



普通高等教育“十二五”规划教材
电气工程·自动化专业规划教材

- ◆ 彭杰纲 主编
- ◆ 宁静 邓 罡 编

传感器原理及应用



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育“十二五”规划教材
电气工程·自动化专业规划教材

传感器原理及应用

彭杰纲 主编
宁 静 邓 罡 编

电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内 容 简 介

本书对常用传感器原理及其数据采集和信号处理进行阐述，且注重对传感器应用和工程实践能力的培养。本书共 11 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，以及无线传感器网络等。本书提供配套电子课件。

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 / 彭杰纲主编；宁静，邓罡编. —北京：电子工业出版社，2012.9

电气工程、自动化专业规划教材

ISBN 978-7-121-17272-4

I. ①传… II. ①彭… ②宁… ③邓… 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 (2012) 第 118762 号

策划编辑：王羽佳

责任编辑：王羽佳

特约编辑：王 崧

印 刷：

涿州市京南印刷厂

装 订：

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：18.5 字数：523 千字

印 次：2012 年 9 月第 1 次印刷

印 数：4000 册 定价：38.00 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。

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。

服务热线：(010)88258888。

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

目 录

第 1 章 绪论	1	3.2.3 热电偶的结构	42
1.1 传感器的概念	1	3.2.4 热电偶冷端温度误差及其补偿 ..	43
1.1.1 传感器的基本组成	1	3.2.5 热电偶实用测量电路	46
1.1.2 传感器的定义	2	3.3 电阻型温度传感器	47
1.2 传感器的分类	2	3.3.1 热电阻	47
1.3 传感器的基本特性	4	3.3.2 热敏电阻	50
1.3.1 传感器的静态特性	4	3.3.3 陶瓷半导体热敏电阻	51
1.3.2 传感器的动态特性	7	3.3.4 半导体热电阻温度传感器 ..	55
1.4 传感器的标定	12	3.4 半导体 PN 结型温度传感器 ..	57
1.4.1 传感器的静态特性标定 ..	14	3.4.1 温敏二极管	58
1.4.2 传感器的动态标定	14	3.4.2 温敏三极管	59
1.5 传感器技术现状	16	3.4.3 温敏晶闸管(可控硅) ..	60
1.5.1 发达国家传感器技术水平 ..	16	习题	63
1.5.2 我国传感器研究现状	17	第 4 章 力敏传感器	64
1.5.3 传感器技术发展方向 ..	19	4.1 应变式电阻传感器	64
1.6 重要的传感器信息来源 ..	21	4.1.1 电阻应变片的种类	64
习题	22	4.1.2 金属电阻应变片	64
第 2 章 传感器的功能材料及加工工艺 ..	23	4.1.3 半导体应变片	69
2.1 传感器使用的材料	23	4.1.4 电阻应变片的测量电路 ..	70
2.1.1 导体、半导体和电介质 ..	24	4.1.5 电阻应变式传感器应用 ..	75
2.1.2 有机高分子敏感材料 ..	26	4.2 压电式力传感器	78
2.1.3 磁性材料	27	4.2.1 压电效应和压电材料	79
2.2 传感器的加工工艺	27	4.2.2 压电传感器的等效电路与	
2.2.1 结构型传感器的加工工艺 ..	28	测量线路	82
2.2.2 微机械加工艺	29	4.2.3 压电式传感器的应用举例 ..	86
习题	37	4.2.4 压电式传感器的主要性能及	
第 3 章 温敏传感器	38	其影响因素	87
3.1 基本概念	38	4.3 电容式力传感器	88
3.1.1 温标	38	4.3.1 电容式传感器的特点	88
3.1.2 热力学相关概念	38	4.3.2 电容式压力传感器	89
3.1.3 温敏传感器的分类	39	4.3.3 电容式集成压力传感器 ..	91
3.2 热电偶传感器	39	4.4 电感式压力传感器	92
3.2.1 热电效应	39	4.5 谐振式压力传感器	94
3.2.2 热电偶基本定律	41	4.5.1 工作原理和特性	95

4.5.2	谐振式压力传感器的特性	95	5.7.4	韦根德磁敏器件	134
4.5.3	谐振式压力传感器的类型	97	5.7.5	磁通门传感器	135
4.6	光纤力学传感器	99	习题		136
4.7	压电涂层压力传感器	101	第 6 章	光敏传感器	137
4.8	力敏 Z-元件及触觉传感器	102	6.1	概述	137
4.9	陶瓷压阻式压力传感器	103	6.1.1	光谱	137
习题		104	6.1.2	光学传感器的相关计量单位	138
第 5 章	磁敏传感器	105	6.1.3	光源	139
5.1	概述	105	6.2	光电效应传感器	139
5.2	霍尔元件	106	6.2.1	外光电效应及器件	139
5.2.1	霍尔效应	107	6.2.2	内光电效应(光电导)及 器件	144
5.2.2	影响霍尔效应的因素	109	6.3	光生伏特效应器件	148
5.2.3	霍尔元件基本结构	109	6.3.1	光生伏特效应	148
5.2.4	霍尔元件的基本特性	110	6.3.2	光电池	149
5.2.5	霍尔元件的电磁特性	111	6.4	光敏二极管	150
5.2.6	霍尔元件不等位电势补偿	112	6.4.1	结构原理	150
5.2.7	霍尔元件温度补偿	112	6.4.2	光电二极管应用实例	152
5.2.8	霍尔集成电路	115	6.5	光敏晶体管	153
5.2.9	霍尔式传感器的应用	115	6.5.1	光敏晶体管和光敏二极管 基本特性	154
5.3	半导体磁阻器件	117	6.5.2	光电三极管应用实例	155
5.3.1	磁阻效应	117	6.6	色敏光电传感器	156
5.3.2	磁阻元件	118	6.6.1	双结型色彩传感器	156
5.3.3	磁敏电阻的应用	120	6.6.2	非晶态集成色彩传感器	157
5.4	结型磁敏器件	121	6.6.3	应用实例	158
5.4.1	磁敏二极管	121	6.7	光电耦合器件	158
5.4.2	磁敏三极管	125	6.7.1	光电耦合器	158
5.5	铁磁性金属薄膜磁阻元件	128	6.7.2	光电开关	159
5.5.1	铁磁体中的磁阻效应	129	6.8	红外热释电光敏器件	160
5.5.2	铁磁薄膜磁敏电阻的结构 与工作原理	129	6.8.1	红外热释电光敏效应	160
5.5.3	铁磁薄膜磁敏电阻的技术性 能及特点	130	6.8.2	热释电传感器的结构	161
5.6	压磁式传感器	130	6.8.3	热释电红外传感器的应用	162
5.6.1	压磁式传感器的基本原理	130	6.9	固态图像传感器	165
5.6.2	压磁传感器的主要特性	131	6.9.1	CCD 图像传感器	165
5.6.3	压磁式传感器的应用举例	132	6.9.2	MOS 固态图像传感器	168
5.7	新型磁传感器	132	6.9.3	CCD 与 CMOS 图像传感器的 性能比较	170
5.7.1	MOS 磁敏器件	132	6.10	光纤传感器	171
5.7.2	高分辨率磁性旋转编码器	133			
5.7.3	涡流传感器	134			

6.10.1	概述	171	8.2	气体传感器的主要参数与特性	211
6.10.2	光纤的结构和传输原理	172	8.3	半导体气体传感器	212
6.10.3	光纤传感器	173	8.3.1	电阻型半导体气敏元件	212
习题		177	8.3.2	半导体气敏二极管和MOSFET气体传感器	224
第7章	声敏传感器	178	8.4	固态电解质气体传感器	228
7.1	声波的基本性质	178	8.5	接触燃烧式气体传感器	231
7.1.1	声压及其描述	178	8.5.1	检测原理与结构	231
7.1.2	声功率和声强	179	8.5.2	气敏特性	231
7.1.3	声波的反射、折射、透射和吸收	180	8.6	新型气体传感器	232
7.2	声敏传感器	182	8.6.1	红外吸收式传感器	232
7.2.1	电阻变换型声敏传感器	182	8.6.2	热导率变化式气体传感器	233
7.2.2	压电声敏传感器	183	8.6.3	气敏半导体材料吸附机理及器件	233
7.2.3	电容式声敏传感器(静电型)	184	8.6.4	气-磁传感器	233
7.2.4	音响传感器	184	8.7	气体传感器的应用	234
7.3	水声传感器	187	8.7.1	家用煤气、液化石油气泄漏报警器	234
7.3.1	水声传感器的性能指标	187	8.7.2	自动换气扇	234
7.3.2	水声传感器用郎之万型换能器	189	8.7.3	自动抽油烟机	235
7.3.3	海底地貌仪	190	8.7.4	酒精检测报警器	236
7.3.4	多普勒计程仪	191	8.7.5	缺氧检测	237
7.3.5	相关计程仪	191	习题		237
7.4	超声波传感器	192	第9章	湿敏传感器	238
7.4.1	超声波及其物理性质	192	9.1	湿度的基本概念	238
7.4.2	超声波对超声场产生的作用(效应)	193	9.1.1	相对湿度和绝对湿度	238
7.4.3	超声波传感器	194	9.1.2	露点	238
7.4.4	超声波传感器的应用	195	9.2	湿度传感器的特性参数	239
7.5	声表面波传感器	198	9.3	湿度传感器的分类	242
7.5.1	表面声波的类型	199	9.4	陶瓷式湿度传感器	243
7.5.2	SAW传感器的结构与工作原理	203	9.4.1	陶瓷电阻式湿度传感器	243
7.5.3	高分辨率SAW温度传感器	204	9.4.2	陶瓷电容式湿度传感器	245
7.5.4	SAW气体传感器	205	9.5	有机物及高分子聚合物湿度传感器	245
7.5.5	SAW压力传感器	206	9.5.1	高分子电阻式湿度传感器	245
7.5.6	声板波传感器	207	9.5.2	高分子电容式湿度传感器	248
习题		209	9.6	半导体结型和MOS型湿度传感器	250
第8章	气体传感器	210			
8.1	概述	210			

9.6.1 湿敏二极管	250	10.4.3 免疫传感器及其应用	268
9.6.2 湿敏 MOS 场效应管	251	10.4.4 半导体生物传感器及其 应用	269
9.7 固体电解质界限电流式高温 湿度传感器	252	10.4.5 组织传感器	269
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	252	10.4.6 细胞传感器	271
9.7.2 固体电解质界限电流式湿度 传感器的特性	253	10.4.7 基因芯片	272
9.8 溶性电解质湿度传感器	254	习题	273
9.8.1 登莫式	254	第 11 章 传感器的信号处理和网络化、 智能化	274
9.8.2 浸渍式	255	11.1 传感器的信号处理	274
9.8.3 光硬化树脂电解质湿敏 元件	255	11.1.1 信号变换电路及阻抗匹 配器	274
习题	256	11.1.2 噪声及其抑制	275
第 10 章 生物传感器	257	11.2 传感器的数字化	277
10.1 生物传感器的基本概念	258	11.2.1 模拟信号数字变换系统	277
10.2 生物传感器的特点	258	11.2.2 数据变换系统的抗混滤波	277
10.3 生物反应基本知识	258	11.3 智能传感器	278
10.3.1 酶反应	258	11.3.1 智能传感器的结构	278
10.3.2 微生物反应	260	11.3.2 智能传感器的功能	279
10.3.3 免疫学反应	261	11.3.3 网络化的智能传感器	279
10.3.4 生物传感器膜技术和固定 化技术	262	11.4 无线传感器网络	280
10.3.5 基本电极	266	11.4.1 无线传感器网络概述	280
10.3.6 测量方式	266	11.4.2 无线传感器网络体系结构	284
10.4 生物传感器的工作原理及 类型	266	11.4.3 无线传感器网络的关键 技术	287
10.4.1 酶传感器及其应用	267	习题	287
10.4.2 微生物传感器及其应用	267	参考文献	288

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，迫切地需要适应各种极限环境的高灵敏度、高可靠性能的检测传感器。

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。在我们每个人的生活里，处处都在使用着各种各样的传感器，例如电视机、音响、DVD、空调遥控器等所使用的是红外线传感器；电冰箱、微波炉、空调机温控所使用的是温度传感器；家用煤气灶、燃气热水器报警所使用的是气体传感器；家用摄像机、数码相机、上网聊天视频所使用的是光电传感器；汽车所使用的传感器就更多，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成一种与被测量有对应的函数关系且便于传输和处理的物理量。例如，家庭常使用的遥控器是把光信号转换成电信号，楼道照明的声控开关是把声音转换成电信号。所以传感器又经常被称为变换器、转换器、检测器、敏感元件、换能器等。这些不同的称谓，反映在不同的学科领域中，是根据同一类型的器件在不同领域中的应用而得来的。现代化生产和科学技术的发展不断地应用于传感技术中，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，几乎渗透到人类的一切活动领域，发挥着越来越重要的作用。研究新机理、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，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。所以，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，并不是所有的传感器都包括敏感元件与转换元件，有一部分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。

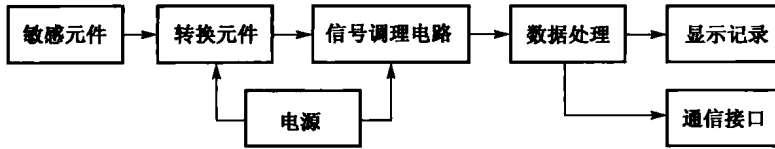


图 1-1 传感器的基本组成

1.1.2 传感器的定义

对于传感器有不同的定义，现在主要的定义有如下几种。

定义 1: 国家标准《传感器通用术语》(GB7665—87) 对于传感器 (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) 给出的定义相类似，这个定义包含的内容是：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 的含义引申出更通俗和更易理解的传感器定义，供读者参考。

定义 2: 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。

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它的输出量是某种便于转换、传输和处理的物理量，可能是气、光、电等物理量，但主要是电物理量，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，而且这种对应关系必须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 给出了传感器与执行器系统的基本组成。

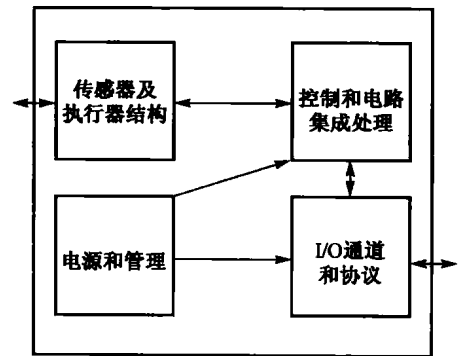


图 1-2 广义换能器

1.2 传感器的分类

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

1. 从物理定律机理进行分类

(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学、电磁场的电磁定律等。这些定律一般是以方程式给出的，所以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,光电子管就是物性型传感器,它按照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

由结构型和物性型组合而成、兼有两者特征的传感器,称为复合型传感器。

2. 从电路供电方式进行分类

(1) 无源传感器

无源传感器也叫能量转换型传感器,主要由能量变换元件构成,它不需要外部电源。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

有源传感器也叫能量控制型传感器,在信息变化过程中,其能量需要外部电源供给。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. 按原理分类的传感器

电参量式传感器:电阻式、电感式、电容式传感器。

磁电式传感器:磁电感应式、霍尔式、磁栅式传感器。

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。

光电式传感器:红外式、CCD 摄像式、光纤式、激光式传感器等。

气电式传感器:半导体气体传感器,集成复合型气体传感器。

热电式传感器:热电偶等。

波式传感器:超声波式、微波式传感器。

射线式传感器:核辐射物位计、厚度计、密度计等。

半导体式传感器:半导体温度传感器、半导体湿度传感器等。

其他原理的传感器。

4. 按用途分类的传感器

- 温度传感器
- 气体传感器
- 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
- 其他传感器

5. 按信号输出方式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. 单向传感器和双向传感器

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成上述 6 种模式,但常用的分类方法还是按原理和用途两种方

法。这两种分类方法存在的缺陷是很难严格地归类，所以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。本书的分类方法是经过比较分析各种分类方法之后，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，也是传感器的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它具有不同的外部特性。

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），后者的信号是随时间变化而变化的。传感器就是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来的输入和输出特性也就不同，即存在静态特性和动态特性。

不同的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

传感器的静态特性是指被测量的值处于稳定状态时的输出和输入关系。只考虑传感器的静态特性时，输入量与输出量之间的关系式中不含有时间变量。衡量静态特性的重要指标是线性度、灵敏度、迟滞和重复性等。

1. 线性度

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一个多项式表示：

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \cdots + a_nx^n \quad (1-1)$$

式中， a_0 为零位输出； x 为输入量； a_1 为线性常数； a_2, \dots, 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的方便，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。但如果传感器非线性的方次不高，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 1-3 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

$$\delta_f = \pm \frac{\Delta L_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-2)$$

式中， ΔL_{\max} 是实际曲线和拟合直线间的最大偏差， Y_{FS} 是满量程输出。

目前常用的拟合方法有：① 理论拟合；② 过零旋转拟合；③ 端点连线拟合；④ 端点平移拟合；⑤ 最小二乘拟合等。前4种方法如图1-3所示。图中实线为实际输出曲线，虚线为拟合直线。

图1-3(a)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 ΔL_{\max} 较大。

图1-3(b)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1-3(c)中，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 ΔL_{\max} 也较大。

图1-3(d)在图1-3(c)基础上使直线平移，移动距离为原先 ΔL_{\max} 的一半，这样输出曲线分布于拟合直线的两侧， $\Delta L_2 = |\Delta L_1| = |\Delta L_3| = \Delta L_{\max}$ ，与图1-3(c)相比，非线性误差减小一半，提高了精度。

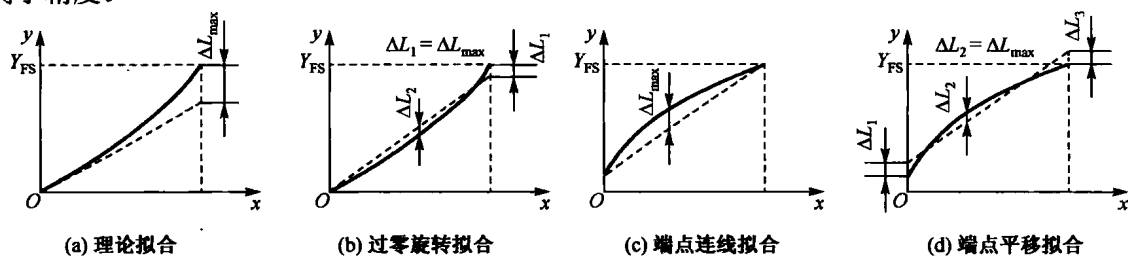


图1-3 几种直线拟合方法

采用最小二乘法拟合时，拟合结果如图1-4所示。

设拟合直线方程为
$$y = kx + b \quad (1-3)$$

实际校准测试点有 n 个，则第 i 个校准数据与拟合直线上响应值之间的残差为

$$\Delta_i = y_i - (kx_i + b) \quad (1-4)$$

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

$$\sum_{i=1}^n \Delta_i^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - (kx_i + b)]^2 = \min \quad (1-5)$$

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

$$\frac{\partial}{\partial k} \sum \Delta_i^2 = 2 \sum (y_i - kx_i - b)(-x_i) = 0 \quad (1-6)$$

$$\frac{\partial}{\partial b} \sum \Delta_i^2 = 2 \sum (y_i - kx_i - b)(-1) = 0 \quad (1-7)$$

从而求出 k 和 b 的表达式为

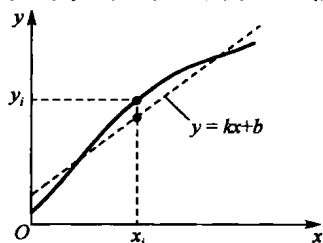


图1-4 最小二乘法拟合

$$k = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (1-8)$$

$$b = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (1-9)$$

在获得 k 和 b 之值后代入式(1-3)即可得到拟合直线，然后按式(1-4)求出残差的最大值 ΔL_{\max} 即为非线性误差。

由图 1-3 和图 1-4 可见,即使是同类传感器,拟合直线不同,其线性度也是不同的。选取拟合直线的方法很多。不同拟合方式得到的结果不相同,在实践中应选择使用。

2. 灵敏度

灵敏度指传感器在稳定工作时的输出量变化 (Δy) 对输入量 (Δx) 的比值。对于线性传感器,它的灵敏度就是它的静态特性的斜率,即 $S = \Delta y / \Delta x$,它为一常数;而非线性传感器的灵敏度为一变量,用 $S = dy/dx$ 表示。传感器的灵敏度如图 1-5 所示。

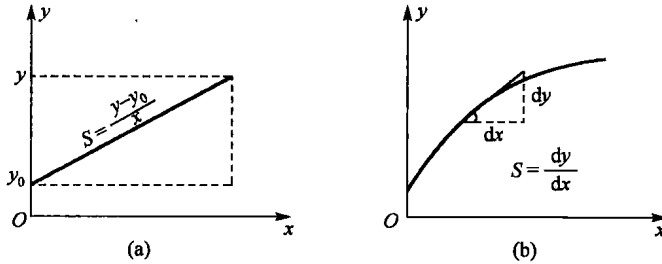


图 1-5 传感器的灵敏度

3. 迟滞

将在相同工作条件下进行全测量范围测量时正行程和反行程输出的不重合程度称为迟滞或滞后。传感器的正反行程输出信号大小不相等,如图 1-6 所示。产生这种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,弹性敏感元件的弹性滞后、运动部件摩擦、传动机构的间隙、紧固件松动等。迟滞大小通常由实验确定。

$$\delta_H = \pm \frac{\Delta H_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-10)$$

式中, Y_{FS} 是满量程输出, ΔH_{\max} 是正反量程最大输出偏差。

4. 重复性

用于描述在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), ΔR_{\max} 是正反量程最大重复性偏差,如图 1-7 所示。

$$\delta_K = \pm \frac{\Delta R_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-11)$$

或用同一输入量 N 次测量的标准偏差 δ 与满量程的百分比表示

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}{N-1}} \quad (1-12)$$

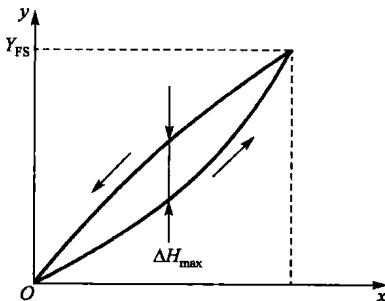


图 1-6 传感器迟滞特性

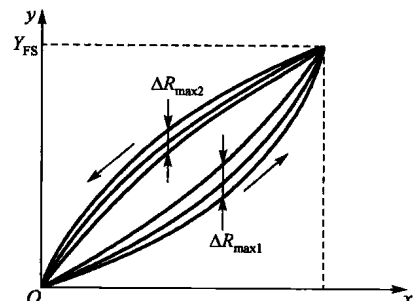


图 1-7 传感器重复性

5. 分辨力

分辨力是描述传感器可以感受到的被测量最小变化的能力。若输入量缓慢变化且其变化值未超过某一范围时输出不变化,即此范围内分辨不出输入的变化(如图 1-8 所示),只有当输入量变化超过此范围时输出才发生变化。一般,各输入点能分辨的范围不同,人们将用满量程中使输出阶跃变化的输入量中最大的可分辨范围作为衡量指标,定义为传感器的分辨力(ΔX_{\max})。也可以用分辨率表示,即

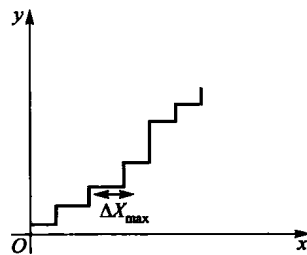


图 1-8 分辨力

$$\frac{\Delta X_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-13)$$

在传感器零点附近的分辨力称为**阈值**。

6. 温度稳定性

一般用温度系数来描述温度引起的这个误差,表示为

$$\alpha_T = \frac{Y_2 - Y_1}{Y_{FS} \Delta T} \times 100\% \quad (1-14)$$

式中, Y_1 、 Y_2 分别为温度 T_1 、 T_2 时的输出值, $\Delta T = T_2 - T_1$ 。

温度稳定性用一些重要指标来确定,如测量范围、线性度、迟滞、重复性及灵敏度等。

7. 测量范围(Y_{FS})

每个传感器都有一定的测量范围,超过该范围进行测量时,会带来很大的测量误差,甚至将其损坏。一般,测量范围确定在一定的线性区域或者保证一定寿命的范围内。在实际应用时,所选择传感器的测量范围应大于实际的测量范围,以保证测量的准确性并延长传感器及其电路的寿命。

1.3.2 传感器的动态特性

从上面传感器的静态特性可以看出,被测信号是一个不随时间变化的量。因此,在测量时不受时间的影响。但是在实际的测量过程中,很多的被测信号是随时间变化的,对这种动态信号的测量不仅需要精确地测量信号的幅值,而且还要测量和记录这种动态信号的变化过程,因此,就需要传感器能迅速、准确地测出信号幅值和被测信号随时间变化的规律。

传感器的动态特性是指其输出对随时间变化的输入量的响应特性。当被测量随时间变化,即是时间的函数时,传感器的输出量也是时间的函数,它们之间的关系要用动态特性来表示。一个动态特性好的传感器,其输出将再现输入量的变化规律,即具有相同的时间函数。实际上,除了具有理想的比例特性外,输出信号将不会与输入信号具有相同的时间函数,这种输出与输入间的差异就是所谓的动态误差。

为了说明传感器的动态特性,下面简要介绍动态测温的问题。在被测温度随时间变化或传感器突然插入被测介质中,以及传感器以扫描方式测量某温度场的温度分布等情况下,都存在动态测温问题。例如,把一支热电偶从温度为 $t_0^\circ\text{C}$ 的环境中迅速插入一个温度为 $t^\circ\text{C}$ 的恒温水槽中(插入时间忽略不计),这时热电偶测量的介质温度从 $t_0^\circ\text{C}$ 突然上升到 $t^\circ\text{C}$,而热电偶反映出来的温度从 $t_0^\circ\text{C}$ 变化到 $t^\circ\text{C}$ 需要经历一段时间,即有一段过渡过程,如图 1-9

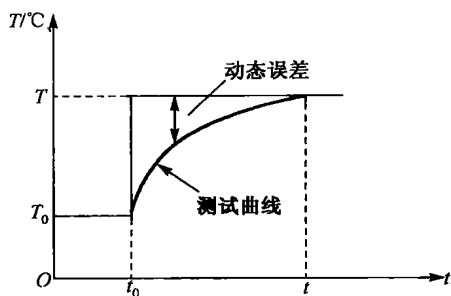


图 1-9 热电偶测温过程的动态特性

所示。热电偶反映出来的温度与介质温度的差值就称为动态误差。

造成热电偶输出波形失真和产生动态误差的原因，是因为温度传感器有热惯性（由传感器的比热容和质量大小决定）和传热热阻，使得在动态测温时传感器输出总是滞后于被测介质的温度变化。例如，带有套管的热电偶的热惯性要比裸热电偶的大得多。这种热惯性是热电偶固有的，且决定了热电偶测量快速温度变化时会产生动态误差。影响动态特性的“固有因素”任何传感器

都有，只不过它们的表现形式和作用程度不同而已。动态特性除了与传感器的固有因素有关之外，还与传感器输入量的变化形式有关。也就是说，我们在研究传感器动态特性时，通常是根据不同输入变化规律来考察传感器的响应的。

动态特性除了与传感器的固有因素有关之外，还与传感器输入量的变化形式有关。也就是说，在研究传感器动态特性时，通常应根据不同输入变化规律来考察传感器的响应。用于研究传感器动态特性的激励信号是多种多样的，常见的激励信号可做如图 1-10 所示分类。

一般来说，在研究动态特性时，通常只能根据“规律性”的输入来考虑传感器的响应。复杂周期信号可以分解为各种谐波，所以可用正弦周期输入信号来代替；其他瞬变输入不及阶跃输入对系统的影响剧烈，可用阶跃输入代表。因此，通常使用的“标准”输入只有两种：正弦输入和阶跃输入。传感器动态特性的分析及标定都以这两种输入为依据。当采用正弦输入作为评价依据时，一般使用幅频特性与相频特性进行描述，评价指标为频带宽度，简称带宽，即传感器输出增益变化不超出某一规定分贝值的频率范围，相应的方法称为频率响应法。当采用阶跃输入为评价依据时，常用上升时间、响应时间、超调量等参数来综合描述，相应的方法称为阶跃响应法。

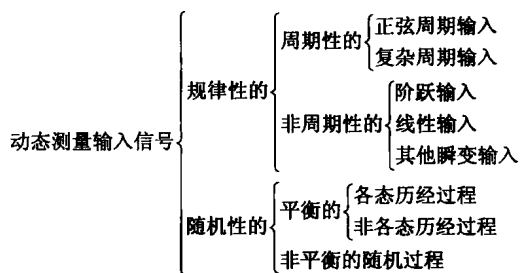


图 1-10 常见激励信号分类

虽然传感器的种类和形式很多，但它们一般可以简化为一阶或二阶系统（高阶可以分解成若干低阶环节），因此一阶和二阶传感器是最基本的。传感器的输入量随时间变化的规律是各种各样的，下面在对传感器动态特性进行分析时，采用最普遍、最简单、易实现的阶跃信号和正弦信号作为标准输入信号。对于阶跃输入信号，传感器的响应称为阶跃响应或瞬态响应。对于正弦输入信号，则称为传感器的频率响应或稳态响应。

1. (阶跃) 瞬态响应特性

传感器的瞬态响应是时间响应。在研究传感器的动态特性时，有时需要从时域中对传感器的响应和过渡过程进行分析，这种分析方法是时域分析法。传感器对所加激励信号的响应称为瞬态响应。常用激励信号有阶跃函数、斜坡函数、脉冲函数等。下面以传感器的单位阶跃响应来分析传感器的动态性能指标。

当输入为阶跃函数时，则传感器的响应函数 $Y(t)$ 分为两个响应过程，一个是从初始状态到接近终态之间的过程，即动态过程（又称为过渡过程）， t 趋于无穷时，输出基本稳定，称为稳态过程，如图 1-11 所示。