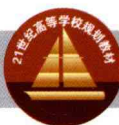


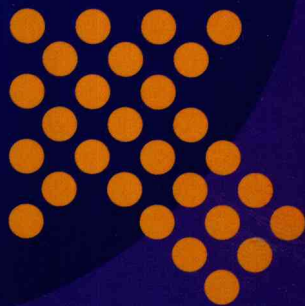
21世纪高等学校规划教材



LIUTILIXUE BENG YU FENGJI

# 流体力学 泵与风机

刘宏丽 孟涛 靳智平 主编  
柯选玉 副主编



中国电力出版社  
<http://jc.cepp.com.cn>

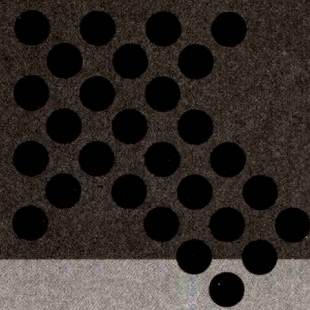
21世纪高等学校规划教材



LIUTILIXUE BENG YU FENGJI

# 流体力学 泵与风机

主 编 靳智平  
副主编 刘宏丽 孟 涛 柯选玉  
编 写 王慧丽  
主 审 贾月梅



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

## 内 容 提 要

本书为 21 世纪高等学校规划教材。

本书以基本理论为基础,以实践应用为目的,以理论联系实际为原则。内容以突出流体力学的分析方法和工程应用为特点,着重对基本概念的理解和基本原理的应用进行讲解,注重学生工程应用能力和工程素质的培养。

本书详细阐述了流体静力学、流体流动的基本方程、黏性流体的管流、流体多元流动动力学基础、泵与风机的基本参数及其结构、泵与风机的设备性能和运行调节等。

本书可作为高职高专电力技术类火电厂集控运行、电厂设备运行与维护及其相近专业的教材或教学参考书,也可供电厂运行人员培训使用。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

流体力学 泵与风机/靳智平主编. —北京:中国电力出版社, 2008

21 世纪高等学校规划教材

ISBN 978 - 7 - 5083 - 7268 - 6

I. 流… II. 靳… 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. O35 TH3 TH44

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 086906 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2008 年 8 月第一版 2008 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 17.5 印张 421 千字

定价 28.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

## 前 言

本书为 21 世纪高等学校规划教材,是电力技术类高职高专火电厂集控运行、电厂设备运行与维护专业“流体力学 泵与风机”课程的教材。主要内容有流体静力学、流体流动的基本方程、黏性流体的管流、流体多元流动动力学基础、泵与风机的基本参数及其结构、泵与风机的设备性能和运行调节等。教材的编写以突出流体力学的分析方法和工程应用为特点,着重于基本概念的理解和基本原理的应用,注重学生工程应用能力和工程素质的培养。

参加编写的人员有:太原电力高等专科学校孟涛编写绪论,第四章,第六章;太原电力高等专科学校刘宏丽编写第一章,第二章,第三章第一节~第七节;山西电力职业技术学院柯选玉编写第三章第八节~第十节,第七章第一节~第六节,第七章第八节;太原电力高等专科学校靳智平编写第五章;山西电力职业技术学院王慧丽编写第七章第七节。本书靳智平担任主编并统稿,刘宏丽、孟涛、柯选玉任副主编。

本书由太原理工大学贾月梅教授担任主审。

在本书的编写过程中,参考了有关兄弟院校和企业的大量文献和技术资料,并得到有关院校老师和同事们热情帮助,在此表示衷心的感谢。

由于水平有限,书中不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2008 年 4 月

# 目 录

前言	
绪论	1
第一节 流体力学的研究对象、任务及发展概况	1
第二节 流体的定义和特征、连续介质模型	3
第三节 流体的主要物理性质	3
第四节 表面力和质量力	10
思考题	11
习题	11
第一章 流体静力学	13
第一节 流体静压强及其特性	13
第二节 流体的平衡微分方程	15
第三节 流体静力学基本方程及其应用	17
第四节 压强的表示方法和实际应用	19
第五节 液体的相对平衡理论和实例分析	26
第六节 静止液体作用于平面上的总压力	30
第七节 静止液体作用于曲面上的总压力	37
思考题	42
习题	42
第二章 流体运动的基本方程	49
第一节 描述流体运动的几个基本概念	49
第二节 连续性方程	56
第三节 理想流体一元流动的运动微分方程及伯努利方程	59
第四节 恒定总流伯努利方程	63
第五节 伯努利方程的应用	67
第六节 动量方程	71
思考题	76
习题	76
第三章 黏性流体的管流	82
第一节 流动阻力的计算	82
第二节 黏性流体的两种流动状态	84
第三节 圆管中的层流流动和紊流流动	86
第四节 沿程阻力研究	90
第五节 非圆管流的沿程损失	94
第六节 局部阻力研究	97

第七节	综合应用举例	107
第八节	管路水力计算	112
第九节	管网计算基础	119
第十节	有压管中的水击	124
思考题		127
习题		129
<b>第四章</b>	<b>流体多元流动动力学基础</b>	<b>133</b>
第一节	有旋流动和无旋流动	133
第二节	绕流运动和附面层的基本特征	135
第三节	绕流阻力与升力	138
第四节	射流	142
思考题		151
习题		152
<b>第五章</b>	<b>泵与风机的基本参数及其结构</b>	<b>153</b>
第一节	泵与风机的主要性能参数	153
第二节	泵与风机的分类及其应用	153
第三节	离心式泵与风机	154
第四节	轴流式泵与风机	160
第五节	电厂常用叶片式风机的典型结构	165
思考题		173
<b>第六章</b>	<b>泵与风机的设备性能</b>	<b>174</b>
第一节	离心泵与风机的叶轮理论	174
第二节	功率、损失和效率	180
第三节	离心式泵与风机的性能曲线	185
第四节	泵与风机的相似定律与比转数	190
第五节	叶片式风机的无因次性能曲线	199
第六节	泵内汽蚀	202
第七节	轴流泵与风机的叶轮理论和性能	209
思考题		214
习题		214
<b>第七章</b>	<b>泵与风机的运行调节</b>	<b>217</b>
第一节	管路特性曲线及工作点	217
第二节	泵或风机的联合运行	220
第三节	运行工况的调节	225
第四节	变速调节的变速方式	231
第五节	泵与风机的工作稳定性	234
第六节	泵与风机的运行	238
第七节	现代高压锅炉给水泵的运行特点	249
第八节	泵与风机的选择及应用	250

思考题	257
习题	258
附录 I 泵系列型谱及风机性能选择曲线	261
附录 II 泵与风机的型号编制	265
参考文献	269

## 绪 论

### 第一节 流体力学的研究对象、任务及发展概况

#### 一、流体力学的研究对象和任务

流体力学是研究流体平衡与运动规律的一门学科。其基础理论包括流体静力学，即流体处于平衡状态时的规律；流体动力学，即流体处于流动状态时的规律；气体动力学，即气体处于高速流动状态时的规律。工程流体力学的研究范畴只涉及流体的宏观机械运动，主要揭示流体运动的质量守恒、能量守恒和转化以及动量守恒等基本规律，并指出其在工程技术领域的应用。

流体力学是一门基础性很强和应用性很广的学科。流体力学作为经典力学的一个重要分支，其发展与数学、力学的发展密不可分。同时，它还在工程技术领域有着广泛的应用，如在能源、化工、环保、机械、建筑等工程技术领域的设计、施工和运行等方面都涉及流体力学问题。

从工程角度上看，不同工程技术领域的流体力学问题有各自不同的特点，以热能动力专业为例，涉及的流体问题主要有三种：压管流，即流体在管道中的压力差流动；绕流，即流体绕过障碍物的流动，如流体在流体机械中绕过叶片的流动；射流，即有压流体脱离管道束缚后的流动，如流体从孔口或管嘴喷出的流动。工程流体力学就是要研究解决具体流体运动形式中的速度分布、压力分布、能量损失以及流体与固体壁面之间的作用。

#### 二、流体力学的发展概况

人类最早对流体的认识是从治水、灌溉、航行等方面开始的。

在中国，从四千多年前的大禹治水到公元前 256~公元前 210 年间修建的都江堰、郑国渠、灵渠三大水利工程，说明那时劳动人民对明槽水流和堰流流动规律的认识已经达到相当水平。我国古代劳动人民还发明了以水为动力的简单机械，例如用水轮提水，水力鼓风，或通过简单的机械传动去碾米、磨面等。我国古代的铜壶滴漏（铜壶刻漏）——计时工具，就是利用孔口出流使铜壶的水位变化来计算时间的。

欧美诸国历史上有记载的最早从事流体力学现象研究的是古希腊学者阿基米德（Archimedes）。他在公元前 250 年发表的学术论著《论浮体》，第一个阐明了相对密度的概念，发现了物体在流体中所受浮力的基本原理——阿基米德原理，这也是关于流体力学的第一部著作。在此后一段较长的历史时期，没有有关流体力学发展情况的记载。直至欧洲文艺复兴时期（16 世纪），随着文化、思想以及城市商品经济、手工业的发展，资本主义关系逐渐形成，自然科学和众多为工业服务的学科都有了长足的发展，流体力学也不例外。著名物理学家和艺术家列奥纳多·达·芬奇（Leonardo Da. Vinci）在米兰附近设计建造了一个小型水渠，系统地研究了物体的沉浮、孔口出流、物体的运动阻力以及管道、明渠中水流等问题。斯蒂文（S. Stevin）将用于研究固体平衡的凝结原理转用到流体上。伽利略（Galileo）则在流体力学中应用了虚位移原理，并首先提出，运动物体的阻力随流体介质密度的增大和速度



的提高而增大。1643年托里拆利(E. Torricelli)论证了孔口出流的基本规律。1650年帕斯卡(B. Pascal)提出了液体中压力传递原理——帕斯卡原理。1686年牛顿(I. Newton)出版了他的名著《自然哲学的数学原理》，对普通流体的黏性性质进行了描述，建立了流体内摩擦定律，为黏性流体力学初步奠定了理论基础。

18~19世纪，流体力学在理论上得到了较大发展。1738年伯努利(D. Bernoulli)出版名著《流体动力学》，推导出了流体位置势能、压强势能和动能之间的能量转换关系——伯努利方程。1755年欧拉(L. Euler)建立理想流体的运动微分方程。在此基础上，纳维尔(C. L. M. H. Navier)和斯托克斯(G. G. Stokes)建立黏性流体运动微分方程。拉格朗日(J. L. Lagrange)、拉普拉斯(Laplace)和高斯(Gosse)等人更是将欧拉和伯努利所开创的流体动力学推向完美的分析高度。

19世纪末以来，机器大工业的建立，极大地促进了工业生产，也带动了科学技术的迅速发展，理论与实践逐渐密切结合起来。雷诺(O. Reynolds)1853年用实验证实了黏性流体的两种流动状态——层流和紊流的客观存在，为流动阻力的研究奠定了基础。库塔(M. W. Kutta)1902年就曾提出过绕流物体上的升力理论，但没有在通行的刊物上发表。普朗特(L. Prandtl)1904年发表了《关于摩擦极小的流体运动》的学术论文，建立了边界层理论，解释了阻力产生的机制。儒科夫斯基从1906年起，发表了《论依附涡流》等论文，找到了翼型升力和绕翼型的环流之间的关系，建立了二维升力理论的数学基础。卡门(T. von)在1911~1912年连续发表的论文中，提出了分析带旋涡尾流及其所产生的阻力的理论。布拉休斯(H. Blasius)在1913年发表的论文中，提出了计算紊流光滑管阻力系数的经验公式。尼古拉兹(J. Nikuradze)在1933年发表的论文中，公布了他对砂粒粗糙管内水流阻力系数的实测结果——尼古拉兹曲线，据此他还给紊流光滑管和紊流粗糙管的理论公式选定了应有的系数。科勒布茹克(C. F. Colebrook)在1939年发表的论文中，提出了把紊流光滑管区和紊流粗糙管区联系在一起的过渡区阻力系数计算公式。莫迪(L. F. Moody)在1944年发表的论文中，给出了他绘制的实用管道的当量糙粒阻力系数图——莫迪图。至此，有压管流的水力计算已渐趋成熟。我国科学家的杰出代表钱学森早在1938年发表的论文中，便提出了平板可压缩层流边界层的解法——卡门—钱学森解法。吴仲华在1952年发表的《在轴流式、径流式和混流式亚声速和超声速叶轮机械中的三元流普遍理论》和在1975年发表的《使用非正交曲线坐标的叶轮机械三元流动的基本方程及其解法》两篇论文中所建立的叶轮机械三元流理论，至今仍是国内外许多优良叶轮机械设计计算的主要依据。

20世纪中叶以来，大工业的形成，高新技术工业的出现和发展，特别是电子计算机的出现、发展和广泛应用，大大地推动了科学技术的发展。由于工业生产和尖端技术的发展需要，促使流体力学和其他学科相互渗透，形成了许多边缘学科，使这一古老的学科发展成包括多个学科分支的全新的学科体系，焕发出强盛的生机和活力。这一全新的学科体系，目前已包括(普通)流体力学、黏性流体力学、流变学、气体动力学、稀薄气体动力学、水动力学、渗流力学、非牛顿流体力学、多相流体力学、磁流体力学、化学流体力学、生物流体力学、地球流体力学、计算流体力学等。

## 第二节 流体的定义和特征、连续介质模型

### 一、流体的定义和特征

流体是在任何微小切力的作用下都能够发生连续变形的物质。所以，流体具有易变形性或易流动性。液体、气体统称为流体。

液体和气体都有易于流动的共同特征，但也有不同的特性：在相同的外部条件下，气体的分子间距大，易压缩，液体的分子间距小，不易压缩；气体分子间的引力非常微小，气体分子可以自由运动，故气体极易流动，而液体分子间的引力较大，分子间相互制约，它可以作无一定方向和周期的不规则振动，也可在其他分子间移动，但不能像气体分子那样自由运动，故液体的流动性不如气体；一定质量的液体有一定的体积，这取决于容器的形状，如与气体接触，便出现自由液面，而气体却能够充满所能到达的全部空间。

流体所占据的空间称为流场。

### 二、连续介质模型

和所有的物质一样，流体也是由大量的分子组成的。从微观上看，构成流体的无数分子之间存在间隙，流体是不连续的。然而，一般工程上所涉及的流体问题的尺寸远大于流体分子间的距离，流体问题属于宏观范畴。因此，在流体力学中，忽略分子间的间隙，将流体看成是由无限多连续分布的流体微团所组成的连续介质。流体微团也可称为流体质点，它是根据客观要求所选取的保持流体宏观特性的最小单元。从宏观上看，流体质点和流动所涉及的物体的特征尺寸相比，它可以作为一个有质量无体积的几何点来处理；从微观上看，它又是一个包含大量分子的流体分子团（在标准状态下， $1\text{mm}^3$  气体中有  $2.7 \times 10^{16}$  个分子， $1\text{mm}^3$  液体中有  $3 \times 10^{19}$  个分子），与分子的平均自由行程相比，该团的尺寸充分大，代表了这些分子的共同物理属性的统计平均值。这就是 1755 年欧拉提出的“连续介质模型”的主要内容。

当把流体看作连续介质后，表征流体宏观运动的宏观物理属性（诸如密度、压强、速度、温度、黏度、热力学能等）的物理量在空间和时间上也都是连续分布的，都应该是空间坐标和时间的单值连续可微函数，这样便可用解析函数等诸多数学工具去研究流体的平衡和运动规律，为流体力学的研究提供了更大的方便。

流体作为连续介质的假设对大部分工程技术问题是适用的，但也有例外。例如在超声速气流中出现激波时，激波前后的气流参数将发生突变，解析函数便不适用了；再如，在空气非常稀薄的高空中运动的飞行器，当分子的平均自由行程和飞行器的特征尺寸可以相比拟时，连续介质模型就不适用了，必须用分子运动论的研究方法。本书只研究连续介质的力学规律。

## 第三节 流体的主要物理性质

### 一、流体的密度

#### 1. 流体的密度

密度是流体的重要物理属性，它表征流体的质量在空间的密集程度。

对于非均质流体，在流场某处取流体的微小体积  $\Delta V$ ，其中流体的质量为  $\Delta m$ ，则该处的密度为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \quad (0-3-1)$$

式中： $m$  为流体的质量，kg； $V$  为流体的体积， $m^3$ ； $\rho$  为流体的密度， $kg/m^3$ 。

对于均质流体，其密度为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (0-3-2)$$

由流体密度的定义知，对于一定质量的流体，密度的大小和体积有关，而体积受温度和压强影响。表 0-1 列出了常用液体在标准大气压下的物理性质，表 0-2 列出了一些常用气体在标准大气压下和  $20^\circ C$  时的物理性质。

## 2. 流体的相对密度

流体的相对密度是指在共同的特定条件下某一流体的密度  $\rho_t$  与另一参考流体的密度  $\rho_w$  之比，用符号  $d$  表示，即

$$d = \frac{\rho_t}{\rho_w} \quad (0-3-3)$$

在流体力学中，通常选  $4^\circ C$  时的纯水作为参考流体。

表 0-1 标准大气压下常用液体的物理性质

液体种类	温度 $t$ ( $^\circ C$ )	密度 $\rho$ ( $kg/m^3$ )	相对密度 $d$	动力黏度 $\mu \times 10^4$ ( $Pa \cdot s$ )
纯水	20	998	1.00	10.1
海水	20	1026	1.03	10.6
20%盐水	20	1149	1.15	—
乙醇(酒精)	20	789	0.79	11.6
苯	20	895	0.90	6.5
四氯化碳	20	1588	1.59	9.7
氟利昂-12	20	1335	1.34	—
甘油	20	1258	1.26	14900
汽油	20	678	0.68	2.9
煤油	20	808	0.81	19.2
原油	20	850~958	0.85~0.93	72
润滑油	20	918	0.92	—
氢	-257	72	0.072	0.21
氧	-195	1206	1.21	2.8
水银	20	13555	13.58	15.6

表 0-2 常用气体在标准大气压下和  $20^\circ C$  时的物理性质

气 体	密度 $\rho$ ( $kg/m^3$ )	动力黏度 $\mu \times 10^5$ ( $Pa \cdot s$ )	气体常数 $R$ [ $J/(kg \cdot K)$ ]	气 体	密度 $\rho$ ( $kg/m^3$ )	动力黏度 $\mu \times 10^5$ ( $Pa \cdot s$ )	气体常数 $R$ [ $J/(kg \cdot K)$ ]
空 气	1.205	1.80	287	氮	1.16	1.76	297
二氧化碳	1.84	1.48	188	氧	1.33	2.00	260
一氧化碳	1.16	1.82	297	甲 烷	0.668	1.34	520
氢	0.166	1.97	2077	饱和水蒸气	0.747	1.01	462
氦	0.0839	0.90	4120				

## 二、流体的膨胀性和压缩性

### 1. 流体的膨胀性

在一定压强条件下，流体的体积随着温度变化而变化的性质，称为流体的膨胀性。

流体的膨胀性可用体积膨胀系数  $\alpha_V$  表示。体积膨胀系数的定义为：当压强一定时，单位温度变化引起的流体体积或密度的相对变化率，即

$$\alpha_V = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT} \quad (0-3-4)$$

或

$$\alpha_V = -\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} \quad (0-3-5)$$

由于  $d\rho$  与  $dT$  的符号相反，故式 (0-3-5) 中  $\alpha_V$  为正值， $\alpha_V$  的单位为  $K^{-1}$  或  $^{\circ}C^{-1}$ 。

实验表明，液体的体积膨胀系数小。在一定的压强条件下，水的体积膨胀系数与温度的关系见表 0-3。

表 0-3 水的体积膨胀系数  $\alpha_V$  ( $K^{-1}$  或  $^{\circ}C^{-1}$ )

压强 ( $10^5$ Pa)	温 度 ( $^{\circ}C$ )				
	1~10	10~20	40~50	60~70	90~100
0.98	$14 \times 10^{-6}$	$150 \times 10^{-6}$	$422 \times 10^{-6}$	$556 \times 10^{-6}$	$719 \times 10^{-6}$
98	$43 \times 10^{-6}$	$165 \times 10^{-6}$	$442 \times 10^{-6}$	$548 \times 10^{-6}$	$704 \times 10^{-6}$
196	$72 \times 10^{-6}$	$83 \times 10^{-6}$	$426 \times 10^{-6}$	$539 \times 10^{-6}$	
490	$149 \times 10^{-6}$	$236 \times 10^{-6}$	$429 \times 10^{-6}$	$523 \times 10^{-6}$	$661 \times 10^{-6}$
882	$229 \times 10^{-6}$	$289 \times 10^{-6}$	$437 \times 10^{-6}$	$514 \times 10^{-6}$	$621 \times 10^{-6}$

### 2. 流体的压缩性

在一定温度条件下，流体的体积随着压强变化而变化的性质，称为流体的压缩性。

流体的压缩性用体积压缩模量  $K$  和体积弹性模量  $E$  来度量。体积压缩模量的定义为：当温度一定时，单位压强变化引起的流体体积或密度的相对变化率，即

$$K = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (0-3-6)$$

或

$$K = -\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp} \quad (0-3-7)$$

由于  $d\rho$  和  $dV$  的符号相反，故式 (0-3-6) 中  $K$  恒为正值， $K$  的单位为  $m^2/N$ 。

体积压缩模量  $K$  的倒数为流体的体积弹性模量  $E$ ，即

$$E = \frac{1}{K}$$

实验表明，液体的体积压缩模量很小。例如水，当压强在  $(1 \sim 490) \times 10^7$  Pa、温度在  $0 \sim 20^{\circ}C$  的范围内时，水的体积压缩模量仅约为二万分之一。表 0-4 列出了  $0^{\circ}C$  水在不同压强下的  $K$  值。

表 0-4  $0^{\circ}C$  水在不同压强下的  $K$  值

$p$ ( $\times 10^5$ Pa)	4.9	9.8	19.6	39.2	78.4
$K$ ( $\times 10^{-9} m^2/N$ )	0.539	0.537	0.531	0.523	0.515

气体的压缩性要比液体的压缩性大得多，这是因为气体的密度随着温度和压强的改变将发生显著的变化。在压强不过高 ( $p < 20$  MPa)，温度不过低 ( $T > 253$  K) 的条件下，气体

密度与温度和压强的关系可用热力学中的状态方程表示, 即

$$\frac{p}{\rho} = RT \quad (0-3-8)$$

式中:  $p$  为气体的绝对压强, Pa;  $\rho$  为气体的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $T$  为热力学温度, K;  $R$  为气体常数,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

常用气体的气体常数见表 0-2。

在工程上, 不同压强和温度下气体的密度可按式 (0-3-9) 计算:

$$\rho = \rho_0 \frac{273}{273+t} \times \frac{p}{101325} \quad (0-3-9)$$

式中:  $\rho_0$  为标准状态 ( $0^\circ\text{C}$ 、 $101325\text{Pa}$ ) 下某种气体的密度, 如空气的  $\rho_0 = 1.293\text{kg}/\text{m}^3$ , 烟气的  $\rho_0 = 1.34\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\rho$  为在温度  $t^\circ\text{C}$ 、压强  $p\text{N}/\text{m}^2$  下的气体的密度。

### 3. 可压缩流体和不可压缩流体

任何一定质量流体的体积都是可以改变的, 只是可变化的程度不同。

液体体积变化性小。随着压强和温度的变化, 液体的密度或体积仅有微小的变化。在大多数情况下, 可忽略液体的这种变化, 认为液体的密度是一个常数。密度为常数的流体就是不可压缩流体。

气体体积变化性大。从热力学中可知, 当温度不变时, 完全气体的体积与压强成反比; 当压强不变时, 温度升高  $1^\circ\text{C}$  体积就要膨胀  $1/T_0$  ( $T_0$  为原温度)。因此, 气体的密度不能作为常数。密度随温度和压强变化的流体则为可压缩流体。

把液体看做是不可压缩流体, 气体看做是可压缩流体, 是相对的。在实际工程中, 要不要考虑流体的压缩性, 要视具体情况而定。例如, 研究管道中水击和水下爆炸时, 水的压强变化较大, 而且变化过程非常迅速, 这时水的密度变化就不可忽略, 就要考虑水的压缩性, 把水作为可压缩流体处理; 在锅炉尾部烟道和通风管道中, 流动气体的压强和温度变化较小, 密度变化也很小, 气体可按不可压缩流体处理。

## 三、流体的黏性

### 1. 流体的黏性

由于流体分子间的相互作用, 流体内部存在着阻碍流层间或流团间相对运动的性质就是黏性。液体产生黏性的原因是液体分子间的吸引, 气体产生黏性的原因是气体分子的热运动。流体的黏性直观地表现为流体的黏稠程度。由于黏性, 水在管内流动时, 紧靠管壁的流体黏附在管壁上, 其流速为零; 管轴心处的流体受管壁影响最小, 速度最大, 如图 0-1 所示。

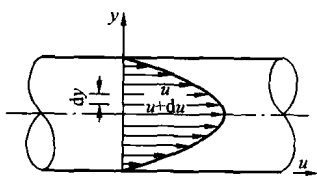


图 0-1 圆管内流速分布

黏性产生流体中的内摩擦力, 内摩擦力又称黏性切向力, 其大小可根据牛顿内摩擦定律来计算, 即

$$T = \mu A \frac{du}{dy} \quad (0-3-10)$$

式中:  $T$  为黏性切向力或内摩擦力, N;  $A$  为流层间接触面积,  $\text{m}^2$ ;  $du/dy$  为垂直于速度方向的速度梯度,  $1/\text{s}$ ;  $\mu$  为黏度或称动力黏度,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

单位面积上的内摩擦力称为切向应力, 那么

$$\tau = \frac{T}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (0-3-11)$$

式中： $\tau$ 为黏性切向应力， $N/m^2$ 。

动力黏度 $\mu$ 是流体黏性的量度，它表示流体在单位速度梯度作用下的黏性切应力。从式(0-3-10)分析可知，当流体处于静止或以相同速度运动时，内摩擦力为零，此时流体有黏性，但黏性作用表现不出来。当流体没有黏性( $\mu=0$ )时，内摩擦力也为零。

流体力学中还常用到 $\mu$ 与 $\rho$ 的比值，称为运动黏度，记为 $\nu$ ，单位是 $m^2/s$ ，即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (0-3-12)$$

## 2. 影响黏性的因素

流体的黏性受压强和温度的影响。

在通常的压强下，压强对流体的黏性影响很小，可忽略不计。在高压下，流体（包括气体和液体）的黏性随压强升高而增大。流体的黏性受温度的影响很大，而且液体和气体的黏性随温度的变化是不同的：温度升高，液体分子间的吸引力减小，液体的黏性降低；而气体则相反，温度越高，气体分子的热运动越强烈，动量交换就越频繁，气体的黏性也就越大。

在一个标准大气压下水和空气的黏度可参见表0-5和表0-6。

**表 0-5 水的黏度 (一个标准大气压下)**

温度 (°C)	$\mu \times 10^3$ (Pa·s)	$\nu \times 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	温度 (°C)	$\mu \times 10^3$ (Pa·s)	$\nu \times 10^6$ (m <sup>2</sup> /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	1.141	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

**表 0-6 空气的黏度 (一个标准大气压下)**

温度 (°C)	$\mu \times 10^6$ (Pa·s)	$\nu \times 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	温度 (°C)	$\mu \times 10^6$ (Pa·s)	$\nu \times 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)
0	17.09	13.00	260	28.06	42.40
20	18.08	15.00	280	28.77	45.10
40	19.04	16.90	300	29.46	48.10
60	19.97	18.80	320	30.14	50.70
80	20.88	20.90	340	30.80	53.50
100	21.75	23.00	360	31.46	56.50
120	22.60	25.20	380	32.10	59.50
140	23.44	27.40	400	32.77	62.50
160	24.25	29.80	420	33.40	65.60
180	25.05	32.20	440	34.02	68.80
200	25.82	34.60	460	34.63	72.00
220	26.58	37.10	480	35.23	75.20
240	27.33	39.70	500	35.83	78.50

### 3. 黏性流体和理想流体

实际流体都是具有黏性的，都是黏性流体。不具有黏性 ( $\mu=0$ ) 的流体称为理想流体，这是客观世界上并不存在的一种假想的流体。

在流体力学中引入理想流体的假设，是因为在实际流体的黏性作用表现不出来的场合（如在静止流体中或匀速直线流动的流体中），完全可以把实际流体当理想流体来处理。

在许多场合，想求得黏性流体流动的精确定解是很困难的。对某些黏性不起主要作用的问题，先不计黏性的影响，可使问题的分析大为简化，从而有利于掌握流体流动的基本规律。至于黏性的影响，则可根据试验引进必要的修正系数，对由理想流体得出的流动规律加以修正。此外，即使是对于黏性为主要影响因素的实际流动问题，先研究不计黏性影响的理想流体的流动，而后引入黏性影响，再研究黏性流体流动的更为复杂的情况，也是符合认识事物由简到繁的规律的。基于以上诸点，在流体力学中，总是先研究理想流体的流动，而后再研究黏性流体的流动。

### 4. 黏度的测量

流体的黏度不能直接测量，它们的数值往往是通过测量与其有关的其他物理量，再由有关方程进行计算而得到的。由于计算所根据方程的不同，测量方法有许多种，所要测量的物理量也不尽相同。

(1) 管流法。让待测黏度的流体，以一定的流量流过已知管径的细管，再在细管的一定长度上用测压计测出这段管道上的压降，从而通过层流管流的哈根—普索勒流量定律计算出流体的黏度。

(2) 落球法。一般用于黏度大的流体，使已知直径和质量的小球沿盛有待测黏度液体的玻璃圆管中心线垂直降落，测量小球在液体中自由沉降的速度，由此速度计算该液体的黏度。

(3) 旋转法。在两个有不同直径的同心圆筒的环形间隙中，充以待测黏度液体，其中一圆筒固定，另一圆筒以已知角速度旋转，测定出旋转力矩，便可计算出流体的黏度。

(4) 泄流法。使已知温度和体积的待测液体通过仪器下部已知管径的短管自由泄流而出，测定规定体积的液体全部流出的时间，与同样体积已知黏度的液体的泄流时间相比较，从而推求出待测液体的黏度。泄流法是工业上测定各种液体（例如润滑油等）黏度最常用的测定方法，采用的仪器是工业黏度计。

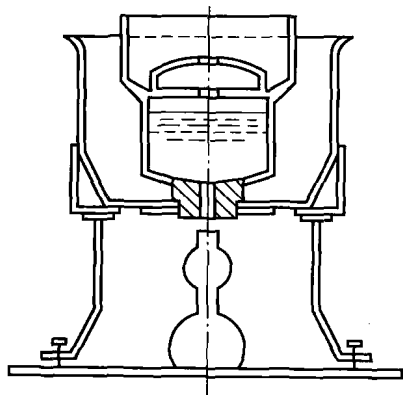


图 0-2 恩格勒黏度计

工业黏度计有几种类型。我国目前采用的是恩格勒黏度计（欧洲大陆的一些国家，如德国，采用这种黏度计，英国采用 Redwood 黏度计，美国采用 Saybolt 黏度计，它们的原理都是一样的），其测定结果为恩氏度，用 $^{\circ}E$ 表示，其结构见图 0-2。测定实验方法如下：先用木制针阀将锥形短管的通道关闭，把 220cm<sup>3</sup> 的蒸馏水注入贮液罐 1，开启水箱 2 中的电加热器，加热水箱中的水，以便加热贮液罐中的蒸馏水，使其温度达到 20℃，并保持不变，然后迅速提起针阀，使蒸馏水经锥形通道泄入长颈瓶 4 至容积为 200cm<sup>3</sup>，记录所需的时间  $t$ ；然后用同样的程序测定待测液体流出 200cm<sup>3</sup>

所需的时间  $t'$ 。待测液体在给定温度下的恩氏度为

$$^{\circ}\text{E} = t'/t \quad (0-3-13)$$

待测液体在给定温度下的运动黏度为

$$\nu = 0.0731^{\circ}\text{E} - 0.0631/^{\circ}\text{E} \text{ (cm}^2/\text{s)} \quad (0-3-14)$$

**【例 0-1】** 将长度  $L=1\text{m}$ 、直径  $d=200\text{mm}$  水平放置的圆柱体，置于内径  $D=206\text{mm}$  的圆管中以  $u=1.5\text{m/s}$  的速度移动。已知间隙中油液的相对密度为  $d=0.92$ ，运动黏度  $\nu=5.61 \times 10^{-4}\text{m}^2/\text{s}$ ，求所需拉力  $T$  为多少？

解：间隙中油的密度：

$$\rho = \rho_{\text{水}} d = 1000 \times 0.92 = 920 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

动力黏度：

$$\mu = \rho \nu = 920 \times 5.61 \times 10^{-4} = 0.51612 \text{ (Pa} \cdot \text{s)}$$

根据牛顿内摩擦定律：

$$T = \mu A \frac{u-0}{\frac{D-d}{2}} = 0.51612 \times 3.14 \times 0.2 \times 1 \times \frac{1.5}{\frac{206-200}{2}} \times 1000 = 16206 \text{ (N)}$$

#### 四、液体的表面张力和毛细现象

##### 1. 表面张力

表面张力存在于不同流体介质的分界面（如液体的自由液面）中，它使分界面好像一个被拉紧的弹性薄膜。

以自由液面为例，表面张力形成的原因是分界面上液体分子和液体内部分子间的吸引力。在液体中，一个分子受到周围分子吸引力影响半径范围约为  $10^{-7}\text{cm}$ 。在这个范围内的液体分子对该分子的吸引力各方向相等，分子处于平衡状态。但在靠近静止液体的自由表面、厚度小于约  $10^{-7}\text{cm}$  薄的表面层内，每个液体分子与周围分子之间的吸引力不能达到平衡，而合成一个垂直于自由表面并指向液体内部的合力。当分子处于自由表面上时，向下的合力达到最大值。表面层内的所有液体分子均受到向下的吸引力，从而把表面层紧紧拉向液体内部。为了反抗这种力的作用，沿着自由表面存在表面张力。表面张力的大小以作用在单位长度上的力表示，单位为  $\text{N/m}$ 。表 0-7~表 0-9 为几种常见介质的表面张力值。

由于表面张力的存在，将使分界面两侧产生压强差  $\Delta p$ ，大小为

$$\Delta p = \sigma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (0-3-15)$$

式中： $\sigma$  为表面张力； $R_1$ 、 $R_2$  为分界面的曲率半径。

表 0-7 常用液体在  $20^{\circ}\text{C}$  时与空气接触的表面张力

液 体	表面张力 $\sigma$ (N/m)	液 体	表面张力 $\sigma$ (N/m)	液 体	表面张力 $\sigma$ (N/m)
纯 水	0.0728	四氯化碳	0.0266	润 滑 油	0.0350~0.0379
乙醇（酒精）	0.0223	煤 油	0.0234~0.0321	水 银	0.513*~0.485**
苯	0.0289	原 油	0.0234~0.0379		

\* 和空气接触。

\*\* 和水银本身蒸气接触。



表 0-8 水与空气接触的表面张力

温度 (°C)	表面张力 $\sigma$ (N/m)	温度 (°C)	表面张力 $\sigma$ (N/m)	温度 (°C)	表面张力 $\sigma$ (N/m)
0	0.0756	25	0.0720	60	0.0662
5	0.0749	30	0.0712	70	0.0644
10	0.0742	35	0.0704	80	0.0626
15	0.0735	40	0.0696	90	0.0608
20	0.0728	50	0.0679	100	0.0589

表 0-9 20°C 时两种介质分界面上的表面张力

场 合	温度 (°C)	表面张力 $\sigma$ (N/m)	场 合	温度 (°C)	表面张力 $\sigma$ (N/m)
苯—水银	20	0.375	水—四氯化碳	20	0.045
水—苯	20	0.035	水—水银	20	0.0375

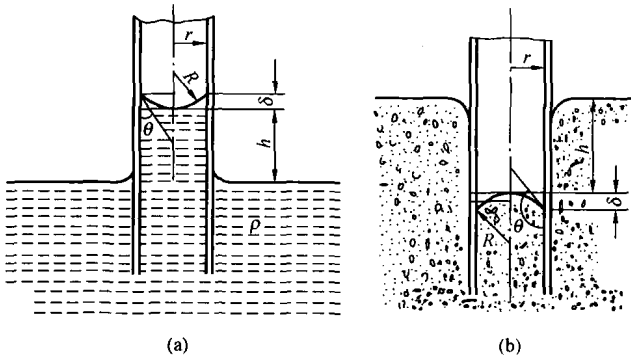


图 0-3 液体在毛细管内上升或下降

- (a) 湿润管壁的液体的液面上升；  
 (b) 不湿润管壁的液体的液面下降

## 2. 毛细现象

将细管插入液体内，若液体分子间的吸引力（内聚力）小于液体分子与固体分子间的吸引力（附着力），则液体将在管内上升到一定的高度，管内液面呈凹面，如图 0-3 (a) 所示；若液体分子间的吸引力（内聚力）大于液体分子与固体分子间的吸引力（附着力），则液体将在管内下降到一定的高度，管内液面呈凸面，如图 0-3 (b) 所示。

上述现象就是毛细现象，管内液面上升或下降的高度与表面张力和重力有关，并可求得

$$h_{\text{上升}} = \frac{1.98\sigma}{\rho gr} - 0.324r \quad (0-3-16)$$

和

$$h_{\text{下降}} = -\left(\frac{1.53\sigma}{\rho gr} - 0.216r\right) \quad (0-3-17)$$

由式 (0-3-16) 和式 (0-3-17) 可知，当细管半径  $r$  越小时，上升的或下降的  $h$  就越大。当用内径很细的管子作液柱式测压计时，将会造成较大测量误差。所以，测压计的细水管的内径应大于 14mm；对于水银，细管的内径应大于 10mm，这样毛细现象产生的测量误差很小，不必修正。

## 第四节 表面力和质量力

作用于流体上的力分为质量力和表面力两类。

### 一、质量力

质量力是指作用在流体某体积内所有流体质点上的力，它与这一体积的流体质量成正