

传感器及测试技术①



中国科学技术大学

练习簿

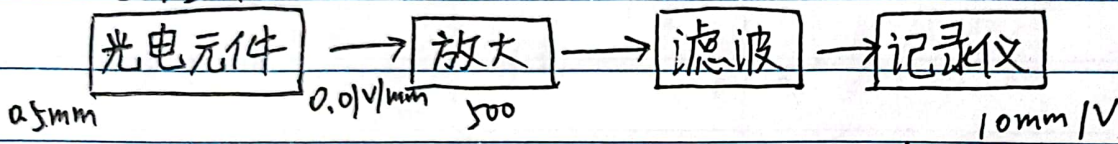
LIANXIBU LIANXIBU

申向阳

JL22050004

作业1: 第一章 装置的静态特性和动态特性

1. 如果采用光电元件测量位移, 其系统框图如图所示: 设光电元件的输出为  $0.01 \text{ V/mm}$ , 放大器的放大倍数为  $500$ , 该滤波器为一阶系统, 时间常数  $\tau = 0.001 \text{ s}$ ,  $\omega = \frac{1}{5\tau}$ , 该记录仪的灵敏度为  $10 \text{ mm/V}$ , 如果被测量位移最大为  $0.5 \text{ mm}$ , 问记录仪在记录纸上记录的幅值偏转是多少? 该系统的灵敏度是多少?



解 幅值偏转  $A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1+(\omega\tau)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1+(0.2)^2}} = 0.9806$

最大幅值偏转:  $A = 0.01 \times 0.5 \times 500 \times 10 = 25 \text{ mm}$

灵敏度:  $k = 25 \div 0.5 = 50$

2: 3145型加速计的典型阻尼比为0.7,最小阻尼比为0.4,典型共振频率为1200Hz.

试计算当对典型阻尼比和最小阻尼比两种情况以10g阶跃加速度时的最大过冲.

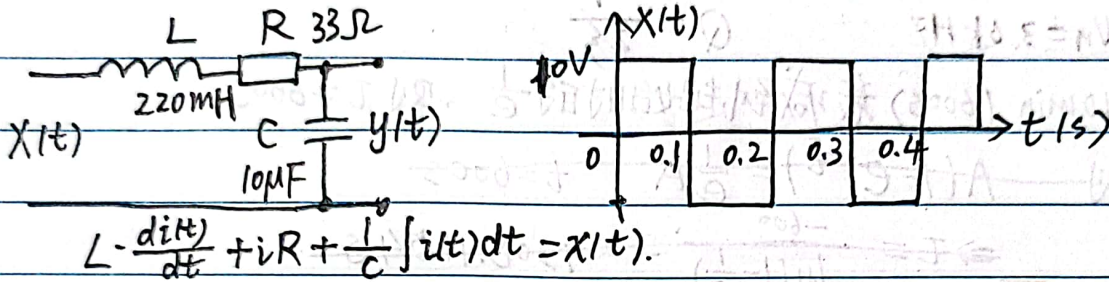
解:  $\omega_n = 1200\text{Hz}$

$$\xi = 0.7 \text{ 时, 最大过冲 } M_p = 10g \cdot e^{-\frac{\xi \omega_n \pi}{\omega_n \sqrt{1-\xi^2}}} \approx 0.4599g$$

$$\xi = 0.4 \text{ 时, 最大过冲 } M_p = 10g \cdot e^{-\frac{\xi \omega_n \pi}{\omega_n \sqrt{1-\xi^2}}} = 2.538g.$$

3. 下图电路, 输入端  $X(t)$  加方波电压, 假设在 0 时刻之前已经加上电压足够长的时间。已知  $R=33\Omega$ ,  $C=10\mu F$ ,  $L=220mH$ , 右图横坐标单位为 s, 峰峰值为 20V。试大致绘出输出  $y(t)$  电压波形, 只考虑基频、3 倍频、5 倍频的贡献。

(选做: 如果方波从 0 时刻开始加, 分析如何给出加上电压后, 0 到 0.5s 内的波形。



解: 二阶系统对单位阶跃函数的响应为

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

周期为 0.2s, ~~幅~~

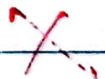
$$\zeta = \frac{R}{2\omega_0 L}$$

在  $[0, 0.1]$  时,  ~~$y(t) = 10\bar{y}(t)$~~

在  $[0.1, 0.2]$  时,  ~~$y(t) = -20\bar{y}(t)$~~

在  $[0, 0.1]$  时,  $y(t) = 20\bar{y}(t) - 10$

$[0.1, 0.2]$  时,  $y(t) = 10 - 20\bar{y}(t)$



4. 一个石英陀螺仪的Q值极高,为了对其进行测量,先通过激励让其在共振态具有一定的振幅振荡,然后撤掉激励,观察其振幅的衰减情况,若其固有频率为3.6kHz,振幅10分钟衰减到起始时的 $\frac{1}{e}$ ,试计算其Q值大小。

解:  $\omega_n = 3.6 \text{ kHz}$        $Q = \frac{1}{2\zeta}$   
 振幅10min (600s) 衰减到起始时的 $\frac{1}{e}$ , 则  $\tau = 600 \text{ s}$ .

$$\text{则 } A(t) = e^{-\frac{t}{\tau}} = \frac{1}{e} A \quad t = 600 \text{ s}$$

$$\Rightarrow \tau = \frac{-600}{\ln(\frac{1}{e})} \text{ s} \approx 1308.1154 \text{ s}$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}}$$

$$\therefore Q = \frac{\sqrt{km}}{c} = \frac{\omega_n}{m \cdot c}$$

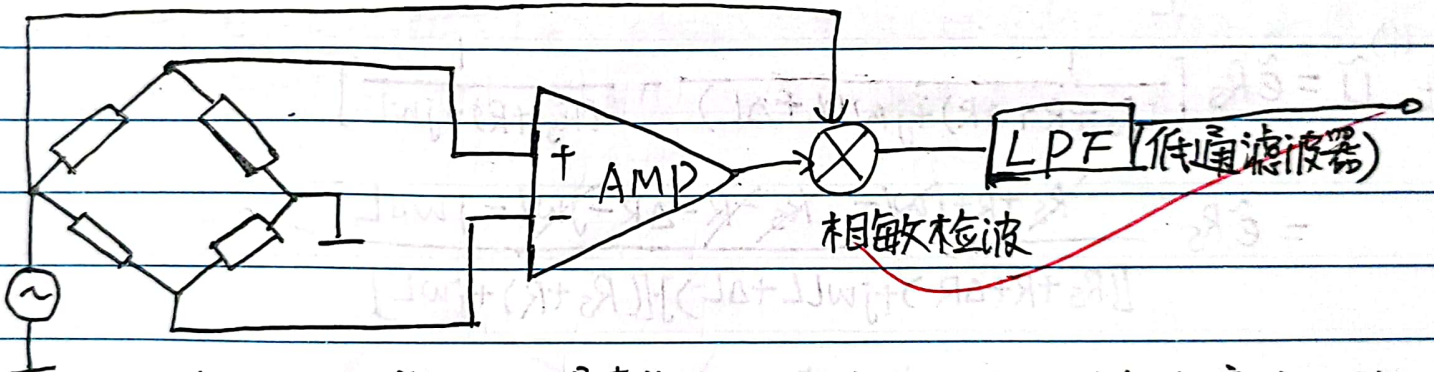
9.5

不同题型

## N0.4. 电抗式传感器

1. 感应同步器可以有两种工作方式。一种是激励定子用滑尺探测，一种是激励滑尺用定子探测。试研究滑尺激励的可能工作方式，要求能辨方向。

2. 给出应变桥的相敏检波电路框图；进一步对相敏检波的高抗干扰性能进行解释；使用相敏检波能消除掉热电偶引起的漂移吗？



设激励交流信号的角频率为  $\omega_0$ ，噪声为  $\omega_n$ ，经过相敏检波后有角频率为  $\omega_0 + \omega_n$  和  $|\omega_0 - \omega_n|$  的信号输出，使用截止频率  $\omega_c < |\omega_0 - \omega_n|$  的低通滤波器即可滤除

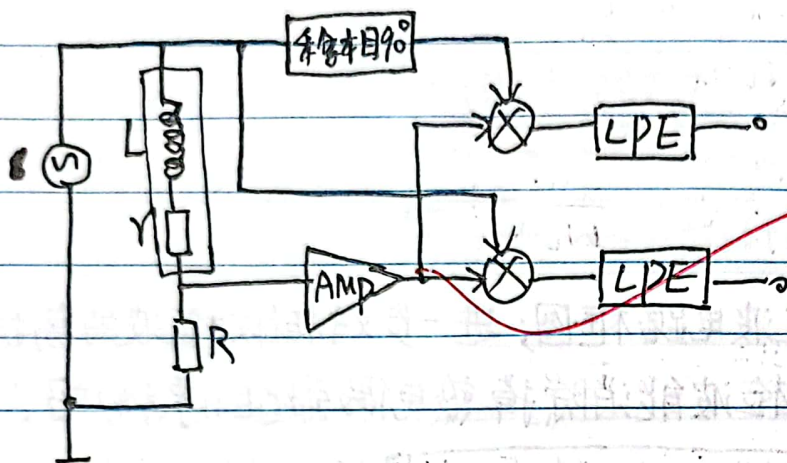
能

3. (1) 5KHZ

(2) 使用差动方式

(3) 当有噪声信号  $V_n \cos(\omega_n t)$  时, 其引起的输出包含两个步频率成分:  $\omega + \omega_n$ ,  $\omega - \omega_n$ , 使用低通滤波器可以滤掉  $\omega + \omega_n$  频率的信号, 从而提高信噪比

(4) 将



$$\begin{aligned}
 4. \text{ (1)} \quad \tilde{U} &= \tilde{e} R_s \left[ \frac{1}{(R_s + R + \Delta R) + j\omega(L + \Delta L)} - \frac{1}{(R_s + R) + j\omega L} \right] \\
 &= \tilde{e} R_s \frac{R_s + R + j\omega L - R_s - R - \Delta R - j\omega L - j\omega \Delta L}{[(R_s + R + \Delta R) + j\omega(L + \Delta L)] [(R_s + R) + j\omega L]} \\
 &= -\tilde{e} R_s \cdot \frac{j\omega \Delta L + \Delta R}{[(R_s + R + \Delta R) + j\omega(L + \Delta L)] [(R_s + R) + j\omega L]}
 \end{aligned}$$

$$\because R + R_s = \omega L, \quad \Delta R \ll \omega L, \quad \Delta L \ll L$$

$$\therefore \tilde{U} = -\tilde{e} R_s \cdot \frac{j\omega \Delta L + \Delta R}{(\omega L + \Delta R + j\omega L + j\omega \Delta L) \cdot (j\omega L + \omega L)}$$

$$= -\tilde{e} R_s \cdot \frac{j\omega \Delta L + \Delta R}{\omega L(j+1) [\omega L(j+1) + j\omega \Delta L + \Delta R]}$$

$$= -\tilde{e} R_s \cdot \frac{j\omega \Delta L + \Delta R}{(j\omega L + \omega L)^2}$$

$$= \frac{-\tilde{e} R_s}{\omega L^2} \cdot \frac{j\omega \Delta L + \Delta R}{2j}$$

$$= \frac{-\tilde{e} R_s}{2\omega L} \cdot \frac{j\omega \Delta L + \Delta R}{j\omega L}$$

$$= \frac{-\tilde{e} R_s}{2\omega L} \cdot \left( \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta R}{\omega L} j \right)$$

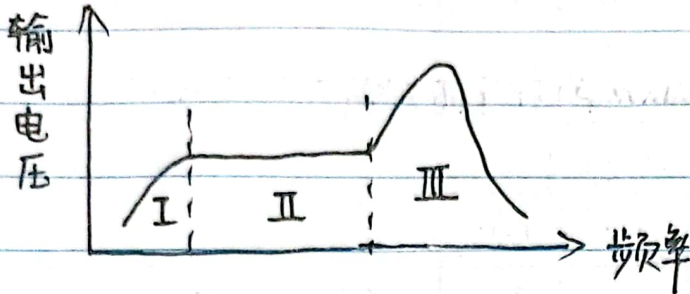
$$= \frac{\tilde{e} R_s}{2\omega L} \left( -\frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta R}{R_s + R} j \right)$$

(2) 将待解调信号(含电感分量)作为输入信号接入相敏检波电路中, 选择合适的低通滤波器, 经过低通滤波器后, 信号输出信号就是解调后的电感分量信号。



1. 给出一般压电传感器的频率响应曲线, 并解释各段形成的原因。

为何一般不用压电传感器做电子称的敏感元件?



I: 由于压电材料的漏电阻引起的。

II: 压电材料正常工作区间

III: 由传感器机械结构的共振引起的。

因为压电传感器适用于测高频变化的量(频率低时, 外力引起的积聚在极板上的电荷会因压电材料的漏电阻泄掉)。

2. 给出右图电荷放大器电路的传递函数

$$H(s) = \frac{U_o(s)}{F(s)} \quad (\text{假设运放理想 } A = \infty, Q = kF)$$

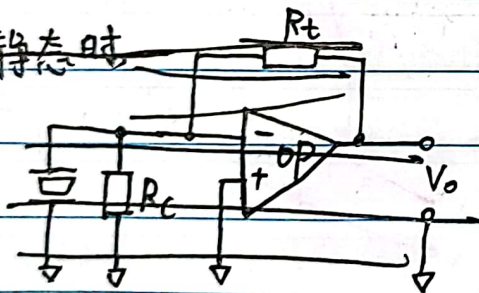
说明  $R_t$  的值如何选择。

解:  $U_o = -\frac{q(t)}{C_f}$

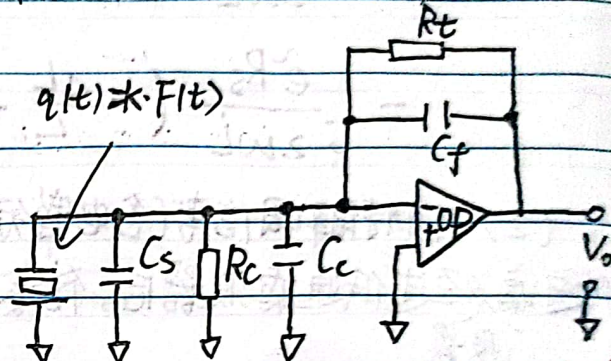
$$\because A = \infty \quad \therefore U_o = -\frac{Q}{C_f} \quad U_o(t) = -\frac{q(t)}{C_f}$$

$$\therefore H(s) = \frac{U_o(s)}{F(s)} = -\frac{q(s)}{C_f} \cdot \frac{1}{F(s)} = -\frac{k}{C_f}$$

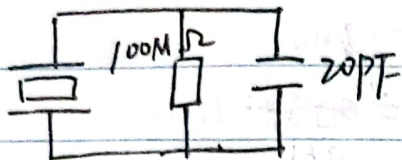
在静态时



$R_t$  选择足够多大, 越大越好。



3. 解: 石英晶体~~的~~电容  $C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d} = \frac{8.85 \times 10^{-12} \times 5 \times 10^{-4}}{10^{-3}} \text{ F}$   
 $= 4.425 \times 10^{-12} \text{ F} = 4.425 \text{ pF}$



面积为  $1 \text{ cm}^2$ , 厚为  $1 \text{ mm}$  的石英两对边之间的电阻

~~$R_c = \frac{1}{10} \times 10^{12} \Omega = 10$~~

$R_c = \frac{1}{10} \times 100 \text{ T} \Omega = 10^3 \Omega$

$\therefore$  总电阻  $R = R_c // 100 \text{ M} \Omega = 10^3 \Omega // 10^8 \Omega \approx 10^3 \Omega$

总电容  $C = 4.425 \text{ pF} // 20 \text{ pF} = 24.425 \text{ pF}$

$\therefore F = 0.01 \sin(1000t) \text{ N}$ . 电荷灵敏度  $k = 2 \text{ pC/N}$ .

$\therefore Q = k \cdot F = 0.02 \sin(1000t) \text{ pC}$

~~无负载时, 输出电压幅值  $V_m = \frac{Q_m}{C} = \frac{0.02 \text{ pC}}{24.425 \text{ pF}}$~~

相对幅频特性  $A(\omega) = \frac{\omega C}{\sqrt{1 + (\omega C)^2}} = \frac{1000 \times 10^8 \times 24.425 \times 10^{-12}}{\sqrt{1 + (1000 \times 10^8 \times 24.425 \times 10^{-12})^2}}$

$\therefore V_m = A(\omega) \cdot \frac{Q_m}{C} = 0.9254 \times \frac{0.02 \text{ pC}}{24.425 \text{ pF}} \approx 0.758 \text{ mV}$

$\therefore$  电极之间形成的峰峰值  $V_{pp} = 2V_m = 2 \times 0.758 \text{ mV} = 1.516 \text{ mV}$

$\therefore \sigma = E \cdot \epsilon \quad \therefore \epsilon_m = \frac{\sigma_m}{E} = \frac{F_m}{S \cdot E} = \frac{0.01}{10^{-4} \times 9 \times 10^{10}} \approx 1.11 \times 10^{-9}$

$\therefore \epsilon_m = \frac{\Delta d_m}{d}$

$\therefore \Delta d_m = \epsilon_m \cdot d = 1.11 \times 10^{-9} \times 1 \text{ mm} = 1.11 \times 10^{-9} \text{ mm}$

材料最大变形  $\Delta d = 2\Delta d_m$

$= 2.22 \times 10^{-9} \text{ mm}$

1.5

Nov. 11 噪声

1. 噪声峰峰值约为  $0.01 \times 10^4 \mu V = 0.01 \mu V$

$\therefore$  噪声有效值  $V_{rms} = \frac{V_{pp}}{6.6} = \frac{0.01 \mu V}{6.6}$

$\therefore$  传感器分辨率峰峰值为  $0.01 \mu V \times 1000 nm/\mu V = 4 nm$

分辨率有效值为  $\frac{0.01 \mu V}{6.6} \times 1000 nm/\mu V \approx 0.61 nm$

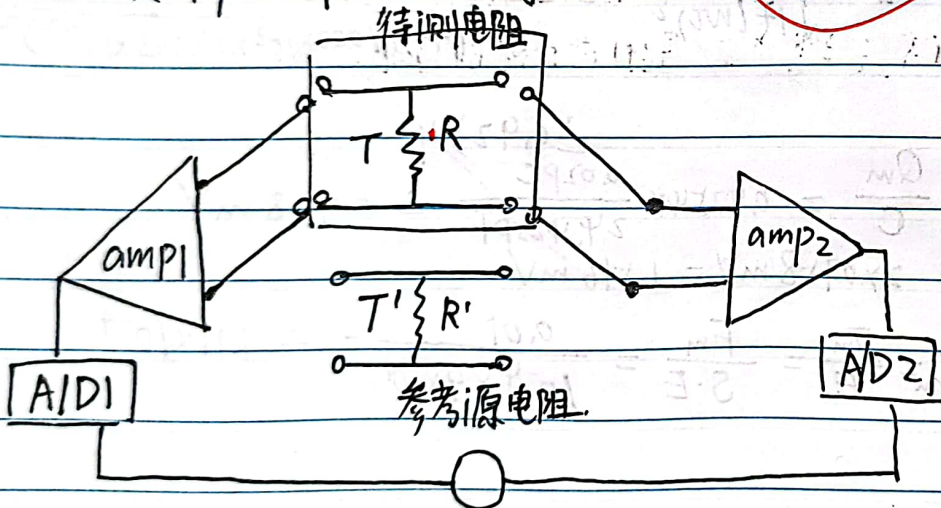
直. 交流特性

2. 一个传感器在 1kHz 到 100kHz 处噪声频谱密度为  $0.52 nm/\sqrt{Hz}$ , 问若使用 90kHz 到 100kHz 一段频率, 其分辨率可以达到多少?

$0.52 nm/\sqrt{Hz} \times \sqrt{(100-90) \times 10^3 Hz} = 52 nm.$

3. 根据电阻的热噪声大小, 可以计算出其所处的环境温度, 也就是说可以做温度计。原理性构思基于此的温度计。

电阻热噪声:  $\overline{e_T^2} = 4kTR\Delta f$



设待测电阻热噪声产生的电压值为  $e_T^2$ , 参考源电阻产生热噪声电压值为  $e_{T'}$

则  $T = \frac{e_T^2}{e_{T'}^2} \cdot \frac{R'}{R} \cdot T'$

$e_{T'}$

4. 使用麦克风阵列既可以提高信噪比，也可以对声音进行定位，试说明原理及有关限制条件。(注：百度<揭秘科大讯飞麦克风阵列技术>)

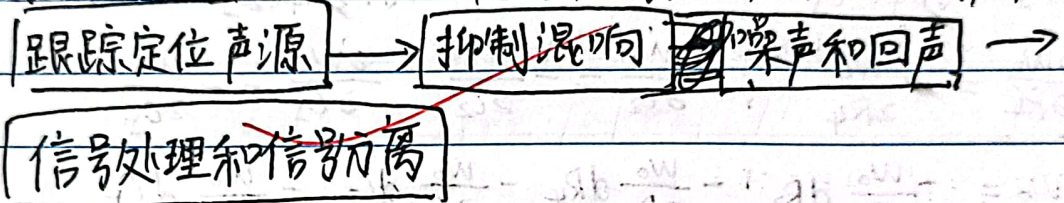
原理:  $\frac{nV}{\sqrt{n}V_{ns}} = \sqrt{n} \frac{V}{V_{ns}}$

~~N个性能一致的传感器可以提高信噪比  $\sqrt{n}$  倍。~~

原理: 通过模拟人耳的功能, 借助若干个麦克风阵元组成的阵列采集声纹信号

通过计算声音到达不同位置的时间差、幅度差或相位差用以判断声源的方向。

限制条件:



限制条件: 过大的噪声, 回声混响

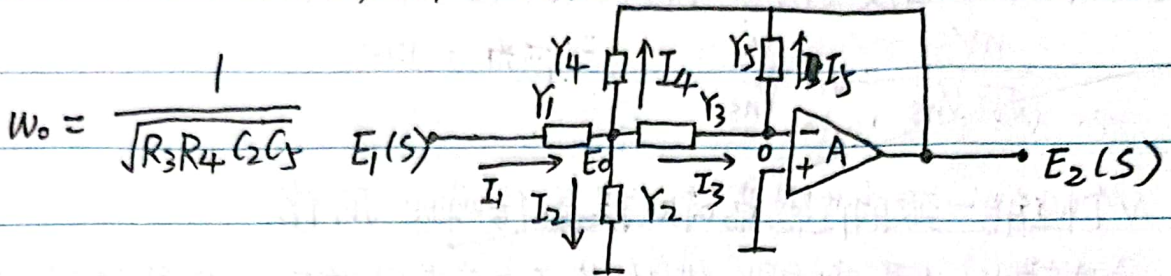
噪声与目标语音信号可能具有相同的频谱特性

语言传播速度会随温度变化而轻微变化。

14

### 作业13 信号滤波

1. 多路负反馈有源低通滤波器的截止频率可以并行计算。若  $R_3, R_4, C_2, C_5$  精度是  $\pm 1\%$ ，估计截止频率有可能的波动范围。



$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_3 R_4 C_2 C_5}}$$

解:  $\frac{\partial \omega_0}{\partial R_3} = \frac{1}{\sqrt{R_4 C_2 C_5}} \times (-\frac{1}{2}) R_3^{-\frac{3}{2}} = -\frac{1}{2} \times \frac{1}{\sqrt{R_3 R_4 C_2 C_5}} \times \frac{1}{R_3} = -\frac{\omega_0}{2R_3}$

$$\frac{\partial \omega_0}{\partial R_4} = -\frac{\omega_0}{2R_4}, \quad \frac{\partial \omega_0}{\partial C_2} = -\frac{\omega_0}{2C_2}, \quad \frac{\partial \omega_0}{\partial C_5} = -\frac{\omega_0}{2C_5}$$

$$\therefore d\omega_0 = -\frac{\omega_0}{2R_3} dR_3 - \frac{\omega_0}{2R_4} dR_4 - \frac{\omega_0}{2C_2} dC_2 - \frac{\omega_0}{2C_5} dC_5$$

$$\therefore \frac{d\omega_0}{\omega_0} = -\frac{dR_3}{2R_3} - \frac{dR_4}{2R_4} - \frac{dC_2}{2C_2} - \frac{dC_5}{2C_5}$$

$\therefore$  截止频率有可能的波动范围是  $\frac{1}{2} \times 4 \times (\pm 1\%) = \pm 2\%$

$\pm 2\%$

2. 若使用3个衔接的滤波器，对1kHz到8kHz的信号进行分析，问：

(1) 若使用等带宽和恒带宽比滤波器，它们各应该如何分配滤波器的截止频率？

(2) 若一正弦信号正好落在上、下两个带通滤波器的交叉截止频率点上，信号如何通过滤波器？（一个正弦信号被分解到两个滤波器，其幅值要满足输入与输出相等，功率要满足输入与输出相等两个条件）

解: (1) ① 等带宽滤波器

∵ 总带宽  $8\text{kHz} - 1\text{kHz} = 7\text{kHz}$ ,

∴ 每个滤波器的上下截止频率之差应为  $\frac{7}{3}\text{kHz}$

分配: 滤波器1:  $1\text{kHz} \sim \frac{10}{3}\text{kHz}$

滤波器2:  $\frac{10}{3}\text{kHz} \sim \frac{17}{3}\text{kHz}$

滤波器3:  $\frac{17}{3}\text{kHz} \sim 8\text{kHz}$ .

② 等带宽比滤波器:

由等比数列知识分配: 滤波器1:  $1\text{kHz} \sim 2\text{kHz}$

滤波器2:  $2\text{kHz} \sim 4\text{kHz}$

滤波器3:  $4\text{kHz} \sim 8\text{kHz}$

(2) 设该正弦信号为  $y = A \sin(\omega t + \varphi)$

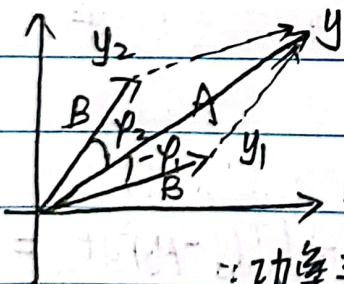
前一个滤波器对它进行滤波得到的结果为  $y_1 = B \sin(\omega t + \varphi + \varphi_1)$

后一个滤波器对它进行滤波得到的结果为  $y_2 = B \sin(\omega t + \varphi + \varphi_2)$  ( $\varphi_2 > \varphi_1$ )

由题意:  $y_{\text{rms}} = \frac{A}{\sqrt{2}}$   $y_{1\text{rms}} = \frac{B}{\sqrt{2}}$   $y_{2\text{rms}} = \frac{B}{\sqrt{2}}$

$y_1 + y_2$

易知:



~~$\omega t + \varphi = \frac{1}{2}[(\omega t + \varphi + \varphi_1) + (\omega t + \varphi + \varphi_2)]$~~

$\varphi_2 = -\varphi_1 \Rightarrow \varphi_1 + \varphi_2 = 0$

$\therefore y_{\text{rms}} = \frac{A}{\sqrt{2}}, y_{1\text{rms}} = y_{2\text{rms}} = \frac{B}{\sqrt{2}}$

$\therefore$  功率输入 = 输出  $\therefore 2\left(\frac{B}{\sqrt{2}}\right)^2 = \left(\frac{A}{\sqrt{2}}\right)^2 \Rightarrow B = \frac{1}{\sqrt{2}}A$

$\therefore A = \sqrt{2}B \therefore \varphi_2 = -\varphi_1 = \frac{\pi}{4}$

$\therefore \begin{cases} y_1 = \frac{A}{\sqrt{2}} \sin(\omega t + \varphi - \frac{\pi}{4}) \\ y_2 = \frac{A}{\sqrt{2}} \sin(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{4}) \end{cases}$  或  $\begin{cases} y_1 = \frac{A}{\sqrt{2}} \sin(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{4}) \\ y_2 = \frac{A}{\sqrt{2}} \sin(\omega t + \varphi - \frac{\pi}{4}) \end{cases}$

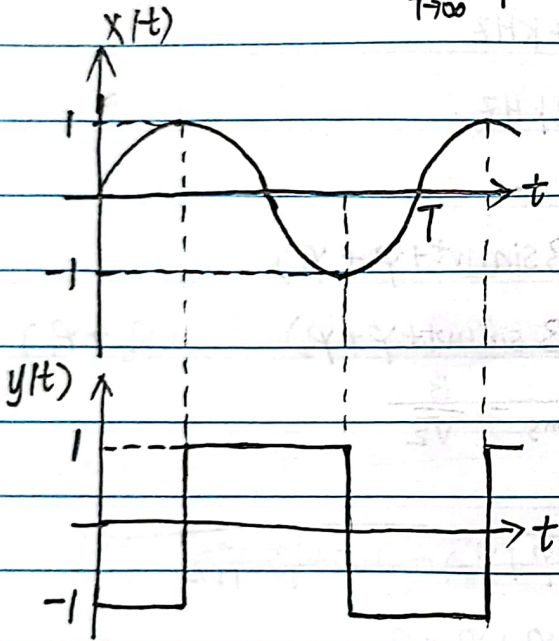
# 作业14 相关运算.

1. 计算正弦函数与同周期的方波函数之间的互相关函数及系数, 举出若干使用相关进行检测的典型例子。

解: 设  $x(t) = x_0 \sin(\omega t + \theta)$   $y(t) = \begin{cases} y_0 \\ -y_0 \end{cases}$   
 $T = \frac{2\pi}{\omega}$

~~设  $x(t) = x_0 \sin(\omega t + \theta)$   $y(t) = \begin{cases} y_0, & 0 \leq t \leq \frac{\pi}{\omega} \\ -y_0, & \frac{\pi}{\omega} < t \leq \frac{2\pi}{\omega} \end{cases}$~~

互相关函数  $R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) y(t+\tau) dt$   
 ~~$= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \left[ \int_0^{\frac{T}{2}} x_0 \sin(\omega t + \theta) y_0 \int_{\frac{T}{2}}^T x_0 \sin(\omega t + \theta) dt \right]$~~



$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) y(t+\tau) dt$$

$$= \frac{1}{T} \int_0^T x(t-\tau) y(t) dt$$

$$= \frac{1}{T} \left[ \int_0^{\frac{T}{4}} (-1) \sin(\omega t - \omega\tau) dt + \int_{\frac{T}{4}}^{\frac{3T}{4}} \sin(\omega t - \omega\tau) dt + \int_{\frac{3T}{4}}^T (-1) \sin(\omega t - \omega\tau) dt \right]$$

$$= \frac{2}{\pi} \sin(\omega\tau)$$

$\mu_x = E(x) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \sin \omega t dt = 0, \mu_y = 0.$

$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (x - \mu_x)^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \sin^2 \omega t dt} = \frac{\sqrt{2}}{2}, \sigma_y = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (y - \mu_y)^2 dt} = 1$

$E\{[x(t) - \mu_x][y(t+\tau) - \mu_y]\} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) y(t+\tau) dt = \frac{2}{\pi} \sin(\omega\tau)$

$\therefore \rho_{xy}(\tau) = \frac{\frac{2}{\pi} \sin(\omega\tau)}{\frac{\sqrt{2}}{2} \times 1} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \sin(\omega\tau)$

例子: 光电鼠标

基于互相关分析的约瑟夫逊  
噪声测温法.

2. 通过相关原理可以制作光电鼠标, 讨论其相关的维数, 以及其对工作表面的要求。

维数: 3.

工作表面要求: 表面要粗糙, 颜色尽量选比较深的纯色, 不能在透明的表面上使用。

3. 如何利用噪声进行温度测量? (提示: 可以利用电阻的热噪声与绝对温度有关的原理; 但由于热噪声很小, 需要利用相关原理消除放大器引入的噪声等技术)

解: 如果两个随机过程的发生互相独立(如信号和随机噪声), 则互相关函数将是一个常数, 它等于两个随机函数的平均值的积。若其中一个平均值为0, 则互相关函数处处为0。

原理: 先对约翰逊噪声电压信号( $\sqrt{v} = 4k_B T R \Delta f$ )作傅里叶变换计算得到该信号的功率谱密度函数(PSD), 再对其进行双通道信号采集和放大后用互相关函数处理, 得到对应的互功率谱密度函数(CPSD), 最后对互功率谱密度函数作傅里叶反变换就可得到互相关函数。在这样一个变换与计算过程中温度测量电阻被平行地连接到两个独立的高输入阻抗放大器上。因为每个都是由有互相关联的噪声电压和不相关联的噪声电压的总和组成的, 所以这两个放大器的输出部分有互相关关系。如果连接到相同电阻上的两个约翰逊噪声放大器信号组合在一起而且时间平均, 噪声的有相互关系的部分将会保持, 但是不相关的放大器噪声将会接近0。



## 作业 15. 信号通讯

1. PCB的icp振动传感器有些也采用两线供电和传输信号, 比较它与4-20mA的异同。

相同点: 采用两线供电、传输信号

不同点: 4-20mA用电流传输信号, 具有较高的抗干扰特性

icp用电压传输信号, 抗干扰能力不及4-20mA.

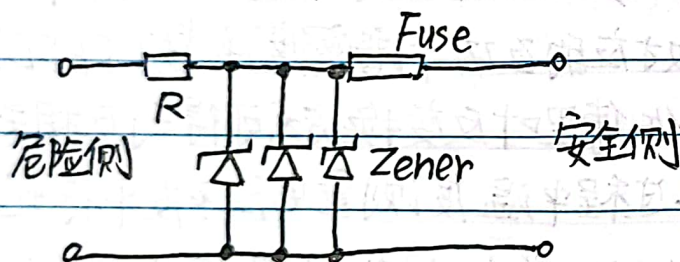
2. 在易燃危险场所使用传感器需要注意什么?

画出典型隔离栅原理图并解释之。

注意: 1. 控制易爆气体

2. 控制爆炸范围

3. 控制引爆源

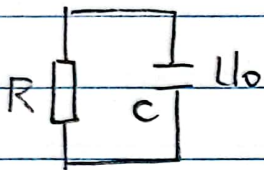


当回路电压接近安全限压值时, 齐纳二极管导通放电, 稳定电压使其处于安全值之下, 保险丝用于因二极管长时间大电流烧坏导致限压失败, 过大电流时, 保险丝熔断而保护电路, 用三个二极管是保证至少有一个正常工作。

3. 使用一般的数字万用表、示波器测一个  $1\text{nF}$  的电容上的电压, 可以看到电压不断向零点漂移。估计使用典型数字万用表 ( $10\text{M}\Omega$ ) 测量电容上电压时示值的漂移速度; 如果使用 INA116 做前级隔离后测量, 这个漂移速度会变成多少?

解: 设  $1\text{nF}$  的电容上的电压为  $U_0$  (初始)。

$$\text{则 } U = U_0 e^{-\frac{t}{RC}} = U_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$



$$\tau = RC = 10 \times 10^6 \times 10^{-9} \text{ s} = 10^{-2} \text{ s}$$

$$\frac{dU}{dt} = -\frac{U_0}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \left| \frac{dU}{dt} \right| = \frac{U_0}{RC} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$\therefore$  使用典型数字万用表测量电容上电压的漂移速度为  $\frac{U_0}{10^2 \text{ s}} e^{-\frac{t}{10^2 \text{ s}}}$

$$\frac{U_0}{10^2 \text{ s}} e^{-\frac{t}{10^2 \text{ s}}}$$

$$\left( \tau = 10^2 \text{ s} \right)$$

传感器及测试技术 ②



中国科学技术大学

练习簿

LIANXIBU LIANXIBU

申向阳

JL22050004

### No.3 电阻式传感器信号调节

1. 用 Pt100 测温, 使用两线传输, 距离 100 米, 导线为 20AWG, 分析在 20°C 附近由此可能产生多少度的测量误差。 (20AWG, 33.2 Ω/km)

解: 铂的温度系数为 3850 ppm/K

· Pt100 电阻温度传感器的电阻变化率为 0.385 Ω/°C

假设温度变化 ΔT 摄氏度, 则导线电阻的变化为

$$\Delta R = 33.2 \times 10^{-3} \times 100 \Omega \cdot \Delta T = 3.32 \Omega \cdot \Delta T$$

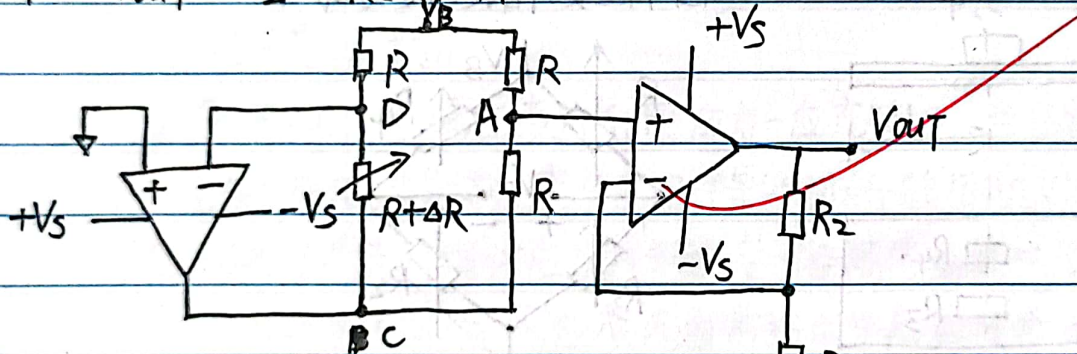
两线 200 米

∴ 误差产生的原因是导线电阻值的变化

∴ 温度测量误差近似等于导线电阻变化引起的误差

∴ 测量误差 ≈ ΔR = 3.32 Ω · ΔT

2. 证明:  $V_{OUT} = \frac{V_B}{2} \left[ \frac{\Delta R}{R} \right] \left[ 1 + \frac{R_2}{R_1} \right]$



证:  $V_D = 0 \quad \therefore \frac{V_B}{R} = \frac{-V_C}{R + \Delta R}$

$$\therefore V_C = -\frac{R + \Delta R}{R} V_B$$

$$\therefore V_A = \frac{1}{2}(V_B + V_C) = \frac{1}{2} \left( \frac{R - R - \Delta R}{R} \right) V_B = -\frac{V_B}{2} \left( \frac{\Delta R}{R} \right)$$

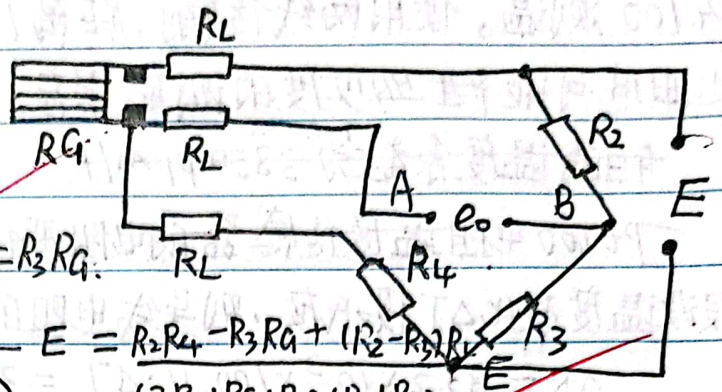
$$\therefore \frac{V_{OUT}}{R_1 + R_2} = \frac{V_A}{R_1}$$

$$\therefore V_{OUT} = \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) V_A = -\frac{V_B}{2} \left( \frac{\Delta R}{R} \right) \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

(题目是不是少了一个“-”)

3. 右图是使用三根引线引入应变片，从而减小引线电阻的影响。

分析原理



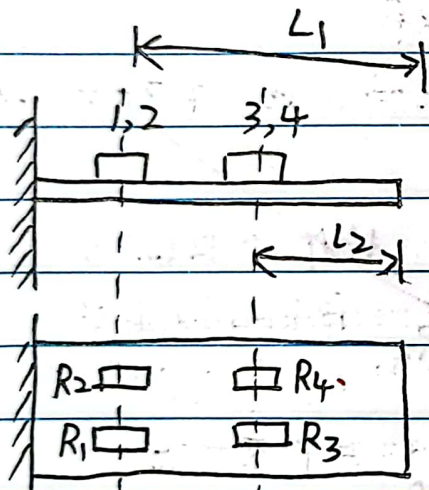
解：在制作时不考虑引线电阻时， $R_2 R_4 = R_3 R_1$ 。

使用三引线时，
$$e_0 = \frac{\frac{R_2 + R_4}{R_2 + R_4} - \frac{R_3}{R_2}}{\left(1 + \frac{R_2 + R_4}{R_2 + R_4}\right) \left(1 + \frac{R_3}{R_2}\right)}$$

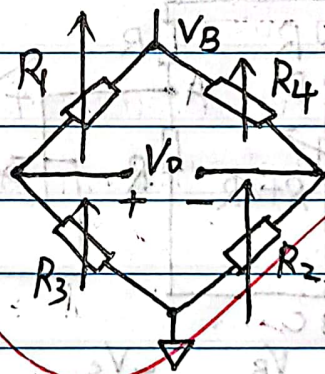
$$E = \frac{R_2 R_4 - R_3 R_1 + (R_2 - R_3) R_1}{(2R_2 + R_4)(R_2 + R_1)}$$

当电桥平衡时， $R_2$ 与 $R_3$ 接近时， $(R_2 - R_3) R_1 \approx 0$  从而减小引线电阻的影响。

4. 11)



四个应变片的连接方式：



重物在中心时的全桥的输出与重量的关系：

$$\sigma = \frac{6F \cdot (\frac{1}{2})}{bh^2} = \frac{3FL}{bh^2}$$

$$12) \Delta R_1 = S L_1 \Delta F \quad \Delta R_2 = S L_1 \Delta F \quad \Delta R_3 = S L_2 \Delta F \quad \Delta R_4 = S L_2 \Delta F$$

$$\Delta U = V_B \left( \frac{R_3 + S L_2 \Delta F}{R_1 + S L_1 \Delta F + R_3 + S L_2 \Delta F} - \frac{R_2 + S L_1 \Delta F}{R_4 + S L_2 \Delta F + R_2 + S L_1 \Delta F} \right)$$

取  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$

$$\Delta U = V_B \cdot \frac{-S \Delta F (l_1 - l_2)}{2R + S l_1 \Delta F + S l_2 \Delta F} \approx V_B \left( \frac{-S \Delta F (l_1 - l_2)}{2R} \right)$$

电桥的输出基本与重物的位置无关。

1. 应变片有哪两类？有哪些共同点和不同点？

金属应变片和半导体应变片

共同点：① 可测量物体应变，将应变转化为电信号。

不同点：② ① 材料不同，金属应变片通常由金属材料制成，而半导体应变片则采用半导体材料

② 原理不同，金属应变片利用应力-应变特性，当金属应变时，其电阻值会发生变化；半导体应变片利用半导体材料的压阻效应实现应变测量。

③ 灵敏度不同，半导体应变片灵敏度一般高于金属应变片

④ 适用范围不同，金属应变片通常适用于高应变和高温环境，而半导体应变片则适用于小应变和常温环境。

2. 应变片受温度的影响较大，为了使测量数据更真实，在实际应用中应该采取哪些措施？

① 使用温度补偿电路或算法，根据应变片与温度之间的已知关系进行修正

② 在应变片周围设置隔热层或隔热材料

- ③ 改善应变片的散热条件,使自热易于散发
- ④ 采取间歇测量(激励)方式
- ⑤ 优化设计测量电路。在保证足够的信号灵敏度和信噪比的条件下,尽可能地降低应变片的激励电流

3. 有一钢板,原长  $L=1\text{m}$ ,截面为  $1\text{cm} \times 1\text{cm}$ ,钢板的弹性模量  $E=2.1 \times 10^6 \text{kg/cm}^2$  ( $1\text{kg/cm}^2 = 98.07 \times 10^5 \text{Pa}$ ) 在力  $F$  的作用下拉伸,使用箔式应变片 ( $R=120\Omega$ , 灵敏度  $S=2$ ), 测出应变片的电阻变化量为  $0.3\Omega$ , 求钢板的拉伸量  $\Delta L$  和力  $F$  的大小。

解:  $E = 2.1 \times 10^6 \times 98.07 \times 10^5 \text{Pa}$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad \sigma = E \cdot \varepsilon \Rightarrow \frac{F}{S} = E \cdot \frac{\Delta L}{L}$$

灵敏度:  $S = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} \Rightarrow \Delta L = \frac{0.3}{240} \text{m} = 1.25 \times 10^{-3} \text{m}$

$$\therefore F = E \cdot S \cdot \frac{\Delta L}{L}$$

$$= 2.1 \times 10^6 \times 98.07 \times 10^5 \times 1 \times 10^{-4} \times 1.25 \times 10^{-3} \text{N}$$

$$= ~~10297350 \text{N}~~ 25743375 \text{N}$$

$$= ~~1.03 \times 10^7 \text{N}~~ 2.57 \times 10^6 \text{N}$$

4. 铂电阻是目前应用较多的一种测温元件,但它存在自热升温的现象,采取哪些措施可以减小自热升温的影响、提高测量精度?

① 改变铂电阻的测量条件,铂电阻在设计上采取好的封装开式,使其自热易于散发。

② 优化设计测量电路。在保证足够的信号灵敏度和信噪比的条件下,

尽可能地降低铂电阻测温传感器的激励电流。

③ 采取间歇测量(激励)方式。

No.5

1. 精密仪器中的电路为避免热电偶效应带来的影响,可采取哪些措施?

① 由于温度的变化一般是缓慢的,因此可以用电容把这一直流分量给去除。

这里的前提是有用信号必须是快变的。

② 当有用信号也是慢变的时候,可以使用斩波的方法把它加载到高频分量上,从而与温度的变化区分开。

③ 在设计电路时,还可通过减小温度差、恒温、使用热电势小的导体等等减小热电势的影响。

2. 使用时补偿导线处于冷端,冷端温度不为0,因此需要将冷端温度测出来进行补偿。LM35CZ测量冷端温度,其电压通过一跟随器加入输出回路,因为 $R_x$ 右端为零电位,故通过温度转化过来的电流信号反映在 $R_x$ 上是电压信号, $R_x$ 上电压为补偿电压,热电偶输出电压减去该值即可。

$$10\text{mV} \cdot \frac{R_x}{1\text{k}\Omega + R_x} = 0.05\text{mV}$$

(1°C时, J型热电偶.  
输出0.05mV)

$$\Rightarrow R_x = 5.025\text{k}\Omega$$

$$R_x = \frac{0.005}{0.995} \text{k}\Omega = 5.025\text{ }\Omega$$



3. 解:  $1^{\circ}\text{C}$  变化带来的结果为  $39.4\mu\text{V}$ .

$$\therefore 10\text{V} \cdot \frac{100\Omega(1+3.85 \times 10^{-3})}{R_2 + 100\Omega(1+3.85 \times 10^{-3})} - 10\text{V} \cdot \frac{100\Omega}{100\Omega + R_1} = 39.4\mu\text{V}$$

$$10\text{V} \cdot \frac{100\Omega(1+3.85 \times 10^{-3})}{R_2 + 100\Omega} - 10\text{V} \cdot \frac{100\Omega}{100\Omega + R_1} \approx 39.4\mu\text{V}$$

$$10\text{V} \cdot \frac{100\Omega \times 3.85 \times 10^{-3}}{100\Omega + R_x} \approx 39.4\mu\text{V}$$

$$\therefore R_x = 97.6\text{k}\Omega$$

$$R_1 = R_2 = R_x = 97.6\text{k}\Omega$$

12

No. 6.

1. 永磁体旁放一个 Hall 元件, 转盘转动产生磁场变化, 从而霍尔电压改变, 找到  $U_H$  与  $\omega$  之间关系即可通过  $U_H$  变化推出  $\omega$  变化; 另一方面, ~~从  $U_H$  变化推出  $\omega$  与  $\omega$  找出转动方向与  $U_H$  的关系即可反推出转动方向~~

2. 工作原理: 当 Hall 元件检测到磁场的时候, 输出一个电压, 从而驱动副绕组产生一个相反方向的磁场。如果放大器的增益  $K$  为无穷大, 穿过 Hall 元件的磁场几乎为零。

$$\cancel{I_0} \quad \cancel{I_2} \quad \cancel{I_1}$$

$$I_1 = n I_2 = n \frac{V}{R_L}$$

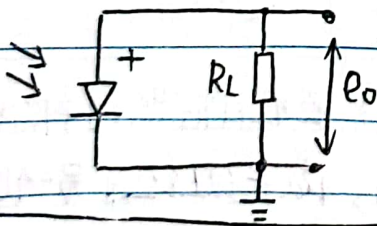
## 优点及来源:

- ① 线性好 — 与Hall元件本身的非线性无关, 只工作在零点
- ② 动态特性好 —  $i_2$  通过磁环没有阻碍
- ③ 对测量对象无影响 — 磁环上没有磁场.
- ④ 测量范围宽 — 不受Hall本身工作区间的限制.
- ⑤ 精度高 — 其他性能保证.
- ⑥ 分辨率高 — Hall的激励电流上的噪声对输出影响小.  
( $\because U_H = R_H B I, B=0$ ).
- ⑦ 稳定性高 — 只受零点性能的影响.

## NO. 10 光电元件

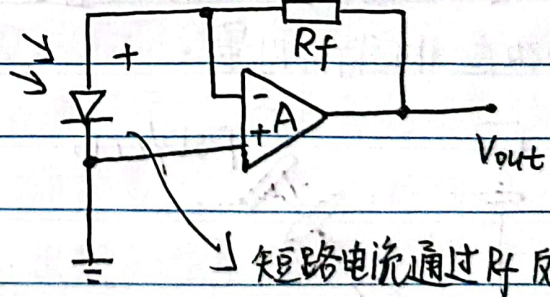
### 1. 说明光电二极管三种典型的使用方法

#### ① 光电应用



电压输出  
(非线性大).

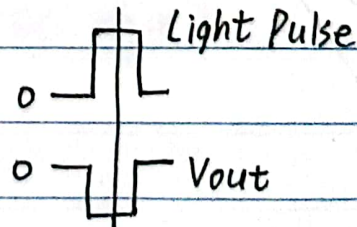
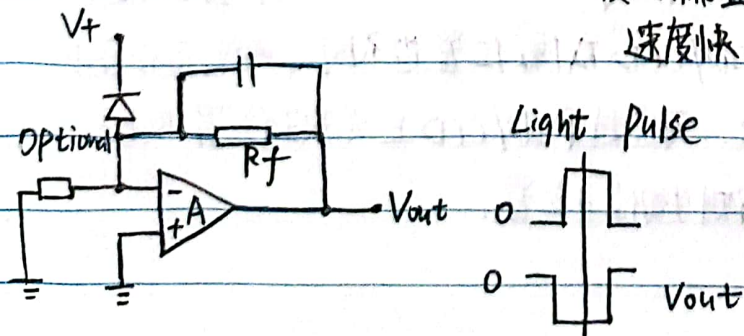
#### ② 零偏应用:



短路电流通过  $R_f$  反映上  $V_{out}$  上.

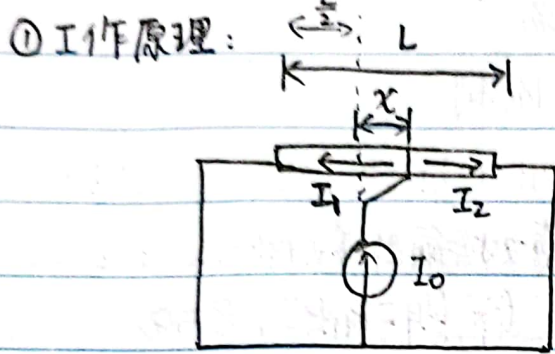
#### ③ 光导应用

反向偏置  
速度快.



电流输出  
线性很好

2. 解释横向效应PSD的工作原理；根据位置可以通过电流的比来计算，是否可以认为位置与光强无关？如何使用横向效应PSD进行位置的非接触测量？给出原理图并解释。



$$R_x = k \cdot x$$

$$\therefore \frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{\frac{L}{2} - x}{\frac{L}{2} + x}$$

$$\Rightarrow x = \frac{L}{2} \left( \frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1} \right)$$

② 当光强变化但位置不变时， $I_2 \rightarrow kI_2$ ， $I_1 \rightarrow kI_1$

$$\therefore x' = \frac{L}{2} \frac{k(I_2 - I_1)}{k(I_2 + I_1)} = \frac{L}{2} \left( \frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1} \right) = x$$

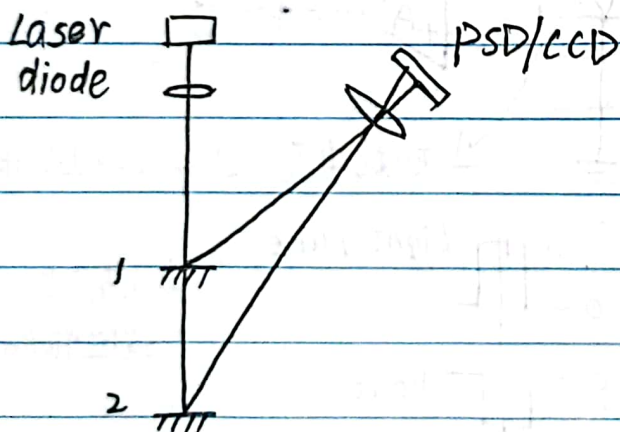
理论上，可以认为位置与光强无关。

但光强过小，信号会湮没于噪声中。

光强过大，电流过大，会烧坏元件。

综合考虑，~~光~~光强不宜过大/过小。

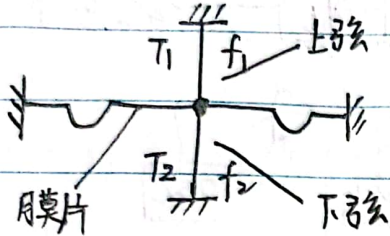
③ 横向效应非接触测量：



激光器发出的光经准直后照到被测物面上形成光斑，该光斑经过另一个透镜成像在 PSD/CCD 上，不同物体位置的光斑在 PSD/CCD 成像位置也不同，两者存在函数关系。可通过 PSD/CCD 上光斑位置反推被测物位置。

## 《谐振式传感器》

1. 分析差动式振弦传感器是如何提高输出的线性以及减轻温度的影响的。



由于振弦传感器所利用的是  $f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$  公式，通过作用于振动金属丝上的机械力来测量，而差动法则利用测量膜片两侧受到的压力差，即利用两个性能相同的传感器进行差动输出测量，一个感受正方向，一个负方向，若其静态特性为  $F_1 = a_0 + a_1 X + a_2 X^2 + \dots + a_n X^n$ ，则正向为左式，负向为  $F_2 = a_0 - a_1 X + a_2 X^2 - \dots$

则  $\Delta F = F_1 - F_2 = 2(a_1 X + a_3 X^3 + a_5 X^5 + \dots)$ ，从而清除偶次非线性误差，

将灵敏度与线性提高一倍。同时，由于温度影响主要存在于  $a_0$ ，

~~云质量流量计工作原理~~ 即零位输出影响，即温度引起传感器零点漂移，因此消除了减轻了温度影响。

2. 质量流量计工作原理：

让两个并排 U 型管下端弯曲部分微振动，从而带动直管部分振动，两根管同时分开并拢，即振动是同步的。这时如果有流体通过，管道会强迫着流体一起振动，而流体为了反抗这种运动，会在管道上施加一个反作用力，即科里奥利力，在科氏力的作用下，两根管子的振动不同步，出现相位差，而相位差与流体流速成正比。故通过检测两个振动的相位差就能反推出流速大小。

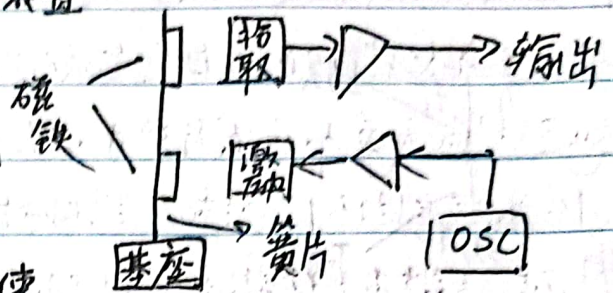
(见后面)

3. 右图中的悬臂梁、磁铁及线圈组成的装置

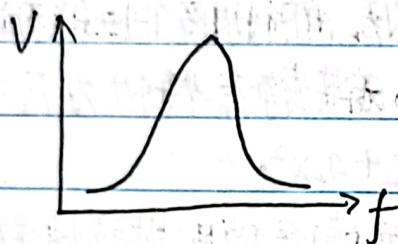
可以做带通滤波器用

(1) 在一个较宽的频率范围内, 定性画出  
该输出电压与频率的关系曲线

(2) 如何选取磁铁在簧片上的安装位置使  
得灵敏度最高?

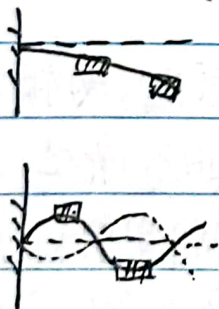


解: (1)



磁铁放置

(2) 对于簧片的振动, 有不同的模态, 不同模态对应位置不同,  
一般而言, 磁铁要放在对应模态下, 可以偏离平衡位置最大的  
地方, eg 在特定谐振频率下, 在振幅较大的位置贴磁铁。



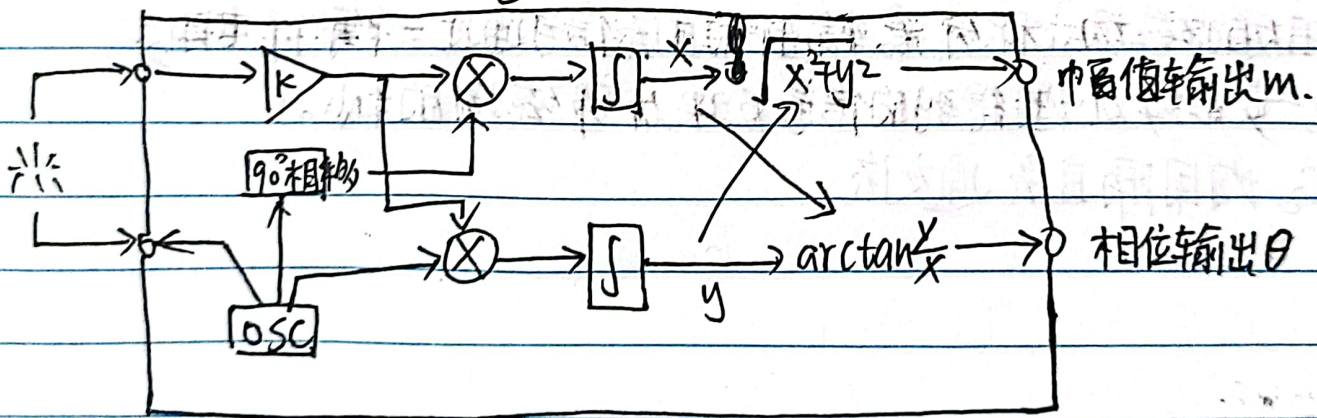
10.5

# 磁通子

## 2. 质量流量计工作原理:

(常见的质量流量计)是依靠U形导流管的科里奥利效应进行工作的,安装在U形管弯曲处的电磁装置以其固有频率进行振动。当液体流入管道时,由于管道的垂直运动使液体感受到的科里奥利力与液体离开管道时感受到的科里奥利力的作用方向相反,相反的速度产生相反的力。这就是说,流体进入管道时要阻碍向上(或向下)运动,并受到下推(反之上推)作用。当流体在被强迫向上推(或向下推)之后离开管道时,其阻碍作用削弱了流体的垂直运动而被向上推(反之,向下推)。结果形成了管道的扭转,扭转的幅度与液体的质量流速成正比。

如何在质量流量计中使用相敏检波对信号进行处理?如果激励信号幅值不稳定如何角解决?



$$x = m \cos \theta$$

$m, \theta$ 是与多种因素有关的量,当测量电路稳定时,

$$y = m \sin \theta$$

$m, \theta$ 与外部系统的状态变化有关。

将信号输入左侧即得相位差。

当管内无流体流过时,振幅稳定,当有流体流过时,阻尼增大,需提供更多的激励能量,使振幅保持不变。可以加一个负反馈电路来保证管的振幅保持不变。同时还应该保持激励信号与系统谐振频率一致。

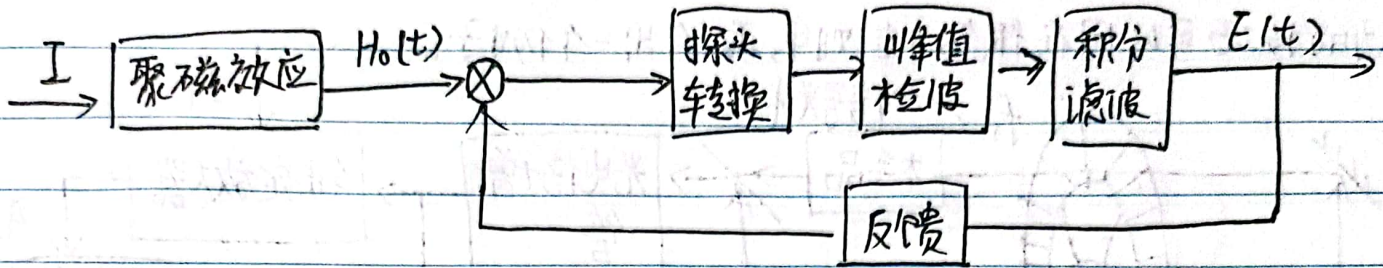
## No. 10 磁通门

### 1. 反馈式磁通门工作原理:

环形磁通门: 激励线圈均匀绕在母环形磁芯上, 探测线圈绕在磁芯的外部, 可探测磁场的方向为探测线圈的轴向, 在激励线圈中通以交流电, 在磁环里产生交流磁场, 磁场方向沿磁环的圆周方向, 当没有外部附加磁场时, 由于对称性, 穿过探测线圈轴向的两个磁感生磁场时刻保持大小相等, 方向相反, 此时探测线圈里的感应电流为零; 当在探测线圈轴向存在外部磁场时(假设该外部磁场的 $f$ 小于激励 $f$ 的 $\frac{1}{2}$ ), 探测线圈中便有感应电流输出, 且该感应电流的 $f$ 为激励 $f$ 的2倍; 振荡器产生的激励信号进行相敏检波(开关乘十低通滤波); 得到的直流信号再通过积分器, 积分器是一个无稳态误差环节, 并起到了滤除高频信号的作用; 积分器输出信号再通过电感 $L$ 进一步隔去交流信号, 得到的信号反馈到探测线圈中, 它使探测线圈产生一个与外部磁场大小相等, 方向相反的磁场; 积分器输出的直流信号通过一个采样电阻, 采样并进一步后续处理得到的信号反映外部磁场的大小。

$C_1, C_2$  均用隔直通交流。

## 2. fluxgate原理做电流传感器(反馈):



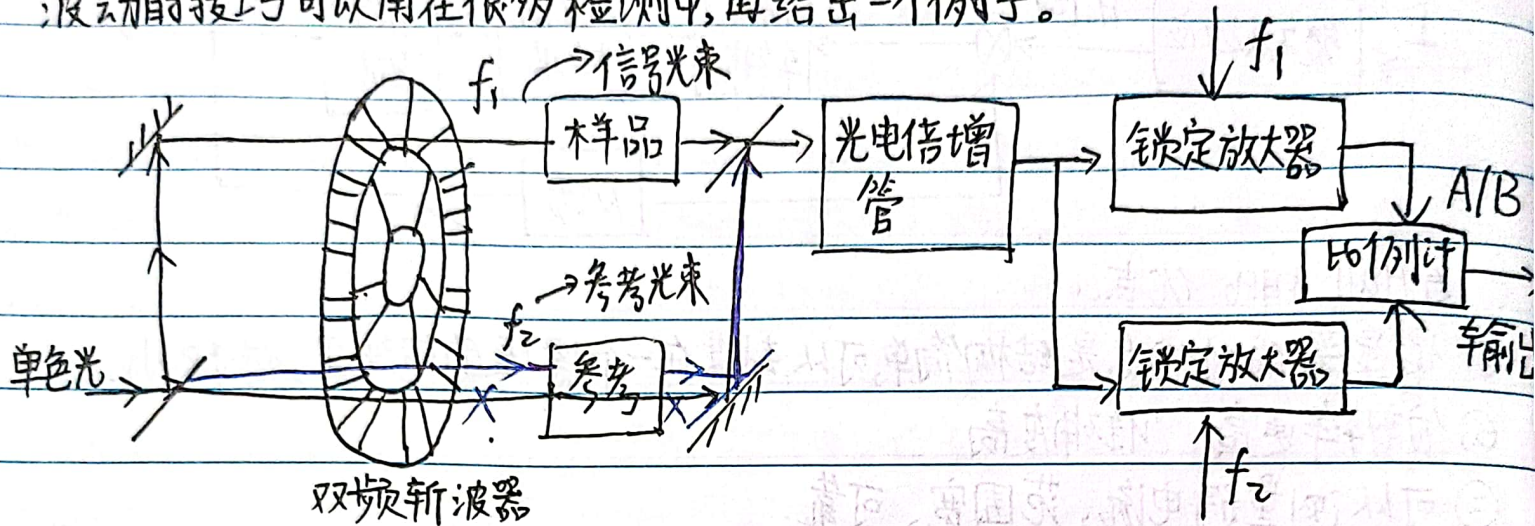
与Hall相比,优点:

- ① 最显著的一个优点是结构简单,可以封装在一个紧凑的包装里,体积小.
- ② 分辨率更高,准确度高.
- ③ 可以测量弱电流,范围宽,可靠.
- ④ 调整简单
- ⑤ 可以在低速系统中使用.
- ⑥ 造价低.



## No.16 调制与解调

1. 试述双频双光束检测系统的工作原理。它有哪些主要优点？这里消除光源波动的技巧可以用在很多检测中，再给出一个例子。



### 工作原理:

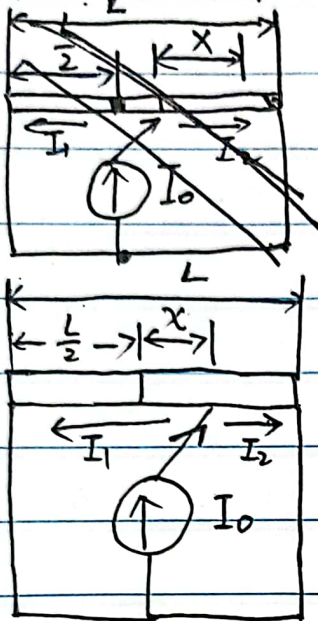
输入光被分光镜分成两束，其中一束光连续地通过样品通道，另一束光则连续地通过样品参考通道，为了识别和分离参考光束和信号光束，将它们用不同的频率调制，方法是利用有两组间距不同的小孔提供两种不同的频率，此即为双频斩光器。于是光电倍增管的输出含有两种信号，每种信号由各自的频率表征。这里用了两个锁定放大器，其中一个输入参考信号的频率 $f_2$ （与参考光束的频率相同），另一个输入信号光束频率 $f_1$ ，另一个输入参考光束 $f_2$ 频率。 $f_1$ 与 $f_2$ 没有相近的谐波关系，这样，两个锁定放大器分别测量样品光束分量和参考光束分量，并用一个比例计得到A/B输出。

优点：①消除光源自身波动对结果的影响，（抗干扰）

~~噪声~~

②应用双频斩光器，将低频信号 $\Rightarrow$ 高频信号，放大电路工作在高频频部分，噪声密度比低频部分小得多。 $\rightarrow$ （分辨率提高）

例子: PSD位置传感器中



$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{\frac{L}{2} - x}{\frac{L}{2} + x}$$

$$\Rightarrow x = \frac{L}{2} \left( \frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1} \right)$$

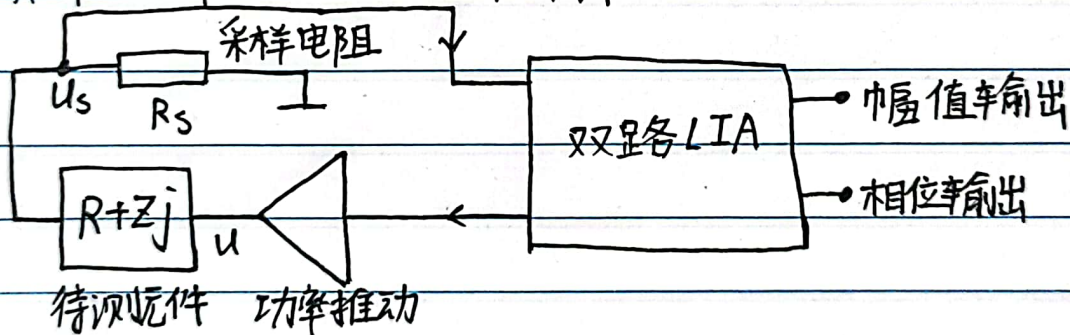
$$I_0 \Rightarrow I'_0 \quad \text{则 } I_2 \Rightarrow k I_2$$

$$I_1 \Rightarrow k I_1$$

$$\text{而 } x' = x$$

14

2. 如何使用锁定放大器测量两端网络 (R, L, C 组成, 如下图的  $R + Zj$ ) 的实部 R 和虚部 Z? 已知 U 和采样电阻  $R_s$  的值。



解:  $i_s = \frac{U}{Zj + R + R_s} \Rightarrow U_s = R_s \cdot i_s = \frac{U}{Zj + R + R_s} \cdot R_s = \frac{U \cdot R_s (R + R_s - Zj)}{(R + R_s)^2 + Z^2}$

$$\Rightarrow \begin{cases} (U_s)_{ReZ} = \frac{U \cdot R_s (R + R_s)}{(R + R_s)^2 + Z^2} \\ (U_s)_{ImZ} = \frac{U \cdot R_s Z}{(R + R_s)^2 + Z^2} \end{cases}$$

$$\frac{(U_s)_{ReZ}}{(U_s)_{ImZ}} = \frac{R + R_s}{Z} = m \Rightarrow (U_s)_{ReZ} = \frac{U \cdot R_s m Z}{(mZ)^2 + Z^2} \Rightarrow \begin{cases} Z = \frac{U}{(U_s)_{ReZ}} \cdot \frac{R_s}{m^2 + 1} \\ R = \frac{(U_s)_{ReZ}}{(U_s)_{ImZ}} Z - R_s \end{cases}$$