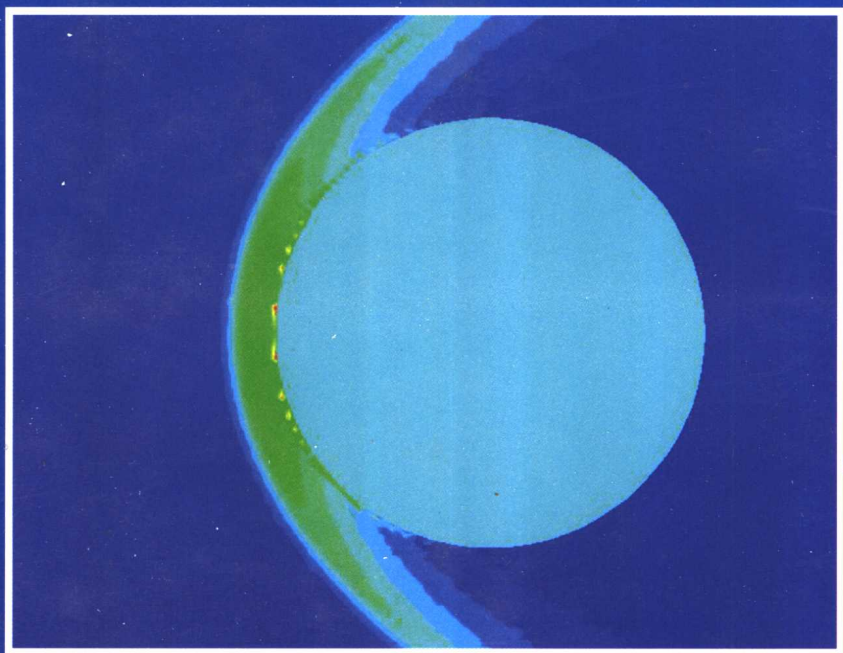


《近代空气动力学丛书》

稀薄气体动力学

Rarefied Gas Dynamics

沈 青 著



国防工业出版社

近代空气动力学丛书

稀薄气体动力学
Rarefied Gas Dynamics

沈 青 著

国防工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

稀薄气体动力学/沈青著. —北京:国防工业出版社,
2003.1

(近代空气动力学丛书)

ISBN 7-118-02955-6

I. 稀... II. 沈... III. 稀薄空气动力学
IV. V211.25

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 071701 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京奥隆印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 $10\frac{3}{4}$ 270 千字

2003 年 1 月第 1 版 2003 年 1 月北京第 1 次印刷

印数:1—2500 册 定价:28.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

IV

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金

第三届评审委员会组成人员

名誉主任委员 怀国模

主任委员 黄 宁

副主任委员 殷鹤龄 高景德 陈芳允 曾 铎

秘 书 长 崔士义

委 员 于景元 王小谟 尤子平 冯允成
(以姓氏笔划为序)

刘 仁 朱森元 朵英贤 宋家树

杨星豪 吴有生 何庆芝 何国伟

何新贵 张立同 张汝果 张均武

张涵信 陈火旺 范学虹 柯有安

侯正明 莫梧生 崔尔杰

序

有书应有序,序者必须说明为什么要写书,写书有什么意义。

近代空气动力学丛书是 1994 年开始酝酿的,等书出齐肯定是下一世纪了。这是一套跨世纪的丛书,当然我们希望它能有跨世纪的意义。20 世纪初始有飞机出现,莱特(W. Wright, O. Wright)兄弟于 1903 年发明了飞机。到 30 年代,低速飞机的设计已日趋成熟,而空气动力学的研究为此做出了突出的贡献。1934 年开始由美国戈根海姆基金会支持、由杜朗(W. F. Durand)主编并成为航空发展基石的六卷本的空气动力学理论(Aerodynamic Theory)丛书就是很好的佐证。著名的力学家普朗特(L. Prandtl)、泰勒(G. I. Taylor)及卡门(T. von Karman)等均为该丛书撰写了重要章节。我国学者钱学森在 40 年代末曾称丛书中泰勒所写的可压缩性流体力学为此领域当时最佳的著作。杜朗的这一套书并不是直接为设计用的,它强调的是一个一个专题的理论基础,是为飞机设计者的技术创新服务的。第二次世界大战后,人类很快进入了超声速时代,卡门和钱学森等人在 40 年代末提出要编写一套现代化的空气动力学丛书,这就是由查雷(J. Charyk)做主编的由普林斯顿大学出版的高速空气动力学与喷气推进(High Speed Aerodynamics and Jet Propulsion)丛书,这套丛书直到 50 年代后期才出齐。著名空气动力学学者钱学森、林家翘、郭永怀都是该丛书的主要作者。

进入 50 年代,洲际核导弹的研制成为苏美两国武器竞赛的关键项目。苏联在 1957 年 10 月 4 日发射了世界上第一颗人造地球卫星,显示了苏联有发射洲际导弹的能力;1961 年 4 月 12 日,世界上第一位航天员加加林(Ю. А. Гагарин)乘“东方”1 号飞船实现

了绕地球的轨道飞行。美国提出了“阿波罗”登月计划,并于1969年7月20日实现了两名航天员登上了月球,并顺利地返回;1981年4月12日美国“哥伦比亚”号航天飞机从地面起飞,绕地球36圈以后成功地降落在爱德华兹空军基地。另一方面,气动性能先进的苏-27和F-22等也相继出现。这些大大促进了航空航天事业的发展。作为航空航天事业的基础,近代空气动力学不仅涉及低速、跨声速、超声速,而且包括高超声速和超高速范围,此时空气中已产生离解、电离和其他化学反应。空气动力学已不再仅仅是30年代以机翼理论为代表的传统的学科,它的发展引发了多学科之间相互渗透,大大丰富了空气动力学的内涵。

过去近50年的航空航天事业的迅速发展,拉动了空气动力学各方面的研究工作,使空气动力学作为一个重要学科,全方位突出于航空航天科学的前沿。特别是半个世纪以来计算机及计算理论和技术的发展使计算流体力学(计算空气动力学)成为一个主要的分支学科;电子技术、控制技术及传感器技术的迅猛发展使气动实验技术日新月异,从以前宏观的测力测压,发展到精细流场的测量;非线性动力学的发展和拓扑分析提供了新的理论武器。在这半个世纪内虽然有空气动力学专著出版,但是没有看到30年代、50年代那样高品位的空气动力学丛书。因此,在1994年的一次有国内部分空气动力学工作者参加的座谈会上,张涵信等同志就倡议由中国的空气动力学工作者发挥集体智慧来编著一套跨世纪的近代空气动力学丛书,并很快得到原国防科工委的赞同,成立了编委会,编委会的日常管理工作挂靠在中国空气动力研究与发展中心,并在国防科技图书出版基金评审委员会和国防工业出版社的支持下开展工作。

前面这两套丛书都是世界级权威写的。30年代的丛书是世界性的,主要的作者包括了世纪性的科学家普朗特、泰勒和卡门。50年代普林斯顿大学的那套丛书,主要的作者都是当时在美国的第一流科学家。我们的丛书要继承和发扬前两套丛书的优点,显然,编著工作是十分艰巨的。

新中国成立后,在自力更生的方针指导下,由于国内空气动力学部门和全国有关单位的大力协同,以及气动力学工作者的努力奋斗,在钱学森和郭永怀的率领下,不仅继承了普朗特、卡门学派的优良传统,而且在钱学森发展的系统工程思想的指导下,抓住空气动力学总体,促进各学科之间的交叉,使我国的空气动力学在过去 40 多年的时间里得到了迅速的发展,可以说从无到有接近和达到国际先进水平,并积累了十分宝贵的经验。我们不能妄自菲薄,应该很好地加以总结,使这套丛书能充分反映新中国空气动力学工作者的重要成就。

我们并不认为这套丛书是经典性的、完美无缺的,但是是认真朝这个方向努力的。我们希望这套丛书的出版不仅能够促进中国航空航天事业在 21 世纪的发展,并且对世界航空航天事业也有所贡献。

庄逢甘

1999 年 9 月 9 日

近代空气动力学丛书编辑委员会 组成人员

主任委员 庄逢甘

副主任委员 张涵信 崔尔杰 贺德馨 张仁杰

委员 王承尧 王政礼 邓学蓓 田震
(按姓氏笔画为序)

乔志德 邬华谟 刘官德 安复兴

杨其德 杨岍生 李椿萱 吴芝萍

吴望一 沈青 沈孟育 苗瑞生

范洁川 俞鸿儒 蒋范 程厚梅

舒玮 童秉纲

前 言

空气动力学是研究空气和其他气体的运动以及与物体相互作用的科学,是航空航天技术最重要的理论基础之一。飞机和航天器的外形不断改进,性能不断提高,无不与空气动力学的发展密切相关。在新型飞行器设计中,空气动力学将起到愈发重要的作用。

我国的航空航天事业取得了举世瞩目的成就,广大空气动力学工作者为发展航空航天事业和空气动力学科学做出了突出贡献。为了促进空气动力学的进一步发展,迎接新世纪挑战,总结经验,培养人才,更好地为航空航天事业和国民经济服务,特组织编著出版近代空气动力学丛书。

近代空气动力学丛书由 20 多种单本专著组成,分理论和实验两部分。理论部分包括:跨声速空气动力学理论,无黏性高超声速空气动力学理论,稀薄气体动力学,计算流体力学——差分方法的原理与应用,计算流体力学谱方法,流体力学的有限元方法,高速气流传热与烧蚀热防护,多相湍流反应流体力学,高温非平衡空气绕流,湍流,旋涡与分离流动结构的分析,风工程与工业空气动力学,飞机设计空气动力学,发射气体动力学等。实验部分包括:风洞实验,风洞天平,风洞实验干扰与修正,脉冲风洞,近代流动显示技术等,丛书的编著坚持“五性”原则。即桥梁性:丛书是基础空气动力学到空气动力学前沿过渡的桥梁。专题性:丛书分成若干单本,每一单本仅涉及一个专门领域,是专著性丛书。近代性:丛书不仅重视学科已有的成就,而且重视近代的发展。系统性:每一单本专著,均有系统地介绍该领域的知识和发展。配套性:丛书的各单本专著联合在一起,基本覆盖了近代空气动力学各领域。为了组织和推动丛书的编著,组成了以庄逢甘院士为主任委员的编辑

委员会,负责制定丛书编写计划、选定编著者、审查书稿以及向国防科技图书出版基金评审委员会推荐申请资助等。中国空气动力研究与发展中心对编辑委员会的工作在人员和经费方面都给予了支持。丛书的各单本专著系通过申请国防科技图书出版基金获得资助后,由国防工业出版社列选出版。

航天飞行器在高空飞行、机动和制动,要求空气动力学回答低密度气流绕流下飞行器的受力、受热问题。当密度降低到气体分子的平均自由程与特征尺度相比不为小量时,通常的气体动力学方法不再适用,要求采用间断分子气体动力学的方法,或稀薄气体动力学的方法。同时高速飞行条件还导致要求考虑气体分子内能激发、化学反应、电子能级激发跃迁等发生在分子内部的物理过程。这导致了气体动力学在两层意义上的细观化,即应从分子水平或用分子动理论的方法研究气体的流动,同时要考虑分子内部结构的变化。稀薄气体动力学的应用领域除航天外,还有真空系统等离子体材料加工、微电子蚀刻、微机电系统、化工等在 21 世纪处于技术发展前沿的领域,这使得对低速稀薄气体的流动的研究变得重要。国际上对分子水平上气动力学的研究以及对于气流中分子内部物理过程的研究十分活跃。相对来讲,国内这方面的工作要少一些。从学科发展前景和科技发展的需要看,气动力学细观水平的研究在我国需要加强与发展,从科研布局和教学安排上加以鼓吹和推动是合适的。

本书阐述气体分子密度低的情况下气体间断分子效应显著时处理气体流动问题的分子气体动力学方法或稀薄气体动力学方法,重点是给出方法的基础,并着重介绍与用于非平衡效应模拟的直接模拟 Monte Carlo 方法以及低速稀薄气体流动相关的前沿课题。作为学科的基础,书中引入了分子结构与能态及分子动理论基础两章。第 1 章以空气为对象对于分子能态结构、能态分布等以极小的篇幅作了简要而概括的叙述,以给研究高焓稀薄气体流动中的非平衡现象前沿课题准备必要的物理基础。第 2 章则围绕双体碰撞、Boltzmann 方程及气体的平衡态对分子动理论的基础

做了必要的讨论,其中包括了对唯象论分子相互作用模型的介绍,突出了 Bird 引入的变径硬球模型(VHS)以及变径软球(VSS)和概括化硬球(GHS)模型的论述。第3章中重点讨论了各种现实的分子和表面的相互作用模型,包括反映细致平衡的互易原理和基于此原理的 CLL 分子表面作用模型,及直接统计模拟中在不完全能量适应情况和内能交换情况下的应用。第4章讨论自由分子流。第5章讨论应用于滑流领域的各连续介质方程及边界条件,包括对于最近的研究表明其适用性可深入到更稀薄范围的 Burnett 方程及滑流边界条件,并讨论了用 Navier-Stokes 方程加滑移条件求解一些简单问题和热泳问题。第6章则较全面、概括地介绍了过渡领域中发展起来的各种分析和数值方法。第7章着重介绍了直接模拟 Monte Carlo (DSMC)方法,对于非平衡流动以及低速流动遇到的特殊问题等学科前沿的课题择重点加以阐明,其中包括作者及其课题组在处理内能松弛、化学反应、复杂流场的通用软件、低速流动特殊模拟方法等方面的一些工作。在内容的选用上作者是以阐明问题为出发点,同时受到作者兴趣范围的影响,文献引用很不全面,希望对学科发展做出贡献的诸多学者谅解。

本书给航天航空院校以及高等学校力学和工程力学系的高年级学生和研究生提供一个从事分子气体动力学研究的坚实基础,并使他们对于稀薄气体动力学各个领域的近代发展有一全貌的了解,同时引导他们达到有关非平衡稀薄气体流动和低速稀薄气体流动等学科研究的前沿。对于从事航天高空气动力热设计的科技人员处理实际的稀薄气体流动问题也有裨益。

我愿感谢胡振华研究员和樊青研究员,在一些章节的内容方面与他们进行了有益的讨论。谢聃和刘宏立同志帮助绘制了插图,李雪梅和鲍惠兰同志帮助打印了书稿,在此向他们表示衷心的感谢。

作者

目 录

符号表	1
绪论	7
0.1 稀薄气体动力学的提出	7
0.2 气体的分子模型	8
0.3 分子平均自由程	9
0.4 流动的区域划分	10
0.5 非平衡现象与稀薄气体动力学	14
0.6 相似准则	17
第 1 章 分子结构与能态	21
1.1 双原子分子	21
1.2 分子的能态分布	31
1.2.1 Boltzmann 关系式	31
1.2.2 微观态数 Ω 的计算	33
1.2.3 Boltzmann 分布	36
1.3 分子的内能、内自由度和内能分布函数	41
第 2 章 分子动理论基础	49
2.1 速度分布函数	49
2.2 宏观量的表达	51
2.3 分子的双体碰撞模型	59
2.4 碰撞截面与分子模型	68
2.4.1 硬球模型	70
2.4.2 逆幂律分子模型	72
2.4.3 Maxwell 分子	74
2.4.4 变径硬球(VHS)模型	74

2.4.5 变径软球(VSS)模型	77
2.4.6 概括化硬球(GHS)模型	81
2.4.7 概括化软球(GSS)模型	83
2.5 Boltzmann 方程	83
2.6 碰撞积分与气体中分子的总碰撞数	88
2.7 碰撞积分的计算	90
2.8 Maxwell 输运方程——矩方程	94
2.9 Maxwell 分布	96
2.10 气体的平衡态	102
2.10.1 气体的几个特殊速度	102
2.10.2 分子碰撞频率与平均自由程	105
2.10.3 碰撞量的平均值	110
2.10.4 VSS 模型与 VHS 模型分子参考直径	113
2.10.5 VSS 模型(或 VHS 模型)混合气体中组分 A 的 一个分子与组分 B 分子的碰撞频率	114
2.11 8 速度气体模型	115
2.12 混合气体	118
第 3 章 分子表面相互作用	121
3.1 引言	121
3.2 镜面反射与漫反射, 适应系数	122
3.3 互易性原理	127
3.4 CLL 分子表面相互作用模型	129
第 4 章 自由分子流	141
4.1 气体中的分子数目通量和动量通量	141
4.2 作用于物体的气动力	144
4.3 表面元素的热传导	151
4.4 自由分子流出与热流逸	154
4.5 Couette 流动与平板间的传热问题	156
4.6 无碰撞 Boltzmann 方程的通解, 非定常流动	160
第 5 章 连续介质模型	167

5.1 引言	167
5.2 基本方程	168
5.2.1 质量、动量和能量守恒方程式	168
5.2.2 Chapman-Enskog 展开	169
5.2.3 Euler 方程	169
5.2.4 Navier-Stokes 方程	170
5.2.5 Burnett 方程	171
5.2.6 Grad 十三矩方程	175
5.2.7 小 Kn 数渐近理论	177
5.3 滑流边界条件	177
5.3.1 简单推导	177
5.3.2 Knudsen 层内动量能量通量的守恒	178
5.3.3 滑移速度公式的推导	179
5.3.4 温度跳跃公式的推导	181
5.3.5 向多组分非平衡流情况的推广	183
5.4 一些简单问题的求解	184
5.4.1 Couette 流动	184
5.4.2 Poiseuille 流动	186
5.4.3 Rayleigh 问题	188
5.5 热蠕动与热泳	190
第 6 章 过渡领域	196
6.1 概述	196
6.2 线化的 Boltzmann 方程	198
6.3 矩方法	203
6.4 模型方程	210
6.5 有限差分法	216
6.6 间断纵坐标方法	217
6.7 积分方法	223
6.8 直接模拟方法	224
第 7 章 直接模拟 Monte Carlo(DSMC)方法	228

7.1 引言	228
7.2 碰撞的取样	231
7.3 DSMC 方法求解问题实例	233
7.4 内能的激发与松弛	239
7.4.1 唯象论模型的引入	239
7.4.2 Larsen-Borgnakke 模型的实现	240
7.4.3 有奇异性分布的情况,推广取舍法或积累 分布—取舍联合法	243
7.4.4 间断能级的 Larsen-Borgnakke 方法	245
7.4.5 松弛碰撞数与振动交换几率	246
7.5 化学反应的模拟	248
7.5.1 化学反应速率常数	248
7.5.2 Bird 的唯象化学反应模型	249
7.5.3 一个依赖空间取向的化学反应模型	251
7.6 复杂流场的计算,位置元方法	258
7.7 微尺度低速气体流动,信息保存法	260
7.7.1 引言	260
7.7.2 信息保存法	262
7.7.3 单方向流动	265
7.7.4 二维与三维问题	270
附录 I 气体的性质和分子性质	277
附录 II 分布函数求矩遇到的积分	279
附录 III 具有给定分布的随机数的取样	284
III.1 积累分布函数求逆法	284
III.2 取舍法	286
III.3 推广取舍法或积累分布-取舍联合法	286
附录 IV Couette 问题程序(DSMC, * IP 方法)	289
参考文献	302
主题词索引	316