

实用通风空调风道计算法

冯永芳 编著

中国建筑工程出版社

(京) 新登字 035 号

本书叙述通风、除尘与空气调节工程设计中有关水力计算方面的理论和方法。全书从风道设计基本知识开始讨论,继而分章阐述了空气在风道内流动时的阻力、风道的水力计算、均匀送风和均匀吸风管道的计算,风道设计中的技术经济参数及风道特性曲线与风机的选择等问题,尤其对于风道的沿程阻力、风道的水力计算及均匀送风等问题,作了比较深入的探讨。

书中附有较多的列线图表及日常风道计算的备查公式,可供从事通风、除尘、空调、环境保护、劳动保护专业的工程技术人员在设计、施工及管理通风系统时参考,也可供大专院校的师生阅读和参考。

实用通风空调风道计算法

冯永芳 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京市顺义县燕华印刷厂印刷

*

开本: 850×1168 毫米 1/32 印张: 9 $\frac{5}{8}$ 字数: 255 千字

1995 年 10 月第一版 1995 年 10 月第一次印刷

印数: 1—6,600 册 定价: 13.50 元

ISBN 7-112-02628-8

TU · 2002 (7717)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题,可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

建国以来,国内有关通风管道计算方面的书籍主要有四本,其中 50 年代出版过三本,就内容而言,基本上是一致的。60 年代为前苏联 Б·Н·洛巴耶夫所著《通风、压缩空气和气力输送设备的风道计算法》。就目前来看,这些 50 年代的文献资料,除数学模型陈旧外,要想参考,也难以找到了。至于洛氏在整理 ВТИ 实验资料基础上提出决定过渡区摩擦阻力系数的简化公式,据我国的试验报告^①,认为“存在某些不合理性,今后不宜再采用”。作者认为,洛氏所著的《风道计算法》,应该说是一本较好的著作,是值得我们借鉴的。但就通风、除尘与空调系统中的一些风道计算问题,还有待于进一步充实、发展、提高与改进。例如:风道系统的阻力平衡问题,按洛氏的“当量阻力法”还远远不能满足设计者的要求,需要改进;复杂分支风道系统的技术经济计算,准确度欠高,演绎欠简洁等。又,至今我们尚未建立任意断面风道比摩阻的数学模型;对于矩形风道比摩阻的计算,仅仅停留在“当量直径”这一中间变量的计算方法上;带条缝的变截面均匀送风管道的的设计方法,无论分析解或数值解都还不能被广大设计者所接受;静压复得法只能借助于图解法,以及通风工作者对于风道设计中的技术经济依据尚无足够的意识等问题。作者有鉴于此,在重庆建筑大学李惠风教授的热心鼓励下,根据国内外的一些先进经验,结合自己工作中的体会,参以平素所学,编著本书,旨在供我国的通风工作者探讨与参考。

全书共分六章。第一章风道设计基本知识,讨论有关涉及风

① 详见重庆建筑大学(即原重庆建筑工程学院)等四个单位《圆截面风道摩擦阻力试验报告》,同济大学科学技术情报站编印,1978 年 3 月。

目 录

第一章 风道设计基本知识	1
第一节 概述	1
一、风道	1
二、风道的种类	1
三、管段	2
四、风道计算的基本任务	2
第二节 有关空气的物理知识	2
一、空气的组成	2
二、空气的物理特性	3
三、标准空气	4
第三节 有关术语	5
一、流量与流速	5
二、稳定流连续性方程式	6
三、静压、动压与全压	9
四、湿周与水力半径	14
五、沿程损失、局部损失与能量损失	16
第四节 层流、紊流与雷诺数	17
一、两种流态	17
二、流态的判别准则——雷诺数	18
三、流态分析	20
第五节 沿程摩擦阻力系数的确定	21
一、尼古拉兹实验	21
二、莫迪 (Lewis F. Moody) 实验	24
三、沿程摩擦阻力系数的计算	26
第六节 局部损失的定性、定量分析	31
一、局部损失的定性分析	31

二、局部损失的定量分析	33
第二章 空气在风道内流动时的阻力	38
第一节 沿程阻力损失	38
一、圆形风道的沿程阻力	38
二、矩形风道的沿程阻力	39
三、矩形风道比摩阻的直接算法	45
四、其他形状（长缝形和星形断面除外）断面比摩阻的计算	46
五、应用例题	47
第二节 影响沿程阻力损失的诸因素	48
一、风道当量绝对粗糙度修正（ ϵ_k ）	49
二、空气温度修正（ ϵ_t ）	50
三、海拔高度修正（ ϵ_h ）	51
四、气体含尘浓度修正（ ϵ_c ）	51
第三节 局部阻力损失	52
一、风道断面的突然扩大	52
二、风道断面的突然缩小	53
三、渐扩管	53
四、渐缩管	57
五、弯管的局部阻力	57
六、三通的局部阻力	59
第四节 风道内的压力分布	67
一、仅有摩擦阻力的简单风道的压力分布	67
二、有局部阻力的风道的压力分布	70
第三章 风道的水力计算	74
第一节 概述	74
一、风道设计的主要内容	74
二、风道设计要则	74
三、风道设计步骤	81
四、风道设计方法	82
第二节 压损平均法	86
第三节 假定流速法	88
第四节 静压复得法	93
一、静压复得法的基本原理	94

二、关于局部阻力系数	99
三、矩形风道的计算	100
第五节 当量长度法	102
第六节 阻力平衡法	105
第七节 风道设计中的有关注意事项	113
一、风道的布置	113
二、风道断面形状的选择	115
三、风道材料的选择	116
四、风道的保温	117
五、风道的防腐	117
六、风道的防爆及防火	118
第八节 高速风道设计	119
一、风道的分类	119
二、设计要点	120
三、高速风道的设计方法	121
四、高速风道的施工要求	122
第四章 均匀送风和均匀吸风管道的计算	123
第一节 改变风道断面, 孔口面积不变的均匀送风	123
第二节 改变风道断面, 条缝宽度不变的均匀送风	138
第三节 改变条缝宽度, 风道断面不变的均匀送风	142
第四节 改变孔口面积, 风道断面不变的均匀送风	147
第五节 风道断面与条缝宽度都不变的均匀送风	152
第六节 均匀吸风管道的设计原理	158
第七节 改变风道断面, 条缝宽度不变的均匀吸风	167
第八节 带有分支管的均匀吸风	171
第五章 风道设计中的技术经济参数	179
第一节 概述	179
第二节 经济流速的确定	180
一、圆形风道的经济流速	180
二、矩形风道的经济流速	183
第三节 经济断面的确定	187
一、圆形风道的经济断面	187
二、矩形风道的经济断面	189

第四节 经济比摩阻的确定	191
一、圆形风道的经济比摩阻	191
二、矩形风道的经济比摩阻	193
第五节 无分支风道技术经济参数的确定	195
一、主风道	196
二、无分支风道	198
第六节 有分支风道的技术经济水力计算	202
一、由并联组成的风道系统	202
二、有串联有并联的风道系统	205
第六章 风道特性曲线与风机的选择	213
第一节 概述	213
一、通风机的种类	213
二、离心式风机的基本参数	215
三、风机基本参数的换算关系	217
四、通风机的选择	219
第二节 风道的特性曲线	219
第三节 风机的特性曲线与工作点	221
第四节 风机的并联工作与串联工作	224
一、风机的并联工作	224
二、风机的串联工作	229
第五节 风机的调节	232
一、改变风道特性曲线的调节方法	232
二、改变风机特性曲线的调节方法	233
三、改变风机进口处导流叶片角度调节法	234
应用例题	236
一、风道设计基本知识	236
二、空气在风道内流动时的阻力	240
三、风道的水力计算	245
附录一 各种配件的局部阻力系数 ζ	259
附录二 圆形风道比摩阻计算图 ($K=0.15$)	287
附录三 矩形风道比摩阻计算图 ($K=0.15$, 已知风量)	288

附录四	矩形风道比摩阻计算图 ($K=0.15$, 已知风速)	289
附录五	圆形风道比摩阻计算图 ($K=3.0$)	290
附录六	矩形风道比摩阻计算图 ($K=3.0$, 已知风量)	291
附录七	矩形风道比摩阻计算图 ($K=3.0$, 已知风速)	292
附录八	任意断面的比摩阻计算图 ($K=0.15$)	293
附录九	任意断面的比摩阻计算图 ($K=3.0$)	294
主要参考文献		295

第一章 风道设计基本知识

什么叫做风道，风道有哪些种类，风道计算的基本任务是什么；空气组成与物理特性，何谓标准空气，涉及风道设计中的一些流体力学的基本知识和有关术语。所有这些基本知识都是本章所要回答的问题。

第一节 概 述

一、风道

一种输送空气（或气体）的器具或器械叫做风道。亦有称管道的，如通风管道。

在通风、除尘与空气调节工程中，在排风系统中，借助于风道将室内污浊而有害的空气或气体排出室外（有的污浊气体尚须净化后才能排出室外）；在送风系统中，借助于风道将室外的新鲜空气送到室内需气的地方（有的尚须处理后才能送入室内）。

二、风道的种类

（一）按风道内的空气流速分^①，有低速风道和高速风道两类。

流速的划分（低速或高速），视风量的大小、风道的性质（主风道还是支风道、水平风道还是垂直风道等）、风道的部位以及各个国家的技术经济状况等来确定。

若以风量或以主风道来划分，一般认为当流速 $\geq 15\text{m/s}$ 或静压 $\geq 400\text{Pa}$ 时，谓高速风道。

（二）按风道断面的几何形状分，有圆形风道和非圆形风道两

① 这种分类通常指空调工程中的送风风道而言。

类。

非圆形风道有矩形风道、正方形风道以及其他几何形状风道。

(三) 按风道所用的材料分, 有金属风道和非金属风道两类。

金属风道有镀锌钢板(白铁皮)、薄钢板和不锈钢板等。

非金属风道有木板、纤维板、胶合板、塑料板、玻璃钢板、矿渣混凝土或矿渣石膏板、混凝土和砖砌等。

三、管段

具有一定长度的, 并且保持摩擦阻力系数 λ 、流速 V 及断面的几何形状不变的风道, 叫做管段。

不言而喻, 按上述定义, 在此全长的风道(或管段)中流经的空气量及风道边壁的当量绝对粗糙度 $K^{\text{①}}$ 均保持不变。

四、风道计算的基本任务

风道计算通常为了解决如下两类计算问题。

第一类为设计计算

通风工程中, 当已知通风(除尘或空调)系统和通风量时, 如何经济合理地确定风道(管道)的断面尺寸和阻力, 以便选择合适的风机和电动机的功率。

第二类为校核计算

通风工程中, 当已知通风系统和风道的断面尺寸, 如采用已有的风机, 核算该风机是否能够满足要求, 以及采用该风机时, 其动力消耗是否合理等问题。

第二节 有关空气的物理知识

一、空气的组成

地球的四周, 包围着一层相当厚的大气。空气是组成大气的物质。由实验可知, 未受污染的大气是由氧、氮、二氧化碳、氩、氦、氖、氙及水蒸汽等数种气体的混合物组成。其主要气体

① 详见第二章表 2-4。

之含量如表 1-1 所示。

空气主要气体组成含量表

表 1-1

气 体 名 称	分 子 式	按 体 积 计 (%)
氮	N ₂	78.03
氧	O ₂	20.93
氩	Ar	0.932
二氧化碳	CO ₂	0.03
水 蒸 汽	H ₂ O	0.47 (不固定)
氖、氦、氙、氪、氢、臭氧	Ne、Kr、Xe、He、H ₂ 、O ₃	微 量

二、空气的物理特性

空气中的氧气是人类和一切生命物质赖以生存的气体，是空气中最活泼的元素。在通风与空气调节中，为了能对空气有所区别，通常把氧、氮及一些其他气体的混合物称为“干空气”；把含有水蒸汽的混合物称为“湿空气”。若从表 1-1 中除去水蒸汽，便成为“干空气”。水蒸汽与干空气的混合物称为“湿空气”。每 1m³ 湿空气中所含的水蒸汽量 (kg) 称为“绝对湿度”。

空气的物理特性见表 1-2 及表 1-3。

干空气在压力为 100kPa 时的参数

表 1-2

温 度 <i>t</i> (°C)	密 度 ρ (kg/m ³)	比 热 容 c_p (kJ/kg · K)	导热系数 λ (W/m · K)	动力粘度 μ (10 ⁻⁶ Pa · s)	运动粘度 ν (10 ⁻⁶ m ² /s)
-20	1.365	1.009	2.256	16.28	11.93
0	1.252	1.009	2.373	17.16	13.70
10	1.206	1.009	2.454	17.75	14.70
20	1.164	1.013	2.524	18.24	15.70
30	1.127	1.013	2.582	18.73	16.61
40	1.092	1.092	2.652	19.22	17.60
50	1.056	1.056	2.733	19.61	18.60

注：表中数值实际是干空气压力为 98.0665kPa 时之值。

湿空气在压力为 100kPa 时的参数

表 1-3

温度 t (°C)	含湿量 $d \cdot 10^{-3}$ (kg/kg)	密 度 ρ (kg 干空 气/m ³)	比 焓 h_a (kJ/kg 干空气)	比 熵 s_a (kJ/kg 干 空气 · K)	冷 凝 水		
					比 焓 h_w (kJ/kg)	比 熵 s_w (kJ/kg · K)	蒸汽压力 P_s (kPa)
-30	0.2436	1.453	-30.171	-0.1170	-393.14	-1.4524	0.03882
-20	0.6373	1.396	-20.115	-0.0765	-373.95	-1.3750	0.10326
-10	1.6062	1.342	-10.057	-0.0375	-354.01	-1.2978	0.25991
0	3.7895	1.293	0.000	0.000	0.06	-0.0001	0.61117
10	7.661	1.247	10.959	0.0362	42.11	0.1511	1.2280
20	14.758	1.204	20.121	0.0711	84.00	0.2965	2.3389
30	27.329	1.165	30.185	0.1048	125.81	0.4367	4.2462
40	49.141	1.127	40.253	0.1375	167.61	0.5724	7.3838
50	86.856	1.092	50.326	0.1692	209.42	0.7038	12.3503

注：表中数值实际是湿空气在压力为 101325Pa 时之值。

在通风与空气调节工程中的湿空气都服从理想气体的诸定律。

当海拔高度 $H < 11 \times 10^3 \text{m}$ 范围内时，大气压力、温度和密度可由下式求得

$$P = 10^5 (1 - 0.02257H)^{5.256} \quad \text{Pa} \quad (1-1)$$

$$t = t_0 - 6.5H \quad ^\circ\text{C} \quad (1-2)$$

$$\rho = \rho_0 (1 - 0.02257H)^{4.256} \quad \text{kg/m}^3 \quad (1-3)$$

式中 P ——大气压力，Pa；

t ——大气温度的，°C；

t_0 ——海平面上大气温度的，°C；

ρ ——大气密度，kg/m³；

ρ_0 ——海平面上大气的密度，kg/m³；

H ——海拔高度，m/1000。

三、标准空气

通风与空调工程中，通常将大气压力为 101.325kPa，温度为

20℃，相对湿度为 50% 的状况下的空气，称之为标准空气^①。

第三节 有关术语

一、流量与流速

(一) 流量

单位时间内通过风道某一横断面的流体量^②，称为流量（或风量）。一般以 m³/s 计（按 m³/s 计的流量又称流率），通风工程中常常以 m³/h 计。这个流体量如果是指体积，即称“体积流量”（m³/h）；若指质量，则称“质量流量”（kg/h）；若指重量，则称“重量流量”（N/h）。

在通风工程中，流量是一个很重要的物理量，通风就是借助于风道将一定流量的空气输送到被通风的地区。风道设计问题实质上是流体输送问题，也是个流量问题。

流量的数学表达式为

$$L = A \cdot V \quad \text{m}^3/\text{s} \quad (1-4)$$

或
$$L = A \cdot V \cdot 3600 \quad \text{m}^3/\text{h} \quad (1-5)$$

式中 L ——体积流量（风量），m³/s；

A ——风道的过流横断面积，m²；

V ——风道内空气的平均流速，m/s。

若以质量流量表达之

$$\begin{aligned} M &= \rho \cdot L \\ &= \rho \cdot A \cdot V \quad \text{kg/s} \end{aligned} \quad (1-6)$$

或
$$M = \rho \cdot A \cdot V \cdot 3600 \quad \text{kg/h} \quad (1-7)$$

式中 M ——质量流量（风量），kg/s 或 kg/h；

ρ ——流体的密度，kg/m³。

(二) 流速

① 标准状况下的空气是指温度为 0℃，大气压力为 101.325kPa 时的空气。

② 液体和气体，统称为流体。

单位时间内流体运动的距离叫流速。在通风工程中亦称风速，常以 m/s 计。

在风道中，空气的流速可以用仪器来测定，亦可用理论公式计算，但均是短时间的平均流速，不是瞬时速度。用仪器测定流速仅限于断面上某一点的速度，根据全断面若干点测定的流速，经过计算，可得出全断面内的平均流速。风道计算中的流速均指断面平均流速。

在通风工程中，流速也是一个重要物理量，它的选取须十分严肃认真，严格地讲应作技术经济比较后才能确定，对于一般的通风、除尘及空调工程中常用或推荐流速，可从第三章表 3-3～表 3-9 中查取。

流速的数学表达式（见图 1-1）

为

$$V = \frac{L}{A}$$

$$= \frac{\int_A \mu \cdot dA}{A} \quad \text{m/s} \quad (1-8)$$

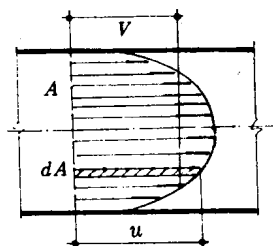


图 1-1

二、稳定流连续性方程式

（一）稳定流

若流体运动时，流体内任意一点的流速、压强、密度等运动要素不随时间而发生变化，这种流动称之为稳定流。

在通风工程中，一般的空气运动都可视作稳定流。因为工程设计和运行工况，都是针对稳定流而言的。即使有些非稳定流，诸如调节阀门、风机的启动等，虽然风道中的流速、压强等运动要素要随时间变化，但由于调节阀门之后，或风机启动后相当长的时间内，风道中的流速及压强都不再随时间而发生变化，故仍然可以视作稳定流。因为稳定流在整个运行过程中占主导地位，非稳定流居次要地位。

（二）连续性原理与连续性方程

在同一条风道（或管道）中，对于不可压缩的流体来说，若流速和风道的横断面的乘积是一个常量（如图 1-2），则称为流体的连续性原理。即

$$V_1 \cdot A_1 = V_2 \cdot A_2 = C(\text{常量}) \quad (1-9)$$

式中 V_1 、 V_2 ——风道或管道内流体的平均流速，
m/s；

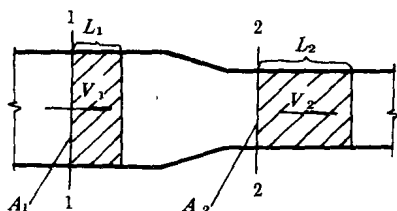


图 1-2

A_1 、 A_2 ——风道或管道的过流横断面积， m^2 。

不难看出，(1-9) 式的量纲正是 (1-4) 式的量纲，所以说这个常量不是别的，正是体积流量（风量） L 。即 (1-9) 式亦可改写为

$$L_1 = L_2 = L \quad (1-10)$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{A_2}{A_1} \quad (1-11)$$

在通风工程中，常常把 (1-9)、(1-10) 及 (1-11) 式，都称为稳定流不可压缩流体总流的连续性方程式，简称流量连续性方程。

连续性方程式表明，稳定流不可压缩流体的体积流量沿程不变；或断面平均流速与其过流横断面积成反比。

稳定流连续性方程，是质量守恒定律在流体力学中的具体应用。确定了断面平均流速沿流向的变化规律。应用这一规律，当已知流量和过流面积的大小时，可以确定任意断面上的平均流速。由于连续性方程并未涉及到作用在流体上的力。因此对于理想流体和实际流体均适用。

对于可压缩性的流体，只要考虑到流体的密度或容重的变化，同样具有这一规律。它们的区别如表 1-4 所示。

在应用上述流量连续性方程时，应注意以下几点

1. 流体必须是稳定流。

稳定流连续性方程式

表 1-4

	不可压缩流体	可 压 缩 流 体	
总 流	$V_1 \cdot A_1 = V_2 \cdot A_2$ $V \cdot A = L = \text{常量}$	$\rho_1 \cdot V_1 \cdot A_1 = \rho_2 \cdot V_2 \cdot A_2$ $\rho \cdot V \cdot A = \rho \cdot L = \text{常量}$	$\gamma_1 \cdot V_1 \cdot A_1 = \gamma_2 \cdot V_2 \cdot A_2$ $\gamma \cdot V \cdot A = \gamma \cdot L = \text{常量}$
物 理 意 义	各断面的体积流量等于常量, 断面平均流速与过流面积成反比	各断面的质量流量等于常量	各断面的重量流量等于常量
应 用 条 件	稳定流不可压缩性空气的密度、容重均为常量	稳定流可压缩性空气的密度不为常量	稳定流可压缩性空气的容重不为常量

2. 流体必须是连续的。

3. 要分清是可压缩性流体还是不可压缩性流体, 以便采用相应的公式进行计算。

4. 对于中途有流量输出与输入的分支风道(如三通), 根据质量守恒定律, 流量连续性方程应按下式改写

当风道中途有流体输出时(如图 1-3 中的实线箭头)

$$L_1 = L_2 + L_3$$

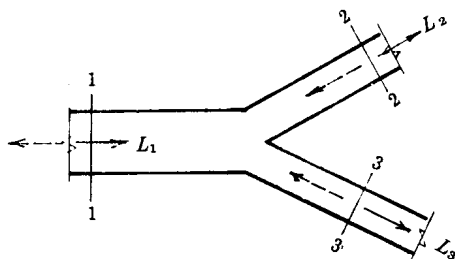


图 1-3

当风道中途有流体输入时(如图 1-3 中的虚线箭头)

$$L_2 + L_3 = L_1$$

【应用例题】

如图 1-4 所示, 有一变径风道, 已知 $D_1 = 199\text{mm}$, $D_2 = 179\text{mm}$, 若 D_1 处的断面平均流速 $V_1 = 8\text{m/s}$, 试求 D_2 处的断面平均流速 V_2 。

【解】根据公式 (1-11)

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{A_2}{A_1} = \frac{\frac{1}{4}\pi D_2^2}{\frac{1}{4}\pi D_1^2} = \frac{D_2^2}{D_1^2}$$

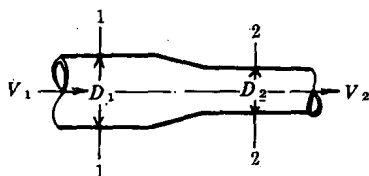


图 1-4

$$\text{故 } V_2 = V_1 \frac{D_1^2}{D_2^2} = 8 \frac{0.199^2}{0.179^2} = 9.89\text{m/s}$$

三、静压、动压与全压

(一) 静压

在通风工程中, 通常将静止的空气作用于风道壁面的压强的总合力, 称之为静压力, 简称静压。

作用在风道壁面的静压强^① 有两个明显的特征

第一是, 静压强的方向垂直于风道壁面, 并指向风道壁面;

第二是, 作用在风道壁面上的任意一点的静压强的大小均相等。

静压力有使空气发生压缩的趋势, 它的作用遍及四方, 不但压缩空气, 而且也压向风道壁面 (管壁)。静压力之值有正有负, 当风道内空气的压力大于大气压力时, 其值为正, 反之则为负。

空气静压力和空气静压强都是一种压力量度。两者区别在于: 前者是作用在某一面积上的总压力; 而后者是作用在某一面积上的平均压强或某一点的压强。

压强可以用三种量度单位表示

1. 从压强的基本定义出发, 用单位面积上所受的压力表示。

① 单位面积上的静压力称为静压强。