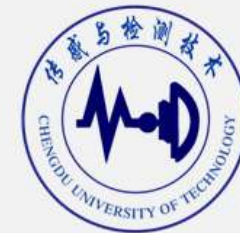


传感与检测技术

第2章 传感器基本特性

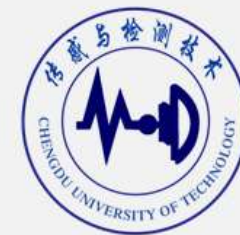
第2章 传感器的基本特性



主要内容

2.1 传感器静态特性

2.2 传感器动态特性

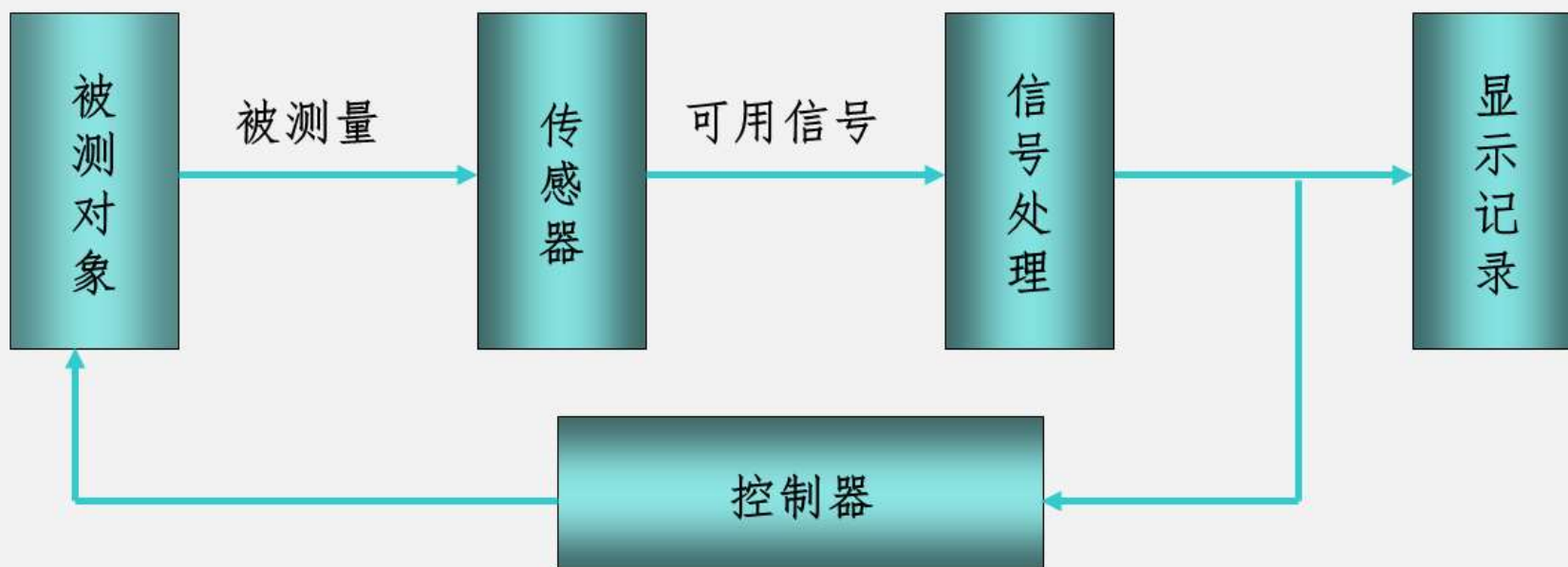


第2章 传感器的基本特性

概述:

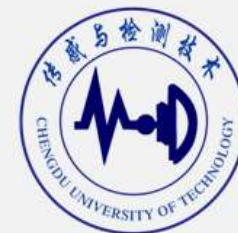
□ 检测系统中传感器位于最前端,是决定系统性能的重要部件

● 如灵敏度、分辨率、检出限、稳定性等,其中每项指标都直接影响测量结果的好坏以及控制过程的准确性。



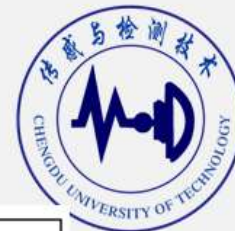
检测控制系统原理框图

第2章 传感器的基本特性



- ❑ 不同传感器对同一种信号的输出结果是不同的，而通常高性能的传感器是以高的价格为代价的。
- ❑ 在工程设计中要获得最好的性/价比，需要根据具体要求合理选择使用传感器，所以对传感器的各种特性、性能应该有所了解。

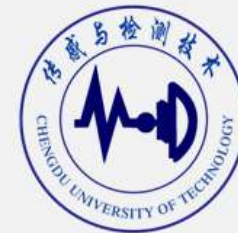
第2章 传感器的基本特性



技术参数			
信号输出类型	电压输出 0-2V 输出阻抗<1Kohm	电流输出 4-20mA 负载电阻<500ohm	RS485接口, Modbus协议
供电电压	5-30V/DC 直流	12-30V/DC 直流	5-30V/DC 直流
最大功耗	40mA@24V DC 直流	80mA@24V DC 直流 (当两电流输出通道均为 20mA 时)	30mA@24V DC 直流
土壤水分测量区域	以中央探针为中心, 直径为 20cm、高为 17cm 的圆柱体内		
响应时间(水分与温度)	小于 1 秒		
土壤水分测量量程	可选量程: 0-30% 容积含水率 0-50% 容积含水率 0-100% 容积含水率		
土壤水分测量精度	0-53%范围内为 $\pm 3\%$; 53-100%范围内为 $\pm 5\%$		
土壤温度测量量程	$-40^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$		
土壤温度测量精度	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$		
防护等级	IP68		
运行环境	$-40^{\circ}\text{C} \sim 85^{\circ}\text{C}$		
储存环境	$-40^{\circ}\text{C} \sim 85^{\circ}\text{C}$		
探针材料	食品级不锈钢		
密封材料	黑色阻燃环氧树脂		
安装方式	全部埋入或探针全部插入被测介质		

某型号土壤温湿度一体传感器

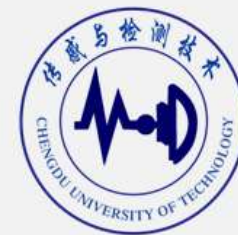
第2章 传感器的基本特性



某型号 压力传感器

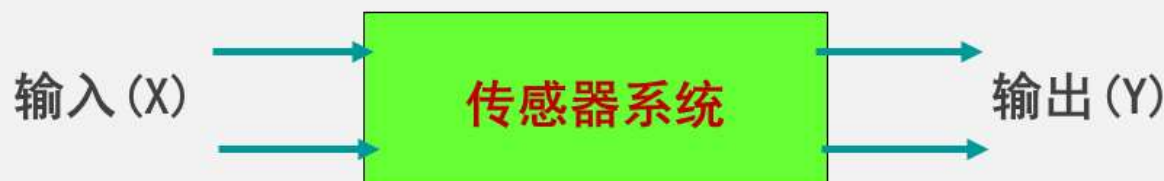
2 规格及主要技术参数

规格代号		VWE-0.4	VWE-0.6	VWE-0.8	VWE-1	VWE-1.6	VWE-2.5
尺寸 参数	最大外径D:	156mm					
	承压盘高H:	26mm					
性能 参数	测量范围:	0~400	0~600	0~800	0~1000	0~1600	0~2500
	分辨率:	$\leq 0.025\%F.S$					
	测量精度:	$\pm 0.1\%F.S$					
	温度测量范围:	$-40^{\circ}\text{C} \sim +150^{\circ}\text{C}$					
	灵敏度:	$\pm 0.1^{\circ}\text{C}$					
	耐水压:	测量范围的1.2倍					
	绝缘电阻:	$\geq 50\text{M}\Omega$					
	储存温度:	$-30^{\circ}\text{C} \sim +70^{\circ}\text{C}$					

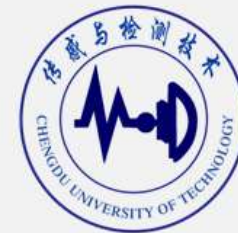


第2章 传感器的基本特性

- 可将传感器看成一个具有输入、输出的二端网络



- ❑ 同一个传感器对不同的输入信号输出特性也是不同；
- 由于受传感器内部储能元件（电感、电容、质量块、弹簧等）影响，对快变信号与慢变信号反应大不相同。
- 慢变信号——输入为静态或变化极缓慢的信号时（环境温度），我们讨论研究传感器静态特性，即不随时间变化的特性；
- 快变信号——输入量随时间（ t ）较快变化时（如振动），我们考虑输出传感器动态特性，即随时间变化的特性；
- 根据快变与慢变信号，分别讨论传感器的静态特性、动态特性。

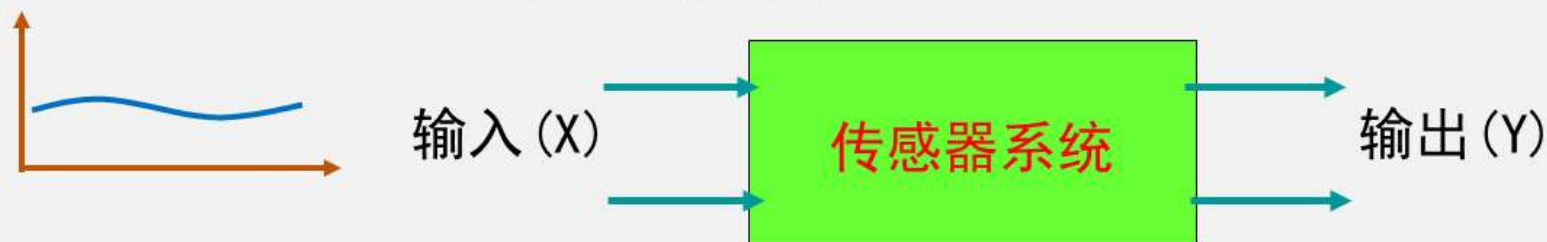


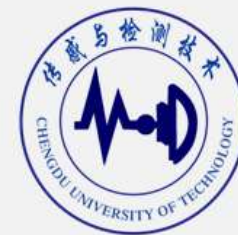
第2章 传感器的基本特性

2.1 传感器静态特性

- ☺ 传感器的各种特性是根据“输入—输出”关系来描述的。
- 当输入量（X）为静态或变化缓慢的信号时，讨论传感器的静态特性，输入输出关系称静态特性。
- 🌐 静态特性主要包括：线性度、迟滞、重复性、灵敏度、稳定性…
- 静态特性可以用函数式表示为：（与时间无关）

$$y = f(x)$$





第2章 传感器的基本特性

(1) 线性度

➤ 一个理想的传感器我们希望它具有**线性**的输入输出关系,但实际上大多数传感器是**非线性**的.

❖ 传感器的输入输出关系可用多项式表示

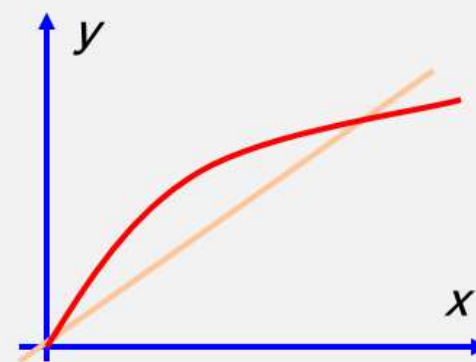
$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \cdots + a_nx^n$$

式中: x : 输入量; y : 输出量;

a_0 : $x = 0$ 时的输出值——**零位输出**;

a_1 : **理想灵敏度**;

a_2, a_3, \dots, a_n 为**非线性项系数**, 各项系数不同时决定特性曲线的形式



?

➤ 传感器输入-输出特性线性化有何意义?

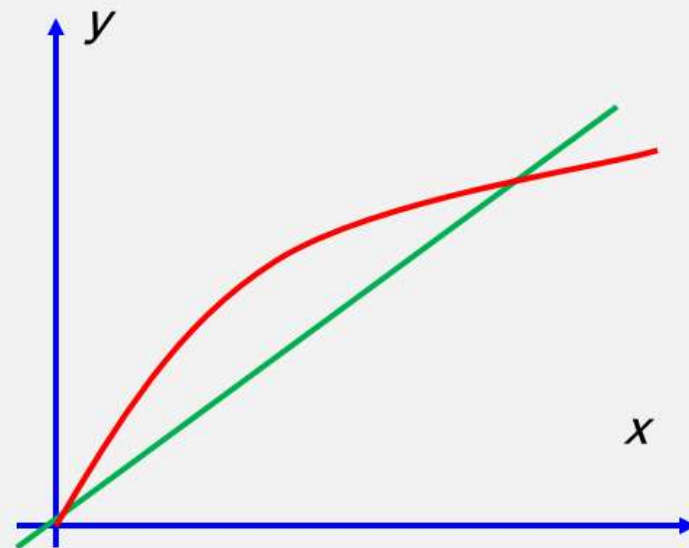
有助于简化传感器的理论分析、数据处理、制作标定和测试。

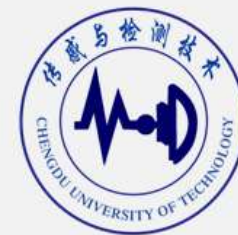
单选题 1分

图中所示，传感器的实际输出曲线为（ ）

A 红色曲线

B 绿色曲线





第2章 传感器的基本特性

(1) 线性度

- 由于实际传感器总有（高次项）非线性存在，输入输出关系总是非线性关系，使近似后的拟合直线与实际曲线存在偏差。这个最大偏差称为传感器的**非线性误差（线性度）**。

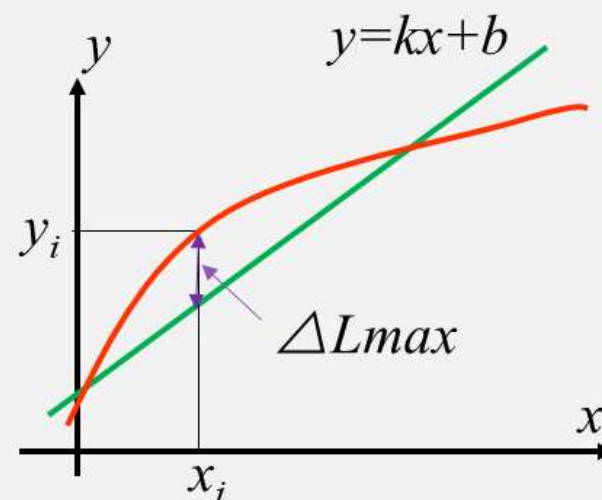
- 通常用**相对误差**表示线性度

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

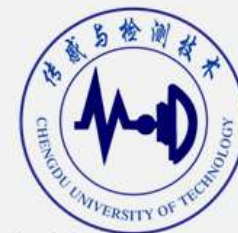
ΔL_{\max} —— 最大非线性绝对误差

y_{FS} —— 满量程输出

r_L —— 线性度



😊 **线性度 r_L** 是表征实际特性与拟合直线不吻合的参数



第2章 传感器的基本特性

➤ 传感器的非线性误差是以一条理想直线作基准的,基准不同时得出的线性度不同,所以不能笼统地提出线性度,必须说明所依据的基准直线.

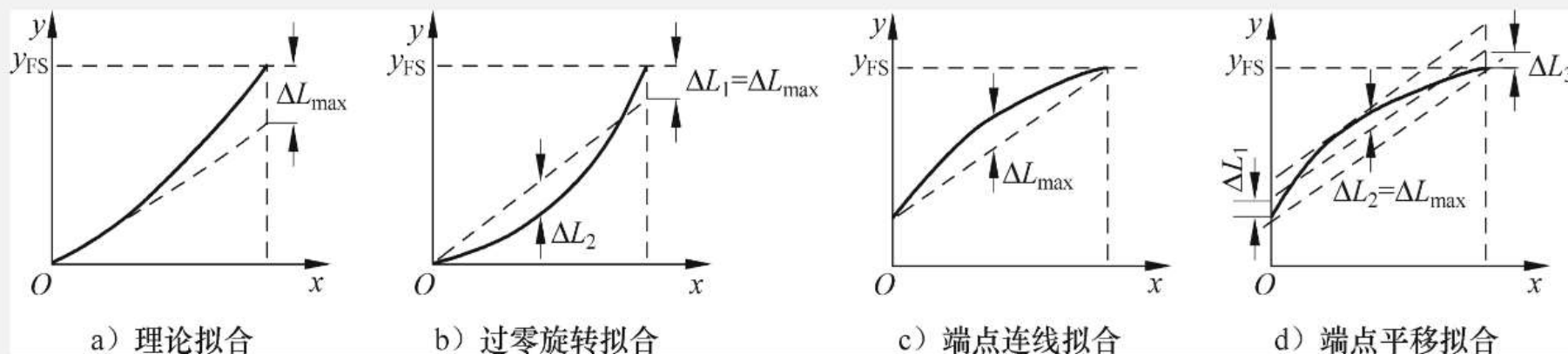
• 几种直线拟合方法

a、理论拟合 (切线) 以0%起点,满量程100%作终点;

b、过零旋转拟合 常用于校正曲线过零的传感器,非线性误差较a小。

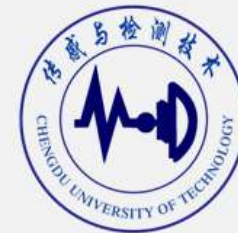
c、端基线性度(端点连线拟合) 实际曲线的起点与终点的直线;

d、独立线性度(端点平移) 以端基线平行作直线恰好包围所有标定点,



☞ **最小二乘法线性度** 拟合的直线精度最高,也是最常用的方法。

第2章 传感器的基本特性



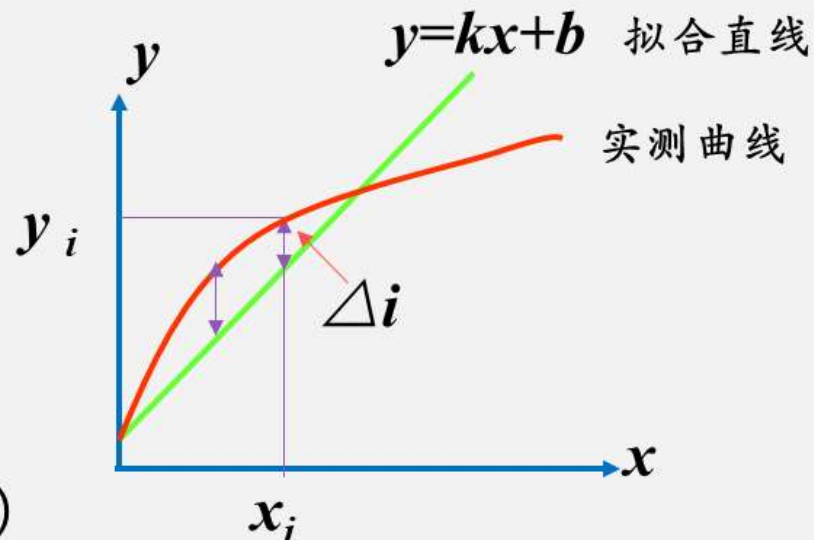
➤ 最小二乘法线性度

设拟合直线方程为

$$y = kx + b \quad (1)$$

对实测曲线取 n 个测点,
第 i 个测点的残差为

$$\Delta i = y_i - (kx_i + b) \quad (2)$$



➤ 最小二乘法原理是求所有测点的残差平方和为最小值

$$\frac{\partial}{\partial k} \sum_{i=1}^n \Delta i^2 = 0 \quad \frac{\partial}{\partial b} \sum_{i=1}^n \Delta i^2 = 0$$

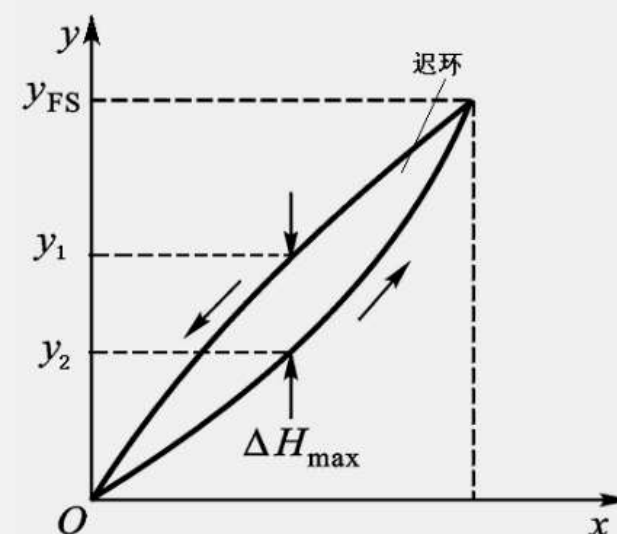
- 求偏导为零, 解出 k 、 b , 代入式 (1) 作拟合直线, 实际曲线与拟合直线的最大残差 Δi 为非线性误差. 以此求出的线性度为最小二乘法线性度。

第2章 传感器的基本特性

(2) 迟滞

☺ 传感器在正、反行程期间输出特性曲线不重合的现象称迟滞（迟环）。

❖ 输入逐渐增加再逐渐减小，相同输入值输出不等。

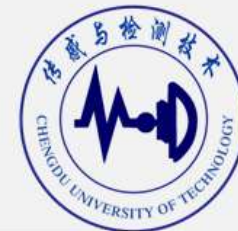


例：电子秤

砝码重量 (x)	10g	50g	100g	200g
加砝码↑时输出(y)	0.5mV	2mV	4mV	10mV
减砝码↓时输出(y)	1mV	3mV	6mV	10mV

速度越快这种现象越明显。

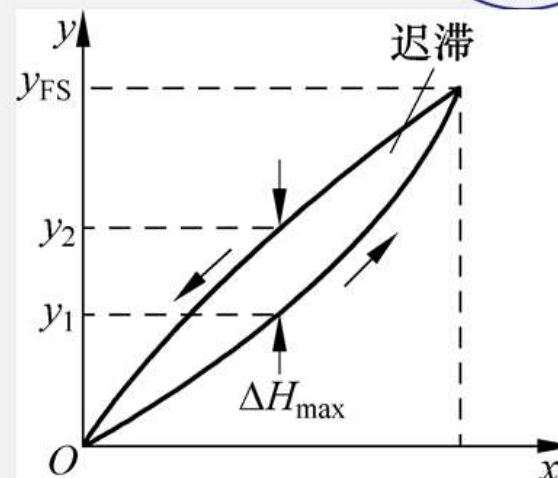
第2章 传感器的基本特性



(2) 迟滞

❖ 迟滞误差由满量程输出的百分数表示：

$$r_H = \pm \left(\frac{\Delta H_{\max}}{y_{FS}} \right) \times 100\%$$



$\Delta H_{\max} = y_2 - y_1$ 为正、反行程输出值之间的最大差值

➤ 产生迟滞误差的原因：主要是由于敏感元件材料的物理性质缺陷造成的。如弹性元件的滞后，铁磁体、铁电体在加磁场、电场作用下也有这种现象。

❖ 迟滞误差的存在使输入输出不能一一对应。

第2章 传感器的基本特性

(3) 重复性

☺ 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。

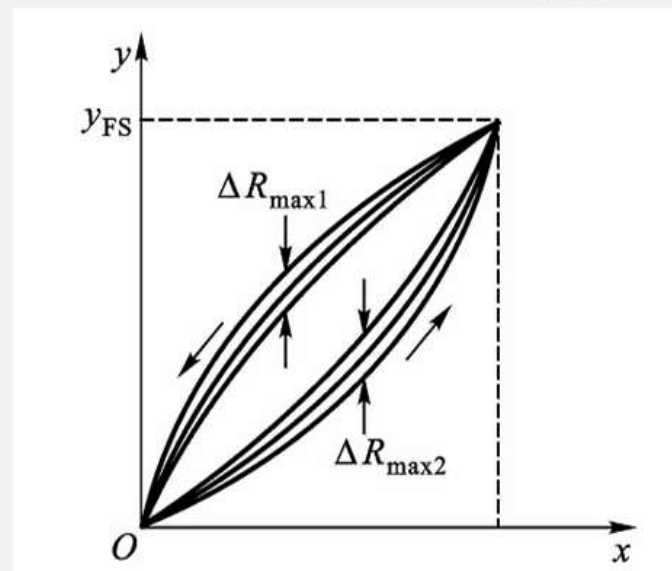
- 用最大重复偏差 ΔR_{\max} 表示：

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

- 重复性误差属于随机误差可用**标准偏差**表示：

$$r_R = \pm \frac{(2 \sim 3)\sigma_{\max}}{y_{FS}} \times 100\%$$

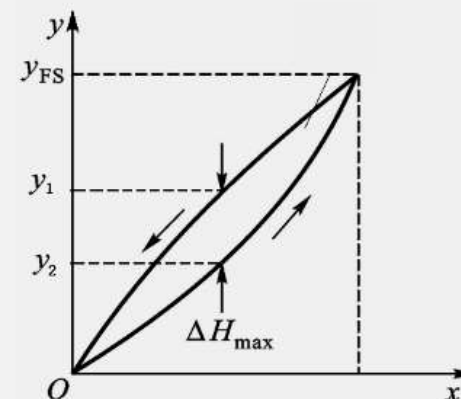
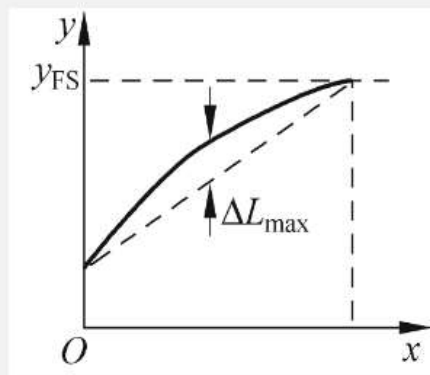
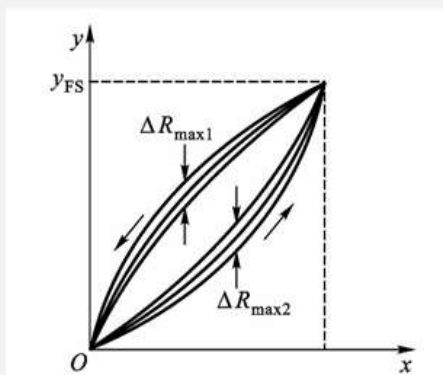
σ_{\max} 最大标准差，在测量次数趋于无穷时的正态总体的平均值；
(2~3) 置信度（概率95.4%，99.7%）



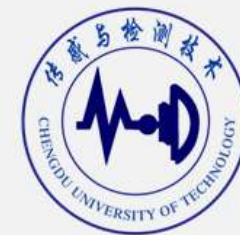
➤ 产生不重复的原因与迟滞产生的原因基本相似，也存在不稳定问题。

填空题 3分

所示传感器的静态特性曲线图，表示了传感器的什么静态特性？（按顺序填写字母序号） [填空1] [填空2] [填空3]



1. 线性度
2. 迟滞
3. 重复性



第2章 传感器的基本特性

(4) 灵敏度

😊 **灵敏度** 反映单位输入变量能引起的输出变化量

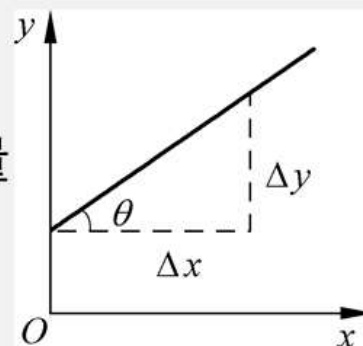
❖ 在稳定条件下输出微小增量与输入微小增量的比值

- **线性**传感器灵敏度是直线的斜率，为常数

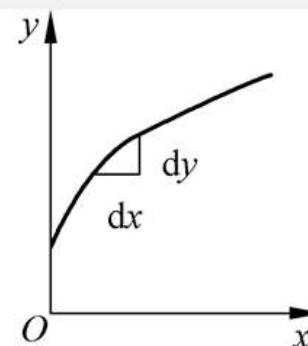
$$S = \Delta y / \Delta x$$

- **非线性**传感器灵敏度，为一变量

$$S = dy / dx$$



a) 灵敏度特性



b) 非线性传感器的灵敏度

- 灵敏度单位，mV/mm（位移）；mV/°C（温度）；
传感器所加电压不同时输出不同，实际灵敏度要除总的电压值。

👉 传感器灵敏度的定义是每伏电压的灵敏度：mV/mm · V；mV/°C · V。

单选题 1分

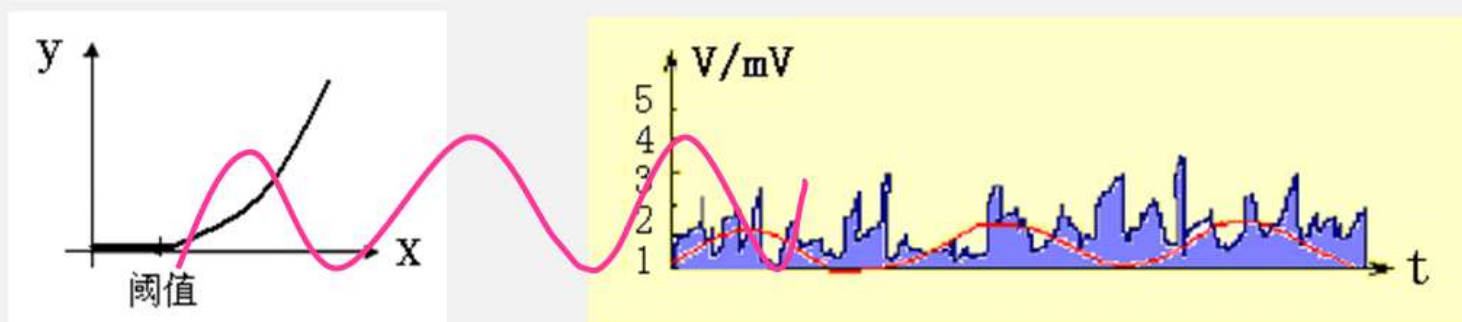
两个电子秤的传感器分别标有 1mV/g.V 、 0.5mV/g.V ，问哪个传感器灵敏度高？

- ☒ A 1mV/g.V
- ☐ B 0.5mV/g.V

第2章 传感器的基本特性

(5) 分辨率和阈值

- 😊 分辨率 —— 传感器能够检测到的最小输入**增量**；
- ❖ 阈值 —— **输入小到某种程度输出不再变化的值**，这时的输入值增量 Δx 称为门槛灵敏度，指输入零点附近的分辨能力。
- 存在“门槛”的原因有两个：
 - 一是输入的变化被传感器**内部吸收**了反映不到输出端；
 - 二是传感器输出**存在噪声**，所以要求输入信号必须大于噪声电平，否则无法将信号与噪声分开，或尽量减小噪声提高分辨能力。



单选题 1分

两个电子秤可感受的最小感量分别为：0.1g、0.05g，问哪个分辨率高？

- ☐ A 0.1g
- ☒ B 0.05g

第2章 传感器的基本特性

(6) 漂移

😊 漂移是指传感器的输入量不变，而输出量却发生了改变。

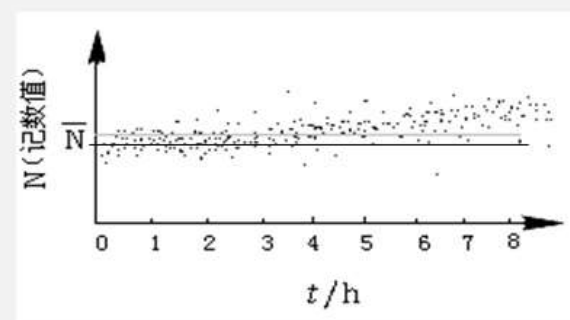
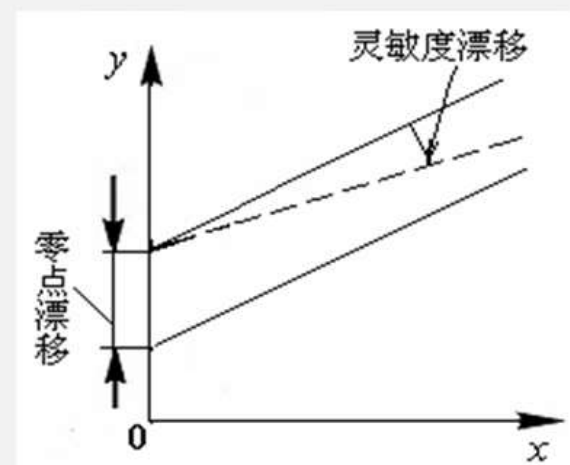
❖ 漂移包括零点漂移与灵敏度漂移

👉 零点漂移与灵敏度漂移又可分为：
时间漂移（时漂）和温度漂移（温漂）

✓ 时漂——指在规定条件下，零点或灵敏度随时间缓慢变化；

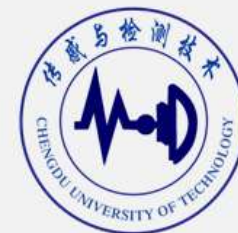
✓ 温漂——则是指环境温度变化引起的零点漂移或与灵敏度漂移。

➤ 图为闪烁探测器对同一标准样品的长时间稳定性检查，八小时内测量数据表示了射线探测器的状态。



X射线荧光仪的闪烁探测器，8小时长期稳定性测量散点图

第2章 传感器的基本特性



(7) 稳定性



表示传感器在一较长时间内保持性能参数的能力

- 理想情况传感器性能参数不随时间变化，但多数传感器的特性随使用时间的延长发生变化，如果长期放置不用或使用时间过长，应定期进行校正。
- 仪器操作人员应该对使用仪器的每日、每月、每年变化情况有标准数据的记载，有证明仪器数据可靠性的记录。
- 一般在室温条件下，经过规定时间后，传感器**实际输出与标定时输出的差异程度来表示其稳定性**。稳定性可用相对误差或绝对误差来表示，如：XX月（或XX小时）不超过XX % 满量程输出。
- 其它特性： 准确性、噪声、…

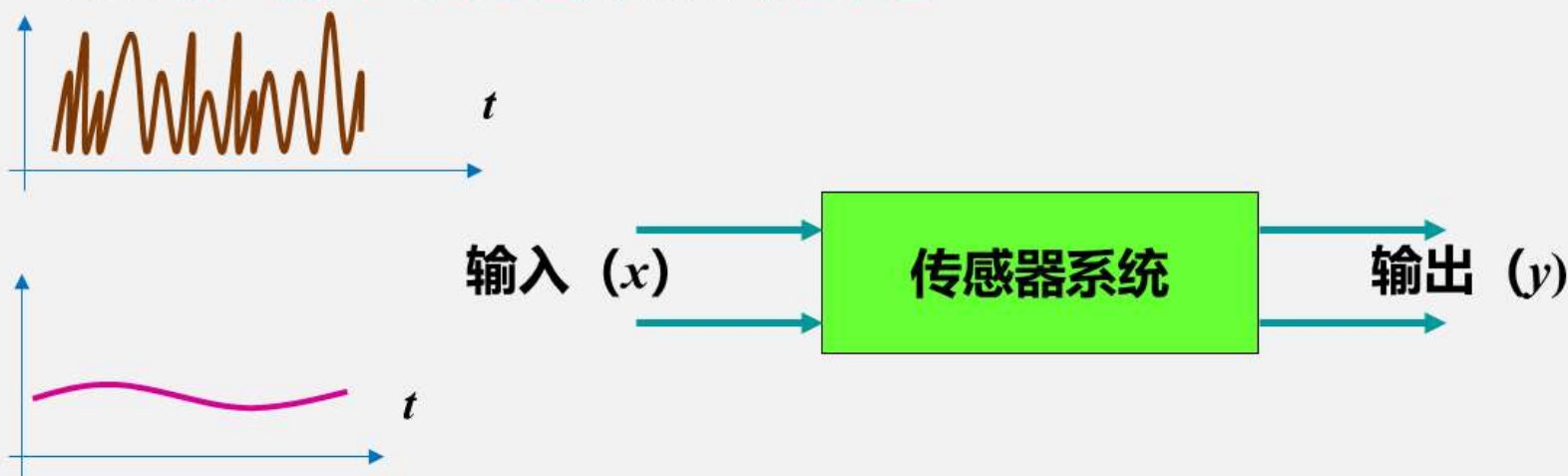
填空题 3.5分

1. 单位输入量引起输出量的特性变化, 称为 [填空1]
2. 正反行程测量, 输出量不完全相同的特性, 称为 [填空2]
3. 实际特性曲线与拟合直线间不吻合的参数, 称为 [填空3]
4. 多次测量, 输出不完全相同的特性, 称为 [填空4]
5. 传感器能够感知最小被测量增量的参数, 称为 [填空5]
6. 传感器能够检测到的最大被测量的参数, 称为 [填空6]
7. 传感器能够检测到的最小被测量的参数, 称为 [填空7]

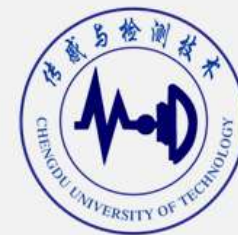
第2章 传感器的基本特性

2.2 传感器动态特性

- 在实际测量中，多数传感器输入信号是随时间变化的，对动态信号的测量不仅需要测量信号幅值大小，还需要测量记录反映动态信号变化过程的波形。
- 一个动态性能好的传感器输入与输出应具有相同的时间函数，但除理想状态外，输出信号一定不会与输入信号有相同时间函数。
- 这种输入输出之间的差异就是动态误差。



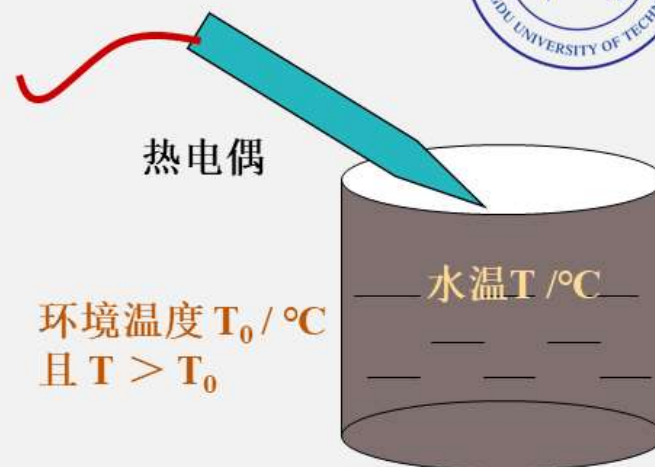
第2章 传感器的基本特性



以温度测量来说明传感器的动态特性

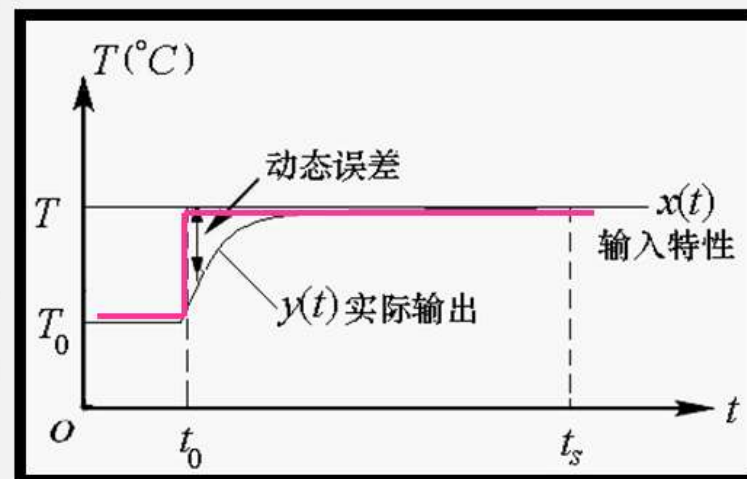
动态测温的几种情况：

- A. 被测介质温度随时间快速变化；
- B. 传感器突然插入被测介质中；
- C. 传感器以扫描的方式测量温度场分布。



➤ 传感器突然插入被测介质中

- 设环境温度为 T_0 ，水槽中水的温度为 T ，而且 $T > T_0$ ；
- 用热电偶测温；
- 传感器在 t_0 时刻突然插入被测介质中；
- 理想情况测试曲线是阶跃变化的；
- 实际热电偶输出值是缓慢变化，存在一个过渡过程，这一过程与阶跃特性的误差就是动态误差。



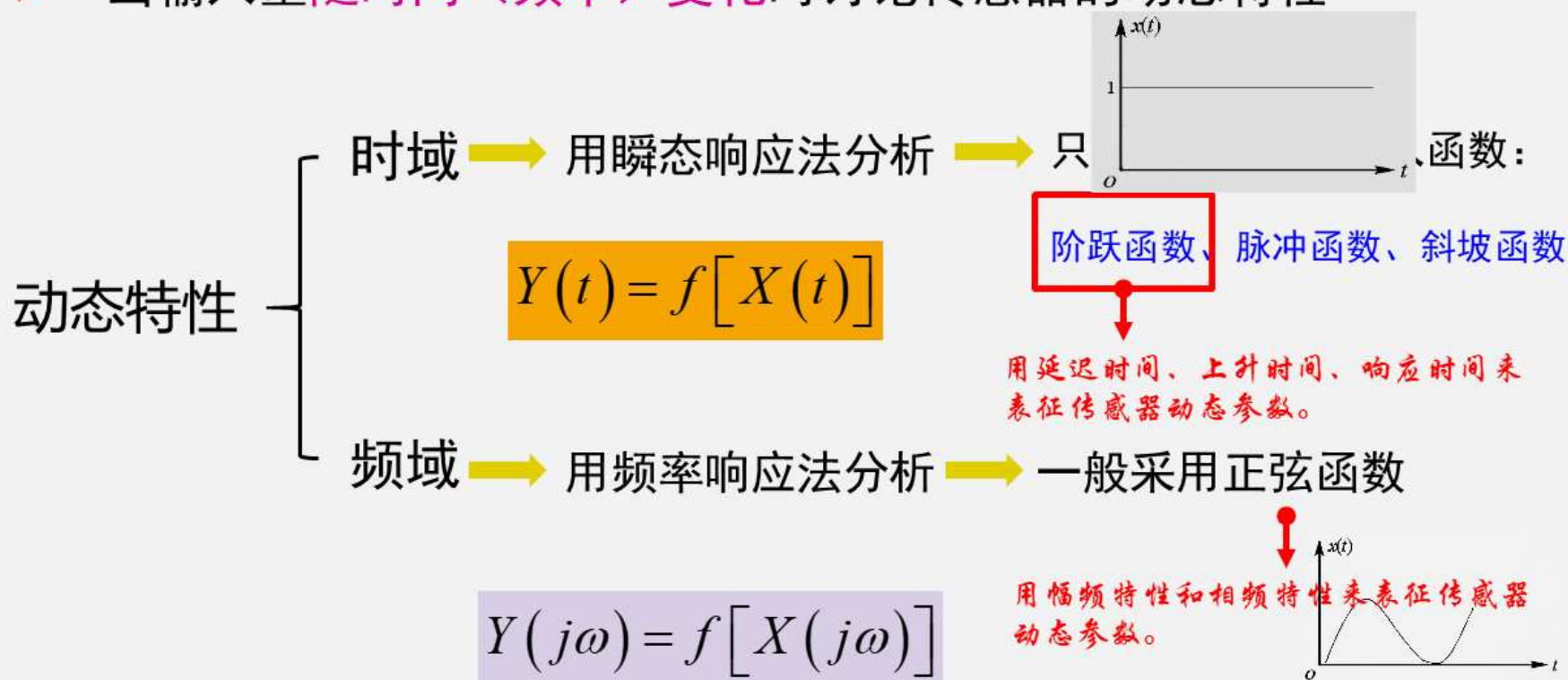
第2章 传感器的基本特性

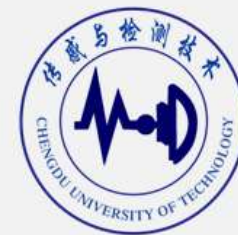
2.2 传感器动态特性



☺ 动态特性是指传感器输出对时间变化的输入量的响应特性

➤ 当输入量随时间（频率）变化时讨论传感器的动态特性





第2章 传感器的基本特性

2.2 传感器动态特性

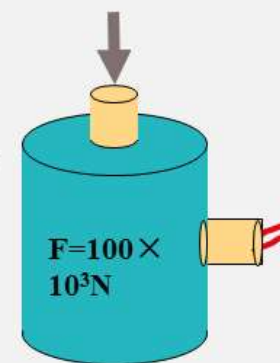
(1) **传递函数** ☺ 传递函数表示系统本身的传输、转换特性。

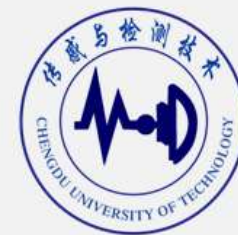
■ 为了分析动态特性，首先要写出传感器的数学模型求出传递函数。

➤ 已知外界有一激励施加于系统时，系统对外界有一响应；



- 传感器是个信号转换元件，假设是测力传感器，系统存在**阻尼**，**弹性**和**惯性**元件；
- 当输入量随时间变化时，在力作用下，输出不仅与**位移** x 有关，还与**速度** dx/dt 、**加速度** d^2x/dt^2 有关。





第2章 传感器的基本特性

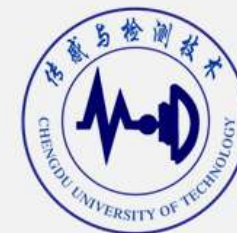
(1) 传递函数

- 因此要准确的写出数学模型很困难，为使数学模型的建立和求解方便，往往略去影响小的因素。
- 假设传感器输入、输出在线性范围变化，当输入量随时间变化时，它们的关系可用高阶常系数线性微分方程表示

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

式中：y — 输出；x — 输入； a_i 、 b_i 为常数

- 可见要求解这样一个方程仍然是很困难的，为简化运算对上式两边取拉氏变换。



第2章 传感器的基本特性

(1) 传递函数

当初始状态满足 $t \leq 0, y = 0$ 时

- 输入与输出的拉氏变换分别为

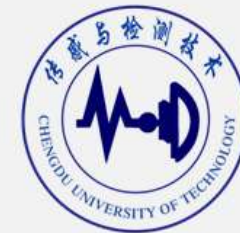
$$x(s) = \mathcal{L}[x(t)] = \int_0^{\infty} x(t)e^{-st} dt$$

$$y(s) = \mathcal{L}[y(t)] = \int_0^{\infty} y(t)e^{-st} dt$$

- 对微分方程两边取拉氏变换 $a_n \frac{d^n y}{dt^n} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + \dots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x$

$$y(s)(a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0) = x(s)(b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_0)$$

➤ 将实函数变换到复变函数，从时域变换到频域。



第2章 传感器的基本特性

(1) 传递函数

- 传感器的传递函数由输出和输入的拉氏变换表示为

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

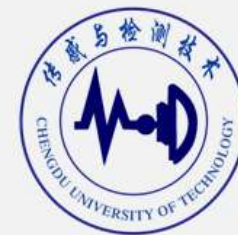
- 传感器的输出拉氏变换

$$y(s) = x(s)H(s)$$

复数 s 为拉氏变换自变量

$$s = \sigma + j\omega$$

式中: σ — 为收敛因子



第2章 传感器的基本特性

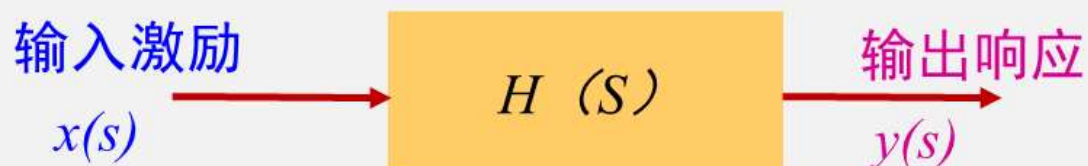
(1) 传递函数

- ☺ 传感器传递函数的在数学上的定义是：
初始条件为零 ($t \leq 0, y = 0$),
输出的拉氏变换与输入的拉氏变换之比。

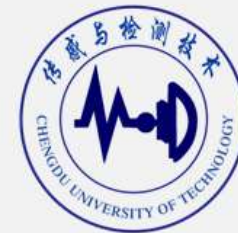
$$H(s) = y(s) / x(s)$$

$$y(s) = x(s)H(s)$$

- 传感器的转换特性可以用传递函数 $H(s)$ 表示。



- 由输入拉氏变换 $X(s)$ 和传递函数 $H(s)$ 求出输出拉氏变换 $Y(s)$
➤ 再求逆变换得出 $Y(t)$, 将频域变换为时域求解。



第2章 传感器的基本特性

(1) 传递函数

传递函数 $H(s) = \frac{y(s)}{x(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \cdots + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_0}$

根据大多数传感器的情况进行化简

一般有 $b_m = b_{m-1} = \cdots = b_1 = 0$

- 传递函数可化简为

$$H(s) = \frac{y(s)}{x(s)} = \frac{b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_0}$$

- 其中分母多项式中的方程式有 n 个根，用分母的阶次 n 代表传感器的特征，数学模型是 n 阶就称 n 阶传感器。

$$a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_0 = 0$$