

调整或者输出电压稳定性要求较高时，一般都不采用并联稳压器。

并联稳压器的主要优点是输出短路时，不会损坏并联调整元件。并联稳压器的这种过载自动保护作用是由串联电阻完成的。当输出端负载短路时，与输出端并联的调整元件的两端电压为零，因此不会损坏调整元件。这时，全部输入电压都加到串联电阻两端。因此，串联电阻的额定功率要根据输出短路的工作状态来计算。此外，负载变化较小时，并联稳压器的稳定性较好，对各种瞬时变化的适应性也比较出色。

第二章 串联稳压器的原理与设计

串联稳压器的原理电路如图2-1所示。它由串联调整元件和泄放电阻 R_2 组成。由于调整元件是与负载串联的，所以称为串联稳压器。串联调整元件的作用是根据输入电压和负载电流的变化来调整输出电压。泄放电阻 R_2 的作用是增加稳压器的空载电流，使稳压器的的工作更为可靠。当稳压器具有固定负载时，泄放电阻可以去掉不用。

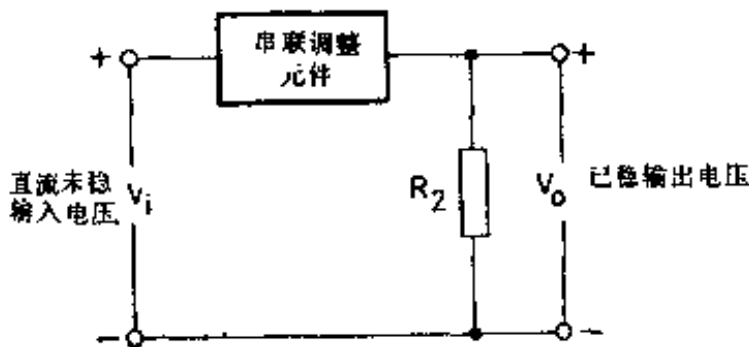


图 2-1 串联稳压器的原理电路

串联稳压器既适用于固定负载，也适用于可变负载。一般来说，串联稳压器的效率比并联稳压器稍高一些。但是，在串联稳压器中，当负载短路或过载时，有可能损坏串联调整元件。为此，必须增加保护电路。

第一节 最简单的串联稳压器 的原理与设计

一、基本工作原理

串联稳压器的基本电路如图2-2所示。图中， R_S 是输入电源的内阻， R_1 是稳压管 D_1 的串联限流电阻。正确选择 R_1 的阻值，就能保证在输入电压或负载电流发生变化时，稳压管两端的电压保持不变。因此，输入电压 V_i 的任意变化，都会使晶体管 TR_1 的集电极与基极之间的电压产生同样的变化，同时，输出电压 V_o 的任意变化也都会使晶体管 TR_1 的发射极与基极之间的电压产生同样的变化。晶体管集-基极电压或射-基极电压的变化，能够改变晶体管的集电极与发射极之间的电压，从而使输出电压保持稳定的数值。

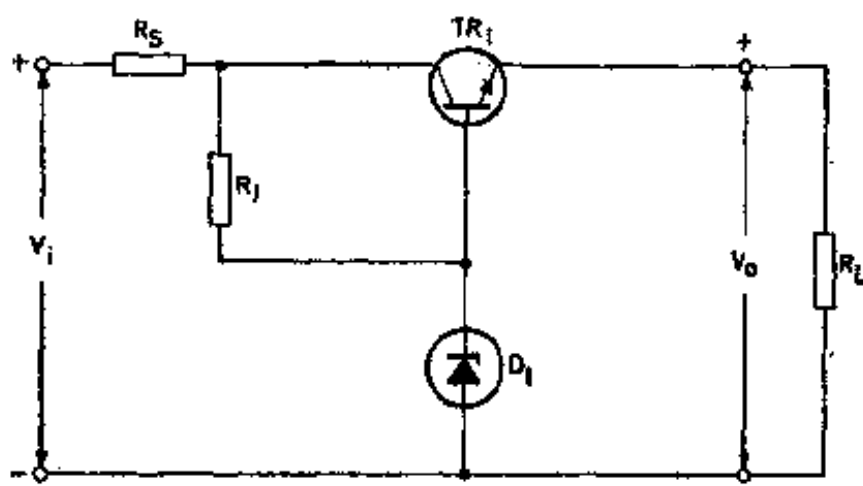


图 2-2 串联稳压器的基本电路

从图2-2可以看出，如果不考虑稳压管的动态电阻，那么，晶体管 TR_1 的基-射极电压 V_{BE} 应等于稳压管 D_1 的基准电压 V_Z

与输出电压 V_o 之差，即 $V_{BE} = V_z - V_o$ 。如果保持输入电压 V_i 不变，当负载电流减小时，输出电压 V_o 将会升高。由于稳压管的基准电压 V_z 基本上是不变的，所以， V_{BE} 将会减小，晶体管的基极电流 I_B 也将随之减小。根据晶体管的基本原理可知，当基极电流 I_B 减小时，晶体管的集-射极电压 V_{CE} 将会增加。由于 $V_o = V_i - V_{CE}$ ，所以，如果设计适当的话，就可以使稳压器的输出电压 V_o 保持不变。同样，如果保持稳压器的负载电流不变，当输入电压 V_i 降低时，输出电压 V_o 将会下降。由于稳压管的基准电压 V_z 基本上是不变的，所以，晶体管的基-射极电压 V_{BE} 将会升高，晶体管的基极电流 I_B 也将随之增加。当基极电流 I_B 增加时，晶体管集-射极电压 V_{CE} 将会减小。由于 $V_o = V_i - V_{CE}$ ，所以，如果设计适当的话，也可以使稳压器的输出电压 V_o 保持不变。

串联稳压器基本电路的等效电路如图 2-3 所示。下面根据

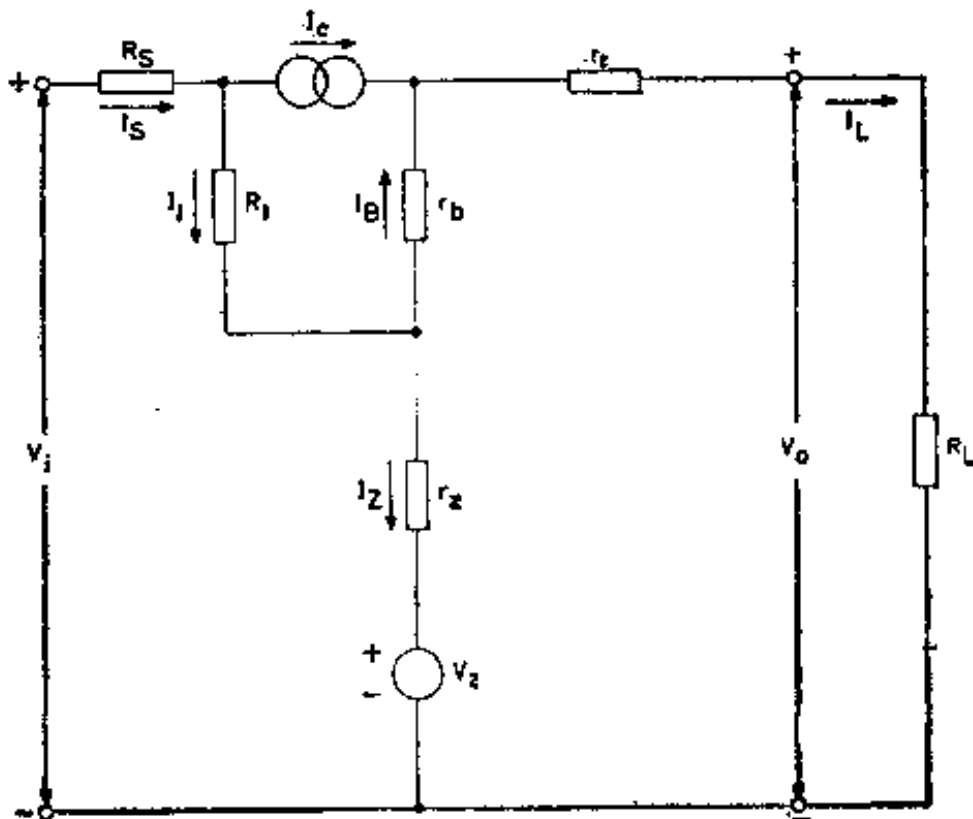


图 2-3 串联稳压器基本电路的等效电路

这个等效电路分析电路的性能。

1. 稳压系数

根据等效电路，可给出下列方程式，

$$I_s = \frac{V_i - V_o - I_s r_s - V_s}{R_s} = I_1 + I_e = I_1 + h_{FE} I_B \quad (2-1)$$

$$V_o = V_s + I_s r_s - V_{BE} \quad (2-2)$$

根据公式(2-2)，可以得出：

$$I_s = \frac{V_o + V_{BE} - V_s}{r_s} \quad (2-3)$$

式中， $V_{BE} = I_B R_B \quad (2-4)$

同时， $R_B = r_b + (1 + h_{FE}) r_e$

从等效电路也可以看出：

$$I_L = \frac{V_o}{R_L} = I_B = (1 + h_{FE}) I_B \quad (2-5)$$

根据公式(2-5)，可以得出：

$$I_B = \frac{V_o}{(1 + h_{FE}) R_L} \quad (2-6)$$

将公式(2-6)代入公式(2-4)求出 V_{BE} 后，再将 V_{BE} 代入公式(2-3)，可以得出：

$$I_s = \frac{V_o + \frac{V_o R_B}{(1 + h_{FE}) R_L} - V_s}{r_s} \quad (2-7)$$

从等效电路可以看出：

$$I_1 = I_s + I_B \quad (2-8)$$

因此，将公式(2-6)和(2-7)代入公式(2-8)，可以得出：

$$I_1 = \frac{V_o + \frac{V_o R_B}{(1+h_{FE})R_L} - V_s}{r_s} + \frac{V_o}{(1+h_{FE})R_L} \quad (2-9)$$

由于 $V_1 = I_1 R_1$ ，所以，

$$V_1 = \left[\frac{V_o + \frac{V_o R_B}{(1+h_{FE})R_L} - V_s}{r_s} + \frac{V_o}{(1+h_{FE})R_L} \right] R_1 \quad (2-10)$$

将公式 (2-10)、(2-7)、(2-9) 和 (2-6) 所表示的 V_1 、 I_2 、 I_1 和 I_B 代入公式 (2-1)，经过适当整理后，可以得出下式：

$$\begin{aligned} V_o \left\{ 1 + \frac{R_1 + R_s}{r_s} + \frac{R_1 + R_B}{(1+h_{FE})R_L} + \frac{R_s}{R_L} + \frac{R_B(R_1 + R_s)}{(1+h_{FE})r_s R_L} \right\} \\ = V_s \frac{R_1 + R_s}{r_s} \end{aligned} \quad (2-11)$$

根据公式 (2-11)，并求 V_o 对 V_s 的微商，可以得出稳压系数 S ：

$$S = \frac{1}{1 + \frac{R_1 + R_s}{r_s} + \frac{R_1 + R_B}{(1+h_{FE})R_L} + \frac{R_s}{R_L} + \frac{R_B(R_1 + R_s)}{(1+h_{FE})r_s R_L}} \quad (2-12)$$

2. 输出电阻

根据公式 (2-5)，可以得出：

$$I_B = \frac{I_L}{1+h_{FE}} \quad (2-13)$$

将公式 (2-13) 代入公式 (2-4) 求出 V_{BE} ，然后，把求出的

V_{BB} 代入公式(2-3), 可以得出:

$$I_z = \frac{V_b + \frac{I_L R_B}{1+h_{FB}} - V_s}{r_s} \quad (2-14)$$

将公式(2-13)和(2-14)代入公式(2-8), 可以得出,

$$I_1 = \frac{V_b + \frac{I_L R_B}{1+h_{FB}} - V_s}{r_s} + \frac{I_L}{1+h_{FB}} \quad (2-15)$$

由于 $V_1 = I_1 R_1$, 所以, V_1 能很容易地由公式(2-15)算出。将公式(2-15)、(2-14)和(2-13)所表示的 V_1 、 I_1 、 I_z 和 I_B 代入公式(2-1), 经过适当整理后, 可以得出下式:

$$V_b \left(1 + \frac{R_1 + R_2}{r_s} \right) = V_s - I_L \left[\frac{R_B (R_1 + R_2)}{(1+h_{FB})r_s} + \frac{R_1 + R_B}{1+h_{FB}} \right] + \frac{V_s (R_1 + R_2)}{r_s} \quad (2-16)$$

求 V_b 对 I_L 的微商, 可以得出输出电阻 R_o :

$$R_o = \frac{R_B (R_1 + R_2) + r_s (R_1 + R_B) + (1+h_{FB})r_s R_s}{(1+h_{FB})(r_s + R_1 + R_2)} \quad (2-17)$$

3. 温度系数

根据公式(2-2), 并且假设 $I_z r_z$ 是不变的, 求出输出电压 V_b 对温度 T 的微商, 就可以得出温度系数 S_T 的近似表示式。电路的总温度系数 S_T 可由下式给出:

$$S_T = S_s + S_{TR} \quad (2-18)$$

式中, S_s 是稳压管 D_1 的温度系数, 其数值决定于所用稳压管的型号; S_{TR} 是晶体管 TR_1 基-射极电压的温度系数, 其数值

约为 -2 毫伏/ $^{\circ}C$ 。

4. 输出电压总变化量

稳压器输出电压总变化量的基本公式(0-1)和一般表示式(1-34)同样适用于串联稳压器,因此将公式(2-12)、(2-17)和(2-18)所表示的稳压系数 S 、输出电阻 R_o 和温度系数 S_T 代入公式(1-34),可以得出串联稳压器的输出电压总变化量。

二、实际电路设计

设计最简单的串联稳压电路,首先要明确设计要求。假设采用图2-4所示的串联稳压电路,并要求输出电压 V_o 为12伏,负载电流 I_L 为50~250毫安,输入电压 V_i 为 18 ± 2 伏,最高环境温度 T 为 $65^{\circ}C$ 。

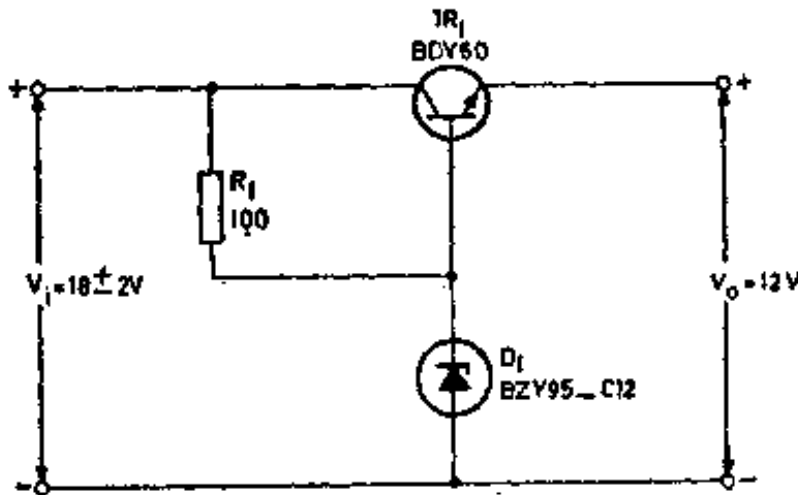


图 2-4 12伏250毫安串联稳压器的实际电路

1. 选择晶体管

串联晶体管的选择主要取决于晶体管所能承受的耗散功率。根据上述设计要求,晶体的最大耗散功率 $P_{C(max)}$ 应为:

$$\begin{aligned}
 P_{c(max)} &= (V_{i(max)} - V_o) I_{L(max)} \\
 &= (20 - 12) \times 250 \times 10^{-3} = 2(W)
 \end{aligned}$$

选择串联晶体管时，还要考虑晶体管的电流放大倍数。通常应尽可能选用电流放大倍数较大的晶体管。BDY60型晶体管的最小电流放大倍数为45，完全能够满足要求。根据晶体管的基本原理可知，串联晶体的最大基极电流 $I_{B(max)}$ 应为：

$$I_{B(max)} = \frac{250 \times 10^{-3}}{1 + 45} (A) \approx 5.5 (mA)$$

2. 选择稳压管及其串联限流电阻

为了保持稳压器的输出电压更加稳定，流过稳压管的电流一般应当远远大于晶体管的基极电流。根据上述计算，晶体的最大基极电流约为5.5毫安，因此，稳压管的电流取定为25毫安是比较合适的。这样，流过串联限流电阻 R_1 的总电流应为30.5毫安左右。稳压管的基准电压应接近于要求的输出电压（12伏）。如果稳压管的基准电压具有 $\pm 5\%$ 的偏差，那么，基准电压的最大值应为12.6伏，最小值应为11.4伏。这样，根据公式（1-14），可以确定出串联限流电阻 R_1 的最大阻值为：

$$R_{1(max)} \leq \frac{16 - 12.6}{30.5 \times 10^{-3}} \approx 112 (\Omega)$$

根据设计要求，最小负载电流为50毫安。BDY60型晶体管的 h_{FE} 最大值为130，因此，晶体的最小基极电流应为0.385毫安。该电流即为稳压管的最小负载电流，因此，根据公式（1-17），稳压管的最大耗散功率 $P_{Z(max)}$ 应为：

$$\begin{aligned}
 P_{Z(max)} &= \left(\frac{20 - 11.4}{112} - 0.385 \times 10^{-3} \right) \\
 &\quad \times 11.4 \approx 880 (mW)
 \end{aligned}$$

根据晶体管手册给出的数据,可以看出BZY95-C12型稳压管的额定耗散功率、额定工作电流和基准电压都能满足上述要求。BZY95-C12型稳压管的基准电压具有5%的偏差,因此, R_1 的最大值为112欧。

在25°C时,BZY95-C12型稳压管的允许耗散功率为1.5瓦。因此,根据公式(1-20)和(1-21),可以算出 R_1 的最小值为:

$$R_{1(\min)} \geq \frac{20-12.6}{1.5/12.6+0.385 \times 10^{-3}} = 61.9(\Omega)$$

或者,

$$R_{1(\min)} \geq \frac{20-11.4}{1.5/11.4+0.385 \times 10^{-3}} = 65.2(\Omega)$$

由此可见,为了保证稳压管不过载,并且保证在整个输入电压变化范围内稳压管的输出电压保持不变, R_1 的阻值必须在65.2Ω和112Ω之间。图2-4中, R_1 的阻值取定为100Ω±10%。

3. 计算输出电压总变化量

假设输入电源内阻为2欧。BDY60型晶体管的等效基极电阻 R_B 为5欧,BZY95-C12型稳压管在工作电流为25毫安时,动态电阻 r_z 为12欧。串联限流电阻 R_1 为100欧。将这些数值代入公式(2-12)和(2-17),可以算出稳压系数 S 和输出电阻 R_o :

$$S = \frac{1}{1 + \frac{100+2}{12} + \frac{100+5}{(1+45)48} + \frac{2}{48} + \frac{5(100+2)}{(1+45)12 \times 48}}$$

$$= 0.102$$

$$R_o = \frac{5(100+2) + 12(100+5) + (1+45)12 \times 12}{(1+45)(12+100+2)} = 0.53(\Omega)$$

按设计要求，最高允许环境温度为 65°C 。晶体管手册给出BZY95-C12型稳压管的温度系数 $S_z=8$ 毫伏/ $^{\circ}\text{C}$ ，晶体管基-射极电压的温度系数 S_{TR} 为 -2 毫伏/ $^{\circ}\text{C}$ 。因此，根据公式(2-18)，稳压电路的总温度系数 S_T 为：

$$S_T = 8 - 2 = 6(\text{mV}/^{\circ}\text{C})$$

根据设计条件， $dV_i=4$ 伏， $dI_L=250-50=200$ 毫安 $=0.2$ 安， $dT=65^{\circ}\text{C}-25^{\circ}\text{C}=40^{\circ}\text{C}$ 。将上述数据代入公式(1-34)，可得出稳压器输出电压的总变化量 dV_o 为：

$$dV_o = 0.102 \times 4 - 0.53 \times 0.2 + 6 \times 10^{-3} \times 40 = 0.542(\text{V})$$

4. 散热器设计

BZY95-C12型稳压管的两个电极都是用导线引出的，不能安装散热器，因此，必须保证稳压管的耗散功率低于它的最大额定耗散功率。

根据公式(1-17)，在实际电路($R_1=100$ 欧)中，稳压管的最大耗散功率为936毫瓦。稳压管的最高允许结温为 175°C ，稳态热阻 $R_{th(j-cmb)}$ 为 $100^{\circ}\text{C}/\text{瓦}$ 。因此，根据公式(1-2)，在实际电路中，BZY95-C12型稳压管的最高允许环境温度为 81.4°C 。在设计要求中，规定最高环境温度为 65°C 。因此，这种稳压管完全可以满足要求。

晶体管的最高允许结温为 175°C 。因此，根据公式(1-2)和(1-3)，在环境温度为 65°C 时，晶体管所需散热器的热阻应为：

$$R_{th(j-s)} = \frac{175-65}{2} - (1.5+0.5) = 53(^{\circ}\text{C}/\text{W})$$

用1.625毫米厚的10毫米²铜板制成的散热器能够满足这个要求。

三、改进电路

上述最简单的晶体管串联稳压器存在不少缺点：(1)输入电压的变化影响稳压管的基准电压，因而也影响稳压器输出电压的稳定性；(2)稳压器的最大输出电流依赖于晶体管的电流增益和稳压管的工作电流，因此，串联调整管需要选用高增益晶体管，稳压管也需要采用大功率稳压管；(3)灵敏度很差。因此，宜采用下述各种改进电路。

如图2-5所示，稳压器的输入电压首先通过 R_2 和 D_2 组成的前置稳压器稳压，然后再供给 R_1 和 D_1 组成的稳压器。这样，基准电压就比较稳定，输入电压变化对稳压器基准电压的影响就大大减小，因此，稳压管 D_1 的基准电压只受因负载电流变化引起的基极电流变化的影响。由于晶体管基极电流的变化量一般都比较小，所以，稳压管基准电压所受到的影响也比较小。

如图2-6所示，在晶体管串联稳压器的基本电路中增加一

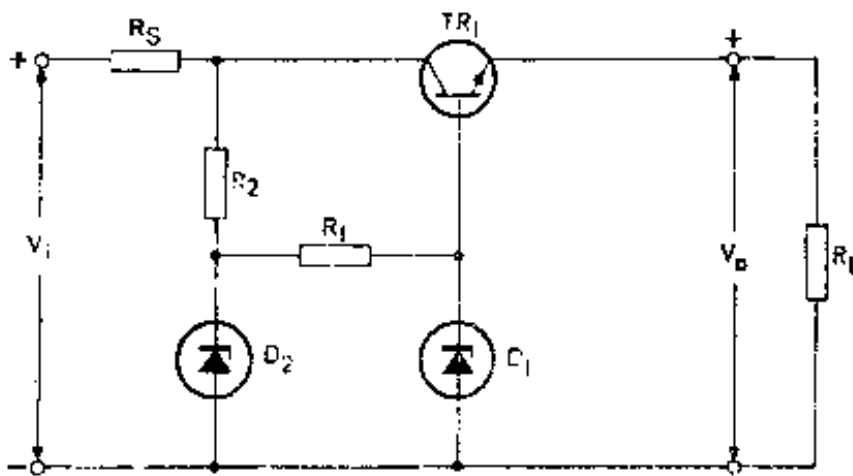


图 2-5 带有前置稳压器的简单串联稳压器

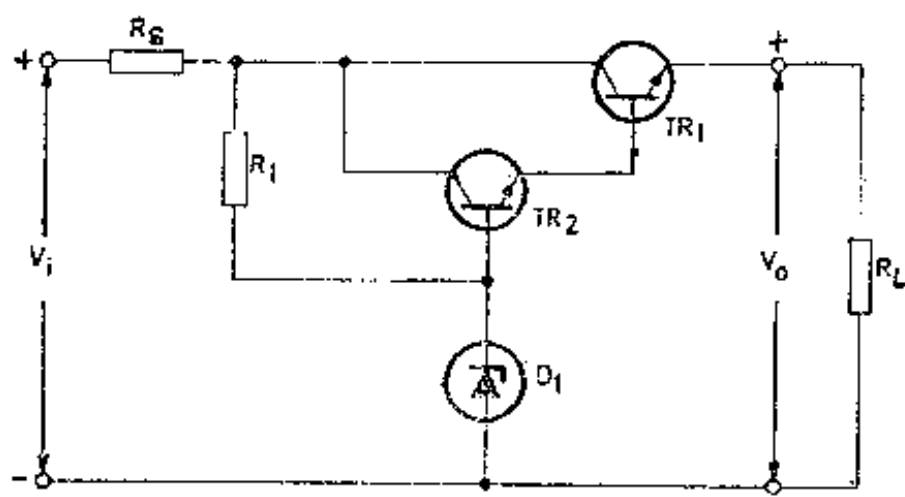


图 2-6 采用复合调整管的串联稳压器电路

只晶体管，与原来的晶体管组成复合射极跟随器电路。这样，调整管的电流增益就会大大增加，上述第二个缺点可以克服。这种电路的等效电路如图 2-7 所示。图 2-7 与图 2-3 所示的等效电路分析方法基本相同。不同点只是在图 2-7 所示的等效电路中，负载电流 I_L （等于晶体管 TR_1 的发射极电流 I_{E1} ）应当用 TR_2 的基极电流 I_{B2} 来表示。

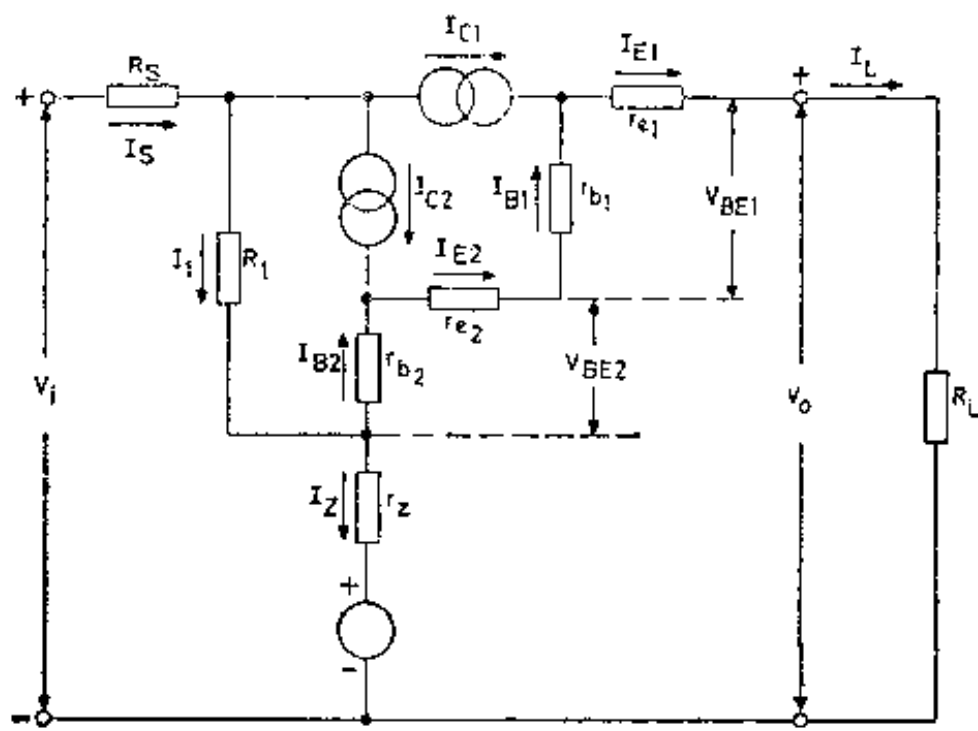


图 2-7 复合调整管串联稳压器的等效电路

根据图2-7所示的等效电路，可以给出下列方程式：

$$I_{B1} = I_{B2} = (1 + h_{FE2}) I_{B2} \quad (2-19)$$

$$I_L = I_{B1} = (1 + h_{FE1}) I_{B1} \quad (2-20)$$

把公式(2-19)代入(2-20)，可以得出：

$$I_L = (1 + h_{FE1} + h_{FE2} + h_{FE1} h_{FE2}) I_{B2} \quad (2-21)$$

由上式可以看出，复合调整管的总电流增益比单个晶体管的电流增益有很大的提高。下面研究一下这种电路的温度系数。根据图2-7所示的等效电路，可以给出下列方程式：

$$V_o = V_z + I_z r_z - V_{BE1} - V_{BE2} \quad (2-22)$$

求输出电压 V_o 对温度 T 的微商，可以得出：

$$S_T = S_z - S_{TR1} - S_{TR2} \quad (2-23)$$

由于两只晶体管基-射极电压的温度系数基本相等，即： $S_{TR1} = S_{TR2} = -2$ 毫伏/ $^{\circ}\text{C}$ ，因此，上式可以简化为：

$$S_T = S_z - 2S_{TR} \quad (2-24)$$

这个公式表明，稳压器输出电压的稳定性不仅受稳压管温度系数的影响，而且也受两只晶体管温度系数的影响。

如果将上述电路改进为图2-8所示的电路，那么，温度变化对输出电压的影响就大大减小。图2-8中，复合调整管由

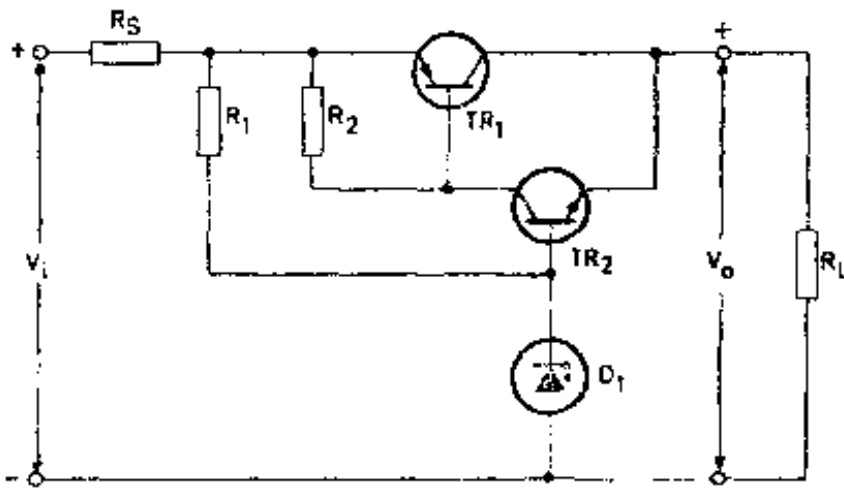


图 2-8 互补型调整管串联稳压器

$p-n-p$ 型和 $n-p-n$ 型互补晶体管构成。这种电路的等效电路如图2-9所示。

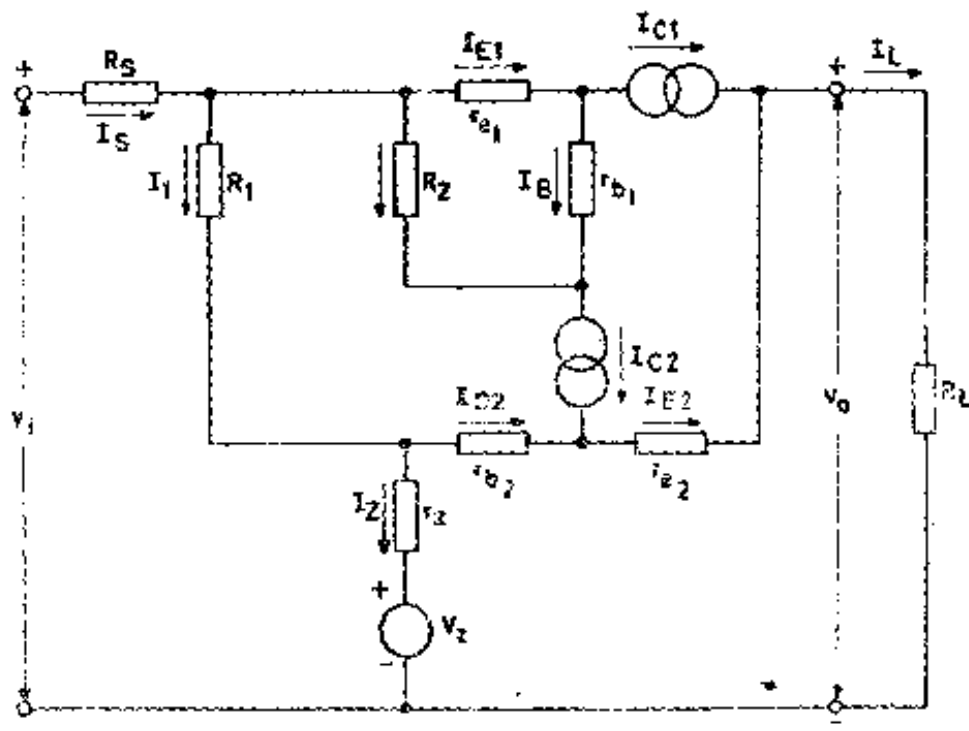


图 2-9 互补型调整管串联稳压器的等效电路

根据这个等效电路可以看出，互补型调整管串联稳压器的输出电压 V_0 可由下式表示：

$$V_0 = V_z + I_z r_z - V_{BE2} \quad (2-25)$$

根据公式(2-25)，可以求出该电路的温度系数 S_T ：

$$S_T = S_z - S_{TR2} \quad (2-26)$$

这个公式清楚地表明，如果只研究温度变化对输出电压的影响，那么，稳压器的输出电压只受稳压管 D_1 与晶体管 TR_2 的温度系数的影响；而晶体管 TR_1 的温度系数对输出电压是没有影响的。

如果 TR_2 采用锗管的话，要用电阻 R_2 旁路 TR_2 的集电极漏电流。如果 TR_2 采用硅管的话， TR_2 的集电极漏电流很小， R_2 可以省去不用。

如果需要更大的电流放大倍数，复合调整管可用更多的晶体管构成。但是，在用三只晶体管直接耦合而构成的射极跟随器电路中，串联调整元件的温度系数为 $3S_{TR}$ 。因此，只有在温度变化很小的条件下，才选用这种复合调整管。一般都采用由 $p-n-p$ 型和 $n-p-n$ 型晶体管构成的互补型复合调整管。图2-10绘出互补型复合调整管的两种接法。其中，图2-10(a)所示的复合调整管可等效为一只 $n-p-n$ 型晶体管。当输入电压和输出电压为正值时，可采用这种复合调整管。图2-10(b)所示的复合调整管可等效为一只 $p-n-p$ 型晶体管。当输入电压和输出电

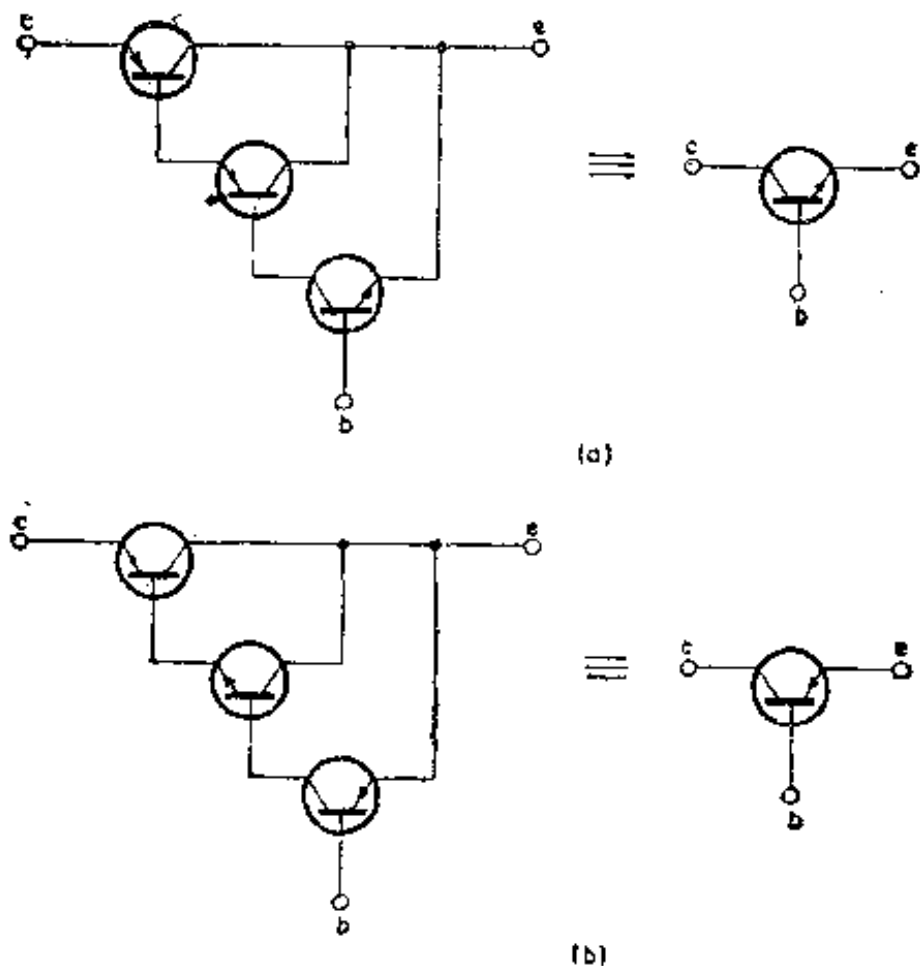


图 2-10 互补型复合调整管
(a)等效为一只 $n-p-n$ 型晶体管
(b)等效为一只 $p-n-p$ 型晶体管

压为负值时，可采用这种复合调整管。这两种复合调整管，输出电压的温度系数都只等于一只晶体管的温度系数。

第二节 带有单管电压放大器的 串联稳压器

上述的简单串联稳压器中，调整管只具有电流放大作用。为了提高稳压器输出电压的稳定性，通常需要将输出电压与基准电压比较，将其差值通过晶体管放大，然后再去控制调整管，以保持输出电压不变。

一、输出电压接近基准电压的串联稳压器

1. 基本电路

带有电压放大器的串联稳压器基本电路如图 2-11 所示。晶体管 TR_1 作为串联调整元件，具有电流放大作用。晶体管

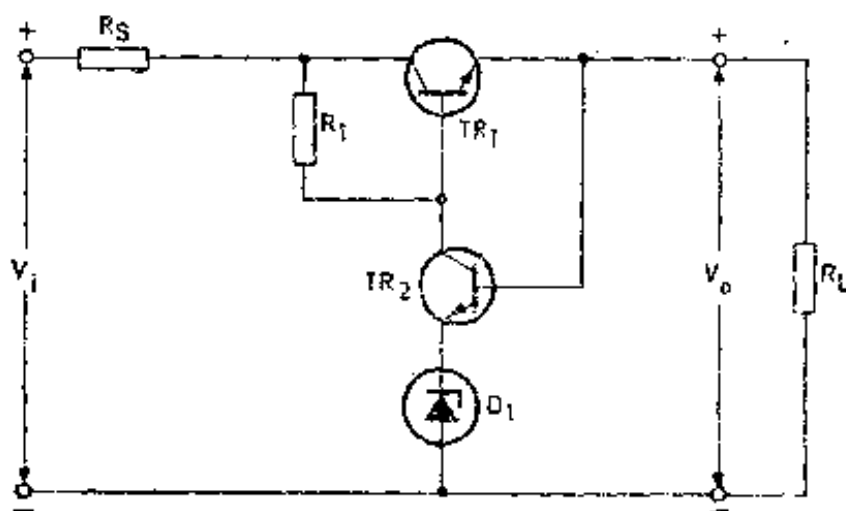


图 2-11 带有电压放大器的串联稳压器的基本电路

TR_2 构成误差电压放大器。稳压管 D_1 接在 TR_2 的发射极电路中，它的作用是产生基准电压。输出电压 V_o 与稳压管 D_1 两端的基准电压 V_z 进行比较，两者之差通过晶体管 TR_2 放大。经过放大的差值电压，控制调整管 TR_1 的集-射极电压，从而使输出电压保持不变。例如，因某种影响而引起输出电压升高时，由于 TR_2 的发射极电压等于稳压管的基准电压，基本上保持不变，所以，晶体管 TR_2 的基极电压将会升高，基极电流将会增加，因而发射极电流 I_{E2} 和集电极电流 I_{C2} 也会随之增加。由于 TR_2 的集电极电流流过电阻 R_1 ，所以， R_1 两端的压降 V_{R1} 也会增加。从图 2-11 可以看出，如果把电源内阻 R_s 的影响忽略不计，那么，稳压器的输入电压 V_i 应等于晶体管 TR_1 的集-射极电压 V_{CE1} 与输出电压 V_o 之和，而 TR_1 的集-射极电压 V_{CE1} 则等于集-基极电压 V_{CB1} ($V_{CB1} = V_{R1}$) 与基-射极电压 V_{BE1} 之和。由此可知， TR_1 的基-射极电压 $V_{BE1} = V_i - (V_o + V_{R1})$ 。因此，当输出电压 V_o 和电阻 R_1 两端的压降升高时， TR_1 的 V_{BE1} 将会减小， TR_1 的基极电流也将随之减小，从而 TR_1 的集-射极电压 V_{CE1} 将会增加。如果电路设计得当，输出电压 V_o 就可以基本上保持不变。

象其他稳压器一样，带有电压放大器的串联稳压器也可以利用等效电路（如图 2-12）分析其特性。

(1) 稳压系数

根据等效电路，可以列出下列方程式：

$$\begin{aligned} V_i &= I_1 R_s + V_{CB1} + V_o \\ &= (I_{C1} + I_1) R_s + I_1 R_1 + V_{BE1} + V_o \end{aligned} \quad (2-27)$$

根据晶体管的基本原理可知：

$$I_{E1} = h_{FE1} I_{B1} \quad I_{C2} = h_{FE2} I_{E2} \quad (2-28)$$

从等效电路也可以看出：

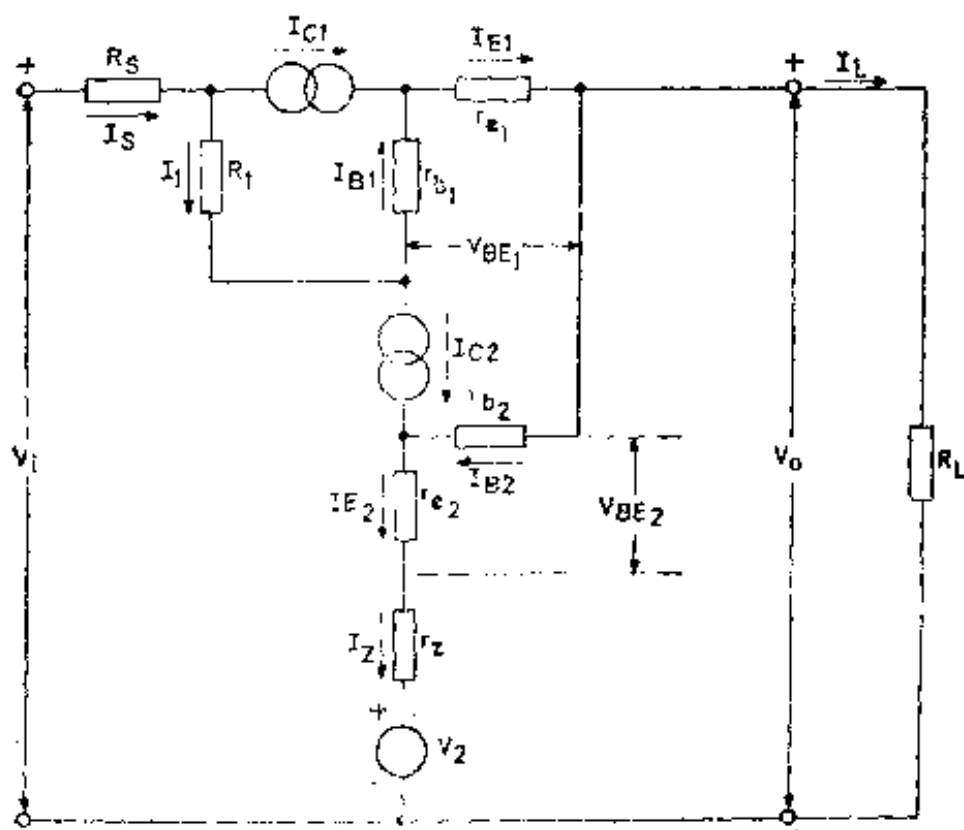


图 2-12 带有电压放大器的串联稳压器的等效电路

$$\begin{aligned} I_1 &= I_{B1} + I_{C2} \\ &= I_{B1} + h_{FE2} I_{B2} \end{aligned} \quad (2-29)$$

$$V_{BE1} = I_{B1} R_{B1} \quad (2-30)$$

式中,

$$R_{B1} = r_{b1} + (1 + h_{FE1}) r_{e1} \quad (2-31)$$

将公式 (2-28)、(2-29) 和 (2-30) 代入公式 (2-27), 经过适当整理后, 可以得出:

$$\begin{aligned} V_i &= V_o + I_{B1} (R_1 + R_{B1} + R_i + h_{FE1} R_i) \\ &\quad + h_{FE2} I_{B2} (R_i + R_L) \end{aligned} \quad (2-32)$$

根据等效电路, 也可以列出下列方程式:

$$I_L = I_{E1} - I_{B2} = (1 + h_{FE1}) I_{B1} - I_{B2}$$

因此,

$$I_{B1} = \frac{I_L + I_{B2}}{1 + h_{FE1}} \quad (2-33)$$

根据等效电路，还可以列出下列方程式：

$$V_o = V_z + I_z r_z + V_{BE2} \quad (2-34)$$

式中， $I_z = I_{B2} = (1 + h_{FE2}) I_{B2}$ (2-35)

$$V_{BE2} = I_{B2} R_{B2} \quad (2-36)$$

$$R_{B2} = r_{b2} + (1 + h_{FE2}) r_{e2} \quad (2-37)$$

将公式(2-35)和(2-36)代入公式(2-34)，经过适当整理后，可以得出：

$$I_{B2} = \frac{V_o - V_z}{(1 + h_{FE2}) r_z + R_{B2}} \quad (2-38)$$

再将公式(2-33)和(2-38)代入公式(2-32)，经过适当整理后，可以得出：

$$\begin{aligned} & V_o \left\{ 1 + \frac{R_1 + R_{B1} + (1 + h_{FE1}) R_z}{(1 + h_{FE1}) ((1 + h_{FE2}) r_z + R_{B2})} \right. \\ & \quad \left. + \frac{h_{FE2} (R_1 + R_z)}{(1 + h_{FE2}) r_z + R_{B2}} \right\} \\ & = V_i - I_L \frac{R_1 + R_{B1} + (1 + h_{FE1}) R_z}{1 + h_{FE1}} \\ & \quad + V_z \left\{ \frac{R_1 + R_{B1} + (1 + h_{FE1}) R_z}{(1 + h_{FE1}) ((1 + h_{FE2}) r_z + R_{B2})} \right. \\ & \quad \left. + \frac{h_{FE2} (R_1 + R_z)}{(1 + h_{FE2}) r_z + R_{B2}} \right\} \quad (2-39) \end{aligned}$$

将 $I_L = V_o / R_L$ 代入公式(2-39)，经过适当整理后，再求 V_o 对 V_i 的微商，可以得出稳压系数 S ：