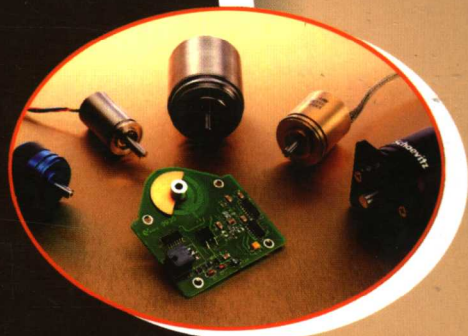
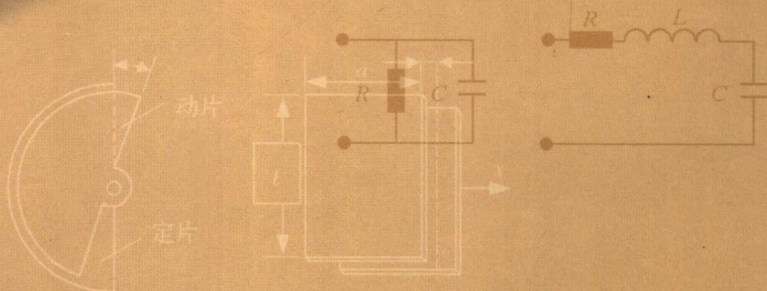


CHUANGANQI
YUANLI
YU
YINGYONG
JISHU



传感器 原理与应用技术

◎ 刘爱华 满宝元 编著



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

传感器原理与应用技术

刘爱华 满宝元 编著

人民邮电出版社

图书在版编目(CIP)数据

传感器原理与应用技术/刘爱华, 满宝元编著. —北京: 人民邮电出版社, 2006. 10
ISBN 7-115-14959-3

I. 传... II. ①刘... ②满... III. 传感器 IV. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 072732 号

内 容 提 要

本书系统地介绍了传感器的基本结构、工作原理、特性及相应的测量电路。全书共 9 章, 第 1 章介绍了传感器的基本概念及传感器的静、动态特性; 第 2 章至第 9 章分别介绍了电阻式、电容式、电感式、压电式、热电式、磁敏式、光电式传感器与光纤传感器的结构、工作原理及应用。书中每章都提供了大量的应用实例, 并附有课后习题。

本书可作为理工院校应用物理、电子信息、工业自动化、电子技术、计算机应用等专业的教材, 也可作为其他相关专业技术人员的技术参考书。

传感器原理与应用技术

- ◆ 编 著 刘爱华 满宝元
责任编辑 付方明
- ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
河北三河市海波印务有限公司印刷
新华书店总店北京发行所经销
- ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 13
字数: 314 千字 2006 年 10 月第 1 版
印数: 1-6 000 册 2006 年 10 月河北第 1 次印刷

ISBN 7-115-14959-3/TN · 2801

定价: 19.00 元

读者服务热线: (010) 67129264 印装质量热线: (010) 67129223

前 言

人类已经进入了科学技术空前发展的信息社会，科学研究和生产过程都要获取大量的信息。传感器作为感知、获取与检测信息的窗口，能够采集各种有用的信息并将其转换为容易传输和处理的信息，为计算机、智能机器人、自动化设备、自动控制装置充当“感觉器官”。传感器在自动检测与控制系统中必不可少，而且科学技术越发达，自动化程度越高，对传感器的依赖就越大。因而传感器技术（非电量检测技术）成为了现代电子信息技术的关键，在现代科学技术领域中占有极其重要的地位。

传感器应用极其广泛，而且种类繁多，涉及的学科也很多，本书介绍的内容仅限于基于物理学科的几类传感器。本书本着从基础性、实用性出发的原则，对这些传感器的基本原理、结构、性能、用途及基本测量电路进行了介绍，给出了详细的物理概念、规律及必要的、简明的数学推导，并结合传感器的应用实例进行讲解，引导读者学习掌握传感器的应用技术。全书共9章，除第1章介绍了传感器的基础知识外，其余各章均具有一定的独立性。

本书在编写过程中参阅了很多专著及文献，在此向其作者表示诚挚的谢意。

由于水平和经验有限，书中难免会有错误和不妥之处，敬请广大读者批评指正。

编著者

目 录

第 1 章 传感器基础知识	1
1.1 传感器技术的重要性	1
1.2 传感器的组成与分类	2
1.2.1 传感器的定义	2
1.2.2 传感器的组成	2
1.2.3 传感器的分类	2
1.3 传感器的数学模型概述	4
1.3.1 静态模型	4
1.3.2 动态模型	4
1.4 传感器的基本特性	5
1.4.1 静态特性	6
1.4.2 动态特性	8
1.5 传感器的标定与校准	15
1.5.1 传感器的标定	15
1.5.2 提高传感器性能的方法	16
习题	16
第 2 章 应变式电阻传感器	17
2.1 电阻应变片	17
2.1.1 应变效应	17
2.1.2 电阻应变片的工作原理	18
2.1.3 电阻应变片的分类	19
2.2 电阻应变片的主要特性	22
2.2.1 灵敏系数	22
2.2.2 横向效应	23
2.2.3 机械滞后、零漂及蠕变	24
2.2.4 应变极限	25
2.2.5 动态特性	25
2.3 温度特性及其补偿	26
2.3.1 温度误差	26
2.3.2 温度补偿	27
2.4 电阻应变片的测量电路	28
2.4.1 直流电桥	28
2.4.2 交流电桥	31
2.4.3 恒流源电桥	33
2.5 固态压阻式传感器	34
2.5.1 压阻式传感器的结构与工作原理	34

2.5.2	压阻系数	34
2.5.3	固态压阻器件	35
2.5.4	压阻式传感器的测量电路	35
2.6	应变式传感器的应用	35
2.6.1	应变式传感器测量力	36
2.6.2	应变式传感器测量压力	38
2.6.3	应变式传感器测量加速度	39
2.6.4	压阻式传感器的应用	39
2.6.5	应变式传感器应用实例	40
	习题	41
第3章	电容式传感器	42
3.1	电容式传感器的工作原理及特性	42
3.1.1	基本工作原理	42
3.1.2	电容式传感器的类型和特性	43
3.2	电容式传感器的测量电路	47
3.2.1	电容式传感器的等效电路	47
3.2.2	电容式传感器的测量电路	48
3.3	电容式传感器的特点及设计与应用中存在的问题	53
3.3.1	电容式传感器的特点	53
3.3.2	设计与应用中存在的问题	54
3.4	电容式传感器的应用	57
	习题	59
第4章	电感式传感器	60
4.1	自感式传感器	60
4.1.1	自感式传感器的结构和工作原理	60
4.1.2	变气隙式自感传感器的输出特性	62
4.1.3	差动式自感传感器	63
4.1.4	自感式传感器的等效电路	64
4.1.5	自感式传感器的测量电路	64
4.2	互感式传感器	66
4.2.1	互感式传感器的结构与工作原理	66
4.2.2	差动变压器的输出特性	68
4.2.3	差动变压器的测量电路	69
4.3	电涡流式传感器	72
4.3.1	电涡流式传感器的基本原理	72
4.3.2	电涡流式传感器的等效电路	73
4.3.3	电涡流式传感器的种类	74

4.3.4 电涡流式传感器的转换电路	75
4.4 电感式传感器的应用	77
4.4.1 差动变压器的应用	77
4.4.2 电涡流式传感器的应用	78
习题	79
第5章 压电式传感器	80
5.1 压电效应	80
5.1.1 压电效应及其可逆性	80
5.1.2 石英晶体的压电效应	81
5.1.3 压电陶瓷的压电效应	84
5.2 压电材料	86
5.2.1 石英晶体	86
5.2.2 压电陶瓷	86
5.2.3 新型压电材料	87
5.3 压电式传感器的测量电路	87
5.3.1 压电晶片的连接方式	87
5.3.2 压电式传感器的等效电路	88
5.3.3 压电式传感器的测量电路	89
5.4 压电式传感器的应用	92
5.4.1 压电式传感器对压力、加速度等的测量	92
5.4.2 压电传感器应用实例	94
习题	96
第6章 热电式传感器	97
6.1 热电偶	97
6.1.1 热电偶的工作原理	97
6.1.2 常用热电偶的结构	103
6.1.3 热电偶材料	105
6.1.4 热电偶的种类	105
6.1.5 热电偶的冷端补偿方法	109
6.1.6 热电偶测温线路	113
6.2 热电阻	115
6.2.1 热电阻的类型	115
6.2.2 常用的几种热电阻	116
6.2.3 热电阻测量线路	118
6.3 热敏电阻	119
6.3.1 热敏电阻的结构	119
6.3.2 热敏电阻的基本参数	120

6.3.3	热敏电阻的主要特性	121
6.3.4	热敏电阻输出特性的线性化处理	122
6.4	PN 结温度传感器	123
6.4.1	温敏二极管、三极管	123
6.4.2	集成温度传感器	125
6.5	热电式传感器的应用	127
6.5.1	热电偶温度传感器的典型应用	127
6.5.2	热电阻温度传感器的典型应用	128
6.5.3	热敏电阻温度传感器的典型应用	128
6.5.4	集成温度传感器的典型应用	129
	习题	130
第7章	半导体磁敏传感器	132
7.1	霍尔传感器	132
7.1.1	霍尔效应	132
7.1.2	霍尔元件的构造及测量电路	135
7.1.3	霍尔元件的技术参数	136
7.1.4	霍尔元件的测量误差和补偿	136
7.2	集成霍尔传感器	140
7.2.1	开关型集成霍尔传感器	140
7.2.2	线性集成霍尔传感器	140
7.3	磁敏电阻器	141
7.3.1	磁阻效应	141
7.3.2	磁敏电阻的结构	141
7.3.3	磁阻元件的主要特性	142
7.4	磁敏二极管和磁敏三极管	143
7.4.1	磁敏二极管的工作原理和主要特性	143
7.4.2	磁敏三极管的工作原理和主要特性	146
7.5	磁敏式传感器的应用	148
7.5.1	霍尔式传感器的典型应用	148
7.5.2	磁敏电阻的应用	151
7.5.3	磁敏二极管和三极管的应用	151
	习题	152
第8章	光电式传感器	153
8.1	概述	153
8.1.1	光的特性	153
8.1.2	光源(发光器件)	153
8.2	光电效应	154

8.2.1	外光电效应	154
8.2.2	内光电效应	155
8.3	外光电效应器件	156
8.3.1	光电管及其基本特性	156
8.3.2	光电倍增管及其基本特性	158
8.4	内光电效应器件	159
8.4.1	光敏电阻	159
8.4.2	光电池	162
8.4.3	光敏晶体管	164
8.5	新型光电传感器	167
8.5.1	高速光电二极管	167
8.5.2	色敏光电传感器	168
8.5.3	光固态图像传感器	169
8.6	光电传感器的应用举例	173
8.6.1	模拟式光电传感器的应用	173
8.6.2	开关式光电传感器的应用	174
8.6.3	光电池的应用	175
8.6.4	CCD 图像传感器的应用	177
	习题	178
第9章	光纤传感器	179
9.1	光纤的结构与传光原理	179
9.1.1	光纤的结构	179
9.1.2	光纤的传光原理	180
9.1.3	光纤的种类	181
9.2	光纤传感器的结构原理及分类	182
9.2.1	光纤传感器的结构原理	182
9.2.2	光纤传感器的类型	182
9.2.3	光纤传感器的发展方向	184
9.3	光纤传感器的调制形式	184
9.3.1	强度调制	184
9.3.2	偏振调制	185
9.3.3	频率调制	186
9.3.4	相位调制	187
9.3.5	波长调制	187
9.4	光纤传感器的应用	187
9.4.1	温度的检测	187
9.4.2	压力的检测	189
9.4.3	液位、流量、流速的检测	191
	习题	194
	主要参考文献	195

第 1 章 传感器基础知识

1.1 传感器技术的重要性

信息技术的三大支柱是测控技术、通信技术和计算机技术，而传感器技术是测控技术的基础。传感器处于自动检测与控制系统之首，是感知、获取与检测信息的窗口。科学研究和生产过程需要获取的信息，都要首先通过传感器转换成电信号或光信号等容易传输和处理的信号。科学技术越发达，自动化程度越高，对传感器的依赖就越大。“没有传感器技术就没有现代科学技术”的观点已为全世界公认。

传感器技术是材料学、力学、电学、磁学、微电子学、光学、声学、化学、生物学、精密机械、仿生学、测量技术、半导体技术、计算机技术、信息处理技术，乃至系统科学、人工智能、自动化技术等众多学科相互交叉的综合性高新技术密集型前沿技术，广泛应用于航空航天、兵器、信息产业、机械、电力、能源、交通、冶金、石油、建筑、邮电、生物、医学、环保、材料、灾害预测预防、农林渔业、食品、烟酒制造、建筑、汽车、舰船、机器人、家电、公共安全等领域，可以说是无所不在。

21 世纪是人类全面进入信息电子化的时代。随着人类探知领域和空间的拓展，人们需要获得的自然信息的种类日益增多，信息传递的速度需要加快，信息处理能力需要增强，因此要求与此相对应的信息获取技术，即传感技术，必须跟上信息化发展的需要。传感器是人类获取自然界信息的触角，为人们认识和控制相应的对象提供了条件和依据。

国外传感器的发展已有近 200 年的历史，特别是近年来，由于世界各国的普遍重视和投入开发，传感器的发展十分迅速，美国、法国、德国、荷兰、俄罗斯、日本等国家已实现产业化。目前世界上传感器的种类约有 2 万种，从事传感器研制和生产的单位已有 5000 余家。我国传感器行业始于 20 世纪 50 年代初期，但直到“七五”开始的 1986 年才正式将传感器技术列入国家重点攻关项目，进行了以机械敏、力敏、气敏、湿敏、生物敏为主的五大敏研究。目前国内可批量或小批量生产的传感器约 3000 种，其中主要传感器产品 1000 多种，基本涵盖了信息采集的各个领域。产品开发涵盖光敏、热敏、力敏、电压敏、磁敏、气敏、湿敏、声敏、射线敏、离子敏、生物敏等各种传感器，以及变送器、二次仪表等多种类、多形式产品，与国外研制领域相当。“八五”期间，我国把传感器技术列为国家重点攻关项目及中长期科技发展重点新技术之一。

计算机和通信技术的发展为传感器技术的广泛应用提供了巨大的平台。相关学科(如材料科学、微电子学、数学、计算机、信息处理技术)和相关产业(如电子装备制造业)的发展为传感器技术的发展提供了理论支持和物质基础。相信在不久的将来，传感器技术一定会取得长足发展。

1.2 传感器的组成与分类

1.2.1 传感器的定义

传感器(Transducer 或 Sensor)是能感受规定的被测量并按照一定规律转换成可用输出信号的器件或装置。在有些国家和有些学科领域,也将传感器称为变换器、检测器或探测器等。

传感器一般是利用物理、化学和生物等学科的某些效应或机理,按照一定的工艺和结构研制出来的。因此,传感器的组成在细节上有较大差异。但总的来说,传感器主要由敏感元件、转换元件和其他辅助元件组成。敏感元件是指传感器中能直接感受(或响应)和检出被测对象的待测信息(非电量)的部分;转换元件是指传感器中能将敏感元件所感受(或响应)出的信息直接转换成有用信号(一般为电信号)的部分。例如,应变式压力传感器是由弹性膜片和电阻应变片组成的。其中弹性膜片就是敏感元件,它能将压力转换成弹性膜片的应变;弹性膜片的应变施加在电阻应变片上,电阻应变片再将其应变量转换成电阻的变化量,电阻应变片就是转换元件。但并不是所有的传感器都能明显区分为敏感元件与转换元件两个部分,有的是二者合为一体。例如半导体气体、湿度传感器等,它们一般都是将感受的被测量直接转换为电信号,没有中间转换环节。

1.2.2 传感器的组成

一般来讲,传感器由敏感元件和转换元件组成。但是,由于传感器输出的信号一般都很微弱,需要有信号调节与转换电路将其放大或转换为容易传输、处理、记录和显示的形式。随着半导体器件与集成技术在传感器中的应用,传感器的信号调节与转换电路可能安装在传感器的壳体内或与敏感元件一起集成在同一芯片上。因此,信号调节与转换电路以及所需电源都应作为传感器组成的一部分。常见的信号调节与转换电路有放大器、电桥、振荡器、变阻器等等。图 1-1 为传感器组成方块图。

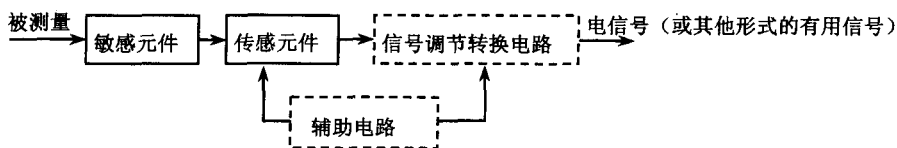


图 1-1 传感器组成框图

1.2.3 传感器的分类

传感器的品种很多,原理各异,检测对象门类繁多,一般可按如下几种方法分类:

1. 按工作机理分类

这种分类方法是以其工作原理划分,将物理、化学和生物等学科的原理、规律、效应

作为分类的依据，如应变式、热电式、压电式传感器等。这种分类法的优点是对传感器的工作原理分析得比较清楚，类别少，有利于传感器工作者从原理与设计上进行归纳性地分析和研究。本书就是按工作原理对传感器进行分类的。

2. 按被测量分类

这种分类方法是按被测量的性质不同对传感器进行划分。目前把不同被测量的传感器分为物理量传感器、化学量传感器和生物量传感器三大类。这种分类方法又把种类繁多的被测量分为基本量和派生量两大类，表 1-1 所示为基本物理量和派生物理量的关系。

表 1-1 基本物理量和派生物理量

基本物理量		派生物理量
位移	线位移	长度、厚度、应变、振动、磨损、不平度等
	角位移	旋转角、偏转角、角振动等
速度	线速度	速度、振动、流量、动量等
	角速度	转速、角振动等
加速度	线加速度	振动、冲击、质量等
	角加速度	角振动、扭矩、转动惯量等
力	压力	重量、应力、力矩等
时间	频率	周期、记数、统计分布等
温度		热容量、气体速度、涡流等
光		光通量与密度、光谱分布等

由于这种分类方法是按被测量对传感器命名的，因此能明确地指出传感器的用途，便于使用者根据其用途选用。例如，若需要测量压力、重量、力矩等物理量，只要采用力传感器就可以了。但因为这种分类方法将原理互不相同的传感器归为一类，所以很难找出每种传感器在转换机理上有何共性和差异，因此对掌握传感器的一些基本原理及分析是不利的。

3. 按敏感材料分类

这种分类方法是按制造传感器的材料分类。可分为半导体传感器、陶瓷传感器、光导纤维传感器、高分子材料传感器、金属传感器等等。

4. 按能量的关系分类

根据能量关系分类，可将传感器分为有源传感器和无源传感器两大类。有源传感器一般是将非电能量转换为电能量，称之为能量转换型传感器，也称为换能器。通常它们配有电压测量和放大电路，如压电式、热电式、压阻式等。无源传感器又称为能量控制型传感器。它本身不是一个换能装置，被测非电量仅对传感器中的能量起控制或调节作用。所以，它们必须具有辅助能源(电源)。这类传感器有电阻式、电容式和电感式等。无源传感器常用电桥和谐振电路等电路进行测量。

5. 其他分类法

除以上几种常用的分类法外，还有按用途、学科、功能和输出信号的性质等分类方法。

1.3 传感器的数学模型概述

从系统角度来看,一种传感器就是一种系统。根据系统工程学理论,一个系统总可以用一个数学方程式或函数来描述。即可用某种方程式或函数表征传感器的输出-输入间的关系和特性,从而用这种关系来指导对传感器的设计、制造、使用和校正。

在理想情况下,传感器的输出量应随输入量无失真地变化。但是实际的传感器(或测试系统)总是存在着诸如弹性、惯性和阻尼等元件,使得输出量 y 不仅与输入量 x 有关,而且还与输入量的变化速度、加速度等其他因素有关。所以要准确地建立传感器的数学模型是很困难的。在工程上总是通过忽略一些影响不大的因素,采用一些近似方法建立起系统的初步模型,然后经过反复模拟实验确立系统的最终数学模型。这种方法同样适用于传感器数学模型的建立。通常从传感器的静态输入-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 静态模型

静态模型是指在输入静态信号(输入信号不随时间变化)的情况下,描述传感器输出与输入量间关系的一种函数。如果不考虑蠕动效应和迟滞特性,传感器的静态模型一般可用下面的多项式来表示:

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

式中: x 为输入量;

y 为输出量;

a_0 为零位输出;

a_1 为传感器线性灵敏度,常用 K 或 S 表示;

a_2, \cdots, a_n 为非线性项的待定系数。

1.3.2 动态模型

动态模型是指传感器在准动态信号或动态信号(输入信号随时间而变化)作用下,描述传感器输出量和输入量间关系的一种函数,通常称为响应特性。动态模型通常采用微分方程和传递函数等来描述。

1. 微分方程

大多数传感器都属于模拟系统。为了准确建立传感器的动态数学模型,需忽略一些影响不大的因素,如非线性和随机变量等复杂因素,将传感器作为线性定常系统来考虑,因而其动态数学模型可以用线性常系数微分方程来表示,即用线性常系数微分方程表示传感器输出量 y 和输入量 x 之间的关系。其通式如下:

$$\begin{aligned} a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y \\ = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \cdots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x \end{aligned} \quad (1-2)$$

式中 a_n, a_{n-1}, \dots, a_0 和 b_m, b_{m-1}, \dots, b_0 为传感器的结构参数, 是常量。对于传感器, 除 $b_0 \neq 0$ 外, 一般取 b_1, b_2, \dots, b_m 为零。

所谓线性系统就是在此方程式中不包含变量及其各阶微分的非一次幂项(包括交叉相乘项)。如果线性系统方程中各系数 a_n, b_m 在工作过程中不随时间和输入量的变化而变化, 那么该系统就称为线性定常系统。用线性常系数微分方程来表示传感器的动态模型的优点是易于通过解微分方程分清暂态响应和稳态响应。

2. 传递函数

为了求解的方便, 常采用拉普拉斯变换将(1-2)式变为算子 s 的代数式, 或采用传递函数研究传感器的动态特性。如果在 $t \leq 0$ 时, $y(t) = 0$, 则 $y(t)$ 的拉氏变换可定义为

$$Y(s) = \int_0^{\infty} y(t)e^{-st} dt \quad (1-3)$$

式中 $s = \sigma + j\omega$, $\sigma > 0$ 。微分方程(1-2)两边取拉氏变换, 则得

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

定义输出 $y(t)$ 的拉氏变换 $Y(s)$ 和输入 $x(t)$ 的拉氏变换 $X(s)$ 的比为该系统的传递函数 $H(s)$, 则

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0} \quad (1-4)$$

对 $y(t)$ 进行拉氏变换的初始条件是 $t \leq 0$ 时, $y(t) = 0$ 。对于传感器被激励之前所有的储能元件(如质量块、弹性元件、电气元件等)来说, 均符合上述的初始条件。

显然, $H(s)$ 与输入量 $x(t)$ 无关, 只与系统的结构参数有关。因而, $H(s)$ 可以简单而恰当地描述传感器输出与输入的关系。

对于多环节串、并联组成的传感器, 若各环节阻抗匹配适当, 则可忽略相互间的影响, 传感器的等效传递函数可按代数方式求得。

若传感器由 r 个环节串联而成, 其等效传递函数为

$$H(s) = H_1(s) \times H_2(s) \times \dots \times H_r(s) \quad (1-5)$$

若传感器由 p 个环节并联而成, 其等效传递函数为

$$H(s) = H_1(s) + H_2(s) + \dots + H_p(s) \quad (1-6)$$

这样就容易看清各个环节对系统的影响, 因而便于对传感器或测量系统进行改进。

1.4 传感器的基本特性

传感器(或测量设备)的输出-输入关系特性是传感器的基本特性。从误差角度分析输出-输入特性是测量技术所要研究的主要内容之一。输出-输入特性虽是传感器的外部特性, 但与其内部参数有密切关系。因为传感器不同的内部结构参数决定它们具有不同的外部特性, 所以测量误差也是与内部结构参数密切相关的。

传感器所测量的物理量一般有两种形式, 一种是稳态的(静态或准静态), 即信号不随时间变化或变化很缓慢; 另一种是动态的, 信号随时间的变化而变化。由于输入物理量状态不同, 传感器所表现出来的输出-输入特性也不同, 因此存在所谓的静态特性和动态特性。由于不同传感器有不同的内部参数, 它们的静态特性和动态特性也表现出不同的特点,

对测量结果的影响也各不相同。一个高精度传感器，必须有良好的静态特性和动态特性，这样它才能完成信号(或能量)的无失真转换。

1.4.1 静态特性

衡量传感器静态特性的主要技术指标有线性度、测量范围和量程、迟滞和重复性、灵敏度、分辨力等。

1. 线性度

在采用直线拟合线性化时，输出-输入的校正曲线与其拟合直线之间的最大偏差，称为非线性误差或线性度，通常用相对误差来表示，即

$$\gamma_L = \pm \frac{\Delta L_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (1-7)$$

式中： ΔL_{\max} 为输出量和输入量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。

由此可见，非线性误差的大小是以一定的拟合直线为基准直线而得出来的。拟合直线不同，非线性误差也不同。所以，选择拟合直线的主要出发点应是获得最小的非线性误差。另外，还应考虑使用是否方便，计算是否简便。

传感器的静态模型(1-1)式有三种有用的特殊形式，它们所呈现的非线性程度可用图1-2表示。

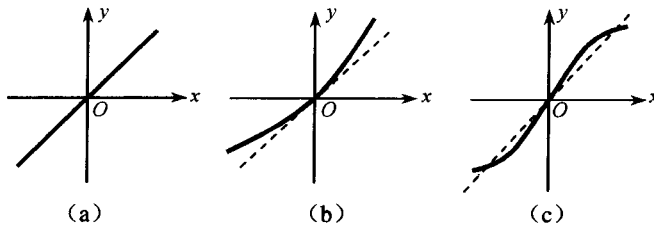


图1-2 传感器的线性度表示

(1) 理想的线性特性

理想的线性特性是如图1-2(a)所示的直线，在这种情况下，有 $a_0 = a_2 = a_3 = \dots = a_n = 0$ ，因此得到

$$y = a_1 x \quad (1-8)$$

(2) 仅有偶次非线性项

图1-2(b)所示为仅有偶次非线性项的曲线。其输出-输入特性方程为

$$y = a_0 + a_2 x^2 + a_4 x^4 + \dots \quad (1-9)$$

因为它没有对称性，所以其线性范围较窄。一般传感器的设计很少采用这种特性。

(3) 仅有奇次非线性项

图1-2(c)所示为仅有奇次非线性项的曲线。其输出-输入特性方程为

$$y = a_1 x + a_3 x^3 + a_5 x^5 + \dots \quad (1-10)$$

具有这种特性的传感器，一般在输入量 x 相当大的范围内具有较宽的准线性。这是比较接近于理想直线的非线性特性，它相对坐标原点对称的，即 $y(+x) = -y(-x)$ ，所以

它具有相当宽的近似线性范围。

2. 灵敏度

在稳态下传感器输出的变化量 Δy 与引起此变化量的输入变化量 Δx 的比值即为其静态灵敏度。其表达式为

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1-11)$$

式中： Δy 为输出的变化量；

Δx 为输入的变化量。

由此可见，传感器校准曲线的斜率就是其灵敏度。对线性传感器而言，其特性曲线的斜率处处相同，灵敏度 k 是一常数，其灵敏度就是它的静态特性曲线的斜率，即

$$k = \frac{y}{x} \quad (1-12)$$

非线性传感器的灵敏度是一个变量，只能表示传感器在某一工作点的灵敏度。

3. 重复性

重复性是指传感器在输入量按同一方向作全量程多次测试时，所得特性曲线不一致的程度。图 1-3 所示为实际输出的校正曲线的重复特性。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 $\Delta R_{\max 2}$ 。重复性误差用这两个最大偏差之中较大者 ΔR_{\max} 与满量程输出 y_{FS} 之比的百分数表示，即

$$\gamma_R = \pm \frac{\Delta R_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (1-13)$$

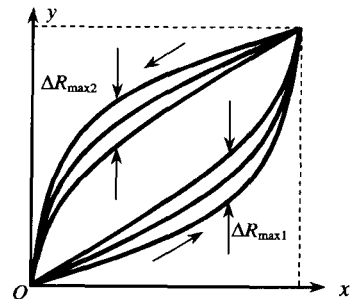


图 1-3 重复性

重复性误差也常用绝对误差表示。

4. 迟滞(回差滞环)

对于同一大小的输入信号 x ，传感器在正(输入量增大)反(输入量减小)行程中，输出-输入曲线不重合称为迟滞。

迟滞特性如图 1-4 所示，它一般是通过实验方法测得。迟滞误差一般以正反行程中输出的最大偏差量与满量程输出之比的百分数表示，即

$$\gamma_H = \pm \frac{\Delta H_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (1-14)$$

式中： ΔH_{\max} 为正反行程输出量之间的最大差值；

y_{FS} 为输出满量程值。

迟滞的影响因素包括传感器机械结构中的摩擦、间隙、松动、积尘和结构材料受力变形的滞后现象等。

5. 分辨力与阈值

分辨力是指传感器在规定测量范围内所能检测出被测输入量的最小变化值。该值与满量程输入值之比的百分数称为分辨率。

阈值是使传感器的输出端产生可测变化量的最小被测输入量值，即零点附近的分辨力。

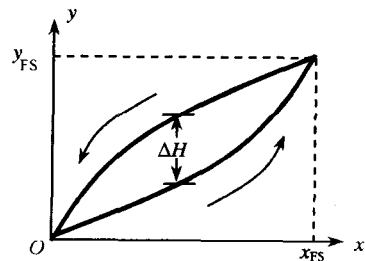


图 1-4 迟滞特性

6. 稳定性

稳定性又称长期稳定性,即传感器在长时间内保持其原性能的能力。稳定性一般以室温条件下经过规定时间间隔后,传感器的输出与起始标定时输出之间的差异来表示,有时也用标定的有效期来表示。

7. 漂移

漂移是指在一定时间间隔内,传感器的输出存在着与被测输入量无关的、不需要的变化。漂移常包括零点漂移和灵敏度漂移。

零点漂移或灵敏度漂移又可分为时间漂移和温度漂移,又称时漂和温漂。时漂是指在规定的条件下,零点或灵敏度随时间有缓慢的变化;温漂是指由周围温度变化所引起的零点或灵敏度的变化。

8. 静态误差(精度)

静态误差是指传感器在其全量程内任一点的输出值与其理论输出值的偏离程度。求静态误差是把全部校准数据与拟合直线上对应值的残差看成是随机分布,求出其标准偏差 σ ,取 2σ 或 3σ 值即为传感器的静态误差。

静态误差也可用相对误差表示,即

$$\gamma = \pm \frac{(2 \sim 3)\sigma}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-15)$$

静态误差是一项综合性指标,它基本上包含了前面叙述的非线性误差、迟滞误差、重复性误差等。所以也可以由这几个单项误差综合而得,即

$$\gamma = \sqrt{\gamma_L^2 + \gamma_H^2 + \gamma_R^2 + \dots} \quad (1-16)$$

1.4.2 动态特性

动态特性是指传感器对随时间变化的输入量的响应特性。

1. 动态误差

在测量静态信号时,线性传感器的输出-输入特性是一条直线,二者之间有一一对应的关系,而且因为被测信号不随时间变化,测量和记录过程均不受时间的限制。而在实际测量工作中,大量的被测信号是动态信号,传感器对动态信号的测量不仅需要精确地测量信号幅值的大小,而且需要测量和记录动态信号变换过程的波形,这就要求传感器能迅速准确地测出信号幅值的大小和无失真地再现被测信号随时间变化的波形。

动态特性好的传感器,其输出量随时间变化的曲线与被测量随时间变化的曲线一致或者相近,即具有相同的时间函数。但实际上,除了具有理想的比例特性的环节外,输出信号将不会与输入信号具有完全相同的时间函数,这种输出与输入间的差异就是所谓的动态误差。例如,用一只热电偶测量热水温度 T 。若环境温度为 T_0 (设 $T > T_0$),测试曲线与温度从 T_0 到 T 的阶跃存在一个差值,这个差值就是动态误差,如图1-5所示。

在用热电偶测量热水温度时,水温的热量需通过热电偶的壳体传播到热接点上,热接点又具有一定热容量,它与水

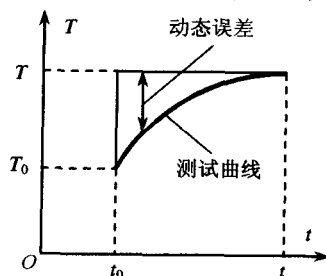


图1-5 热电偶测温过程