第一章 传感器技术基础

主讲：王鹏
东南大学 仪器科学与工程学院

第一章 传感器技术基础

1.1 传感器的一般数学模型

- 传感器作为感受被测量信息的器件，希望它能按照一定的规律输出有用信号，需要研究输入–输出关系及特性，有必要建立传感器数学模型；

- 传感器的数学模型是指传感器的输入输出关系。对应于输入信号的性质，传感器的数学模型常有静态和动态之分。

第一章 传感器技术基础

- 1.1.1 传感器的静态特性

静态特性是指在静态条件下（即输入量对时间t的各阶导数为零）得到的传感器数学模型。

其中，误差就是衡量传感器静态特性的主要技术指标

- 传感器的输出——输入关系或多或少地存在非线性问题，在不考虑迟滞、蠕变、不稳定性等因素的情况下，其静态模型可用下列多项式代数方程表示：

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + \cdots + a_n x^n \quad (2\text{-}1)$$

- 式中 y — 输出量；
- x — 输入量；
- a_0 — 零点输出；
- a_1 — 理论灵敏度；
- a_2, a_3, a_n — 非线性项系数

1 线性度

- **线性度**又称非线性，是表征传感器输出——输入校准曲线与所选定的拟合直线（作为工作直线）之间的吻合（或偏离）程度的指标。通常用相对误差来表示线性度或非线性误差，即

$$e_L = \pm \frac{\Delta L_{max}}{y_{F.S.}} \times 100\% \qquad 式(2-2)$$

式中 ΔL_{max}——输出平均值与拟合直线间的最大偏差；

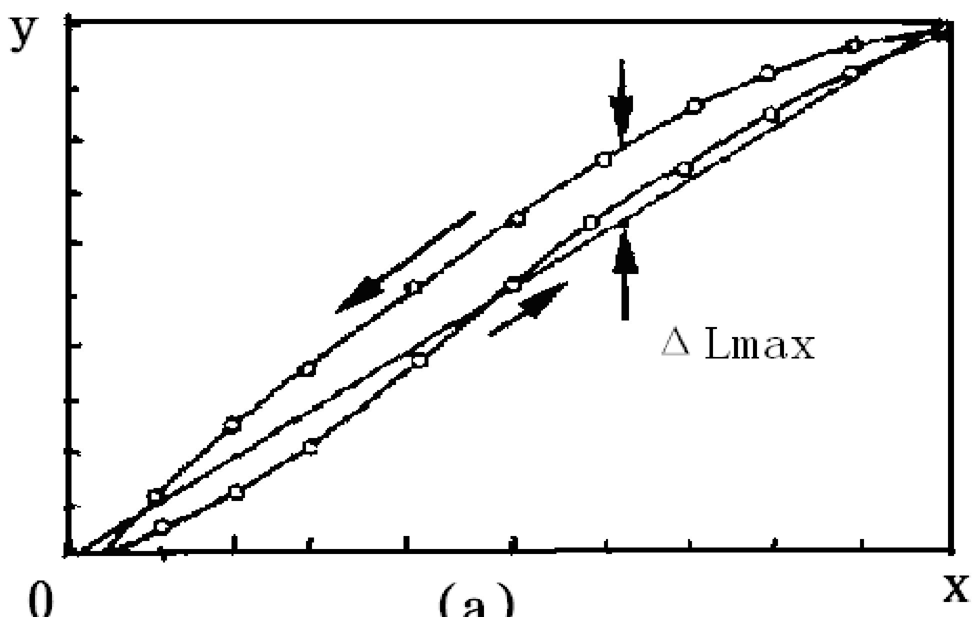
$y_{F.S.}$——理论满量程输出值。

- 各项系数不同，决定了特性曲线的具体形式。静态特性曲线可实际测试获得，在非线性误差不太大的情况下，总是采用直线拟合的方法来线性化。
- 显然，选定的拟合直线不同，计算所得的线性度数值也就不同。选择拟合直线应保证获得尽量小的非线性误差，并考虑使用与计算方便。

- 下面介绍几种目前常用的拟合方法：

$y = b + kx$

- （1）**理论直线法**　以传感器的理论特性线作为拟合直线，它与实际测试值无关。优点是简单、方便，但通常Δ$Lmax$很大。



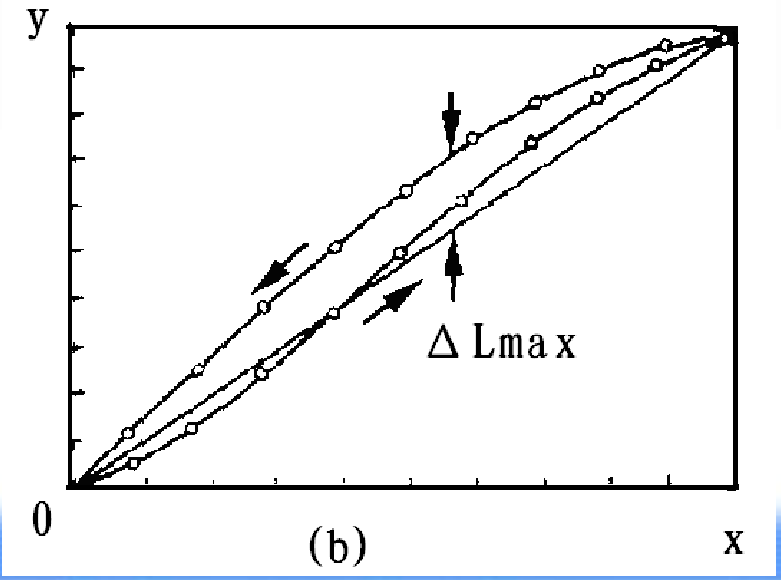
(a)

$y = b + kx$

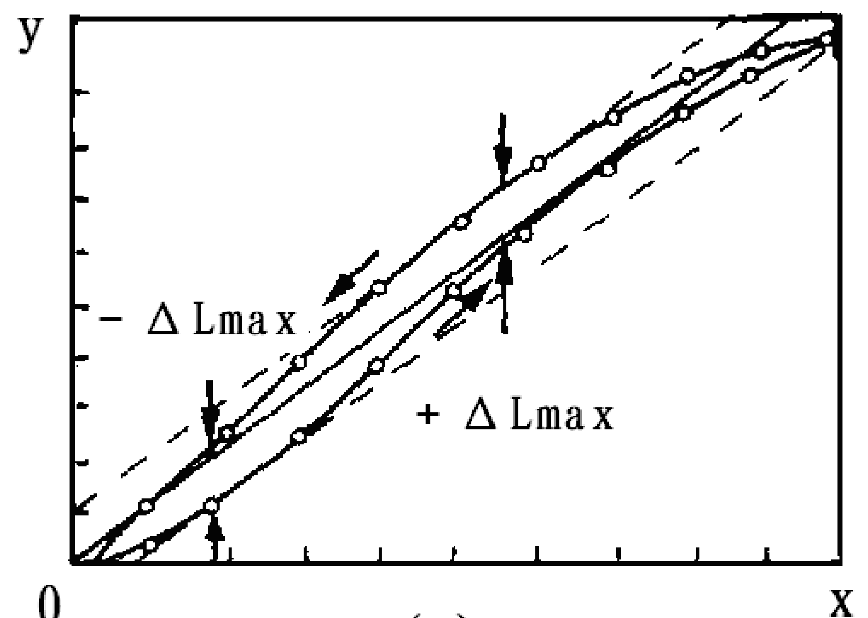
- （2）端点线法　以传感器校准曲线两端点间的连线作为拟合直线。其方程式为

$$y = b + kx \quad 式（2\text{-}3）$$

- 式中 ***b***和***k***——分别为截距和斜率，这种方法也很简便，但通常**Δ*Lmax***也很大。



- （3）“最佳直线”法 这种方法以“最佳直线”作为拟合直线，该直线能保证传感器正反行程校准曲线对它的正、负偏差相等并且最小，由此所得的线性度称为“独立线性度”。显然，这种方法的拟合精度最高。通常情况下，“最佳直线”只能用图解法或通过计算机解算来获得。



(c)

- **（4）最小二乘法**

拟合直线方程

$$\boxed{y = b + kx}$$

按最小二乘原理求取拟合直线，该直线能保证传感器校准数据的残差平方和最小。

系数**b**和**k**可根据以下公式求得，设实际校准测试点有**n**个，则第**i**个标准数据与拟合直线上相应值之间的残差为

$$\Delta_i = y_i - (b + kx_i)$$

- （4）最小二乘法

按照最小二乘法原理，应使 $\sum_{i=1}^{n} \Delta_i^2$ 最小；故由 $\sum_{i=1}^{n} \Delta_i^2$ 分别对 k 和 b 求一阶偏导数并令其等于零，即可求得 k 和 b

$$k = \frac{n\sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

$$b = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum x_i y_i}{n\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

式中： $\sum x_i = x_1 + x_2 + \cdots + x_n$ $\quad \sum x_i y_i = x_1 y_1 + x_2 y_2 + \cdots + x_n y_n$

$\sum y_i = y_1 + y_2 + \cdots + y_n$ $\quad \sum x_i^2 = x_1^2 + x_2^2 + \cdots + x_n^2$

- （4）最小二乘法

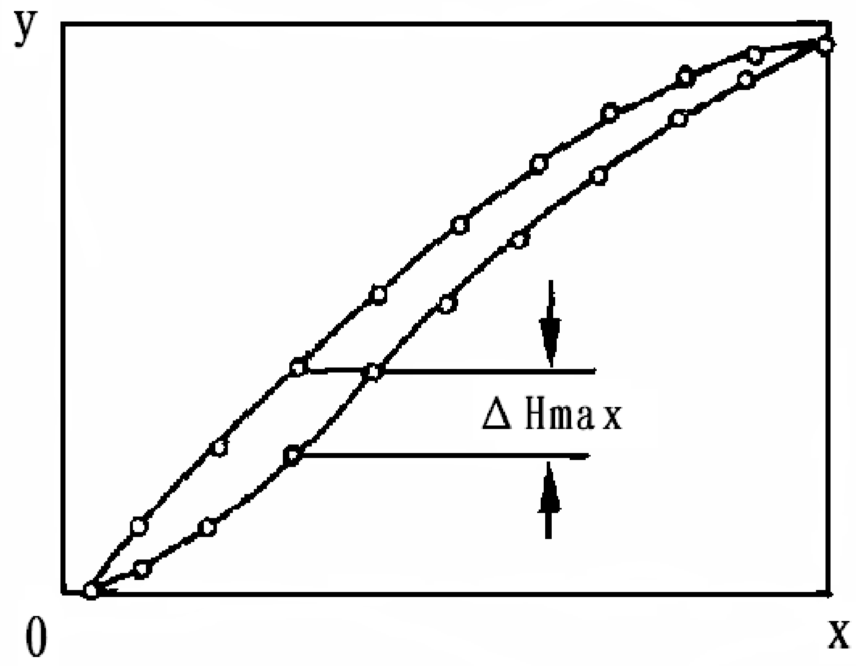
最小二乘法的拟合精度很高，但校准曲线相对拟合直线的最大偏差绝对值并不一定小，最大正、负偏差的绝对值也不一定相等。

2 回差（滞后）（Hysteresis）

- 回差是反映传感器在正（输入量增大）反（输入量减小）行程过程中输出——输入曲线的不重合程度的指标。通常用正反行程输出的最大差值ΔHmax计算，并以相对值表示（见图2-2）。

$$e_H = \frac{\Delta H_{\max}}{y_{F.S.}} \times 100\%$$ 式（2-4）

图2－2 回差（滞后）特性



3 重复性（Repeatability）

- 重复性是衡量传感器在同一工作条件下，输入量按同一方向作全量程连续多次变动时，所得特性曲线间一致程度的指标。各条特性曲线越靠近，重复性越好。
- 重复性误差反映的是校准数据的离散程度，属随机误差，因此应根据标准偏差计算，即

$$e_R = \pm \frac{a\sigma_{\max}}{y_{.F.S}} \times 100\% \qquad \text{式（2-6）}$$

式中 σ_{max} ——各校准点正行程与反行程输出值的最大标准差；

a ——通常取2或3。**a=2**时，置信概率为**95.4%**；**a=3**时，置信概率为**99.73%.**

计算标准偏差 σ 的方法常用的有：贝塞尔公式法和极差法

按上述方法计算所得重复性误差不仅反映了某一传感器输出的一致程度，而且还代表了在一定置信概率下的随机误差极限值。

$mV/mm\cdot V$

4 灵敏度（Sensitivity）

- 灵敏度是传感器输出量增量与被测输入量增量之比，线性传感器的灵敏度就是拟合直线的斜率，即 $K=\Delta y/\Delta x$ ，非线性传感器的灵敏度不是常数，应以导数 dy/dx 表示。
- 例如某位移传感器，当电源电压为1V时，每1mm位移变化引起输出电压变化100 mV，其灵敏度可表示为 100（$mV/mm\cdot V$）。

5 分辨力（Resolution）

- 分辨力是传感器在规定测量范围内所能检测出的被测输入量的最小变化量。有时用该值相对满量程输入值之百分数表示，则称为分辨率。

$$F.S.\%$$

6 阈值（Threshold）

- 阈值是能使传感器输出端产生可测变化量的最小被测输入量值，即零位附近的分辨力。有的传感器在零位附近有严重的非线性，形成所谓“死区”，则将死区的大小作为阈值；更多情况下阈值主要取决于传感器的噪声大小，因而有的传感器只给出噪声电平。

7 稳定性（Stability）

- 又称长期稳定性，即传感器在相当长时间内仍保持其性能的能力。稳定性一般以室温条件下经过一规定的时间间隔后，传感器的输出与起始标定时的输出之间的差异来表示，有时也用标定的有效期来表示。

8 漂移（Drift）

- 漂移指在一定时间间隔内，传感器输出量存在着与被测输入量无关的、不需要的变化。漂移包括零点漂移与灵敏度漂移。
- 零点漂移或灵敏度漂移又可分为时间漂移（时漂）和温度漂移（温漂）。时漂是指在规定条件下，零点或灵敏度随时间的缓慢变化；温漂为周围温度变化引起的零点或灵敏度漂移。

9 静态误差（精度）（Precision）

- 这是评价传感器静态性能的综合性指标，指传感器在满量程内任一点输出值相对其理论值的可能偏离（逼近）程度。它表示采用该传感器进行静态测量时所得数值的不确定度。

- 静态误差的计算方法常用的有3种。

9 静态误差（精度）（Precision）

- 方法一：静态误差的计算是将非线性、回差、重复性误差按几何法综合，即

$$\boxed{e_S = \pm\sqrt{e_L^2 + e_H^2 + e_R^2}}$$

$$\boxed{e_S = \pm(e_L + e_H + e_R)}$$

9 静态误差（精度）（Precision）

- 方法二：全部测量数据相对拟合直线的残差看成随机分布，求出标准差σ，然后取2σ或3σ作为静态误差。

$$\sigma=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{P}(\Delta y_i)^2}{p-1}}$$

式中，Δy_i —各测试点的残差

p —所有测试循环中总的测试点数。例如正反行程共有m个测试点，每测试点重复测量***n***次，则***p=m·n***

仍用相对误差表示静态误差，则有

$$e_S=\pm\frac{(2\sim3)\sigma}{y_{F.S.}}\times100\%$$

9 静态误差（精度）（Precision）

- 方法三：由于非线性、回差可反映为系统误差，而重复性则反映为随机误差。
- 将系统误差与随机误差分开考虑，从原理上讲比较合理。

$$e_S = \pm \frac{|(\Delta y)_{\max}| + a\sigma}{y_{F.S.}}$$

$(\Delta y)_{\max}$ ——校准曲线相对拟合直线的最大偏差，即系统误差的极限值;

σ ——按极差法计算所得的标准偏差;

a ——根据所需置信概率确定的置信系数。

1. 1. 2 传感器的动态特性

- 传感器的数学模型是指传感器的输入输出关系。

- 动态特性是反映传感器随时间变化的输入量的响应特性。用传感器测试动态量时，希望它的输出量随时间变化的关系与输入量随时间变化的关系尽可能一致，但实际并不尽然，因此需要研究它的动态特性——分析其动态误差。

- 动态特性包括两部分：1）输出量达到稳定状态以后与理想输出量之间的差别；2）当输入量发生跃变时，输出量由一个稳态到另一个稳态之间的过渡状态中的误差。

1．1．2 传感器的动态特性

- 由于实际测试时输入量是千变万化的，且往往事先并不知道，故工程上通常采用输入“标准”信号函数的方法进行分析，并据此确立若干评定动态特性的指标。常用的“标准”信号函数是正弦函数与阶跃函数。本节将分析传感器对正弦输入的响应（频率响应）和阶跃输入的响应（阶跃响应）特性及性能指标。

在不考虑各种静态误差的条件下，可以用常系数线性微分方程描述单输入x、单输出y传感器动态特性，以下为其**动态数学模型**：

$$a_n\frac{d^{n}y}{dt^{n}}+a_{n-1}\frac{d^{n-1}y}{dt^{n-1}}+\cdots\cdots+a_1\frac{dy}{dt}+a_0y=b_m\frac{a^{m}x}{dt^{m}}+b_{m-1}\frac{a^{m-1}x}{dt^{m-1}}+\cdots\cdots+b_1\frac{dx}{dt}+b_0x$$

式（2–9）

设x(t)、y(t)的初始条件为零，对上式两边逐项进行拉氏变换，可得：

$$a_n s^n Y(s)+a_{n-1}s^{n-1}Y(s)+\cdots\cdots+a_1 sY(s)+a_0 Y(s)$$
$$=b_m s^m X(s)+b_{m-1}s^{m-1}X(s)+\cdots\cdots+b_1 sX(s)+b_0 X(s) \qquad \text{式（2-10）}$$

由此得传递函数：

$$H(s)=\frac{Y(s)}{X(s)}=\frac{b_m s^m+b_{m-1}s^{m-1}+\cdots\cdots+b_1 s+b_0}{a_n s^n+a_{n-1}s^{n-1}+\cdots\cdots a_1 s+a_0} \qquad \text{式(2-11)}$$

- 传递函数是拉氏变换算子S的有理分式，所有系数都是实数，这是由传感器的结构参数决定的。分子的阶次m不能大于分母的阶次n，这是由物理条件决定的。分母的阶次用来代表传感器的特征：

  n = 0时，称为零阶；

  n = 1时，称一阶；

  n = 2时，为二阶；

  n更大时，为高阶。

- 分析方法完全借鉴于电路分析课程或控制原理课程中的相应内容，只不过输入量为非电量。

1．1．2．1 传感器的频率响应特性

将各种频率不同而幅值相等的正弦信号输入传感器，其输出信号的幅值、相位与频率之间的关系称为频率响应特性。设输入幅值为 x、角频率为 ω 的正弦量

$$x = X\sin\omega t$$

则获得的输出量为 $y = Y\sin(\omega t + \varphi)$

式中 Y、φ 分别为输出量的幅值和初相角。

在传递函数式（2-11）中令s=jω，代入得：

$$\frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)}=\frac{b_m(j\omega)^m+b_{m-1}(j\omega)^{m-1}+\cdots\cdots+b_1(j\omega)+b_0}{a_n(j\omega)^n+a_{n-1}(j\omega)^{n-1}+\cdots\cdots+a_1(j\omega)+a_0} \quad \text{式}(2\text{-}12)$$

式（2-12）将传感器的动态响应从时域转换到频域，表示输出信号与输入信号之间的关系随着信号频率而变化的特性，故称之为传感器的频率响应特性，简称频率特性或频响特性。其物理意义是：当正弦信号作用于传感器时，在稳定状态下的输出量与输入量之复数比。

- 称为传感器的动态灵敏度（或称增益）。A（ω）表示输出，输入的幅值比随ω而变，故又称为幅频特性。以 $\mathrm{Re}\left[\frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)}\right]$ 和 $\mathrm{Im}\left[\frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)}\right]$

分别表示A（ω）的实部和虚部，频率特性的相位角

$$\varphi(\omega)=\arctan\left\{\frac{\mathrm{Im}\left[\frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)}\right]}{\mathrm{Re}\left[\frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)}\right]}\right\}$$

代表输出超前于输入的角度。对传感器而言，通常为负值，即输出滞后于输入。$\varphi(\omega)$表示 φ随ω而变，称之为相频特性。

在形式上它相当于将传递函数式（2-11）中之s置换成（$j\omega$）而得，因而又称为频率传递函数，其指数形式为

$$\frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)}=\frac{Ye^{j(\omega t+\varphi)}}{Xe^{j\omega t}}=\frac{Y}{X}e^{j\varphi} \qquad 式（2-13）$$

由此可得频率特性的模

$$A(\omega)=\left|\frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)}\right|=\frac{Y}{X} \qquad 式（2-14）$$

1.1.2.3 传感器典型环节的频域分析

- 常见的传感器通常可以看成是零阶、一阶或二阶环节，下面将着重介绍零阶、一阶、二阶环节的**频域分析**

1. 零阶环节

- 零阶环节的微分方程和传递函数分别为

$$y=\frac{b_0}{a_0}x=Kx \qquad 式（2-16）$$

$$\frac{Y(s)}{X(s)}=\frac{b_0}{a_0}=K \qquad 式（2-17）$$

式中K——静态灵敏度。

- 可见零阶环节的输入量无论随时间怎么变化，输出量的幅值总与输入量成确定的比例关系，在时间上也无滞后。它是一种与频率无关的环节，故又称比例环节或无惯性环节。
- 在实际应用中，许多高阶系统在变化缓慢、频率不高的情况下，都可以近似看作零阶环节。

2. 一阶环节

- 一阶环节的微分方程为

$$a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_0 x \qquad (2\text{-}18)$$

- 令 $\tau = a1 / a0$——时间常数;
- $K = b0 / a0$——静态灵敏度。

则式(2-18)变成 $(\tau s + 1)y = Kx$

(2-19)

其传递函数和频率特性分别为:

$$\frac{Y(s)}{X(s)}=\frac{K}{\tau s+1} \qquad (2-20)$$

$$\frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)}=\frac{K}{j\omega\tau+1} \qquad (2-21)$$

幅频特性和相频特性分别为：

$$A(\omega)=K\Big/\sqrt{(\omega\tau)^2+1} \qquad (2-22)$$

$$\phi(\omega)=\arctan(-\omega\tau) \qquad (2-23)$$

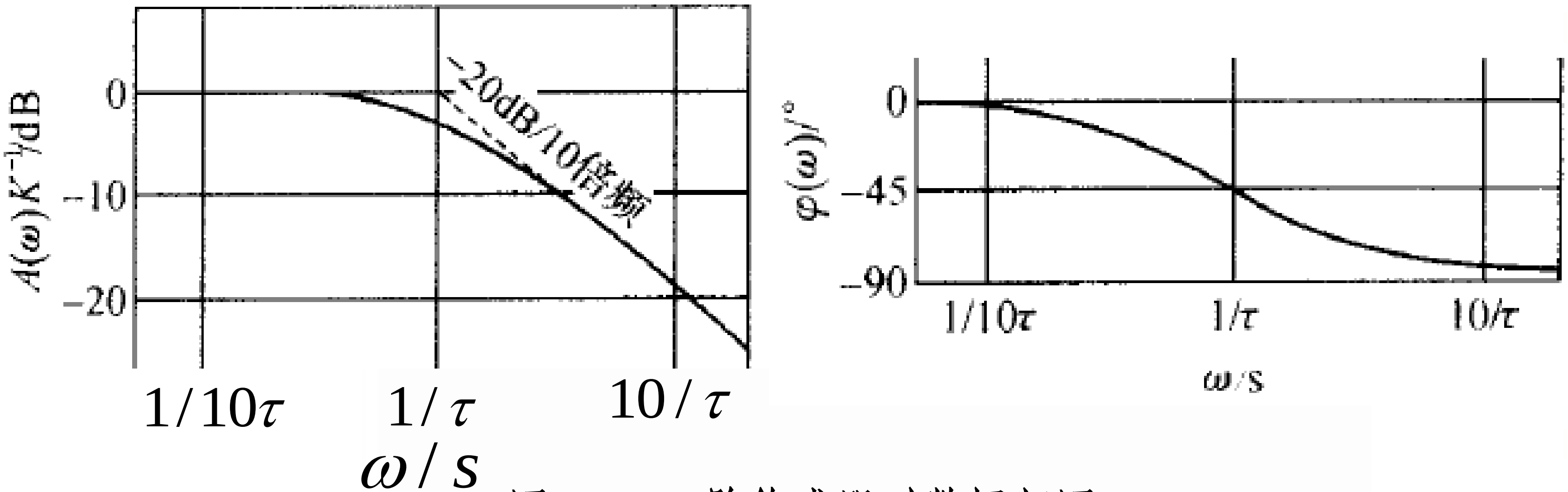


图2-4　一阶传感器对数幅频图

$A(\omega)$ 与 $\phi(\omega)$ 如图2-4所示(图中坐标为对数坐标)

当 $\omega\tau \ll 1$ 时，有 $A(\omega) \approx k$，$\varphi(\omega) \approx -\omega\tau$，$\varphi(\omega)/\omega \approx -\tau$，即输出量相对于输入量的滞后与 ω 基本无关；

输出能比较真实地反映输入的变化。因此，减小 τ 可改善传感器的频率特性。

3. 二阶环节

二阶环节的微分方程为

$$a_2\frac{d^2y}{dt^2}+a_1\frac{dy}{dt}+a_0y=b_0x \qquad (2\text{-}26)$$

令 $K=b_0/a_0$ ——静态灵敏

$\tau=\sqrt{\dfrac{a_2}{a_0}}$ ——时间常数

$\omega_0=\dfrac{1}{\tau}=\sqrt{a_0/a_2}$ ——固有频率

$\xi=a_1/2\sqrt{a_0a_2}$ ——阻尼比

式（2-26）可写成

$$\left(\frac{1}{\omega_n^2}s^2+\frac{2\xi}{\omega_n}s+1\right)y=Kx \qquad (2\text{-}27)$$

其传递函数和频率响应分别为:

$$H(s)=\frac{Y(s)}{X(s)}=\frac{K}{\dfrac{s^2}{\omega_n^2}+\dfrac{2\xi}{\omega_n}s+1} \qquad (2\text{-}28)$$

幅频特性和相频特性分别为:

$$A(\omega)=\frac{K}{\sqrt{\left[1-\left(\omega/\omega_n\right)^2\right]^2+\left(2\xi\omega/\omega_n\right)^2}} \tag{2-29}$$

$$\varphi(\omega)=-\arctan\frac{2\xi\omega/\omega_n}{1-\left(\omega/\omega_n\right)^2} \tag{2-30}$$

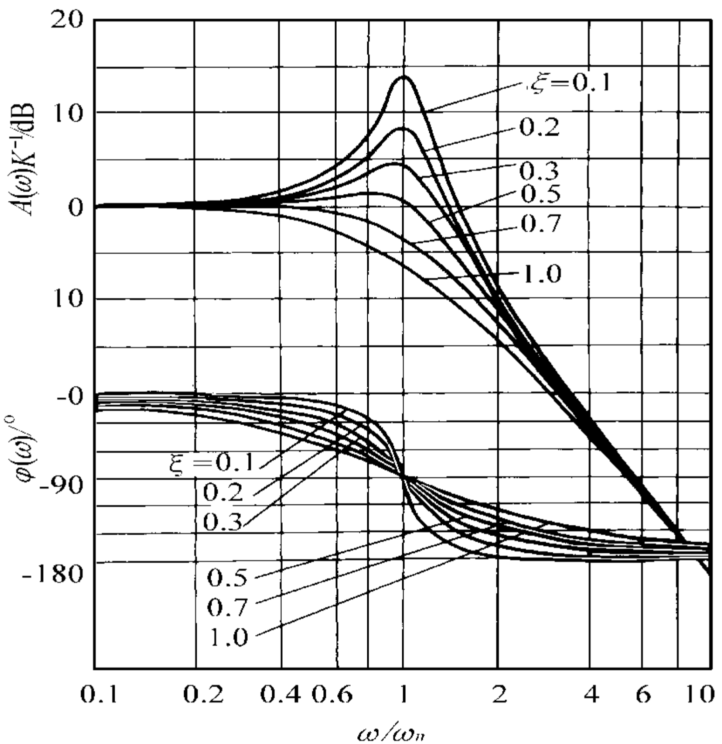


图 2-5　二阶环节的幅频特性与相频特性

从图中可看出，传感器的频率响应特性好坏，主要取决于传感器的固有频率和阻尼比。

二阶环节的幅频特性与相频特性如图2-5所示。由图可见，当$\omega/\omega_n \leqslant 1$时，$A(\omega) \approx K$，$\phi(\omega)/\omega \approx 0$，近似于零阶环节。在无阻尼固有频率附近（$\omega/\omega_n=1$），系统发生谐振。

为了避免这种情况，可增大ξ值，当$\xi > 0.707$时，谐振就不会发生了。当$\xi=0.707$时，幅频特性的平坦段最宽，而且相频特性接近于一条斜直线，在检测复合周期振动时能保证有较宽的频响范围且幅值失真与相位失真均较小。$\xi=0.707$称为最佳阻尼。

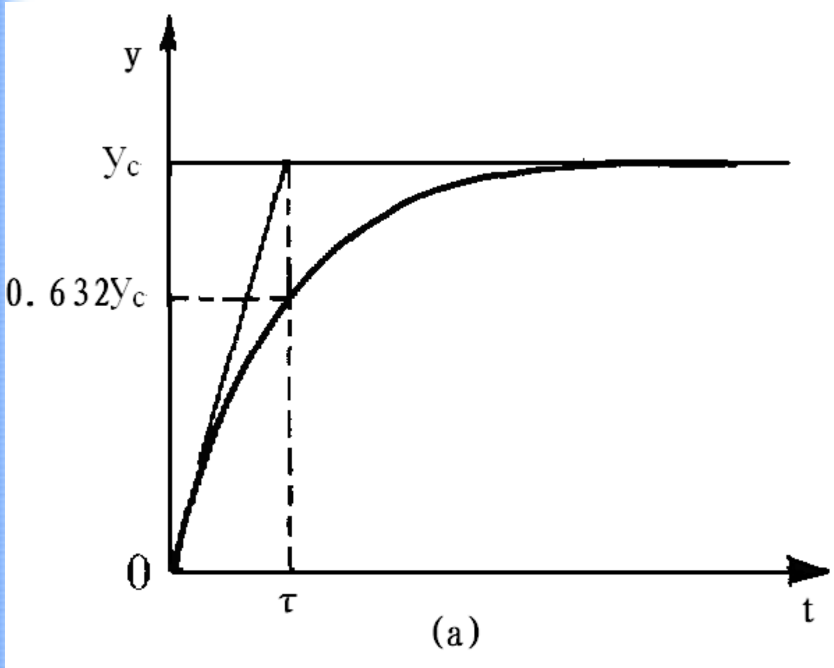
1.1.2.2 传感器典型环节的时域分析

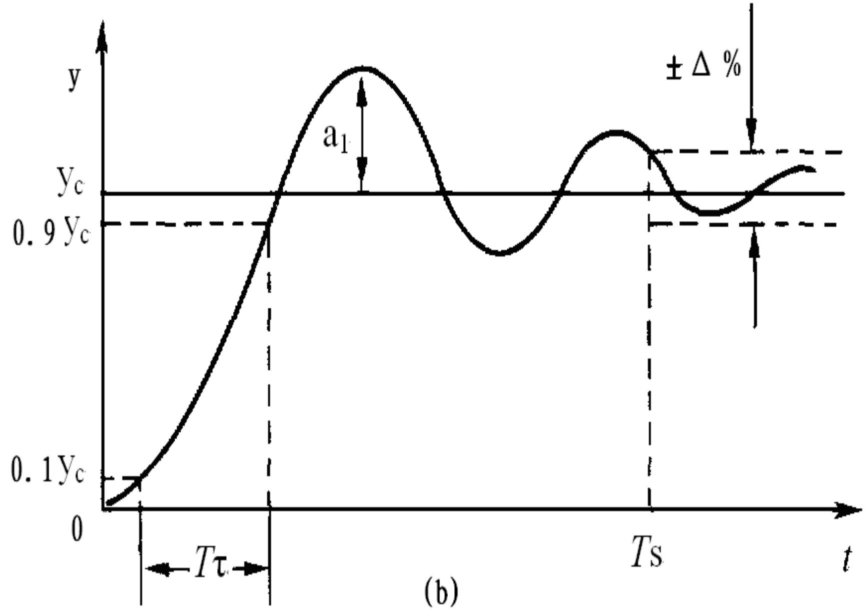
• 当给静止的传感器输入一个单位阶跃信号

$$u(t)=\begin{cases}0 & t<0\\ 1 & t>0\end{cases} \qquad \text{式(2-15)}$$

时，其输出信号称为阶跃响应,可参见图2-3

图2－3阶跃响应曲线





（a）一阶系统　　（b）二阶系统

衡量阶跃响应的指标有：

- （1）时间常数τ　传感器（一阶）输出值上升到稳态值yc的63.2％所需的时间。
- （2）上升时间Tr　传感器输出值由稳态值的10％上升到90％所需的时间，但有时也规定其他百分数。
- （3）响应时间Ts　输出值达到允许误差范围5%（或2％）所经历的时间，或明确为“百分之二响应时间”。
- （4）超调量a1　响应曲线第一次超过稳态值之峰高，即a1 = ymax+yc，或用相对值a=〔（ymax－ yc）/ yc〕×100％表示。
- （5）衰减率φ　指相邻两个波峰（或波谷）高度下降的百分数：φ=〔（an－an＋2）/ an〕×100％。
- （6）稳态误差ess　系无限长时间后传感器的稳态输出值与目标值之间偏差ζss的相对值：ess=（ζss / yc）×100％。

1) 一阶传感器的单位阶跃响应

一阶传感器的传递函数:

$$H(s)=\frac{Y(S)}{X(S)}=\frac{1}{\tau s+1}$$

对初始状态为零的传感器，当输入一个单位阶跃信号

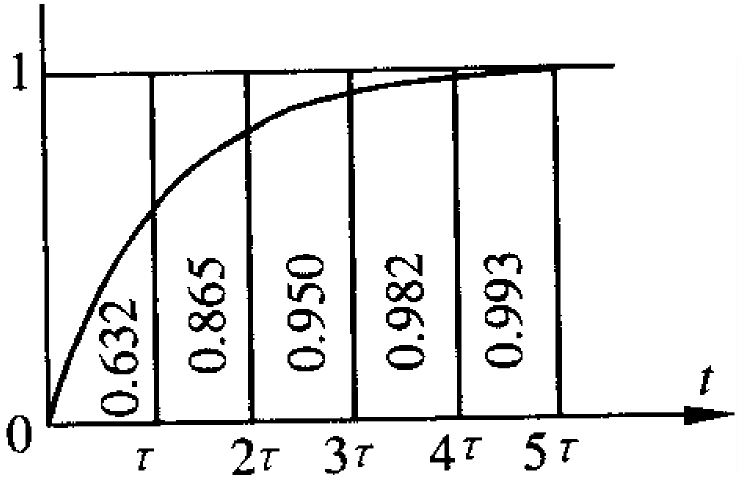
$$x(t)=\begin{cases}0 & t\le 0\\ 1 & t>0\end{cases}$$

时，由于x(t)=1(t), x(s)= $\frac{1}{s}$，传感器输出的拉氏变换为

$$Y(s)=H(s)X(s)=\frac{1}{\tau s+1}\cdot\frac{1}{s}$$

一阶传感器的单位阶跃响应信号为:

$$y(t)=1-e^{-\frac{t}{\tau}}$$



一阶传感器单位阶跃响应

由图可见，传感器存在惯性，它的输出不能立即复现输入信号，而是从零开始，按指数规律上升，最终达到稳态值。理论上传感器的响应只在t趋于无穷大时才达到稳态值，但实际上当t=4τ时其输出达到稳态值的98.2%，可以认为已达到稳态。τ越小，响应曲线越接近于输入阶跃曲线，因此，τ值是一阶传感器重要的性能参数。

动态相对误差:

$$\gamma = \frac{KA - KA\left(1 - e^{-t/\tau}\right)}{KA} = e^{-t/\tau} \qquad (A = 1) \qquad (2\text{-}24)$$

一阶环节输入阶跃信号后在 t >5 τ 之后采样，其动态误差可以忽略，可认为输出已接近稳态。反过来，若已知允许的相对误差值γ计算出稳定时间:

$$t_{\omega} = \tau \ln \gamma \qquad (2\text{-}26)$$

τ 为一阶环节的时间常数，τ 越小阶跃响应越迅速，频率响应的上截止频率越高。τ 的大小表示惯性的大小，故一阶环节又称为惯性环节。

2) 二阶传感器的单位阶跃响应

二阶传感器的传递函数:

$$H(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$$

传感器对单位阶跃响应输出的拉氏变换如下:

$$Y(s) = \frac{\omega_n^2}{s(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)}$$

二阶传感器对阶跃信号的响应取决于阻尼比ξ和固有频率ω_n。固有频率ω_n由传感器主要结构参数所决定，ω_n越高，传感器的响应越快。

若对二阶环节输入一阶跃信号，式（2-27）就变成：

$$\left(\frac{1}{\omega_n^2}s^2+\frac{2\xi}{\omega_n}s+1\right)y=KA \qquad (2\text{-}31)$$

特征方程及其两根分别为:

$$\frac{1}{\omega_n^2}s^2+\frac{2\xi}{\omega_n}s+1=0 \qquad (2\text{–}32)$$

$$\begin{cases} r_1=\left(-\xi+\sqrt{\xi^2-1}\right)\omega_n \\ r_2=\left(-\xi-\sqrt{\xi^2-1}\right)\omega_n \end{cases} \qquad (2\text{–}33)$$

当 $\xi > 1$（过阻尼）时:

$$y = KA\left[1 - \frac{\left(\xi + \sqrt{\xi^2 - 1}\right)}{2\sqrt{\xi^2 - 1}} e^{\left(-\xi + \sqrt{\xi^2 - 1}\right)\omega_n} + \frac{\left(\xi - \sqrt{\xi^2 - 1}\right)}{2\sqrt{\xi^2 - 1}} e^{\left(-\xi - \sqrt{\xi^2 - 1}\right)\omega_n t}\right] \quad (2-34)$$

当 $\xi = 1$（临界阻尼）时:

$$y = KA\left[1 - \sin\left(\omega_n + \varphi\right)\right] \quad (2-35)$$

$$y = KA\left[1 - \left(1 + \omega_n t\right)e^{-\omega_n t}\right] \quad (2-36)$$

当 $\xi<1$（欠阻尼）时:

$$y = KA\left[1-\frac{e^{-\xi\omega_n t}}{\sqrt{1-\xi^2}}\sin\left(\sqrt{1-\xi^2}\,\omega_n t+\varphi\right)\right] \qquad (2\text{–}37)$$

式中 $\varphi=\arcsin\sqrt{1-\xi^2}$ ------衰减振荡相位差。

将上述三种情况绘成曲线，可得图2-6所示二阶环节的阶跃响应曲线簇。

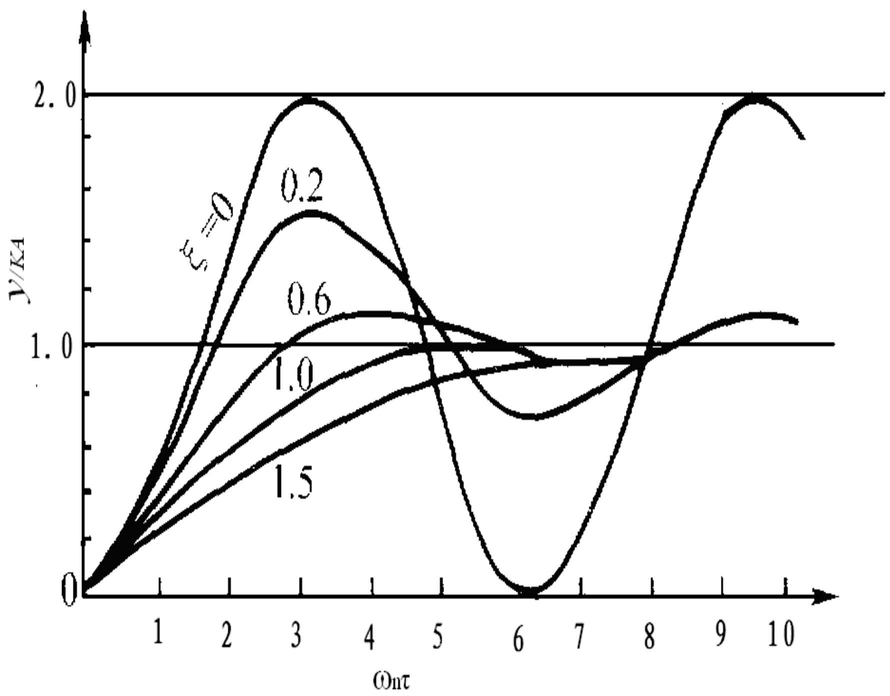


图2－6 二阶环节的阶跃响应

- 将上述三种情况绘成曲线，可得图2-6所示二阶环节的阶跃响应曲线簇。由图可知，固有频率 ωn越高，则响应曲线上升越快，即响应速度越高；反之 ωn越小，则响应速度越低。而阻尼比 ξ越大，则过冲现象减弱越快。$\xi>1$时完全没有过冲，也不产生振荡；$\xi<1$时，将产生衰减振荡。为使接近稳态值的时间缩短，设计时常取 ξ=0.6～0.8。
- 当 ξ=0时，式（2-37）变成 $y=KA([1-\sin(\omega_n+\varphi)])$ ，形成等幅振荡，这时振荡频率就是二阶环节的振动角频率 ωn，称为“固有频率”。

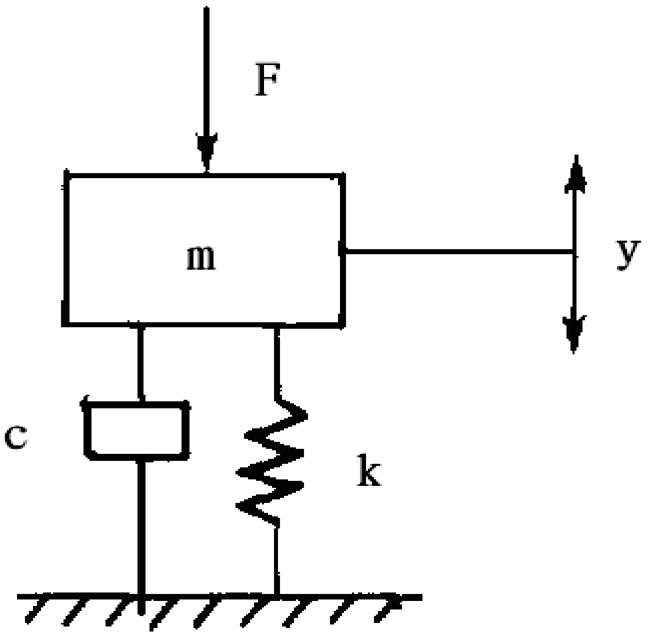


图2－7 二节环节实例

图2-7所示由弹簧（*k*）、阻尼（*c*）和质量（*m*）组成的机械系统是二阶环节在传感器中的应用实例。在外力F作用下，其运动微分方程为:

$$m\frac{d^2y}{dt^2}+c\frac{dy}{dt}+ky=F$$

1. 1. 3 传感器的性能指标一览

- 由于传感器的类型五花八门，使用要求千差万别，要列出可用来全面衡量传感器质量优劣的统一指标极其困难；迄今为止，国内外还是采用罗列若干基本参数和比较重要的环境参数指标的方法来作为检验、使用和评价传感器的依据。表2-1列出了传感器的一些常用指标，可供读者参考。

表2－1

基本参数指标	环境参数指标	可靠性指标	其它指标
1量程指标: 量程范围、过载能力等 2灵敏度指标: 灵敏度、满量程输出、分辩力、输入输出阻抗等 3精度方面的指标: 精度（误差）、重复性、线性、回差、灵敏度误差、阈值、稳定性、漂移、静态总误差等 4动态性能指标: 固有频率、阻尼系数、频响范围、频率特性、时间常数、上升时间、响应时间、过冲量、衰减率、稳定误差、临界速度、临界频率等	1温度指标: 工作温度范围、温度误差、温度漂移、灵敏度温度系数、热滞后等 2 抗冲振指标: 各向冲振容许频率、振幅值、加速度、冲振引起的误差等 3 其他环境参数: 抗干扰、抗介质腐蚀、抗电磁场干扰能力等	工作寿命、平均无故障时间、保险期、疲劳性能、绝缘电阻、耐压、反抗飞狐性能等	1使用方面: 供电方式（直流、交流、频率、波形等）、电压幅度与稳定度、功耗、各项分布参数等 2结构方面: 外形尺寸、重量、外壳、材质、结构特点等 3安装连接方面: 安装方式、馈线、电缆等

1. 2 传感器设计中的共性技术

- 结构、材料与参数的合理选择
- 差动技术
- 平均技术
- 稳定性处理
- 屏蔽、隔离与干扰抑制
- 零示法、微差法与闭环技术
- 补偿与校正
- 集成化、智能化与信息融合

1. 2. 1 差动技术

在使用中，通常要求传感器输出—输入关系成线性，但实际难于做到。如果输入量变化范围不大，而且非线性项的方次不高时，在对多项式进行分析后，找到了一种切实可行的减小非线性的方法——差动技术。这种技术也已广泛用于消除或减小由于结构原因引起的共模误差（如温度误差）方面。其原理如下:

设有一传感器，其输出为:

$$y_1 = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + a_4 x^4 + \cdots$$

用另一相同的传感器，但使其输入量符号相反（例如位移传感器使之反向移动），则它的输出为:

$$y_2 = a_0 - a_1 x + a_2 x^2 - a_3 x^3 + a_4 x^4 - \cdots$$

使二者输出相减，即:

$$\Delta y = y_1 - y_2 = 2\left(a_1 x + a_3 x^3 + \cdots\right)$$

- 于是，总输出消除了零位输出和偶次非线性项，得到了对称于原点的相当宽的近似线性范围，减小了非线性，而且使灵敏度提高了一倍，抵消了共模误差。在传感器中，外界被检测量的满量程往往只引起单个敏感元件的少量变化，为了取出这种少量变化，去除不变部分，需要在敏感部分采取差动技术，如各种测量桥路（不平衡电桥）。

- 差动技术已在电阻应变式、电感式、电容式等传感器中得到广泛应用。在于涉光学传感器技术中光路光程差、谐振传感器中频率差等方法技术也源于动差动技。本书在相关章节将重点介绍该技术。

1．2．5 补偿与校正

- 有时传感器或测试系统的系统误差的变化规律过于复杂，采取了一定的技术措施后仍难满足要求;或虽可满足要求，但因价格昂贵或技术过分复杂而无现实意义。这时，可以找出误差的方向和数值，采用修正的方法，包括修正曲线或公式加以补偿或校正。例如，传感器存在非线性．可以先测出其特性曲线，然后加以校正；又如存在温度误差，可在不同温度进行多次测量，找出温度对测量值影响的规律，然后在实际测量时进行补偿。上述方法在传感器或测试系统中已被采用。

- 补偿与校正，可以利用电子技术通过线路（硬件）来解决；也可以采用微型计算机（通常采用单片微机）通过软件来实现。在测量电路中设置一个或多个基准信号元，通过测量信号与基准信号的切换比较，可以实现自（动）校正的目的。

1. 3. 7 图示化技术

- 这里图示化技术指传感信息图形化表示。传感器是“能感受规定的被测量并按一定规律转换成可用输出信号的器件或装置”。“可用”与表现形式有关，不能仅限于一维，有时多维形式更容易被人脑理解，找出共性与规律。

- 用可见光图像传感器把被测物反射能力的空间分布转换成一维时间序列电信号，然后经显示器转换成二维平面分布光强信号，人眼就可以找出被测物边界、颜色、灰度等等多方面特征信息。

- 医用B型超声传感器把人体对内部组织对超声波的反射、透射能力的空间分布转换成一维时间序列电信号，然后经显示器转换成二维平面分布光强信号，人眼就可以找出被测物边界、密度等等多方面特征信息。

- X光CT技术是通过运算，解耦出物体内部各细分单元对于X射线的透射能力，然后图示表现。

- 还可以举出众多例子，如表达速度、温度、磁场、重力等等的空间分布的传感技术。物体被测量的空间分布形式与物质的空间分布形式紧密相关，人眼和脑就能理解这些图像，这是上述各种传感的基础。

- 把传感器信息通过运算转换成另一种形式，然后图示化表现，是另一种图示化技术。傅立叶变换、小波变换等等都是运算方法，某些变换的图形表示可能更利于人来理解或计算机识别。

2.3 传感器的合理选择

2.3.1 合理选择传感器的基本原则与方法

- 依据测量对象和使用条件确定传感器的类型
- 线性范围与量程
- 灵敏度
- 精度
- 频率响应特性
- 稳定性

2.3.2 传感器的正确使用

- 认真阅读使用说明书
- 正确选择测试点、正确安装
- 保证被测信号的有效、高效传输。
- 传感器测量系统必须有良好的接地，有屏蔽、抗干扰措施
- 对非接触式传感器，现场标定。

2.3.3 无合适传感器可供选用时的对策（举例）

2.4 传感器的标定和校准

- **标定**：在明确输入—输出变换对应关系的前提下，利用某种标准量或标准器具对传感器的量值进行标度。
- **校准**：将传感器在使用中或储存后进行的性能复测。

区别：一般来讲，标定是指单个项目单个参数的准确度测定；校准往往是指仪器仪表多个功能和项目的综合调整，使之符合技术规范。

- 任何一种传感器在装配完后都必须按设计指标进行全面严格的性能鉴定。使用一段时间后（中国计量法规定一般为一年）或经过修理，也必须对主要技术指标进行校准试验，以便确保传感器的各项性能指标达到要求。
- 传感器标定就是利用精度高一级的标准器具对传感器进行定度的过程，从而确立器输出量和输入量之间的对应关系。同时也确定不同使用条件下的误差关系。
- 根据系统的用途输入可以是静态的也可以是动态的。因此传感器的标定有静态和动态标定二种。

2.4.1 传感器的静态标定

- 静态标定主要用于检测、测试传感器（或传感器系统）的静态特性指标，如静态灵敏度、非线性、回差、重复性等。
- 静态标定首先要建立静态标定系统。关键在于被测非电量的标准发生器及标准测试系统。

2.4.1 传感器的动态标定

- 用于确定传感器的动态性能，如固有频率和频响范围等、动态灵敏度等。

- 传感器进行动态标定时，需有一标准信号对它激励，常用的标准信号有二类：一是周期函数，如正弦波等；另一是瞬变函数，如阶跃波等。

- 用标准信号激励后得到传感器的输出信号，经分析计算、数据处理、便可决定其频率特性，即幅频特性、阻尼和动态灵敏度等。

本章结束，谢谢