

6.4 PN 结温度传感器

PN 结温度传感器是利用 PN 结的结电压随温度成近似线性变化这一特性实现对温度的检测、控制和补偿等功能。可直接用半导体二极管或将半导体三极管接成二极管(将三极管的集电极与基极短接,利用 be 结作为感温器件)做成 PN 结温度传感器。这种传感器的测温范围为 $-50\sim 150^{\circ}\text{C}$, 与其他的温度传感器相比有较好的线性度, 且尺寸小, 响应快, 灵敏度高, 热时间常数小, 因此用途较广。

6.4.1 温敏二极管、三极管

晶体二极管或三极管 PN 结的结电压是随温度变化的。例如硅管的 PN 结的结电压在温度每升高 1°C 时, 下降约 2mV (而一般热电偶的温度灵敏度仅为 $3\sim 50\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$), 在一定的电流模式下, PN 结的正向电压与温度之间的线性关系更接近理论推导值。例如砷化镓和硅温敏二极管在 $1\sim 400\text{K}$ 范围内的温度特性表现为良好的线性。

1. 温敏二极管的工作原理

根据 PN 结理论, 对于理想二极管, 其伏安特性可近似表示为

$$I_F = I_S \left[\exp\left(\frac{qU_F}{kT}\right) - 1 \right]$$

式中: I_F 为二极管的正向电流;

U_F 为二极管的正向外加电压;

q 为电子电量, $q=1.6\times 10^{-19}\text{C}$;

k 为波尔兹曼常数, $k=1.381\times 10^{-23}\text{J/K}$;

T 为热力学温度, 单位为 K;

I_S 为二极管的反向饱和电流, 且

$$I_S = B'T^{\gamma} \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) \quad (6-29)$$

式中: B' 为与温度无关并包含结面积 A 的常数;

γ 为与迁移率有关的常数;

E_g 为材料在绝对零度时的禁带宽度, 单位 eV。

只要满足正向电压 U_F 大于几个 kT/q , 其正向电流 I_F 与正向电压 U_F 及温度 T 之间的关系可表示为

$$I_F = I_S \exp\left(\frac{qU_F}{kT}\right) \quad (6-30)$$

把(6-30)式两边除以 I_S 后取对数, 得

$$\ln \frac{I_F}{I_S} = \frac{qU_F}{kT}$$

所以

$$\begin{aligned}
 U_F &= \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_F}{I_S}\right) = -\frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_S}{I_F}\right) = -\frac{kT}{q} \ln\left[\frac{B'T^\gamma \exp\left(-\frac{E_{g0}}{kT}\right)}{I_F}\right] \\
 &= -\frac{kT}{q} \ln\left(\frac{B'T^\gamma}{I_F}\right) - \frac{kT}{q} \left(-\frac{E_{g0}}{kT}\right) = \frac{E_{g0}}{q} - \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{B'T^\gamma}{I_F}\right) \\
 &= U_{g0} - \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{B'T^\gamma}{I_F}\right)
 \end{aligned}$$

即
$$U_F = U_{g0} - \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{B'T^\gamma}{I_F}\right) \quad (6-31)$$

式中: $U_{g0} = E_{g0}/e$ 。

(6-31)式表明: 在恒流供电条件下, PN 结的正向电压随温度的升高而线性下降, 呈负温度系数(只要它们工作在 PN 结空间电荷区中的复合电流和表面漏电流可以忽略), 这就是 PN 结测温的基本原理。

经研究表明, 对于锗和硅二极管, 在相当宽的一个温度范围内, 其正向电压与温度之间的关系与上式吻合。

对于不同的工作电流, 温敏二极管 U_F-T 的关系是不同的。 U_F-T 的特性还随 PN 结的材料而异, 但是它们的 U_F-T 之间总是线性关系。

值得注意的是, (6-31)式只对扩散电流成立, 但实际二极管的正向电流还包括空间电荷区中的复合电流和表面复合电流。这两种电流与温度的关系不同于扩散电流, 故实际二极管的电压-温度特性是偏离理想情况的。

2. 温敏三极管的工作原理

温敏三极管利用的是三极管发射结正向电压 U_{be} 随温度上升而下降的原理。在发射结正向偏置下, 虽然发射结电流也包括上述三种成分(即扩散电流、空间电荷的复合电流和表面复合电流), 但是只有其中的扩散电流能够到达集电极形成集电极电流 I_c , 而另外两种电流则作为基极电流漏掉。因此, 三极管的 I_c-U_{be} 关系比二极管的 I_F-U_F 关系更符合理想情况, 所以表现出更好的电压-温度线性关系。

对 NPN 型三极管, 其基极-发射极电压与温度 T 和 I_c 的函数关系为

$$U_{be} = U_{g0} - \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{B'T^\gamma}{I_c}\right) \quad (6-32)$$

若 I_c 恒定, 则 U_{be} 仅随温度 T 呈单调单值函数变化。

图 6-28 所示为温敏三极管的基本测温电路。电路中温敏三极管 VT 作为负反馈元件跨接在运算放大器 A 的反相输入端和输出端之间, 基极接地。这样发射结为正偏, 而集电结几乎为零偏, 使得集电结电流中不需要的空间电荷的复合电流和表面复合电流为零, 而发射结电流中的发射结空间电荷复合电流和表面漏电流作为基极电流流入地。因此, 集电极电流完全由扩散电流成分组成。集电极电流 I_c 只取决于集电极电阻 R_c 和电源 E , 保证了温敏三极管的 I_c 恒定。电容 C 的作用是防止寄生振荡。

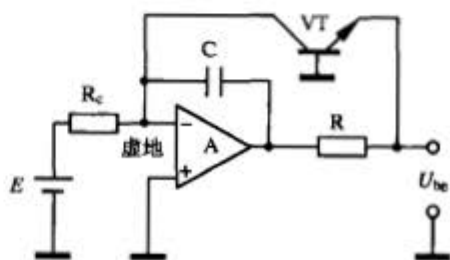


图 6-28 温敏三极管测温电路

6.4.2 集成温度传感器

集成温度传感器是将温敏三极管、传感驱动电路、信号处理电路等集成在同一芯片上的集成化温度传感器,封装后的组件体积非常小,因而使用方便,价格便宜。其中尤其线性度好及输出信号大且规范化、标准化是其他温度计无法比拟的。因此,它是现代半导体温度传感器的主要发展方向之一,目前,已经广泛用于 $-50 \sim +150^{\circ}\text{C}$ 温度范围内的温度监测、控制和补偿的许多场合。

1. 基本原理

由(6-32)式知,三极管的 U_{be} 在 I_c 恒定条件下,可认为与温度呈线性关系,但实际上该式中仍然存在非线性项。目前在集成温度传感器中均采用一对非常匹配的差分对管作为温度敏感元件,电路形式如图6-29所示,使其直接给出正比于热力学温度的严格的线性输出。

电路中 VT_1 、 VT_2 是两只结构和性能完全相同的三极管,它们分别在不同的集电极电流 I_{c1} 和 I_{c2} 下工作。由图可见,电阻 R_1 的电压应为 VT_1 、 VT_2 的基极-发射极电压差,即

$$\begin{aligned}\Delta U_{be} &= U_{be1} - U_{be2} \\ &= U_{g0} - \frac{kT}{q} \ln \frac{B'T'}{I_{c1}} - U_{g0} + \frac{kT}{q} \ln \frac{B'T'}{I_{c2}} \\ &= \frac{kT}{q} \ln \frac{I_{c1}}{I_{c2}}\end{aligned}$$

由于两管集电极面积相等,因此,集电极电流之比 I_{c1}/I_{c2} 应等于集电极电流密度比,上式可写成

$$\Delta U_{be} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{J_{c1}}{J_{c2}} \right) \quad (6-33)$$

式中: J_{c1} 、 J_{c2} 分别为 VT_1 、 VT_2 的集电极电流密度。

由此可见,只要保持两管的集电极电流密度之比不变, R_1 上的电压 ΔU_{be} 将正比于热力学温度 T 。

若两管增益很高,则基极电流可以忽略不计,那么集电极电流等于发射极电流,则

$$I_{c2} \approx I_{e2} = \frac{\Delta U_{be}}{R_1} = \frac{kT}{qR_1} \ln \left(\frac{J_{c1}}{J_{c2}} \right)$$

即 $I_{c2} \propto T$ 。

因此 R_2 上的电压也正比于热力学温度 T 。又因为 I_{c1}/I_{c2} 保持不变,则 $I_{c1} \propto T$,于是电路总电流 $I = (I_{c1} + I_{c2}) \propto T$ 。

2. 集成温度传感器的信号输出方式

集成温度传感器按输出信号可分为电压型、电流型和数字型三种,通常又把前两种称为模拟型,后一种称为智能型。

电压型的温度系数约为 10mV/K ,电流型的温度系数约为 $1\mu\text{A/K}$,这就很容易从它们

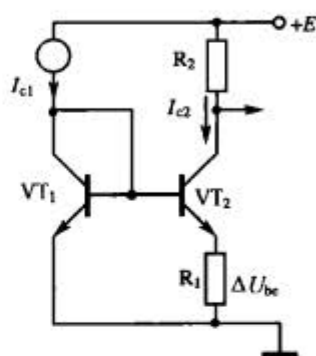


图 6-29 差分对管电路

输出信号的大小换算成热力学温度, 且其输出电压或电流与热力学温度为线性关系。

(1) 电流型集成温度传感器

电流镜 PTAT(Proportional To Absolute Temperature)电路是一种基本的电流型集成温度传感器, 如图 6-30 所示。该电路是在差分对管电路的基础上, 用两只结构完全对称的 PNP 管 VT_3 和 VT_4 分别与测温用的两只 NPN 管 VT_1 和 VT_2 串联组成所谓的电流镜电路。因两 PNP 管发射极偏压相同, 故流过 VT_1 和 VT_2 的集电极电流在任何温度下始终相等。

前面对 PTAT 核心电路作了两管增益无穷大的假设, 故可忽略 I_c 随集电极电压变化和基极电流的影响。为使 VT_1 、 VT_2 工作在不同的电流密度下, 两管必须采用不同的集电极面积。设计时, 使 VT_1 、 VT_2 的集电极面积之比 $\gamma=8$, 则两管的电流密度之比为其面积的反比。因此, 只要在电路两端施加高于 $2U_{be}$ 的电压, 在电阻 R_1 上的电压根据(6-33)式可得

$$\Delta U_{be} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{J_{c2}}{J_{c1}}\right) = \frac{kT}{q} \ln\gamma = \frac{kT}{q} \ln 8$$

故流过该电路的总电流为

$$I = 2I_1 = 2I_2 = \frac{2\Delta U_{be}}{R_1} = \frac{2kT}{qR_1} \ln 8 \quad (6-34)$$

式中: I_1 、 I_2 为流过该电路的左、右两支路的电流。

若电阻 R_1 的温度系数为零, 则电路的总电流正比于热力学温度。若取 $R_1 = 358\Omega$, 代入(6-34)式可求得电路的输出灵敏度为 $1\mu A/K$ 。

美国 AD 公司生产的 AD590、我国生产的 SG590 都是典型的电流输出型温度传感器。它们的基本电路与图 6-30 一样, 只是增加了一些附加电路以提高其性能。

(2) 电压型集成温度传感器

在电流镜 PTAT 电路上加一个和 VT_3 、 VT_4 相同的 PNP 管 VT_5 (VT_3 、 VT_4 、 VT_5 组成恒流源)和一只电阻 R_2 , 就构成了一种电压输出型的集成温度传感器的基本电路, 如图 6-31 所示。

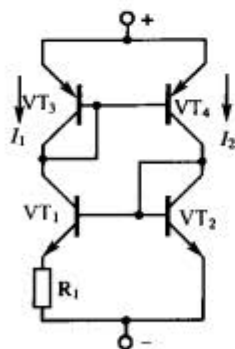


图 6-30 电流输出型电路

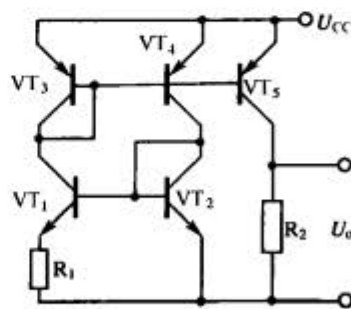


图 6-31 电压输出型电路

由于 VT_5 的发射极电压与 VT_3 、 VT_4 相同, 所以流过 VT_5 和 R_2 支路的电流与另两支路电流相等, 因此输出电压为

$$U_o = I_2 R_2 = \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{kT}{q} \ln \gamma \quad (6-35)$$

由此可见, 只要 R_1/R_2 为一常数, 就可以得到正比于热力学温度的输出电压 U_o , 输出

电压的温度灵敏度可由 R_1/R_2 和 γ 来调整。