

国家出版基金项目

“十二五”国家重点出版物出版规划项目

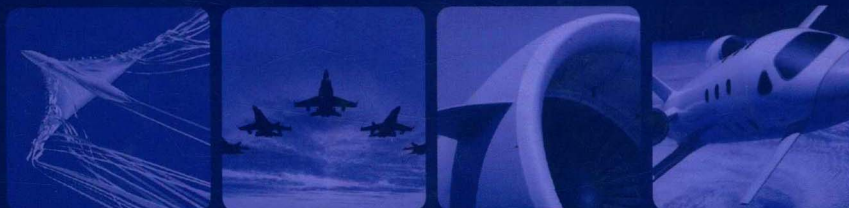
航空航天科技出版工程

1

流体动力学与空气热力学

[英]理查德·布洛克利 (Richard Blockley) [美]史维 (Wei Shyy) ©主编

吴小胜 雷娟棉 黄晓鹏 等◎译



**ENCYCLOPEDIA OF
AEROSPACE ENGINEERING 1**
Fluid Dynamics and Aerothermodynamics

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

WILEY





国家出版基金项目

“十二五”国家

规划项目

航空航天科技出版工程

1

流体动力学与空气热力学

[英] 理查德·布洛克利 (Richard Blockley) [美] 史维 (Wei Shyy) ©主编

吴小胜 雷娟棉 黄晓鹏 等©译

*ENCYCLOPEDIA OF
AEROSPACE ENGINEERING 1
Fluid Dynamics and Aerothermodynamics*

图书在版编目 (CIP) 数据

航空航天科技出版工程 . 1, 流体动力学与空气热力学 / (英) 理查德·布洛克利 (Richard Blockley), (美) 史维 (Wei Shyy) 主编; 吴小胜等译. —北京: 北京理工大学出版社, 2016. 6

书名原文: Encyclopedia of aerospace engineering

国家出版基金项目 “十二五” 国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978-7-5682-2416-1

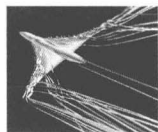
I. ①航… II. ①理… ②史… ③吴… III. ①航空学-流体动力学②航空学-空气动力学-热力学
③航天学-流体动力学④航天学-空气动力学-热力学 IV. ①V

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 123672 号

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01-2013-1965 号

All Rights Reserved. Authorised translation from the English language edition published by John Wiley & Sons Limited. Responsibility for the accuracy of the translation rests solely with Beijing Institute of Technology Press Co., LTD and is not the responsibility of John Wiley & Sons Limited. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyright holder, John Wiley & Sons Limited.

封面图片来源:



源自 ONERA, France



源自 Shutterstock



源自 Shutterstock



源自 EADS Astrium

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京地大天成印务有限公司

开 本 / 889 毫米×1194 毫米 1/16

印 张 / 46.25

字 数 / 1345 千字

版 次 / 2016 年 6 月第 1 版 2016 年 6 月第 1 次印刷

定 价 / 286.00 元

责任编辑 / 封 雪

文案编辑 / 封 雪

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

航空航天科技出版工程

译审委员会

主任 杜善义

副主任 李椿萱 余梦伦 黄瑞松 叶培建 唐长红 甘晓华

委员 (按姓氏笔画排序)

才满瑞 刘 莉 杨 超 昂海松 周志成 唐胜景 熊 克

翻译委员会

主任 刘 莉

副主任 朱春玲 赵 宁 江 驹

委员 (按姓氏笔画排序)

万志强 马东立 王晓芳 王焕瑾 王锁柱 毛军逵 古兴瑾
龙 腾 朱程香 向彩霞 刘东旭 齐艳丽 孙康文 孙慧玉
杜 骞 杜小菁 李 书 李 响 李世鹏 杨春信 肖天航
吴小胜 吴志刚 宋 晨 宋豪鹏 张景瑞 陈永亮 武志文
林 海 昂海松 周光明 周建江 周思达 周储伟 郑祥明
徐 军 徐 明 郭 杰 唐胜景 黄晓鹏 龚 正 韩 潮
韩启祥 谢 侃 谢长川 雷娟棉 谭慧俊 熊 克 冀四梅

审校委员会

主任 林 杰

副主任 樊红亮 李炳泉

委员 (按姓氏笔画排序)

于 勇 王佳蕾 王玲玲 王美丽 尹 晷 白照广 多海鹏
祁载康 杜春英 李秀梅 杨 侧 张云飞 张海丽 张鑫星
陈 竑 季路成 周瑞红 孟雯雯 封 雪 钟 博 梁铜华

推荐序

航空航天是国家的战略产业，其科技水平直接决定着综合国力和国家安全。近年来，我国航空航天科技水平得到显著提升，在若干领域取得了举世瞩目的成就。在建设航空航天强国的进程中，广大科技人员需要学习和借鉴世界航空航天科技的最新成就。《航空航天科技出版工程》是综合反映当今世界范围内航空航天科技发展现状和研究前沿的一套丛书，具有系统性、学术性、前沿性等特点。该丛书的翻译和出版，为我国科技工作者学习和借鉴世界航空航天科技提供了一个良好平台。

《航空航天科技出版工程》英文版由美国 WILEY 出版公司和 AIAA（美国航空航天学会）联合出版。全世界 34 位来自航空航天领域的顶级专家组成丛书顾问团，负责对丛书进行规划指导，来自美国、英国、德国、法国等国家的 600 多位著名专家参与丛书撰写。该丛书是当今世界上最为系统和权威的航空航天科技丛书，共有 9 卷、近 5000 页，涵盖航空航天科技的 43 个领域主题，442 个章节。该丛书对航空航天科技所涉及的重要概念、理论、计算、实验等进行了系统阐述，并配有大量工程实践案例，主要内容包括：流体动力学与空气热力学、推进与动力、结构技术、材料技术、动力学与控制、环境影响与制造、飞行器设计、系统工程等。最难能可贵的是，该丛书对航空航天工程的战略决策、实施路径、技术应用、实践验证和评价等方面进行了系统阐释，对未来二十年面临的挑战和机遇进行了深入分析。

该丛书中有些专题研究在我国尚属起步阶段，不少内容是国内紧缺的文献资料。例如，丛书对高超声速稀薄气体动力学、扑翼空气动力学、高超声速气动热弹性、多运动体协调控制、多种飞行器融合、深空探测、航天系统设计认证等领域的介绍颇有参考价值。丛书内容不仅适用于国防领域，而且适用于民用领域，对我国航空航天科技发展具有指导意义。

北京理工大学是我国首批设立火箭、导弹等专业的高校，曾为我国航天事业的创立和发展做出重要贡献，近年来又在深空探测、制导武器、空间信息处理等领域取得重要进展。该丛书英文版问世不久，北京理工大学出版社敏锐地预判到该丛书对我国航空航天科技发展具有重要借鉴作用，提出翻译这套巨著的设想。北京理工大学航空航天学科的教授们积极投身于翻译丛书的策划中，他们联合我国高校、研究机构中一



批长期从事航空航天科技工作的教师和工程技术人员组成团队，仅用一年多时间就将这套巨著译为中文。我帮助他们邀请到丛书英文版顾问、著名航天结构力学家杜善义院士担任译审委员会主任，邀请到我国航空航天科技领域的多位领军科学家、总设计师共同负责丛书译审，进而确保中文版的科学性、准确性、权威性。

作为长期从事航空航天科技工作的学者，看到这套丛书即将问世由衷高兴。我认为，该丛书将为我国航空航天科技工作者提供一套不可多得的工具书，有利于提升我国航空航天科技水平，有利于促进我国航空航天科技与世界航空航天科技的有效对接，有利于推动我国建设航空航天强国。因此，我郑重向航空航天科技界的同行们推荐这套丛书。

中国科学院院士
北京理工大学校长

译者序

航空航天的发展水平体现了一个国家的综合实力。我国高度重视航空航天技术的创新发展，将航空航天产业列入国家战略性新兴产业和优先发展的高技术产业。近年来，国家科技重大专项（如大型飞机、载人航天与探月工程、高分辨率对地观测、航空发动机与燃气轮机等）的实施带动了我国航空航天技术的迅猛发展。

航空航天技术的发展日新月异并呈现出跨学科化和国际化的特征，国内学者需要一套系统全面的丛书，来巩固现有的知识、了解国际前沿发展动态、紧盯航空航天科技前沿。《航空航天科技出版工程》正是这样的一套技术研究丛书。北京理工大学出版社在组织专家对英文版《航空航天科技出版工程》的章节标题及主要内容进行翻译和评审后，发现该丛书内容翔实、信息丰富、学科体系完整，具有较高的前瞻性、探索性、系统性和实用性，是一套对中国航空航天领域有较强学习与借鉴作用的专著。因此，出版社决定引进、出版本套丛书的中文版。

英文版《航空航天科技出版工程》由美国 WILEY 出版公司和 AIAA（美国航空航天学会）联合出版，主编为 Richard Blockley（英国克兰菲尔德大学航空航天顾问、英国 BAE 系统公司前技术总监）和 Wei Shyy（原美国密歇根大学航空航天工程系教授兼系主任），历经多年，完成了 9 卷的出版。各章均由活跃在全球航空航天各专业领域研究一线的专家执笔，集成了编写团队在航空航天科技领域的重要科学研究成果和宝贵的科学试验数据。

《航空航天科技出版工程》从力学、动力及推进技术、制导和控制技术、电子仪表技术、通信技术、计算机科学、系统工程、材料科学、加工和制造技术及空间物理学等多个相互支撑的学科技术领域，全面而系统地阐述航空航天领域所涉及的知识，综合体现了目前航空航天技术的国际水平。9 卷包括《流体动力学与空气热力学》《推进与动力》《结构技术》《材料技术》《动力学与控制》《环境影响与制造》《飞行器设计》《系统工程》《航空航天专业术语》。丛书中文版配有丰富的原版插图、表格以及大量的图片资料，最大程度地保留了原版书的编写风格。该丛书对于国内的科研和技术人员，以及承担着未来航空航天技术开发的年轻人和学生来说，都无疑是一套非常好的参考资料。



北京理工大学出版社依托北京理工大学、南京航空航天大学、北京航空航天大学、中国航天科工集团北京航天长征科技信息研究所、中国航天科技集团空间技术研究院等国内从事航空航天技术研究的高校和科研院所，组建了翻译团队和专家译审团队，对《航空航天科技出版工程》进行翻译。

《航空航天科技出版工程1 流体动力学与空气热力学》包含航空航天工程研究评述、流体动力学基础、不可压缩流体和空气动力学、可压缩流动——亚声速到超声速、高超声速稀薄气体动力学、传热和热物理学、计算流体力学、流体动力学和热力学实验技术8个部分，由吴小胜、雷娟棉、黄晓鹏、刘莉、尹晋涛、张巧、王锁柱、李正东、龙腾、周思达、卢天宇、刘清扬、彭雪莹、姚冉、牛建平、陈昭岳、马志赛翻译。特别感谢出版社引进本书，更感谢各位院士学者们对此书出版的大力支持。译、校者虽在译文、专业内容、名词术语等方面进行了反复斟酌，并向有关专业人员请教，但限于译、校者的水平与对新知识的理解程度，谬误和不当之处恳请读者批评、指正。

翻译委员会

英文版序

能够受邀介绍这部航空航天丛书，我们和各自代表的学会都感到非常的荣幸和愉快。

毫无疑问，这部丛书体现了英国皇家航空学会和美国航空航天学会最大的期望。我们这两个学会都在寻求推进航空航天知识体系进步的方法，同时也都认识到航空航天领域具有动态、多学科和跨国界的特性。

这部丛书是一个独特的工具。它提供了涉及很多方面的快照，包含：全球共享的知识体系、全球企业共享的观念、共享的技术展望和挑战、共享的发展节奏、新方法和新视野，尤其是共享的对教育和培训重要性的关注——所有这些都是关于一个工业领域和一组学科，是它们塑造了并将继续改变我们所生活的世界。

这个共享的知识体系超出了国家的、商业的、组织的和技术学科的界限。在这个界限中我们进行着日复一日的工作，虽然这些工作必然引起经常的竞争，但也总是激发创新性和建设性的尝试。因此，我们怀着无比激动的心情看到了一项完全专业性工作的开展，它尝试着将这个知识体系的精华以全新的形式整理和出版。

航空航天领域对我们世界的影响是巨大的。早期的空气动力学创立者，从 George Cayley 爵士到 Wright 兄弟，都难以想象航空工业、更不必说太空飞行是如何彻底改变了我们的文明世界：它使我们的星球变成了一个很小的区域、允许瞬时联系全球任何地方、提供大范围的人和物资运输以及可以从外太空独特的视角来观看我们的星球和人类自己。航空航天工程师不仅直接为我们收集的知识体系做出了贡献，还驱动了广大的相关领域的进步，从基础的数学、电子学和材料科学到生物学和人因工程。因此，说这部丛书捕捉到了该领域当下的精华是非常恰当的。

对于内容广泛的航空航天工程技术和研究领域，提取其关键要素形成一个相互关联的框架结构，并不具备明显的可能性，更不要说涉及诸多细节。然而这部丛书正是要雄心勃勃地尝试做到这些，甚至更多。从这点看，这部丛书是一个勇敢的、有远见的、有胆识的计划。

这部丛书勾画出了我们领域最好和最醒目的专门技术，其成果是对发起者和作者们最好的回报，这些人值得我们向他们对航空航天行业做出的贡献表示祝贺。



虽然这部丛书的目标是达到相当的深度，但从实用的角度，这部丛书被设计成非常容易阅读和理解。我们希望读者看到这部丛书并可以广泛地应用，包括作为权威的参考书目、作为学习和专业发展的重要工具，或许可以作为课程作业和技术模块设计跨国界、跨机构可信赖的测试基准。

正值载人动力飞行第二个百年开始，太空的前景似乎正在不断复苏，这部丛书的出版是航空航天工程和科学持续发展的里程碑和标志。

我们非常自豪地、共同地将这部丛书推荐给你们。

Dr. Mark J. Lewis

美国航空航天学会主席

马里兰大学帕克分校航空航天工程系主任、教授，马里兰州，美国

Dr. Mike Steeden

英国皇家航空学会主席，英国

英文版前言

航空航天工程的历史可以追溯到早期希腊的哲学家亚里士多德和阿基米德，经哥白尼、伽利略、达·芬奇、牛顿、伯努利和欧拉到 19 世纪伟大的机械师纳威、斯托克顿和雷诺以及许多其他研究者，一直到 1903 年由莱特兄弟第一次成功地起飞了一台比空气重的动力机器。从普朗特、冯·卡门、惠特尔、冯·奥西恩、屈西曼、冯·布劳恩和科罗廖夫（这里只给出了少数的名字）等人开创性的成就，仅仅过去一个世纪的时间，航空器和航天器就以一种让最有远见的现代飞行预见者都震惊的速度得到了发展。超音速飞行（具有代表性的协和号客机、SR71 黑鸟式侦察机）、人类在月球上行走以及航天器向太阳系的远端航行，这些都是顽强不屈的技术探索的见证。

几代哲学家、科学家和工程师的工作使航空航天工程形成一个确定的学科，而且需要持续对新的商业、环境和安全相关因素、科学技术领域其他学科的进展、之前未探索的飞行器设计概念、推进、结构与材料、控制、导航和动力学、通信、航空电子、天基系统与旅行中的技术挑战等做出响应。航空航天工程产品是科学与技术多学科综合的产物，当航空器和航天器中的系统集成变得越来越复杂的时候，前所未有的设计挑战出现了，一个部门就需要借鉴不同领域的专业知识。因此，工程师们不仅需要专注于专门知识，还需要将他们的知识扩展到更广泛的学科领域。

本套书的主要目的是：为本科生、研究生以及学术界、工业界、研究机构和政府部门中的专业人士提供一个随手可得的、涵盖航空航天工程主要学科的专用参考书。本套书阐述了基本科学概念及其在当前工程实践中的应用，并将读者引导到更专业的书籍中。

本套书包含 442 篇文章，划分为 43 个领域主题，围绕科学基础和当前的工业实践，贯穿了航空航天工程的全部。当本套书被确定在同类著作中最先出版时，编辑团队从支撑航空航天科学、工程与技术研究和开发的专家们那里得到了原作稿件的授权。这些稿件包括力学、推进、导航与控制、电子器件和测量仪表、通信、计算机科学、系统工程、材料科学、生产与制造以及物理学。此外，考虑到当前围绕航空的担忧，环境科学、噪声与排放中的一些特定学科也被包含在本套书中。



本套书由热心的、杰出的国际顾问委员会指导编写，委员会由 34 名来自学术界、工业界和研究中心的委员组成。在顾问委员会的指导下，我们确定了一个主要作者团队，由他们来确定每个主题覆盖的范围，并选择了有能力来贡献他们文章的合适的作者。

在本套书的引导章节中，包含了系统思想的概念和在可预见的未来航空航天工程师们将面临的挑战。在顾问委员会和主要作者团队的大力帮助下，我们试图包含有人、无人航空器和航天器领域中所有的主题，然而我们意识到还有一些重要的主题没有涉及，或是因为我们没有及时注意到它们，或是由于作者没能赶上最后的出版期限。我们打算将后续的投稿和最新的进展放在每年的在线更新中。

非常遗憾，我们的一位主题作者 Philip Pugh 于 2009 年 1 月去世了，他为第 37 部分的规划和前期实施做出了难以估量的贡献。我们也非常感谢 David Faddy 继续完成了这一部分的工作。

Richard Blockley

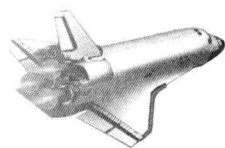
克兰菲尔德大学航空航天顾问，克兰菲尔德，英国

BAE 系统公司前技术总监，法恩伯勒，英国

Wei Shyy

密歇根大学航空航天工程系，安娜堡，密歇根州，美国

目 录



Contents



第1部分 航空航天工程研究评述

■ 第1章 系统工程：用系统思想设计更好的航空航天系统	3
1 引言	3
2 系统工程、系统思想和系统	5
2.1 系统的特征与属性	8
2.2 总结与结论	13
3 系统工程	13
3.1 系统工程的目的	13
3.2 系统工程的背景	14
3.3 系统工程是转换系统	14
3.4 系统工程包含子系统并且自身为更大系统的子系统	16
4 结论	22
参考文献	22
■ 第2章 航空航天工程未来20年的挑战与机遇	23
1 引言	23
2 航空器	24
2.1 飞行器的性能、飞行运营与环境的影响	24
2.2 推进系统	25
2.3 非常规飞机	25
2.4 无人机系统	26
2.5 吸气式高超声速系统	26
2.6 组件集成与热管理	27
2.7 建模、仿真与软件	27
3 航天器	28
3.1 航天发射系统	28

3.2 发射/助推发动机与飞船推进系统	29
3.3 快速响应的空间进入与航天系统构建	30
3.4 空间环境	30
4 结论	30

第2部分 流体动力学基础

■ 第3章 流体动力学早期理论和实验发展简史	35
1 引言	35
2 早期希腊科学：亚里士多德与阿基米德	35
3 达·芬奇的流体动力学	36
4 速度平方定律	37
5 牛顿和正弦平方定律	38
6 丹尼尔·伯努利与压力 速度概念	40
7 亨利·皮托与皮托管的发明	41
8 18世纪流体动力学的发展顶峰——莱昂哈德·欧拉与非黏性流体流动控制方程	42
9 包含摩擦的理论流体动力学：纳维尔和斯托克斯的工作	43
10 奥斯本·雷诺：认识湍流流动	45
11 升力环量理论：库塔和儒可夫斯基	48
12 路德维希·普朗特与边界层理论	50
13 总结	52
参考文献	52
■ 第4章 空气动力学基本控制方程	53
1 基本原理	53
1.1 无黏流动和黏性流动的区别	53



1.2	不可压缩流动与可压缩流动的区别	53
1.3	控制体与流体单元	55
1.4	连续性方程	56
1.5	动量方程	56
1.6	能量方程	56
1.7	分类: 欧拉方程和纳维尔-斯托克斯方程	57
1.8	迹线、流线和脉线	57
1.9	涡量	57
1.10	速度势	58
1.11	流函数	58
1.12	环量	58
2	势流方程	59
2.1	势流的定义	59
2.2	伯努利方程	59
2.3	速度的散度	59
2.4	拉普拉斯方程	59
2.5	中期总结	60
2.6	基本势流	60
2.7	基本流动方程	61
2.8	基本流动的叠加	62
2.9	升力环量理论: 基本原理	63
2.10	高亚声速和超声速势流: 基本理论和基本方程	63
3	欧拉方程	64
3.1	随体导数: 物理意义	64
3.2	由随体导数表示的欧拉方程	65
3.3	边界条件	66
3.4	欧拉方程的讨论	66
3.5	欧拉方程解的重要意义	66
4	纳维尔-斯托克斯方程	66
4.1	纳维尔-斯托克斯方程的展开式	66
4.2	相似参数	67
4.3	边界条件	68
4.4	纳维尔-斯托克斯方程的讨论	68
4.5	纳维尔-斯托克斯方程解的重要意义	68
5	边界层方程	68
5.1	背景	68
5.2	边界层特性	68
5.3	边界层方程	70
5.4	边界层方程的解	71
6	化学反应流动方程	71
6.1	化学反应流动的重要性: 高超声速飞行与燃烧	71

6.2	化学反应流动的性质	71
6.3	高温空气的化学反应	72
6.4	真实气体与理想气体的定义	72
6.5	气体的分类	73
6.6	化学反应流动控制方程	74
	参考文献	75
	扩展阅读	75

第3部分 不可压缩流体和空气动力学

■ 第5章	位势流	79
1	引言	79
2	位势流问题	79
3	伯努利方程	80
4	求解位势流问题的一般方法	80
5	二维空间的基本解	81
5.1	点源	81
5.2	偶极子	81
5.3	二维涡旋	82
6	三维空间的基本解	83
6.1	点源	83
6.2	基本方案: 偶极子	83
6.3	三维涡旋	83
7	举例: 圆柱绕流	83
8	圆柱绕流的升力	84
9	结束语	85
	参考文献	85
■ 第6章	二维翼型绕流	86
1	问题的定义	86
2	厚度和升力问题的分解	87
3	一定攻角下的零厚度翼型	87
4	升力问题的经典解	88
5	薄翼型上的气动力和气动力矩	89
6	集中涡流单元	91
7	薄翼型理论的总结与结论	92
8	薄翼型理论的不足	92
	参考文献	92
■ 第7章	有限展长翼的不可压缩流动	93
1	引言	93
2	升力线模型	93
3	椭圆升力分布的求解	95
4	细长翼理论	97



5 复杂外形的三维解:面元法	99	3.1 额外应变率	130
6 结论	101	4 挑战与展望	131
参考文献	101	参考文献	131
■ 第 8 章 层流边界层	102	■ 第 11 章 非定常空气动力学	133
1 引言	102	1 引言	133
2 边界层方程	103	2 涡旋脱落引起的非定常流动	133
2.1 压力梯度的影响,边界层分离,旋涡动 力学特性	104	3 升力的产生	134
3 边界层方程的精确解	105	4 颤振现象	135
3.1 平板边界层	107	5 涡旋脱落引起的推力	135
3.2 楔形流	108	6 动态失速现象	135
4 近似解	109	7 波的传播引起的非定常流动	135
4.1 层流中的黏性与无黏耦合	110	8 涡轮机械中的非定常流动	137
5 结论	111	9 斯特劳哈尔数:流动不稳定性的度量	138
符号表	111	10 非定常流动方程	138
参考文献	112	11 非定常流动分析方法	139
■ 第 9 章 流动稳定性与转捩	114	12 总结	140
1 引言	114	参考文献	140
2 二维流动稳定性分析	114	■ 第 12 章 大攻角空气动力学	142
2.1 线性稳定性理论概述	114	1 引言	142
2.2 Blasius 边界层流动	116	2 流动型态	142
2.3 Falkner-Skan 剖面:压力梯度效应	117	3 涡升力	143
2.4 高雷诺数下 TS 波的瑞利方程和 结构	118	4 涡破碎	143
2.5 瑞利理论	119	5 涡的不稳定性	144
2.6 三维扰动	119	6 机翼和垂尾抖振	145
3 边界层的接受性	120	7 非定常流动中的前缘涡	146
4 壁面层转向湍流的方式	120	8 机翼振动	146
5 转捩预测:模态增长(A 途径)	121	9 多重涡	147
6 结论	122	10 涡控制技术	148
致谢	122	11 总结	148
参考文献	122	符号表	148
■ 第 10 章 湍流边界层	125	致谢	148
1 引言	125	参考文献	149
2 基本考量	126	■ 第 13 章 导弹空气动力学	150
2.1 雷诺分解	126	1 引言	150
2.2 湍流边界层的尺度	126	2 零攻角导弹	150
2.3 普朗特边界层近似	127	2.1 波阻	152
2.4 自相似性	127	2.2 等值法则或面积律	152
2.5 雷诺应力与速度谱	128	3 小攻角导弹	153
2.6 内外交互作用	129	3.1 交叉流分析	154
3 复杂流动 扭曲边界层	130	3.2 细长翼升力	154
		4 大攻角导弹	155
		5 总结	156



参考文献	156	3 微型飞行器	186
■ 第 14 章 旋翼飞行器空气动力学	158	致谢	187
1 引言	158	符号表	187
2 气动环境	158	参考文献	187
3 旋翼分析的总体理论	159	■ 第 17 章 扑翼空气动力学	190
3.1 盘旋飞行	159	1 引言	190
3.2 垂直升降	161	2 量纲为 1 量、运动学特性和控制方程	191
3.3 前行	162	2.1 扑翼飞行的运动学特性	192
4 旋翼分析的叶素方法	163	2.2 雷诺数	192
4.1 诱导速度场	165	2.3 斯特劳哈尔数和简约频率	192
5 非定常空气动力学	166	2.4 控制方程	193
6 综合分析	167	3 扑翼飞行器非定常空气动力学	193
7 进阶的分析方法	167	3.1 扑动机制 $[Re:O(10^1)\sim O(10^4)]$	193
8 总结	168	3.2 上仰旋转 $[Re:O(10^2)\sim O(10^3)]$	193
参考文献	168	3.3 尾迹捕捉 $[Re:O(10^2)\sim O(10^4)]$	193
■ 第 15 章 气流流控制	170	3.4 前缘涡 $[Re:O(10^2)\sim O(10^4)]$	194
1 引言	170	3.5 翼尖涡 $[Re:O(10^2)\sim O(10^4)]$	196
2 度量参数	171	4 结构翼的柔性	197
2.1 稳定吸气和吹气	171	4.1 标度律	197
2.2 周期摄动	171	4.2 翼结构的柔性对扑翼空气动力学的影响	197
2.3 频率度量	172	5 总结	197
2.4 扩展参数范围与技术比较	172	符号表	198
3 AFC 的应用领域	173	致谢	199
4 AFC 的计算方法	174	参考文献	199
4.1 CFD 方法	175	■ 第 18 章 地面效应空气动力学	200
4.2 主动流动控制的 CFD 验证	176	1 引言	200
5 结论与展望	177	1.1 定义	200
符号表	177	1.2 历史背景:地效飞行器	200
参考文献	177	1.3 历史背景:地效赛车	201
■ 第 16 章 低雷诺数固定翼飞行器空气动力学	181	2 理论解释	202
1 引言	181	2.1 飞行器地效空气动力学	202
1.1 低雷诺数翼型流动问题	181	2.2 赛车地效空气动力学	203
1.2 分离泡	182	3 地面效应预测	204
1.3 翼型设计	182	3.1 二维流动简化的计算方法	204
2 风洞验证	183	3.2 解析方法	204
2.1 风洞	183	3.3 计算流体动力学(CFD)	205
2.2 端板的影响	184	3.4 机翼飞过平静和波动的水面	205
2.3 湍流强度的影响	185	3.5 极近地效区域的非线性现象	206
2.4 机翼弯度的影响	185	4 试验方法	206
2.5 低展弦比机翼空气动力学	185	4.1 镜像模型方法	206
		4.2 拥有边界层吸气功能的接地平板	206



4.3 运动带方法	206	2 基本的可压缩流动	232
4.4 拖曳模型方法	207	3 控制方程	233
5 地面效应对气动性能的影响	207	4 状态方程	234
5.1 飞行器的起飞和着陆	207	5 结论	234
5.2 近地直升机旋翼构型	207	注释	234
5.3 地效运载工具	207	参考文献	235
5.4 近地飞行器稳定性	207	扩展阅读	235
6 结论	208	第 22 章 复杂内部可压缩流动	236
参考文献	208	1 控制体分析	236
第 19 章 编队飞行的气动效益	210	2 变截面管道定常流动	236
1 引言	210	3 加热和摩擦定常流动	237
2 双机编队	210	4 喷管启动与壅塞现象	237
2.1 总诱导阻力的计算	211	5 激波串	237
2.2 诱导阻力随横向间隔的变化	212	6 激波管	238
3 多机编队	213	7 有棱弯管	238
3.1 诱导阻力随横向间隔的变化	213	8 冲压/超燃冲压喷气发动机	240
4 V形编队	214	9 喷射器	240
5 结论	214	10 结论	241
致谢	215	符号表	242
相关章节	215	参考文献	242
参考文献	215	第 23 章 外部跨声速流动	244
第 20 章 飞行器尾涡	217	1 引言	244
1 引言	217	2 跨声速流动基础	244
1.1 飞行器产生的涡旋	217	2.1 压力系数	244
1.2 尾涡的潜在危险	218	2.2 二维机翼流动	245
2 中部尾迹	218	2.3 机翼压缩效应	245
2.1 二维模型	218	2.4 马赫波与激波	246
2.2 飞行器参数	219	2.5 二维机翼上的激波	246
2.3 涡龄	221	2.6 机翼上的黏性流动效应	246
3 衰退机制	222	2.7 激波诱导边界层分离	247
3.1 涡量输运方程	222	3 跨声速气动设计	247
3.2 二维衰退	222	3.1 掠翼设计	247
3.3 湍流的影响	222	3.2 掠翼的应用	248
3.4 三维衰退机制	223	4 结论	249
4 涡流检测	225	致谢	249
5 结论和展望	226	参考文献	249
参考文献	226	第 24 章 复杂激波现象	251
第 4 部分 可压缩流动——亚声速到超声速		1 引言与实例	251
第 21 章 可压缩流动简介	231	1.1 几何复杂性:外流空气动力学	251
1 可压缩物质状态和流动分区	231	1.2 物质的复杂性:混合材料的影响	251
		1.3 物理复杂性:超新星爆炸	252
		2 基本分析	252