



国家出版基金项目

“十二五”国家重点出版物出版规划项目

现代兵器火力系统丛书

非定常气体 动力学

Unsteady Aerodynamics

王保国 高歌 黄伟光 徐燕骥 闫文辉 著

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



国家出版基金项目

“十二五”国家重点出版物出版规划项目

现代兵器火力系统丛书

非定常气体动力学

王保国 高歌 黄伟光
徐燕骥 闫文辉



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

内 容 简 介

在现代气体动力学的研究中,非定常流动问题难度很大,物理现象复杂,一直是该领域的前沿内容。本书是关于气体动力学非定常流动问题的一部专著。全书分两篇12章,分别从一维、二维和三维非定常流动的重要特征入手,描述简单波、稀疏波、压缩波、激波、燃烧波以及爆轰波间相互作用的特点,分析涡量动力学在非定常气动力计算中的作用,探讨脉冲激光推进技术的力学基础以及应用前景。书中还细致讨论非定常流动在航空动力设计、现代兵器的气动设计、飞行器气动布局和未来航天器研制中的应用。

本书可供航空航天、动力工程与工程热物理以及兵器科学领域等相关专业科研人员参考,也可作为有关院校流体力学专业、航空航天专业研究生学位课教材。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

非定常气体动力学/王保国等著. —北京:北京理工大学出版社, 2014. 2

(现代兵器火力系统丛书)

国家出版基金项目及“十二五”国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978-7-5640-8770-8

I. ①非… II. ①王… III. ①非定常空气动力学 IV. ①O354

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第020667号

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)

82562903 (教材售后服务热线)

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 / 787毫米×1092毫米 1/16

印 张 / 38

字 数 / 718千字

版 次 / 2014年2月第1版 2014年2月第1次印刷

定 价 / 144.00元

责任编辑 / 李炳泉

王佳蕾

文案编辑 / 李炳泉

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

现代兵器火力系统丛书

编 委 会

主 任 王兴治

副主任 王泽山 朵英贤

编 委 (按姓氏笔画排序)

王亚平 王志军 王保国 尹建平 冯顺山

吕春绪 刘吉平 肖忠良 张 合 张小兵

张相炎 陈国光 林 杰 欧育湘 金志明

周长省 胡双启 姜春兰 徐 诚 谈乐斌

董素荣 韩子鹏 韩 峰 蔡婷婷 樊红亮

总 序

国防科技工业是国家战略性产业，是先进制造业的重要组成部分，是国家创新体系的一支重要力量。为适应不同历史时期的国际形势对我国国防力量提出的要求，国防科技工业秉承自主创新、与时俱进的发展理念，建立了多学科交叉，多技术融合，科研、实验、生产等多部门协作的现代化国防科研生产体系。兵器科学与技术作为国防科学与技术的一个重要分支，直接关系到我国国防科技总体发展水平，并在很大程度上决定着国防科技诸多领域的成果向国防军事硬实力的转化。

进入 21 世纪以来，随着兵器发射技术、推进增程技术、精确制导技术、高效毁伤技术的不断发展，以及新概念、新原理兵器的出现，火力系统的射程、威力和命中精度均大幅提升。火力系统的技术进步将推动兵器系统的其他分支发生相应的革新，乃至促使军队的作战方式发生变化。然而，我国现有的国防科技类图书落后于相关领域的发展水平，难以适应信息时代科技人才的培养需求，更无法满足国防科技高层次人才的培养要求。因此，构建系统性、完整性和实用性兼备的国防科技类专业图书体系十分必要。

为了解决新形势下兵器科学所面临的理论、技术和工程应用等问题，王兴治院士、王泽山院士、朵英贤院士带领北京理工大学、南京理工大学、中北大学的学者编写了《现代兵器火力系统》丛书。本丛书以兵器火力系统相关学科为主线，运用系统工程的理论和方法，结合现代化战争对兵器科学技术的发展需求和科学技术进步对其发展的推动，在总结兵器火力系统相关学科专家学者取得主要成果的基础上，较全面地论述了现代兵器火力系统的学科内涵、技术领域、研制程序和运用工程，并按照兵器发射理论与技术的研究方法，分述了枪炮发射技术、火炮设计技术、弹药制造技术、引信技术、火炸药安全技术、火力控制技术等内容。

本丛书围绕“高初速、高射频、远程化、精确化和高效毁伤”的主题，梳理了近年来我国在兵器火力系统相关学科取得的重要学术理论、技术创新和工程转化等方面的成

果。这些成果优化了弹药工程与爆炸技术、特种能源工程与烟火技术、武器系统与发射技术等专业体系，缩短了我国兵器火力系统与国外的差距，提升了我国在常规兵器装备研制领域的理论水平和技术水平，为我国兵器火力系统的研发提供了技术保障和智力支持。本丛书旨在总结该领域的先进成果和发展经验，适应现代化高层次国防科技人才的培养需求，助力国防科学技术研发，形成具有我国特色的“兵器火力系统”理论与实践相结合的知识体系。

本丛书入选“十二五”国家重点出版物出版规划项目，并得到国家出版基金资助，体现了国家对兵器科学与技术，以及对《现代兵器火力系统》出版项目的高度重视。本丛书凝结了兵器领域诸多专家、学者的智慧，承载了弘扬兵器科学技术领域技术成就、创新和发展兵工科技的历史使命，对于推进我国国防科技工业的发展具有举足轻重的作用。期望这套丛书能有益于兵器科学技术领域的人才培养，有益于国防科技工业的发展。同时，希望本丛书能吸引更多的读者关心兵器科学技术发展，并积极投身于中国国防建设。

丛书编委会

序

非定常流动是指流动状态随时间变化的流动，而不随时间变化的称为定常流动。在自然界中非定常流动是最普遍存在的流体运动形式。

飞机飞行时若迎角超过一定范围，气流会在机翼吸力面分离，而分离流往往是非定常的。特别对于现代战斗机，大迎角机动飞行在进攻和防御中都是不可缺少的，具备这种能力是现代先进战机的重要标志。随着迎角增大，气流分离现象更加严重，往往导致飞机发生抖振和失控现象。要解决这些问题就必须对非定常流动特性进行深入研究。

各种燃气轮机的压气机和涡轮通道中，转子与静子叶片排的交替排列使得流场具有固有的非定常性。在此背景框架下，进口流场畸变、旋转失速、喘振、颤振、二次流、叶尖泄漏流、分离流、转捩、尾迹、不同尺度的旋涡，以及几乎充满整个流动空间的湍流等各种非定常流动现象更加复杂。

非定常性进一步增加了气动力学的复杂性和难度。针对非定常性，数学家进行了大量研究，得到了一些深刻反映非定常物理特征的结果，深化了人们的认识，很有教益。尽管非定常项本身不是非线性，但描写非定常气动力学物理现象的却是非定常非线性偏微分方程组，对于这样的数学问题，至今未能得到一般情况下的解析解，而且至今也看不到从理论上根本解决这些问题的前景。不断提高产品质量的客观需求不能等待科学问题的彻底解决，于是采用了两条途径：一是简化数学问题；二是依靠试验研究，这两者紧密结合、相互补充，取得了惊人的成就。

简化数学问题主要是非定常问题定常化，即用各种方法将非定常问题近似为定常问题。例如，将非定常偏微分方程（组）对时间积分，消去时间项，成为定常方程（组）；也可以采用其他假设，简化为定常方程（组）。应当指出，过去几十年，压气机和涡轮的产品性能得到了非常大的提高，而工程设计的手段都是基于各种简化的定常设计体系，而且至今这仍是世界先进国家所采用的基本体系。当然，这些体系都是以大量试验

数据为支撑的。尽管定常体系取得了巨大的成就，但毕竟没有反映真实流动的全部信息，有一定局限性。这正是本书的出发点。特别是随着数值技术的进步，人们做出了很大的努力，力求利用 CFD 的方法，在设计体系中引入非定常的因素，并已取得可喜的进展。

依靠试验研究处理非定常问题，是基本的有效途径。最典型的成功例子是 Calming 效应。剑桥大学针对上游叶排尾迹对下游叶排扫掠的作用，经过大量深入细致的试验研究发现，在非定常尾迹作用下，边界层的转换过程与定常边界层有明显不同，充分利用湍流斑镇静区（Calming Region）的特性可以既延缓分离，又得到高效率。利用此技术，在低雷诺数条件下，可使得低压涡轮在效率不降低甚至略有提高的情况下，气动负荷提高 30%~40%。此技术已成功应用于多种航空燃气涡轮发动机上。

鉴于非定常流动现象的普遍性和工程应用的重要性，本书从现代航空、航天、动力与工程热物理以及兵器科学与技术中，抽取其中的非定常流动问题并针对流动中所发生的基本物理现象和流动作用的机理进行阐述，力求使读者对问题有一个较全面的了解与认识，使读者能够掌握书中所讲述的基本理论和基本方法，并为进一步开展这方面的科学研究指明方向。该书的出版进一步充实、加强了空气动力学领域中的非定常部分，对空气动力学本身也是非常有意义的。本书的五位作者来自两所国家级重点高校（北京理工大学、北京航空航天大学）和两个国家级科研机构（中国科学院上海高等研究院、中国航空研究院），他们率领着五个学术研究团队，其研究领域涵盖了航空、航天、动力工程与工程热物理以及兵器科学与技术的多个学科。他们实行强强联合、优势互补的合作模式，具有很好的多学科融合性。这种合作的模式，有利于理论分析与工程实践之间的密切结合，有利于多个学科之间的交叉、碰撞与激励，有利于写出一本好书，值得推广。本书凝聚了作者们多年来的研究成果与实践经验，是一本学术水平高、系统性强、密切联系实际的好书，对读者很有启示和教益。相信本书的出版，对非定常气体动力学的研究会产生积极的推动作用。

陈懋章

2013 年 9 月 18 日

前 言

这是一部气体动力学非定常问题的专著，全书分两篇 12 章，始终坚持重基础、重应用和少而精的基本原则。目前，阐述从一维、二维到三维非定常流动的重要特征，研究从内流到外流的流动性质，描述从简单波、稀疏波、压缩波、激波、燃烧波到爆轰波间相互作用的特点，分析涡量动力学在非定常气动力计算中的重要作用，探讨激光推进技术的力学基础，讨论非定常流动在航空动力设计、飞行器气动布局、未来航天器研制以及在现代兵器设计中应用的书籍实为少见，从这个意义上讲，这部专著弥补了国内这方面出版的缺憾。

长期工作在教学与科研第一线上的五位作者，分别来自北京理工大学宇航学院、北京航空航天大学能源与动力工程学院、中国科学院上海高等研究院和中国航空研究院新技术研究所，他们都是这个领域中不同部门的学术带头人，曾发表过百余篇学术论文，出版过多部专著与教材，具有较丰富的科研与写作经验。本书第一作者王保国教授荣获北京市教学名师称号，出版专著与教材 12 部，而且全部为第一作者，其中已出版的《流体力学》（机械工业出版社）、《空气动力学基础》（国防工业出版社）、《气体动力学》（原国防科工委五院校出版社）、《工程流体力学（上、下册）》（科学出版社）、《高超声速气动热力学》（科学出版社）、《稀薄气体动力学计算》（北京航空航天大学出版社）、《高精度算法与小波多分辨分析》（国防工业出版社）、《叶轮机械跨声速及亚声速流场的计算方法》（国防工业出版社）、《传热学》（机械工业出版社）、《安全人机工程学》（机械工业出版社）、《人机环境安全工程原理》（中国石化出版社）、《人机系统方法学》（清华大学出版社）等涉及流体力学学科、工程热物理学学科以及航空宇航一级学科中人与环境工程学科，涉及高速飞行器、动力机械以及喷气推进装置的气动布局与气动设计，涉及航天器的高超声速再入飞行问题以及热防护与热安全，涉及微观物理与宏观力学之间的交叉与结合，涉及物理力学与工程力学问题的融合与统一。上述书籍的写作与王保

国教授在中国科学院力学研究所和工程热物理研究所长达 16 年、在清华大学力学系长达 10 年以及在北京理工大学宇航学院长达 10 年的工作经历紧密相联。另外，王保国教授有许多社会学术兼职，他连续两届担任中国人类工效学学会副理事长（2008—2016 年）、长期担任人机工程专业委员会主任（自 2003 至今）；另外，从 2003 年至今还一直担任中国系统工程学会人一机—环境委员会副秘书长等。2011 年 10 月 22 日在北京召开的“隆重纪念伟大科学家钱学森诞辰 100 周年暨人一机—环境系统工程创立 30 周年大会”上授予王保国教授终身成就奖并颁发证书（本次全国大会两名获奖人之一）。此外，有一点还应说明：山东临清是京剧之乡，也是国学大师季羨林先生的故乡，因此王保国教授自幼喜爱中国京剧（虽不是京剧名票，但自 5 岁开始听戏至今）并受益极大，从中学会了做人、做事、做学问，学会了为人忠厚、懂得感恩，深知百善孝为先的人生道理；他自幼立志以季羨林先生为榜样，具有学习刻苦认真、一丝不苟的基本素质；深刻理解了苦练基本功、举一反三、融会贯通做学问的基本道理。正是这些基本素质和基本道理，促使王教授写出了上述 12 本专著与教材。这些著作深刻与准确地反映了他在从事航空发动机气动设计、飞行器气动布局与高超声速再入热防护、载人航天器人机系统评价与分析三个涉及国防建设的重要前沿科学领域中，40 多年学术研究与辛勤耕耘的丰硕成果；体现了他作为学术带头人，在工程热物理、航空航天、人机与环境工程这三个不同学科但又密切联系的交叉学术前沿领域中，潜心专研、勇于探索、一丝不苟、严谨求实的优良学风。本书第二作者高歌教授是 1984 年国家发明一等奖、首届航空金奖和首届国防科工委光华特等奖的获得者，是 GAO-YONG 理性湍流理论的创始人；他提出与设计的沙丘驻涡火焰稳定器是我国近年来在喷气推进技术上的重大发明之一，1985 年 2 月国家最高领导人在中南海接见了高歌教授和宁槐先生，并合影留念；他于 1980 年在科学出版社出版的《燃烧室气动力学》一书一直作为航空航天动力专业高年级学生及研究生的重要指导性著作；近年来，他出版的《兰星科技畅想》和《宇宙天演论》深受国内外读者们的欢迎。本书第三作者黄伟光先生现任中国科学院上海高等研究院副院长、研究员，曾任中国科学院工程热物理研究所所长以及国家重点基础研究发展（“973”计划）项目首席科学家，曾两次荣获国家科技进步二等奖，一次荣获国家自然科学二等奖，著有《气体动力学》、《高超声速气动热力学》和《人机环境安全工程原理》；兼任《航空学报》与《工程热物理学报》编委、《Journal of Thermal Science》杂志主编；另外，兼任北京理工大学特聘教授。本书第四作者徐燕骥博士是 20 世纪 80 年代毕业于清华大学热能系的优秀学子，大学毕业后一直在中国科学院工程热物理研究所和中国科学院上海高等研究院从事气动热力学以及新型能源动力的研究，他是中国科学

院上海新喆机电技术的总负责人、学术带头人。本书第五作者闫文辉博士，在北京航空航天大学接受的长达9年的本科和研究生系统教育，打下了坚实的理论基础；在美国著名大学的留学经历开阔了眼界，增强了从事科学研究的活力；他是中国航空研究院新技术研究所的高级工程师，是一位年轻的学术新秀。五位作者紧密合作、共同完成了这部多学科交叉、紧紧贴近气体动力学前沿的学术著作。

五位作者十分感谢卞荫贵先生、吴仲华先生、宁槐先生、陈乃兴先生、陈懋章院士、童秉纲院士、朵英贤院士、徐更光院士、顾诵芬院士和陶文铨院士对研究工作的长期关心与支持。另外，感谢五位作者所在团队人员的共同努力和不懈的工作。此外，还向书中参考文献里所列出的作者们与同仁们表示感谢。在本书出版期间，得到了北京理工大学出版社罗勇总编、樊红亮副社长以及编辑尹晖的大力支持与帮助，正是他们的敬业精神才使得本书得以如期出版，我们表示感谢。尤其令五位作者非常感动并深受教育的是，陈懋章院士那种一丝不苟的敬业精神和对晚辈那份关爱与热情，也体现在为本书写序的过程中。为给本书写序，先生在百忙之中，占用了整整一个星期的宝贵时间。他首先认真审阅了该书的详细目录、写作大纲和整体框架以及全书的重点章节，而后在此基础上动手写序。为了准确与充分地给读者表达书中的内容，陈先生反复推敲序中的用词、用字以及序中的内容，并与我们多次当面或电话沟通。序的电子稿，我们曾收到过四稿，这种办事认真负责的敬业精神深深地教育了我们。同样，陈懋章院士的这种严谨学风也体现在他的著作与他发表的文章中。他的《黏性流体动力学基础》（高等教育出版社，2002年）概念准确、论述严谨，是我们业内公认的打好专业基础的必读教材；他的《黏性流体动力学理论及紊流工程计算》（北京航空学院出版社，1986年）是我们当时学习湍流工程算法的最宝贵教材，也是当时最贴近工程计算的工具书，深得专业工程技术人员欢迎。他发表的《压气机气动力学发展的一些问题》（《航空学报》，1985年）、《中国航空发动机高压压气机发展的几个问题》（《航空发动机》，2006年）、《叶轮机气动力学研究及其发展趋势》（《航空百年学术论坛》，2003年）、《中国压气机基础研究及工程研制的一些进展》（《航空发动机》，2007年）、《大涵道比涡扇发动机风扇/压气机气动设计技术分析》（《航空学报》，2008年）、《风扇/压气机技术发展和对今后工作的建议》（《航空动力学报》，2002年）以及《风扇/压气机气动设计技术发展趋势——用于大型客机的大涵道比涡扇发动机》（《航空动力学报》，2008年）等，这些极为重要的文章及时地为我国从事航空发动机研制的高等学校、研究院所以及工程技术人员指明了方向，为我国航空发动机关键部件压气机与涡轮的研究与研制引领了前进的方向。这里必须指出的是，航空发动机对一个国家的安全至关重要。航空发达国家都把发

动机作为优先发展的技术列入国家或国防关键技术计划，并且严格禁止向别国转让。世界上能够自主设计与生产航空喷气发动机的也仅有少数几个国家，因此航空发动机的研制关系到我国国防的安全。我国需要一批像陈院士这样敬业的科学家和工程师去发展我国的航空事业，我国更需要成千上万的学子们能够热爱祖国的航空、热爱祖国航空发动机事业的发展、热爱祖国的国防事业，陈懋章院士为我们树起了人生楷模。

本书主要内容已在北京理工大学博士生《高等计算流体力学》学位教材中讲过多届，同学们反映较好。该书可作为研究生学位教材，也可作为相关专业科技人员的参考书。由于五位作者水平有限，书中的错误和不妥之处，敬请读者批评指正；还可通过 Email: bguowang@163.com 与我们联系，共同探讨。

作 者

2013 年 9 月 28 日

目 录

第一篇 基本理论与力学基础

第 1 章 广义气体动力学基本方程组	3
1.1 经典气体动力学的 Navier-Stokes 方程组	4
1.1.1 一般控制体及 Reynolds 输运定理	4
1.1.2 一般控制体下流体力学的基本方程组	4
1.1.3 Navier-Stokes 方程组的守恒形式	8
1.1.4 Navier-Stokes 方程组的数学性质与定解条件	9
1.2 非惯性相对坐标系中 Navier-Stokes 方程组	12
1.2.1 绝对坐标系与非惯性相对坐标系间的转换关系	12
1.2.2 绝对坐标系中叶轮机械 Navier-Stokes 方程组	13
1.2.3 绝对坐标系中 Navier-Stokes 方程组的强守恒与弱守恒型	14
1.2.4 相对坐标系中 Navier-Stokes 方程组及广义 Bernoulli 方程	16
1.2.5 吴仲华的两类流面理论以及涉及转子焓与熵的气动方程组	18
1.2.6 三维空间中两类流面的流函数主方程以及拟流函数法	21
1.3 电磁流体力学的基本方程组及电磁对偶原理	23
1.3.1 Maxwell 电磁理论的普遍规律及其对称形式	24
1.3.2 电磁场的标量势与矢量势以及 Maxwell 方程组的规范条件	26
1.3.3 电磁流体力学的基本方程组及其守恒形式	27
1.3.4 电流体力学与磁流体力学的基本方程组	29
1.3.5 电磁对偶原理	31
1.4 高温高速热力学与化学非平衡流动的基本方程组	34
1.4.1 组元 s 的连续方程以及总的连续方程	34
1.4.2 组元 s 的动量方程以及总的动量方程	35
1.4.3 组元 s 的能量方程以及总的能量方程	36

2 非定常气体动力学 ■

1.4.4	组元 s 的振动能量方程	37
1.4.5	总的电子与电子激发能量守恒方程	37
1.5	辐射流体力学及其基本方程组	38
1.5.1	粒子以及中子的辐射输运方程	39
1.5.2	光子的输运方程	41
1.5.3	三维非定常辐射流体力学基本方程组	43
1.6	气体动理学中的 Boltzmann 方程及广义 Boltzmann 方程	44
1.6.1	Boltzmann 方程的守恒性质及宏观守恒方程	44
1.6.2	单原子分子、多组元气体的 Boltzmann 方程	48
1.6.3	单组元、多原子分子、考虑分子内部量子数及简并度的 Boltzmann 方程	50
1.6.4	多组元、多原子分子的广义 Boltzmann 方程	52
1.6.5	BGK 模型方程	52
1.6.6	小 Knudsen 数特征区的一些特点及其分析	56
第 2 章	膨胀波、激波、燃烧波和爆轰波	61
2.1	膨胀波、压缩波的形成及 Prandtl-Meyer 流动	62
2.1.1	几个重要的概念与术语	62
2.1.2	理想气体定常、等熵流动的基本方程组	62
2.1.3	膨胀波与微弱压缩波的形成	64
2.1.4	Prandtl-Meyer 流动时的微分关系	66
2.2	激波的性质及激波前后的参数关系	68
2.2.1	驻激波的形成	69
2.2.2	运动激波的形成	70
2.2.3	激波间断面的动力学条件及激波性质	72
2.2.4	激波前后的参数关系	77
2.3	正激波与斜激波	78
2.3.1	定常气体运动的固定正激波	78
2.3.2	运动正激波	79
2.3.3	斜激波	83
2.4	激波、膨胀波的反射和相交	88
2.5	超声速圆锥绕流及轴对称锥型流的求解	92
2.5.1	锥型流以及超声速气流绕圆锥流动的基本方程	92
2.5.2	轴对称超声速气流绕圆锥的流动及其求解	94
2.6	超声速进气道的激波系以及排气喷管的波系分析	97
2.6.1	超声速进气道的激波系分析	97

2.6.2 排气喷管的重要作用及塞式喷管的波系分析	101
2.7 压气机及涡轮中的激波与膨胀波	102
2.7.1 超声速压气机叶栅中的流动	104
2.7.2 任意回转面叶栅超声速进口流场中唯一进气角的确定	107
2.7.3 涡轮叶栅中的气流流动及波系结构	118
2.8 波的相互作用	120
2.8.1 特征线在刚性边界上的反射	121
2.8.2 膨胀波或压缩波在开口端处的反射	122
2.8.3 等熵波之间的相互作用	123
2.9 有间断面的一维非定常流动	124
2.9.1 运动激波与驻激波之间的共性及重大区别	125
2.9.2 运动正激波在静止气体中的传播	129
2.9.3 激波的相互作用及接触间断面的计算	131
2.9.4 初始间断的分解及 Riemann 问题的精确解法	136
2.10 激波管问题的流动分析	145
2.10.1 激波管各区流动的计算与分析	145
2.10.2 获得较高试验温度与速度的途径	147
2.11 气体动力突跃面的分类以及一维燃烧波的分析	150
2.11.1 气体动力突跃面存在的条件与突跃面分类	150
2.11.2 一维燃烧波分析以及 C-J 理论模型	150
2.11.3 Rankine-Hugoniot 曲线的分析	152
2.12 爆轰波的 ZND 模型	153
第 3 章 非定常无黏流的数学结构以及一维广义 Euler 流	157
3.1 可压缩、无黏、非定常 Euler 方程组的数学结构	157
3.1.1 可压缩、无黏、完全气体非定常流动基本方程组的数学结构	157
3.1.2 一维非定常无黏流基本方程组特征值与特征方程	160
3.2 守恒变量与原始变量基本方程组间的相互转换及特征分析	161
3.2.1 双曲型方程组的左右特征矢量矩阵及特征标准型方程	161
3.2.2 两类基本方程组间的相互转换及特征分析	165
3.3 双曲型守恒律方程的弱解及熵函数、熵通量、熵条件	168
3.3.1 熵函数与熵通量	168
3.3.2 强间断以及接触间断面两侧参数间的关系	170
3.3.3 典型模型方程的经典解	170
3.3.4 单个守恒律方程及 Олейник 熵条件	175
3.4 双曲型偏微分方程组初、边值问题的提法	177

4 非定常气体动力学 ■

3.4.1 双曲型方程边界条件提法的一般性原则	178
3.4.2 单向波动方程的初、边值问题的提法	182
3.4.3 一维非定常 Euler 方程组初、边值问题的提法	183
3.5 非定常一维均熵流动及分析	184
3.5.1 均熵流动下的 Riemann 不变量	185
3.5.2 初值问题的依赖域与影响区	187
3.5.3 简单波区的性质及流动参数计算	188
3.6 非定常非均熵一维流动及分析	192
3.7 一维磁流体力学方程组及其特征值	193
3.8 一维球面爆轰波问题的自模拟解	195
第 4 章 非定常黏性流的数学结构以及一维广义 Navier-Stokes 方程组	198
4.1 Navier-Stokes 方程组的几种通用形式	198
4.1.1 笛卡儿坐标系下守恒型基本方程组的微分形式	198
4.1.2 曲线坐标系下守恒型方程组的微分形式	200
4.1.3 守恒方程组坐标变换的重要特点	202
4.2 黏性项计算的一种简便方法	207
4.3 黏性流体力学方程组的数学性质及定解条件	210
4.3.1 一阶拟线性方程组分类的一般方法	210
4.3.2 方程分类的实例 (用一阶的方法)	210
4.3.3 二阶拟线性方程组分类的一般方法及方程定解条件	213
4.4 广义一维非定常流动的特征线方程和相容关系	218
4.4.1 考虑摩擦、加热、添质效应的广义一维非定常流动	218
4.4.2 广义一维非定常流动沿特征线的相容关系	221
4.5 一维黏性热传导流体力学方程组	223
4.6 考虑离子黏性的一维非定常辐射磁流体力学方程组	224
4.7 非定常 Navier-Stokes 方程的一个精确解	225
4.7.1 有运动边界的非定常流动——Stokes 第一问题	225
4.7.2 Stokes 第一问题的解法	226
4.7.3 流场涡量分析	228
4.8 非线性 Burgers 方程的求解与分析	230
4.8.1 Burgers 方程的推导	230
4.8.2 Burgers 方程的求解	232
4.8.3 Burgers 方程解的讨论与分析	233
4.9 KdV 方程以及 KdV-Burgers 方程	234
4.9.1 KdV 方程及典型算例	234

4.9.2 KdV-Burgers 方程	236
第 5 章 二维与三维流场的分析与数值计算方法	240
5.1 三维定常与非定常速度势函数的主方程	240
5.1.1 等熵、定常、无黏流动的两个基本方程	240
5.1.2 定常流动的速度势主方程	241
5.1.3 非定常流动的速度势主方程	241
5.2 定常/非定常流动时机翼与叶栅绕流的尾缘条件	243
5.2.1 无黏流与黏性流动边界条件的数学处理概述	243
5.2.2 不可压缩理想流体的保角映射方法	245
5.2.3 Kutta-Жуковский 假设及环量的确定	248
5.2.4 非定常 Kutta-Жуковский 条件	251
5.3 跨声速流函数方法以及人工可压缩性	252
5.3.1 三维空间中的两族等值面	252
5.3.2 二维空间中的弱守恒型流函数方程及人工密度	252
5.4 二维与三维跨声速势函数方法	254
5.4.1 两种形式的全位势主方程及 AF2 格式	254
5.4.2 二维小扰动势函数方程的 Murman-Cole 格式及线松弛解法	257
5.5 跨声速流场计算中的高效率、高分辨率算法	260
5.5.1 高效率算法	260
5.5.2 高分辨率算法以及 Harten 的 TVD 格式	261
5.5.3 具有 TVD 保持性质的 Runge-Kutta 方法	267
5.6 超声速流动的空间推进高效算法	268
5.6.1 可压缩无黏与黏性气体基本方程组的数学性质及 PNS 方程	268
5.6.2 隐式 LU 分解格式	269
5.6.3 PNS 方程的空间推进求解方法	271
5.7 高超声速无黏流动分析	277
5.7.1 高超声速小扰动方程及边界条件	277
5.7.2 Mach 数无关原理	281
5.7.3 高超声速流的等价原理	283
5.8 高超声速无黏流数值计算概述	284
5.9 高超声速黏性流动分析	286
5.9.1 驻点的层流边界层方程及热流计算	286
5.9.2 激波与边界层相互干扰的数值计算	291
5.10 高温效应以及高温无黏气体的平衡流与非平衡流动	298
5.10.1 高温气体的性质及真实气体的概念	298