

## 第一章:

### 误差

1.定义:利用各种物理、化学效应,选择合适的方法与装置,将生产、科研、生活等各方面的有关信息通过检查与测量的方法,赋予定性或定量结果的过程称为检测技术。

2.组成:非电量经过传感器或敏感元件把信号变成电量的过程。3.特性:静态特性:灵敏度、非线性度

动态特性:(1)真值:理想情况下表征一个物理量真实的值。(2)实际值:满足规定准确度时用以代替真值使用的值。

(3)标称值:计量或计量器具上标注的量值。(4)示值:测量仪表、量器给出或提供的量值。

4.误差分析:

(1)误差分类:系统误差:服从一定规律的误差。(定值、线性、周期性)随机误差:服从统计规律的误差。;粗大误差:显然与事实不符、无规律的误差。

(2)精度:准确度(与系统误差有关)精密度(与随机误差有关)精确度(精确度决定前两者)

(3)测量误差的表示方法 绝对误差  $\Delta X = X - A$ ; 相对误差①实际相对误差 ②示值相对误差 ③满度(引用)相对误差  
(指示仪表的最大满度误差不许超过该仪表准确度等级的百分数)  $\gamma = \frac{\Delta}{A_0} \times 100\%$   $\gamma_x = \frac{\Delta}{A_x} \times 100\%$   $\gamma_m = \frac{\Delta}{A_m} \times 100\%$

1)随机误差:随机误差以不可预定的方式变化着的误差,在一定条件下服从统计规律。实际工作中用残差来近似代替随机误差求标准差的估计值。正态分布的随机误差分布规律:对称性 单峰性 有界性 抵偿性;

消除办法:用多次测量和统计测量来减少它,无法消除。

2)系统误差:发现:A)理论分析及计算 B)实验对比法 C)残余误差观察法 D)残余误差校核法 E)计算数据比较法

消除办法:A)从产生误差源上消除系统误差:选最合理的机理,避免原理上的不完善、计算上的近似、定义不严格等方法误差。材料、零部件选用优质产品,精心设计、精心施工,避免工具误差。

B)引入修正值法:为了消除系统误差用代数法加到测量结果上的值称为修正值,常用C表示。将测得示值加上修正值后可得到真值的近似值,即  $A_0 = X + C$ 。由此得  $C = A_0 - X$ ;在实际工作中,可以用实际值A近似真值A0,则上式变为  $C = A - x = -\Delta x$  修正值与误差值大小相等、符号相反,测得值加修正值可以消除该误差的影响。

C)零位式测量法:又称平衡法。它是把被测量与作为计量单位的标准已知量进行比较,使其效应相互抵消,当两者的差值为0时,被测量就等于已知的标准量。

D)替代法:又称置换法。是先将被测量x接入测量装置使之处于一定的状态,然后以已知量A代替x,并通过改变A的值,使测量装置恢复到x接入时的状态,于是  $x = A$ 。

E)半周期法:半周期法主要是用来消除周期性系差的。在测量中,每隔半个周期进行一次测量。如果误差是周期性变化的,经过半个周期后,误差符号会改变,取两次测量值求平均便可消除周期性系差。

3)粗大误差;特点:原理真值;发现:明显偏离真值的误差称为粗大误差,也叫过失误差。粗大误差主要是由于测量人员的粗心大意及电子测量仪器受到突然而强大的干扰所引起的。当发现粗大误差时,应予以剔除。

粗大误差常用统计判别法:测量数据>10个时,若所有数据标准差是 $\delta$ ,其中某一项残差  $V_d > 3\delta$ ,认为  $V_d$  为粗大误差,与其对应的测量数据  $x_d$  是坏值,应从测量列测量数据中删除。

传感器及基本特征:非电量→||敏感元件||→非电量→||传感元件||→电参量→||测量转换电路||→电量

传感器的特性:一般指输入输出特性,包括:灵敏度、分辨力、线性度、稳定性、电磁兼容性、可靠性等。

灵敏度是指传感器在稳态下:输出变化值与输入变化值之比,用K来表示;  $K = \frac{dy}{dx} \approx \frac{\Delta y}{\Delta x}$

线性度(非线性误差),指传感器实际特性曲线与拟合直线(理论直线)之间最大偏差与传感器量程范围内输出之百分比。将传感器输出起始点与满量程点连接起来的直线作为拟合直线,求得端基线性度,非线性误差越小越好。线性度的计算公式如下:  $\gamma_L = \frac{\Delta_{Lmax}}{y_{max} - y_{min}} \times 100\%$

第二章:

### 电阻传感器:

应变电阻:导体或半导体材料在外力作用下,会产生机械变形,其电阻值也将随着发生变化,这种现象称为应变效应。

电阻应变式传感器主要由电阻应变片及测量转换电路等组成。P是电阻率;K是灵敏度系数。

如果应变片的灵敏度K和试件的横截面积A以及弹性模量E均为已知,则只要设法测出  $\Delta R/R$  的数值,即可获知试件受力F的大小  $\frac{\Delta R}{R} = K \frac{F}{AE}$  (2-2) 泊松系数:

$$\frac{\Delta R}{R} = (1+2\mu)\varepsilon_x + d\rho/\rho = \left[ (1+2\mu) + \frac{d\rho/\rho}{\varepsilon_x} \right] \varepsilon_x = K\varepsilon_x \quad \mu = -\frac{dr/r}{dl/l} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \quad \frac{dl}{l} = \varepsilon_x \text{ 称为轴向应变} \quad K = 1+2\mu + \frac{d\rho}{\rho \varepsilon_x}$$

灵敏度系数K受两个因素影响:

① 受力后材料几何尺寸的变化,即  $(1+2\mu)$  (金属材料);

② 受力后材料的电阻率发生的变化,即  $\frac{d\rho/\rho}{\varepsilon_x}$  (半导体材料)。



测量方法：不平衡电桥

应变片可分为金属应变片及半导体应变片两大类。前者可分成金属丝式、箔式、薄膜式三种。

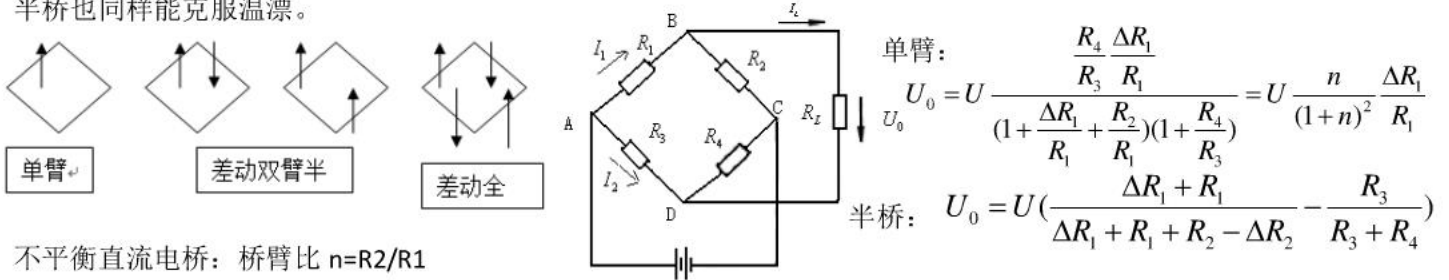
测量电路：电桥；电桥分为：单臂 双臂 全臂

电桥平衡条件：当  $u=0$  时 得  $R_1R_4=R_2R_3$ ，即  $R_1/R_3=R_2/R_4$

灵敏度：全桥  $K_u=U$ ，半桥：  $K_u=U/2$ ，单臂半桥：  $K_u=U/4$ ；

输出：全桥  $U_o=UK \epsilon$ ，半桥：  $U_o=UK \epsilon /2$ ，单臂半桥：  $U_o=UK \epsilon /4$ ；（ $K \epsilon = \Delta R/R$ ）；

半桥也同样能克服温漂。



不平衡直流电桥：桥臂比  $n=R_2/R_1$

提高灵敏度的措施：① 提高供电电源的电压  $U$ （在功耗允许的范围内） ②  $n=1$   $R_1=R_2=R_3=R_4$

直流电桥的优点：高稳定度直流电源易于获得，电桥调节平衡电路简单，传感器及测量电路分布参数影响小等。

当被测量为动态量时，应变电桥采用交流电桥。

电桥的非线性误差：（1）差动电桥减小非线性误差：特点：差动电桥消除了非线性误差，灵敏度比单臂电桥提高一倍。

具有温度补偿作用。（2）采用恒流源电桥减小非线性误差：特点：桥臂阻值变化受温度影响小，非线性小。

恒流源 
$$U_0 = I \frac{R_1R_4 - R_2R_3}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}$$
 桥臂阻值变化受温度影响小、非线性小

恒压源 
$$U_0 = U \frac{R_1R_4 - R_2R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}$$
 影响大、非线性大

半导体的压阻效应：

固体受到作用力后，电阻率就要发生变化，这种效应称为压阻效应。半导体材料的压阻效应特别强；

压阻式传感器：灵敏系数大，分辨率高。频率响应高，体积小。灵敏系数随杂质的增加而减小；

优点：灵敏系数比金属电阻应变片灵敏系数大数十倍，横向效应和机械滞后极小

缺点：温度稳定性和线性度比金属电阻应变片差得多

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\mu)\epsilon + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad \text{可写成} \quad \frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\mu + \pi_l E)\epsilon$$

$\pi_l$  为半导体材料的压阻系数，它与半导体材料种类及应力方向与晶轴方向之间的夹角有关；

$E$  为半导体材料的弹性模量，与晶向有关。

对半导体材料而言， $\pi_l E \gg (1 + 2\mu)$ ，忽略  $1 + 2\mu$ ，半导体单晶的应变灵敏系数  $K = \frac{\Delta R/R}{\epsilon} = \pi_l E$

测量电路：恒压源  $U_0 = U \Delta R / (R + \Delta R)$ ；电桥输出电压与  $\Delta R/R$  成正比，输出电压受环境温度的影响。

恒流源  $U_0 = I \cdot \Delta R$ ；电桥输出电压与  $\Delta R$  成正比，环境温度的变化对其没有影响。减少与补偿误差措施：（1）恒流源供电电桥  $U_o = U_{BD} = 0.5I (R + \Delta R + \Delta R_T) - 0.5I (R - \Delta R + \Delta R_T) = I \Delta R$

电桥的输出电压与电阻变化成正比，与恒流源电流成正比，但与温度无关，因此测量不受温度的影响。

（2）温度漂移及其补偿：温度变化而变化，将引起零漂和灵敏度漂移

零位漂移：扩散电阻值随温度变化；串、并联电阻；串电阻  $R_s$  调零；并电阻  $R_p$  补偿

灵敏度漂移：压阻系数随温度变化；串联二极管；

荷重传感器计算公式  $U_o = \frac{F}{F_m} U_{om} = \frac{Kf U_i}{F_m} F$   $Kf = \frac{U_{om}}{U_i}$

当  $Kf$  为常数时，桥路所加的激励源电压  $U_i$  越高，满量程输出电压  $U_{om}$  也越高。

半导体热敏电阻器：

分类：NTC 负温度系数  $R_t = R_0 e^{-\frac{B_n}{(T-T_0)}}$ ，PTC 正温度系数  $R_t = R_0 e^{\frac{B_p(T-T_0)}{}}$ ，CTR 临界温度电阻

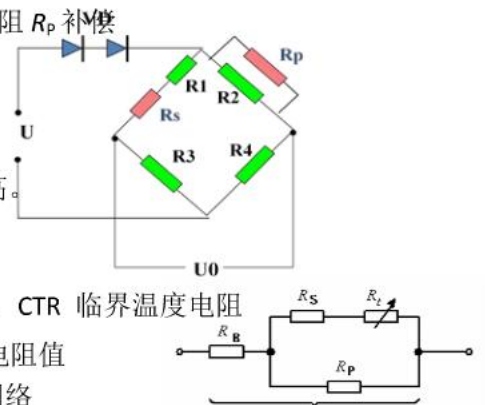
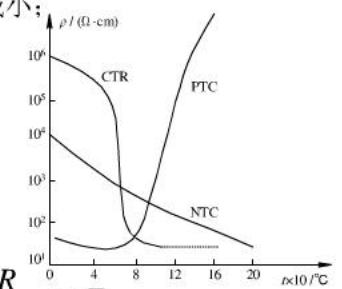
$B_n$ 、 $B_p$  是材料系数  $B=2000 \sim 6000K$ ； $R_t$ 、 $R_0$  ——分别为  $T_k$  和  $T_{0k}$  时的热敏电阻值

使用注意：1 热敏电阻温度特性的非线性：线性化处理（1）线性化网络

（3）计算修正法（2）利用电子装置中其它部件的特性进行综合修正 2 热敏电阻器特性的稳定性和老化问题；

正温度系数热敏电阻器和临界温度热敏电阻器特性的均匀性要差于负温度系数热敏电阻器

电阻应变片应用分两类：1 应变片贴于某些弹性体，通过测量转换电路构成测量各种物理量的应变式传感器。2 应变片贴于被测件上，通过应变仪直接读取被测件的应变值。





金属热电阻铜电阻：测温精度较高，范围广，稳定性、重复性好。但热惯性大，灵敏度低。  $R_t = R_0(1 + \alpha t)$

1) 铂电阻特点：精度高、稳定性好、性能可靠。测温范围广。微型铂电阻特点：体积小，气密性好，热惯性小

2) 铜电阻：优：电阻与温度呈线性关系、电阻温度系数高、易提纯、价格低； 缺：机械强度低、易氧化，温度范围小。

3) 其它金属热电阻：钢电阻，锰电阻，碳电阻

1) 自热误差：一般是限制电流,规定其值应不超过 6mA

2) 引线电阻的影响：三线制（小电流）四线制（大电流）：在三线式连接法中,一根引线接到电源对角线上,另两根分别接到电桥相邻的两个臂。这样，引线电阻值及其变化对仪表读数的影响可以互相抵消。

#### 第四章

电涡流：当电涡流线圈与金属板的距离  $x \downarrow$  时，电涡流线圈等效电感  $L \downarrow$ ，等效电阻  $R \uparrow$ 。感抗  $XL$  的变化比  $R$  的变化大得多，流过电涡流线圈的电流  $i_1 \uparrow$ 。

当导体置于交变磁场或在固定磁场中运动时，导体内引起感应电流，此电流在导体内闭合,称为涡流

涡流存在的条件：①存在交变磁场②导体处于交变磁场中 穿透深度

式中， $\rho$ ——导体电阻率( $\Omega \cdot \text{cm}$ )； $\mu_r$ ——导体相对磁导率； $f$ ——交变磁场频率(Hz)。

$$h = 50.3 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}} (\text{cm})$$

电涡流线圈 探头直径越大，测量范围越大，分辨力越差，灵敏度也降低。

一、高频反射式涡流传感器

1.基本原理：线圈置于金属导体附近,线圈中通以高频信号  $i_1$ ，

正弦交变磁场  $H_1$ ，金属导体内就会产生涡流，涡流产生电

磁场，反作用于线圈,改变了电感

电感变化程度：取决于线圈  $L$  的外形尺寸，线圈  $L$  至金属板之

间的距离，金属板材料的电阻率和磁导率 以及的频率等

2.等效电路分析

$$Z = \frac{U}{I_1} = R_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} R_2 + j\omega \left[ L_1 - \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} L_2 \right] = R + j\omega L$$

有导体影响后，线圈阻抗的实数部分等效  $R \uparrow$ ；虚数部分等效  $L \downarrow$ ，线圈阻抗发生了改变，这种作用称为反射阻抗作用。

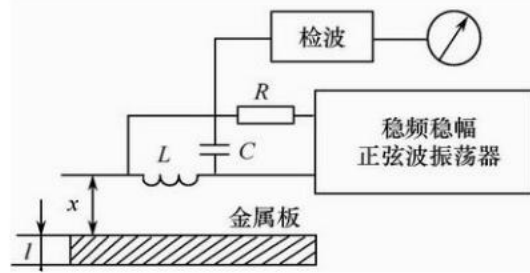
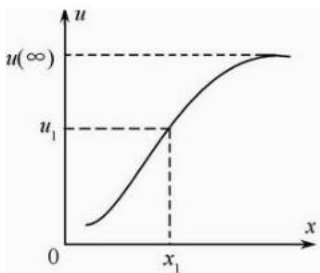
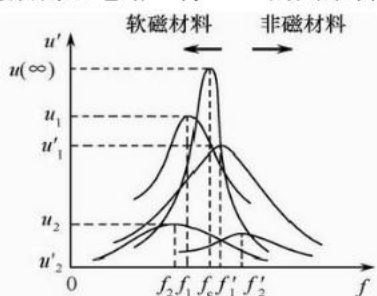
电涡流传感器的工作原理：实质上是受到交变磁场作用的导体中产生的电涡流起到调节原来阻抗作用的结果。

传感器线圈受电涡流影响时的等效阻抗  $Z$  的函数关系式为  $Z = f(\omega, \mu, \sigma, r, x,)$

间隙越大，电涡流越小；若保持大部分参数不变, $Z$  成为  $x$  的单值函数，由  $Z$  可知  $x$ ，因此可以做成涡流式位移传感器。

测量电路：

1.定频测距电路：将  $L-x$  的关系转换成  $U-x$  的关系。通过检波电压  $U$  的测量，就可以确定距离  $x$  的大小。



无金属板， $L=L_\infty$  (即  $x \rightarrow \infty$  时的  $L$  值)；有金属板，设振荡器频率  $f_0$ ，若改变金属板与传感器之间距离  $x$ ，则  $U-x$  曲线。当传感器线圈接近金属导体时，等效电感  $L$ 、等效阻抗  $Z$ 、谐振频率  $f$  都会发生变化，回路失谐，谐振峰将向左或向右移动。则可以得到  $U-f$  曲线，即传感器回路的并联谐振曲线测频测距电路。

2.定频测距电路：

当传感器线圈与被测物体间的距离  $x$  变化时，

引起线圈的电感量  $L$  发生变化，从而使振荡器的频率改变，

然后通过鉴频器将频率变化再变成电压输出。

#### 第五章

电容式传感器

电容传感器的基本理想公式为：

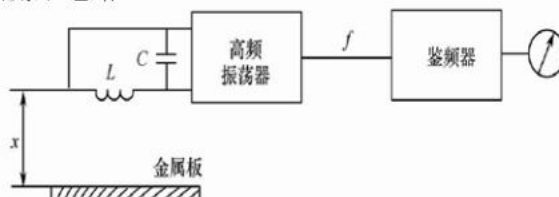
$$\gamma_L = \frac{\Delta L_{\max}}{y_{\max} - y_{\min}} \times 100\%$$

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

A：极板相对覆盖面积；d：极板间距离； $\epsilon_r$ ：相对介电常数； $\epsilon_0$ ：真空介电常数， $\epsilon$ ：电容极板间介质的介电常数

1.变极距型电容传感器，若极距缩小  $\Delta d$  (非线性关系)，使用时要注意：最大位移应小于间距的 1/10，采用差动式以改善其非线性，可以用来测量小位移。

$$\text{则: } C = C_0 + \Delta C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r s}{d - \Delta d} = \frac{C_0}{1 - \frac{\Delta d}{d}} = \frac{C_0(1 + \frac{\Delta d}{d})}{1 - \left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2} \quad \text{若 } \Delta d/d \ll 1 \text{ 时, 则上式可简化为: } C = C_0 + C_0 \frac{\Delta d}{d}$$





## 2.变面积型电容传感器

沿长度方向平移电极板时，其电容变化量为（线性关系，可以用于测量大位移）：

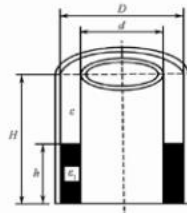
$$\Delta C = C_0 - C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r a b}{d} - \frac{\epsilon_0 \epsilon_r (a - \Delta x) b}{d} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r b \Delta x}{d}$$

3.电容式角位移传感器：当  $\theta = 0$  时  $C_0 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A_0}{d_0}$

$$\theta \neq 0 \text{ 时 } C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r (1 - \frac{\theta}{\pi})}{d_0} = C_0 - C_0 \frac{\theta}{\pi}$$

## 4.变介电常数型电容式传感器（线性关系）

以电容式液位传感器为例电容和液位的关系是：



$$C = C_1 + C_2 = \epsilon_0 b_0 \frac{\epsilon_{r1}(L_0 - L) + \epsilon_{r2}L}{d_0}$$

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{C - C_0}{C_0} = \frac{(\epsilon_{r2} - 1)L}{L_0} \quad C_0 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{r1} L_0 b_0}{d_0} = \frac{\epsilon_0 L_0 b_0}{d_0}$$

● 灵敏度  
变极距型  $k_s = \frac{\Delta C}{\Delta d} = \frac{C_0}{d} \left( \frac{1}{1 - \Delta d/d} \right)$

$d \downarrow, k_g \uparrow ; ;$  差动结构

● 非线性

变极距型  $\Delta C = C_0 \frac{\Delta d}{d \pm \Delta d} = C_0 \frac{\Delta d}{d} \left( \frac{1}{1 \pm \Delta d/d} \right)$  当  $\frac{\Delta d}{d} \ll 1$   $\Delta C = C_0 (\Delta d/d)$   $\Delta d = \left( \frac{1}{10} \sim \frac{1}{5} \right) d = 0.01 \mu m \sim 0.9 mm$

差动形式的非线性得到了很大的改善，灵敏度也提高了一倍

1.调频测量电路：把电容式传感器作为振荡器谐振回路一部分。输入量导致电容量变化，振荡器的振荡频率就发生变化。虽可将频率作为测量系统输出量，来判断被测非电量大小，但系统非线性，不易校正，因此加入鉴频器，将频率变化转换为振幅变化，经放大可用仪器指示或记录仪记录。

测量电路特点：高灵敏度（0.01  $\mu m$  级位移变化量）。频率输出易于用数字仪器测量、与计算机通讯，抗干扰能力强，可以发送、接收以实现遥测遥控。

## 2.电桥电路

(1)测量电桥：电容传感器接入交流电桥作电桥的一个臂(另一臂为固定电容)或两个相邻臂,另两臂可以是电阻/电容/电感/变压器两个二次线圈。另两个臂紧耦合,电感臂电桥具有较高的灵敏度和稳定性。

3.二极管双T型电路：①线路简单，可全部放在探头内，大大缩短了电容引线、减小了分布电容的影响；②电源周期、幅值直接影响灵敏度，要求它们高度稳定；③输出阻抗为R，而与电容无关，克服了电容式传感器高内阻的缺点；④适用于具有线性特性的单组式和差动式电容式传感器。

4.差动脉冲宽度调制电路：利用对传感器电容充放电，使电路输出脉冲宽度随电容式传感器电容量而变化，

通过低通滤波器得到对应被测量变化的直流信号。差动电容传感器、双稳态触发器、比较器及低通滤波器配合，实现：

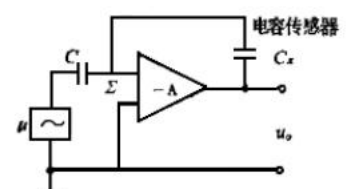
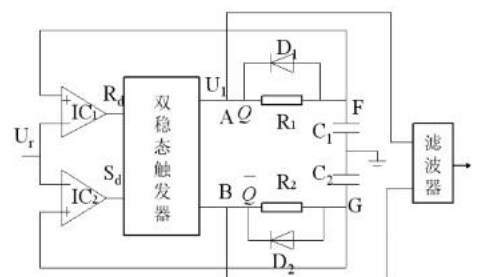
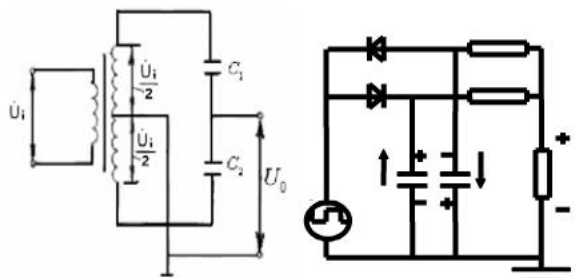
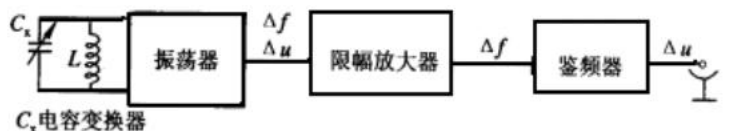
$U_0 = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} U_1$  比较器输出控制双稳态触发器状态；双稳态触发器输出提供差动电容器电压；电容端电压控制比较器翻转。

电路特点：适用于变极板距及变面积式差动式电容传感器，具有线性特性，转换效率高，经低通放大器有较大直流输出，调宽频率变化对输出没有影响  $C_1 = C_2$  时，占空比=0.5； $C_1 < C_2$  时，占空比>0.5

5.运算放大器式电路：将电容传感器接于放大器反馈回路，输入电路接固定电容，构成反相放大器。能克服变极距型电容式传感器的非线性。

运算放大器电路解决了单个变极板间距式电容传感器的非线性问题。为保证仪器精度,还要求电源电压 的幅值和固定电容C值稳定。

采用直流电源，电压稳定度高，无稳频、波形纯度要求，无需相敏检波与解调，对元件非线性要求，经低通滤波器可输出较大直流电压，对输出矩形波纯度要求不高





应用：电容式液位计 硅微加工加速度传感器 湿敏电容 电容式油量表 电容式接近开关

## 第六章

压电传感器：压电传感元件是力敏感元件，它可以测量最终能变换为力的那些非电物理量，例如动态力、动态压力、振动加速度等，（一般必须高于 100Hz，但在 50kHz 以上时，灵敏度下降）。但不能用于静态参数的测量。

压电材料可以分为三大类：压电晶体、压电陶瓷和高分子压电材料。

石英最明显的优点是它的介电和压电常数的温度稳定性好，适于做工作温度范围很宽的传感器。石英晶体的机械强度很高，可用来测量大量程的力和加速度。天然石英的稳定性很好，但资源少并且大多存在一些缺陷。故一般只用在校准用的标准传感器或精度很高的传感器中。

电轴（X 轴）：垂直于此轴面上的压电效应最强，纵向压电效应。 $q_x = d_{11} F_x$

电荷与几何尺寸无关。机械轴（Y 轴）：在电场（沿 X 向）作用下，沿该轴方向的机械变形最大，横向压电效应，电荷与几何尺寸有关，a 是长度，b 是厚度。

光轴（Z 轴）：光线沿该轴通过石英晶体时，无折射，在此方向加外力，无压电效应。 $q_x = d_{12} \frac{a}{b} F_y = -d_{11} \frac{a}{b} F_y$

1、并联方式  $C' = nC$   $U' = U$   $q' = nq$

特点：输出电荷大，时间常数大，适合测慢速信号，以电荷为输出的场合。

2、串联方式

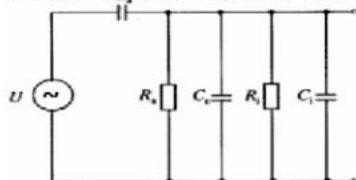
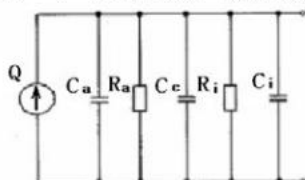
$$C' = \frac{C}{n} \quad U' = nU \quad q' = q$$

特点：输出电压大，电容、时间常数小，适合以电压为输出，高输入阻抗的场合

压电传感器可以等效为一个电荷源与一个电容并联。

也可以等效为一个与电容相串联的电压源。电压灵敏度与电荷灵敏度之间关系

$$K_u = \frac{K_q}{C_a}$$

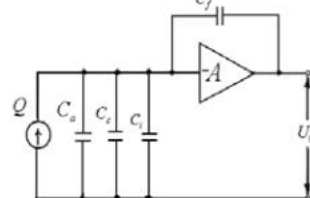
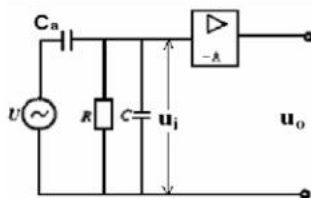


测量时，需把压电传感器用电缆接于前置放大器，前置放大器的作用：一是放大传感器输出的微弱信号。二是把它的高输出阻抗变换为低输出阻抗

1、电压放大器：当要使电压灵敏度为常数，应使压电片与前置放大器的连接导线为定长，以保证  $C_c$  不变。压电式传感器的高频响应很好。

2、电荷放大器——特点：输出电压与电缆电容  $C_c$  无关，即与电缆长度无关，更换电缆不影响传感器灵敏度，且输出电压与输出电荷成正比。

$$\text{电荷放大器: } U_0 = -\frac{AQ}{C + (1+A)C_f} \approx -\frac{Q}{C_f}$$



压电传感器应用：只能应用于动态测量

## 第九章

热电偶传感器：导体两端相互紧密连接在一起，组成一个闭合回路。当两接点温度不等（ $T > T_0$ ）时，回路中就会产生电动势，从而形成热电流。这一现象称为热电效应。回路中产生的电动势称为热电势。热电势由两部分组成：接触电势和温差电势。电偶回路总电势主要由接触电势引起。

组成定则：①热电偶两电极材料相同，无论两接点温度如何，总热电势为 0。②热电偶两接点温度相同，A、B 材料不同，回路中总电势为 0。③热电偶产生的热电势只与材料和接点温度有关，与热电极的尺寸/形状无关。因此，热电极材料相同热电偶可互换。④热电极 A、B 选定后，热电势  $E_{AB}(T, T_0)$  是两接点温度 T 和  $T_0$  的函数差， $E_{AB}(T, T_0) = f(T) - f(T_0)$

中间温度定则： $E_{AB}(T_1, T_3) = E_{AB}(T_1, T_2) + E_{AB}(T_2, T_3)$

中间导体定则：在 A、B 材料组成的热电偶回路中接入第三导体 C，只要引入的第三导体两端温度相同，则此导体的引入不会改变总电势  $E_{AB}(T, T_0)$  的大小

标准电极定则： $E_{AB}(T, T_0) = E_{AC}(T, T_0) - E_{BC}(T, T_0)$  优点：自发电型 测温范围广 -270°C--1800°C

热电偶测温的主要优点：1.它属于自发电型传感器：测量时可不需外加电源，可直接驱动动圈式仪表；

2. 测温范围广：下限可达 -270°C，上限可达 1800°C 以上；

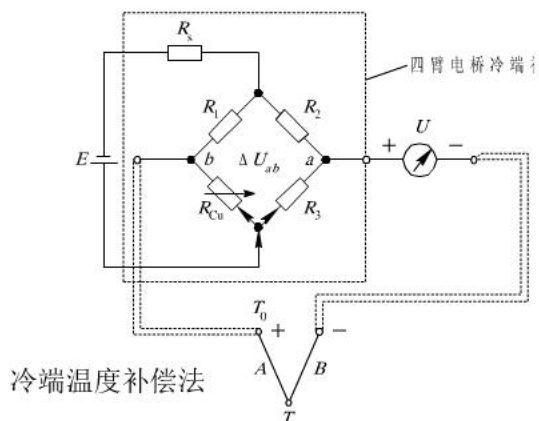
冷端补偿：采用相对廉价的补偿导线，可延长热电偶的冷端，使之远离高温区；可节约大量贵金属；易弯曲，便于敷设。补偿导线在 0~100°C 范围内的热电势与配套的热电偶的热电势相等，所以不影响测量精度。

热电偶的冷端温度补偿必要性：

1.用热电偶分度表查毫伏数-温度时，必须满足  $t_0 = 0^\circ\text{C}$  条件。实际测温中，冷端温度常随环境温度变化，这样  $t_0$  既不是  $0^\circ\text{C}$ ，也不恒定，因此将产生误差。2.冷端温度均高于  $0^\circ\text{C}$ ，热电势总偏小。应想办法消除或补偿热电偶冷端损失。

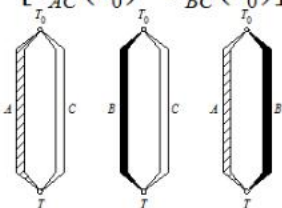


冷端恒温法：冰浴法（实验室）； 计算修正法： $E_{AB}(t, 0^{\circ}\text{C}) = E_{AB}(t, t_0) + E_{AB}(t_0, 0^{\circ}\text{C})$



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

$$\begin{aligned} &= e_{AC}(T) - e_{AC}(T_0) - e_{BC}(T) + e_{BC}(T_0) \\ &= [e_{AC}(T) - e_{BC}(T)] - [e_{AC}(T_0) - e_{BC}(T_0)] \\ &= e_{AB}(T) - e_{AB}(T_0) \\ &= E_{AB}(T, T_0) \end{aligned}$$



## 第十章

### 光电传感器：

光电效应：光照射某一物体，可以看作物体受到一连串能量为  $hf$  的光子的轰击，组成这物体的材料吸收光子能量而发生相应电效应的物理现象。

光敏电阻的光照特性呈非线性（用作开关式传感元件）。

偏压给定，光照度越大，光电流也就越大。光照度一定，加的电压越大，光电流越大，无饱和现象。光敏电阻的最高工作电压由耗散功率决定，耗散功率与面积以及散热条件等因素有关。光敏电阻对不同波长的光，灵敏度是不同的。光敏电阻材料不同，响应时间不同，所以频率特性也不同。

1. 外光电效应：光线作用下，电子逸出物体表面，如：光电管、光电倍增管、光电摄像管等。

2. 内光电效应：光线作用下能使物体的电阻率改变的现象。如：光敏电阻，光敏二极管，光敏晶体管，光敏晶闸管。

3. 光生伏特效应：光线作用下，物体产生一定方向电动势的现象，如：光电池

光电流定义：亮电流与暗电流之差。

光敏电阻工作原理：无光照时，光敏电阻值(暗电阻)很大，电路中电流很小。有光照时，光敏电阻值(亮电阻)急剧减少，电流迅速增加。

半导体的光电效应，只限于光照的表面薄层。光敏电阻的电极一般采用梳状，提高灵敏度

光敏电阻受温度影响：温度升高，其暗电阻和灵敏度都下降。

应用分析：

1. 应用于开关电路分析，用作开关电路：光照特性非线性；低速：响应时间和频率特性；分析：等效电路，伏安特性曲线

2. 应用于器件的选取，考虑光谱特性：对不同波长的光选用不同的器件。

光敏二极管在电路中一般处于反向工作状态；温度变化对光电流影响很小，而对暗电流影响很大

光电池：短路电流与光照度成线性关系；开路电压与光照度呈非线性关系；光电池作为测量元件使用时，应以电流源形式使用

### 电感传感器

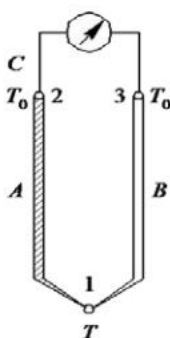
电感式传感器：利用电磁感应原理将被测非电量如位移、压力、流量、振动等转换成线圈自感量  $L$  或互感量  $M$  的变化，再由测量电路转换为电压或电流的变化量输出的装置。

优点：结构简单，工作可靠，精度高，零点稳定，输出功率较大等，能实现信息的远距离传输、记录、显示和控制，在工业自动控制系统中广泛采用。

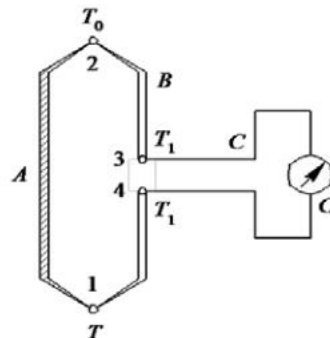
表给出的

测出的

补上的



(a)



(b)

热电偶推导：中间导体定则：图左推导

$$E_{ABC}(T, T_0) = e_{AB}(T) + e_{BC}(T_0) + e_{CA}(T_0) \quad (9.7)$$

$$e_{BC}(T_0) + e_{CA}(T_0) = -e_{AB}(T_0) \quad (9.8)$$

缺点：灵敏度、线性度和测量范围相互制约，传感器自身频率响应低，不适用于快速动态测量。灵敏度

$$L = \frac{\Psi}{I} = \frac{N\Phi}{I} = \frac{N^2}{R_m} \quad K_0 = \frac{\Delta L}{\Delta \delta} = \frac{\frac{\Delta L}{L_0}}{\frac{\Delta \delta}{\delta_0}} = \frac{1}{\delta_0}$$

1 变气隙式

变隙式电感式传感器  $L$  与  $\delta$  成反比，输入输出是非线性关系， $\delta$  越小，灵敏度越高。用于测量微小位移。为了减小非线性误差，提高灵敏度，实际测量中采用差动变气

$$L = \frac{N^2}{R_m} = \frac{N^2 \mu_0 A_0}{2\delta}$$

隙式电感传感器。

气隙型自感传感器的测量范围与灵敏度及线性度相矛盾，所以变隙式电感式传感器用于测量微小位移时是比较精确的。

(1) 差动变间隙式自感传感器的灵敏度是单线圈式传感器的两倍。差动式自感式传感器线性度得到明显改善。

(2) 变面积式自感传感器在忽略气隙磁通边缘效应的条件下，输入与输出呈线性关系；得到较大的线性范围。但是与变气隙式自感传感器相比，其灵敏度降低。

差动式的与单线圈的相比，有下列优点：

①线性好；②灵敏度提高一倍，即衔铁位移相同时输出信号大一倍；③温度变化、电源波动、外界干扰等对传感器精度的影响，由于能相互抵消而减小；④电磁吸力对测力变化的影响也由于能相互抵消而减小。

自感式传感器测量电路：衔铁下移，下线圈感抗增加，上线圈感抗减小，输出电压绝对值增大，相位与激励源同相；衔铁上移，相位与激励源反相；

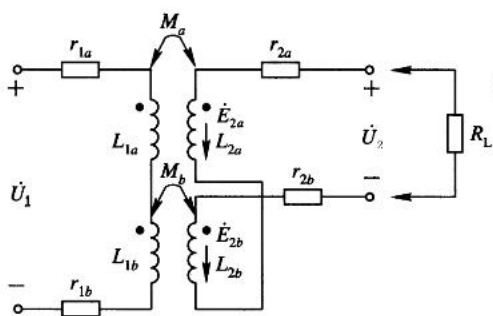
当衔铁偏离中间位置而使  $Z_1=Z+\Delta Z$  增加，则  $Z_2=Z-\Delta Z$  减少。这时当电源  $u$  上端为正，下端为负时，电阻  $R_1$  上的压降大于  $R_2$  上的压降；当  $u$  上端为负，下端为正时， $R_2$  上压降则大于  $R_1$  上的压降，电压表  $V$  输出上端为正，下端为负。

使用相敏整流，输出电压  $U_0$  不仅能反映衔铁位移的大小和方向，而且还消除零点残余电压的影响，

谐振式调幅电路电路的灵敏度很高，但是线性差，适用于线性要求不高的场合。

1. 变隙式差动变压器

当一次侧线圈接入激励电压后，二次侧线圈将产生感应电压输出互感变化时，输出电压将作相应变化 两个初级绕组的同名端顺向串联，而两个次级绕组的同名端则反向串联。电压的大小反映了被测位移的大小，通过用相敏检波等电路处理，使最终输出电压的极性能反映位移的方向。差动变压器工作原理图



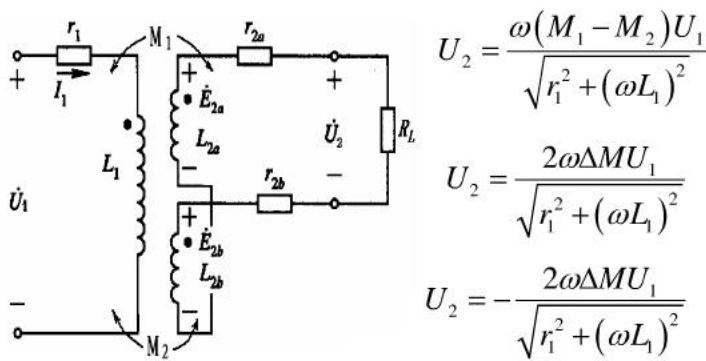
$$\dot{U}_2 = -\frac{\delta_b - \delta_a}{\delta_b + \delta_a} \frac{W_2}{W_1} \dot{U}_1$$
$$k_0 = \frac{\Delta L / L_0}{\Delta \delta} = \frac{2}{\delta_0}$$

(1) 供电电源首先要稳定，电源幅值的适当提高可以提高灵敏度  $K$  值；不超过 10v，频率为 1~10khz 为好

(2) 增加  $W_2/W_1$  的比值和减少  $\delta_0$  都能使灵敏度  $K$  值提高

(3) 提高绕组  $Q=X_L/R$  值，衔铁直径在尺寸允许内尽量大，使有效磁通较大，选用导磁好，铁损小，涡流损耗小的导磁材料。

螺线管差动变压器



(1) 当活动衔铁处于中间位置时  $M_1= M_2=M$  则  $U_2=0$

(2) 当活动衔铁向  $W_{2a}$  方向移动时  $M_1= M+\Delta M$ ,  $M_2= M-\Delta M$ ,

(3) 当活动衔铁向  $W_{2b}$  方向移动时  $M_1= M-\Delta M$ ,  $M_2= M+\Delta M$ ,

理想条件下，差动变压器的灵敏度  $K_E$  正比于电源激励频率  $f$ 。提高输入激励电压，将使传感器灵敏度按线性增加。

除了激励频率和输入激励电压对差动变压器灵敏度有影响外，提高线圈品质因数  $Q$  值，增大衔铁直径，选择导磁性能好，铁损小以及涡流损耗小的导磁材料制作衔铁和导磁外壳等可以提高灵敏度。

线性度：传感器实际特性曲线与理论直线之间的最大偏差除以测量范围（满量程），并用百分数来表示。

影响差动变压器线性度的因素：骨架形状和尺寸的精确性，线圈的排列，铁芯的尺寸和材质，激励频率和负载状态等。

改善差动变压器的线性度：

取测量范围为线圈骨架长度的 1/10~1/4，激励频率采用中频，配用相敏检波式测量电路

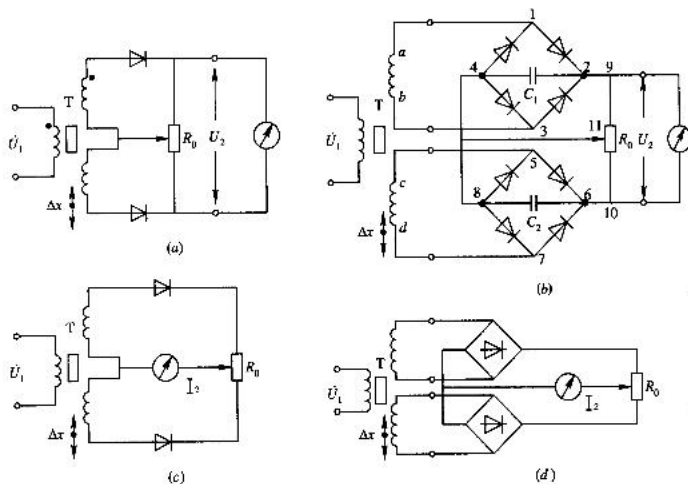
零点残余电压危害：使传感器输出特性在零点附近的范围内不灵敏，限制着分辨力的提高。零点残余电压太大，将使线性度变坏，灵敏度下降，甚至会使放大器饱和，堵塞有用信号通过，致使仪器不再反映被测量的变化。

产生零点残余电压的原因 (1) 由于两个二次测量线圈的等效参数不对称，使其输出的基波感应电动势的幅值和相位不同，调整磁芯位置时，也不能达到幅值和相位同时相等 (2) 由于铁芯的 B-H 特性的非线性，产生高次谐波不能互相抵消。

减小零点残余电压措施：(1) 在设计和工艺上，力求做到磁路对称，线圈对称。铁芯材料要均匀，要经过热处理去除机械应力和改善磁性。两个二次侧线圈窗口要一致，两线圈绕制要均匀一致。一次侧线圈绕制也要均匀。

(2) 采用拆圈的实验方法来减小零点残余电压。其思路是，由于两个二次侧线圈的等效参数不相等，用拆圈的方法使  $\dot{U}_2 = -\frac{W_2}{W_1} \frac{\dot{U}_1}{\delta_0} \Delta \delta$  相等。(3) 在电路上进行补偿。线路中加电阻，加并联电容，加反馈电阻或反馈电容。

$$K = \frac{U_2}{\Delta \delta} = \frac{W_2}{W_1} \frac{U_1}{\delta_0}$$



(a)、(b)适用于高阻抗负载(c)、(d)适用于低阻抗负载电阻  $R_0$  用于调整零点残余电压。

### 电感传感器应用

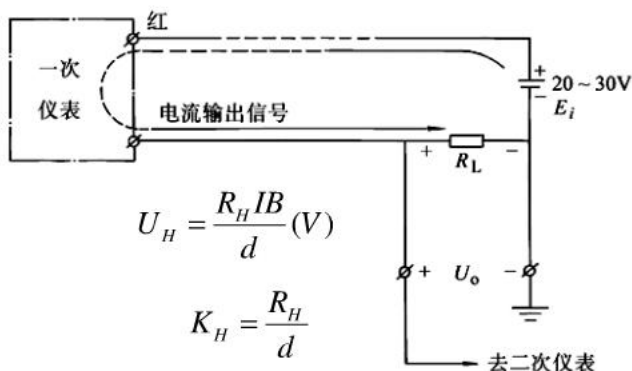
位移测量, 电感式滚柱直径分选装置, 电感式不圆度计。

压力测量传感器与弹性敏感元件(膜片、膜盒和弹簧管等)相结合, 可以组成开环压力传感器和闭环力平衡式压力计

压力变送器已经将传感器与信号处理电路组合在一个壳体中, 这在工业中被称为一次仪表。一次仪表的输出信号可以是电压, 也可以是电流。由于电流信号不易受干扰, 且便于远距离传输(可以不考虑线路压降), 所以在一次仪表中多采用电流输出型。

新的国家标准规定电流输出为 4~20mA; 电压输出为 1~5V(旧国标为 0~10mA 或 0~2V)。4mA 对应于零输入, 20mA 对应于满度输入。不让信号占有 0~4mA 这一范围的原因, 一方面是有利于判断线路故障(开路)或仪表故障; 另一方面, 这类一次仪表内部均采用微电流集成电路, 总的耗电还不到 4mA, 因此还能利用 0~4mA 这一部分“本底”电流为一次仪表的内部电路提供工作电流, 使一次仪表成为两线制仪表。

所谓二线制仪表是指仪表与外界的联系只需两根导线。多数情况下, 其中一根(红色)为+24V 电源线, 另一根(黑色)既作为电源负极引线, 又作为信号传输线。在信号传输线的末端通过一只标准负载电阻(也称取样电阻)接地(也就是电源负极), 将电流信号转变成电压信号。4~20mA 二线制仪表接线方法



### 霍尔传感器:

半导体薄片置于磁感应强度为  $B$  的磁场中, 磁场方

向垂直于薄片, 当有电流  $I$  流过薄片时, 在垂直于电流和磁场的方向上将产生电动势  $E_H$ , 这种现象称为霍尔效应。

由式  $U_H = K_H I B$  ( $U_H = K_H I B \cos \theta$ )。可知, 霍尔电势的大小正比于控制电流  $I$  和磁感应强度  $B$ 。霍尔元件的灵敏度  $K_H$  是表征对应于单位磁感应强度和单位控制电流时输出霍尔电压大小的一个重要参数, 一般要求它越大越好。  $K_H$  与元件材料的性质和几何尺寸有关。由于半导体(尤其是  $N$  型半导体)的霍尔常数  $R_H$  要比金属的大得多, 所以在实际应用中, 一般都采用  $N$  型半导体材料做霍尔元件。元件的厚度  $d$  对灵敏度的影响也很大, 元件越薄, 灵敏度就越高。

建立霍尔效应所需的时间很短(约  $10^{-12} \sim 10^{-14} s$ ), 因此控制电流用交流时, 频率可以很高(几千兆赫)。

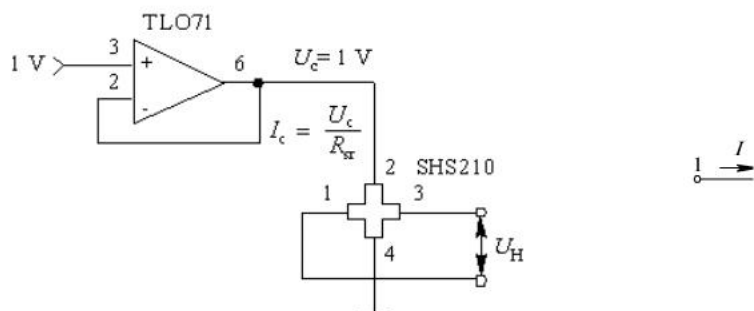
两种工作模式:

1. 恒压工作: 如图所示, 恒压工作比恒流工作的性能要差些, 只适用于对精度要求不太高的地方。在恒压条件下性能不好的主要原因为霍尔元件输入电阻随温度变化和磁阻效应的影响。输入电阻的温度系数因霍尔元件的材料型号而异, 砷化镓  $GaAs$  型为  $\pm 0.3\% / ^\circ C$  (最大), 锑化铟  $InSb$  型为  $-2\% / ^\circ C$  (最大)。

2. 恒流工作: 为了充分发挥霍尔传感器的性能, 最好使用恒流源供电, 即恒流工作。在恒流工作下, 没有霍尔元件输入电阻和磁阻效应的影响。恒流工作时偏移电压的稳定性比恒压工作时差些。特别是锑化铟  $InSb$  霍尔元件, 由于输入电阻的温度系数大, 偏移电压的影响更为显著。对电路图中的 THS103A 砷化镓  $GaAs$  霍尔元件, 在 5 mA 工作电流、1 kGs 下, 输出电压 50~120 mV, 此时的偏移电压为  $\pm 10\%$  (5~12 mV)。

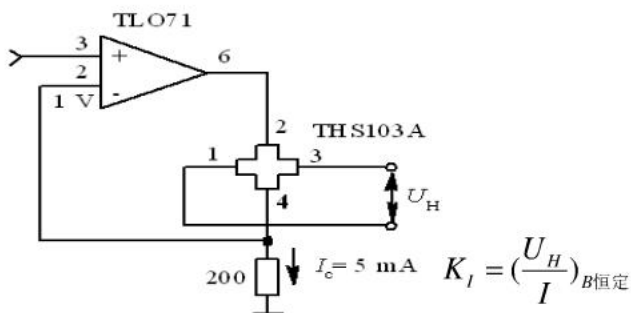
霍尔元件的输出电压一般为数毫伏到数百毫伏, 需要用放大电路放大其输出电压。霍尔元件是四端器件, 为了去除同相电压, 需要使用差分放大器。

1.  $U_H-I$  特性: 固定磁场  $B$ , 在一定温度下, 霍尔输出电势  $U_H$  与控制电流  $I$  之间呈线性关系。直线的斜率称为控制电流灵敏度, 用  $K_I$  表示。按照定义, 控制电流灵敏度  $K_I$  为(右上)。由上式可知, 霍尔元件的灵敏度  $K_H$  越大, 控制电流灵敏度也就越大。但灵敏度大的元件, 其霍尔输出并不一定大。这是因为霍尔电势在  $B$  固定时, 不但与  $K_H$  有关, 还与控制电流有关。因此, 即使灵敏度不大的元件, 如果在较大的控制电流下工作, 那么同样可以得到较大的霍尔输出。



$$K_{II} = \frac{R_H}{d}$$





## 2. $U_H$ -B 特性

固定控制电流, 元件的开路霍尔输出随磁场的增加并不完全呈线性的转动, 而使磁阻随空气隙的改变而周期性地变化, 元件工作在  $0.5 \text{ Wb/m}^2$  以下时线性度较好。使用中, 若对线性度要求很高时, 可采用 HZ-4, 它的线性偏离一般不大于 0.2%

### 1. 不等位电势及其补偿

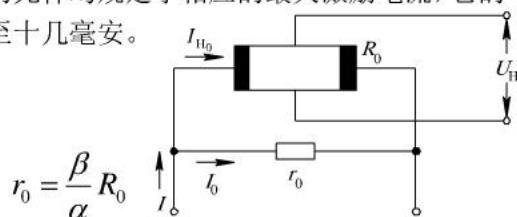
不等位电势是一个主要的零位误差。由于在制作霍尔元件时, 不可能保证将霍尔电极焊在同一等位面上, 因此, 当控制电流  $I$  流过元件时, 即使磁场强度  $B$  等于零, 在霍尔电极上仍有电势存在, 该电势就称为不等位电势。

在制造过程中如确知霍尔电极偏离等位面的方向, 就应采用机械修磨或用化学腐蚀元件的方法来减小不等位电势。对已制成的霍尔元件, 可以采用外接补偿线路进行补偿

### 2. 温度误差及其补偿

由于半导体材料的电阻率、迁移率和载流子浓度等会随温度的变化而发生变化, 因此, 霍尔元件的性能参数 (如内阻、霍尔电势等) 对温度的变化也是很灵敏的。为了减小霍尔元件的温度误差, 除选用温度系数小的元件 (如砷化镓) 或采用恒温措施外, 用恒流源供电往往可以得到明显的效果。恒流源供电的作用是减小元件内阻随温度变化而引起的控制电流的变化。但采用恒流源供电还不能完全解决霍尔电势的稳定性问题, 还必须结合其它补偿线路。一种既简单、补偿效果又较好的补偿线路。它是在控制电流极并联一个合适的补偿电阻  $r_0$ , 这个电阻起分流作用。当温度升高时, 霍尔元件的内阻迅速增加, 所以流过元件的电流减小, 而流过补偿电阻  $r_0$  的电流却增加。这样, 利用元件内阻的温度特性和一个补偿电阻, 就能自动调节流过霍尔元件的电流大小, 从而起到补偿作用。  $\beta$  是霍尔元件的内阻温度系数  $\alpha$  是霍尔电势的温度系数

由于霍尔电势随激励电流增大而增大, 故在应用中总希望选用较大的激励电流。但激励电流增大, 霍尔元件的功耗增大, 元件的温度升高, 从而引起霍尔电势的温漂增大, 因此每种型号的元件均规定了相应的最大激励电流, 它的数值从几毫安至十几毫安。



## 霍尔集成电路

1. 线性型当磁场为零时, 它的输出电压等于零; 当感受的

磁场为正向 (磁钢的 S 极对准霍尔器件的正面) 时, 输出为正; 磁场反向时, 输出为负。较典型的线性型霍尔器件如 UGN3501 等

2. 开关型当外加磁场强度超过规定的工作点时, OC 门由高阻态变为导通状态, 输出变为低电平; 当外加磁场强度低于释放点时, OC 门重新变为高阻态, 输出高电平。较典型的开关型霍尔器件如 UGN3020 等。回差越大, 抗振动干扰能力就越强。

1. 霍尔高斯计 (特斯拉计) 的使用器用于测量磁场强度

2. 霍尔转速表: 将线性型霍尔器件及磁路系统靠近齿盘。线性转动而使磁阻随空气隙的改变而周期性地变化, 霍尔器件输出的微小脉冲信号经隔直、放大、整形后可以确定被测物的转速。

3. 霍尔式接近开关: 它只能用于铁磁材料的检测, 并且还需要建立一个较强的闭合磁场。

4. 霍尔电流传感器将被测电流的导线穿过霍尔电流传感器的检测孔。当有电流通过导线时, 在导线周围将产生磁场, 磁力线集中在铁心内, 并在铁心的缺口处穿过霍尔元件, 从而产生与电流成正比的霍尔电压。

频率高于 20kHz 的机械振动波称为超声波。它的指向性很好, 能量集中, 穿透本领大。在遇到两种介质的分界面, 能产生明显的反射和折射现象, 超声波的频率越高, 其声场指向性就愈好。

超声波测距, 超声波发射探头发出的超声波脉冲在介质中传到相介面经过反射后, 再回到接收探头。  $\delta = \frac{1}{2} ct$

超声波探头常用的材料是压电晶体和压电陶瓷, 称为压电式超声波探头。它是实现声、电转换的装置。利用压电材料的压电效应来工作的: 逆压电效应将高频电振动转换成高频机械振动, 从而产生超声波, 可作为发射探头; 利用正压电效应, 将超声振动波转换成电信号, 可用为接收探头。

当超声发射器与接收器分别置于被测物两侧时, 这种类型称为透射型。透射型可用于遥控器、防盗报警器、接近开关等。超声发射器与接收器置于同侧的属于反射型, 反射型可用于接近开关、测距、测液位或物位、金属探伤以及测厚等。

超声波塑料焊接机, 超声波金丝焊接机, 超声波探鱼器, 超声波用于高效清洗。

后记: 此资料是北京工业大学电控学院自动化专业《自动检测》课期末考试复习资料, 是由老师课件上的重点集合而成, 知识点覆盖很全面。由 07 级自动化专业几位同学制作而成 (有传为几位女同学制作, 我们男同胞都是拿来主义, 辛苦几位女同学啦!), 在此特别提出感谢!

接網  
中路  
斷連