

# 传感器教学大纲

---

## 自测

---

### 测量的基本知识

传感器与检测技术概念 什么是传感器？

传感器的静态特性及其指标有哪些？

静态特性概念是是什么？

线性度怎么算？

拟合直线有哪些方法？

迟滞怎么算？

重复性怎么算？

灵敏度怎么算？

分辨率怎么算？

稳定性是什么？怎么算？（零漂蠕变）

静态误差有哪些？

仪表的误差有哪些？

精度等级怎么算？

测量方法有哪些？分三类？

传感器特性标定怎么做？

### 电阻式传感器

应变片原理是什么？

金属应变片与半导体应变片区别在哪里？

应变片结构组成？

应变片主要特性有哪些？

应变片灵敏系数怎么算？

应变片灵敏系数和金属丝灵敏系数的区别？why？

横向效应是什么？

零漂蠕变是什么？

温度效应是什么，有哪些因数影响？

应变极限是什么？

绝缘电阻最大工作电流是什么？约为多少？

动态响应特性怎么分析？

温度误差分析怎么分析？

温度补偿方法有哪些？

自补偿有哪些方法？

双丝自补偿怎么做的？

电桥补偿怎么补偿？

怎么放置应变片？

直流电桥的原理是什么？

电压输出直流电桥原理是什么？

直流电桥灵敏度计算？

直流电桥非线性计算与分析？

应变片传感器的应用？

## 电感式传感器

自感式传感器原理是什么？

自感式传感器结构有哪些？

对自感式传感器怎么进行非线性分析？（泰勒展开）

电感转换成电压的电路有哪些？

交流电桥和直流电桥的区别在哪里？

交流电桥的原理与分析？

调幅电路调相电路的结构？

调频电路的原理是什么？

调频电路频率随电感的变换是什么？

零点残余电压是什么？

零点残余电压产生原因是什么？

怎么消除零点残余电压的影响？

变压器式传感器原理是什么？

变压器式传感器等效电路是什么？

变压器式传感器灵敏度计算？非线性计算？

相敏检测电路结构？原理？

差分整流电路结构？原理？

零点残余电压补偿方法？

涡流式传感器有哪些？

高频反射式涡流式传感器原理？分析？搭配电路？原因？

低频透射式涡流式传感器原理？分析？搭配电路？原因？

电感式传感器的应用？

## 霍尔式传感器

霍尔效应原理是什么？

N型和P型霍尔使用区别在哪里？

霍尔元件材料为？

霍尔元件结构为？

霍尔元件是厚一点好还是薄一点好？

霍尔元件主要技术指标有哪些？

什么是霍尔系数？

什么是灵敏系数？

什么是霍尔的输入输出电阻？

霍尔的不等位电势是什么？是怎么产生的？

霍尔有哪些主要误差因数？

不等位电势的补偿方法？

温度误差的补偿方法？

温度误差补偿计算？

霍尔传感器的应用？

## 压电式传感器

压电效应原理是什么样的？

压电效应传感器有哪些？

石英晶体压电效应原理？

压电陶瓷压电效应原理？

石英晶体压电效应三个轴分别是什么？

石英晶体压电效应电荷面使用哪个轴？

石英晶体压电效应在三个方向作用轴向切向力会有什么效果？

压电陶瓷压电效应三个轴分别是什么？

压电陶瓷压电效应电荷面使用哪个轴？

压电陶瓷压电效应在三个方向作用轴向切向力会有什么效果？

压电方程是什么？

压电常数是什么？

石英晶体压电常数有什么关系？

压电陶瓷压电常数有什么关系？

石英晶体和压电陶瓷比较？

压电传感器等效电路是什么？

压电传感器的特性怎么看？

为什么要看压电传感器的介电常数和电导率？

介电常数是大好还是小好？电导率？

压电传感器测量电路有哪些？

电压型测量电路灵敏度计算？

电荷型测量电路灵敏度计算？

电压型测量电路的时间常数是什么？

要满足相应频率特性需要时间常数为？

怎么调整时间常数？

压电传感器的应用？

## 光电式传感器

外光电效应是什么？什么器件使用了这个原理？

内光电效应是什么？

内外光电效应区别是什么？

光电导效应和光生伏特效应的区别在哪？

光电导效应什么器件使用了这个原理？

光生伏特效应什么器件使用了这个原理？

光电元件及特性有哪些器件，需要关注哪些特性？

结合各自原理——举出光电管光电倍增管、光敏电阻、光敏晶体管、光电池的光电特性、伏安特性、光谱特性、频率特性、温度特性。

光电式传感器测量电路有什么？

光电式传感器的应用？

光导纤维结构有三层，分别是？

光纤传光原理是什么？什么是临界入射角？

光纤数值孔径是什么？代表了什么？和光纤几何尺寸有关吗？

光纤种类有哪些？

光纤传感器工作原理是什么？

什么影响光振幅？

什么影响光偏振角？

光纤传感器应用？

## 热电式传感器

热电阻材料有哪些？

热电阻材料工作原理是什么？

Pt和Cu的差别在哪里？

什么叫测温复现性？

为什么Pt需要保护套？

Pt电阻的电阻温度关系为？

$R_{t100}$  是什么意思？

$W_{100}$  是什么意思？中文名是什么？

热电阻传感器测量电路是什么的？

二线制、三线制、四线制是什么样的？

三四线制的作用是什么？

热电效应是什么（2个）？

接触电势和温差电势和总热电势的关系是什么？

热电偶基本定律是什么（3个）？

热电偶测温线路是什么？

冷端会存在什么问题？

热电偶参考端温度处理怎么做（6个）？

补偿导线是什么？什么原理？补偿后是什么样的？

如果补偿导线接反了会怎么样？

热敏电阻主要特性是什么？

PTC、NTC、CTC分别是什么？

用NTC怎么做热敏电阻特性线性化（2种）？

热电式传感器应用？

集成式热电传感器有哪些应用？

## 电流电压检测技术

测电流有三种原理，哪三种？

电磁感应式的比差和角差怎么算？

为什么电流型不能开路？

比差和角差受哪些因数的影响（3）？

怎么减小这些误差的影响（1+3）？

使用电流互感器时为了安全需要哪些措施（3）？ Why？

LPCT是什么东西？

罗氏线圈特殊在哪？

罗氏线圈适合测什么？

罗氏线圈测量电流的原理为？

光学电流传感器的原理是什么？

什么是分流器？其结构是什么样的？Why？

分流器误差来源（5）？

为了消除稳定性误差，需要？

热电势的影响？

分流器的局限性（3）？

分流器可以用在交流电流测量吗？Why？如果用了会怎么样？

可以用分流器测电流谐波吗？

电流型互感器的型号分别是什么意思？

电压型互感器的误差需要从什么看？这些怎么算？

影响电压型互感器误差的因数（4）？

使用电压型互感器时为了安全需要哪些措施（3）？Why？

电容分压器为提高带载能力可以采用哪些措施（3）？

电阻型分压测交流电压时分压会如何变化？

电阻、电容、阻容分压器的比较？

光学电压互感器测量原理？

磁光效应是什么？

## 传感器关键词

---

### 测量的基本知识 4 学时

#### 传感器与检测技术概念

检测：对基本参数和物理量进行检查测量，从而获得定量信息的过程。

检测技术：完成检测过程所采取的技术措施。

传感器定义：能够感受规定的被测量并按照一定规律转换成可用输出信号的器件或装置。或者说是将被测非电量信号转换为与之**有确定对应关系的电量信号输出**的器件或装置。

## 传感器的静态特性及其指标

静态特性概念：当输入量 (X) 为静态 (常量) 或变化缓慢的信号时 (如温度、压力)，讨论传感器的输入输出关系称静态特性。

传感器的数学模型 (在设计和研究阶段) 传感器的各种基本特性指标 (在制造和使用阶段)

静态特性曲线：静态特性曲线是在标准条件下，利用一定精度等级的标准设备，对仪表(或传感器)进行往复循环测试，得到的输出—输入数据，将这些数据列成表格，再画出各被测量值 (正行程和反行程) 对应输出平均值的连线，即为传感器的静态特性曲线。

线性度为输出平均值和拟合直线的最大偏差除以满量程输出，表示传感器的实际特性曲线与拟和直线之间的偏离程度

$$\gamma_L = \frac{\Delta L_{max}}{y_{FS}} \quad (1)$$

拟合直线目标——获得最小的非线性误差

拟合方法：①理论拟合；②过零旋转拟合；③端点连线拟合；④端点连线平移拟合；⑤最小二乘拟合

迟滞为正反程的差值最大值的一半，传感器在正 (输入量增大) 反 (输入量减小) 行程中输出与输入曲线不重合时称为迟滞。

$$\gamma_H = \pm \frac{1}{2} \frac{\Delta H_{max}}{y_{FS}} \quad (2)$$

重复性为正反行程中重复偏差最大值，是指传感器在输入按同一方向连续多次变动时所得特性曲线不一致的程度。

$$\gamma_R = \pm (\Delta R_{max} / Y_{FS}) \quad (3)$$

灵敏度在稳定条件下输出微小增量与输入微小增量的比值，为输入输出函数的导数。

$$k = \frac{dU_{sc}}{dF} \quad (4)$$

灵敏度误差

$$\gamma_S = \frac{\Delta k}{k} \quad (5)$$

分辨率为传感器能够检测到的最小输入增量。

测量范围：传感器在正常的工作条件下，测量的下限值和上限值。

量程：测量范围上限值与下限值的代数差。

**稳定性**：表示传感器在一较长时间内保持性能参数的能力，有时称为长时间工作稳定性或零点漂移。

稳定性误差：前后两次输出之差。

静态误差为三倍方差除以量程：传感器在其全量程内任一点的输出值与其理论值的偏离程度。

$$\gamma = \pm \frac{3\sigma}{y_{FS}} \quad (6)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (\Delta y_i)^2}$$

$$or \sigma = \pm \sqrt{\sum \gamma^2}$$

## 仪表的误差和精度等级

静态测量数据的处理——误差处理和回归分析

基本误差——是指仪表在规定的工作条件（额定工作条件或标准工作条件）下的误差。

按误差的表示方法:绝对误差、相对误差[实际、示值]、引用误差[满量程误差]。

按误差的性质:系统误差[检测装置不完善、测量方法不完善、操作使用不当、环境影响等]、随机误差[精密度、准确度、精确度]、粗大误差

精度等级：通常取最大引用误差不能超过的允许值来确定仪表的精度等级。某指针式电压表的精度为2.5级，用它来测量电压时可能产生的最大引用误差为 $\pm 2.5\%$ 。

## 检测技术基础（测量方法、测量系统）

测量：用实验方法，借助于一定的仪器或设备，将被测量与同性质的单位标准量进行比较，确定被测量对标准量的倍数，获得被测量的定量信息。

**测量的四个步骤：比较、示差、平衡、读数。**

测量的重要概念：转换 非电量测量结果只有转换才能更好的测出。

➤ 按测量手段：直接测量、间接测量、联立测量

➤ 按获得测量值的方法：偏差式测量、零位式测量[调节已知标准量与被测量达到平衡状态（相等），读取标准量作为被测值。]和微差式测量 [测量前先把被测量U调到基准数值大小，调节已知标准量使二者相等，读取被测值的基准大小 $U_0$ 。测量中只读取被测值的微小变化]

➤ 按测量敏感元件是否与被测介质接触分：接触式测量和非接触式测量

➤ 按被测量变化快慢分：静态测量和动态测量

## 传感器 特性标定

传感器的标定是利用精度高一级的标准器具对传感器进行定标的过程，从而确立传感器的输入量与输出量之间的关系。同时，也确定出不同使用条件下的误差关系。

## 电阻式传感器 2 学时

### 应变片原理与结构（金属应变片与半导体应变片区别）

电阻丝

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

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} - \frac{dA}{A} + \frac{d\rho}{\rho} \quad (7)$$

$$K_0 = \frac{dR/R}{\epsilon_x} = (1 + 2\mu) + \frac{d\rho/\rho}{\epsilon_x}$$

金属： $1 + 2\mu$ 占比大，为定值

半导体： $\frac{d\rho/\rho}{\epsilon_x}$ 占比大，不为定值，灵敏更多。

结构：敏感栅、基底、覆盖层、引线

金属型：丝式、箔式、薄膜式



## 应变片主要特性

(灵敏系数、横向效应、零漂蠕变、温度效应、应变极限、绝缘电阻最大工作电流、动态响应特性)；

$$\text{灵敏系数 } K = \frac{dR/R}{\epsilon_x} < K_0$$

$K < K_0$ , 应变片的横向效应和粘贴胶带来的应变传递失真。

横向效应：圆弧段沿轴向压应变使得电阻减小，灵敏系数减小。

机械滞后：应变片粘贴在被测试件上，当温度恒定时，其加载特性与卸载特性不重合。应变片在承受机械应变后的残余变形，使敏感栅电阻发生少量不可逆变化；在制造或粘贴应变片时，敏感栅受到的不适当

的变形或粘结剂固化不充分等。通常在实验之前应将试件预先加、卸载若干次，以减少因机械滞后所产生的实验误差。

零漂：随着时间推移，即使没有应变也会指示应变的现象。敏感栅通电后的温度效应；应变片的内应力逐渐变化；粘结剂固化不充分等。

蠕变：随着时间推移，指示应变逐渐减小的现象。由于胶层之间发生“滑动”，使力传到敏感栅的应变逐渐减少。

$$\text{温度效应: } \frac{\Delta R_t}{R_0} = (\alpha + K(\beta_g - \beta_s))\Delta t$$

➤ 应变片敏感栅材料本身电阻温度系数；

$$R_t = R_0(1 + \alpha\Delta t)$$

➤ 试件材料的线膨胀系数 与应变片本身线膨胀系数 的不一致

当试件与电阻丝材料的线膨胀系数不同时：环境温度变化，电阻丝会产生附加变形，从而产生附加电阻变化。

$$\begin{aligned}\Delta l &= (\beta_g - \beta_s)l_0\Delta t \\ \epsilon_\beta &= \frac{\Delta l}{l_0} = (\beta_g - \beta_s)\Delta t \\ \Delta R_\beta &= KR_0\epsilon_\beta\end{aligned}\quad (8)$$

允许电流：指由电流产生的热量不影响测量精度时，应变片允许通过的最大电流。一般为25mA。

动态响应特性：最高工作频率，由应变片反映出来的应变波形，是应变片线栅长度内所感受应变量的平均值。

## 温度误差分析

$$\frac{\Delta R_t}{R_0} = (\alpha + K(\beta_g - \beta_s))\Delta t \quad (9)$$

## 温度补偿方法（自补偿、电桥补偿）

$$\text{单丝自补偿: } \frac{\Delta R_t}{R_0} = (\alpha + K(\beta_g - \beta_s))\Delta t = 0$$

$$\text{使得 } \alpha_t = -K_0(\beta_g - \beta_s)$$

优点：容易加工，成本低，缺点：只适用特定试件材料，温度补偿范围也较窄。

双丝自补偿： $\Delta R_1 + \Delta R_2 = 0$  选用温度系数一正一负组成

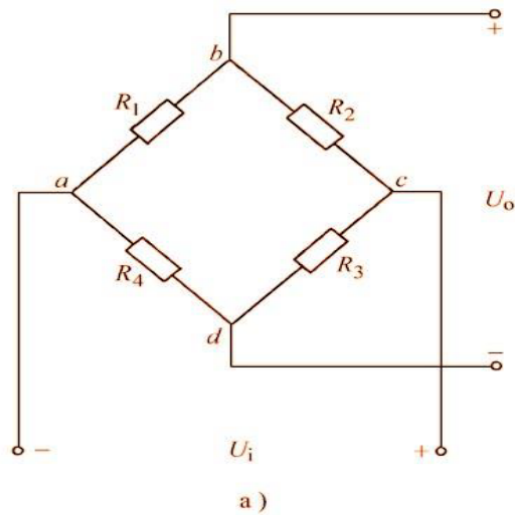
则取双丝电阻比为

$$R_1 \quad \Delta R_{2t}/R_2 \quad \alpha_2 + K(\beta_a - \beta_2) \quad \dots$$

$$\frac{\Delta R_2}{R_2} = -\frac{\Delta R_{1t}/R_1}{\alpha_1 + K(\beta_g - \beta_1)} \quad (10)$$

线路补偿：被测试件相邻臂上安装一补偿片，处于相同的温度场,但不受力。

### 直流电桥（电压输出直流电桥原理、灵敏度、非线性分析）



单桥臂、双桥臂、全桥

相邻臂相减，相对臂相加。通过不同的组合方式，可提高灵敏度，消除非线性误差及温度效应的影响

### 应变片传感器的应用

测力、加速度

粘贴应变片

## 电感式传感器 3 学时

电感式传感器是将被测量的变化转换成线圈电感量（自感或互感）的变化，再经过转换电路变成电信号输出。

### 自感式传感器原理、结构

通过改变L来进行测量。

还有差动式自感，就是桥臂上自感不同。灵敏度提高一倍，线性度得到改善，抵消温度噪声影响。

### 非线性分析

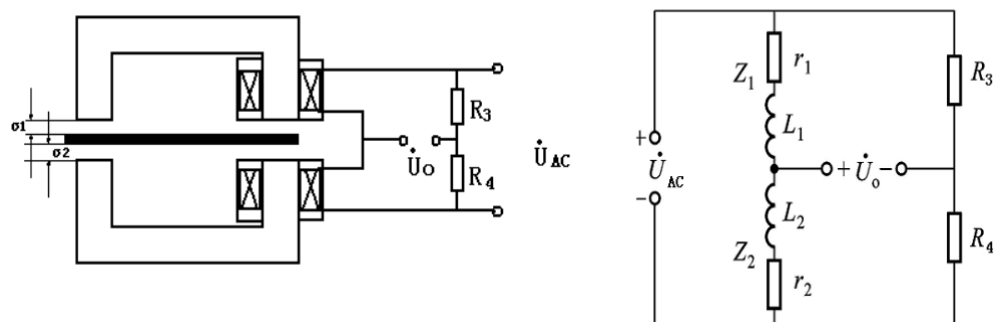
$$L = \frac{W^2}{R_m} = \frac{W^2 \mu_0 s_0}{\delta} \quad (11)$$

$\delta$ 为气隙总长，忽略铁心磁压降

L与 $\delta$ 之间是非线性关系

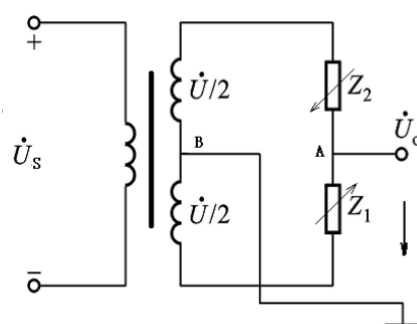
磁导率型，通过改变铁心的磁导率改变电感

## 转换电路（交流电桥、调幅调频调相电路）



$$\dot{U}_o = \frac{\dot{U}_{AC}}{2} \frac{\Delta\delta}{\delta_0} \quad (12)$$

变压器式交流电桥，用变压器做桥臂



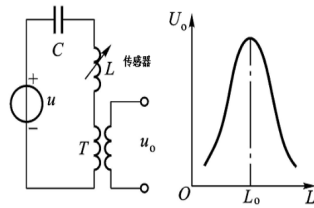
## 输出空载电压

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{U}}{Z_1 + Z_2} Z_1 - \frac{\dot{U}}{2} = \frac{\dot{U}}{2} \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

衔铁上下移动相同距离时，输出电压大小相等方向相差180°，要判断衔铁方向就是判断信号相位。

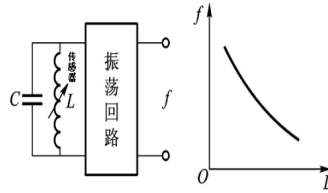
对非差分式的，测单一电感的方法：

### 调幅式电路 输出幅值随电感L变化



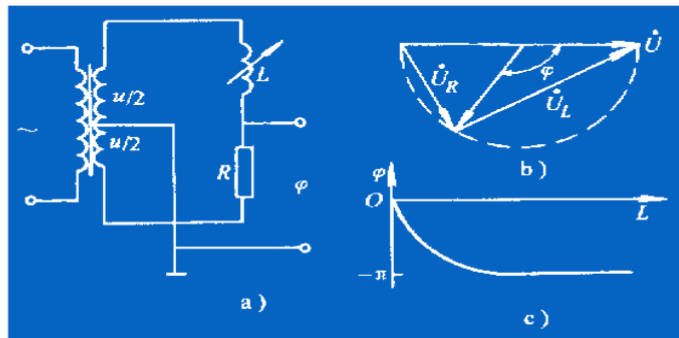
灵敏度高，线性差

### 调频电路 电感L变化时谐振频率变化



要求/较大，且非线性严重

### 调相式电路 输出相位随电感L变化



#### 零点残余电压

实际的特性曲线，在零点上总有一个最小的输出电压，这个铁芯处于中间位置时最小不为零的电压称为零点残余电压。

零点残余电压产生的原因：

两个传感器线圈不完全对称（导磁体的几何尺寸、线圈的电气参数等不对称）

传感器铁磁材料磁化曲线存在非线性；

供电电源存在高次谐波，而电桥只能对基波较好的预平衡；

线圈间存在分布电容等寄生参数

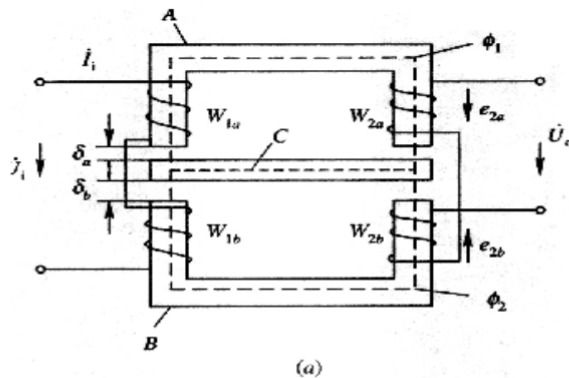
高频干扰

减小零点残余电压的措施

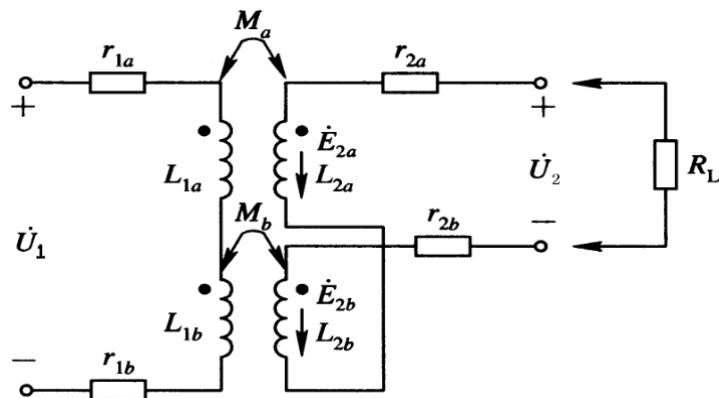
- (1) 在设计和工艺上，力求做到磁路对称，线圈对称。铁芯材料要均匀。两个二次侧线圈窗口要一致，两线圈绕制要均匀一致。一次侧线圈绕制也要均匀。
- (2) 采用拆圈的实验方法来减小零点残余电压。其思路是，由于两个二次侧线圈的等效参数不相等，用拆圈的方法，使两者等效参数相等。
- (3) 在电路上进行补偿。线路补偿主要有：加串联电阻，加并联电容，加反馈电阻或反馈电容等。加带滤波电路。

#### 变压器式传感器原理、等效电路及特性分析

工作频率 2~10kHz，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；增加  $W_2/W_1$  的比值和减少  $\delta_0$  都能使灵敏度K值提高。略去了铁损及线圈中分布电容的影响，次级绕组开路。



两个初级绕组的同名端**顺向串联**，  
两个次级绕组的同名端则**反向串联**。



$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1(r_{1a} + r_{1b} + j\omega L_{1a} + j\omega L_{1b})$$

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_1(j\omega M_a - j\omega M_b)$$

$$M_a = W_{1a}W_{2a}/R_{ma}$$

$$M_b = W_{1b}W_{2b}/R_{mb}$$

$$L_{1a} = W_{1a}^2/R_{ma}$$

$$L_{1b} = W_{1b}^2/R_{mb}$$

$$R_{ma} = \frac{2(\delta + \Delta\delta)}{\mu_0 s_0}$$

$$R_{mb} = \frac{2(\delta - \Delta\delta)}{\mu_0 s_0}$$

(13)

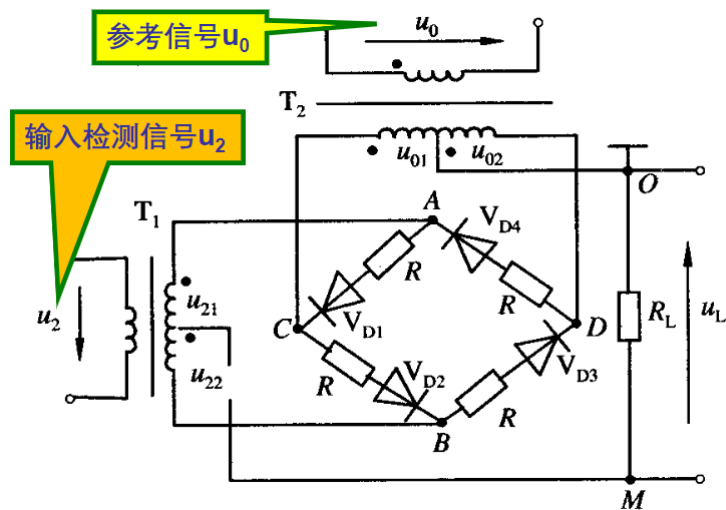
联立可以解得输出电压与输入电压和各元件的关系。得到品质因数、幅频特性、相频特性、传感器灵敏度

$$K = \frac{U_2}{\Delta\delta} = \frac{W_2}{W_1} \frac{U_1}{\delta_0} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{Q^2}}}$$

(14)

### 相敏检测电路、差分整流电路分析

相敏检波电路

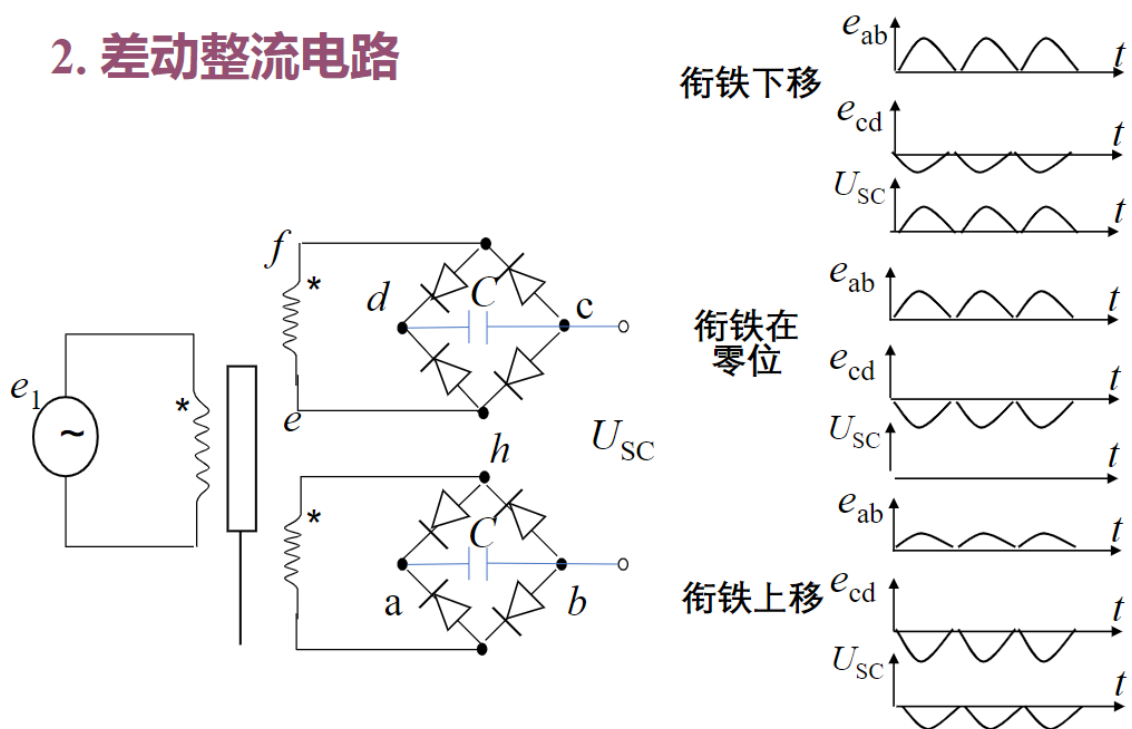


$u_0$  的幅值要远大于输入信号  $u_2$  的幅值, 以便有效控制四个二极管的导通状态。 $u_0$  和  $u_2$  由同一振荡器提供, 保证二者同频、同相 (或反相)

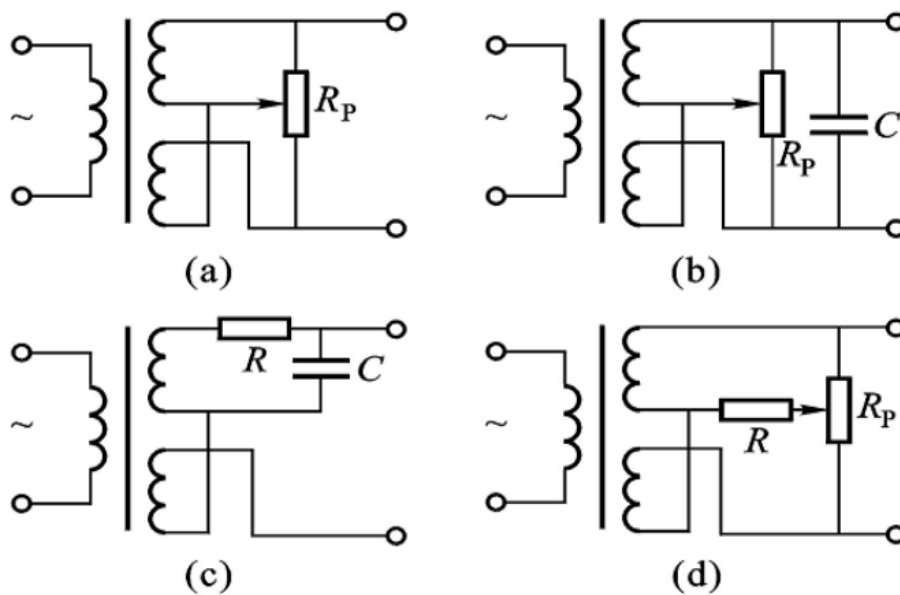
结论: 只要位移  $\Delta x > 0$ , 不论  $u_2$  与  $u_0$  是正半周还是负半周, 负载  $R_L$  两端得到的电压  $u_L$  始终为正。

相敏检波电路输出电压  $u_L$  的变化规律充分反映了被测位移量的变化规律, 即  $u_L$  的值反映位移  $\Delta x$  的大小, 而  $u_L$  的极性则反映了位移  $\Delta x$  的方向。

## 2. 差动整流电路

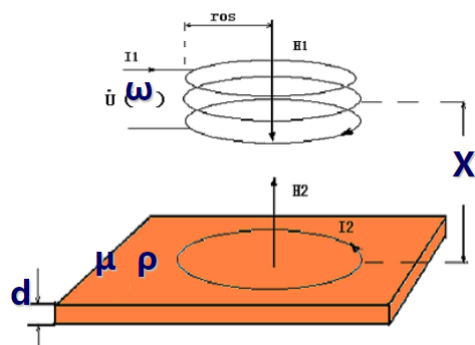


零点残余电压补偿方法



## 电涡流式传感器原理（高频反射式、低频透射式）及分析

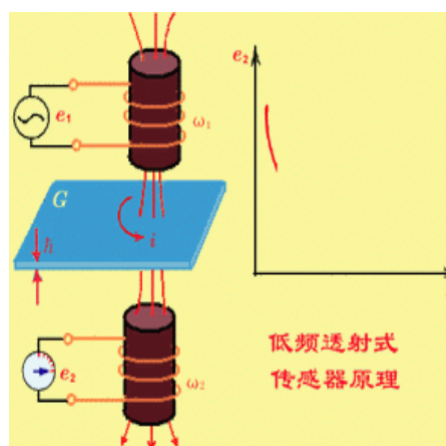
高频反射测电感



一个线圈，靠近金属，电阻增加，电感减小。测距离、材料导磁率、电阻率、频率。

通过测电感的测幅调频来测变化后的电感值和电阻值。

低频投射，测金属板吸收电磁功率



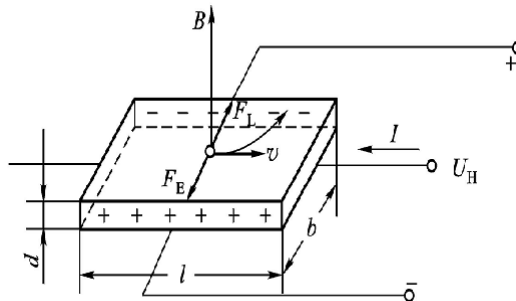
电感式传感器的应用。

测地雷，测位移，测震动，测金属。

## 霍尔式传感器 2 学时

### 霍尔效应原理

霍尔效应的推导



$$qBv = qE_H$$

$$U_H = bE_H$$

$$U_H = -\frac{IB}{ned} \quad (N\text{型霍尔})$$

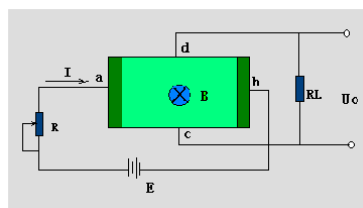
(15)

$$\text{霍尔系数 } R_H = -\frac{1}{ne} = \rho\mu$$

$$\text{灵敏度 } K_H = \frac{R_H}{d}$$

霍尔电势与IB成正比关系。

### 霍尔元件材料、结构



外形特点：四端元件,一对控制极，一对输出极；

结构简单，体积小；频带宽；非接触测量，寿命长；

易受温度影响。

### 霍尔元件主要技术指标

输入/输出电阻： $R_i$  ,  $R_O$  ( $B=0$ ,  $T$ 一定)

**温度系数 (霍尔电压系数，电阻系数)**

额定激励电流/最大激励电流： $I_n/I_m$

最大磁感应强度： $B_m$

霍尔灵敏度： $K_H$

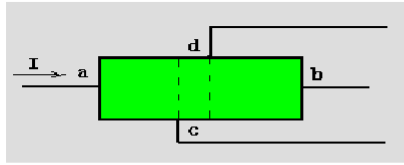
不等位电势： $U_{no}$



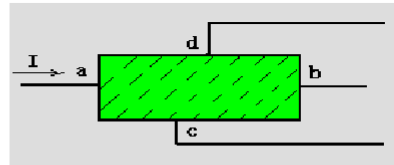
## 霍尔式传感器的误差分析

### 1. 不等位电势

- 当霍尔元件通以激励电流 $I$ 时，若磁场 $B=0$ ，理论上霍尔电势 $U_H=0$ ，但实际 $U_H$ 不等于0，这时测得的空载电势称不等位电势 $U_0$ 。产生的原因：



霍尔引出电极安装不对称



半导体材料不均匀

### 2. 温度误差

霍尔元件是半导体元件，它的许多参数与温度有关。当温度 $T$ 变化时，载流子浓度 $n$ 、迁移率 $\mu$ 、电阻率 $\rho$ ，霍尔系数 $R_H$ 都会变化。

$$\text{霍尔系数 } R_H = R_{H0}(1 + \alpha t)$$

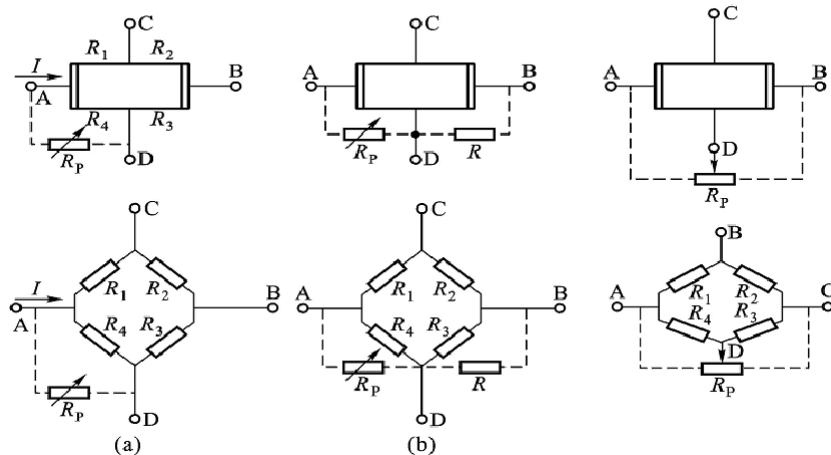
$$\text{输入电阻 } R_{it} = R_{i0}(1 + \beta t)$$

$$\text{输出电阻 } R_{ot} = R_{o0}(1 + \beta t)$$

## 霍尔式传感器的补偿方法

### 1. 不等位电势的补偿方法

#### 1) 不等位电势的补偿



### 2. 温度补偿

#### 输入电压源串电阻补偿

对输入电压源串电阻，即当温度增加时，通过输入电流的减小（by 输入电阻串电阻）来进行补偿，使得不变。

$$\Delta U_H = (R_H B I)' \Delta t = U_{H0} \left( \alpha - \frac{R_{i0} \beta}{R_{i0} + R} \right) \Delta t \quad (16)$$

故串不随温度改变的电阻 $R$ ，补偿前提 $\beta > \alpha$

$$R = \frac{R_{i0}(\beta - \alpha)}{\alpha} \quad (17)$$

### 输出回路并负载补偿

$$\Delta U_H = (R_H B I \frac{R_L}{R_L + R_{ot}})' \Delta t = U_{H_0} (\alpha - \beta \frac{R_{o0}}{R_L + R_{O0}}) \quad (18)$$

即

$$R_L = R_{o0} (\frac{\beta}{\alpha} - 1) \quad (19)$$

### 霍尔式传感器应用

测距离，磁场和电流。

(1) 测转速/检齿(2) 测磁场(3) 测位移(4) 测压力(5) 测振动(6) 测电流

## 压电式传感器 2 学时

### 压电效应原理

发电型传感器，以电介质的压电效应为基础，外力作用下在电介质表面产生电荷，从而实现非电量测量。对各种**动态力**、机械冲击和振动进行测量。

$$q \propto F$$

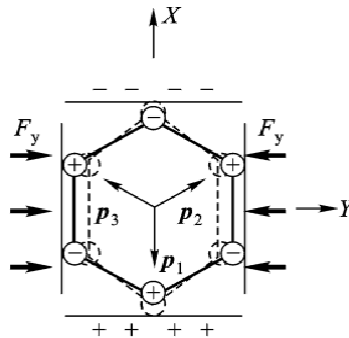
压电效应

当沿着一定方向施加力变形时，内部产生极化现象，同时在它表面会产生符号相反的电荷；当外力去掉后，又重新恢复不带电状态；当作用力方向改变后，电荷的极性也随之改变；

❖ 这种现象称压电效应。

压电效应是可逆的在介质极化的方向施加电场时，电介质会产生形变，将电能转化成机械能，这种现象称“**逆压电效应**”。压电元件可以将机械能——转化成电能,也可以将电能——转化成机械能。

### 石英晶体压电效应



Z轴为光轴，为晶体对称轴。X轴为电轴，此处压电效应最明显。Y轴为机械轴，在此轴加力产生的形变最大。

沿X轴方向的应力时，X方向压缩形变，X轴正方向有正电荷。

$$q_x = d_{11} F_x \quad (20)$$

沿Y轴方向的应力时，Y方向压缩形变，X轴正方向有负电荷。

$$q_x = -d_{11} \frac{A_x}{A_y} F_y (d_{11} = -d_{12}) \quad (21)$$

沿X轴方向的切应力时，Y方向倾斜形变，Y轴正方向有正电荷。

## 压电陶瓷压电效应

压电陶瓷是人工制造的多晶体压电材料，材料的内部晶粒有许多自发极化的电畴，有一定的极化方向。无电场作用时，电畴在晶体中分布杂乱分布，极化相互抵消，呈中性。

施加外电场时，电畴的极化方向发生转动，趋向外电场方向排列。外电场强度达到饱和程度时，所有的电畴与外电场一致。外电场去掉后，电畴极化方向基本不变，剩余极化强度很大。所以，**压电陶瓷极化后才具有压电特性**，未极化时是非压电体。

与石英晶体不同，通常取压电陶瓷的极化方向为z轴，垂直于z轴的平面上任何直线都可作为x或y轴。当压电陶瓷在沿极化方向受力时，则在垂直于z轴的上、下两表面上将会出现电荷，电荷量q与作用力Fz成正比，即

$$q_3 = d_{33}F_z \quad (22)$$

压电陶瓷在受到沿y方向的作用力Fy或沿x方向的作用力Fx时，在垂直于z轴的上、下平面上分别出现正、负电荷，电荷量q与作用力Fy、Fx也成正比，即

$$\begin{aligned} q_3 &= d_{31}F_x \frac{A_z}{A_x} \\ q_3 &= d_{32}F_y \frac{A_z}{A_y} \\ d_{31} &= d_{32} \end{aligned} \quad (23)$$

## 压电方程与压电常数

$$Q_{3 \times 1} = d_{3 \times 6} F_{6 \times 1} \quad (24)$$

$i = 1, 2, 3 \rightarrow$  产生电荷的表面的轴向，分别表示x轴、y轴、z轴  
 $j = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \rightarrow$  (作用力的轴向，分别表示沿x、y、z轴单向力)、  
 (绕x、y、z作用的剪切力)

## 压电传感器性能指标

压电系数d：反映电荷与作用力的关系。(大)

**介电系数：对一个特定几何形状的压电元件，决定了传感器固有电容及固有频率。**

居里点：即最大安全温度。在此温度及以上，压电性能被破坏。(高)

最大安全应力：刚度或机械强度。在最大安全应力内，性能稳定。(大)

电阻（率）：**电阻大，电荷泄漏小，低频特性好。**(大)

安全湿度：压电材料易潮湿的程度。(高)

石英晶体：

- > 石英晶体在几百°C的温度范围内，介电常数和压电系数几乎不随温度而变化。
- > 当温度超过**573°C**居里点时，石英晶体完全丧失压电特性。
- > 石英晶体的突出优点：**性能非常稳定**，有很大的机械强度和稳定的机械性能。

- > 但石英材料价格昂贵，且压电系数比压电陶瓷低得多。
- > 因此一般仅用于标准仪器或要求较高的传感器中。

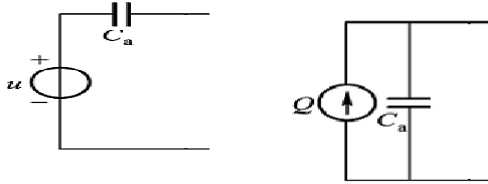
钛酸钡压电陶瓷

优点：**介电常数和压电系数大**（约为石英晶体的50倍）。

缺点：居里点温度低（120℃），温度稳定性和机械强度不如石英晶体。

### 压电传感器等效电路

电压源与电容串联/一个电荷源Q和电容Ca并联



$$U = \frac{Q}{C_a} \quad (25)$$

$$C_a = \frac{\epsilon S}{d}$$

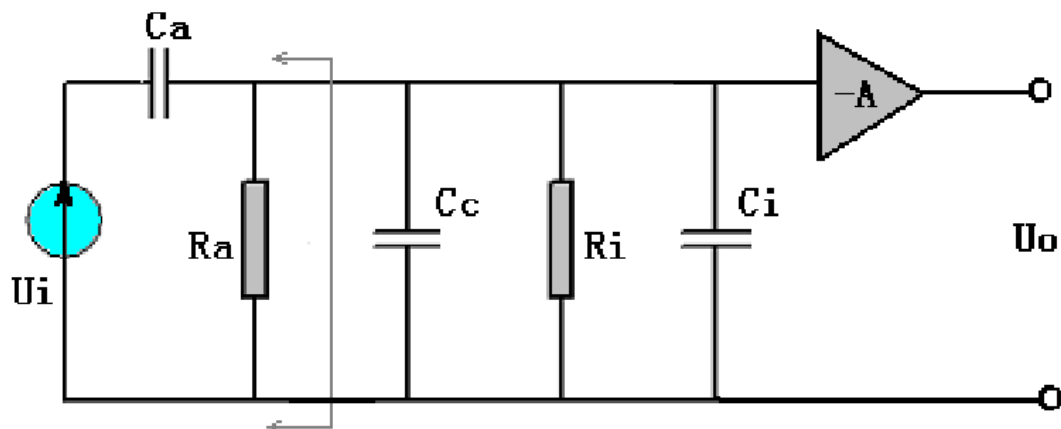
### 压电传感器测量电路



前置放大器的作用 { 阻抗变换作用：高阻抗→低阻抗  
放大传感器输出的微弱信号

前置放大器 { 电压放大器 — 高内阻的电压源转换成低内阻的电压源  
(阻抗变换器) 输出电压 ∝ 输入电压  
电荷放大器 — 高内阻的电荷源转换成低内阻的电压源  
输出电压 ∝ 输入电荷

电压放大器



电压放大器等效电路

$$u = \frac{d * F_m \sin \omega t}{C_a}$$

$$\dot{U}_{im}(\omega) = \dots \text{会推}$$

$$K_u = \frac{U_{im}}{F_m} = \frac{d}{C_a + C_c + C_i} \quad (26)$$

$$\tau = R(C_a + C_c + C_i)$$

需要  $\omega\tau > 3$

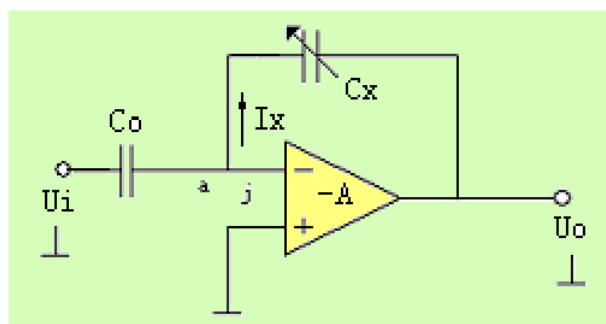
提高低频响应的办法是增大 $\tau$ ，但不能增大电容（？）

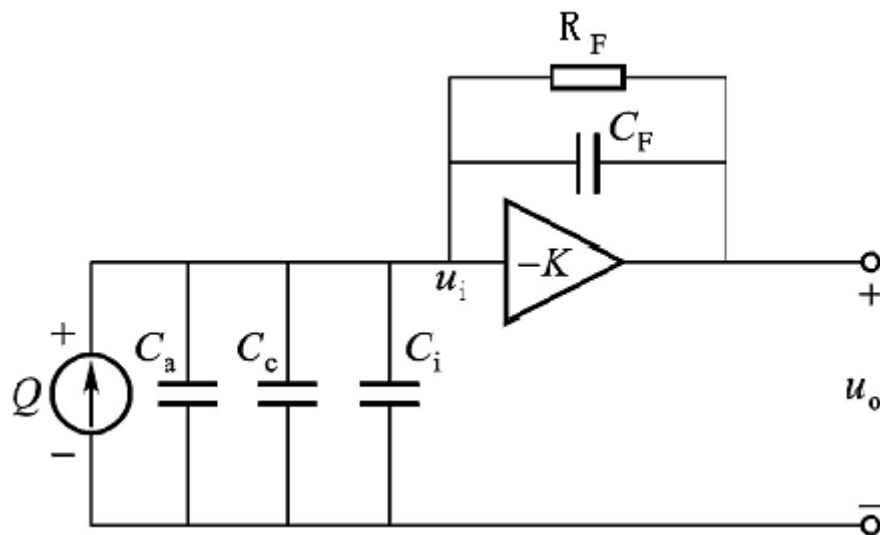
从传感器电压灵敏度 $K_u$ 可见，连接电缆的分布电容 $C_c$ 影响灵敏度。使用时如更换电缆就要重新标定，测量系统对电缆长度变化很敏感，这是电压放大器的缺点。

## (2) 电荷放大器

为解决电缆分布电容对传感器灵敏度的影响，可采用电荷放大法。

电荷放大器是一种输出电压与输入电荷量成正比的放大；其利用电容作反馈元件，是具有深度负反馈的高增益放大器。





用电压源更好算，我也不知道用电荷源这个怎么算

$$\begin{aligned}
 K &\rightarrow \infty \\
 u_o &= \frac{Q}{C_i} / X_i * -X_F = -\frac{Q(j\omega C_i)}{C_i(j\omega C_F + R)} \\
 &= -\frac{j\omega}{j\omega C_F + R} dF \approx -\frac{1}{C_F} dF (\omega \rightarrow \infty) \\
 U_0 &\approx \frac{-Q}{C_F}
 \end{aligned} \tag{27}$$

电荷放大器中，输出电压与电缆电容 $C_c$ 无关，与 $Q$ 成正比，与 $C_F$ 成反比，这是电荷放大器的突出优点。反馈电容 $C_F$ 小，输出灵敏度越大；反馈电容 $C_F$ 越大，下限频率越低，可以获得更宽的频率响应；

### 压电传感器的应用

测动态的力。测时间差，测超声波，测液位。

## 光电式传感器 3 学时

### 光的特性

光的粒子性：光是以光速运动着的粒子（光子）流，一束频率为 $\nu$ 的光由能量相同的光子所组成。

每个光子的能量  $E = hf$

每个光子具有的能量正比于光的频率。光照射某一物体，就可以看作该物体受到一连串具有一定能量的光子所轰击，而光电效应就是由于该物体吸收到光子能量后产生的电效应。

### 外光电效应



### 内光电效应



## 外光电效应

在光照射下，电子逸出物体表面向外发射的现象（又称为光电子发射效应）

$$\frac{1}{2}m_e V^2 = hf - A_0$$

$$f_0: \text{红限频率 } f_0 = \frac{A_0}{h}$$

➤ 当入射光的频谱成分不变时，产生的光电流与光强成正比。

➤ 为使光电流为零，必须加**负的截止电压**，其大小与入射光频率成正比

光照（光电）特性 光电流与光通量之间的关系。

光谱特性 灵敏度（光电流）与光波长 的关系 能量的关系

频率特性 光电流与调制光频率之间的关系。

温度特性 灵敏度（光电流）、光谱与光波长 的关系。

暗电阻、暗电流 光电元件在未受到光照射时的阻值和电流

响应时间

伏安特性 在一定光照下，器件两端电压与产生的电流之间的关系

能量的传递

## 内光电效应（光电导效应、光生伏特效应）

在光的照射下，材料的电阻率发生改变的现象。阻值随光照增强而减小。

$hf > E_g$  入射光照射时，电子吸附光子能量，从价带激发到导带；导带的电子和价带的空穴浓度增大，引起材料电阻率减小；

光敏电阻

光生伏特效应是半导体材料吸收光能后，在PN结上产生电动势的效应。

PN结处于反偏时光敏二极管、光敏晶体管

PN结不加偏压时基于这种效应的器件有光电池

实用的光敏电阻的暗电阻往往超过1MΩ,甚至高达100MΩ，而亮电阻则在几kΩ以下，暗电阻与亮电阻之比在 $10^2 \sim 10^6$ 之间，可见光敏电阻的灵敏度很高。

## 光电元件及特性（光电管光电倍增管、光敏电阻、光敏晶体管、光电池）

1. 光电特性
2. 伏安特性
3. 光谱特性
4. 频率特性
5. 温度特性

1. 光电管、光电倍增管：外光电效应

光照（光电）特性 光电流与光通量之间的关系。

光谱特性 灵敏度（光电流）与光波长 的关系 能量的关系

频率特性 光电流与调制光频率之间的关系。

温度特性 灵敏度（光电流）、光谱与光波长 的关系。

暗电阻、暗电流 光电元件在未受到光照射时的阻值和电流

响应时间

伏安特性 在一定光照下，器件两端电压与产生的电流之间的关系

## 2. 光敏电阻：内光电效应，光电导效应

暗电流、灵敏度高

响应时间长，不可以用在要求快速响应的场合

非线性

温度特性，当温度升高时，光敏电阻的暗电阻和灵敏度下降。对光敏电阻的光谱特性也有很大影响

光敏二极管、光敏晶体管：内光电效应，光生伏特效应、PN结处于反偏时

近似线性

伏安特性

光谱特性，频率特性

温度特性，温度升高，电流线性增加

## 3. 光电池：内光电效应，光生伏特效应、PN结不加偏压

电流源使用

频率特性

温度特性，温度升高，开路电压线性增加，开路电流线性减小

## 光电式传感器测量电路

中，根本没必要记吧

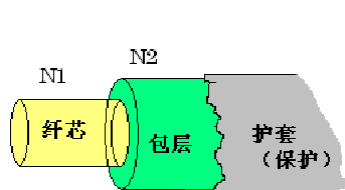
什么继电器什么的

## 光电式传感器的应用

测光，测温

测仪器

## 光导纤维结构



光纤的传光原理基于光的全反射：

有临界角，所以截面积不能无限大

临界入射角 $\theta_c$ 的正弦函数定义为光纤的数值孔径



NA表示光纤的集光能力。NA越大集光能力越强，光纤与光源间耦合会更容易。但NA越大光信号畸变越大，要选择适当。

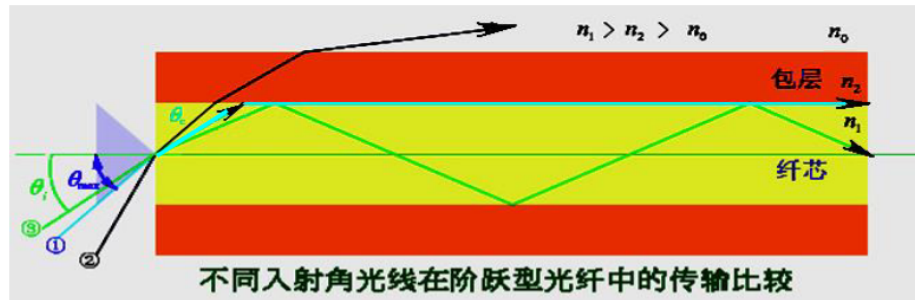
单模阶跃型，多模阶跃型，多模渐变型

单模光纤原则上只能传送一种模数的光纤常用于通信和光纤传感器。这类光纤传输性能好、频带很宽，具有较好的线性度；但因内芯尺寸小，难以制造和耦合。

多模光纤纤芯直径远大于光的波长，传输模数很多。这类光纤性能较差，带宽较窄；但由于芯子的截面积大，容易制造、连接耦合比较方便，也得到了广泛应用。

## 传光原理

### 光纤的传光原理：基于光的全反射



临界角

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{1}{N_0} \sqrt{N_1^2 - N_2^2}\right) \quad \text{空气中} \quad N_0 = 1$$

$$\theta_c = \arcsin\left(\sqrt{N_1^2 - N_2^2}\right)$$

2022/3/14

## 光纤种类

1. 传光型传感器
2. 功能型传感器

振幅型（强度型）光纤传感器，待测的物理量扰动直接调制光强

相位型（干涉仪型）光纤传感器在单模光纤中传输相干光，因待测物理场的作用，产生相位调制；

偏振调制型；

频率调制光纤传感器

## 光纤传感器工作原理

微弯损耗光强调制测变形

光纤的吸收特性进行射线强度测试

利用光波的偏振性质，可以制成光纤的偏振调制传感器。光纤传感器中的偏振调制器常用**电光、磁光、光弹**等物理效应进行调制。

## 光纤传感器应用

迈克尔逊干涉仪

马赫-泽德干涉仪

萨格奈克干涉仪

法布里-珀罗干涉仪

## 热电式传感器 2 学时

### 热电阻

能用作温度检测元件的电阻体称为热电阻。

工业用热电阻测温范围：-200~650 °C

### 热电阻材料及工作原理（铂、铜、【镍】）

- 电阻温度系数要大，以提高热电阻的灵敏度；
- 电阻率尽可能大，以便减小电阻体尺寸；
- 热容量要小，以便提高热电阻的响应速度；
- 在测量范围内，应具有稳定的物理和化学性能；
- 电阻与温度的关系最好接近于线性；
- 应有良好的可加工性，且价格便宜

铂热电阻的长时间稳定的复现性可达 $10^{-4}$  K，是目前测温复现性最好的一种温度计。

注意：铂在还原性气体尤其在高温还原性气体中，容易被污染，导致铂丝变脆，并改变电阻与温度间的关系。因此必须用**保护套管把电阻体与有害气体隔离**。

### R0是什么 Pt100是什么

R100是什么，W100是什么，百度电阻比是什么

铂热电阻的精度可以达到0.03 °C

铜热电阻

应用：测量精度要求不高且温度较低场合

优点：

温度范围内线性好，灵敏度比铂电阻高，容易提纯、加工，价格便宜，复制性能好。

缺点：

易于氧化，一般只用于150°C以下的低温测量和没有水分及无侵蚀性介质的温度测量。与铂相比，铜的电阻率低，铜电阻的体积较大。

### 热电阻传感器测量电路

直流电桥

二线制、三线制、四线制

为了消除**接线电阻**引起的误差

## 热电偶

属于自发电型传感器：测量时可以不需外加电源，可直接驱动动圈式仪表；

下限可达-200℃，上限可达1800℃以上；

### 热电效应

#### 1. 接触电势

$$E_{AB}(T) = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_A}{N_B}$$

#### 2. 温差电势

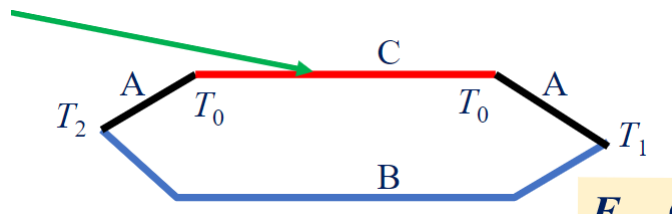
$$E_A(T, T_0) = \int_{T_0}^T \sigma_A dT$$

#### 3. 总热电势

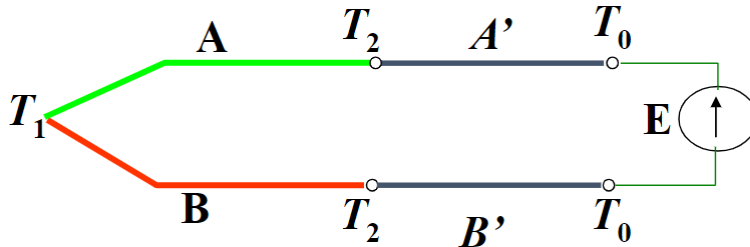
$$E_{AB}(T, T_0) = E_{AB}(T) - E_{AB}(T_0) - E_A(T, T_0) + E_B(T, T_0)$$

如果热电极材料是非均质的，由于温度梯度的存在，将会有附加热电势产生。

热电偶闭合回路中，当某导体两端温度相同时，不影响回路的总热电势。



连接导体与中间温度



$$E_{ABB'A'}(T_1, T_2, T_0) = E_{AB}(T_1, T_2) + E_{A'B'}(T_2, T_0)$$

$$E_{ABB'A'}(T_1, T_2, T_0) = E_{AB}(T_1, T_2) + E_{A'B'}(T_2, T_0) \quad (28)$$

### 热电偶基本定律

1. 回路串导体
2. 标准电极替换
3. 连接导体与中间温度求和

### 热电偶测温线路

#### 热电偶参考端温度处理

1. 冰点槽
2. 计算修正
3. 零点迁移

## 4. 冷段补偿器

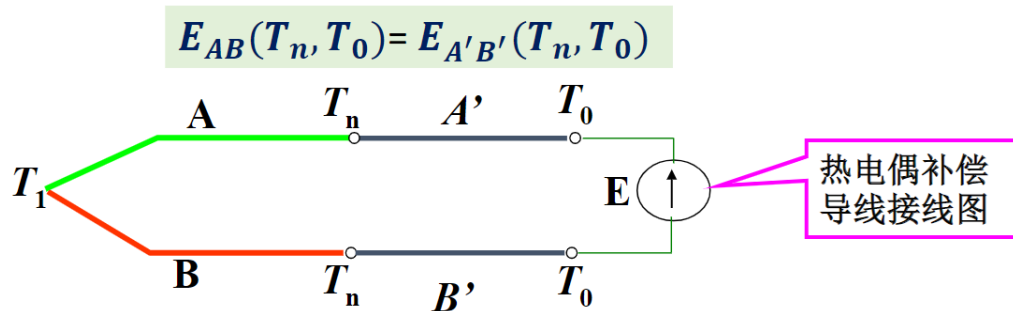
不平衡电桥

## 5. 软件处理

## 6. 延长导线

补偿导线

**补偿导线：在一定的温度范围内（0~100 °C ）与热电偶具有相同的热电特性。**



**利用中间温度定律：**

$$E_{AB}(T_1, T_n) + E_{A'B'}(T_n, T_0) = E_{AB}(T_1, T_0)$$

## 热敏电阻

热敏电阻用**半导体材料**氧化复合高温烧结而成: Mn、Co、Ni、Cu、Fe氧化物

### 热敏电阻主要特性

热敏电阻的特点

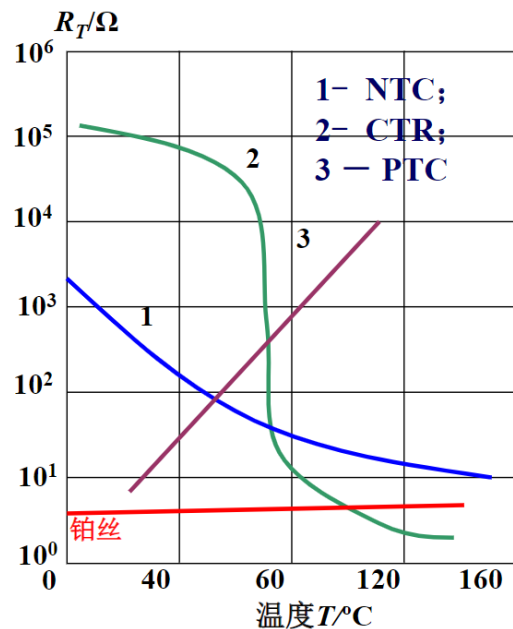
- 电阻温度系数的范围甚宽
- 阻值在1 ~ 10M之间可供自由选择
- 动态特性好（响应时间快）
- 材料加工容易
- 体积小、寿命长
- 原料资源丰富，价格低廉

### 热敏电阻特性线性化

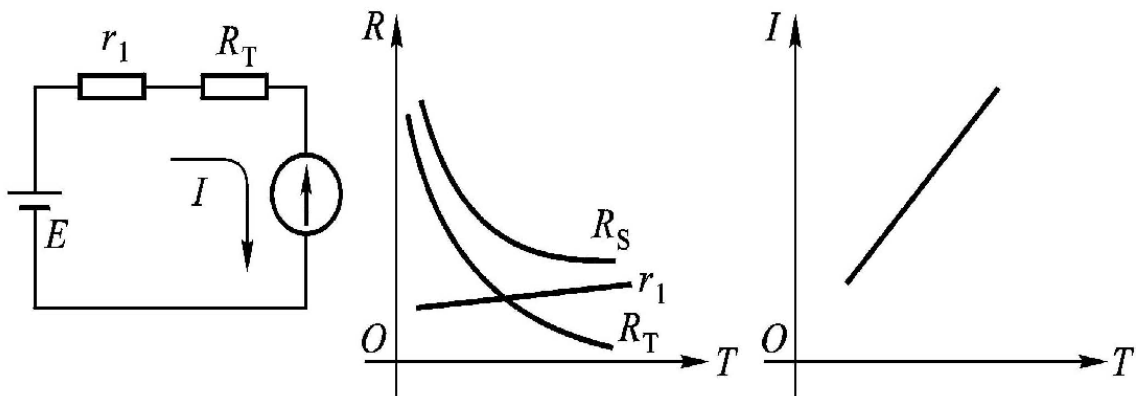
**正温度系数热敏电阻器 (PTC)**  
主要材料是掺杂的 $\text{BaTiO}_3$ 半导体陶瓷。

**负温度系数热敏电阻器 (NTC)**  
主要材料是一些过渡金属氧化物半导体陶瓷。

**突变型负温度系数热敏电阻器 (CTR)**  
其主要材料是 $\text{VO}_2$ 并添加一些金属氧化物。

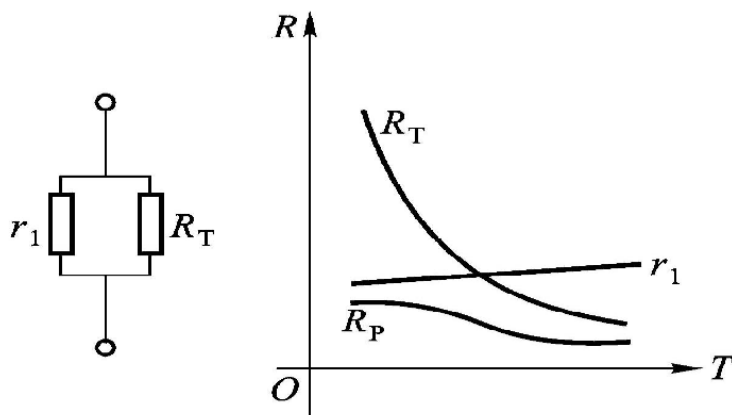


热电阻传感器应用



在一定温度范围内可得到总的等效电阻与温度呈近似的双曲线特性，则回路中的电流 $I$ 与温度呈近似线性特性。

NTC与普通电阻串联使电流与温度成近似线性



并联等效电阻 $R_P$ 温度系数变小，可在某一温度范围内得到线性的输出特性。

## 集成温度传感器

集成PN结测温

温敏二极管

温敏三极管

电压输出、电流输出、数字输出集成温度传感器

## 电流电压传感器 6 学时

- 万用表
- 电位差计
- 电阻分压
- 微型电压互感器

- 万用表
- 电阻取样
- 微型电流互感器

主要指高压等级的电压电流测量

- 能复现电压、电流波形
- 需将一次高压与二次仪表电气隔离
- 能输出方便测量的幅值较小的量

## 电流互感器

### 定义

- 一次将一次大电流转换为较小的电流（1A或5A）或较低的电压（<5V）；
- 实现高压和二次低压之间的电气隔离；

### 结构

单匝式电流互感器和多匝式电流互感器

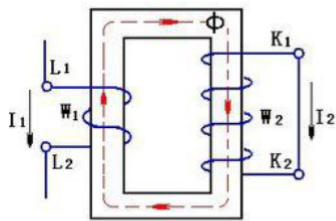
贯穿型电流互感器和母线型电流互感器

### 原理

电磁式电流互感器

磁效应式电流互感器

磁光效应式电流互感器



电磁感应式

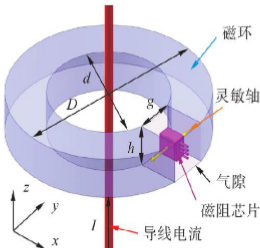
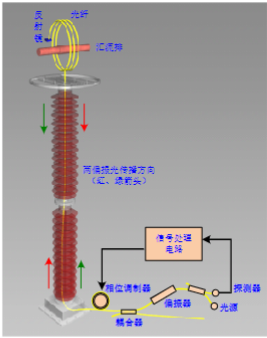


图2 磁环结构示意图

磁效应式



磁光效应式

准确度等级

额定电流下规定的最大允许误差

比值差

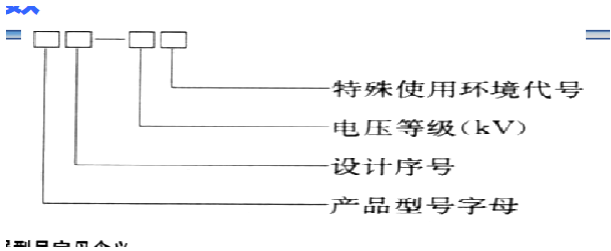
$$\epsilon = \frac{K_{ra}I_s - I_p}{I_p} \tag{29}$$

相差定义，一次电流和二次输出的相位差

$$\varphi = \varphi_s - \varphi_p$$

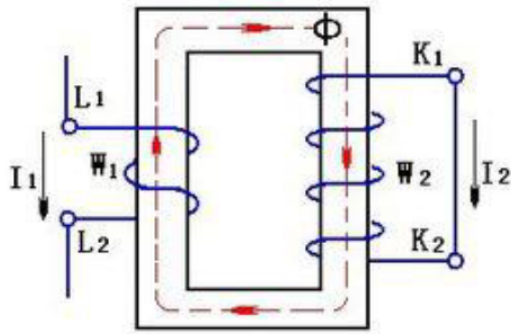
参数特性

1. 型号



- 2. 准确度等级
- 3. 额定电流变比
- 4. 额定容量
- 5. 额定电压

原理



$$K = \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$$



- **一次串联入被测线路；**
- **二次绕组近似在短路状态下工作，不能开路运行。**
- **额定二次输出电流5A/1A。**

依赖磁势平衡,  $N_2 \gg N_1$

### 误差

电流互感器的比差和角差

电流互感器的比差和角差不仅与励磁电流  $I_{10}$  有关，还与负载功率因数  $\cos\varphi_2$  损耗角  $\theta$  有关

$$f_I = \frac{I_2 N_2 - I_1 N_1}{I_1 N_1} \quad (30)$$

**一次电流影响：**当电流互感器工作在小电流时，由于硅钢片磁化曲线的非线性影响，其初始的磁通密度较低，因而导磁率  $\mu$  小，引起的误差增大。所以在选择电流互感器容量时，不能选得过大，以避免在小电流下运行。电流互感器误差与一次电流百分数的关系，称为电流特性。

**二次负载影响：**二次负载阻抗  $Z_b$  增加时，由于一次电流  $I_1$  不变，并假设负载功率因数不变，则二次电流  $I_2$  减小。故比差及角差增大

**一次频率影响：**频率降低时，将使  $\varphi_2$  减小，影响误差。电流互感器误差与频率的关系如图。频率降低时，比差减小、角差增大

### 误差调节方法

#### 减小励磁电流

减小磁阻增大磁导减小铁心损耗

• 匝数补偿法 • 二次绕组并联附加阻抗元件 • 附加磁场

### 互感器的选择

额定电压

额定变比

准确度

额定容量



**注意使用**

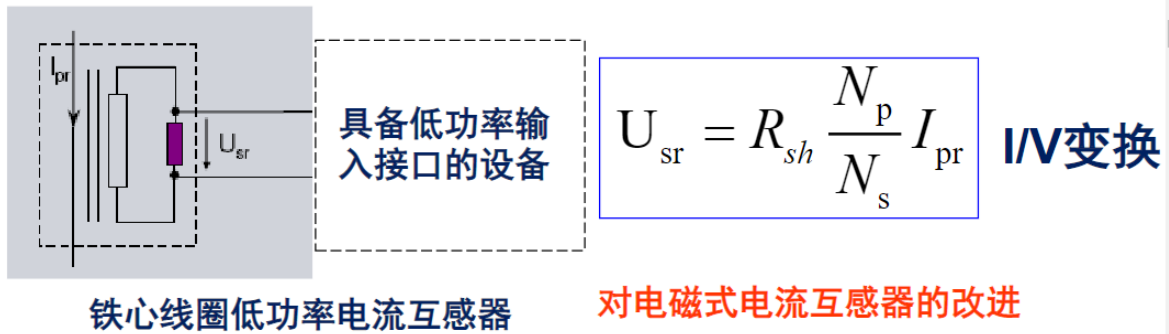
二次端严禁开路

绕组按极性选择

二次侧可靠接地

**LPCT low power current transistor**

LPCT将一次电流转换为较低的电压输出。

**空芯线圈电流传感器**

罗氏 (Rogowski) 线圈是将导线均匀地绕在非铁磁性环形骨架上，一次母线置于线圈中央，由于不存在铁心所以不存在饱和现象。

$$u_2(t) = -nS \cdot \frac{dB_r}{dt} = -\frac{\mu_0 nS}{2\pi r} \cdot \frac{dI(t)}{dt}$$

输出信号是电流对时间的微分。通过对输出电压信号进行积分，就可以复现输入电流。

积分：自积分、RC积分器、带反馈电阻的运放积分

工作在自积分状态下的空心线圈常用来测量**脉冲电流**。

3) 采用Rogowski线圈原理（也叫空心线圈）易于制成感应系数较大的谐波电流传感器，且结构简单、轻巧，线性度好，适于谐波电流的测量。

**光学电流传感器-光纤偏振**

当平面偏振光沿磁场方向通过Faraday材料，光矢量发生旋转，旋转角度 $\theta$ 由下式确定： $\theta = v \cdot L \cdot H$

当光行进的路线依安培环路定律围绕载流导体闭合时，Faraday旋转角为：

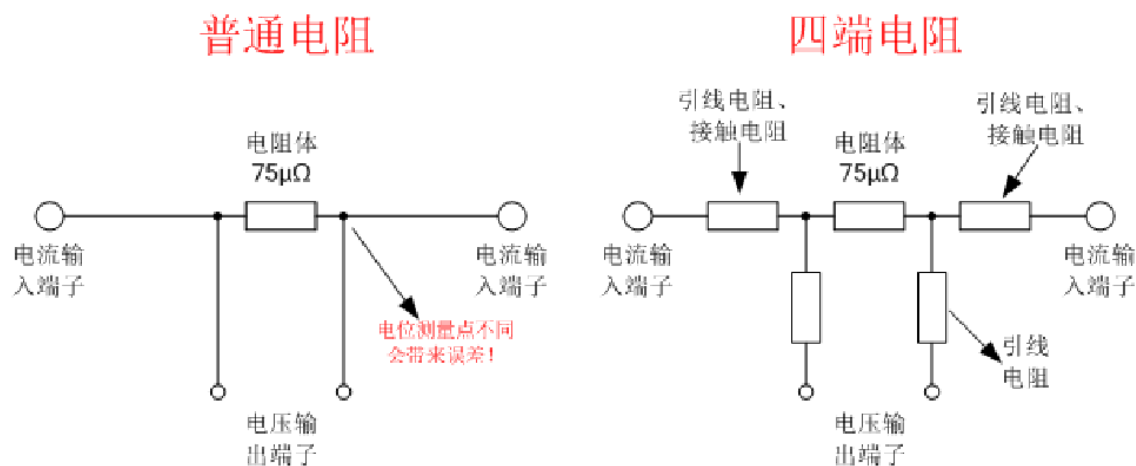
$$\theta_F = \oint_{N_l} v H dl = v N_l \oint H dl = v N_l \sum_{N_i} I_i = N_l v I$$

## 分流器

直流大电流的测量方法：

- 1.根据被测电流在已知电阻上的电压来确定被测电流的大小；
- 2.以被测电流所建立的磁场为基础,通过磁场的测量来确定被测电流的大小。

### 四端器件 and why



### 误差因数

电阻稳定性

- A) 锰铜合金成分的不均匀
- B) 外界机械作用引起的内应力
- C) 锰铜合金表面氧化作用

上述三种因素的综合作用，使锰铜合金的电阻值和电阻温度系数的时间不稳定性明显地显示出来。为稳定该电阻值，应对加工完成的分流器进行**老化处理**。

- D) 温度系数
- E) 热电势

热电势是**低电平直流电压**测量中最普遍的误差源。

### 局限性

只适宜测量10 kA以下的电流；

- 安装需要断开一次回路；
- 一次回路和二次回路不隔离

### 集肤效应-频率

电阻变化

分流器的交流电阻一般大于其直流电阻，且随谐波频率的增加，其交流电阻也增加，因此直接用普通分流器测量谐波电流误差较大。

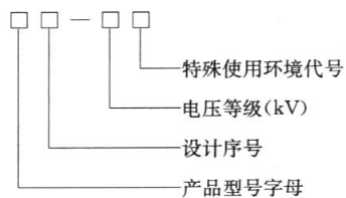
## 电压互感器

一次将一次高电压转换为较低的电压（100V或100V/ 3）或更低的电压（<5V）；

实现高压和二次低压之间的电气隔离；

### 指标

#### 1. 型号



#### 2. 额定电压

#### 3. 额定电压变比

#### 4. 二次负载

#### 5. 准确度等级

$$err = \frac{K_n U_2 - U_1}{U_1}$$

(31)

相位差 = 一次电压相量与二次电压相量的相位之差。

若二次电压相量超前一次电压相量，则相位差为正值。

### 误差

比差角差

### 影响误差的因数

磁密与饱和

#### 1. 电压特性

励磁电流取决于一次电压

#### 2. 负荷特性

#### 3. 频率特性

#### 4. 过电压和限制

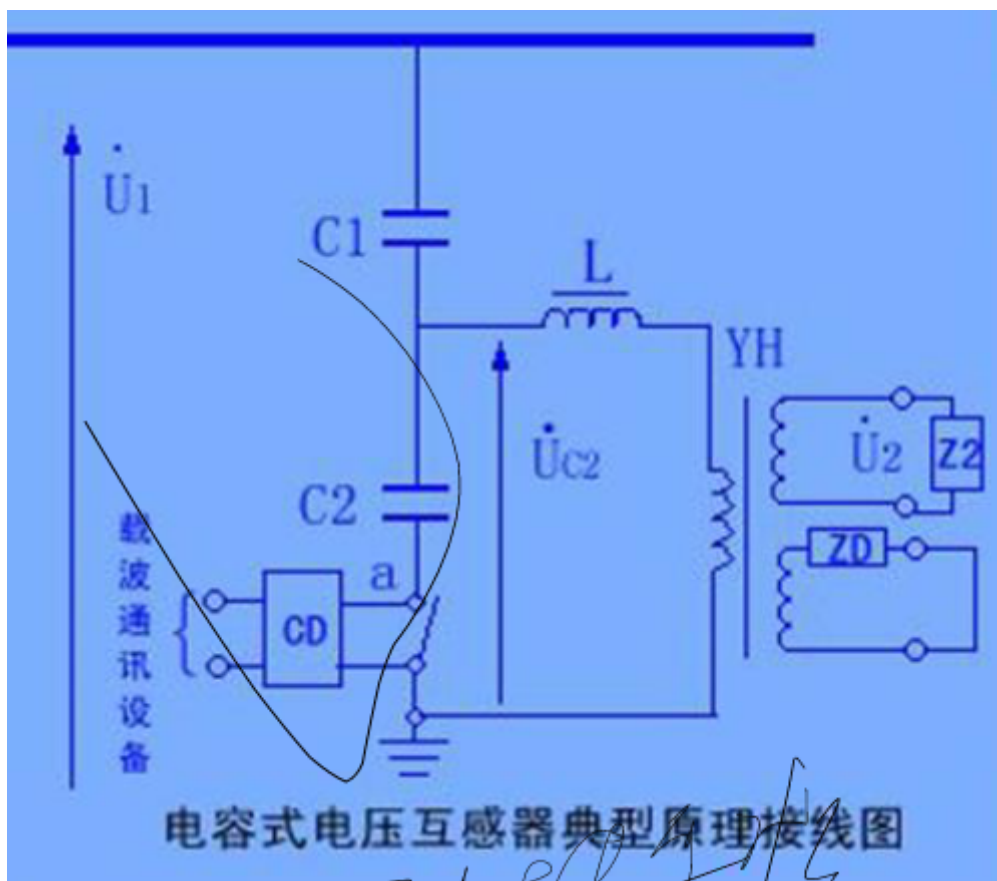
### 注意

按要求的相序进行接线，防止接错极性，否则将引起某一相电压升高 $\sqrt{3}$ 倍，可能烧坏电压互感器。

电压互感器二次侧应可靠接地，以保证人身和仪表安全。

电压互感器二次侧严禁短路

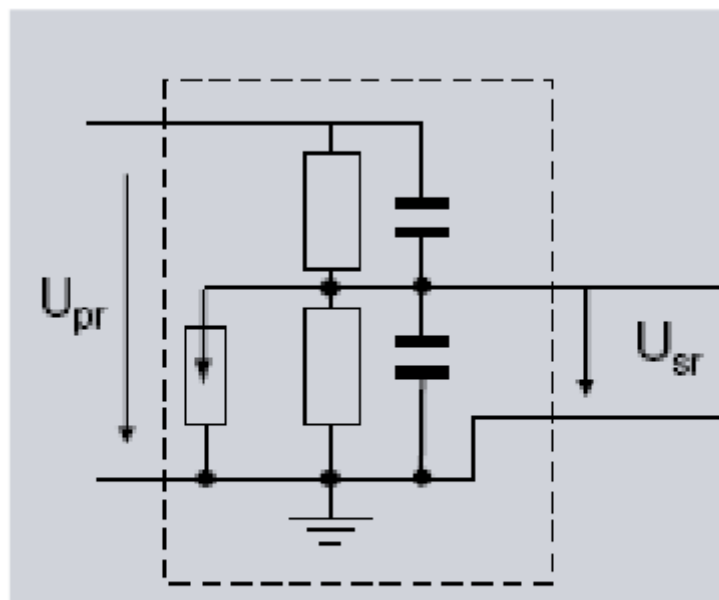
## 电容分压器



加阻尼一直过电压

加阻尼和饱和电抗器

谐振型



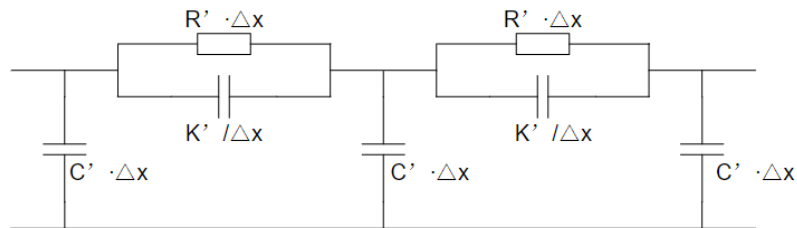
**阻容分压**

## 电阻分压器

电晕电流----由于电晕放电引起的泄露，本质是电场作用的结果。

泄漏电流----沿着绝缘支架引起的泄露，本质是电路作用的结果。

### 电阻分压器测量交流电压时



$R'$  一单位长度的电阻； $K'$  一单位长度的纵向电容； $C'$  一单位长度的对地电容

通过理论推导得到：

$$A = 1 - \omega^2 R^2 C^2 / 180 \qquad \theta = \arctan(\omega RC / 6)$$

$\omega$ —频率； $R$ —总电阻； $C$ —总对地电容

- **电阻分压器**：温度稳定性高，长期稳定性较高，需关注响应特性等
- **电容分压器**：抗干扰能力强，交流测量，容易颠簸损坏，成本相对电阻式分压器偏高
- **阻容分压器**：抗干扰性能好，精度高，结构相对复杂

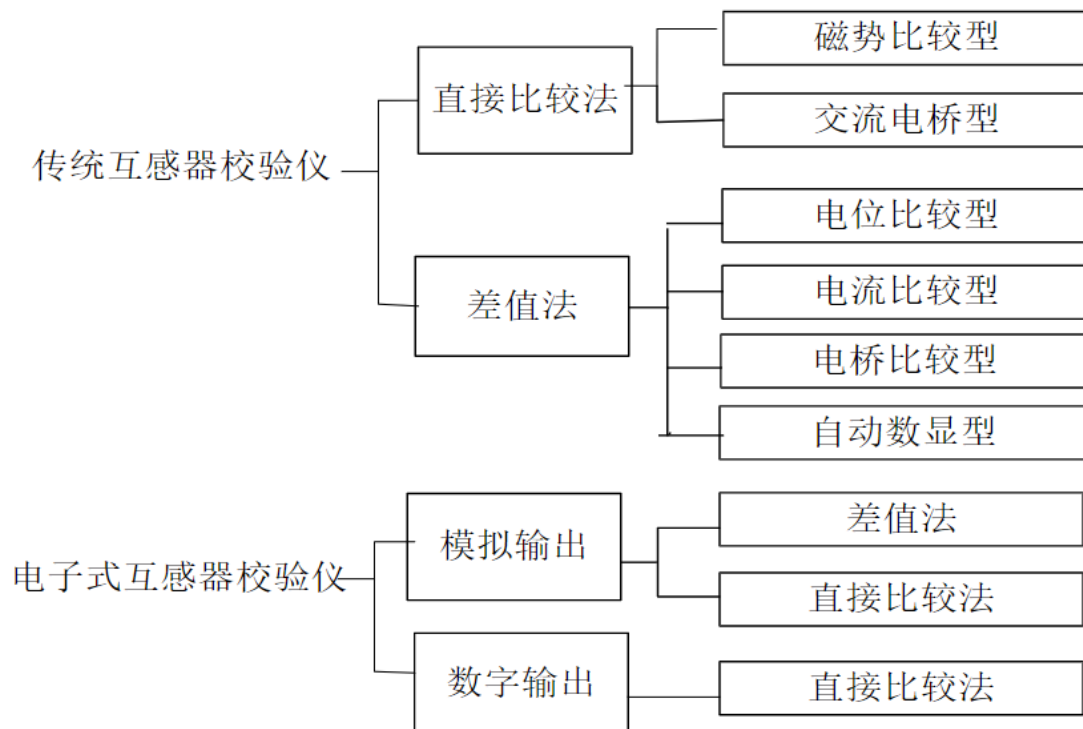
## 光学电压互感器

### 线性电光效应

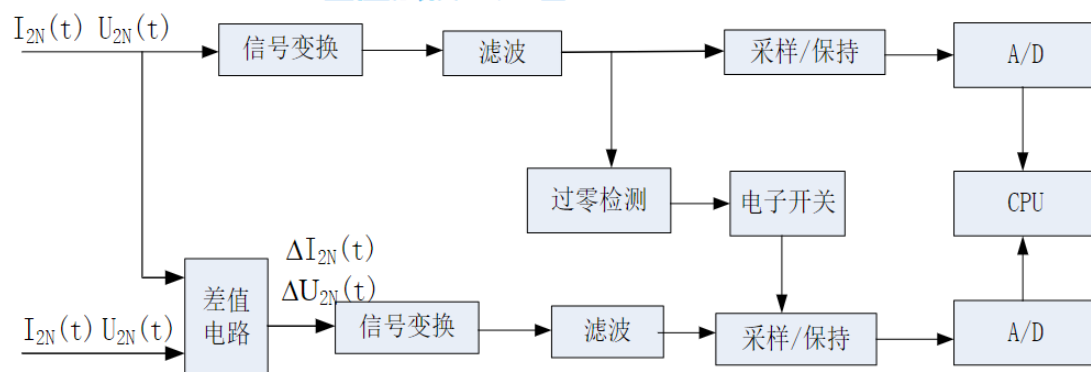
- 晶体在外加电场作用下，其折射率会发生变化。
- 晶体折射率的各向异性体现为组成晶体的原子或分子的排列方式和相互作用的特点，而当外界的某种作用改变了它们的排列方式（例如压力下的变形）或相互作用的情况（例如电场使原子极化）时，必然导致晶体的光学性质产生某种相应的变化

从而改变偏振角

# 互感器校准



## 差值法校验原理



## 直接比较法校验原理

