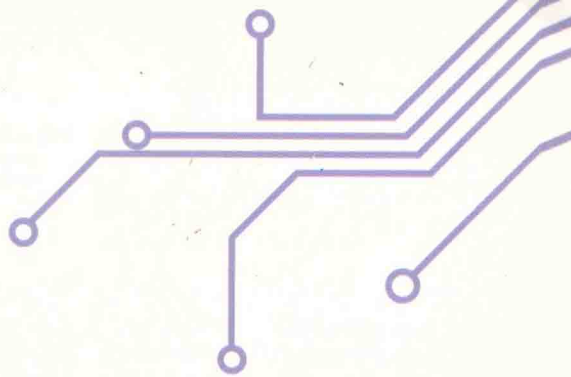
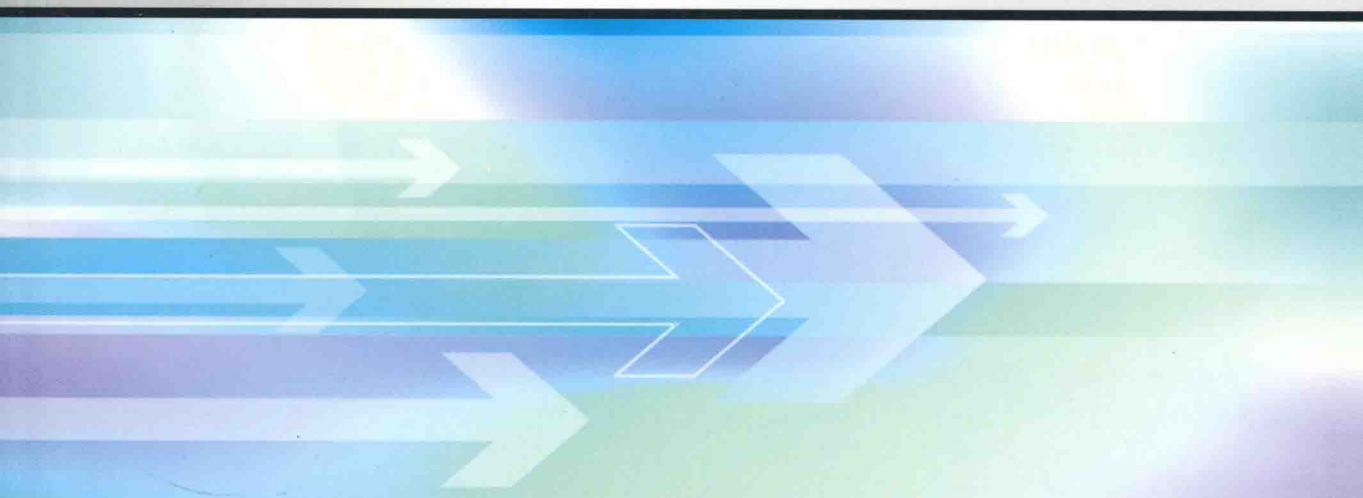


高职高专“十二五”规划教材



传感器与检测技术

主编◎赵 锋 袁桂玲



哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press

高职高专“十二五”规划教材

传感器与检测技术

主 编 赵 锋 袁桂玲
副主编 倪祥明 凌 云 李 丽
徐忠根 何根茂
参 编 徐勇光 张松锋

 **哈尔滨工程大学出版社**
Harbin Engineering University Press

内容提要

本书以应用为目的,以必需、够用为尺度,理论少而精,加强理论与实际的统一,且注重新技术、新成果的应用。加强教学过程的实践性、开放性和职业性,融“教、学、做”为一体,大力推行工学结合,突出实践能力培养。本书主要介绍三个方面的内容:一是传感器的组成原理、特性和使用方法,主要包括电阻应变式、电感式、电容式、磁敏式、压电式、热电式、光电式、数字式和智能传感器;二是结合应用实例,介绍了过程参数检测中的常用传感技术,如温度检测、压力检测、流量检测、物位检测原理及方法;三是介绍了一定的实验,有利于读者验证传感器的工作原理。

本书可作为高职高专计算机控制技术、自动化、仪表、应用电子、通信、机电一体化等相关专业的教材,也可供有关专业本科生、大专生和研究生选用,同时也可作为有关工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

传感器与检测技术/赵锋等主编. —哈尔滨:哈尔滨
工程大学出版社, 2011. 1
ISBN 978-7-81133-996-3

I. ①传… II. 赵… III. ①传感器-检测
IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 261603 号

出版发行: 哈尔滨工程大学出版社

社 址: 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号

邮 编: 150001

发行电话: 0451-82519328

传 真: 0451-82519699

经 销: 新华书店

印 刷: 北京市通州京华印刷制版厂

开 本: 787mm×1092mm 1/16

印 张: 15.5

字 数: 358 千字

版 次: 2011 年 1 月第 1 版

印 次: 2011 年 1 月第 1 次印刷

定 价: 28.00 元

http: //press. hrbeu. edu. cn

E-mail: heupress@hrbeu. edu. cn

对本书内容有任何疑问及建议, 请与本书责编联系。邮箱: jixie_book@sina. com

出版说明

近年来,我国的高等职业教育事业实现了跨越式发展,为社会主义现代化建设事业培养了大批急需的各类人才,在提高劳动者的素质、建设社会主义精神文明、促进社会进步和经济发展方面发挥了重要的作用。

随着我国科技的发展和经济的腾飞,高技能人才的缺乏逐渐成为影响社会快速、健康发展的瓶颈。高等职业院校作为培养各类高素质人才的重要基地,必然要对教育教学制度进行改革,以转变教育思想和教育观念为先导,以促进就业为目标,实行多样、灵活、开放的人才培养模式,把教育教学与生产实践、社会服务、技术推广结合起来,逐步形成适应我国社会主义现代化建设需要的高等职业教育思想和教育理念。

要加快高等职业教育改革和发展的步伐,就必须对课程体系和教学模式等问题进行探索。在这个过程中,教材的建设与改革无疑起着至关重要的基础性作用,高质量的教材是培养高素质人才的保证。高等职业教育教材作为知识的载体和教学的基本工具,直接关系到高等职业教育能否为社会培养并输送符合要求的高技能人才。

为推动高等职业教育教材的建设,加快高等职业教育改革和发展的步伐,我们精心组织了一批具有丰富教学和科研经验的教师,针对高等职业院校的教学特点,编写了“高职高专“十二五”规划教材”,旨在使学生在具有必备的基础理论知识和专业知识的基础上,重点掌握从事本专业领域实际工作的基本能力和基本技能,致力于培养基础理论知识适度、技术应用能力强、知识面宽、素质高的应用型人才。

本系列教材非常注重培养学生的实践技能,力避传统教材“全而深”的教学模式,将“教、学、做”有机地融为一体,在教给学生知识的同时,强化对学生实际操作能力的培养。在编写过程中,教材力求从实际应用的需要出发,尽量减少枯燥、实用性不强的理论灌输,充分体现出“以行业为导向,以能力为本位,以学生为中心”的特色,更具有实用性和前瞻性,与就业市场结合更为紧密。

本系列教材的编写力求突破陈旧的教育理念,采用了“以案例导入教学”的编写模式。在对某一理论进行讲解的同时,紧密结合实际,援引大量鲜明、实用的案例进行分析说明,以达到编写高质量教材的目标。这些精心设计的案例不但可以方便教师授课,同时还可以启发学生思考,加快对学生实践能力的培养,改革人才的培养模式。

本系列教材可供高等职业院校、成人高校及各类培训学校相关专业使用。在编写过程中,得到了许多教师的大力支持,在此特向他们致以衷心的感谢,同时也对所有参与本系列教材出版工作的人员表示感谢!

哈尔滨工程大学出版社

前言

根据教育部《关于全面提高高等职业教育教学质量的若干意见》的指导思想,高等职业教育作为高等教育发展中的一个类型,肩负着培养面向生产、建设、服务和管理第一线需要的高技能人才的使命。高等职业教育要积极推行与生产劳动和社会实践相结合的学习模式,把工学结合作为高等职业教育人才培养模式改革的重要切入点,带动专业调整与建设,引导课程设置、教学内容和教学方法改革。

在国内高等学校中,传感器与检测技术这门课程已成为自动化、电气工程及其自动化、测控技术与仪器等专业的主干课程。但许多著作在原理性与实用性,传统性与新型性,以及广度与深度上各有侧重。随着科学技术的发展,专业面的拓宽和适应传感器的开发和应用的需要,更希望有两者兼顾的教材。为此,本书根据高职高专教育的特点,以就业为导向,以职业岗位核心能力为目标,精选教学内容,学用结合,从教学实践出发进行撰写。

本书以应用为目的,以必需、够用为尺度,理论少而精,加强理论与实际的统一,且注重新技术、新成果的应用。加强教学过程的实践性、开放性和职业性,融“教、学、做”为一体,大力推行工学结合,突出实践能力培养。本书的结构体系主要有以下四个方面:

- 一、介绍传感器的基本知识;
- 二、各种不同类型传感器的工作原理;
- 三、工程实际中的应用;
- 四、基本的实验指导。

结合本书的结构体系,本书主要介绍三个方面的内容:一是传感器的组成原理、特性和使用方法,主要包括电阻应变式、电感式、电容式、磁敏式、压电式、热电式、光电式、数字式和智能传感器;二是结合应用实例,介绍了过程参数检测中的常用传感技术,如温度检测、压力检测、流量检测、物位检测原理及方法;三是介绍了一定的实验,有利于读者验证传感器的工作原理。

本书由焦作大学赵锋、河南质量工程职业学院袁桂玲担任主编,负责制定编写要求和详细的内容编写目录,并对全书进行统稿和定稿;黄冈职业技术学院倪祥明、株洲冶金职业技术学院凌云、济源职业技术学院李丽、商丘科技职业学院徐忠根、永州职业技术学院何根茂担任副主编;周口职业技术学院徐勇光、张松锋参与编写。具体分工如下:第1、2章由赵锋编写,第7、9章由袁桂玲编写,第3章由倪祥明编写,第4、8章由李丽编写,第5章由徐忠根编写,第11章由凌云、何根茂共同编写,第6章由徐勇光编写,第10章由张松锋编写。

本书在编写过程中,参考和引用了已有教材和文献资料,在此向所有参考文献的作者表示衷心的感谢。

本书的出版,得到了哈尔滨工程大学出版社编辑的指导和支持,对他们辛勤劳动和无私奉献表示真诚的谢意。

本书编写时,力求做到体系结构完整,内容丰富、新颖、实用,叙述方法由浅入深,适用于高职高专计算机控制技术、自动化、仪表、应用电子、通信、机电一体化等相关专业的教材,也可作为跨专业选修课教材。除概论外,传感器各篇均具有一定的独立性,可供有关专业本科生、大专生和研究生选用,同时也可作为有关工程技术人员参考书。

由于编者水平所限,加之时间仓促,错误和不妥之处在所难免,恳请广大专家和读者批评指正。

编者

目 录

第 1 章 传感器与检测技术基础	1
1.1 传感器概述	1
1.1.1 传感器的概念	2
1.1.2 传感器的组成与作用	2
1.1.3 传感器的分类	3
1.2 传感器的特性及其主要技术指标	3
1.2.1 传感器的静态特性和动态特性	4
1.2.2 传感器的主要技术指标	11
1.3 提高传感器性能的技术途径	12
1.4 传感器的标定和校准	13
1.5 传感器选择的一般原则	15
第 2 章 测量技术基础知识	21
2.1 测量和测量误差的基本概念	21
2.1.1 测量的基础知识	21
2.1.2 测量误差的基本概念	24
2.2 测量误差的分类	26
2.2.1 系统误差	26
2.2.2 随机误差	27
2.2.3 粗大误差	27
2.2.4 测量精度	27
2.3 测量数据处理	28
2.3.1 测量数据的统计参数	28
2.3.2 随机误差及其处理	28
2.3.3 系统误差的发现	31
2.3.4 减小系统误差的方法	33
2.4 测量数据的表述方法	34

2.5 测量不确定度	36
2.5.1 测量不确定度的定义及分类	36
2.5.2 测量误差与不确定度	37
2.5.3 测量不确定度的评定方法	38
2.5.4 测量不确定度的评定流程	39
第3章 电阻式传感器	42
3.1 电阻应变式传感器	42
3.1.1 电阻应变片的类型和工作原理	42
3.1.2 电阻应变片的特性	45
3.1.3 测量电路	48
3.1.4 温度误差及补偿措施	51
3.1.5 电阻应变式传感器的应用	53
3.2 压阻式传感器	55
3.2.1 压阻式传感器的工作原理	55
3.2.2 压阻式传感器的类型	56
3.2.3 温度补偿	57
第4章 电感式传感器	60
4.1 差动螺管式(自感式)传感器	60
4.1.1 自感式电感传感器的工作原理	60
4.1.2 自感式电感传感器的测量电路	63
4.1.3 自感式电感传感器的误差分析	66
4.2 差动变压器(互感式)传感器	67
4.2.1 差动变压器式传感器的工作原理	68
4.2.2 差动变压器式传感器的测量电路	70
4.3 电涡流式传感器	71
4.3.1 电涡流式传感器的结构和工作原理	71
4.3.2 电涡流式传感器的测量电路	73
4.4 电感式传感器的应用	75
第5章 电容式传感器	79
5.1 电容式传感器的结构、工作原理和特性	79
5.1.1 变极距型电容传感器	80

5.1.2 变面积型电容传感器	82
5.1.3 变介电常数型电容传感器	83
5.2 电容式传感器的测量电路	84
5.2.1 电容式传感器的等效电路	84
5.2.2 电容式传感器的测量电路	84
5.3 电容式传感器的应用	88
5.4 应用中存在的问题及其改进措施	90
第6章 磁敏式传感器	95
6.1 霍尔式磁敏传感器	95
6.1.1 霍尔效应	96
6.1.2 霍尔元件的主要技术参数	99
6.1.3 测量误差及补偿措施	100
6.1.4 霍尔磁敏传感器电路分析	102
6.1.5 霍尔集成电路	104
6.1.6 霍尔式磁敏传感器的应用	104
6.2 结型磁敏器件	107
6.2.1 磁敏二极管	107
6.2.2 磁敏三极管	111
6.3 半导体磁阻传感器	114
6.3.1 磁阻效应	114
6.3.2 磁敏电阻的形状	116
6.3.3 半导体磁敏电阻的主要技术参数	117
6.3.4 半导体磁敏电阻的应用	117
6.4 铁磁性金属薄膜磁敏电阻	118
6.4.1 铁磁材料磁电阻的各向异性效应	118
6.4.2 金属薄膜磁敏电阻的结构、特点与工作原理	118
6.4.3 金属膜磁敏电阻的主要技术参数	119
6.4.4 金属膜磁敏电阻的应用	119
第7章 压电式传感器	122
7.1 压电效应及压电材料	122
7.1.1 压电效应	122
7.1.2 压电材料	123

7.2 压电传感器工作原理和测量电路	128
7.2.1 压电传感器工作原理	128
7.2.2 压电传感器测量电路	129
7.3 压电式传感器及其应用	133
第8章 热电式传感器	139
8.1 热电偶传感器	139
8.1.1 热电效应和热电偶测温原理	139
8.1.2 热电偶的基本定律	141
8.1.3 热电偶类型和热电偶材料	142
8.1.4 热电偶的结构形式	143
8.1.5 热电偶的补偿导线及冷端温度的补偿方法	144
8.1.6 热电偶测温线路	146
8.2 金属热电阻传感器	147
8.3 热敏电阻	150
8.3.1 热敏电阻的工作原理	150
8.3.2 热敏电阻的主要特性及参数	150
第9章 光电式传感器	153
9.1 光	153
9.1.1 光的特性	154
9.1.2 光源	155
9.2 光电效应及光电器件	159
9.2.1 光电效应	159
9.2.2 光电器件	159
9.3 光纤传感器	171
9.3.1 光纤传感器基础	171
9.3.2 光纤传感器中几种常用的光强调制技术	175
9.3.3 光纤干涉传感器原理	179
9.4 光电式传感器	180
9.4.1 光电式传感器的类型	180
9.4.2 光电尺寸测量举例	182
9.4.3 光纤传感器实例	183

第 10 章 数字式传感器	187
10.1 感应同步器	187
10.1.1 感应同步器的结构与类型	187
10.1.2 感应同步器的工作原理	189
10.1.3 数字测量系统	192
10.2 编码器	195
10.2.1 光电编码器的基本结构与原理	195
10.2.2 测量电路	199
10.3 光栅	200
10.3.1 莫尔条纹	201
10.3.2 光电转换	202
10.4 容栅式传感器	203
10.4.1 容栅传感器的工作原理	203
10.4.2 数字测量原理	203
10.5 频率式传感器	206
10.5.1 振弦式频率传感器	207
10.5.2 振筒式频率传感器	210
第 11 章 智能传感器	213
11.1 智能传感器概述	213
11.1.1 智能传感器的概念及发展	213
11.1.2 智能传感器的分类	214
11.1.3 智能传感器的功能	215
11.1.4 智能传感器的特点	215
11.1.5 智能传感器的应用	216
11.2 单片集成化智能传感器	217
11.2.1 单片集成化智能传感器的分类	217
11.2.2 单片集成化智能传感器的发展趋势	218
11.3 单片智能温度传感器的原理与应用	219
11.3.1 DS18B20 的性能特点	219
11.3.2 DS18B20 的引脚功能介绍	219
11.3.3 DS18B20 的内部结构	220
11.3.4 DS18B20 的测温原理	221

11.3.5 DS18B20 的工作时序·····	222
11.3.6 DS18B20 的控制命令·····	223
11.3.7 DS18B20 与单片机的典型接口·····	223
11.3.8 提高 DS18B20 测温精度的途径·····	226
11.3.9 DS18B20 构成的智能温度测量装置·····	227
11.4 集成湿度传感器的原理与应用·····	230
11.4.1 湿敏元件的特性·····	231
11.4.2 集成湿度传感器的性能特点及产品分类·····	231
11.4.3 集成湿度传感器典型产品的技术指标·····	232
11.4.4 单片智能化湿度/温度传感器·····	232
参考文献·····	237

第 1 章

传感器与检测技术基础

【课题目标】

1. 熟悉传感器的定义与分类，掌握传感器的组成与作用。
2. 掌握传感器基本特性，掌握传感器的主要技术指标。
3. 熟悉提高传感器性能的技术途径和传感器选择的一般原则。

1.1 传感器概述

传感器与检测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，是国民经济发展和社会进步的一项必不可少的重要技术。在 18 世纪产业革命以前，传感技术由人的感官实现：人观天象而仕农耕，察火色以冶铜铁。从 18 世纪产业革命以来，特别是在 20 世纪信息革命中，传感技术越来越多地由人造感官（即工程传感器）来实现。现代技术的发展不断地向检测技术提出新的要求，创造了多种多样的工程传感器。工程传感器可以轻而易举地测量人体所无法感知的量，如紫外线、红外线、超声波、磁场等。从这个意义上讲，工程传感器超过人的感官能力。有些量虽然人的感官和工程传感器都能检测，但工程传感器测量得更快、更精确。例如虽然人眼和光传感器都能检测可见光，进行物体识别与测距，但是人眼的视觉残留约为 0.1s，而光晶体管的响应时间可短到纳秒以下；人眼的角分辨率为 $1'$ ，而光栅测距的精确度可达 $1''$ ；激光定位的精度在月球距离 $3 \times 10^4 \text{ km}$ 范围内可达 10cm 以下；工程传感器可以把人不能看到的物体通过数据处理变为视觉图像。CT 技术就是一个例子，它把人体的内部形貌用断层图像显示出来，其他的例子还有遥感技术。

但是目前工程传感器在以下几方面还远比不上人类的感官：多维信息感知、多方面功能信息的感知功能、对信息变化的微分功能、信息的选择功能、学习功能、对信息的联想功能、对模糊量的处理能力以及处理全局和局部关系的能力。这正是今后传感器智能化的一些发展方向。随着信息科学与微电子技术，特别是微型计算机与通信技术的迅猛发展，近期传感器的发展走上了与微处理器内微型计算机相结合的必由之路，智能（化）传感器的概念应运而生。

检测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数据分析与数据处理,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。我们已经知道,对于电量参数的测量具有测量精度高、反应速度快、测量安全可靠、可进行远距离遥测及遥控、可实现无损检测、能连续进行测量和记录、可以与计算机方便地连接进行数据处理、并根据处理结果对测量对象进行工作状态的控制,也可采用微处理器做成智能仪表、能实现自动检测与转换等一系列优点。但是在工程上和实际的测量中,所需要测量的参数往往有相当大的部分为非电量,例如温度、加速度、压力、位移等,所以通常传感器是指能够检测特定的物理量(非电量或电量)并将其转换为相应的电量的装置。

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。传感器一般处于研究对象或检测控制系统的最前端,是感知、获取与检测信息的窗口,它所获得和转换的信息正确与否,直接关系到整个测控系统的性能好坏,所以它是检测与控制系统的首要环节。只有拥有众多性能良好的传感器,才能开发性能更加优越的检测仪器。可以说,传感器技术的发展在很大程度上代表了科学技术的发展水平。

1.1.1 传感器的概念

传感器是一种以一定的精确度把被测量转换为与之有确定对应关系的、便于应用的某种物理量的测量装置。

这一定义包含了以下四个方面的含义:①传感器是一种测量装置,能够完成检测任务。②它的输入量是某一被测量,可能是物理量,也可能是化学量、生物量等。③它的输出量是某种物理量,这种量要便于传输、转换、处理、显示等,主要是电量,如电压、电流、电容、电阻等。④输入量与输出量之间有对应关系,并且具有一定的转换精确度。

中华人民共和国国家标准《传感器通用术语》(GB 7665—2005)也对传感器的定义作了类同的规定,定义为:传感器是指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,所以传感器又称为敏感元件、转换元件等。如在电子技术中的热敏元件、磁敏元件、光敏元件及气敏元件,在机械测量中的转矩、转速测量装置,在超声波技术中的压电式换能器等都可以统称为传感器。

1.1.2 传感器的组成与作用

传感器的组成按其定义一般由敏感元件、转换元件、信号调理转换电路三部分组成,有时还需外加辅助电源提供转换能量,如图 1-1 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。转换元件是指传感器中能将敏感元件感受或响应的被测量转换成适于传输或测量的电信号的部分。由于传感器输出信号一般都很微弱,因此传感器输出的信号一般需要进行信号调理与转换、放大、运算与调制之后才能进行显示和参与控制。随着半导体器件与集成技术在传感器中的应用,已经实现了将传感器的信号调理转换电路与敏感元件一起集成在同一芯片上的传感器模块和集成电路传感器,如集成温度传感器 AD590, DS18B20 等。传感器的作用包括信息的收集、信息数据的转换和控制信息的采集,处于被检测对象和检测系统的接口位置。

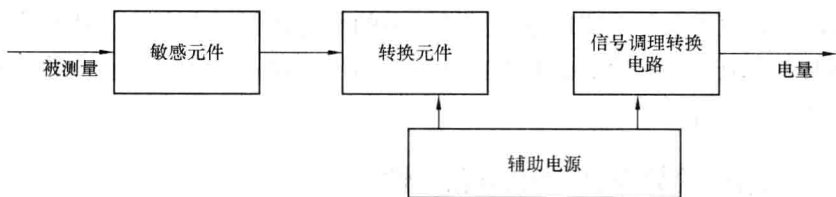


图 1-1 传感器组成图

1.1.3 传感器的分类

一般情况下，传感器技术涉及多学科交叉，对某一物理量的测量可以使用不同的传感器，而同一传感器又往往可以测量不同的多种物理量。所以传感器从不同的角度有许多分类方法，见表 1-1 传感器的分类。目前一般采用两种分类方法：一种是按被测参数分类，如对温度、压力、位移、速度、加速度等的测量，相应的有温度传感器、压力传感器、位移传感器、速度传感器、加速度传感器等；另一种是按传感器的工作原理分类，如应变原理工作式、电容原理工作式、压电原理工作式、磁电原理工作式、光电效应原理工作式等，相应的有应变式传感器、电容式传感器、压电式传感器、磁电式传感器、光电式传感器等。传感器按其工作原理分类便于学习研究，把握本质与共性；按被测量来分类，能很方便地表示传感器的功能，便于选用。另外按输出信号的性质分类可分为模拟式传感器和数字式传感器。本书的编排主要是按其工作原理分类。

表 1-1 传感器的分类

分 类 法	型 式	说 明
按构成基本效应分	物理型、化学型、生物型	分别以转换中的物理效应、化学效应等命名
按构成原理分	结构型	以其转换元件结构参数特性变化实现信号转换
	物理型	以其转换元件物理特性变化实现信号转换
按能量关系分	能量转换型	传感器输出量直接由被测量能量转换而得
	能量控制型	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	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	位移、压力、温度、速度、气体等	以被测量命名（即按用途分类法）
按输出量分	模拟式	输出量为模拟信号
	数字式	输出量为数字信号

1.2 传感器的特性及其主要技术指标

在检测控制系统和科学实验中，需要对各种参数进行检测和控制，而要达到比较优良

的控制性能,则必须要求传感器能够感测被测量的变化并且不失真地将其转换为相应的电量,这种要求主要取决于传感器的基本特性,即输出—输入特性。传感器的基本特性主要分为静态特性和动态特性。

1.2.1 传感器的静态特性和动态特性

1. 传感器的静态特性

静态特性是指传感器被测输入量各个值为不随时间变化的恒定信号时,系统的输出与输入之间的关系。主要包括线性度、灵敏度、迟滞、重复性、漂移、分辨力等。

(1) 线性度 线性度又称非线性,是表征传感器输出量—输入量之间的实际关系曲线偏离拟合直线的程度的指标,为在全量程范围内实际特性曲线与拟合直线之间的最大偏差值 $\Delta L_{\max}$ 与满量程输出值 Y_{FS} 之比。通常用相对误差来表示线性度或非线性误差,即用 γ 表示为

$$\gamma = \frac{\Delta L_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-1)$$

式中 γ ——线性度;

$\Delta L_{\max}$ ——最大非线性绝对误差;

Y_{FS} ——理论满量程输出值。

传感器的静态特性是在稳态标准条件下,利用一定等级的校准设备,对传感器进行往复循环测试,得出的输出—输入特性。通常希望这个特性是线性的,这样会对标定和数据处理带来方便;但传感器的输出—输入特性或多或少地存在非线性问题,在不考虑迟滞、蠕变、不稳定性等因素的情况下,其静态特性可用下列多项式代数方程表示。

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + \cdots + a_n x^n \quad (1-2)$$

式中 y ——输出量;

x ——输入量;

a_0 ——零点输出;

a_1 ——理论灵敏度;

a_2, a_3, a_n ——非线性项系数。

各项系数不同,特性曲线的具体形式也不同。静态特性曲线可实际测试获得,在非线性的误差不太大的情况下,总是采用直线拟合的方法来线性化。显然选定的拟合直线不同,计算所得的线性度数值也就不同。选择拟合直线应保证获得尽量小的非线性误差,并考虑使用与计算方便,下面介绍几种目前常用的拟合方法。

①理论直线法:以传感器的理论特性线作为拟合直线,它与实际测试值无关。优点是简单、方便,但通常 $\Delta L_{\max}$ 很大。

②端点线法:以传感器校准曲线两端点间的连线作为拟合直线。其方程式为

$$y = kx + b \quad (1-3)$$

式中 b 和 k 分别为截距和斜率,这种方法也很简便,但通常 $\Delta L_{\max}$ 也很大。

③“最佳直线”法:这种方法以“最佳直线”作为拟合直线,该直线能保证传感器正

反行程校准曲线对它的正、负偏差相等并且最小,由此所得的线性度称为“独立线性度”。显然这种方法的拟合精度最高。通常情况下,“最佳直线”只能用图解法或通过计算机软件解算来获得。

④最小二乘法:这种方法按最小二乘原理求取拟合直线,该直线能保证传感器校准数据的残差平方和最小。

最小二乘法的拟合精度很高,但校准曲线相对拟合直线的最大偏差绝对值并不一定最小,最大正、负偏差的绝对值也不一定相等。几种不同的拟合方法如图 1-2 所示。

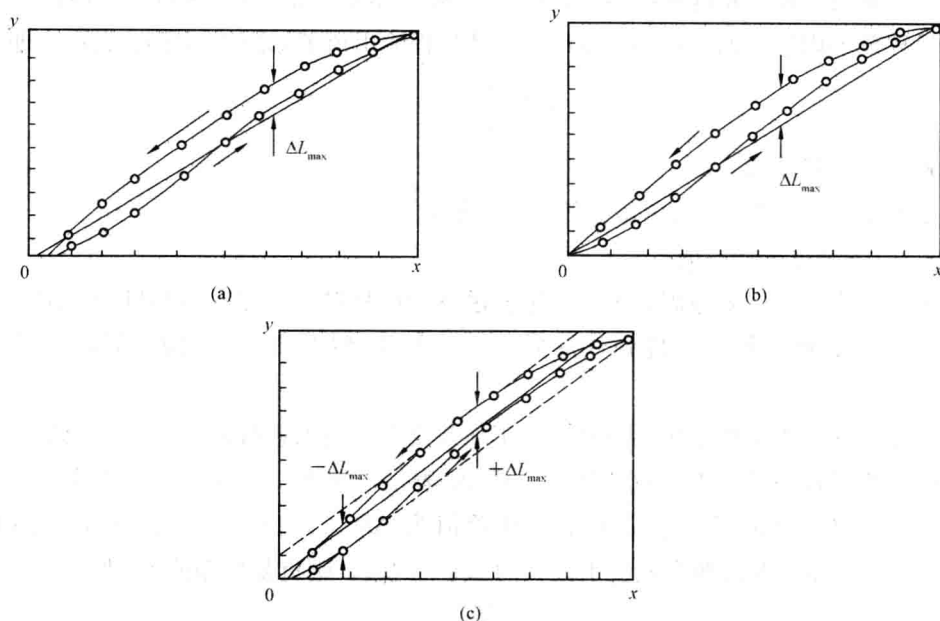


图 1-2 几种不同的拟合方法

(a) 理论直线法; (b) 端点线法; (c) “最佳直线”法

(2) 灵敏度 灵敏度是传感器静态特性的一个重要指标,为传感器在稳态条件下输出变化量 Δy 与相应输入变化量 Δx 之比。用 K 表示灵敏度,它表示单位输入量的变化所引起传感器输出量的变化,显然灵敏度 K 值越大,表示传感器越灵敏。对于输入输出为线性关系的传感器,其灵敏度为一常数,如图 1-3 (a) 所示,灵敏度为直线的斜率,即

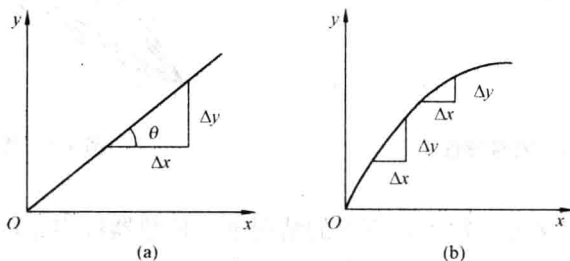


图 1-3 传感器的灵敏度

(a) 输入输出为线性; (b) 输入输出为非线性

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1-4)$$

而对于输入输出为非线性关系的传感器，其灵敏度为工作点处的切线斜率，如图 1-3 (b) 所示，即灵敏度为

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{dy}{dx} \quad (1-5)$$

(3) 迟滞 在相同的条件下，传感器输入量增大（正行程）及输入量减小（反行程）变化期间，输出—输入特性曲线不重合的现象称为迟滞，如图 1-4 所示。迟滞误差是传感器在全量程范围内最大的迟滞差值 $\Delta H_{\max}$ 与满量程输出值 Y_{FS} 之比，用 γ_H 表示，即

$$\gamma_H = \frac{\Delta H_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-6)$$

式中 γ_H ——迟滞误差；

$\Delta H_{\max}$ ——全量程范围内最大的迟滞差值；

Y_{FS} ——满量程输出值。

产生迟滞现象的主要原因是由于传感器敏感元件材料的物理性质和机械零部件的缺陷所造成的，例如弹性敏感元件弹性滞后、运动部件摩擦、传动机构的间隙、紧固件松动等。

(4) 重复性 重复性是传感器在同一工作条件下，输入量按同一方向作全量程连续多次变化时，所得特性曲线不一致的程度，用 γ_R 表示，如图 1-5 所示。各条特性曲线越靠近，重复性越好。设正行程中最大重复性差值为 $\Delta R_{\max 1}$ ，反行程中最大重复性差值为 $\Delta R_{\max 2}$ ，重复性差值取这两个差值中较大的那个 $\Delta R_{\max}$ ，则重复性差值 γ_R 即为

$$\gamma_R = \pm \frac{\Delta R_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-7)$$

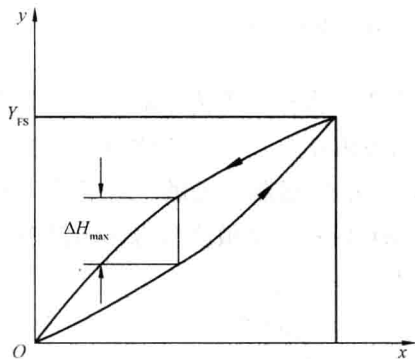


图 1-4 迟滞特性

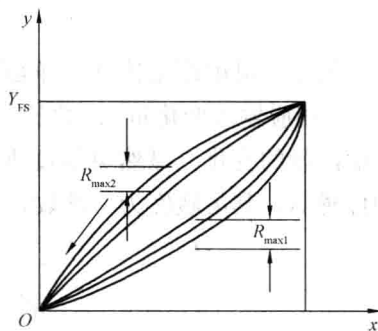


图 1-5 重复性

(5) 漂移 漂移定义为在输入量不变的情况下，传感器输出量随着时间发生变化。产生漂移的原因有两个方面：一是传感器自身结构参数；二是周围环境（如温度、湿度等）。最常见的漂移是温度漂移，即周围环境温度变化而引起输出量的变化，温度漂移主要表现为温度零点漂移和温度灵敏度漂移。温度漂移通常用传感器工作环境温度偏离标准环境温