

《国防科研试验工程技术系列教材》

空气动力系统

高低速风洞气动与结构设计

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

高低速风洞气动与结构设计

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

高低速风洞气动与结构设计/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, 2003. 4

国防科研试验工程技术系列教材·空气动力系统
ISBN 7-118-03068-6

I. 高... II. 中... III. ①跨音速风洞—气动特性
②低速风洞—气动特性③跨音速风洞—结构设计④低速
风洞—结构设计 IV. V211.74

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 106770 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 16 $\frac{1}{8}$ 417 千字

2003 年 4 月第 1 版 2003 年 4 月北京第 1 次印刷

印数:1—2000 册 定价:37.00 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 郭詮水

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

高低速风洞气动与结构设计

主 编 刘政崇

副主编 廖达雄 董谊信

主 审 陶祖贤

编写人员

第 1 章 陶祖贤

第 2 章 陶祖贤

第 3 章 凌其扬 胡兆火

第 4 章 董谊信 廖达雄 胡兆火

第 5 章 丛厚生 蒋钟培 虞则斌

第 6 章 蒋钟培 刘政崇 丛厚生 艾祖鉴 朱燕烨 柳新民

第 7 章 胡兆火 凌其扬

第 8 章 张国标

第 9 章 陶祖贤

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

《高低速风洞气动与结构设计》是《国防科研试验工程技术系列教材》空气动力系统中的第8册。本书主要介绍了低速和高速风洞的设计技术。全书共9章。第1章概论,介绍风洞用途、分类及其设计特点。第2章风洞设计原理和程序,介绍影响风洞设计的相似准则和风洞设计程序。第3章和第4章分别介绍常规低速风洞和跨超声速风洞的气动设计。第5章和第6章分别介绍低速风洞和跨超声速风洞的结构设计。第7章和第8章分别介绍专用低速风洞和高雷诺数风洞的设计要点。第9章介绍了风洞的发展趋向。

本书是根据《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。编写人员是长期从事风洞设计与建设的专家,书中凝集了他们在国内风洞设计与建设中的经验,并吸取了国外风洞的先进设计技术。全书内容突出了先进性和实用性,在编写过程中,力求观点正确、语言精练,是一本供从事风洞设计的工程技术人员阅读的参考书。

本书在中国空气动力研究与发展中心及其所属的设备设计与测试技术研究所组织下编写的,编写过程中得到了中心领导和所领导、机关的关怀与支持,在此表示感谢。

由于我们水平有限,错误之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

2002年8月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 风洞及其用途	1
1.1.1 空气动力试验的必要性	1
1.1.2 风洞在飞行器研制与发展中的地位和作用	3
1.1.3 风洞在工业空气动力学方面的应用	6
1.2 风洞的分类、组成及其设计特点	10
1.2.1 风洞的分类、组成	10
1.2.2 各类风洞的设计特点	11
第 2 章 风洞设计原理与程序	15
2.1 影响风洞设计的相似准则	15
2.1.1 雷诺数	17
2.1.2 马赫数	19
2.1.3 湍流度	23
2.1.4 比热比	25
2.1.5 普朗特数	26
2.1.6 斯特罗哈数	27
2.1.7 佛劳德数	27
2.1.8 表示物体弹性变形的相似准则($C = E/\rho v^2$)和表示物体质量 分布的相似准则($m/\rho L^2$)	28
2.1.9 模型表面粗糙度 $\Delta = h/L$	28
2.1.10 α 和 β 准则	28
2.2 风洞设计	29
2.2.1 风洞的建造地点	30
2.2.2 风洞型式的选取	31
2.2.3 采用成熟技术,不断发展新技术	31

2.3 风洞设计程序	32
2.3.1 立项论证	32
2.3.2 可行性研究	33
2.3.3 初步设计	34
2.3.4 技术设计	35
2.3.5 施工设计	35
2.3.6 风洞调试	36
第3章 常规低速风洞气动设计	38
3.1 概述	38
3.1.1 常规低速风洞的速度和主要相似参数	38
3.1.2 常规低速风洞试验段气流品质的基本要求	40
3.1.3 常规低速风洞的基本型式	41
3.1.4 常规低速风洞气动总体方案的确定	45
3.2 试验段	46
3.2.1 试验段口径	46
3.2.2 试验段截面形状	48
3.2.3 试验段的长度	49
3.2.4 闭口试验段的边界层影响	49
3.2.5 模型支撑方式	50
3.2.6 闭口试验段的大门、观察的照明	51
3.2.7 压力平衡缝	51
3.2.8 开口试验段的自由射流	52
3.2.9 开口试验段减振设计	54
3.3 稳定段	60
3.3.1 稳定段直径和收缩比	60
3.3.2 蜂窝器	62
3.3.3 阻尼网	63
3.3.4 静流段	65
3.4 收缩段	66
3.4.1 收缩段长度	66
3.4.2 收缩曲线	66
3.4.3 收缩度内流场计算	69

3.5 扩散段	71
3.5.1 常规扩散段的扩散角	71
3.5.2 常规扩散段的面积比	73
3.5.3 大角度扩散段	73
3.5.4 扩散段内流场计算	76
3.6 拐角和拐角导流片	76
3.6.1 拐角	76
3.6.2 拐角导流片的排列	78
3.6.3 拐角导流片型面	80
3.7 防护网	81
3.8 风扇段	81
3.8.1 风扇段的位置	81
3.8.2 风扇段截面积	82
3.8.3 风扇段整流装置	82
3.8.4 正反旋风扇	84
3.8.5 变距风扇	84
3.8.6 驱动电机的位置	84
3.9 风扇	85
3.9.1 影响风扇设计的主要因素	85
3.9.2 止旋片	87
3.9.3 风扇—止旋片系统气动设计	89
3.10 风扇系统的减振和降噪设计	93
3.10.1 风扇系统的特征振动和减振措施	94
3.10.2 风扇的降噪和降噪措施	95
3.11 风洞的损失系数、能量比和运行功率	96
3.11.1 损失系数	96
3.11.2 总压损失 ΔP_0 和静压损失 ΔP	97
3.11.3 管段损失的来源	99
3.11.4 损失系数的叠加和折算	99
3.11.5 风洞运转功率和能量比	100
3.12 风洞各段损失的计算	102
3.12.1 开口试验段	102

3.12.2	闭口试验段	104
3.12.3	模型和模型支架	104
3.12.4	扩散段	104
3.12.5	拐角和拐角导流片	105
3.12.6	风扇段	106
3.12.7	蜂窝器、阻尼网和安全网	107
3.12.8	直流式风洞的进气和排气损失	108
3.13	风洞各段气动载荷计算	108
3.13.1	风洞各截面压力计算	108
3.13.2	风洞各段轴向力计算	109
3.14	回流式风洞的冷却	109
3.14.1	风洞温度的影响	109
3.14.2	风洞的冷却方式	110
3.15	直流式风洞进、排气装置及其他方面的设计	111
3.15.1	进气装置	112
3.15.2	排气装置气动设计	113
3.15.3	隔断幕	114
3.15.4	进口消声器	114
第4章	跨超声速风洞气动设计	115
4.1	概述	115
4.2	风洞驱动型式及气源系统	120
4.2.1	风洞驱动型式	120
4.2.2	连续式风洞驱动装置简介	123
4.2.3	暂冲型风洞气源设计与系统配置	128
4.3	气动总体设计	135
4.3.1	试验段尺寸和截面形状	136
4.3.2	风洞运行压力	144
4.3.3	风洞试验雷诺数模拟能力	147
4.3.4	试验段流场品质规范	148
4.3.5	风洞一次持续运行时间和数据生产能力	149
4.4	跨超声速试验段与驻室	151
4.4.1	跨声速试验段	151

4.4.2	超声速试验段	168
4.5	模型支撑及支架段	171
4.5.1	模型支撑	171
4.5.2	支架段	177
4.5.3	模型气动载荷	181
4.5.4	迎角机构调节范围及速度	184
4.6	二维喷管	186
4.6.1	喷管的作用和设计要求	186
4.6.2	喷管的种类和特点	187
4.6.3	二元超声速喷管的位流型面设计	190
4.6.4	二维超声速喷管位流型面的边界层修正	210
4.7	收缩段	219
4.8	稳定段	222
4.8.1	大角度扩散段(大开角段)	223
4.8.2	整流段	229
4.8.3	消声段	234
4.9	超声速扩散段	240
4.9.1	超声速扩散段的作用	240
4.9.2	扩散段性能和效率	242
4.9.3	固定壁扩散段及其几何参数的确定	245
4.9.4	调节片式超声速扩散段	249
4.9.5	栅指式扩散段	253
4.10	引射器	261
4.10.1	引射器的作用和基本原理	261
4.10.2	引射器的性能计算分析	262
4.10.3	影响引射器性能的诸因素分析	267
4.10.4	引射器的种类和性能特点	270
4.11	阀门配置与压力调节阀	272
4.11.1	调压阀门几何外形和特征尺寸	274
4.11.2	阀门型面设计	277
4.11.3	阀门调节特性	277
4.12	风洞性能测试	279

4.12.1	风洞性能调试	279
4.12.2	流场校测标准	282
4.12.3	流场校测内容、方法及装置设计	282
4.12.4	标模试验	288
第5章	低速风洞结构设计	289
5.1	低速风洞结构总体设计	289
5.1.1	结构总体设计的工作内容	289
5.1.2	风洞洞体结构总体设计	289
5.1.3	工艺总体设计	295
5.2	试验段	298
5.2.1	试验段框架和壁板	298
5.2.2	观察窗、照明窗及灯具设置	299
5.2.3	顶门	300
5.2.4	迎角机构	301
5.2.5	转盘机构设计	305
5.2.6	地板	307
5.3	风扇段	308
5.3.1	风扇段的组成	308
5.3.2	风扇段壳体	308
5.3.3	风扇	309
5.3.4	电机的布置	311
5.4	稳定段	312
5.4.1	蜂窝器	312
5.4.2	阻尼网设计	314
5.5	收缩段	317
5.5.1	收缩段型面精度与材料和加工工艺	317
5.5.2	收缩段型面检验方法	319
5.6	拐角导流片	319
5.6.1	拐角导流片的结构	319
5.6.2	拐角导流片的安装	320
第6章	跨超声速风洞结构设计	323
6.1	跨超声速风洞结构总体设计	323