

高等学校教材

传感器与测试技术

李晓莹 主 编

张新荣 任海果 副主编

李晓莹 张新荣 任海果 刘笃喜 马炳和 编 著

高等教育出版社

内容提要

全书共分三篇 17 章。第一篇着重介绍工程测试基础和传感器技术基础,内容包括:测试的基础知识、信号分析基础、测试系统的特性及传感器技术概论;第二篇着重从应用的角度,介绍常用传感器的原理、结构及应用,内容包括:电阻应变式传感器、电感式传感器、电容式传感器、压电式传感器、磁敏式传感器、光电式传感器、热电式传感器和数字式传感器,以典型示例的形式给出各种传感器在工程测试中的具体应用,详细论述常见物理量的测试方法;第三篇主要介绍新型传感器与检测技术,内容包括:光纤传感器、固态图像传感器、辐射式传感器、微型传感器等新型传感器的基本原理、基本特性和应用实例;本书最后还介绍了计算机辅助测试系统的组成、设计以及虚拟测试仪器,并以综合应用示例的形式分析了其应用特点。全书内容信息量大,突出传感器的原理与应用,各章均附有习题或思考题。

本书可作为机械工程、测控技术及仪器、自动化等专业的教材或参考书,也可供相关专业工程技术人员参考。

前 言

传感器与测试技术是集机械、电子、信息及控制等为一体的综合技术。随着现代科学技术的飞速发展,特别是微电子技术、计算机技术及信息处理技术的发展,各个领域需要获取的信息量(物理量、化学量、生物量等等)越来越多,对信息测试准确度的要求越来越高,测试的难度越来越大,从而对传感器与测试技术提出了更高更新的要求。当前国内外都将传感器与测试技术作为优先发展的科技领域之一。

本书力求从突出工程应用、强化理论联系实际的角度出发,着重对工程测试技术及常用传感器应用技术的基本理论、基本方法进行较为系统的阐述;从适应学科发展需要的角度出发,对国内外传感器与测试技术新成果与新技术做实用性论述;最后对计算机辅助测试系统及虚拟测试仪器做概要性介绍。本书采用将传感器与测试技术结合起来介绍的方法,充分考虑了传感器的应用及教学内容的需要,以此促进传感器与测试技术的教学。

本书取材新颖,内容丰富,每章内容相对独立,不同专业可对内容适当进行取舍。本书将理论与工程实际紧密结合,实用性强,具有一定的深度与广度,可作为机械工程、测控技术及仪器、自动化等专业的教材,也可供相关专业工程技术人员参考。

全书共分17章。参与编写的有李晓莹(绪论、第1、2、3、4、5章,附录)、张新荣(第8、9、10、13、14章)、刘笃喜(第12、15、17章)、任海果(第6、7、11章)、马炳和(第16章)。全书由李晓莹统稿、整理及补充。

本书由西北工业大学朱名铨教授审阅。朱名铨教授对本书的总体结构和内容细节等进行了全面审订,提出了许多宝贵意见,在此深表感谢。

本书从编写大纲的制定到全书的完成,得到了朱名铨教授、冯凯昉教授、石秀华教授和焦生杰教授的指导和帮助,在编写过程中也得到其他兄弟院校许多同志的关心和帮助,在此表示衷心地感谢。

本书涉及的知识面较广,尽管作者已做了很大努力,但由于水平所限,书中欠妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

编者

2004年3月

目 录

绪论	1
----------	---

第一篇 工程测试技术基础

第 1 章 测试的基础知识	5
1.1 测试的基本概念	5
1.1.1 测量、计量和测试	5
1.1.2 测试方法的分类	5
1.1.3 测试系统的组成	6
1.2 测量误差及其不确定度	7
1.2.1 真值及测量误差	7
1.2.2 测量误差的分类	8
1.2.3 测量不确定度	8
1.3 测量数据处理	14
1.3.1 测量数据的统计特性	14
1.3.2 粗大误差的判别和剔除	14
1.3.3 测量数据的表述方法	15
1.3.4 一元线性回归	17
习题与思考题	19
第 2 章 信号分析基础	20
2.1 信号的分类与描述	20
2.1.1 信号的分类	20
2.1.2 信号的描述	25
2.2 周期信号与离散频谱	26
2.2.1 傅里叶级数与周期信号的分解	26
2.2.2 周期信号频域描述的物理意义	29
2.2.3 周期信号的频域描述实例	29
2.2.4 周期信号的强度描述	34

2.3 非周期信号与连续频谱	35
2.3.1 傅里叶变换	36
2.3.2 傅里叶变换的基本性质	38
2.3.3 典型非周期信号的频谱	40
2.4 随机信号	43
2.4.1 平均值、方差、均方值	43
2.4.2 概率密度函数	44
2.4.3 相关函数	45
2.4.4 功率谱密度函数	51
习题与思考题	54
第3章 测试系统的特性	56
3.1 测试系统与线性系统	56
3.1.1 测试系统的基本要求	56
3.1.2 线性系统及其主要特性	57
3.1.3 测试系统的传输特性	58
3.2 测试系统的静态特性	59
3.2.1 静态特性指标	59
3.2.2 静态特性的标定	64
3.3 测试系统的动态特性	64
3.3.1 动态特性的数学描述	65
3.3.2 常见测试系统的频率响应	69
3.3.3 常见测试系统的阶跃响应	73
3.3.4 测试系统动态特性的标定	77
3.4 实现系统不失真测试的条件	79
习题与思考题	81
第4章 传感器技术概论	83
4.1 传感器的基本概念	83
4.1.1 传感器的定义及组成	83
4.1.2 传感器的分类	84
4.1.3 常用技术性能指标	85
4.2 弹性敏感元件	86
4.2.1 弹性敏感元件的基本特性	86
4.2.2 弹性敏感元件的材料	88
4.2.3 弹性敏感元件的结构型式	91
4.3 传感器的应用及发展趋势	100
习题与思考题	101

第二篇 常用传感器的原理及应用

第 5 章 电阻应变式传感器	103
5.1 工作原理及结构参数	103
5.1.1 电阻应变片的工作原理	104
5.1.2 电阻应变片的种类及材料	107
5.1.3 电阻应变片的性能参数	110
5.2 测量电路及温度补偿	111
5.2.1 测量电桥	111
5.2.2 温度误差及补偿	114
5.2.3 电阻应变片的布置和接桥方式	116
5.3 电阻应变式传感器的应用	117
5.3.1 测力传感器	118
5.3.2 压力传感器	119
5.3.3 加速度传感器	120
习题与思考题	121
第 6 章 电感式传感器	123
6.1 自感式电感传感器	123
6.1.1 工作原理	123
6.1.2 差动式自感传感器	125
6.1.3 测量电路	126
6.2 互感式电感传感器	133
6.2.1 工作原理	133
6.2.2 测量电路	134
6.3 电涡流式传感器	135
6.3.1 工作原理	135
6.3.2 测量电路	138
6.4 电感式传感器的应用	140
6.4.1 差动式电感传感器应用实例	140
6.4.2 电涡流式传感器应用实例	142
习题与思考题	143
第 7 章 电容式传感器	145
7.1 工作原理与特性	145
7.1.1 极距变化型	146
7.1.2 面积变化型	146

7.1.3 介电常数变化型	147
7.2 测量电路	147
7.2.1 调频电路	147
7.2.2 脉冲宽度调制电路	148
7.3 电容式传感器的应用	150
习题与思考题	152
第8章 压电式传感器	153
8.1 压电效应	153
8.1.1 压电效应	153
8.1.2 压电材料	155
8.2 测量电路	157
8.2.1 等效电路	157
8.2.2 测量电路	159
8.3 压电式传感器的应用	160
8.3.1 加速度传感器	160
8.3.2 测力传感器	165
8.3.3 压力传感器	167
习题与思考题	167
第9章 磁敏式传感器	168
9.1 霍尔传感器	168
9.1.1 霍尔效应与霍尔元件	168
9.1.2 霍尔元件材料及主要特性参数	171
9.1.3 测量误差及其补偿	172
9.1.4 霍尔集成传感器	174
9.1.5 霍尔传感器的应用	176
9.2 磁敏电阻	179
9.2.1 磁阻效应	179
9.2.2 磁敏电阻的结构与特性	180
9.2.3 磁敏电阻的应用	182
9.3 磁敏二极管和磁敏三极管	184
9.3.1 磁敏二极管	184
9.3.2 磁敏三极管	187
9.3.3 磁敏二极管和磁敏三极管的应用	189
习题与思考题	190
第10章 光电式传感器	191
10.1 光电效应	191

10.2 光电管及光电倍增管	192
10.2.1 光电管	192
10.2.2 光电倍增管	195
10.3 光敏电阻	197
10.3.1 结构原理	197
10.3.2 基本特性	197
10.4 光电池	200
10.4.1 硅光电池的结构原理	200
10.4.2 光电池的基本特性	200
10.5 光电二极管和光电三极管	203
10.5.1 结构原理	203
10.5.2 基本特性	204
10.5.3 结构及技术参数	206
10.6 光电式传感器及其应用	208
10.6.1 光电式传感器的类型	208
10.6.2 应用实例	208
习题与思考题	212
第 11 章 热电式传感器	213
11.1 概述	213
11.2 热电阻	214
11.2.1 金属热电阻	214
11.2.2 热敏电阻	216
11.3 热电偶	218
11.3.1 热电效应	218
11.3.2 热电偶的基本定律	220
11.3.3 常用热电偶及热电势的测量	222
11.3.4 热电偶的冷端温度补偿	224
11.3.5 热电偶的校准和标定	226
11.4 新型热电式传感器	226
11.4.1 PN 结温度传感器	226
11.4.2 压电型温度传感器	227
11.4.3 磁热敏传感器	228
习题与思考题	228
第 12 章 数字式传感器	230
12.1 光栅数字传感器	230
12.1.1 光栅的类型和结构	230

12.1.2	光栅数字传感器的工作原理	231
12.1.3	辨向与细分电路	234
12.1.4	光栅数字传感器的应用	237
12.2	感应同步器	237
12.2.1	感应同步器的基本结构	238
12.2.2	感应同步器的工作原理	239
12.2.3	感应同步器的信号处理	242
12.2.4	感应同步器的应用	244
12.3	光电编码器	245
12.3.1	绝对编码器	246
12.3.2	增量编码器	247
12.3.3	光电编码器的应用	248
12.4	容栅传感器	249
12.4.1	容栅传感器的结构和工作原理	249
12.4.2	容栅传感器的测量电路	251
12.4.3	容栅传感器的应用	252
	习题与思考题	252

第三篇 新型传感器与检测技术

第 13 章	光纤传感器	255
13.1	光纤的结构及传光原理	255
13.1.1	光纤的结构及分类	255
13.1.2	传光原理	256
13.2	光纤传感器的工作原理	259
13.2.1	光纤传感器的组成	259
13.2.2	光纤传感器的分类	260
13.2.3	光的调制技术	260
13.3	光纤传感器的应用	262
13.3.1	光纤位移传感器	263
13.3.2	光纤振动传感器	265
13.3.3	光纤流速及加速度传感器	266
13.3.4	光纤温度传感器	268
	习题与思考题	268
第 14 章	固态图像传感器	270
14.1	电荷耦合器件(CCD)的工作原理	270

14.2 CCD 图像传感器	271
14.2.1 线阵 CCD 图像传感器	271
14.2.2 面阵 CCD 图像传感器	272
14.3 CCD 的基本特性参数	274
14.4 CCD 图像传感器及其应用	276
习题与思考题	278
第 15 章 辐射式传感器	279
15.1 红外辐射传感器	279
15.1.1 红外辐射的物理基础	279
15.1.2 红外探测器(传感器)	281
15.1.3 红外辐射传感器的应用	284
15.2 超声波传感器	286
15.2.1 超声波检测的物理基础	286
15.2.2 超声波探头	288
15.2.3 超声波传感器的应用	289
15.3 核辐射传感器	290
15.3.1 核辐射及其物理特性	291
15.3.2 核辐射传感器	292
15.3.3 核辐射传感器的应用	294
习题与思考题	296
第 16 章 微型传感器	297
16.1 微机电系统与微型传感器	297
16.1.1 微机电系统	297
16.1.2 MEMS 微型传感器	298
16.2 微型压力传感器	299
16.2.1 压阻式微型压力传感器	300
16.2.2 电容式微型压力传感器	301
16.2.3 谐振式微型压力传感器	302
16.3 微型加速度计	303
16.3.1 压阻式微型加速度计	303
16.3.2 电容式微型加速度计	305
习题与思考题	306
第 17 章 计算机辅助测试技术	307
17.1 计算机辅助测试系统概述	307
17.1.1 基本结构	307
17.1.2 接口和总线技术	308

17.1.3 基于 PC 总线的计算机辅助测试系统	310
17.2 计算机辅助测试系统的设计	310
17.2.1 硬件设计	311
17.2.2 抗干扰设计	314
17.3 虚拟仪器	316
17.3.1 概述	316
17.3.2 虚拟仪器的硬件结构	317
17.3.3 虚拟仪器的软件开发平台	321
17.3.4 用 LabVIEW 设计虚拟仪器实例	323
习题与思考题	325
附录 1 常用名词术语汉英对照	326
附录 2 单位冲击函数和抽样定理	336
附录 3 ZCY - II 型综合传感器实验仪	342
附录 4 常用热电偶分度表	346
参考文献	348

绪 论

传感器与测试技术是一门随着现代科学技术发展而迅猛发展的综合性技术学科,广泛应用于人类的社会生产和科学研究中,起着越来越重要的作用,成为国民经济发展和社会进步的一项必不可少的重要技术。

测试的基本任务就是获取有用的信息,通过借助专门的仪器、设备,设计合理的实验方法以及进行必要的信号分析与数据处理,从而获得与被测对象有关的信息,最后将结果提供显示或输入其他信息处理装置、控制系统。因此,传感器与测试技术属于信息科学范畴,它与通信技术、计算机技术一起分别构成信息技术系统的“感官”、“神经”和“大脑”,是信息技术的三大支柱(传感技术、计算机技术和通信技术)之一。

测试技术的发展与生产和科学技术的发展是紧密相关的,它们互相依赖、相互促进。现代科技的发展不断地向测试技术提出新的要求,推动了测试技术的发展,与此同时,测试技术迅速汲取各个科技领域(如材料科学、微电子学、计算机科学等)的新成果,开发出新的测试方法和先进的测试仪器,同时又给科学研究提供了有力的工具和先进的手段,从而促进了科学技术的发展。

在各种现代机械设备的设计和制造中,测试技术的成本已达到设备系统总成本的 50%~70%。据资料统计:一辆汽车需要 30~100 余种传感器及配套测试仪表用以检测车速、方位、转矩、振动、油压、油量、温度等;一架飞机需要 3 600 余种传感器及配套测试仪表,用来监测飞机各部位的参数(压力、应力、温度等)和发动机的参数(转速、振动等)等等。由此可见,传感器与测试技术在工程技术领域占有非常重要的地位。

在进入信息社会的今天,人们对信息的提取、处理和传输的要求更加迫切。传感器是信息的源头,只有拥有多样而良好的传感器,才能开发性能优越的测试仪器。目前的传感器,无论从数量上、质量上和功能上都不能满足测试技术发展的需求,传感器与测试技术的发展必将在我国的现代化建设中做出贡献。

综合国内外的技术动态,传感器与测试技术的发展趋势归纳起来主要是:

1. 传感器向新型、微型、智能化发展。

传感器的工作原理是基于各种效应和定律,因此探索具有新效应的敏感功能材料是研制新型传感器的重要基础。以半导体材料、陶瓷材料和有机材料为代表的新型敏感材料应用于传感器件中,不仅使可测量的参量增多,使力、热、光、磁、湿度、气体、离子等方面的一些参量的测量成为现实,同时也使集成化、小型化和高性能传感器的出现成为可能。

随着微电子学、微细加工技术和集成化工艺等方面的发展,将敏感器件与其信号处理电路制作在一块芯片上,可以实现传感器的集成化和微型化。目前,传感器与计算机的紧密结合,使传感器不仅具有信号检测功能,同时还具有记忆、存储、自诊断、自校准、自适应等功能,从而实现了传感器的智能化。如美国霍尼韦尔公司的 ST-3000 型智能传感器,在同一块芯片上制作 CPU、EPROM 和静压、压差、温度等三种传感元件,其芯片尺寸为 $3 \times 4 \times 2$ mm。

2. 测试仪器向高精度和多功能方向发展。

高精度的测试仪器及测试系统,不仅能提高测试数据的可信度,而且可以减少试验次数,从而可缩短产品的研制周期,降低产品成本,因此提高测试系统的精度具有重要意义。

在提高测试仪器精度的同时还应扩大仪器的功能。传统的测试系统是由多台仪器组成,使用中需要对每台仪器进行调试,既不方便又容易出错。近年来,随着计算机辅助测试系统(CAT)和虚拟仪器的出现,使测试仪器的结构和功能发生了根本的变化,用户可在集成仪器平台上按自己的要求构成所需要的实用仪器和实用测试系统,并开发相应的应用软件来控制测试仪器和系统,其仪器和系统的功能不受约束。

3. 参数测量与数据处理向自动化方向发展。

目前,越来越多的测试系统都采用以计算机为核心的多通道自动测试系统,这样的系统既能实现动态参数的在线实时测量,又能快速地进行信号的实时分析与处理。因此,测试系统中越来越多地融入了计算机技术,也表明了计算机技术在测试系统中的重要地位。

对于高等学校机械工程各有关专业,“传感器与测试技术”是一门技术基础课。通过本课程的学习,可以使学生建立起测试系统的完整概念,培养学生能合理地选用测试仪器,并初步掌握动态测试的基本理论、基本知识和基本技能,为进一步学习、研究和处理工程领域的测试技术问题打下基础。

传感器与测试技术也是一门实践性很强的课程,除理论学习外,还需加强实验环节,实验是本课程不可缺少的重要组成部分。本书附录中介绍了 ZCY-II 型综合传感器实验仪,可以对不同传感器的特性进行研究,掌握常见物理量的测试方法,加深对理论知识的理解,从而提高学生分析问题和解决问题的能力。

本课程涉及的学科面广,是多门学科(数学、物理学、电工电子学、自动控制工程、计算机技术等)的交叉融合。因此,要求学生在学本课程之前,应具备有关学科特别是电工电子学、微机原理及应用等课程的基础。

第一篇 工程测试技术基础

第 1 章 测试的基础知识

1.1 测试的基本概念

1.1.1 测量、计量和测试

测量、计量和测试是三个密切相关的技术术语。测量是以确定被测对象的量值为目的的全部操作。如果测量的目的是实现测量单位统一和量值准确传递,则这种测量被称为计量。因此,研究测量、保证测量统一和准确的科学被称为计量学。具体来讲,计量的内容包括计量理论、计量技术与计量管理,这些内容主要体现在计量单位、计量基准(标准)、量值传递和计量管理等。测试则是具有试验性质的测量,或者可以理解为测量和试验的综合。由于测试和测量密切相关,在实际使用中往往并不严格区分测试与测量。

一个完整的测试过程必定涉及到被测对象、计量单位、测试方法和测量误差。

1.1.2 测试方法的分类

测试方法是指在实施测试中所涉及的理论运算和实际操作方法。测试方法可按多种原则分类,通常采用以下原则来分类:

1. 按是否直接测定被测量的原则分类,可分为直接测量法和间接测量法。直接测量法是指被测量直接与测量单位进行比较,或者用预先标定好的测量仪器或测试设备进行测量,而不需要对所获取数值进行运算的测量方法,例如用直尺测量长度,用万用表测量电压、电流和电阻值等。间接测量法是指通过测量与被测量有函数关系的其他量,来得到被测量量值的测量方法。例如,为了测量一台发动机的输出功率,必须首先测出发动机的转速 n 及输出转矩 M ,通过公式 $P = Mn$ 可计算出其功率值。

2. 按测量时是否与被测对象接触的原则,可分为接触式测量和非接触式测量。接触式测量往往比较简单,比如测量振动时采用带磁铁座的加速度计直接放在被测位置进行测量;而非接触式测量可以避免对被测对象的运行工况及其特性的影响,也可避免测试设备受到磨损,例如用多普勒超声测速仪测量汽车超速就属于非接触测量。

3. 按被测量是否随时间变化的原则,分为静态测量和动态测量。被测量不随时间变化或变化缓慢的测量属于静态测量,而动态测量是指被测量随时间变化的测量,因此动态测量中,要确定被测量就必须测量它的瞬时值及其随时间变化的规律。需要注意的是,这里的“静态”和“动态”专指被测量是否随时间变化,而不是指被测对象是否处于静止或运动中。实际上,在进行静态测量和动态测量时,两者对测试系统特性的要求和测量数据的处理是有很大差别的,工作中必须密切注意。

1.1.3 测试系统的组成

一般来说,测试系统的组成框图如图 1.1.1 所示。由图可知,测试系统包括信号的检测和转换、信号调理、信号分析与处理、信号的显示和记录等。有时候测试工作所希望获取的信息并没有直接显示在可检测的信号中,这时测试系统就必须选用合适的方式激励被测对象,使其产生既能充分表征其有关信息又便于检测的信息。

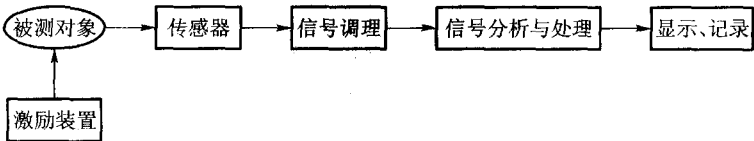


图 1.1.1 测试系统组成框图

在测试系统中,传感器直接作用于被测量,并能按一定规律将被测量转换成电信号(包括电阻、电容、电感等),然后利用信号调理环节(如放大、调制解调、阻抗匹配等)把来自传感器的信号转换成适合进一步传输和处理、功率足够的形式,这里的信号转换多数情况下是电信号之间的转换,例如幅值放大、将阻抗的变化转换成电压、电流、频率的变化等;信号分析处理环节接受来自调理环节的信号,并进行各种运算、分析(如提取特征参数、频谱分析、相关分析等);信号显示记录环节是测试系统的输出环节,用以显示记录分析处理结果的数据、图形等,以便进一步分析研究,找出被测信息的规律。

1.2 测量误差及其不确定度

任何测试都具有误差,误差自始至终存在于一切科学实验和测量过程中,这就是“误差公理”。研究测量误差的目的就是为了减小测量误差,使测量结果尽可能接近真值。

1.2.1 真值及测量误差

1. 真值的定义

真值即真实值,是指被测量在一定条件下客观存在的、实际具备的量值。真值是不能确切获知的,通常所说的真值可分为理论真值、约定真值、相对真值。理论真值又称为绝对真值,是根据一定的理论,在严格的条件下,按定义确定的数值,例如三角形的内角和恒为 180° 。约定真值是指用约定的办法确定真值,就给定的目的而言,它被认为充分接近于真值,例如砝码的质量。相对真值也叫实际值,是指若将计量器具按精度不同分为若干等级,高一等级计量器具的测量值即为相对真值,相对真值在误差测量中的应用最为广泛。

2. 测量误差

测量结果与被测量真值之差称为测量误差,即

$$\text{测量误差} = \text{测量结果} - \text{真值} \quad (1.2.1)$$

由于真值无法确定,实际测试中常用约定真值或相对真值代替,因此误差准确值也无法得到,只能估计其大小。

常用的测量误差表示方法有两种:

(1) 绝对误差

绝对误差是指测量值 x (也称仪器示值) 与真值 A_0 之差,即

$$\Delta = x - A \quad (1.2.2)$$

绝对误差是可正可负,且具有量纲的物理量。

(2) 相对误差

相对误差定义为绝对误差 Δ 与真值 A_0 之比的百分数,即

$$\delta = \frac{\Delta}{A} \times 100\% \quad (1.2.3)$$

这里真值 A_0 常常也用测量值(示值)代替,即

$$\delta_s = \frac{\Delta}{x} \times 100\% \quad (1.2.4)$$

应当注意,在误差比较小时, δ_0 和 δ_x 相差不大,无需区分;但在误差比较大