



新世纪土木工程系列教材

工程流体力学

禹华谦 主 编 莫乃榕 副主编



高等教育出版社

新世纪土木工程系列教材

工程流体力学

禹华谦 主编 莫乃榕 副主编

ISBN 7-04-013086-6

1.4004.1

1251N 7-04-013086-6



高等教育出版社

教育部高等教育出版社土建类系列教材

编辑委员会委员名单

主任委员 沈蒲生(湖南大学)

副主任委员 (排名先后以姓氏笔画为序)

白国良(西安建筑科技大学)

邹超英(哈尔滨工业大学)

周绪红(长安大学)

强士中(西南交通大学)

委 员 (排名先后以姓氏笔画为序)

卫 军(华中科技大学)

王清湘(大连理工大学)

江见鲸(清华大学)

刘 明(沈阳建筑工程学院)

张印阁(东北林业大学)

吴胜兴(河海大学)

尚守平(湖南大学)

胡长顺(长安大学)

黄醒春(上海交通大学)

焦兆平(广州大学)

霍 达(北京工业大学)

王 健(北京建筑工程学院)

叶志明(上海大学)

关宝树(西南交通大学)

朱彦鹏(甘肃工业大学)

张家良(辽宁工学院)

杨和礼(武汉大学)

周 云(广州大学)

赵明华(湖南大学)

梁兴文(西安建筑科技大学)

廖红建(西安交通大学)

出版者的话

新世纪土木工程系列教材是我社组织编写出版的“大土木”范畴的专业系列教材。1998年教育部颁布了新修订的《普通高等学校本科专业目录和专业介绍》，新专业目录中土建类土木工程专业覆盖了原来建筑工程和交通土建工程等8个专业。1999年各高校已按新的专业目录招生。开设土木工程专业的各院校把近年来在教育思想与教学观念、教学内容与课程体系、教学方法与教学手段等方面取得的改革成果固化到教学计划和人才培养过程中，设计了从教学思想到教学模式等一系列教学改革方案。大家在教学实践中体会到：专业、课程教学改革必然引起相应的教材改革。我社从1999年开始进行土木工程专业系列教材的策划工作，并于2000年成立了“教育部高等教育出版社土建类系列教材编辑委员会”。

我们编辑出版土木工程系列教材的指导思想是：

1. 紧密结合人才培养模式改革，根据拓宽专业基础、提高综合素质、增强创新能力的要求，调整学生的知识结构。
 2. 从各院校调整土建类各专业教学计划出发，加强基础课程到专业课程的有机沟通，用系统的观点和方法建立新的课程体系结构，包括对课程的整合与集成，组织和建设专业核心课程，成套成系列地推出土木工程系列教材。
 3. 各门课程教材要具有与本门学科发展相适应的学科水平，以科技进步和社会发展的最新成果充实、更新教材内容，贯彻理论联系实际的原则。
 4. 要正确处理继承、借鉴和创新的关系，不能简单以传统和现代划线，决定取舍，而应根据教学要求进行取舍。继承、借鉴历史和国外的经验，注意研究结合我国的现实情况，择善而从，消化创新。
 5. 随着高新技术、特别是数字化和网络化技术的发展，在土木工程系列教材建设中，要充分考虑文字教材与音像、电子、网络教材的综合发展，发挥综合媒体在教学中的优势，提高教学效率。在开发研制教学软件的同时，要注意使文字教材与先进的软件接轨，明确不同形式教材之间的关系是相辅相成、相互补充的。
 6. 坚持质量第一。图书是特殊的商品，教材是特殊的图书。教材质量的优劣直接影响教学质量和教学秩序，最终影响学校人才培养的质量。教材不仅具有传播知识服务教育、积累文化的功能，也是沟通作者、编辑、读者的桥梁，一定程度上还代表着国家学术文化或学校教学、科研水平。因此，遴选作者、审定教材、贯彻国家标准和规范等方面需严格把关。
- 为了实现本套教材的指导思想，我们组建了由有丰富的教学经验、有较高的学术水平和学术声望的教师组成的编委会，由编委会研究提出土木工程系列教材的选题及其基本内容与编写原则，并推荐作者。

我们出版本系列教材，旨在为新世纪的土木工程专业学生提供一套经过整合优化的比较系

前 言

工程流体力学是高等学校土建类各专业的一门重要技术基础课。面对科学技术的不断发展,更好地适应 21 世纪人才培养,工程流体力学课程的教学改革势在必行。本教材就是根据高等学校土建类专业流体力学教学基本要求和编者多年的教学实践,并本着加强基础理论、拓宽专业面、按大类培养的教育改革思想编写的。教材系统地阐述了工程流体力学的基本概念、基本理论和基本工程应用。在基本理论的阐述上,采用了总流分析与流场分析相结合的方法,并将控制体的概念贯穿全教材。在内容选择上,力求贯彻“少而精”原则,以恒定不可压缩流体为主,考虑到现代土建工程的需要,对可压缩气体动力学基础作了适当介绍。在计算方法上,删除了传统的图表算法,介绍了简单易学的数值计算方法,并适当增加了电算要求。另外,编写中还力求做到概念清晰、重点突出、语言简洁、富有启发性、便于教学和适当反映本学科的最新进展。

本教材可作为高等学校土建类的土木工程、市政工程、给水排水工程、环境工程、地质工程等专业工程流体力学或水力学课程的教材,也可作为其他相近专业以及全国注册结构工程师考试的参考书。本教材包含了土建类各专业所需的内容,使用时可根据专业要求和学时多少作必要的取舍。

本教材由西南交通大学禹华谦教授主编,华中科技大学莫乃榕教授副主编。参加编写工作的有禹华谦(第 1、3、8 章)、莫乃榕(第 2、5、10 章)、西南交通大学陈春光(第 4、6 章)和麦继婷(第 7、9 章),西南交通大学研究生罗忠贤、杨庆华等参加了部分绘图工作。

北京建筑工程学院李兆年教授审阅了全部书稿,并提出了宝贵的修改建议。在此表示衷心地感谢!

编者水平有限,教材中若有疏漏和不足之处,恳请读者批评指正。

编 者

2003 年 7 月

内容简介

本书为新世纪土木工程系列教材之一,是根据高等学校土建类专业流体力学课程教学基本要求,并本着加强基础理论、拓宽专业面、按大类培养的教育改革思想编写的。本教材系统地阐述了工程流体力学的基本概念、基本理论和基本工程应用。教材共分10章,内容包括绪论,流体静力学,流体动力学理论基础,量纲分析和相似理论,流动阻力与水头损失,孔口、管嘴和有压管道流动,明渠恒定流动,堰流,渗流,可压缩气体的一元流动等。教材中的例题力求富有创意,习题多选自各类试题,教材末附有习题答案。

本教材可作为高等学校土建类的土木工程、市政工程、给水排水工程、环境工程、地质工程等专业的工程流体力学或水力学课程的教材,也可作为其他相近专业以及全国注册结构工程师考试的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

工程流体力学/禹华谦主编. —北京:高等教育出版社, 2004.1

ISBN 7-04-013086-6

I.工... II.禹... III.工程力学:流体力学—高等学校—教材 IV.TB126

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第098348号

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100011
总 机 010-82028899

购书热线 010-64054588
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所
印 刷 北京中科印刷有限公司

开 本 787×1092 1/16
印 张 15
字 数 360 000

版 次 2004年1月第1版
印 次 2004年1月第1次印刷
定 价 17.60元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

目 录

第 1 章 绪论	1	第 5 章 流动阻力与水头损失	84
§ 1-1 概述	1	§ 5-1 水头损失的两种形式	84
§ 1-2 流体的连续介质模型	3	§ 5-2 粘性流体运动的两种流态	86
§ 1-3 流体的主要物理性质	3	§ 5-3 圆管层流	88
§ 1-4 作用在流体上的力	8	§ 5-4 湍流运动的特点	90
习题	9	§ 5-5 边界层理论简介	92
第 2 章 流体静力学	10	§ 5-6 圆管湍流速度分布	98
§ 2-1 静止流体的应力特征	10	§ 5-7 沿程损失因数的变化规律	102
§ 2-2 流体静止的微分方程	11	§ 5-8 局部水头损失	109
§ 2-3 重力作用下静止液体的压强分布	13	习题	113
§ 2-4 液体的相对静止	15	第 6 章 孔口、管嘴和有压管道	
§ 2-5 测压计	18	流动	116
§ 2-6 静止液体作用在平面上的总压力	21	§ 6-1 孔口恒定出流	116
§ 2-7 静止液体作用在曲面上的总压力	24	§ 6-2 管嘴恒定出流	119
§ 2-8 潜体和浮体的平衡及稳定	27	§ 6-3 孔口(或管嘴)的变水头出流	120
习题	30	§ 6-4 短管的水力计算	121
第 3 章 流体动力学理论基础	34	§ 6-5 长管的水力计算	126
§ 3-1 描述流体运动的方法	34	§ 6-6 管网水力计算基础	132
§ 3-2 研究流体运动的若干基本概念	35	§ 6-7 离心式水泵及其水力计算	135
§ 3-3 流体运动的连续性方程	39	§ 6-8 水击简介	138
§ 3-4 理想流体的运动微分方程及		习题	142
其积分	43	第 7 章 明渠恒定流动	146
§ 3-5 伯努利方程	44	§ 7-1 明渠的分类	146
§ 3-6 动量方程	50	§ 7-2 明渠均匀流	147
§ 3-7 流体微团运动的分析	54	§ 7-3 无压圆管均匀流	152
§ 3-8 理想流体无旋流动简介	58	§ 7-4 明渠恒定非均匀流动的若干	
习题	63	基本概念	154
第 4 章 量纲分析和相似理论	67	§ 7-5 水跃和水跌	158
§ 4-1 量纲分析的概念和原理	67	§ 7-6 明渠恒定非均匀渐变流的基本	
§ 4-2 量纲分析法	69	微分方程	161
§ 4-3 流动相似性原理	73	§ 7-7 棱柱形渠道中恒定非均匀渐变	
§ 4-4 相似准则	75	流的水面曲线分析	162
§ 4-5 相似原理应用	78	§ 7-8 棱柱形渠道中恒定非均匀渐变	
习题	81	流水面曲线的计算	167

习题	170	习题	196
第8章 堰流	173	第10章 可压缩气体的一元流动	199
§ 8-1 堰流的定义及其分类	173	§ 10-1 可压缩气体的物理性质	199
§ 8-2 堰流基本公式	174	§ 10-2 可压缩气体一元流动的基本 方程	201
§ 8-3 薄壁堰溢流	176	§ 10-3 微弱压力扰动的传播 声速	202
§ 8-4 宽顶堰溢流	178	§ 10-4 可压缩气体在管道中的流动	206
§ 8-5 小桥孔径水力计算	181	§ 10-5 隧道空气动力学基础	213
习题	185	习题	216
第9章 渗流	186	主要参考文献	218
§ 9-1 渗流基本定律	186	习题答案	219
§ 9-2 地下水的均匀流和非均匀流	189	名词索引	223
§ 9-3 集水廊道和井	191		
§ 9-4 井群	195		

第1章

绪论

§ 1-1 概述

1-1-1 工程流体力学的任务

工程流体力学是研究流体的机械运动规律及其实际应用的科学，是工程力学的分支学科。

自然界物质存在的主要形式是固体、液体和气体。液体和气体统称为流体。从力学分析的角度看，流体与固体的主要差别在于它们对外力抵抗的能力不同。固体可以抵抗拉力、压力和剪力，而流体则几乎不能承受拉力，处于平衡状态的流体还不能抵抗剪力，即流体在很小的剪力作用下将发生连续不断的变形。流体的这种宏观力学特性称为易流动性。易流动性既是流体命名的由来，也是流体区别于固体的根本标志。至于气体与液体的差别则主要在于气体易于压缩，而液体难于压缩。本教材根据土建类专业的要求，主要讨论液体的运动规律，只在最后一章简单介绍了一些可压缩气流的基本知识。

1-1-2 工程流体力学的发展简史

同其他自然科学一样，工程流体力学也是随着生产实践而发展起来的。早在几千年前，由于治河、航运、农业、交通等事业的发展，人们便开始了解一些水流运动的基本规律。如相传四千多年以前的大禹治水，“疏壅导滞”使滔滔洪水各归于河，表明我国古代进行过大规模的治河防洪工作。秦代在公元前 256~公元前 210 年间修建了都江堰、郑国渠和灵渠三大水利工程，说明当时对明渠水流和堰流已有一定的认识。又如距今已近 1400 年而依然保持完好的赵州桥，在主拱圈两边各设有两个小腹拱，既减轻了主拱的负载，又可泄洪，说明当时人们对桥涵水力学已有相当的认识。一般认为，工程流体力学萌芽于公元前 250 年左右希腊科学家阿基米德 (Archimedes) 写的《论浮体》，该文对静止时的液体力学性质作了第一次科学总结。

16 世纪以后，随着资本主义制度的兴起，生产力得以迅速发展，自然科学如数学、力学等也发生了质的飞跃。这些都为工程流体力学的发展提出了要求和创造了条件。18 世纪，在伽利略 (Galileo) - 牛顿 (I. Newton) 力学基础上形成的古典流体力学 (或称古典水动力学)，用严格的数学分析方法建立了流体运动的基本方程，为工程流体力学奠定了理论基础。但古典流体力学或由于理论的假定与实际不尽相符，或由于求解上的困难，尚难以解决各种实际问题。为了满足生产发展的需要，依靠试验和实测资料而形成的实验流体力学 (或称实验水力学) 相应得到了发展，它为人们提供了许多计算有压管流、明渠水流、堰流等实际问题的经验公式和图表。但实验流体力学由于理论指导不足，其成果往往具有一定的局限性，难以解决各

种复杂的工程问题。

19世纪末以来,随着生产技术的发展,尤其是航空方面的理论和实验的迅速发展,导致了古典流体力学与实验流体力学的日益结合,逐渐形成了理论与实验并重的现代流体力学(或称流体力学)。现代流体力学是建立在古典流体力学的基础上,根据古典流体力学的基本理论和现代的湍流理论、边界层理论以及量纲分析与相似理论等,结合实验、实测数据和经验公式,来探索实际流体运动的基本规律。一般将侧重于理论方面的流体力学称为理论流体力学,而侧重于应用的称为工程流体力学或应用流体力学。

近几十年来,流体力学学科随着现代生产建设的迅速发展和科学技术的进步而不断发展,研究范围和服务领域越来越广,新的学科分支亦不断涌现,如现已派生出计算流体力学、环境流体力学、工业流体力学、生物流体力学等许多新的学科分支。由此可见,流体力学既是一门古老的学科,又是一门富有生机的学科。

1-1-3 工程流体力学的研究方法

工程流体力学的研究方法一般有理论分析、实验研究和数值模拟三种。

理论分析方法是根据工程实际中流动现象的特点和物质机械运动的普遍规律,建立流体运动的基本方程及定解条件,然后运用各种数学方法求出方程的解。理论分析法的关键在于提出理论模型(亦称数学模型),并能运用数学方法求出揭示流体运动规律的理论结果。但由于数学上的困难,许多实际流动问题还难以精确求解。

实验研究在工程流体力学中占有极为重要的地位,它是理论分析结果正确与否的最终判决。实验研究方法是通过对具体流动的观测,来认识流体运动的规律。工程流体力学的实验研究主要包括原型观测、系统实验和模型实验,而以模型实验为主。

数值模拟又称数值实验,是伴随现代计算机技术及其应用而出现的一种方法。它广泛采用有限差分法、有限单元法、有限分析法、边界元法以及谱方法等将工程流体力学中一些难以用解析方法求解的理论模型离散为数值模型,用计算机求得定量描述流体运动规律的数值解。

以上三种方法相互结合,为发展流体力学理论和解决复杂的工程流体力学问题奠定了基础。本教材主要介绍理论分析和实验研究方法。至于数值模拟,本教材不作介绍,读者可参阅有关计算流体力学或计算水力学书籍。

1-1-4 流体力学在土木工程中的应用

工程流体力学在土木工程中有着广泛的应用。例如,在市政建设中,有诸如城市防洪工程设计、城市给水排水管网设计、取水口的布置、水塔高度的计算、水泵的选择和井的产水量计算等;在供热通风设计中,有诸如热的供应、空气的调节、燃气的输配、排毒排湿、除尘降温的计算等;在建筑及交通土建工程中,有诸如室内给水排水设计、地基降水及抗渗设计、桥涵孔径水力设计、站场及路基排水设计、隧道及地下工程通风和排水设计、高速铁(公)路隧道洞型设计等。

随着生产的发展,还将会不断地提出新的课题。相信在今后全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化建设的事业中,工程流体力学将会发挥更大的作用,学科本身也将会得到更大的发展。

§ 1-2 流体的连续介质模型

流体是由大量不断地作无规则热运动的分子所组成。从微观角度看,由于分子之间存在有空隙,因此流体的物理量如密度、压强、流速等在空间上的分布是不连续的;同时,由于流体分子不断地作随机热运动,又导致物理量在时间上的变化也不连续。显然,以离散的分子为对象来研究流体的运动将是极其复杂的。

现代物理研究表明,在标准状况下,1 cm³ 液体中约含有 3.3×10^{22} 个分子,相邻分子间的距离约为 3.1×10^{-8} cm; 1 cm³ 气体中约含有 2.7×10^{19} 个分子,相邻分子间的距离约为 3.2×10^{-7} cm。可见,流体分子间的距离是相当微小的,在很小的体积中已包含了难以计数的分子。在一般工程中,所研究流体的空间尺度远比分子尺寸大得多,而且要解决的实际问题又不是流体微观运动的特性,而是流体宏观运动的特性,即大量分子运动的统计平均特性。基于上述原因,1753 年瑞士学者欧拉(L. Euler)提出了流体的连续介质假说,即认为流体所占有的空间连续而无空隙地充满着流体质点(亦称流体微团),质点的尺度在微观上足够大,大到能包含大量的分子,使得在统计平均后能得到其物理量的确定值;而在宏观上又足够小,远小于所研究问题的特征尺度,使得其平均物理量可看成是均匀的。

把流体视为连续介质后,流体运动中的物理量均可视为空间坐标和时间变量的连续函数,这样就可充分利用数学中的连续函数分析方法来研究流体流动问题。实践证明,采用流体的连续介质模型,解决一般工程(包括土木工程)中的流体力学问题是完全合理而有效的,但对于某些特殊问题,如研究导弹、卫星等在高空稀薄气体中飞行时,由于稀薄气体分子之间距离很大,已能和飞行物的特征尺寸相比拟,则连续介质模型将不再适用。

§ 1-3 流体的主要物理性质

流体运动的规律,除与外部因素(如边界的几何条件及动力条件等)有关外,更重要的是取决于流体本身的物理性质。本节将讨论几个与流体运动有关的物理性质。

1-3-1 惯性

与固体一样,流体也具有惯性。

质量是惯性大小的度量。单位体积所具有的质量称为密度,以符号 ρ 表示。对于均质流体,若体积为 V 的流体具有质量 m , 则

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

密度的单位为 kg/m³。密度亦称体积质量。

流体的密度一般取决于流体的种类、压强和温度。对于液体,密度随压强和温度的变化很小,一般可视为常数,如在工程计算中,通常取淡水的密度为 1 000 kg/m³,水银的密度为 13 600 kg/m³。

在一个标准大气压(101 325 Pa)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 ρ

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

表 1-2 几种常见流体的密度 ρ

流体名称	空气	水银	酒精	四氯化碳	汽油	海水
温度/℃	20	20	15	20	15	15
密度/(kg·m ⁻³)	1.20	13 550	799	1 590	700~750	1 020~1 030

1-3-2 粘性

流体在运动状态下具有抵抗剪切变形能力的性质，称为粘滞性或简称粘性。粘性是流体的固有属性，是运动流体产生机械能损失的根源。

现用牛顿平板实验来说明流体的粘性。如图 1-1a 所示，在面积为 A 、相距 h 的两平行平板之间充满流体，下板固定，上板受拉力 F_R 的作用，以匀速 U 沿 x 方向运动。由于流体与板壁固体分子间的附着力和流体内部分子间的内聚力，粘附于上板的流层随上板以速度 U 运动，并将运动逐层向下传递，直至粘附于下板的流层，速度为零。实验表明，当 h 和 U 不是太大时，两平板间沿 y 方向的流速呈线性分布，即

$$u = \frac{U}{h}y \tag{1-2}$$

且对于大多数流体，拖动上板的拉力满足

$$F_R = \mu \frac{U}{h}A$$

式中 μ 为比例系数，通常称为粘度或动力粘度（亦称粘性系数）。

取图 1-1b 所示隔离体，由平衡条件可得

$$F_T = F_R = \mu \frac{U}{h}A \tag{1-3}$$

式中 F_T 是下部流体对上部流体的阻力，其方向与 U 相反。根据牛顿第三定律，上部流体对

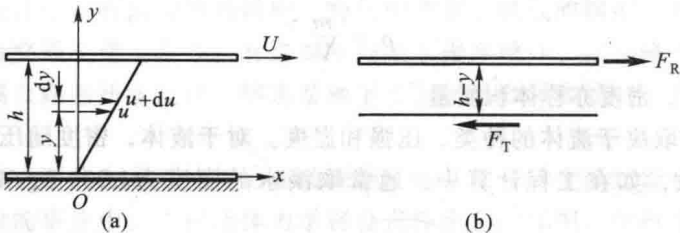


图 1-1

下部流体的作用力也为 F_T ，但方向与 U 相同。上、下部流体在 y 平面上的这一对相互作用的剪力，即为流体的粘滞力或内摩擦力。由此可见，流体作相对运动（即各流层速度不等）时，必然在内部产生剪力以抵抗流体的相对运动，流体的这一特性，即为粘性。

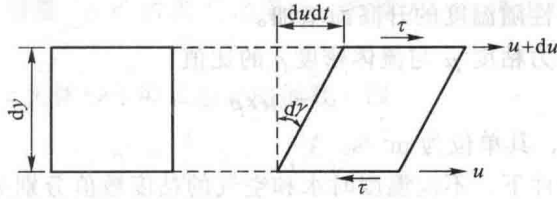


图 1-2

由于两平板间的流速分布为线性关系，故有 $du/dy = U/h$ ，将其代入式 (1-3)，可得流体的粘滞切应力

$$\tau = \frac{F_T}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-4)$$

上式即为著名的牛顿内摩擦定律。式中 du/dy 称为流速梯度，它表示流速沿流层法线方向 y 的变化率，实质上它代表流体微团的剪切变形速率。兹证明如下：

设 t 时刻在厚度为 dy 的上、下两流层间取流体微团，如图 1-2 所示。因上、下流层的速度相差 du ，经过 dt 时段后，流体微团除平移外，还有角变形

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

由上式可得

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

可见，流速梯度等于角变形速率，因为它是在切应力作用下发生的，故亦称为剪切变形速率。因此，牛顿内摩擦定律式 (1-4) 又可写成

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

上式表明粘性即为运动流体抵抗剪切变形速率的能力。

牛顿内摩擦定律仅适用于在温度不变条件下，动力粘度 μ 等于常数的一类流体。一般把符合牛顿内摩擦定律的流体称为牛顿流体，否则称为非牛顿流体，前者如水、空气、汽油、酒精、水银等，后者如聚合物溶液、泥浆、血浆、新拌水泥砂浆、新拌混凝土、泥石流等。牛顿流体与非牛顿流体的差别，可用图 1-3 表示，其中 τ_0 为初始（屈服）切应力。本教材只讨论牛顿流体。

流体的粘性可用粘度 μ 来量度。 μ 值越大，流体抵抗剪切变形的能力就越大。 μ 的单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。粘性主要与

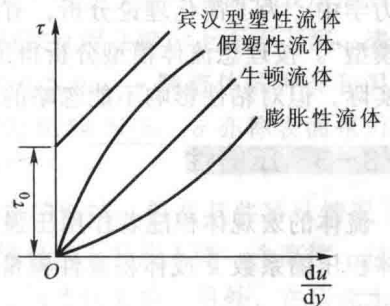


图 1-3

流体的种类和温度有关。液体的粘性随着温度的升高而减小，气体则反之。这是因为粘性是流体分子间的内聚力和分子不规则的热运动产生动量交换的结果。温度升高，分子间的内聚力降低而动量交换加剧。对于液体，因其分子间距较小，内聚力是决定性的因素，故液体的粘性随温度的升高而减小；而对于气体，由于其分子间距较大，分子间热运动产生的动量交换是决定性的因素，所以气体的粘性随温度的升高而增加。

流体的粘性还可用力粘度 μ 与流体密度 ρ 的比值

$$\nu = \mu / \rho \tag{1-5}$$

来表示。 ν 称为运动粘度，其单位为 m^2/s 。

在 1 个标准大气压条件下，不同温度时水和空气的粘度数值分别见表 1-3、表 1-4。

表 1-3 水的动力粘度 μ 与运动粘度 ν

温度/℃	$\mu / (10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s})$	$\nu / (10^{-6} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1})$	温度/℃	$\mu / (10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s})$	$\nu / (10^{-6} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1})$
0	1.781	1.781	40	0.653	0.658
5	1.519	1.519	45	0.595	0.601
10	1.307	1.307	50	0.547	0.553
15	1.139	1.139	60	0.466	0.474
20	1.002	1.003	70	0.404	0.413
25	0.890	0.893	80	0.354	0.364
30	0.798	0.800	90	0.315	0.326
35	0.718	0.722	100	0.282	0.294

表 1-4 空气的动力粘度 μ 与运动粘度 ν

温度/℃	$\mu / (10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s})$	$\nu / (10^{-6} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1})$	温度/℃	$\mu / (10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s})$	$\nu / (10^{-6} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1})$
0	1.71	13.2	80	2.09	20.9
10	1.76	14.1	100	2.18	23.0
20	1.81	15.0	120	2.26	25.2
30	1.86	16.0	140	2.34	27.4
40	1.90	16.8	160	2.43	29.8
60	2.00	18.8	200	2.59	34.6

实际流体都是有粘性的，但考虑流体的粘性将使流体运动的分析变得非常复杂。在工程流体力学中，为了简化理论分析，有时对流体的粘性暂不考虑，从而引出不考虑粘性的“理想流体模型”。按理想流体模型分析得出的流体运动结果，对某些粘性影响较小的流体能较好地符合实际，但对粘性影响不能忽略的流动，则必须加以修正才能用于解决实际流动问题。

1-3-3 压缩性

流体的宏观体积随着作用压强的增大而减小的性质，称为流体的压缩性。压缩性的大小可用体积压缩系数 κ 或体积弹性模量 K 来量度。流体的体积压缩系数定义为

$$\kappa = - \frac{dV/V}{dp} \tag{1-6}$$

式中 dV/V 为相应于压强增量 dp 的体积变化率, 由于 dp 与 dV 恒异号, 故上式右端加一负号, 以使 κ 为正值。因质量 $m = \rho V$, 将其代入式 (1-6), 故体积压缩系数又可写成

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

其中 $d\rho/\rho$ 为相应于压强增量 dp 的密度变化率。 κ 值越大, 流体的压缩性越大。 κ 的单位为 m^2/N 。

体积弹性模量 K 定义为体积压缩系数 κ 的倒数, 即

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

其单位为 N/m^2 。

液体的压缩性很小。如 10°C 时, 水的体积弹性模量 $K \approx 2 \times 10^9 \text{ N}/\text{m}^2$, 亦就是说, 每增加 1 个大气压, 水的相对压缩值约为 $1/20\,000$, 所以, 在一般工程设计中认为水的压缩性可以忽略, 其密度可视为常数。但在研究有压管道中的水击、水中爆炸波的传播等问题时, 水的压缩性则必须考虑。

至于气体, 其压缩性比液体显著。一般情况下, 气体的压缩性还与压缩过程有关。对于理想气体 (亦称完全气体), 密度与压强遵循基本方程

$$p/\rho^n = C(\text{常数}) \quad (1-8)$$

式中指数 n 取决于气体的压缩过程。例如, 当 $n = 1$ 时为等温过程; $n = \gamma$ 时则为等熵过程, 这里 γ 为绝热指数 (亦称等熵指数或比热比), 对于空气, $\gamma = 1.4$ 。

将式 (1-8) 代入式 (1-7), 可得

$$K = np \quad (1-9)$$

可见, 气体的体积弹性模量 K 与压强 p 成正比, 且与压缩过程有关。

但需指出, 在低温、低压、低速条件下的气体运动, 如隧道施工及运营通风、低压气体输运、低温烟道流动等, 其气流速度远小于声速 (约为 340 m/s), 气体压缩性对气流流动的影响也可以忽略, 亦就是说, 此时的气体也可视为不可压缩的。

实际流体都是可压缩的, 但在可以忽略流体压缩性时, 引出“不可压缩流体模型”, 可使流动分析大为简化。

1-3-4 表面张力特性

表面张力是液体自由表面在分子作用半径范围内, 由于分子引力大于斥力而在表层沿表面方向产生的拉力。它可使水滴悬在水龙头出口上而不滴落, 使铁针浮在液面上而不下沉。表面张力 σ 定义为自由表面内单位长度上所受的横向力, 其单位为 N/m 。 σ 随流体的种类和温度而变化, 如 20°C 时, 水的表面张力 $\sigma = 0.074 \text{ N}/\text{m}$, 水银则为 $0.54 \text{ N}/\text{m}$ 。 σ 亦称表面张力系数。

表面张力的数值并不大, 在工程流体力学中一般不考虑它的影响, 但在某些特殊情况下, 如当细口径管子插在液体中时, 由于表面张力会使管中的液体自动上升或下降一个高度, 这种所谓的毛细管现象, 是工程流体力学实验中使用测压管时所必须要注意的。另外, 在研究水深很浅的明渠水流和堰流时, 其影响也是不可忽略的。

以上讨论了流体的主要物理性质。在工程流体力学中所称的流体,一般系指易流动的(静止时不能承受切应力)、具有粘性的、不易压缩的、均质的连续介质。在以后的讨论中,如没有特别说明,即认为是对上述流体而言。

§ 1-4 作用在流体上的力

在工程流体力学中,一般将作用在流体上的力分为表面力和质量力两类。

1-4-1 表面力

作用在流体隔离体表面上,其大小与作用面积成比例的力称为表面力。表面力又称接触力,它是相邻流体之间或其他物体与流体之间作用的结果。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,至于拉力则一般都将其忽略。根据连续介质的概念,表面力连续分布在隔离体表面上,因此分析时常采用应力的概念。与作用面正交的应力称为压应力或压强,与作用面平行的应力称为切应力。

如图 1-4 所示,在流体隔离体表面上取包含 B 点的微小面积 ΔA ,作用在 ΔA 上的法向力为 ΔF_p ,切向力为 ΔF_T ,则 B 点处的压强 p 及切应力 τ 分别为

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_p}{\Delta A} \quad (1-10)$$

$$\tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_T}{\Delta A} \quad (1-11)$$

p 及 τ 的单位为 Pa,即 N/m^2 。

顺便指出,在静止流体中,流层间没有相对运动,流速梯度 $du/dy=0$,或者在理想流体中,粘度 $\mu=0$,由牛顿内摩擦定律可知,两种情况均有 $\tau=0$,即作用在 ΔA 上的表面力只有法向压力 ΔF_p 。

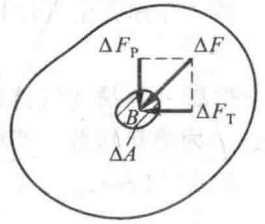


图 1-4

1-4-2 质量力

作用在流体隔离体内每个流体微团上,其大小与流体质量成比例的力称为质量力。最常见的质量力是重力。另外,在非惯性坐标系中,质量力还包括惯性力。

在工程流体力学中,质量力常用单位质量力来量度。设均质流体的质量为 m ,所受质量力为 F ,则单位质量力 f 为

$$f = \frac{F}{m} \quad (1-12)$$

若质量力 F 在坐标轴上的投影分别为 F_x 、 F_y 、 F_z ,则单位质量力 f 在各坐标轴上的分量为

$$f_x = \frac{F_x}{m}, \quad f_y = \frac{F_y}{m}, \quad f_z = \frac{F_z}{m} \quad (1-13)$$

单位质量力的单位为 m/s^2 ,与加速度的单位相同。