

高等教育“十三五”规划教材

PLANNING TEXTBOOKS FOR HIGHER EDUCATION



流体力学

樊哲超 吴恒滨 主编

西北工业大学出版社

LIXUE

流体力学

主 编 樊哲超 吴恒滨

西北工业大学出版社

【内容简介】 本书是土木工程专业流体力学课程的教材。内容覆盖了全国注册结构工程师和注册土木工程师(岩土)流体力学考试大纲的全部内容。全书共分为8章,主要内容有流体静力学,流体运动学及动力学基础,流动阻力与水头损失,孔口、管嘴出流和有压管流,明渠流动,堰流与渗流,量纲分析和相似原理等。

本书可作为高等学校土建类专业教材,也可供独立学院、高职高专和成人高校师生及相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

流体力学/樊哲超, 恒滨主编. —西安:西北工业大学出版社, 2016.8
高等教育“十三五”规划教材
ISBN 978-7-5612-4974-1

I. ①流… II. ①樊…②吴… III. ①流体力学—高等学校—教材 IV. ①O35

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第176152号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路127号 邮编:710072

电话:(029)88493844 88491757

网址:<http://www.nwpu.com>

印刷者:陕西博闻印务有限责任公司

开本:787 mm×1 092 mm 1/16

印张:9.75

字数:234千字

版次:2016年8月第1版

2016年8月第1次印刷

定价:25.00元

前 言

本书是为应用型高等学校土木工程等专业流体力学课程编写的教材(适合于48学时),覆盖了全国注册结构工程师和注册土木工程师(岩土)流体力学考试大纲的全部内容。

本书根据土木工程专业的需要,介绍流体力学的基本概念、基本原理和基本方法,注重加强理论基础和能力的培养,力求思路清晰,物理概念明确,理论联系实际。

本书由重庆三峡学院樊哲超、吴恒滨担任主编;重庆三峡学院王海龙、郭正超担任副主编。全书共分为8章,主要内容有绪论,流体静力学,流体运动学及动力学基础,流动阻力与水头损失,孔口、管嘴出流和有压管流,明渠流动,堰流与渗流,量纲分析和相似原理等。

具体编写分工:

重庆三峡学院,樊哲超(前言、第1章、第2章);

重庆三峡学院,吴恒滨(第3章、第8章);

重庆三峡学院,王海龙(第4章、第5章);

重庆三峡学院,郭正超(第6章、第7章)。

本书在编写过程中得到了重庆三峡学院土木工程学院何运祥院长、程龙飞副院长的指导和帮助,重庆三峡学院钟华栋、吴浪、姚正珍、江威、陶然、金婷、文政礼、晏立、钟代印、章琦等同学进行了文字编辑及绘图工作。在编写过程中参考了大量文献,限于篇幅没有一一列举,在此向各位表示深深的谢意。同时对于教材中的纰漏和错误,欢迎读者批评指正。

编 者

2016年4月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 流体力学研究的对象及任务	1
1.2 流体力学的发展简史	2
1.3 作用在流体上的力	4
1.4 流体的主要物理性质	5
1.5 流体的力学模型	11
习题	13
第 2 章 流体静力学	15
2.1 流体静压强特性	15
2.2 流体平衡微分方程	16
2.3 重力场中流体静压强的分布	19
2.4 平面上静水总压力的计算	24
2.5 曲面上静水总压力的计算	29
习题	33
第 3 章 流体运动学及动力学基础	39
3.1 流体运动的描述方法	39
3.2 流场的基本概念	43
3.3 流动的质量守恒方程	47
3.4 流体运动微分方程	51
3.5 实际流体的能量方程	57
3.6 恒定流的动量方程	64
习题	67
第 4 章 流动阻力与水头损失	69
4.1 流动阻力和水头损失的分类	69
4.2 层流、紊流与雷诺数	70
4.3 均匀流基本方程	72
4.4 圆管层流的速度分布、沿程损失	74
4.5 紊流运动	76

4.6	紊流的沿程水头损失	78
4.7	局部水头损失	82
	习题	86
第5章	孔口、管嘴出流和有压管流	89
5.1	孔口出流	89
5.2	管嘴出流	91
5.3	有压管道的水力计算	93
	习题	97
第6章	明渠流动	101
6.1	概述	101
6.2	明渠均匀流	103
6.3	无压圆管均匀流	109
6.4	水跃和水跌	113
	习题	115
第7章	堰流与渗流	116
7.1	堰流及其特征	116
7.2	宽顶堰	117
7.3	薄壁堰和实用堰	121
7.4	渗流概述	124
7.5	渗流的达西定律	125
7.6	普通井和井群的计算	128
	习题	131
第8章	量纲分析与相似原理	132
8.1	量纲和谐原理	132
8.2	量纲分析方法	136
8.3	流体相似原理	142
8.4	量纲分析的工程应用	148
	习题	149
	参考文献	150

第 1 章 绪 论

在学习流体力学这门课程之前,本绪论将主要回答以下几个问题:什么是流体力学?它的主要研究对象和任务是什么?流体力学的发展历史,作用在流体上的力有哪些,流体主要的物理性质有哪些,以及研究流体的力学概化模型?使同学们对流体力学有一个大致的了解,帮助学生在后面的学习中掌握流体力学的主要脉络。

1.1 流体力学研究的对象及任务

流体力学是力学的一个独立分支。它是研究流体的平衡和流体的机械运动规律及其在工程实际中应用的一门学科。流体力学的研究对象是流体,包括液体和气体。在力学研究中,根据研究对象的不同,一般可分为:以受力后不变形的绝对刚体为研究对象的理论力学;以受力后产生微小变形的固体为研究对象的固体力学;以受力后产生较大变形的流体为研究对象的流体力学。

流体是气体和液体的总称。在人们的生活和生产活动中随时随地都可遇到流体,所以流体力学与人类日常生活和生产事业密切相关。它是一门应用较广的科学,在航空航天、水运工程、流体机械、给水排水、水利工程、化学工程、气象预报以及环境保护等学科中均以流体力学为其重要的理论基础。

20 世纪初,世界上第一架飞机出现以后,飞机和其他各种飞行器得到迅速发展。20 世纪 50 年代开始的航天飞行,使人类的活动范围扩展到其他星球和银河系。航空航天事业的蓬勃发展是同流体力学的分支学科——空气动力学和气体动力学——的发展紧密相联的。这些学科是流体力学中最活跃、最富有成果领域。

石油和天然气的开采,地下水的开发利用,要求人们了解流体在多孔或裂隙介质中的运动,这是流体力学分支之一——渗流力学——研究的主要对象。渗流力学还涉及土壤盐碱化的防治,化工中的浓缩、分离和多孔过滤,燃烧室的冷却等技术问题。

燃烧离不开气体,燃烧过程中涉及到许多有化学反应和热能变化的流体力学问题是物理—化学流体动力学的内容之一。爆炸是猛烈的瞬间能量变化和传递过程,涉及气体动力学,从而形成了爆炸力学。

生物流变学研究人体或其他动植物中有关的流体力学问题,例如血液在血管中的流动,心、肺、肾中的生理流体运动和植物中营养液的输送。此外,鸟类在空中的飞翔,动物在水中的游动等,都是流体力学研究内容。

在土木工程中,流体力学亦得到了广泛的应用。在给水排水工程中,无论是管网流量计算、管网设计还是渠道开挖、水泵选型等都需要解决一系列流体力学问题;在建筑暖通工程中,热风采暖、冷风降温、燃气输送等均以流体为输送介质。在公路和桥梁建设中,路基和边坡的

稳定性、桥梁和涵洞的修建也与水密切相关。此外,在土建工程施工中,围堰修建、基坑排水也涉及到许多流体力学问题。只有学好流体力学,掌握流体的各种力学特性和运动规律,才能很好地解决土木工程中遇到的流体力学问题。

因此,流体力学既包含自然科学的基础理论,又涉及工程技术科学方面的应用。此外,如从流体作用力的角度,则可分为流体静力学、流体运动学和流体动力学;从对不同“力学模型”的研究来分,则有理想流体动力学、黏性流体动力学、不可压缩流体动力学、可压缩流体动力学等。

流体力学和固体力学有着密切的关系。流体力学与弹性力学同属于连续介质力学范畴,都采用连续介质力学的一般方法研究问题,就是基本方程亦有一定相似之处,如流体力学中的纳维—斯维托克斯方程与弹性力学中的拉梅方程,流体力学中的边界层概念应用到弹性力学板壳问题中得到了边缘效应方程,甚至在一定条件下固体可当做流体处理。如岩土定向爆破、与固体物质的聚能爆炸中,爆震波的传播可当做气体中激波的传播。流变学就是统筹研究流体和固体的形变与流动。

1.2 流体力学的发展简史

人类为了生存,自远古以来一直持续不断地与自然界进行着不懈的斗争。流体力学同其他自然科学一样,是在长期的生产实践和科学研究中逐渐被人们认识和总结,发展成为自然科学的一个重要分支的。正如奥地利物理学家汉斯·蒂林格在《从牛顿到薛定谔的理论物理学之路》一书中写道:“每一门科学都是用世世代代的研究者无数努力的代价建立起来的大厦。”古今中外许许多多从事流体力学问题的研究者,如同卓越的建筑师,用自己的聪明才智和辛勤劳动的汗水筑成了完整的流体力学“大厦”。人们最早对于有关流体知识的认识是从治水、灌溉、航行等方面开始的。

1. 中国流体力学发展

几千年来,流体力学是人们在与水患作斗争发展生产的长期过程中形成和发展起来的。相传 4000 千多年前(公元前 2070 年,夏左右)大禹治水采用填堵筑堤,疏通导引方法,治理了黄河和长江。春秋战国末期(公元前 221 年左右)秦国蜀郡太守李冰在岷江中游修建了都江堰,这闻名世界的防洪灌溉工程,消除了岷江水患,灌溉了大片土地,使成都平原成为沃野。2000 年来,一直造福于人类。都江堰工程采取了中流作堰的方法,把岷江水分分为内江和外江,内江供灌溉,外江供分洪,这就控制了岷江急流,免除了水灾,灌溉了 300 多万亩农田。说明当时对堰流理论有一定认识。

在秦代,除了都江堰,还有郑国渠、灵渠 2 大水利工程,说明我们的祖先当时对明槽水流和堰流流动规律的认识已经达到了相当高的水平。西汉武帝时期,为引洛水灌溉农田,他们在黄土高原上修建了龙首渠,创造性地采用了井渠法即用竖井沟通长 10 余里的穿山隧洞,有效地防止了黄土的塌方。北宋(公元 960—1126 年)时期,在运河上修建的真州船闸与 14 世纪末荷兰的同类船闸相比,早了 300 多年。

在古代,以水为动力的简单机械也有了长足的发展,例如用水轮提水,或通过简单的机械传动去碾米、磨面等。东汉杜诗任南阳太守时(公元 37 年)曾创造水排(水力鼓风机),即利用水力,通过传动机械,使皮制鼓风囊连续开合,将空气送入冶金炉。

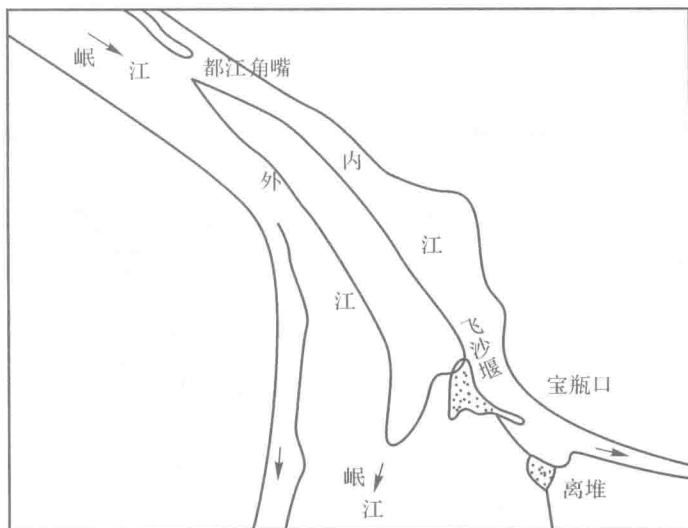


图 1-1 都江堰水利工程平面图

清朝雍正年间,何梦瑶在《算迪》一书中提出流量等于过水断面面积乘以断面平均流速的计算方法。

必须指出的是,从 14 世纪欧洲文艺复兴时期开始,西方涌现出了一大批学者,他们对流体力学理论的形成作出了重要贡献,但是我国在科学技术方面已经逐渐落后了。

进入 20 世纪,我国出现了几位重要的科学家,他们对流体力学的发展作出了重要贡献。钱学森(1911—2009 年)在火箭、导弹、航天器等领域为中国火箭导弹和航天事业的创建与发展作出了杰出的贡献。周培源(1902—1993 年)在流体力学中的湍流理论方面取得了出色的成果。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机械三元流理论,至今仍是国内外许多优良叶轮机机械设计计算的主要依据。

2. 西方流体力学发展

与我国情况相类似,早在几千年前,在埃及、巴比伦、希腊和印度等地,为了发展农业和航运事业,也修建了大量的渠系。古罗马人则修建了大规模的供水管道系统。这些事例说明人们在大量的生产实践中也认识了一些水流运动的规律。但是,真正对流体物理学学科形成最早作出贡献的是古希腊的阿基米德(Archimedes),他在公元前 3 世纪撰写了“论浮体”,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。

公元 15 世纪至 17 世纪,达·芬奇、伽利略、E. 托里拆利、B. 帕斯卡、I. 牛顿等人用实验方法研究了水静压力、大气压力、孔口出流、压力传递和水的切应力等问题。公元 18 世纪以后,流体力学得到了较快的发展,流体运动规律的研究大致可分为两大类:一类是用数学分析的方法进行比较严格的推导,建立流体运动的基本方程,在这一方面做出杰出贡献的有 D. 伯努利、L. 欧拉、纳维、G. G. 斯托克斯、O. 雷诺等人,他们分别建立了伯努利方程、欧拉方程、纳维-斯托克斯方程、雷诺方程等。但是由于这些纯理论的推导所作的某些假定与实际不尽相符,或由于数学上难以求解,所以无法用于解决实际工程中一些复杂问题。与此同时,另一类的研究是

为了解决生产实际问题,从大量的实验和实际观测中总结出来一些经验关系式,并根据简化后的一维方程进行数学分析,建立各运动要素间的定量关系。从事这类研究并作出贡献的主要有 H. 毕托、G. B. 文丘里、A. de 谢齐、R. 曼宁等人。使上述两类研究得到统一的是由德国人 L. 普朗特在 1904 年创立的边界层理论。这一理论既明确了理想流体的适用范围,又能计算实际物体运动时的摩阻力。

20 世纪以来,随着生产和科学技术的发展,特别是航空技术的迅速发展,使得理论分析和实验方法日益结合,形成了现代流体力学。根据侧重不同,又可将侧重于理论分析的流体力学称为理论流体力学。

1.3 作用在流体上的力

任何物体的平衡和运动都是受力作用的结果。因此,在研究流体力学规律之前,必须首先分析作用在流体上的力的种类和性质。

作用在流体上的力通常分为两大类。

1.3.1 表面力

表面力是作用在隔离体表面上的力,其大小和受力作用的表面面积成正比。表面力是相邻流体或其他物体对隔离体作用的结果。由于流体内部不能承受拉力,所以表面力又可分为垂直于作用面的压力和平行于作用面的切力。如果在隔离体表面上取一个包含 A 点的微小面积 ΔA ,作用在 ΔA 上的法向力为 ΔP (即垂直于作用面上的压力),切向力为 ΔT (参见图 1-2),则 ΔA 上的平均压应力(流体力学里通称平均压强) $\bar{p}$ 和平均切应力 $\bar{\tau}$ 分别为

$$\bar{p} = \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad (1-1)$$

$$\bar{\tau} = \frac{\Delta T}{\Delta A} \quad (1-2)$$

若 ΔA 面积无限缩小至 A 点,则 A 点的压强和切应力为

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad (1-3)$$

$$\tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta A} \quad (1-4)$$

在国际单位制中,压强和切应力的单位均为 Pa。

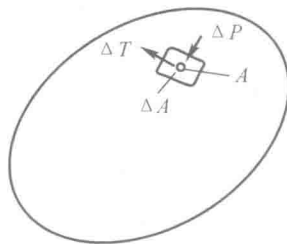


图 1-2 表面力

1.3.2 质量力

质量力是指作用在隔离体内每个流体质点上的力,其大小和流体的质量成正比的。在均质流体中,质量力也必然和受作用流体的体积成正比,所以质量力又称为体积力。最常见的质量力是重力和惯性力。

设在流体中取一个质量为 m 的质点,作用在这个质点上的质量力为 F ,则单位质量力为

$$f = \frac{F}{m} \quad (1-5)$$

若 F 在每个坐标轴上的分力为 F_x, F_y, F_z ,则单位质量力 f 在三个坐标轴上的分量分别为

$$\begin{cases} f_x = \frac{F_x}{m} \\ f_y = \frac{F_y}{m} \\ f_z = \frac{F_z}{m} \end{cases} \quad (1-6)$$

单位质量力及其分量都具有加速度的量纲 LT^{-2} 。若流体所受的质量力只有重力时,则 $G = mg$,那么单位质量力的三个分量分别为

$$f_x = 0, \quad f_y = 0, \quad f_z = -g$$

式中,负号表示重力的方向是垂直向下的,正好与 z 轴方向相反。

用矢量表示单位质量力为

$$\mathbf{f} = f_x \mathbf{i} + f_y \mathbf{j} + f_z \mathbf{k}$$

式中, $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ 分别为 x, y, z 轴方向的单位矢量。

1.4 流体的主要物理性质

1.4.1 流体的密度

流体的密度是流体的重要属性之一,它表征流体在空间某点质量的密集程度。流体的密度定义为单位体积流体所具有的质量,用符号 ρ 来表示。

对于流体中各点密度相同的均质流体,其密度为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-7)$$

式中, ρ 为流体的密度, kg/m^3 ; m 为流体的质量, kg ; V 为流体的体积, m^3 。

对于各点密度不同的非均质流体,在流体的空间中某点取包含该点的微小体积 ΔV ,该体积内流体的质量为 Δm ,则该点的密度为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \quad (1-8)$$

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 $1\,000\text{ kg}/\text{m}^3$,水银的密度为 $13\,600\text{ kg}/\text{m}^3$ 。

气体的密度随压强和温度而变化,一个标准大气压下 0℃ 空气的密度为 1.29 kg/m³。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。

表 1-1 水的密度

温度 /℃	0	4	10	20	30
密度 /(kg · m ⁻³)	999.87	1 000.00	999.73	998.23	995.67
温度 /℃	40	50	60	80	100
密度 /(kg · m ⁻³)	992.24	988.07	983.24	971.83	958.38

表 1-2 几种常见流体的密度

流体名称	空气	酒精	二氧化碳	水银	汽油	海水
温度 /℃	20	20	20	20	15	15
密度 /(kg · m ⁻³)	1.20	799	1 590	13 550	700 ~ 750	1 020 ~ 1 030

1.4.2 流体的压缩性和膨胀性

随着压强的增加,流体体积缩小;随着温度的增高,流体体积膨胀,这是所有流体的共同属性,即流体的压缩性和膨胀性。

1. 流体的膨胀性

在一定的压强下,流体的体积随温度的升高而增大的性质称为流体的膨胀性。流体膨胀性的大小用体积膨胀系数 α_v 来表示,它表示当压强不变时,升高一个单位温度所引起流体体积的相对增加量,即

$$\alpha_v = \frac{1}{V} \frac{dV}{dt} \tag{1-9}$$

式中, α_v 为流体的体积膨胀系数,1/℃,1/K; dt 为流体温度的增加量,℃,K; V 为原有流体的体积,m³; dV 为流体体积的增加量,m³。

实验指出,液体的体积膨胀系数很小,例如在 9.8×10^4 Pa 下,温度在 1~10℃ 范围内,水的体积膨胀系数 $\alpha_v = 14 \times 10^{-6}$ (1/℃);温度在 10~20℃ 范围内,水的体积膨胀系数 $\alpha_v = 150 \times 10^{-6}$ (1/℃)。在常温下,温度每升高 1℃,水的体积相对增量仅为 $1.5/10^4$;温度较高时,如 90~100℃,也只增加 $7/10^4$ 。其他液体的体积膨胀系数也是很小的。

流体的体积膨胀系数 α_v 还取决于压强。对于大多数液体, α_v 随压强的增加稍为减小。水的 α_v 在高于 50℃ 时也随压强的增加而减小,只有在低于 50℃ 时随压强的增大而增大。

在一定压强作用下,水的体积膨胀系数与温度的关系见表 1-3。

表 1-3 水的体积膨胀系数 $\alpha_v(1/^\circ\text{C})$

压强 10^5 Pa	温度/ $^\circ\text{C}$				
	1~10	10~20	40~50	60~70	90~100
0.98	14×10^{-6}	150×10^{-6}	422×10^{-6}	556×10^{-6}	719×10^{-6}
98	43×10^{-6}	165×10^{-6}	422×10^{-6}	548×10^{-6}	704×10^{-6}
196	72×10^{-6}	183×10^{-6}	426×10^{-6}	539×10^{-6}	
490	149×10^{-6}	236×10^{-6}	429×10^{-6}	523×10^{-6}	661×10^{-6}
882	229×10^{-6}	289×10^{-6}	437×10^{-6}	514×10^{-6}	621×10^{-6}

2. 流体的压缩性

在一定的温度下,流体的体积随压强升高而减小的性质称为流体的压缩性。流体压缩性的大小用体积压缩系数 κ 来表示。它表示当温度保持不变时,单位压强增量引起流体体积的相对缩小量,即

$$\kappa=-\frac{1}{dp}\frac{dV}{V}$$

(1-10)

式中, κ 为流体的体积压缩系数, m^2/N ; dp 为流体压强的增加量, Pa ; V 为原有流体的体积, m^3 ; dV 为流体体积的增加量, m^3 。

由于压强增加时,流体的体积减小,即 dp 与 dV 的变化方向相反,故在(1-10)式中加个负号,以使体积压缩系数 κ 恒为正值。

实验指出,液体的体积压缩系数很小,例如水,当压强为 $(1\sim 490)\times 10^7\text{ Pa}$ 、温度在 $0\sim 20^\circ\text{C}$ 的范围内时,水的体积压缩系数仅约为 $5/10^5$,即每增加 10^5 Pa ,水的体积相对缩小为 $5/10^5$ 。表 1-4 列出了 0°C 水在不同压强下的 κ 值。

表 1-4 0°C 水在不同压强下的 κ 值

压强/ (10^5 Pa)	4.9	9.8	19.6	39.2	78.4
$\kappa/(10^{-9}\text{ m}^2\cdot\text{N}^{-1})$	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,这是由于气体的密度随着温度和压强的改变将发生显著的变化。对于完全气体,其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

$$\frac{p}{\rho}=RT$$

(1-11)

式中, p 为气体的绝对压强, Pa ; ρ 为气体的密度, kg/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可查相关规范。

1.4.3 流体的黏性和牛顿内摩擦定律

1. 流体的黏性

黏性是流体抵抗剪切变形的一种属性。由流体的力学特点可知,静止流体不能承受剪切力,即在任何作用微小剪切力的持续作用下,流体要发生连续不断的变形。但不同的流体在相同的剪切力作用下其变形速度是不同的,它反映了抵抗剪切变形能力的差别,这种能力就是流体的黏性。

现通过一个实验来进一步说明流体的黏性。将两块平板相隔一定距离水平放置,其间充满某种液体,并使下板固定不动,上板以某一速度 u_0 向右平行移动,如图 1-3 所示。由于流体与平板间有附着力,紧贴上板的一薄层流体将以速度 u_0 跟随上板一起向右运动,而紧贴下板的一薄层流体将和下板一样静止不动。两板之间的各流体薄层在上板的带动下,都作平行于平板的运动,其运动速度由上向下逐层递减,由上板的 u_0 减小到下板的零。如果上下板之间的距离 h 很小,板间流体流动的速度可以看成是按直线变化的。显然,由于各流层速度不同,流层间就有相对运动,从而产生切向作用力,称其为内摩擦力。作用在两个流体层接触而上的内摩擦力总是成对出现的,即大小相等而方向相反,分别作用在相对运动的流层上。速度较大的流体层作用在速度较小的流体层上的内摩擦力 F ,其方向与流体流动方向相同,带动下层流体向前运动;而速度较小的流体层作用在速度较大的流体层上的内摩擦力 F' ,其方向与流体流动方向相反,阻碍上层流体运动。

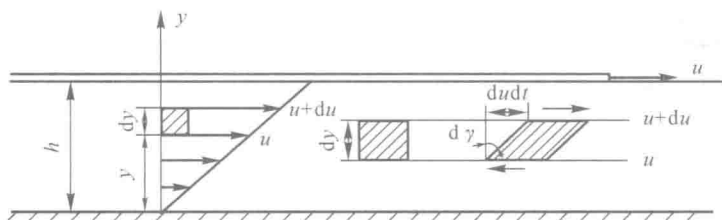


图 1-3 流体的黏性实验

2. 牛顿内摩擦定律

根据牛顿(Newton)实验研究的结果得知,运动的流体所产生的内摩擦力(切向力) F 的大小与垂直于流动方向的速度梯度 du/dy 成正比,与接触面的面积 A 成正比,并与流体的种类有关,而与接触面上压强 p 无关。故内摩擦力的数学表达式可写为

$$F \propto A \frac{du}{dy} \quad (1-12)$$

写成等式为

$$F = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1-13)$$

式中, F 为流体层接触面上的内摩擦力,N; A 为流体层间的接触面积, m^2 ; du/dy 为垂直于流动方向上的速度梯度, $1/s$; μ 为动力黏度, $Pa \cdot s$ 。

流层间单位面积上的内摩擦力称为切向应力,则

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-14)$$

式中, τ 为切向应力, Pa 。

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,这里的微团就是质点,只是在考虑尺度效应(旋转、变形)时,习惯上称为微团(见图 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(1-14)又可写成

$$\tau = \mu \frac{d\gamma}{dt} \tag{1-15}$$

式(1-15)表明,黏性是流体阻抗剪切变形速度的特性。

μ 是比例系数,称为动力黏度,简称黏度,单位 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。动力黏度是流体黏性大小的度量, μ 值越大,流体越黏,流动性越差。气体的黏度不受压强影响,液体的黏度受压强影响也很小。黏度随温度而变化,不同温度下水和空气的黏度见表 1-5 和表 1-6。

表 1-5 不同温度下水的黏度

t ℃	$\frac{\mu}{10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}}$	$\frac{\nu}{10^{-6} \text{m}^2/\text{s}}$	t ℃	$\frac{\mu}{10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}}$	$\frac{\nu}{10^{-6} \text{m}^2/\text{s}}$
0	1.792	1.792	40	0.651	0.659
5	1.519	1.519	45	0.597	0.603
10	1.310	1.310	50	0.549	0.356
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	0.281	0.296

表 1-6 不同温度下空气的黏度

t ℃	$\frac{\mu}{10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}}$	$\frac{\nu}{10^{-6} \text{m}^2/\text{s}}$	t ℃	$\frac{\mu}{10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}}$	$\frac{\nu}{10^{-6} \text{m}^2/\text{s}}$
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

在分析黏性流体运动规律时,黏度 μ 和密度 ρ 经常以比的形式出现,将其定义为流体的运动黏度,即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-16)$$

运动黏度的单位是 m^2/s 。

由表1-5、表1-6可见,水的黏度随温度升高而减小,空气的黏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,是形成黏性的主要因素,温度升高,分子间距离增大,内聚力减小,黏度随之减小;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,是形成黏性的主要因素,温度升高,分子热运动加剧,动量交换加大,黏度随之增大。

【例1-1】 一平板距另一固定平板 $\delta=0.05\text{ mm}$,二板水平放置,其间充满流体,上板在单位面积上为 $\tau=2\text{ N/m}^2$ 的力作用下,以 $u=0.25\text{ m/s}$ 的速度移动,求该流体的动力黏度。

解 由牛顿内摩擦定律式(1-4)可得

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

由于两平板间隙很小,速度分布可认为是线性分布,可用增量来表示微分:

$$\mu = \tau \frac{dy}{du} = \tau \frac{\delta}{u-0} = 2 \times \frac{0.5 \times 10^{-3}}{0.25-0} = 0.004\text{ Pa} \cdot \text{s}$$

【例1-2】 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 $u=1\text{ m/s}$ 的速度移动,已知间隙中油液的密度的为 920 kg/m^3 ,运动黏度 $\nu=5.6 \times 10^{-4}\text{ m}^2/\text{s}$,求所需拉力 F 为多少?

解 间隙中油的动力黏度为

$$\mu = \rho \nu = 920 \times 5.6 \times 10^{-4} = 0.5152\text{ Pa} \cdot \text{s}$$

由牛顿内摩擦定律式(1-13)可得

$$F = \mu A \frac{du}{dy}$$

由于间隙很小,速度可认为是线性分布,则

$$F = \mu A \frac{u-0}{\frac{D-d}{2}} = 0.5152 \times 3.14 \times 0.2 \times 1 \times \frac{1}{\frac{206-200}{2}} \times 10^3 = 107.8\text{ N}$$

1.4.4 液体表面张力

液体具有黏附力和附着力,两者都是分子吸引力,黏附力使液体抵抗切向应力,而附着力使液体能够附着到另一个物体上,在液体和气体的交界面处和在两种不互溶液体的界面处,分子间附着力和黏附力产生的向外的平衡吸引力使液体形成了一个明显的表面液膜并在液膜表面内产生了张力,液体的这个特性称为表面张力 σ ,其单位是 N/m 。各种流体的表面张力变化范围大,并且随温度升高略有下降。水的表面张力在结冰点和沸腾点之间的变化为 $0.0756 \sim 0.0589\text{ N/m}$ 。

毛细力是在细管或多孔介质内产生的作用在液体上的一种力,其形成是由于黏附力和附着力的作用。当附着力大于黏附力时,液体将浸润与它接触的固体表面,并在接触点处上升;

反之,液体表面在接触点处收缩。如图1-4所示,毛细力的作用使玻璃管内水位上升,使水银收缩并低于实际高度。

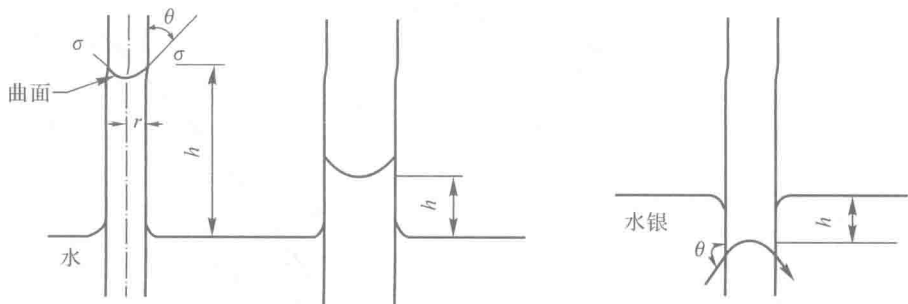


图1-4 表面张力与毛细现象

管内上升的毛细高度,由表面张力形成的提升力与重力相平衡得到

$$2\pi r\sigma\cos\theta = \pi r^2 h\rho g$$

所以

$$h = \frac{2\sigma\cos\theta}{\rho gr} \quad (1-17)$$

式中, σ 为表面张力; θ 为浸润角; ρ 为液体密度; r 为管半径; h 为毛细高度。

式(1-17)可以用来计算管内液体上升或下降的毛细高度。如果管子是干净的,水的浸润角为 0° ,水银的浸润角为 140° ,管子直径越大,毛细高度越小。对于直径大于12 mm的管子,可以忽略毛细力的作用。

表面张力的影响在绝大多数的工程应用中可以忽略,但是,涉及毛细上升的问题时,表面张力非常重要,如在土壤含水区的大多数植物如果离开了毛细作用将变得枯萎。当用细管测量流体物性,如测量压力时,则必须注意表面张力对读数的影响。表面张力在液体射流、液滴与气泡的形成、多孔介质内的流动等方面也很重要。如分析液滴的形成是喷墨打印机设计中最关键的考虑因素,也是最复杂的问题。

【例1-3】 10°C 水在直径为2 mm的干净的玻璃管内高度为35 mm,求水实际的静态高度是多少?

解 10°C 的水 $\rho=999.7\text{ kg/m}^3$, $\sigma=0.074\text{ 2 N/m}$;干净玻璃管的 $\theta=0^\circ$,所以

$$h = \frac{2\sigma}{\rho gr} = \frac{2 \times 0.074\text{ 2}}{999.7 \times 9.807 \times 0.001} = 0.015\text{ 14 m} = 15.14\text{ mm}$$

$$\text{水实际的静态高度} = 35.00 - 15.14 = 19.86\text{ mm}$$

1.5 流体的力学模型

实际流体具有各种物理力学性质。在研究流体运动的时候,不可能同时考虑所有的因素,往往是抓住主要矛盾,建立力学模型,对流体加以科学的抽象,以便建立流体运动的数学方程式。这种研究问题的方法在固体力学中也是经常采用的,例如可以把一个物体看作是一个刚体或者是弹性体,所以力学模型的概念是具有普遍意义的。在流体力学中常用的力学模型有以下三种。