

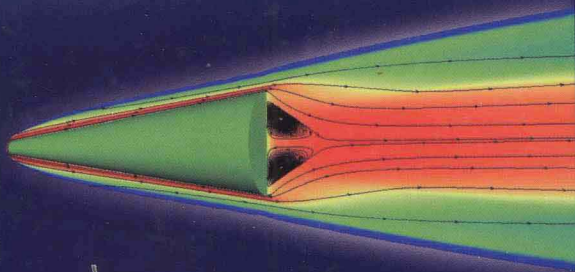


国防科技图书出版基金

气动物理学

Aero-Physics

■ 张志成 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

气 动 物 理 学

Aero-Physics

张志成 编著



国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

气动物理学/张志成编著. —北京:国防工业出版社,
2013. 8

ISBN 978-7-118-08627-0

I. ①气... II. ①张... III. ①空气动力学-物理学
IV. ①V211②04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 057707 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 100048)

北京嘉恒彩色印刷责任有限公司

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 13¼ 字数 241 千字

2013 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 66.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

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。

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 第七届评审委员会组成人员

主任委员 王 峰

副主任委员 吴有生 蔡 镭 杨崇新

秘书长 杨崇新

副秘书长 邢海鹰 贺 明

委 员 才鸿年 马伟明 王小谟 王群书
(按姓氏笔画排序)

甘茂治 甘晓华 卢秉恒 巩水利

刘泽金 孙秀冬 芮筱亭 李言荣

李德仁 李德毅 杨 伟 肖志力

吴宏鑫 张文栋 张信威 陈良惠

陆 军 房建成 赵万生 赵凤起

郭云飞 唐志共 陶西平 韩祖南

傅惠民 魏炳波

前 言

气动物理学是空气动力学与电磁学、光谱学、光学等多学科交叉的一个空气动力学分支学科,主要研究飞行器与大气相互作用引起的飞行器周围气体物理性质变化及其与电磁波、光波相互作用的规律,并应用这些规律解决实际工程技术问题。本书把当今气动物理学的主要研究内容按交叉学科分为三个课题:气动—电磁学、气动—光谱学和气动—光学。对每一个研究课题,从工程应用背景提炼出它的科学问题;再从学科交叉点切入,分析相关物理现象,探讨引起飞行器周围气体物理性质变化的机理,引出物理模型,研究数学求解方法和相应的地面试验研究技术;然后以实际工程技术问题为例,提出解决问题的技术途径。本书侧重于气动物理科学问题的分析,而不是数学公式的推演;侧重于物理概念,而不是数学解算技术;目的在于指出关键问题所在,启发读者的研究思路。本书主要供气动物理研究人员和涉及气动物理专业的工程设计人员阅读参考,也可供相关专业研究生学习。

全书分为6章。第1章阐述了气动物理学的概念、学科特点、主要研究课题、理论基础和一般研究方法。第2章着重分析了引起飞行器周围流场物理性质变化的重要化学物理现象和飞行器表面热响应、高超声速流场的一般流动特征和数学求解方法。第3章至第5章,分别从工程应用背景提炼出气动—电磁学、气动—光谱学和气动—光学课题的主要研究内容,探讨引起飞行器周围流场相关物理性质变化的机理,求解流动状态参数的变化规律;再把流场转换为相应介质场,获得这些介质场的变化规律;进而研究他们的电磁波传播效应、辐射特性和光学效应。最后,分别讨论解决典型工程问题的技术途径。第6章罗列了有关模拟律的研究成果,分析现有地面试验设备的试验能力,引出确定气动物理地面试验方案的基本原则,再介绍几种测量技术、几类常用气动物理试验设备和典型气动物理风洞试验案例。

气动物理学涉及的专业面比较广,作者对气动物理问题的认识和研究体会定有不当之处,敬请读者批评指正,热诚欢迎展开学术技术讨论,以共同促进我国气动物理研究的深入发展。

本书完稿时适逢钱学森先生诞辰100周年。钱学森先生是一位国际著名的空气动力学家,在20世纪50年代初又创立了物理力学学科,把气动物理作为物理力学的一个重要应用方向,还曾亲自指导我国气动物理研究。作为中国科学

技术大学化学物理系物理力学专业的学生,作者借此机会以本书表达对钱学森先生的深切怀念。

本书出版得到中国空气动力研究与发展中心的大力支持,在此表示衷心感谢。作者衷心感谢中国科学院力学研究所俞鸿儒院士、中国科学院研究生院童秉纲院士、中国空气动力研究与发展中心唐志共研究员、高铁锁研究员和董维中研究员对本书初稿提出的宝贵修改意见和对出版本书的支持。

张志成

2011 年 11 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 气动物理学概念	1
1.2 气动物理学主要研究课题	4
1.3 气动物理学理论基础	7
1.4 气动物理学研究方法	9
1.5 关于本书	10
第 2 章 高超声速流场和飞行器表面热响应	13
2.1 概述	13
2.2 再入流场中的流动和化学物理现象	14
2.3 再入流场中的化学反应	21
2.4 高超声速流场的数值模拟	30
2.5 飞行器表面热响应	34
2.6 羽流流场	39
参考文献	43
第 3 章 气动—电磁学	44
3.1 概述	44
3.2 气动—电磁学问题	45
3.3 高超声速流场中等离子体产生机理	51
3.4 高超声速等离子体流场	55
3.5 等离子体的电磁特性参数	63
3.6 电磁波传播的基本方程	66
3.7 气动—电磁波传输效应	69
3.8 高超声速飞行器的雷达散射特性	75
3.9 解决通信中断的技术途径	82
参考文献	85
第 4 章 气动—光谱学	87
4.1 概述	87
4.2 气动—光谱学问题	88
4.3 高超声速飞行目标光辐射机理	92

4.4	高超声速热/化学非平衡流场	98
4.5	光辐射传移	101
4.6	高温气体光辐射强度	105
4.7	再入目标光辐射特性计算	112
	参考文献	118
第5章	气动—光学	120
5.1	概述	120
5.2	气动—光学问题	121
5.3	气动光学效应	125
5.4	光在流场中的传播	128
5.5	统计气动光学效应	131
5.6	湍流边界层统计光学效应	135
5.7	动态气动光学效应	143
5.8	气动光学效应的控制和补偿	152
	参考文献	153
第6章	气动物理试验技术	156
6.1	概述	156
6.2	风洞试验的模拟	157
6.3	流动等离子体静电探针诊断技术	168
6.4	等离子体微波诊断技术	174
6.5	光辐射测量技术	180
6.6	常用气动物理试验设备和试验案例	183
	参考文献	196

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Concept about Aero-Physics	1
1.2 Main Topic of Aero-Physical Research	4
1.3 Theoretical Fundamental of Aero-Physics	7
1.4 Method of Aero-Physical Research	9
1.5 About this Book	10
Chapter 2 Hypersonic Flow Field and Thermal Response of Vehicle Surface	13
2.1 Outline	13
2.2 Flow and Chemicophysical Phenomena in Reentry Flow Field	14
2.3 Chemical Reaction in Reentry Flow Field	21
2.4 Numerical Simulation of Hypersonic Flow Field	30
2.5 Thermal Response of Vehicle Surface	34
2.6 Flow Field of Plume	39
References	43
Chapter 3 Aero-Electromagnetics	44
3.1 Outline	44
3.2 Questions on Aero-Electromagnetics	45
3.3 Plasma Generating Mechanism in Hypersonic Flow Field	51
3.4 Hypersonic Plasma Flow Field	55
3.5 Electromagnetical Property of Plasma	63
3.6 Basic Equations of Electromagnetic Wave Propagation	66
3.7 Aero-Electromagnetic Wave Transmission Effect	69
3.8 Radar Scattering Property of Hypersonic Vehicle	75
3.9 Communication Blackout Alleviation Technique	82
References	85
Chapter 4 Aero-Spectroscopy	87
4.1 Outline	87
4.2 Questions on Aero-Spectroscopy	88

4.3	Mechanism of Optical Radiation of Hypersonic Target	92
4.4	Hypersonic Thermochemical Nonequilibrium Flow Field	98
4.5	Transport of Radiation	101
4.6	Radiance of High Temperature Gas	105
4.7	Calculation of Reentry Target Radiation Signature	112
	References	118
Chapter 5	Aero-Optics	120
5.1	Outline	120
5.2	Questions on Aero-Optics	121
5.3	Aero-Optics Effect	125
5.4	Light Propagation in Flow Field	128
5.5	Statistical Aero-Optics Effect	131
5.6	Statistical Optics Effect of Turbulent Boundary Layer	135
5.7	Dynamic Aero-Optics Effect	143
5.8	Control and Compensation of Aero-Optics Effect	152
	References	153
Chapter 6	Aero-Physical Wind Tunnel Test Technique	156
6.1	Outline	156
6.2	Simulation of Wind Tunnel Test	157
6.3	Flowing Plasma Diagnostic with Electrostatic Probe	168
6.4	Plasma Diagnostic with Microwaves	174
6.5	Radiation Measurement	180
6.6	Typical Aero-Physical Test Facility and Case	183
	References	196

第 1 章 绪 论

1.1 气动物理学概念

1.1.1 何谓气动物理学

空气动力学是研究物体和空气作相对运动时的相互作用及其规律、并应用这些规律解决实际问题的一门科学。随着物体相对于空气的运动速度增加,物体与空气之间的相互作用越来越强烈,出现了众所周知的“声障”、“热障”和“黑障”。研究解决这些工程实际问题不仅促进了超声速和高超声速飞行器技术发展,同时推动了空气动力学科发展,成为空气动力学发展史上的里程碑。

突破“声障”发展形成了以激波理论为核心的超声速空气动力学理论,突破“热障”发展形成了以研究飞行器周围气体对飞行器的热输运为核心的气动热力学。“黑障”一词意指通信中断,高超声速飞行器周围气体在激波和表面摩擦作用下成为高温气体,高温气体发生电离,成为部分电离气体,当弹载电磁通信天线发射或接收的电磁波通过这个电离气体层传播时,电磁波被电离气体反射、吸收而强度衰减,甚至完全不能穿过等离子体层而发生通信中断。20 世纪 50 年代至 70 年代中,美国和苏联对“黑障”问题开展了大规模研究,进行了大量飞行试验,研究飞行器周围气体中等离子体的产生机理、气体的电磁性质的变化以及电磁波相互作用规律,寻找解决通信中断的技术途径,形成以研究飞行器周围高温气体电磁性质变化及其与电磁波相互作用规律为代表的气动物理研究领域。克服“黑障”被誉为继克服“声障”和“热障”以后,超声速飞行器技术发展史上的又一个里程碑。

由于“黑障”问题出现在飞行器高超声速再入过程中,人们常称“黑障”问题的研究为“再入物理”。当时,“再入物理”还包括再入过程中飞行器和周围气体的光辐射、对雷达波的散射、大气中雨、雪粒子对飞行器表面耐热材料的侵蚀等物理现象的研究。

随着导弹和航天器技术的发展,“黑障”问题的内涵不断在扩大。人们不再限于要求掌握通信“中断”或“不中断”的规律,还要求准确掌握飞行器周围等离子体对电磁信号的传输效应、对飞行器电磁导航和末制导的影响;人们也不再限于研究“再入”飞行状态,还研究飞行器周围出现等离子体的各种飞行状态下等离子体效应。飞行器技术发展提出的物理问题的范围也不断扩展,例如,“气动

光学”已成近 20 多年来的研究热点。因此,“再入物理”这一名词已不能完全包容这一交叉学科领域的发展现状,用“气动物理学”这个词来表达更为贴切,也更直观地体现这一交叉学科的学术特点。

英文复合词“aero-physics”直译为气动物理学,中文里的“气动”和英文的“aero-”都是对“物理学”起限定作用。在国内外,“气动物理”一词被广泛使用,单从字面理解,“气动物理”一词的含义很多,我们可把“气动”理解为气体动力学或空气动力学的简称,前者的涵盖面更宽;被限定的“物理”一词的含义更多,这可以从国外的“气动物理研究所”、“气动物理研究中心”、“国际气动物理会议”等名称及它们从事或涉及的研究工作看出来。因此,本书使用“气动物理学”这一词时,先对它做一些约定。

(1) 本书所说的“气动”是指空气动力学,把“气动物理学”限定在空气动力学学科范围内。

(2) 空气动力学范围内的物理问题也很多,我们再做进一步限定。空气动力学研究物体和空气作相对运动时的相互作用规律,“物体和空气作相对运动”可以是物体相对于静止空气运动,如飞行器或地面车辆运动,也可以是空气相对于静止物体运动,如风工程所研究的火箭矗立状态、地面建筑等所受的风载。“相互作用”意味着空气对物体的作用和物体对空气的作用两个方面。本书进一步限定“物理”是指物体和空气作相对运动时周围空气发生的物理现象,把物体受空气作用时发生的物理问题归入相应的飞行器技术。例如,可把粒子侵蚀问题归入气动热和热防护技术类,高超声速吸气式发动机里内流的物理问题纳入发动机技术类,气动弹性问题归入飞行器结构类等,这样分也与飞行器专业技术比较一致。此外,随着科学技术的发展,学科分类越来越细,交叉学科越来越多,像“气动声学”早已自成一体,没有必要再把它含到“气动物理学”里面了。

于是,我们可以把“气动物理学”理解为研究物体和空气相对运动时相互作用引起的物体周围气体物理性质的变化及其与电磁波、光波相互作用规律,并应用这些规律解决实际问题的一个空气动力学分支,是一个空气动力学与物理学分支学科交叉的技术科学。

1.1.2 气动物理学问题的特点

气动物理学作为空气动力学的一个分支,与气动力、气动热研究既有共同之处又有不同之处;作为空气动力学与物理学分支学科的交叉学科,又与物理学有关分支所研究的对象有所不同,是一个具有明显特点的交叉学科。

气动物理与气动力、气动热都研究物体和空气作相对运动时的相互作用及其规律,但是,研究对象的侧重不同。气动力和气动热主要研究物体受到的周围空气的作用,而气动物理主要研究物体周围空气受到物体的作用,研究物体周围空气受物体作用后的流动特性和热力学状态的变化规律,以及物体表面状态变

化(如温度升高,发生烧蚀等)对周围空气流动特性和热力学状态的影响等。

其次,研究内容不同。气动力和气动热研究飞行器所受到的作用力和热输运,它们是气动控制方程中3个速度分量和2个状态参数的显函数,而气动物理研究飞行器周围空气的电磁、光学和辐射光谱等物理性质的变化规律,这些物理特性还要应用附加物理模型才能获得,是这5个变量的隐函数。

再次,涉及的空气成分不尽相同。气动力和气动热研究仅涉及空气的主要成分、 N_2 和 O_2 及它们的高温组分,而空气中的微量组分对气动物理特性有重要影响。例如,空气中的 CO_2 ,它的含量只占干燥洁净空气的万分之几,对红外辐射贡献却很大,气动物理研究不可忽略。又如,电子密度,它在高超声速流场中的含量一般比 N_2 和 O_2 小几个量级,却是决定流场电磁特性的关键参数。再如,气体组分的内能分布,气相原子分子不同内能态激发和去激发及参与的粒子数决定了气体的辐射光谱分布,是气动光谱学的重要研究内容。因此,气动物理研究所求解的流动控制方程的实际内容与气动力和气动热研究不同,控制方程需要包含对流场物理性质有重要影响的微量组分,包含它们的内能交换,从而,流动控制方程的解算方法也不同。

进而,采用的风洞试验技术也不同。气动力和气动热试验直接在模型上安装天平、表面压力和传热传感器进行测量,测量精度高。而气动物理试验要采用接触式或非接触式测量技术测量流场参数和流场的物理参数。这些参数往往不是测量仪器的直接测量量,例如静电探针借助探针回路的电子流和离子流获得流动等离子体的电子和离子密度,探针理论比较复杂,数据处理又与流场参数耦合。在测量这些物理参数时测量仪器受到的干扰比较大,例如流场辐射光谱和光传输测量,测量仪器受风洞洞体振动、洞体和支架辐射、风洞自由流边界层等多种干扰,测量数据误差相对较大。

从物理学角度来说,我们可以把飞行器周围气体看作不同物理性质的介质场。然而,它们不是普通介质场,而是具有不同于常见物理学问题的特殊介质场。

(1) 薄层介质场。薄是相对于光学系统的孔径,或电磁系统的波长而言,孔径和波长是光学系统和电磁系统的重要性能参数。通常,作为光学介质,在光传输方向上飞行器周围被扰动的气体层厚度与光学孔径相当或小于光学孔径;作为电磁介质,飞行器周围被扰动的气体层厚度与电磁波波长相当,或小于电磁波波长。

(2) 性质快速变化的介质场。飞行器绕流场参数在垂直于流动方向上快速变化,沿流动方向也在急剧变化,随飞行高度和姿态又不断变化,飞行器周围被扰动的气体是个非定常的介质场。特别是湍流场,其介质特性参数随空间、时间随机变化。

(3) 近区介质场。对于弹载光学或电磁系统,飞行器周围的介质场位于光、

电接收或发射系统的近区,而不是光学和电磁学通常所研究的远场区。

以上着重强调了气动物理问题的特殊性,正是由于这些特殊性才形成气动力学这个交叉学科,需要运用多学科知识进行研究。

1.1.3 气动力学和电磁空气动力学

近十几年来,利用物理学方法控制飞行器周围空气流动特性、进而改善飞行器气动力/热性能成了气动界的研究热点。例如,在机翼局部施加脉冲交变电场,使气体局部电离,进而在电磁场作用下,局部电离气体流动特性发生变化,可增加升力,减少阻力;对发动机喷流施加脉冲交变电场,改变喷流方向,以实现矢量控制。又如,利用强磁场控制高超声速飞行器周围的部分电离气体流动特性,或控制已播撒电离组分的气体流动特性,用来减少阻力、减小热流,或用以控制吸气式发动机压缩面的流量。再如,在以高超声速飞行的钝锥体前施加一高能束(如强激光束)以改变脱体激波形状,从而减小钝锥体弓激波波阻;甚至在高超声速飞行器附近某一合适部位施加高能束,以改变飞行器所受气动载荷,控制飞行器飞行轨道,或使无动力飞行器产生动力,或损坏飞行器结构,等等。人们把这些研究称为电空气动力学、磁空气动力学或电气体动力学、磁气体动力学。

虽然这些研究也是一个空气动力学与物理学的交叉学科,但与气动力学有所不同。如前所述,气动物理研究物体与空气相对运动状态下出现的一类物理问题,这些问题受空气动力学方程控制。而采用物理学方法控制飞行器周围气体的流动特性时,飞行器周围局部气流不仅受空气动力学运动方程控制,还受电磁方程控制,要联立求解气体动力学和相关物理学的控制方程。

1.2 气动力学主要研究课题

气动力学是一个多学科交叉的学科分支,例如高超声速流场,高温是高超声速流场的一个基本特征,高温气体必然发生化学反应,研究高超声速流场要涉及高温气体化学反应动力学;飞行器表面材料温升、相变和烧蚀对流场有重要影响,研究高超声速流场又要涉及材料学和材料烧蚀反应动力学,等等。本书从气动力学所研究的物理问题角度,按主要交叉学科把当今气动力学所研究的内容归纳为三个主要研究课题:气动—电磁学、气动—光谱学和气动—光学。本书将在有关章节分别介绍它们的工程背景和详细的研究内容和方法,这里只做简要介绍,以便读者先有一个初步了解。

1.2.1 气动—电磁学

由于激波加热和与飞行器表面强烈摩擦,高超声速飞行器周围气体变成高

温高速流动气体,高温导致部分气体发生电离,成为部分电离气体或称之为等离子体。这些电离气体流向飞行器尾部,形成等离子体尾迹。通常,把飞行器周围的等离子体称为等离子鞘。

等离子鞘使高超声速飞行器再入通信中断,使再入飞行试验遥测中断;等离子鞘影响导弹微波末制导、GPS 导航的精度。发动机喷流等离子体使雷达制导导弹的电磁波信号衰减,甚至中断,可能导致导弹失控。此外,等离子鞘和等离子体尾迹、发动机喷流等离子体改变导弹的电磁散射特性,影响导弹的雷达探测识别和指示。因此,发展高超声速导弹、提升导弹突防能力、改善航天器再入通信都需要解决这一类技术问题。

从电磁学观点,等离子鞘、等离子体尾迹和发动机喷流等离子体流场都是一种特殊的电磁介质场。我们要研究高超声速飞行器全流场(包括绕流和尾流场)、发动机喷流和外流耦合流场中等离子体的产生机理、流场的电磁性质和变化规律;研究这些电磁介质场和电磁波的相互作用及其变化规律;研究改善或控制电磁波传输特性和散射特性、消除通信中断的技术途径;进而开发利用这些电磁特性改善飞行器的某些性质,例如等离子体隐身等新技术。本书把这一类问题研究称之为气动—电磁学。

在工程上,弹载电磁系统的电磁传输特性还与天线窗的传输性质有关。天线窗受到气动加热而温升,表面甚至发生相变和烧蚀,天线窗的介电特性发生明显变化,从而对电磁波的传播产生严重影响。虽然本书不把这个列入气动—电磁学课题范畴内,但是,也要同时进行研究,才能解决有关工程技术问题。

1.2.2 气动—光谱学

高超声速飞行器绕流场和尾流场中的高温高速流动气体产生强烈光辐射,火箭发动机喷流也产生强烈光辐射。导弹在高速飞行时与周围大气发生强烈作用,弹头表面温度升高,甚至出现烧蚀,弹头表面烧蚀产物进入流场,与高温空气发生化学反应,这些高温气体发出强烈光辐射。高温弹头表面也发出强烈光辐射,这些辐射经过弹头周围的高温气体层向外转移。导弹弹头表面、导弹全流场高温气体和发动机喷流的高温气体辐射光谱特征及其变化规律是导弹光学探测识别指示的依据。此外,高速导弹光学头罩周围流场中的高温气体辐射会增加弹载光学系统的噪声,影响弹载光学系统性能。因此,发展导弹光学探测识别技术和光学寻的技术需要掌握这些辐射场的辐射光谱特性和变化规律。

本书把高超声速飞行器全流场和它与发动机喷流耦合场的高温气体辐射光谱特性研究称为气动—光谱学。气动—光谱学要研究这些流场的光辐射机理,研究光辐射的分谱特性及变化规律,研究控制这些流场辐射光谱特性的技术途径。气相原子分子的辐射和吸收源自内能级间跃迁,原子分子的内能级间跃迁是原子分子间碰撞能量交换过程,飞行器再入过程经历稀薄气体和稠密气体层,