



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

工程流体力学

ENGINEERING FLUID MECHANICS

第二版

黄卫星 李建明 肖泽仪 编



化学工业出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

工程流体力学

第二版

黄卫星 李建明 肖泽仪 编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书系国家级十一五规划教材,在《工程流体力学》第一版(过程装备专业核心课教材)基础上修订成稿。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、流体力学实验研究方法、管内流体流动、流体绕物流动、化工机械中的典型流动分析、流体流动数值模拟。

本书吸取传统工程流体力学与化工传递过程教材的特点,将流体力学与过程设备内的流动问题紧密结合,内容编排层次清楚,概念阐述直观明确,例题丰富分析详尽;书中选编习题均针对各章主要知识点和基本概念设计,并附有详尽答案及解题要点提示,以有利于课程教学和课程内容的理解与掌握。

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,在作为“过程装备与控制工程”专业教材的同时,可供高校化工、轻工、机械、能源及相关专业作为教材或教学参考书选用,对化工机械及相关专业的科研和工程技术人员亦有实际参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

工程流体力学/黄卫星编著. —2版. —北京:化学工业出版社, 2008.12

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-122-03940-8

I. 工… II. 黄… 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(2008)第165696号

责任编辑:程树珍 金玉连

文字编辑:项 激

责任校对:吴 静

装帧设计:杨 北

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:北京市兴顺印刷厂

787mm×1092mm 1/16 印张19¼ 字数502千字 2009年3月北京第2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:30.00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 王良恩 王淑兰 王 毅 叶德潜 刘敏珊

闫康平 毕明树 李 云 李建明 李德昌 张早校

吴旨玉 陈文梅 陈志平 肖泽仪 林兴华 卓 震

胡 涛 郑津洋 姜培正 桑芝富 钱才富 徐思浩

黄卫星 黄有发 董其伍 廖景娱 魏新利 魏进家

主审人员（按姓氏笔画排列）：

丁信伟 施 仁 郁永章 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

第二版前言

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》（第一版）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，全章章数和各章标题保持均与第一版一致；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”的线路为原则；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，通过对第一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，第一版是以“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，等等。

3. 与第一版相比，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4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至第5章，以及第一版中例题较少的第7至第10章；新增习题和新增插图主要集中于基本教学内容第1至第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一版一致，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章至第5章是基本教学内容，其中第3章和第4章是重点；第6章至第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。

在本书第二版即将出版之际，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

第一版序

按照国际标准化组织的认定 (ISO/DIS 9000: 2000), 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) 和服务型产品 (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) 二者的统称为过程装备。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 and 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 and 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课时数, 以加强学生自学、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 教授

丁信伟

2001年3月于大连

第一版前言

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、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、4、5、6、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、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、10、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，分别介绍叶轮机械、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。对于本科学生，第1~5章可作为基本教学内容，第6~10章可根据学时多少选择讲解或介绍；第6~10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1~3章、第11章由肖泽仪教授编写，第7~10章由李建明教授编写。黄卫星教授编写第4~6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

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	2
1.2.2 可压缩性	2
1.2.3 黏滞性	3
1.2.4 表面张力特性	6
1.3 牛顿流体和非牛顿流体	10
1.3.1 牛顿流体与非牛顿流体	10
1.3.2 非牛顿流体及其黏度特性	10
习题	11
第 2 章 流体流动的基本概念	14
2.1 流场及流动分类	14
2.1.1 流场的概念	14
2.1.2 流动分类	14
2.2 描述流体运动的两种方法	16
2.2.1 拉格朗日法	16
2.2.2 欧拉法	17
2.2.3 两种方法的关系	17
2.2.4 质点导数	18
2.3 迹线和流线	21
2.3.1 迹线	21
2.3.2 流线	21
2.3.3 流管与管流连续性方程	23
2.4 流体的运动与变形	24
2.4.1 微元流体线的变形速率	24
2.4.2 微元流体团的变形速率	26
2.4.3 涡量与有旋流动	27
2.4.4 无旋流动——势流	28
2.5 流体的流动与阻力	29
2.5.1 流体流动的推动力	30
2.5.2 层流与湍流	30
2.5.3 流场边界的对流动的影响	32
2.5.4 流动阻力与阻力系数	33
习题	35

第3章 流体静力学	38
3.1 作用在流体上的力	38
3.1.1 质量力	38
3.1.2 表面力——应力与压力	39
3.1.3 静止流场中的表面力	39
3.1.4 压力的表示方法及单位	40
3.2 流体静力学基本方程	41
3.2.1 流体静力学基本方程	41
3.2.2 静止流场基本特性	41
3.3 重力场中的静止液体	43
3.3.1 重力场中静止流体的压力分布	43
3.3.2 U形管测压原理	44
3.3.3 静止液体中固体壁面的受力	46
3.3.4 静止液体中物体的浮力与浮力矩	51
3.4 非惯性坐标系中的静止液体	53
3.4.1 非惯性坐标系中的质量力	53
3.4.2 直线匀加速运动中的静止液体	53
3.4.3 匀速旋转容器中的静止液体	54
3.4.4 高速回转圆筒内流体的压力分布	56
习题	57
第4章 流体流动的守恒原理	62
4.1 概述	62
4.1.1 系统与控制体	62
4.1.2 输运公式	63
4.2 质量守恒方程	64
4.2.1 控制面上的质量流量	64
4.2.2 控制体质量守恒方程	65
4.2.3 多组分系统的质量守恒方程	67
4.3 动量守恒方程	69
4.3.1 控制体动量守恒方程	69
4.3.2 动量守恒方程的简化形式	71
4.4 动量矩守恒方程	75
4.4.1 动量矩定律	75
4.4.2 控制体动量矩守恒方程	75
4.5 能量守恒方程	79
4.5.1 运动流体的能量	79
4.5.2 控制体能量守恒方程	82
4.5.3 化工流动系统的能量方程	84
4.5.4 伯努利方程及其应用说明	87
4.6 守恒方程综合应用分析	92
4.6.1 小孔流动问题	92
4.6.2 管流中的液体汽化问题	94
4.6.3 驻点压力与皮托管	95
4.6.4 管道局部阻力损失分析	97

习题	101
第 5 章 不可压缩流体的一维层流流动	108
5.1 概述	108
5.1.1 建立流动微分方程的基本方法	108
5.1.2 常见边界条件	109
5.1.3 流动条件说明	109
5.2 狭缝流动分析	109
5.2.1 狭缝流动的微分方程	110
5.2.2 狭缝流动的切应力与速度分布	112
5.2.3 水平狭缝压差流的流动阻力	112
5.3 管内流动分析	114
5.3.1 圆管内的层流流动	114
5.3.2 圆形套管内的层流流动	118
5.4 降膜流动分析	120
5.4.1 倾斜平板上的降膜流动	120
5.4.2 竖直圆管外壁的降膜流动	122
习题	124
第 6 章 流体流动微分方程	127
6.1 连续性方程	127
6.1.1 直角坐标系中的连续性方程	127
6.1.2 柱坐标和球坐标系中的连续性方程	129
6.2 以应力表示的运动方程	130
6.2.1 作用于微元体上的力	130
6.2.2 动量流量及动量变化率	132
6.2.3 以应力表示的运动方程	133
6.3 黏性流体运动微分方程	134
6.3.1 牛顿流体的本构方程	134
6.3.2 流体运动微分方程——Navier-Stokes 方程	136
6.3.3 柱坐标和球坐标系中的 N-S 方程	138
6.4 流体流动微分方程的应用	140
6.4.1 N-S 方程应用概述	140
6.4.2 N-S 方程应用举例	140
习题	146
第 7 章 不可压缩理想流体的平面运动	149
7.1 流体微团的运动	149
7.1.1 流体微团平面运动的分解	149
7.1.2 有旋流动与无旋流动	150
7.1.3 线流量与速度环量	151
7.2 速度势函数与流函数	152
7.2.1 速度势函数、势流	152
7.2.2 流函数及其性质	152
7.2.3 速度势函数与流函数的关系	154
7.3 不可压缩理想流体平面流动的基本方程	155
7.3.1 连续性方程与运动微分方程	155

7.3.2	不可压缩平面势流的基本方程——拉普拉斯方程	156
7.3.3	速度势函数与流函数的全微分方程	156
7.4	简单有势流动及其组合流动	157
7.4.1	平行直线等速流	157
7.4.2	角形区域内的流动	158
7.4.3	点源与点汇	158
7.4.4	点涡	159
7.4.5	复合流动	159
7.4.6	理想流体绕固定圆柱体的流动	162
7.4.7	理想流体绕转动圆柱体的流动	164
	习题	166
	思考题	166
第8章	流体力学的实验研究方法	167
8.1	流动相似原理	167
8.1.1	几何相似	167
8.1.2	运动相似	168
8.1.3	动力相似	168
8.2	相似准则及其分析方法	168
8.2.1	微分方程分析法	169
8.2.2	量纲分析法	173
8.3	工程模型研究	176
8.3.1	模型与原型的相似	176
8.3.2	参数测试及实验结果整理	177
8.3.3	模型研究应用举例	178
8.4	流场测试技术	181
8.4.1	速度场的测量	181
8.4.2	压力场的测量	185
	习题	185
	思考题	186
第9章	管内流体流动	187
9.1	层流与湍流	187
9.1.1	雷诺实验	187
9.1.2	圆管内充分发展的层流流动	188
9.1.3	湍流及其基本特性	189
9.1.4	湍流理论简介	190
9.2	湍流的半经验理论	191
9.2.1	雷诺方程	191
9.2.2	湍流假说——普朗特混合长度理论	192
9.2.3	通用速度分布——壁面律	194
9.3	圆管内充分发展的湍流流动	196
9.3.1	光滑管内的湍流速度与切应力	196
9.3.2	粗糙管内的湍流速度分布	197
9.4	圆管内流动的阻力损失	198
9.4.1	圆管阻力损失与阻力系数定义	198

9.4.2	光滑圆管的阻力系数	199
9.4.3	粗糙圆管的阻力系数	200
9.4.4	局部阻力系数	203
9.5	圆管进口段流动分析	206
9.5.1	进口段流动状态与进口段长度	206
9.5.2	进口段阻力	206
9.6	非圆形截面管内的流体流动	207
9.7	弯曲管道内的流体流动	208
	习题	209
	思考题	209
第 10 章	流体绕物流动	210
10.1	边界层基本概念	210
10.1.1	边界层理论	210
10.1.2	边界层的厚度与流态	210
10.1.3	平壁表面摩擦阻力与摩擦阻力系数	212
10.2	平壁边界层流动	213
10.2.1	普朗特边界层方程	213
10.2.2	平壁层流边界层的精确解	214
10.2.3	冯·卡门边界层动量积分方程	216
10.2.4	平壁层流边界层的近似解	218
10.2.5	平壁湍流边界层的近似解	220
10.3	边界层分离及绕流总阻力	223
10.3.1	边界层分离现象	223
10.3.2	绕流总阻力	224
10.4	绕圆柱体的流动分析	226
10.4.1	绕圆柱体的流动	227
10.4.2	圆柱绕流总阻力	228
10.5	绕球体的流动分析	229
10.5.1	绕球体的流动	229
10.5.2	球体绕流总阻力	229
10.5.3	颗粒的沉降速度	230
	习题	232
	思考题	233
第 11 章	化工机械中的典型流动分析	234
11.1	叶轮机械中的流体流动	234
11.1.1	叶轮机械工作原理	234
11.1.2	轴流式叶轮机械中的流体流动	236
11.1.3	径流式叶轮机械中的流体流动	237
11.2	旋流器中的流体流动	239
11.2.1	概述	239
11.2.2	旋流器中的流体流动	240
11.2.3	旋流器中的压力分布	241
11.3	通过滤饼层的流体流动	242
11.3.1	达西公式及其修正	242

11.3.2	不可压缩滤饼和可压缩滤饼	244
11.3.3	过滤基本方程的积分	245
11.3.4	离心过滤	247
11.4	沉降离心机中的流体流动	248
11.4.1	转鼓内的流体流动形式	249
11.4.2	颗粒的运动	250
	思考题	250
	本章符号说明	251
第 12 章	流体流动的数值模拟	252
12.1	概述	252
12.1.1	研究流体流动的三种基本方法	252
12.1.2	数值模拟基本方法与过程	253
12.2	模型方程的建立	254
12.2.1	化工设备中的流动分析与简化	254
12.2.2	模型方程及其规范化	255
12.2.3	求解 N-S 方程的原始变量法和涡量-流函数法	257
12.2.4	以涡量-流函数表示的模型方程	257
12.2.5	涡量-流函数模型方程的边界条件	258
12.3	流动区域及模型方程的离散	259
12.3.1	流动区域的离散	259
12.3.2	基本差分公式	261
12.3.3	模型方程与边界条件的离散	263
12.4	代数方程的求解方法	265
12.4.1	迭代法基本公式及收敛判别	265
12.4.2	加速迭代收敛的基本方法和思想	267
12.5	模型方程计算程序及结果讨论	269
12.5.1	计算程序及过程说明	269
12.5.2	计算结果讨论	271
	思考题	273
	本章符号说明	274
附录 A	矢量与场论的基本定义和公式	275
附录 B	流体力学常见物理量量纲、单位换算及特征数	279
附录 C	流体的物性参数	281
附录 D	习题参考答案	284
	参考文献	292

第 1 章 流体的力学性质

根据现代的科学观点, 物质可区分为五种状态: 固态、液态、气态、等离子态和凝聚态, 其中, 固、液、气三态是自然界和工程技术领域中常见的。从力学的角度看, 固态物质与液态和气态物质有很大的不同: 固体具有确定的形状, 在确定的切应力作用下将产生确定的变形, 而液体或气体则没有固定的形状, 且在切应力作用下将产生连续不断的变形——流动, 因而液体和气体又通称为流体。应用物理学基本原理研究流体受力及其运动规律的学科称为流体力学。流体力学作为宏观力学的重要分支, 与固体力学一样同属于连续介质力学的范畴。

本章将首先阐述流体连续介质模型, 在此基础上讨论流体的力学特性。

1.1 流体的连续介质模型

1.1.1 流体质点的概念

流体是由分子构成的, 根据热力学理论, 这些分子(无论液体或气体)在不断地随机运动和相互碰撞着。因此, 到分子水平这一层, 流体之间总是存在着间隙, 其质量在空间的分布是不连续的, 其运动在时间和空间上都是不连续的。但是, 在流体力学及与之相关的科学领域中, 人们感兴趣的往往不是个别分子的运动, 而是大量分子的统计平均特性, 如密度、压力和温度等, 而且, 为了准确地描述这些统计特性的空间分布, 需要在微分即“质点”的尺度上讨论问题, 为此, 必须首先建立流体质点的概念。

建立流体质点的概念可借助于物质物理量的分子统计平均方法。以密度为例, 在流体中任取体积为 ΔV 的微元, 其质量为 Δm , 则其平均密度可表示为:

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

显然, 为了描述流体在“质点”尺度上的平均密度, ΔV 应该取得尽量小, 但另一方面, ΔV 的最小值又必须有一定限度, 超过这一限度, 分子的随机进出将显著影响微元体的质量, 使密度成为不确定的随机值。因此, 两者兼顾, 采用使平均密度为确定值(与分子随机进出无关)的最小微元 ΔV_l 作为质点尺度的度量, 并将该微元定义为流体质点, 其平均密度就定义为流体质点的密度:

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow \Delta V_l} \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (1-2)$$

推广到一般, 流体质点就是使流体统计特性为确定值(与分子随机进出无关)的最小微元 ΔV_l , 而流体质点的密度、压力和温度等均是指 ΔV_l 内的分子统计平均值。

举例来说, 在一般关于流体运动的工程和科学问题中, 将描述流体运动的空间尺度细分到 0.01mm 的数量级已足够精确。在三维空间, 该尺度相当于 10^{-6}mm^3 , 如果令 $\Delta V_l = 10^{-6}\text{mm}^3$, 则在标准大气条件下, ΔV_l 中的空气分子数就有 2.69×10^{10} 个之多, 足以使其统计平均特性与个别分子的运动无关; 但另一方面, 与一般工程问题的特征几何尺度相比,