



面向 21 世纪课程教材

Textbook Series for 21st Century

高校土木工程学科
专业指导委员会规划推荐教材

流体力学

刘鹤年 主编



中国建筑工业出版社

CHINA ARCHITECTURE & BUILDING PRESS

面 向 21 世 纪 课 程 教 材

高校土木工程学科专业指导委员会规划推荐教材

流 体 力 学

刘鹤年 主编

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

流体力学/刘鹤年主编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2001. 6

面向 21 世纪课程教材. 高校土木工程学科专业指导委员会规划推荐教材

ISBN 7-112-04399-9

I. 流... II. 刘... III. 流体力学-高等学校-教材
IV. 035

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 22799 号

本书是教育部面向 21 世纪土建类人才培养方案和教学内容改革与实践项目研究成果的一部分, 是普通高等学校土木工程专业流体力学课程教材。

全书的主要内容有: 绪论, 流体静力学, 流体运动学, 流体动力学基础, 量纲分析和相似原理, 流动阻力和水头损失, 孔口、管嘴出流和有压管流, 明渠流动, 堰流, 渗流, 一元气体动力学基础。本书针对土建类专业的特点, 注意加强理论基础, 注重对学生能力的培养, 论述简明严谨, 便于教学。

本书也可作为市政、环境、水利等专业流体力学 (水力学) 教学用书, 以及全国注册结构工程师流体力学考试的首选参考书。

面向 21 世纪课程教材 高校土木工程学科专业指导委员会规划推荐教材

流 体 力 学

刘鹤年 主编

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

新华书店总店科技发行所发行

北京市兴顺印刷厂印刷

*

开本: 787×960 毫米 1/16 印张: 17½ 字数: 352 千字

2001 年 6 月第一版 2001 年 6 月第一次印刷

印数: 1—2000 册 定价: 25.00 元

ISBN 7-112-04399-9

TU·3913 (9861)

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)

本社网址: <http://www.china-abp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

前 言

本书是面向 21 世纪土建类人才培养方案和教学内容改革与实践项目研究成果的一部分,是普通高等学校土木工程专业流体力学课程教材,也可作为市政、环境、水利等专业流体力学(水力学)课程教学用书,以及全国注册结构工程师流体力学考试的首选参考书。

本书从流体力学课程的基础地位出发,加深加宽理论基础,在不削弱一元流动理论的同时,加强对质点运动的分析,注意运用基本方程分析流动问题,引导学以致用,重在培养学生分析问题的能力。

根据土木工程专业的专业特点,学生的基础情况和减少课内教学时数的需要,本书适当提高了知识起点,并精简传统的经验性内容和计算方法,尽量减小篇幅。部分带*号的章节,作为选学内容,以便于组织教学。

在本书之前,曾编写出版了高等学校建筑工程专业系列教材《水力学》(中国建筑工业出版社,1998年12月),受到有关学校的欢迎。本书吸收了编写《水力学》的经验和各校教师的建议,进一步提高了书的质量,当此《流体力学》出版之际,再次向各校同仁深致谢意。

本书的编写得到建设部高等土木工程学科专业指导委员会、教育部工科力学课程教学指导委员会水力学和流体力学组专家的鼓励和指导,也得到中国建筑工业出版社、哈尔滨工业大学土木工程学院的大力支持,在此致以衷心的感谢。

由于编者学识所限,书中难免有疏漏和不足之处,恳请读者批评指正。

目 录

第 1 章 绪论	(1)
§ 1.1 流体力学及其任务	(1)
§ 1.2 作用在流体上的力	(3)
§ 1.3 流体的主要物理性质	(4)
§ 1.4 牛顿流体和非牛顿流体	(10)
习题	(12)
第 2 章 流体静力学	(14)
§ 2.1 静止流体中应力的特性	(14)
§ 2.2 流体平衡微分方程	(15)
§ 2.3 重力场中流体静压强的分布规律	(17)
§ 2.4 流体的相对平衡	(23)
§ 2.5 液体作用在平面上的总压力	(26)
§ 2.6 液体作用在曲面上的总压力	(31)
习题	(35)
第 3 章 流体运动学	(41)
§ 3.1 流体运动的描述	(41)
§ 3.2 欧拉法的基本概念	(44)
§ 3.3 连续性方程	(50)
§ 3.4 流体微团运动分析	(54)
习题	(59)
第 4 章 流体动力学基础	(61)
§ 4.1 流体的运动微分方程	(61)
§ 4.2 元流的伯努利方程	(65)
§ 4.3 总流的伯努利方程	(68)
§ 4.4 总流的动量方程	(78)
§ 4.5 理想流体的无旋流动	(82)
习题	(93)
第 5 章 量纲分析和相似原理	(97)
§ 5.1 量纲分析的意义和量纲和谐原理	(97)
§ 5.2 量纲分析法	(100)
§ 5.3 相似理论基础	(105)

§ 5.4 模型实验	(110)
习题	(113)
第 6 章 流动阻力和水头损失	(116)
§ 6.1 流动阻力和水头损失的分类	(116)
§ 6.2 粘性流体的两种流态	(118)
§ 6.3 沿程水头损失与切应力的关系	(120)
§ 6.4 圆管中的层流运动	(122)
§ 6.5 紊流运动	(125)
§ 6.6 紊流的沿程水头损失	(130)
§ 6.7 局部水头损失	(141)
§ 6.8 边界层概念与绕流阻力	(146)
习题	(153)
第 7 章 孔口、管嘴出流和有压管流	(157)
§ 7.1 孔口出流	(157)
§ 7.2 管嘴出流	(160)
§ 7.3 短管的水力计算	(162)
§ 7.4 长管的水力计算	(167)
§ 7.5 有压管道中的水击	(172)
§ 7.6 离心泵的原理和选用	(178)
习题	(181)
第 8 章 明渠流动	(186)
§ 8.1 概述	(186)
§ 8.2 明渠均匀流	(188)
§ 8.3 无压圆管均匀流	(195)
§ 8.4 明渠流动状态	(199)
§ 8.5 水跃和水跌	(207)
§ 8.6 棱柱形渠道非均匀渐变流水面曲线的分析	(212)
§ 8.7 明渠非均匀渐变流水面曲线的计算	(219)
习题	(221)
第 9 章 堰流	(224)
§ 9.1 堰流及其特征	(224)
§ 9.2 宽顶堰溢流	(225)
§ 9.3 薄壁堰和实用堰溢流	(229)
§ 9.4* 小桥孔径的水力计算	(232)
习题	(235)
第 10 章 渗流	(237)

§ 10.1 概述	(237)
§ 10.2 渗流的达西定律	(238)
§ 10.3 地下水的渐变渗流	(240)
§ 10.4 井和井群	(244)
习题	(248)
第 11 章 一元气体动力学基础	(250)
§ 11.1 可压缩气流的一些基本概念	(250)
§ 11.2 理想气体一元恒定流动的基本方程	(253)
§ 11.3 喷管的等熵出流	(259)
§ 11.4 可压缩气体管道流动	(261)
习题	(266)
习题答案	(268)
主要参考文献	(273)

第1章 绪 论

§ 1.1 流体力学及其任务

1.1.1 流体力学的研究对象

流体力学是研究流体的机械运动规律及其应用的科学，是力学的分支学科。

自然界物质有三种形态：固体、液体和气体。液体和气体合称为流体，流体的基本特征是具有流动性。什么是流动性呢？观察流动现象，诸如微风吹过平静的池水，水面因受气流的摩擦力（沿水面作用的切力）作用而流动；斜坡上的水，因受重力沿坡面方向的切向分力而往低处流淌……。这些现象表明，流体在静止时不能承受切力，或者说任何微小的切力作用，流体都将产生连续不断地变形，这就是流动。只要切力存在，流动就持续进行。流体的这种在微小切力作用下，连续变形的特性，称为流动性。此外，流体无论静止或运动，都几乎不能承受拉力。

固体没有流动性，在剪切力的作用下可以维持平衡。所以，流动性是区别流体和固体的力学特征。

1.1.2 连续介质模型

流体力学研究的对象是流体，从微观角度来看，流体是由大量的分子构成的，这些分子都在作无规则的热运动。由于分子之间存在空隙，流体的物理量（如密度、压强和速度等）在空间的分布是不连续的。同时，由于分子的随机运动，所以在空间任一点上，流体的物理量在时间上的变化，也是不连续的。显然，以分子为对象来研究流体的运动将极为复杂。

现代物理学的研究得出，在标准状况下， 1cm^3 的水中约有 3.3×10^{22} 个水分子，相邻分子间的距离约为 $3 \times 10^{-8}\text{cm}$ ； 1cm^3 气体约有 2.7×10^{19} 个分子，相邻分子间的距离约为 $3 \times 10^{-7}\text{cm}$ 。分子间距离如此微小，即使在很小的体积中，也含有大量的分子，足以得到与分子数目无关的各项统计平均特性。

流体力学研究流体宏观机械运动的规律，也就是大量分子统计平均的规律性。1755 年瑞士数学家和力学家欧拉（Euler, L. 1707—1783）首先提出，把流体当作是由密集质点构成的、内部无空隙的连续体来研究，这就是连续介质模型。这里所说的质点，是指大小同一切流动空间相比微不足道，又含有大量分子、具有一定质量的流体微元。建立连续介质模型，是为摆脱分子运动的复杂性，对流体

物质结构的简化。按连续介质模型, 流体运动中的物理量都可视为空间坐标和时间变量的连续函数。这样就能用数学分析方法来研究流体运动。

连续介质模型用于一般的流动是合理和有效的, 但是对某些特殊的问题, 如研究导弹和卫星在高空飞行的稀薄气体力学中, 气体分子间距离很大, 已能和飞行物的特征尺寸比拟, 则连续介质模型不能成立。

连续介质模型对于学过固体力学的读者并不陌生, 在材料力学和弹塑性力学中, 都是把受力构件当作连续介质, 来研究应力和变形的规律。可以说连续介质模型是固体和流体力学许多分支学科共同的理论基础。

1.1.3 流体力学的研究方法

流体力学的研究方法大体上有理论、数值和实验三种。

理论方法是通过对流体物理性质和流动特征的科学抽象, 提出合理的理论模型。对这样的理论模型, 根据物质机械运动的普遍规律, 建立控制流体运动的闭合方程组, 将实际的流动问题, 转化为数学问题, 在相应的边界条件和初始条件下求解。理论研究方法的关键在于提出理论模型, 并能运用数学方法求出理论结果, 达到揭示运动规律的目的。但由于数学上的困难, 许多实际流动问题还难以精确求解。

数值方法是在计算机应用的基础上, 采用各种离散化方法(有限差分法、有限元法等), 建立各种数值模型, 通过计算机进行数值计算和数值实验, 得到在时间和空间上, 许多数字组成的集合体, 最终获得定量描述流场的数值解。近二三十年来, 这一方法得到很大发展, 已形成一个专门学科——计算流体力学。

实验方法是通过对具体流动的观察与测量, 来认识流动的规律。理论上的分析结果需要经过实验验证, 实验又需用理论来指导。流体力学的实验研究, 包括原型观测和模型实验, 而以模型实验为主。

上述三种方法互相结合, 为发展流体力学理论, 解决复杂的工程技术问题, 奠定了基础。

1.1.4 流体力学与土木工程

人类同洪水斗争的历史, 可以追溯到遥远的上古时期。在中国古代的典籍中, 就有相传四千多年以前大禹治水, “疏壅导滞”使滔滔洪水各归于河的记载。先秦时期(公元前256~公元前251)在四川岷江中游建都江堰, 从此成都平原“水旱从人, 时无饥馑, 无凶年”。隋朝自文帝始, 历二世(公元584~610), 修浚并贯通南北大运河, “自是天下利于转输”, “运漕商旅, 往来不绝”。又如隋大业年间(公元605~617), 工匠李春在河上建赵州桥, 这座石拱桥的跨径37.4m, 拱背上还有4个小拱, 既减轻了主拱的负载, 又可泄洪, 迄今1380余年依然完好。历史上, 这些伟大的工程, 皆因“顺应水性”, 才能跨江河逾千年而不毁。

流体力学成为一门独立的科学,是在 16 世纪欧洲文艺复兴以后至 18 世纪中叶。这个时期,作为近代自然科学基础的古典力学已相当成熟,为流体力学的建立,奠定了理论基础。资本主义工商业的崛起,航海、造船、水利以及城市建设等新兴产业的要求,是流体力学建立和发展的推动力。20 世纪以来,随着航空技术的发展,以及大型水利工程、环境工程的需要,流体力学得到了空前的发展。近年来,由于科学技术的飞速进步,流体力学与其他学科相互渗透,形成了一系列边缘学科,如电磁流体力学、化学流体力学、生物流体力学、高温气体力学、爆炸力学等等。当此人类迈入 21 世纪之际,展望未来,流体力学这一古老学科将更加充满活力,欣欣向荣!

流体力学广泛应用于土木工程各个领域。例如,在建筑工程和桥梁工程中,研究解决风对高耸建筑物的荷载作用和风振问题,要以流体力学为理论基础;进行基坑排水、地基抗渗稳定处理、桥渡设计都有赖于水力分析和计算;从事给水排水系统的设计和运行控制,以及供热、通风与空调设计和设备选用,更是离不开流体力学。可以说,流体力学已成为土木工程各领域共同的专业理论基础。

流体力学不仅用于解决单项土木工程的水和气的问題,更能帮助工程技术人员进一步认识土木工程与大气和水环境的关系。大气和水环境对建筑物和构筑物的作用是长期的、多方面的,其中台风、洪水通过直接摧毁房屋、桥梁、堤坝,造成巨大的自然灾害;另一方面,兴建大型厂矿、公路、铁路、桥梁、隧道、江海堤防和水坝等,都会对大气和水环境造成不利影响,导致生态环境恶化,甚至加重自然灾害,这方面国内外已有惨痛的教训。只有处理好土木工程与大气和水环境的关系,作到保护环境,减轻灾害,才能实现国民经济可持续发展。

§ 1.2 作用在流体上的力

力是造成物体机械运动的原因,因此研究流体机械运动的规律,要从分析作用在流体上的力入手。作用在流体上的力,按作用方式的不同,分为两类。

1.2.1 表面力

表面力是通过直接接触,施加在接触表面上的力。

在运动流体中,取隔离体为研究对象(图 1-1),周围流体对隔离体的作用,以分布的表面力代替。表面力在隔离体表面某一点的大小(集度)用应力来表示。

设 A 为隔离体表面上的一点,包含 A 点取微小面积 ΔA ,若作用在 ΔA 上的总表面力为 ΔF_s ,将其分解为法向分力(压力) ΔP 和切向分力 ΔT ,则

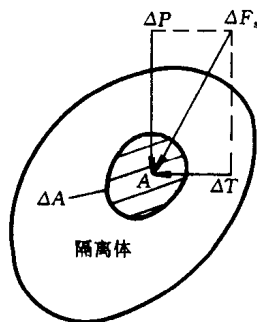


图 1-1 表面力

$$\bar{p} = \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad \text{为 } \Delta A \text{ 上的平均压应力}$$

$$\bar{\tau} = \frac{\Delta T}{\Delta A} \quad \text{为 } \Delta A \text{ 上的平均切应力}$$

取极限 $p_A = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A}$ 为 A 点的压应力, 习惯上称为 A 点的压强

$$\tau_A = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta A} \quad \text{为 } A \text{ 点的切应力}$$

应力的单位是帕斯卡 (Pascal, B. 法国数学家, 物理学家, 1623~1662), 简称帕, 以符号 Pa 表示, $1\text{Pa} = 1\text{N/m}^2$ 。

1.2.2 质 量 力

质量力是以隔距离作用, 施加在每个质点上的力。重力是最常见的质量力。除此之外, 若所取坐标系为非惯性系, 建立力的平衡方程时, 其中的惯性力如离心力、科里奥利 (Coriolis) 力也属于质量力。

质量力的大小用单位质量力表示。设均质流体的质量为 m , 所受质量力为 $\vec{F}_B$, 则单位质量力为

$$\vec{f}_B = \frac{\vec{F}_B}{m}$$

在各坐标轴上的分量

$$X = \frac{F_{Bx}}{m}, Y = \frac{F_{By}}{m}, Z = \frac{F_{Bz}}{m}$$

$$\vec{f}_B = X\vec{i} + Y\vec{j} + Z\vec{k}$$

若作用在流体上的质量力, 只有重力 (图

1-2), 则

$$F_{Bx} = 0 \quad F_{By} = 0 \quad F_{Bz} = -mg$$

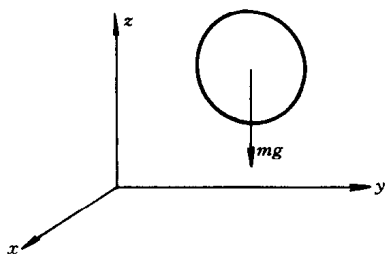


图 1-2 重力

单位质量力 $X=0, Y=0, Z = \frac{-mg}{m} = -g$

负号表示重力方向与 z 轴的方向相反。

单位质量力的单位为 m/s^2 , 与加速度单位相同。

§ 1.3 流体的主要物理性质

流体的物理性质是决定流动状态的内在因素, 同流体运动有关的主要物理性质是惯性、粘性和压缩性。

1.3.1 惯 性

惯性是物体保持原有运动状态的性质, 凡改变物体的运动状态, 都必须克服

惯性的作用。

质量是惯性大小的度量，单位体积的质量称为密度，以符号 ρ 表示。如均质流体的体积为 V ，质量为 m ，则

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-1)$$

密度的单位是 kg/m^3 。

液体的密度随压强和温度的变化很小，一般可视为常数，如采用水的密度为 1000kg/m^3 ，水银的密度为 13600kg/m^3 。

气体的密度随压强和温度而变化，一个标准大气压下 0°C 空气的密度为 1.29kg/m^3 。

在一个标准大气压条件下，水的密度见表 1-1，几种常见流体的密度见表 1-2。

水 的 密 度 表 1-1

温度 ($^\circ\text{C}$)	0	4	10	20	30
密度 (kg/m^3)	999.87	1000.00	999.73	998.23	995.67
温度 ($^\circ\text{C}$)	40	50	60	80	100
密度 (kg/m^3)	992.24	988.07	983.24	971.83	958.38

几种常见流体的密度 表 1-2

流体名称	空气	酒精	四氯化碳	水银	汽油	海水
温度 ($^\circ\text{C}$)	20	20	20	20	15	15
密度 (kg/m^3)	1.20	799	1590	13550	700~750	1020~1030

1.3.2 粘 性

粘性是流体固有的物理性质，可从三个方面去认识。

1. 粘性的表象

观察图 1-3 所示两块平行平板，其间充满静止流体，两平板间距离 h ，以 y 方向为法线方向。保持下平板固定不动，使上平板沿所在平面，以速度 U 运动。于是粘附于上平板表面的一层流体，随平板以速度 U 运动，并一层一层地向下影响，各层相继运动，直至粘附于下平板的流层，速度为零。在 U 和 h 都较小的情况下，各流层的速度，沿法线方向呈直线分布。

上平板带动粘附在板上的流层运动，而且能影响到内部各流层运动，表明内部各流层之间，存在着切向力，即内摩擦力，这就是粘性的表象。由此得出，粘性是流体的内摩擦特性。

2. 牛顿内摩擦定律

牛顿 (Newton, I.) 1687 年在所著《自然哲学的数学原理》中提出，并经后

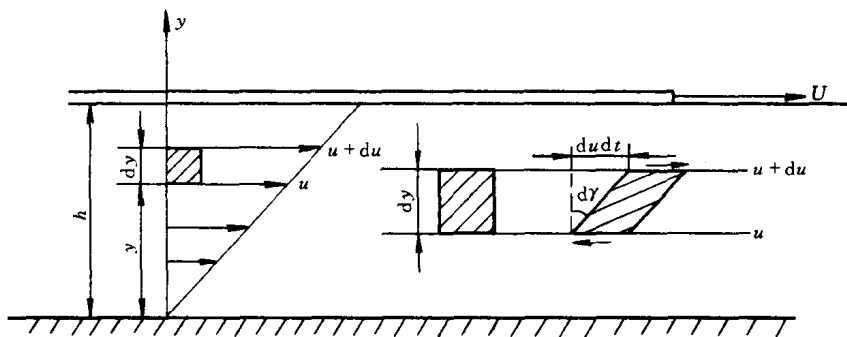


图 1-3 粘性表象

人验证：流体的内摩擦力（切力） T 与流速梯度 $\frac{U}{h} = \frac{du}{dy}$ 成比例；与流层的接触面积 A 成比例；与流体的性质有关；与接触面上的压力无关。即

$$T = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1-2)$$

以应力表示

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-3)$$

式 (1-2) 或式 (1-3) 称为牛顿内摩擦定律。

式中 $\frac{du}{dy}$ 为流速在流层法线方向的变化率，称为速度梯度。为进一步说明该项的物理意义，在厚度为 dy 的上、下两流层间取矩形流体微团，这里微团就是质点，只是在考虑尺度效应（旋转、变形）时，习惯上称为微团（图 1-3）。因上、下层的流速相差 du ，经 dt 时间，微团除位移外，还有剪切变形 $d\gamma$

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

$$\frac{du}{dy} = \frac{d\gamma}{dt}$$

可知速度梯度 $\frac{du}{dy}$ 实为流体微团的剪切变形速度（或剪切变形速率），牛顿内摩擦定律式 (1-3) 又可写成

$$\tau = \mu \frac{d\gamma}{dt} \quad (1-4)$$

此式表明，粘性是流体阻抗剪切变形速度的特性。

μ 是比例系数，称为动力粘度，简称粘度，单位是 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。动力粘度是流体粘性大小的度量， μ 值越大，流体越粘，流动性越差。气体的粘度不受压强影响，液体的粘度受压强影响也很小。粘度随温度而变化，不同温度下水和空气的粘度见表 1-3、表 1-4。

不同温度下水的粘度

表 1-3

t (°C)	μ ($10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$)	ν ($10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$)	t (°C)	μ ($10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$)	ν ($10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$)
0	1.792	1.792	40	0.654	0.659
5	1.519	1.519	45	0.597	0.603
10	1.310	1.310	50	0.549	0.556
15	1.145	1.146	60	0.469	0.478
20	1.009	1.011	70	0.406	0.415
25	0.895	0.897	80	0.357	0.367
30	0.800	0.803	90	0.317	0.328
35	0.721	0.725	100	0.284	0.296

不同温度下空气的粘度

表 1-4

t (°C)	μ ($10^{-5}\text{Pa}\cdot\text{s}$)	ν ($10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$)	t (°C)	μ ($10^{-5}\text{Pa}\cdot\text{s}$)	ν ($10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$)
0	1.72	13.7	90	2.16	22.9
10	1.78	14.7	100	2.18	23.6
20	1.83	15.7	120	2.28	26.2
30	1.87	16.6	140	2.36	28.5
40	1.92	17.6	160	2.42	30.6
50	1.96	18.6	180	2.51	33.2
60	2.01	19.6	200	2.59	35.8
70	2.04	20.5	250	2.80	42.8
80	2.10	21.7	300	2.98	49.9

在分析粘性流体运动规律时, 粘度 μ 和密度 ρ 经常以比的形式出现, 将其定义为流体的运动粘度

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-5)$$

运动粘度的单位为 m^2/s 。

由表 1-3、表 1-4 可见, 水的粘度随温度升高而减小, 空气的粘度随温度升高而增大。其原因是, 液体分子间的距离很小, 分子间的引力即内聚力, 是形成粘性的主要因素, 温度升高, 分子间距离增大, 内聚力减小, 粘度随之减小; 气体分子间的距离远大于液体, 分子热运动引起的动量交换, 是形成粘性的主要因素, 温度升高, 分子热运动加剧, 动量交换加大, 粘度随之增大。

3. 理想流体

实际的流体, 无论液体或气体, 都是有粘性的。粘性的存在, 给流体运动规律的研究, 带来极大的困难。为了简化理论分析, 特引入理想流体概念, 所谓理想流体, 是指无粘性即 $\mu=0$ 的流体。理想流体实际上是不存在的, 它只是一种对物性简化的力学模型。

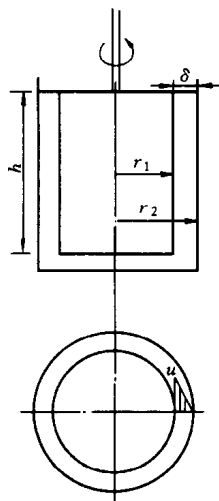


图 1-4 旋转粘度计

由于理想流体不考虑粘性,所以对流动的分析大为简化,从而容易得出理论分析的结果。所得结果,对某些粘性影响很小的流动,能够较好地符合实际;对粘性影响不能忽略的流动,则可通过实验加以修正,从而能比较容易地解决许多实际流动问题。这是处理粘性流体运动问题的一种有效方法。

【例 1-1】 旋转圆筒粘度计,外筒固定,内筒由同步电机带动旋转。内外筒间充入实验液体(图 1-4)。已知内筒半径 $r_1 = 1.93\text{cm}$,外筒半径 $r_2 = 2\text{cm}$,内筒高 $h = 7\text{cm}$ 。实验测得内筒转速 $n = 10\text{r/min}$,转轴上扭矩 $M = 0.0045\text{N} \cdot \text{m}$ 。试求该实验液体的粘度。

【解】 充入内外筒间隙的实验液体,在内筒带动下作圆周运动。因间隙很小,速度近似直线分布,不计内筒端面的影响,内筒壁的切应力为

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} = \mu \frac{\omega r_1}{\delta}$$

式中

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}, \delta = r_2 - r_1$$

扭矩

$$M = \tau A r_1 = \tau \times 2\pi r_1 h \times r_1$$

解得

$$\mu = \frac{15M\delta}{\pi^2 r_1^3 h n} = 0.952\text{Pa} \cdot \text{s}$$

1.3.3 压 缩 性

压缩性是流体因压力、温度等因素的变化,体积发生变化的性质。液体和气体的压缩性有很大差别,下面分别说明。

1. 液体的压缩性

液体的压缩性用压缩系数来表示。它表示在一定的温度下,增加单位压强,体积的变化率。若液体的原体积为 V ,压强增加 dp 后,体积减小 dV ,压缩系数为

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

由于液体受压体积减小, dp 和 dV 异号,式中右侧加负号,以使 κ 为正值。其值愈大,愈容易压缩。 κ 的单位是 m^2/N 。

根据增压前后质量无变化

$$dm = d(\rho V) = \rho dV + V d\rho$$

得

$$-\frac{dV}{V} = \frac{d\rho}{\rho}$$

故压缩系数也可写成

$$\kappa = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp} \quad (1-7)$$

液体的压缩系数随温度和压强变化,水温 0°C ,不同压强下的压缩系数见表 1-5,表中符号 at 表示工程大气压, $1\text{at}=98000\text{N/m}^2$ 。

水的压缩系数

表 1-5

压强 (at)	5	10	20	40	80
$\kappa \times 10^9 \text{ (m}^2/\text{N)}$	0.538	0.536	0.531	0.528	0.515

压缩系数的倒数是体积模量,即

$$K = \frac{1}{\kappa} = -V \frac{dp}{dV} = \rho \frac{dp}{d\rho} \quad (1-8)$$

K 的单位是 N/m^2 。

在流体力学中,常用膨胀性来表示流体因温度升高,体积膨胀的性质。液体的膨胀性用体膨胀系数表示。它表示在一定的压强下,单位温度升高,体积的变化率。若液体的原体积为 V ,温度升高 dT 后,体积增加 dV ,体膨胀系数为:

$$\alpha_v = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT} = -\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} \quad (1-9)$$

α_v 的单位是 $1/\text{K}$ 或 $1/^{\circ}\text{C}$ 。

液体的体膨胀系数随压强和温度变化,水在 1 标准大气压下,不同温度的体膨胀系数见表 1-6。

水的膨胀系数

表 1-6

温度 ($^{\circ}\text{C}$)	1~10	10~20	40~50	60~70	90~100
$\alpha_v \times 10^4 \text{ (1/}^{\circ}\text{C)}$	0.14	0.15	0.42	0.55	0.72

从表 1-5 和表 1-6 可知,水的压缩系数和体膨胀系数都很小。一般情况下,水的压缩性和膨胀性均可忽略不计。对于某些特殊的流动,如有压管道中的水击,水中爆炸波的传播等,压缩性起着关键作用,必须考虑水的压缩性;在液压封闭系统或热水采暖系统中,当工作温度变化较大时,须考虑体积膨胀对系统造成的影响。

2. 气体的压缩性

气体具有显著的压缩性,在一般情况下,常用气体(如空气、氮、氧、二氧化碳等)的密度、压强和温度三者之间的关系,符合理想气体状态方程,即

$$\frac{p}{\rho} = RT \quad (1-10)$$

式中 p 为气体的绝对压强 (N/m^2); ρ 为气体的密度 (kg/m^3); T 为气体的热力学温度 (K); R 为气体常数,在标准状态下, $R = \frac{8314}{M} \text{ (J/kg} \cdot \text{K)}$, M 为气体的分子量。空气的气体常数 $R = 287 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ 。

当气体在很高的压强,很低的温度下,或接近于液态时,就不能当作理想气体看待,式 (1-10) 不再适用。

3. 不可压缩流体

实际流体都是可压缩的,然而有许多流动,流体密度的变化很小,可以忽略,由此引出不可压缩流体的概念。所谓不可压缩流体,是指流体的每个质点在运动全过程中,密度不变化的流体。对于均质的不可压缩流体,密度时时、处处都不变化,即 $\rho = \text{常数}$ 。不可压缩流体是又一理想化的力学模型。

如前所述,液体的压缩系数很小,在相当大的压强变化范围内,密度几乎不变。因此,一般的液体平衡和运动问题,都按不可压缩流体进行理论分析。

气体的压缩性远大于液体,是可压缩流体。需要指出的是,在土木工程中常见的气流运动,如通风管道、低温烟道,管道不很长,气流的速度不大,远小于音速(约 340m/s),气体在流动过程中,密度没有明显变化,仍可作为不可压缩流体处理。

§ 1.4 牛顿流体和非牛顿流体

1.4.1 流变性

牛顿内摩擦定律给出了流体在简单剪切流动(图 1-3)条件下,切应力与剪切变形速度的关系。这种关系反映流体物料的力学性质,称为流变性。表示流变关系的曲线,称为流变曲线。

水和空气等常见流体的流变性符合牛顿内摩擦定律

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

这样的流体通称为牛顿流体。牛顿流体的动力粘度 μ ,在一定的温度和压力下是常数,切应力与剪切变形速度成线性关系,流变曲线是通过坐标原点的直线(图 1-5a),斜率就是牛顿流体的粘度。即

$$\mu = \frac{\tau}{du/dy} = \tan\theta$$

除了以水和空气为代表的牛顿流体外,自然界和工程中还有许多液体物料(如沥青、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 1-5b~d),这样的流体通称为非牛顿流体。

对于非牛顿流体,也类似于牛顿流体,把切应力与剪切变形速度之比,定义为非牛顿流体在该剪切速度时的表观粘度。表观粘度一般随剪切变形速度和剪切持续时间而变化。

1.4.2 非牛顿流体简介

非牛顿流体根据表观粘度是否和剪切持续时间有关,将其分为非时变性非牛顿流体和时变性非牛顿流体两类。下面介绍工程中最常见的几种非时变性非牛顿