

$$R_1 \geq \frac{V_o - V_{BE3} - V_{z1}}{I_{R1}} = \frac{30 - 0.8 - 6.2}{5 \times 10^{-3}} = 4.6(K\Omega)$$

实际电路中， R_1 取定为4.7千欧。

由于 TR_3 的基极电流远远小于 I_{R1} ，所以，可以认为流过电阻 R_2 的电流与流过 R_1 的电流是相等的。因此，

$$R_2 + R_p = \frac{V_{BE3} + V_{z1}}{I_{R1}} = \frac{0.8 + 6.2}{5 \times 10^{-3}} = 1.4(K\Omega)$$

$$R_2 = 1400 - 500 = 900\Omega = 0.9(K\Omega)$$

实际电路中， R_2 取定为1.0千欧。

在 TR_3 的集电极与基极之间接入0.01微法的电容器是为了防止高频不稳定性。加入 R_6 是为了给晶体管的漏电流构成通路，使得稳压器在低负载电流时能够可靠地工作。

(3) 电路性能

在图2-27所示的稳压器中，输出电压 V_o 与输入电压 V_i 的关系曲线，输出电压 V_o 与输出电流 I_o 的关系曲线以及输出电压 V_o 与温度 T 的关系曲线分别如图2-28、2-29和2-30所示。同时，图2-28给出了负载电流从零变化到400毫安时稳压系数 S 的数值；图2-29给出了输入电压从37.5伏变化到70伏时，输出电阻

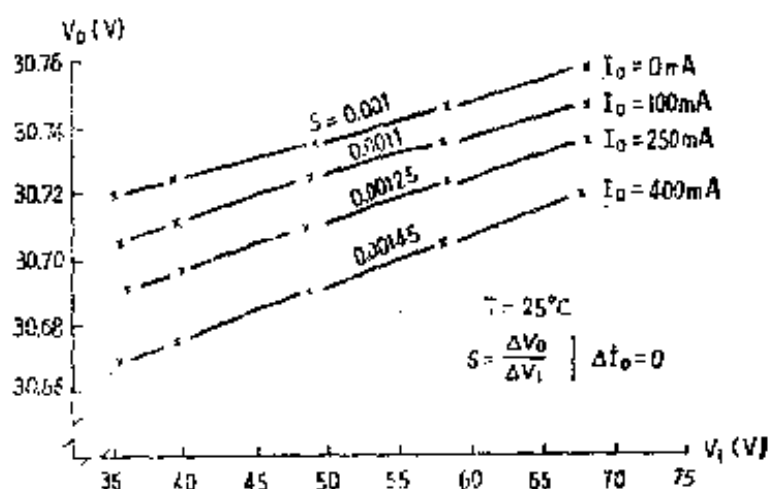


图 2-28 输出电压 V_o 与输入电压 V_i 的关系曲线

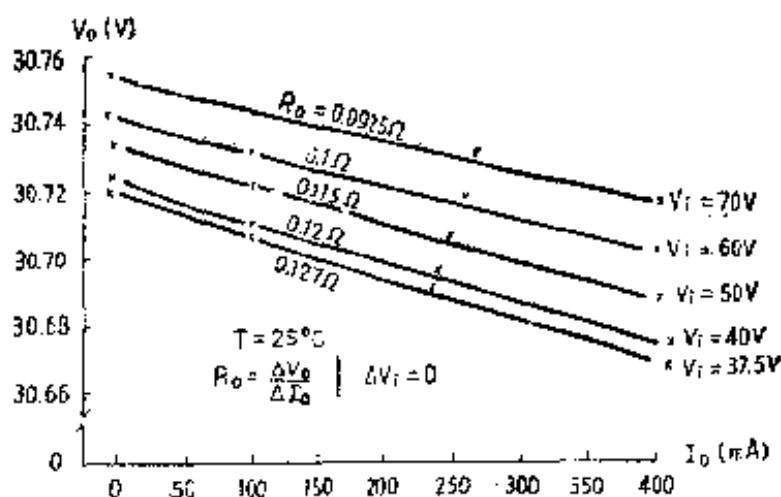


图 2-29 输出电压 V_o 与输出电流 I_o 的关系曲线

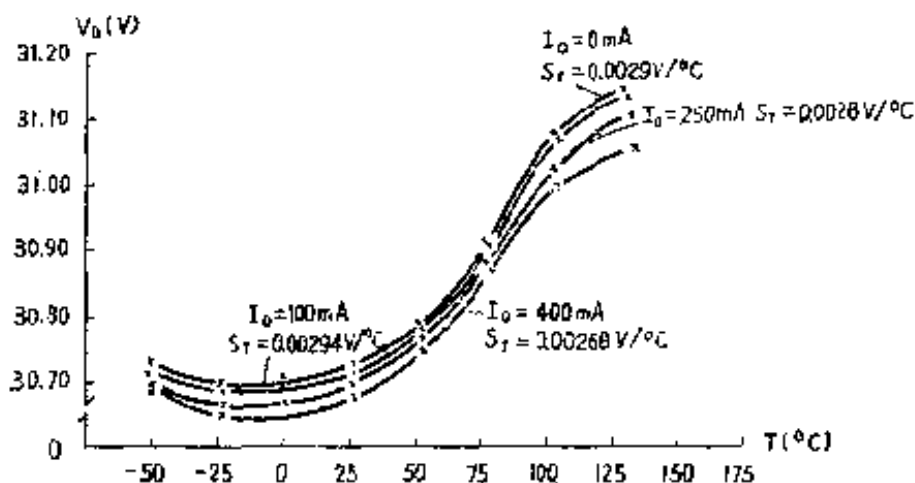


图 2-30 输出电压 V_o 与温度 T 的关系曲线

R_o 的数值；图2-30给出了负载电流从零变化到400毫安时温度系数 S_T 的数值。

第三节 带有差动放大器的串联稳压器

最简单的串联稳压器中，负载电流和输入电压的变化对输出电压的影响远远大于温度变化对它的影响。如前所述，一些高精度稳压电源中，增加一级单管电压放大器后，负载电流和输入电压的变化对输出电压的影响就大大减小。除此以外，在

高精度稳压电源中，温度变化对输出电压的影响也必须认真研究，并且应当采取措施减小各种元件的温度系数对稳压器输出电压的影响。为此，通常可采用带有差动放大器的串联稳压器。

一、基本电路

1. 工作原理

大家知道，稳压管的基准电压和晶体管的 V_{BE} 、 I_{CBO} 和 β 等参数都随温度变化而变化。一般来说，当晶体管的发射极电流 I_E 不变时，温度每升高 1°C ，晶体管的基-射极电压 V_{BE} 就要减小2毫伏左右。同一型号的晶体管，在同样的工作电流下，基-射极电压 V_{BE} 的温度系数是非常接近的。即使不同型号的晶体管，基-射极电压 V_{BE} 的温度系数也都在 -2 毫伏/ $^\circ\text{C}$ 到 -2.5 毫伏/ $^\circ\text{C}$ 之间，差别是不大的。根据实验得出的结果，温度每升高 1°C ，晶体管的 β 值就要增加0.5%到1%。但是，各种晶体管的 β 值随温度变化的规律很不一致。即使是同一型号，并且 β 值又基本相同的许多晶体管中，每只管子的 β 值随温度变化的规律也不尽相同。此外，晶体管基极与集电极之间的反向饱和电流 I_{CBO} 也会随着温度的升高而急剧增加。一般来说，晶体管的 I_{CBO} 基本上是随温度按指数规律增加的，所以，温度越高，增加得就越快。非常明显，在带有单管电压放大器的串联稳压器中，晶体管的这些参数随温度的变化都会影响到稳压器的输出电压。当然，当温度变化时，稳压器的比较放大管和串联调整管的参数都会发生变化。但是，调整管的参数变化所引起的漂移不大，只要保证调整管在不同的环境温度下都能工作于放大区就行了。因此，提高温度稳定性的关键在于提高比较放

大器的温度稳定性。为此，可以采用如图2-31所示的由 TR_2 和 TR_3 组成的差动放大器来代替如图2-18所示的由 TR_2 组成的单管电压放大器。

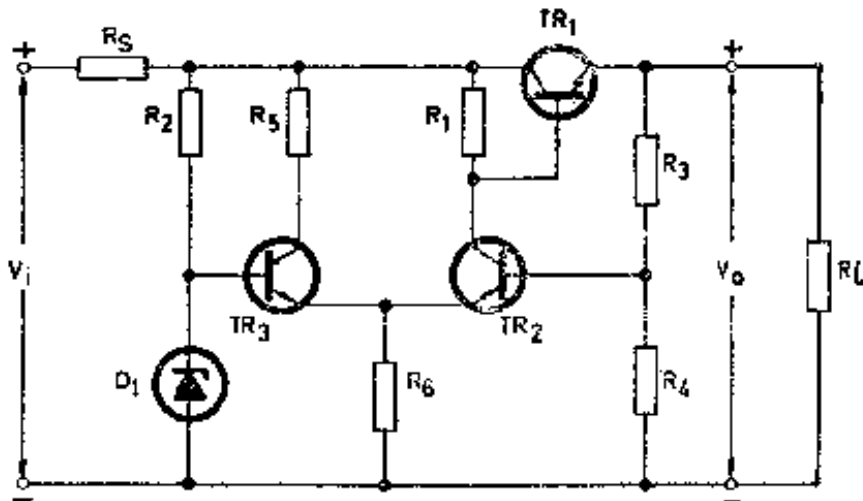


图 2-31 带有差动放大器的串联稳压器的基本电路

图2-31中， R_6 两端的压降等于稳压管的基准电压与 TR_3 的基-射极电压 V_{BE3} 之差。因此，当由于温度变化而使 TR_3 的基-射极电压 V_{BE3} 变化时， R_6 两端的压降也会发生变化。由于基准电压基本上可以认为是不变的，所以， R_6 两端的压降变化应与 V_{BE3} 的变化大小相等，方向相反。同样，温度变化时， TR_2 的基-射极电压 V_{BE2} 的变化也将引起 R_6 两端的压降产生相同的变化。由于 TR_2 和 TR_3 采用同一型号的晶体管，因此，温度变化对它们产生的影响大致相同。假设，因温度升高而使两只晶体管的集电极电流 I_C 增加时，流过 R_6 的发射极电流 I_E 将增加， R_6 两端的压降也增大，这样，加到两只晶体管的基-射极电压 V_{BE} 就减小，两只晶体管的基极电流 I_B 也减小。这就使两只晶体管的集电极电流保持不变，因而差动放大器的输出电压也就保持不变。

如果在差动放大器中，采用参数完全匹配的晶体管，或者把参数相同的两只晶体管装入同一个外壳作为一个特殊的晶体

管对（即孪生管）来运用，两只晶体管的基-射极电压和其它参数随温度变化而引起的差值就会更小。比如，BCY87型晶体管就是把两只参数相同的晶体管装入同一个外壳而制成的。这种晶体管的基-射极电压随温度变化而引起的差值可低达1微伏/ $^{\circ}\text{C}$ 。

2. 设计实例

图2-32是图2-17的改进电路。这种电路共用四只BFY52型晶体管。其中， TR_1 和 TR_2 组成复合调整管， TR_3 和 TR_4 组成差动放大器。这种电路比图2-17所示的电路具有更高的增益和更好的稳定性。稳压器的基准电压由BZY88-C6V2型稳压管供给。由于差动放大器的补偿作用，温度变化对稳压器输出电压的影响大大减小。

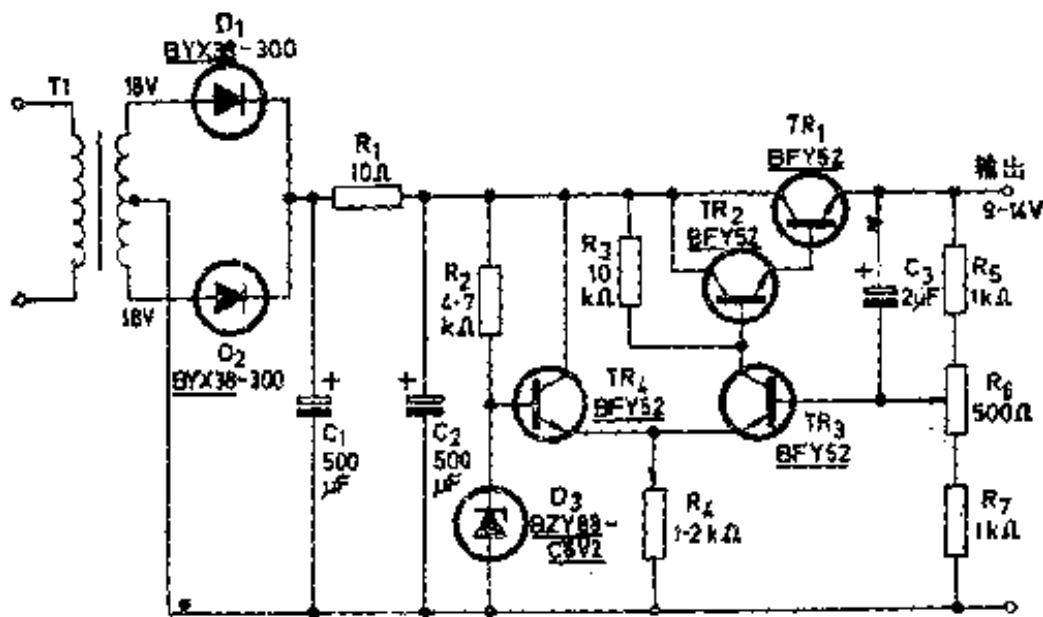


图 2-32 带有差动放大器的串联稳压器的实际电路

与图2-17所示的电路一样，该电路的输出电压也可在9.5伏到14伏之间调节。最大输出电流也是250毫安。波纹电压（有效值）低于2毫伏。当输入电压在16伏到20伏之间变化，并且

满负载输出时, $\partial V_o / \partial V_i$ 为 4%。调整率 $\left[\left(\frac{V_o(\text{空载}) - V_o(\text{满载})}{V_o(\text{空载})} \right) \times 100\% \right]$ 为 1.5%。晶体管 TR_1 应安装散热器。假如环境温度为 50°C , 散热器的热阻应为 $10^\circ\text{C}/\text{瓦}$ 。

3. 另一个设计实例

如图 2-33 所示, 正比于输出电压 V_o 的取样电压, 也可以加到差动放大器另一只晶体管的基极。图 2-33 所示的稳压电源最大输出电流为 1.5 安时, 输出电压可以在 15 伏到 20 伏之间调整。

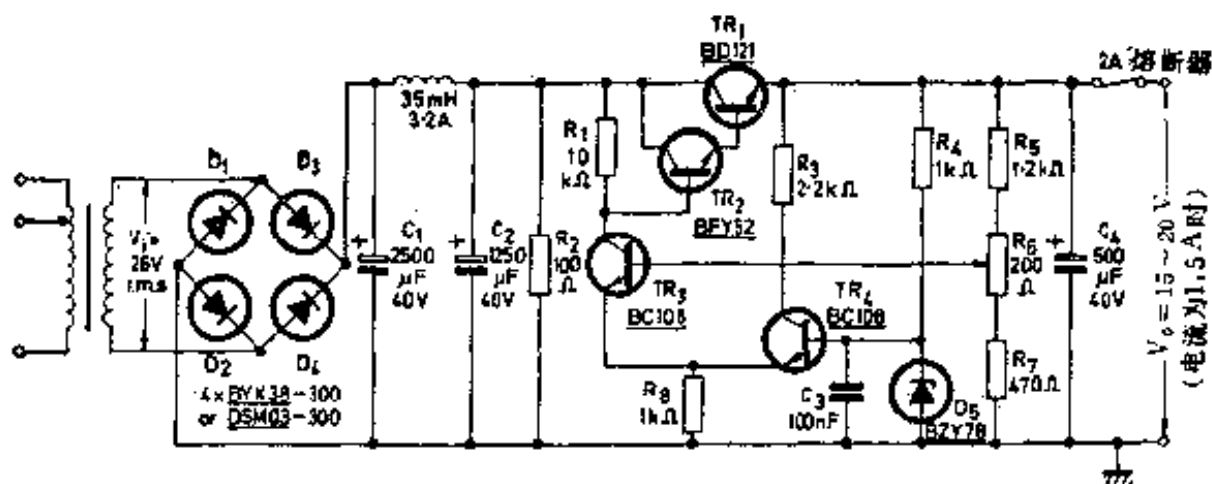


图 2-33 15~20 伏 1.5 安串联稳压电源

晶体管 TR_1 和 TR_2 组成复合调整元件。其中, TR_1 为 $BD121$ 型硅平面晶体管, TR_2 为 $BFY52$ 型晶体管。由于这种复合调整管具有较大的电流增益, 所以, 稳压器具有更好的电压调整率。晶体管 TR_3 和 TR_4 组成差动放大器。这两只晶体管都采用 $BC108$ 型晶体管。由于温度变化时, 这种差动放大器具有较好的补偿作用, 所以, 稳压电源的工作温度范围很宽。在这种稳压电源中, 输出电压随温度变化, 主要是由于稳压管 D_5 的温度系数造成的。在实际电路中, D_5 选用 $BZY78$ 型稳压管。

当最高环境温度为 50°C 时， TR_1 应安装散热器。散热器的热阻应为 $1.1^{\circ}\text{C}/\text{瓦}$ 。调整率 $\left\{ \left(\frac{V_{o(\text{空载})} - V_{o(\text{满载})}}{V_{o(\text{空载})}} \right) \times 100\% \right\}$ 低于 1.8% 。当输入电压 V_i 在24伏到28伏之间变化，并且负载电流为1.5安时，输入电压变化引起的输出电压变化 $\left(\frac{\partial V_o}{\partial V_i} \right) \times 100\%$ 为 3.5% 。波纹电压（有效值）低于2.5毫伏。

二、经过改进的电路

图2-33所示的电路还可以作进一步的改进。如图2-34所示，差动放大器的负载 R_L 可以用稳流电源代替。在这种电路中，稳流电源由晶体管 TR_4 、稳压管 D_2 和电阻 R_1 、 R_7 组成。又如图2-35所示，差动放大器也可由前置稳压器供电。在这种电路中，前置稳压器由电阻 R_7 和稳压管 D_2 组成，电阻 R_7 和稳压管 D_2 串联后接在调整管的两端。对于这种前置稳压器来说，要求稳压器的输入电压取得高一些。否则，应如图2-26所示，增加单独的稳压电源 V_{i2} 。图2-33、2-34和2-35所示的各种电路，都是利用稳压器的输出电压 V_o 作为差动放大器和稳压管的电源。一般来说，这些电路的输出电压都不太高，但是，要求采用高压晶体管和高压稳压管。

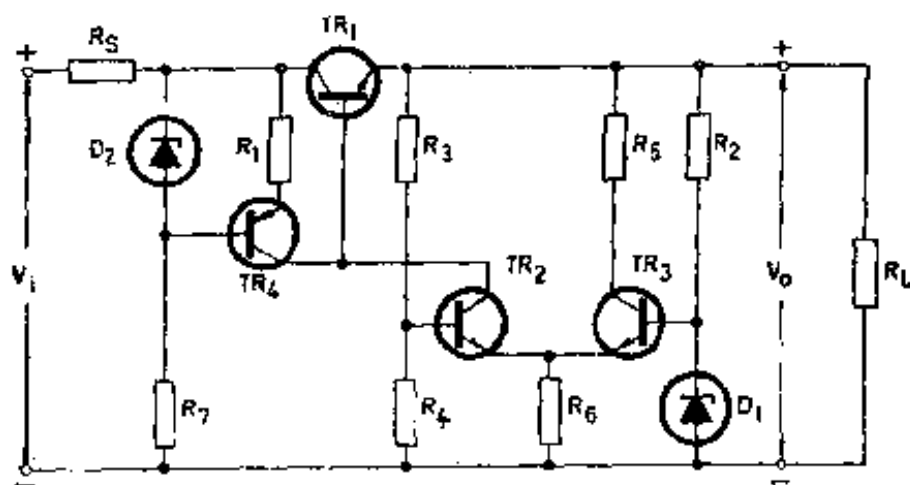


图 2-34 差动放大器的负载为稳流电源的串联稳压器

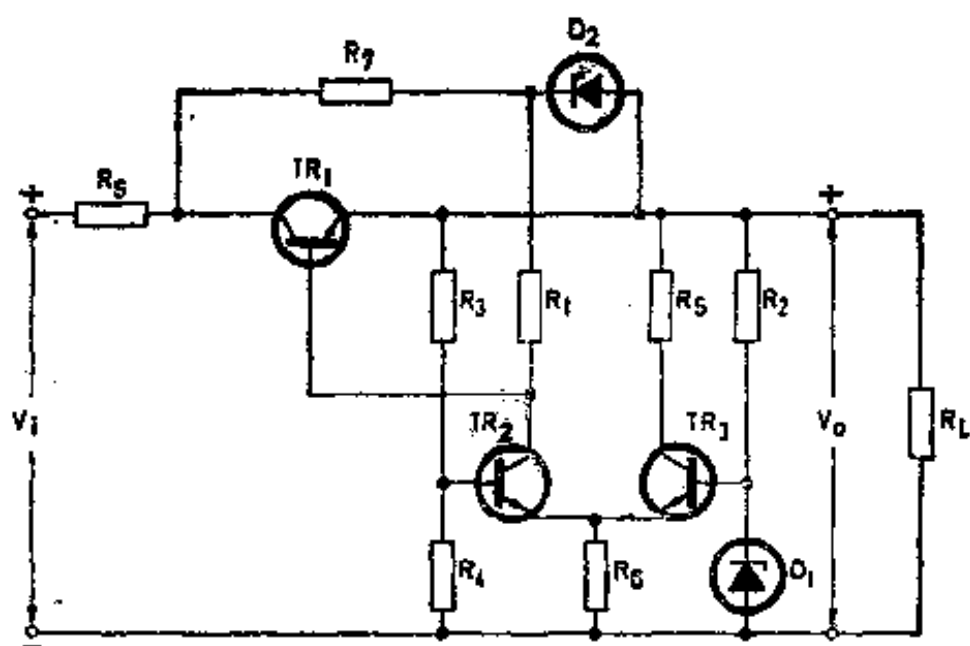


图 2-35 差动放大器由前置稳压器供电的串联稳压器

三、带有差动放大器的高压串联稳压器

1. 高压串联稳压器的电路原理

当稳压电源的输出电压较高时，上述各种串联稳压电路必须作适当的变更，才能采用额定电压低于稳压器最高输出电压的晶体管。满足这种要求的电路如图2-36所示。图中，稳压管 D_1 接到稳压器输出电压的正端。这样， R_3 、 R_4 和 R_6 的阻值可以远远大于 R_1 、 R_2 和 R_5 的阻值。因此， TR_2 和 TR_3 的发射极公用电阻 R_6 两端的压降大大增加，使 R_6 更接近于一个恒流源，并且加到 TR_2 和 TR_3 的集-射极电压也更低。

为了得到适当的相位关系， TR_1 的基极应接到 TR_3 的集电极。

这种电路可以采用低压稳压管。由于低压稳压管的动态电阻较小，所以，稳压器的温度系数较低。

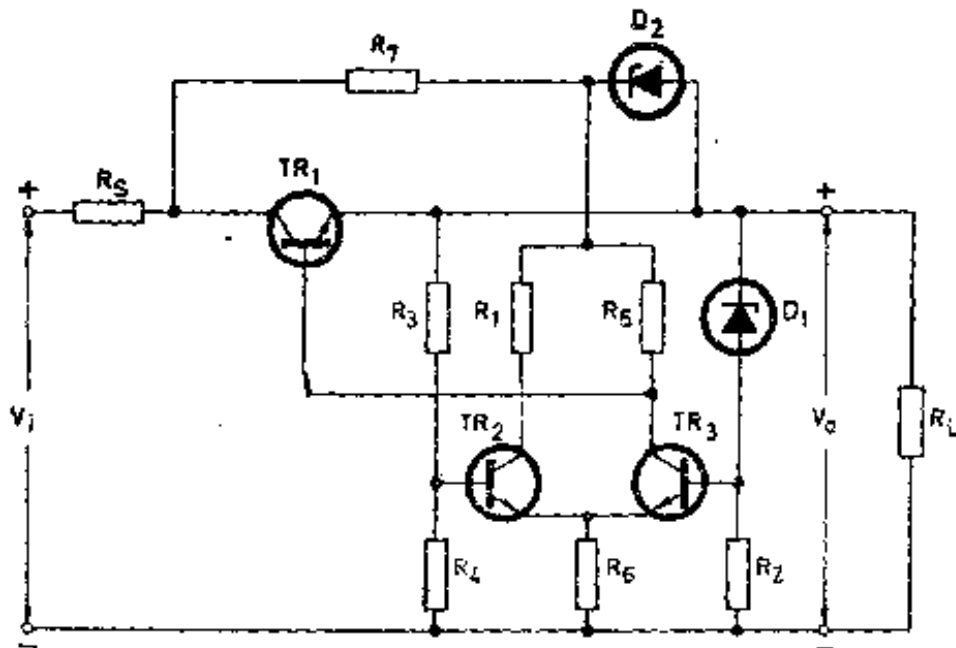


图 2-36 高压串联稳压器的基本电路

高压串联稳压器的实际电路如图2-37所示。当负载电流为50毫安到600毫安时，输出电压为290伏。

在图2-37所示的电路中，误差信号是由 TR_2 的集电极输出

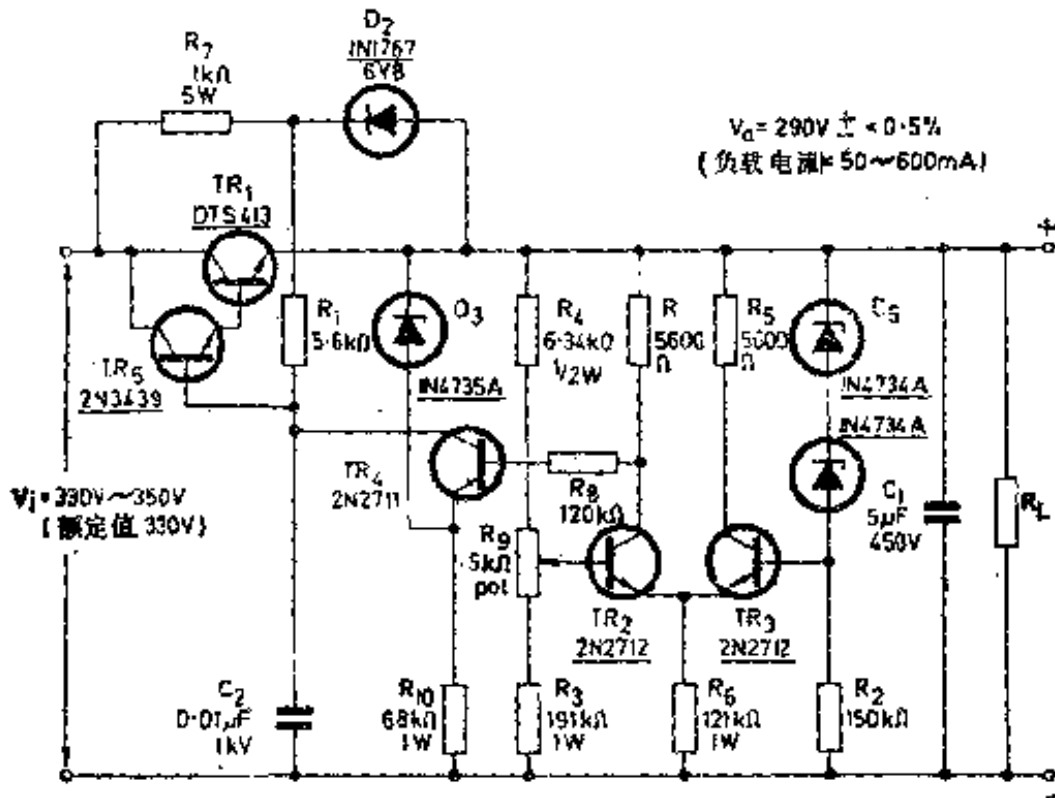


图 2-37 高压串联稳压器的实际电路

的，而不是象图2-36那样由 TR_3 的集电极输出的。为了倒相和放大误差信号，多用了一只晶体管 TR_4 。

稳压管 D_3 与晶体管 TR_4 的发射极电阻 R_1 组合在一起，能够产生适当的发射极电压以使 TR_4 有合适的工作状态。用电位器 R_6 调整稳压器的输出电压时，电阻 R_8 可以把 TR_4 的基极电流限制在安全范围以内。 TR_5 能产生附加的电流增益，以减小 TR_4 的负载。当输入电压变化15%时，稳压器的电压调整率低于 $\pm 0.05\%$ 。

2. 带有两级前置稳压器的高压串联稳压器

带有两级前置稳压器的高压串联稳压器的实际电路如图2-38所示。在这种电路中， TR_5 的集电极电压是通过两级前置

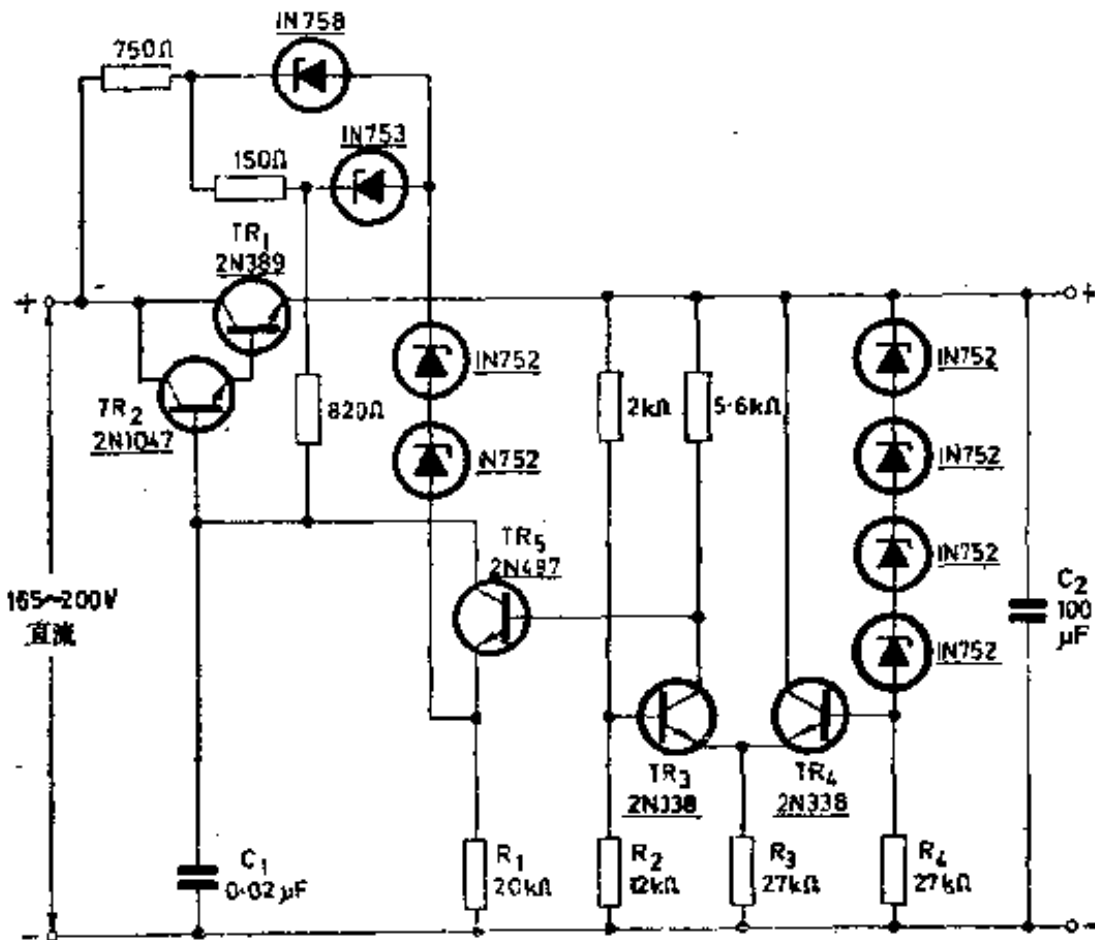


图 2-38 带有两级前置稳压器的150伏串联稳压器

稳压器稳压后供给的。除此以外，这种电路与上述带有单级前置稳压器的串联稳压器基本相同。由 TR_1 和 TR_2 组成的复合射极跟随器作为稳压器的串联调整元件。四只1N752型低温度系数（ $5.6\text{伏} \pm 0.006\%/^{\circ}\text{C}$ ）稳压管串联，以供给适当的基准电压。

图2-37和2-38所示的两种高压串联稳压器都具有下列优点：由于采用了两级直流放大器，误差信号的放大倍数较高；由于采用了复合射极跟随器作串联调整元件，电流放大倍数较高，稳压电路的灵敏度较高；由于采用了前置稳压器，稳压器的电压调整率得到改善；由于稳压管接到比较放大器的基极，减少了稳压器的输出阻抗；由于采用了差动放大器作比较放大器，晶体管的温度系数对输出电压的影响大大减小。

第四节 具有双路输出电压和输出电压 调整范围较宽的串联稳压器

有些电子设备需要大小相等而极性相反的两种电源电压。这样的电源电压可以通过对称的稳压电路来获得。在对称的双路稳压器中，各支路的串联调整元件可以采用互补晶体管，即一路采用 $p-n-p$ 型调整管，而另一路则采用 $n-p-n$ 型调整管。也可以采用等效互补接法的复合晶体管，即两路都采用复合调整管，但一路的复合调整管应能等效为 $p-n-p$ 型晶体管，而另一路的复合调整管则应能等效为 $n-p-n$ 型晶体管。此外，也有一些电子设备要求电源电压能在较宽的范围内进行调整。下面分别介绍可以满足这两种要求的串联稳压器。

一、双路串联稳压器

1. 最简单的双路稳压电源

最简单的双路稳压电源如图2-39所示。每路都采用最简单的串联稳压电路。在输出电压为+9伏的稳压电路中，采用 $n-p-n$ 型晶体管作串联调整元件，而在输出电压为-9伏的稳压电路中，则采用 $p-n-p$ 型晶体管作串联调整元件。除此以外，两路稳压电路的结构完全相同，各元件的数值也完全一样。输入电压偏差为 $\pm 10\%$ 。最大输出电流为50毫安。满载时纹波电压为20毫伏（峰—峰值）。当环境温度为 0°C 到 50°C 时，晶体管不需要安装散热器。电源变压器次级需要有中心抽头。直流电流为80毫安时，变压器次级电压有效值为11-0-11伏。次级线圈的电阻小于28欧（包括次级线圈电阻与初级线圈

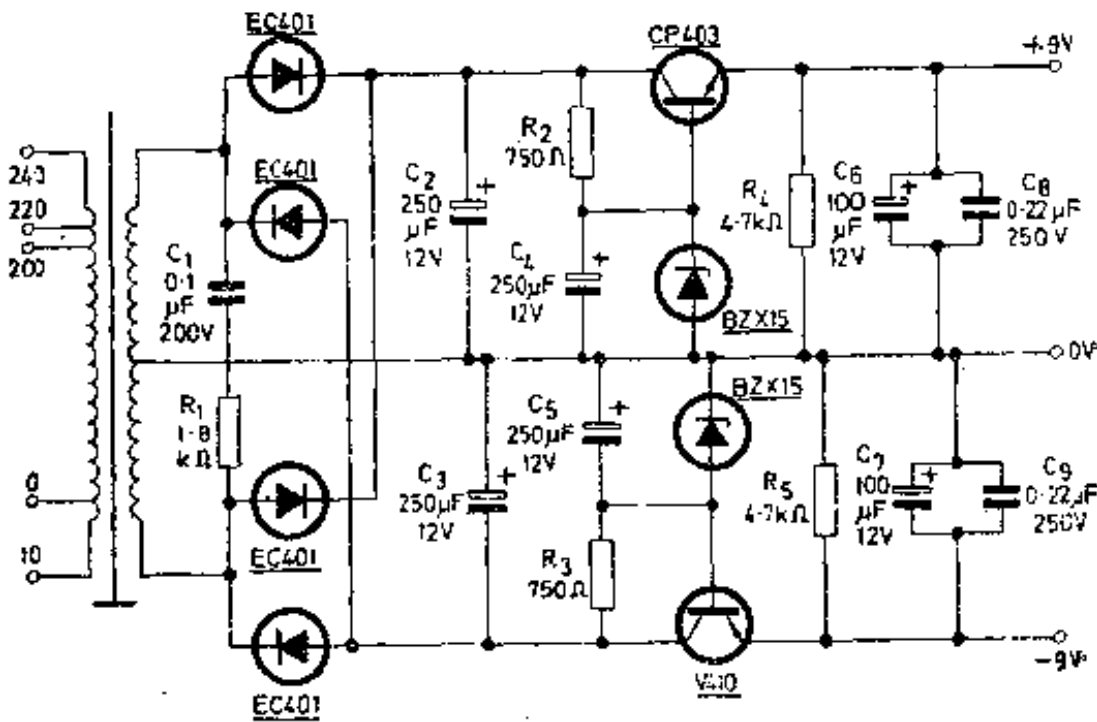


图 2-39 最简单的双路稳压电源

反射电阻)。

2. 带有电压放大器的双路稳压电源

带有电压放大器的双路稳压电源如图2-40所示。在这种电路中，串联调整元件采用复合调整管，并且只用一只稳压管。稳压电源的额定输出电压为 ± 9 伏。在取样电路内串联一只电位器。通过调整电位器的阻值，可以使输出电压在 $+8.5$ 伏到 $+9.5$ 伏之间和 -8.5 伏到 -9.5 伏之间调整。每路稳压器的最大输出电流为100毫安。输出纹波电压与杂音电压之和低于5毫伏(峰-峰值)。

当任何一路输出短路或两路输出均短路时，该稳压器能够

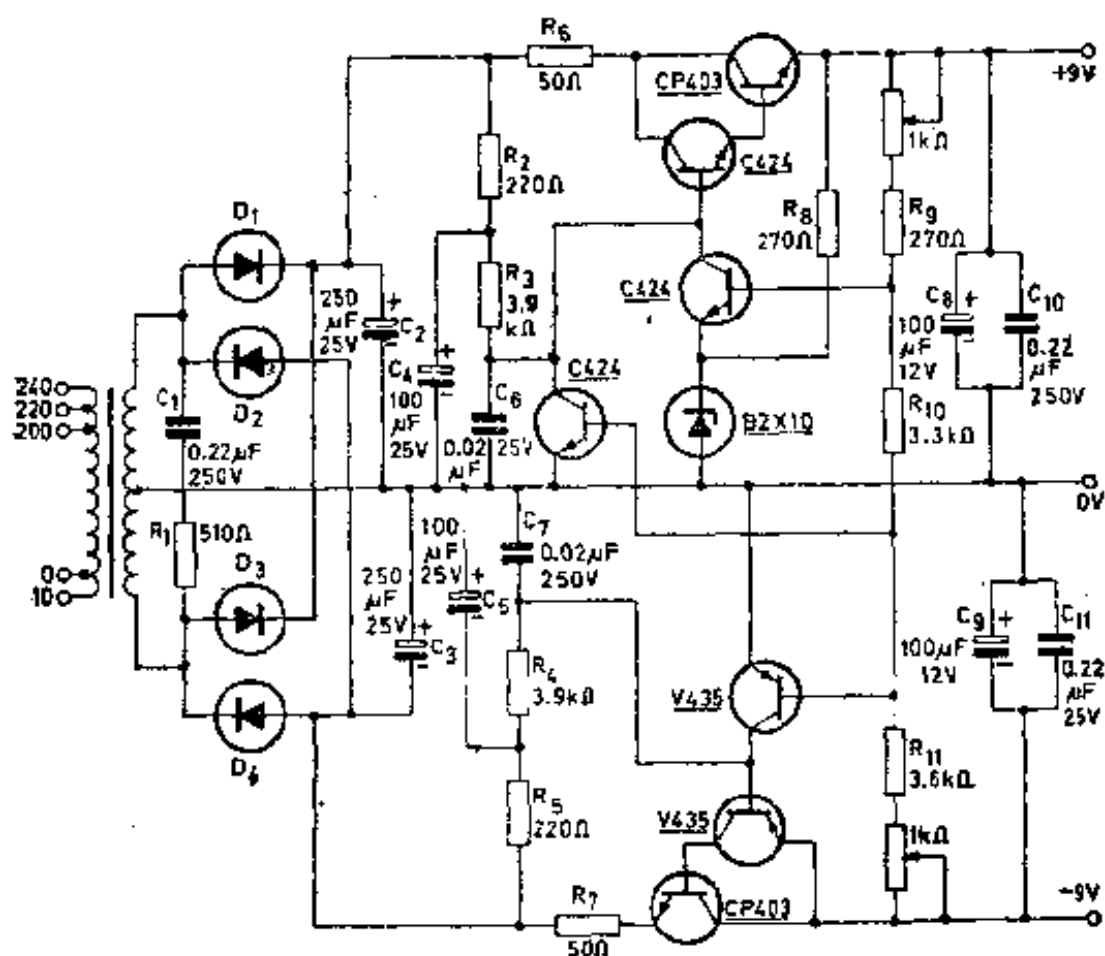


图 2-40 带有电压放大器的双路稳压电源

安全工作。输出电流超过最大规定值时，串联调整管将会饱和。因此，每路输出电流均不能超过300毫安。如果任何一路输出短路时，另一路输出将下降到1伏以下。这种电路的工作温度范围为 0°C 到 55°C ，串联调整管要安装散热器，比较合适的是5F-2型散热器。

二、输出电压调整范围较宽的串联稳压器

1. 输出电压可连续调整的串联稳压器

输出电压高于基准电压的串联稳压器，其输出电压的调整范围取决于取样电路内各个电阻的阻值之比。从图2-18可以看出，串联稳压器的输出电压 V_o 可以由下式给出：

$$V_o = (V_z + V_{BE2}) \frac{R_3 + R_4}{R_4} \quad (2-63)$$

由此可见，当 $R_3 = 0$ 时，稳压器的输出电压最低，其值为：

$$V_{o_{\min}} = V_z + V_{BE2} \quad (2-64)$$

当 R_3 的阻值增加时，输出电压将升高。当 R_3 为最大值时，输出电压最高。如果 R_4 的阻值是固定的，那么， R_3 的最大值应照下述办法选定：把 R_3 的阻值代入公式(2-63)求出稳压器的输出电压 V_o ，并且， V_o 的数值至少要比给定的输入电压低2伏。只有这样，才能保证串联调整管不会达到饱和状态，否则，调整管增益下降，稳压器的电压调整率将变坏。

这种电路的缺点是输出电压不可能低于由公式(2-64)决定的最低值。如果将上述串联稳压电路改变为图2-41所示的电路，那么，上述缺点即可克服。

在图2-41所示的电路中，增加了一个辅助电源，并且把差动放大器的公共发射极电阻 R_e 接到比电源零端更负的辅助电源

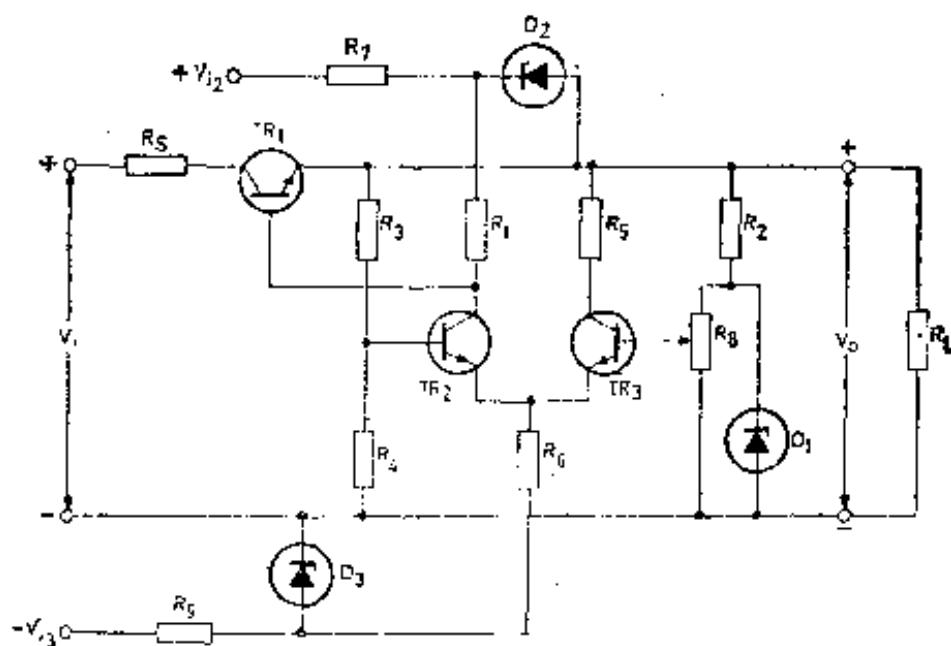


图 2-41 输出电压调整范围较宽的串联稳压器

上，以供给所需的发射极电流。 R_8 为电位器。调整电位器 R_8 可以使加到 TR_3 基极的基准电压在 0 到 V_z 之间变化。这样，输出电压的调整范围可以由下式给出：

$$0 \leq V_o \leq \frac{(V_z + V_{BE2})(R_3 + R_4)}{R_4} \quad (2-65)$$

但是，在这种电路中，基准电源的有效电阻有所增加，因此，稳压器的输出电阻也会有所增加。这是它的不足之处。

图2-42所示的稳压电源，最低输出电压也可以调整到零。在这种电路中，稳压管和差动放大器一起接到电压为负值的辅助电源 V_{i3} 上，调整可变电阻 R_3 ，稳压器的输出电压可以在 0 到 $V_{b(max)}$ 之间选定。

2. 输出电压可分档调整的串联稳压器

如图2-43所示，串联稳压器的输出电压可在 0 到20伏之间分档调整，每档 1 伏。输出电流可以达到 1 安。

图中，晶体管 TR_3 、 TR_4 和电阻 R_2 、 R_7 、 R_8 组成限流保护电路（限流保护电路的基本原理将在本章第五节介绍）。当

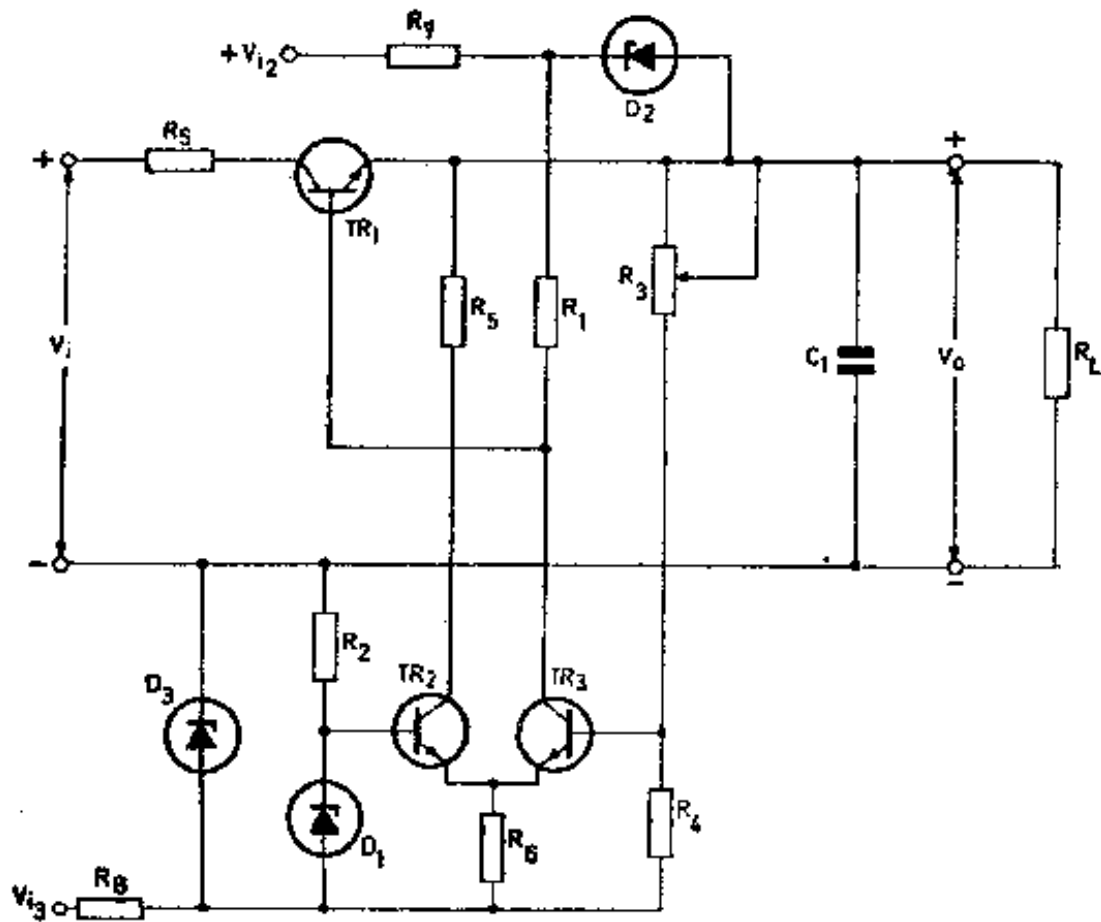


图 2-42 输出电压调整范围较宽的改进型串联稳压器

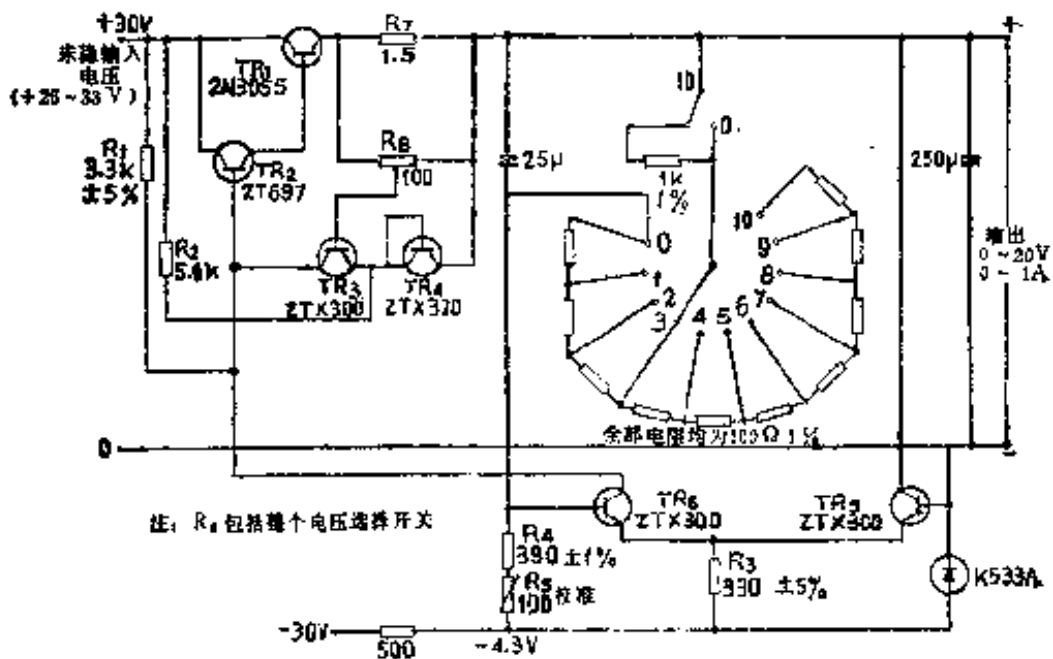


图 2-43 输出电压可分档调整的串联稳压器

负载短路时， TR_1 承受全部输入电压和全部输出电流。额定输入电压为30伏，因此， TR_1 的最大耗散功率约为30瓦。 TR_1 应当安装散热器。并且， TR_2 可以与 TR_1 装在同一个散热器上。

3. 输出电压可分档连续调整的串联稳压器

在输出电压可连续调整的串联稳压器中，为了避免输出电压调整到最低时串联调整管承受过高的压降，必须对上述电路作适当的变更。

输出电压可连续调整的串联稳压器输出低电压时，为了减小串联调整管压降而采取的第一种方法如图2-44所示。通过开关 S 同时转换输入电压和控制电路元件的数值。输出电压分为10伏、15伏和20伏几档，并且在每一档内，通过调整电位器 R_8 。

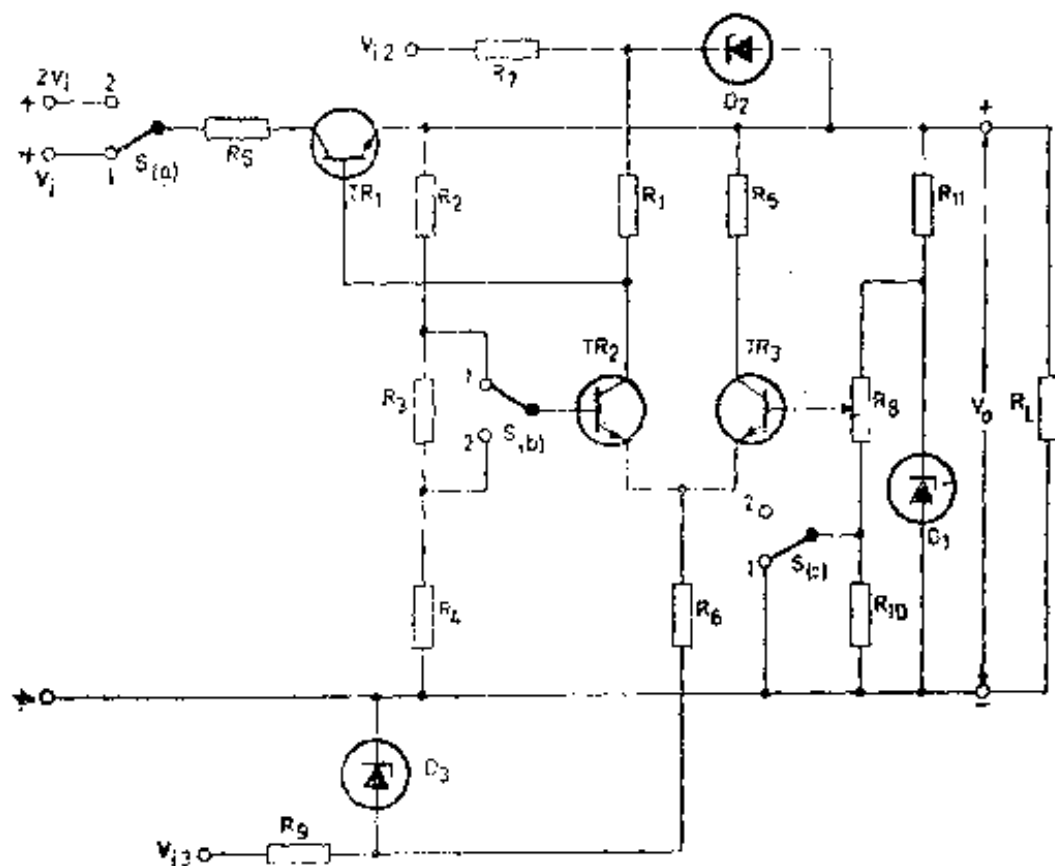


图 2-44 输出电压可分档连续调整的串联稳压器

使输出电压均可以连续调整。这种电路的缺点是：当输出电压调整到最高档时，如果负载短路，全部输入电压将加在串联调整管的两端。因此，为了使稳压器能够绝对安全工作，串联调整管电路中除了加限流保护外，还需要加过压保护。

输出电压可连续调整的串联稳压器输出低电压时，为了减小串联调整管压降而采取的第二种方法如图 2-45 所示。图中，稳压器的整流输入电路由自耦变压器供电，并且，自耦变压器与输出电压调整电位器 R_3 同轴调整，同时，稳压器控制电路和基准电源采用不同的电源供电。这样，对于任意的输出电压来

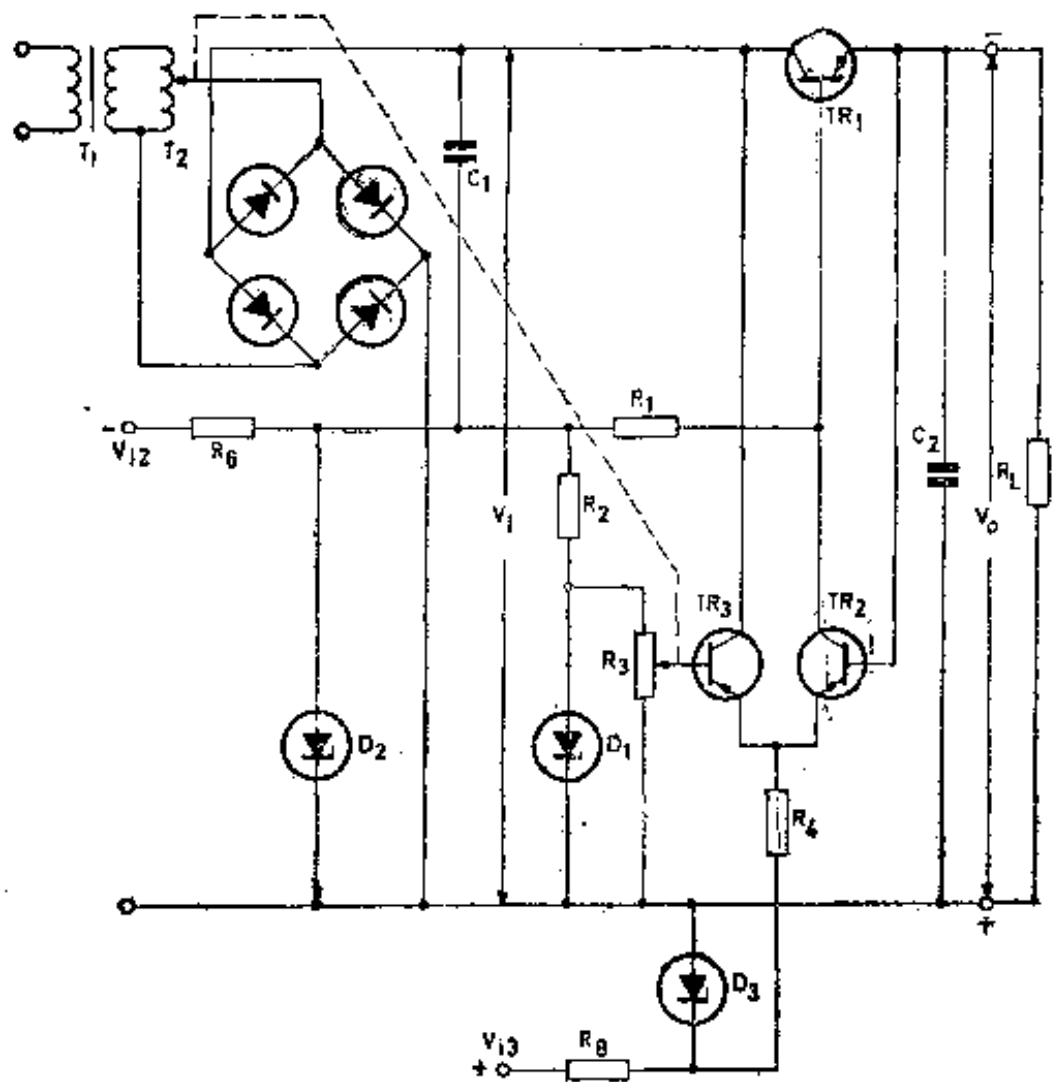


图 2-45 采用自耦变压器调压的串联稳压电源

说，串联调整管两端的压降都可以基本上保持不变。这种稳压电源的工作比较安全，耗散功率较小。但是，由于采用自耦变压器调压，成本较高。

第五节 晶体管串联稳压器的保护电路

晶体管串联稳压器接有电容性负载时，电源接通后造成稳压器的瞬间输出电流过大，有可能损坏串联调整管。接有其它负载时，如果负载短路或者负载电流过大，也有可能损坏串联调整管。因此，在串联稳压电路中，必须采用适当的电路保护串联调整元件。否则，负载短路时，全部输入电压都会加在串联调整管集-射结两端，并且，流过串联调整管的电流只受电路内有效串联电阻的限制。有效串联电阻的阻值通常只能稍大于变压器线圈的电阻。此外，在串联稳压电路中，为了提高输出电压的稳定性，输入电压一般都取得比较高，至少要比输出电压高几伏。这样，负载短路时，串联调整管所承受的耗散功率通常要比它的允许耗散功率大好多倍。因此，为了避免损坏晶体管，必须采取保护措施。

常用的保护电路有下列几种：（1）限流保护电路；（2）断流保护电路；（3）负载转换保护电路；（4）调整管失控保护电路。下面分别加以介绍。

一、限流保护电路

1. 电阻限流保护电路

最简单的限流保护电路是在串联稳压器的输出回路中串入一个电阻。这个电阻的阻值应取得相当大，足以保证在晶体管

的耗散功率达到最大值以前，使晶体管饱和。但是，串入阻值过大的电阻不仅要损耗较大的功率，而且也影响稳压器的性能。

2. 二极管限流保护电路

为了避免串入阻值较大的电阻，可以采用二极管限流保护电路。采用二极管限流保护电路的稳压电源如图 2-46(a) 所示。限流保护电路由二极管 D_2 和电阻 R_4 构成。 D_2 可以采用一只普通二极管或几只普通二极管串联，也可以采用稳压管。从

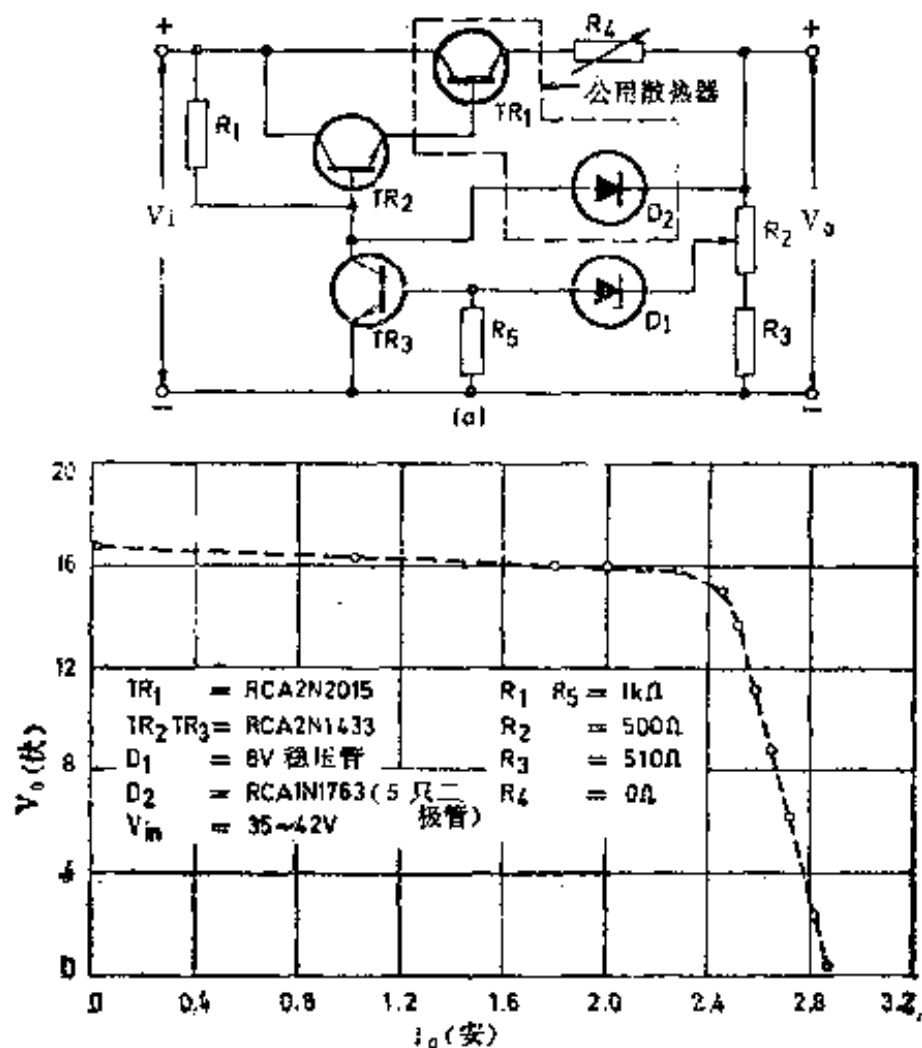


图 2-46 (a) 采用二极管限流保护电路的稳压电源，
(b) 稳压器的输出特性曲线