

图中可以看出，加到二极管 D_2 两端的电压等于 TR_1 与 TR_2 的 V_{BE} 之和再加上负载电流 I_L 在 R_4 上产生的压降，即：

$$V_{D_2} = V_{BE_1} + V_{BE_2} + I_L R_4。$$

当稳压器正常工作时，二极管 D_2 两端的电压较低，不能导通，对调整管没有影响。当负载电流 I_L 过大时， R_4 两端降压增大，二极管 D_2 两端的电压随之增大，因而 D_2 导通。二极管 D_2 导通后，正向电阻很小，对调整管的分流作用较大，从而使调整管的基极电流减小。这样，就能限制调整管的发射极电流 I_E ，也能限制负载电流 I_L 。稳压器的最大负载电流 $I_{L(max)}$ 可以由下式给出：

$$I_{L(max)} = \frac{V_{D_2} - V_{BE_1} - V_{BE_2}}{R_4}$$

由此可见，改变电阻 R_4 的阻值或者改变串联二极管的数目，就可以改变稳压器的最大负载电流。在实际电路中， V_D 和 V_{BE} 将随着温度变化而变化，所以，稳压器的最大负载电流 $I_{L(max)}$ 也是随温度而变化的。

图2-46所示的稳压电源中，二极管 D_2 由五只1N1763型二极管串联构成。如果把 R_4 调整到零，稳压电源的输出特性曲线如图2-46(b)所示。如果 R_4 的阻值不为零，最大负载电流 $I_{L(max)}$ 就会稍低一些。

3. 晶体管限流保护电路

采用晶体管限流保护电路的串联稳压器如图2-47(a)所示。限流保护电路由晶体管 TR_4 、二极管 D_2 、电阻 R_4 和 R_5 组成。保护电路不一定要装在稳压器的内部，也可以作为单独的装置与稳压器相连接。在正常工作时，先适当调整 R_5 的阻值，使 TR_4 达到饱和状态。这时，由于负载电流较小， R_4 两

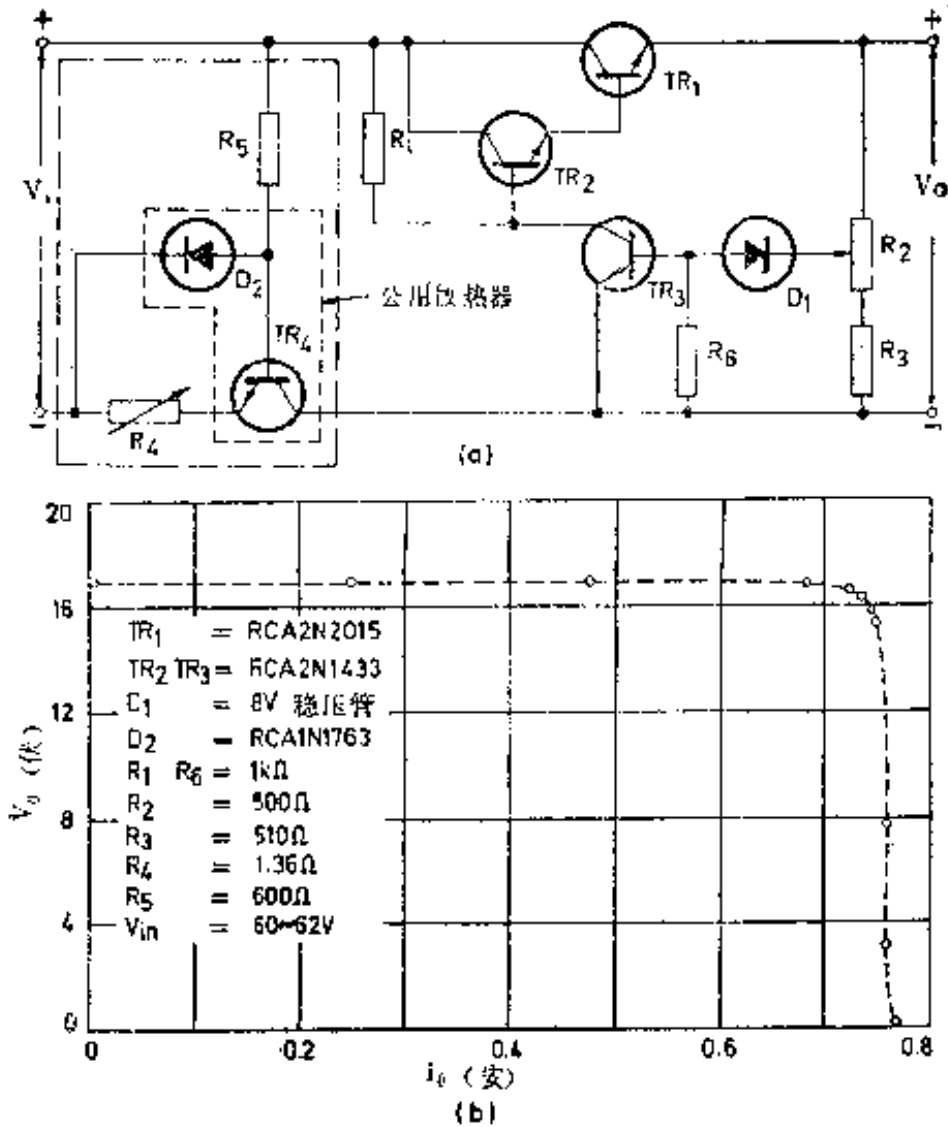


图 2-47 (a)采用附加串联晶体管的限流保护电路，
(b)稳压器的输出特性曲线

端的压降较小，二极管 D_2 不导通。一旦过载时， R_4 两端的压降增加，二极管 D_2 导通。二极管 D_2 导通后，正向电阻很小，对 TR_4 产生较大的分流作用， TR_4 的基极电流减小，从而离开饱和区进入放大区，集-射极电压降增加，使稳压器的输出电压降低。当负载短路时， TR_4 截止。当 R_4 调整在最大值时，全部输入电压都加在 R_4 与 TR_4 的两端。这种电路的输出特性曲线如图 2-47 (b) 所示。如果该电路过载，二极管和晶体管

的结温都会发生变化，因此 D_2 的正向压降和 TR_4 的基-射极电压 V_{BE} 都将发生变化。为了减小过载时结温变化的影响， D_2 和 TR_4 应装在同一个散热器上。

这种电路的缺点是需要增加一个串联晶体管 TR_4 。从图中可以看出， TR_4 与串联调整管 TR_1 具有同样的额定电流和额定电压。

如果利用稳压器中的串联调整管来完成限流作用，上述缺点可以克服。但是为了提高限流电路的灵敏度，在这种限流保护电路中仍需要增加一只晶体管。利用调整管作限流保护的稳压电路如图2-48所示。在该电路中，串联调整元件采用复合射极跟随器接法。

在这种电路中，电阻 R_4 两端的压降以及 TR_1 与 TR_2 的基-射极电压之和都正比于负载电流。过载时， R_4 两端的压降加上 TR_1 与 TR_2 的基-射极电压之和，应能使 D_2 和 TR_4 导通。这时，由于 TR_4 的集-射极与串联调整管 TR_1 的基-射极并联，所以， TR_4 对 TR_1 起一定的分流作用。于是，调整管 TR_1 的集-射极电阻将会增加，从而限制了负载电流。改变电阻 R_4 的阻值，或者改变串联二极管 D_2 的数目，可以调整稳压器的最大输出电流。如果 TR_1 和 TR_4 装在同一个散热器上，温度对稳压器性能的影响可以减小。稳压器的输出特性曲线如图2-48(b)所示。

利用串联调整管作限流保护的另一种稳压电路如图2-49(a)所示。限流保护电路由 D_2 、 TR_2 和 R_4 构成。通过调整 R_4 ，可以改变稳压器的最大输出电流。稳压器的输出特性曲线如图2-49(b)所示。

采用晶体管限流保护电路的另一种稳压电源如图2-50所示。整流部分采用无变压器的半波整流电路。输入交流电压为

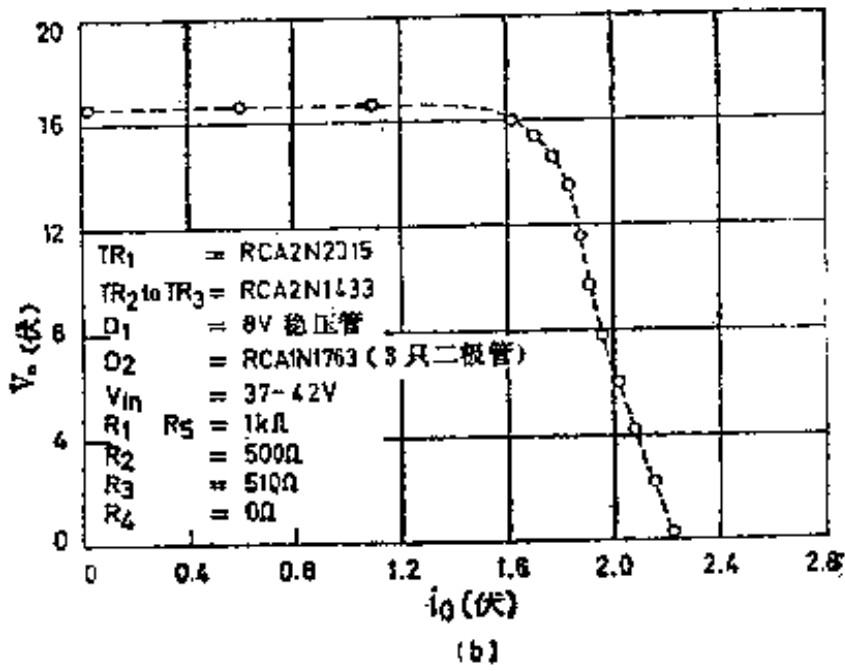
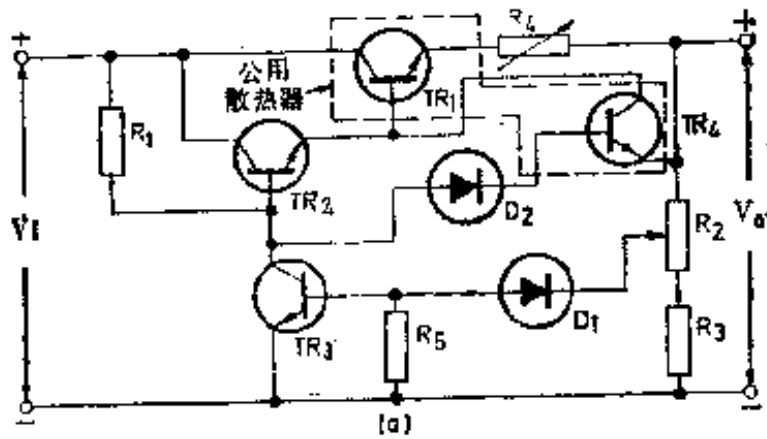


图 2-48 (a) 利用调整管作限流保护的稳压器，
(b) 稳压器的输出特性曲线

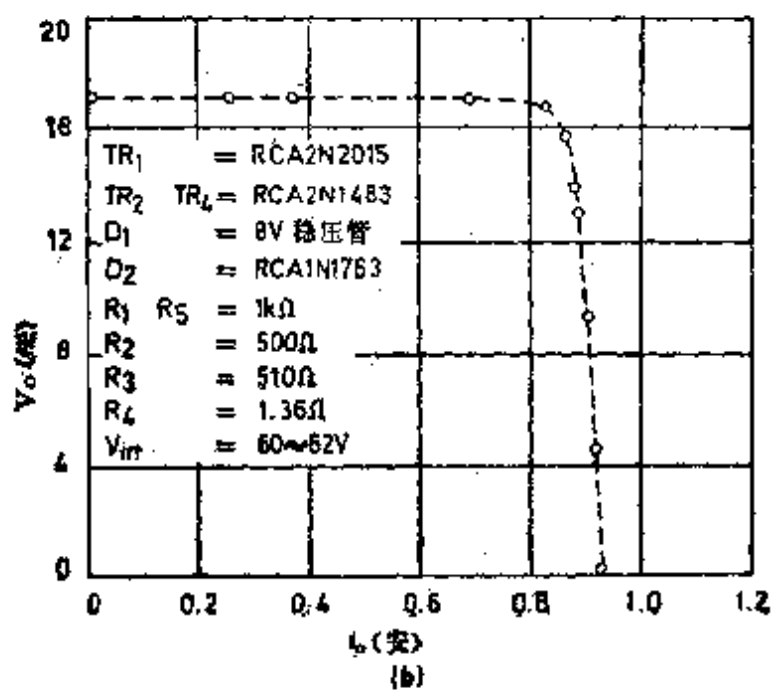
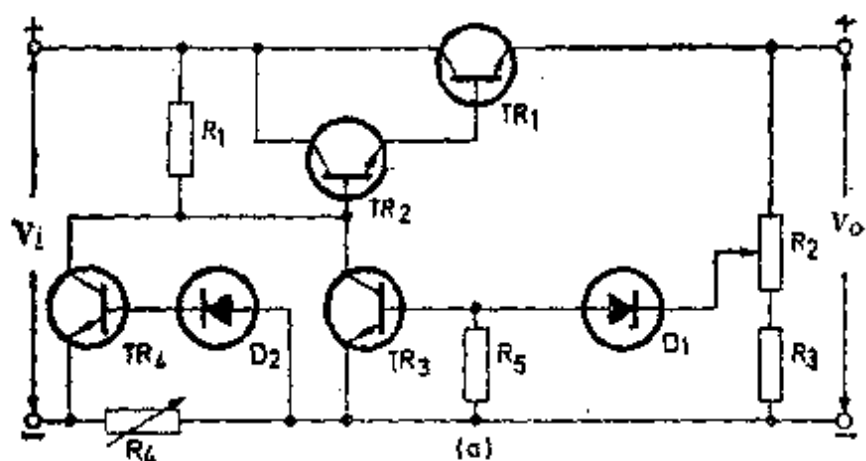


图 2-49 (a) 利用调整管作限流保护的另一种稳压电路, (b) 稳压器的输出特性曲线

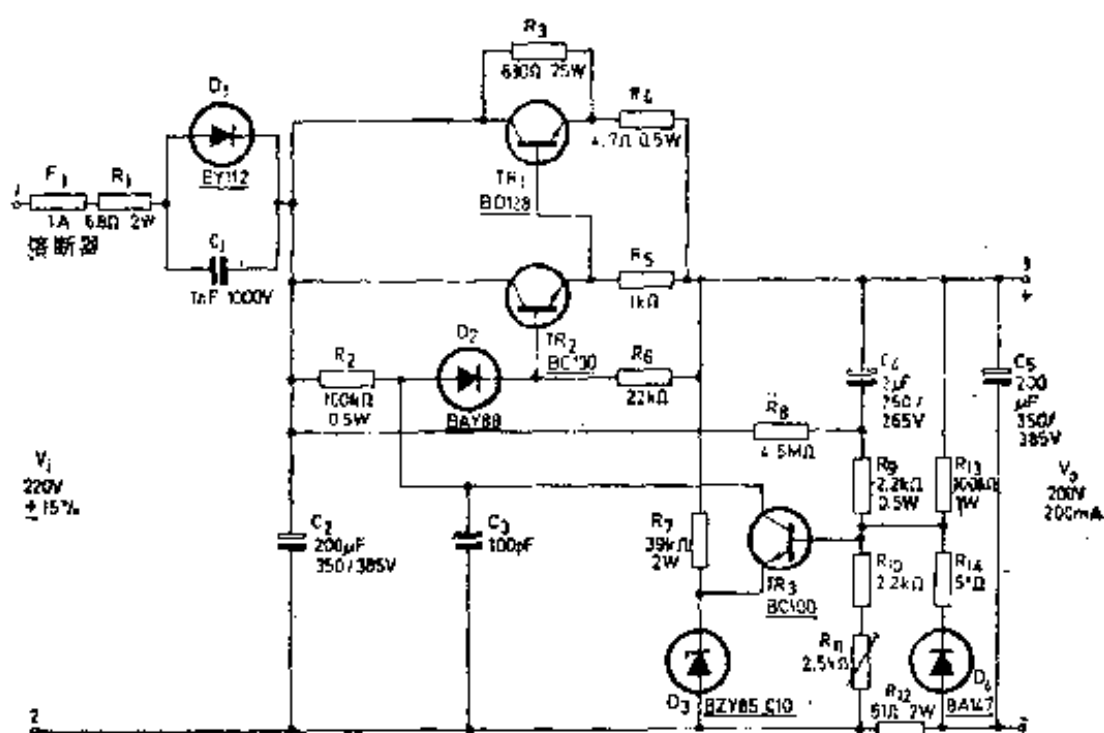


图 2 50 带有限流保护的无变压器稳压电源

220 伏 $\pm 15\%$ 。这种稳压电源采用两个限流保护电路。第一个限流保护电路由串联晶体管 TR_1 及其发射极电阻 R_4 构成。负载电流的增加将引起 R_4 两端电压降增加，因此， TR_1 的有效驱动电压有所减小。第二个保护电路由 R_{12} 、 R_{14} 、 D_4 、 TR_3 和 D_2 组成。在正常工作状态下， R_{10} 和 R_{11} 两端压降的最小值约为 10.4 伏。当负载电流为 200 毫安时， R_{12} 两端的压降为 10.2 伏。这时， D_4 被反向偏置。当负载电流增加 10% 时， R_{12} 两端的压降为 11.4 伏。这时， D_4 导通。这样， R_{10} 和 R_{11} 两端的压降增加，使 TR_3 饱和， TR_3 集电极电压下降 D_2 反向偏置。结果，使复合串联调整元件截止。该稳压器中，如果接入 R_3 的话，在最高输入电压为 290 伏，最大短路输出电流将为 430 毫安。

稳压器的直流输出电压为 200 伏，输出负载电流为 200 毫安，波纹电压低于 1.2 伏（峰—峰值）。

二、断流保护电路

1. 断路器断流保护

在稳压器中接入熔断器或由双金属片制成的热触点断路器时，如果负载电流过大，熔断器或断路器就会断路，因而能够完成断流保护作用。但是，熔断器和热触点断路器的热惯性通常都大于晶体管的热惯性，因此，只有当晶体管的额定功率是正常耗散功率的许多倍时，这两种保护元件才能起到保护作用。不过，采用额定功率很大的串联调整管，稳压器的成本将会大大增加。

稳压器接入电磁断路器，如继电器等，也能完成断流保护作用。这种元件比熔断器更为有效，并且，在过载消除之后，继电器能够恢复正常工作状态。但是，由于接入电感元件，所以，负载电流中断后将产生电感储能式振荡。为了抑制瞬时过电压，必须增加元件。

2. 可控硅断流保护电路

当负载电流超过额定值以后，如果促使流过熔断器或继电器的电流急剧增加，那么，就能够缩短熔断器的熔断时间或者继电器的动作时间，为了使过载后流过熔断器的电流急剧增加，可以采用图2-51所示的可控硅保护电路。在稳压器正常工作时，负载电流在10欧可变电阻两端产生的压降较小，不能使可控硅 SCR_1 触发。 SCR_1 处于关断状态，对稳压器没有影响。但是，当负载短路后，10欧可变电阻两端的压降大大增加，这样， SCR_1 在1微秒内就能触发导通，使流过熔断器 AGC_1 的电流急剧增加，在3—5微秒内，1安熔断器即可熔断。如果没

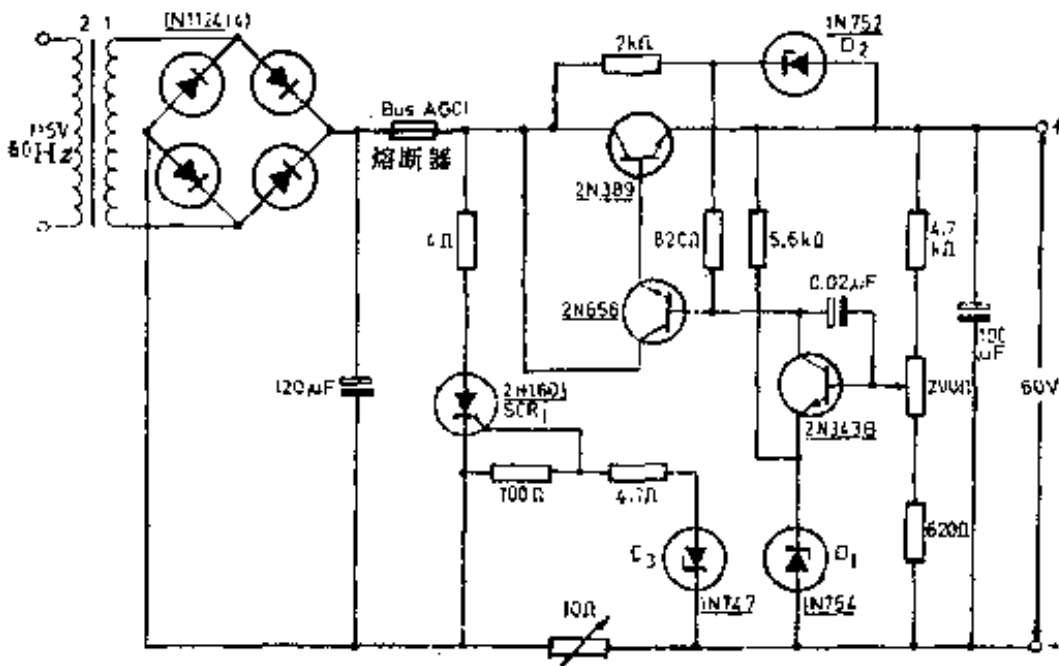


图 2-51 带有可控硅断流保护电路的稳压电源

有可控硅保护电路，同样的 1 安熔断器约需 400 微秒才能熔断。晶体管在这么长的时间内过载，很可能损坏。

另一种采用可控硅断流保护的稳压电源如图 2-52 所示。这

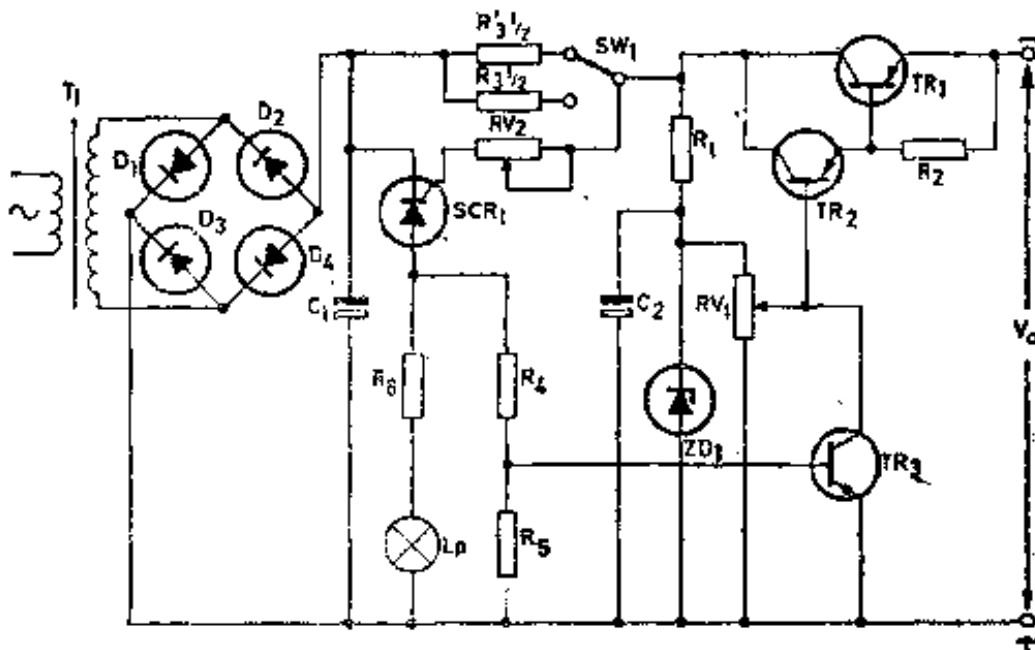


图 2-52 带有可控硅断流保护和过载指示的稳压电源

种可控硅断流保护电路适用于输出电压可调的稳压电源。它能发出过载灯光指示。当负载电流超过规定值时，可控硅 SCR_1 被触发导通， R_5 两端的压降使晶体管 TR_3 饱和，晶体管 TR_2 的基极到电源正端被 TR_3 所短路，因此，串联调整管 TR_1 截止。即使流过 R_5 的电流降到非常小的数值时， SCR_1 仍能继续导通，输出电压接近于零。电路中，信号灯 L_P 与电阻 R_6 串联后，并联在 R_4 和 R_5 的两端，由于过载而使可控硅 SCR_1 导通后， R_4 和 R_5 两端的压降将使信号灯 L_P 点燃，发出过载指示。除了这种并连接法以外，信号灯 L_P 也可以与 R_4 和 R_5 串联。不过，采用这种串连接法时，如果信号灯损坏，保护电路就会失去作用。所以，这种串连接法一般都不采用。当稳压器过载或负载短路排除以后，必须使可控硅 SCR_1 关断，稳压器才能恢复正常工作。为此，应当在 SCR_1 的阳极电路中加入“按钮式复位开关”。在保护电路中，通过开关 SW_1 改变 R_3 的阻值，可以调整过电流保护范围。并且，在 R_3 确定的范围内，改变可变电阻 R_{V2} 的阻值，稳压器的最大负载电流可以连续调整。

3. 晶体管断流保护电路

(1) 最简单的晶体管断流保护电路

带有晶体管断流保护电路的稳压电路如图 2-53 所示。断流保护电路由晶体管 TR_4 、电阻 R_8 、 R_{11} 、 R_7 、 R_{10} 和过流检测电阻 R_N 构成。辅助电源的输出电压 V_{13} 经过 R_8 和 R_{11} 分压后供给 TR_4 的基极电压 V_{B4} 。已知辅助电源的输出电压 V_{13} 为 -30 伏，所以，

$$V_{B4} = \frac{R_{11}}{R_8 + R_{11}} V_{13} = \frac{47}{3900 + 47} \times (-30) \approx -0.35 (V)$$

稳压器的输出电压 V_0 经过 R_7 和 R_{10} 分压后供给 TR_4 的发射

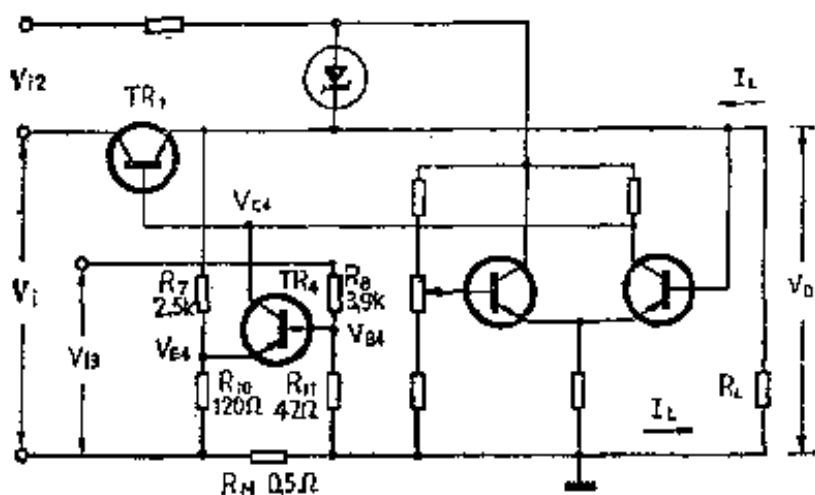


图 2-53 晶体管断流保护电路

极电压 V_{B4} 。已知稳压器的输出电压 V_o 为-30伏，所以，

$$V_{B4} = \frac{R_{10}}{R_7 + R_{10}} \times V_o = \frac{120}{2500 + 120} \times (-30) \approx -1.35(V)$$

从图2-53可以看出， TR_4 的基-射极电压 V_{BE4} 为：

$$V_{BE4} = V_{B4} - V_{E4} - I_L R_M$$

稳压器正常工作时，负载电流 I_L 小于2安，而检测电阻 R_M 的阻值为0.5欧，因此，这个电阻两端的压降小于1伏。由于 V_{B4} 比 V_{E4} 更负，所以，

$$V_{BE4} = V_{B4} - V_{E4} - I_L R_M > 0$$

这时，晶体管 TR_4 反向偏置，从而处于截止状态，对稳压器的的工作没有任何影响。

当稳压器的负载电流超过规定数值后，譬如说为2.4安，检测电阻 R_M 的压降将增加到 $0.5 \times 2.4 = 1.2$ 伏，这时，晶体管 TR_4 的基-射极电压 V_{BE4} 应为：

$$V_{BE4} = V_{B4} - V_{E4} - I_L R_M \approx -0.2(V)$$

因此， TR_4 将处于导通状态，其集电极电压 V_{c4} 绝对值减小，

使调整管 TR_1 趋向于截止，从而使调整管不会因负载电流过大而损坏。

除了上述断流保护电路外，稳压器还经常采用不需要辅助电源的断流保护电路。采用这种保护电路的稳压器如图2-54所示。

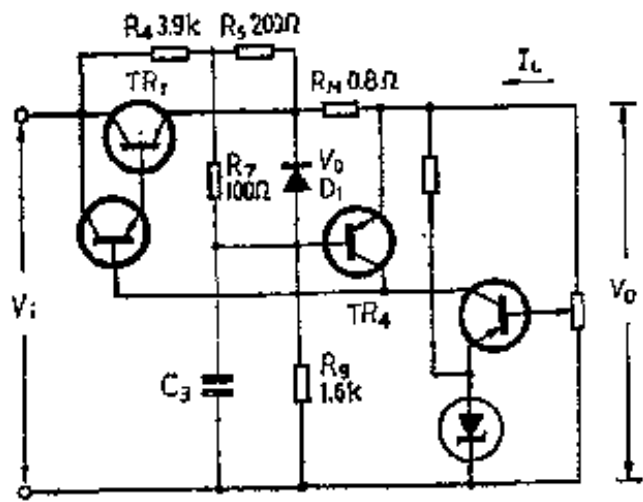


图 2-54 不需要辅助电源的断流保护电路

在这种电路中，稳压器正常工作时，普通硅二极管 D_1 导通，其正向压降约为0.6伏。这时，流过检测电阻 R_M 的电流较小， R_M 两端的压降小于0.6伏。由图中可以看出， TR_4 的基-射极电压为：

$$V_{BE4} = V_{D1} - I_L R_M = 0.6 - I_L R_M > 0$$

因此， TR_4 截止，对稳压器的正常工作没有任何影响。

当负载电流超过规定值后，检测电阻 R_M 两端的压降增加，如果设计适当的话，可以使 R_M 两端的压降约为0.8伏。这样， TR_4 的基-射极电压 V_{BE4} 将变为：

$$V_{BE4} = V_{D1} - I_L R_M \approx -0.2(V)$$

因此， TR_4 导通，从而使串联调整管 TR_1 截止，输出电流接近于零，输出电压也接近于零。 TR_1 截止后，稳压器的全部输入电压都加到 TR_1 的集-射极两端。这个电压通过 R_4 、 R_5 和 R_7 在 TR_4 的基-射极之间加入一定的电压。只要所加的电压大于 TR_4 导通所需的最小基-射极电压， TR_4 就能一直保持导通。这样，只要过载故障没有消除，串联调整管 TR_1 就能基本上保持截止状态。由于发生保护动作后， TR_1 并没有完全截止，同时，通过 R_4 和 R_5 还能产生一定的输出电流，因此，当负载恢

恢复正常后，稳压器能够自动恢复正常工作。电容器 C_s 可以改善保护时的动态特性。

(2) 双稳态断流保护电路

在串联稳压器中，有时还采用如图2-55所示的双稳态断流

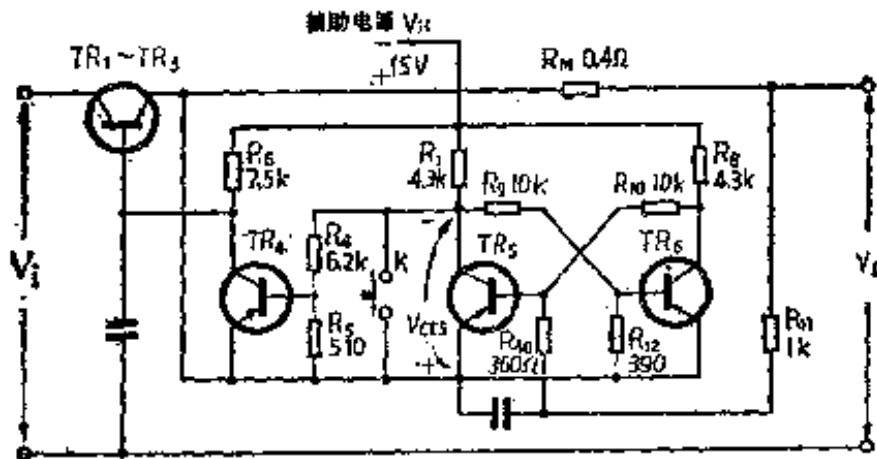


图 2-55 双稳态断流保护电路

保护电路。图中， R_M 为检测电阻。当负载电流不超过规定值时，检测电阻 R_M 两端的压降较小。这个压降的正端通过 R_{11} 和 R_{10} 加到 TR_5 的基极。由于电压数值较小，对双稳态电路的工作状态没有影响。当负载电流超过规定值时，检测电阻 R_M 两端的压降增加。这个压降通过 R_{11} 和 R_{10} 加到 TR_5 的基极，它的极性正好使 TR_5 的基极得到一个正向偏压。对于 $p-n-p$ 型晶体管来说，基极加上正偏压等于发射结反向偏置。因此， TR_5 处于截止状态，其集-射极电压 V_{CE5} 升高。从图中可以看出， V_{CE5} 经过分压电阻 R_9 和 R_{12} 、 R_7 和 R_5 分压后，分别加到 TR_4 和 TR_5 的基-射极之间，并且基极为正，发射极为负，这时， TR_4 和 TR_5 都处于导通饱和状态，集-射极饱和电压很低。从图中可以看出， TR_4 的集-射极饱和电压正好等于复合调整管 $TR_1 \sim TR_3$ 的基-射极电压。 TR_4 的集-射极饱和电压远远小于使晶体管导通所需的最小基-射极电压，所以， TR_4 饱和就迫

使复合调整管 $TR_1 \sim TR_3$ 截止。从图中也可以看出， TR_4 的集-射极饱和电压通过 R_1 ，加到 TR_5 的基-射极之间。因此，在复合调整管 $TR_1 \sim TR_3$ 截止后，尽管检测电阻 R_M 上的压降为零，但是， TR_5 仍能保持截止状态。

值得注意的是，有些稳压器的输出端接有容量较大的电容器，当电源刚刚接通时，由于电容器充电，检测电阻 R_M 两端也可能产生一个很大的脉冲电压。这种电压也会使 TR_5 截止，从而使复合调整管 $TR_1 \sim TR_3$ 截止，造成稳压器没有输出的现象。这时要按动一下工作开关 K ，使 TR_4 的集-射极电压变为零。这样， TR_5 就会截止，稳压器即可正常工作。

(3) 单稳态断流保护电路

采用过载检测电路和单稳态断流保护电路的稳压电源如图2-56所示。过载检测电路由隧道二极管 D_3 和晶体管 TR_8 等元

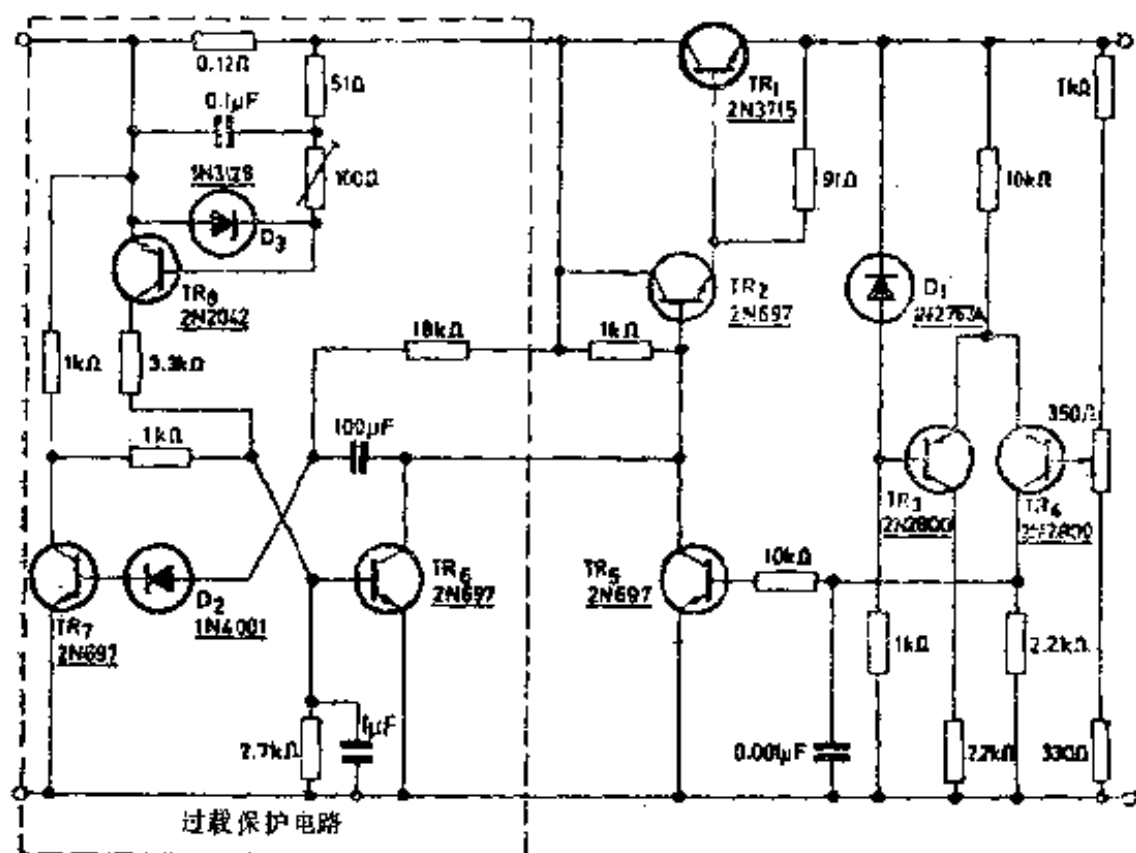


图 2-56 带有单稳态电路断流保护的稳压器

三、负载转换保护电路

高压大电流稳压电源一般都不能采用限流保护电路或断流保护电路，而要采用负载转换保护电路。常用的负载转换保护电路如图2-58所示。稳压器输出过载时，这种保护电路能够变

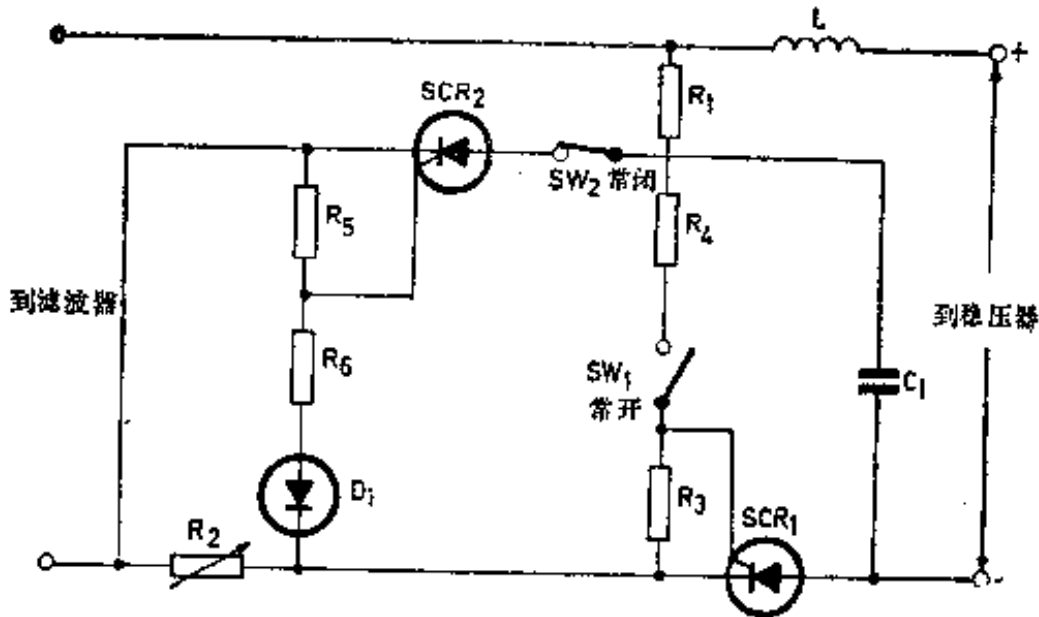


图 2-58 负载转换保护电路

换稳压器的负载，即去掉原来的负载并接入 R_1 作为新负载。从稳压器输出短路到可控硅 SCR_1 完全关断，大约需要 5 到 10 微秒的时间。

四、调整管失控保护电路

在如图2-59(a)所示的采用复合调整管的稳压电源中， TR_2 的反向漏电流 I_{CBO2} 将流过调整管 TR_1 的基极，并被 TR_1 放大。因此，流过 TR_1 的总漏电流应为：

$$I_{CBO2} = I_{CBO1} + \beta_1 I_{CBO2}$$

由于 $I_{CBO} = (1 + \beta) I_{CBO}$ ，如果取近似值 $1 + \beta \approx \beta$ ，那么，就可以得出下式：

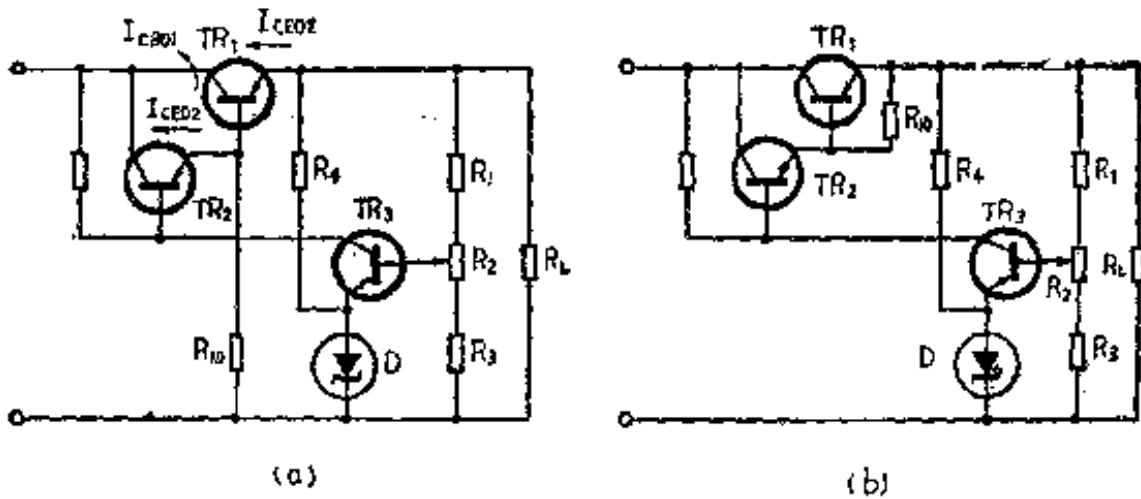


图 2-59 防止复合调整管高温空载失控的保护电路

$$I_{CBO2} = \beta_1 I_{CBO1} + \beta_1 \beta_2 I_{CBO2}$$

当复合调整管采用大功率锗管时，由于锗管的 I_{CBO} 比较大，并且将随着温度的升高而按指数规律增加，因此，当温度升高时，流过调整管 TR_1 的漏电流不断升高，从而会引起稳压器输出电压不断升高。输出电压增量 ΔV_o 通过取样电路和比较放大器后，使 TR_1 的基极电流减小，因而使 TR_1 的发射极电流也随之减小。这样，就能使输出电压趋向原来的数值。但是，如果 TR_1 的基极电流已经减小到零，而温度仍在继续升高，这时反向漏电流将会继续增大， TR_1 的基极电流必须反向才能获得稳定的输出电压。如果在稳压电路中没有 R_{10} ，那么， TR_1 的基极电流反向，表明 TR_2 的发射极电流也必须反向。这时， TR_2 因发射结反向运用而处于截止状态。这样，调整管 TR_1 就失去控制作用，稳压器的输出电压将随温度升高而增加。这种现象称为调整管失控。在高温下为了使复合调整管的每个晶体管都工作于放大区，通常在 TR_1 的基极接入电阻 R_{10} 。这样，因温度不断升高而使 TR_1 的基极电流下降到零并需要反向时，电流可以通过 R_{10} 流入到 TR_1 的基极，把复合调整管的发射极电流调低，使输出电压保持稳定。这时，并不需要 TR_2 。

的发射极电流反向，所以，这个管子不会进入截止区。

稳压器空载时，调整管 TR_1 的发射极电流很小。这样，即使在室温下， TR_1 的漏电流也远远大于发射极的电流。这一点表明，在空载状态下， TR_1 的基极电流应为负值。如前所述，如果稳压电路不接入 R_{10} ，空载状态将导致 TR_2 截止，造成调整管 TR_1 失控。接入 R_{10} 以后，通过 R_{10} 可以给 TR_1 提供负的基极电流，使它能够起到控制调整作用。

如图2-59(b)所示， R_{10} 接在 TR_1 的发射极与基极之间，也能够防止 TR_1 失控。由于 R_{10} 的分流作用， TR_2 的漏电流 I_{CEO_2} 流入 TR_1 基极的数量大为减小。此外，晶体管的基-射极之间接有电阻时，集-射极漏电流将会减小，即 $I_{CER} < I_{CEO}$ 。因此，接入电阻 R_{10} 后， TR_1 的漏电流 I_{CER_1} 将会减小，可以避免失控现象。但是， R_{10} 除了对漏电流具有分流作用外，对有用的信号也起旁路分流作用。这样，复合调整管的电流放大倍数将会下降。为了保证复合调整管具有足够的电流放大倍数， R_{10} 的阻值不能太小。在这种情况下，为了保证在空载高温状态下调整管不发生失控现象，通常可以在稳压器的输出端接入一个泄放电阻。这样，在空载状态下，复合调整管的发射极电流大大增加，因而基极电流也会随之增加，复合调整管不会出现因基极电流反向而发生失控的现象。

但是，泄放电阻要损耗功率，并且会使最大负载电流减小，所以，它的阻值也不能太小。

第三章 稳流电源及其在稳压器中的应用

当输入电压、负载电流和温度发生变化时，输出电流保持不变的电源称为稳流电源。理想稳流电源的输出特性如图3-1所示。可以看出，当负载电阻变化时，尽管输出电压 V_o 有所改变，但是，它的输出电流却保持不变。也就是说，理想稳流电源对任意频率都具有无穷大的输出阻抗。

稳流电源常常用来控制各种半导体电路的参数，也可以作为电化学加工装置的电源、蓄电池充电电源以及聚焦线圈或其它磁路的控制电源。如前所述，稳压电源的负载总是与电源输出端并联（决不能串联）的，而稳流电源的负载却总是与输出端串联（决不能并联）的。

最简单的稳流电源如图3-2所示。这种电路实际上就是一

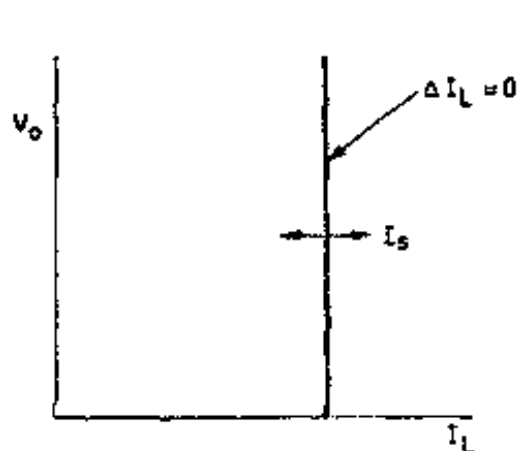


图 3-1 理想稳流电源的输出特性

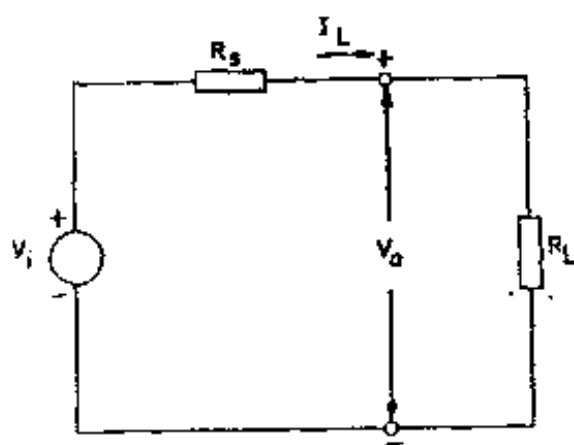


图 3-2 最简单的稳流电源

个具有串联内阻 R_s 的电压源，其负载电流 I_L 可以由下式给出：

$$I_L \approx \frac{V_i}{R_s + R_L}$$

由于 $R_s \gg R_L$ ，所以负载电流 I_L 可以由下式表示：

$$I_L \approx \frac{V_i}{R_s} \quad (3-1)$$

实际上，这种稳流电路没有任何使用价值。因为，即使要求的负载电流 I_L 很小（譬如说10毫安），这种稳流电源也必须有很高的输入电压 V_i 。下面的例子可以说明这一点。假设，输入电压 $V_i = 100$ 伏，并要求负载电阻 R_L 从零变化到10千欧时稳流电源能供给10毫安的电流。当 $R_L = 0$ 时，串联电阻 R_s 应当为100伏/10毫安=10千欧。如果选用 $R_s = 10$ 千欧，当 $R_L = 10$ 千欧时，公式(3-1)就不能适用。这时，稳流电源的实际输出电流将为5毫安。如果要求的负载电流为1毫安，那么，当 $R_L = 0$ 时， $R_s = 100$ 伏/1毫安=100千欧。当 $R_L = 10$ 千欧时， $I_L = 100$ 伏/(100+10)千欧=0.91毫安。这个数值才比较接近1毫安。由此可见，为了获得更稳定的或者更大的输出电流，采用最简单的稳流电路是不行的。

理想的稳流电路如图3-3所示。这种电路由恒流源 I_i 和内阻 R_s 组成。 R_s 的理想值为无穷大，这样， I_s 就可以忽略不计；而且不管 R_L 如何变化，都能使负载电流 I_L 等于 I_i 。

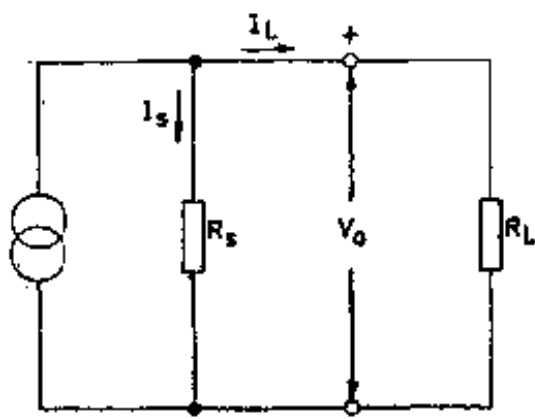


图 3-3 理想的稳流电源

第一节 四端稳流电源

四端稳流电路如图3-4所示。在这种电路中，利用晶体管或者晶体管与其它元件的组合，就能够得到很大的 R_s 值。当负载电阻 R_L 与输入电源有一个公共端点时，常用的四端电路可以看作是三端电路。

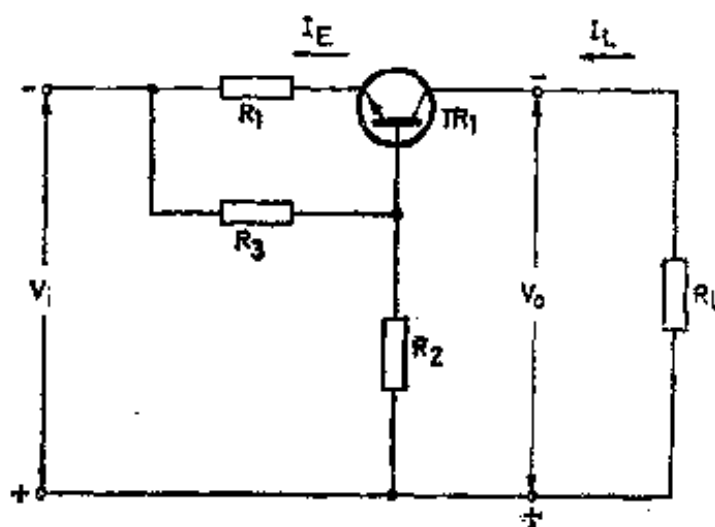


图 3-4 最基本的晶体管稳流电路

一、晶体管四端稳流电源的基本电路

如果图3-2中的电源内阻 R_s 用一个具有适当偏置的晶体管代替，那么，稳流电源不仅可以具有很高的阻抗，而且，对于给定的负载电流来说，所需的输入电压也比较低。

晶体管稳流电源的基本电路如图3-4所示。这种电路实际上是一个共基极电路。在放大区内，它的输出特性曲线比较平坦，在一定的发射极电流下，输出电压 V_o 在很宽范围内变化时，集电极输出电流 I_c 基本上保持不变，因此，可以说，共基极电路具有稳流特性。当采用高增益晶体管 ($h_{FE} > 100$) 时，