

《国防科研试验工程技术系列教材》

空气动力系统

# 高低速风洞测量与 控制系统设计

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

# 高低速风洞测量与 控制系统设计

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

高低速风洞测量与控制系统设计/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, 2001. 11

国防科研试验工程技术系列教材·空气动力系统  
ISBN 7-118-02654-9

I. 高... II. 中... III. ①超高速风洞—测量—控制系统—系统设计②低速风洞—测量—控制系统—系统设计 IV. V211.74

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 065010 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 13¼ 343 千字

2001 年 11 月第 1 版 2001 年 11 月北京第 1 次印刷

印数: 1—1000 册 定价: 32.00 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 (以下按姓氏笔划排列)

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

# 高低速风洞测量与控制系统设计

主 编 施洪昌  
副 主 编 张学祥 李尚春  
主 审 马兴尧  
副 主 审 叶吉成 汤更生

## 编写人员

第 1 章 施洪昌 康 虎 李尚春  
第 2 章 王设希 宋巍巍 施洪昌  
第 3 章 顾兴若 马护生 于昆龙  
第 4 章 施洪昌 汤更生 张 军 吴家明 祝汝松  
第 5 章 曾志善 叶吉成  
第 6 章 康 虎 李尚春  
第 7 章 马兴尧  
第 8 章 郑继荣 王 帆 张正军  
第 9 章 施洪昌 马兴尧 张俊生

## 打印、制图

鲍安桂 杨丽萍 何先琼 罗跃华 吴家明  
赵 崑 肖丽娟

## 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、航空气动力研究的科技人员支持“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

《高低速风洞测量与控制系统设计》是《国防科研试验工程技术系列教材·空气动力系统》第九册。主要介绍了高速风洞和低速风洞测量控制系统设计技术。全书共九章。第1章为概论,主要介绍风洞测控系统基本概念和控制理论;第2~4章为测量系统,主要介绍测压、测温、测力(天平)传感器、电子压力扫描阀、数据采集处理、计算机网络、数据库等技术;第5~8章介绍了风洞控制系统,包括高低速风洞控制系统设计、液压控制和气动控制系统设计、供配电系统设计;第9章介绍了风洞测控技术的发展。

本书是根据国防科研试验工程技术系列教材要求编写的。编写人员都是长期从事风洞测控技术的专家和学者,作者把从事风洞测控宝贵经验写进了书中。全书内容进行反复修改,力求观点正确、语言精炼、内容实用。它是一本供从事风洞测控技术科技人员阅读的专业书籍。

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、资料室的全力支持,萧泰顺同志对本书作了详细的校审,在此一并表示感谢。

由于我们水平有限,错误之处在所难免,请读者批评指正。

编 者

2001年4月

## 内 容 简 介

本书主要介绍了高低速风洞的测量控制系统设计和使用技术。测量系统包括风洞测压、测温传感器,模型力和力矩测量、数据采集处理;控制系统包括低速风洞控制、高速风洞控制、气动和液压控制、供配电系统。还介绍了风洞测控技术的发展。

本书主要适用于具有大专以上学历的从事风洞测控系统设计和使用技术人员阅读,也可供其他有关人员参考。

# 《国防科研试验工程技术系列教材· 空气动力系统》

---

编号	教材名称
7-1	分离流与旋涡运动的结构分析
7-2	计算流体力学及应用
7-3	低速风洞试验
7-4	高速风洞试验
7-5	高超声速气动力试验
7-6	高超声速气动热和热防护
7-7	再入物理
7-8	高低速风洞气动与结构设计
7-9	高低速风洞测量与控制系统设计
7-10	高超声速试验设备设计
7-11	飞行器系统辨识学
7-12	模型自由飞试验
7-13	流动显示技术

ISBN 7-118-02654-9/V·193

定价:32.00 元

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 风洞测量系统基本概念 .....	1
1.2 被测参数 .....	2
1.3 测量系统技术指标 .....	6
1.4 风洞控制的对象和特点 .....	10
1.5 风洞的运行参数控制 .....	15
1.6 风洞控制系统设计理论基础 .....	18
<b>第 2 章 风洞测压测温技术</b> .....	21
2.1 传感器在测量系统中的地位 .....	21
2.2 压力传感器设计 .....	21
2.3 风洞测压系统设计 .....	33
2.4 风洞测温传感器 .....	37
2.5 电子扫描阀测压系统 .....	41
<b>第 3 章 风洞天平</b> .....	58
3.1 风洞天平概述 .....	58
3.2 应变天平设计 .....	64
3.3 应变天平校准 .....	74
3.4 BCL-30000 全自动无砝码天平校准系统 .....	78
<b>第 4 章 风洞数据采集处理系统</b> .....	89
4.1 数据采集系统结构及发展 .....	89
4.2 信号调理器 .....	92
4.3 数字化技术 .....	114
4.4 数据传送技术 .....	125
4.5 总线技术 .....	133

4.6	风洞数据采集系统设计 .....	147
4.7	风洞中常用的几种数据采集系统 .....	156
4.8	数据采集系统抗干扰技术 .....	193
4.9	以太网技术 .....	203
4.10	数据库技术 .....	212
<b>第5章</b>	<b>低速风洞控制系统设计 .....</b>	<b>231</b>
5.1	低速风洞风速控制 .....	231
5.2	低速风洞模型姿态控制 .....	253
5.3	低速风洞运行自动化 .....	258
5.4	典型低速风洞控制系统简介 .....	263
<b>第6章</b>	<b>跨超声速风洞控制系统设计 .....</b>	<b>269</b>
6.1	风洞运行参数控制 .....	269
6.2	风洞状态控制 .....	278
6.3	风洞运行自动化 .....	287
6.4	典型跨声速风洞控制系统简介 .....	290
6.5	2.4m 跨声速风洞多变量控制系统 .....	299
<b>第7章</b>	<b>风洞供电系统设计 .....</b>	<b>306</b>
7.1	风洞供电特点 .....	306
7.2	供电设计基础 .....	308
7.3	风洞供电设计 .....	324
<b>第8章</b>	<b>风洞液压控制和气动控制系统设计 .....</b>	<b>334</b>
8.1	风洞液压系统 .....	334
8.2	风洞液压拖动系统 .....	336
8.3	风洞电液伺服系统 .....	350
8.4	风洞气动控制系统 .....	365
<b>第9章</b>	<b>风洞测量控制技术发展 .....</b>	<b>391</b>
9.1	风洞数据采集系统发展 .....	391
9.2	传感器技术的发展 .....	394
9.3	压敏漆技术 .....	395
9.4	智能控制技术 .....	396

9.5 柔性智能测控技术 .....	399
9.6 可编程控制技术 .....	400
9.7 仿真技术 .....	400
9.8 测量控制系统集成化 .....	401
9.9 现场总线将成为热点 .....	402
<b>参考文献</b> .....	<b>404</b>

# 第1章 绪 论

## 1.1 风洞测量系统基本概念

风洞由洞体、驱动系统、控制系统、测量系统和辅助系统等组成。测量系统的作用是用来完成风洞试验的各种参数测试。风洞产生数据,数据靠测量系统获取,测量系统在风洞中有重要地位。

风洞试验主要是常规测力、测压试验,包括模型纵向、横向测力、测压等;风洞建成或系统更新后应进行通气调试、流场校测、标模测力。动态试验也是风洞试验重要项目,包括抖振边界测量、抖振载荷测量、飞行器翼面的非定常压力分布测量、飞行器摇摆特性测量、飞行器结构动力响应测量、颤振试验测量、脉动压力测量和多种特种测量等。

测量系统要进行总压、静压、总温、模型的力和力矩、模型迎角、风洞监视压力等测量。风洞测量系统设计包括应变天平、压力和温度传感器、数据采集处理系统、电子扫描测压系统,试验分析系统、网络通信系统等设计。

测量系统的任务就是通过传感器把压力、温度、力、力矩、角度、位移、速度、电量等物理量,转化成电压或电流信号,然后通过数据采集系统逐个采样,再量化成数字信号送入计算机处理、计算,并显示、打印试验结果。

设计测量系统的步骤是,首先根据气动要求提出测量系统技术条件,然后进行精度分析(对系统中用到的部件进行精度分配)、系统方案设计(确定各部分技术指标)、系统技术设计(包括各部件的选择)、系统施工设计(各部件布局、安装、连接)、测量系统概算等。