

高等院校规划教材

流体力学与流体机械

主编 崔丽琴 罗建国



煤炭工业出版社

高等院校规划教材

流体力学与流体机械

主 编 崔丽琴 罗建国
副主编 王旭明 张玉洁



煤炭工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

流体力学与流体机械/崔丽琴, 罗建国主编. --北京: 煤炭工业出版社, 2017
高等院校规划教材
ISBN 978-7-5020-5796-1

I. ①流… II. ①崔… ②罗… III. ①流体力学—高等学校—教材 ②流体机械—高等学校—教材 IV. ①O35 ②TH3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 081174 号

流体力学与流体机械 (高等院校规划教材)

主 编 崔丽琴 罗建国
责任编辑 李振祥
编 辑 田小琴
责任校对 姜惠萍
封面设计 于春颖

出版发行 煤炭工业出版社 (北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)
电 话 010-84657898 (总编室)
010-64018321 (发行部) 010-84657880 (读者服务部)

电子信箱 cciph612@126.com

网 址 www.cciph.com.cn

印 刷 北京玥实印刷有限公司

经 销 全国新华书店

开 本 787mm×1092mm¹/₁₆ 印张 12³/₄ 字数 300 千字

版 次 2017 年 6 月第 1 版 2017 年 6 月第 1 次印刷

社内编号 8659 定价 31.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,本社负责调换,电话:010-84657880

内 容 提 要

本书包括流体力学与流体机械两部分内容。流体力学部分详细阐述了流体力学的基本理论及其工程应用,主要包括流体静力学、流体动力学、黏性流体运动阻力与水头损失,孔口、管嘴出流,有压管路和明渠均匀流及相似原理与量纲分析;流体机械部分介绍常见泵与风机的分类、结构、原理及选型,重点介绍了离心式泵与风机的基本理论、设备性能、运行与调节等。本书针对基本理论每章附有例题和复习思考题,计算题部分书末附有参考答案。

本书可作为高等院校环境工程、矿物加工工程、机械工程、建筑环境工程、安全工程、土木工程等专业教学用书,也可作为考研、工程技术人员的参考书。

前 言

本书是作者在积累多年教学经验，经过教学实践并吸收有关教材优点的基础上编写而成。根据目前高等教育改革的需求，本书从教学与学生认知的规律性出发，建立一个既符合流体力学学科系统性，又注重理论基础与实践能力的培养并重的内容体系，以适应课程教学及科学技术发展需要。针对流体力学学习难的特点，本书列出了大量的例题、思考题，以便学生尽快掌握流体力学的基本公式及应用，同时在题型的选取上与工程实际相符。

全书共八章。第一章由于润祥编写，第二章由王旭明编写，第三、四章由崔丽琴编写，第五、六章由张玉洁编写，第七章由孙辉辉编写，第八章由罗建国、崔丽琴编写。全书由崔丽琴负责定稿，崔丽琴和罗建国担任主编，并由韩红利和张洪斌教授主审。

在本书编写过程中，得到了华北科技学院教务处、机电工程学院多名老师的大力支持与帮助。为了充实教材内容，参考了诸多文献、教材等资料，在此一并表示感谢。

由于编者水平所限，书中难免存在不足之处，敬请同行专家和读者批评指正。

编 者

2017年2月

目次

第一章 绪论	1
第一节 流体力学的研究对象、发展概况及研究方法	1
第二节 连续介质假设	3
第三节 流体的主要物理性质	4
第四节 作用在流体上的力	15
复习思考题	16
第二章 流体静力学	18
第一节 流体静压强及其特性	18
第二节 静止流体的平衡微分方程	19
第三节 流体静力学基本方程	21
第四节 压强的测量	24
第五节 液体的相对平衡	28
第六节 静止流体对平面、曲面的作用力	32
复习思考题	39
第三章 流体动力学	44
第一节 研究流体运动的方法	44
第二节 流体运动的基本概念	46
第三节 流体的连续性方程	50
第四节 理想流体运动微分方程及其积分	54
第五节 黏性流体运动微分方程及伯努利方程	57
第六节 黏性流体总流的伯努利方程	59
第七节 黏性流体总流的伯努利方程的应用	62
第八节 定常流动总流的动量方程及其应用	69
复习思考题	77
第四章 黏性流体运动阻力与水头损失	83
第一节 流动阻力与能量损失的类型	83
第二节 黏性流体运动的两种流态	85
第三节 圆管内的层流运动及其沿程损失	89
第四节 圆管内的紊流运动及其沿程损失	93

第五节 圆管的沿程阻力系数	99
第六节 局部水头损失	106
复习思考题	114
第五章 孔口、管嘴出流	117
第一节 孔口出流	117
第二节 管嘴出流的计算	122
复习思考题	126
第六章 有压管路和明渠均匀流	128
第一节 管路计算	128
第二节 管网计算基础	131
第三节 明渠的分类	136
第四节 明渠均匀流的特征及水力计算	140
复习思考题	147
第七章 相似原理与量纲分析	149
第一节 相似原理	149
第二节 量纲分析	154
复习思考题	158
第八章 泵与风机	160
第一节 概述	160
第二节 离心式泵和风机的基本理论	163
第三节 离心式泵与风机的设备性能	167
第四节 泵与风机的相似定律与比转数	171
第五节 水泵的气蚀性能	175
第六节 泵与风机的运行与调节	178
第七节 其他常用泵与风机简介	185
复习思考题	191
各章部分题答案	193
参考文献	197

第一章 绪 论

第一节 流体力学的研究对象、发展概况及研究方法

一、流体力学的研究对象

流体力学是力学的重要学科分支之一，它的研究对象是流体。流体和固体是物质存在的主要形态。从力学分析的角度来看，流体与固体的主要差别是抵抗外力能力的不同。固体能够抵抗一定程度的压力、拉力和剪切力；流体一般不能抵抗拉力，在静止状态下也不能抵抗剪切力。如果对流体进行施加一定的剪切力，则无论这个剪切力多么小，都会发生连续变形；只要剪切力不停止，流体就永远不会达到静止平衡。因此，这种在剪切力作用下发生的连续变形通常称为流动。

从微观上讲，流体与固体是物质的不同表现形式，他们都有下列三个物质基本属性：由大量分子组成；分子不停地做热运动；分子与分子之间有分子力的作用。不过这三个物质基本属性表现在气体、液体与固体方面却有量和质的差别。同样体积内的分子数目，气体少于液体，液体又少于固体；同样分子距上的分子力，气体小于液体，液体小于固体。于是气体的分子运动有较大的自由行程和随机性，液体则较小，而固体分子却只能围绕自身位置做微小的振动。以上宏观和微观上的差异使流体在力学性能上表现出下述两个特点：

(1) 流体不能承受拉力，因而流体内部永远不存在抵抗拉伸变形的拉应力。

(2) 流体在宏观平衡状态下不能承受剪切力，任何微小的剪切力都会导致流体连续变形，平衡破坏，产生流动。

许多与人类生活密切相关的物质，如水、空气、油、酒精等都是流体。此外，流体还包括作为汽轮机工作介质的水蒸气、润滑油、地下石油、含泥沙的江水、血液、超高压作用下的金属和燃烧后产生成分复杂的气体、高温条件下的等离子体等。流体分为液体和气体。液体与气体在力学性质上的主要差别在气体比液体更容易被压缩。

流体力学研究流体的运动规律和流体相互作用的规律，研究流体流动过程中的质量、能量和动量的传输规律。流体力学所研究的规律具有普遍性，因此是一门基础科学。另一方面，流体力学的一般原理与分析方法又被广泛地用来解决各种与流动相关的实际问题，它在许多工程技术领域中有着广泛的应用性，因此流体力学又是一门应用学科。

二、流体力学的发展概况

1738年伯努利出版他的专著时，首先采用了水动力学这个名词并作为书名；1880年前后出现了空气动力学这个名词；1935年以后，人们概括了这两方面的知识，建立了统一的体系，统称为流体力学。

气象、水利的研究，船舶、飞行器、叶轮机机械和核电站的设计及其运行，可燃气体或

炸药的爆炸，以及天体物理的若干问题等，都广泛地用到流体力学知识。许多现代科学技术所关心的问题既受流体力学的指导，同时也促进了它不断地发展。1950年后，电子计算机的发展又给予流体力学极大的推动。

对流体力学学科的形成作出第一个贡献的是古希腊的阿基米德，他建立了包括物理浮力定律和浮体稳定性在内的液体平衡理论，奠定了流体静力学的基础。此后千余年间，流体力学没有重大发展。直到15世纪，意大利达·芬奇的著作才谈到水波、管流、水力机械、鸟的飞翔原理等问题。17世纪，帕斯卡阐明了静止流体中压力的概念。但流体力学尤其是流体动力学作为一门严密的科学，却是随着经典力学建立了速度、加速度、力、流场等概念，以及质量、动量、能量三个守恒定律的奠定之后才逐步形成的。力学奠基人牛顿研究了在流体中运动的物体所受到的阻力，得到阻力与流体密度、物体迎流截面积以及运动速度的平方成正比的关系，他针对黏性流体运动时的内摩擦力也提出了牛顿黏性定律。但是，牛顿还没有建立起流体动力学的理论基础，他提出的许多力学模型和结论同实际情形还有较大的差别。

之后，法国皮托发明了测量流速的皮托管；达朗贝尔对运河中船只的阻力进行了许多实验工作，证实了阻力同物体运动速度之间的平方关系；瑞士的欧拉采用了连续介质的概念，把静力学中压力的概念推广到运动流体中，建立了欧拉方程，正确地用微分方程组描述了无黏流体的运动；伯努利从经典力学的能量守恒出发，研究供水管道中水的流动，精心地安排了实验并加以分析，得到了流体定常运动下的流速、压力、管道高程之间的关系——伯努利方程。欧拉方程和伯努利方程的建立，是流体动力学作为一个分支学科建立的标志，从此开始了用微分方程和实验测量进行流体运动定量研究的阶段。从18世纪起，位势流理论有了很大进展。在上述的研究中，流体的黏性并不起重要作用，即所考虑的是无黏流体。这种理论当然阐明不了流体中黏性的效应。

19世纪，工程师们为了解决许多工程问题，尤其是要解决带有黏性影响的问题。于是他们部分地运用流体力学，部分地采用归纳实验结果的半经验公式进行研究，这就形成了水力学，至今它仍与流体力学并行发展。1822年，纳维建立了黏性流体的基本运动方程；1845年，斯托克斯又以更合理的基础导出了这个方程，并将其所涉及的宏观力学基本概念论证得令人信服。这组方程就是沿用至今的纳维-斯托克斯方程（简称N-S方程），它是流体动力学的理论基础。上面说到的欧拉方程正是N-S方程在黏度为零时的特例。

普朗特学派在1904—1921年间，逐步将N-S方程作了简化，从推理、数学论证和实验测量等各个角度建立了边界层理论，能实际计算简单情形下边界层内流动状态和流体同固体间的黏性力。同时普朗克又提出了许多新概念，并广泛地应用到飞机和汽轮机的设计中。这一理论既明确了理想流体的适用范围，又能计算物体运动时遇到的摩擦阻力。

20世纪初，飞机的出现极大地促进了空气动力学的发展。以儒科夫斯基、恰普雷金、普朗克等为代表的科学家，开创了以无黏不可压缩流体位势流理论为基础的机翼理论，阐明了机翼怎样会受到举力，从而空气能把很重的飞机托上天空。机翼理论的正确性，使人们重新认识无黏流体的理论，肯定了它指导工程设计的重大意义。机翼理论和边界层理论的建立和发展是流体力学的一次重大进展，它使无黏流体理论同黏性流体的边界层理论很

好地结合起来。20 世纪 40 年代以后, 由于喷气推进和火箭技术的应用, 飞行器速度超过声速, 进而实现了航天飞行, 使气体高速流动的研究进展迅速, 形成了气体动力学、物理-化学流体动力学等分支学科; 从 50 年代起, 电子计算机不断完善, 使原来用分析方法难以进行研究的课题, 可以用数值计算方法来进行, 出现了计算流体力学这一新的分支学科。与此同时, 由于民用和军用生产的需要, 液体动力学等学科也有很大进展; 从 60 年代起, 流体力学开始了流体力学和其他学科的互相交叉渗透, 形成新的交叉学科或边缘学科 (如物理-化学流体动力学、磁流体力学等), 原来基本上只是定性地描述的问题, 逐步得到定量的研究, 生物流变学就是一个例子。

人类社会发展到今天, 所提出的流体力学问题越来越多, 所涉及的技术领域也越来越广。例如, 动力工程中的能量转换; 机械工业中的润滑、液压传动、气力输送; 高温液态金属在炉内或铸型内的流动; 在水处理和防水排水工程中, 液体对容器壁的作用力、水流的运动规律、速度分布、流量的确定、水流对各种设施的冲击力、水泵的选择、管路的水利计算; 在采矿及矿物加工工程中, 矿井通风、通风防尘、矿山排水、选矿工艺等都需要流体力学的知识。总之, 只有掌握好流体力学的基本知识, 才能有效、正确地解决工程中所遇到的各种流体力学问题。

三、流体力学的研究方法

流体力学研究所采用的主要手段有理论分析、实验研究和数值计算。

(1) 理论分析是应用基本物理定律建立方程, 通过数学分析找出各种流动状态下相关参数之间的依赖关系。

(2) 实验研究主要是在配备有各种测量和观察手段的专门实验设备 (如风洞、水槽、管道等) 上对流动现象进行观察和测量, 找出流动的规律。

(3) 数值计算是使用计算机对流动现象进行数值模拟。正确的理论分析结果可以揭示流体运动的本质特性和规律, 具有普遍的适用性; 实验结果能够反映真实的流动规律, 发现新的物理现象, 检验理论分析和数值模拟的结果; 数值计算则能够求解复杂的流动问题, 能够模拟多种工况, 比实验经济、省时。这三种手段相辅相成, 使流体力学学科日益完善和不断发展。

第二节 连续介质假设

一、流体质点的概念

所谓流体质点就是流体中宏观尺寸非常小而微观尺寸又足够大的任意一个物理实体, 它是流体力学学科中必需引用的理论模型。流体质点具有下述 4 层含义:

(1) 流体质点的宏观尺寸非常小。甚至可以小到肉眼无法观察, 且工程仪器无法测量的程度, 用数学用语来说就是流体质点所占据的宏观体积极限为零, 简记为 $\lim \Delta V \rightarrow 0$, 极限为零并不等于零。

(2) 流体质点的微观尺寸足够大。这种宏观为零的尺寸用微观仪器度量必然又很客观, 所谓微观尺寸足够大, 就是说质点的微观体积必然大于流体分子尺寸的数量级, 这样

在流体质点内任何时刻都包含有足够多的流体分子，个别分子的行为不会影响质点总体的统计平均特性。

(3) 流体质点是包含有足够多分子在内的一个物理实体，因而在任何时刻都应该具有一定的宏观物理量。例如：流体质点具有质量，这质量就是所包含分子质量之和；流体质点具有密度，这密度就是质点质量除以质点体积；流体质点具有温度，这温度就是所包含分子热运动动能的统计平均值；流体质点具有压强，这压强就是所包含分子热运动互相碰撞从而在单位面积上产生的压力的统计平均值。此外，流体质点也具有流速、动量、动能等宏观物理量，这些物理量的统计平均概念均类似，在此不一一详述。

(4) 流体质点的形状可以任意划定，因而质点和质点之间可以完全没有空隙，流体所在的空间中质点紧密毗邻、连绵不断、无所不在，于是也就引出下述连续介质的概念。

二、连续介质的概念

既然假定组成流体的最小物理实体是流体质点而不是流体分子，因而也就等于假定流体是由无穷多个、无穷小的、紧密毗邻、连绵不断的流体质点所组成的一种绝无间隙的连续介质。基于这种连续介质假设，流体的物理参数如压强、质点速度、密度、温度等都是连续分布的变量。把流体当作由质点（或者微团）组成的连续介质，也就是所谓的连续介质模型或者连续介质假设。提出连续介质模型，就是为了用连续函数来描述流体中的物理参数，从而在流体力学中可以使用微积分等数学工具。

在流体连续介质假设中，流体质点的一切物理量必然都是坐标与时间 (x, y, z, t) 变量的单值、连续、可微函数，从而形成各种物理量的标量场和矢量场，这样就可以顺利地用连续函数和场论等数学工具研究流体运动和平衡问题，这就是连续介质假定的重要作用。

第三节 流体的主要物理性质

流体受外力而做机械运动以及怎么样运动，是由流体自身的物理力学性质所决定的。外因是变化的条件，内因才是变化的根据，因此流体的物理力学性质是研究流体机械运动的基本出发点和依据。在流体力学中，有关流体的主要物理力学性质有密度与重度、黏性、压缩性和膨胀性、表面张力等。

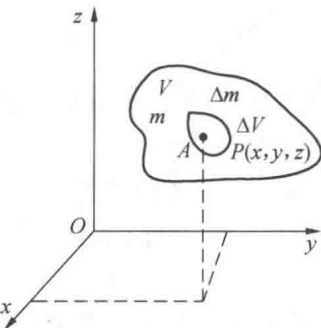


图 1-1 流体微团

一、密度与重度

流体的密度是单位体积流体所具有的质量。如图 1-1 所示，取流体中任一流体微团 A，其微元体积为 ΔV ，微元质量为 Δm 。当微元无限小而趋近 $P(x, y, z)$ 点成为一个质点时，则定义一点上的流体密度为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \tag{1-1}$$

在国际单位制中，密度的单位是 kg/m^3 。

如果流体是均质的，则流体密度为

$$\rho = \frac{m}{V} \tag{1-2}$$

均质流体指在空间上质量分布是均匀的，但流体密度仍然是可以随温度和压强而变化的。实验表明，流体的密度随温度和压强的变化很小，一般情况下可以视为常数。

单位体积流体内所具有的重量称为重度，用 γ 表示。对于均质流体，设其体积为 V ，重量为 G ，其关系式为

$$\gamma = \frac{G}{V} \tag{1-3}$$

对于非均质流体，根据连续介质模型，则有

$$\gamma = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta G}{\Delta V} \tag{1-4}$$

此处， γ 为某一点的重度，单位是 N/m^3 。

还可以表示为

$$\gamma = \rho g \tag{1-5}$$

式中 g ——重力加速度，其大小与地球维度有关，一般取 9.8 m/s^2 。

流体的重度随压强和温度的变化而变化，但液体重度变化很小，一般可看作常数。例如，水的重度常采用的数值为 9800 N/m^3 。

二、黏性

流体具有流动性，静止状态的流体不能承受切力抵抗剪切变形，但在运动状态下，流体就具有阻止流层间相对运动、抵抗剪切变形的能力，这就是流体的黏性。在运动的流体内部，相对运动的相邻流层或质点间成对出现的剪切力称为内摩擦力，即为黏性力。在流体的各种性质中，黏性是其最重要的性质。

1. 黏性的基本概念

为了更好地理解流体的黏性，先介绍如图 1-2 所示的实验。图中有上下两块平行的平板，其间充满静止的流体，两平板间距为 h ， y 方向为平板的法线方向；下平板固定不动，使上平板在流体表面，沿着与下平板平行的方向以速度 u 做匀速运动；由于固液分子之间的黏附效应，紧挨着上平板下表面的一层流体质点就黏附于平板下表面上，该层流体随同

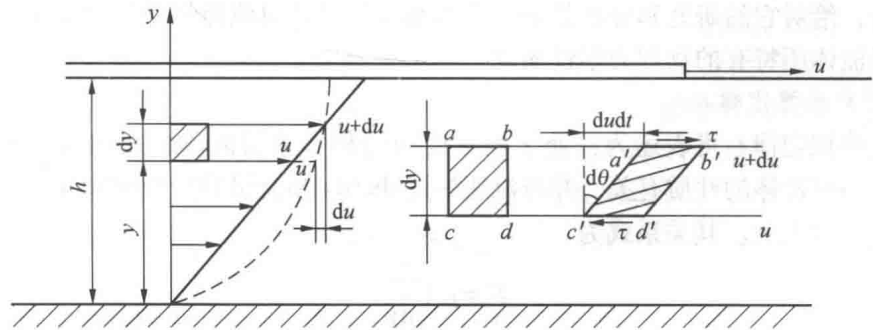


图 1-2 牛顿平板实验

上平板一起以速度 u 运动；然后，该层流体会影响到相邻的下一层，并带动其运动，这样一层一层地向下影响，使各层都相继流动，直至黏附于下平板上的流层其速度为零。于是在两平板间沿法线 y 方向，流速由 0 变化至 u ，在 u 和 h 都较小的情况下，各流层的速度沿法线方向可视为呈线性分布，其流速梯度为 u/h ；在一般情况下，为非线性分布，其流速梯度为 du/dy 。

该实验由牛顿于 1686 年首次提出，因此又叫牛顿平板实验。牛顿平板实验说明，静止状态下的流体不能承受切力，不能抵抗剪切变形，即静止流体不显现黏性。但在运动状态下，流体内部质点间或流层间出现相对运动，流动快的流层要带动流动慢的流层运动，流动慢的流层要阻碍流动快的流层运动，因而在流层间发生了相对运动，从而产生了内摩擦，其作用就是阻碍流层间的相对运动，抵抗剪切变形，所以实际流体在运动状态下就显现出了它的固有特性——黏性。

实验表明，处于流动状态的流体，其紧贴于固体边壁的一层流体质点是黏附在固体壁面上的，与边界之间没有相对运动，因此流体与固体边壁之间不存在摩擦力，这样流体中的摩擦力均表现为流体各流层之间的摩擦力，因此又叫流体的内摩擦力。

在相对运动的流层间，内摩擦力总是成对出现的，其大小相等，方向相反。速度快的流层施加于较慢流层上的切力与流速方向一致；速度较慢的流层作用在较快流层上的切力与流速方向相反。两个力分别作用于相邻的两个不同流层上。

从微观上来讲，内摩擦是流体层之间分子内聚力和分子动量交换的宏观表现。在常温、常压下，静止液体中分子之间的平均距离为平衡距离，分子之间的吸引力和排斥力相平衡。当液体层之间发生相对运动时，分子之间的平均距离增大，分子之间的吸引力也大增，于是产生内聚力。内聚力阻碍液体层的相对运动，也就是说，内聚力对液体层相对运动的阻碍作用就是液体中所表现出来的内摩擦。对于气体，一般情况下分子之间的平均距离远大于平衡距离，内聚力作用非常微弱，但分子的随机运动很剧烈，气体层之间分子交换频繁。当气体层之间发生相对运动时，运动速度大的气体层和速度小的气体层分别具有动量较大的分子和动量较小的分子，相邻气体层中的分子频繁发生交换，速度大的气体层损失了动量，速度小的气体层增加了动量，因此运动速度趋于平均。这就是气体在宏观上所表现出来的内摩擦。

黏性就是流体在运动过程中产生阻力的特性。流体运动要克服其内摩擦阻力而做功，就要消耗能量，因而黏性的存在就是产生机械能损失的根源。黏性也使流体运动的规律变得异常复杂，给对它的研究和分析带来很多困难。黏性是对流体运动具有重要影响的固有属性，它是流体所特有的物理力学性质之一。

2. 牛顿内摩擦定律

牛顿内摩擦定律，可表述为：处于相对运动的相邻两层流体之间的内摩擦力（或切力） F 的大小与流体的性质有关，并与流速梯度 du/dy 和流层的接触面积 A 成正比，而与接触面上的压力无关。其关系式为

$$F = \mu A \frac{du}{dy} \tag{1-6}$$

式中 μ ——流体黏性大小的一个比例系数（称为动力黏度，也称为动力黏性系数）， $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

若以 τ 代表单位面积上的内摩擦力，即黏性切应力，则

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-7)$$

式中 τ ——黏性切应力，Pa。

流体黏性的大小还可以用另外一个系数 ν (m^2/s) 来表示，其表达式为

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-8)$$

式 (1-7) 中的流层速度梯度 du/dy 表示的是流速沿垂直于流动方向即流层法线 y 方向的变化率。为进一步理解其物理意义，沿法线 y 方向任取一边长为 dy 的方形流体微团 $abcd$ (图 1-2)，其上下表面流速不同，相差 du ，经过一个 dt 微小时段后，微团除了平移到新的位置外，还产生了剪切变形 $d\theta$ ，成为图中所示的 $a'b'c'd'$ 。由于 dt 是一个微小时段，故 $d\theta$ 也很小，所以可视为

$$d\theta = \tan(d\theta) = \frac{du dt}{dy}$$

所以

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{du}{dy} \quad (1-9)$$

由此可知，速度梯度 du/dy 实际上就是流体微团的剪切变形速度。所以牛顿内摩擦定律也可以理解为流体内摩擦力 F 或黏性切应力 τ 与流体的剪切变形速度 $d\theta/dt$ (剪切变形速率) 成正比。其数学表达式可写为

$$F = \mu A \frac{d\theta}{dt} \quad \text{或} \quad \tau = \mu \frac{d\theta}{dt} \quad (1-10)$$

当切应力一定时，黏性越大，剪切变形速度就越小。

动力黏度 μ 是流体黏性大小的度量。 μ 值越大，黏性作用越强，流体就越黏，流动性就越差。 μ 值的大小随流体种类的不同而不同，并随压强和温度的变化而变化。但实践表明，在一般情况下，压强对流体黏性的变化影响很小，可以忽略。温度则成为影响流体黏性的主要因素。而且液体和气体的黏度随温度变化规律是不同的，液体的 μ 值随温度升高而减小；而气体正好相反，其 μ 值随温度的升高而增大，常见流体的动力黏度和运动黏度变化曲线如图 1-3 和图 1-4 所示。究其原因，可用微观的分子热运动解释：流体的黏性是由分子间的吸引力和分子本身不规则的热运动所产生的动量交换而形成的。对于液体的黏性而言，分子间的吸引力是形成其黏性的决定性因素，因此液体随温度升高，分子间的吸引力降低，所以其黏性就减小。气体分子间距离本来就很大，彼此间的吸引力作用很小，气体的黏性主要是通过分子热运动，使分子彼此间发生动量交换所形成的。当气体温度升高时，其分子热运动加快，分子间碰撞的概率增高，随之产生的动量交换增大，其黏性也就随之增大，所以气体的黏性随温度的升高而增大。但相对而言，温度对黏性的影响，液体较气体更为明显。如当温度同时由 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 增至 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，此时水的 μ 值减小约一半，而空气的 μ 值仅增加为 9%。

常见流体的黏度值见表 1-1、表 1-2、表 1-3。

3. 黏度的测定

流体黏度的测定有两种方法：

(1) 直接测定法。借助于黏性流动理论中的某一基本公式，测量该公式中除黏度外的所有参数，从而直接求出黏度。直接测定法的黏度计有转筒式、毛细管式、落球式等，这种黏度计的测试手段比较复杂，使用不太方便。

(2) 间接测定法。在这种方法中首先利用一起测定经过某一标准孔口流出一定流体所需的时间（因为黏度大的流得慢，黏度小的流得快），然后再利用仪器特有的经验公式间接地算出流体的黏度。这种方法所用的仪器简单，操作方便，故多为工业界所采用。我国

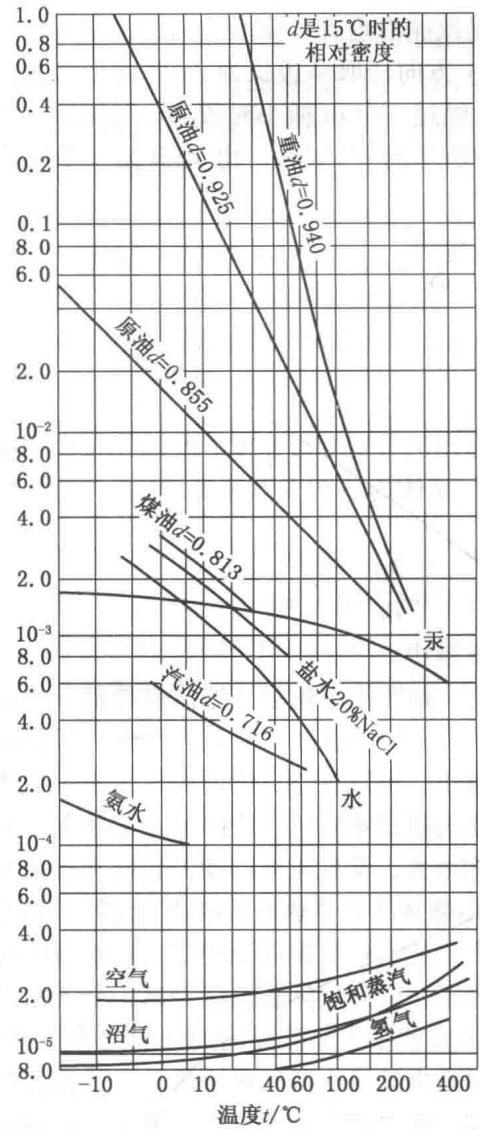


图 1-3 流体的动力黏度曲线

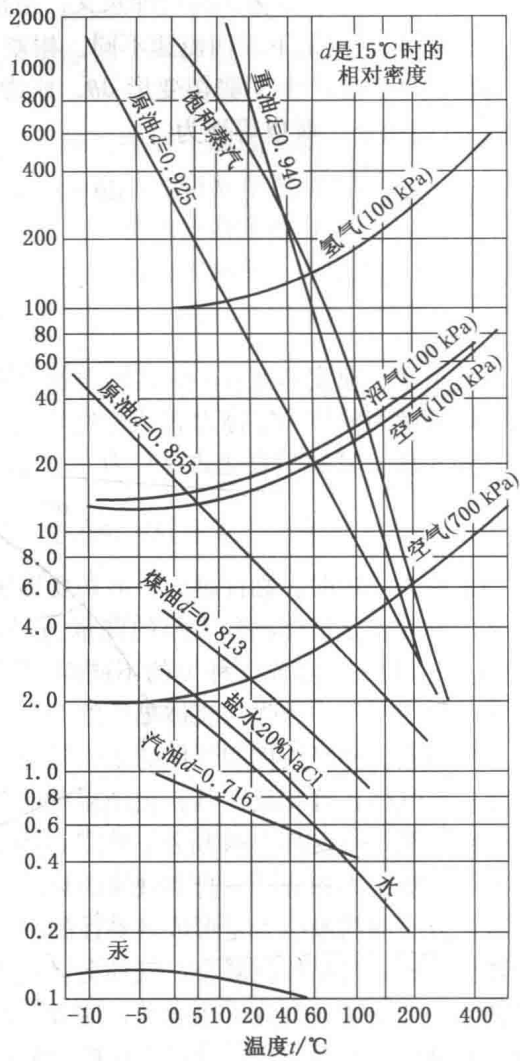


图 1-4 流体的运动黏度曲线

表 1-1 水的物理性质

温度 $t / ^\circ\text{C}$	密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	动力黏度 $\mu / (10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s})$	运动黏度 $\nu / (10^{-6} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	温度 $t / ^\circ\text{C}$	密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	动力黏度 $\mu / (10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s})$	运动黏度 $\nu / (10^{-6} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
0	999.8	1.781	1.785	5	1000	1.518	1.519

表 1-1 (续)

温度 $t /$ ℃	密度 $\rho /$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	动力黏度 $\mu /$ ($10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$)	运动黏度 $\nu /$ ($10^{-6} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	温度 $t /$ ℃	密度 $\rho /$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	动力黏度 $\mu /$ ($10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$)	运动黏度 $\nu /$ ($10^{-6} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
10	999.7	1.307	1.306	50	988.0	0.547	0.553
15	999.1	1.139	1.139	60	983.2	0.466	0.474
20	998.2	1.002	1.003	70	977.8	0.404	0.413
25	997.0	0.890	0.893	80	971.8	0.354	0.364
30	995.7	0.798	0.800	90	965.3	0.315	0.326
40	992.2	0.653	0.658	100	958.4	0.282	0.294

表 1-2 标准大气压下空气的物理性质

温度 $t /$ ℃	密度 $\rho /$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	动力黏度 $\mu /$ ($10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{s}$)	运动黏度 $\nu /$ ($10^{-6} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	温度 $t /$ ℃	密度 $\rho /$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	动力黏度 $\mu /$ ($10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{s}$)	运动黏度 $\nu /$ ($10^{-6} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
-40	1.515	1.49	9.8	30	1.156	1.86	16.0
-20	1.395	1.56	11.2	40	1.128	1.91	17.1
-10	1.350	1.62	12.0	60	1.060	2.03	19.2
0	1.293	1.68	13.0	80	1.000	2.15	21.7
10	1.248	1.73	13.9	100	0.946	2.28	24.3
20	1.205	1.80	14.9	200	0.747	2.58	34.5

表 1-3 常见流体的物理性质

液体名称	密度 $\rho /$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	动力黏度 $\mu /$ ($10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$)	运动黏度 $\nu /$ ($10^{-6} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	液体名称	密度 $\rho /$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	动力黏度 $\mu /$ ($10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$)	运动黏度 $\nu /$ ($10^{-6} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
苯	895	0.65	0.7263	煤油	808	1.92	2.3762
四氯化碳	1588	0.97	0.6108	水银	13550	1.56	0.1685
原油	856	7.2	8.4112	液氧	1206	0.28	0.2322
汽油	678	0.29	0.4277	SAE10 油	918	82	89.32
甘油	1258	1490	1184	SAE30 油	918	440	479.3

石油与机械工业常用的恩氏黏度计如图 1-5 所示。图中容器 1 中盛足够量的水，借助恒温加热器及搅拌器使容器 4 中的待测液体稳定在某一待测温度下，其温度 t 用温度计读出。拔开柱塞，让事先装入的待测液体自直径为 2.8 mm 的标准孔口流入量杯中，测出待测流体在 $t^{\circ}\text{C}$ 下流出 200 cm³ 所需要的时间为 T_1 ，再将待测液体换成 20℃ 的蒸馏水，测出流出 200 cm³ 所需要的时间为 T_2 ，则有

$$\frac{T_1}{T_2} = r$$

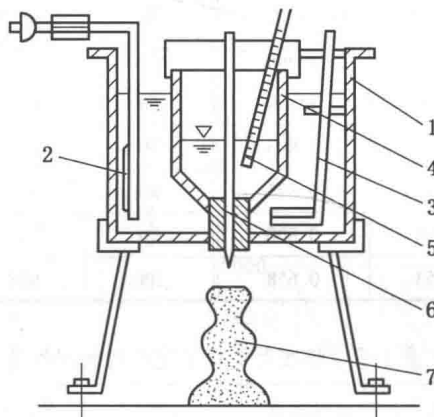
(1-11)

r 称为待测液体在 $t^{\circ}\text{C}$ 时的恩氏度，单位符号为 $^{\circ}\text{E}$ ，恩氏黏度计的经验公式为

$$\nu = \left(7.31r - \frac{6.31}{r} \right) \times 10^{-6}$$

(1-12)

利用式(1-12)即可求出流体在 $t^{\circ}\text{C}$ 时的运动黏度,再根据 $\mu = \rho\nu$ 即可求出流动的动力黏度。



1、4—容器; 2—恒温加热器; 3—搅拌棒; 5—温度计; 6—柱塞; 7—量杯
图 1-5 恩氏黏度计

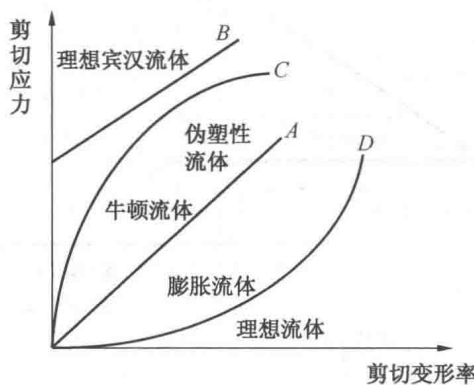


图 1-6 流变曲线

4. 牛顿流体与非牛顿流体

牛顿内摩擦定律给出了流体在简单剪切流动条件下切应力与剪切变形速度的关系,这种关系成为流变性,它反映了流体物质的物理力学性质,表示流变关系的曲线称为流变曲线(图 1-6)。

一般常见的流体如水和空气等的流变性符合牛顿内摩擦定律,这样的流体统称为牛顿流体。其黏度在一定温度和压力下是常数,切应力与剪切变形速度呈线性关系,流变曲线为通过坐标原点的直线(图 1-6 中 A 线),其斜率即为牛顿流体的动力黏度。

除了牛顿流体外,自然界和工程实际中还有许多流体(如原油、沥青、水泥砂浆等)的流变性不符合牛顿内摩擦定律,其流变曲线不是通过原点的直线(图 1-6 中 B、C、D 线),这些流体统称为非牛顿流体。工程常用的非牛顿流体有以下几种。

(1) 宾汉流体。其流体特点是,只有当施加的切应力超过屈服应力(或初始应力) τ_0 才能产生流动,而流动过程中,切应力与剪切变形速度成直线关系(图 1-6 中 B 线)。宾汉流体是工业上常见的流体,如新拌水泥砂浆、新拌混凝土,高含蜡低温原油、泥浆、牙膏及中等浓度的悬浮液等。

(2) 拟塑性流体。其流动特点是随剪切变形速度的增大,表观黏度降低(图 1-6 中 C 线),流动性增大,表现出流体变稀。故拟塑性流体又称剪切稀化流体。多数非牛顿流体,如高分子聚合物溶液、油漆、绝缘清漆、油画用的颜料、某些原油、人体血液等都属拟塑性流体。

(3) 膨胀流体。其流动特点是随剪切变形速度增大,表观黏度增大(图 1-6 中 D