

面向21世纪

高职高专系列教材

# 传感器技术与应用

◎金发庆 主编

◎李瑜芳 审

 机械工业出版社  
China Machine Press



面向 21 世纪高职高专系列教材

# 传感器技术与应用

金发庆 主编

李瑜芳 审



机械工业出版社

本书主要讲述传感器原理、特性、用途与用法。书中介绍了传感器的分类、数学模型、材料及特性,介绍了温度、力、光、磁、位移、气体及湿度、生物、微波、超声波、机器人等各种传感器的工作原理、性能指标与应用方法,对传感器的输出信号处理及与微型计算机的接口进行了详细叙述。书中列举了传感器在工农业生产、科学研究、医疗卫生以及家用电器等许多方面的应用实例。本书共9章,每章均附有习题。

本书可供大学专科和高职应用电子技术、自动控制、仪器仪表、测量、机电技术及计算机应用专业等用做教学用书,也可作为有关工程技术人员的技术参考和自学用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

传感器技术与应用/金发庆主编. —北京:机械工业出版社, 2002. 1

面向21世纪高职高专系列教材

ISBN 7-111-08473-X

I. 传... II. 金... 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(2001)第097310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:汪汉友 版式设计:张世琴 责任校对:韩晶

封面设计:雷明顿 责任印制:路琳

中国建筑工业出版社密云印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2002年7月第1版·第2次印刷

1000mm×1400mm B5·5.875印张·263千字

5001—10000册

定价:17.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换  
本社购书热线电话(010)68993821、68326677—2527  
封面无防伪标均为盗版

# 面向 21 世纪高职高专 电子技术专业系列教材编委会成员名单

顾问	王文斌	陈瑞藻	李奇	杨杰		
主任委员	曹建林					
副主任委员	穆天保	张中洲	张福强	巩志强	董维佳	
	祖炬	华永平	任德齐			
委员	张锡平	刘美玲	杨元挺	刘涛	马彪	
	华天京	冯满顺	周卫华	崔金辉	曹毅	
	朱华贵	孙吉云	孙津平	吴元凯	孙心义	
	张红斌	饶庆和	苟爱梅			
秘书长	胡毓坚					
副秘书长	邓红					

## 出版说明

积极发展高职高专教育,完善职业教育体系,是我国职业教育改革和发展的一项重要任务。为了深化职业教育的改革,推进高职高专教育的发展,培养21世纪与我国现代化建设要求相适应的,并在生产、管理、服务第一线从事技术应用、经营管理、高新技术设备运作的高级职业技术应用型人才,尽快组织一批适应高职高专教学特色的教材,已成为各高职高专院校的迫切要求。为此,机械工业出版社与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联合组织了全国40多所院校的骨干教师,共同研究开发了一批计算机专业、电子技术专业和机电专业的高职高专系列教材。

各编委会确立了“根据高职高专学生的培养目标,强化实践能力和创新意识的培养,反映现代职业教育思想、教育方法和教育手段,造就技术实用型人才为立足点”的编写原则。力求使教材体现“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。

本套系列教材是由高职高专计算机专业、电子技术专业、机电专业教材编委会分别会同各院校第一线专业教师针对高职高专计算机、电子技术和机电各专业的教学现状和教材存在的问题开展研讨,尤其针对目前高职高专教学改革的新情况,分别拟定各专业的课程设置计划和教材选题计划。在教材的编制中,将教学改革力度比较大、内容新颖、有创新精神、比较适合教学、需要修编的教材以及院校急需、适合社会经济发展的新选题优先列入选题规划。在广泛征集意见及充分讨论的基础上,由各编委会确定每个选题的编写大纲和编审人员,实行主编负责制,编委会通过责任编委和主审对教材进行质量监控。

担任本套教材编写的老师们都是来自各高职高专院校教育第一线的教师,他们以高度的责任感和使命感,经过近一年的努力,终于将本套教材呈现在广大读者面前。由于高职高专教育还处于起步阶段,加上我们的水平和经验有限,在教材的选题和编审中可能出现这样那样的问题,希望使用这套教材的教师和学生提出宝贵的意见和建议,以利我们今后不断改进,为我国的高职高专教育事业的繁荣而共同努力。

高职高专系列教材编委会  
机械工业出版社

# 前 言

本书系大学专科和高职教育使用教材，由全国高等职业技术教育电子技术专业教材编委会编审、推荐出版。

本书讲述的是作为一门新兴学科的传感器的技术及开发应用。今天，人类已进入科学技术空前发展的信息社会，电子计算机、机器人、自动控制技术以及单片机嵌入系统的迅速发展，迫切需要形形色色的传感器。作为“感觉器官”，传感器用于将各种各样的信息检测并转换为工作系统能进行处理的信息。显而易见，传感器在现代科学技术领域中占有极其重要的地位，了解、掌握和应用传感器成了许多专业工程技术人员的必需，“传感器技术与应用”成了应用电子技术、自动控制技术、自动信号技术、测量技术、机器人技术及计算机应用等专业的必修课。

本书力求内容新颖、叙述简练、灵活应用，其参考学时 60 学时。本书以传感器定义、工作原理、分类和特性以及传感器用途和使用为主线，介绍了传感器的分类、数学模型、特性、材料及技术指标的标定，介绍了温度、力、光、磁、位移、湿度及气体、生物、微波、超声波、机器人等传感器的原理、结构、性能与应用。并在最后介绍了传感器输出信号的处理以及与微型计算机的连接。

本书第 1 章由金发庆编写并统稿全书，第 2、3 章由孙卫星编写，第 4、7、8 章由李晴编写，第 5、6、9 章由张天伟编写。并由李瑜芳对全书进行审稿，谨此致谢。

在本书编写过程中，得到许多同志热情关心和帮助，并提出了许多宝贵意见，在此一并表示衷心感谢。

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

# 目 录

出版说明	2.2.3 热电偶测温及参考端温度 补偿 .....	24
前言	2.3 金属热电阻传感器 .....	26
第 1 章 传感器技术基础 .....	2.3.1 热电阻的温度特性 .....	26
1.1 自动测控系统与传感器 .....	2.3.2 热电阻传感器的结构 .....	27
1.1.1 自动测控系统 .....	2.4 集成温度传感器 .....	27
1.1.2 传感器 .....	2.4.1 集成温度传感器基本工作 原理 .....	27
1.2 传感器的分类 .....	2.4.2 电压输出型集成温度传 感器 .....	28
1.2.1 按被测物理量分类 .....	2.4.3 电流输出型集成温度传 感器 .....	28
1.2.2 按传感器工作原理分类 .....	2.5 半导体热敏电阻 .....	29
1.3 传感器的数学模型 .....	2.5.1 热敏电阻的( $R_t-t$ )特性 .....	29
1.3.1 传感器的静态数学模型 .....	2.5.2 热敏电阻温度测量非线性 修正 .....	29
1.3.2 传感器的动态数学模型 .....	2.6 温度传感器应用举例 .....	30
1.4 传感器的特性与技术指标 .....	2.6.1 双金属温度传感器的应用 .....	30
1.4.1 静态特性 .....	2.6.2 热敏电阻温度传感器的 应用 .....	31
1.4.2 动态特性 .....	2.6.3 晶体管温度传感器的应用 .....	33
1.5 传感器的材料与制造 .....	2.6.4 集成温度传感器应用举例 .....	34
1.5.1 传感器的材料 .....	2.7 小结 .....	36
1.5.2 传感器制造技术 .....	2.8 习题 .....	36
1.6 提高传感器性能的方法 .....	第 3 章 力传感器 .....	37
1.6.1 传感器性能指标 .....	3.1 弹性敏感元件 .....	37
1.6.2 提高性能指标的方法 .....	3.1.1 弹性敏感元件的特性 .....	37
1.7 传感器的标定与校准 .....	3.1.2 弹性敏感元件的分类 .....	38
1.7.1 标定与校准的方法 .....	3.2 电阻应变片传感器 .....	41
1.7.2 静态标定 .....	3.2.1 电阻应变片工作原理 .....	41
1.7.3 动态标定 .....	3.2.2 电阻应变片的分类 .....	42
1.8 小结 .....	3.2.3 电阻应变片的测量电路 .....	42
1.9 习题 .....	3.3 压电传感器 .....	44
第 2 章 温度传感器 .....		
2.1 温度测量概述 .....		
2.2 热电偶传感器 .....		
2.2.1 热电偶测温原理 .....		
2.2.2 热电偶的结构形式及热 电偶材料 .....		22

3.3.1	石英晶体的压电效应	44	4.5	CCD 图像传感器	79
3.3.2	压电陶瓷的压电效应	46	4.5.1	CCD 电荷耦合器件	79
3.3.3	压电式传感器的测量电路	46	4.5.2	CCD 图像传感器	80
3.3.4	压电式传感器结构	49	4.6	光纤传感器	81
3.4	电容式传感器	50	4.6.1	光纤传感元件	81
3.4.1	变极距式电容传感器	50	4.6.2	常用光纤传感器	83
3.4.2	变面积式电容传感器	51	4.7	光传感器应用实例	84
3.4.3	变介电常数式电容传感器	53	4.8	小结	88
3.4.4	电容式传感器测量电路	53	4.9	习题	88
3.5	电感式传感器	56	<b>第 5 章 霍尔传感器及其他磁</b>		
3.5.1	自感式传感器	56	<b>传感器</b>	90	
3.5.2	测量电路	57	5.1	霍尔传感器工作原理	90
3.5.3	互感式传感器	58	5.1.1	霍尔效应	90
3.5.4	差动变压器式传感器测量		5.1.2	霍尔元件的主要技术参数	92
	电路	59	5.2	霍尔传感器	93
3.6	力传感器应用举例	60	5.2.1	霍尔开关集成传感器	93
3.6.1	煤气灶电子点火器	60	5.2.2	霍尔线性集成传感器	94
3.6.2	压电式玻璃破碎报警器	61	5.3	其他磁传感器	94
3.6.3	2S5M 压力传感器应用		5.3.1	磁阻元件	94
	电路举例	62	5.3.2	磁敏二极管	95
3.7	小结	62	5.3.3	磁敏三极管	96
3.8	习题	63	5.4	霍尔传感器及其他磁传感器	
<b>第 4 章 光电式传感器</b>		64	<b>应用实例</b>	98	
4.1	光电效应	64	5.4.1	霍尔汽车无触点点火器	98
4.1.1	外光电效应	64	5.4.2	霍尔无刷直流电动机	98
4.1.2	内光电效应	64	5.4.3	自动供水装置	99
4.1.3	光生伏打效应	65	5.5	小结	100
4.2	光电器件	65	5.6	习题	101
4.2.1	光电管和光电倍增管	65	<b>第 6 章 位移传感器</b>	102	
4.2.2	光敏电阻	66	6.1	机械位移传感器	102
4.2.3	光电二极管和光电三极管	67	6.1.1	电位器式位移传感器	102
4.2.4	光电池	67	6.1.2	电容式位移传感器	103
4.2.5	光电元件的特性	68	6.1.3	螺线管式电感位移传感器	104
4.2.6	光电耦合器件	73	6.1.4	差动变压器	104
4.3	红外线传感器	74	6.2	光栅位移传感器	105
4.3.1	概述	74	6.2.1	莫尔条纹	105
4.3.2	热释电型红外传感器	75	6.2.2	光栅位移传感器的结构及	
4.4	色彩传感器	77		工作原理	106



6.2.3	光栅位移传感器的应用	106	7.3.1	气体报警器	131
6.3	磁栅位移传感器	106	7.3.2	自动空气净化换气扇	131
6.4	接近传感器	108	7.3.3	自动去湿装置	132
6.4.1	电容式接近传感器	108	7.3.4	录像机结露报警控制电路	132
6.4.2	电感式接近传感器	108	7.3.5	气体报警器与控制器电路	133
6.4.3	热释电红外传感器接近 电路	108	7.4	小结	134
6.5	转速传感器	110	7.5	习题	134
6.5.1	磁电式转速传感器	110	<b>第8章 新型传感器</b>		135
6.5.2	光电式转速传感器	111	8.1	生物传感器	135
6.6	多普勒传感器	112	8.1.1	概述	135
6.6.1	多普勒效应	112	8.1.2	生物传感器的工作原理及 结构	136
6.6.2	多普勒雷达测速	112	8.2	微波传感器	140
6.7	液位传感器	113	8.2.1	概述	140
6.7.1	导电式水位传感器	113	8.2.2	微波传感器及其分类	140
6.7.2	压差式液位传感器	114	8.2.3	微波传感器的优点及存在的 问题	141
6.8	流量及流速传感器	115	8.2.4	微波传感器的应用——微波 温度传感器	142
6.8.1	电磁式流量传感器	116	8.3	超声波传感器	142
6.8.2	涡轮式流速传感器	117	8.3.1	超声波传感器的物理基础	142
6.9	小结	118	8.3.2	超声波换能器及耦合技术	144
6.10	习题	118	8.3.3	超声波传感器的应用	146
<b>第7章 气体和湿度传感器</b>		120	8.4	机器人传感器	149
7.1	气体传感器	120	8.4.1	机器人与传感器	149
7.1.1	半导体型气体传感器	121	8.4.2	机器人传感器的分类	150
7.1.2	固体电解质式气体传感器	122	8.4.3	触觉传感器	150
7.1.3	接触燃烧式气体传感器	122	8.4.4	接近觉传感器	152
7.1.4	电化学式气体传感器	123	8.4.5	视觉传感器	153
7.1.5	集成型气体传感器	124	8.4.6	听觉、嗅觉、味觉及其他 传感器	156
7.1.6	气体传感器的应用	124	8.5	小结	158
7.1.7	烟雾传感器	125	8.6	习题	158
7.2	湿度传感器	126	<b>第9章 传感器接口电路</b>		159
7.2.1	概述	126	9.1	传感器输出信号的处理 方法	159
7.2.2	陶瓷型湿度传感器	128	9.1.1	输出信号的特点	159
7.2.3	有机高分子湿度传感器	129	9.1.2	输出信号的处理方法	160
7.2.4	半导体型湿度传感器	130			
7.2.5	含水量检测	130			
7.3	气体和湿度传感器的 应用	131			

9.2 传感器信号检测电路 .....	160	机前的处理 .....	167
9.2.1 检测电路形式 .....	160	9.3.3 模—数转换电路 .....	168
9.2.2 常用电路 .....	161	9.3.4 电压—频率转换电路 .....	169
9.3 传感器和微型计算机的 连接 .....	166	9.4 传感器应用系统实例 .....	171
9.3.1 传感器与微型计算机 结合的重要性 .....	166	9.5 小结 .....	174
9.3.2 检测信号在输入微型计算 机前的处理 .....		9.6 习题 .....	174
		<b>参考文献</b> .....	175

# 第 1 章 传感器技术基础

世界是由物质组成的，各种事物都是物质的不同形态。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，例如电压、电流、电阻、电容及电感等；非电量则是指除电量之外的一些参数，例如压力、流量、尺寸、位移量、重量、力、速度、加速度、转速、温度、浓度及酸碱度等等。人类要认识物质及事物的本质，需要对物质特性进行测量，其中大多数是对非电量的测量。

非电量的测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信号，只能测量电量。非电量需要转换成与非电量有一定关系的电量，再进行测量。实现这种转换技术的器件叫传感器。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，现在也出现了光通量、化学量等作为可测量的传感器。

当今信息时代，随着电子计算机技术的飞速发展，自动检测、自动控制技术显露出非凡能力，而设备只能处理电信号，也就需要把被测、被控非电量的信息通过传感器转换成电信号。可见，传感器是实现自动检测和自动控制的首要环节。没有传感器对原始信息进行精确可靠的捕获和转换，就没有现代化的自动检测和自动控制系统；没有传感器就没有现代科学技术的迅速发展。

## 1.1 自动测控系统与传感器

### 1.1.1 自动测控系统

自动检测和自动控制技术是人们对事物的规律进行定性了解和定量分析预期效果所从事的一系列的技术措施。自动测控系统是完成这一系列技术措施的装置之一，它是检测控制器与研究对象的总和。自动测控系统通常可分为开环与闭环两种，如图 1-1 和图 1-2 所示。

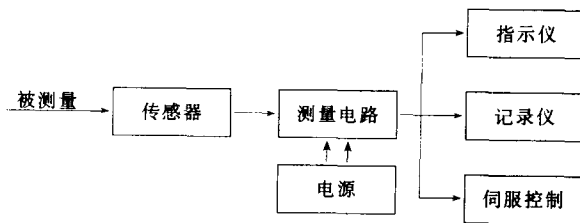


图 1-1 开环自动测控系统框图

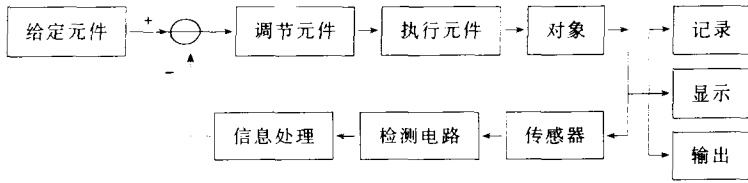


图 1-2 闭环自动测控系统框图

由图 1-1 和图 1-2 可以看出，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以及电源这四部分组成。

### 1.1.2 传感器

传感器的作用是将被测非电物理量转换成与其有一定关系的电信号，它获得的信息正确与否，直接关系到整个系统的精度。依照中华人民共和国国家标准 (GB/T7665 - 1987 传感器通用术语) 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被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部分。传感器的组成如图 1-3 所示。

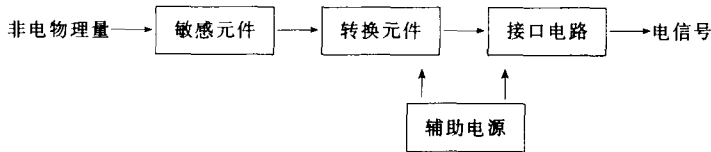


图 1-3 传感器组成框图

应该指出的是，并不是所有的传感器必需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变换为便于处理、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，例如应变片组成的电桥、差动变压器等；有的传感器则不需要外加电源便能工作，例如压电晶体等。

传感器转换能量的理论基础都是利用物理学、化学、生物学现象和效应来进行能量形式的变换。图 1-4 给出了传感器各种能量之间的转换关系，可见，被测量和它们之间的能量的相互转换是各种各样的。传感器技术就是掌握

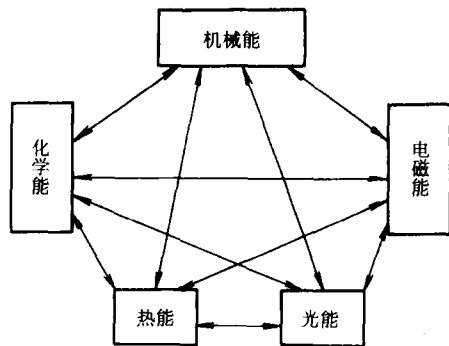


图 1-4 传感器的能量转换关系

和完善这些转换的方法和手段，是涉及传感器能量转换原理、材料选取与制造、器件设计、开发和应用等多项综合技术。

## 1.2 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物理量，而有时一种非电物理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，但常用的分类方法有两种，一种是按被测输入量来分；另一种是按传感器的工作原理来分。

### 1.2.1 按被测物理量分类

这一种方法是根据被测量的性质进行分类，如温度传感器、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、加速度传感器及转矩传感器等。

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、应力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。

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		水气、水分、露点

### 1.2.2 按传感器工作原理分类

这一种分类方法是以工作原理划分，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。这种分类法的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。具体划分为：

### 1. 电学式传感器

电学式传感器是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。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等。电阻式传感器主要用于位移、压力、力、应变、力矩、气体流速、液位和液体流量等参数的测量。

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。主要用于压力、位移、液位、厚度及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原理制成的。主要用于位移、压力、力、振动及加速度等参数的测量。

磁电式传感器是利用电磁感应原理，把被测非电量转换成电量而制成。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而制成。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。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而制成，主要用于光强、光通量、位移、浓度等参数的测量。

### 4. 电势型传感器

电势型传感器是利用热电效应、光电效应及霍尔效应等原理而制成，主要用于温度、磁通量、电流、速度、光通量及热辐射等参数的测量。

### 5. 电荷型传感器

电荷型传感器是利用压电效应原理而制成，主要用于力及加速度的测量。

### 6. 半导体型传感器

半导体型传感器是利用半导体的压阻效应、内光电效应、磁电效应及半导体与气体接触产生物质变化等原理而制成，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而制成，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原理为基础而制成。根据其电特性的形成不同，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（极化）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成分、液体成分、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，还有按能量的关系分类，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，将传感器分为模拟式传感器和数字式传感器。数字式传感器输出为数字量，便于与计算机联用，且抗干扰性较强，例如盘式角度数字传感器，光栅传感器等。

本书的传感器主要是按被测量分类编写的，适当加以工作原理的分析，重点讲述了各种传感器的用途，使读者学会应用传感器，进一步去开发新型传感器。

# 1.3 传感器的数学模型

传感器作为感受被测量信息的器件，总是希望它能按照一定的规律输出有用信号，因此，需要研究其输入—输出之间的关系及特性，以使用理论指导其设计、制造、校准与使用。理论和技术上表征输入—输出之间的关系通常是以建立数学模型来体现，这也是研究科学问题的基本出发点。

传感器可能用来检测静态量（不随时间变化的量）、准静态量、动态量（随时间变化的量），输入信号的状态不同，传感器表现出来的输出特性也不相同。为了简化，传感器的静、动态特性可以分开来研究，从静态输入—输出关系和动态输入—输出关系两方面建立数学模型。

### 1.3.1 传感器的静态数学模型

静态数学模型是指在静态信号作用下，传感器输出与输入量间的一种函数关系。如果不考虑迟滞特性和蠕动效应，传感器的静态数学模型一般可以用  $n$  次多项式来表示为

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

式(1-1)中， $x$  为输入量； $y$  为输出量； $a_0$  为零输入时的输出，也叫零位输出； $a_1$  为传感器线性项系数也称线性灵敏度，常用  $K$  或  $S$  表示； $a_2, a_3, \cdots, a_n$  为非线性项系数，其数值由具体传感器非线性特性决定。传感器静态数学模型有 3 种有用的特殊形式：

1) 理想的线性特性 其线性度最好，通常是所希望的传感器应具有的特性，只有具备这样的特性才能正确无误地反映被测的真值。其数学模型为

$$y = a_1x \quad (1-2)$$

具有该特性的传感器的灵敏度为直线  $y = a_1 x$  的斜率, 其中  $a_1$  为常数。

2) 仅有偶次非线性项 其线性范围较窄, 线性度较差, 灵敏度为相应曲线的斜率, 一般传感器设计很少采用这种特性。其数学模型为

$$y = a_0 + a_2 x^2 + a_4 x^4 + \cdots + a_{2n} x^{2n}, \quad n = 0, 1, 2, \cdots \quad (1-3)$$

3) 仅有奇次非线性项 其线性范围较宽, 且相对坐标原点对称的, 线性度较好, 灵敏度为该曲线的斜率。其数学模型为

$$y = a_1 x + a_3 x^3 + a_5 x^5 + \cdots + a_{2n+1} x^{2n+1}, \quad n = 0, 1, 2, \cdots \quad (1-4)$$

这种特性传感器使用时应采取线性补偿措施。

### 1.3.2 传感器的动态数学模型

在实际测量中, 大量的被测量是随时间变化的动态信号。传感器的动态数学模型是指在随时间变化的动态信号作用下, 传感器输出一输入量间的函数关系, 它通常称为响应特性。动态数学模型一般采用微分方程和传递函数描述。

#### 1. 微分方程

绝大多数传感器都属于模拟(连续变化信号)系统, 描述模拟系统的一般方法是采用微分方程。在忽略了一些影响不大的非线性和随机变量等复杂因素后, 可将传感器作为线性定常数系统来考虑, 因而其动态数学模型可以用线性常系数微分方程来表示, 其通式为

$$\begin{aligned} & a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y \\ & = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \cdots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x \end{aligned} \quad (1-5)$$

式(1-5)中,  $a_n, a_{n-1}, \cdots, a_0; b_m, b_{m-1}, \cdots, b_0$  分别为与传感器的结构有关的常数。

对于复杂的系统, 其微分方程的建立和求解都是很困难的。但是一旦求解出微分方程的解就能分清其暂态响应和稳态响应。数学上采用拉普拉斯变换将实数域的微分方程变换成复数域( $S$ 域)的代数方程, 求解就容易一些了。另外, 也可采用传递函数的方法研究传感器动态特性。

#### 2. 传递函数

由数学理论知, 如果当  $t \leq 0$  时,  $y(t) = 0$ , 则  $y(t)$  的拉普拉斯变换可定义为

$$Y(s) = \int_0^{\infty} y(t) e^{-st} dt \quad (1-6)$$

式中,  $s = \sigma + j\omega$ ,  $\sigma > 0$ 。

对式(1-5)两边取拉普拉斯变换, 则得

$$Y(s)(a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_0) = X(s)(b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \cdots + b_0)$$

输出  $y(t)$  拉普拉斯变换  $Y(s)$  和输入  $x(t)$  拉普拉斯变换  $X(s)$  的比为该系统的传递函数  $H(s)$

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \cdots + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_0} \quad (1-7)$$



式(1-7)第二个等号右边是一个与输入无关的表达式，只与系统结构参数有关，可见传递函数  $H(s)$  是描述传感器本身传递信息的特性，条件是  $t \leq 0, y(t) = 0$ ，即传感器被激励之前所有储能元件如质量块、弹性元件、电气元件均没有积存能量。这样不必了解复杂系统的具体结构内容，只要给出一个激励  $x(t)$ ，得到系统对  $x(t)$  的响应  $y(t)$ ，由它们的拉普拉斯变换就可以确定系统的传递函数  $H(s)$ 。对于多环节串联或并联组成的传感器或检测系统，如果各环节阻抗匹配适当，可略去相互之间的影响，总的传递函数可由各环节传递函数相乘或相加求得。当传感器比较复杂或传感器的基本参数未知时，可以通过实验求得传递函数。

## 1.4 传感器的特性与技术指标

传感器测量静态量表现为静态特性，测量动态量表现为动态特性。为了降低或消除传感器在测量控制系统中的误差，传感器必需具有良好的静态和动态特性，才能使信号或能量按准确的规律转换。

### 1.4.1 静态特性

传感器的静态特性主要由下列几种性能来描述。

#### 1. 线性度

线性度是传感器输出量与输入量之间的实际关系曲线偏离直线的程度，又称非线性误差。线性度可用下式表示为

$$E = \pm \frac{\Delta_{\max}}{y_{fs}} \times 100\% \quad (1-8)$$

式中， $\Delta_{\max}$  为实际曲线与拟合直线之间的最大偏差； $y_{fs}$  为输出满量程值。

根据式(1-1)、式(1-2)、式(1-3)及式(1-4)的静态数学模型画出的关系曲线如图 1-5 所示。

由图可见，除图 1-5a 为理想特性外，其他都存在非线性，都应进行线性处理。常用的方法有理论直线法、端点线法、割线法、最小二乘法和计算程序法等。

#### 2. 灵敏度

灵敏度是传感器在稳态下输出增量与输入增量的比值。对于线性传感器，其灵敏度就是它的静态特性的斜率，如

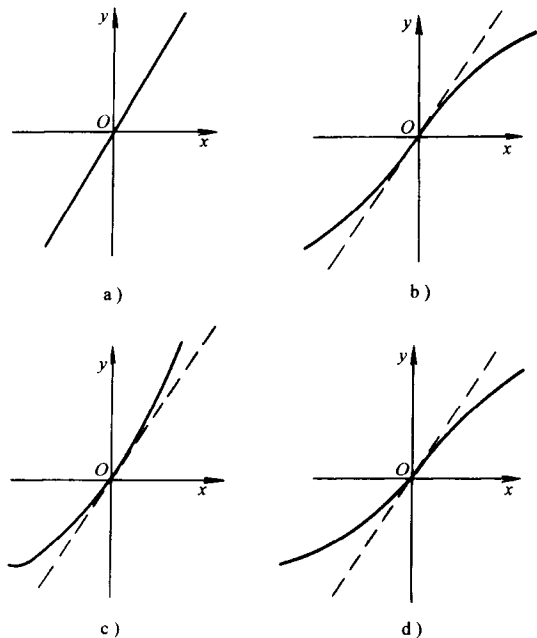


图 1-5 传感器的线性度