

一、测试技术的基础知识

●测试技术的概念。

测量技术与实验技术的综合。

●非电量电测的基本思想。

首先将输入物理量转换为电量，然后再进行必要的调节、转换、运算，最后以适当的形式输出。

●测量的特征?测量分为直接测量和间接测量。直接测量的基本形式是什么?直接测量的特点。

测量的基本形式是**比较**，即将待测量的未知量与预定的标准作比较。

●直接测量可以分为直接比较和间接比较, 直接比较和间接比较的区别?

直接比较: 直接把被测物理量和**标准**作比较的测量方法;

间接比较: 利用测量系统把原始形态的待测物理量的变化变换成与之保持已知函数关系的另一种物理量的变化, 并以人的感官所能接受的形式, 在测量系统的输出端显示出来。

●间接测量的特点。

被测物理量不能用现有仪表直接测量得到, 需通过数学关系计算得到。

●常用**测量系统**由哪几部分组成?各组成部分的作用或用途是什么?

1) **传感器 (一次仪表)**

将被测非电量通过某种原理转换成电信号的装置, 将被测非电量转换成便于放大、记录。

2) **中间变换与调理电路 (二次仪表)**

将传感器输出的微弱信号进行放大, 调理输出给记录仪器的装置。

3) **显示记录设备 (三次仪表)**

把中间变换与测量电路送来的电压或电流信号不失真地显示和记录出来。

●欲使测量结果具有普遍的科学意义应具备哪些条件?

- 1、作比较的标准必须是**精确已知**的, 得到公认的;
- 2、进行比较的测量系统必须**工作稳定**, 经得起检验。

●线性时不变系统的基本特性有哪些?

(1) **叠加性和比例性**

(2) **微分性质**: 若 $x(t) \rightarrow y(t)$, $\frac{dx(t)}{dt} \rightarrow \frac{dy(t)}{dt}$

(3) **积分性质**: 若 $x(t) \rightarrow y(t)$, $\int_0^t x(t)dt \rightarrow \int_0^t y(t)dt$

(4) **频率不变性**: 若输入为正弦信号: $x(t) = A \sin \omega t$, 则输出函数必为:

$$y(t) = B \sin(\omega t \pm \phi)$$

● 正确理解线性测量系统的叠加性, 比例特性及频率不变性的物理意义及应用。

叠加性和比例特性: 分析线性系统在复杂输入作用下的总输出时, 可以将复杂输入分解为若干简单的输入分量, 求解之后再求和即为总输出。

频率不变性: 在稳态时线性系统的输出, 其频率恒等于原输入的频率, 但其幅值与相角均有变化。

二、工程信号分析及其可测性

● 了解工程信号的分类方法

- 1 根据信号随时间变化的情况可分为:
动态信号和静态信号。
- 2 根据信号随时间变化的规律信号可分为:
确定性信号和非确定性信号。
- 3 从信号的幅值和能量上
能量信号与功率信号。
- 4 从分析域上
时域与频域。
- 5 从连续性上
连续时间信号与离散时间信号。
- 6 从可实现上
物理可实现信号与物理不可实现信号。

● 确定性信号与非确定性信号的区别?

确定性信号能用确定的数学关系式描述; 随机信号不能用精确的数学关系式来表达, 也无法确切地预测未来任何瞬间精确值。

● 周期信号频谱分析方法傅立叶级数公式中各物理量的含义?

$$\begin{aligned} x(t) &= a_0 + \sum_{n=1}^{+\infty} (a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t) = a_0 + \sum_{n=1}^{+\infty} A_n \sin(n\omega_0 t + \theta_n) \\ &= a_0 + \sum_{n=1}^{+\infty} A_n \cos(n\omega_0 t + \phi_n) \end{aligned}$$

式中 $A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$

$$\theta_n = \arctg \frac{a_n}{b_n}, \quad \phi_n = \arctg \left(-\frac{b_n}{a_n} \right)$$

A_0 、 A_n 为谐波系数, ω_0 为基波角频率, ϕ_n 为各阶谐波分量为初相角。

● 周期信号频谱的特点

- 1) 凡是周期量都可看成静态分量和谐波分量和, 但不同周期量的频率结构不同(周

期信号的共性与个性)；

2) 离散性、谐波性、收敛性；

3) 随着阶数 n 的增加，谐波系数 A_n 逐渐减小，当 n 很大时， A_n 所起的作用很小；

4) 低频谐波幅值较大，是构成信号的主体，而高频谐波只起美化细节的作用。

● 时限信号（瞬态信号）频谱分析方法。

瞬态信号可以是周期 T_0 为无限大的量，故瞬态量的频谱是连续谱。

周期量的傅立叶级数复数形式：
$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} X(n\omega_0) e^{jn\omega_0 t} \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

其中
$$X(n\omega_0) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) e^{-jn\omega_0 t} dt$$

$$X(n\omega_0) \cdot T = \frac{2\pi}{\omega_0} X(n\omega_0) = \int_{-T/2}^{T/2} x(t) e^{-jn\omega_0 t} dt$$

$$T_0 \rightarrow \infty, \text{ 时, 有 } \begin{cases} \omega_0 = \Delta\omega \rightarrow d\omega \\ n\omega_0 \rightarrow \omega \\ \text{求和运算变成积分运算} \end{cases}$$

则有
$$X(j\omega) = \lim_{\omega_0 \rightarrow 0} \frac{2\pi}{\omega_0} X(n\omega_0) = \lim_{T \rightarrow \infty} X(n\omega_0) T$$

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \right] \cdot e^{j\omega t} d\omega$$

故
$$\begin{cases} x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(j\omega) \cdot e^{j\omega t} d\omega \\ X(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot e^{-j\omega t} d\omega \end{cases}$$

意义： 1) $X(j\omega)$ 称为信号 $x(t)$ 的傅立叶积分变换，为 $x(t)$ 的频谱密度函数；

2) $x(t)$ 称为 $X(j\omega)$ 的傅立叶积分逆变换；

3) $X(j\omega)$ 能被分解为连续的无限个频率为 ω 的，并且有无限个小幅值的频率分量组成。

● 傅立叶级数及傅式变换的基本条件。

满足狄里赫利条件：

② 信号 $x(t)$ 绝对可积，即：
$$\int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)| dt < \infty$$

② 在任意有限区间内，信号 $x(t)$ 只有有限个极大/小值；

③在任意有限区间内, 信号 $x(t)$ 仅有有限个不连续点, 而且在这些点的跃变都必须是有有限值。

●时限信号频谱的特点。

频谱是连续的, 它的形状和周期量的离散谱的包络线是相似的, 有一个主瓣和一些副瓣组成。

●周期信号与非周期信号频谱分析方法及频谱结构的异同点。

1、相同点: 周期信号频谱的包络线与时限信号频谱的包络线相似。

2、不同点: 时限信号的频谱是连续谱, 周期信号的频谱是离散谱。

●信号频谱分析目的, 对信号可测性的理解。

用于识别信号中的周期分量; 在选择测量仪器时, 测量仪器的工作频率范围必须大于被测信号的频宽。

三、测量系统的静动基本特性

●激励、响应的概念

测量系统的输入量/输出量。

●静态特性, 动态特性的定义。

静态特性: 通过静态标定, 可得到测量系统的响应值 y_i 和激励值 x_i 之间的一一对应关系。

动态特性: 系统对激励的响应特性。一个动态特性好的测量系统, 其输出随时间变化的规律(变化曲线), 将能同时再现输入随时间变化的规律(变化曲线), 即具有相同的时间函数。

●静态标定的定义及意义。

静态标定: 就是将原始基准器, 或比被标定系统准确度高的各级标准器或已知输入源作用于测量系统, 得出测量系统的激励—响应关系的实验操作;

意义: ①确定仪器或测量系统的输入—输出关系, 赋予仪器或测量系统分度值;

②确定仪器或测量系统的静态特性指标;

③消除系统误差, 改善仪器或测量系统的正确度

●静态标定的过程及要求。

●几种曲线: 正行程曲线, 反行程曲线, 实际工作曲线。

●参考工作曲线: 端点连线, 端点平行线, 最小二乘线, 过原点的最小二乘线。

各种参考工作曲线的求取方法, 求取的基本思想。

●测量系统静态特性指标: 灵敏度、线性度、迟滞性、重复性、分辨率、阈值、准确度、

漂移、量程和测量范围……(定义, 求取方法)。

$$\text{灵敏度 } s = \Delta y / \Delta x = y / x = \text{常数}$$

$$\text{线性度 } \delta_L = \Delta L_{\max} / Y_{FS} \times 100\%$$

$$\text{迟滞 } \delta_H = \frac{\Delta H_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\%$$

$$\text{重复性 } \delta_R = \frac{\Delta R}{Y_{FS}} \times 100\%, \quad \Delta R = K\sigma / \sqrt{n}, \quad \sigma = \sqrt{\left(\sum_{j=1}^m \sigma_{jI}^2 + \sum_{j=1}^m \sigma_{jD}^2 \right) \frac{1}{2m}}, \quad \text{其中}$$

$$\sigma_{jD} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_{jiD} - \bar{y}_{jD})^2}, \quad \sigma_{jI} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_{jiI} - \bar{y}_{jI})^2} \quad \text{分别为正、反行程各标定}$$

点响应量的标准偏差。

$$\text{分辨率 } F = \frac{\Delta x_{\max}}{Y_{FS}}$$

● 正确理解灵敏度、分辨率、量程、固有频率、刚度、等效质量之间的关系。

为减小动态误差和扩大频响范围, 一般应提高测量系统的固有频率 ω_n , 提高 ω_n 是通过减小系统运动部分质量和增加弹性敏感元件的刚度来实现的 ($\omega_n = \sqrt{k/m}$)。但刚度 k 增加, 必然使灵敏度 s 按相应比例减小。

● 当一测量系统出现明显的非线性时, 可采取哪些措施使用该系统。

曲线校正或输出补偿技术作非线性校正, 或限制测量范围。

● 测量系统传递函数的基本定义, 求取方法, 传递函数的物理意义。

传递函数的物理意义:

- 1) 传递函数反映了测量系统的固有特性, 不随输入信号、输出信号的变化而变化;
- 2) 不同类型的测量系统可用同一种形式的拉氏传递函数表达。

● 测量系统频率响应函数的定义, 求取方法及其物理意义。

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

频响函数的物理意义: 直观的反映了测试系统对不同频率成分输入信号的扭曲情况, 包括幅值的缩放能力和相位角的增减能力。

● 幅频函数、相频函数, 幅频特性曲线, 相频特性曲线。

● 测量系统冲激响应函数的定义及求取方法? 与频率响应函数的区别?

$$L[\delta(t)] = X(s) = 1, \quad h(t) = L^{-1}[H(s)] = L^{-1}[Y(s)] = y_{\delta}(t)$$

区别:一个在时域, 一个在频域。

●典型一阶测量系统的运动微分方程, 传递函数, 频率响应函数, 幅频函数, 相频函数, 幅频特性曲线, 相频特性曲线及其特点。

运动微分方程: $\frac{a_1}{a_0} \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = \frac{b_0}{a_0} x(t)$

时间常数: $\tau = \frac{a_1}{a_0}$; 灵敏度: $S = \frac{b_0}{a_0}$ 。

灵敏度归一化后, 有: $\tau \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = x(t)$

传递函数: $H(s) = \frac{1}{1 + \tau s}$; 频率响应函数: $H(j\omega) = \frac{1}{\tau(j\omega) + 1}$

幅频函数: $A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\tau\omega)^2}}$; 相频函数: $\varphi(\omega) = -\arctan(\tau\omega)$

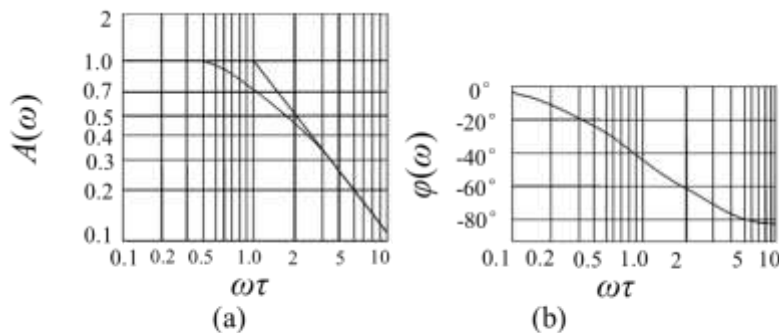


图2-8 一阶测量系统的频率特性

(a) 幅频特性; (b) 相频特性。

时间常数越小, 频率响应特性越好。

当 $\omega\tau \ll 1$ 时:

$A(\omega) \approx 1$, 表明测量系统输出与输入为线性关系;

$\varphi(\omega)$ 很小, $\text{tg} \varphi \approx \varphi$, $\varphi(\omega) \approx -\omega\tau$, 相位差与频率 ω 呈线性关系。

●典型二阶测量系统的运动微分方程, 传递函数, 频率响应函数, 幅频函数, 相频函数, 幅频特性曲线, 相频特性曲线及其特点。

运动微分方程: $a_2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_0 x(t)$

固有圆频率： $\omega_n = \sqrt{a_0/a_2}$ ， 阻尼比系数： $\xi = a_1/2\sqrt{a_0a_2}$

传递函数：
$$H(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$$

频率响应函数：
$$H(j\omega) = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 + 2j\xi\frac{\omega}{\omega_n}}$$

幅频函数：
$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{[1 - (\frac{\omega}{\omega_n})^2]^2 + 4\xi^2(\frac{\omega}{\omega_n})^2}}$$

相频函数：
$$\varphi(\omega) = -\arctan \frac{2\xi(\frac{\omega}{\omega_n})}{1 - (\frac{\omega}{\omega_n})^2}$$

系统的频率响应特性好坏，取决于系统的固有频率 ω_n 和阻尼比 ξ 。一般地， ω_n 要尽

可能大， ξ 选择在 0.6~0.8 之间。

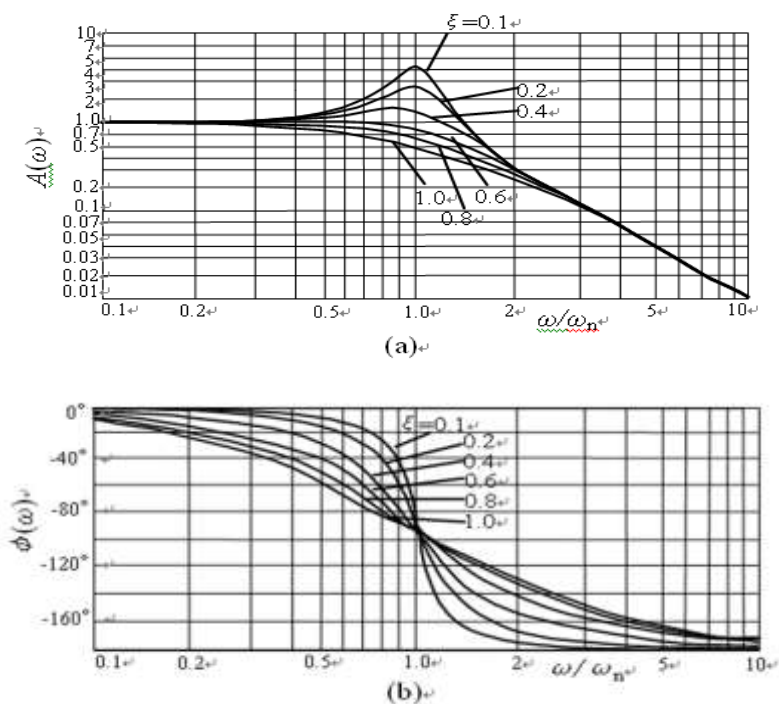


图 2-10 二阶测量系统的频率特性

(a)幅频特性；(b)相频特性。

被测量为非周期信号时，可将其分解为各次谐波，从而得到其频谱。如果传感器的固有频率 ω_n 不低于输入信号谐波中最高频率 ω_{\max} 的（3~5）倍，这样可保证动态测试

精度。但保证 $\omega_n \geq (3:5)\omega_{\max}$ ，制造上很困难,且 ω_n 太高又会影响其灵敏度 S 。故一般情况下, $\omega_n \approx 10\omega_0$ 。(高次谐波具有较小的幅值,占整个频谱中次要部分,所以即使测量系统对它们没有完全地响应,对整个测量结果也不会产生太大的影响)

●针对典型一阶,二阶系统的动态特性的讨论方法及结论。

一阶系统:一般地,时间常数 τ 越小越好。

二阶系统:一般地, ω_n 要尽可能大, ξ 选择在 $0.6 \sim 0.8$ 之间。

●测量系统不失真测量的基本条件(含推导过程)。

$$y(t) = A_0 x(t - \tau_0)$$

$$\text{傅里叶变换, 有 } Y(j\omega) = A_0 e^{-j\tau_0\omega} X(j\omega)$$

$$\text{频率响应: } H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = A_0 e^{-j\tau_0\omega}$$

$$\text{即: } A(\omega) = A_0 = \text{常数}$$

$$\varphi(\omega) = -\tau_0\omega$$

●针对典型一阶,二阶系统不失真测量的条件,如何选取系统的动态参数。

一阶测量系统:时间常数 τ 愈小,则响应愈快。

二阶测量系统:在 $\omega < 0.3\omega_n$ 范围内, $\varphi(\omega)$ 的数值较小,而且相频特性接近直线,

在 $\omega > (2.5 \sim 3)\omega_n$ 范围内, $\varphi(\omega)$ 接近于 180° ,且差值很小,在实测或数据处理中用减去固定相位差值或把测试信号反相 180° ,也接近于可不失真地恢复被测信号波形。在 $\xi = 0.6 \sim 0.7$ 时,幅值在比较宽的范围内保持不变,可获得较为合适的综合特性。

●产生动态误差的原因是什么,动态误差的定义及分类。

原因:一般测量系统的灵敏度是由静态标定获得的,对动态信号测量来讲,由于一阶、二阶系统的幅频特性不可能做到从零频到无穷大是一条平直的直线,因此产生测量误差是必然的。

定义:由于测量系统的动态响应特性不够理想,造成输出信号的波形与输入信号的波形的畸变称之为动态误差。

●一阶、二阶系统典型激励的响应有何特点。

●二阶测量系统中特性参量的含义及相互关系:刚度、阻尼系数、无阻尼固有圆频率、无阻尼阻尼比、有阻尼固有圆频率、有阻尼共振圆频率。

$$\text{有阻尼固有圆频率: } \omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2}$$

有阻尼共振圆频率： $\omega_r = \omega_n \sqrt{1 - 2\xi^2}$

● 几种常见计算题的解题方法。

1. 已知：① $H(j\omega)$ 或 $A(j\omega)$ 、 $\phi(\omega)$ 或 $H(s)$ ；

② $x(t)$ 或 $y(t)$ ；

求： $y(t)$ 或 $x(t)$

思路：由 $H(j\omega)$ 或 $H(s)$ 求 $A(j\omega)$ 、 $\phi(\omega)$ 将 $x(t)$ 、 $y(t)$ 分解成正弦谐波信号，再用 $A(j\omega)$ 、 $\phi(\omega)$ 定义求取。

2. 已知：① $H(j\omega)$ 或 $A(j\omega)$ 、 $\phi(\omega)$ 或 $H(s)$ ；

② 被测信号的最高频率分量；

求：动态误差（幅值误差、相位误差）

思路：由 $H(j\omega)$ 或 $H(s)$ 求取 $A(j\omega)$ 、 $\phi(\omega)$

幅值误差： $|1 - A(j\omega)|$ ； 相位误差： $\phi(\omega)$ 。

3. 已知：① 动态误差（幅值，相位）

② $H(j\omega)$ 或 $A(j\omega)$ 、 $\phi(\omega)$ 或 $H(s)$

确定：不失真测量范围。

思路：由 $H(j\omega)$ 或 $H(s)$ 求解 $A(j\omega)$ 、 $\phi(\omega)$ 代入 $|1 - A(j\omega)| \leq \delta\%$ ，

$\phi(\omega) \leq$ 角度误差

4. 已知：1) 动态误差

2) 被测信号频率

确定：一阶、二阶系统的特性参数。

思路：代入方程求解 τ 或 ξ 、 ω_n 。

四、计算机测试技术

● 计算机测试系统的特点。

● 采样定理。

● 智能传感器的定义，智能传感器与传感器的区别。

● GPIB 总线的基本特性，相关的基本概念。

GPIB 采用字节串行/位并行协议。GPIB 通过连接总线传输信息而实现通信。

讲 者	听 者
被控者指定去讲	被控者指定去听
将数据放到 GPIB 上	读出由讲者送到 GPIB 上的数据
一次只能有一个器件被寻址讲话	每次可有多台器件被寻址为听者

五、测量结果表述及误差分析

●最小二乘法的基本思想。

残差平方和最小。

●一元线性回归分析的基本方法及其考核指标。

$$\hat{y}_i = kx_i + b$$

其中，
$$k = \frac{L_{xy}}{L_{xx}} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i - \frac{1}{N} (\sum_{i=1}^N x_i)(\sum_{i=1}^N y_i)}{\sum_{i=1}^N x_i^2 - \frac{1}{N} (\sum_{i=1}^N x_i)^2}$$

$$b = \bar{y} - k\bar{x}$$

●非线性回归的基本方法。

- ①利用变量变换把非线性模型转化为线性模型。
- ②利用最小二乘原理推导出非线性模型回归的正规方程，然后求解。
- ③采用直接最优化方法，以残差平方和为目标函数，寻找最优化回归函数。

●误差的定义,产生的原因,分类方法。系统误差,粗大误差,随机误差定义及其特性,如何发现这些误差。

原因： ①工具误差；②方法误差；③环境误差；④人员误差。

●描述测量结果的几个质量指标:准确度，精确度,精密度,不确定度。

- 正确度：测量结果中系统误差大小的程度；
- 精密度：测量结果中随机误差大小的程度；
- 准确度：测量结果中系统误差与随机误差综合大小的程度；
- 不确定度：合理赋予被测量之值的分散性。

●不确定度的定义,分类方法。

不确定度：合理赋予被测量之值的分散性。

●A 类不确定度与 B 类不确定度的区别。等精度重复测量的概念。

A 类不确定度：以样本的算术平均值作为被测量值的估计（即测量结果），以平均值

的实验标准差作为被测量结果的标准不确定度；

B 类不确定度：被测量 X 的估计值 x_i 不是由重复观测得到，其标准不确定度可用 x_i 可能变化的有关信息或资料来评定；

等精度测量：使用同样的仪器，在同等的测量环境条件下，同一人员进行的测量。

● 单次测量结果试验标准差与平均值试验标准差。

单次测量：
$$s(x_i) = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

平均值：
$$s(\bar{x}) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}}$$

● B 类不确定度的评定的信息来源。

● B 类不确定度的评定方法。

1、已知置信区间和包含因子

$$u(x) = \frac{a}{k}$$

2、已知扩展不确定度 U 和包含因子 k ；

3、已知扩展不确定度和置信水准 p 的正态分布；一般按正态分布考虑评定其标准不

确定度：
$$u(x_i) = \frac{U_p}{k_p}$$

4、已知扩展不确定度 U_p 以及置信水准 p 与有效自由度 ν_{eff} 的 t 分布。

如 x_i 的扩展不确定度 U_p 不仅给出了扩展不确定度 U_p 和置信水平 p ，及有效自由

度 ν_{eff} 或包含因子 k_p ，按 t 分布处理：
$$u(x_i) = \frac{U_p}{t_p(\nu_{\text{eff}})}$$

值 y 的分散性。

六、信号调理电路及指示记录装置

● 信号调理电路的作用。

对信号进行变换和处理，如放大、滤波、调制等。

● 常用滤波器的设计思想、特征及其主要指标

① 纹波幅度 d

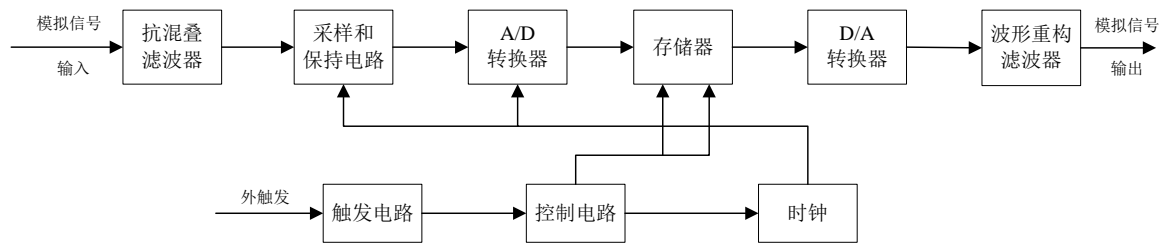
② 截止频率 ω_c

③ 带宽 B 与品质因素 Q 值

④倍频程选择性 W

⑤滤波器因素（或矩形系数）

●瞬态波形存贮器工作原理框图。



待记录的模拟信号经抗混叠滤波器后，通过 A/D 转换器由模拟信号转变成数字信号并存储于存储器中，显示时再将存储信号取出，经由 D/A 转换器恢复成原模拟信号。这个信号可在模拟量记录仪(如阴极射线示波器、X—Y 记录仪等)上显示出来。由于并非“实时”重放，因而可以根据不同记录仪的要求，可快速或慢速重放，改变时间比例尺和信号比例尺，从而可得到充分展宽和放大的波形。

七、应变测试技术

●金属应变片的工作原理及结构特点。

工作原理：基于金属的电阻应变效应。

●金属应变片的主要特性参数。

尺寸：标距 l 、栅宽 b ，阻值，机械滞后，热滞后，零点漂移，蠕变，应变极限，绝缘电阻，疲劳寿命，最大工作电流。

$$\text{灵敏系数: } K_s = \frac{dR/R}{\varepsilon_x} = (1 + 2\mu) + \frac{d\rho/\rho}{\varepsilon_x}$$

●应变片产生温度效应的原因、计算公式、补偿方法。

原因：(1) 温度变化引起应变片敏感栅电阻变化而产生附加应变

$$\varepsilon_{ta} = \frac{\Delta R_{ta} / R_0}{K} = \frac{\alpha \Delta t}{K}$$

(2) 试件材料与敏感栅材料的线膨胀系数不同，使应变片产生附加应变

$$\varepsilon_{t\beta} = \frac{\Delta l_{t\beta}}{l_0} = (\beta_{丝} - \beta_{试}) \Delta t$$

补偿方法：(1) 桥路补偿法（补偿片法）

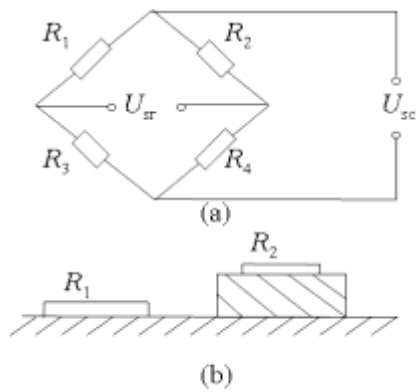


图 8.18 桥路补偿法

(2) 应变片自补偿法

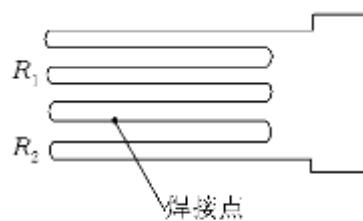
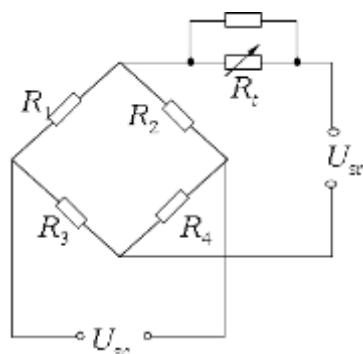


图 8.19 双金属线栅法

(3) 热敏电阻补偿法



● 半导体应变片的工作原理。

压阻效应：半导体材料的**电阻率**随作用应力而变化。

● 金属应变片与半导体应变片的异同点。

金属应变片：导体的**形状变形**引起的阻值变化；

半导体应变片：半导体的**电阻率的变化**引起的阻值变化。

● 电桥的分类、电桥平衡条件、电桥输出公式、直流电桥与交流电桥的异同点, 电桥输出公式应用(含计算)。

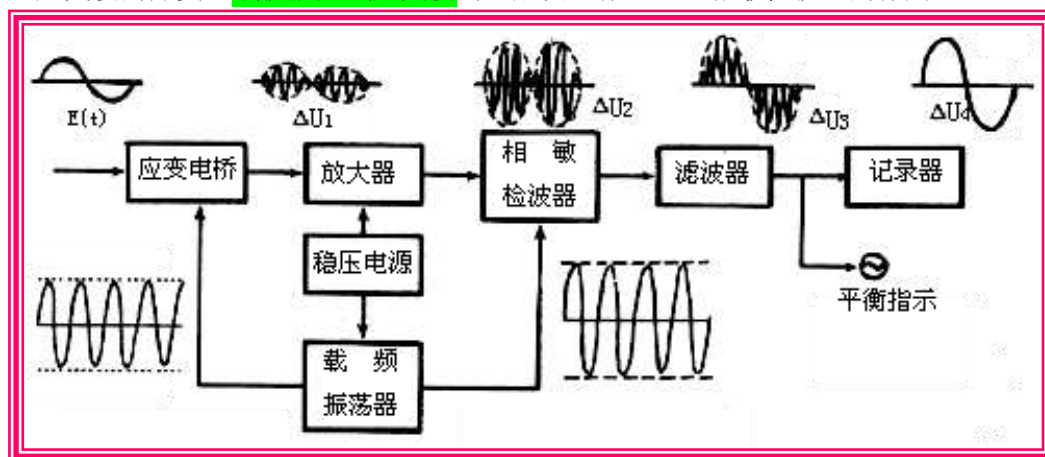
电桥平衡条件: 相对桥臂电阻之积相等, 即 $\frac{R_1}{R_4} = \frac{R_2}{R_3}$

电桥输出公式: $U_{sc} = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{\Delta R_1}{R} + \frac{\Delta R_3}{R} - \frac{\Delta R_2}{R} - \frac{\Delta R_4}{R} \right) \cdot U_{sr}$

异同：(1) 直流电桥相对桥臂电阻之积相等，而交流电桥相对桥臂电阻和电容之积均相等。

(2) 直流电桥从输出电压的正/负，判断是拉/压应变；交流电桥通过输出与参考桥压的相位相同/反来判断拉/压应变。

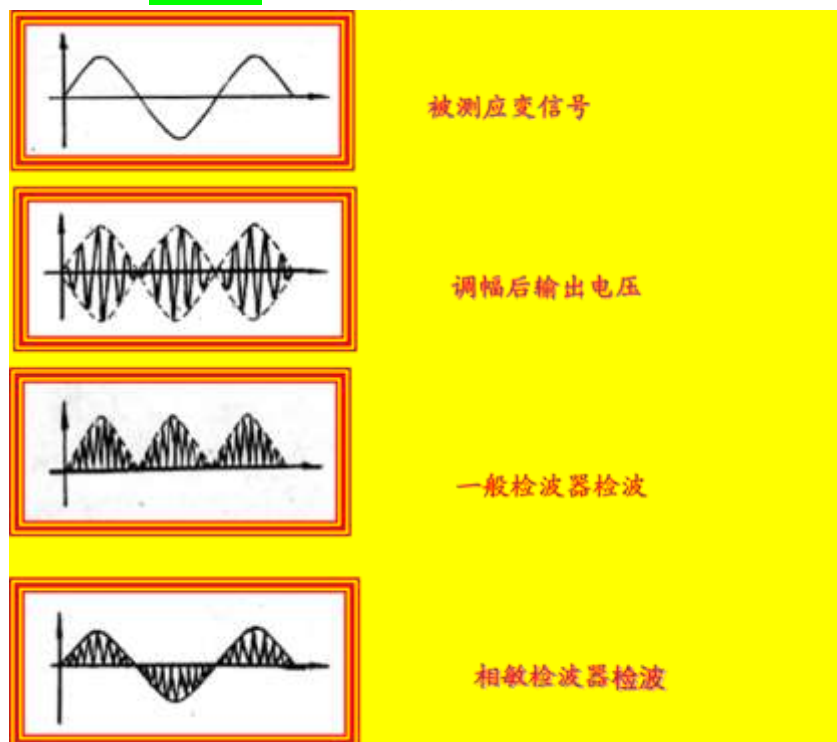
● 应变仪的分类、载波放大式应变仪的组成及工作原理、相敏检波器的作用。



组成：电桥，放大器，载频振荡器，相敏检波器

相敏检波器：检波器（解调）、辨别相位

● 应变测量中信号转换的历程(能举例明)。



● 常用应变式传感器。

① 应变式力传感器(柱形、悬臂梁式)

② 应变式压力传感器(应变筒式、活塞式)

③ 感应式加速度传感器(含半导体加速度传感器)

以上传感器的工作原理(含弹性敏感元件)、应变片的粘贴位置、方向(含工作应变

片、温度补偿应变片)、如何运用电桥输出特性(相邻相减, 相对相加的原则)连桥。

●常用电桥的结构形式(半桥、全桥)。

●应变测量中电标定的基本思想。

为模拟当变形使应变片产生的电阻变化, 在应变片 R 上并联一大阻值电阻, 使并联后与并联前相比也产生 ΔR 的变化。(在桥臂并联大电阻来模拟试件变形的办法)

●熟悉应变片的粘贴工艺。

●几种典型的计算题

八、压电测试技术

●石英压电晶体的压电效应(正压电效应、逆压电效应、纵向压电效应、横向压电效应、切向压电效应)原理、输出特性。

当沿着一定方向对材料施力而使它变形时, 内部产生极化现象, 同时在它的两个表面上产生符号相反的电荷; 当外力去除后, 又重新恢复为不带电的状态。当作用力的方向改变时, 电荷的极性随之改变。

●压电陶瓷(材料的构成及压电效应)。

●压电陶瓷极化处理的目的、方法。

一定温度下, 对压电陶瓷施加强电场, 使电畴的自发极化方向按外加电场的方向取向。

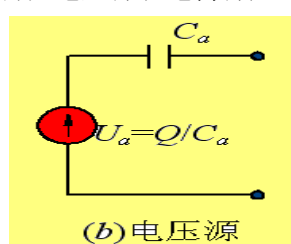
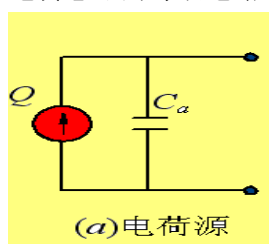
●压电传感器灵敏度定义(含电荷灵敏度、电压灵敏度及其二者之间关系)。

电压灵敏度: $K_U = \frac{U}{F}$

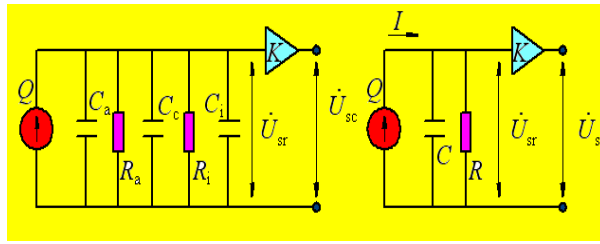
电荷灵敏度: $K_q = \frac{Q}{F}$

关系: $K_U = \frac{K_q}{C_a}$, 其中 $C_a = \frac{\varepsilon S}{t} = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 S}{t}$

●压电传感器的等效电路(两种: 电压源和电荷源)。



●压电传感器与电压放大器相连的等效电路、电器特性、使用注意事项。



等效电阻： $R = \frac{R_a R_i}{R_a + R_i}$ ，等效电容： $C = C_a + C_c + C_i$

前置放大器的输入电压： $U_{sr} = \frac{R}{1 + j\omega RC} \dot{Q}$ ，作用力为： $F = F_m \sin \omega t$ ，产生的

电荷为： $Q = dF$

则 $i = \frac{dQ}{dt} = \omega dF_m \cos \omega t$ ，化为复数形式： $\dot{I} = j\omega d \dot{F}$

故 $U_{sr} = d \dot{F} \frac{j\omega R}{1 + j\omega RC}$

输入电压的幅值： $U_{im} = \frac{dF_m \omega R}{\sqrt{1 + (\omega R)^2 (C_a + C_c + C_i)^2}}$

相位差： $\varphi = \frac{\pi}{2} - \arctan \omega (C_a + C_c + C_i) R$

理想情况下，传感器的绝缘电阻 R_a 和前置放大器的输入电阻 R_i 都为无限大，即等效电阻 R 为无限大的情况，电荷没有泄漏（即传感器的开路电压）。

前置放大器输入电压的幅值： $U_{am} = \frac{dF}{C_a + C_c + C_i}$

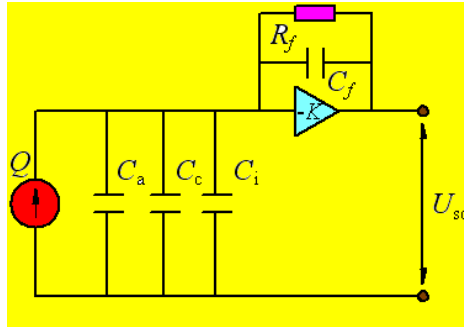
比值： $\frac{U_{im}}{U_{am}} = \frac{\omega R (C_a + C_c + C_i)}{\sqrt{1 + (\omega R)^2 (C_a + C_c + C_i)^2}}$

令 $\omega_1 = \frac{1}{R(C_a + C_c + C_i)} = \frac{1}{\tau}$

则有： $\frac{U_{im}}{U_{am}} = \frac{\frac{\omega}{\omega_1}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega\tau}\right)^2}}$

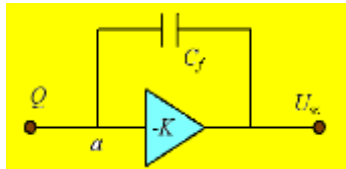
$$\varphi = \frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{\omega}{\omega_1}\right) = \frac{\pi}{2} - \arctan(\omega\tau)$$

- 压电传感器与电荷放大器相连的等效电路，输出公式推导、电荷放大器的特点。



推导：

反馈电容 C_f 折合到放大器输入端的有效电容： $C'_f = (1+K)C_f$



由电路图，有： $Q_c = U_a C$ ， $Q_f = U_f C_f$ ， $U_f = U_a - U_{sc}$ ， $U_{sc} = -K U_a$

于是： $U_f = (K+1)U_a$

则有： $Q = Q_c + Q_f = U_a [C + (K+1)C_f]$

故放大器输出电压：
$$U_{sc} = \frac{-KQ}{C_a + C_c + C_i + (1+K)C_f}$$

放大器的开环增益 K 足够高，并满足 $(1+K)C_f \gg (C_a + C_c + C_i)$ ，则有

$$U_{sc} \approx U_{C_f} = -\frac{Q}{C_f}$$

- 特点：
- (1) 电荷放大器是一个具有深度电容负反馈的高增益放大器；
 - (2) 电荷放大器将高内阻的电荷源转换为低内阻的电压源，且输出电压正比于输入电荷；
 - (3) 在一定条件下，传感器的灵敏度与电缆长度无关。

- 灵敏度归一化处理的目、电荷放大器使用注意事项。

目的：方便由放大器的输出直接读出被测物理量的大小

注意事项：(1) 放大器的开环增益 K 足够高，满足 $(1+K)C_f \gg (C_a + C_c + C_i)$ 时，

传感器的输出灵敏度可认为与电缆电容无关；

(2) 在反馈电容的两端并联一个大电阻 R_f (约 $10^8 : 10^{10} \Omega$)，其功能是提供直流反馈，减小零漂，使电荷放大器工作稳定。

● 压电式测量系统的工作频率上下限的确定及其相关的影响因素。

上限：取决于传感器的机械特性 (运算放大器的频率响应，电缆长度)；

下限：取决于全系统的电气特性，即时间常数 τ 。

● 常用压电式传感器的工作原理。

⊙ 压电式力传感器。

典型的结构、工作原理、使用注意事项。

⊙ 压电式加速度传感器。

典型的结构、工作原理、上下限工作频率的影响因素、横向灵敏度

⊙ 压电式压力传感器。

① 膜片式压电压力传感器：结构、工作原理、提高灵敏度的方法、各组成结构单元的作用，温度补偿的原理、加速度补偿原理。

② 活塞式压电压力传感器：结构、工作原理。

● 提高压电式传感器灵敏度的方法

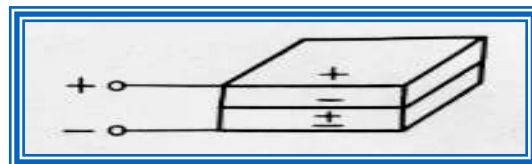
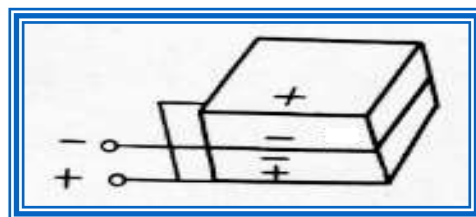
两种：机械上串联、机械上并联。

并联：

$$Q' = 2Q ; U' = U_a ; C' = 2C_a$$

串联：

$$Q' = Q ; U' = 2U_a ; C' = \frac{C_a}{2}$$



九、温度测量技术

● 温度测量方法的分类。

接触式、非接触式

● 接触式及非接触式温度测量的主要区别。

接触式测温基于热平衡原理，非接触式测温利用物质的热辐射原理。

● 金属测温电阻的工作原理。

金属导体具有正的电阻温度系数 (电阻率随温度的上升而增加)，在一定的温度变化范围内，有 $R = R_0[1 + \alpha(t - t_0)] = R_0(1 + \alpha \cdot \Delta t)$

● 测温电阻金属材料的要求。

1) 电阻温度系数 α 要大；

- 2) 在测量范围内, 材料的物理、化学性质稳定;
- 3) 电阻率 ρ 要大, 可提高温度计的动态响应;
- 4) 电阻温度关系线性好;
- 5) 材料要容易制作, 价格便宜。

● 半导体热敏电阻的工作原理, 温度系数的求取方法。

热敏电阻的阻值随温度上升而下降: 设 $R = Ae^{\frac{B}{T}}$

$$\text{电阻温度系数 } \alpha = \frac{\frac{dR}{R}}{\frac{dT}{R}} = \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dT}$$

$$R = Ae^{\frac{B}{T}} \Rightarrow \frac{dR}{dT} = Ae^{\frac{B}{T}} \left(-\frac{B}{T^2} \right) = R \left(-\frac{B}{T^2} \right)$$

$$\therefore \alpha = \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dT} = -\frac{B}{T^2}$$

当 $T = T_0$ 时有电阻 R_0 , 则当 $T = T$ 时有电阻 R :

$$R_0 = Ae^{\frac{B}{T_0}} \Rightarrow A = R_0 e^{-\frac{B}{T_0}}$$

$$\text{故 } R = R_0 e^{-\frac{B}{T_0}} \cdot e^{\frac{B}{T}} = R_0 e^{B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}, \text{ 其中常数 } B \text{ 可通过实验获得: } B = \frac{\ln R_1 - \ln R_0}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_0}}$$

● 金属测温电阻与半导体热敏电阻的主要区别。

半导体热敏电阻优点:

- 1) 温度系数的绝对值较热电阻大, 灵敏度高, 可测微小的温度变化;
- 2) 电阻率大, 时间常数小(毫秒级)。可制成体积小、热惯性小、响应速度快的感温元件。

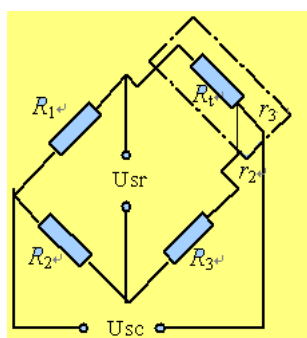
半导体热敏电阻缺点:

- 1) 电阻温度特性分散性大;
- 2) 稳定性差;
- 3) 非线性较严重。

● 常用二线接桥法测温存在的问题。

将热电阻接到电桥的导线会产生附加电阻 r_1 、 r_2 , 产生测量误差。

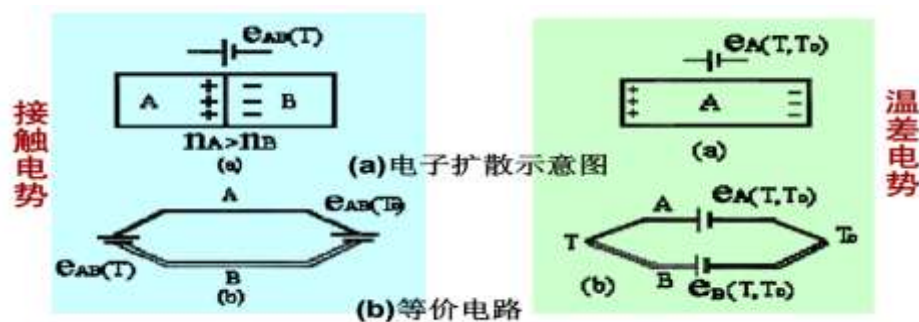
● 采用三线接桥法测量电阻的工作原理、接桥方法。



用具有相同温度特性的导线 r_1 、 r_2 分别接到两个邻臂上，因而可互相抵消，而第三根线与负载电阻 R_L 相串联，由于负载的输入阻抗都很大， r_3 可忽略不计。

● 热电效应产生的机理(含接触电势及温差电势)。

由两种导体的接触电势(珀耳贴电势)与同一种导体的温差电势(汤姆逊电势)组成。



● 热电偶的基本实验定律。

1) 均质导体定律(含应用)

由一种均质导体组成的闭合回路，不论回路中是否存在温度梯度，都不会产生热电势

2) 热电势定律

热电偶的热电势只和接点温度有关，而和其它部位的温度无关。

3) 中间导体定律

在热电偶回路中加入第三种均质材料，只要它的两个接点温度相同，则对回路的热电势没有影响。

4) 中间温度定律

热电偶接点温度为 T_1 和 T_2 时的热电势为 E_1 ，接点温度为 T_2 和 T_3 时的热电势为 E_2 ，

则当接点温度为 T_1 和 T_3 时的热电势为 $E_1 + E_2$ 。

5) 参考电极定律

金属 A 、 B 、 C 两两相接，当接点温度分别为 T_1 和 T_2 时，金属 A 和 C 的热电势为 E_{AC} ，

金属 C 和 B 的热电势为 E_{CB} ，则金属 A 和 B 的热电势： $E_{AB} = E_{AC} + E_{CB}$

● 热电偶测温系统的标定方法。

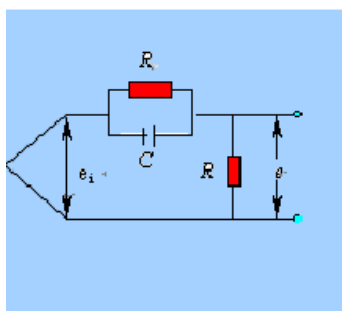
1) 直接标定法

2) 比对标定法 (非标准热电偶)

● 热电偶测温系统的动态特性。

热电偶是一种一阶线性系统: $\tau \frac{dT}{dt} + T = T_i$

● 热电偶测温系统的动态特性补偿。



十、压力测试技术

● 塑性测压法的基本原理。

测量时, 将测压器放入弹膛内某位置, 火药燃气压力通过活塞作用于塑性测压器件, 使其产生塑性永久变形, 为获得膛压峰值, 需要对铜柱变形量或铜球压后高进行定度, 即获得变形量或压后高与压力之间的对应关系(压力对照表)。

● 铜柱、铜球测压的主要区别。

① 测压试件不同。

铜球测压法的测压试件是具有一定直径的铜球 (铝球或铁球), 使用前不进行预压, 直接用压后高作为最大膛压的度量;

② 压力标定的方法不同。

铜球压力表的编制是在能产生模拟膛压曲线的半正弦压力波形的动态压力发生器上进行。

● 产生静动差的原因。

燃气压力通过测压器活塞压缩测压器件的同时, 活塞获得运动速度, 压力脉冲消失后, 由于活塞的惯性, 要继续压缩测压器件, 产生过冲, 从而产生静动差。

● 准动态校定的基本思想。

用已知峰值且波形与膛压曲线接近的压力脉冲作用于塑性测量元件上, 得出峰压和测压器材的输出间的对应关系, 再据此编出动态压力对照表。由于标定压力和待测压力有相似的动态特征, 得到的响应自然也比较接近, 因此, 准动态校准可以减小塑性测压器材的静动差。

十一、位移、速度、加速度量技术

● 各种常用位移量传感器的工作原理、输出特性、结构特点、适用范围及相应调理电路的要求, 调理电路的电器特性(电涡流式、电容式)

① 机械式位移测量法

工作原理: 利用浮子来感受液面的位移, 达到指示油量的大小和液位的高低。

特点：机械惯性大，动态特性较差，不能远距离传送。

②电气式位移测量法

工作原理：位移量通过位移传感器转换为电量，再经相应的测试电路处理后，传递到显示或记录装置。

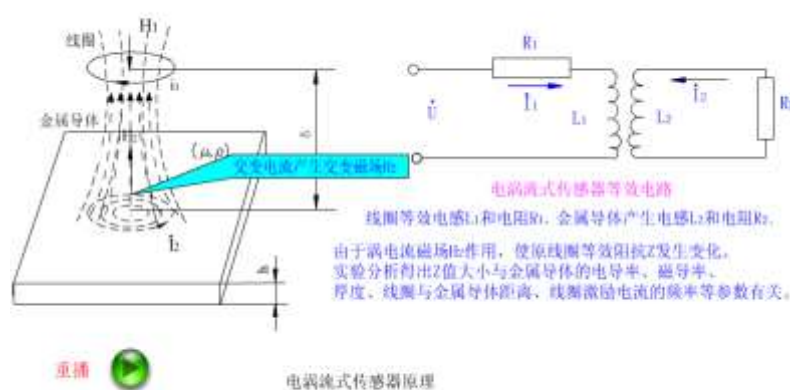
特点：动态范围大，接触式测量时，传感器对被测对象有一定影响。

③光电式位移测量法

工作原理：将机械位移量通过光电式位移传感器转换为电量再进行测量的方法。

特点：应用于需进行非接触测量的场合，对被测对象无不良影响，具有较高的频响精度。

调理电路：(1)电涡流式传感器：



(2)电容式传感器：以电容器为敏感元件，将被测非电量转化为电容量的变化，进而实现非电量到电量的转换。

优点：高阻抗，小功率；灵敏度高，具有较高的信噪比和系统稳定性；良好的动态特性。

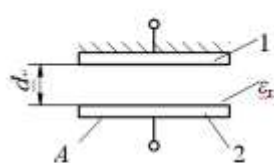


图 5-1 平板电容器

1-定极板；2-动极板。

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d}$$

●平均速度测量方法的基本思想，常用的区载装置工作原理(线圈靶)。

基于电磁感应原理。

●瞬时速度测量的原理。

基于电磁感应原理： $e \propto nBv$

●永磁感应式测速传感器的工作原理。

(含：两组线圈绕组串联的目的，位移线圈绕组的结构特性、铁芯材料、永久磁铁)

$$e = e_{\perp} + e_{\parallel} \propto nB_{\perp}v + nB_{\parallel}v = nv(B_{\perp} + B_{\parallel}) = nv \cdot B, B \text{ 是恒定的, 确保了输出信号}$$

的线性关系, 同时消除了振动。

磁头件安装在两平行线圈之间的运动杆上。

两组速度线圈绕组串联的目的: (1) 提高传感器灵敏度; (2) 消除运动体振动。

位移线圈绕制方法: 相邻两个位移槽内绕组的绕向相反。

位移线圈绕组作用: 对速度进行标定或标记。

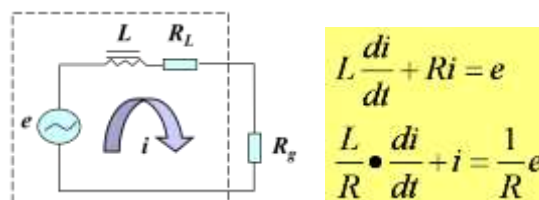
铁芯材料: 采用软磁材料, 同时采取防涡流措施。

永久磁铁: 有较强的矫顽力, 要抗冲击, 选用硬磁材料, 以提高传感器灵敏度。结构要求: 永久磁铁的宽度要小于节距。

● 永磁感应测速传感器测量系统的组成及其要求 (含测量系统组成, 传感器对测量放大器的要求, 速度灵敏度的求取方法)



测量放大器: 将被对信号进行放大, 并具有阻抗变换作用;



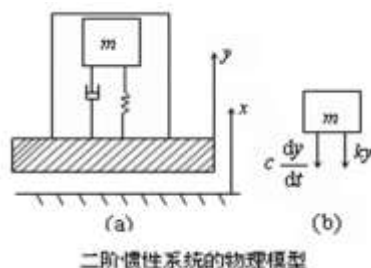
$\tau = \frac{L}{R}$: τ 愈小, 则测量电路的动态特性愈好。为改善测量电路的动态特性, 要求

电路中的 L 应当小些, R 应当大些。对于一定的感应传感器, L 和 R_L 是一定的, 就需要测量仪器的输入电阻 R_g 大一些。

● 惯性式加速度测量的工作原理 (含: 牵连运动、惯性运动、惯性式加速度计的工作原理)。

牵连运动: 和被测运动体一起运动;

惯性运动: 质量体相对于运动体的运动;



运动微分方程: $m(\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{d^2y}{dt^2}) = -c \frac{dy}{dt} - ky$

整理后: $m \frac{d^2y}{dt^2} + c \frac{dy}{dt} + ky = -m \frac{d^2x}{dt^2}$

即: $\frac{d^2y}{dt^2} + 2\xi\omega_n \frac{dy}{dt} + \omega_n^2 y = -\frac{d^2x}{dt^2}$

传递函数: $H_a(S) = \frac{Y(S)}{A(S)} = -\frac{1}{S^2 + 2\xi\omega_n S + \omega_n^2}$

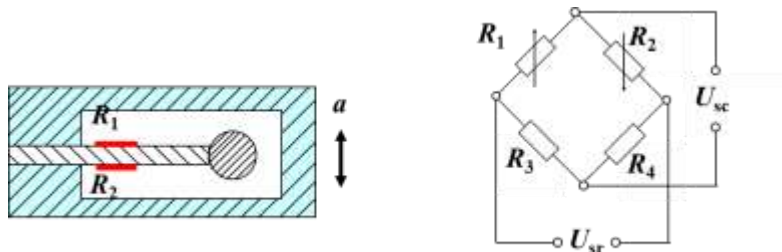
频率响应函数: $H_a(j\omega) = -\frac{1}{\omega_n^2} \frac{1}{[1 - (\omega/\omega_n)^2] + j2\xi\omega/\omega_n}$

幅频特性: $A_a(\omega) = \frac{1}{\omega_n^2} \frac{1}{\sqrt{[1 - (\omega/\omega_n)^2]^2 + (2\xi\omega/\omega_n)^2}}$

相频特性: $\phi_a(\omega) = -\arctg \frac{2\xi\omega/\omega_n}{1 - (\omega/\omega_n)^2}$

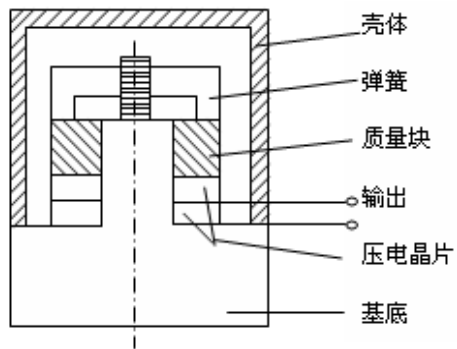
惯性式加速度计必须工作在低于其固有频率的频域内。因此，惯性式加速度计有尽可能宽的工作频域，它的固有频率应尽可能高一些，即弹簧的刚度 k 应尽可能大一些，质量 m 应尽可能小。

● 应变式加速度计的工作原理、结构特点。



工作原理: 被测加速度 $a \rightarrow ma \rightarrow F(\text{惯性力}) \rightarrow Q \rightarrow U$

● 压电式加速度计的工作原理、结构特点。



压电加速度计结构示意图

压电式加速度计由壳体、弹簧、质量块、压电晶片、基底组成，换能元件为上面压着质量块的压电晶片。工作时，通过连接螺栓把加速度计壳体牢牢固定在被测对象的振动方向上。当加速度计壳体随对象振动时，质量块也将振动，质量块的惯性力作用在压电晶片使其产生变形而在表面产生电荷，通过电荷放大器即可测量。

$$\text{被测加速度 } a \rightarrow ma \rightarrow F(\text{惯性力}) \rightarrow Q \rightarrow U$$

● 加速度传感器系统的常用标定方法。

(重点: 正弦运动标定法中的绝对标定和相对标定的基本思路)

1. 正弦运动标定法:

(1) 绝对标定

以振动的位移和频率作为基本量值

(2) 相对标定

由标准加速度计测出振动体的加速度值，再根据标准加速度值与被标加速度计的输出信号进行换算。

2. 瞬态运动法

加速度由两个质量间的撞击产生