



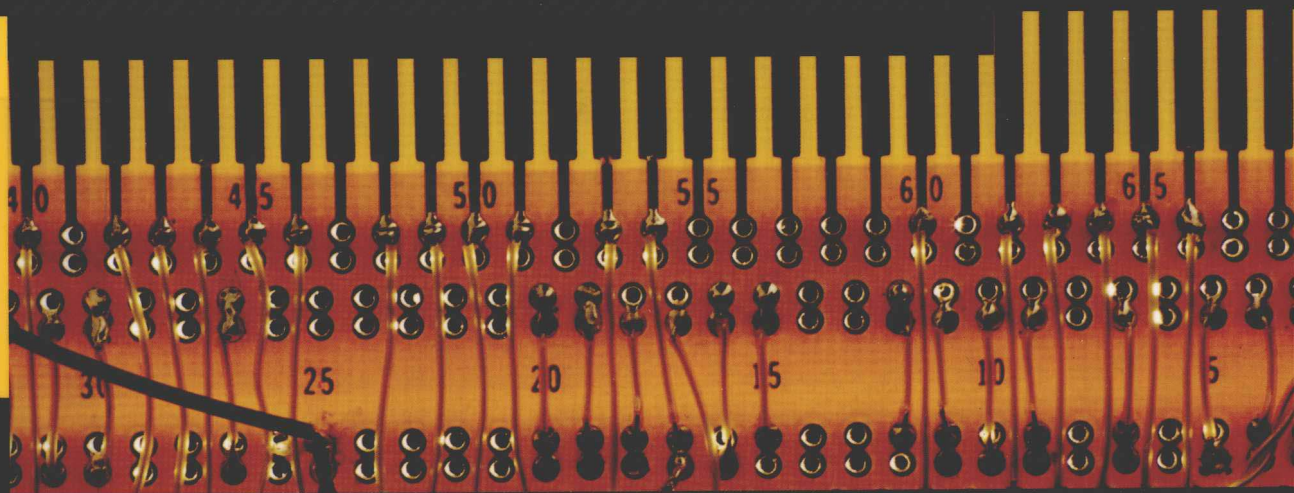
21 世纪高等院校电气工程与自动化规划教材

S ensors and Detection Technology

传感器 与检测技术

魏学业 主编

张俊红 王立华 副主编



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



21 世纪高等院校

21 century institutions of higher learning

教材

Textbook

Sensors and Detection Technology

传感器 与检测技术

魏学业 主编

张俊红 王立华 副主编

人民邮电出版社

北京

图书在版编目(CIP)数据

传感器与检测技术 / 魏学业主编. — 北京: 人民邮电出版社, 2012.9
21世纪高等院校电气工程与自动化规划教材
ISBN 978-7-115-28730-4

I. ①传… II. ①魏… 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172043号

内 容 提 要

本书在内容组织上,更加注重简洁的基础知识和实际应用,对传感器和检测技术的内容进行了有机整合。本书不仅介绍了传统传感器和检测技术,同时也对新型传感器和现代检测技术进行了介绍,在表达方式上力求做到语言通俗、简洁易懂,提高学生的学习兴趣。

本书共分14章,第1至第9章是对传感器进行介绍,内容包括传感器的基础知识,以及电阻式、电感式、电容式、热电偶、压电式、霍尔式、流量式、超声波、红外式、光电式、化学和集成温度传感器。围绕着基本原理、测量电路和应用实例3个方面进行介绍,使学生在掌握基本原理的基础上,将传感器得到的微弱信号通过测量电路转换成可测量的信号,通过实例介绍了实际应用。

第10至第14章是对检测技术进行介绍,包括检测技术的基础知识,以及温度、振动、物位、运动量和力学量参数的检测技术。围绕着参数检测的基础知识和检测方法进行介绍,使学生不仅了解测量某一参数的基本知识,同时学习采用哪种测量方法更适合。

本书可作为高等院校自动化、电气工程及自动化、电子信息工程等专业的教材,也可供从事相关领域的工程技术人员参考。

21世纪高等院校电气工程与自动化规划教材

传感器与检测技术

-
- ◆ 主 编 魏学业
 - ◆ 副 主 编 张俊红 王立华
 - 责任编辑 李海涛
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号
 - 邮编 100061 电子邮件 315@ptpress.com.cn
 - 网址 <http://www.ptpress.com.cn>
 - 北京昌平百善印刷厂印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
 - 印张: 17.25 2012年9月第1版
 - 字数: 429千字 2012年9月北京第1次印刷

ISBN 978-7-115-28730-4

定价: 36.00元

读者服务热线: (010)67170985 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

传感器与检测技术是自动化、电气工程及其自动化、电子信息工程、仪器仪表类专业的重要课程,涉及电路分析基础、数字电路、模拟电路、电子测量技术、材料科学、机械与结构学等专业知识,是获取信息的重要手段,同时也是工业过程控制、测控仪器等必不可少的部分,并且与交通、电力、冶金、化工、建材等各领域的自动化装备和生产过程密切相关。电类相关专业的学生通过本门课程的学习,可以更好地运用专业知识解决实际问题。

本书的初稿源自编者多年从事传感器、检测技术和相关课程教学的教案及其相关的研究成果及心得体会,同时也参考了国内外传感器与检测技术相关的论文和专著。本书的部分内容也来源于编者的一些实际项目实例,既博采众家之长,又具有独到见解。

本书在内容上略去了繁琐的公式推导和理论分析,以简洁和实用的表述方式,系统地介绍传感器与检测技术知识。首先从传感器与检测技术的基本知识开始,依次介绍了应用技术、设计基础、应用实例等。

本书力求学生在学习传感器与检测技术课程中达到事半功倍的效果,使从事传感器与检测系统的设计人员,设计出更好的产品,同时给教学和科研工作者提供新的启发和示范作用。

本书突出应用性,强化实践能力的培养,将传感器和检测技术有机地结合起来,使学生在掌握传感器和检测技术原理的基础上,更进一步地应用这些知识去解决工程实际问题。

本书的编写得到了北京交通大学电子信息工程学院精品课程的资助。

自动化技术处于朝气蓬勃的发展时期,这使得传感器与检测技术也处于快速发展之中,相关技术和测试手段不断更新。限于编者自身的学识和水平,书中难免存在疏漏和错误之处,恳请读者指正。

编 者

2012年5月

目 录

第1章 基础知识	1	第3章 电感式和电容式传感器	42
1.1 概述	1	3.1 电感式传感器	42
1.1.1 传感器的定义和组成	2	3.1.1 变磁阻式传感器	42
1.1.2 传感器的地位和作用	2	3.1.2 差动变压器式传感器	49
1.1.3 传感器的分类	3	3.2 电容式传感器	52
1.1.4 传感器的发展方向	5	3.2.1 工作原理	52
1.2 传感器的基本特性	6	3.2.2 测量电路	56
1.2.1 传感器的静态特性	6	3.2.3 应用实例	58
1.2.2 传感器的动态特性	10	小结	59
1.2.3 传感器的标定	16	思考题和习题	59
1.3 传感器的基本测量电路	17	第4章 热电偶传感器	61
1.3.1 直流电桥	18	4.1 基本原理	61
1.3.2 交流电桥	21	4.1.1 热电势	61
1.3.3 仪表放大器	24	4.1.2 热电偶基本定律	64
1.3.4 变送器	26	4.2 冷端补偿原理	66
小结	28	4.2.1 热电偶补偿导线	66
思考题和习题	28	4.2.2 冷端0℃恒温法	67
第2章 电阻式传感器	30	4.2.3 冷端温度修正法	67
2.1 热电阻式传感器	30	4.2.4 冷端温度自动补偿法	68
2.1.1 铂热电阻	30	4.3 几种测量温度的连接方法	69
2.1.2 铜热电阻	31	4.3.1 测量某点温度的基本电路	69
2.1.3 几种常用的连接方式	31	4.3.2 测量两点之间的温度差	69
2.1.4 应用实例	32	4.3.3 测量平均温度的线路	69
2.2 热敏电阻传感器	33	4.3.4 测量几点温度之和的线路	70
2.2.1 热敏电阻的分类	33	4.4 热电偶在盐浴炉温控中的应用	70
2.2.2 特性	33	小结	71
2.2.3 热敏电阻的应用	34	思考题和习题	71
2.3 应变式传感器	35	第5章 压电式传感器和霍尔式传感器	73
2.3.1 工作原理	35	5.1 压电式传感器	73
2.3.2 电阻应变片的结构	36	5.1.1 压电效应	73
2.3.3 应变片的误差及补偿	38	5.1.2 结构和等效电路	74
2.3.4 典型应用	40	5.1.3 测量电路	75
小结	41	5.1.4 应用实例	76
思考题和习题	41	5.2 霍尔式传感器	76

5.2.1 基本原理	76	小结	121
5.2.2 测量电路	77	思考题和习题	121
5.2.3 应用实例	78	第 8 章 光电式传感器	122
小结	79	8.1 光电式传感器的类别和	
思考题和习题	79	光电效应	122
第 6 章 流量式传感器	80	8.1.1 分类	122
6.1 流量的基础知识	80	8.1.2 光电效应	123
6.1.1 流量及其表示方法	80	8.2 CCD 传感器	125
6.1.2 流量的测量方法	82	8.2.1 基本原理	125
6.2 差压式流量传感器	83	8.2.2 分类	127
6.2.1 节流式流量计	83	8.2.3 应用实例	127
6.2.2 皮托管式流量计	88	8.3 光纤传感器	129
6.2.3 均速管式流量计	89	8.3.1 基本原理	129
6.2.4 转子流量计	90	8.3.2 光纤传感器的分类	130
6.2.5 靶式流量计	91	8.3.3 光纤传感器的应用	131
6.3 容积式流量计	92	8.4 光电编码器	133
6.3.1 椭圆齿轮流量计	92	8.4.1 基本原理	133
6.3.2 腰轮流量计	93	8.4.2 光电式编码器的应用	137
6.3.3 刮板式流量计	94	8.5 计量光栅	138
6.4 速度式流量计	94	8.5.1 光栅的结构及工作原理	138
6.4.1 涡街流量计	94	8.5.2 计量光栅的应用	143
6.4.2 超声波流量计	96	小结	144
6.5 质量流量传感器	99	思考题和习题	144
6.5.1 直接式质量流量计——		第 9 章 化学传感器和集成式温度	
科里奥利质量流量计	99	传感器	145
6.5.2 热式质量流量计	101	9.1 化学传感器	145
6.5.3 间接式质量流量计	103	9.1.1 气敏传感器	145
小结	105	9.1.2 湿敏传感器	151
思考题和习题	105	9.2 集成式温度传感器	158
第 7 章 超声波传感器和红外传感器	107	9.2.1 AD590 集成式温度传感器	158
7.1 超声波传感器	107	9.2.2 DS18B20 集成式温度	
7.1.1 工作原理	107	传感器	160
7.1.2 驱动和接口电路	110	小结	167
7.1.3 典型应用	112	思考题和习题	167
7.2 红外传感器	116	第 10 章 检测技术基础知识	168
7.2.1 红外传感器的分类	116	10.1 检测技术概述	168
7.2.2 红外光谱	117	10.1.1 检测技术的定义和作用	168
7.2.3 红外传感器	117	10.1.2 检测技术的发展	170
7.2.4 红外光传感器应用实例	120	10.2 检测系统误差分析	172

10.2.1 系统误差处理·····	172	12.4 相界面的检测·····	214
10.2.2 随机误差处理·····	174	小结·····	214
10.2.3 粗大误差处理·····	177	思考题和习题·····	214
10.2.4 测量不确定度分析·····	178	第 13 章 运动量检测技术 ·····	215
10.3 最小二乘法与回归算法 ·····	182	13.1 位移检测·····	215
10.3.1 最小二乘法·····	182	13.1.1 位移检测方法·····	215
10.3.2 一元线性拟合·····	183	13.1.2 常用的位移传感器·····	216
10.3.3 多元线性拟合·····	184	13.1.3 相位差法·····	218
10.3.4 曲线拟合·····	185	13.2 速度检测·····	220
小结·····	186	13.2.1 速度检测方法·····	220
思考题和习题·····	186	13.2.2 常用的速度测量传感器·····	221
第 11 章 温度和振动参数检测技术 ·····	188	13.2.3 光纤陀螺·····	223
11.1 温度参数检测技术·····	188	13.3 加速度检测·····	225
11.1.1 温标及测温方法·····	188	13.3.1 加速度检测方法·····	225
11.1.2 膨胀式温度计·····	190	13.3.2 微机电加速度计·····	226
11.2 振动量检测技术·····	191	13.3.3 应用例子·····	230
11.2.1 概述·····	192	13.4 惯性测量·····	231
11.2.2 振动测量系统·····	193	13.4.1 惯性测量原理·····	231
11.2.3 振动参数的测量·····	195	13.4.2 典型应用·····	233
11.2.4 振动测量的应用·····	197	小结·····	234
小结·····	200	思考题和习题·····	234
思考题和习题·····	200	第 14 章 力学量检测技术 ·····	236
第 12 章 物位检测技术 ·····	201	14.1 压力的测量·····	236
12.1 物位检测的分类·····	201	14.1.1 压力的基本概念·····	236
12.2 液位检测方法·····	202	14.1.2 常用压力检测仪表·····	237
12.2.1 直接测量法·····	203	14.2 力的测量·····	244
12.2.2 静压式液位检测·····	203	14.2.1 力的基本概念·····	244
12.2.3 浮力法液位检测·····	205	14.2.2 力的测量方法·····	244
12.2.4 电学法液位检测·····	207	14.2.3 测力的传感器·····	246
12.2.5 超声波液位检测·····	209	14.3 转矩的测量·····	248
12.2.6 激光液位检测·····	210	14.3.1 转矩的基本概念·····	248
12.2.7 光纤液位检测·····	210	14.3.2 转矩的测量方法·····	248
12.3 料位检测方法·····	211	14.4 称重系统·····	250
12.3.1 重锤探测法·····	211	14.4.1 电子皮带秤·····	250
12.3.2 称重法·····	211	14.4.2 地磅·····	253
12.3.3 电气法·····	211	小结·····	254
12.3.4 声学法·····	212	思考题和习题·····	254
12.3.5 光学法·····	212	附录 1 Pt100 铂热电阻分度表 ·····	255
12.3.6 物位开关·····	213	附录 2 Pt10 铂热电阻分度表 ·····	256

附录 3	Cu50 铜热电阻分度表	257	(S 型)	261
附录 4	Cu100 铜热电阻分度表	258	附录 7	铂铑 13—铂热电偶分度表
附录 5	铂铑 30—铂铑 6 热电偶分度表 (B 型)	259	(R 型)	265
附录 6	铂铑 10—铂热电偶分度表		参考文献	266

测量可分为电参数测量和非电参数测量。电参数测量包括电压、电流、阻抗等，这些参数的测量可以用万用表、RLC 测量仪等电子测量仪器来完成。非电量参数包括机械量（如位移、力、应力应变等）、运动量（如速度、加速度等）、物位量（如液体的高度、物料的高度等）、流量（如体积流量、质量流量等）等的测量。在实际生产中，特别是自动化生产过程中，主要是采集非电量信息进行测量并实现控制。而非电量的测量一般是要用电测量的方法完成，那么就要将非电量转换成电量，这就是本书第一部分要介绍的传感器技术。

1.1 概述

传感器能够把自然界的各种物理量、化学量等转换成电信号，再经过电子电路变换后进行采集和处理，从而实现非电量的检测，这个过程可以与人的感官作用相对应。人们用视觉、听觉、味觉、嗅觉和触觉等感官感受外界的信息，如通过视觉（眼睛）可知物体的大小、形状等，通过听觉（耳朵）可以听到声音，通过嗅觉（鼻子）可以闻到气味，通过触觉（皮肤）可以感觉到物体的冷热等。人的眼睛相当于光敏传感器，如 CCD、光敏电阻等；人耳相当于压力传感器，如电容式和压电式传感器等；人的皮肤相当于压力传感器和温、湿度传感器，如应变传感器、热电阻传感器等；人的鼻子相当于气敏传感器，如气体传感器等；人的舌头相当于味觉传感器，如离子传感器。其关系如图 1-1 所示。

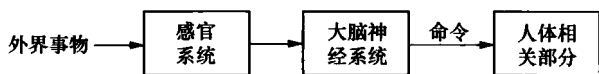


图 1-1 人与传感器的关系

在图 1-1 中，大脑神经系统相当于计算机，它将信息汇总后进行处理，这是本书的第二部分——检测技术篇要介绍的内容。人体相关部分相当于自动化控制系统的执行机构，不在本书的介绍范围之内。

对传感器的学习主要包括传感器的工作原理、特性参数、测量电路和典型应用等方面的知识，这些传感器包括电阻式、电感式、电容式、应变式、压电式、磁电式、热电式、光电式、辐射式等。

1.1.1 传感器的定义和组成

1. 传感器的定义

传感器 (Sensor) 也称变换器 (Transducer), 是将非电量 (物理量、化学量等) 等按一定规律转换成便于测量、传输和控制的电量或另一种非电量的元器件或装置 (本书只介绍转换为电量的部分, 转换为非电量的部分不在本书的介绍范围之内)。它是利用物理、化学学科的某些效应 (如压电效应、热电效应)、守恒原理 (如动量、电荷量)、物理定律 (如欧姆定律、胡克定律) 及材料特性按一定工艺实现的。

2. 传感器的组成

传感器是由敏感元件 (Sensitive Component)、转换元件、信号调理与转换电路组成的。敏感元件是能直接感受 (或响应) 被测信息 (通常为非电量) 的元件; 转换元件则是能将敏感元件感受 (或响应) 的信息转换为电信号的部分; 信号调理和转换电路是将来自转换元件的微弱信号转换成便于测量和传输的较大信号。传感器的典型组成如图 1-2 所示。

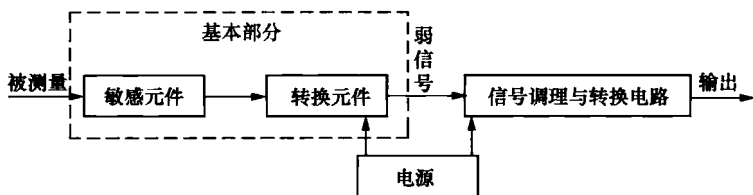


图 1-2 传感器的组成

各部分的作用如下所述。

① 敏感元件。敏感元件直接与被测对象接触, 将被测量 (非电量) 预先变换为另一种非电量。如应变式压力传感器的弹性膜片就是敏感元件, 作用是将压力转换成弹性膜片的变形。

② 转换元件。转换元件又称为变换元件, 是将敏感元件的输出量转换成电信号的部分。一般情况下, 不直接感受被测量 (特殊情况例外)。如应变式压力传感器中的应变片就是转换元件, 作用是将弹性膜片的变形转换成电阻值的变化。

值得注意的是, 并不是所有的传感器都必须含有敏感元件和转换元件。如果敏感元件直接输出电信号, 它就同时兼为转换元件。敏感元件和转换元件合二为一的传感器很多, 如压电传感器、热电偶、热电阻、光电器件等。

③ 信号调理与转换电路。信号调理与转换电路也称为二次仪表, 将转换元件输出的电信号放大, 转变成易于处理、显示和记录的信号。信号调理电路的类型视传感器的类型而定, 通常采用的有电桥电路、放大器电路、变阻器电路和振荡器电路等。

④ 电源。电源的作用是为传感器提供能源。需要外部接电源的称为无源传感器, 不需要外部接电源的称为有源传感器。如电阻、电感和电容式传感器就是无源传感器, 工作时需要外部供电电源, 而压电式传感器、热电偶是有源传感器, 工作时不需要外部电源供电。

实际上, 传感器的组成方式因被测量 (对象)、转换原理、使用环境及性能指标要求等具体情况的不同而有较大差异。

1.1.2 传感器的地位和作用

以减少劳动力和减轻劳动强度, 提高产品质量和提高产品的一致性为动力, 对自动化提

出了更多的需求和更高的要求。自动化是现代工业生产过程、交通、军事等领域不可缺少的部分。随着产品质量和控制精度的提高,对自动化的依赖越来越强,为了实现这些领域的控制,就需要获取信息,那么传感器就是获取信息的必由之路,可以说传感器是实现自动控制的源。如果没有传感器,就无法获取控制信息,就无法输出控制信号,也就无法实现自动控制。图 1-3 所示是自动控制的一个循环。

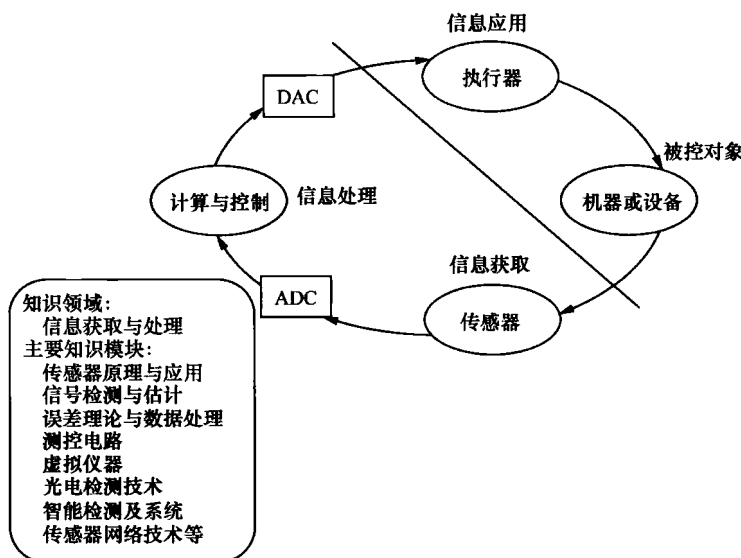


图 1-3 传感器的地位与作用

传感器技术不仅对科学技术的发展起到基础和支柱的作用,而且对产品的质量和产品的一致性起着决定性的作用,因而被世界各国列为科学攻关的关键技术之一。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高质量的生活以及生活所必须的合格产品”。传感器技术的发展推动了自动化技术的发展,自动化技术的发展也要求新的传感器技术出现,传感器技术是一个国家科学技术和国民经济发展水平的标志之一。

1.1.3 传感器的分类

一般来说,测量同一种被测参数,可以采用的传感器有多种。反过来,同一个传感器也可以用来测量多种被测参数。因此,传感器的分类方法有很多种。

1. 根据传感器是否需要提供外部电源分类(可以将传感器分为有源传感器和无源传感器)

有源传感器也称为能量转换型传感器,其特点在于它无需提供外部电源就能工作,敏感元件本身能将非电量直接转换成电信号。它无能量放大作用,只是从一种能量转换成了另一种能量,所以要求从被测对象获取的能量越大越好。例如,超声波传感器就是压/电转换、压电式传感器也是压/电转换、热电偶是热/电转换、光电池是光/电转换等。

与有源传感器相反,无源传感器的敏感元件本身不产生能量,而是随被测量而改变本身的电特性,因此必须采用外加激励源对其进行激励,才能输出电量信号。大部分传感器,如热电阻是热/电阻转换、压敏电阻是压/电阻转换、湿敏电容式是湿/电容转换,压力电感式是压/电感转换,这些就属于无源传感器。由于无源传感器需要为敏感元件提供激励源才能工作,所以无源传感器通常需要比有源传感器更多的引线,传感器的灵敏度也会受到激励信

号的影响。

2. 根据被测参数进行分类

通常以被测物理量命名,如测量温度的称为温度传感器、测量压力的称为压力传感器、测量流量的称为流量传感器、测量位移的称为位移传感器、测量速度的称为速度传感器等。如热电阻温度传感器、应变片式压力传感器、电感式位移传感器、容积式流量计等。

3. 根据输出信号的类型进行分类(可以将传感器分为模拟式传感器与数字式传感器)

模拟式传感器是将被测量转换为模拟电信号直接输出,输出信号的幅度表示被测对象的变化量。数字式传感器是将被测量转换为数字信号输出,被测对象的变化量通常由输出信号的数字量大小表征。

数字式传感器是模拟式传感器与数字技术相结合的产物。随着集成电路技术的发展,数字式传感器将会越来越多,如集成式温度传感器就是数字式温度传感器。也可以通过数字芯片将模拟信号转换成数字信号,如可以将V/F芯片与模拟式传感器相结合,就可以输出脉宽调制的数字信号。数字信号具有抗干扰能力强、易于传输等特点。

4. 根据传感器的工作原理进行分类

按传感器的工作原理进行分类,可以将传感器分为电阻式传感器(被测对象的变化引起了电阻的变化)、电感式传感器(被测对象的变化引起了电感的变化)、电容式传感器(被测对象的变化引起了电容的变化)、应变电阻式传感器(被测对象的变化引起了敏感元件的应变,从而引起电阻的变化)、压电式传感器(被测对象的变化引起了电荷的变化)、热电式传感器(被测对象温度的变化引起了输出电压的变化)等。

5. 按传感器的基本效应分类(可以将传感器分为物理传感器、化学传感器等)

物理传感器是把被测量的一种物理量转化成为便于处理的另一种物理量的元器件或装置,主要的物理传感器有光电式传感器、压电式传感器、压阻式传感器、电磁式传感器、热电式传感器等。例如,光电式传感器,其主要的原理是光电效应,当光照射到物质上就发生电效应,如光敏电阻就是光的变化引起了电阻的变化。按其构成可细分为物性型传感器和结构型传感器。

① 物性型传感器是指依靠敏感元件材料本身物理特性的变化来实现信号的转换,如利用材料在不同湿度下的特性变化制成的湿敏传感器,利用材料在光照下改变其特性可以制成光敏传感器,利用材料在磁场作用下改变其特性可以制成磁敏传感器等。

② 结构型传感器是指依靠传感器元件的结构参数变化实现信号的转换,主要通过机械结构的几何尺寸或形状的变化,转换为相应的电阻、电感、电容等物理量的变化,实现被测参数的测量。如变极距型电容式传感器就是通过极板间距的变化实现位移、压力等物理量的测量;变气隙电感式传感器就是利用衔铁的位置变化,实现位移、振动等物理量的测量。

化学传感器是将各种化学物质的特性(如气体、离子、电解质浓度、空气湿度等)的变化定性或定量地转换成电信号,如离子敏、气敏、湿敏和电化学传感器。

无论何种类型的传感器,它作为非电量测量与控制系统的首要环节,应能达到快速、准确、可靠且经济地实现信息获取和转换的基本要求。即①传感器反应速度快,可靠高;②传感器的输出量与被测对象之间具有确定的关系;③传感器的精度适当,稳定性好,满足静态、动态特性的要求;④传感器的适应性强,对被测对象影响小,不易受干扰;⑤传感器工作范围或量程足够大,具有一定的过载能力;⑥使用经济,成本低,寿命长。

1.1.4 传感器的发展方向

传感器技术是21世纪世界各国在高新技术领域争夺的一个制高点。从20世纪80年代起,日本将传感器列为优先发展的高新技术之首,美国和欧洲等西方国家也将此技术列为国家高科技和国防技术的重点内容,同时我国也将传感器技术列入国家高新技术发展的重点。有学者认为今后传感器的研究和开发方向应是:环保传感器、医疗卫生和食品业检测器、微机械传感器、汽车传感器、高精度传感器、新型敏感材料等。

传感器的发展趋势可概括为以下几个方面。

1. 传感器的小型化、集成化

由于航空航天和医疗器械的需要,以及减小传感器对被测对象的影响,传感器必须向小型化方向发展,以便减小仪器的体积和重量。同时为了减少转换、测量和处理环节,传感器也应向集成化方向发展,进一步减小体积、增加功能、提高稳定性和可靠性。

传感器的集成化分为3种情况:一是具有同样功能的传感器集成在一起,从而使一个点的测量变成对一个面和空间的测量;二是不同功能的传感器集成在一起,从而形成一个多功能或具有补偿功能的传感器;三是将传感器与放大、运算及补偿等环节一体化,组装成一个具有处理功能的器件。

集成传感器的优势是传统传感器无法达到的,它不仅仅是一个个传感器的简单叠加,而是将辅助电路中的元件与传感元件同时集成在一块芯片上,使之具有校准、补偿、自诊断和网络通信功能,它可降低成本、减小体积、增强抗干扰性能。

2. 传感器的智能化

智能化传感器就是传统传感器与微处理器、测量电路、补偿电路等集成在一起或组装在一起的成果,是一种带“电脑”的传感器,它不仅具有传统传感器的感知功能,而且还具有判断和信息处理功能。与传统传感器相比具有以下特点。

① 具有修正、补偿功能:可在正常工作中通过软件对传感器的非线性、温度漂移、响应时间等进行修正和补偿。

② 具有自诊断功能:传感器上电后,其内部程序就对传感器进行自检,如果某一部分出现了问题,能够指示传感器某一点出现了故障或某一部分出现了故障。

③ 多传感器融合和多参数测量功能。

④ 具有数据处理功能:通过设定的算法自动处理数据和存储数据。

⑤ 具有通信功能:传感器获取的数据,可以通过总线将测量结果传输给信息处理中心,信息处理中心也可以将算法或阈值等传输给传感器,从而实现了信息的传输与反馈。

⑥ 可设置报警功能:通过它的通信功能,可以通过总线设置报警的上限值和下限值。

3. 传感器的网络化

将多个传感器通过通信协议连接在一起就组成了一个传感器网。特别是传感器与无线技术、网络技术相结合,出现了一个新网络——传感器网或物联网,引起了广泛的关注。

基于 Zigbee 技术的无线传感器网是以 IEEE 802.15.4 协议为基础,得到了迅猛发展,它具有极低的功耗、组网方式灵活、低成本等优点,在军事侦察、环境检测、医疗健康、科学研究等众多领域具有广泛的应用前景。

4. 生物传感器

生物传感器是利用生物特异性识别过程来实现检测的传感器件,生物传感器中的生物敏感

元件包括生物体、组织、细胞、细胞器、细胞膜、酶、抗体、核酸等，而生物传感器就是利用这些从微观到宏观多个层次相关物质的特异识别能力来实现的器件。传统上光学检测是生物传感器的主流，然而近年来随着界面科学（如分子自组装技术）与纳米科学（如扫描探针显微镜）的发展，电化学纳米生物传感器获得了前所未有的发展机遇，并引起了极大的关注。

1.2 传感器的基本特性

在生产过程中，要求对各种各样的参数进行检测和控制，这就要求传感器不仅能感受到非电量的变化，并且不失真地变换成另一种非电量或电量输出，这些取决于传感器的基本特性，即传感器的输入—输出特性，它是由传感器的内部结构参数和性能参数相互作用在外部的表现。不同类型的传感器有不同的内部结构和性能参数，这些内部参数决定了它们具有不同的外部特性。

传感器的输入（被测量）一般有两种形式：①静态信号：输入信号不随时间变化或变化极其缓慢；②动态信号：输入信号随时间变化而变化。由于输入信号的不同，传感器所呈现出来的输入—输出特性也不同，因此存在静态和动态两种特性。具有良好的静态和动态特性的传感器可以降低或抵消测量过程中的误差。

本部分将介绍传感器的静态和动态的特性及传感器的标定方法。

1.2.1 传感器的静态特性

传感器的静态特性（Static Characteristics）就是传感器在稳态信号作用下，它的输入与输出的关系。静态特性主要包括线性度、灵敏度、分辨率、迟滞性、重复性、漂移。

1. 线性度

线性度（Linearity）是指传感器的输入与输出成线性关系的程度。理想情况下，传感器的输入输出特性应是线性的。可用式（1-1）表示。

$$y = a_0 + a_1 x \quad (1-1)$$

式中： y 为输出量； x 为输入量； a_0, a_1 为常数（ a_1 就是下面要讲的灵敏度）。

如果传感器的输入与输出成严格的线性比例关系，这是非常理想的情况。而实际情况是，传感器的静态输入与输出一般是一条曲线而非直线，可用式（1-2）表示。

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

式中： y 为输出量； x 为输入量；而常数项变成了 $a_0, a_1, a_2, \cdots, a_n$ 。

式（1-2）中除了1次方项外，还出现了2次方项、3次方项等高次方项，2次方以上项的出现，使得输出与输入不是式（1-1）的线性比例关系了，而是一个非线性关系。为了计算方便，常用一条拟合直线近似地代表实际的特性曲线，线性度（非线性误差）就是这个近似程度的一个性能指标。

将非线性曲线拟合（Curve Fitting）成直线的方法有多种，下面介绍几种方法。

（1）两点法

将零输入时的输出点和满量程时的输出点相连的直线作为拟合直线，如图1-4所示。也就是零输入时传感器的输出为 $y_{\min}$ ，最大输入 $x_{\max}$ 时输出为 $y_{\max}$ ，将 $(0, y_{\min})$ 和 $(x_{\max}, y_{\max})$ 这两点连成直线，作为传感器的近似特性曲线。此方法十分简单，但一般来说非线性误差较大。

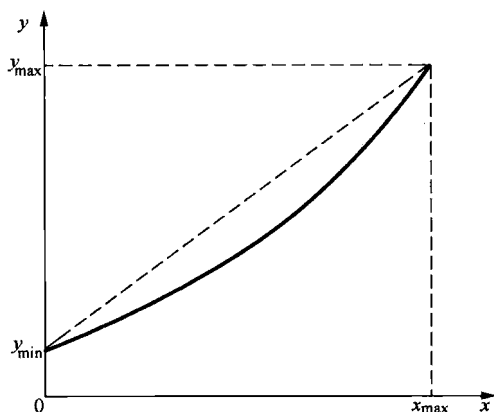


图 1-4 零输入—满量程输出拟合

(2) 最小二乘法拟合

将与特性曲线上各点偏差的平方和为最小的理论直线作为拟合直线，此拟合直线称为最小二乘法拟合直线（具体实现方法见第 10 章）。

(3) 切线/割线拟合、过零旋转拟合、端点平移拟合

如果传感器的非线性项的方次不高，在输入量变化范围不大的条件下，可以用切线或割线拟合、过零旋转拟合、端点平移拟合等来近似地代表实际曲线的一段，这就是传感器非线性化特性的线性化处理，如图 1-5 所示。

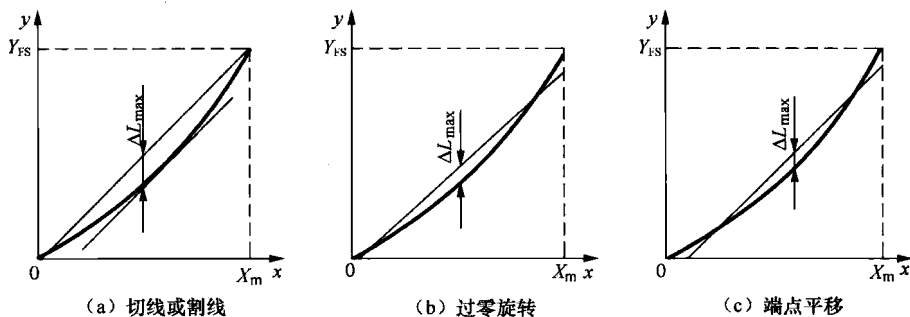


图 1-5 几种非线性拟合

(4) 分段拟合

由于计算机速度的提高，要求测量的精度提高，可以采用上面介绍的某一种方法，进行分段线性化拟合，示于图 1-6 中。

输入—输出曲线与理想直线的偏离程度称为非线性误差（Non-Linearity Error）。非线性误差有绝对误差（Absolute Error）和相对误差（Relative Error）两种表示方式。传感器的输出值与其线性拟合值的偏差称为绝对误差，绝对误差 ΔL 用下式表示：

$$\Delta L = |L_{\text{out}} - L_{\text{linear}}|$$

式中： L_{out} 为传感器的输出值； L_{linear} 为传感器的线性拟合值。 ΔL 在传感器的输出范围内的最大值 ΔL_{max} 称为传感器的最大绝对误差（Maximum Absolute Error）。传感器的绝对误差与传感器的满量程比称为传感器的相对误差，它表示为

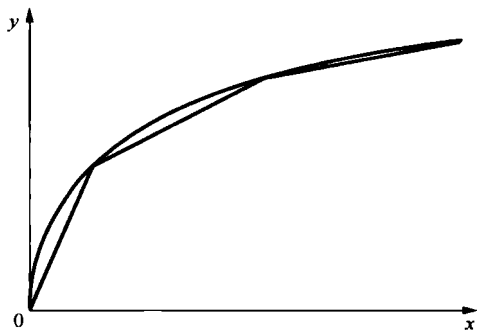


图 1-6 分段线性化拟合

$$e = \frac{\Delta L}{y_{FS}} \times 100\%$$

式中： ΔL 为传感器的绝对误差； y_{FS} 为传感器的满量程输出值。

实际传感器的输入与输出基本上都是非线性关系，理想的线性关系一般是不存在的，通常利用测量数据，选择合适的拟合方法，通过计算获得拟合直线。

2. 灵敏度

灵敏度（Sensitivity）是指传感器在稳态工作情况下，在输入量变化 Δx 时输出量变化了 Δy ，输出量的变化 Δy 与输入量的变化 Δx 的比值称为灵敏度，它是输出—输入特性曲线的斜率。灵敏度 S 表示为

$$S = \Delta y / \Delta x$$

如果传感器的输出和输入之间呈线性关系，那么灵敏度 S 是一个常数，即式（1-1）中的 a_1 。若传感器的输出与输入之间是非线性关系，那么灵敏度 S 在不同的输入时是不同的。常用 dy/dx 表示在某一工作点处的灵敏度，它随输入量的变化而变化，如图 1-7 所示。

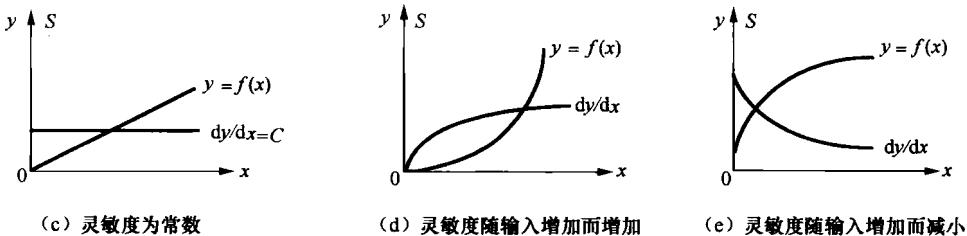
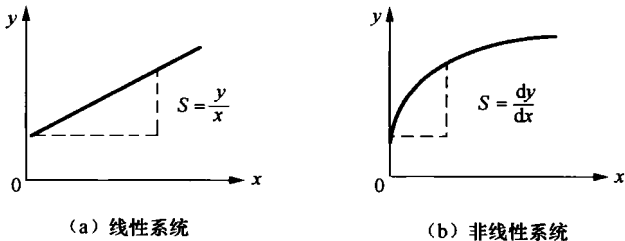


图 1-7 传感器的灵敏度

灵敏度的量纲是输出、输入量的量纲之比。例如，热电偶温度传感器，在某一时刻温度

变化了 1°C 时, 其输出电压变化了 5mV , 那么其灵敏度应表示为 $5\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ 。

提高传感器的灵敏度, 可得到较高的测量精度, 但灵敏度愈高, 测量范围愈窄, 稳定性也往往愈差。

3. 分辨率

分辨率 (Resolution) 是指传感器可感受到的被测量的最小变化的能力。也就是说, 如果输入量从某一非零值缓慢地变化, 当输入的变化值未超过某一数值时, 传感器的输出不会发生变化, 即传感器对此输入量的变化是分辨不出来的, 只有当输入的变化值超过某一数值时, 传感器的输出才会发生变化, 使传感器的输出发生变化的这个数值就是传感器的分辨率。

通常传感器在满量程范围内各点的分辨率并不相同, 因此常用满量程中能使输出量产生阶跃变化的输入量中的最大变化值作为衡量分辨率的指标。

例如, 应变式压力传感器, 在 100.0kg 时输出的电压值为 35mV , 在 100.2kg 时输出的电压值仍为 35mV , 但在 100.3kg 时输出的电压值为 36mV , 则其分辨率为 0.3kg 。

分辨率与测量仪表也是有关的, 如上面的应变式压力传感器, 若采用精度更高的电压表来测量。同样在 100.0kg 时输出的电压值为 35.0mV , 100.1kg 时输出的电压值为 35.1mV , 那么其分辨率为 0.1kg 。

4. 迟滞性

相同测量条件下, 对应于同一大小的输入信号, 传感器在正向 (输入量增大) 行程和反向 (输入量减小) 行程期间, 输入—输出特性曲线不重合的程度称为迟滞性 (Hysteresis), 如图 1-8 所示。对应于同一输入 x_i , 正向行程时传感器输出 y_1 与反向行程时传感器输出 y_d 之间的差值叫滞环误差, 这种现象称为迟滞现象。迟滞常用最大滞环误差 $\Delta H_{\max}$ 与满量程输出 y_{FS} 之百分比表示, 即

$$e_H = \frac{\Delta H_{\max}}{y_{\text{FS}}} \times 100\%$$

式中: $\Delta H_{\max}$ 为正反行程输出值的最大偏差。

迟滞特性反映了传感器正、反行程期间输入输出特性曲线不重合的程度。

迟滞现象产生的原因: 传感器机械部分存在不可避免的摩擦、间隙、松动、积尘及辅助电路老化、漂移等, 引起能量的吸收和消耗。

5. 重复性

传感器在输入量按同一方向 (增加或减小) 作全量程多次测量时, 所得输入—输出特性曲线的一致程度称为重复性 (Repeatability), 如图 1-9 所示。如果传感器多次按相同输入条件下测量的输出特性曲线越重合, 误差越小, 则其重复性越好, 重复性误差反映的是测量数据的离散程度。实际特性曲线不重复的原因与迟滞产生的原因相同。重复性是检测系统最基本的技术指标, 是其他各项指标的前提和保证。

6. 漂移

漂移 (Drift) 是传感器在输入量不变的情况下, 由于外界的干扰 (例如温度、噪声等), 传感器的输出量发生了变化。常用的有零点漂移和温度漂移, 一般可通过串联或并联可调电阻来消除。

(1) 零点漂移

零点漂移简称为零漂, 是指传感器在无输入时, 其输出值偏移零值的现象。主要由于传感器自身结构参数老化等引起的。