

第三节 传感器的特性

传感器的基本特性是指传感器的输出与输入之间的关系，分为静态特性和动态特性。当传感器的输入量为稳定状态的信号或变化极其缓慢的信号（常称为静态信号）时，可用静态参数来描述和表征传感器的静态特性。当传感器的输入量是周期信号、瞬变信号或随机信号（常称为动态信号）时，可用动态参数来描述和表征传感器的动态特性。

理想的传感器应该具有单值的、确定的输出-输入关系，其输出电量无论是在静态量或动态量输入时，都应当不失真地体现输入量的变化。这主要取决于静态特性和动态特性。

一、静态特性

传感器在被测量处于稳定状态时，输出量和输入量之间的关系称为静态特性。对传感器静态特性的基本要求是，输出相对于输入应保持确定的对应关系。

（一）灵敏度

传感器的灵敏度是指在稳定工作状态下输出变化量与输入变化量的比值，即

$$K = \frac{\text{输出变化量}}{\text{输入变化量}} = \frac{\Delta Y}{\Delta X}$$

例如，某位移传感器，当位移变化 1mm 时，输出电压变化 200mV，则其灵敏度为 200mV/mm。

对于线性传感器，其灵敏度就是它的校准曲线的斜率，为一常数。而非线性传感器的灵敏度为一变量，其灵敏度可表示为 $K = dY/dX$ ，也可用某一小区域内的拟合直线的斜率表示。通常希望传感器的灵敏度高，在满量程内是恒定的，即传感器的输入输出特性为直线。

(二) 线性度 (非线性误差)

在实际工作中，为了读数方便，使仪表具有均匀刻度的标尺和便于分析、处理测量结果，常用一条拟合直线近似地代表实际的特性曲线。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输出量的百分比称为线性度，如图 1-4 所示。用 δ_L 代表线性度，则

$$\delta_L = \pm \frac{\Delta Y_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\%$$

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

由此可知，线性度是以拟合直线为基准直线计算出来的，若基准直线不同，则求出的线性度也不同。因此，在谈到线性度或非线性误差时，必须同时说明其所依据的基准直线。

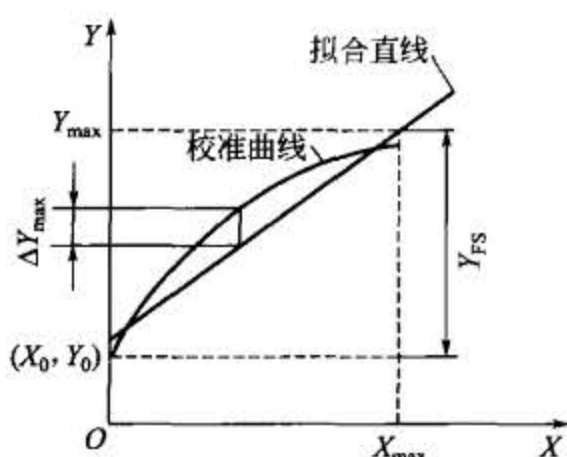


图 1-4 传感器的线性度

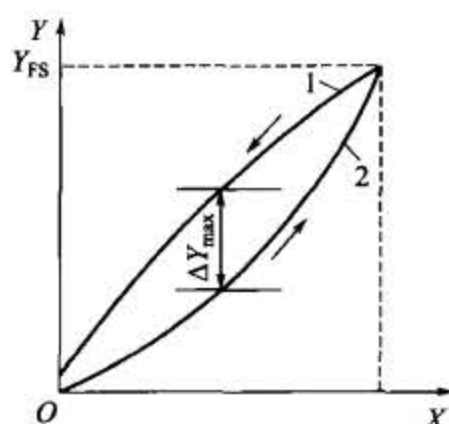


图 1-5 传感器的迟滞特性
1—反向特性；2—正向特性

(三) 分辨力

分辨力是指传感器在规定的测量范围内能够检测出被测量的最小变化量的能力。它往往受噪声的限制，因此通常用相当于噪声电平 (N) 若干倍 (C) 的被测量表示，即

$$M = \frac{CN}{K}$$

式中， M 为最小检测量； C 为系数，一般取 1~5 倍； K 为灵敏度。

实际应用中，可用传感器的输出表示分辨力，常与分辨率通用。一般模拟式仪表的分辨率为最小刻度分格值的一半，数字式仪表的分辨率是输出数据最后一位数字所代表的输入量。

(四) 迟滞

迟滞是指传感器在相同工作条件下做整个测量范围校准时，在同一次校准中，当输入量相同时，其正行程（输入量增大）和反行程（输入量减小）期间的特性曲线不一致的程度，如图 1-5 所示。迟滞大小一般由实验确定，用最大偏差或最大偏差的一半对满量程输出值的百分比表示。

$$\delta_H = \pm \frac{\Delta Y_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\%$$

$\frac{d^n y}{dt^n}$ ——输出量对时间 t 的 n 阶导数；

$\frac{d^m x}{dt^m}$ ——输入量对时间 t 的 m 阶导数。

(二) 传递函数

动态特性的传递函数在线性（或线性化）定常系统中是指初始条件为 0 时，系统输出量的拉氏变换与输入量的拉氏变换之比。

传感器的一般方程式(1-1)，当其初值为 0 时，对式(1-1) 进行拉氏变换，即可得系统传递函数 $H(s)$ 的一般式为

$$H(s) = \frac{y(s)}{x(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \cdots + b_1 s^1 + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_1 s^1 + a_0} \quad (1-2)$$

式中 $y(s)$ ——传感器输出量的拉氏变换式；

$x(s)$ ——传感器输入量的拉氏变换式。

上式中的分母是传感器的特征多项式，由它来决定系统的“阶”数。由上式可知，对一定常系统，当系统微分方程已知，只要把方程式中各阶导数用相应的 s 变量来替换，即可求得传感器的传递函数。图 1-6 所示是由各环节的传递函数求取系统传递函数的一个实例。

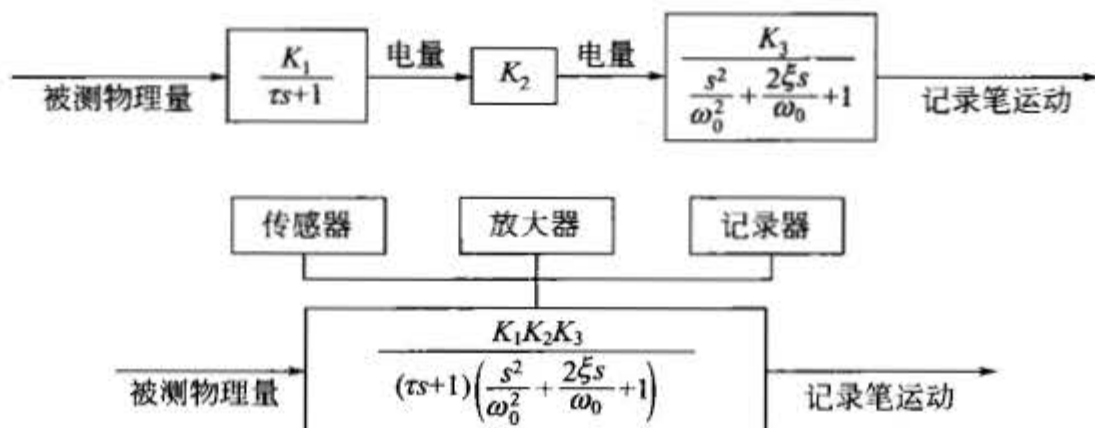


图 1-6 各环节传递函数和系统传递函数

正弦输入下传感器的动态特性（即频率特性）可以由式(1-2) 导出：

$$H(j\omega) = \frac{y(j\omega)}{x(j\omega)} = \frac{b_m (j\omega)^m + b_{m-1} (j\omega)^{m-1} + \cdots + b_1 (j\omega)^1 + b_0}{a_n (j\omega)^n + a_{n-1} (j\omega)^{n-1} + \cdots + a_1 (j\omega)^1 + a_0} \quad (1-3)$$

(三) 传感器的动态特性指标

尽管大部分传感器的动态特性可以近似地用一阶系统或二阶系统来描述，但这仅仅是近似的描述而已。实际的传感器往往比这种简化的数学描述（数学模型）要复杂。因此动态响应特性一般并不能直接给出其微分方程，而是通过实验给出传感器与阶跃响应曲线和幅频特性曲线的某些特征值来表示仪器的动态响应特性。

1. 与阶跃响应有关的指标

图 1-7 所示是两条典型的阶跃响应曲线，一条近似于一阶系统的阶跃响应（点画线），另一条近似于二阶系统的阶跃响应（实线），与这两种阶跃响应有关的动态响应指标如下。

时间常数 τ 。凡是能近似用一阶系统描述的传感器（如测温传感器），一般用阶跃响应曲线由零上升到稳态值的 63.2% 所需的时间作为时间常数。这种方法的缺点是曲线的起点往往难于准确判断。

上升时间 T_r 。通常是指阶跃响应由稳态值的 10% 上升到 90% 的时间，有时也采用其他的百分数，要注意其具体定义。

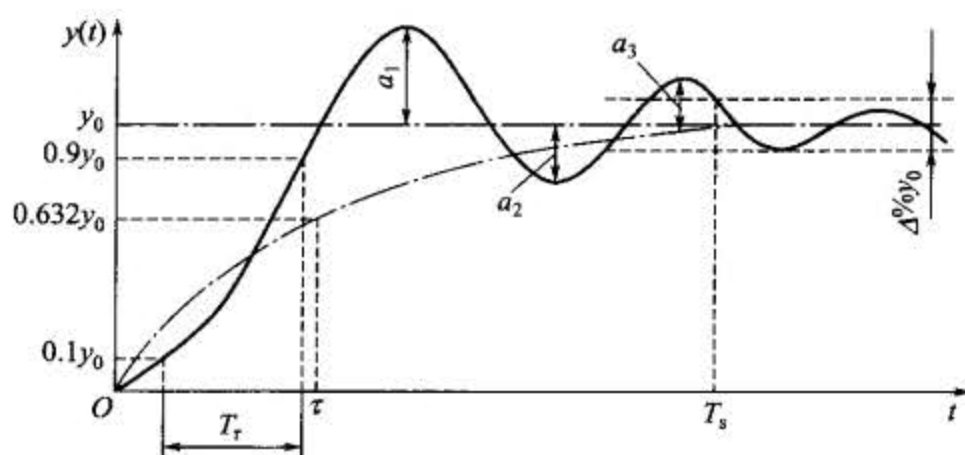


图 1-7 两条典型的阶跃响应曲线

建立时间 T_s 。它表示传感器建立起一个足够精确的稳态响应所需的时间。一般在稳态响应值 y_0 的上下规定一个 $\pm\Delta\%$ 的公差带，当响应曲线开始全部进入这个公差带的瞬间就是建立时间 T_s 。为了明确起见，往往说“ $\Delta\%$ 建立时间”，对于理想的一阶系统来讲，5% 的建立时间为 $T_s = 3\tau$ 。对于理想的二阶系统，当阻尼比 $\xi = 0.6$ 时，10% 的建立时间 $T_s = 0.38T_n$ (T_n 为固有周期)。

上述表示响应快慢的三个“时间”通常根据情况给出其中之一。

(1) 过冲量 a_1 阶跃响应曲线第一次超过稳态值的峰高，即 $a_1 = y_{\max} - y_0$ 。显然过冲量越小越好。

(2) 衰减率 ψ 相邻两个波峰（或波谷）高度下降的百分数。

$$\psi = \frac{a_n - a_{n+2}}{a_n} \times 100\% \quad (1-4)$$

(3) 衰减比 δ 相邻两个波峰（或波谷）高度的比值。 $\delta = a_n / a_{n+2}$ 。

(4) 对数减缩 σ 衰减比的自然对数值， $\sigma = \ln\delta$ 。对于二阶系统可以证明阻尼比 ξ 与对数减缩 σ 的关系为

$$\xi = \frac{\sigma}{\sigma^2 + 4\pi^2} \quad (1-5)$$

上述三个表示振荡衰减快慢的特征量，一般是不给的，或者给出其中某一个。

2. 与频率响应特性有关的指标

由于相频特性与幅频特性之间有一定的内在关系，通常在表示传感器的动态特性时，主要用幅频特性，图 1-8 所示是一个典型的对数幅频特性曲线。

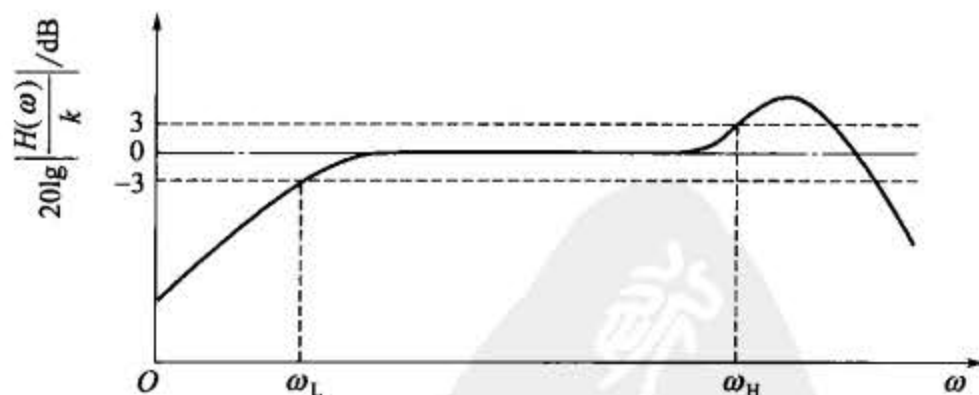


图 1-8 对数幅频特性曲线

图中 0dB 的水平线是理想的零阶（比例）系统的幅频特性。因为 $H(\omega) = k$ ，故 $20\lg|H(\omega)/k| = 0(\text{dB})$ 。如果某传感器的幅频特性曲线偏离理想直线，但还不超过某个允许的公差带，则仍然认为是可用的范围。在声学 and 电学仪器中往往规定 $\pm 3\text{dB}$ 的公差带，这相

当于 $H(\omega)/k=0.708\sim 1.41$ 。而对传感器来讲则根据所需的测量精度来定公差带。幅频特性曲线超出公差带处所对应的频率分别称为下截止频率 ω_L 和上截止频率 ω_H 。而这个频率区间称为传感器的频响范围或者称为通频带或频带。如果下截止频率为零则写直流 (DC)。在选择频响范围时应使被测信号的有用谐波频率都在这个范围之内。

对于有的传感器, 考虑到它可以较好地用一阶系统加以描述 (如测温传感器), 则只给出其时间常数 τ 。其幅频特性则可以根据一阶系统的频率响应关系推算, 例如 3dB 的上截止频率 $\omega_H=1/\tau$ 等。

对于某些可以用二阶系统很好地描述的传感器 (如加速度计、测压传感器), 有时只给出其固有频率 ω_n , 而不再给出有关频率响应特性的其他指标。