



工业和信息化部“十二五”规划教材

传感与测试技术

Transducer and Measurement Technology

● 黄文涛 主编

 哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

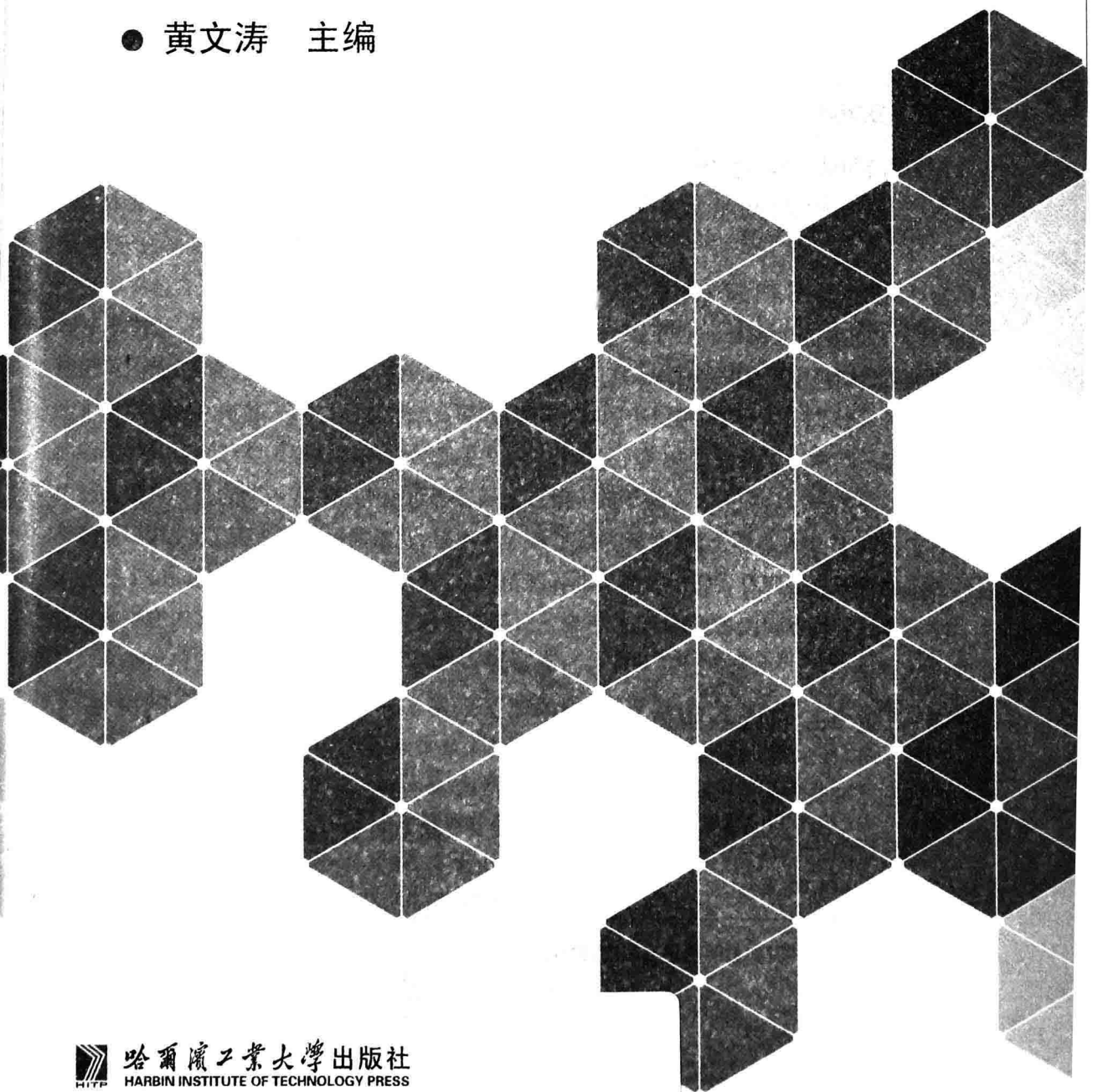


工业和信息化部“十二五”规划教材

传感与测试技术

Transducer and Measurement Technology

● 黄文涛 主编



 哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 提 要

本书按照传感器的工作原理分章介绍测试技术中常用的各类传感器的工作原理、结构形式、工程设计方法等基本知识,适当增加了传感与测试技术基础、传感器误差补偿及抗干扰技术和测量误差分析等内容,贴近工程应用实际,便于教学和工程技术人员自学。

本书可作为高等院校机械电子工程及相近专业本科生的教材,也可作为机械工程学科研究生的参考教材,并可供从事工程测试、机电一体化系统研制的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

传感与测试技术/黄文涛主编. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2014. 10

ISBN 978 - 7 - 5603 - 4565 - 9

I. ①传… II. ①黄… III. ①传感器-测试技术-高等学校-教材 IV. ①TP212.06

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 146525 号

责任编辑 王桂芝

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451 - 86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 哈尔滨市工大节能印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 19 字数 475 千字

版 次 2014 年 10 月第 1 版 2014 年 10 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978 - 7 - 5603 - 4565 - 9

定 价 48.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

现代传感与测试技术已发展成为一门新型综合性学科,微电子学、材料学、信息处理技术和计算机技术的融入,使传感测试技术广泛应用于各科学领域,不仅在工业自动化、农业现代化、军事工程等传统的应用领域,而且在航空航天、资源控制、环境监测、生命科学、医疗诊断、安全防护和家用电器等领域,对传感测试技术的需求也越来越多。

本书是作者在多年从事传感与测试技术教学和科研工作的基础上编写的。本书在注重基本概念、基本理论阐述的同时,针对传感与测试技术应用实践性强的特点,强调技术的应用,从实用的角度出发组织教材内容,并在吸取国内外同类教材长处的基础上,按照传感器的工作原理分章介绍测试技术中常用的各类传感器。这种编排方法更加贴近工程应用实际,便于教学和工程技术人员自学,实用性强。

本书包含了工程实际中常用的各类传感器的工作原理、结构形式、工程设计方法和选用等基本知识,共分12章:第1章传感与测试技术基础,介绍了传感与测试技术的发展趋势,传感器的静态、动态特性,传感器的标定与校准等内容;第2~9章以工作原理为主线分别介绍了电阻、电容、电感、压电、磁电、光电、温度(热电)和超声传感器,每种传感器又分为传统的结构型和体现新型敏感材料的物性型两大类进行叙述;第10章介绍了在测试系统中应用广泛的信号转换电路内容;第11章传感器误差补偿与抗干扰技术和第12章测量误差分析与表达,从贴近工程实践应用的角度,叙述了传感器的非线性补偿、温度误差补偿和各种抗干扰技术,并通过增加测量误差分析内容,对传感器测得的数据进行合理表达和不确定度评定。本书在内容的组织上,将测试技术与传感技术紧密结合,能更好地满足课程教学需求。

本书由哈尔滨工业大学黄文涛主编,参加编写的还有王伟杰和陈芳。具体编写分工如下:黄文涛编写第1~6章、第10~12章;王伟杰编写第8、9章;陈芳编写第7章。全书由赵学增教授审阅。此外,诚挚地感谢侯国章老师对本书编写工作的支持。

本书在编写过程中参阅了许多专家学者的教材、著作和论文等,在此一并表示感谢。由于编者水平有限,书中难免存在不当与疏漏之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

2014年5月

目 录

第 1 章 传感与测试技术基础	1
1.1 测试技术概述	1
1.2 传感器概述	5
1.3 传感器的静态特性	10
1.4 传感器的动态特性	17
1.5 传感器的标定与校准	24
1.6 合理选用传感器	30
复习题	31
第 2 章 电阻式传感器	32
2.1 金属应变片	32
2.2 应变式力传感器	39
2.3 压阻式传感器	46
复习题	57
第 3 章 电容式传感器	58
3.1 电容式传感器	58
3.2 电容式传感器输出电路	65
3.3 电容式压力传感器	71
复习题	76
第 4 章 电感式传感器	77
4.1 自感式传感器	77
4.2 差动变压器式传感器	86
4.3 感应同步器	89
4.4 压磁式传感器	92
复习题	94
第 5 章 压电式传感器	95
5.1 压电转换器件	95
5.2 压电式传感器输出电路	102
5.3 压电式力学量传感器	109

复习题.....	115
第 6 章 磁电式传感器	117
6.1 磁电感应式传感器	117
6.2 强磁性金属磁敏器件	122
6.3 磁头与磁栅	125
6.4 霍尔传感器	127
6.5 半导体磁阻器件	136
复习题.....	139
第 7 章 光传感器	140
7.1 内光电效应器件	140
7.2 光量子型红外传感器	148
7.3 电荷耦合器件(CCD)	150
7.4 光栅	157
7.5 光电码盘	165
复习题.....	168
第 8 章 温度传感器	169
8.1 热电偶	169
8.2 热敏电阻	173
8.3 半导体温度传感器	186
8.4 热电型红外传感器	192
复习题.....	195
第 9 章 超声传感器	197
9.1 超声换能器	198
9.2 超声流量传感器	201
9.3 超声位移传感器	205
9.4 超声温度传感器	207
9.5 超声探伤传感器	208
9.6 超声传感器电路	213
复习题.....	216
第 10 章 信号转换电路	217
10.1 A/D 转换器	217
10.2 U/F 转换器.....	226
10.3 D/A 转换器	231
10.4 频率-电压转换	237

10.5	逻辑电平转换	238
10.6	电压-电流转换	241
	复习题	242
第 11 章	传感器误差补偿及抗干扰技术	243
11.1	非线性补偿技术	243
11.2	温度误差补偿技术	253
11.3	抗干扰技术	256
	复习题	272
第 12 章	测量误差分析与表达	273
12.1	测量误差分析基础	273
12.2	随机误差的处理	277
12.3	系统误差的处理	281
12.4	粗大误差的处理	285
12.5	测量不确定度的评定	289
	复习题	294
	参考文献	295

第 1 章 传感与测试技术基础

1.1 测试技术概述

1.1.1 测试技术的重要性

测试技术属于信息科学范畴,与计算机技术和通信技术构成信息技术的基础,是人类认识客观世界和改造客观世界不可缺少的重要手段,是科学研究和技术评价的基本方法之一。测试技术是测量和试验的综合,是将被测量转换成可以检测、传输、处理、显示或记录的量,再与预定的标准量值相比较的一系列技术。

在科学研究和工程实践中,测试技术的应用十分广泛,越来越多地应用于认识自然界和工程实际中的各种现象,了解研究对象的状态及其变化规律等。现代科学技术的发展与测试技术息息相关,特别是科学技术日新月异的今天,在机械工程、电子通信、交通运输、国防军事、空间探测等许多领域都有测试技术的广泛应用。

1. 在工业检测和自动控制系统中的应用

在机械、石油、化工、电力、钢铁等工业生产中需要测试各种工艺参数的信息,然后通过电子计算机或者控制器对生产过程进行自动控制。如制造业中,通过对机床的切削速度、床身振动、加工精度等进行测试来控制加工质量;在化工、石油等工业生产中,需要随时对生产工艺过程的温度、压力、流量、速度等多种参数进行自动测试,以保证生产过程正常、安全地进行。

测试技术也是各种自动控制系统不可或缺的重要组成部分,为了实现预定的控制目标,需要通过测试技术对被测量进行检测和分析判断,以便实现自动控制系统的控制目标。

2. 在国防军事、航空航天领域的应用

随着国防军事、航空航天领域科学研究的需求,催生了许多先进的测试技术,在军事装备及产品全寿命周期内要进行试验测试性设计与评价,并通过研制相应的测试设备、测试系统(含软、硬件)以确保军事装备和产品达到规定动作的要求,以提高军事装备和产品的完好性、任务成功性,减少对维修人力和其他资源要求,降低寿命周期费用。在火炮发射的瞬间,需要测试诸如膛压的变化过程、弹丸的运动速度、炮管压力分布等参数;在航空航天领域的飞机、火箭等飞行器上,需要对飞行速度、加速度、飞行轨迹、飞行姿态以及发动机工况进行测试,为空间运行控制提供必要的信息。如土星 SA525 运载火箭的第一、二、三级和仪器舱共有 2 049 个传感器,协同完成整个火箭系统的控制任务。

3. 在家用电器、汽车领域的应用

随着家电产品自动化与智能化程度的提高,测试技术也进入了人们的日常生活,现代家

用电器中,空调、电冰箱、洗衣机、电热水器、照相机、安全报警器、厨房用具等都用了测试技术,如全自动洗衣机中就需要对衣物质量、质地、水温、透光率(洗净度)、液位以及衣物烘干等进行测试,为自动运行提供信息。测试技术不仅测量汽车的行驶速度、行驶距离、发动机转速和燃料消耗量等相关参数,而且在新型汽车的安全气囊、防盗抢、防碰撞、电子变速控制、防滑、电子燃料喷射等装置中都起到了非常重要的作用。

4. 在医疗仪器和设备中的应用

各种医疗仪器和设备应用测试技术对人体温度、血压、心脑电波及肿瘤等进行准确的监测和诊断,对治疗和康复效果进行观察检测。

5. 在遥感技术和资源环境保护中的应用

在飞机及卫星等飞行器上利用紫外、红外光电传感器及微波传感器探测气象、海洋和地质,监测大气、水质及噪声污染等情况,服务于资源和环境保护工作。

由此可见,测试技术的应用范围广泛,发挥的作用巨大,已经成为国民经济发展和科技进步的一项不可缺少的重要基础技术。测试技术的发展推动着生产和科技的进步,生产和科技的进步反过来也要求和支持着测试技术的发展。

1.1.2 测试系统的组成

由完成测试过程中各环节的专门设备组成的系统通常称为测试系统。在工程实际中,测试系统包括信号的获取、加工、处理、显示、反馈、计算等,因此测试系统对被测参量测试的整个过程都是信号的流程。虽然测试系统种类繁多,功能各异,但一般主要由传感器、信号处理模块、显示存储和输出装置三部分组成。三部分之间的相互关系如图 1.1 所示。

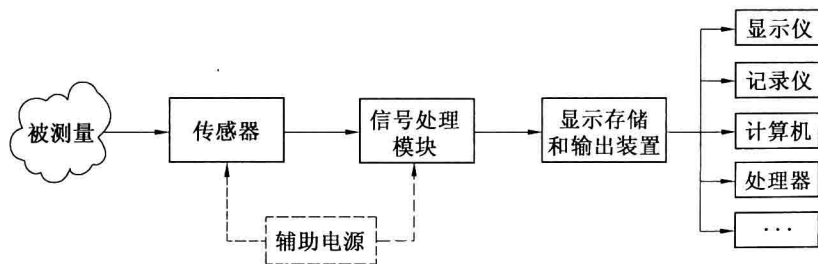


图 1.1 测试系统框图

1. 传感器

传感器是测试系统与被测量直接发生联系的器件或装置,主要功能是检测或敏感被测量,传感器通常由敏感元件和转换元件组成,其中敏感元件直接感受被测量的变化,转换元件通常将敏感元件的输出转换为便于传输和处理的电信号。需要指出的是,并不是所有的传感器都可以清晰地分为敏感元件和转换元件,有的传感器已经将二者合一,也有的传感器仅有敏感元件而无转换元件。

传感器作为测试系统的信号源,其性能将直接影响测试系统的精度等参数指标,是测试系统中重要的组成部分。通常测试系统对传感器的要求如下:

(1) 准确性:传感器的输出信号必须准确地反映被测量的变化,因此传感器的输入输出特性曲线应该是严格的单值函数关系,最好是线性关系,或者传感器的工作范围段是线性关系;

(2) 稳定性:传感器输入输出的单值函数关系最好不随时间、温度等参数而变化,同时受外界环境因素的干扰和影响也要很小,传感器测量的重复性要好;

(3) 灵敏度:传感器要能灵敏地感受到被测量的微小变化,并能够有较大的输出信号;

(4) 其他要求:为了保证传感器可靠地工作,还要求其具备耐腐蚀性良好、能耗低、性价比高等特点。

2. 信号处理模块

信号处理模块在测试系统中的功能是对传感器的输出信号进行转换、滤波、放大等,以便于测试系统的处理和显示。有的测试系统还需要通过信号处理模块将传感器输出的连续模拟信号离散成数字量信息,便于针对被测量的各种控制操作。信号处理模块是现代测试系统数据处理和控制的核心,如果将传感器比作人类感知外界环境变化的五官,那么信号处理模块就类似人类的大脑,通常以单片机、微处理器、DSP、嵌入式模块、工业计算机等来构建测试系统的信号处理模块。

3. 显示存储、输出装置

显示存储、输出装置是测试系统的输出环节,用来显示、记录、分析、处理数据及图形等,常用的有显示仪(如移动式指针、分度盘、示波器、数码管显示等)、记录仪(如光线振子示波器、函数记录仪、数字计数器、磁记录器等)、计算机及处理器(各种专用或通用的、用于输入数据、读出记录的装置等)以及其他在测试系统中实现类似功能的装置。

4. 其他辅助部分

测试系统中的传感器及信号处理模块等需要稳定的电源,为了保证测试系统不受电网电压波动的影响,通常配备有高精度的稳压电源,给测试系统各部分电路和器件提供所需的稳定电源。

1.1.3 测试系统的分类

随着科学技术的发展,现代测试系统的种类不断增加,其分类方法也多种多样,工程实践中根据测试对象参量通常分为以下几类:

(1) 电工量:电压、电流、电功率、电阻、电容、频率、磁场强度、磁通密度等。

(2) 热工量:温度、热量、比热、热流、压力、真空度、流量、流速、物位、液位等。

(3) 机械量:力、应力、力矩、重量、位移、质量、速度、加速度、振动、噪声等。

(4) 光学量:光强、光通量、光照度、辐射能量等。

(5) 状态量:颜色、透明度、磨损量、裂纹、缺陷、泄漏、表面质量等。

(6) 物性和成分量:气体成分、液体成分、固体成分、盐度、黏度、密度、酸碱度等。

另外,按照是否与被测量对象直接接触,可以分为直接测试系统和间接测试系统。按照被测量是否随时间变化,可以分为静态测试系统和动态测试系统。

1.1.4 测试技术的发展趋势

随着微电子技术、通信技术、计算机网络技术、微机械加工技术和材料科学的不断进步,对测试技术不断地提出了新的需求。目前,现代测试技术的发展趋势主要体现在以下几个方面。

1. 拓展测量范围,提高测试精度和可靠性

随着科学技术的发展,对测试仪器和测试系统的精度、测量范围和可靠性等性能指标的要求越来越高。相对而言,一般常规参量的测试技术已较为成熟,而一些极端情况下的测量,例如超高温与超低温的测量、大尺寸及微纳尺寸的测量则存在许多亟待解决的科学和技术问题,直接促使测试技术向解决这些极端测量问题的方向发展。

以几何量为例,极端测量主要就是大尺寸及微纳尺寸的测量。

(1) 大尺寸测量。

由于国防、航空、航天及大型工程的需要,大尺寸测量已经是一个热门研究课题,大尺寸测量主要指几米至几百米范围内物体的空间位置、尺寸、形状、运动轨迹等的测量。航空、航天、天文观测与空间探索、交通(含交通监测、轨道、管道铺设、电梯安装运行等)、大型工程(如粒子加速器、发电机组、轮船、大型容器等)都对大尺寸测量提出很多、很高的要求。微/纳米技术作为当前发展最迅速,研究最广泛、投入最多的技术之一,被认为是当前科技发展的重要前沿。在该技术中,微/纳米的超精密测量技术是有代表性的研究领域,也是微/纳米技术得以发展的前提和基础。

(2) 微纳尺寸的测量。

在微纳测量领域,基础问题包括纳米计量、纳米测量系统理论与设计、微观形貌测量等方面,主要研究问题和方向为:基于扫描电子显微镜的精密纳米计量、微纳坐标测量机(分子测量机)、基于干涉的非接触微观形貌测量、基于原子晶格作刻度的 X 射线干涉测量及其与光学干涉仪的组合原理、纳米测量系统设计理论和微纳尺寸测量条件的研究等。涉及的重要工程测量问题有:面向 MEMS 和 MOEMS 的微尺度测量、面向 22 ~ 45 nm 极大规模集成电路制造的测量等。

目前,除了大尺寸、微纳尺寸测试有待突破外,诸如超高温、超低温、微差压、超高压在线检测等都是亟需攻克的测试技术难题。努力研制在复杂、极端环境下满足精度要求、稳定可靠的各类测试仪器和测试系统是促使测试技术不断进步的一个长期发展方向。

2. 重视非接触式测试技术

在测试过程中,将传感器与测试对象接触,灵敏地感知被测量的变化,这种接触式测量直接可靠,测量精度较高,但接触式测量会对被测对象的工作环境和状态产生影响,从而影响测量的精度。特别是对一些无法进行直接接触的测试场合,诸如高温、高速等,各种可行的非接触测试技术应运而生,目前成熟的超声波测试技术、辐射测试技术等都是在这种背景下发展起来的。近年来,利用光学原理研制的非接触测量设备在制造业中获得了广泛的应用,如安装激光测头的新型测量机,可在 CNC 机床运转情况下,自动对所有工具进行非接触测量,并可根据测得数据对工具进行定位,测量精度和效率都显著提高。测试技术要实现高精度化、高速化和高效率化,非接触测试是测试技术的重要发展方向。

3. 多传感器测量与信息融合技术

多传感器测量与测量信息的融合是现代测试技术呈现的新特点,现代复杂机电系统涉及信息多,测量信息量大,传感器数量较多,多源巨量信息分析评估困难,需借助数据融合理论进行处理;另外多传感器信息融合技术通过传感器群实现多个参数的测试,并采用融合技术(数据层融合、特征层融合和决策层融合)在一定准则下进行分析、综合、支配和使用,通

过传感器之间的协调和性能互补的优势,克服单个传感器的不确定性和局限性,提高整个传感器系统的有效性,获得对被测对象的一致性解释和描述,进而实现相应的决策与估计,使测试系统获得比它的各组成部分更充分的信息。与单传感器系统相比,运用多传感器信息融合测试技术在解决探测、跟踪和目标识别等问题方面,能够增强系统生存能力,提高整个系统的可靠性和鲁棒性,增强数据的可信度,并提高精度,扩展整个系统的时间、空间覆盖率,增强系统的实时性和信息利用率等。多传感器测量应用中的数据融合技术正逐渐成为提升测试系统性能的关键技术之一。

4. 传感器的集成化、微型化和智能化

随着半导体集成技术和微加工技术的发展,微型传感器得到了迅速发展。微型传感器具有尺寸微小、功耗小、启动快、成本低、测量精度和灵敏度高、易于实现数字化和智能化等优点,且制作精确、重复性好、易于集成化,因此广泛应用于工程、生物和航空等领域。此外,微传感器还可以实现把传感器和测量电路集成在一起,用于恶劣环境下的测量。如利用半导体技术制造出硅微传感器;利用薄膜工艺制造出快速响应的气敏、湿敏传感器;利用溅射薄膜工艺制造压力传感器等。

传感器的集成化和微型化也为其智能化奠定了基础,许多以微处理器、微控制器或微型计算机为核心的传感器实现了智能化。这些测试仪器通常具有自诊断、自调零、自校准、自选量程、自动测试功能,强大的数据处理和统计分析功能,远距离数据通信功能,可配置各种数字通信接口,还可以方便地接入不同规模的自动检测、控制与管理信息网络系统。这种将传感器与微处理器等技术相结合,使之不仅具有检测功能,还具有信息处理、逻辑判断、自动诊断等功能的智能传感器是测试技术发展的主要方向。

随着现代传感技术、通信技术和计算机技术的日益发展和相互融合,各种先进的测试技术与成果不断应用于实际测试系统中,这将为测试技术的发展与应用注入源源不断的活力。

1.2 传感器概述

1.2.1 传感器的定义

随着科学技术的发展,尤其是微电子加工技术、计算机技术和信息技术的发展,各行各业对信息资源的需求与日俱增。作为提供信息的最前端,传感器是根据检测对象的不同,在各个行业领域中相对独立地发展起来的。从机械制造、化工生产、航空航天、生物工程、医疗医药和信息产业等生产应用领域到各种基础科学研究领域,各种各样的传感器被广泛地研究、开发和使用。传感器在不同的行业和领域有着不同的称呼和名字,表 1.1 给出了传感器在国内外的一些称呼。

表 1.1 传感器在国内外的一些称呼

国外	Transducer, Sensor, Transduction Element, Converter, Gauge, Transponder, Transmitter, Detector, Pick-up, Probe, X-meter
国内	传感器、换能器、变换器、敏感器件、探测器、检出器、检测器, ×× 计(如加速度计)

传感器可以定义为一种以一定的精确度把被测量转换为与之有确定关系的、便于应用的某种物理量的测量器件或装置。

上述定义包含了以下含义：

- (1) 传感器是测量装置,能完成检测任务。
- (2) 其输入量是某种被测量,可能是物理量,也可能是化学量、生物量等。
- (3) 其输出量是某种便于传输、转换、处理和显示的物理量,如气、光、电参量等,目前主要是电参量。
- (4) 输出量与输入量有单值确定的对应关系,并且具有一定的精确度。

1.2.2 传感器的组成

传感器一般由敏感元件和转换元件两部分组成,由于传感器输出信号一般都很微弱,需要相应转换电路将其变为易于传输、转换、处理和显示的物理量形式。另外,除能量转换型传感器外,还需外加辅助电源提供必要的能量,所以有时还有转换电路和辅助电源两部分,传感器的基本组成如图 1.2 所示。



图 1.2 传感器的基本组成

(1) 敏感元件:传感器中能直接感受或响应被测量的部分,它的功能是直接感受被测量并输出与之有确定关系的另一类物理量。例如温度传感器的敏感元件的输入是温度,它的输出则应为温度以外的某类物理量,传感器的工作原理一般由敏感元件的工作原理决定。

(2) 转换元件:有时需要将敏感元件的输出转换为电参量(电压、电流、电阻、电容、电感等),以便于进一步处理,转换元件是传感器中将敏感元件的输出转换为电参量的部分。

(3) 转换电路:如果转换元件输出的信号很微弱,或者不是易于处理的电压或电流信号,而是其他电参量,则需要相应转换电路将其变为易于传输、转换、处理和显示的形式(一般为电压或电流信号)。转换电路的功能就是把转换元件的输出变为易于处理、显示、记录、控制的信号。有的传感器将转换电路、敏感元件和转换元件做在一起,有些则分开。

(4) 辅助电源:有些传感器需外加电源才能工作,辅助电源就是提供传感器正常工作所需能量的电源部分,它有内部供电和外部供电两种形式。

图 1.3 所示为一典型的电阻应变片式测力传感器,弹性体为敏感元件,感受被测力 F 并将其转换成应变;电阻应变片是转换元件,将弹性体输出的应变转换成电阻值的变化;电桥是转换电路,将电阻值的变化转换成电压 U 输出;电源是辅助电源,为电桥供电。

实际上,有些传感器的敏感元件和转换元件两部分的区别并不明显,而是二者合为一体。如图 1.4 所示的热电偶,两种金属材料 A 和 B,其中一端连接在一起放在被测温度为 T 的环境中,另一端放在环境温度为 T_0 的参考环境中,则在回路中将有反映 T 与 T_0 温差的电势产生,利用这个电势可以进行温度测量。

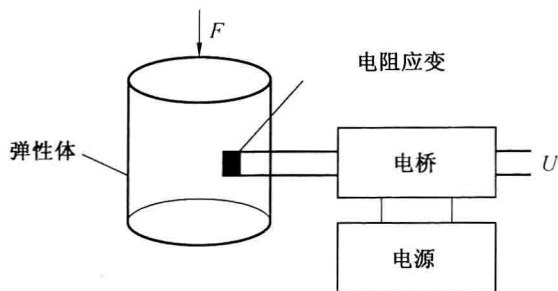


图 1.3 电阻应变片式测力传感器



图 1.4 热电偶传感器

对于一个传感器而言,敏感元件和转换元件是必不可少的,这两者有时可能合为一体(如上例),而转换电路和辅助电源则不是必须有的。敏感元件和转换元件在结构上常组装在一起,而转换电路和辅助电源与它们有时装在一起,有时则是装在另外一个独立的电箱之中。

1.2.3 传感器的分类

传感器的种类繁多,功能各异,应用领域广泛。对于同一被测量可用不同转换原理来实现测量,利用同种原理又可以设计出检测不同被测量的传感器,所以传感器有许多不同的分类方法。表 1.2 列出了若干种传感器的分类。

(1) 根据传感器感知外界信息所依据的基础效应,可以将传感器分为物理型、化学型和生物型等。

(2) 传感器按工作原理(转换机理)可分为电参量传感器(包括电阻式、电感式、电容式三个基本形式,以及由此而派生出的差动变压器式、涡流式、压磁式、感应同步器式、容栅式等)、磁电式传感器、压电式传感器、光电式传感器(包括光栅式、激光式、光电码盘式、光导纤维式、红外式等)、气电式传感器、热电式传感器和半导体式传感器等。

(3) 传感器按被测对象可分为力学量传感器、热量传感器、磁传感器、光传感器、气体成分传感器和液体成分传感器等。

(4) 传感器按使用的敏感材料可分为半导体传感器、光纤传感器、陶瓷传感器、金属传感器、高分子材料传感器和复合材料传感器等。

(5) 传感器根据能量的转换情况可分为能量控制型和能量转换型。能量控制型是指其变换的能量由外部电源供给,而传感器输入量的变化只能对输出起控制作用,如电阻、电感、电容等电路参量传感器。而能量转换型是由传感器输入量的变化直接引起能量的变化,如基于压电、热电和霍尔传感器等。

(6) 传感器按构成原理可分为结构型与物性型。结构型传感器是利用物理学中场的定律构成的,包括力场的运动定律、电磁场的电磁定律等。利用场的定律做成的传感器,如磁电式传感器、电容式传感器、激光传感器等,结构型传感器一般通过敏感元件结构参数变化实现信息转换。物性型传感器是利用物质定律构成的,如胡克定律、欧姆定律、晶体的压电效应、半导体材料的压阻、热阻、光阻效应等。利用物质定律做成的传感器,如压电式传感器、热敏电阻、光敏电阻、光电管等,物性型传感器一般通过敏感元件材料物理性质的变化实现信息转换。

(7) 传感器按其输出信号形式可分为模拟量传感器和数字量传感器。

表 1.2 传感器的分类

分类方法	传感器的种类	说 明
按依据的效应	物理传感器 化学传感器 生物传感器等	基于物理效应,如光、电、声、磁、热效应; 基于化学效应,如化学吸附、选择性化学反应等; 基于生物效应,如基于酶、抗体、激素等分子识别和选择功能的生物传感器
按工作原理 (转换机理)	电参量传感器,磁电式传感器,压电式传感器,光电式传感器,气电式传感器,热电式传感器,波式传感器,射线式传感器,半导体式传感器等	传感器依据其工作原理命名。电参量传感器包括电阻式、电容式、电感式三个基本类型;磁电式传感器包括磁电感应式、霍尔式、磁栅式等;光电式传感器包括一般光电式、光栅式、激光式、光电码盘式、光纤式、红外式等;波式传感器包括超声波式、微波式等
按被测量或用途	位移、速度、温度、压力、气体成分、浓度传感器等	传感器依据被测量或用途命名
按使用的敏感材料	半导体传感器、光纤传感器、复合材料传感器、金属传感器、陶瓷传感器、高分子材料传感器等	传感器依据使用的材料命名
按能量关系	能量转换型传感器 能量控制型传感器	能量转换型直接将测量转换为输出量的能量,如利用压电效应、热电效应等的传感器;能量控制型由外部提供能量,而由被测量控制输出能量,如电阻、电感、电容传感器
按构成原理	结构型传感器 物性型传感器	结构型通过敏感元件结构参数变化实现信息转换;物性型通过敏感元件材料物理性质的变化实现信息转换
按输出信号	数字式传感器 模拟式传感器	输出为数字量 输出为模拟量

1.2.4 传感器的发展趋势

现代科学技术和生产的发展对传感器提出了越来越高的要求,同时也为传感器的开发提供了丰富的研究手段和技术条件。如何采用新技术、新工艺、新材料以及探索新的理论,使传感器达到新的技术高度是总的发展方向。目前,传感器主要的发展动向:一是进行基础研究,发现新现象,开发传感器的新材料和新工艺;二是实现传感器的集成化与智能化。具体分为以下几个方面。

1. 利用新原理、新效应等研制新型传感器

基于各种物理、化学、生物效应和物质定律,以及利用各种新型敏感材料和功能材料来

研制新型传感器,是传感器技术的重要发展方向。如日本夏普公司利用超导技术研制的高温超导磁性传感器,其灵敏度仅次于超导量子干涉器件;利用生物抗体和抗原在电极表面相遇复合引起电极电位变化的现象研制的免疫传感器,可用于快速准确地检查患者的肝炎病毒抗体。

2. 提高精度和扩大测量范围

随着自动化程度和技术水平的提高,新型传感器应具有更高的灵敏度和精度、更快的响应速度、更好的互换性。另外,空间技术、海洋开发、环境保护和地震预测等要求传感技术满足观测宏观世界的需要,而细胞生物学、遗传工程、医学及微纳米研究等又对传感技术在微观领域的研究提出了要求。如一种高性能小型石英绝对压力传感器,具有 $\pm 10\text{ Pa}$ 的高精度和 0.1 Pa 的高分辨力。

3. 向低功耗及无源化发展

多数传感器工作时需要电源,因此在野外或无法取得电源的地方常采用电池或太阳能对传感器进行供电。开发低功耗传感器及无源传感器既可以节省电能又可以扩大传感器的应用范围。如一种新型流量传感器,能把所通过的流体的动能自行转化为电能,实现自行“发电”,大大方便了系统的设计和维护。

4. 向高可靠性发展

传感器的高可靠性直接影响测试系统的工作性能,研制高可靠性、宽温度范围的传感器是永恒的主题。特别是对航空航天、军事国防上应用的传感器,高可靠性是一项重要的技术指标。如航天上使用的传感器需要适应空间辐射、真空失重、极端温度等环境;尤其是用于发控指令、安全保护类型的航天传感器,其可靠性至关重要,承担火箭控制任务的传感器可靠度要求为 $0.995 \sim 0.998$ 。

5. 向微型化与集成化发展

从使用角度讲,传感器的体积越小越好,这就要求利用微细加工等新的方法和工艺制造出体积微型化的传感器,其敏感元件的尺寸一般为微米级,由光刻、腐蚀、沉积、键合和封装等微机械加工制作工艺制作而成。如敏感单元只有 $2\text{ }\mu\text{m}$ 长、 50 nm 厚的硅悬臂梁传感器,可以检测出 $5.5 \times 10^{-15}\text{ g}$ 的物质,可以实现对蛋白质、细胞等物质的检测。与微型化密切相关的是传感器的集成化,包含两方面的含义:其一是将传感器与放大电路、运算电路、温度补偿电路等集成为一体化的组件;其二是将同类传感器集成后构成多维或阵列式传感器。如采用厚膜制造工艺在同一个基片上制作能够检测氧、氨、乙醇、乙烯四种气体的多功能传感器。

6. 向智能化与网络化发展

随着电子技术的发展,传感器已突破传统的功能。智能传感器模糊了检测系统和传感器的界限,它本身就是一种带微处理器,兼有检测、判断、信息处理等功能的传感器系统,开辟了“材料、器件、电路、仪表”一体化的新途径。其典型产品如美国霍尼韦尔公司的ST-3000型智能传感器,在一个 $3\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 的芯片上制作了CPU(中央处理器)、EPROM(存储器)和静压、压差、温度三种传感器。有些传感器还具有可外部设定测量物理量、自动更换量程、自动标定和自动维护功能。

网络化是传感器技术的新动向,利用网络协议,使现场执行测控任务的传感器自动组网,并与网络上有通信能力的节点直接进行通信,实现数据的实时发布和共享,多传感器以协同的方式工作,获取丰富的信息。其应用已扩展到国防军事、环境监测、交通管理、医疗卫生等领域。

1.3 传感器的静态特性

传感器感受被测量,并以一定精度把被测量转换为与之有确定对应关系的电参量输出。传感器研究的核心问题就是输出量与输入量之间的对应关系,这种确定的对应关系存在于时间和空间中。传感器静态特性和动态特性是从时间域上,分析输出量对输入量的依存关系,也就是输出量对输入量可真实表达的程度,越接近真实,传感器工作精度越高。

1.3.1 输入 - 输出静态函数关系式

传感器输入量有两种形态:一种是输入量为常量或随时间缓慢变化的量,称作静态输入;另一种是输入量随时间变化,称作动态输入。不论输入量是静态量还是动态量,输出量都跟随输入量变化。研究这种跟随性,即响应问题,就是输入量与输出量间在时域上的关系特性。这种输入 - 输出特性是传感器工作质量的表征,即由传感器内部结构参数决定的特性。传感器输入 - 输出的静态函数关系可表示为

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \cdots + a_nx^n \quad (1.1)$$

式中, a_0 为零输入时的输出值; a_1 为线性输出系数,或称作理论灵敏系数; a_2, \cdots, a_n 为非线性项系数。当 $a_0 = 0$ 时,零输入时为零输出。

静态函数关系式有三种特殊情况,也是最常采用的函数关系。

1. 理想线性关系

a_0 和各非线性项系数 a_2, a_3, \cdots, a_n 均为零,此时

$$y = a_1x \quad (1.2)$$

为过原点的直线,定义线性灵敏系数 $k = a_1 = y/x$,是一个常数。这是用最常采用的直线方程去拟合相应的输入 - 输出关系曲线,得到最简单的输入 - 输出函数关系,误差要在允许范围内。

2. 非线性项中仅有奇次项的奇函数关系

a_0 和各非线性项系数 a_2, a_4, a_6, \cdots 均为零,此时

$$y = a_1x + a_3x^3 + a_5x^5 + \cdots \quad (1.3)$$

具有这种静态特性的传感器,在原点附近很大的测量范围内,输入 - 输出近似为理想线性关系,并且有 $y(x) = -y(-x)$ 的对称性,所以其特性较偶函数关系好。

3. 非线性项中仅有偶次项的偶函数关系

a_0 和各非线性项系数 a_1, a_3, a_5, \cdots 均为零,此时

$$y = a_2x^2 + a_4x^4 + a_6x^6 + \cdots \quad (1.4)$$

具有这种静态特性的传感器,具有 $y(x) = y(-x)$ 的对称性。在零点附近灵敏度很小,所以其线性范围窄,其特性较奇函数关系差。