

第9章 直流电源

本章要求:

- 一、理解直流稳压电源的组成及各部分的作用;
- 二、能够分析整流电路的工作原理, 并估算输出电压及电流的平均值;
- 三、了解滤波电路的工作原理, 能够估算电容滤波电路输出电压的平均值;
- 四、掌握稳压管稳压电路的工作原理, 能够合理选择限流电阻;
- 五、了解串联型稳压电路的工作原理和三端稳压器的应用。

目 录

9.1 直流电源的组成及各部分的作用

9.2 整流电路

9.3 滤波电路

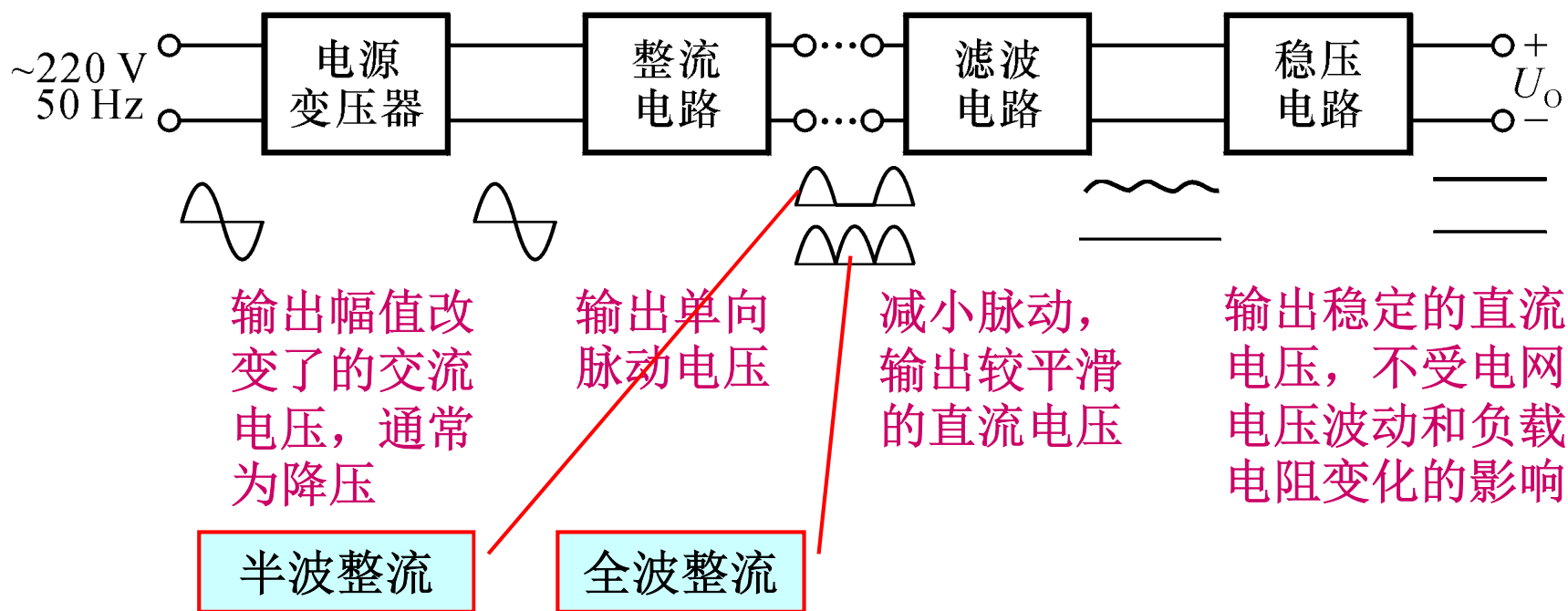
9.4 稳压管稳压电路

9.5 串联型稳压电路

9.6 开关型稳压电路

9.1 直流电源的组成及各部分的作用

作用是将交流电变换成平滑而稳定的直流电。



在分析电源电路时要特别考虑的两个问题：允许电网电压波动 $\pm 10\%$ ，且负载有一定的变化范围。

9.2 整流电路

整流电路有单相半波、全波、桥式和倍压整流电路；三相半波、三相桥式整流电路等。

对整流电路要研究以下问题：

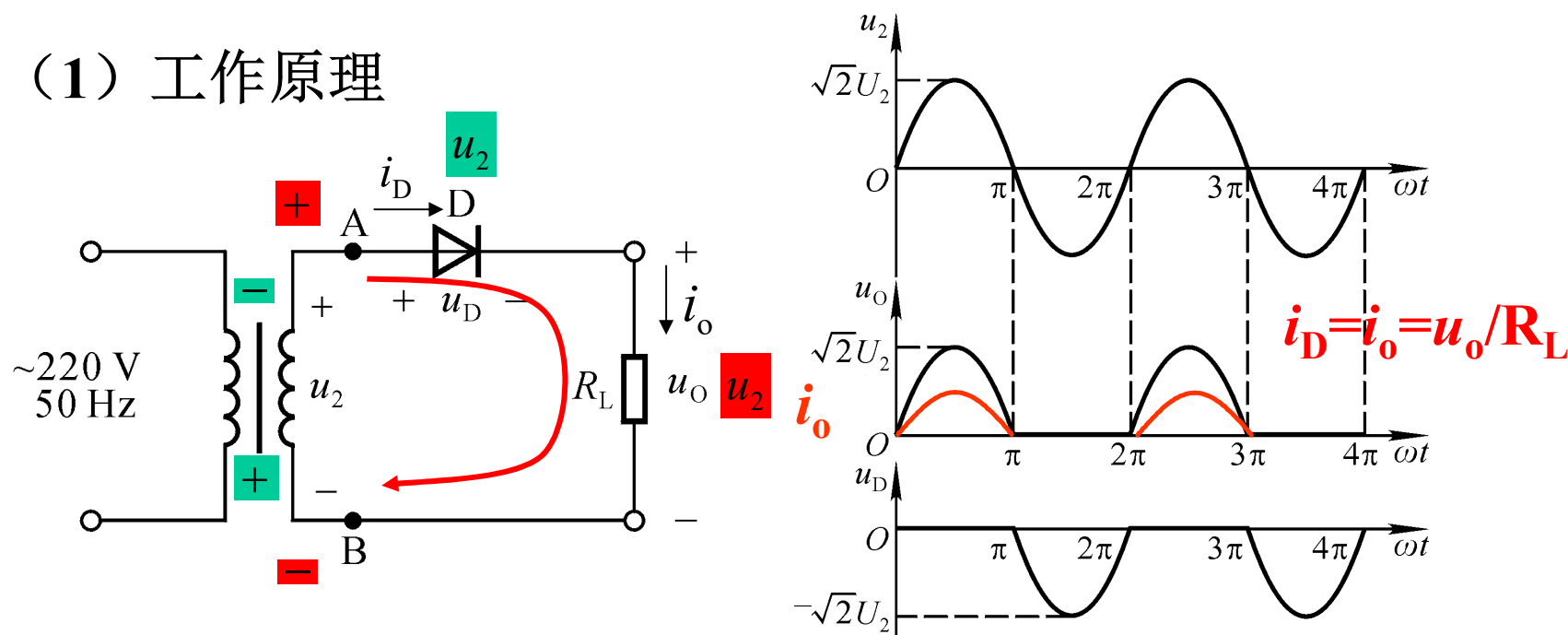
1. **电路的工作原理**：二极管工作状态、波形分析
2. **输出电压和输出电流的平均值**：输出为单向脉动电压
3. **整流二极管的选择**：二极管承受的最大整流平均电流和最高反向工作电压

为分析问题简单起见，设**整流二极管为理想二极管；负载为纯阻性；变压器无损耗。**

9.2.1 单相整流电路

1. 单相半波整流电路

(1) 工作原理

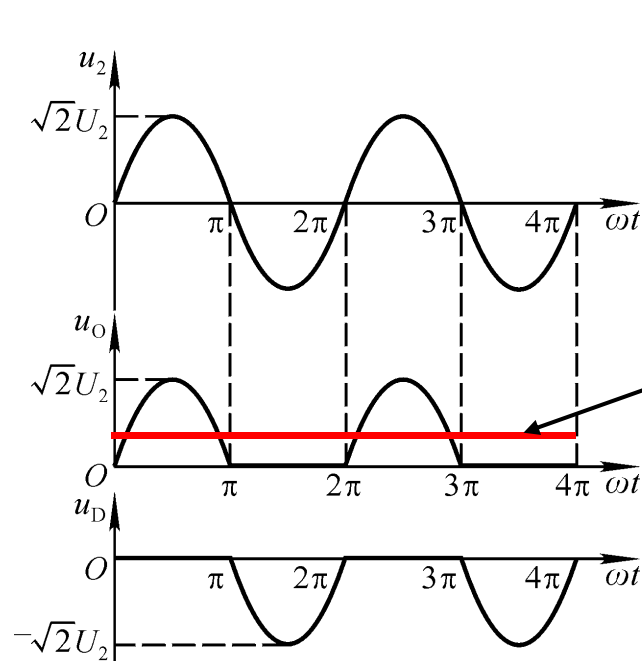


u_2 的正半周，D导通， $u_o = u_2$ ， $u_D = 0$ ；

u_2 的负半周，D截止， $u_o = 0$ ， $u_D = u_2$ 。

(2) 主要参数

已知变压器副边电压有效值为 U_2 ，得到输出电压平均值和输出电流平均值：



$$U_{O(AV)} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \sqrt{2}U_2 \sin \omega t d(\omega t)$$

$$U_{O(AV)} = \frac{\sqrt{2}U_2}{\pi} \approx 0.45U_2$$

$$I_{O(AV)} = \frac{U_{O(AV)}}{R_L} \approx \frac{0.45U_2}{R_L}$$

(3) 二极管的选择

得到二极管的正向平均电流和承受的最大反向电压：

$$I_{D(AV)} = I_{O(AV)} \approx \frac{0.45U_2}{R_L}$$

$$U_{R\max} = \sqrt{2}U_2$$

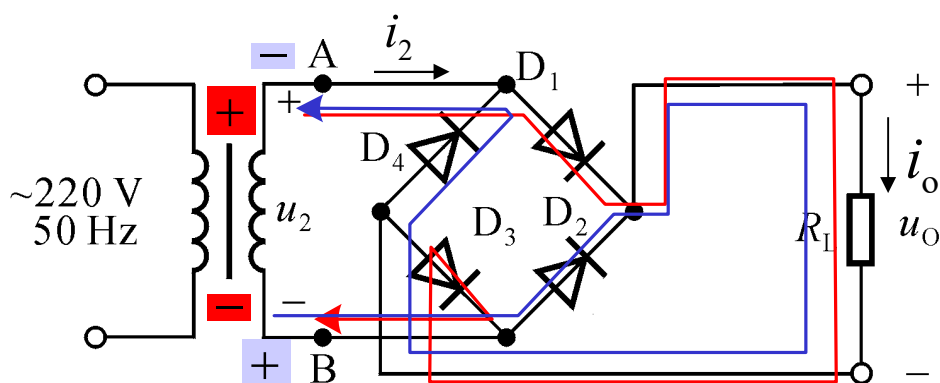
考虑到允许电网电压的波动范围为±10%，
二极管的极限参数最大整流平均电流和最高反向
工作电压应满足：

$$\begin{cases} I_F > 1.1I_{D(AV)} = 1.1 \frac{0.45U_2}{R_L} \\ U_R > 1.1U_{R\max} = 1.1\sqrt{2}U_2 \end{cases}$$

单相半波整流电路简单，二极管数量少；但输出电压低，脉动大(脉动系数 $S=1.57$)，效率低。

2. 单相桥式整流电路

(1) 工作原理

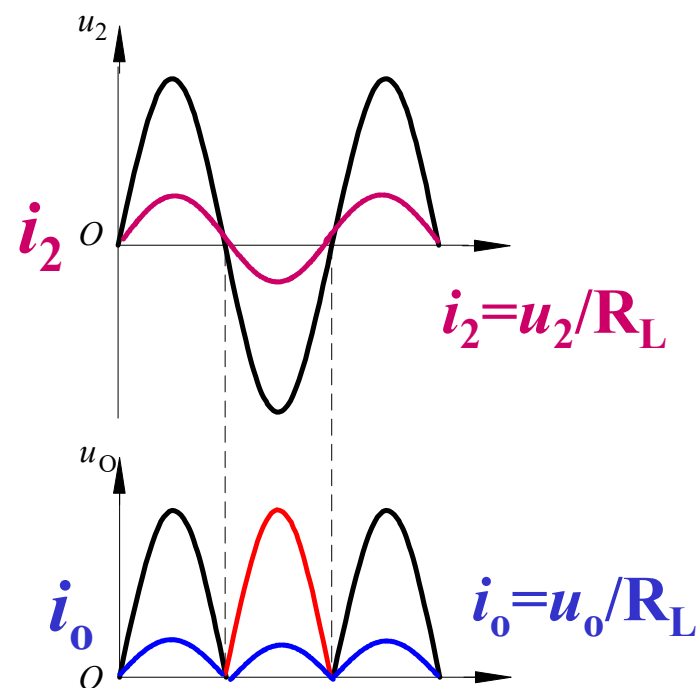


u_2 的正半周:

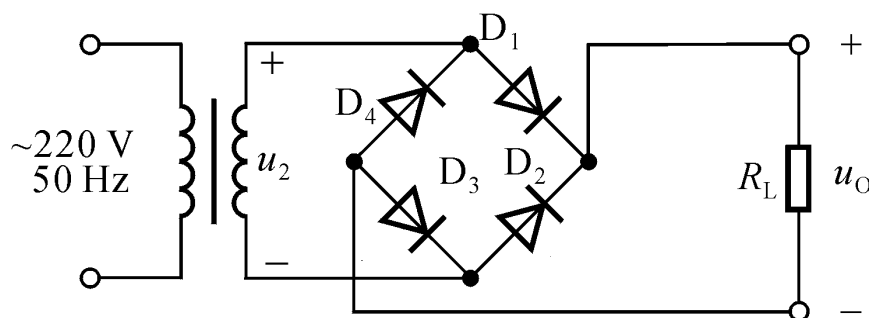
$$A \rightarrow D_1 \rightarrow R_L \rightarrow D_3 \rightarrow B, \quad u_O = u_2$$

u_2 的负半周:

$$B \rightarrow D_2 \rightarrow R_L \rightarrow D_4 \rightarrow A, \quad u_O = -u_2$$



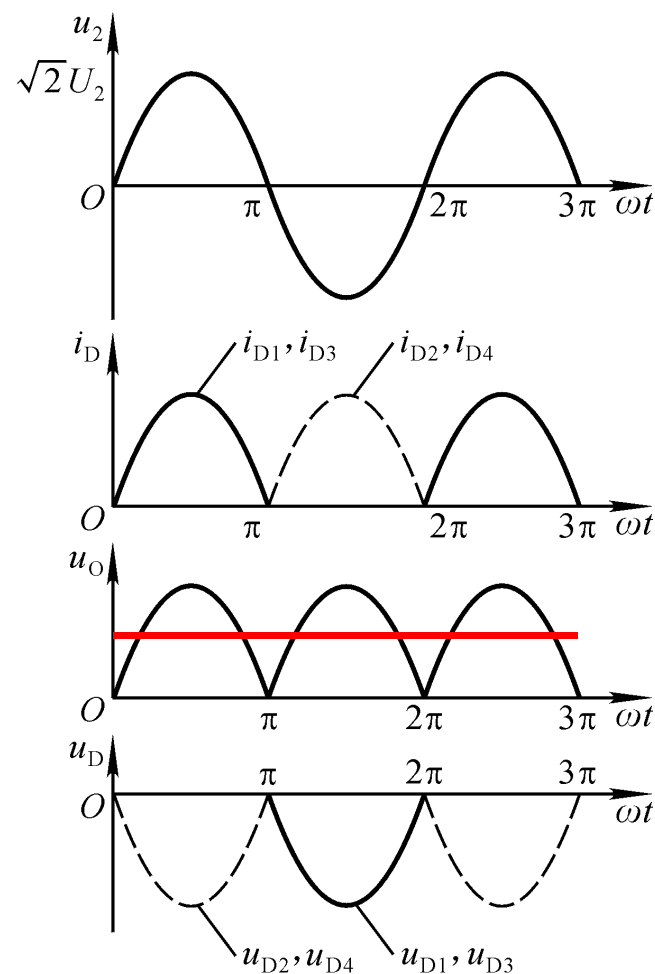
(2) 主要参数



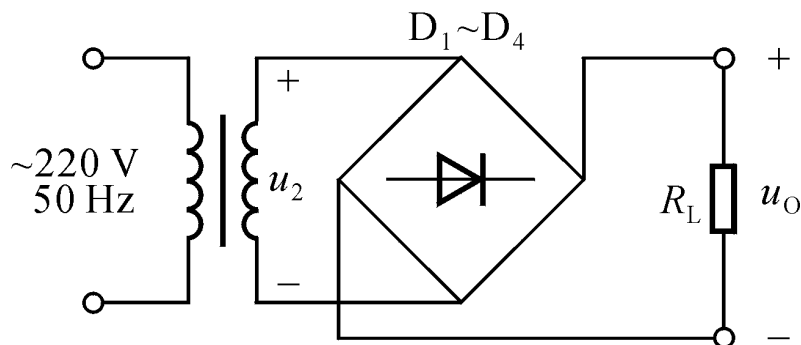
$$U_{O(AV)} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d(\omega t)$$

$$U_{O(AV)} = \frac{2\sqrt{2}U_2}{\pi} \approx 0.9U_2$$

$$I_{O(AV)} = \frac{U_{O(AV)}}{R_L} \approx \frac{0.9U_2}{R_L}$$



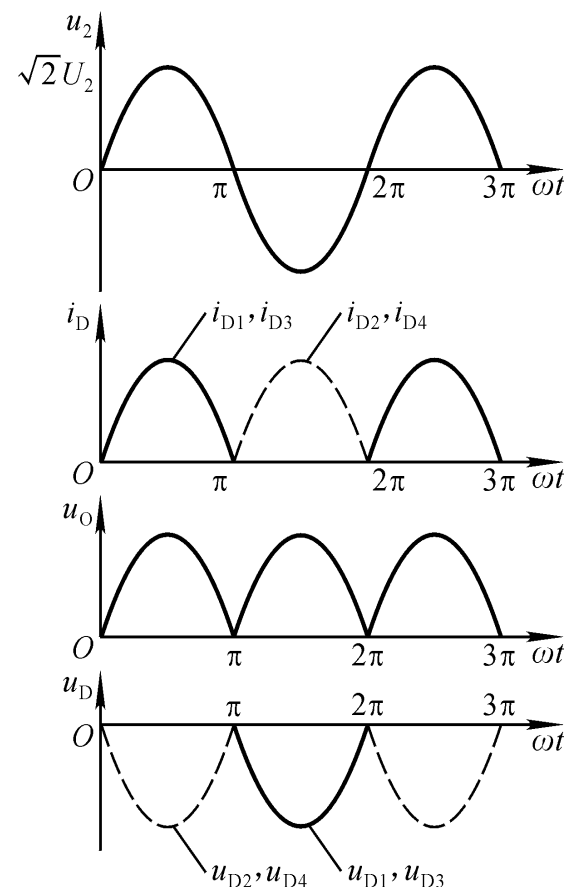
(3) 二极管的选择



$$I_{D(AV)} = \frac{I_{O(AV)}}{2} \approx \frac{0.45U_2}{R_L}$$

$$U_{R\max} = \sqrt{2}U_2$$

$$\begin{cases} I_F > 1.1I_{D(AV)} = 1.1 \times \frac{0.45U_2}{R_L} \\ U_R > 1.1U_{R\max} = 1.1\sqrt{2}U_2 \end{cases}$$

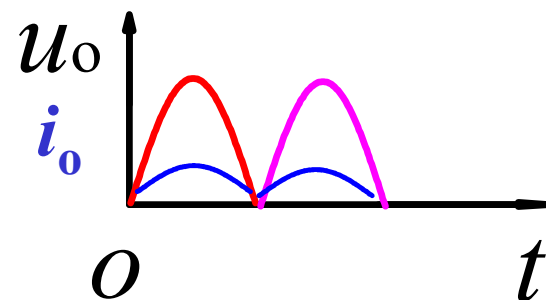
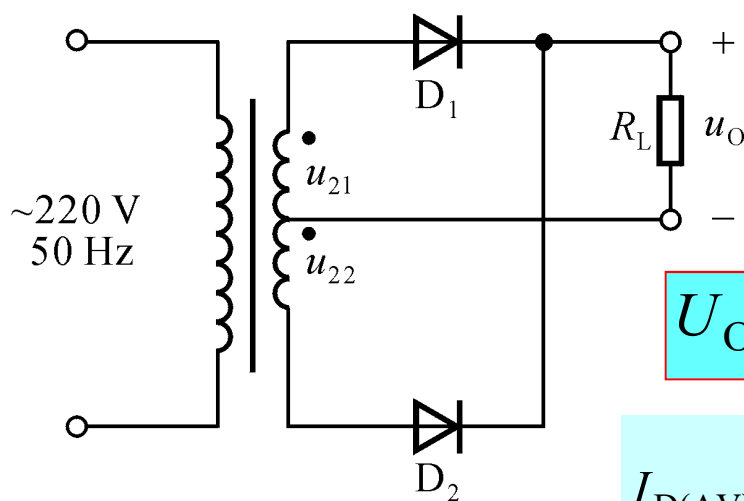


单相桥式整流电路与半波整流电路相比，对二极管参数的要求是一样的，并且还具有输出电压高、变压器利用率高、脉动小(脉动系数 $S=0.67$)等优点，但是所需二极管的数量多，使整流电路的内阻较大，当然损耗也较大。

习题9.6 单相全波整流

例9.2.2

整流电路如图所示，变压器副边电压有效值 $U_{21} = U_{22} = U_2$ ；求解输出电压的波形和平均值、整流二极管的最大整流电流和最高反向工作电压。



$$U_{O(AV)} \approx 0.9U_2$$

$$I_{O(AV)} = \frac{U_{O(AV)}}{R_L} \approx \frac{0.9U_2}{R_L}$$

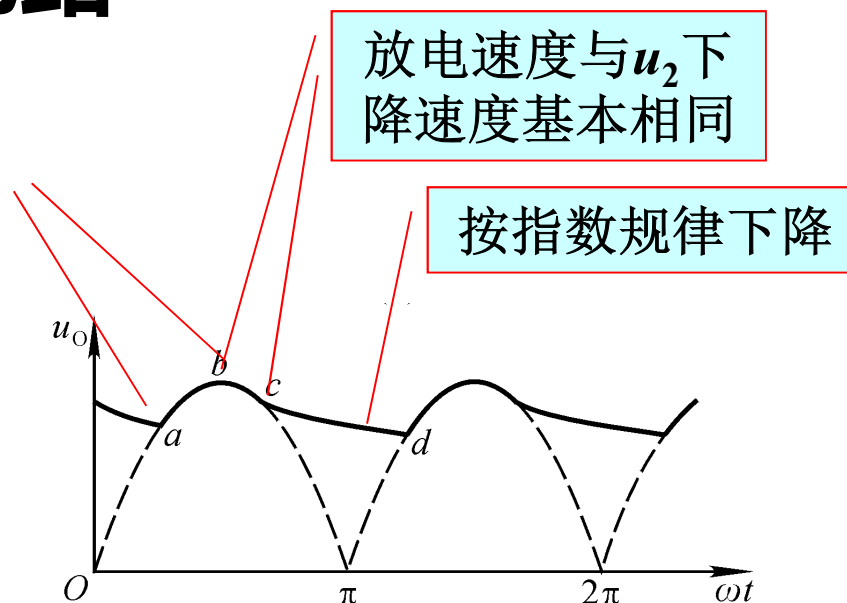
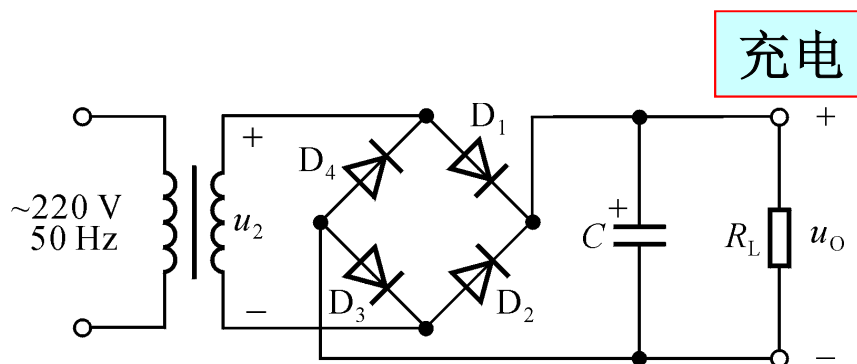
$$I_{D(AV)} = \frac{I_{O(AV)}}{2} \approx \frac{0.45U_2}{R_L}$$

$$U_{R \max} = 2\sqrt{2}U_2$$

$$\begin{cases} I_F > 1.1I_{D(AV)} = 1.1 \times \frac{0.45U_2}{R_L} \\ U_R > 1.1U_{R \max} = 1.1 \times 2\sqrt{2}U_2 \end{cases}$$

9.3 滤波电路

9.3.1 电容滤波电路



(1) 工作原理

当 $|u_2| > u_C$ 时，有一对二极管导通，对电容充电， $\tau_{\text{充电}}$ 非常小。

当 $|u_2| < u_C$ 时，所有二极管均截止，电容通过 R_L 放电， $\tau_{\text{放电}} = R_L C$ 。

滤波后，输出电压平均值增大，脉动变小。

C 越大， R_L 越大， $\tau_{\text{放电}}$ 将越大，曲线越平滑，脉动越小，输出电压平均值越大。

(2) 输出电压平均值

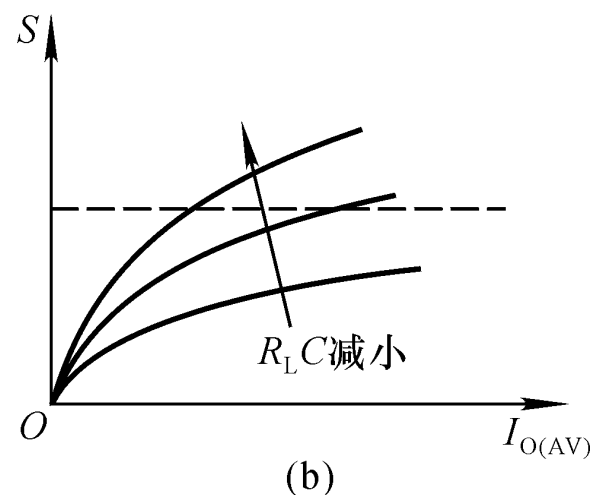
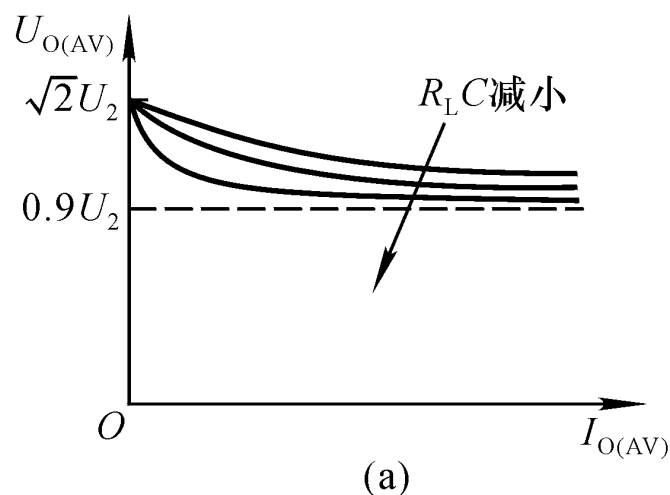
例9.3.1

当负载开路,即 $R_L = \infty$ 时, $U_{O(AV)} = \sqrt{2}U_2$ 。

当 $R_L C = (3 \sim 5) \frac{T}{2}$ 时, $U_{O(AV)} \approx 1.2U_2$ 。

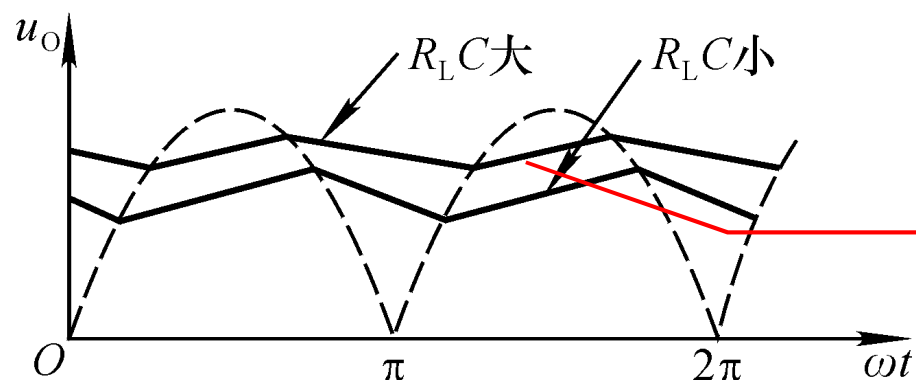
C 的耐压值应大于 $1.1\sqrt{2}U_2$ 。

(3) 输出特性和滤波特性



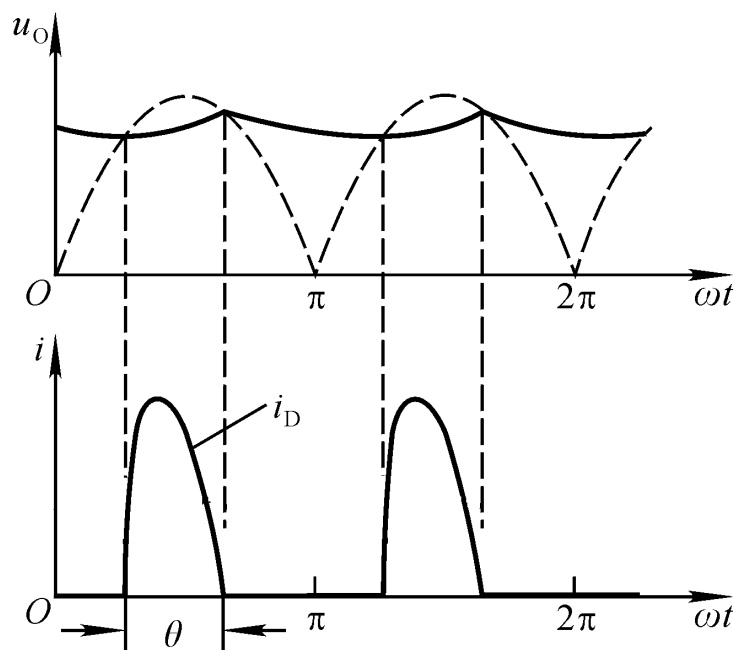
$\begin{cases} C \downarrow \\ I_{O(AV)} \uparrow \rightarrow R_L \downarrow \end{cases} \rightarrow \tau_{\text{放电}} \downarrow \rightarrow \begin{cases} \text{脉动 } S \uparrow, \text{ 滤波效果越差} \\ U_{O(AV)} \downarrow \end{cases}$

若考虑整流电路的内阻（包括变压器内阻和二极
管的导通电阻）



内阻上的压降使 $u_O < |u_2|$

(4) 二极管的导通角



导通角

无滤波电容时 $\theta = \pi$ 。

有滤波电容时 $\theta < \pi$ ，且输出平均电流增大，故二极管电流的峰值很大，在短暂的时间内受到很大的冲击电流！

C 越大， R_L 越大， $\tau_{\text{放电}}$ 将越大，曲线越平滑，二极管的导通角越小，而输出电流平均值越大，所以 i_D 的峰值越大。

结论

(1) 输出电压的平均值

对于单相全波或桥式整流电容滤波电路：

$$\text{当 } R_L C = (3 \sim 5) \frac{T}{2} \text{ 时, } U_{O(AV)} \approx 1.2U_2$$

对于单相半波整流电容滤波电路：

$$\text{当 } R_L C = (3 \sim 5) \frac{T}{2} \text{ 时, } U_{O(AV)} \approx 1U_2$$

以上电路都有：当负载 R_L 开路时， $U_{O(AV)} = \sqrt{2}U_2$

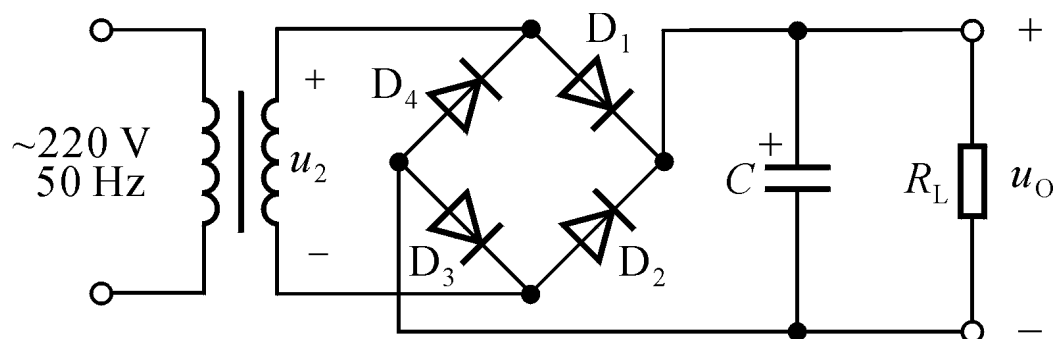
(2) 二极管承受的最大反向电压

$$U_{Rmax} = \sqrt{2}U_2 \quad (\text{单相桥式整流电容滤波电路})$$

$$U_{Rmax} = 2\sqrt{2}U_2 \quad (\text{单相半波整流电容滤波电路})$$

$$U_{Rmax} = 2\sqrt{2}U_2 \quad (\text{单相全波整流电容滤波电路})$$

例（自测题二）

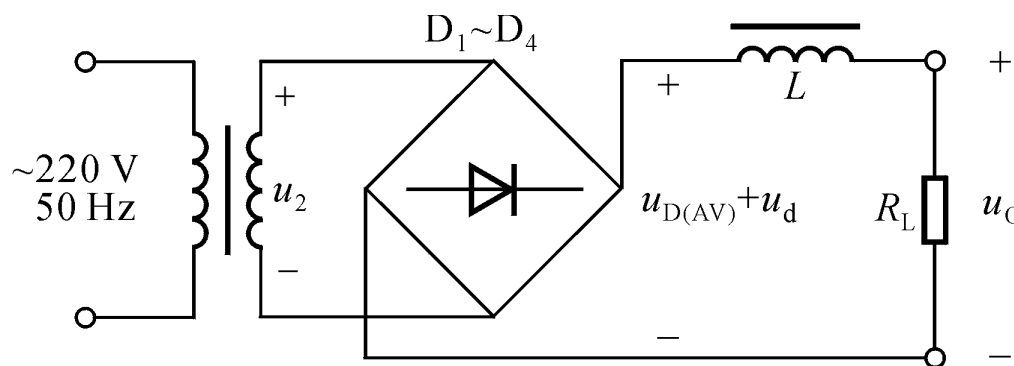


已知变压器副边电压有效值为 10V ，电容足够大，判断下列情况下输出电压平均值 $U_{O(\text{AV})} \approx ?$

1. 正常工作；
2. C 开路；
3. R_L 开路；
4. D_1 和 C 同时开路。

电容滤波电路简单易行，输出电压平均值高，适用于负载电流较小且其变化也较小的场合。

9.3.2 电感滤波电路



适于大电流负载！

$\begin{cases} R_L \downarrow \\ L \uparrow \end{cases} \rightarrow \begin{cases} U_{O(AV)} \downarrow \\ u_O \downarrow, \text{脉动越小, 滤波效果越好} \end{cases}$

当回路电流变化时，产生的感生电动势将阻止电流的变化，因而达到滤波的目的，并能增大二极管的导通角。

电感对直流分量的电抗为线圈电阻，对交流分量的感抗为 ωL 。

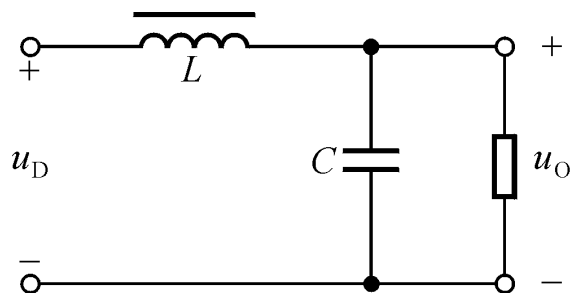
$$\text{直流分量: } U_{O(AV)} = \frac{R_L}{R + R_L} \cdot U_{D(AV)} \approx \frac{R_L}{R + R_L} \times 0.9U_2$$

$$\text{交流分量: } u_O = \frac{R_L}{\sqrt{R_L^2 + (\omega L)^2}} \cdot u_d \approx \frac{R_L}{\omega L} \cdot u_d$$

9.3.3 复式滤波电路

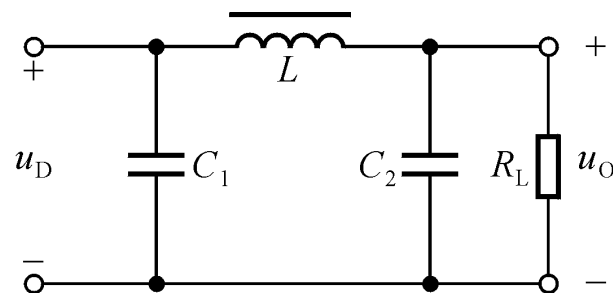
为获得更好的滤波效果，可采用复式滤波电路。

电感应与负载串联，电容应与负载并联。



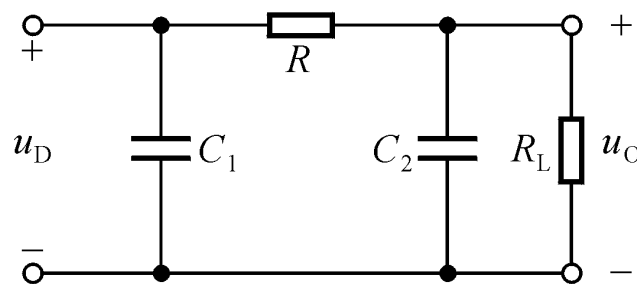
(a)

LC滤波电路



(b)

LCπ型滤波电路

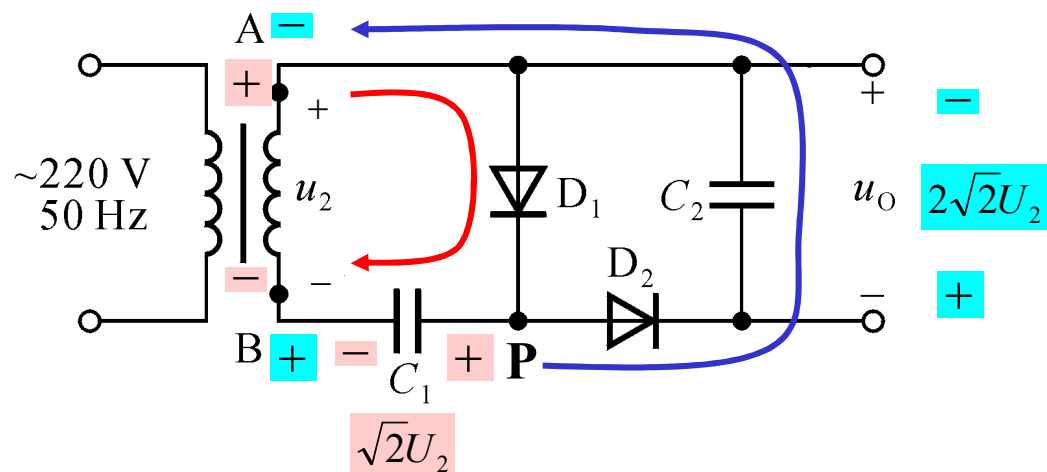


(c)

RCπ型滤波电路

9.3.4 倍压整流电路

1. 二倍压整流电路



分析时的两个要点：设①负载开路，②电路进入稳态。

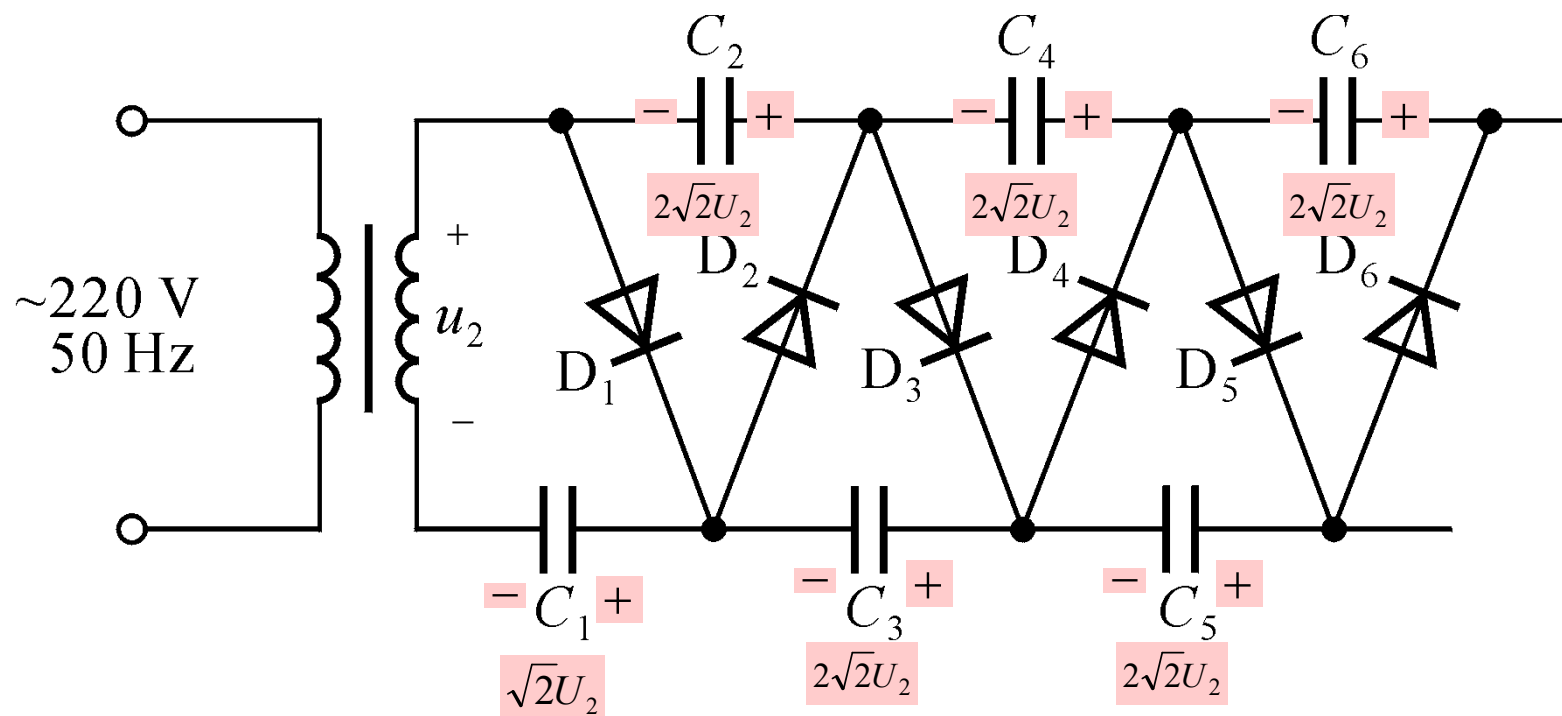
u_2 正半周 C_1 充电：A → D_1 → C_1 → B，最终

$$U_{C1} = \sqrt{2}U_2$$

u_2 负半周， u_2 加 C_1 上电压对 C_2 充电：P → D_2 → C_2 → A，最终

$$U_{C2} = 2\sqrt{2}U_2$$

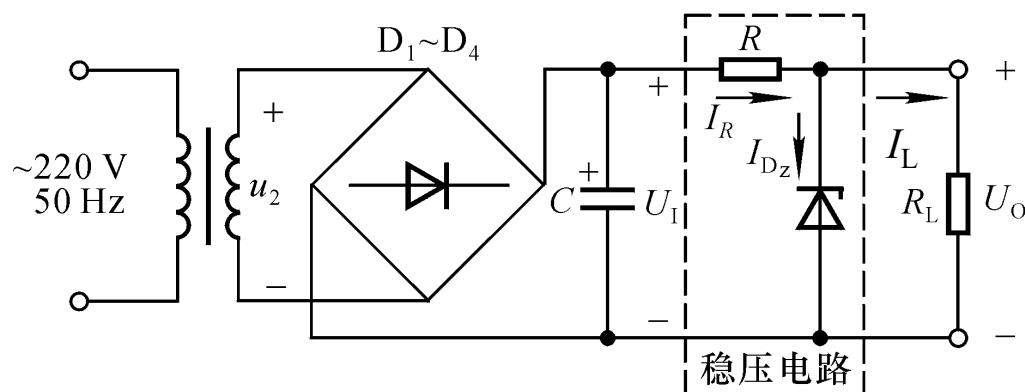
2. 多倍压整流电路



从不同位置输出，可获得 $\sqrt{2}U_2$ 的不同倍数输出电压

9.4 稳压管稳压电路

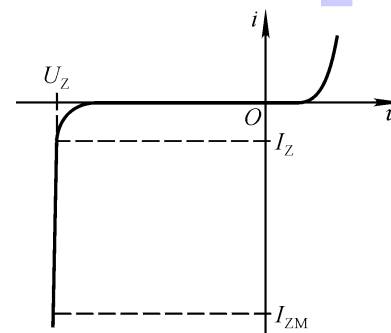
9.4.1 电路组成及稳压原理



$$U_O = U_Z$$

$$U_I = U_R + U_O$$

$$I_R = I_{DZ} + I_L$$



电网电压 $\uparrow \rightarrow U_I \uparrow \rightarrow U_O \uparrow (U_Z) \uparrow \rightarrow I_{DZ} \uparrow \rightarrow I_R \uparrow \rightarrow U_R \uparrow \rightarrow U_O \downarrow$

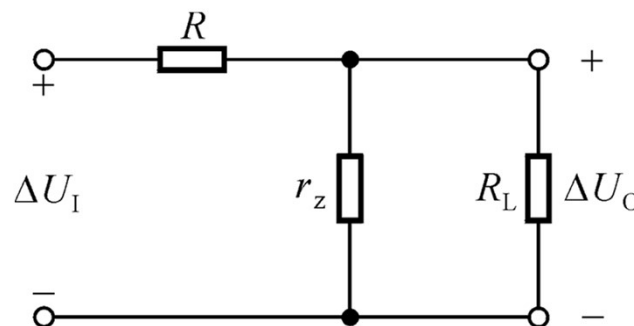
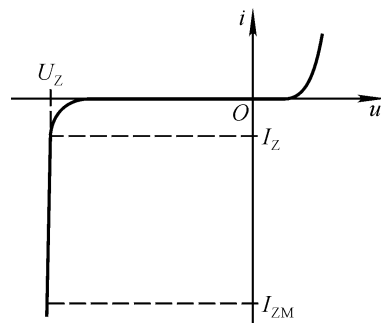
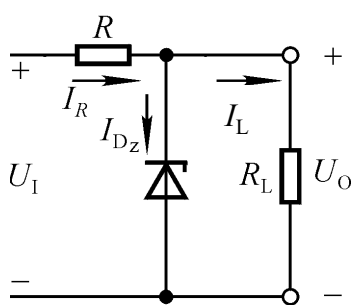
若 $\Delta U_I \approx \Delta U_R$, 则 U_O 基本不变。

$R_L \downarrow (I_L \uparrow) \rightarrow I_R \uparrow \rightarrow U_O \downarrow (U_Z \downarrow) \rightarrow I_{DZ} \downarrow \rightarrow I_R \downarrow \rightarrow U_O \uparrow$

若 $\Delta I_{DZ} \approx -\Delta I_L$, 则 I_R 基本不变, U_O 也就基本不变。

利用限流电阻 R 上电压或电流的变化进行补偿, 达到稳压目的。

9.4.2 性能指标



(1) 稳压系数 表明电网电压波动时电路的稳压性能。

在负载不变时，输出电压相对变化量与输入电压变化量之比。

$$S_r = \frac{\Delta U_O / U_O}{\Delta U_I / U_I} \Big|_{R_L = \text{常数}} = \frac{U_I}{U_O} \cdot \frac{\Delta U_O}{\Delta U_I} \Big|_{R_L = \text{常数}}$$

$$S_r = \frac{r_z // R_L}{R + r_z // R_L} \cdot \frac{U_I}{U_O} \approx \frac{r_z}{R} \cdot \frac{U_I}{U_Z}$$

(2) 输出电阻 表明负载电流变化时电路的稳压性能。

在电网电压不变时，负载变化引起的输出电压的变化量与输出电流的变化量之比。

$$R_o = \frac{\Delta U_O}{\Delta I_O} \Big|_{U_I = \text{常数}}$$

$$R_o = r_z // R \approx r_z$$

9.4.3 电路参数的选择

(1) U_I 的选择: $U_I = (2 \sim 3) U_O$

(2) 稳压管的选择: $U_Z = U_O$ $I_{ZM} - I_Z > I_{Lmax} - I_{Lmin}$

(3) 限流电阻 R 的选择:

保证稳压管既稳压又不损坏 $I_{DZmin} \geq I_Z$ 且 $I_{DZmax} \leq I_{ZM}$

电网电压最低且负载电流最大时, 稳压管的电流最小。

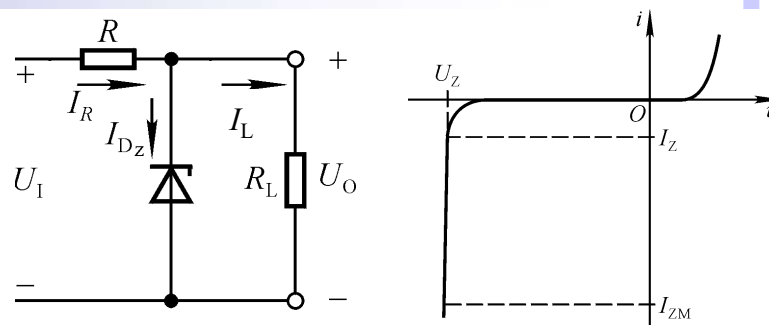
$$I_{DZmin} = \frac{U_{Imin} - U_Z}{R} - I_{Lmax} \geq I_Z$$

$$R \leq \frac{U_{Imin} - U_Z}{I_Z + I_{Lmax}}$$

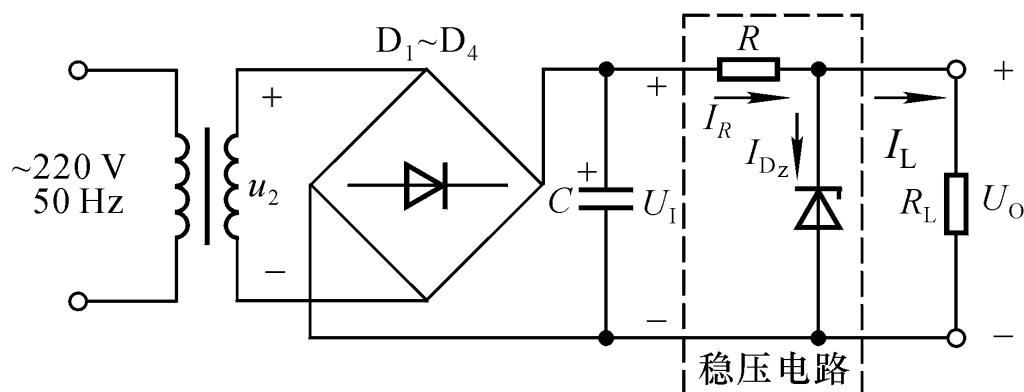
电网电压最高且负载电流最小时, 稳压管的电流最大。

$$I_{DZmax} = \frac{U_{Imax} - U_Z}{R} - I_{Lmin} \leq I_{ZM}$$

$$R \geq \frac{U_{Imax} - U_Z}{I_{ZM} + I_{Lmin}}$$



例9.4.2



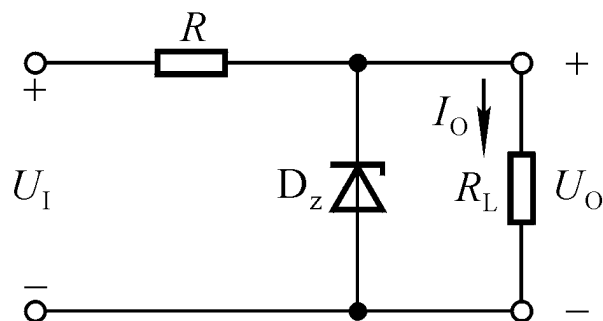
稳压管稳压电路简单易行，稳压性能好，
但输出电压不可调、输出电流较小。

9.5 串联型稳压电路

9.5.1 串联型稳压电路的工作原理

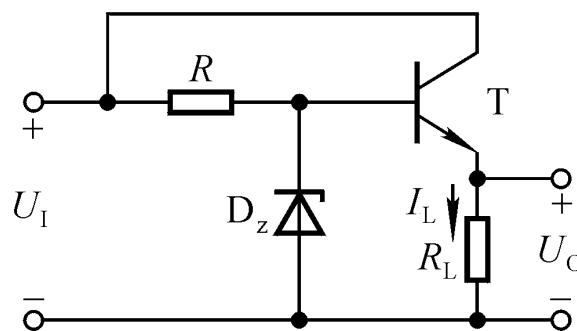
一、基本调整管稳压电路

为了使稳压管稳压电路输出大电流，需要加晶体管进行电流放大



稳压管稳压电路

输出电流最大变化范围
等于 $(I_{ZM} - I_Z)$

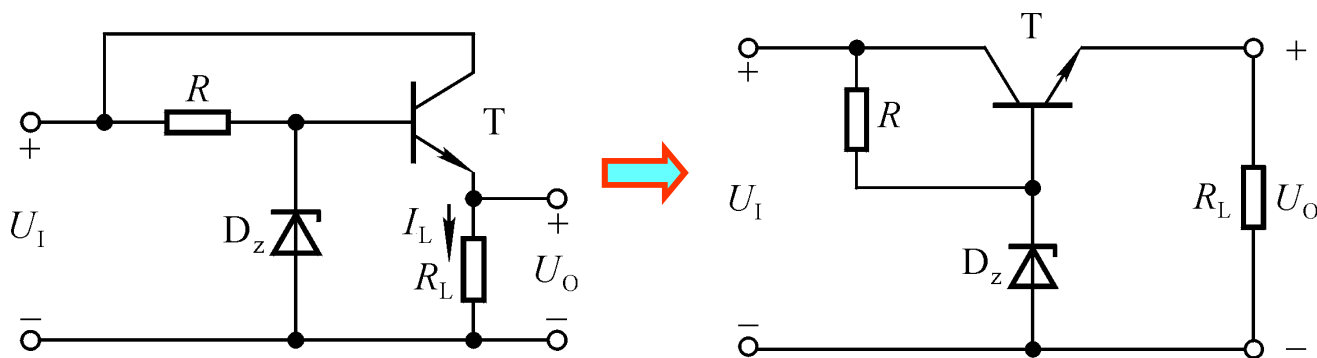


输出电流最大变化范围
等于 $(1 + \beta)(I_{ZM} - I_Z)$

$$U_O = U_Z - U_{BE}$$

稳压原理：电路引入电压负反馈，稳定输出电压，称晶体管为调整管。

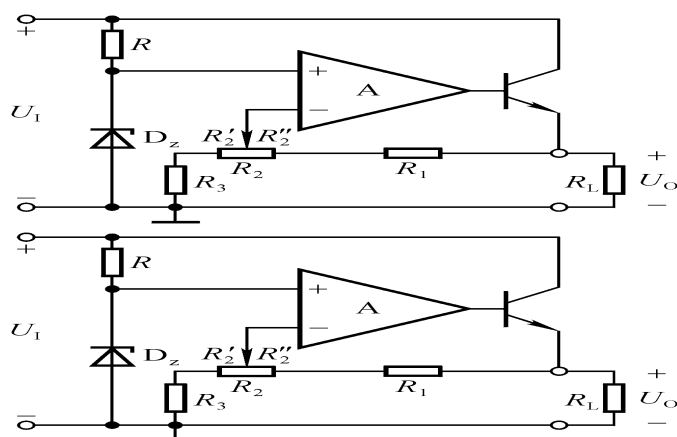
常见画法



由于调整管与负载**串联**，故称为**串联型稳压电源**；
由于调整管工作在线性区，故称为**线性稳压电源**。

为了使**输出电压可调**，也为了**加深电压负反馈**以提高输出电压的稳压性，通常在基本调整管稳压电路的基础上引入**放大环节**（由集成运放组成）。

二、具有放大环节的串联型稳压电路



同相比例运算电路：

引入电压串联负反馈

1. 电路的构成

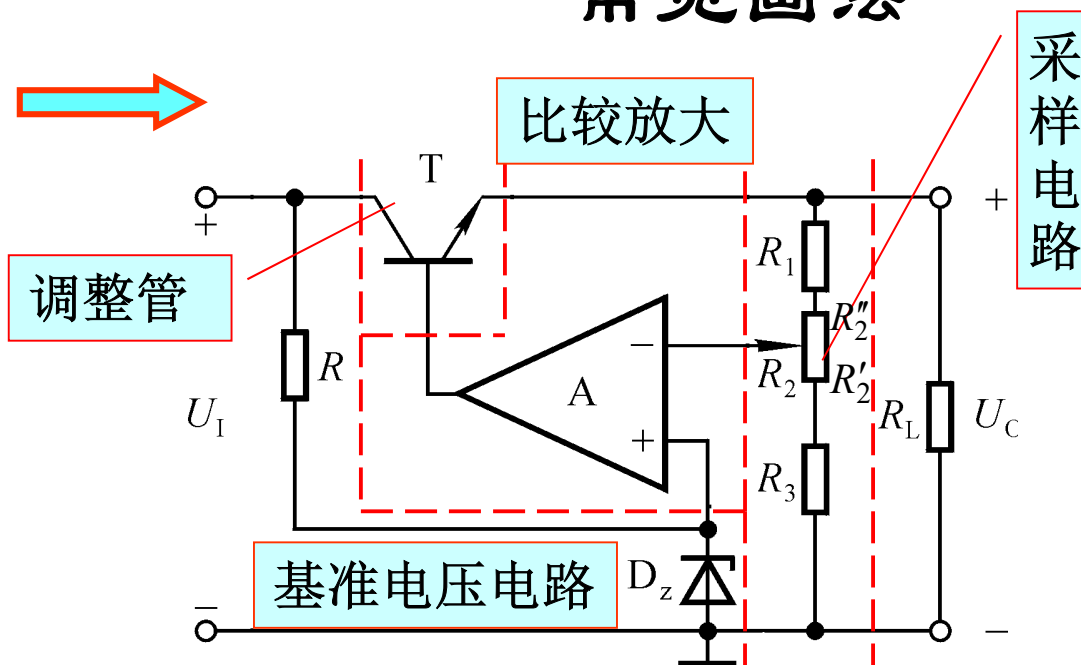
调整管：采用射极输出形式来提高输出电流的变化范围

基准电压： U_Z

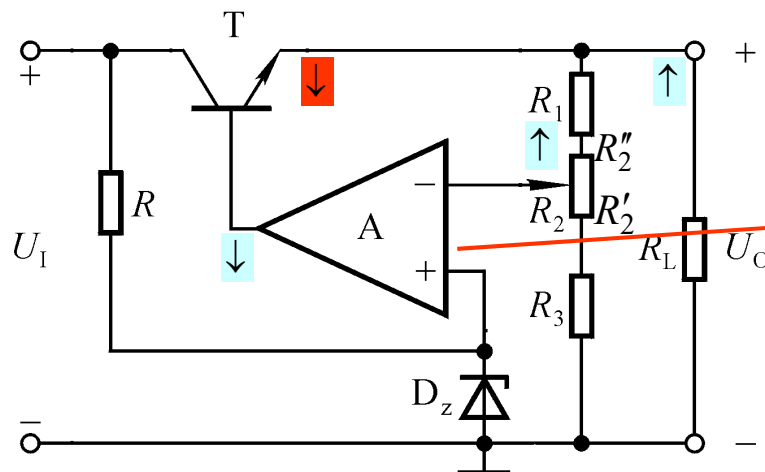
采样电路：对 U_O 的取样

比较放大：将 U_O 的采样电压与基准电压比较后放大

常见画法



2.电路的分析



运放组成同相比
例运算电路来使
输出电压可调

- (1) 稳压原理：若由于某种原因使 U_O 增大
 则 $U_O \uparrow \rightarrow U_N \uparrow \rightarrow U_B \downarrow \rightarrow U_O \downarrow$
 引入深度电压串联负反馈稳定输出电压

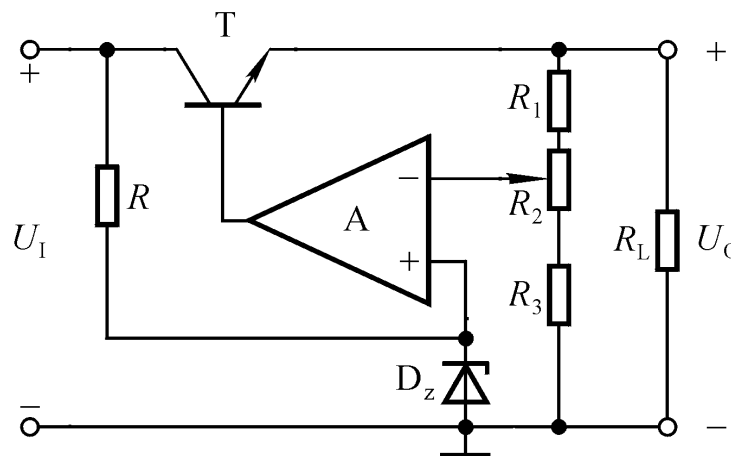
- (2) 输出电压及调节范围

$$\frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_2 + R_3} \cdot U_Z \leq U_O \leq \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_3} \cdot U_Z$$

$$U_O = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R'_2 + R_3} U_Z$$

(3) 调整管的选择

根据极限参数 I_{CM} 、 $U_{(BR)CEO}$ 、 P_{CM} 选择调整管！
应考虑电网电压的波动和负载电流的变化！



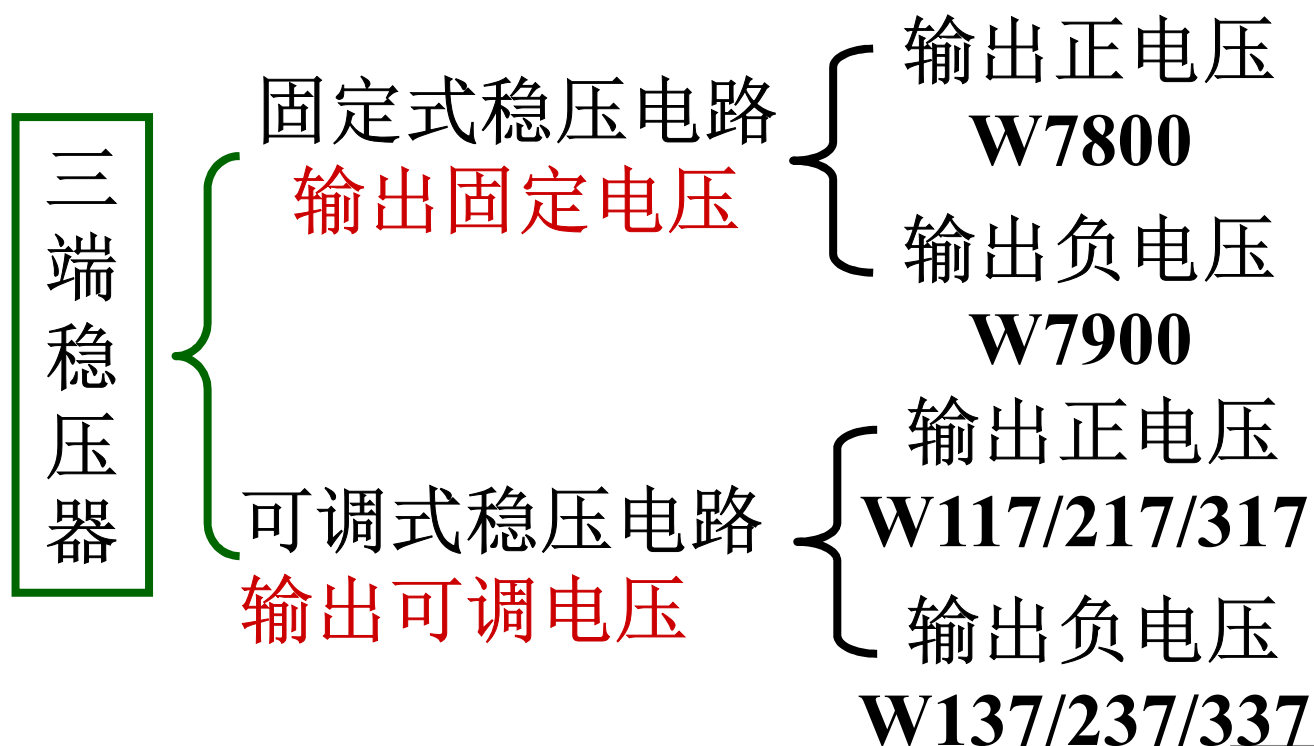
$$I_{Cmax} \approx I_{Emax} \approx I_{R1} + I_{Lmax} \approx I_{Lmax} < I_{CM}$$

$$U_{CEmax} = U_{I_{max}} - U_{Omin} < U_{(BR)CEO}$$

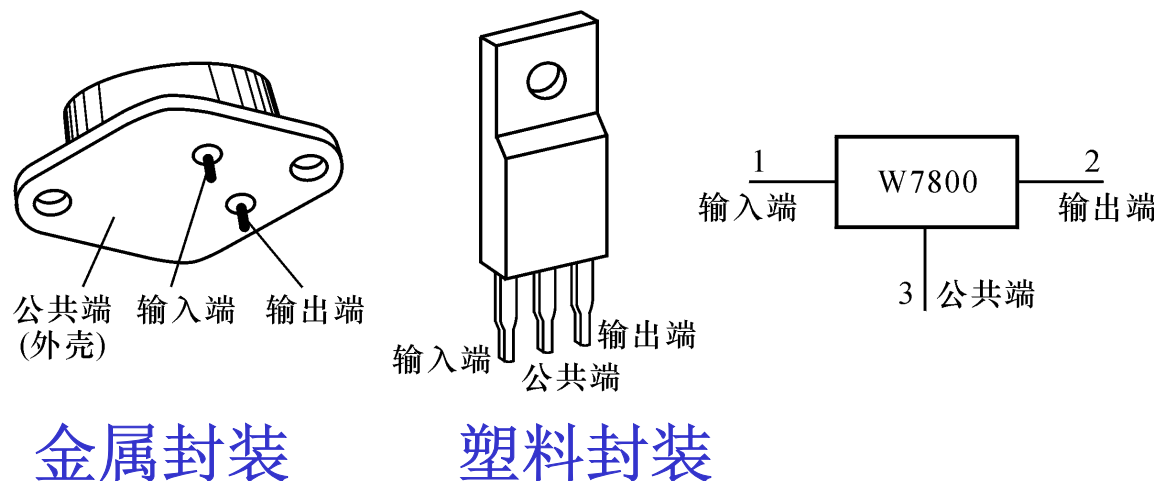
$$P_{Tmax} = I_{Cmax} U_{CEmax} < P_{CM}$$

9.5.2 集成稳压器电路

集成串联型稳压电路有三个引脚，输入端、输出端和公共端（或调整端），又称为三端稳压器。



1. W7800系列简介

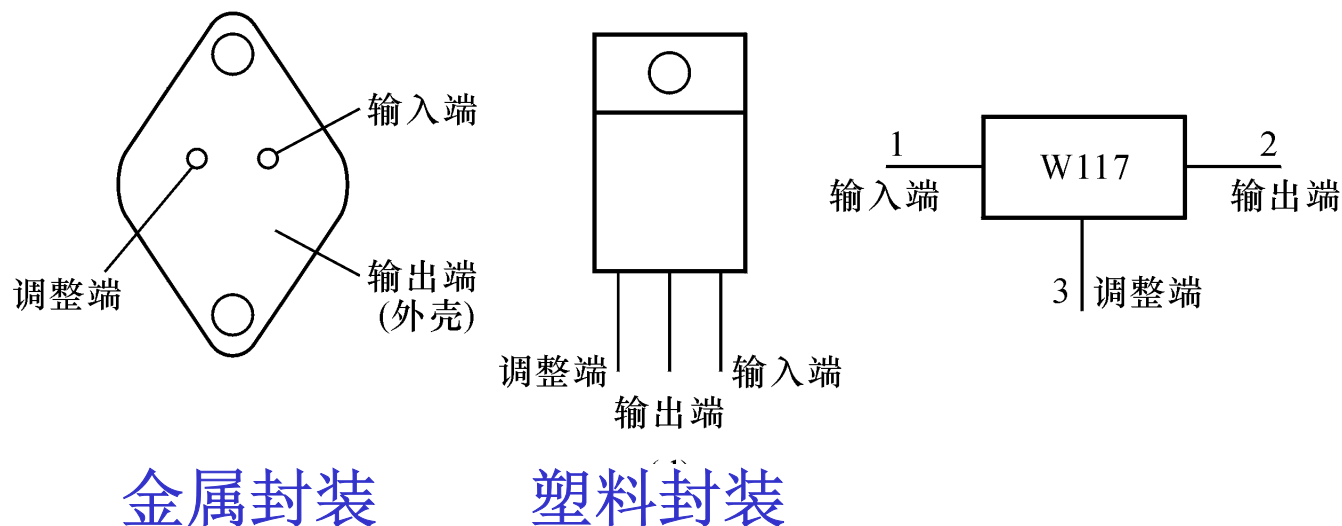


输出电压：5V、6V、9V、12V、15V、18V、24V

最大输出电流：1.5A（W7800）、0.5A（W78M00）、
0.1A（W78L00）

型号后面的两位数字表示输出电压值

2. W117系列简介



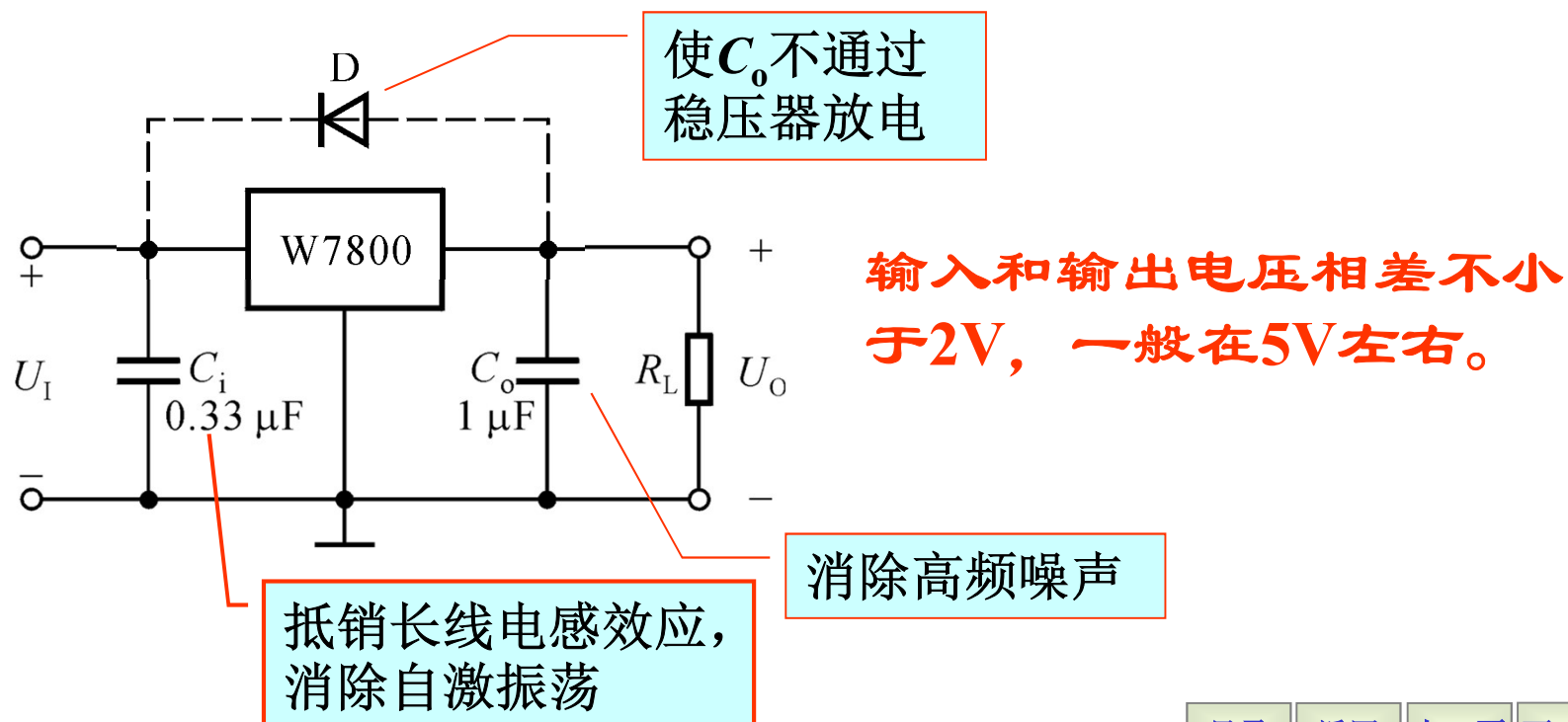
最大输出电流: **1.5A (W117)**、**0.5A (W117M)**、**0.1A (W117L)**

工作温度范围: **-55°C~150°C (W117)**、**-25°C~150°C (W217)**、**0°C~125°C (W317)**

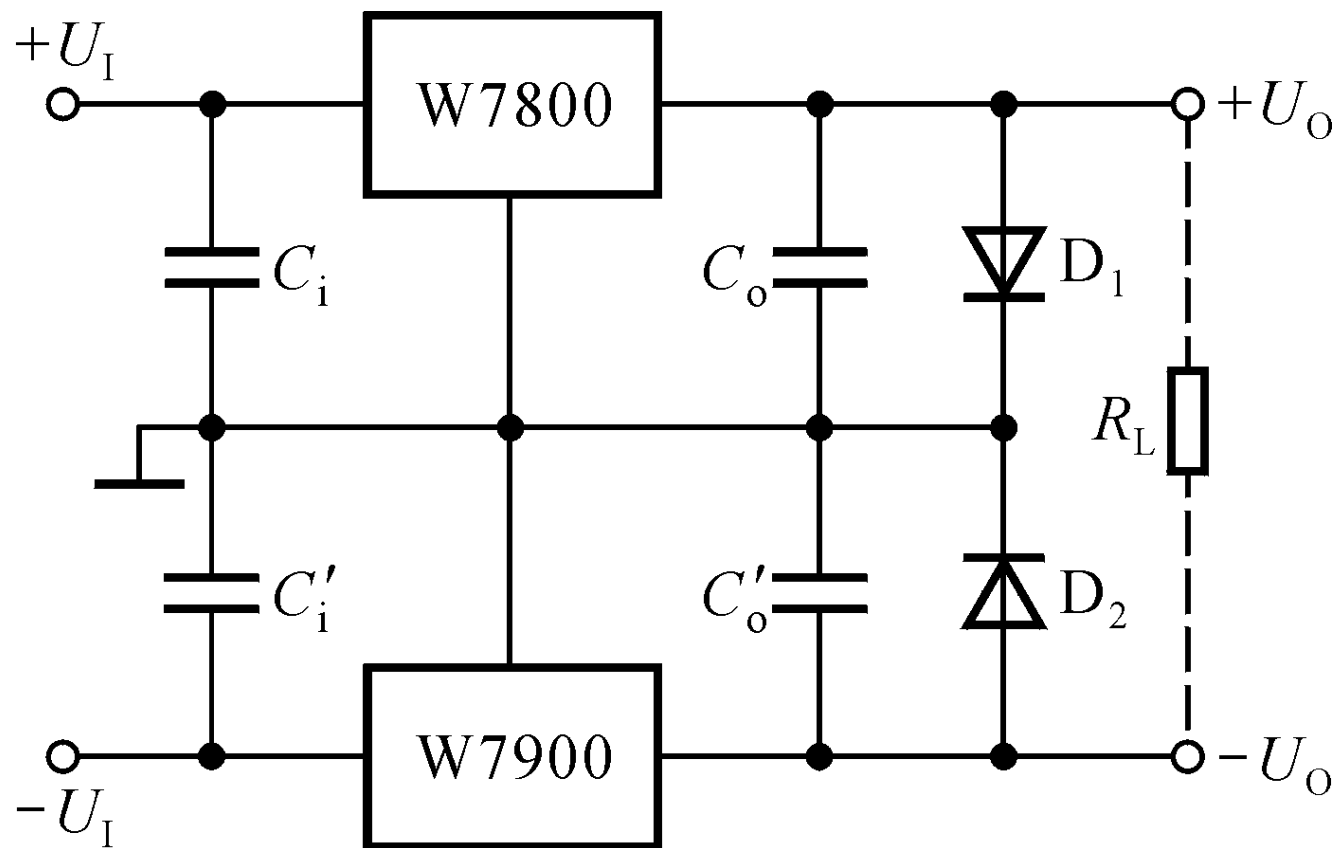
3. W7800的应用

(1) 基本应用

将输入端接整流滤波电路的输出，将输出端接负载电阻，构成串联型稳压电路。

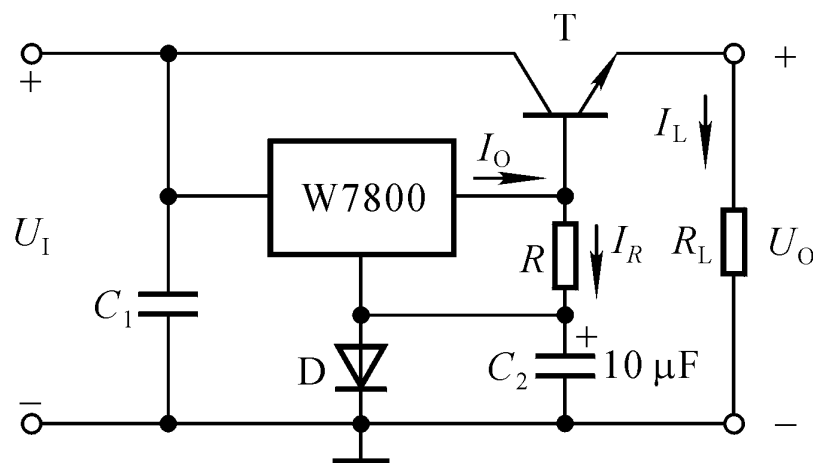


(2) 正、负输出稳压电路



(3) 输出电流扩展电路

为使负载电流大于三端稳压器的输出电流，可采用射极输出器进行电流放大。



$$I_L = (1 + \beta)(I_O - I_R)$$

很小

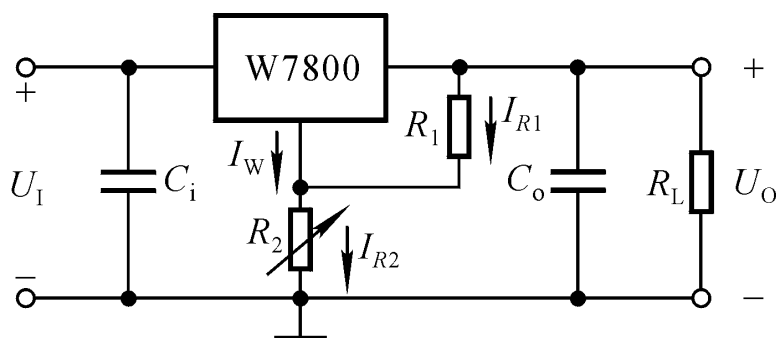
$$U_O = U'_O + U_D - U_{BE}$$

三端稳压器的输出电压

若 $U_{BE} = U_D$ ，则 $U_O = U'_O$

二极管的作用：消除 U_{BE} 对 U_O 的影响。

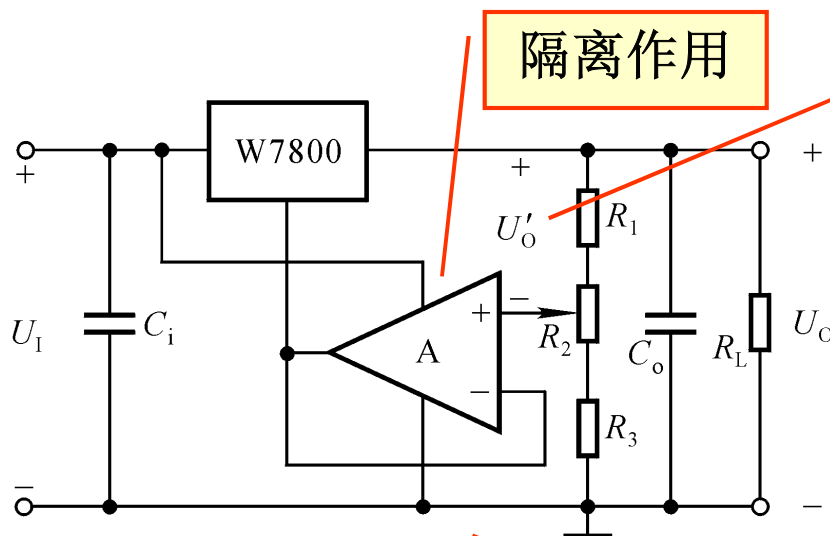
(4) 输出电压扩展电路



$$U_O = (1 + \frac{R_2}{R_1}) \cdot U'_O + I_W R_2$$

公共端电流 I_W 为几mA

U_O 与三端稳压器的参数 I_W 有关



隔离作用

基准电压

$$\frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_1 + R_2} \cdot U'_O \leq U_O$$

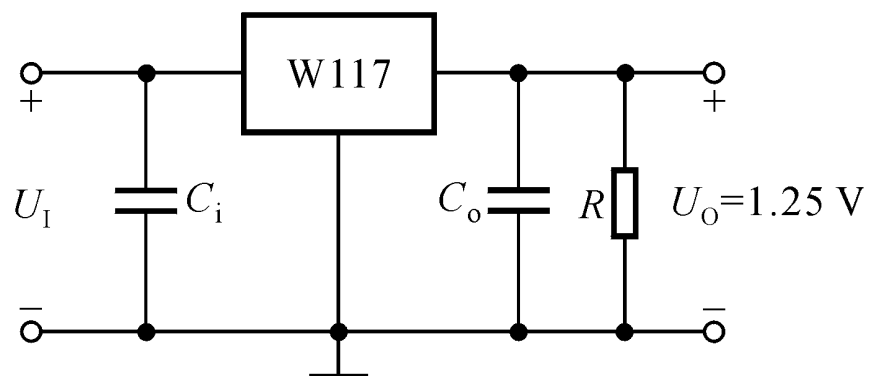
$$\leq \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_1} \cdot U'_O$$

电路复杂

U_O 与 I_W 无关

4. W117 的应用

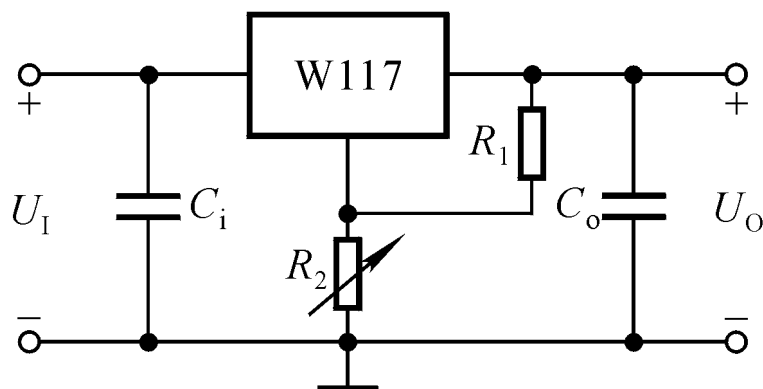
(1) 基准电压源电路



R 一般取 240Ω

$U_O = U_{\text{REF}} = 1.25\text{ V}$,
非常稳定

(2) 典型应用电路



R_1 一般取 240Ω

调整端电流为几 μA , 可忽略不计

$$U_O = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \times 1.25\text{ V}$$

比较容易实现输出电压可调

第 9 章

结 束