

《国防科研试验工程技术系列教材》

空气动力系统

# 高超声速气动力试验

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

《国防科研试验工程技术系列教材》  
空气动力系统

# 高超声速气动力试验

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

高超声速气动力试验/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, 2004. 1

(国防科研试验工程技术系列教材·空气动力系统)  
ISBN 7-118-03148-8

I. 高... II. 中... III. 高超音速空气动力学—气动力试验—教材 IV. V211

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 032853 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 12½ 321 千字

2004 年 1 月第 1 版 2004 年 1 月北京第 1 次印刷

印数:1—2000 册 定价:31.00 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 皞 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

# 高超声速气动力试验

主 编 唐志共  
副主编 徐 翔 胥继斌  
主 审 杨祖清  
副主审 董广彪

## 编写人员

第1章	唐志共	杨彦广		
第2章	徐 翔	胥继斌	王志坚	杨彦广
第3章	董广彪	胥继斌	吕治国	韩雪峰
	陈洪滨	戴金雯		
第4章	董广彪	胥继斌	吕治国	
第5章	董广彪	庞旭东	许晓斌	陈思科
	吕治国	李 毅		
第6章	刘 伟	吕治国	杨彦广	许晓斌
	王树民			
第7章	胥继斌	刘玉兵	朱 涛	王志坚
	邓建平	赵忠良	蒋忠东	董广彪
第8章	马晓宇	凌忠伟	王新彬	胥继斌
	朱 涛	董广彪		
第9章	王泽江	陈洪滨		
第10章	杨彦广	唐志共	徐 翔	
打 印:	向 莉	唐 蓉		
制 图:	于时恩			

# 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 年来的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

《高超声速气动力试验》是《国防科研试验工程技术系列教材·空气动力系统》中的一卷。本书以高超声速飞行的战略战术导弹和航天飞行器为主要研究对象,论述了高超声速气动力试验的基本理论和方法,介绍了在高超声速地面模拟试验设备中的气动力试验技术。全书共10章:第1章概要介绍了高超声速气动力试验的任务、要求和研究方法,以及高超声速气动力试验的发展概况。第2章论述了高超声速气动力试验的基本理论和模拟准则。第3、4章简要介绍了高超声速地面试验设备和高超声速风洞流场校测的有关内容。第5、6章对高超声速气动力试验模型、天平的设计、天平的校准作了较为详细的介绍。第7、8章介绍了高超声速风洞中常用的和部分特种试验技术,以及试验数据的分析处理方法。弹道靶气动力试验由于其特殊性单独列在第9章介绍。最后在第10章对高超声速气动力试验的热点问题和发展趋势进行了探讨。

本书是按照《国防科研试验工程技术系列教材》的性质、阅读对象和编写要求编写的。书中的主要内容是根据中国空气动力研究与发展中心在高超声速气动力试验方面的研究工作实践,在参阅国内外有关文献和研究成果的基础上,总结、归纳、集体编写而成,力求内容简练、具有实用价值,对从事该项工作的科技人员有一定的参考作用。

本书的编写在《国防科研试验工程技术系列教材·空气动力系统》编审委员会的领导下进行,中国空气动力研究与发展中心空气动力系统编委会办公室和超高速所分编委会做了大量的组织协调工作。编写工作得到了中国空气动力研究与发展中心超高速所、

高速所的支持和超高速所资料室的大力协助,谢利同志在本书的编写过程中做了大量艰苦细致的工作,在此一并表示感谢。

由于编者的学识和水平有限,书中错误和不妥之处难免,敬请各位读者批评指正。

编 者

2001年10月

# 目 录

<b>第 1 章 概 论</b> .....	1
1.1 高超声速气动力试验发展概况 .....	1
1.2 高超声速流动特征 .....	4
1.3 高超声速气动力试验的任务及一般要求 .....	11
1.4 高超声速气动力试验的研究方法及主要试验技术 .....	15
1.5 高超声速气动力试验在航天飞行器发展中的 作用和地位 .....	20
参考文献 .....	24
<b>第 2 章 高超声速气动力试验的基本理论和相似准则</b> .....	25
2.1 相似理论 .....	25
2.1.1 量纲分析 .....	26
2.1.2 相似定理 .....	31
2.1.3 常用的相似参数 .....	35
2.2 坐标系及其坐标转换 .....	38
2.2.1 坐标系的定义 .....	38
2.2.2 角度的定义 .....	39
2.2.3 力矢量和力矩矢量方向的定义 .....	40
2.2.4 基本转换矩阵的定义 .....	41
2.2.5 坐标系转换路径 .....	42
2.2.6 坐标系转换关系 .....	42
2.3 高超声速风洞气动力试验模拟准则 .....	45
2.4 喷流干扰试验模拟准则 .....	47
2.5 低密度风洞气动力试验模拟准则 .....	49
2.5.1 玻耳兹曼方程及其边界条件 .....	49

2.5.2	相似参数和流态划分 .....	50
2.5.3	低密度高超声速风洞气动力试验模拟准则 .....	53
2.6	模型自由飞气动力试验模拟准则 .....	54
	参考文献 .....	55
<b>第3章</b>	<b>高超声速地面模拟试验设备概况</b> .....	<b>56</b>
3.1	国内外风洞设备概况 .....	56
3.1.1	高超声速风洞设备种类 .....	57
3.1.2	国内外高超声速风洞概况 .....	63
3.2	国内典型风洞地面模拟试验设备性能 .....	64
3.2.1	常规高超声速风洞 .....	64
3.2.2	激波风洞 .....	70
3.2.3	高超声速推进风洞 .....	75
3.2.4	超高速自由飞弹道靶 .....	80
3.2.5	高超声速低密度风洞 .....	83
	参考文献 .....	87
<b>第4章</b>	<b>高超声速风洞流场校测</b> .....	<b>89</b>
4.1	气动力试验对风洞气流品质的要求 .....	89
4.1.1	风洞流场品质对气动力试验影响 .....	89
4.1.2	风洞流场品质的基本要求 .....	92
4.2	流场校测 .....	93
4.2.1	喷管壁面轴向马赫数分布测量 .....	93
4.2.2	稳定段总温分布和总压分布测量 .....	94
4.2.3	喷管出口截面边界层位移厚度测定 .....	94
4.2.4	试验段速度场校测 .....	95
4.2.5	试验段温度场校测 .....	97
4.2.6	试验段方向场校测 .....	97
4.2.7	标准模型试验 .....	98
4.3	数据处理方法 .....	103
4.3.1	试验段速度场校测数据处理 .....	103
4.3.2	稳定段和试验段温度场校测数据处理 .....	105
4.3.3	喷管出口截面边界层位移厚度测定数据处理 .....	106
4.3.4	典型流场校测结果 .....	109

4.4 改善风洞流场品质的方法 .....	111
附录 计及温度对比热比影响的热力学完全气体 流动参数计算公式 .....	112
参考文献 .....	116
<b>第5章 高超声速气动力试验模型设计 .....</b>	<b>118</b>
5.1 高超声速气动力试验模型设计一般要求 .....	118
5.1.1 模型设计的基本要求 .....	118
5.1.2 模型在风洞中的位置 .....	119
5.1.3 模型的支撑 .....	119
5.1.4 模型结构的一般要求 .....	120
5.1.5 模型和支杆的强度要求 .....	121
5.1.6 模型和支杆的刚度要求 .....	121
5.1.7 模型的精度要求 .....	122
5.2 高超声速风洞气动力试验模型设计 .....	123
5.2.1 常规高超声速风洞试验模型设计 .....	123
5.2.2 推进风洞试验模型设计 .....	126
5.2.3 低密度风洞试验模型设计 .....	127
5.3 激波风洞试验模型设计 .....	129
5.3.1 模型材料及缩比的选择 .....	129
5.3.2 模型连接部分设计 .....	130
5.3.3 模型外形设计 .....	131
5.4 自由飞弹道靶模型设计 .....	131
5.4.1 弹道靶模型设计要求 .....	131
5.4.2 模型设计的基本原则 .....	133
5.4.3 模型尺寸的限制 .....	134
5.4.4 模型的结构要求 .....	134
5.4.5 模型的强度要求 .....	134
5.4.6 模型表面粗糙度 .....	135
5.4.7 模型的精度要求 .....	135
5.4.8 弹托设计要求 .....	136
5.5 喷流干扰气动力试验模型设计 .....	137
5.5.1 喷流干扰模型设计基本要求 .....	137

5.5.2	冷气喷流试验模型设计	138
5.5.3	热气喷流试验模型设计	141
	参考文献	142
<b>第 6 章</b>	<b>风洞天平及其校准</b>	144
6.1	引言	144
6.2	压电天平及其校准	145
6.2.1	压电天平	145
6.2.2	压电天平设计	149
6.2.3	压电天平的校准	155
6.3	微量天平及其校准	160
6.3.1	微量天平设计	160
6.3.2	微量天平校准	164
6.4	中温天平	167
6.4.1	中温天平设计	167
6.4.2	温度补偿及修正	168
6.4.3	中温天平校准	170
6.4.4	水冷天平	171
6.5	其他特种测力天平	172
6.5.1	铰链力矩天平	173
6.5.2	推力测量天平	174
6.5.3	表面摩阻天平	175
6.5.4	喷流试验天平	177
6.5.5	压心天平	179
6.5.6	小滚转力矩天平	180
	参考文献	181
<b>第 7 章</b>	<b>试验技术</b>	182
7.1	试验程序和一般试验方法	182
7.2	全模测力试验	186
7.2.1	全模测力试验的一般做法	186
7.2.2	不同高超声速风洞全模测力试验的特殊性	189
7.3	压力分布测量试验	189
7.4	模型自由飞试验	191



7.4.1	激波风洞中模型自由飞试验	191
7.4.2	高超声速推进风洞中模型自由飞试验	195
7.5	喷流干扰试验	196
7.5.1	模拟方法	197
7.5.2	喷流模型及装置	198
7.6	高超声速进气道试验	198
7.6.1	研究内容和试验目的	199
7.6.2	试验方法	199
7.7	铰链力矩试验	203
7.7.1	试验方法	203
7.7.2	应注意的问题	205
7.8	动稳定性试验	206
7.8.1	自由振动法	206
7.8.2	自由滚转试验技术	212
7.8.3	自由翻滚试验技术	213
7.8.4	强迫振动试验技术	215
7.8.5	风洞模型自由飞试验技术	216
7.8.6	参数辨识技术	217
7.9	级间分离及多体分离试验	219
7.9.1	无喷级间分离试验	220
7.9.2	有喷级间分离试验	222
7.9.3	轨道器分离试验	224
7.10	小滚转力矩/小不对称气动特性试验	225
7.10.1	天平直接测量法	225
7.10.2	自由滚转法	226
7.10.3	气浮轴承加天平法	226
7.10.4	角度、同轴度的影响	227
	参考文献	228
<b>第8章</b>	<b>试验数据的处理与分析</b>	<b>229</b>
8.1	对数据采集与处理系统的要求	229
8.1.1	连续式风洞试验数据采集与处理系统	237
8.1.2	脉冲风洞试验数据采集与处理系统	243