

10 直流稳压电源

10.1 概述

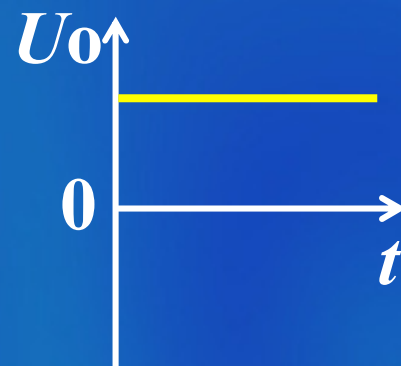
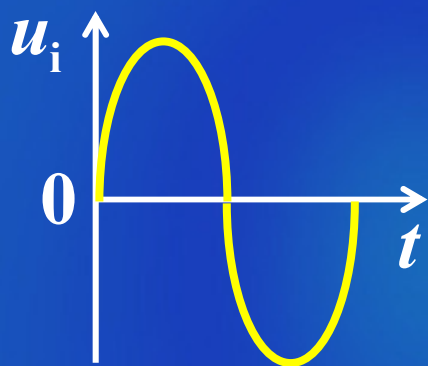
电子设备需要直流电源

直流稳压电源的功能

交流电源



直流电源

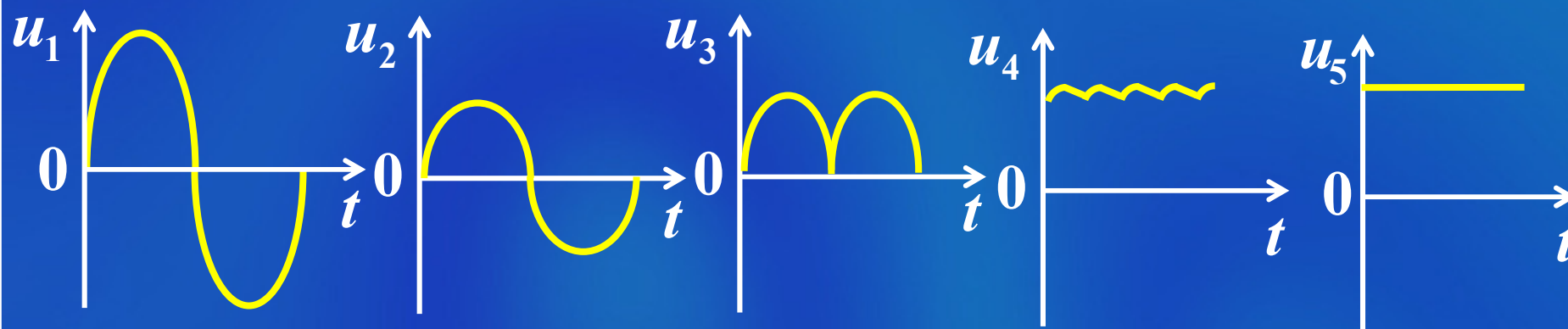
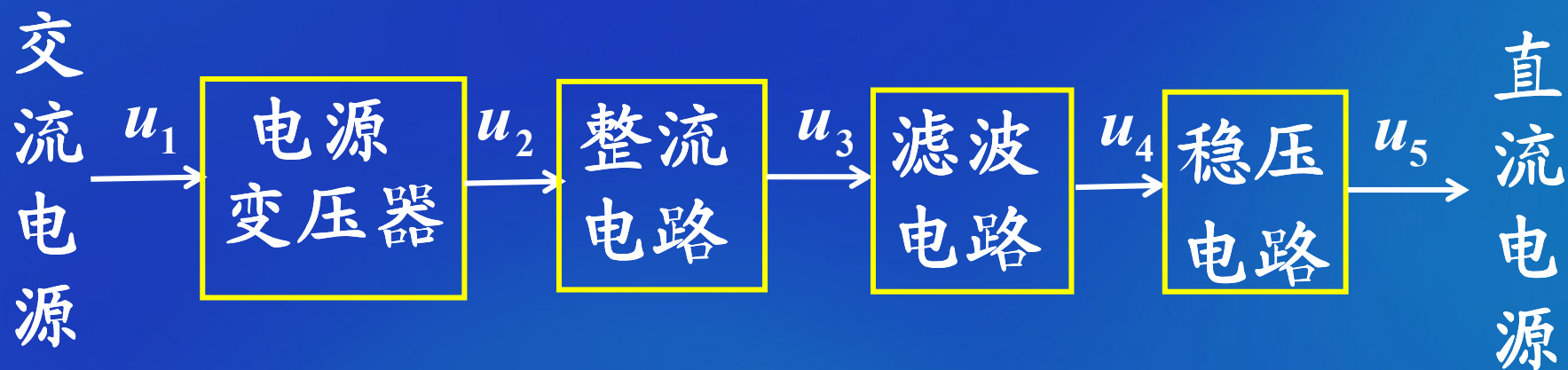


上页

下页

后退

直流稳压电源的组成方框图



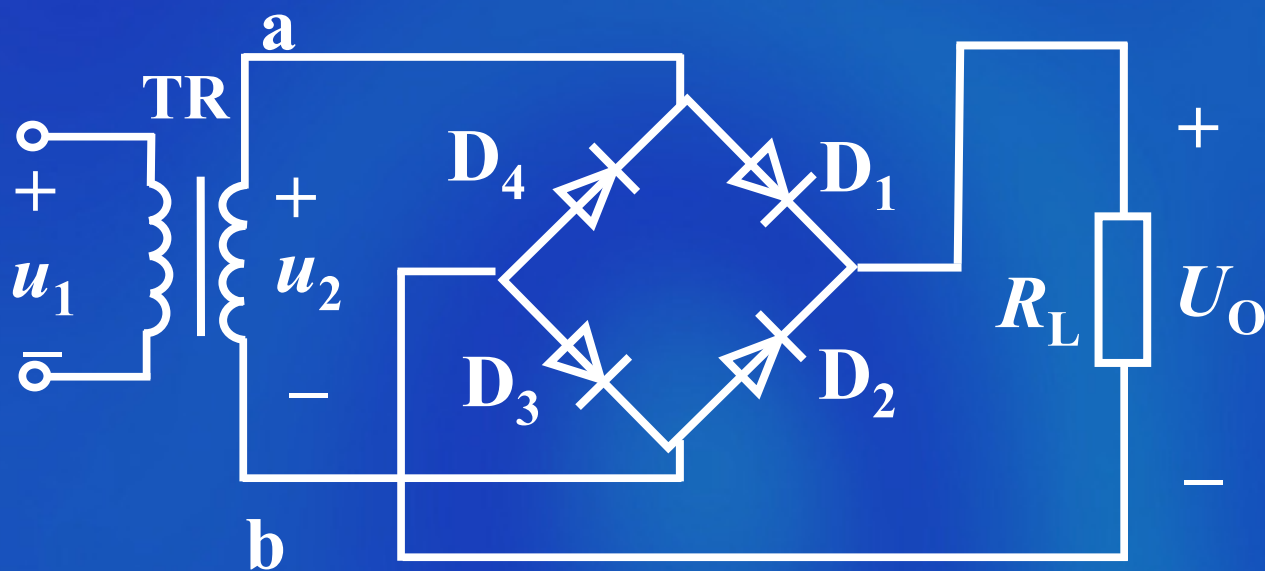
10.2 单相整流及电容滤波电路

10.2.1 单相桥式整流电路 设

1. 电路组成

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

(b) 二极管 $D_1 \sim D_4$ 性能理想

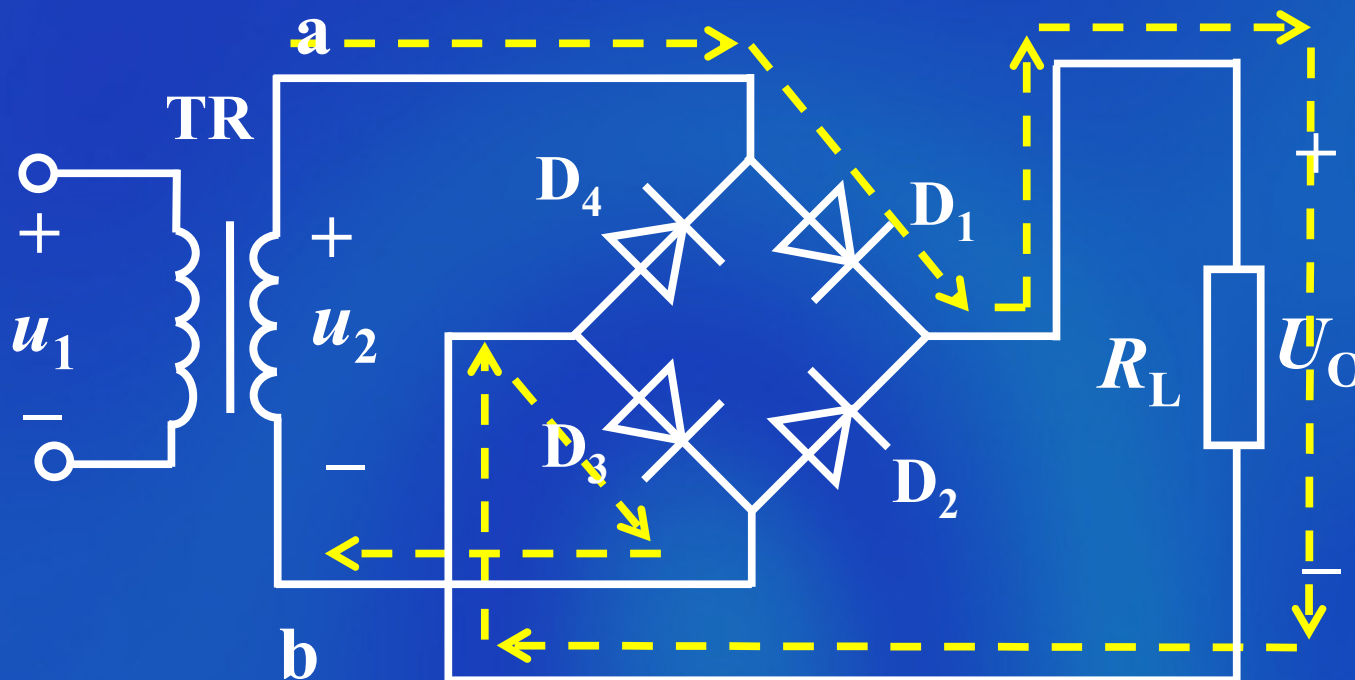


1. 工作原理

a. 当 $u_2 > 0$ 时

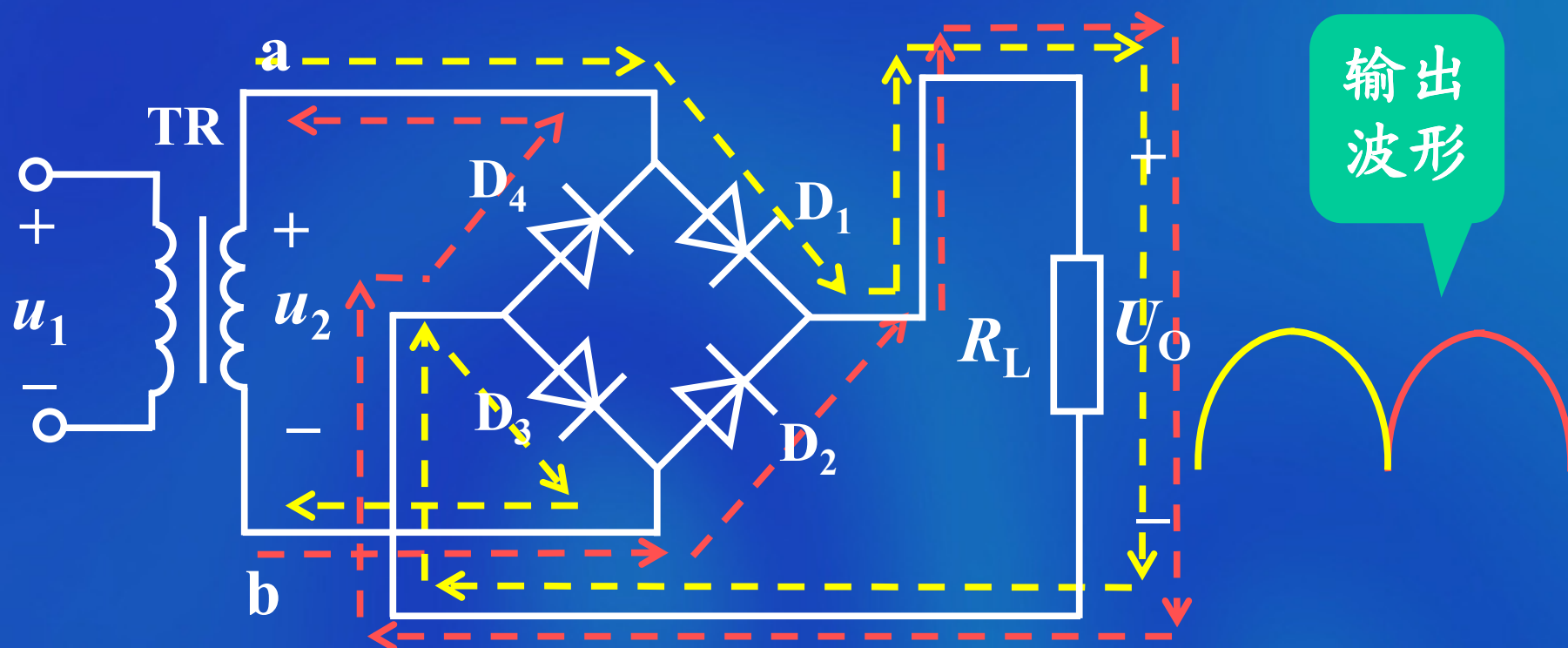
电流流动方向

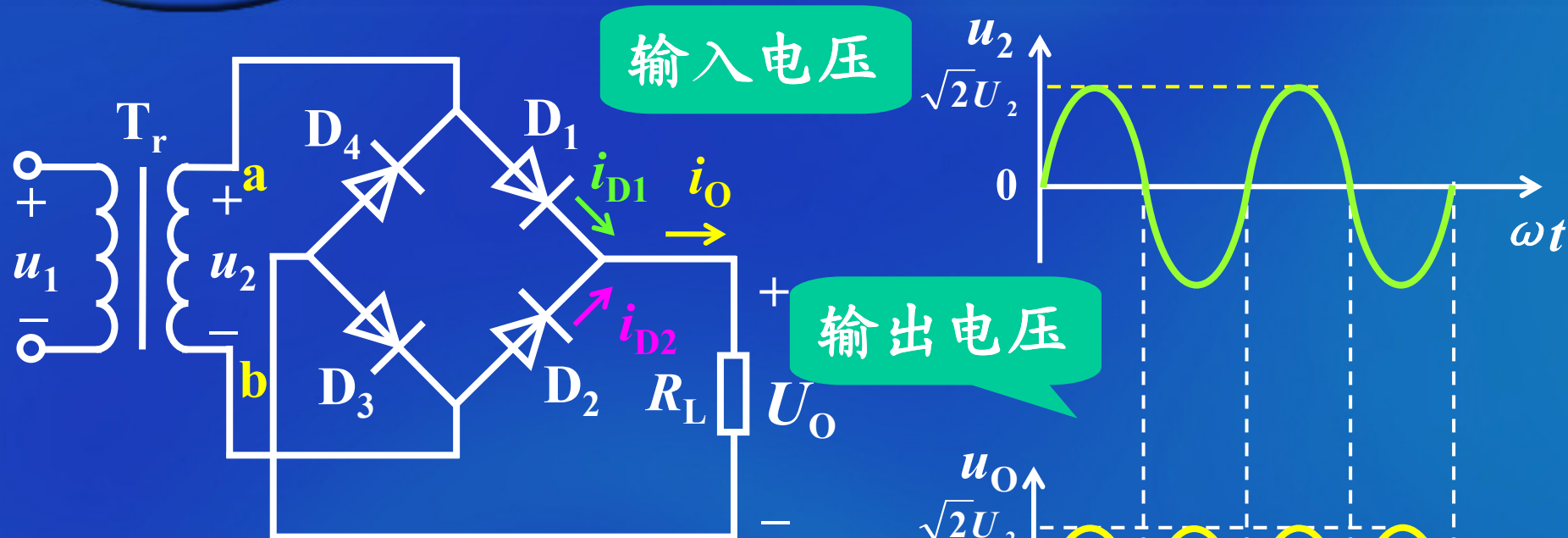
输出
波形



b. 当 $u_2 < 0$ 时

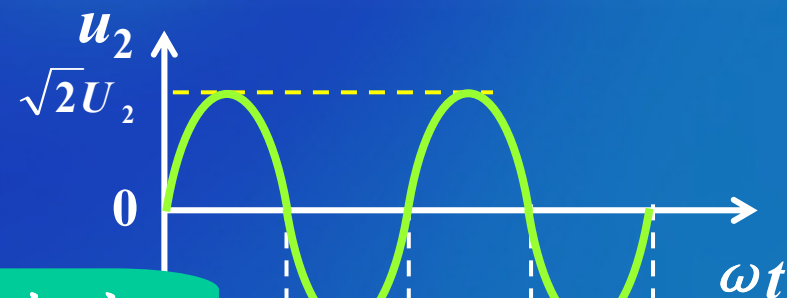
电流流动方向



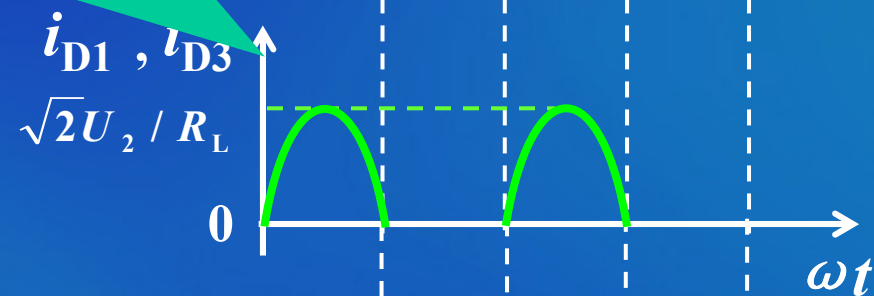


2. 信号波形

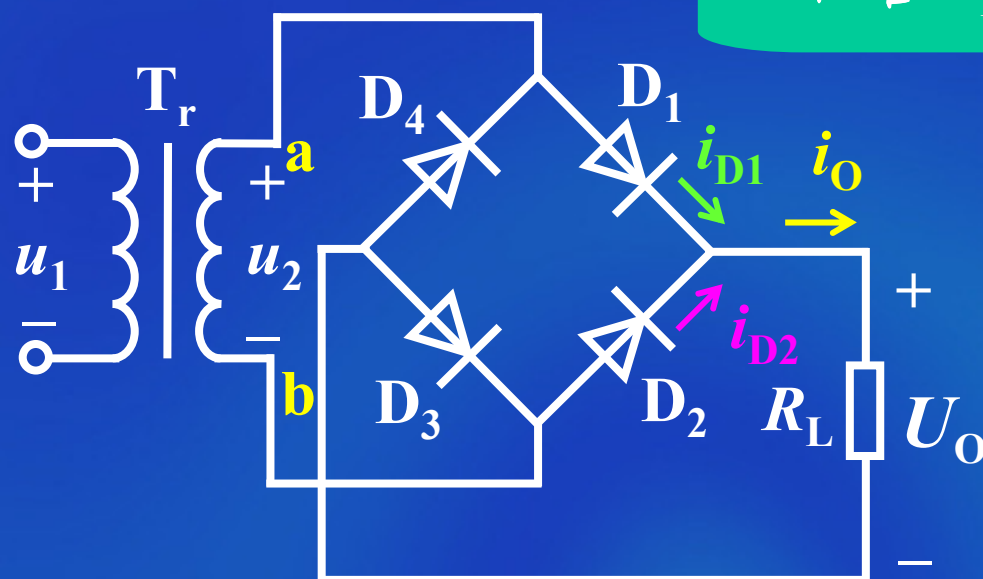
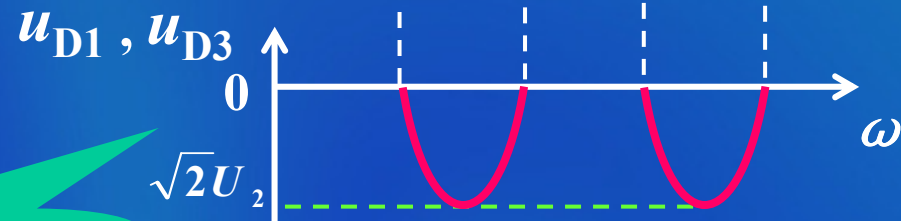
输入电压



二极管 D_1 、 D_3 电流

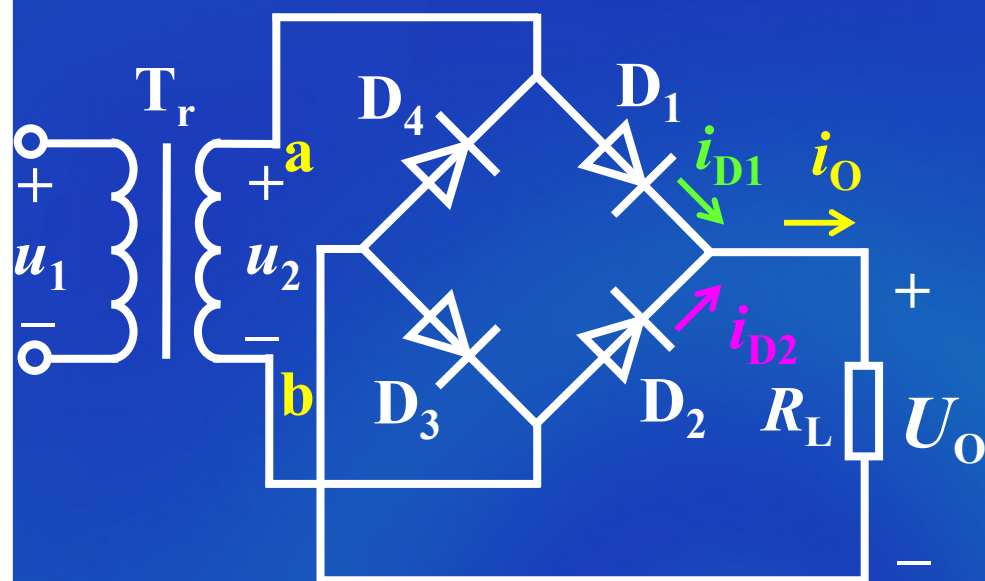


二极管 D_2 、 D_4 电压



思考题

1. 如果 D_1 开路或者短路，输出电压如何变化？



D_1 开路: 半波整流，输出电压平均值减小；

D_1 短路: 短接变压器二次侧，烧毁二极管 D_2 和变压器；

2. 如果有二极管有一个接反，后果如何？

会出现两个正偏二极管并接的情况，短接变压器二次侧，烧毁二极管和变压器，输出电压为零。

3. 主要性能指标

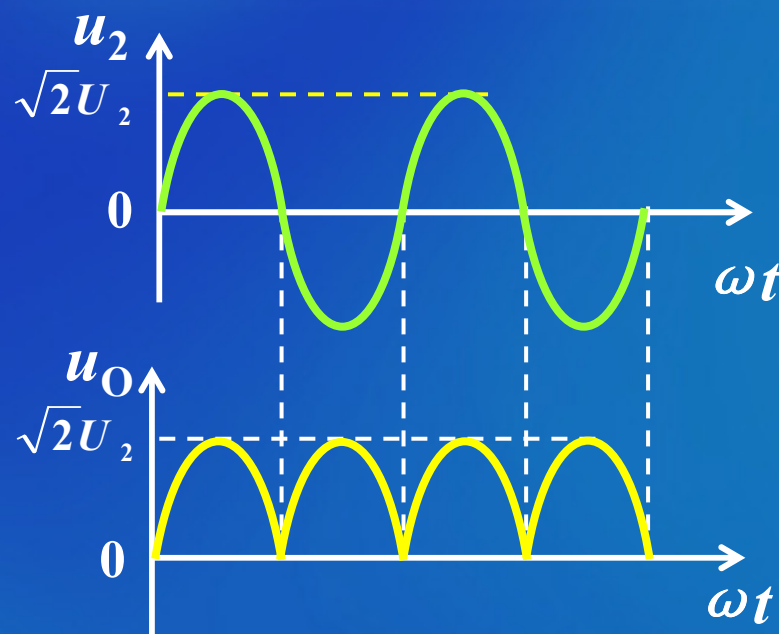
(1) 整流输出直流电压

因为输出电压

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

输出直流电压

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



(2) 输出电压纹波因数 γ

定义

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

式中

U_{or} ——输出电压中各次谐波电压有效值的总和

U_o ——输出电压的平均值

对于全波整流电路

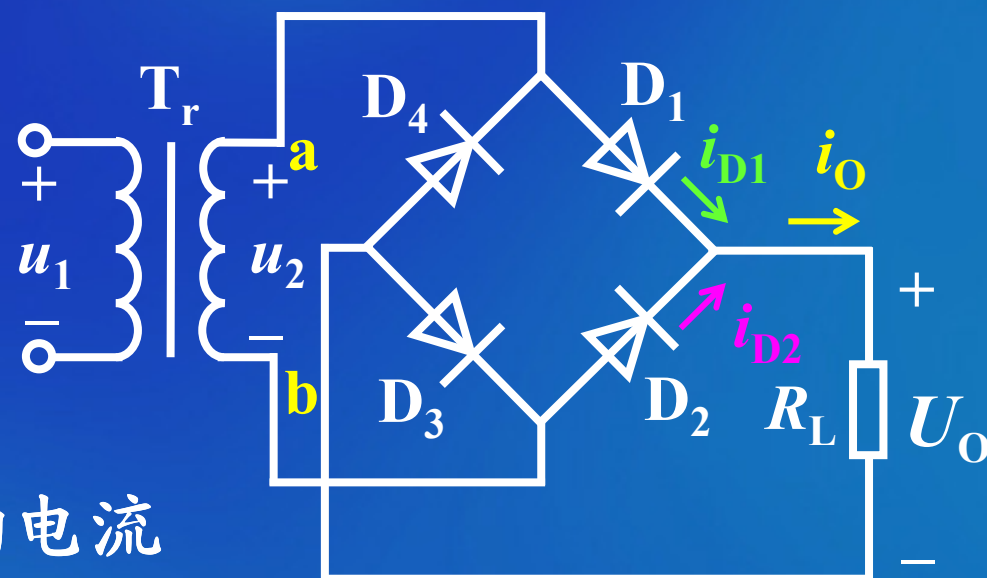
由于

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

$$\begin{aligned} U_{or} &= \sqrt{U_{o2}^2 + U_{o4}^2 + U_{o6}^2 + \Lambda} \\ &= \sqrt{U_2^2 - U_o^2} \end{aligned}$$

故

$$\gamma = \frac{U_{or}}{U_o} = \frac{\sqrt{U_2^2 - U_o^2}}{U_o} = \sqrt{\left(\frac{U_2}{U_o}\right)^2 - 1} = 0.483$$



(3) 整流二极管的正向平均电流

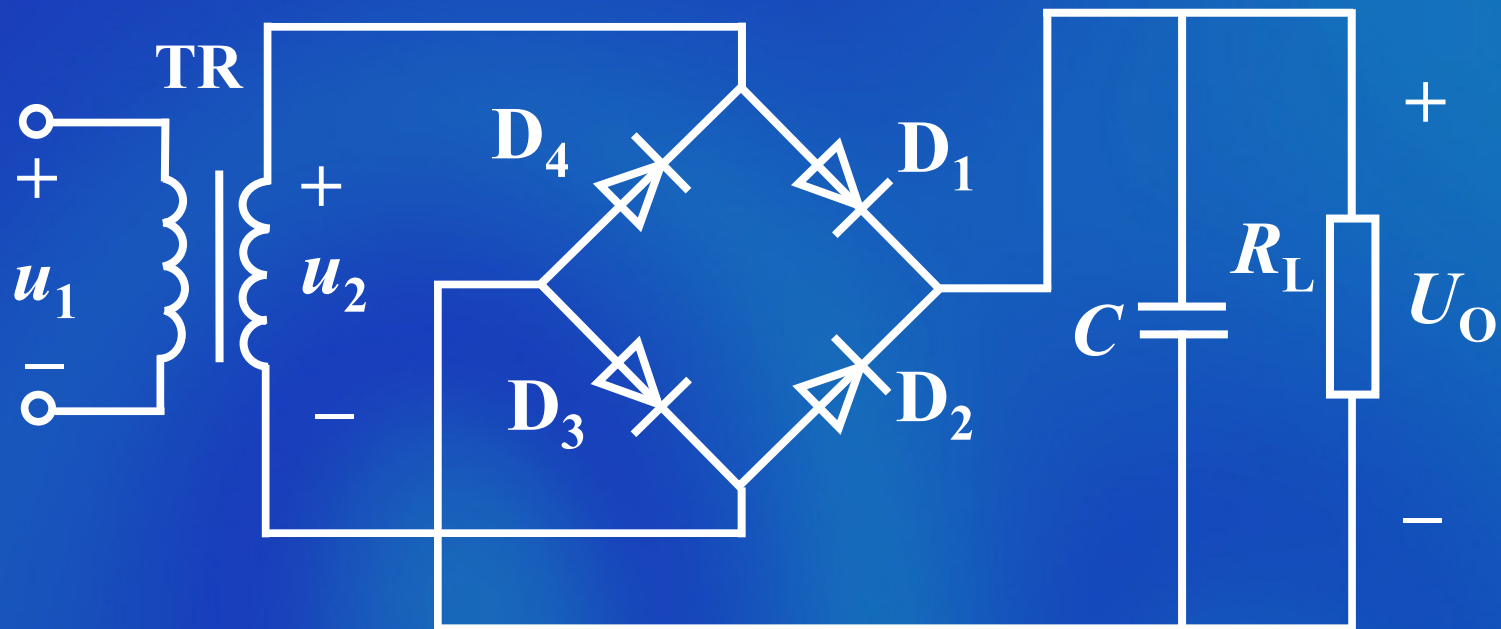
$$I_D = \frac{I_O}{2} = \frac{U_O}{2R_L} = \frac{0.9U_2}{2R_L} = \frac{0.45U_2}{R_L}$$

(4) 整流二极管的最高反向电压

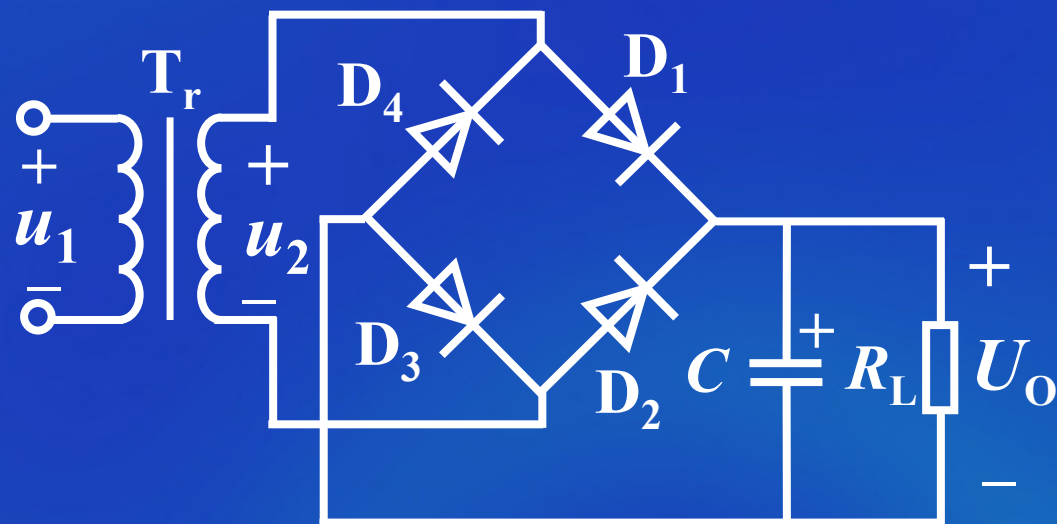
$$U_{RM} = \sqrt{2}U_2$$

10.2.2 电容滤波电路

1. 电路组成

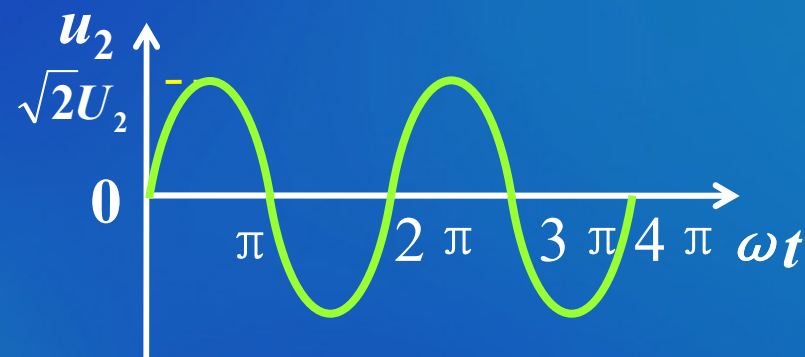


2. 工作原理



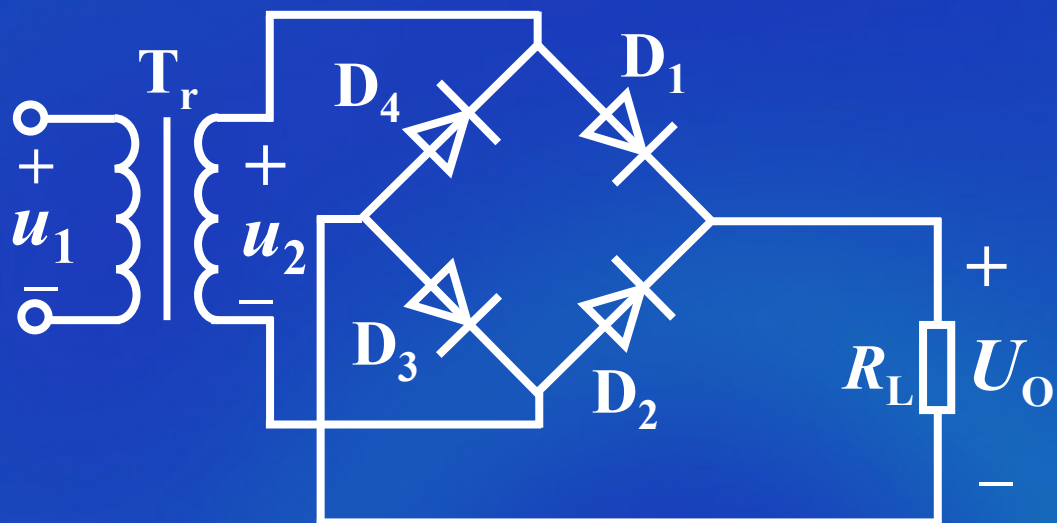
输入电压

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



(1) 当 $C=0$ 时

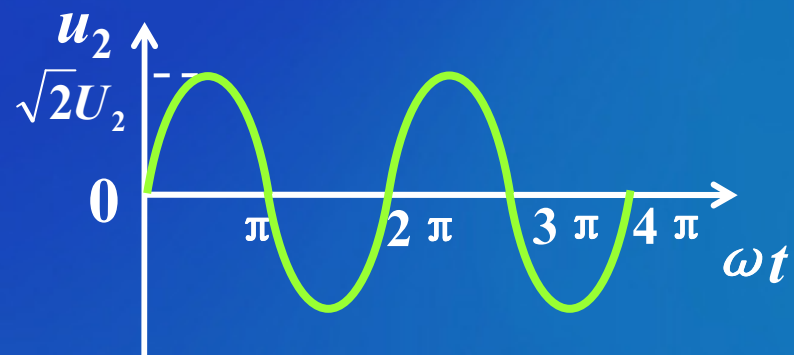
桥式整流电路



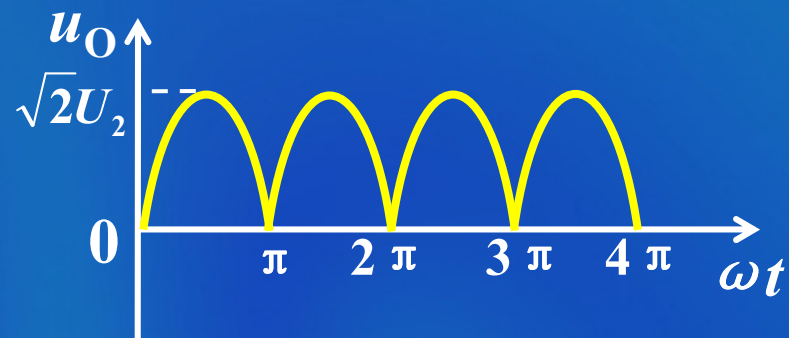
输出电压

$$U_O \approx 0.9U_2$$

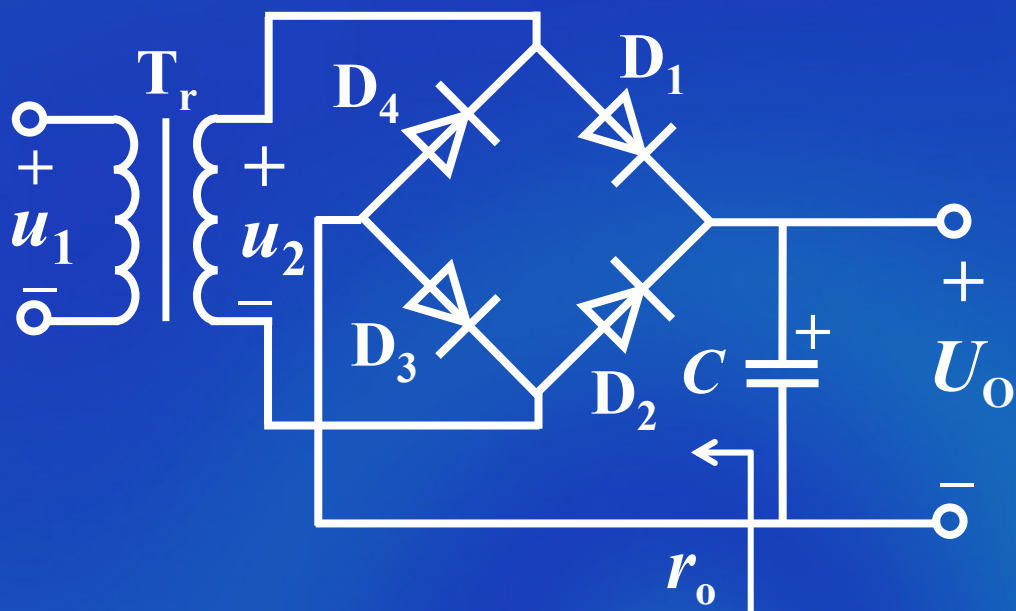
输入电压



输出电压波形



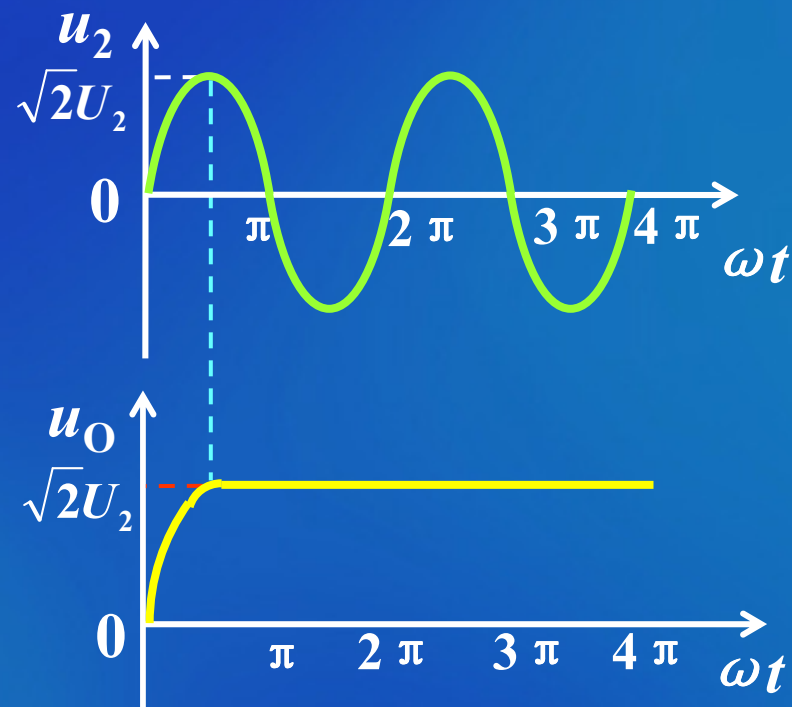
(2) 当 $C \neq 0$ 、 $R_L = \infty$ 时



由于电容器的充电时间常数

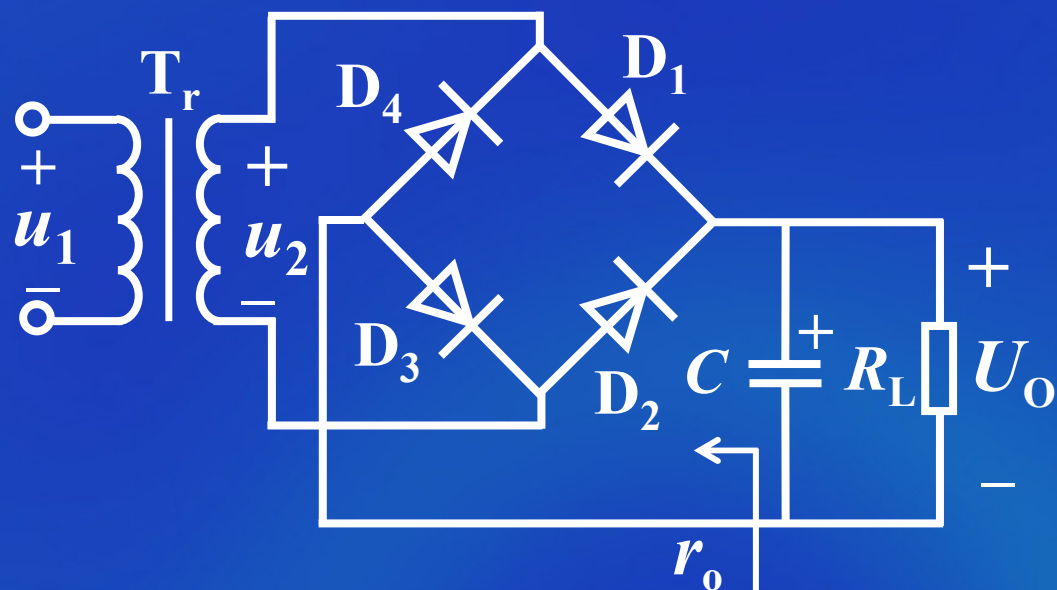
$$\tau_1 = r_o C = (r_T + 2r_D)C \approx 0$$

输入电压



输出电压波形

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

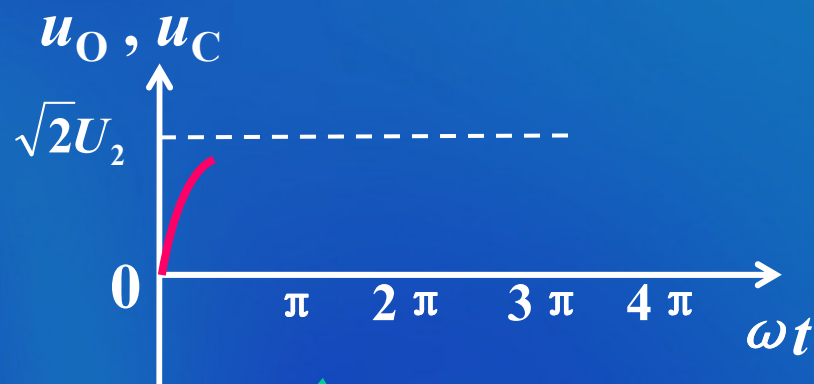
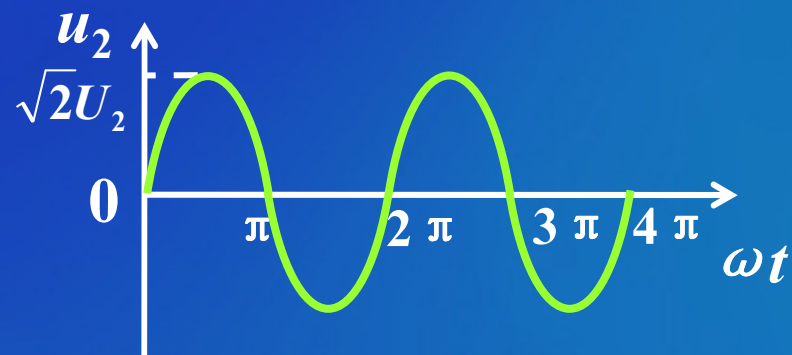


电容器的充电时间常数

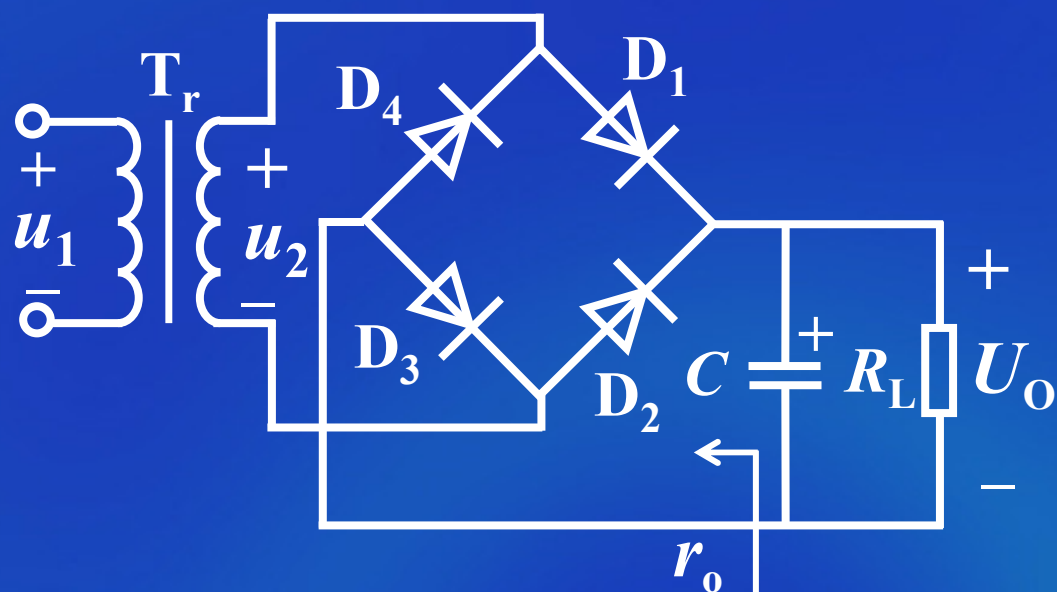
$$\tau_1 = (r_0 // R_L)C \approx r_0 C \approx 0$$

$$u_O = u_C \approx u_2$$

输入电压

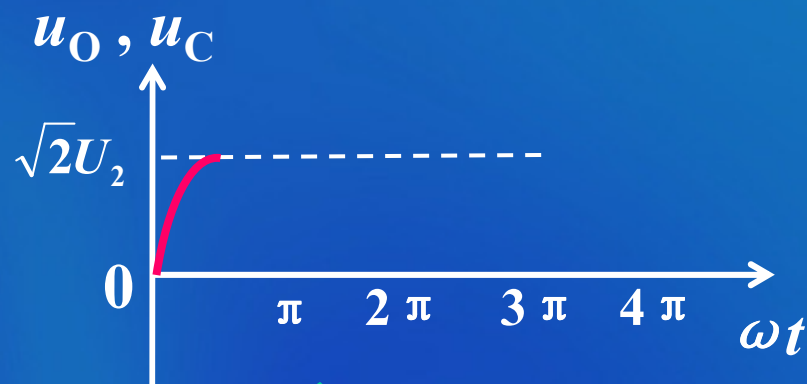
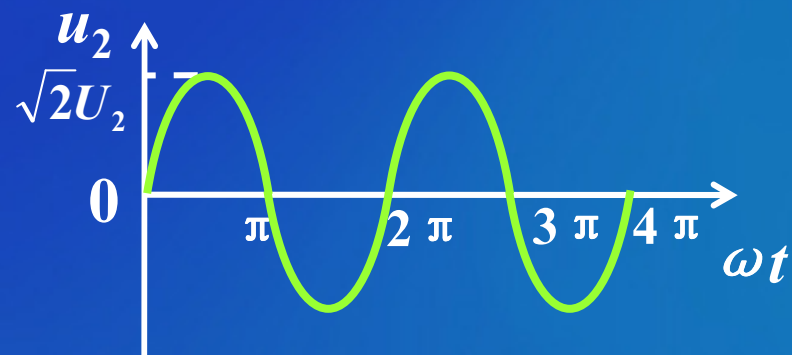


输出电压

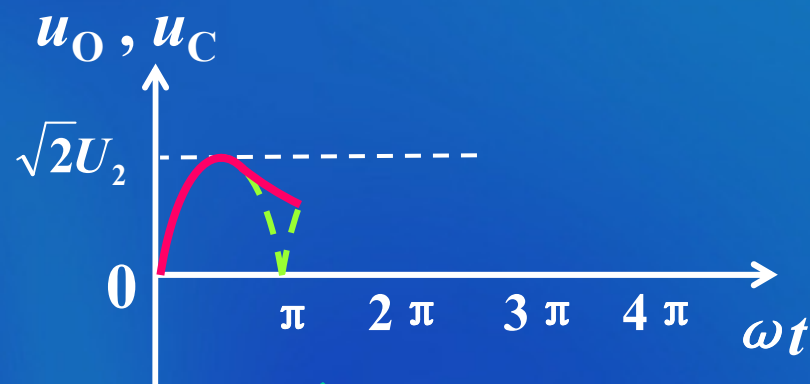
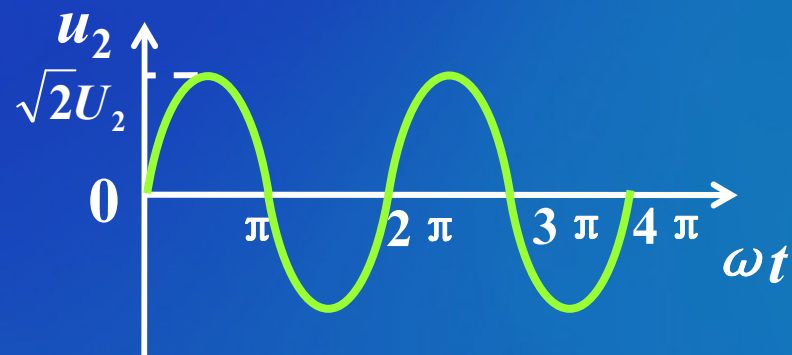
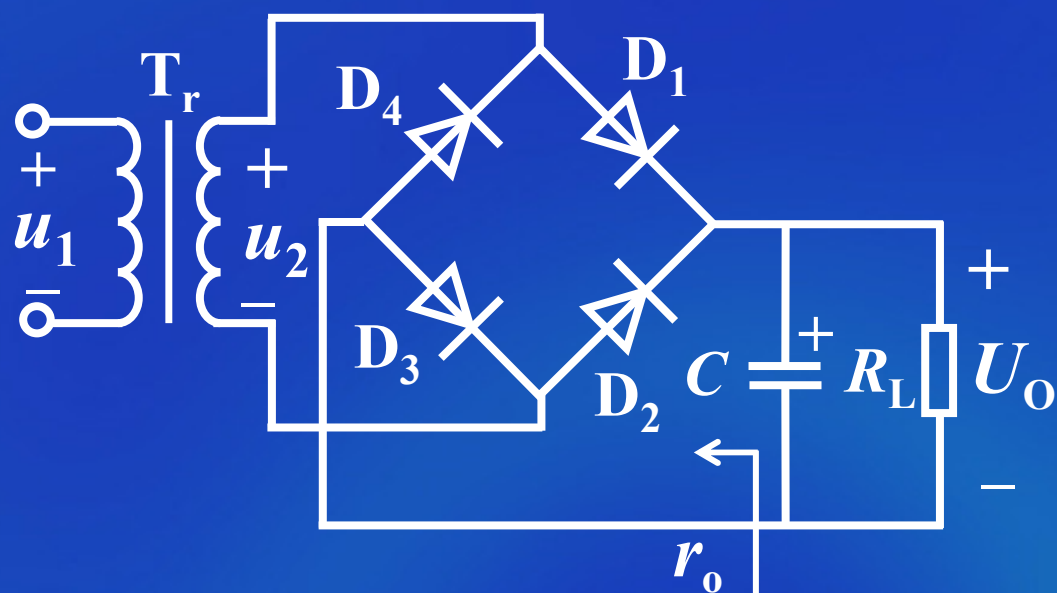


当 C 充电到最高点时，
二极管 D_1 、 D_3 将截止，
 C 将通过 R_L 开始放电。

输入电压



输出电压

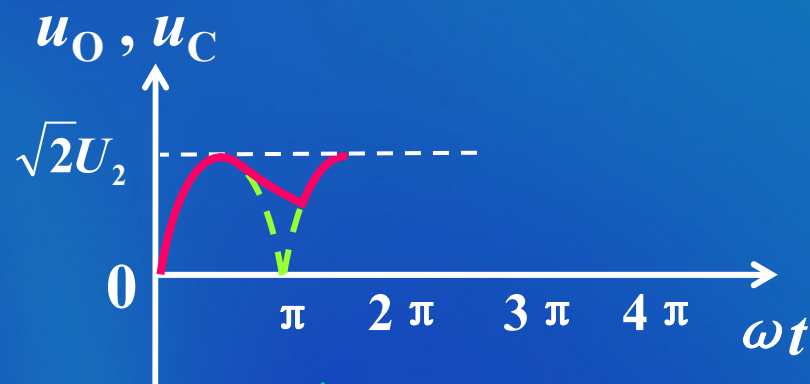
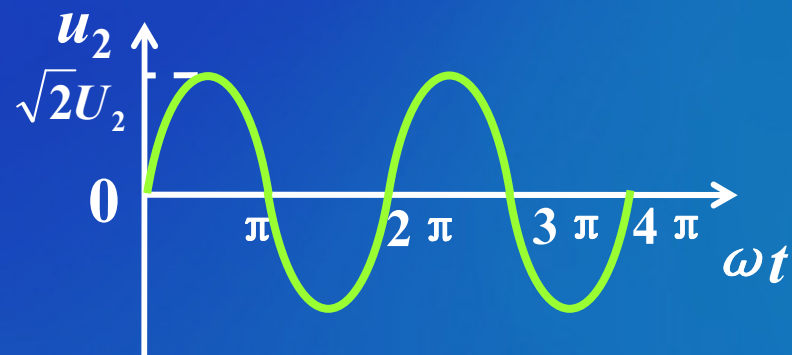
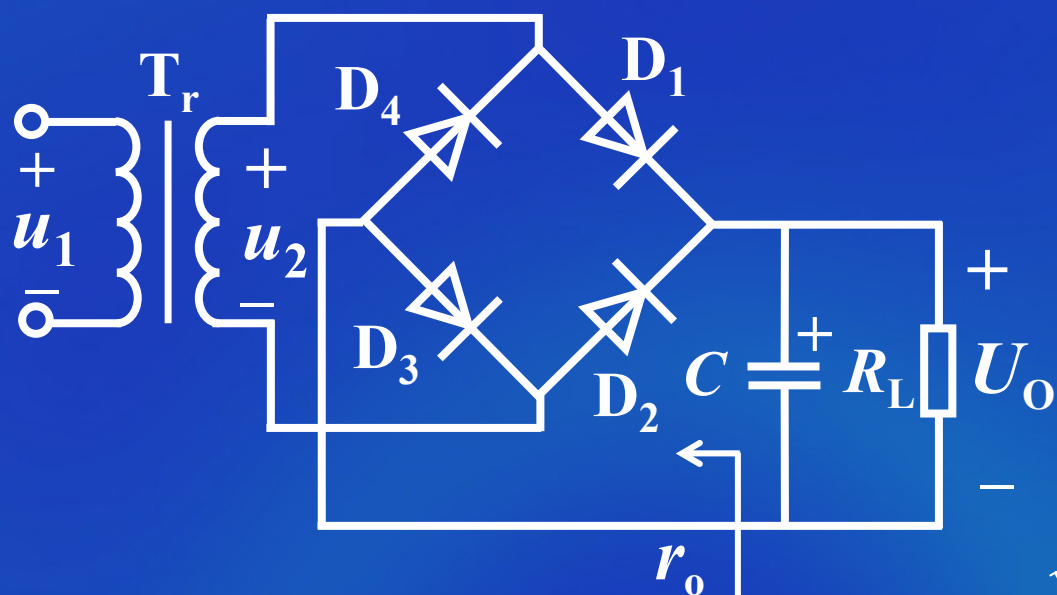


输出电压

电容器的放电时间常数

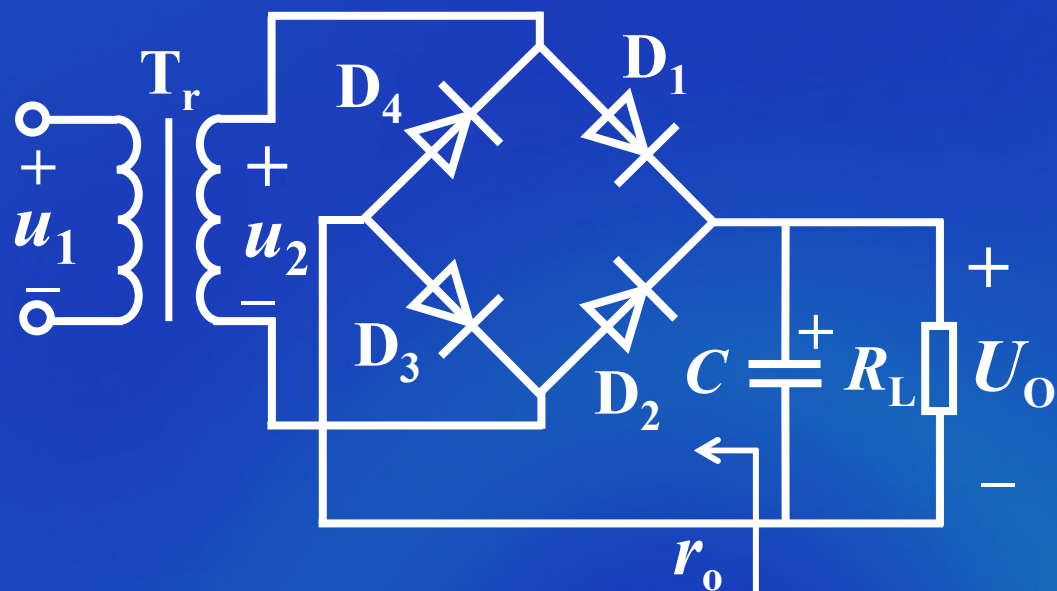
$$\tau_2 = R_L C$$

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。

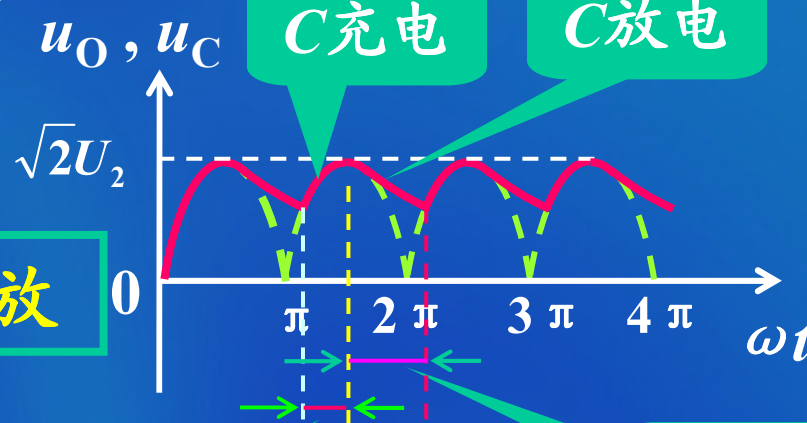
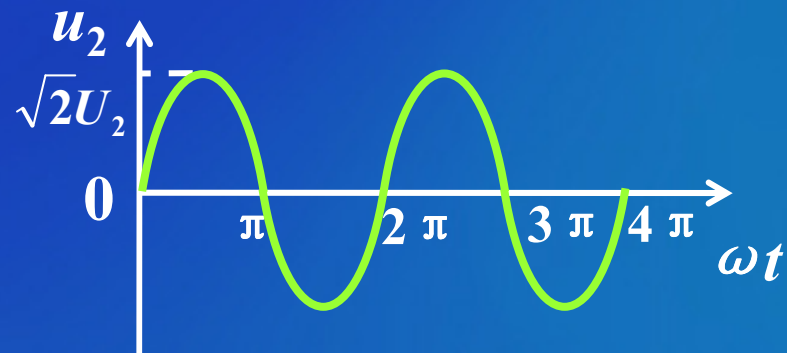


周而复始

特点：快冲慢放

可画出输出电压波形

输入电压



D导通

输出电压

D截止

上页

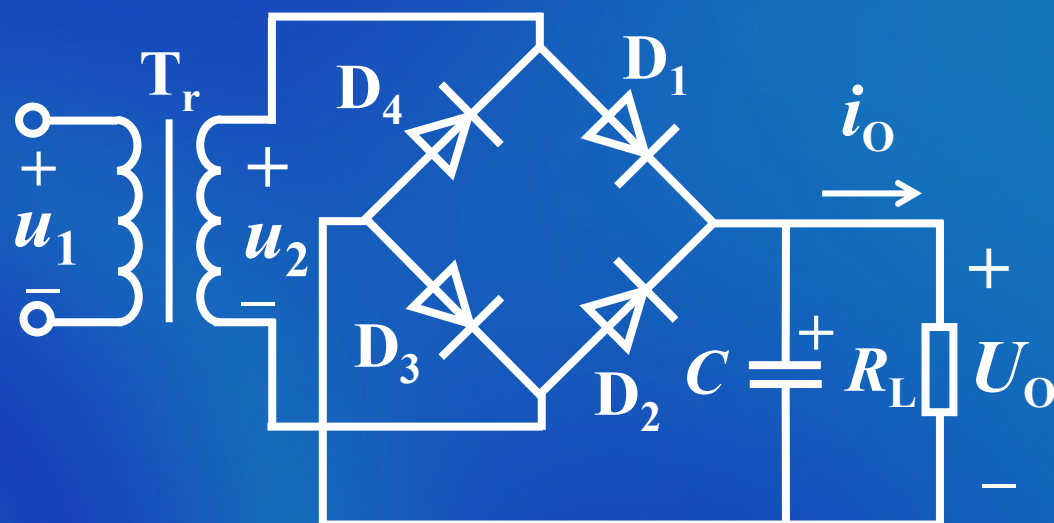
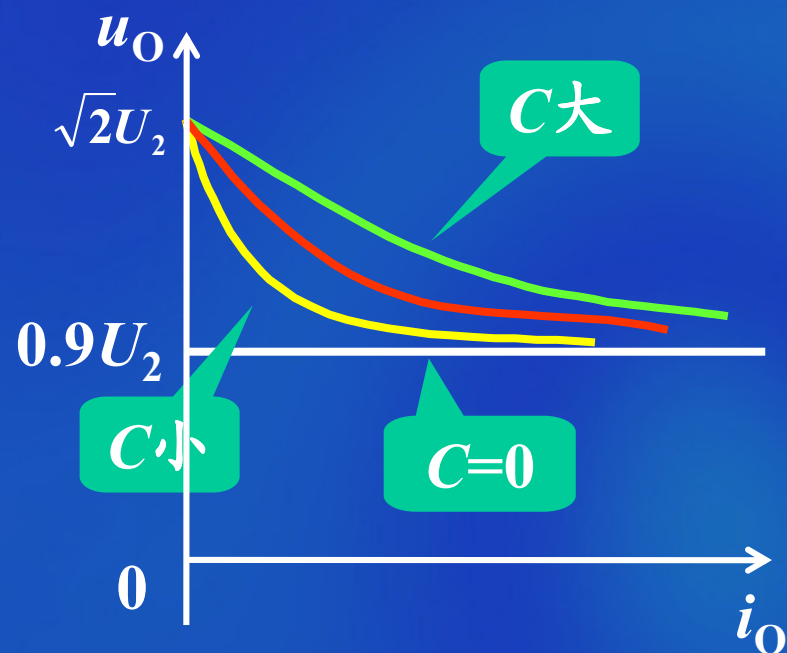
下页

后退

3. 电容滤波电路的外特性及主要参数估计

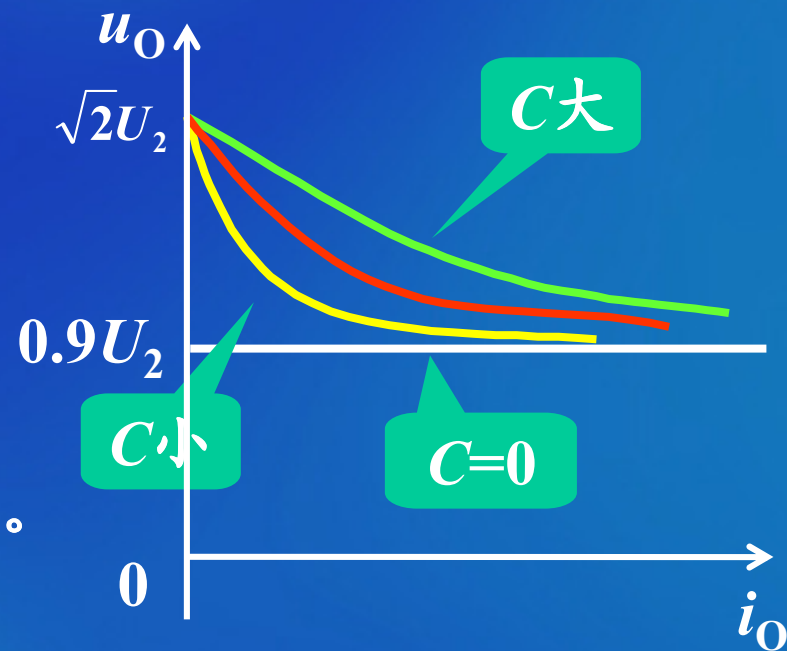
(1) 电容滤波电路的外特性

$$u_o = f(i_o)$$



外特性特点:

- a. C 越小, $u_{O(AV)}$ 越小, 纹波越大。
- b. 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基本不变的情况。

(2) 输出电压平均值

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

$$U_{O(AV)} = (1.1 \sim 1.4)U_2$$

$$\text{一般取 } U_{O(AV)} \approx 1.2U_2$$

(3) 输出电流平均值

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

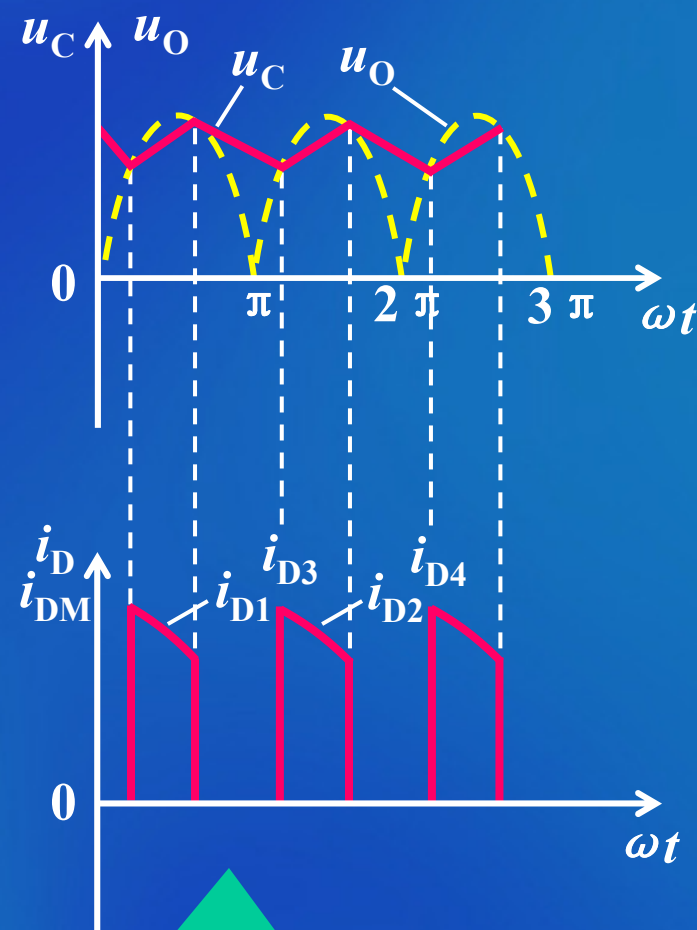
(4) 整流二极管的平均电流

考虑二极管内阻
时输出电压波形

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。



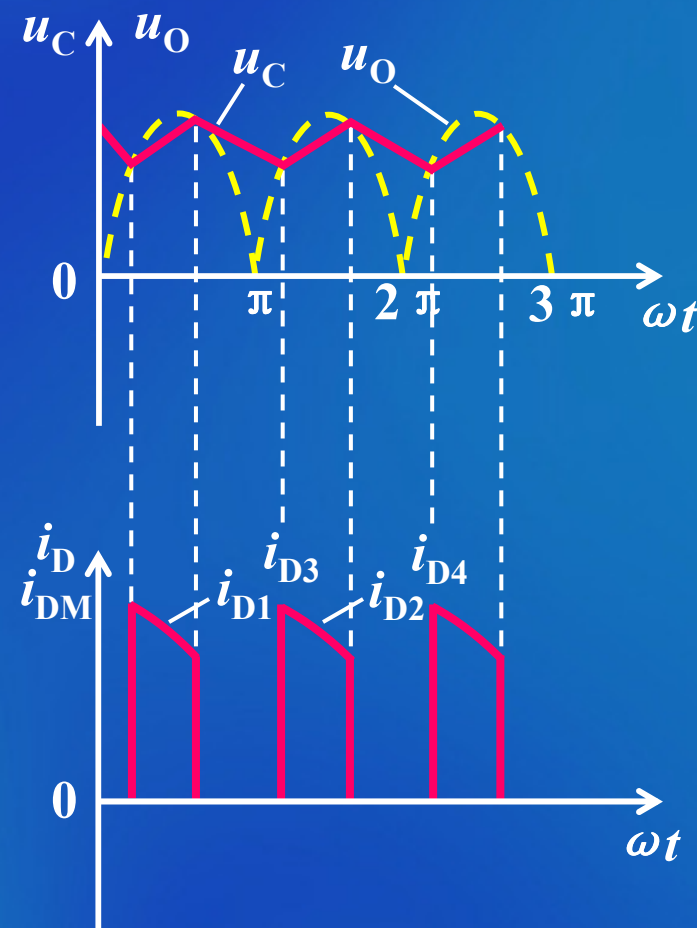
二极管电流波形

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

放电时间常数越大, θ 越小, 冲击电流越大。

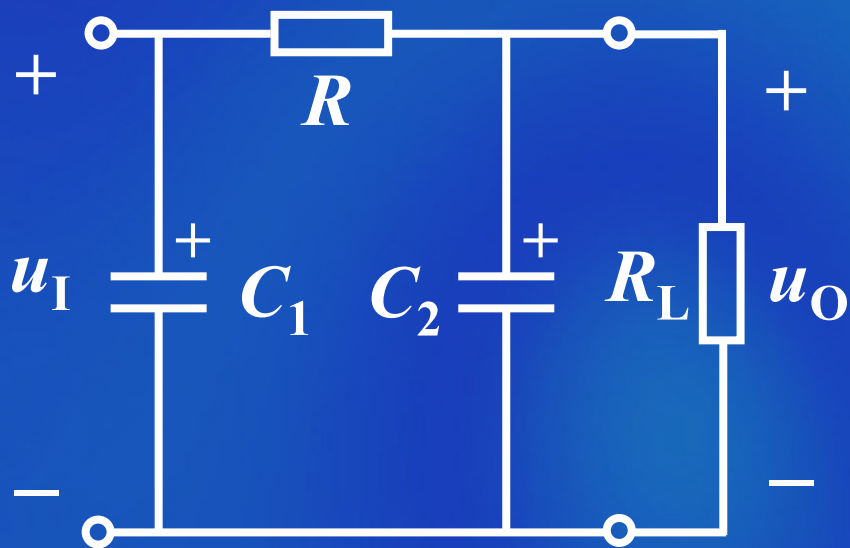
(5) 整流二极管的最高反向电压

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

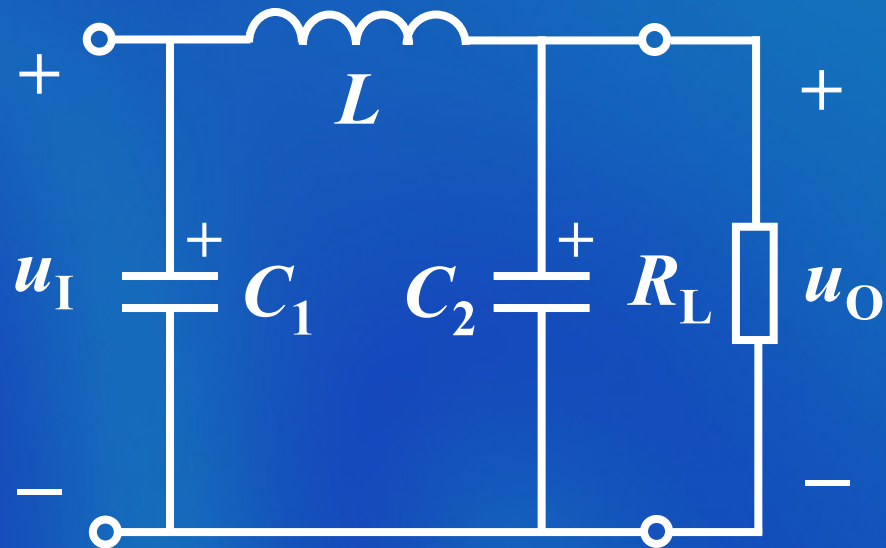


2. π 型滤波电路

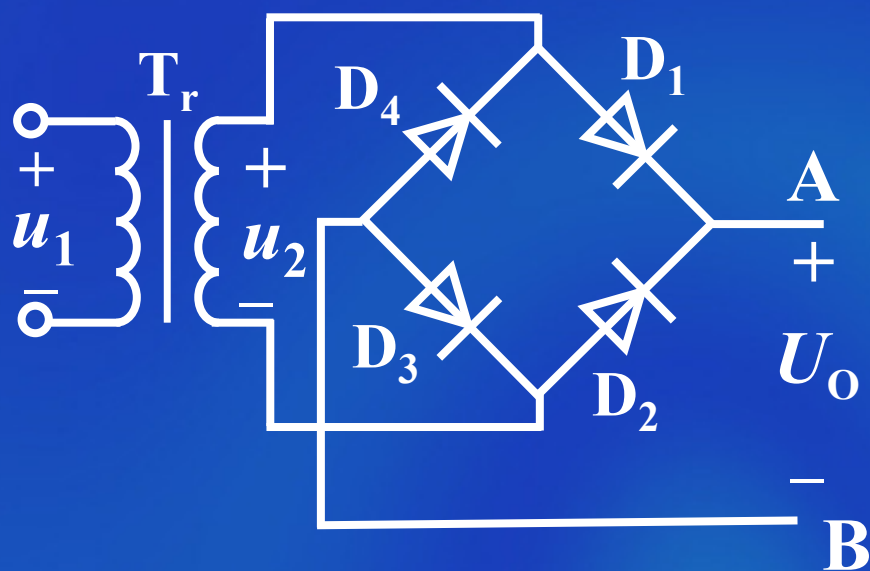
RC — π 型滤波电路



LC — π 型滤波电路



例1. 下图D为理想二极管，C足够大，求以下三种情况下的直流平均电压 U_O (注： U_2 的有效值为10V)



(1) A、B间接 R_L ;

(2) A、B间接C;

(3) A、B间接 R_L 和C并联。

解: (1) $U_O = 0.9 U_2 = 9V$

(2) $U_O = \sqrt{2} U_2 = 14V$

(3) $U_O = 1.2 U_2 = 12V$

例2 下图电路中有否不妥之处？（ U_2 有效值为30V）

解：有，一是滤波电容耐压应为 $\sqrt{2}U_2 = 30\sqrt{2}\text{V}$ 。

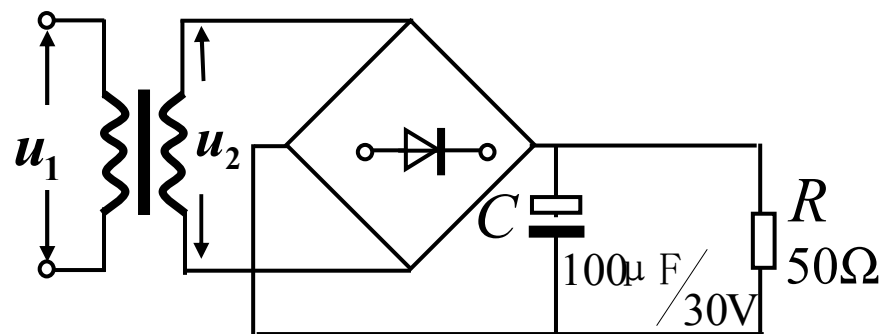
此处只30V。

二是其容量太小，

$$RC = 50 \times 10^{-4} = 5 \times 10^{-3}$$

$$\frac{T}{2} = 0.01\text{S}$$

$$RC < (3 \sim 5) \frac{T}{2} \quad \therefore \text{滤波效果不佳。}$$



10.3 串联反馈型线性稳压电路

10.3.1 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

在负载电流计环境温度不变时，输出直流电压的相对变化量与输入直流电压相对变化量之比

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

(2) 电压调整率

在负载电流和环境温度不变及给定输入电压变化量（电网 $\pm 10\%$ 波动）时，单位输出电压增量与对应输入电压增量之比

$$S_U = \left\{ \frac{1}{U_O} \frac{\Delta U_O}{\Delta U_I} \right\}_{\Delta I_O=0, \Delta T=0} \times 100\%$$

(3) 输出电阻

当输入电压和环境温度不变时，输出电压的变化量与输出电流的变化量之比

$$R_O = \left. \frac{\Delta U_O}{\Delta I_O} \right|_{\Delta U_I=0, \Delta T=0}$$

(4) 电流调整率

当输入电压和环境温度保持不变及给定输出电流变化量（常指负载电流从空载到满载时的变化量）时，输出电压相对变化量的百分比

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

(5) 输出电压的温度系数

在规定的温度范围内，当输入电压和负载电流保持不变时，单位温度变化所引起的输出电压相对变化量的百分比

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

以上系数越小，输出电压越稳定

(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。

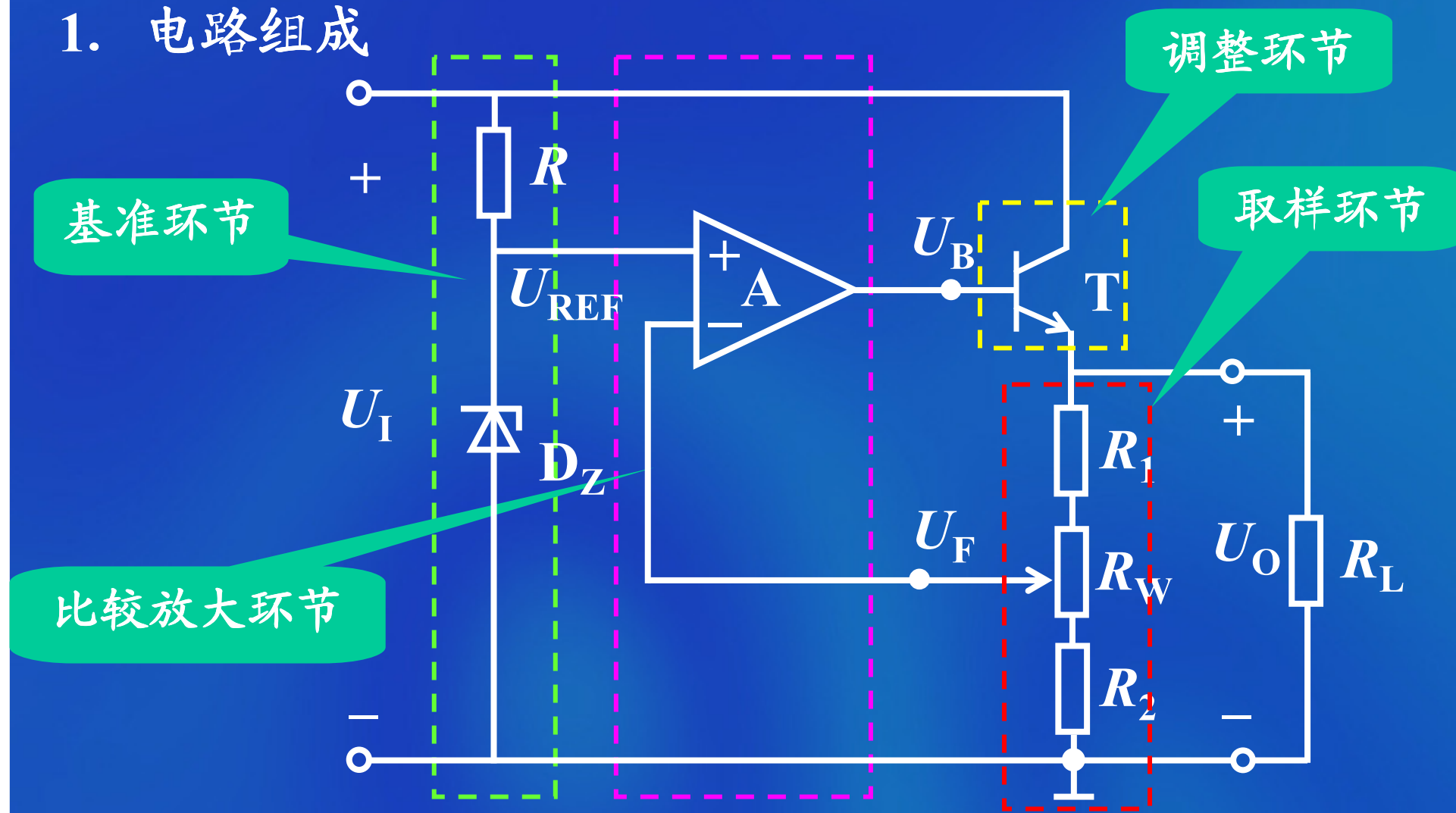
(7) 纹波电压抑制比

输入、输出电压中的纹波电压之比

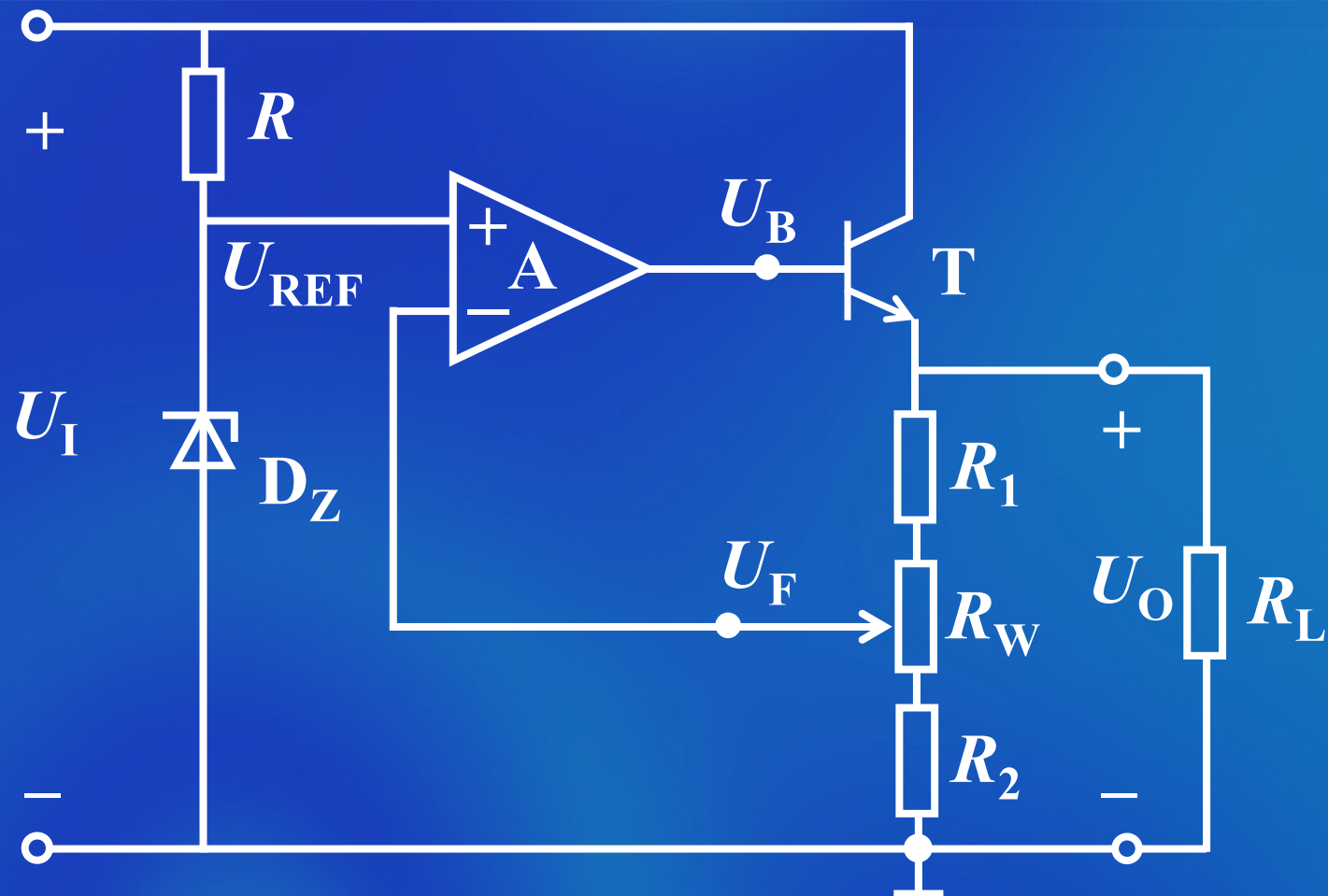
$$S_{\text{rip}} = 20 \lg \frac{U_{\text{ipp}}}{U_{\text{opp}}}$$

10.3.2 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



$$U_I \uparrow (\text{或 } R_L \uparrow) \rightarrow U_O \uparrow \rightarrow U_F \uparrow \rightarrow U_B \downarrow$$

$$U_O \downarrow \leftarrow \text{~~~~~} \leftarrow$$

3. 输出电压

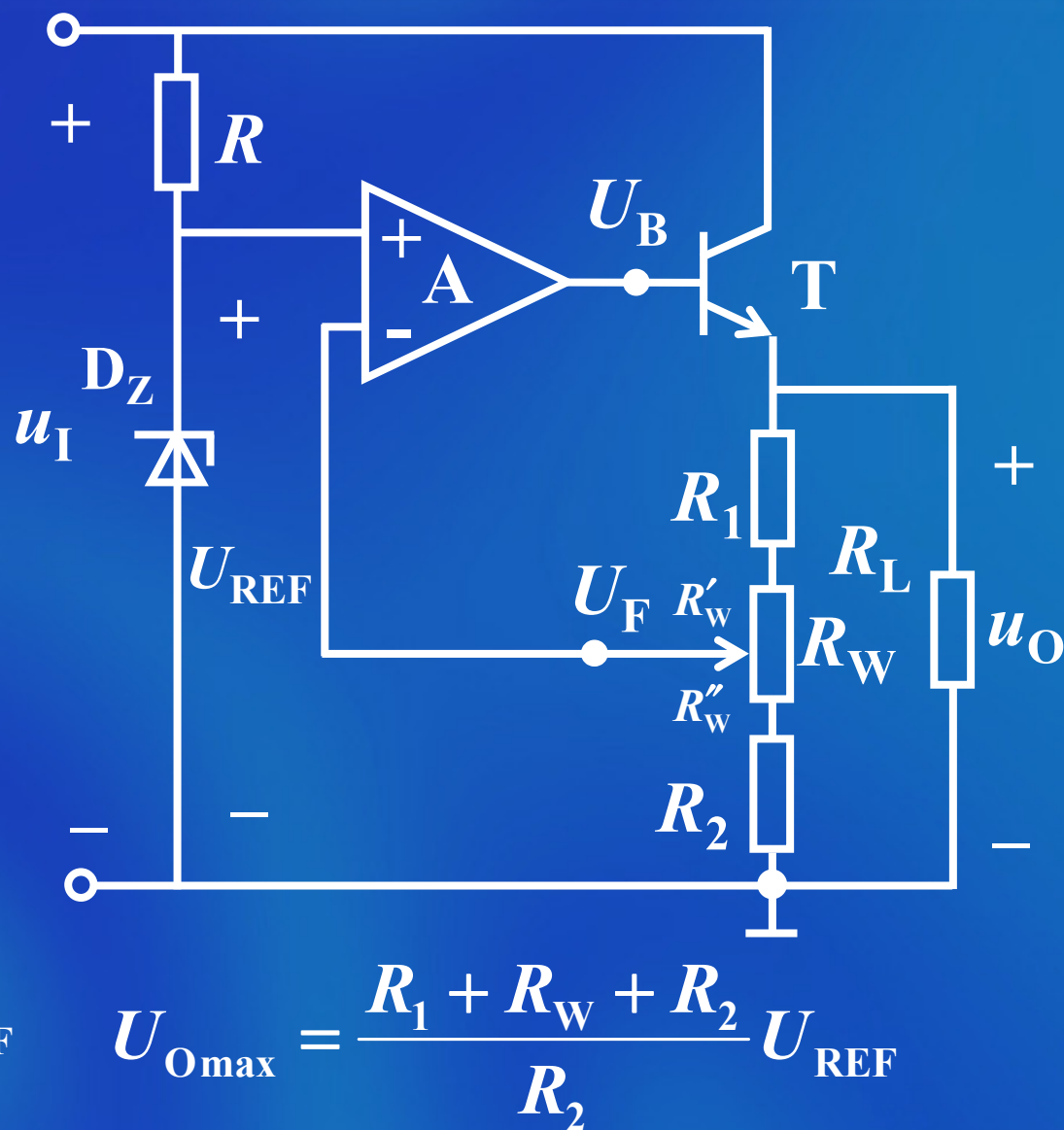
运放有负反馈

$$U_{\text{REF}} = \frac{R_2 + R''_{\text{W}}}{R_1 + R_{\text{W}} + R_2} U_{\text{O}}$$

所以

$$U_{\text{O}} = \frac{R_1 + R_{\text{W}} + R_2}{R_2 + R''_{\text{W}}} U_{\text{REF}}$$

$$U_{\text{Omin}} = \frac{R_1 + R_{\text{W}} + R_2}{R_2 + R_{\text{W}}} U_{\text{REF}}$$



$$U_{\text{Omax}} = \frac{R_1 + R_{\text{W}} + R_2}{R_2} U_{\text{REF}}$$

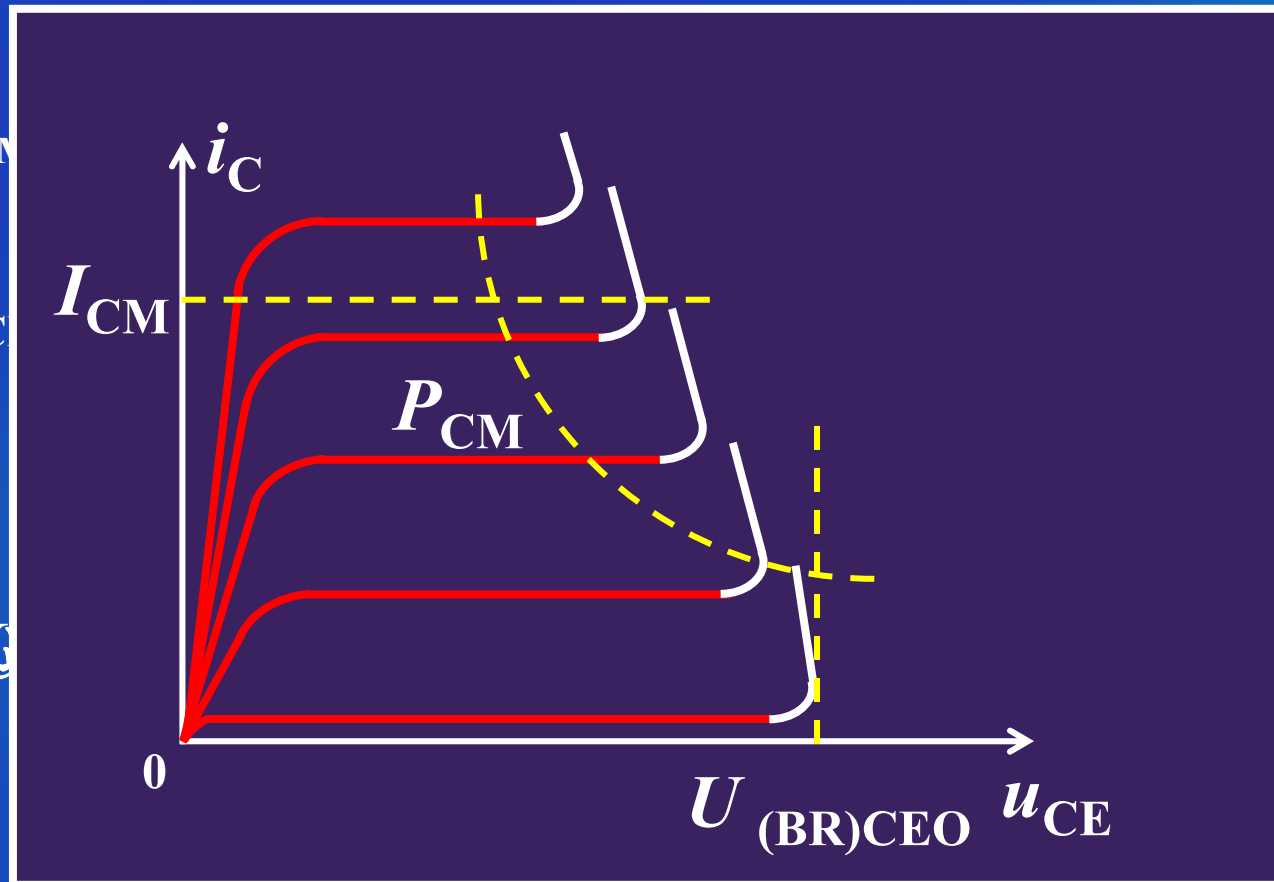
4. 调整管参数选取原则

(1) I_{CM}

(2) P_{CM}

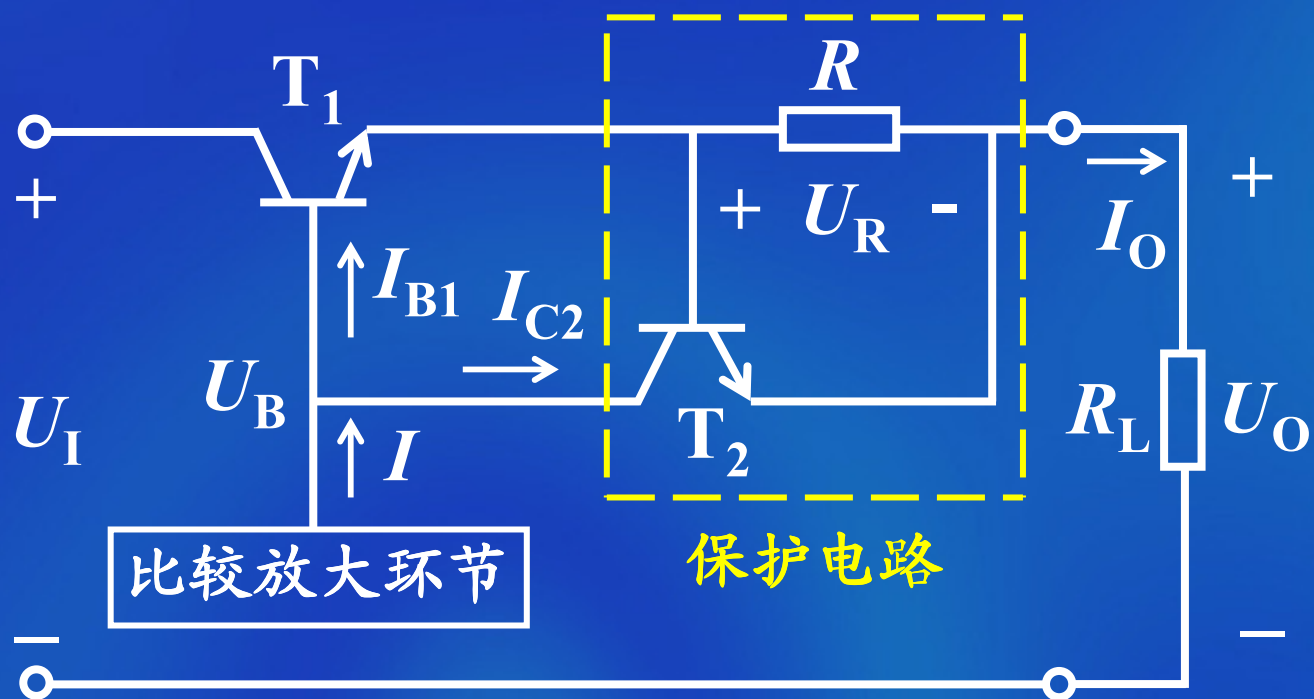
(3)

(4) 电压

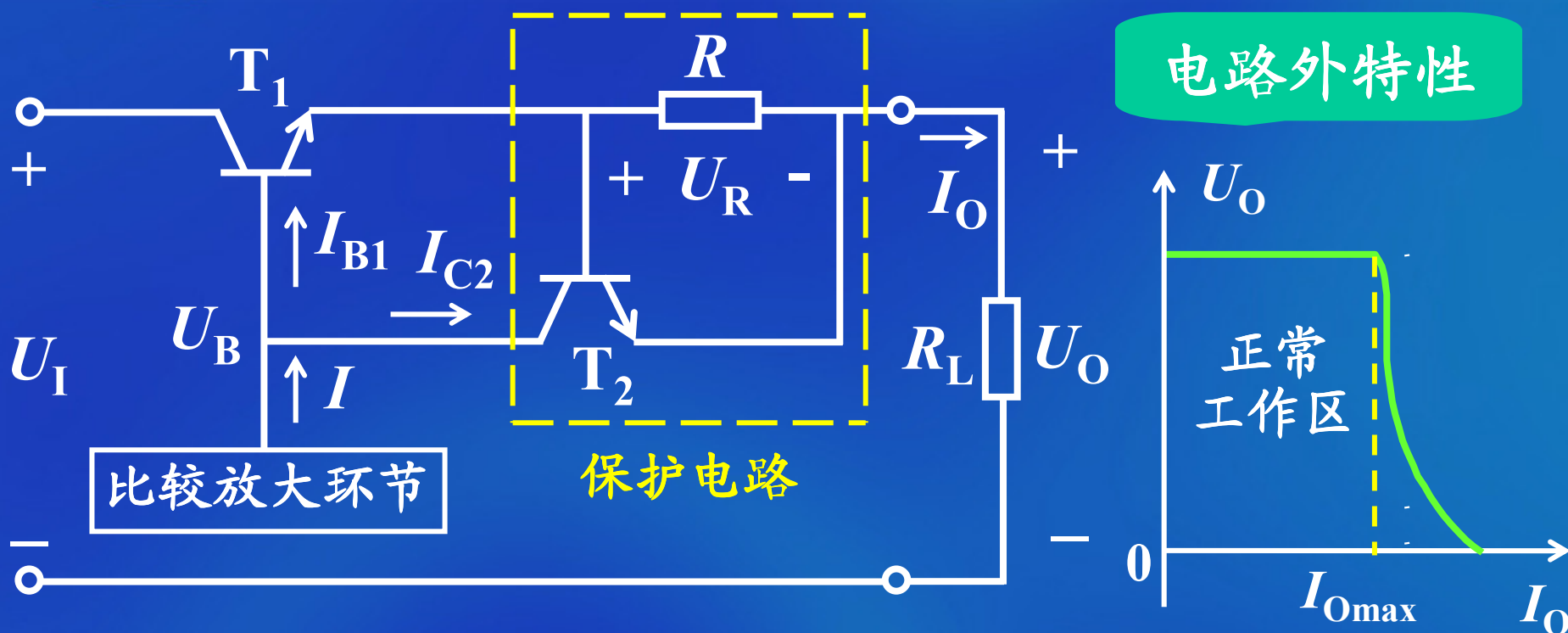


O(min)

5. 限流保护电路

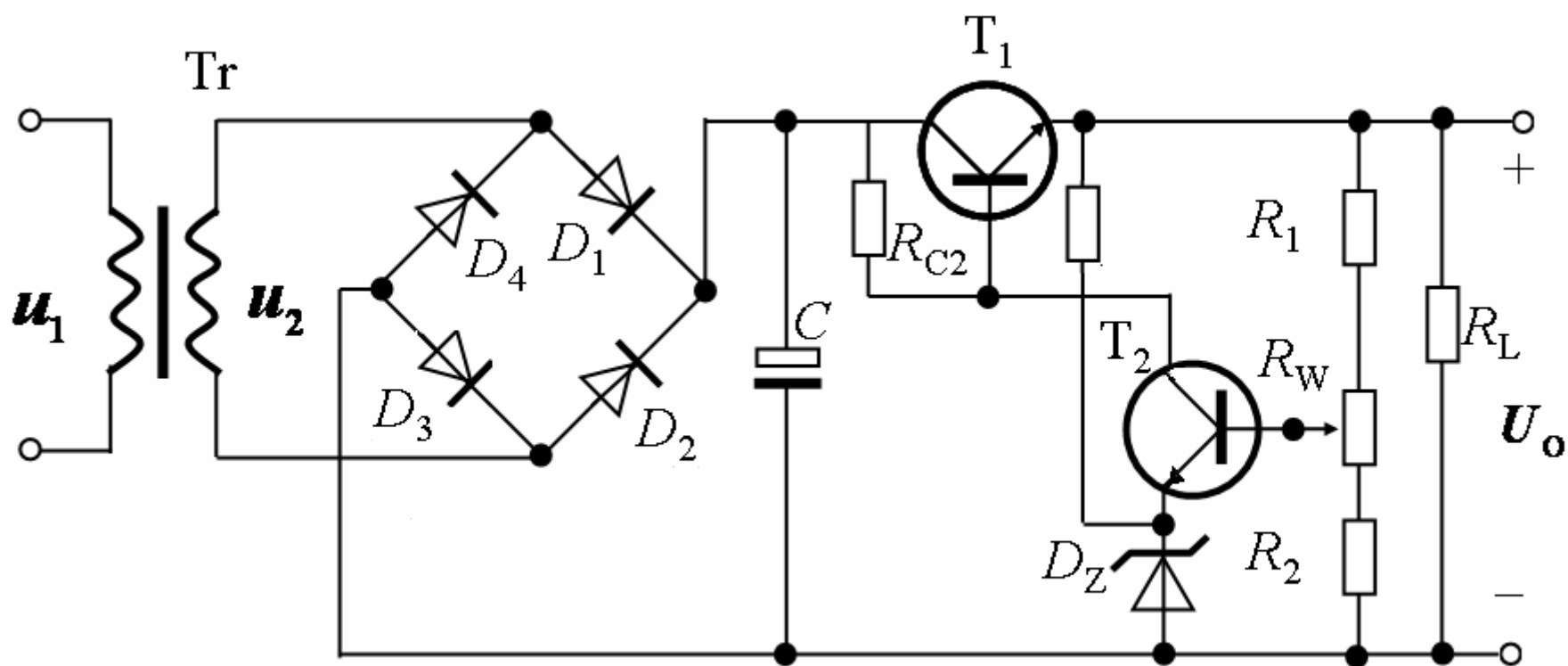


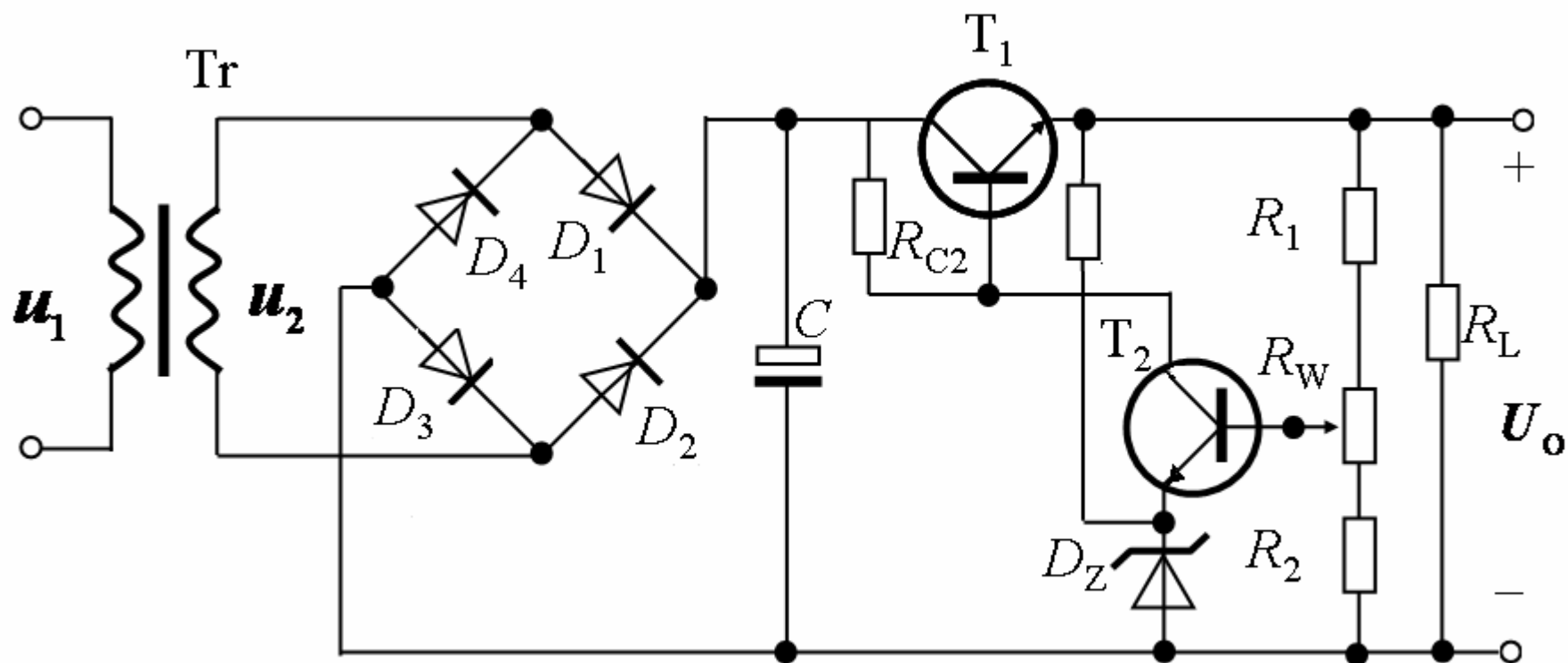
工作原理



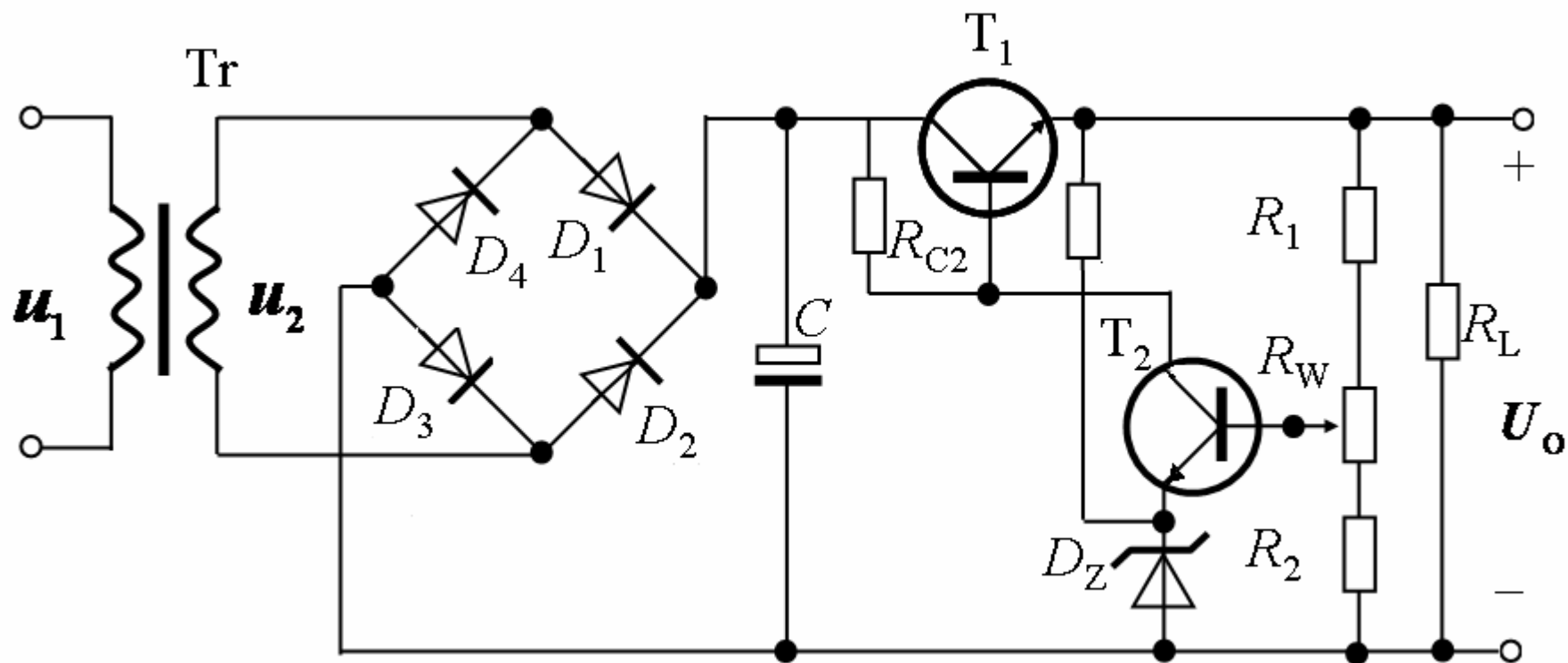
- (1) 当 I_O 较小时, $U_R < U_{BE2}$, T_2 截止, 电路正常工作。
- (2) 当 I_O 增大, T_2 导通。 I_{B1} 减小, 限制了 I_O 的增大。

例：串联型稳压电路如下图。稳压管 D_Z 的稳定电压 $V_Z=5.3V$ ，电阻 $R_1=R_2=200\Omega$ 。晶体管的 $V_{BE}=0.7V$ 。



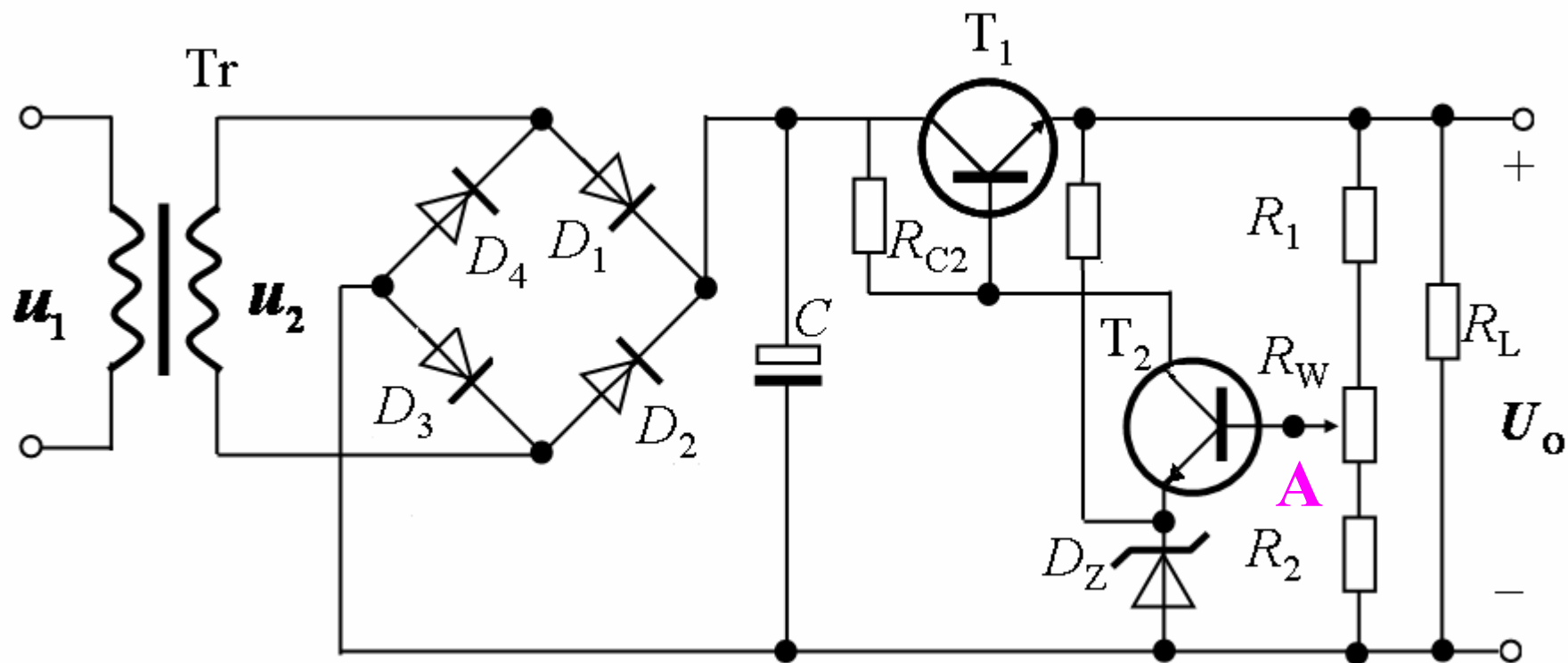


- (1) 试说明电路的如下四个部分分别由哪些元、器件构成;
- (2) 当 R_W 的滑动端在最下端时 $U_O = 15V$, 求 R_W 的值;
- (3) 若 R_W 的滑动端移至最上端, 问 $U_O = ?$



解：(1)

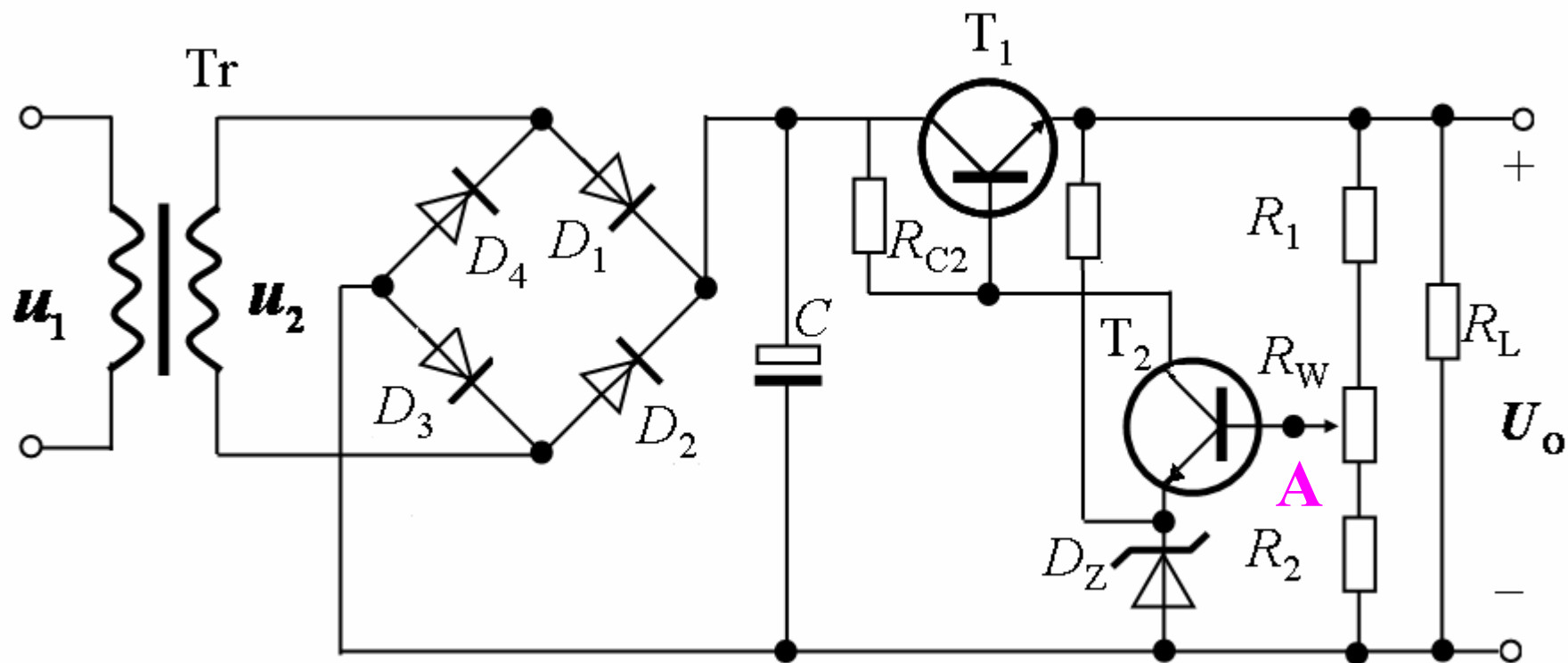
- ★ 调整管为： T_1
- ★ 放大环节为： T_2, R_{C2}
- ★ 基准电压为： D_Z, R
- ★ 取样环节为： R_1, R_W, R_2



(2) 当 R_W 的滑动端在最下端时 $U_O=15V$

$$U_A = \frac{U_O \cdot R_2}{R_1 + R_W + R_2}$$

$$6 = \frac{200 \times 15}{200 + R_W + 200} \quad \text{得 } R_W = 100\Omega$$



(3) 若 R_W 的滑动端移至最上端，问 $U_O = ?$

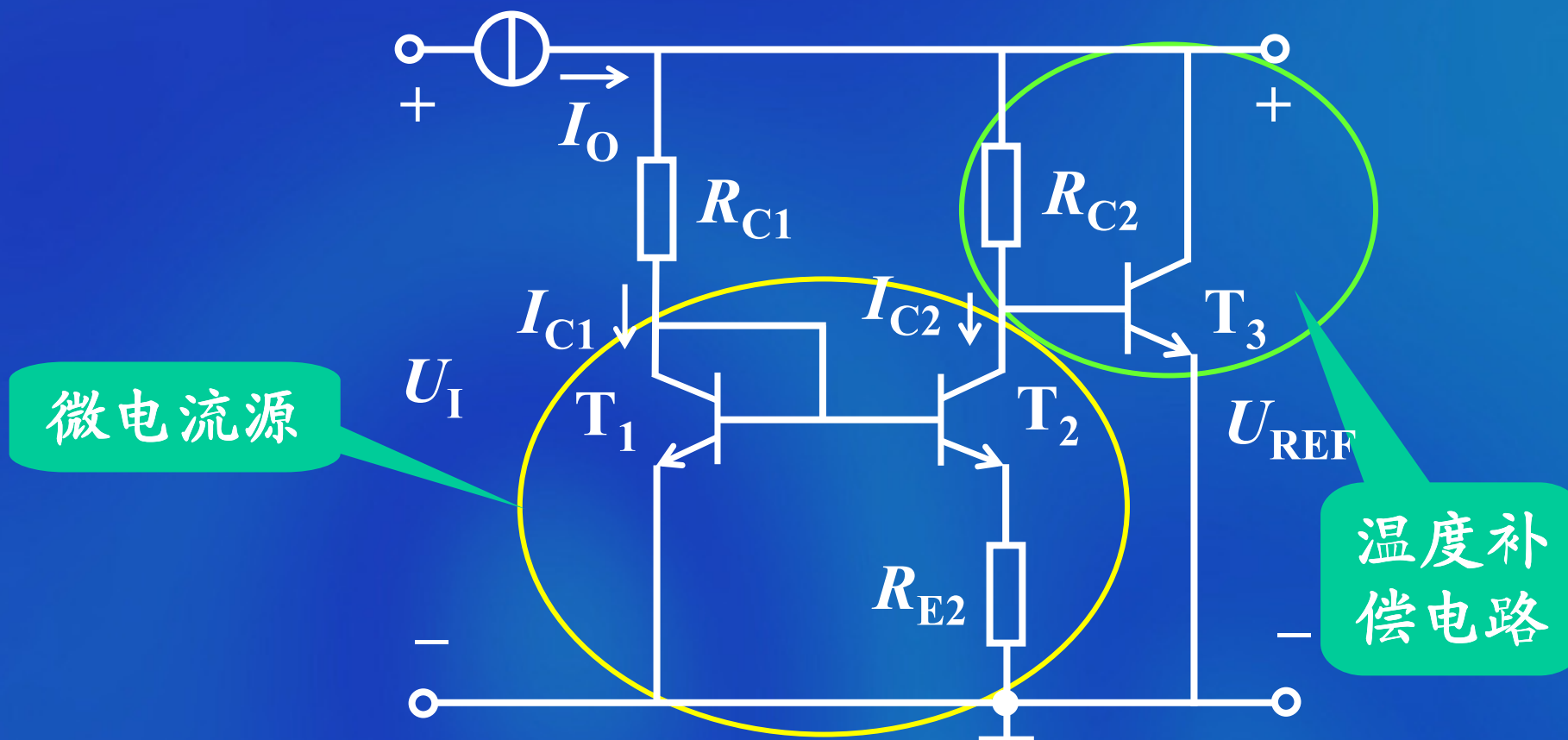
(2) $U_A = U_Z + U_{BE2} = 6V$

$$\begin{aligned}
 U_O &= \frac{R_1 + R_W + R_2}{R_2 + R_W} U_A \\
 &= \frac{200 + 100 + 200}{100 + 200} \times 6 \\
 &= 10V
 \end{aligned}$$

10.3.3 高精度基准电压源 (自学)



1. 电路组成



2. 工作原理

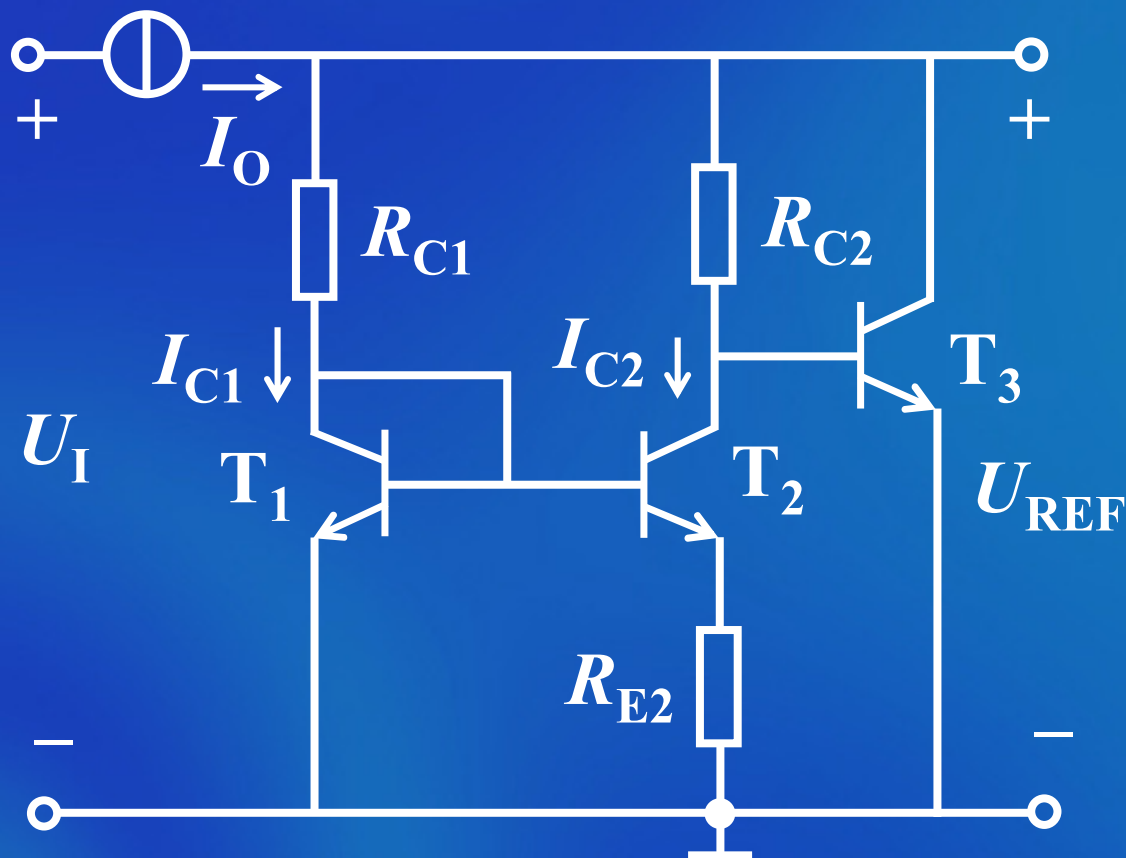
图中

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

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

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

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。

10.3.4 集成三端稳压器

1. 电路主要组成部分

- (1) 串联反馈型线性稳压电路
- (2) 高精度基准电压源
- (3) 过流、过热保护等电路

2. 主要特点:

- (1) 工作可靠
- (2) 外接元件少
- (3) 使用方便

3. 分类

按输出电压是否可调

{	固定式三端稳压器
	可调式三端稳压器

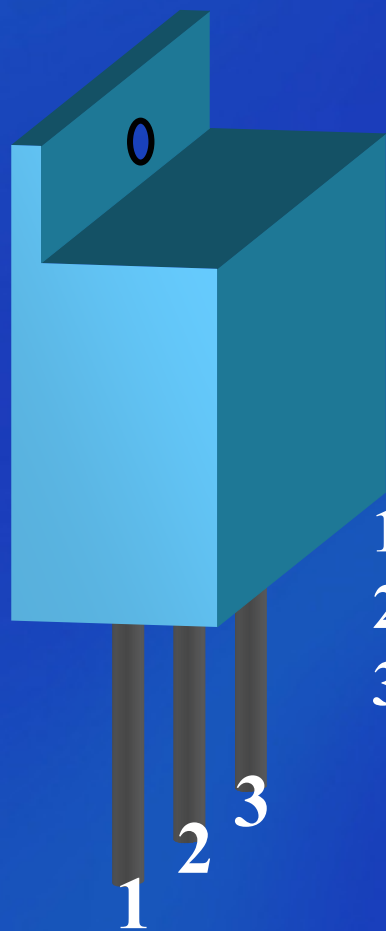
4. 固定式集成三端稳压器的型号

a. $78 \times \times$ (输出正电压) 系列 b. $79 \times \times$ (输出负电压) 系列

$\times \times$ ——输出电压的标称值

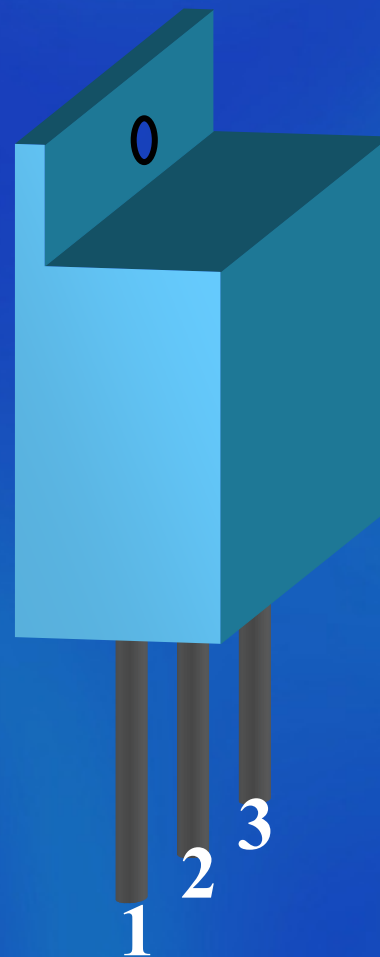
输出电压种类

5V、6V、9V、12V、15V和24V等



1端: 输入端
2端: 公共端
3端: 输出端

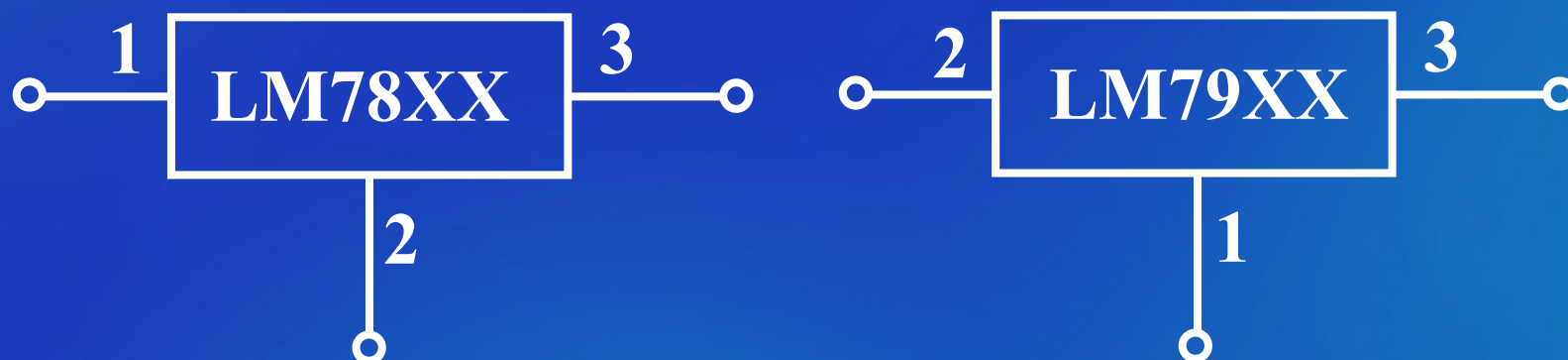
W7800系列稳压器外形



1端: 公共端
2端: 输入端
3端: 输出端

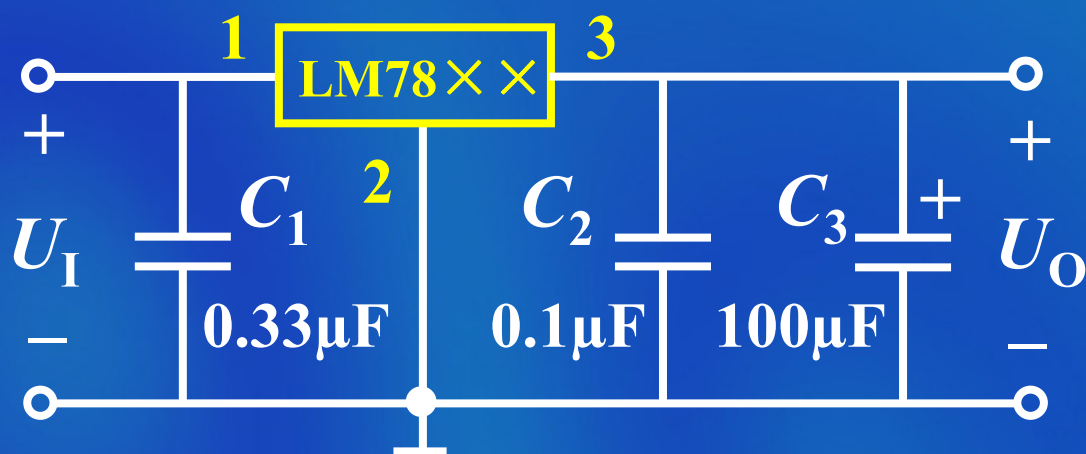
W7900系列稳压器外形

6. 稳压器电路符号

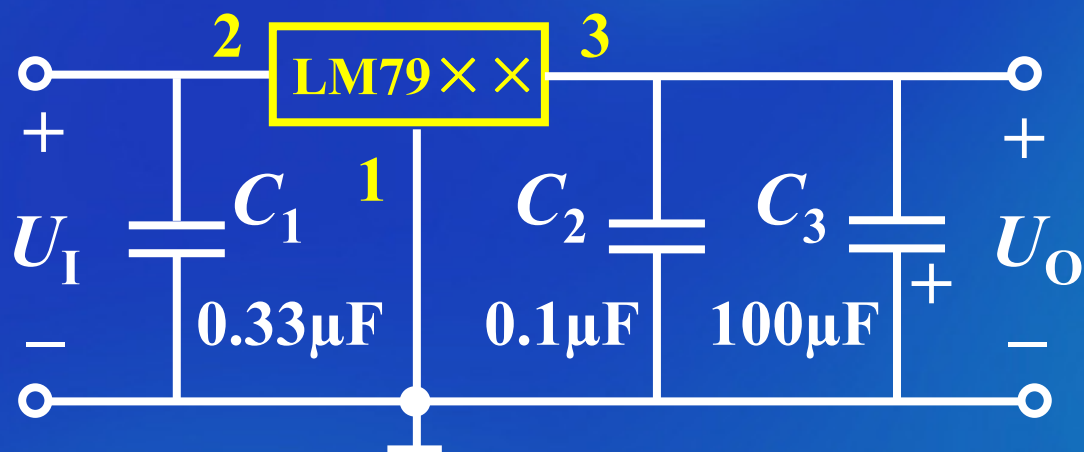


7. 固定式三端稳压器的典型接法

a. 78系列



b. 79系列



电容作用

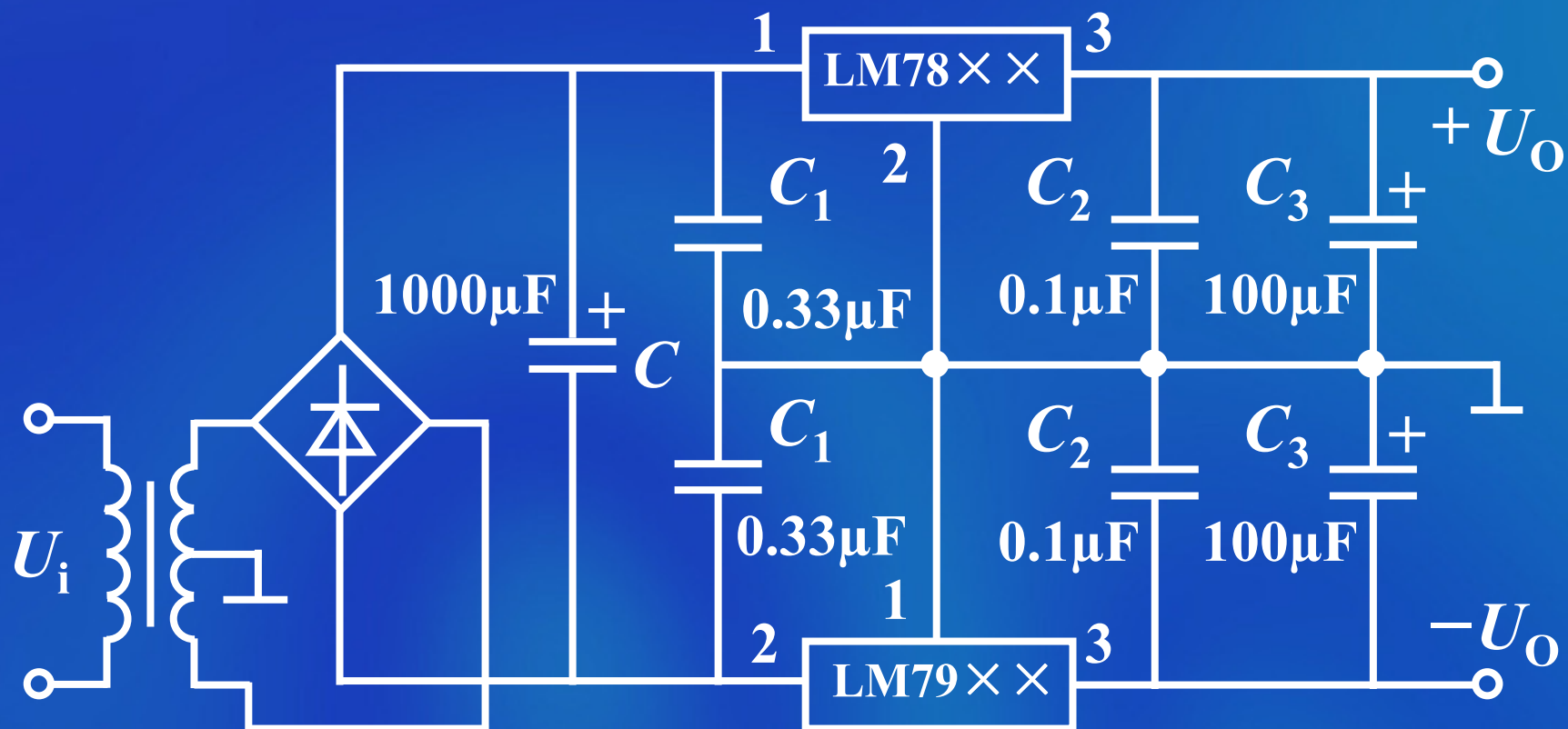
C_1 —防止自激振荡

C_2 —减小高频干扰

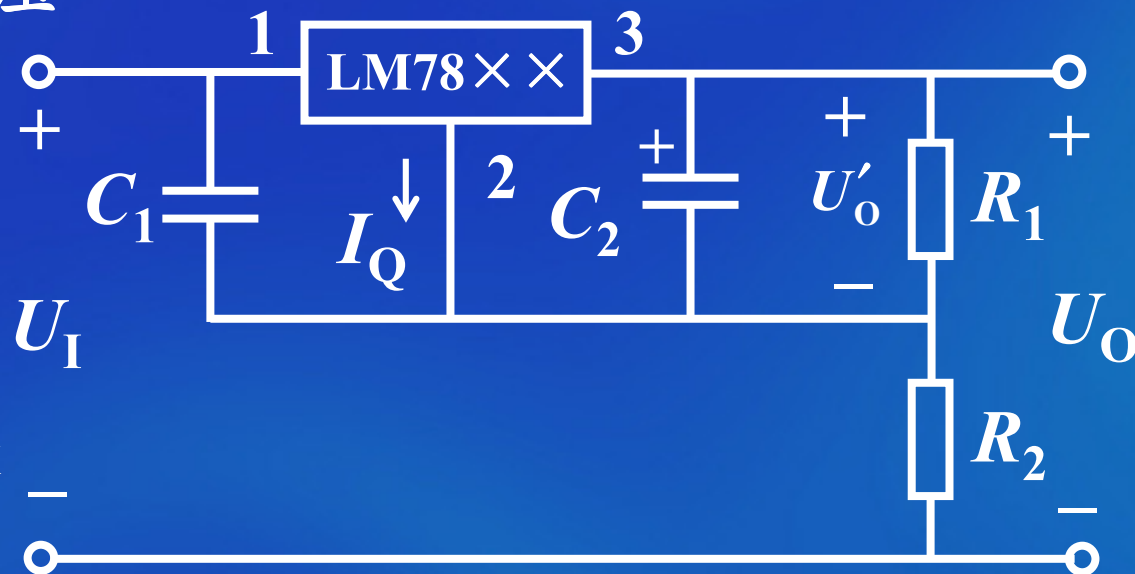
C_3 —减小输出纹波和低频干扰

8. 固定式三端稳压器的应用电路

a. 输出正、负电压的稳压电路



b. 提高输出电压



$$U'_0 = U_{R1} = U_{XX}$$

因为

$$U_O = U'_0 + \left(\frac{U'_0}{R_1} + I_Q \right) R_2 \quad \text{所以} \quad U_O = \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) U'_0 + I_Q R_2$$

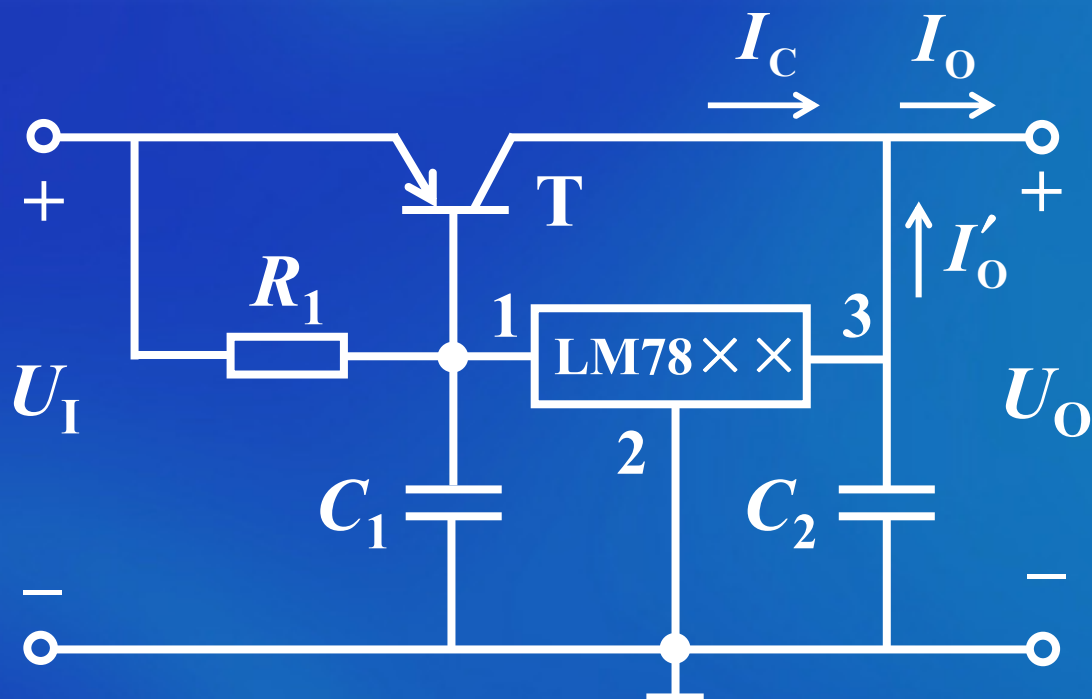
忽略公共端电流 I_Q $U_O \approx \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) U'_0$

c. 扩大输出电流

图中

$$I_O = I_C + I'_O$$

$$= \beta I_B + I'_O$$



若 $\beta=10$, $R_1=0.5\Omega$, $|U_{BE}|=0.3V$, $I'_O=1A$ 。则

$$I_C = 4A \quad I_O = 5A$$

10.4 开关型稳压电路

线性稳压电路的主要特点:

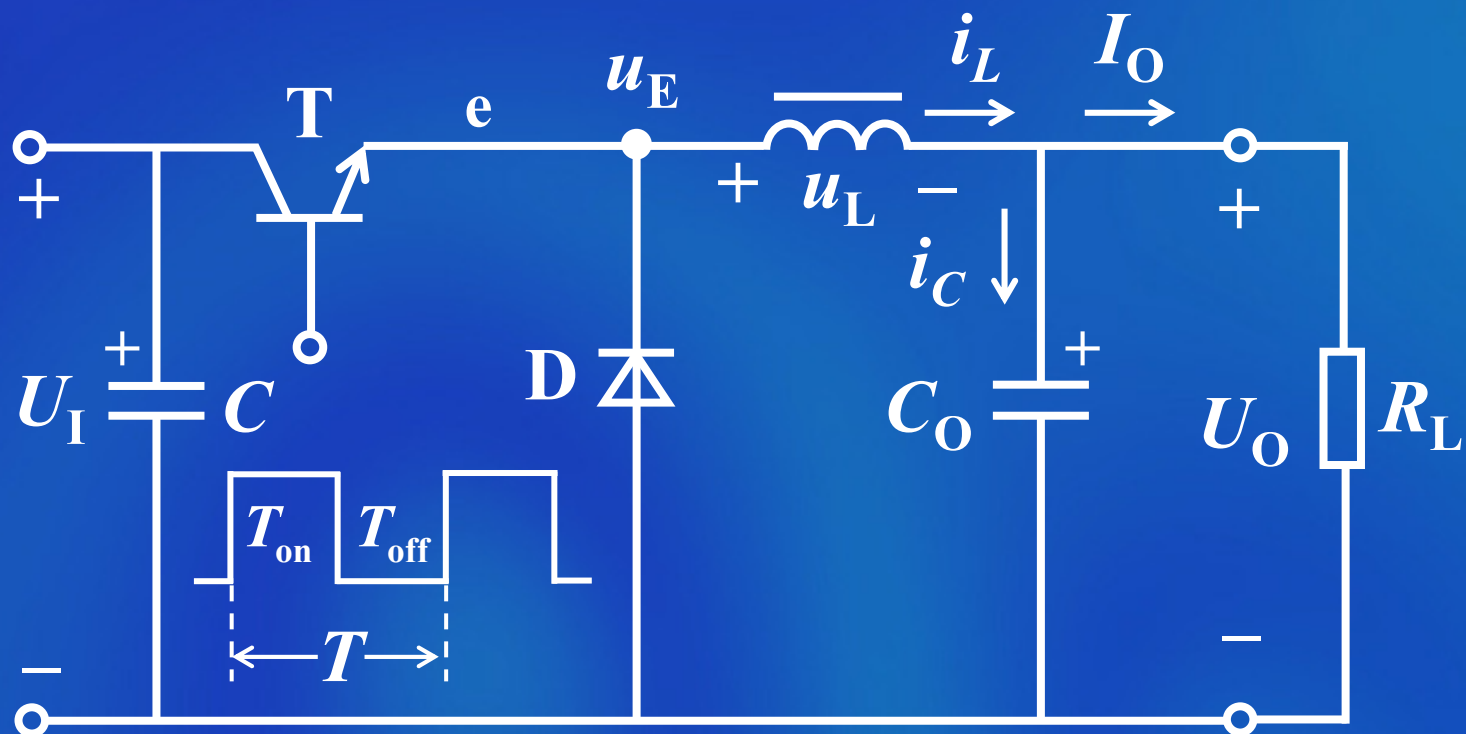
- (1) 电压稳定度高
- (2) 纹波电压小
- (3) 响应速度快
- (4) 电路简单
- (5) 调整管的功耗大
- (6) 功率变换效率低

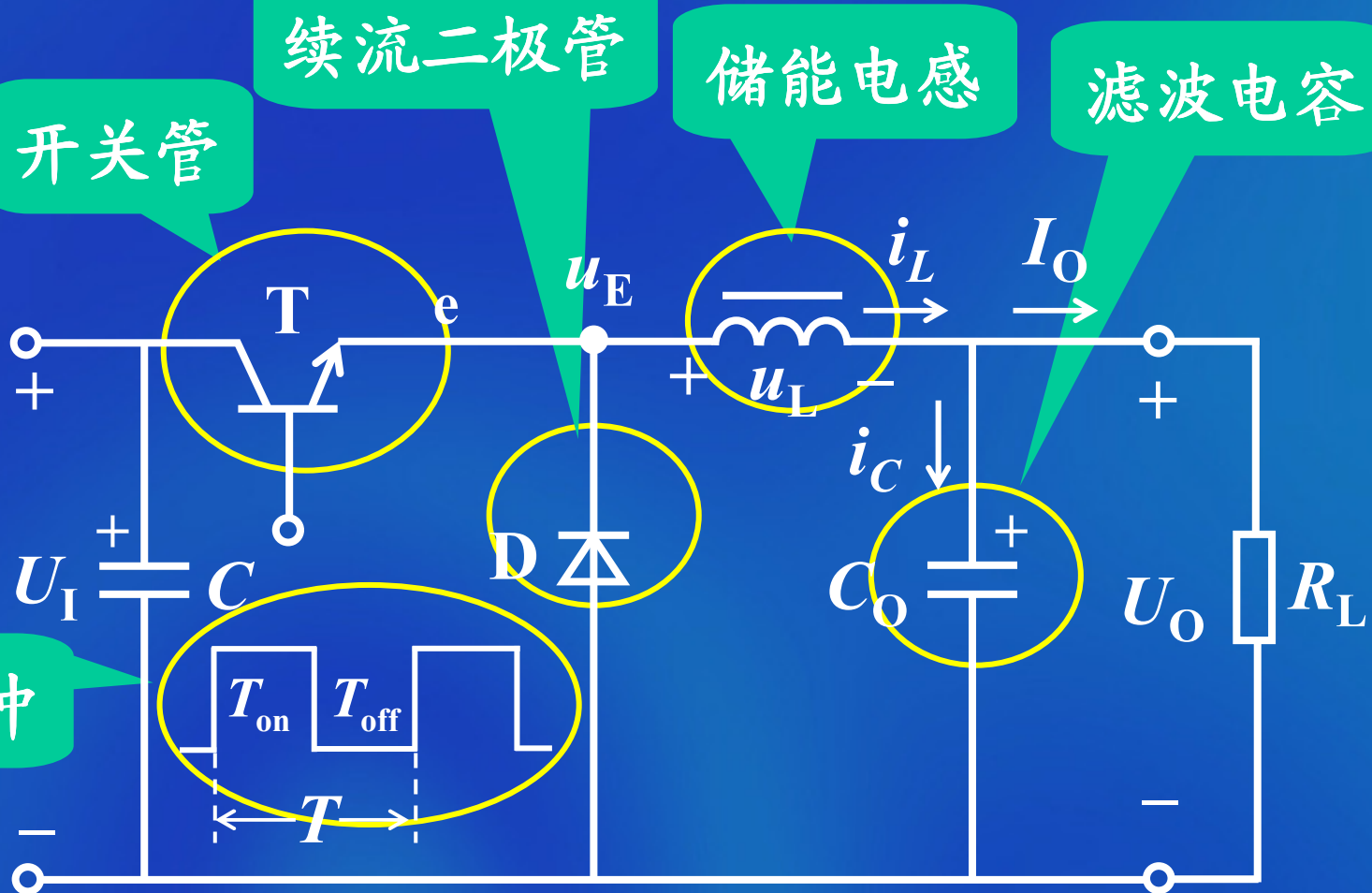
开关型稳压电路的主要特点:

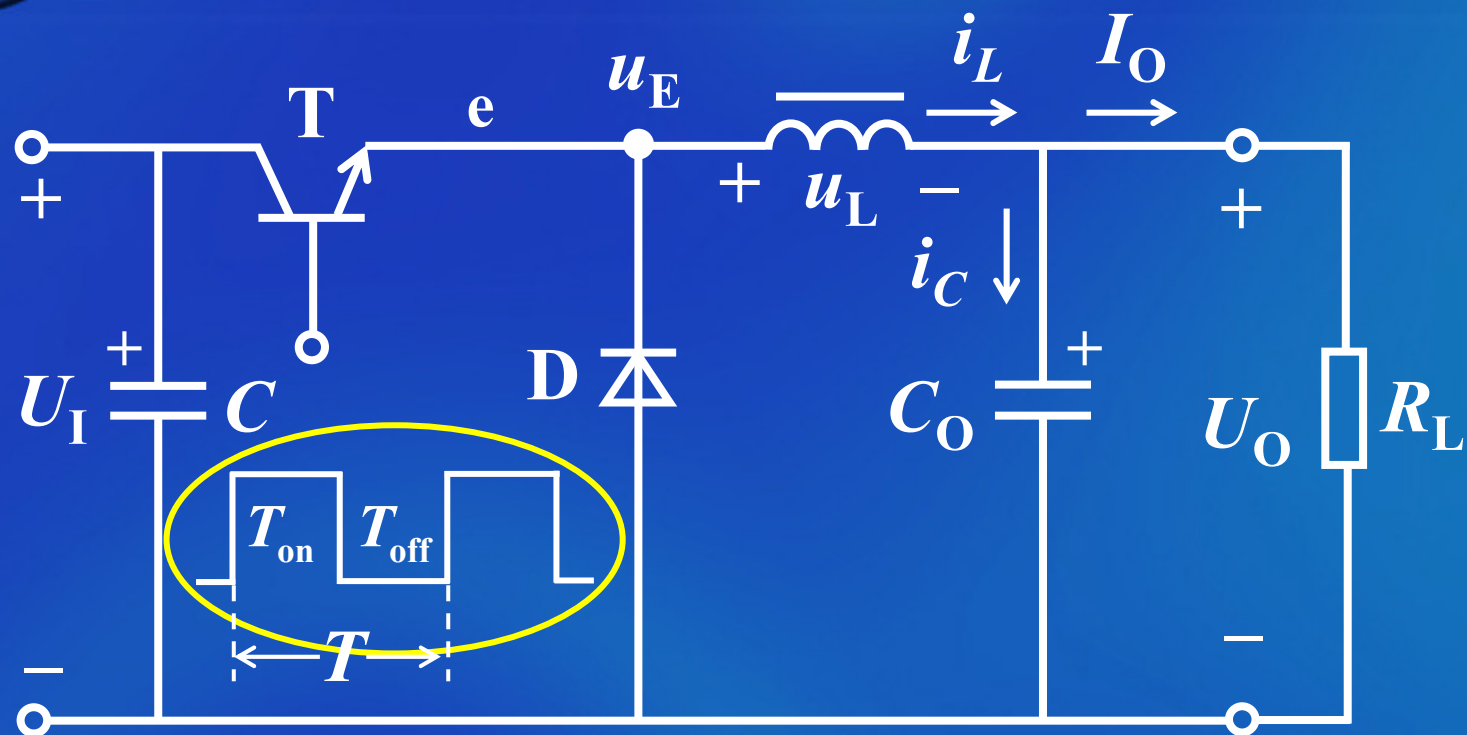
- (1) 调整管的工作于开关状态, 功耗低
- (2) 功率变换效率高
- (3) 体积小、重量轻
- (4) 可以省去电源变压器
- (5) 输出纹波大

降压型开关稳压电路的工作原理

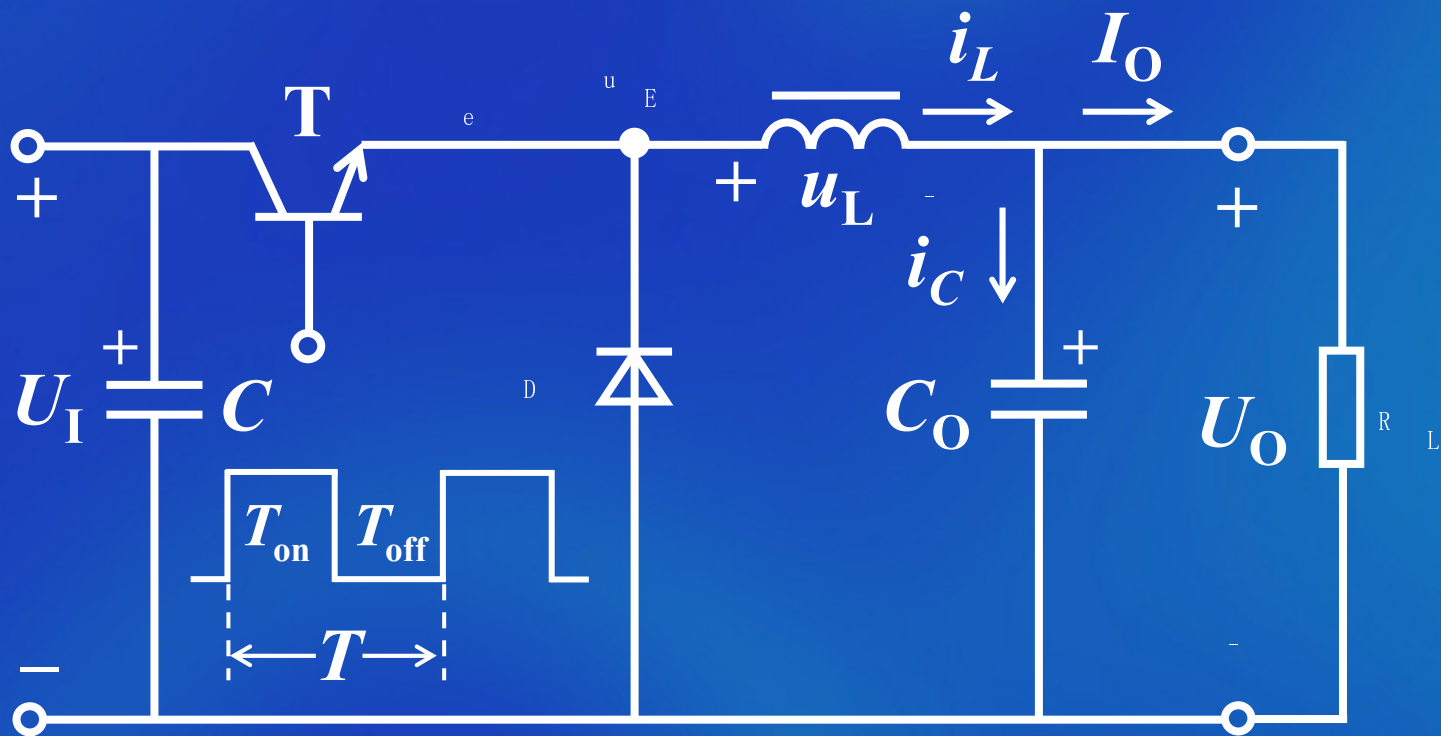
1. 降压型开关稳压电路







控制脉冲的特点 { 来自反馈控制电路
周期 T 恒定



2. 工作原理

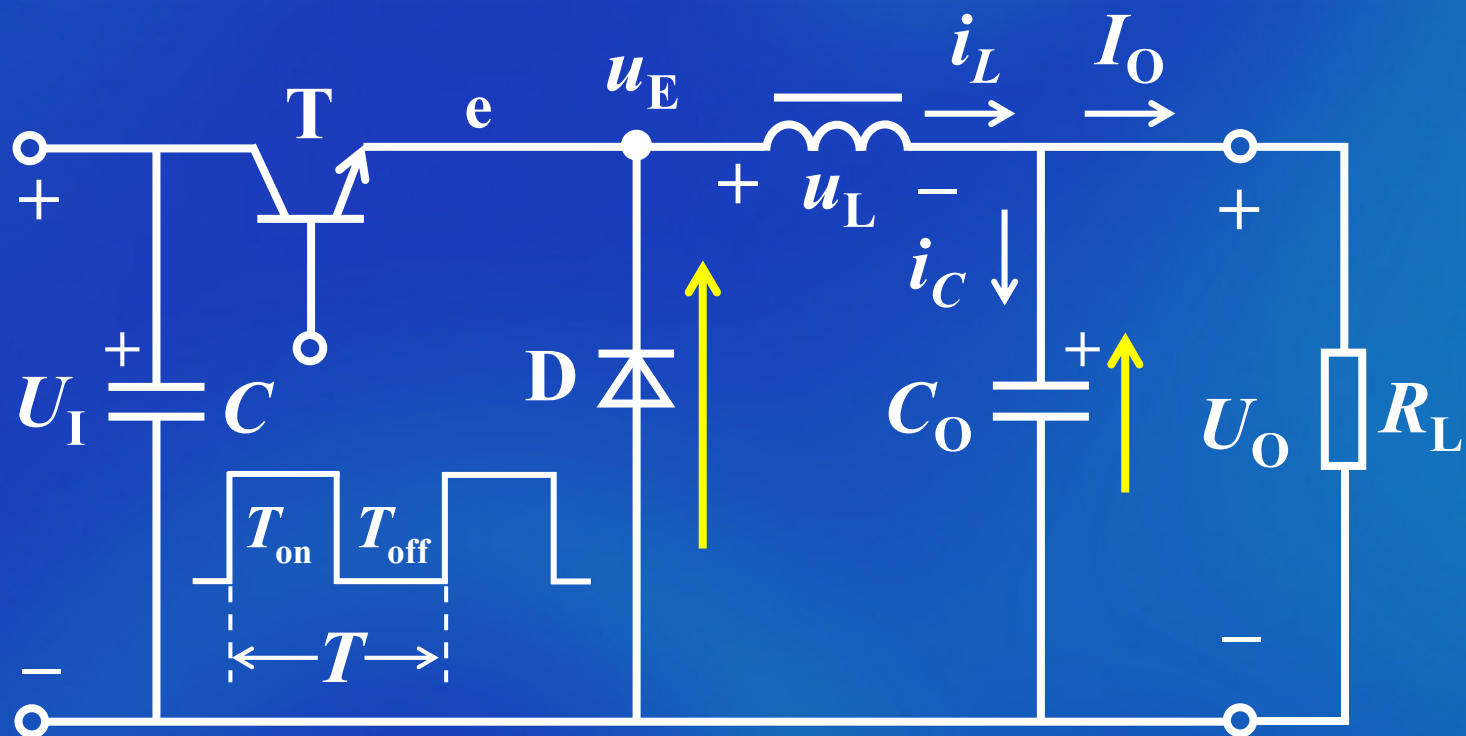
(1) 当控制脉冲为高电平(T_{on} 期间)时

T饱和导通

$$u_E \approx U_I$$

D截止

C_0 充电、 L 储能



(2) 当控制脉冲为低电平(T_{off} 期间)时

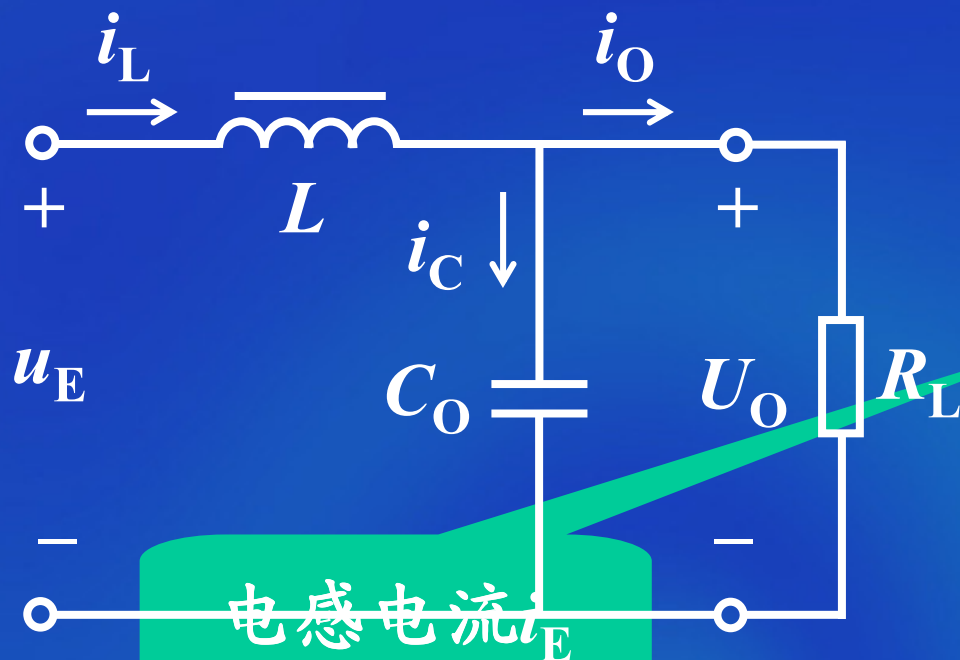
T 截止

D 导通

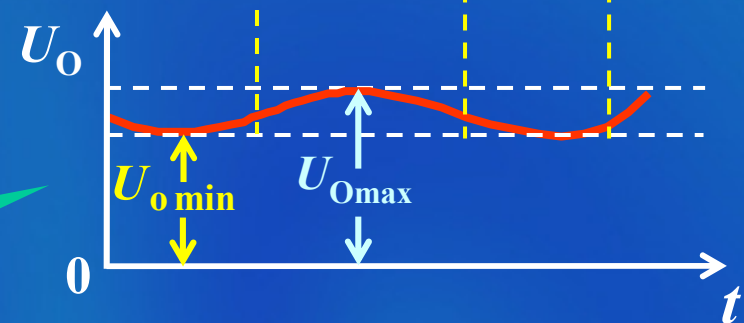
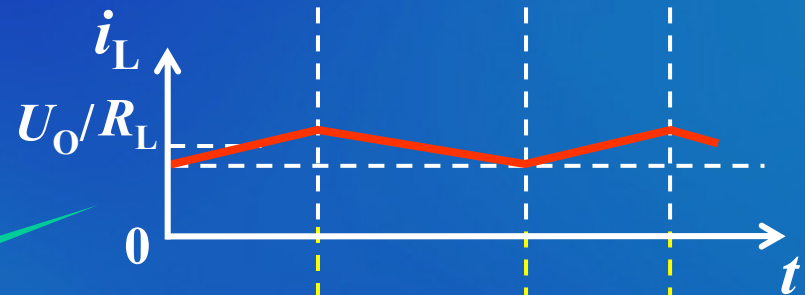
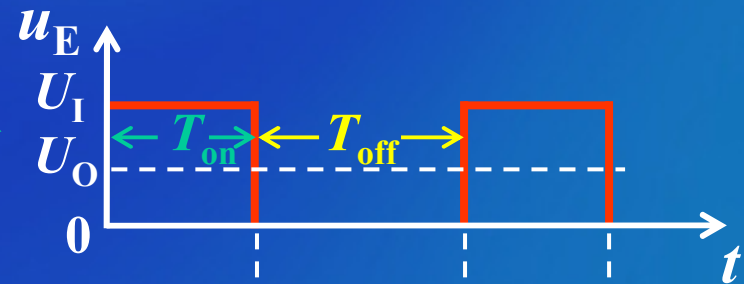
C_O 、 L 放能

(3) 工作波形

射极电压 u_E



输出电压 u_O



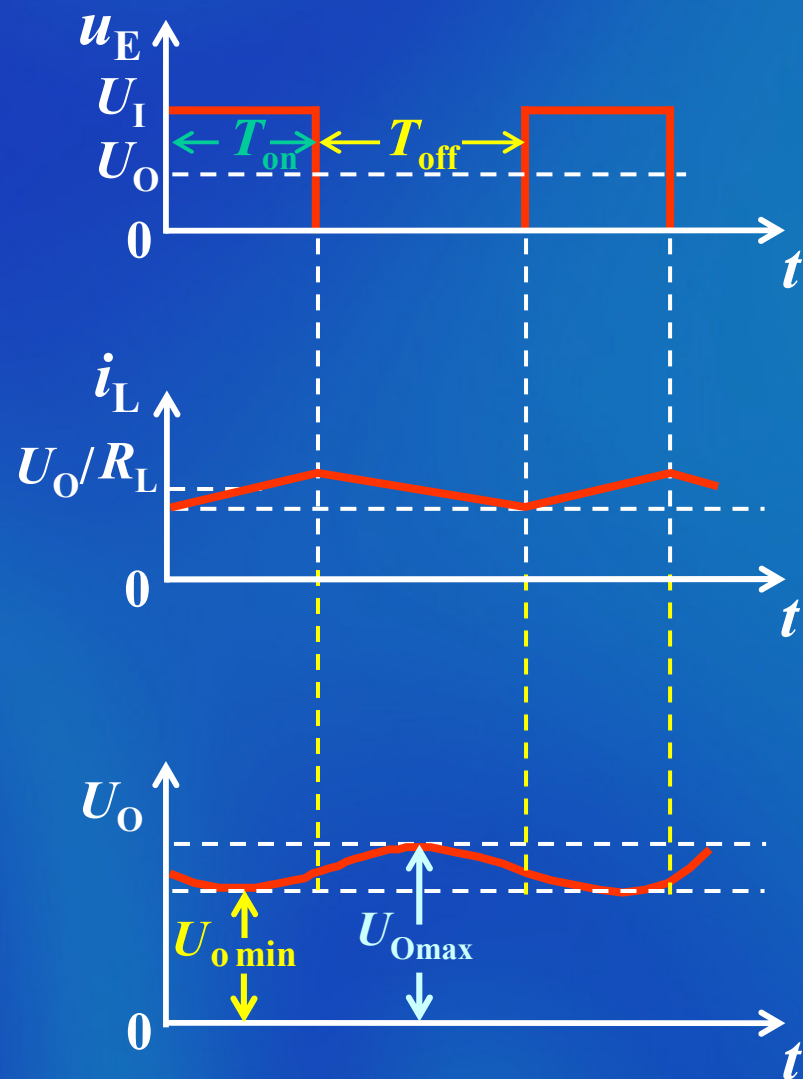
3. 输出电压 U_O

占空比

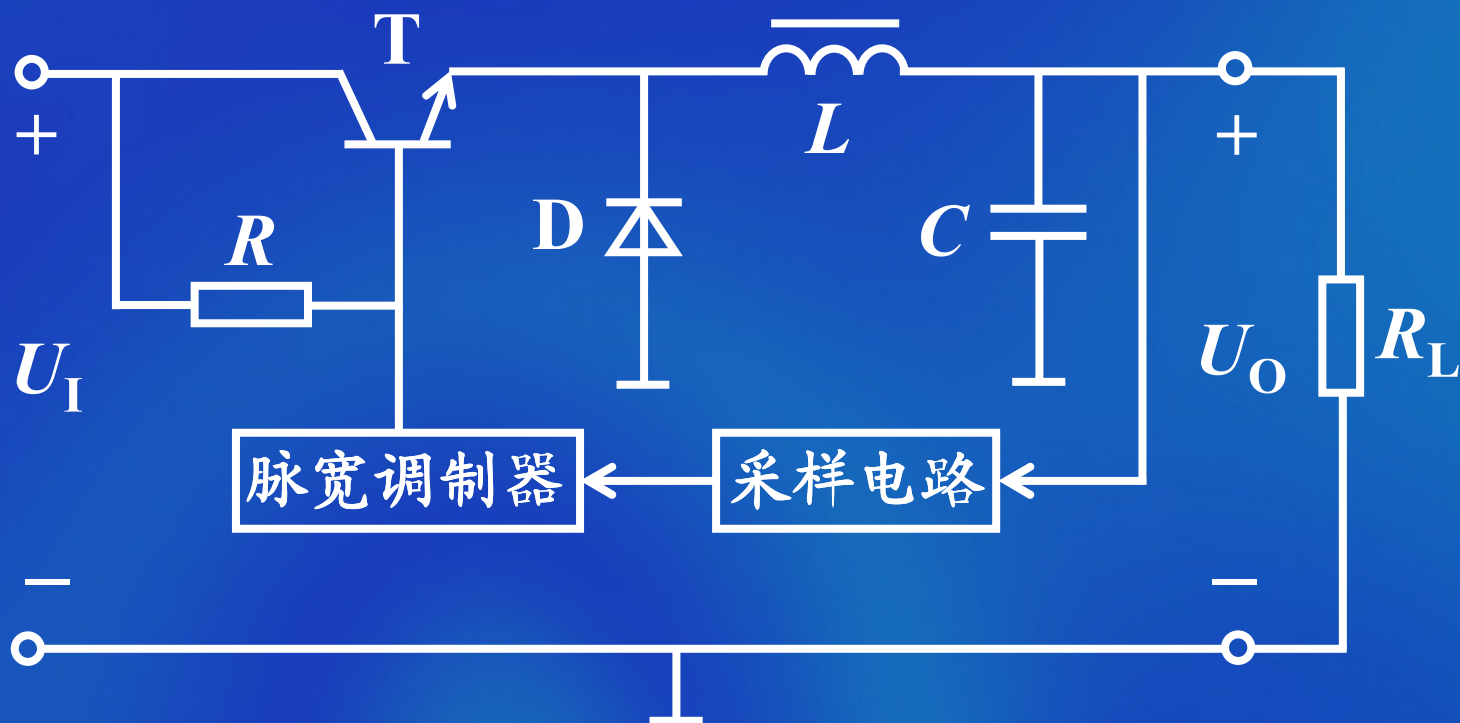
$$q = \frac{T_{\text{on}}}{T_{\text{on}} + T_{\text{off}}} = \frac{T_{\text{on}}}{T}$$

输出直流电压

$$U_O \approx qU_I$$



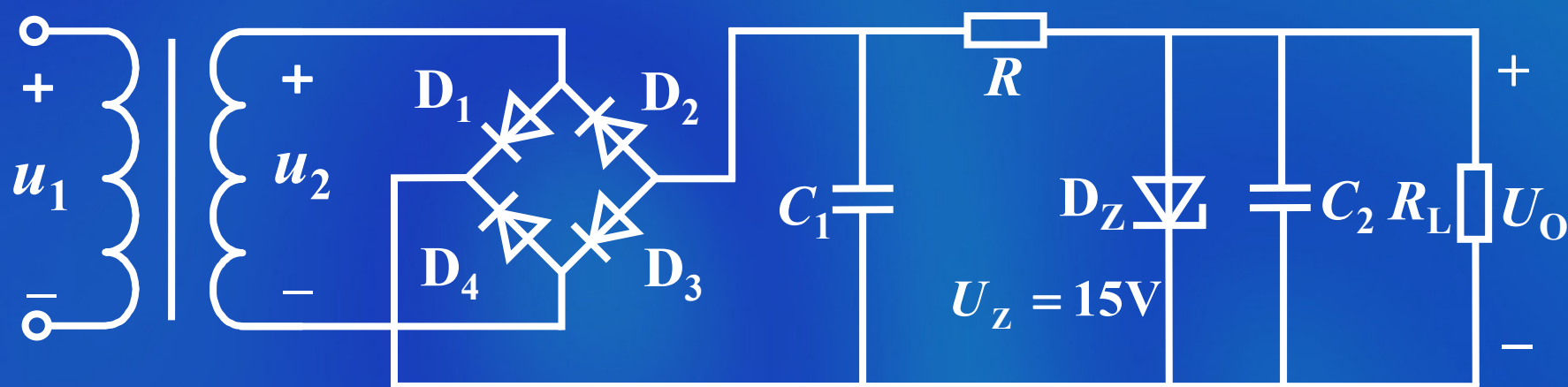
4. 反馈控制的降压型开关稳压电源方框图

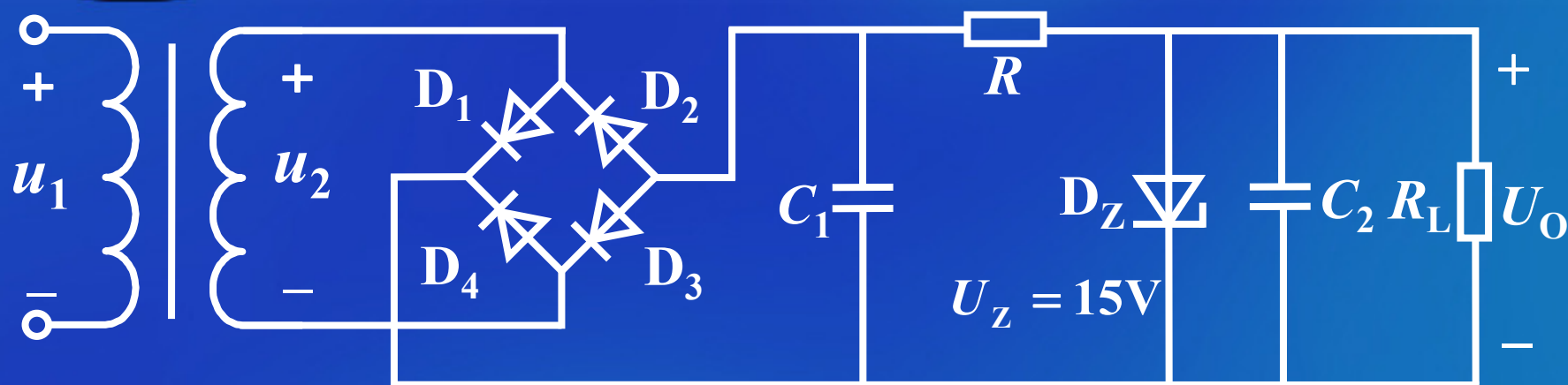


练习题

例1. 某稳压电源如图所示, 试问:

- (1) 输出电压 U_O 的极性和大小如何?
- (2) 电容器 C_1 和 C_2 的极性如何?
- (3) 如将稳压管接反, 后果如何?
- (4) 如 $R=0$, 又将产生怎样的后果?





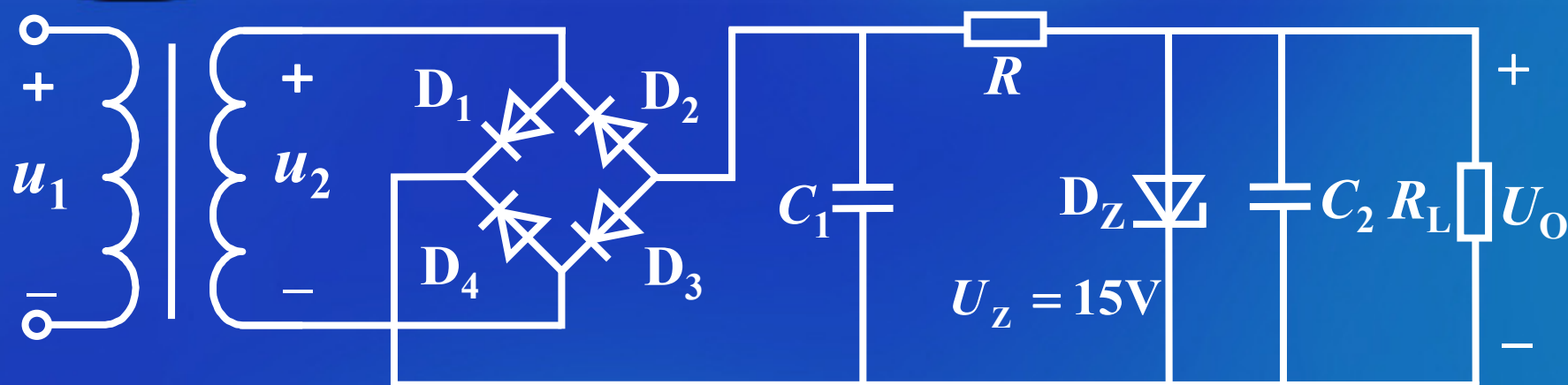
解: (1) $U_O = -15V$, 极性上“-”下“+”。

(2) C_1 和 C_2 的极性均为上“-”，下“+”。

(3) 稳压管接反的直接后果是:

(a) 输出电压 $U_O \approx 0$;

(b) 可能造成二极管和稳压管也被烧坏。

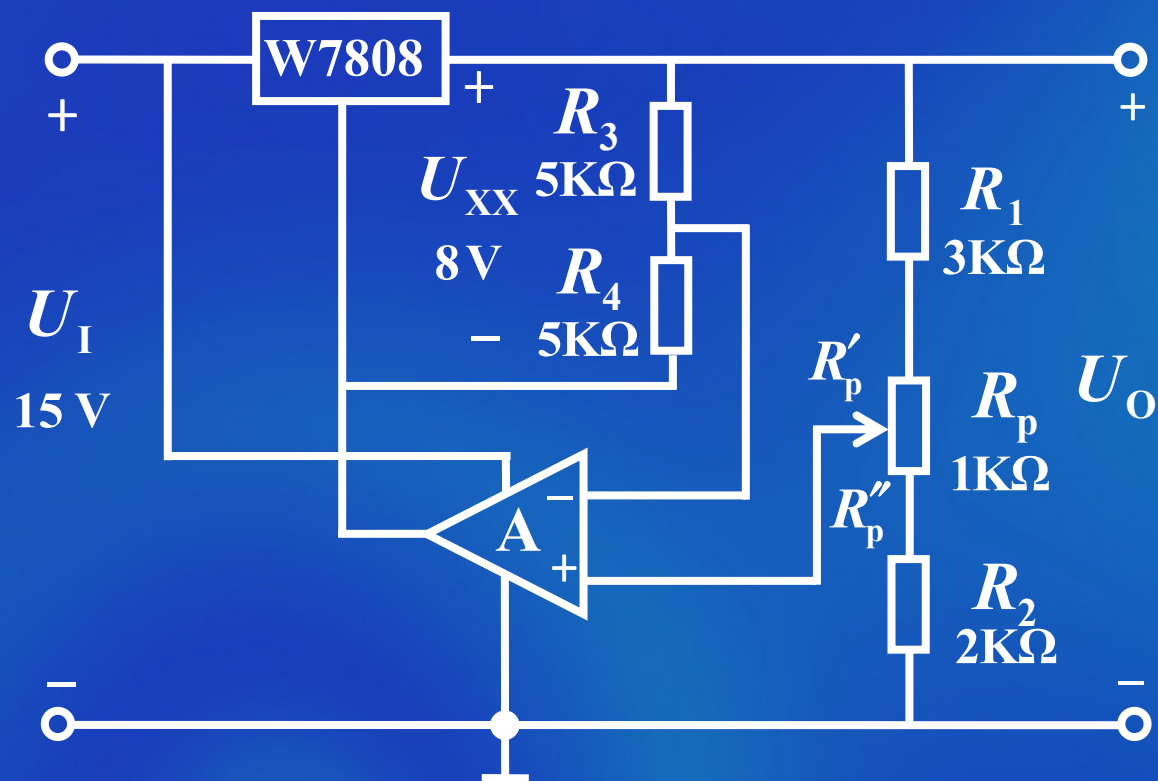


(4) 如 $R=0$, 则

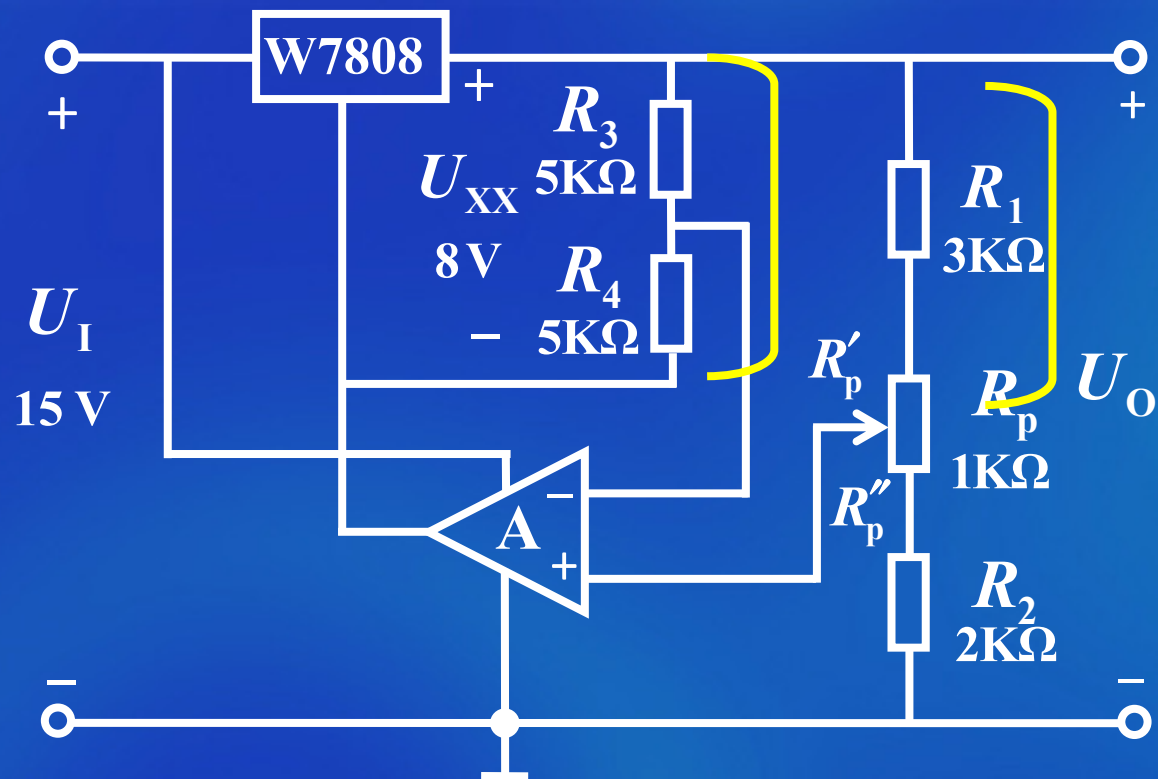
(a) $U_I \approx U_Z$ 、 $I_Z > I_{Z\max}$, 稳压管首先可能烧坏。

(b) 当稳压管烧坏造成短路时, 二极管电流过大也会被烧坏。

例2 试求图示电路的输出电压 U_O 的可调范围。



解 由题意知，运算放大器处于线性状态，根据“虚短”的概念，由图可得



$$\frac{R_3}{R_3 + R_4} U_{XX} = \frac{R_1 + R'_p}{R_1 + R_p + R_2} U_O$$

故

$$U_O = \frac{R_3}{R_3 + R_4} \times \frac{R_1 + R_p + R_2}{R_1 + R'_p} U_{XX}$$

$$U_o = \frac{R_3}{R_3 + R_4} \times \frac{R_1 + R_p + R_2}{R_1 + R'_p} U_{xx} \quad (0 \leq R'_p \leq R_p)$$

当 $R'_p = R_p$ 时

$$U_o = \frac{5}{5+5} \times \frac{3+1+2}{1+2} \times 8 = 8V$$

当 $R'_p = 0$ 时

$$U_o = \frac{5}{5+5} \times \frac{3+1+2}{2} \times 8 = 12V$$

即 U_o 的可调范围为 $8 \sim 12V$ 。