

《国防科研试验工程技术系列教材》

空气动力系统

低速风洞试验

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

低速风洞试验

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

低速风洞试验/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, 2002.7

国防科研试验工程技术系列教材·空气动力系统
ISBN 7-118-02806-1

I. 低... II. 中... III. 低速风洞-风洞试验-教材 IV. V211.74

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 006779 号

国防工业出版社

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京景隆印刷厂印刷

新华书店经售

开本 850×1168 ~~1/32~~ 印张 35.14 ~~20.1~~ 千字

2002 年 7 月第 1 版 2002 年 7 月北京第 1 次印刷

印数:1—1500 册 定价:36.00 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

低速风洞试验

主 编 王勳年

副主编 孙正荣 刘伯均 肖京平

编著人员

第 1 章 刘义信 刘国强

第 2 章 沈礼敏 李 明

第 3 章 刘伯均 叶吉成 肖京平 彭 毅 杨国祥

高业芝 官锡本 蒋 敏 李德祥

第 4 章 华尚钟 李征初

第 5 章 张 钧

第 6 章 王勳年 刘义信 陈 洪 刘国强 胡国风

张 钧 刘晓晖 杨远志

第 7 章 陈 洪 沈礼敏 孙海生 肖京平 陈 忻

王文金 程 松 杨远志 姜裕标 杨万富

张维智

第 8 章 邱玉鑫 刘晓晖 程 松 江桂清

第 9 章 孙正荣 黄明其 杨永东 杨国祥 邢 霞

第 10 章 周瑜平 张亮亮 李明水 张维智

第 11 章 刘义信 战培国

插 图 张 钧

改编人员

刘伯均

王勳年

陈 洪

邱玉鑫

孙正荣

周瑜平

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。编著这套系列教材,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,主要试验方法与工程程序,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

《低速风洞试验》主要论述有关低速风洞试验的原理、设备和试验技术。全书共 11 章,约 40 万字,包括概论、低速风洞试验的基本理论、低速风洞概况、低速风洞流场校测、低速风洞试验模型设计、低速风洞常规试验技术、低速风洞特种试验技术、低速风洞试验数据修正、直升机低速风洞试验、低速风洞在其它方面的应用、低速风洞发展趋势等内容。

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、编写要求,综合了国内外低速风洞试验技术,结合中国空气动力研究与发展中心低速空气动力研究所(气动中心低速所)的科研成果编写而成的。本书介绍了低速风洞试验的原理和设备,重点介绍了广泛应用的试验技术。全书内容丰富,语言精练,实用性强。

本书的编写过程中,参考了国内外空气动力学实验技术方面的教材和专著。本书的编写工作是在中国空气动力研究与发展中心的领导下进行的,在书稿编写过程中,总装备部司令部军训局给了我们许多指导和帮助,在此表示感谢!

本书成稿后,刘国强对全书做了仔细的审阅和修改。由于编者的水平有限,错误之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

2001 年 12 月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 概述	1
1.2 低速风洞试验的工作原理	6
1.3 低速风洞试验的地位与作用	7
1.4 低速风洞试验的发展概况	9
参考文献	15
第 2 章 低速风洞试验的基本理论	16
2.1 概述	16
2.2 相似理论	16
2.3 误差理论	22
2.4 坐标轴系及其转换	31
参考文献	36
第 3 章 低速风洞概况	37
3.1 概述	37
3.2 风洞的构成	39
3.3 风洞的动力系统	43
3.4 风洞的控制系统	50
3.5 风洞的测量系统	57
3.6 特种用途风洞	63
参考文献	66
第 4 章 低速风洞流场校测	67
4.1 概述	67
4.2 流场品质要求	68
4.3 流场校测方法	72

4.4 改善流场品质的方法·····	90
参考文献·····	92
第5章 低速风洞试验模型设计 ·····	93
5.1 概述·····	93
5.2 模型设计要求·····	94
5.3 模型结构设计·····	102
5.4 低速风洞试验模型的验收·····	108
参考文献·····	110
第6章 低速风洞常规试验技术 ·····	111
6.1 概述·····	111
6.2 气动载荷测量方法·····	112
6.3 模型支撑·····	127
6.4 全模测力试验·····	135
6.5 半模试验·····	145
6.6 压力分布试验·····	146
6.7 翼型试验·····	150
参考文献·····	155
第7章 低速风洞特种试验技术 ·····	156
7.1 概述·····	156
7.2 螺旋桨飞机动力影响试验·····	157
7.3 进气道试验·····	164
7.4 喷流试验·····	183
7.5 进排气试验·····	195
7.6 推力矢量转向试验·····	205
7.7 鱼雷动力影响试验·····	209
7.8 尾旋特性试验·····	215
7.9 连续变迎角试验·····	226
7.10 动导数试验·····	235
7.11 大振幅振荡试验·····	246
7.12 颤振试验·····	251

7.13	吹(吸)气流动控制试验	272
7.14	铰链力矩试验	278
7.15	投放试验	281
7.16	捕获轨迹试验	291
7.17	降落伞试验	301
7.18	弹射救生系统试验	309
7.19	流动测量和显示试验	311
	参考文献	318
第 8 章	低速风洞试验数据修正	321
8.1	概述	321
8.2	平均气流偏角修正	322
8.3	支架干扰修正	324
8.4	洞壁干扰修正	331
8.5	雷诺数效应修正	345
	参考文献	356
第 9 章	直升机低速风洞试验	358
9.1	概述	358
9.2	主要符号及坐标轴系	362
9.3	试验模型	368
9.4	试验设备	373
9.5	试验方法	395
9.6	试验数据处理	412
9.7	发展趋势	417
	参考文献	419
第 10 章	低速风洞在其它方面的应用	421
10.1	概述	421
10.2	大气边界层模拟	423
10.3	火箭风载试验	430
10.4	建(构)筑物试验	437
10.5	桥梁试验	445

10.6	风力机试验	451
10.7	车辆试验	455
	参考文献	461
第 11 章	低速风洞发展趋势	462
11.1	低速风洞试验设备发展趋势	462
11.2	低速风洞试验技术发展趋势	465

第1章 概 论

1.1 概 述

我们所处的时代是航空航天时代,是人类进入空间开发的新时期。空气动力学是目前世界科学领域内最为活跃、最有发展潜力的学科之一。纵观一百多年来空气动力学的发展历史,实验空气动力学研究对空气动力学的发展和各种航空航天飞行器的研制起着决定性的作用,风洞试验则一直是实验空气动力学研究最为重要而有效的手段。空气动力学发展的每一阶段总有与之相应的风洞试验设备的建立与投入使用。世界上航空航天技术发达的国家,都建立有种类齐全、速度衔接、尺寸配套、用途广泛,配备了高性能测试设备,包括常规试验风洞和特种试验风洞的庞大风洞试验基地。

早期的风洞试验主要涉及航空航天工程,但随着现代科学技术的发展,空气动力学特别是低速空气动力学已跨出航空航天领域,向国民经济的各个领域渗透,逐步形成了一门新兴的边缘学科,即风工程与工业空气动力学,以研究非航空航天方面,诸如运输交通工具、建筑物构筑物以及地球环境等领域的工程问题。风洞试验也从研究航空航天飞行器的性能试验扩展到研究大气边界层内流动的空气与人类创造的物体之间的相互作用,乃至人类在地球表面的活动,诸如环境保护等方面的试验。

风洞的种类按试验速度可划分为亚声速风洞、跨超声速风洞和高超声速风洞。虽然这些风洞都用来解决空气动力学问题,但在不同的速度范围中,空气动力学都有一些特殊的问题。这些风

洞在解决其特殊问题时各有各的优势,但没有哪一种风洞在解决这些问题时是全能的。在亚声速风洞中,当速度低于 135m/s 左右时,称为低速风洞。就空气动力学的研究范围来说,空气是可压缩气体,但在低速风洞试验中,空气的压缩性可以忽略不计。

低速风洞试验就是用试验的手段研究航空航天飞行器的空气动力性能,特别是起飞着陆阶段的空气动力性能;研究水中兵器的流体动力性能和航空航天救生器具的气动特性;研究汽车、列车的空气动力性能;研究风力机械的空气动力特性;研究单体或群体建筑构筑物在风场中的受力状态及其对风载的响应特性;研究桥梁的风载状态和风振规律;还可以研究一些体育运动器械如标枪、排球运动的基本规律等等。

《低速风洞试验》一书旨在向从事低速风洞试验的工程技术人员讲授低速风洞试验的基本理论;介绍低速风洞试验的基本设备以及相关的试验技术;传授前人解决空气动力学问题的基本知识和技能,以便他们能有效地应用这些技术解决工程中的各种气动问题,引导他们去发现新现象新问题,并寻求解决这些问题的新技术、新方法,创造空气动力学研究的新高度、新水平。

本书系实验空气动力学低速风洞试验方面的专业基础课教材,其主要内容如下所述。

1) 低速风洞试验的基本原理

在空气动力学研究中,人们通常对空气动力学工程问题建立数学模型,然后建立描述这些数学模型的数学物理基本方程,讨论求解这些基本方程的方法并得到问题的数值解。在空气动力学实验中,一般采用模拟方法,即使用模型试验来模拟原型的物理现象。所谓模拟是指在一定的条件下用一个比较容易求得结果的物理现象来研究另一个遵循相同物理规律或数学规律的物理现象的方法。风洞试验就是研究实际飞行器的绕流现象与风洞中模型绕流现象的等效性和相似性,建立试验的相似准则,研究模拟试验与实际的物理现象的近似程度以及由此产生的种种偏差。此外,由