

晶体管继电保护温度补偿问题探讨

北京电力自动化设备厂 李素蕊

温度补偿问题和抗干扰问题是晶体管保护设计者必须解决的两大问题。完善的温度补偿措施,可减少继电保护装置的整定值温度误差,提高保护装置的质量指标和运行可靠性。因此,探讨晶体管继电保护的补偿问题,就成了继电保护设计者和调试者所共同关心的问题。本文就晶体管保护的补偿问题,提出几种行之有效的补偿措施,作为抛砖引玉之用。

温度误差的由来

要解决晶体管保护整定值的温度误差问题,首先必须了解温度误差的成因,然后才能对症下药,采取对策进行温度补偿。下面分别就交流回路和直流回路的温度误差成因进行分析:

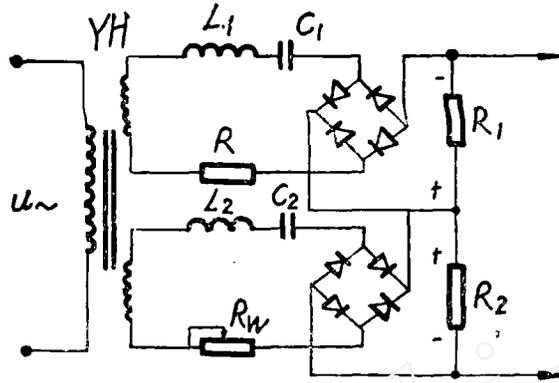
一、交流回路:

一般的电流、电压继电器和相位比较原理继电保护装置的交流回路受温度影响对保护整定值的影响都不大(一般小于保护整定值的5%)。但如果交流回路采用谐振回路又利用绝对值比较原理构成继电保护装置者,交流回路参数的温度误差对保护整定值的影响就能大到不能允许的地步。如我厂生产的“JGB—1”型二次谐波制动的差动保护由于交流回路采用了并联谐振,致使保护整定值的温度误差高达10%;JPJH—1型按频率自动减负荷装置的交流回路由于采用了双谐振回路,致使频率动作值的温度误差超过0.25HZ。下面分别介绍这两套装置的动作原理并分析其温度误差成因:

(一)装置动作原理。

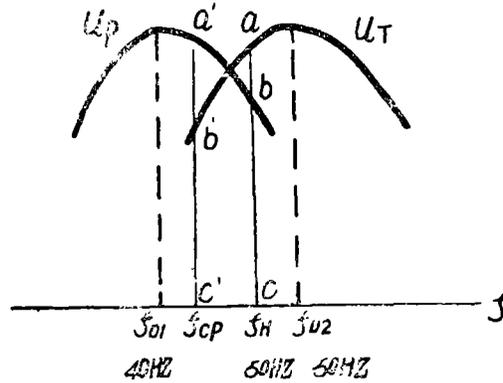
(1) JPJH型按频率自动减负荷装置:

JPJH型装置的交流回路系采用双谐振回路。如(图一)所示。电源变压器YH二次有两个线圈。一个线圈和电感 L_1 、电容 C_1 、电阻 R 串联组成40HZ谐振回路;另一个线圈和电感 L_2 、电容 C_2 、电位器 RW 串联组成55HZ谐振回路。 R_1R_2 分别为两回路的负荷电阻。40HZ串联谐振回路的电流在负荷电阻 R_1 上的电压降落形成动作电压 u_p ;而55HZ串联谐振回路的电流在其负荷电阻 R_2 上的电压降落则形成制动电压 u_T 利用绝对值比较原理,正常运行时 $u_T \geq u_p$ 装置制动。故障时,当频率降低至频率动作值时,装置动作。其动作原理可用谐振曲线图解说明如下:



图一 JPH装置交流回路

(图二)中 $u_p = \phi(f)$ 曲线为40HZ谐振曲线; $u_T = \phi(f)$ 为55HZ谐振曲线。正常运行时对应工频 $f = 50\text{HZ}$ 时之 u_p , u_T 分别为线段 bc 和 ac 此时 $u_p \leq u_T$ ($bc < ac$) 装置制动。



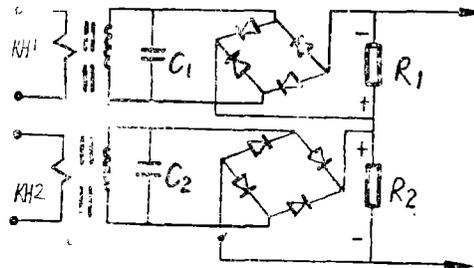
图二 双谐振回路的谐振曲线

故障时,当频率降低至装置的动作频率 f_{cp} 时, f_{cp} 所对应的 u_p , u_T 如图中 $b'c'$ 和 $a'c'$ 线段所示, $u_p > u_T$, 且 $u_p - u_T$ 差值(对应 $a'b'$ 线段)等于或大于逻辑回路动作电压, 故装置动作。

(2) JGB—1型二次谐波制动的差动保护:

JGB—1型差动保护也是按绝对值比较原理构成。其交流回路如(图三)所示。

电抗变压器 KH_1 , KH_2 一次线圈串联接于差流回路。 KH_1 的二次线圈和电容 C_1 并联,组成50HZ谐振回路,



图三 JGB—1型差动保护交流回路

经整流后加至负荷电阻 R_1 上构成动作电压 u_p ， KH_2 的二次线圈和电容 C_2 并联组成100HZ谐振回路，经整流后加至负荷电阻 R_2 上构成制动电压 u_T 正常运行时因无差流，装置不会动作。内部故障时50HZ谐振回路输出电压大于100HZ谐振回路输出的制动电压，故保护动作。变压器空载投入或外部故障切除时，由二次谐波分量制动，故装置不会误动作。

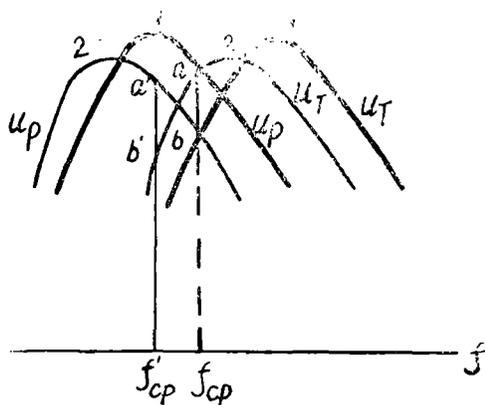
(二) 交流回路参数的温度误差对保护整定值的影响分析：

(1) 电容：一般金属纸介电容为正温度系数，当温度升高时，其电容量随温度升高而增大。根据谐振频率公式： $f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ ，当电容量随温度升高而增大时，将造

成谐振频率 f_o 的降低。其结果对“JPJH”装置来说是引起动作频率值的下降，对JGB—1差动保护来说是造成动作电流的增大。这可分别用谐振曲线的偏移图解说明如下：

(A) “JPJH”按频率减负荷装置

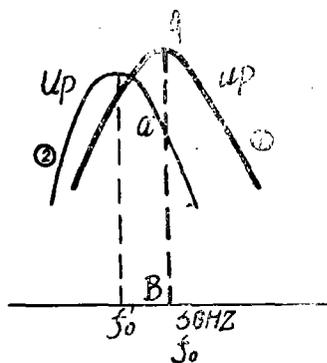
设常温时的谐振曲线为1—1，频率动作值为(图四)中 ab 线段所对应的 f_{cp} 当电容 C_1C_2 随温度升高而增大时，谐振曲线便由1—1变成2—2，相应地动作频率也由 f_{cp} 降至 $a'b'$ 线段所对应的 f'_{cp} 。(线段 $a'b'$ 和 ab 长度相等，都对应于逻辑回路的动作电压)。这就造成了频率动作值的温度误差。其变化规律为：温度升高，频率动作值下降；温度降低，频率动作值升高。



图四 温度变化时的谐振曲线

(B) JGB—1型差动保护：

设常温时50HZ谐振曲线为曲线①，对应工频 $f = 50HZ$ 时的动作电压 u_p 为线段 AB 。当温度升高时，谐振频率由 f_o 下降至 f_o' ，相应的谐振曲线为曲线②。此时对应工频 $f = 50HZ$ 时的动作电压 u_p 为线段 aB ，显然，线段 $aB < AB$ ，动作电压随温度升高而变小，使保护不易起动。



图五 50HZ谐振曲线

而在100HZ谐振制动回路，由于温度升高，谐振频率由100HZ降为 f_o' ，谐振曲线由曲线①变成曲线②，对应工频 $f = 50HZ$ 时，制动电压也由 AB 变为 aB ，显然， $aB > AB$ ，故制动

电压 u_T 随温度升高而变大,使保护不易起动。由于温度升高时,动作电压变小,制动电压变大,故保护的動作电流随温度升高而变大。这就形成了JGB—1差动保护整定值的温度误差。其变化规律为:温度升高,保护动作值增大;温度降低,保护动作值下降。

(2) 电感:

$$\text{电感的表示式为: } L = K \frac{W^2 D^2}{l}$$

式中: K 为比例系数

W 为线圈匝数

D 为线圈直径

l 为线圈长度

当温度升高时,由于漆包线和线圈骨架的热膨胀,使 D 和 l 增大,但因电感 L 正比于

D^2 ,故 D 对 L 的影响更大,故电感量随温度升高而增大。根据谐振频率公式: $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$

电感随温度增大的结果会导致谐振频率的下降。其对JPJH装置和JGB—1差动保护的影响和电容一样。(分析见上)

(3) 漆包线电阻: 漆包线的温度系数亦为正温度系数。一般继电保护用的高强度漆包线QZ(或QQ)的温度系数为0.004。当温度升高时,漆包线电阻随温度升高而增大,相应地引起动作回路和制动回路电流的变化其变化规律为:温度升高,动作回路电阻值增加,动作电流下降,从而引起JPJH装置动作频率值下降,JGB—1型差动保护动作电流值增大;但温度升高,又使得制动回路电阻值增大,制动电流下降,从而引起JPJH装置动作频率值上升;JGB—1差动保护动作电流下降。

二、直流回路:

如所周知,晶体二极管、三极管的管压降 u ,三极管的放大系数 β ,集电极的反向饱和电流 I_{c0} 随温度变化而变化,其变化规律是:

晶体管管压降 u 随温度升高而降低,其温度特性为: $\frac{du}{dT} = -(1.8 \sim 2.5) \text{ mV}/^\circ\text{C}$

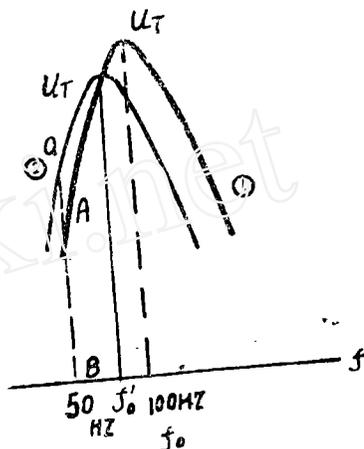
即:温度每升高 1°C ,管压降就要降低 2 mV 左右。

晶体管放大系数 β 随温度升高而增大。

$$C = \frac{1}{\beta} \frac{d\beta}{dT} = (0.5\% \sim 1\%) / ^\circ\text{C}$$

即:温度每升高 1°C ,晶体管放大系数就要增加 0.5% 至 1% 。

晶体管的集电极反向饱和电流 I_{c0} 随温度升高而增大。硅管的 I_{c0} 温度每升高 8°C 数值增大一倍,锗管的 I_{c0} 温度每升高 12°C 数值约增大一倍。两者的 I_{c0} 基本上随温度变化按指数规律增加。近似地可用公式表示如下:



图六 100Hz 谐振曲线

$$I_{cb0} = I_{cb0} (T = 25^\circ\text{C}) e^{K(T-25)}$$

T : 任意温度, T_0 : 25°C 室温。

K : 温度系数。锗管: $K = 0.08/^\circ\text{C}$

硅管: $K = 0.12/^\circ\text{C}$

晶体管保护的直流逻辑回路通常采用单稳态触发器或施密特触发器作为起动回路。单稳态触发器第一级三极管一般为导通管。温度升高时, 发射结管压降 u_{be} 降低, 从而基极电流 I_b 增大, $I_b = \frac{E - u_{be}}{R_b}$, I_b 的增大加深了第一级导通管 S_1 的饱和深度, 使触发器难于翻转, 因此使保护动作值 I_{CP} 增大。

温度升高时, 晶体管放大系数 β 增大, 也使 S_1 的饱和深度加深, 从而也使保护动作值 I_{CP} 增大。

温度升高时, 集电极反向饱和电流 I_{cb0} 增大使 S_1 管导通得更好, 从而也使保护动作值 I_{CP} 增大。

施密特触发器第一级管一般为截止管, 受温度的影响和导通管相反。温度升高时, S_1 管 u_{be} 减少, I_b 增大, 使 S_1 容易导通, 从而使保护动作电流值减小。

温度补偿措施

找到温度误差原因后, 即可着手进行温度补偿。一般属于交流回路的温度误差适于在交流回路进行温度补偿。属于直流回路的温度误差适于在直流回路进行温度补偿。

一、交流回路的温度补偿:

(1) 将谐振回路的电容换成涤纶电容: 涤纶电容的温度系数很小, 约为 $(1.5 \sim 5) \times 10^{-4}$ 。将金属纸介电容换成涤纶电容后, 可大大地减少交流回路参数的温度误差对保护动作值的影响, 如我厂生产的 JPH 型按频率自动减负荷装置的交流回路的电容 $C_1 C_2$ 由金属纸介电容换成涤纶电容后, 频率动作值的温度误差即由 0.25HZ 降为 0.15HZ 。

交流回路采用温度系数小的元件, 是减小保护整定值误差的根本方法。应首先考虑之。

(2) 在动作回路串进温度系数为负电阻元件: 使温度升高时, 动作回路电阻减小, 动作电流增加, 从而使保护起动电流下降, 起到温度补偿作用。

负温度系数的电阻元件有:

(A) 热敏电阻: 热敏电阻阻值随温度升高而降低, 其特性如下式所示:

$$R = R_\infty e^{\frac{B}{T}} \dots\dots\dots (1)$$

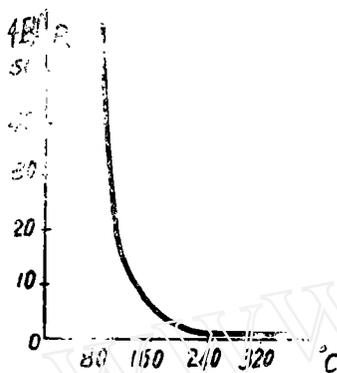
式中:

T ——绝对温度

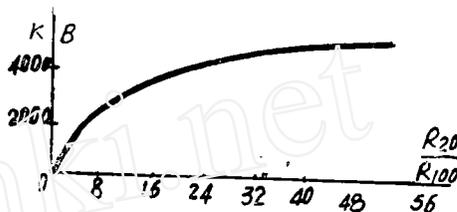
R ——在该温度下热敏电阻的阻值 (欧)

R_∞ 和 B ——对该热敏电阻为恒定的数

如给定两个已知的电阻值 R_1, R_2 及相应的温度值 T_1, T_2 , 便可以利用①式计算 R_∞ 和 B 。



图七 热敏电阻温度特性



图八 按热敏电阻的电阻倍数确定温度特性的系数B的曲线

$$B = \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \ln \frac{R_1}{R_2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$R_\infty = R_1 e^{-\frac{B}{T_1}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

通常取 20°C 时的热敏电阻为 R_1 (记作 R_{20})， 100°C 时的热敏电阻为 R_2 (记作 R_{100}) 此时 $T_1 = 293^\circ\text{K}$ ， $T_2 = 373^\circ\text{K}$ ，代入式(2)则可求得：

$$B = 1365 \ln \frac{R_{20}}{R_{100}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

其关系特性如(图八)所示。

如已知某一温度值 T_1 时的热敏电阻值 R_1 ，也可利用式(5)求 T_2 温度时的热敏电阻值 R_2

$$R_2 = R_1 e^{\left(\frac{B}{T_2} - \frac{B}{T_1}\right)} \quad \dots\dots\dots (5)$$

将热敏电阻和金属膜电阻并联，可以调节其温度特性，以取得合乎需要的温度特性。其变化规律为：和热敏电阻并联的金属膜电阻阻值愈小，并联合成的电阻阻值 R_x 随温度变化也愈小，即 $R_x = f(T)$ 特性曲线愈平缓。(图九)示出 $R_x = f(T)$ 特性曲线。曲线①表示100欧姆的热敏电阻和100欧姆的金属膜电阻并联的 $R_x = f(T)$ 特性曲线；曲线②表示100欧姆的热敏电阻和220欧姆的金属膜电阻并联的 $R_x = f(T)$ 特性曲线。由图可见，曲线(2)比曲线(1)平缓。

使用热敏电阻时要注意不要超过其规定容许温度，因超过了容许温度，半导体中就会发生不可逆变化而使热敏电阻破坏。

(B) 碳膜电阻：碳膜电阻为负温度系数。串在动作回路可使动作电流随温度升高

而增大，从而使电流动作值下降，起到温度补偿作用。

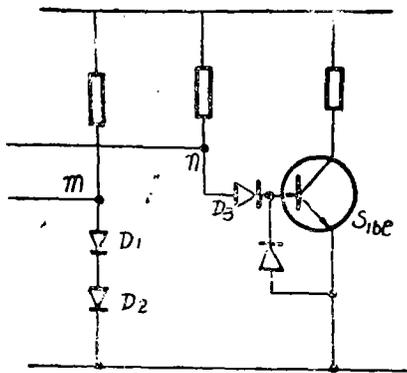
(3) 在制动回路串进温度系数为正值元件：使温度升高时，制动回路电阻增加，制动电流 I_T 下降，从而使保护动作电流值减少。起到温度补偿作用。

漆包线的阻值随温度升高而增大。将制动回路的漆包线电阻值制作得大于动作回路的漆包线电阻值，可以起到温度补偿作用。这对于温度误差要求极高的装置尤其适用。如我厂生产JPTB型按频率自动减负荷装置就是利用双谐振回路漆包线电阻值随温度变化对频率动作值的相反作用，将制动回路(55HZ谐振回路)的漆包线电阻制作成比动作回路(40HZ谐振回路)的漆包线电阻大一适当值，从而达到在温度从 -20°C 至 $+50^{\circ}\text{C}$ 的变化范围内，频率动作值的温度误差不超过 0.05HZ 的高标准。

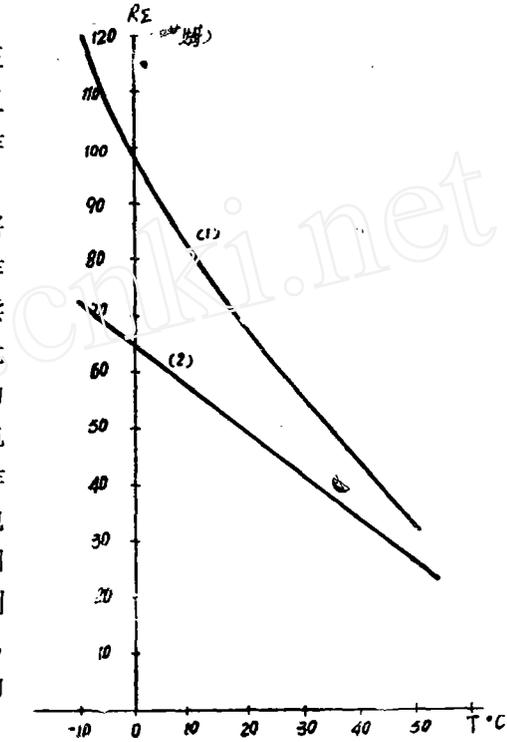
二、直流回路的温度补偿：

晶体管的管压降、放大系数 β 和集电极反向饱和电流 I_{c0} 随温度变化而变化。

在使用硅管的直流逻辑回路中，主要影响继电保护整定值温度误差的是晶体管管压降随温度的变化。因此直流逻辑回路的温度补偿措施一般是采用同样材料的二极管或三极管加在相应回路里进行温度补偿。下面举几个例子来说明：



图十 零指示器



图九 热敏电阻和金属膜电阻并联合成电阻的温度特性 $R_{\Sigma} = f(T)$

(1) 零指示器：根据克氏第二定理，零指示器应满足：

$$u_{D1} + u_{D2} = u_{D3} + u_{e1be}$$

当温度变化时，晶体管管压降随温度升高而降低。二极管和三极管的管压降温度特性基本相同。因此可选取和 D_3 、 S_1 材料相同、温度特性一样的二极管 D_1 、 D_2 ，使温度变化时，满足：

$$\Delta u_{D1} + \Delta u_{D2} = \Delta u_{D3} + \Delta u_{e1be}$$

则触发器在温度变化时，仍保持为零指示器。

$$\text{即： } u'_{D1} + u'_{D2} = u'_{D3} + u'_{e1be}$$

式中： u'_{D1} 、 u'_{D2} 、 u'_{D3} 、 u'_{e1be} 为温度变化时相

应的管压降。可达到温度补偿目的。

(2) 单稳态触发器:

根据克氏第二定律, 单稳态触发器应满足下式:

$$u_m - u_n = u_{D1} + u_R - [(-u_{D2}) + u_{D3} + u_{i1bc}]$$

$$\text{或 } u_m - u_n = u_{D1} + u_R + u_{D2} - u_{D3} - u_{i1bc}$$

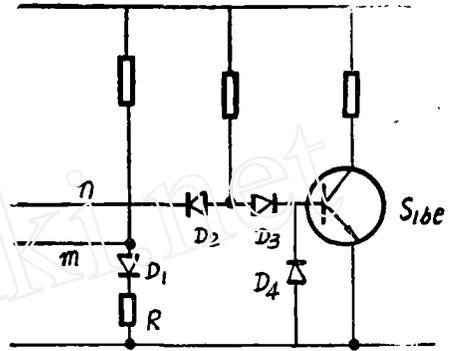
选取和 D_3 、 S_1 材料相同的二极管 D_1 、 D_2 , 使温度变化时满足:

$$\begin{aligned} \Delta u_m - \Delta u_n &= \Delta u_{D1} + \Delta u_{D2} - \Delta u_{D3} \\ -\Delta u_{i1bc} &= 0 \end{aligned}$$

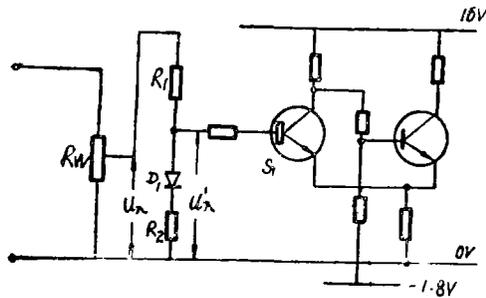
(因金属膜电阻的温度系数很小, 其温度误差可忽略, 故考虑 $\Delta I \cdot R = 0$)

可起到温度变化时补偿 D_3 、 S_1 管压降随温度变化的作用。

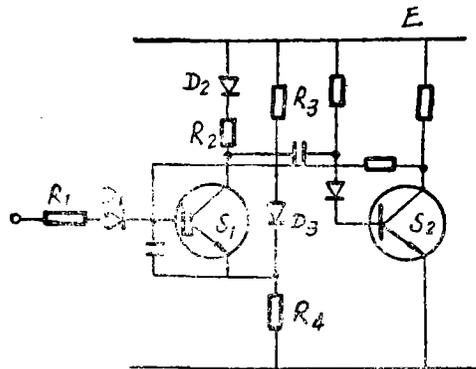
(3) 施密特触发器: 施密特触发器第一级管为截止管, 当温度升高时, u_{i1bc} 减小, 而使基流 I_b 增大 (在同样的输入电压下) 使管子 S_1 容易导通, 从而引起动作电流 I_c 下降。利用同样材料的二极管 D_1 接在输入回路和电阻 R_1 、 R_2 组成分压器, 再和定值电位器 R_n 并联, 使在温度升高时, 由于 D_1 管压降减少, 加至 S_1 发射结的分压 u'_1 也随之减小 (见下式)



图十一 单稳态触发器



图十二 施密特触发器



图十三 具有自保持时间的单稳态触发器

$$u'_1 = u_1 \frac{R_{D1} + R_2}{R_1 + R_2 + R_{D1}}$$

使 S_1 不易导通, 从而起到温度补偿作用。

(4) 具有自保持时间特性的单稳态触发器:

由 (图十三) 得知, 第一级晶体管 S_1 为截止管。当温度升高时由于 u_{i1bc} 减少而使基流增大, 使 S_1 管子容易导通, 而使动作电流值减小。利用和 S_1 同样材料的二极管 D_3 、和 R_3 、

R_4 组成分压器，当温度升高时， D_3 管压降减小，根据公式：

$$u_{R4} = E \frac{R_4}{R_3 + R_4 + R_{D3}}$$

电阻 R_4 上的分压增加，则 S_1 发射极上电位增加，因而使加至 S_1 发射结的电压减少（在同样的输入电压下）使 S_1 不易导通，从而起到温度补偿作用。

（5）分差放大器：

利用同样材料、温度特性相同的三极管 $S_1 S_2$ 组成分差放大器，使在温度变化时，满足 $\Delta u_{1be} = \Delta u_{2be}$ 则可起到良好的温度补偿作用。由于分差放大器是用三极管的温度特性补偿三极管的温度变化，所以可以对管压降，放大系数 β 和集电极反向饱和电流即随温度的变化即能起到完全的补偿作用，从而得到良好的温度特性。

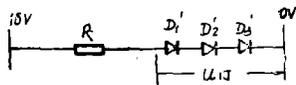
以上是对晶体管管压降进行温度补偿的几种电路。

至于晶体管的放大系数随温度变化对保护整定值的影响，由于放大系数 β 的温度系数 C 分散性较大，同一型号、 β 值相同的管子、温度系数可以差别很大，因此可以选取 β 温度系数小的管子用于起动回路，以减小保护整定值的温度误差。

至于对集电极反向饱和电流 I_{cb} 的温度补偿，由于硅管 I_{cb} 很小（一般小于一微安）可忽略不计。不过接于 S_1 射基极的反向接法的二极管 D_4 （见图十一）由于材料和 S_1 相同，其反向饱和电流的温度特性和 S_1 也相同，因此对 S_1 的反向饱和电流也能起到补偿作用。

对于温度误差要求高的装置，也可加强门槛电压的温度变化来补偿晶体管管压降，放大系数 β 、和集电极反向饱和电流 I_{cb} 随温度的变化方法有：

（A）在门槛支路用多个锗管代替硅管：如在（图十）的零指示器的门槛支路里用三个锗管代替二个硅管，如（图十五）所示：



图十五 由三个锗管组成门槛电压

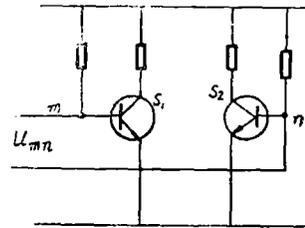
锗管的管压降约为 0.2~0.3 伏，硅管的管压降约为 0.6~0.7 伏。调节门槛支路的电阻 R ，可调节锗管的管压降，使由三个锗管组成的门槛电压等于由二个硅管组成的门槛电压：

$$u_{17} = u_{D1'} + u_{D2'} + u_{D3'} = u_{D1} + u_{D2}$$

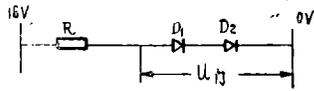
使触发器仍是零指示器。锗管管压降随温度变化的规律虽然和硅管差不多（锗管管压降的温度特性约为 $-2.1mV/^\circ C$ ，硅管的温度特性约为 $-1.8mV/^\circ C$ ），但由于锗管数目比硅管多，故在温度变化时，可使门槛电压的变化大于二极管 D_3 加三极管 S_1 发射结管压降的变化： $\Delta u_{17} > \Delta u_{D3} + \Delta u_{1be}$ 。当温度升高时，门槛电压下降得较多，从而使保护起动电流值下降较多，而起到温度补偿作用。

（B）门槛支路用热敏电阻和金属膜电阻并联组成门槛电压，如（图十七）所示：

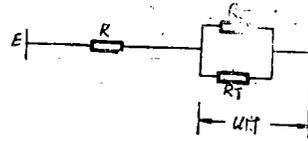
$$u_{17} = E \frac{R_{并}}{R + R_{并}}$$



图十四 分差放大器



图十六 由二个硅管组成门槛电压



图十七

式中：
$$R_{\text{并}} = \frac{R_T R_J}{R_T + R_J}$$

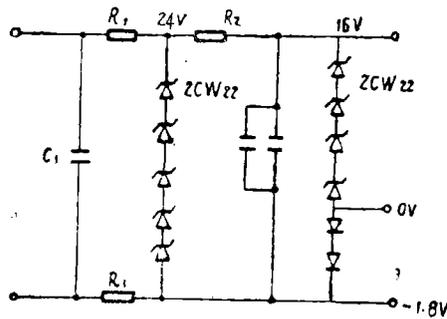
R_T ——热敏电阻

R_J ——金属膜电阻

当温度升高时，由热敏电阻和金属膜电阻并联组成的合成电阻 $R_{\text{并}}$ 阻值减小，因而门槛电压减小，使保护起动电流值下降，从而起到温度补偿作用。

三、稳压电源的温度补偿：

稳压二极管的管压降的温度特性和齐纳电压值有关。当齐纳电压高于5.6伏时，其电压温度系数为正值，而当齐纳电压低于5.6伏时，其电压温度系数则为负值。用齐纳电压接近5.6伏的稳压管组成继电保护的稳压电源，可以避免稳压电源的温度误差影响保护整定值的温度误差。如用齐纳电压低于5.6伏的稳压管组成保护的稳压电源，还可适当补偿直流逻辑回路因晶体管管压降，放大系数、集电极反向饱和电流随温度变化引起的保护动作值的温度误差。如我厂生产的JPJH型按频率自动减负荷装置的稳压电源，采用了2CW22稳压管稳压（2CW22的齐纳电压为3.2~4.5伏，电压温度系数为 $-0.05 \sim -0.03\%/^{\circ}\text{C}$ ）取得了较好的温度特性。



图十八 JPJH装置的稳压电源