

2023.09.04 (-)

←> 测试装置的基本特性.

1. 静态模型, 静态条件: (输入~~时间~~对时间 $t$ 的各阶导数为0.)

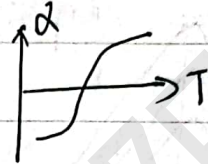
2. 静态特性: 灵敏度, 线性度, 回程误差, 稳定性, 时漂,

温漂.  $1\text{ppm} = 10^{-6}\text{m}$   $1\text{m} \rightarrow 1\mu\text{m}$ .

钢材:  $12\text{ppm/K}$ .  $1\text{m} \rightarrow 12\mu\text{m}/^\circ\text{C}$

石英玻璃:  $0.5\text{ppm/K}$ .

微晶:  $0.05 \sim \text{ppm/K}$ .



殷瓦合金 (invar)  $1.7 \sim 2.0\text{ppm/K}$ . 不同温度下不同, 也可以为0.

分辨率  $\rightarrow$  噪声表示  $\rightarrow$  最小能分辨的.

(精度) 精确度: 和真值相比, 差多少

eg:  $1\text{nm}$  (分辨率)  $>$   $10\text{nm}$  (精确度), 两者不要混

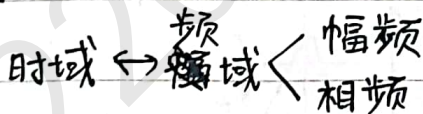
"零误差": 小, 温漂小, 分辨率高.  $\rightarrow$  精密传感器.

精确: 相对目标, 离散小.

精密: 聚集小, 更密.

铜电阻:  $3680\text{ppm}/^\circ\text{C}$  温漂大.  $< 100\text{ppm}/^\circ\text{C}$  比较精密电阻

3. 动态特性



一阶系统:  $H(s) = \frac{1}{1+\tau s}$   $\rightarrow$  取决于  $(\tau)$

二阶系统的传递函数  $m \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + c \frac{dy(t)}{dt} + ky(t) = x(t)$

研究  $s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 = 0$

$ms^2 Y(s) + c s Y(s) + k Y(s) = X(s)$

$\Rightarrow$   $s$  取值范围

$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{ms^2 + cs + k}$

$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$   $\zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}}$   $\rightarrow$  取决于  $\omega_n, \zeta$

$\Rightarrow H(s) = k' \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$

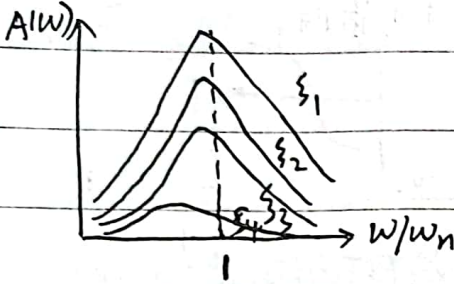
典型拉氏变换

$\delta$	阶跃	斜坡	$K$	$\frac{1}{s}$
$1$	$\frac{1}{s}$	$\frac{1}{s^2}$	$\frac{K}{s}$	$\frac{1}{s^2}$

一阶过程结束点:  $3\tau$  (98%)

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

二阶系统的幅频特性曲线:



$$\zeta_1 < \zeta_2 < \zeta_3 < \zeta_4$$

$\zeta < 1$ , 随着  $\zeta$  减小, 最高点越来越靠近  $\omega_n$ .

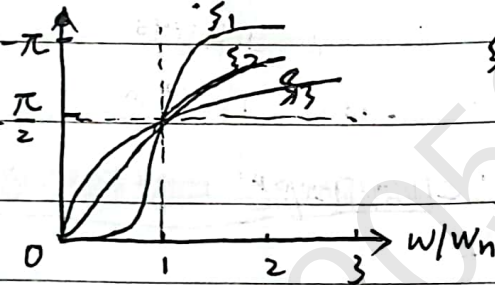
$$Q = \frac{1}{2\zeta}$$

$$A(\omega) = \left| \frac{\omega_n^2}{(j\omega)^2 + 2\zeta\omega_n j\omega + \omega_n^2} \right|$$

二阶系统: 相频特性:  
对于RLC谐振电路:  $Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{2\zeta}$

相移  
一阶最大:  $\frac{\pi}{2}$   
二阶...  $\pi$   
三...  $\frac{3}{2}\pi$

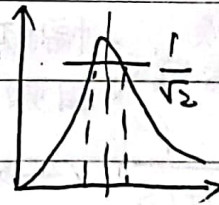
相移  $\frac{\pi}{2}$  的点即对应  $\omega = \omega_n$ .



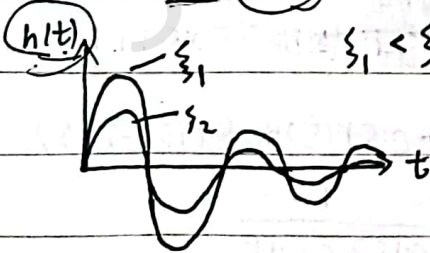
$$\zeta_1 < \zeta_2 < \zeta_3$$

随着  $\zeta$  减小, 在  $\omega = \omega_n$  处变化越陡峭.

与幅频特性中  $\zeta$  减小,  $Q$  增大相对应.

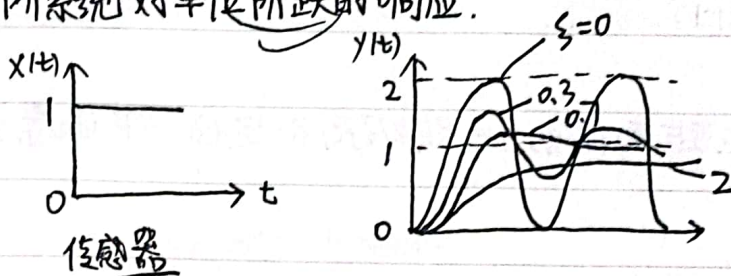


二阶系统对单位脉冲的响应:



$\zeta_1 < \zeta_2$ . 周期变化, 逐渐减小, 趋近于 0.

= 二阶系统对单位阶跃的响应。

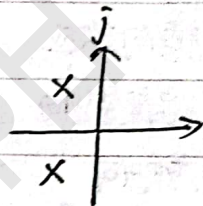


设计二阶系统  $\zeta$  取 0.6 ~ 0.8 之间的原因: 进入 2% ~ 5% 范围的时间最短。

分析二阶系统: 解:  $s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 = 0$

$$s = \frac{-2\zeta\omega_n \pm \sqrt{4\zeta^2\omega_n^2 - 4\omega_n^2}}{2}$$

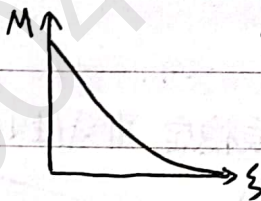
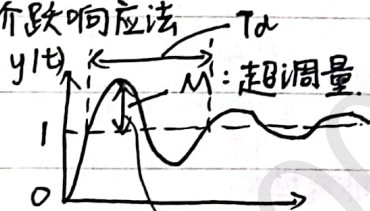
$$= -\zeta\omega_n \pm (\omega_n\sqrt{1-\zeta^2})j$$



当  $\zeta$  太小时, 可通过引入 反馈 来改变  $\zeta$ , 使  $\zeta$  接近 0.7。

特征参数的测试

1) 阶跃响应法



$$\zeta = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{\pi}{\ln M}\right)^2 + 1}}$$

M: 超调量

Mp: 最大过冲

★ 实现不失真测试的条件

输出  $y(t)$  和输入  $x(t)$  满足:

$$y(t) = A_0 x(t - t_0)$$

即输入与输出在形状上完全一样, 只是输出波形相对于输入波形可以有延迟。在时间上比输入波形延迟一些。

$$\begin{cases} A(\omega) = A_0 (\text{常数}) & \text{幅频} \\ \varphi(\omega) = -t_0\omega & \text{相频} \end{cases}$$

对于一个二阶系统来讲, 在阻尼比 0.7 左右时, 可以获得较好的综合性能。在 0 ~ 0.58 倍固有频率的范围内, 幅频特性的变化不超过 5%。同时相频特性也接近直线, 因而所产生的相位失真也最小。



③ 电阻式敏感元件

$$S_g = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L}$$

半导体应变片灵敏度比金属应变片高很多,但灵敏度高不一定好,其温漂大,而金属应变片的温漂小.

与应变片使用有关的问题:

1. 横向效应 : 垂直方向应变  $\rightarrow$  电阻变化
2. 温度影响  $\left\{ \begin{array}{l} \text{① 测量对象、应变片、}\alpha\text{不同,}\rightarrow\text{相对应变,} \\ \text{② 应变片R受T影响} \end{array} \right.$
3. 频响 : 小的应变片具有高的频响.
4. 电流的影响 :  $\leftarrow$  间断通电
5. 光磁 :
6. 引线接点的热电势  $\leftrightarrow$  热电偶
7. 粘贴工艺的影响

PT100  $0^\circ\text{C} \rightarrow 100\Omega$

化学性质稳定,机械性质稳定,非线性小.

温度系数: 3850ppm/K

热电阻  $\neq$  热敏电阻  
 $\downarrow$  RTD  
 导体

Thermistor

$\rightarrow$  半导体

$\left\{ \begin{array}{l} \text{PTCR 正温度系数} \\ \text{NTCR 负...} \end{array} \right.$

$\rightarrow$  非线性大.

铂电阻的自热影响及其补偿方法

1. 改善散热条件
2. 优化设计测量电路
3. 采取乘积测量方式

光敏电阻 LDR: 电阻大小与光强成反比,非线性大,精度低

磁电阻效应: MR

钻石的热导率非常高.

负载效应 : 测量仪器的接入对测量对象的影响

→ 限制了电阻式传感器的分辨率

电阻的热噪声

$$\bar{e}_T^2 = 4kTR\Delta f$$

k: 玻尔兹曼常数

$$\bar{e}_T = \sqrt{4kTR\Delta f}$$

功率

电压

### 5 电阻式传感器信号调节

#### 1. 电阻的四线制测量



测量端

高阻抗测量仪表

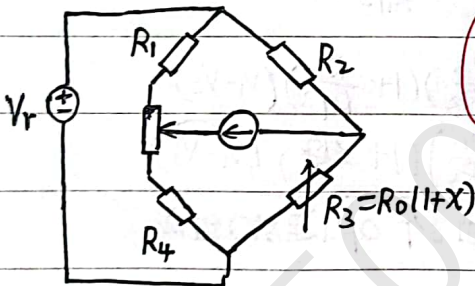
→ 测量回路电流 → 0.

∴ 测量回路传输线上压降 → 0.

∴ 提高了测量精度

#### 2. 直流电桥及其平衡

平衡测量法 (对应后面反馈测量)

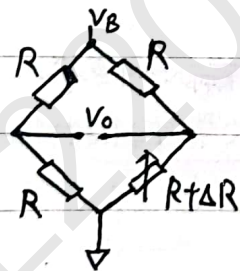


优点:

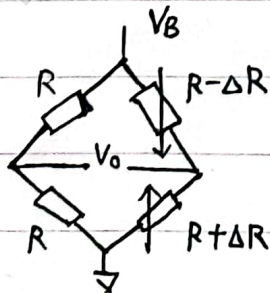
1. 对激励电压的变化, 探测器的型号不敏感
2. 能得到很高的测量精度、分辨率

$$R_1 R_3 = R_2 R_4$$

偏转测量法

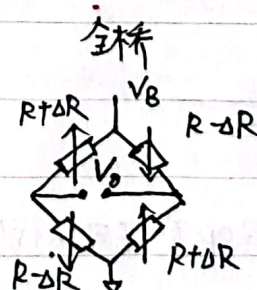


$$V_0 = \frac{V_B}{4} \left[ \frac{\Delta R}{R + \frac{\Delta R}{2}} \right] \rightarrow \text{非线性大.}$$



差动结构

$$V_0 = \frac{V_B}{2} \left[ \frac{\Delta R}{R} \right]$$



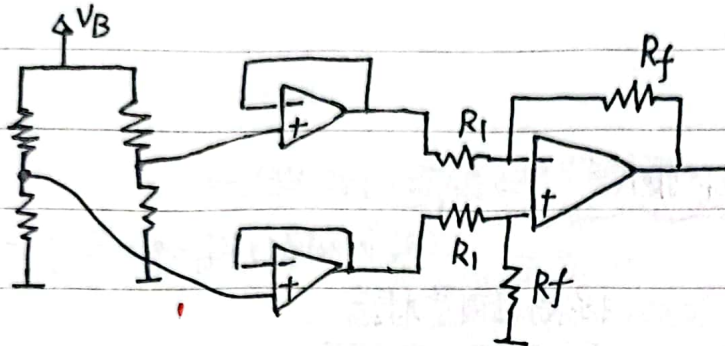
$$V_0 = V_B \left[ \frac{\Delta R}{R} \right]$$

线性好

灵敏度

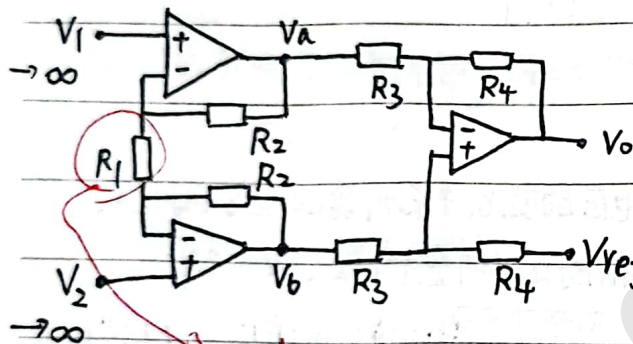
# 灵敏度与激励电压、应变片电阻值的关系

仪用放大器 放大差模信号.



(输入阻抗 $\infty$ )

( $V_{ref}=0$ )

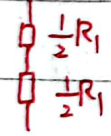


$$V_a = (1 + \frac{R_2}{R_{1/2}}) V_1$$

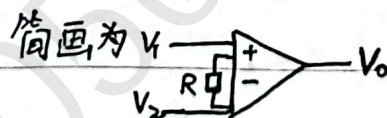
$$V_b = (1 + \frac{R_2}{R_{1/2}}) V_2$$

$$V_0 = (\frac{R_4}{R_3}) (1 + \frac{R_2}{R_{1/2}}) (V_1 - V_2)$$

$$= (\frac{R_4}{R_3}) (1 + \frac{2R_2}{R_1}) (V_1 - V_2)$$



IA (仪用放大器) 由 3 个 OP (运放) 组成



可用于四线制电阻的测量

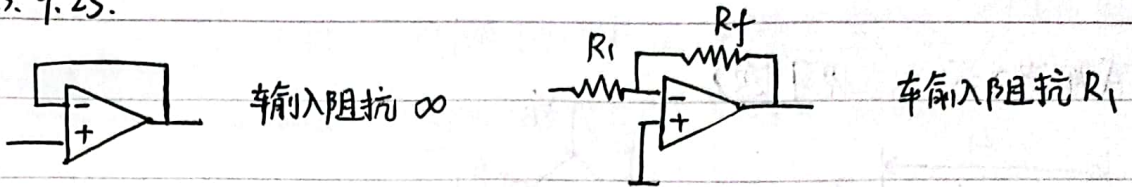
特点

(必考) 优点:

1. 输入阻抗很高, 引起的负载效应小, 放大差模信号时对原的影响很小.
2. 共模抑制比高.
3. 放大倍数容易调整

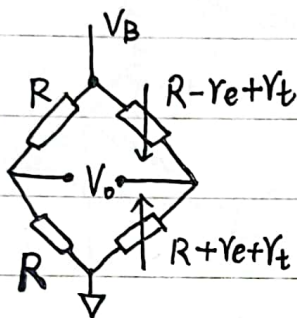
IA 可以代替 OP, 但 OP 不一定可以代替 IA

2023.9.25.



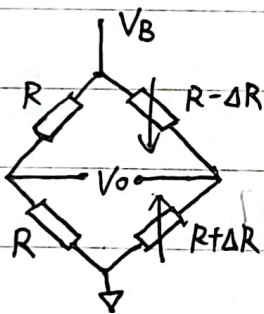
应变桥排除导线的影响可以采用六线制。  
(原理见PPT)

**差动方式**



$$V_o = \frac{V_B}{2} \left[ \frac{\Delta R}{R} \right]$$

- ① 减轻共模信号的影响 (温度等) 抑制
- ② 线性 ↑
- ③ 灵敏度 ↑ (信噪比 ↑)



$$V_o = \frac{V_B}{2} \left[ \frac{\Delta R}{R} \right] \Rightarrow \frac{\Delta R}{R} = 2 \left( \frac{V_o}{V_B} \right)$$

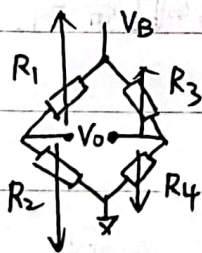
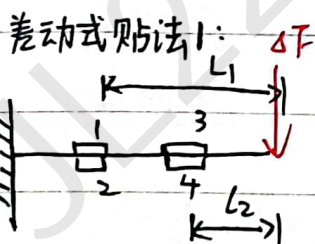
非比例测量

测  $\frac{V_o}{V_B}$ , **bb1 测量**

消除激励电压不稳定带来的 effect, 稳定性 ↑

热电偶效应的影响消除? (见PPT, 课后习题)

使用交流电, 后级电路使用 电容隔直通交



$$\Delta R_1 = S L_1 \Delta F \quad \Delta R_3 = S L_2 \Delta F$$

$$\Delta R_2 = -S L_1 \Delta F \quad \Delta R_4 = -S L_2 \Delta F$$

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

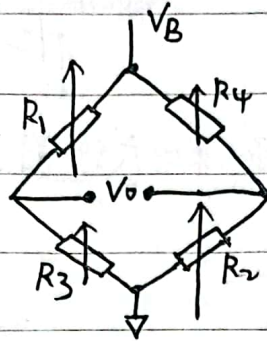
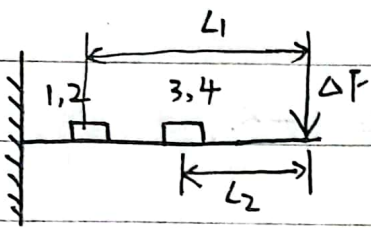
$$= V_B \left( \frac{R - S L_1 \Delta F - R + S L_2 \Delta F}{2R} \right)$$

$$\text{取 } R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R \Rightarrow V_o = V_B \left( \frac{-S \Delta F (L_1 - L_2)}{2R} \right)$$

优点: ①  $V_o$  与  $\Delta F$  作用位置无关

② 可以通过  $(L_1 - L_2) \uparrow$ , 提高  $S_g$

差动式贴法2: (见习题)



缺点: 有较大的非线性

## 6 电抗式传感器及其信号调节 9.2

LVDT: 差动变压器式传感器

$$e_0 = e_1 - e_2$$

相敏检波

$$\cos \alpha \cos \beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha + \beta) + \cos(\alpha - \beta)]$$

$$\text{调制 } \cos(\omega_1 t) \cos(\omega_0 t) = \frac{1}{2} [\cos(\omega_1 t - \omega_0 t) + \cos(\omega_1 t + \omega_0 t)]$$

$$\text{解调: } \cos(\omega_1 t) \cos(\omega_0 t) \cos(\omega_0 t)$$

$$= \cos(\omega_1 t) \cdot \frac{1}{2} [1 + \cos(2\omega_0 t)]$$

$$= \frac{1}{2} \cos(\omega_1 t) + \frac{1}{2} \cos(\omega_1 t) \cos(2\omega_0 t)$$

低通滤波器在滤除高频信号同时, 又限制了带宽。

差动式自感传感器:

$$L = \frac{N^2 \mu_0 A}{2\delta} \quad \text{与 } N^2 \text{ 成正比} \quad A = \pi r^2$$

$$L = \frac{N^2 \mu_0 A}{2} \cdot \frac{1}{\delta_0 + \delta x} = \frac{N^2 \mu_0 A}{2\delta_0} \cdot \frac{1}{1+x} = k \frac{1}{1+x}$$

$$L_1 = k \frac{1}{1+x} \quad L_2 = k \frac{1}{1-x}$$

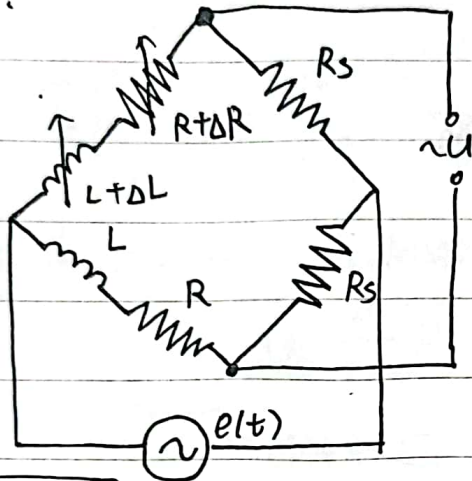


涡流传感器

- 电感:  $\alpha$  随  $T$  变化小,  $L$  随  $X$  变化大 (小范围内) 线性如
- 电阻:  $\alpha$  随  $T$  变化大,  $R$  随  $X$  变化小

设想把两者分离, 电感部分测位移  
电阻部分测  $T$ , 同时两者相互补偿。

桥路:

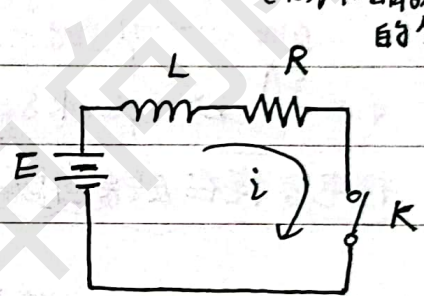


$$\Delta L \ll L, \Delta R \ll \omega L, R + R_s = \omega L$$

推导见习题

$$Z = R_s C \quad Z = \frac{L}{R}$$

$C, R$  为化简元件两端的等效电阻



分析  $K$  断开瞬间电流  $i$  的变化情况。

$$i = \frac{E}{R} e^{-\frac{t}{L/R}}$$

$$f(t) = f(\infty) + [f(0+) - f(\infty)] e^{-\frac{t}{\tau}}$$

**感应同步器**

一个拾取线圈不能辨方向。

必须使用两个线圈联动, 一般成  $90^\circ$  电气角

正交探头

不定  $90^\circ$ , 但  $0^\circ$  容错性最高, ~~不~~

**电容传感器**

$$C = \frac{\epsilon A}{\delta} = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{\delta}$$

边缘效应

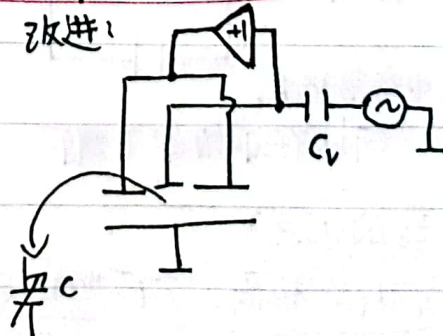
具有保护环的优点:
 

- ① 抗干扰能力强
- ② 线性好.

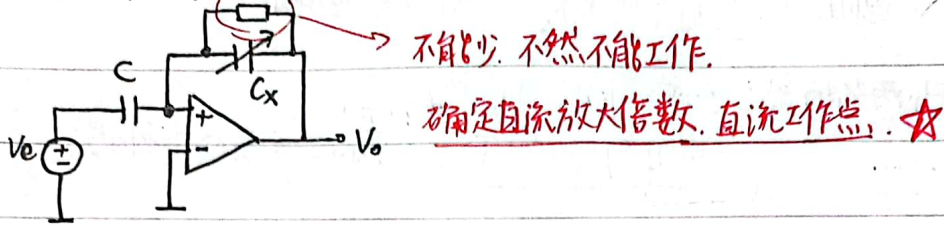
$$C = \frac{\epsilon A}{\delta} \quad Z_c = \frac{1}{j\omega C} = \frac{\delta}{j\omega \epsilon A} = k\delta$$

$$U_c = I_c Z_c = k I_c \delta.$$

改进:



### 电容传感器典型输入电路



$$Z_c = \frac{1}{j\omega C} = \frac{1}{j\omega(\frac{\epsilon A}{\delta})} = \frac{\delta}{j\omega \epsilon A}$$

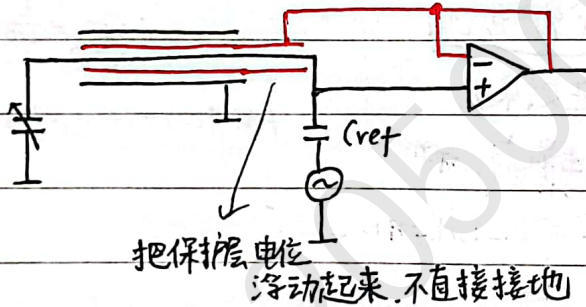
$$\Rightarrow V_o = V_e \cdot \frac{Z_{cx}}{Z_c} = V_e \cdot \frac{\frac{\delta}{j\omega \epsilon A}}{\frac{1}{j\omega C}} = k \cdot \delta. \quad \star$$

反比      正比

$$C = \frac{\epsilon A}{\delta} \Rightarrow V_o = k \delta.$$

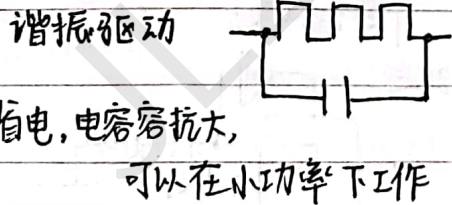
把电容接在反馈回路中

三同轴线的使用 ← 传递电容信号, 不能用普通电缆.  
(敏感信号)



- 优点: ① 排除外界干扰  
② 消除电缆分布电容的影响
- ☆

### 容栅:



### 谐振时

$$Z = 0$$

$$Z = \infty$$

### 电容传感器的优点:

分辨率极高, 动态特性好, 线性好

缺: 湿度, 灰尘影响大

→ 高的分辨率、稳定性，比激光干涉仪好。

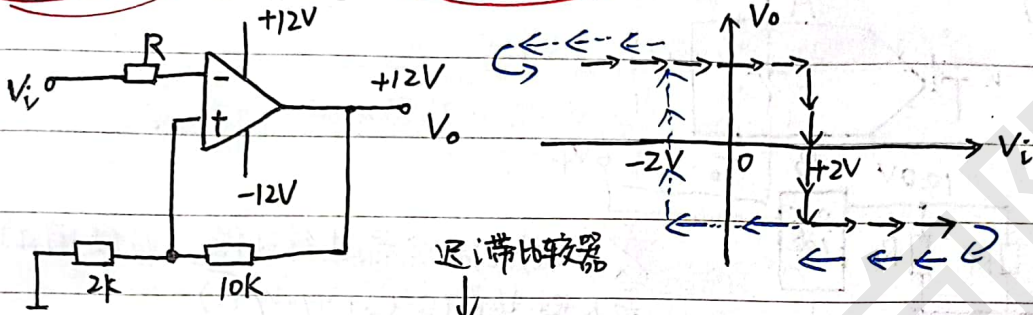
电容传感器

激光干涉仪

→ 需要大的参考面，...，稳定性不好。

在微小位移测量时，电容传感器更好。 eg: 光刻机。

迟滞比较器工作过程: (模数转化)



迟滞比较器

模 → 数

不用迟滞比较器，会带来干扰。



施密特触发器

O/p: output 输出

NC: ~~Normally~~ Normally Connected 常闭

NO: Normally Open 常开

O.C: open collect 集电极开路

→ 与各种不同的输出负载接口。

磁电式 热电偶

1. 动圈式磁电传感器  $e = N \frac{d\Phi}{dt}$   $e = kV$  → V 相对量

缺点: 不能感知慢速移动

2. 磁阻式传感器

3. 磁电式流量计

4. 磁栅

5. 动圈磁电式传感器等磁敏电路。

(1) 感生电势与速度成正比，因此当相对移动很慢时，灵敏度很低，不能用来测量慢变信号。

(2) 由于有零位误差，通过积分得到的位移只能在短时间内保持

$$s = \int v dt$$

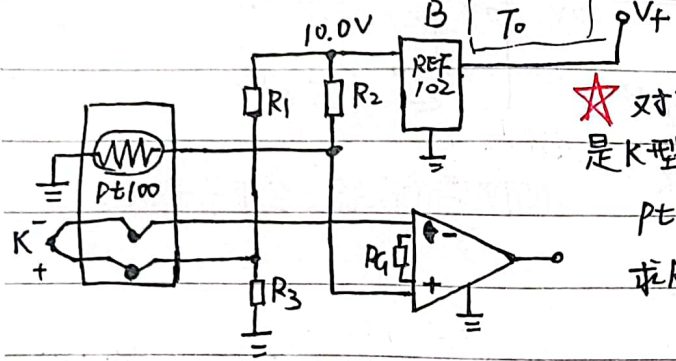
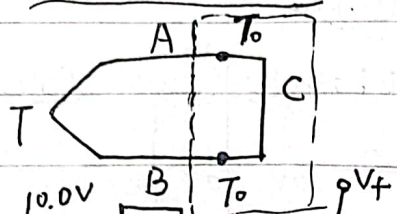
一定精度

# 热电偶 TC

## 工作原理:

- a. 帕尔贴效应: 两种导体的接触电势.  $E_{AB}(T) = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_A}{N_B}$
- b. 汤姆逊效应: 单一导体的温差电势.  $E_A(T, T_0) = \int_{T_0}^T \sigma_A dT$

## 中间导体定律



★ 对热电偶冷端进行补偿, 没使用的是 K 型热电偶 (39.4 μV/°C).

PT100: 3850 PPM/°C    R3 = 100 Ω  
求 R1, R2

1°C 变化带来的结果: 39.4 μV

$$\approx 10V \cdot \frac{100\Omega (1 + 3850 \times 10^{-6})}{100\Omega + R_1} - 10V \cdot \frac{100\Omega}{100\Omega + R_2} = 39.4\mu V$$

$$10V \cdot \frac{100\Omega (1 + 3850 \times 10^{-6})}{100\Omega (1 + 3850 \times 10^{-6}) + R_2} - 10V \cdot \frac{100\Omega}{100\Omega + R_1} = 39.4\mu V$$

$$10V \cdot \frac{100\Omega (1 + 3850 \times 10^{-6})}{100\Omega + R_2} - 10V \cdot \frac{100\Omega}{100\Omega + R_1} \approx 39.4\mu V$$

$$10V \cdot \frac{100\Omega \times 3850 \times 10^{-6}}{100\Omega + R_x} \approx 39.4\mu V$$

$$\therefore R_x = 97.6k\Omega \quad R_1 = R_2 = R_x = 97.6k\Omega$$

补偿导线: 把冷端拉到测温点更远的位置.

对测量结果没有影响.

对远距离、高温测量有很大的好处.

一般热电偶的

★ 热电势在 几个 μV/°C ~ 几十个 μV/°C

热电偶的主要特点: 1. 热电势很小, 在几个~几十个微伏每度数量级

2. .

3.

4.

5.

6. 非线性大

7. 需要冷端补偿

8. 精度没有Pt100高, 很少<sup>达到</sup>超过 $0.5^{\circ}\text{C}$ .

Why  $\diamond$  不能用热电偶测人体体温  $\uparrow$

精密仪器中的热电偶效应, 为~~避免~~, 采取措施?

- 措施:
1. 热电势小的材料
  2. 减小温度梯度, 恒温.
  3. 采用交流信号

斩波, 相敏检波.

$\rightarrow$  当有用信号是快变时, 由于温度变化是缓慢的, 可以用电~~流~~把这一直流变量给去除.

$\rightarrow$  当有用信号慢变时, 可以用斩波的方法把~~它~~加载到高频分量上, 从而与 $T$ 的变化区分.

### ⑧ 霍尔传感器及反馈测量

$$E_H = \frac{R_H I B}{d} \quad U_H = R_H I B$$

☆ 霍尔电压与载流子类型有关



差动放大电路 最好 → I.A

复习 I.A 特点

Hall 优点:

1. 可以用来测量交直流磁场
2. 动态特性极好
3. 体积小
4. 易于集成

一般Hall集成的两种常用形式

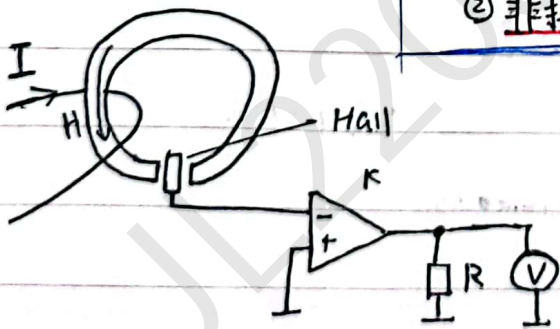
- ① 线性
- ② 开关型

REG: 调节器, 稳压器



Hall 电流传感器

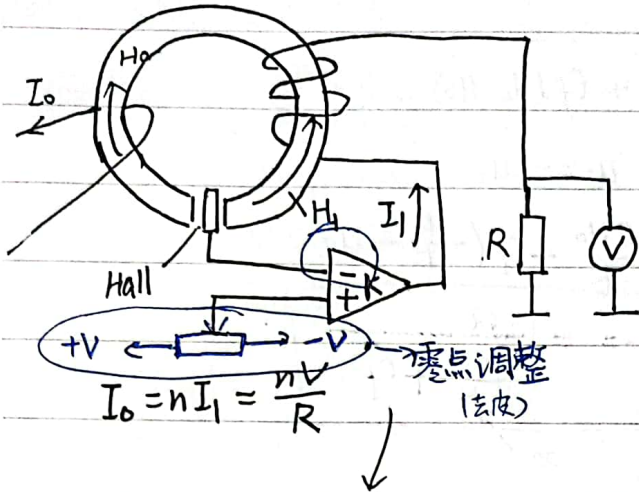
→ 优: ① 可以测交、直流 频率直达 D.C.  
 ② 非接触测量



→ eg: 相对重力仪

### 反馈测量原理及其优点

☆☆ 反馈平衡式结构所共有的优点: (平衡测量)



- ① 只工作在零点, 线性好 ✓
- ② 非常好的 动态特性 ✓
- ③ 对测量对象 无影响: (负载效应小)
- ④ 测量范围宽 ✓ - 不受 Hall 本身工作区间的限制
- ⑤ 分辨率高  
 $\because U_H = R_H B I$ ,  $B=0$ , Hall 的激励力电流上的噪声对输出影响小)
- ⑥ 精度高
- ⑦ 稳定性高, 只受 Hall 零点性能的影响

缺点: 高频受运放性能的影响. ( $\because$  Hall  $\rightarrow$  测中低频)

结构复杂, 造价高, 可能会有自激振荡.

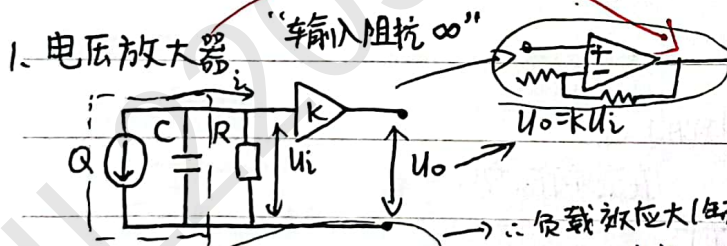
9 压电传感器  $C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{\delta}$   $Q = k F$   $U = \frac{Q}{C}$

石英: 压电系数不高  $2pC/N$ , 与厚薄无关, 无热释电  
 → 压电逆压电效应, 很好的热稳定性  $0.5ppm/^\circ C$

压电陶瓷 (PZT) 锆钛酸铅, 压电陶瓷的种.  $370pC/N$

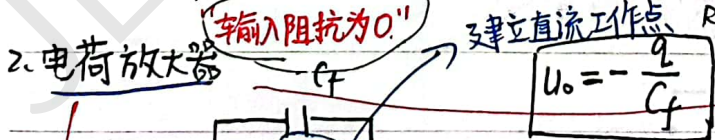
高分子压电材料

典型应用对象: 石英类



$R_f$  需要很大.

$\therefore$  负载效应大 (缺点)



建立直流工作点,  $R_f$  越大越好.

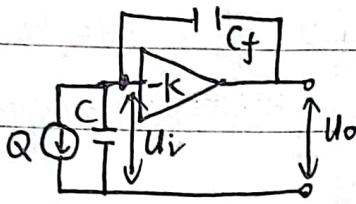
典型应用对象: 压电陶瓷

$C = \text{电缆电容} + \text{压电元件电容} + \text{运放输入电容}$

理想情况下, 电荷放大器的输出电压只与反馈电容的大小、

解决传输电缆电容的影响. 压电体产生的电荷量有关, 而与  $\downarrow$  无关.

# 电荷放大器(一般情况)



$$C \cdot U_i + C_f (U_i - U_o) = Q$$

$$U_o = -k U_i$$

$$\Rightarrow -\frac{C U_o}{k} + C_f (-\frac{U_o}{k} - U_o) = Q$$

$$\Rightarrow U_o = -\frac{Q}{\frac{C+C_f}{k} + C_f}$$

压电传感器不能用来静态测量

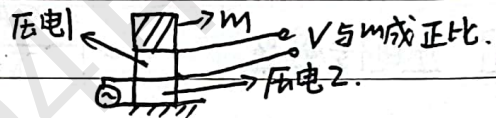
eg: 电子秤 (应变片)

漏电阻

→ 可以测高频

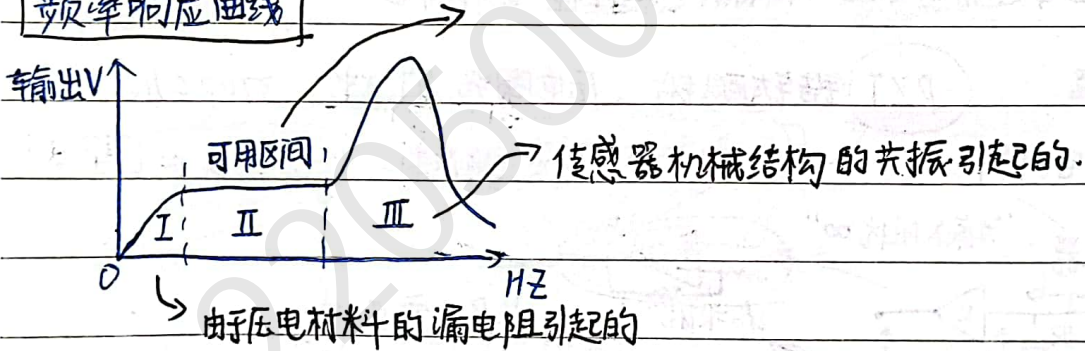
利用压电材料测 m 思路:

即之结构:



给压电2一个交流信号, 产生振动

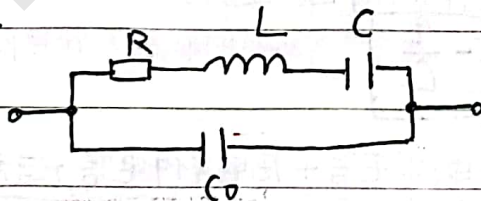
## 频率响应曲线



直流响应为0.

~~解释: why 不能做电子秤~~

等效电路



热释电敏感元件 — 照射后并不是源源不断产生电荷, 只有一瞬间

主要用来检测红外信号

(解决方法: 斩波调制)

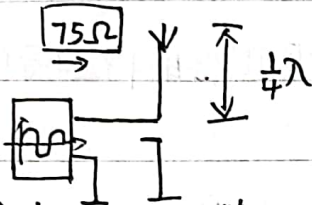
菲涅尔透镜 → 弥补低频特性差



10-11 光电式检测技术

石英玻璃 { 热膨胀系数很小  
压电、逆压电  
稳定性高  
透光范围广  
光纤通讯

金刚石 { 导热性极好  
滑动摩擦系数小  
透光范围广  
硬度高



1. 外光电效应: 光电管

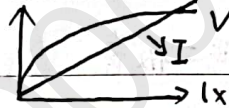
(光电倍增管): 灵敏度很高, 对弱光很敏感

2. 内光电效应及相应的器件:

LDR: 光敏电阻

光谱特性、频率特性不是很好, 只能用在低速、无特别精度要求的场合。

光敏二极管

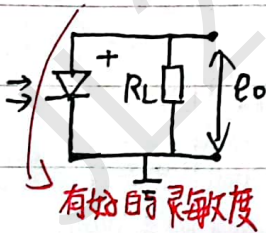


光照特性中, 开路电压与光照度的关系呈现严重的非线性, 因此不能用来测量

光强等线性应用的场合; 而短路电流却有非常好的线性, 常被采用

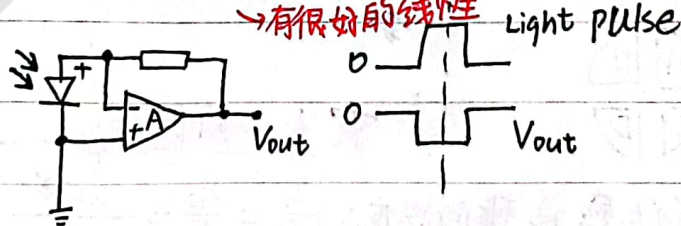
三种使用:

1. 开路电压



有很好的灵敏度

2. 短路电流

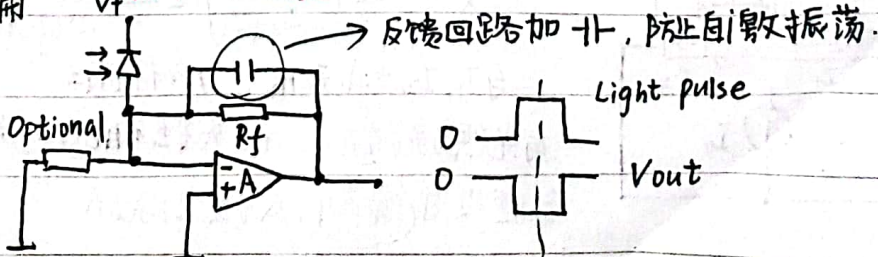


有很好的线性

TIA: 跨阻放大器

3. 反偏

有非常快的速度



反馈回路加电容, 防止自激振荡.

☆ 反向偏置提高速度的原因 → 反向电压越大, 耗尽层越厚, <sup>结电容</sup> C 越小, 高频特性越好

☆ 减小结电容.

暗电流的温度特性: 降低温度, 可以有效提高分辨率以及灵敏度

当反偏不能解决问题时, 可以改进结构:  $\downarrow$  PIN 管结光电二极管.  
在 P、N 之间加一层很厚的本征半导体.

APD (雪崩光电二极管)

工作电压很高 结区内电场极强, 带宽可达 100 GHz

是目前响应速度最快的一种光电二极管

光电耦合器: 既可传输信号, 又能实现电路隔离

LED: 发光二极管      LD: 激光二极管

PSD  $\left\{ \begin{array}{l} \text{位置敏感元件} \\ \text{光敏感器件} \end{array} \right.$

1. 4象限检测元件

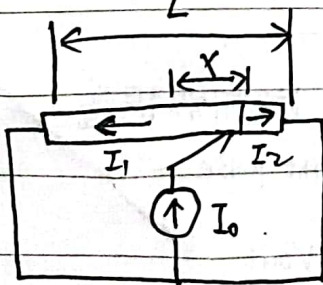


2. PSD 位置传感器 横向效应:

☆☆ 工作原理: 比例测量  
抑制激光力信号变化带来的影响.

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

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



与  $I_1, I_2$  大小无关, 与比例有关  
与光照强弱无关, 但光强不能为 0. 光强太弱会湮没于噪声中, 太强会烧坏.

∴ 要有合适的光强.

三角法测量 无接触位移测量

分辨率 < 静态 static (10Hz以下)  
动态 dyn

CCD 电荷耦合器件

CMOS 互补型金属氧化物半导体

CCD, CMOS 用于测量

光电式码盘 { 绝对编码码盘 并行式编码码盘  
增量式编码码盘

自然二进制编码, 若电刷安装有误差, 由于编码不连续, 在变化点时容易出现错码 (有歧义)

格雷码: 每次只允许一个位置跳变 (必考)

由于编码连续, 在跳变时, 不会产生歧义

增量式码盘, 码盘的辨率向.

透射式计量光栅  $B = \frac{W}{2\sin\theta} \approx \frac{W}{\theta}$  莫尔条纹.



几何放大

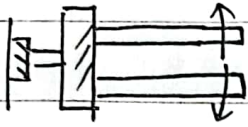
常用光栅尺结构

标尺光栅  
指示光栅

光纤传感器 遮光式光强调制方式  
光波强度调制型.

### 13 谐振法检测技术

相比一个簧片的好处：



两个运动相反，对支座的力相互抵消，对固定方式无太大要求。

保证精度： $R > C > L$

#### 振弦式测量法

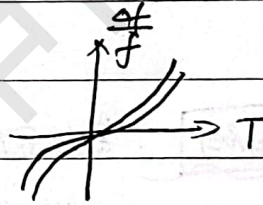
$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{E}{\mu}} \rightarrow \text{机械振动系统的谐振频率}$$

F.S. 满量程 Full. scale

石英温度传感器

“温漂”是石英测温的基础。

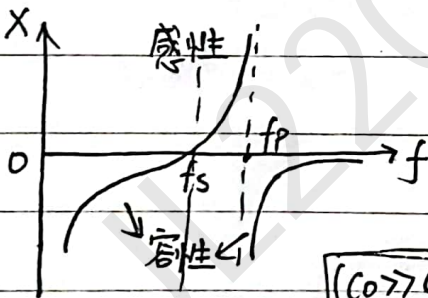
石英不同切角，温漂不同。



石英微天平 QCM 原理：

近似频率  $\Delta f = f_0^2 \frac{\Delta m/A}{N\rho}$  当晶体的质量↑，晶体谐振器的振荡频率↓。

#### 石英晶体的等效电路及特性

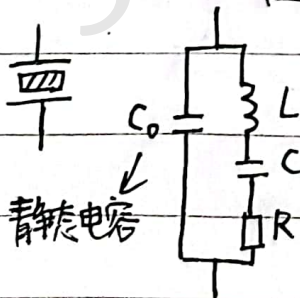


(a) R, L, C支路串联谐振

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

(b) R, L, C支路感性，与  $C_0$  并联谐振。

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \frac{C C_0}{C + C_0}}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \sqrt{1 + \frac{C}{C_0}} = f_s \sqrt{1 + \frac{C}{C_0}}$$



$C_0 \gg C$   
晶片的弹性

$C \ll C_0$

$\therefore f_s$  与  $f_p$  接近

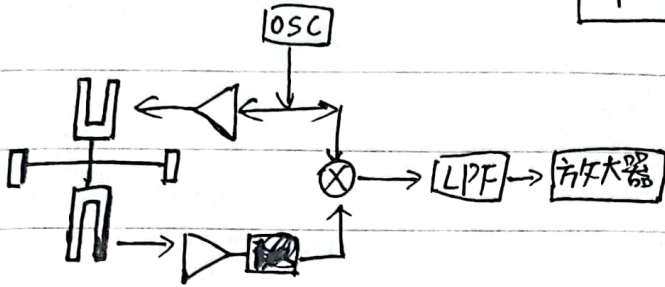
L很大，C、R很小

# 音叉式陀螺仪

上部的扭摆造成下部的扭摆。

## 石英角速度传感器

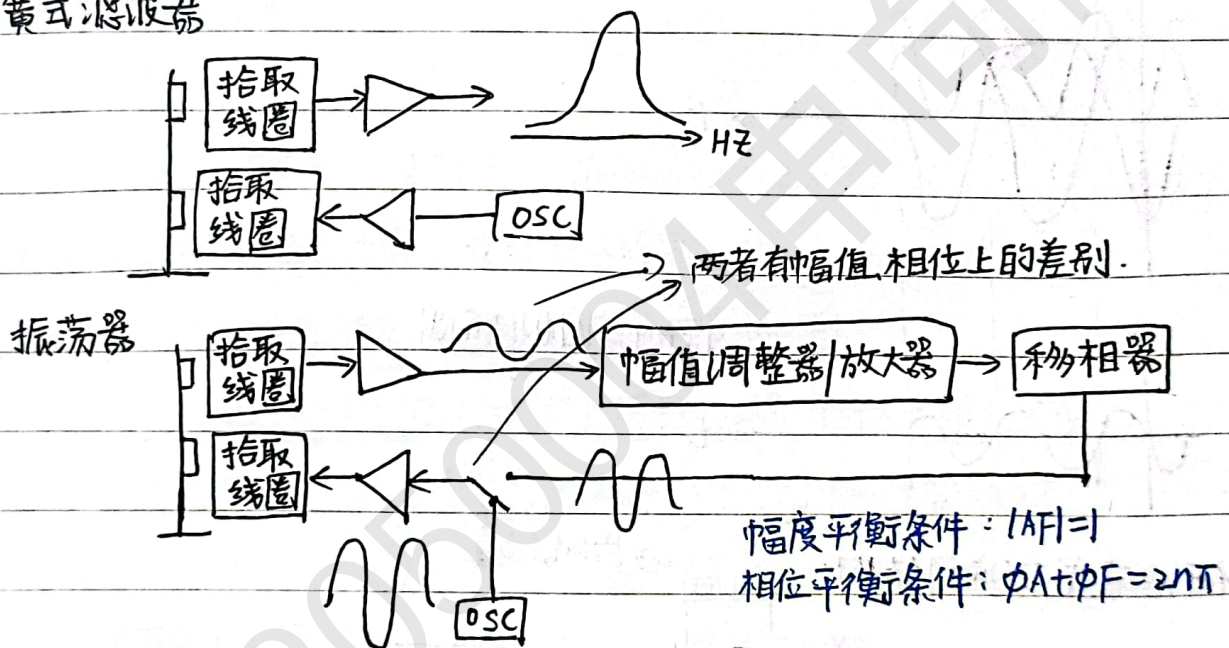
$$\vec{F} = 2m\vec{v} \times \vec{\Omega}$$



# 质量流量计

音叉式结构, 力相互抵消, 好固定

## 簧式滤波器



# SAW原理

## 原理及应用



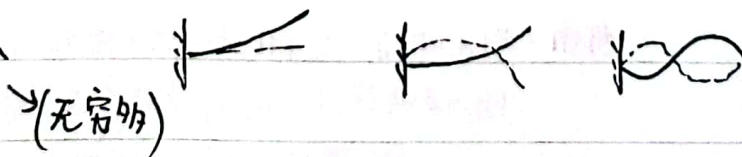
加到电极上的频率为  $f$  的电压将引起表面变形, 这种变形作为表面波以速度  $v$  沿两个方向传播。

## SAW滤波器

当电极间的距离为  $\lambda$  时, 激励力波满足  $f = \frac{v}{\lambda}$  能有效地激励力并被传输到远处的检测电极

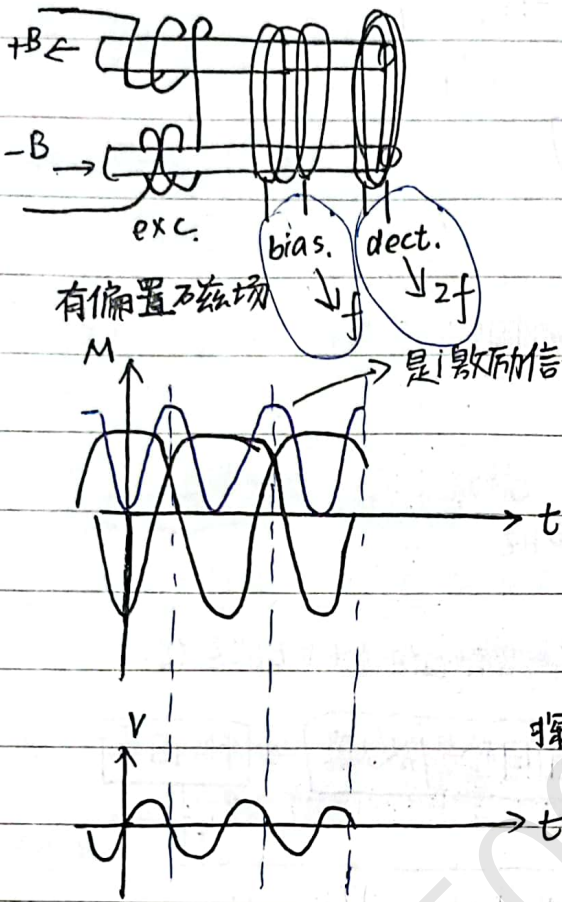
## 差动结构

## 振动模式



### 13 Fluxgate 磁通门

使用“固态(电子)振动线圈”测准直流磁场

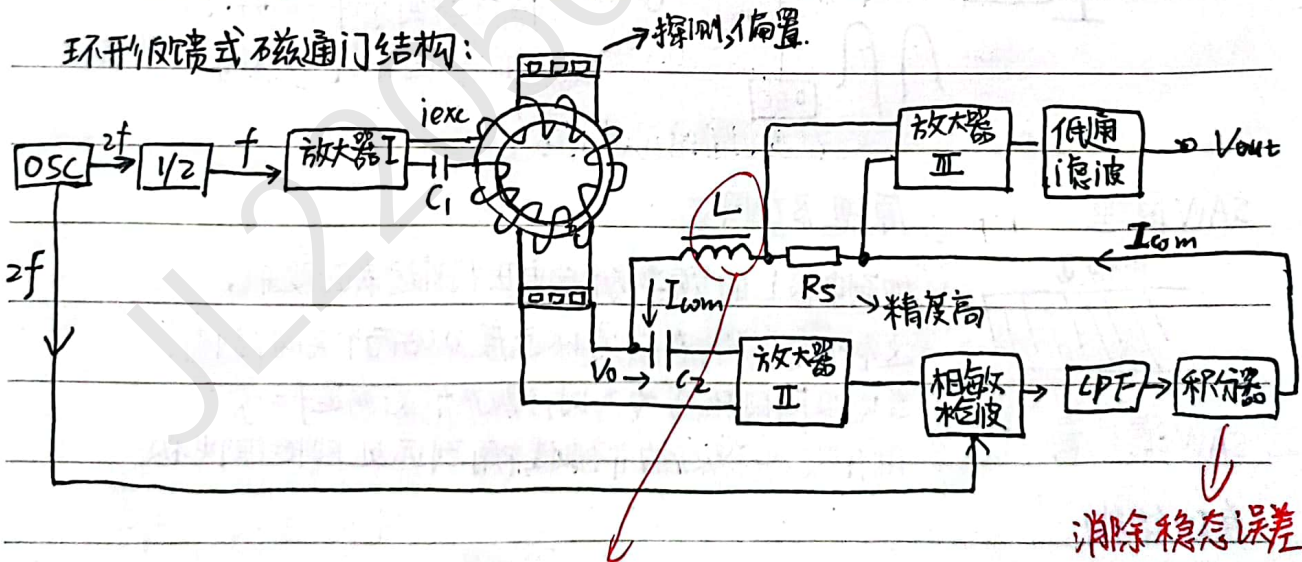


有偏置磁场

是激励信号  $f$  的 2 倍

探测线圈电压输出

环形反馈式磁通门结构:



探测, 偏置

精度高

消除稳态误差

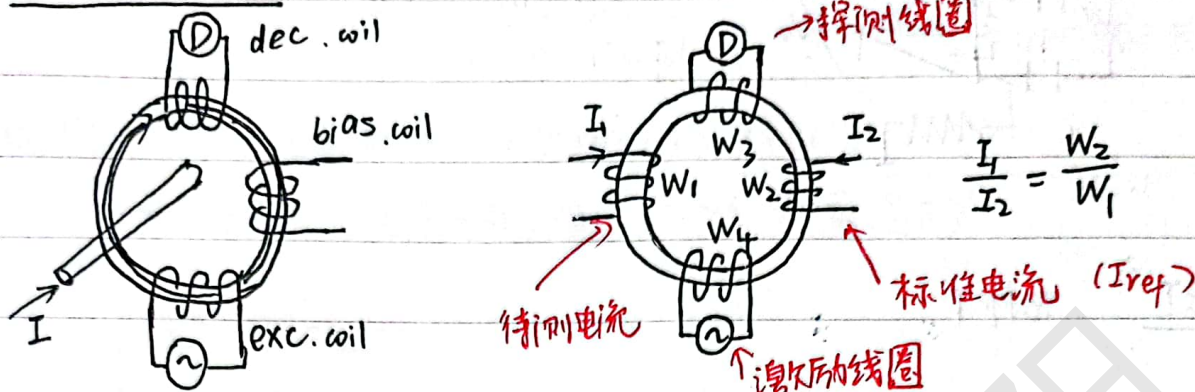
作用: 无阻碍通过这个低频的反馈电流,

阻碍线圈获取  $2f$  频率的高频信号进入

放大器 II、积分器 组成的低频回路

W<sub>3</sub> 输出波形是否有二次分量

### 直流电流测量



亥姆霍兹线圈 → 在一个空间得到均匀磁场

静态磁栅读取头

### 14 FET ISFET SQUID

★ 场效应管的几种应用场景: ★★ (必考)

1. 匹配输出电阻极高的信号源, 比如 电场测量
2. 导通电阻是纯电阻, 可以做 线性很好的开关, 也就是 模拟开关
3. 导通电阻可以做得非常小, 可以做 动力开关, 可以代替 二极管
4. CMOS 电路具有极低的静态功耗, 用在 低功耗电路.

比如电子钟、千分尺数显、遥控器数显

CMOS  $\begin{cases} \text{NMOS} \\ \text{PMOS} \end{cases}$

### 离子选择性电极 (ISE)

扩散  $\leftrightarrow$  电位差, 两种力平衡  $\rightarrow$  电势差

$$\text{能斯特方程: } E = \frac{RT}{zF} \ln \frac{a_{i,1}}{a_{i,2}}$$

图见 PPT

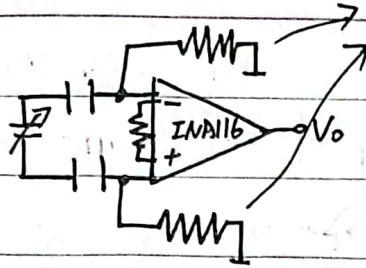
使用 仪用放大器 测电压.

↳ 高阻放大器

目的: 建立直流通道

尽可能大

由于任何运放在使用时都有电容, 会对电容充电, 会使输出饱和。



ISFET ppt

SQUID 超导量子干涉仪 灵敏度极高 → 测磁场 (极微弱)

基于约瑟夫逊效应, 建立电压与频率关系。

$$f = \frac{2e}{h} V$$

约瑟夫逊结 (两层超导) + (一层绝缘)

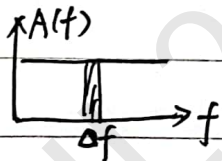
应用前景: 磁场探测 建立标准量  $f \rightarrow V$  超导计算

### 15 传感器噪声

$$X_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} x^2(t) dt}$$
 均方根值 → 做功能力

$V_{pp}$   $V_{rms}$

白噪声: 是一种功率谱密度为常数的随机信号。



此信号在各个频段上的功率是一样的。

白噪声的  $V_{rms}$  和  $V_{pp}$  之间的关系:

$$V_{n,rms} \times 6.6 \approx V_{pp}$$
 ☆☆☆

$$V_{rms} \approx \frac{V_{pp}}{6.6}$$

ppm:  $10^{-6} m$

ppb:  $10^{-9} m$



不同噪声来源即不相关 (一个动, 另一个不动)

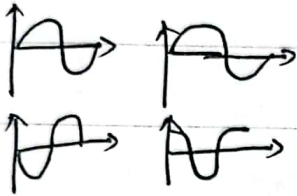
不同噪声的“加”

$$U_{op} = \sqrt{U_{n1}^2 + U_{n2}^2 + \dots + U_{np}^2}$$

$$\begin{aligned} I \quad V_{n1} \quad V_{n1} + V_{n2} &= \sqrt{2} \\ I \quad V_{n2} \quad V_{n1} - V_{n2} &= \sqrt{2} \end{aligned}$$

但, 同一个噪声相加时, 相加几次放大几倍. (相关)

对于交流信号, 还要考虑相角 (频率一样前提下)



多传感器提高信噪比 (相关信号)

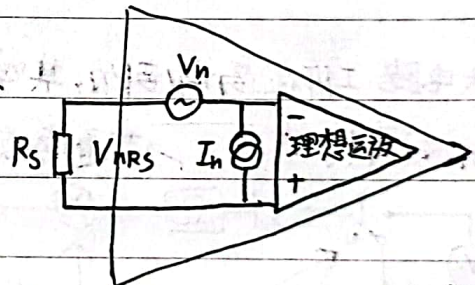
$$\frac{nV}{\sqrt{n}V_{ns}} = \sqrt{n} \frac{V}{V_{ns}}$$

$N$  个性能一致的传感器可以提高信噪比  $\sqrt{N}$  倍.

电阻的热噪声  $\overline{e_T^2} = 4KTR\Delta f$

$$\overline{e_T^2} \propto \Delta f$$

$\frac{1}{f}$  噪声 (闪烁噪声) 与  $f$  成反比.  
粉红噪声

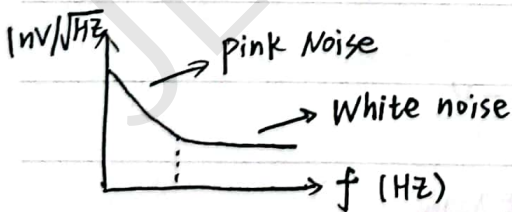


运算放大器输入端噪声的计算

$$V_{nt} = \sqrt{V_{nRS}^2 + V_n^2 + (I_n R_s)^2} \quad (\text{必考})$$

→ 对 95% 情况是这样.

- ① 信号源电阻热噪声
- ② 运放电压噪声
- ③ 运放电流噪声



说噪声得对应带宽 (分辨率)

DC:  $\sim 0.01 \text{ Hz} \sim 10 \text{ Hz}$ .

## 减小系统噪声的方法:

1. 信号源电阻  $\downarrow$  (放大器输入阻抗)
2. 带宽  $\downarrow$  (满足前提下)
3. 阻止外部噪声, eg: 保护电缆, 接地
4. 放大器第一级噪声  $\downarrow$
5. 比较低的工作电压

• 噪声决定分辨率

• 脱离工作带宽范围谈分辨率无意义

• 带宽决定了传感器的动态特性。带宽  $\uparrow$ , 动态特性  $\uparrow$ , 然而引入噪声越大

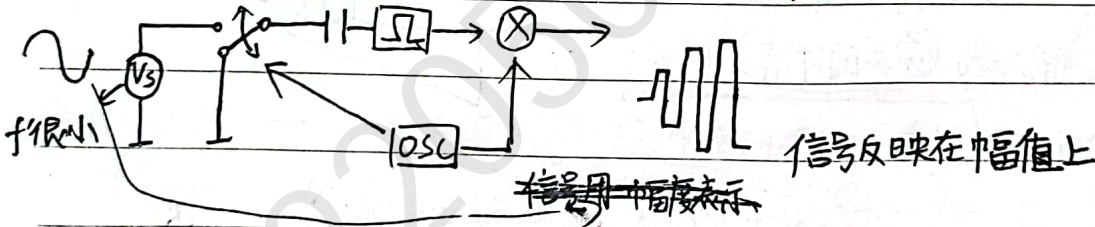
• 噪声  $\begin{cases} \text{Static} \\ \text{Dynamic} \end{cases}$

• 低精度传感器也可以有很高的分辨率。分辨率  $\neq$  精度

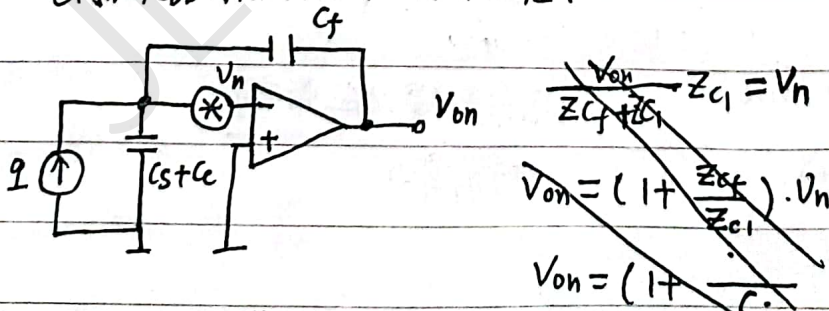
$\Delta$  放大电路工作在高频部分, 其噪声密度比低频部分要小很多。

斩波调制放大  $\rightarrow$  带通滤波

低频  $\rightarrow$  高频



电荷放大器为什么不允许太长的电缆?

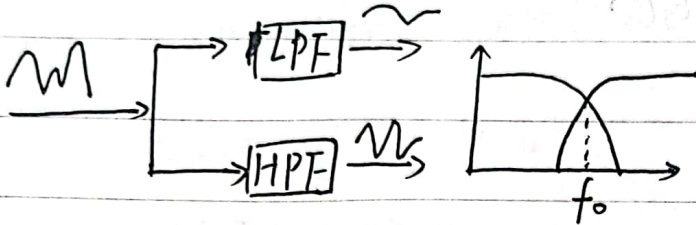


电缆长度增大, 输出噪声增大

# 16.17 信号滤波

$\omega_c$ : 截止频率

一阶低通滤波器特性: 相移  $45^\circ$  对应截止频率  $f_0$



正交分解:

~~幅值相加相等 (输入=输出)~~

输出两个信号相加 = 输入信号 (即波开) 相加相等  
功率相等 (入=出)

若输入信号中有一频率  $f_0$  的信号

输出两个幅值  $\frac{\sqrt{2}}{2}, \frac{\sqrt{2}}{2}$

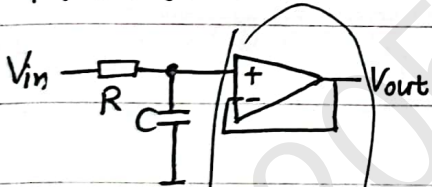
$$\left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right)^2 = 1$$

$$\frac{\sqrt{2}}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2} = \sqrt{2} > 1 ?$$

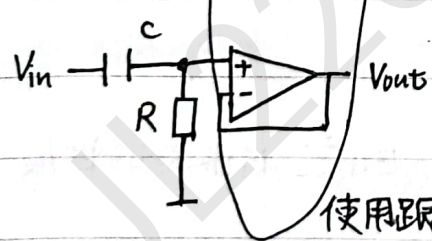
矛盾, 两个波开相差  $90^\circ$ .



## 一阶滤波器的使用



低通滤波器可以做简单的积分器使用

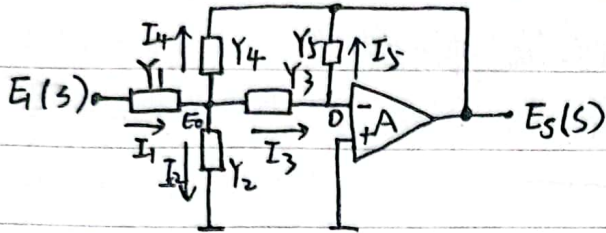


高通滤波器可以做简单的微分器使用

使用跟随器可以减轻负载效应.

## 二阶有源滤波器

### 1) 多反馈环滤波器



$$E_1 = \frac{I_1}{Y_1} + E_0$$

$$I_1 = I_2 + I_3 + I_4 \quad I_2 = Y_2 E_0 \quad I_3 = Y_3 E_0 \quad I_4 = Y_4 (E_0 - E_2)$$

$$I_5 = I_3 = Y_3 E_0 = -Y_5 E_2$$

$$\Rightarrow H(s) = \frac{E_2(s)}{E_1(s)} = \frac{-Y_1 Y_3}{Y_5 (Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4) + Y_3 Y_4}$$

$$R_1 \rightarrow Y_1 \quad C_2 \rightarrow Y_2 \quad R_3 \rightarrow Y_3 \quad R_4 \rightarrow Y_4 \quad C_5 \rightarrow Y_5$$

$$Y_1 = \frac{1}{R_1} \quad Y_2 = sC_2 \quad Y_3 = \frac{1}{R_3} \quad Y_4 = \frac{1}{R_4} \quad Y_5 = sC_5$$

$$H(s) = \frac{-\frac{1}{R_1 R_3 C_2 C_5}}{s^2 + \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}\right) \frac{s}{C_2} + \frac{1}{R_3 R_4 C_2 C_5}}$$

$$s \rightarrow \infty, H(s) \rightarrow 0$$

$$s \rightarrow 0, H(s) \rightarrow \text{定值}$$

$\therefore$  LPF

~~看~~ 看  $s$  在零点和无穷大点的情况, 基本可以断定滤波器的性质

$$s \rightarrow 0? \quad H(s) = \frac{k_0 \omega_0^2}{s^2 + 2D\omega_0 s + \omega_0^2} \quad \text{低通}$$

$$s \rightarrow \infty? \quad H(s) = \frac{k_0 s^2}{s^2 + 2D\omega_0 s + \omega_0^2} \quad \text{高通}$$

$$H(j\omega) = \frac{2k_0 D \omega_0 s}{s^2 + 2D\omega_0 s + \omega_0^2} \quad \text{带通}$$

$$H(s) = \frac{2(s^2 + \omega_0^2)}{s^2 + 2D\omega_0 s + \omega_0^2} \quad \text{带阻}$$

## (2) 压控电压源 (VCVS) 型滤波器

$\xi \leftrightarrow D$ . 阻尼比.

$D = \frac{\sqrt{3}}{2}$	Bessel 贝塞尔	Bessel <sup>记忆!</sup>	$\frac{\sqrt{3}}{2}$
$D = \frac{\sqrt{2}}{2}$ (0.707)	Butterworth 巴特沃兹	Butterworth	$\frac{\sqrt{2}}{2}$
$D < \frac{\sqrt{2}}{2}$	Chebyshev 契比雪夫	Chebyshev	$< \frac{\sqrt{2}}{2}$

### 典型滤波器的特性图 (必考)

典型滤波器的幅频特性

滤波器的阶数对幅频特性的影响

阶数  $\uparrow$  滤波效果  $\uparrow$  越接近理想窗口.

★ 优点:

~~Bessel~~ Bessel — 能保证波形失真最小.

Chebyshev — 在截止频率以外滤波效果最好

Butterworth: 在截止频率内最平坦


★ 滤波器对参数的敏感性

略. 见PPT

★ 滤波器的衔接

- 恒带宽滤波器 中心频率  $f_0 = \frac{1}{2}(f_{c2} - f_{c1})$
- 恒带宽比...  $f_0 = \sqrt{f_{c1} f_{c2}}$
- 相对带宽  $b = \frac{B}{f_0} \times 100\%$

实现恒带宽比滤波器的方法是采用 倍频程带通滤波器 11.27

 $f_{c2} = 2^n f_{c1}$

$\rightarrow n$ : 倍频程数

$n = \frac{1}{3}$  —  $\frac{1}{3}$  倍频程滤波器

$n = 1$  — 1 倍频程滤波器.

→ 和参考信号独立

模拟滤波器，阶数越多，滤波效果越好，但事实上并不是阶数做的越多越好  
原因：元器件敏感性，可能会因信号波动导致有用信号被滤掉  
 $f_0$  本身不稳定造成影响

相敏检波 → 中心频率可以自动调整的窄带滤波器

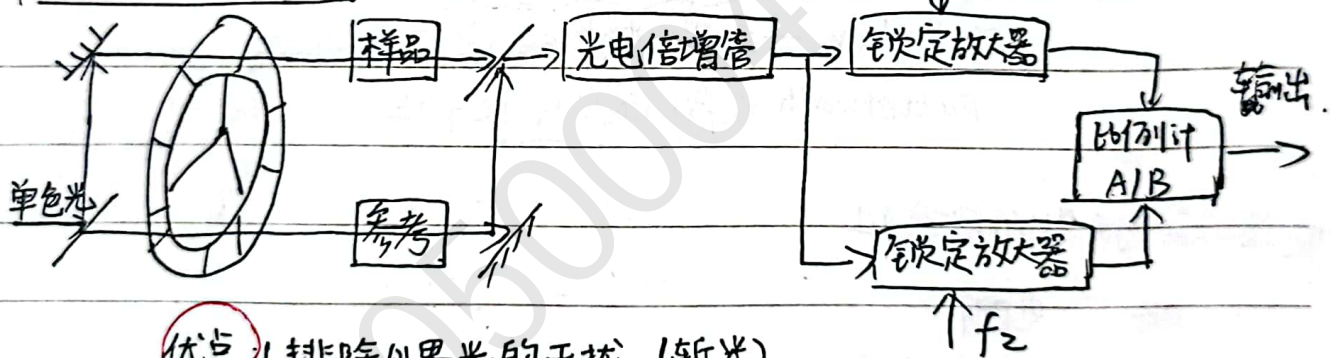
→ 与有关元器件参数的温漂无关

参考信号<sup>频率</sup>的改变，基本不影响滤波效果

滤波器与参考信号相关。

### 17 相敏检波 调制与解调

#### 双频双光束检测系统原理



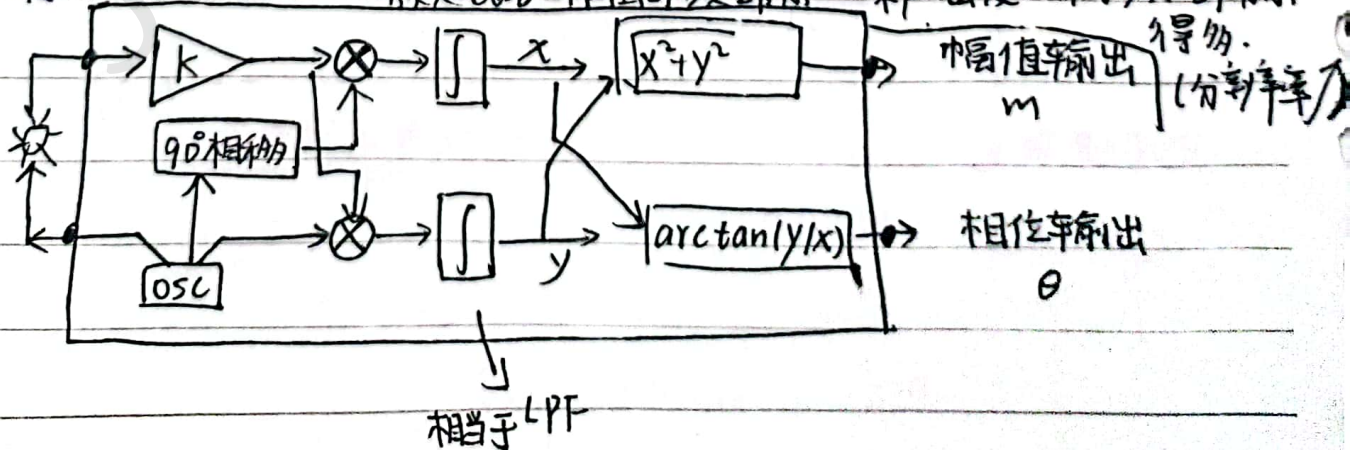
**优点** 1. 排除外界光的干扰 (斩光)

2. 消除光源波动的影响

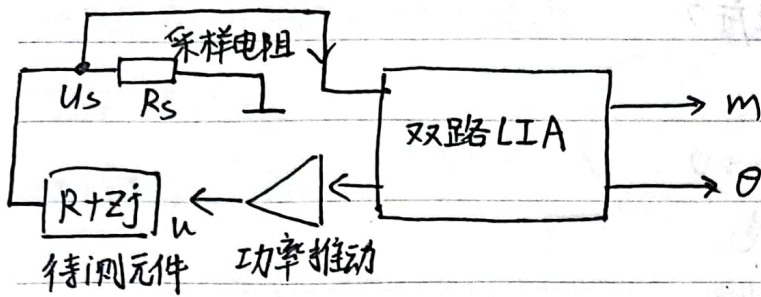
3. 消除光电管性能漂移

4. 应用双频斩波器，将低频信号 → 高频信号，放大电路工作在高频部分，噪声密度比低频部分小得多。

#### 锁定放大器 (LIA)



# 锁定放大器阻抗仪中的应用



$$i_s = \frac{u}{R + Zj + R_s}$$

$$U_s = \frac{u}{R + Zj + R_s} \cdot R_s$$

$$= \frac{u R_s (R + R_s)}{(R + R_s)^2 + Z^2} - \frac{u R_s Z}{(R + R_s)^2 + Z^2} j$$

$$\downarrow \qquad \qquad \downarrow$$

$$U_{sr} \qquad \qquad U_{si}$$

$$\frac{U_{sr}}{U_{si}} = \frac{R + R_s}{Z} = m$$

$$\Rightarrow U_{sr} = \frac{u R_s m Z}{(mZ)^2 + Z^2} \Rightarrow R \cdot Z$$

(脉冲宽度调制)

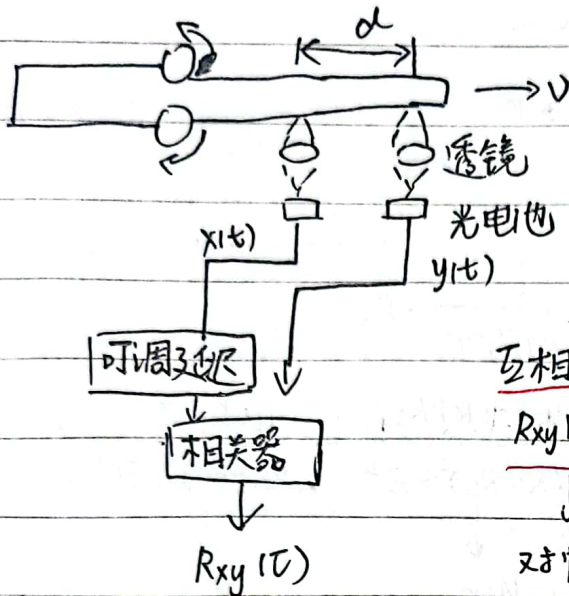
PWM 用于传输信号时的优点:

占空比  $\leftrightarrow$  信息  
映射

1. 可以传输信号的百分比, 不受导线电阻影响.
2. 前后电路的使用电压可以自由选取, 只要做好接口电路即可, 对精度无影响.

# 18 相关检测

如何非接触地测量钢板的速度?



互相关函数

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

对幅值敏感

∴ 用  $\rho_{xy}(\tau) = \frac{E\{[x(t) - \mu_x][y(t+\tau) - \mu_y]\}}{\sigma_x \sigma_y}$

标准差:  $\sigma_x = \sqrt{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T (x - \mu_x)^2 dt}$

均方根值:  $X_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} x^2(t) dt}$

自相关函数  $R_x(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t+\tau) dt$

自相关系数  $\rho_x(\tau) = \frac{E\{[x(t) - \mu_x][x(t+\tau) - \mu_x]\}}{\sigma_x^2}$

应用: 光电鼠标

导弹 (地形匹配)

输油管破损位置

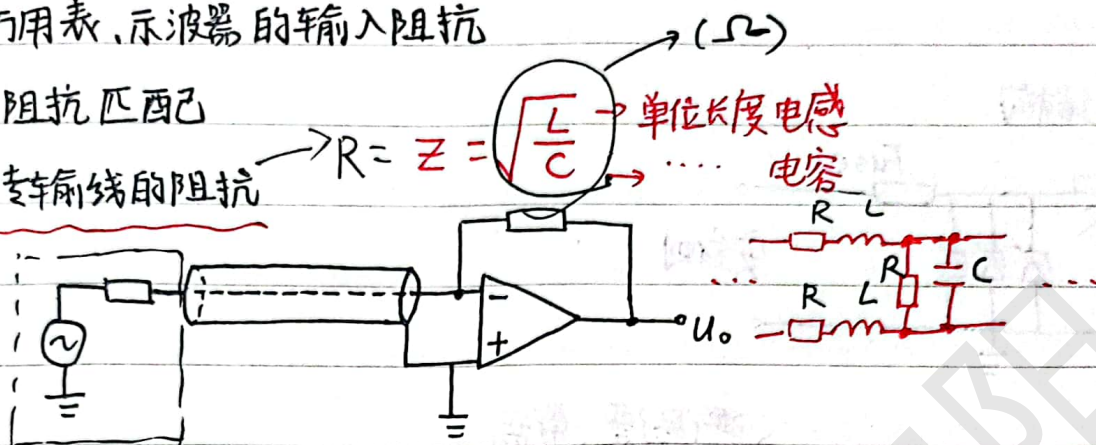


# 19 信号传输

→ 万用表、示波器的输入阻抗

→ 阻抗匹配

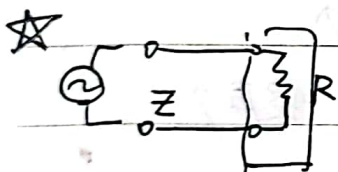
→ 传输线的阻抗



反向放大器，受到电缆分布的影响较小。

(跟据根据前面噪声可知，还是与长度有影响)

三同轴 (见前面)



当  $Z = R$  时，阻抗匹配，可从输入端看，相当于没有导线，信号完美地从输入 → 输出。

利用阻抗匹配获取最大信噪比

双绞线抗干扰 (磁场、电场分析都是)

~~在分布电容~~  $1/nC$

## 4-20mA 标准

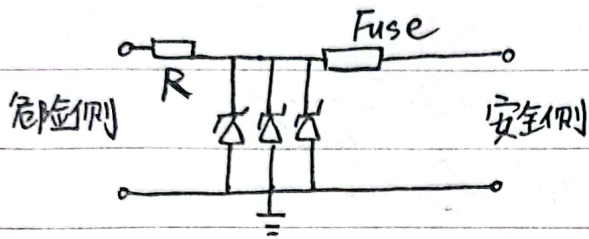
工业上常把传感器测量结果使用 4-20mA 电流进行较长距离的信号传输。

4-20mA 优点

1. 抗干扰能力强。
2. 可以同时传输信号和电源。
3. ~~电阻~~ 只与探测电阻有关，与导线电阻无关。
4. 能对线路故障进行判断。

# 现场总线

## 隔离栅结构



灵敏度、电阻、电压、噪声的辩证关系。  
√ 温漂、带宽

在阻值不变的情况下:

电压 $\uparrow$   $\rightarrow$  灵敏度 $\uparrow$  + 发热 $\uparrow$  (温漂 $\uparrow$ )

$R \uparrow \rightarrow S$  不变 + 发热 $\downarrow$  (温漂 $\downarrow$ ) + 噪声 $\uparrow$

$V \uparrow + R \uparrow \rightarrow S \uparrow$  + 温漂可保持不变 + 噪声 $\uparrow$

带宽 $\downarrow$   $\rightarrow$  噪声 $\downarrow$

$V \uparrow + R \uparrow +$  带宽 $\downarrow \rightarrow S \uparrow$  + 温漂可不变 + 分辨率可不变