

第5章 磁电式传感器

1

5.1 磁电感应式传感器

2

5.2 霍尔效应及霍尔元件





概述

磁敏式传感器是通过磁电作用将被测量（如振动、位移、转速等）转换成电信号的一种传感器。磁敏式传感器种类不同，其原理也不完全相同，因此各有各的特点和应用范围。





5.1 磁电感应式传感器

磁电感应式传感器也称为电动式传感器或感应式传感器。

- ◆磁电感应式传感器是利用导体和磁场发生相对运动产生电动式的，它不需要辅助电源就能把被测对象的机械量转换成易于测量的电信号，是有源传感器。
- ◆由于它输出功率大且性能稳定，具有一定的工作带宽（ $10\sim 1000\text{ Hz}$ ），所以得到普遍的应用。





5.1 磁电感应式传感器

5.1.1 磁电感应式传感器工作原理

- ◆根据电磁感应定律，当 w 匝线圈在恒定磁场内运动时，设穿过线圈的磁通为 Φ ，则线圈内的感应电势 E 与磁通变化率 $d\Phi/dt$ 有如下关系：

$$E = -w \frac{d\Phi}{dt} \quad (6-1)$$

- ◆根据这一原理，可以设计成两种磁电传感器结构：变磁通式和恒磁通式。
- ◆图5-1是变磁通式磁电传感器，用来测量旋转物体的角速度。



5.1 磁电感应式传感器

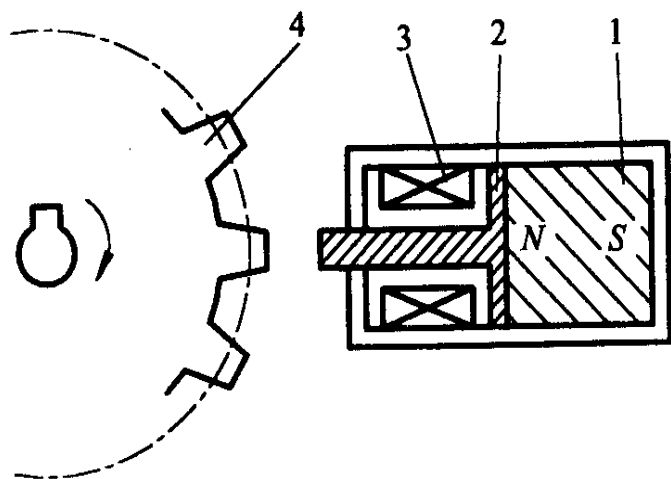
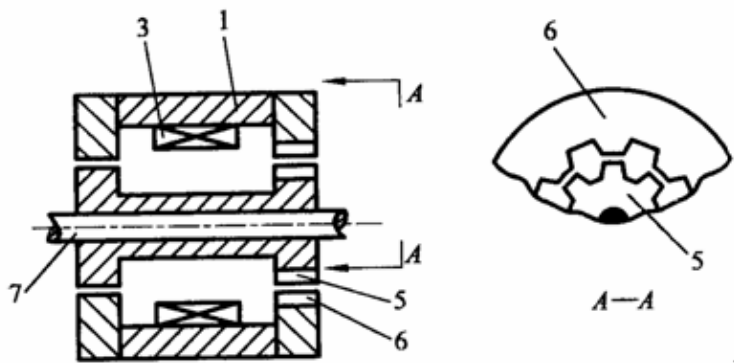


图5-1 (a)

图5-1 (a) 为开磁路变磁通式：线圈、磁铁静止不动，测量齿轮安装在被测旋转体上，随之一起转动。每转动一个齿，齿的凹凸引起磁路磁阻变化一

次，磁通也就变化一次，线圈中产生感应电势，其变化频率等于被测转速与测量齿轮齿数的乘积。这种传感器结构简单，但输出信号较小，且因高速轴上加装齿轮较危险而不宜测量高转速。

5.1 磁电感应式传感器



(b) 闭磁路

1、永久磁铁；2、软磁铁；3、感应线圈；4、测量齿轮；5、内齿轮；6、外齿轮；7、转轴

图5-1 (b)

轮不动，内齿轮随被测轴而转动，内、外齿轮的相对转动使气隙磁阻产生周期性变化，从而引起磁路中磁通的变化，使线圈内产生周期性变化的感生电动势。感应电势的频率与被测转速成正比。

图5-1 (b) 为闭磁路变磁通式，它由装在转轴上的内齿轮和外齿轮、永久磁铁和感应线圈组成，内外齿轮齿数相同。当转轴连接到被测转轴上时，外齿



5.1.1 磁电感应式传感器

◆图5-2 恒磁通式磁电传感器结构原理图

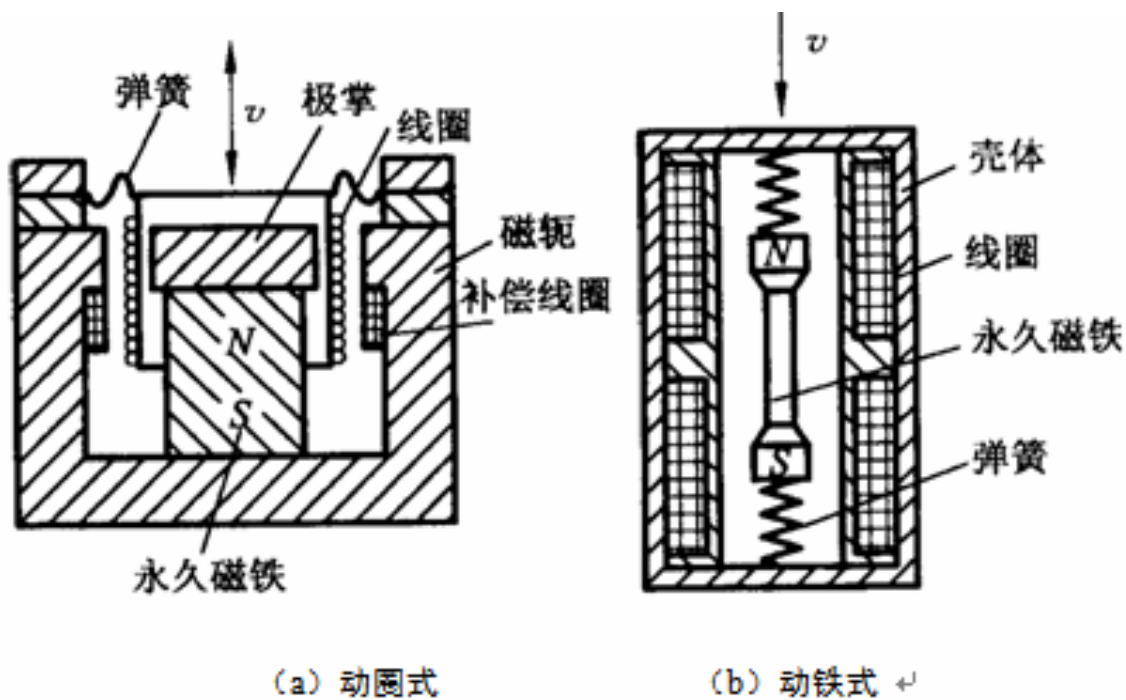


图5-2 恒磁通式磁电传感器结构原理图



5.1.1 磁电感应式传感器

- ◆磁路系统产生恒定的直流磁场，磁路中的工作气隙固定不变，因而气隙中磁通也是恒定不变的。其运动部件可以是线圈（动圈式），也可以是磁铁（动铁式），动圈式（如图5-2（a））和动铁式（如图5-2（b））的工作原理是完全相同的。当壳体随被测振动体一起振动时，由于弹簧较软，运动部件质量相对较大。当振动频率足够高（远大于传感器固有频率）时，运动部件惯性很大，来不及随振动体一起振动，近乎静止不动，





5.1 磁电感应式传感器

振动能量几乎全被弹簧吸收，永久磁铁与线圈之间的相对运动速度接近于振动体振动速度，磁铁与线圈的相对运动切割磁力线，从而产生感应电势为：

$$E = -wB_0Lv \quad (6-2)$$

式中：

B_0 ——工作气隙磁感应强度；

L ——每匝线圈平均长度；

w ——线圈在工作气隙磁场中的匝数；

v ——相对运动速度。



5.1 磁电感应式传感器

5.1.2 磁电感应式传感器基本特性

◆当测量电路接入磁电传感器电路中，磁电传感器的输出电流 I 为：

$$I_0 = \frac{E}{R + R_f} = \frac{B_0 L w v}{R + R_f} \quad (5-3)$$

式中：

R_f ——测量电路输入电阻；

R ——线圈等效电阻。

◆传感器的电流灵敏度为：
$$S_I = \frac{I_0}{v} = \frac{B_0 L w}{R + R_f} \quad (5-4)$$

5.1 磁电感应式传感器

◆而传感器的输出电压和电压灵敏度分别为：

$$U_0 = I_0 R_f = \frac{B_0 L w v R_f}{R + R_f} \quad (5-5)$$

$$S_U = \frac{U_0}{v} = \frac{B_0 L w R_f}{R + R_f} \quad (5-6)$$

◆当传感器的工作温度发生变化或受到外界磁场干扰、机械振动或冲击时，其灵敏度将发生变化而产生测量误差。相对误差为

$$\gamma = \frac{ds_I}{s_I} = \frac{dB}{B} + \frac{dL}{L} - \frac{dR}{R} \quad (5-7)$$

◆磁电式传感器在使用时存在误差，主要为非线性误差和温度误差。

5.1 磁电感应式传感器

1) 非线性误差 磁电式传感器产生非线性误差的主要原因是：由于传感器线圈内有电流 I 流过时，将产生一定的交变磁通 ΦI ，此交变磁通叠加在永久磁铁所产生的工作磁通上，使恒定的气隙磁通变化如图5-3所示。

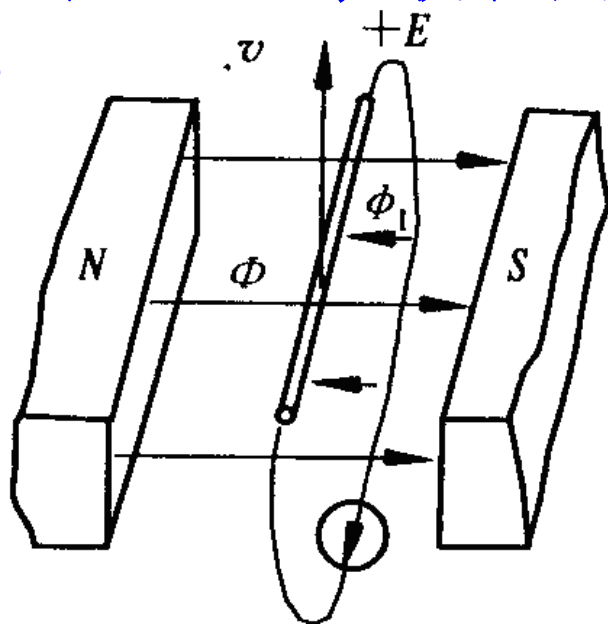


图5-3 传感器电流的磁场效应

5.1 磁电感应式传感器

2) 温度误差 当温度变化时, 式 (5-7) 中右边三项都不为零, 对铜线而言每摄氏度变化量为 $dL/L \approx 0.157 \times 10^{-4}$, $dR/R \approx 0.43 \times 10^{-2}$, dB/B 每摄氏度的变化量取决于永久磁铁的磁性材料。对铝镍钴永久磁合金, $dB/B \approx -0.02 \times 10^{-2}$, 这样由式 (5-7) 可得近似值:

$$\gamma_t \approx (-4.5\%) / 10C^\circ$$

这一数值是很可观的, 所以需要进行温度补偿。补偿通常采用热磁分流器。热磁分流器由具有很大的负温度系数的特殊磁性材料做成。它在正常工作温度下已将空气隙磁通分路掉一小部分。

5.1 磁电感应式传感器

5.1.3 磁电感应式传感器测量电路

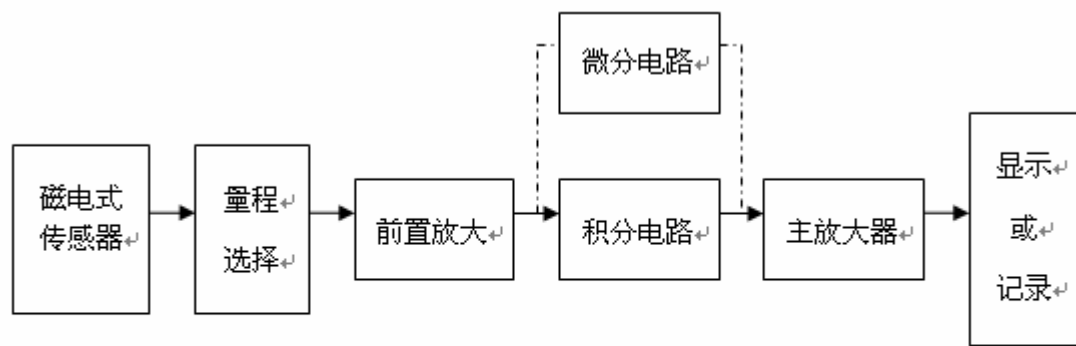


图5-4 磁电感应式传感器测量电路方框图

磁电式传感器直接输出感应电动势，且传感器通常具有较高的灵敏度，不需要高增益放大器。但磁电式传感器是速度传感器，若要获取被测位移或加速度信号，则需要配用积分或微分电路。图5-4为一般测量电路方框图。



5.2 霍尔效应及霍尔元件

霍尔传感器为载流半导体在磁场中有电磁效应（霍尔效应）而输出电动势的一种传感器。

- ◆ 随着半导体技术的发展，开始用半导体材料制成霍尔元件，由于它的霍尔效应显著而得到应用和发展。
- ◆ 霍尔传感器广泛用于电磁测量电流、磁场、压力、加速度、振动等方面的测量。

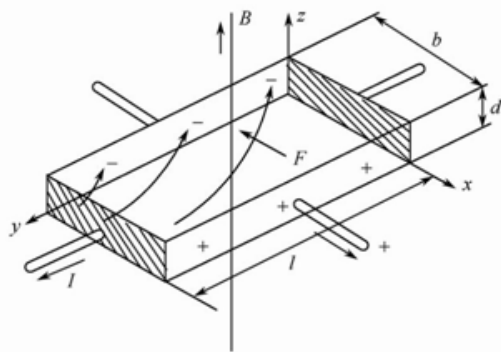


5.2 霍尔效应及霍尔元件

5.2.1 霍尔效应及霍尔元件

1) 霍尔效应 置于磁场中的静止载流导体，当它的电流方向与磁场方向不一致时，载流导体上平行于电流和磁场方向上的两个面之间产生电动势，这种现象称霍尔效应，该电势称霍尔电势，半导体薄片称霍尔元件。

◆图5-5所示，在垂直于外磁场 B 的方向上放置一个导电板，导电板通以电流 I ，方向如图所示。



霍尔效应原理图

5.2 霍尔效应及霍尔元件

- ◆ 导电板中的电流是金属中自由电子在电场作用下的定向运动。此时，每个电子受洛仑磁力 F_m 的作用， F_m 的大小为：

$$F_m = -evB$$

式中： e -电子电荷； v -电子运动平均速度；
 B -磁场的磁感应强度。

- ◆ F_m 的方向在图5-5中是向上的，此时电子除了沿电流反方向作定向运动外，还在 F_m 的作用下向上漂移，结果使金属导电板上底面积累电子，而下



5.2 霍尔效应及霍尔元件

底面积累正电荷，从而形成了附加内电场 E_H ，称霍尔电场，该电场强度为：

$$E_H = \frac{U_H}{b} \quad (5-10)$$

$$-eE_H = -evB \quad (5-11)$$

则

$$E_H = vB \quad (5-12)$$

$$U_H = bvB \quad (5-13)$$

◆此时电荷不再向两底面积累，达到平衡状态。



5.2 霍尔效应及霍尔元件

◆ 若金属导电板单位体积内电子数为 n ，电子定向运动平均速度为 v ，则激励电流 $I = n v b d (-e)$ ，则：

$$v = -\frac{I}{bdne} \quad (5-14)$$

将式 (5-14) 代入式 (5-12) 得：

$$E_H = -\frac{IB}{bdne} \quad (5-15)$$

将上式代入式 (5-10) 得： $U_H = -\frac{IB}{ned}$ (5-16)



5.2 霍尔效应及霍尔元件

- ◆ 式中令 $R_H = -1/(ne)$ ，称之为霍尔常数，其大小取决于导体载流子密度，则：

$$U_H = R_H \frac{IB}{d} = K_H IB \quad (5-17)$$

式中： $K_H = R_H/d$ 称为霍尔片的灵敏度。

- ◆ 由式 (5-17) 可见，霍尔电势正比于激励电流及磁感应强度，其灵敏度与霍尔常数 R_H 成正比而与霍尔片厚度 d 成反比。为了提高灵敏度，霍尔元件常制成薄片形状。



5.2 霍尔效应及霍尔元件

◆上述推导是针对N型半导体，对于P型半导体，则：

$$U_H \frac{IB}{ped} = R_H \frac{BI}{d} \quad (6-18)$$

◆式中：
$$R_H = \frac{1}{pe} \quad (5-19)$$

◆对霍尔片材料的要求，希望有较大的霍尔常数 R_H ，霍尔元件激励极间电阻 $R = \frac{bd}{L}$ ，同时， $R = \frac{U_I}{I} = \frac{E_I L}{I} = \frac{vL}{-nevbd}$ ，其中 U_I 为加在霍尔元件两端的激励电压， E_I 为霍尔元件激励极间内电场， v 为电子移动的平均速度。

5.2 霍尔效应及霍尔元件

则：

$$\frac{\rho L}{bd} = -\frac{L}{\mu nebd} \quad (5-20)$$

解得：

$$R_H = \mu\rho \quad (5-21)$$

◆从式 (5-21) 可知，霍尔常数等于霍尔片材料的电阻率与电子迁移率 μ 的乘积。若要霍尔效应强，即霍尔电势大，则 R_H 值大，因此要求霍尔片材料有较大的电阻率和载流子迁移率。此外，



5.2 霍尔效应及霍尔元件

霍尔电势的大小还与霍尔元件的几何尺寸有关。一般要求霍尔元件灵敏度越大越好，霍尔元件的厚度 d 与 K_H 成反比，因此，霍尔元件的厚度越小，其灵敏度越高。当霍尔元件的宽度 b 加大，或减小 $\frac{L}{b}$ 时，载流子在偏转过程中的损失将加大，使 U_H 下降。通常要对式(5-17)加以形状效应修正：

$$U_H = K_H IBf \left(\frac{L}{b} \right) \quad (5-23)$$



5.2 霍尔效应及霍尔元件

式中, $f(\frac{L}{b})$ 为形状效应系数, 其修正值如表5-1所示。

表5-1 形状效应系数

L/b	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0
$f(\frac{L}{b})$	0.370	0.675	0.841	0.923	0.967	0.984	0.996



5.2 霍尔效应及霍尔元件

◆一般金属材料载流子迁移率很高，但电阻率很小；而绝缘材料电阻率极高，但载流子迁移率极低。故只有半导体材料适于制造霍尔片。目前常用的霍尔元件材料有：锗、硅、砷化镓、锑化镓等半导体材料。其中N型锗容易加工制造，其霍尔系数、温度性能和线性度都较好。N型硅的线性度最好，其霍尔系数、温度性能同N型锗相近。锑化镓对温度最敏感，尤其在低温范围内温度系数大，但在室温时其霍尔系数较大。砷化镓的霍尔系数较小，温度系数也较小，输出特性线性度好。书中表5-2为常用国产霍尔元件的技术参数。



5.2 霍尔效应及霍尔元件

2) 霍尔元件基本结构

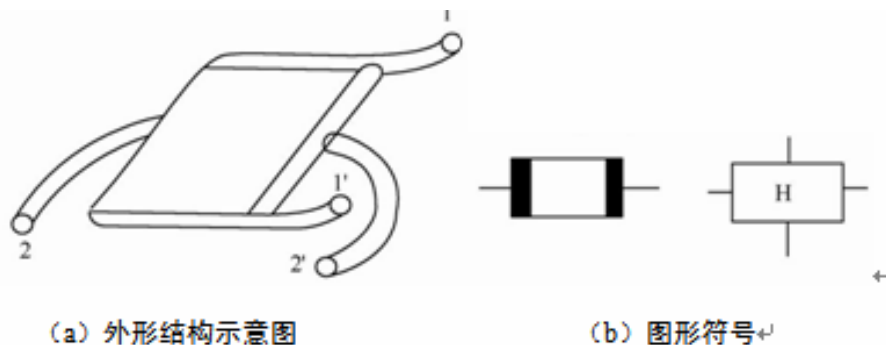


图5-6 霍尔元件

霍尔元件的结构很简单，它由霍尔片、引线和壳体组成，如图5-6 (a) 所示。霍尔片是一块矩形半导体单晶薄片，引出四个引线。1、1' 两根引线加激励电压或电流，称为激励电极；2、2' 引线为霍尔输出引线，称为霍尔电极。霍尔元件壳体由非导磁金属、陶瓷或环氧树脂封装而成。在电路中霍尔元件可用两种符号表示，如图5-6 (b) 所示。

霍尔元件的结构很简单，它由霍尔片、引线和壳体组成，如图5-6 (a) 所示。霍尔片是一块矩形半导体单晶薄片，引出四个引线。1、1' 两根引线加激励电压或电流，称为激励电极；2、2' 引线为霍尔输出引线，称为霍尔电极。霍尔元件壳体由非导磁金属、陶瓷或环氧树脂封装而成。在电路中霍尔元件可用两种符号表示，如图5-6 (b) 所示。



5.2 霍尔效应及霍尔元件

3) 霍尔元件基本特性

- 额定激励电流和最大允许激励电流
- 输入电阻和输出电阻
- 不等位电势和不等位电阻
- 寄生直流电势
- 霍尔电势温度系数

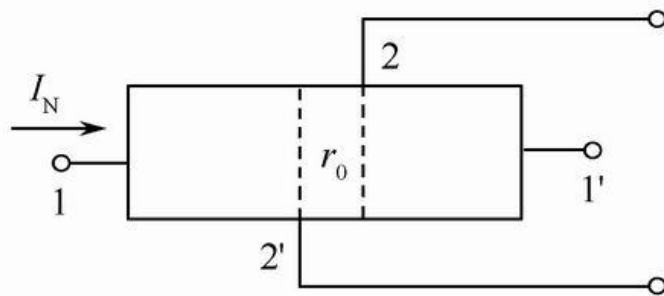


图5-7 不等位电阻

5.2 霍尔效应及霍尔元件

6.2.2 霍尔传感器的基本电路

1) 简单的恒电压工作电路

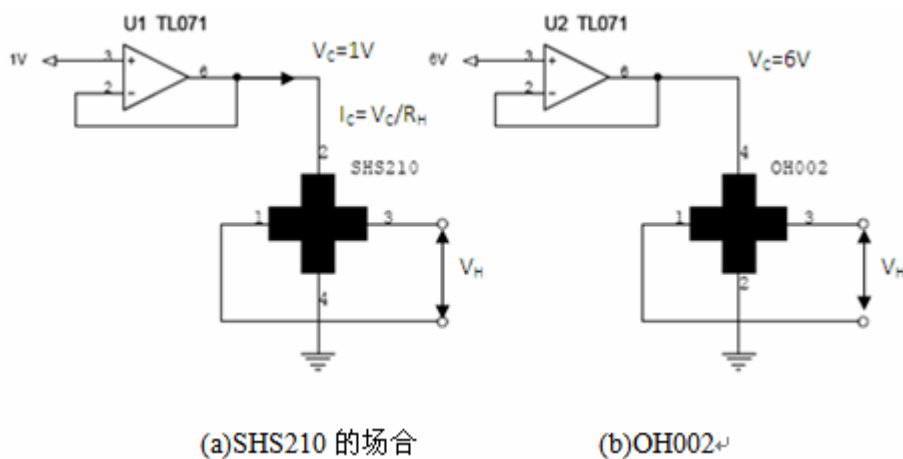


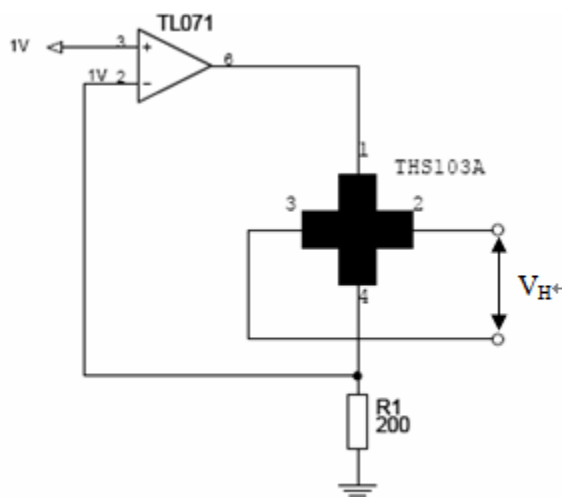
图5-8 霍尔传感器的恒电压工作电路

恒电压工作电路如图5-8所示，是一种非常简单的施加控制电流的方法。恒电压工作电路比较适合

于精度要求不是很高的数字方面的应用，例如录像机的电动机位置检测等。

5.2 霍尔效应及霍尔元件

2) 简单的恒电流工作电路



霍尔效应传感器的恒电流工作电路适于高精度测量，可以充分发挥霍尔效应传感器的性能。在恒电流工作时输出特性不受输入电阻温度系数以及磁阻

图5-9 霍尔传感器的恒电流工作电路的影响。当然，与恒电压工作电路相比，某些电路会变得复杂，不过这个问题不那么严重。霍尔效应传感器的恒电流工作电路如图5-9所示。

5.2 霍尔效应及霍尔元件

3) 霍尔效应传感器放大电路基本的差动放大电路

◆ 霍尔效应传感器的输出电压通常只有数毫伏至数百毫伏，因而需要有放大电路。霍尔效应传感器是一种4端器件，为了消除非磁场因素引入的同向电压的影响，必须构成差动放大器，如图5-10。

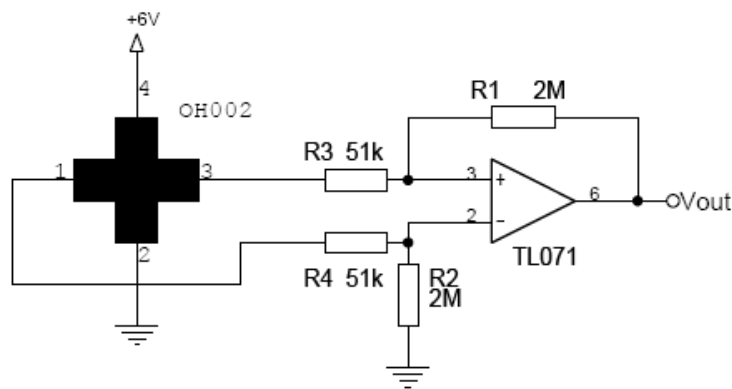


图5-10 a 一个运算放大器构成的差动放大器

5.2 霍尔效应及霍尔元件

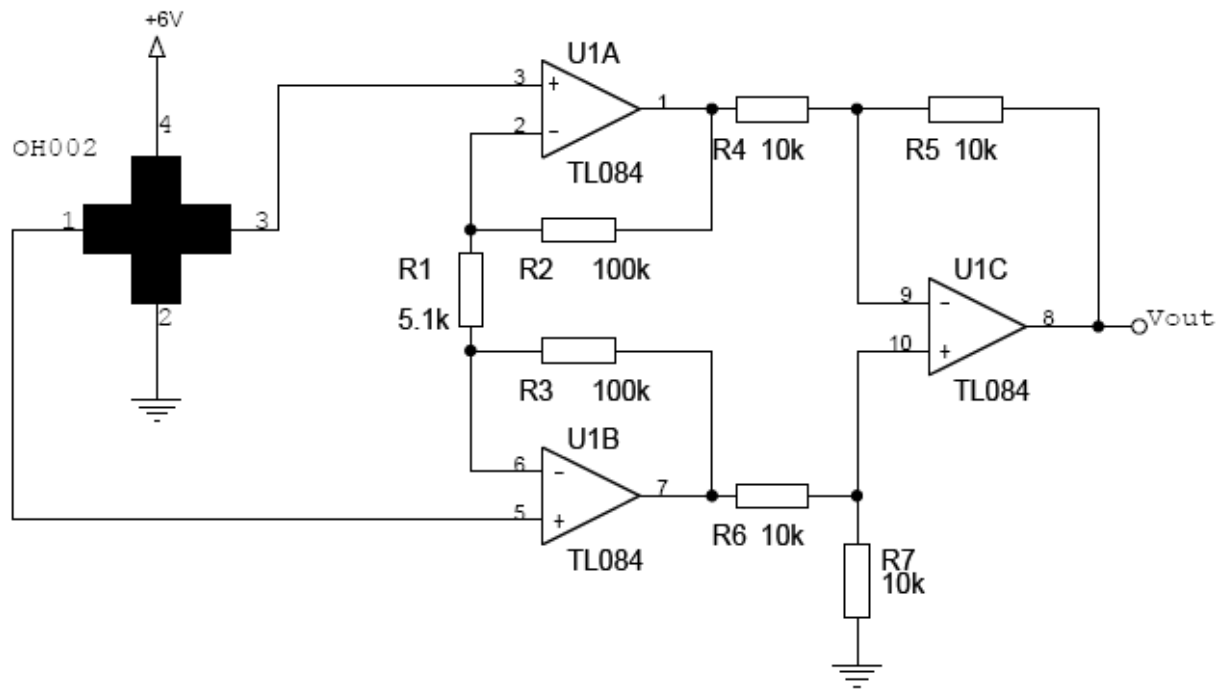
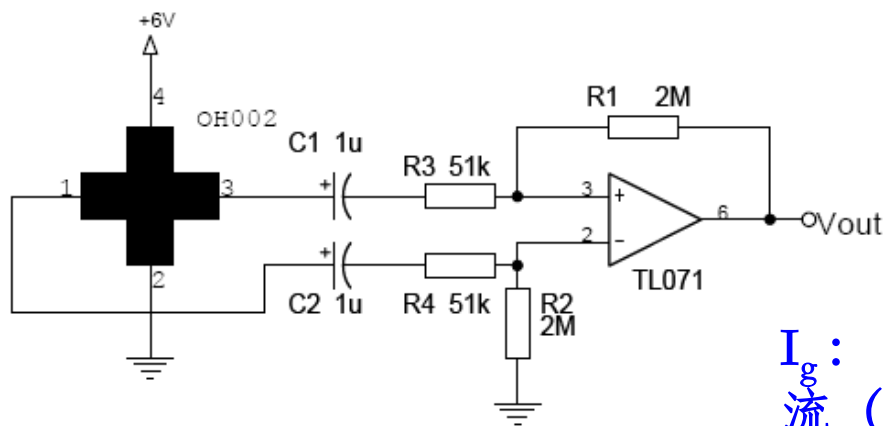


图5-10 b 3个运算放大器构成的差动放大器



5.2 霍尔效应及霍尔元件

◆在图5-10的电路中，既可以使用霍尔效应传感器的交流电压输出，也可以使用它的直流输出，则可以构成如图5-11所示的电路，使用了隔直流电容器。



I_g : 电容器的漏电流 (直流成分)

图5-11 a 电容器漏电流的影响

5.2 霍尔效应及霍尔元件

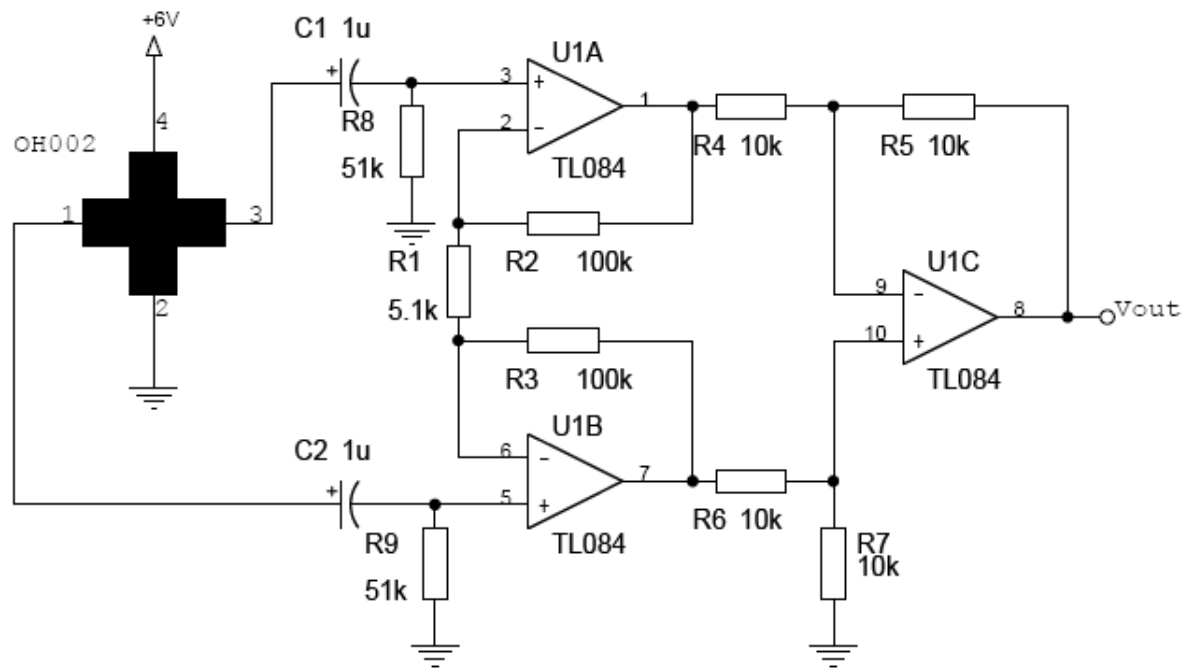


图5-11 b 3个运算放大器构成的差动放大 (1)

5.2 霍尔效应及霍尔元件

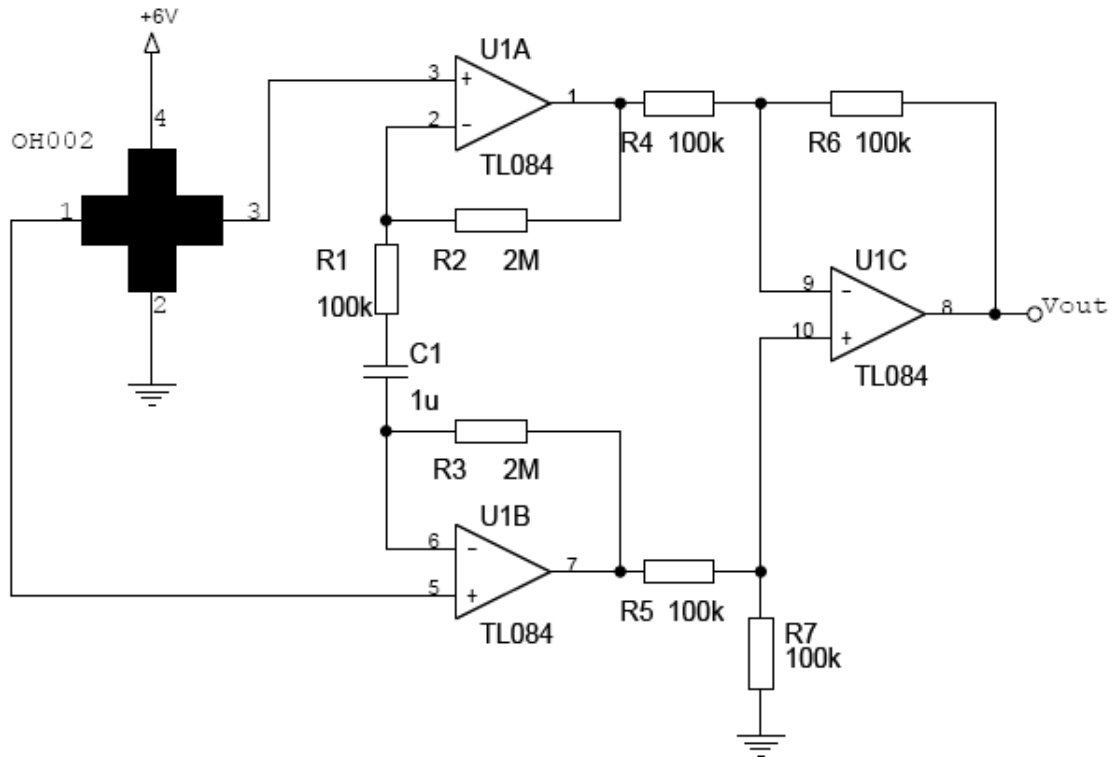


图5-11 c 3个运算放大器构成的差动放大 (1)

5.2 霍尔效应及霍尔元件

5.2.3 霍尔元件的补偿电路

1) 霍尔元件不等位电势补偿

不等位电势与霍尔电势具有相同的数量级，有时甚至超过霍尔电势，因而必须采用补偿的方法。如图 5-12 所示。

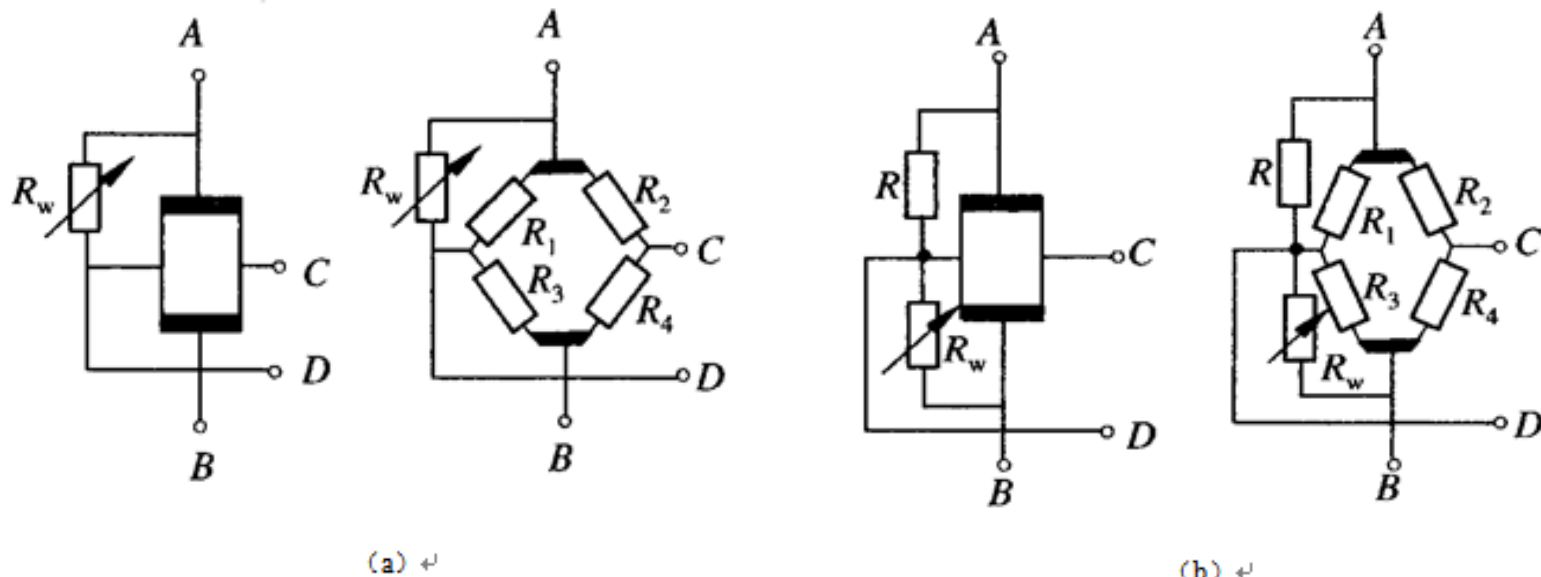


图5-12不等位电势补偿电路



5.2 霍尔效应及霍尔元件

◆其中A、B为激励电极，C、D为霍尔电极，极分布电阻分别用 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 表示。理想情况下， $R_1=R_2=R_3=R_4$ ，即可取得零位电势为零（或零位电阻为零）。实际上，由于不等位电阻的存在，说明此四个电阻值不相等，可将其视为电桥的四个桥臂，则电桥不平衡。为使其达到平衡，可在阻值较大的桥臂上并联电阻（如图5-12（a）所示），或在两个桥臂上同时并联电阻（如图5-12（b）所示）。





5.2 霍尔效应及霍尔元件

2) 霍尔元件温度补偿

- ◆ 霍尔元件是采用半导体材料制成的，因此它们的许多参数都具有较大的温度系数。
- ◆ 为了减小霍尔元件的温度误差，除选用温度系数小的元件或采用恒温措施外，由 $U_H = K_H IB$ 可看出：采用恒流源供电是个有效措施，可以使霍尔电势稳定。但也只能减小由于输入电阻随温度变化而引起的激励电流 I 变化所带来的影响。霍尔元件的灵敏系数 K_H 也是温度的函数，它随温度的变化引起霍尔电势的变化。霍尔元件的灵敏度系数与温度的关系可写成：

$$K_H = K_{HO} (1 + \alpha \Delta T) \quad (5-23)$$



5.2 霍尔效应及霍尔元件

式中：

K_{H0} --温度 T_0 时的 K_H 值； $\Delta T=T-T_0$ --温度变化量； α --霍尔电势温度系数。

- ◆并且大多数霍尔元件的温度系数 α 是正值，它们的霍尔电势随温度升高而增加 $(1+\alpha\Delta T)$ 倍。如果，与此同时让激励电流 I 相应地减小，并能保持 $K_H I$ 乘积不变，也就抵消了灵敏系数 K_H 增加的影响。图5-13就是按此思路设计的一个既简单、补偿效果又较好的补偿电路。电路中用一个分流电阻 R_p 与霍尔元件的激励电极相并联从而达到补偿的目的。

5.2 霍尔效应及霍尔元件

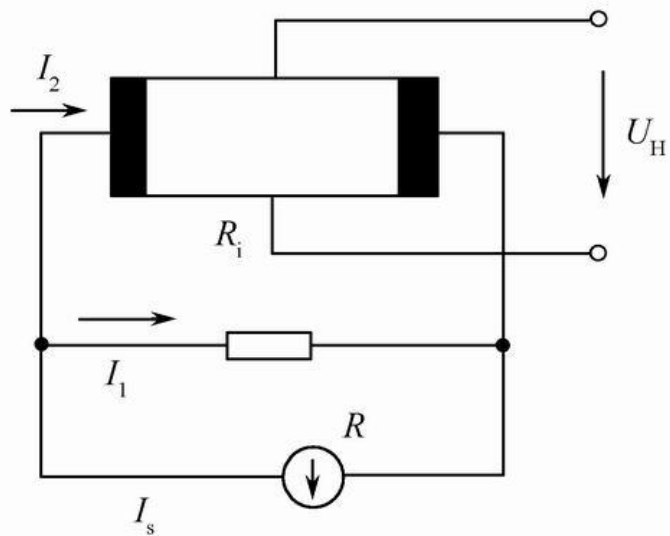
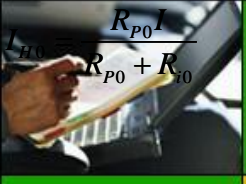


图5-13 恒流源温度补偿电路

在图5-13所示的温度补偿电路中，设初始温度为 T_0 ，霍尔元件输入电阻为 R_{i0} ，灵敏系数为 K_{H1} ，分流电阻为 R_{p0} ，根据分流概念得：



5.2 霍尔效应及霍尔元件

$$I_{H0} = \frac{R_{P0} I}{R_{P0} + R_{i0}} \quad (5-24)$$

当温度升至T时，电路中各参数变为：

$$R_i = R_{i0} (1 + \delta \Delta T) \quad (5-25)$$

$$R_P = R_{P0} (1 + \beta \Delta T) \quad (5-26)$$

式中：

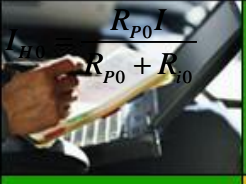
δ ——霍尔元件输入电阻温度系数；

β ——分流电阻温度系数。

则：

$$I_H = \frac{R_P I}{R_P + R_i} = \frac{R_{P0} (1 + \beta \Delta T) I}{R_{P0} (1 + \beta \Delta T) + R_{i0} (1 + \delta \Delta T)}$$





5.2 霍尔效应及霍尔元件

温度升高 ΔT ，为使霍尔电势不变，补偿电路必须满足温升前、后的霍尔电势不变，即：

$$U_{H0} = K_{H0} I_{H0} B = U_H = K_H I_H B \quad (5-27)$$

$$K_{H0} I_{H0} = K_H I_H \quad (5-28)$$

将式 (5-20)、(5-21)、(5-24) 代入上式，经整理并略去 α 、 β 、 ΔT^2 高次项后得：

$$R_{P0} = \frac{\delta - \beta - \alpha}{\alpha} R_{i0} \quad (5-29)$$





5.2 霍尔效应及霍尔元件

- ◆当霍尔元件选定后，它的输入电阻 R_{i0} 和温度系数 δ 及霍尔电势温度系数 α 是确定值。由式(5-27)即可计算出分流电阻 R_{p0} 及所需的温度系数 β 值。为了满足 R_0 及 β 两个条件，分流电阻可取温度系数不同的两种电阻的串、并联组合，这样虽然麻烦但效果很好。





5.2 霍尔效应及霍尔元件

磁敏电阻器是基于磁阻效应的磁敏元件。磁敏电阻是磁阻位移传感器、无触点开关等的核心部件。

5.3.1 磁阻效应

- ◆ 当一载流导体置于磁场中，其电阻会随磁场而变化，这种现象被称为磁阻效应。当温度恒定时，在磁场内，磁阻和磁感应强度 B 的平方成正比。理论推导出来的磁阻效应方程为：

$$\rho = \rho_0 (1 + 0.273 \mu^2 B^2)$$





5.2 霍尔效应及霍尔元件

式中， ρ 是磁感应强度为B的电阻率， ρ_0 是零磁场下的电阻率； μ 是电子迁移率；B是磁感应强度。

