

3. 多级稳压器

图1-19所示的多级稳压器是由七只稳压管构成的。输出电

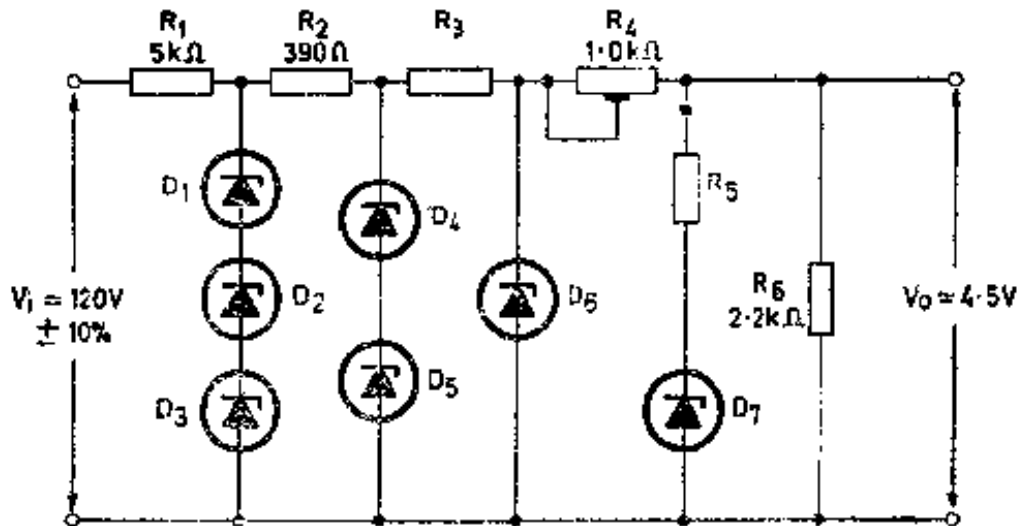


图 1-19 多级稳压器的实际电路

压为4.5伏，温度系数接近于零。这种稳压器可用来代替标准电池。这种电路有许多优点。比如，当温度从30°C增加到60°C时，输出电压基本上保持不变；当负载发生断续短路时，不会损坏稳压管。这种稳压器比标准电池更为坚固，并且能承受更高的工作温度，因此，用作基准电压源，比韦斯顿电池更为优越。

通过前面三级稳压器（第三级稳压器由 R_3 和 D_3 组成）之后，电源电压变化对输出电压的影响大为减小。稳压管 D_7 与电阻 R_4 、 R_5 和 R_6 构成补偿网路，能够补偿温度变化（从30°C增加到60°C）对输出电压的影响。从理论上讲，采用温度系数数值相等而符号相反的两只稳压管串联，温度变化对输出电压的影响可以得到完全补偿。然而，完全匹配的稳压管是难以找到的，所以，实际上温度变化对输出电压的影响并不可能得到完全补偿。图1-19中，稳压管 D_7 和 D_6 的温度系数符号相反，

但数值并不恰好相等。但是，改变电阻 R_4 的阻值，可以改变流过稳压管 D_7 的电流，从而改变稳压管 D_7 的温度系数。这样，就能够得到更好的补偿。因此，对温度变化引起输出电压变化的补偿程度，可由电阻 R_3 和 R_5 加以控制。

如果流过每一只稳压管的电流都是5毫安，那么，当输入电压为120伏时，电阻 $R_1 \sim R_4$ 应具有下列数值：

$$\begin{aligned} R_1 &= 5K\Omega & R_3 &= 600\Omega \\ R_2 &= 390\Omega & R_4 &= 500\Omega \end{aligned}$$

为了便于调整， R_4 可采用1千欧的电位器。

R_5 的阻值通过试验决定。当输入电压的变化为10%时，稳压器输出电压变化量与 R_5 阻值的关系曲线如图1-20所示。

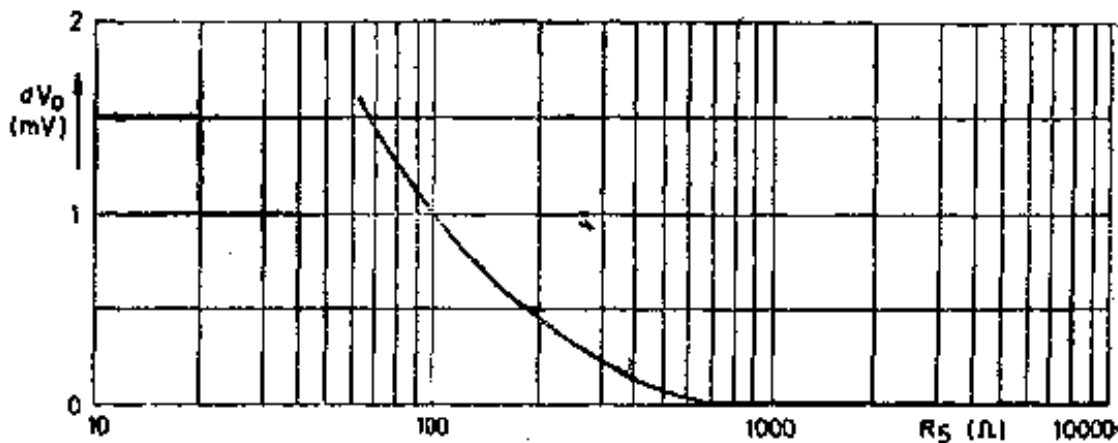


图 1-20 输入电压变化10%时，稳压器输出电压变化量与 R_5 阻值的关系曲线

从图上可以看出， R_5 阻值较小时，输入电压变化对输出电压的影响较大。同时，还可以看出，当 R_5 的阻值稍高于400欧时，输入电压变化对输出电压的影响大大减小。因此， R_5 取定为390欧。

图1-19所示的实际电路中，稳压管 D_6 具有正温度系数，并且，这个温度系数随稳压管的电流增加而增加。稳压管 D_7

具有负温度系数，并且，这个温度系数随着稳压管的电流增加而减小。 R_3 的阻值影响流过稳压管 D_6 和 D_7 的电流，而 R_4 的阻值则只影响流过稳压管 D_7 的电流。因此， R_3 比 R_4 对温度补偿有更大的影响。由于 R_3 和 R_4 是串联的，因此，这两个电阻是互相影响的。尽管如此，根据下述调整方法，仍能很容易地确定出这两个电阻的最佳值。外部负载电阻 R_6 的阻值对输出电压的影响不大。但是，当作为基准电源的稳压器调整好以后，为了保持最佳性能， R_6 的阻值最好不再变动。

现在，谈谈调整方法。首先，把 R_3 取定为600欧。在环境温度为 30°C 时，精确地测出标准电源的输出电压。然后，将环境温度升高到 60°C ，并且，在基准电源达到稳定温度以后，重新测试输出电压。当基准电源温度降低以后，把 R_3 的阻值变为1千欧，并且，在环境温度为 30°C 和 60°C 时，再重新测试基准电源的输出电压。

当 $R_3=600$ 欧、温度从 30°C 变化到 60°C 时，输出电压的变化为5毫伏，如图1-21中的A点所示。当 $R_3=1000$ 欧、温度从 30°C 增加到 60°C 时，输出电压的变化为9毫伏，如图1-21中的B点所示。连接A、B两点的直线与横轴相交于一点，该

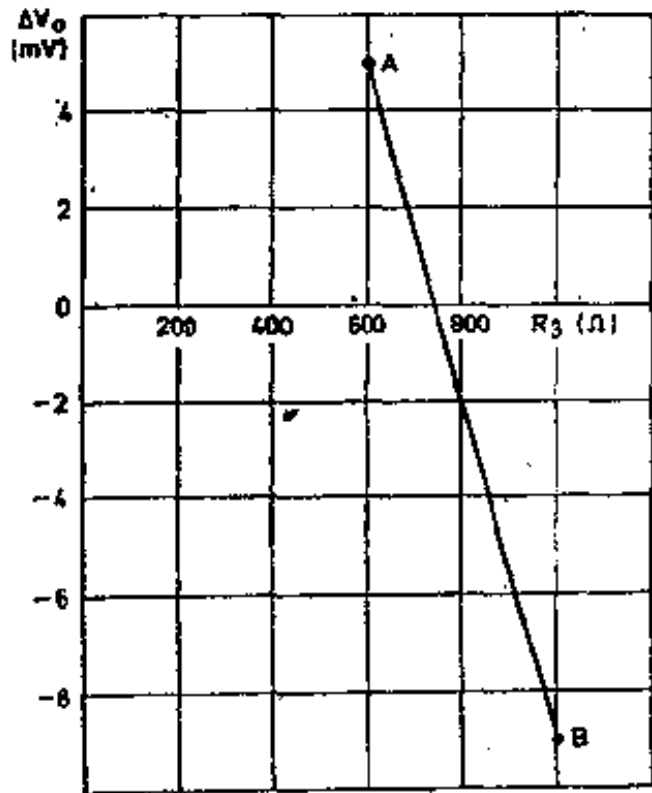


图 1-21 温度从 30°C 变化到 60°C 时，输出电压变化量与 R_3 阻值的关系曲线

点所对应的阻值（约为750欧）能给出最佳的温度补偿。

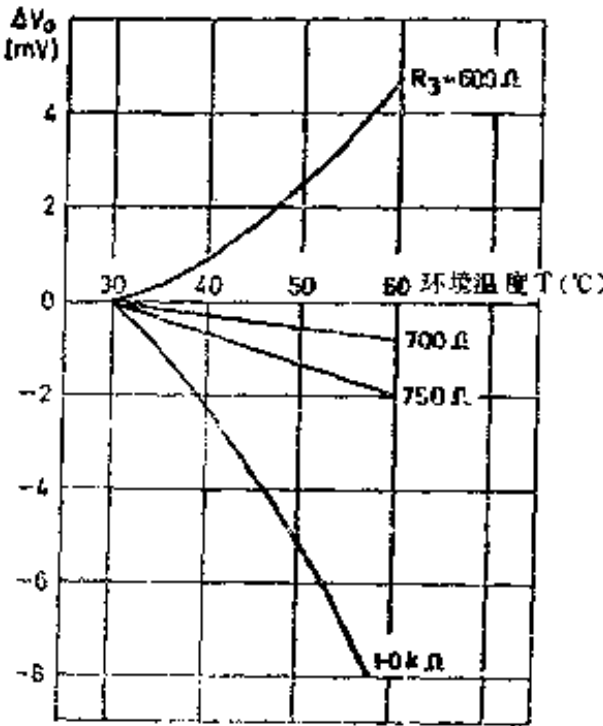


图 1-22 R_3 为不同数值时，基准电源的输出电压变化量与温度的关系

将 R_3 的阻值变为从图 1-21 得出的最佳值，并且，在环境温度为 30°C 时，调整 R_4 ，使基准电源的输出电压与在 R_3 为 600Ω 、环境温度为 30°C 时的输出电压相等。这样，即可最后确定 R_4 的阻值。即使以后为了获得更好的温度补偿， R_3 的阻值需要作一些变更时， R_4 的阻值也无需再作调整。

基准电源的最后校正，还需要通过测试因温度升高而引起的输出电压变化来完成。这一步，应当把 R_3 取定为不同的

数值做几次测试，然后再从测试结果中确定 R_3 的最佳值。

当 R_3 取定为 600Ω 、 750Ω 和 1000Ω 时，基准电源的输出电压变化量与温度的关系如图 1-22 所示。这些曲线表明，在 R_3 的阻值稍低于 750Ω 时，可以获得最佳的温度补偿。当 R_3 变为 700Ω 时，整个基准电源应该重新校正。当 R_3 等于 700Ω 时，输入电源电压变化 $\pm 10\%$ 所引起的输出电压变化量与温度的关系如图 1-23 所示。

重新校正时， R_3 仍取三个不同的数值（分别为 700Ω 、 600Ω 和 900Ω ），再按上述方法进行调整。 R_3 为这三个不同阻值时，温度变化对输出电压的影响如图 1-24 所示。在该图中，同时绘出温度变化对韦斯顿标准电池输出电压（计算值）的影响。图 1-25 对 $R_3 = 700\Omega$ 时基准电源与韦斯顿标准电池的

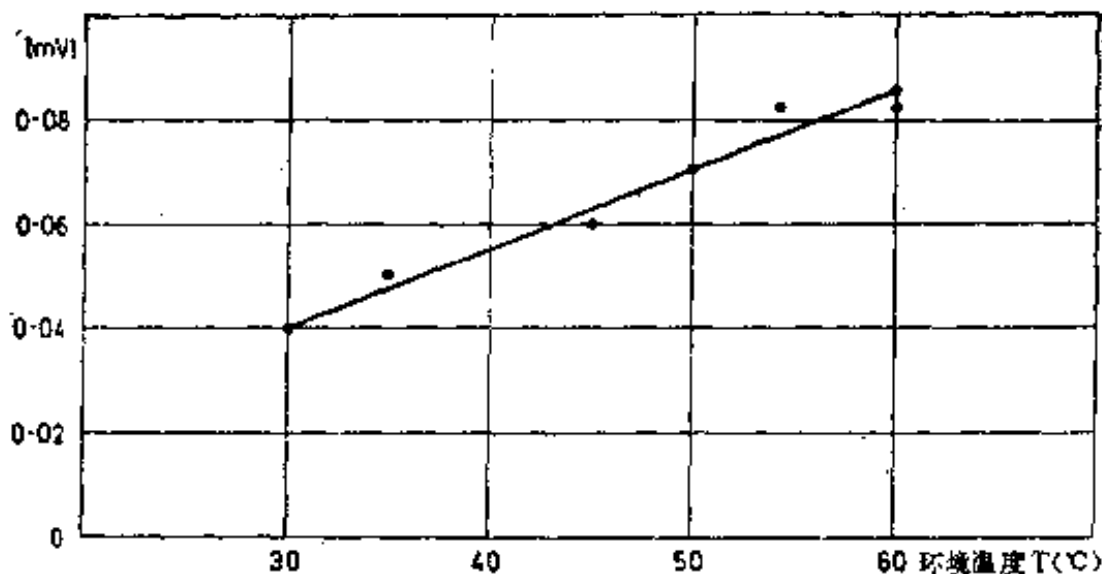


图 1-23 $R_s = 700$ 欧, 输入电压变化 $\pm 10\%$ 时, 输出电压变化量与温度的关系

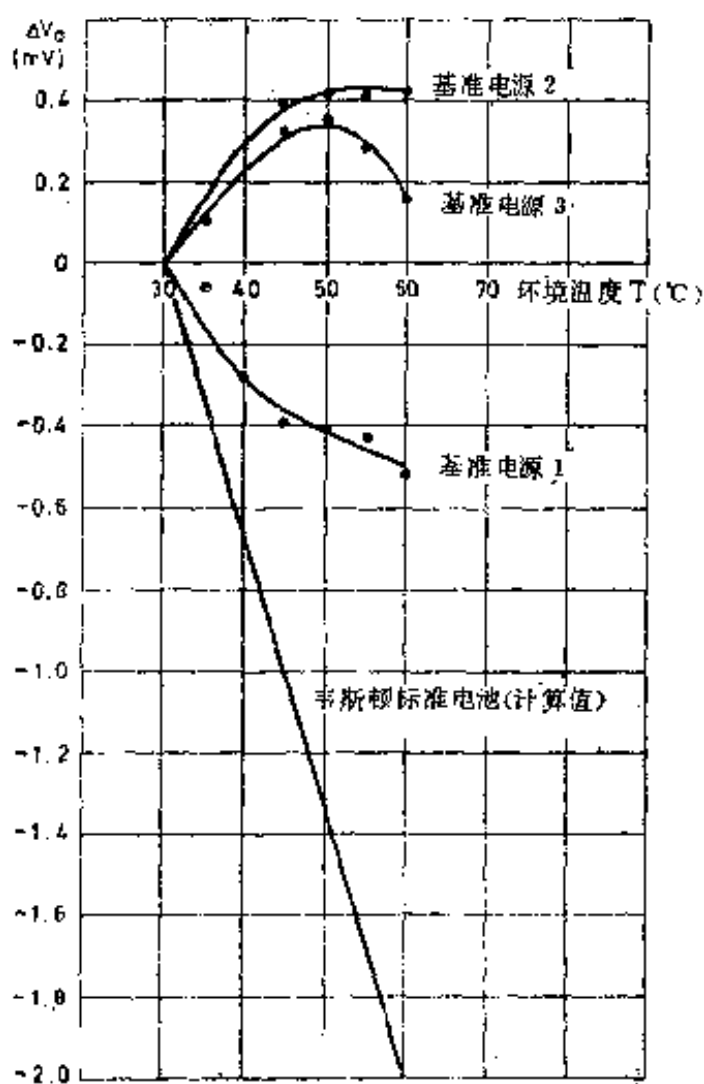


图 1-24 R_s 为三个不同阻值时, 基准电源输出电压和韦斯顿电池输出电压与温度的关系

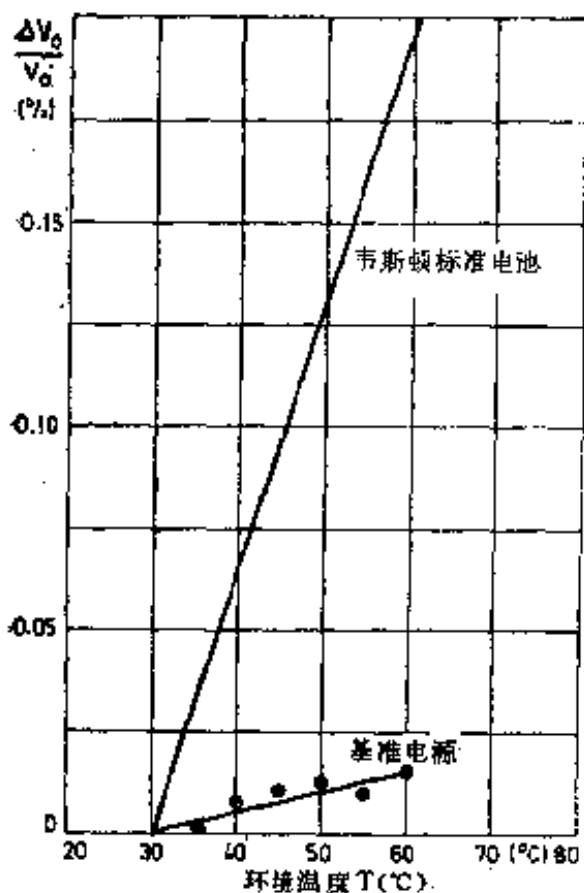


图 1-25 $R_s = 700$ 欧时，基准电源与韦斯顿标准电池的性能比较

性能作了比较。图中，输出电压变化量用百分数表示。

虽然，稳压管标准电源的性能优于韦斯顿标准电池，但是，基准电源的输出电压只能在 4 伏~6 伏之间保持稳定，并且，必须用直流电位计和其他标准仪表精确测定。

必须明确的是，稳压管基准电源只是基准电压电源，并不能供给可变的电流。可贵的是，输出端的瞬时短路不会损坏这种基准电源，而且在短路消除后，输出电压仍能保持不变。在

可靠性测试中，基准电源的输入电源先接通一小时，然后再断开 20 分钟，如此重复一个月。在这段时期内，用精度为 0.01% 的电压表测试，输出电压不应有所改变。

4. 桥式稳压器

最简单的稳压管并联稳压器，如果输入电压较低或者所用稳压管的动态电阻较大，那么稳压器的稳压系数就较高，输入电压变化对输出电压的影响也较大。为了减小输入电压变化对输出电压的影响，可以采用图 1-26 所示的桥式稳压器。

在桥式稳压电路中，如果输入电压的变化在各条串联支路内按比例分配，那么，对于 R_1 与 D_1 的串联支路来说，就可

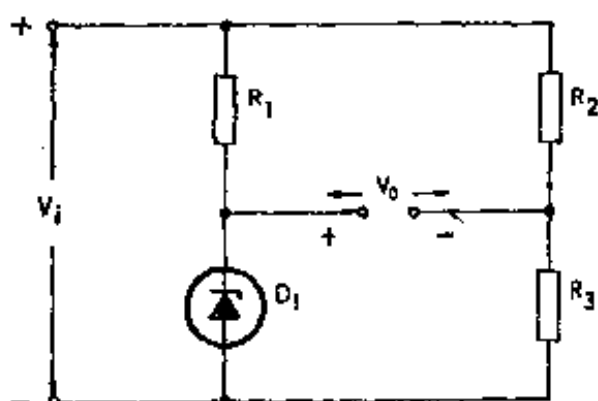


图 1-26 桥式稳压电路

以列出下列方程:

$$\Delta V_z = \Delta V_i \frac{R_z}{R_1 + R_z} \quad (1-30)$$

式中, R_z 为稳压管的内阻; ΔV_z 为稳压管两端电压的变化量。

对于 R_2 和 R_3 串联支路来说, 也可以列出下列方程:

$$\Delta V_3 = \Delta V_i \frac{R_3}{R_2 + R_3} \quad (1-31)$$

式中, ΔV_3 为 R_3 两端电压的变化量。

非常明显, 输出电压变化量 ΔV_o 应等于 ΔV_z 与 ΔV_3 之差, 即:

$$\Delta V_o = \Delta V_z - \Delta V_3 = \Delta V_i \left(\frac{R_z}{R_1 + R_z} - \frac{R_3}{R_2 + R_3} \right) \quad (1-32)$$

上式也可以写成:

$$\frac{\Delta V_o}{\Delta V_i} = \frac{R_z}{R_1 + R_z} - \frac{R_3}{R_2 + R_3} \quad (1-33)$$

由此可见, 为了把因输入电压变化而引起的输出电压变化量减到最小, $R_3/(R_2 + R_3)$ 必须近似等于 $R_z/(R_1 + R_z)$ 。在最

简单的稳压管并联稳压器中， R_1 为串联限流电阻，其阻值取决于输入电源电压和稳压管的工作特性； R_z 为稳压管的内阻，其阻值与稳压管的工作点有关。电阻 R_2 和 R_3 的阻值可根据 $R_z/(R_2 + R_3) = R_z/(R_1 + R_z)$ 的条件来选择。通常，为了减小电阻的耗散功率， R_2 和 R_3 的阻值可适当选得较大一些。

在实际电路中，当稳压管的电流变化时，其动态电阻 R_z 也随之发生变化，因此，桥式稳压器只能在稳压管的电流为某一数值时，输入电压变化所引起的输出电压变化才能得到完全补偿。但是，如图1-27所示，当输入电压在很宽的范围内变化时，桥式稳压器仍具有很好的输出电压调整特性。

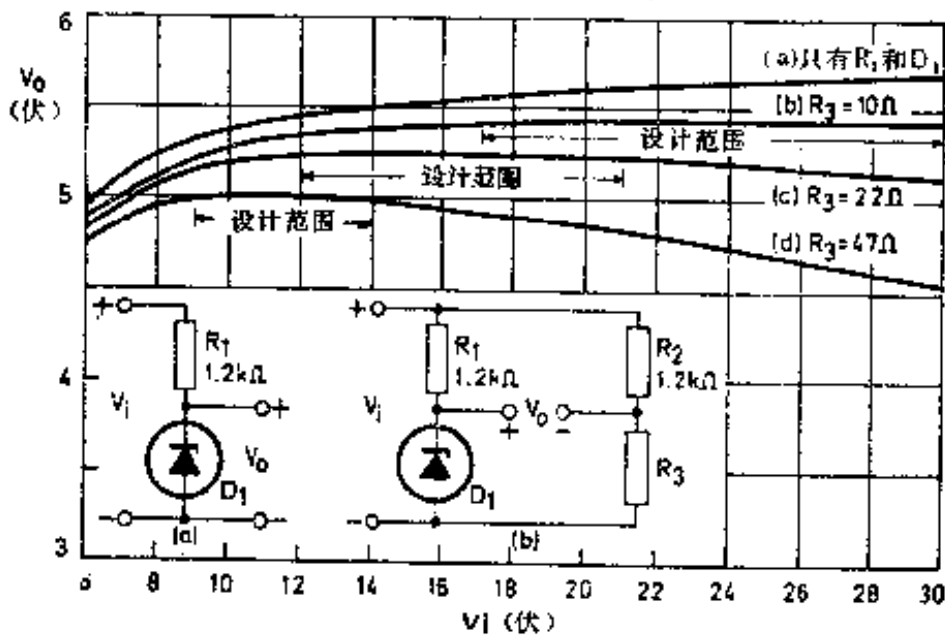


图 1-27 桥式稳压器的输出电压调整特性

图1-27中，曲线(a)为只含有 R_1 和 D_1 的简单稳压器的输出电压调整特性曲线。当 R_1 和 R_2 均为1.2千欧， R_3 分别为10欧、22欧和47欧时，稳压管桥式稳压器的输出电压调整特性曲线分别如曲线(b)、(c)和(d)所示，这三条曲线与曲线(a)相比，可明显地看出，在设计范围内，输出电压变化量有显著的降低。当桥式稳压器采用BYZ88-C5V6型稳压管时，

在各种情况下的输出电压测试数据如表1-2所示。

表 1-2

V_i (伏)	V_o (伏)	V_o (伏) 从图1-27曲线(b)上取得的数据		
	从图1-27曲线(a)上 取得的数据 ($R_1 = 1.2 \text{ k}\Omega$)	($R_1 = R_2 = 1.2 \text{ k}\Omega$ $R_3 = 10 \Omega$)	($R_1 = R_2 = 1.2 \text{ k}\Omega$ $R_3 = 22 \Omega$)	($R_1 = R_2 = 1.2 \text{ k}\Omega$ $R_3 = 47 \Omega$)
2	2.000	1.985	1.964	1.901
3	2.998	2.978	2.946	2.891
4	3.945	3.914	3.872	3.798
5	4.608	4.568	4.517	4.423
6	4.944	4.895	4.834	4.721
7	5.126	5.068	4.999	4.866
8	5.241	5.171	5.094	4.992
9	5.322	5.246	5.149	4.984
10	5.378	5.294	5.195	5.004
11	5.422	5.330	5.221	5.011
12	5.458	5.357	5.238	5.010
13	5.488	5.378	5.250	5.002
14	5.513	5.396	5.257	4.989
15	5.536	5.408	5.260	4.973
16	5.554	5.419	5.260	4.953
17	5.571	5.427	5.259	4.933
18	5.586	5.433	5.255	4.910
19	5.599	5.438	5.250	4.886
20	5.615	5.442	5.244	4.859
21	5.624	5.445	5.235	4.832
22	5.636	5.446	5.228	4.805
23	5.646	5.447	5.219	4.775
24	5.654	5.448	5.208	4.745
25	5.664	5.449	5.199	4.716
26	5.675	5.448	5.189	4.686
27	5.683	5.447	5.176	4.652
28	5.691	5.446	5.165	4.621
29	5.699	5.444	5.154	4.590
30	5.705	5.442	5.141	4.556

桥式稳压器最适合采用低压稳压管。由于低压稳压管的动态电阻较大,如果采用简单的稳压管并联稳压器,输入电压变化对输出电压的影响就会较大。例如, $BZY88-C3V3$ 型稳压管,动态电阻为82欧。当 $R_1 = R_2 = 1.2$ 千欧, 并且 $R_3 = 82$ 欧时,由 $BZY88-C3V3$ 型稳压管组成的简单稳压器和桥式稳压器输出电压调整特性曲线如图1-28所示。输入电压变化时,两种稳压器输出电压的实测数据如表1-3所示。

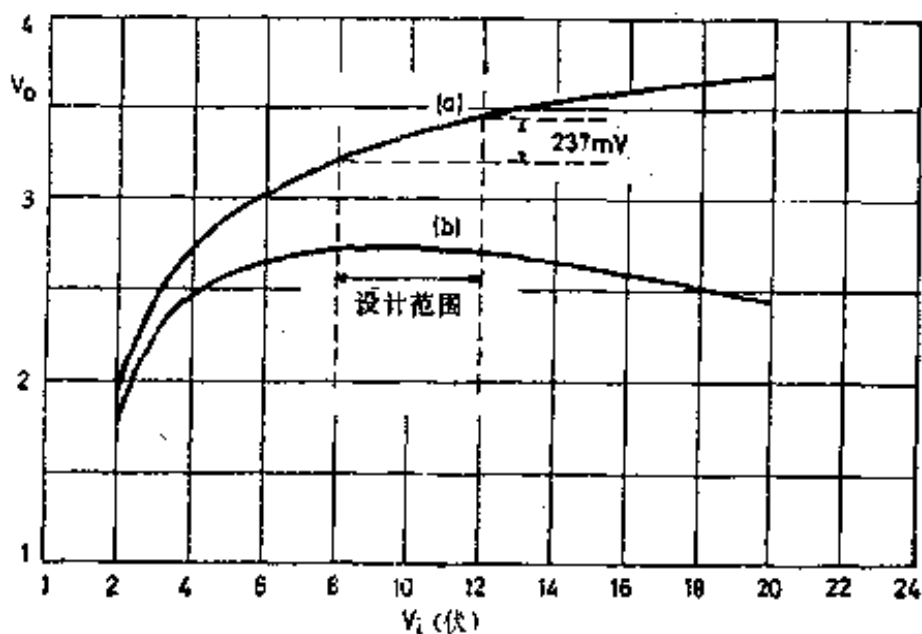


图 1-28 低压稳压器的输出电压调整特性曲线

从图 1-28 可以看出,在给定的输入电压变化范围(8~12 伏)内,简单稳压器的输出电压变化量 ΔV_o 为237毫伏,而桥式稳压器的输出电压变化量 ΔV_o 仅为25毫伏。

如果采用图1-29所示的带有前置稳压的桥式稳压器,输出电压调整特性就能得到进一步的改善。图中, R_1 和 D_1 构成前置稳压器, R_2 、 R_3 、 R_4 和 D_2 构成桥式稳压器。桥式稳压器的输入电压由前置稳压器供给。

表 1—3

V_i (伏)	V_o (伏) 图1-27曲线(a) ($R_1 = 1.2\text{ k}\Omega$)	V_o (伏) 图1-27曲线(b) ($R_1 = R_2 = 1.2\text{ k}\Omega$, $R_3 = 8\text{ Z}\Omega$)
2	1.903	1.779
3	2.421	2.232
4	2.700	2.448
5	2.883	2.568
6	3.017	2.640
7	3.123	2.682
8	3.209	2.706
9	3.284	2.715
10	3.344	2.714
11	3.399	2.705
12	3.446	2.690
13	3.488	2.669
14	3.526	2.644
15	3.561	2.613
16	3.595	2.579
17	3.621	2.546
18	3.649	2.510
19	3.671	2.471
20	3.697	2.430

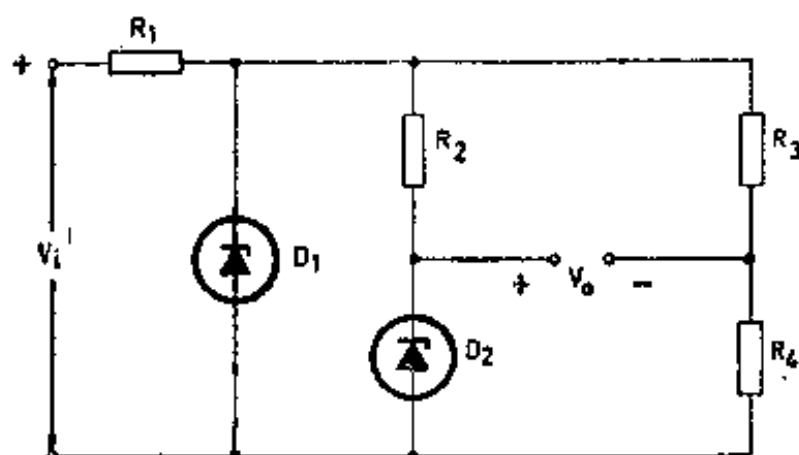


图 1-29 带有前置稳压的桥式稳压器

五、稳压管并联稳压器的简单评价

稳压管并联稳压器的电路虽然比较简单，但是，由于存在不少缺点，一般只用于稳定度要求不高且负载固定的小电流稳压电源，或者作为各种复杂稳压器的基准电压电源。稳压管并联稳压器的主要缺点有：

1. 效率太低

在稳压管并联稳压器中，为了获得较高的输出电压稳定性，必须采用较高的输入电压和较大的串联限流电阻，同时还要求流过稳压管的电流适当增大一些。在稳压器工作过程中，当负载电流减小时，为了保持输出电压不变，必须把流过稳压管的电流增大一些。因此，稳压管和串联限流电阻的耗散功率较大，因而整个电路的效率很低。

2. 输出电压一般不能调整

稳压管并联稳压器的输出电压等于稳压管的基准电压。对于选定的稳压管来说，稳压器的输出电压是不能调整的。

3. 稳压性能不够理想

稳压管的动态电阻一般都在几欧到几十欧之间。稳压管并联稳压器的输出电阻基本上等于稳压管的动态电阻。一般来说，性能较好的稳压电源的输出电阻最大为十分之几到百分之几欧。显然，一般稳压管的动态电阻远远大于这个数值。因此，稳压管并联稳压器的稳压性能较差。要提高稳压性能，可以采用晶体管并联稳压器。

第三节 晶体管并联稳压器的原理与设计

如前所述，稳压管并联稳压器的稳压性能较差。为了提高稳压器的性能，可以采用晶体管并联稳压器。

一、最基本的晶体管并联稳压器

1. 基本电路

最基本的晶体管并联稳压器如图1-30所示。图中， R_S 是输入电源内阻， R_1 是串联稳压电阻。 R_S 的阻值通常远远小于 R_1 ，因此， R_S 可忽略不计或者并入 R_1 之中。当输入电流或负载电流变化时，为了稳定输出电压 V_o ，电阻 R_1 两端的电压必须随之作相应的改变。当因输入电压降低而使输出电压降低时，由于稳压管 D_1 两端的电压与晶体管 TR_1 的基-射极电压之和等于输出电压，而且，稳压管 D_1 两端电压基本上保持不变，所

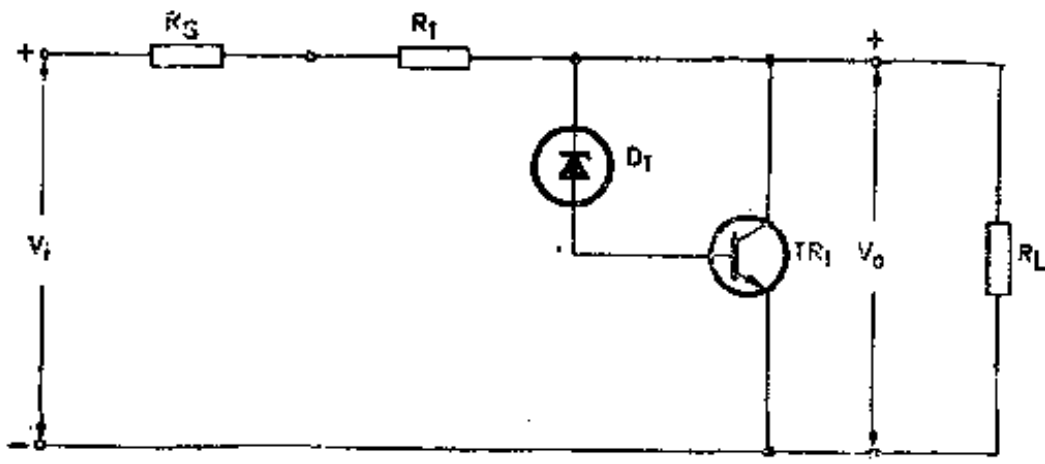


图 1-30 最基本的晶体管并联稳压器

以，晶体管 $T R_1$ 基-射极电压随输出电压降低而降低，因而基极电流减小，集电极电流也减小，使流过电阻 R_1 的电流减小，电阻 R_1 两端的压降也随之减小，这样就能维持输出电压不变。当因负载电流减小而使输出电压增加时，晶体管 $T R_1$ 的基-射极电压将升高，基极电流增加，集电极电流也增加，从而使流过 R_1 的电流增加，因此，输出电压仍然能够维持不变。

下面通过数学分析，进一步研究输入电压、负载电流和温度的变化对输出电压的影响。根据稳压器的基本原理可知，输入电压、负载电流和温度发生变化时，稳压器输出电压的总变化量为：

$$dV_o = S dV_i - R_o dI_L + S_T dT \quad (1-34)$$

式中， S 为稳压系数， R_o 为输出电阻， S_T 为总的温度系数。

最基本的晶体管并联稳压器等效电路如图1-31所示。

(1) 温度系数

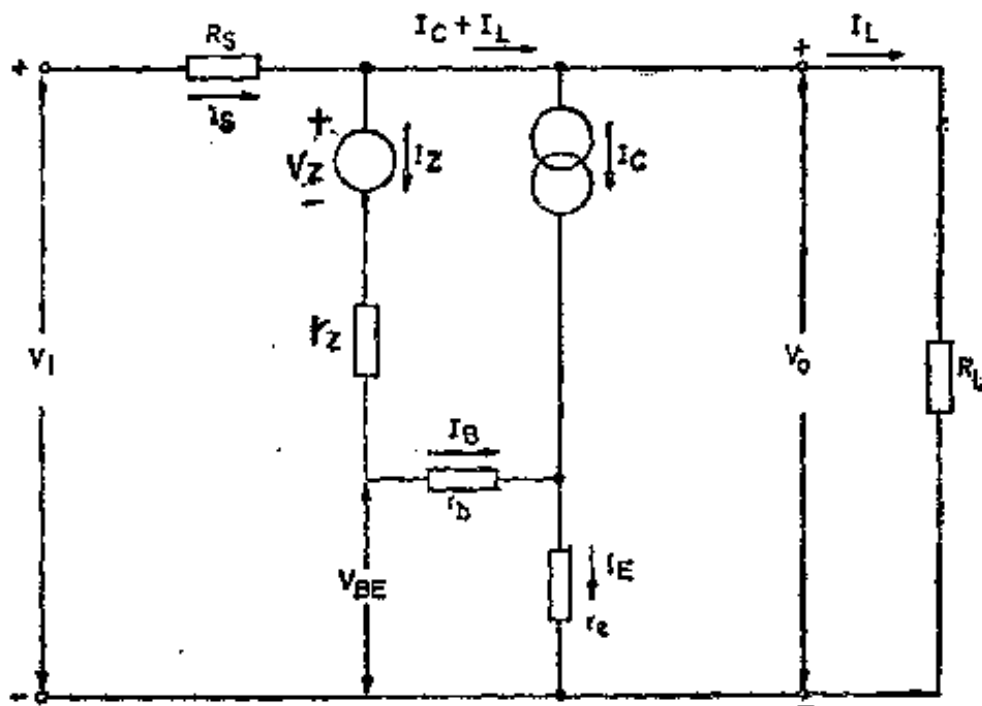


图 1-31 最基本的晶体管并联稳压器的等效电路

根据图1-31所示的等效电路，稳压器的输出电压 V_o 可由下式给出：

$$V_o = V_z \textcircled{1} + I_z r_z + V_{BE} \quad (1-35)$$

研究温度变化对输出电压 V_o 的影响时，假设输入电压 V_i 、输出电流 I_L 和 $I_z r_z$ 都是不变的，这样，就有 $\partial V_o / \partial T = S_T$ ，并且

$$S_T = S_z + S_{TR} \quad (1-36)$$

式中， S_z 是稳压管 D_1 的温度系数，其数值与所用的稳压管有关； S_{TR} 是晶体管 TR_1 基-射结的温度系数。一般来说， S_{TR} 总是接近于 -2 毫伏/ $^{\circ}C$ 。

(2) 稳压系数

图1-30中， R_s 与 R_1 之和用 R_s 表示。因为流过稳压管的电流也是晶体管的基极电流，所以， $I_z = I_B$ 。从图1-31所示的等效电路可以看出：

$$I_s = \frac{V_i - V_o}{R_s} = I_B + I_C + I_L \quad (1-37)$$

根据晶体管的基本原理可知：

$$V_{BE} = I_B R_B \quad (1-38)$$

$$\text{式中，} \quad R_B = r_b + (1 + h_{FE}) r_e \textcircled{2} \quad (1-39)$$

将 $V_{BE} = I_B R_B$ 和 $I_z = I_B$ 代入公式(1-35)，经过适当整理后，可以得出下式：

$$V_o = V_z - I_B (r_z + R_B)$$

或者写为：

$$I_B = \frac{V_z - V_o}{r_z + R_B} \quad (1-40)$$

注①严格地讲，这里的 V_z 是指稳压管刚刚击穿时的端电压。——编译者注

注②这里指的是直流参数。——编译者注

因为 $I_c = h_{FE} I_B$, 从而得出下式:

$$I_c = \frac{h_{FE}(V_o - V_z)}{r_z + R_B} \quad (1-41)$$

将公式(1-40)和(1-41)代入公式(1-37), 经过适当整理后, 可以得出下式:

$$\frac{V_i - V_o}{R_s} = \frac{V_o - V_z}{r_z + R_B} + \frac{h_{FE}(V_o - V_z)}{r_z + R_B} + I_L \quad (1-42)$$

将 $I_L = V_o/R_L$ 代入, 从上式可以得出:

$$V_o = \frac{\frac{V_i}{R_s} + \frac{(1+h_{FE})V_z}{r_z + R_B}}{\frac{1}{R_s} + \frac{1+h_{FE}}{r_z + R_B} + \frac{1}{R_L}}$$

最后, 求 V_o 对 V_i 的微商并把分子分母同除以 $1/R_s$, 就可以得出稳压系数 S :

$$S = \frac{1}{1 + \frac{(1+h_{FE})R_s}{r_z + R_B} + \frac{R_s}{R_L}} \quad (1-43)$$

(3) 输出电阻

稳压器的输出电阻 $R_o = -\partial V_o / \partial I_L$ 。为了算出 R_o , 必须找出输出电压 V_o 与负载电流 I_L 的关系式。为此, 可把公式(1-42)中含有 V_o 的各项合并起来, 经过适当变换后, 可以得出:

$$V_o = \frac{\frac{V_i}{R_s} + (1+h_{FE})\frac{V_z}{r_z + R_B} - I_L}{\frac{1}{R_s} + \frac{1+h_{FE}}{r_z + R_B}}$$

求 V_o 对 I_L 的微商, 就可以得出输出电阻 R_o :

$$R_o = \frac{1}{\frac{1}{R_s} + \frac{1+h_{FE}}{r_z + R_B}} \quad (1-44)$$

(4) 输出电压总变化量

把公式(1-43)、(1-44)和(1-36)代入公式(1-34), 就可以得出稳压器的输出电压总变量 dV_o :

$$dV_o = \frac{dV_i}{1 + \frac{(1+h_{FE})R_s}{r_z + R_B} + \frac{R_s}{R_L}} + \frac{dI_L}{\frac{1}{R_s} + \frac{1+h_{FE}}{r_z + R_B}} + (S_z + S_{TR})dT \quad (1-45)$$

从以上的分析可知, 最基本的晶体管并联稳压器可以根据负载状态或输入电压的变化, 自动调整晶体管的基极电流, 以达到稳压的目的。但是, 在这种最基本的晶体管并联稳压器中, 晶体管的基极电流也就是稳压管的工作电流, 因此, 当晶体管基极电流发生变化时, 流过稳压管的电流也会随之变化。由于稳压管几乎所有的参数都随着流过它的电流而变化。所以, 当晶体管的基极电流变化时, 稳压管的基准电压、动态电阻等参数也将随之变化。由于上述原因, 这种电路的稳压性能较差。这一点是最基本的晶体管并联稳压器的严重缺点。

2. 经过改进的电路

输出电压接近于稳压管基准电压的晶体管并联稳压器改进电路如图1-32所示。为了避免稳压管的各项参数随晶体管的基极电流而变化, 改进电路内增加了电阻 R_2 。如果稳压管的工作电流远远大于晶体的最大基极电流, 那么, 基极电流 I_B 变化所引起的基准电压 V_z 的变化基本上可以忽略不计。

还应当注意到, 当稳压管的工作电流增加时, 稳压管的动态电阻 r_z 和温度系数 S_z 都会减小, 这样, 电路的性能可得到进一步改善。

晶体管并联稳压器改进电路的等效电路如图1-33所示。这

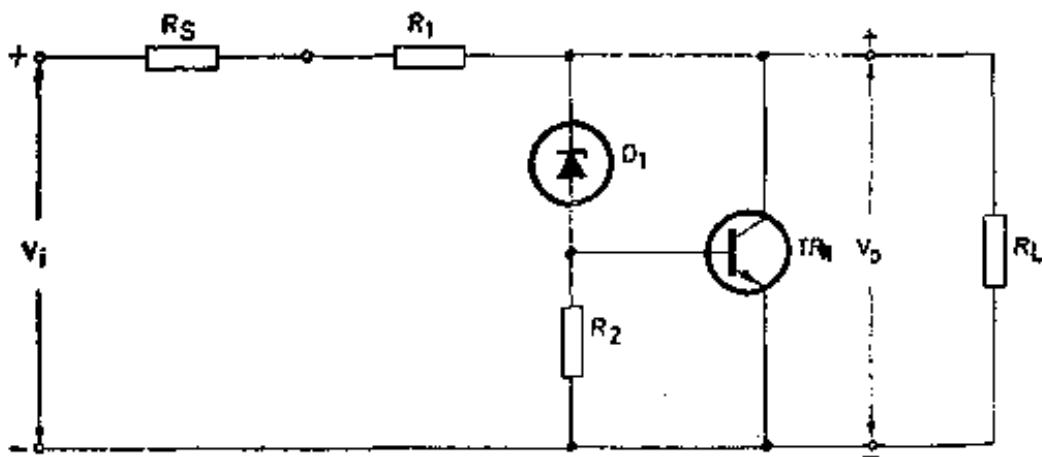


图 1-32 晶体管并联稳压器的改进电路

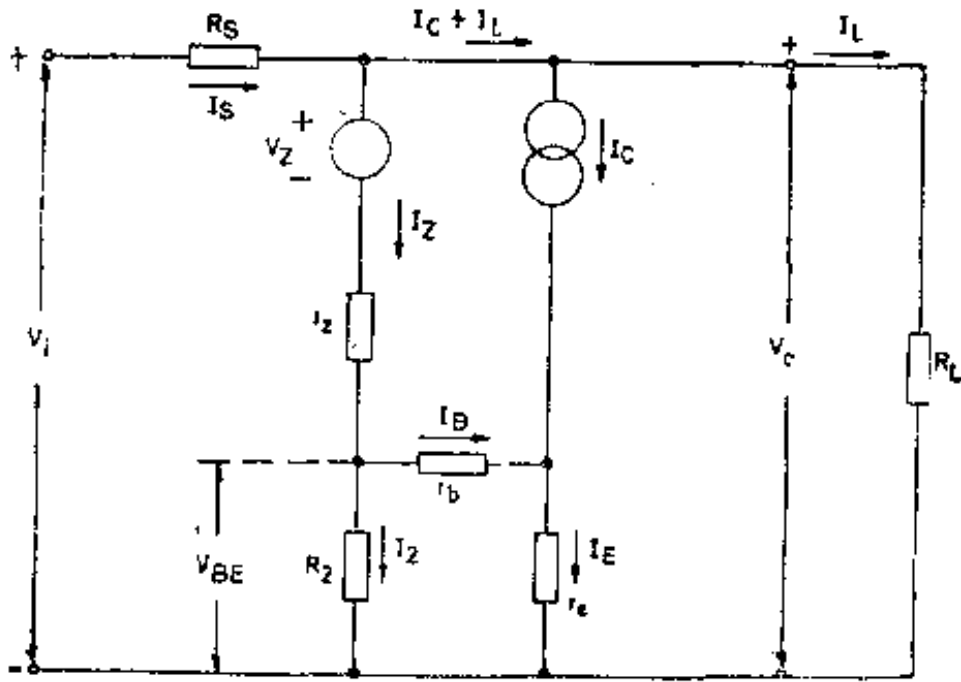


图 1-33 晶体管并联稳压器改进电路的等效电路

种电路的分析方法与前述基本电路类似。

(1) 稳压系数

根据图1-33所示的等效电路，可以给出下列方程式：

$$I_e = \frac{V_i - V_o}{R_e}$$

$$\begin{aligned}
 &= I_x + I_c + I_L \\
 &= I_z + I_B + I_L
 \end{aligned}
 \tag{1-46}$$

式中, $I_z = I_z + I_B$

并且,
$$I_z = \frac{V_{BB}}{R_z} = \frac{I_B R_B}{R_z} \tag{1-47}$$

因此,
$$I_x = I_B \left(1 + \frac{R_B}{R_z} \right) \tag{1-48}$$

在实际电路中, I_z 远远大于 I_B , 比如说, $I_z = 10 I_B$ 。式中的 I_B 是为获得最大集电极电流所需的基极电流值, 也就是使负载电流为最小值时所需的基极电流值。

根据图1-33所示的等效电路, 也可以给出下列方程式:

$$V_o = V_x + I_z r_z + V_{BE} \tag{1-49}$$

把公式(1-48)代入公式(1-49), 经过适当整理后, 可以得出基极电流的下列表示式:

$$I_B = \frac{V_o - V_x}{(1 + R_B/R_z)r_z + R_B} \tag{1-50}$$

将公式(1-48)和 $I_c = h_{FE} I_B$ 代入公式(1-46), 可以得出下列表示式:

$$\frac{V_i - V_o}{R_i} = \frac{(V_o - V_x)(1 + R_B/R_z + h_{FE})}{(1 + R_B/R_z)r_z + R_B} + I_L \tag{1-51}$$

将 $I_L = V_o/R_L$ 代入上式, 并且将含有 V_o 的各项合并起来, 经过适当整理后可以得出 V_o 与 V_i 的关系式。最后, 求 V_o 对 V_i 的微商, 就可以得出稳压系数 S :

$$S = \frac{1}{1 + \frac{(1 + R_B/R_z + h_{FE})R_i}{(1 + R_B/R_z)r_z + R_B} + \frac{R_i}{R_L}} \tag{1-52}$$

(2) 输出电阻

同样地把公式(1-51)适当整理，并且求 V_o 对 I_L 的微商，就可以得出输出电阻 R_o ：

$$R_o = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1 + R_B/R_2 + h_{FE}}{(1 + R_B/R_2)r_z + R_B}} \quad (1-53)$$

(3) 温度系数

根据公式(1-49)，如果稳压管的工作电流不变，该电路的温度系数 S_T 应为：

$$S_T = S_v + S_{TR} \quad (1-54)$$

值得注意的是，尽管公式(1-35)和(1-36)分别与公式(1-49)和(1-54)完全相同，但是，两种稳压电路的输出电压和温度系数是各不相等的。在两种稳压电路中，由于 I_z 的数值不同，因此， r_z 和 S_z 的数值也不相同。在计算过程中，稳压管工作电流 I_z 应代入适当的数值。

(4) 输出电压总变化量

把公式(1-52)、(1-53)和(1-54)代入公式(1-34)，就可以得出输出电压的总变化量 dV_o ：

$$dV_o = \frac{dV}{1 + \frac{(1 + R_B/R_2 + h_{FE})R_1}{(1 + R_B/R_2)r_z + R_B} + \frac{R_1}{R_L}} - \frac{\frac{dI_L}{\frac{1}{R_1} + \frac{1 + R_B/R_2 + h_{FE}}{(1 + R_B/R_2)r_z + R_B}}}{1 + \frac{(1 + R_B/R_2 + h_{FE})R_1}{(1 + R_B/R_2)r_z + R_B} + \frac{R_1}{R_L}} + (S_v + S_{TR})dT \quad (1-55)$$

在这种电路中，稳压管 D_1 及其限流电阻 R_2 最好由稳定的输出电压供电。也就是说， R_2 和 D_1 的串联电路应当接在晶体管的两端，这样就能供给较稳定的基准电压。不过，在这样的电路中，如果晶体管的增益较低，那么稳压管所需的电流较大，