

清华大学

清华园

第十章 直流电源

2001 11 11



第十章 直流电源

§ 10.1 直流电源的组成

§ 10.2 单相整流电路

§ 10.3 滤波电路

§ 10.4 稳压管稳压电路

§ 10.5 串联型稳压电路

§ 10.6 开关型稳压电路





§ 10.1 直流电源的组成

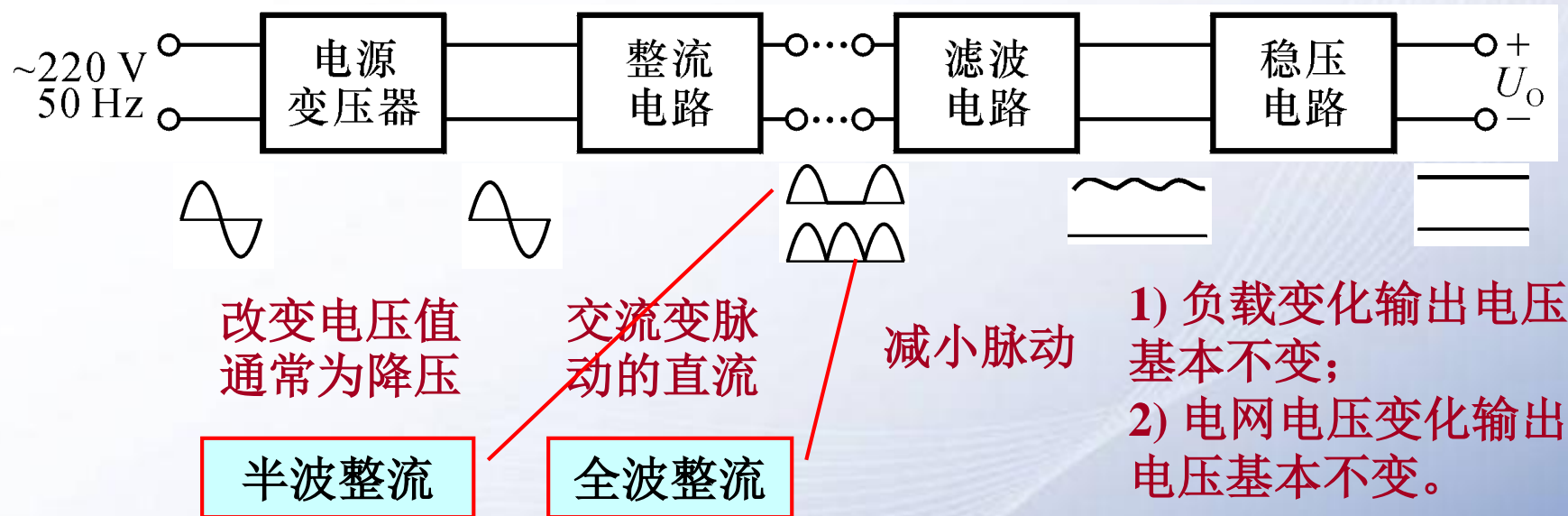
直流电源的组成及各部分的作用





直流电源的组成及各部分的作用

直流电源是能量转换电路，将220V（或380V）50Hz的交流电转换为直流电。



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。





§ 10.2 单相整流电路

- 一、对整流电路要研究的问题
- 二、单相半波整流电路
- 三、单相桥式整流电路





一、对整流电路要研究的问题

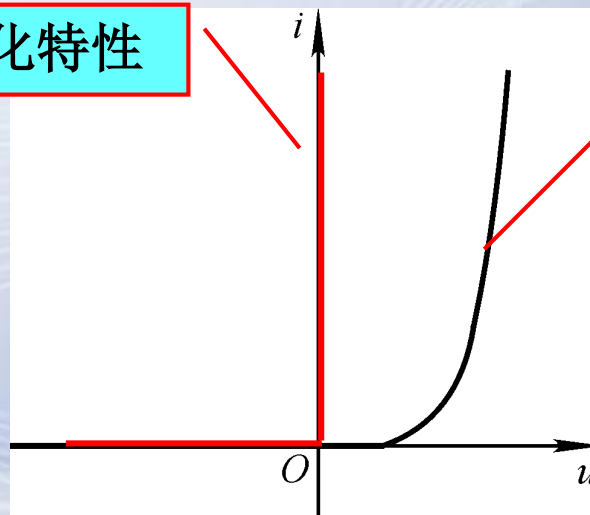
1. 电路的工作原理：即二极管工作状态、电路波形的分析
2. 输出电压和输出电流平均值：即输出脉动直流电压和电流平均值的求解方法
3. 整流二极管的选择：即二极管承受的最大整流平均电流和最高反向工作电压的分析

为分析问题简单起见，设二极管为理想二极管，变压器内阻为0。

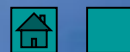
整流二极管的伏安特性：

理想化特性

理想二极管的正向导通电压为0，即正向电阻为0；反向电流为0，即反向电阻为无穷大。



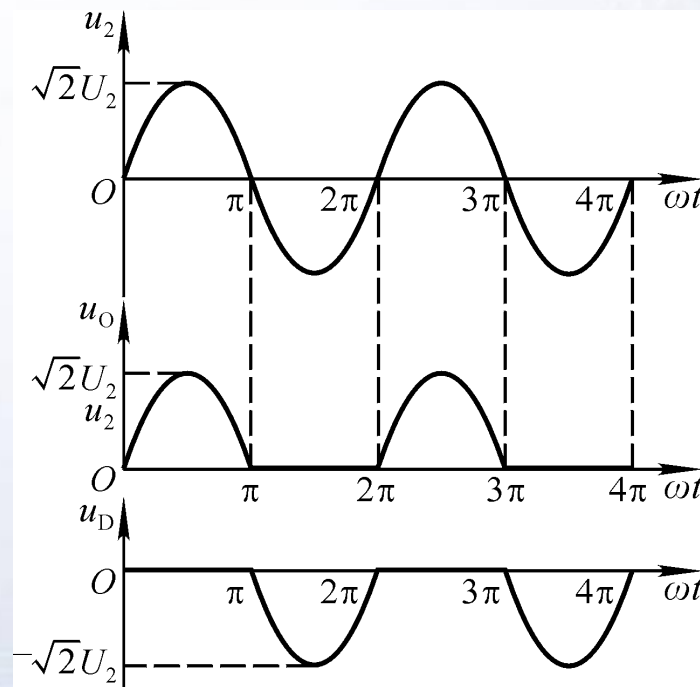
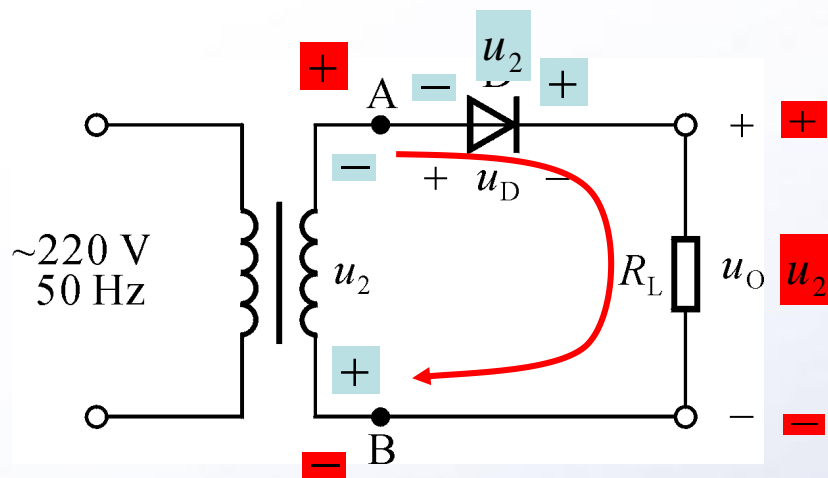
实际特性





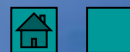
二、单相半波整流电路

1. 工作原理



u_2 的正半周，D导通， $A \rightarrow D \rightarrow R_L \rightarrow B$ ， $u_O = u_2$ 。

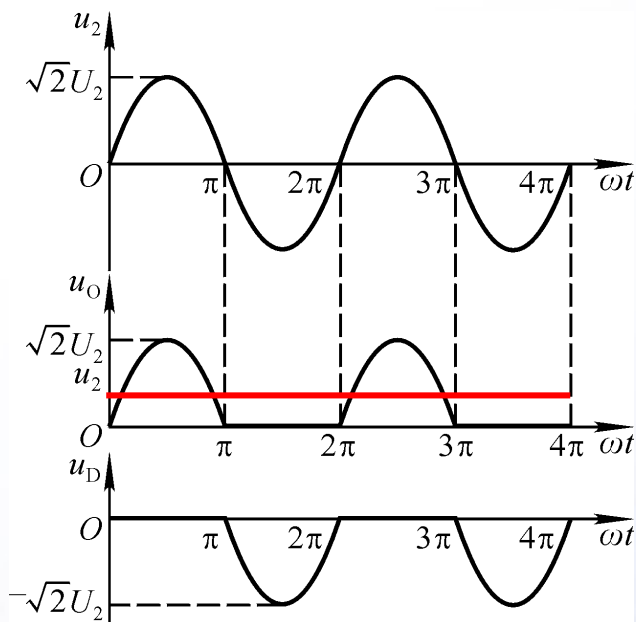
u_2 的负半周，D截止，承受反向电压，为 u_2 ， $u_O = 0$ 。





2. U_O (AV) 和 I_L (AV) 的估算

已知变压器副边电压有效值为 U_2



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

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

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

(3) 二极管的选择

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

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

考虑到电网电压波动范围为 $\pm 10\%$ ，二极管的极限参数应满足：

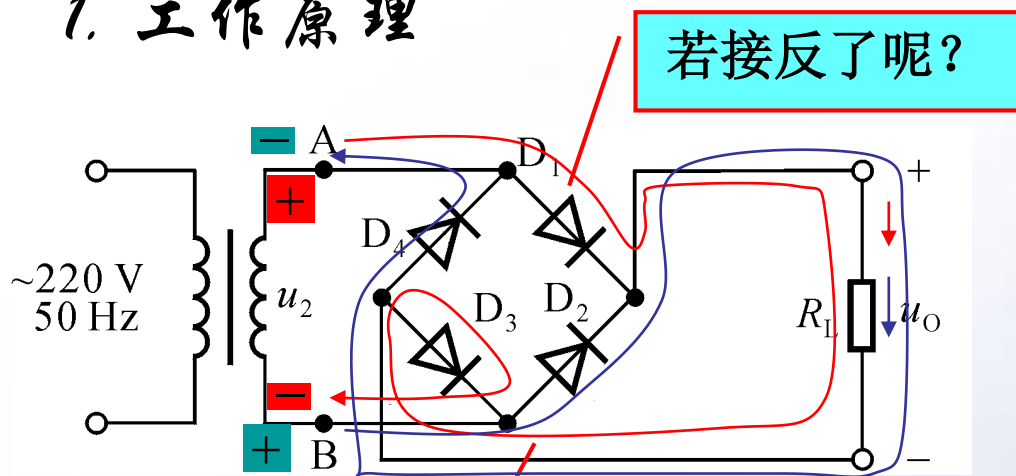
$$\begin{cases} I_F > 1.1 \times \frac{0.45U_2}{R_L} \\ U_R > 1.1\sqrt{2}U_2 \end{cases}$$





三、单相桥式整流电路

1. 工作原理



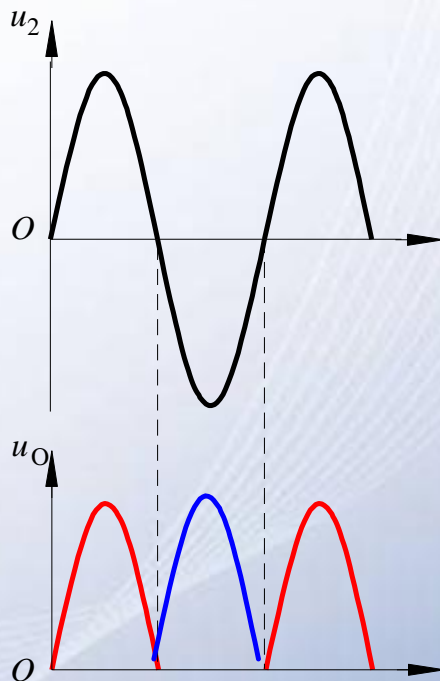
四只管子如何接?

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

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

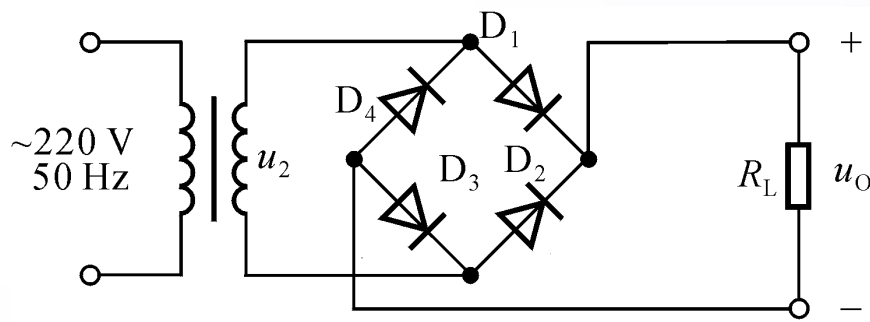


集成的桥式整流电路称为整流堆。





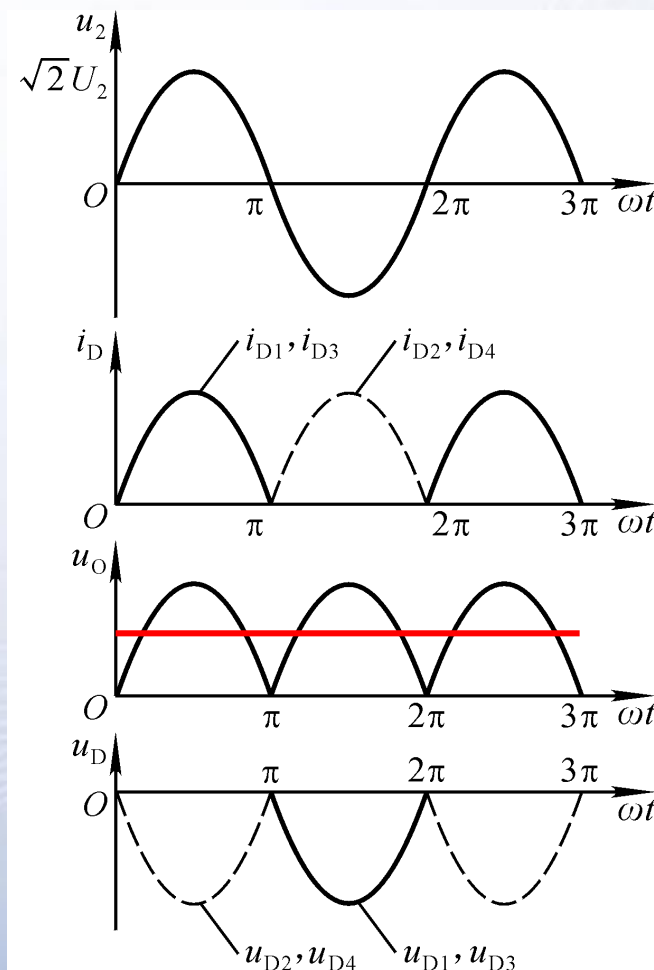
2. 输出电压和电流平均值的估算



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

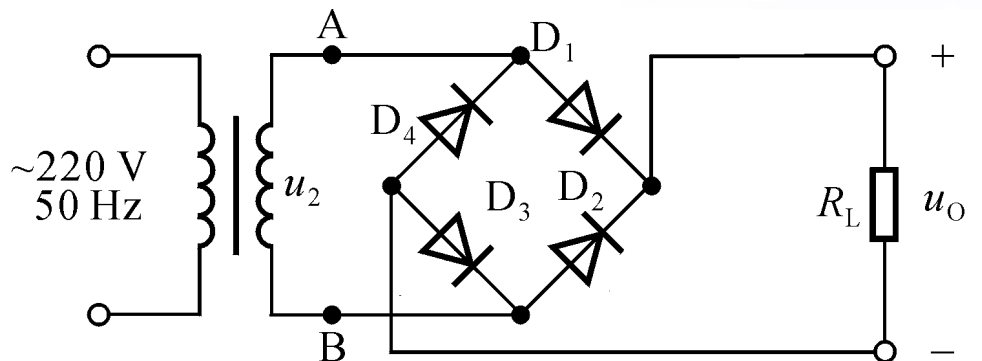
$$U_{O(AV)} = \frac{2\sqrt{2}U_2}{\pi} \approx 0.9U_2$$

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





3. 二极管的选择



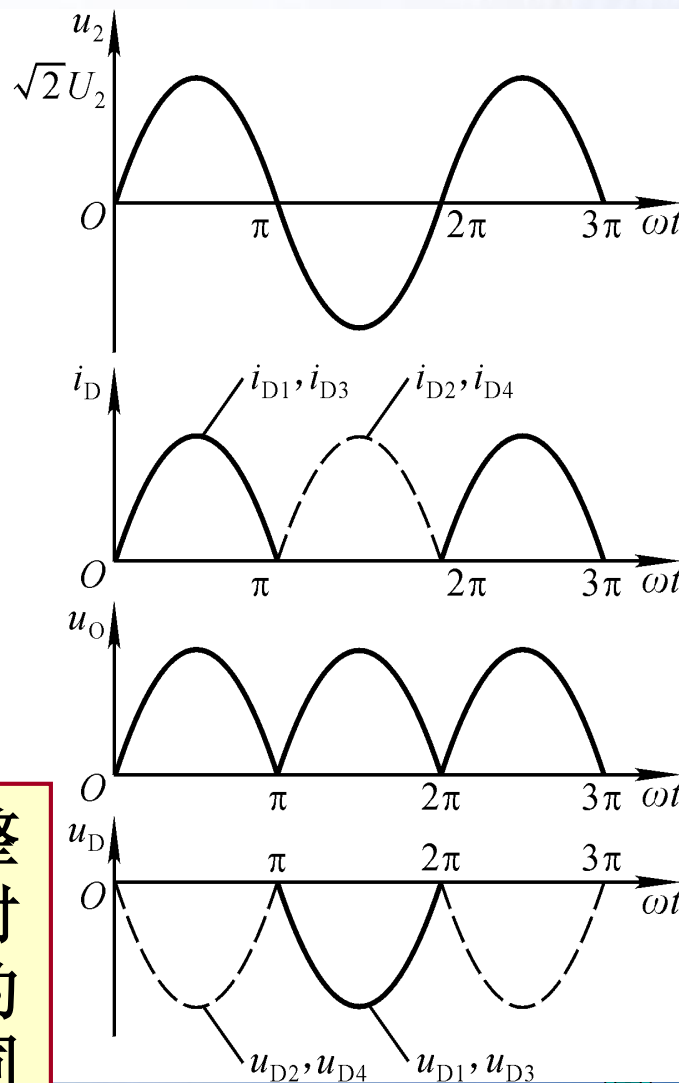
$$U_{R\max} = \sqrt{2}U_2$$

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

考虑到电网电压波动范围为
 $\pm 10\%$ ，二极管的极限参数应满足：

$$\begin{cases} I_F > 1.1 \times \frac{0.45U_2}{R_L} \\ U_R > 1.1\sqrt{2}U_2 \end{cases}$$

与半波整
流电路对
二极管的
要求相同





§ 10.3 滤波电路

一、电容滤波电路

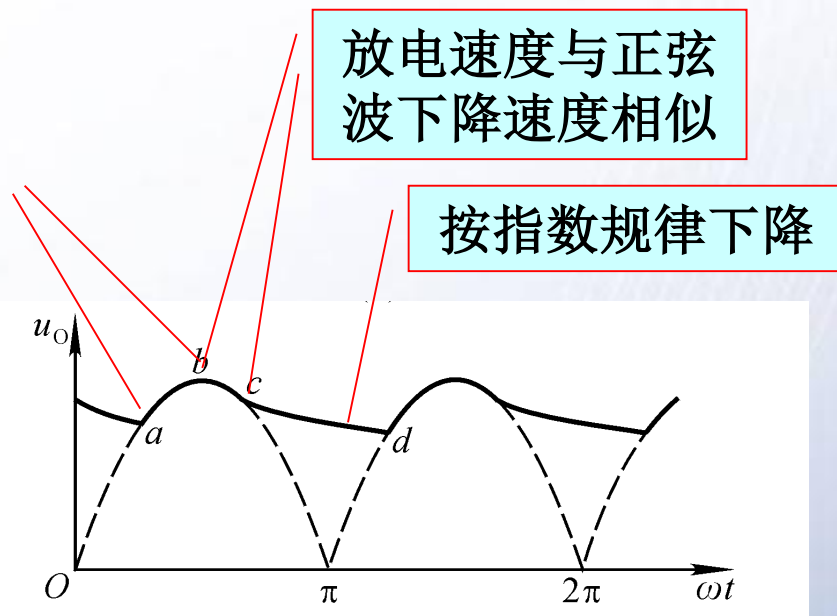
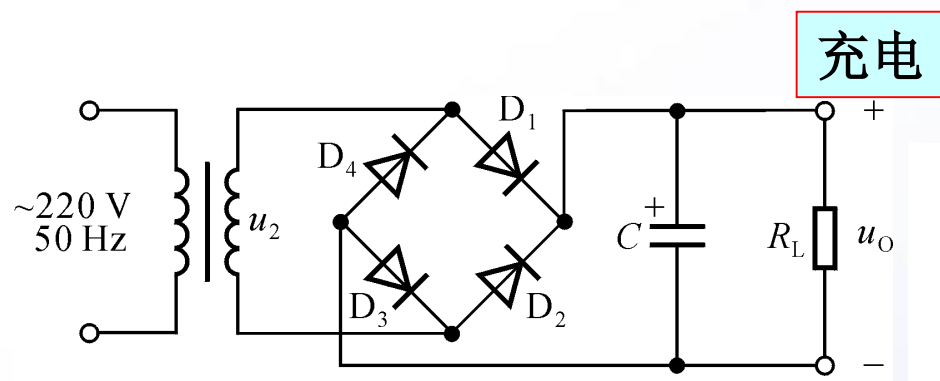
二、电感滤波电路

三、倍压整流电路

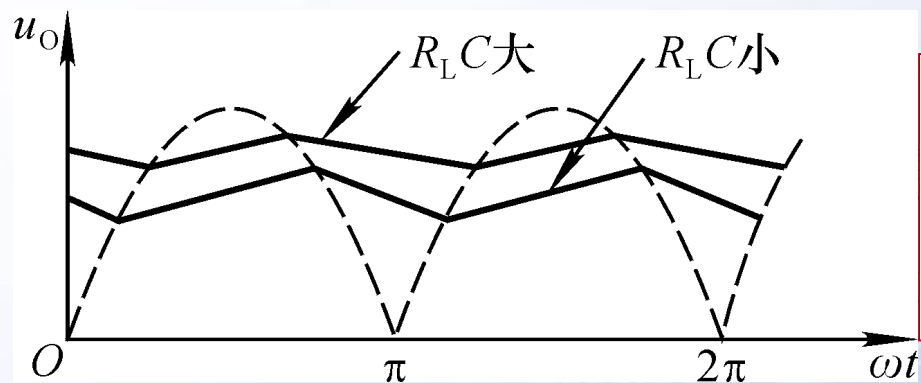




一、电容滤波电路

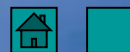


考虑整流电路的内阻



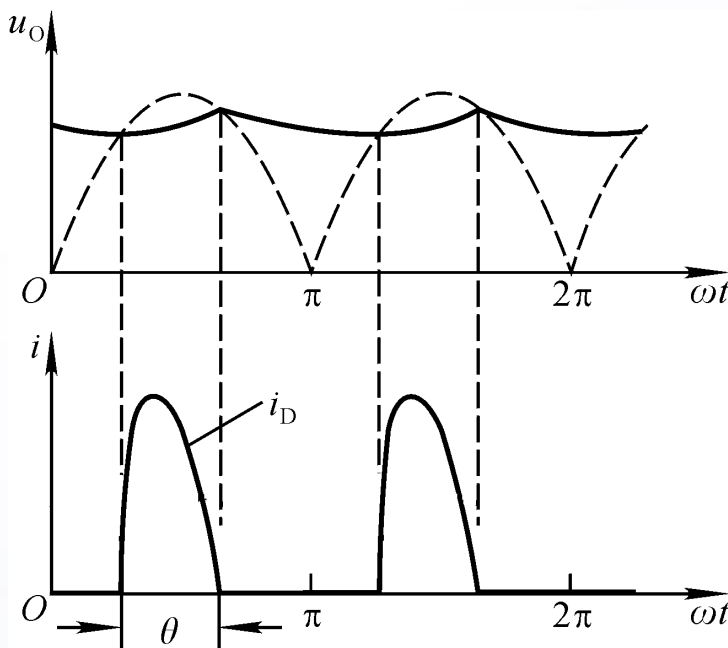
C 越大, R_L 越大, τ 越大, 放电越慢, 曲线越平滑, 脉动越小。

滤波后, 输出电压平均值增大, 脉动变小。





2. 二极管的导通角



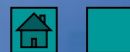
导通角

$$\begin{cases} C \uparrow \\ R_L \uparrow \end{cases} \rightarrow \tau_{\text{放电}} \uparrow \rightarrow \begin{cases} \text{脉动} \downarrow \\ U_{O(AV)} \uparrow \\ \theta \downarrow \rightarrow i_D \text{的峰值} \uparrow \end{cases}$$

无滤波电容时 $\theta = \pi$ 。

有滤波电容时 $\theta < \pi$ ，且二极管平均电流增大，故其峰值很大！

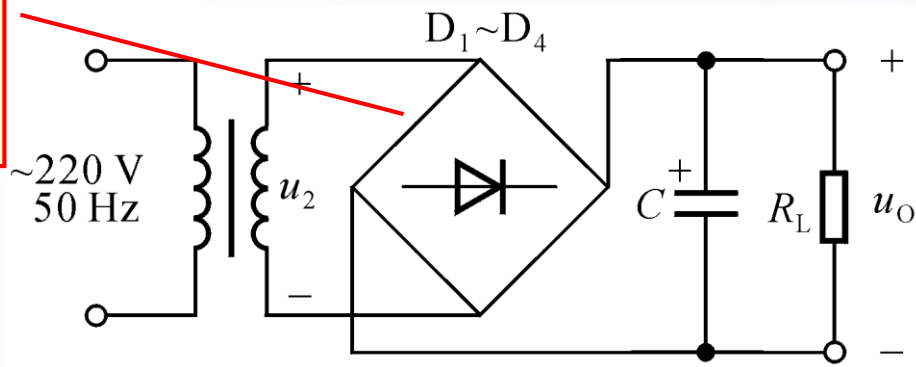
θ 小到一定程度，难于选择二极管！





3. 电容的选择及 $U_{O(AV)}$ 的估算

整流桥的
简化画法



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

C 的耐压值应大于 $1.1\sqrt{2}U_{2\circ}$

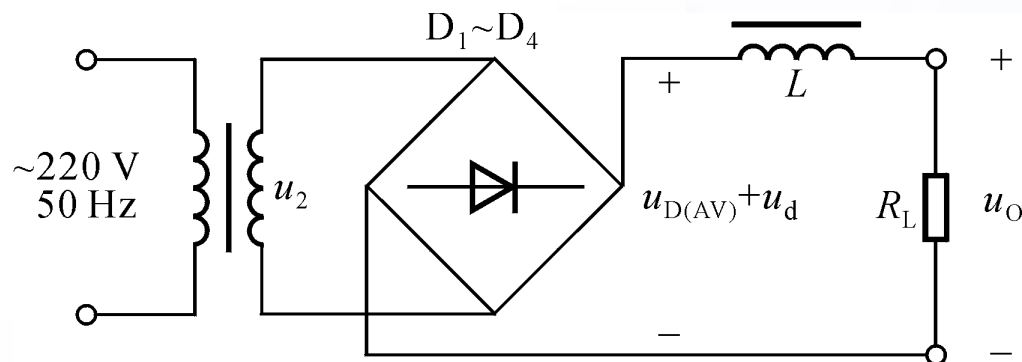
4. 优缺点

简单易行, $U_{O(AV)}$ 高, C 足够大时交流分量较小;
不适于大电流负载。



二、电感滤波电路

适于大电流负载！



$$\begin{cases} R_L \downarrow \\ L \uparrow \end{cases} \rightarrow \begin{cases} U_{O(AV)} \downarrow \\ \text{交流分量} \downarrow \end{cases}$$

当回路电流减小时，感生电动势的方向阻止电流的减小，从而增大二极管的导通角。

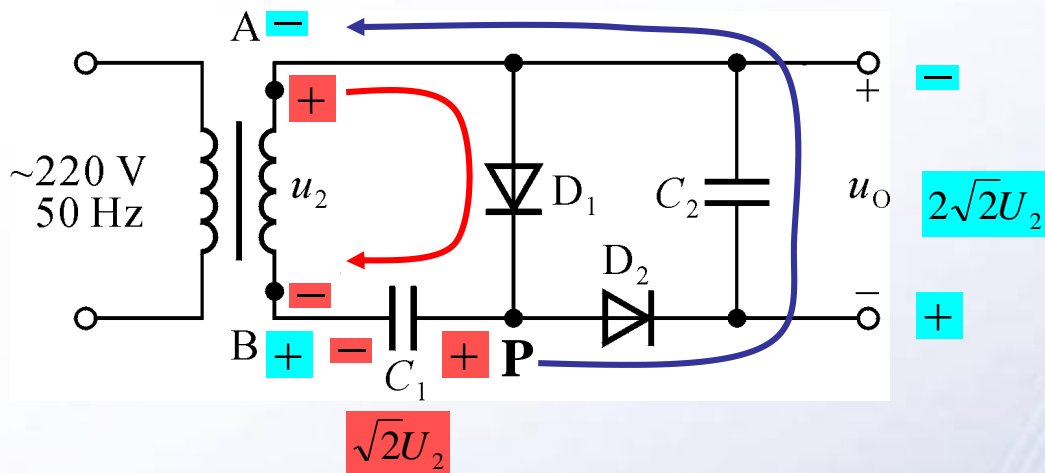
电感对直流分量的电抗为线圈电阻，对交流分量的感抗为 ωL 。

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

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



三、倍压整流电路



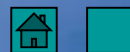
分析时的两个要点：设①负载开路，②电路进入稳态。

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

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

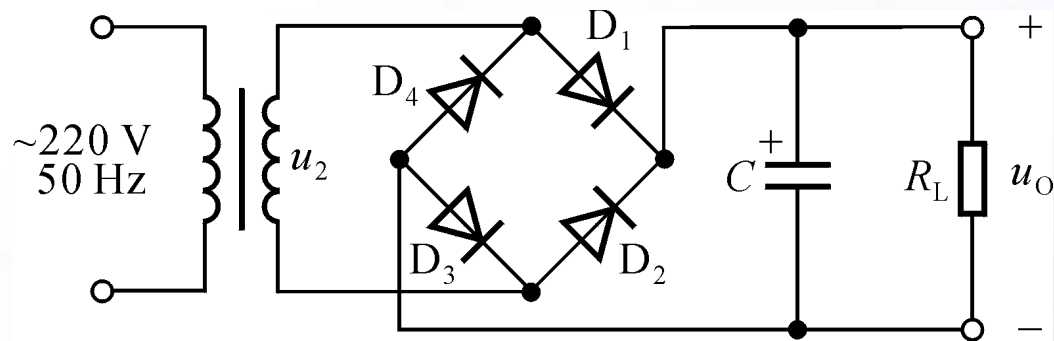
u_2 负半周， u_2 加 C_1 上电压对 C_2 充电： $P \rightarrow D_2 \rightarrow C_2 \rightarrow A$ ，最终

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





讨论



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；
5. D_1 开路。





§ 10.2 稳压管稳压电路

一、稳压电路的性能指标

二、稳压管稳压电路





一、稳压电路的性能指标

1. 输出电压

2. 输出电流

3. 稳压系数 表明电网电压波动时电路的稳压性能。

在负载电流不变时，输出电压相对变化量与输入电压变化量之比。

$$S_r = \frac{\Delta U_o / U_o}{\Delta U_i / U_i} \Big|_{R_L} = \frac{\Delta U_o}{\Delta U_i} \cdot \frac{U_i}{U_o} \Big|_{R_L}$$

4. 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。

$$R_o = \left| \frac{\Delta U_o}{\Delta I_o} \right|_{U_i}$$

5. 纹波电压 测试出输出电压的交流分量。

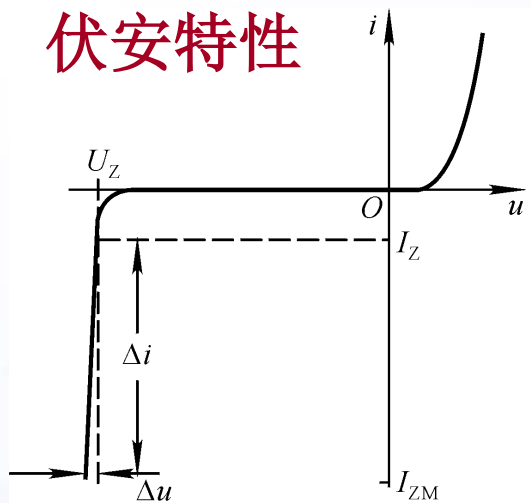




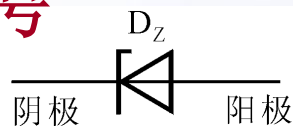
二、稳压管稳压电路

1. 稳压管的伏安特性和主要参数

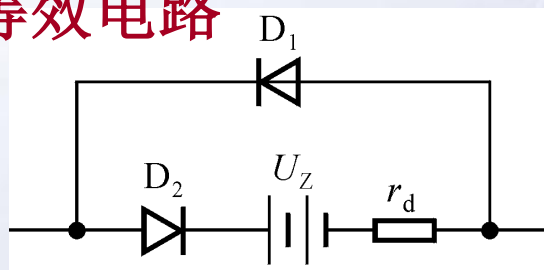
伏安特性



符号



等效电路

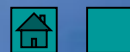


稳定电压 U_Z : 稳压管的击穿电压

稳定电流 I_Z : 使稳压管工作在稳压状态的最小电流

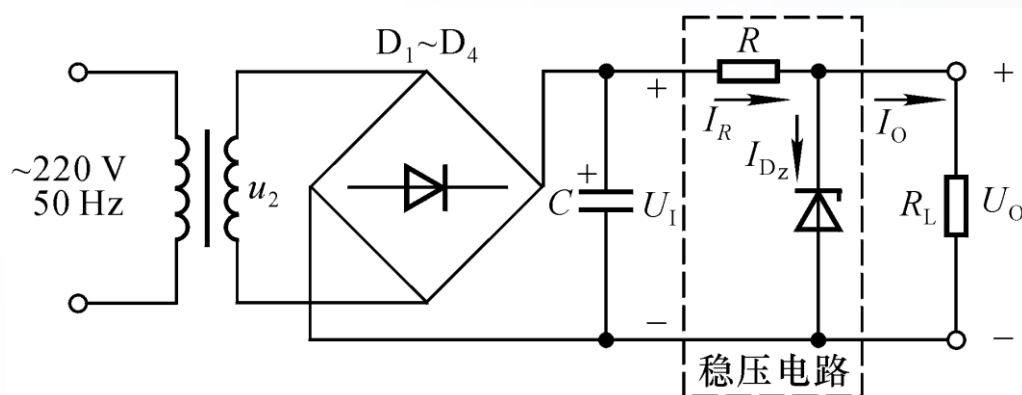
最大耗散功率 P_{ZM} : 允许的最大功率, $P_{ZM} = I_{ZM} U_Z$

动态电阻 r_z : 工作在稳压状态时, $r_z = \Delta U / \Delta I$





2. 稳压管稳压电路的工作原理



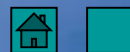
$$\begin{aligned}U_I &= U_R + U_O \\ I_R &= I_{DZ} + I_L\end{aligned}$$

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。利用 R 上的电压变化补偿 U_I 的波动。

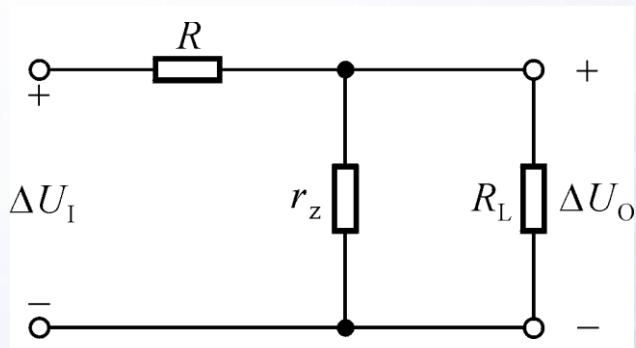
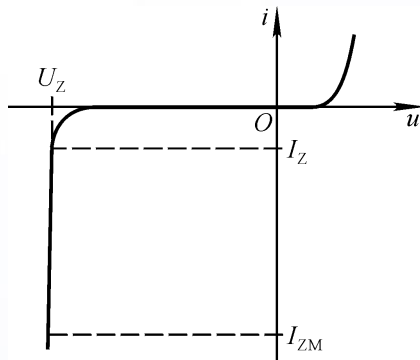
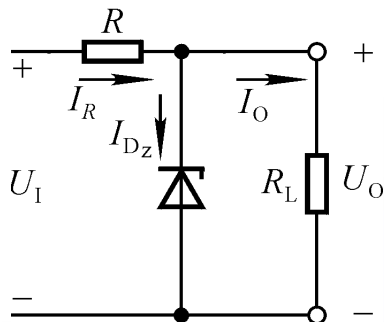
$$\begin{cases} R_L \downarrow \rightarrow U_O \downarrow (U_Z \downarrow) \rightarrow I_{DZ} \downarrow \rightarrow I_R \downarrow \\ R_L \downarrow \rightarrow I_L \uparrow \rightarrow I_R \uparrow \end{cases}$$

若 $\Delta I_{DZ} \approx -\Delta I_L$ ，则 U_R 基本不变， U_O 也就基本不变。
利用 I_{DZ} 的变化来补偿 I_L 的变化。





3. 稳压管稳压电路的主要指标



(1) 输出电压

$$U_O = U_Z$$

(2) 输出电流

$$I_{Z\max} - I_{Z\min} \leq I_{ZM} - I_Z$$

(3) 稳压系数

$$S_r = \frac{\Delta U_O}{\Delta U_I} \cdot \frac{U_I}{U_O} \bigg|_{R_L} = \frac{r_z // R_L}{R + r_z // R_L} \cdot \frac{U_I}{U_O} \approx \frac{r_z}{R} \cdot \frac{U_I}{U_O}$$

(4) 输出电阻

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

4. 特点

简单易行，稳压性能好。适用于输出电压固定、输出电流变化范围较小的场合。





5. 稳压管稳压电路的设计

为减小 S_r ,取值矛盾!

$$S_r \approx \frac{r_z}{R} \cdot \frac{U_I}{U_O}$$

(1) U_I 的选择 $U_I = (2 \sim 3) U_Z$

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

(3) 限流电阻的选择 保证稳压管既稳压又不损坏。

$$I_{Dzmin} > I_Z \text{ 且 } I_{Dzmax} < I_{ZM}$$

电网电压最低且负载电流最大时, 稳压管的电流最小。

$$I_{Dzmin} = \frac{U_{Imin} - U_Z}{R} - I_{Lmax} > I_Z$$

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

电网电压最高且负载电流最小时, 稳压管的电流最大。

$$I_{Dzmax} = \frac{U_{Imax} - U_Z}{R} - I_{Lmin} < I_{ZM}$$

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

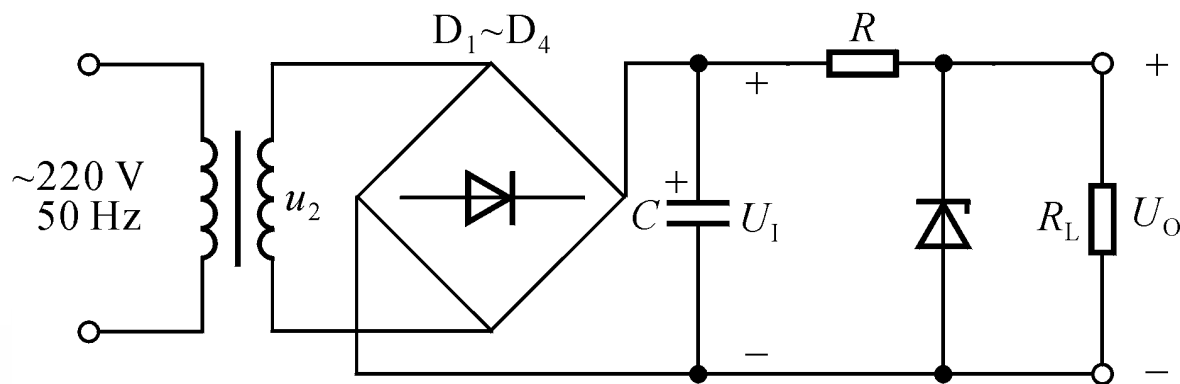
若求得 $R=200 \sim 300 \Omega$, 则该取接近 200Ω 还是接近 300Ω ? 为什么?

若求得 $R_{min} > R_{max}$, 怎么办?





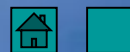
讨论：稳压管稳压电路的设计



已知输出电压为
6V，负载电流为0~
30mA。试求图示电
路的参数。

依次选择稳压管、 U_I 、 R 、 C 、 U_2 、二极管

1. 输出电压、负载电流→稳压管
2. 输出电压→ U_I
3. 输出电压、负载电流、稳压管电流、 U_I → R
4. U_I 、 R →滤波电路的等效负载电阻→ C
5. U_I → U_2
6. U_2 、 R 中电流→整流二极管





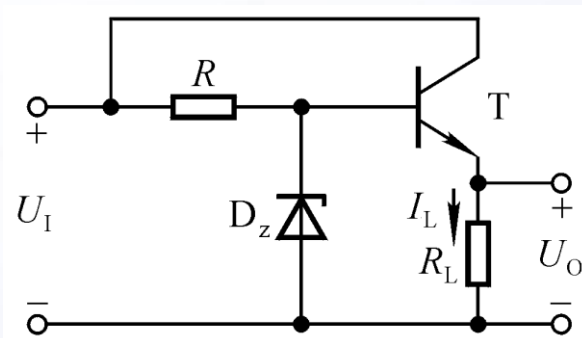
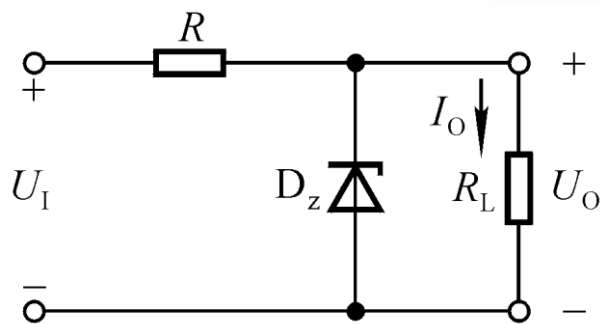
§ 10.3 串联型稳压电路

- 一、基本调整管稳压电路
- 二、具有放大环节的串联型稳压电路
- 三、集成稳压器（三端稳压器）



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，需要加晶体管放大。



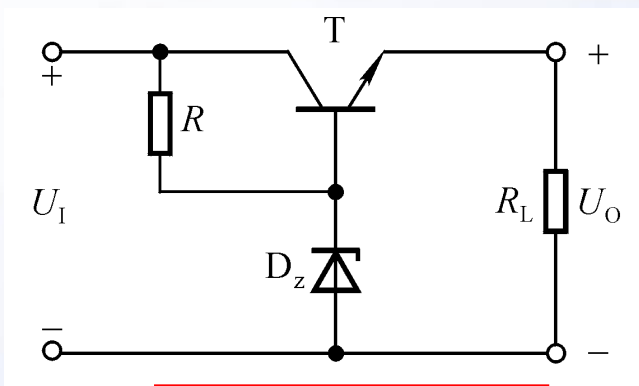
$$I_L = (1 + \beta)I_O$$

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

稳压原理：电路引入电压负反馈，稳定输出电压。

不管什么原因引起 U_O 变化，都将通过 U_{CE} 的调节使 U_O 稳定，故称晶体管为调整管。

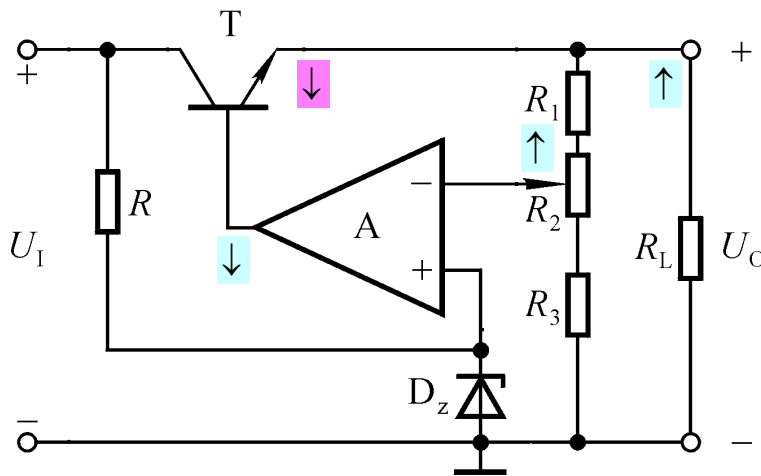
若要提高电路的稳压性能，则应加深电路的负反馈，即提高放大电路的放大倍数。



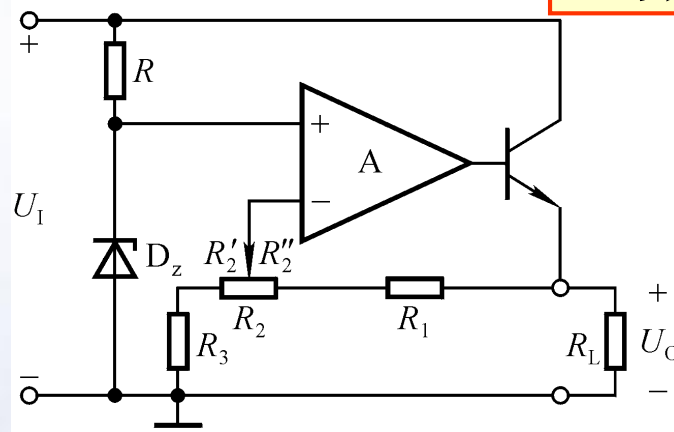
$$U_O = U_I - U_{CE}$$



二、具有放大环节的串联型稳压电路



同相比例
运算电路

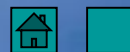


1. 稳压原理：若由于某种原因使 U_O 增大

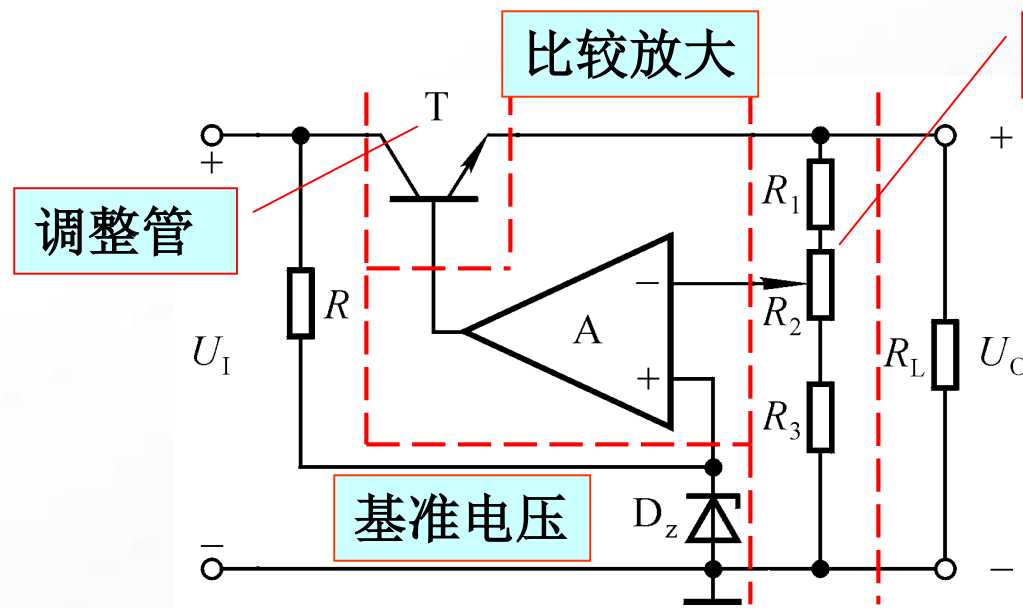
则 $U_O \uparrow \rightarrow U_N \uparrow \rightarrow U_B \downarrow \rightarrow U_O \downarrow$

2. 输出电压的调节范围

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



3. 串联型稳压电路的基本组成及其作用



调整管：是电路的核心， U_{CE} 随 U_I 和负载产生变化以稳定 U_O 。

基准电压：是 U_O 的参考电压。

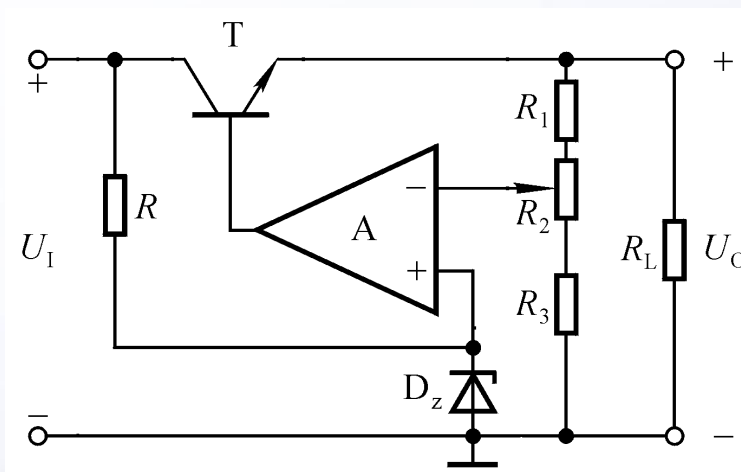
取样电阻：对 U_O 的取样，与基准电压共同决定 U_O 。

比较放大：将 U_O 的取样电压与基准电压比较后放大，决定电路的稳压性能。



4. 串联型稳压电源中调整管的选择

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！



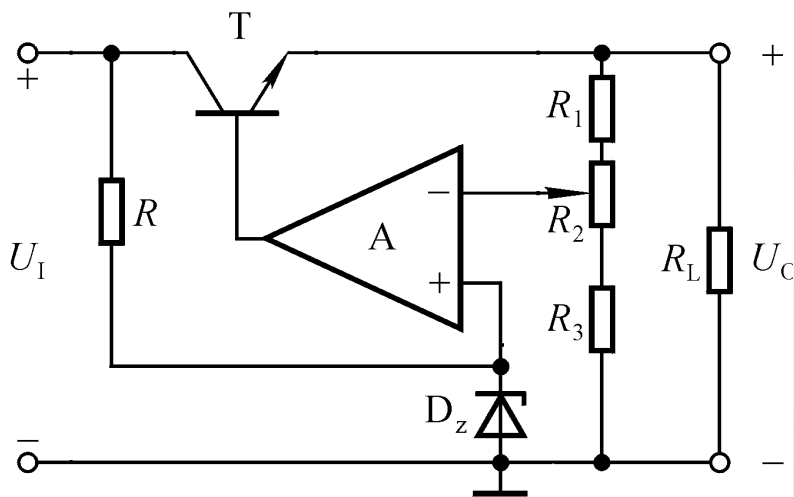
$$I_{E\max} = I_{R1} + I_{L\max} \approx I_{L\max} < I_{CM}$$

$$U_{CE\max} = U_{I\max} - U_{O\min} < U_{(BR)CEO}$$

$$P_{T\max} = I_{E\max} U_{CE\max} < P_{CM}$$



讨论一：对于基本串联型稳压电源的讨论



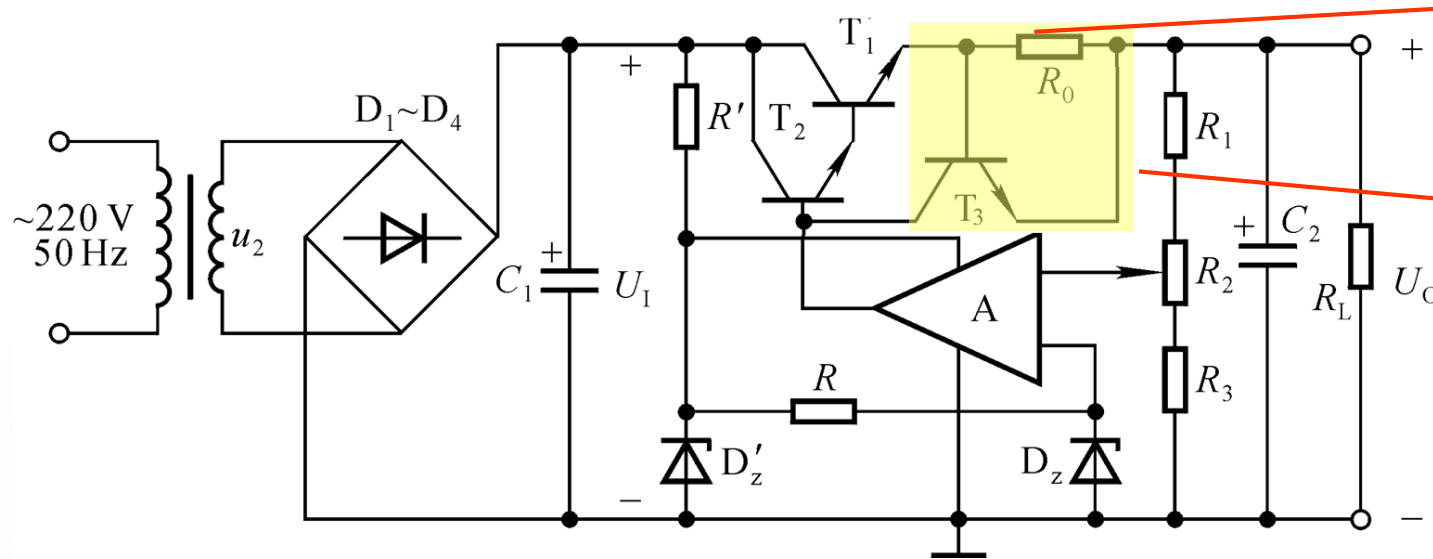
1. 若 U_O 为 $10V \sim 20V$, $R_1 = R_3 = 1k\Omega$, 则 R_2 和 U_Z 各为多少?

2. 若电网电压波动 $\pm 10\%$, U_O 为 $10V \sim 20V$, $U_{CES} = 3V$, U_I 至少选取多少伏?

3. 若电网电压 $28V$, U_O 为 $10V \sim 20V$; 晶体管的电流放大系数为 50 , $P_{CM} = 5W$, $I_{CM} = 1A$; 集成运放最大输出电流为 $10mA$, 则最大负载电流约为多少?

应取几个极限值求出的负载电流最大值中最小的那个作为电源的性能指标——最大负载电流

讨论二：关于实用串联型稳压电源的讨论



输出电流
取样电阻

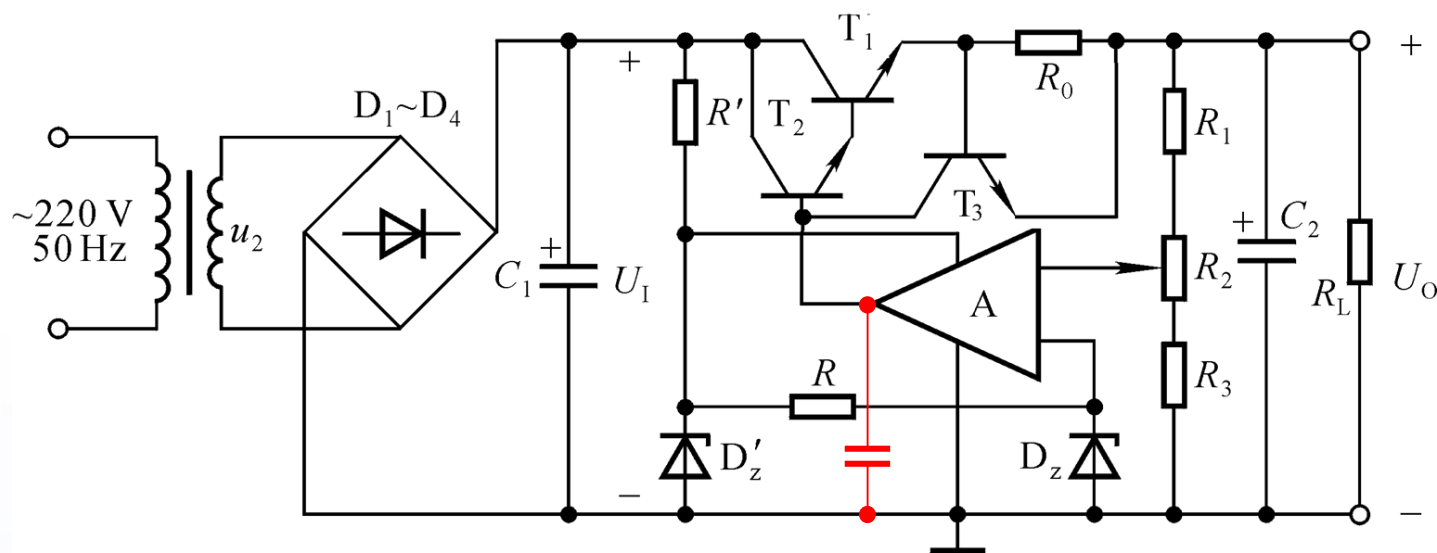
限流型过流
保护电路

$$I_{E\max} \approx \frac{U_{BE}}{R_0}$$

1. 标出集成运放的同相输入端和反相输入端；
2. 电路由哪些部分组成？
3. $U_I = 21V$, $R_1 = R_2 = R_3 = 300\Omega$, $U_Z = 6V$, $U_{CES} = 3V$, $U_O = ?$
4. 如何选取 R' 和 R ？



讨论三：关于实用串联型稳压电源的讨论



其电流应大于调 电路可能产生了自激振荡

5. 取样电阻的取值应大些还是小些，为什么？它们有上限值吗？
6. 若电路输出纹波电压很大，则其原因最大的可能性是什么？
7. 根据图中过流保护电路的原理组成一种限流型过流保护电路。

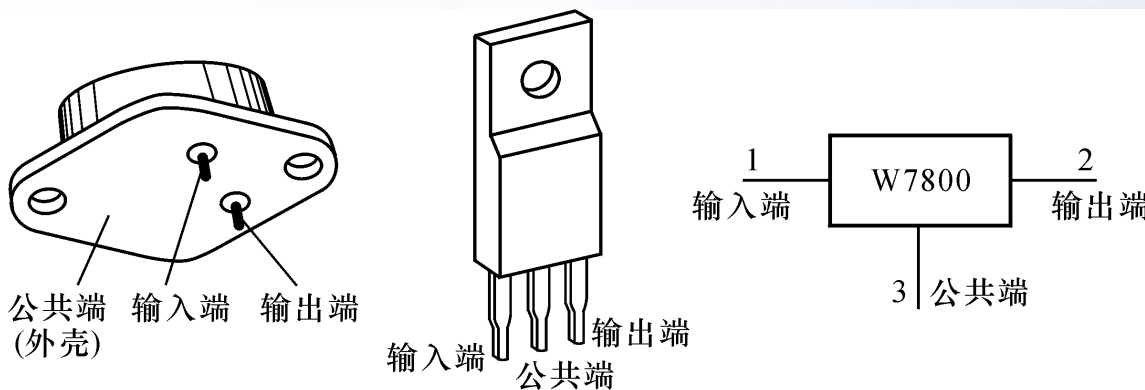




三、集成稳压器（三端稳压器）

1. W7800 系列

(1) 简介



输出电压：5V、6V、9V、12V、15V、18V、24V

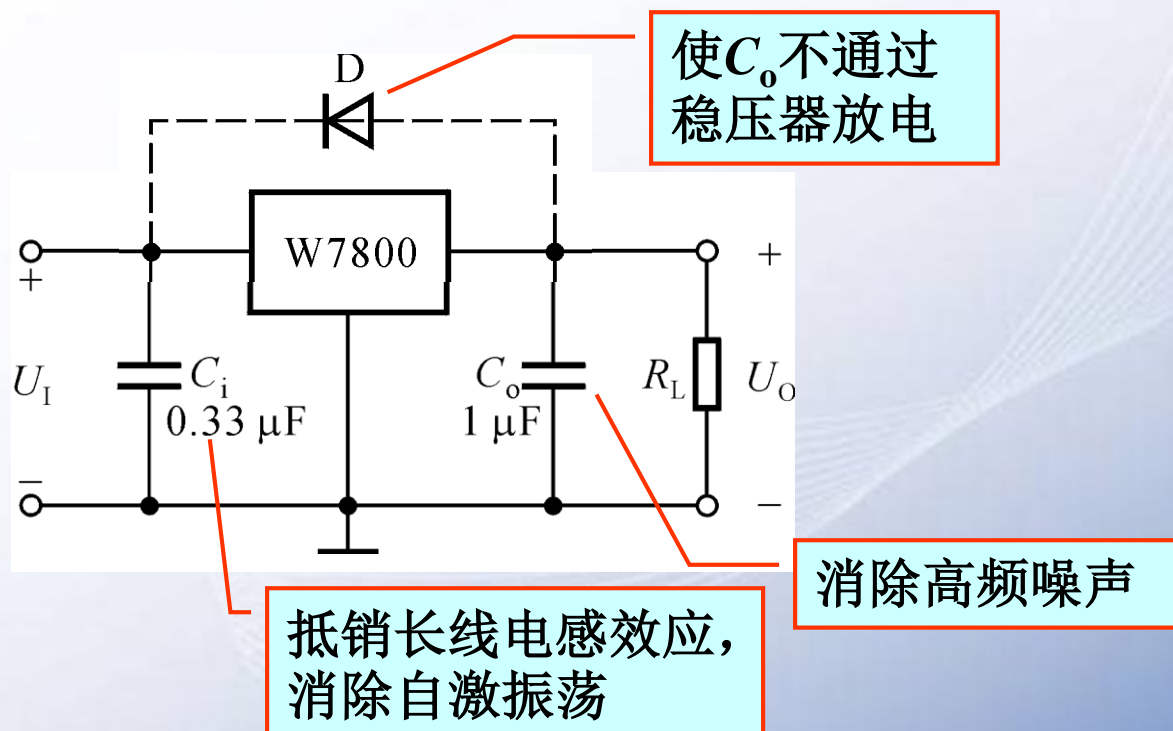
输出电流：1.5A（W7800）、0.5A（W78M00）、0.1A（W78L00）





(2) 基本应用

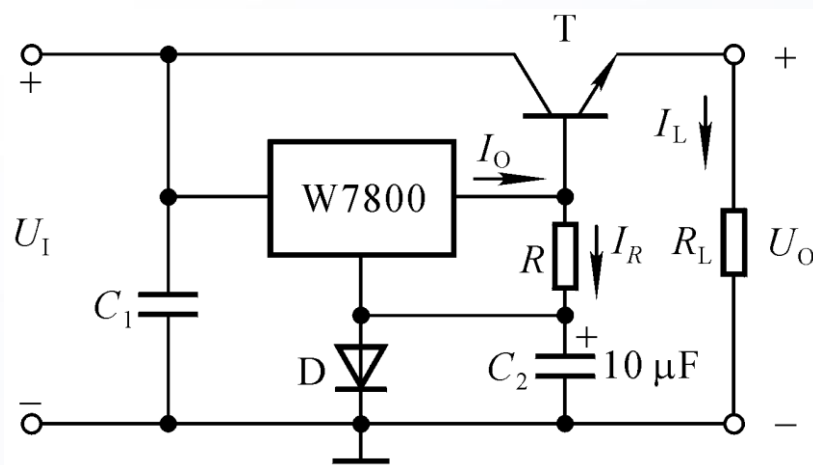
将输入端接整流滤波电路的输出，将输出端接负载电阻，构成串类型稳压电路。





(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

二极管的作用：消除 U_{BE} 对 U_O 的影响。

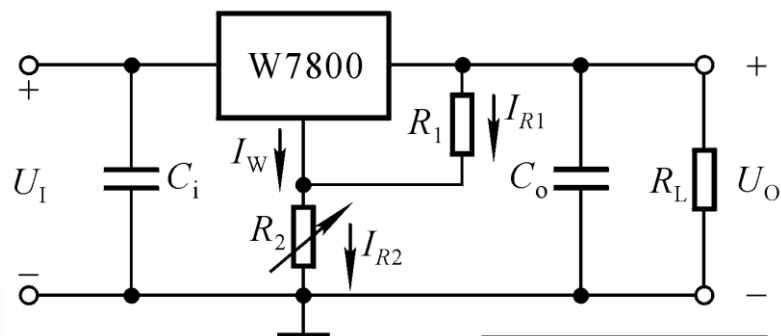
$$U_O = U'_O + U_D - U_{BE}$$

若 $U_{BE} = U_D$ ，则 $U_O = U'_O$

三端稳压器的输出电压



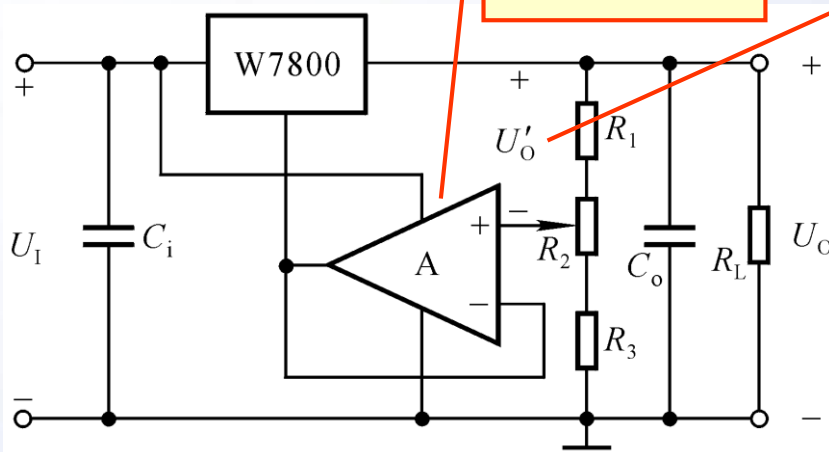
(4) 输出电压扩展电路



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

I_W 为几mA, U_O 与三端稳压器参数有关。

隔离作用



基准电压

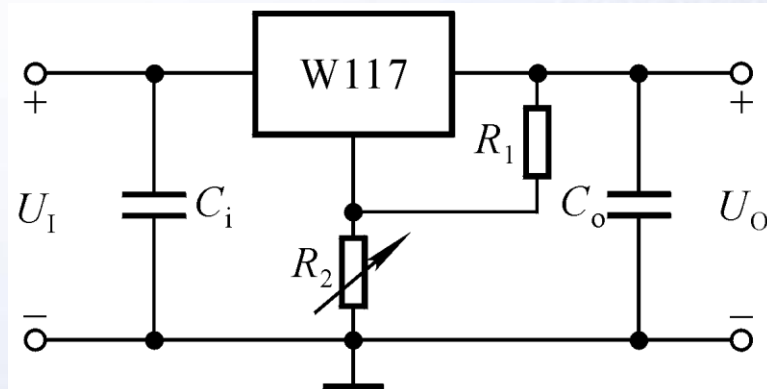
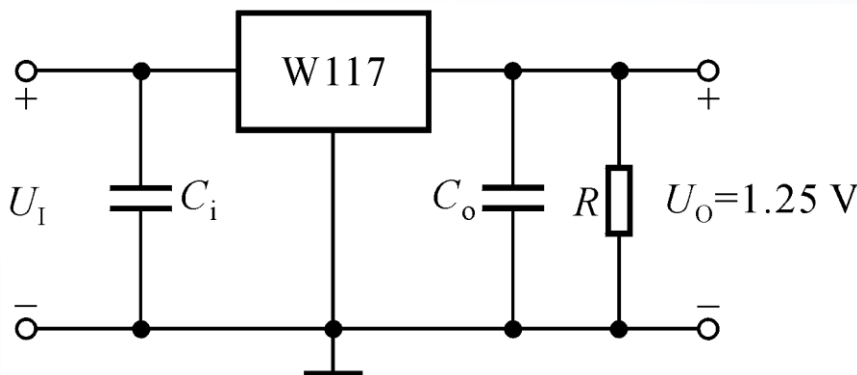
$$\begin{aligned} \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_1 + R_2} \cdot U'_O &\leq U_O \\ &\leq \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_1} \cdot U'_O \end{aligned}$$



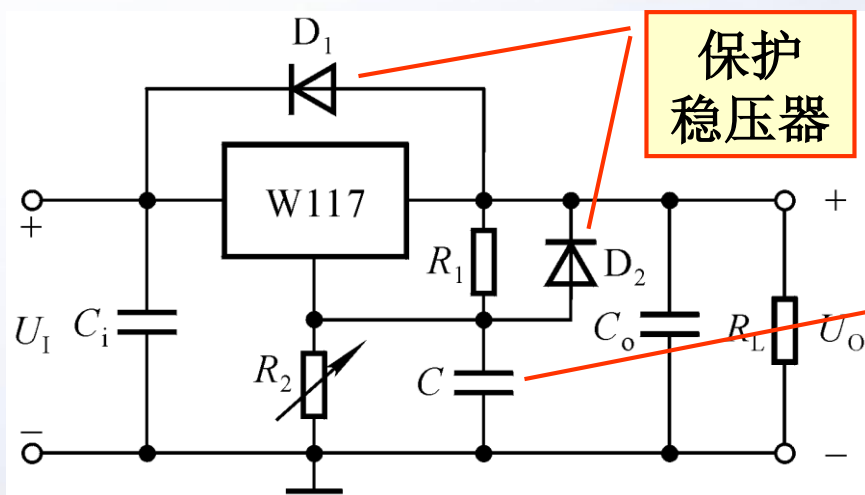


2. 基准电压源三端稳压器 W117

输出电压 $U_{\text{REF}} = 1.25\text{V}$ ，调整端电流只有几微安。

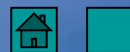


$$U_O = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot U_{\text{REF}}$$



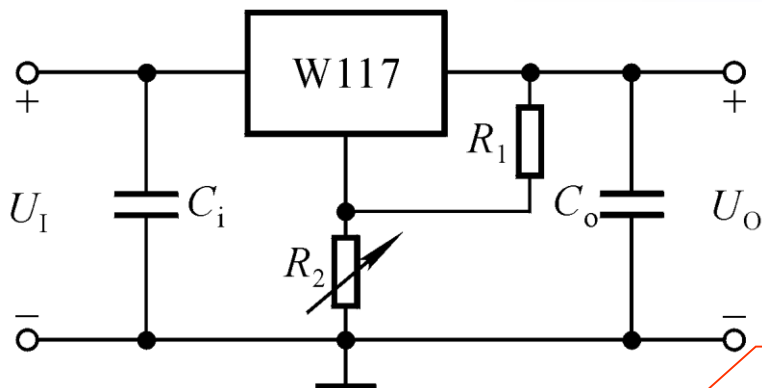
保护
稳压器

减小纹波电压





讨论三：W117的应用



$$3V \leq U_I - U_O \leq 40V$$

$$3mA \leq I_O \leq 1.5A$$

决定于 I_{Omin}

1. R_1 的上限值为多少？

两种情况：1. 已知 U_I
2. 自己选取 U_I

2. U_O 可能的最大值为多少？

决定于 W117 的输出

3. 输出电压最小值为多少？

4. $U_{Omax} = 30V$ ，选取 R_1 、 R_2 ；

根据输出电压表达式

5. 已知电网电压波动 $\pm 10\%$ ，输出电压最大值为 $30V$ ， U_I 至少取多少伏？

输入电压最低、输出电压最高时，
 $U_{Imin} - U_{Omax} > 3V$ 。





§ 10.4 开关型稳压电路

- 一、开关型稳压电路的特点和基本原理
- 二、串联开关型稳压电路
- 三、并联开关型稳压电路



一、开关型稳压电源的特点及基本原理

线性稳压电源：结构简单，调节方便，输出电压稳定性强，纹波电压小。缺点是调整管工作在甲类状态，因而功耗大，效率低（20%~49%）；需加散热器，因而设备体积大，笨重，成本高。

若调整管工作在开关状态，则势必大大减小功耗，提高效率，开关型稳压电源的效率可达70%~95%。体积小，重量轻。适于固定的大负载电流、输出电压小范围调节的场合。



构成开关型稳压电源的基本思路:

AC→DC→AC→DC

将交流电经变压器、整流滤波得到直流电压



控制调整管按一定频率开关，得到矩形波



滤波，得到直流电压

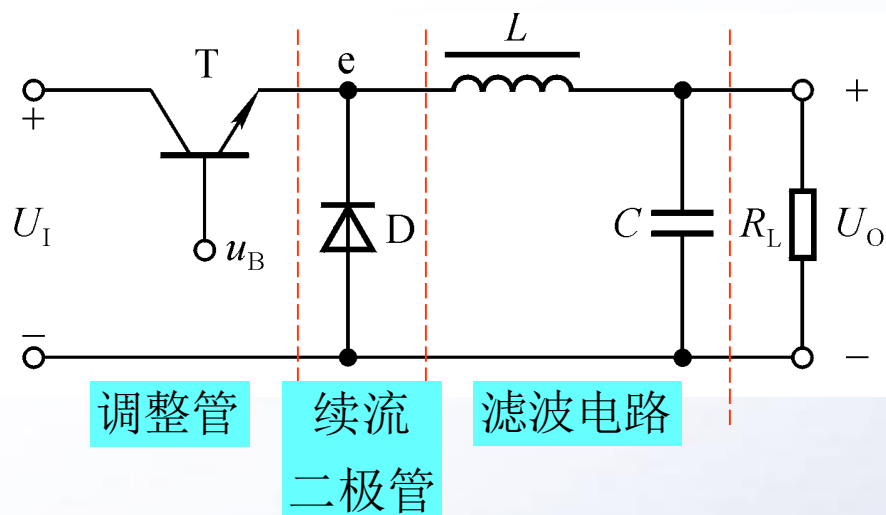
引入负反馈，控制占空比，使输出电压稳定。



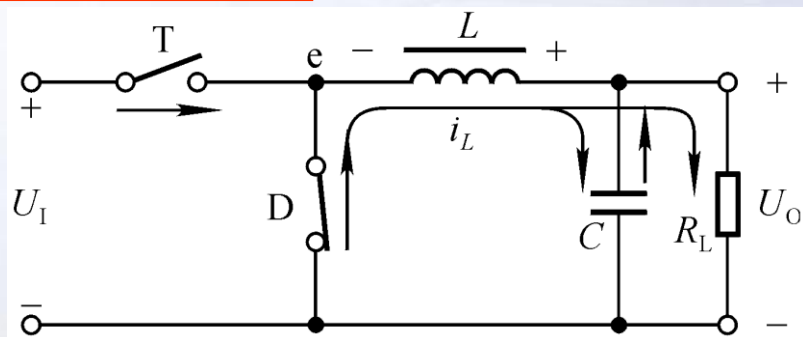


二、串联开关型稳压电路

1. 电路组成及工作原理

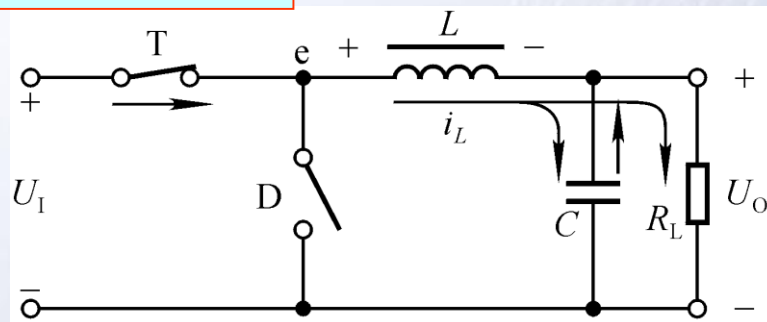


$u_B = U_L$ 时



T、D 均工作在开关状态。

$u_B = U_H$ 时

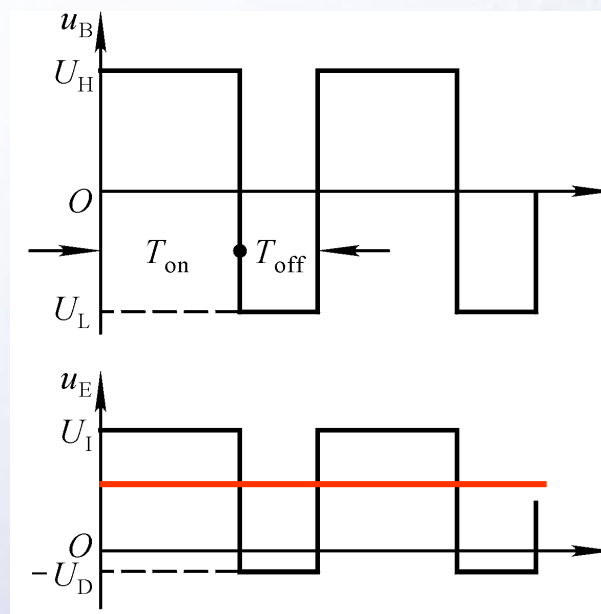
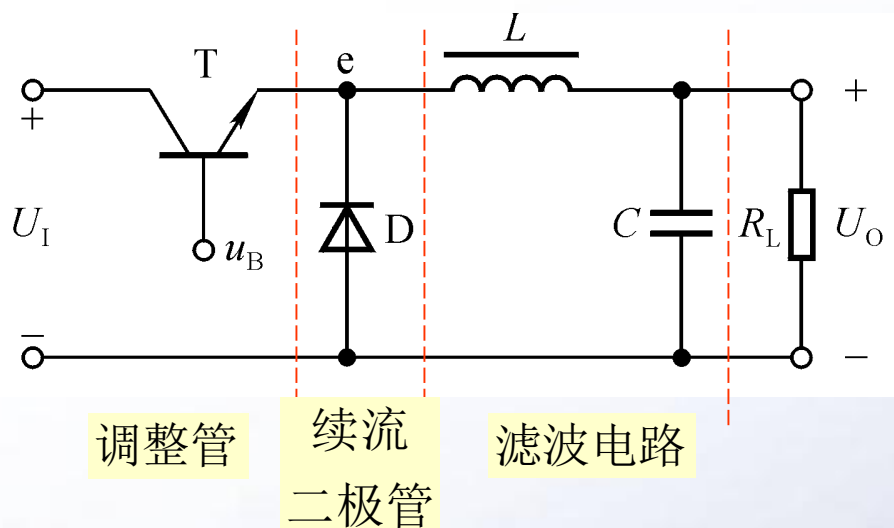


T饱和导通，D截止，
 $u_E \approx U_I$ ；L 储能，C 充电。

T截止，D导通，
 $u_E \approx -U_D$ ；L 释放能量，C 放电。



2. 波形分析及输出电压平均值



$$U_O \approx \frac{T_{\text{on}}}{T} \cdot U_I + \frac{T_{\text{off}}}{T} \cdot (-U_D) \approx \delta U_I$$

关键技术：大功率高频管，高质量磁性材料

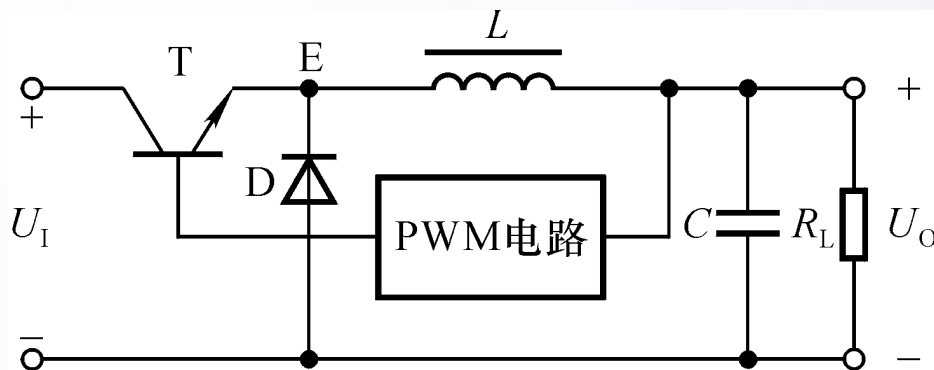
稳压原理：若某种原因使输出电压升高，则应减小占空比。



3. 稳压原理

脉冲宽度调制式：PWM电路作用：

$$U_O \uparrow \rightarrow T_{on} \downarrow \rightarrow \delta \downarrow \rightarrow U_O \downarrow$$



其它控制方式：

脉冲频率调制式： $U_O \uparrow \rightarrow T \uparrow$ （脉宽不变） $\rightarrow \delta \downarrow \rightarrow U_O \downarrow$

混合调制式： $U_O \uparrow \rightarrow T \uparrow T_{on} \downarrow \rightarrow \delta \downarrow \rightarrow U_O \downarrow$

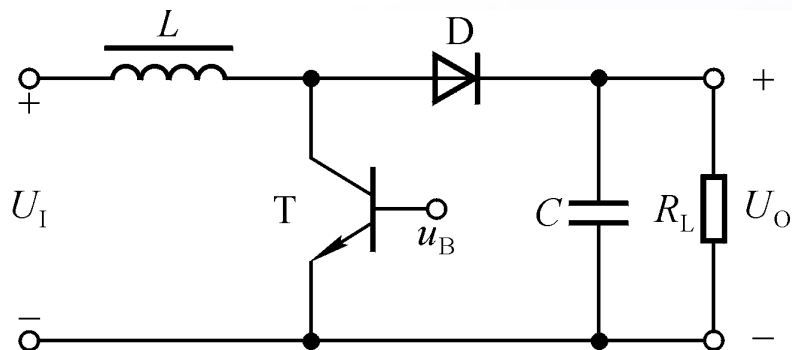
在串联开关型稳压电路中 $U_O < U_I$ ，故为降压型电路。



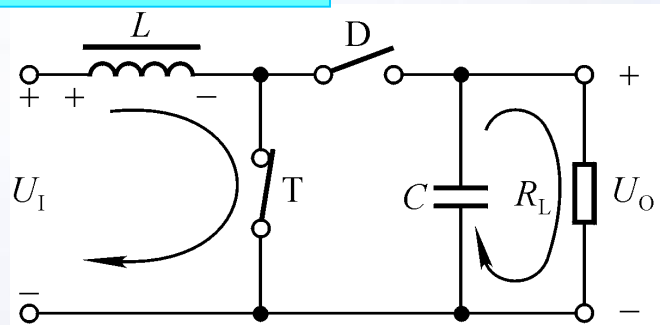


三、并联开关型稳压电路 (升压型)

1. 工作原理



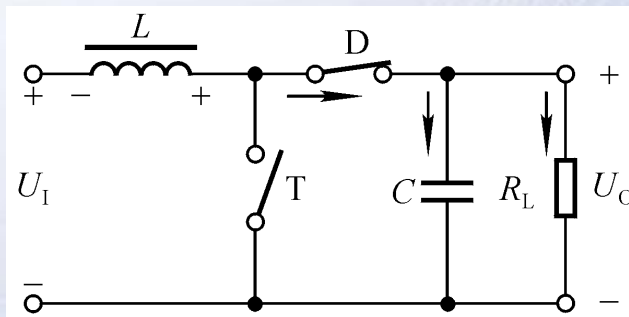
$u_B = U_H$ 时



T 饱和导通, L 储能,
D 截止, C 对负载放电。

要研究调整管在饱和导通和截止状态下电路的工作情况。

$u_B = U_L$ 时

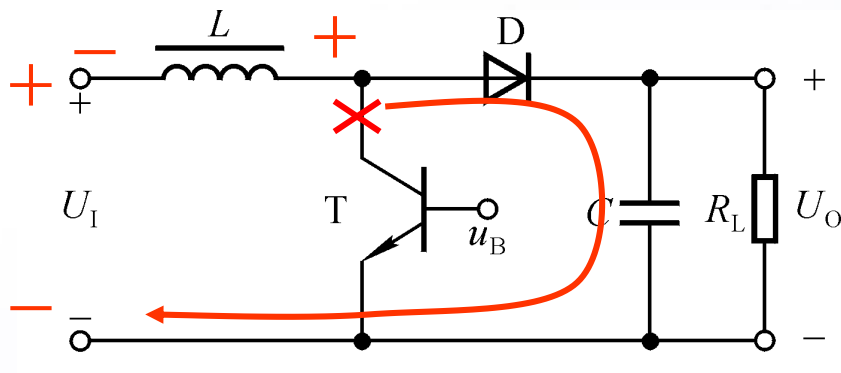


T 截止, L 产生感生电动势, D 导通; U_I 与 L 所产生的感生电动势相加对 C 充电。



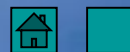
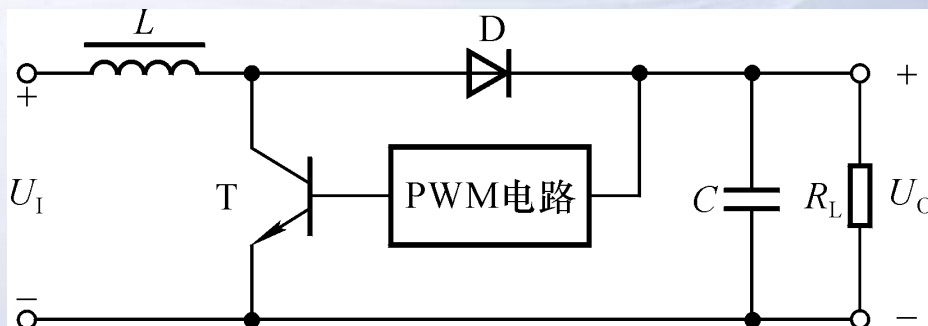


2. 输出电压



只有 L 足够大，才能升压；只有 C 足够大，输出电压交流分量才足够小！

在周期不变的情况下， u_B 占空比越大，输出电压平均值越高。





讨论

1. 什么样的电子设备适于用开关型稳压电源作能源？
2. 在开关型稳压电源中，调整管的开关信号频率高些好还是低些好？为什么？
3. 在开关型稳压电源中是否可不用电源变压器而直接进行整流？为什么？
4. 如何使开关型稳压电路输出电压有较小的调节范围？