



大飞机出版工程

总主编 顾诵芬

“十二五”国家重点图书规划项目

工程师用空气动力学

Aerodynamic for Engineers
(Fifth Edition)

【美】约翰·J·伯廷 拉塞尔·M·卡明斯 著
王福新 王奇志 陈 方 王晓亮 译



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS



大飞机出版工程

总主编 顾诵芬

工程师用空气动力学

Aerodynamic for Engineers(Fifth Edition)

【美】约翰·J·伯廷 拉塞尔·M·卡明斯 著
王福新 王奇志 陈 方 王晓亮 译



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书在系统阐述了空气动力学基本原理的基础上,针对不可压缩、可压缩流动实际应用的问题,以及解决实际空气动力学问题的方法和工具,通过浅显易懂的介绍,并结合大量的设计实例对比,加上实用、有趣的章节后习题,让读者全方位了解现代空气动力学在飞行器设计中的地位、作用和意义,提供了实际应用理论的方法和技巧,同时给出了运用实际空气动力学分析工具时应注意的问题。

本书可作为空气动力学和相关专业的在校大学生及机械工程和航空宇航工程专业的研究生的读物,也可作为设计工程师甚至已工作多年的相关领域的专家参考用书。

© John J. Bertin, Russell M. Cummings

Authorized translation from the English language edition, entitled AERODYNAMICS FOR ENGINEERS, 5E, 9780132272681 by BERTIN, JOHN J.; CUMMINGS, RUSSELL M., published by Pearson Education, Inc., Copyright 2008

图书在版编目(CIP)数据

工程师用空气动力学/(美)伯廷(Bertin, J.J.), (美)卡明斯(Cummings, R.M.)

著;王福新等译. —上海:上海交通大学出版社, 2015

(大飞机出版工程)

ISBN 978-7-313-14247-4

I. ①工… II. ①伯…②卡…③王… III. ①空气动力学

IV. ①V211.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 309142 号

工程师用空气动力学

著 者:[美]约翰·J·伯廷 拉塞尔·M·卡明斯

出版发行:上海交通大学出版社

邮政编码:200030

出 版 人:韩建民

印 制:上海万卷印刷有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

字 数:830 千字

版 次:2015 年 12 月第 1 版

书 号:ISBN 978-7-313-14247-4/V

定 价:170.00 元

译 者:王福新 王奇志 陈 方 王晓亮

地 址:上海市番禺路 951 号

电 话:021-64071208

经 销:全国新华书店

印 张:41.75

印 次:2015 年 12 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:021-56928277

丛书编委会

总主编

顾诵芬(中国航空工业集团公司科技委副主任、中国科学院和中国工程院院士)

副总主编

金壮龙(中国商用飞机有限责任公司董事长)

马德秀(上海交通大学原党委书记、教授)

编委(按姓氏笔画排序)

王礼恒(中国航天科技集团公司科技委主任、中国工程院院士)

王宗光(上海交通大学原党委书记、教授)

刘洪(上海交通大学航空航天学院副院长、教授)

许金泉(上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院教授)

杨育中(中国航空工业集团公司原副总经理、研究员)

吴光辉(中国商用飞机有限责任公司副总经理、总设计师、研究员)

汪海(上海市航空材料与结构检测中心主任、研究员)

沈元康(中国民用航空局原副局长、研究员)

陈刚(上海交通大学原副校长、教授)

陈迎春(中国商用飞机有限责任公司常务副总设计师、研究员)

林忠钦(上海交通大学常务副校长、中国工程院院士)

金兴明(上海市政府副秘书长、研究员)

金德琨(中国航空工业集团公司科技委委员、研究员)

崔德刚(中国航空工业集团公司科技委委员、研究员)

敬忠良(上海交通大学航空航天学院常务副院长、教授)

傅山(上海交通大学电子信息与电气工程学院研究员)

总 序

国务院在 2007 年 2 月底批准了大型飞机研制重大科技专项正式立项,得到全国上下各方面的关注。“大型飞机”工程项目作为创新型国家的标志工程重新燃起我们国家和人民共同承载着“航空报国梦”的巨大热情。对于所有从事航空事业的工作者,这是历史赋予的使命和挑战。

1903 年 12 月 17 日,美国莱特兄弟制作的世界第一架有动力、可操纵、比重大于空气的载人飞行器试飞成功,标志着人类飞行的梦想变成了现实。飞机作为 20 世纪最重大的科技成果之一,是人类科技创新能力与工业化生产形式相结合的产物,也是现代科学技术的集大成者。军事和民生对飞机的需求促进了飞机迅速而不间断的发展和应用,体现了当代科学技术的最新成果;而航空领域的持续探索 and 不断创新,为诸多学科的发展和相关技术的突破提供了强劲动力。航空工业已经成为知识密集、技术密集、高附加值、低消耗的产业。

从大型飞机工程项目开始论证到确定为《国家中长期科学和技术发展规划纲要》的十六个重大专项之一,直至立项通过,不仅使全国上下重视起我国自主航空事业,而且使我们的人民、政府理解了我国航空事业半个世纪发展的艰辛和成绩。大型飞机重大专项正式立项和启动使我们的民用航空进入新纪元。经过 50 多年的风雨历程,当今中国的航空工业已经步入了科学、理性的发展轨道。大型客机项目其产业链长、辐射面宽、对国家综合实力带动性强,在国民经济发展和科学技术进步中发挥着重要作用,我国的航空工业迎来了新的发展机遇。

大型飞机的研制承载着中国几代航空人的梦想,在 2016 年造出与波音 B737 和

空客 A320 改进型一样先进的“国产大飞机”已经成为每个航空人心中奋斗的目标。然而,大型飞机覆盖了机械、电子、材料、冶金、仪器仪表、化工等几乎所有工业门类,集成了数学、空气动力学、材料学、人机工程学、自动控制学等多种学科,是一个复杂的科技创新系统。为了迎接新形势下理论、技术和工程等方面的严峻挑战,迫切需要引入、借鉴国外的优秀出版物和数据资料,总结、巩固我们的经验和成果,编著一套以“大飞机”为主题的丛书,借以推动服务“大型飞机”作为推动服务整个航空科学的切入点,同时对于促进我国航空事业的发展和加快航空紧缺人才的培养,具有十分重要的现实意义和深远的历史意义。

2008 年 5 月,中国商用飞机有限公司成立之初,上海交通大学出版社就开始酝酿“大飞机出版工程”,这是一项非常适合“大飞机”研制工作时宜的事业。新中国第一位飞机设计宗师——徐舜寿同志在领导我们研制中国第一架喷气式歼击教练机——歼教 1 时,亲自撰写了《飞机性能及算法》,及时编译了第一部《英汉航空工程名词字典》,翻译出版了《飞机构造学》《飞机强度学》,从理论上保证了我们飞机研制工作。我本人作为航空事业发展 50 年的见证人,欣然接受了上海交通大学出版社的邀请担任该丛书的主编,希望为我国的“大型飞机”研制发展出一份力。出版社同时也邀请了王礼恒院士、金德琨研究员、吴光辉总设计师、陈迎春副总设计师等航空领域专家撰写专著、精选书目,承担翻译、审校等工作,以确保这套“大飞机”丛书具有高品质和重大的社会价值,为我国的大飞机研制以及学科发展提供参考和智力支持。

编著这套丛书,一是总结整理 50 多年来航空科学技术的重要成果及宝贵经验;二是优化航空专业技术教材体系,为飞机设计技术人员培养提供一套系统、全面的教科书,满足人才培养对教材的迫切需求;三是为大飞机研制提供有力的技术保障;四是将许多专家、教授、学者广博的学识见解和丰富的实践经验总结继承下来,旨在从系统性、完整性和实用性角度出发,把丰富的实践经验进一步理论化、科学化,形成具有我国特色的“大飞机”理论与实践相结合的知识体系。

“大飞机”丛书主要涵盖了总体气动、航空发动机、结构强度、航电、制造等专业方向,知识领域覆盖我国国产大飞机的关键技术。图书类别分为译著、专著、教材、工具书等几个模块;其内容既包括领域内专家们最先进的理论方法和技术成果,也

包括来自飞机设计第一线的理论和实践成果。如:2009年出版的荷兰原福克飞机公司总师撰写的 *Aerodynamic Design of Transport Aircraft* (《运输类飞机的空气动力设计》), 由美国堪萨斯大学2008年出版的 *Aircraft Propulsion* (《飞机推进》) 等国外最新科技的结晶; 国内《民用飞机总体设计》等总体阐述之作和《涡量动力学》《民用飞机气动设计》等专业细分的著作; 也有《民机设计1000问》《英汉航空双向词典》等工具类图书。

该套图书得到国家出版基金资助, 体现了国家对“大型飞机项目”以及“大飞机出版工程”这套丛书的高度重视。这套丛书承担着记载与弘扬科技成就、积累和传播科技知识的使命, 凝结了国内外航空领域专业人士的智慧和成果, 具有较强的系统性、完整性、实用性和技术前瞻性, 既可作为实际工作指导用书, 亦可作为相关专业人员的学习参考用书。期望这套丛书能够有益于航空领域里人才的培养, 有益于航空工业的发展, 有益于大飞机的成功研制。同时, 希望能为大飞机工程吸引更多的读者来关心航空、支持航空和热爱航空, 并投身于中国航空事业做出一点贡献。

顾诵芬

2009年12月15日

译者序

针对国内航空航天事业发展以及相关工业领域设计的现实需求,由大飞机出版工程编委会推荐上海交通大学出版社引进了由美国空军学院约翰·J·伯廷和拉塞尔·M·卡明斯教授编著的第5版《工程师用空气动力学》。该书针对实际设计应用问题,系统地阐述了空气动力学的基础理论,并结合设计实例进行了翔实的应用阐释,是一本针对性、应用性很强又易于理解和掌握的好教材。

不同于空气动力学教科书以及飞机气动设计的专著,该书能够作为理论与工程设计之间的桥梁,既适合工科大学本科教学参考以了解空气动力学实际气动设计的作用,也可作为工程设计一线的设计工程师的参考书。有几个特点值得推荐:一是在介绍有关理论和设计技术时总是以实际问题为例并给出可以解决这些问题的技术或技巧,而且实例翔实、系统且引人入胜,使得读者能以轻松、兴趣盎然的心情学习;二是基于现实中理论和技术的不断发展,每一版都适时补充了大量的先进成果和最新文献(第5版出版之前),且大部分实例都来自工程实际,数据真实可靠,在提供佐证的同时也提高了材料的可读性;三是编著者不仅本身长期从事空气动力学教学和研究,而且得到了诸多领域的专家、学者的大力支持,行业几乎覆盖了与空气动力学有关的所有专业,如理论研究、风洞试验、数值计算、飞行试验以及飞行驾驶等,不仅使得该书的理论阐述、实例佐证更加系统完整,而且极大地丰富了读者各方面的知识;四是对一些机型实例的设计点介绍和创新技术的分析,使读者能很快就认识到并理解理论的实际应用价值且加深对前沿知识的了解和掌握等。这些特点不仅使得本书的可读性极强,也正是本书一版再版的目和原因所在。

本书的译者王福新、王奇志、陈方和王晓亮从事空气动力学或飞行器设计研究或教学多年,有幸承担了本书的译校工作,刘洪教授和陈迎春研究员对全书译稿进行了审校。感谢李伟鹏特别是副研究员和博士后万佳、张斌和田伟等参与了部分章节的初稿/样稿的校对,也感谢研究生李高华、黄华、黄文涛、韩龙、刘志仁、傅翔、张屹、励效杰以及本科生周琳婧、吴嘉俊和杜越等同学在部分章节初始

译稿或后期文字编排中的协助。由衷地感谢上海交通大学出版社编辑部钱方针、王珍和陈艳等编辑们的辛勤劳动,没有她们的努力,本书出版不可能这么顺利。

最后,译者希望本书能帮助国内从事空气动力学、飞行器设计乃至其他相关领域教学或研究的学生、工程师、专家和学者们,并能在各自的领域从这本书有所获益,从而有利我国的航空航天事业的创新发展。由于译者水平有限,该书知识面又广,所以翻译存在的不妥甚至错误之处,敬请各位读者批评指正。

王福新

2015 年 12 月

第5版序言

编写《工程师用空气动力学》第5版有以下两个主要目的:

- (1) 以更轻松、有趣且易懂的方式促进读者学习空气动力学;
- (2) 更新自前版编写以来在空气动力学领域已经取得的新的技术创新和进步成果。

为有助于达到第一个目的,我们为读者提供了研究空气动力学真实目的的背景,即我们相信研究空气动力学的目的在于,为了更好地理解所选择的各种设计给出的性能益处需要预测作用在飞行中飞机上的各种力和力矩。为了更好地达到此目的,第1章以一篇有趣、可读且触动性强的有关飞行器性能的内容开始,涉及的材料是有关于“比过剩功率”(一个在美国空军学院对所有学生讲授的话题)的。这一新的介绍有助于使学生和工程师更清晰地认识到理解空气动力学对于弄清楚飞机是如何运动的而为什么在某一特定任务中一种飞机比另一种飞机好是至关重要的。

贯穿第五版的其余部分,我们补充了在空气动力学领域中取得的新的飞行器技术。这些创新包括详细讨论的有:层流和低雷诺数翼型以及现代高升力系统(第6章);微型无人飞行器(MUAV)和高空/长航时机翼几何外形(第7章);试验在确定空气动力学中的作用,包括缩尺数据对全尺寸飞行器的影响(第8章);细长体理论和减弱音爆(第11章);高超声速转捩(第12章)以及翼尖装置,还有现代机翼平面形状(第13章);有关估算飞行器阻力的实用方法的重要的新材料也已编入第4和第5章,包括表面摩擦阻力估算方法、形状因素、粗糙度作用以及边界层转捩影响。第5版中特别令人感兴趣的是将有关F-35的气动力设计描述收录入第13章。

此外,有包含了更新的和含新信息的32幅图,同时还在全书中补充了大量最新的参考文献。几乎各章都添加了新问题,同时例题也向学生们展示了如何将理论概念应用于实际问题。本书第4版的使用者会发现第5版中不但包括了前一版的所有材料,还在全书添加了给正在发展的概念,带来了具有现实世界特

色的新材料。我们希望读者能发现所添加的材料是有帮助的和有教益的。

为了有助于达到这些目的,一位新的合作编写者,美国空军学院的拉塞尔·库明教授加入了《工程师空气动力学》第5版的编撰工作。他在写作和提供新的/更新的材料上作了重要贡献,为本书增添了令人欢迎的风格和实用性。

最后,如果没有众人的帮助就不会有像《工程师用空气动力学》这样一本书的多次再版。作者特别感谢那些在第5版中帮助收集新材料的各位。我们尤其要感谢 Doug McLean、John McMasters 以及他们波音的同事们 Rick Baker、Mark Buchholz 以及他们的洛克希德·马丁公司的同事们 Charles Boccadoro、Davide Graham 和他们诺斯洛普·格拉曼公司的同事们;马塞诸塞技术学院的 Mark Drela;伊利诺斯大学的 Michael Selig;加利福尼亚大学戴维斯分校的 Case van Dam;另外,我们非常感激第5版的审稿人极好的建议和评价:拉特格斯大学的 Doyle Knight;爱荷华州立大学的胡辉和美国海军学院的 Gabriel Karpouzian。最后,我们也感谢美国空军学院的 Shirley Orlofsky 在本项目中的持续支持。

第4版序言

本课程是为以下学生设计使用的：

- (1) 空气动力学中级和高级班的在校大学生；
- (2) 机械工程和航空航天工程的研究生。

前四章主要介绍基本的流体力学原理。第1章讨论流体特性和标准大气模型，“流体特性”。第2章讲述流体运动控制方程，“流体力学基础”，包括微分和积分形式的连续方程(基于质量守恒)、线性动量方程(基于牛顿运动定律)以及能量方程(基于热力学第一定律)。无黏不可压流动的模拟则是第3章的主题，“不可压、无黏流场动力学”。黏性边界层的模拟，尤其强调不可压流动又是第4章的主要内容“黏性边界层”。因此，第1章到第4章阐述的内容涵盖了空气动力学应用所依据的基本原理。对于已经学过一门或几门流体力学课程的读者，这四章提供了流体力学的综合复习和对本书的术语和风格的一个介绍。

至此读者将开始集中学习空气动力学的应用。第5章介绍表征气动构型和气动性能的参数，“翼型和机翼的特征参数”。第6和第7章分别介绍低速(此时密度的变化可忽略)二维翼型和有限翼展机翼的空气动力性能模拟技术。第6章标题为“无限翼展机翼不可压流动”，而第7章为“有限翼展机翼不可压流动”。

后续五章讲述可压缩流场。为给读者提供高速空气动力学的必要背景知识，第8章讨论可压缩流动的流体力学基本原理，“可压缩流场动力学”。因此，从教学的角度来看，第8章是对第1到4章的材料上的补充。第9到12章介绍了高速(此时密度的变化不能忽略)流动的模拟技术。可压缩亚声速到跨声速流动的空气动力学性能是第9章的主题，“可压缩亚声速和跨声速流动”。二维翼型的超声速空气动力学则是第10章的主题，“薄翼型的二维超声速流动”，而第11章是关于有限翼展机翼的，“流经机翼和飞机构型的超声速流动”。第12章是高超声速流动。

下面章节将专注于计算每个可能的速度域内空气动力性能参数的基本模型的发展。那些在理论发展中提出的假设抑或限制都仔细地进行了注释。理论的

应用都通过解决一个或几个问题举例说明了。对于那些获得解析解不实际或不可能的流动,为了应用理论,解是通过数值技术获得的。在每一章,计算得出的空气动力参数都与试验数据进行了对比,这些数据都来自于公开文献,以证明理论分析的有效性和局限性(或等效地,理论可以应用的范围)。目的是为了利用试验数据确定所建议模型在应用上的局限性。

对黏性、压缩性、激波/附面层干扰、湍流模型以及当代空气动力学设计其他实际应用情况也进行了深入讨论。每章末尾所列的问题主要用来作为对章节中的内容的补充和使学生了解到各种现象的相对重要性。本书强调实际问题 and 可以获得这些问题答案的技术。因为国际单位制(System International Unites, SI)和英制单位在航空航天领域都普遍使用,因此本书两者都采用。两者间的转换系数会在文中给出。

第13和14章给出了与超过一个多世纪的飞行器特性设计和用于确定空气动力学参数的工具相关的材料。13章标题为“空气动力设计考虑”,14章为“确定空气动力环境的工具”。第14章解释了试验和计算在确定空气动力环境方面相互补充的作用。进一步,讨论了不同精度的计算技术的优势、局限性和作用。这两章的内容不仅会为学生提供有趣的阅读,而且对那些很久以前即已完成正式高等学院训练的专家们也会有用处的。

对前三版的注释

作者要感谢 Michael L. Smith 对《工程师用空气动力学》的重要贡献。是他帮助建立了本书从开篇到后续版本赖以为基础的品质。因此,他是前三版的合著者。

作者感激他的很多朋友和同事,他们为本书的前三版的准备提供了帮助。感谢他们的建议、支持以及在照片复印、插图和参考文献编辑上的帮助。作者感谢剑桥大学的 L. C. Squire; 奥斯丁的德克萨斯大学的 V. G. Szebehely; 赖斯大学的 F. A. Wierum; 圣母玛利亚大学的 T. J. Mueller; 通用动力公司的 R. G. Bradley 和 C. Smith; 洛克希德公司导弹和空间研究室的 G. E. Erickson 和 L. E. Ericsson; 洛克希德公司佐治亚分部的 L. Lemmerman 和 A. S. W. Thomas; 军用飞机马塞尔达索公司的 J. Periaux; 兰利研究中心的 H. W. Carlson, M. L. Spearman 和 P. F. Covell; 约翰逊空间中心的 D. Kanipe; Sandia 国家试验室的 R. C. Maydew, S. McAlees 和 W. H. Rutledge; 洛克希德马丁公司战术飞行器系统的 M. J. Nipper; 通用动力学的 H. J. Hillaker (原职); ANSER 公司的 R. Chase; 美国空军学院的 Lt. Col. S. A. Brant, Lt. Col. W. B. McClure 和 Maj. M.

C. Towne; 北加利福尼亚州立大学的 F. R. DeJarnette 以及弗吉尼亚工艺学院和弗吉尼亚州立大学的 J. F. Marchman III 作为前三版的审阅者提供的有价值的意见。

T. C. Valdez 不仅作为前三版的插图制作者,而且还把已经编入本书各版本的飞行器设计方面令人感兴趣的文章有规律地进行了整理。

第四版

软硬件的飞速进展使计算流体力学(CFD)在飞行器设计上得到了不断增长的运用。对计算方法的这种增长性依赖给第四版带来了三个独特的变化。

(1) 有关大迎角流场(第7章)、NACA翼型的跨声速流场(第9章)和SR71三个高马赫数的流场(第11章)的一些非常精妙的数值解第一次出现在工程师用空气动力学手册中。尽管在公开的文献中已经发表了这些结果,但 LLC Cobalt Solution 公司运用后处理软件包 Fieldview 和 EnSight 提供了高质量的图片。J. R. Forsythe 上校帮助获得了合适的图片。

(2) 文中唯一最大的变化就是对作为确定空气动力环境工具的试验和计算的互补性运用的讨论。第14章主要阐述这一点,试图客观地给出通篇分别讨论的各种工具的优势和局限性。

(3) 有一张CD包含了很多补充的作业问题和生动的图片可以提供给读者。请与 USAFA 的作者联系。

D. C. Blake 少校、J. R. Forsythe 上校和 M. C. Towne 对本书第四版的这些变化作出了有价值的贡献。他们担任了本书编写前的咨询顾问、修改内容的编辑和图片的提供者。正是因为作者期望能在本书反映计算的现实作用(局限性、优势和使用)和展示一些挑战性实例,所以作者非常感谢 D. C. Blake 少校、J. R. Forsythe 上校和 M. C. Towne 作出的大量贡献,他们都是在飞行器设计中运用和发展 CFD 的专家。

作者也非常感谢 M. Gen. E. R. Brachen 提供了有关军用飞机设计和飞行的信息和照片。波音公司的 G. E. Peter 和洛克希德马丁航空公司的 M. C. Towne 作为他们公司为第四版提供最新材料的联系人。

作者也要感谢奥本大学的 John Evan Burkhalter、克莱姆森大学的 Richard S. Figliola、乔治亚工学院的 Marilyn Smith 和德州农工大学的 Leland A. Carlson,他们是本书手写草稿的审阅人,所提供的评语已融入本书或相关的CD中。

作者也要感谢美国航空航天协会(AIAA)、空间研究和发展咨询组(AGARD)、北大西洋公约组织(NATO)、波音公司和洛克希德马丁战术飞机系统允许作者复制大量的档案材料。这些材料不仅成为第四版的重要部分,而且可以作为读者开展新的研究的绝好基础。

最后,感谢 Margaret Baker 和 Shirley Orlofsky。

约翰·J·伯廷
美国空军学院

目 录

第 1 章 为什么要学习空气动力学 1

- 1.1 能量-机动技术 1
- 1.2 气动热力学参数求解 5
- 1.3 总结 19

第 2 章 流体力学基础 24

- 2.1 流体力学介绍 24
- 2.2 质量守恒 26
- 2.3 线性动量守恒 29
- 2.4 常特性流动的应用 33
- 2.5 作为相似参数的雷诺数和马赫数 39
- 2.6 边界层概念 43
- 2.7 能量守恒 44
- 2.8 热力学第一定律 45
- 2.9 能量方程推导 46
- 2.10 总结 53

第 3 章 不可压无黏流场动力学 65

- 3.1 无黏流动 65
- 3.2 伯努利方程 66
- 3.3 利用伯努利方程确定空速 69
- 3.4 压力系数 71
- 3.5 环量 73
- 3.6 无旋流动 75
- 3.7 开尔文定理 76
- 3.8 不可压缩无旋流动 77

- 3.9 二维不可压缩无旋流动的流函数 78
- 3.10 流线与等势线的关系 79
- 3.11 流动的叠加 82
- 3.12 基本流动 82
- 3.13 叠加基本流动以描述圆柱绕流 87
- 3.14 作为无量纲场参数的升力和阻力系数 93
- 3.15 绕有环量圆柱流动 97
- 3.16 在物体表面上的源密度分布 100
- 3.17 不可压缩轴对称流动 104
- 3.18 总结 107

第4章 黏性边界层 119

- 4.1 二维、定常、不可压缩流动的边界层控制方程 120
- 4.2 边界条件 122
- 4.3 不可压缩层流边界层 123
- 4.4 边界层转捩 140
- 4.5 不可压缩湍流边界层 141
- 4.6 涡黏性和混合长度概念 148
- 4.7 平板边界层的积分方程 152
- 4.8 常特性流动的热边界层 160
- 4.9 总结 166

第5章 翼型和机翼的空气动力学特征参数 171

- 5.1 空气动力的力和力矩特性 171
- 5.2 翼型几何参数 174
- 5.3 机翼几何参数 176
- 5.4 空气动力的力和力矩系数 184
- 5.5 有限翼展机翼 207

第6章 绕无限展长翼型的不可压缩流动 224

- 6.1 概述 224
- 6.2 环量和升力的产生 225
- 6.3 一般的薄翼型理论 226
- 6.4 薄的平板翼型(对称翼型) 229
- 6.5 薄的有弯度翼型 232
- 6.6 层流翼型 241