

Internet of Things

物联网工程与技术规划教材

# 现代传感器原理 及应用

张志勇 王雪文 翟春雪 贡江妮 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

物联网工程与技术规划教材

# 现代传感器原理及应用

张志勇 王雪文 翟春雪 贞江妮 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书以现代传感器原理及应用为背景,在详细论述基本传感器的原理、结构与应用的基础上,论述了智能传感器和网络传感器,介绍了一些新型传感器和设计中的相关技术及其实现方法,反映了传感、测试和控制技术的最新发展和重要应用。

全书内容共9章,其中第1~7章主要以测量对象种类为主线,依次全面、系统地论述了测量温度、光、力、磁、气体、湿度和声波/超声波等各类传感器的原理、结构、性能指标及其应用电路的设计,第8章介绍了智能传感器的工作原理、系统构成及智能化功能的实现方法等,第9章介绍了网络传感器的系统结构、网络管理及应用实例。

本书内容结合教科书要求的理论性和系统性,兼备解决实际问题的实用性。可作为电子科学与技术、电气工程、信息与通信工程、物理及其应用、检测技术与仪器、自动化、机械工程及机电一体化、探测制导与控制、物联网和计算机应用类专业的大学本科高年级学生的教材,可作为相关专业的科学硕士生和工程硕士生的教材,也可供从事传感器技术和信息工程的研究与开发、生产与应用的科技工作者和工程技术人员参考。

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

现代传感器原理及应用/张志勇等编著. —北京:电子工业出版社,2014.1

物联网工程与技术规划教材

ISBN 978-7-121-22079-1

I. ①现… II. ①张… 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(2013)第291527号

策划编辑:索蓉霞

责任编辑:张京

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:23.25 字数:687.5千字

印次:2014年1月第1次印刷

定 价:49.00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](mailto:zltz@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

服务热线:(010)88258888。

# 前 言

随着高新科学技术的发展,传感器技术成为构成现代信息技术系统的主要内容,是实现自动检测和自动控制的首要环节,在原理、结构、技术和应用等方面都发生了很大的变化,特别是传感器在数字化、微型化、集成化、智能化和网络化等方面,取得了令人瞩目的创新性进展。现代传感器技术已能够精确地获取和及时处理信息并渗透到工业自动化和物联网中,被广泛应用于航空、航天和航海技术、民用设施、机器人技术、汽车工业、生物医学和医疗器械等领域。

为了使人才培养适应新形势的要求,教学内容和教材建设在保证基础理论知识的同时,必须增添新技术。利用传感器能将各种外界信息(温度、光、力、磁、气、声等的变化)转变为电信号的原理,人们可以设计相应的电路以实现信息的自动测量、处理和控制。考虑传感器存在不同程度的非线性、响应特性、稳定性和选择性等因素,人们不仅必须掌握各类传感器的结构、原理及其性能指标,还必须熟悉传感器的输出信号经过适当的接口电路调整才能满足信号的处理、显示和应用的要求;通过分析和了解传感器应用实例和智能传感器实例,才能设计出更多传感器和信息处理结合的应用;通过掌握网络传感器的结构和信息管理,了解信息接口模块和通信协议,才能使现代传感器的生产、研制、开发和应用有新的突破。另外,由于传感器的被测信号来自各个应用领域,为了改革生产力、革新产品和拓宽测试范围,每个领域都在利用新技术研制更高精度的传感器,所以,为适应高科技的前沿,应该阐述最近涌现出的多种新型传感器、小型传感器、智能传感器及无线网络传感器系统。

为了适应较多专业传感器技术教学的需求,本着实用、典型和新颖的原则,我们在前几年编写的《传感器原理及应用》教材基础上,删除了一些实际应用中使用不多的知识内容,同时,增添了一些采用新型结构的基本传感器和采用新原理、应用更广泛的实用传感器器件的介绍,重新编写、整理了新版《现代传感器原理及应用》教材。

本书系统地传感器的基础知识与其应用有机结合,在详细讲述基本传感器的原理(如热电阻、热电偶、光电管、光导管、光敏二极管、应变片、压电式传感器、电容和电感压力传感器、霍尔器件、结型磁敏器件、气敏电阻器、浓差电池、湿敏传感器、声波传感器等)及其实际应用电路的基础上,阐述了实用的集成温度传感器、热释电器件、CCD 图像传感器、光纤传感器、谐振式传感器、电感式磁敏器件、光吸收式气敏传感器、表面声波 SAW 传感器和智能传感器,还介绍了一些新型传感器(如热辐射传感器、激光传感器、磁通门、磁栅式传感器、超声波传感器、Z 元件、高分子传感器、电子鼻、模糊传感器和人工神经网络的智能传感器等)和现代信息时代应用最广的网络传感器,以扎实基础、拓宽知识面,结合新技术和交叉技术、扩大测试范围和开阔应用领域,并与现代信息技术接轨,实现智能生活、智能科技。

本书内容包括绪论和 1~9 章:从绪论介绍传感器的定义和基本特性开始,先详细讲述最基础的温度传感器,依次是应用面宽的光敏传感器、支撑工业控制的力学量传感器、影响环境的磁敏传感器和气体/湿敏传感器、通过声波/超声波传感器检测影响它们传播的外界信息,再讲述智能传感器和多功能传感器,最后介绍将各种传感器应用于信息时代的网络传感器。逐步深入、环环紧扣,如后面介绍的传感器在应用时考虑了用前面讲述的温度传感器进行温度补偿以提高测量精度,最后两章体现了传感器的发展方向及其在现代信息技术中的地位。

为便于教师组织教学及学生自学，本书配有电子教案，读者可以登录华信教育资源网（[www.hxedu.com.cn](http://www.hxedu.com.cn)）注册下载。

本书绪论和第 1、8 章由张志勇教授编写并负责全书定稿，第 2、3、6 章由王雪文教授编写并负责本书统稿，第 4、5 章由翟春雪博士编写，第 7、9 章由贡江妮博士编写。

由于本书内容涉及物理学、半导体物理学、化学、机械学、电子电路、自动控制、信息科学、物联网和计算机技术等多学科的知识，加之编著者水平有限，若有不妥和错误之处，敬请广大读者批评指正。

编者  
于西安·西北大学

# 目 录

绪论	1	2.3 光生伏特效应器件	60
第 1 章 温度传感器	9	2.3.1 光生伏特效应	60
1.1 电阻型温度传感器	9	2.3.2 典型的光生伏特探测器	61
1.1.1 金属热电阻	9	2.3.3 光生伏特效应器件的应用	70
1.1.2 热敏电阻	11	2.4 固态图像传感器	75
1.1.3 半导体热电阻	15	2.4.1 电荷耦合器件	75
1.1.4 电阻式温度传感器的应用	18	2.4.2 CMOS 固态图像传感器	82
1.2 热电偶	22	2.4.3 图像传感器的应用	86
1.2.1 热电偶的基本原理	22	2.5 光纤传感器	87
1.2.2 热电偶的种类和结构	25	2.5.1 光纤传感器的基本构成	87
1.2.3 热电偶的实用测量电路	28	2.5.2 光纤传感器的原理	88
1.3 PN 结型温度传感器	29	2.5.3 光纤传感器	89
1.3.1 单 PN 结温度传感器	29	2.5.4 光纤光栅传感器	91
1.3.2 集成温度传感器	31	2.6 新型光敏传感器及发展动向	93
1.3.3 温敏闸流晶体管	34	2.6.1 激光传感器	93
1.3.4 结型温度传感器的应用	36	2.6.2 高分子光传感器	94
1.4 热释电器件	39	2.6.3 机器人光学阵列触觉系统	95
1.4.1 热释电效应及器件	39	2.6.4 光敏传感器的发展动向	96
1.4.2 双元型热释电传感器	40	习题与思考题	96
1.4.3 热释电器件的应用	42	第 3 章 力学量传感器	98
1.5 新型温度传感器及发展趋势	42	3.1 应变计	98
1.5.1 辐射温度传感器	42	3.1.1 金属应变计	98
1.5.2 温度传感器的发展趋势	44	3.1.2 半导体应变计	102
习题与思考题	45	3.1.3 应变计的测量电路	105
第 2 章 光敏传感器	46	3.1.4 硅膜片上压阻全桥的设计	108
2.1 外光电效应及器件	46	3.1.5 硅杯式压力传感器	110
2.1.1 外光电效应	46	3.1.6 应变式传感器的应用	112
2.1.2 光电发射二极管	47	3.2 压电式传感器	115
2.1.3 光电倍增管	49	3.2.1 压电效应	115
2.1.4 光电倍增管的应用	54	3.2.2 典型材料的压电效应	116
2.2 光电导效应器件	54	3.2.3 压电传感器的相应电路	120
2.2.1 光电导效应	54	3.2.4 压电式传感器	123
2.2.2 光敏电阻及其偏置电路	56	3.3 电容式压力传感器	124
2.2.3 光敏电阻的应用	59	3.3.1 单电容压力传感器	124

3.3.2	差动式电容压力传感器	126	4.5.1	电涡流磁传感器	177
3.3.3	电容式集成压力传感器	127	4.5.2	磁通门	181
3.3.4	电容式压力传感器的应用电路	129	4.6	新型磁敏传感器及其发展趋势	189
3.4	电感式压力传感器	133	4.6.1	CMOS 磁敏器件	189
3.4.1	自感式压力传感器的工作原理	133	4.6.2	电磁式流量传感器	190
3.4.2	单电感压力传感器	134	4.6.3	磁栅式传感器	190
3.4.3	差动式电感压力传感器	134	4.6.4	磁敏传感器的发展前景	194
3.4.4	互感式压力传感器及其接口 电路	135		习题和思考题	194
3.4.5	特点和应用	137	<b>第 5 章</b>	<b>气敏传感器</b>	195
3.5	谐振式压力传感器	137	5.1	概述	195
3.5.1	谐振式压力传感器的基本原理	137	5.2	半导体电阻式气敏传感器	196
3.5.2	测量接口电路	140	5.2.1	表面电阻控制型气敏传感器	196
3.5.3	压电谐振传感器及其应用	140	5.2.2	体电阻控制型气敏传感器	201
3.6	新型力学量传感器及其发展	141	5.2.3	多层薄膜及复合型气敏传感器	204
3.6.1	压电涂层传感器	141	5.3	结型气敏传感器	205
3.6.2	力敏 Z 元件	141	5.3.1	气敏二极管	205
3.6.3	基于硅微机械谐振传感器的稳 幅式真空计	143	5.3.2	MOSFET 型气敏元件	207
3.6.4	机器人力学量传感器	144	5.4	浓差电池式气敏传感器	208
3.6.5	力敏传感器的发展趋势	144	5.4.1	O <sub>2</sub> 传感器	208
	习题与思考题	144	5.4.2	SO <sub>2</sub> 和 H <sub>2</sub> S 传感器	212
<b>第 4 章</b>	<b>磁敏传感器</b>	146	5.5	接触燃烧式气敏传感器	212
4.1	霍尔器件	146	5.5.1	气敏元件结构及其工艺	212
4.1.1	霍尔效应	147	5.5.2	检测原理	213
4.1.2	霍尔元件	148	5.5.3	气敏元件的优点及特性	214
4.1.3	霍尔集成传感器	154	5.6	光学类气敏传感器	215
4.1.4	霍尔器件的应用	156	5.6.1	红外吸收式气敏传感器	215
4.2	半导体磁阻器件	159	5.6.2	检测中的干扰因素及补偿方法	218
4.2.1	磁阻效应	159	5.6.3	光纤吸收式气敏传感器	221
4.2.2	磁阻元件	162	5.7	气敏传感器的应用及其发展	225
4.2.3	磁敏电阻的应用	163	5.7.1	气敏传感器的典型应用	225
4.3	结型磁敏器件	164	5.7.2	新型气敏传感器	227
4.3.1	磁敏二极管	164	5.7.3	气敏传感器的发展趋势	232
4.3.2	磁敏三极管	167		习题与思考题	232
4.3.3	结型磁敏元件的应用	170	<b>第 6 章</b>	<b>湿敏传感器</b>	234
4.4	铁磁性磁敏元件	171	6.1	概述	234
4.4.1	强磁性金属薄膜磁阻传感器	172	6.2	湿敏电阻	235
4.4.2	巨磁阻抗传感器	174	6.2.1	无机电解质湿敏传感器	235
4.5	电感式磁传感器	177	6.2.2	高分子湿敏传感器	236
			6.2.3	其他电阻式湿敏传感器	238
			6.3	电容式湿敏传感器	239

6.3.1	湿敏电容器结构	239	7.6.2	次声波传感器	284
6.3.2	多孔陶瓷湿敏电容器	240	7.6.3	次声波传感器的应用	285
6.3.3	高分子湿敏电容器	242	7.7	微波声波及其延迟线	286
6.4	光学湿敏传感器	245	7.7.1	微波声波	286
6.4.1	光敏薄膜式湿敏传感器	245	7.7.2	微波声波延迟线	287
6.4.2	光纤式湿敏传感器	246	7.7.3	微波声波延迟线的应用	287
6.4.3	平面光波导式湿敏传感器	248	7.8	新型声波传感器及其发展	288
6.5	其他类型湿敏传感器	248	7.8.1	新型次声波传感器	288
6.5.1	MOS 型湿敏传感器	248	7.8.2	听觉传感器	289
6.5.2	界限电流式高温湿敏传感器	248	7.8.3	波传感器的发展趋势	289
6.5.3	射频湿敏传感器	250		习题与思考题	289
6.6	湿敏传感器的应用及发展	251	<b>第 8 章</b>	<b>智能传感器</b>	291
6.6.1	湿度/电压与电容湿度/频率转换 电路	251	8.1	概述	291
6.6.2	湿敏传感器的实用电路	252	8.2	智能传感器的原理	292
6.6.3	新型湿敏传感器及其发展	254	8.2.1	计算机型智能传感器	292
	习题与思考题	255	8.2.2	材料型智能传感器	294
			8.2.3	结构型智能传感器	294
			8.2.4	集成智能传感器	295
<b>第 7 章</b>	<b>声波传感器</b>	256	8.3	智能传感器的数据处理技术	298
7.1	概述	256	8.3.1	非线性校正	298
7.1.1	声波	256	8.3.2	自校准	302
7.1.2	声波的物理性质	257	8.3.3	自补偿	305
7.2	声波传感器的类型	259	8.3.4	自适应	305
7.2.1	电阻变换型声波传感器	260	8.3.5	自诊断	306
7.2.2	静电变换型声波传感器	260	8.3.6	噪声抑制与弱信号检测	306
7.2.3	电磁变换型声波传感器	263	8.4	智能传感器的接口技术	307
7.2.4	光电变换型声波传感器	264	8.4.1	数据输出接口电路	307
7.3	超声波及其传感器	265	8.4.2	智能传感器的接口芯片	307
7.3.1	超声波	265	8.4.3	IEEE 1451 智能传感器的接口 标准	308
7.3.2	超声波换能器	265	8.4.4	基于 IEEE 1451 标准的传感器	310
7.3.3	超声波传感器	266	8.5	智能传感器应用实例	312
7.3.4	常用超声波传感器应用电路	271	8.5.1	智能温度传感器	312
7.4	声表面波传感器	274	8.5.2	其他智能传感器	314
7.4.1	SAW 传感器的工作原理	275	8.6	智能传感器新技术及其发展	317
7.4.2	实用的 SAW 传感器	276	8.6.1	多传感器信息融合技术	317
7.5	声板波及其传感器	282	8.6.2	模糊传感器	320
7.5.1	声板波	282	8.6.3	人工神经网络	322
7.5.2	APM 传感器	283	8.6.4	新型智能传感器系统	324
7.5.3	APM 传感器的应用	283	8.6.5	智能传感器的发展方向	325
7.6	次声波及其传感器	284			
7.6.1	次声波及其特性	284			



习题与思考题	326	9.3.1 WSN 的特征	337
<b>第 9 章 网络传感器</b>	<b>327</b>	9.3.2 WSN 的体系结构	337
9.1 概述	327	9.3.3 WSN 的通信技术	338
9.1.1 网络传感器的概念与结构	327	9.3.4 WSN 的网络管理	343
9.1.2 网络传感器信息交换体系	329	9.3.5 WSN 网络优化处理技术	350
9.1.3 网络传感器测控系统体系结构	329	9.3.6 WSN 的应用	356
9.2 网络传感器的通信协议	330	9.3.7 网络传感器的展望	360
9.2.1 IEEE 802.15.4 协议	330	习题与思考题	360
9.2.2 蓝牙协议	330	<b>参考文献</b>	<b>361</b>
9.3 无线传感器网络	336		

# 绪 论

在高新技术迅速发展的信息时代，获取准确可靠的信息成为做好一切工作的前提，传感器技术作为信息采集和转换的重要部件，是测量计量和控制系统的关键环节，是工业自动化和智能技术的先导，在国民经济各个领域的应用日益广泛。在世界范围内，一个国家一项工程设计中所用传感器的数量和水平直接标志着其科学技术的先进程度，许多国家都把传感器技术列为国家优先发展的技术之一，因此传感器技术成为信息时代的焦点，被称为现代信息技术的三大支柱之一。

## 1. 传感器的定义及其检测对象

人类社会文明的发展过程中经历了几次大的科技革命，其从根本上都表现为用机器（人）代替人的劳动。一般，人在劳动过程中首先通过人的五官（眼、耳、鼻、舌、皮）感受外界，将所得到的信息送入大脑并进行思维和判断，然后大脑命令四肢完成某种动作。传感器是能够代替人的五官完成获取外界信息，并且能够传送感觉（应）的一种器件。

通常“五官”能感受的外界信息的范围很小，包括对人体无害的信息（如温度、可见光、呼吸气体、听到的声音、力、尺寸、外形等）和对人体有害的信息（如毒物）；还有很多无法或难以感知的被测量（如紫外光、红外光、电磁场、无味无色的气体、特高温、剧毒品、各种微弱信号等）和超过人能承受范围的、不能触及的和感觉不准的（如位移、加速度、浓度、噪声、缺陷等）被测量，所有这些外界信息传感器都可以感知。因为电信号具有高精度，高灵敏度，可测量、控制的范围广，便于传递、放大及反馈等处理，并可连续检测和实现遥测，易储存等很多优点，所以人们希望传感器能将外界信息变成电信号，以便于进一步放大、传输、存储、显示、输出信息。于是，更广义地可以把传感器归纳为一种能感受外界信息（力、热、声、光、磁、气体、湿度、蛋白质、离子等）并按一定的规律将其转换成易处理的电信号的装置。

若被测量是非电学量，可以分为物理量（如力学量、湿度、流量、物位、光学量、温度）、化学量（如成分、浓度、离子、反应速度）、生物量（如葡萄糖、酶、DNA、血压、人体反应）等，必须通过相应的传感器将它们转换成电学量，再送入计算机进行处理。若被测量是电学量，可以直接与各种智能仪器（机器人、计算机）连接，并进行信号处理。

## 2. 传感器的分类

由于被测信号种类很多，一种被测量可以用不同种类的传感器来测量，而且一种传感器也可以测量几种被测信号，所以存在多种分类方式，这里介绍几种基本的分类方式。

(1) 按照工作机理可以分为物性传感器和结构型传感器两大类。物性传感器利用外界信息使材料本身的固有性质发生变化，通过检测性质的变化来检测外界信息。将外界信息使材料的物理性质（力、热、声、光）发生变化的传感器称为物理传感器，如应变计、热电阻、拾音器、光敏二极管等；将外界信息使材料的化学性质发生变化的传感器称为化学传感器，如  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  气敏传感器等；将外界信息使生物或微生物组织的生物效应发生变化的传感器称为生物传感器，如酶传感器、微生物传感器等。结构型传感器利用外界信息使某些元件的结构（如弹簧、气压或磁致伸缩等）发生形变，通过测量结构的变化来检测被测对象。

(2) 按照信息的传递方式可以分为直接型传感器和间接型传感器。将被测的信息通过传感器直接转换成电信号的传感器称为直接型传感器，如光敏二极管直接将光信号转换成电压信号和电流信号。

将被测信息通过多于一次的转换才变为电信号的传感器称为间接型传感器，如压力传感器先将压力施加于感压膜片上使其产生形变（即应变），进而产生压阻效应。

(3) 按照人类的感覺功能分类，如表 0-1 所示。机器人的感觉系统由视觉、触觉、痛觉、滑动觉、接近觉、热觉或温觉、力觉、嗅觉、听觉、味觉等组成；工作时将多个传感器得到的信息综合，利用多信息融合处理技术，使机器人更准确、全面和低成本地获取所处环境的信息。进而采用机器人智能技术，如机器人的多感觉系统（Robot Sensory System）、多传感器信息的集成与融合（Multi-Sensor Integration and Fusion）、人工智能、图像识别和语音识别等技术，结合自动控制技术或程控和遥控等技术，形成智能机器人，可以完成感知功能、决策功能和动作功能。

表 0-1 按照感觉功能分类

感 官	感觉传感器	传 感 对 象	主要的传感器
眼	视觉传感器、接近觉传感器	光强和颜色、大小和形状、距离感觉、三维图像	光电二极管、光电倍增管、光敏二极管、光敏三极管、电荷耦合器件、图像传感器、感应线圈接近觉传感器、电容式接近觉传感器
耳	听觉传感器	声音信息	压电传感器、拾音器、压磁式传感器、声表面波传感器、超声波传感器、语音识别系统
鼻	嗅觉传感器	气体和湿度	电阻式气敏传感器、电容式气敏传感器和电感式气敏传感器、电阻式湿敏传感器
皮	触觉传感器、滑动觉传感器、压觉传感器、热觉传感器	表面特征和物理性能、滑、热、压	压阻式力传感器、压电式触觉传感器、光电式触觉传感器、电容式触觉传感器、位移传感器、振动传感器、热敏电阻传感器、热电偶、集成温度传感器
舌	味觉传感器	成分和浓度	生物传感器、葡萄糖传感器、DNA 芯片

另外，按照能量关系分类为能量转换型和能量控制型。前者由被测对象输入能量使其工作，如热电偶、光电池和浓差电池等有源传感器；后者从外部获得激励能量控制其工作，如电阻式和电感式等必须提供激励源（如电源）传感器，也称为无源传感器。还可以按照制备传感器所用的材料分为半导体传感器、金属传感器、陶瓷传感器、光纤传感器、高分子传感器、生物传感器等。按传感器的检测对象分类，如温度传感器、光敏传感器、压敏传感器、磁敏传感器、气敏传感器、湿敏传感器、声波传感器和生物传感器等。还可以按照集成度和智能化分类，按照网络管理的传感器和无线传感器网络分类，按照用途分类（工业、民用、医疗、军用、汽车），还有更为具体的分类形式（如流量传感器、离子传感器、电磁传感器、光电传感器）等。总之，为了使用方便，不同的行业中的分类方式不同，而且会随着传感器的发展出现更新的种类。

### 3. 传感器基础简介

#### (1) 传感器的基本特性

从传感器本身的作用可知，它是直接与被测对象发生联系的部分，是信息输入的窗口，可提供原始信息，检测的准确与否与一定范围内反映被测量的精确程度有关。于是，它必须具备一定的基本特性，而了解和掌握其基本特性是正确选择和使用传感器的基本条件。传感器的基本特性指传感器的输出与输入之间关系的特性，一般分为静态特性和动态特性两大类。当被测量不随时间变化或随时间变化缓慢（常称为静态信号）时，传感器的输出信号反映其静态特性，可用一系列静态参数来描述；当被测量随时间变化很快（常称为动态信号）时，传感器的输出信号反映其动态特性，可用一系列动态参数来描述。

##### ① 静态特性。

传感器的静态特性指对于静态的输入信号，传感器的输出量与输入量之间所具有的相互关系。此时输入信号与时间无关，输出量也与时间无关，输出量与输入量的关系可用一个不含时间的方程来表示：

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \cdots + a_nx^n \quad (0-1)$$

式中,  $a_0$  为零位输出,  $a_1$  为线性常数,  $a_2, a_3, \cdots, a_n$  为非线性待定常数, 它们都可由实际的测量数据标定。

实际测量中也可以以  $x$  为横坐标、 $y$  为纵坐标, 根据测量结果画出特性曲线来表征输出与输入的关系。而由多次测量的结果分析可知, 任何传感器的输出与输入的关系不会完全符合所要求的特征线性或非线性关系, 必须用一些重要指标来衡量传感器的静态特性, 如测量范围、线性度、迟滞、重复性、灵敏度等。

a. 测量范围 ( $y_{FS}$ ): 一般测量范围 (又称为量程) 确定在一定的线性区域或保证一定寿命的范围内, 实际应用中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和延长传感器及其电路的寿命。每个传感器都有其测量范围, 若超过了这个范围进行测量, 就会带来很大的非线性误差或测量误差, 甚至将其损坏。

b. 线性度 ( $\delta_f$ ): 为了标定和数据处理方便, 通常总希望得到线性关系, 采用各种硬件或软件的线性化处理方法, 用一条拟合直线近似代表实际的特性曲线, 这样会使输出曲线不能完全反映实验曲线, 总存在一定的非线性误差。线性度就是用来表示实际曲线与拟合直线接近程度的一个性能指标, 如图 0-1 所示, 用二者间的最大偏差  $\Delta y_{\max}$  与满量程输出  $y_{FS}$  的百分比来表示, 即:

$$\delta_f = \pm \frac{\Delta y_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (0-2)$$

实用拟合直线的方法有理论拟合、过零旋转拟合、端点平移或连线拟合、最小二乘法拟合等, 以所参考的拟合直线计算出的线性度也不同, 比较传感器线性度好坏时必须建立在相同的拟合方法上。

c. 迟滞 ( $\delta_H$ ): 又称滞后, 指在相同工作条件下进行全范围测量时正行程和反行程输出的不重合程度, 如图 0-2 所示, 常用全量程范围校准时同一输入量的正行程输出值和反行程输出值之间的最大偏差  $\Delta H_{\max}$  与满量程输出值的百分比表示:

$$\delta_H = \pm \frac{\Delta H_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (0-3)$$

它反映了传感器材料参数的恢复快慢、机械结构和制造工艺的缺陷等。

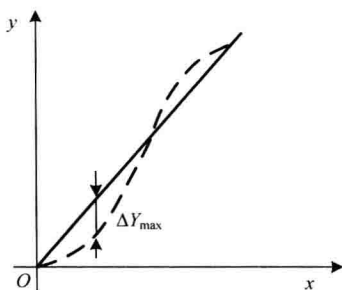


图 0-1 线性度

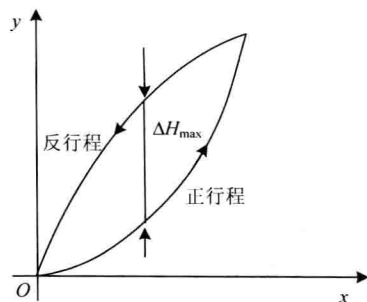


图 0-2 迟滞

d. 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测量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), 如图 0-3 所示, 若正行程的最大重复性偏差为  $\Delta R_{\max 1}$ , 反行程的最大重复偏差为  $\Delta R_{\max 2}$ , 取两个中最大的, 再用满量程的百分比表示, 即:

$$\delta_K = \pm \frac{\Delta R_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (0-4)$$

或用同一输入量  $N$  次测量的标准偏差  $\sigma$  与满量程的百分比表示。其标准偏差用下式表示:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}{N-1}} \quad (0-5)$$

式中  $\bar{y}$  为测量值的算术平均值,  $N$  为测量的次数。

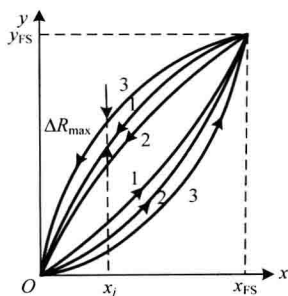


图 0-3 重复性偏差示意图

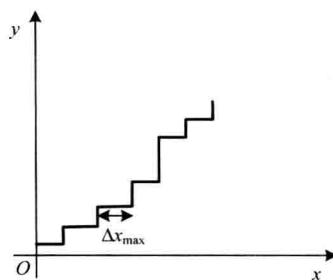


图 0-4 分辨力

e. 灵敏度 ( $S$ ): 用传感器稳定工作时输出量的变化 ( $\Delta y$ ) 与输入量变化 ( $\Delta x$ ) 的比值表示:

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{dy}{dx} \quad (0-6)$$

可以看出,  $S$  的量纲是输出量与输入量的量纲之比。对于线性传感器来讲,  $S$  就是其校准时输出-输入特性直线的斜率; 对于非线性传感器来讲,  $S$  随输入量的变化而变化。一般  $S$  较高时测量容易, 精度提高; 但  $S$  越高测量的范围就越窄, 稳定性越差; 应根据具体情况择优选择。

f. 分辨力: 它是描述传感器可以检测到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, 即在此范围内分辨不出输入的变化, 如图 0-4 所示, 只有当输入量变化超过此范围时输出才发生变化。一般各个输入点上能分辨的范围不同, 人们将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 ( $\Delta x_{\max}$ ), 也可以用分辨率表示, 即:

$$\frac{\Delta x_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (0-7)$$

g. 温度稳定性: 将传感器的输入量设定在某个值, 测量出相应的输出值, 使环境温度上升或下降一定间隔, 输出值会发生变化, 说明传感器具有温度不稳定性。一般用温度系数来描述温度引起的这个误差, 表示为

$$\alpha_T = \frac{y_2 - y_1}{y_{FS} \Delta T} \times 100\% \quad (0-8)$$

式中,  $y_1$ 、 $y_2$  分别为温度为  $T_1$ 、 $T_2$  时的输出值,  $\Delta T = T_2 - T_1$ 。

## ② 动态特性。

当输入量随时间变化时传感器的输出量响应特性就称为动态特性, 一般应使输出量随时间的变化与输入量随时间的变化相近, 否则输出量就不能反映输入量的变化, 实时测量就毫无意义。动态输入量的变化规律分为规律性的和随机性的两种: 前者又可以分为周期性的 (正弦周期和复杂周期) 和非

周期性的(阶跃函数、线性函数和其他瞬变函数),后者包括平稳的随机函数和非平稳的随机函数。在此,分析传感器对某些标准动态输入信号的响应情况。

#### a. 阶跃响应。

当输入为阶跃函数时,如图 0-5(a)所示,则传感器的响应函数  $y(t)$  分为两个响应过程,见图 0-5(b)。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。表达式为

$$\begin{cases} t = 0, & x(t) = 0 \\ t > 0, & x(t) = A \end{cases} \quad (0-9)$$

$$\begin{cases} t = 0, & y(t) = 0 \\ t > 0, & Y(t) \uparrow, \text{过渡区域} \\ t \rightarrow \infty, & y(t) = B \end{cases} \quad (0-10)$$

过渡过程中的特性参数有以下几个。

- 时间常数  $\tau$ : 输出量从 0 上升到稳态值  $y(\infty)$  的 63% 所需的时间。
- 上升时间  $t_r$ : 由稳态值  $y(\infty)$  的 10% 上升到 90% 所需的时间。它表示传感器的响应速度,  $t_r$  越小表明传感器对输入的响应速度越快。
- 响应时间  $t_s$ : 从输入量开始到输出进入稳定值的允许误差范围 ( $\pm 1\%$  或  $\pm 2\%$ ) 内所需的时间,也能表示响应速度。
- 振荡次数  $N$ : 输出量在稳态值  $y(\infty)$  上下摆动的次数,  $N$  越小表明稳定性越好。
- 稳态误差  $e$ : 响应的实际值  $y(\infty)$  与期望值之差,它反映稳态的精确程度。

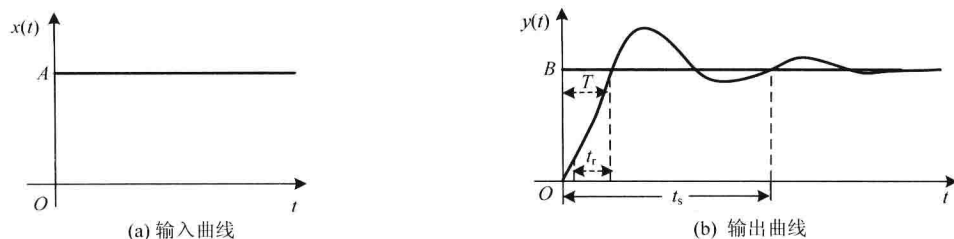


图 0-5 传感器的动态特性

#### b. 频率响应。

- 零阶传感器的数学模型。

如果一个传感器的输入量随时间的变化为  $X(t)$ , 其输出量随时间的变化  $Y(t)$  是输入量的  $b_0/a_0$  倍, 则输出量与输入量的关系可以表示为

$$a_0 Y(t) = b_0 X(t) \quad (0-11)$$

式中,  $a_0$  和  $b_0$  是传感器的系数,  $b_0/a_0$  称为静态灵敏度。实际中, 滑线电阻器的输出电压  $U(t)$  与触点距边界的距离  $X(t)$  成正比, 可以将具有这种关系的传感器称为零阶传感器。

- 一阶传感器的数学模型。

如果传感器电路中含有一个储能元件(电感器或电容器), 其输出量  $y(t)$  与输入量  $x(t)$  的关系可以表示为

$$a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_0 x(t) \quad (0-12)$$

式中,  $a_1$ 、 $a_0$  和  $b_0$  是传感器的常数,  $b_0/a_0=K$  称为静态灵敏度。实际中, 热电偶所测的节点温度  $T_0(t)$  随被测介质温度  $T_i(t)$  的关系类似 (0-11) 式, 若  $\tau = RC$  ( $R$  为介质热阻,  $C$  为热电偶的比热), 即:

$$\tau \frac{dT_0}{dt} + T_0 = KT_i。$$

● 二阶传感器系统的数学模型。

二阶传感器系统的微分方程通式为

$$\frac{1}{\omega_n^2} \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + \frac{2\zeta}{\omega_n} \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = Kx(t) \quad (0-13)$$

式中,  $\omega_n = \sqrt{a_0/a_2}$  为传感器的固有角频率,  $\zeta = a_1/(2\sqrt{a_0a_2})$  为传感器的阻尼比,  $K = b_0/a_0$  为静态灵敏度。一般加速度传感器属于二阶传感器系统, 其  $x(t) = F(t)$ , 其传递函数  $H(s)$  为

$$H(s) = \frac{y(s)}{x(s)} = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (0-14)$$

频率特性为

$$H(j\omega) = \frac{K}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 + 2j\zeta\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)} \quad (0-15)$$

其频率传递函数的模  $|H(j\omega)|$  与角频率  $\omega$  的关系被称为幅频特性, 即:

$$A(\omega) = |H(\omega)| = \frac{K}{\sqrt{[1 - (\omega/\omega_n)^2]^2 + 4\zeta^2(\omega/\omega_n)^2}} \quad (0-16)$$

输出信号与输入信号的相位之差与频率的关系  $\varphi(\omega)$  称为相频特性, 即:

$$\varphi(\omega) = -\arctan \frac{2\zeta(\omega/\omega_n)}{1 - (\omega/\omega_n)^2} \quad (0-17)$$

●  $n$  阶传感器系统的数学模型。

对于线性系统的传感器, 可以用常系数线性微分方程来表示:

$$a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_0 y(t) = b_m \frac{d^m x(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_0 x(t) \quad (0-18)$$

式中,  $a_n, a_{n-1}, \dots, a_1, a_0, b_m, b_{m-1}, \dots, b_1$  和  $b_0$  均为常数 ( $m < n$ ), 可以通过  $n$  次实验确定之。

$y(t)$  和  $x(t)$  的拉氏变换为  $y(s) = L[y(t)] = \int_0^\infty y(t)e^{-st} dt$  和  $x(s) = L[x(t)] = \int_0^\infty x(t)e^{-st} dt$ , 且将式(0-18)

进行拉氏变换, 得到的方程为

$$(a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0) y(s) = (b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0) x(s) \quad (0-19)$$

由式 (0-19) 可以得到输入量和输出量之间的拉氏传递函数  $H(s)$ :

$$H(s) = \frac{y(s)}{x(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} \quad (0-20)$$

若输入信号为正弦波  $x(t) = A \sin(\omega t)$ , 用  $j\omega$  代替式 (0-20) 中的  $s$ , 则可以得出传感器的输出量与输入量之比和频率的关系, 即频率传递函数  $H(j\omega)$  为

$$H(j\omega) = \frac{y(j\omega)}{x(j\omega)} = \frac{b_m(j\omega)^m + b_{m-1}(j\omega)^{m-1} + \cdots + b_1(j\omega) + b_0}{a_n(j\omega)^n + a_{n-1}(j\omega)^{n-1} + \cdots + a_1(j\omega) + a_0} \quad (0-21)$$

式中,  $j = (-1)^{1/2}$ 。其幅频特性  $A(\omega) = \sqrt{[H_R(\omega)]^2 + [H_I(\omega)]^2}$  和相频特性  $\varphi(\omega) = -\arctan \frac{H_I(\omega)}{H_R(\omega)}$  都与角频率  $\omega$  有关, 一般情况下传感器的输出量滞后于输入量,  $\varphi(\omega)$  为负值。

若由两个频率响应为  $H_1(j\omega)$  和  $H_2(j\omega)$  的常系数线性系统串联组成一个总系统, 其频率响应为  $H(j\omega) = H_1(j\omega) \cdot H_2(j\omega)$ , 幅频特性为  $A(j\omega) = A_1(j\omega) \cdot A_2(j\omega)$ , 相频特性为  $\varphi(\omega) = \varphi_1(\omega) + \varphi_2(\omega)$ , 它们都只是  $\omega$  的函数, 与时间和输入量无关。若将两个频率响应的常系数线性系统并联, 则总系统的传递函数为  $H_1(j\omega) + H_2(j\omega)$ 。如果系统为非线性的, 则  $H(j\omega)$  将与输入量有关; 如果系统为非常系数的, 则  $H(j\omega)$  还与时间有关。

## (2) 传感器的基本应用

传感器首先应用在测量与控制系统(也叫测控系统)中, 而且是其中的关键部件。它在测量系统中执行测量的功能, 并将测定“量或性质”的值显示出来; 在控制系统中将测量到的量或性质的信息进行分析, 用于控制以达到预期的目的。

### ① 在测量系统中的应用。

基本的电子测量系统由传感器、信号调节、显示系统和电源等四部分组成, 如图 0-6(a)所示。其中信号调节和转换部分可使用阻抗匹配器、多级放大器、数模转换器或转换电路(如振荡器)等, 使传感器输出的电信号转换为便于显示和记录的信号; 显示部分可使用模拟或数字表、纸带记录仪、字符打印机、示波器等, 之后再对输出数据进行分析。如果一个环境有两个或更多个被测信号(如温度、压力、振动等), 则需要用同样数量、不同种类的传感器测量, 也需要各自的信号调节处理并显示输出; 若只用一个显示器, 其信号调节采用软件控制分别处理, 系统中加一个手动开关或自动定时分档器(或定序器), 见图 0-6(b), 显示面板上增加一个显示传感器序号的字符, 记录时可对显示面板进行扫描, 读出所显示值及相应标号, 也可以定时打印输出。

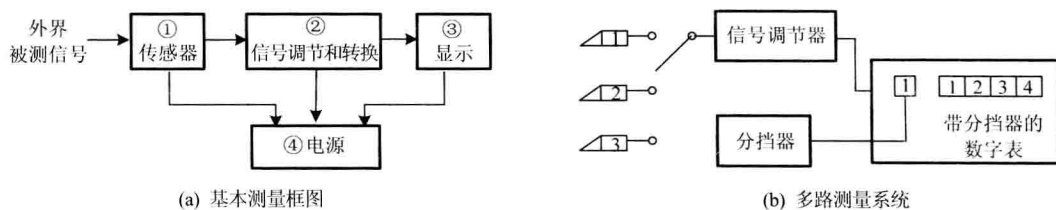


图 0-6 电子测量系统

若显示点距测量点很近, 则测量系统可以直接显示所测量到的值, 工作人员可以在一定的时间内将显示值记录下来, 或用自动摄像机拍摄带有时间的测量指示装置; 若显示点距测量点很远, 则需在系统中增加由测量装置到显示装置传送信息的设备, 如机械系统使用钢丝绳连接, 气动系统利用管道传递测量装置的压力变化。还可以将测量数据组合成一个复合信号调制高频载波, 放大送到天线, 从天线发射出去, 再用天线接收后用解调器从高频载波中分离出信号, 分析并显示出相应传感器的输出信号。

### ② 在控制系统中的应用。

按照控制的方式将控制系统分为开环和闭环两类。前者是将传感器测量出来的数据经信号调节器后显示出来, 由操作员分析判断, 并进行控制(如提高温度、减小压力、截止流动、装填容器或改变速度等)的系统。后者将传感器测量出来的数据经信号调节器后送入比较器, 与参考数据(即要保持



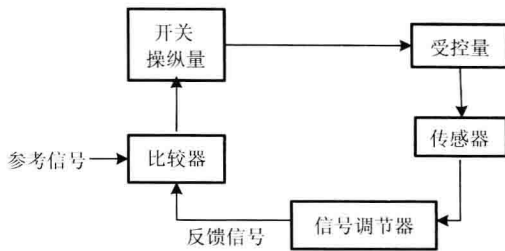


图 0-7 闭环控制系统框图

规定大小的指定量)进行比较,如果二者之差超过一定的范围,比较器或分析器会输出一个信号,可以自动启动开关、操控量或执行器,对被测量系统进行自动控制。图 0-7 给出了闭环控制系统框图。

### ③ 传感器的应用领域及其重要性。

在工农业、国防、航空、航天、医疗卫生和生物工程等各个领域及人们的日常生活中,会遇到各种物理量、化学量和生物量等被测信息,利用相应

的传感器对它们进行测量与控制具有十分重要的意义,体现在如下几方面。

a. 传感器是实现自动检测和自动控制的首要环节。若没有它对原始的各种参数进行精确、可靠的测量,无论是信号转换、处理还是最佳数据的显示与控制,都将成为一句空话。可以毫不夸张地说,如果没有精确的传感器,就没有精确的自动监测和控制。目前,近代检测与控制正经历着重大的变革,没有传感器就无法实现。

b. 传感器技术是构成现代信息技术系统的主要内容之一。基本信息系统包括三个主要组成部分:感受外界各种刺激并及时做出响应的传感器相当于“电五官”,传感器技术也就是信息的获取技术;传送信息或信息的传输技术相当于“神经”,也就是通信技术;处理信息的技术相当于“大脑”,运用科学的信息处理方法(即电子信息科学与技术)、处理电路和自动控制原理(即电子信息工程)和处理仪器(即计算机技术)来实现,如智能仪器、计算机、机器人等都只能处理信息,而不能自己获取信息,它们之间可以互相促进,但不能互相代替,在现代信息系统中起着各自的重要作用。当前处理信息技术和通信技术的发展都非常快,传感器技术的发展就成为信息技术发展的标志,有待进一步发展。

c. 传感器是航空、航天和航海事业不可缺少的器件。在现代飞行器上装备着种类繁多的显示与控制系统,而传感器首当其冲地对反映飞行器的参数、姿态、工作状态等各种量加以检测,其精度可决定飞行员或宇航员进行操作的正确程度和复杂程度。

d. 传感器是机器人的重要组成部件。在工业机器人的控制系统中,要完成检测功能、操作与驱动功能、比较与判断功能等,必须借助检测机器人内部各部分状态和检测并控制机器人与所操作对象的关系和工作现场之间的状态两类传感器。要使机器人从事更高级的作业,必须为它开发更精良的“五官”——传感器。

e. 传感器在生物医学和医疗器械领域也已显示出了广阔的前景。它可将人体的各种生理信息转化成工程上易于测定的电学量,从而正确地显示人体的生理信息,如心电图、B超、胃镜、血压器、CT等各类先进的检测和医疗设备。

f. 传感器已渗透到人们日常生活的各个方面,如家电中温度、湿度的测控,音响系统、电视机和电风扇的遥控,煤气和液化气的泄漏报警,路灯的声控、汽车测速、道路障碍物测试等都离不开传感器。

g. 新型行业物联网的产生和发展基于传感器,并促进无线传感器、光纤传感器等的产生和应用。利用传感器能将电信网、计算机网和有线电视网三大网络有机结合,会更方便生活、更易于智能控制,不是简单的物理合一而是三网融合,主要利用物联网 WiFi 发射接收实现高层业务应用的融合,相互渗透、互相兼容,并逐步整合为全世界统一的信息通信网络。为了实现网络资源的共享,形成适应性广、容易维护、费用低的高速带宽的多媒体基础平台,“三网融合”通过技术改造,其技术功能趋于一致,业务范围趋于相同,民众可用电视遥控器打电话,在手机上看电视剧,随需选择网络和终端,只要拉一条线或无线接入,即可通信、电视、上网等。

总之,各个领域的人们都已认识到传感器在整个科学技术及人类生活中的重要性。目前,全世界都越来越重视新型传感器的研究和开发。可以预测,传感器技术必将获得迅速发展,也能与各领域交叉和融合,能促进高新科技的发展,进而改变人类的生活方式。