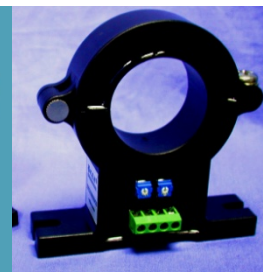


传感器与检测技术

周凯波

QQ:397425887 ; zhoukb@hust.edu.cn;

13659805326



传感器与检测技术

1 教学目的

- (1) 目的在于让学生掌握传感器与检测技术的基本理论，要求掌握有关测量中常用的各种传感器的工作原理、输入输出特性、误差分析与补偿方法、相关检测电路、检测数据的处理；
- (2) 使学生能合理地选择和使用传感器，并进一步掌握传感器的实验研究方法；
- (3) 熟悉常用传感器在信息采集系统中使用时需注意的问题，同时了解传感器及检测技术的国内外研究概况与发展动向。

传感器与检测技术

2 教材和参考书目

教材:

王化祥, 传感器原理及应用(第四版), 天津大学出版社, 2014

教辅:

王化祥, 《传感器原理及应用》例题与习题, 天津大学出版社, 2016

参考书目:

高成. 传感器与检测技术, 机械工业出版社

刘焕成. 传感器与电测技术, 清华大学出版社

吴朝霞等. 现代检测技术, 北京邮电大学出版社

徐恕宏. 传感器原理及其设计基础, 华中理工大学出版社

Pallas Areny, Ramon. Sensors and signal conditioning.

传感器与检测技术

3 考核方法

总成绩主要由如下3部分组成：

- ① 考试卷面成绩 (约50%)
- ② 实验成绩 (约15%)
- ③ 作业、报告等 (约35%)

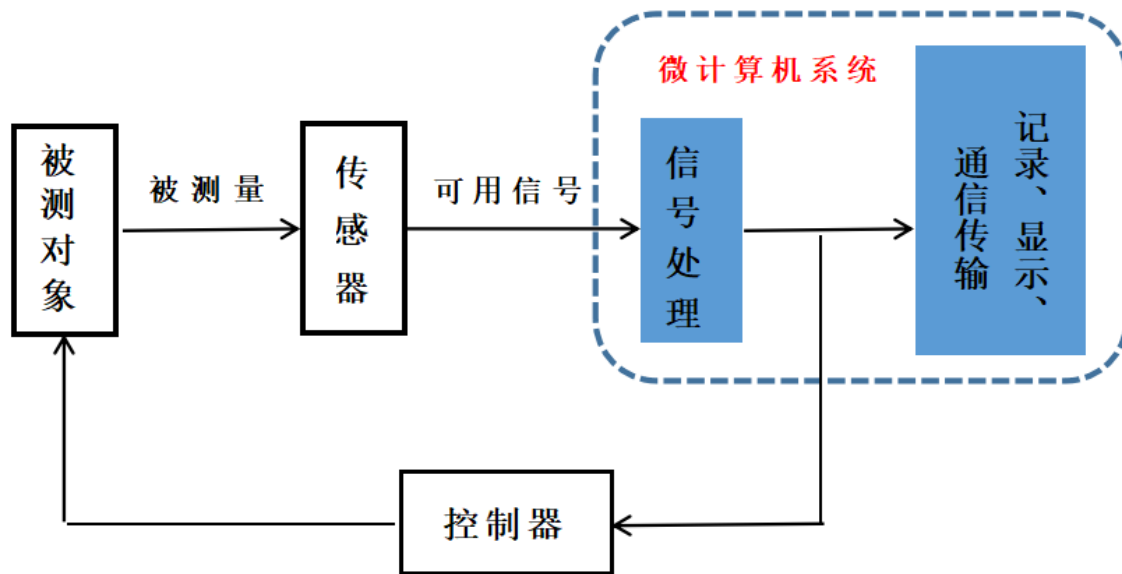
第一章 绪论

本章主要内容

- 传感器与检测技术的地位与作用
- 传感器与检测技术的发展趋势
- 传感器的定义与分类
- 传感器的基本特性
- 传感器性能与结构的关系

1 传感器与检测技术的地位与作用

1.1 是测控系统中的关键环节

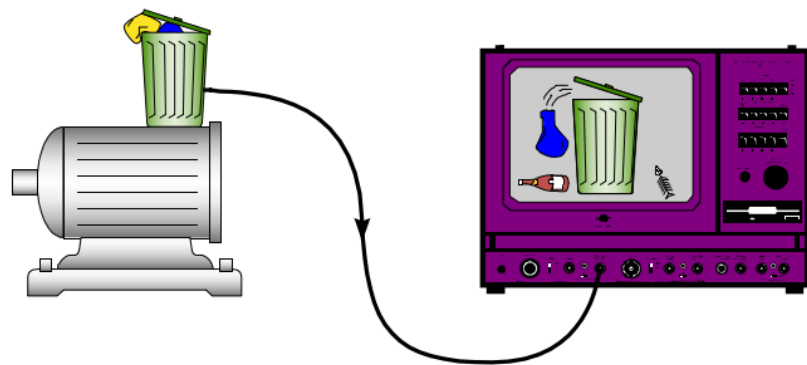


1.1 是测控系统中的关键环节

① 信息不增定理

传感器决定了获取的信息量，一旦获取信息后，在以后的数据处理、特征提取和识别中，只能对它进行变换，使之成为更易于识别的形式，但不能产生表征信息源本质的新信息。

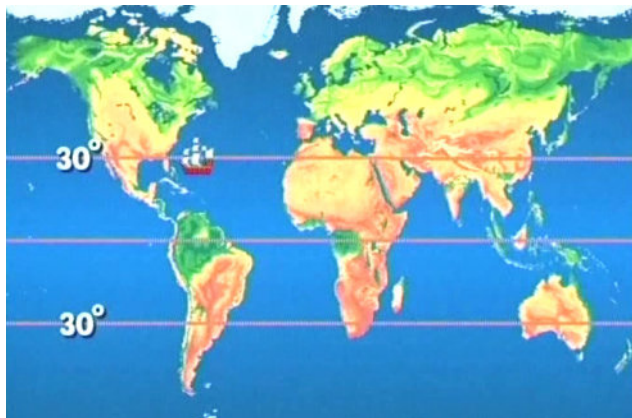
② 支持的**反馈是控制** 科学的基本思想



Garbage In = Garbage Out

Gold In = Gold Out

1.2 促进基础学科研究



*1912年魏格纳提出了**大陆漂移假说**，并于1915年在《海陆的起源》一书中全面系统的阐述了这个理论。

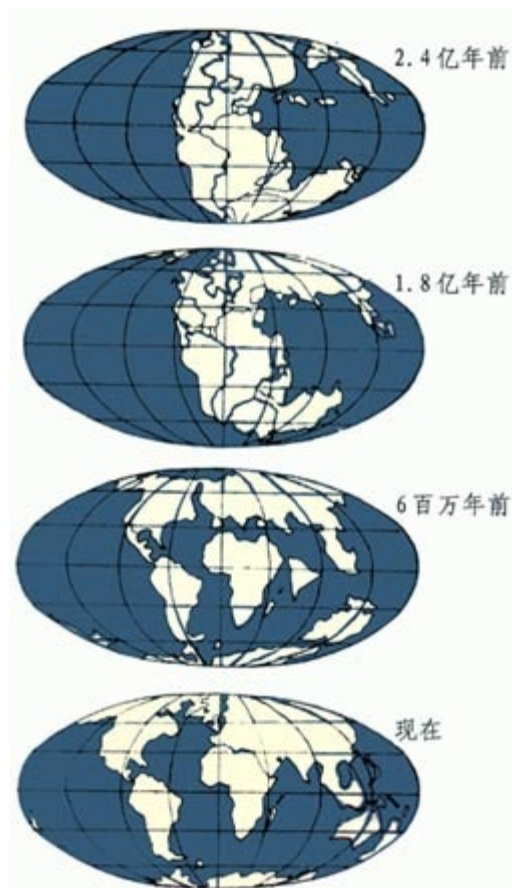
* 1928年，大陆漂移的内在动力被发现：地幔对流

* 1961年左右——**核磁共振磁力仪**——古地磁学研究

* 其它先进传感器的出现——**声纳探测**、人工地震波等——海洋研究突飞猛进。

——→ **大陆漂移学说**

·测量科学与仪器系



1.2 促进基础学科研究

扫描隧道显微镜开启了纳米科学时代

* 扫描隧道显微镜(scanning tunneling microscope, STM)是一种利用量子理论中的**隧道效应**探测物质表面结构的仪器。在量子隧道效应中，原子间距离与隧道电流有关。

* STM使人类第一次能够实时地观察单个原子在物质表面的排列状态和与表面电子行为有关的**物化性质**，在**表面科学、材料科学、生命科学**等领域的研究中有着重大的意义和广泛的应用前景，被国际科学界公认为20世纪80年代世界十大科技成就之一。



1986年诺贝尔物理学奖获得者格尔德·宾宁 (Gerd K.Binnig)及亨利希·罗勒(Heinrich Rohrer)与他们发明的扫描隧道显微镜

1.2 促进基础学科研究

中国天眼-500米口径球面射电望远镜(FAST)

* FAST是世界上目前口径最大、最精密的单天线射电望远镜。它将在基础研究的众多领域，例如**宇宙大尺度物理学**、**物质深层次结构和规律**等方向提供发现和突破的机遇。

* FAST的科学目标中，排在最前列的是**寻找脉冲星**。脉冲星是快速自转的中子星，它能够发射严格周期性脉冲信号。脉冲星的观测研究不仅具有重要的物理意义，而且具有重要应用价值，在时间尺度、深空自主导航等方面具有重要的应用前景。

* 截至2019年8月28日，已发现132颗优质的脉冲星候选体，其中有93颗已被确认为新发现的脉冲星。



500米口径球面射电望远镜

1.3 推动经济发展、社会进步

*各类产品生产的质量保障、食品安全、环境保护等等

*城市治安、交通管理（图像传感器）等

*老龄服务（跌倒报警器）等

• • • • •

2 传感器与检测技术发展的趋势

■ “三新”

- 新材料的开发应用
- 新工艺技术的应用
- 新效应的发现

■ “五化”

- 固态化
- 集成化和多功能化
- 图像化
- 智能化
- 网络化

➤ 传感器的固态化

物性型传感器亦称固态传感器，目前发展最快。它包括半导体、电介质和强磁性体三类，其中半导体传感器的发展最引人注目。它具有灵敏度高、响应速度快、小型轻量等优点，而且便于传感器的集成化和多功能化。

➤ 传感器的集成化和多功能化

所谓的集成化，就是将敏感元件、信息处理或转换单元以及电源等部分利用半导体技术将其制作在同一芯片上。

所谓的多功能化，则意味着传感器具有多种参数的检测功能，如半导体温湿敏传感器，多功能气体传感器等。

➤ 传感器的图像化

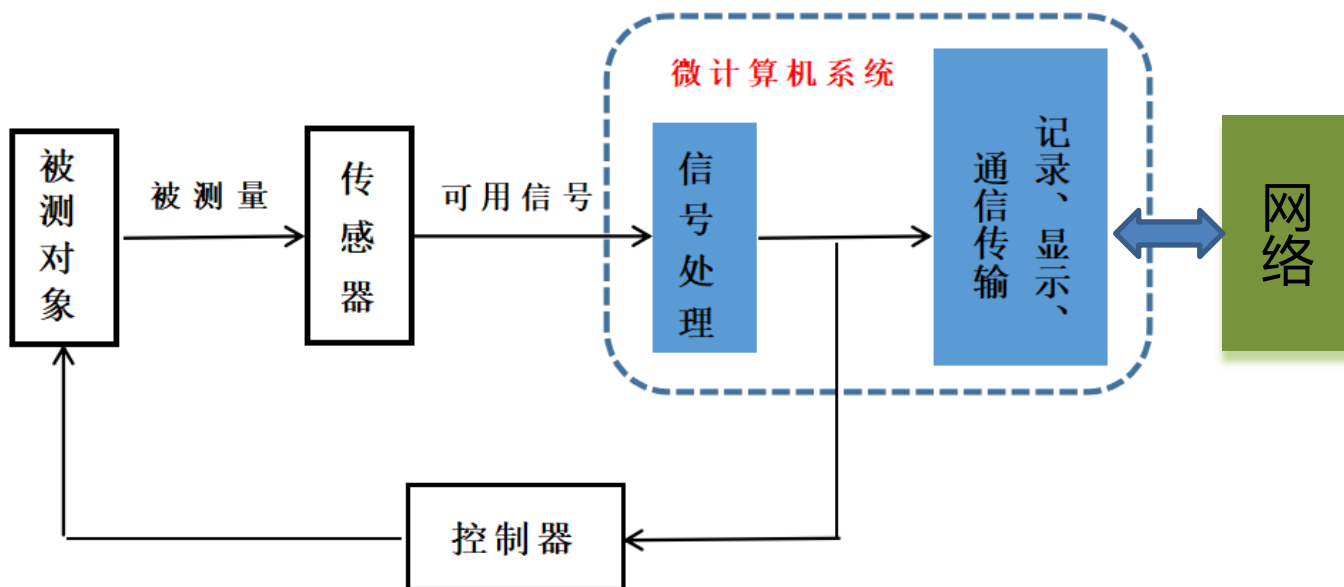
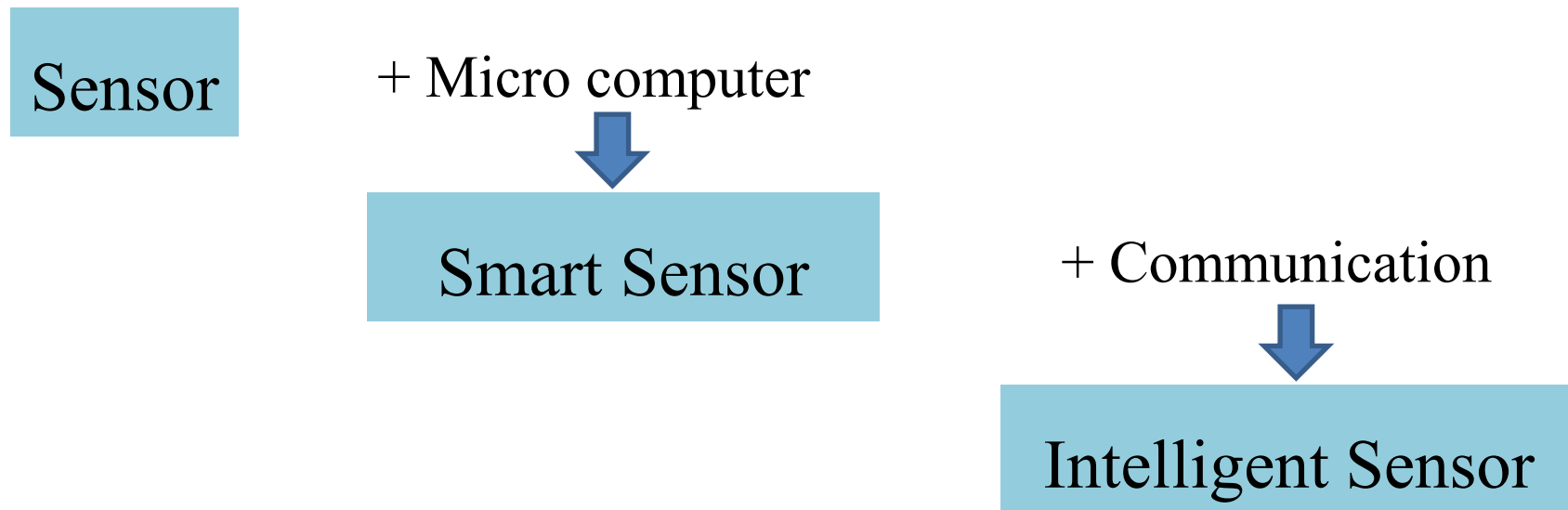
传感器的应用不仅限于对某一点物理量的测量，而面向从一维、二维到三维空间的测量问题。

➤ 传感器的智能化

智能传感器是一种带有微型计算机兼有检测和信息处理及通讯功能的传感器。

它是将信号检测、驱动回路和信号处理回路等外围电路全部集成到一块基片上，具有自诊断、自动调整零点和量程、以及通信的功能。

➤ 传感器的智能化（续）



➤ 传感器的网络化

无线传感器网络 (WSN) 由大量的低功耗传感器节点组成，通过无线通讯方式形成多跳自组织网络系统。

Internet 构成逻辑上的信息世界，改变了人与人的交流方式。

WSN 将逻辑上的信息世界与客观物理世界融合，改变了人与自然的交互方式，从而极大扩展了现有网络的功能和人类认识世界的能力。

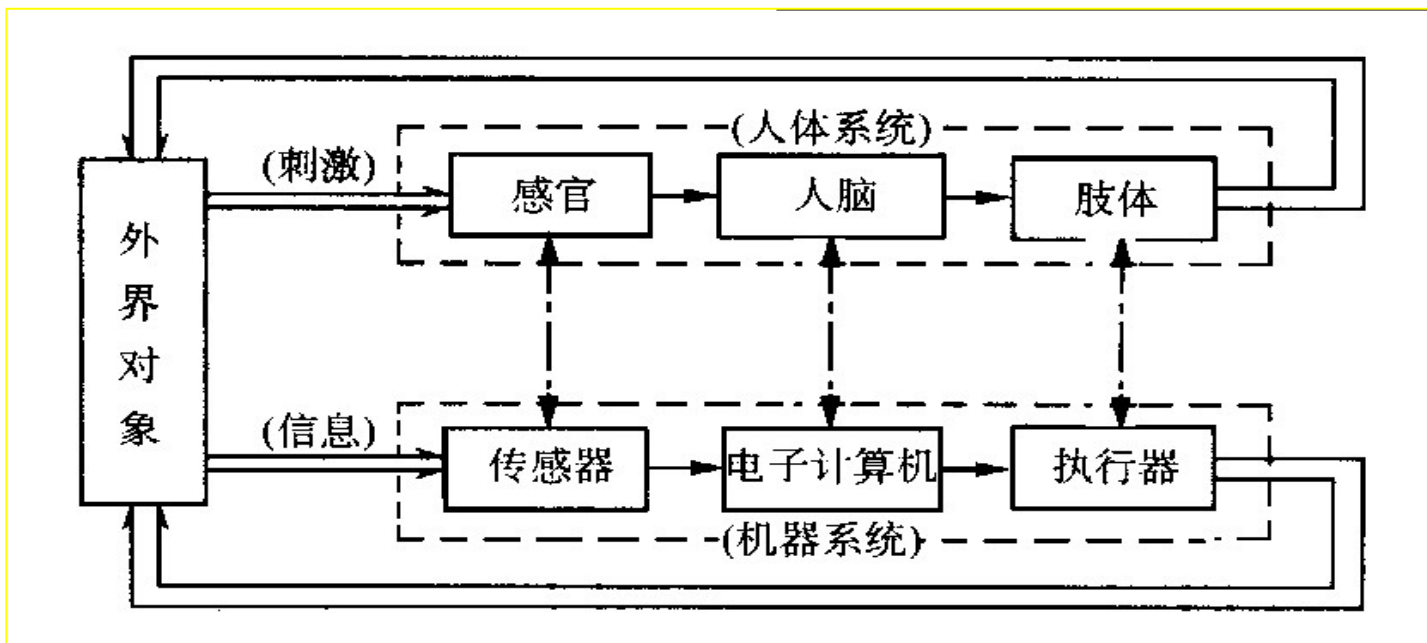
3 传感器的定义、组成与分类

3.1 定义 一能将规定的被测量按一定规律转换成可用信号输出的器件或装置。

•物理量、化学量、生物量/其他

•便于处理和传输的信号

•人的五官： 眼睛 耳朵 鼻子 舌头 皮肤
 ↑ ↑ ↑ ↑ ↑
 视觉、听觉、嗅觉、味觉、触觉

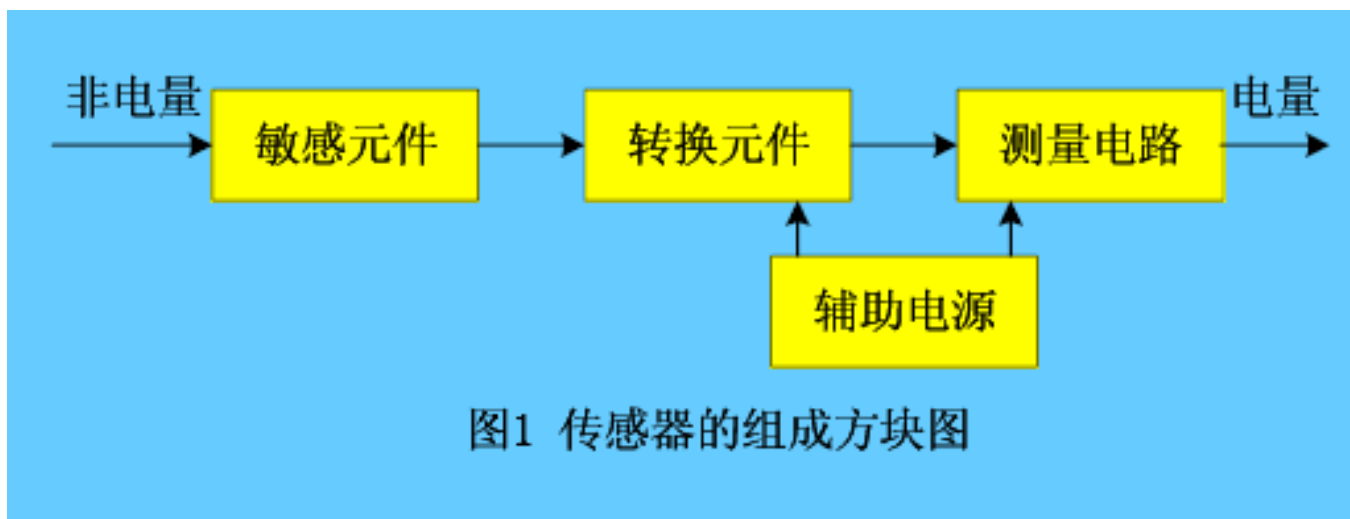


传感器的主要内涵和特征：

- 输入端__一个指定的传感器只能响应某一**规定的**被测量。
- 输出端__**可用信号**。便于后续部件接收和处理的信号。最常用的是电信号，广义角度看也可以是其它信号。
- 输入输出之间的关系__**具有规律性**。同一个传感器转换规律具有复现性，不同传感器转换规律不同。

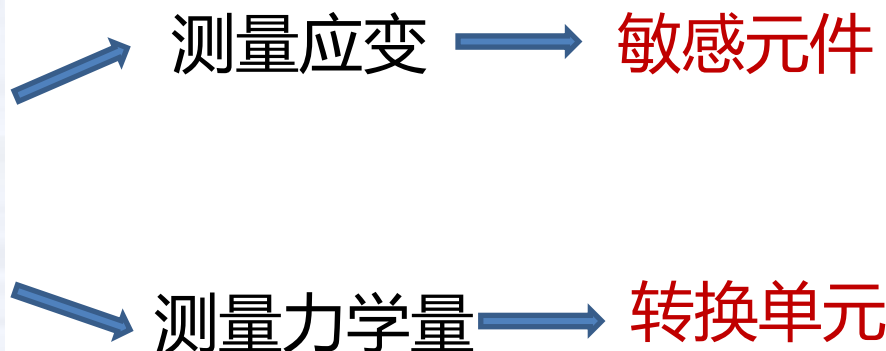
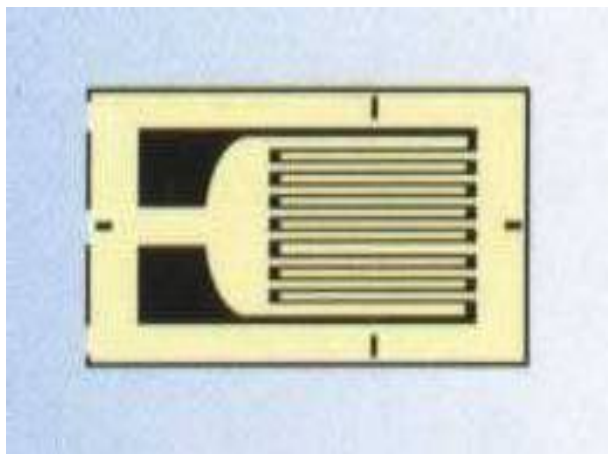
3.2 组成

传感器一般由敏感元件（预变换器）、转换元件和测量电路三部分组成，有时候还需要加辅助电源。



敏感元件（预变换器）

在完成非电量到电量的变换时，并非所有的非电量都能利用现有手段直接变换为电量，往往是将被测非电量预先变换为另一种易于变换成电量的非电量，然后再变换为电量。



转换元件

- 能将敏感元件感受到的非电量直接转换为电量的器件。
- 敏感元件的输出是它的输入，它把输入转换成电路参数，送给测量电路。

测量电路

- 将转换元件输出的电量变成便于显示、记录、控制和处理的有用信号的电路。

3.3 分类

➤ 按被测量分类

温度、压力、流量、位移等

➤ 按测量原理分类

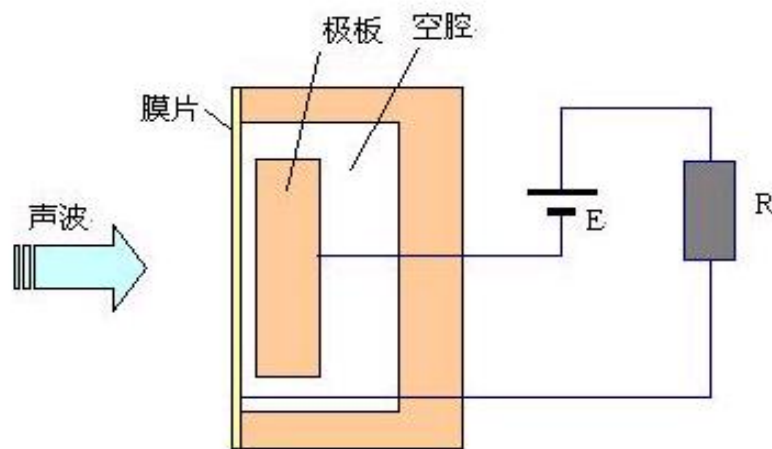
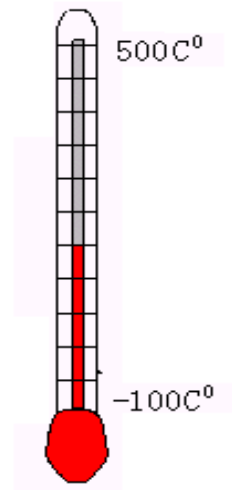
应变式、电容式、电感式、压电式、光电式等

➤ 按信息能量变换方式分类

能量转换型、能量控制型

➤ 按传感器的构成

物性型、结构型



4 传感器的基本特性

4.1 传感器的静态特性

- 稳态工作条件下的输出—输入关系。

稳态工作状态是指传感器的输入量恒定或缓慢变化而输出量也达到相应的稳定时的工作状态。

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



4.1 传感器的静态特性

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

主要指标：

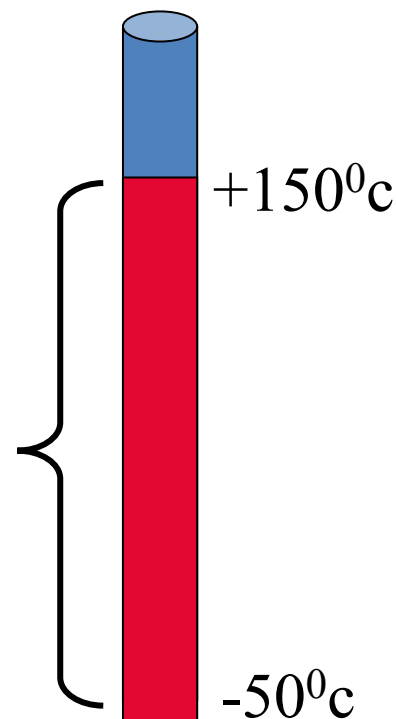
准确度（精度）、灵敏度、线性度、迟滞、死区、重复性、噪声电平、分辨率（力）、测量范围和量程

(1) 测量范围与量程

- ❖ 测量上限：传感器所能测量的最大被测量的数值 (x_{\max})。
- ❖ 测量下限：传感器所能测量的最小被测量的数值 (x_{\min})。
- ❖ 测量范围：-50~150、0 ~ 50、-50 ~ +50、20 ~ 100
- ❖ 量程：测量上限和测量下限的代数差。

$$\text{量程} = x_{\max} - x_{\min}$$

$$\text{如：量程} = 150 - (-50) = 200$$

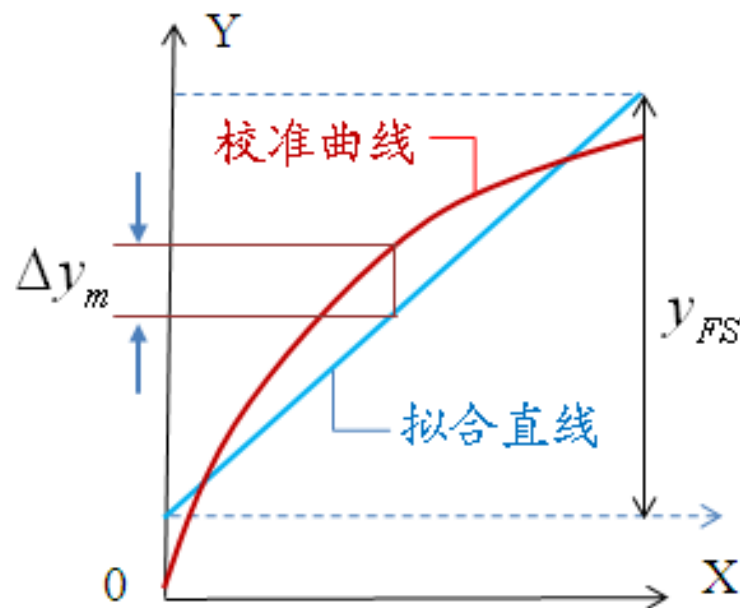


(2) 线性度

线性度（非线性误差）用来说明静特性曲线偏离某种拟合直线的程度，通常以其最大偏差 Δy_m 与满刻度输出值 y_{FS} 的比值来表示：

$$\varepsilon_L = \frac{|\Delta y_m|}{y_{FS}} \times 100\%$$

- Δy_m ——校准曲线与拟合直线间的最大偏差
- y_{FS} ——传感器满刻度输出。



- 线性度是以一定的拟合直线或理想直线为基准直线算出来的, 基准直线 (拟合直线) 不同, 线性度不同。

- 选择拟合直线的主要出发点:

- 获得最小的非线性误差
- 计算简便, 使用方便

几种常用直线拟合方法：

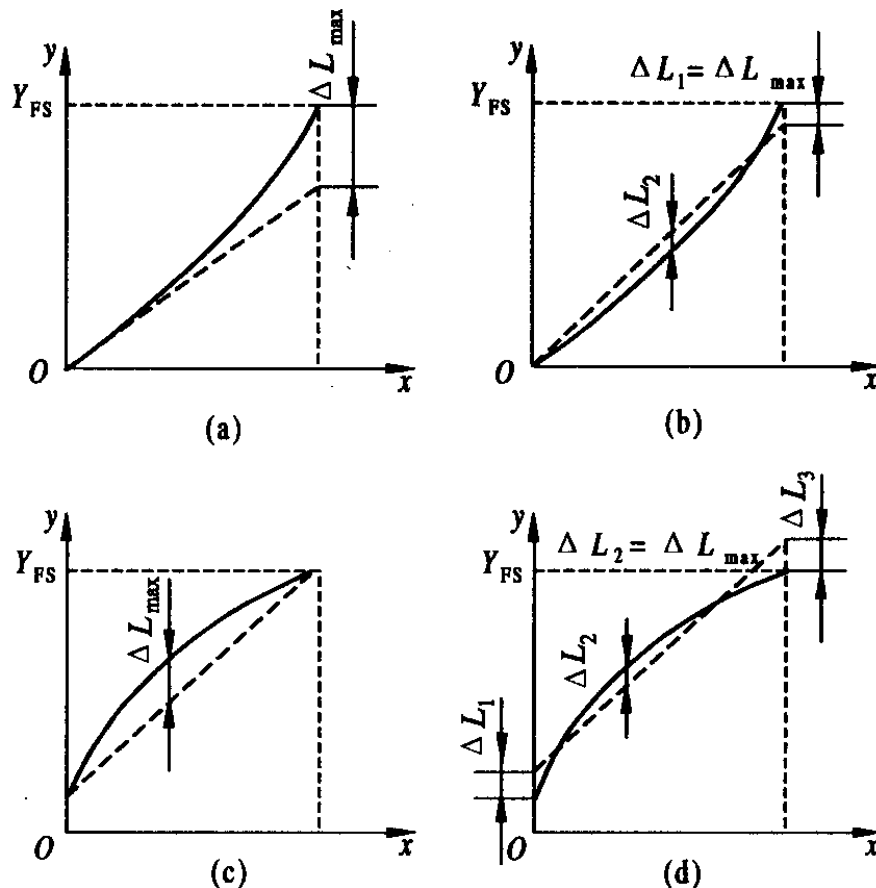
(a) 理论拟

(b) 过零旋转拟合

(c) 端点连线拟合 (端基法)

(d) 端点平移拟合

(e) **最小二乘法**



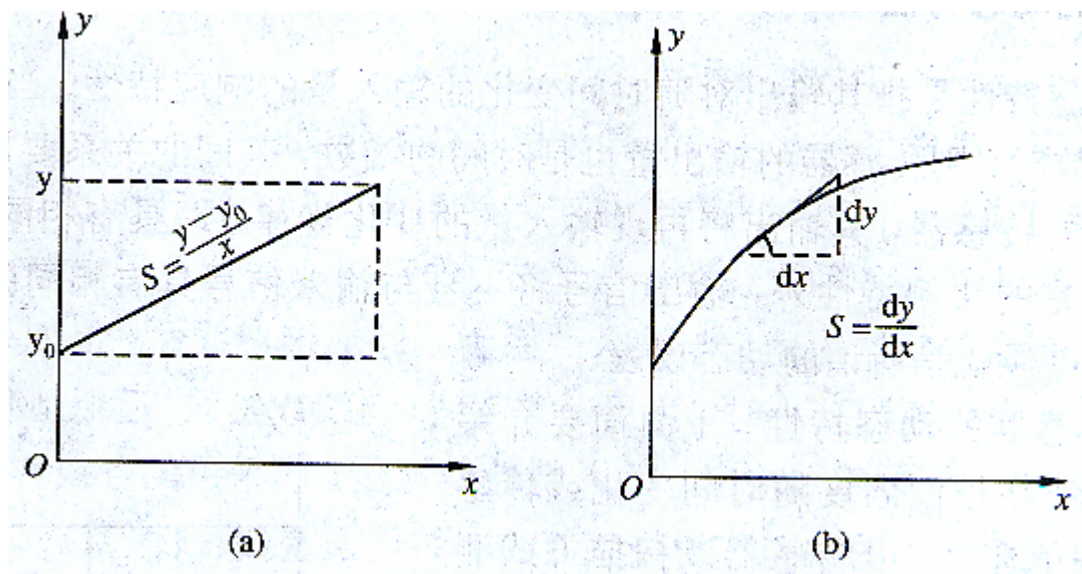
几种直线拟合方法示意图

(a) 理论拟合； (b) 过零旋转拟合；

(c) 端点连线拟合； (d) 端点平移拟合

(3) 灵敏度

灵敏度定义为输出量的微小增量与相应的输入量微小增量的比值。



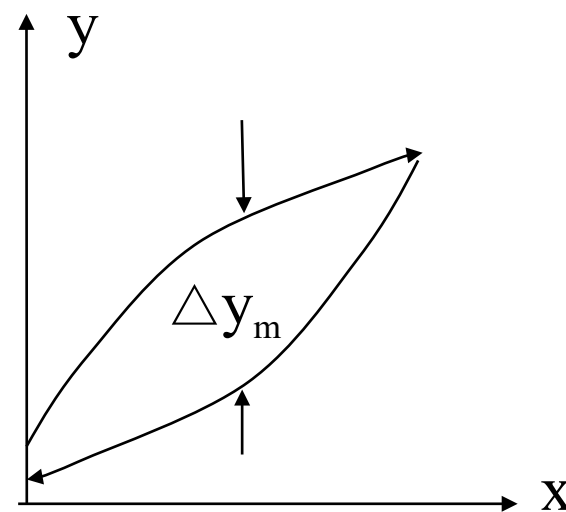
- ①灵敏度的高低是选择和设计传感器的重要依据之一；
- ②当传感器输出是几种因素作用的结果时，可以分别对各个因素确定其灵敏度；
- ③构成系统时，灵敏度与电路的放大倍数类同，即环节串联时灵敏度相乘，并联时灵敏度相加。

(4) 迟滞 (变差)

表示传感器在正、反行程期间输出—输入曲线的不重合程度。

$$\varepsilon_H = \frac{|\Delta y_m|}{y_{FS}} \times 100\%$$

$$\text{or } \varepsilon_H = \frac{|\Delta y_m|}{2y_{FS}} \times 100\%$$



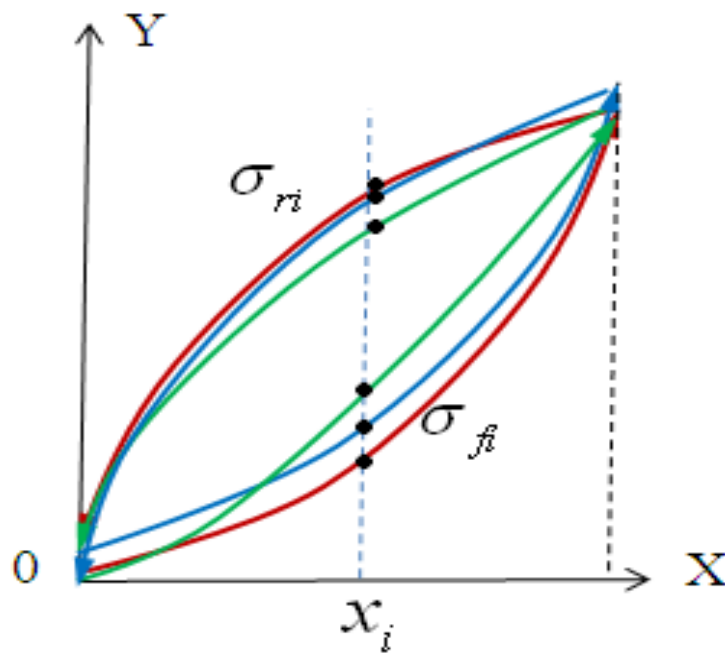
(5) 重复性

表示传感器在同一工作条件下，输入按同一方向作全量程、连续多次重复测量时所得特性曲线的一致程度。

$$\varepsilon_R = \frac{\lambda \sigma_{\max}}{y_{FS}} \times 100 \%$$

σ_{\max} : 正反行程标准偏差最大值;

λ : 系数, 通常取2~3。

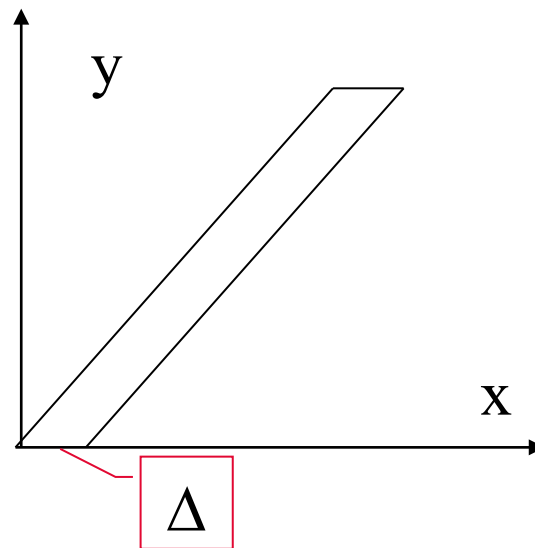


σ_{fi} : 正行程输入为 x_i 点的标准偏差

σ_{ri} : 反行程输入为 x_i 点的标准偏差

(6) 死区

指输入信号变化而输出信号没有相应变化的范围。



(7) 回差

当传感器同时具有死区和滞环两种非线性因素时，其综合影响是复杂的，通常称为回差。

(8) 噪声电平 (N)

用于衡量传感器内部固有的噪声大小，常用折算到输出端的噪声电压表示。它表明系统可以探测的最小信号。

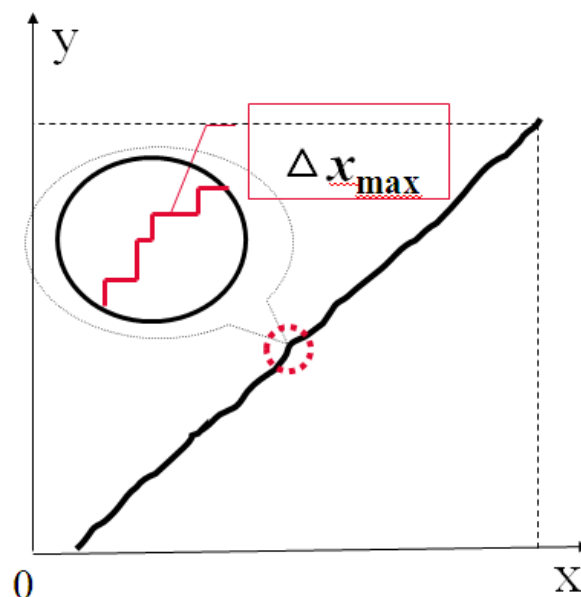
(9) 最小检测量和分辨力

分辨力是传感器能感测到的被测量的最小变化量。有时用该值相对于满量程之百分数表示，则称为**分辨率**。

最小检测量是传感器能确切反映被测量的最低极限值。

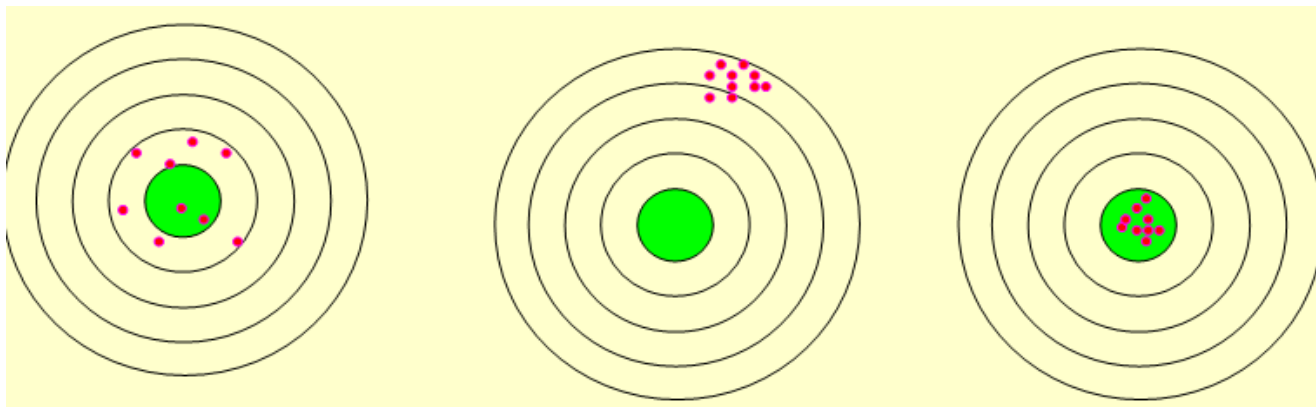
$$M = \frac{CN}{K}$$

其中：M为最小检测量，N为噪声电平，K为传感器的灵敏度，C为噪声系数（一般取1~5）。



(10) 准确度 (精确度、精度)

■ 你会打靶吗?



(a) 正确度高而精密度低

(b) 正确度低而精密度高

(c) 准确度高

测量精密度 (precision of measurement)

测量正确度 (correctness of measurement)

测量准确度 (accuracy of measurement)

在测量中我们希望得到准确度高的结果

准确度 ε

准确度是反映系统误差和随机误差的综合误差指标

正确度

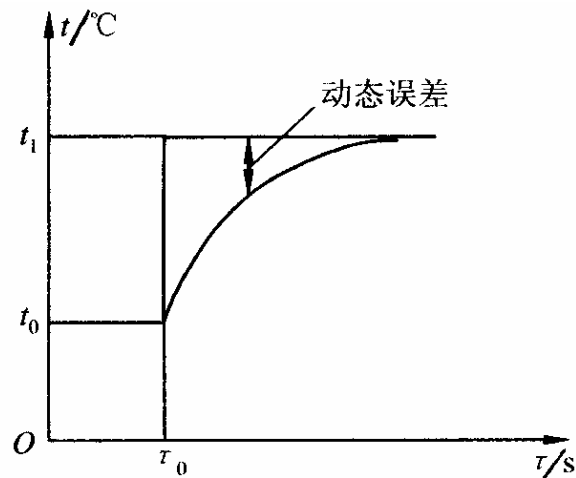
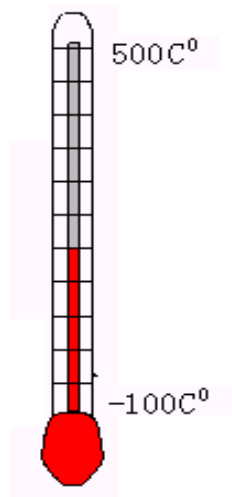
精密度

常用的总误差计算公式: $\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_L^2 + \varepsilon_H^2 + \varepsilon_R^2}$

- 精密度: 它说明测量结果的分散性 (随机误差)
- 正确度: 它说明测量结果偏离真值大小的程度 (系统误差)
- 准确度: 它含有精密度和正确度之和的意思, 即测量的综合优良程度。

4.2 传感器的动态特性

反映传感器对于随时间变化的输入量的响应特性。



4.2.1 动态数学模型

微分方程：

$$a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \cdots + a_0 y(t) = b_m \frac{d^m x(t)}{dt^m} + \cdots + b_0 x(t)$$

传递函数：

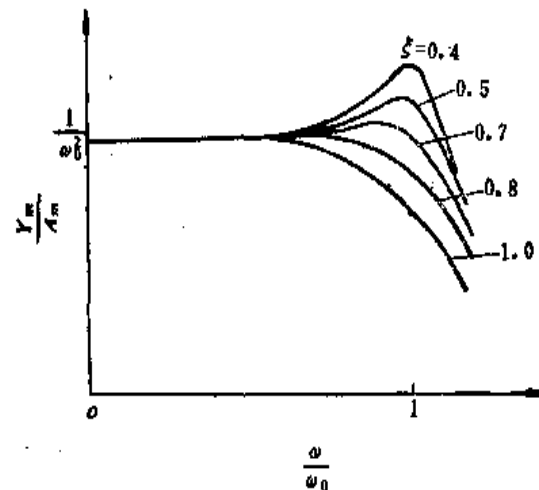
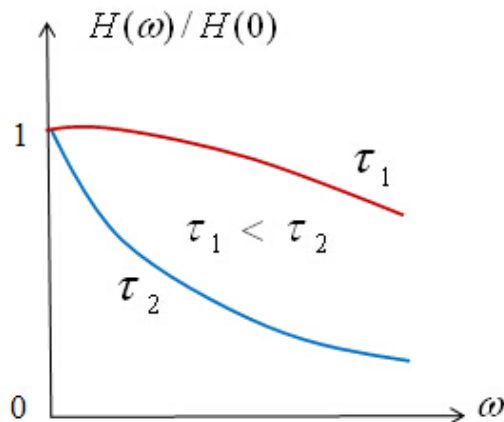
一阶传感器： $H(s) = \frac{K}{\tau s + 1}$

二阶传感器： $H(s) = \frac{K \omega_0^2}{s^2 + 2\xi \omega_0 s + \omega_0^2}$

输入标准信号：

- 正弦输入：频域响应特性（稳态响应、频域响应）
- 阶跃输入：时域响应特性（瞬态响应）

4.2.2 频率特性及其动态品质之间的关系



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

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

相频特性: $\psi = \arctan(-\omega\tau)$

$$H(s) = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2}$$

$$H(\omega) = \frac{1}{\sqrt{[1 - (\frac{\omega}{\omega_0})^2]^2 + 4\xi^2 (\frac{\omega}{\omega_0})^2}}$$

$$\psi = -\arctan \frac{2\xi(\frac{\omega}{\omega_0})}{1 - (\frac{\omega}{\omega_0})^2}$$

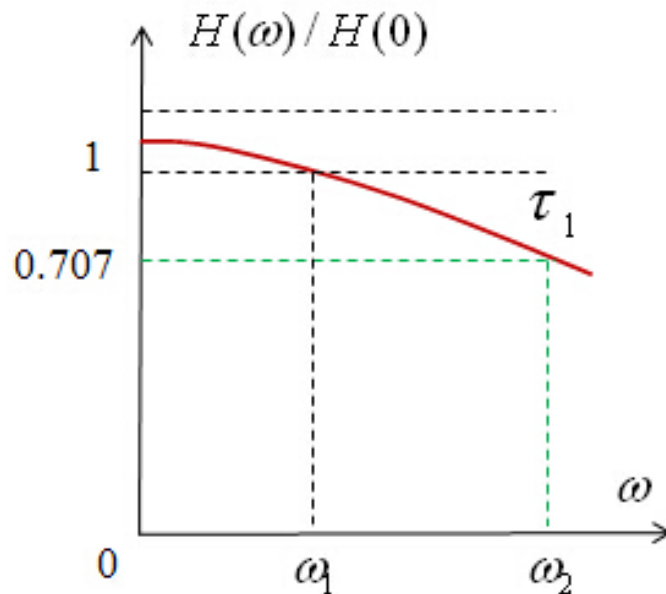
4.2.2 频率特性及其动态品质之间的关系（续）

频域性能指标：

• **通频带** (transmission band) 是指在规定的衰减值下，能通过的频率范围。一般采用3分贝带宽（幅度下降到0.707）。

• **工作频带** (working band) 是指满足精度指标要求下，能通过的频率范围。

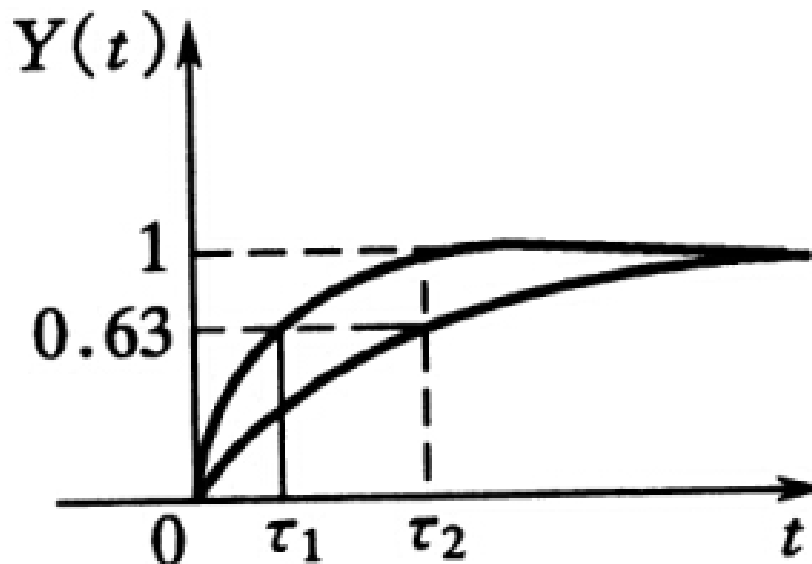
• **相位误差** (Phase error)



4.2.3 时域响应特性及其动态品质指标

一阶系统：

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

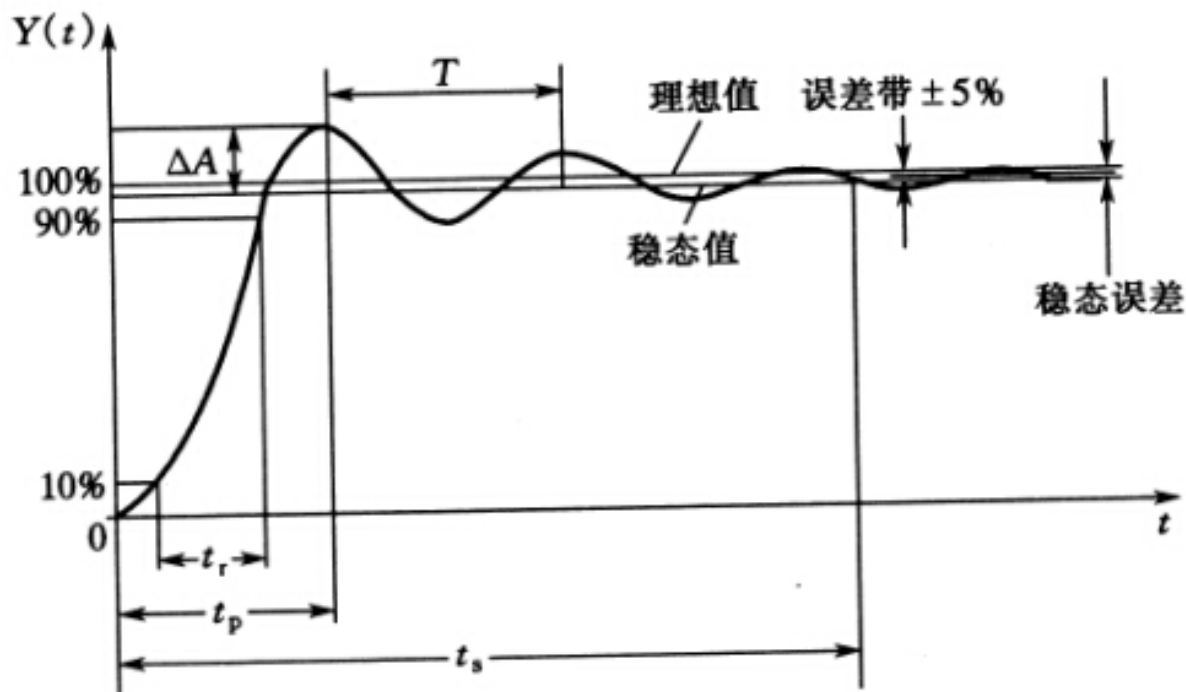


●动态品质指标：时间常数 τ

4.2.3 时域响应特性及其动态品质指标（续）

二阶系统：

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



动态品质指标：

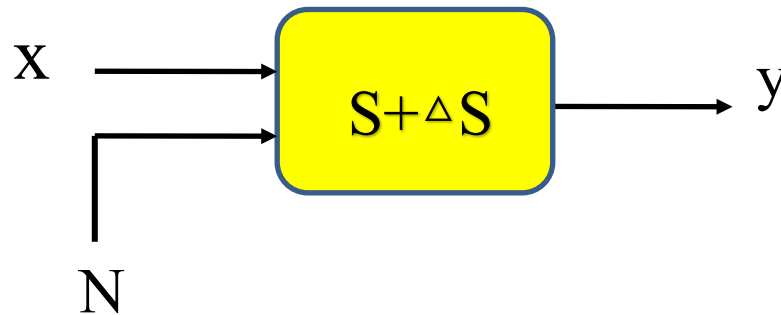
- 上升时间 t_r ：稳态值的10%上升到90%的时间
- 稳定时间 t_s ：从阶跃输入开始到系统开始稳定在给定精度指标的时间
- 峰值时间、超调量、振荡周期等

5 传感器性能与结构的关系

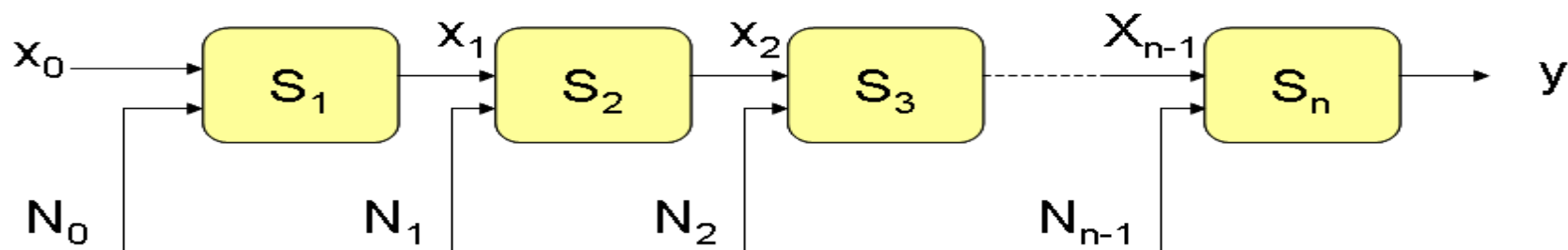
- 直接变换型
- 差动型
- 平衡型—含有反馈环节
- 冗余型

结构与传感器抗干扰能力的关系？

在此问题定义下，设环境对传感器的影响表现为灵敏度变化 ΔS 和一个等效的噪声 N 。



(1) 直接变换型



①灵敏度扰动模型：
$$S_i = S_{i0} + \Delta S_i$$

②加性噪声信号模型

问题：

①整个系统的性能指标与各环节性能指标的关系？

②各环节性能的运筹？

在理想条件下：

$$y_0 = s_{10}s_{20} \cdots s_{n0}x_0$$

①元件灵敏度发生变化 $s_i = s_{i0} + \Delta s_i$

$$y = y_0 + \Delta y = s_1 s_2 \cdots s_n x_0$$

忽略灵敏度扰动高阶无穷小 $\Delta s_m \cdot \Delta s_n = 0$

$$\frac{\Delta y}{y_0} = \frac{\Delta s_1}{s_{10}} + \frac{\Delta s_2}{s_{20}} + \cdots + \frac{\Delta s_n}{s_{n0}}$$

结论：

- ①灵敏度变化引起的相对误差等于各个环节相对误差的代数和
- ②可相互补偿

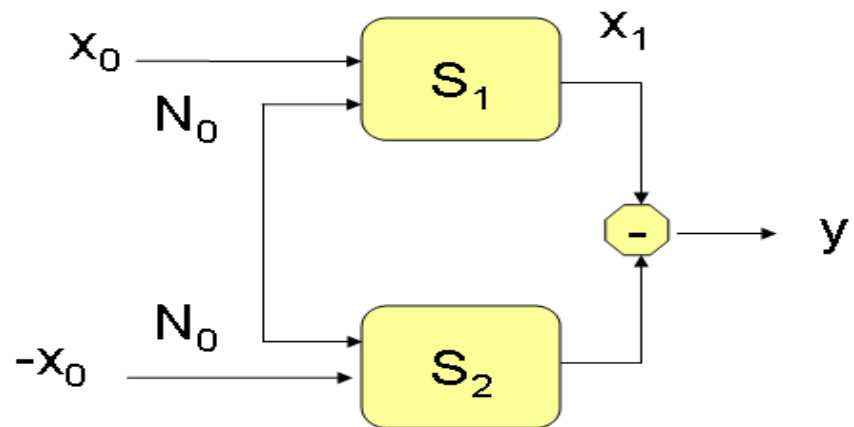
②在有噪声情况下：

$$\begin{aligned}\frac{\Delta y}{y_0} &= \frac{N_0 \cdot s_{10} \cdot s_{20} \cdots s_{n0} + \cdots + N_{n-1} \cdot S_{n0}}{x_0 \cdot s_{10} \cdots s_{n0}} \\&= \frac{1}{x_0} \left[N_0 + \frac{N_1}{s_{10}} + \frac{N_2}{s_{10} \cdot s_{20}} + \cdots \right] \\&= \frac{N_0}{x_0} + \frac{N_1}{x_1} + \cdots + \frac{N_{n-1}}{x_{n-1}}\end{aligned}$$

结论：

- ①总误差等于各变换环节输入端的噪信比总和
- ②总灵敏度一定，提高前面元件灵敏度可降低总噪声
- ③尽量降低第一个元件的噪信比

(2) 差动型



问题:

差动系统有何优点?

设两通道完全对称，即 $s_1=s_2=s$

①系统灵敏度 $y = s_1x_0 - s_2(-x_0)$
 $= (s_1 + s_2)x_0$
 $= 2sx_0$

②灵敏度发生变化 $\frac{\Delta y}{y_0} = \frac{2 \cdot \Delta s \cdot x_0}{2 \cdot s_0 \cdot x_0} = \frac{\Delta s}{s_0}$

③灵敏度的非线性补偿

$$s = s_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 + \dots \quad |x| < 1$$

直接变换型: $y' = s \cdot x = s_0x + a_1x^2 + a_2x^3 + a_3x^4 + \dots$

差动型: $y = s_1x - s_2(-x)$
 $= 2s_0x + 2a_2x^3 + 2a_4x^5 + \dots$

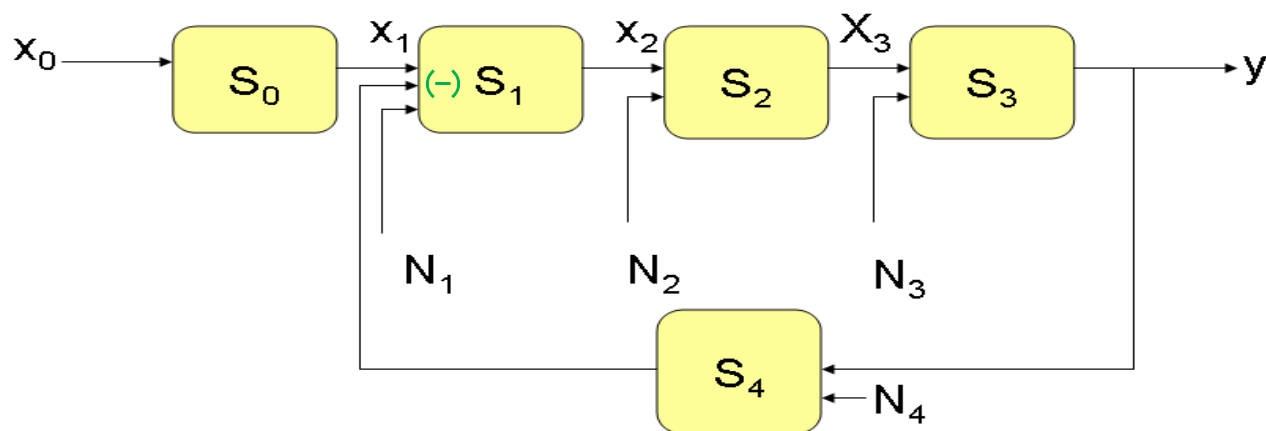
④在有噪声情况下, 若 $N_1=N_2$, 则

$$\frac{\Delta y}{y_0} = \frac{s \cdot (N_1 - N_2)}{2 \cdot s \cdot x_0} = 0$$

结论:

- ①差动系统的灵敏度是单个系统的两倍。
- ②可补偿偶次非线性误差。
- ③对于相同条件引起的误差有很好的抑制作用。

(3) 平衡型



$$\begin{cases} y_0 = \frac{S_0 S_1 S_2 S_3}{1 + S_1 S_2 S_3 S_4} X_0 \\ S_1 S_2 S_3 S_4 \rightarrow \infty, y_0 \approx (S_0 / S_4) X_0 \end{cases}$$

问题：如何在有限的条件下实现高品质的传感器？

①灵敏度变化 $S + \Delta S$

$$\therefore \frac{\Delta y}{y_0} = \frac{\Delta S_0}{S_0} + \frac{1}{1 + S_1 S_2 S_3 S_4} \left[\frac{\Delta S_1}{S_1} + \frac{\Delta S_2}{S_2} + \frac{\Delta S_3}{S_3} \right] - \frac{S_1 S_2 S_3 S_4}{1 + S_1 S_2 S_3 S_4} \frac{\Delta S_4}{S_4}$$

$$S_1 S_2 S_3 S_4 \rightarrow \infty$$

$$\therefore \frac{1}{1 + S_1 S_2 S_3 S_4} \left[\frac{\Delta S_1}{S_1} + \frac{\Delta S_2}{S_2} + \frac{\Delta S_3}{S_3} \right] \text{ 对系统影响很小}$$

$$\therefore \frac{\Delta y}{y_0} \approx \frac{\Delta S_0}{S_0} - \frac{\Delta S_4}{S_4}$$

结论：传感器的灵敏度只与 S_0 、 S_4 有关; S_1 、 S_2 、 S_3 选用可只考虑高灵敏度,不须考虑稳定性; S_4 稳定性对系统有重大影响。

$$\textcircled{2}\text{噪声影响} \begin{cases} N \\ y_0 = \frac{1}{S_4} X_1 \end{cases}$$

$$y_0 + \Delta y = \frac{S_1 S_2 S_3}{1 + S_1 S_2 S_3 S_4} X_1 \left[1 + \frac{N_1}{X_1} - S_4 \cdot \frac{N_4}{X_1} \right]$$

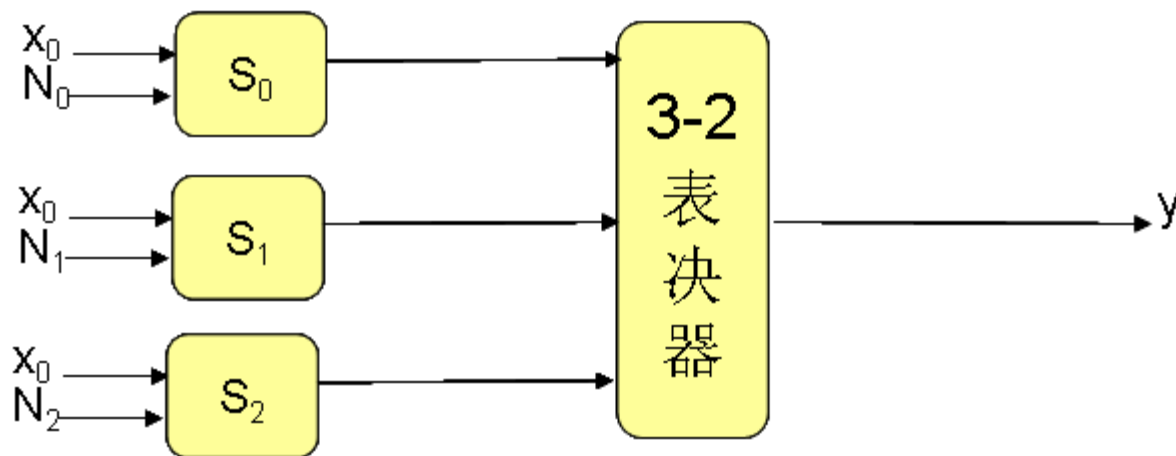
$$= y_0 \left[1 + \frac{N_1}{X_1} - \frac{N_4}{y_0} \right]$$

$$\frac{\Delta y}{y_0} = \frac{N_1}{X_1} - \frac{N_4}{y_0}$$

小结:

1. 前向通道灵敏度足够大。（特别是S1）
2. 闭环环节特性（灵敏度、线性度、稳定性等）主要取决于反馈环节S4。
3. 系统噪声引起的误差主要取决于S1的噪信比。

(4) 冗余型



问题： 如何实现高可靠性的传感器？

结论： 通过冗余配置传感器实现高可靠性。

作业：1. 设有压力传感器的校准数据列于下表，试求（1）端基拟合直线；（2）端基线性度；（3）滞环误差；（4）重复性误差（ $\lambda=3$ ）；（5）准确度。

<div> <div> $y_i (V)$ $x_i \times 10^5 (Pa)$ </div> <div>次数</div> </div>		0.0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
1	正行程	0.0020	0.2015	0.4005	0.6000	0.7995	1.0000
	反行程	0.0030	0.2020	0.4020	0.6010	0.8005	
2	正行程	0.0025	0.2020	0.4010	0.6000	0.7995	0.9995
	反行程	0.0035	0.2030	0.4020	0.6015	0.8005	
3	正行程	0.0035	0.2020	0.4010	0.6000	0.7995	0.9990
	反行程	0.0040	0.2030	0.4020	0.6010	0.8005	



END !

