑物的通风、空气调节设计。

11.1 建筑通风设计规范

1. 建筑通风设计的一般规定

第 1 条 为了防止大量热、蒸汽或有害物质向人员活动区散发，防止有害物质对环境的污染，必须从总体规划、工艺、建筑和通风等方面采取有效的综合预防和治理措施。

第 2 条 放散有害物质的生产过程和设备，宜采用机械化、自动化，并应采取密闭、隔离和负压操作措施。对生产过程中不可避免放散的有害物质，在排放前，必须采取通风净化措施，并达到国家有关大气环境质量和各种污染物排放标准的要求。

第 3 条 放散粉尘的生产过程，宜采用湿式作业。输送粉尘物料时，应采用不扬尘的运输工具。放散粉尘的工业建筑，宜采用湿法冲洗措施。当工艺不允许湿法冲洗且防尘要求严格时，宜采用真空吸尘装置。

第 4 条 大量散热的热源（如散热设备、热物料等），宜放在生产厂房外面。对生产厂房内的热源，应采取隔热措施。工艺设计宜采用远距离控制或自动控制。

第 5 条 确定建筑物方位和形式时，宜减少东西向的日晒。以自然通风为主的建筑物，其方位还应根据主要进风面和建筑物形式，按夏季最多风向布置。

第 6 条 位于夏热冬冷或夏热冬暖地区的建筑物建筑热工设计，应符合国家现行标准《民用建筑热工设计规范》（GB 50176）的规定。采用通风屋顶隔热时，其通风层长度不宜大于 10m，空气层高度宜为 20cm 左右。散热量小于 $23\text{W}/\text{m}^3$ 的工业建筑，当屋顶离地面平均高度小于或等于 8m 时，宜采用屋顶隔热措施。

第 7 条 对于放散热或有害物质的生产设备布置，应符合下列要求：

1) 放散不同毒性有害物质的生产设备布置在同一建筑物内时，毒性大的应与毒性小的隔开。

2) 放散热和有害气体的生产设备，应布置在厂房自然通风的天窗下部或穿堂风的下风侧。

3) 放散热和有害气体的生产设备，当必须布置在多层厂房的下层时，应采取防止

污染室内上层空气的有效措施。

第8条 建筑物内，放散热、蒸汽或有害物质的生产过程和设备，宜采用局部排风。当局部排风达不到卫生要求时，应辅以全面排风或采用全面排风。

第9条 设计局部排风或全面排风时，宜采用自然通风。当自然通风不能满足卫生、环保或生产工艺要求时，应采用机械通风或自然与机械的联合通风。

第10条 凡属设有机械通风系统的房间，人员所需的新风量应满足《采暖通风与空气调节设计规范》（GB 50019—2003）第3.1.9条的规定；人员所在房间不设机械通风系统时，应有可开启外窗。

第11条 组织室内送风、排风气流时，不应使含有大量热、蒸汽或有害物质的空气流入没有或仅有少量热、蒸汽或有害物质的人员活动区，且不应破坏局部排风系统的正常工作。

第12条 凡属下列情况之一时，应单独设置排风系统。

- 1) 两种或两种以上的有害物质混合后，能引起燃烧或爆炸的。
- 2) 混合后能形成毒害更大或腐蚀性的混合物、化合物的。
- 3) 混合后易使蒸汽凝结并聚积粉尘的。
- 4) 散发剧毒物质的房间和设备。
- 5) 建筑物内设有储存易燃、易爆物质的单独房间，或有防火防爆要求的单独房间。

第13条 同时放散有害物质、余热和余湿时，全面通风量应按其中所需最大的空气量确定。多种有害物质同时放散于建筑物内时，其全面通风量的确定，应按国家现行标准《工业企业设计卫生标准》（GBZ 1）执行。

送入室内的室外新风量，不应小于《采暖通风与空气调节设计规范》（GB 50019—2003）第《采暖通风与空气调节设计规范》（GB 50019—2003）3.1.9条所规定的人员所需最小新风量。

第14条 放散入室内的有害物质数量不能确定时，全面通风量可参照类似房间的实测资料或经验数据，按换气次数确定，也可按国家现行的各相关行业标准执行。

第15条 建筑物的防烟、排烟设计，应按国家现行标准《高层民用建筑设计防火规范》（GB 50045—1995）及《建筑设计防火规范》（GB 50016—2006）执行。

2. 自然通风

第1条 消除建筑物余热、余湿的通风设计，应优先利用自然通风。

第2条 厨房、厕所、盥洗室和浴室等，宜采用自然通风。当利用自然通风不能满足室内卫生要求时，应采用机械通风。

民用建筑的卧室、起居室（厅）以及办公室等，宜采用自然通风。

第3条 放散热量的工业建筑，其自然通风量应根据热压作用，按此规范附录F的规定进行计算。

第4条 利用穿堂风进行自然通风的厂房，其迎风面与夏季最多风向宜成 $60^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 角，且不应小于 45° 角。

第 5 条 夏季自然通风应采用阻力系数小、易于操作和维修的进排风口或窗扇。

第 6 条 夏季自然通风用的进风口，其下缘距室内地面的高度不应大于 1.2m；冬季自然通风用的进风口，当其下缘距室内地面的高度小于 4m 时，应采取防止冷风吹向工作地点的措施。

第 7 条 当热源靠近工业建筑的一侧外墙布置，且外墙与热源之间无工作地点时，该侧外墙上的进风口，宜布置在热源的间断处。

第 8 条 利用天窗排风的工业建筑，符合下列情况之一时，应采用避风天窗。

1) 夏热冬冷和夏热冬暖地区，室内散热量大于 $23\text{W}/\text{m}^3$ 时。

2) 其他地区，室内散热量大于 $35\text{W}/\text{m}^3$ 时。

3) 不允许气流倒灌时。

注：多跨厂房的相邻天窗或天窗两侧与建筑物邻接，且处于负压区时，无挡风板的天窗可视为避风天窗。

第 9 条 利用天窗排风的工业建筑，符合下列情况之一时，可不设避风天窗：

1) 利用天窗能稳定排风的；

2) 夏季室外平均风速小于或等于 $1\text{m}/\text{s}$ 的。

第 10 条 当建筑物一侧与较高建筑物相邻接时，为了防止避风天窗或风帽倒灌，其各部尺寸应符合《采暖通风与空气调节设计规范》（GB 50019—2003）表 5.2.10 的要求。

第 11 条 挡风板与天窗之间，以及作为避风天窗的多跨工业建筑相邻天窗之间，其端部均应封闭。当天窗较长时，应设置横向隔板，其间距不应大于挡风板上缘至地坪高度的 3 倍，且不应大于 50m。在挡风板或封闭物上，应设置检查门。

挡风板下缘至屋面的距离，宜采用 0.1 ~ 0.3m。

第 12 条 不需调节天窗窗扇开启角度的高温工业建筑，宜采用不带窗扇的避风天窗，但应采取防雨措施。

3. 机械通风

第 1 条 设置集中采暖且有机械排风的建筑物，当采用自然补风不能满足室内卫生条件、生产工艺要求，或在技术经济上不合理时，宜设置机械送风系统。设置机械送风系统时，应进行风量平衡及热平衡计算。

每班运行不足 2h 的局部排风系统，当室内卫生条件和生产工艺要求许可时，可不设机械送风补偿所排出的风量。

第 2 条 选择机械送风系统的空气加热器时，室外计算参数应采用采暖室外计算温度；当其用于补偿消除余热、余湿用全面排风耗热量时，应采用冬季通风室外计算温度。

第 3 条 要求空气清洁的房间，室内应保持正压。放散粉尘、有害气体或有爆炸危险物质的房间，应保持负压。

当要求空气清洁程度不同，或与有异味的房间比邻且有门（孔）相通时，应使气流从较清洁的房间流向污染较严重的房间。

第4条 机械送风系统进风口的位置应符合下列要求:

- 1) 应直接设在室外空气较清洁的地点。
- 2) 应低于排风口。
- 3) 进风口的下缘距室外地坪不宜小于2m, 当设在绿化地带时, 不宜小于1m。
- 4) 应避免进风、排风短路。

第5条 用于甲、乙类生产厂房的送风系统, 可共用同一进风口, 但应与丙、丁、戊类生产厂房和辅助建筑物及其他通风系统的进风口分设; 对有防火防爆要求的通风系统, 其进风口应设在不可能有火花溅落的安全地点, 排风口应设在室外安全处。

第6条 凡属下列情况之一时, 不应采用循环空气:

- 1) 甲、乙类生产厂房, 以及含有甲、乙类物质的其他厂房。
- 2) 丙类生产厂房, 如空气中含有燃烧或爆炸危险的粉尘、纤维, 含尘浓度大于或等于其爆炸下限的25%时。
- 3) 含有难闻气味以及含有危险浓度的致病细菌或病毒的房间。
- 4) 对排除含尘空气的局部排风系统, 当排风经净化后, 其含尘浓度仍大于或等于工作区容许浓度的30%时。

第7条 机械送风系统(包括与热风采暖合用的系统)的送风方式, 应符合下列要求:

- 1) 放散热或同时放散热、湿和有害气体的工业建筑, 当采用上部或上下部同时全面排风时, 宜送至作业地带。
- 2) 放散粉尘或密度比空气大的气体和蒸汽, 而不同时放散热的工业建筑, 当从下部地区排风时, 宜送至上部区域。
- 3) 当固定工作地点靠近有害物质放散源, 且不可能安装有效的局部排风装置时, 应直接向工作地点送风。

第8条 符合下列条件, 可设置置换通风。

- 1) 有热源或热源与污染源伴生。
- 2) 人员活动区空气质量要求严格。
- 3) 房间高度不小于2.4m。
- 4) 建筑、工艺及装修条件许可且技术经济比较合理。

第9条 置换通风的设计, 应符合下列规定:

- 1) 房间内人员头脚处空气温差不应大于3℃。
- 2) 人员活动区内气流分布均匀。
- 3) 工业建筑内置换通风器的出风速度不宜大于0.5m/s;
- 4) 民用建筑内置换通风器的出风速度不宜大于0.2m/s。

第10条 同时放散热、蒸汽和有害气体或仅放散密度比空气小的有害气体的工业建筑, 除设局部排风外, 宜从上部区域进行自然或机械的全面排风, 其排风量不应小于每小时1次换气; 当房间高度大于6m时, 排风量可按 $6\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ 计算。

第11条 当采用全面排风消除余热、余湿或其他有害物质时, 应分别从建筑物内

温度最高、含湿量或有害物质浓度最大的区域排风。全面排风量的分配应符合下列要求：

1) 当放散气体的密度比室内空气轻，或虽比室内空气重，但建筑内放散的显热全年均能形成稳定的上升气流时，宜从房间上部区域排出。

2) 当放散气体的密度比空气重，建筑内放散的显热不足以形成稳定的上升气流而沉积在下部区域时，宜从下部区域排出总排风量的 2/3，上部区域排出总排风量的 1/3，且不应小于每小时 1 次换气。

3) 当人员活动区有害气体与空气混合后的浓度未超过卫生标准，且混合后气体的相对密度与空气密度接近时，可只设上部或下部区域排风。

第 12 条 排除有爆炸危险的气体、蒸汽和粉尘的局部排风系统，其风量应按在正常运行和事故情况下，风管内这些物质的浓度不大于爆炸下限的 50% 计算。

第 13 条 局部排风罩不能采用密闭形式时，应根据不同的工艺操作要求和技术经济条件选择适宜的排风罩。

第 14 条 建筑物全面排风系统吸风口的布置，应符合下列规定：

1) 位于房间上部区域的吸风口，用于排除余热、余湿和有害气体时（含氢气时除外），吸风口上缘至顶棚平面或屋顶的距离，不大于 0.4m。

2) 用于排除氢气与空气混合物时，吸风口上缘至顶棚平面或屋顶的距离，不大于 0.1m。

3) 位于房间下部区域的吸风口，其下缘至地板间距，不大于 0.3m。

4) 因建筑结造成有爆炸危险气体排出的死角处，应设置导流设施。

第 15 条 含有剧毒物质或难闻气味物质的局部排风系统，或含有浓度较高的爆炸危险性物质的局部排风系统所排出的气体，应排至建筑物空气动力阴影区和正压区外。

注：当排出的气体符合国家现行的大气环境质量和各种污染物排放标准，以及各行业污染物排放标准时，可不受本条规定的限制。

第 16 条 采用燃气加热的采暖装置、热水器或炉灶等的通风要求，应符合国家现行标准《城镇燃气设计规范》（GB 50028）的有关规定。

第 17 条 民用建筑的厨房、卫生间宜设置竖向排风道。竖向排风道应具有防火、防倒灌、防串味及均匀排气的功能。

住宅建筑无外窗的卫生间，应设置机械排风排入有防回流设施的竖向排风道，且应留有必要的进风面积。

4. 事故通风

第 1 条 可能突然放散大量有害气体或有爆炸危险气体的建筑物，应设置事故通风装置。

第 2 条 设置事故通风系统，应符合下列要求：

1) 放散有爆炸危险的可燃气体、粉尘或气溶胶等物质时，应设置防爆通风系统或诱导式事故排风系统。

2) 具有自然通风的单层建筑物，所放散的可燃气体密度小于室内空气密度时，宜

设置事故送风系统。

3) 事故通风宜由经常使用的通风系统和事故通风系统共同保证,但在发生事故时,必须保证能提供足够的通风量。

第3条 事故通风量宜根据工艺设计要求通过计算确定,但换气次数不应小于每小时12次。

第4条 事故排风的吸风口,应设在有害气体或爆炸危险性物质放散量可能最大或聚集最多的地点。对事故排风的死角处,应采取导流措施。

第5条 事故排风的排风口,应符合下列规定:

1) 不应布置在人员经常停留或经常通行的地点。

2) 排风口与机械送风系统的进风口的水平距离不应小于20m;当水平距离不足20m时,排风口必须高出进风口,并不得小于6m。

3) 当排气中含有可燃气体时,事故通风系统排风口距可能火花溅落地点应大于20m。

4) 排风口不得朝向室外空气动力阴影区和正压区。

第6条 事故通风的通风机,应分别在室内、外便于操作的地点设置电器开关。

11.2 建筑消排烟设计规范

1. 建筑消排烟设计的一般规定

第1条 高层建筑的防烟设施,分为机械加压送风的防烟设施和可开启外窗的自然排烟设施。

第2条 高层建筑的排烟设施,分为机械排烟设施和可开启外窗的自然排烟设施。

第3条 一类高层建筑和建筑高度超过32m的二类高层建筑的下列部位,应设排烟设施:

1) 长度超过20m的内走道。

2) 面积超过 100m^2 ,且经常有人停留或可燃物较多的房间。

3) 高层建筑中的中庭和经常有人停留,或可燃物较多的地下室。

第4条 通风、空气调节系统应采取防火、防烟措施。

第5条 机械加压送风和机械排烟的风速,应符合下列规定:

1) 采用金属风道时,不应大于 20m/s 。

2) 采用内表面光滑的混凝土等非金属材料风道时,不应大于 15m/s 。

3) 送风口的风速不应大于 7m/s ;排烟口的风速不应大于 10m/s 。

2. 自然排烟

第1条 除建筑高度超过50m的一类公共建筑和建筑高度超过100m的居住建筑外,靠外墙的防烟楼梯间及其前室、消防电梯间前室和合用前室,宜采用自然排烟方式。

第2条 采用自然排烟的开窗面积应符合下列规定:

1) 防烟楼梯间前室、消防电梯间前室可开启外窗面积不应小于 2.00m^2 ，合用前室不应小于 3.00m^2 。

2) 靠外墙的防烟楼梯间，每五层内可开启外窗总面积之和不应小于 2.00m^2 。

3) 长度不超过 60m 的内走道，可开启外窗面积不应小于走道面积的 2% 。

4) 需要排烟的房间，可开启外窗面积不应小于该房间面积的 2% 。

5) 净空高度小于 12m 的中庭，可开启的天窗或高侧窗的面积不应小于该中庭地面面积的 5% 。

第 3 条 防烟楼梯间前室或合用前室，利用敞开的阳台、凹廊，或前室内有不同朝向的可开启外窗自然排烟时，该楼梯间可不设防烟措施。

第 4 条 排烟窗宜设置在上方，并应有方便开启的装置。

3. 机械防烟

第 1 条 下列部位应设置独立的机械加压送风的防烟设施：

1) 不具备自然排烟条件的防烟楼梯间、消防电梯间前室或合用前室。

2) 采用自然排烟措施的防烟楼梯间，其不具备自然排烟条件的前室。

3) 封闭避难层（间）。

第 2 条 高层建筑防烟楼梯间及其前室、合用前室和消防楼梯间前室的机械加压送风量，应由计算确定，或按表 11-1 至表 11-3 的规定确定。当计算值和表不一致时，应按两者中较大值确定。

表 11-1 防烟楼梯间（前室不送风）的加压送风量

系统负担层数	加压送风量/ (m^3/h)
<20 层	25000 ~ 30000
20 ~ 32 层	35000 ~ 40000

表 11-2 防烟楼梯间及其合用前室的分别加压送风量

系统负担层数	送风部位	加压送风量/ (m^3/h)
<20 层	防烟楼梯间	16000 ~ 20000
	合用前室	12000 ~ 16000
20 ~ 32 层	防烟楼梯间	20000 ~ 25000
	合用前室	18000 ~ 22000

表 11-3 防烟楼梯间采用自然排烟，前室或合用前室不具备自然排烟条件时的送风量

系统负担层数	加压送风量/ (m^3/h)
<20 层	22000 ~ 27000
20 ~ 32 层	28000 ~ 32000

注：1. 表 11-1 至表 11-3 的风量按开启 $2.00\text{m} \times 1.60\text{m}$ 的双扇门确定。当采用单扇门时，其风量可乘以 0.75 系数计算；当有两个或两个以上出入口时，其风量应乘以 $1.50 \sim 1.75$ 系数计算。开启门时，通过门的风速不宜小于 0.70m/s 。

2. 风量上下限选取应按层数、风道材料、防火门漏风量等因素综合比较确定。

第3条 层数超过三十二层的高层建筑，其送风系统及送风量应分段设计。

第4条 剪力楼梯间可合用一个风道，其风量应按两个楼梯间风量计算，送风口应分别设置。

第5条 封闭避难层（间）的机械加压送风量，应按避难层净面积每平方米不小于 $30\text{m}^3/\text{h}$ 计算。

第6条 机械加压送风的防烟楼梯间和合用前室，宜分别独立设置送风系统。当必须共用一个系统时，应在通向合用前室的支风管上设置压差自动调节装置。

第7条 机械加压送风机的全压，除计算最不利环管道压头损失外，尚应有余压。其余压值应符合下列要求：

1) 防烟楼梯间为 50Pa 。

2) 前室、合用前室、消防电梯间前室、封闭避难层（间）为 25Pa 。

第8条 楼梯间宜每隔二到三层设一个加压送风口；前室的加压送风口应每层设一个。

第9条 机械加压送风机可采用轴流风机或中、低压离心风机。风机位置应根据供电条件、风量分配均衡、新风入口不受火、烟威胁等因素确定。

4. 机械排风

第1条 一类高层建筑和建筑高度超过 32m 的二类高层建筑的下列部位，应设置机械排烟设施：

1) 无直接自然通风，且长度超过 20m 的内走道，或虽有直接自然通风，但长度超过 60m 的内走道。

2) 面积超过 100m^2 ，且经常有人停留，或可燃物较多的地上无窗房间和设固定窗的房间。

3) 不具备自然排烟条件或净空高度超过 12m 的中庭。

4) 除利用窗井等开窗进行自然排烟的房间外，各房间总面积超过 200m^2 ，或一个房间面积超过 50m^2 ，且经常有人停留，或可燃物较多的地下室。

第2条 设置机械排烟设施的部位，其排烟风机的风量应符合下列规定：

1) 担负一个防烟分区排烟或净空高度大于 6.00m 的不划防烟分区的房间时，应按每平方米面积不小于 $60\text{m}^3/\text{h}$ 计算，单台风机最小排烟量不应小于 $7200\text{m}^3/\text{h}$ 。

2) 负担两个或两个以上防烟分区排烟时，应按最大防烟分区面积每平方米不小于 $120\text{m}^3/\text{h}$ 计算。

3) 中庭体积小于 17000m^3 时，其排烟量按其体积的 6 次/ h 换气计算；中庭体积大于 17000m^3 时，其排烟量按其体积的 4 次/ h 换气计算；但最小排烟量不应小于 $102000\text{m}^3/\text{h}$ 。

第3条 带裙房的高层建筑防烟楼梯间及其前室，消防电梯间前室或合用前室，当裙房以上部分利用可开启外窗进行自然排烟，裙房部分不具备自然条件时，其前室或合用前室应设置局部机械排烟设施，其排烟量按前室每平方米不小于 $60\text{m}^3/\text{h}$ 计算。

第4条 排烟口应设在顶棚上或靠近顶棚的墙面上。设在顶棚上的排烟口，距可燃

构件或可燃物的距离不应小于 1.00m。排烟口平时应关闭，并应设有手动和自动开启装置。

第 5 条 防烟分区内的排烟口距最远点的水平距离不应超过 30m。在排烟支管上应设有当烟气温度超过 280℃ 时，能自行关闭的排烟防火阀。

第 6 条 走道的机械排烟系统宜竖向设置；房间的机械排烟系统宜按防烟分区设置。

第 7 条 排烟风机可采用离心风机或采用排烟轴流风机，并应在其机房入口处，设有当烟气温度超过 280℃ 时能自动关闭的防烟防火阀。排烟风机应保证在 280℃ 时能连续工作 30min。

第 8 条 机械排烟系统中，当任一排烟口或排烟阀开启时，排烟风机应能自行启动。

第 9 条 排烟管道必须采用不燃材料制作。安装在吊顶内的排烟管道，其隔热层应采用不燃烧材料制作，并应与可燃物保持不小于 150mm 的距离。

第 10 条 机械排烟系统与通风、空气调节系统宜分开设置。若合用时，必须采取可靠的防火安全措施，并应符合排烟系统要求。

第 11 条 设置机械排烟的地下室，应同时设置送风系统，且送风量不宜小于排烟量的 50%。

第 12 条 排烟风机的全压应按排烟系统最不利环管道进行计算，其排烟量应增加漏风系数。

5. 通风和空气调节

第 1 条 空气中含有易燃、易爆物质的房间，其送、排风系统应采用相应的防爆型通风设备；当送风机设在单独隔开的通风机房内，且送风干管上设有止回阀时，可采用普通型通风设备，其空气不应循环使用。

第 2 条 通风、空气调节系统，横向应按每个防火分区设置，竖向不宜超过五层。当排风管道设有防止回流设施，且各层设有自动喷水灭火系统时，其进风和排风管道可不受此限制。垂直风管应设在管井内。

第 3 条 下列情况之一的通风、空气调节系统的风管道应设防火阀：

- 1) 管道穿越防火分区的隔墙处。
- 2) 穿越通风、空气调节机房，以及重要的或火灾危险性大的房间隔墙和楼板处。
- 3) 垂直风管与每层水平风管交接处的水平管段上。
- 4) 穿越变形缝处的两侧。

第 4 条 防火阀的动作温度宜为 70℃。

第 5 条 厨房、浴室、厕所等的垂直排风管道，应采取防止回流的措施，或在支管上设置防火阀。

第 6 条 通风、空气调节系统的管道等，应采用不燃烧材料制作；但接触腐蚀性介质的风管和柔性接头，可采用难燃烧材料制作。

第 7 条 管道和设备的保温材料、消声材料和粘结剂，应为不燃烧材料或难燃烧材

料。穿过防火墙和变形缝的风管两侧各 2.00m 范围内，应采用不燃烧材料及其粘结剂。

第 8 条 风管内设电加热器时，风机应与电加热器联锁。电加热器前后各 800mm 范围内的风管和穿过设有火源等容易起火部位的管道，均必须采用不燃保温材料。

11.3 建筑空调设计规范

1. 建筑空调设计一般规定

第 1 条 符合下列条件之一时，应设置空气调节：

- 1) 采用采暖通风达不到人体舒适标准，或室内热湿环境要求的。
- 2) 采用采暖通风达不到工艺对室内温度、湿度、洁净度等要求的。
- 3) 对提高劳动生产率和经济效益有显著作用的。
- 4) 对保证身体健康、促进康复有显著效果的。
- 5) 采用采暖通风虽能达到人体舒适和满足室内热湿环境要求，但不经济的。

第 2 条 在满足工艺要求的条件下，宜减少空气调节区的面积和散热、散湿设备。当采用局部空气调节或局部区域空气调节能满足要求时，不应采用全室性空气调节。

有高大空间的建筑物，仅要求下部区域保持一定的温湿度时，宜采用分层式送风或下部送风的气流组织方式。

第 3 条 空气调节区内的空气压力应满足下列要求：

- 1) 工艺性空气调节，按工艺要求确定。
- 2) 舒适性空气调节，空气调节区与室外的压力差，或空气调节区相互之间有压差要求时，其压差值宜取 5 ~ 10Pa，但不应大于 50Pa。

第 4 条 空气调节区宜集中布置。室内温湿度基数和使用要求相近的空气调节区宜相邻布置。

第 5 条 围护结构的传热系数，应根据建筑物的用途和空气调节的类别，通过技术经济比较确定。对于工艺性空气调节不应大于表 11-4 所规定的数值；对于舒适性空气调节，应符合国家现行有关节能设计标准的规定。

表 11-4 围护结构传热系数 K 值

围护结构名称	室温允许波动范围/℃		
	±0.1 ~ 0.2	±0.5	≥ ±1.0
	传热系数 K / [W/(m ² ·℃)]		
屋顶	—	—	0.8
顶棚	0.5	0.8	0.9
外墙	—	0.8	1.0
内墙和楼板	0.7	0.9	1.2

注：1. 表中内墙和楼板的有关数值，仅用于相邻空气调节区的温差大于 3℃ 时。

2. 确定围护结构的传热系数时，应符合《采暖通风与空气调节设计规范》（GB 50019—2003）第 4.1.8 条的规定。

第 6 条 工艺性空气调节区，当室温允许波动范围小于或等于 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 时，其围护结构的热惰性指标 D 值，不应小于表 11-5 的规定。

表 11-5 围护结构最小热惰性指标 D 值

围护结构名称	室温允许波动范围/ $^{\circ}\text{C}$	
	$\pm 0.1 \sim 0.2$	± 0.5
	最小热惰性指标 D	
外墙	—	4
屋顶	—	3
顶棚	4	3

第 7 条 工艺性空气调节区的外墙、外墙朝向及其所在层次，应符合表 11-6 的要求。

表 11-6 外墙、外墙朝向及所在层次

室温允许波动范围/ $^{\circ}\text{C}$	外 墙	外墙朝向	层 次
± 1.0	宜减少外墙	宜北向	宜避免在顶层
± 0.5	不宜有外墙	如有外墙时，宜北向	宜底层
$\pm 0.1 \sim 0.2$	不应有外墙	—	宜底层

注：1. 室温允许波动范围小于或等于 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 的空气调节区，宜布置在室温允许波动范围较大的空气调节区之中；当布置在单层建筑物内时，宜设通风屋顶。

2. 第 7 条和《采暖通风与空气调节设计规范》（GB 50019—2003）第 6.1.9 条规定的“北向”，适用于北纬 23.5° 以北的地区；北纬 23.5° 以南的地区，可相应地采用南向。

第 8 条 空气调节建筑的外窗面积不宜过大。不同窗墙面积比的外窗，其传热系数应符合国家现行有关节能设计标准的规定；外窗玻璃的遮阳系数，严寒地区宜大于 0.80，非严寒地区宜小于 0.65，或采用外遮阳措施。

室温允许波动范围大于或等于 $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ 的空气调节区，部分窗扇应能开启。

第 9 条 工艺性空气调节区，当室温允许波动范围大于 $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ 时，外窗宜北向； $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ 时，不应有东、西向外窗； $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 时，不宜有外窗，如有外窗时，应北向。

第 10 条 工艺性空气调节区的门和门斗，应符合表 11-7 的要求。舒适性空气调节区开启频繁的外门，宜设门斗、旋转门或弹簧门等，必要时可设置空气幕。

表 11-7 门和门斗的要求

室温允许波动范围/ $^{\circ}\text{C}$	外门和门斗	内门和门斗
± 1.0	不宜设置外门，如有经常开启的外门，应设门斗	门两侧温差大于或等于 7°C 时，宜设门斗
± 0.5	不应有外门，如有外门时，必须设门斗	门两侧温差大于 3°C 时，宜设门斗

(续)

室温允许波动范围/℃	外门和门斗	内门和门斗
±0.1~0.2		内门不宜通向室温基数不同,或室温允许波动范围大于±1.0℃的邻室

注:外门门缝应严密,当门两侧的温差大于或等于7℃时,应采用保温门。

第11条 选择确定功能复杂、规模很大的公共建筑的空气调节方案时,宜通过全年能耗分析、投资及运行费用等的比较,进行优化设计。

2. 负荷计算

第1条 除方案设计或初步设计阶段可使用冷负荷指标进行必要的估算之外,应对空气调节区进行逐项、逐时的冷负荷计算。

第2条 空气调节区的夏季计算的热量,应根据下列各项确定:

- 1) 通过围护结构传入的热量。
- 2) 通过外窗进入的太阳辐射热量。
- 3) 人体散热量。
- 4) 照明散热量。
- 5) 设备、器具、管道及其他内部热源的散热量。
- 6) 食品或物料的散热量。
- 7) 渗透空气带入的热量。
- 8) 伴随各种散湿过程产生的潜热量。

第3条 空气调节区的夏季冷负荷,应根据各项得热量的种类和性质,以及空气调节区的蓄热特性,分别进行计算。

通过围护结构进入的非稳态传热量、透过外窗进入的太阳辐射热量、人体散热量,以及非全天使用的设备、照明灯具的散热量等形成的冷负荷,应按非稳态传热方法计算确定,不应将上述得热量的逐时值直接作为各相应时刻冷负荷的即时值。

第4条 计算围护结构传热量时,室外或邻室计算温度宜按下列情况分别确定:

1) 对于外窗,采用室外计算逐时温度,按《采暖通风与空气调节设计规范》(GB 50019—2003)第3.2.10条式(3.2.10-1)计算。

2) 对于外墙和屋顶,采用室外计算逐时综合温度,按下式计算:

$$t_{zs} = t_{sh} + \frac{\rho J}{\alpha_w} \quad (11-1)$$

式中, t_{zs} 为夏季空气调节室外计算逐时综合温度(℃); t_{sh} 为夏季空气调节室外计算逐时温度(℃),按GB 50019—2003的第3.2.10条的规定采用; ρ 为围护结构外表面对于太阳辐射热的吸收系数; J_p 为围护结构所在朝向太阳总辐射照度的日平均值(W/m^2); α_w 为围护结构外表面传热系数 [$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$]。

3) 对于隔墙、楼板等内围护结构,当邻室为非空气调节区时,采用邻室计算平均温度,计算公式如下:

$$t_{ls} = t_{wp} + \Delta t_{ls} \quad (11-2)$$

式中, t_{ls} 为邻室计算平均温度 (°C); t_{wp} 为夏季空气调节室外日平均温度 (°C); Δt_{ls} 为邻室计算平均温度与夏季空气调节室外计算日平均温度的差值 (°C), 按表 11-8 选用。

表 11-8 温度的差值

邻室散热量/ (W/m ²)	$\Delta t_{ls}/^{\circ}\text{C}$
很少 (如办公室和走廊等)	0 ~ 2
< 23	3
23 ~ 116	5

第 5 条 外墙和屋顶传热形成的逐时冷负荷, 宜按下式计算:

$$CL = KF(t_{w1} - t_n) \quad (11-3)$$

式中, CL 为外墙或屋顶传热形成的逐时冷负荷 (W); K 为传热系数 [W/(m²·°C)]; F 为传热面积 (m²); t_{w1} 为外墙或屋顶的逐时冷负荷计算温度 (°C), 根据建筑物的地理位置、朝向和构造、外表面颜色和表面粗糙程度, 以及空气调节区的蓄热特性, 可按《采暖通风与空气调节设计规范》(GB 50019—2003) 第 6.2.4 条确定的 t_{w1} 值, 通过计算确定; t_n 为夏季空气调节室内计算温度 (°C)。

注: 当屋顶处于空气调节区之外时, 只计算屋顶传热进入空气调节区的辐射部分形成的冷负荷。

第 6 条 对于室温允许波动范围大于或等于 ±1.0°C 的空气调节区, 其非轻型外墙传热形成的冷负荷, 可近似下式计算。

$$CL = KF(t_{zp} - t_n) \quad (11-4)$$

第 7 条 外窗温差传热形成的逐时冷负荷, 宜按下式计算:

$$CL = KF(t_{w1} - t_n) \quad (11-5)$$

式中, CL 为外窗温差传热形成的逐时冷负荷 (W); t_{w1} 为外窗的逐时冷负荷计算温度 (°C), 根据建筑物的地理位置和空气调节区的蓄热特性, 按《采暖通风与空气调节设计规范》(GB 50019—2003) 第 3.2.10 条确定的值, 通过计算确定。

第 8 条 空气调节区与邻室的夏季温差大于 3°C 时, 宜按式 (11-6) 计算通过隔墙、楼板等内围护结构传热形成的冷负荷:

$$CL = KF(t_{ls} - t_n) \quad (11-6)$$

式中, CL 为内围护结构传热形成的冷负荷 (W)。

第 9 条 舒适性空气调节区, 夏季可不计算通过地面传热形成的冷负荷。工艺性空气调节区, 有外墙时, 应计算距外墙 2m 范围内的地面传热形成的冷负荷。

第 10 条 透过玻璃窗进入空气调节区的太阳辐射热量, 应根据当地的太阳辐射照度、外窗的构造、遮阳设施的类型, 以及附近高大建筑或遮挡物的影响等因素, 通过计算确定。

第 11 条 透过玻璃窗进入空气调节区的太阳辐射热形成的冷负荷, 应根据第 10 条

得出的太阳辐射热量，考虑外窗遮阳设施的种类、室内空气分布特点，以及空气调节区的蓄热特性等因素，通过计算确定。

第 12 条 确定人体、照明和设备等散热形成的冷负荷时，应根据空气调节区蓄热特性和不同使用功能，分别选用适宜的人员群集系数、设备功率系数、同时使用系数及通风保温系数，有条件时宜采用实测数值。

当上述散热形成的冷负荷占空气调节区冷负荷的比率较小时，可不考虑空气调节区蓄热特性的影响。

第 13 条 空气调节区的夏季计算散湿量，应根据下列各项确定：

- 1) 人体散湿量。
- 2) 渗透空气带入的湿量。
- 3) 化学反应过程的散湿量。
- 4) 各种潮湿表面、液面或液流的散湿量。
- 5) 食品或其他物料的散湿量。
- 6) 设备散湿量。

第 14 条 确定散湿量时，应根据散湿源的种类，分别选用适宜的人员群集系数、同时使用系数及通风系数。有条件时，应采用实测数值。

第 15 条 空气调节区的夏季冷负荷，应按各项逐时冷负荷的综合最大值确定。

空气调节系统的夏季冷负荷，应根据所服务空气调节区的同时使用情况、空气调节系统的类型及调节方式，按各空气调节区逐时冷负荷的综合最大值，或各空气调节区夏季冷负荷的累计值确定，并应计入各项有关的附加冷负荷。

第 16 条 空气调节系统的冬季热负荷，宜按 GB 50019—2003 的第 4.2 节的规定计算；室外计算温度，应按第 3.2.5 条的规定计算。

3. 空气调节系统

第 1 条 选择空气调节系统时，应根据建筑物的用途、规模、使用特点、负荷变化情况与参数要求、所在地区气象条件与能源状况等，通过技术经济比较确定。

第 2 条 属下列情况之一的空气调节区，宜分别或独立设置空气调节风系统：

- 1) 使用时间不同的空气调节区。
- 2) 温湿度基数和允许波动范围不同的空气调节区。
- 3) 对空气的洁净要求不同的空气调节区。
- 4) 有消声要求和产生噪声的空气调节区。
- 5) 空气中含有易燃易爆物质的空气调节区。
- 6) 在同一时间内需分别进行供热和供冷的空气调节区。

第 3 条 全空气空气调节系统应采用单风管式系统。下列空气调节区宜采用全空气定风量空气调节系统：

- 1) 空间较大、人员较多。
- 2) 温湿度允许波动范围小。
- 3) 噪声或洁净度标准高。

第 4 条 当各空气调节区热湿负荷变化情况相似,采用集中控制,各空气调节区温湿度波动不超过允许范围时,可集中设置共用的全空气定风量空气调节系统。需分别控制各空气调节区室内参数时,宜采用变风量或风机盘管等空气调节系统,不宜采用末端再热的全空气定风量空气调节系统。

第 5 条 当空气调节区允许采用较大送风温差或室内散湿量较大时,应采用具有二次回风的全空气定风量空气调节系统。

第 6 条 当多个空气调节区合用一个空气调节风系统,各空气调节区负荷变化较大、低负荷运行时间较长,且需要分别调节室内温度,在经济、技术条件允许时,宜采用全空气变风量空气调节系统。当空气调节区允许温湿度波动范围小或噪声要求严格时,不宜采用变风量空气调节系统。

第 7 条 采用变风量空气调节系统时,应符合下列要求:

- 1) 风机采用变速调节。
- 2) 采取保证最小新风量要求的措施。
- 3) 当采用变风量的送风末端装置时,送风口应符合《采暖通风与空气调节设计规范》(GB 50019—2003)第 6.5.2 条的规定。

第 8 条 全空气空气调节系统符合下列情况之一时,宜设回风机:

- 1) 不同季节的新风量变化较大、其他排风出路不能适应风量变化要求。
- 2) 系统阻力较大,设置回风机经济合理。

第 9 条 空气调节区较多、各空气调节区要求单独调节,且建筑层高较低的建筑物,宜采用风机盘管加新风系统。经处理的新风宜直接送入室内。当空气调节区空气质量和温、湿度波动范围要求严格,或空气中含有较多油烟等有害物质时,不应采用风机盘管。

第 10 条 经技术经济比较合理时,中小型空气调节系统可采用变制冷剂流量分体式空气调节系统。该系统全年运行时,宜采用热泵式机组。在同一系统中,当同时有需要分别供冷和供热的空气调节区时,宜选择热回收式机组。

变制冷剂流量分体式空气调节系统,不宜用于振动较大、油污蒸汽较多,以及产生电磁波或高频波的场所。

第 11 条 当采用冰蓄冷空气调节冷源或有低温冷媒可利用时,宜采用低温送风空气调节系统;对要求保持较高空气湿度,或需要较大送风量的空气调节区,不宜采用低温送风空气调节系统。

第 12 条 采用低温送风空气调节系统时,应符合下列规定:

- 1) 空气冷却器出风温度与冷媒进口温度之间的温差不宜小于 3℃,出风温度宜采用 4~10℃,直接膨胀系统不应低于 7℃。
- 2) 应计算送风机、送风管道及送风末端装置的温升,确定室内送风温度,并应保证室内温湿度条件下风口不结露。
- 3) 采用低温送风时,室内设计干球温度应比常规空气调节系统提高 1℃。
- 4) 空气处理机组的选型,应通过技术经济比较确定。空气冷却器的迎风面风速宜

采用 1.5 ~ 2.3m/s, 冷媒通过空气冷却器的温升宜采用 9 ~ 13℃。

5) 采用向空气调节区直接送低温冷风的送风口, 应采取能够在系统开始运行时, 使送风温度逐渐降低的措施。

6) 低温送风系统的空气处理机组、管道及附件、末端送风装置必须进行严密的保冷, 保冷层厚度应经计算确定, 并应符合 GB 50019—2003 的第 7.9.4 条的规定。

7) 低温送风系统的末端送风装置, 应符合 GB 50019—2003 的第 6.5.2 条的规定。

第 13 条 下列情况应采用直流式(全新风)空气调节系统:

- 1) 夏季空气调节系统的回风焓值, 高于室外空气焓值。
- 2) 系统服务的各空气调节区排风量, 大于按负荷计算出的送风量。
- 3) 室内散发有害物质, 以及防火防爆等要求不允许空气循环使用。
- 4) 各空气调节区采用风机盘管或循环风空气处理机组, 集中送新风的系统。

第 14 条 空气调节系统的新风量, 应符合下列规定:

1) 不小于人员所需新风量, 以及补偿排风和保持室内正压所需风量两项中的较大值。

2) 人员所需新风量应满足 GB 50019—2003 的第 3.1.9 条的要求, 并根据人员的活动和工作性质, 以及在室内的停留时间等因素确定。

第 15 条 舒适性空气调节和条件允许的工艺性空气调节可用新风作冷源时, 全空气调节系统应最大限度地使用新风。

第 16 条 新风进风口的面积应适应最大新风量的需要。进风口处应装设能严密关闭的阀门。进风口位置应符合 GB 50019—2003 的第 5.3.4 条的规定。

第 17 条 空气调节系统应有排风出路, 并进行风量平衡计算。室内正压值应符合《采暖通风与空气调节设计规范》(GB 50019—2003) 第 6.1.3 条的规定。人员集中或过渡季节使用大量新风的空气调节区, 应设置机械排风设施, 排风量应适应新风量的变化。

第 18 条 设有机械排风时, 空气调节系统宜设置热回收装置。

第 19 条 空气调节系统风管内的风速, 应符合 GB 50019—2003 的第 9.1.5 条的规定。

4. 空气调节冷热水及冷凝水系统

第 1 条 空气调节冷热水参数, 应通过技术经济比较后确定。宜采用以下数值:

- 1) 空气调节冷水供水温度 5 ~ 9℃, 一般为 7℃。
- 2) 空气调节冷水供回水温差 5 ~ 10℃, 一般为 5℃。
- 3) 空气调节热水供水温度 40 ~ 65℃, 一般为 60℃。
- 4) 空气调节热水供回水温差 4.2 ~ 15℃, 一般为 10℃。

第 2 条 空气调节水系统宜采用闭式循环。当必须采用开式系统时, 应设置蓄水箱。蓄水箱的蓄水量应按系统循环水量的 5% ~ 10% 确定。

第 3 条 全年运行的空气调节系统, 仅要求按季节进行供冷和供热转换时, 应采用两管制水系统。当建筑物内一些区域需全年供冷时, 宜采用冷热源同时使用的分区两管

制水系统；当供冷和供热工况交替频繁或同时使用时，可采用四管制水系统。

第 4 条 中小型工程宜采用一次泵系统；系统较大、阻力较高，且各环路负荷特性或阻力差悬殊时，应在空气调节水的冷热源侧和负荷侧分别设一次泵和二次泵。

第 5 条 设置 2 台或 2 台以上冷水机组和循环泵的空气调节水系统，应能适应负荷变化而改变系统流量，并宜按照 GB 50019—2003 的第 8.5.6 条的要求，设置相应的自控设施。

第 6 条 水系统的竖向分区应根据设备、管道及附件的承压能力确定。两管制风机盘管水系统的管路，应按建筑物的朝向及内外区分区布置。

第 7 条 空气调节水循环泵，应按下列原则选用：

1) 两管制空气调节水系统，宜分别设置冷水和热水循环泵。当冷水循环泵兼作冬季的热水循环泵使用时，冬、夏季水泵运行的台数及单台水泵的流量、扬程应与系统工况相吻合。

2) 一次泵系统的冷水泵及二次泵系统中，一次冷水泵的台数和流量，应与冷水机组的台数及蒸发器的额定流量相对应。

3) 二次泵系统的二次冷水泵台数，应按系统的分区和每个分区的流量调节方式确定，每个分区不宜少于 2 台。

4) 空气调节热水泵台数应根据供热系统规模和运行调节方式确定，不宜少于 2 台；严寒及寒冷地区，当热水泵不超过 3 台时，其中一台宜设置为备用泵。

第 8 条 多台一次冷水泵之间通过共用集管连接时，每台冷水机组入口或出口管道上应设电动阀。电动阀应与对应运行的冷水机组和冷水泵联锁。

第 9 条 空气调节水系统布置和选择管径时，应减少并联环路之间的压力损失的相对差额。当超过 15% 时，应设置调节装置。

第 10 条 空气调节水系统的小时泄漏量，应按系统水容量的 1% 计算。

第 11 条 空气调节水系统的补水点，应设置在循环水泵的吸入口处。当补水压力低于补水点压力时，应设置补水泵。空气调节补水泵按下列要求选择和设定：

1) 补水泵的扬程，应保证补水压力比系统静止时补水点的压力高 30 ~ 50kPa。

2) 小时流量应为系统水容量的 5% ~ 10%。

3) 严寒及寒冷地区空气调节热水用及冷热水合用的补水泵，应设置备用泵。

第 12 条 当设置补水泵时，空气调节水系统应设补水调节水箱。水箱的调节容积应按照水源的供水能力、水处理设备的间断运行时间，以及补水泵稳定运行等因素确定。

第 13 条 闭式空气调节水系统的定压和膨胀，应按下列要求设计：

1) 定压点应设在循环水泵的吸入口处，定压点最低压力应使系统最高点压力高于大气压力 5kPa 以上。

2) 宜采用高位水箱定压。

3) 膨胀管上不应设置阀门。

4) 系统的膨胀水量应能够回收。

第 14 条 当给水硬度较高时,空气调节热水系统的补水应进行水处理,并应符合设备对水质的要求。

第 15 条 空气调节水管的坡度、设置伸缩器的要求,应符合 GB 50019—2003 的第 4.8.17 条和第 4.8.18 条对热水供暖管道的规定。

第 16 条 空气调节水系统应设置排气和泄水装置。

第 17 条 冷水机组或换热器、循环水泵、补水泵等设备的入口管道上,应根据需要设置过滤器或除污器。

第 18 条 空气处理设备冷凝水管道,应按下列规定设置:

1) 当空气调节设备的冷凝水盘位于机组的正压段时,冷凝水盘的出水口应设置水封;位于负压段时,应设置水封,水封高度应大于冷凝水盘处正压或负压值。

2) 冷凝水盘的泄水支管沿水流方向坡度不应小于 0.01,冷凝水水平干管不应过长,其坡度不应小于 0.003,且不允许有积水部位。

3) 冷凝水水平干管始端应设置扫除口。

4) 冷凝水管道宜采用排水塑料管或热镀锌钢管,管道应采取防凝露措施。

5) 冷凝水排入污水系统时,应有空气隔断措施,冷凝水管不得与室内密闭雨水系统直接连接。

6) 冷凝水管管径应按冷凝水的流量和管道坡度确定。

第 12 章 建筑通风和空调工程设计范例

12.1 风机选型注意事项

1. 选择原则

风机的选择总的原则在于设备在系统中能够安全、经济地运行。选择的内容主要是确定它的型式、台数、规格、转速，以及与之配套的原动机功率。

选择时应具体考虑以下几个原则：①所选风机应满足工作中所需要的最大流量和最大的压头，从而不致于使主要设备的输出功率受到限制。同时要使所选用的泵或风机的正常运行工况点，尽可能靠近它的设计工况点，从而使风机能长期地在高效率区运行，以提高设备长期运行的经济性。②力求选择结构简单、体积小、重量轻的风机。为此应在允许的条件下，尽量选择高转速。③力求运行时安全可靠。④对于有特殊要求的风机，除以上要求外，还应尽可能地满足以下要求：例如，安装位置受限制时应考虑体积小，进出口管路要能匹配等。

2. 选择风机时一般应先知道的参数

- 1) 不同条件下的流量和压头，至少要知道所需要的最大流量 $q_{V\max}$ 及最大压头 H_{\max} 。
- 2) 被输送介质的温度 t 。
- 3) 被输送介质的密度 ρ 。
- 4) 工作条件下的大气压力 p_a 。

为了获得上述参数，最好是对系统管路进行实际的试验测定。一般以现场实测为基础，用理论计算来校核。但是对于提供的参数需考虑测试的误差，运行时设备性能的变化等，应当有一定的裕量。因此在实际选择时， q_V 、 H 需比 $q_{V\max}$ 、 H_{\max} 大些，可以取为

$$q_V = (1.05 \sim 1.10) q_{V\max} \quad (12-1a)$$

$$H = (1.01 \sim 1.15) H_{\max} \quad (12-1b)$$

或
$$P = (1.01 \sim 1.15) P_{\max} \quad (12-1c)$$

应当注意：在设计规范中，送风机的工作参数是对温度 $t = 293\text{K}$ (20°C)，大气压力 $p_a = 101\text{kPa}$ ，相对湿度为 50% 的干净空气，空气的密度为 $\rho = 1.2\text{kg/m}^3$ 而言。引风机的工作参数是对气体温度 $t = 473\text{K}$ (200°C)，大气压力 $p_a = 101\text{kPa}$ ，气体的密度 $\rho = 0.745\text{kg/m}^3$ ，相对湿度为 50% 而言。

假如所输送的流体介质不符合上述状态时，为了按照设计规范来选择风机，必须对流量、压头、功率按下列公式进行换算：

(1) 通风机

$$q_{V20} = q_V \quad (12-2a)$$

$$p_{20} = p \times \frac{101 \times 10^3}{p_a} \times \frac{t + 273}{293} \quad (12-2b)$$

$$P_{20} = P \times \frac{101 \times 10^3}{p_a} \times \frac{t + 273}{293} \quad (12-2c)$$

式中, q_v 、 p 、 P 为风机在使用条件下的风量 (m^3/s)、全压 (Pa) 和功率 (kW); p_a 为当地大气压值 (Pa); t 为使用条件下风机进口处气体的温度 ($^{\circ}\text{C}$)。

(2) 引风机

$$q_{v200} = q_v \quad (12-3a)$$

$$p_{200} = p \times \frac{101 \times 10^3}{p_a} \times \frac{t + 273}{473} \quad (12-3b)$$

$$P_{200} = P \times \frac{101 \times 10^3}{p_a} \times \frac{t + 273}{473} \quad (12-3c)$$

在选择风机时, 如果烟气密度没有精确的数据, 则可按下式计算烟气密度 ρ (kg/m^3):

$$\rho = 1.34 \frac{273}{t} \quad (12-4)$$

式中, 1.34 为温度为 273K (0°C) 时, 烟气的平均密度 (kg/m^3); t 为烟气的温度 (K)。

3. 风机的选择方法

风机的选择大致有以下三种方法:

(1) 按风机性能表来选择风机 这种方法简单方便, 但不能准确地确定风机在系统中的最佳工况。选择步骤如下:

1) 根据生产需要, 按式 (11-1) 决定计算流量 q_v 和计算风压 p 。

2) 根据风机的用途, 例如引风机就在常用的引风机性能表中查找合适的型号 (叶轮直径)、转速和电动机功率, 这样便决定了所选的风机。

(2) 利用风机的选择曲线来选择风机 这是最常用的一种方法。风机的选择曲线是以对数坐标表示的, 它把具有相似的不同叶轮直径 D_2 的风机的风压、风量、转速和功率绘在一张图上。风机的工作范围一般规定为设计点效率的 90% 以上的一段。选择步骤如下:

1) 按式 (12-1) 计算流量 q_v 和风压 p 。如果输送的介质参数与常态状况不符合, 应按式 (12-2) 或 (12-3) 进行换算。

2) 按照技术规范, 从安全、经济的原则出发, 决定合理的运行方式和设备的台数。如果选定两台或两台以上设备并联运行, 则应将计算流量参数除以设备的台数, 计算风压保持不变。要考虑在管道阻力一定下, 并联后的总流量, 比各台单独运行的流量之和有所减少。如果选定为两台或两台以上设备串联运行, 则应使计算流量 q_v 保持不变, 计算风压除以设备的台数, 也应考虑串联后总压头有所减小, 从而决定单台设备所需要的选择参数。

3) 根据已定的选择参数, 在风机的选择曲线上作相应坐标轴的垂线, 从其交点即可知道所选风机的机号、转速和功率。往往交点不是刚好落在风机的性能曲线上, 如图 12-1 中 1 点。通常是保持风量不变的条件下垂直往上找, 找到最接近的一条性能曲线上的 2 点或 3 点; 再由 2 点或 3 点所在的性能曲线, 查出在最高效率点时所选风机的机号 (叶轮直径 D_2)、转速, 功率, 然后用插入法经重度换算, 求出工作状况下的功率; 考虑一定的裕量后选用电动机。电动机的安全系数, 通风机采用 1.15, 引风机采用 1.30, 排粉风机采用 1.20。

根据上面 2、3 两点选得了两台风机, 经过权衡分析, 核查运行工况点是否处于高效区。一般选取转速较高, 叶轮直径较小, 运行经济 (风机在流量减小时, 可较长时间保持高效率) 的第 3 点所决定的风机。

(3) 利用风机的量纲一的性能曲线选择风机 风机量纲一的性能曲线代表叶轮外径和转速不同, 但几何形状和性能完全相似的同类型风机的性能曲线。其选择步骤如下:

1) 按生产需要, 选择几种可用的风机型式, 由所选类型的设计点效率 η (一般为 η_{\max}), 查出各类型的流量系数 \bar{q}_v 和压力系数 \bar{p} 。选择时可把几种型式进行列表计算, 便于比较和挑选。

由公式

$$q_v = \frac{\pi}{4} D_2^2 u_2 \bar{q}_v \quad \text{和} \quad p = \rho u_2^2 \bar{p}$$

联立求解出

$$D_2 = \sqrt[4]{\frac{16\rho q_v^2 \bar{p}}{\pi^2 p \bar{q}_v^2}} = 1.131 \sqrt[4]{\frac{\rho q_v^2 \bar{p}}{p \bar{q}_v^2}} \quad (12-5)$$

式中, q_v 、 p 为风机计算风量 (m^3/s)、计算风压 (Pa); u_2 为叶轮圆周速度 (m/s); ρ 为介质的密度, 空气处于标准状态时 $\rho_0 = 1.2 \text{kg}/\text{m}^3$ 。

以计算出的 D_2 , 按生产的机号选型。

2) 按下式计算风机的转速 n (r/min):

$$n = \frac{60}{\pi D_2} \sqrt{\frac{p}{\rho \bar{p}}} \quad (12-6)$$

求得各型式所需转速 n , 选取与算出的 n 值相近的电动机转速。

3) 由上面选用的 D_2 和 n , 按式 (12-5) 和式 (12-6) 算出所需的 u_2' 、 \bar{q}_v' 和 \bar{p}' 。

4) 由 \bar{q}_v' 和 \bar{p}' 查所选类型的量纲一的性能曲线图。如果由 \bar{q}_v' 和 \bar{p}' 决定的点落在 $\bar{q}_v - \bar{p}$ 曲线下面, 而且紧靠曲线, 即认为合适。否则应加大叶轮直径 D_2 或转速 n 进行重选。

5) 根据 \bar{q}_v' 和 \bar{p}' 查量纲一的 $\bar{q}_v - \eta$ 曲线, 得 η 。利用下式计算电动机的功率 P

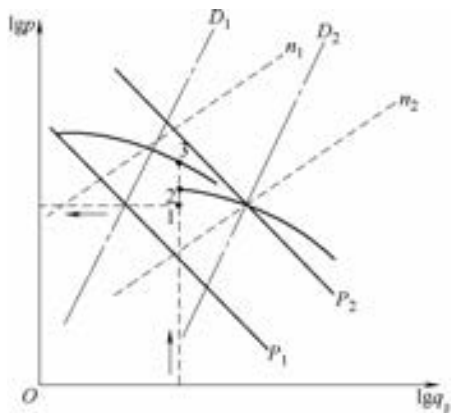


图 12-1 风机选择曲线的使用

(kW):

$$P = \frac{pq_v}{1000\eta}$$

或直接查 $\bar{q}_v - \bar{P}$ 曲线算出 P 。考虑电动机功率的安全系数, 选用标准电动机。

6) 把各型的情况加以比较, 选出适合需要的风机。

对于改装风机, 往往转速已知, 此时是先计算比转数 n_v ; 由比转数 n_v 找出与它相近型号风机的量纲一的性能曲线; 由 n_v 查出 \bar{q}_v 、 \bar{p} , 计算出 D_2 ; 最后根据风机的空气动力学图, 定出风机流道各部分的尺寸和形状。对于圆周速度超过120m/s的叶轮, 必须进行强度校核。

【例题1】 试选择满足下列条件的引风机: $q_{v\max} = 42.46 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$, 管网中损失 $p_{\max} = 321 \text{ mmHg}$, 烟气温度 $t = 411 \text{ K}$, 当地大气压 $p_a = 745 \text{ mmHg}$ 。

解: 根据《热电厂技术设计规范》选用两台, 并联运行。每台参数为

$$\begin{aligned} q'_v &= \frac{1}{2} (1.10) q_{v\max} = \frac{1}{2} \times 1.10 \times 42.46 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h} \\ &= 23.35 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h} \\ p' &= 1.15 p_{\max} = 1.15 \times 321 \text{ mmHg} = 359 \text{ mmHg} \end{aligned}$$

由于引风机的性能曲线表和选择曲线是按常态状况 ($t = 200^\circ\text{C}$, $p_a = 745 \text{ mmHg}$, 密度 $\rho = 0.745 \text{ kg/m}^3$) 绘制的。故风机的计算参数修正为

$$\begin{aligned} q_v &= q'_v 23.35 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h} \\ p_{200} &= p' \frac{760}{p_a} \times \frac{t}{473} = 359 \times \frac{760}{745} \times \frac{411}{473} \text{ mmH}_2\text{O} \\ &= 319 \text{ mmH}_2\text{O} \end{aligned}$$

根据 q_v 和 p 查图Y4-73-11型引风机选择曲线, 选联Y4-73-11No. 20型风机两台。转速 $n = 960 \text{ r/min}$, 叶轮直径 $D_2 = 2 \text{ m}$, 电动机功率 $P = 380 \text{ kW}$, 效率 $\eta = 93\%$, 此台风机的风量为 $q_v = 26.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$, 全压 $p = 322 \text{ mmH}_2\text{O}$ 。

【例题2】 试根据通风风量纲一的性能曲线选出通风机。已知条件: $q_v = 40 \text{ m}^3/\text{s}$, $p = 215 \text{ mmH}_2\text{O}$, 介质为空气, $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$ 。

解: 以4-73型通风机量纲一的性能曲线为例。其他类型仿此进行

当 $\eta = \eta_{\max} = 93\%$ 时, $\bar{p} = 0.435$, $\bar{q}_v = 0.22$, 按式(12-5)计算风机的外径 D_2 (m):

$$D_2 = 1.131 \sqrt[4]{\frac{\rho q_v^2 \bar{p}}{p \bar{q}_v^2}} = 1.131 \sqrt[4]{\frac{0.1224 \times 40^2 \times 0.435}{215 \times 0.22^2}} = 1.92$$

选取机号No. 20的4-73-11型离心通风机, $D_2 = 2 \text{ m}$ 。

由式(12-6)计算转速 n (r/min):

$$n = \frac{60}{\pi D_2} \sqrt{\frac{p}{\rho \bar{p}}} = \frac{60}{3.142 \times 2} \sqrt{\frac{215}{1.2 \times 0.435}} = 606$$

取 $n = 610 \text{ r/min}$ 。

根据 $D_2 = 2 \text{ m}$, $n = 610 \text{ r/min}$, 计算 u_2' (m/s)、 \bar{q}_V' 和 \bar{p}' 如下:

$$u_2' = \frac{\pi D_2 n}{60} = \frac{3.142 \times 2 \times 610}{60} = 63.9$$

$$\bar{p}' = \frac{P}{\rho u_2'^2} = 215 / (0.1224 \times 63.9^2) = 0.43$$

$$\bar{q}_V' = \frac{q_V}{\frac{\pi}{4} D_2^2 u_2'} = \frac{40}{\frac{\pi}{4} \times 2^2 \times 63.9} \approx 0.2$$

根据 \bar{q}_V' 和 \bar{p}' , 查 4-73 型通风机无因次性能曲线由 \bar{q}_V' 、 \bar{p}' 决定的点落在 \bar{q}_V' - \bar{p} 曲线下面, 认为合适。

计算风机的轴功率:

$$P' = \frac{pq_V}{1000\eta} = \frac{9810 \times 0.215 \times 40}{1000 \times 0.92} \text{ kW} = 91.7 \text{ kW}$$

$$\text{电动机功率 } P = \frac{K_1 P'}{\eta_{\text{tm}}} = \frac{1.15 \times 91.7}{0.98} \text{ kW} = 107.6 \text{ kW}$$

电动机容量安全系数 $K = 1.15$, 最后选定电动机标准功率 $P = 125 \text{ kW}$ 。

12.2 工程设计实例

设计二等人员 (是指城市居民)。掩蔽所, 设有简易洗消间, 平时作库房用, 掩蔽室有窗井采光, 战时采用档窗板完善防护密闭。设计步骤如下:

1. 了解设计条件, 明确设计标准, 计算掩蔽人数, 计算清洁通风, 滤毒通风的新风量

(1) 计算人员掩蔽面积 掩蔽面积是指供人员有效使用的面积。其值为人防地下室的净面积, 扣除下列各部分面积: 口部房间面积; 通风、给排水、供电等专业设备房间面积; 厕所、盥洗室面积。从建筑专业发给的作业平面中, 计算得该工程的总掩蔽面积为 255 m^2 。

(2) 二等人员掩蔽所, 按规定每人占有有效面积 1 m^2 。

掩蔽人数为

$$n = \frac{255 \text{ m}^2}{1 \text{ m}^2/\text{人}} = 255 \text{ 人}$$

(3) 计算清洁通风新风量 查通风手册, 清洁通风新风量 $5 \sim 7 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{人})$, 此工程取上限 $7 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{人})$, 则清洁通风新风量 L_1 为

$$L_1 = 255 \text{ 人} \times 7 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{人}) = 1785 \text{ m}^3/\text{h}$$

(4) 计算滤毒通风的新风量 查通风手册, 滤毒通风新风量 $2 \sim 3 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{人})$, 此工程取上限 $3 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{人})$, 则滤毒通风新风量 L_2 为

则 $L_2 = 3\text{m}^3 / (\text{h} \cdot \text{人}) \times 255 \text{人} = 765\text{m}^3/\text{h}$

校核最小防毒通道的换气次数：此工程设有简易洗消间，据规范要求，二等人员掩蔽室主要出入口的最小防毒通道，保证 40 次/h 的换气。该项目最小防毒通道体积 12.5m^3 。则需新风量 L_3 为

$$L_3 = 40 \text{次/h} \times 12.5\text{m}^3 = 500\text{m}^3/\text{h}$$

滤毒通风新风量 $765\text{m}^3/\text{h} > 500\text{m}^3/\text{h}$ ，取 $765\text{m}^3/\text{h}$ 。

2. 选用人防通风设备

(1) 通风机选用 清洁通风与滤毒通风合用一台风机，风机采用手摇电动两用风机，型号为 F270-2 型，性能：风量 $500 \sim 1100\text{m}^3/\text{h}$ ，风压 $1230 \sim 580\text{Pa}$ ，电源三相， 380V ， 0.75W ，两台并联。

(2) 过滤吸收器选用 滤毒通风新风量为 $765\text{m}^3/\text{h}$ ，选用 500 型过滤吸收器两台并联。每台风量 $500\text{m}^3/\text{h}$ ，压力损失为 700Pa 。

(3) 粗过滤器选用 清洁通风量为 $1785\text{m}^3/\text{h}$ ，选用 LWP-(X) 型金属网油浸滤尘器，每个风量为 $1000\text{m}^3/\text{h}$ ，初压力损失 21Pa 。两台并联。

(4) 消波装置选用 进风口部防爆波活门一般由建筑设计选用。暖通专业要作校核，此工程应选用门式防爆悬板活门 MH1800-3，通风量 $1800\text{m}^3/\text{h}$ ，风速 $v \leq 8\text{m/s}$ ，抗冲击波 0.3MPa 。

3. 排风设备选用

1) 主要出入口设有简易洗消间，防毒通道体积为 12.5m^3 ，按 40 次/h 换气计算，排风量为 $500\text{m}^3/\text{h}$ 。

2) 进入简易洗消间的自动排气活门排风量为 $500\text{m}^3/\text{h}$ ，人防地下室战时通风按超压 50Pa 计算时，选用两个 YF-200 型。

3) 简易洗消间设有自动排气活门，空气排出经短管进入防毒通道。短管管径确定，取短管内风速不超过 6m/s 为宜，此工程短管管径 $D = 200\text{mm}$ ，风速 $v \leq 4.5\text{m/s}$ 。

4) 排风管与密闭阀确定 通过密闭阀和风管，直到扩散室的风量是 $500\text{m}^3/\text{h}$ ，风管内空气流速不大于 6m/s ，风管直径 $D = 200\text{mm}$ ，风速 $v \leq 4.4\text{m/s}$ ，密闭阀门 $D = 200\text{mm}$ ，风速 $v \leq 4.42\text{m/s}$ 。

5) 防爆活门选用 排风量 $500\text{m}^3/\text{h}$ ，选门式防爆悬板活门 MH900-3，并与建筑专业核实。

4. 旱厕自动排气活门的选型

简易洗消间设有自动排气活门，排至防毒通道，满足最小防毒通道的换气次数的同时，旱厕要设自动排气活门，以满足厕所间的换气。此工程旱厕体积 42m^3 ，按 10 次/h 换气，排风量为 $420\text{m}^3/\text{h}$ 。选用 YF-200，超压值 $30 \sim 100\text{Pa}$ ，排风量 $120 \sim 500\text{m}^3/\text{h}$ 。此处门式防爆悬板活门选 MH900-3。

5. 通风管道设计

(1) 进风管 这是指进风防爆活门扩散室与粗过滤器、密闭阀门、过滤吸收器到风机的吸入口之间的配管。这段管道要求有抗暴波能力，为此一般均采用 2mm 厚钢板

焊制而成。清洁通风风管的管径为 300mm，密闭阀 $D = 300\text{mm}$ 。滤毒通风风管 D 的管径为 200mm，密闭阀 $D = 200\text{mm}$ 。

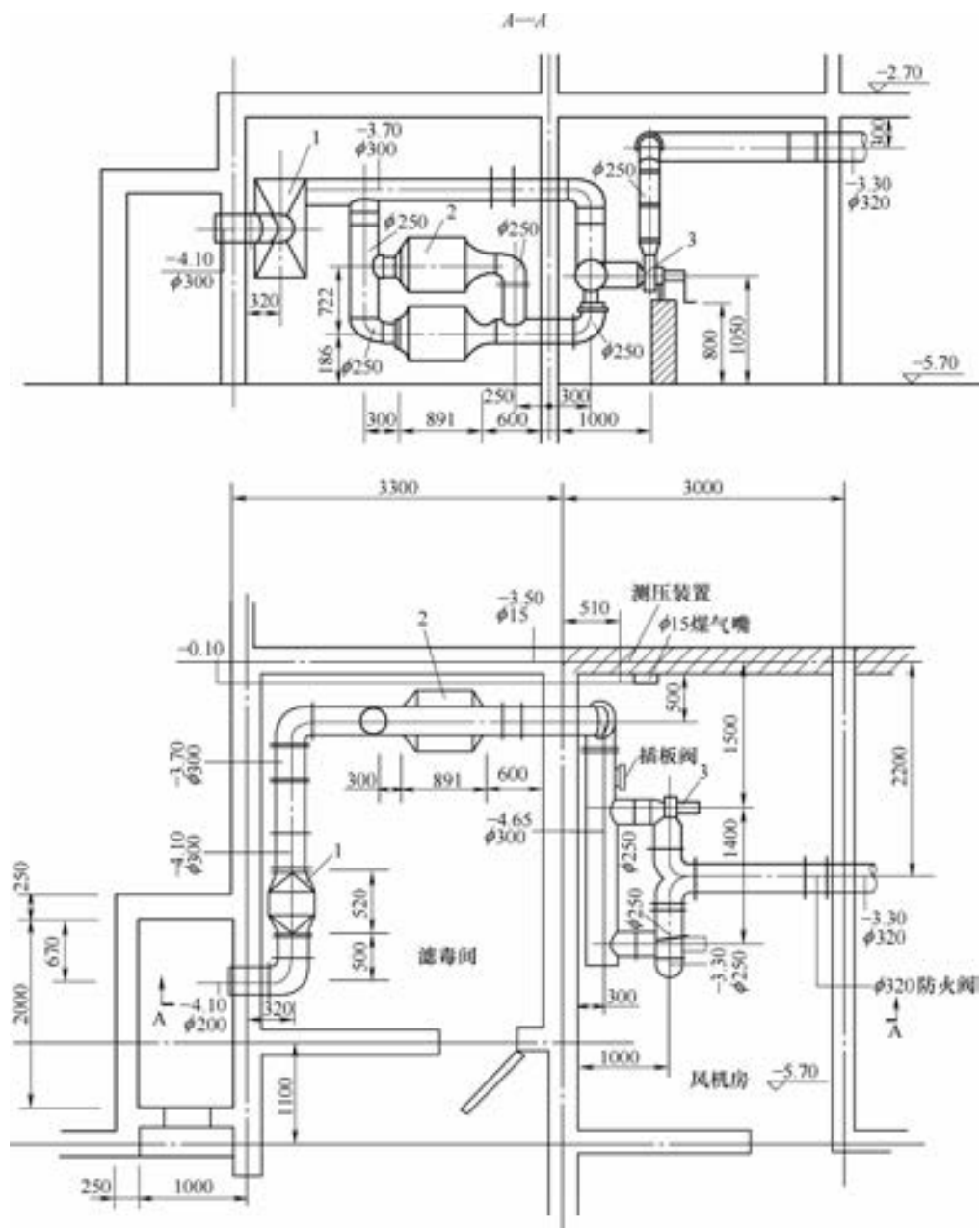


图 12-2 通风机房布置

1—过滤器 2—风机 3—除尘器

(2) 送风管 这是指风机出口至各房间的送风口之间的部分。送风管道出机房时应设防火阀，并与风机连锁。为了简化设计计算，送风管道风量按清洁通风工况送风量 $1785\text{m}^3/\text{h}$ 计算。风机出口一段风管空气流速不大于 10m/s ，主干管空气流速不大于 6m/s ，支风管空气流速不大于 4.5m/s ，支风管管径不小于 130mm 条件下，由风机出口到最远最不利送风口的送风管总长度不大于 50m 时，送风管道系统可不进行阻力计算。

由于地下室夏季比较潮湿，送风管道宜采用玻璃钢制品。图 12-2 示出通风机房布置。

参 考 文 献

- [1] 孙一坚. 简明通风设计手册 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50736—2012 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [3] 中华人民共和国建设部. GB 50176—2002 民用建筑热工设计规范 [S]. 北京: 计划出版社, 2002.
- [4] 中华人民共和国公安部消防局. GB 50045—2005 高层民用建筑设计防火规范 [S]. 北京: 计划出版社, 2005.
- [5] 中国建筑标准设计研究院. 建筑设计防火规范 [S]. 北京: 计划出版社, 2006.
- [6] 中华人民共和国建设部. GB 50028—2006 城镇燃气设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [7] 孙一坚, 沈恒根. 工业通风机 [M]. 4版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [8] 沈阳鼓风机研究所. GB/T 1236—2000 工业通风机 用标准化风道进行性能试验 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- [9] 李庆宜. 通风机 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1981.
- [10] 长春冶金建筑学校, 吉林建筑工程学院, 西北建筑工程学院. 通风工程 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1981.
- [11] 刘士学, 等. 透平压缩机振动 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- [12] 机械设计手册编委会. 机械设计手册: 机械振动和噪声 (单行本) [M]. 4版. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [13] 商景泰, 等. 通风机实用技术手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.



JIANZHU JIKONGTIAO FENGJIDE
GONGCHENG SHEJISHIYONG YU WEIXIU

地址：北京市百万庄大街22号
邮政编码：100037

电话服务

社服务中心：010-88361066

销售一部：010-88326294

销售二部：010-88379649

读者购书热线：010-88379203

网络服务

教材网：<http://www.cmpedu.com>

机工官网：<http://www.cmpbook.com>

机工官博：<http://weibo.com/cmp1952>

封面无纺布袋均为盗版

ISBN 978-7-111-46543-0

策划编辑◎沈红 / 封面设计◎陈沛

ISBN 978-7-111-46543-0



9 787111 465430 >

定价：58.00元