

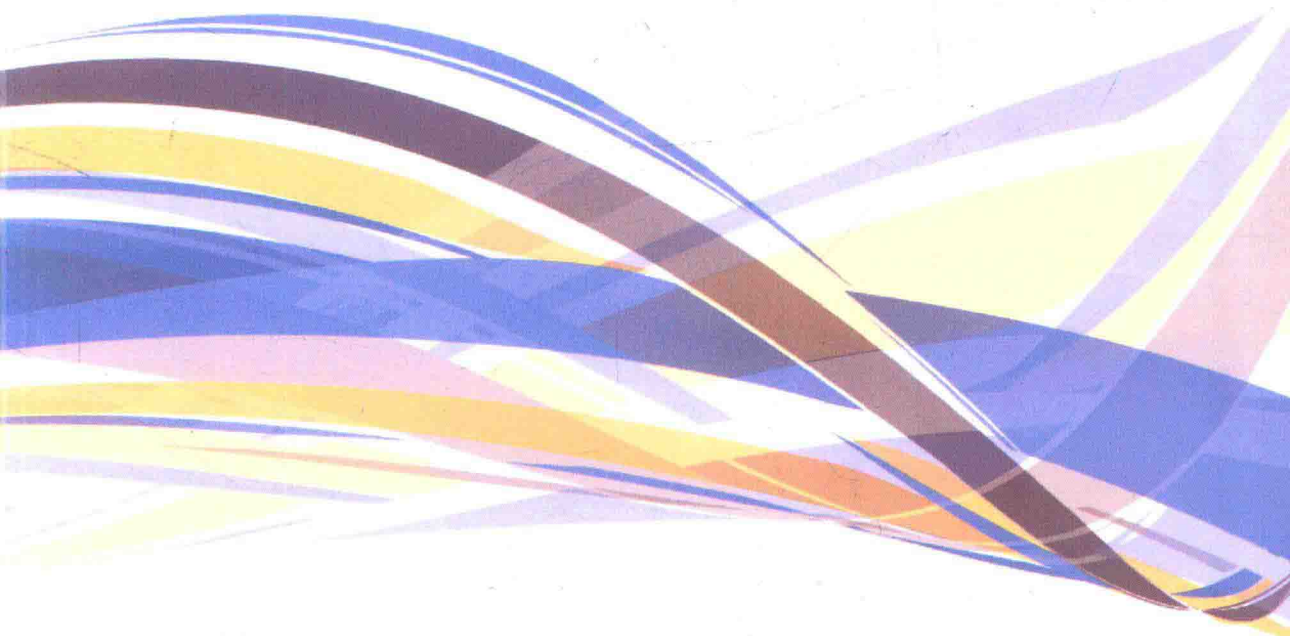


普通高等教育研究生规划教材

Modern Sensing Technology and Application

现代传感技术及应用

● 王化祥 编著



天津大学出版社

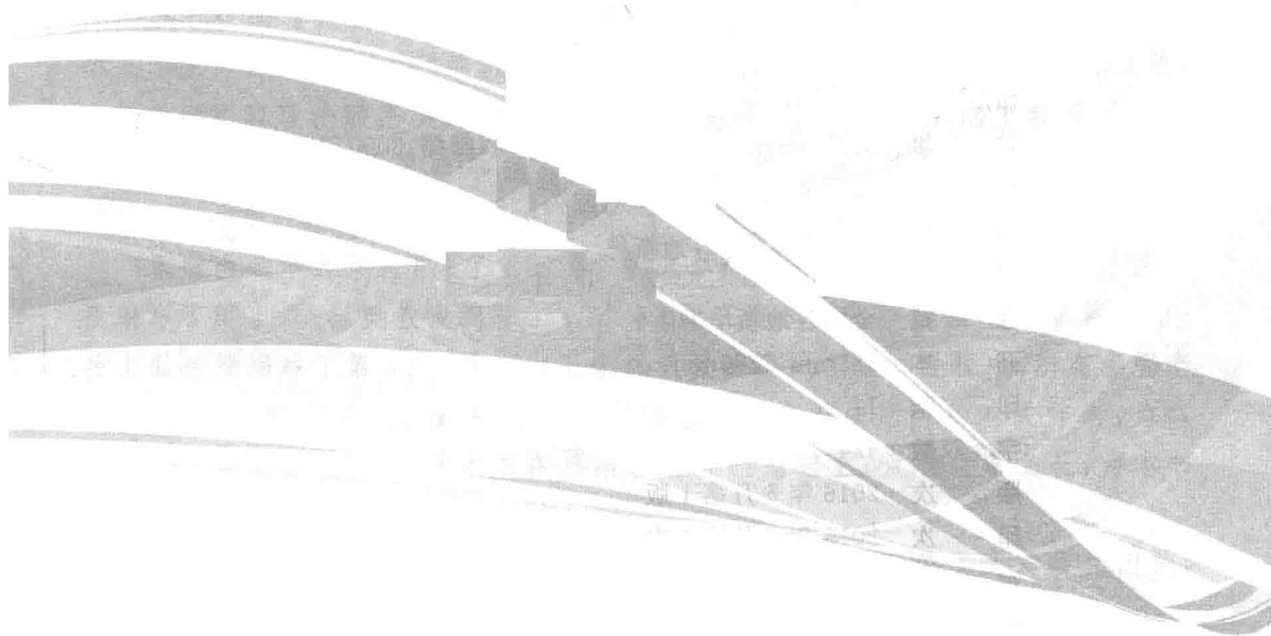


普通高等教育研究生规划教材

Modern Sensing Technology and Application

现代传感技术及应用

● 王化祥 编著



天津大学出版社

内容提要

本书介绍了现代传感器的原理、特性及其在工程中的应用技术,并紧密围绕当前传感器技术发展最新内容和方向编写,叙述由浅入深,循序渐进。全书在介绍传感器基本特性的基础上,详细介绍了光纤、图像、生物传感器以及无线传感器网络、移动机器人传感器、智能传感技术,最后介绍了多源传感器的信息融合技术。

本书可作为高等院校测控技术与仪器、自动化、电气工程及其自动化、计算机科学与技术、通信工程、生物医学工程等专业研究生选修课教材和本科专业高年级学生的参考教材,也可供从事传感与信息检测相关领域应用和设计开发的研究人员、工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代传感技术及应用 / 王化祥编著. —天津: 天津大学出版社, 2016. 6

普通高等教育研究生规划教材

ISBN 978-7-5618-5567-6

I. ①现… II. ①王… III. ①传感器—高等职业教育—教材 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 120304 号

出版发行 天津大学出版社

地 址 天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编:300072)

电 话 发行部:022-27403647

网 址 publish.tju.edu.cn

印 刷 天津市蓟县宏图印务有限公司

经 销 全国各地新华书店

开 本 185mm×260mm

印 张 17

字 数 424 千

版 次 2016 年 6 月第 1 版

印 次 2016 年 6 月第 1 次

定 价 38.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,烦请向我社发行部门联系调换

版权所有 侵权必究

前 言

由王化祥教授等人编著的《传感器原理及应用》一书,自1988年正式出版以来,受到广大读者的欢迎,并选为教材使用。该书所讲述内容主要是传统式传感器原理及应用,对现代最新发展的传感器内容涉及较少。基于上述情况,并在广泛征求意见的基础上,认为有必要编写一本反映当今最新发展和应用的现代传感器教材。

本书正是基于上述考虑编写完成的,并于2008年4月由化工出版社正式出版。这次再版进行了认真修订整理。本书主要涉及的内容包括光纤传感器、图像传感器、生物传感器、无线传感器网络、移动机器人传感器、智能传感技术以及多源传感器的信息融合技术。上述内容是对传统传感器的补充。本书可作为高等院校测控技术与仪器、自动化、电气工程及其自动化、计算机科学与技术、通信工程、生物医学工程等专业研究生选修课教材和本科专业高年级学生的参考教材,也可供从事传感与信息检测相关领域应用和设计开发的研究人员、工程技术人员参考。

本书在编写过程中紧密结合现代传感技术教学改革和课程建设,贯彻“以学生为主体,教师为主导”的教学原则,注重学生能力的培养和新知识的吸收,注重教学内容理论联系实际,在编者多年教学、科研实践的基础上参考了国内外相关教材和学术研究成果,在阐述基础理论的同时,将实际应用贯穿全书始终。

本书由天津大学王化祥教授主编,并编写了本书的第1、2、3、7章,王学民教授编写了第4章;杨挺教授编写了第5章;孟庆浩和王化祥教授编写了第6章;岳士弘教授编写了第8章;最后由王化祥教授统稿。在编写过程中,所有参编老师精诚合作,精益求精。这里还要特别感谢参考文献中所列的有关作者,为本书提供了宝贵参考资料,使本书在总结已有经验基础上,吸取众家之长,为本书增色不少。

传感技术所涉及内容比较广泛,而且传感技术本身正在飞速发展。因此,由于编者水平和知识有限,难免有疏漏和不妥之处,恳请读者不吝赐教。

编 者

2015年6月于天津大学

目 录

1 传感器基本特性..... (1)	3.1.2 电荷转移与电极结构 (57)
1.1 概述..... (1)	3.1.3 电荷的注入与读出 (61)
1.1.1 传感器的作用..... (1)	3.1.4 CCD 图像传感器 (63)
1.1.2 传感器及传感技术..... (1)	3.1.5 图像传感器的主要特性参数 ... (65)
1.1.3 传感器的组成..... (2)	3.2 热成像技术 (72)
1.1.4 传感器的分类..... (2)	3.2.1 热像仪的组成 (72)
1.1.5 传感器的发展趋势..... (2)	3.2.2 热释电摄像管的结构及原理 ... (74)
1.2 传感器的组成与结构..... (3)	3.3 图像传感器的典型应用 (80)
1.2.1 传感器的组成..... (3)	3.3.1 固态图像传感器的应用 (80)
1.2.2 传感器的结构形式..... (4)	3.3.2 热成像无损探测 (83)
1.3 传感器的一般特性..... (8)	练习题..... (87)
1.3.1 传感器的静态特性..... (8)	4 生物传感器 (88)
1.3.2 传感器的动态特性 (14)	4.1 生物传感器概述 (88)
1.3.3 不失真测试的条件分析 (22)	4.1.1 生物传感器的应用范围 (88)
1.3.4 传感器的标定 (25)	4.1.2 生物传感器的发展 (89)
练习题..... (27)	4.1.3 生物传感器的基本原理及特点 (91)
2 光纤传感器 (28)	4.1.4 生物传感器的分类 (93)
2.1 光纤传感器的特点及分类 (28)	4.2 生物识别机理及膜固定技术 (94)
2.1.1 光纤传感器的特点 (28)	4.2.1 酶反应 (95)
2.1.2 光纤传感器的分类 (29)	4.2.2 微生物反应及检测 (95)
2.2 光纤的传光特性 (29)	4.2.3 免疫学反应 (97)
2.2.1 光纤的结构及分类 (30)	4.2.4 其他类型的生物学反应 (99)
2.2.2 光纤的传光原理 (33)	4.2.5 膜及其固定技术 (100)
2.2.3 光纤的衰减机理 (36)	4.3 生物传感器原理及应用 (104)
2.3 光纤传感器的光源与光检测器 (38)	4.3.1 酶传感器..... (104)
2.3.1 光纤传感器用光源的分类及特点 (38)	4.3.2 免疫传感器..... (106)
2.3.2 半导体光电检测器 (41)	4.3.3 微生物传感器..... (109)
2.4 光纤传感器的应用 (45)	4.3.4 新型生物传感器简介..... (111)
2.4.1 光纤温度传感器 (45)	练习题 (118)
2.4.2 光纤压力传感器 (49)	5 无线传感器网络..... (119)
2.4.3 光纤流量、流速传感器..... (51)	5.1 无线传感器网络概述..... (119)
练习题..... (54)	5.1.1 无线传感器网络生成过程..... (119)
3 图像传感器 (55)	5.1.2 无线传感器网络结构..... (119)
3.1 电荷耦合摄像器件 (55)	5.1.3 传感器节点构成..... (120)
3.1.1 CCD 基本工作原理 (55)	5.1.4 无线传感器网络特点..... (121)

5.1.5 无线传感器网络应用	(122)	6.4.3 测距传感器	(178)
5.2 无线传感器网络关键技术	(125)	6.5 主动嗅觉感知	(181)
5.2.1 无线传感器网络体系	(125)	6.5.1 机器人嗅觉	(181)
5.2.2 无线传感器网络拓扑	(126)	6.5.2 机器人嗅觉常用气体/气味传感器	(182)
5.2.3 无线传感器网络物理层协议	(130)	6.5.3 常用风速/风向传感器	(186)
5.2.4 无线传感器网络 MAC 协议	(131)	6.5.4 气味/气体源搜寻策略	(187)
5.2.5 无线传感器网络路由协议	(136)	练习题	(188)
5.2.6 无线传感器网络传输和应用层协议	(141)	7 智能传感技术	(189)
5.2.7 无线传感器网络其他关键技术	(142)	7.1 智能传感器概述	(189)
5.2.8 无线传感器网络能量管理机制	(150)	7.2 智能传感器的实现	(190)
5.3 无线传感器网络的典型设计实例	(151)	7.2.1 非集成化结构	(190)
5.3.1 设计简介	(151)	7.2.2 集成化结构	(190)
5.3.2 Mica2 节点设计分析	(152)	7.2.3 标度变换技术	(192)
5.4 无线传感器网络应用实例	(155)	7.2.4 混合实现	(193)
5.4.1 芯片制造厂设备监控系统应用	(155)	7.3 数据处理及软件实现	(194)
5.4.2 大鸭岛海燕生活习性监测保护应用	(155)	7.3.1 非线性校正	(194)
5.4.3 家庭及办公智能化网络应用	(156)	7.3.2 自校零与自校准技术	(198)
练习题	(157)	7.3.3 噪声抑制技术	(200)
6 移动机器人传感器	(158)	7.3.4 自补偿、自检验及自诊断	(203)
6.1 移动机器人传感器概述	(158)	7.4 微机电系统	(205)
6.1.1 机器人与移动机器人	(158)	7.4.1 微机电系统概述	(205)
6.1.2 移动机器人感知	(158)	7.4.2 微机电系统的关键技术	(206)
6.1.3 移动机器人传感器分类	(159)	7.4.3 典型微机电传感器	(210)
6.2 移动机器人常用内部传感器	(160)	7.5 网络传感器	(211)
6.2.1 编码器	(160)	7.5.1 网络传感器及其特点	(212)
6.2.2 惯性传感器	(164)	7.5.2 网络传感器的类型	(212)
6.3 移动机器人航位推算模型	(172)	7.5.3 网络传感器通用接口标准	(213)
6.3.1 差速驱动移动机器人	(172)	7.5.4 网络传感器的发展形式	(215)
6.3.2 类车或三轮移动机器人	(173)	练习题	(216)
6.4 移动机器人常用外部传感器	(174)	8 多源传感器信息融合技术	(218)
6.4.1 触觉传感器	(174)	8.1 信息融合技术的基本概念和分类	(218)
6.4.2 接近觉传感器	(174)	8.2 贝叶斯(Bayes)估计	(219)
		8.2.1 Bayes 条件概率公式	(219)
		8.2.2 基于 Bayes 方法的信息融合原理	(220)
		8.3 卡尔曼(Kalman)滤波	(221)
		8.3.1 卡尔曼滤波的基本方程	(221)
		8.3.2 基于卡尔曼滤波器的数据融合方法在高温炉检测系统中的应用	(223)

8.4 自适应加权平均和有序加权平均算法	(225)	8.8.3 分布式检测多传感器系统结构	(245)
8.4.1 自适应加权平均	(225)		(247)
8.4.2 有序加权平均算子(ordered weighted averaging,OWA)	(226)	8.9 基于案例的推理技术在数据融合中的应用	(248)
8.5 Dempster-Shafer 证据理论	(227)	8.9.1 基于案例推理的基本原理	(249)
8.5.1 证据理论基本模型和性质	(227)	8.9.2 一个基于案例推理的应用实例	(251)
8.5.2 证据理论的组合规则	(228)	8.10 粗集理论与信息融合	(253)
8.5.3 证据理论的进一步说明	(229)	8.10.1 粗集的基本概念	(253)
8.6 神经网络信息融合方法	(234)	8.10.2 粗集	(254)
8.6.1 单个 BP(back propagation)网络的建立	(235)	8.10.3 知识的约简	(255)
8.6.2 多个 BP 网络的集成	(235)	8.10.4 基于粗集理论的多传感器融合	(256)
8.7 数据关联的基本概念和方法	(237)	8.10.5 本节小结	(260)
8.7.1 数据关联的概念	(237)	8.11 基于模糊积分的信息融合	(260)
8.7.2 “最近邻”法	(238)	8.11.1 模糊测度的基本概念	(260)
8.7.3 概率数据关联滤波器	(238)	8.11.2 模糊积分的基本概念和性质	(261)
8.7.4 模糊数据关联	(240)	8.11.3 钢铁厂的试验	(261)
8.7.5 多传感器的模糊聚类融合技术	(241)	练习题	(262)
8.8 多传感器目标检测	(243)	参考文献	(263)
8.8.1 问题的描述	(243)		
8.8.2 检测空间的划分与信任级别			

1 传感器基本特性

1.1 概述

1.1.1 传感器的作用

随着现代测量、控制和自动化技术的发展,传感器技术越来越受到人们的重视。特别是近年来,由于科学技术、经济发展及生态平衡的需要,传感器在各个领域中的作用也日益显著。在工业生产自动化、能源、交通、灾害预测、安全防卫、环境保护、医疗卫生等方面所开发的各种传感器,不仅能代替人的感官功能,并且在检测人的感官所不能感受的参数方面创造了十分有利的条件。在工业生产中,它起到了工业耳目的作用。例如,冶金工业中连续铸造生产过程中的钢包液位测量,高炉铁水硫磷含量分析等方面,就需要多种多样的传感器为操作人员提供可靠的数据。此外,用于工厂自动化柔性制造系统(flexible manufacturing system, FMS)中的机械手或机器人可实现高精度在线实时测量,从而保证了产品的产量和质量。在微型计算机广为普及的今天,如果没有各种类型的传感器提供可靠、准确的信息,计算机控制就难以实现。因此,可以说传感器是信息采集系统的首要环节,是实现现代化测量和自动控制的重要部件,是现代信息产业的源头,也是信息社会赖以存在和发展的物质与技术基础。当今社会是信息化的社会,传感技术与信息技术、计算机技术被并列称为支撑现代信息产业的三大支柱。可以设想,若没有精度高和性能可靠的传感器,没有先进的传感器技术,那么信息的准确获取将无从谈起,信息技术与计算机技术将成为无源之水、无本之木。

1.1.2 传感器及传感技术

传感器(transducer 或 sensor)是将各种非电量(包括物理量、化学量、生物量等)按一定规律转换成便于处理和传输的另一种物理量(一般为电量)的装置。

过去人们习惯地把传感器仅作为测量工程的一部分加以研究,但是自 20 世纪 60 年代以来,随着材料科学的发展和固体物理效应的不断发现,目前传感器技术已形成了一个新型科学技术领域,建立了一个完整的独立科学体系——传感器工程学。

传感技术是利用各种功能材料实现信息检测的一门应用技术,它是检测(传感)原理、材料科学、工艺加工三个要素的最佳结合。

检测(传感)原理指传感器工作时所依据的物理效应、化学反应和生物反应等机理,各种功能材料则是传感技术发展的物质基础,从某种意义上讲,传感器也就是能感知外界各种被测信号的功能材料。传感技术的研究和开发,不仅要求原理正确、选材合适,而且要求有先进的、高精度的加工装配技术。除此之外,传感技术还包括如何更好地把传感元件用于各个领域的所谓传感器软件技术,如传感器的选择、标定以及接口技术等。总之,随着科学技术的发展,传感器技术的研究开发范围正在不断扩大。

1.1.3 传感器的组成

传感器一般由敏感元件、转换元件和测量电路三部分组成,有时还需要加辅助电源,用方框图表示,如图 1-1 所示。



图 1-1 传感器的组成方框图

敏感元件(预变换器):在完成非电量到电量的变换时,并非所有的非电量都能利用现有手段直接变换为电量,往往是将被测非电量预先变换为另一种易于变换成电量的非电量,然后再变换为电量。能够完成预变换的器件称为敏感元件,又称为预变换器。如在传感器中各种类型的弹性元件常被称为敏感元件,并统称为弹性敏感元件。

转换元件:将感受到的非电量直接转换为电量的器件称为转换元件,例如压电晶体、热电偶等。

需要指出的是,并非所有的传感器都包括敏感元件和转换元件,如热敏电阻、光电器件等。而另外一些传感器,其敏感元件和转换元件可合二为一,如固态压阻式压力传感器等。

测量电路:将转换元件输出的电量变成便于显示、记录、控制和处理的有电信号的电路称为测量电路。测量电路的类型视转换元件的分类而定,经常采用的有电桥电路及其他特殊电路,如高阻抗输入电路、脉冲调宽电路、振荡回路等。

1.1.4 传感器的分类

传感器的种类很多,目前尚没有统一的分类方法,一般常采用的分类方法有如下几种。

(1) 按输入量分类

如输入量分别为温度、压力、位移、速度、加速度、湿度等非电量时,则相应的传感器称为温度传感器、压力传感器、位移传感器、速度传感器、加速度传感器、湿度传感器等。这种分类方法给使用者提供了方便,容易根据测量对象选择所需要的传感器。

(2) 按测量原理分类

现有传感器的测量原理主要是基于电磁原理和固体物理学理论。如根据变电阻的原理,相应的有电位器式、应变式传感器;根据变磁阻的原理,相应的有电感式、差动变压器式、电涡流式传感器;根据半导体有关理论,则相应的有半导体力敏、热敏、光敏、气敏等固态传感器。

(3) 按结构型和物性型分类

所谓结构型传感器,主要是通过机械结构的几何形状或尺寸的变化,将外界被测参数转换成相应的电阻、电感、电容等物理量的变化,从而检测出被测信号,这种传感器目前应用得最为普遍。物性型传感器则是利用某些材料本身物理性质的变化实现测量,它是以半导体、电介质、铁电体等作为敏感材料的固态器件。

1.1.5 传感器的发展趋势

近年来,由于半导体技术已进入了超大规模集成化阶段,各种制造工艺和材料性能的研

究已达到相当高的水平。这为传感器的发展创造了极为有利的条件。从发展前景来看,它具有以下几个特点。

(1) 传感器的固态化

物性型传感器亦称固态传感器,目前发展很快。它包括半导体、电介质和强磁性体三类,其中半导体传感器的发展最引人注目。它不仅灵敏度高、响应速度快、小型轻量,而且便于实现传感器的集成化和多功能化。如目前最先进的固态传感器,在一块芯片上可同时集成差压、静压、温度三个传感器,使差压传感器具有温度和压力补偿功能。

(2) 传感器的集成化和多功能化

随着传感器应用领域的不断扩大,借助半导体的蒸镀技术、扩散技术、光刻技术、精密细微加工及组装技术等,使传感器从单个元件、单一功能向集成化和多功能化方向发展。所谓集成化,就是利用半导体技术将敏感元件、信息处理或转换单元以及电源等部分制作在同一芯片上,如集成压力传感器、集成温度传感器、集成磁敏传感器等。多功能化则意味着传感器具有多种参数的检测功能,如半导体温湿敏传感器、多功能气体传感器等。

(3) 传感器的图像化

目前,传感器的应用不仅限于对某一点物理量的测量,而开始研究从一维、二维到三维空间的测量问题。现已研制成功的二维图像传感器,有 MOS 型、CCD 型、CID 型全固体式摄像器件等。

(4) 传感器的智能化

智能传感器是一种带有微型计算机兼有检测和信息处理功能的传感器。它通常将信号检测、驱动回路和信号处理回路等外围电路全部集成在一块基片上,使它具有自诊断、远距离通信、自动调整零点和量程等功能。

①自补偿功能。对信号检测过程中的非线性误差、温度变化及其导致的信号零点漂移和灵敏度漂移、响应时间延迟、噪声与交叉感应等效应的补偿功能。

②自诊断功能。接通电源时系统的自检;系统工作时实现运行的自检;系统发生故障时的自诊断,包括确定故障的位置与部件等。

③自校正功能。系统中参数的设置与检查;测试中的自动量程转换;被测参数的自动运算等。

④数据的自动存储、分析、处理与传输等。

⑤微处理器与微型计算机和基本传感器之间具有双向通信功能。

1.2 传感器的组成与结构

1.2.1 传感器的组成

传感器的核心部分是转换元件。转换元件是将感受到的非电量转换为电量输出的器件。

转换元件可以直接感受被测量,而输出与被测量成确定关系的电量。这时转换元件本身就可作为一个独立的传感器使用。这样的传感器一般称为元件式传感器,元件式传感器的组成框图如图 1-2 所示。例如,电阻应变片在作应变测量时,它直接感受被测量——应变,输出与应变有确定关系的电量——电阻变化。

转换元件也可以不直接感受被测量,而是感受与被测量有确定关系的其他非电量,再将其转换为电量。这时转换元件本身不作为一个独立的传感器使用,而作为传感器的一个转换环节。而在传感器中,尚需要另一个非电量之间的转换环节,即敏感元件来完成同类或不同类的非电量转换。这样的传感器通常称为结构式传感器。结构式传感器的组成框图如图 1-3 所示。

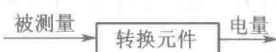


图 1-2 元件式传感器组成框图



图 1-3 结构式传感器组成框图

传感器中的转换元件决定了传感器的工作原理,也决定了测试系统的中间变换环节。敏感元件环节则大大扩展了转换元件的应用范围。在大多数测试系统中,应用的一般是结构式传感器。

1.2.2 传感器的结构形式

传感器的结构形式取决于传感器的设计思想。而传感器设计的要点就是依据选择信号的方式,将选择出来的信号的某一方面性能在结构上予以具体化,以满足传感器的技术要求。

1. 固定信号方式和传感器的直接结构

固定信号方式是把除被测量 x 以外的变量固定或控制在某个定值上。以金属导线的电阻变化为例,电阻是金属种类、纯度、尺寸、温度、应力等的函数。如果仅选择根据温度产生的变化为信号时,就可以制成电阻温度计;如果选择根据尺寸或应力产生的变化作为信号时,就可制成电阻应变片。显然,对于确定的金属材料,在设计温度计时要防止应力带来的影响;在设计应变片时要防止温度带来的影响。如果在测试中,控制前者的应力和后者的温度不变,则为选择固定的信号方式。

选择固定信号方式的传感器采用直接结构形式。这种传感器是由一个单独的传感元件和其他环节构成,直接将被测量转换为所需输出量。图 1-4 为直接式传感器的构成方式。

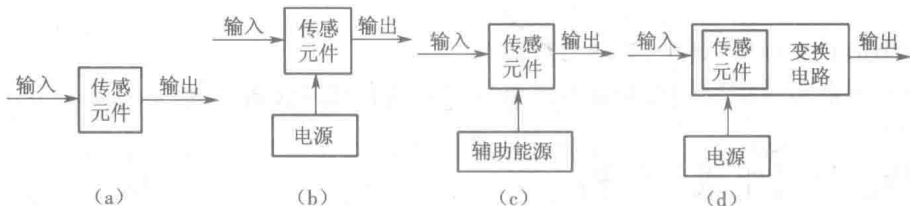


图 1-4 直接式传感器的构成方式

图 1-4(a)所示是仅有传感元件的最简单的一种,如热电偶和压电元件。图 1-4(b)所示是通过电源提供输出能量,如光敏晶体管。图 1-4(c)所示是利用磁铁为传感元件提供能量,如磁电式传感器。而霍尔式传感器则是图 1-4(b)、图 1-4(c)两种情况的结合。图 1-4(d)所示的传感元件是阻抗元件,输入信号改变其阻抗值,为得到具有能量的输出信号,必须设计包括传感元件在内的变换电路,如具有电桥电路的电阻应变传感器等。

固定的信号方式和直接的传感器结构是最简单、最基本的形式。传感器设计中常常采用这种形式。但在一些场合下,这种传感器往往不能满足要求,主要原因是它的灵敏度低,

易受外界干扰。

2. 补偿信号方式和传感器的补偿结构

大多数情况下,传感器特性要受到周围环境和内部各种因素的影响。当这些影响不能忽略时,必须采取一定的措施,以消除这些影响。

在设计某种传感器时,面临两种变量,一种是需要测量的量 x ,另一种是不希望出现而又存在的各种影响量 n (统称干扰量)。假设被测量 x 和影响量 n 都起作用时的变化关系为第一函数,仅影响量起作用时的变化关系为第二函数。对于被测量来说,如果影响量的作用效果是叠加的,则可取两函数之差;如果影响量的作用效果是乘积递增的,则可取两函数之商,即可消除 n 的影响。这种选择信号方式称为补偿方式。实现补偿信号方式的传感器结构是补偿式结构。其构成方式如图 1-5 所示。

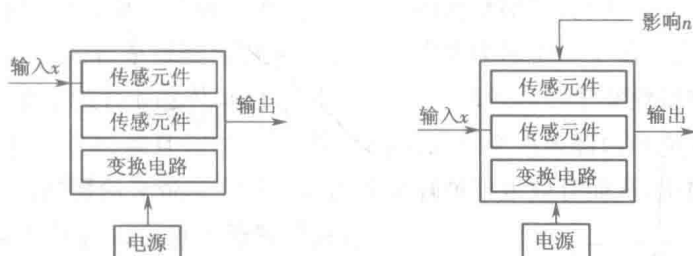


图 1-5 补偿式传感器的构成方式

图 1-5 中使用两个原理和特性完全一样的传感元件,其中一个接收输入信号(被测量),另一个不接收输入信号;两个传感元件对环境、内部条件的特性变化相同。虚设一个传感元件的目的在于抵消环境及内部条件变化对接收输入信号的传感元件的影响。

图 1-6 是具有补偿结构的应变式传感器及测量电桥。测量应变时,使用两个性能完全相同的应变片,其中一片贴在被测试件的表面,如图 1-6(a)中 R_1 ,称为工作应变片;另一片贴在与被测试件材料相同的补偿块上,如图 1-6(a)中 R_2 ,称为补偿应变片。工作过程中,补偿块不承受应变,仅随温度变化而变形。

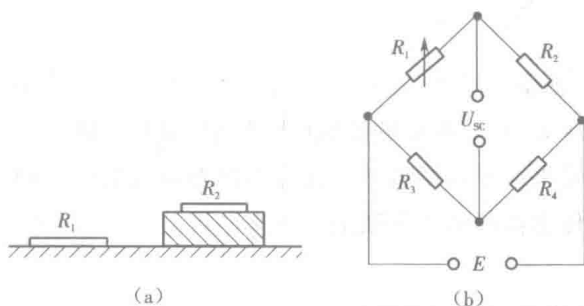


图 1-6 补偿结构的应变式传感器及测量电桥

当测试件不承受应变时, R_1 和 R_2 处于同一温度场,调整图 1-6(b)中电桥参数,可使电桥输出电压为零,即 $U_{sc} = A(R_1 R_4 - R_2 R_3) = 0$,式中可以选择 $R_1 = R_2 = R$ 及 $R_3 = R_4 = R'$ 。

当温度升高或降低时,若 $\Delta R_{1t} = \Delta R_{2t}$,即两个应变片的热输出相等,则电桥输出电压为零,即

$$U_{sc} = A[(R_1 + \Delta R_{1t})R_4 - (R_2 + \Delta R_{2t})R_3]$$

$$\begin{aligned}
 &= A[(R + \Delta R_{1t})R' - (R + \Delta R_{2t})R'] \\
 &= A(RR' + \Delta R_{1t}R' - RR' - \Delta R_{2t}R') \\
 &= AR'(\Delta R_{1t} - \Delta R_{2t}) = 0
 \end{aligned} \quad (1-1)$$

若此时有应变作用,只会引起电阻 R_1 变化, R_2 不承受应变,其输出电压为

$$U_{sc} = A[(R_1 + \Delta R_{1t} + R_1 K\epsilon)R_4 - (R_2 + \Delta R_{2t})R_3] = AR'RK\epsilon \quad (1-2)$$

式中 A ——桥路输出电压系数;

K ——应变片灵敏度系数;

ϵ ——应变。

由式(1-2)可知,电桥输出电压只与应变 ϵ 有关,与温度无关。

3. 差动信号方式和传感器的差动结构

使被测量反向对称变化,影响量同向对称变化,然后取其差值,可有效地将被测量选择出来,即为差动方式。图 1-7 所示为实现差动方式的传感器构成方式。其构成特点是把输入信号加在原理和特性完全一样的两个传感元件上,但使传感元件的输出对输入信号(被测量)反向变换,对环境 and 内部条件变化(影响量)同向变换,并且通过变换电路以两个传感元件输出之差为总输出,从而有效地抵消环境和内部条件变化带来的影响。

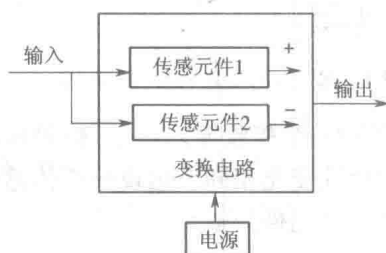


图 1-7 差动传感器的构成方式

差动式传感器不仅可以有效地抑制干扰,而且由于对称性消除了偶次非线性项,从而传感器的线性度得到改善。此外,差动式传感器的灵敏度比直接式传感器提高了一倍。

差动式结构广泛用于传感器设计,如差动变压器、差动式电容传感器及应变片的差动电桥方式等。

4. 平均信号方式和传感器的平均结构

平均信号方式来源于误差分析理论中对随机误差的平均效应和信号(数据)的平均处理。在传感器结构中,利用 N 个相同的转换元件同时感受被测量,则传感器的输出为各转换元件输出之和,而随机误差则减小为单个转换元件的 $1/\sqrt{N}$ 。

采用平均结构的传感器有光栅、磁栅、容栅、感应同步器等。带有弹性敏感元件的电阻应变式传感器进行力、压力、扭矩等量的测试时,可粘贴多片电阻应变片,在具有差动作用的同时,具有明显的平均效果。平均结构的传感器不仅有效地采用平均信号方式,大幅度降低测试误差,而且可弥补传感器制造工艺缺陷所带来的误差,同时还可以补偿某些非测量载荷的影响。

5. 平衡信号方式和传感器的闭环结构

一般由敏感元件、转换元件组成的传感器均属于开环式传感器。这种传感器和相应的中间变换电路、记录显示分析仪器等构成开环测试系统。开环式传感器,尽管可以采用补偿、差动、平均等结构形式有效地提高自身性能,但仍然存在两个突出问题。

①开环系统中,各环节之间是串联的,环节误差存在累积效应。要保证测试准确度,需要降低每一环节的误差,因此提高了对每一环节的要求。

②随着科技和生产的发展,要求传感器乃至整个测试系统的静态特性、动态特性、稳定

性、可靠性等同时具有高性能,而采用开环系统难以满足上述要求。

依据测量学中的零示法测量原理,选择平衡信号方式,采用闭环式传感器结构,可有效地解决上述问题。闭环传感器采用反馈技术,极大地提高了性能。闭环传感器在结构上增加了一个由反向传感器构成的反馈环节,其结构原理见图 1-8。构成反馈环节的反向传感器一般为磁电式、压电式等具有双向特性的传感器,实现“电—机”变换,起力(或力矩)发生器作用。

图 1-9 所示为闭环传感器原理框图。图中 $H(s)$ 为前向环节的总传递函数, β 为反馈环节的反馈系数,闭环系统总的传递函数为

$$H'(s) = \frac{H(s)}{1 + \beta H(s)} \quad (1-3)$$

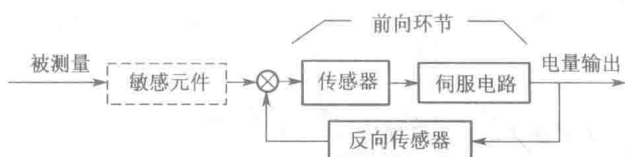


图 1-8 闭环传感器的结构原理

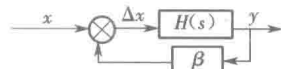


图 1-9 闭环传感器原理框图

与开环式传感器相比,闭环传感器有如下优点。

(1) 准确度高,稳定性好

由式(1-3)可见,闭环系统总灵敏度为

$$K'(s) = \frac{K}{1 + \beta K} \quad (1-4)$$

若前向环节为高增益,即 $\beta K \gg 1$, 则 $K' = \frac{1}{\beta}$, 闭环总灵敏度基本与前向环节无关。因此,前向环节增益波动对闭环传感器的准确度和稳定性影响很小。闭环传感器的测量准确度和工作稳定性主要取决于反向传感器。

(2) 灵敏度高

闭环传感器工作在平衡状态,相对初始平衡位置的偏离很小,外界干扰因素较少,因此比一般传感器具有更低的阈值。

(3) 线性好,量程大

由于闭环传感器相对初始平衡位置的偏离小,故非线性影响也小,因而具有更宽的量程。

(4) 动态特性好

设前向环节的传递函数为

$$H(s) = \frac{K}{1 + \tau s} \quad (1-5)$$

式中 τ ——时间常数。

则有

$$H'(s) = \frac{\frac{K}{1 + \tau s}}{1 + \frac{\beta K}{1 + \tau s}} = \frac{\frac{K}{1 + \tau s}}{1 + \frac{\beta K}{1 + \tau s}} = \frac{K'}{1 + \tau' s} \quad (1-6)$$

这里, $K' = K/(1 + \beta K)$, 而 $\tau' = \tau/(1 + \beta K)$, τ' 降低为开环时间常数 τ 的 $1/(1 + \beta K)$, 即 $\tau' \ll \tau$

τ ,从而大大改善了动态特性。

图 1-10 所示为力平衡式加速度传感器,它是一种典型的闭环结构传感器。这种传感器由惯性敏感元件、电容式位移传感器、伺服电路(由交流放大器、解调器、直流放大校正电路、振荡器等组成)和磁电式力发生器组成。

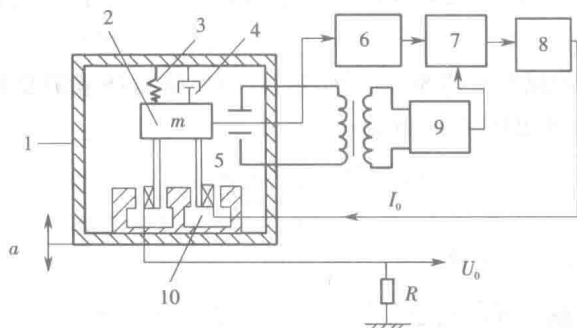


图 1-10 力平衡式加速度传感器

1—外壳 2—惯性敏感元件 3—弹性支撑元件 4—阻尼器 5—电容式位移传感器
6—交流放大器 7—解调器 8—直流放大校正电路 9—振荡器 10—磁电式力发生器

测试时,将力平衡式加速传感器固定在被测体上。当传感器感受到被测加速度 a 时,惯性质量 m 因惯性力而产生相对壳体的位移;电容式位移传感器将此位移变换为电信号,并经伺服电路处理,输出电流 I_0 至磁电式力发生器的动圈。磁电式力发生器的磁路系统和传感器的壳体固连,而动圈和惯性质量相连,当动圈中通有电流 I_0 时,将有电磁力作用在可动部分上,并与被测加速度作用于惯性质量上而产生的惯性力相平衡,使惯性质量回到初始平衡位置。磁电式力发生器产生的电磁力为

$$F_p = BlI_0 \quad (1-7)$$

式中 B ——气隙磁感应强度;

l ——动圈绕组导线工作长度。

于是有

$$BlI_0 = ma \quad (1-8)$$

或

$$I_0 = \frac{ma}{Bl} \quad (1-9)$$

$$U_0 = I_0 R = \frac{maR}{Bl} \quad (1-10)$$

I_0, U_0 与被测加速度 a 成正比,由此可测得 a 的值。

1.3 传感器的一般特性

传感器的输入量可分为静态量和动态量两类。静态量指稳定状态的信号或变化极其缓慢的信号(准静态)。动态量通常指周期信号、瞬变信号或随机信号。无论对动态量还是静态量,传感器输出电量都应当不失真地复现输入量的变化。这主要取决于传感器的静态特性和动态特性。

1.3.1 传感器的静态特性

传感器在被测量的各个值处于稳定状态时,输出量和输入量之间的关系称为静态特性。

通常,要求传感器在静态情况下的输出—输入关系保持线性。实际上,其输出量和输入量之间的关系(不考虑迟滞及蠕变效应)可由下列方程式确定

$$Y = a_0 + a_1 X + a_2 X^2 + \cdots + a_n X^n \quad (1-11)$$

式中 Y ——输出量;

X ——输入量;

a_0 ——零位输出;

a_1 ——传感器的灵敏度,常用 K 表示;

$a_2, a_3, \cdots, a_n$ ——非线性项待定常数。

由式(1-11)可见,如果 $a_0 = 0$,表示静态特性通过原点。此时,静态特性是由线性项 $a_1 X$ 和非线性项 $a_2 X^2, \cdots, a_n X^n$ 叠加而成,一般可分为以下 4 种典型情况。

①理想线性[图 1-11(a)]

$$Y = a_1 X \quad (1-12)$$

②具有 X 奇次项的非线性[图 1-11(b)]

$$Y = a_1 X + a_3 X^3 + a_5 X^5 + \cdots \quad (1-13)$$

③具有 X 偶次项的非线性[图 1-11(c)]

$$Y = a_1 X + a_2 X^2 + a_4 X^4 + \cdots \quad (1-14)$$

④具有 X 奇、偶次项的非线性[图 1-11(d)]

$$Y = a_1 X + a_2 X^2 + a_3 X^3 + a_4 X^4 + \cdots \quad (1-15)$$

由此可见,除图 1-11(a)为理想线性关系外,其余均为非线性关系。其中,具有 X 奇次项的曲线图 1-11(b),在原点附近一定范围内基本上是线性关系。

实际应用中,若非线性项的方次不高,则在输入量变化不大的范围内,用切线或割线代替实际的静态特性曲线的某一段,使传感器的静态特性接近于线性,这称为传感器静态特性的线性化。在设计传感器时,应将测量范围选取在静态特性最接近直线的一小段,此时原点可能不在零点。以图 1-11(d)为例,如取 ab 段,则原点在 c 点。传感器静态特性的非线性,使其输出不能成比例地反映被测量的变化情况,而且对动态特性也有一定影响。

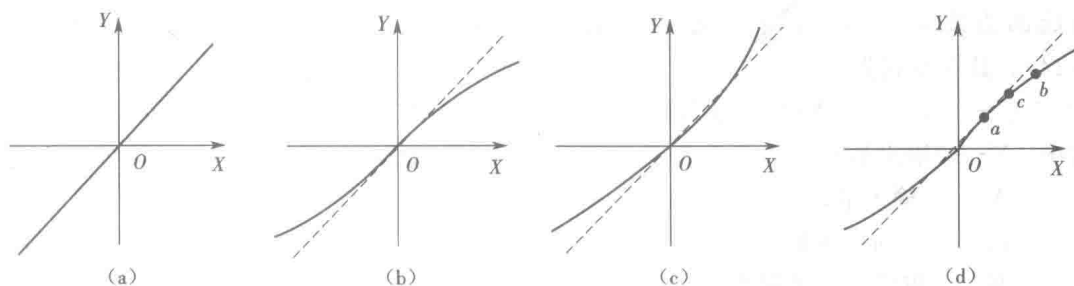


图 1-11 传感器的 4 种典型静态特性

传感器的静态特性是在静态标准条件下测定的。在标准工作状态下,利用一定精度等级的校准设备,对传感器进行往复循环测试,即可得到输出—输入数据。将这些数据列成表格,再画出各被测量值(正行程和反行程)对应输出平均值的连线,即为传感器的静态校准曲线。

传感器静态特性的主要指标有以下 7 个。

1. 线性度(非线性误差)

在规定条件下,传感器校准曲线与拟合直线间最大偏差与满量程($F \cdot S$)输出值的百分比称为线性度,如图 1-12 所示。

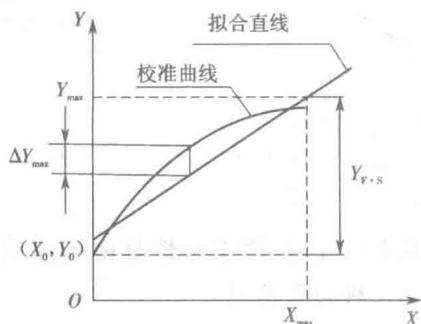


图 1-12 传感器的线性度

用 e_L 代表线性度,则

$$e_L = \pm \frac{\Delta Y_{\max}}{Y_{F.S.}} \times 100\% \quad (1-16)$$

式中 $\Delta Y_{\max}$ ——校准曲线与拟合直线间的最大偏差;

$Y_{F.S.}$ ——传感器满量程输出, $Y_{F.S.} = Y_{\max} - Y_0$ 。

由此可见,非线性误差是以一定的拟合直线或理想直线为基准直线算出来的。因而,基准直线不同,所得线性度也不同,见图 1-13。

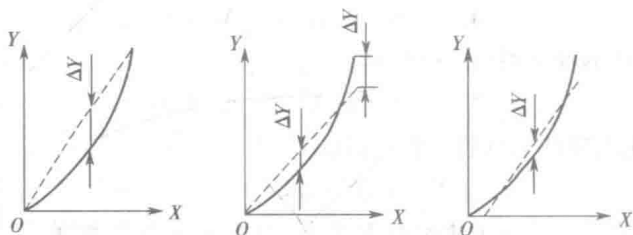


图 1-13 基准直线的不同拟合方法

应当指出,对同一传感器,在相同条件下进行校准试验时,得出的非线性误差不会完全一样。因而不能笼统地说线性度或非线性误差,必须同时说明所依据的基准直线。目前,关于拟合直线的计算方法不尽相同,下面仅介绍两种常用的拟合基准直线方法。

(1) 端基法

把传感器校准数据的零点输出 a_0 和满量程输出 b_0 连成的直线 $a_0 b_0$ 作为传感器特性的拟合直线(见图 1-14)。其方程式为

$$Y = a_0 + KX \quad (1-17)$$

式中 Y ——输出量;

X ——输入量;

a_0 —— Y 轴上截距;

K ——直线 $a_0 b_0$ 的斜率。

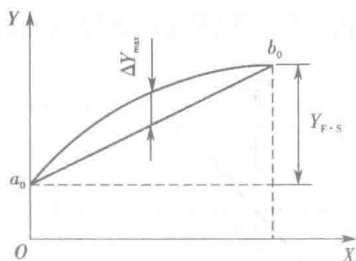


图 1-14 端基法线性度拟合直线

由此得端基法拟合直线方程,按式(1-16)计算出端基线性度。这种拟合方法简单直观,但是未考虑所有校准点数据分布,拟合精度较低,一般用在特性曲线非线性度较小的情况。

(2) 最小二乘法

用最小二乘法原则拟合直线,可使拟合精度最高。其计算方法如下。

令拟合直线方程为 $Y = a_0 + KX$ 。假定实际校准点有 n 个,在 n 个校准数据中,任一个校准数据 Y_i 与拟合直线上对应的理想值 $a_0 + KX_i$ 间的线差为