

晶体管用的恒温器¹⁾

陳 由 迪

摘 要

在恒温器的温度检测元件方面,本文研究了晶体管反向电流的爬行现象,以及热敏电阻的挑选原则。对恒温器的过渡过程作了近似分析,并提出了测定时间常数的简便方法。给出了几个试验性装置的实验结果。

一、概 述

晶体管恒温器被用来供给晶体管一个具有稳定温度的环境,以便改善晶体管装置的温度特性。晶体管恒温器的结构原理如图1所示。图中金属块1用导热性良好的材料

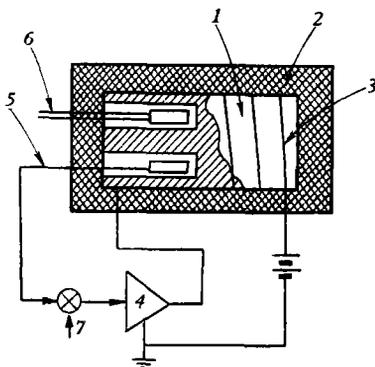


图1. 晶体管恒温器结构原理图

1—金属块; 2—隔热材料; 3—加热电阻丝; 4—直流放大器; 5—温度检测元件; 6—被恒温的晶体管; 7—比较讯号。

(通常是铝或铜)做成,在它的几个孔眼中放置被恒温的晶体管和温度检测元件。检测元件按照金属块的温度给出温度讯号,这一讯号与比较讯号7的差值经过直流放大器在加热电阻丝3上产生相应的加热电流,用以改变金属块的温度。这样就构成了温度控制回路。当控制回路的增益足够大时,即使环境温度有较大的变化,也能保证金属块的温度为恒定^[1,2,3]。本文研究的恒温器只要求放置一二个晶体管,结构简单。文中着重研究了温度检测元件和过渡过程两个主要问题。

二、温度检测元件的研究

我们选用了热敏电阻和晶体管两种元件作为检测元件。用晶体管作检测元件时,可利用它的 I_{CEO} -温度特性和 V_{BE} -温度特性^{2)[4]}。我们的恒温器是用于某一固定温度。由于利用 I_{CEO} -温度特性的检测方式比利用 V_{BE} -温度特性的检测方式在电路上要简单些,并且灵敏度也较高,故在使用晶体管作检测元件时,是利用它的 I_{CEO} -温度特性的。

1. 晶体管反向电流 I_{CEO} 爬行现象的研究

实验中发现,在一定温度下,给晶体管加上固定的反向电压后, I_{CEO} 会随时间作缓慢的变化,而经过相当长的时间才能到达稳定值,这种现象被称为“爬行”。图2(a)、(b)示出了几种管子的 I_{CEO} 爬行曲线。若以达到偏离稳定值1%的那个时刻计算,则稳定时间分别为:

1) 本文曾在1963年7月中国自动化学会模拟技术和运动技术学术会议上宣读。
2) I_{CEO} 是基极开路时的反向电流, V_{BE} 是基极与发射极间的电压。

| | | | |
|-----------|-------|-------|-------|
| GT792-(1) | 60 分, | GET4 | 45 分, |
| GT792-(2) | 70 分, | OC70 | 70 分, |
| GT792-(3) | 27 分, | 2NJ5A | 90 分, |
| GT792-(4) | 55 分, | П13 | 70 分. |

其它晶体管如 ZK356、104NU70、2N445 等也都发现有爬行现象。与图 2 曲线中 I_{CEO} 随时间增长的情况相反, 有少数管子的 I_{CEO} 则是随时间作衰减变化的。与 I_{CEO} 相仿, I_{CBO} ¹⁾ 也存在有爬行现象。

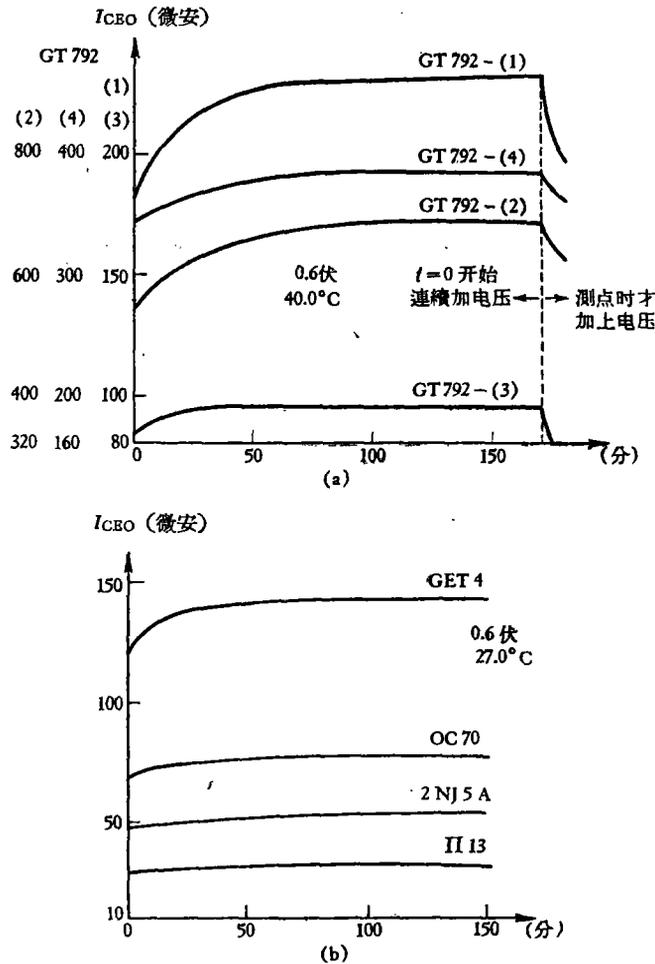


图 2. 几种管子的 I_{CBO} 爬行曲线

当在晶体管上加一持续的电压后, 在管子上将有一定的消耗功率被转化为热。爬行现象是不是这种热积累所引起的, 这可从图 3 所给出的 4 个 GT792 在连续加压和间断加压下的 I_{CEO} -温度特性中作出判断。在连续加压下, 晶体管在测量开始前 12 小时就预先被加上电压, 此电压一直持续到测量结束后为止, 故所测得的 I_{CEO} 是各个温度下爬行结束

1) I_{CBO} 是发射极开路时的反向电流。

后的稳定值。在间断加压测量时,电压只在测点的时刻才加上,故所测得的 I_{CEO} 是爬行的起始值。如果爬行的原因是热积累,那么在固定电压下决定 I_{CEO} 值的唯一因素是晶体管结的温度。在间断加压下,管子的平均功率消耗极微,结的温度等于管子的环境温度;而在连续加压下,由于管子消耗一定的功率,结的温度将高于环境温度。以 GT792-(2) 为例,从图 3 可看出环境温度为 40.0°C 时连续加压下的 I_{CEO} 值(=680 微安)与环境温度为 42.6°C 时间断加压下的 I_{CEO} 值相等。这两种情况下的 I_{CEO} 既相等,故晶体管结的温度应都等于 42.6°C ,而管子的热阻值则应等于

$$(42.6^{\circ}\text{C}-40.0^{\circ}\text{C})/0.6 \text{ 伏} \times 680 \text{ 微安} = 5.4^{\circ}\text{C}/\text{毫瓦}.$$

这个数值显然大得不合理,故可断定爬行的原因不是热积累。爬行的真正原因迄今尚未研究清楚。Makoto Kikuchi^[5] 曾研究了老管子反向电流的爬行,推论是由于晶体管表面场效应所引起。不过他提到新管子中没有这种现象,而在我们的试验中被测试的管子大多数都是新的,但仍有爬行现象。 I_{CEO} 的爬行现象使得在采用这种检测方式的恒温器中,在过渡过程后还有一段温度爬行过程。

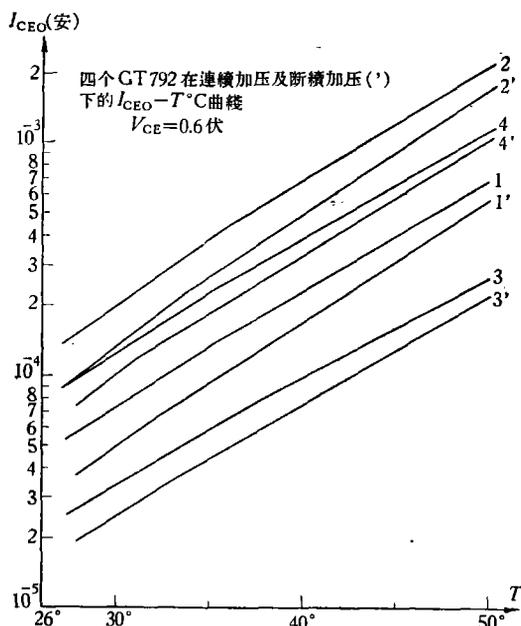


图 3. 连续加压和间断加压下的 I_{CEO} -温度特性

2. 根据检测灵敏度挑选热敏电阻的原则

图 4 是用热敏电阻作检测元件的恒温器的输入等效电路。温度改变时所引起的 R 值的变化,对放大器输入电流 I_{in} 而言可等效于 R 不变而在 R 臂中引入一

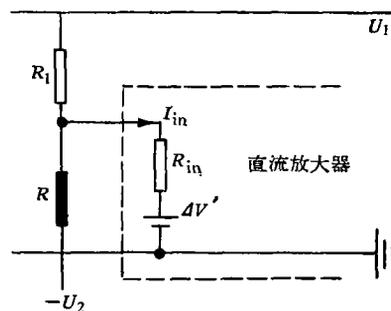


图 4. 热敏电阻作检测元件的恒温器的输入等效电路

R ——热敏电阻;
 $R_{in}, \Delta V'$ ——放大器输入等效电路。

个电压源。提高检测灵敏度的途径是增加引入直流放大器中这一信号的功率,这样就要求直流放大器的输入阻抗 R_{in} 越小越好,而热敏电阻 R 的阻值则尽量接近于匹配运用值

$$\frac{R_1 R_{in}}{R_1 + R_{in}}. \text{ 当 } R = \frac{R_1 R_{in}}{R_1 + R_{in}} \text{ 并给出 } R \text{ 的允许耗散功率 } P \text{ 时, 检测灵敏度 } = \frac{\partial I_{in}}{\partial T^0} =$$

$$= \frac{K_T \sqrt{P}}{2} \sqrt{\frac{R_1}{R_{in}(R_1 + R_{in})}}, \text{ 此处 } K_T = \frac{\partial R / \partial T^0}{R} \text{ 为热敏电阻的相对温度系数. 由此}$$

可知 P 值越大越好。根据这些原则选用了 ITT2.5 型热敏电阻,它的功率温升系数为 1.6 毫瓦/ $^{\circ}\text{C}$,温度为 55°C 时 $K_T = 4.39\%$ 。

三、过渡过程的分析

恒温器的电路刚被接通时，金属块的温度等于室温，此时检测元件的输出甚小，放大器处于饱和状态，并以最大的加热功率供给加热电阻丝。在此情况下，金属块和检测元件的温度将迅速上升，但后者的变化滞后于前者。由于这种惯性的存在，检测元件的温度将发生过调现象，使得放大器从饱和状态越过线性运用区很快地转入截止状态（参考图 6 和图 9）。此时加热功率接近于零，金属块和检测元件将缓慢地冷却，直到检测元件的温度降到恒温器的工作温度附近时，放大器又重新进入线性运用区。此后是一段温度衰减振荡过程。最后，金属块和检测元件的温度都稳定在恒温器的工作温度。这个过渡过程的特性取决于恒温器热传导回路的参数和控制回路的增益。热传导回路是一个复杂的、具有分布参数的非线性系统。为了便于分析，可将之简化成一个如图 5(a) 所示的近似线性集中参数网络。图中 T_A 、 T_B' 、 T_B 和 T_J 分别表示环境、金属块外壁、金属块孔眼内壁和检测元件的温度， R_C 和 R_B 表示隔热层的热阻和金属块内外壁间的平均热阻， C_B 表示金属块的热容量， R_J 、 C_J 分别表示检测元件的热阻和热容量， I_0 为放大器输出的加热电流， R_L 为加热电阻丝的电阻值， J 为热功当量 $\frac{1}{4.18}$ 卡/焦耳。由于 $C_B \gg C_J$ 、 $R_C \gg R_B$ 和 $R_C \gg R_J$ ，图 5(a) 又可以进一步被简化成一个如图 5(b) 所示的其时间常数等于 τ_s 、 $\frac{\tau_B}{4}$ 和 τ_J 的三阶系统（其中 $\tau_s \gg \frac{\tau_B}{4}$ 和 $\tau_s \gg \tau_J$ ）。图 5(b) 中的 T_B'' ，在物理意义上可理解为位于金属块内外壁间中间位置的温度。以下所作的分析均基于图 5(b) 的热传导回路。

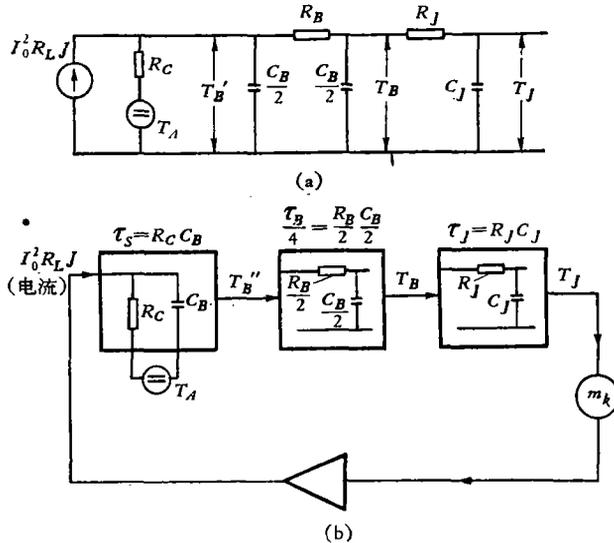


图 5.

(a) 简化后的恒温器的热传导回路；(b) 进一步简化后的恒温器的热传导回路。

令 $I_{0\text{最大}}$ 表示放大器饱和时的最大加热电流。为了迅速加热，一般取最大加热功率 $I_{0\text{最大}}^2 R_L J \gg \frac{T_{J0} - T_A}{R_C}$ (T_{J0} 为恒温器的工作温度)，因此在放大器处于饱和状态的预热

期間內, T_B'' 的上升曲綫近似一直綫; 而当 T_A 与 T_{J_0} 不十分接近时, 在放大器处于截止状态的冷却期間內, T_B'' 的下降曲綫也近似一直綫. 在此情況下, 过渡过程期間內的 T_B'' 、 T_B 、 T_J 以及 I_0 的变化曲綫将如图 6 所示. 从图 6 可得:

預热時間

$$(t_1 - 0) = \frac{(T_{J_0} - T_A)C_B}{I_{0\text{最大}}^2 R_{LJ}} + \tau_J + \frac{\tau_B}{4}, \quad (1)$$

冷却時間

$$(t_2 - t_1) = \frac{(\Delta T_2 + \Delta T_1)\tau_s}{T_{J_0} + \Delta T_1 + \Delta T_2 - T_A} + \tau_J + \frac{\tau_B}{4} = \left(\frac{\tau_s}{\text{預热時間}} + 1 \right) \left(\tau_J + \frac{\tau_B}{4} \right). \quad (2)$$

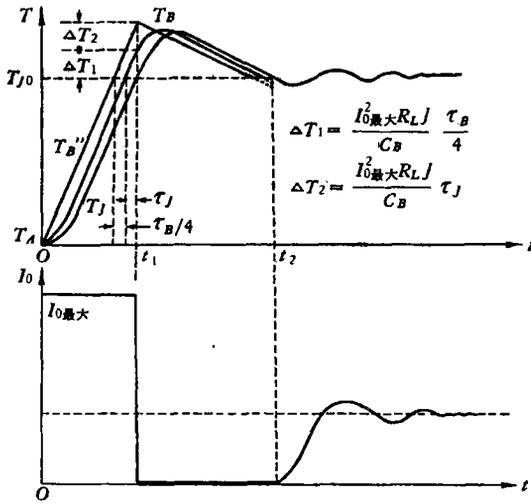


图 6. 过渡过程期間內温度和加热电流的变化曲綫

或 τ_J , 或者增加 τ_s , 都能加速振蕩的衰減过程. 从以上分析中可得下列結論: 为了縮短过渡过程, 必須減小 $\frac{\tau_B}{4}$ 和 τ_J , 也就是說要适当減少金属块內外壁間的厚度和选用 τ_J 小的检测元件. 減小 τ_s , 預热和冷却時間可被縮短, 但衰減振蕩过程的时间却被延长. 在一定的 τ_s 值下, 減小 C_B 和增加 R_C 可以減小 $I_{0\text{最大}}^2 R_{LJ}$, 因而一般宜用鋁作金属块 (鋁的 C_B 比銅小). 金属块的体积縮小时, C_B 比 $\frac{1}{R_C}$ 減小得快, 故在金属块相当小、隔热层又不可能很厚的条件下, 如用鋁无法滿足 τ_s , 則可采用紫銅. 至于黃銅, 因其单位体积的热容量与紫銅差不多, 而热导率比鋁还低, 故不宜采用.

τ_J 、 $\frac{\tau_B}{4}$ 和 τ_s 值的測量可以这样进行: 将检测元件从空气(室温)中突然浸入一盆預热到一定温度的油中, 而后測量 T_J -時間曲綫, 以求得 τ_J . 在恆温器的加热綫圈中通过一固定电流, 待 T_J 上升到 T_{J_0} 附近时再切断此电流, 而后測出 T_J -時間曲綫. 从图 6 可知, 此曲綫上升部分的时延等于 $\frac{\tau_B}{4} + \tau_J$, 下降部分在 T_{J_0} 处的斜率等于 $\frac{T_{J_0} - T_A}{\tau_s}$, 因此这样就可求出 τ_s 和 $\frac{\tau_B}{4}$. 这种測量方法既簡單又符合实际过程.

在 t_2 以后的温度衰減振蕩过程中, 虽然放大器处于綫性运用区内, 但由于加热功率与 I_0 的非綫性关系, 整个控制系統仍然是非綫性的. 在小偏差的情況下, 系統可被近似地看成是綫性的. 在此假定下, 恆温器能够稳定工作的最大增益为

$$\text{益为 } \left(\tau_s + \frac{\tau_B}{4} \right) (\tau_s + \tau_J) \frac{\tau_J + \frac{\tau_B}{4}}{\tau_J \frac{\tau_B}{4} \tau_s} \cong$$

$$\cong \tau_s \frac{\tau_J + \frac{\tau_B}{4}}{\tau_J \frac{\tau_B}{4}} \quad [6]. \text{ 由于 } \tau_s \gg \frac{\tau_B}{4} \text{ 和 } \tau_s \gg$$

τ_J , 因此在固定增益条件下, 減小 $\frac{\tau_B}{4}$

四、几个试验性恒温器的实验结果

用晶体管作检测元件的恒温器，我们实验了二种样品，即A型和B型。为了比较起见，我们对B型恒温器又试验了黄铜的和铝的两种金属块。用热敏电阻作检测元件的恒温器，我们实验了一种样品，称作C型。几种恒温器的实物及线路如照片及图7所示。恒温器中直流放大器的第一级 J_1 放置在金属块的孔眼内。

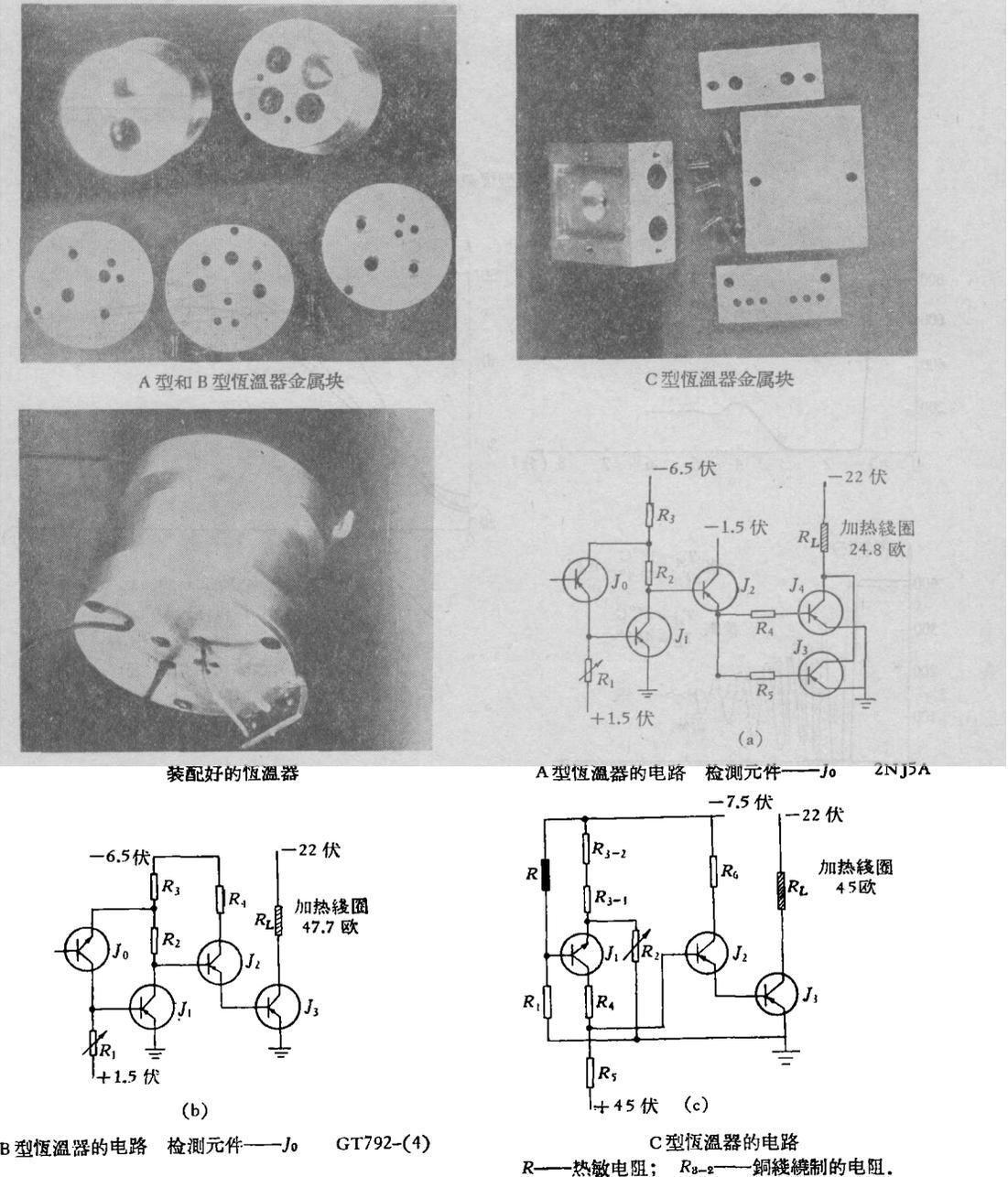


图 7.

图 8 给出了晶体管作检测元件的 A 型和 B 型恒温器的温度爬行曲线, 曲线起点前是恒温器的过渡过程。B 型恒温器在温度爬行结束后连续运用 160 小时内的温度变化小于 0.95°C。热敏电阻式 C 型恒温器在过渡过程结束后的前 9 个小时内的温度变化值小于 0.1°C, 接着连续运用 290 小时, 其温度变化值小于 ±0.04°C。

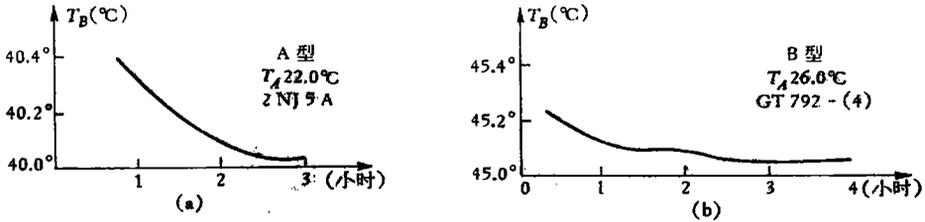


图 8. A 型和 B 型恒温器的温度爬行曲线

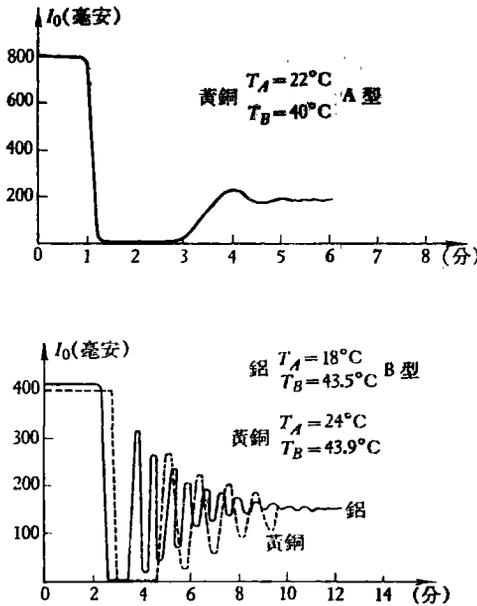


图 9. A 型和 B 型恒温器过渡过程期间内 I_0 的变化曲线

图 9 是 A 型和 B 型过渡过程期间内 I_0 的变化曲线。使用前述测量时间常数方法所测得的恒温器的 T_J 变化曲线以及检测元件的 T_J 变化曲线, 示于图 10 和图 11 中。从图 11 曲线求得的达到稳定值 63.2% 时的各检测元件的 τ_J 是:

| | | |
|-------|-------|--------|
| 2NJ5A | GT792 | ITT2.5 |
| 11 秒 | 8 秒 | 9 秒 |

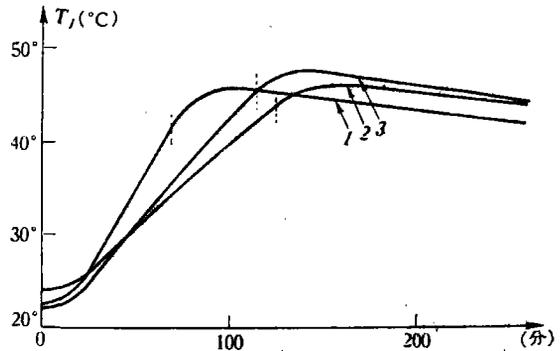


图 10. 恒温器的 T_J -时间曲线

- 1——A 型(黄铜), 加热功率 13.8 瓦;
 - 2——B 型(黄铜), 加热功率 8.40 瓦;
 - 3——B 型(铝), 加热功率 8.58 瓦;
- 虚线为切断加热电流时刻。

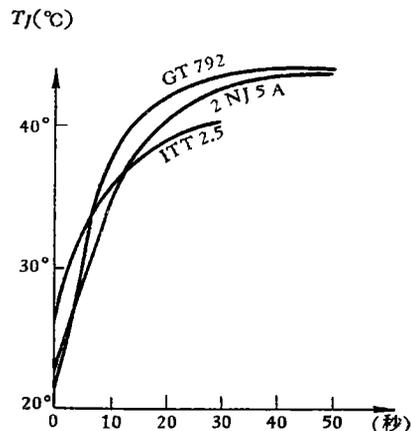


图 11. 检测元件的 T_J -时间曲线

从图 10 算出的各恒温器的 $\frac{\tau_B}{4}$ 和 τ_s 是:

| | A型(黄铜) | B型(铝) | B型(黄铜) |
|------------|--------|-------|--------|
| $\tau_B/4$ | 1.5 秒 | 4.0 秒 | 5.5 秒 |
| τ_s | 956 秒 | 790 秒 | 978 秒 |

恒温器加热功率-温升曲线的斜率即是静态 R_c 。用此方法测得的 A 型和 B 型的 $R_c J = 25^\circ\text{C}/\text{瓦}$ 。图 10 中直线上升部分的斜率等于 $\frac{\text{加热功率}}{C_B}$ ，由这一关系式可求出 C_B 。从上面求得的 R_c 和 C_B 又可以算出一组 τ_s ，用来与上面用直接方法求得的 τ_s 作比较:

| | A型(黄铜) | B型(铝) | B型(黄铜) |
|----------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| C_B/J | 40.4 焦耳/ $^\circ\text{C}$ | 36.0 焦耳/ $^\circ\text{C}$ | 45.4 焦耳/ $^\circ\text{C}$ |
| τ_s | 1.00×10^3 秒 | 900 秒 | 1.14×10^3 秒 |

从上列数字可看出，用静态 R_c 乘上 C_B 算出的 τ_s 都大于直接求得的 τ_s 。这点说明了隔热层实际上不完全等效于一个简单的热阻。

根据图 9 B 型(铝)的衰减振荡部分的衰减率和所测得的 τ_s 、 τ_f 、 $\frac{\tau_B}{4}$ ，可计算出线性化系统的增益等于 208，直接测量 B 型(铝)的增益等于 176。利用公式(1)、(2)算出的 B 型(铝)的预热时间 = 127 秒，冷却时间 = 67 秒。从图 9 曲线中可以很方便地求得 B 型(铝)的实际预热时间 = 144 秒，实际冷却时间 = 66 秒。

各恒温器的恒温性能是

A 型(黄铜): $T_{J_0} = 40^\circ\text{C}$, T_A 从 $20^\circ\text{C} \rightarrow 35^\circ\text{C}$, $\Delta T_B = 0.48^\circ\text{C}$;

B 型(铝): $T_{J_0} = 45^\circ\text{C}$, T_A 从 $20^\circ\text{C} \rightarrow 40^\circ\text{C}$, $\Delta T_B = 0.12^\circ\text{C}$ 。

在 C 型恒温器中，由于利用了放在金属块外面的 R_{3-2} 铜线电阻(图 7(c))正电阻温度系数的温度补偿作用，因而获得了良好的恒温性能。当 T_A 从 $20^\circ\text{C} \rightarrow 50^\circ\text{C}$, $\Delta T_B = 0.017^\circ\text{C}$, $T_{J_0} = 55^\circ\text{C}$ 。

五、结 语

1. 由于晶体管的 I_{CEO} 存在爬行现象，故检测元件采用热敏电阻在一定条件下可得到更好的效果。

2. 前节所列数据表明了对过渡过程的分析用一次近似计算方法是可行的。

3. 有些文献中介绍的恒温器外面没有隔热层，然而使用隔热层可使金属块的温度较为均匀，并且由于 R_c 和 τ_s 的增大，还可以减少加热功率和增加回路增益。

4. 使用热敏电阻作检测元件时，采用温度补偿后，即使是较简单的装置也能获得很好的恒温性能。

本文中的部分实验工作是由曹桂卿同志进行的。

参 考 文 献

- [1] Kemhadjian, H., A Simple Temperature Control System for Transistor, *Mullard Tech. Commun.*, 1958, Dec., 186—190.
- [2] Rignall, M. W., A Constant Temperature Transistor Enclosure, *Electronic Engng*, 1961, July, 452—453.
- [3] Kemhadjian, H., High Stability Temperature Controller for Transistor, *Electronic Application*, **22** (1961—1962), No. 2/3, 97—108.
- [4] Pallett, J. E., The Transistor as a Temperature Sensing Device in Temperature Control System, *Electronic Engng*, 1961, June, 360—363.
- [5] Makoto, Kikuchi, On the Backward Leakage Current in the Alloyed Germanium P-N Junction, *J. Phys. Soc., Japan*, **13** (1958), April, 350—362.
- [6] Thomson, L. C., *Linear Feedback Analysis*, Pergamon Press Ltd., London, 1955, 131.

THERMOSTAT FOR TRANSISTORS

CHEN YOU-DI

In this paper, the creeping phenomenon of the reverse current of transistors and the sensitivity of thermistors are studied with regard to their applications as a temperature sensing element for the thermostat. The transient behavior of the thermostat is analyzed approximately and methods for measuring the time constants of the thermostat are described. Experimental results of some laboratory built thermostats are given.