

高职高专教育“十二五”规划教材

CHUANGANQI YU JIANCE JISHU
XIANGMUHUA JIAO CHENG

传感器与检测技术

项目化教程

主 编 王 淼 耿俊梅

中国建材工业出版社

高职高专教育“十二五”规划教材

传感器与检测技术 项目化教程

主 编 王 森 耿俊梅
副主编 王传清 张艳鹏 廖建波
苗晓峰 宋 涛
参 编 李 莎 赵亚楠 杨德校



中国建材工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

传感器与检测技术项目化教程 / 王森, 耿俊梅主编
—北京: 中国建材工业出版社, 2012.9
ISBN 978-7-5160-0276-6

I. ①传… II. ①王…②耿… III. ①传感器-检测
-高等学校-教材 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 213257 号

内容简介

传感器与检测技术是整个自动化技术中的重要基础, 是一门理论与实践结合十分密切的技术基础课程。在整个机电一体化学科体系中占有非常重要的地位。

全书共分 11 个项目, 主要内容包括: 传感器检测技术基础知识, 电阻式传感器, 电感式传感器, 电容式传感器, 磁电式传感器, 压电式传感器, 热电式传感器, 光电式传感器, 数字式传感器, 传感器的标定与选用和传感器抗干扰技术、微机接口技术。

本书可作为高等院校机电一体化技术类、电子信息类等专业的教材, 也可作为成人教育、职业培训的教材, 还可作为生产技术管理人员及其他工程技术人员参考和自学用书。

传感器与检测技术项目化教程

主 编: 王 森 耿俊梅
封面设计: 华盛英才
出版发行: 中国建材工业出版社
地 址: 北京市西城区车公庄大街 6 号
邮 编: 100044
经 销: 全国各地新华书店
印 刷: 北京天宇万达印刷有限公司
开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16
印 张: 18
字 数: 416 千字
版 次: 2013 年 1 月第 1 版
印 次: 2013 年 1 月第 1 次印刷
书 号: ISBN 978-7-5160-0276-6
定 价: 38.00 元

本社网址: www.jcbs.com.cn

本书如出现印装质量问题, 由我社发行部负责调换。联系电话: (010) 88386906

前言

我国“两弹一星”的元勋、“航天之父”、著名科学家钱学森明确指出：“发展高新技术，信息技术是关键；信息技术包括测量技术、计算机技术和通信技术；测量技术是关键和基础。”作为测量和测试技术集中体现的仪器科学与技术学科，在当今我国国民经济和科学技术发展中的作用日益明显。正如著名科学家、资深两院院士王大珩指出的，“仪器仪表是工业生产的‘倍增器’，科学研究的‘先行官’，军事上的‘战斗力’，国民活动中的‘物化法官’，应用无所不在”。这已广为人们所理解。

传感器技术是信息产业的三大支柱之一，传感器在机械电子工程、控制、测试、计量等领域，都是必不可少的获取信息的关键部件。测试技术是信息技术的重要组成部分，在科学实验、工业过程控制等许多活动中都要以测试为基础。测试工作不仅为这些活动提供可靠的技术保证，也成为提高科学研究水平、提高产品质量和经济效益的必不可少的技术手段。因此，传感器技术与测试技术二者是相辅相成共同发展的。我国高等院校的许多专业都开设和传感器与测试技术相关的课程，其目的就是为了适应社会信息化的发展，使大学生将来能够更好地为社会服务。

本书从实用角度出发，根据我国最新发布的《传感器通用术语》国家标准（GB/T 7665—2005），主要介绍常用传感器的工作原理、外特性及基本应用电路，并介绍了选择和应用传感器的基本技能。

全书共分 11 个项目，主要内容包括：传感器检测技术基础知识，电阻式传感器，电感式传感器，电容式传感器，磁电式传感器，压电式传感器，热电式传感器，光电式传感器，数字式传感器，传感器的标定与选用和传感器抗干扰技术、微机接口技术。

针对高职教育的特点，我们在教材的编写过程中特别重视理论与实际应用相结合。为此，本书作了以下方面的考虑：

①注重理论知识，基础理论知识尽量做到全而不深，通俗易懂。目前一些高职院校为加强对学生职业能力的培养，过分强调操作能力，忽略了基础理论知识的讲授，以致学生在实际工作中后劲不足，上升空间有限，结果导致高职学生所学知识缺乏含金量，最终成为简单的“操作工”。

②突出实践性，每一种类型的传感器，在工作原理之后都有相应的应用案例；并且专门给出了几种典型工程参数的测试过程。

本书可作为高等院校测控技术与仪器、机电一体化、电子信息工程、检测技术、自动化和仪器仪表、机械设计制造及其自动化、电气工程及其自动化、通信工程、光信息科学与技术、电子信息科学与技术等专业的教材，也可作为其他相近专业的学习参考书，同时可供与上述领域相关专业的科研人员和工程技术人员参考。

在本书的编写过程中，参考了相关著作和论文，在此特向相关作者表示衷心的感谢！

由于传感器技术、测试技术知识面广，而编者水平有限，书中不足之处在所难免，恳请专家和广大读者多提宝贵意见，以便在今后的重印或再版中改进和完善。

编者

目 录

项目一 传感器检测技术基础知识	1
任务一 传感器的基本概念	2
任务二 传感器静态、动态特性	14
任务三 传感器的技术性能指标及改善性能的途径	24
任务四 传感器检测技术发展趋势	28
思考与练习	34
项目二 电阻式传感器	35
任务一 电位器式传感器	35
任务二 应变式传感器	40
任务三 压阻式传感器	66
思考与练习	76
项目三 电感式传感器	78
任务一 自感式电感传感器	78
任务二 差动变压器式传感器	82
任务三 了解零点残余电压	85
任务四 电涡流式传感器	86
任务五 压磁式传感器	90
思考与练习	94
项目四 电容式传感器	96
任务一 电容式传感器的结构类型和特征	96
任务二 电容式传感器的测量转换电路	104
任务三 测量误差及改进措施	112
任务四 电容式传感器的应用	116
任务五 了解容栅式传感器	122
思考与练习	126
项目五 磁电式传感器	127
任务一 霍尔式传感器	127
任务二 磁阻式传感器及磁敏二、三极管	137
思考与练习	143
项目六 压电式传感器	145
任务一 压电效应及常数、电荷的计算	145
任务二 了解压电材料	152

任务三 了解压电元件的组合形式·····	155
任务四 压电式传感器的等效电路·····	156
任务五 压电、电荷放大器·····	157
任务六 加速度传感器和力传感器·····	162
任务七 压电式传感器精度的影响因素·····	171
思考与练习·····	174
项目七 热电式传感器 ·····	175
任务一 热电阻式传感器·····	175
任务二 了解热电偶·····	181
任务三 半导体式传感器·····	192
任务四 温度传感器、仪表的选用·····	197
思考与练习·····	200
项目八 光电式传感器 ·····	202
任务一 光电效应与光电元件·····	202
任务二 光电式传感器的应用·····	216
任务三 光纤传感器·····	219
任务四 红外传感器·····	223
思考与练习·····	227
项目九 数字式传感器 ·····	229
任务一 光栅传感器·····	229
任务二 感应同步器·····	237
任务三 绝对编码器与增量编码器·····	243
思考与练习·····	250
项目十 传感器的标定与选用 ·····	252
任务一 传感器的标定与校准·····	252
任务二 传感器的选用原则·····	263
思考与练习·····	265
项目十一 传感器抗干扰技术、微机接口技术 ·····	266
任务一 传感器抗干扰技术·····	266
任务二 微机接口技术·····	272
思考与练习·····	279
参考文献 ·····	281

项目一

传感器检测技术基础知识



项目简介

著名俄罗斯化学家德·伊·门捷列夫说过,科学是从测量开始的。仪器是对物质世界的信息进行测量与控制的基础手段和设备,是我们认识世界的工具。而传感器技术又是我们认识世界的“先行官”,它和通信技术及计算机技术一起,完成对信息的获取、传输和处理,形成了信息技术系统的“感官”“神经”和“大脑”三大组成部分,构成了 Collection、Communication and Computer,即 3C 技术。其中“感官”是信息的“先行官”,因此传感器是信息获取系统的首要部件,是现代信息技术的源头。传感器技术已不再被视为制造产业的一个附属技术,它是现代信息技术和物联网技术的关键和基础。

在现代科学技术和生产力的推动下,测量控制与仪器仪表已成为完整的仪器科学与技术学科,它作为一个工程性学科,承担着各类仪器研究、开发、制造和应用的任務,包括有关新仪器的设计、制造,各类仪器运行、应用的基础理论研究,新技术、新器件、新材料、新工艺的开发研究及相关的传感器、元器件和材料等领域的研究工作。

由中国科学技术协会主编、中国仪器仪表学会编写的《2006—2007 仪器科学与技术学科发展报告》中指出:

“传感技术不仅是检测的基础,它也是控制的基础。这不仅是因为控制必须以检测输入的信息为基础,而且是由于控制达到的精度和状态必需被感知所决定的,否则,不明确控制效果的控制仍然是盲目的。信息获取、传感器技术是仪器科学与技术学科的基础技术;新型传感器是发展高水平测量控制仪器仪表的基础。传感器技术已成为制约测量控制仪器仪表发展的瓶颈。

新型传感器及信息获取、传感器技术主要是对客观世界有用信息的检测,它包括有用被测量敏感技术,涉及各学科工作原理、遥感遥测、新材料等技术、信息融合技术、传感器制造技术等。信息融合技术涉及传感器分布、微弱信号提取(增强)、传感信息融合、成像等技术;传感器制造技术涉及微加工、生物芯片、新工艺等技术。”

传感器制造技术是涉及传感器的机理研究与分析、设计与研制、材料与工艺、性能评估与应用等的综合性技术,是一门以传感器为核心逐渐外延,与测量学、物理学、微电子学、光学与光电子学、机械学、材料学、计算机科学等多门学科和多种技术相互交叉、互相渗透和结合的现代科学技术。

随着现代测量技术、控制技术、自动化技术和物联网技术的发展,传感器技术越来越受

到人们的重视,传感器检测技术在国民经济各领域和宇航、军工等国防建设中的应用也越来越广泛。

检测技术是多门学科和多种技术的综合应用技术,它涉及信息论、数理统计、电子学、光学、精密机械,以及传感技术、计量测试技术、自动化技术、微电子技术和计算机应用技术等学科知识和近代技术。

检测技术,有时也称为测试技术,它包含测量和检测(试验)两部分。测量,就是把被测对象中的某种信息测出来,并加以度量;检测是指利用各种物理效应及化学效应,将生产、科研及日常生活诸方面的检测系统中所存在的某种信息,通过某种合适的方法与装置,人为地把它激发出来,并加以检查与测量,给出定性或定量的结果。

“传感器与检测技术项目化教程”是一门涉及传感器技术、电工电子技术、光电检测技术、控制技术、计算机技术、数据处理技术、精密机械设计技术等众多基础理论和技术的综合性技术。现代检测系统通常是集光、机、电、计算机于一体,软硬件相结合。

因此,要学好“传感器与检测技术项目化教程”,必须要有良好的高等数学、大学物理、模拟电子技术、数字电子技术、电路分析基础、测控电路、信号与系统、概率论与数理统计等先修课程的基础。本课程要求学生掌握传感器的基本概念、基本特性、基本测量电路及其应用,了解改善性能途径、传感器的标定和校准方法,同时了解其他现代新型传感器和传感器技术的发展,并着重培养学生熟练掌握各类传感器(包括电阻式、电感式、电容式、压电式、磁电式、热电式、光电式、数字式和光纤传感器等)的工作原理、组成结构、主要特性及其在生产过程和日常生活中的典型应用和选用原则,了解并掌握传感器检测系统。

本课程是一门实践性很强的课程,在理论学习的同时,要求学生通过一系列实验和实践来熟练掌握各类典型传感器的基本原理及其应用,达到理论与实践高度统一,突出能力的培养。

本项目将简要阐述传感器的基本概论、传感器的基本特性、传感器的技术性能指标及改善性能的途径,以及传感器技术的现状与发展。

任务一 传感器的基本概念

一、传感器的定义与组成

1. 传感器的定义

在国外,如美国,transducer 和 sensor 是通用的,均称为传感器;英国则称 sensor 为传感器、敏感元件,而将 transducer 称为变换器、换能器。通常将传感器(sensor)定义为接收信号或激励并以电信号进行响应的装置,而变换器(transducer)则是把一种能量转换成另一种能量的转换器。不过,实际上这两个术语常常交替使用。国际电工委员会(IEC, International Electrotechnical Committee)将传感器定义为“传感器是测量系统中的一种首要部件(primary element),它将输入变量转换成可供测量的电信号”。

根据我国 2005 年 7 月 29 日发布的《传感器通用术语》国家标准(GB/T 7665-2005),传感器(transducer/sensor)的定义为:能感受被测量并按照一定的规律转换成可用输出信号

的器件或装置,通常由敏感元件和转换元件组成。

在该标准中,同时附有三条注释。

注(1):敏感元件(sensing element)是指传感器中能直接感受或响应被测量的部分。

注(2):转换元件(transducing element)是指传感器中能将敏感元件的感受或响应的被测量转换成适于传输或测量的电信号部分。

注(3):当输出为规定的标准信号时,则称为变送器(transmitter)。

根据这一定义,可获得关于传感器的以下几方面的信息:

- ①传感器是一种测量“器件或装置”,能完成检测任务;
- ②它的输入量是某一“被测量”,它可能是物理量,也可能是化学量、生物量等;
- ③它的输出量是“可用”的信号,便于传输、转换、处理和显示等,这种信号可以是气、光、电等物理量,但主要是易于处理的电物理量,如电压、电流、频率等;
- ④输出输入之间的对应关系应具有“一定的规律”,且应有一定的精确程度,可以用确定的数学模型来描述;

⑤将传感器和变送器的概念明确区分开来,当传感器(transducer/sensor)的输出为“规定的标准信号”时,则称之为变送器(transmitter)。所谓的“规定的标准信号”,即是指新的国家标准规定的若以电流形式输出,标准信号应为 $4\sim 20\text{mA}$;若以电压形式输出,标准信号应为 $1\sim 5\text{V}$ (旧国家标准规定电流输出为 $0\sim 10\text{mA}$,电压输出为 $0\sim 2\text{V}$)。

由传感器的定义可知,传感器的基本功能是检测被测量信号和信号的转换。因此,传感器总是处于检测系统的源头,是获取信息的先行官,因此传感器对整个检测系统至关重要。

对现有的以及正在发展中的检测系统来说,如果说电子计算机相当于人的大脑(即电脑),而相应于人的感官部分接受外界信息的装置就是传感器。传感器是人类感官的扩展和延伸,传感器的功能可与人类五大感觉器官相比拟:光敏传感器——视觉;声敏传感器——听觉;气敏传感器——嗅觉;化学传感器、微生物传感器——味觉;力敏、温敏、流体传感器——触觉。因此,传感器又可称为“电五官”。

2. 传感器的组成

根据传感器的定义还可知,传感器的基本组成为敏感元件和转换元件两部分,它们分别完成检测和转换两个基本功能。例如,应变式测力传感器,其测量框图如图 1-1 所示,其基本组成部分即为弹性元件(力敏元件)和应变片(转换元件)两部分,弹性元件对所测的力“敏感”并将力变成弹性元件的变形,而应变片则将该变形“转换”成电阻的变化。

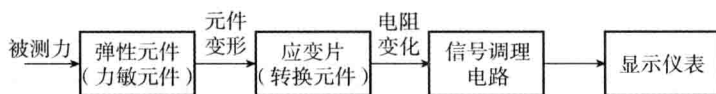


图 1-1 应变式测力传感器的测量框图

值得指出的是,一方面,并不是所有传感器都能明显地区分敏感元件和转换元件这两个部分,如半导体气敏或湿度传感器、热电偶、压电晶体、光电器件等,它们一般能将感受到的被测量直接转换为电信号输出,即将敏感元件和转换元件两者的功能合二为一了;另一方面,仅由敏感元件和转换元件组成的传感器通常输出信号较弱,还需要信号调理电路将输出信号进行放大并转换为容易传输、处理、记录和显示的形式。信号调理电路的作用是:把来

自传感器的信号进行转移和放大,使其更适合于作进一步处理和传输,多数情况下是将各种电信号转换为电压、电流、频率等少数几种便于测量的电信号;进行信号处理,即对经过调理的信号,进行滤波、调制和解调、衰减、运算、数字化处理等。

常见的信号调理与转换电路有放大器、电桥、振荡器、电荷放大器、滤波器等。另外,传感器的基本部分和信号调理电路,还需要辅助电源提供工作能量。

因此,传感器的组成部分可由图 1-2 所示。

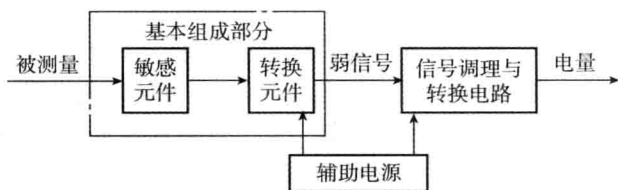


图 1-2 传感器的组成部分

二、传感器的基础定律

传感器的共性就是利用物理定律或物质的物理、化学、生物特性,将非电量(如位移、速度、加速度、力等)的信号输入转换成电量(如电压、电流、电容、电阻等)信号输出。

传感器之所以能正确地传递信息和信息转换,成为现代信息技术的源头,是因为它遵循并利用了自然规律中的各种定律、法则和效应。

1. 守恒定律

守恒定律是自然科学中最重要也是最基本的定律,它是自然界普遍遵守的定律之一,即某一种物理量,它既不会自行产生,也不会自行消失,其总量守恒不变。它包括:能量守恒定律、质量守恒定律、动量守恒定律、角动量守恒定律、电荷守恒定律及信息守恒定律等。

下面对能量守恒定律、动量守恒定律、电荷守恒定律分别进行说明。

(1) 能量守恒定律

能量守恒定律可表述为:在自然界里任何与周围隔绝的物质系统(孤立系统)中,不论发生什么变化或过程,能量的形态虽然可以发生转换,但能量的总和保持不变。非孤立系统由于与外界可以通过作功或传递热量等方式发生能量交换,它的能量会有改变,但它增加(或减少)的能量值一定等于外界减少(或增加)的能量值。所以从整体看来,能量之和仍然是不变的。这个规律称为“能量守恒和转化定律”。它是自然科学中关于物质运动的最重要的普遍定律之一。

这一定律包括定性和定量两个方面,在性质上它确定了能量形式的可变性,在数值上肯定了自然界能量总和的守恒性。一种能量的减少,总是伴随某种能量的增加,一减一增,其数值相等。由于各种不同形式的运动(如机械运动、热运动、电磁运动等)都具有相应的能量,因而这一定律是人类对自然现象长期观察和研究的经验总结。

(2) 动量守恒定律

动量守恒定律也是物理学中的重要定律之一。它可表述为:任何物质系统(包括质点)在不受外力作用或所受外力之和为零时,它的总动量保持不变。若所受外力之和不为零,但

在某一方向上的分力之和为零时,则总动量在该方向的分量保持不变。

(3)电荷守恒定律

电荷守恒定律也是自然科学中的基本定律之一。在一个与外界不发生电荷交换的孤立系统中,所有正负电荷的代数和保持不变。

它也可表述为:电荷既不能被创造,也不能被消灭,它们只能从一个物体转移到另一个物体,或者从物体的一部分转移到另一部分,也就是说,在任何物理过程中电荷的代数和是守恒的。

利用守恒定律可以构成传感器,例如利用差压原理进行流量测量的传感器,其基本测量原理就是以能量守恒定律、伯努利方程和流动连续性方程为基础的。

2. 场的定律——关于物质作用的定律

物理学上“场”的概念最早是由英国物理学家法拉第和麦克斯韦在电磁场理论的研究中确立的。法拉第首先提出了磁力线和电力线的概念,在电磁感应、电化学及静电感应的研究中进一步深化和发展了力线思想,并第一次提出“场”的思想,建立了电场、磁场的概念。后来,经麦克斯韦与赫兹进一步研究,经典电磁场论得到确立。在经典电磁学的建立与发展过程中,形成了电磁场的概念。

现在人们认识到电磁场是物质存在的一种特殊形式。电荷在其周围产生电场,这个电场又以力作用于其他电荷。磁体和电流在其周围产生磁场,而这个磁场又以力作用于其他磁体和内部有电流的物体。电磁场也具有能量和动量,是传递电磁力的媒介,它弥漫于整个空间。

随着科学技术的发展,场的概念已经远远超出了电磁学的范围。场成了非常基本、非常普遍的概念。在现代物理学中,所谓物理场,即相互作用场,是物质存在的两种基本形态之一,存在于整个空间,是指某一空间范围及其各种事物分布状况的总称。电场、磁场、引力场、光电磁场、声场、热场等都是物理场,而物理场是空间中存在的一种物理作用或效应,分布在引起它的场源体周围。实物之间的相互作用就是依靠有关的场来实现的,例如,在电磁场中,带电粒子受到电磁力的作用;在引力场中,两个物体之间受到万有引力的相互作用。

场本身有能量、动量和质量,而且在一定条件下可以和实物相互转化。根据量子场论的观点,场与基本粒子有不可分割的联系,即一切基本粒子都可以看做相应场的最小单位(量子),例如,光子是物质的基本粒子,光子联系于电磁场,电子联系于电子场等。这样,一切相互作用都可归结为有关场之间的相互作用。按照这种观点,场和实物并没有严格的区别。

场的定律,如电磁场感应定律、光电磁场干涉现象、动力场的运动定律等,都是关于物质作用的客观规律。这些规律所揭示的是物体在空间排列和分布状态与某一时刻的作用有关的客观规律,一般可用物理方程给出。这些方程就是某些传感器工作的数学模型,与这些定律有关的参数通常和具体物质的内部结构(如成分、材料等)无关,而与物质在空间的位置及分布状态和某时刻的作用有关。

例如,由电磁感应定律:导体回路中感应电动势的大小与穿过回路的磁通量的变化率 $d\Phi/dt$ 成正比。感应电动势 E 为

$$E = -K \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-1)$$

其中, K 为比例常数。当 $d\Phi$ 的单位为 Wb , t 的单位为 s 时, E 的单位为 V 时, $K=1$ 。

而当线圈在恒定磁场中以速度 v 作切割磁力线运动时, 则在线圈中产生的感应电动势 E 与运动速度 v 成正比, 那么, 感应电动势 E 可表示为

$$E = -BlvN\sin\theta \quad (1-2)$$

式中: N 为线圈匝数; l 为每匝线圈平均长度; B 为磁感应强度; θ 为线圈运动方向与磁场方向的夹角。

利用电磁感应定律可以构成磁电感应式(或称电动式)传感器, 如自感式传感器、互感式传感器、感应同步器和电涡流式传感器等, 可用来测量位移、运动速度、振动等多种物理量。

又如, 利用静电场的有关定律制成电容传感器。静电场中两平行电极板间的电容量 C 为

$$C = \frac{\epsilon S}{\delta} = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 S}{\delta} \quad (1-3)$$

式中: S 为极板相对覆盖面积; δ 为极板间距离; ϵ_r 为相对介电常数; ϵ_0 为真空介电常数, $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$; ϵ 为电容极板间介质的介电常数。

当被测量的变化使式中的 δ 、 S 和 ϵ_r 中的某一项或几项发生变化时, 电容量 C 就随之发生变化。 δ 和 S 的变化可以反映线位移或角位移的变化, 也可间接反映压力、加速度等的变化; ϵ_r 的变化则可反映液面的高度、材料厚度等的变化。这就可以制成测量各种物理量的电容式传感器。

波是场的一种运动形态, 光波是一种广泛存在的电磁波。利用光电磁场的基本定律, 如光的直线传播定律、光波之间的相互作用, 如干涉、衍射、偏振现象、光的多普勒效应等, 可以制成影像、干涉、衍射、偏振及光栅、光学码盘等各式各样的传感器和测量装置。

利用场的定律所构成的传感器, 其性能由定律决定, 而与所使用的材料无关, 例如差动变压器, 铁芯可以使用坡莫合金或铁氧体制成, 绕组可使用铜线或其他导线制成, 都是利用电磁感应定律作为差动变压器而工作。这类传感器的形状、尺寸等参数决定了传感器的量程、灵敏度等性能, 也即传感器的工作原理是以传感器中元件相对位置的变化而引起场的变化为基础, 而不是以材料特性变化为基础。因此, 这类传感器统称为结构型传感器。这类传感器具有设计的自由度较大、选择材料的限制较小等优点, 但一般体积较大, 并且不容易集成。

3. 物质定律

物质定律是表示各种物质本身内在性质的定律、法则、规律等。这些定律通常以物质所固有的物理常数加以描述, 并决定着传感器的主要性能, 即定律是定义各种物理常数的公式。一般来说公式是近似的, 超过某些范围就不成立。如胡克定律, 欧姆定律及各种效应等。

利用各种物质定律构成的传感器统称为物性型传感器。这些传感器的主要性能在很大程度上受相应的物理常数或化学、生物特性所决定, 也即物性型传感器的性能是随材料的不同而不同的。例如, 利用半导体物质具有的压阻、压电、热阻、光阻、湿阻和霍尔等效应, 可以分别制成力、压力、温度、光强、湿度和磁场等传感器; 利用压电材料所具有的压电效应可制成压电式、声表面波和超声波等传感器; 利用生物、化学敏感特性制成生物、化学传感器等。

由于利用物质定律的物性型传感器具有构造简单、体积小、无可动部件及反应快、灵敏度高、稳定性好、易集成等特点,因此是当代传感技术领域中具有广阔发展前景的传感器。

与物质所固有的物理常数有关的各种现象可分为三大类:热平衡现象、传输现象和量子现象。关于这些现象,可参考相关的参考书。

4. 统计定律

统计定律是对大量偶然事件整体起作用的定律,它表现了这些事物整体的本质和必然的联系。

5. 传感器的基础效应

物性型传感器是利用某些物质(如半导体、陶瓷、压电晶体、强磁性体和超导体等)的物理性质随外界待测量的作用而发生变化的原理制成的。它利用了诸多的效应(包括物理效应、化学效应和生物效应)和物理现象,如利用材料的压阻、压电、湿敏、热敏、光敏、磁敏、气敏等效应,把应变、力、湿度、温度、位移、磁场、煤气浓度等被测量转换成电量。而新原理、新效应(如约瑟夫逊效应等)的发现和利用,新型材料的开发和应用,使传感器得到很大发展,并逐步成为传感器发展的主流。因此,了解传感器所基于的各种效应,对传感器的深入理解、开发和使用是非常必要的。主要物性型传感器所基于的效应及所使用的材料如表 1-1 所示。

表 1-1 主要物性型传感器所基于的效应及所使用的材料

检测对象	类型	所基于的效应	输出信号	传感器或敏感元件举例	主要材料
光	量子型	光导效应	电阻	光敏电阻	可见光: CdS, CdSe, α -Si; H
					红外: PbS, InSb
		光生伏特效应	电流、电压	光敏二极管、光敏三极管、光电池	Si, Ge, InSb(红外)
				光电管, 光电倍增管	Pt-Si
		光电子发射效应	电流	肖特基光敏二极管	Ag-O-Cs, Cs-Sb
		约瑟夫逊效应	电压	红外传感器	超导体
	热型	热释电效应	电荷	红外传感器, 红外摄像管	BaTiO ₃
机械量	电阻式	电阻应变效应	电阻	金属应变片	康铜, 卡玛合金
		压阻效应		半导体应变片	Si, Ge, GaP, InSb
	压电式	压电效应	电压	压电元件	石英, 压电陶瓷, PVDF
		正、逆压电效应	频率	声表面波传感器	石英, ZnO+Si
	压磁式	磁致伸缩效应 压磁效应	感抗 电压	压磁元件, 力、扭矩、 转矩传感器	硅钢片, 铁氧体, 坡莫合金
	磁电式	霍尔效应	电压	霍尔元件, 力、压力、 位移传感器	Si, Ge, GaAs, InAs
	光电式	光电效应	电流, 电压	各种光电器件, 位移、 振动、转速传感器	Si, CdS 等, 参见光电式传感器
		光弹性效应	折射率	压力、振动传感器	

续表

检测对象	类型	所基于的效应	输出信号	传感器或敏感元件举例	主要材料
温度	热电式	塞贝克效应	电压	热电偶	Pt-PtRh ₁₀ , NiCr-NiCu, Fe-NiCu
		约瑟夫逊效应	噪声电压	绝对温度计	超导体
		热释电效应	电荷	驻极体温敏元件	PbTiO ₃ , PVF ₂ , TGS, LiTaO ₃
	压电式	正、逆压电效应	电压,频率	声表面波温度传感器	石英
	热型	热磁效应	电场	Nernst 红外探测器	热敏铁氧体,磁钢
磁	磁电式	霍尔效应	电压	霍尔元件	Si,Ge,GaAs,InAs
				霍尔 IC,MOS 霍尔 IC	Si
		磁阻效应	电阻	磁阻元件	Ni-Co 合金,InSb,InAs
			电流	PIN 二极管,磁敏晶体管	Ge
		约瑟夫逊效应	噪声电压	超导量子干涉器件 (SQUID)	Pb,Sn,Nb-Ti
	光电式	磁光法拉第效应	偏振光面偏转	光纤传感器	YAG,EuO,MnBi
		磁光克尔效应			MnBi
放射线	光电式	放射性效应	光强,电流	光纤射线传感器	加钛石英
	量子型	PN 结光生伏特效应	电脉冲	射线敏二极管,PIN 二极管	Si,Ge,掺 Li 的 Ge,Si
		肖特基效应	电流	肖特基二极管	Au-Si
湿度	电阻型	吸附效应	电阻,电导率	金属氧化物湿敏传感器	LiCl,MgCr ₂ O ₄ -TiO ₂
	电容型	吸附效应	电容,电压	有机,高分子湿敏传感器	醋酸丁酸,聚苯乙烯、聚酰亚胺

这些基础效应的基本原理大多数将在本书后续的相关项目中作较详细的介绍。读者还可通过查阅一些专著对这些效应作进一步的深入了解,并对表 1-1 的内容作进一步的补充和充实。

三、传感器的分类

传感器的种类繁多,一种被测量可以用不同类型的传感器来测量,而同一原理的传感器通常又可测量多种被测量,因此,对传感器的分类方法各不相同,目前尚没有统一的分类方法。一般常见的分类方法有以下几种(见表 1-2)。

表 1-2 传感器的典型分类

分类方法	传感器的类型	说 明
按基本效应分类	物理型、化学型、生物型	分别以效应命名为物理、化学、生物传感器
按构成原理分类	结构型 物性型	以其转换元件结构参数变化实现信号转换 以其转换元件结构物理特性变化实现信号转换
按能量关系(传感器的能源)分类	能量转换型(自源型)(无源传感器) 能量控制型(外源型)(有源传感器)	传感器输出量直接由被测量能量转换而得 传感器输出量能量由外源供给但受被测输入量控制
按作用原理分类	应变式、电容式、压电式、热电式等	以传感器对信号转换的作用原理命名
按输入量分类	位移、压力、温度、流速、气体、振动、温度、湿度、黏度等	以被测量命名(即按用途分类法)
按敏感材料分类	半导体、光纤、陶瓷、高分子材料、复合材料等	以使用的敏感材料命名
按输出信号分类	模拟式 数字式	输出量为模拟信号 输出量为数字信号
按与被测对象的空间关系分类	接触式传感器 非接触式传感器	传感器与被测对象之间没有空隙 传感器与被测对象之间有一定的空间距离
按与某种高新技术结合分类	集成、智能、机器人、仿生等	按所基于的高新技术命名

1. 按照传感器的工作机理分

即按照感知被测量(外界信息)所依据的基本效应的科学属性,可以将传感器分成三大类:基于物理效应(如光、电、声、磁、热效应等)进行工作的物理传感器;基于化学效应(如化学吸附、离子化学效应等)进行工作的化学传感器;基于生物效应(利用生物活性材料如酶、微生物、抗体、DNA、蛋白质、激素等分子作用和识别功能)的生物传感器。本书涉及的传感器主要是物理传感器。

2. 按照传感器的构成原理分

物理传感器按照构成原理或结构的性质可分为结构型传感器和物性型传感器两大类。

正如前面所述,结构型传感器是遵循物理学中场的定律构成的,包括动力场的运动定律,电磁场的电磁定律等。这类传感器的特点是,传感器的工作原理是以传感器中元件相对位置变化引起场的变化为基础,而不是以材料特性变化为基础。如电容传感器是利用静电场定律制成的结构型传感器,其极板的形状、距离等的变化均能改变电容传感器的性能。

物性型传感器是基于物质定律构成的,如胡克定律、欧姆定律等。物质定律是表示物质某种客观性质的法则。这种法则,大多数是以物质本身的常数形式给出的。这些常数的大

小决定了传感器的主要性能。因此,物性型传感器的性能随材料的不同而异。如压阻式压力传感器就是利用半导体材料的压阻效应制成的物性型传感器,即使是同一种半导体,如掺杂材料不同或掺杂浓度不同,其压阻效应就不同。属光电传感器类的光电管的特性与涂覆在电极上的材料密切相关。

3. 按照传感器的能量转换情况分

按照传感器的能量转换情况分,传感器可分为能量转换型传感器和能量控制型传感器。

能量转换型传感器犹如一台微型发电机,能将非电功率转换为电功率,传感器起能量转换的作用,因此又称为发电型传感器。传感器输入量的变化可直接引起电量的变化。如热电效应中的热电偶,当温度变化时,直接引起输出的电动势改变。基于压电效应的压电传感器、光电动势效应的光电传感器等都属于此类传感器。能量转换型传感器一般不需外部电源或外部电源只起辅助作用,它的输出能量是从被测对象上获取的,所以又称自源型传感器,或称无源传感器。其后续的信号调理电路通常是信号放大器。

能量控制型传感器是指在信息变化过程中,其变换的能量需要由外部电源供给,而外界的变化(即传感器输入量的变化)只起到控制的作用,所以又称外源型传感器,或有源传感器。例如,用电桥测量电阻温度的变化时,电桥中的热敏电阻阻值的变化受外界温度的变化的控制,而要使电桥的输出发生变化,必须有辅助能源(电源)对电桥供电,作为外部激励源。基于应变电阻效应、磁阻效应、热阻效应、光电效应、霍尔效应等的电阻式、电感式、电容式和霍尔式传感器等属于此类传感器。无源传感器本身不是一个信号源,所以后续的信号调理电路通常是电桥或谐振电路。

4. 按照传感器的工作原理分

按照传感器对信号转换作用的原理可将传感器分为以下几种。

1) 电路参量式传感器:包括电阻式,电感式,电容式三种基本形式,以及由此衍生出来的差动变压器式,涡流式,压磁式,感应同步器式,容栅式等。

2) 压电式传感器。

3) 磁电式传感器:包括磁电感应式,霍尔式,磁栅式等。

4) 光电式传感器:包括一般光电式,光栅式,光电码盘式,光纤式,激光式,红外式,固态图像式等。

5) 热电式传感器。

6) 波式传感器:包括超声波式,微波式等。

7) 射线式传感器。

8) 半导体式传感器。

9) 其他原理的传感器。

按照工作原理分类,有利于理解传感器的工作原理、工作机理。

5. 按照被测量或输入信号分

例如可把被测的机械量传感器分为位移、速度、流量、力、压力、振动、温度、湿度及黏度、密度传感器等。

有时把被测量进一步归类,将物理量分为机械量、热学、电学、光学、声学、磁学、核辐射传感器等;化学量分为气体、离子、湿度传感器等;生物量分为生物、微生物、酶、组织、免疫传

传感器等。

按被测量分类的方法体现了传感器的功能和用途,有利于用户有针对性地选择传感器。在许多情况下,往往将按照工作原理分类和按照被测量分类两种方法综合使用,如应变式压力传感器、压电式加速度传感器、光电码盘式转速传感器等。

6. 按照传感器使用的敏感材料分

按照传感器使用的敏感材料分,传感器可分为半导体传感器、光纤传感器、陶瓷传感器、高分子材料传感器、复合材料传感器、智能材料传感器等。

7. 按照传感器输出信号分

按照传感器输出信号分,传感器可分为模拟量传感器和数字量(开关量)传感器。

8. 按照传感器与被测对象的空间关系分

根据传感器与被测量之间有没有空间间隙,传感器可分为接触式传感器和非接触式传感器。

9. 按照与某种高新技术结合的情况分

根据与某种高新技术结合的情况,可按所基于的高新技术命名传感器,如集成传感器、智能传感器、机器人传感器、仿生传感器、纳米传感器及传感器网络等。

上述分类尽管有较大的概括性,但由于传感器是知识密集、技术密集的门类,它是与许多学科交叉的现代科学技术,种类十分繁多,至今又不统一,因此各种分类方法都具有相对的合理性。从学习的角度来看,按传感器的工作原理分类,对理解传感器的工作原理、工作机理很有利;而从使用的角度来看,按被测量(或输入信息)分类,为正确选择传感器提供了方便。

四、传感器的命名方法及代号

根据我国 2005 年 7 月 29 日发布的《传感器命名法及代码》国家标准(GB/T 7666-2005),对传感器的命名方法及代码(代号)作如下规定。

1. 传感器命名方法

(1)命名法的构成

一种传感器产品的名称,应由主题词加四级修饰语构成。

1)主题词——传感器。

2)第一级修饰语——被测量,包括修饰被测量的定语。

3)第二级修饰语——转换原理,一般可后续以“式”字。

4)第三级修饰语——特征描述,指必须强调的传感器结构、性能、材料特征、敏感元件及其他必要的性能特征,一般可后续以“型”字。

5)第四级修饰语——主要技术指标(如量程、测量范围、精度、灵敏度等)。

(2)命名法范例

1)题目中的用法。本命名法在有关传感器的统计表格、图书索引、检索及计算机汉字处理等特殊场合,应采用上述命名法的构成所规定的顺序。

示例 1:传感器,位移,应变[计]式,100mm。

注[]内的词,在不引起混淆时,可省略。