



普通高等教育“十三五”规划教材
电子信息科学与工程类专业 规划教材

传感器原理及应用

(第2版)

◆ 彭杰纲 编著

Electronic Information
Science and Engineering



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育“十三五”规划教材
电子信息科学与工程类专业规划教材

传感器原理及应用

(第2版)

彭杰纲 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书由电子科技大学自动化工程学院传感器课程组依据教学实践,在《传感器原理及应用》一书的基础上修订而成。全书共 12 章,主要内容包括传感器的概念、分类、基本特性、标定和技术现状,传感器的功能材料及加工工艺,温敏传感器,力敏传感器,磁敏传感器,光敏传感器,声敏传感器,湿敏传感器,生物传感器,传感器的信号处理和智能化,无线传感器网络等。本书的特点是,内容涵盖传感器原理及其数据采集、信号处理和互联网+应用,注重对传感器应用和工程实践能力的培养。本书提供配套电子课件,任课教师可自华信教育资源网 www.hxedu.com.cn 免费注册下载。

本书可作为高等学校工科测控技术与仪器、自动化、机电一体化及仪器仪表等专业高年级、本科生和研究生的教材,也可供相关工程技术人员学习参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

传感器原理及应用 / 彭杰纲编著. —2 版. —北京: 电子工业出版社, 2017.2

ISBN 978-7-121-30967-0

I. ①传… II. ①彭… III. ①传感器—高等学校—教材 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 031681 号

策划编辑: 王羽佳

责任编辑: 郝黎明

印 刷: 涿州市京南印刷厂

装 订: 涿州市京南印刷厂

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 22 字数: 640 千字

版 次: 2012 年 9 月第 1 版

2017 年 2 月第 2 版

印 次: 2017 年 2 月第 1 次印刷

定 价: 55.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及
邮购电话: (010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: (010) 88254535, wylj@phei.com.cn。

第1版前言

随着“信息时代”的到来,作为获取信息的手段——传感器技术得到了长足的进步:一方面其应用领域越来越广泛,人们对其要求越来越高,需求越来越迫切。虽然传感器能将各种物理量、化学量和生物量等信号转变为电信号,使得人们可以利用计算机实现自动测量、信息处理和自动控制,但是它们都不同程度地存在温漂和非线性等影响因素。因此,对于相关工程和研究人員不仅必须掌握各类传感器的结构、原理及其性能指标,还必须懂得传感器经过适当的接口电路调整才能满足信号的处理、显示和控制的要求。另一方面,传感器的被测信号来自于各个应用领域,各自都在开发研制适合应用的传感器,于是种类繁多的新型传感器及传感器系统不断涌现。因此,了解并掌握各类传感器的基本结构、工作原理及特性是非常重要的。传感器技术是一门涉及微机械与微电子技术、计算机技术、信号处理技术、电路与系统、传感技术等多种学科的综合性技术。对传感器原理的掌握对于高等学校自动化、测控技术与仪器等专业的学生是至关重要的。

传感器原理是一门面向工科类各相关专业的学科专业课,是综合应用相关课程知识和内容,解决科研、生产、国防建设所面临的工程检测问题的基础性课程。该课程还对培养学生的实验能力、创新能力等方面具有重要作用。“传感器原理”课程是测控技术与仪器和自动化类本科专业的专业必修课程,也会作为机械制造及其自动化专业和机械电子工程专业的选修课程。

为了进一步加强传感器原理教学工作,适应高等学校正在开展的课程体系与教学内容的改革,及时反映传感器原理教学的研究成果,积极探索适应21世纪人才培养的教学模式,我们编写了本书。本书有3个特色:一是将MEMS技术与传感器技术结合在一起,介绍两者的相互影响和相互应用;二是对传感器工作机理进行了透彻的分析,应用性与基础性并重,有助于读者深刻理解传感器的工作机理,在工程中选择合适的传感器;三是内容全面、丰富,从原理到应用再到工程技术全都涉及,对于工程人員也有很大的参考价值。

本书详细介绍传感器的基本原理和相关应用,共11章。第1章是传感器概论及相关基础知识;第2章对与传感器密切相关的材料及加工工艺技术做了系统的介绍;第3~10章按综合分类法介绍传感器原理及应用,主要内容包括:热学量(热敏)、力学量(力敏和声敏)、磁学量(磁敏)、光学量(光敏)、化学量(气敏和湿敏)及生物量(生物传感器)等传感器的原理、结构、性能指标及其应用电路;第11章介绍传感器的信号处理、智能化及无线传感器网络,为后续的仪器电路、无线传感器网络等课程做了铺垫。

本书语言简明扼要、通俗易懂,具有很强的专业性、技术性和实用性,是作者多年教学和科研经验的积累和总结。本书可作为高等学校工科测控技术与仪器、自动化、机电一体化及仪器仪表等专业高年级本科生和研究生的教材,也可供相关工程技术人员学习参考。

教学中,可以根据教学对象和学时等具体情况对书中的内容进行删减和组合,也可以进行适当扩展,参考学时为32~64学时。为适应教学模式、教学方法和手段的改革,本书配套多媒体电子课件和习题参考答案,请登录华信教育资源网(<http://www.hxedu.com.cn>)注册下载。

本书第1、2、8、9、10章由彭杰纲编写,第3、4、5、11章由宁静编写,第6、7章由邓罡编写。全书由彭杰纲统稿。浙江理工大学的胡旭东教授在百忙之中对全书进行了审阅。在本书的编写过程中,西南交通大学的高品贤教授、伍川辉副教授和浙江理工大学的李晓明副教授提出了许多宝贵意见,研

研究生王文龙和方敏在教材编写过程中做了大量工作。在此一并表示衷心的感谢!

本书的编写参考了大量近年来出版的相关技术资料,吸取了许多专家和同仁的宝贵经验,在此向他们深表谢意。

由于传感器技术发展迅速, 作者学识有限, 书中误漏之处难免, 望广大读者批评指正。

作者

2012 年 7 月

第2版前言

本书是《传感器原理及应用》一书的修订版,主要面向仪器、自动化和机械专业的本科生。本书采用原理与用途相结合的编排体系,以及以用途为主线的分类方式,便于相关专业学生理解书中的内容,也便于学生查阅资料。

教材修订的初衷如下:(1)以本科教学为出发点,以学生对相关知识的理解为目的,从新视角深入浅出地阐述相关的知识;(2)强化知识的系统性,便于学生从整体上了解相关知识;(3)强调教材和传感器发展的同步性,紧密跟踪传感器领域的最新进展;(4)修正上一版中存在的错误,并补充课后习题。

本书前10章的内容基本保持不变。除保持前一版系统性的稳定外,为提升教学效果,对教学的重点内容进行了充实与提高。第1章在保持传感器概论及相关基础知识体系稳定的情况下,对相关概念进行了更为科学的表述,充实了关于传感器动静态特性的内容,由于传感器的动态和静态特性是本章的重点与难点,因此这次修订时重新编写了相关的内容,以利于教学中对该问题的阐述,同时修正了此前的笔误;第2章系统介绍了与传感器密切相关的材料及加工工艺,对仪器、自动化和机械专业的学生而言,这部分内容的作用主要是拓展知识面,因此除修订印刷错误外,内容基本保持稳定。

第3~10章按照综合分类法介绍传感器的原理及应用,主要内容包括热学量(温敏)、力学量(力敏和声敏)、磁学量(磁敏)、光学量(光敏)、化学量(气敏和湿敏)及生物量(生物传感器)等传感器的原理、结构、性能指标及应用电路。其中,热学量(温敏)、力学量(力敏和声敏)、磁学量(磁敏)、光学量(光敏)传感器是仪器、自动化和机械专业学生的重点学习内容,为便于学生理解相关的概念,重新编写了这部分内容,并修订了上一版中的错误,增加了关于传感器应用的实例。

化学量(气敏和湿敏)、水声传感器及生物量(生物传感器)作为现代传感器技术的尖端领域,其应用领域日益广泛,并成为传感器领域发展的重要部分,本书力图通过对上述新型领域传感器的介绍,拓展学生的知识面。新版本保持了这部分内容的稳定性,仅更正了部分印刷错误。

新版对第1版中的第11章做了重大修改。由于在教学实践过程中发现该章的内容无法适应当前的教学要求,因此对该部分内容进行了重新编写,将其分为了两章,即第11章“传感器的信号处理”和第12章“传感器的智能化和网络化”。对新的第11章进行了系统整理,提升了传感器调理电路的理论知识,以便学生从理论高度理解传感器调理电路的共性问题,系统阐述了传感器信号的测量、变换及放大和分离的整个过程。为适应传感器与互联网+的深度融合,第12章丰富了网络化传感器的内容,以反映传感器原理课程与现代传感器应用的进展。

本书的修订工作由彭杰纲完成。电子科技大学自动化工程学院传感器原理课程组的詹慧琴、胡学海、邓罡、蒋毅、闫斌等老师提出了许多宝贵的意见,研究生祝悦和欧斌在教材编写和电子教案的准备过程中做了大量的工作,研究生杨超、何春秋、雍涛、董冠奇、吴俊、刘露、邹地长在教材的外文资料翻译和校对方面也做了不少工作,在此表示衷心的感谢!

教材的修订得到了电子科技大学高水平规划教材项目和新编特色教材建设项目的支持,在此表示感谢。

本书的编写参考了大量近年来出版的国内外相关技术资料,吸取了许多专家和同仁的宝贵经验,在此向他们深表谢意。

由于传感器技术发展迅速,作者学识有限,书中误漏之处难免,望广大读者批评指正。

编者

2017年1月

目 录

第1章 绪论	1	3.2.6 热电偶传感器应用实例	50
1.1 传感器的概念	1	3.3 电阻型温度传感器	52
1.1.1 传感器的基本组成	1	3.3.1 热电阻	52
1.1.2 传感器的定义	2	3.3.2 热敏电阻	55
1.2 传感器的分类	2	3.3.3 陶瓷半导体热敏电阻	57
1.3 传感器的基本特性	3	3.3.4 半导体热电阻温度传感器	61
1.3.1 传感器的静态特性	4	3.3.5 热敏电阻温度传感器的典型应用	63
1.3.2 传感器的动态特性相关的数学模型	11	3.4 半导体PN结型温度传感器	64
1.3.3 传感器的动态特性描述	15	3.4.1 温敏二极管	64
1.4 传感器的标定	20	3.4.2 温敏晶闸管(可控硅)	66
1.4.1 传感器的静态特性标定	21	3.4.3 温敏三极管	68
1.4.2 传感器的动态标定	21	3.4.4 半导体PN结型温度传感器典型应用	70
1.5 传感器技术发展方向	23	习题	71
习题	25	第4章 力敏传感器	73
第2章 传感器的功能材料及加工工艺	27	4.1 应变式电阻传感器	73
2.1 传感器使用的材料	27	4.1.1 电阻应变片的种类	73
2.1.1 导体、半导体和电介质	28	4.1.2 金属电阻应变片	73
2.1.2 有机高分子敏感材料	30	4.1.3 半导体应变片	78
2.1.3 磁性材料	30	4.1.4 电阻应变片的测量电路	79
2.2 传感器的加工工艺	31	4.1.5 电阻应变式传感器的应用	83
2.2.1 结构型传感器的加工工艺	31	4.2 压电式力传感器	88
2.2.2 微机械加工工艺	32	4.2.1 压电效应和压电材料	88
习题	40	4.2.2 压电传感器的等效电路与测量线路	91
第3章 温敏传感器	41	4.2.3 压电式传感器的应用举例	95
3.1 热学相关基本概念	41	4.2.4 压电式传感器的主要性能及其影响因素	97
3.1.1 温标	41	4.3 电容式力传感器	99
3.1.2 热力学相关概念	41	4.3.1 电容式传感器的特点	99
3.1.3 温敏传感器的分类	42	4.3.2 电容式压力传感器	100
3.2 热电偶传感器	42	4.4 电感式压力传感器	102
3.2.1 热电效应	42	4.5 谐振式压力传感器	104
3.2.2 热电偶基本定律	44	4.5.1 工作原理和特性	104
3.2.3 热电偶的结构	45		
3.2.4 热电偶冷端温度误差及其补偿	46		
3.2.5 热电偶实用测量电路	49		

4.5.2 谐振式压力传感器的特性	104	第 6 章 光敏传感器	144
4.5.3 谐振式压力传感器的类型	106	6.1 概述	144
4.6 光纤力学传感器	108	6.1.1 光谱	144
4.7 其他新型传感器	110	6.1.2 光学传感器的相关计量单位	145
习题	112	6.1.3 光源	146
第 5 章 磁敏传感器	113	6.2 光电效应传感器	148
5.1 概述	113	6.2.1 外光电效应及器件	148
5.2 霍尔元件	114	6.2.2 内光电效应(光电导)及器件	153
5.2.1 霍尔效应	115	6.3 光生伏特效应器件	157
5.2.2 影响霍尔效应的因素	116	6.3.1 光生伏特效应	157
5.2.3 霍尔元件基本结构	117	6.3.2 光电池	158
5.2.4 霍尔元件的基本特性	117	6.4 光敏二极管	159
5.2.5 霍尔元件的电磁特性	118	6.4.1 结构原理	159
5.2.6 霍尔元件不等位电势补偿	120	6.4.2 光电二极管应用实例	161
5.2.7 霍尔元件温度补偿	120	6.5 光敏晶体管	162
5.2.8 霍尔式传感器的应用	123	6.5.1 光敏晶体管和光敏二极管基本特性	163
5.3 半导体磁阻器件	124	6.5.2 光敏三极管应用实例	164
5.3.1 磁阻效应	124	6.6 色敏光电传感器	165
5.3.2 磁阻元件	126	6.6.1 双结型色彩传感器	165
5.3.3 磁敏电阻的应用	127	6.6.2 非晶态集成色彩传感器	165
5.4 结型磁敏器件	128	6.6.3 应用实例	166
5.4.1 磁敏二极管	128	6.7 光电耦合器件	167
5.4.2 磁敏三极管	132	6.7.1 光电耦合器	167
5.5 铁磁性金属薄膜磁阻元件	136	6.7.2 光电开关	167
5.5.1 铁磁体中的磁阻效应	136	6.8 热释电红外光敏器件	168
5.5.2 铁磁薄膜磁敏电阻的结构与工作原理	136	6.8.1 热释电红外光敏效应	168
5.5.3 铁磁薄膜磁敏电阻的技术性能及特点	136	6.8.2 热释电传感器的结构	169
5.6 压磁式传感器	137	6.8.3 热释电红外传感器的应用	170
5.6.1 压磁式传感器的基本原理	137	6.9 固态图像传感器	173
5.6.2 压磁式传感器的主要特性	138	6.9.1 CCD 图像传感器	173
5.6.3 压磁式传感器的应用举例	139	6.9.2 MOS 固态图像传感器	176
5.7 新型磁敏传感器	139	6.9.3 CCD 与 CMOS 图像传感器的性能比较	178
5.7.1 MOS 磁敏器件	139	6.10 光纤传感器	179
5.7.2 高分辨率磁性旋转编码器	140	6.10.1 概述	179
5.7.3 涡流传感器	141	6.10.2 光纤的结构和传输原理	180
5.7.4 韦根德磁敏器件	141	6.10.3 光纤传感器	181
5.7.5 磁通门传感器	142	习题	185
习题	143		

第7章 声敏传感器	186	8.5 接触燃烧式气敏传感器	234
7.1 声波的基本性质	186	8.5.1 检测原理与结构	234
7.1.1 声压及其描述	186	8.5.2 气敏特性	235
7.1.2 声功率和声强	187	8.6 新型气敏传感器	236
7.1.3 声波的反射、折射、透射和吸收	188	8.6.1 红外吸收式传感器	236
7.2 声敏传感器	190	8.6.2 热导率变化式气敏传感器	236
7.2.1 电阻变换型声敏传感器	190	8.6.3 气敏半导体材料吸附机制及器件	236
7.2.2 压电声敏传感器	191	8.6.4 气-磁传感器	237
7.2.3 电容式声敏传感器(静电型)	191	8.7 气敏传感器的应用	238
7.2.4 音响传感器	192	8.7.1 家用煤气、液化石油气泄漏报警器	238
7.3 水声传感器	194	8.7.2 自动换气扇	238
7.3.1 水声传感器的性能指标	194	8.7.3 自动抽油烟机	239
7.3.2 水声传感器用郎之万型换能器	196	8.7.4 酒精检测报警器	239
7.3.3 海底地貌仪	197	8.7.5 缺氧检测	240
7.3.4 多普勒计程仪	198	习题	241
7.3.5 相关计程仪	198	第9章 湿敏传感器	242
7.4 超声波传感器	199	9.1 湿度的基本概念	242
7.4.1 超声波及其物理性质	199	9.1.1 相对湿度和绝对湿度	242
7.4.2 超声波对超声场产生的作用(效应)	200	9.1.2 露点	242
7.4.3 超声波传感器概述	201	9.2 湿度传感器的特性参数	243
7.4.4 超声波传感器的应用	201	9.3 湿度传感器的分类	246
7.5 表面声波传感器	204	9.4 陶瓷式湿度传感器	246
7.5.1 表面声波的类型	205	9.4.1 陶瓷电阻式湿度传感器	246
7.5.2 SAW传感器的结构与工作原理	209	9.4.2 陶瓷电容式湿度传感器	248
7.5.3 高分辨率SAW温度传感器	210	9.5 有机物及高分子聚合物湿度传感器	249
7.5.4 SAW气敏传感器	211	9.5.1 高分子电阻式湿度传感器	249
7.5.5 SAW压力传感器	212	9.5.2 高分子电容式湿度传感器	251
7.5.6 声板波传感器	213	9.6 半导体结型和MOS型湿度传感器	253
习题	215	9.6.1 湿敏二极管	254
第8章 气敏传感器	216	9.6.2 湿敏MOS场效应管	254
8.1 概述	216	9.7 固体电解质界限电流式高温湿度传感器	255
8.2 气敏传感器的主要参数与特性	216	9.7.1 固体电解质界限电流式湿度传感器的结构与工作原理	255
8.3 半导体气敏传感器	218	9.7.2 固体电解质界限电流式湿度传感器的特性	256
8.3.1 电阻型半导体气敏元件	218		
8.3.2 半导体气敏二极管和MOSFET气敏传感器	228		
8.4 固态电解质气敏传感器	232		

9.8 溶性电解质湿度传感器	257	11.3.1 晶体管阻抗匹配器	301
习题	259	11.3.2 场效应管阻抗匹配器	302
第 10 章 生物传感器	260	11.3.3 运算放大器阻抗匹配器/信号 放大电路	303
10.1 生物传感器的基本概念	260	11.4 信号分离/滤波电路	306
10.2 生物传感器的特点	261	11.4.1 滤波器的基本知识	306
10.3 生物反应基本知识	261	11.4.2 按频带分类的滤波器	308
10.3.1 酶反应	261	11.4.3 按逼近方式分类的滤波器	312
10.3.2 微生物反应	263	11.4.4 按电路组成分类的滤波器	312
10.3.3 免疫学反应	264	习题	314
10.3.4 生物传感器膜技术和固定化 技术	265	第 12 章 传感器的智能化和网络化	315
10.3.5 基本电极	268	12.1 智能传感器	315
10.3.6 测量方式	268	12.1.1 智能传感器的结构	315
10.4 生物传感器的工作原理及类型	269	12.1.2 智能传感器的功能	315
10.4.1 酶传感器及其应用	269	12.2 智能传感器的网络化	317
10.4.2 微生物传感器及其应用	270	12.2.1 现场总线智能传感器	317
10.4.3 免疫传感器及其应用	270	12.2.2 基于 TCP/IP 协议的网络化 智能传感器	320
10.4.4 半导体生物传感器及其应用	271	12.3 无线传感器网络概述	321
10.4.5 组织传感器	271	12.3.1 无线传感器网络的基本概念	321
10.4.6 细胞传感器	273	12.3.2 无线传感器网络的特征	322
10.4.7 基因芯片	274	12.3.3 无线传感器网络的发展	324
习题	275	12.3.4 无线传感器网络的应用	325
第 11 章 传感器的信号处理	276	12.3.5 无线传感器网络所面临的 挑战	326
11.1 信号测量电路	276	12.3.6 无线传感器网络的体系结构	327
11.1.1 桥电路	276	12.3.7 无线传感器网络的系统结构	327
11.1.2 电阻测量	285	12.3.8 无线传感器网络体系结构的 设计要求	329
11.1.3 电感测量	286	12.3.9 无线传感器网络的关键技术	332
11.1.4 电容测量及电容检测电路	287	习题	338
11.2 信号变换电路	295	参考文献	339
11.2.1 电压—电流变换	296		
11.2.2 电流—电压变换	299		
11.3 阻抗匹配器/信号放大电路	301		

第1章 绪 论

1.1 传感器的概念

人们在利用传感器获取信息的过程中,首先要获取精确、可靠的信息。这种信息的获取是保证机器设备正常运行或处于最佳状态的基础。传感器不仅在现代化生产、经营领域中发挥着重要的作用,而且在基础学科研究和高新技术领域的开发过程中具有重要的应用,尤其是在超高温、超低温、超高压、超高真空、超强磁场、超弱磁场等条件下,迫切需要适应各种极限环境的高灵敏度、高可靠性的检测传感器。

目前,传感技术早已渗透到工业生产、环境保护、资源调查、医学诊断、生物工程、宇宙开发、海洋探测,甚至文物保护等广泛的领域。在人们的生活中,处处都使用着各种各样的传感器,如电视机、音响、DVD、空调遥控器等使用的是红外线传感器;电冰箱、微波炉、空调机温控使用的是温度传感器;家用煤气灶、燃气热水器报警使用的是气敏传感器;家用摄像机、数码相机、上网聊天视频使用的是光电传感器;汽车使用的传感器更多,如速度、压力、油量、爆震传感器及角度线性位移传感器等。这些传感器的共同特点是利用各种物理、化学、生物效应等实现对被测信号的测量。

在传感器中包含两个不同的概念:一是检测信号,二是能把检测的信号转换为一种与被测量有对应函数关系且便于传输和处理的物理量。例如,家庭常用的遥控器把光信号转换为电信号,楼道照明的声控开关把声音转换为电信号。因此,传感器又常称为变换器、转换器、检测器、敏感元件、换能器等。在不同的学科领域中,这些不同的名称是根据同一类型的器件在不同领域中的应用得来的。现代化生产和科学技术的发展不断地应用于传感技术,也有力地推动着传感技术的现代化。传感技术与现代化生产和科学技术的密切关系,使传感技术成为一门十分活跃的技术学科,几乎渗透到了人类的一切活动领域,发挥着越来越重要的作用。研究新机制、高性能传感器,往往会导致某些边缘学科在技术上的突破。

1.1.1 传感器的基本组成

传感器一般由两个基本元件组成:敏感元件与转换元件。在完成非电量到电量的变换过程中,并非所有的非电量参数都能一次直接变换为电量,而往往是先变换成一种易于变换成电量的非电量(如位移、应变等),然后再通过适当的方法变换成电量。因此,人们把能够完成预变换的器件称为敏感元件。例如,在传感器中,建立在力学结构分析上的各种类型的弹性元件(如梁、板等)统称为弹性敏感元件。而转换元件是能将感觉到的被测非电量参数转换为电量的器件,如应变计、压电晶体、热电偶等。转换元件是传感器的核心部分,是利用各种物理、化学、生物效应等原理制成的。新的物理、化学、生物效应的发现,常被用到新型传感器上,使其品种与功能日益增多,应用领域更加广泛。应该指出的是,并非所有传感器都包括敏感元件与转换元件,有些传感器不需要起预变换作用的敏感元件,如热敏电阻、光电器件等。传感器的基本组成如图1.1所示。



图 1.1 传感器的基本组成

1.1.2 传感器的定义

传感器的定义有很多种，当前的主要定义如下。

【定义 1】国家标准《传感器通用术语》(GB7665—1987)对传感器(Transducer/Sensor)的定义是：“能感受(或响应)规定的被测量并按一定规律转换成可用信号输出的器件或装置。传感器通常由直接响应于被测量的敏感元件和产生可用信号输出的转换元件以及相应的电子线路所组成。”

这一定义与美国仪表协会(ISA)给出的定义类似，该定义包含的内容是：① 传感器是测量装置，能完成检测任务；② 传感器可以完成对被测量的转换。

除定义 1 外，有些教科书根据定义 1 的含义引申出了更通俗和更易理解的传感器定义。

【定义 2】传感器是一种以一定的精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。

在上述定义中，需要说明的是：① 被测量可能是物理量，也可能是化学量或生物量等；② 其输出

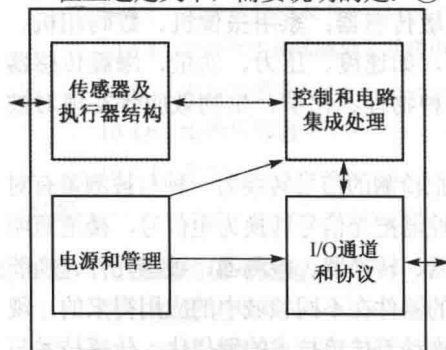


图 1.2 广义换能器

量是某种便于转换、传输和处理的物理量，可能是气、光、电等物理量，但通常是电物理量，电物理量是物理量中最容易传输、转换和处理的；③ 传感器的输出与输入之间有对应的关系，且这种对应关系需有一定的规律性和精度要求；④ 传感器可以是一种由简单的物理材料制成的元器件，也可以是较复杂的、包含转换和放大环节的集成电路元件或装置。

【定义 3】从广义来讲，传感器是换能器的一种，换能器(Transducer)是将能量从一种形式转换为另一种形式的装置。换能器包括传感器和执行器两个方面的含义。图 1.2 所示为传感器与执行器系统的基本组成。

1.2 传感器的分类

传感器是知识密集、技术密集的产品，其种类十分繁杂。主要的分类方式有以下几种。

1. 按物理定律机制进行分类

(1) 结构型传感器

结构型传感器是按物理学中场的定律定义的，这些定律包括动力场的运动力学、电磁场的电磁定律等。这些定律一般是以方程式给出的，因此这些方程式也就是许多传感器工作时的数学模型。其特点是，传感器的工作原理是以传感器中元件相对位置的变化引起场的变化为基础的，而不是以材料特性的变化为基础的。

(2) 物性型传感器

物性型传感器是按照物质定律定义的，如胡克定律、欧姆定律等。由于物质定律是表示物质某种客观性质的法则，因此物性型传感器的性能随着材料的性质不同而异。例如，光电管就是物性型传感器，它基于物质法则中的外光电效应，其特性与电极涂层材料的性质密切相关。

(3) 复合型传感器

复合型传感器是由结构型和物性型组合而成的,兼有两者特征的传感器。

2. 按电路供电方式进行分类

(1) 无源传感器

无源传感器也称为能量转换型传感器,主要由能量变换元件构成,它不需要外部电源。例如,基于压电效应、热电效应、光电动势效应构成的传感器都属于无源传感器。

(2) 有源传感器

有源传感器也称为能量控制型传感器,在信息变化过程中,其能量需要由外部电源供给。例如,电阻、电容、电感等电路参量传感器和基于应变电阻效应、磁阻效应、热阻效应、光电效应、霍尔效应等的传感器均属于有源传感器。

3. 按原理进行分类

按原理进行分类时,传感器主要包括以下几种。

- ① 电参量式传感器:电阻式、电感式、电容式传感器。
- ② 磁电式传感器:磁电感应式、霍尔式、磁栅式传感器。
- ③ 压电式传感器:压电式力传感器、压电式加速度传感器、压电式压力传感器。
- ④ 光电式传感器:红外式、CCD 摄像式、光纤式、激光式传感器等。
- ⑤ 气电式传感器:半导体气敏传感器、集成复合型气敏传感器。
- ⑥ 热电式传感器:热电偶等。
- ⑦ 波式传感器:超声波式、微波式传感器。
- ⑧ 射线式传感器:核辐射物位计、厚度计、密度计等。
- ⑨ 半导体式传感器:半导体温度传感器、半导体湿度传感器等。
- ⑩ 其他原理的传感器。

4. 按用途进行分类

按用途分类的传感器包括温度传感器、气敏传感器、生物传感器、光敏传感器、力敏传感器、声敏传感器、湿度传感器、磁敏传感器、流量传感器及其他传感器。

5. 按信号输出方式进行分类

按信号输出方式进行分类,可分为模拟量传感器和数字量传感器。凡输出量为模拟量的传感器称为模拟量传感器,而输出量为数字量的传感器则称为数字量传感器。

6. 按传输、转换过程是否可逆进行分类

根据传输、转换的过程是否可逆,传感器可分成双向(可逆)传感器和单向(不可逆)传感器。

传感器的分类方法大致可分为上述6种模式,但常用的分类方法还是按照原理和用途来分的。这两种分类方法的缺点是很难严格地归类,因此在许多情况下常常出现两种分类的交叉、重叠和混淆。如果根据工作原理和用途把两种方法综合使用,则比较科学、合理。本书在经过比较和分析各种分类方法后,采用了按原理和用途两种方法的综合分类法。

1.3 传感器的基本特性

传感器是实现传感功能的基本器件,传感器的输入和输出关系特性是传感器的基本特性,也是传感器内部参数作用关系的外部特性表现,不同传感器的内部结构参数决定了其所具有的不同外部特性。

传感器测量的物理量基本上有两种形式:静态(稳态或准静态)和动态(周期变化或瞬态)。前者的信号不随时间变化(或变化比较缓慢),后者的信号则随时间变化而变化。传感器要尽量准确地反映输入物理量的状态,因此传感器所表现出的输入和输出特性也就不同,即存在静态特性和动态特性。

不同传感器有不同的内部参数,因此它们的静态特性和动态特性就表现出不同的特点,对测量结果也产生不同的影响。一个高精度的传感器,必须要有良好的静态特性和动态特性,从而确保检测信号(或能量)的无失真转换,使检测结果尽量反映被测量的原始特征。

1.3.1 传感器的静态特性

假设房间里有一个温度计,且其读数显示的温度为 20°C 。不必关心房间的真实温度是 19.5°C 还是 20.5°C ,而且人们的身体也不能区分 0.5°C 这样小的温度变化,因此不准确度在 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 范围内的温度计完全够用。如果必须测量某些化学过程的温度,那么 0.5°C 的温度变化就可能会对反应的速率甚至产品的过程产生明显的作用,此时的测量不准确度就必须远低于 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。

测量准确度是在特定应用中选择传感器时需要考虑的因素,需要考虑的其他因素包括灵敏度、线性度及对环境温度变化的反应。这些因素统称为传感器的静态特性,它们会在特定传感器的数据表中给出。特别需要注意的是传感器特性值,仅在特定的校准条件下适用。在其他条件下使用传感器时,需对特性做某些补偿。

下面介绍各种静态特性。

1. 准确度和不准确度(测量的不确定度)

传感器的准确度(Accuracy)衡量的是传感器的示值与真值的接近程度。真值是指被测量在一定条件下客观存在的、实际具备的量值。真值是不可确切获知的,实际测量中常用“约定真值”和“相对真值”。约定真值是用约定的办法确定的真值,如砝码的质量。相对真值是指具有更高精度等级的计量器的测量值。示值是由传感器给出的量值,也称测量值或测量结果。准确度是测量结果中系统误差与随机误差的综合,表示测量结果与真值的一致程度,由于真值未知,因此准确度是个定性的概念。

在实践中,更常引用的是一个传感器的不准确度(Inaccuracy)或测量不确定度而非准确度。不准确度或测量的不确定度是指其中一个读数可能是错误的程度,经常被引述为传感器满量程(Y_{FS})读数的百分比。传感器测量的不准确度表示测量结果不能肯定的程度,或者表征测量结果分散性的一个参数。它只涉及测量值,是可以量化的,且经常由被测量算术平均值的标准差、相关量的标准不准确度等联合表示。

由于传感器的最大测量误差通常与传感器满量程的读数相关,若测量值远小于满量程读数,这意味着放大了可能的测量误差。因此,需要选择量程和测量对象测量值相近的传感器,进而减少传感器的测量误差,这是传感器系统的一项重要设计规则。例如,一个压力测量预期值为 $0\sim 1\text{MPa}$ 的测控系统,应该选择 $0\sim 1\text{MPa}$ 的传感器,而不应使用测量范围为 $0\sim 10\text{MPa}$ 的传感器。

【例 1.1】 一个压力传感器的测量范围为 $0\sim 10\text{MPa}$,其满量程读数误差为 $\pm 1\%$ 。(a)该传感器的最大测量误差的预期是什么?(b)如果该压力计测量 1MPa 的压力,那么可能的测量误差表示为输出读数的百分比是多少?

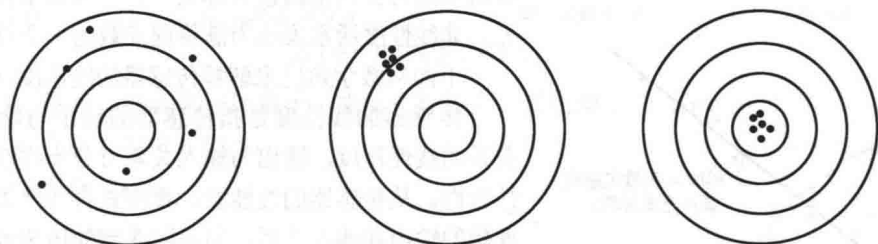
解: 任何传感器读数的最大测量误差的预期是满量程读数的 1.0% ,该特定传感器的满量程是 10MPa ,因此最大可能的误差是 $1.0\% \times 10 = 0.1\text{MPa}$ 。

最大测量误差是一个定值,它仅与传感器的满量程读数有关,而与该传感器实际测量的量的大小无关。在这种情况下,正如之前计算出的那样,最大测量误差的大小为 0.1MPa 。因此,在测量 1MPa 的压力时,最大可能的误差为 0.1MPa ,因此其测量误差是 10% 。

2. 精度/重复性/再现性

精度 (Precision) 是描述传感器自由度随机误差的一个术语, 如果用高精度传感器测得的大量读数的值相同, 那么这些读数的传播会非常小。精度往往会与准确度相混淆。精度高并不意味着准确度高。高精度的传感器可能准确度低。高精度传感器中的低准确度通常是由测量过程中的偏差引起的, 而偏差可通过重校校准来消除。

图 1.3 所示为三个工业机器人将组件放在桌上一个规定点处的测试结果, 它清楚地说明以上概念。目标点在同心圆的中心位置, 黑点表示每个机器人实际每次尝试放置组件的点。机器人 1 的准确度和精度在该次试验中都很低, 即低精度、低准确度; 机器人 2 始终把组件放在大致相同的错误位置, 因此其精度高, 准确度低; 机器人 3 的精度和准确度都很高, 因为它始终将组件放在正确的目标位置。



(a) 低精度、低准确度 (机器人 1) (b) 高精度、低准确度 (机器人 2) (c) 高精度、高准确度 (机器人 3)

图 1.3 准确度和精度的比较

重复性 (Repeatability) 和再现性 (Reproducibility) 的含义基本相同, 但应用在不同环境下。重复性描述在测量条件、传感器和观察者、位置、使用条件相同时, 短时间内重复相同的输入时, 输出读数的接近程度。再现性描述在测量方法、观察者、测量传感器、测量位置、使用条件和测量时间发生变化时, 相同的输入所对应的输出读数的接近程度。这两个术语均描述了在相同的输入时, 输出读数的分布。这种分布在测量条件不发生变化时称为重复性, 而在测量条件发生变化时则称为再现性。传感器在测量过程中, 重复性和再现性的程度是其精度的另一种表达方式。在一般模式中, 传感器的重复性用于描述同一工作条件下输入量按同一方向在全量程范围内连续多次重复测量所得特性曲线的不一致性 (波动性), $\Delta R_{\max}$ 是正反量程最大重复性偏差, 如图 1.4 所示。

$$\delta_k = \pm \frac{\Delta R_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1.1)$$

或者用同一输入量 N 次测量的标准偏差 δ 表示:

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}{N-1}} \quad (1.2)$$

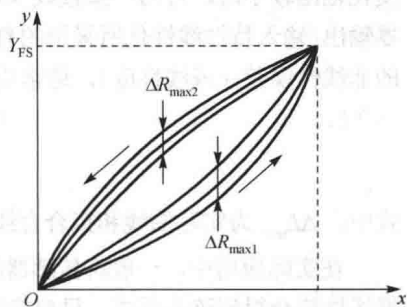


图 1.4 传感器的重复性

3. 容差

容差 (Tolerance) 是一个与准确度紧密相关的术语, 它定义了某些值的可预期最大误差。严格地说, 容差并不是传感器的一个静态特性, 这里提到它是因为某些传感器的准确度有时会引用为容差值。

在正确使用的情況下, 容差在机械制造中称为公差, 它描述了机械组件尺寸相对于一些额定值的

最大偏差。例如,曲轴加工的直径公差是几微米(10^{-6}m),普通电阻有约5%的容差。在传感器中,有时用容差来表示准确度。

【例 1.2】 电子元件店购买了一包电阻,标称电阻值为 1000Ω ,其制造容差为 5%。若在这包电阻中随机选择一个电阻,这个特定电阻的最小和最大电阻值可能是多少?

解: 最小可能值是 $1000 \times (1 - 5\%) = 950\Omega$; 最大可能值是 $1000 \times (1 + 5\%) = 1050\Omega$ 。

4. 线性度

传感器的输出读数通常线性正比于被测量值。图 1.5 中的“×”表示相应被测量值所对应的传感器典型输出读数的点。一般拟合过程是通过图中的“×”画一条合适的直线来实现的,如图 1.5 所示(虽然通常可以通过眼睛合理并准确地完成,但最好用数学中的最小二乘法拟合技术)。因此,非线性度就定义为任何输出读数标记“×”与这条直线的最大偏差。非线性度通常表示为满量程读数的一个百分比。

下面从数学角度来解释传感器的线性度 (Linearity)。

传感器的线性度是指传感器的输出与输入之间数量关系的线性程度。输出与输入关系可分为线性特性和非线性特性。从传感器的性能看,希望具有线性关系,即具有理想的输出和输入关系。但实际遇到的传感器大多为非线性的,传感器的输出与输入关系可用多项式表示:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \cdots + a_nx^n \quad (1.3)$$

式中, a_0 为零位输出; x 为输入量; a_1 为线性常数; $a_2, \cdots, a_n$ 为非线性项系数。

各项系数不同,决定了特性曲线的具体形式各不相同。线性度就是用来表示实际曲线与拟合直线接近的一个性能指标,静态特性曲线可通过实际测试获得。在实际使用中,为了标定和数据处理方便,希望得到线性关系,因此引入各种非线性补偿环节。例如,采用非线性补偿电路或计算机软件进行线性化处理,从而使传感器的输出与输入关系为线性或接近线性。但在传感器非线性的幂次不高,输入量变化范围较小时,可用一条直线(切线或割线)近似地代表实际曲线的一段,如图 1.6 所示,使传感器输出/输入特性线性化所采用的直线称为拟合直线。实际特性曲线与拟合直线之间的偏差称为传感器的非线性误差(或线性度),通常用相对误差表示,即

$$\delta_f = \pm \frac{\Delta L_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1.4)$$

式中, $\Delta L_{\max}$ 为实际曲线和拟合直线间的最大偏差; Y_{FS} 为满量程输出。

在实际应用中,一般将传感器的标定曲线用一条直线关系表达,为确定该线性关系式一般通过数据线性拟合得到该关系式。目前常用的拟合方法有理论拟合、过零旋转拟合、端点连线拟合、端点平移拟合及最小二乘拟合等。

前 4 种方法如图 1.6 所示。图中实线为实际输出曲线,虚线为拟合直线。

图 1.6(a)所示为理论拟合,拟合直线为传感器的理论特性,与实际测试值无关。该方法十分简单,但一般来说 $\Delta L_{\max}$ 较大。

图 1.6(b)所示为过零旋转拟合,常用于曲线过零的传感器。拟合时,使 $\Delta L_1 = |\Delta L_2| = \Delta L_{\max}$ 。这种方法也比较简单,非线性误差比前一种小很多。

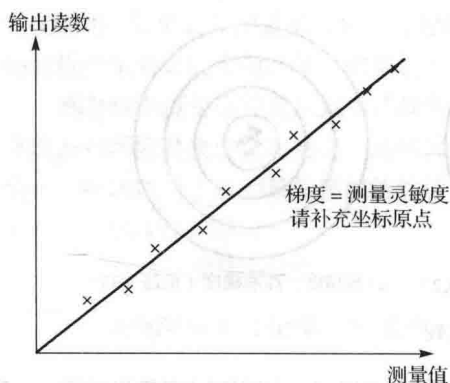


图 1.5 传感器的输出特性

图 1.6(c)所示为端点连线拟合,是指把输出曲线两端点的连线作为拟合直线。这种方法比较简便,但 $\Delta L_{\max}$ 也较大。

图 1.6(d)所示为端点平移拟合,是在图 1.6(c)的基础上使直线平移,移动距离为原 $\Delta L_{\max}$ 的一半,这样输出的曲线就分布于拟合直线的两侧, $\Delta L_2 = |\Delta L_1| = |\Delta L_3| = \Delta L_{\max}$, 与图 1.6(c)相比,非线性误差减小一半,提高了精度。

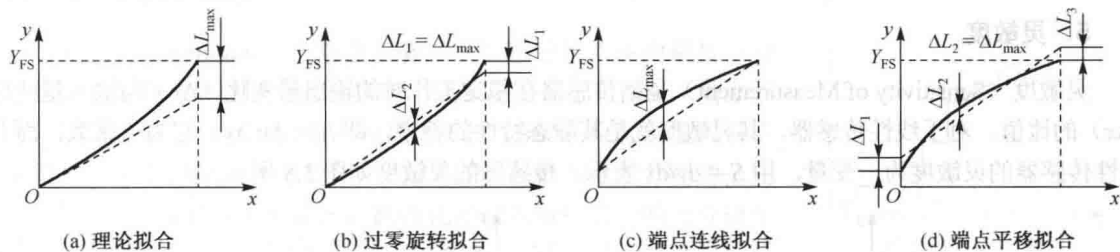


图 1.6 几种直线拟合方法

除了上述方法外,还经常采用最小二乘法进行拟合,采用最小二乘法拟合时,拟合结果如图 1.7 所示。

最小二乘法拟合过程如下。

设拟合直线方程为

$$y = kx + b \quad (1.5)$$

实际校准测试点有 n 个,第 i 个校准数据与拟合直线上响应值之间的残差为

$$\Delta_i = y_i - (kx_i + b) \quad (1.6)$$

最小二乘法拟合直线的原理就是使 $\sum \Delta_i^2$ 的值最小,即

$$\sum_{i=1}^n \Delta_i^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - (kx_i + b)]^2 = \min \quad (1.7)$$

也就是使 $\sum \Delta_i^2$ 关于 k 和 b 的一阶偏导数等于零,即

$$\frac{\partial}{\partial k} \sum_{i=1}^n \Delta_i^2 = 2 \sum_{i=1}^n (y_i - kx_i - b)(-x_i) = 0 \quad (1.8)$$

$$\frac{\partial}{\partial b} \sum_{i=1}^n \Delta_i^2 = 2 \sum_{i=1}^n (y_i - kx_i - b)(-1) = 0 \quad (1.9)$$

从而求出 k 和 b 的表达式为

$$k = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (1.10)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (1.11)$$

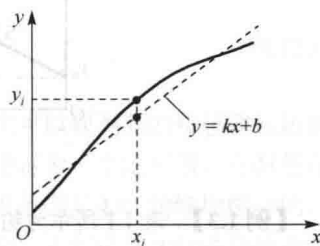


图 1.7 最小二乘法拟合