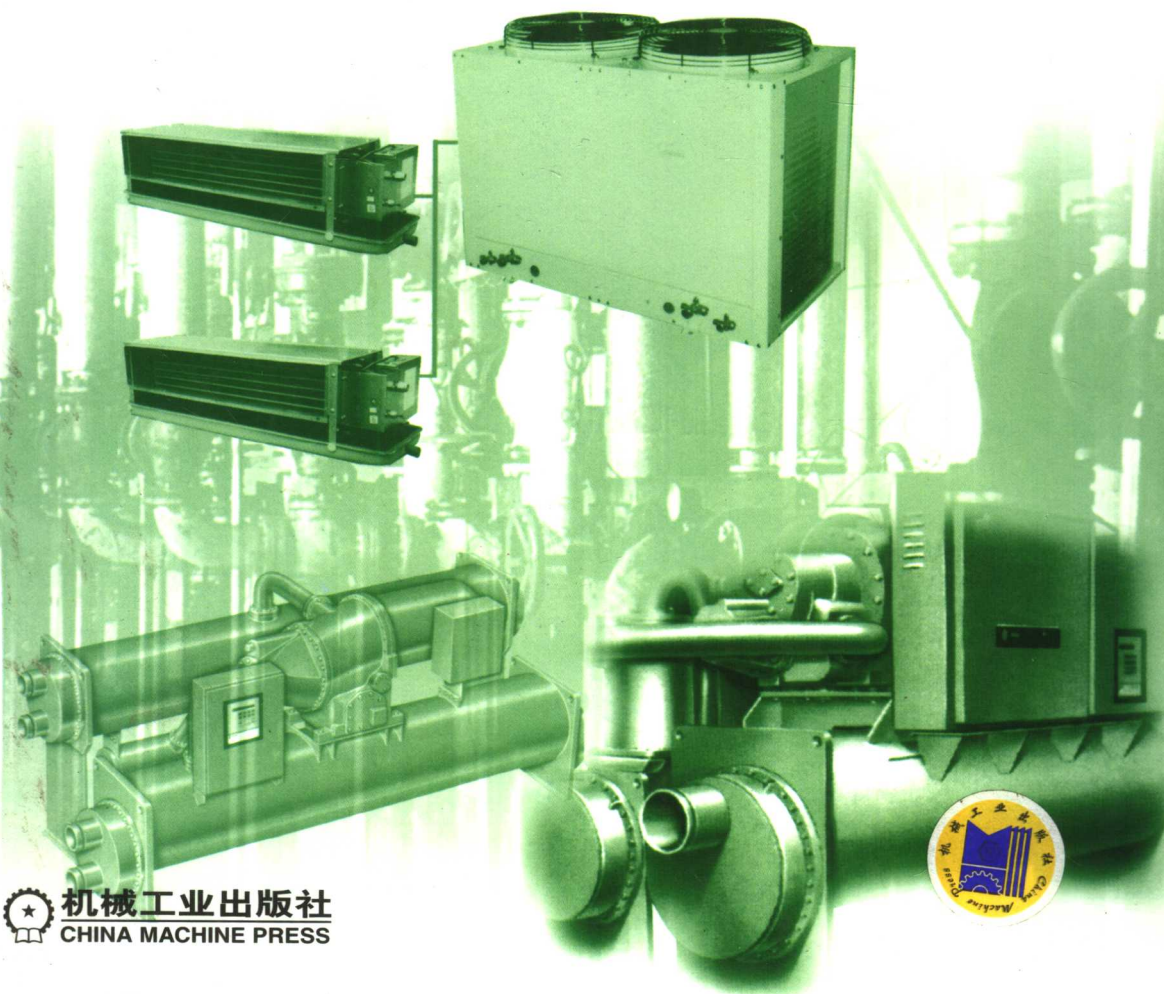


21世纪供热通风与空调工程系列规划教材

流体力学·泵与风机

主编 白扩社
主审 吴耀伟



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



035
B-462

21 世纪供热通风与空调工程系列规划教材

流体力学·泵与风机

主 编 白扩社
副主编 吕 萍
参 编 白 桦
主 审 吴耀伟



机械工业出版社

本书在编写上力求适应高职高专学生的入学水平及学制要求,注重与初高中相关知识的衔接,降低了理论深度,突出了理论与专业应用的结合,重在培养学生的分析与应用能力。

本书共十一章,分为上、下篇,上篇为流体力学,下篇为泵与风机。其中第一章~第四章为流体力学基本理论,第五章~第八章为流体力学基本应用,第九章~十一章为泵与风机理论及其选择应用。本书各章均附有小结、思考题及习题,便于学生自学、复习。

本书可作为高职高专及应用型本科供热通风与空调工程、燃气工程及给水排水工程等专业的教材,也可作为其他相近专业及有关工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

流体力学·泵与风机/白扩社主编. —北京:机械工业出版社, 2005.1

(21世纪供热通风与空调工程系列规划教材)

ISBN 7-111-15446-0

I. 流... II. 白... III. ①流体力学-高等学校-教材②泵-高等学校-教材③鼓风机-高等学校-教材 IV. ①O35②TH

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第17106号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:李俊玲 版式设计:李俊玲 责任校对:李秋荣

封面设计:姚毅 责任印制:李妍

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2005年1月第1版第1次印刷

1000mm×1400mm B5·8.875印张·342千字

定价:24.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68993821、88379646

68326294、68320718

封面无防伪标均为盗版

前 言

流体力学·泵与风机是供热通风与空调、燃气工程等专业的专业基础课。流体力学·泵与风机理论已非常成熟，并在许多专业上得到广泛的应用，用于大学本科、中专的此类教材已有许多版本。随着国家大力发展高等职业教育，提倡大量培养应用型高级人才，大批职业技术学院相继成立，急需一本适应高职高专学生入学水平及学制要求，适应应用型人才培养需要的教材，基于此，我们编写了本书。本书在编写中，理论以够用、适用为度，突出了理论与专业应用的有机结合，重在培养学生分析及解决工程实际问题的能力。为了便于学生复习与自学，各章均附有小结和一定数量的思考题，以便于学生理解消化基本概念、基本理论。习题以适用为前提进行了精选，较以往教材有适当减少，并附有习题答案。

本书分为上、下篇，共十一章，第一~四章为流体力学基本理论部分，由山西建筑职业技术学院白扩社编写；第五~八章为流体力学基本应用部分，由长春工程学院吕萍编写；第九~十一章为泵与风机理论及其选择应用部分，由徐州建筑职业技术学院白桦编写。本书由黑龙江建筑职业技术学院吴耀伟任主审。

本书在编写过程及书稿会审中，承蒙各兄弟院校老师提出许多宝贵意见，在此一并致谢。但由于编者水平有限，错误疏漏在所难免，敬请广大读者及同行批评指正。

编 者

目 录

前言

上篇 流体力学

第一章 绪论	1
第一节 流体力学的任务	1
第二节 流体的主要力学性质	2
第三节 作用在流体上的力及力学模型	9
小结	10
思考题	10
习题	10
第二章 流体静力学	12
第一节 流体静压强及其特性	12
第二节 流体静压强基本方程式及意义	13
第三节 压强的度量	17
第四节 液柱式测压计	18
第五节 作用于平面上的液体静压力	22
第六节 作用于曲面上的液体静压力	27
小结	30
思考题	31
习题	34
第三章 流体动力学基础	39
第一节 流体运动的描述方法	39
第二节 流动的分类	42
第三节 恒定流连续性方程	46
第四节 恒定流能量方程	50
第五节 能量方程的应用	57
第六节 恒定流动量方程	65
小结	68
思考题	69
习题	70
第四章 流体阻力与能量损失	73
第一节 流动阻力或能量损失的两种形式	73

第二节	层流与湍流、雷诺数	74
第三节	圆管中层流运动的沿程阻力	79
第四节	湍流运动的特征与湍流阻力	82
第五节	沿程阻力系数的确定	84
第六节	非圆管的沿程损失计算	91
第七节	局部阻力计算	93
第八节	减小流动阻力的措施	100
小结	.....	102
思考题	.....	103
习题	.....	104
第五章	管路计算	106
第一节	管路计算的任务	106
第二节	简单管路计算	107
第三节	串联与并联管路计算	112
第四节	管网计算基础	119
第五节	压力管路中的水击	125
第六节	无压均匀流的计算	130
小结	.....	135
思考题	.....	136
习题	.....	137
第六章	孔口管嘴出流与气体射流	140
第一节	孔口出流	140
第二节	管嘴出流	146
第三节	无限空间淹没射流的特征	149
第四节	圆断面射流的运动分析	152
第五节	平面射流	157
第六节	温差与浓差射流	158
第七节	有限空间射流简介	164
小结	.....	168
思考题	.....	169
习题	.....	170
第七章	绕流运动	172
第一节	绕流运动与附面层基本概念	172
第二节	绕流阻力与升力	177
小结	.....	182
思考题	.....	183
习题	.....	183
第八章	相似原理及因次分析	184

第一节 力学相似性条件	184
第二节 模型律	186
第三节 因次分析法	190
小结	193
思考题	193
习题	193

下篇 泵与风机

第九章 离心式泵与风机的构造与原理	196
第一节 离心式风机的工作原理与基本构造	196
第二节 离心式泵的基本构造	200
第三节 离心式泵与风机的基本性能参数	203
第四节 离心式泵与风机的基本方程式	205
第五节 离心式泵与风机的性能曲线	210
第六节 离心式泵的气蚀与安装高度	214
第七节 相似律与比转速	219
小结	225
思考题	227
习题	228
第十章 离心式泵与风机的工况分析、调节与选择	230
第一节 管路性能曲线与工作点	230
第二节 泵与风机的联合运行	233
第三节 离心式泵与风机的工况调节	236
第四节 离心式泵与风机的选择	242
第五节 常见故障的分析与排除	249
小结	256
思考题	257
习题	257
第十一章 其他常用泵与风机	259
第一节 轴流式泵与风机	259
第二节 贯流式风机	265
第三节 往复式泵	267
小结	269
思考题	270
习题	270
习题答案	271
参考文献	275

上篇 流体力学

第一章 绪 论

第一节 流体力学的任务

流体是指易于流动的物质，它们包括液体、气体及分散状的固体微粒集合体。流体从宏观上讲没有固定的形状，其形状随容器形状而定，但有固定的体积。从力学性能上讲，凡是不能承受切应力或剪切后会产生连续变形的物质，统称为流体。

流体力学是力学的一个分支，主要研究大量流体分子的宏观运动特性，即在工程实际问题中的平衡与运动规律，以及流体与固体之间的相互作用。

流体力学根据研究的重点与方法不同分为理论流体力学与工程流体力学。理论流体力学重在建立流体运动的数学描述、理论分析与理论计算。工程流体力学是建立在实验基础上的理论分析与工程应用。本书研究工程流体力学。

流体力学按流体性质的不同可分为水力学、空气动力学与两相流体力学等。本教材涉及专业包括了水力学与空气动力学的主要内容，但不包括两相流体力学。两相流体力学主要适用于气体输送固体物质的相关专业。

流体力学是从物理学中分离出来，并逐步发展成为一门独立的学科。因此，学习流体力学必须紧密结合中学的物理知识，重视基本概念、基本理论、基本方法的理解与掌握，重视基本实验与习题的训练，从而掌握流体力学在专业应用上的理论分析与应用计算方法，为后续专业课程的学习奠定坚实的基础。

在暖通、给水排水、燃气、水利、航空、动力等许多专业部门，经常将空气、水、蒸汽作为工质通过管道或沟渠输送，并经过加压或减压、加热或冷却等过程，实现能量的传递或转换。工程流体力学解决了流体输送过程所需的断面尺寸、流动阻力等问题，从而确定了所需输送机械——泵与风机的参数，或根据已定的泵与风机的参数确定管道的长度及断面尺寸以及一定压力的流体在流出管道后的流速、压强等变化规律，为研究各种喷管及射流等奠定了理论基础。总之，只有学好流体力学，才能对专业范围内的流体力学现象作出正确的

分析与判断，并进行专业设计与计算。

本书主要采用我国的法定计量单位，鉴于我国长期采用工程单位制（MKS制），学习者应注意这两种单位的换算。

第二节 流体的主要力学性质

流体不同于固体的基本特征是流体的流动性。而流体的流动性取决于流体本身的物理性质，如物质的分子间距、温度等。一般来讲，物质的流动性与分子间距成正比，即分子间距愈大，流动性愈大，如气体流动性优于液体，液体又优于固体。

固体具有抗拉、拉压与抗切的能力。与固体相比，流体的抗拉与抗切能力非常小，或经剪切后会产生连续变形，但流体和固体一样能够承受较大的压力。流体的这种力学特征使得它能用管渠来输送，并通过管道来传递压力。

下面分别介绍与流体力学性质有关的几个主要物理性质。

一、密度与重度

流体和固体一样具有质量，质量愈大，惯性愈大。对于匀质流体，单位体积的质量称为密度，以 ρ 表示，即

$$\rho = m/V \quad (1-1)$$

式中 ρ ——流体的密度 (kg/m^3);

m ——流体的质量 (kg);

V ——该质量流体的体积 (m^3)。

流体和固体一样受地球引力而产生重力。对于匀质流体，作用于单位体积流体上的重力称重度，以 γ 表示，即

$$\gamma = G/V \quad (1-2)$$

式中 γ ——流体的重度 (N/m^3);

G ——体积为 V 的流体所受的重力 (N);

V ——重力为 G 的流体体积 (m^3)。

由物理学知道，重力是质量和重力加速度的乘积，代入式 (1-2)，得出密度与重度的关系式

$$\gamma = mg/V = \rho g \quad (1-3)$$

式中 g ——重力加速度，一般取 $g = 9.81\text{m}/\text{s}^2$ 。

计算中常用流体的密度与重度如下：

在 4°C 时水的密度与重度分别为

$$\rho = 1000\text{kg}/\text{m}^3; \gamma = 9870\text{N}/\text{m}^3$$

汞的密度与重度分别为

$$\rho_{\text{Hg}} = 13596 \text{ kg/m}^3; \gamma_{\text{Hg}} = 133326 \text{ N/m}^3$$

干空气在常温常压下的密度与重度分别为

$$\rho_a = 1.2 \text{ kg/m}^3; \gamma_a = 11.77 \text{ N/m}^3$$

这里必须强调，流体的密度与重度随外界压力与温度变化而变化，因此，当指出流体的密度与重度时，必须指明外界压力与温度条件。

在工程应用中，可根据流体的密度与重度确定容纳流体的水箱与水池等容器的体积，或已知容器的体积确定可容纳流体的质量。同时也可确定作用于容器总的重力，为这些容器受力分析提供计算数据。

【例 1-1】 试求在常温常压状态下， 2 m^3 空气的重量及质量是多少？

【解】 根据式 (1-2)，得

$$G = \gamma V = (11.77 \times 2) \text{ N} = 23.54 \text{ N}$$

根据重量与质量的关系式，得

$$m = G/g = \frac{23.54}{9.807} \text{ kg} = 2.4 \text{ kg}$$

【例 1-2】 试设计一个可容纳质量为 100 t 水的蓄水池，若底面积 A 为 25 m^2 ，问蓄水池的有效高度为多少米？

【解】 由式 (1-1) 得蓄水池的体积为

$$V = m/\rho = \frac{100000}{1000} \text{ m}^3 = 100 \text{ m}^3$$

故水池的有效高度 H 为

$$H = V/A = \frac{100}{25} \text{ m} = 4 \text{ m}$$

二、流体的压缩性与膨胀性

流体的压缩性是指流体受压，体积缩小而密度增大的性质；流体的热胀性是指流体受热，体积膨胀而密度减小的性质。

1. 液体的压缩性与热胀性

液体压缩性的大小通常用压缩率 κ 来表示。它是指温度不变时，密度增加率 $d\rho/\rho$ 与压强变化 dp 的比值，即

$$\kappa = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dp} \quad (1-4)$$

κ 值愈大，则液体的压缩性也愈大。 κ 的单位为 m^2/N 。

由压缩性的定义可知，压缩率 κ 也可用体积减小率 dV/V 与 dp 的比值表示，即

$$\kappa = \frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (1-5)$$

压缩率 κ 的倒数称为液体的弹性模量，以 E 表示，即

$$E = 1/\kappa = \rho \frac{dp}{d\rho} = -V \frac{dp}{dV} \quad (1-6)$$

表 1-1 列举了水在温度为 0 °C 时, 不同压强下的压缩率。

表 1-1 0 °C 时水的压缩率

压强 (大气压)	5	10	20	40	80
$\kappa / (10^{-9} \text{m}^2/\text{N})$	0.538	0.536	0.531	0.528	0.518

液体的膨胀性通常用热胀系数 α 来表示。它是指压强不变, 当温度增加 dT 时, 流体体积的增加率 dV/V 或密度的减小率 $d\rho/\rho$ 与 dT 的比值, 即

$$\alpha = \frac{dV}{V} = -\frac{d\rho}{\rho} \quad (1-7)$$

α 值愈大, 则液体的热胀性愈大, α 的单位为 K^{-1} 。

表 1-2 列举了 1at (0.098MPa) 压强下, 不同温度时水的重度与密度。

表 1-2 1at (0.098MPa) 压强水的重度与密度

温度/ °C	重度/ (kN/m ³) ^①	密度/ (kg/m ³)	温度/ °C	重度/ (kN/m ³)	密度/ (kg/m ³)	温度/ °C	重度/ (kN/m ³)	密度/ (kg/m ³)
0	9.806	999.9	15	9.799	999.1	60	9.645	983.2
1	9.806	999.9	20	9.790	998.2	65	9.617	980.6
2	9.807	1000.0	25	9.778	997.1	70	9.590	977.8
3	9.807	1000.0	30	9.755	995.7	75	9.561	974.9
4	9.807	1000.0	35	9.749	994.1	80	9.529	971.8
5	9.807	1000.0	40	9.731	992.2	85	9.500	968.7
6	9.807	1000.0	45	9.710	990.2	90	9.467	965.3
8	9.806	999.9	50	9.69	988.1	95	9.433	961.9
10	9.805	999.7	55	9.657	985.7	100	9.399	958.4

① 在国际单位制中常将因数 10^3 写成词头千, 以符号 k 表示, 10^6 写成词头兆, 以符号 M 表示。

从表 1-1 与表 1-2 看出, 压强每升高 1at (0.098MPa), 水的密度约增加二万分之一。在温度较低时 (10~20 °C), 温度每增加 1 °C, 水的体积增加约为万分之一点五; 当温度较高时 (70~95 °C), 温度每增加 1 °C, 水的体积增加约为万分之七。这说明水的热胀性与压缩性是很小的, 一般情况下可忽略不计, 即可把液体看作不可压缩流体。只有在某些特殊情况下, 如在封闭循环的热水采暖系统中, 才考虑水加热后对系统产生的膨胀应力, 以防止管道与散热器被胀裂, 因此需设置膨胀水箱以释放膨胀后的液体体积, 如图 1-1 所示。

2. 气体的压缩性及热胀性

对于气体来讲, 随着压强或温度的变化, 气体的体积和密度将产生较大的

变化。在温度不太低、压强不太高时，气体密度、压强和温度三者之间的关系服从理想气体状态方程式，即

$$p/\rho = RT \text{ 或 } pV = mRT \quad (1-8)$$

式中 p ——气体的绝对压强 (N/m^2 或 Pa)；

T ——气体的热力学温度 (K)；

ρ ——气体的密度 (kg/m^3)；

R ——气体常数 [$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$]。对于空气， $R = 287$ ；对于其他气体，在标准状态下， $R = 8314\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})/n$ ，式中 n 为气体的摩尔质量 (kg/mol)；

V ——气体的体积 (m^3)；

M ——气体的质量 (kg)。

在温度不变即等温情况下， $RT = \text{常数}$ ，状态方程简化为 $p/\rho = \text{常数}$ 。写成常用形式

$$p/\rho = p_1/\rho_1 \quad (1-9)$$

式 (1-9) 说明，等温情况下压强与密度成正比，即压强增大，体积缩小，密度增大，也就是说压强不太高时，压强增大一倍，体积缩小一倍，而密度增加一倍。反之也是如此。

在压强不变即等压情况下， $p/R = \text{常数}$ ，状态方程简化为 $\rho T = \text{常数}$ 。写成常用形式

$$\rho T = \rho_0 T_0$$

式中 ρ_0 ——热力学温度 $T_0 = 273.16\text{K}$ 时的密度；

ρ 、 T ——其他状态下的密度与温度。

式 (1-9) 说明，等压情况下温度与密度成反比，温度与体积成正比。或者说，温度升高，体积增大，密度减小，反之也是如此。

表 1-3 给出了在标准大气压 1atm (101.325kPa) 下，不同温度时空气的重度与密度。

表 1-3 标准大气压 (atm) 下空气的重度与密度表

温度/ °C	重度/ (kN/m^3)	密度/ (kg/m^3)	温度/ °C	重度/ (kN/m^3)	密度/ (kg/m^3)	温度/ °C	重度/ (kN/m^3)	密度/ (kg/m^3)
0	12.70	1.293	25	11.62	1.185	60	10.40	1.060
5	12.47	1.270	30	11.43	1.165	70	10.10	1.029
10	12.24	1.248	35	11.23	1.146	80	9.81	1.000
15	12.02	1.226	40	11.05	1.128	90	9.55	0.973
20	11.80	1.205	50	10.72	1.093	100	9.30	0.947

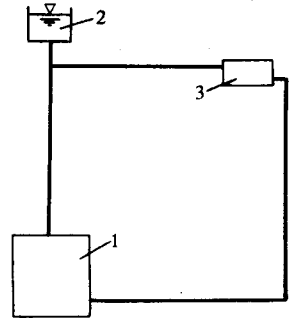


图 1-1 自然循环热水采暖系统图

1—热水锅炉 2—膨胀水箱
3—散热器

【例 1-3】 已知压强为 98.07kN/m^2 ， 0°C 时锅炉烟气重度为 13.13N/m^3 ，求排烟温度为 200°C 时烟气的重度与密度。

【解】 锅炉烟气升温过程为等压过程，由式 (1-9) 可求出排烟重度与密度。

$$T = T_0 + t = 273\text{K} + t$$

$$\text{因为 } \rho_0 = \gamma_0/g = \frac{13.13}{9.807}\text{kg/m}^3 = 1.34\text{kg/m}^3$$

$$\text{所以 } \rho = \rho_0 T_0/T = \frac{1.34 \times 273}{273 + 200}\text{kg/m}^3 = 0.77\text{kg/m}^3$$

$$\gamma = \rho g = 0.77 \times 9.807\text{N/m}^3 = 7.55\text{N/m}^3$$

由此可见，当温度变化较大时，气体的重度与密度有较大的变化。

气体虽然较液体而言具有较大的压缩性与膨胀性，但在工程实际中，如果压强与温度变化不大时，仍可将气体看作不可压缩流体，这样在不影响工程计算精度的情况下，可大大简化其分析与计算。如通风与空调工程中对送风的加热与冷却的温度一般在 50°C 左右，整个过程均在等压下进行，所以近似将空气看作不可压缩流体是完全可以的。

但气体流速接近于声速或变化较大时，流体在流动过程中将产生较大的压强变化，流体的密度也将产生较大的变化，如喷管内的气体流动，此时应将气体看作可压缩气体。因此气体能否看作是可压缩或不可压缩，要依据工程实际定量分析确定。

三、流体的粘滞性

流体的粘滞性是指流体自身阻止其产生相对运动的性质。如从瓶中倒水或油到同一桌面上，会发现水比油流的快，即油比水的粘滞性大。但液体装在瓶内，我们就无法直观地进行判断。这说明，流体的粘滞性只有在流体产生运动时才能体现出来。假如我们测定一圆管中液体的流速分布，如图 1-2 所示，我们会发现，靠近管壁处流速为零，位于管轴线上的流速最大。这说明管轴线上的流体受管壁影响较小。如果我们将流体从管壁至管轴分成若干层，各层的流速各不相同，各流层间产生了相对运动，速度快的流层对速度慢的流层有拖动作用，速度慢的流层对速度快的流层有阻力作用。这说明流层间产生了内摩擦力，即粘滞阻力，这就是流体运动产生能量损失的原因。

经过大量的实验研究，针对流体的内摩擦力，牛顿提出了“内摩擦定律”，内摩擦力的大小与以下因素有关：

1) 内摩擦力与两流层间的速度差 du 成正比，与流层间的距离 dy 成反比。



图 1-2 流体在圆管中的流速分布图

2) 内摩擦力与流层的接触面积 A 的大小成正比。

3) 内摩擦力与流体的种类有关。

4) 内摩擦力与流体的压力大小无关。

内摩擦力的数学表达式可写作

$$F \propto Adu/dy$$

或
$$F = \mu Adu/dy \quad (1-10)$$

$$\tau = F/A = \mu du/dy \quad (1-11)$$

式中 F ——总内摩擦力 (N);

τ ——单位面积上的内摩擦力, 即切应力 (N/m^2);

du/dy ——速度梯度, 表示速度在垂直于速度方向 y 的变化率;

μ ——动力粘度 ($N/m^2 \cdot s$ 或 $Pa \cdot s$)。

对同一流体, μ 值愈大, 粘滞性愈强。 μ 的物理意义可理解为: 当取 $du/dy = 1$ 时, 则 $\tau = \mu$, 即 μ 表示单位速度梯度作用下的切应力, 它反映了粘滞性的动力性质, 因此 μ 也称为动力粘度。在流体力学中, 经常出现 μ/ρ 的比值, 用 ν 表示, 即

$$\nu = \mu/\rho \quad (1-12)$$

式中 ν ——运动粘度 (m^2/s)。

表 1-4 列举了不同温度下水的粘度。表 1-5 列举了 1at (0.098MPa) 压强下不同温度下空气的粘度。

表 1-4 水的粘度

$t/^\circ C$	$\mu/ (10^{-3} Pa \cdot s)$	$\nu/ (10^{-6} m^2 \cdot s)$	$t/^\circ C$	$\mu/ (10^{-3} Pa \cdot s)$	$\nu/ (10^{-6} m^2 \cdot s)$
0	1.792	1.792	40	0.656	0.661
5	1.519	1.519	45	0.599	0.605
10	1.308	1.308	50	0.549	0.556
15	1.140	1.140	60	0.469	0.477
20	1.005	1.007	70	0.406	0.415
25	0.894	0.897	80	0.357	0.367
30	0.801	0.804	90	0.317	0.328
35	0.723	0.727	100	0.284	0.296

从表 1-4 与表 1-5 中可看出, 水和空气的粘度随温度变化的规律是不同的。水的粘滞性随温度升高而减小; 空气的粘滞性随温度升高而增大。这是因为粘度是分子间吸引力和分子间不规则的热运动产生动量交换的综合结果。温度升高, 分子间吸引力降低, 动量增大; 温度降低, 分子间吸引力增大, 动量减小。对于液体, 分子间间距小, 分子间的吸引力是决定性因素, 所以液体的粘滞性随温度升高而减小; 对于气体, 分子间的间距较大, 分子间吸引力较小, 分子

间的热运动产生的动量交换起决定性作用，所以气体的粘滞性随温度升高而增大。

表 1-5 1at (0.098MPa) 压强下的空气的粘度

$t/^\circ\text{C}$	$\mu/ (10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s})$	$\nu/ (10^{-9}\text{m}^2\cdot\text{s})$	$t/^\circ\text{C}$	$\mu/ (10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s})$	$\nu/ (10^{-9}\text{m}^2\cdot\text{s})$
0	0.0172	13.7	90	0.0216	22.9
10	0.0178	14.7	100	0.0218	23.6
20	0.0183	15.7	120	0.0228	26.2
30	0.0187	16.6	140	0.0236	28.5
40	0.0192	17.6	160	0.0242	30.6
50	0.0196	18.6	180	0.0251	33.2
60	0.0201	19.6	200	0.0259	35.8
70	0.0204	20.5	250	0.0280	42.8
80	0.0210	21.7	300	0.0298	49.9

综上所述，流体的粘滞性是由流体本身的物理性质所决定的，是产生粘滞阻力的内因；流体流动或质点间的相对运动是使粘滞性得以体现的外因。此外，流体所接触的固体边界的表面粗糙度也将直接影响流体流动阻力的大小，是构成影响流动阻力或能量损失的重要外因之一。

【例 1-4】 在图 1-3a 中，气缸内壁的直径 $D = 12\text{cm}$ ，活塞的直径 $d = 11.96\text{cm}$ ，活塞的长度 $l = 14\text{cm}$ ，活塞往复运动的速度为 1m/s ，润滑油液的 $\mu = 0.1\text{Pa}\cdot\text{s}$ ，试问作用在活塞上的粘滞力是多少？

【解】 因粘性作用，粘附在气缸内壁的润滑油油层速度为 0，粘附在活塞外沿的润滑油层与活塞速度相同，即 $u = 1\text{m/s}$ 。因此，润滑油层的速度由零增至 1m/s ，油层间因相对运动产生切应力，故用 $\tau = \mu du/dy$ 计算。该切应力乘以活塞面积，就是作用于活塞上的粘滞力 F 。

我们将间隙 n 放大，绘出该间隙中的速度分布图，如图 1-3b 所示。由于活塞与气缸的间隙 n 很小，速度分布图近似认为是直线分布，故

$$du/dy = \mu/n = \frac{100}{2(12 - 11.96)} \text{s}^{-1} = 5 \times 10^3 \text{s}^{-1}$$

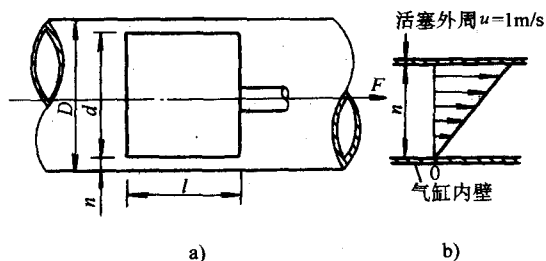


图 1-3 活塞运动的粘性阻力

将以上数值代入式 (1-11), 得

$$\tau = \mu du/dy = 0.1 \times 5 \times 10^3 \text{N/m}^2 = 5 \times 10^2 \text{N/m}^2$$

$$\text{接触面积 } A = \pi dl = \pi \times 0.1196 \times 0.14 \text{m}^2 = 0.053 \text{m}^2$$

所以

$$F = A\tau = 0.053 \times 5 \times 10^2 \text{N} = 26.5 \text{N}$$

第三节 作用在流体上的力及力学模型

流体的平衡与运动规律, 除了取决于流体本身的物理性质外, 还与作用在流体上的力密切相关。因此, 必须分析作用在流体上的力。

客观存在的实际流体的物质结构和物理性质是非常复杂的。如果我们考虑所有流体内部与外部力的作用, 几乎无法建立力学关系式。因此, 我们在研究具体的流体力学应用问题时, 常常忽略掉一些对问题本质影响不大的因素, 提出一些假设, 这就是力学模型, 如材料力学中的“刚体”概念。

一、作用在流体上的力

作用在流体上的力可分为两类, 一是表面力, 作用于流体表面上, 并与作用面的表面积成正比。如作用于某个流体表面上的力是倾斜的, 则可以将此力分解为与表面法线方向相同的压力 P , 及与表面法线方向垂直的切向应力 τ , 因为流体几乎不能承受拉力, 故不存在外法线方向的拉力。对于静止流体, 切向应力不存在, 故只存在法线方向的压力 P 。

作用于流体上的另一类力是质量力。质量力作用于流体内部质点 (或微团) 上, 并与流体质量成正比。质量力又可分为两种, 一种是地球引力即重力, 垂直指向地心; 另一种是由加速度引起的惯性力, 如作直线加速度运动时的直线惯性力 ($F = ma$) 和作曲线运动时的离心惯性力 ($F = m\omega^2 R$)。这两种力虽然形式不同, 但均与质量成正比, 均称为质量力。

对于静止流体 (相对地球而言), 只有重力存在, 故惯性力等于零。

二、流体的力学模型

1. 连续性介质

流体是由无数分子组成, 分子间存在一定的间隙, 也就是说, 流体实质上是不连续的。但是, 流体力学是研究大量流体分子宏观运动的特性, 分子间的间隙对研究影响不大。因此, 我们将流体看作连续性介质。

2. 无粘滞性流体

任何流体均具有粘滞性, 但在研究某些工程问题时, 流体的粘滞性可能不占主导地位, 此时我们将流体看作是无粘滞性流体, 无粘滞性流体也称为理想流体。如确需考虑粘滞性时, 再对粘滞性影响进行实验补充与修正。这种分两

步走的方法，可以大大简化或方便研究。

3. 不可压缩流体

不可压缩流体是忽略流体自身的压缩性与热胀性。由前所知，实际流体或多或少都存在一定的压缩性与热胀性。但针对工程应用的实际问题，如流速不太高的流动过程，压强与流速变化均不大，此时即可将流体看作不可压缩流体来处理。

总之以上这些力学模型，都是为使研究问题方便而提出，实际中并不存在这样的流体。工程应用中，要根据所遇问题区别对待。

小 结

流体力学的任务是研究流体静止与运动的力学规律及其在工程技术中的应用。流体最基本的特性是流动性。流体只能抗压，而不能抗拉、拉剪。与流体的力学性质有关的主要物理性质有：密度与重度、压缩性与热胀性、粘滞性。液体与空气的压缩性及热胀性存在较大的差别，液体压缩性与热胀性较小，一般可作为不可压缩流体对待，气体压缩性与热胀性较大，一般不能作为不可压缩流体对待。流体的粘滞性是流体本身的性质所决定的。但气体与水的粘滞性随温度的变化不同，水的粘滞性随温度升高而减少，空气的粘滞性随温度升高而增大，这是流体分子间吸引力和分子不规则的热运动产生动量交换的综合结果。流体的粘滞性是产生运动阻力的内因，流体运动及固体边壁的表面粗糙度是影响流动阻力及能量损失大小的外因。

作用于流体上的力可分为两类：质量力与表面力。为了方便研究流体的运动状况，提出了流体的力学模型：连续性介质、无粘性流体及不可压缩流体。实际工程应用中，应根据所遇问题区别处理。

思 考 题

- 1-1 流体的重度与密度有何区别？在工程中有何应用？
- 1-2 举例说明在生活中流体的压缩性与热胀性的应用。
- 1-3 流体的粘滞性对流体流动有何作用？为什么气体与液体的粘滞性随温度变化的规律不同？
- 1-4 为什么流体的粘滞性只有在流体质点或流层产生相对运动时才能体现出来？
- 1-5 作用于流体上的质量力与表面力有何差别？其大小与方向有何区别？
- 1-6 实际工程中是否存在连续性介质、不可压缩及无粘性流体？为什么要提出这些力学模型？

习 题

- 1-1 在大气压强作用下，求空气温度为 180°C 时的重度与密度为多少？