



中等职业教育国家规划教材
全国中等职业教育教材审定委员会审定

传感器及应用

(机电技术应用专业)

王煜东 主编

212-43
8



机械工业出版社



326

TP211-4

V.15

中等职业教育国家规划教材
全国中等职业教育教材审定委员会审定

传感器及应用

(机电技术应用专业)

主 编 王煜东
参 编 王兴举 马 琳
胡海清 冀秀焕
责任主审 罗圣国
审 稿 人 马祥华 陈 工



机械工业出版社

本书以传感器的应用为目标,从应用角度出发,系统地介绍了传感器的原理、特性及应用。书中用较多的篇幅介绍了现代新型传感器及传感器的应用方法和实例,内容丰富新颖,涵盖面广,是一本能够适应经济发展、科技进步和生产实践的实用性和教学功能较强的教科书。

全书共分9章和绪论。书中系统地介绍了传感器的基本知识,重点介绍了电位器式、应变式、电容式、电感式、电涡流式、压电式、超声波、霍尔式、光电式(引入了紫外线、热释电、CCD、PSD及色彩传感器)、光纤式、热敏、气敏、湿敏、离子敏、频率式及数字式(数字编码器、感应同步器、磁栅及光栅)传感器的原理、特性及应用;完整地介绍了抗干扰技术,传感器信号的预处理方法,数据采集及智能化传感器的概念;恰当地介绍了检测仪表的基本组成、种类及应用;列举了传感器在机电设备中的应用实例,其中有在机床、自动化生产线、汽车和家用电器中的应用。

本书避开了过深的理论分析和繁琐的非计算型、非重要概念型的公式及其推导,给出了较多的应用方法和实用资料,语言精练、概念清晰、结构严谨、重点明确;书中适当插入了一些传感器的实物照片以增强直观性和真实感;每章末均附有适当的练习题,便于教学。

本书可作为成人教育、高职高专、职业培训的教材,也可供自动化、电气化、仪表、电器等有关专业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

传感器及应用/王煜东主编. —北京:机械工业出版社, 2002.8
中等职业教育国家规划教材. 机电技术应用专业
ISBN 7-111-10028-X

I. 传... II. 王... III. 传感器-专业学校-教材 IV. TP212

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第044247号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
责任编辑:王小东 版式设计:张世琴 责任校对:张媛
封面设计:姚毅 责任印制:路琳
北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行
2002年7月第1版·第1次印刷
787mm×1092mm¹/₁₆·9.25印张·225千字
0 001—3 000册
定价:11.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010) 68993821、68326677-2527
封面无防伪标均为盗版

中等职业教育国家规划教材出版说明

为了贯彻《中共中央国务院关于深化教育改革全面推进素质教育的决定》精神，落实《面向 21 世纪教育振兴行动计划》中提出的职业教育课程改革和教材建设规划，根据《中等职业教育国家规划教材申报、立项及管理意见》（教职成〔2001〕1 号）的精神，教育部组织力量对实现中等职业教育培养目标和保证基本教学规格起保障作用的德育课程、文化基础课程、专业技术基础课程和 80 个重点建设专业主干课程的教材进行了规划和编写，从 2001 年秋季开学起，国家规划教材将陆续提供给各类中等职业学校选用。

国家规划教材是根据教育部最新颁布的德育课程、文化基础课程、专业技术基础课程和 80 个重点建设专业主干课程的教学大纲编写而成的，并经全国中等职业教育教材审定委员会审定通过。新教材全面贯彻素质教育思想，从社会发展对高素质劳动者和中初级专门人才需要的实际出发，注重对学生的创新精神和实践能力的培养。新教材在理论体系、组织结构和阐述方法等方面均做了一些新的尝试。新教材实行一纲多本，努力为教材选用提供比较和选择，满足不同学制、不同专业和不同办学条件的教学需要。

希望各地、各部门积极推广和选用国家规划教材，并在使用过程中，注意总结经验，及时提出修改意见和建议，使之不断完善和提高。

教育部职业教育与成人教育司

2001.5

前 言

本书是面向 21 世纪中等职业教育国家规划教材,是根据 2001 年颁发的全国中等职业学校机电技术应用专业“传感器及应用”课程教学大纲编写的。

为适应教育改革的现状与发展,以及现代职业教育的特点与规律,本书进行了大胆的改革尝试。全书共分 9 章和绪论:绪论中阐明了传感器的定义、作用、应用领域、发展方向及本课程的性质、任务、特点和学习方法;第 1 章为传感器的基本知识,包括传感器基本概念、常用的物理概念、转换电路及弹性元件;第 2 章将电位器式、应变式、电容式、电感式、电涡流式等无源传感器综合为能量控制型传感器;第 3 章将压电式、超声波、霍尔式、光电式、光纤等传感器综合为物性型传感器,并介绍了近年来发展较快、应用较广的新型光电元件;第 4 章将温度、湿度、气敏、离子敏传感器融合为环境量传感器;第 5 章为频率及数字式传感器;第 6 章为抗干扰技术;第 7 章为传感器与微机的接口技术,介绍了传感器信号的预处理方法、信号放大、数据采集、线性化及标度变换,建立了传感器及检测仪表的智能化概念;第 8 章对常用模拟及数字检测仪表作了简介;第 9 章为传感器在机电设备中的应用,既有传感器在普通机电设备中的应用,又有在现代自动生产线中的应用;既有在已成为重要产业的汽车中的应用,又有在与民生有密切关系的家用电器中的应用,它增强了本课程对能力的培养,具有开发智力、拓宽知识面、扩大视野的功效。本书结构紧凑、内容丰富新颖、具有普遍性和实用性。本书语言简练、通俗易懂,体现了“四新”(新知识、新技术、新工艺、新方法)的精神和科学性、简约性及以人为本位、能力为目标的思想原则。

本书由河南工业职业技术学院王煜东主编,王兴举、冀秀焕、马琳、无锡中德高等职业技术学院胡海清协编。王煜东编写了绪论及第 3、6、8、9 章,其中第 9 章第 2 节由胡海清编写;王兴举编写了第 2、5、7 章;冀秀焕编写了第 4 章;马琳编写了第 1 章。全书由王煜东统稿。

本书由上海第一仪表电子工业学校蔡祖光主审,他认真仔细地审阅了全部书稿,提出了大量宝贵意见,在此表示衷心感谢。在本书编写过程中得到了重庆大学自动化仪表研究所蒙建波教授的帮助及一些企业的支持,提供了不少新的、实用的资料,胡雪梅也作了大量的工作,在此一并表示感谢。

本书是全国中等职业学校机电技术应用专业的国家规划教材,也可作为成人教育、高职高专及职业培训的教材,还可供自动化、电气化、仪表、电器等有关专业的工程技术人员参考。

由于作者水平有限,书中难免有缺点和不妥之处,恳请读者批评指正。

作者

2002 年 1 月

目 录

前言	
绪论	1
练习题	4
第1章 传感器的基本知识	5
1.1 传感器的基本物理概念	5
1.2 传感器的组成与分类	6
1.3 传感器的基本特性	7
1.4 传感器中的弹性敏感元件	10
练习题	15
第2章 能量控制型传感器	16
2.1 电位器式传感器	16
2.2 应变式传感器	18
2.3 电容式传感器	24
2.4 电感式传感器	28
2.5 电涡流式传感器	34
练习题	38
第3章 物性型传感器	39
3.1 压电式传感器	39
3.2 超声波传感器	42
3.3 磁敏传感器	45
3.4 光电式传感器	48
3.5 光纤传感器	57
练习题	61
第4章 环境量传感器	62
4.1 温度传感器	62
4.2 气敏传感器	69
4.3 湿敏传感器	73
4.4 离子敏传感器	77
练习题	78
第5章 频率式及数字式传感器	79
5.1 振弦式频率传感器	79
5.2 数字编码器	81
5.3 感应同步器	83
5.4 磁栅传感器	85
5.5 光栅传感器	86
练习题	89
第6章 抗干扰技术	90
6.1 干扰来源及形式	90
6.2 干扰的抑制技术	93
练习题	96
第7章 传感器与微机的接口技术	97
7.1 传感器信号的预处理方法	97
7.2 传感器信号的放大电路	99
7.3 数据采集	101
7.4 传感器信号的线性化与标度变换	103
7.5 智能化传感器	105
练习题	107
第8章 检测仪表概述	108
8.1 模拟仪表简介	108
8.2 数字仪表简介	111
练习题	114
第9章 传感器在机电设备中的应用	115
9.1 传感器在普通机电设备中的应用	115
9.2 MPS系统中使用的传感器	117
9.3 汽车中的传感器	119
9.4 传感器在家用电器中的应用	123
9.5 传感器的使用与选择	129
练习题	130
附录	131
附录A 几种常用传感器性能比较表	131
附录B 热电偶分度表	132
附录C 热电阻分度表	134
附录D 仪表集成放大电路介绍	135
参考文献	141

绪 论

0.1 传感器的定义

什么是传感器？根据中华人民共和国国家标准（GB7665—1987），传感器是指能感受规定的被测量，并按照一定的规律转换成可用输出信号的器件或装置。对非电量的自动检测与控制常以电信号为载体，因此狭义地说传感器是把被测的非电量转换成电量的器件或装置。传感器的其它称呼还有换能器、探测器等。

0.2 传感器的作用与地位

1. 传感器的作用

现代科学技术使人类社会进入了信息时代，来自自然界的物质信息都需要通过传感器进行采集才能获取。人们把电子计算机比喻为人的大脑，而传感器则可比喻为人的五种感觉器官，并且在诸如高温、高湿、深井、高空等环境及高精度、高可靠性、远距离、超细微等方面是人的感官所不能代替的。传感器的作用可包括信息的收集、信息数据的交换及控制信息的采集。

2. 传感器的应用领域

无论今天还是将来，传感器不仅充当着计算机、机器人、自动化设备的感觉器官及机电结合的接口，而且已渗透到军事和人类生命、生活的各个领域，从太空到海洋，从各种复杂的工程系统到人们日常生活的衣食住行，都已经离不开各种各样的传感器。

(1) 传感器在工业检测和自动控制系统中的应用 在石油、化工、电力、钢铁、机械等工业生产中需要及时检测各种工艺参数的信息，通过电子计算机或控制器对生产过程进行自动化控制。

(2) 传感器在汽车中的应用 目前，传感器在汽车上不只限于测量行驶速度、行驶距离、发动机旋转速度以及燃料剩余量等有关参数，而且对一些新设施：汽车安全气囊、防滑控制等系统，防盗、防抱死、排气循环、电子变速控制、电子燃料喷射等装置以及汽车“黑匣子”等都安装了相应的传感器。例如美国为实现汽车自动化，曾在—辆汽车上安装 90 多只传感器去检测不同的信息。

(3) 传感器在家用电器中的应用 现代家庭中，用电厨具、空调器、电冰箱、洗衣机、电子热水器、安全报警器、吸尘器、电熨斗、照相机、音像设备等都用到了传感器。

(4) 传感器在机器人中的应用 在生产用的单能机器人中，传感器用来检测臂的位置和角度；在智能机器人中，传感器用作视觉和触觉。在日本，机器人成本的二分之一是耗费在高性能的传感器上。

(5) 传感器在人体医学上的应用 在医疗上应用传感器对人体温度、血压、心脑电波及肿瘤等进行准确地诊断。

(6) 传感器在环境保护中的应用 为保护环境, 研制用以监测大气、水质及噪声污染的传感器, 已为世界各国所重视。

(7) 传感器在航空航天中的应用 飞机、火箭等飞行器上, 要使用传感器对飞行速度、加速度、飞行距离及飞行方向、飞行姿态进行检测。

(8) 传感器在遥感技术中的应用 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来探测气象、地质等; 在船舶上利用超声波传感器进行水下探测。

(9) 传感器在军事方面的应用 利用红外探测可以发现地形、地物及敌方各种军事目标; 红外雷达具有搜索、跟踪、测距等功能, 可以搜索几十到上千公里的目标; 其它还有红外制导、红外通信、红外夜视、红外对抗等。再如, 用压电陶瓷制成的压电引信称为弹丸起爆装置, 具有瞬发度高、灵敏度底、不用配置电源等特点, 常用在破甲弹上。

3. 传感器的地位

综上所述, 传感器技术不仅对现代化科学技术、现代化农业及工业自动化的发展起到基础和支柱的作用, 同时也被世界各国列为关键技术之一。可以说“没有传感器就没有现代化的科学技术”, “没有传感器也就没有人类现代化的生活环境和条件”。

0.3 传感器的发展方向

现代科学技术和生产的发展对传感器技术提出了更高的要求, 也为传感器技术提供了丰富的物质手段和技术条件, 因而促进其不断发展。目前, 传感器技术的发展趋向可从以下四个方面进行综述。

1. 不断扩大测量范围

例如为了满足超低温技术开发的需要, 利用超导体的约瑟夫逊效应已开发出能检测 10^{-6} K 超低温传感器; 利用热电偶测温最高可达 3000°C , 辐射温度传感器原理上最高可测 10^5 K, 而要测可控聚核反应的理想温度 (10^8 K) 仍是新的课题; 核磁共振仪的测磁灵敏度已达到胎儿的心脏磁场值 ($\approx 10^{-11}$ T), 但要检测脑磁场值 ($\approx 10^{-12}$ T), 只有 SQUID 器件才能实现。

2. 提高测量精度及可靠性

科学技术的发展对检测精度的要求亦愈来愈高。仍以温度检测为例, 一般实用温度计的测温精度为 $\pm 0.1 \sim \pm 1^{\circ}\text{C}$, 标准铂电阻温度计的精度可达 $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ 。人体各部位的温度分布构成的温度场, 在病变时变化量很小, 需要用精度为 $\pm 10^{-2} \sim 10^{-3}^{\circ}\text{C}$ 的温度计才能检测出来。在用于测量微生物的传感器中, 则需要能分辨出小于 10^{-3}°C 温差的热敏元件。

随着人类探求自然奥秘的范围不断扩大, 检测环境变得越来越复杂, 对传感器可靠性的要求也愈来愈高。例如, 科学探测卫星里装有探测太空的各种参量的传感器, 不仅要求体积小、省电, 而且要求具有极高的可靠性和工作寿命, 能在极低温、强辐射下保持正常工作。

在现代化大规模连续生产过程中同样需要高精度、高可靠性的传感器。

3. 开发新领域与新技术

随着人类活动领域的扩大, 测量对象也在扩展。目前传感器技术正向宏观世界和微观世界发展。航天技术、地球物理学、射电天文技术、海洋科学、地震预测预报、气象学等都要测试技术满足观测、研究宏观世界的要求。细胞生物学、遗传工程、光合作用、医学、超微细加工技术等又希望传感器技术跟上研究微观世界的步伐。传感器的应用领域正向着自然

界无限的物理量、化学量和生物量不断拓展。

开发非接触式传感器取代接触式传感器有着重要的意义。现已开发的非接触式传感器有光、磁、超声波、同位素、微波等。但目前非接触式传感器尚存在精度不高、品类不多等问题，人们正在研究利用新的原理和方法开发新型非接触式传感器。

4. 传感器的微型化与智能化

在大规模集成电路技术和微机技术的支持下，传感器的发展出现了“多样、新型、集成、智能”的趋势。

(1) 新型 其含义有三个方面：

- 1) 采用新型敏感材料、新原理、新效应或新工艺。
- 2) 利用原有的物理、化学效应，根据被测物理量的要求，巧妙地运用于传感技术。如谐振传感器近年来广泛用于温度、湿度、气体和力等参数的测量。
- 3) 利用集成技术和计算机技术开发的新型传感器。

(2) 集成化 其含义也有三个方面：

1) 将众多单体敏感元件集成在同一衬底上，构成一维或二维图像的敏感元件，主要用于光、图像传感器领域。例如作为工业视觉，电荷耦合器件 (CCD) 和 MOS 摄像元件就是典型的例子。

2) 把传感器与放大、运算及温度补偿等环节集成在一个基片上，体积小，重量轻，可靠性和稳定性好。如集成压力传感器就是将硅膜片、压阻电桥、放大器和温度补偿电阻集成为一个器件，称为“热敏晶闸管器件”。

3) 将两种或两种以上敏感元件集成在一起，称为多功能传感器。如用 $\text{MgCr}_2\text{O}_4\text{-TiO}_3$ 陶瓷做成的湿-气敏元件；用 $\text{BaTiO}_3\text{-SrTiO}_3$ 陶瓷材料制成温-湿度传感器等。

(3) 智能化 固体化和智能化的结果逐渐模糊了检测系统和传感器的界限，智能化传感器本身就是智能化检测系统，从而开创了“材料、器件、电路、仪表”一体化的新途径。

仿生学的研究、微电子技术的发展及微处理机的应用为检测技术固体化、智能化发展开辟了广阔道路。但是真正的智能今天还称不上，关键仍在于开发传感技术。例如相当于人的视觉、听觉、触觉和嗅觉的敏感元件已达到一定水平，而相当于味觉的敏感元件才刚刚问世。随着科学技术的发展，人们完全应该相信传感器技术必将攀登一个新的高峰。

0.4 课程的性质、任务、特点和学习方法

1. 课程性质和任务

本课程是中等职业学校机电技术应用专业的一门专业课。它的任务是：使学生具备机电技术应用专业的高素质的劳动者和中初级专门人才所必需的常用传感器原理和测量电路的知识，以及在机电设备控制系统中传感器和测量电路的使用、调整能力。

2. 课程教学目标

本课程的教学目标是：培养学生具备常用传感器及测量电路的基本知识和基本技能，具有使用和调整机电设备控制系统中传感器和测量电路的能力，培养辩证思维的方法，增强职业道德观念，使之成为机电技术应用专业的高素质劳动者和中初级专门人才。具体要求如下：

- 1) 了解传感器的基本概念。

- 2) 掌握常用传感器的原理、结构、特性和用途，能正确选用传感器。
- 3) 理解传感器的信号处理方法和测量电路、抗干扰技术及数据采集系统的组成方法。
- 4) 掌握机电设备控制系统中常用传感器的技术特性及其使用和调整方法。

3. 课程特点与学习方法

1) 本课程是一门知识和技术都很密集的新型学科。直接与本课程有关的基础有数学、物理、工程力学、电工、电子、仪器零件、自动控制原理、数字技术、微机原理等。因此，在学习时，必须对相关课程有一定的基础和回顾。

2) 本课程各章节内容相互独立，自成体系，联系松散。学习时可能会感到找不到重点，摸不着规律。在学习时应以检测对象为基点，传感器及其接口和处理电路为基础，传感器的应用为目标，把各部分内容联系起来。

3) 本课程是一门实践性很强的应用技术，学习时务必联系实际，着眼于应用；要富于设想，善于借鉴，乐于实践，勇于开拓，学而用之。

练 习 题

- 0-1 什么是传感器？
- 0-2 传感器有哪些作用？
- 0-3 传感器有哪些应用领域？
- 0-4 本课程的教学目标是什么？

第1章 传感器的基本知识

传感器的基本知识包括传感器的基本物理概念,传感器的组成与分类,传感器的基本特性和传感器中常用的弹性敏感元件。

1.1 传感器的基本物理概念

传感器的原理是基于各种物理效应、化学效应(或反应)以及生物效应,常用传感器大都是利用各种物理效应工作的,在此回顾一下有关物理概念是必要的。

1.1.1 平行金属板间的电容量

在物理教材中讲到,两个彼此绝缘而又靠得很近的导体就组成一个电容器,电容量等于极板所带电荷量与极板间的电压之比。平行金属板间的电容量为:

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{\epsilon S}{4\pi kd} \quad (1-1)$$

式中 $k \approx 9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$ 。此公式是电容式传感器的理论依据。

1.1.2 导体的电阻定律

金属导体的电阻与材料、长度、截面积和温度有关。在温度一定时,导体的电阻定律可用数学公式表示为:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (1-2)$$

式中, ρ 为导体的电阻率,不同材料的电阻率不同。 ρ 随温度升高而增大,因此称导体电阻具有正温度系数。此公式是应变式传感器和热电阻传感器的理论依据。

1.1.3 线圈的电感量

由电工知识,线圈的自感量等于线圈中通入单位电流所产生的磁链数,即线圈的自感系数 $L = \psi / I = N\Phi / I$ (H)。 $\psi = N\Phi$ 为磁链, Φ 为磁通 (Wb), I 为流过线圈的电流 (A), N 为线圈匝数。根据磁路欧姆定律: $\Phi = \mu NIS / l$, μ 为磁导率, S 为磁路截面积, l 为磁路长度。令 $R_m = l / \mu S$ 为磁路的磁阻,可得

$$L = \frac{N^2}{R_m} \quad (1-3)$$

此公式是电感式(或称变磁阻式)传感器的理论依据。

1.1.4 电磁定律

(1) 安培定则 电流产生磁场的现象称为电流的磁效应。右手握住导线,拇指垂直于四指并指向电流方向,四指则指向磁力线方向。通电螺线管产生的磁场,右手握住螺线管,四指指向电流方向,拇指与四指垂直指向磁力线方向(N极)。

(2) 安培力 磁场对通电导体的电磁力。其方向可用左手定则确定:伸开左手,使拇指与四指在同一平面并垂直,让磁力线穿过手心,四指指向电流方向,拇指则指向导体的受力方向。

(3) 洛伦兹力 磁场对运动电荷的作用力。将运动电荷看作通电导体，洛伦兹力的方向也可用左手定则确定。由此引出霍耳效应，它是霍耳式传感器的理论依据。

1.1.5 电磁感应

穿过闭合导体的磁通发生变化，就会产生感应电流。感应电流产生的磁场总是阻碍磁通的变化，磁场增强时，感应电流磁场与原磁场方向相同；磁场减弱时，感应电流磁场与原磁场方向相反，可依据感应电流的磁场用右手定则确定感应电流的方向。因此，一个线圈中的电流发生变化就会在相邻其它线圈中感应出电动势，称为互感。两线圈的互感 $M = K\sqrt{L_1 L_2}$, K 为耦合系数。电磁感应是电磁式、电涡流式、互感式（差动变压器）传感器所依据的原理。

1.1.6 光的知识

(1) 光的电磁说 光是一种电磁波，其频谱如图 1-1 所示。可见光只是电磁波谱中的一小部分，波长在 780~380nm 之间，红光频率最低，紫光频率最高。光的频率越高，携带的能量越大。

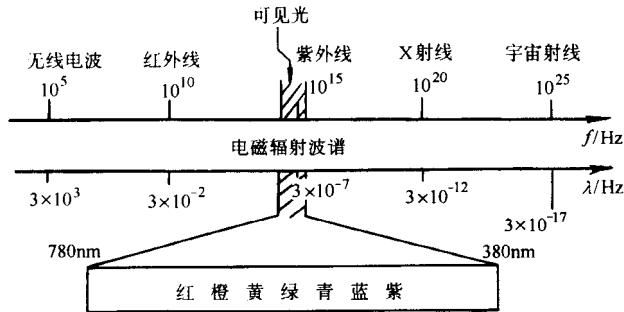


图 1-1 电磁波谱

(2) 光的量子说 光是一种带有能量的粒子（称为光子）所形成的粒子流。光子的能量为 $h\nu$, $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ 为普朗克常数， ν 为光的频率。当物质受光照后，物质的电子吸收了光子的能量所产生的电现象称为光电效应。它是光电元件的理论基础。

传感器中应用到的物理概念还很多，以上仅为几个常用的概念。

1.2 传感器的组成与分类

1.2.1 传感器的组成

传感器通常由敏感元件、转换元件及转换电路组成，如图 1-2 所示。敏感元件是指传感器中能直接感受（或响应）被测量的部分。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转换成电量，往往是先变换为另一种易于变成电量的非电量，然后再转换成电量。如传感器中各种类型的弹性元件常被称为弹性敏感元件。

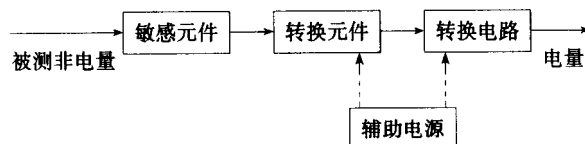


图 1-2 传感器的组成

转换元件是指能将感受到的非电量直接转换成电量的器件或元件。如光电池将光的变化

量转换为电动势，应变片将应变转换为电阻量等。

转换电路是指将无源型传感器输出的电参数量转换成电能量。常用的转换电路有电桥电路、脉冲调宽电路、谐振电路等，它们将电阻、电容、电感等电参量转换成电压、电流或频率。

需要指出的是，并非所有的传感器都包括以上部分，有些传感器的敏感元件和转换元件可合二为一，如压电晶体、光电器件等。有些传感器的转换元件能直接输出电信号而无需转换电路，如热电偶、光电池等。

辅助电源为无源传感器的转换电路提供电能。

1.2.2 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，下面介绍几种常用分类方法。

1. 按输入量（被测对象）分类

输入量即被测对象，按此方法分类，传感器可分为物理量传感器、化学量传感器和生物量传感器三大类。其中，物理量传感器又可分为温度传感器、压力传感器、位移传感器等等。这种分类方法给使用者提供了方便，容易根据被测对象选择所需要的传感器。

2. 按转换原理分类

从传感器的转换原理来说，通常分为结构型、物性型和复合型三大类。结构型传感器是利用机械构件（如金属膜片等）在动力场或电磁场的作用下产生变形或位移，将外界被测参数转换成相应的电阻、电感、电容等物理量，它是利用物理学运动定律或电磁定律实现转换的。物性型传感器是利用材料的固态物理特性及其各种物理、化学效应（即物质定律，如虎克定律、欧姆定律等）实现非电量的转换。它是以半导体、电介质、铁电体等作为敏感材料的固态器件。复合型传感器是由结构型传感器和物性型传感器组合而成的，兼有两者的特征。例如：电阻式、电感式、电容式、压电式、光电式、热敏、气敏、湿敏、磁敏等等。这种分类方法清楚地指明了传感器的原理，便于学习和研究。

3. 按输出信号的形式分类

按输出信号的形式，传感器可分为开关式、模拟式和数字式。

4. 按输入和输出的特性分类

按输入、输出特性，传感器可分为线性和非线性两类。

5. 按转换能量转换的方式分类

按转换元件的能量转换方式，传感器可分为有源型和无源型两类。有源型也称能量转换型或发电型，它把非电量直接变成电压量、电流量、电荷量等，如磁电式、压电式、光电池、热电偶等。无源型也称能量控制型或参数型，它把非电量变成电阻、电容、电感等量。这种分类方法便于选择测量电路。

1.3 传感器的基本特性

传感器的特性参数有很多，且不同类型的传感器，其特性参数的要求和定义也各有差异，但都可以通过其静态特性和动态特性进行全面描述。

1.3.1 传感器的静态特性

静态特性表示传感器在被测各量值处于稳定状态时的输出与输入的关系。它主要包括灵敏度、分辨力（或分辨率）、测量范围及误差特性。

1. 灵敏度

灵敏度是指稳态时传感器输出量 y 和输入量 x 之比, 或输出量 y 的增量和相应输入量 x 的增量之比。用 k 表示为

$$k = \frac{\text{输出量增量}}{\text{输入量增量}} = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1-4)$$

线性传感器的灵敏度 k 为一常数; 非线性传感器的灵敏度 k 是随输入量变化的量。

2. 分辨力

传感器在规定的测量范围内能够检测出的被测量的最小变化量称为分辨力。它往往受噪声的限制, 所以一般用相当于噪声电平 (N) 的若干倍 (C) 的被测量表示, 即

$$M = \frac{CN}{k} \quad (C \text{ 取 } 1 \sim 5) \quad (1-5)$$

式中, M 为最小检测量。

实际中, 分辨力可用传感器的输出值表示, 常与分辨率通用。模拟式传感器以最小刻度的一半所代表的输入量表示, 数字式传感器则以末位显示一个字所代表的输入量表示。

3. 测量范围和量程

在允许误差范围内, 传感器能够测量的下限值 ($y_{\min}$) 到上限值 ($y_{\max}$) 之间的范围称为测量范围, 表示为 $y_{\min} \sim y_{\max}$; 上限值与下限值的差称为量程, 表示为 $y_{F.S} = y_{\max} - y_{\min}$ 。如某温度计的测量范围是 $-20 \sim 100^{\circ}\text{C}$, 量程则为 120°C 。

4. 误差特性

传感器的误差特性包括线性度、迟滞、重复性、零漂和温漂等。

(1) 线性度 线性度即非线性误差。为了便于对传感器进行标定和数据处理, 要求传感器的特性为线性关系, 而实际的传感器特性常呈非线性, 这就需要对传感器进行线性化。传感器的静态特性是在标准条件下校准 (标定) 的, 即在没有加速度、振动、冲击及温度为 $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$ 、湿度不大于 $85\% \text{ RH}$ 、大气压力为 $101327 \pm 7800 \text{ Pa}$ ($760 \pm 60 \text{ mmHg}$) 的条件下, 用一定等级的设备, 对传感器进行反复循环测试, 得到的输入和输出数据用表格列出或画出曲线, 这条曲线称为校准曲线。传感器的校准曲线与理论拟合直线之间的最大偏差 ($\Delta L_{\max}$) 与满量程值 ($y_{F.S}$) 的百分比称为线性度, 用 γ_L 表示:

$$\gamma_L = \pm \frac{\Delta L_{\max}}{y_{F.S}} \times 100\% \quad (1-6)$$

由此可知, 非线性误差是以一定的拟合直线为基准算出来的, 基准直线不同, 所得线性度也不同。根据求得拟合直线的方法, 线性度可分为端基线性度、平均选点线性度和独立线性度, 如图 1-3 所示。

1) 端基拟合直线是由传感器校准数据的零点输出平均值和满量程输出平均值连成的一条直线, 如图 a 所示。这种拟合方法简单直观, 应用较广, 但拟合精度很低, 尤其对非线性比较明显的传感器, 拟合精度更差。

2) 平均选点拟合直线的求法, 将测量若干点的数据分成前后数目相等的两组, 分别求出两组数据相应的输入和输出数据的平均值, 即

$$\bar{x}_1 = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^{n/2} x_i, \bar{y}_1 = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^{n/2} y_i; \bar{x}_2 = \frac{2}{n} \sum_{i=n/2+1}^n x_i, \bar{y}_2 = \frac{2}{n} \sum_{i=n/2+1}^n y_i \quad (1-7)$$

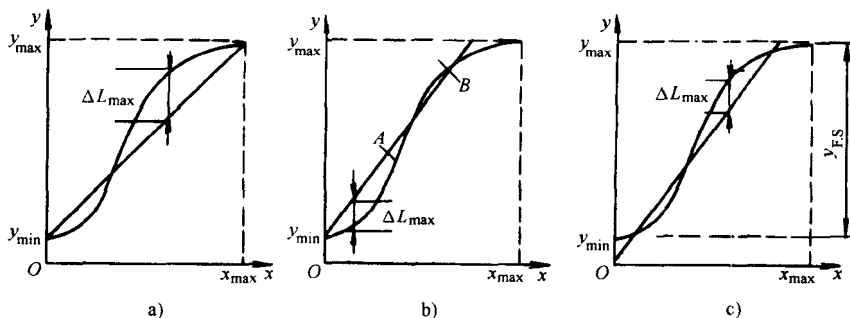


图 1-3 传感器的线性度示意图

a) 端基线性度 b) 平均选点线性度 c) 独立线性度

这两组平均值在直角坐标系中的坐标点分别称为其“点系中心”，如图 b 中的 A、B 两点，连接两点的直线就是拟合直线。这种方法拟合精度比较高，也不很复杂。

3) 独立线性度也称最小二乘法线性度，它的拟合直线方程是用最小二乘法求得的，在全量程范围内各处误差都最小。这种方法拟合精度最高，但计算很复杂。

(2) 迟滞 迟滞是指在相同工作条件下，传感器正行程特性与反行程特性的不一致的程度，如图 1-4 所示。其数值为对应同一输入量的正行程和反行程输出值间的最大偏差 $\Delta H_{\max}$ 或最大偏差的一半；与满量程输出值的百分比。用 γ_H 表示为：

$$\gamma_H = \pm \frac{\Delta H_{\max}}{y_{F.S.}} \times 100\% \quad (1-8a)$$

或

$$\gamma_H = \pm \frac{\Delta H_{\max}}{2y_{F.S.}} \times 100\% \quad (1-8b)$$

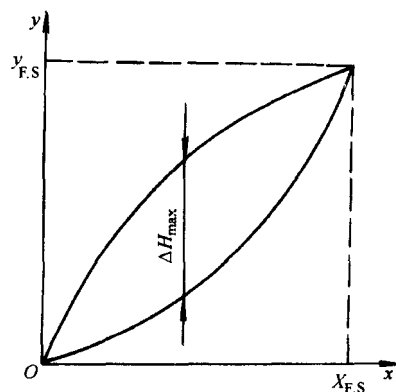


图 1-4 传感器的迟滞特性

(3) 重复性 重复性指在同一工作条件下，输入量按同一方向在全测量范围内连续变化多次所得特性曲线的不一致性，如图 1-5 所示。在数值上用各测量值正、反行程标准偏差最大值 σ 的两倍或三倍与满量程的百分比表示，记作 γ_k ：

$$\gamma_k = \pm \frac{(2 \sim 3) \sigma}{y_{F.S.}} \times 100\% \quad (1-9)$$

从误差的性质讲，重复性误差属于随机误差，可按随机误差的分析方法，由各次校准测量数据间的最大误差 Δ_{im} 求出标准误差 σ 。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta_{im}^2}{n-1}} \quad (1-10)$$

式 (1-9) 中， σ 前的系数为置信因数。若误差完全按正态分布，置信因数取 2 时，置信概率为 95%；置信因数取 3 时，置信概率为 99.73%。

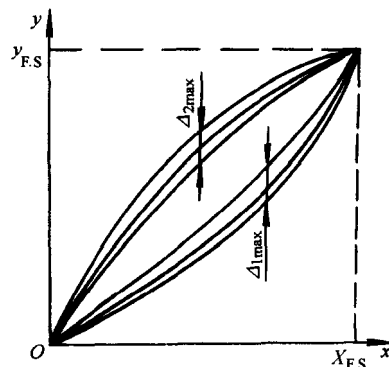


图 1-5 传感器的重复性

(4) 零漂和温漂 传感器无输入(或某一输入值不变)时,每隔一定时间,其输出值偏离原示值的最大偏差与满量程的百分比,即为零漂。温度每升高 1°C ,传感器输出值的最大偏差与满量程的百分比,称为温漂。

1.3.2 传感器的动态特性

动态特性是描述传感器在被测量随时间变化时的输出和输入的关系。对于加速度等动态测量的传感器必须进行动态特性的研究,通常是用输入正弦和阶跃信号时传感器的响应来描述的,即传递函数和频率响应。一般在“自动控制原理”课程中都有详细讨论,本课程不再介绍。

1.3.3 传感器的误差与准确度

不言而喻,测量的目的是希望得到被测事物的真实量值——真值。但是,任何传感器不可避免地存在着误差。传感器的误差可用准确度表示。

1. 误差的表示方法

(1) 绝对误差 某被测量的指示值 A_x 与其真值 A_0 之间的差值,称为绝对误差 Δ 。

$$\Delta = A_x - A_0 \quad (1-11)$$

当 $A_x > A_0$ 时,为正误差;反之为负误差。在计量工作和实验室测量中常用修正值 C 表示真值 A_0 与示值 A_x 之差,它等于绝对误差的相反数 ($C = -\Delta$),则

$$A_0 = A_x + C \quad (1-12)$$

一般,绝对误差和修正值的量纲必须与示值量纲相同。

绝对误差可表示测量值偏离实际值的程度,但不能表示测量的准确程度。

(2) 相对误差 相对误差即百分比误差。

1) 实际误差:它等于绝对误差与约定真值的百分比,用 γ_A 表示:

$$\gamma_A = \frac{\Delta}{A_0} \times 100\% \quad (1-13)$$

2) 示值(标称)相对误差:它等于绝对误差与示值的百分比,用 γ_x 表示:

$$\gamma_x = \frac{\Delta}{A_x} \times 100\% \quad (1-14)$$

3) 满度(引用)相对误差:它等于绝对误差与仪表满量程值 $A_{F.S}$ 的百分比,用 γ_n 表示:

$$\gamma_n = \frac{\Delta}{A_{F.S}} \times 100\% \quad (1-15)$$

式中, $A_{F.S}$ 为仪表刻度上限值 $A_{\max}$ 和下限值 $A_{\min}$ 之差,当 Δ 为最大值 $\Delta_{\max}$ 时,称为最大引用误差,记作 γ_{rm} 。

2. 传感器的准确度

传感器的准确度常用最大引用误差来定义 $\pm S\% = \gamma_{\text{rm}}$, 则

$$S = \frac{|\Delta_{\max}|}{A_{F.S}} \times 100 \quad (1-16)$$

如压力传感器的准确度等级分别为 0.05、0.1、0.2、0.3、0.5、1.0、1.5、2.0 等。

1.4 传感器中的弹性敏感元件

能将力、力矩、压力、温度等物理量转换成位移、转角或应变的弹性元件,称为弹性敏

感元件。结构型传感器的组成都有弹性敏感元件。

1.4.1 应力与应变

1. 应力

截面积为 S 的物体受到外力 F 的作用并处于平衡状态时, 物体在单位面积上引起的内力称为应力, 记作 σ , 其值为:

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (1-17)$$

如图 1-6a 所示, 物体两端受拉力或压力作用时, 物体处于拉伸或压缩状态, 其应力称为正(向)应力。处于拉伸状态的应力为正值, 压缩状态的应力为负值。如图 1-6b 所示, 物体一端固定, 另一端受平行于端面的力作用时, 内部任意截面上产生大小相等、方向相反的应力, 称为切(向)应力。图示方向的应力为正值, 反之为负值。

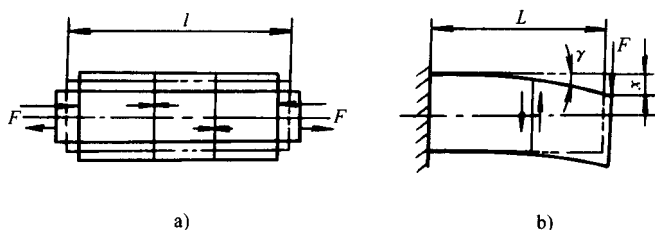


图 1-6 应变种类示意图

a) 拉压应力 b) 剪切应力

2. 应变

应变是物体受外力作用时产生的相对变形, 是一个无量纲的物理量。设物体原长度为 l , 受力后产生 Δl 的变形。若 $\Delta l > 0$, 则表示物体被拉伸; $\Delta l < 0$, 则表示物体被压缩。其应变 ϵ 定义为:

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (1-18)$$

式中, ϵ 称为纵向应变。由于其量值非常小, 常用微应变 ($\mu\epsilon$) 作为单位, $1\mu\epsilon = 10^{-6}\epsilon$ 。当物体纵向发生变形时, 其横向发生相反变形, 称为横向应变。为了区别, 将前者记作 ϵ_l , 后者记作 ϵ_r 。

$$\epsilon_r = \frac{\Delta r}{r} = -\mu\epsilon_l \quad (1-19)$$

式中, μ 为泊松比。

由切应力所产生的变形称为切应变。如图 1-6b 所示, 力 F 使自由端产生位移 x , 切应变 γ 可通过近似直角三角形求出, 即

$$\gamma \approx \tan \alpha = \frac{x}{L} \quad (1-20)$$

式中, L 为固定端至力作用点之间的距离。

3. 虎克定律与弹性模量

虎克定律: 当应力未超过某一限值时, 应力与应变成正比, 其数学表达式为:

$$\sigma = E\epsilon \quad (1-21)$$

$$\tau = G\gamma \quad (1-22)$$