

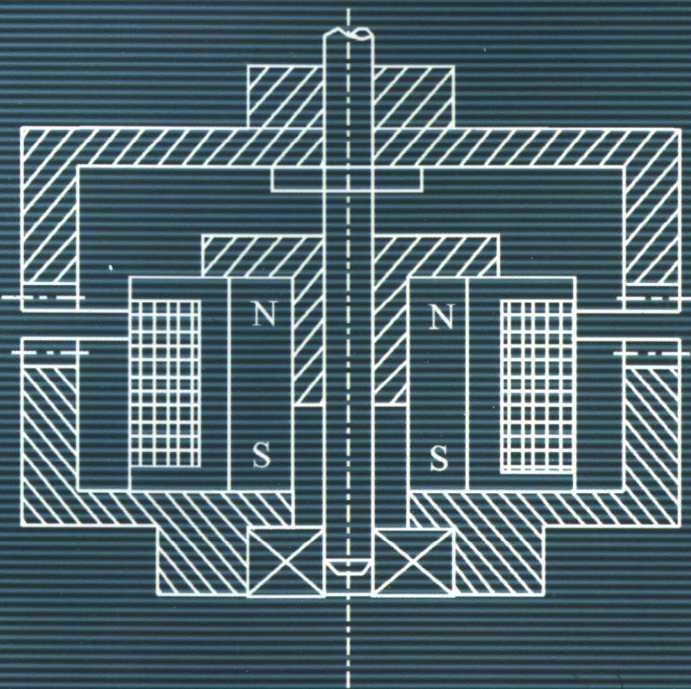
机械工程



国防科工委「十五」规划教材

传感与测试技术

●王昌明 孔德仁 何云峰 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

TP212
99



国防科工委“十五”规划教材. 机械工程

传感与测试技术

王昌明 孔德仁 何云峰 编著

RBR56/04

北方工业大学图书馆



00594961

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

本书介绍了传感与测试技术的理论基础和各种传感器的原理、特性及传感与测试技术在工程中的应用。全书共有3篇13章。第1篇第1章至第4章,主要阐述传感与测试技术的内涵、测量与测量系统的基本特性、工程信号分析和测量数据处理及表述等。第2篇第5章至第11章,根据传感器的工作原理分类,分别介绍传感器的工作原理、性能、测量电路及应用。第3篇第12章至第13章,介绍常用物理量测试方法和计算机在工程测试中的应用。

本书可作为机械工程、应用电子、工业自动化、仪器科学与技术以及计算机应用等专业的教材,也可供其他专业师生和有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

传感与测试技术/王昌明等编著. —北京:北京航空航天大学出版社,2005.6

ISBN 7-81077-611-8

I. 传… II. 王… III. 传感器—测试技术
IV. TP212.06

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第013949号

传感与测试技术

王昌明 孔德仁 何云峰 编著

责任编辑 刘晓明

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:25 字数:560千字

2005年6月第1版 2005年6月第1次印刷

印数:5000册

ISBN 7-81077-611-8 定价:33.00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,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晌。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

随着科学技术的飞速发展,尤其是微电子加工技术、计算机技术及信息处理技术的发展,各行各业对信息资源的要求日益增长,作为提供信息的传感与测试技术,愈来愈引起人们的高度重视。传感器位于信息系统的最前端,其性能的好坏和输出信息的可靠与否,对信息系统的质量至关重要。而作为与传感器技术相辅相成的测试技术,将逐步成为各个领域提高测试水平和能力的重要环节和突破口。为了适应高科技的需求,特别是要适应国防工业目前承担的特殊使命的要求,国防科技专业人才应具备较为宽广的传感与测试技术的理论基础和工程能力。

要及时正确地获取各种信息,解决工程、生产及科研中遇到的各种具体或特殊的传感与测试问题,就必须合理选择和善于应用各种传感与测试技术。国防工业较其他行业对工程技术有许多特殊要求,如高精度、高标准和高指标等,因此国防工业专业人才的培养也应根据这一要求,制定特殊的培养方案,建立特殊的培养模式,编写特殊的相关教材,以达到这一目的。本书就是在这种指导思想基础上编写的。

全书内容分3篇。第1篇介绍传感与测试技术的理论基础,包括传感与测试技术的内涵、测量与测量系统的基本特性、工程信号分析和测量数据处理及表述;第2篇系统地介绍各种传感器的原理、结构和应用;第3篇介绍工程技术中常用物理量测试方法和计算机在工程测试中的应用,将传感器和工程测试技术方面的知识有机地联系起来,使学生在掌握传感技术的基础上,更进一步地应用这方面的知识,以解决工程测试技术中的具体问题。

本书可作为机械工程、应用电子、工业自动化、仪器科学与技术 and 计算机应用等专业的教材,也可供其他专业师生和有关工程技术人员参考。

本书由王昌明编写第1章、第5章、第8章,孔德仁、狄长安、刘兵编写第2章、第3章、第4章、第12章、第13章,何云峰、朱蕴璞编写第6章、第7章、第9章、第10章,王芳编写第11章。全书由王昌明统稿。赵辉、鲍



建东、季卫荣、胡作进等在编著工作中做了大量的工作。全书在编写过程中得到了南京理工大学教务处及国内许多同行的支持,在此表示衷心感谢。同时,作者在编写本书的过程中参阅了许多文献,在此谨向参考文献的作者们表示深深的感谢。编著者们在此向百忙之中审阅本书的专家们表示敬意。

由于传感与测试技术涉及面广,发展迅速,加之编著者们水平有限,书中可能会有错误和不妥之处,恳请广大读者不吝赐教。

作者

2005年1月

目 录

第 1 篇 传感与测试技术的理论基础

第 1 章 绪 论

1.1 传感与测试技术的内涵	1
1.2 传感器的组成及分类	2
1.2.1 传感器的组成	2
1.2.2 传感器的分类	3
1.3 传感与测试技术在工程中的地位	4
1.4 传感与测试技术的发展状况	5
1.5 本课程的内容及特点	6
思考题与习题	7

第 2 章 测量与测量系统的基本知识

2.1 测量的基础知识	8
2.1.1 直接测量	8
2.1.2 间接测量	9
2.1.3 标 准	9
2.2 非电量电测系统的组成	9
2.3 传感器与测量系统的静态特性	11
2.3.1 静态标定	12
2.3.2 工作曲线及参考工作曲线	13
2.3.3 静态特性指标	14
2.4 传感器与测量系统的动态特性	18
2.4.1 线性时不变系统	18
2.4.2 传感器与测量系统动态特性描绘方法	19
2.4.3 典型系统的频率响应	22
2.4.4 典型激励的系统响应	26
2.4.5 无失真测试条件	29
2.5 传感器及测量系统动态特性获取方法	30
2.6 动态误差修正	32
2.6.1 频域修正方法	32



2.6.2 时域修正方法	33
思考题与习题	33
第3章 工程信号及其分析	
3.1 工程信号的分类	35
3.1.1 确定性信号	35
3.1.2 随机信号	36
3.2 周期信号描述	38
3.2.1 周期信号的分解和频谱	38
3.2.2 周期信号的可测性分析	42
3.3 时限信号(瞬态信号)描述	45
3.3.1 时限信号的分解和频谱	46
3.3.2 时限信号的可测性分析	48
3.4 随机信号描述	48
3.4.1 随机信号的特征参数	48
3.4.2 随机信号的特征估计	52
3.5 典型激励信号描述	56
3.5.1 冲激函数及其频谱分析	56
3.5.2 单位阶跃信号及其频谱分析	58
3.5.3 单位斜坡信号及其频谱	60
思考题与习题	61
第4章 测量数据处理及表述	
4.1 实验数据的表示方法	62
4.1.1 表格法	62
4.1.2 图解法	62
4.1.3 经验公式	63
4.1.4 有效数字及数据修约	64
4.2 误差的定义及分类	64
4.2.1 误差的定义	64
4.2.2 误差的分类	65
4.2.3 误差的表示方法	66
4.2.4 表征测量结果质量的指标	66
4.3 不确定度的基本概念	67
4.3.1 有关不确定度的术语	67
4.3.2 产生测量不确定度的原因和测量模型	68
4.4 标准不确定度的 A 类评定	69
4.4.1 单次测量结果试验标准差与平均值试验标准差	69
4.4.2 测量过程的合并样本标准差	71



4.4.3	规范测量中的合并样本标准差	73
4.4.4	极 差	74
4.4.5	最小二乘法	75
4.4.6	不确定度 A 类评定的独立性	75
4.5	标准不确定度的 B 类评定	76
4.5.1	B 类不确定度评定的信息来源	76
4.5.2	B 类不确定度的评定方法	77
4.6	合成标准不确定度的评定	79
4.6.1	输入量不相关时不确定度的合成	80
4.6.2	输入量相关时不确定度的合成	81
4.6.3	合成标准不确定度的自由度	82
4.7	扩展不确定度的评定及表示形式	82
4.7.1	扩展不确定度的评定	82
4.7.2	测量不确定度的报告与表示	83
4.8	回归分析及其应用	84
4.8.1	直线拟合(一元线性回归)	85
4.8.2	曲线拟合(一元非线性回归)	89
	思考题与习题	91

第 2 篇 传感器技术

第 5 章 应变式传感器

5.1	电阻应变片工作原理	96
5.1.1	电阻应变片的结构和工作原理	96
5.1.2	电阻应变片的种类、材料和参数	99
5.2	电阻应变片特性及粘贴	103
5.2.1	应变片的主要工作参数	103
5.2.2	应变片的粘贴	104
5.2.3	电阻应变片的温度误差及补偿	108
5.3	电阻应变片的信号调理电路	111
5.3.1	直流电桥	111
5.3.2	交流电桥	113
5.3.3	电桥的平衡装置	118
5.3.4	电阻应变仪	119
5.4	常用敏感元件及应变片的排列与接桥	124
5.4.1	常用应变测力传感器的结构	125
5.4.2	各种载荷测量中应变片的排列和连桥	128



思考题与习题	133
第6章 电感式传感器	
6.1 自感式电感传感器	136
6.1.1 单磁路自感式电感传感器	136
6.1.2 自感式差动电感传感器	138
6.1.3 螺管式电感传感器	140
6.2 差动变压器式传感器	142
6.2.1 工作原理	142
6.2.2 差动变压器式传感器的结构类型和主要特性	143
6.2.3 差动变压器的测量电路	145
6.3 电涡流式传感器	146
6.3.1 高频率反射式电涡流传感器	146
6.3.2 低频透射式涡流传感器	148
6.3.3 电涡流传感器的应用	149
思考题与习题	151
第7章 电容式传感器	
7.1 电容式传感器的工作原理及结构	152
7.1.1 工作原理	152
7.1.2 结构类型	154
7.2 电容式传感器的灵敏度及非线性	155
7.2.1 变极距型平板电容式传感器	155
7.2.2 变面积型板状线位移传感器	156
7.2.3 变介电常数型传感器	157
7.2.4 差动电容式传感器	158
7.3 电容式传感器的测量电路	159
7.3.1 电桥电路	159
7.3.2 差动脉冲调宽电路	160
7.3.3 运算放大器式电路	162
7.4 硅电容式集成传感器	162
7.4.1 硅电容式集成压力传感器	163
7.4.2 硅电容式加速度传感器	164
思考题与习题	165
第8章 压电式传感器	
8.1 压电效应与压电常数	167
8.1.1 压电效应	167
8.1.2 压电常数	167
8.2 压电材料及压电元件结构形式	171



8.2.1	压电晶体	171
8.2.2	压电陶瓷	173
8.2.3	压电薄膜	175
8.2.4	压电元件的结构形式	175
8.3	压电式传感器的等效电路	177
8.3.1	压电元件的等效电路	177
8.3.2	压电传感器的等效电路	178
8.4	测量电路	179
8.4.1	电压放大器	179
8.4.2	电荷放大器	183
8.5	压电式传感器	185
8.5.1	压电式力和压力传感器	185
8.5.2	压电式加速度传感器	187
8.6	误差分析	191
8.6.1	环境温度的影响	191
8.6.2	环境湿度的影响	193
8.6.3	电缆噪声	193
	思考题与习题	194
第9章 磁电式传感器		
9.1	磁电感应式传感器	195
9.1.1	磁电式振动传感器的工作原理	196
9.1.2	典型结构	199
9.1.3	磁电式传感器的误差	201
9.2	霍尔式传感器	203
9.2.1	霍尔效应	203
9.2.2	霍尔元件	204
9.2.3	霍尔元件的不等位电势和温度误差的补偿	205
9.2.4	集成霍尔传感器	208
9.2.5	应用	209
	思考题与习题	210
第10章 光电式传感器		
10.1	光电器件	211
10.1.1	外光电效应的光电器件	211
10.1.2	内光电效应的光电器件	214
10.1.3	光电耦合器件	222
10.1.4	电荷耦合器件	222
10.2	光纤传感器	225



10.2.1	光纤的结构和传输原理	225
10.2.2	几种常用的光纤传感器	227
10.3	红外传感器	230
10.3.1	红外辐射	230
10.3.2	红外探测器	230
10.3.3	红外探测器使用中应注意的问题	233
10.3.4	红外测温	233
10.4	光电传感器的应用	235
	思考题与习题	237

第11章 气、湿、色敏传感器

11.1	气敏传感器	238
11.1.1	引言	238
11.1.2	气敏传感器的分类	240
11.1.3	半导体气敏传感器的工作原理及结构	241
11.1.4	其他气敏传感器	245
11.1.5	半导体气敏元件的主要特性参数	246
11.1.6	气敏传感器的应用	250
11.2	湿敏传感器	252
11.2.1	引言	252
11.2.2	湿敏传感器的主要特性参数	254
11.2.3	湿敏传感器的分类	256
11.2.4	湿敏传感器的测量电路	262
11.3	色敏传感器	264
11.3.1	半导体色敏器件的结构与工作原理	264
11.3.2	半导体色敏传感器的颜色识别电路	267
	思考题与习题	268

第3篇 工程测试技术

第12章 常用物理量测试方法

12.1	应力、应变、力测量	269
12.1.1	应变、应力测量	269
12.1.2	力的测量	275
12.1.3	传感器的标定	277
12.2	压力测量	279
12.2.1	概述	279
12.2.2	常用测压传感器	280



12.2.3	动态压力测量时管道传输效应	282
12.2.4	测压系统的标定	284
12.3	流量测量	287
12.3.1	流量测量的基本知识	287
12.3.2	常用流量计	291
12.3.3	流量计的定度	295
12.4	温度测量	297
12.4.1	概 述	297
12.4.2	接触式测量	300
12.4.3	非接触式温度测量	305
12.5	噪声测量	307
12.5.1	噪声测量基础	307
12.5.2	常用噪声测量仪器	312
12.5.3	噪声测量的方法	317
12.6	位移、速度、加速度测量	320
12.6.1	概 述	320
12.6.2	位移测量	320
12.6.3	速度测量	324
12.6.4	加速度测量	331
12.7	机械振动测量	338
12.7.1	振动测量系统的组成	338
12.7.2	振动系统的合理选用	340
12.7.3	传感器的安装	341
12.7.4	机械阻抗测试	342
	思考题与习题	344
第 13 章 计算机化测试技术		
13.1	概 述	347
13.1.1	智能测量仪器	347
13.1.2	计算机自动测试系统	347
13.1.3	计算机数据处理	348
13.2	采 样	349
13.2.1	采样过程	349
13.2.2	采样定理	350
13.2.3	量 化	351
13.3	计算机辅助测试技术中的接口技术	352
13.3.1	概 述	352
13.3.2	RS232C 标准接口总线	354



13.3.3	GPIB 标准接口总线	357
13.3.4	其他标准接口总线简介	363
13.4	VXI 总线系统	365
13.4.1	概述	365
13.4.2	VXI 总线的特点	365
13.4.3	VXI 总线系统简介	366
13.5	虚拟仪器系统	367
13.5.1	概述	367
13.5.2	虚拟仪器的结构及特点	367
13.5.3	虚拟仪器的系统组成	369
13.5.4	VXIplug&play	370
13.5.5	虚拟仪器软件开发平台	371
13.6	计算机辅助测试系统及应用实例	373
13.6.1	多通道数据采集系统	373
13.6.2	微型计算机在火箭发动机测试中的应用	375
13.6.3	基于 PCI 的半正弦压力发生器的测控系统	375
	思考题与习题	377

参考文献