

高等学校通用教材

传感器 原理及应用

王雪文 张志勇 编著

PRINCIPLE AND
APPLICATION OF SENSORS

仪器科学与技术



北京航空航天大学出版社

传感器原理及应用

王雪文 张志勇

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书详细介绍了传感器的基本特性与应用,同时介绍了一些新型传感器的工作原理及智能传感器的系统构成。全书内容共九章,其中第一章到第八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/压力、磁、气体、湿度、声/超声和生物等各类传感器的原理、结构、性能指标及其应用电路的设计,第九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,并列了几种典型的智能传感器系统。

本书内容丰富,取材新颖,技术实用,既突出了作为教科书的理论性和系统性,又具有解决实际问题的实用性。可作为电子信息、物理、仪器仪表、工业自动化、自动控制及机电类专业的大学本科高年级学生和研究生的教材,也可供从事传感器技术的研究与开发、生产与应用的科技工作者和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

传感器原理及应用/王雪文编著. 北京:北京航空航天大学出版社,2004.3

ISBN 7-81077-402-6

I. 传… II. 王… III. 传感器-基本知识
IV. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 119331 号

传感器原理及应用

王雪文 张志勇 编著

责任编辑 邹一晖

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100083) 发行部电话(010)82317024 传真(010)82328026

<http://www.buaapress.com.cn> E-mail: bhpres@263.net

北京市松源印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787 mm×1 092 mm 1/16 印张:22.5 字数:576 千字

2004 年 3 月第 1 版 2004 年 3 月第 1 次印刷 印数:5 000 册

ISBN 7-81077-402-6 定价:29 元

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,其应用领域越来越广泛,对其要求越来越高,需求越来越迫切。传感器技术已成为衡量一个国家科学技术发展水平的重要标志之一。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。

由于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,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,而且只有通过传感器应用实例的原理和智能传感器实例的分析了解,才能将传感器和信息通信和信息处理结合起来,适应传感器的生产、研制、开发和应用。另一方面,传感器的被测信号来自于各个应用领域,每个领域都为了改革生产力、提高工效和时效,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。

为了满足当前传感器技术教学的需求,我们本着新颖、实用、广泛和典型的原则编写了此书。本书系统地把传感器的基础知识与其应用有机结合,在详细讲述应用面较宽的传感器原理(如 PTC 热敏电阻、热电偶、光电二极管、光敏三极管、CCD 图像传感器、应变片、压电式传感器、霍尔器件、气敏传感器及电阻和电容湿度传感器等等)及其实际应用电路的基础上,还介绍了一些新型传感器,如光纤传感器、集成传感器、生物传感器、声/超声传感器和智能传感器等等,以开阔视野、扩大知识面。

本书内容丰富、实用性强,适合于作为电子信息、物理、仪器仪表、工业自动化、自动控制及机电类专业的大学本科高年级学生和研究生教材,也可供从事传感器技术的研究与开发、生产与应用的科技工作者和工程技术人员参考。

由于本书内容涉及到物理学、化学、生物学、半导体物理学和电子线路学等学科的知识,加之编著者水平有限,难免有不妥和错误之处,敬请广大读者批评指正。

作 者

2003 年 4 月

目 录

绪 论

第一章 温度传感器

1.1 电阻型温度传感器	10
1.1.1 热电阻	10
1.1.2 热敏电阻	12
1.1.3 半导体热电阻温度传感器	17
1.1.4 电阻式温度传感器的应用	21
1.2 热电偶	25
1.2.1 热电偶的基本原理	25
1.2.2 热电偶的种类和结构	28
1.2.3 热电偶的实用测量电路	30
1.3 半导体 PN 结型温度传感器	32
1.3.1 PN 结型温度传感器	32
1.3.2 集成温度传感器	33
1.3.3 温敏闸流晶体管	37
1.3.4 半导体结型温度传感器的应用	40
1.4 其他温度传感器	42
1.4.1 热辐射温度传感器	43
1.4.2 热敏电容	44
1.4.3 石英温度计	45
1.4.4 表面波温度传感器	45
1.4.5 超声波温度传感器	46
1.4.6 谐振式温度计	46
1.4.7 音叉式水晶温度传感器	46
1.4.8 光纤温度传感器	47
习 题	48

第二章 光敏传感器

2.1 外光电效应及器件	50
2.1.1 外光电效应	50
2.1.2 光电发射二极管	51
2.1.3 光电倍增管	54

2.1.4 光电倍增管在闪烁计数器中的应用·····	61
2.2 光电导效应器件及其应用·····	62
2.2.1 光电导效应·····	62
2.2.2 光敏电阻器·····	64
2.2.3 光敏电阻的参数及特性·····	65
2.2.4 光敏电阻器的直流偏置与放大接口电路·····	68
2.2.5 光敏电阻的应用·····	70
2.3 光生伏特效应器件·····	71
2.3.1 光生伏特效应·····	71
2.3.2 主要的光生伏特探测器·····	73
2.3.3 光生伏特效应器件的应用·····	79
2.4 红外热释电光敏器件·····	86
2.4.1 热释电效应及器件·····	86
2.4.2 双元型红外传感器·····	88
2.5 固态图像传感器·····	91
2.5.1 电荷耦合器件(CCD)·····	91
2.5.2 MOS 图像传感器 ·····	99
2.5.3 CCD 器件的应用 ·····	102
2.6 光纤传感器 ·····	103
2.6.1 光纤的传光原理 ·····	103
2.6.2 光纤传感器的原理 ·····	105
2.6.3 光纤传感器实例 ·····	107
2.7 新型传感器 ·····	110
2.7.1 光纤烟气光学密度传感器 ·····	110
2.7.2 高灵敏固体摄像器件 ·····	111
2.7.3 多媒体摄像器系统 ·····	113
2.7.4 机器人光学阵列触觉系统 ·····	113
2.7.5 高分子光传感器 ·····	114
习 题·····	116

第三章 力/压力敏传感器

3.1 电阻应变计 ·····	118
3.1.1 金属应变计 ·····	119
3.1.2 半导体应变片 ·····	123
3.1.3 应变计的测量原理和测量线路 ·····	130
3.1.4 硅膜片上的压阻全桥设计 ·····	133
3.1.5 硅杯式压力传感器 ·····	136
3.1.6 电阻应变式传感器的应用 ·····	140
3.2 压电式力传感器 ·····	142

3.2.1 压电式传感器的基本原理	142
3.2.2 典型材料的压电效应	143
3.2.3 压电传感器的等效电路与测量线路	148
3.2.4 压电式传感器的应用	150
3.3 其他力/压力传感器	152
3.3.1 电容式压力传感器	152
3.3.2 电感式压力传感器	155
3.3.3 谐振式压力传感器	157
3.3.4 光纤力学量传感器	159
3.3.5 压电涂层——一种新型振动传感器	161
3.3.6 力敏Z元件及触觉传感器	162
3.3.7 陶瓷压阻式压力传感器	162
3.4 压力传感器的接口及应用电路	163
3.4.1 压力传感器接口电路	163
3.4.2 半导体压力传感器应用电路实例	165
习 题	168

第四章 磁敏传感器

4.1 霍尔元件	170
4.1.1 霍尔效应	170
4.1.2 霍尔元件的结构与特性	173
4.1.3 霍尔集成电路	179
4.1.4 霍尔元件的应用	182
4.2 半导体磁阻器件	186
4.2.1 磁阻效应	186
4.2.2 磁阻元件	189
4.2.3 磁敏电阻的温度补偿	192
4.2.4 磁敏电阻的应用	192
4.3 结型磁敏器件	193
4.3.1 磁敏二极管	193
4.3.2 磁敏三极管	196
4.3.3 结型磁敏元件的应用	199
4.4 铁磁性金属薄膜磁阻元件	201
4.4.1 铁磁体中的磁阻效应	201
4.4.2 铁磁薄膜磁敏电阻的结构与工作原理	201
4.4.3 铁磁薄膜磁敏电阻的技术性能及特点	202
4.5 新型磁传感器	202
4.5.1 MOS磁敏器件	202
4.5.2 高分辨率磁性旋转编码器	203

4.5.3 涡流传感器	205
习 题	206

第五章 气体传感器

5.1 概 述	207
5.2 表面电阻控制型气体传感器	209
5.2.1 SnO_2 系气敏元件	209
5.2.2 ZnO 系气敏元件	213
5.2.3 其他氧化物气敏元件	215
5.3 体电阻控制型气体传感器	217
5.3.1 氧化铁系气敏元件	217
5.3.2 TiO_2 、 Nb_2O_5 氧敏元件	218
5.3.3 其他氧敏元件	221
5.4 二极管和 MOSFET 气体传感器	222
5.4.1 气敏二极管	222
5.4.2 MOSFET 型气敏元件	224
5.4.3 其他结型气体传感器	226
5.5 固体电解质气体传感器	228
5.5.1 浓差电池式 ZrO_2 氧传感器	228
5.5.2 SO_2 传感器	232
5.6 接触燃烧式气体传感器	233
5.6.1 气敏元件的检测原理与结构	233
5.6.2 气敏元件的特性	234
5.7 气体传感器的应用	235
5.8 新型气体传感器	239
5.8.1 光纤气体传感器	239
5.8.2 红外吸收式传感器	242
5.8.3 热导率变化式气体传感器	243
5.8.4 石英振荡式气体传感器	243
5.8.5 气—磁传感器	244
习 题	244

第六章 湿度传感器

6.1 概 述	246
6.1.1 湿度表示法	246
6.1.2 湿度传感器的分类	247
6.2 电阻式湿度传感器	247
6.2.1 陶瓷电阻式湿度传感器	247
6.2.2 热敏电阻绝对湿度传感器	250

6.2.3 高分子电阻式湿度传感器	251
6.3 电容式湿度传感器	254
6.3.1 多孔 Al_2O_3 -陶瓷电容式湿度传感器	254
6.3.2 高分子电容式湿度传感器	257
6.3.3 集成电容式湿度传感器 IH3605	259
6.4 其他类型湿度传感器	261
6.4.1 半导体结型和 MOS 型湿度传感器	261
6.4.2 新型射频传感器	263
6.4.3 光纤湿敏传感器	265
6.4.4 新型界限电流式高温湿度传感器	265
6.5 湿度传感器的应用实例	267
6.5.1 湿度传感器在电路中的接口	267
6.5.2 湿度/电压转换电路	269
6.5.3 实用电路	270
习 题	275

第七章 声/超声波敏感传感器

7.1 声波的基本性质	276
7.1.1 声压及其描述	276
7.1.2 声功率和声强	278
7.1.3 声波的反射、折射、透射和吸收	279
7.2 声敏传感器	280
7.2.1 电阻变换型声敏传感器	281
7.2.2 压电声敏传感器	281
7.2.3 电容式声敏传感器(静电型)	282
7.2.4 音响传感器	283
7.3 超声波传感器	285
7.3.1 超声波及其物理性质	285
7.3.2 超声波探头	286
7.3.3 超声波检传感器检测技术中的应用	288
7.4 声表面波传感器	292
7.4.1 SAW 传感器的结构与工作原理	292
7.4.2 高分辨率 SAW 温度传感器	293
7.4.3 SAW 气体传感器	294
7.4.4 SAW 压力传感器	295
7.5 声板波传感器	297
7.5.1 APM 传感器原理	297
7.5.2 APM 传感器的应用	298

第八章 生物传感器

8.1 生物传感器的工艺原理	300
8.1.1 生物识别功能物质及信号转换方式	300
8.1.2 换能器	301
8.1.3 固定化技术	301
8.1.4 基本电极和测量方式	302
8.2 生物传感器的工作原理	302
8.2.1 最常用的生物传感器	303
8.2.2 半导体复合膜式	306
8.2.3 光导复合膜式	308
8.2.4 压电晶体复合膜式	309
8.3 基因芯片	310
8.3.1 基因芯片的制作原理	311
8.3.2 测试原理	312
8.3.3 检测和分析	314
8.3.4 基因芯片技术的主要应用	315
8.4 LB 仿生功能膜	315
8.4.1 LB 膜与分子电子学的发展	315
8.4.2 LB 膜生物传感器	316
8.4.3 K^+ 离子敏感 LB 膜	318
8.4.4 仿生嗅敏 LB 膜	320
8.5 国内外生物传感器的研究方向	322

第九章 智能传感器

9.1 智能传感器与传感器系统	324
9.2 智能传感器的构成及其功能	325
9.2.1 智能传感器的结构	325
9.2.2 智能传感器的功能	325
9.2.3 智能传感器的特点	326
9.3 传感器的智能化	327
9.3.1 数据处理功能	327
9.3.2 控制功能	334
9.4 常用智能传感器集成电路芯片	337
9.4.1 数据输出接口电路	337
9.4.2 微处理器	337
9.4.3 智能传感器的接口芯片	337
9.5 智能传感器的应用	339
9.5.1 ST-3000 系列智能压力传感器	339

9.5.2	EJA 差压变送器	339
9.5.3	利用通用接口(USIC)构成的智能温度压力传感器	340
9.5.4	人工神经网络智能传感器	342
9.5.5	其他智能传感器	343

绪 论

在当今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。近 20 多年来传感器技术获得了长足的进步,在国民经济相关的各个领域中的应用日益广泛,作为信息的采集和信息的转换的重要部件,是测量和控制系统的首要环节,成为测试计量和工业自动化、智能化的关键技术。在世界范围内,一个国家的一项工程设计中所用传感器的数量和水平直接标志着其技术的先进程度,因此传感器技术成为信息时代的焦点。

一、传感器的定义

人类社会文明的发展过程中经历了几次大的科技革命,其从根本上表现为用机器(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、舌和皮)感受外界信息,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。表现上传感器能够代替人的五官完成感受外界信息的功能,成为传送感觉(应)的一种器件。

但是“五官”感受的外界信息范围很窄(只是对人体无害的信息),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、无味无嗅之气体及特高温、剧毒物和各种微弱信号等,传感器都可以感知。因为电信号具有高精度、高灵敏度,可测量控制的范围宽,便于传递、放大及反馈并连续可测、可遥测、可储存等很多优点,所以人们希望传感器还能将感知的信号放大、传输、存储及显示输出。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、湿度等等),并按一定的规律将其转换成易处理的电信号的装置。

若被测量是电量,可直接与各种智能仪器(电脑、机器人和计算机)连接,并进行信号处理。若被测量是非电量,如物理量(力学量、湿度、流量、物位、光学量和温度),化学量(成分、酸碱度和反应速度),生物量(血压、人体反应)等,必须通过相应的传感器将它们转换成电量,再送入计算机进行处理。

二、传感器的分类

由于被测信号的种类很多,而且一种被测量可以用不同种类的传感器来测量,一种传感器也许可以测量几种被测信号,所以目前传感器存在很多分类方式,这里介绍几种基本的分类形式。

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、声和光)发生变化的传感器称为物理传感器,如半导体的力、热、光和磁敏传感器等;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,如温度传感器、 Fe_2O_3 气体传感器等;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一些元件的结构(如弹簧、气压)发生形变,通过测量结构的变化来检测被测对象,如用金属的伸缩来感知温度等等。

2. 按照信息的传递方式可以分为直接型和间接型传感器。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,如光敏二极管将光信号直接转换成电流信号,热敏电阻将温度的变化直接转变为电阻值的变化。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),形变会引起压阻效应才使电阻值发生了变化。

3. 按照人类的感覺功能分为视觉、听觉、嗅觉、味觉和触觉五类传感器,如表1所列。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、听觉和味觉组成。另外为了将多个传感器得到的信息综合利用,发展多信息处理技术,使机器人更准确、全面和低成本地获取所处环境的信息,组成了机器人智能技术,如机器人的多感觉系统(Robot Sensory System)和多传感器信息的集成与融合(Multi-Sensor Integration and Fusion)。

表1 按照感觉将传感器分类的状况

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, 距离感觉和三维图像	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、感应线圈接近觉和电容式接近觉
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、超声波传感器和语音识别系统
鼻	嗅觉传感器	气体和湿度	电阻式、电容式和电感式气敏传感器和电阻式湿度传感器
皮	触觉、滑觉、压觉、热觉传感器	表面特征 物理性能(滑、热及压)	压阻式力传感器、压电式触觉、光电式触觉及电容式触觉传感器、位移传感器、振动传感器、热敏电阻、热电偶、集成温度传感器
舌	味觉传感器	成分和浓度	味敏传感器、生物传感器

另外,按照制备传感器所用的材料可以分为半导体传感器、金属传感器、陶瓷传感器、光纤传感器、高分子传感器和生物传感器等。按传感器的检测对象分为温度传感器、光敏传感器、压力传感器、磁传感器、气敏传感器、湿度传感器、离子传感器和生物传感器等。还有更为具体的分类形式,如流量传感器,按照转换原理分类的,如电磁传感器和光电传感器,按照用途分类,工业、民用、医疗、军用及汽车等等。总之,为了使用的方便,不同的行业依据的分类方式不同,而且会随着传感器的发展出现更新的种类。

三、传感器基础简介

(一) 传感器的基本特性

从传感器本身的作用知,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,检测的准确与否完全与一定范围内反应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。

传感器的基本特性是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很缓慢(常称为静态信号)时,反应其静态特性,用一系列静态参数来描述其静态特性。当被测量随时间变化很快(常称动态信号)时,可用一系列动态参数来描述其动态特性。

1. 静态特性

传感器的静态特性是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:

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

式中 a_0 为零位输出 1; a_1 为线性常数; $a_2, a_3, \dots, a_n$ 为非线性待定常数, 它们都可由实际的测量数据进行标定。实际中也可以以 x 为横坐标, y 为纵坐标, 用测量结果画出特性曲线来表征输出与输入的关系。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, 衡量传感器的静态特性必须用一些重要指标来确定, 如测量范围、线性度、迟滞、重复性及灵敏度等等。

(1) 测量范围(Y_{FS})

每一个传感器都有一定的测量范围, 如果在超过了这个范围进行测量时, 会带来很大的测量误差, 甚至于将其损坏。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和延长传感器及其电路的寿命。

(2) 线性度(δ_L)

通常为了标定和数据处理方便, 总希望得到线性关系, 可采用各种方法如硬件或软件的补偿即进行线性化处理, 这样就使得输出不可能丝毫不差的反应被测量的变化, 总存在一定的误差(线性或非线性), 即使实际是线性关系特性, 测量的线性关系也并不完全与其符合, 而常用一条拟合直线近似代表实际的特性曲线。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。实际曲线与拟合直线总存在一定的偏差(如图 1 所示), 用实际曲线与拟合直线间的最大偏差 $\Delta Y_{\max}$ 与满量程输出 Y_{FS} 的百分比来表示线性度, 即

$$\delta_L = \pm \frac{\Delta Y_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (2)$$

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及最小二乘法拟合等)不同, 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。

(3) 迟滞(δ_H)

人们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(如图 2 所示), 用全量程范围校准时同一输入量的正行程输出和反行程输出之间的最大偏差 $\Delta H_{\max}$ 与满量程输出值的百分比表示

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

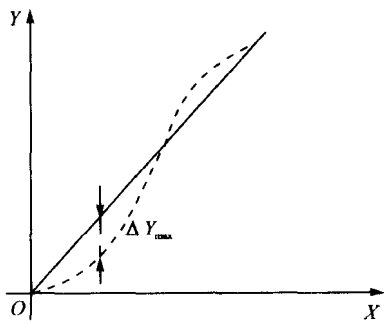


图 1 线性度

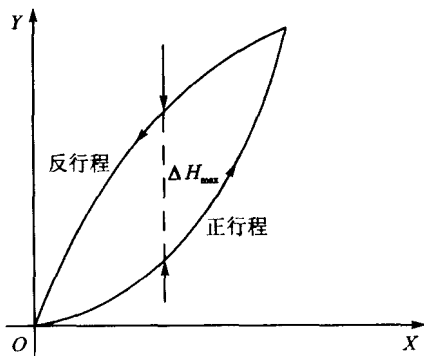


图 2 迟滞

它反映了传感器的材料参数的恢复快慢、机械结构和制造工艺的缺陷等等。

(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 $\Delta R_{\max 1}$,反行程的最大重复性偏差为 $\Delta R_{\max 2}$,取两个中最大的,再用满量程的百分比表示,即

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

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

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

式中 $\bar{Y}$ 为测量值的算术平均值; N 为测量的次数。

(5) 灵敏度(S)

用传感器在稳定工作时的输出量变化(ΔY)对输入量变化(ΔX)的比值表示:

$$S = \frac{\Delta Y}{\Delta X} = \frac{dY}{dX} \quad (6)$$

可以看出,灵敏度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,其校准时输出/输入特性直线的斜率就是灵敏度。对于非线性传感器来讲,灵敏度随输入量的变化而变化。一般 S 较高时,测量容易,精度提高,但是 S 越高测量的范围就越窄,稳定性更差,应根据具体情况择优选择。

(6) 分辨力

它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。一般各个输入点这个能分辨的范围不同,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($\Delta X_{\max}$)。也可以用分辨率表示,即

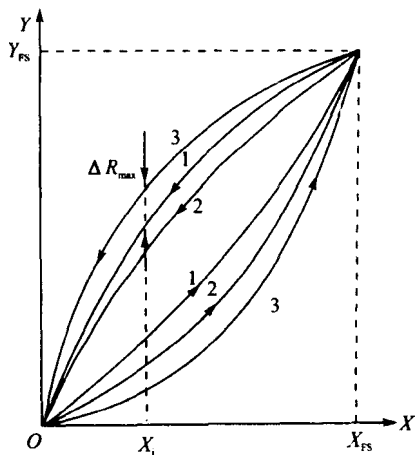


图3 重复性偏差示意图

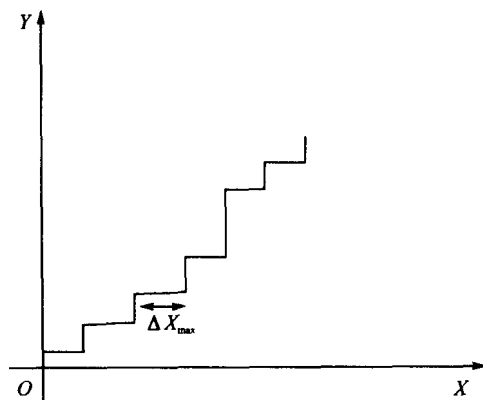


图4 分辨力

$$\frac{\Delta X_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (7)$$

(7) 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

$$\alpha_T = \frac{Y_2 - Y_1}{Y_{FS} \Delta T} \times 100\% \quad (8)$$

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

2. 动态特性

当传感器的输入量随时间变化时,其输出量的响应特性就是动态特性。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应输入的值,测量毫无意义。动态输入量的变化规律分为规律性的和随机的两种变化。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,用传感器对某些标准输入信号的响应来反映。

(1) 阶跃响应

当输入为阶跃函数时,如图 5(a)所示,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,见图 5(b)。即

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

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

过渡过程中特性参数:

① 时间常数 τ ,是指输出量从 0 上升到稳态 $Y(\infty)$ 的 63% 所需的时间。

② 上升时间 t_r ,是指从稳态值 $Y(\infty)$ 的 10% 上升到 90% 所需的时间。它表示传感器的响应速度, t_r 小时,表明传感器对输入的响应速度快。

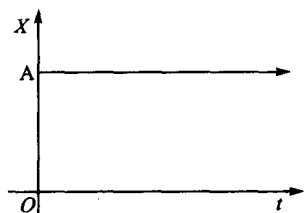
③ 响应时间 t_s ,从输入量开始到输出进入稳定值的允许误差范围($\pm 1\%$ 或 2%)内所需时间,也能表示响应速度。

④ 振荡次数 N ,是指输出量在稳态值 $Y(\infty)$ 上下摆动的次数, N 越小,表明稳定性越好。

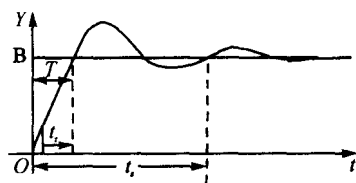
⑤ 稳态误差 e ,是指响应的实际值 $Y(\infty)$ 与期望值之差,它反映稳态的精确程度。

(2) 频率响应

① 零阶传感器的数学模型



(a) 输入曲线



(b) 输出曲线

图 5 传感器的动态特性

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, 则输出与输入的关系可以表示为

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

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 $U(t)$ 与触头距边界的距离 $X(t)$ 成正比, 可以将具有这种关系的传感器称为零阶传感器。

(2) 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(电感或电容), 其输出量 $Y(t)$ 与输入量 $X(t)$ 的关系可以表示为

$$a_1 \frac{dY(t)}{dt} + a_0 Y(t) = b_0 X(t) \quad (12)$$

式中 a_1 、 a_0 和 b_0 是传感器的常数, b_0/a_0 称为静态灵敏度。实际中, 热电偶所测量介质的温度 $T_1(t)$ 随介质温度 $T(t)$ 的关系满足(12)式。

(3) 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

$$a_n \frac{d^n Y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} Y(t)}{dt^{n-1}} + \cdots + a_0 Y(t) = b_m \frac{d^m X(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} X(t)}{dt^{m-1}} + \cdots + b_0 X(t) \quad (13)$$

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

将(13)式进行拉氏变换, 可以得到 $Y(S)$ 和 $X(S)$ 的方程

$$(a_n S^n + a_{n-1} S^{n-1} + \cdots + a_1 S + a_0) Y(S) = (b_m S^m + b_{m-1} S^{m-1} + \cdots + b_1 S + b_0) X(S) \quad (14)$$

由(14)式可以得到输入量和输出量之间的拉氏传递函数 $H(S)$ 为

$$H(S) = \frac{Y(S)}{X(S)} = \frac{b_m S^m + b_{m-1} S^{m-1} + \cdots + b_1 S + b_0}{a_n S^n + a_{n-1} S^{n-1} + \cdots + a_1 S + a_0} \quad (15)$$

若输入信号为正弦波 $X(t) = A \sin(\omega t)$ 时, 用 $j\omega$ 代替(15)式中的 S , 则可以得出传感器的输出与输入之比与频率的关系, 即频率传递函数 $H(j\omega)$ 为

$$H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = \frac{b_m (j\omega)^m + b_{m-1} (j\omega)^{m-1} + \cdots + b_1 (j\omega) + b_0}{a_n (j\omega)^n + a_{n-1} (j\omega)^{n-1} + \cdots + a_1 (j\omega) + a_0} \quad (16)$$

式中 $j = (-1)^{1/2}$ 。然后将 $X(t) = Ae^{j\omega t}$ 和 $Y(t) = Be^{j\omega t}$ 代入(16)式得:

$$H(j\omega) = \frac{Y}{X}(j\omega) = \frac{Be^{j(\omega t + \varphi)}}{Ae^{j\omega t}} = \frac{B}{A} e^{j\varphi} = \frac{b_m (j\omega)^m + b_{m+1} (j\omega)^{m-1} + \cdots + b_1 (j\omega) + b_0}{a_n (j\omega)^n + a_{n-1} (j\omega)^{n-1} + \cdots + a_1 (j\omega) + a_0} \quad (17)$$

频率传递函数的模 $|H(j\omega)|$ 为输出与输入的幅值之比 B/A , 它与角频率 ω 的关系被称为幅频特性。输出与输入信号的相位之差与频率的关系 $\varphi(\omega)$ 称为相频特性, 一般情况下传感器的输出量滞后于输入量, $\varphi(\omega)$ 为负值。

(二) 传感器的基本应用

传感器基本上都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、显示系统和电源四个部分组成, 如图 6(a)所示。其中信号调节部分可使用阻抗匹配器、多级放大器和数模转换器等; 显示部分可使用模拟