




第3章 传感器理论基础

- 3.1传感器的定义、组成和分类
- 3.2传感器的基本特性



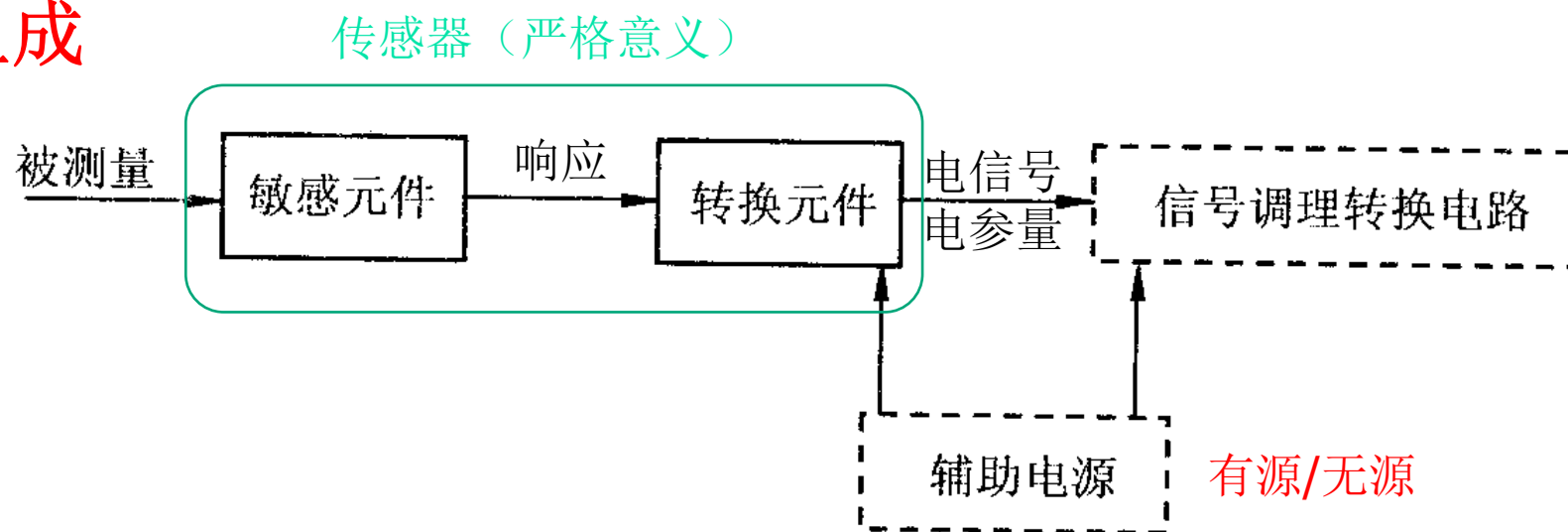
传感器的定义、组成和分类

定义（三要素）

- 对被测量有响应
 - 被测量：被测参数、物理量等
 - 有响应：直接感受或响应被测量--敏感元件：热敏、光敏
- 输出与被测量之间成有规律的一一对应关系
 - 输出：电信号(电压、电流、频率、脉冲)
/电参量（电阻、电容、电感）
 - 规律：一一对应关系--一个输出  一个被测量
- 是一个器件或装置：软件+硬件

传感器的定义、组成和分类

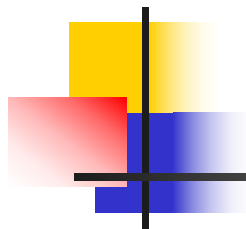
组成



分类

- 按被测参数分：温度、压力、位移、速度等
- 按工作原理分：应变式、电容式、压电式、磁电式等
- 按能源分：有源/无源传感器

第3章 传感器理论基础



敏感元件？转换元件？

被测量？输出？

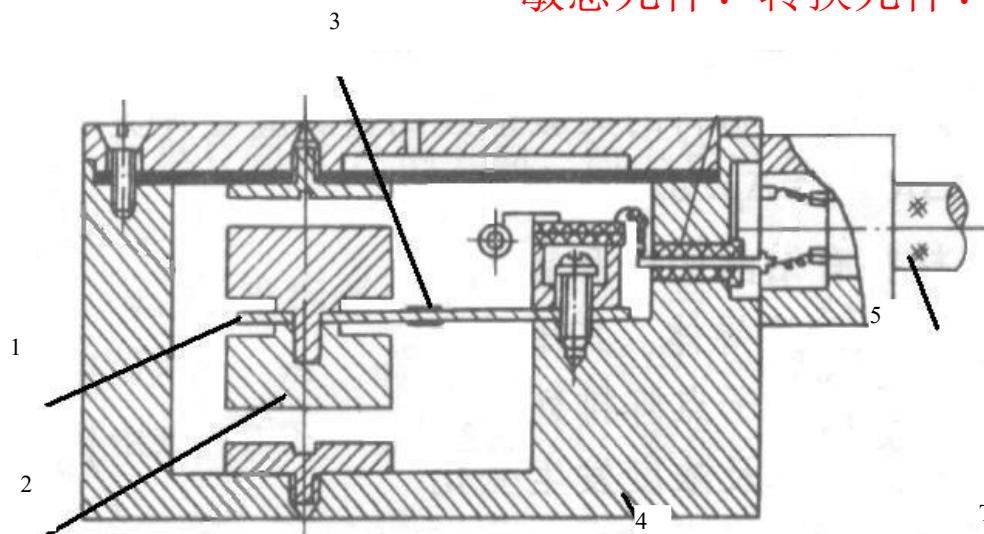


图3-2 应变式加速度传感器

1—应变梁 2—质量块 3—应变片 4—壳体

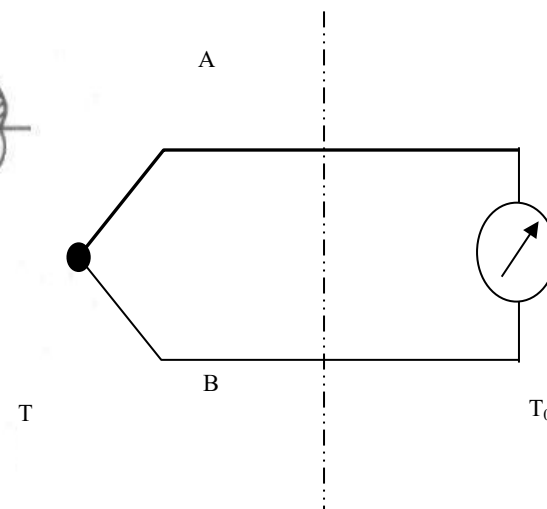


图3-3 热电偶

传感器的基本特性

- 在生产过程和科学实验中，要对各种各样的参数进行检测和控制，就要求传感器能感受被测非电量的变化并不失真地变换成相应的电量——基本特性
- 传感器的基本特性通常分为静态特性和动态特性
 - 静态特性（被测量处于稳定状态时）
 - 输出/输出影响因素-图3-4
 - 灵敏度
 - 线性度
 - 迟滞
 - 重复性
 - 漂移
 - 动态特性（被测量随时间变化时）
 - 瞬态响应特性
 - 频率响应特性

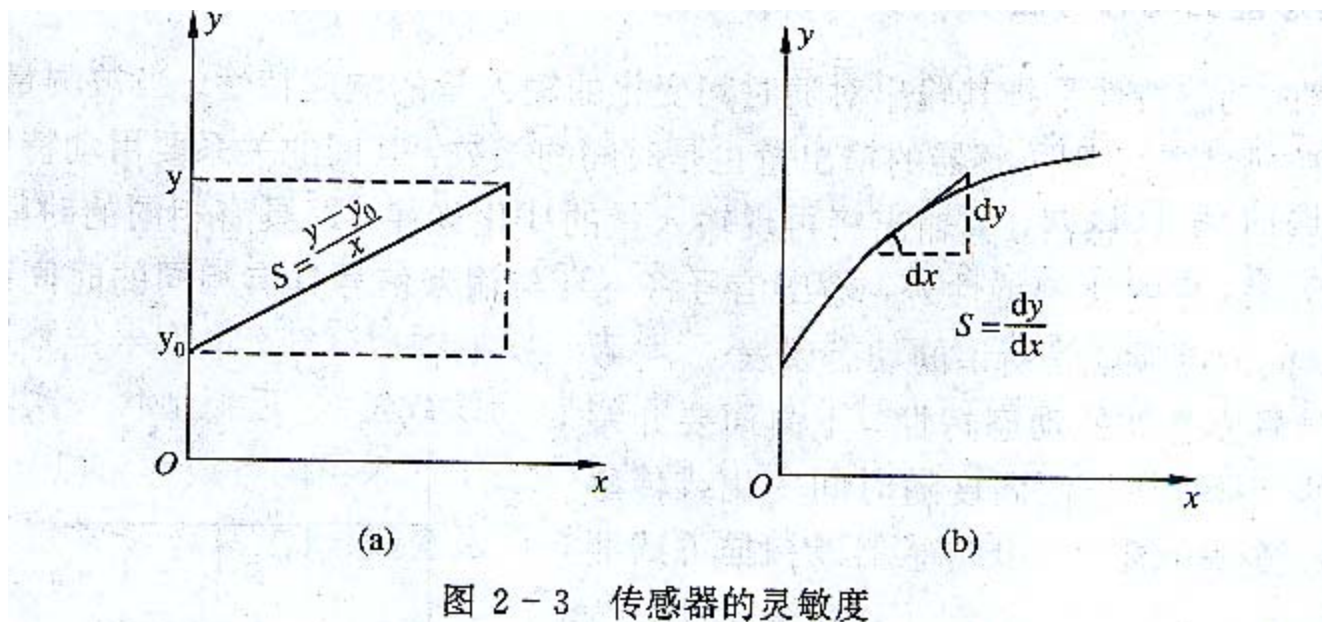
传感器静态输入、输出关系一般可表示为： $y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \cdots + a_nx^n$

灵敏度

■ 灵敏度

- 单位输入量的变化所引起传感器输出量的变化。

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x}$$



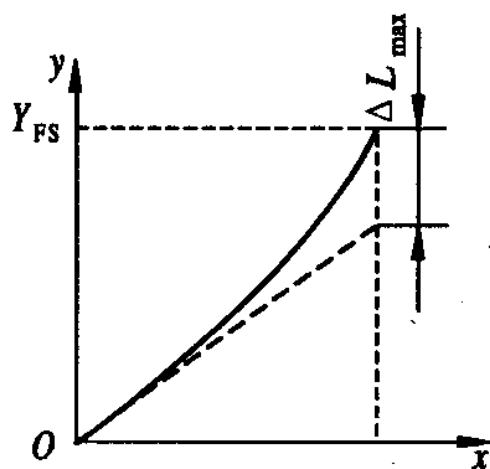
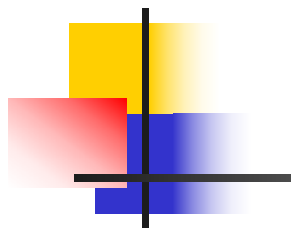
- 灵敏度系数大，表示传感器对被测量的敏感程度高（灵敏度好）

线性度

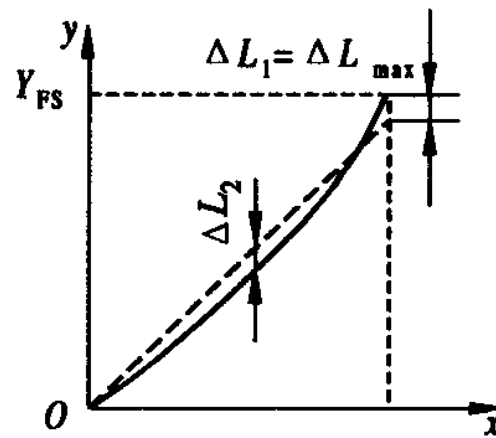
- 线性度是指？（输出与输入之间数量关系与理想线性关系的偏离程度）
- 关于拟合-直线拟合
 - 理论拟合
 - 端点旋转拟合
 - 端点连线拟合
 - 端点连线平移拟合
 - 最小二乘法拟合（回归分析）
- 数学表达式

$$\gamma_L = \pm \frac{\Delta L_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\%$$

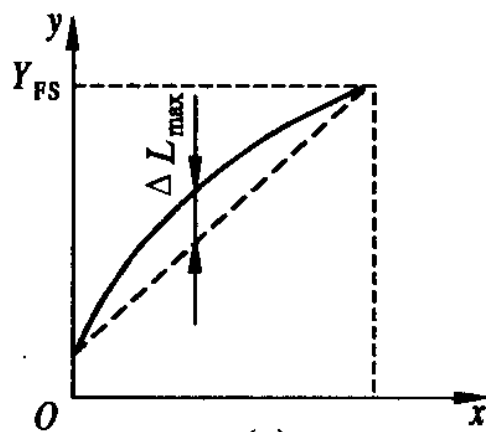
第3章 传感器理论基础



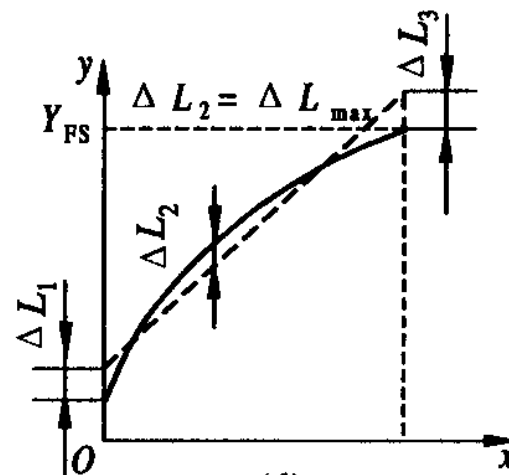
(a)



(b)



(c)



(d)

图 2 - 4 几种直线拟合方法

(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



迟滞

- 迟滞——传感器在输入量由小到大（正行程）及输入量由大到小变化期间其输入输出特性曲线不重合的现象。
- 数学表达式
$$\gamma_H = \pm \frac{\Delta H_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\%$$
- 产生的原因？（传感器敏感元件材料的物理性质和机械零部件的缺陷）

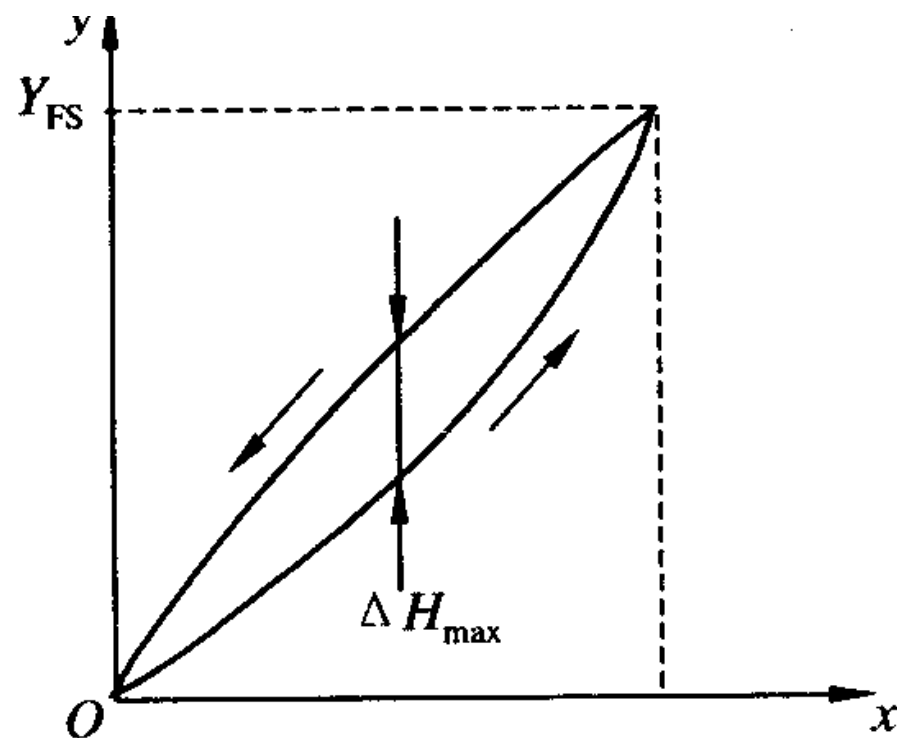


图 2-4 迟滞特性

重复性

- 重复性——传感器在输入量按同一方向作全量程连续多次变化时，所得特性曲线不一致的程度。
- 数学表达式

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

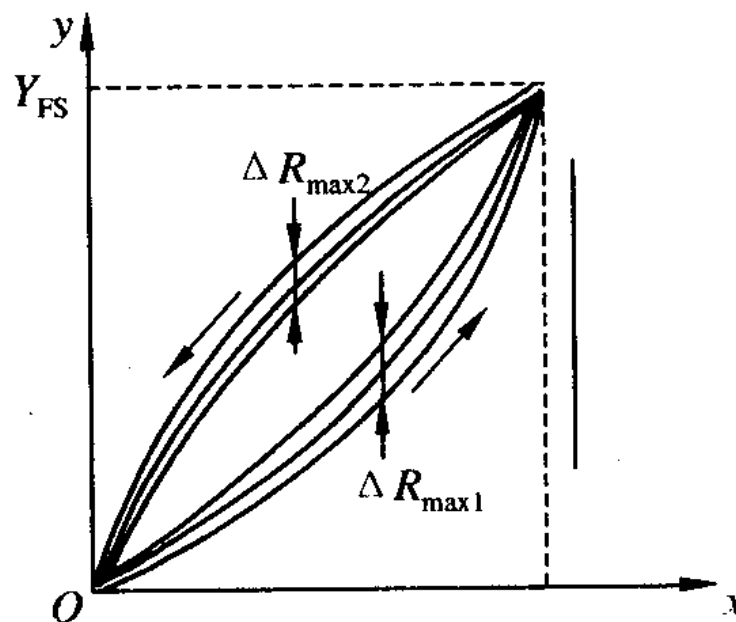


图 2 - 5 重复性



漂移

- 传感器的漂移——输入量不变的情况下，传感器输出量随着时间变化。
- 产生的原因？（*传感器自身结构参数；周围环境*）
- 温度漂移

$$\xi = \frac{y_t - y_{20}}{\Delta t}$$

课堂练习

- 有一位移测量系统，对位移在0~5mm的范围进行了两个循环的测量，测量数据如下：

x_i (mm)		0	1	2	3	4	5
y_i		0	5	10	15	20	25
mV)	上行程	0	4	9	14	20	25
	下行程	0	5	10	16	21	25
	上行程	0	5	10	15	19	25
	下行程	0	5	11	16	20	25
		0	4.75	10	15.25	20	25

以输出的平均值求端点连线拟合直线，问灵敏度和线性度、迟滞、重复性误差各是多少？

传感器的动态特性

- 传感器的动态特性：指输入量随时间变化时传感器的响应特性--输出对输入的**动态跟随能力**
- 例：动态测温

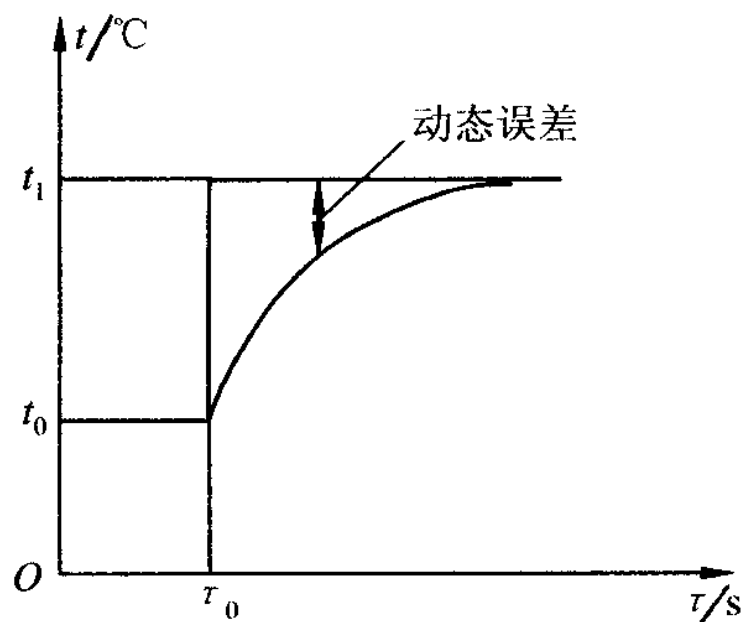


图 2 - 6 动态测温

传感器基本动态特性方程

- 传感器的动态特性一般用下述微分方程来描述：

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

- 零阶系统（又称比例系统）

$$y(t) = kx(t) \quad \text{完全跟踪, 无滞后}$$

- 一阶系统（又称惯性系统）

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


- 二阶系统

$$\frac{d^2 y(t)}{dt^2} + 2\xi\omega_n \frac{dy(t)}{dt} + \omega_n^2 y(t) = \omega_n^2 x$$

- 几个重要参数

$$k \quad \tau \quad \xi \quad \omega_n$$

第3章 传感器理论基础

- 
- 动态特性除了与传感器的固有因素有关之外，还与传感器输入量的变化形式有关。也就是说，我们在研究传感器动态特性时，通常是根据不同输入变化规律来考察传感器的响应的。
 - 瞬态响应特性——用得较多的标准输入信号有阶跃信号和脉冲信号
频域响应特性——输入为正弦信号

瞬态响应特性 (1)

■ 一阶传感器的单位阶跃响应

■ 对于一个阶跃输入:

$$x(t) = \begin{cases} 0 & t \leq 0 \\ 1 & t > 0 \end{cases}$$

得一阶传感器的单位阶跃响应信号

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

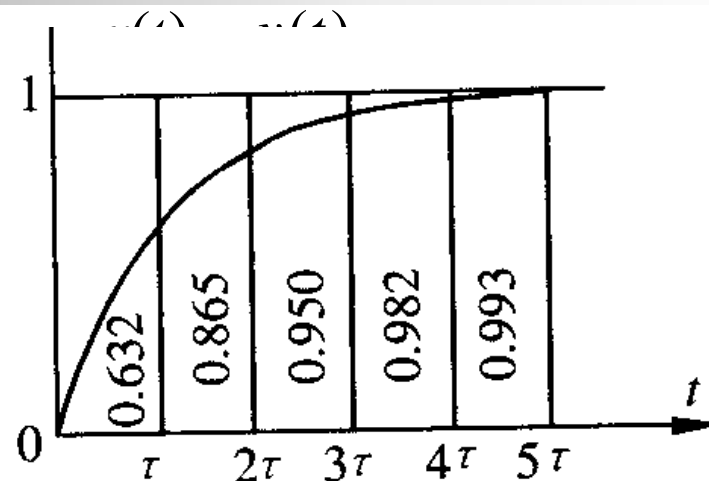


图 2-7 一阶传感器单位阶跃响应

传感器存在惯性， τ 值是一阶传感器重要的性能参数

瞬态响应特性 (2)

■ 二阶传感器的单位阶跃响应

$$Y(S) = \frac{\omega_n^2}{S^2 + 2\xi\omega_n S + \omega_n^2} \cdot \frac{1}{S}$$

- 过阻尼、欠阻尼、临界阻尼
- 二阶传感器对阶跃信号的响应曲线在很大程度上取决于阻尼比 ξ 和固有角频率 ω_n

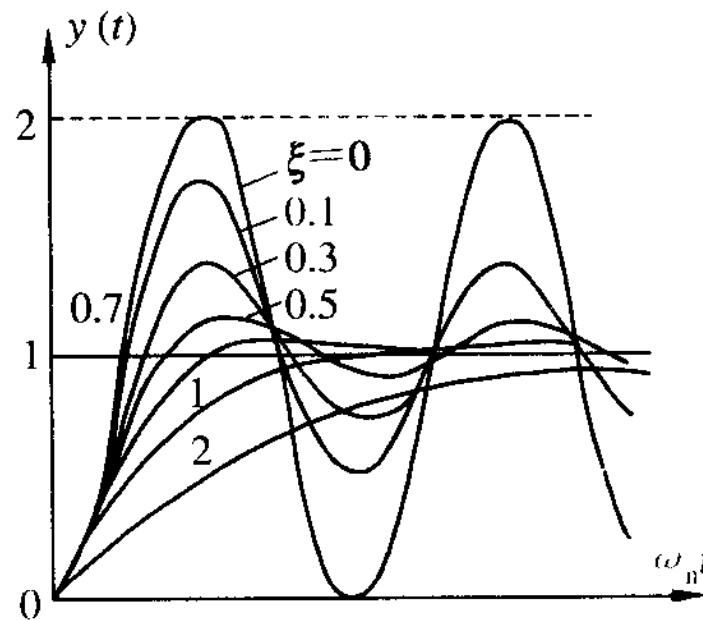


图 2 - 9 二阶传感器单位阶跃响应



传感器的时域动态性能指标

- 动态响应指标-见图3-11

- 时间常数 τ
- 延迟时间 t_d
- 上升时间 t_r
- 峰值时间 t_p
- 超调量 σ

频率响应特性

频率响应特性——传感器对不同频率成分的正弦输入信号的响应特性

■ 一阶传感器的频率响应

- 幅频特性: $A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}}$
- 相频特性: $\Phi(\omega) = -\arctg(\omega\tau)$

τ 值是一阶传感器频率响应的重要性能参数

第3章 传感器理论基础

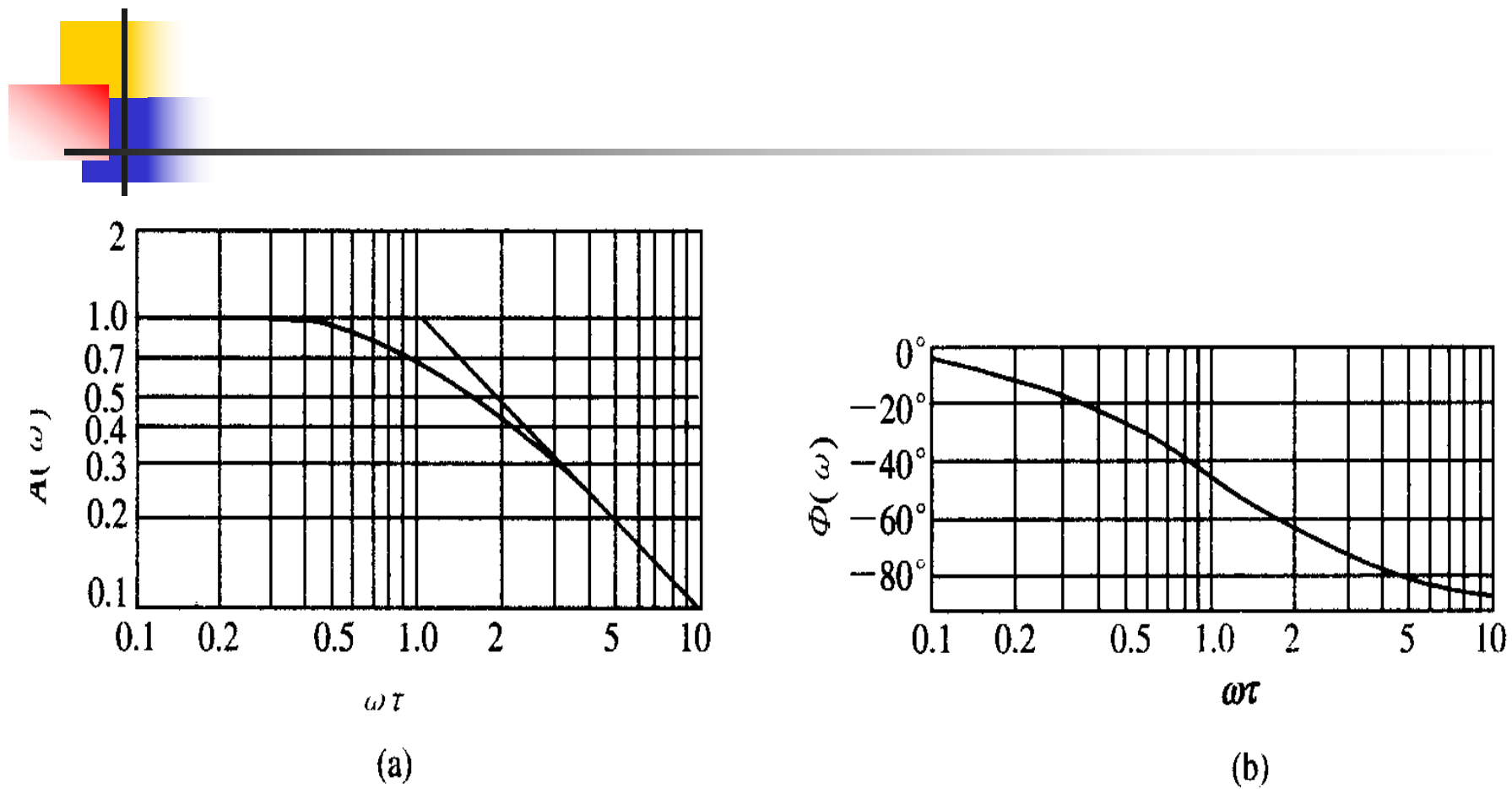


图 2-12 一阶传感器频率响应特性



频率响应特性

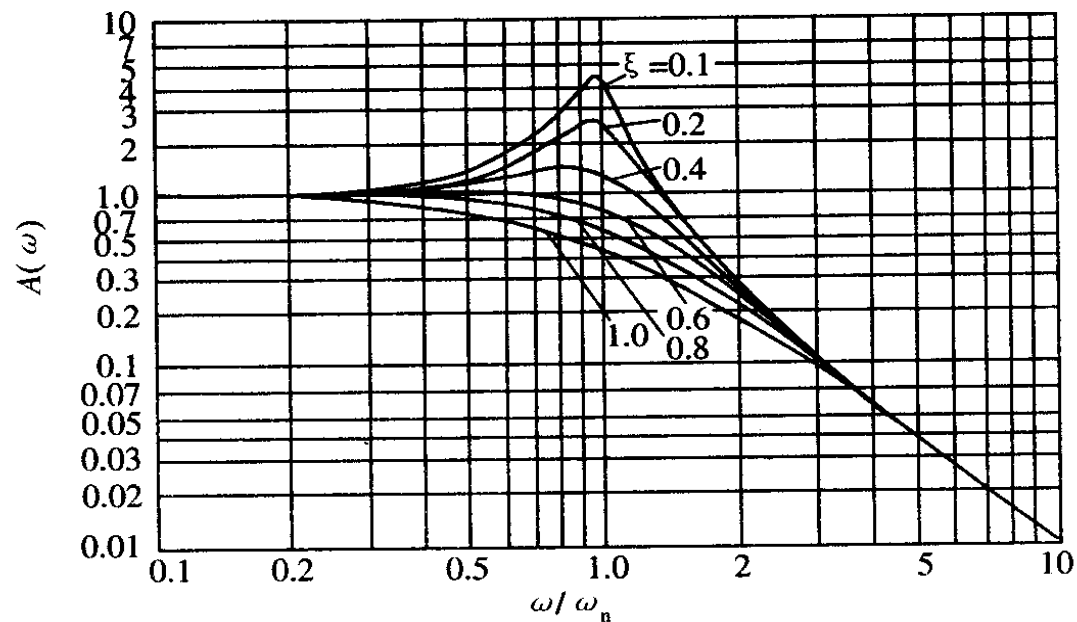
- 二阶传感器的频率响应
 - 幅频特性

$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left(2\xi \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}}$$

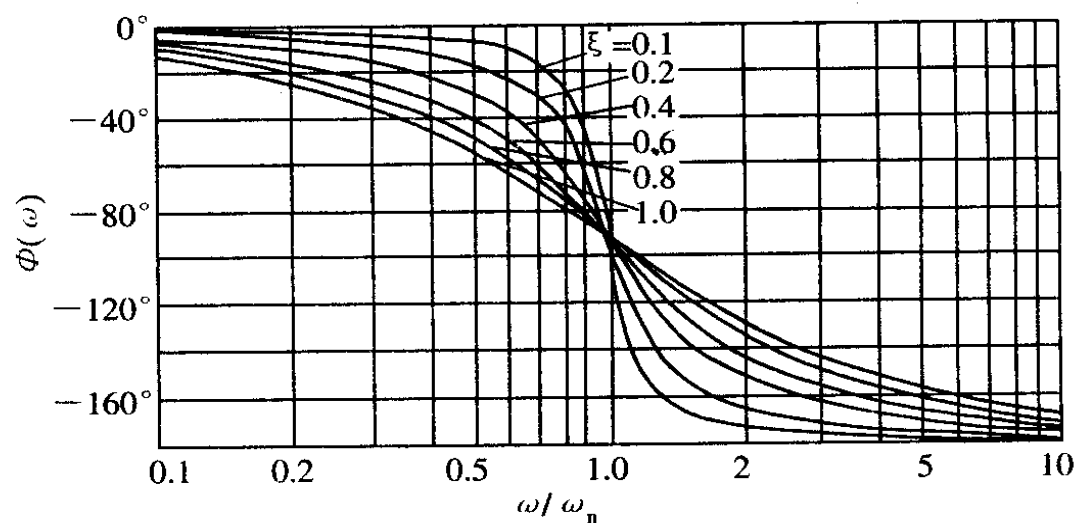
- 相频特性

$$\Phi(\omega) = -\arctg \frac{2\xi \frac{\omega}{\omega_n}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}$$

第3章 传感器理论基础



(a)



(b)

二阶传感器的频率响应特性好坏主要取决于传感器的固有频率 ω_n 和阻尼比 ξ 。

当 $\xi < 1$, $\omega_n \gg \omega$ 时, $A(\omega) \approx 1$, $\Phi(\omega)$ 很小, 此时, 传感器的输出 $y(t)$ 再现了输入 $x(t)$ 的波形。通常固有频率 ω_n 至少应大于被测信号频率 ω 的 3~5 倍, 即 $\omega_n \geq (3 \sim 5) \omega$ 。

图 2-13 二阶传感器频率响应特性



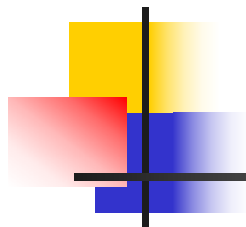
频率响应特性指标

- 通频带 $\omega_{0.707}$
- 工作频带 $\omega_{0.95}$
- 时间常数 τ
- 固有频率 ω_n
- 相位误差
- 跟随角 $\Phi_{0.707}$

传感器静态特性标定

- 传感器静态标定的过程如下：
 - 1.将传感器全量程标准输入量分成若干个间断点，取各点的值作为标准输入值。
 - 2.由小到大一点一点地输入标准值，待输出稳定后记录与各输入值相对应的输出值。
 - 3.由大到小一点一点地输入标准值，待输出稳定后记录与各输入值相对应的输出值。
 - 4.按步骤2和3所述过程，对传感器进行正、反行程往复循环多次测试，将所得输入和输出数据用表格列出或画出曲线。
 - 5.对测试数据进行必要的分析和处理，以确定该传感器的静态特性指标。

第3章 传感器理论基础



量 程: 50 kN
输 出: 1.5 mV/V
非 线 性: 0.1 % F·S
滞 后: 0.1 % F·S
重 复 性: 0.1 % F·S
温 漂: 0.01 % F·S/oC
零位输出: ≤ 2 % F·S
激励电压: 10V
工作温度: -20~80 oC
过载能力: 150% F·S