



第一章 传感器技术基础

主讲人：王慧青

Email: 921394420@qq.com

Tel: 13951864608

东南大学仪器科学与工程学院

复习



www.seu.edu.cn

0.1

传感器的作用和重要性

0.2

传感器的定义和组成

0.3

传感器的分类及要求

0.4

传感器开发的新趋势

复习

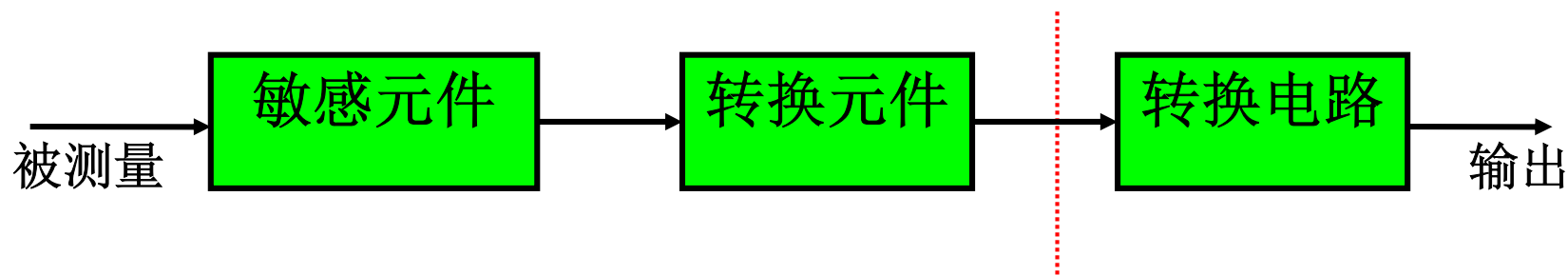


www.seu.edu.cn

传感器将环境信号转换成计算机可以处理的光、电信号（狭义）



利用一定的物质（物理、化学、生物）法则、定理、定律、效应等进行能量转换与信息转换的装置。（广义）



复习



www.seu.edu.cn

常用的分类：

- (1) 被测量
- (2) 传感器的原理

要求：

容量、灵敏度，精度、速度、稳定、可靠性、尺寸、成本

趋势：

- (1) 新
- (2) 集成化
- (3) 智能化
- (4) 仿生

第1章 传感器技术基础



www.seu.edu.cn

1.1

传感器的一般数学模型

1.2

传感器的特性与指标

1.3

改善传感器性能的技术途径

1.4

传感器的标定与校准

❖第1章 传感器技术基础



www.seu.edu.cn

第一节 传感器的一般数学模型

- ❖数学模型：表达传感器输出输入关系及特性的规律
- ❖静态模型：输入量不随时间变化的常量
- ❖动态模型：输入量随时间而变的变量

第1章 传感器技术基础



www.seu.edu.cn

第一节 传感器的一般数学模型

➤ 传感器的数学模型是指传感器的输入输出关系。

(1) 传感器的静态模型：

是指在静态条件下（即输入量对时间 t 的各阶导数为零）得到的传感器数学模型。传感器的静态模型可用一代数方程表示：

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

- x 为输入量， y 为输出量， a_0 为零位输出， a_1 为传感器的灵敏度，常用 K 表示。

a_2, a_3, \cdots, a_n ——非线性项的待定常数。

第1章 传感器技术基础



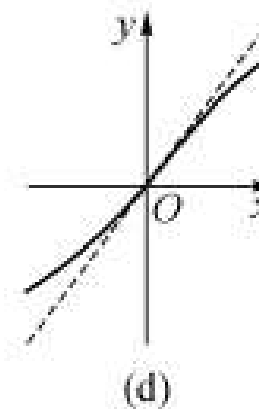
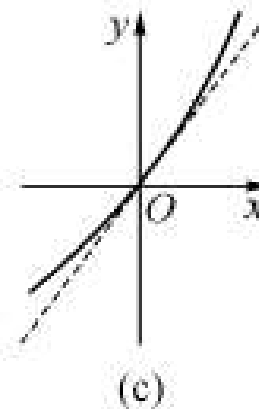
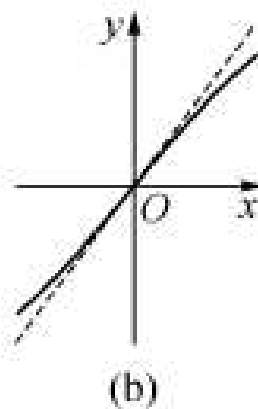
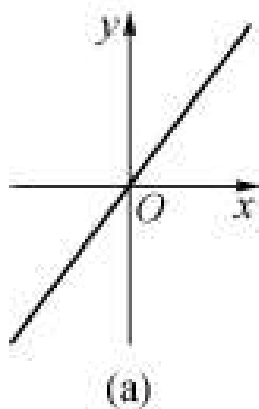
www.seu.edu.cn

第一节 传感器的一般数学模型

下图这种表示输出量与输入量之间的关系曲线，称为特性曲线。

通常希望传感器的输出输入关系呈线性，即图a所示，这时传感器的数学模型为线性模型：（即输入量对时间 t 的各阶导数
为零）

$$y=a_0+a_1x \quad \text{或} \quad y=ax$$



第1章 传感器技术基础



www.seu.edu.cn

第一节 传感器的一般数学模型

传感器静态数学模型建立——传感器数据拟合

$$y = a_0 + a_1 x \quad \text{或} \quad y = ax$$

- 端点线法
- 最佳直线法：保证正反行程对它的正、负偏差相等并且最小
- 最小二乘法

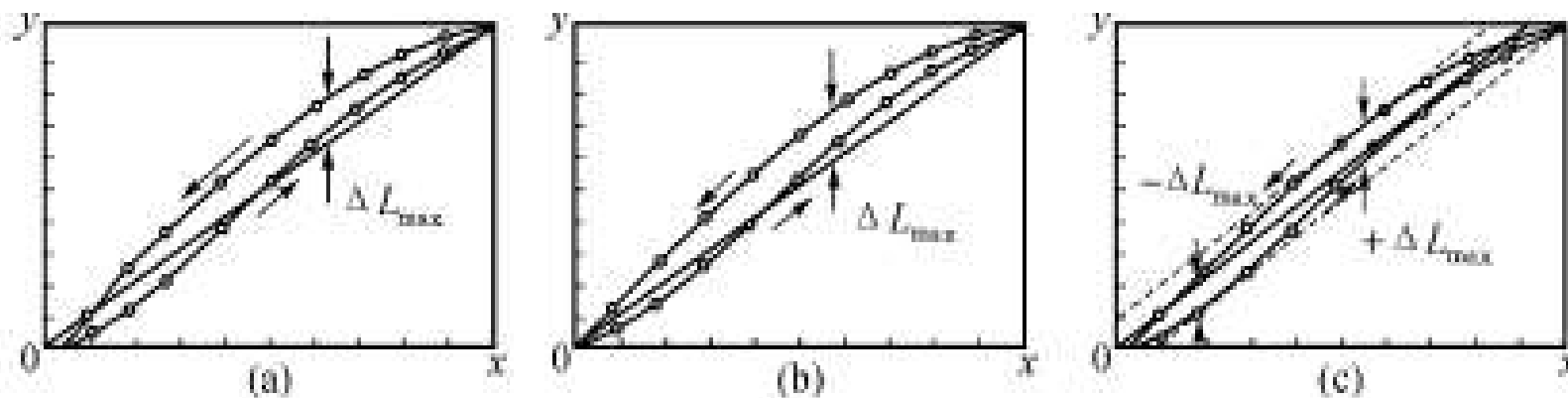


图 1-4 几种不同的拟合方法

(a)理论直线法；(b)端点直线法；(c)“最佳直线”法

第1章 传感器技术基础



www.seu.edu.cn

第一节 传感器的一般数学模型

■ 传感器数据拟合：最小二乘法。

拟合直线方程

$$y = b + kx$$

最小二乘法按最小二乘原理求取拟合直线，该直线能保证传感器校准数据的残差平方和最小。

系数b和k可根据以下公式求得，设实际校准测试点有n个,则第i个标准数据与拟合直线上相应值之间的残差为

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

第1章 传感器技术基础



www.seu.edu.cn

第一节 传感器的一般数学模型

按最小二乘法原理,应使 $\sum_{i=1}^n \Delta_i^2$ 最小;故由 $\sum_{i=1}^n \Delta_i^2$ 分别对 k 和 b 求一阶偏导数并令其等于零,即可求得 k 和 b :

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

式中, $\sum x_i = x_1 + x_2 + \cdots + x_n$;

$\sum y_i = y_1 + y_2 + \cdots + y_n$;

$\sum x_i y_i = x_1 y_1 + x_2 y_2 + \cdots + x_n y_n$;

$\sum x_i^2 = x_1^2 + x_2^2 + \cdots + x_n^2$ 。

第1章 传感器技术基础



www.seu.edu.cn

第一节 传感器的一般数学模型

(2) 传感器的动态模型:

■ 微分方程

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y =$$
$$b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \cdots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x$$

拉氏变换将时域数学模型（微分方程）转换成复数（s域）数学模型（传递函数）

■ 传递函数

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

式中 $a_0, a_1, \cdots, a_n; b_0, b_1, \cdots, b_m$ —— 取决于传感器参数的常数。对于传感器, 除 $b_0 \neq 0$ 外, 一般 $b_1 = b_2 = \cdots = b_m = 0$ 。

第二节 传感器的特性与指标

一、传感器的静态特性

- 静态特性表示传感器当输入量为常量，或变化极慢时，输入输出的关系就称为静态特性。



其中误差因数就是衡量传感器静态特性的主要技术指标。

第1章 传感器技术基础



www.seu.edu.cn

第二节 传感器的特性与指标

(1) 线性度：又称非线性，表征传感器输出-输入校准曲线与拟合直线之间的吻合（或偏离）程度的指标。

相对误差

$$e_L = \pm \frac{\Delta L_{\max}}{y_{F.S}} \times 100\%$$

选定的拟合直线不同，计算所得的线性度数值也就不同

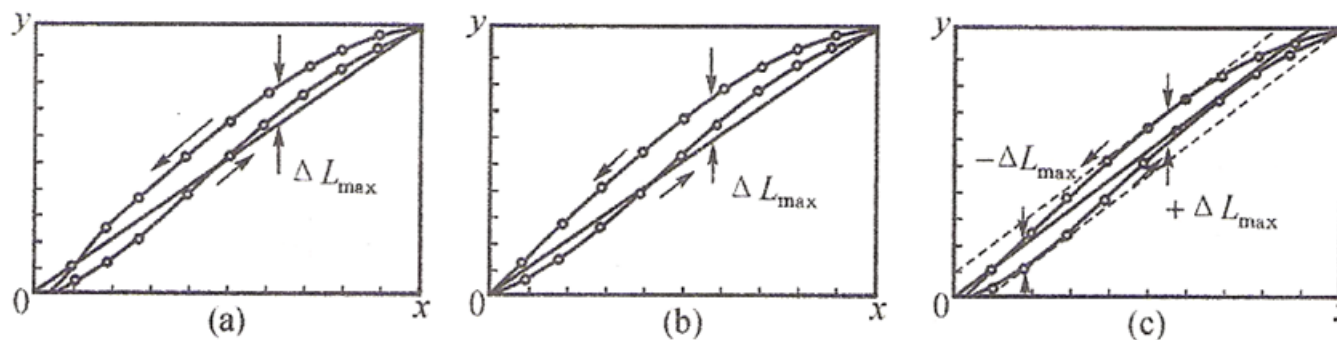


图 1-4 几种不同的拟合方法

(a)理论直线法；(b)端点直线法；(c)“最佳直线”法

第1章 传感器技术基础

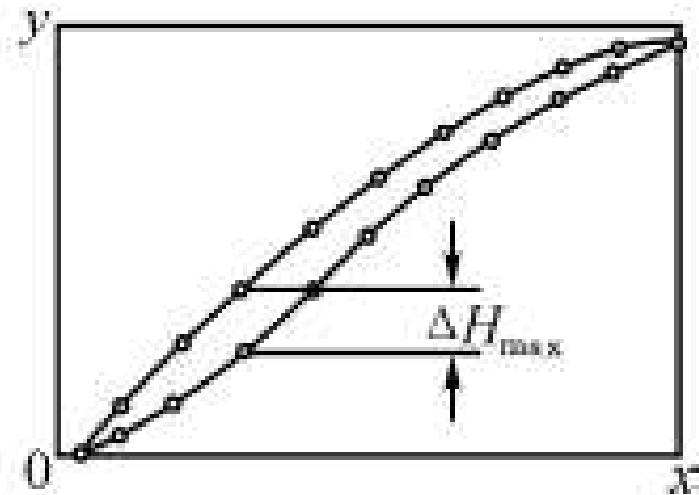


www.seu.edu.cn

(2) 回差（滞后、迟滞）

反映传感器在正反行程过程中输出输入曲线的不重合程度的指标。

$$e_H = \Delta H_{\max} / y_{F.S} \times 100\%$$



第1章 传感器技术基础



www.seu.edu.cn

(3) 重复性

衡量传感器在同一工作条件下，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。

。

$$e_R = \pm \frac{a\sigma_{\max}}{Y_{F.S}} \times 100\%$$

σ_{\max} : 各校准点输出值标准偏差中之最大值

a : 置信系数, 取 $a=2$, 置信概率95.4 % ; $a=3$, 置信概率99.73 %

贝塞尔公式:

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

第1章 传感器技术基础



www.seu.edu.cn

(4) 灵敏度

传感器输出量增量与被测输入量增量之比，拟合直线的斜率

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

(5) 分辨力

在规定测量范围内能测出的输入量的最小值。

有时用该值相对满量程输入值之百分数表示，称为分辨率

$$F.S.\%$$

(6) 阈值

使传感器输出端产生可测变化量的最小被测输入量值，实际上是零位附近的分辨力



(7) 稳定性和温度稳定性

- 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

- 意义：传感器不因输入的原因而发生的变化
- 零点漂移
- 灵敏度漂移
- 时漂、温漂

第1章 传感器技术基础



www.seu.edu.cn

(9) 静态误差[精度]

- 是评价传感器的综合性能指标
- 意义：传感器在满量程内任一点的输出值与理论值的最大偏差。

❖ 静态误差的几种常用的计算方法：

(1) 将非线性、回差、重复性误差按几何法或代数法综合

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

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

(2) 将全部标准数据相对拟合直线的残差看成随机分布，求出标准偏差 σ ，然后取 2σ 或 3σ 作为静态误差：

$$e_S = \pm \frac{(2 \sim 3)\sigma}{y_{F.S.}} \times 100\%$$

(3) 将系统误差与随机误差分开考虑：

$$e_S = \pm \frac{|(\Delta y)_{\max}| + a\sigma}{y_{F.S.}}$$

二、传感器的动态特性

❖ 定义

传感器的动态特性是指其输出对随时间变化的输入量的响应特性，包括两部分

- (1) 输出量达到稳定状态以后与理想输出量之间的差别；
- (2) 当输入量发生跃变时，输出量由一个稳态到另一个稳态之间的过渡状态中的误差。

❖ 输入: $x = X\sin\omega t$

❖ 输出: $y = Y\sin(\omega t + \varphi)$

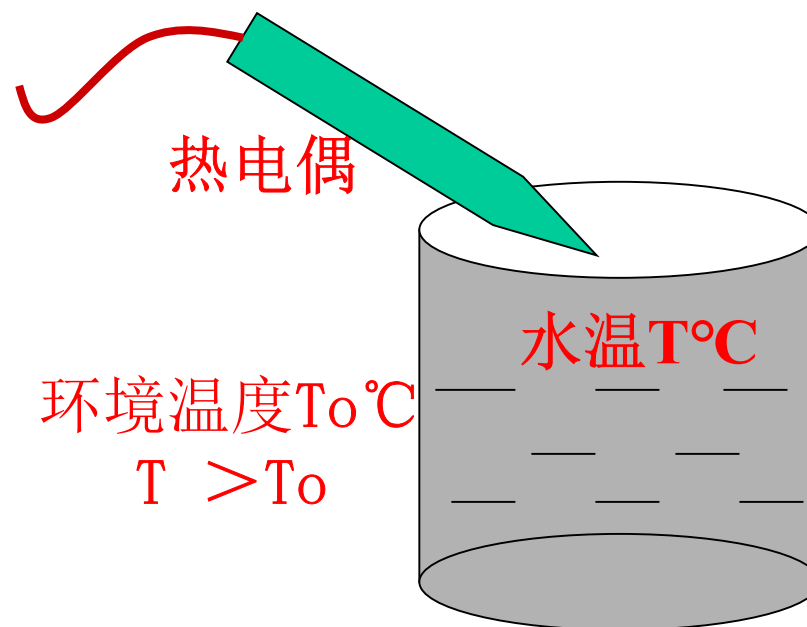
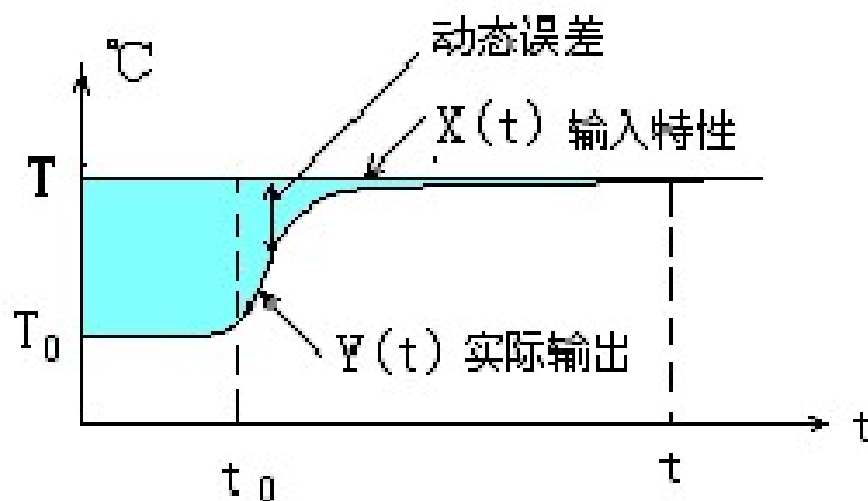
常用的输入信号函数：正弦函数、阶跃函数

第1章 传感器技术基础

www.seu.edu.cn

例：动态测温

- 设环境温度温度为 T_0 ，水槽中水的温度为 T ，而且 $T > T_0$ ；
传感器突然插入被测介质中；
- 用热电偶测温，理想情况测试曲线 T 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



第1章 传感器技术基础

www.seu.edu.cn

1) 一阶传感器的频率响应

一阶传感器微分方程：

$$a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y = b_0 x(t)$$

令 $\tau = a_1 / a_0$ (称为时间常数) , $S_n = b_0 / a_0$

第1章 传感器技术基础

www.seu.edu.cn

2) 二阶传感器的频率响应

二阶传感器的微分方程：

$$a_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = a_0 x$$

$$\text{令 } \omega_n = \sqrt{a_0/a_2} \quad \zeta = a_1/2 \sqrt{a_0/a_2}$$

$$\longrightarrow H(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

第1章 传感器技术基础

www.seu.edu.cn

传感器的阶跃响应特性

❖ 输入: $u(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t > 0 \end{cases}$

❖ 输出响应

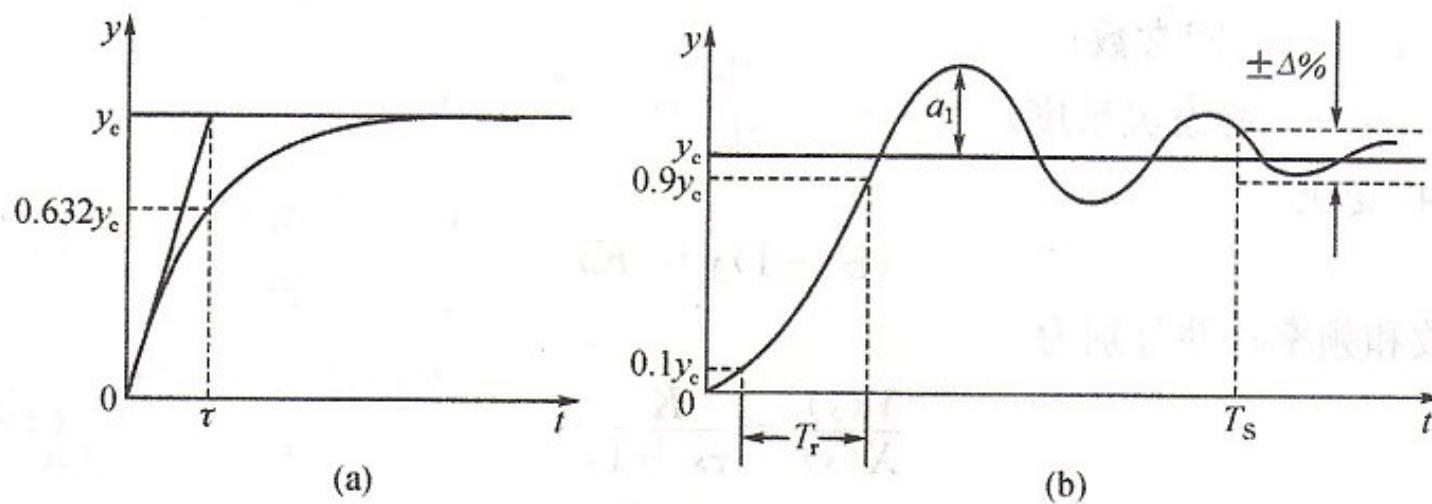


图 1-7 阶跃响应曲线

(a)一阶系统; (b)二阶系统

第1章 传感器技术基础



www.seu.edu.cn

传感器性能指标一览表

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、超调量、稳态误差、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>

第三节 改善传感器性能的技术途径

传感器的误差来源

➤ 内部原因

传感器内部产生的噪声包括

①敏感元件，转换元件和转换电路元件等产生的噪声

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。

②电源产生的噪声。

对电源变压器采用静电屏蔽可减小交流脉动噪声等。

第1章 传感器技术基础



www.seu.edu.cn

➤外部原因

从外部混入传感器的噪声，按其产生原因可分为：

- ① 机械噪声（如振动，冲击）
- ② 音响噪声、
- ③ 热噪声（如因热辐射使元件相对位移或性能变化）、
- ④ 电磁噪声
- ⑤ 化学噪声等。

第1章 传感器技术基础



www.seu.edu.cn

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



www.seu.edu.cn

❖ 1.4.1 合理选择传感器的基本原则与方法

- ✦ 依据测量对象和使用条件确定传感器的类型
- ✦ 线性范围与量程
- ✦ 灵敏度
- ✦ 精度
- ✦ 频率响应特性
- ✦ 稳定性

❖ 1.4.2 传感器的正确使用

- ✦ 认真阅读使用说明书
- ✦ 正确选择测试点、正确安装
- ✦ 保证被测信号的有效、高效传输。
- ✦ 传感器测量系统必须有良好的接地，有屏蔽、抗干扰措施
- ✦ 对非接触式传感器，现场标定。

❖ 1.4.3 无合适传感器可供选用时的对策

第1章 传感器技术基础



www.seu.edu.cn

第四节 传感器的标定与校准

- 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。
- 传感器标定就是利用标准量或精度高一级的标准器具对传感器进行标度的过程。同时也确定不同使用条件下的误差。
- 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标定和动态标定二种。

第1章 传感器技术基础



www.seu.edu.cn

➤ 静态标定

- 静态标定主要用于检测、测试传感器（或传感器系统）的静态特性指标，如静态灵敏度、非线性、回差、重复性等。
- 静态标定首先要建立静态标定系统。关键在于被测非电量的标准发生器及标准测试系统。

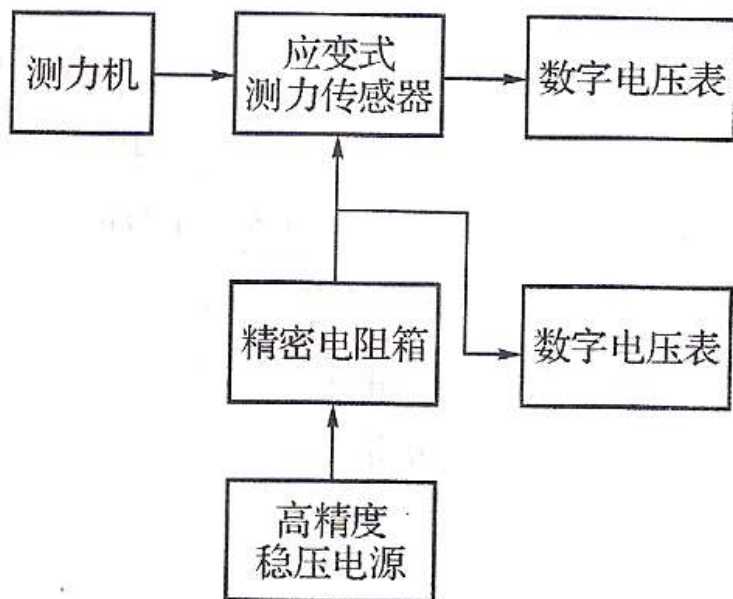


图 1-17 应变式测力传感器静态标定系统

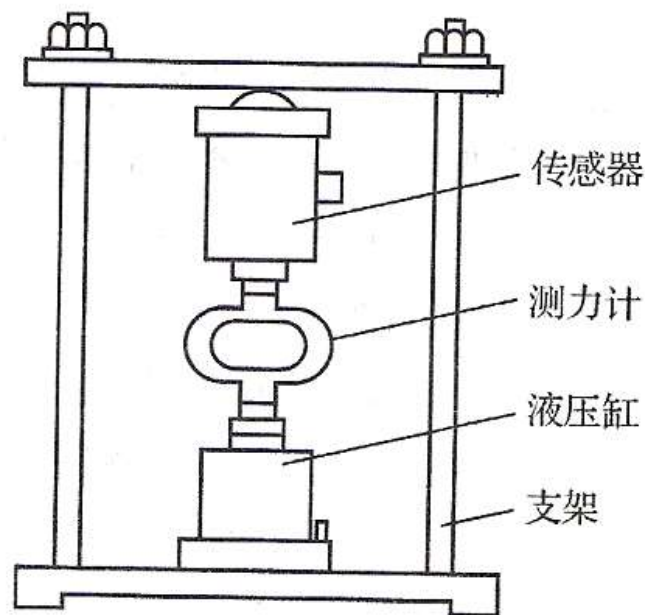


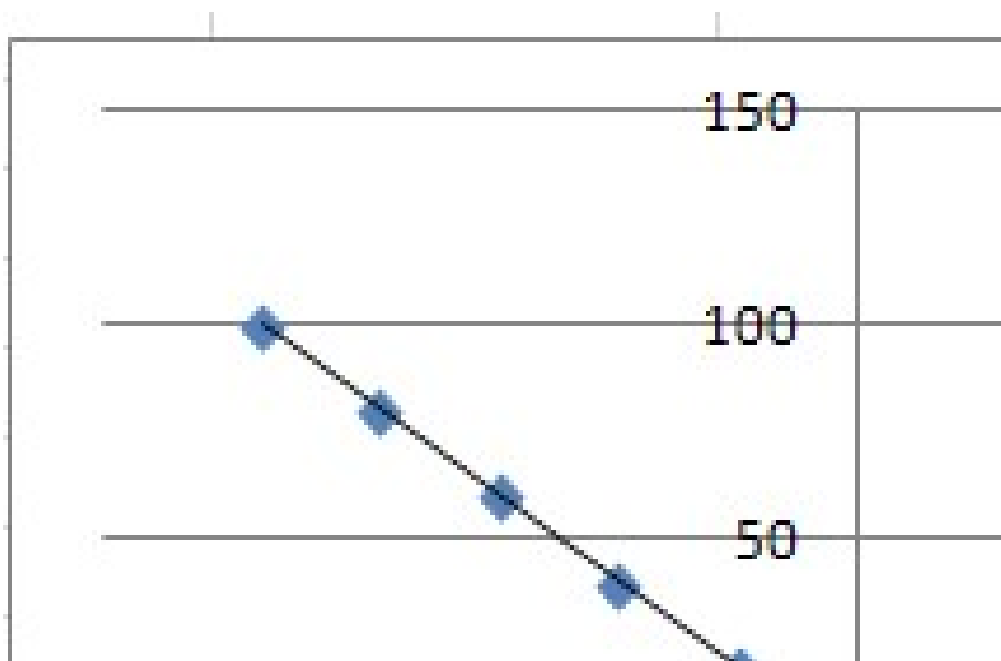
图 1-18 测力标定装置

第1章 传感器技术基础



www.seu.edu.cn

多维力传感器静态标定



第1章 传感器技术基础



www.seu.edu.cn

➤ 传感器的动态标定

- 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，常用的标准信号有二类：一是周期函数，如正弦波等；另一是瞬变函数，如阶跃波等。
- 用标准信号激励后得到传感器的输出信号，经分析计算、数据处理、便可决定其频率特性，即幅频特性、阻尼和动态灵敏度等。

第1章 传感器技术基础

www.seu.edu.cn

多维定位传感器动态标定



第1章 传感器技术基础

www.seu.edu.cn

❖ 习题与思考题 P₃₃ 1, 2, 6

请发 921394420@qq.com