

时代教育 · 国外高校优秀教材精选

Mc  
Graw  
Hill  
Education


**Fluid Mechanics  
Fundamentals  
and  
Applications,  
Second Edition**

**流体力学基础及其  
工程应用**

英文版 · 原书第2版

[美] Yunus A. Cengel 编著  
John M. Cimbala



 **机械工业出版社**  
CHINA MACHINE PRESS

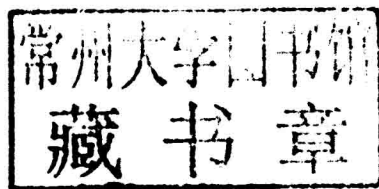
附赠光盘

时代教育·国外高校优秀教材精选

# 流体力学基础及其工程应用

英文版·原书第2版

(美) Y. Cengel 编著  
J. Cimbala



机械工业出版社

本书涵盖了流体力学的基本原理和方程,列举了大量真实世界中的各种工程实例,通过强调物理背景,提供精彩的图片和可视化辅助手段,让学生对流体力学有一个直观的理解并认识到流体力学是如何应用于工程实践的。全书共15章,包括引言与基本概念,流体的性质,压强与流体静力学,流体运动学,质量、伯努利与能量方程,流动系统的动量分析,量纲分析与模型化,内流,流体流动的微分分析,纳维-斯托克斯方程的近似解,外流,可压缩流动,明渠流动,涡轮机械,及计算流体力学导论。

本书后附有DVD光盘,内容包括录像、CFD动画库和EES软件等丰富资源。

本书可作为高等工科院校相关专业的流体力学教材,也可供相关专业科研和工程技术人员参考。

YUNUS A. CENGEL, JOHN M. CIMBALA

FLUID MECHANICS; FUNDAMENTALS AND APPLICATIONS, SECOND EDITION IN SI UNITS

ISBN: 9780077295462

Copyright © 2010 by McGraw-Hill Education, Inc.

All Rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including without limitation photocopying, recording, taping, or any database, information or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

This authorized English reprint edition is jointly published by McGraw-Hill Education (Asia) and China Machine Press. This edition is authorized for sale in the People's Republic of China only, excluding Hong Kong, Macao SAR and Taiwan.

Copyright © 2013 by The McGraw-Hill Asia Holdings (Singapore) PTE. LTD and China Machine Press.

版权所有。未经出版人事先书面许可,对本出版物的任何部分不得以任何方式或途径复制或传播,包括但不限于复印、录制、录音,或通过任何数据库、信息或可检索的系统。

本授权英文影印版由麦格劳-希尔(亚洲)教育出版公司和机械工业出版社合作出版,此版本经授权仅限在中华人民共和国境内(不包括香港特别行政区、澳门特别行政区和台湾)销售。

版权©2013由麦格劳-希尔(亚洲)教育出版公司和机械工业出版社所有。

本书封面贴有McGraw-Hill Education公司防伪标签,无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记号:01-2013-0738。

## 图书在版编目(CIP)数据

流体力学基础及其工程应用 = Fluid mechanics: fundamentals and applications: 第2版: 英文/(美)森哲尔, (美)辛巴拉编著. —北京:机械工业出版社, 2013.8

时代教育·国外高校优秀教材精选

ISBN 978-7-111-43507-5

I. ①流… II. ①森… ②辛… III. ①流体力学—高等学校—教材—英文 IV. ①O35

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第175594号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:姜凤 责任编辑:姜凤

版式设计:霍永明 封面设计:张静

责任印制:杨曦

保定市中华美凯印刷有限公司印刷

2013年11月第1版第1次印刷

200mm×254mm·63印张·800千字

标准书号:ISBN 978-7-111-43507-5

ISBN 978-7-89405-071-7(光盘)

定价:129.00元(含1DVD)

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

# 国外高校优秀教材审定委员会

主任委员：

杨叔子

委员（按姓氏笔画为序）：

王先逵	王大康	白峰杉	史荣昌	朱孝祿
陆启韶	张润琦	张策	张三慧	张福润
张延华	吴宗泽	吴麒	宋心琦	李俊峰
余远斌	陈文楷	陈立周	单辉祖	俞正光
赵汝嘉	郭可谦	翁海珊	龚光鲁	章栋恩
黄永畅	谭泽光			

# 出版说明

---

随着我国加入 WTO，国际间的竞争越来越激烈，而国际间的竞争实际上也就是人才的竞争、教育的竞争。为了加快培养具有国际竞争力的高水平技术人才，加快我国教育改革的步伐，国家教育部出台了一系列倡导高校开展双语教学、引进原版教材的政策。以此为契机，机械工业出版社推出了一系列国外影印版教材，其内容涉及高等学校公共基础课，以及机、电、信息领域的专业基础课和专业课。

引进国外优秀原版教材，在有条件的学校推动开展英语授课或双语教学，自然也引进了先进的教学思想和教学方法，这对提高我国自编教材的水平，加强学生的英语实际应用能力，使我国的高等教育尽快与国际接轨，必将起到积极的推动作用。

为了做好教材的引进工作，机械工业出版社特别成立了由著名专家组成的国外高校优秀教材审定委员会。这些专家对实施双语教学做了深入细致的调查研究，对引进原版教材提出许多建设性意见，并慎重地对每一本将要引进的原版教材一审再审，精选再精选，确认教材本身的质量水平，以及权威性和先进性，以期所引进的原版教材能适应我国学生的外语水平和学习特点。在引进工作中，审定委员会还结合我国高校教学课程体系的设置和要求，对原版教材的教学思想和方法的先进性、科学性严格把关，同时尽量考虑原版教材的系统性和经济性。

这套教材出版后，我们将根据各高校的双语教学计划，及时地将其推荐给各高校选用。希望高校师生在使用教材后及时反馈意见和建议，使我们更好地为教学改革服务。

**机械工业出版社**  
**高等教育分社**

# 作者简介<sup>⊖</sup>

---

## 尤努斯·A. 森哲尔 (Yunus A. Cengel)

美国内华达大学机械工程荣誉退休教授。他在土耳其伊斯坦布尔技术大学获得机械工程学士学位，在北卡罗莱纳州立大学机械工程系获得硕士和博士学位。他的研究领域是可再生能源、脱盐、可用性分析、传热强化、辐射热传递和能量储存等。1996-2000年，他担任内华达大学工业评估中心主任，带领学生到北内华达和加利福尼亚的一些生产厂家做工业评估，筹划能量储备，降低消耗，为他们提供提高生产力的报告。

森哲尔博士是被广泛使用的教科书 *Thermodynamics: An Engineering Approach* (《热力学：工程研究方法》第6版，2008)的作者之一，该书由麦格劳-希尔公司出版。他还是该出版社出版的另两本教科书：*Heat Transfer: A Practical Approach* (《热传输：实用研究方法》第3版，2007)的作者，以及 *Fundamentals of Thermal-Fluid Sciences* (《热流体科学基础》第3版，2008)的作者之一。他的部分教科书已被翻译成中文、日文、韩文、西班牙文、土耳其文、意大利文和希腊文。

森哲尔博士获得了多个优秀教师奖，他还于1992年和2000年两次获得美国工程教育学会 (ASEE) 为优秀原创作者设立的 Meriam/Wiley 卓越作者奖。

森哲尔博士是内华达州的注册教授级工程师，也是美国机械工程师学会 (ASME) 和美国工程教育学会的会员。

## 约翰·M. 辛巴拉 (John M. Cimbala)

美国宾夕法尼亚州立大学机械工程教授。他在宾夕法尼亚州立大学获得航空航天工程学士学位，在加利福尼亚理工学院获得航空硕士学位，1984年在加利福尼亚理工学院获得航空博士学位，师从 Anatol Roshko 教授 (辛巴拉永远感激他)。他的研究领域包括实验与计算流体力学、热传输、湍流、湍流建模、室内空气质量和空气污染控制等。1993-1994年，他利用大学学术休假期间到美国宇航局 (NASA) 兰利研究中心从事计算流体力学和湍流建模研究工作。

辛巴拉博士是三本教科书的作者之一：*Indoor Air Quality Engineering: Environmental Health and Control of Indoor Pollutants* (《室内空气质量工程：健康与室内污染控制》，2003)，该书由 Marcel-Dekker 公司出版；*Essentials of Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications* (《流体力学要素：基础与应用》，2008) 和 *Fundamentals of Thermal-Fluid Sciences* (《热流体科学基础》第3版，2008)，这两本书均由麦格劳-希尔公司出版。他还与别人共同编著了其他一些书，他也是数十篇期刊和会议论文的作者或共同作者。从 [www.mne.psu.edu/cimbala](http://www.mne.psu.edu/cimbala) 网站上可查到他更多的信息。

辛巴拉教授获得多个优秀教学奖，本书就是他热爱教学的一个见证。他是美国航空航天学会 (AIAA)、美国机械工程师学会、美国工程教育学会和美国物理学会 (APS) 的会员。

---

⊖ “作者简介”、“前言”、“目录”由上海交通大学丁祖荣教授翻译。

# 前 言

---

## 一、背景情况

流体力学是一门涉及从微观生物系统到汽车、飞机和宇宙飞船推进等广泛领域，具有无限实际应用价值的令人激动和着迷的学科。它历来是对本科生最具有挑战性的科目。与在一、二年级的物理、化学和工程力学等课程中，学生通常学习一些算式，然后用计算器进行简单计算不同，对流体力学习题的求解远不限于此。学生必需先对习题作分析，作出适当的假设或近似，然后运用相关的物理定律建立控制方程并求解，最后才是代入数据进行计算。在解决流体力学问题中仅懂得一些理论知识是不够的，还需要具有物理直觉和经验。本书的目的在于通过对概念的仔细诠释，并通过运用大量的实际例子、示意图、图片和照片，建立一座跨越理论知识和实际应用之间鸿沟的桥梁。

流体力学是一门成熟的学科，已经建立了基本的或近似的方程，这些方程可以从许多入门的教科书中找到。这些教材形式各异，取决于如何安排这些内容。一本易读的流体力学教科书应该是从简单到复杂循序渐进的，每一章都建立在前面章节的基础上。用这种方法可以有效地学习通常认为具有挑战性的问题。流体力学本质上是一门高度可视化的科目，学生可以通过视觉途径较快地领会内容。因此一本好的流体力学教科书应该提供高质量的图片和照片，用可视化方法帮助学生理解数学表达式的含义和物理意义。

## 二、目标

本书的目的是为三、四年级的工程类本科生提供一本适于学习第一门流体力学课程的教材，假设这些学生在数学、物理、工程力学和热力学方面已具备足够的基础。本书的目标是：

- (1) 涵盖流体力学的基本原理和方程。
- (2) 列举大量真实世界中的各种工程实例，让学生认识到流体力学是如何应用于工程实践的。
- (3) 通过强调物理背景，提供精彩的图片和可视化辅助手段，让学生对流体力学有一个直观的理解。

本书包含了大量素材，让教师在讲解某一主题时能灵活运用。例如，航空和航天工程专业的教师可能会强调势流、阻力和升力、可压缩流动、涡轮机械和 CFD 等；机械和土木工程的教师可能选择管流、明渠流等。本书内容覆盖了足够的宽度，同时可以满足这两门课的需要。

## 三、第 2 版新增内容

在整体布局和表达顺序方面与第 1 版没有明显改变，第 2 版在以下方面作了改进：每章均用精彩的照片作为开头，以刺激学生对本章的内容感兴趣；全书增加了一些新的照片，并用照片代替原来手画的图片，以反映真实生活中的实际应用；我们将描述声速的一节从第 12 章（可压缩流动）移至第 2 章（流体性质）；在第 6 章（流体系统的动量分析）中原来冠名为“无外力的流动”一节作了大幅修改，使其更为清晰；第 13 章（明渠流动）中的几部分在大卫·F·希尔（David F. Hill）教授的帮助下得到了加强，包括数值解举例和章末需要用数值解的几个新习题；在第 14 章（涡轮机械）中，我们将“气体和蒸气涡轮”一节从原来的末尾移至“涡轮机”中；在第 14 章中，我们还增加了“风力涡轮机”一节，对学生了

解今天的不稳定能源是适用的；最后在第 15 章（计算流体动力学引论）中，我们加强了讨论多面体网格的“网格生成”一节，它在今天比较流行。

在这一版中，我们在大部分章内增加了新的例题，还增加了 200 多道习题；对原有的许多习题进行了修订，使其更具通用性和实用性。最明显的改进是加强了 FlowLab CFD 练习。在第 1 版第 15 章中，原有 46 道 FlowLab CFD 习题，本版在 Shane Moeykens、Ajay Parihar、Sujith Sukumaran 和 Ajey Walavalkar 的帮助下借助 ANSYS-FLUENT 增加了 78 道新题。新的 FlowLab 模板把更基础性的流体力学内容加到 CFD 中。因此，FlowLab 练习分布于全书各章，有利于教师尽早地把 CFD 介绍给学生。大多数新的 FlowLab 模板提供给学生把解析解、手算近似解与数值解进行比较的机会。例如，在学习第 2 章中两个同心旋转圆柱缝隙中的黏性流动时，学生可以同时求解章末几道具有相同几何条件的 FlowLab 习题；他们可以了解到随着缝隙间距的增加，速度线性分布的近似不再适用。到第 9 章将重新遇到这个问题。在第 9 章中他们学习用 N-S 方程求解任何缝隙间距的解析解，并再次把解析解与 CFD 数值解作比较。

#### 四、宗旨与目的

本书的宗旨与 *Thermodynamics: An Engineering Approach*（作者为 Y. A. Cengel 和 M. A. Boles）、*Heat Transfer: A Practical Approach*（作者为 Y. A. Cengel）和 *Fundamentals of Thermal-Fluid Sciences*（作者为 Y. A. Cengel、R. H. Turner 和 J. M. Cimbala）”（以上三本教科书均由麦格劳-希尔公司出版）的宗旨相同，即目的是提供一本工程类教科书：

- (1) 用一种简单而精确的方法直接与未来的工程师沟通；
- (2) 引导学生清楚地理解和坚实地掌握流体力学的基本原理；
- (3) 鼓励创造性思维，对流体力学形成深刻理解和直观感觉；
- (4) 让学生带着兴趣和热情而不是仅仅为解题去读这本书。

我们的宗旨是：实践是最好的学习方法。因此全书所做的特殊努力是对学过的内容（包括学过的章和本章学过的节）不断巩固。例如，有很多例题和章末的习题是理解型的，目的是让学生回顾过去章节学过的概念。

全书展现了一些由 CFD 生成的例子，并设立了“计算流体动力学（CFD）导论”一章。我们的目的不是为了教 CFD 的数值算法，这将由一门研究生课程去教授。我们的意图是对本科生介绍 CFD 作为一个工程工具它的适用性和局限性。我们利用 CFD 结果就像观看风洞里的实验结果一样，加强学生对流动现象的物理认识，提供一种流动可视化手段来解释流体的流动行为。全书有上百道 FlowLab CFD 习题分散在各章，教师有足够的机会向学生介绍 CFD 的基础知识。

#### 五、内容与安排

本书分为 15 章，从流体与流动的基本概念开始到末尾的“计算流体动力学导论”结束；即使对本科生，后者的应用也正成为很平常的事。

第 1 章介绍流体的基本概念，流动分类，控制体和系统表示法，量纲，单位，有效数字和解题技巧。

第 2 章介绍流体的性质，如密度、蒸气压、比热比、声速、黏度和表面张力。

第 3 章涉及流体静力学和压强，包括液体压力计和气压计，作用在淹没表面的静压力，浮力与稳定性，以刚体形式运动的流体。

第 4 章流体运动学。包括描述流动的拉格朗日法和欧拉法，流动类型，流动可视化，涡量和有旋性，雷诺输运理论。



第5章质量、动量和能量守恒定律。强调对质量守恒方程、伯努利方程和能量方程的正确使用，及这些方程的工程应用。

第6章将雷诺输运理论应用于线动量和角动量，强调有限控制体动量分析的实际工程应用。

第7章量纲齐次性概念，量纲分析的白金汉 $\Pi$ 定律，动力相似，重复量方法（该方法在本书和许多其他科学和工程领域中得到应用）。

第8章管道流动，层流与湍流的区别，管中摩擦损失，管网中的局部损失，如何选择泵和风机与管网匹配，用于测量流量和速度的各种实验装置。

第9章对流动的微分分析，连续性方程、柯西方程和N-S方程的推导和应用，流函数及其他在流动分析中的用途。

第10章讨论N-S方程的几个简化方程及其解，包括蠕流、无黏流、无旋流（势流）和边界层。

第11章物体绕流的阻力和升力。讨论摩擦阻力与压差阻力的差别，提供许多常见形状物体的阻力系数。强调风洞测量的实际应用，连同第7章引入的动力相似和量纲分析。

第12章可压缩流体对物体的绕流。这里马赫数对气体行为的影响很大；膨胀波、正激波和斜激波概念，介绍壅塞流动。

第13章明渠流。介绍与具有自由液面流动有关的独特性质，如表面波和水跃。

第14章较详细地考查涡轮机械，包括泵、风机、涡轮机。重点是泵和涡轮机是如何工作的，而不是它们的设计细节；讨论基于动力相似和简化的速度矢量法对泵和涡轮机的综合设计。

第15章描述计算流体力学（CFD）的基本概念，介绍如何利用CFD商业软件求解复杂的流体力学问题；强调CFD的应用而不是具体的算法。

每一章包含了大量的习题供教师选择。书末提供了综合性的附录，包括一些流体的物理学（热力学）性质，并不仅仅局限于课文中涉及的空气和水。许多习题需要用到附录中的数据。

## 六、学习方法

### （1）物理概念

本书与众不同的特色是除了数学公式和求解外，强调问题的物理概念。我们相信本科教育应着重训练对物理机制的认识和解决实际问题的能力，这是工程师面对实际世界需要的能力。注重直观理解也能使本课程对学生具有吸引力和激励作用。

### （2）有效利用联系

善于观察能使学生不难理解工程科学。毕竟，工程科学的原理源于我们每天的经历和实验观察之中。因此物理的、直观的方法贯穿于整个教材。经常将课文中的内容与学生的日常生活联系起来，使他们通过自己熟悉的事物来理解课文中的概念。

### （3）自我教育

本书中的材料均按平均水平介绍给学生，让他们学起来比较轻松。与学生平等交流，而非居高临下，实际上就是自我教育。应注意，科学原理都是基于实验观察得来的。本书的大部分推导都基于物理的论证，因此学生容易接受和理解。

### （4）充分利用图片

图片是帮助学生对问题获得大致理解的重要工具，本书有效地运用了插图，包括许多图表和图像，比其他书籍都多。图片可吸引学生的注意力，激发好奇心和兴趣。课文中的大多数图片都用于强调关键性概念（若用其他方式则不易引起注意），有一些则用于某页的总结。

### (5) 章的开头和总结

每章的开头都有对整章内容的概括。末尾的总结提供了对基本概念和重要的关系式的小结，并指出与此相关的材料。

### (6) 大量详细的、带有系统求解过程的例题

每章都包含了一些详细求解的例题，用于阐明问题和说明对基本原理的运用。在例题求解中采用了直观和系统的方法，保持非正式的对话形式。首先提出问题和要解决的目标；然后在求解中先假设，后证明，分别列举求解问题所需要的步骤，数值应连同单位一起使用，无单位的数值是无意义的，处理单位与用计算器计算数值一样重要；最后对求解的结果讨论其意义。在供教师所用的解题手册中也采用了相同的方法。

### (7) 丰富而实用的课后习题

对章末的习题按不同的标题分组，便于教师和学生分类选择。在每组习题中都有用“C”标注的概念题，用于检查学生对基本概念的理解。标题为“复习题”下的题目是带有理解性质的，不直接与本章的哪一节相对应，有时候需要复习前面学过的内容。标题为“设计与实验”下的题目是鼓励学生进行工程判断，对感兴趣的课题作独立探索，将自己的求解结果与用专业方法得到的结果作比较。带有 EES 光盘图案的题目可借助 EES（求解器）求解，即利用随书附带的 DVD 光盘包含的参数法解题软件求解。带有 EES 计算机图案的题目是综合性的，可用计算机求解，最好用本书附带的 EES 软件求解。带有“FlowLab”图案的题目应利用 ANSYS-FLUENT FlowLab 软件求解，这是一个用户友好型的，带有事先定义模板的 CFD 程序包。为了增强工程类学生的价格和安全意识，全书编入了一些与经济和安全有关的题目。为了方便学生，选择一些题目的答案直接列在题目之后。

### (8) 常用符号的运用

在不同工程课程中用相同的符号表示不同的物理量常引起学生困惑。例如，在流体力学和热传输中，符号  $Q$  在一门课程中代表体积流量，在另一门课程中代表热量。在工程教学中，甚至在一些由国家自然科学基金主办的会议报告中，如 2003 年 5 月 28—29 日在威斯康星大学举办的“能源阀杆 (Stem) 革新”小型会议的最后报告中，对统一符号的呼声日益强烈，但这些年收效甚微。在本书中为减少这类困惑我们有意识做了些努力，如采用热力学里熟悉的符号  $\dot{V}$  来表示体积流量，这样  $Q$  就只表示热量；并一律用在字母上加点来表示速率。我们相信对常用符号的这种处理方法将得到学生和教师的认可。

### (9) 联合讨论伯努利和能量方程

伯努利方程是在流体力学中使用最多的方程之一，但也是最易滥用的方程。因此，重要的是强调它的适用范围只限于理想流体，及如何适当地考虑它带来的缺陷和不可逆的损失。在第 5 章里，接着伯努利方程后面就引入了能量方程，以说明很多实际工程问题的解与用伯努利方程求得的解是不一样的。这能帮助认识伯努利方程的真实含义。

### (10) 独立的章介绍 CFD

商用的计算流体动力学软件被广泛应用于实际的工程设计和对流体系统的分析。它对工程师非常重要，必需对 CFD 的基本概念、功能和局限性有足够的了解。大多数工程类本科生的课程表中没有专门的 CFD 课程，本书设立独立的章是为了弥补这个缺陷，以使掌握 CFD 的长处和弱点。

### (11) 应用聚焦

全书有一些例子称为“应用聚焦 (Application Spotlights)”，介绍流体力学的实际应用。这些特殊例子是专门邀请其他作者写的，为向学生展示流体力学在广泛的领域内具有各种不同的应用而设计。这些例子中包含了从受邀作者的研究中获取的精彩照片。

(12) 转换因子

在书前列出了经常使用的转换因子、物理常数、空气和水在 20°C 和大气压条件下的性质等数据，以便查询。

(13) 符号表

在书后列出了本书所用的主要符号、上下标等及其含义，以便查询。

## 七、补充资源

从本书中可得到的补充资源包括：

(1) 学生用 DVD

免费为学生提供的 DVD 包含了书中更新内容的复制文本、流体力学录像、CFD 动画库和 EES 软件等丰富资源。

(2) 课程网站

配合本书设置的专门网址为 [www.mhhe.com/cengel](http://www.mhhe.com/cengel)。从该网站可获得本书和补充资料、勘误表、作者信息，及为教师和学生设置的其他资源。

尤努斯·A. 森哲尔  
约翰·M. 辛巴拉

## Conversion Factors

DIMENSION	METRIC	METRIC/ENGLISH
Acceleration	1 m/s <sup>2</sup> = 100 cm/s <sup>2</sup>	1 m/s <sup>2</sup> = 3.2808 ft/s <sup>2</sup> 1 ft/s <sup>2</sup> = 0.3048* m/s <sup>2</sup>
Area	1 m <sup>2</sup> = 10 <sup>4</sup> cm <sup>2</sup> = 10 <sup>6</sup> mm <sup>2</sup> = 10 <sup>-6</sup> km <sup>2</sup>	1 m <sup>2</sup> = 1550 in <sup>2</sup> = 10.764 ft <sup>2</sup> 1 ft <sup>2</sup> = 144 in <sup>2</sup> = 0.09290304* m <sup>2</sup>
Density	1 g/cm <sup>3</sup> = 1 kg/L = 1000 kg/m <sup>3</sup>	1 g/cm <sup>3</sup> = 62.428 lbf/ft <sup>3</sup> = 0.036127 lbf/in <sup>3</sup> 1 lbf/in <sup>3</sup> = 1728 lbf/ft <sup>3</sup> 1 kg/m <sup>3</sup> = 0.062428 lbf/ft <sup>3</sup>
Energy, heat, work, and specific energy	1 kJ = 1000 J = 1000 N · m = 1 kPa · m <sup>3</sup> 1 kJ/kg = 1000 m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> 1 kWh = 3600 kJ	1 kJ = 0.94782 Btu 1 Btu = 1.055056 kJ = 5.40395 psia · ft <sup>3</sup> = 778.169 lbf · ft 1 Btu/lbf = 25,037 ft <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> = 2.326* kJ/kg 1 kWh = 3412.14 Btu
Force	1 N = 1 kg · m/s <sup>2</sup> = 10 <sup>5</sup> dyne 1 kgf = 9.80665 N	1 N = 0.22481 lbf 1 lbf = 32.174 lbf · ft/s <sup>2</sup> = 4.44822 N 1 lbf = 1 slug · ft/s <sup>2</sup>
Length	1 m = 100 cm = 1000 mm = 10 <sup>6</sup> μm 1 km = 1000 m	1 m = 39.370 in = 3.2808 ft = 1.0926 yd 1 ft = 12 in = 0.3048* m 1 mile = 5280 ft = 1.6093 km 1 in = 2.54* cm
Mass	1 kg = 1000 g 1 metric ton = 1000 kg	1 kg = 2.2046226 lbf 1 lbf = 0.45359237* kg 1 ounce = 28.3495 g 1 slug = 32.174 lbf = 14.5939 kg 1 short ton = 2000 lbf = 907.1847 kg
Power	1 W = 1 J/s 1 kW = 1000 W = 1 kJ/s 1 hp <sup>†</sup> = 745.7 W	1 kW = 3412.14 Btu/h = 1.341 hp = 737.56 lbf · ft/s 1 hp = 550 lbf · ft/s = 0.7068 Btu/s = 42.41 Btu/min = 2544.5 Btu/h = 0.74570 kW 1 Btu/h = 1.055056 kJ/h
Pressure or stress, and pressure expressed as a head	1 Pa = 1 N/m <sup>2</sup> 1 kPa = 10 <sup>3</sup> Pa = 10 <sup>-3</sup> MPa 1 atm = 101.325 kPa = 1.01325 bar = 760 mm Hg at 0°C = 1.03323 kgf/cm <sup>2</sup> 1 mm Hg = 0.1333 kPa	1 Pa = 1.4504 × 10 <sup>-4</sup> psi = 0.020886 lbf/ft <sup>2</sup> 1 psi = 144 lbf/ft <sup>2</sup> = 6.894757 kPa 1 atm = 14.696 psi = 29.92 inches Hg at 30°F 1 inch Hg = 13.60 inches H <sub>2</sub> O = 3.387 kPa
Specific heat	1 kJ/kg · °C = 1 kJ/kg · K = 1 J/g · °C	1 Btu/lbf · °F = 4.1868 kJ/kg · °C 1 Btu/lbfmol · R = 4.1868 kJ/kmol · K 1 kJ/kg · °C = 0.23885 Btu/lbf · °F = 0.23885 Btu/lbf · R
Specific volume	1 m <sup>3</sup> /kg = 1000 L/kg = 1000 cm <sup>3</sup> /g	1 m <sup>3</sup> /kg = 16.02 ft <sup>3</sup> /lbf 1 ft <sup>3</sup> /lbf = 0.062428 m <sup>3</sup> /kg
Temperature	T(K) = T(°C) + 273.15 ΔT(K) = ΔT(°C)	T(R) = T(°F) + 459.67 = 1.8T(K) T(°F) = 1.8 T(°C) + 32 ΔT(°F) = ΔT(R) = 1.8* ΔT(K)
Velocity	1 m/s = 3.60 km/h	1 m/s = 3.2808 ft/s = 2.237 mi/h 1 mi/h = 1.46667 ft/s 1 mi/h = 1.6093 km/h
Viscosity, dynamic	1 kg/m · s = 1 N · s/m <sup>2</sup> = 1 Pa · s = 10 poise	1 kg/m · s = 2419.1 lbf/ft · h = 0.020886 lbf · s/ft <sup>2</sup> = 0.67197 lbf/ft · s

\*Exact conversion factor between metric and English units.

†Mechanical horsepower. The electrical horsepower is taken to be exactly 746 W.

DIMENSION	METRIC	METRIC/ENGLISH
Viscosity, kinematic	1 m <sup>2</sup> /s = 10 <sup>4</sup> cm <sup>2</sup> /s 1 stoke = 1 cm <sup>2</sup> /s = 10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> /s	1 m <sup>2</sup> /s = 10.764 ft <sup>2</sup> /s = 3.875 × 10 <sup>4</sup> ft <sup>2</sup> /h 1 m <sup>2</sup> /s = 10.764 ft <sup>2</sup> /s
Volume	1 m <sup>3</sup> = 1000 L = 10 <sup>6</sup> cm <sup>3</sup> (cc)	1 m <sup>3</sup> = 6.1024 × 10 <sup>4</sup> in <sup>3</sup> = 35.315 ft <sup>3</sup> = 264.17 gal (U.S.) 1 U.S. gallon = 231 in <sup>3</sup> = 3.7854 L 1 fl ounce = 29.5735 cm <sup>3</sup> = 0.0295735 L 1 U.S. gallon = 128 fl ounces
Volume flow rate	1 m <sup>3</sup> /s = 60,000 L/min = 10 <sup>6</sup> cm <sup>3</sup> /s	1 m <sup>3</sup> /s = 15,850 gal/min = 35.315 ft <sup>3</sup> /s = 2118.9 ft <sup>3</sup> /min (CFM)

\*Exact conversion factor between metric and English units.

### Some Physical Constants

PHYSICAL CONSTANT	METRIC	ENGLISH
Standard acceleration of gravity	$g = 9.80665 \text{ m/s}^2$	$g = 32.174 \text{ ft/s}^2$
Standard atmospheric pressure	$P_{\text{atm}} = 1 \text{ atm} = 101.325 \text{ kPa}$ = 1.01325 bar = 760 mm Hg (0°C) = 10.3323 m H <sub>2</sub> O (4°C)	$P_{\text{atm}} = 1 \text{ atm} = 14.696 \text{ psia}$ = 2116.2 lbf/ft <sup>2</sup> = 29.9213 inches Hg (32°F) = 406.78 inches H <sub>2</sub> O (39.2°F)
Universal gas constant	$R_U = 8.31447 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K}$ = 8.31447 kN · m/kmol · K	$R_U = 1.9859 \text{ Btu/lbmol} \cdot \text{R}$ = 1545.37 ft · lbf/lbmol · R

### Commonly Used Properties

PROPERTY	METRIC	ENGLISH
<i>Air at 20°C (68°F) and 1 atm</i>		
Specific gas constant*	$R_{\text{air}} = 0.2870 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ = 287.0 m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> · K	$R_{\text{air}} = 0.06855 \text{ Btu/lbm} \cdot \text{R}$ = 53.34 ft · lbf/lbm · R = 1716 ft <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> · R
Specific heat ratio	$k = c_p/c_v = 1.40$	$k = c_p/c_v = 1.40$
Specific heats	$c_p = 1.007 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ = 1007 m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> · K $c_v = 0.7200 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ = 720.0 m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> · K	$c_p = 0.2404 \text{ Btu/lbm} \cdot \text{R}$ = 187.1 ft · lbf/lbm · R = 6019 ft <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> · R $c_v = 0.1719 \text{ Btu/lbm} \cdot \text{R}$ = 133.8 ft · lbf/lbm · R = 4304 ft <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> · R
Speed of sound	$c = 343.2 \text{ m/s} = 1236 \text{ km/h}$	$c = 1126 \text{ ft/s} = 767.7 \text{ mi/h}$
Density	$\rho = 1.204 \text{ kg/m}^3$	$\rho = 0.07518 \text{ lbm/ft}^3$
Viscosity	$\mu = 1.825 \times 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$	$\mu = 1.227 \times 10^{-5} \text{ lbm/ft} \cdot \text{s}$
Kinematic viscosity	$\nu = 1.516 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$	$\nu = 1.632 \times 10^{-4} \text{ ft}^2/\text{s}$

### *Liquid water at 20°C (68°F) and 1 atm*

Specific heat ( $c = c_p = c_v$ )	$c = 4.182 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ = 4182 m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> · K	$c = 0.9989 \text{ Btu/lbm} \cdot \text{R}$ = 777.3 ft · lbf/lbm · R = 25,009 ft <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> · R
Density	$\rho = 998.0 \text{ kg/m}^3$	$\rho = 62.30 \text{ lbm/ft}^3$
Viscosity	$\mu = 1.002 \times 10^{-3} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$	$\mu = 6.733 \times 10^{-4} \text{ lbm/ft} \cdot \text{s}$
Kinematic viscosity	$\nu = 1.004 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$	$\nu = 1.081 \times 10^{-5} \text{ ft}^2/\text{s}$

\* Independent of pressure or temperature



# 目 录

前言	
第1章 引言与基本概念 1	
1-1 引言 2	
1-2 不滑移条件 6	
1-3 流体力学简要历史 7	
1-4 流动分类 9	
1-5 系统与控制体 14	
1-6 量纲与单位的重要性 15	
1-7 工程问题数学建模 21	
1-8 问题求解技巧 23	
1-9 工程软件包 25	
1-10 准确度、精确度与有效数字 28	
小结 31	
参考文献 31	
应用聚焦：核爆炸与雨滴有什么共同点 32	
习题 33	
第2章 流体的性质 37	
2-1 引言 38	
2-2 密度与比重 39	
2-3 蒸气压与空化 41	
2-4 能量与比热容 43	
2-5 可压缩性与声速 44	
2-6 黏性 50	
2-7 表面张力与毛细现象 55	
小结 61	
应用聚焦：空化 62	
参考文献 63	
习题 63	
第3章 压强与流体静力学 73	
3-1 压强 74	
3-2 压强测量装置 79	
3-3 流体静力学引言 87	
3-4 作用在淹没平板上的静水压力 88	
3-5 作用在淹没曲板上的静水压力 93	
3-6 浮力与稳定性 97	
3-7 以刚体形式运动的流体 102	
小结 110	
参考文献 111	
习题 111	
第4章 流体运动学 131	
4-1 拉格朗日与欧拉法 132	
4-2 流动类型与流动可视化 139	
4-3 流体流动数据图 146	
4-4 其他运动学描述 149	
4-5 涡量与旋度 154	
4-6 雷诺输运理论 158	
小结 166	
应用聚焦：流体驱动器 167	
参考文献 168	
习题 168	
第5章 质量、伯努利与能量方程 183	
5-1 引言 184	
5-2 质量守恒 185	
5-3 机械能与效率 192	
5-4 伯努利方程 197	
5-5 一般能量方程 212	
5-6 定常流能量分析 217	
小结 226	
参考文献 227	
习题 228	
第6章 流动系统的动量分析 239	
6-1 牛顿定律 240	
6-2 选择控制体 A 241	
6-3 作用在控制体 A 上的力 242	

- 6-4 线性动量方程 245
- 6-5 考察旋转运动与角动量 259
- 6-6 角动量方程 261
- 小结 269
- 参考文献 270
- 习题 270
- 第7章 量纲分析与模型化 283**
- 7-1 量纲与单位 284
- 7-2 量纲齐次性 285
- 7-3 量纲分析与相似性 291
- 7-4 重复量方法与白金汉 II 定律 295
- 7-5 实验研究、模型与不完全相似 311
- 应用聚焦: 苍蝇如何飞行 318
- 小结 319
- 参考文献 319
- 习题 319
- 第8章 内流 337**
- 8-1 引言 338
- 8-2 层流与湍流流动 339
- 8-3 入口区域 341
- 8-4 管中层流流动 343
- 8-5 管中湍流流动 351
- 8-6 次要损失 364
- 8-7 管网与泵系统 371
- 8-8 流量与速度测量 381
- 应用聚焦: 孔板流量计如何工作或不工作 399
- 小结 400
- 参考文献 401
- 习题 402
- 第9章 流体流动的微分分析 419**
- 9-1 引言 420
- 9-2 质量守恒——连续性方程 420
- 9-3 流函数 432
- 9-4 线性动量微分方程——柯西方程 441
- 9-5 纳维-斯托克斯方程 446
- 9-6 流体流动问题的微分分析 452
- 小结 475
- 参考文献 476
- 习题 476
- 第10章 纳维-斯托克斯方程的近似解 491**
- 10-1 引言 492
- 10-2 运动的无量纲方程 493
- 10-3 蠕流近似 496
- 10-4 流动无黏区的近似 501
- 10-5 无旋流近似 505
- 10-6 边界层近似 530
- 小结 567
- 参考文献 568
- 应用聚焦: 水滴形成 569
- 习题 570
- 第11章 外流: 阻力与升力 583**
- 11-1 引言 584
- 11-2 阻力与升力 586
- 11-3 摩擦与压差阻力 590
- 11-4 常用几何形状物体的阻力系数 593
- 11-5 绕平板的平行流动 601
- 11-6 绕圆柱与圆球的流动 606
- 11-7 升力 610
- 小结 619
- 参考文献 620
- 应用聚焦: 减阻 621
- 习题 622
- 第12章 可压缩流动 635**
- 12-1 驻点性质 636
- 12-2 一维等熵流动 639
- 12-3 喷管内的等熵流 646
- 12-4 激波与膨胀波 655
- 12-5 具有热传输并忽略摩擦的管道流 (瑞利流) 669
- 12-6 具有摩擦的绝热管道流 (范诺流) 678
- 应用聚焦: 激波与边界层相互作用 688
- 小结 689
- 参考文献 690
- 习题 690
- 第13章 明渠流动 701**
- 13-1 明渠流分类 702
- 13-2 弗劳德数与波速 705
- 13-3 比能 709
- 13-4 质量守恒与能量方程 712
- 13-5 明渠均匀流 713
- 13-6 最佳水力断面 719
- 13-7 渐变流 723
- 13-8 急变流与水跃 733



13-9 流动控制与测量	737	第 15 章 计算流体动力学导论	853
小结	747	15-1 引言与基础	854
参考文献	748	15-2 层流 CFD 计算	867
习题	748	15-3 湍流 CFD 计算	877
第 14 章 涡轮机械	761	15-4 带热传输的 CFD	890
14-1 分类与术语	762	15-5 可压缩流动 CFD 计算	897
14-2 泵	764	15-6 明渠流动 CFD 计算	903
14-3 泵的相似律	799	应用聚焦: 虚拟胃	906
14-4 涡轮机	807	小结	907
14-5 涡轮机相似律	831	参考文献	907
应用聚焦: 旋转燃料喷嘴	837	习题	908
小结	838	附录 1	
参考文献	838	特性参数表与曲线图	921
习题	839	术语表	939
		索引	953