

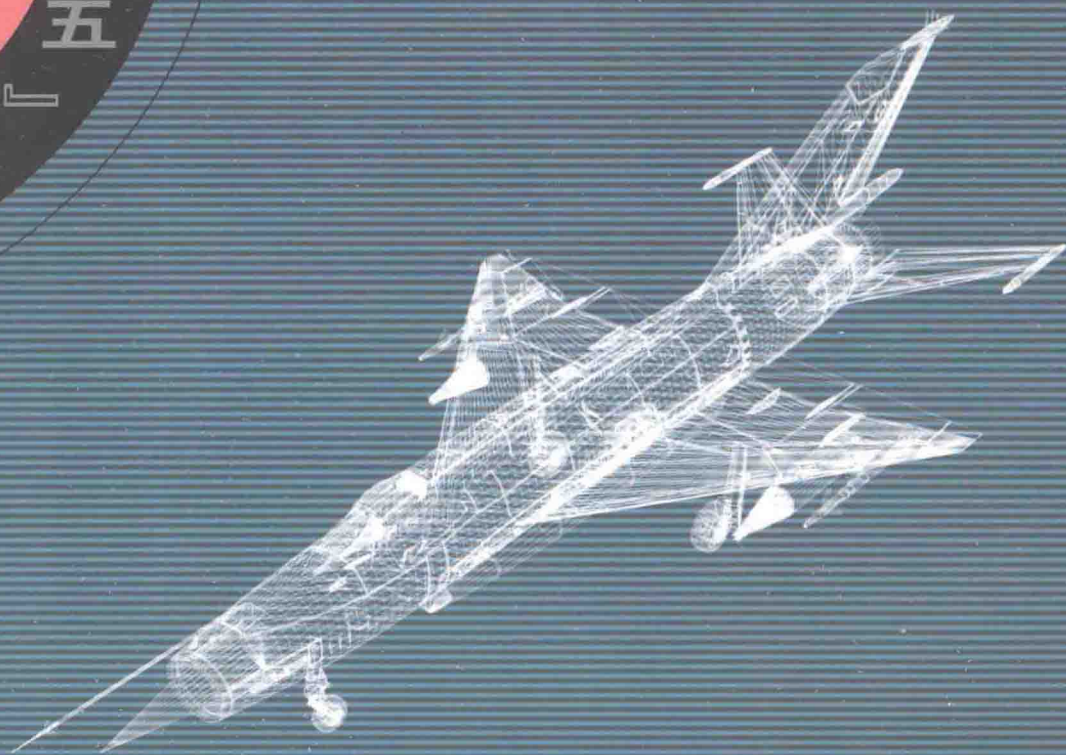
仪器科学与技术



国防科工委「十五」规划
教材

航空测试系统

●樊尚春 吕俊芳 张庆荣 闫 蓓 编著



北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社

西北工业大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

哈尔滨工程大学出版社



国防科工委“十五”规划教材·仪器科学与技术

航空测试系统

樊尚春 吕俊芳 张庆荣 闫 蓓 编著



北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社 西北工业大学出版社
哈尔滨工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

内容简介

本书介绍了测试与测试系统的基本概念,测试系统的动静态特性、动静态误差及其分析方法,以及测试系统的动静态性能指标。在此基础上着重介绍了航空航天及工业领域中经常遇到的压力、振动、冲击、线加速度、温度、流量、油量、转速、扭矩、航向、飞行高度与高度变化率(升降速度)、飞行速度、 Ma 数等被测参数的测量原理、特点以及相应测试系统的组成、动静态特性、误差分析和参数选择原则等;还介绍了计算机测试技术、电子综合显示技术和语音系统等。

为便于读者学习与掌握本书的主要内容,个别章节配有一定的实例分析,每一章都配有思考题与习题。

本书可作为仪器科学与技术、测控技术与仪器本科专业的教材,也可作为电气工程与自动化、信息工程、检测技术与自动化装置、机械电子工程等本科专业的参考书,还可供相关专业的师生和有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

航空测试系统/樊尚春等编著. —北京:北京航空航天大学出版社,2005.7

ISBN 7-81077-632-0

I. 航… II. 樊… III. 航空发动机—测试
IV. V263.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 041861 号

航空测试系统

樊尚春 吕俊芳 张庆荣 闫蓓 编著

责任编辑 韩文礼

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100083)

发行部电话:010-82317024 传真:010-82328026

<http://www.buaapress.com.cn>

E-mail: bhpress@263.net

涿州市新华印刷有限公司印装 各地书店经销

开本:787×960 1/16

印张:26.25 字数:588千字

2005年7月第1版 2005年7月第1次印刷

印数:3 000册

ISBN 7-81077-632-0 定价:36.00元

国防科工委“十五”规划教材编委会

(按姓氏笔画排序)

主任：张华祝

副主任：王泽山 陈懋章 屠森林

编委：王 祁 王文生 王泽山 田 蔚 史仪凯
乔少杰 仲顺安 张华祝 张近乐 张耀春
杨志宏 肖锦清 苏秀华 辛玖林 陈光禡
陈国平 陈懋章 庞思勤 武博祎 金鸿章
贺安之 夏人伟 徐德民 聂 宏 贾宝山
郭黎利 屠森林 崔锐捷 黄文良 葛小春



总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就;研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了一席之地。十一届三中全会以来,伴随着改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济作出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,生产和传播国防科技新知识、新思想,攻克国防基础科研和高技术研究难题当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,积极探索,

锐意改革,大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影响。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版200种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相关专业领域的专家、学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的100多位专家、学者,对经各单位精选的近550种教材和专著进行了严格的评审,评选出近200种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与技术、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者,他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,进入21世纪,我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,提升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱石。全面振兴国防科技工业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华,实现



志向,提供了缤纷的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝



前 言

测试是人们通过实验认识客观世界并取得实验对象的定性或定量信息的一种基本方法,它在日常生活、科学研究、工农业生产、交通运输、医疗卫生和国防建设中发挥着基础性作用。测试技术的水平与发展状况反映了人类认识客观世界的能力与程度。

本教材根据北京航空航天大学本科生自动化测试与控制专业 2000 版教学计划制定的教学大纲,并参照了由朱定国教授、林燕珊教授、杨世均教授于 1990 年编著出版的《航空测试系统》一书编著而成,也适用于其他相关专业。

本书以航空、航天领域的测试为主,兼顾民用领域的测试,力图讲清测试的基本概念和基本理论,对于各个被测参数着重讲清测量原理、系统组成及误差分析等方面的相同点和不同点。

本书共 17 章,包括 3 部分内容:第 1~3 章为基本理论部分,介绍了有关测试技术的基本概念、功能和研究的主要内容,测试系统的组成与分类,航空测试系统的特点,航空测试技术中的传感器,测试系统的静、动态特性的描述与数据处理;第 4~14 章为基本参数测量部分,介绍了航空、航天及工业领域中经常遇到的压力、振动、冲击、线加速度、温度、流量、油量、转速、扭矩、航向、飞行高度与高度变化率(升降速度)、飞行速度、 Ma 数等被测参数的测量原理和特点以及相应测试系统的组成、动静态特性、误差分析和参数选择原则等;第 15~17 章为综合参数测试部分,重点介绍了机载大气数据系统、组合导航系统、飞行模拟器操纵负荷系统、电子综合显示系统和语音系统等。

本书第 1~7 章由樊尚春教授编写,第 8~12 章由吕俊芳教授编写,第 13,14 章由闫蓓副教授编写,第 15~17 章由张庆荣副教授编写。全书由樊尚春教授主编并统稿。

在本教材编写过程中,参考、引用了许多专家学者的论著和教材,特别是得到了北京航空航天大学朱定国教授的真诚指导与大力帮助;他还



与清华大学丁天怀教授审阅了全稿。他们提出了许多宝贵的意见和建议,在此一并表示衷心感谢。

航空测试技术内容广泛且发展迅速,由于编者学识、水平有限,教材中的错误与不妥之处,敬请读者批评指正。

作者

2005年4月

目 录

第 1 章 绪 论

1.1 引 言	1
1.1.1 测试的作用与地位	1
1.1.2 测试技术的内容	1
1.1.3 测试系统的组成与分类	2
1.2 航空测试技术的特点	5
1.2.1 与飞机运动状态有关的坐标系	5
1.2.2 航空测试系统的特点	7
1.3 航空测试技术中的传感器	11
1.3.1 传感器的作用与分类	11
1.3.2 传感器的重要地位和地位	13
思考题与习题	14

第 2 章 测试系统的静态特性与数据处理

2.1 测试系统的静态特性一般描述	15
2.2 测试系统的静态误差	15
2.2.1 误差的分类	15
2.2.2 单参数测试系统静态误差分析	18
2.3 测试系统的静态标定	19
2.3.1 静态标定条件	19
2.3.2 测试系统的静态特性	19
2.4 测试系统的主要静态性能指标及其计算	20
2.4.1 测量范围	20
2.4.2 量 程	20
2.4.3 静态灵敏度	20
2.4.4 分辨力与分辨率	21
2.4.5 漂 移	22
2.4.6 温 漂	22
2.4.7 线性度	22
2.4.8 符合度	24
2.4.9 迟 滞	25
2.4.10 重复性	25
2.4.11 误差的合成	27



2.4.12 计算实例	28
思考题与习题	30
第3章 测试系统的动态特性与数据处理	
3.1 概 述	32
3.2 动态无失真测试条件	32
3.3 测试系统动态特性方程	34
3.3.1 微分方程	34
3.3.2 传递函数	35
3.3.3 状态方程	35
3.4 测试系统动态响应及动态性能指标	36
3.4.1 测试系统时域动态性能指标	37
3.4.2 测试系统频域动态性能指标	43
3.5 测试系统动态特性测试与动态模型建立	49
3.5.1 测试系统动态标定	49
3.5.2 由实验阶跃响应曲线获取系统传递函数的回归分析法	50
3.5.3 由实验频率特性获取系统传递函数的回归分析法	56
思考题与习题	58
第4章 压力测量系统	
4.1 概 述	59
4.1.1 压力的概念	59
4.1.2 压力的单位	59
4.1.3 压力测量系统的分类	61
4.1.4 常用的压力弹性敏感元件	61
4.2 液柱式压力计和活塞式压力计	63
4.2.1 液柱式压力计	63
4.2.2 活塞式压力计	65
4.3 位移式压力测量装置	65
4.3.1 电位计式压力传感器	65
4.3.2 变磁阻式压力传感器	66
4.3.3 电容式压力传感器	66
4.3.4 位置反馈式压力测量系统	70
4.4 应变式压力传感器	73
4.4.1 平膜片应变式压力传感器	74
4.4.2 非粘贴式(张丝式)应变压力传感器	76
4.5 压阻式压力传感器	77
4.6 压电式压力传感器	80
4.7 力平衡式压力测量系统	82



4.7.1	弹簧力反馈式压力测量系统	83
4.7.2	磁电力平衡式压力传感器	86
4.8	谐振式压力传感器	89
4.8.1	谐振弦式压力传感器	89
4.8.2	振动筒式压力传感器	91
4.8.3	谐振膜式压力传感器	95
4.8.4	石英谐振梁式压力传感器	96
4.8.5	硅谐振式压力微传感器	98
4.9	动态压力测量时的管道和容腔效应	101
4.9.1	管道和容腔的无阻尼自振频率	101
4.9.2	管道和容腔存在阻尼时的频率特性	102
4.10	压力测量装置的静、动态标定	104
4.10.1	压力测量装置的静态标定	104
4.10.2	压力测量装置的动态标定	105
	思考题与习题	107
第5章 振动、加速度与冲击测量系统		
5.1	振动测量原理、方案及运动特性分析	109
5.1.1	概 述	109
5.1.2	振动测量原理	109
5.1.3	振动测量方案	110
5.1.4	测振传感器的运动特征分析	112
5.2	位移式测振传感器	116
5.2.1	电位器式测振传感器	116
5.2.2	其他常用的位移式测振传感器	121
5.3	磁电式测振(速度)传感器	121
5.4	应变式振动传感器	123
5.5	压阻式振动传感器	125
5.6	压电式振动加速度传感器	126
5.7	振动传感器的标定	128
5.8	冲击测量	130
5.9	线加速度的测量原理与力学基础	130
5.9.1	线加速度传感器工作原理	131
5.9.2	线加速度测量的力学基础	132
5.9.3	线加速度传感器的设计原则	135
5.10	典型的线位移式加速度传感器	137
5.10.1	简单摆式加速度传感器	137
5.10.2	力平衡式加速度传感器	140



5.11 加速度传感器的静态标定	144
5.11.1 利用重力加速度传感器进行稳态标定	144
5.11.2 利用离心转台进行稳态标定	144
思考题与习题	145
第6章 温度测量	
6.1 概 述	147
6.1.1 温度的概念	147
6.1.2 温 标	147
6.1.3 温度计的标定与校正	148
6.1.4 测温方法与测温仪器的分类	149
6.2 热电阻测温	149
6.2.1 金属热电阻	150
6.2.2 半导体热敏电阻	152
6.2.3 热电阻测温电桥	154
6.3 半导体 P-N 结测温	156
6.4 热电偶测温	157
6.4.1 热电效应	157
6.4.2 热电偶的工作机理	158
6.4.3 热电偶的基本定律	159
6.4.4 热电偶的误差及补偿	161
6.4.5 热电偶的组成、分类及特点	164
6.5 非接触式温度测量系统	166
6.5.1 全辐射测温系统	166
6.5.2 亮度式测温系统	166
6.5.3 比色测温系统	167
思考题与习题	169
第7章 流量测量系统	
7.1 概 述	171
7.2 节流式流量计	172
7.2.1 工作原理	172
7.2.2 流量方程式	172
7.2.3 取压方式	175
7.2.4 节流式流量计的特点	176
7.3 涡轮流量计	176
7.3.1 工作原理	176
7.3.2 流量方程式	176
7.3.3 涡轮流量计的特点	178



7.4	漩涡流量计	178
7.4.1	卡门涡街式漩涡流量计	178
7.4.2	旋进式漩涡流量计	179
7.5	电磁流量计	180
7.5.1	工作原理	180
7.5.2	电磁流量计的结构特点	180
7.5.3	电磁流量计的特点	181
7.6	超声波流量计	182
7.7	质量流量测量	183
7.7.1	间接测量质量流量	183
7.7.2	热式质量流量计	185
7.7.3	谐振式科里奥利直接质量流量计	186
7.8	流量标准与标定	190
7.9	油量表	192
7.9.1	涡轮油量表	192
7.9.2	电容式油量表	192
7.9.3	超声波测量液面位置	193
	思考题与习题	194
第 8 章 转速测量		
8.1	接触式转速表	196
8.1.1	离心式	196
8.1.2	磁性式	197
8.2	测速发电机	198
8.2.1	直流测速发电机	198
8.2.2	交流测速发电机	199
8.3	数字式转速表	199
8.4	转速表的标定	206
	思考题与习题	207
第 9 章 扭矩测量		
9.1	扭矩传感器的变换原理	209
9.1.1	应变式	209
9.1.2	角位移式	210
9.1.3	磁弹式	211
9.1.4	差动变压器式	212
9.2	扭矩传感器的电源、信号传输方式	213
	思考题与习题	214



第 10 章 空速管、迎角及总温测量

10.1 攻(迎)角测量	216
10.1.1 真实攻(迎)角与局部攻(迎)角	216
10.1.2 迎角传感器	217
10.2 总压管及其特性	220
10.2.1 飞行 Ma 数的影响——速度特性	220
10.2.2 迎角的影响——角度特性	221
10.3 静压管及其特性	222
10.3.1 飞行 Ma 数的影响	222
10.3.2 静压管的结构和攻(迎)角的影响	224
10.3.3 安装位置的影响	225
10.4 总温测量	228
10.4.1 高速气流温度测量的特点	228
10.4.2 总温传感器	230
思考题与习题	233

第 11 章 飞行高度及升降速度测量

11.1 测量飞行高度的方法	234
11.2 气压测高的原理和方法	236
11.2.1 国际标准大气及标准压高公式	236
11.2.2 气压测高的原理方案	241
11.2.3 气压式测高的误差	241
11.2.4 气压式测高系统	247
11.3 高度偏差的测量	253
11.4 高度变化率(升降速度)的测量	254
思考题与习题	255

第 12 章 飞行速度测量

12.1 简 述	256
12.2 地速的测量	257
12.2.1 线加速度积分法	257
12.2.2 多普勒效应法	258
12.3 空速测量的理论基础	259
12.3.1 空气流速小于声速时	259
12.3.2 空气流速大于声速时	264
12.4 真空速测量	265
12.4.1 真空速测量原理	265
12.4.2 典型的真空速测量系统	268
12.5 指示空速测量	269



12.6	Ma 数测量	271
12.6.1	Ma 数测量原理	271
12.6.2	Ma 数测量系统的组成原理	272
	思考题与习题	273
第 13 章 姿态测量		
13.1	概 述	275
13.2	机电型框架陀螺仪	275
13.2.1	概 述	275
13.2.2	两自由度陀螺仪特性	276
13.2.3	单自由度陀螺仪特性	282
13.2.4	陀螺稳定平台的基本原理	289
13.3	其他类型的陀螺仪	290
13.3.1	挠性陀螺仪	291
13.3.2	静电陀螺仪	291
13.3.3	激光陀螺	292
13.3.4	光纤陀螺	295
13.3.5	半球谐振陀螺	295
	思考题与习题	296
第 14 章 航向测量		
14.1	航向及航线	298
14.1.1	航 向	298
14.1.2	航 线	301
14.2	磁罗盘及航向传感器	302
14.2.1	磁罗盘	302
14.2.2	陀螺罗盘	304
14.2.3	陀螺磁罗盘	306
14.2.4	罗盘系统	308
	思考题与习题	310
第 15 章 计算机测试系统		
15.1	概 述	311
15.2	计算机测试系统的自检与自校	312
15.2.1	计算机测试系统的自检	312
15.2.2	计算机测试系统的自校	313
15.2.3	零点漂移的内部自动校准	313
15.2.4	倍率偏移的内部自动校准	315
15.3	计算机测试系统中常用的数据处理方法	317
15.3.1	数据的排序与搜索	317



15.3.2	数据的平滑与滤波	318
15.3.3	数据的插值与拟合	322
15.4	计算机测试系统的组成	324
15.4.1	计算机测试系统的一般组成	324
15.4.2	计算机测试系统的分类	325
15.5	电压(电流)测试系统的组成及举例	328
15.5.1	电压(电流)测试系统的组成	328
15.5.2	电压(电流)测试系统举例	329
15.6	时间(频率)测试系统的组成及举例	335
15.6.1	时间(频率)测试系统的组成	335
15.6.2	时间(频率)测试系统举例	337
15.7	航空综合测试系统举例	341
15.7.1	大气数据系统	341
15.7.2	组合导航系统	347
	思考题与习题	351
第 16 章 电子综合显示系统		
16.1	电子显示器件及其驱动电路	352
16.1.1	阴极射线管(CRT)	353
16.1.2	半导体发光二极管(LED)	355
16.1.3	液晶显示器(LCD)	357
16.1.4	场致显示器技术	359
16.1.5	等离子显示器件	360
16.1.6	有机电致发光显示技术(OLED)	363
16.2	电子综合显示技术	364
16.2.1	图像和图形的产生技术	364
16.2.2	影视图像与计算机图形的合成技术	367
16.3	航空测试系统中的电子综合显示系统	369
16.3.1	飞行参数综合显示仪	373
16.3.2	导航参数综合显示仪	375
16.3.3	发动机指示与空勤告警显示仪	376
16.3.4	飞行管理系统显示仪	378
16.3.5	平视显示仪	379
16.3.6	头盔显示器	381
16.3.7	飞行仪表显示系统的发展趋势	384
	思考题与习题	385
第 17 章 航空测试系统中的语音系统		
17.1	语音系统的概述	386