

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

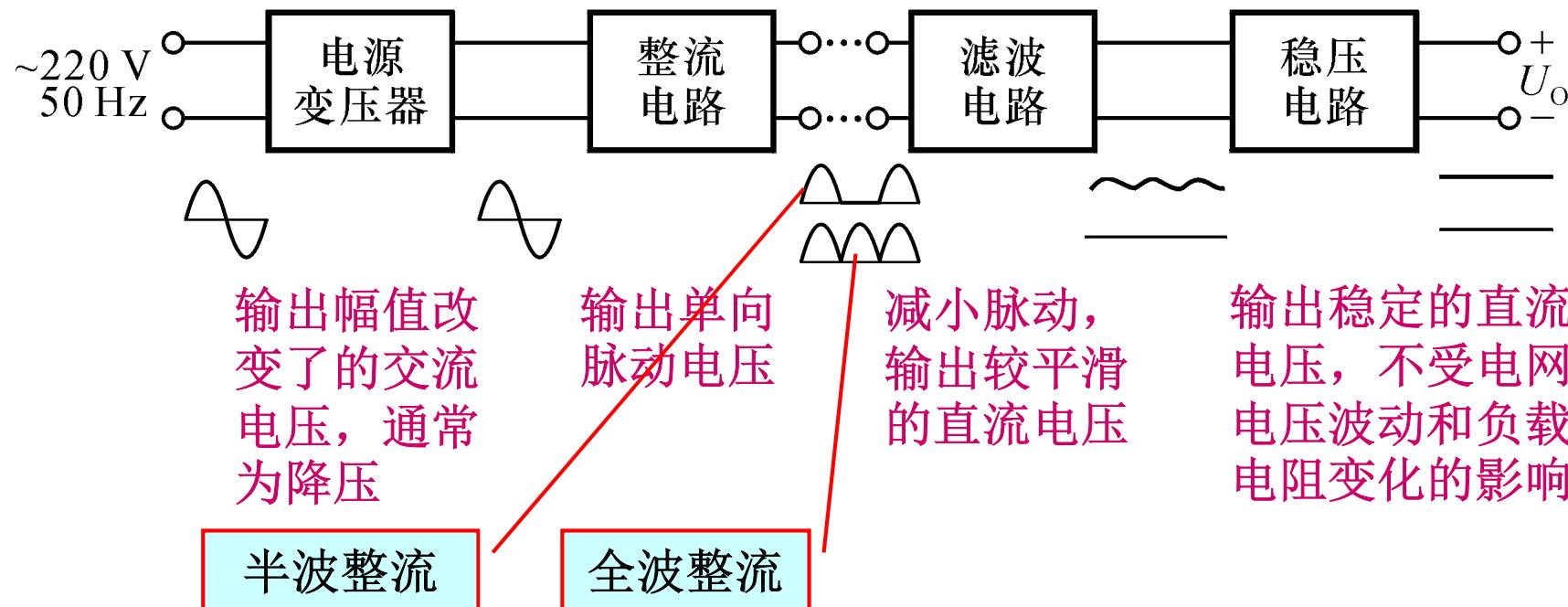
9. 4 稳压管稳压电路

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

作用是将交流电转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±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：

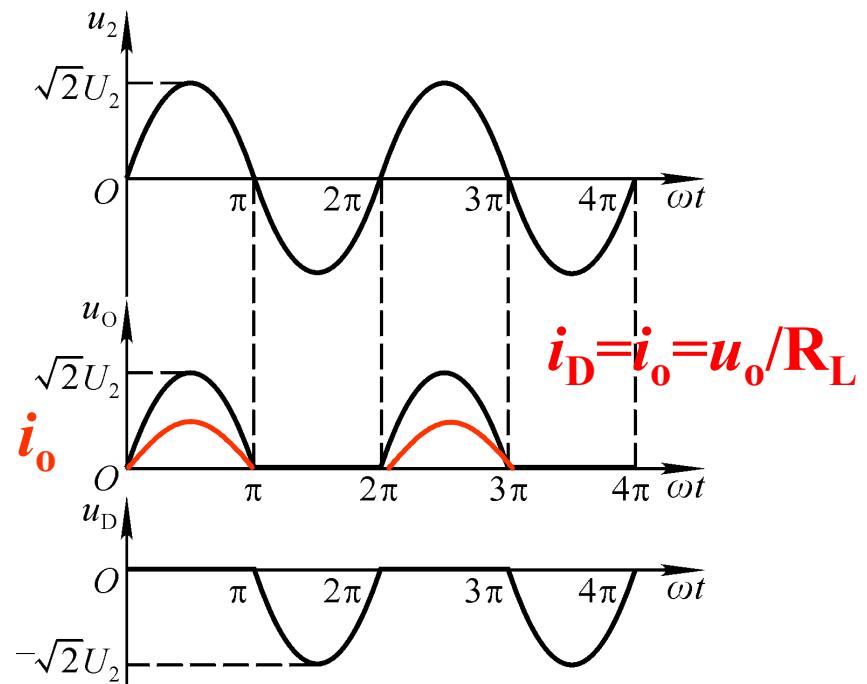
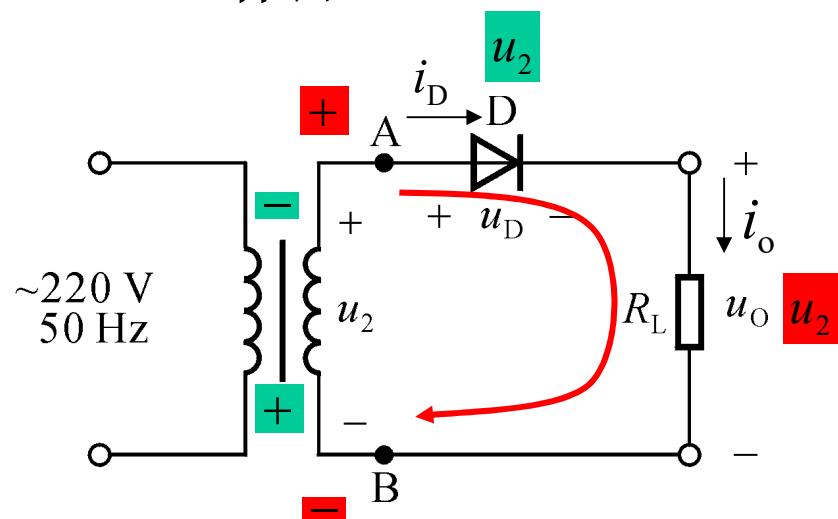
1. 电路的工作原理：二极管工作状态、波形分析
2. 输出电压和输出电流的平均值：输出为单向脉动电压
3. 整流二极管的选择：二极管承受的最大整流平均电流和最高反向工作电压

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

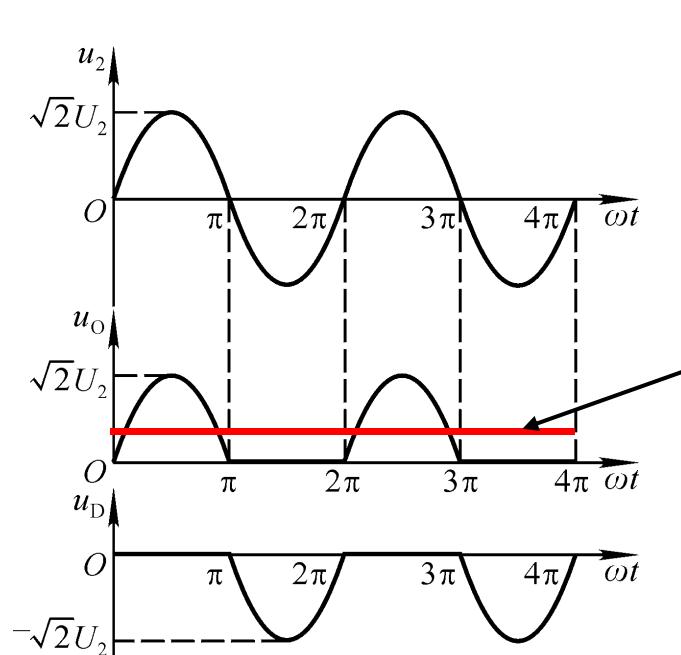


u_2 的正半周，D导通， $u_o = u_2$ ， $u_D = 0$ ；

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：

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

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

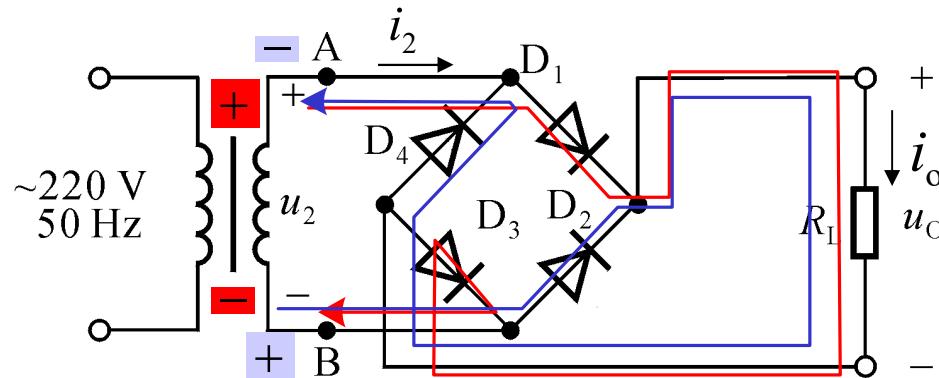
考虑到允许电网电压的波动范围为 $\pm 10\%$ ，
二极管的极限参数最大整流平均电流和最高反向
工作电压应满足：

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

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

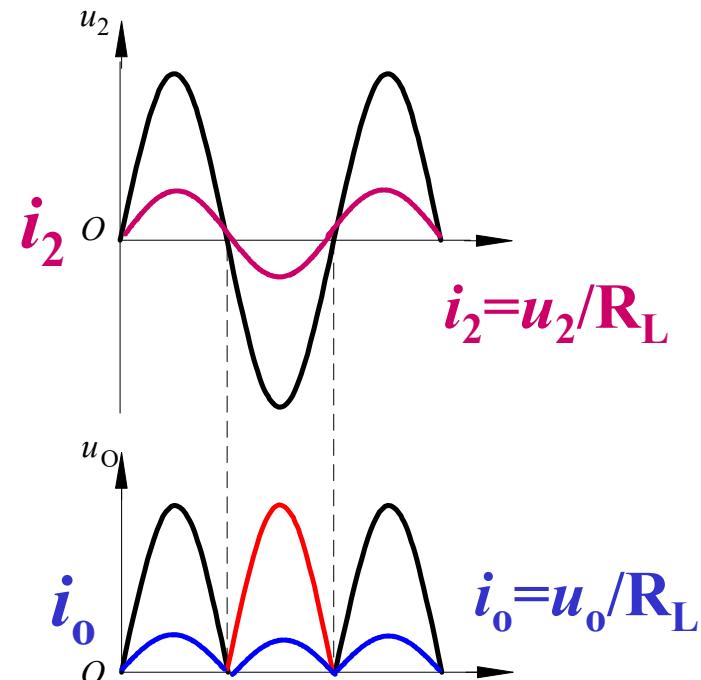


u_2 的正半周:

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

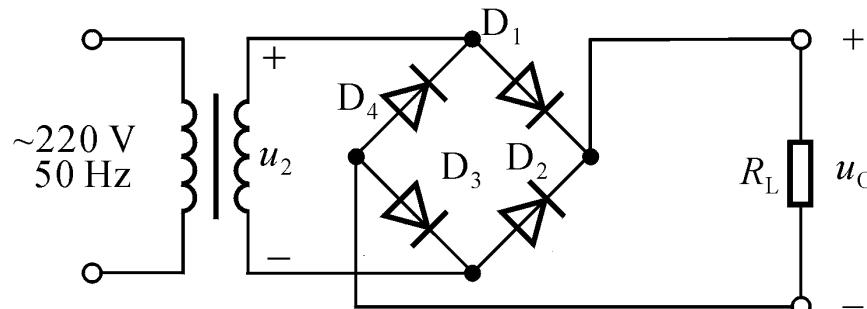
u_2 的负半周:

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



9.2 整流电路

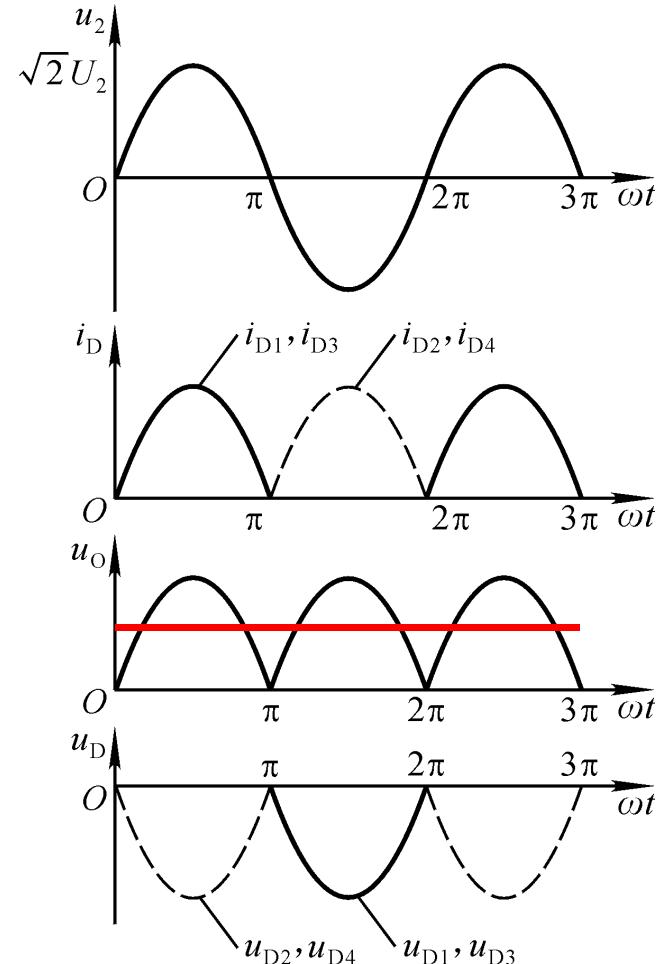
(2) 主要参数



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

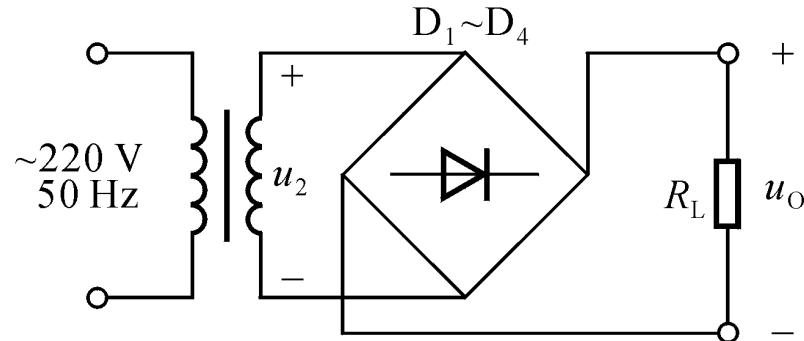
$$U_{O(AV)} = \frac{2\sqrt{2}U_2}{\pi} \approx 0.9U_2$$

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



9.2 整流电路

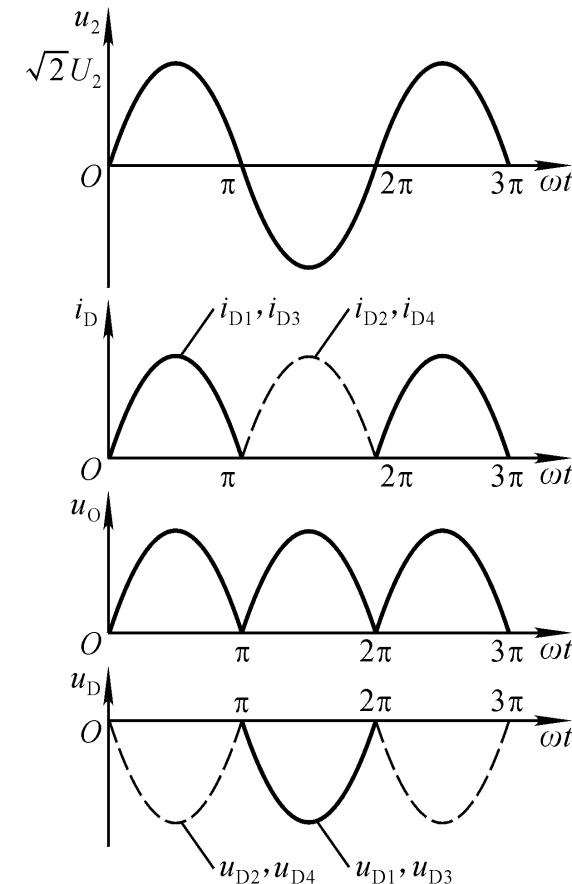
(3) 二极管的选择



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

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

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

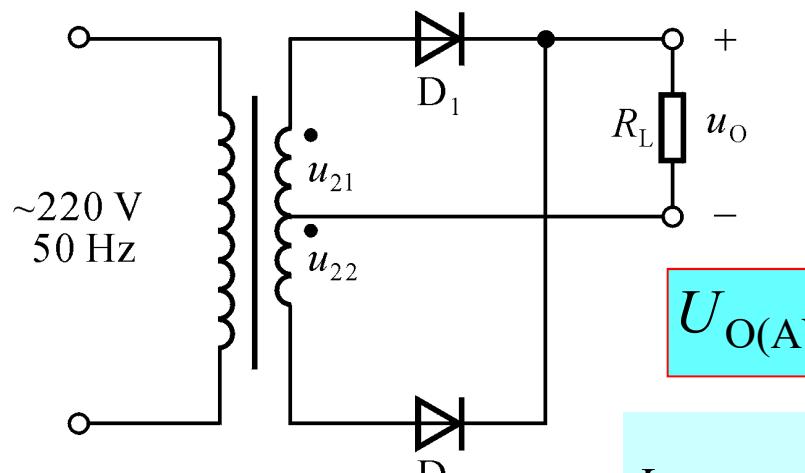


单相桥式整流电路与半波整流电路相比，对二极管参数的要求是一样的，并且还具有输出电压高、变压器利用率高、脉动小(脉动系数S=0.67)等优点，但是所需二极管的数量多，使整流电路的内阻较大，当然损耗也较大。

习题9.6 单相全波整流

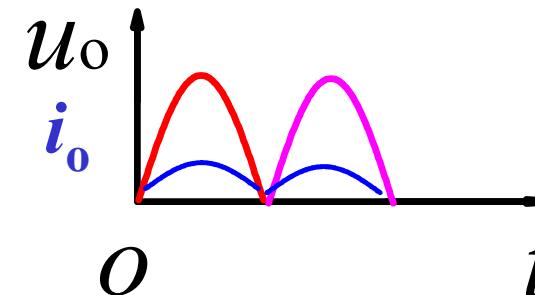
例9.2.2

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。



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

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



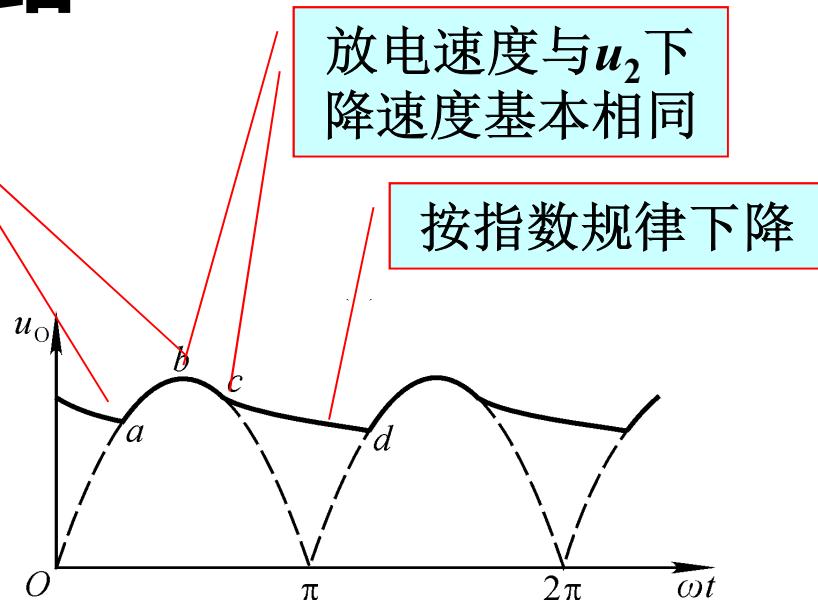
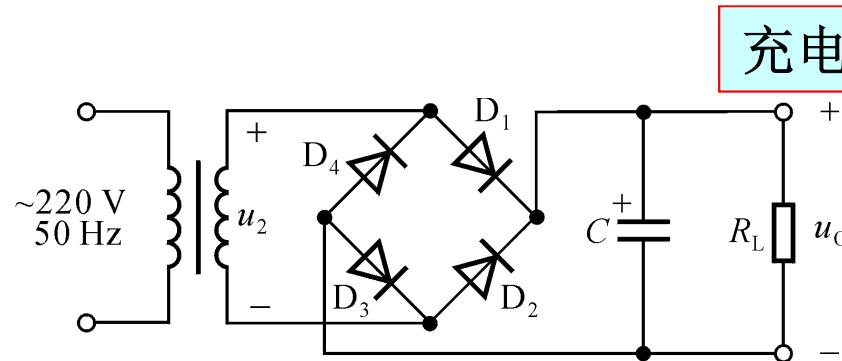
$$I_{O(AV)} = \frac{U_{O(AV)}}{R_L} \approx \frac{0.9U_2}{R_L}$$

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

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

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

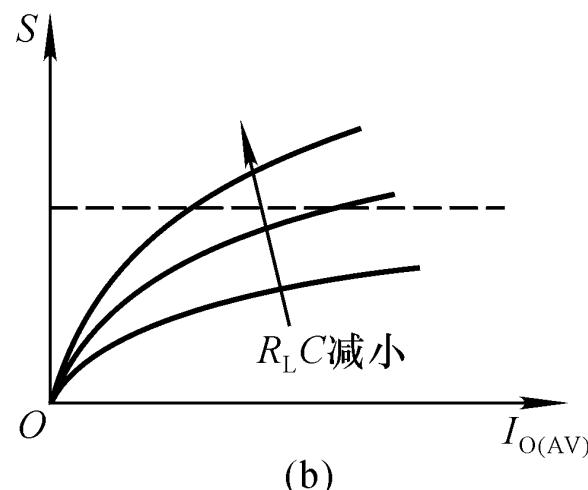
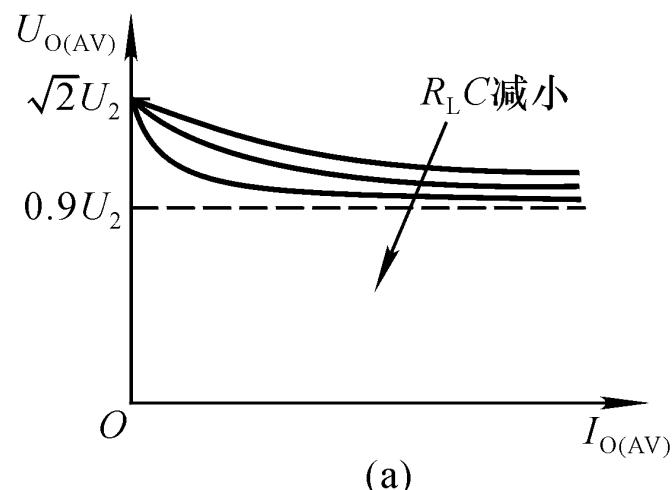
当负载开路,即 $R_L = \infty$ 时, $U_{O(AV)} = \sqrt{2}U_2$

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

例9.3.1

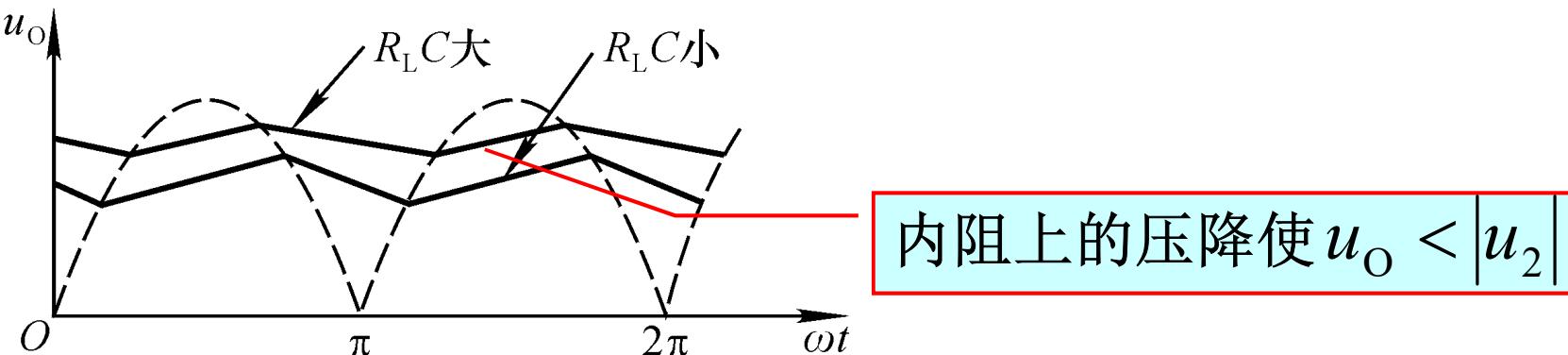
C的耐压值应大于 $1.1\sqrt{2}U_2$

(3) 输出特性和滤波特性

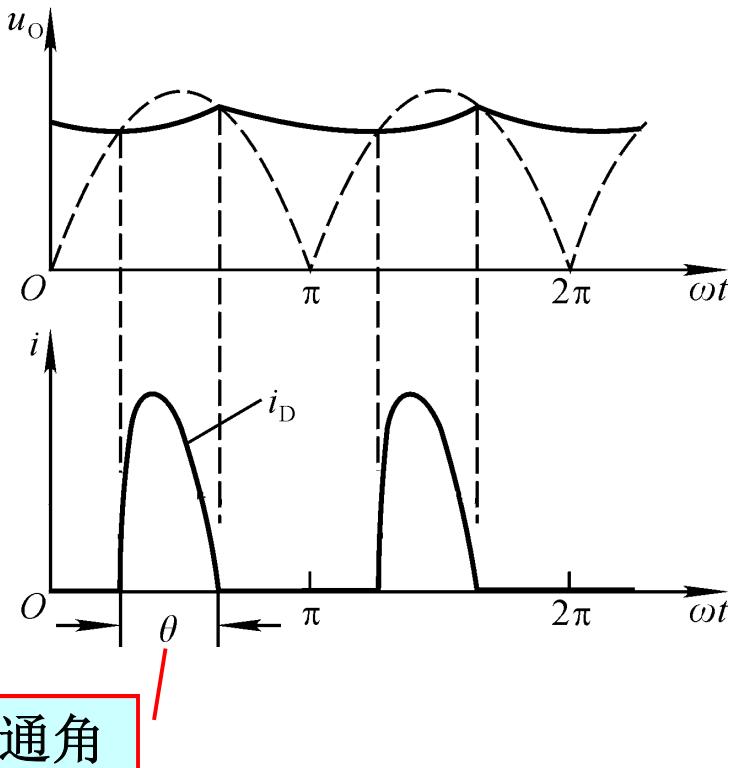


$\begin{cases} C \downarrow \\ I_{O(AV)} \uparrow \rightarrow R_L \downarrow \end{cases} \rightarrow \tau_{放电} \downarrow \rightarrow \begin{cases} \text{脉动} S \uparrow, \text{滤波效果越差} \\ U_{O(AV)} \downarrow \end{cases}$

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）



(4) 二极管的导通角



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， $\tau_{放电}$ 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， $U_{O(AV)} = \sqrt{2}U_2$

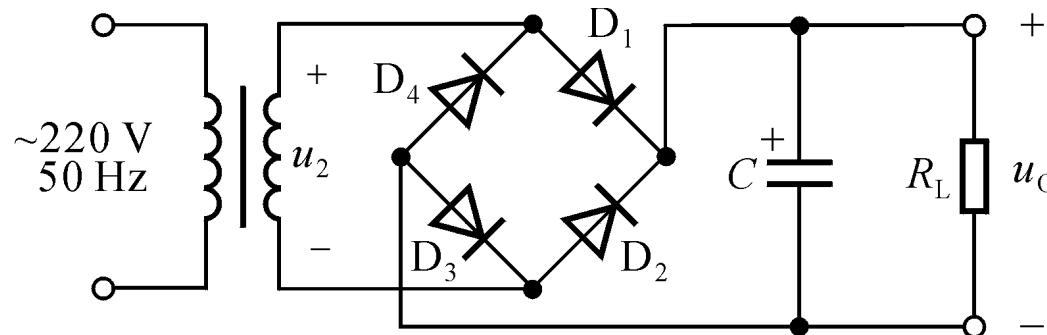
(2) 二极管承受的最大反向电压

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

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

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

例(自测题二)

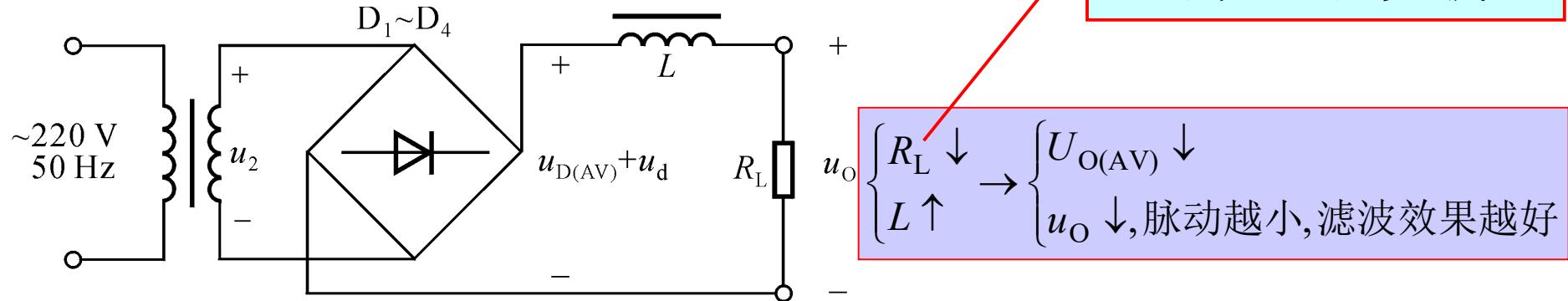


已知变压器副边电压有效值为10V，电容足够大，
判断下列情况下输出电压平均值 $U_{O(AV)} \approx ?$

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



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 。

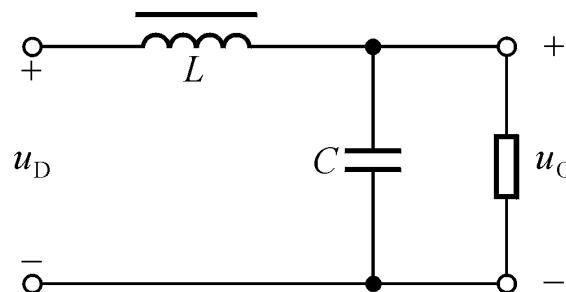
$$\text{直流分量: } U_{O(AV)} = \frac{R_L}{R + R_L} \cdot U_{D(AV)} \approx \frac{R_L}{R + R_L} \times 0.9U_2$$

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

9.3.3 复式滤波电路

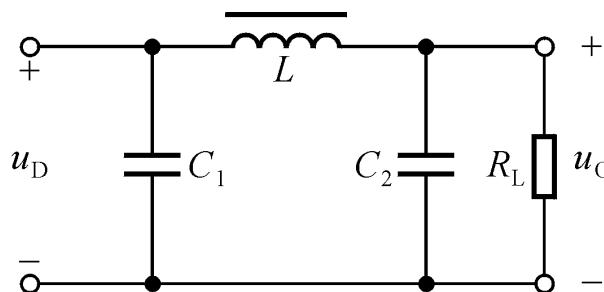
为获得更好的滤波效果，可采用复式滤波电路。

电感应与负载串联，电容应与负载并联。

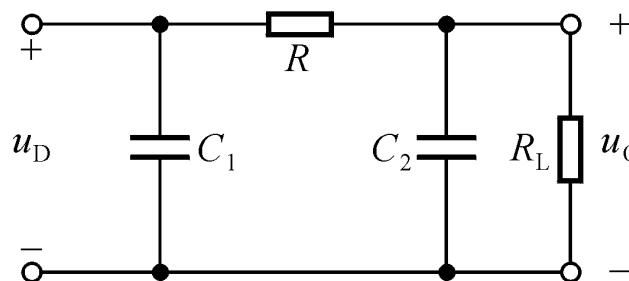


(a)

LC滤波电路



(b)

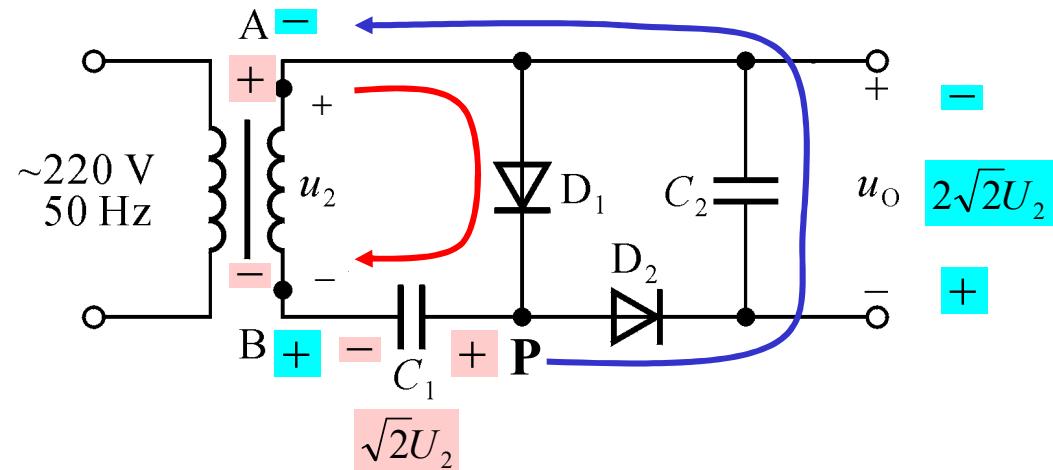
LC π 型滤波电路

(c)

RC π 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。

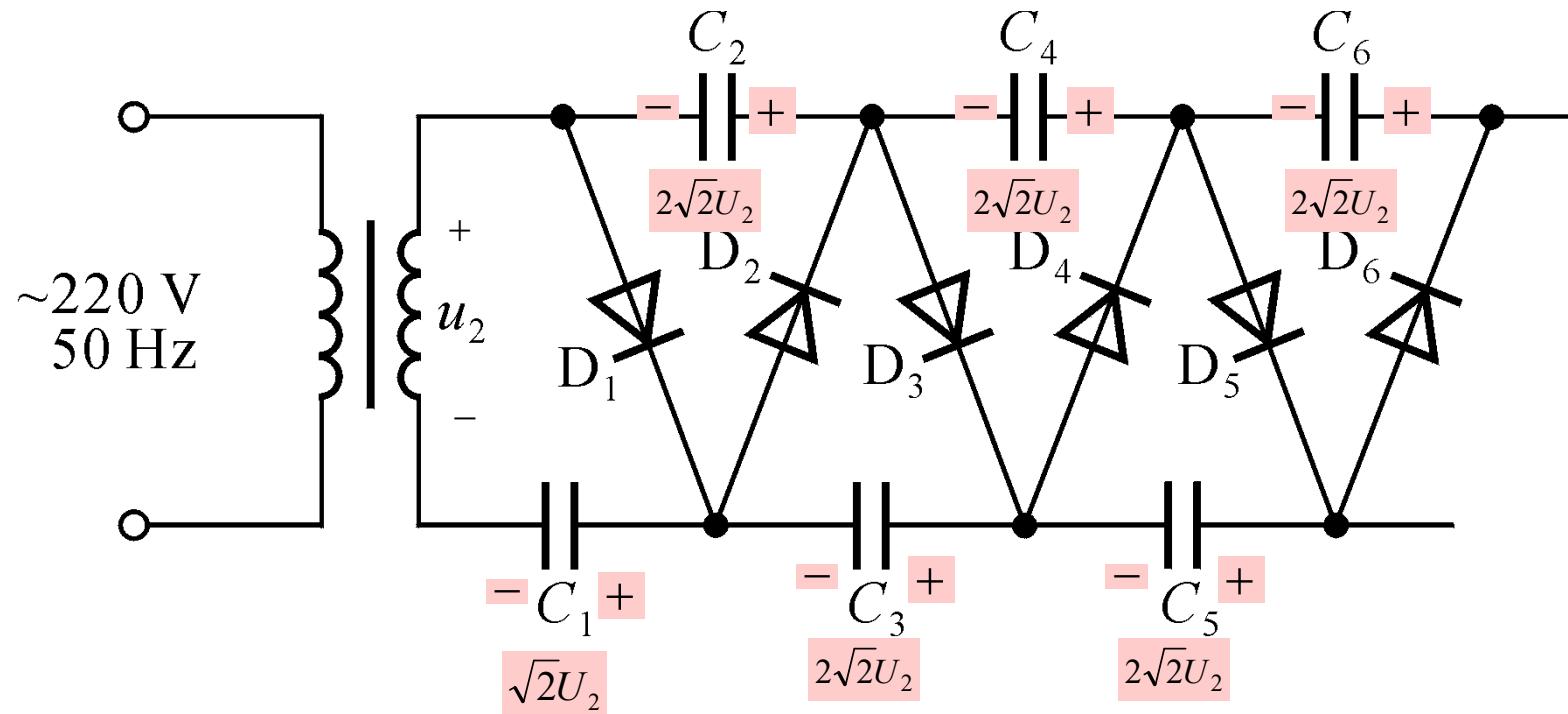
u_2 正半周 C_1 充电： $A \rightarrow D_1 \rightarrow C_1 \rightarrow B$ ， 最终

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

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

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

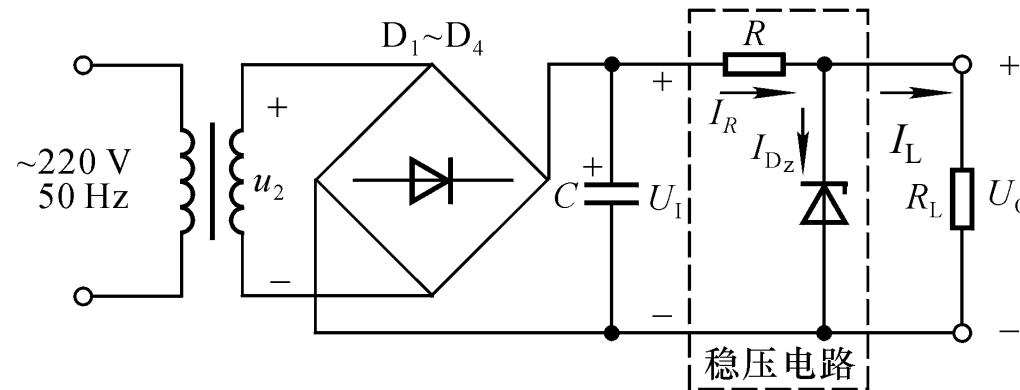
2. 多倍压整流电路



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



$$U_o = U_z$$

$$U_i = U_R + U_o$$

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

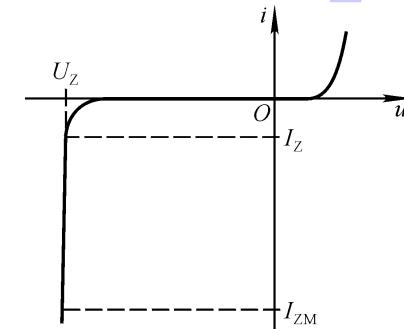
电网电压 $\uparrow \rightarrow U_i \uparrow \rightarrow U_o \uparrow (U_z) \uparrow \rightarrow I_{Dz} \uparrow \rightarrow I_R \uparrow \rightarrow U_R \uparrow \rightarrow U_o \downarrow$

若 $\Delta U_i \approx \Delta U_R$, 则 U_o 基本不变。

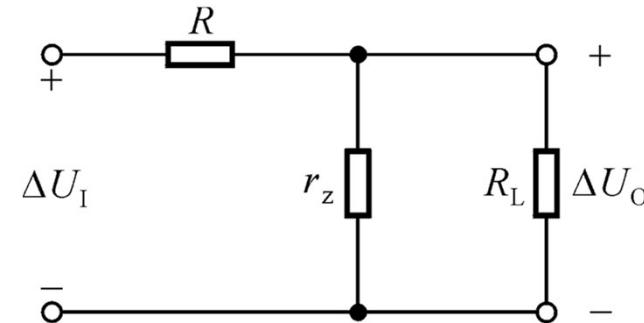
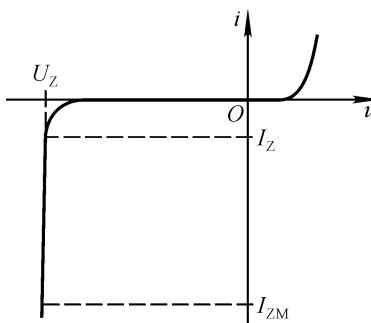
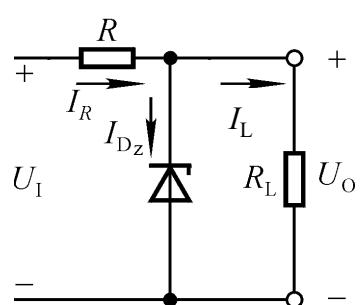
$R_L \downarrow (I_L \uparrow) \rightarrow I_R \uparrow \rightarrow U_o \downarrow (U_z \downarrow) \rightarrow I_{Dz} \downarrow \rightarrow I_R \downarrow \rightarrow U_o \uparrow$

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 稳压管稳压电路

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: $U_Z = U_O \quad I_{ZM} - I_Z > I_{Lmax} - I_{Lmin}$

(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。

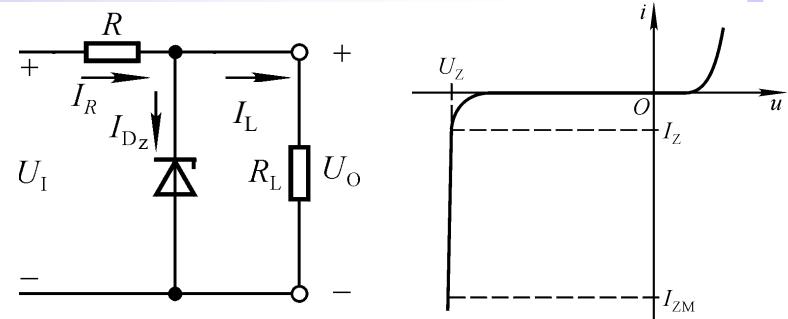
$$I_{DZmin} = \frac{U_{Imin} - U_Z}{R} - I_{Lmax} \geq I_Z$$

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

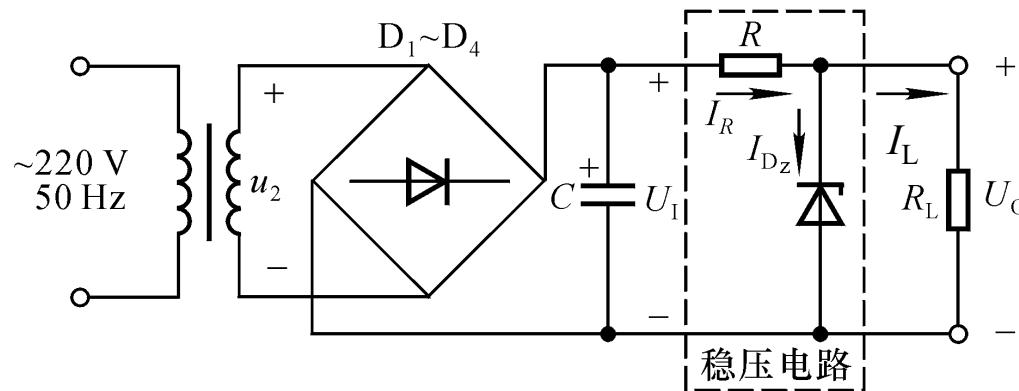
电网电压最高且负载电流最小时, 稳压管的电流最大。

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

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



例9.4.2



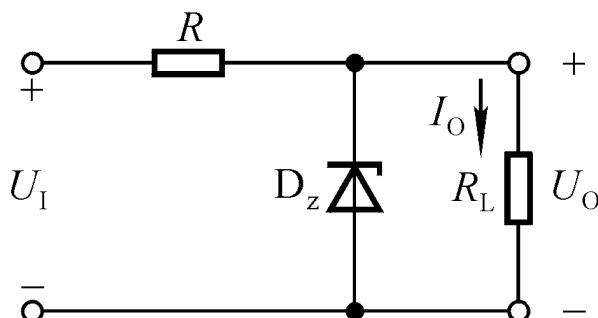
稳压管稳压电路简单易行，稳压性能好，
但输出电压不可调、输出电流较小。

9.5 串联型稳压电路

9.5.1 串联型稳压电路的工作原理

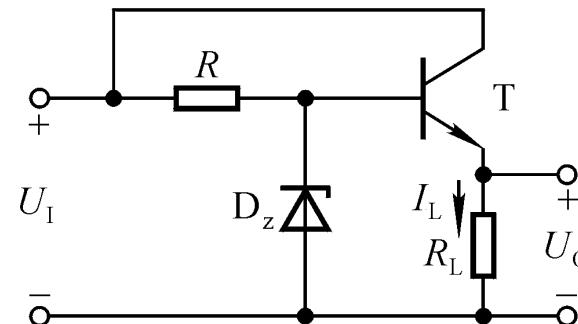
一、基本调整管稳压电路

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($I_{ZM} - I_Z$)



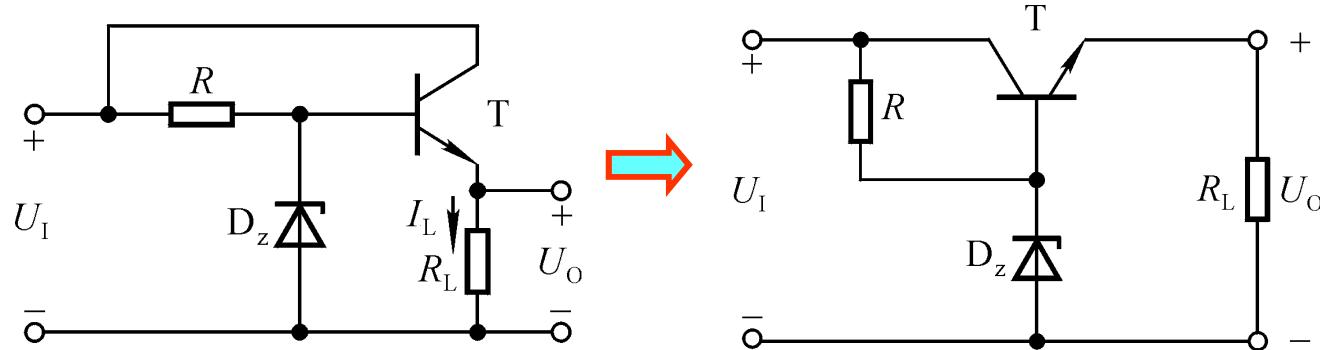
输出电流最大变化范围

$$\text{等于} (1+\beta)(I_{ZM} - I_Z)$$

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

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。

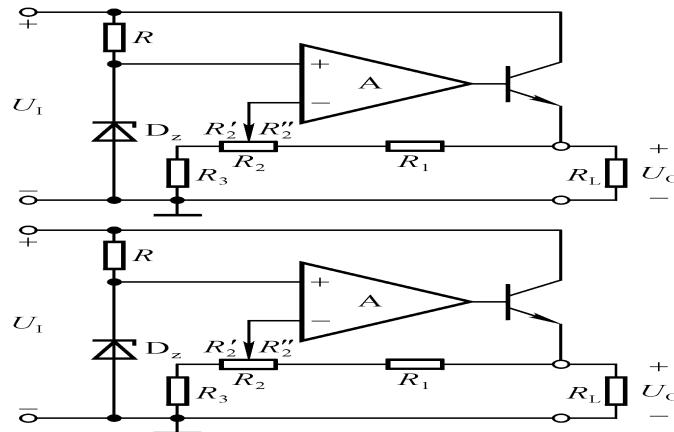
常见画法



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

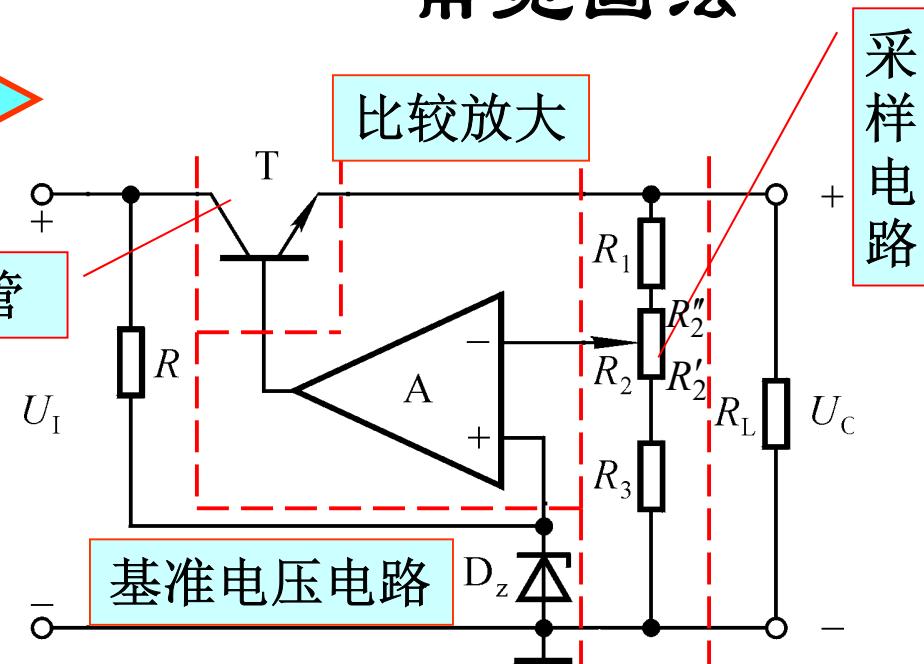
基准电压： U_Z

采样电路：对 U_O 的取样

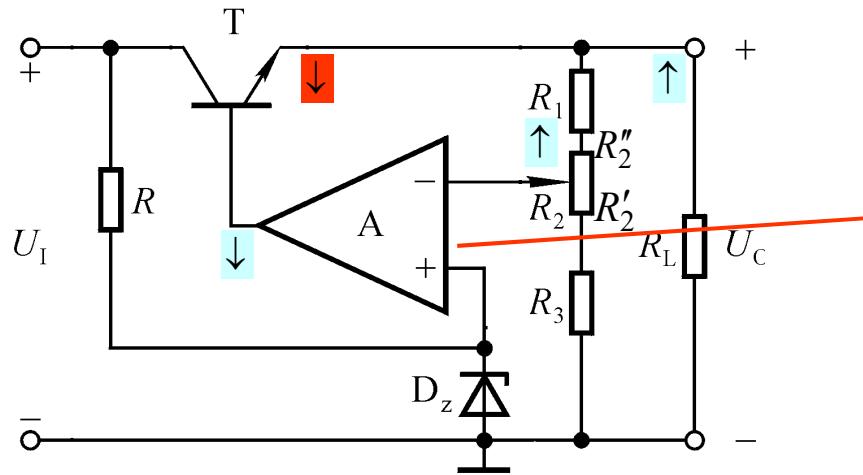
比较放大：将 U_O 的采样电压与基准电压比较后放大



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

$$\text{则 } U_O \uparrow \rightarrow U_N \uparrow \rightarrow U_B \downarrow \rightarrow U_O \downarrow$$

引入深度电压串联负反馈稳定输出电压

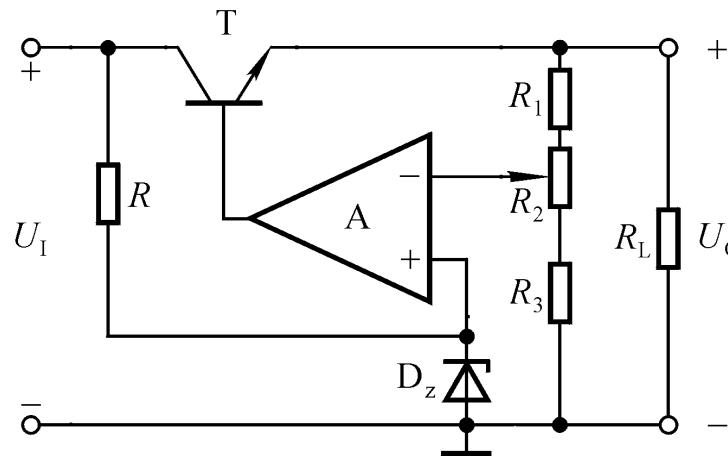
(2) 输出电压及调节范围

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

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

(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！



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

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

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

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。

三端稳压器

固定式稳压电路
输出固定电压

可调式稳压电路
输出可调电压

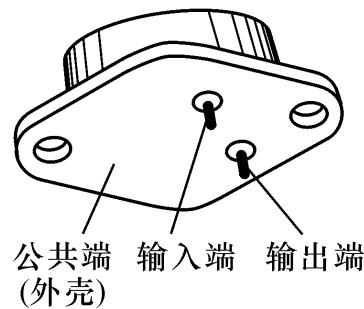
输出正电压
W7800

输出负电压
W7900

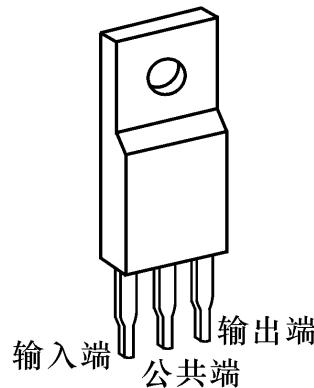
输出正电压
W117/217/317

输出负电压
W137/237/337

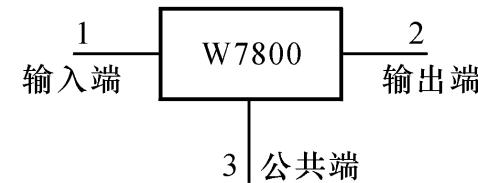
1. W7800系列简介



金属封装



塑料封装

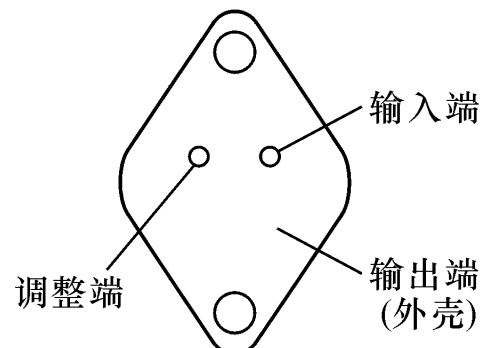


输出电压: 5V、6V、9V、12V、15V、18V、24V

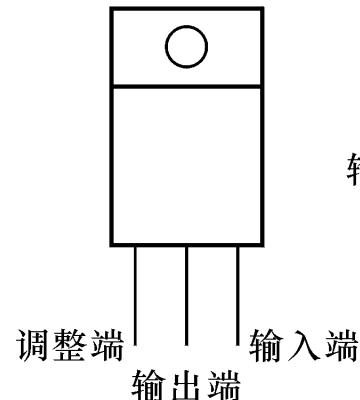
最大输出电流: 1.5A (W7800)、0.5A (W78M00)、
0.1A (W78L00)

型号后面的两位数字表示输出电压值

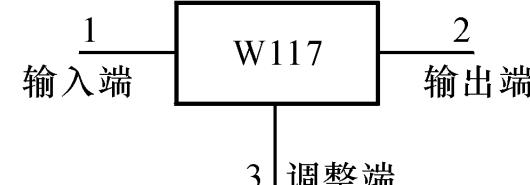
2. W117系列简介



金属封装



塑料封装



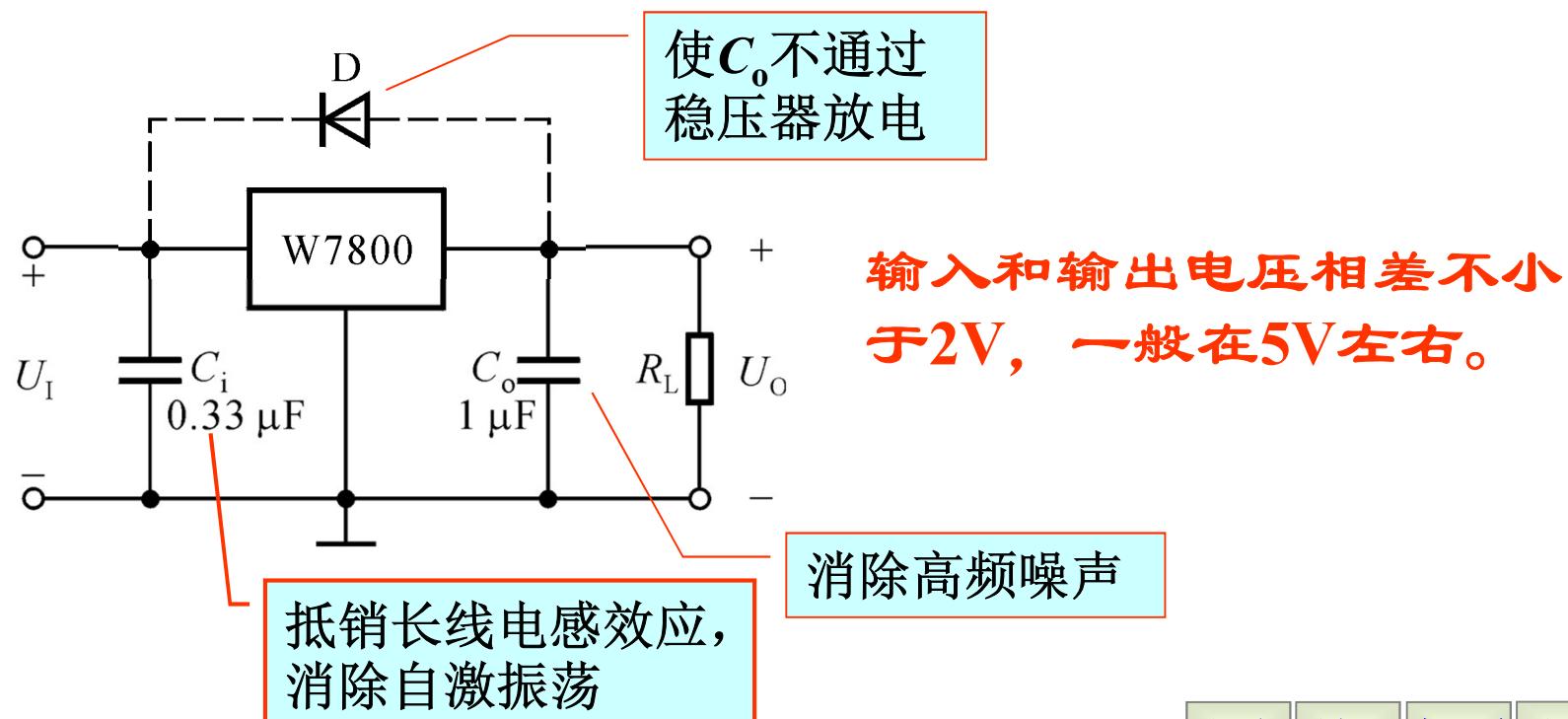
最大输出电流: 1.5A (W117)、0.5A (W117M)、0.1A (W117L)

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

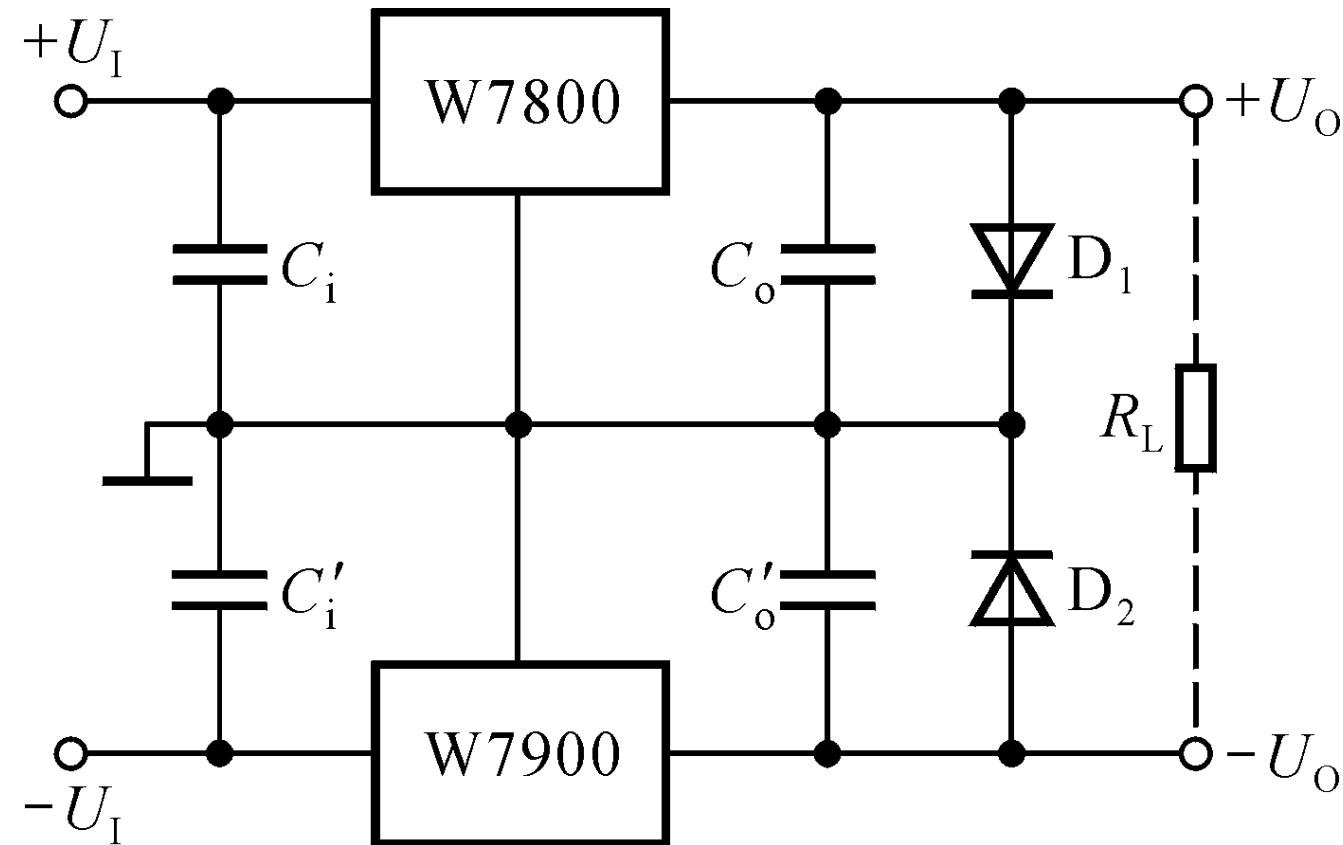
3. W7800的应用

(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。

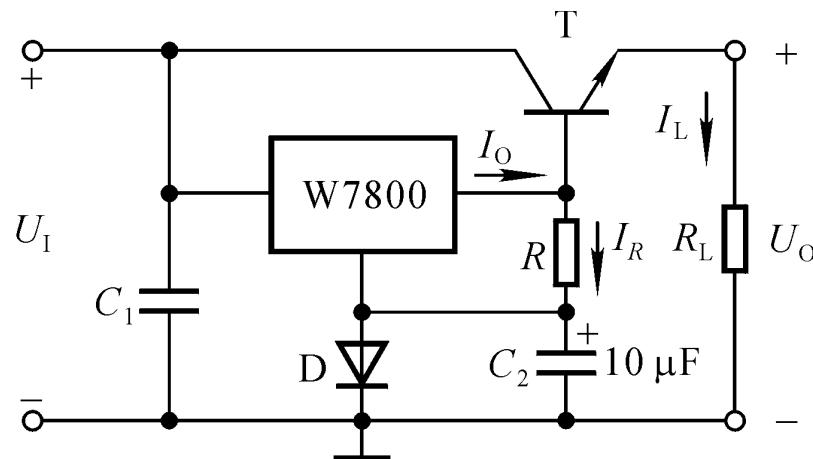


(2) 正、负输出稳压电路



(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

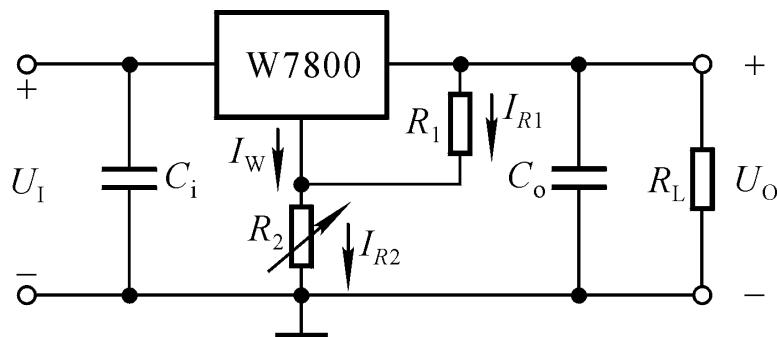
$$U_O = U'_O + U_D - U_{BE}$$

$$\text{若 } U_{BE} = U_D, \text{ 则 } U_O = U'_O$$

三端稳压器的输出电压

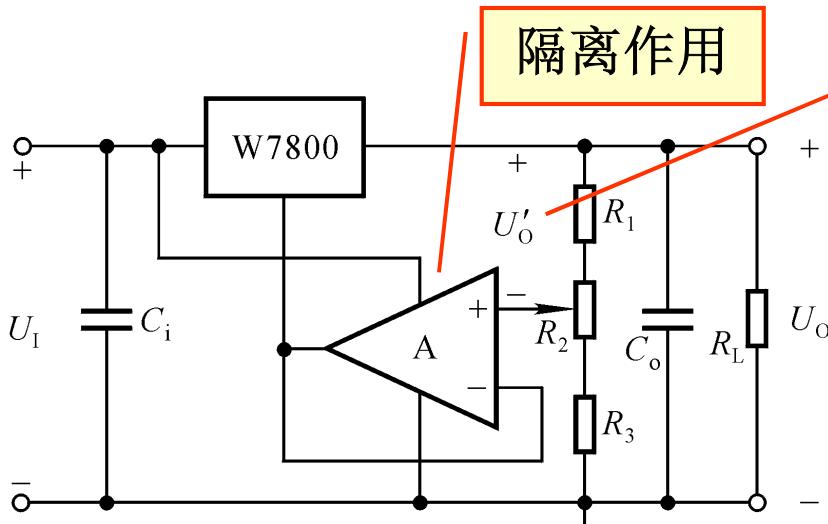
二极管的作用：消除
 U_{BE} 对 U_O 的影响。

(4) 输出电压扩展电路



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

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



基准电压

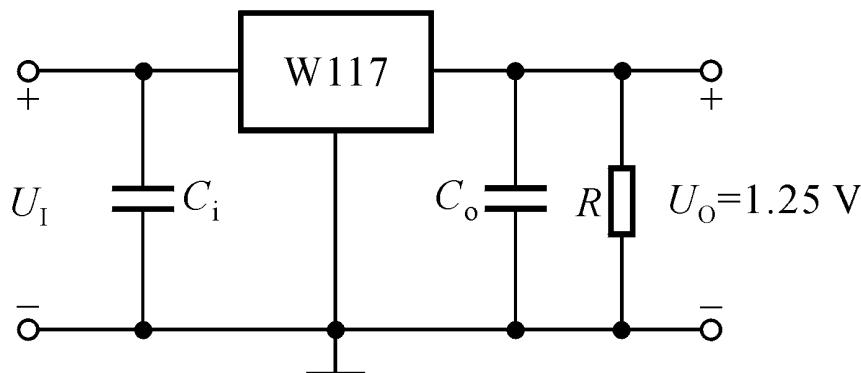
$$\begin{aligned} \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_1 + R_2} \cdot U'_O &\leq U_O \\ &\leq \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_1} \cdot U'_O \end{aligned}$$

电路复杂

U_O 与 I_W 无关

4. W117 的应用

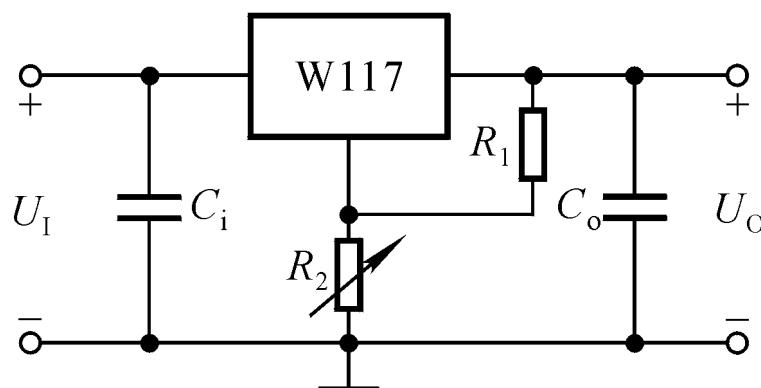
(1) 基准电压源电路



R 一般取 240Ω

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