

# 绪 论

## 一、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也日益显著。在工业生产自动化、能源、交通、灾害预测、安全防卫、环境保护、医疗卫生等方面所开发的各种传感器，不仅能代替人的感官功能，并且在检测人的感官所不能感受的参数方面创造了十分有利的条件。工业生产中，它起到了工业耳目的作用。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、磷含量分析等方面就需要多种多样的传感器为操作人员提供可靠的数据。此外，用于工厂自动化柔性制造系统（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，计算机控制就难以实现。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。

## 二、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。

过去人们习惯地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，目前传感器技术已形成了一个新型科学技术领域，建立了一个完整的独立科学体系——传感器工程学。

传感器技术是利用各种功能材料实现信息检测的一门应用技术。它是检测（传感）原理、材料科学、工艺加工等三个要素的最佳结合。

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，传感技术还包括如何更好地把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。

## 三、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。其组成可用方块图表示，见图 1。

敏感元件（预变换器）在完成非电量到电量的变换时，并非所有的非电量都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。

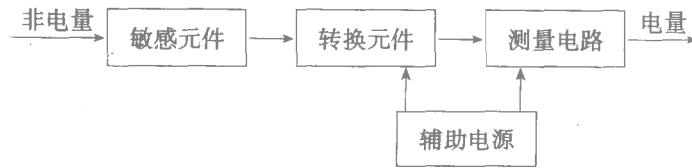


图 1 传感器的组成方块图

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，例如压电晶体、热电偶等。

需要指出的是并非所有的传感器都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。

测量电路：将转换元件输出的电量变成便于显示、记录、控制和处理的有电信号的电路称为测量电路。测量电路的类型视转换元件的分类而定，经常采用的有电桥电路及其他特殊电路如高阻抗输入电路、脉冲调宽电路、振荡回路等。

#### 四、传感器的分类

传感器的种类很多，目前尚没有统一的分类方法，一般常采用的分类方法有如下几种。

##### 1. 按输入量分类

如输入量分别为温度、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。这种分类方法给使用者提供了方便，容易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，相应的有电位器式、应变式传感器根据变磁阻的原理相应的有电感式、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的有半导体力敏、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。物性型传感器则是利用某些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。

#### 五、传感器的发展趋向

近年来，由于半导体技术已进入了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，它具有以下几个特点。

##### 1. 传感器的固态化

物性型传感器亦称固态传感器，目前发展很快。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，使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分利用半导体技术制作在同一芯片上，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，传感器的应用不仅限于对某一点物理量的测量，而开始研究从一维、二维到三维空间的测量问题。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。传感器向智能化方向前进了一大步。

## 第 1 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。

### § 1-1 传感器的静态特性

传感器在被测量的各个值处于稳定状态时,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

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

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(1-1)式可见,如果  $a_0 = 0$ ,表示静态特性通过原点。此时静态特性是由线性项( $a_1 X$ )和非线性项( $a_2 X^2, \cdots, a_n X^n$ )叠加而成,一般可分为以下 4 种典型情况。

理想线性(图 1-1(a))

$$Y = a_1 X \quad (1-2)$$

具有  $X$  奇次项的非线性(图 1-1(b))

$$Y = a_1 X + a_3 X^3 + a_5 X^5 + \cdots \quad (1-3)$$

具有  $X$  偶次项的非线性(图 1-1(c))

$$Y = a_1 X + a_2 X^2 + a_4 X^4 + \cdots \quad (1-4)$$

具有  $X$  奇、偶次项的非线性(图 1-1(d))

$$Y = a_1 X + a_2 X^2 + a_3 X^3 + a_4 X^4 + \cdots \quad (1-5)$$

由此可见,除图 1-1(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 1-1(b)),在原点附近一定范围内基本上是线性特性。

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 1-1(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。

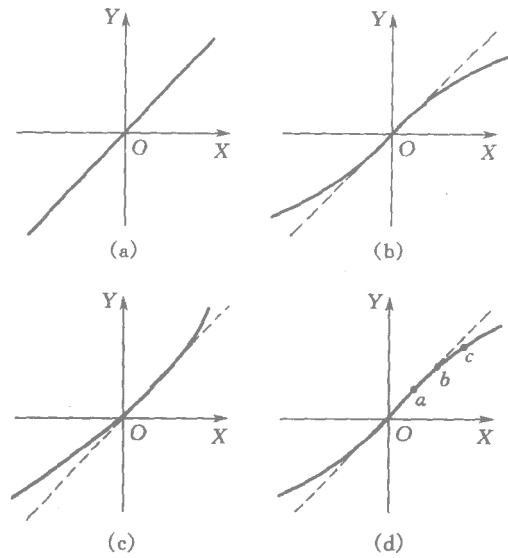


图 1-1 传感器的 4 种典型静态特性

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点。

一、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·S) 输出值的百分比称为线性度 (见图 1-2)。

用  $\delta_L$  代表线性度 则

$$\delta_L = \pm \frac{\Delta Y_{\max}}{Y_{F.S}} \times 100\% \quad (1-6)$$

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

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

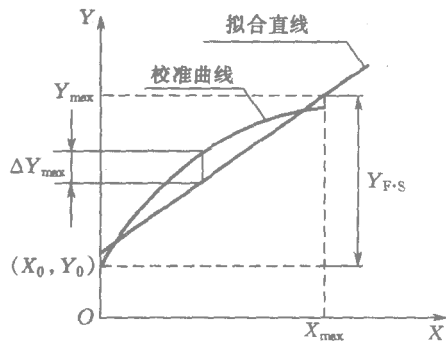


图 1-2 传感器的线性度

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 所得线性度也不同 (见图 1-3)。

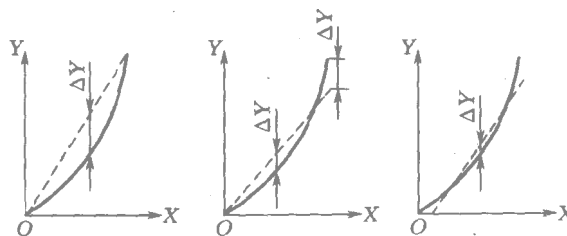


图 1-3 基准直线的不同拟合方法

应当指出,对同一传感器,在相同条件下做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方法。

### (一) 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 1-4)。其方程式为

$$Y = a_0 + KX \quad (1-7)$$

式中  $Y$ ——输出量;

$X$ ——输入量;

$a_0$ —— $Y$ 轴上截距;

$K$ ——直线  $a_0 b_0$  的斜率。

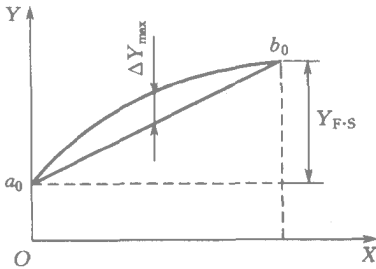


图 1-4 端基线性度拟合直线

由此得到端基法拟合直线方程,按 1-6)式可算出端基线性度。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。

### (二) 最小二乘法

用最小二乘法原则拟合直线,可使拟合精度最高。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

$$\Delta_i = Y_i - (a_0 + KX_i) \quad (1-8)$$

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

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

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

式中  $n$ ——校准点数。

由此得到最佳拟合直线方程,由 1-6)式可算得最小二乘法线性度。

通常采用差动测量方法来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

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

另一个与之完全相同的位移传感器,但是它感受相反方向位移,则特性方程式为

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

在差动输出情况下，其特性方程式可写成

$$\Delta Y = Y_1 - Y_2 = 2(a_1 X + a_3 X^3 + a_5 X^5 + \dots) \quad (1-11)$$

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。因此差动式传感器已得到广泛应用。

## 二、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 1-5 可知，线性传感器校准曲线的斜率就是静态灵敏度  $K$ 。其计算方法为

$$K = \frac{\text{输出变化量}}{\text{输入变化量}} = \frac{\Delta Y}{\Delta X} \quad (1-12)$$

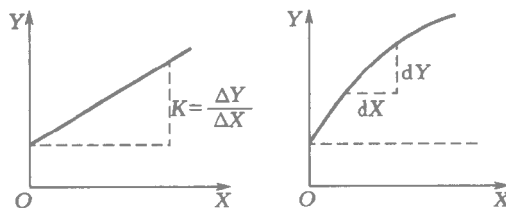


图 1-5 传感器灵敏度的定义

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。

## 三、精确度（精度）

说明精确度的指标有三个 精密度、正确度和精确度。

### （一）精密度 $\delta$

它说明测量结果的分散性。即对某一稳定的对象（被测量）由同一测量者用同一传感器和测量仪表在相当短的时间内连续重复测量多次（等精度测量），其测量结果的分散程度。 $\delta$  愈小则说明测量越精密（对应随机误差）

### （二）正确度 $\epsilon$

它说明测量结果偏离真值大小的程度，即示值有规则偏离真值的程度。换句话说，这是指所测值与真值的符合程度（对应系统误差）

### （三）精确度 $\tau$

它含有精密度与正确度两者之和的意思，即测量的综合优良程度。在最简单的场合下可取两者的代数和 即  $\tau = \delta + \epsilon$ 。通常精确度是以测量误差的相对值来表示的。

在工程应用中 为了简单表示测量结果的可靠程度 引入一个精确度等级概念 用  $A$  来表示。传感器与测量仪表精确度等级  $A$  以一系列标准百分数值（0.001, 0.005, 0.02, 0.05, …, 1.5, 2.5, 4.0, …）进行分档。这个数值是传感器和测量仪表在规定条件下，其允许的最大绝对误差值相对于其测量范围的百分数。它可以用下式表示

$$A = \frac{\Delta A}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-13)$$

式中  $A$ ——传感器的精度；

$\Delta A$ ——测量范围内允许的最大绝对误差；

$Y_{F.S}$ ——满量程输出。

传感器设计和出厂检验时，其精度等级代表的误差指传感器测量的最大允许误差。

#### 四、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 1-6）。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。

$$\delta_H = \pm \frac{\Delta H_{\max}}{Y_{F.S}} \times 100\% \quad (1-14)$$

$$\text{或} \quad \delta_H = \pm \frac{\Delta H_{\max}}{2Y_{F.S}} \times 100\% \quad (1-15)$$

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

$\delta_H$ ——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。

#### 五、重复性

重复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 1-7）。在数值上用各测量值正、反行程标准偏差最大值的两倍或三倍与满量程  $Y_{F.S}$  的百分比表示。即

$$\delta_k = \pm \frac{2\sigma \sim 3\sigma}{Y_{F.S}} \times 100\% \quad (1-16)$$

式中  $\delta_k$ ——重复性；

$\sigma$ ——标准偏差。

当用贝塞尔公式计算标准偏差  $\sigma$  时则有

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{n-1}} \quad (1-17)$$

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，而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。

#### 六、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）即为零点漂移。

$$\text{零漂} = \frac{\Delta Y_0}{Y_{F.S}} \times 100\% \quad (1-18)$$

式中  $\Delta Y_0$ ——最大零点偏差（或相应偏差）

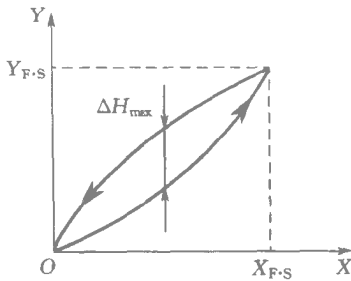


图 1-6 传感器的迟滞特性

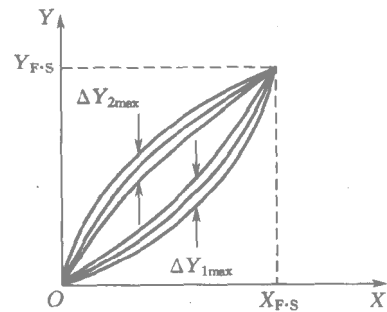


图 1-7 传感器的重复性

$Y_{F.S}$ ——满量程输出。

### 七、温漂

温漂表示温度变化时，传感器输出值的偏离程度。一般以温度变化  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  输出最大偏差与满量程的百分比来表示。

$$\text{温漂} = \frac{\Delta_{\max}}{Y_{F.S}\Delta T} \times 100\% \quad (1-19)$$

式中  $\Delta_{\max}$ ——输出最大偏差；

$\Delta T$ ——温度变化范围；

$Y_{F.S}$ ——满量程输出。

## § 1-2 传感器的动态特性

动态特性是指传感器对于随时间变化的输入量的响应特性。传感器所检测的非电量信号大多数是时间的函数。为了使传感器输出信号和输入信号随时间的变化曲线一致或相近，我们要求传感器不仅应有良好的静态特性，而且还应具有有良好的动态特性。传感器的动态特性是传感器的输出值能够真实地再现变化着的输入量能力的反映。

### 一、动态特性的一般数学模型

在研究传感器动态特性时，根据传感器的运动规律，其动态输入和动态输出的关系可用微分方程式来描述。

对于任何一个线性系统，都可以用下列常系数线性微分方程表示

$$\begin{aligned} a_n \frac{d^n Y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} Y(t)}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dY(t)}{dt} + a_0 Y(t) \\ = b_m \frac{d^m X(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} X(t)}{dt^{m-1}} + \cdots + b_1 \frac{dX(t)}{dt} + b_0 X(t) \end{aligned} \quad (1-20)$$

式中  $Y(t)$ ——输出量；

$X(t)$ ——输入量；

$t$ ——时间；

$a_0, a_1, \cdots, a_n$  及  $b_0, b_1, \cdots, b_m$ ——常数。

如果用算子  $D$  表示  $d/dt$  时，(1-20) 式可以写为

$$(a_n D^n + a_{n-1} D^{n-1} + \cdots + a_1 D + a_0) Y(t) = (b_m D^m + b_{m-1} D^{m-1} + \cdots + b_1 D + b_0) X(t) \quad (1-21)$$

利用拉氏变换由 (1-20) 式可得到  $Y(S)$  和  $X(S)$  的方程式

$$(a_n S^n + a_{n-1} S^{n-1} + \cdots + a_1 S + a_0) Y(S) = (b_m S^m + b_{m-1} S^{m-1} + \cdots + b_1 S + b_0) X(S) \quad (1-22)$$

只要对 (1-20) 式的微分方程求解，便可得到动态响应及动态性能指标。

绝大多数传感器输出与输入的关系均可用零阶、一阶或二阶微分方程来描述。据此可以将传感器分为零阶传感器、一阶传感器和二阶传感器。现将其数学模型分别叙述如下。

### (一) 零阶传感器的数学模型

对照 (1-20) 式零阶传感器的系数只有  $a_0, b_0$ ，于是微分方程为

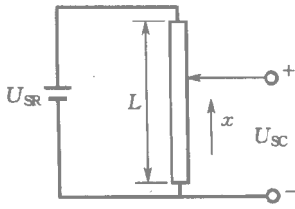


图 1-8 线性电位器

$$a_0 Y(t) = b_0 X(t) \quad (1-23)$$

$$\text{或} \quad Y(t) = \frac{b_0}{a_0} X(t) = KX(t)$$

式中  $K$ ——静态灵敏度。

例如 图 1-8 所示线性电位器就是一个零阶传感器。

设电位器的阻值沿长度  $L$  是线性分布的, 则输出电压  $U_{SC}$  和电刷位移之间的关系为

$$U_{SC} = \frac{U_{SR}}{L} x = Kx \quad (1-24)$$

式中  $U_{SC}$ ——输出电压 (V);  
 $U_{SR}$ ——输入电压 (V);  
 $x$ ——电刷位移 (m)。

由 1-24 式可知 输出电压  $U_{SC}$  与位移  $x$  成正比, 它对任何频率输入均无时间滞后。实际上由于存在寄生电容和电感 高频时会引起少量失真 影响动态性能。

## (二) 一阶传感器的数学模型

对照 (1-20 式, 一阶传感器的微分方程系数除  $a_0$ 、 $a_1$ 、 $b_0$  外 其他系数均为零 因此可写成

$$a_1 \frac{dY(t)}{dt} + a_0 Y(t) = b_0 X(t) \quad (1-25)$$

用算子  $D$  表示则可写成  $(\tau D + 1) Y(t) = KX(t)$

式中  $K$ ——静态灵敏度,  $K = \frac{b_0}{a_0}$ ;

$\tau$ ——时间常数,  $\tau = \frac{a_1}{a_0}$ 。

如果传感器中含有单个储能元件, 则在微分方程中出现  $Y$  的一阶导数, 便可用一阶微分方程式表示。

如图 1-9 所示, 使用不带保护套管的热电偶插入恒温水浴中进行温度测量。

设  $m_1$ ——热电偶质量 (kg);

$C_1$ ——热电偶比热 (J/(kg·K));

$T_1$ ——热接点温度 (K)

$T_0$ ——被测介质温度 (K)

$R_1$ ——介质与热电偶之间热阻 (K/J)。

根据能量守恒定律可列出如下方程组

$$\begin{cases} m_1 C_1 \frac{dT_1}{dt} = q_{01} \\ q_{01} = \frac{T_0 - T_1}{R_1} \end{cases} \quad (1-26)$$

式中  $q_{01}$ ——介质传给热电偶的热量 (忽略热电偶本身热量损耗) (J)。

将 (1-26) 式整理后得

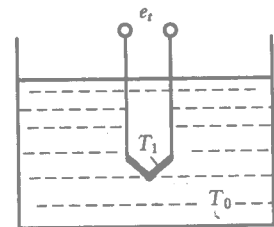


图 1-9 一阶测温传感器

$$R_1 m_1 C_1 \frac{dT_1}{dt} + T_1 = T_0$$

令  $\tau_1 = R_1 m_1 C_1$ 。  $\tau_1$  称为时间常数。则上式可写成

$$\tau_1 \frac{dT_1}{dt} + T_1 = T_0 \quad (1-27)$$

(1-27) 式是一阶线性微分方程。如果已知  $T_0$  的变化规律，求出微分方程 (1-27) 式的解，就可以得到热电偶对介质温度的时间响应。

### (三) 二阶传感器的数学模型

对照 (1-20) 式，二阶传感器的微分方程系数除  $a_2$ 、 $a_1$ 、 $a_0$  和  $b_0$  外，其他系数均为零，因此可写成

$$a_2 \frac{d^2 Y(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dY(t)}{dt} + a_0 Y(t) = b_0 X(t) \quad (1-28)$$

用算子  $D$  表示，则可写成

$$\left( \frac{D^2}{\omega_0^2} + \frac{2\xi D}{\omega_0} + 1 \right) Y(t) = KX(t) \quad (1-29)$$

式中  $K$ ——静态灵敏度  $K = \frac{b_0}{a_0}$ ；

$\omega_0$ ——无阻尼系统固有频率  $\omega_0 = \sqrt{\frac{a_0}{a_2}}$ ；

$\xi$ ——阻尼比  $\xi = \frac{a_1}{2\sqrt{a_0 a_2}}$ 。

上述三个量  $K$ 、 $\omega_0$ 、 $\xi$  为二阶传感器动态特性的特征量。

图 1-10 所示为带保护套管式热电偶插入恒温水浴中的测温系统。

设  $T_0$ ——介质温度 (K)；

$T_1$ ——热接点温度 (K)；

$T_2$ ——保护套管温度 (K)；

$m_1 C_1$ ——热电偶热容量 (J/K)；

$m_2 C_2$ ——套管热容量 (J/K)；

$R_1$ ——套管与热电偶间的热阻 (K/J)；

$R_2$ ——被测介质与套管间的热阻 (K/J)。

根据热力学能量守恒定律列出方程

$$\left. \begin{aligned} m_2 C_2 \frac{dT_2}{dt} &= q_{02} - q_{01} \\ q_{02} &= \frac{T_0 - T_2}{R_2} \\ q_{01} &= \frac{T_2 - T_1}{R_1} \end{aligned} \right\} \quad (1-30)$$

式中  $q_{02}$ ——介质传给套管的热量 (J)；

$q_{01}$ ——套管传给热电偶的热量 (J)。

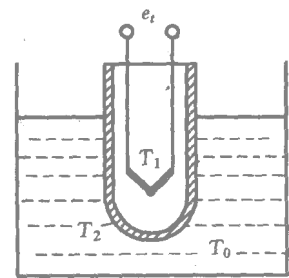


图 1-10 二阶测温传感器

由于  $R_1 \gg R_2$  所以  $q_{01}$  可以忽略。(1-30)式经整理后得

$$R_2 m_2 C_2 \frac{dT_2}{dt} + T_2 = T_0$$

令  $\tau_2 = R_2 m_2 C_2$  则得

$$\tau_2 \frac{dT_2}{dt} + T_2 = T_0 \quad (1-31)$$

同理,令  $\tau_1 = R_1 m_1 C_1$  则得

$$\tau_1 \frac{dT_1}{dt} + T_1 = T_2 \quad (1-32)$$

联立 (1-31) 式和 (1-32) 式 消去中间变量  $T_2$  便得到此测量系统的微分方程式

$$\tau_1 \tau_2 \frac{d^2 T_1}{dt^2} + (\tau_1 + \tau_2) \frac{dT_1}{dt} + T_1 = T_0 \quad (1-33)$$

$$\text{令 } \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{\tau_1 \tau_2}}$$

$$\xi = \frac{\tau_1 + \tau_2}{2\sqrt{\tau_1 \tau_2}}$$

将  $\omega_0$  和  $\xi$  代入 (1-33) 式 则得

$$\frac{1}{\omega_0^2} \cdot \frac{d^2 T_1}{dt^2} + \frac{2\xi}{\omega_0} \cdot \frac{dT_1}{dt} + T_1 = T_0 \quad (1-34)$$

由 (1-34) 式可知带保护套管的热电偶是一个典型的二阶传感器。

## 二、传感器的动态响应及其动态特性指标

传感器的动态响应就是传感器对输入的动态信号 周期信号、瞬变信号、随机信号 所产生的输出。因此传感器的动态响应与输入类型有关。对系统响应测试时,常采用正弦和阶跃两种输入信号。这是由于任何周期函数都可以用傅里叶级数分解为各次谐波分量,并把它近似地表示为这些正弦量之和。而阶跃信号则是最基本的瞬变信号。通常描述传感器动态性能指标的方法是给传感器输入一个阶跃信号,并给定初始条件。求出传感器微分方程的特解,以此作为动态特性指标的描述和表示法。

下面分析传感器在阶跃输入下的响应情况。

$$\text{单位阶跃输入 } \begin{cases} X=0 & t < 0 \\ X=1 & t \geq 0 \end{cases}$$

### (一) 零阶传感器的响应

如图 1-11 所示,阶跃响应和输入成正比。

### (二) 一阶传感器的响应

$$Y(t) = 1 - e^{-t/\tau} \quad (1-35)$$

(1-35) 式所对应的曲线如图 1-12 所示,由图可知随着时间的推移,  $Y(t)$  越来越接近 1。当  $t = \tau$  时,  $Y(t) = 0.63$  时间常数  $\tau$  是决定一阶传感器响应速度的重要参数。

### (三) 二阶传感器的响应

按阻尼比  $\xi$  不同,阶跃响应可分为三种情况。

1. 欠阻尼  $\xi < 1$

$$Y(t) = -\frac{e^{-\xi\omega_0 t}}{\sqrt{1-\xi^2}} K \sin(\sqrt{1-\xi^2}\omega_0 t + \psi) + K \quad (1-36)$$

式中  $\psi = \arcsin \sqrt{1-\xi^2}$

2. 过阻尼  $\xi > 1$

$$Y(t) = -\frac{\xi + \sqrt{\xi^2 - 1}}{2\sqrt{\xi^2 - 1}} K e^{(-\xi + \sqrt{\xi^2 - 1})\omega_0 t} + \frac{\xi - \sqrt{\xi^2 - 1}}{2\sqrt{\xi^2 - 1}} K e^{(-\xi - \sqrt{\xi^2 - 1})\omega_0 t} + K \quad (1-37)$$

3. 临界阻尼  $\xi = 1$

$$Y(t) = -(1 + \omega_0 t) K e^{-\omega_0 t} + K \quad (1-38)$$

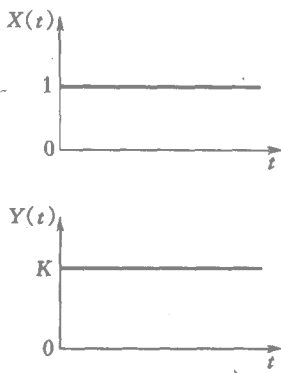


图 1-11 零阶传感器的单位阶跃响应

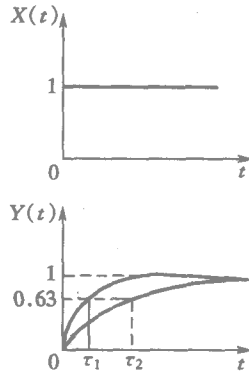


图 1-12 一阶传感器的单位阶跃响应

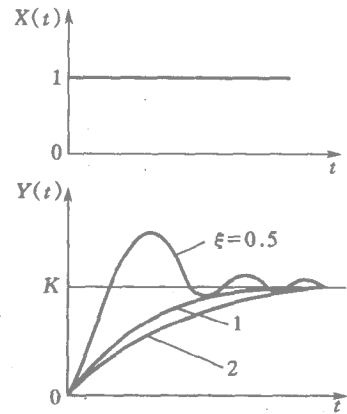


图 1-13 二阶传感器的单位阶跃响应

以上三种阶跃响应曲线示于图 1-13 中。由图可知，只有  $\xi < 1$  时，阶跃响应才出现过冲，即超过了稳态值。(1-36)式表明欠阻尼情况下的振荡频率为  $\omega_d = \omega_0 \sqrt{1-\xi^2}$ ， $\omega_d$  为存在阻尼时的固有频率。在实际应用中，为了兼顾有短的上升时间和小的过冲量，阻尼比  $\xi$  一般取 0.7 左右。

二阶传感器阶跃响应的典型性能指标可由图 1-14 表示。

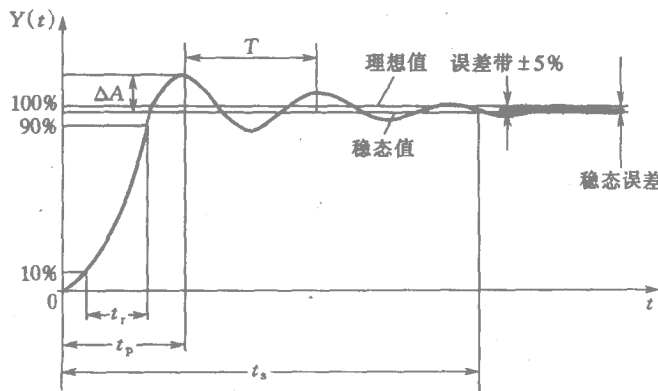


图 1-14 二阶传感器表示动态性能指标的阶跃响应曲线

上升时间  $t_r$  输出由稳态值的 10% 变化到稳态值的 90% 所用的时间。二阶传感器系统中  $t_r$  随  $\xi$  的增大而增大 当  $\xi=0.7$  时,  $t_r = \frac{2}{\omega_0}$ 。

稳定时间  $t_s$  : 指系统从阶跃输入开始到系统稳定在稳态值的给定百分比时所需的最小时间。对稳态值给定百分比为  $\pm 5\%$  的二阶传感器系统 在  $\xi=0.7$  时  $t_s$  最小 ( $t_s = 3/\omega_0$ )。

$t_r$  和  $t_s$  都是反映系统响应速度的参数。

峰值时间  $t_p$  : 阶跃响应曲线达到第一个峰值所需时间。

超调量  $\sigma\%$  : 通常用过渡过程中超过稳态值的最大值  $\Delta A$  (过冲) 与稳态值之比的百分数表示。它与  $\xi$  有关,  $\xi$  愈大,  $\sigma\%$  愈小 其关系可用下式表示

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\pi}{\ln \frac{\sigma}{100}}\right)^2 + 1}} \quad (1-39)$$

通常二阶传感器的动态参数用实验方法测定 即输入阶跃信号 记录传感器的响应曲线, 由此测出过冲量  $\Delta A$ 。利用 1-39 式可算出传感器阻尼比  $\xi$ , 测出衰减振荡周期  $T$  即可由  $T_0 = T\sqrt{1-\xi^2}$  算出传感器的固有周期或固有频率。上升时间  $t_r$ 、稳定时间  $t_s$  及峰值时间  $t_p$  均可在响应曲线上求得。

由上可知, 频域分析和时域分析均可用以描述传感器的动态特性。实际上, 它们之间有一定内在联系。实践和理论分析表明, 传感器的频率上限  $f_n$  和上升时间  $t_r$  的乘积是一个常数, 即  $f_n \cdot t_r = 0.35 \sim 0.45$ 。当超调量  $\sigma\% < 5\%$  时  $f_n \cdot t_r$  用 0.35 计算比较准确 当  $\sigma\% > 5\%$  时,  $f_n \cdot t_r$  用 0.45 计算比较合适。

## 思考题与习题

1-1 何为传感器静态特性? 静态特性主要技术指标有哪些?

1-2 何为传感器动态特性? 动态特性主要技术指标有哪些?

1-3 什么是传感器的差动测量方法? 有何特点?

1-4 检定一台 1.5 级刻度 0~100 Pa 压力传感器 现发现 50 Pa 处误差最大为 1.4 Pa 问这台压力传感器是否合格。

1-5 已知某传感器静态特性方程为  $y = e^x$  试分别用切线法、端基法、最小二乘法 在  $0 < x < 1$  范围内拟合刻度直线方程, 并求出相应的线性度。

1-6 某玻璃水银温度计微分方程式为

$$4 \frac{dQ_0}{dt} + 2Q_0 = 2 \times 10^{-3} Q_i$$

其中,  $Q_0$  (水银柱高度 m);  $Q_i$  (被测温度  $^{\circ}\text{C}$ )。试确定该温度计的时间常数和静态灵敏度系数。

1-7 某压电式加速度计动态特性可用下述微分方程描述

$$\frac{dq^2}{dt^2} + 3.0 \times 10^3 \frac{dq}{dt} + 2.25 \times 10^{10} q = 11.0 \times 10^{10} a$$

式中,  $q$  为输出电荷 (pC);  $a$  为输入加速度 ( $\text{m/s}^2$ )。试确定该测量装置的固有振荡频率  $\omega_0$ 、阻

尼系数  $\xi$ 、静态灵敏度系数  $K$  的值。

1-8 一台精度等级为 0.5 级、量程范围  $600 \sim 1200$   $^{\circ}\text{C}$  的温度传感器，它最大允许绝对误差是多少？检验时某点最大绝对误差是  $4$   $^{\circ}\text{C}$  问此表是否合格。

## 第 2 章 电阻式传感器

### § 2-1 电阻应变式传感器

#### 一、金属应变片式传感器

金属应变片式传感器的核心元件是金属应变片，它可将试件上的应变变化转换成电阻变化。

应用时将应变片用黏合剂牢固地粘贴在被测试件表面上。当试件受力变形时，应变片的敏感栅也随同变形，引起应变片电阻值变化，通过测量电路将其转换为电压或电流信号输出。

应变式传感器已成为目前非电量电测技术中非常重要的检测手段，广泛地应用于工程测量和科学实验中。它具有以下几个特点。

精度高，测量范围广。对测力传感器而言，量程从零点几 N 至几百 kN，精度可达  $0.05\%F \cdot S$  ( $F \cdot S$  表示满量程) 对测压传感器 量程从几十 Pa 至  $10^{11}$  Pa 精度为  $0.1\%F \cdot S$ 。应变测量范围一般可由数  $\mu\epsilon$  微应变 至数千  $\mu\epsilon$  ( $1 \mu\epsilon$  相当于长度为 1 m 的试件 其变形为  $1 \mu\text{m}$  时的相对变形量 即  $1 \mu\epsilon = 1 \times 10^{-6} \epsilon$ )。

频率响应特性较好。一般电阻应变式传感器的响应时间为  $10^{-7}$  s。半导体应变式传感器可达  $10^{-11}$  s。若能在弹性元件设计上采取措施 则应变式传感器可测几十甚至上百 kHz 的动态过程。

结构简单，尺寸小，质量轻。应变片粘贴在被测试件上对其工作状态和应力分布的影响很小。同时使用维修方便。

可在高低温、高速、高压、强烈振动、强磁场及核辐射和化学腐蚀等恶劣条件下正常工作。

易于实现小型化、固态化。随着大规模集成电路工艺的发展，目前有的已将测量电路甚至 A/D 转换器与传感器组成一个整体。传感器可直接接入计算机进行数据处理。

⑥价格低廉 品种多样 便于选择。

但是应变式传感器也存在一定缺点：在大应变状态中具有较明显的非线性，半导体应变式传感器的非线性更为严重；应变式传感器输出信号微弱，故它的抗干扰能力较差，因此信号线需要采取屏蔽措施；应变式传感器测出的只是一点或应变栅范围内的平均应变，不能显示应力场中应力梯度的变化等。

尽管应变式传感器存在上述缺点，但可采取一定补偿措施，因此它仍不失为非电量电测技术中应用最广和最有效的敏感元件。

#### (一) 金属丝式应变片

##### 1. 应变效应

设有一根长度为  $l$ 、截面积为  $S$ 、电阻率为  $\rho$  的金属丝 其电阻  $R$  为

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (2-1)$$

(2-1)式两边取对数得

$$\ln R = \ln \rho + \ln l - \ln S$$

等式两边微分 则得

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dS}{S} \quad (2-2)$$

式中  $\frac{dR}{R}$ ——电阻的相对变化；

$\frac{d\rho}{\rho}$ ——电阻率的相对变化；

$\frac{dl}{l}$ ——金属丝长度相对变化，用  $\epsilon$  表示， $\epsilon = \frac{dl}{l}$  称为金属丝长度方向的应变或轴向应变；

$\frac{dS}{S}$ ——截面积的相对变化，因为  $S = \pi r^2$ ， $r$  为金属丝的半径，则  $dS = 2\pi r dr$ ， $\frac{dS}{S} = 2 \cdot \frac{dr}{r}$ ，

$\frac{dr}{r}$  为金属丝半径的相对变化，即径向应变  $\epsilon_r$ 。

由材料力学知道 在弹性范围内金属丝沿长度方向伸长时 径向 横向 尺寸缩小 反之亦然。即轴向应变  $\epsilon$  与径向应变  $\epsilon_r$  存在下列关系

$$\epsilon_r = -\mu\epsilon \quad (2-3)$$

式中  $\mu$ ——金属材料的泊松比。

根据实验研究结果，金属材料电阻率相对变化与其体积相对变化之间有下列关系

$$\frac{d\rho}{\rho} = C \frac{dV}{V} \quad (2-4)$$

式中  $C$ ——金属材料的某个常数 例如 康铜 一种铜镍合金丝  $C \approx 1$ ；

$V$ ——体积。体积相对变化  $\frac{dV}{V}$  与应变  $\epsilon$ 、 $\epsilon_r$  之间有下列关系

$$V = S \cdot l$$

$$\frac{dV}{V} = \frac{dS}{S} + \frac{dl}{l} = 2\epsilon_r + \epsilon = -2\mu\epsilon + \epsilon = (1-2\mu)\epsilon$$

由此得

$$\frac{d\rho}{\rho} = C \frac{dV}{V} = C(1-2\mu)\epsilon$$

将上述各关系式一并代入(2-2)式得

$$\frac{dR}{R} = C(1-2\mu)\epsilon + \epsilon + 2\mu\epsilon = [(1+2\mu) + C(1-2\mu)] \cdot \epsilon = K_s \cdot \epsilon \quad (2-5)$$

式中  $K_s$  对于一种金属材料在一定应变范围内为一常数。将微分  $dR$ 、 $dl$  改写成增量  $\Delta R$ 、 $\Delta l$  可写成下式

$$\frac{\Delta R}{R} = K_s \frac{\Delta l}{l} = K_s \cdot \epsilon \quad (2-6)$$

即金属丝电阻的相对变化与金属丝的伸长或缩短之间存在比例关系。比例系数  $K_s$  称为金属