

第十章 直流稳压电源

§ 10.1 概述

§ 10.2 单相整流及滤波电路

§ 10.3 串联反馈型线性稳压电路



§ 10.1 概述

提供稳定的直流电压或电流的装置，称为直流电源，它包含直流电流源与直流电压源。

直流稳压电源的基本要求为：

- ◆在电压大小满足要求的前提下，输出的直流电压具有足够的稳定性；
- ◆输出电流的大小满足要求。



现有各种线性稳压电源、通信用的AC/DC开关电源、DC/DC开关电源、UPS、交流变频调速电源、正弦波逆变电源、大功率高频高压直流稳压电源、中频感应加热电源、电力电源、绿色照明电源、光伏逆变电源、风光互补型电源等等。发展趋势：高效节能、智能化、数字化、小型轻量化、安全可靠、无电力公害、电磁干扰小等

稳压电源的分类

类型	类别		特点		
交流稳压电源	自耦调整式稳压电源	机械调整式	结构简单，造价低，输出波形失真小	容易烧毁，电压调整速度慢。	
		自耦变压器式	电路简单，稳压范围宽，价格低	稳压精度较低，工作寿命短。	
		大功率补偿式	抗干扰性能较好，稳压精度高、响应速度快，电路简单。	输入电流失真度大，功率因数较低；输出电压可能影响输入电压的相移	
	参数调整式稳压电源		结构简单，可靠性高，抗干扰能力强。	能耗较大、噪声大、造价较高。	
	开关型稳压电源AC/AC)		稳压性能好，控制功能较强。	电路复杂，价格较高。	
直流稳压电源	化学电源		小巧，灵活。	供电能力受限，污染环境。	
	线性电源		稳定性高，纹波小，可靠性高。	体积大，功耗大，转换效率低。	
	开关式电源	AC/DC 电源		体积小，重量轻，效率高，稳定可靠	纹波较大。需要配以性能良好的低通滤波器。
		DC/DC 电源			
		通信电源			
		电台电源			
	模块电源				
	特种电源				

化学电源

化学电源是利用化学反应产生电流的器件，如干电池、铅酸蓄电池，镍镉、镍氢、锂离子电池等。优点是体积小、使用方便，价格低廉，缺点是提供电流小。



普通化学电池



镍氢电池



纽扣电池



手机电池

线性直流稳压电源

线性直流稳压电源是通过线性工作的BJT调节输出电压稳定的电源。优点是输出电压稳定度较高、噪声和干扰小，缺点是体积大、功耗高、转换效率低等。



线性直流稳压电源



开关式直流稳压电源



开关式直流稳压电源

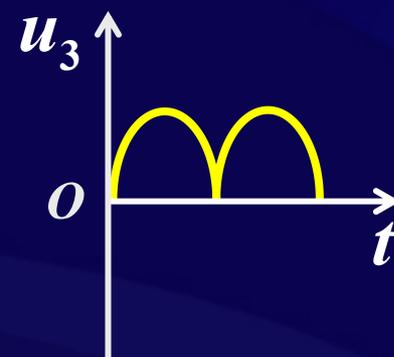
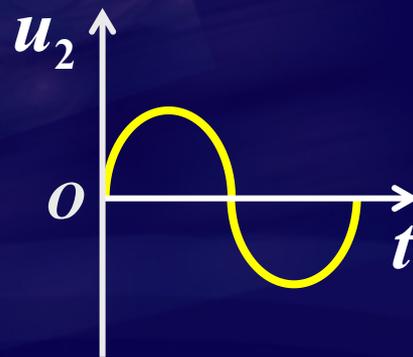
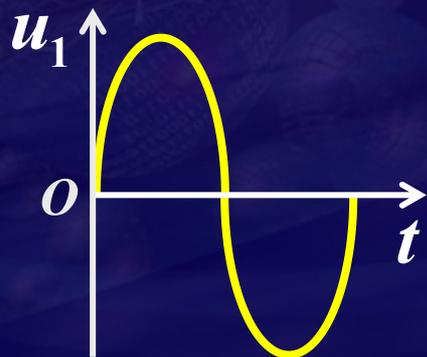
开关式直流稳压电源是通过工作在开关状态的BJT调节输出电压稳定的电源。优点是体积小、效率高、稳定可靠，缺点是输出电压纹波大、电路复杂、维修不便等。



直流稳压电源的组成方框图

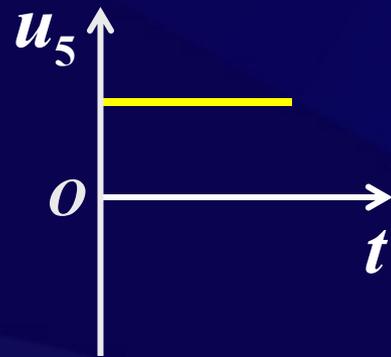
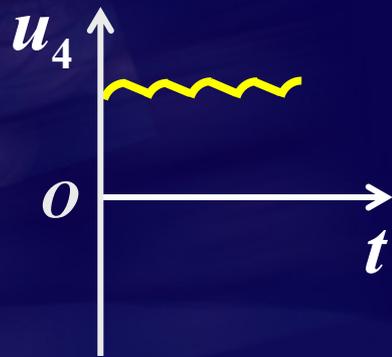
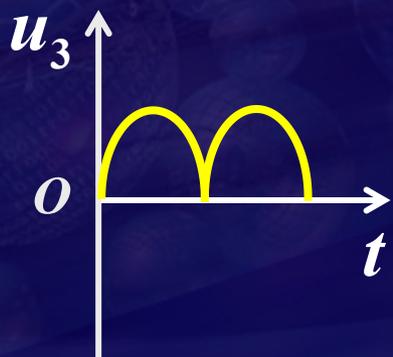


波形图





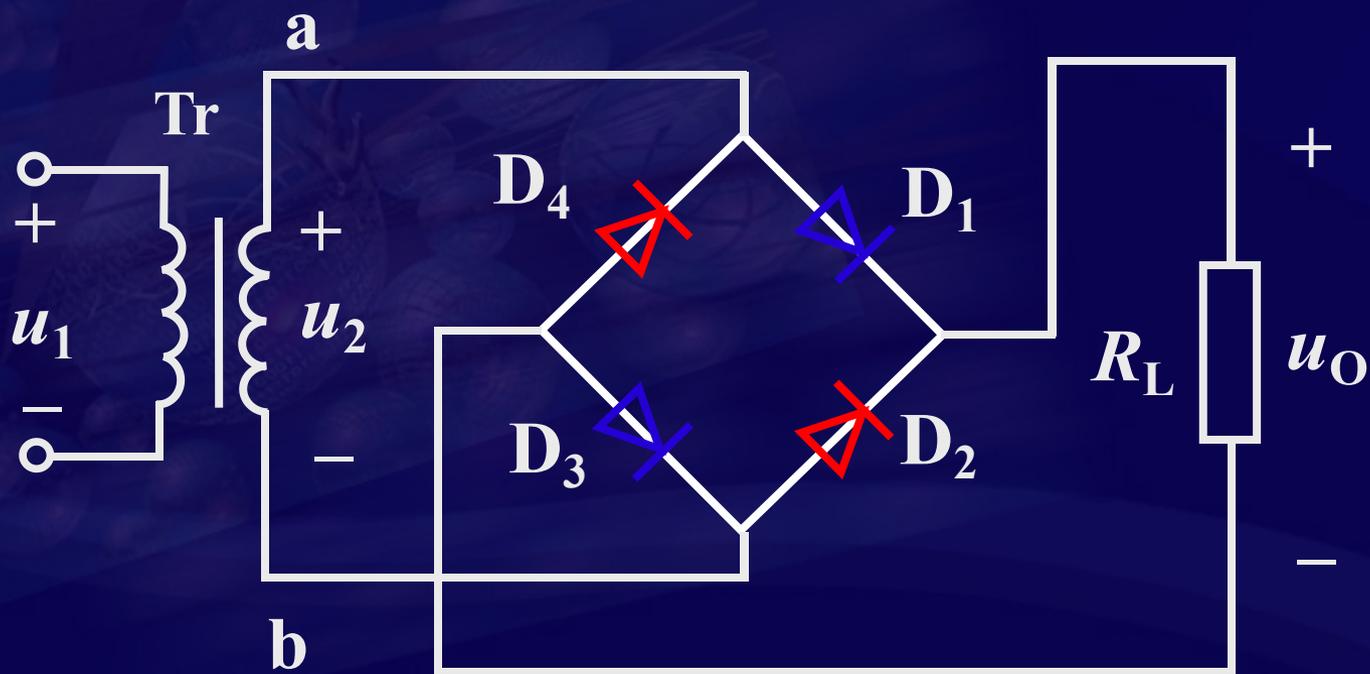
波形图

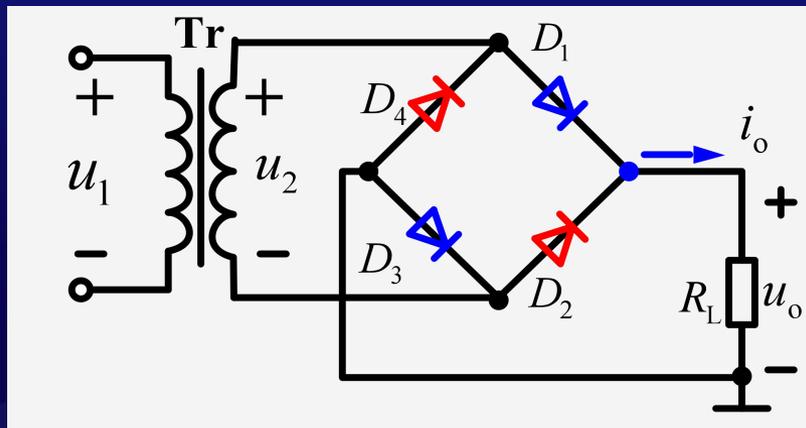


§ 10.2 单相整流及滤波电路

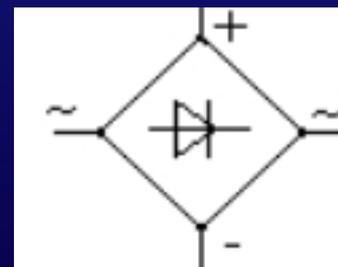
一、单相桥式整流电路

1. 电路组成

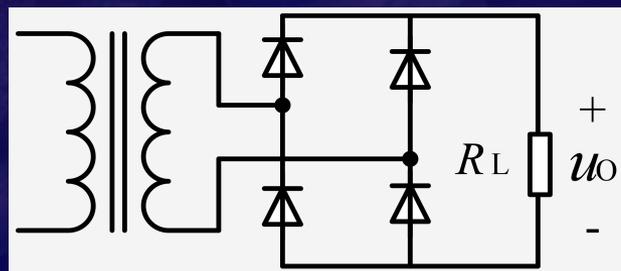
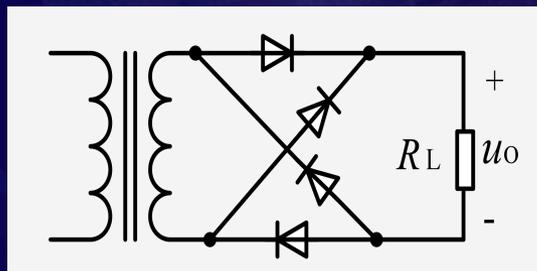




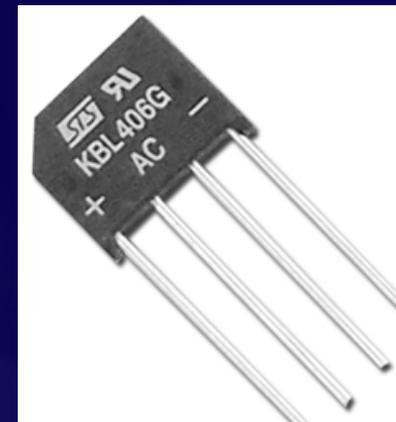
单相桥式全波整流电路



整流桥符号

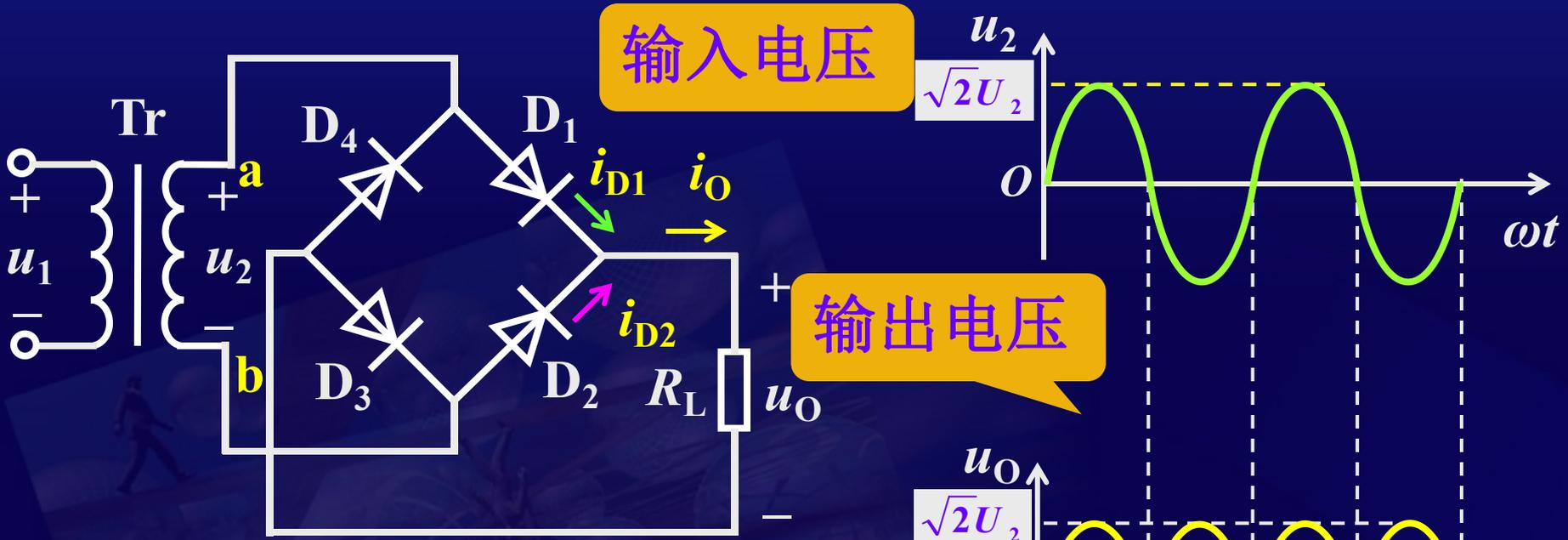


桥式整流电路的另两种画法



整流桥外形图





2. 工作原理

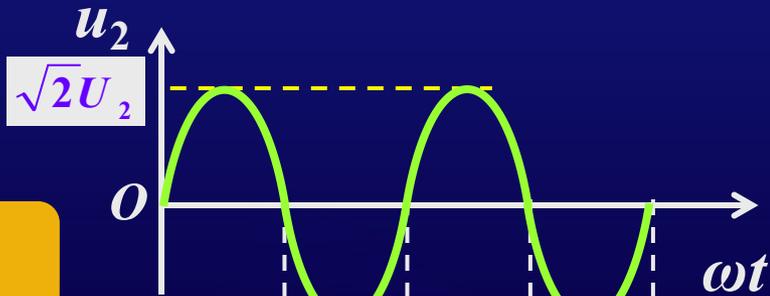
设

(a) $u_2 = \sqrt{2}U_2 \sin \omega t$

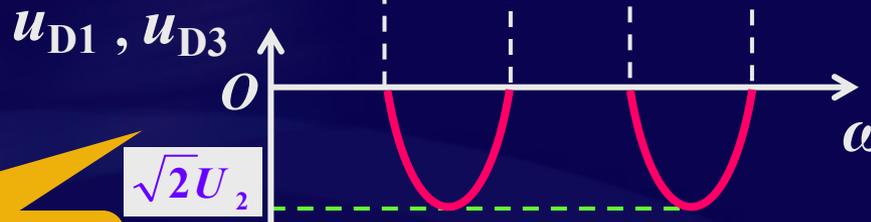
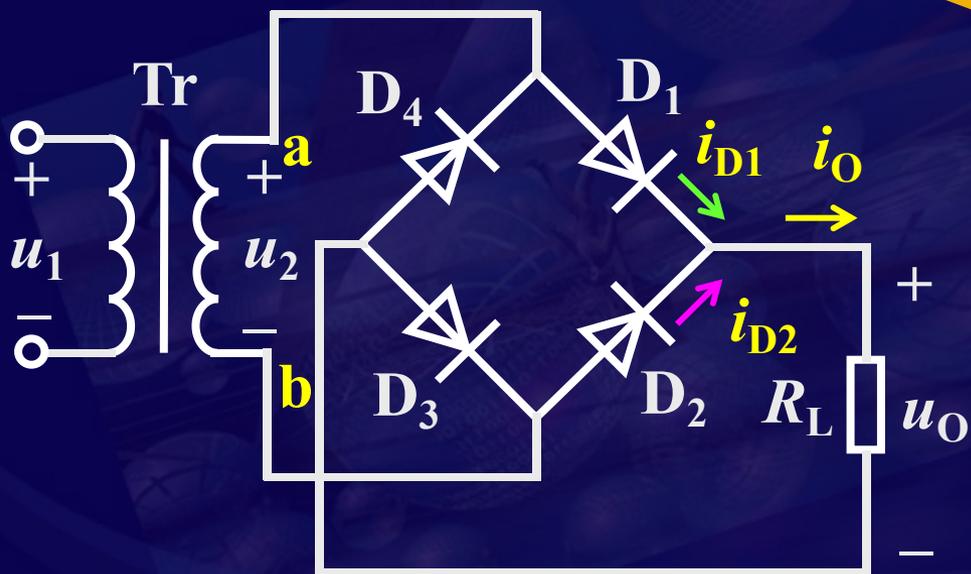
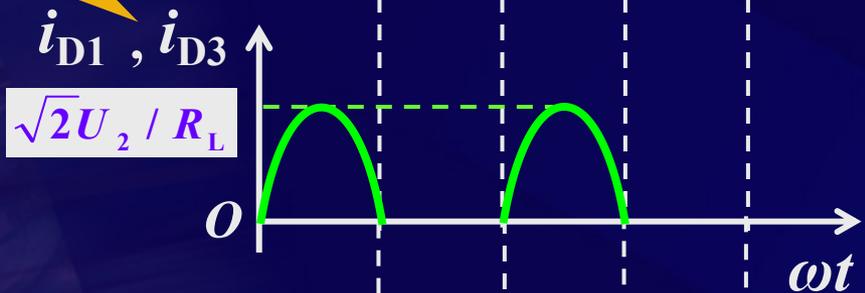
(b) 二极管 $D_1 \sim D_4$ 性能理想



输入电压



二极管 D_1 、 D_3 电流



二极管 D_1 、 D_3 电压



3. 主要性能指标

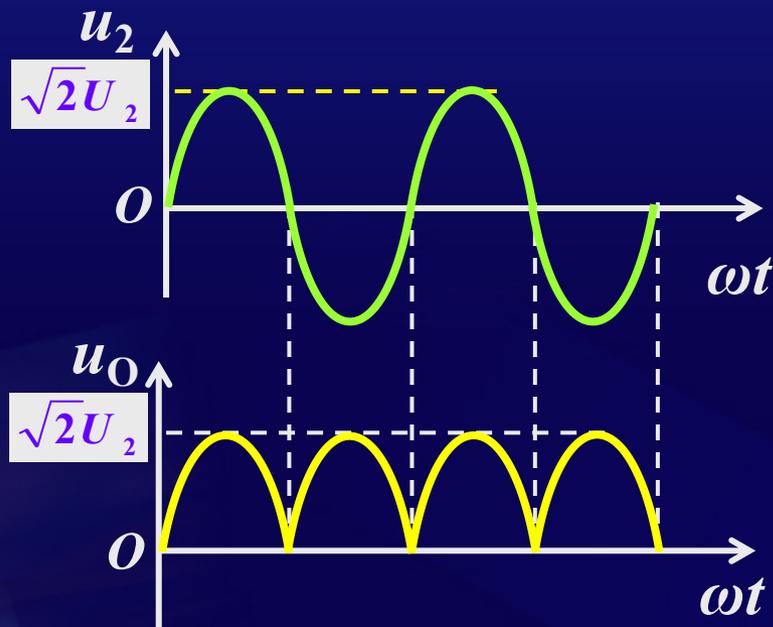
(1) 整流输出直流电压

因为输出电压

$$u_o = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 \left(1 - \frac{2}{3} \cos 2\omega t - \frac{2}{15} \cos 4\omega t - \frac{2}{35} \cos 6\omega t - \dots \right)$$

输出直流电压

$$U_o = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} u_2 d\omega t = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 \approx 0.9U_2$$



(2) 输出电压纹波因数 γ

定义

$$\gamma = \frac{U_{or}}{U_0}$$

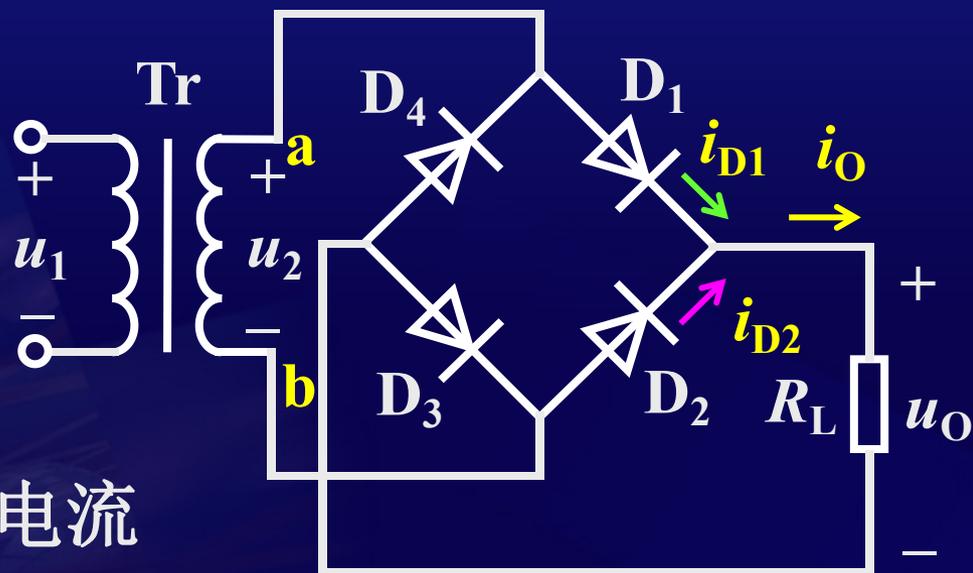
式中

U_{or} ——输出电压中各次谐波电压有效值的总和

U_0 ——输出电压的平均值

对于全波整流电路

$$\gamma = 0.483$$



(3) 整流二极管的正向平均电流

$$I_D = \frac{I_O}{2} = \frac{U_O}{2R_L} = \frac{0.9U_2}{2R_L} = \frac{0.45U_2}{R_L}$$

(4) 整流二极管的最高反向电压

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

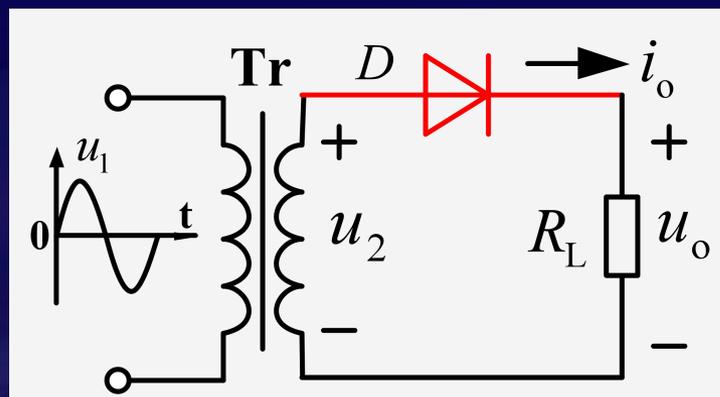


【例题1】单相半波整流电路如图所示。已知负载电阻 $R_L = 75\Omega$ ，变压器副边电压 $U_2 = 20V$ ，试求 U_o 、 I_o 和 U_{RM} ，并选择相应的二极管。

解： $U_o = 0.45U_2 = 9V$

$$I_o = \frac{0.45U_2}{R_L} = \frac{U_o}{R_L} = 120mA$$

$$U_{RM} = \sqrt{2}U_2 = \sqrt{2} \times 20 = 28.2V$$



二极管选择根据

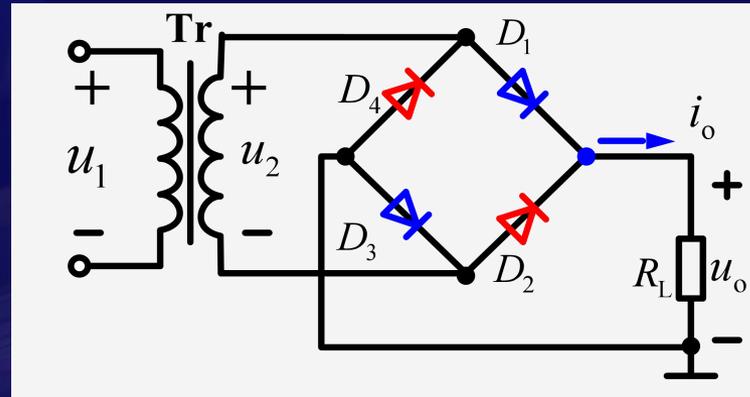
$$\begin{cases} I_D = I_o = 12mA \\ U_{RM} = 28.2V \end{cases}$$



选型号为2DZ13B（或1N4001）
($I_F=16mA$ ， $U_{RM}=50V$)

👉问题1: 如图所示的桥式整流电路中, 在下面三种情况下, 电路的工作情况如何?

1. 若 D_3 管开路;
2. 若 D_3 管接反;
3. 若 D_3 管短路;

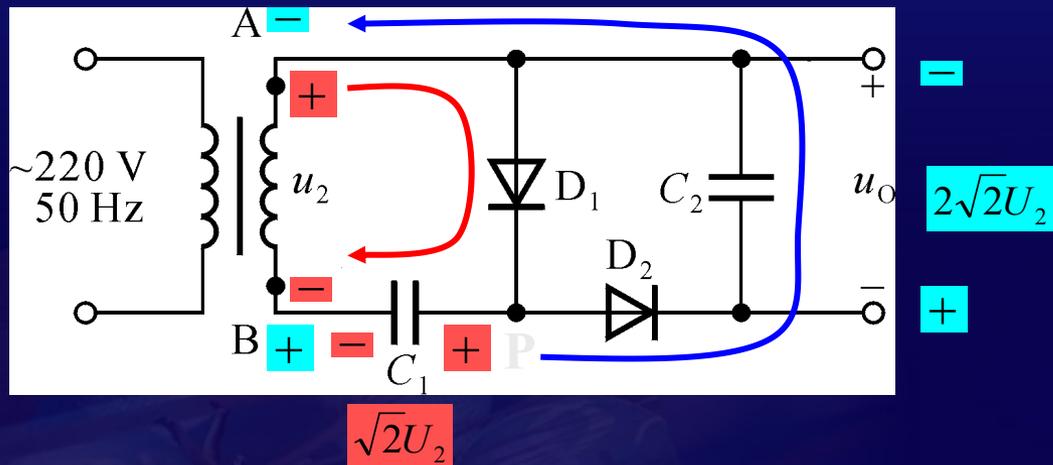


注意: 应用中要仔细检查二极管的极性, 只要有一个接反, 就会造成烧坏变压器的事故

👉提问: 若整流桥中的四个二极管全部反接, 情况会如何?



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。

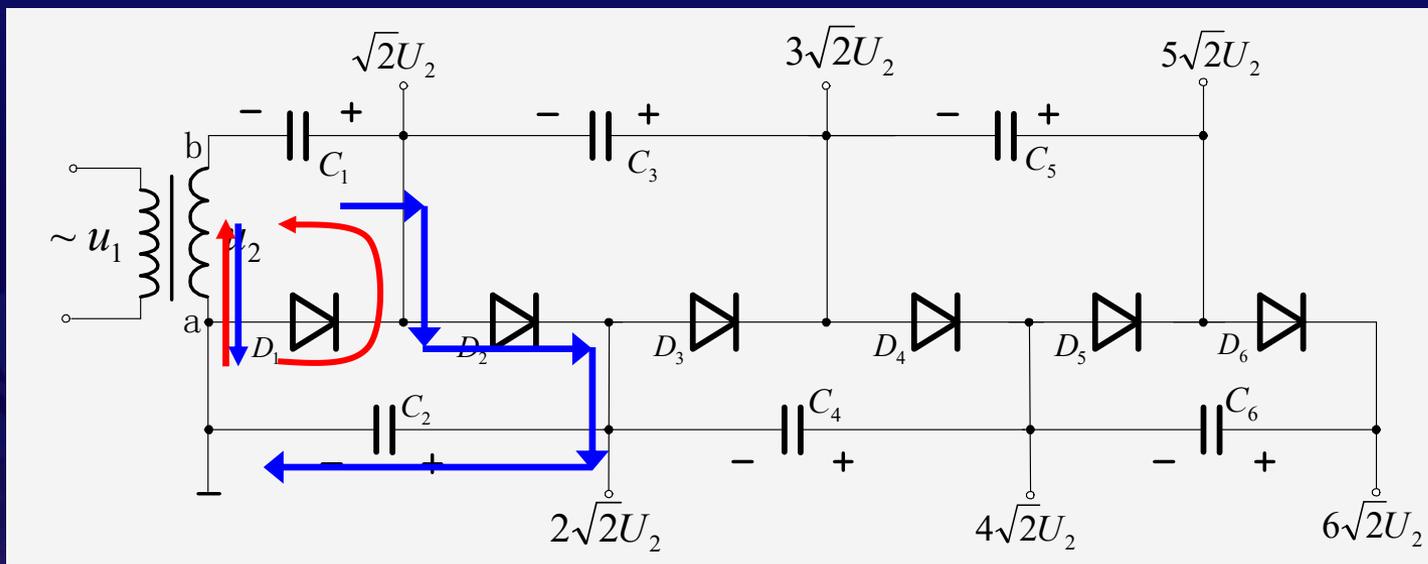
u_2 正半周： C_1 充电： $A \rightarrow D_1 \rightarrow C_1 \rightarrow B$ ，最终

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

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

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

多倍压整流电路

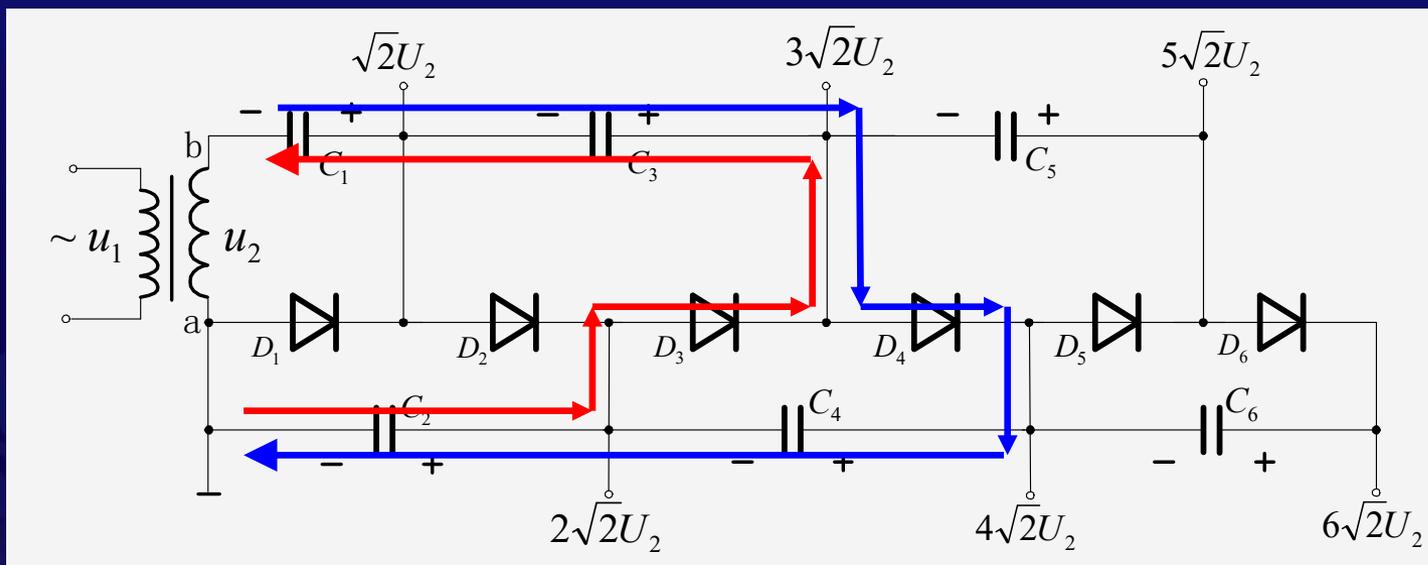


u_2 的第一个负半周: u_2 、 C_1 、 D_1 构成回路, C_1 充电到: $\sqrt{2}U_2$

u_2 的第一个正半周: u_2 、 C_2 、 D_2 、 C_1 构成回路, C_2 充电到: $2\sqrt{2}U_2$



多倍压整流电路



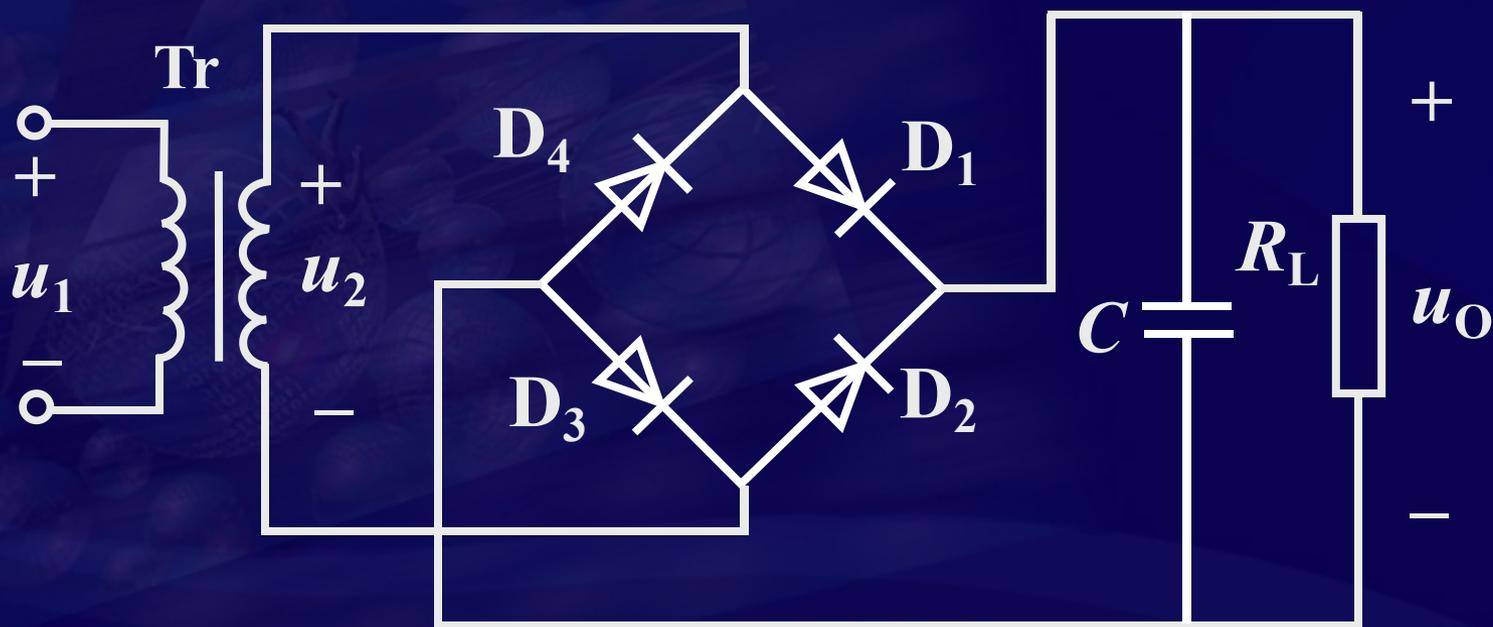
u_2 的第二个负半周： u_2 、 C_1 、 C_3 、 D_3 、 C_2 构成回路， C_1 补充电荷， C_3 充电到： $2\sqrt{2}U_2$

u_2 的第二个正半周： u_2 、 C_2 、 C_4 、 D_4 、 C_3 、 C_1 构成回路， C_2 补充电荷， C_4 充电到： $2\sqrt{2}U_2$

把电容接在相应电容组的两端，即可获得所需的多倍压直流输出。

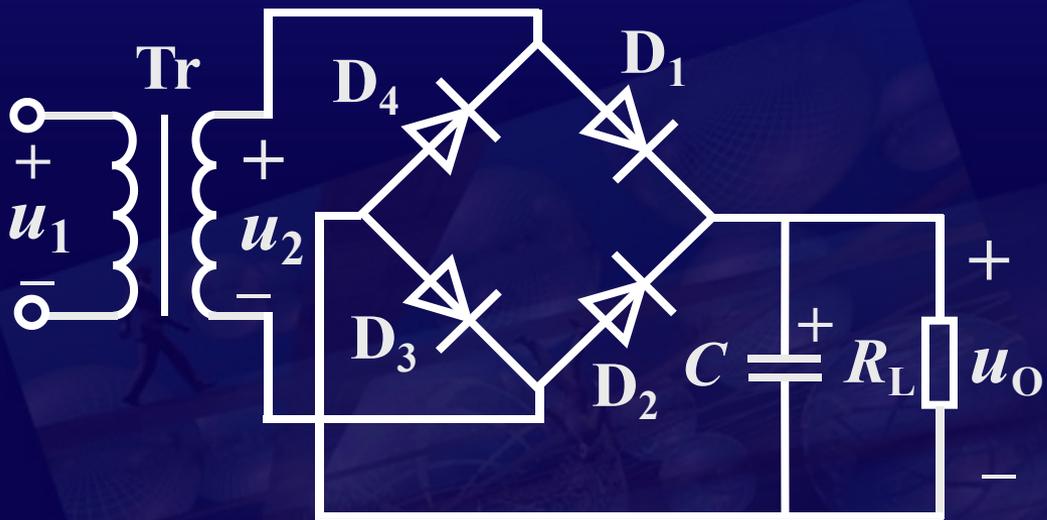
三、滤波电路

滤波电路的作用是滤除整流电压中的纹波。常用的滤波电路有电容滤波、电感滤波、复式滤波及有源滤波。

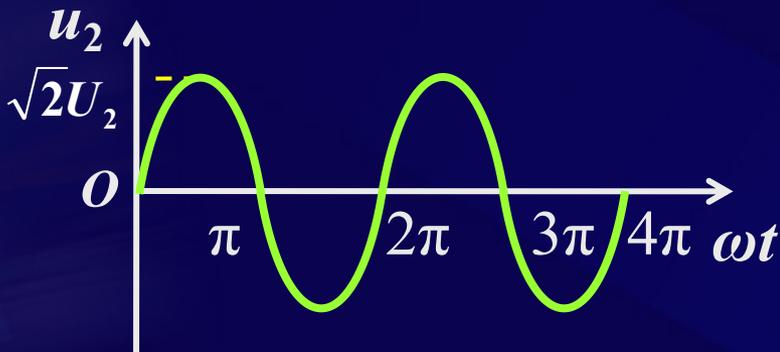


1. 工作原理

输入电压



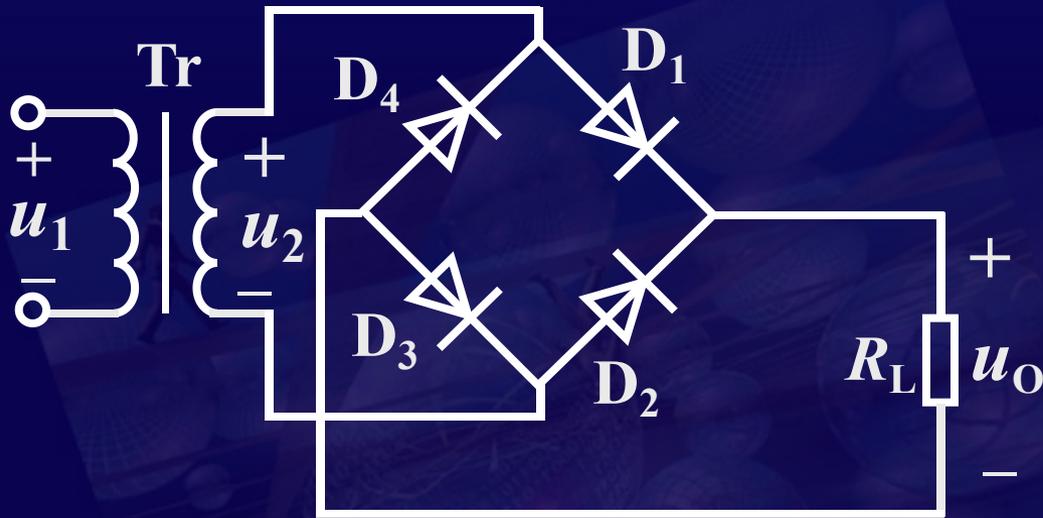
$$u_2 = \sqrt{2}U_2 \sin \omega t$$



(1) 当 $C=0$ 时



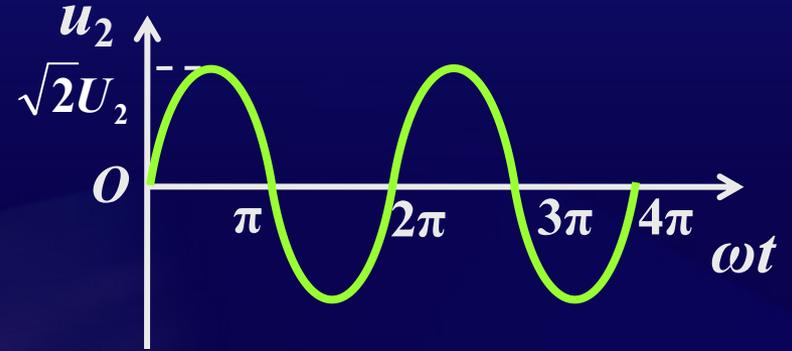
桥式整流电路



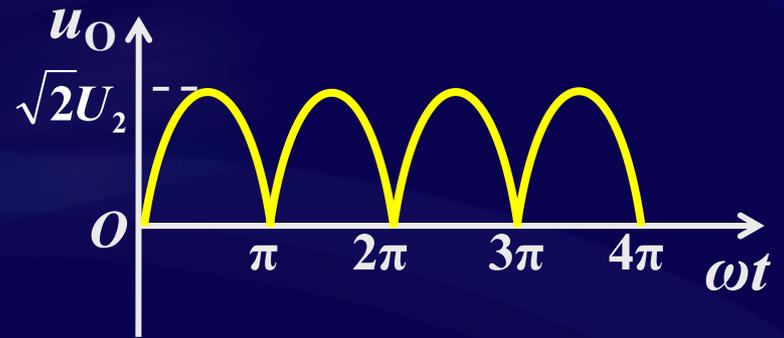
输出电压

$$U_O \approx 0.9U_2$$

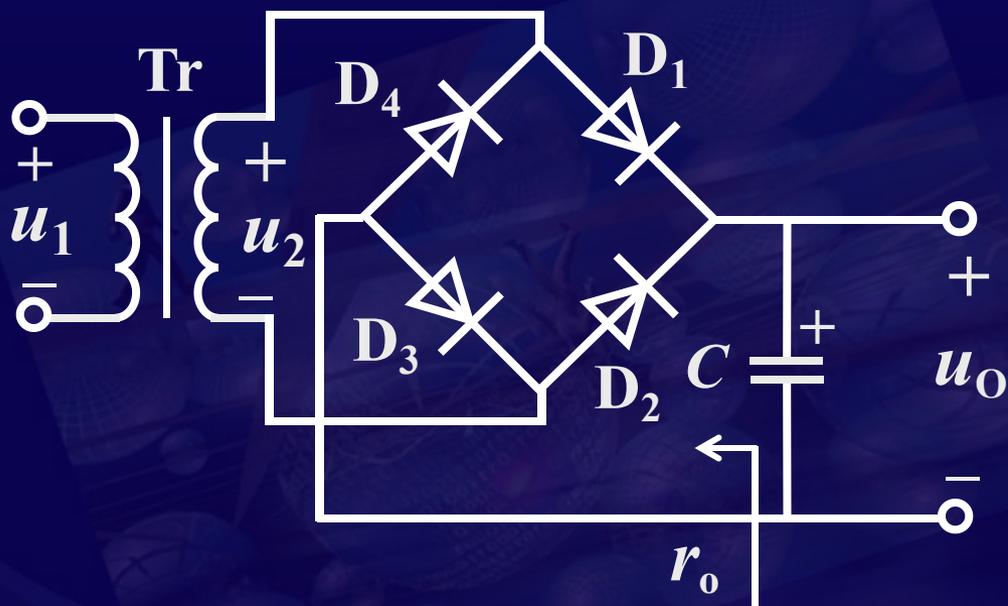
输入电压



输出电压波形



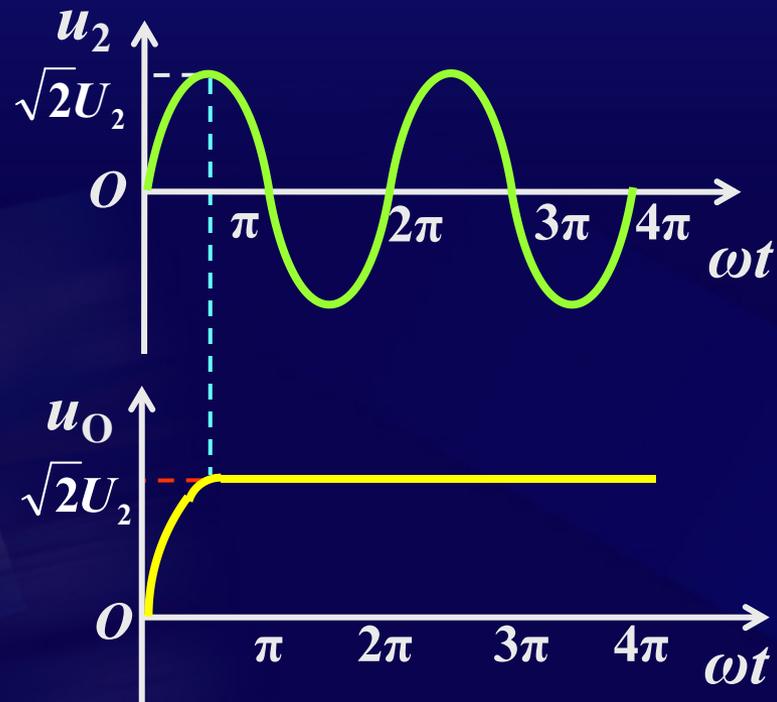
(2) 当 $C \neq 0$ 、 $R_L = \infty$ 时



由于电容器的充电时间常数

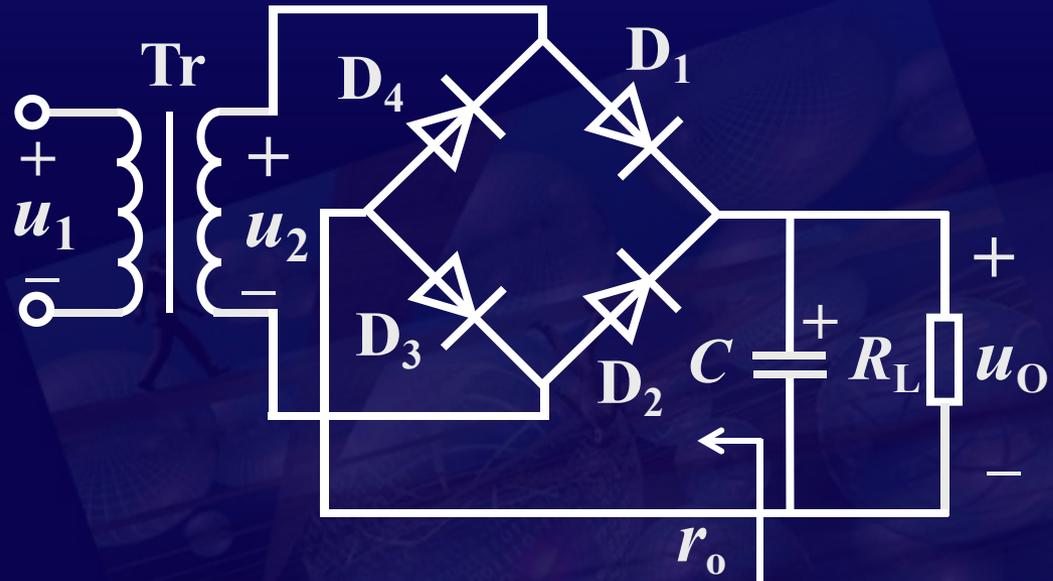
$$\tau_1 = r_0 C \approx 0$$

输入电压



输出电压波形

(3) 当 $C \neq 0$ 、 $R_L \neq \infty$ 时

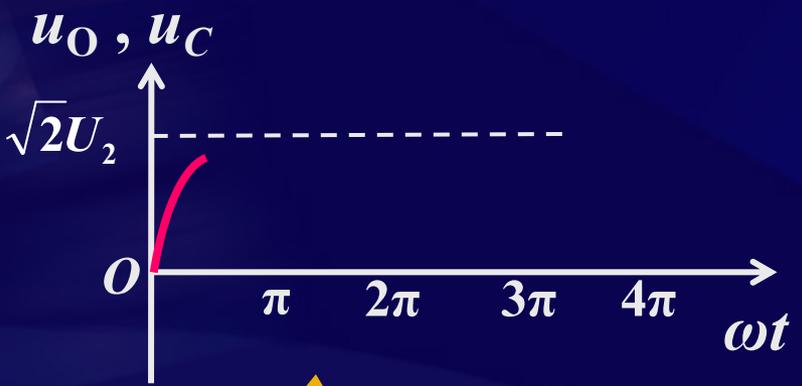
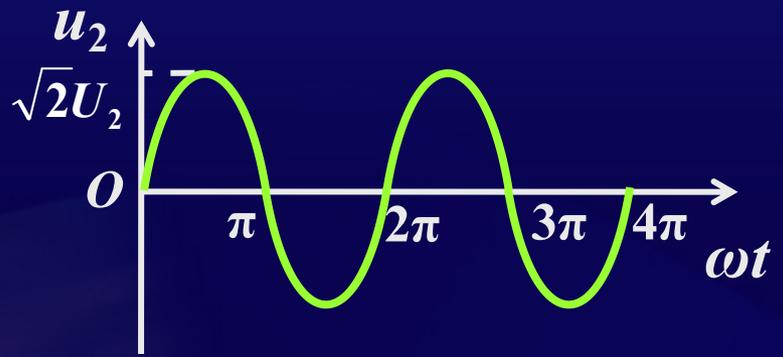


电容器的充电时间常数

$$\tau_1 = (r_o // R_L)C \approx r_o C \approx 0$$

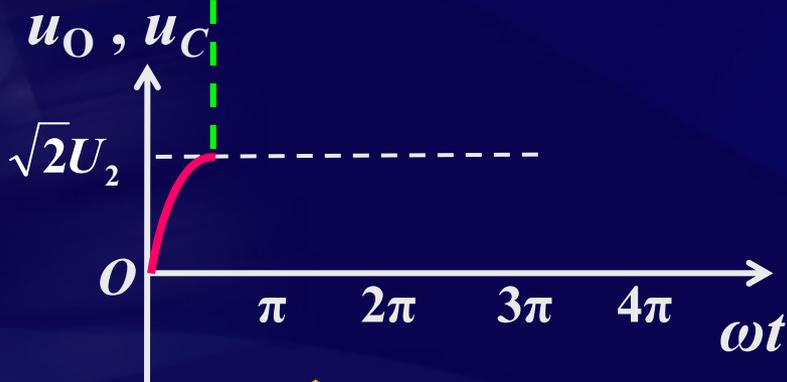
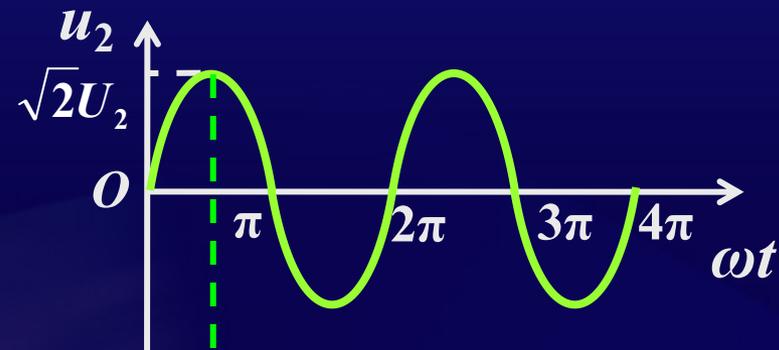
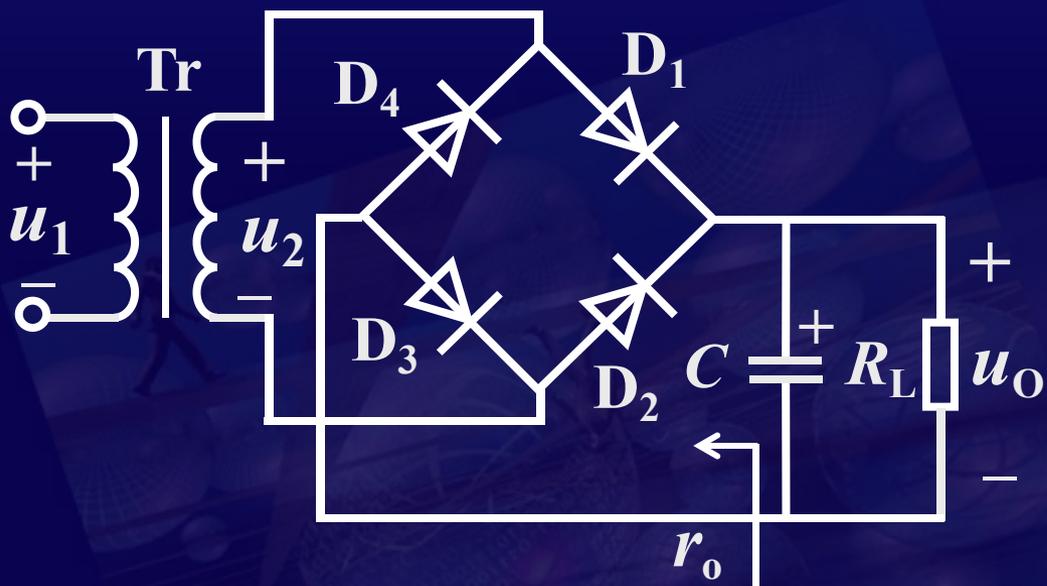
$$u_O = u_C \approx u_2$$

输入电压



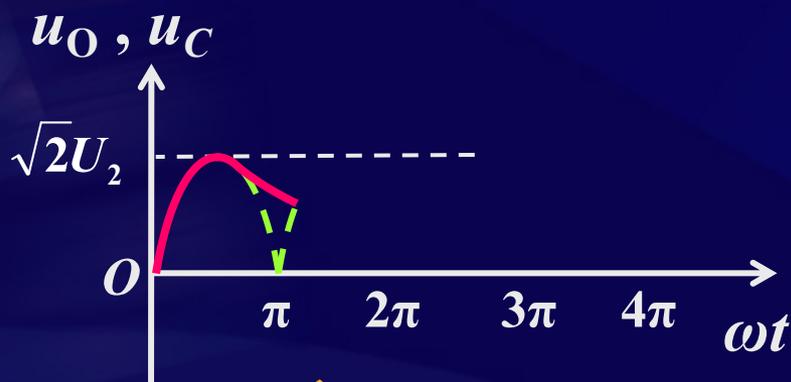
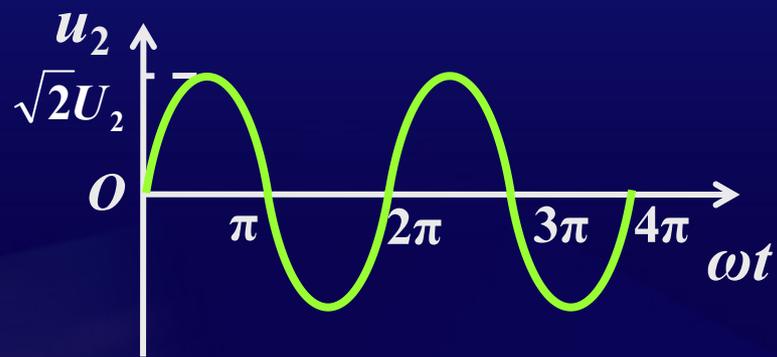
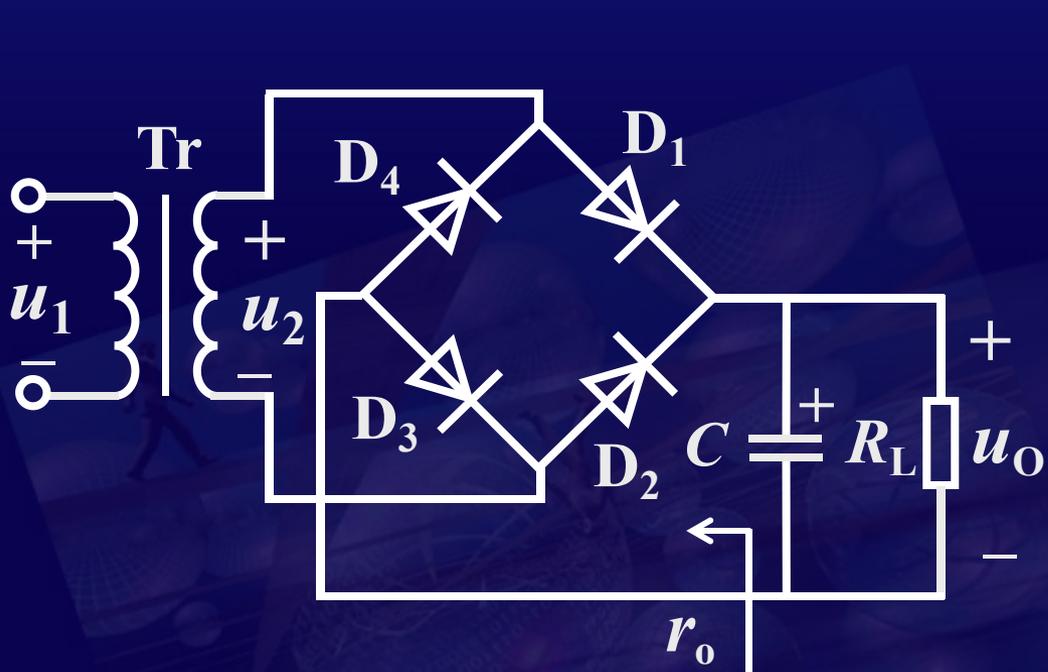
输出电压

输入电压



输出电压

当 C 充电到最高点时
二极管 D_1 、 D_3 将截止
 C 将通过 R_L 开始放电

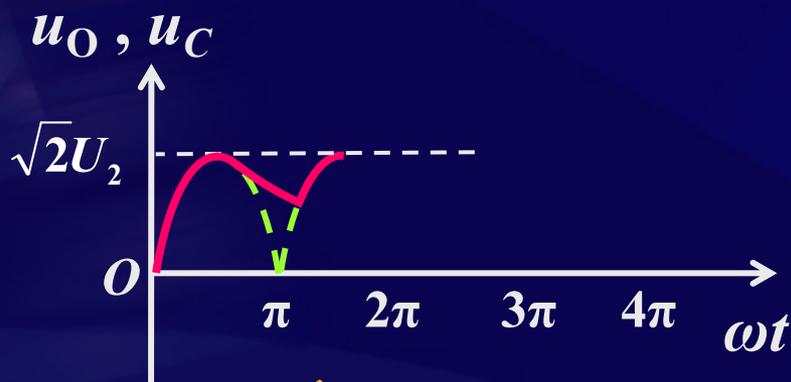
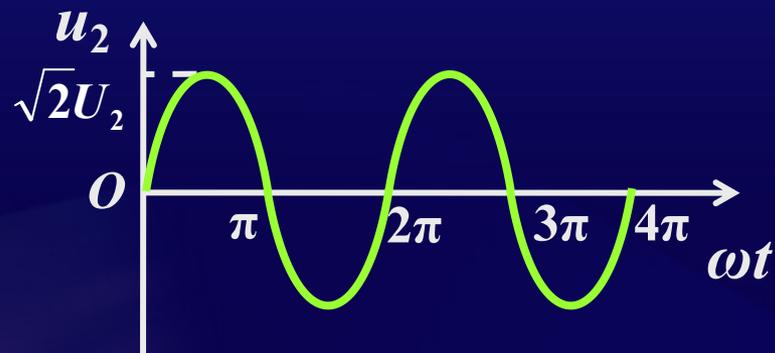
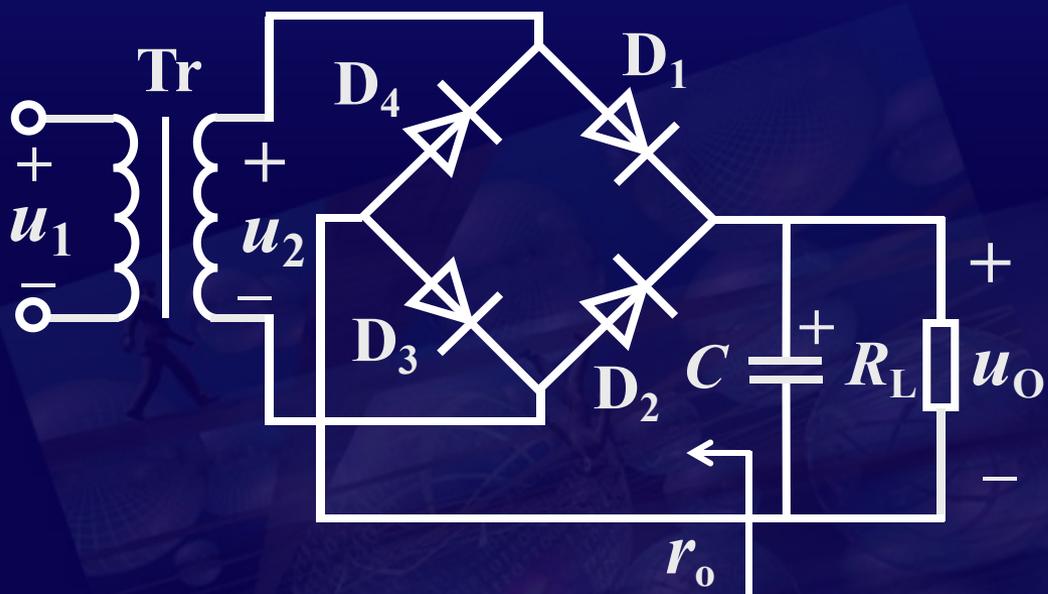


输出电压

电容器的放电时间常数

$$\tau_2 = R_L C$$

由于 τ_2 较大，放电比较缓慢



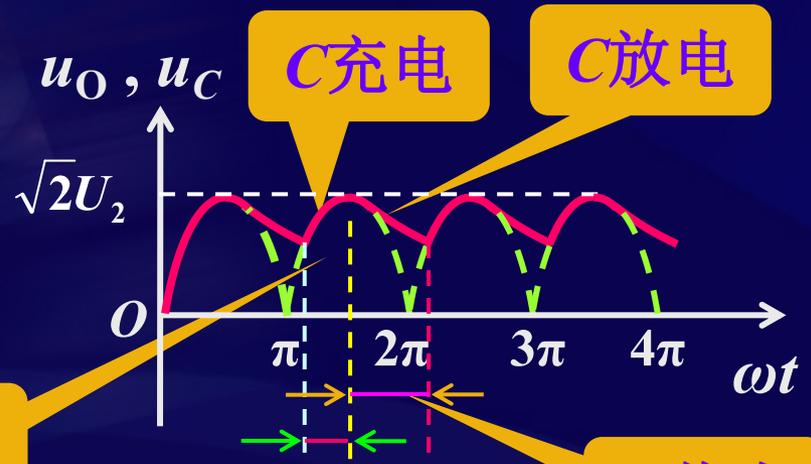
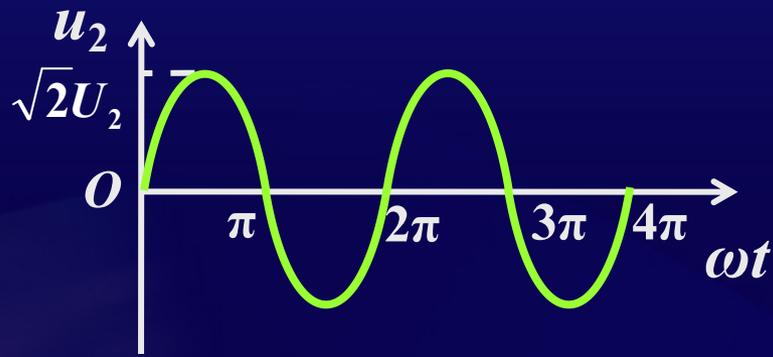
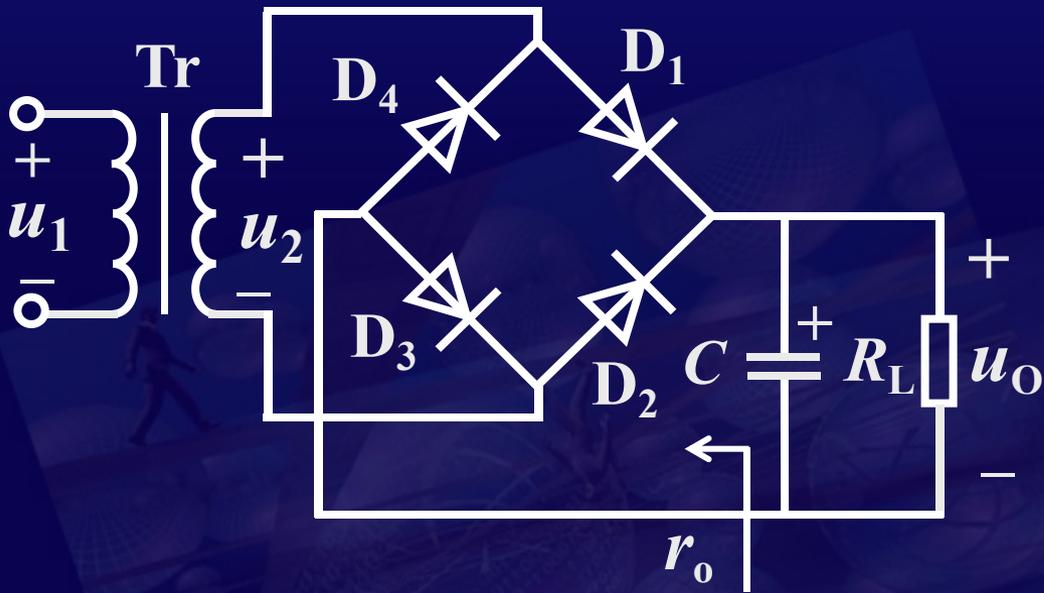
输出电压

当 $|u_2| > u_C$ 时

二极管 D_2 、 D_4 导通

C 又开始充电，直到最大值。

输入电压



D导通

C充电

C放电

D截止

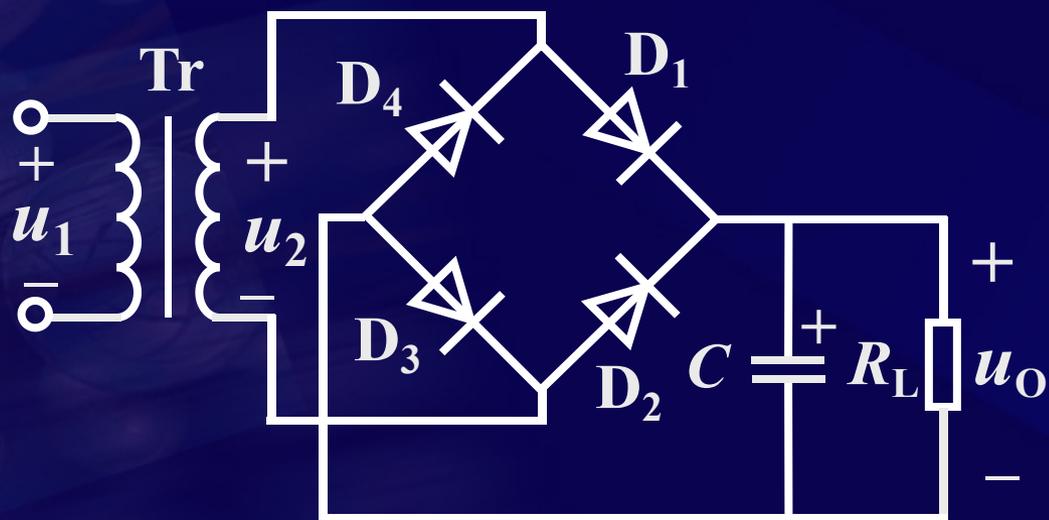
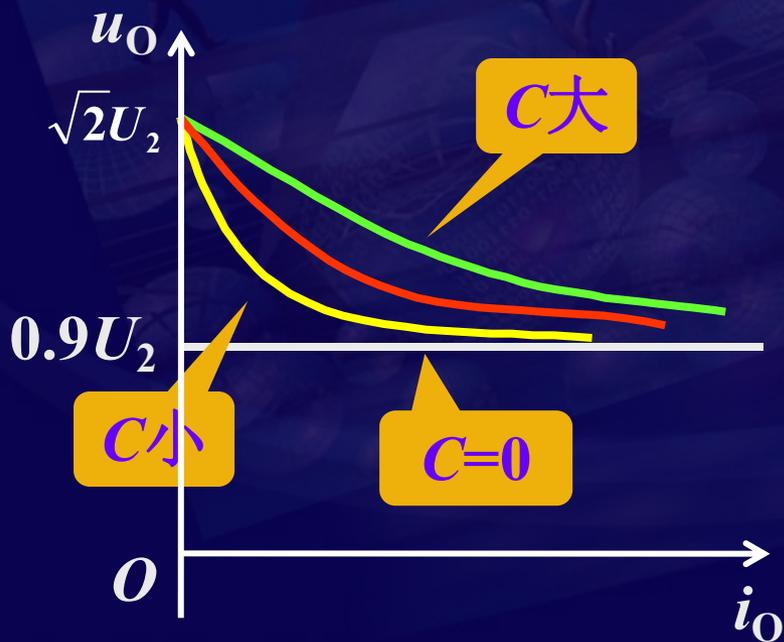
输出电压波形



2. 电容滤波电路的外特性及主要参数估计

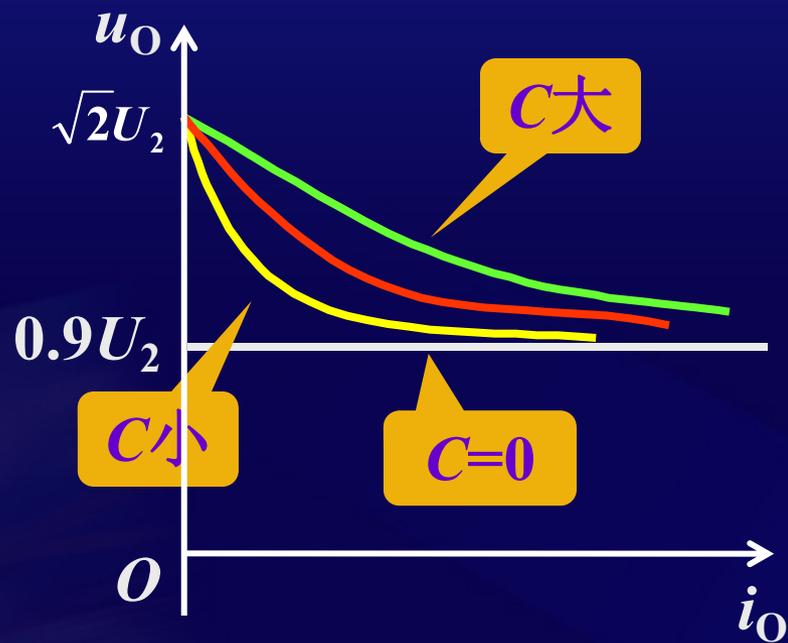
(1) 电容滤波电路的外特性

$$u_o = f(i_o)$$



外特性特点

- 当 i_O 一定时， C 越小， $U_{O(AV)}$ 越小，纹波越大。
- 当 C 一定时， i_O 越大， $U_{O(AV)}$ 越小。



结论： 外特性差

电容滤波电路适用于负载电流比较小或负载基本不变的情况。

(2) 输出电压平均值（直流电压）

$$\text{若 } \tau = CR_L \geq (3 \sim 5) \frac{T}{2} \quad R_L \neq \infty$$

$$U_{O(AV)} = U_O = (1.1 \sim 1.4)U_2 \quad \text{一般取 } U_{O(AV)} = U_O \approx 1.2U_2$$

◆ 全波整流电容滤波: $U_O \approx 1.2U_2$

◆ 半波整流电容滤波: $U_O \approx U_2$

$$\text{若 } \tau = CR_L \geq (3 \sim 5) \frac{T}{2} \quad R_L = \infty \quad U_O \approx 1.4U_2$$

(3) 输出电流平均值

$$I_{O(AV)} = \frac{U_{O(AV)}}{R_L} \approx 1.2 \frac{U_2}{R_L}$$

(4) 整流二极管的平均电流

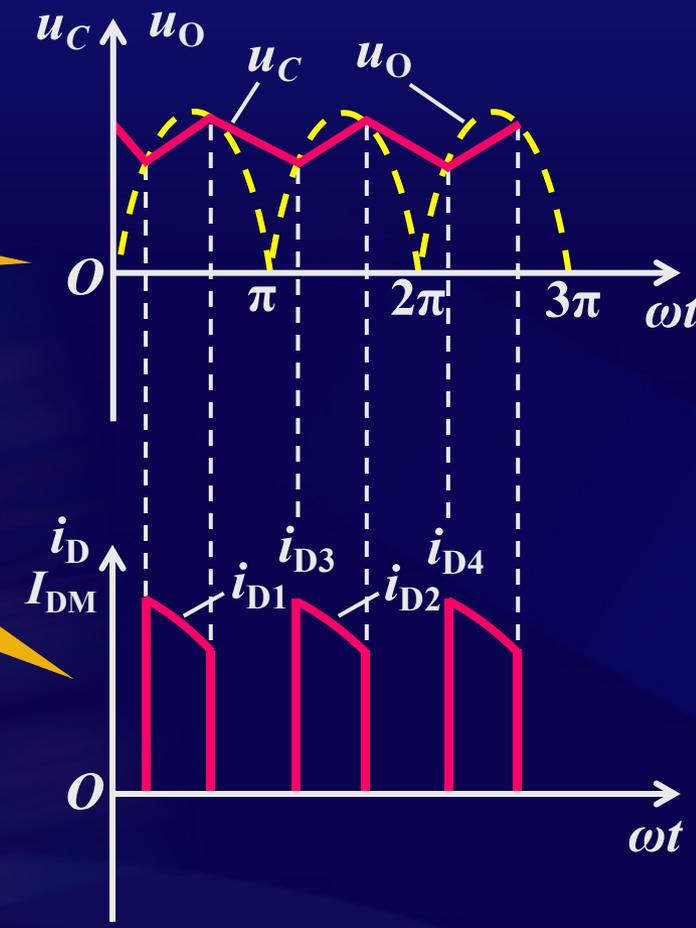
电压波形

流过二极管电流波形

二极管电流的特点

(a) 比无滤波电容时的平均电流大

(b) 二极管导通时，有冲击电流

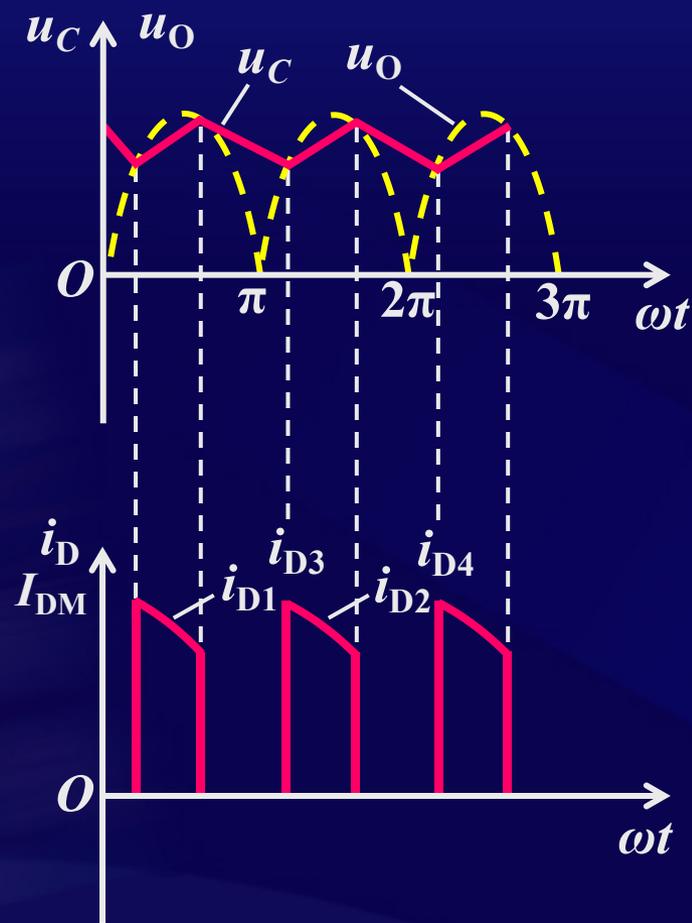


(c) 冲击电流与二极管的导通角 $\theta(\theta < \pi)$ 有关

放电时间常数越大， θ 越小，冲击电流越大。

(5) 整流二极管的最高反向电压

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



(6) 电容的选取

$$\tau = CR_L \geq (3 \sim 5) \frac{T}{2}$$

T  交流电源电压周期

(7) 整流二极管的参数选择

$$I_F \geq (2 \sim 3) I_o$$

I_F 额定整流电流

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



电容滤波适合输出电流较小的场合，且负载变化不大的场合。



电容器的作用

①旁路(bypass)电容；②耦合电容；③滤波电容；④谐振电容；⑤电源去耦(decoupling)电容。...

电容器的选择：

①电源电路中对地滤波电容，多用容量较大的电解电容器，两端并联小容量的电容器，以便为高频谐波电压提供了一个对地通路。

②电源滤波中电容对地脚要尽可能靠近地，半导体器件(尤其是集成电路)电源引线端的去耦滤波电容器，应尽量靠近器件的电源引脚端。

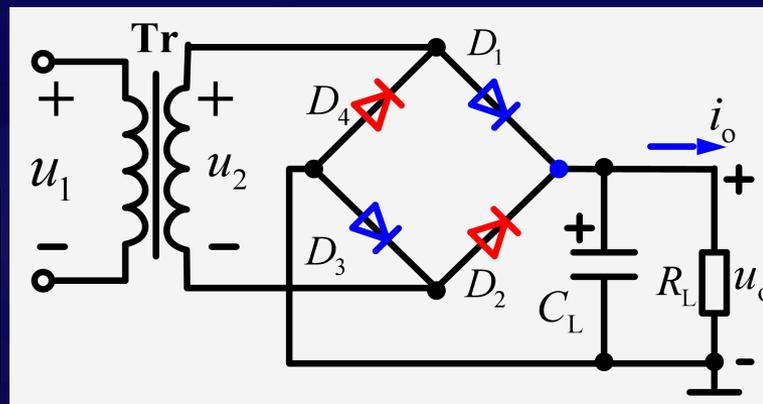
③电源滤波电容并非越大越好，应按实际需要选用。一般大电容滤除低频波，小电容滤除高频波。

【例题2】 单相桥式整流电容电路如图图示。已知电源频率 $f=50\text{Hz}$,负载电阻 $R_L=120\Omega$,要求直流电压 $U_O=30\text{V}$,试确定变压器二次侧的电压 U_2 ,选择整流元件和滤波电容。

解: $U_O \approx 1.2U_2 \implies U_2 \approx \frac{U_O}{1.2} = 25\text{V}$

$I_F \geq (2 \sim 3)I_O \implies I_F \geq (2 \sim 3)I_O = (2 \sim 3)\frac{U_O}{R_L}$
 $= 500 \sim 750\text{mA}$

$U_{RM} = \sqrt{2}U_2 = 35\text{V}$

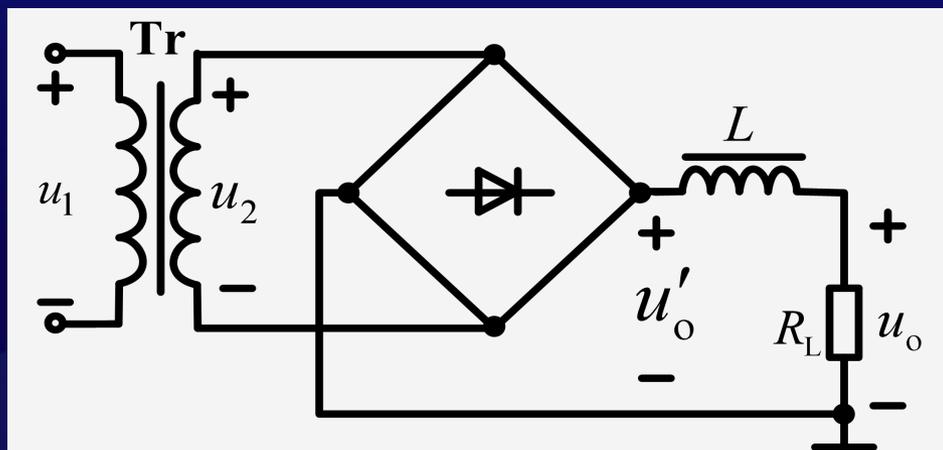


二极管可选择2CZ31D ($I_F=1000\text{mA}, U_{RM}=100\text{V}$)

$R_L C \geq (3 \sim 5)\frac{T}{2} = (3 \sim 5)\frac{1}{2f} \implies C \geq (3 \sim 5)\frac{T}{2R_L} = (250 \sim 417)\mu\text{F}$

取容值为 $470\mu\text{F}$,耐压为 50V 的电解电容

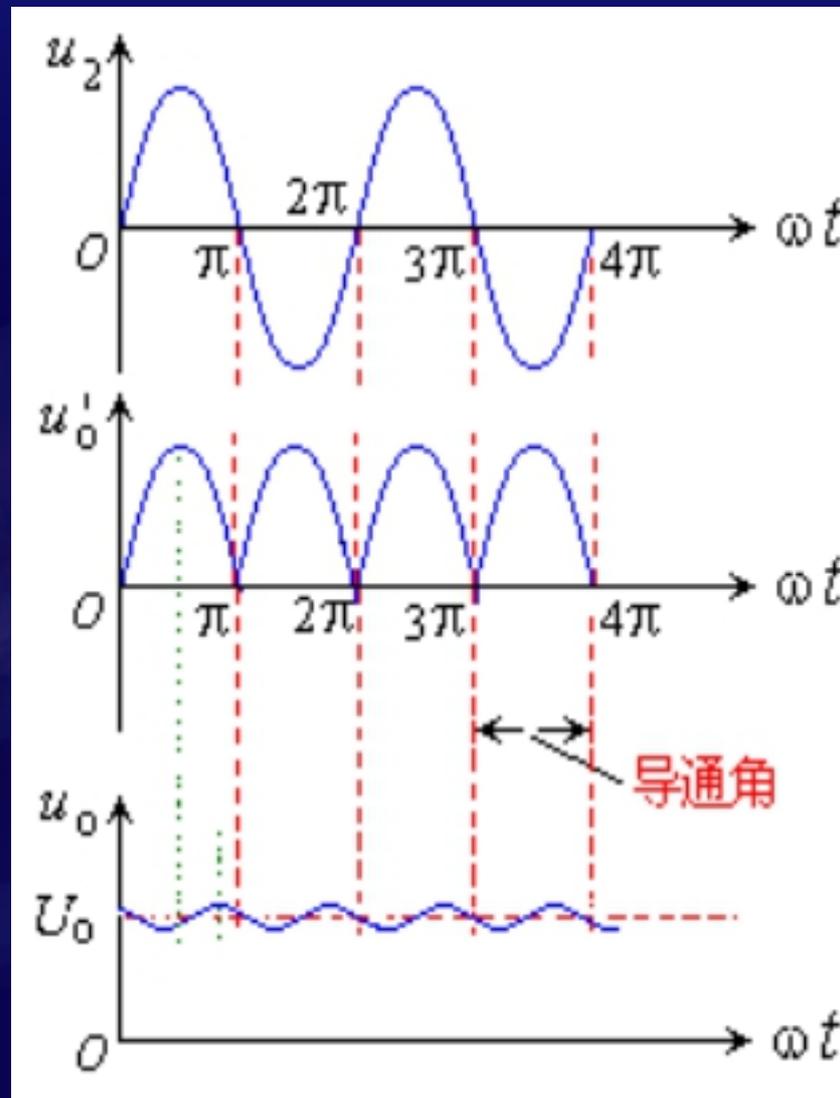
四、电感滤波电路



电感滤波电路

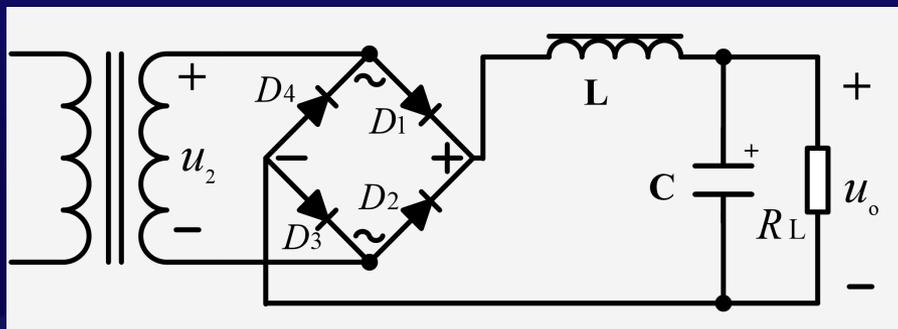
输出直流电压： $U_O = 0.9U_2$

电感滤波的特点：整流管导通角大，峰值电流小，输出特性比较平坦。缺点是体积大，易引起电磁干扰，适合于低电压、大电流的场合。

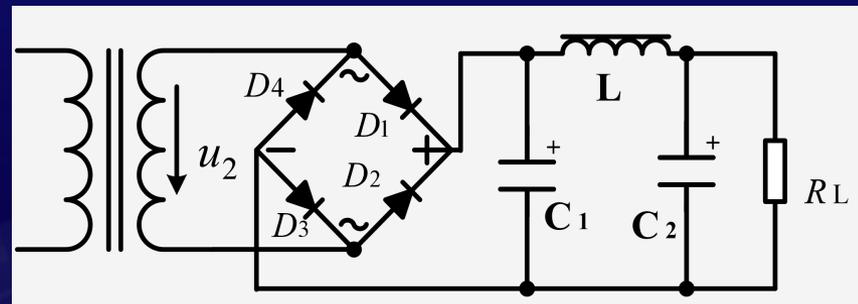


输出电压波形

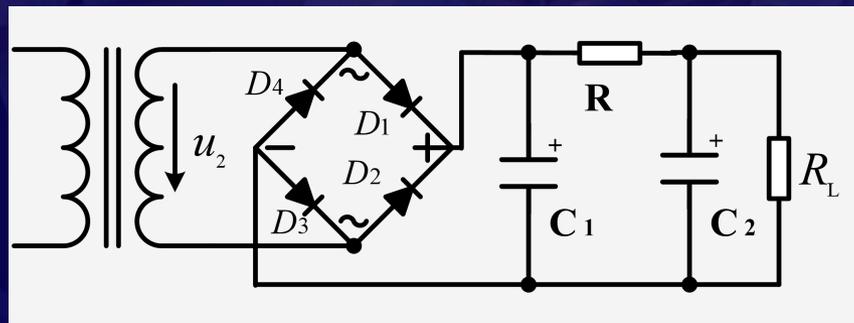
五、复式滤波电路



LC滤波电路



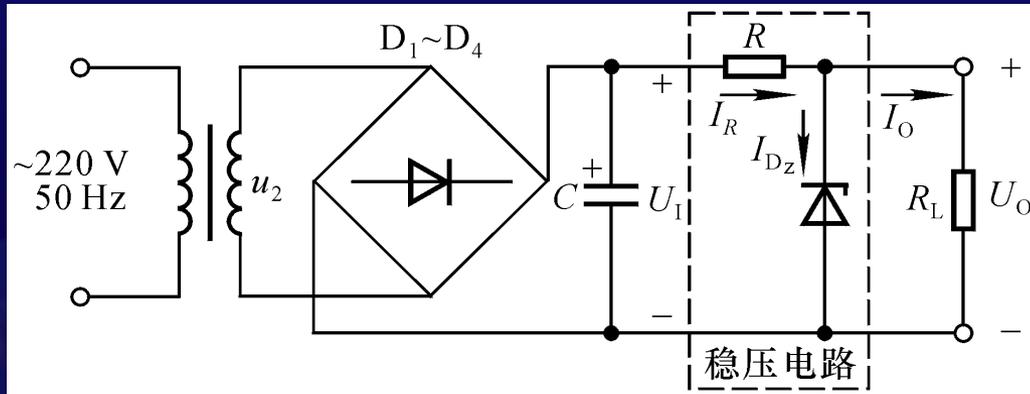
π 型LC滤波电路



π 型RC滤波电路



三. 稳压管稳压电路的工作原理(复习)



$$U_I = U_R + U_O$$
$$I_R = I_{Dz} + I_L$$

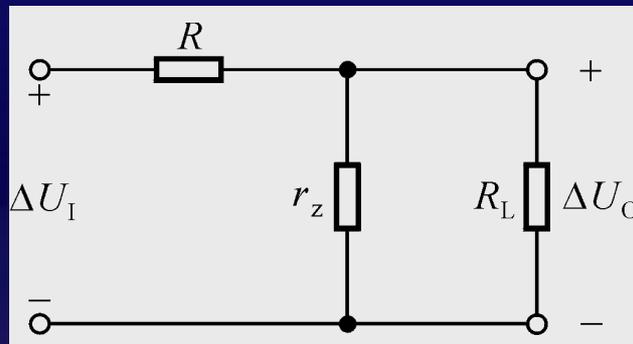
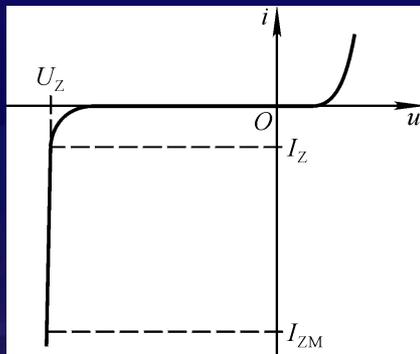
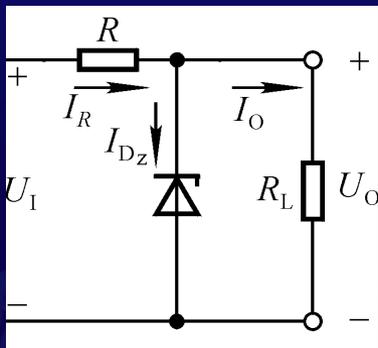
电网电压 $\uparrow \rightarrow U_I \uparrow \rightarrow U_O \uparrow (U_Z) \uparrow \rightarrow I_{Dz} \uparrow \rightarrow I_R \uparrow \rightarrow U_R \uparrow \rightarrow U_O \downarrow$

若 $\Delta U_I \approx \Delta U_R$, 则 U_O 基本不变。利用 R 上的电压变化补偿 U_I 的波动。

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

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。

四、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

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

(4) 输出电阻

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

五、稳压管稳压电路的特点

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。

§ 10.3 串联反馈型线性稳压电路

一、稳压电路的功能和性能指标

1. 稳压电路的功能

稳定输出直流电压

2. 稳压电路的主要性能指标

(1) 稳压系数

$$S_r = \frac{\Delta U_o / U_o}{\Delta U_I / U_I} \Big|_{\Delta I_o = 0, \Delta T = 0}$$

(2) 电压调整率

$$S_U = \left\{ \frac{1}{U_o} \frac{\Delta U_o}{\Delta U_I} \Big|_{\Delta I_o=0, \Delta T=0} \right\} \times 100\%$$

(3) 输出电阻

$$R_o = \frac{\Delta U_o}{\Delta I_o} \Big|_{\Delta U_I=0, \Delta T=0}$$

(4) 电流调整率

$$S_I = \left\{ \frac{\Delta U_o}{U_o} \Big|_{\Delta U_I=0, \Delta T=0} \right\} \times 100\%$$

(5) 输出电压的温度系数

$$S_T = \left\{ \frac{1}{U_o} \frac{\Delta U_o}{\Delta T} \right\}_{\Delta I_o=0, \Delta U_i=0} \times 100\%$$

(6) 纹波电压

稳压电路输出端的交流分量（通常为100Hz）的有效值或幅值。

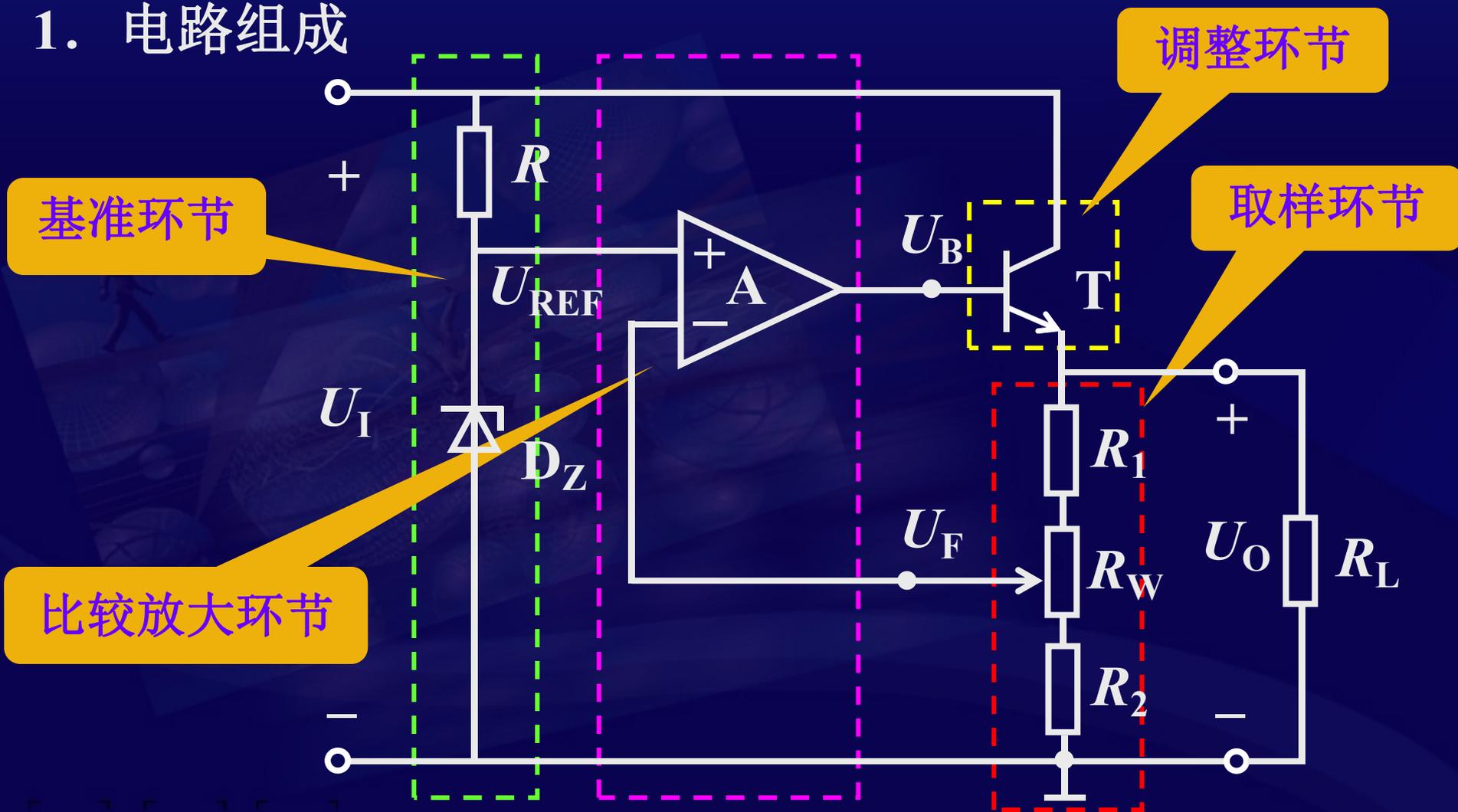
(7) 纹波电压抑制比

输入、输出电压中的纹波电压之比。

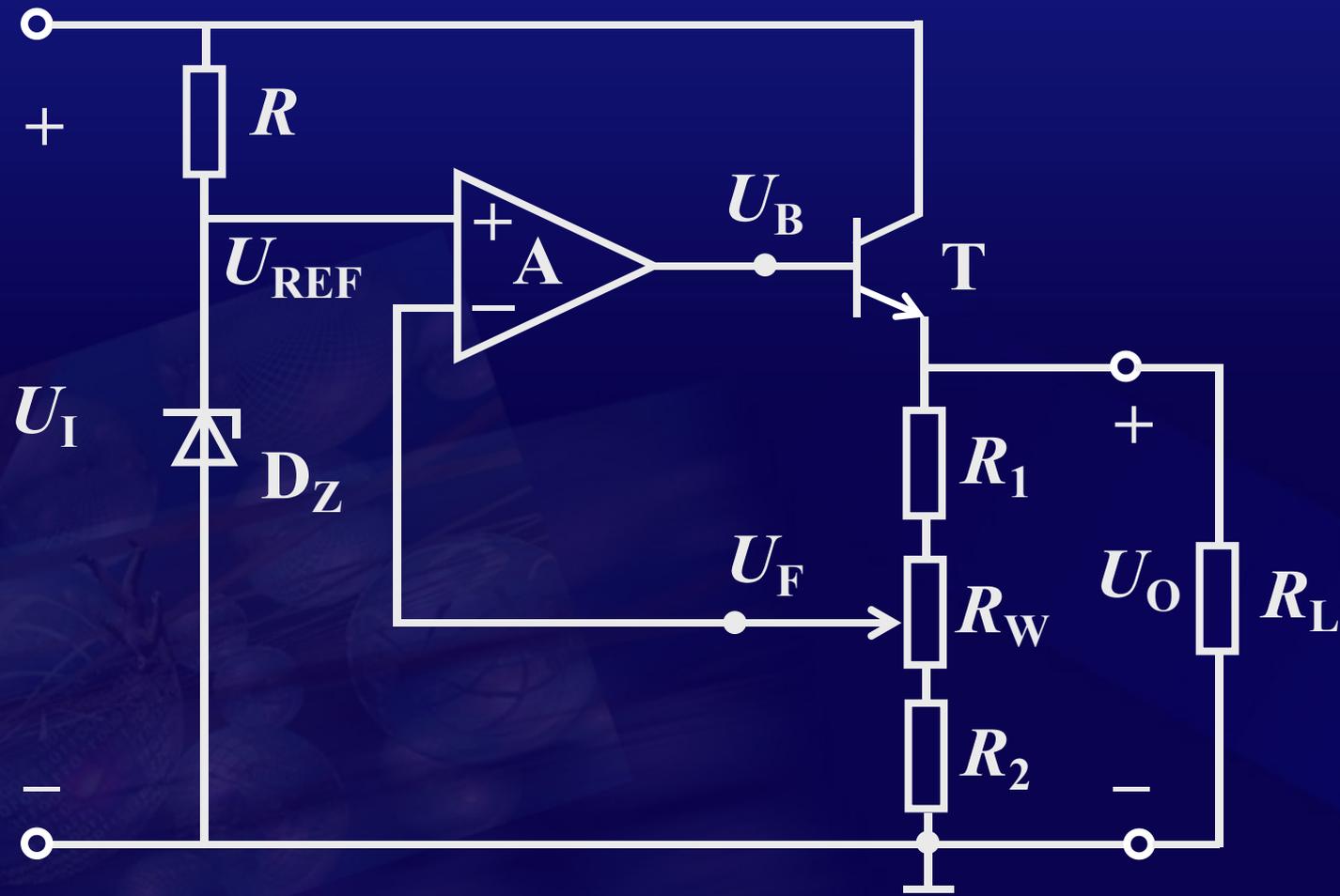
$$S_{rip} = 20 \lg \frac{U_{ipp}}{U_{opp}}$$

二、串联反馈型线性稳压电路的工作原理

1. 电路组成



2. 稳压原理



$U_I \uparrow$ (或 $R_L \uparrow$) $\rightarrow U_O \uparrow \rightarrow U_F \uparrow \rightarrow U_B \downarrow \rightarrow U_{CE} \uparrow$
 $U_O \downarrow \leftarrow \dots \leftarrow$

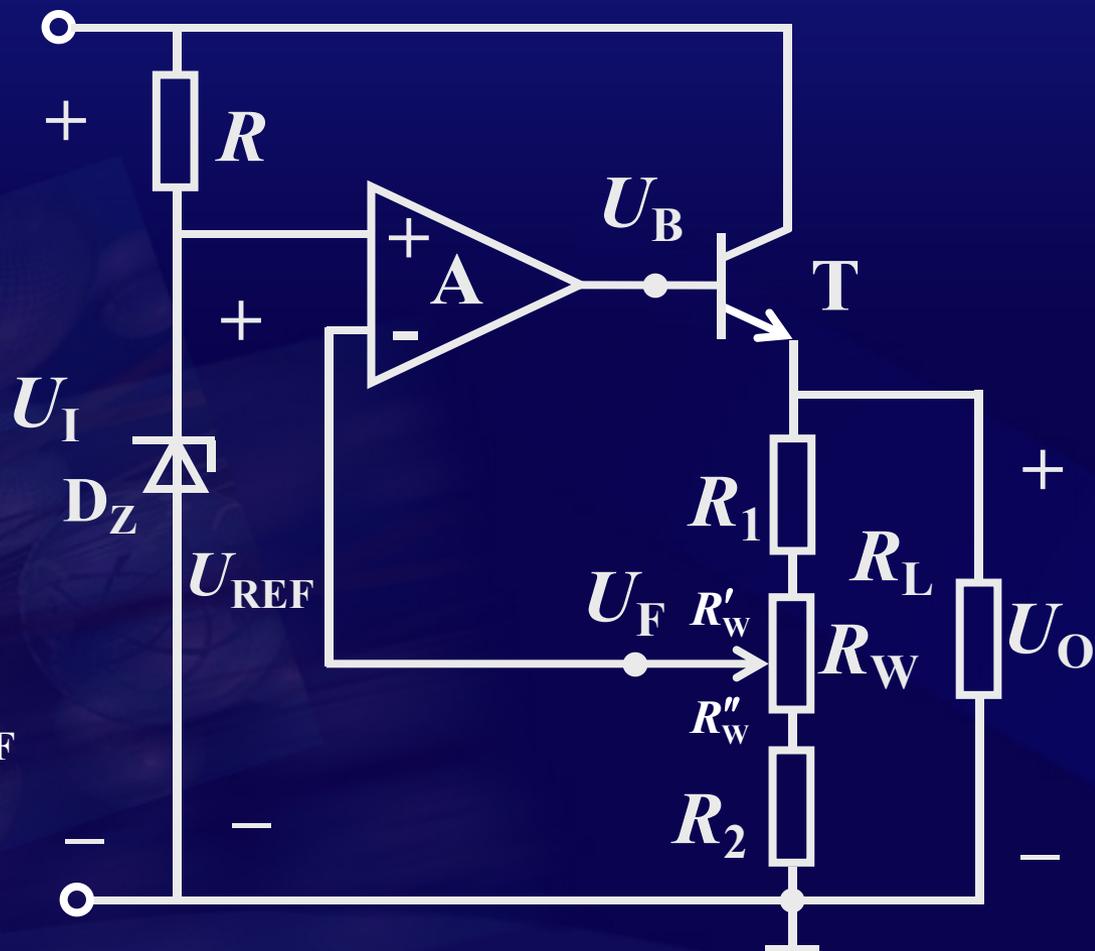


3. 输出电压

$$U_O = \frac{R_1 + R_W + R_2}{R_2 + R''_W} U_{REF}$$

$$U_{Omin} = \frac{R_1 + R_W + R_2}{R_2 + R_W} U_{REF}$$

$$U_{Omax} = \frac{R_1 + R_W + R_2}{R_2} U_{REF}$$



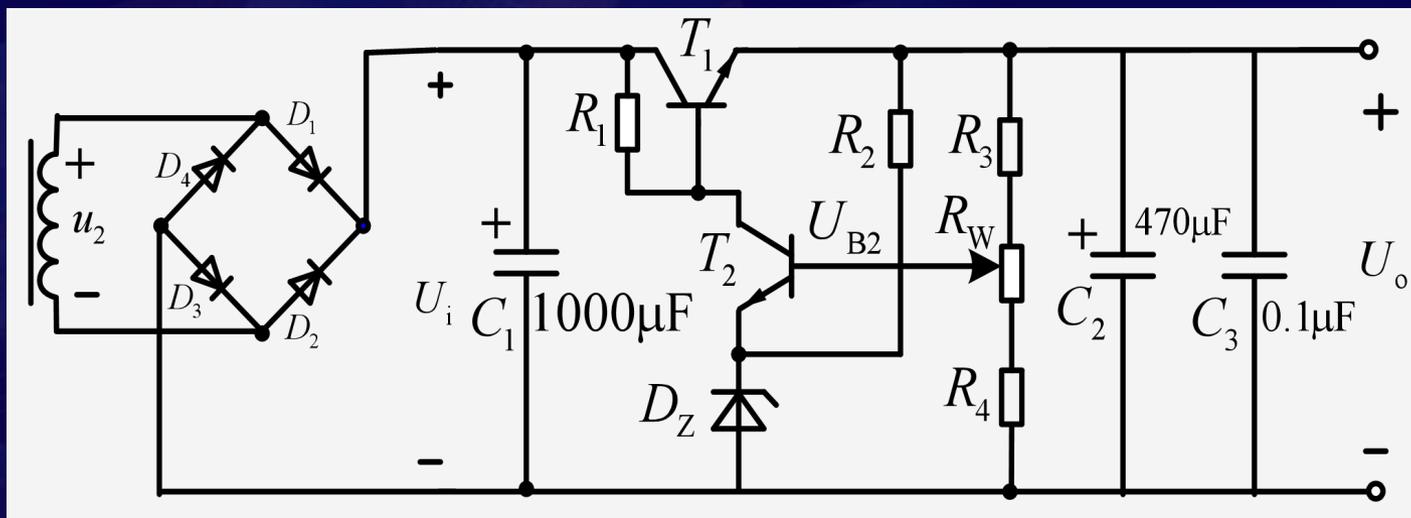
4. 调整管参数选取原则

$$(1) \quad I_{CM} > I_{Omax}$$

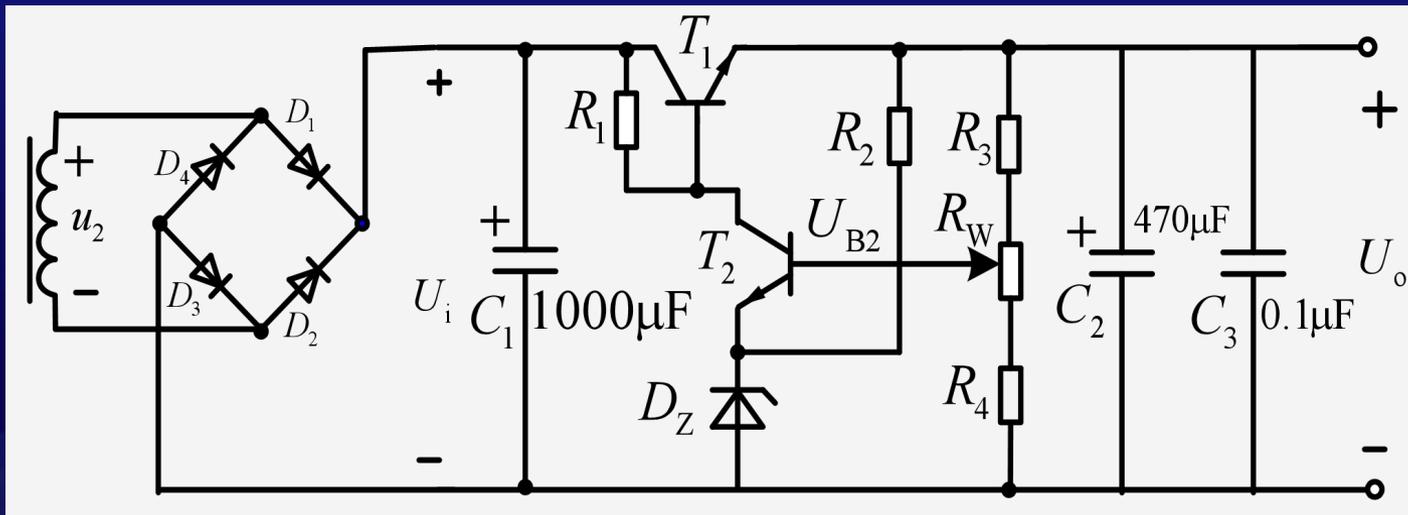
$$(2) \quad P_{CM} > U_{CE(max)} I_{O(max)}$$

$$(3) \quad U_{(BR)CEO} > U_{CE(max)}$$

【例题3】 如图所示电路。已知稳压管 D_Z 的稳定电压 $U_Z=5.3V$ ，晶体管 $U_{BE}=0.7V$ ，电阻 $R_3=R_4=1.5K\Omega$ 。①试说明该直流稳压电源电路中各部分电路由哪些元件组成；②若要求 R_W 的滑动端在最下端时 $U_0=15V$ ，求 R_W 的值；③求 R_W 的滑动端在最上端时的 U_0 值。



解：①由四个二极管构成桥式全波整流电路；由电容 C_1 构成电容滤波电路；由 T_1 、 T_2 、 D_Z 、 R_3 、 R_4 和 R_W 构成串联稳压电路。



②若要求 R_W 的滑动端在最下端时 $U_o=15V$ ，则

$$U_{B2} = U_o \frac{R_4}{R_3 + R_4 + R_W} = 15 \times \frac{R_4}{R_3 + R_4 + R_W} = U_{BE2} + U_Z = 6V$$

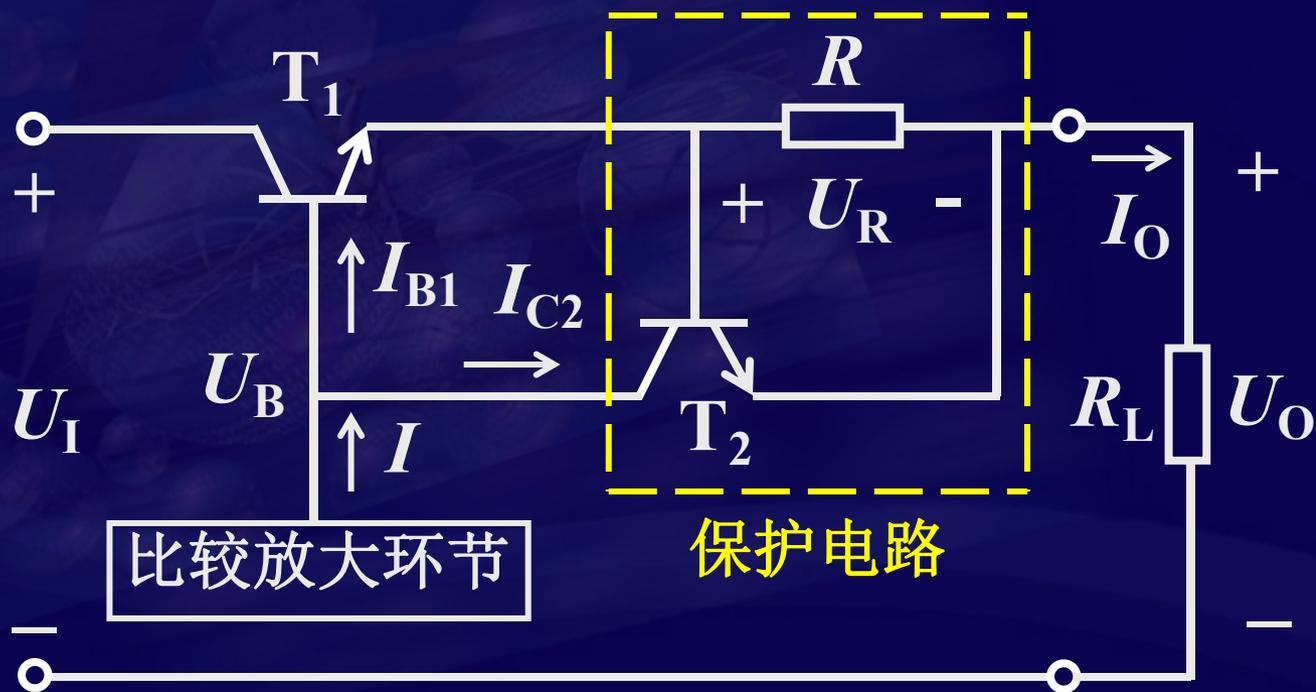
➡ $R_W = 0.75k\Omega$

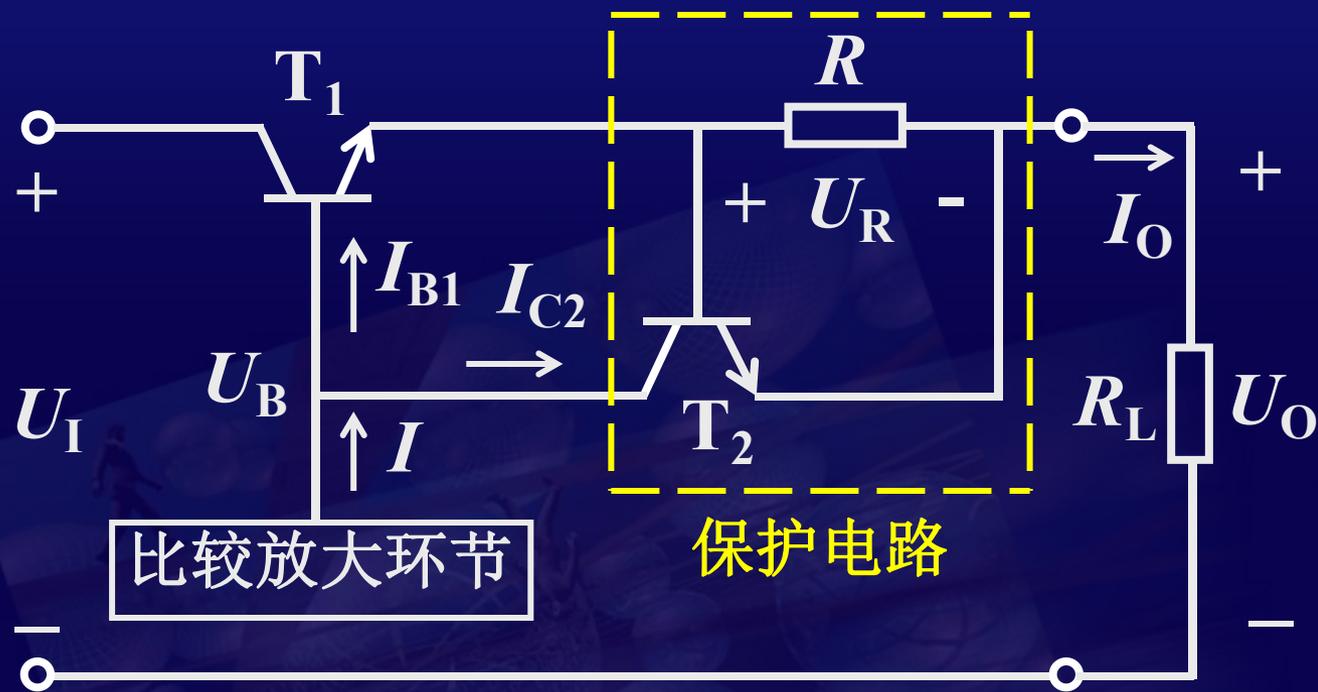
③ R_W 的滑动端在最上端时

$$U_{B2} = U_o \frac{R_4 + R_W}{R_3 + R_4 + R_W} = U_{BE2} + U_Z = 6V \quad \text{➡} \quad U_o = 10V$$

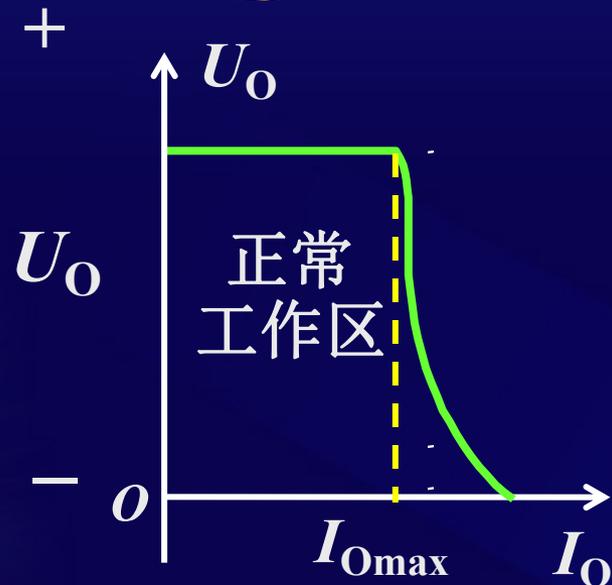
5. 限流保护电路

限流型过流保护电路





电路外特性

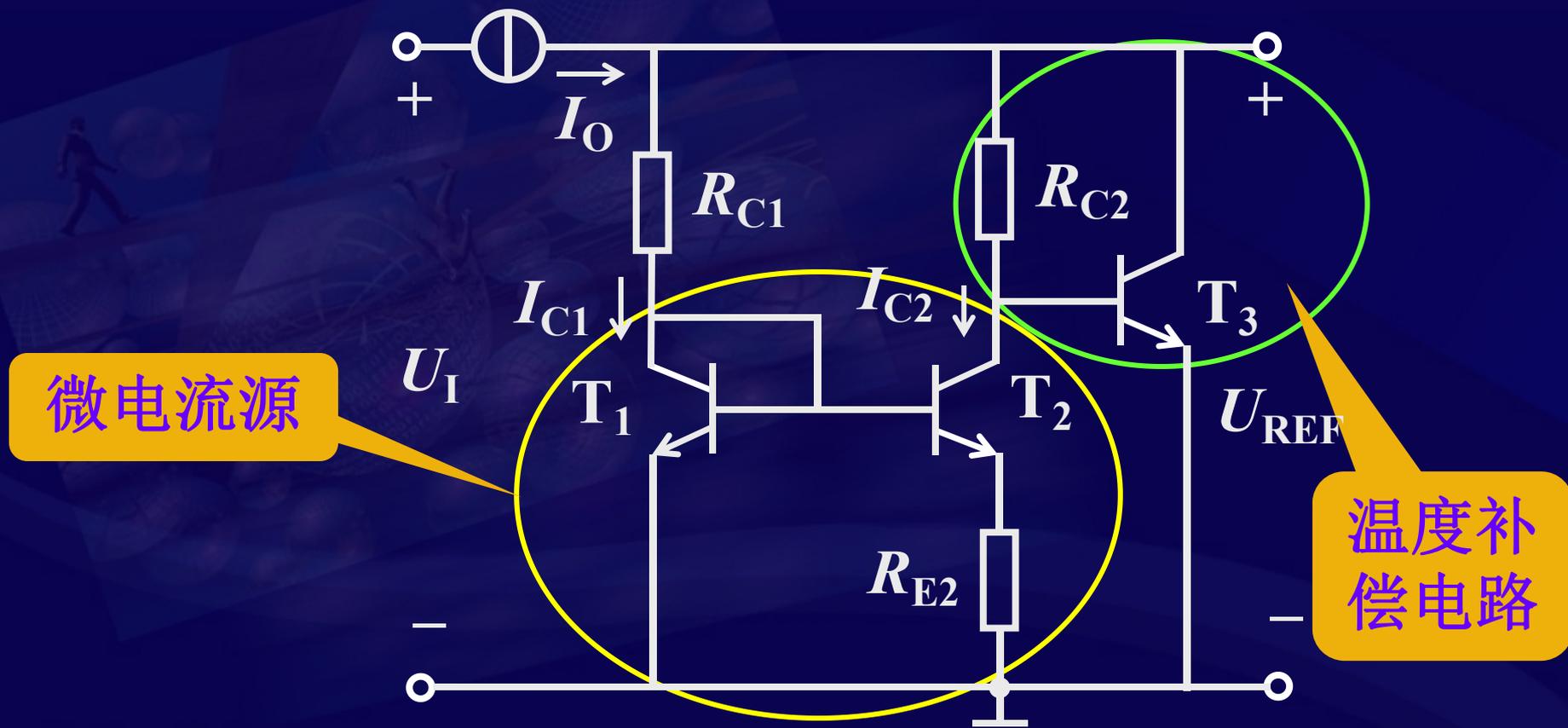


工作原理:

- (1) 当 I_O 较小时, $U_R < U_{BE2}$, T_2 截止, 电路正常工作。
- (2) 当 I_O 增大, T_2 导通。 I_{B1} 减小, 限制了 I_O 的增大。

三、高精度基准电压源

1. 电路组成



2. 工作原理

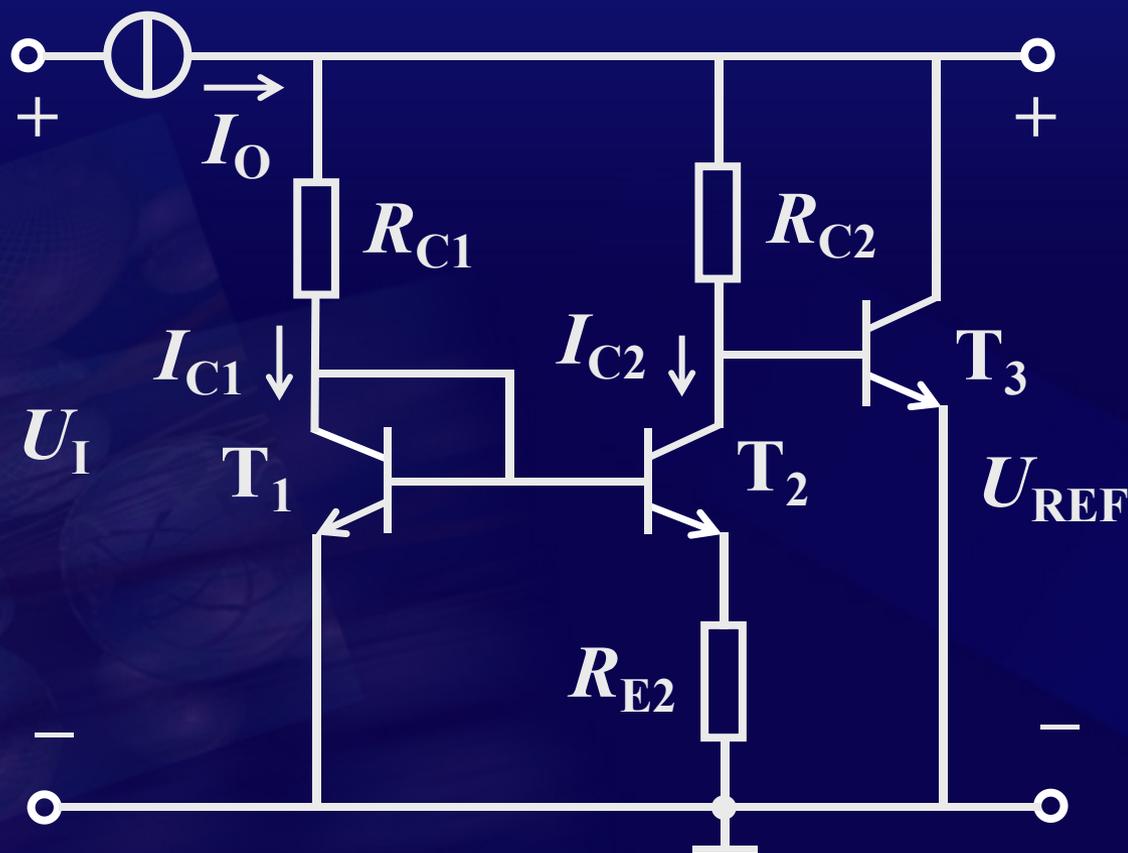
图中

$$U_{\text{REF}} = U_{\text{BE3}} + I_{\text{C2}} R_{\text{C2}}$$

$$I_{\text{C2}} = \frac{U_T}{R_{\text{E2}}} \ln\left(\frac{I_{\text{C1}}}{I_{\text{C2}}}\right)$$

由此可得

$$U_{\text{REF}} = U_{\text{BE3}} + \frac{R_{\text{C2}} U_T}{R_{\text{E2}}} \ln\left(\frac{I_{\text{C1}}}{I_{\text{C2}}}\right)$$



由式 $U_{\text{REF}} = U_{\text{BE3}} + \frac{R_{\text{C2}}U_T}{R_{\text{E2}}} \ln\left(\frac{I_{\text{C1}}}{I_{\text{C2}}}\right)$ 可知

如果合理地选择 $I_{\text{C1}}/I_{\text{C2}}$ 和 $R_{\text{C2}}/R_{\text{E2}}$ 的值，使正温度系数的电压 $I_{\text{C2}}R_{\text{C2}}$ 正好补偿负温度系数电压的 U_{BE3} ，可获得零温度系数的基准电压。

基准电压为

$$U_{\text{REF}} = U_{\text{g0}} = 1.205\text{V}$$

式中

U_{g0} 为硅材料在 0K 时禁带宽度(能带间隙)的电压值。



四、集成三端稳压器

1. 固定式集成三端稳压器

(1) 外形图

外形图

78系列

1 ——— 输入端

2 ——— 公共端

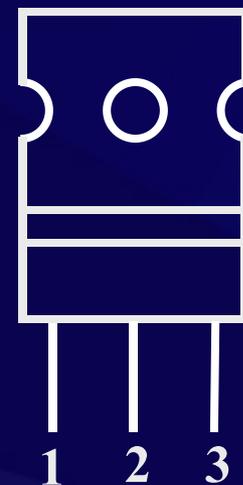
3 ——— 输出端

79系列

1 ——— 公共端

2 ——— 输入端

3 ——— 输出端



(2) 固定式集成三端稳压器的型号

a. 78×× (输出正电压) 系列

b. 79×× (输出负电压) 系列

×× —— 输出电压的标称值

输出电压种类

5V、6V、9V、12V、15V、18V和24V。



输出电流分为三个档次

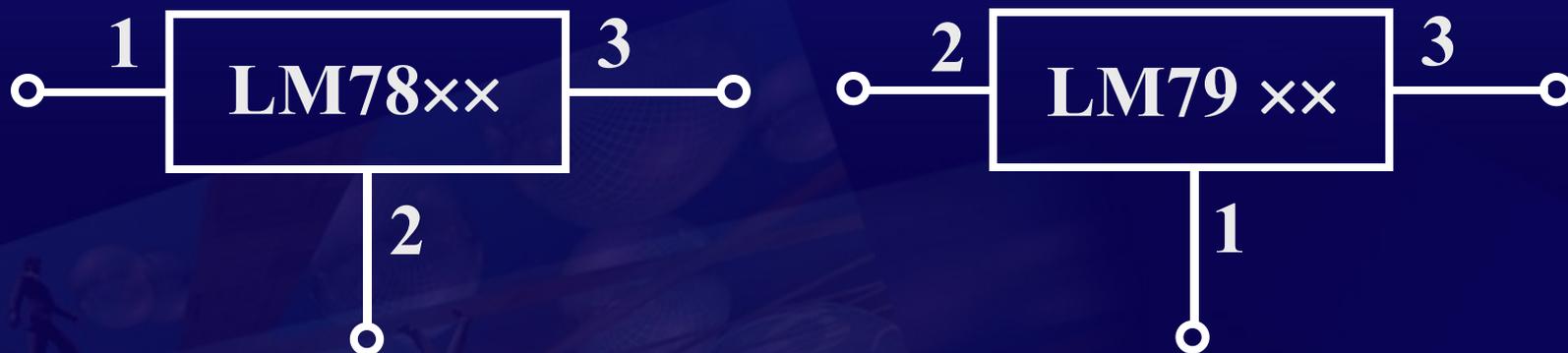
a. LM78XX, 最大输出电流为1A。

b. LM78MXX, 最大输出电流为0.5A。

c. LM78LXX, 最大输出电流为0.1A。

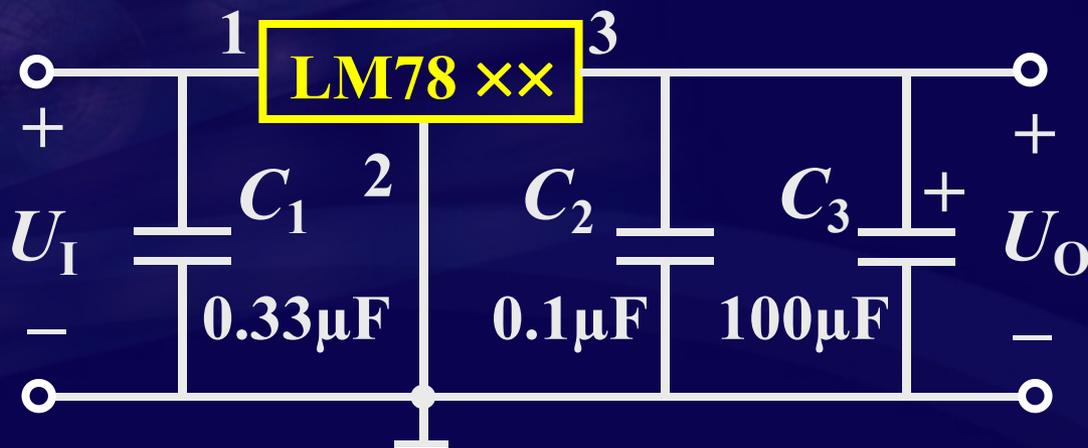


(3) 稳压器电路符号

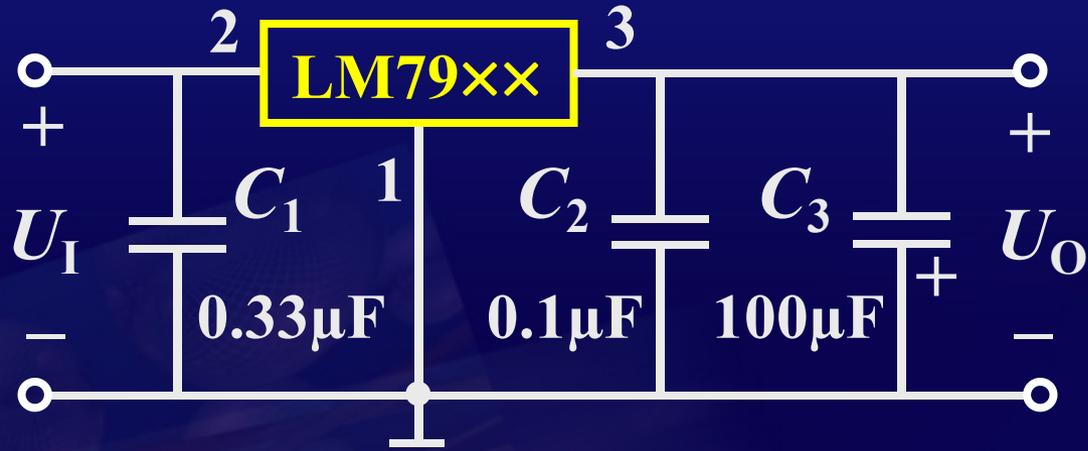


(4) 固定式三端稳压器的典型接法

a. 78系列



b. 79系列



各电容器的作用

C_1 防止自激振荡

C_2 减小高频干扰

C_3 减小输出纹波和低频干扰

五、共地干扰及其解决方法

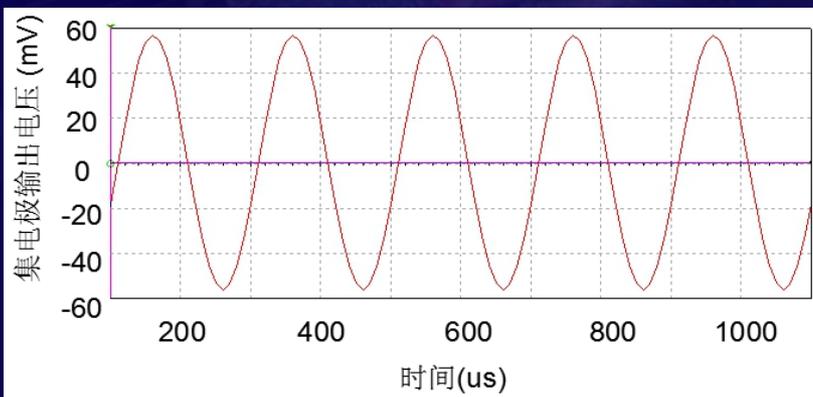
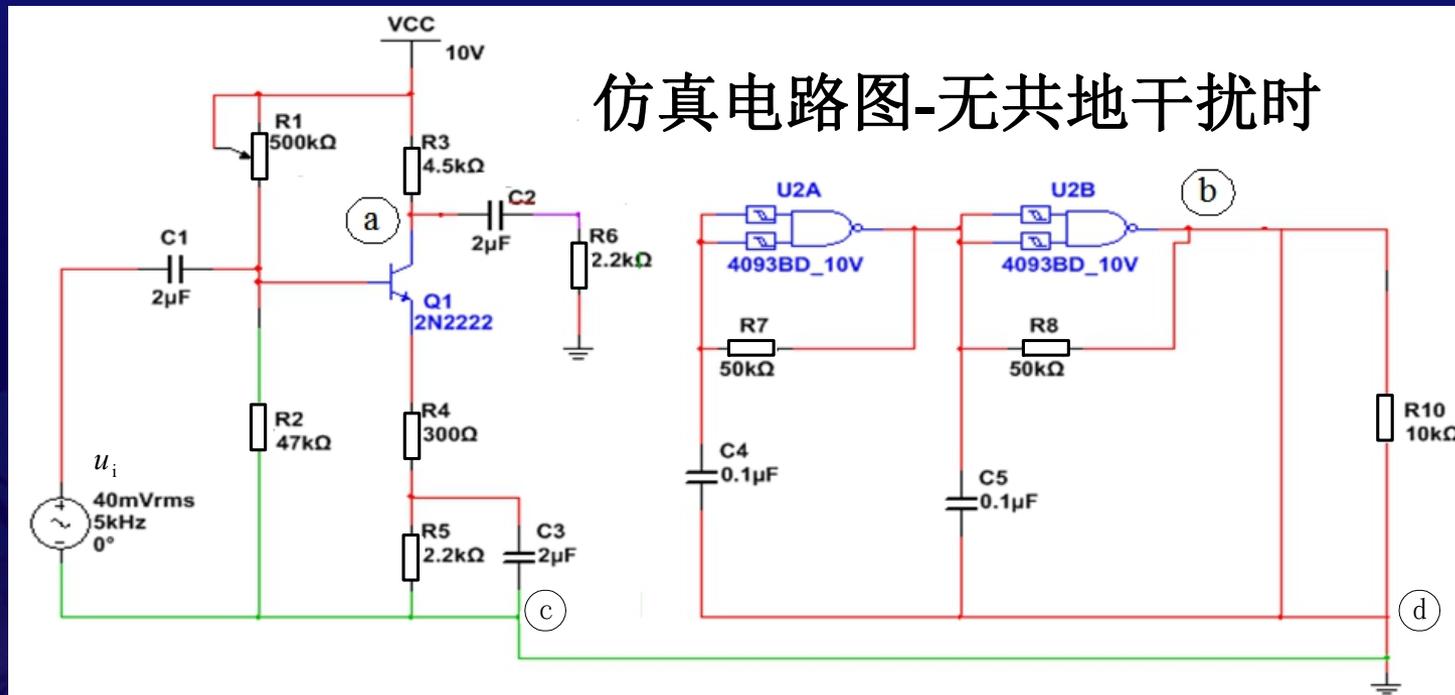
地线分类

	热地： 开关电源中连接开关器件部分的高频高压电路公共参考电位点，所流经的电流为高频脉冲电流
	冷地： 被供电的电路(电源负载)的公共参考电位点，所流经的电流是直流电压在电路中产生的直流电流

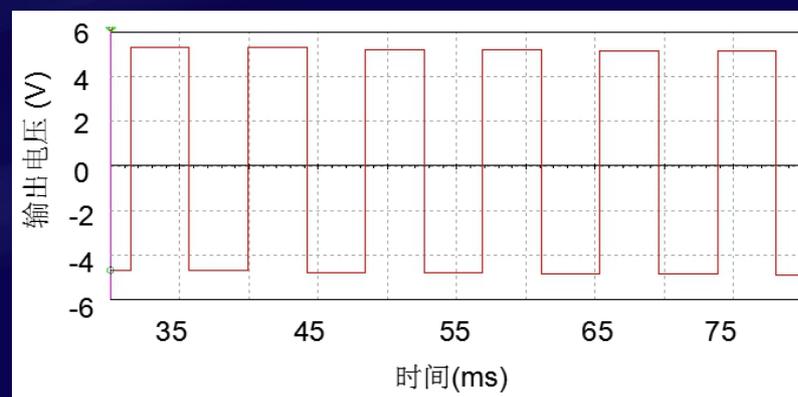
“冷地”与“热地”之间的连接：通过隔离电容连接；
作用：用于为 N_1 （高频脉冲变压器 T_r 的一次侧）与 N_2 （高频脉冲变压器 T_r 的二次侧）之间的高频谐波干扰提供接地回路。



1、电路中的共地问题

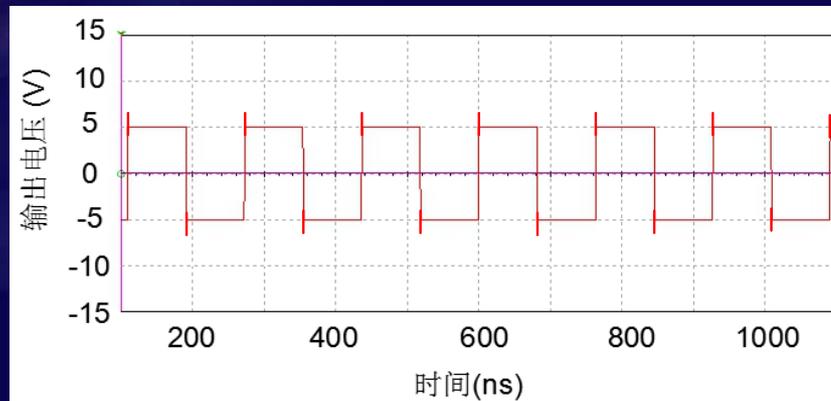
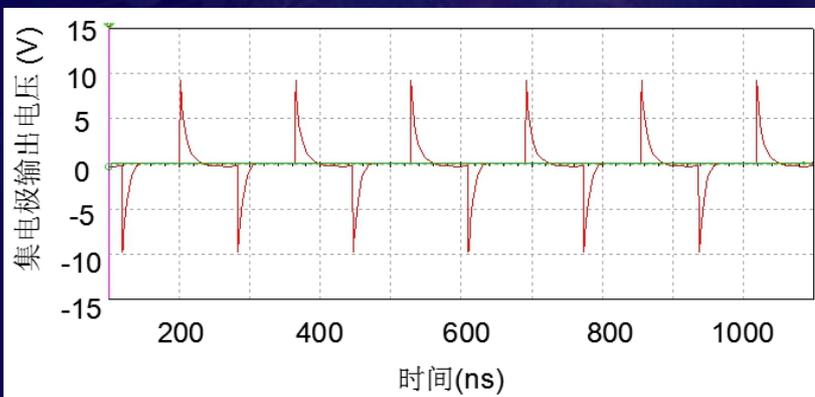
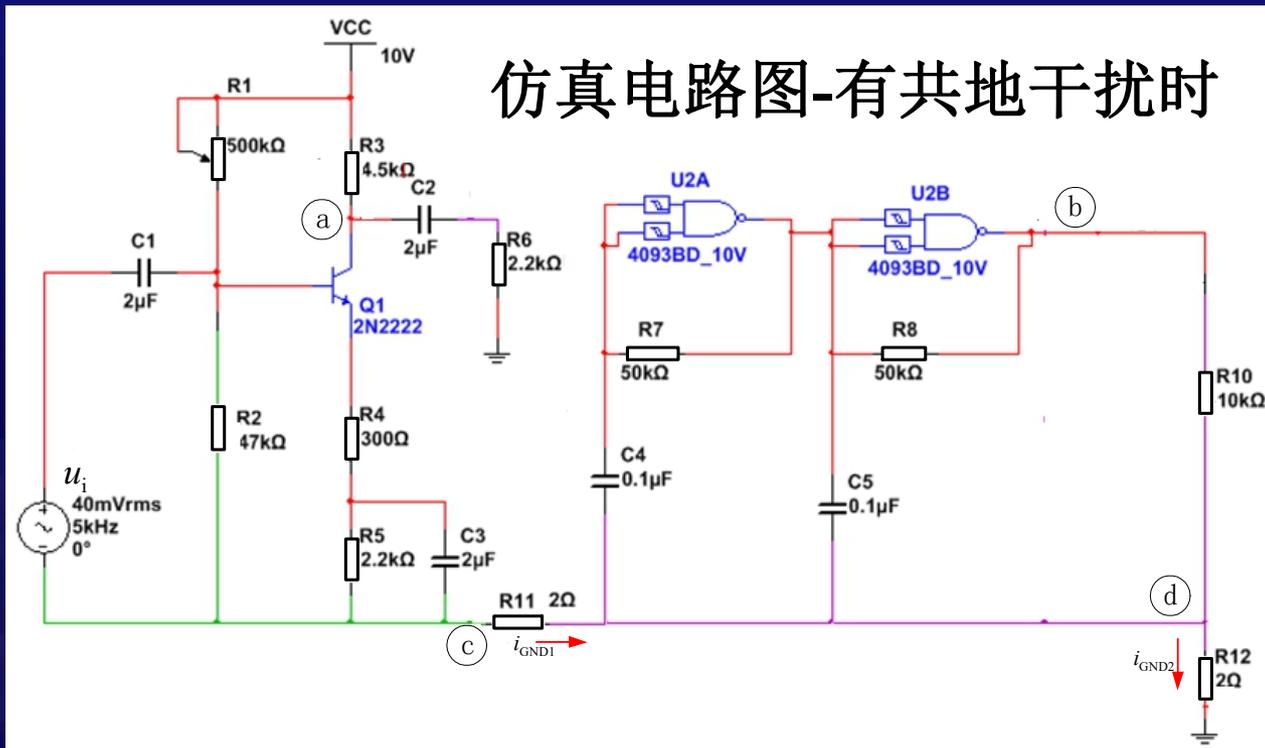


单点接地时Ⓐ点的波形($f \approx 5\text{kHz}$)



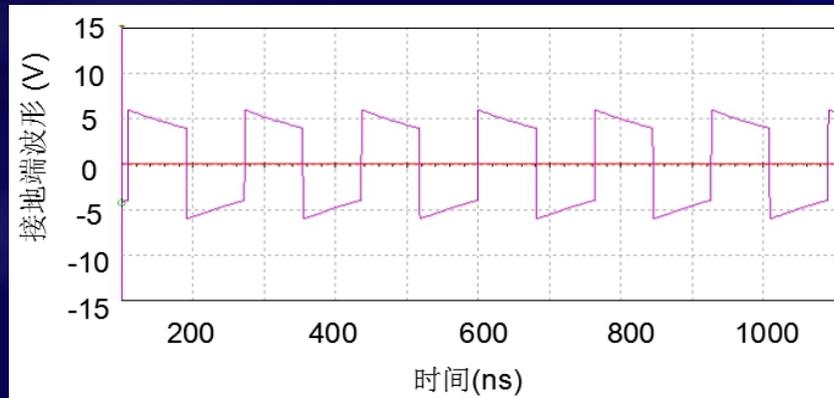
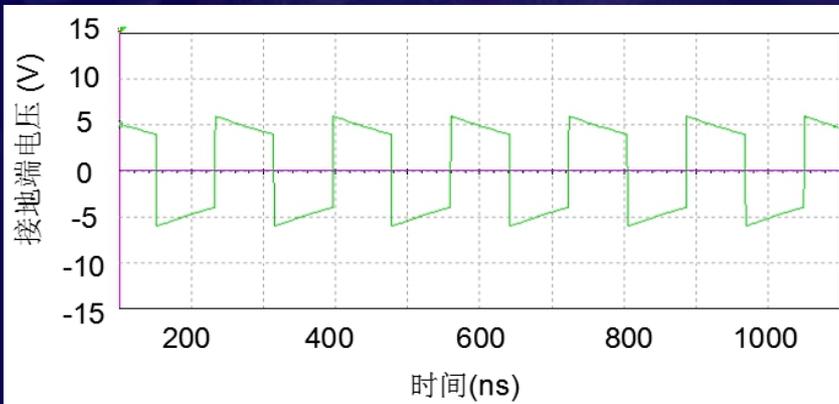
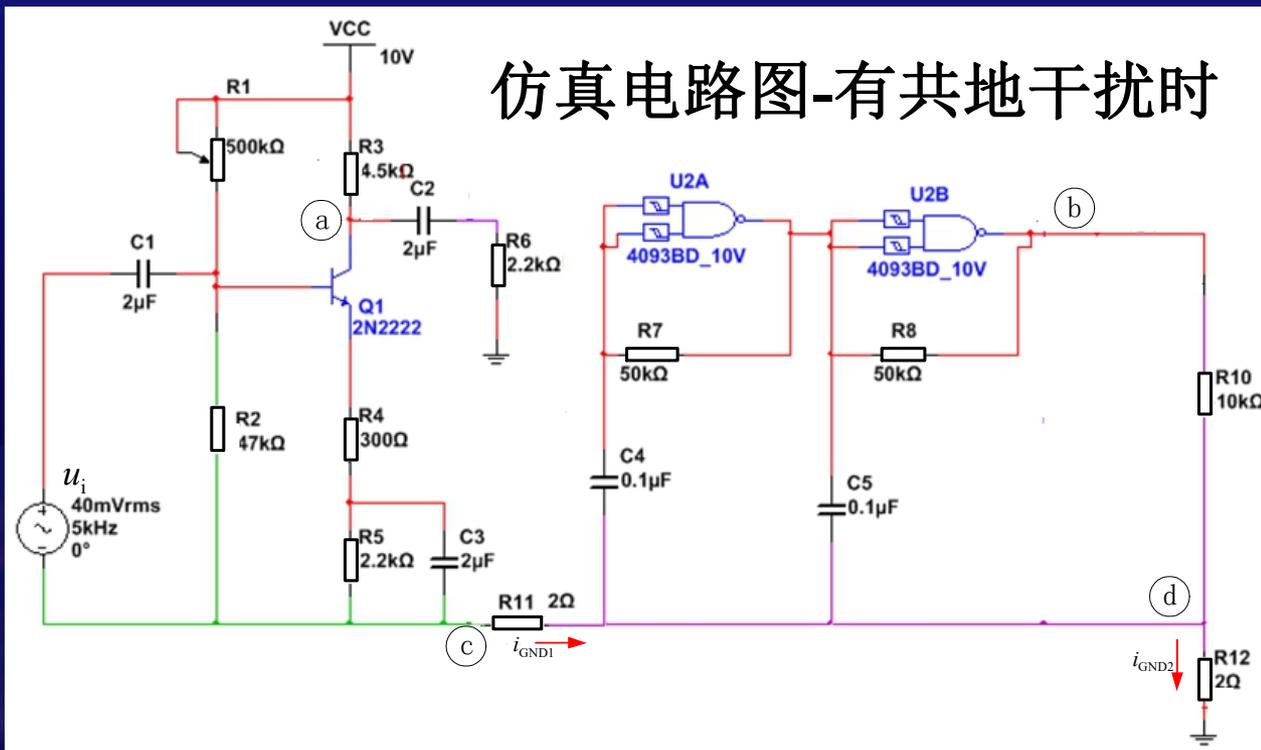
单点接地时Ⓑ点的波形($f \approx 100\text{Hz}$)

仿真电路图-有共地干扰时



考虑共地电阻的影响时①点的波形 考虑共地电阻的影响时②点的波形

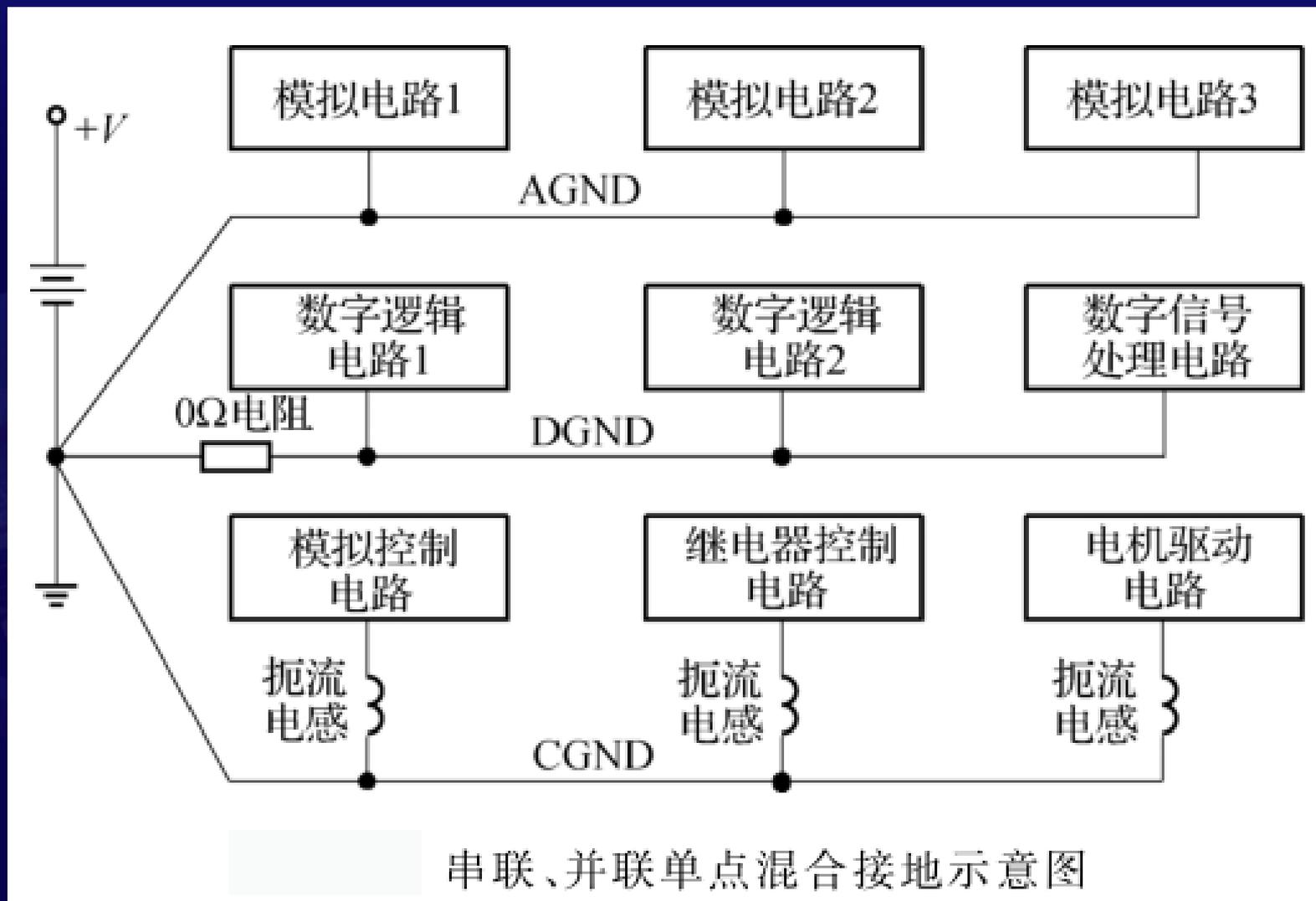
仿真电路图-有共地干扰时

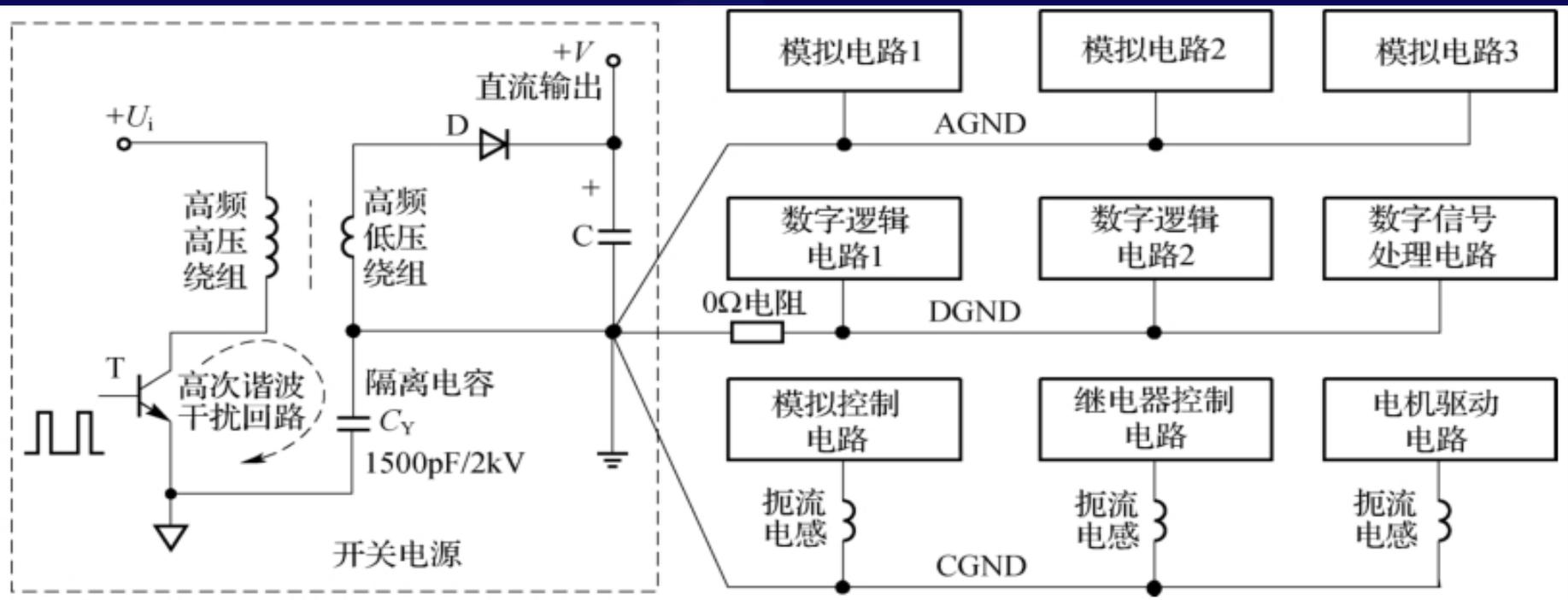


考虑共地电阻的影响时©点的波形

考虑共地电阻的影响时©点的波形

2、解决电路系统中共地干扰的办法





与开关电源连接时串联, 并联单点混合接地示意图

谢谢大家!

