

第4章 常用传感器及典型 调理电路设计



西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

4.1 传感器概述



1. 传感器的定义

能感受规定的被测量并按一定的规律转换成可用输出信号的器件或装置。

- ◆ 传感器处于测量系统的最前端，起着获取信息与转换信息的重要作用。
- ◆ 传感器对规定的被测量具有最大的灵敏度和最好的选择性。



2.传感器的分类:

◆ 按被测量的性质分类

机械量 位移、力、速度、加速度、重量等;
热工量 温度、压力、流量、液位、物位、流速等;
化学量 浓度、粘度、湿度、气体的组分、液体的组分等;
光学量 光强、光通量、辐射能量等;
生物量 血糖、血压、酶等;

◆ 按输出量的性质分类

电参数型传感器: 输出量为电参量, 如电阻式、电感式和电容式
电量型传感器: 输出量为电量, 如热电式、压电式、磁电式等。

◆ 按能量关系分类

能量转换型 如热电偶、光电池等。
能量控制型 如R、L、C电参数型传感器。

4.2 热电阻型温度传感器及其调理电路



4.2.1 热电阻型温度传感器原理

工作原理：利用金属导体或半导体的电阻值随温度变化的特性，制成测量温度的传感器。

1. 金属热电阻：纯金属铂、铜热电阻

(1) 金属热电阻的R-T关系

铂电阻：稳定性好

$$0 \sim 850^{\circ}\text{C} \quad R_t = R_0 (1 + AT + BT^2)$$

$$-200 \sim 0^{\circ}\text{C} \quad R_t = R_0 [1 + AT + BT^2 + C(T-100)^3]$$

A, B, C —— 常数

铜电阻 在 $(-50 \sim 150)^{\circ}\text{C}$ 中稳定性、线性度好，价格低廉

$$-50 \sim 150^{\circ}\text{C} \quad R_t = R_0 (1 + AT + BT^2 + CT^3)$$

A, B, C —— 常数

4.2 热电阻型温度传感器及其调理电路



(2) 灵敏度（温度系数）

计算式：

$$a_t = \frac{\Delta R / R}{\Delta T}$$

铂电阻： $a_t \approx 3.9 \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$ ，铜电阻： $a_t \approx 4.3 \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$

(3) 主要技术指标

◆ 分度号：

铂电阻：Pt100，Pt50；铜电阻：Cu100，Cu50

◆ 测量范围及测量精度

◆ 允通电流：通过热电阻中的工作电流应小于5mA，以避免自热效应产生影响。

4.2 热电阻型温度传感器及其调理电路



◆ **时间常数：** 有四个级别：

I级：(90 ~ 180)s

II级：(30 ~ 90)s

III级：(10 ~ 30)s

IV级：<10s。

◆ **最小插入深度：** 应不小于其保护套管外径的8 ~ 10倍。

◆ **自热效应的抑制方法：** 控制供电电流大小；采用脉冲供电；

2. 热敏电阻

◆ 基本特性

$$R=A\exp(B/T)$$

A、B——与热敏电阻尺寸、形式及其半导体物理性能有关的常数；

T——被测温度

◆ 灵敏度

$$\alpha_t=-B/T^2$$

α_t ——温度系数，为负值。常温度下为 $-(3 \times 10^{-2} \sim 5 \times 10^{-2})/^\circ\text{C}$ ，比热电阻的温度系数高约一个数量级。

4.2 热电阻型温度传感器及其调理电路



◆ 优点:

- 具有很高的负电阻温度系数;
- 灵敏度高
- 阻值大、体积可以做得很小;
- 动态特性好

◆ 缺点:

- 分散性大
- 非线性大
- 长期稳定性差
- 互换性不好

4.2 热电阻型温度传感器及其调理电路

3. 热电阻传感器举例



CRZ1632-100薄膜铂热电阻芯片(日本)

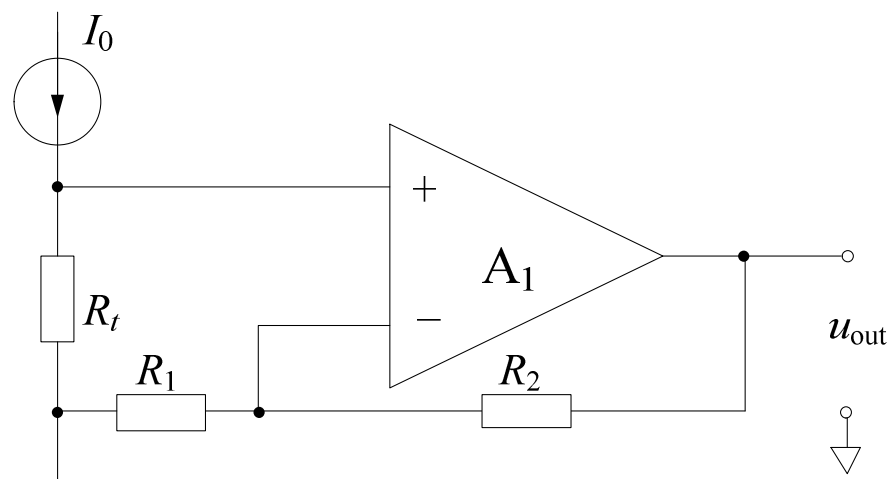
- ✓ 激光喷镀工艺将薄膜铂溅射到陶瓷基地上制成。
- ✓ 体积小（ $1.6\text{mm} \times 3\mu\text{m} \times 0.6\text{mm}$ ），响应快，一致性好，抗震，测温范围宽，长期稳定性好，价格便宜

4.2.2. 电阻型传感器常用调理电路

◆ 单/双恒流源

◆ 电桥

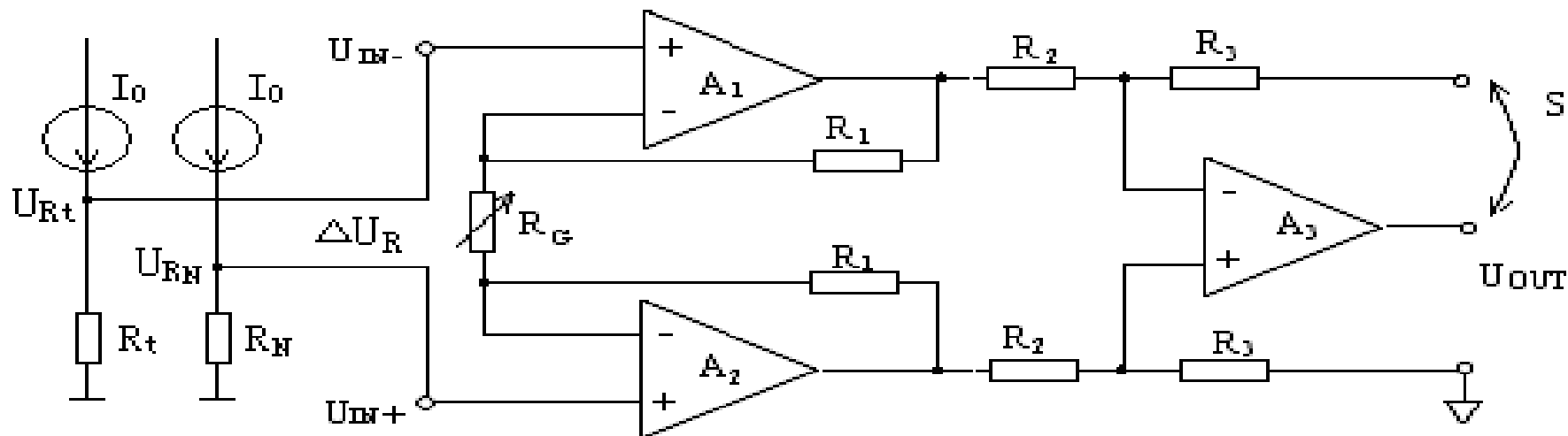
1. 单恒流源调理电路



$$u_{\text{out}} = k I_0 R_t = k R_0 I_0 (1 + AT)$$

4.2 热电阻型温度传感器及其调理电路

2. 双恒流源调理电路



电阻式传感器双恒流源调理电路示意图

双恒流源调理电路输出为：

$$\begin{aligned}\Delta u_R &= u_{R_t} - u_{R_N} \\ &= R_0 I_0 (1 + AT) - R_0 I_0 \\ &= I_0 R_0 AT\end{aligned}$$

经放大后：

$$U_{out} = k I_0 R_0 AT$$

4.3 热电偶型温度传感器



利用热电效应将被测物理量（温度）直接转换为电势。属于能量转换型传感器。是应用非常广泛的测温传感器。

1. 工作原理:

将两种不同材料的金属导体串接成闭合回路，当两个结点处于不同温度即 $T \neq T_0$ 时，导体在回路中产生与两结点有关的温差热电势的现象，称为温差电效应（塞贝克效应）。

4.3 热电偶型温度传感器



✓ 温差电势: $E_{AB}(T, T_0) = \alpha (T - T_0) + \beta (T - T_0)^2 + \dots$

$E_{AB}(T, T_0)$ ——由A,B两种材料组成的热电偶, 结点温度为 T, T_0 时的热电势。

$\alpha, \beta \dots$ ——多项式系数, 对于A,B材料一定时为一常量。

✓ 在一定温度范围内: 上式可近似为:

$$E_{AB}(T, T_0) = K(T - T_0) \text{——与温差成正比}$$

✓ 当 $T_0 = 0$ 时, 则 $E_{AB}(T, T_0) = KT$



4.3 热电偶型温度传感器



2 热电偶的基本定律

◆ 匀质导体定律

由同一种匀质导体组成的闭合回路，不论导体的截面积和长度如何，也不论各处的温度分布如何，都不能产生热电势。

◆ 中间导体定律

当热电偶回路中插入第三种导体C时，只要保证导体C两端的温度与冷端温度相等，连C与否对电势无影响。C可换为仪表或测量电路。

◆ 中间温度定律 —— 主要解决冷端温度补偿

$$E_{AB}(T_1, T_3) = E_{AB}(T_1, T_2) + E_{AB}(T_2, T_3)$$

4.3 热电偶型温度传感器



3. 热电偶的主要技术参数

◆ 分度号与分度表

分度表是用表格的方式列出温度与热电动势的对应关系。分度号(S,R,B,K,E,J,T,N)代表热偶的类型。

◆ 允许误差

热电偶的热电势—温度关系对分度表的最大偏差。根据允许误差将热电偶分为1、2、3级。

◆ 测量范围

不同材料的热电偶，有不同的使用温度极限。

◆ 热响应时间

也称时间常数，用来表示热电偶对温度变化响应快慢的热惰性参数。热响应时间用 τ 或 $\tau_{0.5}$ 表示

4.3 热电偶型温度传感器



4. 冷端温度补偿

◆ 0°C 恒温法

将热电偶冷端置于0°C的恒温器内，使其工作状态与分度表状态一致，测出电势后查分度表直接得到热端温度值。0°C恒温器：冰水混合物、半导体致冷器。

◆ 冷端温度实时测量计算法

计算机自动采集系统常用此法。

◆ 补偿导线法

4.3 热电偶型温度传感器



(1) 冷端温度实时测量计算修正法

通过实时测量当前冷端温度 T_0 ，进行热电偶冷端补偿，步骤如下：

1) 采用热电阻测量当前冷端温度 T_0 ，若 $T_0 = 40^\circ\text{C}$ 。

2) 测 $E_{AB}(T, T_0) = 2.202\text{mV}$

3) 查表： $E_{AB}(T_0, 0) = E_{AB}(40, 0) = 1.611\text{mV}$

4) 加法运算： $E_{AB}(T, 0) = E_{AB}(T, T_0) + E_{AB}(T_0, 0)$
 $= E_{AB}(T, 40) + E_{AB}(40, 0)$
 $= 2.202 + 1.611 = 3.813\text{mV}$

5) 查表： $E_{AB}(T, 0) = 3.813\text{mV}$

热端温度 $T = 90^\circ\text{C}$ 即被测温度。

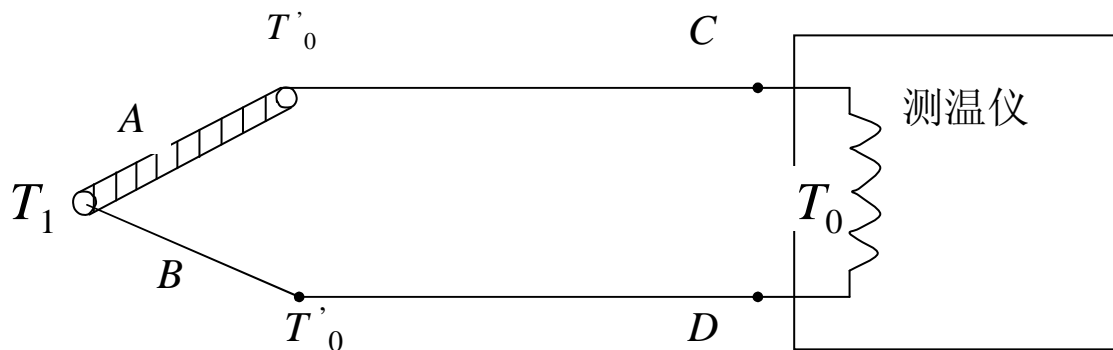
4.3 热电偶型温度传感器

(2) 补偿导线法

在补偿温度范围内，若补偿导线材料C,D构成的热偶与测温热偶有相同的分度值，即： $E_{AB}(T,0)=E_{CD}(T,0)$ 则热电偶所产生的总热电势应为：

$$\begin{aligned} & E_{AB}(T_1, T'_0) + E_{CD}(T'_0, T_0) \\ &= E_{AB}(T_1, T'_0) + E_{AB}(T'_0, T_0) \\ &= E_{AB}(T_1, T_0) \end{aligned}$$

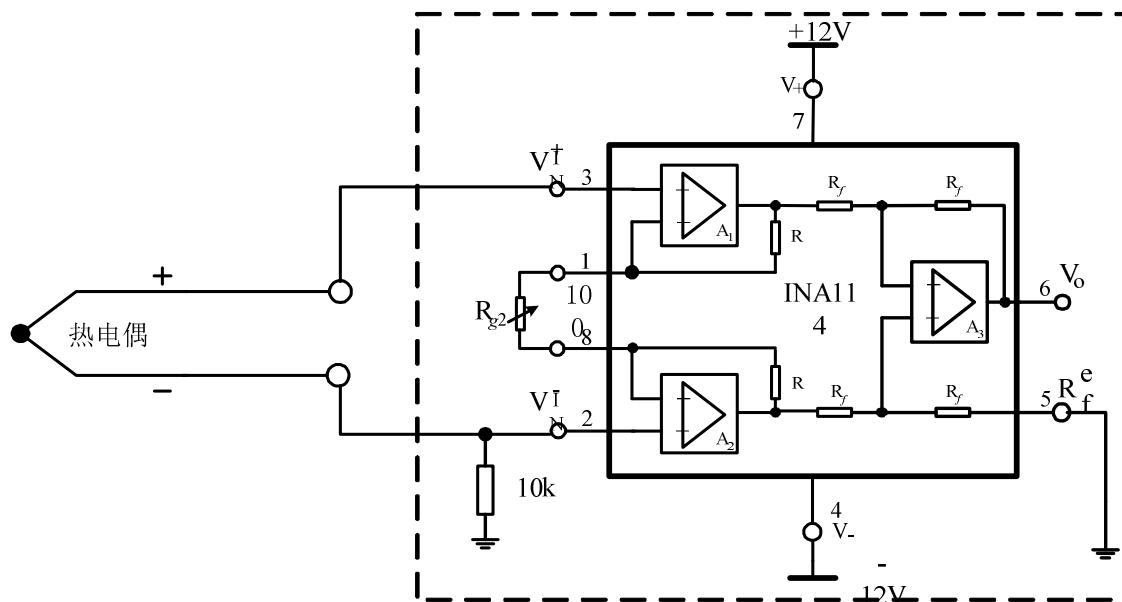
即实现冷端的延长。



4.3 热电偶型温度传感器

5. 热电偶调理电路

热电偶直接输出热电势，可直接用测量放大器。

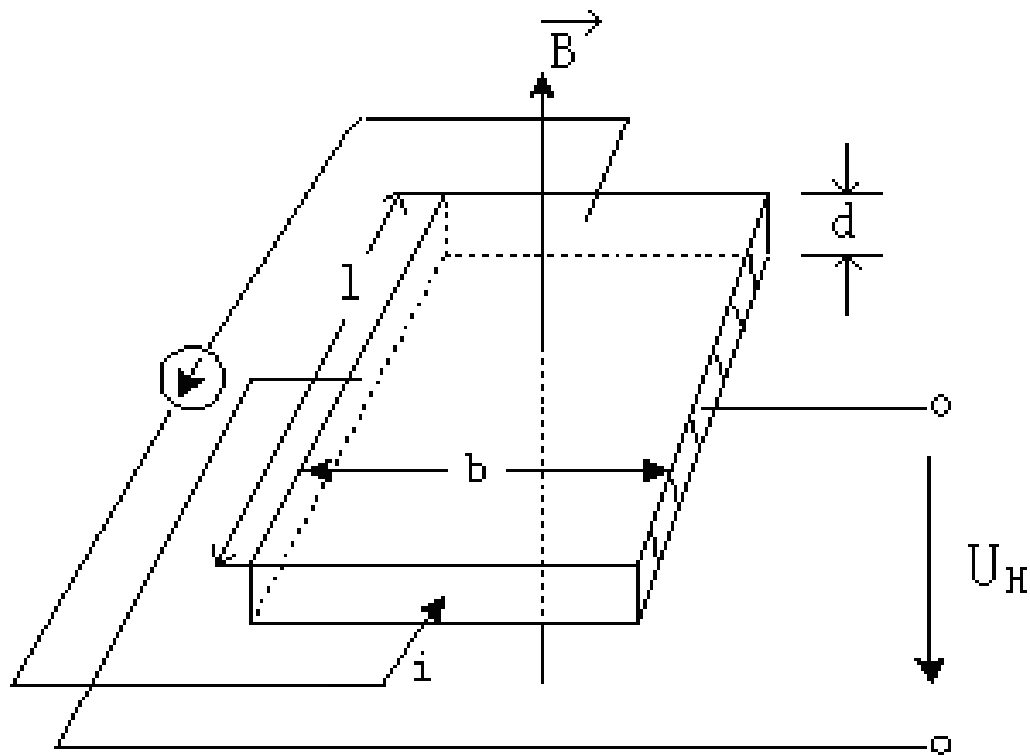


热电偶输出调理电路图

4.4 霍尔传感器及其应用

4.4.1 霍尔元件基本工作原理和特性

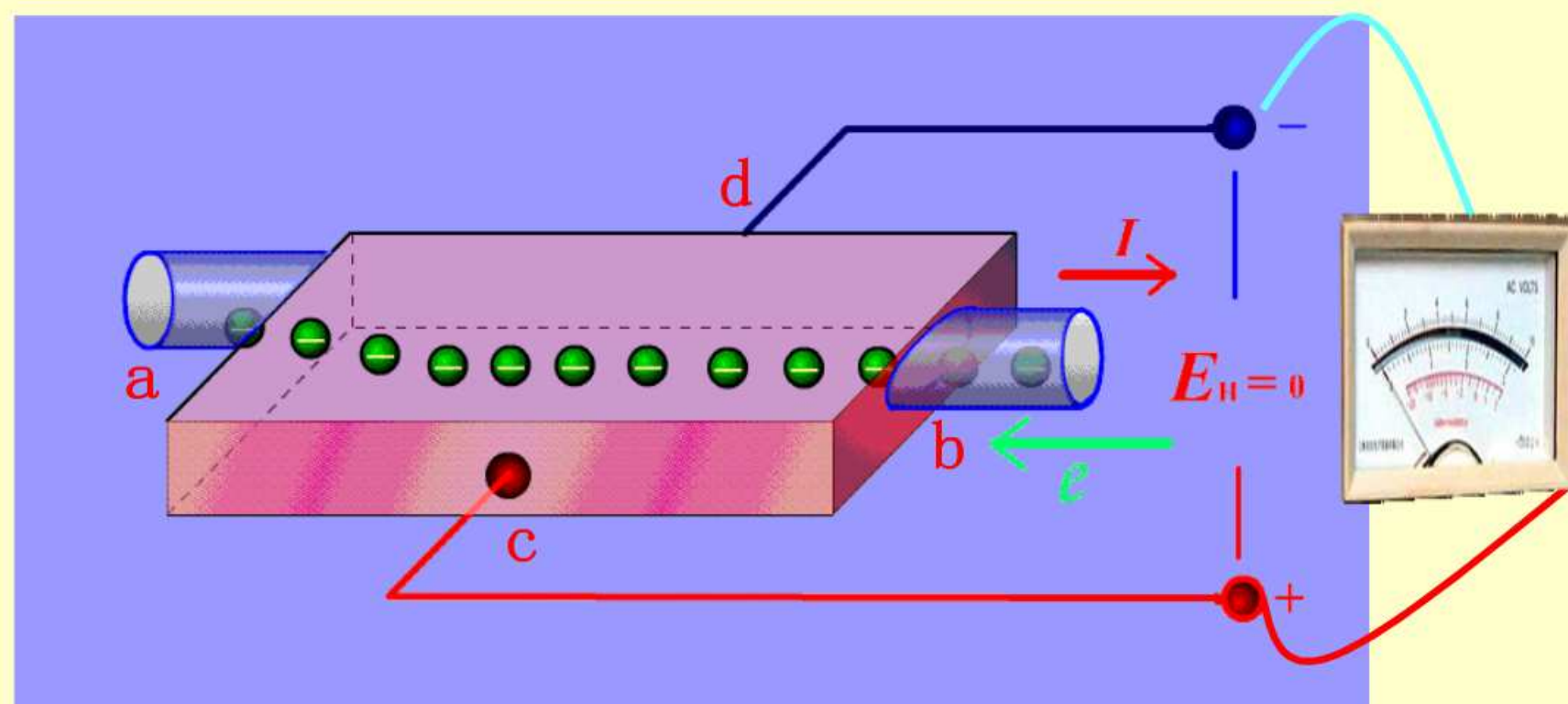
1. 工作原理



两横侧间的霍尔电压:

$$U_H = K_H \cdot B \cdot i$$

K_H - 霍尔片的灵敏度, 与材料的性质、形状有关. 与长度成正比, 与厚度成反比。



当磁场垂直于薄片时，电子受到洛伦兹力的作用，向内侧偏移，在半导体薄片 c 、 d 方向的端面之间建立起霍尔电势。

4.4 霍尔传感器及其应用



2. 霍尔元件主要参数:

◆ 额定控制电流

霍尔元件温升 10°C 所施加的控制电流值，单位为mA。增大元件的控制电流可以获得较大的输出霍尔电动势。但控制电流的增加受到霍尔元件的最高温升的限制。最大温升对于的激励电流为最大允许电流。

◆ 输入电阻 R_i 与输出电阻 R_o

R_i 是指控制电流极之间的电阻值， R_o 指霍尔电极之间的电阻。 R_i 和 R_o 可在无外磁场和室温条件下进行测量。

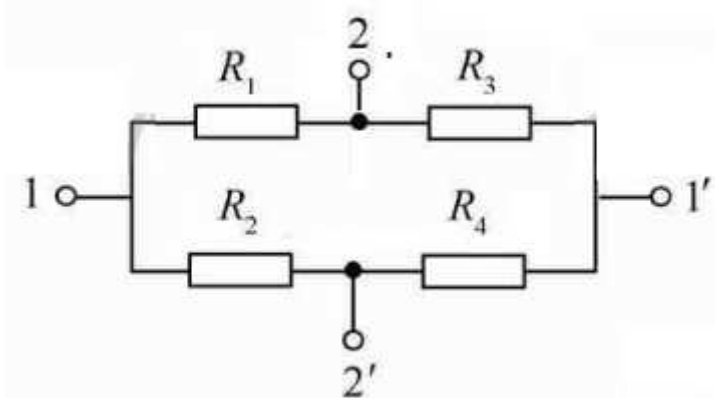
◆ 不等位电势 U_o

在额定控制电流下，不加外磁场时，霍尔电极间的空载电动势成为不等位电势 U_o ，单位为mV。

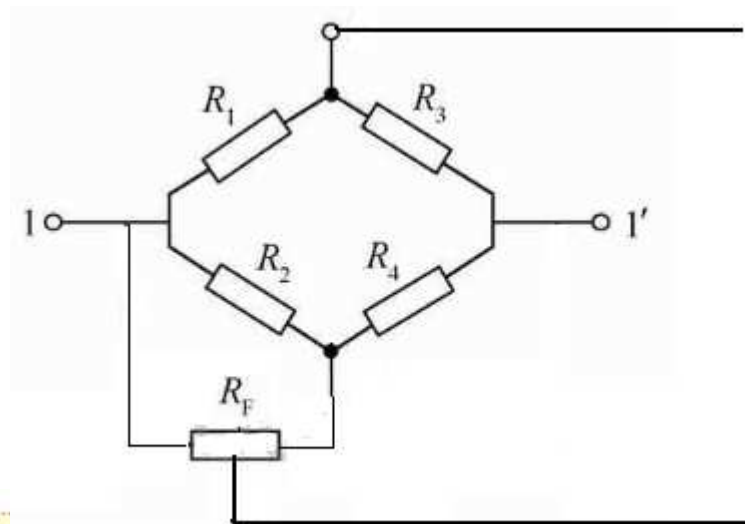
4.4 霍尔传感器及其应用

产生原因：霍尔电极安装不对称、半导体材料电阻率不均匀、基片厚度宽度不一致、霍尔电极与基片接触不良等

补偿方法：



可以把霍尔元件视为一个四臂电阻电桥，不等位电势就相当于电桥的初始不平衡输出电压。



不等位电动势的补偿电路

4.4 霍尔传感器及其应用



◆ 灵敏度 K_H

霍尔元件在单位磁感应强度和单位控制电流作用下的空载霍尔电动势值，称为霍尔元件的灵敏度 K_H ，单位： $V/(AT)$

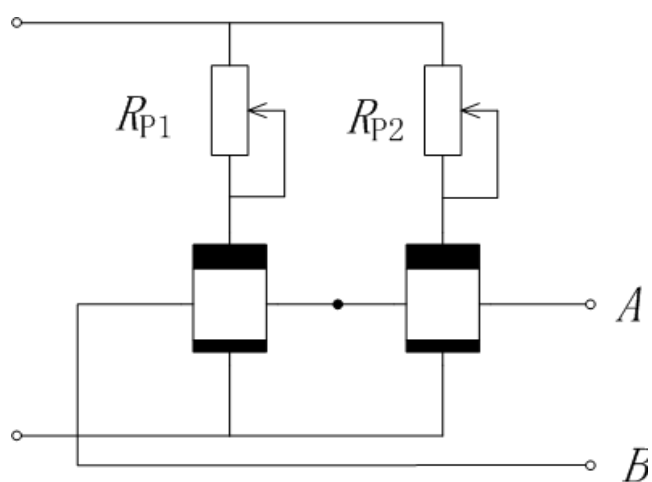
◆ 霍尔电动势温度系数 α

在一定的磁感应强度和单位控制电流下，温度每改变 1°C 时，霍尔电动势值变化的百分率，称为霍尔电动势温度系数 α ，单位为 $1/^\circ\text{C}$ 。

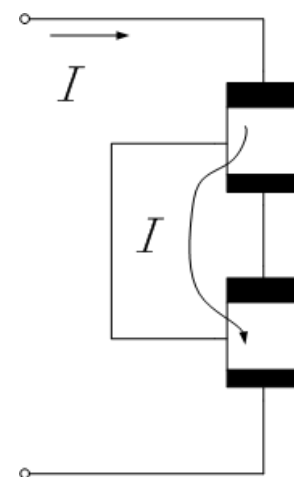
4.4 霍尔传感器及其应用

(3) 霍尔元件的输出电路

直流激励情况下:



(a)

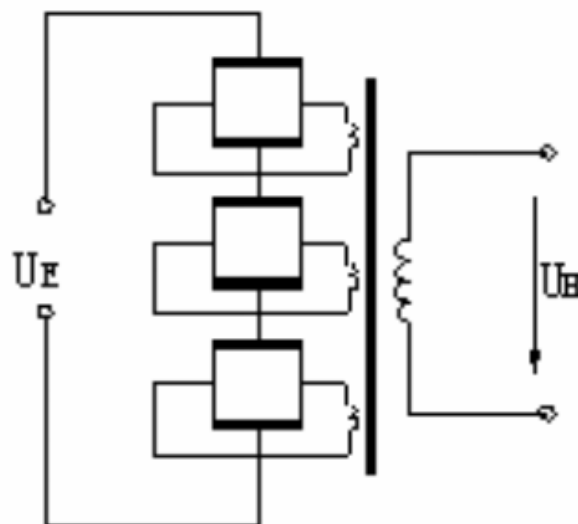


(b)

图 霍尔元件输出迭加连接
(a) 正确接法; (b) 错误接法

4.4 霍尔传感器及其应用

交流激励情况下:

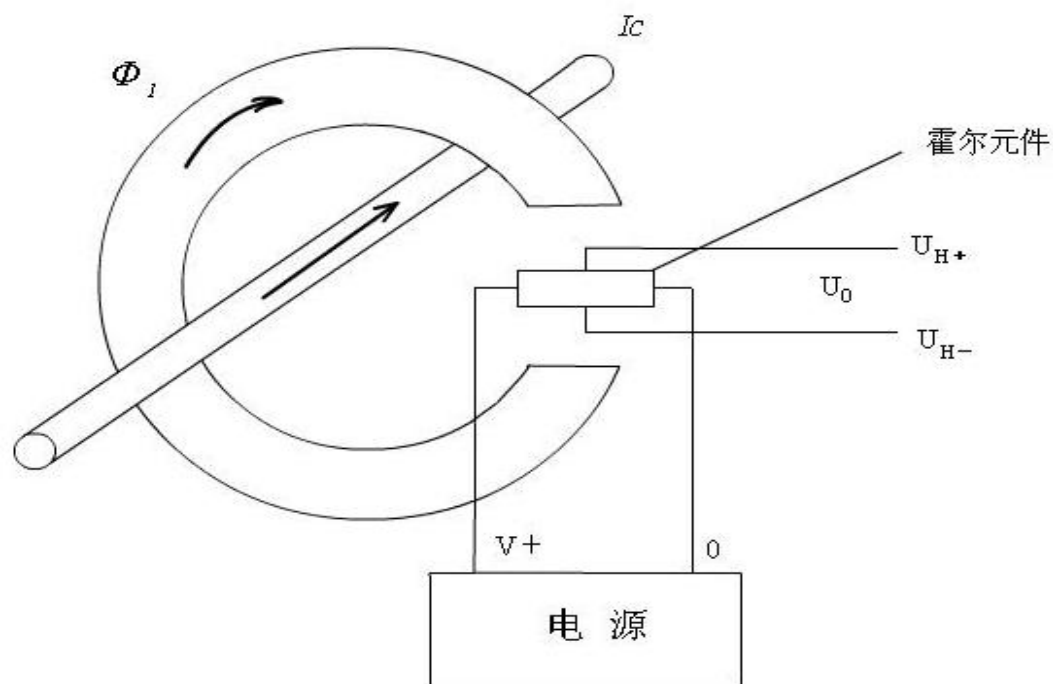


几片霍尔元件的输出通过变压器耦合输出，以增加霍尔电压或功率输出

4.4 霍尔传感器及其应用

4.4.2 霍尔传感器的应用

1. 霍尔直测式电流传感器



霍尔直测式电流传感器

由: $U_H = K_H IB,$

$$H = B / \mu,$$

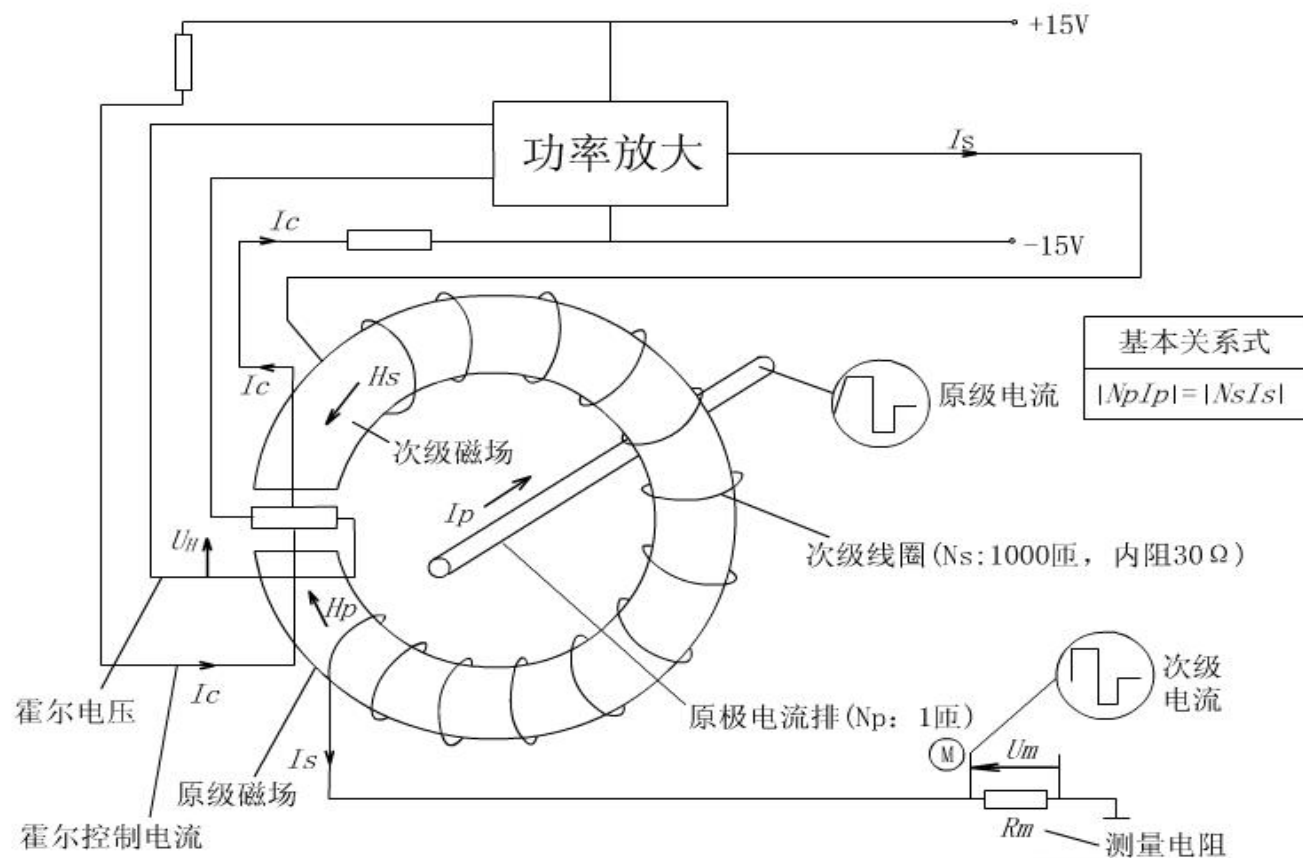
$$H \cdot L = NI_c$$

得到:

$$I_c = \frac{UL}{K_H NI \mu}$$

4.4 霍尔传感器及其应用

2. 霍尔磁补式电流传感器



直到 $H_p = H_s$ 时 I_s 不再增加, 这时霍尔片就达到零磁通检测。

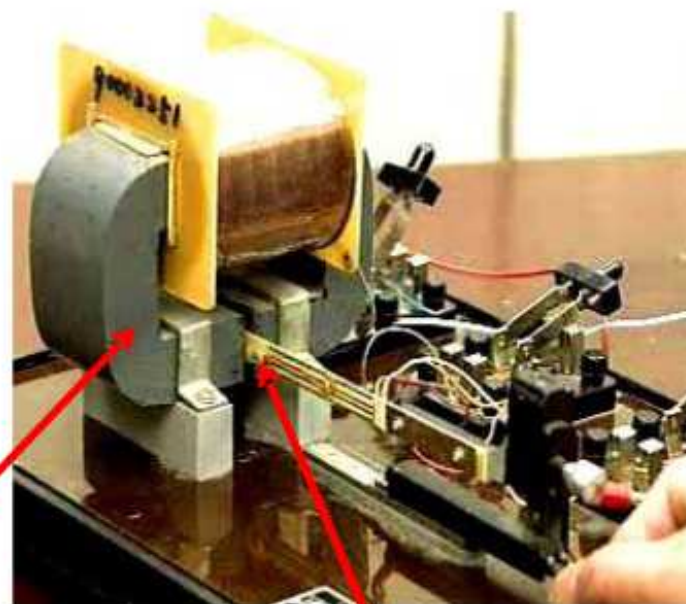
磁平衡时,
 $N_p I_p = I_s N_s$
计算 I_p

4.4 霍尔传感器及其应用

3. 霍尔电压传感器

4. 利用霍尔元件测量空间磁场

1、霍尔特斯拉计（高斯计）



4.5 光纤传感器及其应用



4.5.1 光纤传感器的特点

优点:

- ◆ 对电绝缘，适合高电压场所
- ◆ 无电传输，适合易燃易爆场所
- ◆ 适合大容量、分布式、在线监测
- ◆ 大的传感带宽，海量信号传输，易于组网

缺点:

- ◆ 价格昂贵;
- ◆ 稳定性差;
- ◆ 实用化水平较低;

4.5 光纤传感器及其应用

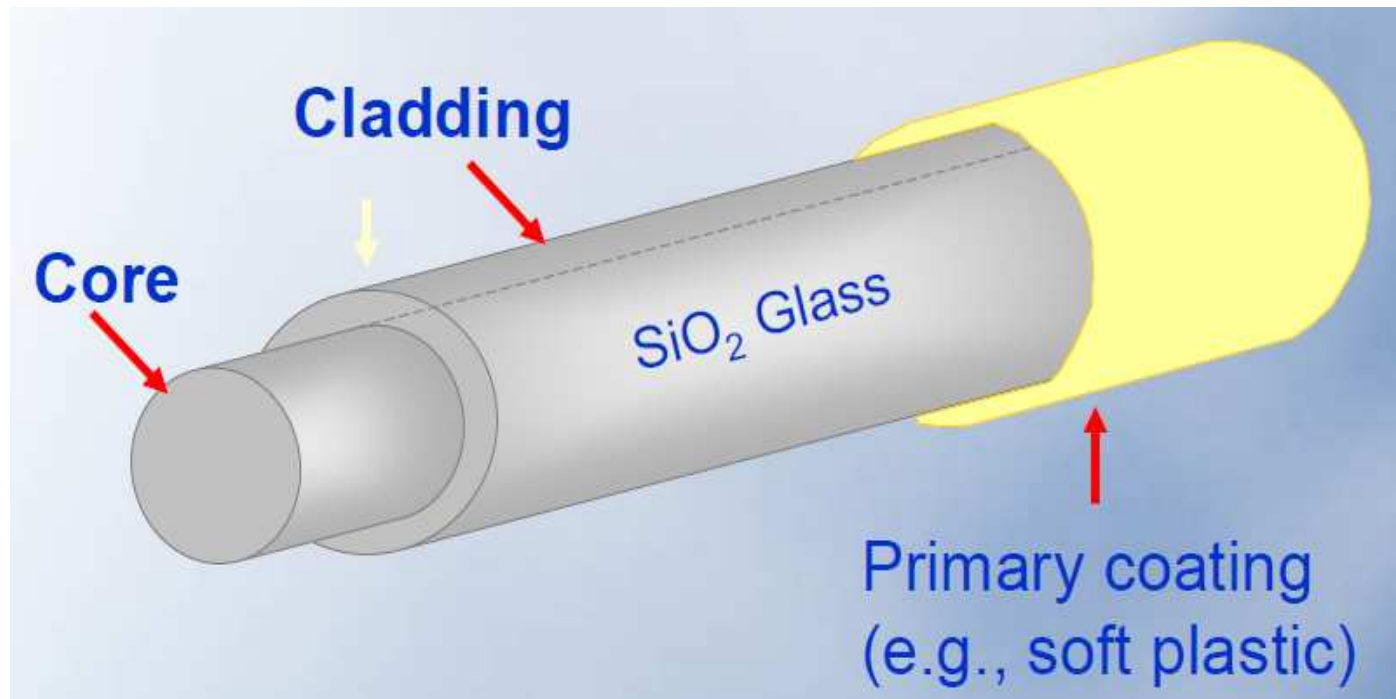


4.5.2 光纤种类

- ◆ **工作波长:** 紫外光纤、可观光纤、近红外光纤、红外光纤（0.85 μm 、1.3 μm 、1.55 μm ）；
- ◆ **折射率分布:** 阶跃（SI）型、近阶跃型、渐变（GI）型、其它（如三角型、W型、凹陷型等）；
- ◆ **传输模式:** 单模光纤（含偏振保持光纤、非偏振保持光纤）、多模光纤；
- ◆ **原材料:** 石英玻璃、多成分玻璃、塑料、复合材料（如塑料包层、液体纤芯等）、红外材料等。按被覆材料还可分为无机材料（碳等）、金属材料（铜、镍等）和塑料等。

4.5 光纤传感器及其应用

4.5.3 典型光纤结构

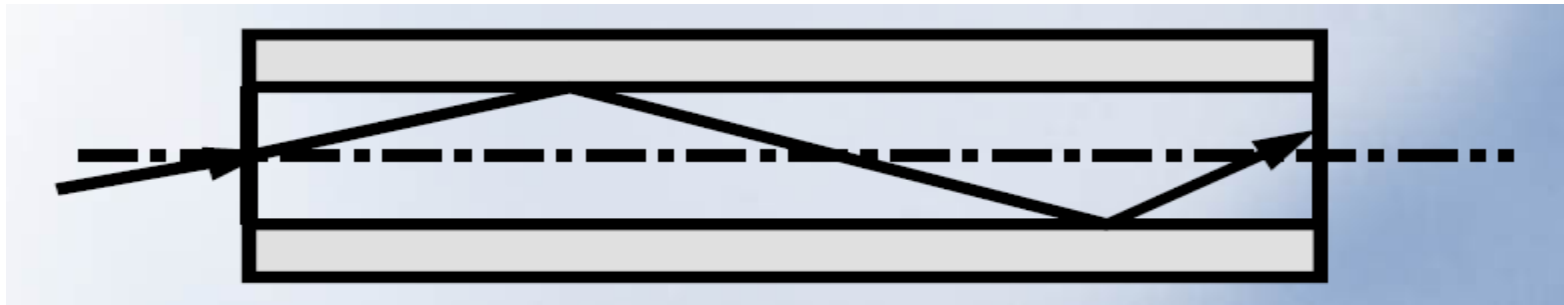


单模光纤: 8 um core, 125 um cladding

多模光纤: 50, 62.5, 100 um core, 125 um cladding

4.5 光纤传感器及其应用

4.5.4 光纤传光原理



光在纤芯（光密介质）和包层（光疏介质）分界面上发生全反射而向前传输。

数值孔径：定义光纤数值孔径NA为入射媒质折射率与最大入射角的正弦值之积，即

$$NA = n_i \sin \theta_{im} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = n_1 \sqrt{2\Delta}$$

数值孔径反应光纤波或光线能力的大小。与纤芯和包层折射率分布有关，而与光纤直径大小无关。**NA**越大捕获能力越强，光纤与光源之间耦合型越好。

4.5 光纤传感器及其应用



4.5.5 光纤传感器的分类

(1) 按光纤在传感器中的作用分

功能型： 光纤本身起传感作用。外界被测量对光纤内传输的光波参数进行调制，通过对被调制过的光波信号进行解调检测，从而获得被测量。

非功能型： 又称传型光纤传感器。光纤只当做传播光的媒介，依靠其它敏感元件实现对待测对象的调制功能。

(2) 按光在光纤中被调制的原理分

强度调制、相位调制、频率调制、波长调制、偏振态调制等等

(3) 按被测对象划分

光纤温度传感器、光纤电流传感器、光纤电压传感器、光纤压力传感器.....

4.5 光纤传感器及其应用



4.5.6 构成光纤传感器的主要器件

光源：钨丝灯、（固定波长/波长可调谐）激光器、发光二极管等

光纤：单模光纤、多模光纤、保偏光纤、塑料光纤、掺杂光纤等

探测器：光电池、光电二极管（PIN光电二极管、雪崩式光电二极管）、光电倍增管。（主要参数：灵敏度、工作波长）

其它常用光学器件：光纤耦合器、隔离器、光纤滤波器等

4.5 光纤传感器及其应用

光器件与电器件的类比

电线	光纤	调制器	光调制器
电阻	光衰减器	三通（多通）	光耦合器
二极管	光隔离器	混频器	光波分复用器
放大器	光放大器	频率转换器	光波长转换器
滤波器	光滤波器	电源	光源
电接插件	光连接器	探头	光探测器
开关	光开关	集成电路	集成光路

4.5 光纤传感器及其应用

4.5.7 光纤传感器举例

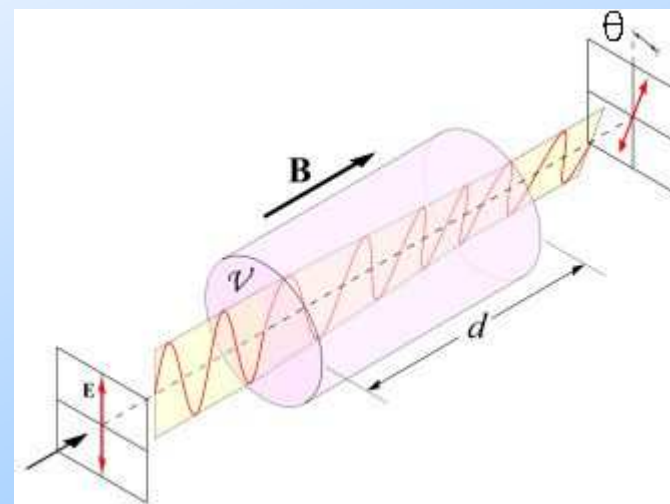
1. 磁光式光纤电流传感器

◆ 磁致旋光效应

一束线偏振光沿外加磁场方向或磁场强度方向通过置于磁场中的磁光介质时，其偏振面发生旋转的现象称为磁光效应，通常又称为法拉第效应。

光波偏振面转过的角度 θ 与光在介质中通过的长度 d 及介质中光传播方向上的磁感应强度 B 成正比，即 $\theta = VBd$

式中 V 称为费尔德常数，它表征物质的磁光特性



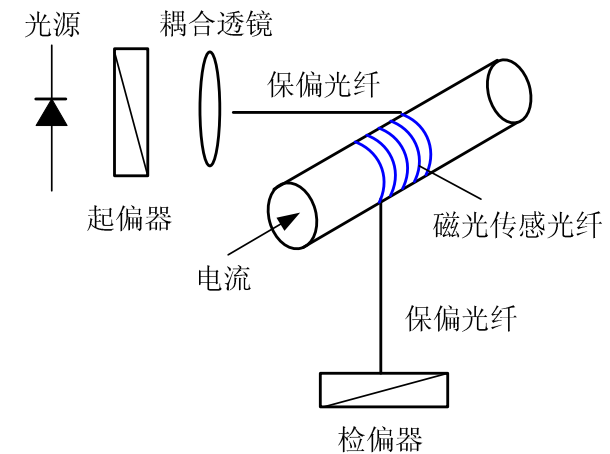
磁光效应原理图

2. 磁光光纤电流传感器原理

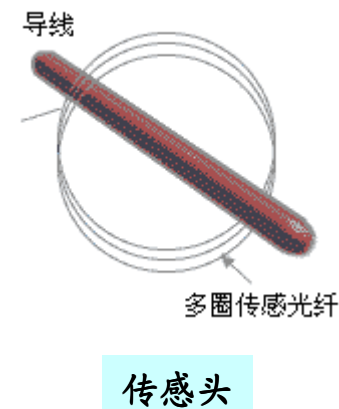
工作原理: 由光源出射的光经过起偏器后变为线偏振光，经保偏光纤传输入传感光纤。传感光纤是采用具有磁光效应的材料制作的特种光纤。其缠绕在电流导线上。由于Faraday效应，线偏振光的磁致旋光角为

$$\theta = V \frac{\mu_0 i}{2\pi r} d$$

式中， μ_0 为真空介电常数， r 为传感光纤半径。



基于磁光效应的光纤电流传感器结构图



2. 磁光光纤电流传感器原理

如果入射光强为 I_0 ，出射光强为 I ，由马吕斯定律可知，末端的检偏器检测到Faraday偏角引起的线偏振光强度为

$$I = I_0 \cos^2(\alpha + \theta)$$

其中， α 为检偏器和起偏器透光轴的夹角， θ 为法拉第磁致旋光角。

当 α 取45度角时，

$$I = I_0 \cos^2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right) = \frac{1}{2} I_0 (1 - \sin 2\theta) \approx \frac{1}{2} I_0 (1 - 2\theta) = \frac{1}{2} I_0 \left(1 - \frac{V \mu_0 d}{\pi r} i\right)$$

此时检测出射光强的变化量，便可求得被测电流的大小。

具有磁光效应的光纤有铅玻璃光纤、火石玻璃光纤、ZF1磁光玻璃光纤等。

2. 电光效应光学电压传感器



◆ 电光效应

在电场作用下，光线通过介质产生双折射的现象称为电光效应。晶体电光效应包括Kerr效应和Pockels效应。

➤ Pockels效应

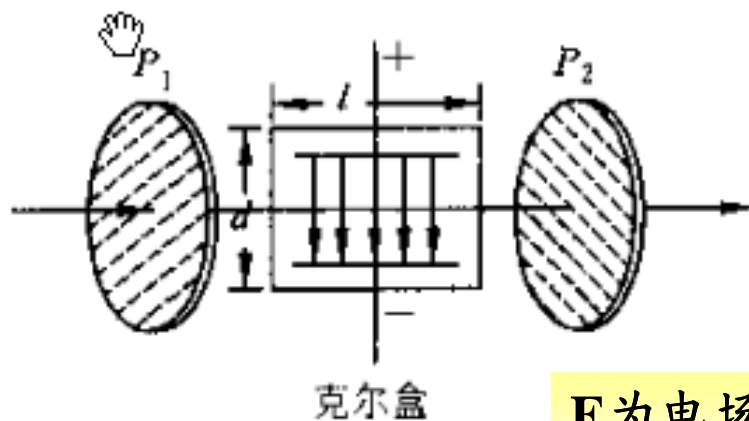
也称线性电光效应，是指在外电场作用下，晶体的介电特性发生变化，晶体的两个主轴折射率（ n_e ， n_o ）之差 Δn 于外电场场强 E 成正比的现象。

$$\Delta n = n_o - n_e = \gamma E, \quad \gamma \text{——线性电光系数。}$$

➤ Kerr效应

$$\Delta n = n_o - n_e = kE^2, \quad k \text{——克尔常数。}$$

利用电光效应测量电压的原理



P_1P_2 是两正交偏振片，克尔盒中成有液体，并装有长为 l ，间隔为 d 的平行板电极，加电场后两电极间液体获得单轴晶体性质，其光轴方向沿电场方向

$$n_o - n_e = kE^2$$

E 为电场强度。线偏振光通过克尔盒是产生双折射， o 光和 e 光的光程差 δ 及对应的相差 $\Delta\phi$ 为：

$$\delta = (n_o - n_e) l = klE^2 = kl \frac{U^2}{d^2}, \quad \Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \delta = \frac{2\pi kl U^2}{\lambda d^2}$$

电压变化导致光程差随之改变，从而透过 P_2 的光强也发生变化。可以推导出输出和输入光强的关系为

$$I = I_0 \sin^2 2\alpha \sin^2 \frac{\phi}{2}$$

α 为克尔盒光轴方向与 p_1 偏振方向的夹角，显然 $\alpha = 45^\circ$ 输出光强极大。且：

$$I = I_0 \sin^2 \frac{\phi}{2} = I_0 \sin^2 \left(\frac{\pi kl U^2}{\lambda d^2} \right) = I_0 \sin^2 \left(\frac{\pi U^2}{2 U_{\lambda/2}^2} \right)$$

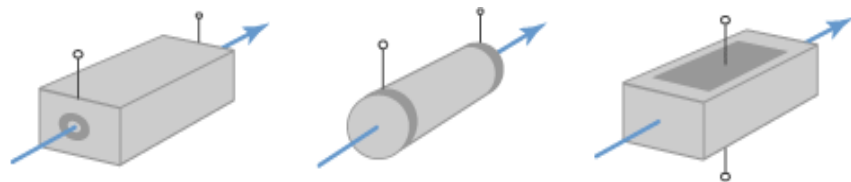
利用电光效应测量电压的原理

其中，
$$U_{\lambda/2}^2 = \frac{\lambda d^2}{2kl}$$

$U_{\lambda/2}$ 称为半波电压，是当两光波间的相位差 $\Delta\phi$ 为 π 弧度时所需要的外加电压

◆ Pockels盒

用各种Pockels晶体可以制成Pockels盒。利用这一结构，可以制成各种光开关、光调制器或电压传感器。



Pockels盒结构



各种Pockels盒
(美国Qioptiq公司)

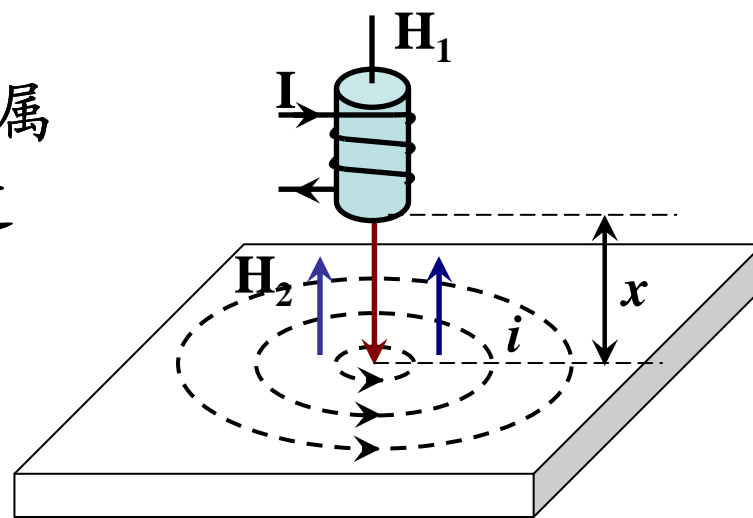
电光效应测量电压信号的特点:

- ◆ 体积小，电气安全性好;
- ◆ 测量频率范围最高达到**GHz**，传统方法很难达到;
- ◆ 灵敏度高，最小检测值可到**10V/m**;

4.6 电涡流传感器及其应用

1) 电涡流的产生原理:

- ◆ 一个有交变电流 I 通过的线圈靠近金属板时，金属板中有环形电流 i 形成，这种电流就称之为电涡流。
- ◆ 电涡流产生磁场方向和原线圈磁场的方向相反，这两个磁场叠加将改变原线圈的阻抗；
- ◆ 线圈电感主要与线圈和金属板距离 d 、金属板磁导率 μ 和电阻率 σ 有关；

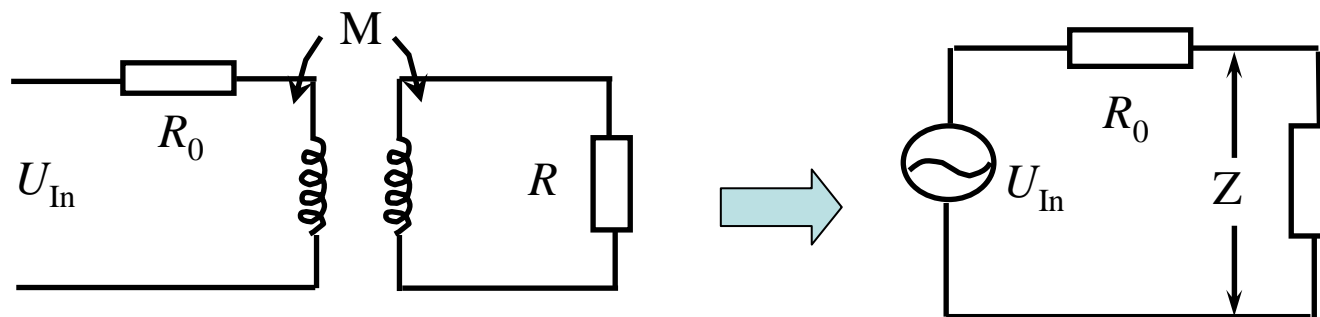


电涡流工作原理

$$Z = F(\sigma, \mu, d)$$

4.6 电涡流传感器及其应用

2) 电涡流测量系统等效电路



3) 电涡流传感器应用

- ◆ 位移检测，可达微米级；
- ◆ 微机械振动测量；
- ◆ 镀膜厚度的检测，包括油膜厚度等；
- ◆ 金属探伤，如汽车轴、钢板、炮管等的内部裂纹的检测；

4.6 电涡流传感器及其应用



4) 电涡流传感器的特点

◆ 优点:

- ▶ 非接触测量;
- ▶ 测量灵敏度高;

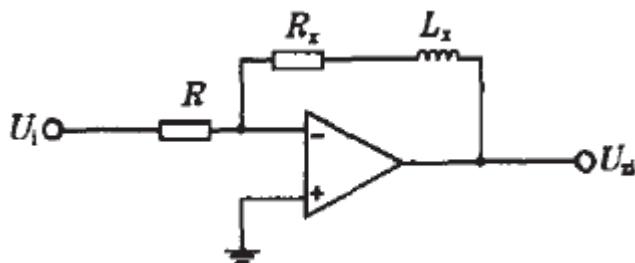
◆ 缺点:

- ▶ 线圈阻抗和被测材料磁导率、导电率等参数有关, 需对不同被测对象进行标定;
- ▶ 采用软磁材料做铁心的线圈, 灵敏度高但性能受环境温度影响较大; 空芯线圈改善了温度性能但灵敏度低;
- ▶ 受环境电磁干扰;

4.6 电涡流传感器及其应用

5) 电涡流传感器常用调理电路——相敏检波

◆ 探头线圈阻抗/电压转换电路



探头线圈阻抗转换电压电路

R_x : 线圈等效电阻; L_x : 线圈等效电感

转换电路输出:

$$U_z = -\frac{U_i}{R}(R_x + j\omega L_x)$$

假设:

$$U_i = u_m \sin(\omega t)$$

则转换电路输出 U_z 为:

$$U_z = u_z u_m \sin(\omega t + \varphi) \quad \text{其中: } \varphi = \tan^{-1} \frac{\omega L_x}{R_x}$$

且有:

$$R_x = R u_z \cos \varphi, \quad \omega L_x = R u_z \sin \varphi,$$

4.6 电涡流传感器及其应用



◆ 相敏检波原理及电路

取正弦波参考信号 U_0 ，频率与探头线圈激励频率即 U_i 的频率相同，则相敏电路（PSD，即乘法器）的输入为：

$$\begin{cases} U_z = u_z u_m \sin(\omega t + \varphi) \\ U_0 = u_m \sin \omega t \end{cases}$$

PSD输出信号为：

$$U_{zo} = \frac{1}{2} u_z u_m \cos(2\omega t + \varphi) - \frac{1}{2} u_z u_m \cos \varphi$$

式中： U_z 为探头线圈/电压转换电路的输出信号， U_0 为参考信号（可与探头的激励信号 U_i 取为同一信号）

4.6 电涡流传感器及其应用



滤去 U_{z0} 信号中的高频分量得:

$$U'_{z0} = -\frac{1}{2}u_z u_m \cos \varphi = k_R R_x$$

其中： K_R 为系数，即 U'_{z0} 正比于线圈等效电阻

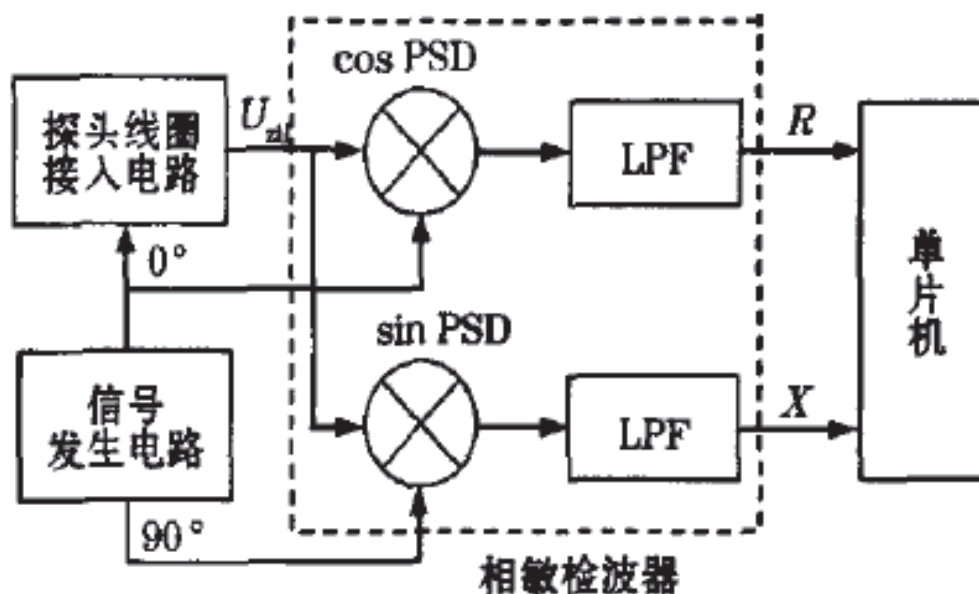
将参考信号 U_0 相移 90° ，重复上述过程得到:

$$U''_{z0} = -\frac{1}{2}u_z u_m \sin \varphi = k_l \omega L_x$$

其中： K_l 为系数，即 U''_{z0} 正比于线圈等效电感

4.6 电涡流传感器及其应用

相敏检波电路分离探头阻抗实部和虚部电路框图



4.6 电涡流传感器及其应用

6) 采用电涡流传感器测量位移实例

采用相敏检波法检测探头线圈阻抗和感抗值。

取幅值2.5V，频率1MHz的参考信号，实验测得探头对6种材料在不同检测距离下测得的等效电抗值和电阻值如表1和表2所示。

表1 不同被测对象时测得的等效电抗值

距离/mm	1Cr18Ni9Ti 等效电抗/ Ω	45#钢 等效电抗/ Ω	A3 等效电抗/ Ω	2169# 等效电抗/ Ω	铝 等效电抗/ Ω	铜 等效电抗/ Ω
0	495	641	664	490	444	447
0.2	535	654	673	526	495	489
0.4	569	667	680	563	538	533
0.6	600	677	688	592	572	569
0.8	622	685	694	617	601	597
1.0	641	692	699	637	623	620
1.2	657	698	703	653	643	639
1.4	670	703	707	665	657	655
1.6	680	707	711	677	669	668
1.8	689	711	713	685	680	679
2.0	696	714	716	693	688	686

4.6 电涡流传感器及其应用

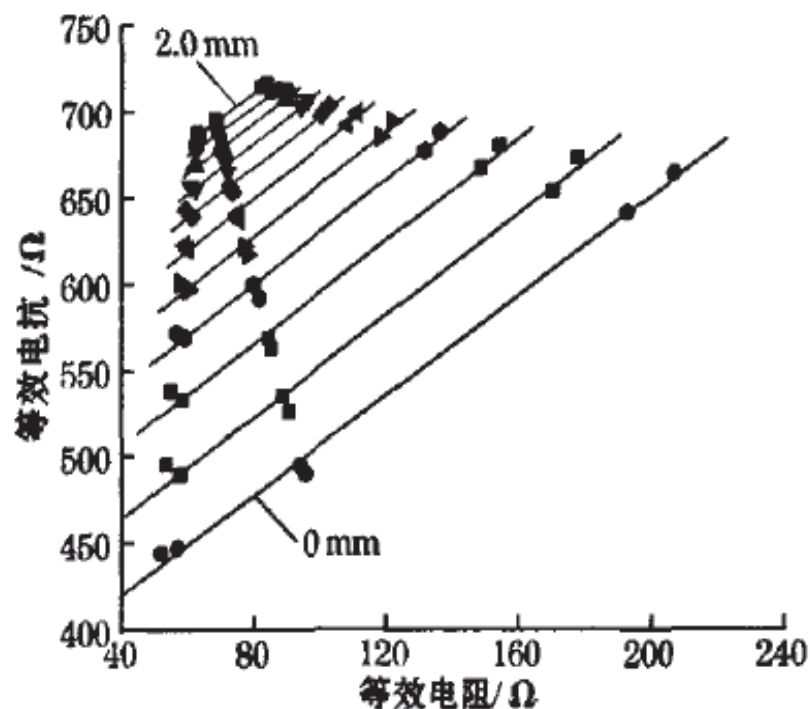


表 2 不同被测对象时测得的等效电阻值

距离 /mm	1Cr18 Ni9Ti 等效电阻 /Ω	45#钢 等效电阻 /Ω	A3 等效电阻 /Ω	2169# 等效电阻 /Ω	铝 等效电阻 /Ω	铜 等效电阻 /Ω
0	93.9	193.0	206.9	95.8	52.0	57.2
0.2	88.8	170.5	177.9	90.8	53.7	58
0.4	84.5	148.5	154.3	85.3	55.0	58.6
0.6	79.8	131.5	135.9	81.7	56.7	59.2
0.8	77.2	118.4	122.0	78.1	57.9	60.3
1.0	75.1	108.3	111.1	75.5	59.2	60.4
1.2	72.7	100.3	102.7	73.7	59.6	61.5
1.4	71.2	94.1	96.2	72.2	60.8	62.5
1.6	70.0	89.1	90.9	71.1	61.9	62.8
1.8	69.1	85.1	87.2	70.0	62.3	63.1
2.0	68.3	81.9	83.5	69.2	62.8	63.6

从表1和表2中可以看出，在相同测试距离下，对不同的被测材料传感器具有不同的等效电抗和等效电阻值，说明材料对传感器输出的影响。

4.6 电涡流传感器及其应用



近似认为各条曲线相互平行。这样可采用拟合直线的截距代替此检测距离下探头线圈的阻抗响应，称为归一化等效阻抗。采用这种方法可消除被测对象的电磁特性对传感器输出特性的影响

不同被测材料和不同测量距离情况下，探头线圈等效电抗-等效电阻关系图