

高等学校教材

# 工程流体力学(水力学)

(第2版)上册

闻德荪 主编  
闻德荪 李兆年 黄正华 编



高等教育出版社

高等学校教材

# 工程流体力学 (水力学)

第2版 上册

闻德荪 主编

闻德荪 李兆年 黄正华 编

高等教育出版社

## 内容简介

本书是1990年出版的《工程流体力学(水力学)》教材的修订版,原书获国家教委优秀教材二等奖和江苏省科技进步二等奖。

本书在原书优点、特点和特色的基础上,力求改革,有所新意、进展和提高。本书基本上保持原书的内容和体系,又有所增减和更改;加强必要的理论基础和适当结合专业、联系实际,注重能力的培养;改写了绪论,增加了地下水污染扩散等内容以及一些章节的例题、讨论题、习题。本书内容丰富、充实、有启发性,便于教和学。

全书分上、下两册,上册共八章:绪论,流体静力学,流体运动学,理想流体动力学和平面势流,实际流体动力学基础,量纲分析和相似原理,流体阻力和能量损失,边界层理论基础和绕流运动。下册共六章:有压管流,明渠流,孔口、管嘴、闸孔出流及堰流,渗流,射流和流体扩散、离散理论基础,可压缩流体的流动。书后附习题答案和中英文术语对照等。

本书可作为高等学校环境类专业和给水排水等专业工程流体力学或流体力学或水力学课程(80学时左右)的教材,也可供其他专业及有关科技人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

工程流体力学.水力学.上册/闻德荪主编. —2版.

北京:高等教育出版社,2004.1

ISBN 7-04-013084-X

I.工... II.闻... III.①工程力学:流体力学—高等学校—教材②水力学—高等学校—教材 IV.TB126

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第1099487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 787×960 1/16  
印 张 22.25  
字 数 410 000

版 次 1990年9月第1版  
2004年1月第2版  
印 次 2004年1月第1次印刷  
定 价 25.60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**

## 第2版前言

原书（即第1版），主要是为高等学校环境类专业及给水排水工程专业“工程流体力学（水力学）”课程编写的教材，1990年由高等教育出版社出版。在编写和出版过程中，得到校内外有关专家、师生、同志们的关心和支持，一些同志为教材出版作出了默默无闻的奉献。我们珍惜这些，并在此致以衷心地感谢。教材出版后，得到校内外有关师生的欢迎和好评，获1995年国家教委第三届普通高等学校优秀教材二等奖和1997年度江苏省科技进步二等奖。

本书（指第2版），是原书的修订版，主要仍是作为上述专业上述课程（有的称流体力学课程）的教材，亦可作为其他相近专业和土建类、交通类、动力类、机械类等其他专业的参考书，并可供有关科技人员参阅。

我们在使用原书和调查研究的基础上，明确这次修订的指导思想仍是继承和改革，保持原书的优点、特点和特色，力求有所新意、进展和提高；内容要精，适应学科发展和专业培养目标的需要，加强必要的理论基础和适当结合专业；基本概念和理论的阐述要准确，问题的讲解要明确具体；体系要比较完整，符合学科的内在联系和人们的认识规律；例题和习题是教材的有机组成部分，要精心选编和设计；努力为教和学考虑，便于内容的增减和体系的调整，利于自学和掌握知识体系和方法；思想性和哲理性寓于教材及其叙述中；要十分注重和探索对学生能力的培养，包括发现、提出、分析、解决问题的能力 and 科学思维、科学方法及自学的能力等。

本书是依据原国家教委高等工业学校力学课程教学指导委员会审订的环境类专业及给水排水工程专业“工程流体力学（水力学）课程教学基本要求”，并结合当前教学改革的精神修订的。在原“基本要求”中，上述课程的参考学时为90~100学时。现各院校的学时数都有不同程度的减少，要求亦有所侧重，我们按80学时左右作了相应的考虑。本书内容比较丰富、充实、有启发性，任课教师可根据具体情况选取内容和组织体系。本书中有\*号的内容，建议作为选读的材料。

本书基本上保持了原书的内容和体系，但又有所更改。例如，根据学科发展的趋势，无论是学习、研究流体运动的规律或与流体运动有关的其他交叉学科，三维流动的基本理论（基本概念、基本原理、基本方法）是最基本、最重

要的,且将长期起作用;而一维流动的基本理论,在工程实际中是常用的。本书比较完整地介绍了三维流动的基本理论,并由此延伸得出一维流动的基本理论;同时,又从一维流完整地介绍一维流动的基本理论;这样既可保证三维流动基本理论和一维流动基本理论的完整性,又可通过对比加深理解和掌握。又如,边界层理论在流体力学发展史中具有重要的意义和作用,为了比较完整地介绍,原书单独列了一章“边界层理论基础和绕流运动”,本书基本上保留了原书的内容,并简单补充介绍了粗糙平板和光滑平板的判别以及卡门涡街。再如,根据环境工程等专业培养目标和后续课程的要求,原书增加了一章“紊流射流和扩散基本理论”,介绍了它们的基本理论和有关专业课程中的几个公式得出的推导过程,本书保持了原书的内容,并根据环境保护、防治地下水污染的需要,新增加了一节“地下水流的离散”,且将包括这一节的整章调整到渗流一章的后面。数值计算方法很重要,因为一般的数值计算方法(如迭代法等)在前导课程(如数学、计算机应用基础)中已学习和掌握,专门的数值计算方法(如有限差分法等)则为研究生课程(如计算流体力学)的内容,所以本书不增加这方面的内容,并删去了原书求解环状管网用FORTRAN语言编制的程序。其他方面,如改写了绪论,结合本书内容较详细介绍了流体力学的发展史,补充阐述了流体的物性以及流体力学的研究方法。本书简单介绍了总流动量矩方程的内容;补充阐述了湍流的动量输运理论;删去了水击的基本微分方程,补充介绍了非恒定有压管流的能量方程和非恒定明渠流的无摩阻正、负涌波;删去了消力池的水力计算,增加了小桥、涵洞孔径的水力计算等。另外,为了开阔眼界,拓宽思路,结合原书内容,简单提及学科发展的一些情况;为了减少授课时数,便于自学,对原书有的基本理论作了一些补充阐述。本书的例题和习题也稍有增加,主要是在理论基础部分,新增加了在教学过程中提出的一些启发性的讨论题,包括流体力学中的佯谬和疑题及其讨论的内容,后者对培养学生发现、提出问题和科学思维的能力是有益的。

本书物理量的名称和符号,尽量采用国家标准《量和单位》规定的名称和符号,或按有关行业规范或惯称。科学技术名词,尽量采用全国自然科学名词审定委员会审定公布的有关学科的规范名词,或按有关行业规范或惯称。

本书仍与原书一样,共十四章。上册共八章,书后有上册各章的习题答案。下册共六章,书后有下册各章的习题答案和全书的参考文献以及中英文术语对照。

参加本书编写的有:东南大学闻德荪(第一、二、三、四、五、七、八、十三章)、北京建筑工程学院李兆年(第六、九、十二章)、东南大学黄正华(第十、十一、十四章),主编仍是闻德荪。本书由清华大学李玉柱教授审阅,提出了宝贵的意见和建议。我们珍惜这些,并衷心感谢李玉柱教授和其他关

心、支持我们修订工作的同志们。

由于我们的水平有限和时间较紧，书中不妥之处恳切希望提出批评、指正。

编者

2003年7月

# 第1版前言

本书是为高等学校环境类专业、给水排水工程专业编写的工程流体力学(水力学)教材。它是在三校编写的讲义基础上,经过教学实践和吸收国内外有关教材的优点修改而成的。本书试图根据内容,建立一个既符合学科系统性又符合教学和认识规律的体系,来阐述工程流体力学的基本概念、基本原理和基本方法。本书内容,注意适应科学技术发展的需要,注重加强理论基础和能力的培养,力求贯彻理论联系实际、知识与能力辩证统一的原则。

根据工程流体力学的发展趋势,三维流动的基本原理及其分析方法,是基本的、重要的,且将长期起作用的。因此本书在介绍流体运动基本方程时,以三维流动的基本原理及其在特殊情况下的应用为线索,结合介绍一维流动的基本原理及其分析方法。

全书尽可能贯穿介绍工程流体力学处理问题的基本方法和常用方法,如理论分析方法中的无限微量法、有限控制体法和实验方法中的量纲分析与相似原理以及雷诺时均运算法则、量级对比、相似变换法等及它们的应用。

本书在介绍基本概念时,力求严格、确切、形象、清晰;在介绍基本原理时,既着重物理观点的阐述,又对必要的数学处理给予扼要的推导过程,并指出适用的范围和条件;在介绍基本理论的应用时,提出关键、要点和带规律性的应用方法、步骤,例如总流伯努利方程的应用,关键在于对流动现象的分析、取好过流断面和计算点、基准面以及能量损失的计算等。

为了巩固和加深对基本理论的理解、提高计算技能以及培养分析问题、解决问题的能力,各章均有一定数量的例题和习题,管网计算附有FORTRAN语言程序和计算结果。

本书内容可分为基本理论、应用与专题两部分,共十四章。上册共八章:绪论,流体静力学,流体运动学,理想流体动力学和平面势流,实际流体动力学基础,量纲分析和相似原理,流动阻力和能量损失,边界层基本理论和绕流运动;下册共六章:有压管流,明渠流,孔口、管嘴、闸孔出流及堰流,紊流射流和紊流扩散,渗流,可压缩流体的流动。

本书采取集体讨论,分工执笔,主编统稿审订的编写方式。参加编写的有:东南大学闻德荪(第一、三、四、五、十二章)、重庆建筑工程学院魏亚东(第二、七、八章)、北京建筑工程学院李兆年(第六、九、十三章)、东南

大学王世和(第十、十一、十四章),主编是闻德荪。本书由哈尔滨建筑工程学院屠大燕教授和清华大学余常昭教授审阅。在编写过程中,得到校内外有关同志和专家的热情鼓励和支持,吸收了他们许多宝贵的经验、意见和建议。在此一并致以衷心的感谢!

由于时间较紧,水平有限,书中不妥之处恳切希望各位批评、指正。

编者

1990年3月



# 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	1
§ 1-1 工程流体力学的任务及其发展简史.....	1
§ 1-2 连续介质假设·流体的主要物理性质 .....	6
§ 1-3 作用在流体上的力.....	23
§ 1-4 工程流体力学的研究方法.....	24
习题.....	28
<b>第二章 流体静力学</b> .....	30
§ 2-1 流体静压强特性.....	30
§ 2-2 流体的平衡微分方程——欧拉平衡微分方程.....	31
§ 2-3 流体静力学基本方程.....	35
§ 2-4 液体的相对平衡.....	43
§ 2-5 作用在平面上的液体总压力.....	48
§ 2-6 作用在曲面上的液体总压力.....	53
§ 2-7 浮力和潜体及浮体的稳定.....	58
* § 2-8 可压缩气体中的静压强分布规律.....	63
习题.....	66
<b>第三章 流体运动学</b> .....	75
§ 3-1 描述流体运动的两种方法.....	75
§ 3-2 描述流体运动的一些基本概念.....	84
§ 3-3 流体运动的类型.....	85
§ 3-4 流体运动的连续性方程.....	89
§ 3-5 流体微元运动的基本形式.....	95
§ 3-6 无涡流（无旋流）和有涡流（有旋流） .....	101
习题 .....	111
<b>第四章 理想流体动力学和平面势流</b> .....	114
§ 4-1 理想流体的运动微分方程——欧拉运动微分方程 .....	114
§ 4-2 理想流体元流的伯努利方程 .....	122
§ 4-3 恒定平面势流 .....	127

习题 .....	156
<b>第五章 实际流体动力学基础 .....</b>	<b>160</b>
§ 5-1 实际流体的运动微分方程——纳维-斯托克斯方程 .....	160
§ 5-2 实际流体元流的伯努利方程 .....	173
§ 5-3 实际流体总流的伯努利方程 .....	175
§ 5-4 不可压缩气体的伯努利方程 .....	189
§ 5-5 总流的动量方程 .....	194
* § 5-6 总流的动量矩方程 .....	201
习题 .....	203
<b>第六章 量纲分析和相似原理 .....</b>	<b>212</b>
§ 6-1 量纲分析 .....	212
§ 6-2 流动相似的概念 .....	222
§ 6-3 相似准则 .....	225
§ 6-4 准数方程 .....	229
§ 6-5 模型试验 .....	230
习题 .....	236
<b>第七章 流动阻力和能量损失 .....</b>	<b>239</b>
§ 7-1 流体的两种流动形态——层流和湍流 .....	239
§ 7-2 恒定均匀流基本方程·沿程损失的表示式 .....	244
§ 7-3 层流沿程损失的分析 and 计算 .....	247
§ 7-4 湍流理论基础 .....	251
§ 7-5 湍流沿程损失的分析 and 计算 .....	267
§ 7-6 局部损失的分析 and 计算 .....	286
习题 .....	295
<b>第八章 边界层理论基础和绕流运动 .....</b>	<b>300</b>
§ 8-1 边界层的基本概念 .....	301
* § 8-2 边界层微分方程——普朗特边界层方程 .....	304
§ 8-3 边界层的动量积分方程 .....	307
§ 8-4 平板上的层流边界层 .....	309
§ 8-5 平板上的湍流边界层 .....	313
§ 8-6 边界层的分离现象和卡门涡街 .....	322
§ 8-7 绕流运动 .....	326
习题 .....	333
<b>习题答案 .....</b>	<b>336</b>

# 第一章 绪 论

## § 1-1 工程流体力学的任务及其发展简史

流体力学是力学的一个分支,是研究流体运动规律及其应用的一门学科。一般将内容侧重于理论的,主要采用严密的数学推理方法,力求准确性和严密性的流体力学,称为理论流体力学;侧重于应用的,主要为解决工程实际问题的,称为工程流体力学;若研究对象是水流,且又侧重于应用的,称为现代水力学或水力学。它们的基本概念、基本原理和基本方法,在很多方面是相同的。因为生活和生产的许多部门和领域,都与流体有着联系,所以,工程流体力学在环境保护、市政建设、给水排水、土木建筑、交通运输、供热通风、化工、机械、动力、能源、资源、水利、气象、航空、国防、医学、生物等工程中都得得到广泛的应用。

工程流体力学亦是由于生产发展的需要,在实践的基础上建立和不断地发展起来的。在此,结合本书的内容,简单介绍它的发展史。

早在几千年前,由于农业、航运等事业的发展需要,修建了一些工程;在生产实践的基础上,开始了解和认识了一些流体运动的规律。我国在公元前485年,开始修筑南北运河,到隋朝最后完成了从杭州到北京长达1782 km的大运河,沟通了江、淮、黄、海四大水系,改善了我国南北运输的条件,并在运河上大量使用了船闸。春秋战国和秦朝时代,为了灌溉的需要,修建了都江堰、郑国渠和灵渠三大灌溉渠道;特别是公元前250年左右,在四川成都开始修建的驰名中外的都江堰工程中,设置了平水池和飞砂堰,并总结了“深淘滩,低作堰”。所有这些都反映了当时人们对明渠水流、堰流等已有一定的认识,并居于世界领先水平。都江堰等工程至今仍在生产建设中起着作用,发挥着效益。由于当时我国处于封建主义制度和思想的统治下,阻碍了生产和科技的发展,工程流体力学处于停滞落后的状态。

与我国情况相似,早在几千年前,埃及、希腊、巴比伦和印度等地区,为了发展农业也修建了灌溉渠道,并发展了航运;古罗马人则修建了大规模的供水管道系统等。约在公元前250年,希腊哲学家、物理学家阿基米德

(Archimedes, 公元前 287—前 212) 总结了观察、实践的经验, 发表了《论浮体》, 提出了浮体原理。一般认为, 它是第一篇阐述流体静力学规律的文献。由于当时欧洲受到封建统治和神学宇宙观的束缚, 生产发展滞缓, 在很长的时间内, 工程流体力学没有新的成就。

15 世纪, 由意大利开始的文艺复兴时期, 工程流体力学停滞的局面随之有所改变。16 世纪初, 意大利艺术家、物理学家兼工程师达·芬奇 (Leonardo da Vinci, 1452—1519) 在观察和实验的基础上, 描绘和叙述了许多重要的流动现象, 写了《论水的流动和水的测量》一文, 探讨了孔口泄流和不可压缩流体恒定流的质量守恒连续性原理等, 但未被重视, 对工程流体力学的发展未能起到应有的作用。1638 年, 意大利物理学家、天文学家伽利略 (Galileo Galilei, 1564—1642), 在比萨斜塔上当众进行了有名的落体实验, 首先将实验方法引入力学, 并用以研究运动物体的阻力, 且更进一步建立了物体浮沉的基本定理。1650 年法国数学家、物理学家、哲学家帕斯卡 (Blaise Pascal, 1623—1662) 通过现场测量, 提出了流体静力学的基本关系式, 建立了流体中压强传递的帕斯卡定律。由于当时还没有发现力与运动之间的关系和恰当的数学方法, 所以一些成就都偏重于流体静力学方面。

17 世纪, 资本主义制度兴起, 由英国开始的工业革命, 使生产迅速发展, 自然科学 (如数学、力学) 亦得到质的飞跃, 这些都为工程流体力学的发展提出了要求和创造了条件。英国数学家、物理学家牛顿 (Isaac Newton, 1642—1727) 在伽利略等人和他自己的大量观察、实验的基础上, 提出了著名的牛顿三大运动定律和万有引力定律; 为了完成他的运动定律, 达到理论上的飞跃, 在数学上发明了能以表达物理量瞬时变化的运算规律——微积分。牛顿在力学和数学方面的成就, 奠定了物质机械运动的理论基础, 形成了牛顿力学 (或称古典力学), 它亦为工程流体力学的发展提供了理论依据。由于人们掌握了观察、实验、理论的科学方法, 自然科学在各方面都呈现出一派迅速发展的大好形势。1686 年, 牛顿通过分析和实验, 首先提出后又被多人验证的粘性流体切应力 (剪应力) 公式, 为建立粘性流体的运动方程组创造了条件。1730 年, 法国工程师、发明家皮托 (Henri Pitot, 1695—1771) 发明了测量流体流速的皮托管。1738 年, 曾在彼得堡工作八年的瑞士物理学家、数学家伯努利 (Daniel bernoulli, 1700—1782) 对孔口出流和变截面管流进行了细致的观察和广泛的测量, 首创将牛顿力学和流体物性、压强概念相结合, 提出了有名的恒定不可压缩理想流体运动的能量方程——伯努利方程。1748 年, 俄国科学家罗蒙诺索夫 (Lomonosov, M V 1711—1765) 提出质量守恒定律。1752 年, 法国数学家、哲学家达朗伯 (Jean le Rond d'Alembert, 1717—1783) 在研究物体阻力时, 获得达朗伯佯谬 (疑题), 即圆柱在静止流体中作等速前进运动

时没有阻力,说明了理想流体假定的局限性。同年,他根据质量守恒定律,首次提出流体的连续性方程。1753年,瑞士数学家、物理学家、俄国科学院院士欧拉(Leonhard Euler, 1707—1783)提出了流体力学中一个带根本性的假设,即将流体视为连续介质;1755年,提出流体运动的描述方法——欧拉法和理想(无粘性)流体运动方程——欧拉运动方程,首先应用微积分的数学分析方法来研究流体力学的问题,为理论流体力学的发展开辟了新的途径,奠定了古典流体力学的基础,并开始研究理想流体无旋流动,提出了速度势概念。1783年,法国数学家、天文学家拉格朗日(Joseph Louis Lagrange, 1736—1813)在总结前人工作的基础上,完整地表述和应用了另一描述流体运动的方法——拉格朗日法;引进流函数的概念,并首先获得理想流体无旋流动所应满足的动力学条件,提出求解这类流体运动的方法,进一步完善了理想流体无旋流动的基本理论。以上的研究,主要是对无粘性理想流体,而客观实际的流体是有粘性的实际流体。1823年,法国工程师纳维(Louis Marie Henri Navier, 1785—1836)和1845年,英国数学家、物理学家斯托克斯(George Gabriel Stokes, 1819—1903)分别用不同的假设和方法,建立了不可压缩实际(粘性)流体的运动方程——纳维-斯托克斯方程,提供了研究实际流体运动的基础,由此开展了对实际流体的研究。1847年,英国物理学家、生理学家亥姆霍兹(Helmholtz, H L F von)用数学形式表达出一般的能量守恒原理;1858年,他将流体质点的运动分解为平移、变形及转动,提出了以他名字命名的亥姆霍兹速度分解定理,推广了理想流体的研究范围,对工程流体力学的发展有很大影响。1822年傅里叶(Fourier J B)和斐克(Fick A E)与牛顿切应力公式相对应,分别提出了傅里叶热传导公式和斐克(第一)扩散定律,为研究流体的传热、传质问题提供了基础。

18、19世纪,在牛顿古典力学基础上,结合流体物性,形成的古典流体力学得到了发展,它主要是用严格的数学分析方法建立了流体的基本运动方程,为工程流体力学提供了理论基础。由于古典流体力学在理论中的假设,如理想流体等与实际不尽相符,或由于数学上求解如纳维-斯托克斯方程等的困难,所以当时尚难以运用来解决实际问题。

与此同时,生产的发展,要求迅速解决实际问题。因此,主要用实验方法,依靠实验和实测资料形成的实验水力学有了发展。它在伯努利成就的基础上,为人们提供了许多计算明渠水流、有压管流、堰流等的经验公式和图表。这一时期,在实验水力学方面卓有成就的大多是工程师,如皮托、法国工程师谢齐(Antonie de Chezy, 1718—1798)、意大利工程师、物理学家文丘里(Abbe Giovanni Battista Venturi, 1746—1822),德国水利工程师哈根(Gotthilf Heinrich Ludwig Hagen, 1707—1884),法国物理学家、生理学家、医生泊肃

叶 (Jean Louis Poiseuille, 1799—1869), 法国工程师达西 (Henry Philibert Gaspard Darcy, 1803—1858), 德国水力学家魏士巴赫 (Julius Weisbach, 1806—1871), 英国工程师弗劳德 (William Froude, 1810—1879), 爱尔兰工程师曼宁 (Robert Manning, 1816—1897), 法国工程师巴赞 (Henri Emile Bazin, 1829—1917) 等。他们的成果, 有的在目前仍被广泛运用, 例如 1755 年谢齐从工程实践中归纳出的明渠恒定均匀流的计算公式等。实验水力学由于理论指导不足和受限于观测仪器, 一些成果在物理本质和公式之间没有明显的内在联系, 且大多是有关水的问题, 所以在应用上有一定的局限性, 难以解决复杂的工程问题。古典流体力学和实验水力学的长期分离, 这和当时欧洲自然科学界中存在机械唯物宇宙观和经验主义的影响有关。

19 世纪末到 20 世纪中叶, 随着生产和科技的迅速发展, 所遇到的工程流体力学问题亦越趋复杂, 不能单纯依靠理论或实验来解决问题, 要求理论和实验相结合, 这就导致了古典流体力学和实验水力学相结合, 形成了现代流体力学 (流体力学)。工程流体力学是根据古典流体力学的基本理论, 结合实验的数据以及经验公式, 以获得在实际工程中所要求的精度范围内的近似结果。这和当时在自然、社会科学界中, 辩证唯物宇宙观的确立和发展有关。1882 年, 英国工程师、物理学家雷诺 (Osborne Reynolds, 1842—1912) 首先阐明了相似原理, 促进了理论和实验的结合。1883 年, 他在圆管中进行了一系列的流体流动实验, 发现流体流动有两种形态, 即层流和湍流 (紊流), 及其判别准则——特征数。1908 年, 索末菲 (Sommerfeld) 为了纪念他, 将上述特征数 (量纲一的量) 取名为雷诺数。1895 年雷诺又引进了湍流应力 (又称雷诺应力) 的概念, 并用时均方法建立了不可压缩实际流体的湍流运动方程, 又称雷诺方程, 为湍流的理论研究提供了基础。1892 年和 1904 年, 英国物理学家、数学家瑞利 (Lord John William Rayleigh, 1842—1919) (1904 年获诺贝尔物理奖) 首先提出了用量纲分析法求流动相似准则, 这是用理论分析和实验研究相结合, 来解决工程流体力学问题的重要方法, 在实验研究中有着重要的意义和作用。1887 年奥地利科学家马赫 (Mach E, 1838—1916) 与塞尔彻 (Salcher P) 共同发表了超声速运动弹头的第一张照片, 明显地发现了一些现象和规律。这一贡献是对了解超声速流动的一大突破, 大大推动了这一方面的研究工作。1929 年, 阿克莱特 (Ackeret J) 认为在高速流动中, 流体速度与声速之比是一个重要的特征数 (量纲一的量), 它标志着流动可压缩效应。为了纪念马赫的贡献, 将上述特征数命名为马赫数。马赫数是判别可压缩气体流动形态的重要参数, 对研究可压缩气体流动有着重要的意义。由于生产和航空事业的发展, 1904 年, 德国工程师、力学家普朗特 (Ludwig Prandtl, 1878—1953) 开始创立, 经后人不断发展的边界层理论, 为解决边界复杂的实际流体运动问

题开辟了途径,并解释了达朗伯佯谬等一些似是而非的现象和疑题,对流体力学的发展有着很重要的意义。1921年匈牙利工程师、德国教授、空气动力学家、美国工程师、水力学及湍流力学专家卡门(Theodore Von Kármán, 1881—1963)用动量方程导出边界层的动量积分方程,是一种较好的近似方法,可解决一些壁面边界层的计算问题。始于1902年,由希开沛(Shakepear)在美国伯明翰完成热线流速仪的原理性实验后,1932年德莱顿(Dryden H.L.)用他自己设计制造的热线流速计,第一次成功地测量到湍流的脉动流速,加深了人们对湍流的认识。另外,其他的电测非电量的测量湍流脉动压强的仪器等亦相继出现和应用。这些先进的量测设备和技术的应用,对学科的发展都起到了重要作用。1933年,德国工程师尼古拉兹(Johann Nikuradse)对采用人工粗糙的管道进行了系统的测定工作,为补充边界层理论、推导湍流的半经验公式提供了可靠的依据。

1946年,美国研制出第一台电子计算机,以计算机为工具的数值计算方法得到迅速发展,它继理论分析和实验方法之后,成为工程流体力学的第三种研究方法。目前,数值计算方法和数值模拟(实验)在工程流体力学中得到广泛的应用,对工程流体力学的发展起着日益重要的作用。另外,现代测量技术如激光测速仪等的应用和计算机在实验数据的监测、采集等中的应用,都促进了工程流体力学的发展。

当前,科学技术的发展趋势是既高度分化,又高度综合。各学科之间相互渗透、结合,形成许多新的分支和交叉(边缘、综合等)学科,如空气动力学、计算流体力学、环境流体力学、生物流体力学、非牛顿流体力学、多相流体力学等。这些新的交叉学科研究的现象和问题都较复杂,例如在环境工程中遇到的流体流动,不仅有动量运输(或称迁移、传输、传递),很多时候还有热量和质量的运输,甚至伴有化学或生物反应。因此,工程流体力学随着生产和科技的发展,研究的领域范围和物质对象亦日益深化和扩大。目前,工程流体力学除了主要研究流体的宏观机械运动和它与周围物体(固体、液体、气体)间力的作用外,还涉及其传热、传质的规律;研究的物质对象亦由主要是牛顿流体扩展到非牛顿流体和多相流体。工程流体力学既是一门古老的,又是一门富有生机的学科,并将得到蓬勃不断的发展。

1949年,中华人民共和国成立,生产、建设和科学、技术得到迅速发展。1950年开始的根治淮河工程,先后建成了一系列的山谷水库和洼地蓄洪工程。1955年决定根治黄河的综合工程,通过野外观测和室内试验,对挟砂水流的基本运行规律和河床变迁的研究都取得可喜的成果。长江综合利用、整治工程和几座大桥相继建成;1992年决定兴建的举世瞩目的长江三峡工程进展顺利,并于2003年如期实现水库初期蓄水、永久船闸通航和首批机组并网发电三大

目标。南水北调世纪工程，分西、东、中三条调水方案，已开始分步实施。原子弹、氢弹、导弹的试验成功，人造地球卫星的发射和准确回收，大庆、胜利油田的开发和建设等，都取得了巨大成就。随着现代化、城市化建设的发展，对环境保护和市政建设的重要性认识日益得到人们的共识和关注。经过几十年的努力，在防治水污染、保护和合理利用水资源、保护和改善大气环境质量、市政建设、给水排水工程等方面都取得了可喜的成绩。其他与流体有关的工农业生产、工程以及国防建设工程等亦都取得了很大的进展和成就。工程流体力学既得到了应用，自身亦得到了发展。我国著名科学家钱学森、周培源、郭永怀等在流体力学方面都有卓越的成就和巨大的贡献，受到人们的尊敬。

工程流体力学在其历史的发展过程中，取得很大的进展，但仍有一些重要问题，例如湍流等问题，至今还没有获得圆满解决。众多与工程流体力学有关的分支或交叉学科，尚处于发展的初期，很多问题有待解决、开拓、创新、发展。与工程流体力学有关的交叉学科，它们的基本理论，部分仍是和工程流体力学一致的或相通的，学习好、掌握好工程流体力学的基本概念、基本原理和基本方法，不仅是应用和研究工程流体力学的需要，亦是学习、掌握与其有关的交叉学科的需要。当前，我国建设蓬勃发展，各方面的情况都很好，为我们创造了学习、工作、奉献、创新的良好条件，愿我们共同努力，为振兴中华、服务人类做出更大的贡献，以此共勉。

## § 1-2 连续介质假设·流体的主要物理性质

### 1-2-1 连续介质假设

根据物质结构理论，自然界所有物体（包括流体）都是由许多不连续的、相隔一定距离的分子所组成，而分子则由更小的原子所组成；所有物体的分子和原子都处在永不停息的不规则运动之中，相互间经常碰撞、掺和，进行动量、热量（能量）、质量的交换。所以，流体的微观结构和运动，在空间和时间上都是不连续的，呈现着离散性、不均匀性和随机性。但是，人们用肉眼观察到的或用仪器测量到的流体宏观结构和运动，却又明显地呈现出连续性、均匀性和确定性。两者不同，却又统一在流体这一物质之中，给研究提出了问题和启示。

工程流体力学主要是研究流体的宏观（机械）运动，根据上述情况，呈有两种不同的研究途径和方法。一种是从分子和原子微观运动出发，采用统计平均方法确定流体的物性，并建立流体宏观物理量满足的方程。因为在气体和液



体两种聚集态中,气体的性质较简单,气体动理学理论(气体分子运动论)比较成熟,所以在气体方面,对分子碰撞等作某些简化、假设后,可导出宏观方程,但某些分子输运系数值还不能准确地得出。由于液体微观结构,在分子间距离和相互作用方面,不同于气体,较复杂,液体输运过程的理论迄今还不完善,常借用气体分子运动的模型,以比拟的方法来推求。目前,用上述途径和方法研究流体宏观运动,虽取得一些进展和部分成果,但因数学形式复杂,当前要直接求解非常困难。目前,主要是用下面的一种研究途径和方法。它是以连续介质假设为基础,即认为流体是由比分子大很多的,微观上充分大,而宏观上充分小的分子团,可以近似地看成几何上没有大小和形状的一个点的质点所组成,质点之间没有空隙,连续地充满流体所占有的空间的连续介质;流体质点所具有的宏观物理量(如质量、速度、压强、温度等)应该遵循物理学基本定律,如牛顿力学定律、质量和能量守恒定律、热力学定律等,但流体的某些物理常数和关系还需用实验方法来确定。这种从连续介质出发,建立流体宏观物理量之间关系式的研究途径和方法,已广泛地被流体力学所采用,并获得了很大的成功,本书只介绍这一种研究途径和方法。上述两种研究途径和方法虽然不同,但是前者对于理解流体力学中很多基本性质和概念十分有用,它力图从微观结构、分子热运动和分子间的作用力等方面来说明宏观现象,从而从深层次揭示微观和宏观之间的内在联系,这对认识一些物理性质和现象是很有帮助的。

流体的连续介质假设,在一般情况下是被允许的。因为流体质点是指微观上充分大、宏观上充分小的分子团,即是指分子团的尺度和分子运动的尺度相比应足够地大,使得其中包含大量的分子,对分子团进行统计平均后能得到稳定的数值,少数分子出入分子团不影响稳定的平均值。另一方面,又要求分子团的尺度和所研究问题的特征尺度相比又要充分的小,使得分子团内平均物理量可看成是均匀不变的,因而可以把它近似地看成是几何上没有维度的一个点。在进行统计平均时,除了分子团的尺度必须满足上述要求外,还应对其进行统计平均的时间作出规定,即要求它必须是微观充分长,宏观充分短的。也就是讲,进行统计平均的时间,从微观上来讲应选得足够长,使得在这段时间内,微观的性质,例如分子间的碰撞已进行了许多次,在这段时间内进行统计平均能得到稳定的数值;另一方面,进行统计平均的时间,从宏观上来讲,应选得比特征时间短得多,可以把进行统计平均的时间看成是一个瞬间。这样,就可以把一个本来是大量离散分子或原子运动问题,近似为充满整个空间流体质点的运动问题,而且每个空间点和每个时刻都有确定的物理量,它们都是空间坐标和时间的连续函数,从而可以运用数学分析这一有力工具来建立和求解宏观物理量之间的方程。在很多情况下,通常遇到的问题中,从体积来讲,微观大、宏观小;从时间来讲,微观长、宏观短,是存在的。例如,在一般的