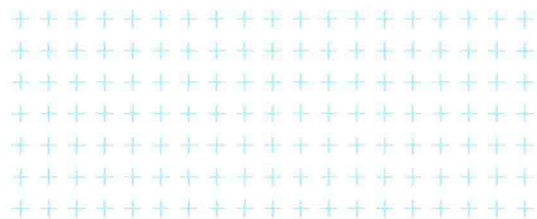


高等学校“十三五”规划教材

传感器

原理与应用技术

王化祥 编著



化学工业出版社

高等学校“十三五”规划教材

传感器 原理与应用技术

王化祥 编著



化学工业出版社

·北京·

本书以非电量电测技术为主要内容,以信息交换与处理为编写体系,主要适用于应用型本科院校自动化、测控技术与仪器以及电气工程及其自动化等专业的学生。

本书共分为12章,除第1、2章外,其他各章均具有一定独立性。第1、2章介绍了传感器的基本概念及传感器静、动态特性;第3~10章介绍了一些典型传感器的变换原理、特性、测量电路及应用技术;第11章介绍了智能传感器和网络传感器有关内容;第12章介绍了最新发展的物联网传感器技术。

本书的内容精练实用,深入浅出,便于读者自学,可作为有关专业的教学用书,也可供从事传感器应用的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

传感器原理与应用技术/王化祥编著. —北京:
化学工业出版社, 2017. 11
高等学校“十三五”规划教材
ISBN 978-7-122-29932-1

I. ①传… II. ①王… 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(2017)第136404号

责任编辑:郝英华

责任校对:宋玮

装帧设计:关飞

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:三河市航远印刷有限公司

装订:三河市瞰发装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张12½ 字数318千字 2018年1月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网址:<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:36.00元

版权所有 违者必究

前 言

传感器技术（即非电量测量技术）是自动化、测控技术与仪器以及电气工程及其自动化等专业的核心课程，也是现代科学技术中的一个重要研究领域。在当今信息时代，随着自动化技术的快速发展，传感器作为获取信息的必要手段，发挥着越来越重要的作用。可以说，没有传感器，便没有现代化的自动测量和控制系统；没有传感器，将不会有现代科学技术的迅速发展。

正是由于传感器技术的重要性，目前国内外均将传感器技术列为优先发展的科技领域之一。国内高校自动化、测控技术与仪器以及电气工程及其自动化等专业普遍开设了传感器课程，并将其列为必修课，同时配套有相应的教材和教学参考书。本书正是根据相关专业应用型本科院校的培养方案，以培养应用型人才为主要目的而编写的。

本书从传感器的基本知识开始，围绕应用基础知识，重点介绍了一些应用较广泛的传感器，同时根据传感器技术的发展趋势，适当地增加了智能传感器以及当前迅速发展的物联网传感器技术有关内容，并附有相应的例题和习题，使学生通过学习本书，对该课程有较全面的认识和理解。本书略去了烦琐的公式推导和理论分析，注重理论与实际的结合，重在应用。

本书共分为 12 章，除第 1、2 章外，其他各章均具有一定的独立性。第 1、2 章介绍了传感器的基本概念及传感器的静、动态特性；第 3~10 章介绍了一些典型传感器的变换原理、特性、测量电路及应用；第 11 章介绍了智能传感器和网络传感器的有关内容；第 12 章介绍了当前迅速发展的物联网传感技术。

本书配套有电子课件供选用本书作为教材的院校使用，如有需要，请发邮件至 cipedu@163.com 索取。

本书在编写过程中参阅了一些国内外公开发表的相关教材和文献资料，在此向所有参考文献的作者表示诚挚的谢意。

由于笔者水平和经验有限，书中不妥之处在所难免，恳请广大读者批评指教。

笔者

2017 年 10 月于天津大学

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 传感器的作用	1
1.2 传感器及传感技术	1
1.3 传感器的组成	2
1.4 传感器的分类	2
1.5 传感器的发展趋势	3
第 2 章 传感器的一般特性	5
2.1 传感器的静态特性	5
2.2 传感器的动态特性	9
第 3 章 应变式传感器	13
3.1 金属应变片式传感器	13
3.2 压阻式传感器	25
第 4 章 电容式传感器	33
4.1 电容式传感器的工作原理	33
4.2 电容式传感器的测量电路	38
4.3 电容式传感器的误差分析	45
4.4 电容式传感器的应用	46
第 5 章 电感式传感器	52
5.1 自感式传感器	52
5.2 差动变压器	55
5.3 电涡流式传感器	62

第 6 章 压电式传感器	71
6.1 压电效应	71
6.2 压电材料	74
6.3 压电式传感器的测量电路	76
6.4 压电式传感器的应用	81
第 7 章 数字式传感器	87
7.1 码盘式传感器	87
7.2 光栅传感器	92
第 8 章 热电式传感器	100
8.1 热电偶	100
8.2 热电阻	108
8.3 热敏电阻	112
8.4 集成温度传感器	118
第 9 章 磁敏传感器	124
9.1 霍尔元件	124
9.2 磁敏电阻	133
9.3 磁敏二极管和磁敏三极管	135
第 10 章 光电传感器	140
10.1 光电效应	140
10.2 光敏电阻	141
10.3 光电池	144
10.4 光敏二极管和光敏三极管	147
10.5 光电传感器的类型及应用	152
10.6 光纤传感器	156
第 11 章 智能传感技术	168
11.1 智能传感器	169
11.2 网络传感器	178

第 12 章 物联网传感技术	183
12.1 物联网的概念	183
12.2 物联网的体系架构	183
12.3 物联网的关键技术	185
12.4 物联网传感器技术应用	186
部分习题参考答案	193
参考文献	194

第 1 章

绪 论

1.1 传感器的作用

随着现代测量、控制和自动化技术的发展，传感器技术越来越受到人们的重视。特别是近年来，由于科学技术、经济发展及生态平衡的需要，传感器在各个领域中的作用日益显著，特别是工业生产自动化、能源、交通、灾害预测、安全防卫、环境保护、医疗卫生等领域所开发的各种传感器，不仅可代替人的感官功能，而且在检测人的感官所不能感受的参数方面具有特别突出的优势。例如，冶金工业中连续铸造生产过程中的钢包液位检测，高炉铁水硫、磷含量分析等方面需要各种各样的传感器为操作人员提供可靠的数据。又如，用于工厂自动化柔性制造系统（Flexible Manufacturing System, FMS）中的机械手或机器人可实现高精度在线实时测量，从而保证了产品的产量和质量。在微型计算机广为普及的今天，如果没有各种类型的传感器提供可靠、准确的信息，计算机控制便难以实现。因此，近几年来传感器技术的应用研究在许多工业发达的国家中已经得到普遍重视。

1.2 传感器及传感技术

传感器（Transducer 或 Sensor）是将各种非电量（包括物理量、化学量、生物量等）按一定规律转换成便于处理和传输的另一种物理量（一般为电量）的装置。

过去人们习惯于把传感器仅作为测量工程的一部分加以研究。但是自 20 世纪 60 年代以来，随着材料科学的发展和固体物理效应的不断发现，传感器技术已形成了一个新型的科学技术领域，并建立了一个完整、独立的科学体系——传感器工程学。

传感技术是一门利用各种功能材料实现信息检测的应用技术。它是检测（传感）原理、材料科学、工艺加工三要素结合的产物。检测（传感）原理指传感器工作时所依据的物理效应、化学反应和生物反应等机理，各种功能材料则是传感技术发展的物质基础。从某种意义上讲，传感器也就是能感知外界各种被测信号的功能材料。传感技术的研究和开发，不仅要求原理正确，选材合适，而且要求有先进、高精度的加工装配技术。除此之外，传感技术还包括研究如何更好地将传感元件用于各个领域的所谓传感器软件技术，如传感器的选择、标定以及接口技术等。总之，随着科学技术的发展，传感技术的研究开发范围正在不断扩大。

1.3 传感器的组成

传感器一般由敏感元件、转换元件以及信号调理与转换电路三部分组成,有时还需要加辅助电源。其组成可用方框图表示,见图 1-1。

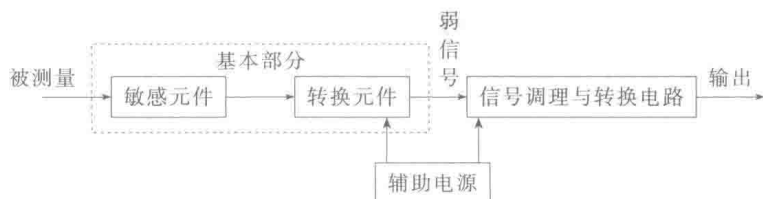


图 1-1 传感器的组成方框图

(1) 敏感元件（预变换器）

并非所有的非电量均能利用现有手段直接变换为电量。在很多情况下,往往是将被测非电量预先变换为另一种易于变换成电量的非电量,然后再变换为电量。能够完成预变换的器件称为敏感元件,又称预变换器。如在传感器中各种类型的弹性元件常被称为敏感元件,并统称为弹性敏感元件。

(2) 转换元件

将感受到的非电量直接转换为电量的器件称为转换元件,如压电晶体、热电偶等。

需要指出的是,有的传感器包括敏感元件和转换元件,如热敏电阻、光电器件等;而另外一些传感器,其敏感元件和转换元件可合二为一,如固态压阻式压力传感器等。

(3) 信号调理与转换电路

信号调理与转换电路将转换元件输出的电信号放大并转变成易于处理、显示和记录的信号。信号调理电路的类型视传感器的类型而定,通常采用的有电桥电路、高阻抗输入电路和振荡器电路等。

(4) 辅助电源

电源的作用是为传感器提供能源。需要外部接电源的传感器称为无源传感器,不需要外部接电源的传感器称为有源传感器。如电阻式、电感式和电容式传感器是无源传感器,工作时需要外部电源供电;而压电传感器、热电偶为有源传感器,工作时不需要外部电源供电。

1.4 传感器的分类

传感器的种类很多,常采用的分类方法有如下几种。

(1) 按输入量分类

当输入量分别为温度、压力、位移、速度、加速度、湿度等非电量时,则相应的传感器称为温度传感器、压力传感器、位移传感器、速度传感器、加速度传感器、湿度传感器等。

这种分类方法便于使用者根据测量对象选择所需要的传感器。

(2) 按测量原理分类

现有传感器的测量原理主要是基于电磁原理和固体物理学理论。如根据变电阻的原理,相应地有电位器式、应变式传感器;根据变磁阻的原理,相应地有电感式、差动变压器式、电涡流式传感器;根据半导体有关理论,则相应地有半导体力敏、热敏、光敏、气敏等固态传感器。

(3) 按结构型和物性型分类

所谓结构型传感器,主要是通过机械结构的几何形状或尺寸的变化,将外界被测参数转换成相应的电阻、电感、电容等物理量的变化,从而检测出被测信号,这种传感器目前应用得最为普遍。物性型传感器则利用材料本身物理性质的变化而实现测量,它是以半导体、电介质、铁电体等作为敏感材料的固态器件。

1.5 传感器的发展趋势

近年来,由于半导体技术已进入超大规模集成化阶段,各种制造工艺和材料性能的研究已达到相当高的水平。这为传感器的发展创造了极为有利的条件。从发展前景来看,它具有以下几个发展趋势。

(1) 传感器的固态化

物性型传感器亦称固态传感器,它包括半导体、电介质和强磁性体三类,其中半导体传感器的发展最引人注目。它不仅灵敏度高、响应速度快、小型轻量,而且便于实现传感器的集成化和多功能化。如目前最先进的固态传感器,在一块芯片上可同时集成差压、静压、温度三个传感器,使差压传感器具有温度和压力补偿功能。

(2) 传感器的集成化和多功能化

随着传感器应用领域的不断扩大,借助半导体的蒸镀技术、扩散技术、光刻技术、精密细微加工及组装技术等,传感器已经从单个元件、单一功能向集成化和多功能化方向发展。所谓集成化,就是将敏感元件、信息处理或转换单元以及电源等部件利用半导体技术制作在同一块芯片上,如集成压力传感器、集成温度传感器、集成磁敏传感器等。多功能化则意味着传感器具有多种参数的检测功能,如半导体温湿敏传感器、多功能气体传感器等。

(3) 传感器的图像化

目前,传感器的应用已从对某一点物理量的测量转向一维、二维甚至三维空间的测量。现已研制成功的二维图像传感器,有MOS型、CCD型、CID型全固体式摄像器件等。

(4) 传感器的智能化

智能传感器是一种带有微型计算机兼有检测和信息处理功能的传感器。它通常将信号检测、驱动回路和信号处理回路等外围电路全部集成在一块基片上,从而具有自诊断、远距离通信、自动调整零点和量程等功能。

(5) 传感器网络化

微电子技术、计算技术和无线通信技术等的进步，推动了低功耗多功能传感器的快速发展，使其在微小体积内能够集成信息采集、数据处理和无线通信等多种功能。无线传感器网络（Wireless Sensor Network, WSN）就是由部署在监测区域内大量的廉价微型传感器节点组成，通过无线通信方式形成的一个多跳的自组织的网络系统，其目的是协同感知、采集和处理网络覆盖区域中感知对象的信息，并发送给观察者。传感器、感知对象和观察者构成了传感器网络的三个要素。如果说 Internet 构成了逻辑上的信息世界，那么无线传感器网络就是将逻辑上的信息世界与客观上的物理世界融合在一起，改变人类与自然界的交互方式。

第2章

传感器的一般特性

传感器的输入量可分为静态量和动态量两类。静态量指处于稳定状态的信号或变化极其缓慢的信号(准静态)。动态量通常指周期信号、瞬变信号或随机信号。无论对动态量或静态量,传感器输出电量都应不失真地复现输入量的变化。这主要取决于传感器的静态特性和动态特性。

2.1 传感器的静态特性

当被测量的各个值处于稳定状态时,传感器输出量和输入量之间的关系称为静态特性。

通常,要求传感器在静态情况下的输出-输入关系保持线性。实际上,其输出量和输入量之间的关系(不考虑迟滞及蠕变效应)可由下列方程式确定:

$$Y = a_0 + a_1 X + a_2 X^2 + \dots + a_n X^n \quad (2-1)$$

式中, Y 为输出量; X 为输入量; a_0 为零位输出; a_1 为传感器的灵敏度,常用 K 表示; a_2, a_3, \dots, a_n 为非线性项待定常数。

由式(2-1)可见,如果 $a_0 = 0$,表示静态特性曲线通过原点。此时静态特性曲线是由线性项($a_1 X$)和非线性项($a_2 X^2, \dots, a_n X^n$)叠加而成,一般可分为以下四种典型情况。

① 理想线性 [图 2-1(a)]:

$$Y = a_1 X \quad (2-2)$$

② 具有 X 奇次阶项的非线性 [图 2-1(b)]:

$$Y = a_1 X + a_3 X^3 + a_5 X^5 + \dots \quad (2-3)$$

③ 具有 X 偶次阶项的非线性 [图 2-1(c)]:

$$Y = a_1 X + a_2 X^2 + a_4 X^4 + \dots \quad (2-4)$$

④ 具有 X 奇、偶次阶项的非线性 [图 2-1(d)]:

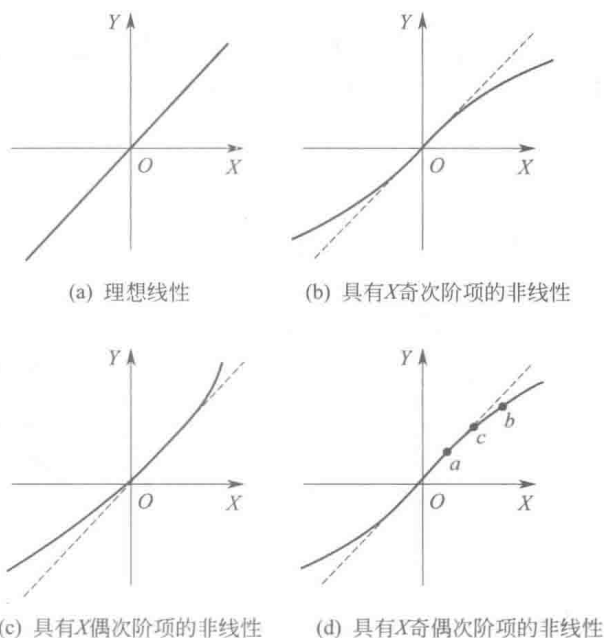


图 2-1 传感器的四种典型静态特性

$$Y = a_1 X + a_2 X^2 + a_3 X^3 + a_4 X^4 + \dots \quad (2-5)$$

由此可见，除图 2-1(a) 为理想线性关系外，其余均为非线性关系。其中具有 X 奇次项的曲线图 2-1(b)，在原点附近一定范围内基本上具有线性特性。

实际应用中，若非线性项的方次不高，则在输入量变化不大的范围内，用切线或割线代替实际的静态特性曲线的某一段，使传感器的静态特性接近于线性，这称为传感器静态特性的线性化。在设计传感器时，应将测量范围选取在静态特性最接近直线的一小段，此时原点可能不在零点。以图 2-1(d) 为例，如取 ab 段，则原点在 c 点。传感器静态特性的非线性，使其输出不能成比例地反映被测量的变化情况，而且对动态特性也有一定影响。

传感器的静态特性是在静态标准条件下测定的。在标准工作状态下，利用一定精度等级的校准设备，对传感器进行往复循环测试，即可得到输出、输入数据。将这些数据列成表格，再画出各被测量值（正行程和反行程）对应输出平均值的连线，即为传感器的静态校准曲线。

传感器静态特性的主要指标有以下几点。

(1) 线性度（非线性误差）

在规定条件下，传感器校准曲线与拟合直线间最大偏差与满量程（ $F \cdot S$ ）输出值的百分比称为线性度（图 2-2）。

用 δ_L 代表线性度，则

$$\delta_L = \pm \frac{\Delta Y_{\max}}{Y_{F \cdot S}} \times 100\% \quad (2-6)$$

式中， ΔY_{\max} 为校准曲线与拟合直线间的最大偏差； $Y_{F \cdot S}$ 为传感器满量程输出， $Y_{F \cdot S} = Y_{\max} - Y_0$ 。

由此可知，非线性误差是以一定的拟合直线或理想直线为基准直线计算出来的。因而，基准直线不同，所得线性度也不同，见图 2-3。

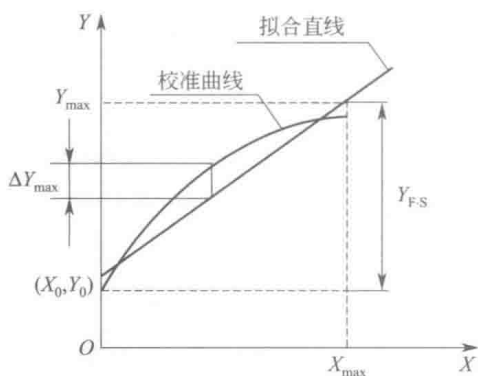


图 2-2 传感器的线性度

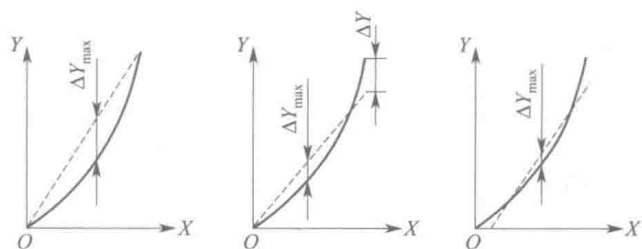


图 2-3 基准直线的不同拟合方法

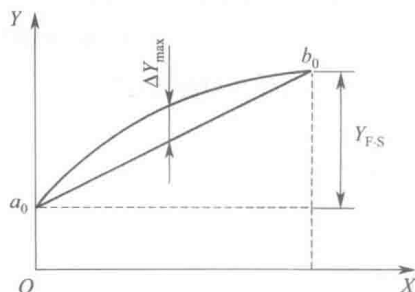


图 2-4 端基线性度拟合直线

应当指出，对同一传感器，在相同条件下进行校准试验时得出的非线性误差不会完全一样。因而不能笼统地说线性度或非线性误差，必须同时说明所依据的基准直线。

① **端基法** 把传感器校准数据的零点输出平均值 a_0 和满量程输出平均值 b_0 连成的直线 $a_0 b_0$ 作为传感器特性的拟合直线（见图 2-4）。其方程式为

$$Y = a_0 + KX \quad (2-7)$$

式中, Y 为输出量; X 为输入量; a_0 为 Y 轴上截距; K 为直线 a_0b_0 的斜率。

由此得到端基法拟合直线方程, 按式(2-6) 可算出端基线性度。这种拟合方法简单直观, 但是未考虑所有校准点数据的分布, 拟合精度较低, 一般用在特性曲线非线性度较小的情况。

② 最小二乘法 用最小二乘法原则拟合直线, 拟合精度高。

令拟合直线方程为 $Y = a_0 + KX$ 。假定实际校准点有 n 个, 在 n 个校准数据中, 任一个校准数据 Y_i 与拟合直线上对应的理想值 $a_0 + KX_i$ 间线差为

$$\Delta_i = Y_i - (a_0 + KX_i) \quad (2-8)$$

最小二乘法拟合直线就是使 $\sum_{i=1}^n \Delta_i^2$ 为最小值, 即

$$\frac{\partial}{\partial K} \sum \Delta_i^2 = 2 \sum (Y_i - KX_i - a_0)(-X_i) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial a_0} \sum \Delta_i^2 = 2 \sum (Y_i - KX_i - a_0)(-1) = 0$$

联立求解以上二式, 可求出 K 和 a_0 , 即

$$K = \frac{n \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \sum_{i=1}^n X_i \cdot \sum_{i=1}^n Y_i}{n \sum_{i=1}^n X_i^2 - (\sum_{i=1}^n X_i)^2} \quad (2-9)$$

$$a_0 = \frac{\sum_{i=1}^n X_i^2 \cdot \sum_{i=1}^n Y_i - \sum_{i=1}^n X_i \cdot \sum_{i=1}^n X_i Y_i}{n \sum_{i=1}^n X_i^2 - (\sum_{i=1}^n X_i)^2} \quad (2-10)$$

式中, n 为校准点数。由此得到最佳拟合直线方程, 由式(2-6) 可算得最小二乘法线性度。

通常采用差动测量方法减小传感器的非线性误差。例如, 某位移传感器特性方程式为

$$Y_1 = a_0 + a_1 X + a_2 X^2 + a_3 X^3 + a_4 X^4 + \dots$$

另有一个与之完全相同但感受相反方向位移的位移传感器, 其特性方程式为

$$Y_2 = a_0 - a_1 X + a_2 X^2 - a_3 X^3 + a_4 X^4 - \dots$$

在差动输出情况下, 其特性方程式可写成

$$\Delta Y = Y_1 - Y_2 = 2(a_1 X + a_3 X^3 + a_5 X^5 + \dots) \quad (2-11)$$

可见采用此方法后, 由于消除了 X 偶次项而使非线性误差大大减小, 灵敏度提高一倍, 零点偏移消除了, 因此差动式传感器得到了广泛应用。

(2) 灵敏度

传感器的灵敏度指到达稳定工作状态时输出变化量与引起此变化的输入变化量之比。由图 2-5 可知, 线性传感器校准曲线的斜率即为静态灵敏度 K 。其计算方法为

$$K = \frac{\text{输出变化量}}{\text{输入变化量}} = \frac{\Delta Y}{\Delta X} \quad (2-12)$$

非线性传感器的灵敏度用 dY/dX 表示, 其数值等于所对应的最小二乘法拟合直线的斜率。

(3) 迟滞

迟滞是指在相同工作条件下作全测量范围校准时, 在同一次校准中对应同一输入量的正

行程和反行程其输出值间的最大偏差（图 2-6）。其数值用最大偏差或最大偏差的一半与满量程输出值的百分比表示。

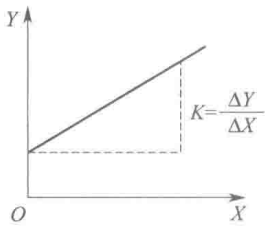


图 2-5 传感器灵敏度的定义

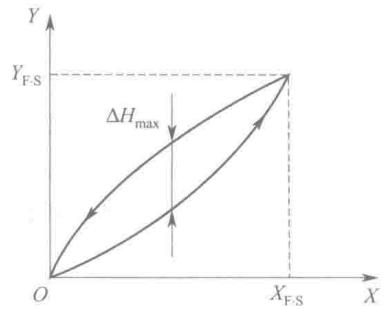
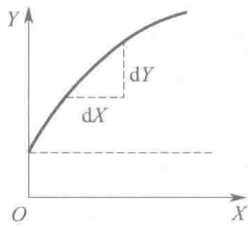


图 2-6 传感器的迟滞特性

$$\delta_H = \pm \frac{\Delta H_{\max}}{Y_{F.S}} \times 100\% \quad (2-13)$$

或

$$\delta_H = \pm \frac{\Delta H_{\max}}{2Y_{F.S}} \times 100\% \quad (2-14)$$

式中， ΔH_{\max} 为输出值在正反行程间的最大偏差； δ_H 为传感器的迟滞。

迟滞现象反映了传感器机械结构和制造工艺上的缺陷，如轴承摩擦、间隙、螺钉松动、元件腐蚀或碎裂及积塞灰尘等。

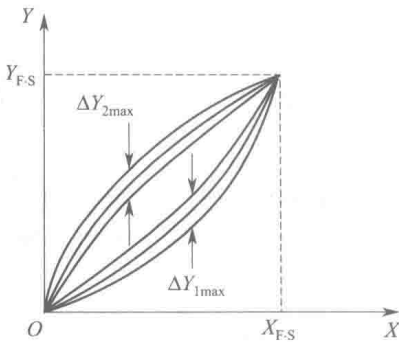


图 2-7 传感器的重复性

(4) 重复性

重复性是指在同一工作条件下，输入量按同一方向在全测量范围内连续变动多次所得特性曲线的不一致性（图 2-7）。在数值上用各测量值正、反行程标准偏差最大值的 2 倍或 3 倍与满量程 $Y_{F.S}$ 的百分比表示。即

$$\delta_k = \pm \frac{2\sigma \sim 3\sigma}{Y_{F.S}} \times 100\% \quad (2-15)$$

式中， δ_k 为重复性； σ 为标准偏差； $Y_{F.S}$ 为满量程输出。

当用贝塞尔公式计算标准偏差 σ 时，则有
$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{n-1}} \quad (2-16)$$

式中， Y_i 为测量值； \bar{Y} 为测量值的算术平均值； n 为测量次数。

重复性所反映的是测量结果偶然误差的大小，有时重复性虽然很好，但可能远离真值。

(5) 零点漂移

传感器无输入（或某一输入值不变）时，每隔一段时间进行读数，其输出偏离零值（或原指示值）的现象，即为零点漂移。

$$\text{零漂} = \frac{\Delta Y_0}{Y_{F.S}} \times 100\% \quad (2-17)$$

式中, ΔY_0 为最大零点偏差 (或相应偏差)。

(6) 精度

精度是反映系统误差和随机误差的综合误差指标。一般用方和根法或代数和法计算。用重复性、线性度、迟滞三项的方和根或简单代数和表示 (以方和根用得较多):

$$\xi = \sqrt{\xi_L^2 + \xi_R^2 + \xi_H^2} \quad (2-18)$$

或
$$\xi = \xi_L + \xi_R + \xi_H$$

当一个传感器或传感器系统设计完成并定标后, 人们有时又以工业上仪表精度的定义给出其精度。它是以最大量程下的绝对误差与最大量程的比值来衡量的, 这种比值称为相对 (于满量程的) 百分误差。例如, 某温度传感器的刻度为 $0 \sim 100^\circ\text{C}$, 即测量范围为 100°C 。若在这个测量范围内, 最大测量误差不超过 0.5°C , 则其相对百分误差为

$$\delta = \frac{0.5}{100} = 0.5\%$$

去掉上式中相对百分误差的“%”, 称为仪表的精确度, 可划分成若干等级, 如 0.1 级、0.2 级、0.5 级、1.0 级等。

(7) 阈值、分辨力

当一个传感器的输入从零开始缓慢地增加时, 只有达到某一最小值后才能测出输出变化, 这个最小值就称为传感器的阈值。

分辨力是指当一个传感器的输入从非零的任意值缓慢增加时, 只有当超过某一输入增量后输出才显示变化, 这个输入增量称为传感器的分辨力。有时用该值相对满量程输入值之百分比表示, 则称为分辨率。

阈值说明了传感器最小可测出的输入量; 分辨力说明传感器最小可测出的输入变量。

(8) 时间漂移、零点温度漂移和灵敏度温度漂移

漂移量是表征传感器稳定性的重要性能指标。传感器的漂移有时会导致整个测量或控制系统处于瘫痪。时间漂移通常是指传感器零位随时间变化的大小, 温度漂移表示温度变化时, 传感器输出值的偏离程度。

漂移指标一般有三种: 时间漂移, 零点温度漂移, 灵敏度温度漂移。

2.2 传感器的动态特性

所谓动态特性是指当被测量随时间变化时, 传感器的输出值与输入值之间关系的数学表达式、曲线或数表。当测量某些随时间变化的参数时, 只考虑静态特性指标还不够, 还必须考虑其动态性能指标, 只有这样才能使检测、控制正确、可靠。当传感器在测量动态压力、振动、上升温度等量时, 均离不开动态指标。实际被测量随时间变化的形式可能是多种多样的, 所以在研究动态特性时, 通常根据正弦变化与阶跃变化两种标准输入考察传感器的响应特性。

为了便于分析和处理传感器的动态特性, 同样需要建立数学模型。对于线性系统动态响

应的研究,最广泛使用的数学模型是普通线性常系数微分方程。只要对微分方程求解,即可得到动态性能指标。

传感器的动态性能指标分为时域和频域两种。

(1) 时域性能指标

通常在阶跃函数作用下测定传感器动态性能的时域指标。图 2-8 所示为单位阶跃作用下过渡过程曲线。

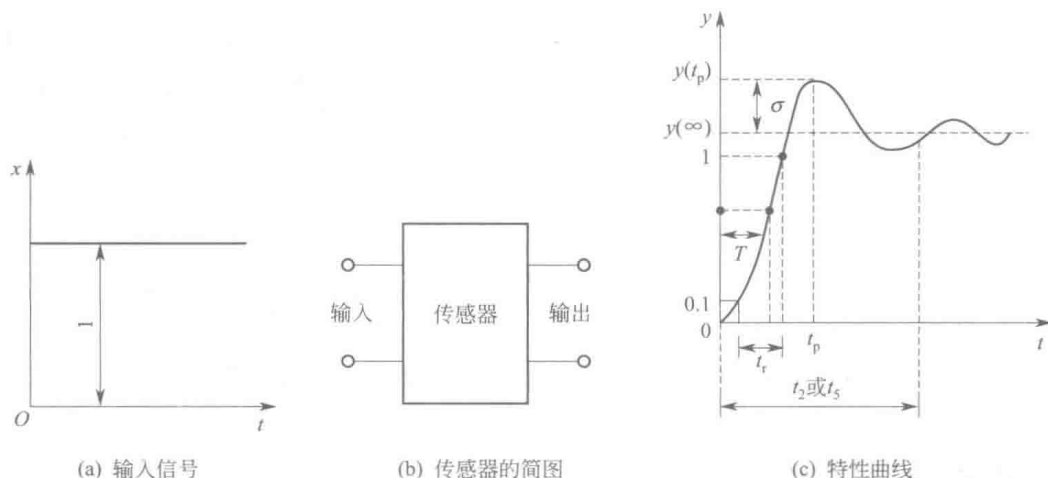


图 2-8 单位阶跃作用于传感器的动态特性

通常用下述 4 个指标来表示传感器的动态性能:

- ① 时间常数 T 。输出值上升到稳态值 $y(\infty)$ 的 63% 所需的时间。
- ② 上升时间 t_r 。输出值从稳态值 $y(\infty)$ 的 10% 上升到 90% 所需的时间。
- ③ 响应时间 t_5, t_2 。输出值达到稳态值的 95% 或 98% 所需的时间。
- ④ 超调量 σ 。在过渡过程中,如果符合输出量的最大值 $y(t_p) < y(\infty)$, 则响应无超调; 如果符合 $y(t_p) > y(\infty)$, 则有超调, 且

$$\sigma = \frac{y(t_p) - y(\infty)}{y(\infty)} \times 100\%$$

输出量 $y(t)$ 跟随输入量的时间快慢,是标定传感器动态性能的重要指标。确定这些性能指标的分析表达式以及技术指标的计算方法,因不同阶次(如一阶、二阶或高阶次传感器)的动态数学模型而异。

(2) 频域性能指标

通常在正弦函数作用下测定传感器动态性能的频域指标。如标定压力传感器的频域性能指标时,常采用正弦波压力信号发生器。

如图 2-9 所示,频域常有如下指标:

- ① 通频带 ω_b 。对数幅频特性曲线上幅值衰减 3dB 时所对应的频率范围。
- ② 工作频带 ω_{g1} 或 ω_{g2} 。幅值误差为 $\pm 5\%$ 或 $\pm 10\%$ 时所对应的频率范围。
- ③ 相对误差。在工作频带范围内相角应小于 5° 或 10° , 即为相位误差的大小。

一个传感器的频域性能指标可以上 3 个指标来标定,至于具体规定为多少,可视其应用需要来定。