

《国防科研试验工程技术系列教材》

空气动力系统

再 人 物 理

中国人民解放军总装备部
军事训练教材编辑工作委员会



国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

再入物理/中国人民解放军总装备部军事训练教材编辑工作委员会编. —北京:国防工业出版社, 2005. 1
国防科研试验工程技术系列教材. 空气动力系统
ISBN 7-118-03192-5

I. 再... II. 中... III. 再入物理学-教材
IV. V412.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 057124 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)
国防工业出版社印刷厂印刷
新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 10 3/4 264 千字
2005 年 1 月第 1 版 2005 年 1 月北京第 1 次印刷
印数:1—2000 册 定价:34.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

《国防科研试验工程技术系列教材》

总编审委员会

名誉主任委员 程开甲 李元正

主任委员 胡世祥

副主任委员 段双泉 尚学琨 褚恭信 马国惠

委员 (以下按姓氏笔画排列)

王国玉 刘 强 刘晶儒 张忠华

李济生 邵发声 周铁民 姚炳洪

姜世忠 徐克俊 钱卫平 常显奇

萧泰顺 穆 山

办公室主任 任万德

办公室成员 王文宝 冯许平 左振平 朱承进

余德泉 李 钢 杨德洲 邱学臣

郑时运 聂 峰 陶有勤 郭淦水

钱玉民

《国防科研试验工程技术系列教材· 空气动力系统》编审委员会

主任委员 董臻东

副主任委员 陈作斌 乐嘉陵

委 员 张涵信 王 侃 张志成 萧泰顺
刘义信 范召林 郭隆德 杨祖清
桂业伟

主 编 张涵信

副 主 编 萧泰顺 张志成 王 侃

秘 书 赵志根 沈秀春

再 人 物 理

主 编 乐嘉陵

副 主 编 高铁锁 曾学军

编写人员(按编写内容顺序)

第 1 章 乐嘉陵

第 2 章 韩隆恒 杨富荣

第 3 章 曾学军 刘伟雄 韩隆恒

第 4 章 许 勇 乐嘉陵

第 5 章 高铁锁 董维中

总 序

当今世界,科学技术突飞猛进,知识经济迅速兴起,国力竞争越来越取决于各类高技术、高层次人才的质量与数量,因此,作为人才培养的基础工作——教材建设,就显得格外重要和紧迫。为总结、巩固国防科研试验的经验和成果,促进国防科研试验事业的发展,加快人才培养,我们组织了近千名专家、学者编著了这套系列教材。

建国以来,我国国防科研试验战线上的广大科技人员,发扬“自力更生、艰苦奋斗、科学求实、大力协同、无私奉献”的精神,经过几十年的努力,建立起了具有相当规模和水平的科研试验体系,创立了一系列科研试验理论,造就了一支既有较高科学理论知识、又有实践经验,勇于攻关、能打硬仗的优秀科技队伍,取得了举世瞩目的成就。这些成就对增强国防实力,带动国家经济发展,促进科技进步,提高国家和民族威望,都发挥了重要作用。

编著这套系列教材是国防科研试验事业继往开来的大事,它是国防科研试验工程技术建设的一个重要方面,是国防科技成果的一个重要组成部分,也是体现国防科研试验技术水平的一个重要标志。它承担着记载与弘扬科技成就、积累和传播科技知识的使命,是众多科技工作者用心血和汗水凝成的科技成果。编著该套系列教材,旨在从总体的系统性、完整性、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国防科研试验理论与实践相结合的知识体系。一是总结整理国防科研试验事业创业40年来重要成果及宝贵经验;二是优化专业技术教材体系,为国防科研试验专业技术人员提供一套系统、全面的教科书,满足人才培养对教材的急需;三是为国防科研试验提供有力的

技术保障;四是将许多老专家、老教授、老学者广博的学识见解和丰富的实践经验总结继承下来。

这套系列教材按国防科研试验主要工程技术范畴分为:导弹航天测试发射系统、导弹航天测量控制系统、试验通信系统、试验气象系统、常规兵器试验系统、核试验系统、空气动力系统、航天医学工程系统、国防科技情报系统、电子装备试验系统等。各系统分别重点论述各自的系统总体、设备总体知识,各专业及相关学科的基础理论与专业知识,主要设备的基本组成、原理与应用,主要试验方法与工作程序,本学科专业的主要科技成果,国内外的最新研究动态及未来发展方向等。

这套系列教材的使用对象主要是:具有大专以上学历的科技与管理干部,从事试验技术总体、技术管理工作的人员及院校有关专业的师生。

期望这套系列教材能够有益于高技术领域里人才的培养,有益于国防科研试验事业的发展,有益于科学技术的进步。

《国防科研试验工程技术系列教材》

总编审委员会

1999年10月

序

空气动力试验与研究是国防科研试验的重要组成部分。

新中国成立以来,我国从事航空、航天空气动力研究的科技人员坚持“自力更生、艰苦奋斗、团结协作、科学求实”的精神,建立了尺寸、速度、性能相配套的各类气动试验设备,开展了气动理论、数值计算、气动试验及模型自由飞研究,承担并完成了一系列航空、航天、兵器武器的试验、计算任务,为我国武器装备的发展作出了重要贡献。

中国空气动力研究与发展中心的广大科技人员,在空气动力试验设备的研制、空气动力试验、计算方法研究及完成航空、航天、兵器等各类武器的试验与设计中,积累了丰富的实践经验,取得了丰硕的科研成果。为了更有效地培养和造就新一代空气动力学研究人才,促进我国空气动力事业的不断巩固和发展,在总装备部的领导下,我们组织有关专家和科技人员编写了这套系统、全面总结几十年来理论与实践经验成果的空气动力系列教材。

本套教材是以具有大专以上学历,从事空气动力研究的科技人员为主要适用对象,既可作为空气动力试验研究的中、高级技术人员的学习指导用书,亦可作为院校空气动力学相关专业的师生参考用书。

本套教材共分 13 卷。包括:《分离流与旋涡运动的结构分析》、《计算流体力学及应用》、《低速风洞试验》、《高速风洞试验》、《高超声速气动力试验》、《高超声速气动热和热防护》、《再入物理》、《高低速风洞气动与结构设计》、《高低速风洞测量与控制系统设计》、《高超声速试验设备设计》、《飞行器系统辨识学》、《模型自由飞试验》和《流动显示技术》。

本套教材在编写过程中,得到了总装备部领导、机关,型号部门和国内空气动力研究单位的大力支持与协作,在此一并表示衷心的感谢。由于本套教材涉及专业面广,包含内容多,编者水平有限,书中难免有错误或疏漏之处,诚请读者予以指正。

《国防科研试验工程技术系列教材·

空气动力系统》编审委员会

2001年3月

前 言

再入物理是研究高超声速飞行器再入大气层过程中产生的各种气动物理现象的学科。它是一门综合性的科学技术,涉及高超声速空气动力学、物理化学、等离子体动力学、电磁学、光学等学科和相关技术。航天、航空高技术的迅猛发展,极大地推动了再入物理相关学科的发展,如计算电磁学、计算空气动力学及辐射气体动力学等,它们作为相对独立的学科都得到了较大发展,并且在航天和航空飞行器的设计中得到了广泛应用。可以预计,再入物理这门学科,不仅在高超声速飞行器的突防系统、热防护系统、高速拦截器寻的系统的设计等方面将发挥较大作用,而且会进一步推动未来民用和军用航空和航天高技术的发展。

由于再入物理问题的复杂性和广泛的应用背景,因而本书不可能叙述再入物理的所有内容,只能从再入飞行器突防设计的背景出发,叙述再入物理涉及的基本内容。

本书共5章。第1章是概论,简要叙述再入物理发展概况、主要研究内容、方法和应用背景。第2章叙述高温气体光谱辐射的确定方法。第3章是再入物理现象试验技术,简要叙述激波管和气动物理靶等地面设备及其相关测试技术,其中主要包括光辐射、光谱和电子数密度的诊断原理和测量方法。第4章叙述再入体的电磁散射特性,包括等离子体湍流尾流的散射和有高温等离子体覆盖的再入体散射的计算方法。第5章是再入化学反应绕流计算,叙述再入体头身部绕流、底部流和尾流等化学反应粘性流(包括壁面催化和烧蚀效应)计算方法,主要介绍求解 PNS 方程的空间推进法和求解 N-S 方程的时间稳定法。

必须指出,由于再入物理涉及的学科多,内容广,因此本书在

编写过程中没有像教科书那样对一般基本概念做过多的叙述,而是着眼于应用,把重点放在解决问题的基本原理、方法和途径的叙述上。由于时间仓促,学识有限,错误和不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

张志成研究员对本书进行了详细审阅,并提出了不少有益的建议。在本书编写过程中,得到了中国空气动力研究发展中心、计算空气动力研究所、高超声速空气动力研究所等机关和领导的关心和支持,在此一并表示感谢。

编 著 者

2003 年 2 月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 再入物理研究的重要性	1
1.2 导弹突防和防御中的目标特性	3
1.2.1 助推段目标特性	3
1.2.2 飞行中段目标特性	4
1.2.3 再入段目标特性	6
1.3 再入体动力学特性和热环境	7
1.3.1 再入体动力学特性	7
1.3.2 再入体的热环境特性	9
1.3.3 表面辐射平衡温度	12
1.4 再入体流场特性	13
1.4.1 再入体头身部流场	13
1.4.2 振动和电子—振动松弛时间的确定	17
1.4.3 化学非平衡	18
1.4.4 振动—离解耦合效应(CVD 或 CVDV 模型)概念	19
1.4.5 再入体热化学非平衡速度高度范围	19
1.4.6 壁面催化	20
1.4.7 烧蚀影响	22
1.5 再入体头身部的光电特性	23
1.5.1 光辐射特性	23
1.5.2 电磁波传播特性	26
1.5.3 再入体尾流流场	30
1.5.4 再入体尾流的光电特性	34
1.5.5 理论计算、地面试验和飞行试验三结合的综合研究方法	40
参考文献	44

第 2 章 高温气体光谱辐射的确定方法	46
2.1 概述	46
2.2 光谱分类	46
2.2.1 原子光谱	46
2.2.2 分子光谱	49
2.3 配分函数的计算	53
2.3.1 能级	53
2.3.2 配分函数	58
2.4 平衡组分的计算方法	63
2.4.1 平衡常数	63
2.4.2 混合反应气体的平衡组分	65
2.5 辐射的吸收和发射	67
2.5.1 吸收和发射过程	67
2.5.2 跃迁几率	69
2.5.3 基尔霍夫(Kirchhoff)定律	72
2.5.4 谱线的吸收系数	73
2.5.5 谱线的发射率	74
2.5.6 连续发射和吸收	75
2.5.7 分子辐射	76
2.5.8 谱线加宽	81
2.6 光谱辐射传递	87
2.6.1 辐射传递方程	87
2.6.2 等效线宽和增长曲线	88
2.6.3 逃逸因子	91
2.7 高温空气辐射	92
2.8 再入体光辐射工程计算	95
2.8.1 吸收系数工程算法	96
2.8.2 转动谱线平滑算法	97
2.8.3 窄带平均算法	97
2.8.4 分子的红外振动—转动吸收系数	99
参考文献	101
第 3 章 再入物理现象试验技术	104

3.1 概述	104
3.2 再入物理现象模拟准则简述	105
3.2.1 流场特性缩比关系	105
3.2.2 考虑化学非平衡效应的再入等离子体相似律	105
3.2.3 电磁波与再入等离子体相互作用时的相似律	112
3.2.4 结论	115
3.3 再入物理现象研究试验设备	115
3.3.1 激波管试验设备	115
3.3.2 气动物理靶	122
3.4 高超声速流场电子数密度诊断技术	125
3.4.1 微波干涉仪	126
3.4.2 微波谐振腔	128
3.4.3 静电探针诊断技术	136
3.4.4 典型试验结果	141
3.5 再入体流场光辐射强度测量技术	143
3.5.1 可见光辐射计	143
3.5.2 红外辐射计	146
3.5.3 再入体辐射特性测量的试验方法	150
3.6 光谱诊断原理和方法	156
3.6.1 光谱信息提取	156
3.6.2 热力学状态分类	157
3.6.3 光谱诊断原理	159
3.6.4 流动热力学状态变量的测量	163
3.6.5 试验装置中的光谱测量	167
参考文献	176
第4章 再入体电磁散射特性	178
4.1 概述	178
4.2 雷达散射截面	179
4.2.1 雷达基础	179
4.2.2 电磁散射分析	184
4.2.3 经典计算电磁学方法	187
4.3 再入体头身部 RCS 计算	190

4.3.1 等离子体基础	190
4.3.2 平面分层等离子体介质反射系数	195
4.3.3 等离子体包覆体 RCS 计算	198
4.4 再入体尾流 RCS 计算	201
4.4.1 随机场基础	201
4.4.2 亚密湍流等离子体尾流 RCS 计算	208
4.4.3 过密湍流等离子体尾流 RCS 计算	213
4.5 雷达高分辨技术	217
4.5.1 电磁系统	217
4.5.2 一维高分辨 RCS 计算	219
4.6 复杂外形飞行器 RCS 计算的现代方法	222
参考文献	226
第 5 章 化学反应绕流计算	229
5.1 概述	229
5.2 化学非平衡粘性绕流空间推进求解法	232
5.2.1 非耦合方法	233
5.2.2 全耦合方法	242
5.2.3 化学反应模型和输运特性	243
5.2.4 边界和初始条件	244
5.2.5 算例	245
5.3 化学反应粘性绕流 N-S 方程求解法	251
5.3.1 控制方程	252
5.3.2 状态方程和能量关系式	256
5.3.3 热化学模型	259
5.3.4 输运系数	266
5.3.5 数值方法	268
5.3.6 计算结果和分析	269
5.4 催化特性的数值计算	276
5.4.1 数值方法	277
5.4.2 流动的热力学特性	278
5.4.3 计算结果和分析	279
5.5 烧蚀效应的数值计算	283

5.5.1 烧蚀壁面边界条件的一般形式	283
5.5.2 数值方法	286
5.5.3 碳—碳材料烧蚀绕流计算	286
5.5.4 泰氟隆材料烧蚀绕流计算	297
5.6 尾流的工程计算方法	302
5.6.1 控制方程	302
5.6.2 求解方法	303
参考文献	307