



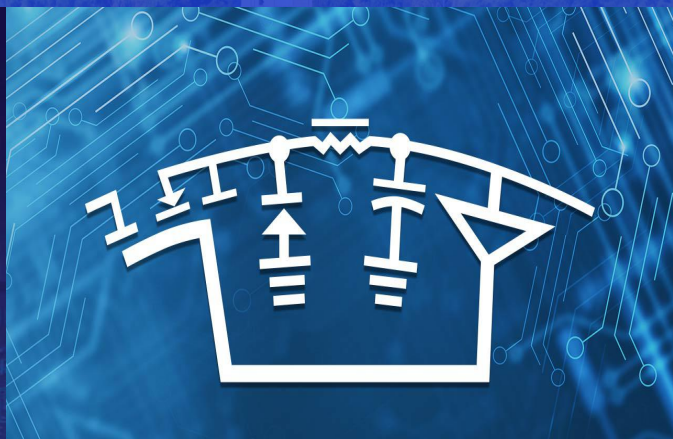
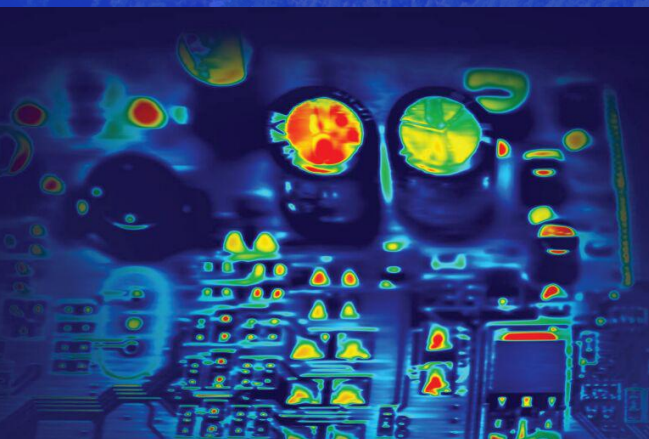
吉林大学

JILIN UNIVERSITY OF CHINA

# 传感器与检测原理

Principles of Sensors and Measurement

## 第三章 传感器与检测系统特性分析



# 传感器与检测系统特性分析基础

## 3.1 概述

## 3.2 传感器与检测系统的静态特性

## 3.3 传感器与检测系统的动态特性

## 3.4 传感器与检测仪器的校准

# 3.1 概述

## 设计检测系统

- 被测参量的基本情况，如变化范围、变化速度、使用环境条件等
- 系统设计要求，如测量精度要求、测量速度要求、稳定性要求、成本控制要求等

选择什么样的传感器？



构建什么样的检测系统方案？

## 传感器和检测系统的基本特性

能否实现及时、真实地（达到所需的精度要求）反映被测参量（在其变化范围内）的变化

### □ 静态特性

- 被测参量基本不变或变化很缓慢
- 用检测系统的一系列静态参数（静态特性）来对这类“准静态量”的测量结果进行表示、分析和处理

### □ 动态特性

- 被测参量变化快
- 用检测系统的一系列动态参数（动态特性）来对这类“动态量”测量结果进行表示、分析和处理

# 传感器与检测系统特性分析基础



3.1 概述

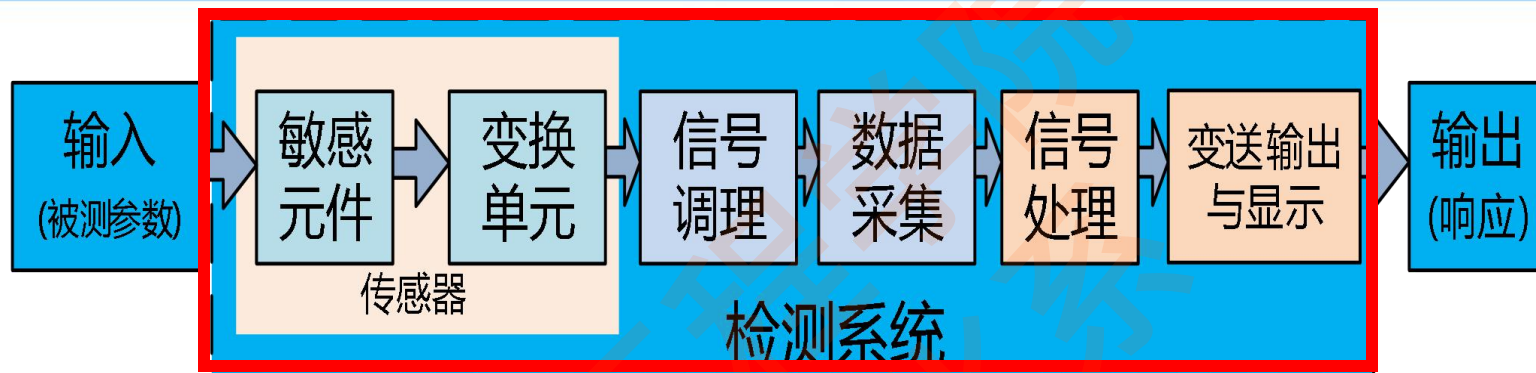
3.2 传感器与检测系统的静态特性

3.3 传感器与检测系统的动态特性

3.4 传感器与检测仪器的校准



## 3.2 传感器与检测系统的静态特性



被测  
参量

- 传感器与检测系统的输入 -- 激励信号
- 传感器与检测系统的输出 -- 系统响应

静态特性方程来描述及表示检测系统对被测参量的输出与输入间的关系，  
即

$$y(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_ix^i + \dots + a_nx^n \quad (3-1)$$

其中， $x$ 为输入量； $y(x)$ 为输出量； $a_0, a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n$ 为常系数项。

- 方程 (3-1) 是非线性方程，式中各常数项决定输出特性曲线的形状
- 希望输出和输入能保持这种较理想的线性关系
  - ✓ 有利于系统设计简化
  - ✓ 有利于提高系统的测量精度

## 3.2 传感器与检测系统的静态特性

### 1. 测量范围

- 每个传感器或检测系统都有**确定的测量范围**，它是检测系统按规定的精度对被测变量进行测量的允许范围
- 测量范围的最小值和最大值分别称为**测量下限**和**测量上限**
- **量程**（**测量范围的大小**），用测量上限值与下限值的代数差来表示，即

$$\text{量程} = | \text{测量上限值} - \text{测量下限值} | \quad (3-2)$$

## 3.2 传感器与检测系统的静态特性

- 理想系统静态特性曲线是直线
- 但实际测量系统的输入与输出曲线是非线性的

### 2. 线性度

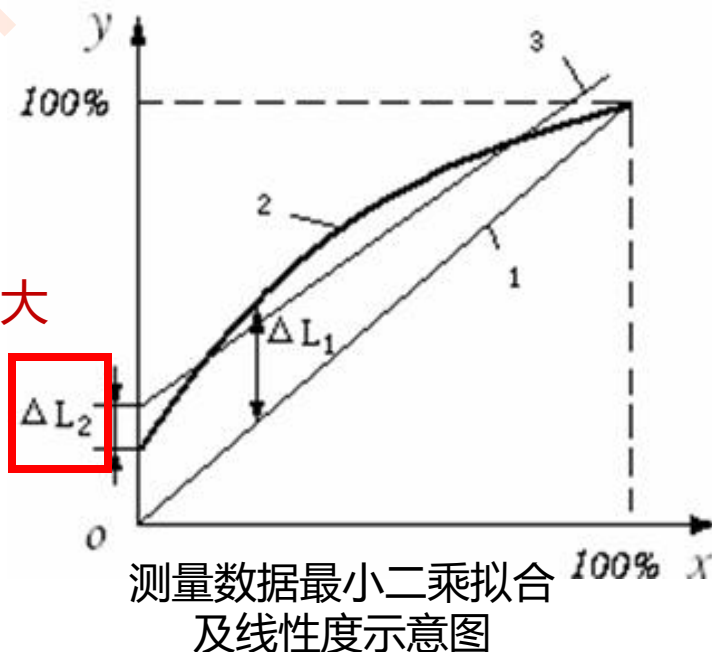
反映测量系统实际输出输入关系曲线与据此拟合直线 $y(x) = a_0 + a_1x$ 的偏离程度。通常用最大非线性引用误差来表示。即

$$\delta_L = \frac{|\Delta L_{\max}|}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (3-3)$$

$\delta_L$ 为线性度； $\Delta L_{\max}$ 为待校准曲线与拟合直线之间的最大偏差； $Y_{FS}$ 为以拟合直线方程计算得到的满量程输出值

#### 拟合直线

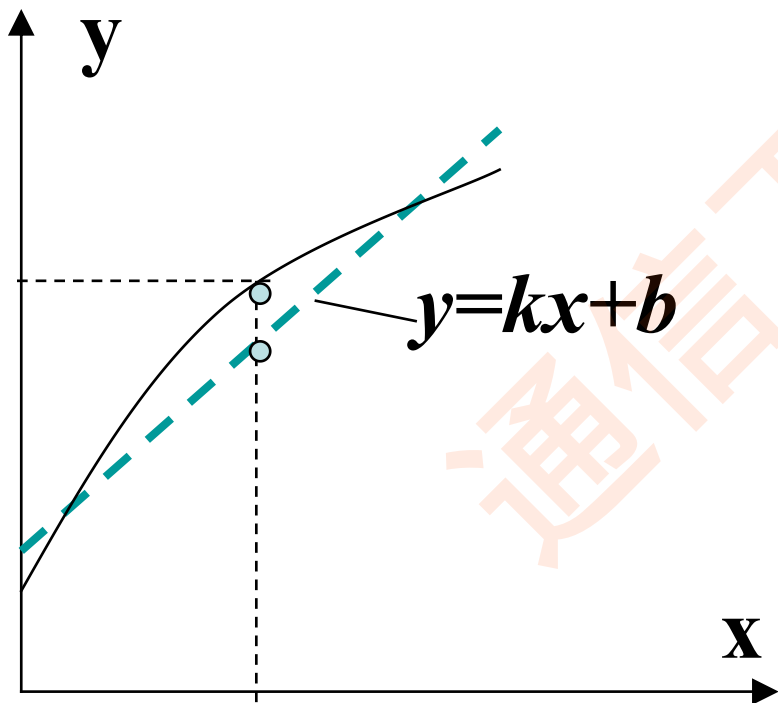
- 理论直线法、端基线法、最小二乘法
- 最小二乘法拟合直线方程为 $y(x) = a_0 + a_1x$



若曲线2和拟合直线3间最大偏差为10，拟合直线与y轴交点值为20，满量程输出值为100-20=80；那么该系统的线性度为0.125

## 3.2 传感器与检测系统的静态特性

### 最小二乘拟合法 原理:



$$y = kx + b$$

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

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

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

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

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

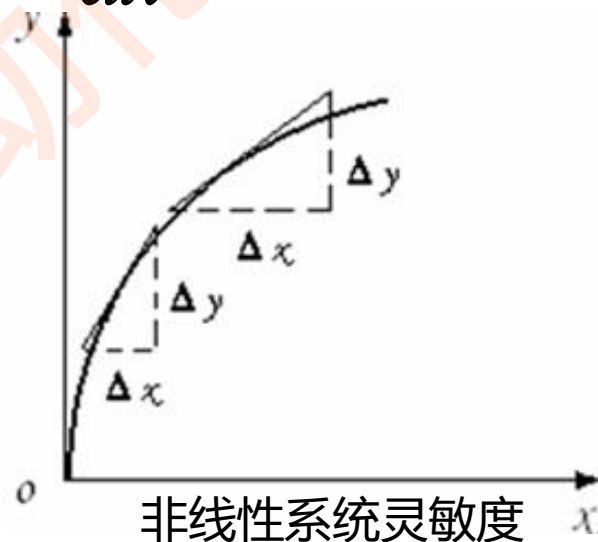
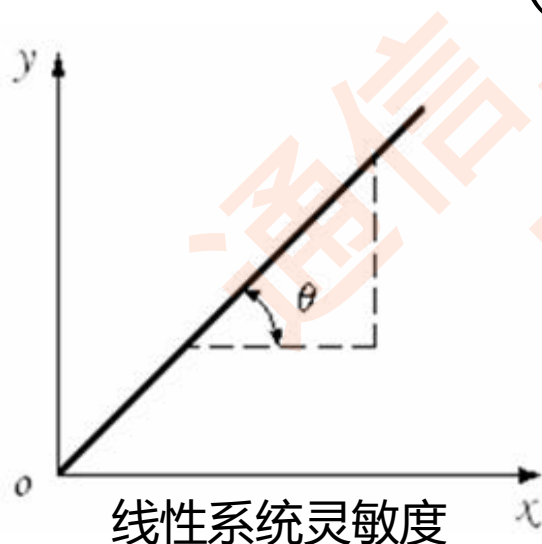


## 3.2 传感器与检测系统的静态特性

### 3.灵敏度

□ 是测量系统在静态测量时，输出量增量与输入量增量之比  
即

$$S = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta y}{\Delta x} \right) = \frac{dy}{dx} \quad (3-4)$$



- ✓ 线性测量系统灵敏度为  $S = \frac{y}{x} = k$
- ✓ 线性系统灵敏度是常数，是静态特性曲线（直线）的斜率

- ✓ 非线性测量系统灵敏度随被测参数变化而变化

## 3.2 传感器与检测系统的静态特性

### 4.迟滞

又称**滞环**，它说明检测系统的**正向**(输入量增大)和**反向**(输入量减少)输入时输出特性的不一致程度

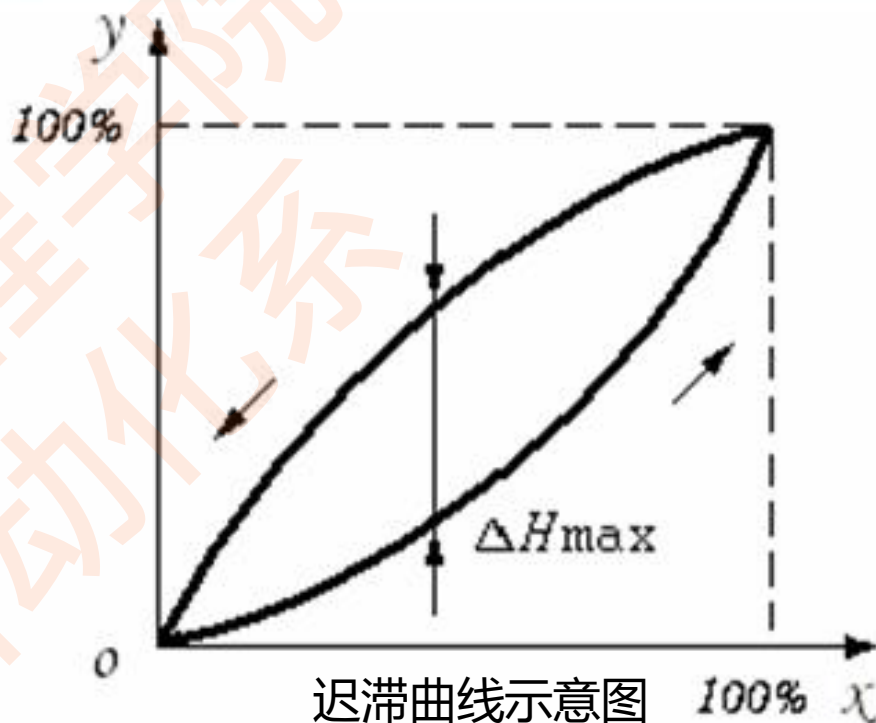
通常用**最大迟滞引用误差**来表示，即

$$\delta_H = \frac{\Delta H_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (3-5)$$

$\delta H$ 为最大迟滞引用误差；

$\Delta H_{\max}$ 为（输入量相同时）正反行程输出之间的最大绝对偏差；

$Y_{FS}$ 为测量系统满量程值。



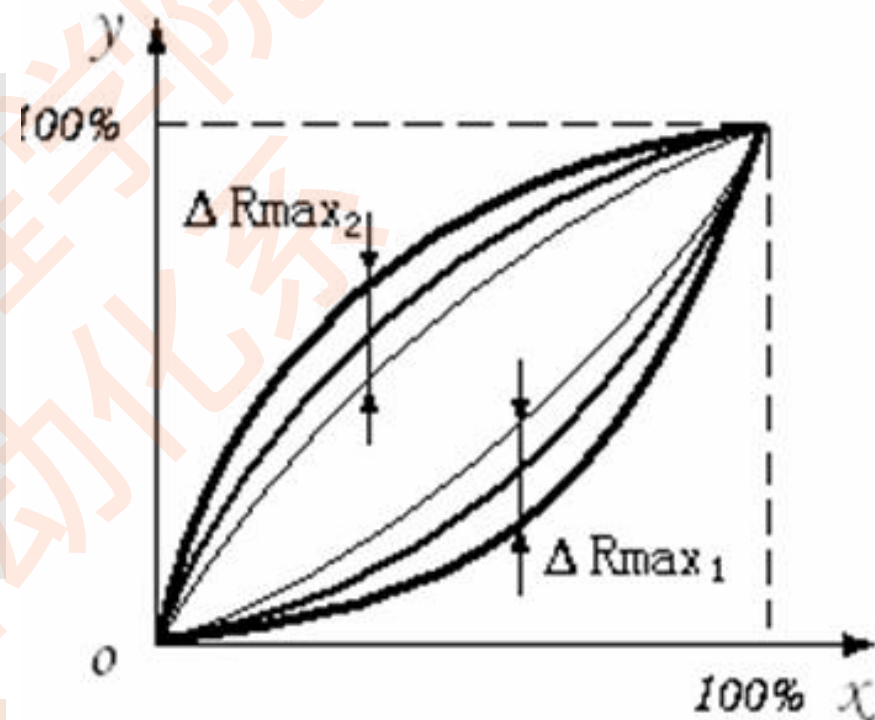
## 3.2 传感器与检测系统的静态特性

### 5.重复性

- 表示检测系统在输入量按同一方向(同为正行程或同为反行程)作全量程连续多次变动时所得特性曲线的不一致程度
- 特性曲线一致好, 重复性就好, 误差也小

重复性误差

$$\gamma_R = \pm(\Delta_{R\text{Max}} / y_{FS}) \times 100\%$$



(3-6) 检测系统重复性示意图

正行程的最大重复性偏差

$\Delta_{R\text{Max}1}$

反行程的最大重复性偏差

$\Delta_{R\text{Max}2}$



$\Delta_{R\text{Max}}$

## 3.2 传感器与检测系统的静态特性

### 6. 分辨力

- 能引起输出量发生变化时输入量的最小变化量称为检测系统的**分辨力**
- 用全量程中能引起输出变化的各点**最小输入量**中的**最大值**  $\Delta X_{\max}$  相对满量程输出值的百分数来表示系统的分辨力。即

$$k = \frac{\Delta X_{\max}}{Y_{FS}} \quad (3-7)$$

### 7. 死区

- 也称失灵区、钝感区、阈值等，指检测系统在量程零点（或起始点）处能引起输出量发生变化的**最小输入量**
- 通常均希望减小失灵区，对数字仪表来说失灵区应小于数字仪表最低位的二分之一

# 传感器与检测系统特性分析基础



3.1 概述

3.2 传感器与检测系统的静态特性

3.3 传感器与检测系统的动态特性

3.4 传感器与检测仪器的校准

### 3.3 传感器或检测系统的动态特性

**动态特性**是指在动态测量时，输出量与**随时间变化**的输入量的响应特性，反应输出值真实再现变化着的输入量的能力

- 研究动态特性主要从测量误差角度分析产生动态误差的原因及改善措施
- 需建立测量系统的动态数学模型 时域：瞬态响应法
- 对于线性系统，时域分析用**常系数线性微分方程**表示 频域：频率响应法

$$\begin{aligned} & a_n \frac{d^n Y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} Y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dY(t)}{dt} + a_0 Y(t) \\ & = b_m \frac{d^m X(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} X(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dX(t)}{dt} + b_0 X(t) \end{aligned}$$

**一阶系统的标准微分方程**

$$\tau \frac{dy(t)}{dx(t)} + y(t) = kx(t)$$

$y(t)$ 为系统的输出函数； $x(t)$ 为系统的输入函数； $\tau$ 为系统的时间常数； $k$ 为系统的放大倍数



# 3.3 传感器或检测系统的动态特性

## 一阶系统的时域动态特性参数

### 1) 时间常数 $\tau$

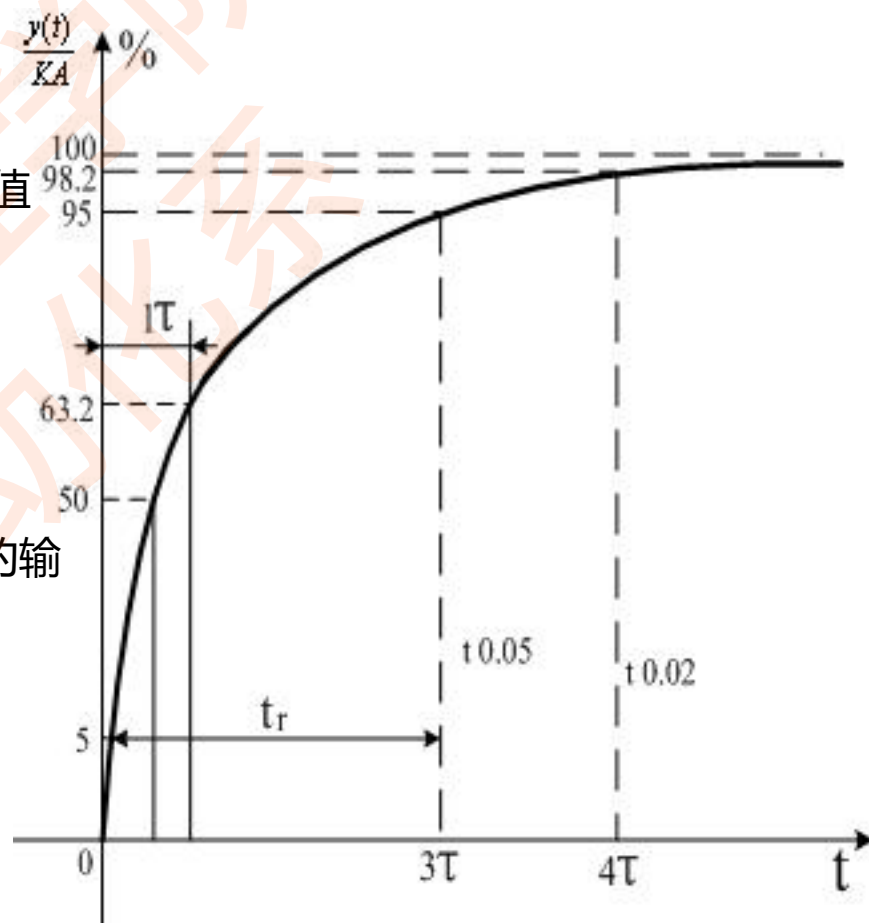
- 时间常数 $\tau$ 是，阶跃输入时，其输出量上升到稳态值的63.2%所需的时间
- 阶跃输入时，响应曲线的初始斜率为 $1/\tau$
- 一阶系统最重要的动态性能指标

### 2) 响应时间

当系统阶跃输入的幅值为 $A$ 时，一阶系统对阶跃输入的响应表达式为

$$y(t) = kA \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

- 一阶系统响应 $y(t)$ 随时间 $t$ 增加而增大
- 当 $t \rightarrow \infty$ 时趋于最终稳态值，即 $y(\infty) = kA$
- 时间常数越小，系统输出的响应就越快



一阶系统阶跃信号时域响应曲线

## 3.3 传感器或检测系统的动态特性

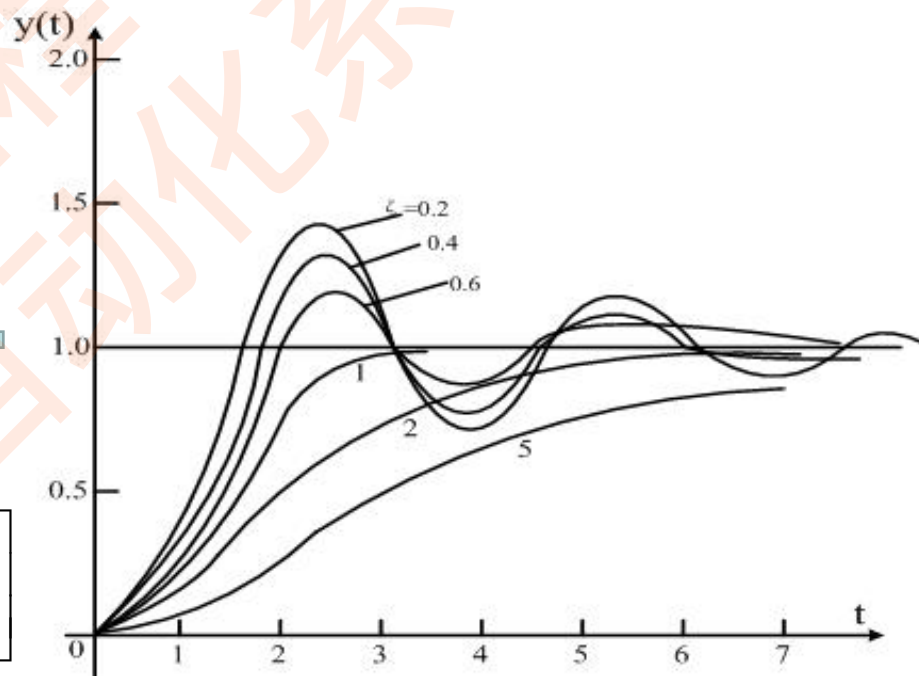
### 二阶系统的标准微分方程

$$\frac{1}{\omega_0^2} \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + \frac{2\zeta}{\omega_0} \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = Kx(t) \quad (3-8)$$

$\omega_0$ 为二阶系统的固有角频率;

$\zeta$ 为二阶系统的阻尼比;

$K$ 为二阶系统的放大倍数或称系统静态灵敏度



### 二阶系统对阶跃输入的输出响应表达式

$$y(t) = KA \left[ 1 - \frac{e^{-\omega_n \zeta t}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin \left( \omega_d t + \arctan \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta} \right) \right]$$

振荡角频率 $\omega_d$ 称为系统有阻尼自然振荡角频率

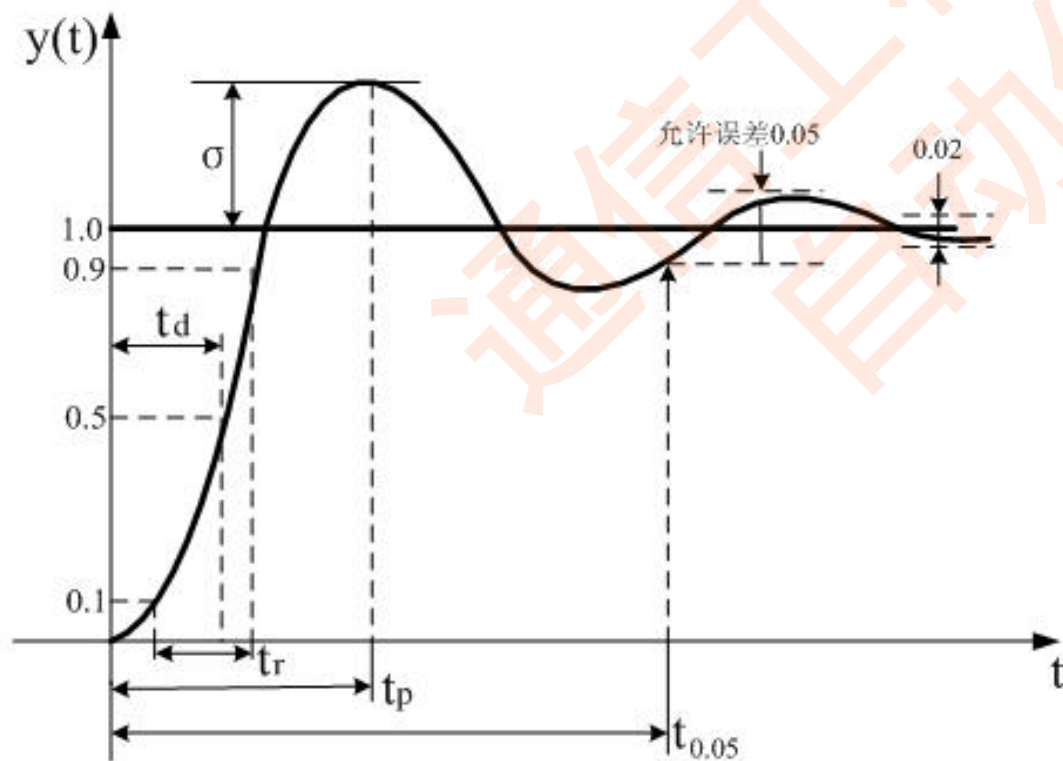
二阶系统不同阻尼比下阶跃响应

$\zeta=0$ , 响应为等幅无阻尼振荡

$\zeta=1$ , 响应为稳态响应 $KA$ 叠加上一项幅值随时间作指数减少的暂态项, 称为临界阻尼

## 3.3 传感器或检测系统的动态特性

- **阻尼比 $\zeta$** 和系统有阻尼自然振荡角频率 $\omega_d$ 是二阶测量系统最主要的动态时域特性参数
- 二阶系统一般为**衰减振荡型**， $0 < \zeta < 1$ ，响应如图所示



- **延迟时间 $t_d$**  响应值达到稳态值的50%所需的时间
- **上升时间 $t_r$**  响应值从10%到达90%稳态值所需的时间
- **响应时间 $t_s$**  在响应曲线上，系统输出响应达到一个允许误差范围的稳态值，并永远保持在这一允许误差范围内所需的**最小时间**
- **峰值时间 $t_p$**  输出响应曲线达到第一个峰值所需的时间
- **超调量 $\sigma$**  为输出响应曲线的最大偏差与稳态值比值的百分数，即

$$\sigma = [y(t_p) - y(\infty)] / y(\infty) \times 100\%$$

# 传感器与检测系统特性分析基础



3.1 概述

3.2 传感器与检测系统的静态特性

3.3 传感器与检测系统的动态特性

3.4 传感器与检测仪器的校准

## 3.4 传感器与检测仪器的校准

### 传感器的标定与校准

- 通过试验建立传感器输入量与输出量之间的关系
- 确定出不同使用条件下的误差关系

标定和校准工作可分为如下几个方面

- 新研制的传感器需进行全面技术性能的检定，用检定数据进行量值传递，同时检定数据也是改进传感器设计的重要依据
  - 经过一段时间的储存或使用后对传感器的复测工作
- 静态校准的目的是确定传感器或检测仪器的静态特性指标。如线性度、灵敏度、滞后和重复性等
  - 动态校准的目的是确定传感器或检测仪器的动态特性参数。如时间常数、固有频率和阻尼比等

## 3.5.1 传感器或检测仪器的静态校准

### 1. 静态标准条件

没有加速度、振动、冲击(除非这些参数本身就是被测物理量)及环境温度一般为室温( $20 \pm 5$ )°C、相对湿度不大于85%、大气压力为( $101 \pm 7$ )kPa的情况

### 2. 校准标定设备精度等级的确定

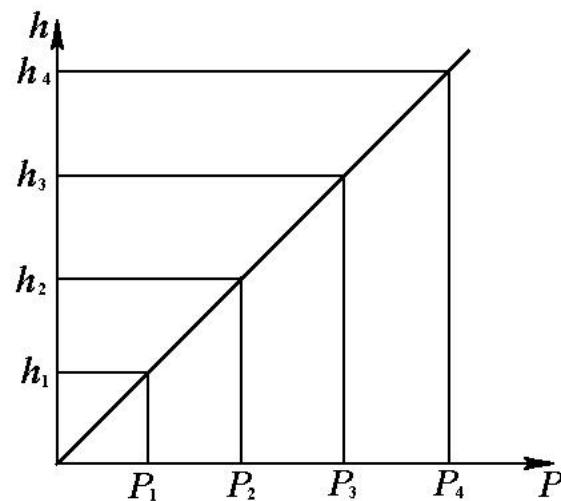
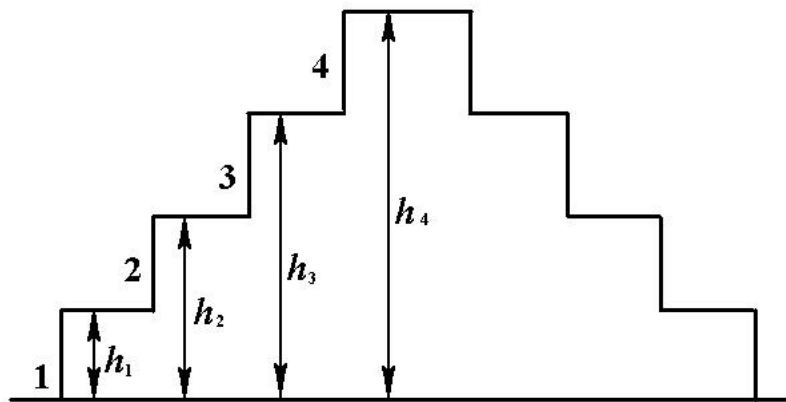
- 对传感器进行标定，是根据试验数据确定传感器的各项性能指标，也就是先确定传感器的测量精度
- 标定传感器时，所用的测量仪器的精度至少要比被标定的传感器的精度高一个等级



## 3.5.1 传感器或检测仪器的静态校准

### 3. 静态特性校准标定的方法和过程

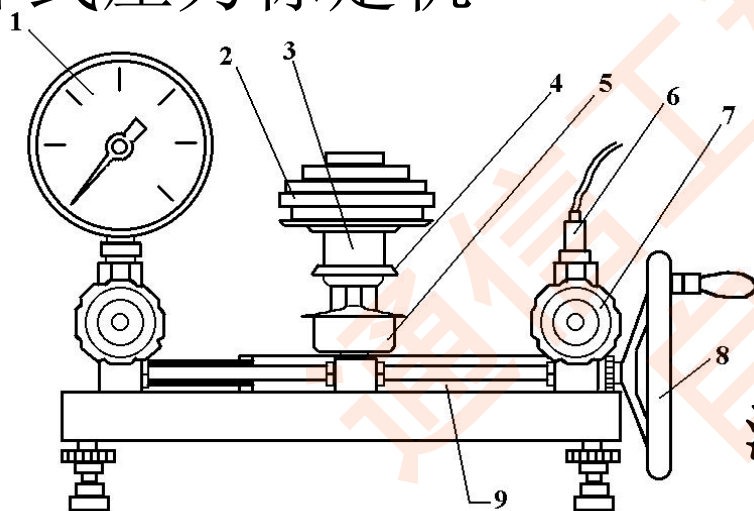
- (1) 将传感器全量程（测量范围）分成若干等间距点；
- (2) 根据传感器量程分点情况，由小到大逐渐一点一点的输入标准量值，并记录下与各输入值相对应的输出值；
- (3) 将输入值由大到小一点一点的减少，同时记录下与各输入值相对应的输出值；
- (4) 按(2)、(3)所述过程，对传感器进行正、反行程往复循环多次测试，将得到的输出—输入测试数据用表格列出或画成曲线；
- (5) 对测试数据进行必要的处理，根据处理结果就可以确定传感器的线性度、灵敏度、滞后和重复性等静态特性指标。



## 3.5.1 传感器或检测仪器的静态校准

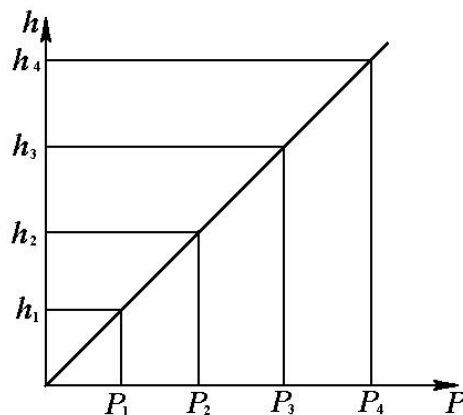
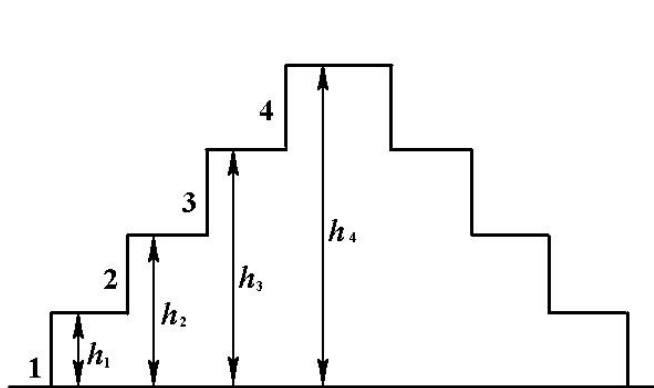
### 4. 压力传感器的静态校准标定

- 常用的标定装置有：活塞压力计、杠杆式和弹簧测力计式压力标定机



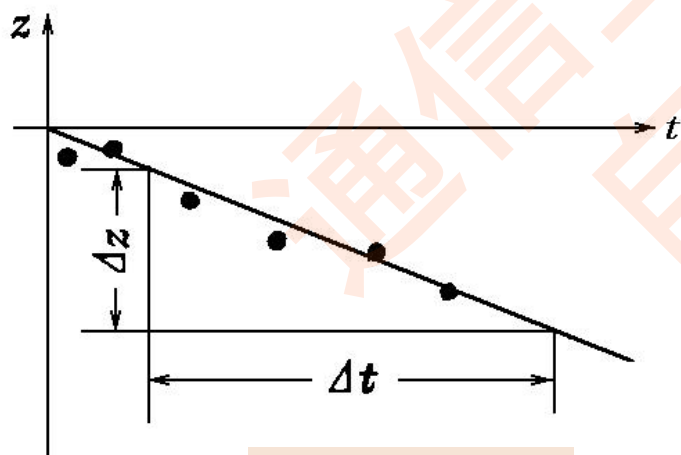
- 1—标准压力表 2—砝码  
3—活塞 4—进油阀  
5—油杯 6—被标传感器  
7—针形阀 8—手轮  
9—手摇压力泵

活塞压力计标定压力传感器示意图



## 3.5.2 传感器或检测仪器的动态校准

- 传感器或检测仪器的动态校准主要是研究传感器或检测仪器的动态响应
- 与动态响应有关的参数：一阶系统只有一个时间常数 $\tau$ ，二阶系统则有固有频率 $\omega_n$ 和阻尼比 $\zeta$ 两个参数



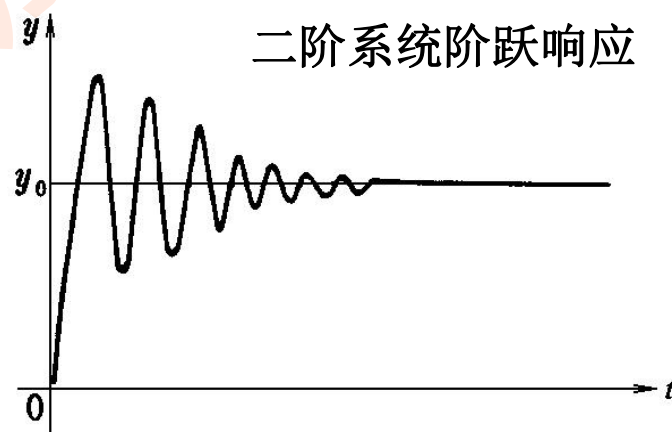
一阶传感器的单位阶跃响应

$$y(t) = 1 - e^{-t/\tau}$$

若  $z = \ln[1 - y(t)]$

$$z = -\frac{t}{\tau}$$

$z$ 和时间 $t$ 成线性关系,并且有 $\tau = \Delta t / \Delta z$   
可以根据测得的 $y(t)$ 值作出 $z-t$ 曲线,  
并根据 $\Delta t / \Delta z$ 的值获得时间常数 $\tau$



- 传感器在激波的激励下按固有频率产生一个衰减振荡
- 其波形由显示系统记录下来用以确定传感器的动态特性