



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

Principles and Applications of Transducers

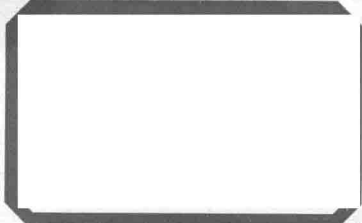
传感器原理及应用

(第2版)

● 王化祥 张淑英 编著



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



Principles and Applications of Transducers

传感器原理及应用

(第2版)

● 王化祥 张淑英 编著



内 容 提 要

本书以非电量测量技术为主要内容,以信息交换与处理为编写体系,主要适用于少学时选修的非自动化、测控技术与仪器以及电气工程与自动化等专业的学生,学时可安排 32 学时或 28 学时。

本书共分为 12 章,除第 1、2 章外,其他各章均有一定的独立性。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 章介绍了信号变换和抗干扰技术。

本书的内容精练实用、深入浅出,便于读者自学,可作为少学时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。

本书配有电子教案,该教案既涵盖“传感器原理及应用”课程的共性知识,又能为教师个性化的教学需要提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

传感器原理及应用:少学时 / 王化祥,张淑英编著.

—2 版. —天津:天津大学出版社,2017.3

ISBN 978-7-5618-5792-2

I. ①传… II. ①王… ②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(2017)第 058484 号

出版发行 天津大学出版社
地 址 天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编:300072)
电 话 发行部:022-27403647
网 址 publish.tju.edu.cn
印 刷 昌黎县佳印印刷有限责任公司
经 销 全国各地新华书店
开 本 185mm×260mm
印 张 14
字 数 359 千
版 次 2004 年 9 月第 1 版 2017 年 3 月第 2 版
印 次 2017 年 3 月第 1 次
定 价 29.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,烦请向我社发行部门联系调换

版权所有 侵权必究

第2版前言

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与自动化等学科主要的专业技术课,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与自动化等学科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专著。但对于其他学科和专业,目前适用于该课程的教材尚不多见。为此,作者在多年教学科研的基础上,收集整理有关资料,编写了这本教材。

本书主要介绍了一些典型的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技术有关内容,并补充了相关的例题和习题,使学生通过学习本书,对该课程有较全面的认识和理解。

本书重点放在原理阐述和实际应用介绍上,既保证必要、简明的理论介绍,又结合一定的应用实例,使学生能够举一反三、触类旁通。

本书共分为12章,除第1、2章外,其他各章均有一定的独立性。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章介绍了信号变换和抗干扰技术。学生可以根据情况选学本教材有关内容。本教材主要适用于少学时选修的相关专业,一般可安排32学时或28学时并可选学相应内容。

本书在编写过程中参阅了国内外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。

由于作者水平和经验有限,书中的错误和不妥之处在所难免,恳请广大读者批评指教。

本书配套有电子教案,该教案既涵盖“传感器原理及应用”课程的共性知识,又能为教师个性化的教学需要提供参考。如有需要,请以电子邮件联系:zhaosm999@sohu.com。

作者

2017年2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	(1)
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	(4)
2.1 传感器的静态特性	(4)
2.2 传感器的动态特性	(9)
第3章 应变式传感器	(12)
3.1 金属应变片式传感器	(12)
3.2 压阻式传感器	(25)
第4章 电容式传感器	(30)
4.1 电容式传感器的工作原理	(30)
4.2 电容式传感器的测量电路	(35)
4.3 电容式传感器的误差分析	(42)
4.4 电容式传感器的应用	(43)
第5章 电感式传感器	(47)
5.1 自感式传感器	(47)
5.2 差动变压器	(50)
5.3 电涡流式传感器	(58)
第6章 压电式传感器	(66)
6.1 压电效应	(66)
6.2 压电材料	(69)
6.3 压电式传感器的测量电路	(72)
6.4 压电式传感器的应用	(77)
第7章 数字式传感器	(79)
7.1 码盘式传感器	(79)
7.2 光栅传感器	(85)
第8章 热电式传感器	(92)
8.1 热电偶	(92)
8.2 热电阻	(101)
8.3 热敏电阻	(105)
8.4 集成温度传感器	(111)

第 9 章 磁敏传感器	(114)
9.1 霍尔元件	(114)
9.2 磁敏电阻	(123)
9.3 磁敏二极管和磁敏三极管	(124)
第 10 章 光电传感器	(129)
10.1 光电效应	(129)
10.2 光敏电阻	(130)
10.3 光电池	(133)
10.4 光敏二极管和光敏三极管	(136)
10.5 光电传感器的类型及应用	(142)
10.6 光纤传感器	(145)
第 11 章 智能传感技术	(157)
11.1 智能传感器	(158)
11.2 网络传感器	(162)
第 12 章 信号变换与抗干扰技术	(166)
12.1 传感器的阻抗匹配	(166)
12.2 信号处理电路	(168)
12.3 抗干扰技术	(175)
附录 例题分析及习题	(188)
部分习题参考答案	(215)
参考文献	(216)

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,尤其是工业生产自动化、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,并建立了一套完整、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、工艺加工等三个要素结合的产物。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、转换元件和测量电路三部分组成,有时还需要加辅助电源。其

组成可用方框图表示,见图 1-1。

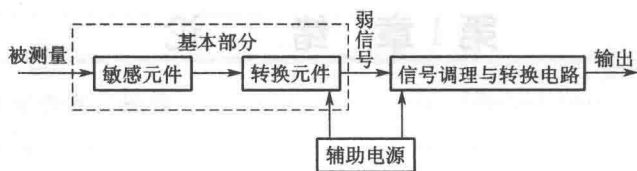


图 1-1 传感器的组成方框图

(1) 敏感元件(预变换器)

在完成非电量到电量的变换时,并非所有的非电量均能利用现有手段直接变换为电量,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,又称为预变换器。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。信号调理与转换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较为普遍。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,它有几个发展趋势。

(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,就是利用半导体技术将敏感元件、信息处理或转换单元以及电源等部件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对一维、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,表明其向智能化方向前进了一大步。

(5)传感器的网络化

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,改变了人与人之间的沟通方式,那么无线传感器网络则是将逻辑上的信息世界与客观上的物理世界融合在一起,改变了人类与自然界的交互方式。人们可以通过无线传感器网络直接感知客观世界,从而极大地扩展现有网络的功能和人类认识世界的能力。

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当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

在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:

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

式中 Y ——输出量;

X ——输入量;

a_0 ——零位输出;

a_1 ——传感器的灵敏度,常用 K 表示;

$a_2, a_3, \cdots, a_n$ ——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($a_2 X^2, \cdots, a_n X^n$)叠加而成的,一般可分为以下四种典型情况。

①理想线性[见图 2-1(a)]:

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

②具有 X 奇次阶项的非线性[见图 2-1(b)]:

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

③具有 X 偶次阶项的非线性[见图 2-1(c)]:

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

④具有 X 奇、偶次阶项的非线性[见图 2-1(d)]:

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

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 奇次阶项的曲线图 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。

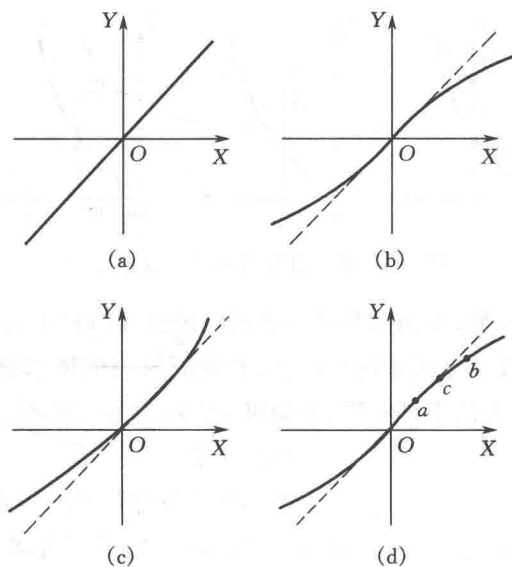


图 2-1 传感器的四种典型静态特性

(a)理想线性 (b)具有 X 奇次项的非线性

(c)具有 X 偶次项的非线性 (d)具有 X 奇、偶次项的非线性

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个。

(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(见图 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 $\Delta Y_{\max}$ ——校准曲线与拟合直线间的最大偏差;

$Y_{F \cdot S}$ ——传感器满量程输出, $Y_{F \cdot S} = Y_{\max} - Y_0$ 。

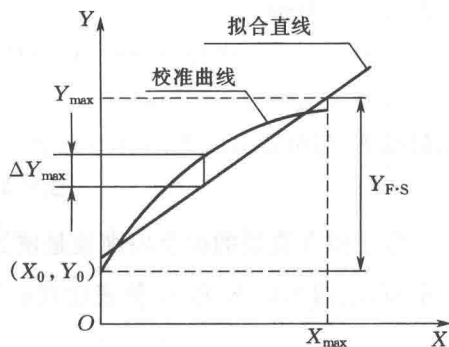


图 2-2 传感器的线性度

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算出来的。因而,基准直线不同,所得线性度就不同,见图 2-3。

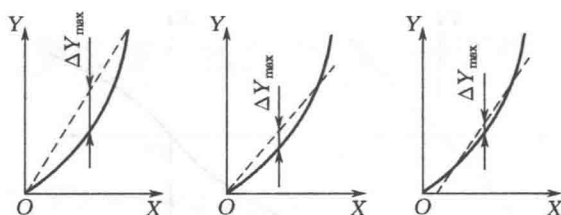


图 2-3 基准直线的不同拟合方法

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。目前,国内外关于拟合直线的计算方法不尽相同,下面仅介绍两种常用的拟合基准直线的方法。

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_0b_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 ——输出量;

X ——输入量;

a_0 —— Y 轴上截距;

K ——直线 a_0b_0 的斜率。

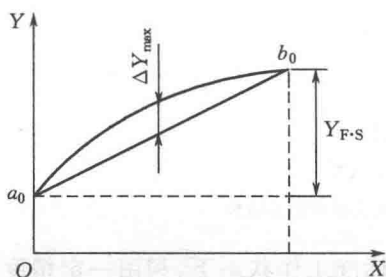


图 2-4 端基线性度拟合直线

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,拟合精度最高。其计算方法如下。

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的拟合原则就是使 $\sum_{i=1}^n \Delta_i^2$ 为最小值,亦即使 $\sum_{i=1}^n \Delta_i^2$ 对 K 和 a_0 的一阶偏导数等于零,从而求出 K 和 a_0 的表达式:

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

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

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 ——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,零点偏移也消除了,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就是静态灵敏度 K ,其计算式为

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

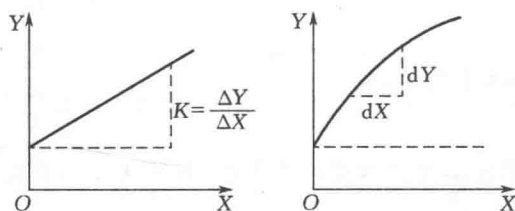


图 2-5 传感器灵敏度的定义

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(见图 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,即

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

或

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

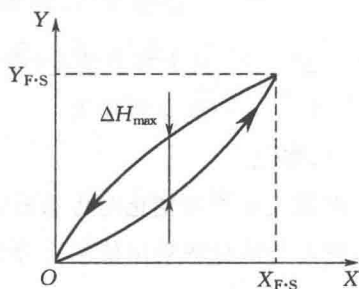


图 2-6 传感器的迟滞特性

式中 $\Delta H_{\max}$ ——输出值在正、反行程间的最大偏差；

δ_h ——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。

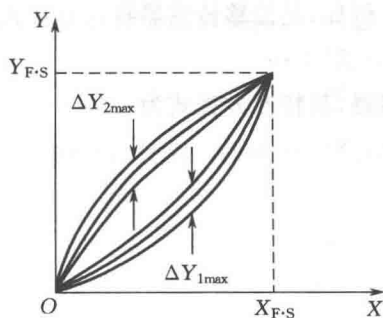


图 2-7 传感器的重复性

(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(见图 2-7)。其数值用各测量值正、反行程标准偏差最大值的 2 倍或 3 倍与满量程输出值的百分比表示，即

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

式中 δ_k ——传感器的重复性；

σ ——传感器的标准偏差；

$Y_{F.S}$ ——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 ——测量值；

$\bar{Y}$ ——测量值的算术平均值；

n ——测量次数。

重复性所反映的是测量结果偶然误差的大小，并不表示与真值之间的差别。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，其输出值偏离零值(或原指示值)的现象，即为零点漂移(简称零漂)。

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

式中 ΔY_0 ——最大零点偏差(或相应偏差)；

$Y_{F.S}$ ——满量程输出。

(6) 温漂

温漂表示温度变化时传感器输出值偏离原指示值的程度。一般以温度变化 1°C 输出最大偏差与满量程输出值的百分比来表示。

$$\text{温漂} = \frac{\Delta_{\max}}{Y_{F.S} \Delta T} \times 100\% \quad (2-18)$$

式中 $\Delta_{\max}$ ——输出最大偏差；

ΔT ——温度变化范围；

$Y_{F.S}$ ——满量程输出。

(7) 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(方和根法用得较多)如下:

$$\delta = \sqrt{\delta_L^2 + \delta_h^2 + \delta_k^2} \quad (2-19)$$

或

$$\delta = \delta_L + \delta_h + \delta_k \quad (2-20)$$

当一个传感器或传感器系统设计完成并实际定标后,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

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

相对百分误差去掉“%”后的值称为仪表的精度。它划分成若干等级,如 0.1 级、0.2 级、0.5 级、1.0 级等。例中的温度传感器的精度即为 0.5 级。

(8) 阈值、分辨力

当一个传感器的输入量值从零开始缓慢地增加时,只有在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。

当一个传感器的输入量值从非零的任意值缓慢增加时,只有在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。有时用该值相对于满量程输入值的百分比表示,则称为分辨率。

阈值表征传感器最小可测出的输入量值,即零位附近的分辨率。

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,表征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是不够的,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这两种标准输入来考察传感器的响应特性。传感器的动态特性分析和动态标定均以这两种标准输入状态为依据。对于任一传感器,只要输入量是时间的函数,则其输出量也应是时间的函数。

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,用数学中的逻辑推理和运算方法来研究传感器的动态响应。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,就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。在理想情况下,阶跃输入信号的大小对过渡过程的曲线形状是没有影响的,但在实际进行过渡过程实验时,应保持阶跃输入信号在传感器特性曲线的线性范围内。图 2-8 所示为单位阶跃作用下过渡过程曲线。

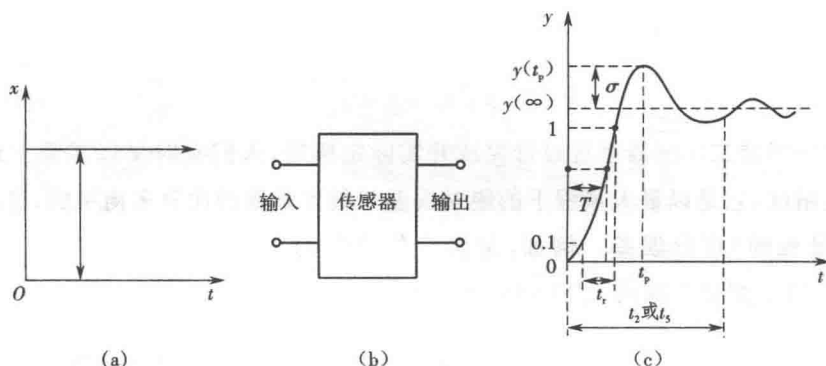


图 2-8 单位阶跃作用于传感器的动态特性

(a) 输入信号 (b) 传感器的简图 (c) 特性曲线

通常用下述四个指标来表示传感器的动态性能。

- ① 时间常数 T , 即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 , 即输出值从稳态值 $y(\infty)$ 的 10% 上升到 90% 所需的时间。
- ③ 响应时间 t_5, t_2 , 即输出值分别达到稳态值 $y(\infty)$ 的 95%、98% 所需的时间。
- ④ 超调量。在过渡过程中, 如果输出量的最大值 $y(t_p) < y(\infty)$, 则响应无超调; 如果 $y(t_p) > y(\infty)$, 则有超调, 且

$$\sigma = \frac{y(t_p) - y(\infty)}{y(\infty)} \times 100\% \quad (2-21)$$

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。在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 , 指对数幅频特性曲线上幅值衰减 3 dB 时所对应的频率范围。
- ② 工作频带 ω_{g1} 或 ω_{g2} , 指幅值误差为 $\pm 5\%$ 或 $\pm 10\%$ 时所对应的频率范围。

一个传感器的频域性能指标可按上述方面来标定, 至于具体为多少, 可视其应用需要来定。

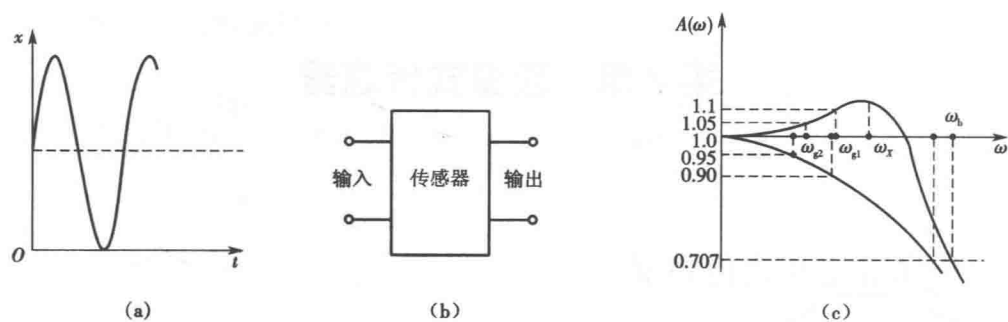


图 2-9 正弦压力作用于传感器的频域特性

(a)输入信号 (b)传感器的简图 (c)特性曲线