



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

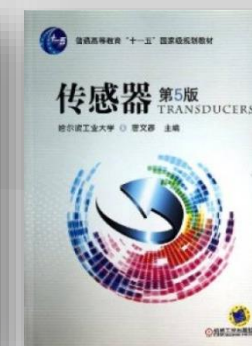
传感器 (第5版)

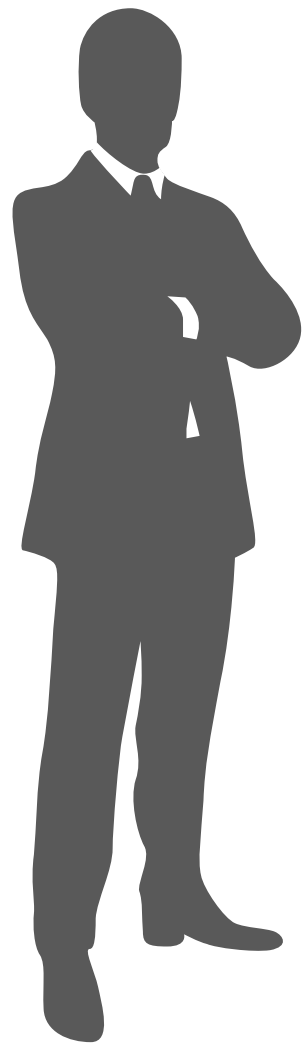
TRANSDUCERS

哈尔滨工业大学 © 唐文彦 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS





第零章

绪论

第一章

传感器的一般特性

第二章

电阻式传感器

第三章

电感式传感器

第四章

电容式传感器

第五章

磁电式传感器

第六章

压电式传感器

第七章

光电式传感器

第八章

热电式传感器

第九章

气电式传感器

第十章

谐振式传感器

第十一章

波式和射线式传感器

第十二章

半导体式物性传感器

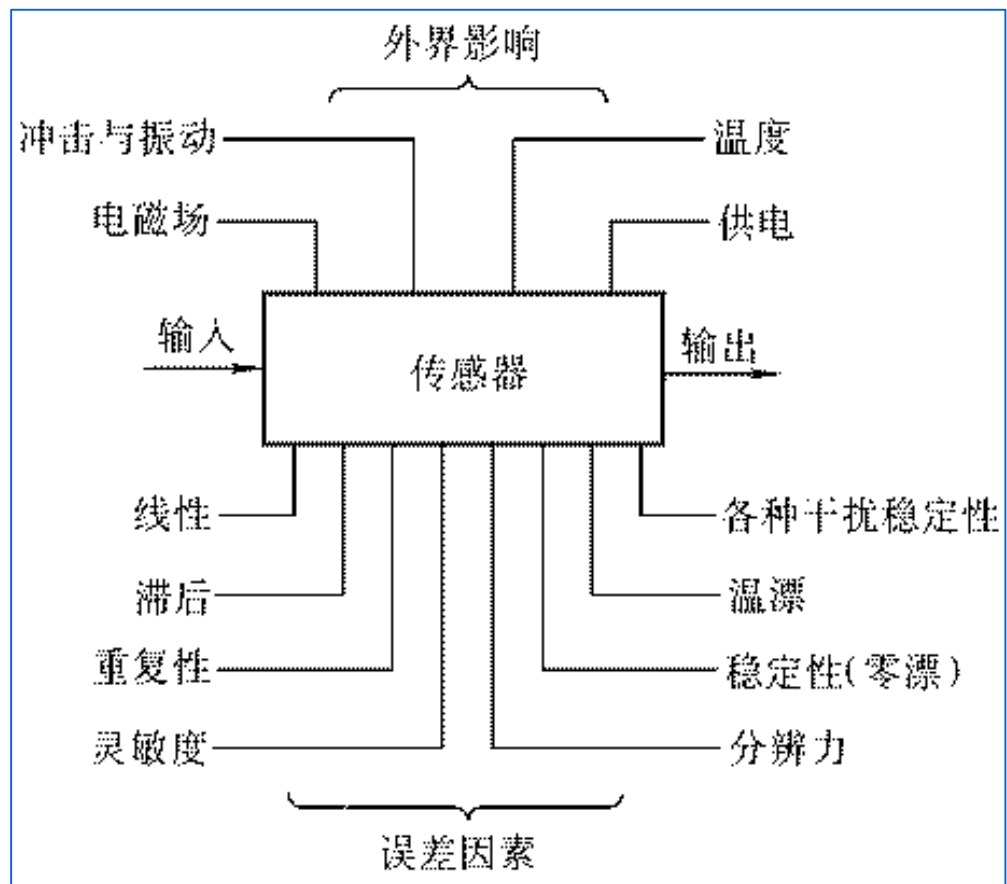
第十三章

传感技术新发展



第一章 传感器的一般特性

- » 1.传感器的静态特性
- » 2.传感器的动态特性
- » 3.传感器的标定
- » 4.传感器的技术指标



传感器的特性
主要是指输出与输入之间的关系。当输入量为常量，或变化极慢时，这一关系就称为静特性；当输入量随时间较快地变化时，这一关系就称为动特性。

第一节 传感器的静态特性

A

静特性表示传感器在被测量处于稳定状态时的输出输入关系。

B

表征传感器静态特性的主要指标有**线性度、迟滞、重复性、灵敏度与灵敏度误差、分辨力与阈值、稳定性、温度稳定性、抗干扰稳定性、静态测量不确定度。**





线性度

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，其静特性可用下列多项式代数方程表示：

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \cdots + a_nx^n$$

式中y——输出量；

x——输入量；

a_0 ——零点输出；

a_1 ——零点处灵敏度；

a_2 、 a_3 、 a_n ——非线性项系数。

各项系数不同，决定了特性曲线的具体形式。



线性度

为了标定和数据处理的方便，希望得到线性关系。在非线性误差不太大的情况下，总是采用直线拟合的办法来线性化。

在采用直线拟合线性化时，**输出输入的实际测量曲线与其拟合直线之间的最大偏差，就称为非线性误差或线性度**，通常用相对误差 γ_L 来表示，即：

$$\gamma_L = \pm(\Delta_{L\max} / y_{FS}) \times 100\%$$

式中 $\Delta_{L\max}$ ——最大非线性误差；

y_{FS} ——满量程输出

由此可见，非线性偏差的大小是以一定的拟合直线为基准直线而得出来的。拟合直线不同，非线性误差也不同。



线性度

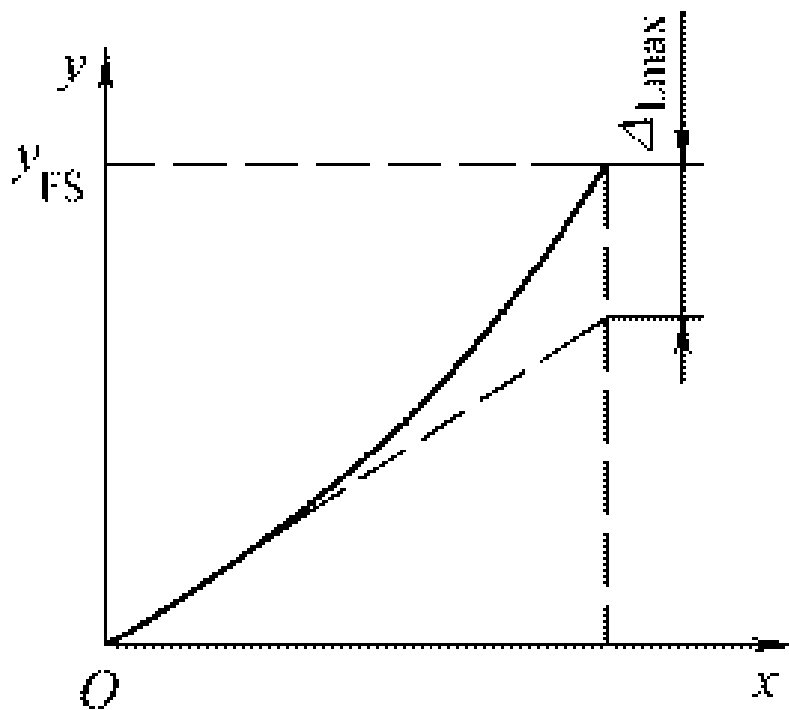
目前常用的拟合方法有：





线性度

理论拟合：


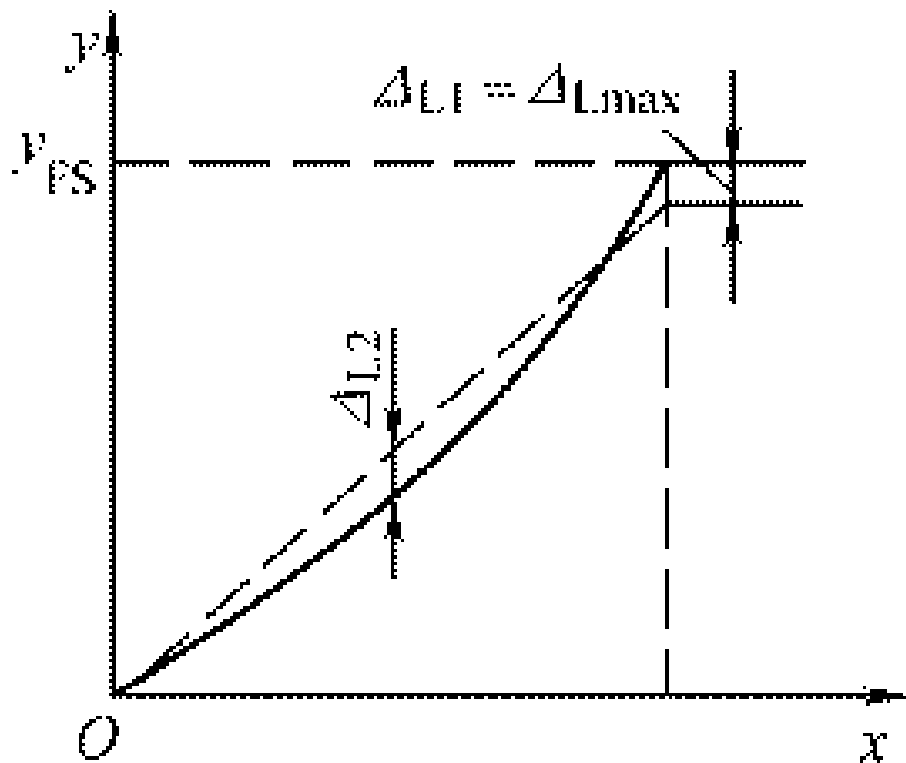


左图中，拟合直线为传感器的理论特性，与实际测试值无关。该方法十分简单，但一般说 $\Delta_{L_{\max}}$ 较大。



线性度

过零旋转拟合：

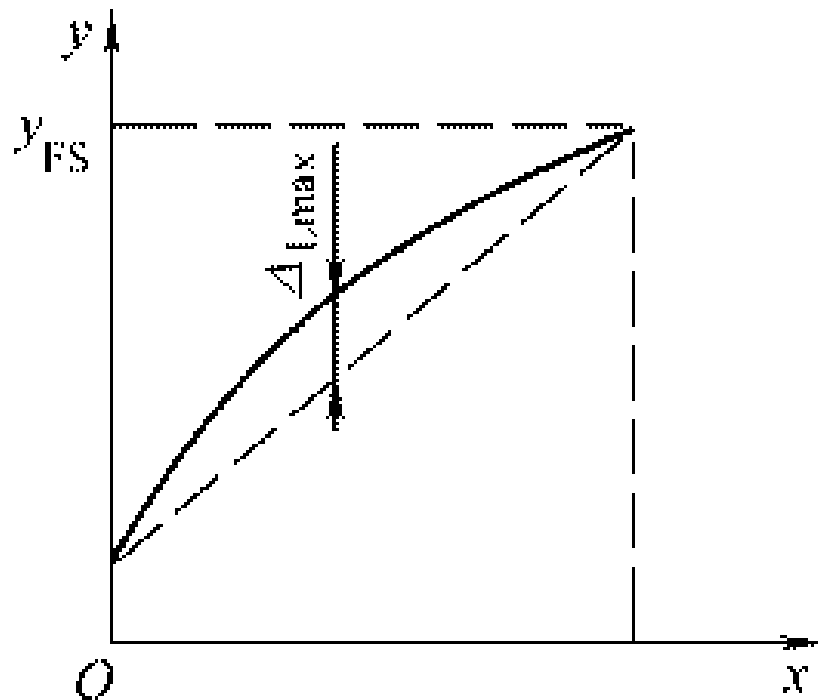


左图为过零旋转拟合，常用于曲线过零的传感器。拟合时，使 $\Delta_{L1} = \Delta_{L2} = \Delta_{Lmax}$ 。这种方法也比较简单，非线性误差比前一种小很多。



线性度

断点连线拟合：

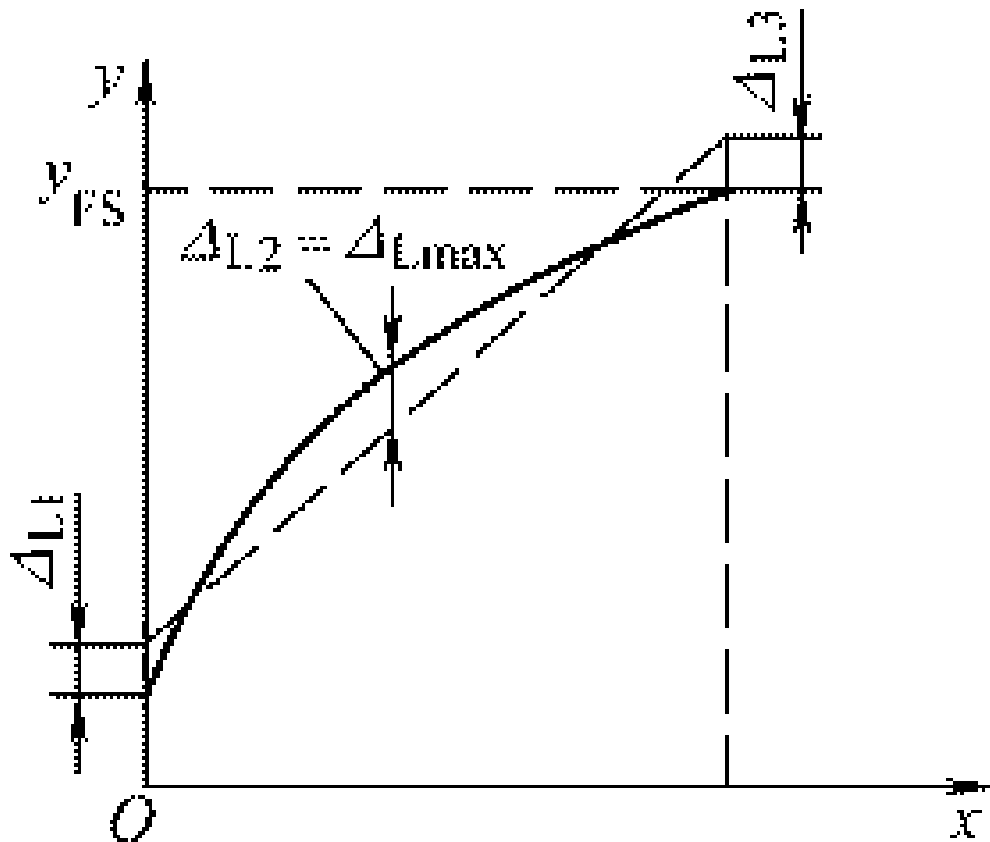


左图中，把输出曲线两端点的连线作为拟合直线。这种方法比较简便，但 $\Delta_{L\max}$ 也较大。



线性度

端点平移拟合：



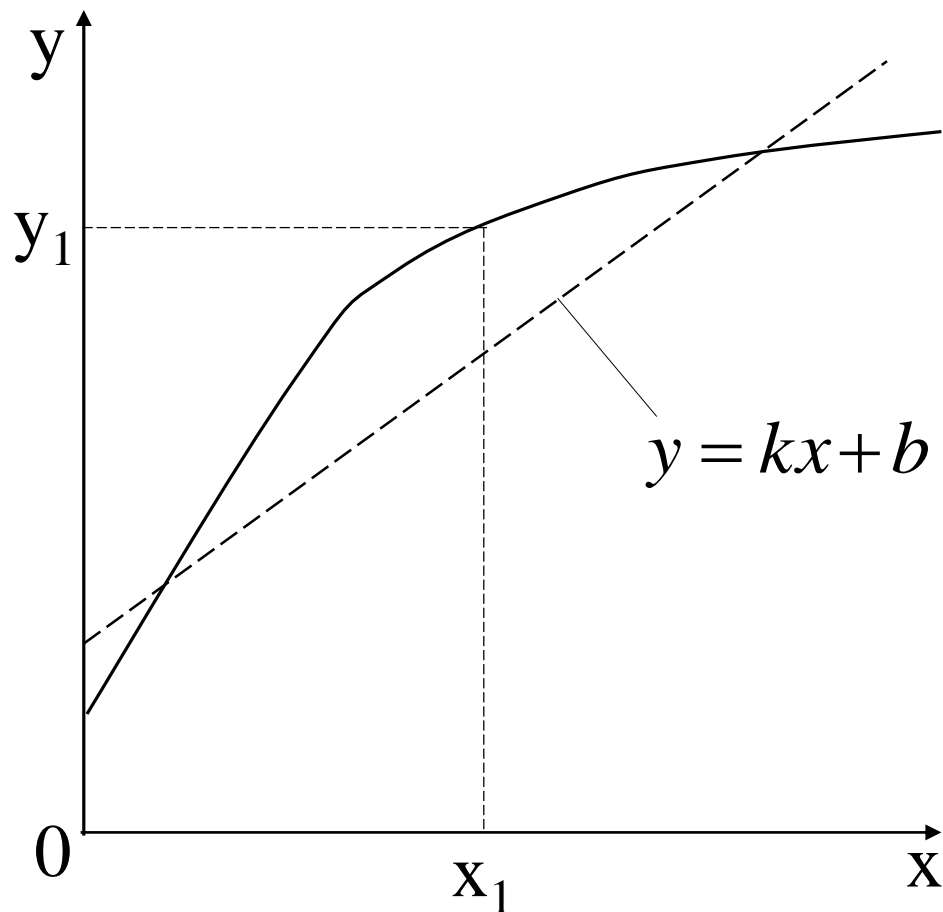
左图是在断点连线拟合直线的基础上使直线平移，移动距离为原先 Δ_{Lmax} 的一半，这样输出曲线分布于拟合直线的两侧， $\Delta_{L2} = \Delta_{L1} = \Delta_{L3} = \Delta_{Lmax}$ ，与图c)相比，非线性误差减小一半，提高了精度。





线性度

最小二乘拟合方法：



采用最小二乘法拟合时，如图1-3所示。设拟合直线方程为：

$$y = kx + b$$

若实际校准测试点有 n 个，则第 i 个校准数据与拟合直线上响应值之间的残差为：

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

最小二乘法拟合直线的原理就是使残差平方和为最小值，从而求出 k 和 b 的表达式为：

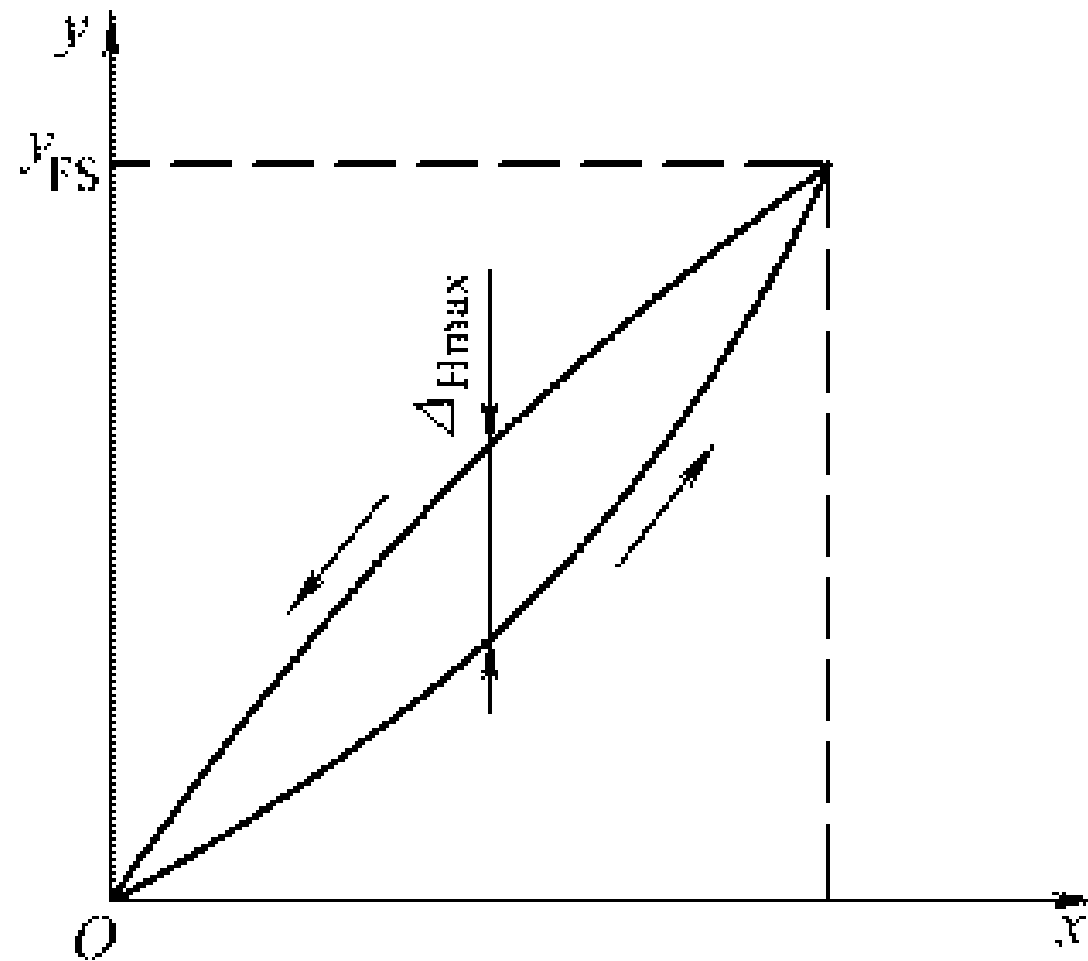
$$k = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad b = \frac{\sum x_i^2 y_i - \sum x_i \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$



迟滞



传感器在正(输入量增大)反(输入量减小)行程中输出输入曲线不重合的现象称为迟滞。迟滞特性如图所示,它一般是由实验方法测得。





迟滞误差一般以满量程输出的百分数表示，即

$$\gamma_H = \pm(1/2)(\Delta_{H\max} / y_{FS}) \times 100\%$$

式中 $\Delta_{H\max}$ ——正反行程间输出的最大差值。

迟滞误差的另一名称叫回程误差。回程误差常用绝对误差表示。检测回程误差时，可选择几个测试点。对应于每一个输入信号，传感器正行程及反行程中输出信号差值的最大者即为回程误差。

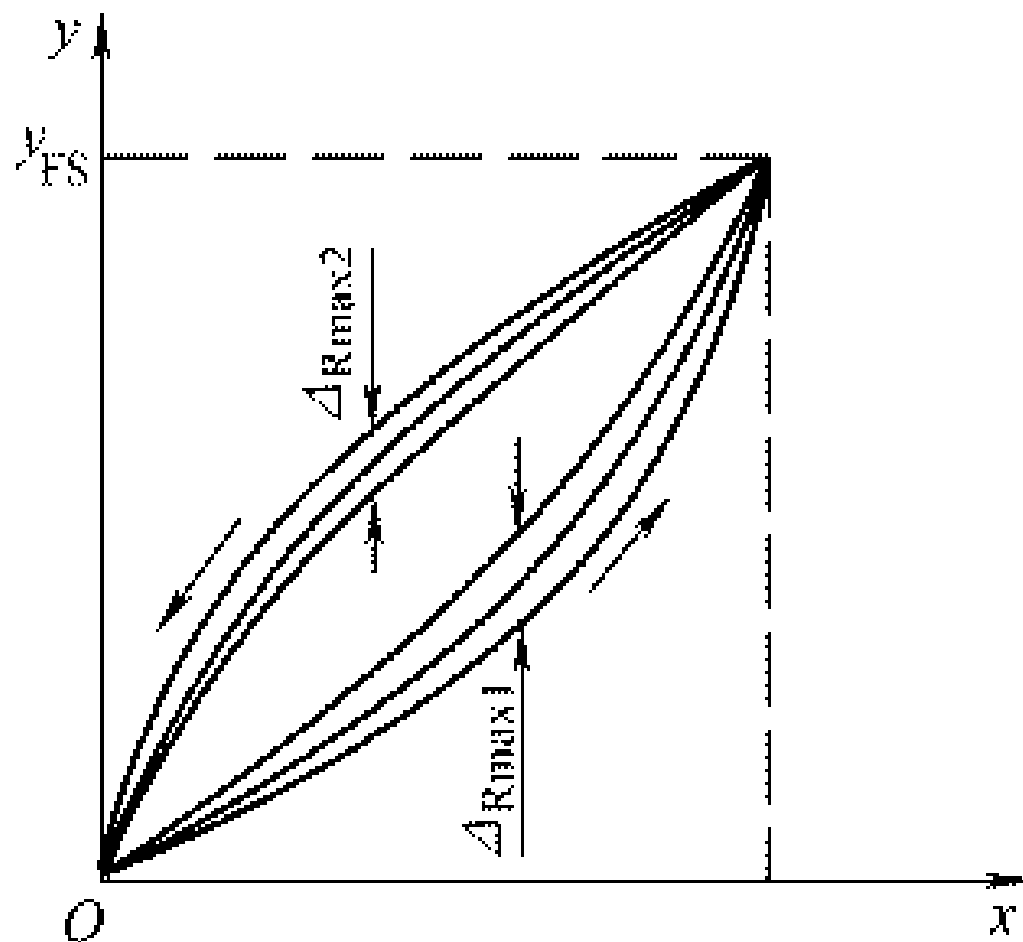


重复性



重复性是指传感器在输入按同一方向连续多次变动时所得特性**曲线不一致的程度**。

右图所示为输出曲线的重复特性，正行程的最大重复性误差为 Δ_{Rmax1} ，反行程的最大重复性误差为 Δ_{Rmax2} 。





重复性

重复性误差取这两个误差之中较大者为 $\Delta_{R\max}$ ，再以满量程 y_{FS} 输出的百分数表示，即

$$\gamma_R = \pm(\Delta_{R\max} / y_{FS}) \times 100\%$$

重复性误差也常用绝对误差表示。检测时也可选取几个测试点，对应每一点多次从同一方向趋近，获得系列输出值 y_{i1} ， y_{i2} ， $y_{i3} \dots$ ， y_{in} ，算出最大值与最小值之差或 3σ 作为重复性偏差 Δ_{Ri} ，在几个 Δ_{Ri} 中取出最大值 $\Delta_{R\max}$ 作为重复性误差。



灵敏度与灵敏度误差

传感器输出的变化量 Δy 与引起该变化量的输入变化量 Δx 之比即为其静态灵敏度，其表达式为：

$$k = \Delta y / \Delta x$$

由此可见，**传感器输出曲线的斜率就是其灵敏度**。对具有线性特性的传感器，其特性曲线的斜率处处相同，灵敏度 k 是一常数，与输入量大小无关。

由于某种原因，会引起灵敏度变化，产生灵敏度误差。灵敏度误差用相对误差表示，即：

$$\gamma_s = (\Delta k / k) \times 100\%$$



分辨力与阈值、稳定性

分辨力是指传感器能检测到的最小的输入增量。

在传感器输入零点附近的分辨力称为**阈值**。

稳定性是指传感器在长时间工作的情况下输出量发生的变化，有时称为长时间工作稳定性或零点漂移。





温度稳定性、抗干扰稳定性



温度稳定性又称为温度漂移，它是指传感器在外界温度变化时输出量发生的变化。

抗干扰稳定性是指传感器对外界干扰的抵抗能力。



静态测量不确定度

静态测量不确定度（传统上也称为静态误差）是指传感器在其全量程内任一点的输出值与其理论值的可能偏离程度。

静态误差的求取方法如下：把全部输出数据与拟合直线上对应值的残差，看成是随机分布，求出其标准偏差 σ ，即

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

式中 Δy_i ——各测试点的残差；

n ——测试点数。

取 2σ 或 3σ 值即为传感器的静态误差。



静态误差也可用相对误差来表示，即

$$\gamma = \pm(3\sigma / y_{FS}) \times 100\%$$

静态误差是一项综合性指标，它基本上包括了前面叙述的非线性误差、迟滞误差、重复性误差、灵敏度误差等，若这几项误差是随机的、独立的、正态分布的，也可以把这几个单项误差综合而得，即

$$\gamma = \pm\sqrt{\gamma_L^2 + \gamma_H^2 + \gamma_R^2 + \gamma_S^2}$$

第二节 传感器的动态特性

A

传感器的动态特性是指传感器对随时间变化的输入量的响应特性，传感器所检测的信号大多数是时间的函数。

B

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。





1、数学模型与传递函数

为了分析动特性，首先要写出数学模型，求得传递函数。
一般情况下，传感器输出 y 与被测量 x 之间的关系可写成：

$$f_1(d^n y / dt^n, \dots, dy / dt, y) = f_2(d^m x / dt^m, \dots, dx / dt, x)$$

不过，大多数传感器在其工作点附近一定范围内，其数学模型可用线性微分方程表示，即：

$$a_n d^n y / dt^n + \dots + a_1 dy / dt + a_0 y = b_m d^m x / dt^m + \dots + b_1 dx / dt + b_0 x$$



1、数学模型与传递函数

设 $x(t)$ 、 $y(t)$ 的初始条件为零，对上式两边进行拉氏变换，可得：

$$a_n s^n Y(s) + \cdots + a_1 s Y(s) + a_0 Y(s) = b_m s^m X(s) + \cdots + b_1 s X(s) + b_0 X(s)$$

由此可求得初始条件为零的条件下输出信号拉氏变换 $Y(s)$ 与输入信号拉氏变换 $X(s)$ 的比值

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = W(s) = \frac{b_m s^m + \cdots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + \cdots + a_1 s + a_0}$$

这一比值 $W(s)$ 就被定义为**传感器的传递函数**。



2、频率特性

输入量 x 按正弦函数变化时，输出量 y 也是同频率的正弦函数，其振幅和相位将随频率变化而变化。这一性质就称之为**频率特性**。设输入量为：

$$x = Ae^{j(\omega t + \varphi_0)}$$

获得的输出量为：

$$y = Be^{j(\omega t + \phi_0)}$$



2、频率特性

从而可得：

$$W(j\omega) = \frac{b_m (j\omega)^m + \cdots + b_1 (j\omega) + b_0}{a_n (j\omega)^n + \cdots + a_1 (j\omega) + a_0}$$

$W(j\omega)$ 为一复数，它可用代数形式及指数形式表示，即

$$W(j\omega) = k_1 + jk_2 = ke^{j\varphi}$$

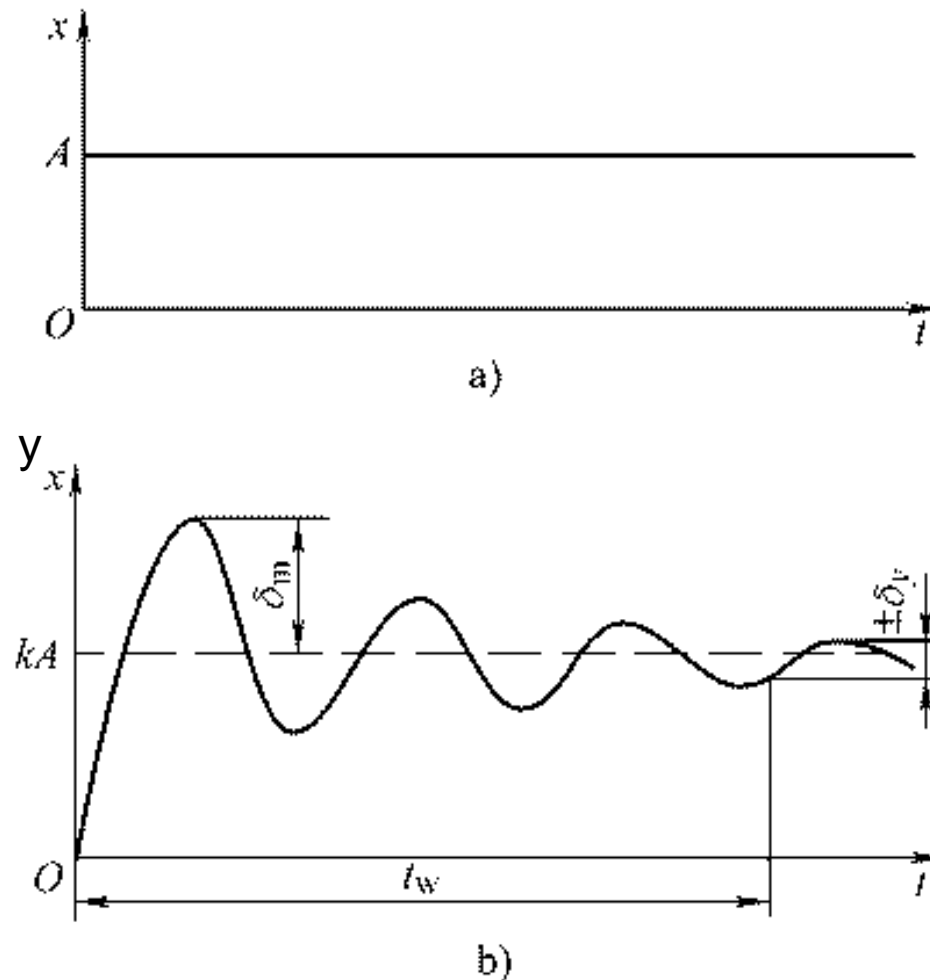
可见， k 值表示了输出量幅值与输入量幅值之比，即动态灵敏度， k 值是 ω 的函数，称为**幅频特性**，以 $k(\omega)$ 表示， j 值表示了输出量的相位较输入量超前的角度，它也是 ω 的函数，称为**相频特性**，以 $j(\omega)$ 表示。



3、过渡时间与稳定时间

过渡函数就是输入为阶跃信号的响应。传感器的输入由零突变到 A ，且保持为 A ，如图a)所示，输出 y 将随时间变化，如图b)所示。这一过程称为过渡过程， **$y(t)$ 称为过渡函数。**

当过渡过程基本结束， y 处于允许误差 δ_y 范围内所经历的时间称为**稳定时间 t_w** 。稳定时间也是重要的动态特性之一。当后续测量控制系统有可能受到过渡函数的极大值的影响时，过冲量 δ_m 应给予限制。





4、应用

现对二阶传感器进行具体分析。二阶传感器的方程为：

$$a_2 d^2 y / dt^2 + a_1 dy / dt + a_0 y = b_0 x$$

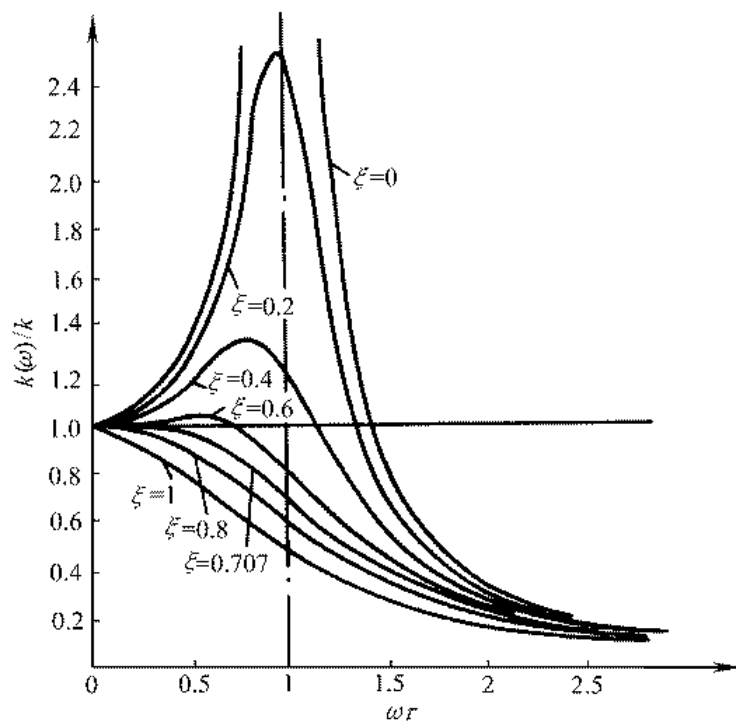
也可写成：

$$(\tau^2 s^2 + 2\xi\tau s + 1)Y = kX$$

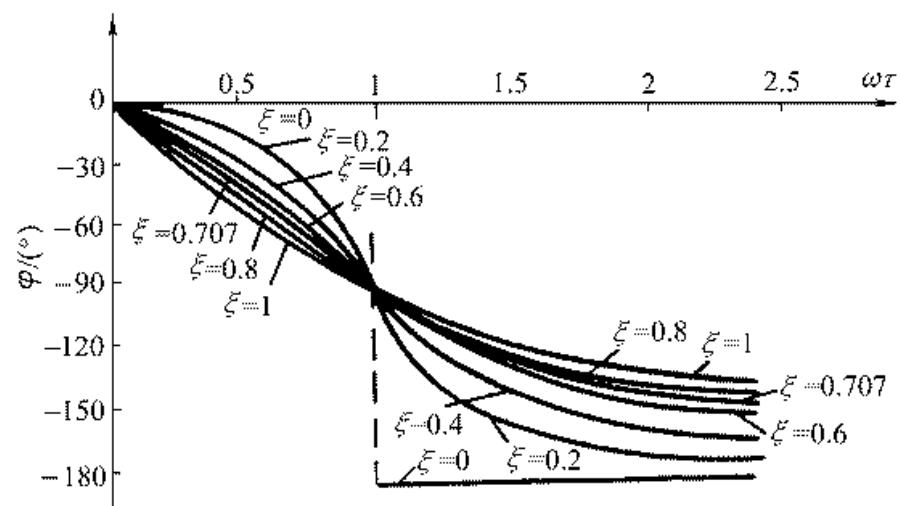
式中 τ ——时间常数， $\tau = \sqrt{a_2/a_0}$
 ω_0 ——自振角频率， $\omega_0 = 1/\tau$;
 ξ ——阻尼比， $\xi = a_1/(2\sqrt{a_0 a_2})$;
 k ——静态灵敏度， $k = b_0/a_0$ 。



4、应用



二阶传感器的幅频特性



二阶传感器的相频特性



4、应用

为了求得二阶传感器的过渡函数，需要在输入阶跃量 $x=A$ 的情况下求下列方程的解：

$$\tau^2 d^2 y / dt^2 + 2\xi\tau dy / dt + y = kA$$

上列方程的特征方程为：

$$\tau^2 s^2 + 2\xi\tau s + 1 = 0$$



4、应用

1) $0 < \xi < 1$ (有阻尼) :

$$\lambda_{1,2} = -(\xi \pm j\sqrt{1-\xi^2})/\tau$$

$$y(t) = kA[1 - \frac{\exp(-\xi t/\tau)}{\sqrt{1-\xi^2}} \sin(\frac{\sqrt{1-\xi^2}}{\tau}t + \arctan \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{\xi})]$$

2) $\xi=0$ (零阻尼) :

$$y(t) = kA[1 - \sin(t/\tau + \varphi_0)]$$

3) $\xi=1$ (临界阻尼) :

$$\lambda_{1,2} = -1/\tau$$

$$y(t) = kA[1 - \exp(-t/\tau) - \frac{t}{\tau} \exp(-t/\tau)]$$

4) $\xi > 1$ (过阻尼) :

$$\lambda_{1,2} = -(\xi \pm \sqrt{\xi^2 - 1})/\tau$$

$$y(t) = kA \times [1 + \frac{-\xi - \sqrt{\xi^2 - 1}}{2\sqrt{\xi^2 - 1}} \exp(\frac{-\xi + \sqrt{\xi^2 - 1}}{\tau}t) - \frac{\xi + \sqrt{\xi^2 - 1}}{2\sqrt{\xi^2 - 1}} \exp(\frac{-\xi - \sqrt{\xi^2 - 1}}{\tau}t)]$$

第三节 传感器的标定

A

传感器标定有两个含义。其一是确定传感器的性能指标；其二是明确这些性能指标所适用的工作环境。本章仅限于讨论第一个问题。

B

传感器的标定有静态标定和动态标定两种。静态标定的目的是确定传感器静态指标，主要是线性度、灵敏度、滞后和重复性。动态标定的目的是确定传感器动态指标，主要是时间常数、固有频率和阻尼比。





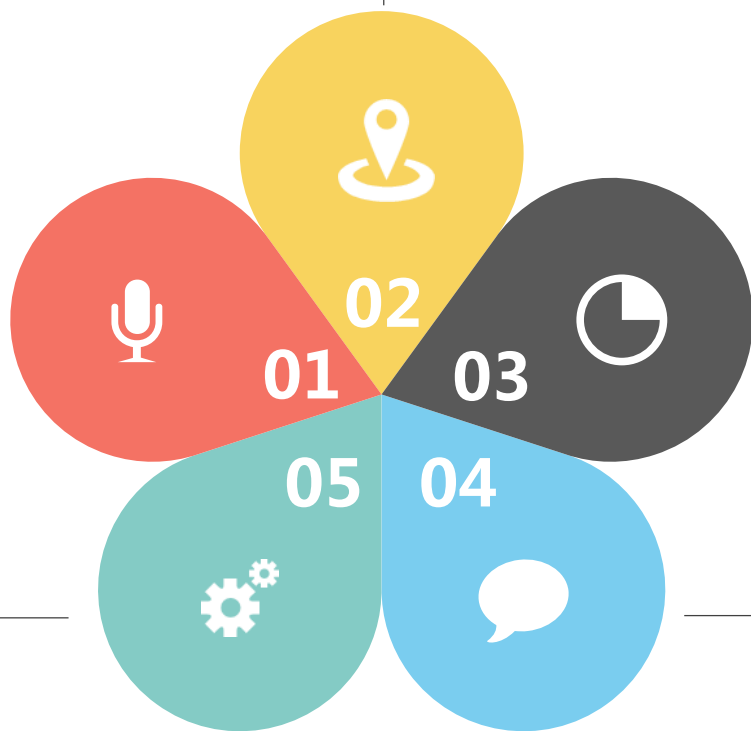
1、传感器静态特性的标定方法

一般的静态标定包括如下步骤：

根据传感器量程分点情况，由小到大、逐点递增输入标准量值，并记录下与各点输入值相对应的输出值。

将传感器全量程(测量范围)分成若干等间距点。

对测试数据进行必要的处理，根据处理结果就可以得到传感器校正曲线，进而可以确定出传感器的灵敏度、线性度、迟滞和重复性。



将输入量值由大到小、逐点递减，同时记录下与各点输入值相对应的输出值。

按2、3所述过程，对传感器进行正、反行程往复循环多次(一般为3~10次)测试，将得到的输出—输入测试数据用表格列出或画成曲线。



2、传感器动态特性的实验确定法

传感器的动态标定，实质上就是**通过实验得到传感器动态性能指标的具体数值**。所以，下面讨论动态特性的实验确定法。确定方法常常因传感器的形式(如电的、机械的、气动的等)不同而不完全一样，但从原理上一般可分为阶跃信号响应法、正弦信号响应法、随机信号响应法和脉冲信号响应法等。

应该指出，标定系统中所用**标准设备的时间常数应比待标定传感器的小得多，而固有频率则应高得多**。这样它们的动态误差才可忽略不计。



第四节 传感器的技术指标



传感器的技术指标

基本参数指标	环境参数指标	可靠性指标	其它指标
<p>量程指标：量程范围、过载能力等</p> <p>灵敏度指标：灵敏度、分辨力、满量程输出等</p> <p>精度有关指标：测量不确定度、误差、线性、滞后、重复性、灵敏度误差、稳定性</p> <p>动态性能指标：固有频率、阻尼比、时间常数、频率响应范围、频率特性、临界频率、临界速度、稳定时间等</p>	<p>温度指标：工作温度范围、温度误差、温度漂移、温度系数、热滞后等</p> <p>抗冲振指标：容许各向抗冲振的频率、振幅及加速度、冲振所引入的误差</p> <p>其他环境参数：抗潮湿、抗介质腐蚀能力、抗电磁场干扰能力等</p>	<p>工作寿命、平均无故障时间、保险期、疲劳性能、绝缘电阻、耐压及抗电火花等</p>	<p>使用有关指标：供电方式(直流、交流、频率及波形等)、功率。各项分布参数值使用电压范围与稳定度等</p> <p>外形尺寸、重量壳体材质、结构特点等安装方式馈线电缆等</p>



第一章 传感器的一般特性

- » 1.传感器的静态特性
- » 2.传感器的动态特性
- » 3.传感器的标定
- » 4.传感器的技术指标

谢 谢 关 注



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



关于我们

PPT制作团队：哈尔滨工业大学精密仪器研究所

参与制作人员：唐文彦、张晓琳、张烈山、李加福、王梅宝

于航、李俊瑶、卢佳宇、李开琴、胡润丽

团队联系方式：哈尔滨市南岗区西大直街92号哈尔滨工业大学电机楼

办公电话：0451-86402601