

# 考试范围（石春班）

重点：

第一章——传感器概述

第二章——温度传感器

第三章——压力传感器

第五章——运动控制类传感器

了解：

第四章——流量传感器

第六章——光电传感器

## 第一章——传感器概述

### 1.传感器的组成：

敏感元件：直接感受被测量,输出与被测量成确定关系。

转换元件：敏感元件的输出就是转换元件的输入,它把输入转换成电量信号。

转换电路：把转换元件输出的电量信号转换为便于处理、显示、记录或控制的电信号的电路。



### 2.传感器的数学建模

静态模型

静态：不随时间变化的输入输出关系

例： $y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n$

动态特性

动态：随时间变化的输入输出关系

线性系统理论

### 3.动态特性（了解）

阶跃响应、bode 图等

### 4.静态特性

#### (1) 线性度

任何实际传感器都是非线性的

描述线性度:描述校准曲线与选定拟合直线的偏差程度

#### (2) 滞后（迟滞）

传感器正反行程中输入输出曲线的不重合程度

如：磁滞现象

#### (3) 重复性

多次测量的一致性程度

#### (4) 灵敏度（重点!）

传感器输出增量与被测输入量增量之比

#### (5) 分辨力

能检测的被测输入量的最小变化量

**(6) 阈值**

传感器输出端产生可测变化量的最小被测输入量值

**(7) 稳定性**

长时间保持其性能的能力

**(8) 飘移**

时间飘移：零点或灵敏度与时间的缓慢变化

温度漂移：温度变化引起的零点或灵敏度变化

**(9) 静态误差 (精度)**

在满量程内任一点输出值相对其理论值的可能偏移

## 第二章——温度传感器

**1.温标:**

$$T \text{ } ^\circ\text{F} = t \text{ } ^\circ\text{C} * 1.8 + 32$$

$$T \text{ } \text{K} = t \text{ } ^\circ\text{C} - 273.16$$

**2.测温分类:**

(1) 接触式 (缺点: 感温元件破坏被测物体的热平衡, 响应速度慢)

(2) 非接触式 (缺点: 精度低)

方式	接触式	非接触式
测量条件	感温元件要与被测对象良好接触; 感温元件的加入几乎不改变对象的温度; 被测温度不超过感温元件能承受的上限温度; 被测对象不对感温元件产生腐蚀	需准确知道被测对象表面发射率; 被测对象的辐射能充分照射到检测元件上
测量范围	特别适合1200°C以下、热容大、无腐蚀性对象的连续在线测温, 对高于1300°C以上的温度测量较困难	原理上测量范围可以从超低温到极高温, 但1000°C以下, 测量误差大, 能测运动物体和热容小的物体温度
精度	工业用表通常为1.0、0.5、0.2及0.1级, 实验室用表可达0.01级	通常为1.0、1.5、2.5级
响应速度	慢, 通常为几十秒到几分钟	快, 通常为2~3秒钟
其它特点	整个测温系统结构简单、体积小、可靠、维护方便、价格低廉, 仪表读数直接反映被测物体实际温度; 可方便地组成多路集中测量与控制系统	整个测温系统结构复杂、体积大、调整麻烦、价格昂贵; 仪表读数通常只反映被测物体表现温度(需进一步转换); 不易组成测温、控温一体化的温度控制装置

**3.接触式温度传感器分类:**

膨胀 (包括液体和固体膨胀) 式;

热阻 (包括金属热电阻和半导体热电阻) 式;

热电(包括热电偶和 PN 结) 式等多种形式

(了解测温范围)

测温方式	类别	原理	典型仪表	测温范围/°C
接触式测温	膨胀类	利用液体气体的热膨胀及物质的蒸汽压变化	玻璃液体温度计	-100~600
		利用两种金属的热膨胀差	压力式温度计	-100~500
	热电类	利用热电效应	双金属温度计	-80~600
			热电偶	-200~1800
	电阻类	固体材料的电阻随温度而变化	铂热电阻	-260~850
			铜热电阻	-50~150
其他电学类		热敏电阻	-50~300	
		半导体器件的温度效应	集成温度传感器	-50~150
		晶体的固有频率随温度而变化	石英晶体温度计	-50~120
光纤类	利用光纤的温度特性或作为传光介质	光纤温度传感器	-50~400	
		光纤辐射温度计	200~4000	
非接触式测温	辐射类	利用普朗克定律	光电高温计	800~3200
			辐射传感器	400~2000
			比色温度计	500~3200

**4.热膨胀式温度传感器 (了解)**

**(1) 分类:**

液体膨胀式玻璃温度计  
 液体或气体膨胀式压力温度计  
 固体膨胀式双金属温度计

**(2) 玻璃温度计**

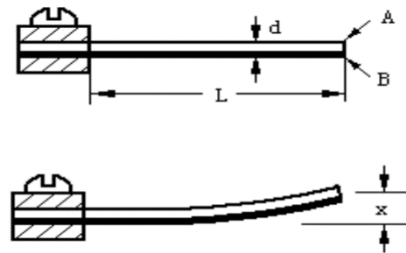
常用液体水银;  
 分类: 全浸式、局浸式

**(3) 压力传感器**

这类压力温度计其毛细管细而长(规格为 1—60m)  
 作用主要是传递压力, 长度愈长, 则使温度计响应愈慢, 在长度相等条件下, 管愈细, 则准确度愈高

**(4) 双金属温度传感器**

基于固体受热膨胀原理, 测量温度通常是把两片线膨胀系数差异相对很大的金属片叠焊在一起, 构成双金属片感温元件当温度变化时, 因双金属片的两种不同材料线膨胀系数差异相对很大而产生不同的膨胀和收缩, 导致双金属片产生弯曲变形。



**5. 热电偶温度计 (重点!)**

**(1) 原理:**

**[1] 热电势的组成: 接触电势+温差电势**

**[2] 接触电势——珀尔帖效应**

导体 A、B 在接触点 1、2 的接触电势  $e_{AB}(T)$  和  $e_{AB}(T_0)$

$$e_{AB}(T) = \frac{KT}{e} \ln \frac{n_A}{n_B}$$

$$e_{AB}(T_0) = \frac{KT_0}{e} \ln \frac{n_A}{n_B}$$

式中: K—波尔兹曼常数,  $K=1.38 \times 10^{-23}$ ;  
 T,  $T_0$ —接触点 1、2 的绝对温度;  
 $n_A, n_B$ —导体 A、B 的自由电子密度;  
 e—电子电荷量。

可以得出回路中总的接触电势为:

$$e_{AB}(T, T_0) = e_{AB}(T) - e_{AB}(T_0) = \frac{K(T - T_0)}{e} \ln \frac{n_A}{n_B}$$

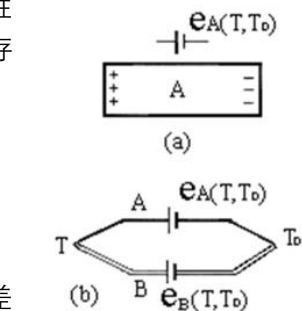
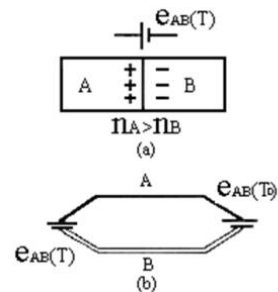
由此不难看出, 热电偶回路中的接触电势只与导体 A、B 的性质和两接触点的温差有关。当  $T=T_0$  时, 尽管两接触点处都存在接触电势, 但回路中总接触电势等于零。

**[3] 温差电势——汤姆逊效应**

由导体 A、B 所组成的回路总的温差电势为:

$$e_A(T, T_0) - e_B(T, T_0) = \int_{T_0}^T (\sigma_A - \sigma_B) dt$$

式中:  $\sigma_A, \sigma_B$  ——汤姆逊系数, 其含义是单一导体两端温度差为  $1^\circ\text{C}$  时所产生的温差电势。



**[4] 热电效应——塞贝克效应=珀尔帖效应+汤姆逊效应**

$$E_{AB}(T) = e_{AB}(T) - \int_0^T (\sigma_A - \sigma_B) dt$$

$$E_{AB}(T_0) = e_{AB}(T_0) - \int_0^{T_0} (\sigma_A - \sigma_B) dt$$

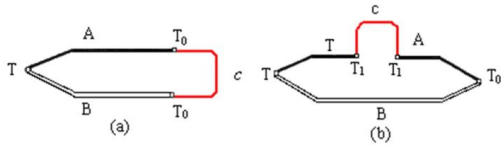
总热电势差:

$$E_{AB}(T, T_0) = e_{AB}(T, T_0) - \int_{T_0}^T (\sigma_A - \sigma_B) dt = \frac{K(T - T_0)}{e} \ln \frac{n_A}{n_B} - \int_{T_0}^T (\sigma_A - \sigma_B) dt$$

**(2) 热电偶基本定律 (注: 需熟知以下定律的证明)**

**[1] 中间导体定律**

$$E_{ABC}(T, T_0) = E_{AB}(T, T_0)$$



证明:

$$E_{ABC}(T, T_0) = e_{AB}(T) + e_{BC}(T_0) + e_{CA}(T_0) - e_A(T, T_0) - e_B(T_0, T) - e_C(T_0, T_0)$$

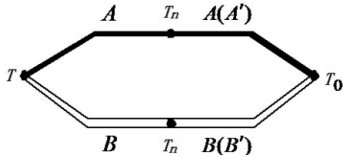
$$E_{ABC}(T, T_0) = \frac{KT}{e} \ln \frac{n_A}{n_B} + \frac{KT_0}{e} \ln \frac{n_B}{n_C} + \frac{KT_0}{e} \ln \frac{n_C}{n_A} - \int_{T_0}^T \sigma_A dt - \int_T^{T_0} \sigma_B dt - \int_{T_0}^{T_0} \sigma_C dt$$

$$\Rightarrow E_{ABC}(T, T_0) = \frac{K(T - T_0)}{e} \ln \frac{n_A}{n_B} - \int_{T_0}^T (\sigma_A - \sigma_B) dt = E_{AB}(T, T_0)$$

**[2] 连接导体定律/中间温度定律**

$$E_{ABB'A'}(T, T_n, T_0) = E_{AB}(T, T_n) + E_{A'B'}(T_n, T_0)$$

$$E_{AB}(T, T_n, T_0) = E_{AB}(T, T_n) + E_{AB}(T_n, T_0)$$



证明:

$$E_{ABB'A'}(T, T_n, T_0) = e_{AB}(T) + e_{B'B'}(T_n) + e_{B'A'}(T_0) + e_{A'A}(T_n) - e_A(T_n, T) - e_B(T, T_n) - e_{B'}(T_n, T_0) - e_{A'}(T_0, T_n)$$

$$E_{ABB'A'}(T, T_n, T_0) = \frac{K(T - T_n)}{e} \ln \frac{n_A}{n_B} + \frac{K(T_n - T_0)}{e} \ln \frac{n_{A'}}{n_{B'}} - \int_{T_n}^T (\sigma_A - \sigma_B) dt - \int_{T_0}^{T_n} (\sigma_{A'} - \sigma_{B'}) dt$$

$$\Rightarrow E_{ABB'A'}(T, T_n, T_0) = E_{AB}(T, T_n) + E_{A'B'}(T_n, T_0)$$

当  $A' = A, B' = B$  时, 即证中间温度定律

**[3] 标准电极定律**

如果已知热电偶的两个电极 A、B 分别与另一电极 C 组成的热电偶的热电势为  $E_{AC}(T, T_0)$  和  $E_{BC}(T, T_0)$ , 则在相同接点温度  $(T, T_0)$  下, 由 A、B 电极组成的热电偶的热电势  $E_{AB}(T, T_0)$  为:

$$E_{AB}(T, T_0) = E_{AC}(T, T_0) - E_{BC}(T, T_0)$$

C 称为标准电极

证略

**【4】常常 A 与 A'不同，原因是：**

A 作为感温元件，材料昂贵，A'作为连接材料可以选择更廉价的材料。

**【5】热电偶分度表：【中间温度定律】**

例：用 K 型镍铬—镍硅热电偶测量炉温时，当冷端温度  $T_0=30^\circ\text{C}$  时，测得热电势  $E(T,T_0)=39.17\text{mv}$ ，求实际炉温。

解：

由  $T_0=30$  查分度表得  $E(30, 0) = 1.2\text{mv}$ ，根据中间温度定律得：

$$E(T, 0) = E(T, 30) + E(30, 0)$$

$$= 39.17 + 1.2 = 40.37(\text{mv})$$

则查表得炉温  $T=977^\circ\text{C}$ 。

**(3) 热电偶使用遇到的问题：**

**【1】如何测量回路中的电信号？是小信号还是标准信号？**

信号调理（滤波、放大）；小信号

**【2】串入回路中仪表是否会影响回路中的电压？**

中间导体对热电偶的影响

**【3】冷端应该如何处理？**

参考温度端

**【4】测量表头应该放置在何处？**

延长导线

**(4) 热电偶的冷端补偿法**

热电偶输出电势是两节点温度差的函数，为了使输出电势成为被测温度  $T$  的单一函数，需要将  $T_0$  端作为固定冷端（参考电极），通常要求  $T_0$  保持为  $0^\circ\text{C}$ ，

否则： $E(T, 0) = E(T, T_0) + E(T_0, 0)$

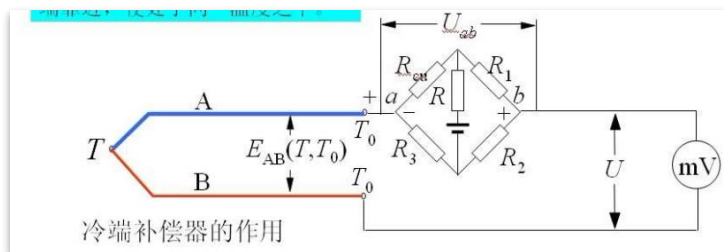
这就导致冷端补偿问题：

**【1】 $0^\circ\text{C}$ 恒定法：**将冷端放在温度恒为  $0$  的制冷器件中

**【2】修正系数法：**用预先测定的参数对冷端温度进行补偿

**【3】延伸热电极法（又称补偿导线法）：**将热电偶的冷端引伸到温度比较稳定的控制室内，然后进行冷端补偿

**【4】补偿电桥法：**用电桥电压随温度的变化来补偿热电偶冷端温度变化导致的电压变化



$R_{Cu}$  为热电阻。在  $0^\circ\text{C}$  下使电桥平衡( $R_1=R_2=R_3=R_{Cu}$ )，此时  $U_{ab}=0$ ，电桥对仪表读数无影响。供电 4V 直流，在  $0\sim 40^\circ\text{C}$  或  $-20\sim 20^\circ\text{C}$  的范围起补偿作用。注意，不同材质的热电偶所配的冷端补偿器，其中的限流电阻  $R$  不一样，互换时必须重新调整。(Cu 热电阻，正温度系数) 当冷端温度发生变化时， $T_0 \uparrow \Rightarrow R_{Cu} \uparrow \Rightarrow U_a \downarrow \Rightarrow U_{ab} < 0$ ， $T_0$  增大， $E_{AB}(T, T_0)$  减小，而  $U_{ab} < 0$  可以使  $E_{AB}(T, T_0)$  减小不那么大。

## 6.热阻式温度传感器

### (1) 分类:

金属导体——热电阻； 半导体——热敏电阻

### (2) 金属电阻温度计

对于绝大多数金属，电阻随温度升高而增大的特性方程为

$$R_t = R_{t_0}(1 + \alpha_1 t + \alpha_2 t^2 + \dots + \alpha_n t^n)$$

式中:

$R_t$  和  $R_{t_0}$  —— 分别为热电阻在  $t^\circ\text{C}$  和  $t_0^\circ\text{C}$  时的电阻值

$\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \dots \alpha_n$  —— 热电阻的温度系数 ( $1/^\circ\text{C}$ )，是温度的函数。

#### 【1】纯金属，原因:

温度系数  $\alpha_i$  越大，热电阻的灵敏度就越高。纯金属的温度系数  $\alpha_i$  比合金要高。所以，一般使用纯金属作热电阻感温元件。

#### 【2】元件有测温范围的原因:

在测量范围内，电阻温度系数要保持常数，温度系数  $\alpha_i$  是热电阻温度计的灵敏度。在测量范围内，要保持其常值特性，以确保输入输出线性，提高测量精度，实现热电阻温度计的线性刻度特性

#### 【3】采用较高电阻率的感温材料的原因:

可以减少热电阻体积和热惯性

### (3) 半导体电阻温度计:

#### 【1】分类:

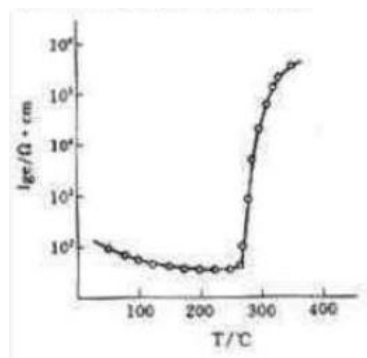
负温度系数热敏电阻 NTC

正温度系数热敏电阻 PTC

临界温度系数热敏电阻 CTR

#### 【2】PTC

超过居里温度时，电阻值随温度的升高呈阶跃性的增高



#### 【3】NTC

$$R_T = R_{T_0} e^{B(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})}$$

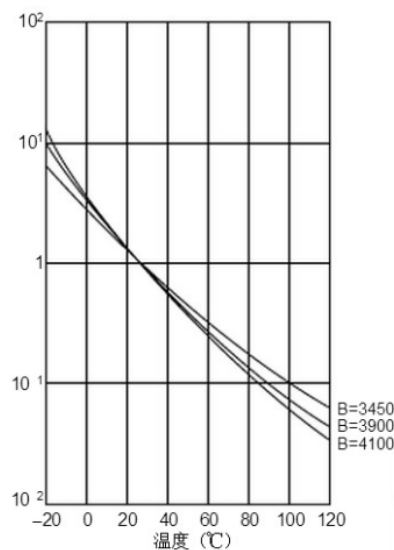
式中:  $R_T$  --- 温度为  $T$  时的电阻值

$R_{T_0}$  ---  $T_0$  温度下的电阻值

$B$  --- 热敏电阻材料常数

$B$  越大灵敏度越高

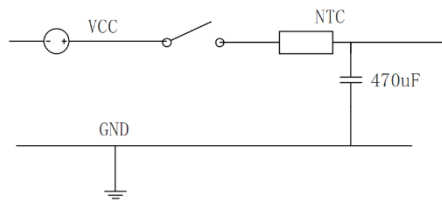
NTC 的作用: 温度测量、温度补偿、抑制浪涌电流



## 补充——抑制浪涌电流的实例：

### 如何起到抑制浪涌电流？

NTC 为负温度系数的热敏电阻，温度越高电阻越低；刚开始工作时温度低，NTC 电阻高，抑制浪涌电流避免火花，正式工作后温度升高 NTC 电阻变小避免减小工作电流。



### 电容接入各数字电路（开关电路）的作用：

缓冲电流

#### (4) 测温电路——单臂电桥

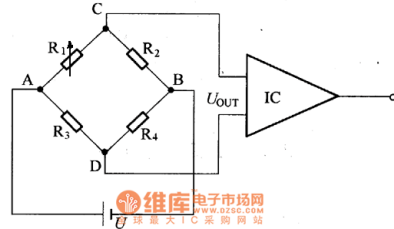
<1>直流电桥平衡条件：

$$R_1 R_3 = R_2 R_4$$

<2>输入-输出关系：

$$\text{令 } R_2 = R_3 = R_4 = R \quad R_1 = R - \Delta R$$

$$U_o/U_i = \frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} = \frac{R}{(2R - \Delta R)} - \frac{1}{2} = \frac{1}{2} \frac{\Delta R}{(2R - \Delta R)}$$



假若不作以上假设，记  $n_0 = \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3}$  (电桥平衡条件)

$$U_o/U_i = \frac{\frac{\Delta R}{R_1} \frac{R_4}{R_3}}{(1 - \frac{\Delta R}{R_1} + \frac{R_2}{R_1})(1 + \frac{R_4}{R_3})} = \frac{n_0}{(1 - \frac{\Delta R}{R_1} + n_0)(1 + n_0)} \frac{\Delta R}{R_1}$$

忽略分母的微量  $\frac{\Delta R}{R_1}$ ，于是：

$$U_o/U_i = \frac{n_0}{(1 + n_0)^2} \frac{\Delta R}{R_1}$$

优点：采用直流电桥，测量前，经调平，可以使输出信号从零点开始变化。

缺点：单臂电桥的输入输出特性是非线性，采用较大  $R_1$  值可以减小非线性误差，但降低灵敏度

## 7. PN 结式温度传感器——便于和半导体集成生产

### (1) 原理：

结电压随温度变化而变化 (测温范围 -50~200°C)

$$I = I_0 e^{\frac{qV}{2KT}}$$

式中， $I_0$ ——硅二极管反向饱和电流；

$q$ ——电子电荷； $K$ ——波尔兹曼常数； $T$ ——绝对温度

$$I = f(T) T^{3/2} e^{\frac{qV - E_g}{2KT}}$$

式中， $E_g$ ——硅在 0 K 时的禁带宽度

可以证明函数  $f(T)$  随温度的变化与  $T^{3/2}$  相抵消，故令  $S = f(T) T^{3/2}$

$$V = \frac{E_g}{q} - \frac{2KT}{q} (\ln S - \ln I)$$

## (2) 温敏二极管

### 【1】工作原理

根据 PN 结理论, 对于理想二极管, 当正向压降  $V_F$  大于几个  $KT/q$  时, 其与温度  $T$  的关系为:

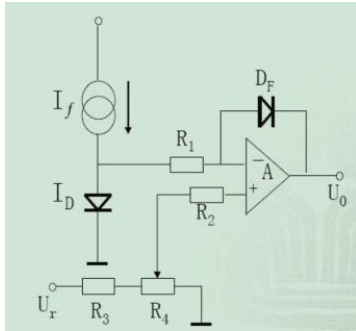
$$V_F = V_{go} - \frac{C_1 K}{q} T$$

式中,  $V_{go}$ ——绝对零度时 PN 结材料的导带与价带的电势差;

$C_1$ ——与 PN 结结构、电子迁移率有关

在一定测温范围内  $V_F$  与  $T$  成线性关系, 负温度系数

### 【2】测温电路



$I_D$  为测温的二极管、 $D_F$  起开环放大的作用

## (3) 温敏三极管

### 工作原理:

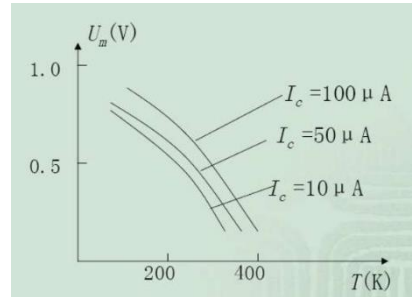
若三极管的发射结处于正向偏置, 并使集电极电流恒定, 则三极管基极与发射极之间的电压与温度的关系为:

$$V_{be} = V_{go} - \frac{C_2 K}{q} T$$

式中,  $V_{go}$ ——绝对零度时 PN 结材料的导带与价带的电势差;

$C_2$ ——与 PN 结结面积、集电极电流有关的常数

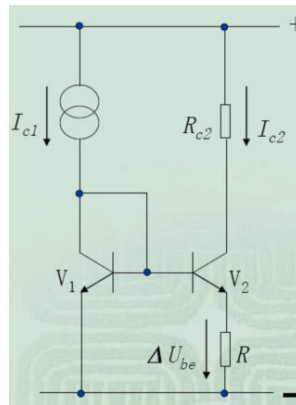
在一定测温范围内  $V_F$  与  $T$  成线性关系, 负温度系数



## (3) 集成温度传感器

### 【1】工作原理

$$\begin{aligned} \Delta U_{be} &= U_{be1} - U_{be2} \\ &= U_{g0} - \frac{C_1 K}{e} T - U_{g0} + \frac{C_2 K}{e} T \\ &= \frac{KT}{e} (C_2 - C_1) \\ C_2 - C_1 &= \ln \frac{I_{c1}}{I_{c2}} \end{aligned}$$



保证两个三极管的集电极电流之比不变, 便可以确保  $\Delta U_{be}$  与  $T$  成线性关系



## 【2】实例：AD22100

$$U_0 = \frac{U^+}{5V} [1.375V + (22.5mV / ^\circ C) T_A]$$

$T_A$  --- 被测对象温度；

$22.5mV / ^\circ C$  -- AD22100 器件的温度系数。

测温范围 -50~150°C

## 8. 辐射式（非接触式）温度传感器

### (1) 分类：

光学高温计

全辐射温度计

比色高温计

红外测温

红外成像测温仪

### (2) 基本原理：

【1】辐射式温度计的感温元件使用的波长范围为 0.3—40 $\mu$ m(可见光和红外光的波长区域)。

【2】绝对黑体：在任何温度下，均能全部吸收辐射到它上面的任何辐射能量

选择吸收体：对辐射能的吸收(或辐射)除与温度有关外，还与波长有关

灰体：吸收(或辐射)本领与波长无关

【3】热辐射：分子作热运动时物体将会向外辐射电磁波

单色辐出度： $M_\lambda(T) = \frac{dM(T)}{d\lambda}$

辐出度： $M(T) = \int_0^\infty M_\lambda(T) d\lambda$

【4】单色吸收比  $\alpha(\lambda, T)$ ：温度为 T 的物体吸收波长在  $\lambda$  到  $\lambda+d$  范围内的电磁波能量与相应波长的入射电磁波能量之比。

单色反射比  $r(\lambda, T)$ ：温度为 T 的物体反射波长在  $\lambda$  到  $\lambda+d$  范围内的电磁波能量与相应波长的入射电磁波能量之比。

两者关系  $\alpha(\lambda, T) + r(\lambda, T) = 1$

$\alpha(\lambda, T) = 1$  的理想物体为绝对黑体,简称黑体。

【5】平衡辐射：辐射出去的能量必定等于在相同时间内吸收的能量

热平衡时  $\frac{M_{\lambda,1}(T)}{\alpha_1(\lambda, T)} = \frac{M_{\lambda,2}(T)}{\alpha_2(\lambda, T)} = \dots = \frac{M_{\lambda,0}(T)}{\alpha_0(\lambda, T)}$

绝对黑体,  $\alpha_0(\lambda, T) = 1$ , 所以  $\frac{M_\lambda(T)}{\alpha(\lambda, T)} = M_{\lambda,0}(T)$

基尔霍夫辐射定律：任何物体的单色辐出度与单色吸收比之比，等于同一温度下绝对黑体的单色辐出度。

发射率 $\epsilon$ ：物体辐出度对同等情况下黑体辐出度的比

### 【6】黑体辐射规律

斯特藩-玻耳兹曼定律：黑体的辐射出射度与黑体温度的四次方成正比，即

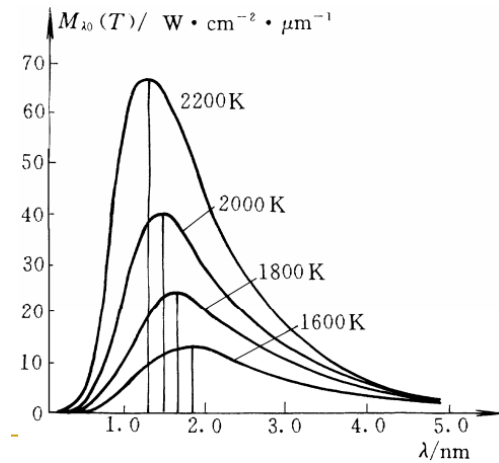
$$M_0(T) = \sigma T^4$$

其中  $\sigma = 5.67051 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$  称为斯特藩常量。

维恩位移律：随着黑体温度的升高，其单色辐射度最大值所对应的波长  $\lambda_m$  按照  $T^{-1}$  的规律向短波方向移动，即

$$\lambda_m T = b$$

其中常量  $b = 2.897756 \times 10^3 \text{ m K}$ 。



### 【7】

**维恩公式：**  $M_{\lambda_0}(T) = \frac{c_1}{\lambda^5} e^{-c_2/\lambda T}$  维恩公式只是在短波波段与实验曲线相符。

$$M_{\lambda_0}(T) = \frac{2ckT}{\lambda^4} \text{ (瑞利-金斯公式)}$$

瑞利-金斯公式在长波波段与实验相

$$E = n\varepsilon = n h \nu, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

$$M_{\lambda_0}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \left( \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \right) \text{ (普朗克辐射公式)}$$

### (3) 光学温度计

工作原理：

亮度温度：在波长为  $\lambda$ 、温度为  $T$  时，某物体的辐射亮度  $L$  与温度为  $T_L$  的绝对黑体的亮度  $L_0$  相等，则称  $T_L$  为这个物体在波长为  $\lambda$  时的亮度温度。其数学表达式为：

$$L(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T)L_0(\lambda, T) = L_0(\lambda, T_L)$$

对漫灰表面，辐射亮度  $L$  正比于辐射出射度  $M$

不同物体的发射率  $\varepsilon$  需要标定。

在常用温度和波长范围内，通常用维恩公式来近似表示光谱辐射亮度：

$$\varepsilon(\lambda, T) \frac{C_1}{\pi \lambda^5 e^{C_2/(\lambda T)}} = \frac{C_1}{\pi \lambda^5 e^{C_2/(\lambda T_L)}}$$

光学高温计是在波长为  $\lambda$  的单色波长下获得的亮度。这样，物体的真实温度为

$$T = \frac{C_2 T_L}{\lambda T_L \ln \varepsilon_\lambda + C_2}$$

### (4) 全辐射温度计：

全辐射温度计是根据全辐射定律，基于被测物体的辐射热效应进行工作的。

全辐射温度计由辐射敏感元件(热电偶串联)、光学系统、显示仪表及辅助装置等几大部分组成。

### (5) 比色温度计

比色温度定义为：绝对黑体辐射的两个波长  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的亮度比等于被测辐射体在相应波长下的亮度比时，绝对黑体的温度就称为这个被测辐射体的比色温度。

绝对黑体对应于波长  $\lambda_1$  与  $\lambda_2$  的光谱辐射亮度之比  $R$ ，可用下式表示：

$$R = \frac{L_{0\lambda_1}}{L_{0\lambda_2}} = \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^5 e^{\frac{C_2}{T_B} \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right)}$$

根据比色温度的定义，应用维恩公式，可导出物体的真实温度和其比色温度的关系：

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_B} = \frac{\ln \frac{\varepsilon(\lambda_1, T)}{\varepsilon(\lambda_2, T)}}{C_2 \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right)}$$

准确度相对光辐射温度计更高，适用恶劣环境

(6) 红外温度计 (不考)

$$W = \varepsilon \sigma T^4$$

$W$ ——物体单位面积所发射的辐射功率，数值上等于物体的全波辐射出射度；

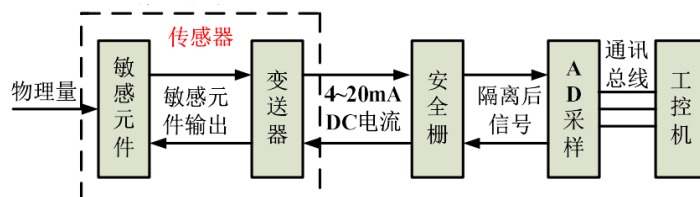
$\varepsilon$ ——物体表面的法向比辐射率；

$\sigma$ ——斯蒂芬—玻尔兹曼常数；

$T$ ——物体的绝对温度(K)

## 9. 温度传感器在工业生产中的应用

### (1) 工业生产流程

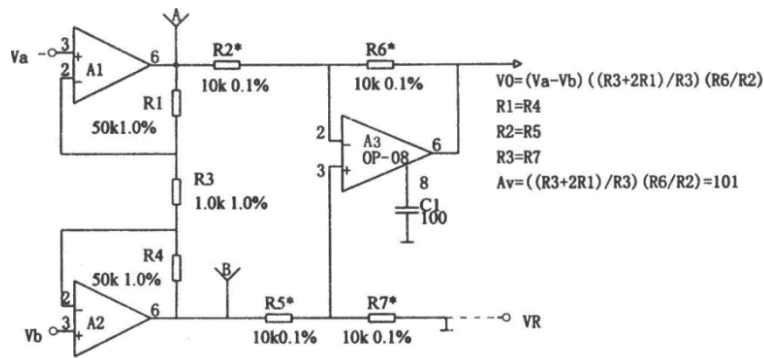


- 敏感元件：将被测物理量转换为电信号，或电可测量物理量，如电阻、电容、电感、形变、位移等，往往为弱信号。
- 变送器：将敏感元件输出转换成电信号、电信号放大，V/I 转换，输出 4-20mA DC
- 安全栅：限制中控室供给现场的电能，不产生引爆危险气体的火花和仪表表面温度，从而消除引爆源。
- AD 采样：数模转换，将模拟量转换成数字量进入工控机。
- 工控机：数据存储、显示、监控、闭环控制器设计等

### (2) V/I 转换：将电压信号转变成 4-20mA DC 电流

- 传输导线电阻影响小（电阻分压）
- 抗噪能力强（空间电辐射）
- 0-4mA 区间可用来进行故障诊断
- 20mA 电流通断引起的火花能量不足以引燃瓦斯

### (3) 仪用放大电路



输入信号的两个引脚都要接放大器？（要求共模抑制比 CMRR 大）  
 差动输入进行差分放大，可以抑制共模噪声信号。

### 第三章——压力传感器

1. 定义及力的转换：

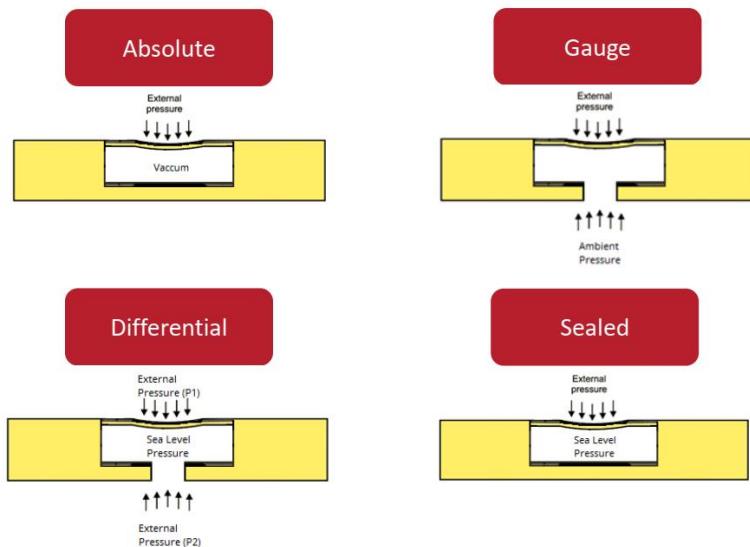
**【1】定义：**

压力是垂直而均匀地作用在单位面积上的力，即物理学中常称的压强。工程上，习惯把压强称为压力。由此定义，压力可表示为：

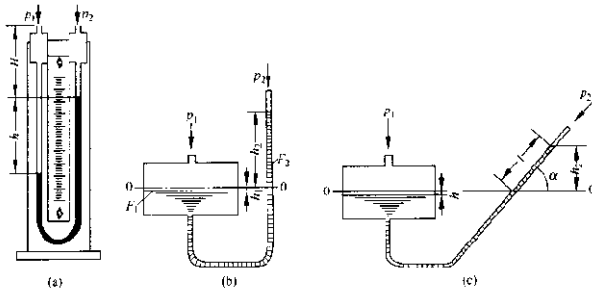
$$p = \frac{F}{S}$$

**【2】压力测量方法：**

绝压、差压、表压、相对密封容器压



<1>重力：液柱式压力计



<2>弹性力

敏感元件受压力作用产生弹性形变，进而由转换元件转换成电信号进行测量的一类方法  
各种弹簧管、弹性膜、波纹管等敏感元件  
应变片

<3>物性测量方法

敏感元件受压力作用进行产生物理特性变化，进而由转换元件转换成电信号进行测量的一类方法  
压阻式、压电式压力传感器

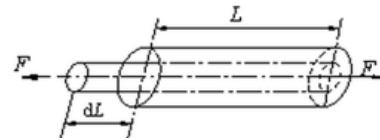
## 2. 电阻应变式压力传感器

(1) 工作原理：

电阻丝的电阻值为：

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

$\rho$ 电阻率； $l$ 长度； $A$ 横截面积  
遇轴向力时



$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} - \frac{dA}{A} + \frac{d\rho}{\rho}$$

轴向线应变： $\varepsilon = \frac{dl}{l}$        $\frac{dA}{A} = 2 \frac{dr}{r}$

在弹性范围内： $\frac{dr}{r} = -\mu \frac{dl}{l} = -\mu \varepsilon$

故  $\frac{dR}{R} = (1 + 2\mu)\varepsilon + \frac{d\rho}{\rho}$

应变灵敏系数： $K_s = \frac{dR}{R} / \frac{dl}{l} = 1 + 2\mu + \frac{d\rho}{\rho} / \varepsilon \Rightarrow \frac{\Delta R}{R} = K_s \varepsilon$

(2) 金属电阻应变片

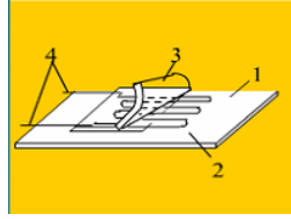
【1】原理：

$$\frac{d\rho}{\rho} = \frac{CdV}{V} = C d \ln V = C \left( \frac{dl}{l} + \frac{dA}{A} \right) = C(1 - 2\mu)\varepsilon$$

$$K_s = 1 + 2\mu + C(1 - 2\mu)$$

【2】结构：

- 1-基底、2-敏感栅、3-盖层、4-引线
- 基底：保持敏感栅固定的形状、尺寸、位置
- 敏感栅：实现应变-电阻转换的敏感元件
- 盖层：保护层
- 引线：连接敏感栅和测量电路



**【3】灵敏系数：**

$$\frac{\Delta R}{R} = k\varepsilon_x$$

应变计的灵敏系数比敏感栅应变丝的灵敏系数小，原因是与敏感栅的形状结构、成型工艺，粘结剂、粘贴工艺，基底性能有关；敏感栅圆弧部分横向效应的影响

**【4】横向效应及横向效应系数 H**

$$\frac{\Delta R}{R} = k_x\varepsilon_x + k_y\varepsilon_y = k_x\varepsilon_x(1 + \alpha H)$$

双向应变比  $\alpha = \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x}$

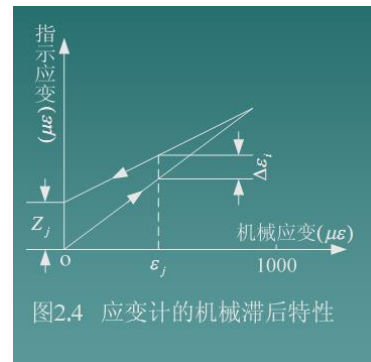
双向应变灵敏系数比  $H = \frac{k_y}{k_x}$

**【5】机械滞后**

<1>产生机械滞后的原因：

敏感栅基底和粘结剂材料性能变化，使用中过载过热，使应变计发生残余形变，导致应变计的输出不重合

<2>  $z_j < 3 - 10\mu\varepsilon \left(\frac{10^{-6}mm}{mm}\right)$



**【6】蠕变和零漂**

<1>蠕变：在恒温恒载条件下，指示应变量随时间单向变化

引起蠕变的原因：制作应变计时内部产生的内应力和工作中出现的剪应力，使丝栅与基底之间尤其是胶层之间产生“漂移”

措施：减薄胶层、基底，使之充分固化

<2>零漂：应变计初始空载时应变计的示值随时间变化

**【7】应变极限**

非线性误差达到 10%

**(3) 半导体电阻应变计**

$$\frac{d\rho}{\rho} = \pi\sigma = \pi\varepsilon E$$

$\varepsilon$ --- 半导体材料在受力方向上的压阻系数，各向异性

$E$ --- 半导体材料的弹性模量

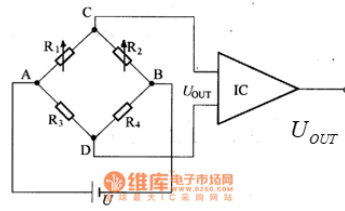
$\sigma$ --- 作用于材料的轴向应力

(4) 测量电路——直流电桥  
(单臂→双臂)

单臂:  $U_{OUT} \approx U \frac{n}{(1+n)^2} \frac{\Delta R_1}{R_1}$

双臂:  $U_{OUT} = U \frac{\Delta R}{R_1 + R_2}$

双臂直流电桥



电桥平衡条件:

$U_{OUT} = A(R_1 \cdot R_4 - R_2 \cdot R_3) = 0$

$R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3$

$U_{OUT} = U_{CD} = U_{CB} - U_{DB}$   
 $= \frac{R_2 + \Delta R}{R_1 - \Delta R + R_2 + \Delta R} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4}$   
 $= \frac{R_2 + \Delta R}{R_1 + R_2} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4}$   
 $= \frac{\Delta R}{R_1 + R_2}$

3. 电感式传感器

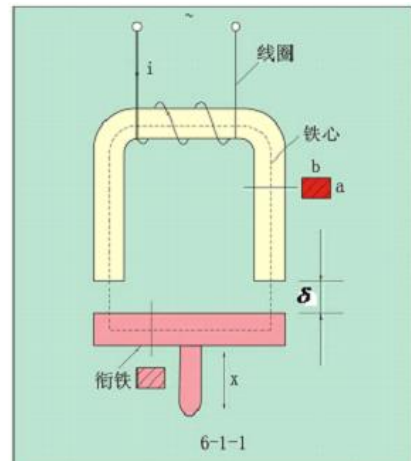
- (1) 核心原理: 电磁感应原理
- (2) 分类: 自感型、涡流型、互感型
- (3) 自感型电感传感器

【1】原理:

电磁感应:

$L = \frac{W\Phi}{i} = \frac{W^2}{R} = \frac{W^2 \mu_0 A}{2\delta}$

磁阻  $R = \frac{l}{A\mu}$



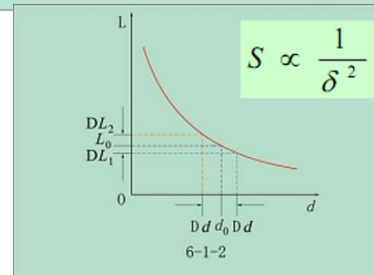
<1>变气隙式: (衔铁纵向运动)

$S = \frac{dL}{d\delta} = -\frac{W^2 \mu_0 A}{2\delta^2} = -\frac{L}{\delta}$

为获得较高灵敏度, 气隙初始值  $\delta_0$  应取稍小。  
为获得良好的线性度, 须限制测量范围, 控制位移:

$\Delta\delta \ll \delta_0 \quad \Delta\delta = (0.1 \sim 0.2)\delta_0$

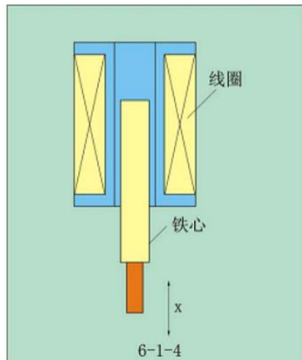
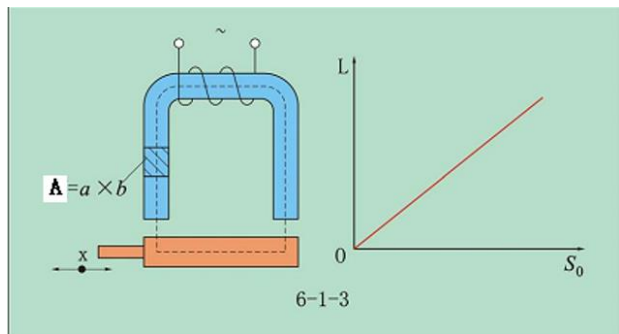
适用微小位移的测量, 测量范围 0.001~1mm



<2>变面积式: (横向)

$S = \frac{dL}{dx} = \frac{W^2 \mu_0}{2\delta}$  (常数)

输入-输出线性, 测量范围大  
为提高灵敏度, 气隙  $\delta$  取稍小



<3>螺管式自感传感器

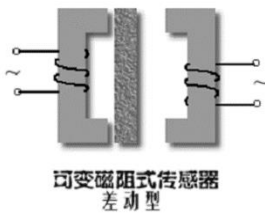
铁芯沿线圈纵轴运动, 改变磁阻, 使线圈自感发生变化。

结构简单, 容易制造

但灵敏度低

适用较大位移测量 (数毫米)

#### <4>差动式自感传感器



(变气隙式的差动式)

两个结构完全相同的自感线圈组合在一起形成差动式结构，可提高灵敏度，改善线性度。

$$L_1 = \frac{W^2 \mu_0 A}{2(\delta - \Delta\delta)} = L \left(1 - \frac{\Delta\delta}{\delta}\right)^{-1}$$

$$L_2 = \frac{W^2 \mu_0 A}{2(\delta + \Delta\delta)} = L \left(1 + \frac{\Delta\delta}{\delta}\right)^{-1} = L - \Delta L$$

在原点作泰勒展开，保留一次项

$$L_1 = L \left(1 + \frac{\Delta\delta}{\delta} + \dots + \left(\frac{\Delta\delta}{\delta}\right)^n + \dots\right)$$

$$L_2 = L \left(1 - \frac{\Delta\delta}{\delta} + \dots + \left(-\frac{\Delta\delta}{\delta}\right)^n + \dots\right)$$

$$\Delta L = L_1 - L_2 \approx 2L \frac{\Delta\delta}{\delta}$$

因此灵敏度： $S = \frac{dL}{d\delta} = 2 \frac{L}{\delta}$  为原来的两倍

#### 【2】测量电路（针对差动式自感传感器）——

交流电桥：

四臂用电抗  $Z$  代替直流电桥时的  $R$

平衡条件： $Z_1 Z_3 = Z_2 Z_4$

<2>电感电桥的初始平衡条件：

$$(R_1 + j\omega L_1)R_3 = (R_4 + j\omega L_2)R_2$$

即

$$R_1 R_3 = R_2 R_4$$

$$L_1 R_3 = L_2 R_2$$

(电容呢?)

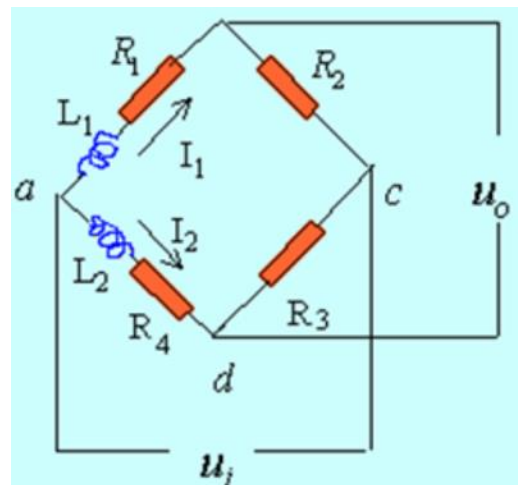
<3>输入-输出关系：

令  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ ,  $L_1 = L_0 - \Delta L$ ,  $L_2 = L_0 + \Delta L$

$$U_o/U_i = \frac{R_2}{R_1 + R_2 + j\omega L_1} - \frac{R_3}{R_3 + R_4 + j\omega L_2} = \frac{2j\omega R \Delta L}{(2R + j\omega L_0 - j\omega \Delta L)(2R + j\omega L_0 + j\omega \Delta L)}$$

幅值关系：(略)

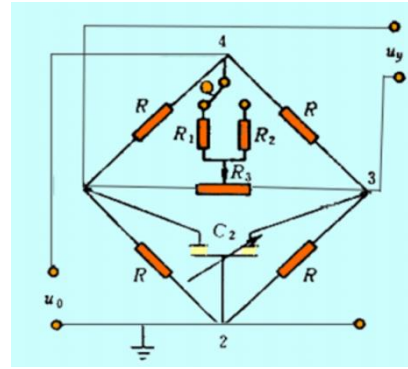
相角关系：(略)





<4>使用交流电桥前，需要进行电阻、电容的平衡调节，原因？

导线之间存在分布电容，相当于在各桥臂上并联一个电容，影响了各臂的阻抗值。



<5>

直流电桥（适合静态量的测量）

直流电桥的优点

稳定性好：直流电源作激励

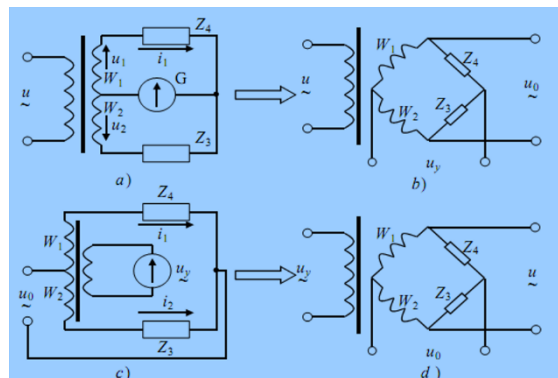
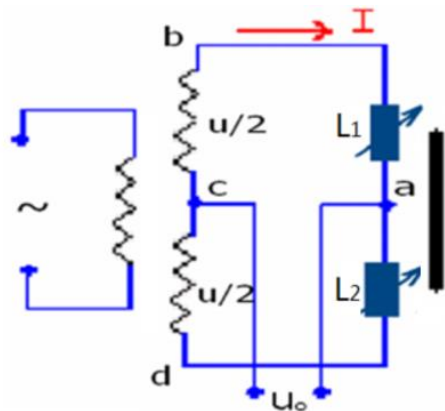
电路简单、输出直流、测量精度高

直流电桥不用考虑分布电容的影响

缺点：易引入工频干扰（由交流整流成直流时，直流受交流中的其他成分影响）；直流放大器较复杂，易受零漂、接地电位的影响。

交流电桥：要求电源稳定性

**[3] 测量电路——变压器电桥（灵敏度高，精度高，稳定性好）**



右图的  $Z_3 Z_4$  即为传感器的  $L$

$$u_o \approx \frac{L_2 - L_1}{L_2 + L_1} \frac{u}{2} = \pm \frac{u \Delta L}{2 L_0}$$

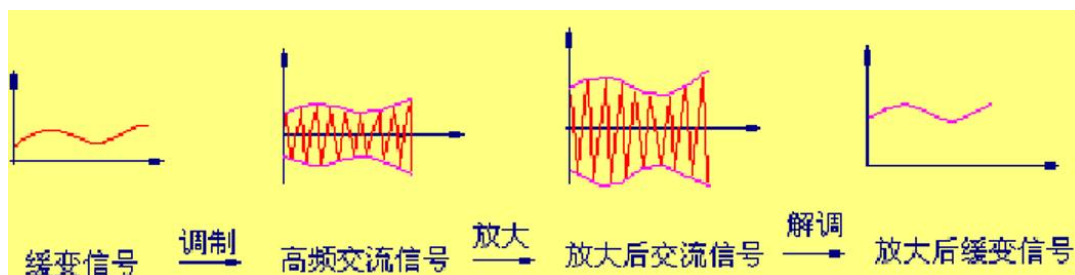
**[4] 交流电桥的调制与解调**

<1>为什么？

（传感器的输出信号往往为低频缓变的微弱信号，且往往有各种噪声信号。

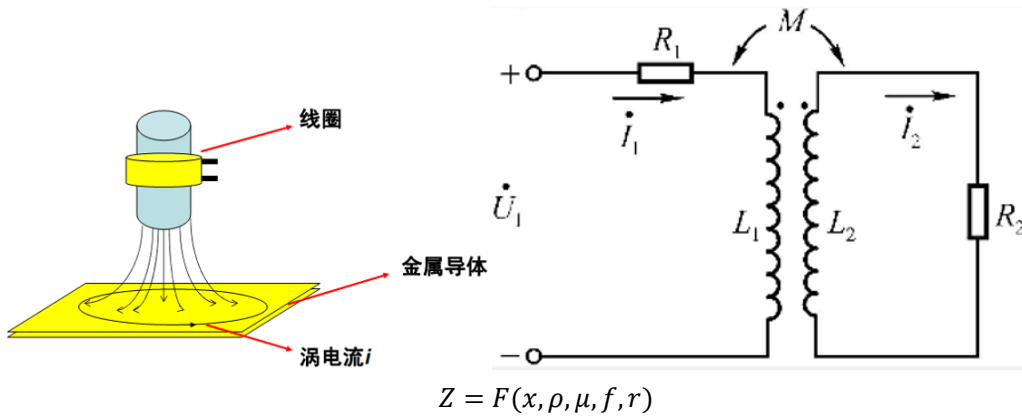
调制信号后，将输出信号与噪声分离，并作放大后再解调回需要的测量信号。）

解决微弱缓变信号的放大以及信号的传输问题，提高被测信号的抗干扰能力。



<2>具体调制解调原理，见信号与系统相关知识。

#### (4) 涡流式电感传感器



应用:

汽车生产线, 涡流传感器用于定位输送带滑翘

冷轧工厂, 涡流传感器用于检测管材的材质和直径

旋转轴偏心 and 径向振动测量

汽轮机叶片振幅测量、齿轮转速测量

工件表面探伤

#### (5) 互感式电感传感器

常采用两个次级线圈组成差动式变压器式传感器。

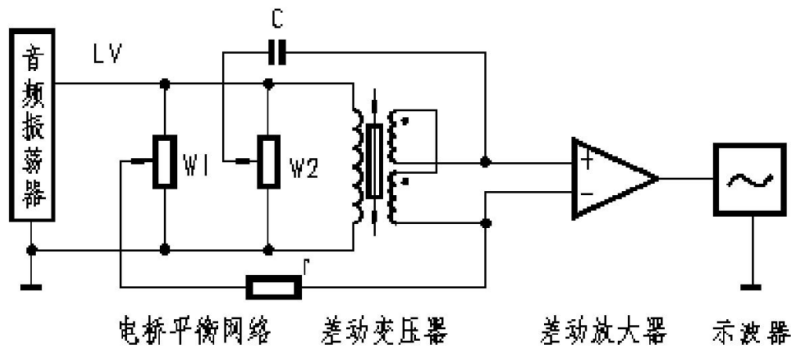


图22

$$u_o = e_1 - e_2$$

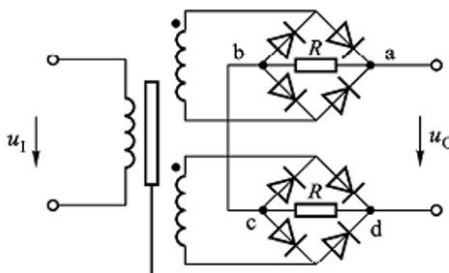
此处为传感器实验十七配图, 压力变化影响铁芯的位置变化, 进而影响差压  $u_o$

<1>零点残余电压:

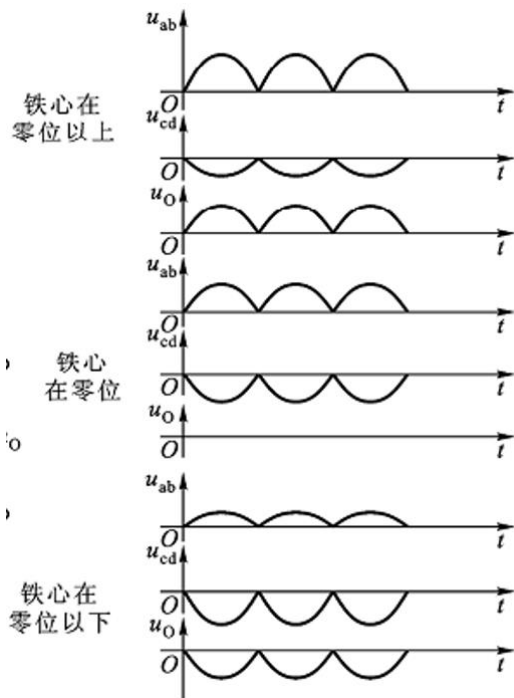
衔铁处于中间位置时输出不为零的现象。可以通过调节 W1、W2 来调节。

<2>如何通过  $u_o$  获得位移的大小、方向?

差动放大电路、相敏检波电路



$$u_o = u_{ab} + u_{cd}$$



<3>优点：精度高、线性范围大、稳定性好、结构简单、使用方便  
 缺点：不宜测量高频动态变化（包含机械结构，频率响应较低）

#### 4. 电容式压力传感器

##### (1) 原理：

将被测量转换为电容量的变化  
 平行板电容器的电容：

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

##### (2) 极距 $\delta$ 变化

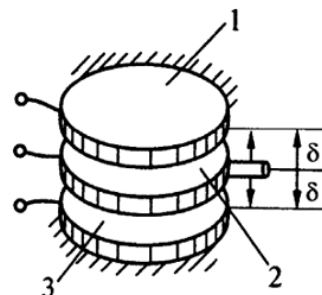
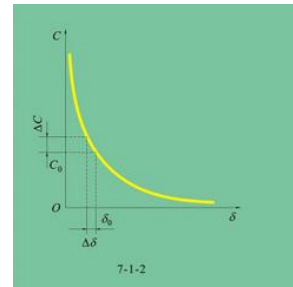
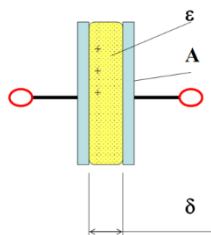
灵敏度： $S = \frac{dC}{d\delta} = -\frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{\delta^2} = -\frac{C}{\delta}$

为获得较高灵敏度，极距初始值 $\delta_0$ 应取稍小。

为获得良好的线性度，须限制测量范围，控制位移：

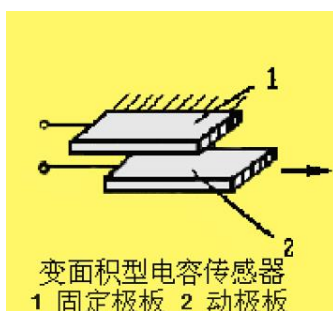
$$\Delta\delta \ll \delta_0 \quad \Delta\delta = (0.01 \sim 0.1)\delta_0$$

适用微小位移的测量，测量范围 0.01~100 $\mu$ m



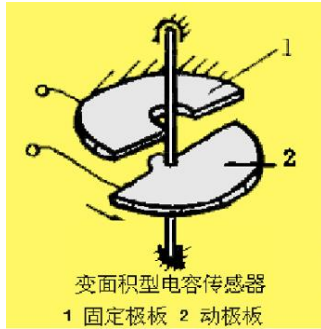
右图为差动式极距变化型电容传感器

##### (3) 面积变化型



灵敏度：

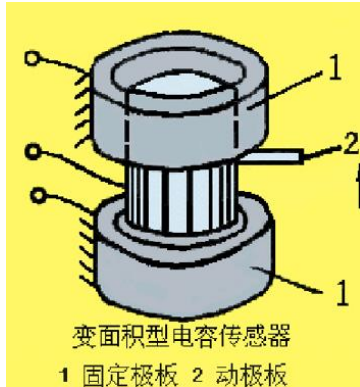
$$S = \frac{dC}{dx} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r b}{\delta} \quad (\text{常数})$$



灵敏度:

$$S = \frac{dC}{d\alpha} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r r^2}{2\delta} \quad (\text{常数})$$

常用圆柱形 (平板型的移动可能会影响极矩, 影响测量精度)



圆筒形电容器的电容:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r x}{\ln(D/d)}$$

灵敏度:

$$S = \frac{dC}{dx} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln(D/d)} \quad (\text{常数})$$

优点: 输入-输出成线性关系

缺点: 灵敏度较低, 适用较大角度及直线位移的测量

#### (4) 介电常数变化型

无介质时:

$$C_0 = \frac{bl}{\delta/\epsilon_1}$$

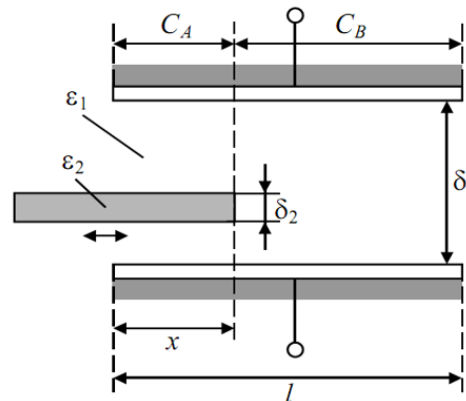
有介质时:

$$C = C_A + C_B \text{ (并联)}$$

$$C_A = \frac{C_{\epsilon_1} C_{\epsilon_2}}{C_{\epsilon_1} + C_{\epsilon_2}} \text{ (串联)} = \frac{1}{\frac{(\delta - \delta_2)/\epsilon_1}{bx} + \frac{\delta_2/\epsilon_2}{bx}} = \frac{bx}{\delta_1/\epsilon_1 + \delta_2/\epsilon_2}$$

$$C_B = \frac{b(l-x)}{\delta/\epsilon_1}$$

$$C = C_A + C_B = C_0 - C_0 \frac{x}{l} \left( 1 - \frac{\frac{\delta}{\epsilon_1}}{\frac{\delta_1}{\epsilon_1} + \frac{\delta_2}{\epsilon_2}} \right) = C_0 - C_0 \frac{x}{l} \frac{\frac{\epsilon_1}{\delta_1} - 1}{\frac{\delta_1}{\delta_2} + \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}}$$



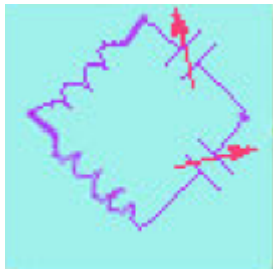
灵敏度:

$$S = \frac{dC}{dx} = -C_0 \frac{1}{l} \frac{\frac{\epsilon_1}{\delta_1} - 1}{\frac{\delta_1}{\delta_2} + \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}} \quad (\text{常数})$$

常用于测量电介质的厚度、位移、液位、温度、湿度、容量

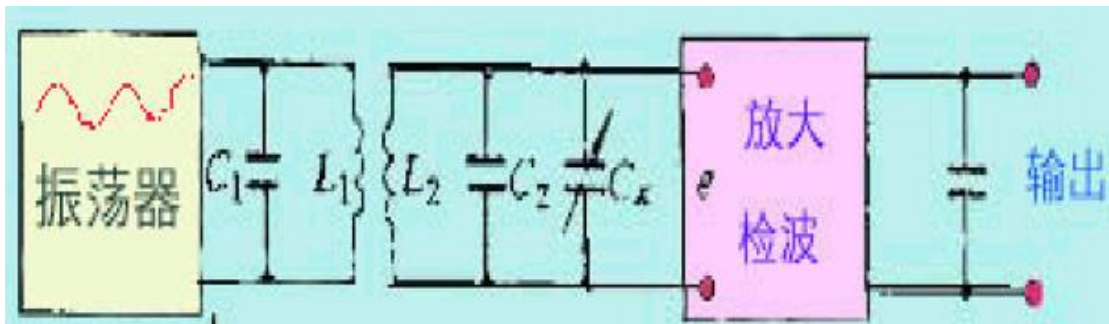
(5) 测量电路

【1】电桥电路

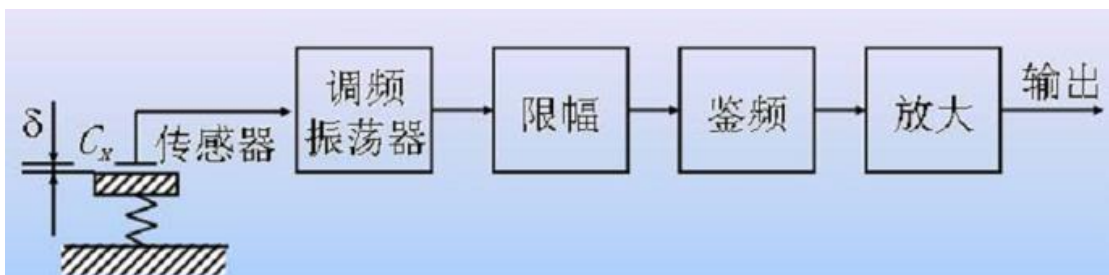


$$u_o \approx \frac{C_1 - C_2}{C_2 + C_1} u = \pm \frac{u \Delta C}{2 C_0}$$

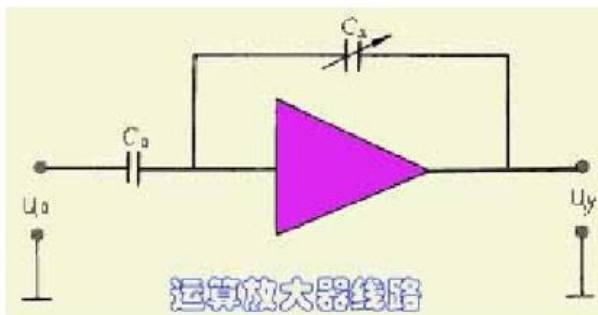
【2】谐振电路



【3】调频电路



【4】运算放大电路



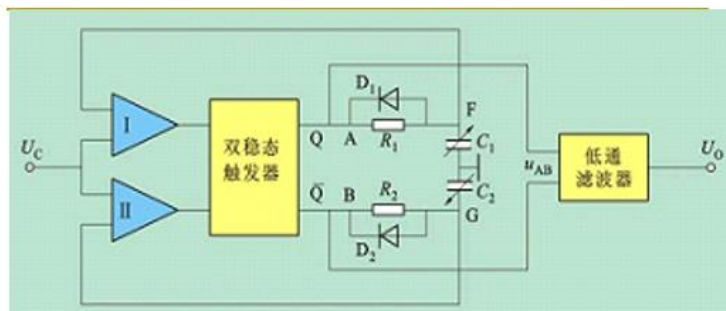
$$u_y = -u_0 \frac{C_0}{C_x} = -u_0 \frac{C_0 \delta}{\epsilon_0 \epsilon_r A}$$

输出电压与间隙成线性关系。

【5】脉冲宽度调制电路

$$U_0 = U_1 \frac{\Delta \delta}{\delta_0}$$

直流输出电压与输入(间隙变化)成线性关系。



**【6】 电容式传感器的优点:**

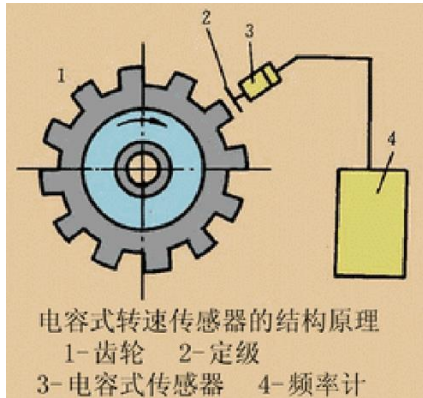
输入能量小、灵敏度高, 能量损耗小  
精度高 (0.01%)

动态特性好, 适合测量动态参数

结构简单, 环境适应性好

缺点: 电缆分布电容影响大。(集成电路、双屏蔽传输电缆降低分布电容的影响)

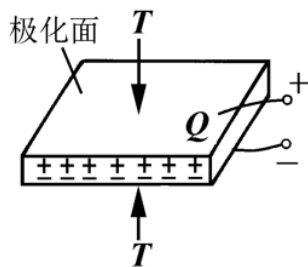
**【7】 应用——电容式转速计**



$$n = 60 \frac{f}{z} (r/min)$$

**5. 压电式压力传感器**

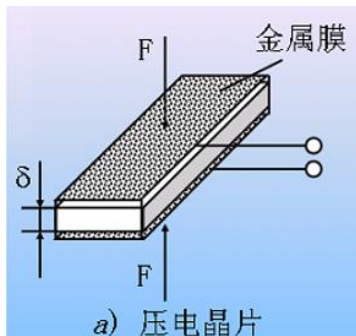
**(1) 压电效应**



d——压电常数矩阵  
D——电位移  
 $\sigma$ ——电荷密度

$$D = dT \quad \sigma = dT$$

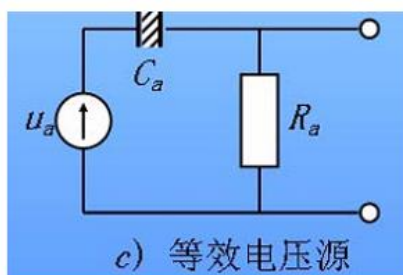
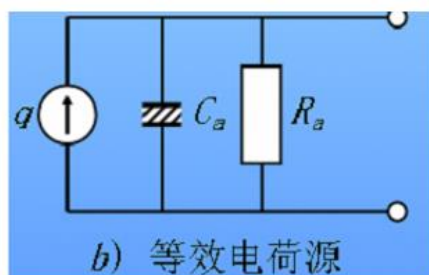
**(2) 压电晶片**



$$C_a = \frac{\epsilon_0 \epsilon A}{\delta}$$

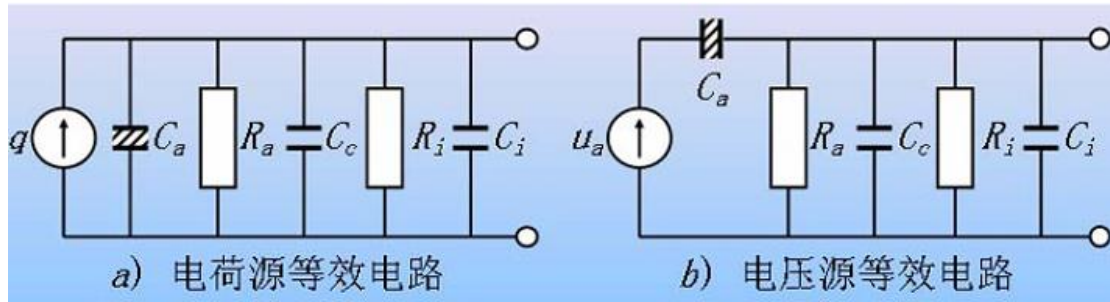
$$u_a = \frac{q}{C_a}$$

等效电路——等效电荷源、等效电压源



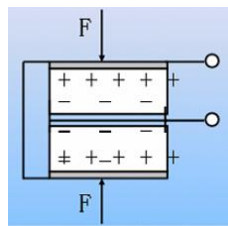


考虑负载效应:



$C_c$  传输电缆分布电容,  $R_i$   $C_i$  放大器输入阻抗、容抗

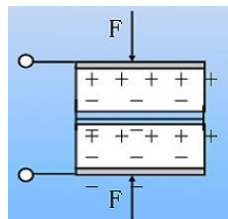
(3) 压电晶片的并联、串联



【1】 并联

输出电荷量大、电容大、时间常数大;

适用测量缓变信号和以电荷输出的场合

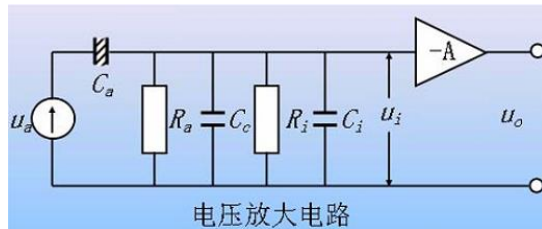


【2】 串联

输出电压大、电容小、时间常数小;

适用测量高频信号和以电压输出的场合

(4) 测量电路——电压放大器



设作用在压电晶片上的交变力  $F = F_0 \sin \omega t$

$$q = d_c F = d_c F_0 \sin \omega t$$

$$u_a = q / C_a = \frac{d_c F_0}{C_a} \sin \omega t$$

$$U_i(s) / U_a(s) = \frac{sRC_a}{sRC + 1}$$

其中  $R = R_a // R_i$   $C = C_a + C_c + C_i$

幅值关系:

$$A(\omega) = \frac{\omega RC_a}{\sqrt{(\omega RC)^2 + 1}}$$

相角关系:

$$\Phi(\omega) = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \omega RC$$

输入端电压幅值:

$$U_{im} = \frac{\omega R}{\sqrt{(\omega RC)^2 + 1}} d_c F_0$$

输出端电压幅值:

$$U_{om} \approx A U_{im}$$

灵敏度:

$$S_{U_o} = \frac{dU_{om}}{dF_0} = \frac{A\omega R}{\sqrt{(\omega RC)^2 + 1}} d_c$$

当作用力频率 $\omega$ 与时间常数 $RC$ 足够大时 $\omega RC \gg 1$

$$U_{om} \approx A U_{im} \approx A \frac{d_c}{C} F_0 = \frac{A d_c}{C_a + C_c + C_i} F_0$$

$$S_{U_o} \approx \frac{A d_c}{C_a + C_c + C_i}$$

### 【1】分布电容的影响?

由上式知, 电缆长度、布线方法改变时,  $C_c$ 分布电容发生变化,  $U_{om}$ 和 $S_{U_o}$ 都会改变, 导致测量误差。

### 【2】静态特性?

当作用静态力为恒力时,  $\omega = 0$ ,  $U_{om}$ 和 $S_{U_o}$ 均为 0。压电传感器不能测量静态力

若为变化频率很慢的力, 必须确保时间常数足够大, 以确保 $\omega RC \gg 1$ , 减小 $\omega$ 对 $U_{om}$ 和 $S_{U_o}$ 的影响, 一般增大时间常数的方法为增加 $R_i$

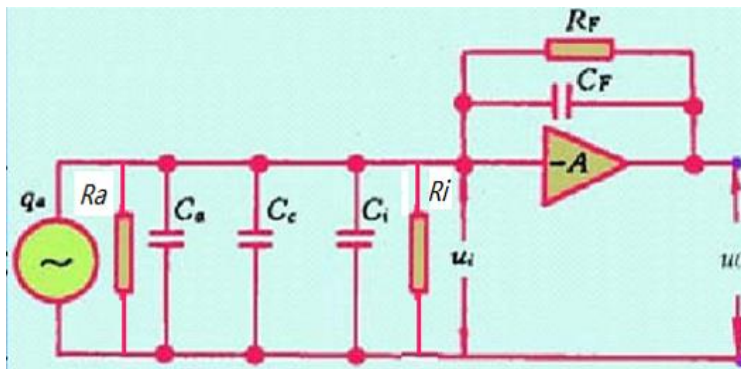
(增大电容 $C$ 会降低灵敏度, 一般 $R_a$ 很大)

下限截止频率:  $f = \frac{1}{2\pi R_i C}$

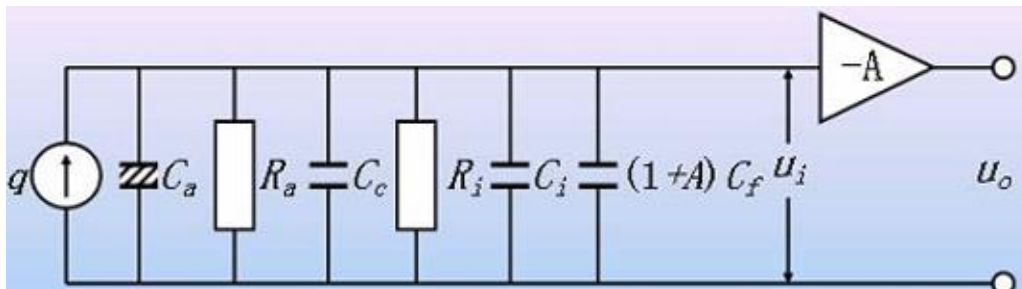
### 【3】压电传感器适合动态测量, 原因?

$\omega$ 较大, 易满足 $\omega RC \gg 1$ , 此时 $U_{om}$ 和 $S_{U_o}$ 与 $\omega$ 近似无关, 有良好的高频响应特性。

### (5) 测量电路——电荷放大器



等效电路:





过程略

输入端电压幅值:

$$U_{im} = \frac{\omega R}{\sqrt{(\omega RC)^2 + 1}} d_c F_0$$

其中  $R = R_a // R_i$   $C = C_a + C_c + C_i + (1 + A)C_f$

输出端电压幅值:

$$U_{om} \approx A U_{im}$$

当作用力频率  $\omega$  与时间常数  $RC$  足够大时  $\omega RC \gg 1$

$$U_{om} \approx A U_{im} \approx A \frac{d_c}{C} F_0 = \frac{A d_c}{C_a + C_c + C_i + (1 + A)C_f} F_0$$

若  $A$  足够大 (100dB 以上), 便有  $(1 + A)C_f \gg C_a + C_c + C_i$

$$U_{om} \approx \frac{d_c}{C_f} F_0$$

灵敏度:

$$S_{U_o} = \frac{dU_{om}}{dF_0} \approx \frac{d_c}{C_f}$$

### 【1】 $R_f$ 的作用?

若只采用电容负反馈, 电荷放大器对直流工作点相当于开环, 零点漂移较大。

为减小零漂, 使电荷放大器工作稳定, 在反馈电容两端并联  $100M\Omega$  的电阻, 提供直流反馈

### 【2】下限截止频率

$$f = \frac{1}{2\pi R_i C_f}$$

### (6) 比较电压放大器、电荷放大器

电荷放大器电路复杂、价格昂贵

电压放大器下限截止频率较高、灵敏度与电缆分布电容有关

### (7) 压电传感器的特点

能量转换型传感器

体积小、重量轻、刚性好, 可以提高固有频率, 得到较宽的工作频率范围

灵敏度高, 稳定性好, 可靠性好

线性性好, 通常无滞后

**低频特性差, 主要用于动态测量**

存在横向效应, 影响测量结果

要求严格绝缘, 使用低电容、低噪声电缆

## 第四章——流量传感器

### 1. 流量概念、单位

#### (1) 瞬态流量

流体的流量是指在短暂时间内流过某一流通截面的流体数量与通过时间之比, 该时间足够短以致可认为在此期间的流动是稳定的。此流量又称瞬时流量。

流体数量以体积表示称为体积流量, 流体数量以质量表示称为质量流量。

$$q_v = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{\Delta t} = uA \quad q_m = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{\Delta t} = \rho uA \quad q_m = \rho q_v$$

A——截面面积, u——流速,  $\rho$ ——流体密度

$q_v$  的单位  $m^3/s$      $q_m$  的单位:  $kg/s$

$$\bar{u} = \frac{q_v}{A} = \frac{\int u dA}{A}$$

#### (2) 累计流量

$$Q_v = \int_0^t q_v dt \quad (m^3) \quad Q_m = \int_0^t q_m dt \quad (kg)$$

### 2. 流量计分类

#### (1) 体积流量计

差压式流量计: 通过测量流体差压信号

容积式流量计: 利用标准小容积来连续测量流量

速度式流量计: 直接测量流体(平均)流速来得出流量

#### (2) 质量流量计

推导式质量流量计: 直接检测与质量流量成比例的量来质量流量

直接式质量流量计: 同时测体积流量和流体密度来计算质量流量

### 3. 流量计的主要技术参数

#### (1) 量程、量程比

量程: 流量范围指可测最大流量和最小流量所限定的范围。

在这个范围内, 仪表在正常使用条件下示值误差不超过最大允许误差。

量程比: 最大流量与最小流量的比值

一般表达为某数与 1 之比, 流量计量程比的大小受仪表的原理与结构所限制。

#### (2) 测量精度、误差

流量仪表的精度等级是根据允许误差的大小来划分的, 其精度等级有: 0.02、0.05、0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5 等。

#### (3) 压力损失

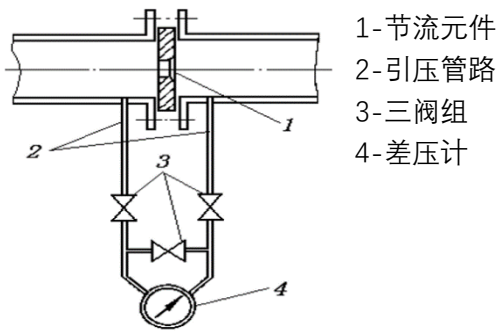
安装在流通管道中的流量计实际上是一个阻力件, 流体在通过流量计时将产生压力损失, 这会带来一定的能源消耗。

各种流量计的压力损失大小是仪表选型的一个重要指标。

压力损失小, 流体能消耗小, 输运流体的动力要求小, 测量成本低。反之则能耗大, 经济效益相应降低。故希望流量计的压力损失愈小愈好

## 4.差压式流量计

### (1) 节流式流量计



#### 【1】适用流体:

- a. 牛顿流体，在物理学和热力学上是均匀的、单相的，或者可认为是单相的流体。
- b. 流体必须充满管道和节流装置且连续流动，流经节流件前流动应达到充分紊流，流束平行于管道轴线且无旋转，流经节流件时不发生相变。
- c. 流动是稳定的或随时间缓变的。

#### 【2】差压计

可将测得的差压信号转换为 0.02-0.1 MPa 的气压信号和 4-20mA 的直流电流信号。

### (2) 转子流量计

#### 【1】原理:

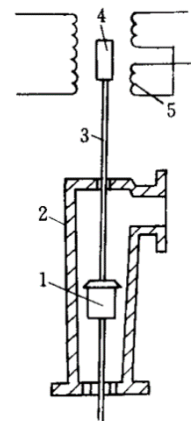
利用节流原理测量流体的流量，但它的差压值基本保持不变，是通过节流面积的变化反映流量的大小，故又称恒压降变截面流量计，也有称作浮子流量计。

#### 【2】适用流体:

适用于中小管径、中小流量和较低雷诺数的流量测量。

#### 【3】分类

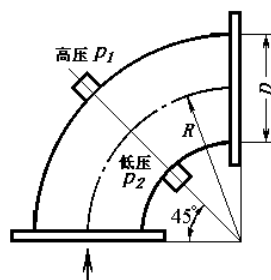
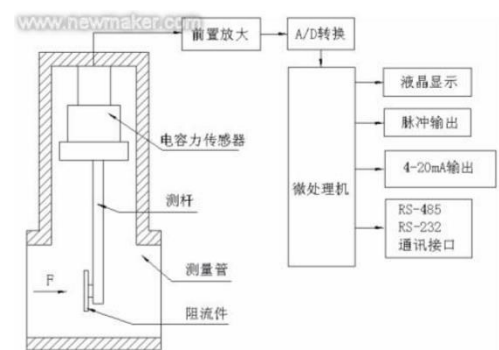
根据锥形管材质分为玻璃管转子流量计、金属管转子流量计



### (3) 靶式流量计

#### 适用流体:

适用于测量高粘度、低雷诺数流体流量的流量测量仪表，例如用于测量重油、沥青、含固体颗粒的浆液及腐蚀性介质的流量

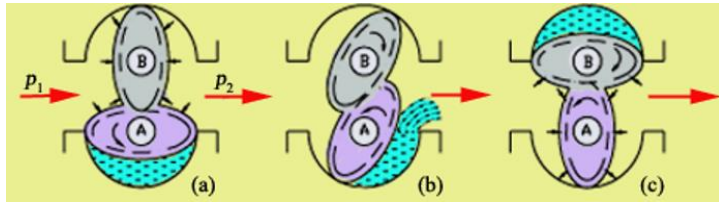


### (4) 弯管流量计

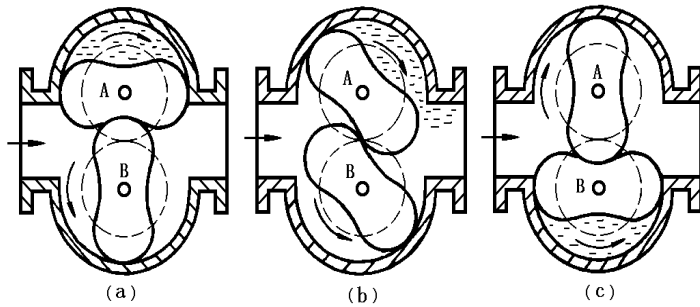
弯管流量计是一种可用于任何工艺管道流量测量的装置。

## 5. 容积式流量计

### (1) 椭圆齿轮流量计



### (2) 腰轮流量计

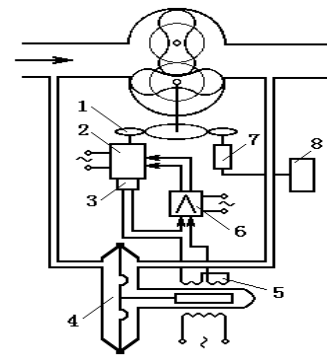


### (3) 伺服式容积流量计

在流量计工作时，腰轮由伺服电机通过传动齿轮带动，伺服电机转动的快慢，随流体进出口压力差的大小而改变。

**特点：压差趋近于零**

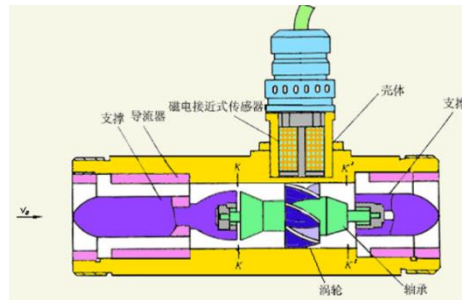
这种近于无压差的流量计，使泄漏量减小到最低限度，因而可以实现小流量的高精度测量，而且测量误差几乎不受流体压力、粘度和密度的影响。



1-传动齿轮； 2-伺服电机；  
3-反馈测速发电机；4-微差压变送器；  
5-差动变压器；6-伺服放大器；  
7-DC测速发电机；8-显示记录器

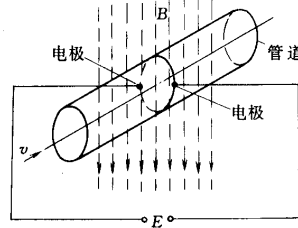
## 6. 速度式流量计

### (1) 涡轮流量计

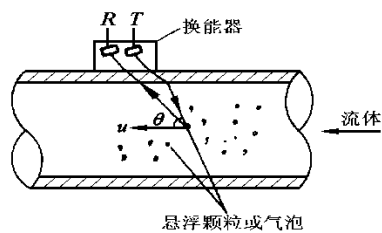


### (2) 电磁流量计

适用流体：导电性的液体介质



### (3) 超声波流量计



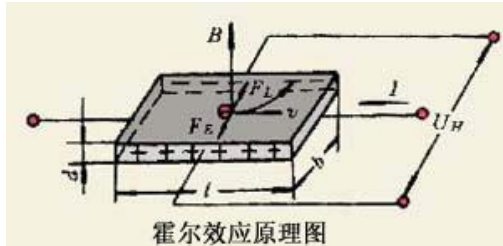
# 第五章——运动控制类传感器

## 1. 位移测量

### (1) 原理:

位移测量包括线位移测量和角位移测量。

- 【1】积分法
  - 【2】线位移和角位移相互转换
  - 【3】位移传感器法
- (2) 霍尔传感器



霍尔效应原理图

原理:

霍尔电压:  $V_H = vBb$

载流子电流:  $I_H = vdbne$

联立:

$$V_H = \frac{1}{ne} \frac{I_H B}{d}$$

记霍尔系数  $R_H = \frac{1}{ne}$  乘积灵敏度  $K_H = \frac{1}{ned}$

当金属薄片沿图中 x 方向水平移动时, 感受到的平均磁场发生变化, 进而导致输出霍尔电势发生变化

### (3) 感应同步器

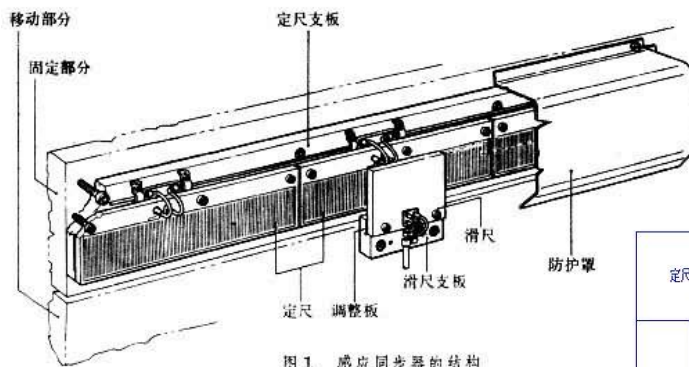


图1 感应同步器的结构

#### 【1】励磁类型

单相励磁: 定尺励磁, 滑尺感应  
两相励磁: 滑尺励磁, 定尺感应

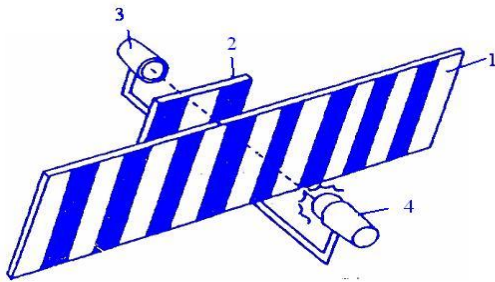
#### 【2】信号处理

鉴相型输出信号处理

鉴幅型输出信号处理

定尺绕组	
滑尺绕组位置	1
	2
	3
	4
	5
定尺感应电势变化情况	

#### (4) 光栅尺



- 1—标尺光栅;
- 2—指示光栅;
- 3—光源;
- 4—光电元件;

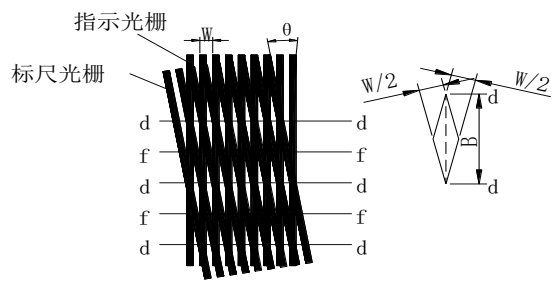
##### 【1】莫尔条纹

当指示光栅和标尺光栅的线纹相交一个微小的夹角时，由于挡光效应和光的衍射作用，在与光栅线纹大致垂直的方向上产生亮、暗相间的条纹

莫尔条纹的间距  $B$  与光栅线纹夹角  $\theta$  的关系：

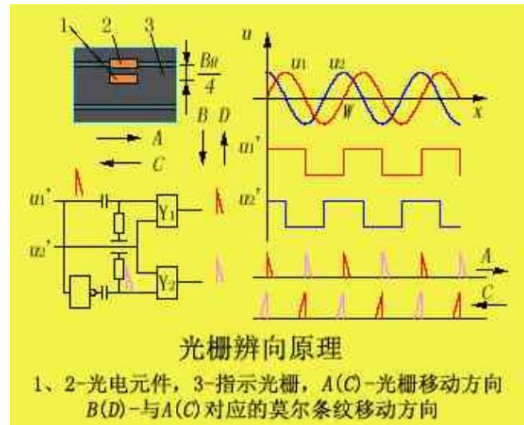
$$B = \frac{W}{2 \sin \frac{\theta}{2}} \approx \frac{W}{\theta} = KW$$

$K$ ——放大倍数

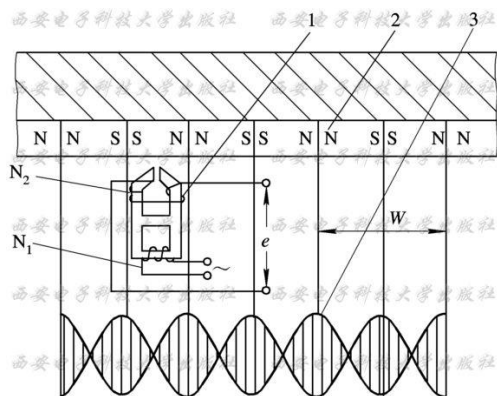


##### 【2】辨向电路

在相隔  $1/4B$  莫尔条纹间距的位置安放两个光电元件，获得相位差为  $90^\circ$  的两个信号——辨向



#### (5) 磁栅尺



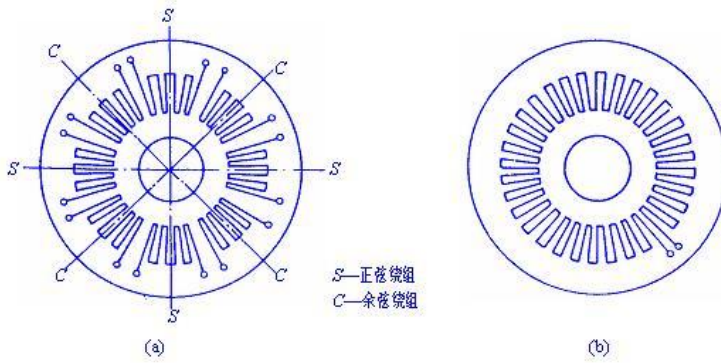
磁信号的波长（周期）又称节距，用  $W$  表示。磁信号的极性是首尾相接，在  $N$ 、 $N$  重叠处为正的最强，在  $S$ 、 $S$  重叠处为负的最强。

$N_1$  为励磁绕组， $N_2$  为感应输出绕组。

励磁电流使磁芯的可饱和部分（截面较小）在每周内发生两次磁饱和。磁饱和时磁芯的磁阻很大，磁栅上的漏磁通不能通过铁芯，输出绕组不产生感应电动势。只有在励磁电流每周两次过零时，可饱和磁芯才能导磁，磁栅上的漏磁通使输出绕组产生感应电动势  $e$ （不规则脉冲信号，非正弦信号）。

感应电动势的频率为励磁电流频率的两倍，而  $e$  的包络线反映了磁头与磁尺的位置关系，其幅值与磁栅到磁芯漏磁通的大小成正比。

### (6) 圆感应同步器

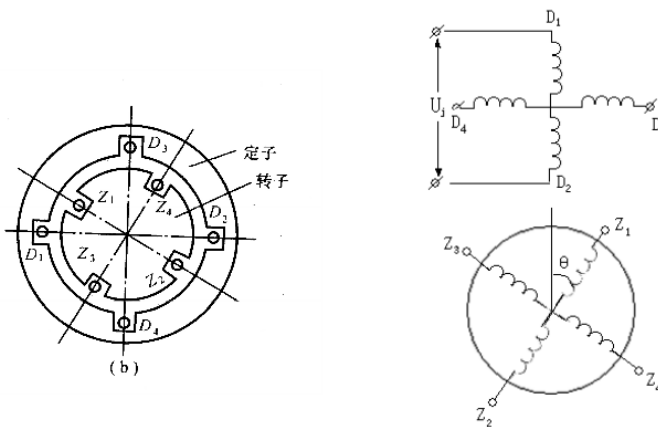


### (7) 旋转变压器

#### 【1】原理:

输出电压随转子转角变化的信号元件

#### 【2】构成



在定子上有激磁绕组和辅助绕组，它们的轴线相互成  $90^\circ$ 。

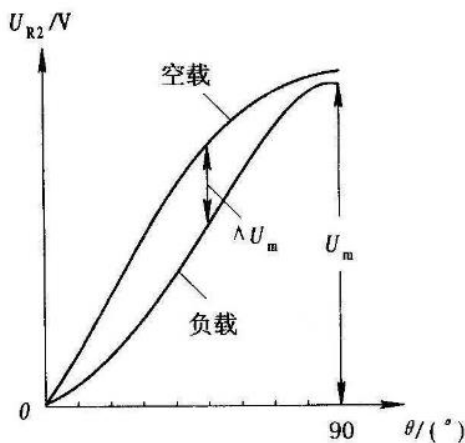
在转子上有两个输出绕组——正弦输出绕组和余弦输出绕组，这两个绕组的轴线也互成  $90^\circ$

当以一定频率（频率通常为  $1\text{kHz} \sim 20\text{kHz}$ ）的激磁电压加于定子绕组时，转子绕组的电压幅值与转子转角成正弦、余弦函数

关系。

当定子绕组中通交变激磁电压  $U_{s1}$  时，便可在转子绕组中得到感应电势  $U_{R1}$ ， $U_{R2}$

#### 【3】负载畸变



负载电流越大，两曲线的差别越大

引起畸变的原因：

接入负载，绕组中产生电流，电流产生脉振磁场。

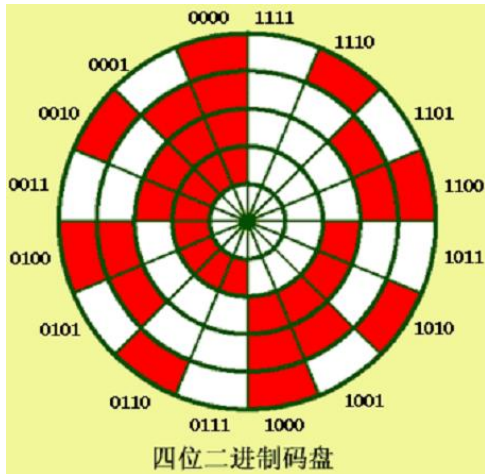
补偿措施：

副边补偿；原边补偿

### (8) 编码器

#### 【1】绝对编码器【8421 盘】





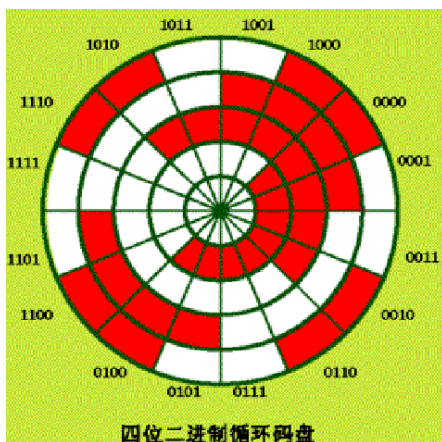
编码数:  $2^n$ 个  
(四位光电码盘: 16个)

每个数位对应一个光电器件、放大整形电路  
分辨角度:

$$360^\circ/2^n$$

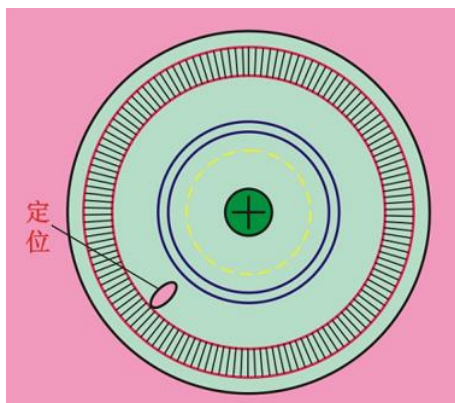
在两码段边缘会产生读数误差  
绝对编码器的读数误差较大, 会出现非单值性误差

## 【2】格雷码盘



读数误差最多不超过 1, 消除非单值性误差

## 【3】增量编码器



只有三个码道, 不直接输出编码。

外码道——产生计数脉冲的增量码道;

内码道——辨向码道

另一码道——产生定位或零位信号

输出光电脉冲, 通过整形、放大、辨向后输出脉冲信号

## 2.速度测量

(1) 原理:

【1】微积分法

【2】线速度和角速度相互转换测速法

【3】速度传感器法

(2) 磁电式速度测量传感器



### 【1】特点

只适用动态测量

有较大的输出功率，配用电路简单

零点稳点，性能稳定

工作频带 10~1000Hz

### 【2】原理

将输入运动速度变换成感应电势输出

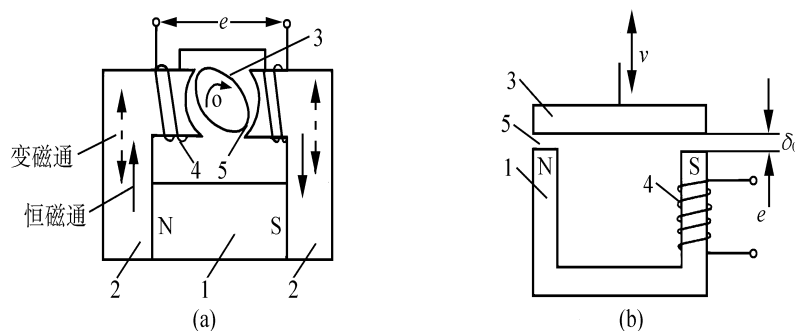
当  $W$  匝线圈在均匀磁场内运动时，设穿过线圈的磁通为  $\Phi$ ，

$$\text{有 } e = -W \frac{d\Phi}{dt}$$

### 【3】分类

恒磁通式、变磁通式

#### (3) 变磁通式速度测量传感器



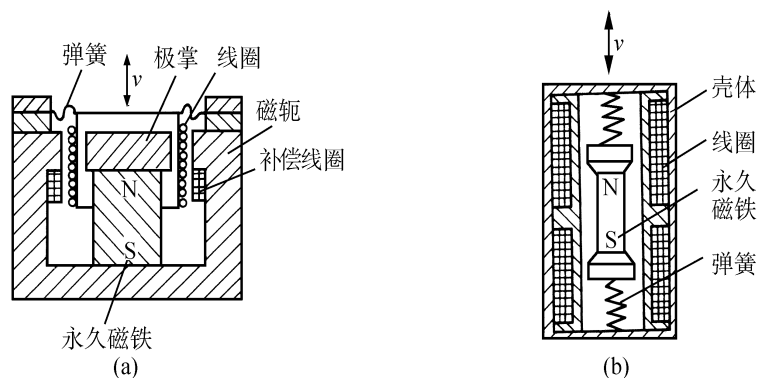
(a) 旋转型 (变磁); (b) 平移型 (变气隙)

1-永久磁铁 (固定) 4-线圈 (固定)

3-铁芯 5-气隙

铁芯的运动引起气隙的变化, 使磁路磁阻改变, 磁通变化产生感应电势 (又称变磁阻式结构)

#### (4) 恒磁通式速度测量传感器



(a) 动圈式; (b) 动铁式

气隙中的磁通恒定, 永久磁铁与线圈之间有相对运动, 产生感应电势

$$e = Blv$$

$$\text{灵敏度: } S = \frac{de}{dv} = Bl$$

### 提高灵敏度的措施：

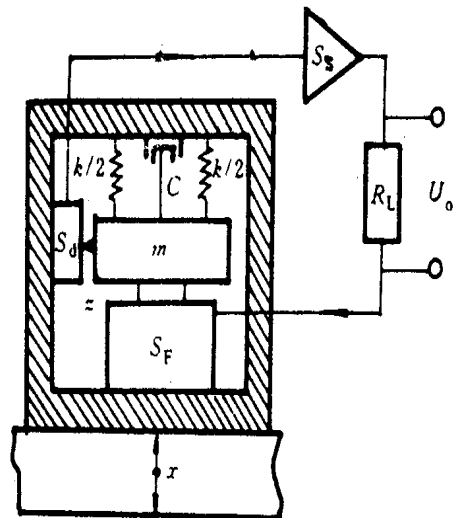
选用磁能积较大的永久磁铁和尽量小的气隙长度，增加  $l$ （或  $W$ ）

为什么要确保线圈匀速运动？

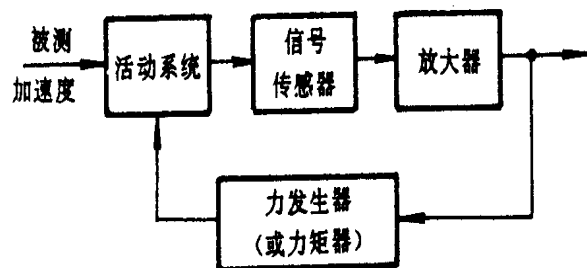
保证输出的线性度

### 3. 加速度测量

#### (1) 伺服式加速度测量



(a) 工作原理图



(b) 原理框图

由检测质量  $m$ 、弹簧  $k$ 、阻尼器  $c$ 、位置传感器  $S_d$ 、伺服放大器  $S_s$ 、力发生器  $S_F$  和标准电阻  $R_L$  等主要部分组成

平衡方程：

$$ma = F = BLI = \frac{BLU}{R_L}$$

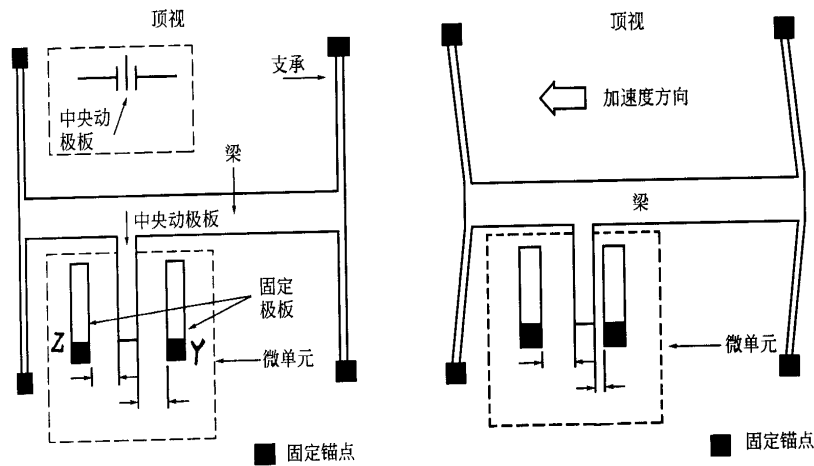
当壳体固定在载体上感受被测加速度  $a$  后，检测质量  $m$  相对壳体作位移  $z$ ，此位移由位置传感器检测并转换成电压，经伺服放大器放大成电流，供给力发生器产生电恢复力，使检测质量返回到初始平衡位置。

灵敏度：

$$S_a = \frac{dU}{da} = \frac{mR_L}{BL}$$

伺服加速度测量由于有反馈作用，增强了抗干扰能力，提高了测量精度，扩大了测量范围。

## (2) 叉指式硅微加速度计



(a) 静止状态; (b) 活动状态

当加速度计处于静止状态时, 叉指正好处于一对固定电极的中央, 即叉指和与其对应的两个固定电极的间距相等 (为  $y_0$ ), 这时电容量  $C_1=C_2$ 。

当加速度计敏感加速度时, 在惯性力作用下, 活动极板产生位移, 这时, 叉指和左右两固定极板的间距发生变化, 即  $C_1 \neq C_2$ , 产生的瞬时输出信号将正比于加速度的大小。运动方向则通过输出信号的相位反映出来。

## 第六章——光电式传感器

### 1. 光电效应

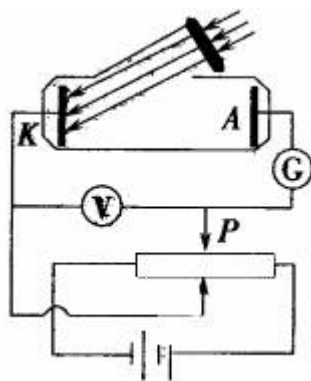
#### (1) 外光电效应

入射光发生光电效应的波长上限:

$$\lambda_0 = \frac{hc}{W} = \frac{1.239}{W} \mu m$$

$W$ ——物体的表面逸出功

推导:



$$\frac{1}{2}mv_{max}^2 = hv - W$$

光子最低发射的频率为:

$$\nu_{min} = \frac{W}{h}$$

对应波长:

$$\lambda_{max} = \frac{hc}{W}$$

#### (2) 内光电效应——光电导效应

发生内光电效应的临界波长:

$$\lambda_0 = \frac{1239}{\Delta E_g} \mu m$$

$\Delta E_g$ ——材料的禁带宽度 (锗 0.75eV, 硅 1.2eV)

### (3) 内光电效应——光生伏特效应

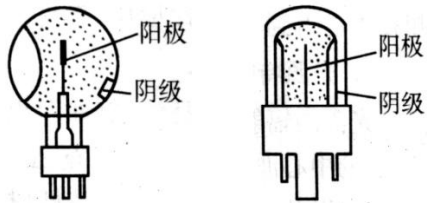
势垒效应（结光电效应）

侧向光电效应

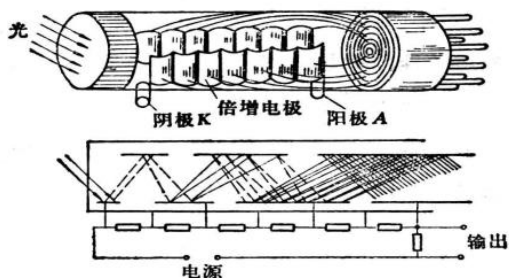
## 2.应用

### (1) 基于外光电效应的器件

#### 【1】光电管

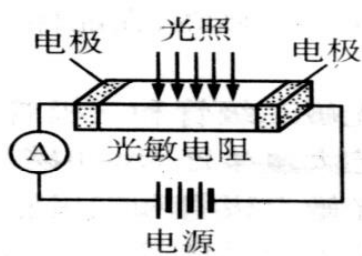


#### 【2】光电倍增管

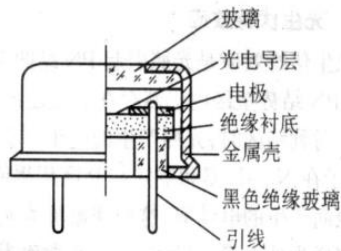


### (2) 基于内光电效应的器件

#### 【1】光敏电阻

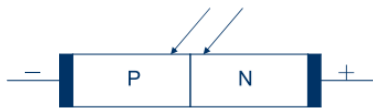


光敏电阻工作原理

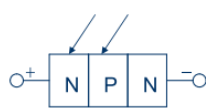


光敏电阻外壳封装

#### 【2】光敏晶体管



光敏二极管



光敏三极管

## 3.光电器件的技术参数

- (1) 光谱特性：相对灵敏度随光波波长的变化
- (2) 频率特性：交变光照下的输出特性
- (3) 伏安特性：外加电压与光电流的关系
- (4) 温度特性
- (5) 峰值探测率：性能衡量