

# 第1章

## 传感器技术基础

# 第1章：传感器技术基础



## 传感器的一般数学模型



## 传感器的特性与指标



## 改善传感器性能的技术途径



## 传感器的标定与校准

# 1.1 传感器的一般数学模型

➤ **静态特性是指：**传感器在稳态信号作用下，其输出——输入关系。衡量测试装置静态特性的重要指标有四个：**线性度、灵敏度、迟滞、重复性等。**

➤ **动态特性是指：**对于动态的输入信号传感器的响应特性。

## 1.1.1 静态模型

在一般情况下，传感器的输入-输出特性是非线性的，用多项式表示为：

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

其中  $y$ —输出量；  $x$ —输入物理量；

$a_0$ —零位输出；  $a_1$ —传感器线性灵敏度；

$a_2, a_3, \cdots, a_n$ —待定常数；

在具体研究时，可不考虑零位输出，即  $a_0 = 0$ 。

现主要介绍3种特殊情况。

### (1) 理想的线性特性

在这种情况下

$$a_0 = a_2 = a_3 = \cdots = a_n = 0$$

可得到

$$y = a_1 x$$

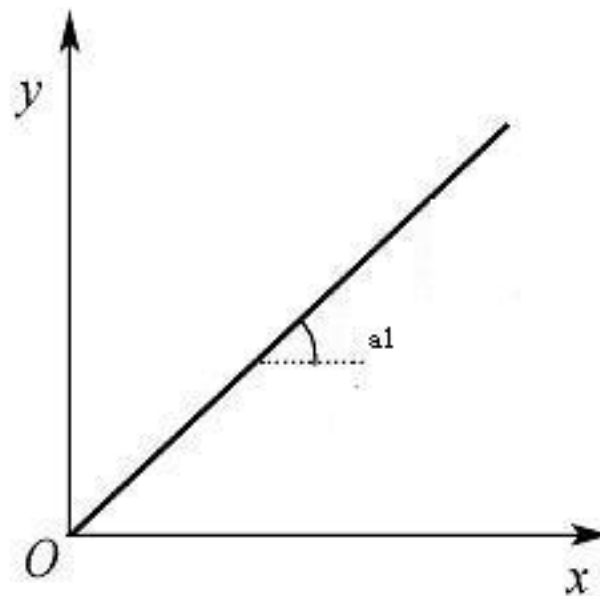


图2-1 传感器线性特性图

## (2) 仅有偶次非线性项

在这种情况下

$$a_0 = a_3 = a_5 = \cdots = 0$$

可得到

$$y = a_1 x + a_2 x^2 + a_4 x^4 + \cdots$$

### (3) 仅有齐次非线性项

在这种情况下

$$a_0 = a_2 = a_4 = \cdots = 0$$

可得到

$$y = a_1 x + a_3 x^3 + a_5 x^5 + \cdots$$

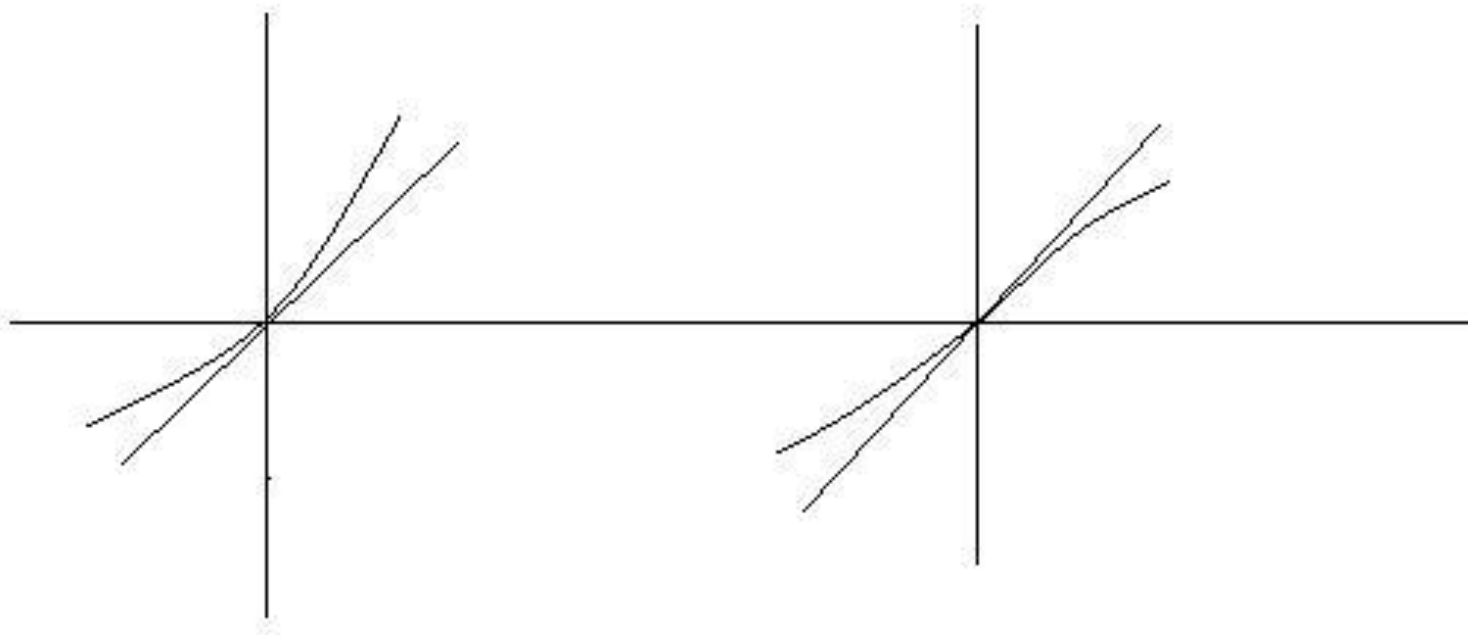


图2-2 传感器非线性特性图



对比上图可以看出：仅有奇次非线性项的特性曲线比仅有偶次非线性项的特性曲线具有更宽的近似线性范围。

为改善线性范围，常采用差动传感器的方式

由 
$$y_1 = a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \cdots + a_nx^n$$

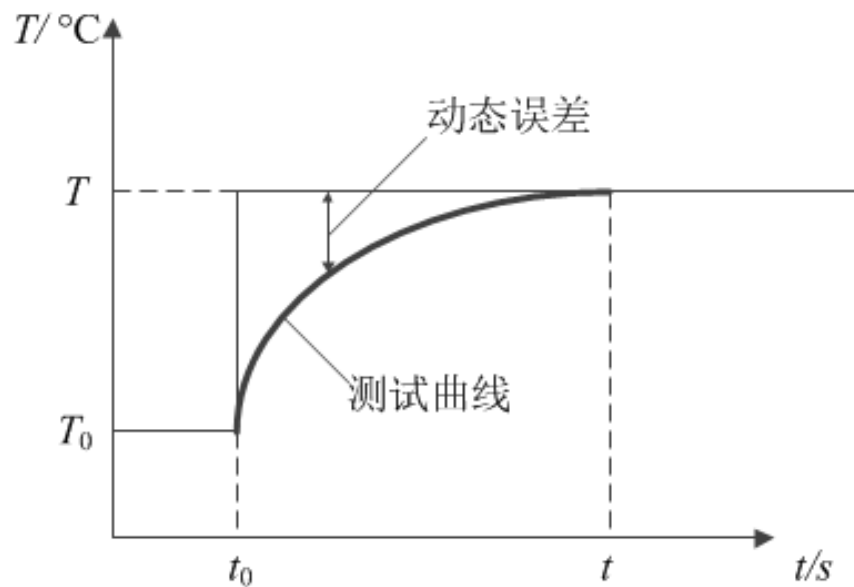
$$y_2 = -a_1x + a_2x^2 - a_3x^3 + \cdots + (-1)^n a_nx^n$$

可得到 
$$y = (y_1 - y_2) = 2(a_1x + a_3x^3 + a_5x^5 + \cdots)$$

差动传感器使线性得到改善，同时使灵敏度提高一倍。

## 1.1.1 动态模型

看个例子：



热电偶测量温度过程曲线



## 1.1.1 动态模型

### 动态特性与静态特性区别

系统中存在储能元件

惯性元件（质量、电感）

容性元件（电容、热容等）

### 动态响应特性参数

动态误差

响应速度（响应时间，时间常数，延迟时间等）

响应带宽

## 1.1.1 动态数学模型

### 微分方程

$$\begin{aligned} & a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) \\ &= b_m \frac{d^m x(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x(t)}{dt^{m-1}} + \cdots + b_1 \frac{dx(t)}{dt} + b_0 x(t) \end{aligned}$$

- $y$ : 输出量;  $x$ : 输入量;  $t$ : 时间;
- 系统的阶次由输入量最高微分阶次 $n$ 决定;
- $a_n, a_{n-1}, \dots, a_0$ 和 $b_m, b_{m-1}, \dots, b_0$ 均为与系统结构有关的常数。

# 线性时不变系统的重要性质

➤ 两个性质：

➤ 叠加性 
$$\sum_{i=1}^n x_i(t) \rightarrow \sum_{i=1}^n y_i(t)$$

➤ 频率保持性：

$$x(t) = A \sin \omega t \rightarrow y(t) = B(\omega) \sin[\omega t + \varphi(\omega)]$$

**对微分方程进行拉普拉斯 (Laplace) 变换, 有**

$$\begin{aligned} Y(s) & \left( a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_1 s + a_0 \right) \\ & = X(s) \left( b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \cdots + b_1 s + b_0 \right) \end{aligned}$$

**定义：初始值均为0时，输出 $y(t)$ 的拉式变换 $Y(s)$ 与输入 $x(t)$ 的拉式变换 $X(s)$ 之比，称为**传递函数**，记为 $H(s)$**

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{\left( b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \cdots + b_1 s + b_0 \right)}{\left( a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_1 s + a_0 \right)}$$

# 第1章：传感器技术基础



传感器的一般数学模型



传感器的特性与指标



改善传感器性能的技术途径



传感器的标定与校准

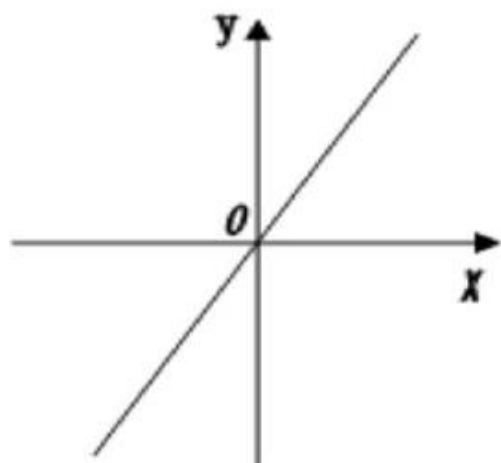
## 1.2 传感器特性与指标

➤ **静态特性是指：**表示传感器在被测输入量各个值处于稳定状态时的输入-输出关系。

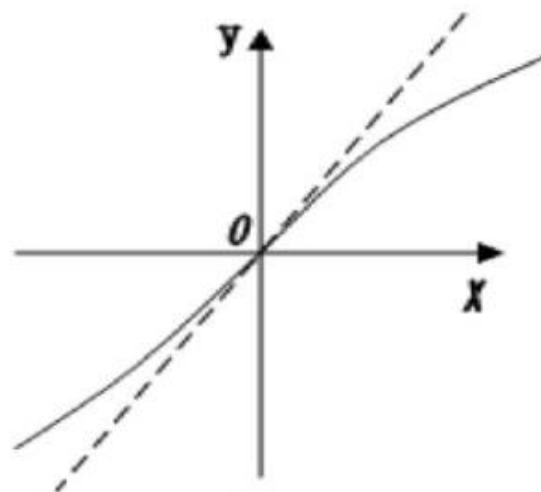
➤ **动态特性是指：**反映传感器对于时间变化的输入量的响应特性。



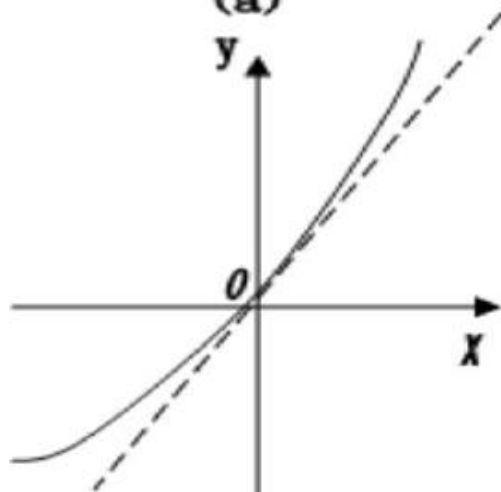
## 1.2.1 静态特性



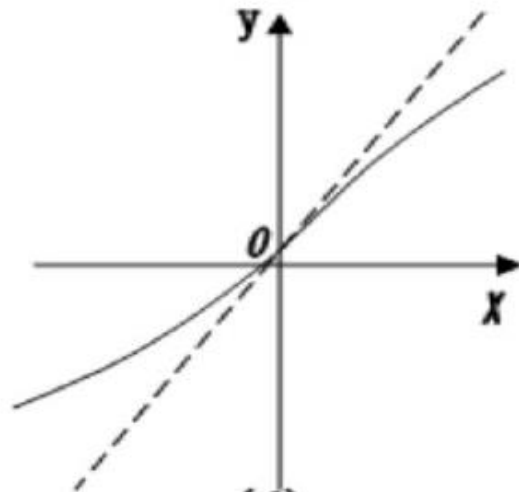
(a)



(b)



(c)



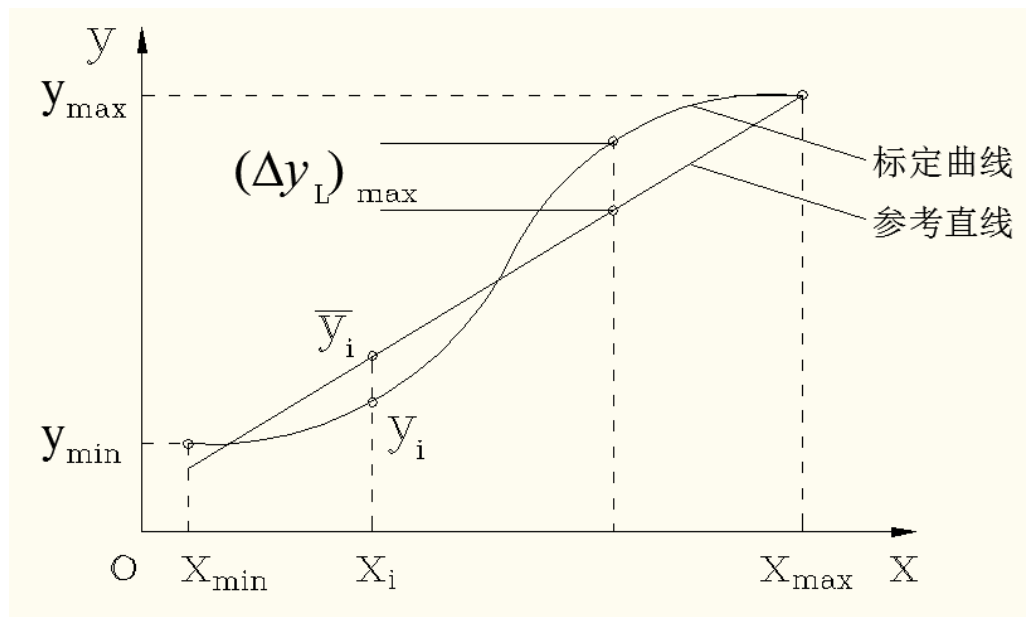
(d)

## 1.2.1 静态特性

### ➤ 1. 线性度: Linearity

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

$$e_L = \pm \frac{\Delta L_{\max}}{y_{FS}} \times 100\%$$



# 直线拟合方法

## □ 理论直线法

以传感器的理论特性线作为拟合直线，  
与实际测试值无关

## □ 端点直线法

以传感器校准曲线两端点间的连线作为  
拟合直线

# 直线拟合方法

## □ “最佳直线”法（端点平行法、端点平移法）

以“最佳直线”作为拟合直线，保证传感器正、反行程校准曲线对它的正、负偏差相等且最小。

## □ 最小二乘法

按最小二乘原理求取拟合直线，保证传感器校准数据的残差平方和最小。

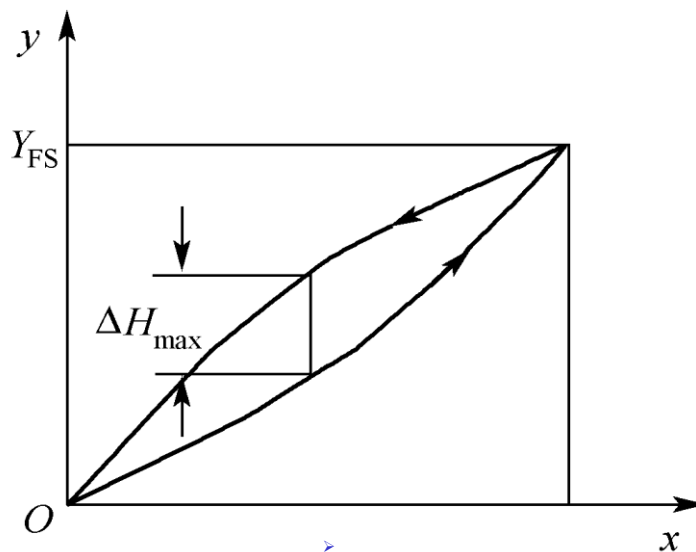
## 1.2.1 静态特性

### ➤ 2. 迟滞（回差）：Hysteresis

在相同工作条件下，**传感器在正、反行程中输入-输出曲线的不重合程度。**

正、反行程的最大偏差与满量程之比。

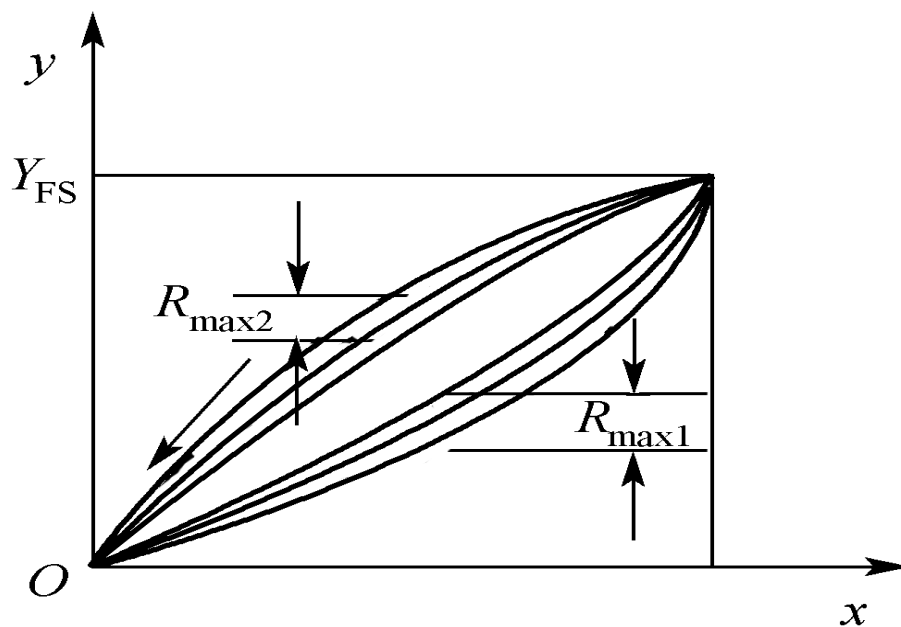
$$e_H = \frac{\Delta H_{\max}}{y_{FS}} \times 100\%$$



## 1.2 静态特性

### ➤ 3. 重复性: Repeatability

在同一工作条件下，传感器的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。



重复性误差反映的是校准数据的离散程度，属于随机误差。

$$e_R = \pm \frac{a\sigma_{\max}}{y_{FS}} \times 100\%$$

$a$ ——置信系数，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%；

$\sigma$ ——各校准点正行程与反行程输出值的标准偏差中之最大值。（Bessel公式, 极差法）

## 1.2 静态特性

### ➤4. 灵敏度: Sensitivity

传感器输出量增量与被测输入量增量之比。

线性传感器

$$K = \Delta y / \Delta x$$

非线性传感器

$$K = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta y}{\Delta x} \right) = \frac{dy}{dx}$$



## ➤ 5. 分辨力: Resolution

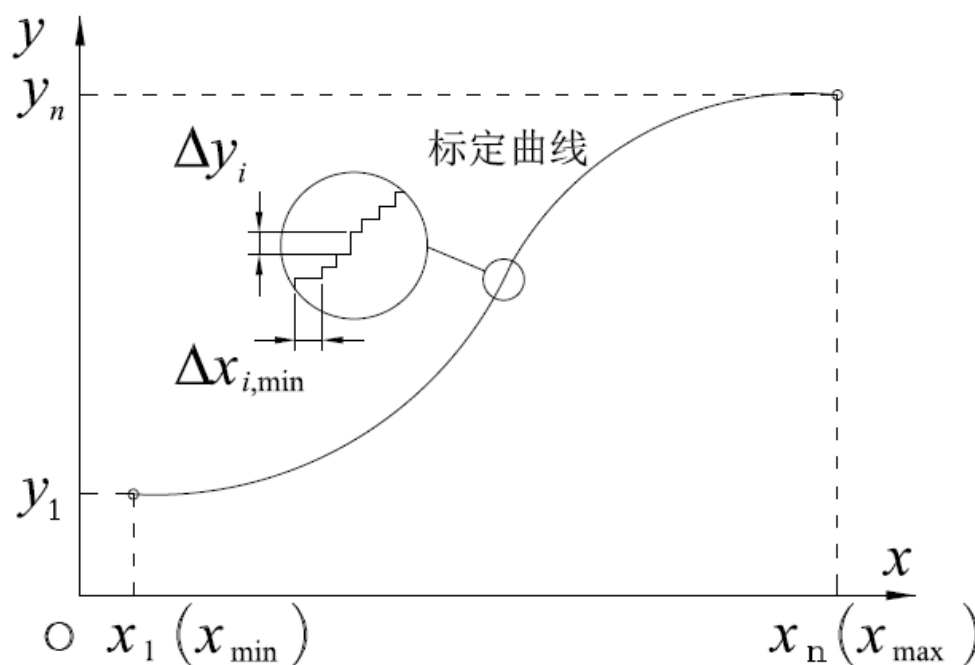
在规定测量范围内能测出的输入量的最小值。

分辨力

$$\Delta x_{i, \min}$$

分辨率

$$r_i = \frac{\Delta x_{i, \min}}{x_{\max} - x_{\min}} \times 100\%$$



分辨力：最小量程的单位值，有量纲；

分辨率：满量程的百分数，无量纲；

## ➤ 6. 阈值: **Threshold**

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

## ➤ 7. 稳定性: **Stability**

意义：又称长期稳定性

表示：用输出值与起始标定之间的差异来表示，也常用有效期来表示

## ➤ 8. 漂移: Drifting

意义: 传感器不因输入的原因而发生的变化

零点漂移: 时漂、温漂

灵敏度漂移

## ➤ 9. 静态误差(精度): Accuracy

是评价传感器的综合性能指标, 定量描述方法包括:

### 1) 简化表示——粗略估计

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

$$e_S = \pm (e_L + e_H + e_R)$$

## 2) 用测量不确定度来表征

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

$$e_s = \pm \frac{(2 \sim 3)\sigma}{y_{FS}} \times 100\%$$

假设前提——没有系统误差

### 3) 系统误差+随机误差分开表示

$$e_s = \pm \frac{\left| (\Delta y)_{\max} \right| + a\sigma}{y_{\text{FS}}} \times 100\%$$

精度等级：去掉±和%后的数值。

0.05、0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.0、5.0 等。

## 1.2.2 传感器动态特性

已知传递函数 $H(s)$

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

令 $s=j\omega$ ，可得：

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

# 频率响应函数

□  $H(j\omega)$  一般为复数，写成实部和虚部的形式：

$$H(j\omega) = R_e(\omega) + jI_m(\omega)$$

$$H(j\omega) = A(\omega)e^{j\phi(\omega)}$$

**幅频特性：**输出与输入幅值比与频率的对应关系

$$A(\omega) = |H(j\omega)| = \sqrt{R_e(\omega)^2 + I_m(\omega)^2}$$

$$\phi(\omega) = \angle H(j\omega) = \arctan \frac{I_m(\omega)}{R_e(\omega)}$$

**相频特性：**输出与输入的相位差与频率的对应关系



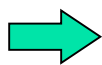
# 频率响应函数

- $A(\omega)$ -  $\omega$  幅频特性曲线;  
 $\varphi(\omega)$ -  $\omega$  相频特性曲线。
- $20\lg A(\omega)$ - $\lg \omega$  对数幅频曲线;  
 $\varphi(\omega)$ - $\lg \omega$  对数相频曲线;  
总称为**伯德图 (Bode图)**。
- $\text{Im}(\omega)$ - $\text{Re}(\omega)$  曲线 (在复平面上) 并注出相应频率  $\omega$ , 称为频率特性的极坐标图或**乃奎斯特图 (Nyquist图)**。

## 零阶环节

在零阶传感器中，只有 $a_0$ 与 $b_0$ 两个系数，微分方程为

$$a_0 y = b_0 x$$



$$y = (b_0 / a_0) x = Kx$$

$K$ ——静态灵敏度

# 一阶环节

➤ 微分方程除系数 $a_1$ ,  $a_0$ ,  $b_0$ 外其他系数均为0, 则

$$a_1(dy/dt) + a_0y = b_0x \quad \Rightarrow \quad \frac{a_1}{a_0} \frac{dy}{dt} + y = \frac{b_0}{a_0} x \quad \Rightarrow \quad \tau \frac{dy}{dt} + y = Kx$$

$\tau$ ——时间常数(  $\tau = a_1/a_0$  );

$K$ ——静态灵敏度(  $K = b_0/a_0$  )

➤ 传递函数:  $H(s) = \frac{K}{1 + \tau s}$

➤ 频率特性:  $H(j\omega) = \frac{K}{1 + j\omega\tau}$

时间常数  $\tau$  越小，  
系统的频率特性越好

➤ 幅频特性:  $|H(j\omega)| = \frac{K}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}}$

➤ 相频特性:  $\phi(\omega) = \arctan(-\omega\tau)$

负号表示相位滞后

## 二阶环节

很多传感器，如振动传感器、压力传感器等属于二阶传感器，其微分方程为：

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

$$\left( \frac{1}{\omega_n^2} s^2 + \frac{2\xi}{\omega_n} s + 1 \right) Y = kX$$

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

➤传递函数

$$H(s) = k / \left[ 1 + 2\xi \left( \frac{s}{\omega_n} \right) + \left( \frac{s}{\omega_n} \right)^2 \right]$$

➤频率特性

$$H(j\omega) = k / \left[ 1 + 2j\xi \left( \frac{\omega}{\omega_n} \right) - \left( \frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 \right]$$

➤幅频特性

$$k(\omega) = k / \sqrt{\left( 1 - \left( \frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 \right)^2 + 4\xi^2 \left( \frac{\omega}{\omega_n} \right)^2}$$

➤相频特性

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

➤不同阻尼比情况下相对幅频特性即动态特性与静态灵敏度之比的曲线如图。

# 传感器性能指标

基本参数指标	环境参数指标	可靠性指标	其他指标
<p>量程指标： 量程范围、过载能力等</p> <p>灵敏度指标： 灵敏度、满量程输出、分辨力、输入输出阻抗等</p> <p>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</p> <p>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、稳态误差、临界速度、临界频率等</p>	<p>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</p> <p>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</p> <p>其他环境参数： 抗潮湿、抗介质腐蚀、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、反抗飞弧性能等</p>	<p>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</p> <p>结构方面： 外形尺寸、重量、外壳、材质、结构特点等</p> <p>安装连接方面： 安装方式、馈线、电缆等</p>

# 第1章：传感器技术基础



传感器的一般数学模型



传感器的特性与指标



改善传感器性能的技术途径



传感器的标定与校准



## 1.3 改善传感器性能的途径

### 传感器的误差来源

- **内部原因：** 感器内部产生的噪声包括敏感元件，转换元件和转换电路元件等产生的噪声以及电源产生的噪声。例如光电真空管放射不规则电子，半导体载流子扩散等产生的噪声。降低元件的温度可减小热噪声，对电源变压器采用静电屏蔽可减小交流脉动噪声等。

## ➤ 外部原因

从外部混入传感器的躁动哼，按其产生原因可分为机械噪声（如振动，冲击）、音响噪声、热噪声（如因热辐射使元件相对位移或性能变化）、电磁噪声和化学噪声等。对振动等机械噪声可采用防振台或将传感器固定在质量很大的基础台上加以抑制；而消除音响噪声的有效办法是把传感器用隔音器材围上或放在真空容器里；消除电磁噪声的有效办法是屏蔽和接地或使传感器远离电源线，或使输出线屏蔽，输出线绞拧在一起等。

# 改善传感器的技术途径

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

# 第1章：传感器技术基础



传感器的一般数学模型



传感器的特性与指标



改善传感器性能的技术途径



传感器的标定与校准

## 1.4 传感器的标定与校准

- **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存储后进行的性能复测。

本质相同！

## 标定系统组成：

- (1) 标准发生器
- (2) 标准测试系统
- (3) 待标定传感器所配接的信号调节器和显示、记录器等

- 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。

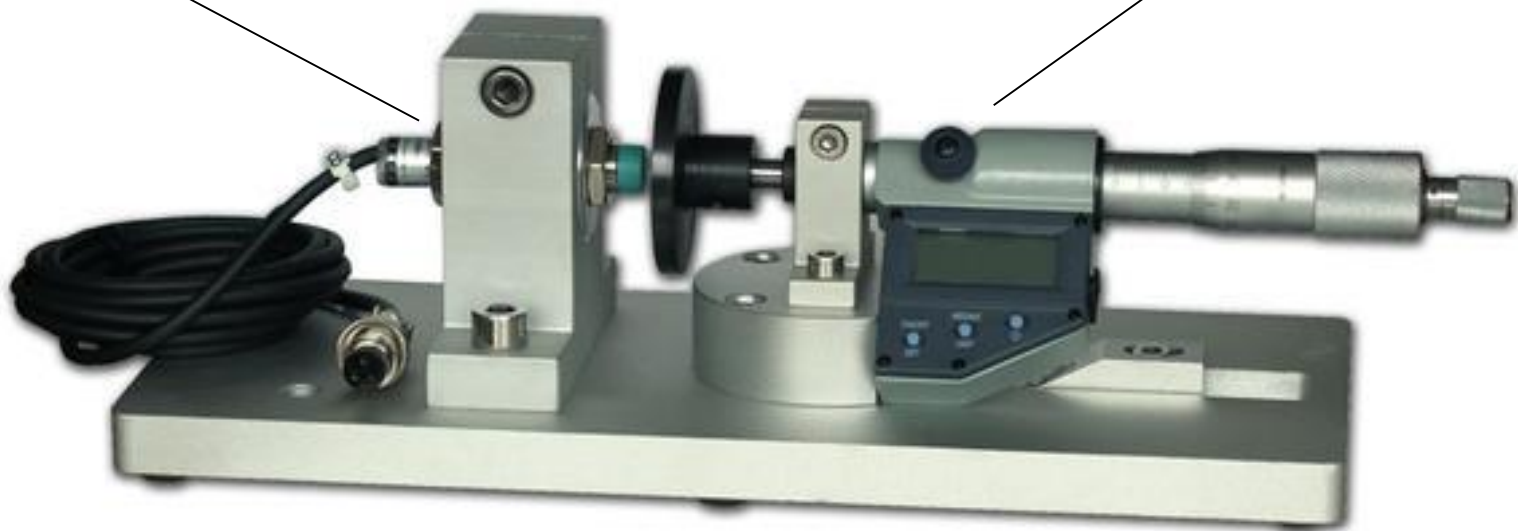
## ➤ 静态标定

——静态特性指标（灵敏度、非线性、迟滞、重复性等）



位移传感器

电子千分尺

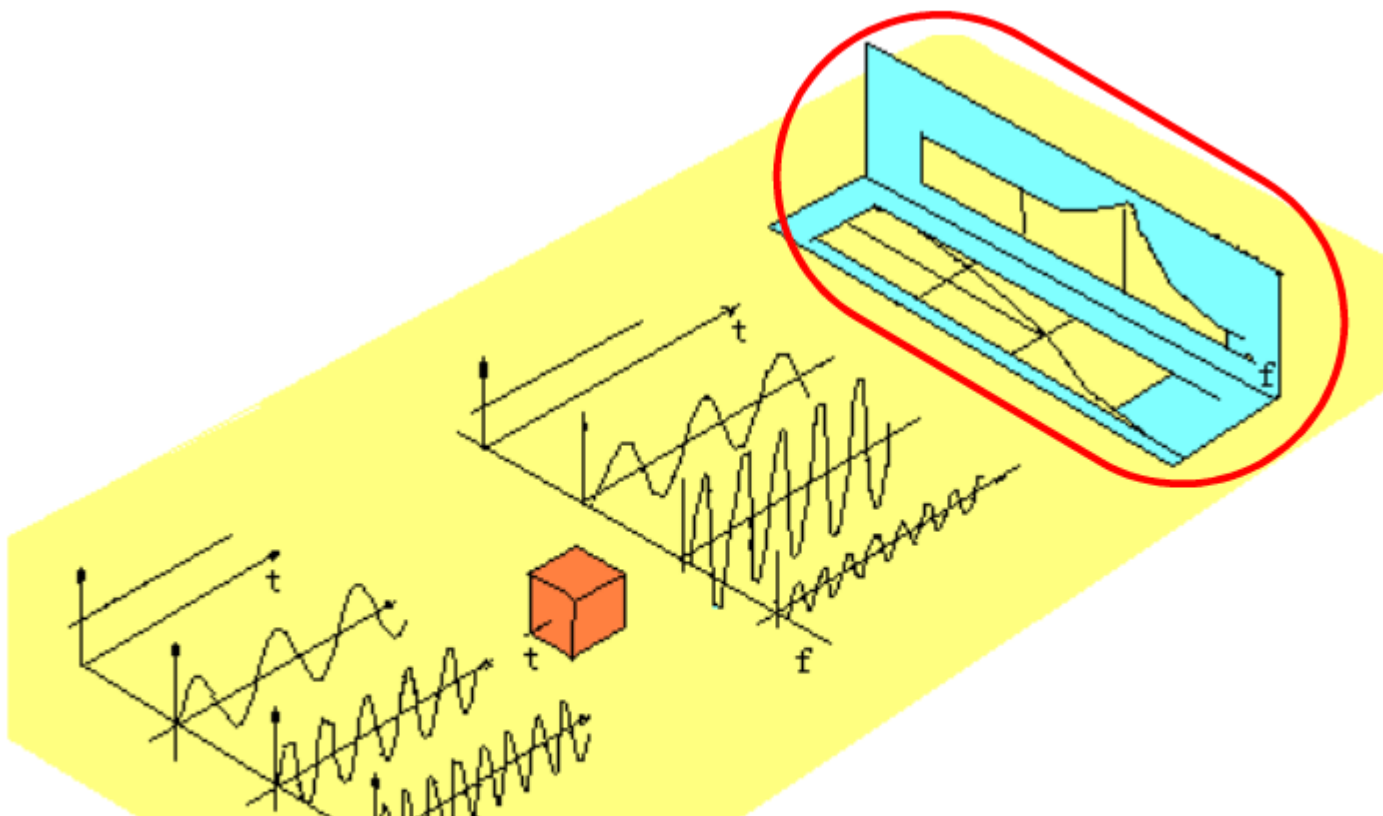


## ➤ 动态标定

### ——动态特性指标

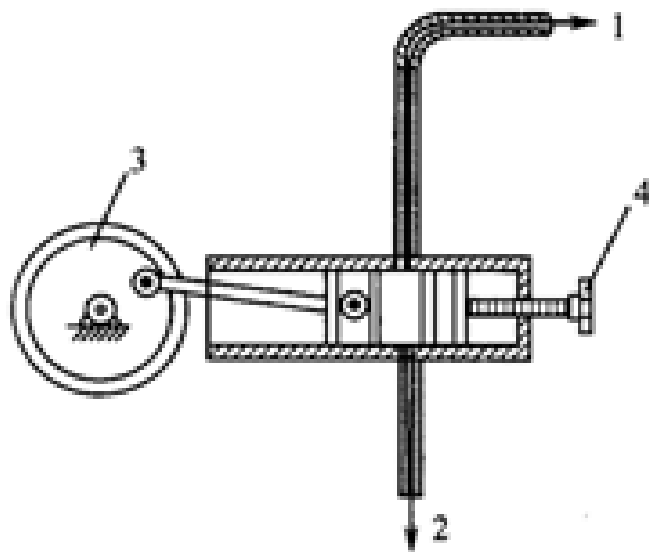
- 用于确定传感器的动态性能，如固有频率和频响范围等、动态灵敏度等。
- 传感器进行动态标定时，需有一标准信号对它激励，常用的标准信号有两类：一类是周期函数，如正弦波等；另一类是瞬变函数，如阶跃波等。

# 周期函数标定

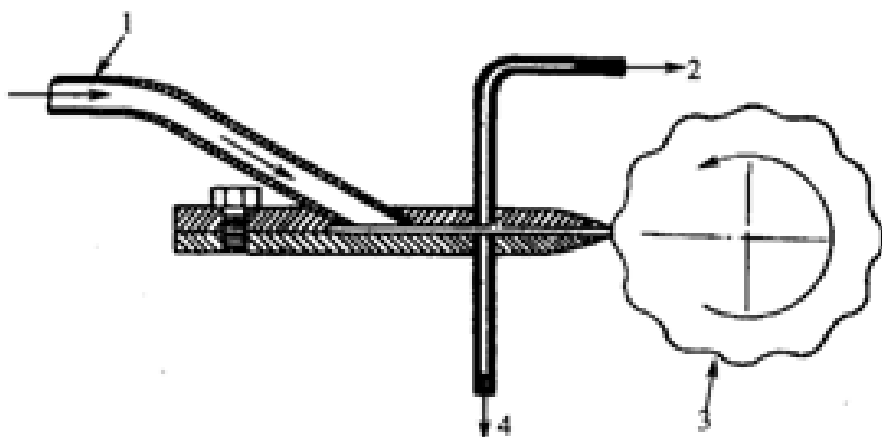


从系统最低测量频率 $f_{\min}$ 到最高测量频率 $f_{\max}$ ，逐步增加正弦激励信号频率 $f$ ，记录下各频率对应的幅值比和相位差，绘图就得到系统幅频和相频特性。

## 周期信号源

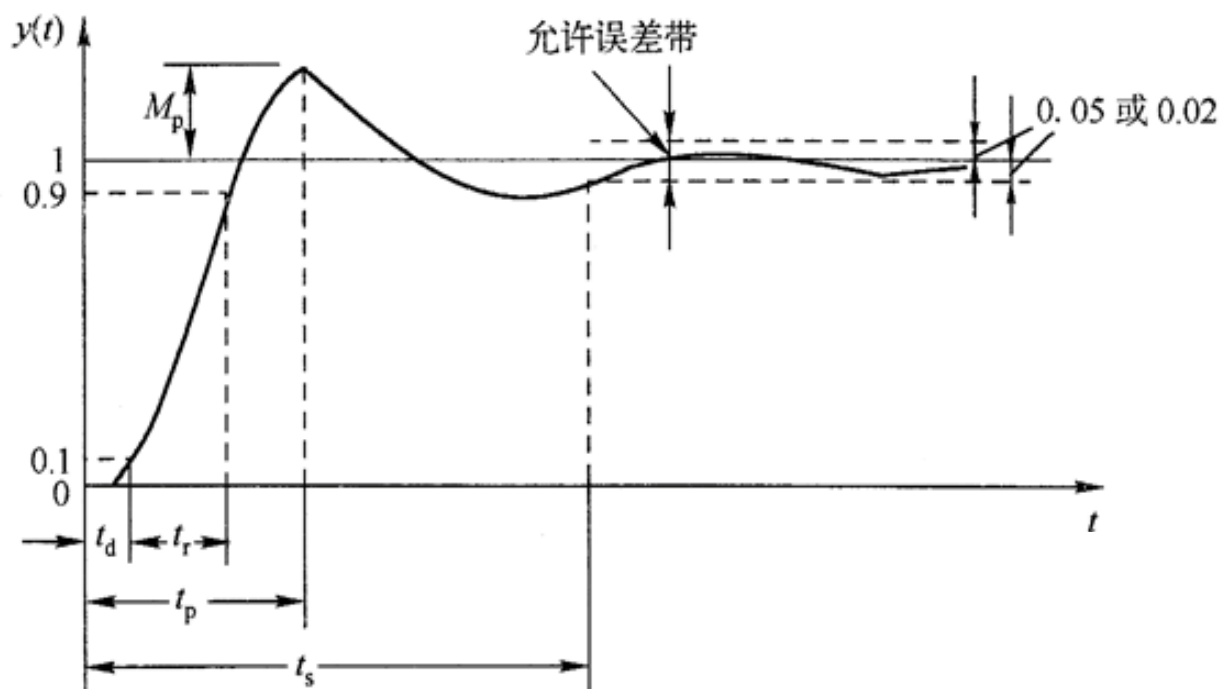


活塞与缸筒式  
稳态压力源



凸轮控制喷嘴式  
稳态压力源

## 阶跃信号标定



**阶跃信号源：**快速卸荷阀，脉冲膜片，  
闭式爆炸器，激波管等。

# 例题

某压力传感器标定数据

求各静态性能指标

行程	输入压力 $x$ ( $\times 10^5 \text{ Pa}$ )	传感器输出电压 $y$ (mV)				
		第1循环	第2循环	第3循环	第4循环	第5循环
正行程	2	190.9	191.1	191.3	191.4	191.4
	4	382.8	383.2	383.5	383.8	383.8
	6	575.8	576.1	576.6	576.9	577.0
	8	769.4	769.8	770.4	770.8	771.0
	10	963.9	964.6	965.2	965.7	966.0
反行程	10	964.4	965.1	965.7	965.7	966.1
	8	770.6	771.0	771.4	771.4	772.0
	6	577.3	577.4	578.1	578.1	578.5
	4	384.1	384.2	384.1	384.9	384.9
	2	191.6	191.6	192.0	191.9	191.9

某压力传感器标定数据的计算处理过程

计算内容	输入压力 $x$ ( $\times 10^5 \text{ Pa}$ )					备注
	2	4	6	8	10	
正行程平均输出 $\bar{y}_w$	191.22	383.42	576.48	770.28	965.08	
反行程平均输出 $\bar{y}_{dr}$	191.80	384.56	577.88	771.28	965.40	
迟滞 $\Delta y_{i, H}$	0.58	1.14	1.40	1.00	0.32	$(\Delta y_H)_{\max} = 1.40$
总平均输出 $\bar{y}_i$	191.51	383.99	577.18	770.78	965.24	
最小二乘直线输出 $y_i$	190.89	384.32	577.74	771.17	964.59	$y_{FS} = 773.70$
非线性偏差 $\Delta y_{i, L}$	0.62	-0.33	-0.56	-0.39	0.65	$(\Delta y_L)_{\max} = 0.65$
正行程非线性迟滞 $\bar{y}_w - y_i$	0.33	-0.90	-1.26	-0.88	0.49	$(\Delta y_{LH})_{\max} = 1.26$
反行程非线性迟滞 $\bar{y}_{dr} - y_i$	0.91	0.24	0.14	0.11	0.81	
正行程极差 $W_w$	0.5	1.0	1.2	1.6	2.1	$\max(s_w, s_{dr})$ $= 0.847$
反行程极差 $W_{dr}$	0.4	0.8	1.2	1.4	1.7	
正行程标准偏差 $s_w$	0.217	0.427	0.517	0.672	0.847	$s_w$ 由式(2.3.32)计算 $\max(s_w, s_{dr})$ $= 0.847$
反行程标准偏差 $s_{dr}$	0.187	0.385	0.512	0.522	0.663	
正行程极限点 ( $\bar{y}_w - 3s_w, \bar{y}_w + 3s_w$ )	190.57, 191.87	382.14, 384.70	574.93, 578.03	768.26, 772.30	962.54, 967.62	$s_w$ 由式(2.3.32)计算
反行程极限点 ( $\bar{y}_{dr} - 3s_{dr}, \bar{y}_{dr} + 3s_{dr}$ )	191.24, 192.36	383.40, 385.72	576.34, 579.42	769.71, 772.85	963.41, 967.39	
综合极限点( $y_{i \min}, y_{i \max}$ )	190.57, 192.36	382.14, 385.72	574.93, 579.42	768.26, 772.85	962.54, 967.39	
极限点偏差 $\Delta y_{i, \text{ext}}$	0.90	1.79	2.25	2.30	2.43	$\Delta y_{\text{ext}} = 2.43$

**本章结束**

**作业： 1-1、 1-6**