



全国高等职业教育规划教材

传感器技术及其应用

陈黎敏 主编



电子课件下载网址 www.cmpedu.com



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

全国高等职业教育规划教材

传感器技术及其应用

陈黎敏 主编



机械工业出版社

本书内容包括温度传感器、力传感器、光电式传感器、磁传感器、位移传感器、环境量检测传感器、新型传感器和安全防范技术、传感器接口电路、现代传感技术。

本书既可作为高职高专院校自动化、机电一体化、应用电子等专业的教材，也可供相关专业技术人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

传感器技术及其应用/陈黎敏主编. —北京：机械工业出版社，2009.6
全国高等职业教育规划教材
ISBN 978-7-111-26724-9

I. 传… II. 陈… III. 传感器—高等学校：技术学校—教材
IV. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2009）第 048731 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：祝 伟 关晓飞 版式设计：张世琴

责任校对：李秋荣 责任印制：邓 博

北京机工印刷厂印刷（兴文装订厂装订）

2009 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·17.75 印张·435 千字

0 001—4 000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-26724-9

定价：29.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

销售服务热线电话：（010）68326294

购书热线电话：（010）88379639 88379641 88379643

编辑热线电话：（010）88379753 88379739

封面无防伪标均为盗版

全国高等职业教育规划教材 机电类专业编委会成员名单

主 任	吴家礼			
副 主 任	任建伟	李望云	张 华	梁 栋
	盛靖琪			
委 员	(排名不分先后)			
	陈志刚	陈剑鹤	韩满林	李柏青
	盛定高	张 伟	李晓宏	刘靖华
	陈文杰	程时甘	韩全立	张宪立
	胡光耀	苑喜军	李新平	吕 汀
	杨华明	刘达有	程 奎	李益民
	吴元凯	王国玉	王启洋	杨文龙
秘 书 长	胡毓坚			
副秘书长	郝秀凯			

出版说明

根据《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》中提出的高等职业院校必须把培养学生动手能力、实践能力和可持续发展能力放在突出的地位,促进学生技能的培养,以及教材内容要紧密结合生产实际,并注意及时跟踪先进技术的发展等指导精神,机械工业出版社组织全国近60所高等职业院校的骨干教师对在2001年出版的“面向21世纪高职高专系列教材”进行了全面的修订和增补,并更名为“全国高等职业教育规划教材”。

本系列教材是由高职高专计算机专业、电子技术专业和机电专业教材编委会分别会同各高职高专院校的一线骨干教师,针对相关专业的课程设置,融合教学中的实践经验,同时吸收高等职业教育改革的成果而编写完成的,具有“定位准确、注重能力、内容创新、结构合理和叙述通俗”的编写特色。在几年的教学实践中,本系列教材获得了较高的评价,并有多品种被评为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。在修订和增补过程中,除了保持原有特色外,针对课程的不同性质采取了不同的优化措施。其中,核心基础课的教材在保持扎实的理论基础的同时,增加实训和习题;实践性较强的课程强调理论与实训紧密结合;涉及实用技术的课程则在教材中引入了最新的知识、技术、工艺和方法。同时,根据实际教学的需要对部分课程进行了整合。

归纳起来,本系列教材具有以下特点:

- (1) 围绕培养学生的职业技能这条主线来设计教材的结构、内容和形式。
- (2) 合理安排基础知识和实践知识的比例。基础知识以“必需、够用”为度,强调专业技术应用能力的训练,适当增加实训环节。
- (3) 符合高职学生的学习特点和认知规律。对基本理论和方法的论述要容易理解、清晰简洁,多用图表来表达信息;增加相关技术在生产中的应用实例,引导学生主动学习。
- (4) 教材内容紧随技术和经济的发展而更新,及时将新知识、新技术、新工艺和新案例等引入教材。同时注重吸收最新的教学理念,并积极支持新专业的教材建设。
- (5) 注重立体化教材建设。通过主教材、电子教案、配套素材光盘、实训指导和习题及解答等教学资源的有机结合,提高教学服务水平,为高素质技能型人才的培养创造良好的条件。

由于我国高等职业教育改革和发展的速度很快,加之我们的水平和经验有限,因此在教材的编写和出版过程中难免出现问题和错误。我们恳请使用这套教材的师生及时向我们反馈质量信息,以利于我们今后不断提高教材的出版质量,为广大师生提供更多、更适用的教材。

机械工业出版社

前 言

本书作为高等职业教育教材，贯彻了理论以够用为度，要为解决专业工作实际问题服务的编写原则，选材广泛，深度适宜，注重应用实例的介绍，并编写了部分实训内容以便于加强学生的技能训练，书中内容尽量反映传感技术领域内的新技术、新动向。

第1章讲述传感器技术基础知识，包括传感器的基本特性、材料与制造、标定与校准等知识。第2~7章系统介绍了机械量、热工量等参数检测用传感器的工作原理、基本结构、主要性能、测量电路和应用实例；每章后编有2~5个实训项目，方便理论与实训一体化教学的实施，培养学生使用各类传感器的能力。第8章介绍了新型传感器和安全防范技术。第9章着重介绍传感器输出信号的处理以及与微型计算机的连接。第10章简要介绍了现代传感技术。

本书语言简练，通俗易懂，书中内容充分体现了“以应用技术为目标”的主导思想；结构紧凑合理，便于根据需要实施项目教学；突出传感器应用的技能知识，具有较强的实用性和可操作性；内容丰富，知识面宽，具有适应现代技术发展的新知识，不仅全面介绍了机械量和过程量的检测技术，而且还介绍了探测技术、安全防范技术、集成传感器应用以及现代传感技术，有较广的适应性和较大的灵活性。

本书参考学时数为60学时，各章相对独立，不同的学校和专业使用本教材时，可根据具体情况对内容进行取舍。实验和实训是本课程不可缺少的重要组成部分，使用本教材时，可根据各校具体的仪器设备情况，结合教材内容弹性选择开设，以提高学生分析问题和解决问题的能力。

本书可作为工科学校机电一体化技术、自动化技术、电气自动化技术、应用电子技术等专业的“传感器技术”课程教材，同类专业成人教育及职业培训也可使用，还可供从事这方面工作的工程技术人员参考。

本书第1、2、3、9、10章由陈黎敏编写并统稿全书，第5、6章由朱俊编写，第4、7、8章由李晴编写。在本书的编写过程中参阅了多种同类教材和专著，在此向其编、著者致谢。

由于编者水平有限，书中难免有不足，恳请广大读者批评指正。

编 者
2008年11月

目 录

出版说明

前言

第1章 传感器技术基础 1

- 1.1 概述 1
 - 1.1.1 测控系统 1
 - 1.1.2 传感器的定义 2
 - 1.1.3 传感器的分类 3
- 1.2 传感器的基本特性 5
 - 1.2.1 传感器的静态特性 5
 - 1.2.2 传感器的动态特性 7
 - 1.2.3 传感器特性的应用 8
 - 1.2.4 提高传感器性能指标的方法 8
- 1.3 传感器的材料与制造 10
 - 1.3.1 传感器的材料 10
 - 1.3.2 传感器制造技术 12
- 1.4 传感器的物理基础与选用 13
 - 1.4.1 传感器的物理基础 13
 - 1.4.2 传感器的选用 14
- 1.5 传感器的标定与校准 16
- 1.6 小结 17
- 习题 17

第2章 温度传感器 18

- 2.1 温度测量概述 18
 - 2.1.1 温度测量 18
 - 2.1.2 温标 19
- 2.2 热电偶传感器 19
 - 2.2.1 热电偶的工作原理 19
 - 2.2.2 热电偶的结构形式与热电偶材料 23
 - 2.2.3 热电偶的冷端补偿 27
 - 2.2.4 热电偶测温基本电路 28
- 2.3 热电阻式传感器 29
 - 2.3.1 常用热电阻 29
 - 2.3.2 热电阻传感器的测量电路 30
 - 2.3.3 热敏电阻 31

- 2.3.4 热敏电阻的应用 32
- 2.4 集成温度传感器 35
 - 2.4.1 集成温度传感器的工作原理及特点 35
 - 2.4.2 常用集成温度传感器及其应用 36
 - 2.4.3 PN结温度传感器及其应用 39
- 2.5 其他温度传感器 40
 - 2.5.1 光纤温度传感器 40
 - 2.5.2 红外温度传感器 41
 - 2.5.3 铁氧体温度传感器 42
 - 2.5.4 石英谐振温度传感器 44
 - 2.5.5 红外线温度传感器 44
- 2.6 综合应用技能实训 45
 - 2.6.1 电冰箱温度超标指示电路的制作 45
 - 2.6.2 基于热电偶的温控电路的制作 45
 - 2.6.3 设计一只0~100℃温度计 48
- 2.7 小结 49
- 习题 49

第3章 力传感器 51

- 3.1 弹性敏感元件 51
 - 3.1.1 弹性敏感元件的特性 51
 - 3.1.2 弹性敏感元件的分类 52
- 3.2 应变式电阻传感器 54
 - 3.2.1 电阻应变片的结构及工作原理 54
 - 3.2.2 应变式电阻传感器使用注意事项 56
 - 3.2.3 应变式电阻荷重传感器及其应用 58
 - 3.2.4 应变式加速度传感器及其应用 60
- 3.3 压阻式压力传感器 62
- 3.4 压电式传感器 63

3.4.1 石英晶体的压电效应	63	4.6 综合应用技能实训	114
3.4.2 压电陶瓷的压电效应	65	4.6.1 光电器件的检测	114
3.4.3 压电材料	65	4.6.2 红外感应灯的安装	117
3.4.4 压电式传感器的测量电路	66	4.7 小结	119
3.4.5 压电式传感器的应用	67	习题	120
3.5 电容式传感器	68	第5章 磁传感器	122
3.5.1 电容式传感器的工作原理 与结构	68	5.1 霍尔传感器	122
3.5.2 电容式传感器的测量电路	70	5.1.1 霍尔元件的工作原理及特性	122
3.5.3 电容式传感器的应用	72	5.1.2 霍尔集成电路	124
3.6 电感式传感器	73	5.1.3 霍尔传感器的应用	125
3.6.1 自感式电感传感器	73	5.2 其他磁传感器	130
3.6.2 差动变压器	76	5.2.1 磁敏电阻	130
3.6.3 电感式传感器的应用	78	5.2.2 磁敏二极管	132
3.7 转矩传感器	79	5.2.3 磁敏晶体管	135
3.7.1 转矩传感器的工作原理	79	5.3 综合应用技能实训	137
3.7.2 常用的转矩传感器	79	5.3.1 用霍尔传感器制作一台高 斯计	137
3.8 综合应用技能实训	82	5.3.2 电动自行车中的霍尔电子 转把和闸把	138
3.8.1 电子秤的设计与制作	82	5.3.3 霍尔传感器在油气管道无 损探伤中的应用	140
3.8.2 料位测控系统的安装与调试	84	5.4 小结	144
3.8.3 读识由压力传感器构成的 自动磅控制电路	86	习题	144
3.9 小结	89	第6章 位移传感器	146
习题	90	6.1 机械位移传感器	146
第4章 光电式传感器	92	6.1.1 电位器式位移传感器	146
4.1 光电效应与光电器件	92	6.1.2 电容式位移传感器	147
4.1.1 光电效应	92	6.1.3 电感式位移传感器	148
4.1.2 光电器件	93	6.1.4 电涡流式位移传感器	148
4.1.3 光电器件的特性	97	6.2 光栅位移传感器	149
4.1.4 光电器件的应用	101	6.2.1 莫尔条纹	149
4.2 红外线传感器	102	6.2.2 光栅位移传感器的结构及 工作原理	150
4.2.1 概述	102	6.2.3 光栅位移传感器的应用	151
4.2.2 热释电型红外线传感器	103	6.3 光电编码器	151
4.2.3 红外探测器	105	6.3.1 增量式编码器	152
4.3 色彩传感器	108	6.3.2 绝对式光电编码器	152
4.3.1 双结型色彩传感器	109	6.3.3 光电编码器的应用	154
4.3.2 非晶态集成色彩传感器	109	6.4 磁栅传感器	155
4.4 CCD 图像传感器	110	6.4.1 磁栅传感器的组成及类型	155
4.5 光纤传感器	112	6.4.2 磁栅传感器的工作原理	157
4.5.1 光纤传感元件	112		
4.5.2 常用的光纤传感器	113		

6.4.3 磁栅传感器的应用	159	7.2.1 概述	189
6.5 感应同步器	159	7.2.2 陶瓷型湿度传感器	190
6.5.1 感应同步器的结构和类型	160	7.2.3 有机高分子型湿度传感器	191
6.5.2 感应同步器的工作原理	160	7.2.4 半导体型湿度传感器	192
6.5.3 感应同步器在数控机床闭环系统中的应用	162	7.2.5 含水量检测	192
6.6 接近传感器	163	7.2.6 湿度传感器的应用	193
6.6.1 电容式接近传感器	163	7.3 声敏传感器及超声波传感器	195
6.6.2 电感式接近传感器	163	7.3.1 声敏传感器	195
6.6.3 超声波式接近传感器	164	7.3.2 超声波传感器	197
6.6.4 热释电式接近传感器	164	7.4 综合应用技能实训	202
6.7 转速传感器	165	7.4.1 火灾自动报警电路	202
6.7.1 磁电式转速传感器	165	7.4.2 实用酒精检测报警器	203
6.7.2 光电式转速传感器	165	7.4.3 超声波倒车防撞报警电路	204
6.8 多普勒效应测速	166	7.4.4 光控、声控延时楼道照明灯电路及其安装	205
6.8.1 多普勒效应	166	7.5 小结	209
6.8.2 多普勒雷达测速	167	习题	209
6.9 液位及物位传感器	167	第8章 新型传感器和安全防范技术	211
6.9.1 压差式液位传感器	168	8.1 生物传感器	211
6.9.2 超声物位传感器	169	8.1.1 概述	211
6.10 流量及流速传感器	170	8.1.2 生物传感器的工作原理与结构	212
6.10.1 电磁式流量及流速传感器	170	8.2 机器人传感器	215
6.10.2 涡轮式流速传感器	172	8.2.1 机器人与传感器	215
6.11 综合应用技能实训	173	8.2.2 机器人传感器的分类	215
6.11.1 角度测量教具的制作	173	8.2.3 触觉传感器	216
6.11.2 电感式传感器在轴承滚柱直径分选中的应用	173	8.2.4 接近觉传感器	217
6.11.3 电动小车上安装的接近传感器	177	8.2.5 视觉传感器	218
6.12 小结	180	8.2.6 听觉、嗅觉、味觉及其他传感器	220
习题	180	8.3 微波传感器	222
第7章 环境量检测传感器	182	8.3.1 概述	222
7.1 气体传感器与烟雾传感器	182	8.3.2 微波传感器及其分类	223
7.1.1 半导体型气体传感器	183	8.3.3 微波传感器的优点及存在的问题	223
7.1.2 固体电解质式气体传感器	184	8.3.4 微波传感器的应用	224
7.1.3 接触燃烧式气体传感器	184	8.4 安全防范技术	228
7.1.4 电化学式气体传感器	184	8.4.1 入侵探测和防盗报警系统概述	228
7.1.5 集成型气体传感器	185	8.4.2 复合探测技术和防范报警系统	231
7.1.6 气体传感器的选择	185		
7.1.7 烟雾传感器	186		
7.1.8 气体传感器的应用	187		
7.2 湿度与水分传感器	189		

8.5 小结	235	习题	253
习题	235	第10章 现代传感技术	254
第9章 传感器接口电路	237	10.1 传感器新技术的发展	254
9.1 传感器输出信号的处理		10.2 无损检测诊断技术的	
方法	237	新进展	255
9.1.1 输出信号的特点	237	10.2.1 常用的无损检测方法	255
9.1.2 输出信号的处理方法	237	10.2.2 无损检测诊断新技术	256
9.2 传感器检测电路	238	10.3 虚拟仪器技术	258
9.2.1 检测电路的形式	238	10.3.1 虚拟仪器简介	258
9.2.2 常用检测电路	239	10.3.2 自动温度采集系统的设计	262
9.2.3 噪声的抑制	241	10.4 多传感器数据融合技术	263
9.3 传感器的非线性补偿技术	243	10.4.1 多传感器数据融合的优点	263
9.3.1 非线性补偿环节特性的获		10.4.2 数据融合的层次	263
取方法	243	10.4.3 数据融合的过程	264
9.3.2 非线性补偿环节的实现		10.4.4 多传感器数据融合中的传	
方法	244	感器工作方式	264
9.4 传感器和微型计算机的		10.5 传感器网络技术	265
连接	247	10.5.1 传感器网络的产生与	
9.4.1 传感器与微型计算机结		发展	265
合的重要性	247	10.5.2 传感器网络的功能与	
9.4.2 检测信号在输入微型计		特点	267
算机前的处理	247	10.6 小结	269
9.4.3 数据采集的概念	248	习题	270
9.4.4 模/数转换电路	250	附录 几种常用传感器的性能比较	271
9.5 小结	253	参考文献	272

第 1 章 传感器技术基础

1.1 概述

我们生活的世界是由物质组成的，一切物质都处在永恒不停的运动之中。物质的运动形式很多，它们通过化学现象或物理现象表现出来。表征物质特性或其运动形式的参数很多，根据物质的电特性，可分为电量和非电量两类。电量一般是指物理学中的电学量，如电压、电流、电阻、电容、电感等；非电量则是指除电量之外的一些参数，如压力、流量、尺寸、位移量、重量、力、速度、加速度、转速、温度、浓度、酸碱度等。

非电量不能直接使用一般电工仪表和电子仪器测量，因为一般电工仪表和电子仪器要求输入的信号为电量信号。在由电子计算机控制的自动化系统中，更要求输入的信息为电量信号。一些在特殊场合下的非电量，如炉内的高温、带有腐蚀性液体的液位、煤矿内瓦斯的浓度等也无法进行直接测量，这也需要将非电量转换成电量进行测量。

这种把被测非电量转换成与非电量有一定关系的电量，再进行测量的方法就是非电量电测法。实现这种转换的器件叫传感器。采用传感器技术的非电量电测方法，就是目前应用最广泛的测量技术。随着科学技术的发展，也出现了将光通量、化学量等作为可测量的传感器。

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。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，而且已渗透到人类生产、生活的各个领域。传感器技术对现代化科学技术、现代化农业及工业自动化的发展起到基础和支柱的作用，已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和条件”，传感器技术已成为科学技术和国民经济发展水平的标志之一。

1.1.1 测控系统

非电量的测量与控制系统，简称测控系统，其典型实例如图 1-1 所示。恒温箱内的温度

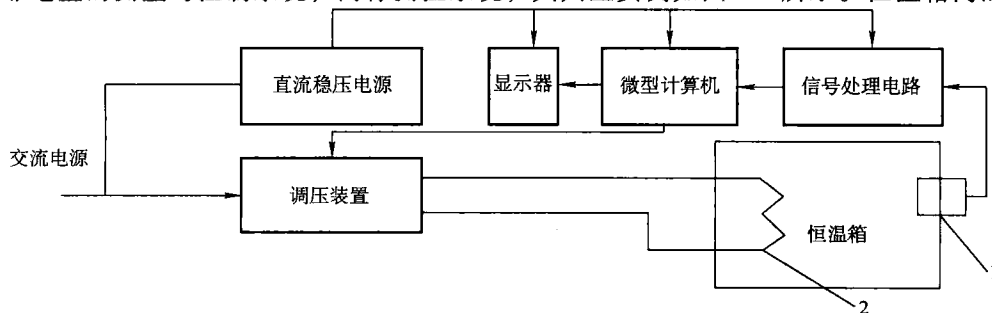


图 1-1 工业测控系统
1—传感器 2—电阻丝

由传感器检测，经信号处理电路后送计算机，计算机对该参数进行一系列的运算、比较、判断后发出控制信号，送至调压装置，控制电阻丝的电功率，达到使恒温箱内温度基本保持稳定的目的；同时，计算机将有关参数送到显示器显示出来。

由上可知，一个完整的自动测控系统一般由传感器、测量电路、显示记录装置（或调节执行装置）和电源四部分组成。自动测控系统通常可分为开环和闭环两种，如图 1-2 所示。系统中传感器的主要作用是将被测非物理量转换成与其有一定关系的电量。从图中可以看出，传感器在非电量电测系统中占有重要的位置，它获得的信息正确与否，直接关系到整个系统的测量精度。

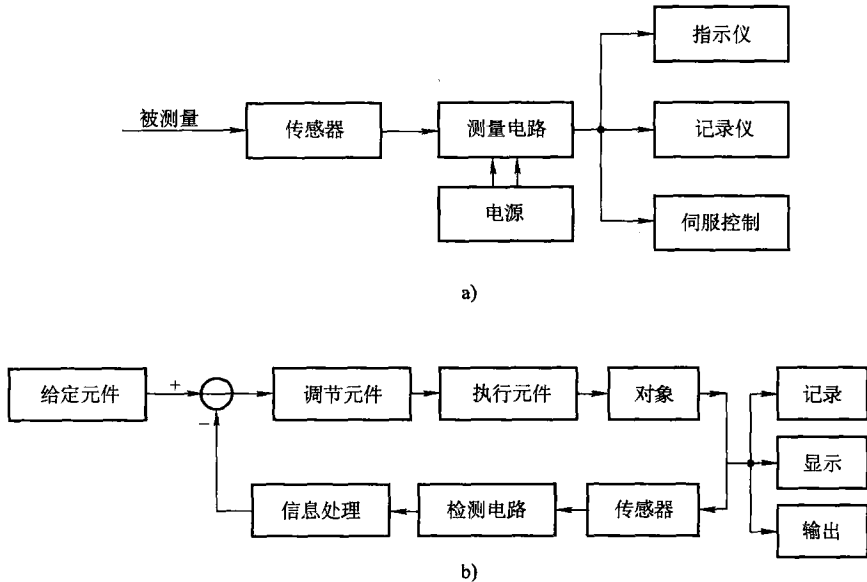


图 1-2 自动测控系统的组成

a) 开环自动测控系统框图 b) 闭环自动测控系统框图

1.1.2 传感器的定义

传感器技术是以研究传感器的原理、传感器的材料、传感器的设计、传感器的制作、传感器的应用为主要内容；以传感器敏感材料的电、磁、光、声、热、力等物理效应、现象，化学中的各种反应以及生物学中的各种机理作为理论基础；并综合了物理学、微电子学、光学、化学、生物工程、材料科学、精密机械、微细加工、试验测量等方面的知识和技术而形成的一门综合性学科。传感器技术与通信技术、计算机技术一起，分别构成了信息技术系统的“感官”、“神经”和“大脑”，是现代信息产业的三大支柱。

依照中华人民共和国国家标准（GB/T 7665—2005）的规定，传感器的定义是：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，通常由敏感元件和转换元件组成。其中，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。传感器也可以狭义地定义为：能把外界非电信息按一定规律转换成电信息输出的器件或装置。传感器的组成如图 1-3 所示。

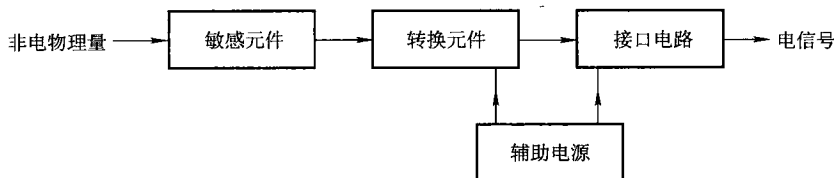


图 1-3 传感器的组成框图

应该指出的是，并不是所有的传感器必须包括敏感元件和转换元件。如果敏感元件直接输出的是电量，它就同时兼为转换元件；如果转换元件能直接感受被测量而输出与之成一定关系的电量，此时传感器就无敏感元件。例如压电晶体、热电偶、热敏电阻及光电器件等。敏感元件与转换元件两者合二为一的传感器是很多的。

图 1-3 中，接口电路的作用是把转换元件输出的电信号转换为便于处理、显示、记录 and 控制的可用电信号，其电路的类型视转换元件的不同而定。经常采用的接口电路有电桥电路和其他特殊电路，例如高阻抗输入电路、脉冲电路、振荡电路等。辅助电源供给转换能量。有的传感器需要外加电源才能工作，例如差动变压器、应变片组成的电桥等；有的传感器则不需要外加电源便能工作，例如压电晶体等。从测量电路输出的信号可用于自动控制系统执行机构，也可直接和计算机系统连接，对测量结果进行信息处理。

1.1.3 传感器的分类

由某一原理设计的传感器可以同时测量多种非电量，而有时一种非电量又可以用几种不同传感器测量，因此，传感器有许多分类方法。常用的分类方法有两种：一种是按被测物理量来分；另一种是按传感器的工作原理来分。

1. 按被测物理量分类

按被测物理量的性质来分类的传感器常见的有温度传感器、湿度传感器、压力传感器、位移传感器、流量传感器、液位传感器、力传感器、加速度传感器、转矩传感器等。

这种分类方法把种类繁多的被测量分为基本被测量和派生被测量两类。例如力可视为基本被测量，从力可派生出压力、重量和力矩等派生被测量，当需要测量这些被测量时，只要采用力传感器就可以了。了解基本被测量和派生被测量的关系，对于系统使用何种传感器是很有帮助的。

常见的非电基本被测量和派生被测量如表 1-1 所示。这种分类方法的优点是比较明确地表达了传感器的用途，便于使用者根据其用途选用。其缺点是没有区分每种传感器在转换机理上有何共性和差异，不便于使用者掌握其基本原理及分析方法。

2. 按传感器的工作原理分类

这种分类将物理、化学、生物等学科的原理、规律和效应作为分类的依据。其优点是对传感器的工作原理比较清楚，类别少，有利于传感器专业工作者对传感器的深入研究分析。其缺点是不便于使用者根据用途选用。

(1) 电学式传感器

电学式传感器是非电量电测技术中应用范围较广的一种传感器，常用的有电阻式传感器、电容式传感器、电感式传感器、磁电式传感器及电涡流式传感器等。

电阻式传感器是利用变阻器将被测非电量转换为电阻信号的原理制成的。电阻式传感器一般有电位器式、触点变阻式、电阻应变片式及压阻式传感器等。电阻式传感器主要用于位移、压力、力、应变、力矩、气流流速、液位和液体流量等参数的测量。

表 1-1 基本被测量和派生被测量

基本被测量		派生被测量
位移	线位移	长度、厚度、应变、振动、磨损、平面度
	角位移	旋转角、偏转角、角振动
速度	线速度	速度、振动、流量、动量
	角速度	转速、角振动
加速度	线加速度	振动、冲击、质量
	角加速度	角振动、转矩、转动惯量
力	压力	重量、应力、力矩
时间	频率	周期、计数、统计分布
温度		热容、气体速度、涡流
光		光通量与密度、光谱分布
湿度		水汽、水分、露点

电容式传感器是利用改变电容的几何尺寸或改变介质的性质和含量，从而使电容量发生变化的原理制成的。电容式传感器主要用于压力、位移、液位、厚度、水分含量等参数的测量。

电感式传感器是利用改变磁路几何尺寸、磁体位置来改变电感或互感的电感量或压磁效应的原理制成的。电感式传感器主要用于位移、压力、力、振动、加速度等参数的测量。

磁电式传感器是利用电磁感应原理制成的。磁电式传感器主要用于流量、转速和位移等参数的测量。

电涡流式传感器是利用金属在磁场中运动切割磁力线，在金属内形成涡流的原理制成的。电涡流式传感器主要用于位移及厚度等参数的测量。

(2) 磁学式传感器

磁学式传感器是利用铁磁物质的一些物理效应而制成的，主要用于位移、转矩等参数的测量。

(3) 光电式传感器

光电式传感器在非电量电测及自动控制技术中占有重要的地位。它是利用光电器件的光电效应和光学原理制成的，主要用于发光强度、光通量、位移、浓度等参数的测量。

(4) 电动势型传感器

电动势型传感器是利用热电效应、光电效应、霍尔效应等原理制成的，主要用于温度、磁通、电流、速度、发光强度、热辐射等参数的测量。

(5) 电荷传感器

电荷传感器是利用压电效应原理制成的，主要用于力及加速度的测量。

(6) 半导体传感器

半导体传感器是利用半导体的压阻效应、内光电效应、磁电效应、半导体与气体接触产

生物物质变化等原理制成的，主要用于温度、湿度、压力、加速度、磁场和有害气体的测量。

(7) 谐振式传感器

谐振式传感器是利用改变电或机械的固有参数来改变谐振频率的原理制成的，主要用来测量压力。

(8) 电化学式传感器

电化学式传感器是以离子导电为基础制成的。根据其电特性形式的不同，电化学传感器可分为电位式传感器、电导式传感器、电量式传感器、极谱式传感器和电解式传感器等。电化学式传感器主要用于分析气体、液体或溶于液体的固体成分、液体的酸碱度、电导率及氧化还原电位等参数的测量。

除了上述两种分类方法外，还可按能量的关系分类，将传感器分为有源传感器和无源传感器；按输出信号的性质分类，可将传感器分为模拟式传感器和数字式传感器（数字式传感器的输出为数字量，便于与计算机联用，且抗干扰能力较强，例如盘式角度数字传感器、光栅传感器等）；根据防爆等级传感器可分为普通型、防爆型及本安型。

本书主要是按被测量对传感器进行分类编写的，并对工作原理进行适当分析。本书讲述的重点是各种传感器的用途，并通过实训使读者学会应用传感器。

1.2 传感器的基本特性

在科学试验和生产过程中，传感器所测量的非电量处在不断变动之中，传感器能否将这些非电量的变化不失真地转换成相应的电量，取决于传感器的输入-输出特性。传感器这一基本特性可用其静态特性和动态特性来描述。

1.2.1 传感器的静态特性

传感器的静态特性是指传感器在被测量处在稳定状态时的输出与输入的关系。传感器静态特性的主要技术指标有线性度、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实际静态特性曲线与拟合直线之间的最大偏差 $\Delta L_{\max}$ 与传感器满量程输出 $y_{\max}$ 的百分比值，如图 1-4 所示，用 γ_L 表示为

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

线性度又称为非线性误差。 γ_L 越小，说明实际曲线与理论拟合直线之间的偏差越小。从特性上看， γ_L 越小越好，但考虑到成本，则一般要求 γ_L 适中。

通常总是希望传感器的输出-输入特性曲线为线性的，但实际的输出-输入特性只能接近线性，都应进行线性处理。常用的线性处理方法有理论直线法、端基拟合法、平均选点法、割线法、最小二乘法和计算程序法等（见图 1-4）。

2. 灵敏度

传感器的灵敏度是指传感器在稳态下的输出变化量 dy 与输入变化量 dx 之比，用 K 表示。对于线性传感器，其灵敏度就是它的静态特性的斜率，如图 1-5 所示。

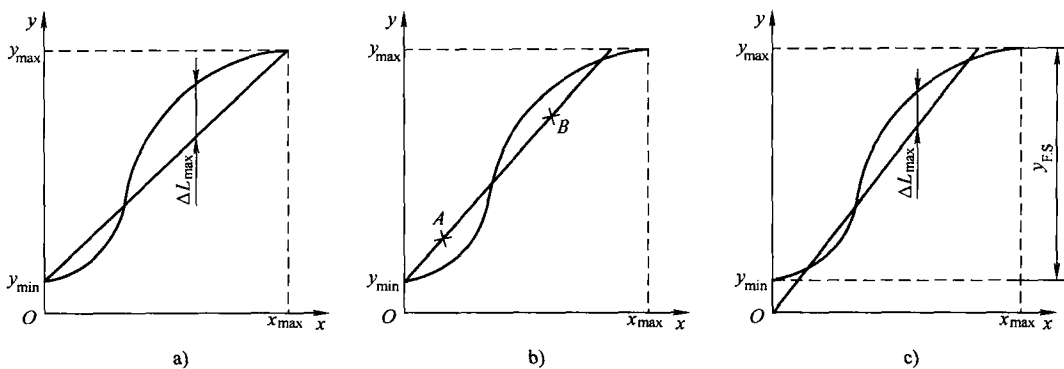


图 1-4 传感器线性度示意图
a) 端基线性度 b) 平均选点线性度 c) 最小二乘法线性度

$$K = \frac{dy}{dx} \quad (1-2)$$

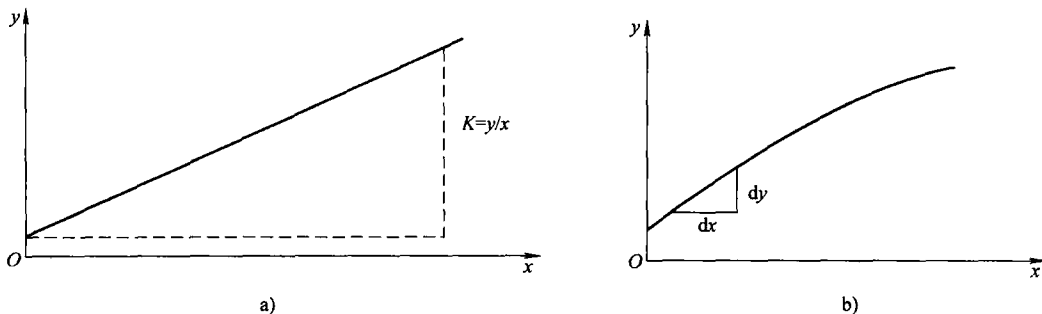


图 1-5 传感器的灵敏度定义示意图
a) 线性测量系统 b) 非线性测量系统

3. 迟滞

传感器的迟滞是指传感器在正向行程（输入量增大）和反向行程（输入量减小）期间，输出-输入特性曲线不一致的程度，如图 1-6 所示。迟滞 γ_H 的值通常由实验来决定，可用下式表示：

$$\gamma_H = \pm \frac{1}{2} \frac{\Delta H_{\max}}{Y_{\max}} \times 100\% \quad (1-3)$$

产生迟滞现象的主要原因是传感器的机械部分不可避免地存在着间隙、摩擦及松动等。

4. 重复性

传感器的重复性是指传感器在输入量按同一方向做全量程内连续重复测量时，所得输出-输入特性曲线不一致的程度，如图 1-7 所示。产生不一致的原因与产生迟滞现象的原因相

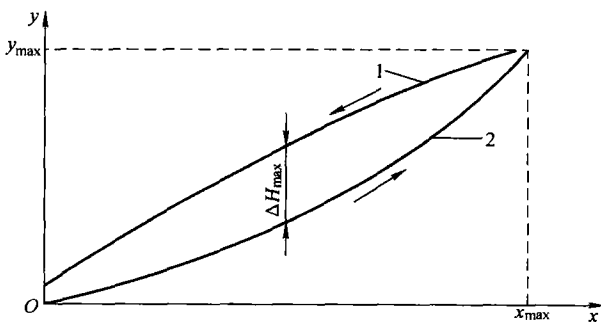


图 1-6 传感器迟滞特性示意图
1—反向特性 2—正向特性

同。重复性可用公式表示为

$$\gamma_x = \pm \frac{\Delta m_{\max}}{Y_{\max}} \times 100\% \quad (1-4)$$

式中， $\Delta m_{\max}$ 取 Δm_1 、 Δm_2 、 $\Delta m_3 \cdots$ 中最大的来计算。传感器重复性越好，使用时误差越小。

5. 分辨力

传感器的分辨力是在规定测量范围内所能检测的输入量的最小变化量。有时也用该值相对于满量程输入值的百分数表示。

6. 稳定性

稳定性有短期稳定性和长期稳定性之分。传感器常用长期稳定性，它是指在室温条件下，经过相当长的时间间隔，如一天、一月或一年，传感器的输出与起始标定时的输出之间的差异。通常又用其不稳定度来表征其输出的稳定程度。

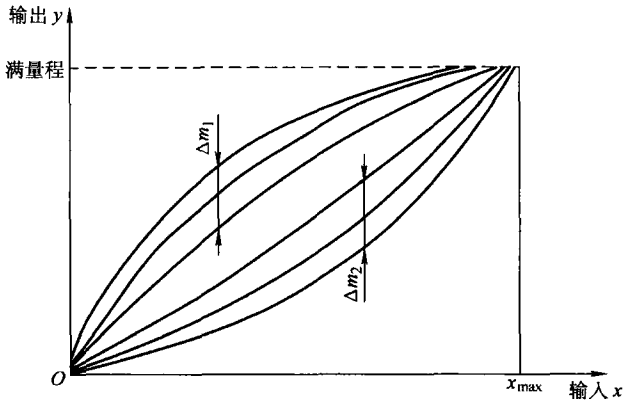


图 1-7 传感器重复性示意图

7. 漂移

传感器的漂移是指在外界的干扰下，输出量发生与输入量无关的不需要的变化。漂移包括零点漂移和灵敏度漂移等。零点漂移和灵敏度漂移又可分为时间漂移和温度漂移。时间漂移是指在规定的条件下，零点或灵敏度随时间的缓慢变化；温度漂移为环境温度变化而引起的零点或灵敏度的变化。

1.2.2 传感器的动态特性

在动态（快速变化）的输入信号情况下，要求传感器不仅能精确地测量信号的幅值大小，而且能测量出信号变化的过程。这就要求传感器能迅速准确地响应和再现被测信号的变化。传感器的动态特性，是指在测量动态信号时传感器的输出反映被测量的大小和随时间变化的能力。动态特性差的传感器在测量过程中，将会产生较大的动态误差。

具体研究传感器的动态特性时，通常从时域和频域两方面采用瞬态响应法和频率响应法来分析。最常用的是通过几种特殊的输入时间函数，例如阶跃函数和正弦函数来研究其响应特性，称为阶跃响应法和频率响应法。在此仅介绍传感器的阶跃响应特性。

给传感器输入一个单位阶跃函数信号：

$$u(t) = \begin{cases} 0 & t \leq 0 \\ 1 & t > 0 \end{cases} \quad (1-5)$$

其输出特性称为阶跃响应特性，如图 1-8 所示，由图可衡量阶跃响应的几项指标。

- 1) 时间常数 τ 传感器输出值上升到稳态值 y_c 的 63.2% 所需的时间。
- 2) 上升时间 t_r 传感器输出值由稳态值的 10% 上升到 90% 所需要的时间。
- 3) 响应时间 t_s 输出值达到允许误差范围 $\pm \Delta\%$ 所经历的时间。
- 4) 超调量 α 输出第一次超过稳值之峰高，即 $\alpha = y_{\max} - y_c$ ，常用 $\alpha/y_c \times 100\%$ 表示。