

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
本书荣获中国石油和化学工业优秀出版物（教材奖）一等奖

工程流体力学

ENGINEERING FLUID MECHANICS

黄卫星 伍 勇 编著

第3版



化学工业出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

本书荣获中国石油和化学工业优秀出版物（教材奖）一等奖

工程流体力学

ENGINEERING FLUID MECHANICS

黄卫星 伍 勇 编著

第3版



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书在第2版基础上总结教学和工程实践修订成稿,内容涉及流体力学基本概念、基本原理、研究方法和工程应用四个方面。全书共12章,包括:流体的力学性质、流体流动的基本概念、流体静力学、流体流动的守恒原理、不可压缩流体的一维层流流动、流体流动微分方程、理想不可压缩流体的平面运动、流体流动模型实验方法、不可压缩流体管内流动、流体绕物流动、可压缩流动基础与管内流动、过程设备内流体的停留时间分布。

本书编者长期专注过程设备流体流动与传递过程的教学与科研,将流体力学基本理论与过程设备内的流动问题紧密结合,内容编排层次清晰,概念阐述直观明确,问题分析联系实际;书中例题丰富,习题均由编者演算后选编或设计,并附有详尽答案及解题提示,对促进课程的教学和各章主要知识点的理解与掌握有重要帮助。

本书基本内容定位于工程专业本科,但亦有深入扩展以满足研究生教学需要,在作为“过程装备”专业核心课教材的同时,可供高校化工、轻工、环境、安全、机械及能源动力类专业作为教材或教学参考书,对以上专业的科研和工程技术人员亦有重要参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

工程流体力学/黄卫星,伍勇编著.—3版.—北京:
化学工业出版社,2017.10

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-122-30462-9

I. ①工… II. ①黄… ②伍… III. ①工程力学-流体力学-高等学校-教材 IV. ①TB126

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第201108号

责任编辑:程树珍 丁文璇
责任校对:宋 夏

装帧设计:史利平

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 装:高教社(天津)印务有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张22¼ 字数577千字 2018年1月北京第3版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:50.00元

版权所有 违者必究

过程装备与控制工程专业核心课程教材 编写委员会

组织策划人员（按姓氏笔画排列）

丁信伟（全国高等学校化工类及相关专业教学指导委员会副主任委员兼化工装备教学指导组组长）

吴剑华（全国高等学校化工类及相关专业教学指导委员会委员）

涂善东（全国高等学校化工类及相关专业教学指导委员会委员）

董其伍（全国高等学校化工类及相关专业教学指导委员会委员）

蔡仁良（全国高等学校化工类及相关专业教学指导委员会委员）

编写人员（按姓氏笔画排列）

马连湘	王毅	王良恩	王淑兰	叶德潜	伍勇	刘敏珊
闫康平	毕明树	李云	李建明	李德昌	吴旨玉	张早校
肖泽仪	陈文梅	陈志平	林兴华	卓震	郑津洋	胡涛
姜培正	钱才富	徐思浩	桑芝富	黄卫星	黄有发	董其伍
廖景娱	魏进家	魏新利				

主审人员（按姓氏笔画排列）

丁信伟 郁永章 施仁 蔡天锡 潘永密 潘家祯

审定人员（按姓氏笔画排列）

丁信伟 吴剑华 涂善东 董其伍 蔡仁良

前言

本书系“过程装备与控制工程”专业核心课教材,在第2版基础上总结教学经验与工程实践修订增补成稿,全书12章。其中,第1~第10章标题与第2版基本保持一致(流体的力学性质、流体流动的基本概念、流体静力学、流体流动的守恒原理、不可压缩流体的一维层流流动、流体流动微分方程、理想不可压缩流体的平面运动、流体流动模型实验方法、不可压缩流体管内流动、流体绕物流动),但内容选材与编排上有不同程度的取舍和调整,系统性和逻辑性进一步增强;第11~第12章分别更换为“可压缩流动基础与管内流动”和“过程设备内流体的停留时间分布”,以适应可压缩流动分析设计和过程设备创新开发的需求。

与第2版相比,本版的主要变化体现在以下四个方面。

1. 改进各章内容选材与展开顺序,知识的系统性和逻辑层次进一步增强。

这一工作从重新审视各章教学内容及展开顺序开始,对每章基本内容的系统性、展开的逻辑顺序、基本概念是否明确、主要知识点如何应用、教学进程能否顺利以及与其它章节知识点的联系与衔接等问题,进行了再次的分析与研判,由此对各章内容选材与编排顺序进行了不同程度的取舍和调整,使各章教学内容的系统性和逻辑层次进一步增强,并以此重新编写了各章引言,以引导读者更清晰地把控每章内容的展开脉络。

2. 改进论述分析方式,促进学生知识应用能力由会做习题向解决实际问题转变。

为达到这样的目的,本书针对具体问题的论述分析着重进行了四个方面的改进。对建立在假设条件下的问题或结果,注重联系实际阐明其假设的可行性和结果的适用性;对适用于同类问题的典型方法或公式,注重通过对比分析阐明其共通性及针对性;对那些在原理解释或应用扩展方面有特别意义的示例问题,注重阐明其特定参数变化如何影响过程行为,或其结果如何推广应用于特定过程;对某些给定条件下的应用问题,注重联系实际反问为什么给定这样的条件或不这样会有什么结果。编者相信,这些改进将对基本概念的理解、主要知识点的掌握和基本方法的应用有重要促进。

3. 更换本书第2版第11、第12章,以适应可压缩流动问题分析和过程设备创新开发的需求。

为适应可压缩流动分析的知识需求,本书将“可压缩流动基础与管内流动”纳入作为第11章。该章站在过程装备的专业角度,在阐述可压缩流动的必要基础后,将应用落脚于管内流动,并联系实际阐明了为什么变截面管中的可压缩流动分析要以等熵过程为条件,为什么等截面管中的可压缩流动要分为绝热流动和等温流动来研究,从而使该章基本理论与工程实际的联系更为明晰。

对于过程设备的创新开发,实验是重要手段。其中关于模型实验的方法已在本书第8章论述。编者此次将“过程设备内流体的停留时间分布”作为第12章纳入本书,是因为流体停留时间分布既能反映过程设备内部的流动行为,又有实验测试相对容易的优势,对于过程设备创新开发中内构件形式与流动行为关系的问题,停留时间分布实验同样是一种有效的、值得重视的研究手段。

4. 例题示范性、习题多样性、思考题引导性增强。

与第2版相比,本书在修订完善原有例题习题基础上,新增例题19例(全书89例),新

增习题 82 题 (全书 216 题), 新增插图 64 幅 (全书插图 327 幅), 同时还重新设计了第 7~第 11 章的全部思考题。其中: ①对于例题, 特别注重了改进其提问的目的性及范围, 阐明其结果的启示性及应用, 以增强其示范性; ②习题中增强了综合应用所学知识和应用 Excel 计算工具解决问题的分量, 以培养学生应用高等数学和现代计算工具综合解决复杂问题的能力; 且所有习题均由编者演算后选编或设计, 并附有详尽答案及解题提示, 以方便课程的教学和促进各章主要知识点的理解与掌握; ③思考题的设计重点在于帮助读者厘清各章主要脉络及关键节点, 深化理解其中的核心概念或知识点, 明确其前提或应用条件。

在课程教学上, 教材基本内容定位于工程专业本科, 但亦有扩展延伸以满足研究生教学需要。编者对课程教学内容安排的建议是: 对于本科生, 第 1~第 5 章是基本教学内容 (约 48 学时), 第 6~第 12 章可供本科多学时课程选择讲授; 对于研究生, 第 6~第 10 章是基本教学内容 (约 48 学时), 第 11 章和第 12 章供选择讲授。任课教师可根据本校专业学科或研究方向特色补充、扩展相关教学内容。

本书修订工作由黄卫星教授负责并主要执笔, 伍勇教授、魏文韞博士、谭帅博士参与共同完成, 其中也包含陈文梅教授、李建明教授、肖泽仪教授曾经的贡献。本书修订工作得到四川大学教务处的的大力支持和四川大学化工学院“多相流设备与安全工程”团队研究生同学的大力协助, 在此一并致谢。

在本书第 3 版即将出版之际, 编者诚挚感谢兄弟院校的专家教授和任课教师对本教材的选用、褒奖以及所提出的宝贵意见, 并希望对本书新版中的缺点、错误与不足继续予以指正。

编者
2017 年 7 月

第1版序

按照国际标准化组织（ISO）的认定，社会经济过程中的全部产品通常分为四类，即硬件产品（hardware）、软件产品（software）、流程性材料产品（processed material）和服务产品（service）。在新世纪初，世界上各主要发达国家和我国都已把“先进制造技术”列为优先发展的战略性高技术之一。先进制造技术主要是指硬件产品的先进制造技术和流程性材料产品的先进制造技术。所谓“流程性材料”是指以流体（气、液、粉粒体等）形态为主的材料。

过程工业是加工制造流程性材料产品的现代国民经济的支柱产业之一。成套过程装置则是组成过程工业的工作母机群，它通常是由一系列的过程机器和过程设备，按一定的流程方式用管道、阀门等连接起来的一个独立的密闭连续系统，再配以必要的控制仪表和设备，即能平稳连续地把以流体为主的各种流程性材料，让其在装置内部经历必要的物理化学过程，制造出人们需要的新的流程性材料产品。单元过程设备（如塔、换热器、反应器与储罐等）与单元过程机器（如压缩机、泵与分离机等）二者统称为过程装备。为此，有关涉及流程性材料产品先进制造技术的主要研究发展领域应该包括以下几个方面：①过程原理与技术的创新；②成套装置流程技术的创新；③过程设备与过程机器——过程装备技术的创新；④过程控制技术的创新。于是把过程工业需要实现的最佳技术经济指标：高效、节能、清洁和安全不断推向新的技术水平，确保该产业在国际上的竞争力。

过程装备技术的创新，其关键首先应着重于装备内件技术的创新，而其内件技术的创新又与过程原理和技术的创新以及成套装置工艺流程技术的创新密不可分，它们互为依托，相辅相成。这一切也是流程性产品先进制造技术与一般硬件产品的先进制造技术的重大区别所在。另外，这两类不同的先进制造技术的理论基础也有着重大的区别，前者的理论基础主要是化学、固体力学、流体力学、热力学、机械学、化学工程与工艺学、电工电子学和信息技术科学等，而后者则主要侧重于固体力学、材料与加工学、机械机构学、电工电子学和信息技术科学等。

“过程装备与控制工程”本科专业在新世纪的根本任务是为国民经济培养大批优秀的能够掌握流程性材料产品先进制造技术的高级专业人才。

四年多来，教学指导委员会以邓小平同志提出的“教育要面向现代化，面向世界，面向未来”的思想为指针，在广泛调研研讨的基础上，分析了国内外化工类与机械类高等教育的现状、存在的问题和未来的发展，向教育部提出了把原“化工设备与机械”本科专业改造建设为“过程装备与控制工程”本科专业的总体设想和专业发展规划建议书，于1998年3月获得教育部的正式批准，设立了“过程装备与控制工程”本科专业。以此为契机，教学指导委员会制订了“高等教育面向21世纪‘过程装备与控制工程’本科专业建设与人才培养的总体思路”，要求各院校从转变传统教育思想出发，拓宽专业范围，以培养学生的素质、知识与能力为目标，以发展先进制造技术作为本专业改革发展的出发点，重组课程体系，在加强通用基础理论与实践环节教学的同时，强化专业技术基础理论的教学，削减专业课程的分量，淡化专业技术教学，从而较大幅度地减少总的授课时数，以增加学生自学、自由探讨和发展的空间，以有利于逐步树立本科学生勇于思考与创新的精神。

高质量的教材是培养高素质人才的重要基础，因此组织编写面向21世纪的6种迫切需

要的核心课程教材，是专业建设的重要内容。同时，还编写了6种选修课程教材。教学指导委员会明确要求教材作者以“教改”精神为指导，力求新教材从认知规律出发，阐明本课程的基本理论与应用及其现代进展，做到新体系、厚基础、重实践、易自学、引思考。新教材的编写实施主编负责制，主编都经过了投标竞聘，专家择优选定的过程，核心课程教材在完成主审程序后，还增设了审定制度。为确保教材编写质量，在开始编写时，主编、教学指导委员会和化学工业出版社三方面签订了正式出版合同，明确了各自的责、权、利。

“过程装备与控制工程”本科专业的建设将是一项长期的任务，以上所列工作只是一个开端。尽管我们在这套教材中，力求在内容和体系上能够体现创新，注重拓宽基础，强调能力培养，但是由于我们目前对教学改革的研究深度和认识水平所限，必然会有许多不妥之处。为此，恳请广大读者予以批评和指正。

全国高等学校化工类及相关专业教学指导委员会
副主任委员兼化工装备教学指导组组长

大连理工大学 博士生导师

丁信伟 教授

2001年3月于大连

第1版前言

流体力学是研究流体受力及其宏观运动规律的一门学科,既有基础学科的性质,又有鲜明的应用学科特点,而工程流体力学则更侧重于后者。

作为“过程装备与控制工程”专业的核心课程之一,“工程流体力学”课程的任务是使学生掌握流体力学的基本原理、基本方法及其在工程实际问题中的应用,从而为分析研究过程装备中的流体流动规律及其相关传递过程,以及为设计开发新型高效的过程装备奠定必备的基础。

本书根据全国高等学校“过程装备与控制工程”专业教学指导组审定的“工程流体力学”教材大纲编写,以体现流体力学学科体系、突出专业应用背景、适应教学规律为基本原则,内容包括流体力学基本概念、基本原理、研究方法和工程应用四个方面,共12章。

第1、第2章分别介绍流体的力学性质及其运动学基本概念,是工程流体力学课程必要的预备性知识。

第3~第7章为流体力学基本原理及分析方法。其中,第3章重点讲述静止条件下的流体受力、流体静力学方程及静止流场特性,该章知识内容既可直接应用于工程实际,也是后续动力学问题中流体受力分析的基础。第4章是以控制体方法分析研究流体流动过程中遵循质量守恒、动量守恒和能量守恒原理所表现出来的总体特性,所建立的积分方程是分析化工流动系统物料平衡、设备受力和能量转换的重要工具。第5章则主要以工程实际中典型的一维流动为对象,阐述将动量定律应用于流体微元从而建立流动微分方程,并由此求解流场内切应力和速度分布的基本方法与过程;在此基础上,第6章将对一维流动分析方法加以推广和普遍化,建立三维条件下流体运动的基本微分方程——连续性方程和 Navier-Stokes 方程。采取由浅入深、由简到繁的方式编排第5、第6章,是希望有助于理解和掌握 Navier-Stokes 方程这一流体力学主干方程的物理意义和实际应用。第7章属流体运动学范畴,主要讲述流体微团基本运动、势流理论以及求解不可压缩无旋流场的基本方法。

第8章和第12章分别为流体力学实验研究方法和数值模拟方法。其中,第8章重点讲述了模型实验基础——相似原理,以及建立相似准则的方法和工程模型研究方法,并简要介绍了流场测试技术。第12章则以弯曲管道中层流流动的数值模拟过程为主线,系统介绍了对二维及轴对称流动问题数值求解行之有效的涡量-流函数法;并同时模型方程的建立、离散及求解方法等作了适当的扩展介绍,以希望对感兴趣的读者起到入门引导作用。

第9~第11章主要为流体力学基本原理和方法的综合应用。其中,第9章和第10章分别为管内流动问题和流体绕物流动分析,这两章中关于速度分布和流体阻力的半经验公式及其实验结果等不仅在工程实际中得到广泛应用,而且其中的湍流半经验理论、Prandtl 边界层理论等本身亦属于流体力学经典知识的范畴。第11章以过程装备为对象,分别介绍叶轮机、旋流器、过滤机及离心机中的流体流动及其相关问题,本章教学可考虑采取专题讲座形式进行,因此,教师有必要根据自身科研特点和新的研究成果选讲、补充或替换本章内容。

本书编写过程中,综合参考了传统工程流体力学教材和化工传递过程教材的内容组织和编写特点,结合了编者近年来的教学经验和研究实践,力求内容编排层次清楚,概念阐述直观明确,同时以较多例题说明基本原理和方法的应用。此外,书中各章均选择编入了一定的

习题和/或思考题，并附有习题答案或解题难点提示，以有利于教学和各章基本内容的理解与掌握。

本书基本内容定位于工程专业本科，但亦有扩展以兼顾研究生教学需要。对于本科学士生，第1~第5章可作为基本教学内容，第6~第10章可根据学时多少选择讲解或介绍；第6~第10章的深入讲解及最后两章可作为研究生基本教学内容。本书主要为“过程装备与控制工程”专业教材，也可供高等学校化工、轻工、机械、能源及相关专业作为教材或教学参考书选用，并可供相关专业科研和工程技术人员参考。

本书由黄卫星教授、陈文梅教授主编，潘永密教授主审，董其伍教授审定。其中第1~第3章、第11章由肖泽仪教授编写，第7~第10章由李建明教授编写。黄卫星教授编写第4~第6章及第12章，并负责全书统稿。编者特此感谢四川大学教务处对本书编写工作的大力支持。

敬请国内同行专家与读者对本书缺点和错误批评指正。

编者

2001年3月

第2版前言

本书系普通高等教育“十一五”国家级规划教材，在“过程装备与控制工程”专业核心课程教材《工程流体力学》（第1版）基础上修订成稿。全书分为12章，包括：

- | | |
|------------------|------------------|
| 1. 流体的力学性质 | 7. 理想不可压缩流体的平面运动 |
| 2. 流体流动的基本概念 | 8. 流体力学实验研究方法 |
| 3. 流体静力学 | 9. 管内流体流动 |
| 4. 流体流动的守恒原理 | 10. 流体绕物流动 |
| 5. 不可压缩流体的一维层流流动 | 11. 化工机械中的典型流动分析 |
| 6. 流体流动微分方程 | 12. 流体流动数值模拟 |

其中，除第2章由原来的“流体运动学基本概念”扩展为“流体流动的基本概念”外，全书章数和各章标题保持均与第1版一致；但对各章内容均作了不同程度的删减和增补，各章内容的编排也作了不同程度的调整，其主要变化体现在以下三个方面。

1. 按知识的逻辑与层次关系编排教材内容，以便于课程的教学和知识的掌握。本书此次修订中，全书章节及各章内容的编排总体以“基本概念+理论与方法+实际应用”的路线为原则，而各章中具体每一节的编排又以同属性知识点按层次相对集中为原则，通过对第1版教材的审读和教学实践总结，对各章内容的编排作了不同程度的调整。兹举例说明如下。

比如，关于全书层面上的基本概念问题，第1版是以“流体的力学性质”和“运动学基本概念”两章来体现的，这也是传统工程流体力学教材常用的编排方式；但从工程流体力学的主要章节知识和工程实际应用的角度看，动力学无疑是核心内容，像流动的起因（推动力）、流动的基本形态（层流与湍流）、流场边界的影响（流动阻力与阻力系数）这些贯穿于动力学各章的基本概念，显然属于全书层面上的基本概念，放在其他知识章节逻辑上都是不平行的。为此，本次修订中，在完善运动学基本概念的同时，将动力学有关基本概念也一并纳入第2章，将该章扩展为“流体流动的基本概念”，从而与第1章一起，构成后续各章共同的基础平台。

又比如，关于具体各章的内容编排，本次修订中重点针对概念的提出与基本理论阐述相互穿插（想到哪儿说到哪儿），导致基本概念定义模糊、章节内容层次不清的问题，以及基本理论落脚到实际应用相对薄弱的问题，对相关各章的内容编排进行了较大的调整，将各章专属通用概念集中系统阐述，并增补实际问题分析作为理论与方法的落脚点，从而使各章内容展现出“基本概念+理论与方法+实际应用”的明确路线。其次，本次修订中对于各章节某一具体知识点的阐述也尽量将与之相联系的概念集中分层阐述，以达提纲挈领之效。例如，对于第1章中流体黏滞性的阐述，通常主要集中于牛顿剪切定律和黏性系数的描述，而本次修订中则从流体黏滞性的现象、本质、数学描述、黏性系数变化行为、黏滞性概念的引申与应用等方面，将其简要归纳为内摩擦力、分子动量扩散、牛顿剪切定律、动力黏度及其温度变化行为和经验关联式、运动黏度、流体流动的无滑移固壁边界条件、理想流体概念共7个要点加以分层论述，这显然更有助于基本概念的系统掌握；本次修订中对细节内容的类似整合见诸于不少章节，此处不再赘述。

2. 加强基本理论与方法的应用分析，促进学生理论联系实际能力的培养。工程流体力学区别于理论流体力学在于它侧重工程实际应用；工程流体力学作为过程装备与控制工程专业

的核心课程，目的也是使学生掌握流体力学的基本原理与分析方法，以解决生产实际中和过程装备设计开发中相关的流体流动问题。为此，本次修订中增补了相当篇幅的内容以落实和加强基本理论和方法的实际应用。比如，第3章中增补的静压测试原理和物体表面受力分析，第4章中增补的运动流体的能量以及守恒方程综合应用分析专节，第8章中增补的模型研究应用举例，第9章中增补的圆管流动阻力损失专节等。

3. 与第1版相比，本次修订在完善更新原有例题习题基础上，新增例题34例，新增习题54题，新增插图100余幅。其中，新增例题主要集中于基本教学内容第1~第5章，以及第1版中例题较少的第7~第10章；新增习题和新增插图主要集中于基本教学内容第1~第5章；新增例题习题的选编均针对相应各章主要知识点和基本概念设计，而且对各章所有习题都进行了仔细验算，并在书末给出了习题答案及解题要点提示。

编者希望修订工作中所做出的上述努力，能有助于本书整体质量的提高，有利于课程的教学和知识的掌握。使之在作为“过程装备与控制工程”及相关专业“工程流体力学”课程教材的同时，亦对化工机械及相关专业的科研和工程技术人员有实际参考价值。

本书课程教学内容定位与第1版一致，基本内容定位于工程专业本科，但亦有扩展以兼顾研究生教学需要。其中，我们对课程教学内容安排的建议是：(1) 对于本科生，第1章~第5章是基本教学内容，其中第3章和第4章是重点，第6章~第10章可供本科多学时课程选择讲授；(2) 对于研究生，第6章至第10章是基本教学内容，第11章和第12章供选择讲授。任课教师可根据本校专业学科或研究方向特色补充扩展相关教学内容。

本书修订工作由黄卫星教授负责并主要执笔，李建明教授、肖泽仪教授参与共同完成。修订工作中，李海龙、朱丽、岳莲、苏丹等研究生同学协助完成了插图绘制、习题编辑与演算和文稿校对，四川大学教务处对本书编写工作给予了大力支持，在此一并感谢。

在本书第2版即将出版之际，编者衷心感谢兄弟院校的教授、老师们对本教材的选用、褒奖以及在教学实践中对本教材提出的宝贵意见，并希望对本书缺点和错误继续批评指正。

编者

2008年10月

目 录

第 1 章 流体的力学性质	1
1.1 流体的连续介质模型	1
1.1.1 流体质点的概念	1
1.1.2 流体连续介质模型	2
1.2 流体的力学特性	2
1.2.1 流动性	3
1.2.2 可压缩性	3
1.2.3 黏滞性	4
1.2.4 表面张力特性	8
1.3 牛顿流体和非牛顿流体	12
1.3.1 牛顿流体与非牛顿流体	12
1.3.2 非牛顿流体及其黏度特性	12
习题	13
第 2 章 流体流动的基本概念	17
2.1 流场及流动分类	17
2.1.1 流场的概念	17
2.1.2 流动分类	17
2.2 描述流体运动的两种方法	19
2.2.1 拉格朗日法	19
2.2.2 欧拉法	20
2.2.3 两种方法的关系	20
2.2.4 质点导数	21
2.3 迹线和流线	24
2.3.1 迹线	24
2.3.2 流线	24
2.3.3 流管与管流连续性方程	26
2.4 流体的运动与变形	27
2.4.1 微元流体线的变形速率	27
2.4.2 微元流体团的变形速率	29
2.4.3 有旋流动与无旋流动	30
2.5 流体的流动与阻力	32
2.5.1 流体流动的推动力	32
2.5.2 层流与湍流	32
2.5.3 固壁边界对流动的影响	34
2.5.4 流动阻力与阻力系数	36
习题	39

第3章 流体静力学	42
3.1 作用在流体上的力	42
3.1.1 质量力	42
3.1.2 表面力——应力与压力	43
3.1.3 静止流场中的表面力	43
3.1.4 压力的表示方法及单位	44
3.2 流体静力学基本方程	45
3.2.1 流体静力平衡方程	45
3.2.2 静止流场的压力微分方程	46
3.3 重力场液体静力学	47
3.3.1 重力场中静止液体的压力分布	48
3.3.2 U形管测压原理	48
3.3.3 静止液体中固体壁面的受力	50
3.3.4 静止液体中物体的浮力与浮力矩	55
3.4 非惯性坐标系液体静力学	57
3.4.1 重力场非惯性坐标系中的质量力	57
3.4.2 直线匀加速运动中的静止液体	58
3.4.3 匀速旋转容器中的静止液体	59
3.4.4 高速回转圆筒内液体的压力分布	62
习题	63
第4章 流体流动的守恒原理	68
4.1 概述	68
4.1.1 系统与控制体	68
4.1.2 守恒定律与输运公式	69
4.2 质量守恒方程	70
4.2.1 控制面上的质量流量	70
4.2.2 控制体质量守恒方程	71
4.2.3 多组分系统的质量守恒方程	73
4.3 动量守恒方程	75
4.3.1 控制体动量守恒方程	75
4.3.2 以平均速度表示的动量方程	76
4.4 动量矩守恒方程	80
4.4.1 控制体动量矩守恒方程	80
4.4.2 稳态平面系统的动量矩方程	81
4.5 能量守恒方程	85
4.5.1 运动流体的能量	85
4.5.2 控制体能量守恒方程	88
4.5.3 化工流动系统的能量方程	90
4.5.4 机械能守恒方程——伯努利方程	93
4.6 守恒方程综合应用分析	98
4.6.1 小孔流动问题	98
4.6.2 管流中的液体汽化问题	101

4.6.3 驻点压力与皮托管测速	102
4.6.4 管道局部阻力问题	104
习题	108
第5章 不可压缩流体的一维层流流动	117
5.1 概述	117
5.1.1 建立流动微分方程的基本方法	117
5.1.2 不可压缩一维稳态层流及其特点	118
5.1.3 常见边界条件	120
5.2 狭缝流动分析	120
5.2.1 平壁层流的微分方程	121
5.2.2 典型狭缝流动问题分析	123
5.3 管内流动分析	126
5.3.1 管状层流的微分方程	126
5.3.2 圆管及圆形套管内的层流流动	128
5.4 降膜流动分析	132
5.4.1 倾斜平壁上充分发展的降膜流动	132
5.4.2 竖直圆管外壁的降膜流动	134
5.4.3 变厚度降膜流动问题分析	135
习题	137
第6章 流体流动微分方程	141
6.1 连续性方程	141
6.1.1 直角坐标系中的连续性方程	141
6.1.2 柱坐标和球坐标系中的连续性方程	142
6.2 以应力表示的运动方程	143
6.2.1 作用于微元体上的力	143
6.2.2 动量流量及动量变化率	145
6.2.3 以应力表示的运动方程	146
6.3 黏性流体运动微分方程	147
6.3.1 牛顿流体的本构方程	147
6.3.2 流体运动微分方程——Navier-Stokes 方程	149
6.3.3 柱坐标和球坐标系中的 N-S 方程	151
6.4 流体流动微分方程的应用	153
6.4.1 N-S 方程应用概述	153
6.4.2 N-S 方程应用举例	153
习题	160
第7章 理想不可压缩流体的平面运动	163
7.1 流体平面运动的速度分解	163
7.2 有旋流场与无旋流场	164
7.2.1 速度环量与线流量	164
7.2.2 有旋流场的运动学特性	165
7.2.3 无旋流场的运动学特性	167
7.3 不可压缩平面流动的流函数	168

7.4 理想不可压缩平面势流及分析方法	170
7.4.1 不可压缩平面势流基本特性	170
7.4.2 拉普拉斯方程和全微分方程	172
7.4.3 理想不可压缩平面势流的伯努利方程	173
7.5 理想不可压缩平面势流典型问题	173
7.5.1 平行直线等速流动	174
7.5.2 点源与点汇流动	174
7.5.3 点涡流动	175
7.5.4 角形区域内的流动	176
7.5.5 复合流动	177
7.5.6 理想流体绕固定圆柱体的流动	180
7.5.7 理想流体绕转动圆柱体的流动	182
习题	184
思考题	185
第8章 流体流动模型实验方法	186
8.1 流动相似原理	186
8.1.1 几何相似	186
8.1.2 运动相似	187
8.1.3 动力相似	187
8.2 相似准则及其分析方法	187
8.2.1 微分方程分析法——N-S方程的相似分析	188
8.2.2 相似数的物理意义及典型应用条件	189
8.2.3 相似准则在模型实验中的应用	191
8.2.4 量纲分析法	194
8.3 模型实验	198
8.3.1 模型实验设计	199
8.3.2 模型实验设计应用举例	199
8.3.3 实验数据的整理及应用说明	206
习题	207
思考题	209
第9章 不可压缩流体管内流动	210
9.1 层流与湍流	210
9.1.1 雷诺实验	210
9.1.2 圆管内充分发展的层流流动	211
9.1.3 湍流及其基本特性	212
9.1.4 湍流理论简介	213
9.2 湍流的半经验理论	214
9.2.1 雷诺方程	214
9.2.2 湍流假说——普朗特混合长度理论	216
9.2.3 通用速度分布——壁面律	217
9.3 圆管内充分发展的湍流流动	219
9.3.1 光滑管内的湍流速度分布与切应力	219

9.3.2 粗糙管内的湍流速度分布	220
9.4 圆管内流动的阻力损失	221
9.4.1 圆管阻力损失与阻力系数定义	221
9.4.2 光滑圆管的阻力系数	222
9.4.3 粗糙圆管的阻力系数	223
9.4.4 局部阻力系数	226
9.5 圆管进口段流动分析	229
9.5.1 进口段流动状态与进口段长度	229
9.5.2 进口段阻力	230
9.6 非圆形截面管内的流体流动	230
9.7 弯曲管道内的流体流动	233
9.7.1 弯曲管道内的流动特点	233
9.7.2 弯曲管道的阻力系数	234
习题	235
思考题	236
第10章 流体绕物流动	238
10.1 边界层基本概念	238
10.1.1 边界层理论	238
10.1.2 边界层的厚度与流态	238
10.1.3 平壁表面摩擦阻力与摩擦阻力系数	240
10.2 平壁边界层流动	241
10.2.1 普朗特边界层方程	241
10.2.2 平壁层流边界层的精确解	242
10.2.3 冯·卡门边界层动量积分方程	245
10.2.4 平壁层流边界层的近似解	246
10.2.5 平壁湍流边界层的近似解	248
10.3 边界层分离及绕流总阻力	252
10.3.1 边界层分离现象	252
10.3.2 绕流总阻力	253
10.4 绕圆柱体的流动分析	255
10.4.1 绕圆柱体的流动	256
10.4.2 圆柱绕流总阻力	257
10.5 绕球体的流动分析	258
10.5.1 绕球体的流动	258
10.5.2 球体绕流总阻力	258
10.5.3 颗粒的沉降速度	259
习题	261
思考题	262
第11章 可压缩流动基础与管内流动	263
11.1 可压缩流动基本过程与方程	263
11.1.1 热力学基本过程	263