

# 第 7 章 半导体磁敏传感器

半导体磁敏传感器是利用半导体材料中的自由电子和空穴随磁场而改变其运动方向这一特性制成的，按其结构可分为体型和结型两大类。体型的主要有霍尔传感器（材料主要是 InSb、InAs、Ge、Si、GaAs）和磁敏电阻（材料主要有 InSb、InAs），结型的主要有磁敏二极管（材料主要是 Ge、Si）和磁敏三极管（材料主要是 Si）。

## 7.1 霍尔传感器

霍尔传感器是一种基于霍尔效应的磁传感器。霍尔效应自 1879 年被美国物理学家爱德文·霍尔发现至今已有 100 多年的历史，但直到 20 世纪 50 年代，由于微电子学的发展，才被重视和开发，现在，已发展成一个品种多样的磁传感器产品族，并得到广泛的应用。霍尔传感器可以检测磁场及其变化，可在各种与磁场有关的场合中使用。

霍尔传感器具有许多优点，其结构牢固，体积小，质量轻，寿命长，安装方便，功耗小，频率高（可达 1MHz），耐震动，不怕灰尘、油污、水汽及盐雾等的污染或腐蚀。

按照霍尔传感器的功能可将它们分为线性霍尔传感器和开关型霍尔传感器。前者输出模拟量，后者输出数字量。

线性霍尔传感器的精度高，线性度好，开关型霍尔传感器无触点，无磨损，输出波形清晰，无抖动，无回跳，位置重复精度高（可达微米级）。采用了各种补偿和保护措施的霍尔传感器的工作温度范围很宽，可达  $-55\sim 150^{\circ}\text{C}$ 。

霍尔传感器可直接用于检测磁场或磁特性，也可通过在被检对象上人为设置的磁场，来检测许多非电、非磁的物理量，例如力、力矩、压力、应力、位置、位移、速度、加速度、角度、角速度、转数、转速以及工作状态发生变化的时间等，还可转换成电量来进行检测和控制。

### 7.1.1 霍尔效应

如图 7-1 所示，一块半导体薄片，其长度为  $l$ ，宽度为  $b$ ，厚度为  $d$ ，置于磁感应强度为  $B$  的磁场中，如果在其相对的两边通入电流  $I$ ，且电流与磁场垂直，则在半导体的另两边将会产生一个电势差  $U_H$ ，这种现象就是霍尔效应，产生的电势差称为霍尔电压。利用霍尔效应制成的元件称为霍尔元件。半导体长度方向上的两个金属电极称为控制电极（或输入电

极)，沿该方向流动的电流  $I$  称为控制电流；宽度方向上的两个电极称为霍尔电极（或输出电极）。

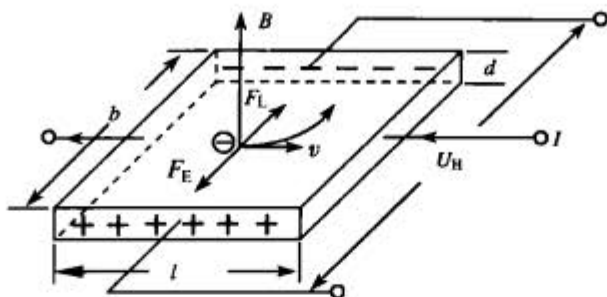


图 7-1 霍尔效应

霍尔效应是半导体中的自由电荷在磁场中受到洛伦兹力作用而产生的。

设图 7-1 中的半导体材料是 N 型半导体，导电的载流子是电子。当半导体中通以电流  $I$  时，在磁场作用下，电子将受到洛伦兹力  $F_L$  的作用，方向如图中所示，其大小为

$$F_L = qvB \quad (7-1)$$

式中： $q$  为载流子电荷；

$v$  为载流子的运动速度；

$B$  为磁感应强度。

在洛伦兹力的作用下，电子向一侧偏转，使该侧形成负电荷的积累，另一侧则形成正电荷的积累。这样，前、后两端面因电荷积累而建立了一个电场  $E_H$ ，称为霍尔电场。该电场对电子的作用力与洛伦兹力的方向相反，即阻止电荷的继续积累。当电场力与洛伦兹力相等时，达到动态平衡，这时有

$$qE_H = qvB$$

霍尔电场的强度为

$$E_H = vB \quad (7-2)$$

所以，霍尔电压  $U_H$  可表示为

$$U_H = E_H b = vBb \quad (7-3)$$

当材料中的载流子浓度为  $n$  时，由电流强度的定义，控制电流  $I$  可表示为

$$I = \frac{dQ}{dt} = bldv_nq$$

即

$$v = \frac{I}{nqbd} \quad (7-4)$$

将 (7-4) 式代入 (7-3) 式，得

$$U_H = \frac{1}{nq} IB \quad (7-5)$$

取  $R_H = \frac{1}{nq}$ ，则 (7-5) 式可写成

$$U_H = R_H \frac{IB}{d} \quad (7-6)$$

$R_H$  被定义为霍尔元件的霍尔系数。显然，霍尔系数由半导体材料的性质决定，它反映

材料霍尔效应的强弱。

$$\text{设} \quad K_H = \frac{R_H}{d} \quad (7-7)$$

则 (7-6) 式可写成

$$U_H = K_H IB \quad (7-8)$$

$K_H$  即为霍尔元件的灵敏度, 它表示一个霍尔元件在单位控制电流和单位磁感应强度时产生的霍尔电压的大小, 单位是  $V/(A \cdot T)$ 。

霍尔元件灵敏度  $K_H$  不仅取决于载流体材料的性质, 而且取决于它的几何尺寸, 即

$$K_H = \frac{1}{nqd} \quad (7-9)$$

由 (7-3) 式可以看出, 霍尔电压的大小决定于载流体中电子的运动速度, 它随载流体材料的不同而不同。材料中电子在电场作用下运动速度的大小常用载流子迁移率来表征, 所谓载流子迁移率, 是指在单位电场强度作用下, 载流子的平均速度值, 即

$$\mu = \frac{v}{E_1}$$

式中:  $\mu$  为载流子迁移率;

$E_1$  为两个控制电极端面之间的电场强度, 它是由外加电压  $U$  产生的, 即  $E_1 = U/l$ 。

因此我们可以把电子运动速度表示为

$$v = \frac{\mu U}{l}$$

代入 (7-3) 式得

$$U_H = \frac{\mu U}{l} b B \quad (7-10)$$

由 (7-6) 式可以得到

$$U_H = R_H \frac{IB}{d} = \frac{R_H B}{d} \cdot \frac{U}{R} = \frac{R_H B}{d} \cdot \frac{U}{\frac{\rho l}{bd}} = \frac{R_H B U b}{\rho l} \quad (7-11)$$

式中:  $\rho$  为载流体的电阻率。

比较 (7-10) 式和 (7-11) 式, 可得出  $\rho$  与霍尔系数  $R_H$  和载流子迁移率  $\mu$  之间的关系为

$$\rho = \frac{R_H}{\mu}$$

$$\text{或} \quad R_H = \rho \mu \quad (7-12)$$

通过以上分析, 可以看出以下几点。

① 如果是 P 型半导体, 其载流子是空穴, 若空穴浓度为  $p$ , 同理可得

$$U_H = \frac{IB}{ped}$$

② 霍尔电压  $U_H$  与材料的性质有关。

根据 (7-12) 式, 材料的  $\rho$ 、 $\mu$  大,  $R_H$  就大。金属的  $\mu$  虽然很大, 但  $\rho$  很小, 不宜做成霍尔元件; 绝缘材料的  $\rho$  很高, 但  $\mu$  很小, 也不能做霍尔元件。故霍尔传感器中的霍尔元件都是由半导体材料制成的。

在半导体材料中, 由于电子的迁移率比空穴的大, 所以霍尔元件一般采用 N 型半导体材料。

③ 霍尔电压  $U_H$  与元件的尺寸有关。

根据 (7-7) 式,  $d$  愈小,  $K_H$  愈大, 霍尔元件灵敏度愈高, 所以霍尔元件的厚度都比较薄, 薄膜霍尔元件的厚度只有  $1\mu\text{m}$  左右。但  $d$  过小, 会使元件的输入、输出电阻增加。

从 (7-10) 式还可发现, 元件的长宽比  $l/b$  对  $U_H$  也有影响。前面的公式推导都是以半导体内各处载流子作平行直线运动为前提的, 这种情况只有在  $l/b$  很大时才成立。由于控制电极对内部产生的霍尔电压有局部短路作用, 在两控制电极的中间处测得的霍尔电压最大, 离控制电极很近的地方, 霍尔电压下降到接近于零。为了减少短路影响,  $l/b$  要大一些, 一般  $l/b=2$ 。但如果  $l/b$  过大, 反而使输入功耗增加, 降低了元件的输出。

④ 霍尔电压  $U_H$  与控制电流及磁场强度有关。

根据 (7-8) 式,  $U_H$  正比于  $I$  和  $B$ 。当控制电流恒定时,  $B$  愈大  $U_H$  愈大; 当磁场改变方向时, 霍尔电场也改变方向。同样, 当磁感应强度恒定时, 增加控制电流, 也可以提高霍尔电压的输出。

## 7.1.2 霍尔元件的构造及测量电路

### 1. 构造

霍尔元件的外形、结构和符号如图 7-2 所示。霍尔元件由霍尔片、四极引线和壳体组成。霍尔片是一块矩形半导体单晶薄片 (一般为  $4\text{mm}\times 2\text{mm}\times 0.1\text{mm}$ )。在它的长度方向两端面上焊有两根引线 (图中 a、b 线), 通常是红色的, 称为控制电极。在另两端面的中点对称地焊有两根引线 (图中 c、d 线), 通常是绿色的, 称为霍尔电极。霍尔元件的壳体是用非导磁金属、陶瓷或环氧树脂封装。霍尔元件在电路中可用图 7-2 (c) 所示的几种符号表示。

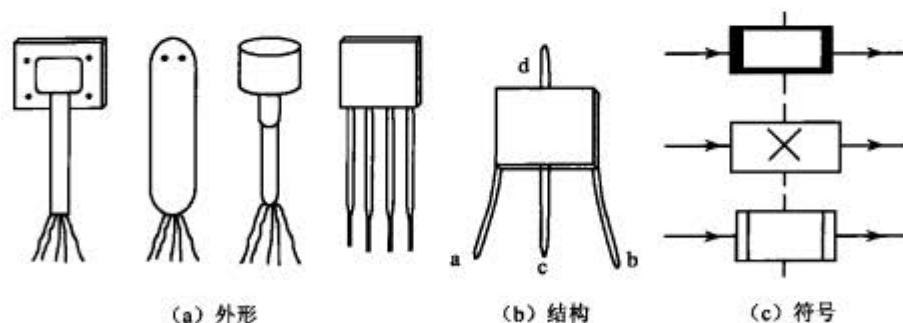


图 7-2 霍尔元件

### 2. 测量电路

霍尔元件的基本测量电路如图 7-3 (a) 所示。激励电流 (控制电流) 由电源  $E$  提供, 电位器  $R_P$  用来调节激励电流  $I$  的大小。  $R_L$  为输出霍尔电势  $U_H$  的负载电阻, 通常它是显示仪表、记录装置或放大器的阻抗。实际使用时, 器件的输入信号可以是  $I$  或  $B$ , 或者  $IB$ , 而输出可以正比于  $I$  或  $B$ , 或者正比于其乘积  $IB$ 。

为了获得更大的霍尔输出电势, 可以采用几片叠加的连接方式。图 7-3 (b) 所示为直

流供电情况。控制电流端并联，由电位器  $RP_1$ 、 $RP_2$  调节两个元件的输出霍尔电势，A、B 为输出端，显然，这种连接方式的输出电势为单片的两倍。

图 7-3 (c) 所示为交流供电情况。控制电流端串联，各元件输出端接变压器的初级绕组，变压器的次级绕组上输出的是霍尔电势信号的叠加值。

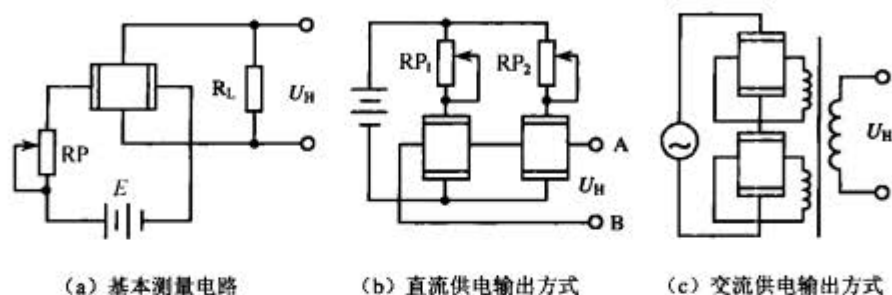


图 7-3 霍尔元件的输出连接方式

### 7.1.3 霍尔元件的技术参数

在实际使用霍尔元件时，还必须考虑以下的因素。

#### 1. 额定功耗 $P_0$

在环境温度  $25^\circ\text{C}$  时，允许通过霍尔元件的电流和电压的乘积称为霍尔元件的额定功耗。在实际应用中，总是希望获得较大的霍尔电压。增加控制电流虽然能提高霍尔电压输出，但控制电流太大，元件的功耗也增加，从而导致元件的温度升高，甚至可能烧毁元件。当供给霍尔元件的电压确定后，根据额定功耗  $P_0$  就可以确定额定控制电流。

#### 2. 输入电阻 $R_i$ 和输出电阻 $R_o$

$R_i$  是指两控制电极之间的电阻值， $R_o$  指霍尔元件输出电极间的电阻。 $R_i$ 、 $R_o$  可以在无磁场时用欧姆表等进行测量。

#### 3. 不等位电势 $U_0$

在额定控制电流  $I$  下，不加磁场时霍尔输出电极间的空载霍尔电势称为不等位电势，用  $U_0$  表示。 $U_0$  与  $I$  的比值称为不等位电阻，用  $R_0$  表示，即  $R_0 = U_0 / I$ 。

#### 4. 霍尔温度系数 $\alpha$

霍尔温度系数定义为在一定的磁感应强度和控制电流下，温度变化  $1^\circ\text{C}$  时霍尔电势变化的百分率，即

$$\alpha = \frac{U_{Ht} - U_{H0}}{U_{H0}} \cdot \frac{1}{t} \quad (7-13)$$

#### 5. 内阻温度系数 $\beta$

内阻温度系数定义为霍尔元件在无磁场及工作温度范围内，温度每变化  $1^\circ\text{C}$  时输入电阻

及输出电阻变化的百分率，即

$$\beta = \frac{R_{\alpha} - R_{\alpha 0}}{R_{\alpha 0}} \quad (7-14)$$

或

$$\beta = \frac{R_{\alpha 0} - R_{\alpha}}{R_{\alpha 0}} \quad (7-15)$$

## 6. 灵敏度 $K_H$

霍尔元件在单位控制电流和单位磁感应强度时产生的霍尔电压的大小称为霍尔元件的灵敏度。

### 7.1.4 霍尔元件的测量误差和补偿

在实际应用中，有许多因素会影响霍尔元件的测量精度，造成误差的主要原因一个是半导体的固有特性（主要是温度特性），另一个就是半导体制造工艺的缺陷，主要表现为零位误差和温度误差。

#### 1. 零位误差及补偿

零位误差是霍尔元件在不加磁场或不加控制电流时产生的霍尔电压，而等位电势是主要的零位误差。不等位电势是由于元件输出极焊接不对称、厚薄不均匀以及两个输出电极接触不良等原因造成的，如图 7-4 所示。

由于不等位电势与不等位电阻是对应的，因此，可以用分析其电阻的方法来进行补偿。控制电极 A、B 和输出电极 C、D 间分布的电阻用  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$  表示，可将它们视为电桥的四个臂，如图 7-5 所示。若  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ ，则电桥平衡，不等位电势  $U_0 = 0$ ；若存在零位电势，则说明电桥不平衡，可在某一桥臂上并联一个电阻，使电桥平衡，从而消除不等位电势。

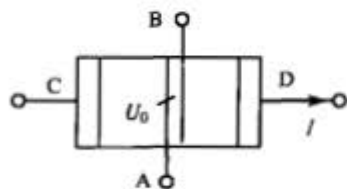


图 7-4 不等位电势

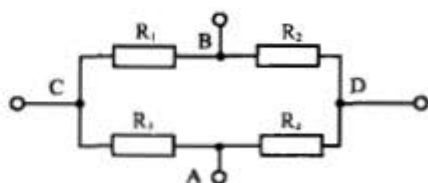


图 7-5 霍尔元件的等效电路

图 7-6 所示是几种常用的补偿方案，显然，方案图 7-6 (c) 调整起来比较方便。

#### 2. 温度误差及补偿

由于半导体的电阻率、迁移率以及载流子浓度等随温度的变化而变化，所以霍尔元件的灵敏度、内阻、输出电压等参数也将随温度而变化。不同材料制成的霍尔元件的灵敏度、内阻及霍尔电压随温度的变化情况有所不同。尤其是当温度高到一定程度时，这种变化相当大。因此，在使用霍尔元件测量时，对温度误差进行补偿是必需的。



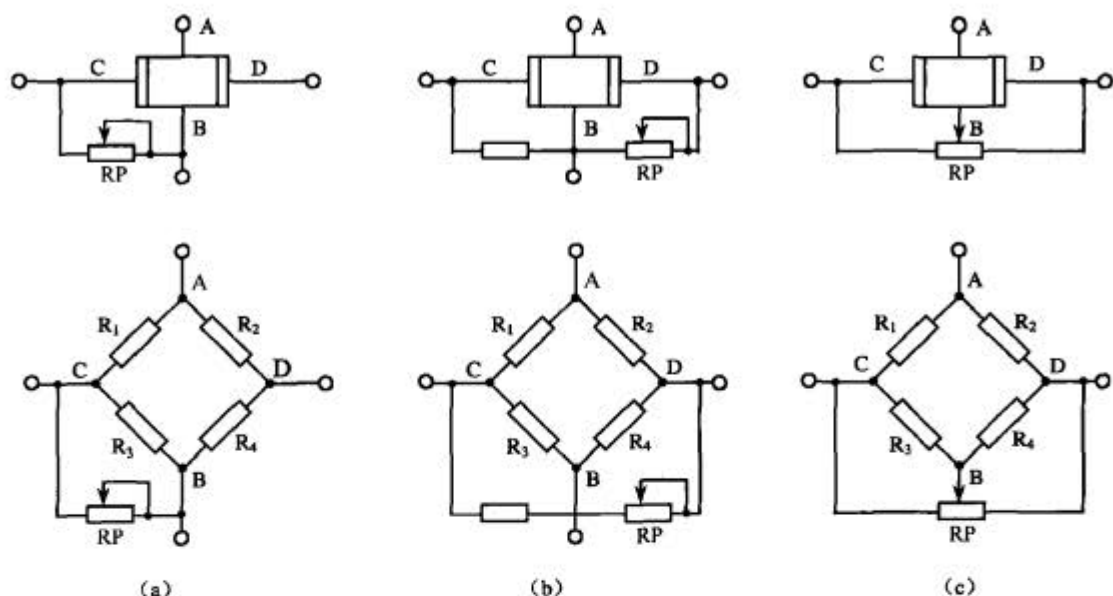


图 7-6 不等位电势补偿电路

霍尔元件温度补偿的方法很多, 下面介绍两种常用的方法。

(1) 利用输入回路的串联电阻进行补偿

图 7-7 (a) 所示是输入补偿的基本电路, 图中霍尔元件的两个输入端串联补偿电阻  $R$ , 并接恒电源  $E$ , 输出端开路。根据 (7-13) 式和 (7-14) 式, 元件霍尔系数和输入内阻与温度之间的关系式为

$$R_{Ht} = R_{H0}(1 + \alpha t)$$

$$R_{it} = R_{i0}(1 + \beta t)$$

式中:  $R_{Ht}$ 、 $R_{H0}$  是温度为  $t$  和  $0^\circ\text{C}$  时的霍尔系数;

$R_{it}$  和  $R_{i0}$  是温度为  $t$  和  $0^\circ\text{C}$  时的输入电阻;

$\alpha$  为霍尔电压的温度系数;

$\beta$  为输入电阻的温度系数。

由图 7-7 可知

$$I = \frac{E}{R + R_{it}}$$

则霍尔电压随温度变化的关系式为

$$U_H = \frac{R_{Ht}}{d} BI = \frac{R_{Ht}}{d} B \frac{E}{R + R_{it}}$$

对上式求温度的导数, 可得增量表达式

$$\begin{aligned} \frac{dU_H}{dt} &= \frac{R_{H0}}{d} BE \frac{(R + R_{i0})}{(R + R_{it})^2} \left( \alpha - \frac{\beta R_{i0}}{R + R_{i0}} \right) \\ &= \frac{R_{H0}}{d} B \frac{E}{(R + R_{i0})} \cdot \frac{(R + R_{i0})^2}{(R + R_{it})^2} \left( \alpha - \frac{\beta R_{i0}}{R + R_{i0}} \right) \end{aligned}$$

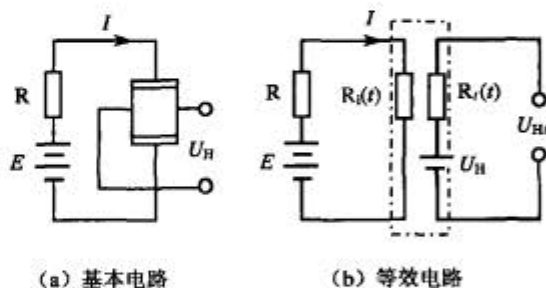


图 7-7 输入回路补偿

$$= U_{H0} \frac{(R + R_0)^2}{(R + R_L)^2} \left( \alpha - \frac{R_0 \beta}{R_0 + R} \right)$$

由上式可以看出, 要使温度变化时霍尔电压不变, 必须使  $\alpha - \frac{R_0 \beta}{R_0 + R} = 0$ 。

$$\text{即} \quad R = \frac{R_0(\beta - \alpha)}{\alpha} \quad (7-16)$$

上式说明, 当元件的  $\alpha$ 、 $\beta$  及内阻  $R_0$  确定后, 温度补偿电阻  $R$  的值便可求出。在实际应用中, 当霍尔元件选定后, 其  $\alpha$ 、 $\beta$  值可以从元件参数表中查出, 而元件内阻  $R_0$  则可通过测量得到。

### (2) 利用输出回路的负载进行补偿

图 7-8 (a) 所示是输出补偿的基本电路。霍尔元件的输入采用恒流源, 使控制电流  $I$  稳定不变。这样, 可以不考虑输入回路的温度影响。输出回路的输出电阻及霍尔电压与温度之间的关系为

$$R_\alpha = R_{\alpha 0}(1 + \beta t)$$

$$U_{Ht} = U_{H0}(1 + \alpha t)$$

式中:  $U_{Ht}$  和  $U_{H0}$  为温度  $t$  和  $0^\circ\text{C}$  时的霍尔电压;

$R_\alpha$  和  $R_{\alpha 0}$  为温度  $t$  和  $0^\circ\text{C}$  时的输出电阻。

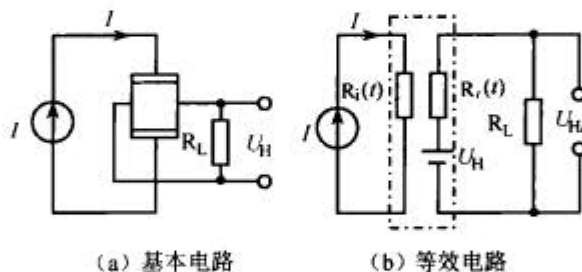


图 7-8 输出回路补偿

负载  $R_L$  上的电压  $U_L$  为

$$U_L = \frac{U_{H0}(1 + \alpha t)}{R_{\alpha 0}(1 + \beta t) + R_L} R_L$$

补偿电阻  $R_L$  上的电压随温度变化最小的极值条件为  $\frac{dU_L}{dt} = 0$ , 故对上式求导数并使其等于零, 得

$$\alpha[R_{\alpha 0}(1 + \beta t) + R_L] - \beta R_{\alpha 0}(1 + \alpha t) = 0$$

整理得

$$\frac{R_L}{R_{\alpha 0}} = \frac{\beta - \alpha}{\alpha} \quad (7-17)$$

将元件的  $\alpha$ 、 $\beta$  值代入 (7-17) 式, 根据  $R_{\alpha 0}$  的值就可确定补偿电阻  $R_L$  的值。当  $R_L = R_{\alpha 0}$  时, 补偿效果最好。

### (3) 利用恒流源进行补偿

当负载电阻比霍尔元件输出电阻大得多时, 输出电阻的变化对霍尔电压输出的影响很小。在这种情况下, 只考虑在输入端进行补偿即可。

若采用恒流源, 输入电阻随温度变化而引起的控制电流的变化极小, 从而减少了输入端



的温度影响。

#### (4) 利用热敏电阻进行补偿

对于用温度系数大的半导体材料制成的霍尔元件，常采用热敏电阻进行补偿。

若霍尔输出随温度升高而下降，只要能使控制电流随温度升高而上升，就能进行补偿。

如图 7-9 (a) 所示，在输入回路串入热敏电阻  $R_t$ ，当温度上升时其阻值下降，从而使控制电流上升。

也可在输出回路进行补偿，如图 7-9 (b) 所示。负载  $R_L$  上的霍尔电势随温度上升而下降的量被热敏电阻的阻值减小所补偿。实际使用时，热敏电阻最好与霍尔元件封在一起或靠近，使它们的温度变化一致。

#### (5) 利用补偿电桥进行补偿

电桥补偿电路如图 7-10 所示。在霍尔输出电极间串入一个调零电桥，电桥由温度系数很低的电阻构成，在某一桥臂电阻上并联一热敏电阻  $R_t$ 。在不加磁场时先调节电位器  $RP_1$ ，使霍尔输出电极间的电压为零，这样，就可以消除空载霍尔电势（即不等位电势）。 $RP_2$  为调节电阻，保证器件内所需的控制电流  $I$ 。  $RP_3$  可调整供桥电流的大小。

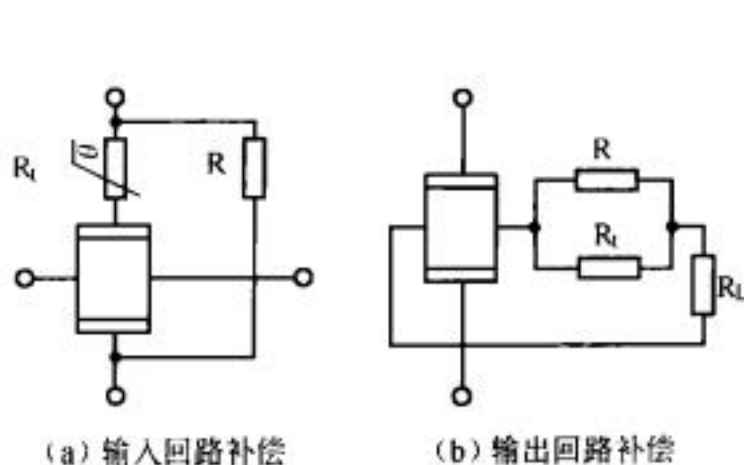


图 7-9 热敏电阻补偿

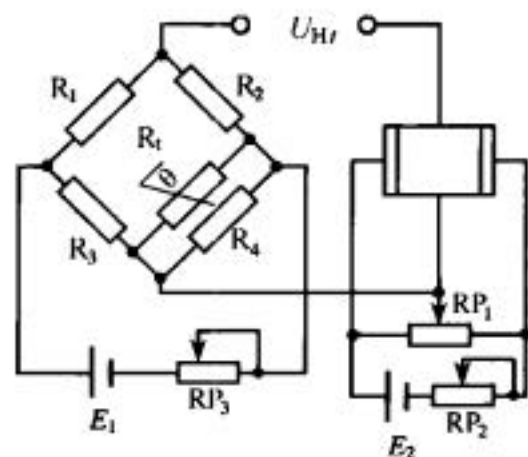


图 7-10 电桥补偿电路

当温度变化时，热敏电阻将随温度的变化而变化，使电桥的输出电压相应变化，只要仔细调节，即可补偿霍尔电势的变化，使其输出电压与温度基本无关。