

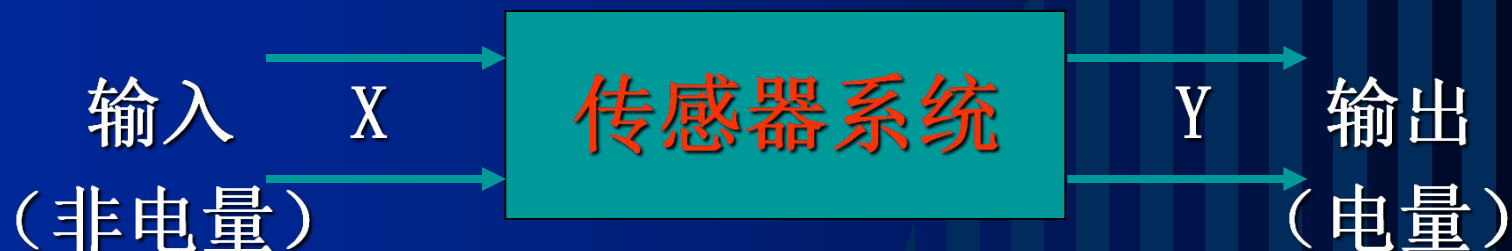


第一章 传感器的一般特性

哈尔滨工业大学 仪器科学与工程学院
授课教师：张晓琳



概述-1



- 传感器要变换各种信息为电量，描述此种变换的**输入与输出**关系表达了传感器的基本特性。
- 一般对传感器的特性分为**静态特性**与**动态特性**分别研究。



概述-2

- 当输入量为常量或变化极慢时，这一关系称为静态特性；

—传感器的静态模型：

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

◆线性模型： $y=a_0+a_1x$ 或 $y=ax$

- 当输入量随时间较快地变化时，这一关系称为动态特性。

—动态模型

- ◆微分方程
- ◆传递函数



概述-3

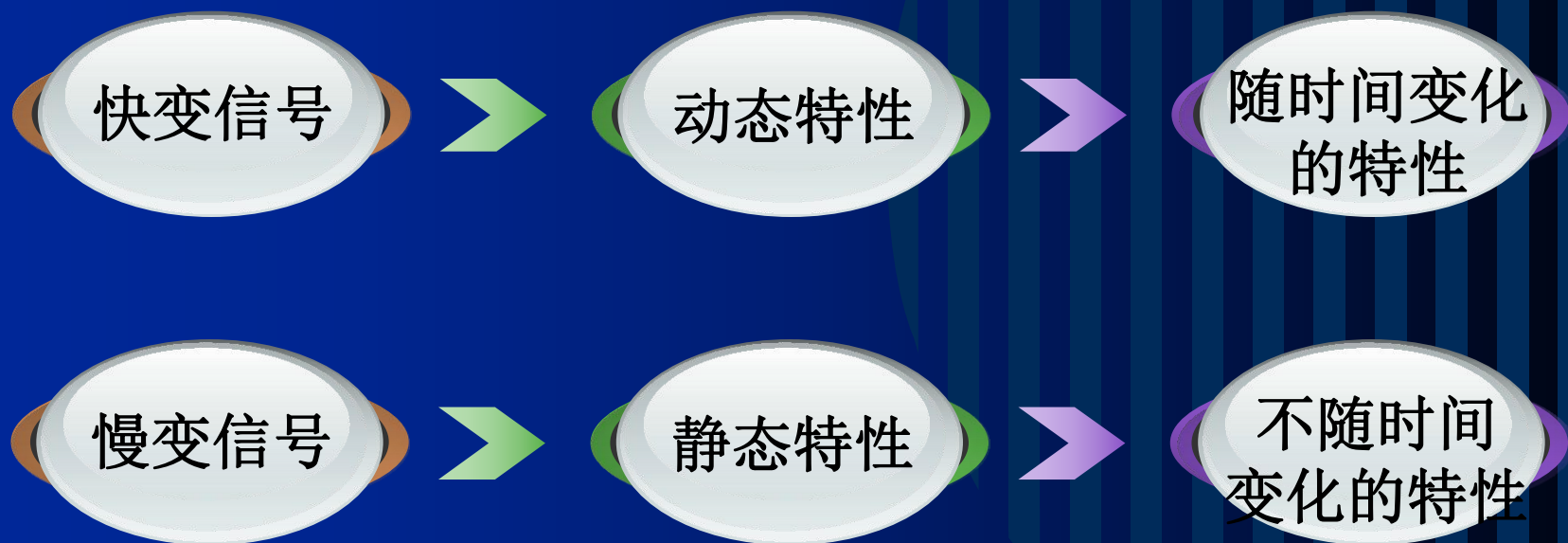
■ 静态模型VS动态模型

- 传感器输出与输入关系可用微分方程来描述。理论上，将微分方程中的一阶及以上的微分项取为零时，即得到静态特性。因此，传感器的静态特性只是动态特性的一个特例。
- 实际上传感器的静态特性要包括非线性和随机性等因素，如果把这些因素都引入微分方程，将使问题复杂化。为避免这种情况，总是把静态特性和动态特性分开考虑。



概述-4

传感器对不同的输入信号，输出特性是不同的，由于受传感器内部储能元件（电感、电容、质量块、弹簧等）的影响，对快变信号与慢变信号，反应大不相同。



1.1 传感器的静特性-1

静特性：被测量处于稳定状态，由实验或分析得到的输入与输出特性。此特性可用数据表格或曲线等方式表示。

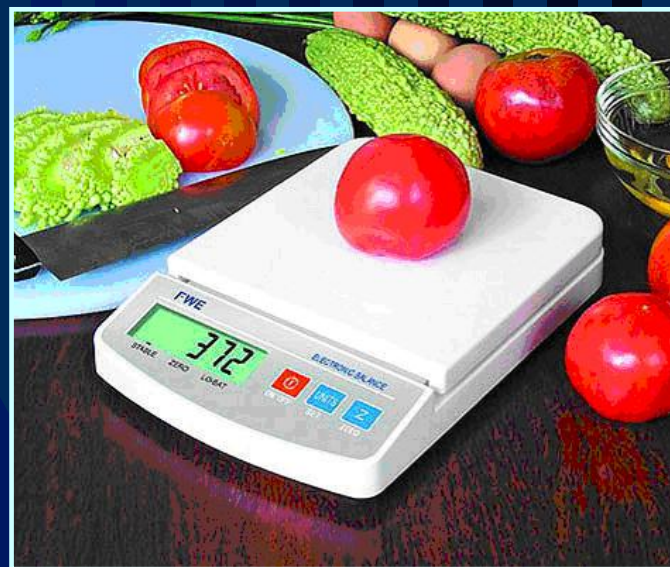
以 x 表示输入量， y 表示输出量，静态特性可以用函数式表示为：

$$y = f(x)$$

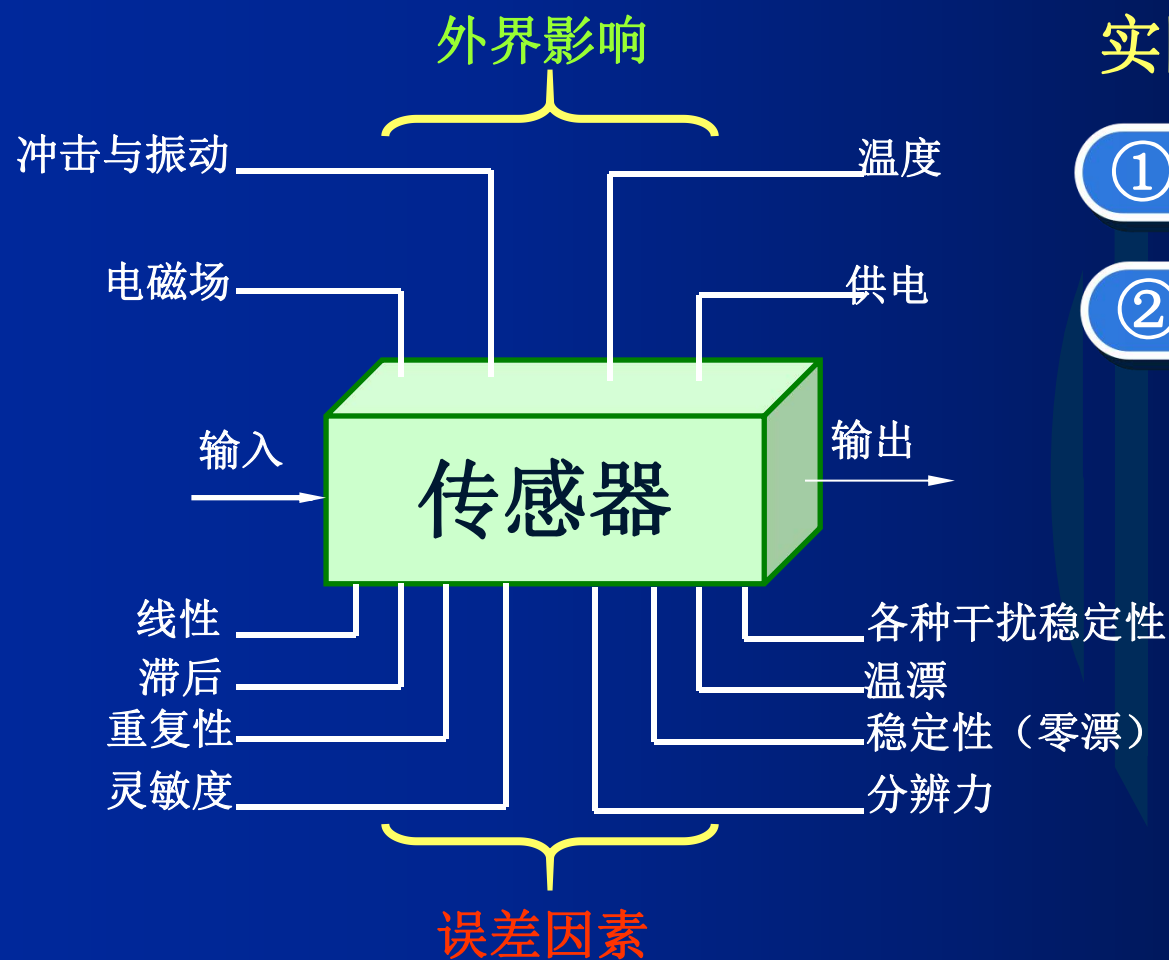
理想传感器的静特性：

①输入与输出具有唯一的对应关系

②输入与输出成线性关系变化



1.1 传感器的静特性-2



实际中:

① 输入输出不符合线性关系

② 唯一确定性不能实现

解决措施:

① 传感器自身性能改善

② 对外界条件加以限制



Tel.: 0451-86402601; Email: zhangxiaolin@hit.edu.cn

1.1 传感器的静特性-3

- 测量范围和量程
- 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
- 漂移
- 不确定度



测量范围和量程

测量上限：传感器所能测量的最大被测量的数值

测量下限：传感器所能测量的最小被测量的数值

测量范围：测量下限和测量上限表示的测量区间

量程 = 测量上限 - 测量下限

例：力传感器测量范围为-5~5N，量程为10N



线性度-1

传感器的输入输出关系可以用多项式表示：

$$y = a_0 + a_1x^1 + a_2x^2 + \dots + a_nx^n$$

其中：

- x — 输入量；
- y — 输出量；
- a_0 — $x = 0$ 时的输出值；
- a_1 — 理想灵敏度；
- a_2, a_3, \dots, a_n —— 非线性项系数。可实验获得

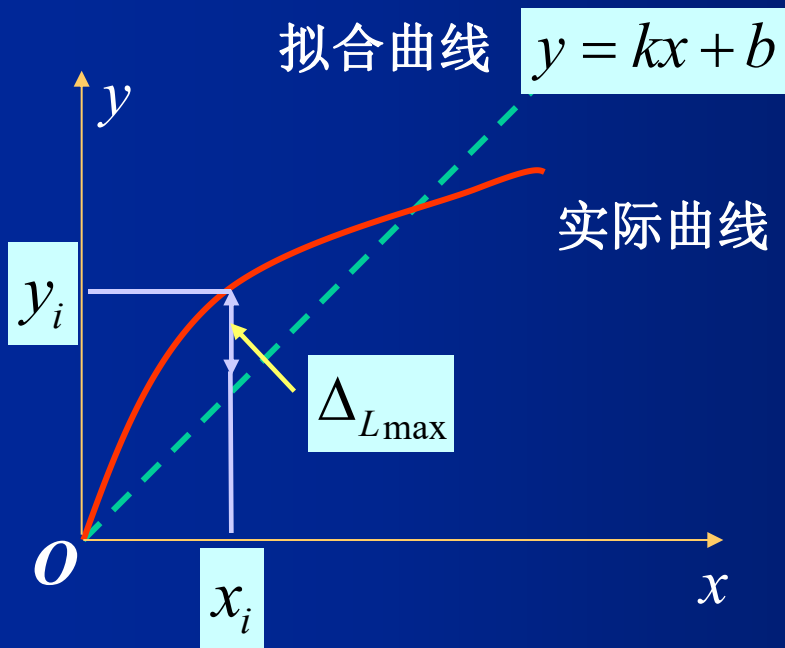
为了处理简单，一般用 $y = kx + b$ 来代替曲线，也称为线性化。

线性度-2

线性度的定义：也称为非线性误差，是指实际曲线与拟合曲线的最大偏差。

线性度用相对误差表示为：

$$\gamma_L = \pm \frac{\Delta_{L\max}}{y_{FS}} \times 100\%$$

 $\Delta_{L\max}$

—— 最大非线性绝对误差

 y_{FS}

—— 满量程输出

 γ_L

—— 线性度



线性度-3

线性度是表征实际特性与拟合直线不吻合的参数。

理想传感器的输入/输出特性成线性关系，主要优点是：

- ❏ 可大大简化传感器的理论分析和设计计算；
- ❏ 为标定和数据处理带来很大方便，只要知道线性输入/输出特性上的两点(一般为零点和满度值)就可以确定其它各点；
- ❏ 可使仪表刻度盘均匀刻度，因而制做、安装、调试容易，提高量精度；
- ❏ 避免了非线性补偿环节。



线性度-4

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的。
拟合直线不同，非线性误差也不同。

- 出发点
获得最小的
非线性误差

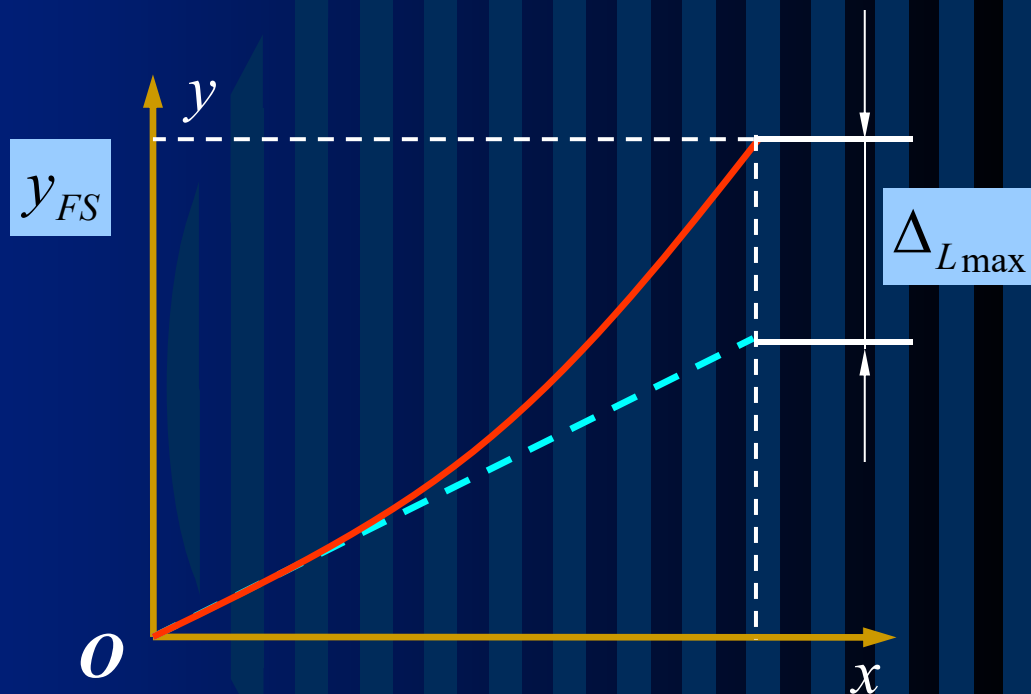
拟合方法:

- ①理论拟合;
- ②过零旋转拟合;
- ③端点拟合;
- ④端点平移拟合;
- ⑤最小二乘拟合;

线性度-5

①理论拟合

拟合直线为传感器的理论特性，与实测值无关。这种方法十分简单，但是一般 $\Delta_{L\max}$ (最大非线性绝对误差) 较大。

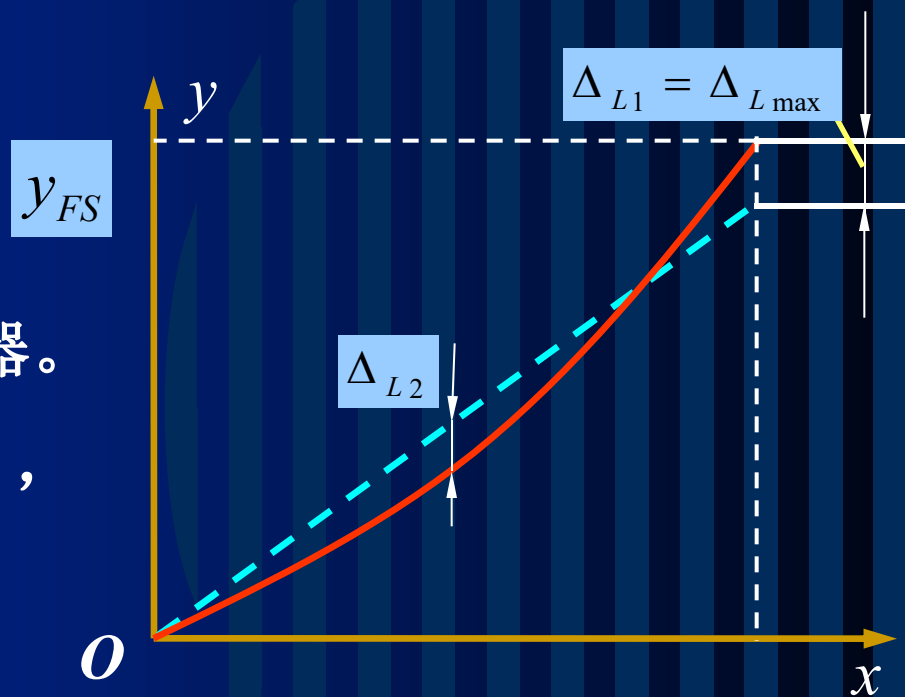


线性度-6

②过零旋转拟合

常用于曲线过零的传感器。

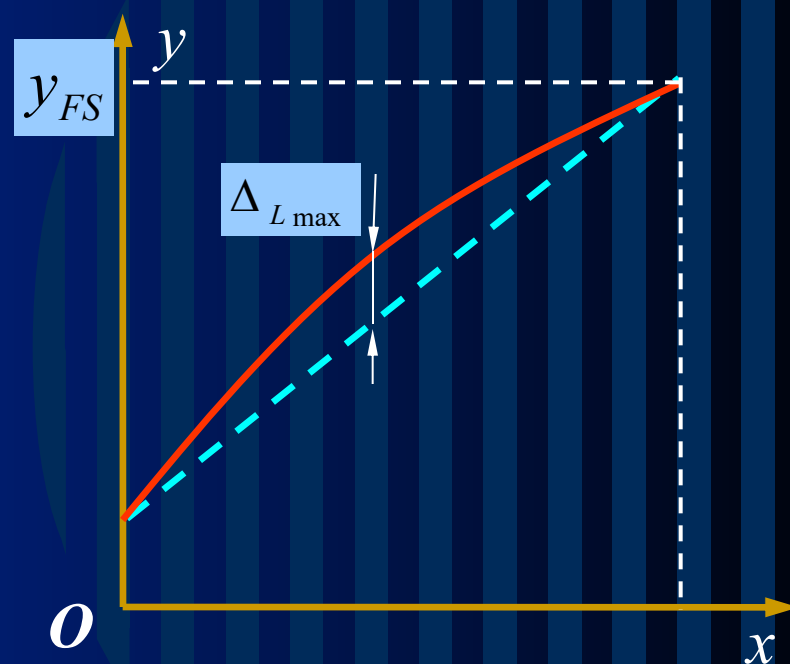
拟合时，使 $\Delta_{L1} = |\Delta_{L2}| = \Delta_{L\max}$ ，
非线性误差比前一种小很多。



线性度-7

③端点连线拟合

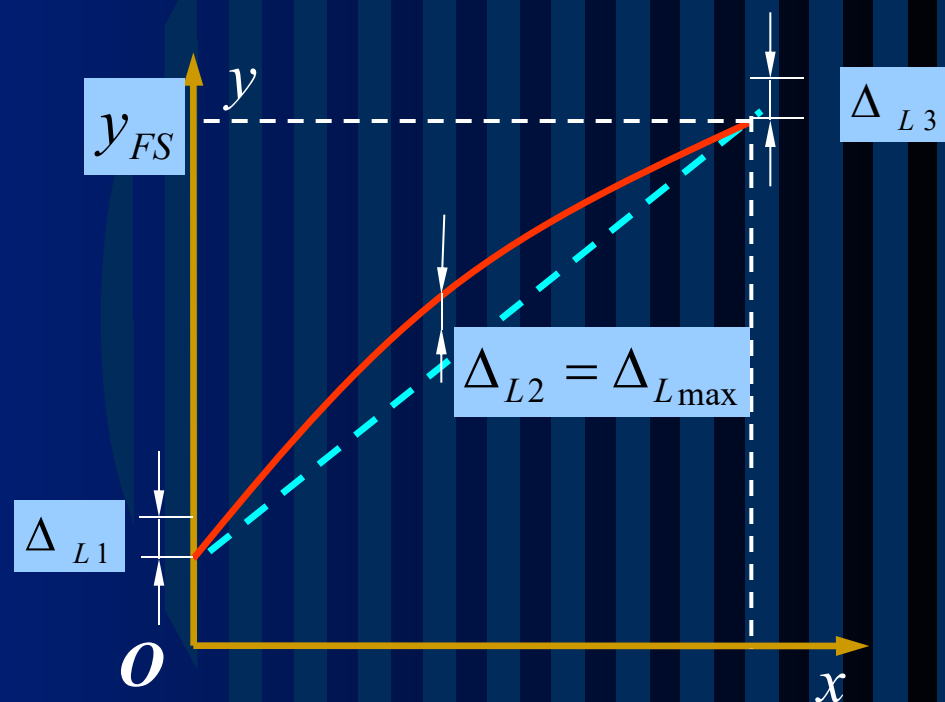
把输出曲线端点的连线作为拟合直线，方法比较简单，但也 $\Delta_{L\max}$ 较大。



线性度-8

④端点平移拟合

在端点连线拟合的基础上使直线平移，移动距离为原先 $\Delta_{L\max}$ 的一半，这样输出曲线分布于拟合直线的两侧此时 $\Delta_{L2}=|\Delta_{L1}|=|\Delta_{L3}|=\Delta_{L\max}$ ，与图端点连线拟合相比，非线性误差减小一半，提高了精度。





线性度-9

⑤最小二乘拟合

设拟合直线方程: $y = kx + b$

取 n 个测点, 第 i 残差为:

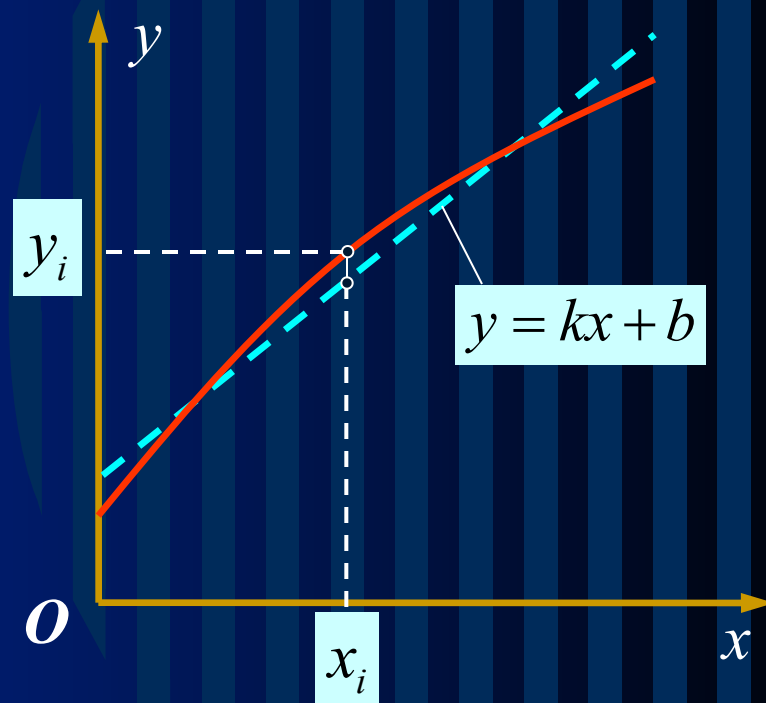
$$\Delta_i = y_i - (kx_i + b)$$

求残差平方和为最小值:

$$\frac{\partial}{\partial k} \sum_{i=1}^n \Delta_i^2 = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial b} \sum_{i=1}^n \Delta_i^2 = 0$$

解出 k 、 b 代入作拟合直线, Δ_i 为非线性误差





线性度-10

$$y = kx + b$$

计算题公式

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

$$\sum_{i=1}^n \Delta_i^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - (kx_i + b)]^2 = \min$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial k} \sum \Delta_i^2 &= 2 \sum (y_i - kx_i - b)(-x_i) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial b} \sum \Delta_i^2 &= 2 \sum (y_i - kx_i - b)(-1) = 0 \end{aligned} \right.$$

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

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



线性度-10

具体用什么拟合方法，根据情况而定。

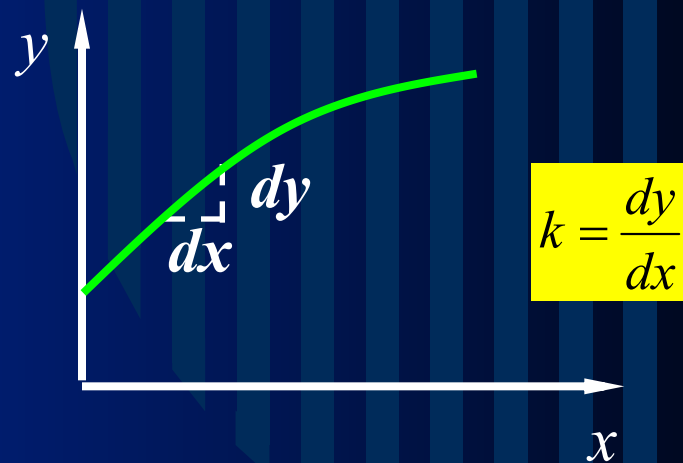
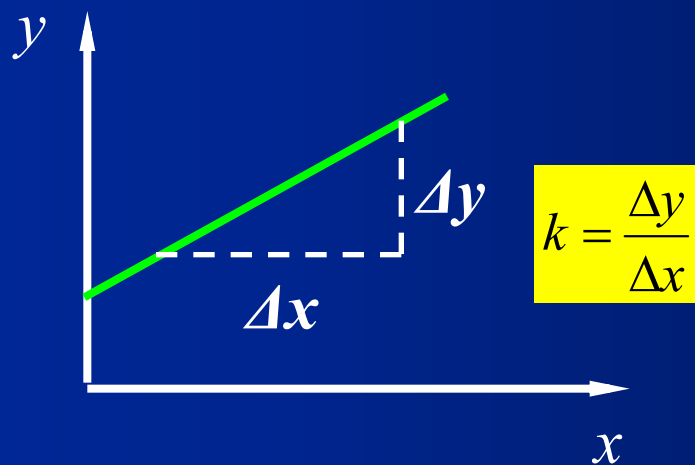
例如：市场用的电子秤，必须过0点

常用：过零点最小二乘

灵敏度

定义：在稳定条件下输出微小增量与输入微小增量的比值。

- 对线性传感器：灵敏度是直线的斜率： $k = \Delta y / \Delta x$
- 对非线性传感器：灵敏度为一变量(只能表示传感器在某一工作点的灵敏度)： $k = dy / dx$



例：某位移传感器，输入量变化5mm时，输出电压变化300mv, 求其灵敏度。



例： 测得某检测装置的一组输入输出数据如下：

x	0.9	2.5	3.3	4.5	5.7	6.7
y	1.1	1.6	2.6	3.2	4.0	5.0

试用最小二乘法拟合直线，求其线性度和灵敏度



解：

$$y = kx + b \quad \Delta_i = y_i - (kx_i + b)$$

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

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

带入数据得：

$$k = 0.68 \quad b = 0.25$$



$$\therefore y = 0.68x + 0.25$$

$$\Delta_1 = 0.238 \quad \Delta_2 = -0.35 \quad \Delta_3 = -0.16$$

$$\Delta_4 = -0.11 \quad \Delta_5 = -0.126 \quad \Delta_6 = -0.194$$

$$\gamma_L = \pm \frac{\Delta L_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% = \pm \frac{0.35}{5} = \pm 7\%$$

线性度用相对误差表示为:

$$\gamma_L = \pm \frac{\Delta_{L_{\max}}}{y_{FS}} \times 100\%$$

拟合直线灵敏度 0.68, 线性度 $\pm 7\%$

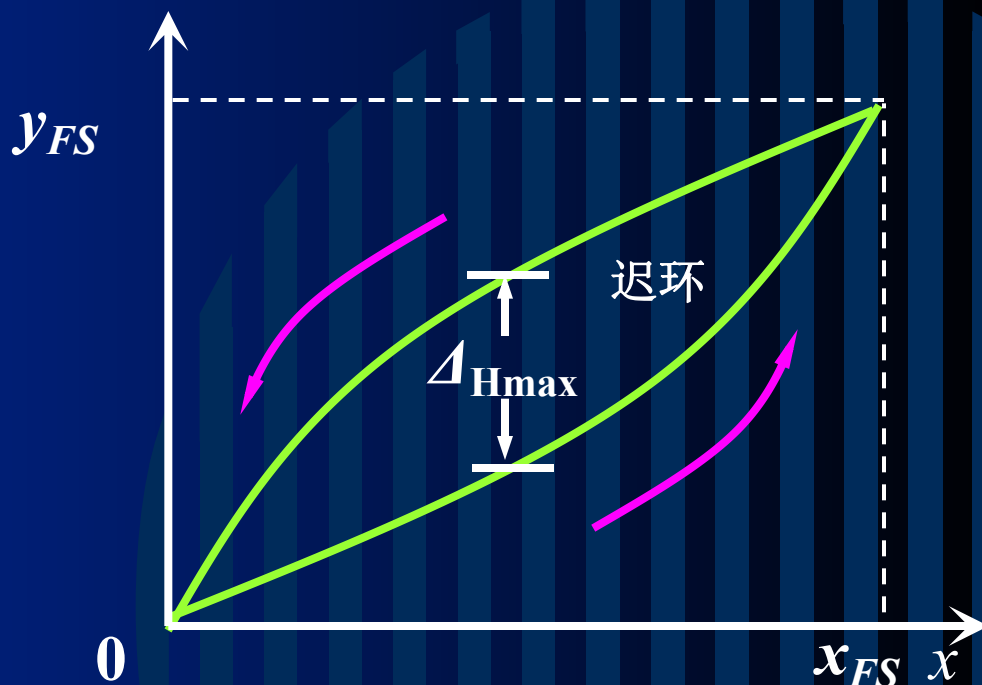


Tel.: 0451-86402601; Email: zhangxiaolin@hit.edu.cn

迟滞（回程误差）-1

定义：传感器在正、反行程期间输入、输出曲线不重合的现象。

迟滞误差计算由满量程输出的百分数表示:



$$\gamma_{\text{H}} = \pm(1/2)(\Delta_{\text{Hmax}}/y_{FS}) \times 100\%$$

 ΔH_{\max}

为正、反行程输出值间的最大差值



迟滞（回程误差）-2

例如：一电子秤

	10g	50g	100g	200g
增加砝码时输出：	0.5mV	2mV	4mV	10mV
减少砝码时输出：	1mV	3mV	6mV	10mV

❖ 产生迟滞误差的原因：

由于敏感元件材料的物理性质（如弹性元件的滞后、外加磁场、电场作用的铁磁体）缺陷造成的。

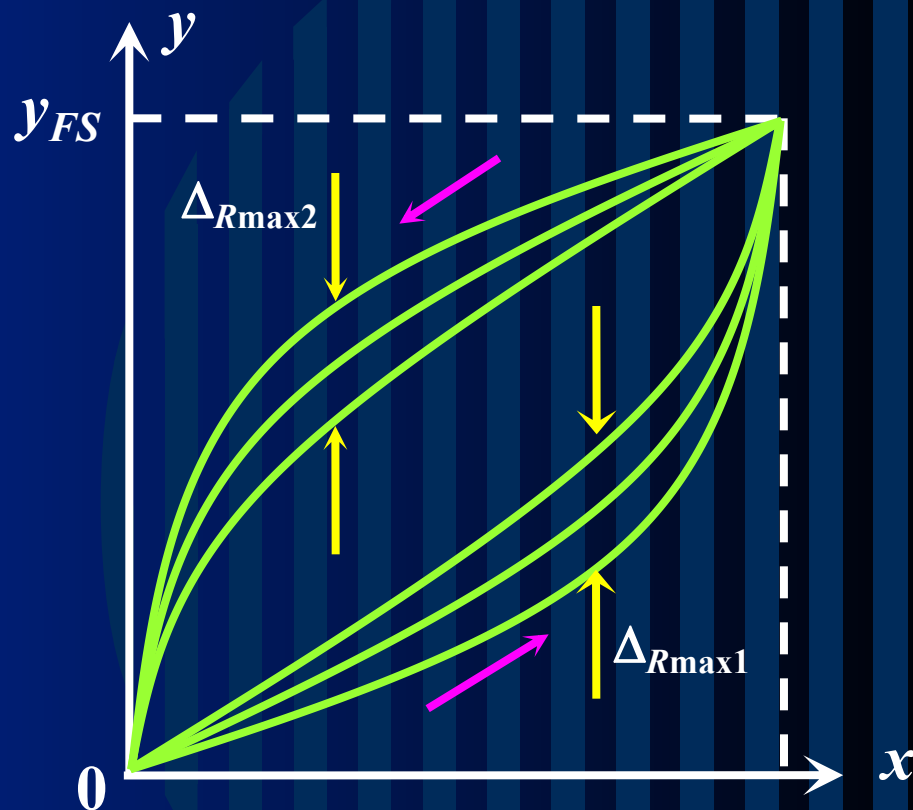
迟滞误差的存在使输入输出不能一一对应。

重复性

定义：传感器输入量按同一方向作多次测量时输出特性不一致的程度。

重复性属于**随机误差**
可用最大重复偏差表示：

$$\gamma_R = \pm \frac{\Delta R_{\max}}{y_{FS}} \times 100\%$$



重复特性

例： 试计算某压力传感器的迟滞误差和重复性误差
(工作特性选端基直线，一组标定数据如下表示)

行程	输入压力 $\times 10^5$ Pa	输出电压 (Mv)		
		(1)	(2)	(3)
正行程	2.0	190.9	191.1	191.3
	4.0	382.8	383.2	383.5
	6.0	575.8	576.1	576.6
	8.0	769.4	769.8	770.4
	10.0	963.9	964.6	965.2
反行程	10.0	964.4	965.1	965.7
	8.0	770.6	771.0	771.4
	6.0	577.3	577.4	578.4
	4.0	384.1	384.2	384.7
	2.0	191.6	191.6	192.0



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

解：

$$\gamma_R = \pm \frac{\Delta R_{\max}}{y_{FS}} \times 100\%$$

$$\textcircled{1} \gamma_H = \pm 0.5 \frac{\Delta H_{\max}}{y_{FS}} \times 100\%$$

$$\Delta H_{\max 1} = 1.5 \quad \Delta H_{\max 2} = 1.3 \quad \Delta H_{\max 3} = 1.8$$

$$\gamma_{H1} = 0.08\% \quad \gamma_{H2} = 0.07\% \quad \gamma_{H3} = 0.09\%$$

$$\textcircled{2} \gamma_R = \pm \frac{\Delta R_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% = \pm \frac{1.1}{965.7} \times 100\% = \pm 0.11\%$$



例： 试计算某压力传感器的迟滞误差和重复性误差
 （工作特性选端基直线，一组标定数据如下表示）

行程	输入压力 $\times 10^5$ Pa	输出电压 (Mv)		
		(1)	(2)	(3)
正行程	2.0	190.9	191.1	191.3
	4.0	382.8	383.2	383.5
	6.0	575.8	576.1	576.6
	8.0	769.4	769.8	770.4
	10.0	963.9	964.6	965.2
反行程	10.0	964.4	965.1	965.7
	8.0	770.6	771.0	771.4
	6.0	577.3	577.4	578.4
	4.0	384.1	384.2	384.7
	2.0	191.6	191.6	192.0

1.1





分辨力（分辨率）

定义：能够检测出的被测量的最小变化量
表征测量系统的分辨能力

说明：1、分辨力 --- 是绝对数值，如 0.01mm, 0.1g, 10ms,

2、分辨率 --- 是相对数值：
能检测的最小被测量的变换量相对于 满量程的百分数，
如： 0.1%, 0.02%

3、阈值 --- 在系统输入零点附近的分辨力



稳定性-1

时间稳定性：指传感器在长时间工作的情况下输出量发生的变化。

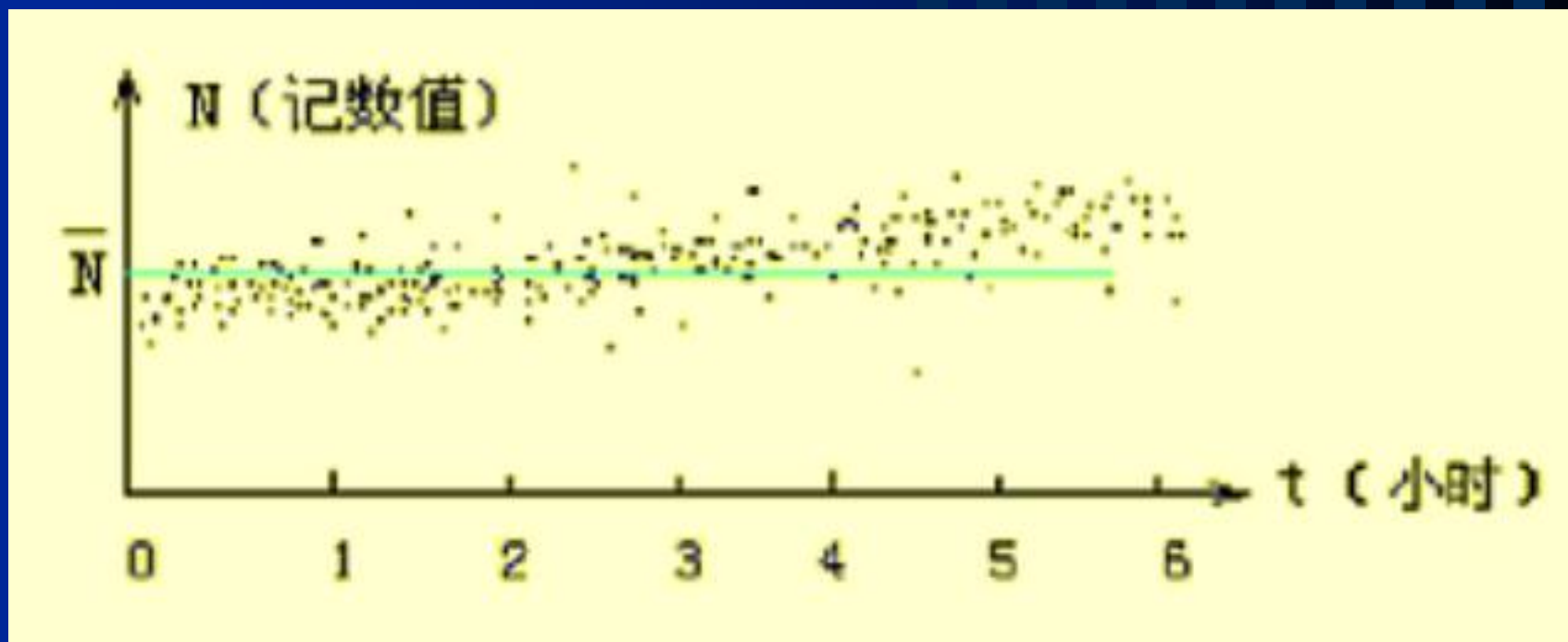
温度稳定性：又称温度漂移，它是指传感器在外界温度变化时输出量发生的变化。

抗干扰稳定性：传感器对外界干扰的抵抗能力

Tel.: 0451-86402601; Email: zhangxiaolin@hit.edu.cn

稳定性-2

例如：闪烁探测器6小时长期稳定性测量散点图





静态测量不确定度

- ※ 定义：是指传感器在其全量程内任一点的输出值与其理论值可能偏离程度。
- ※ 求取方法：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，即

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

取 2σ 或 3σ 值即为传感器的静态误差。

- ※ 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。