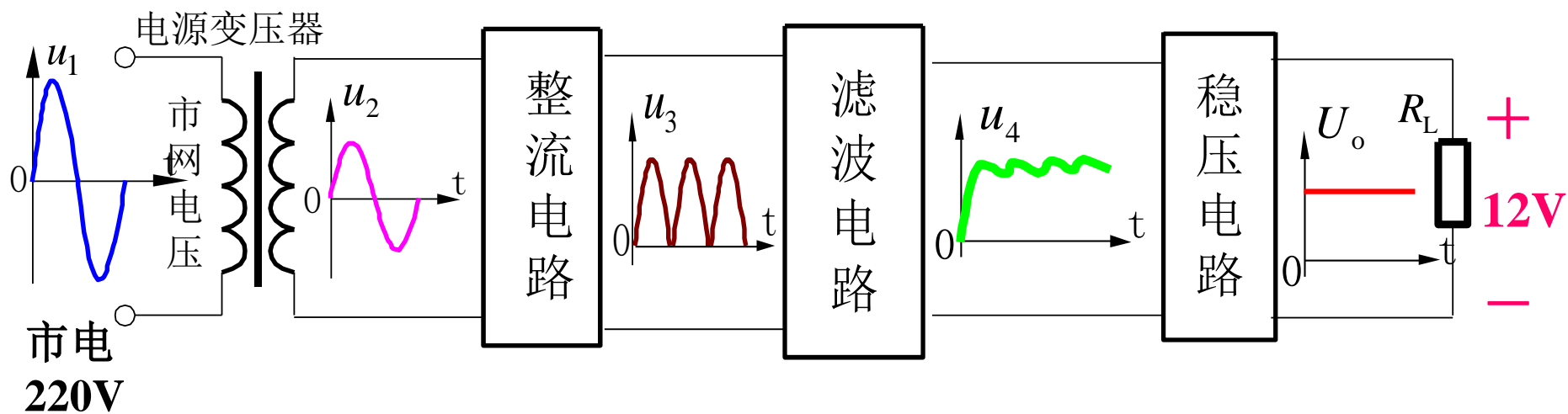


# 第11章 直流稳压电源

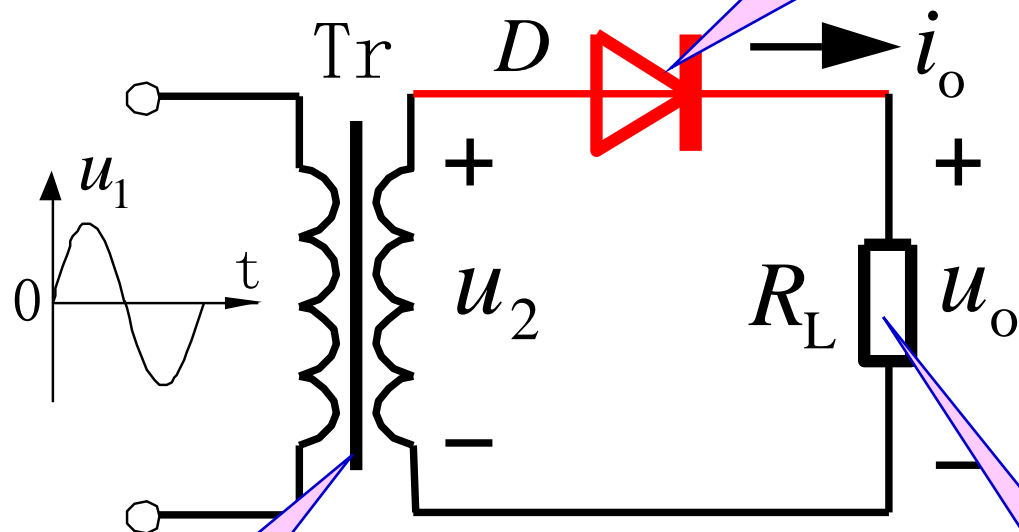
# 直流稳压电源的电路组成及工作原理

## 直流稳压电源的组成



# 单相整流电路

## 单相半波整流电路



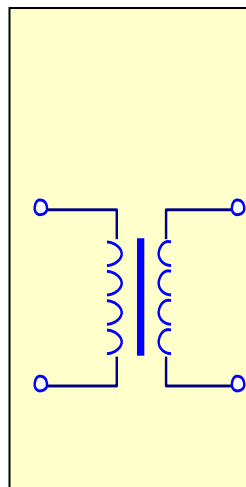
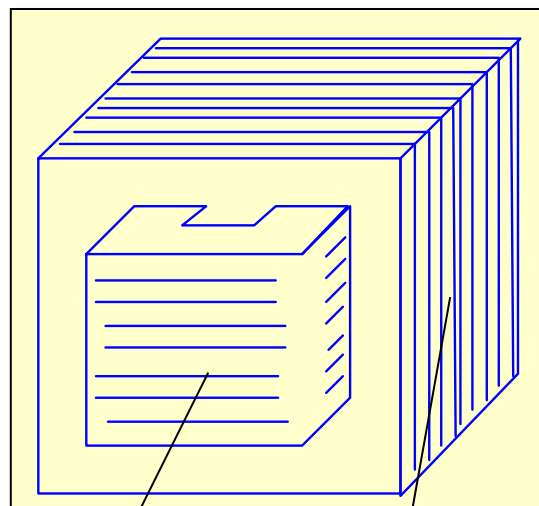
电源变压器

整流二极管

负载

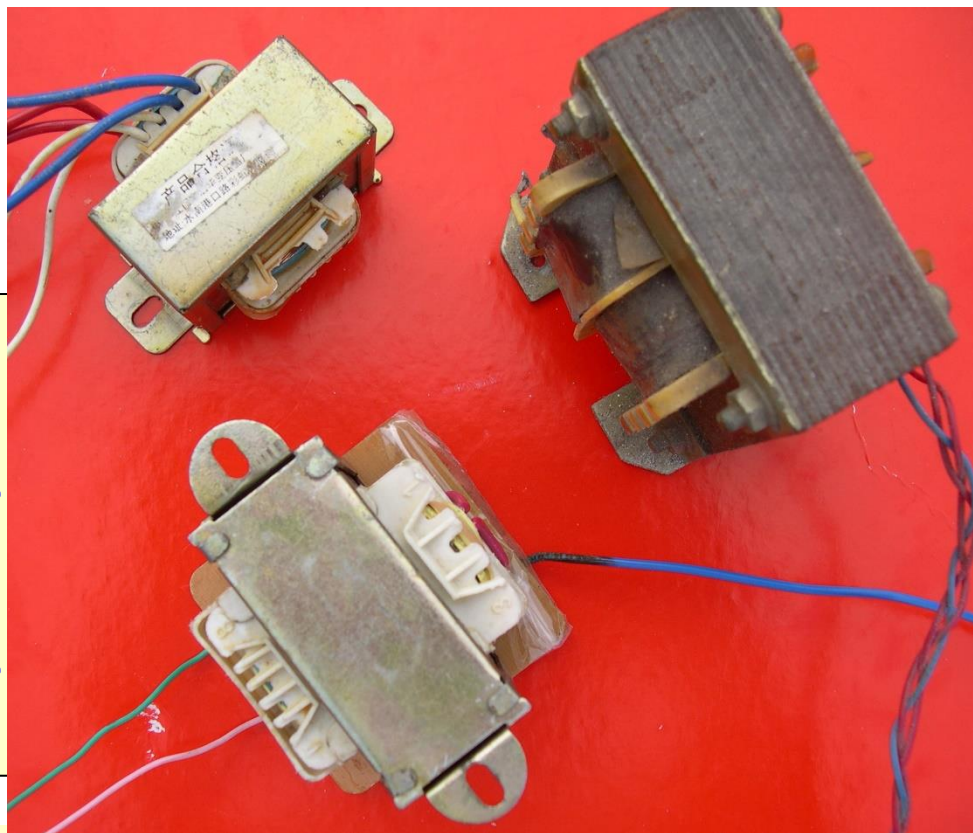
## 单相半波整流电路

## 单相电源变压器



线圈

铁芯



$$k = \frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{n}$$

## 分析的前提

a. 理想的变压器

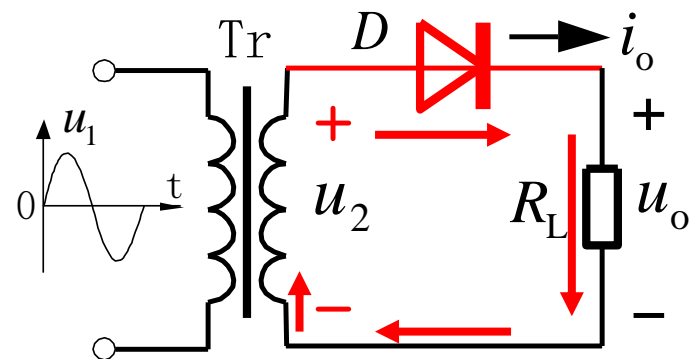
b. 理想的二极管

假设变压器二次侧的电压为

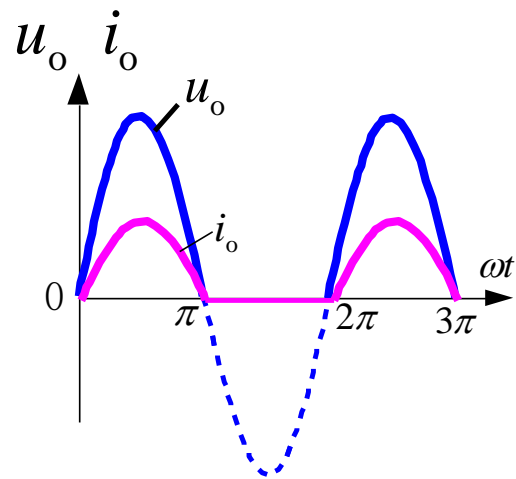
$$u_2 = U_{2m} \sin \omega t = \sqrt{2}U_2 \sin \omega t$$

由二极管的单向导电性

当二极管的阳极电位高于阴极电位时才导通。



(a) 半波整流电路



(b) 输出电压和电流的波形

如果将二极管反接，输出电压有何变化？

负载上得到的是单向脉动电压，其大小仍然在不断变化，其**平均值**为

$$U_o = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t d(\omega t) = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 = 0.45U_2$$

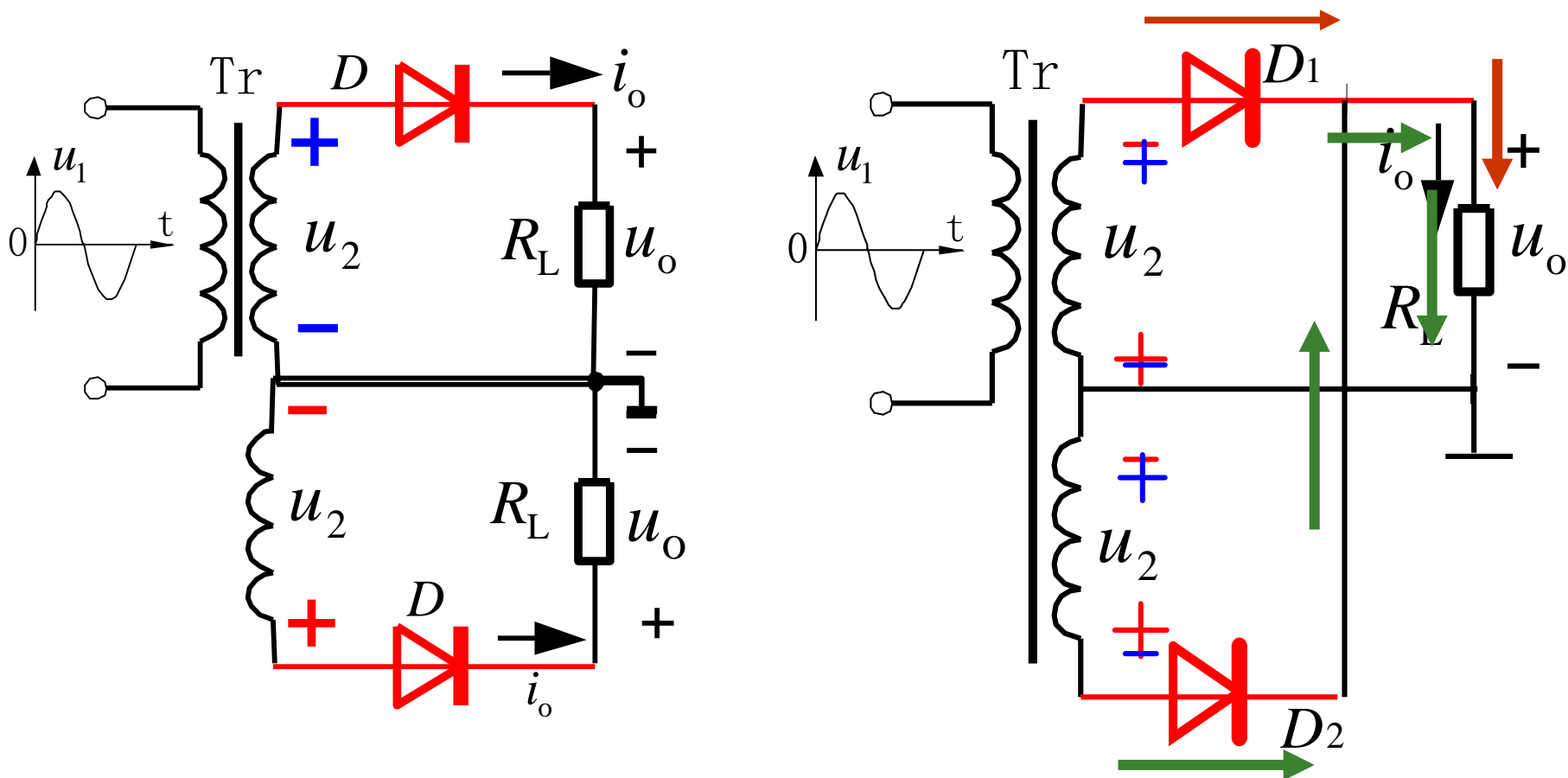
流过**负载电阻**  $R_L$  **电流的平均值**为

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

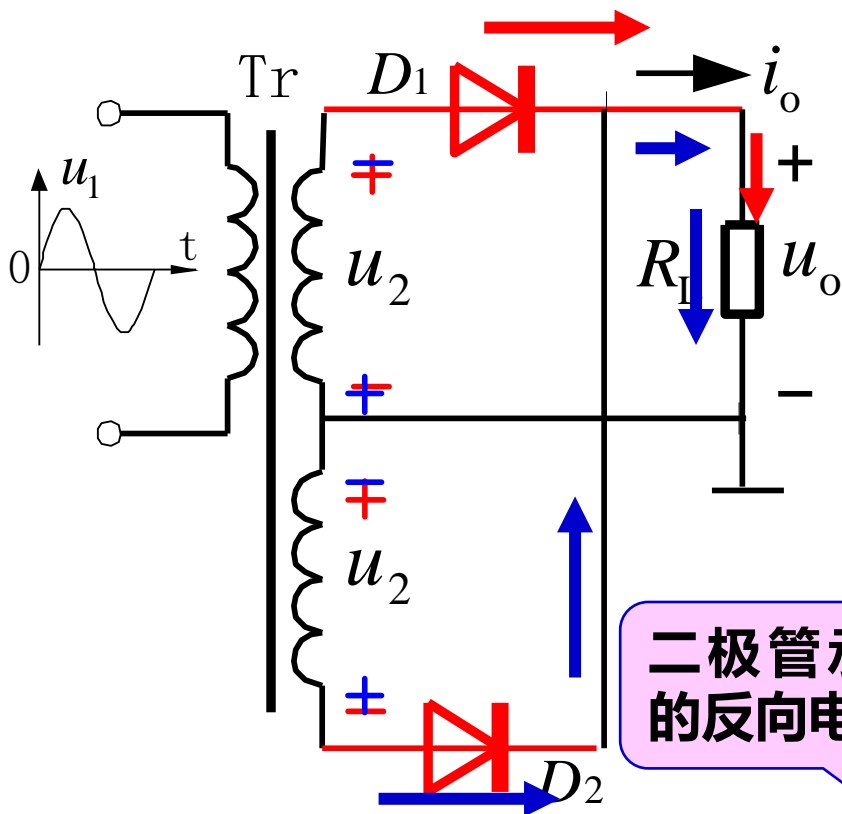
单向半波整流电路中，二极管截止时所承受的**最高反向电压**就是

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

# 单相全波整流电路

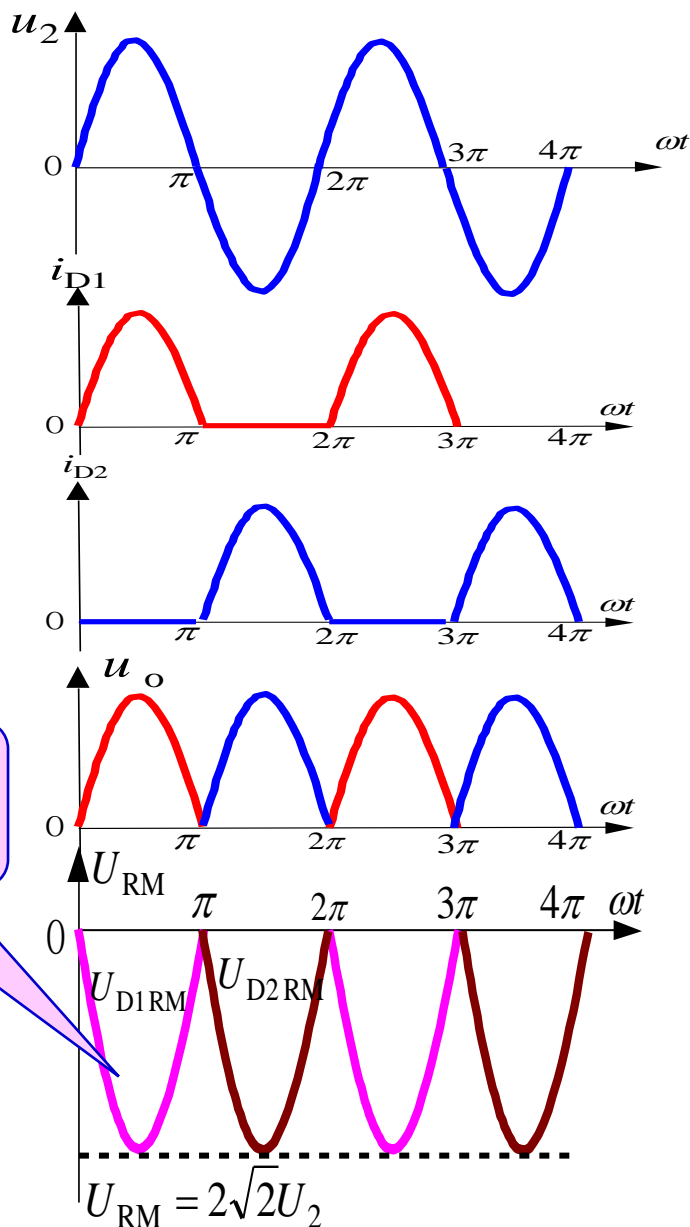


$$u_2 = U_{2m} \sin \omega t = \sqrt{2}U_2 \sin \omega t$$



由图可知二极管所承受的最大反向电压

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





# 全波整流电路参数

由图可知，全波整流电路的输出电压得平均值为

$$U_o = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u_o d(\omega t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t d(\omega t)$$
$$= \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 = 0.9U_2$$

全波整流的输出电压的平均值为半波整流的2倍

由此可以看出，全波整流的输出电压的平均值为半波整流的2倍。其流过负载的平均电流为

$$I_o = \frac{2\sqrt{2}U_2}{\pi R_L} = \frac{0.9U_2}{R_L}$$

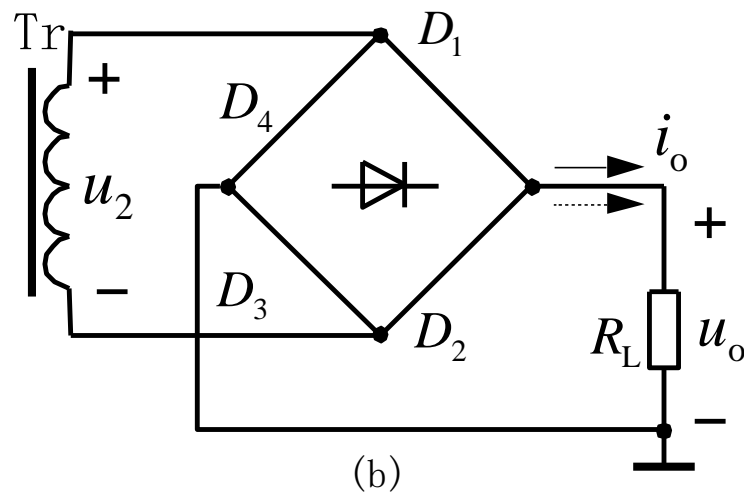
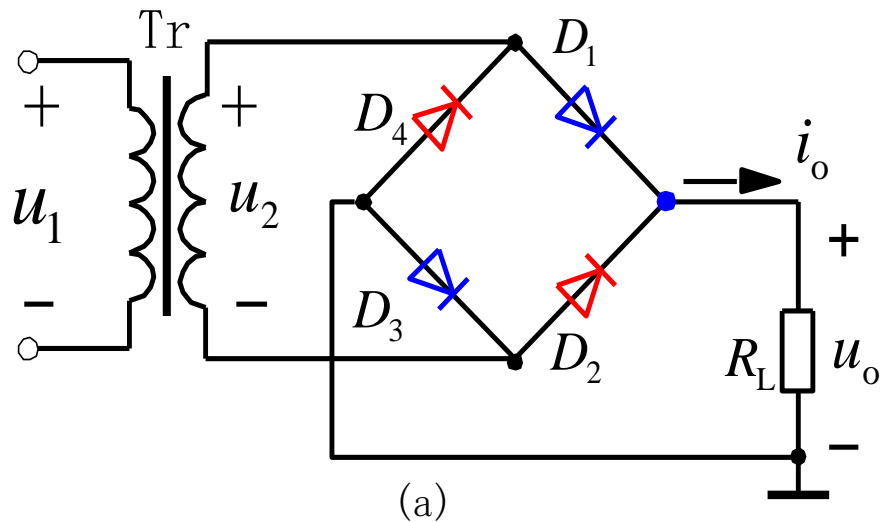
$$I_D = \frac{I_o}{2} = \frac{\sqrt{2}U_2}{\pi R_L} = \frac{0.45U_2}{R_L}$$

# 单相桥式整流电路

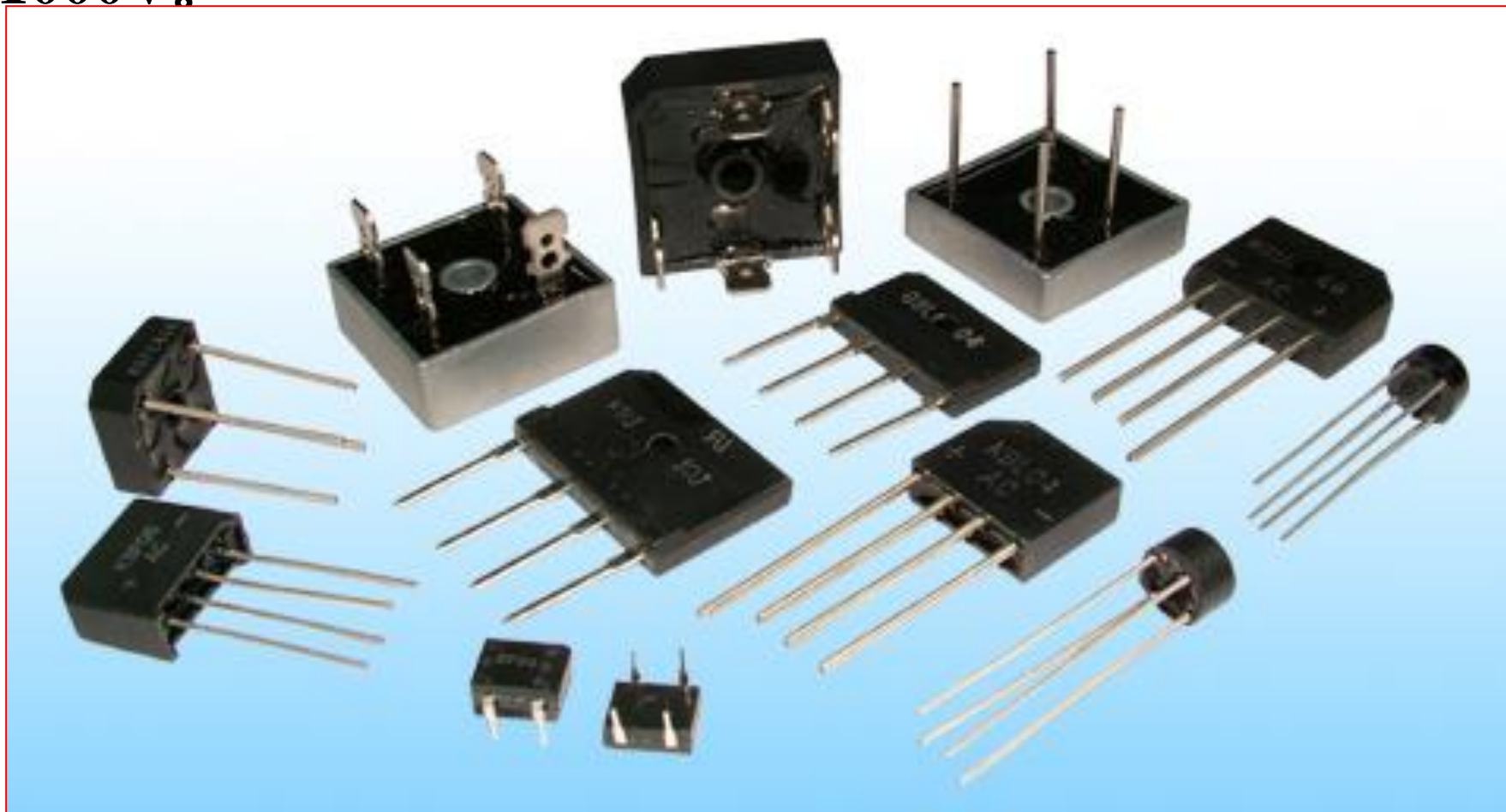
## 1. 单相桥式整流电路

### 1) 电路组成

常用的单相桥式整流电路如图9-3a 所示。

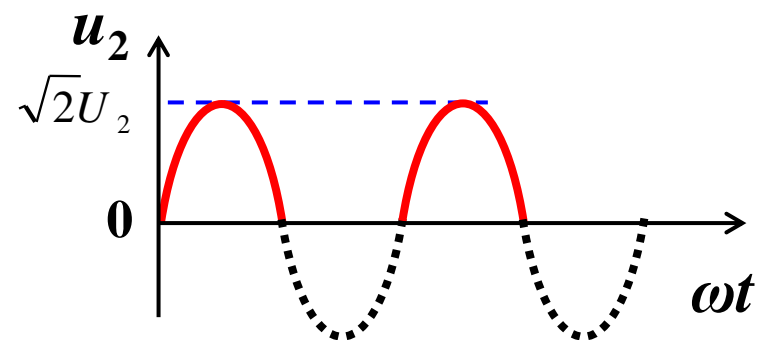


👉 **桥式整流硅堆**：将四个二极管按桥式整流电路的方式连接好封装在一起，只留四个引脚。市面上有售的如QL62A，其额定电流为2A，最大反向电压为25V ~ 1000V。



## 2) 工作原理

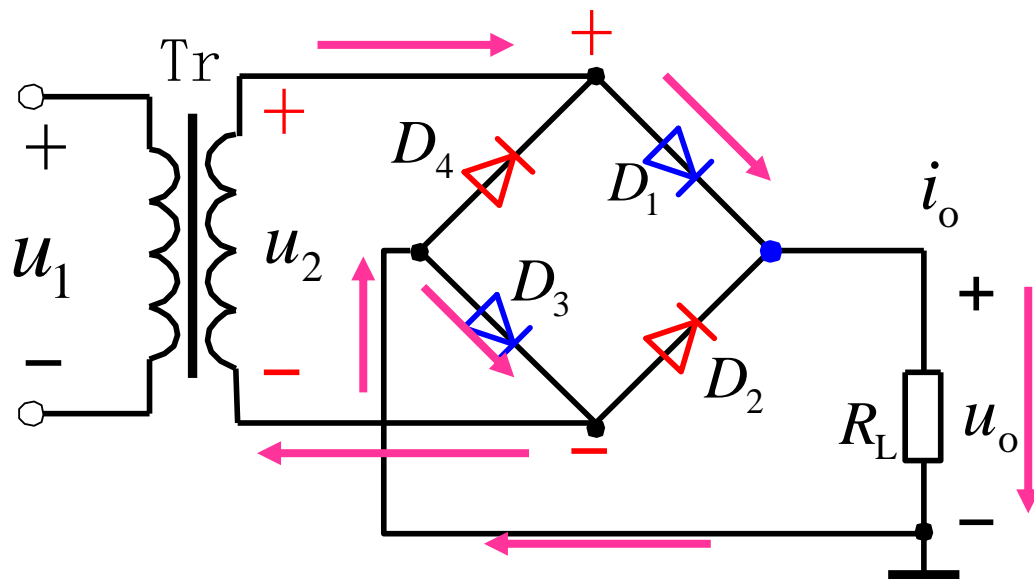
$u_2$  正半周时



分析的前提

(a) 性能理想的二极管  $D_1 \sim D_4$

(b) 理想变压器



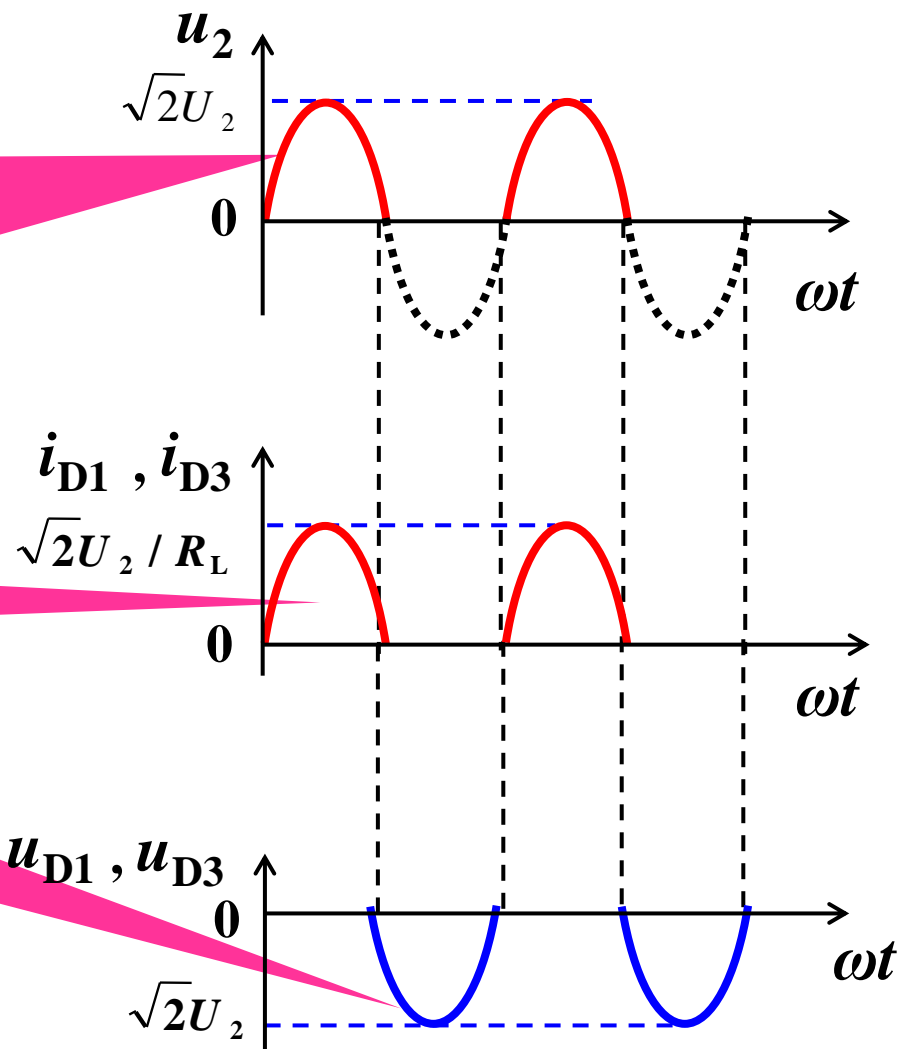
单相桥式整流电路图

## 详细分析

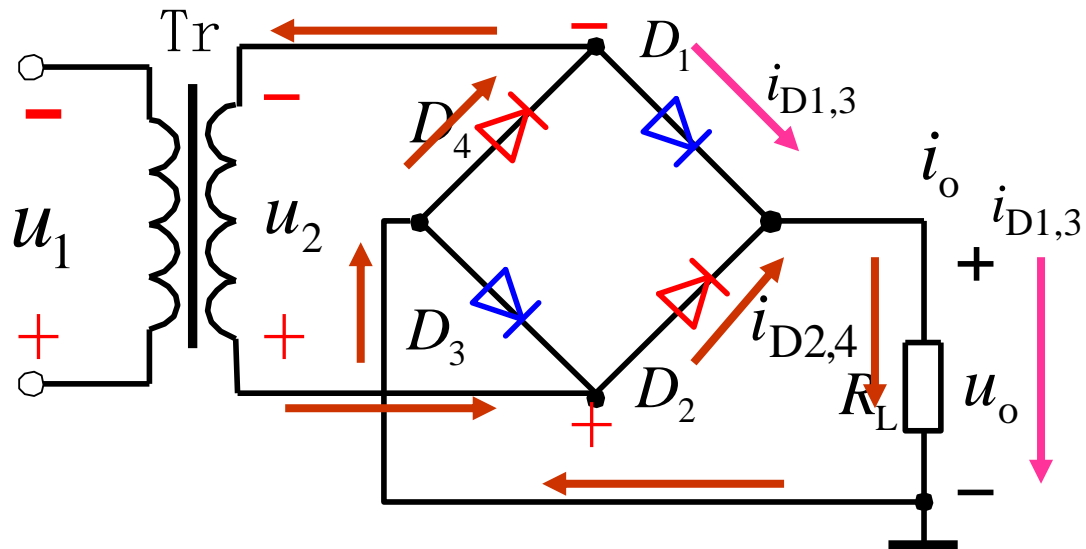
电压 $u_2$ 为正半周时  
 $D_1$ 、 $D_3$ 导通， $D_2$ 、 $D_4$ 截止

二极管 $D_1$ 、 $D_3$ 电流

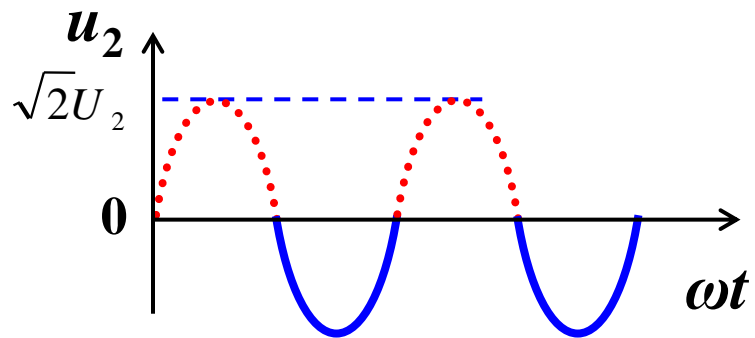
二极管 $D_1$ 、 $D_3$ 承受的  
反向电压



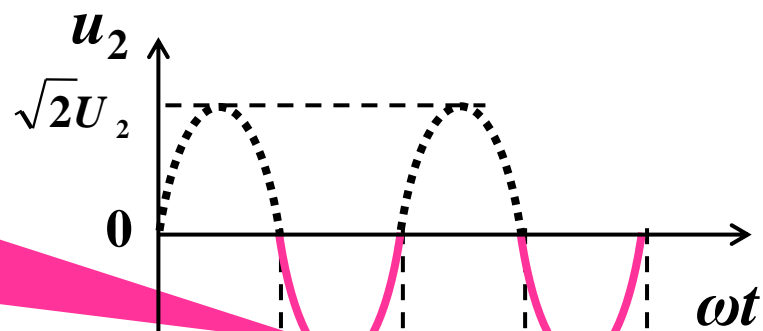
# $u_2$ 负半周时



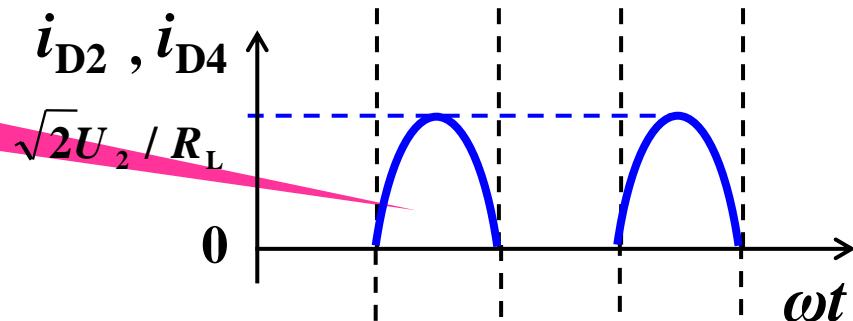
单相桥式整流电路图



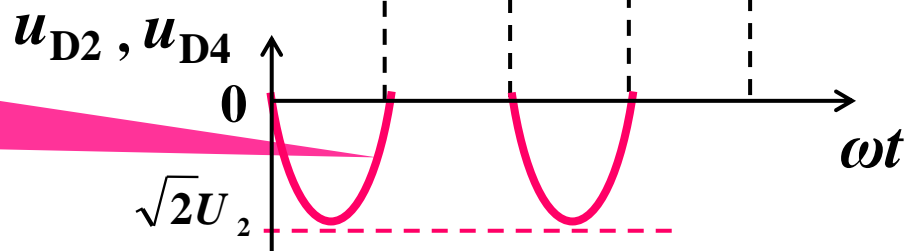
电压 $u_2$ 为负半周时  
 $D_1$ 、 $D_3$ 截止， $D_2$ 、 $D_4$ 导通

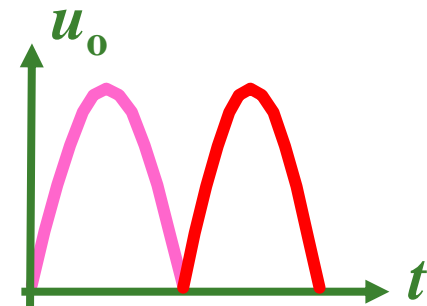
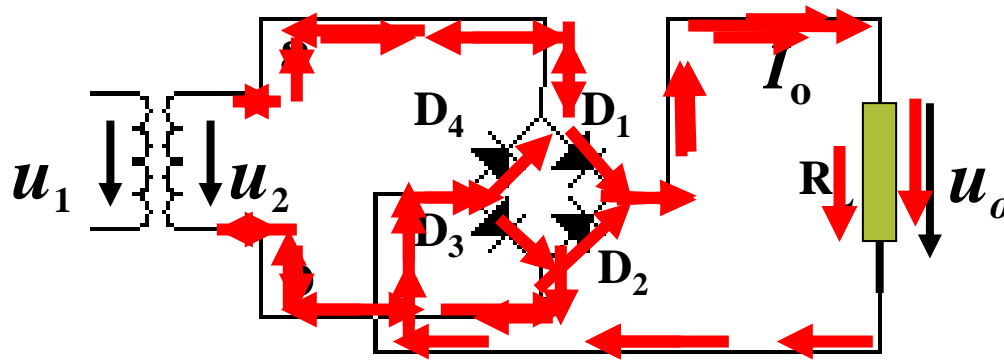


二极管 $D_2$ 、 $D_4$ 电流



二极管 $D_2$ 、 $D_4$ 承受的反向电压





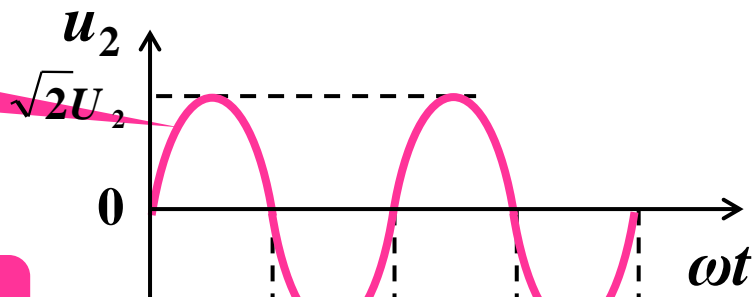
## 工作原理小结

$u_2$  为正半周:  $a \rightarrow D_1 \rightarrow R_L \rightarrow D_3 \rightarrow b$   $D_2 D_4$  截止  $u_0 = u_2$

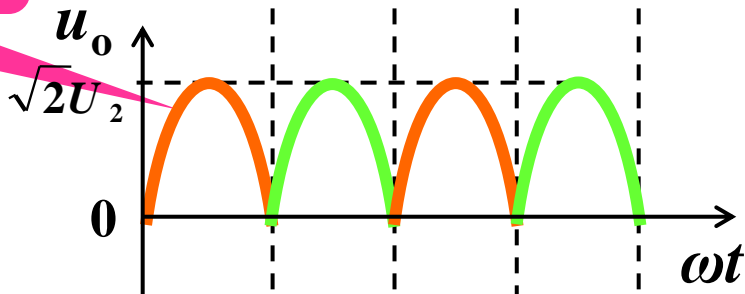
$u_2$  为负半周:  $b \rightarrow D_2 \rightarrow R_L \rightarrow D_4 \rightarrow a$   $D_1 D_3$  截止  $u_0 = -u_2$



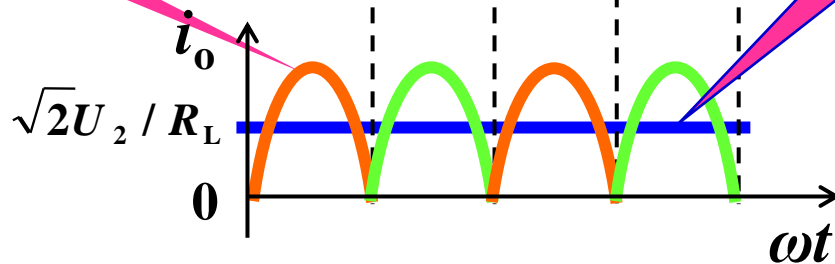
输入电压



整流电路输出电压



输出电流



输出电流的平均值

如果考虑二极管非线性，输出电压有何变化？

## 2. 桥式整流电路的性能分析

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

一个周期内的平均值  $U_o$

$$U_o = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u_o d(\omega t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d(\omega t) = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 = 0.9 U_2$$

直流电流为  $I_o = \frac{0.9 U_2}{R_L}$

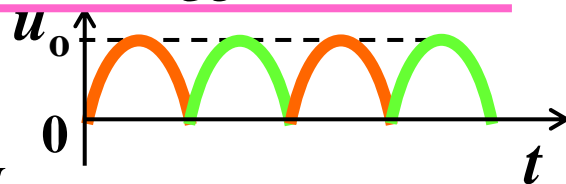
### (2) 脉动系数S

最低次谐波幅值与输出电压平均值之

$$S = \frac{U_{om1}}{U_o}$$

### (3) 流过二极管的正向平均电流

$$\underline{I_{D1,3} = I_{D2,4} = I_D = \frac{1}{2} I_o = \frac{0.45 U_2}{R_L}}$$



**其输出电压波形与单相全波整流相同**

(4) 二极管承受的最大反向电压  $U_{RM}$

二极管在截止时管子承受的最大反向电压

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

(5) 输出电压纹波因数  $\gamma = \frac{U_{or}}{U_o}$

$U_{or}$ ——输出电压中各次谐波电压有效值的总和

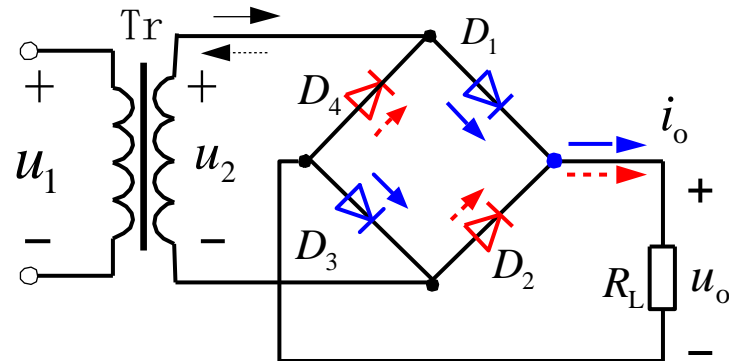
$U_o$ ——输出电压的平均值

**对于桥式整流电路**  $U_{or} = \sqrt{U_{o2}^2 + U_{o4}^2 + U_{o6}^2 + \cdots} = \sqrt{U_2^2 - U_o^2}$

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

## 例 题

**例** 如图所示单相桥式整流电路，电网交流电压220V，负载  $R_L=50\Omega$ ，要求输出  $U_o=100V$ ，试求变压器的变比，并选择整流二极管。



解： 本题的**思路**是

根据  $U_o = 0.9U_2 = 100$

$\rightarrow U_2 = \frac{100}{0.9} = 111V$

$$k = \frac{111}{220} \approx 1/2 \quad I_o = \frac{U_o}{R_L} = \frac{100}{50} = 2A$$

$$\left\{ I_{D1,3} = I_{D2,4} = I_D = \frac{1}{2} I_o = 1A \right.$$

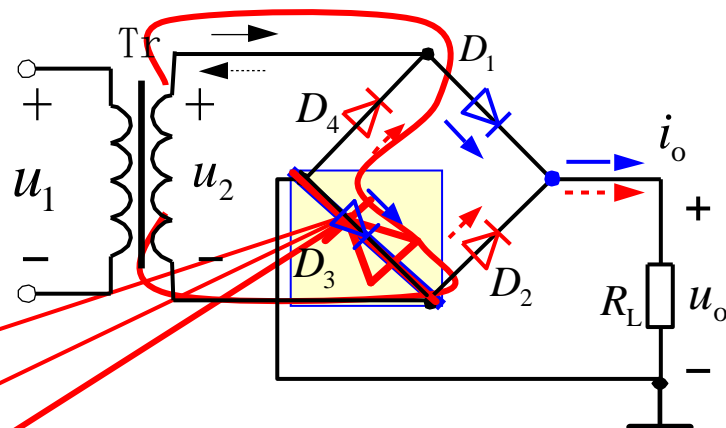
$$U_{RM} = \sqrt{2}U_2 = 157V$$

据此选择二极管

选择 **2CZ12D** (3A, 300V) 二极管4只

或 选择 **2CZ12E** (3A, 400V) 二极管4只

**问题？** 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 $D_3$ 管反接

3. 若 $D_3$ 管短路

解：1. 正半周不通，负半周正常。**结果？** 为半波整流， $U_0 = 0.45U_2$

2. 负半周变压器被短路。**结果？** 烧坏变压器， $U_0=0$

3. 负半周变压器被短路。**结果？** 烧坏变压器， $U_0=0$

## 滤波电路

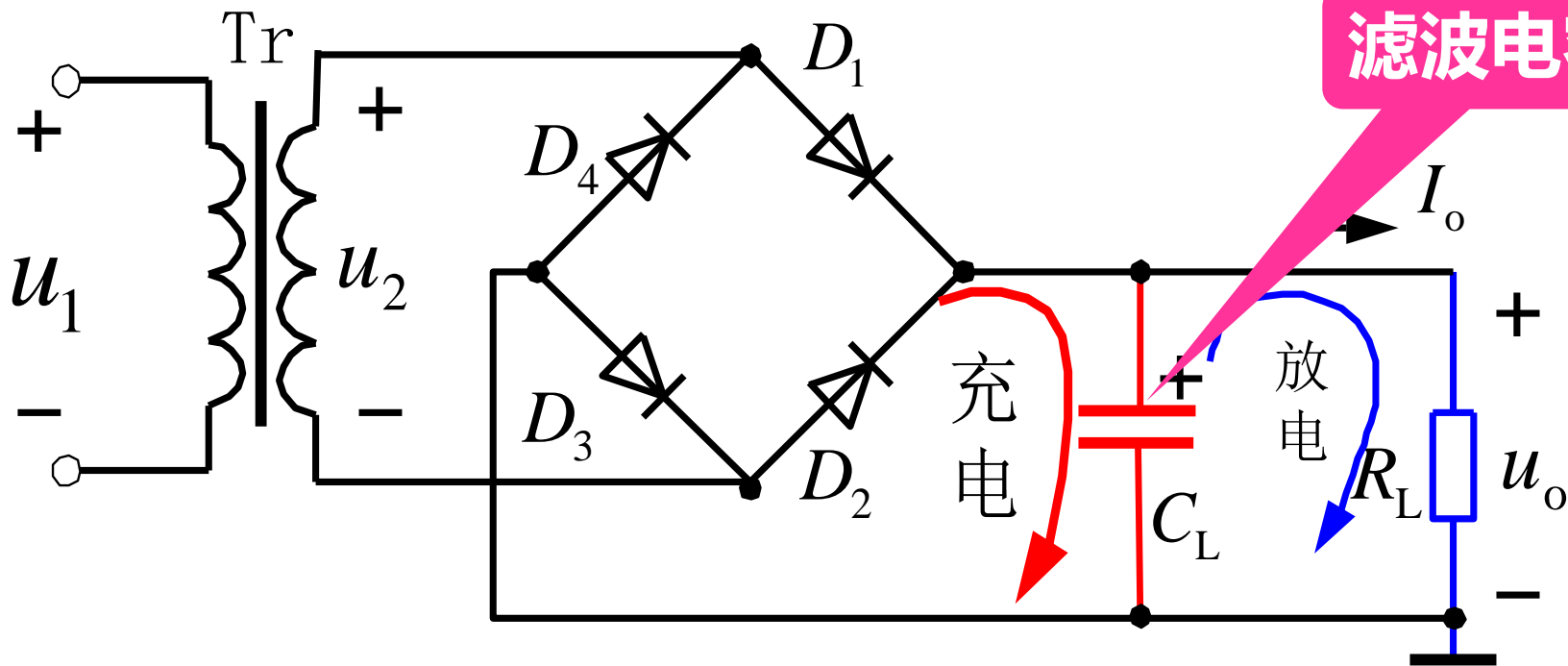
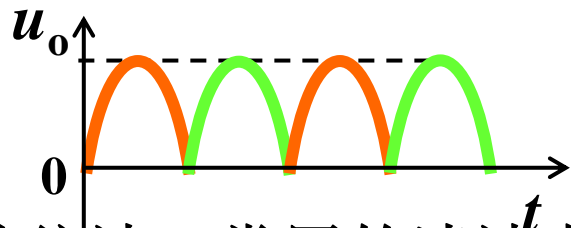
整流输出尽管已经成为直流电压，但脉动太大，输出中的高频分量较多。全波和桥式整流输出电压可表示为：

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

**滤波电路的作用是滤除整流电压中的高频分量。  
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等。**

## 电容滤波

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。



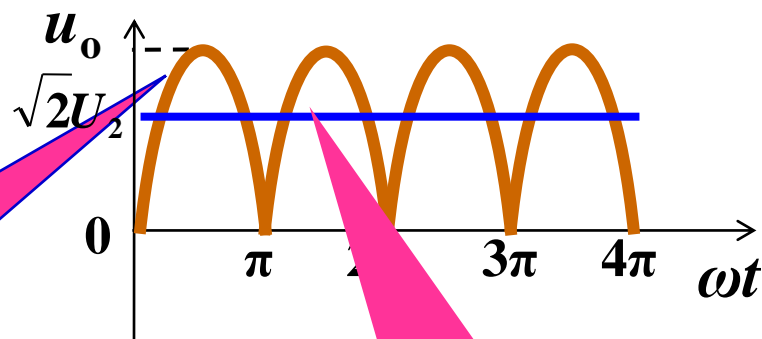
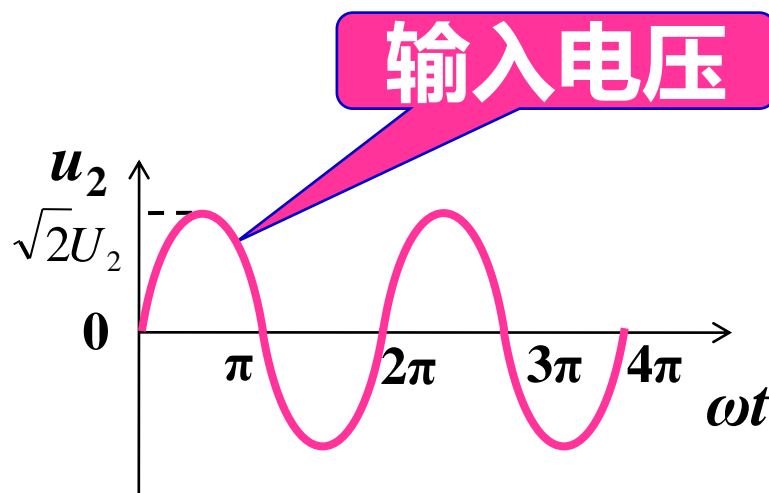
# 1. 滤波原理

(1) 当  $C=0$ ，外接  $R_L$  时

当  $C=0$  (无滤波电容) 时

输出电压

$$U_o \approx 0.9U_2$$

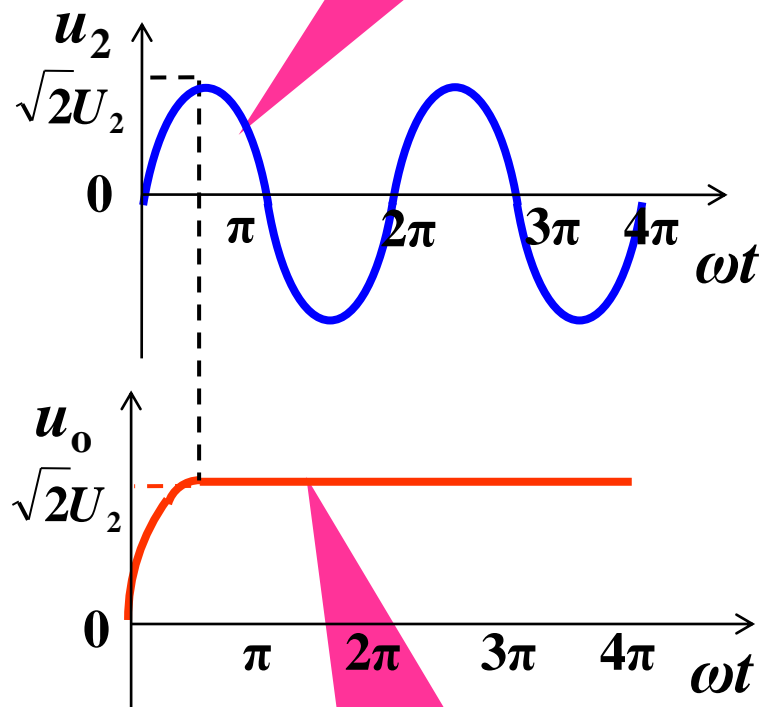
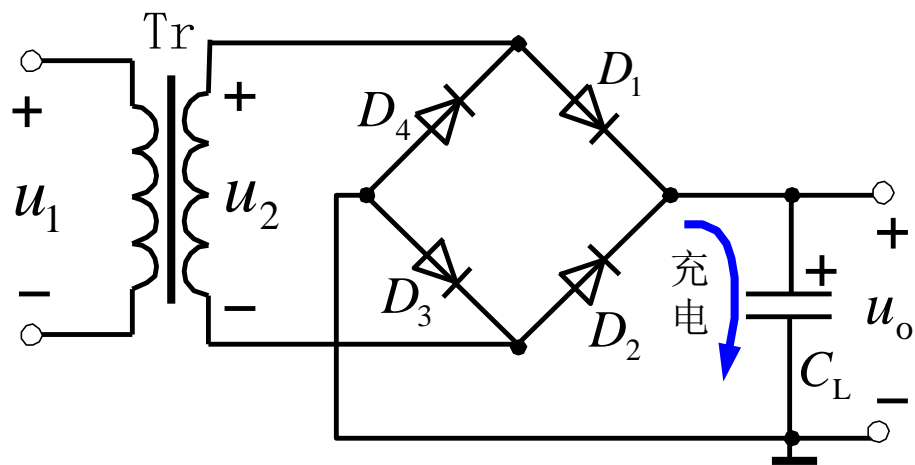


输出电压波形

输出电压平均值



(2) 当  $C \neq 0$ 、 $R_L = \infty$  时

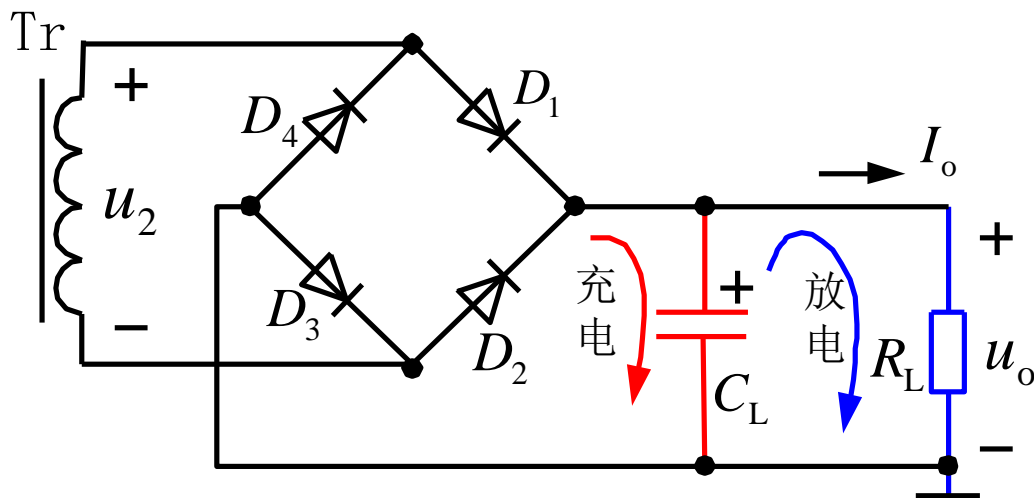


电容器的充电时间常数为

$$\tau_1 = r_o C_L \text{ 很小 } U_o \approx U_{2m}$$

**问题：**  $R_L$  即空载，此时  $U_o = ?$

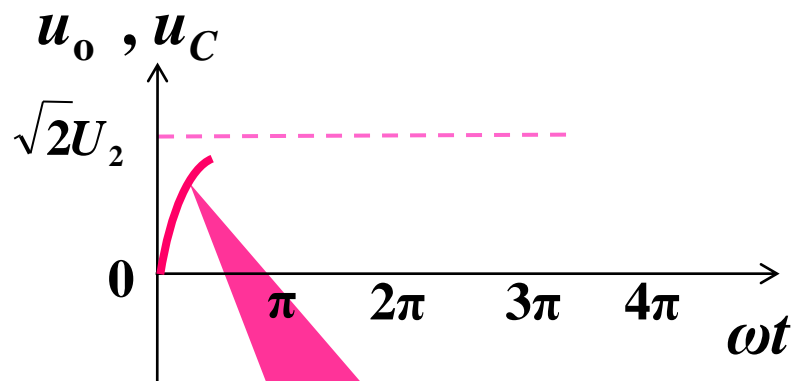
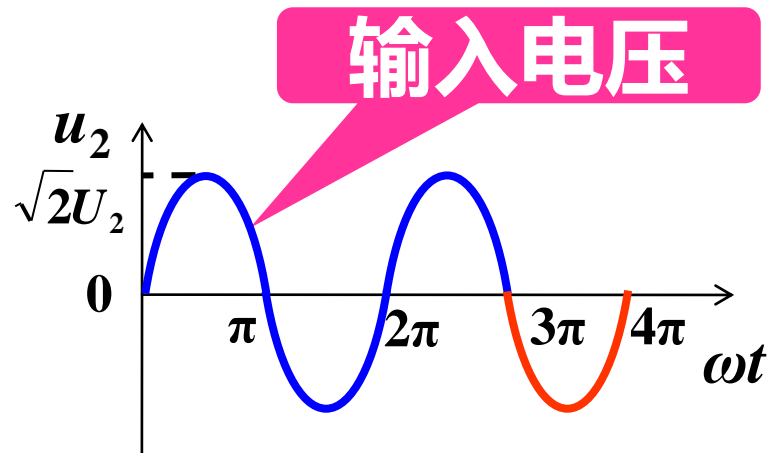
(3) 当  $C \neq 0$ 、 $R_L \neq \infty$  时



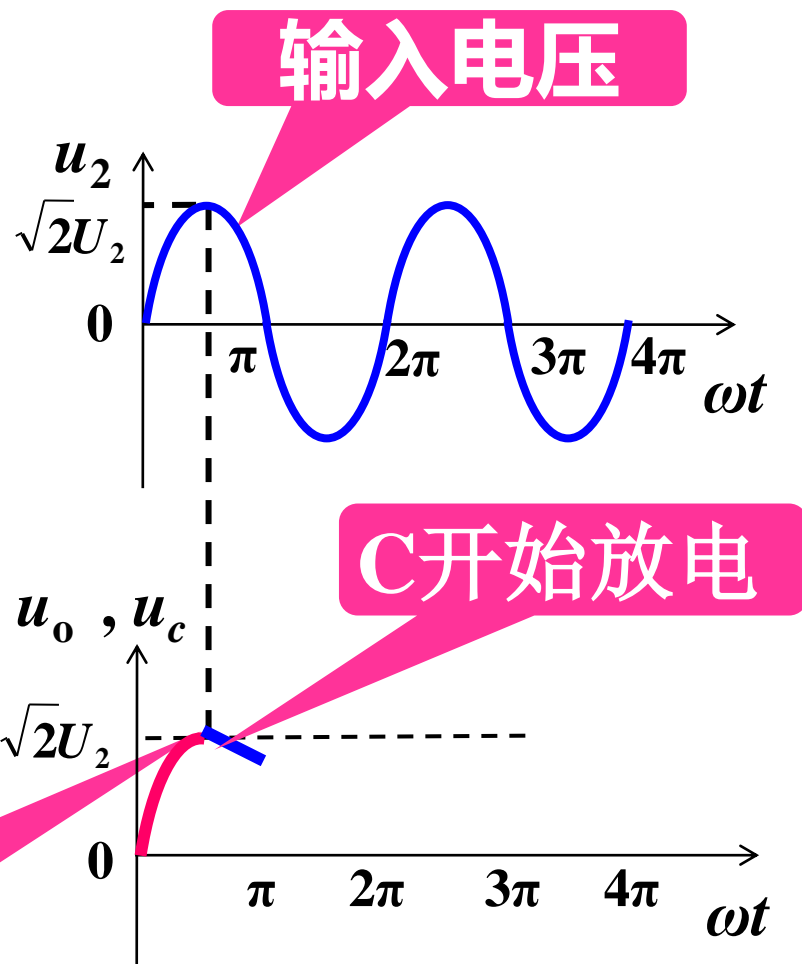
二极管导通时电容器充电，充电时间常数

$$\tau_1 = (r_o // R_L) C_L \approx r_o C_L \text{ 很小}$$

$$u_o = u_c \approx u_2$$



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。



C充电到最高点

滤波器输入  
电压波形

C充电

C放电

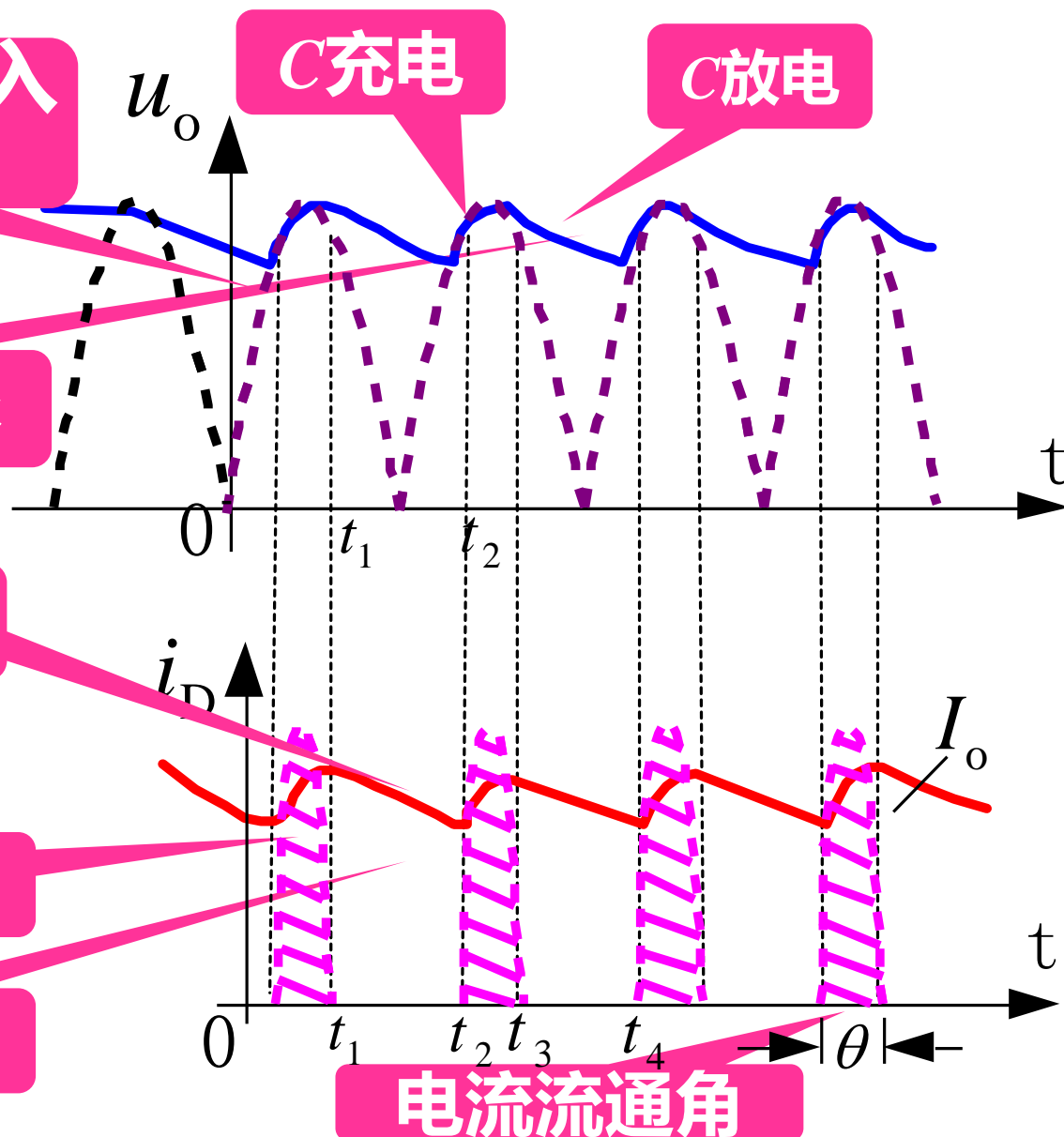
输出电压波形

电流波形

D导通

D截止

电流流通角



1) 当  $R = \infty$  , 即负载开路情况下

$$U_O = \sqrt{2}U_2 = 1.4U_2$$

2) 当  $C = 0$  , 即无电容滤波但有负载的情况

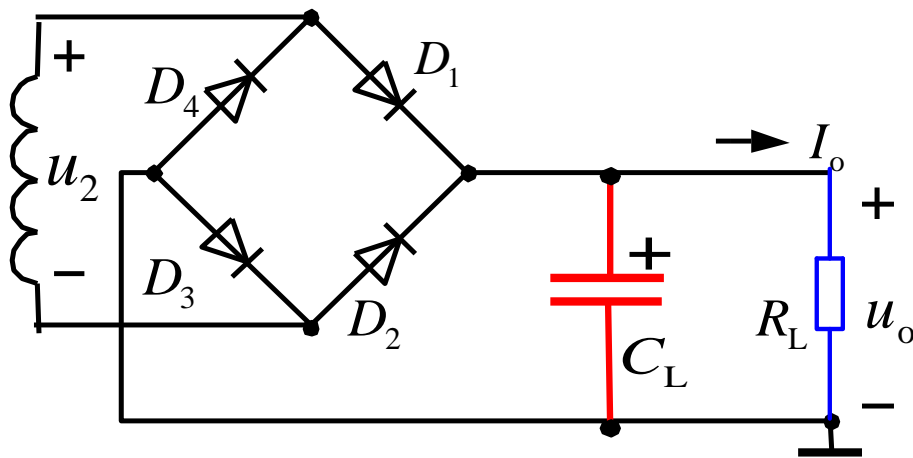
$$U_O = 0.9U_2$$

3) 正常情况下

$$\tau_d = R_L C \geq (3 \sim 5) \frac{T}{2}$$

$$U_O \approx 1.2U_2$$

## 电容滤波小结



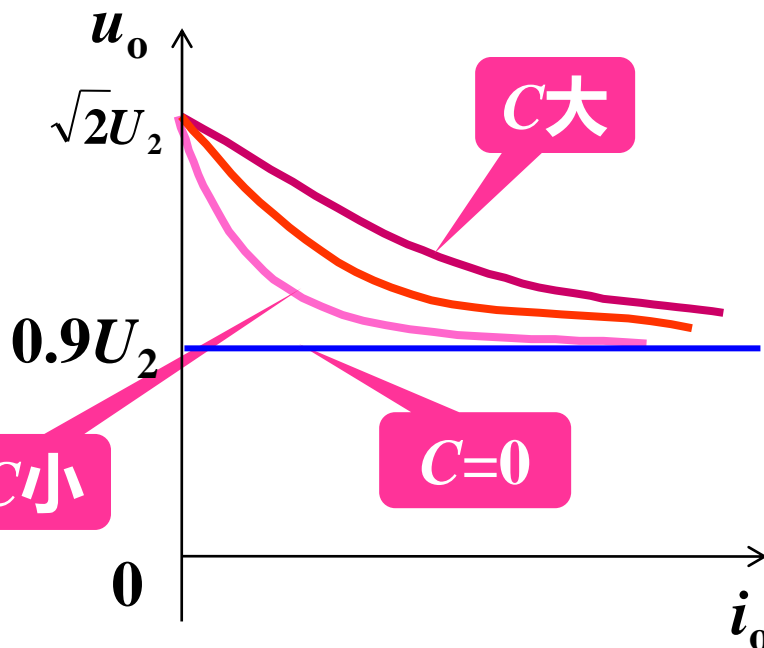
## 2. 性能参数的工程估算

### 1) 电容滤波电路的外特性

$$u_o = f(i_o)$$

#### 外特性特点

- a. 当 $i_o$ 一定时,  $C$ 越小,  $U_{o(AV)}$  越小, 纹波越大。
- b. 当 $C$ 一定时,  $i_o$  越大,  $U_{o(AV)}$  越小。



电容滤波电路适用于负载电流比较小或负载基本不变的场合。

## 2) 输出直流电压

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

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

一般取  $U_{O(AV)} \approx 1.2U_2$

## 3) 输出电流平均值

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

$$I_{D1,3} = I_{D2,4} = I_D = \frac{1}{2} I_{O(AV)}$$

#### 4) 整流二极管的平均电流

##### 二极管的平均电流

$$I_F \geq (2 \sim 3)I_o \quad (9-11)$$

其特点:

- (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,  $\theta$ 越小, 冲击电流越大。

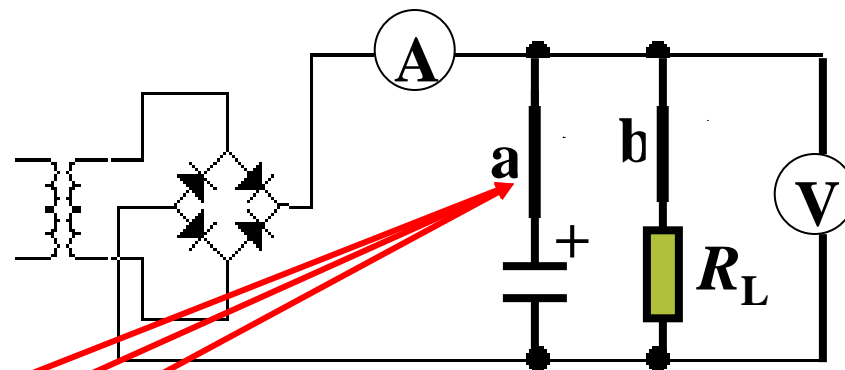
#### 5) 整流二极管的最高反向电压

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



例 整流滤波电路如图，负载  $R_L = 5k\Omega$ ，开关 a 闭合、b 断开时，直流电压表 (V) 的读数为 140V，求：

1. a 闭合, b 断开, 求 (A) 的读数。
2. a 断开, b 闭合, 求 (A) 的读数。
3. ab 均闭合, 求 (A) 的读数。



解：

最初相当于  $R_L$  开路,

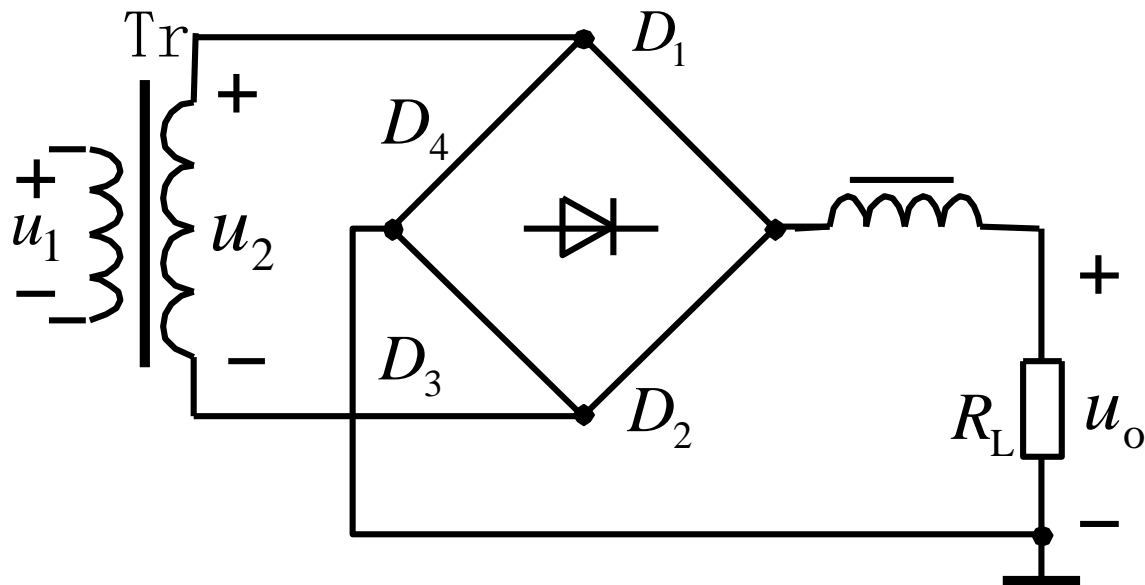
$$U_0 = 1.4U_2 \rightarrow U_2 = 100V$$

1. (A) = 0A

2. 相当于整流电路  $U_0 = 0.9U_2 = 90V$  (A) = 18mA

3. 相当于滤波电路  $U_0 = 1.2U_2 = 120V$  (A) = 24mA

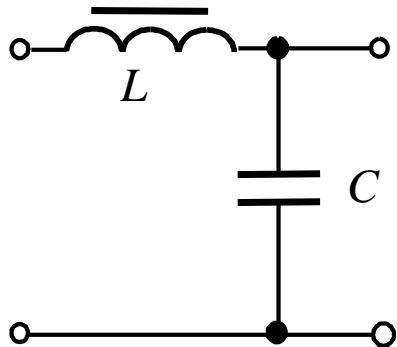
## 电感滤波电路



忽略电感器 $L$ 的电阻时，负载上输出的平均电压和纯电阻(不加电感)负载相同，即

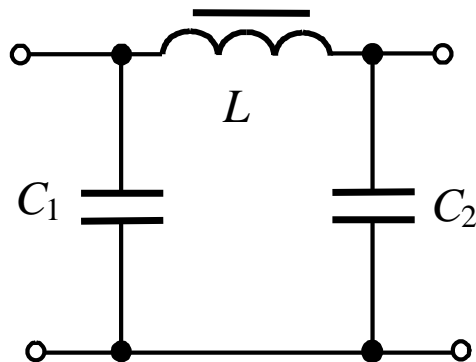
$$U_o = 0.9 U_2$$

# 复式滤波器



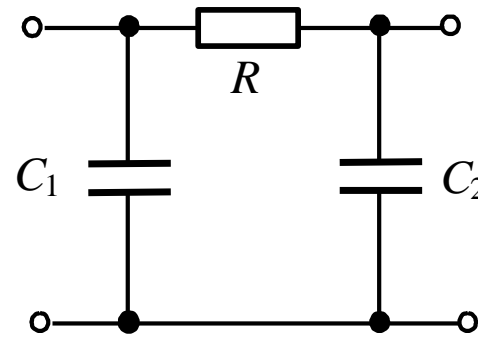
(a)

(a) LC型滤波器



(b)

(b)  $\pi$  型 LC 滤波器

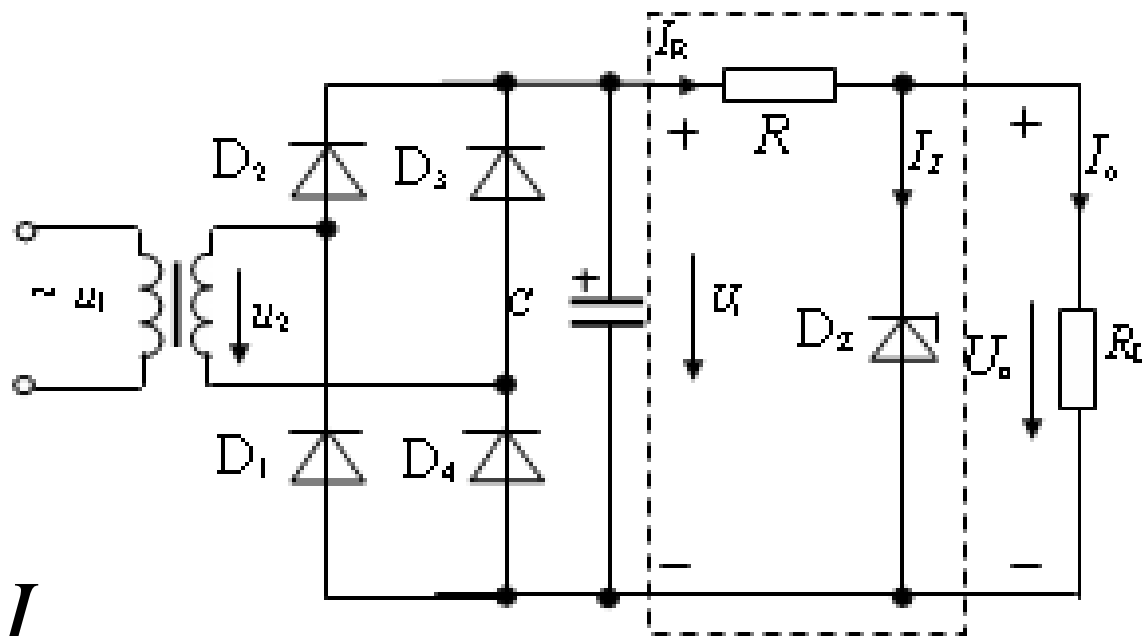


(c)

(b)  $\pi$  型 RC 滤波器

# 稳压电路

## 9.4.1 并联型稳压电路



$$U_Z = U_o$$

$$I_{Z\max} = (1.5 \sim 3)I_{o\max}$$

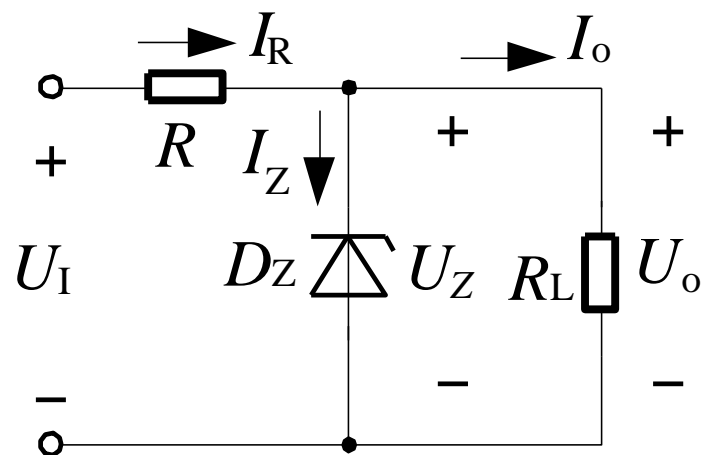
$$U_i = (2 \sim 3)U_o$$

## 稳压管稳压电路


在负载变化不大的场合，稳压管常用来做稳压电源，由于负载和稳压管并联，又称为并联稳压电源。稳压管在实际工作时要和电阻相配合使用，其电路如图2-18所示

选择稳压管一般取

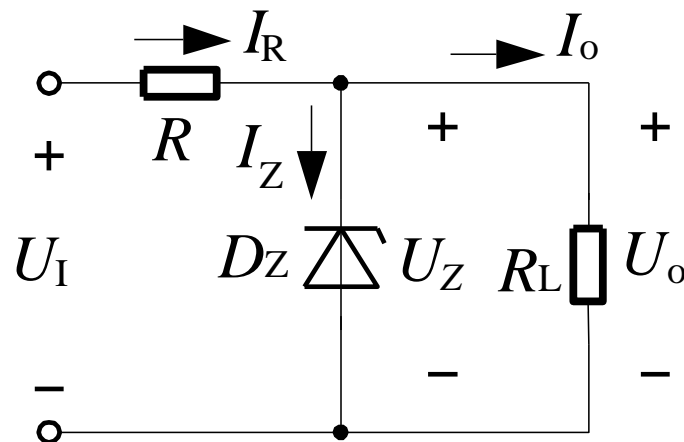
$$\begin{cases} U_Z = U_o \\ I_{ZM} = (1.5 \sim 3) I_{om} \\ U_I = (2 \sim 3) U_o \end{cases}$$



稳压管稳压电路

 当负载电阻 $R_L$ 和输入电压 $U_I$ 一定时，电阻 $R$ 的选择是根据稳压管的电流不超过正常工作范围来选的。稳压管的电流是在 $I_{Z\min} < I_Z < I_{ZM}$ 之间，

$$I_{Z\min} < \frac{U_I - U_Z}{R} - \frac{U_Z}{R_L} < I_{ZM}$$

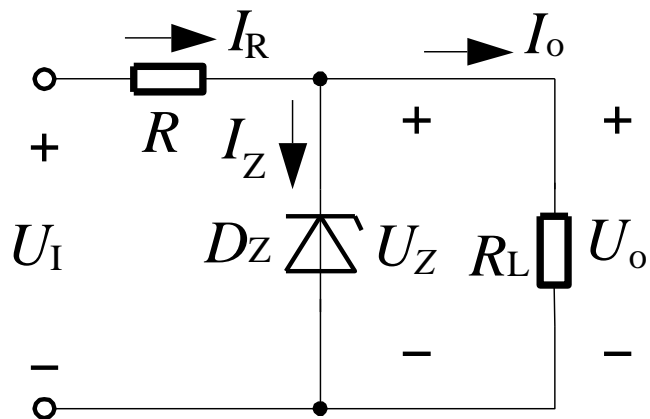


 可得电阻 $R$ 的取值范围为

$$\frac{U_I - U_Z}{I_{ZM} + \frac{U_Z}{R_L}} < R < \frac{U_I - U_Z}{I_{Z\min} + \frac{U_Z}{R_L}}$$

稳压原理如下：

当负载不变，输入电压 $U_I$ 波动使得输出电压 $U_o$ 升高，其调节过程为：



$$U_I \uparrow \rightarrow U_o (U_Z) \uparrow \rightarrow I_Z \uparrow \rightarrow I_R \uparrow \rightarrow U_R \uparrow$$

$U_o \downarrow$  ←

若输入电压 $U_I$ 不变，负载发生变化，如 $R_L$ 减小，其调节过程为：

$$R_L \downarrow \rightarrow U_o (U_Z) \downarrow \rightarrow I_Z \downarrow \rightarrow I_R \downarrow \rightarrow U_R \downarrow$$

$U_o \uparrow$  ←

**例** 如图所示电路中,  $U_I = 12\text{V}$ , 稳压管稳定电压  $U_Z = 6\text{V}$ , 稳定电流  $I_Z = 10\text{mA}$ , 电阻  $R = 100\Omega$ ,  $R_L = 150\Omega$ 。(1)求  $U_o$ 、 $I_R$  和稳压管实际工作电流  $I_Z$ ; (2)若稳压管最大稳定电流  $I_{ZM} = 50\text{mA}$ , 试问  $U_I$  允许波动的范围是多少? (3)若  $U_I = 12\text{V}$ ,  $U_Z = 6\text{V}$ , 稳压管稳定电流  $I_Z = 10\text{mA}$ , 最大稳定电流  $I_{ZM} = 50\text{mA}$ , 问负载电阻  $R_L$  允许变化的范围是多少? (4) 如果电阻  $R = 850\Omega$ ,  $R_L = 150\Omega$ , 求  $U_o$

**解:** (1) 由电路可知

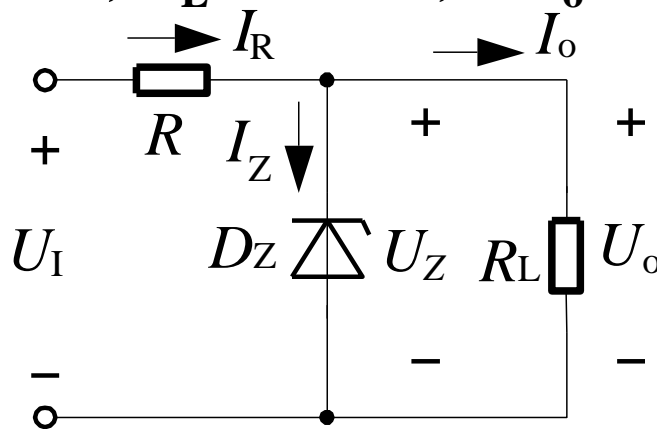
$$U_o = U_Z = 6\text{V}$$

$$I_R = \frac{U_I - U_Z}{R} = \frac{12 - 6}{100} = 60\text{mA}$$

$$I_o = \frac{U_o}{R_L} = \frac{6}{150} = 40\text{mA}$$

**则稳压管的实际工作电流为**

$$I_Z = I_R - I_o = 60 - 40 = 20\text{mA}$$





(2) 若稳压管最大稳定电流 $I_{ZM}=50\text{mA}$ ,  
而稳定电流为 $I_Z=10\text{mA}$ 则

$$U_I = I_R R + U_Z = (I_Z + I_o)R + U_Z$$

将两个电流代入上式得

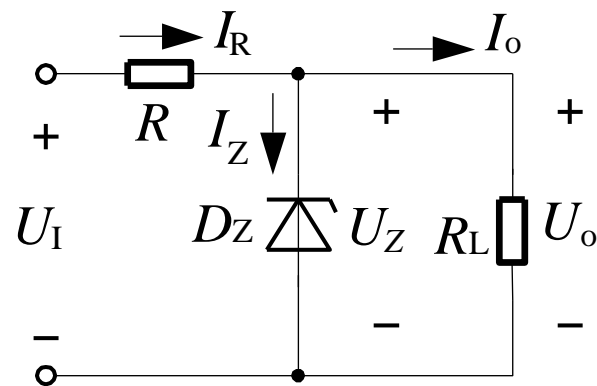
当  $I_Z=10\text{mA}$  时

$$U_{I\min} = (I_Z + I_o)R + U_Z = (10 + 40) \times 10^{-3} \times 100 + 6 = 11\text{V}$$

当  $I_{ZM}=50\text{mA}$  时

$$U_{I\max} = (I_{ZM} + I_o)R + U_Z = (50 + 40) \times 10^{-3} \times 100 + 6 = 15\text{V}$$

故  $U_I$  允许波动的范围是 (11~15) V。



(3)若  $U_I=12V$ ,  $U_Z=6V$ ,稳压管稳定电流  $I_Z=10mA$ ,  
最大稳定电流  $I_Z=50mA$ , 由电路可知

$$R_L = \frac{U_o}{I_o} = \frac{U_o}{I_R - I_Z}$$

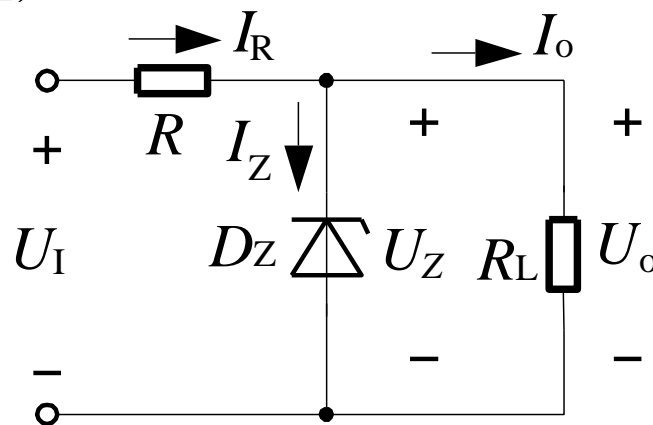
当  $I_Z=10mA$  时

$$R_{Lmin} = \frac{U_o}{I_R - I_Z} = \frac{6}{60 - 10} = 120\Omega$$

当  $I_{ZM}=50mA$  时

$$R_{Lmax} = \frac{U_o}{I_R - I_{ZM}} = \frac{6}{60 - 50} = 600\Omega$$

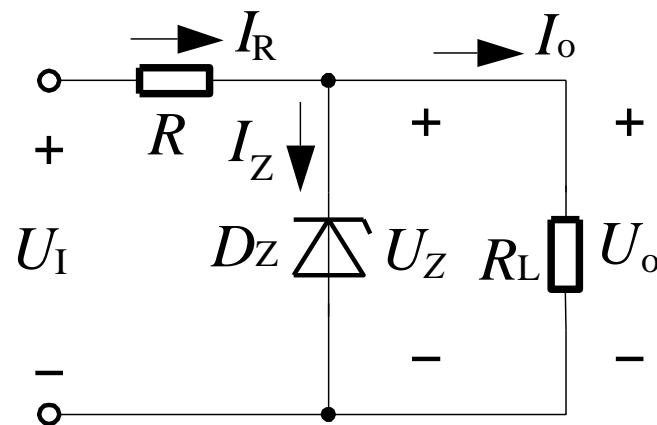
故  $R_L$  允许变化的范围是  $(120 \sim 600) \Omega$ , 取其中合适的标称值电阻。



(4) 因为电阻  $R=850\Omega$ ,  $R_L=150\Omega$   
若将稳压管两端断开, 则可得

$$I_R = \frac{U_I}{R + R_L} = 12mA$$

$$U_O = I_R R_L = 1.8V$$



因为  $U_O < U_Z$

所以稳压管没有工作在其稳定电压区间, 因此其  $U_O$  为 **1.8V**