

“十三五”国家重点图书出版规划项目·重大出版工程

高超声速出版工程

稀薄气体动力学 矩方法及数值模拟

陈伟芳 赵文文 著



科学出版社

“十三五”国家重点图书出版规划项目·重大出版工程
高超声速出版工程

国家自然科学基金资助项目(编号: 11502232 和 11572284)

国家重点基础研究发展计划资助项目(编号: 2014CB340201)

稀薄气体动力学矩方法 及数值模拟

陈伟芳 赵文文 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书共分为七章:第一章为绪论,阐述 Boltzmann 方程与矩方程的研究意义、发展历程、工程应用背景及面临的挑战;第二章详细介绍稀薄气体动力学中的基本物理概念;第三章推导二阶 Burnett 方程的数学形式,并采用 Bobylev 线性稳定性分析方法对典型 Burnett 方程进行稳定性与熵增分析;第四章重点介绍在一维激波结构与三维量热完全气体条件下 Burnett 方程数值计算方法及应用;第五章将 Burnett 方程推广到考虑热化学非平衡效应的高焓连续流及滑移过渡流动,给出 Burnett 方程热化学非平衡流动的数值计算方法及相关应用;第六章主要包括 Grad 矩封闭方法及正则化 Grad 矩方法,重点介绍正则化十三矩方程;第七章介绍广义矩方法中 Eu 方程理论基础、计算方法及应用。

本书可供从事稀薄气体动力学的研究人员阅读,亦可作为航空航天相关领域工程设计人员的工具书和参考书。

图书在版编目(CIP)数据

稀薄气体动力学矩方法及数值模拟 / 陈伟芳, 赵文
文著. —北京: 科学出版社, 2017.12

“十三五”国家重点出版物出版规划项目·重大出版
工程 高速声速出版工程

ISBN 978-7-03-055439-0

I. ①稀… II. ①陈… ②赵… III. ①稀薄气体动力
学—Boltzmann 输运方程—数值模拟—研究 IV. ①O354

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 283676 号

责任编辑: 潘志坚

责任印制: 谭宏宇 / 封面设计: 殷 靓

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

南京展望文化发展有限公司排版

苏州市越洋印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 12 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2017 年 12 月第一次印刷 印张: 22 1/4 插页 7

字数: 372 000

定价: 128.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

高超声速出版工程
丛书专家委员会

顾 问

王礼恒 张履谦

主任委员

包为民

副主任委员

杜善义 吕跃广

委 员

(按姓名汉语拼音排序)

包为民	艾邦成	陈连忠	陈伟芳	陈小前
邓小刚	杜善义	李小平	李仲平	吕跃广
孟松鹤	闵昌万	沈 清	谭永华	汤国建
王晓军	尤延铖	张正平	朱广生	朱恒伟

高超声速出版工程

高超声速空气动力学系列

主 编

沈 清

副主编

艾邦成 陈伟芳 闵昌万

编 委

(按姓名汉语拼音排序)

艾邦成 曹 伟 陈坚强 陈伟芳 符 松
柳 军 罗金玲 罗振兵 闵昌万 沈 清
杨基明 叶友达 余永亮 周 禹

作者简介



陈伟芳,1970年生,湖南邵阳人,博士,浙江大学航空航天学院教授、博士生导师。自1991年9月起一直从事稀薄气体动力学的理论与计算方法研究,1998年6月获国防科技大学博士学位,导师曹鹤荪教授和吴其芬教授。曾任总装备部重大工程论证专家委员会专家、国家“863”高科技计划专家,现任军委科技委科技创新特区项目专家、航天科技集团重大工程专家委员会专家、浙江大学临近空间飞行器研究中心主任。近年来,主持完成了包括国家自然科学基金项目、国家“863”高技术研究发展计划项目、国家重大工程专项等科学研究项目近40项。在国内外期刊发表科研论文50余篇,其中被SCI/EI检索近30篇,撰写国防科技报告20余篇,获得部委级科技进步三等奖2项,著有《稀薄气体动力学》(2004年)和《高温稀薄气体热化学非平衡流动的DSMC方法》(1999年)。



赵文文,1987年生,湖北宜昌人,博士,浙江大学先进技术研究院讲师。2009年毕业于西北工业大学动力与能源学院,获得飞行器动力工程工学学士学位;2014年毕业于浙江大学航空航天学院,获得流体力学博士学位;2013~2014年获得国家留学基金委资助,赴美国圣路易斯华盛顿大学应用科学与工程学院进行博士联合培养。2015年4月进入浙江大学先进技术研究院工作,成为浙江大学临近空间飞行器研究中心主要技术骨干。近年来,紧密围绕国家重大战略需求,重点针对临近空间稀薄气体动力学矩方法理论及高超声速空气动力学数值计算方法开展了相关研究工作,并取得了一系列富有新意的研究成果。

丛书序

飞得更快一直是人类飞行发展的主旋律。

1903年12月17日,莱特兄弟发明的飞机腾空而起,虽然飞得摇摇晃晃犹如蹒跚学步的婴儿,但拉开了人类翱翔天空的华丽大幕;1949年2月24日,Bumper-WAC从美国新墨西哥州白沙发射场发射升空,上面级飞行速度超越马赫数5,实现人类历史上第一次高超声速飞行。从学会飞行,到跨入高超声速,人类用了不到五十年,蹒跚学步的婴儿似乎长成了大人,但实际上,迄今人类还没有实现真正意义的商业高超声速飞行,我们还不得不忍受洲际旅行十多小时甚至更长飞行时间的煎熬。试想一下,当我们将来可以在两小时内抵达全球任意城市的时候,这个世界将会变成什么样!这并不是遥不可及的梦!

到今天,人类进入高超声速领域快70年了,无数科研人员为之奋斗终身。从空气动力学、控制、材料、防隔热到动力、测控、系统集成等众多与高超声速飞行相关的学术和工程领域内,一代又一代科研和工程技术人员传承创新,为人类的进步努力奋斗,共同致力于推动人类飞得更快这一目标。量变导致质变,仿佛是天亮前的那一瞬,又好像是蝶即将破茧而出,几代人的奋斗把高超声速推到了嬗变前的临界点上,相信高超声速飞行的商业应用已为之不远!

高超声速飞行的应用和普及必将颠覆人类现在的生活方式,极大地拓展了人类文明,并有力地促进人类社会、经济、科技和文化的发展。这一伟大的事业,需要更多的同行者和参与者!

培根说:书是人类进步的阶梯。

实现可靠的长时间高超声速飞行堪称人类在求知探索的路上最为艰苦卓越的一次前行,将披荆斩棘走过的路夯实、巩固成阶梯,以便于后来者跟进、攀登,

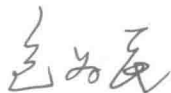
意义深远。

以一套丛书,将高超声速基础研究和工程技术方面取得阶段性成果和宝贵经验固化下来,建立基础研究与高超声速技术应用的桥梁,为广大研究人员和工程技术人员提供一套科学、系统、全面的高超声速技术参考书,可以起到为人类文明探索、前进构建阶梯的作用。

2016年,科学出版社就精心策划并着手启动了“高超声速出版工程”这一非常符合时宜的事业。我们围绕“高超声速”这一主题,邀请国内优势高校和主要科研院所,组织国内各领域知名专家,结合基础研究的学术成果和工程研究实践,系统梳理和总结,共同编写了“高超声速出版工程”丛书,丛书突出高超声速特色,体现学科交叉融合,确保了丛书的系统性、前瞻性、原创性、专业性、学术性、实用性和创新性。

该套丛书记载和传承了我国半个多世纪尤其是近十几年高超声速技术发展的科技成果,凝结了航天航空领域众多专家学者的智慧,既可为相关专业人员提供学习和参考,又可作为工具指导书。期望本套丛书能够为高超声速领域的人才培养、工程研制和基础研究提供有益的指导和帮助,更期望本套丛书能够吸引更多的新生力量关注高超声速技术的发展,并投身于这一领域,为我国高超声速事业的蓬勃发展做出力所能及的贡献。

是为序!



2017年10月

序 言

陈伟芳教授长期从事稀薄气体动力学的教学与科研工作。该书是他在这一专门学科进行理论与前沿探索的积累与总结。

稀薄气体动力学是空气动力学的一个分支,随着航天技术的问世而得到了发展。在航天领域,该学科主要涉及飞行器在大气层边缘飞行时的绕流和发动机羽流等,包括自由分子流和过渡流。目前,其理论体系尚不完备,在工程上的应用有很大的局限性。随着人类不断挑战空天飞机、临近空间高超声速飞行器 etc 新型航天技术的壁垒,以及开展火星科学探索及深空探测,稀薄气体动力学走到了航天技术领域的前沿。

本书首先介绍了经典稀薄气体动力学矩方法的理论与应用,以及该方面的最新研究进展。然后,针对高阶矩方程数值计算不稳定、边界条件处理缺乏理论依据等基础问题,陈伟芳教授及其研究团队开展了理论探索研究,从矩方法建模的基础理论出发,提出了简化常规 Burnett 方程与基于广义流体力学 Eu 方程的非线性本构关系耦合求解思想,解决了上述理论与应用难题。另外,这一新的理论方法与稀薄气体动力学的另一个分支——Boltzmann 方程的 Monte Carlo 直接数值模拟方法相比,计算规模大幅降低,连续流与过渡流可采用统一方法计算,已成功实现工程应用。本书给出了这个新的方法用于三维复杂外形高超声速多尺度稀薄流动的数值仿真计算的研究实例。因此,本书不仅贡献于稀薄气体动力学矩方法的理论进步,还为航天技术创新发展提供了一种先进的稀薄气体效应计算方法。

我认为,本书对于从事稀薄气体动力学研究的科研工作者和研究生是一本很好的理论参考读物,同时为从事空天飞行器、临近空间高超声速飞行器和宇宙探索的科研工作者提供了新的理论指导和研究方法。



2017 年 11 月

前言

临近空间(20~100 km)位于航天器入轨与返回的必经区域,也是长航时高超声速飞行器的巡航空域。飞行轨迹的特殊性决定了临近空间高超声速飞行器在设计过程中必须考虑稀薄大气环境对飞行器气动力、防隔热、通讯及控制的影响。与此同时,高马赫数飞行器前端激波滞止区所产生的高温气体效应将使得气体分子内部发生热力学能态激发、化学反应等复杂物理化学过程。因此,临近空间高超声速飞行器飞行环境同时包括了稀薄气体效应与高温气体效应的影响,两种效应叠加对飞行器空气动力学研究提出了新的课题与挑战。

建立在稀薄气体动理论基础之上的 Boltzmann 方程对气体从自由分子流到连续流进行了统一的描述,在这两种极限流动之间的流域还包含滑移流与过渡流。似乎直接采用理论或数值方法求解 Boltzmann 方程是解决稀薄气体流动问题最直接和统一的途径。但由于 Boltzmann 方程是一个包含多自变量与碰撞积分项的高度非线性的七维积分-微分方程,迄今为止仅得到了如平衡态 Maxwellian 速度分布等极少数解析解,而直接数值求解则因为方程维数过高(包括时间、位置与速度的七维空间)、非线性二元无穷积分碰撞项计算困难及时间-空间所需网格尺度太小导致直接数值求解方法进展缓慢,研究主要集中在针对不同流域发展不同的简化理论与数值计算方法。然而,矩方程为描述稀薄气体流动提供了另一种表达方式,若考虑基于完整函数空间所有矩组成的无穷个矩方程,则该矩方程组与 Boltzmann 方程等价。换言之,采用无穷多的“矩”对气体状态的描述与采用速度分布函数的描述完全一致。此外,处于平衡态附近的流动也并非需要完整给出流场中每一个点的速度分布函数,采用包括热流与应力在内的十三矩已经能够准确地描述近平衡态附近的流动。因此,矩方法作为

稀薄过渡流中的经典理论,在数值求解方法成熟度、计算效率等方面具有显著的优点与不可替代的地位。

本书从 Boltzmann 方程和稀薄气体动力学基本概念出发,并结合作者多年来在稀薄领域的研究基础,对以 Burnett 方程、十三矩方程、R-13 方程及近年来提出的非线性本构关系理论(NCCR 理论)进行全面的阐述,其中还包括了作者首次提出的适用于高超声速连续流、滑移过渡流条件($Kn < 1$)的简化常规 Burnett 方程以及非线性本构关系理论耦合求解方法。重点通过对不同类型矩方程的数学特性、物理含义及数值计算方法的详细介绍,对目前矩方法最新的国内外研究成果进行总结与展望,以期拓展稀薄气体动力学应用领域,提升气体动力学细观研究水平。

本书相关研究内容获得了国家重点基础研究发展计划(编号:2014CB340201)、国家自然科学基金(编号:11502232、11572284)及中央高校基本科研业务费专项资金相关项目资助。同时,在专著撰写过程中,感谢中国航天科技集团公司包为民院士、军委科技委吕跃广院士、美国圣路易斯华盛顿大学 Ramesh K. Agarwal 教授、浙江大学临近空间飞行器研究中心吴昌聚副教授和陈丽华副教授对本书成稿提出的意见和帮助。感谢浙江大学临近空间飞行器研究中心姜婷婷、邵纯、江中正、刘华林、田得阳、蔡林峰等的辛勤付出和努力,全书同样凝聚了他们的汗水与心血。感谢科学出版社给予的大力支持和帮助。由于作者水平有限,书中难免存在纰漏与不足,望同行专家与广大读者批评指正。

作者

2017 年 10 月于求是园

高超声速出版工程

目 录

丛书序

序言

前言

第一章 绪 论

1

- 1.1 Boltzmann 方程研究进展 / 1
- 1.2 矩方法研究进展 / 8
 - 1.2.1 Chapman-Enskog 展开与 Burnett 方程 / 9
 - 1.2.2 Hilbert 展开与 Grad 方程 / 14
 - 1.2.3 非线性本构关系理论 / 15
- 1.3 稀薄气体动力学与临近空间飞行器 / 16
- 1.4 本书主要内容 / 19
- 参考文献 / 21

第二章 Boltzmann 方程与速度矩

30

- 2.1 基本概念 / 30
 - 2.1.1 理想气体与分子平均自由程 / 30
 - 2.1.2 宏观物理量的微观描述 / 32

- 2.1.3 速度分布函数 / 35
- 2.2 Boltzmann 方程 / 35
 - 2.2.1 速度分布函数 f 的时空演化 / 35
 - 2.2.2 Boltzmann 方程的假设与一般形式 / 37
 - 2.2.3 麦克斯韦分布函数与平衡态 / 38
 - 2.2.4 边界条件的微观表达形式 / 41
 - 2.2.5 Boltzmann 模型方程 / 42
- 2.3 矩与输运方程 / 45
 - 2.3.1 单组分相密度的矩 / 45
 - 2.3.2 混合气体相密度的矩 / 49
 - 2.3.3 输运方程 / 51
- 2.4 Boltzmann-H 定理与熵 / 57
 - 2.4.1 Boltzmann-H 定理 / 57
 - 2.4.2 熵和 Boltzmann 方程不可逆性 / 58
 - 2.4.3 Gibbs 悖论 / 60
- 2.5 Chapman-Enskog 展开方法 / 60
- 参考文献 / 69

第三章 Burnett 方程及其稳定性分析

71

- 3.1 Burnett 方程一般形式 / 71
- 3.2 原始 Burnett 方程 / 74
- 3.3 常规 Burnett 方程 / 75
- 3.4 增广 Burnett 方程 / 79
- 3.5 Woods 方程与 BGK-Burnett 方程 / 81
- 3.6 正则化 Burnett 方程 / 82
- 3.7 简化常规 Burnett 方程 / 88
- 3.8 Burnett 方程线性稳定性与熵增分析 / 93
 - 3.8.1 Burnett 方程线性稳定性分析 / 93
 - 3.8.2 Burnett 方程的熵输运及熵增分析 / 107
- 参考文献 / 124

第四章 量热完全气体 Burnett 方程数值模拟

126

- 4.1 激波结构问题 / 126
 - 4.1.1 激波结构特点与关键特征参数 / 127
 - 4.1.2 激波结构计算稳定性与网格敛散性分析 / 128
 - 4.1.3 激波结构计算模拟 / 129
- 4.2 微尺度 Couette 流动问题 / 142
 - 4.2.1 控制方程 / 144
 - 4.2.2 边界条件 / 146
 - 4.2.3 计算方法 / 147
 - 4.2.4 算例分析 / 149
- 4.3 量热完全气体 Burnett 方程形式 / 152
- 4.4 空间差分格式与通量分裂方法 / 160
 - 4.4.1 有限体积空间离散方法 / 161
 - 4.4.2 MUSCL 插值方法 / 162
 - 4.4.3 通量分裂方法与 AUSM 类格式 / 163
- 4.5 时间隐式处理 / 166
 - 4.5.1 隐式时间离散方法的一般形式 / 166
 - 4.5.2 LU-SGS 方法 / 167
 - 4.5.3 时间步长计算与黏性项近似隐式处理 / 169
- 4.6 初边值条件 / 172
 - 4.6.1 流场初始条件与虚拟网格 / 172
 - 4.6.2 边界条件 / 173
 - 4.6.3 多块网格与并行计算 / 174
- 4.7 典型流动数值模拟与分析 / 175
 - 4.7.1 二维高超声速圆柱绕流 / 175
 - 4.7.2 三维高超声速球头绕流 / 185
 - 4.7.3 三维双曲钝锥再入流动 / 191
 - 4.7.4 三维空心扩张圆管 / 196
 - 4.7.5 三维高超声速尖双锥飞行器 / 200

4.7.6 三维高超声速类 HTV-2 飞行器 / 205

参考文献 / 209

第五章 考虑高温气体效应的 Burnett 方程流动数值模拟

214

5.1 高温气体热力学与化学非平衡理论 / 216

5.1.1 气体模型与高温气体效应 / 216

5.1.2 热力学状态与温度模型 / 217

5.1.3 化学平衡流、非平衡流与冻结流 / 220

5.2 高温热化学非平衡流动控制方程 / 221

5.2.1 振动能化学非平衡流 Burnett 方程直角坐标形式 / 221

5.2.2 化学反应动力学模型 / 227

5.2.3 热力学关系 / 228

5.2.4 混合气体输运系数 / 230

5.3 非平衡流数值计算方法 / 232

5.3.1 控制方程定解条件 / 232

5.3.2 数值离散与差分格式 / 233

5.3.3 化学反应源项点隐式处理 / 233

5.3.4 热力学温度的求解 / 235

5.4 典型流动数值模拟与分析 / 236

5.4.1 二维高超声速圆柱绕流 / 236

5.4.2 三维高超声速球头绕流 / 250

5.4.3 三维高超声速钝锥绕流 / 252

参考文献 / 258

第六章 Grad 矩方法及正则化方法

262

6.1 基于 Grad 方法的矩封闭理论 / 262

6.2 Grad 十三矩方程 / 265

6.3 Grad 方程 Chapman-Enskog 展开 / 267

6.4 Grad 方程正则化理论及 R-13 方程 / 269

6.5 矩方程量纲分析法 / 274

参考文献 / 276

第七章 广义流体力学方法理论及应用

278

7.1 NCCR 理论基础与方程基本形式 / 279

7.1.1 Boltzmann-Curtiss 方程 / 279

7.1.2 广义流体动力学方程推导 / 280

7.2 NCCR 理论数值计算方法 / 294

7.2.1 无量纲化的控制方程和非线性耦合本构模型 / 294

7.2.2 非线性耦合本构关系的迭代解法 / 296

7.2.3 非线性耦合本构关系特征曲线 / 302

7.3 典型流动数值模拟与分析 / 308

7.3.1 滑移流域单原子气体圆柱绕流 / 308

7.3.2 过渡流域双原子气体圆柱绕流 / 310

7.3.3 三维轴对称空心扩张圆管高超声速流动 / 312

参考文献 / 314

符号说明 / 317

附录 A Burnett 方程系数表及计算公式 / 322

附录 B 量热完全气体数值通量雅克比矩阵推导 / 325

附录 C 转动非平衡气体源项雅克比矩阵推导 / 327

附录 D 单温模型非平衡数值通量与源项雅克比矩阵 / 329

附录 E 双温模型非平衡数值通量与源项雅克比矩阵 / 331

附录 F 空气化学反应模型及组分常数表 / 334

后记 / 336

彩页 / 337