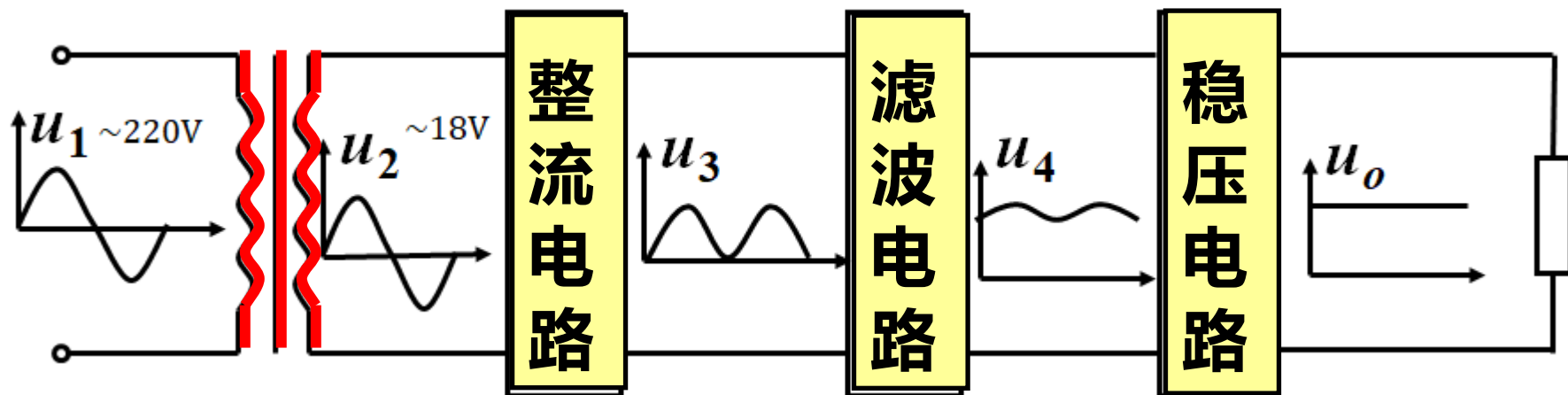


第七章 直流稳压电源

- 一、直流稳压电源的组成和功能
- 二、单相整流电路
- 三、滤波电路
- 四、稳压电路
- 五、集成稳压电源

直流稳压电源的组成和功能

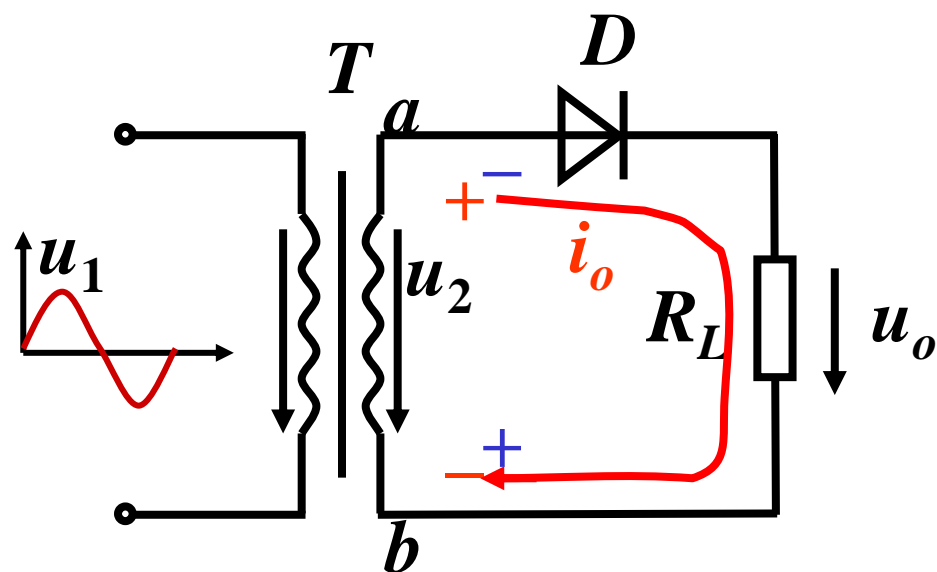


- **电源变压器**: 将交流电网电压 u_1 变为合适的交流电压 u_2 。
- **整流电路**: 将交流电压 u_2 变为脉动的直流电压 u_3 。
- **滤波电路**: 将脉动直流电压 u_3 转变为平滑的直流电压 u_4 。
- **稳压电路**: 清除电网波动及负载变化的影响,保持输出电压 u_o 的稳定。

7.1 整流与滤波电路

一. 单相整流电路

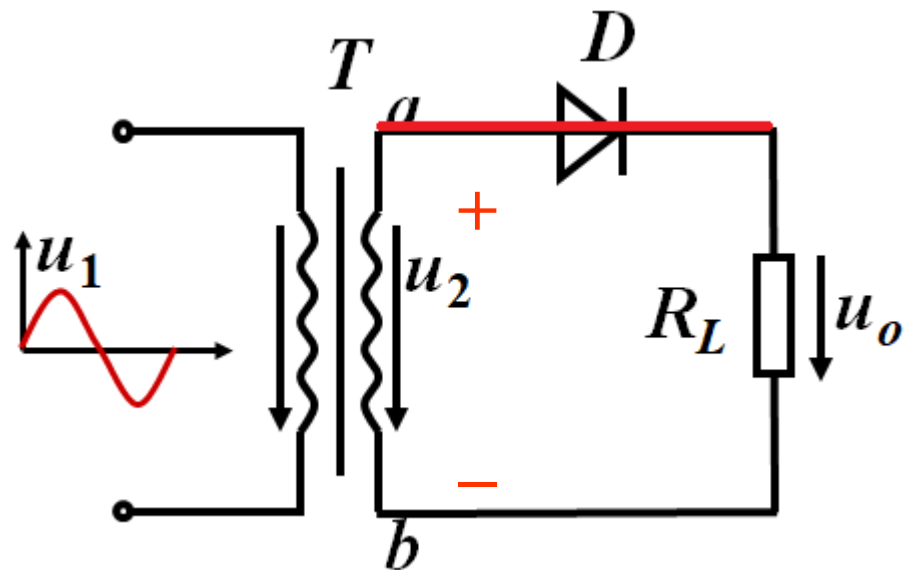
1. 半波整流电路



$u_2 > 0$ 时:

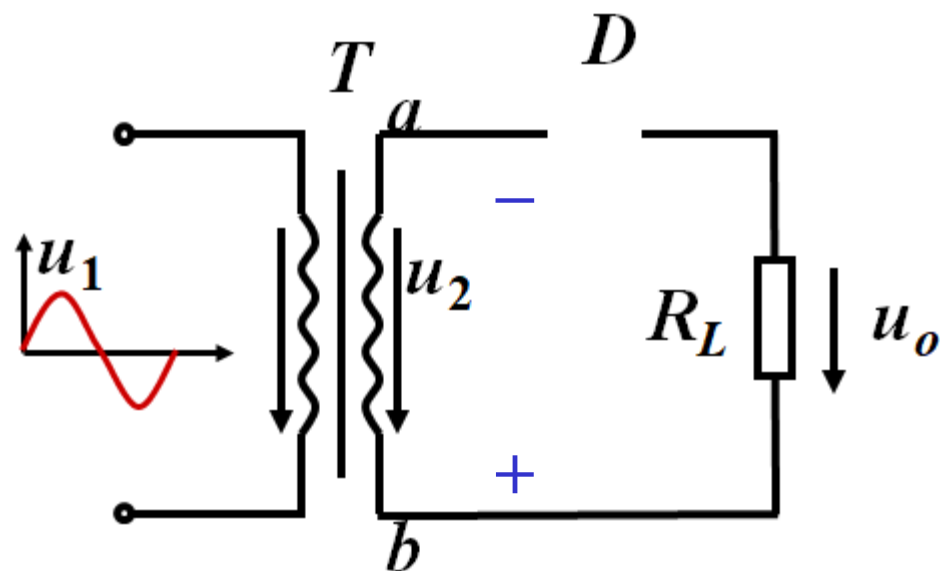
二极管导通, 忽略二极管正向压降,

$$u_o = u_2$$



为分析简单起见, 把二极管当作理想元件处理, 即二极管的正向导通电阻为零, 反向电阻为无穷大。

1.半波整流电路



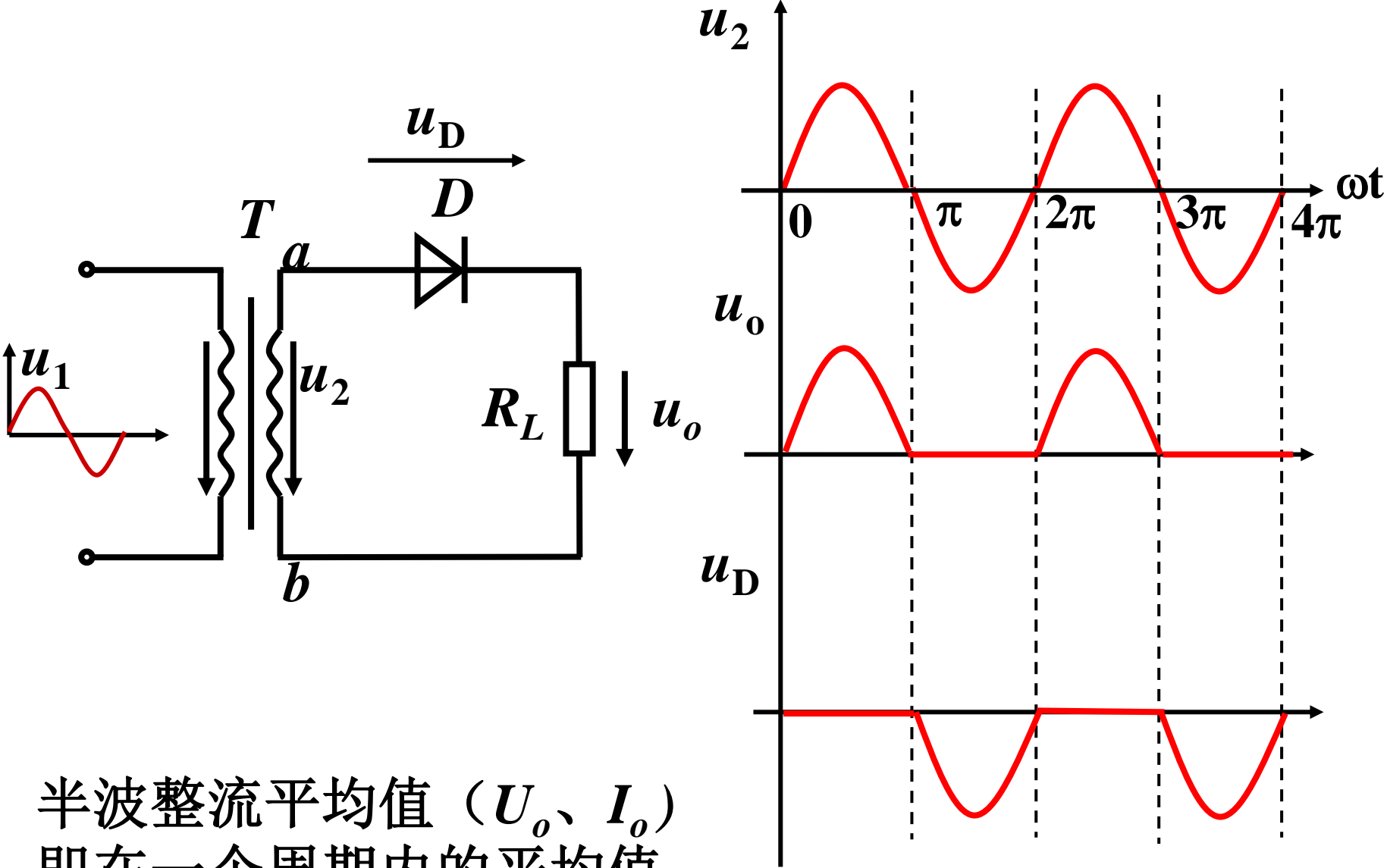
$u_2 < 0$ 时:

二极管截止, 负载 R_L 上
电流为零, 负载电压

$$u_o = 0$$

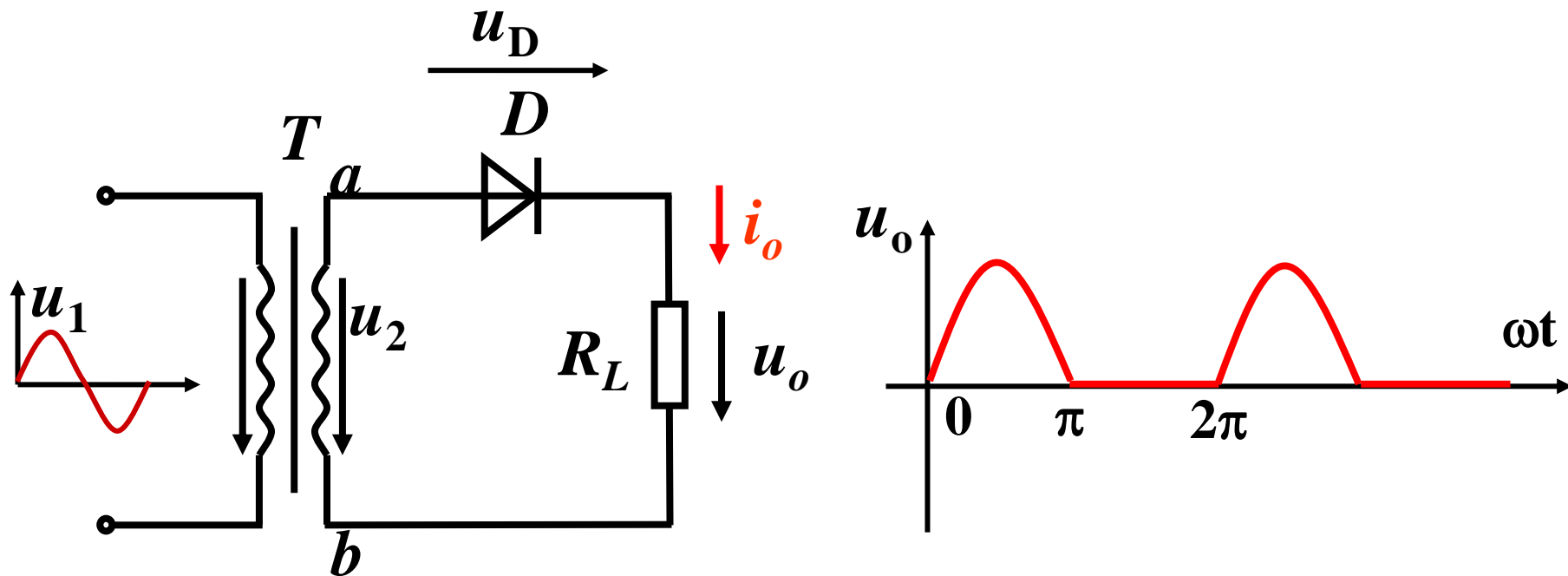
所以负载两端的脉动
电压波形如下:

单相半波整流电压波形



半波整流平均值 (U_o 、 I_o)
即在一个周期内的平均值

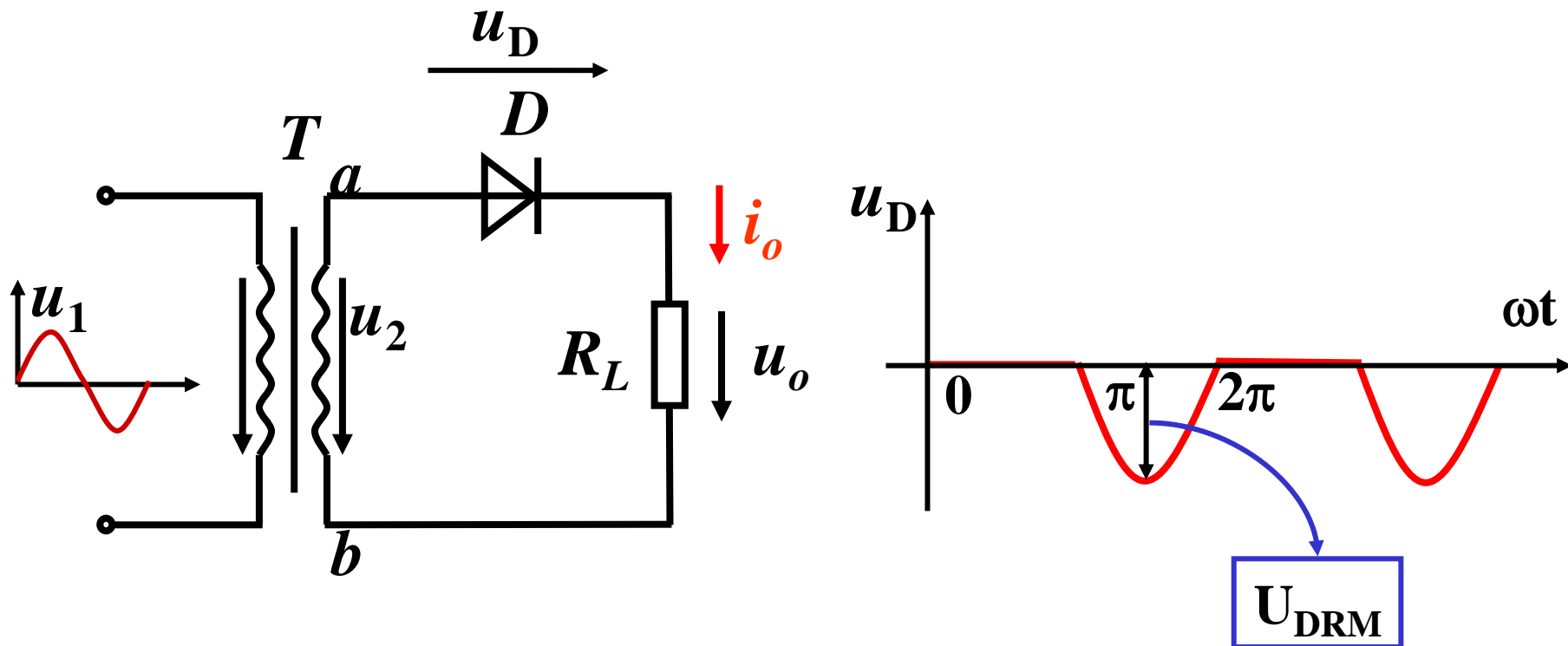
输出电压平均值 (U_o), 输出电流平均值 (I_o):



$$\begin{aligned}
 U_o &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u_o d(\omega t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t d(\omega t) \\
 &= -\frac{\sqrt{2}U_2}{2\pi} \cos \omega t \Big|_0^{\pi} = \frac{\sqrt{2}U_2}{\pi} = 0.45U_2
 \end{aligned}$$

$$I_o = U_o / R_L = 0.45 U_2 / R_L$$

二极管上的平均电流及承受的最高反向电压：

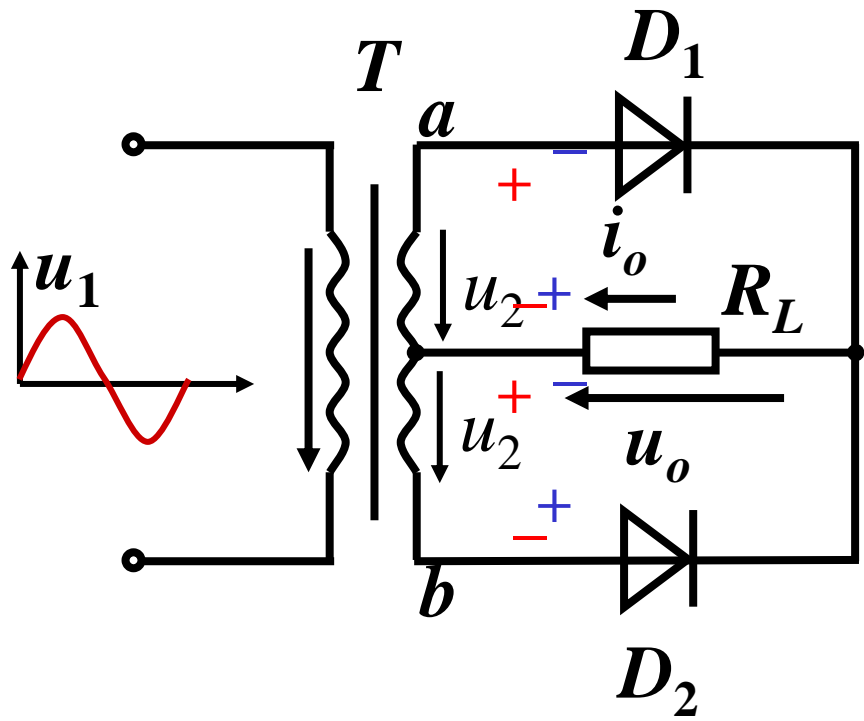


二极管上的平均电流： $I_D = I_O = 0.45 U_2 / R_L$

承受的最高反向电压： $U_{DRM} = \sqrt{2} U_2$

选二极管的参数： $I_F > I_O$ $U_R > U_{DRM}$

2.全波整流电路

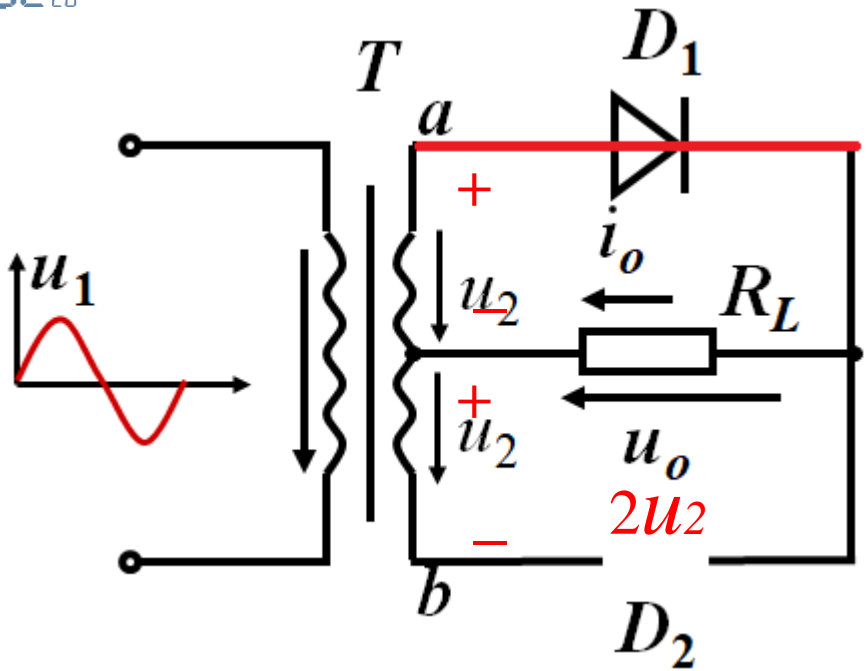


原理：

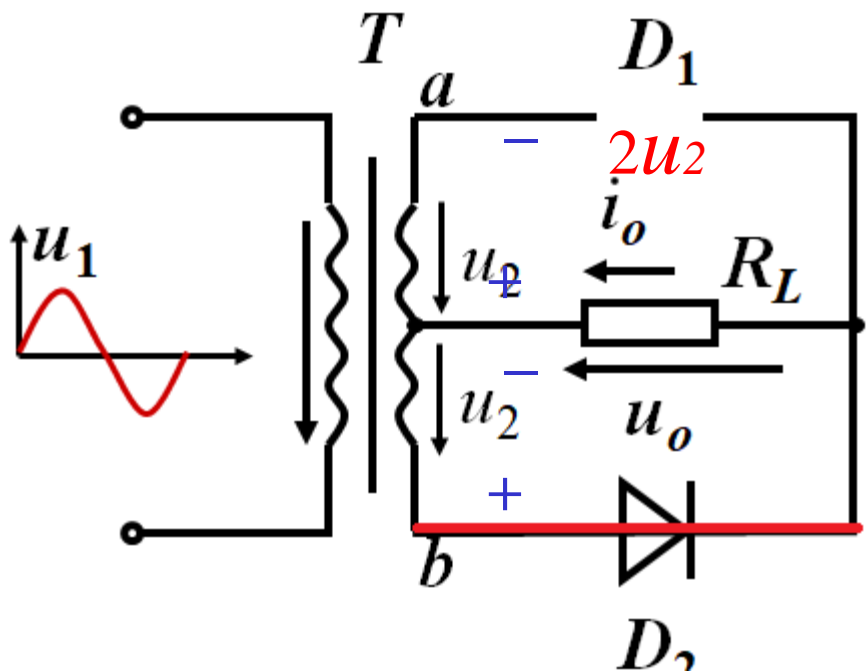
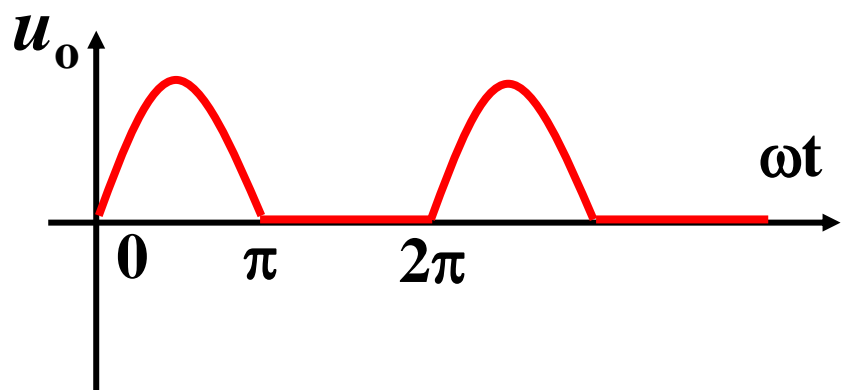
变压器副边中心抽头，
感应出两个相等的电压 u_2

当 u_2 正半周时， D_1 导通，
 D_2 截止。

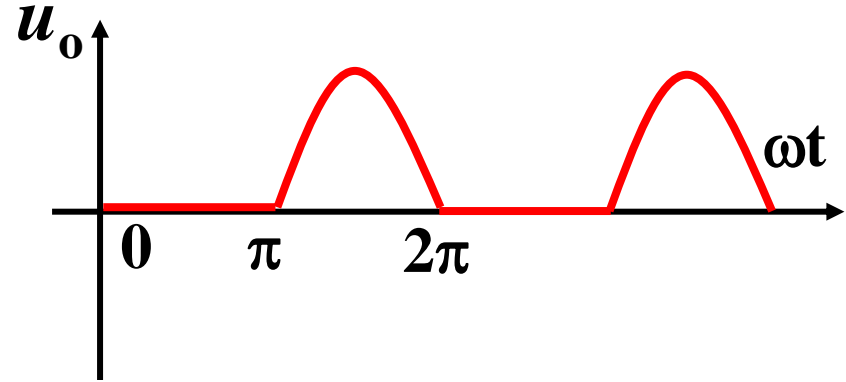
当 u_2 负半周时， D_2 导通，
 D_1 截止。



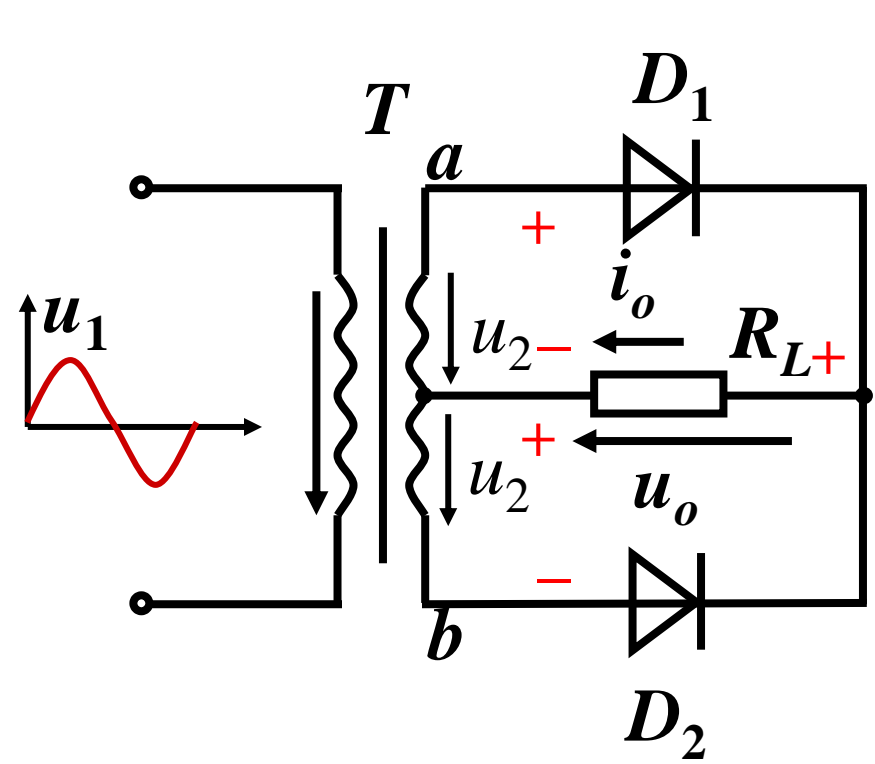
当 u_2 正半周时， D_1 导通， D_2 截止。



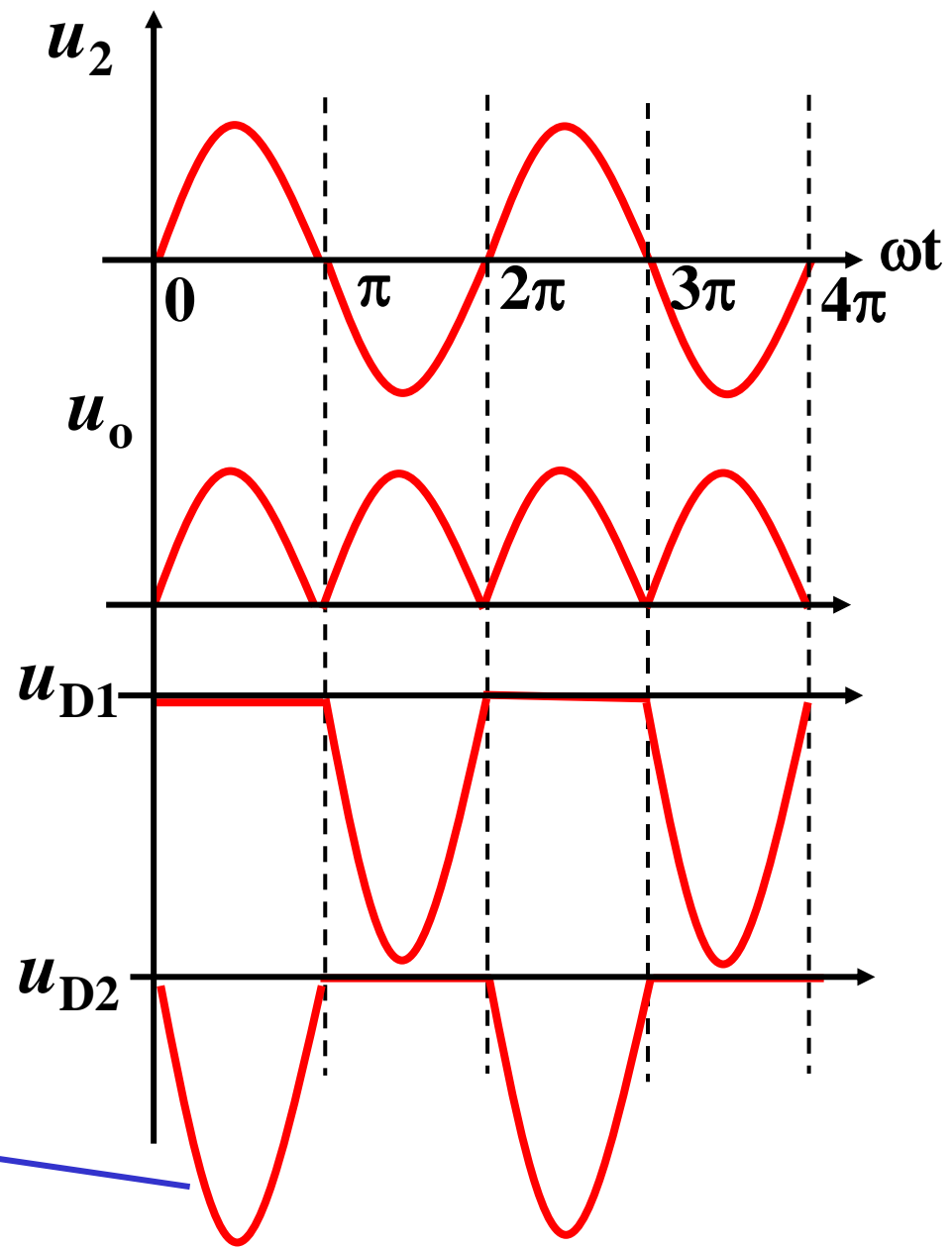
当 u_2 负半周时， D_2 导通， D_1 截止。



所以单相全波整流电压波形

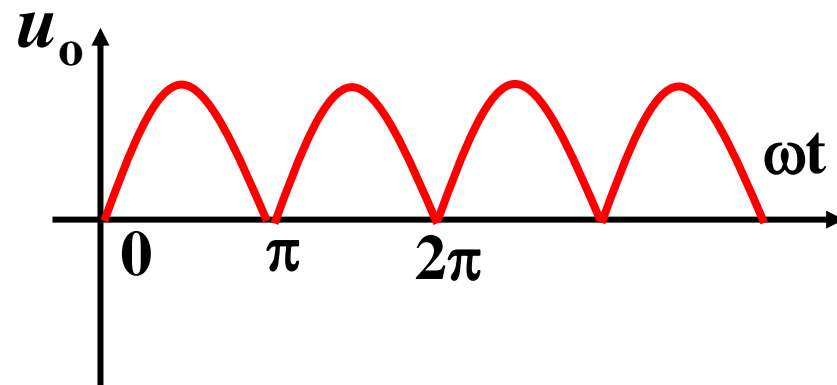
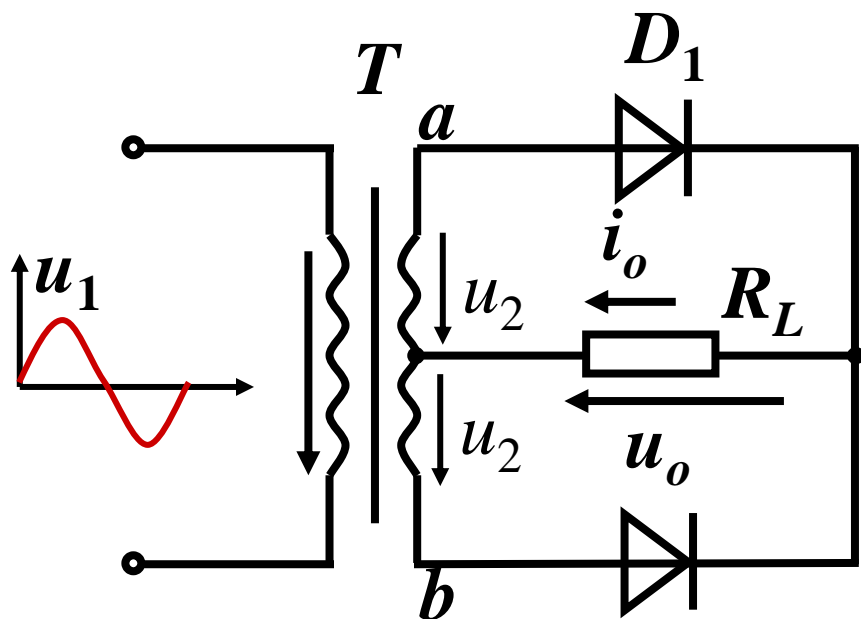


忽略二极管正向压降



$0 \sim \pi$:
 $u_{D2} = 2u_2$

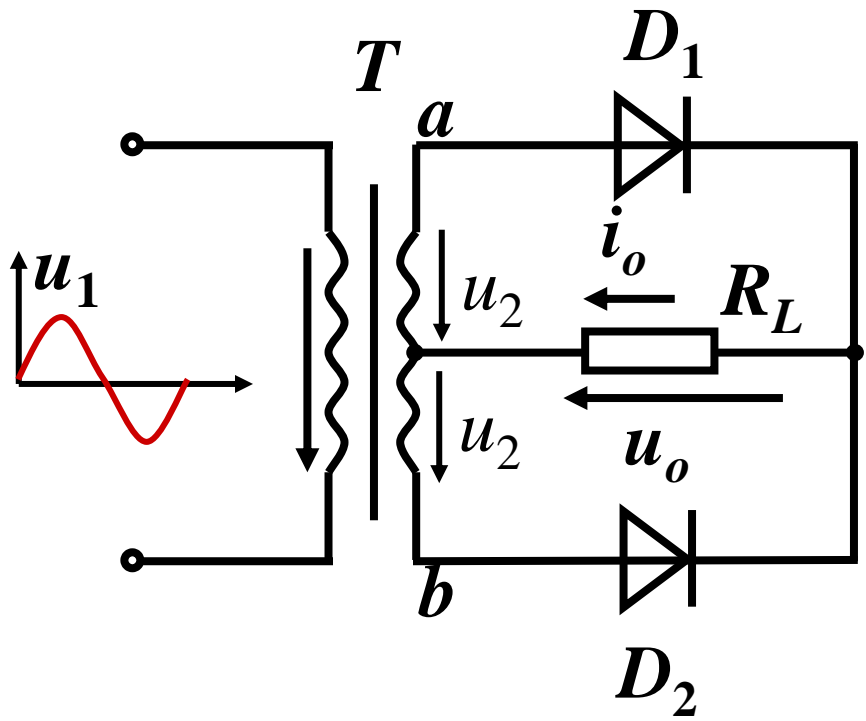
输出电压平均值 (U_o), 输出电流平均值 (I_o):



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

$$I_o = U_o / R_L = 0.9 U_2 / R_L$$

二极管上的平均电流及承受的最高反向电压:

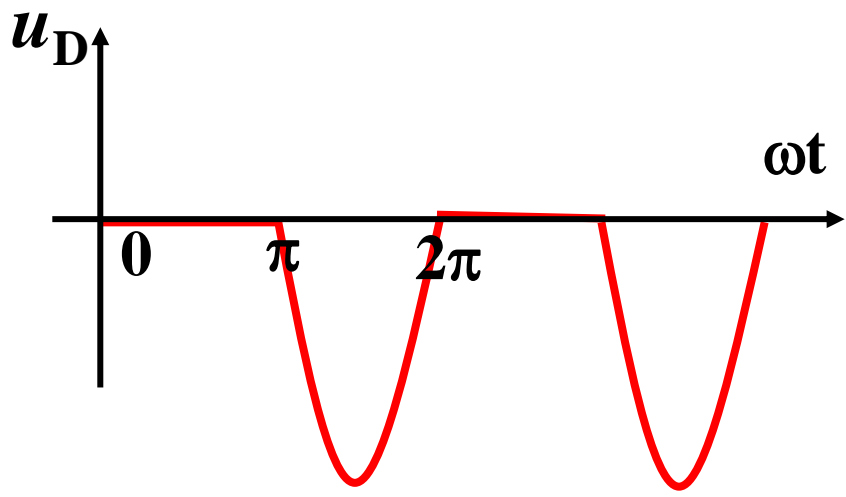


二极管上的平均电流:

$$I_D = \frac{1}{2} I_o$$

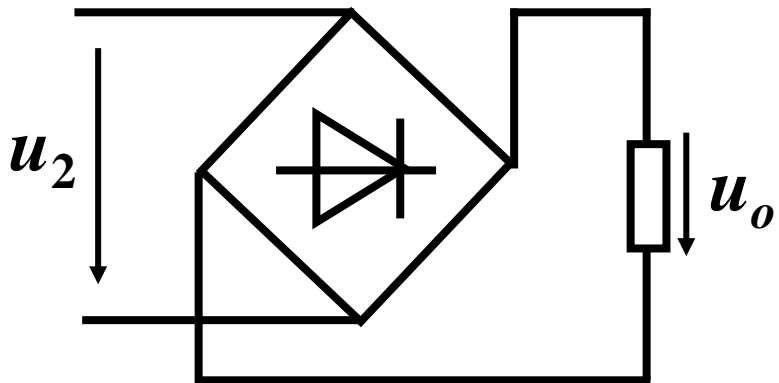
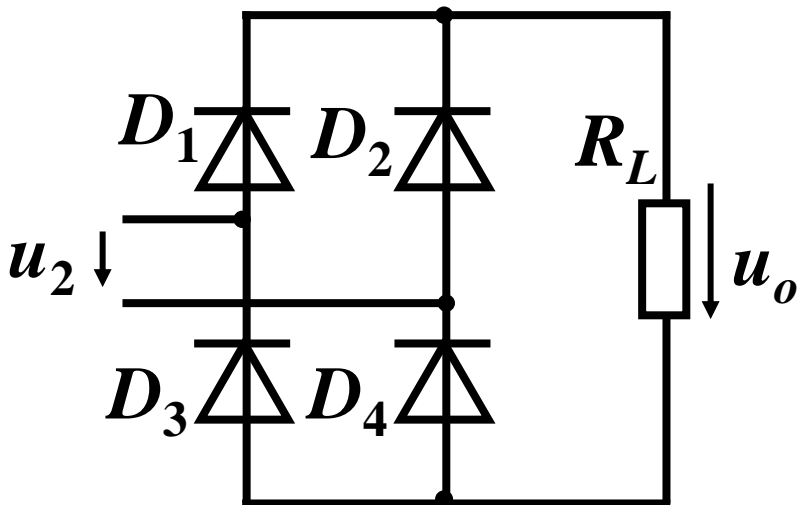
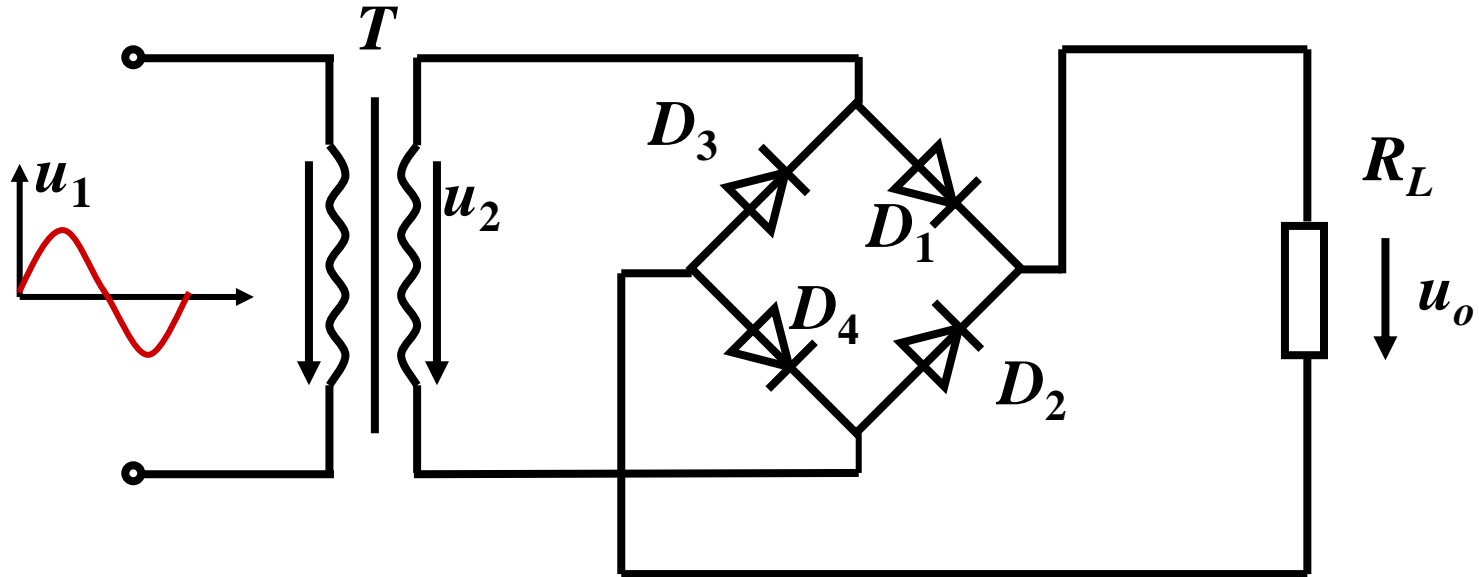
二极管承受的最高反向电压:

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

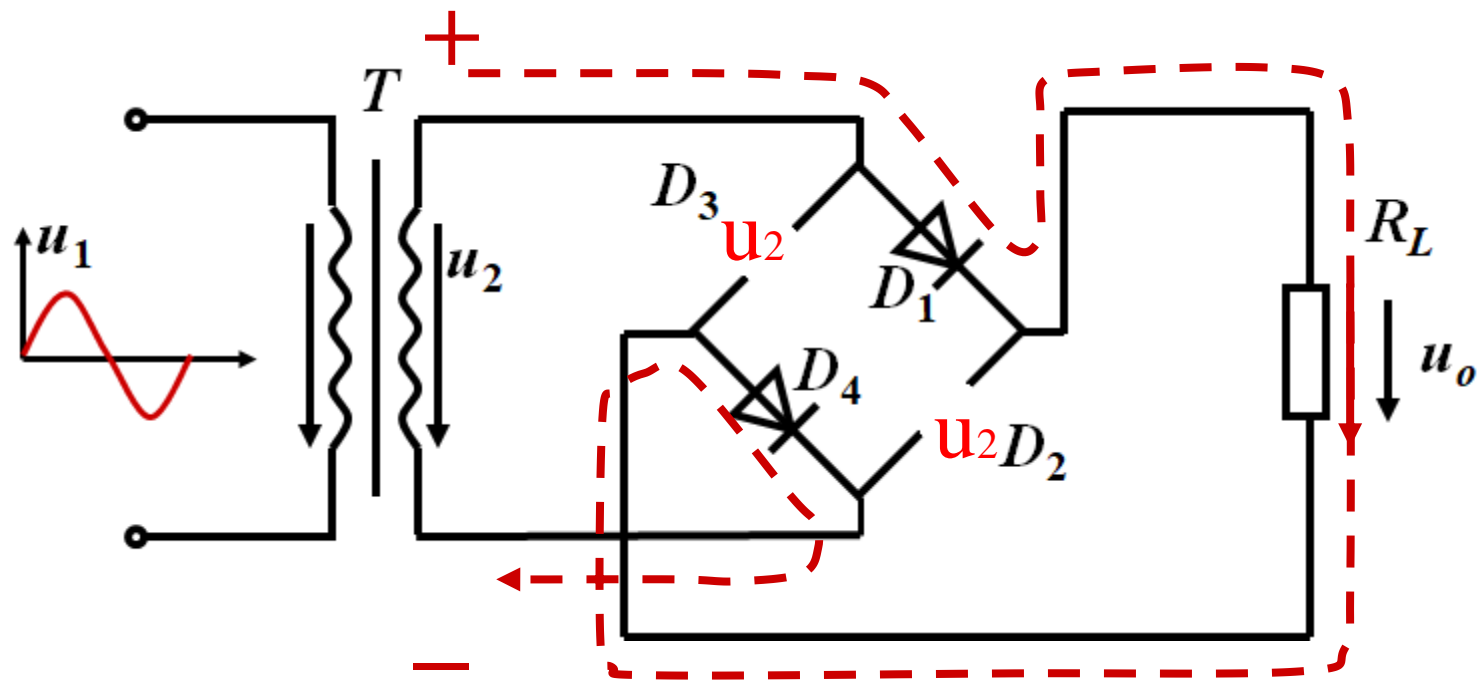


3. 桥式整流电路

组成：由四个二极管组成桥路

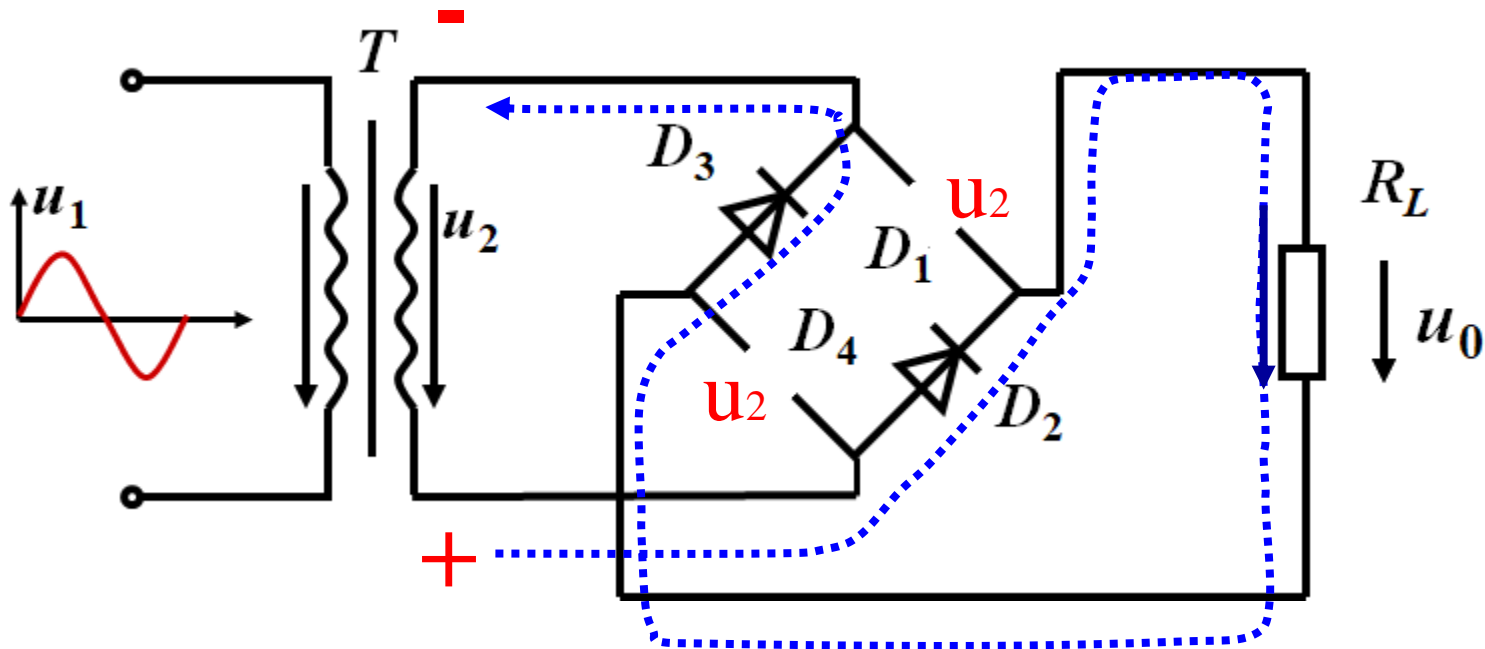


u_2 正半周时电流通路



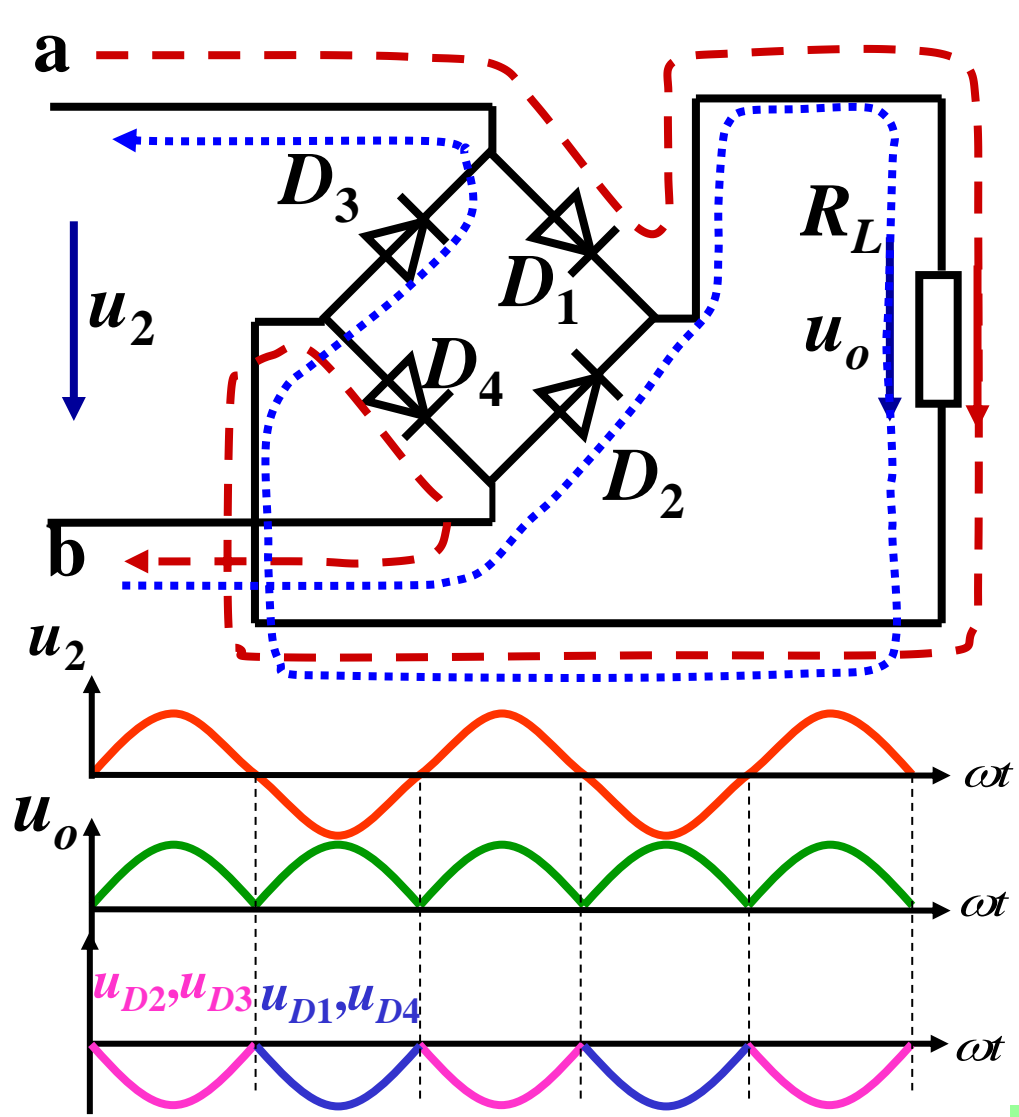
D_1 、 D_4 导通, D_2 、 D_3 截止

u_2 负半周时电流通路



D_2 、 D_3 导通, D_1 、 D_4 截止

单相桥式整流电路输出波形及二极管上电压波形



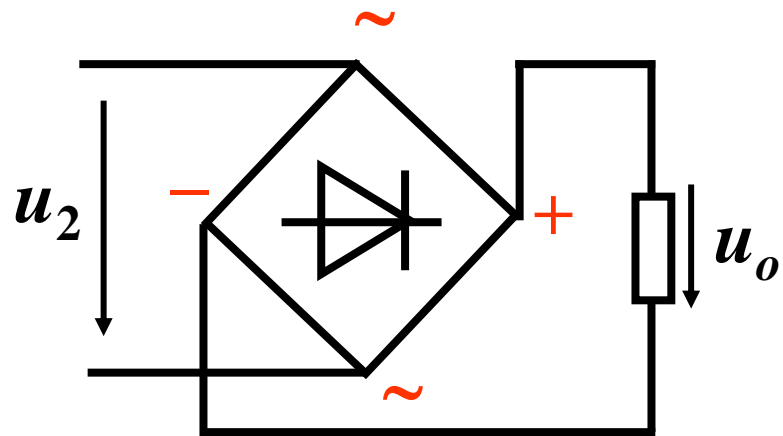
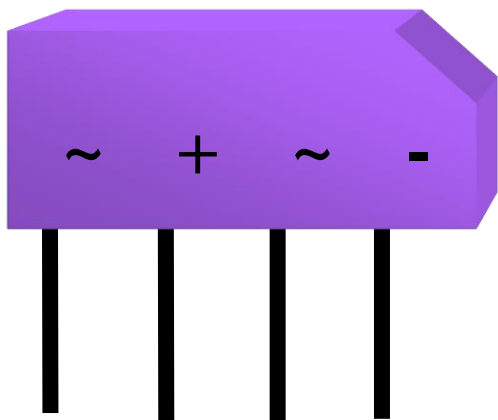
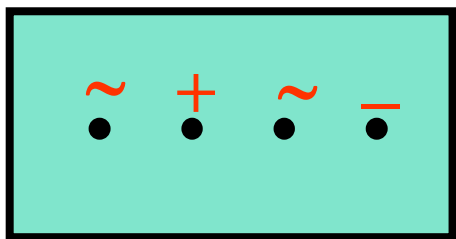
$u_2 > 0$ 时	$u_2 < 0$ 时
D_1, D_4 导通 D_2, D_3 截止 电流通路: $a \rightarrow D_1 \rightarrow R_L \rightarrow D_4 \rightarrow b$	D_2, D_3 导通 D_1, D_4 截止 电流通路: $b \rightarrow D_2 \rightarrow R_L \rightarrow D_3 \rightarrow a$

整流输出电压平均值:
 $U_o = 0.9 U_2$

负载电流平均值:
 $I_o = U_o / R_L = 0.9 U_2 / R_L$

二极管最大反向电压: $U_{DRM} = \sqrt{2} U_2$ 二极管平均电流: $I_D = I_o / 2$

集成硅整流桥：

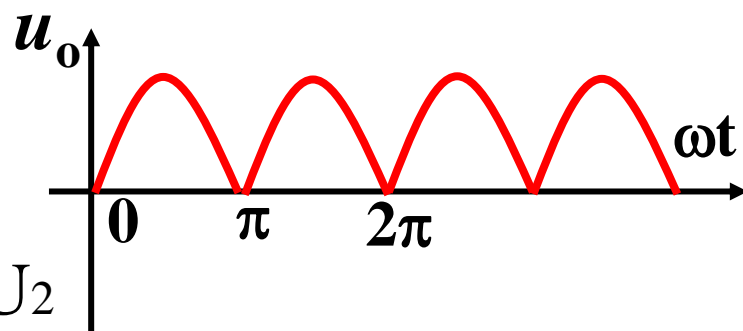


4. 整流电路的主要参数

(1) 整流输出电压的平均值

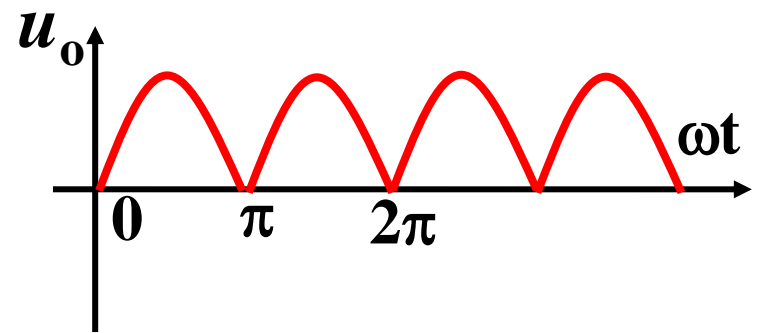
负载电压 U_o 的平均值为:

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



负载上的(平均)电流: $I_o = \frac{U_o}{R_L}$

(2) 脉动系数 S



S定义： 整流输出电压的基波峰值 U_{o1M} 与 U_o 平均值之比。S 越小越好。

用傅氏级数对全波整流的输出 u_o 分解后可得：

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

基波

基波峰值

$$S = \frac{U_{o1M}}{U_o} = \frac{\frac{4\sqrt{2}U_2}{3\pi}}{\frac{2\sqrt{2}U_2}{\pi}} = \frac{2}{3} \approx 0.67$$

输出电压平均值

(3) 二极管平均电流与反向峰值电压

平均电流(I_D)与反向峰值电压(U_{DRM})是选择整流管的主要依据。

例如：在桥式整流电路中，每个二极管只有半周导通。因此，流过每只整流二极管的平均电流 I_D 是负载平均电流的一半。

$$I_D = \frac{1}{2} I_o$$

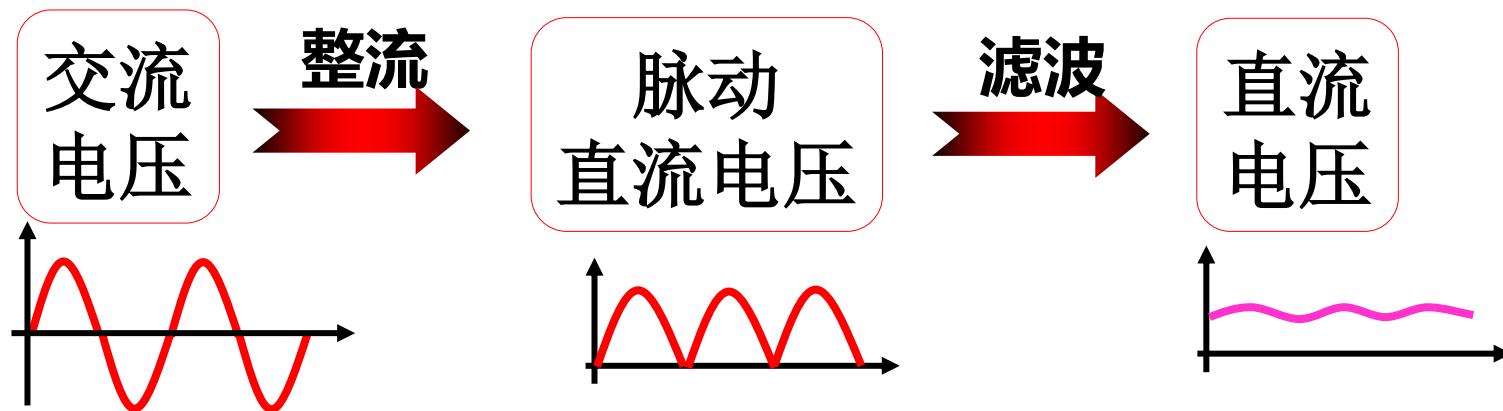
(选购时：二极管额定电流 $\geq 2I_D$)

二极管截止时两端承受的最大反向电压：

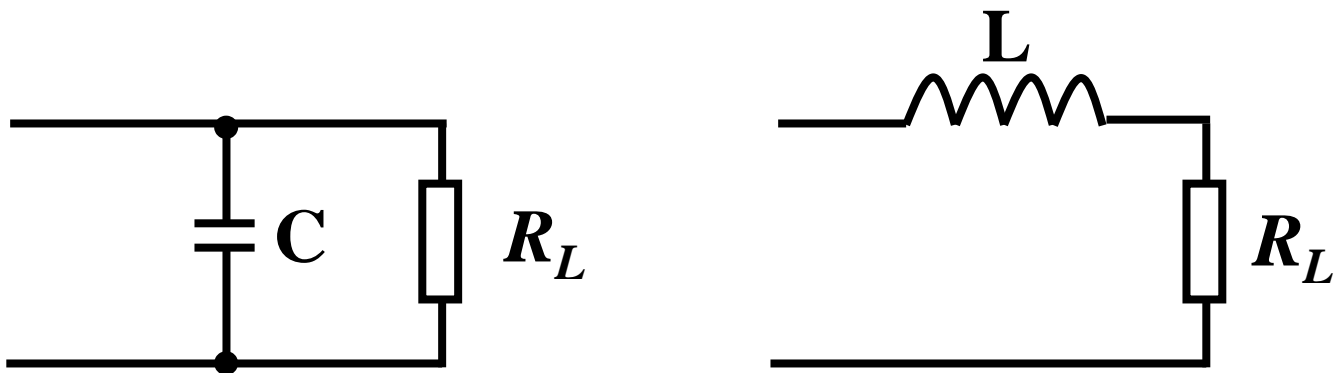
$$U_{RM} = \sqrt{2} U_2$$

(选购时：最大反向电压 $\geq 2U_{RM}$)

二、滤波电路



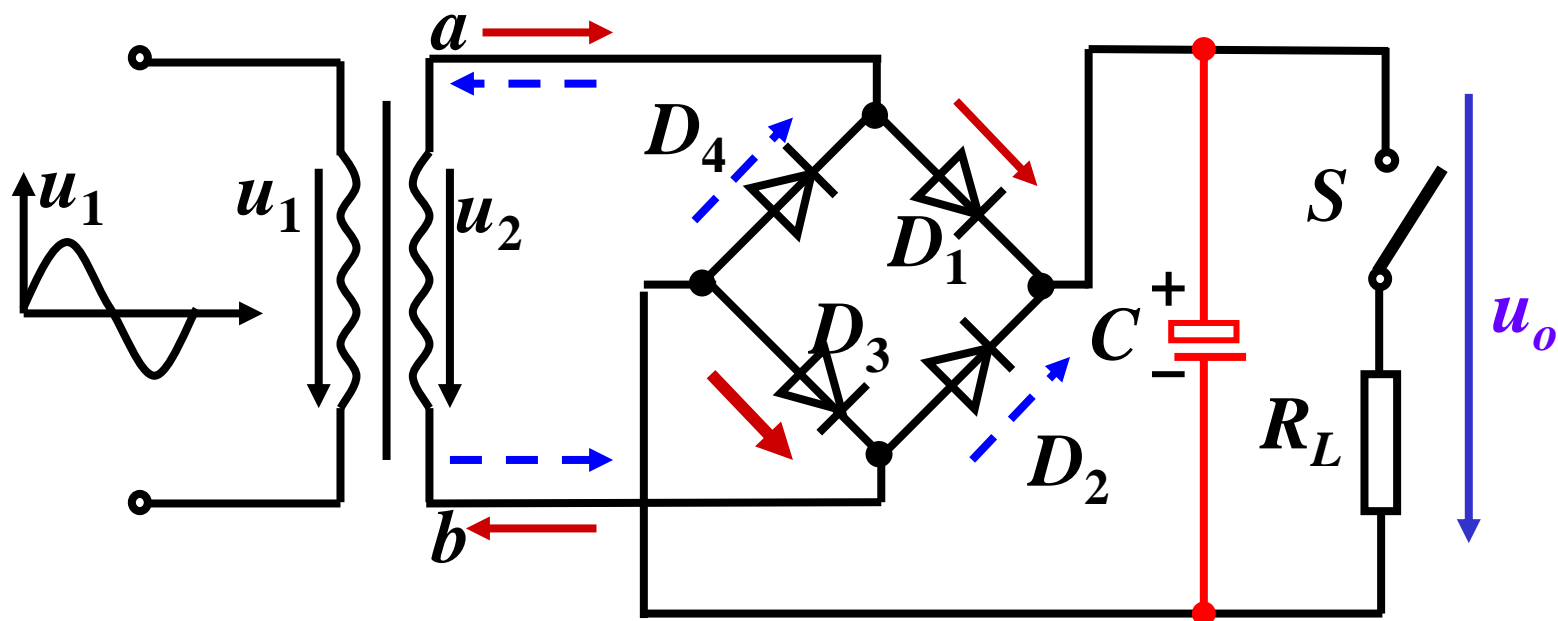
滤波电路的结构特点: 电容与负载 R_L 并联，或电感与负载 R_L 串联。



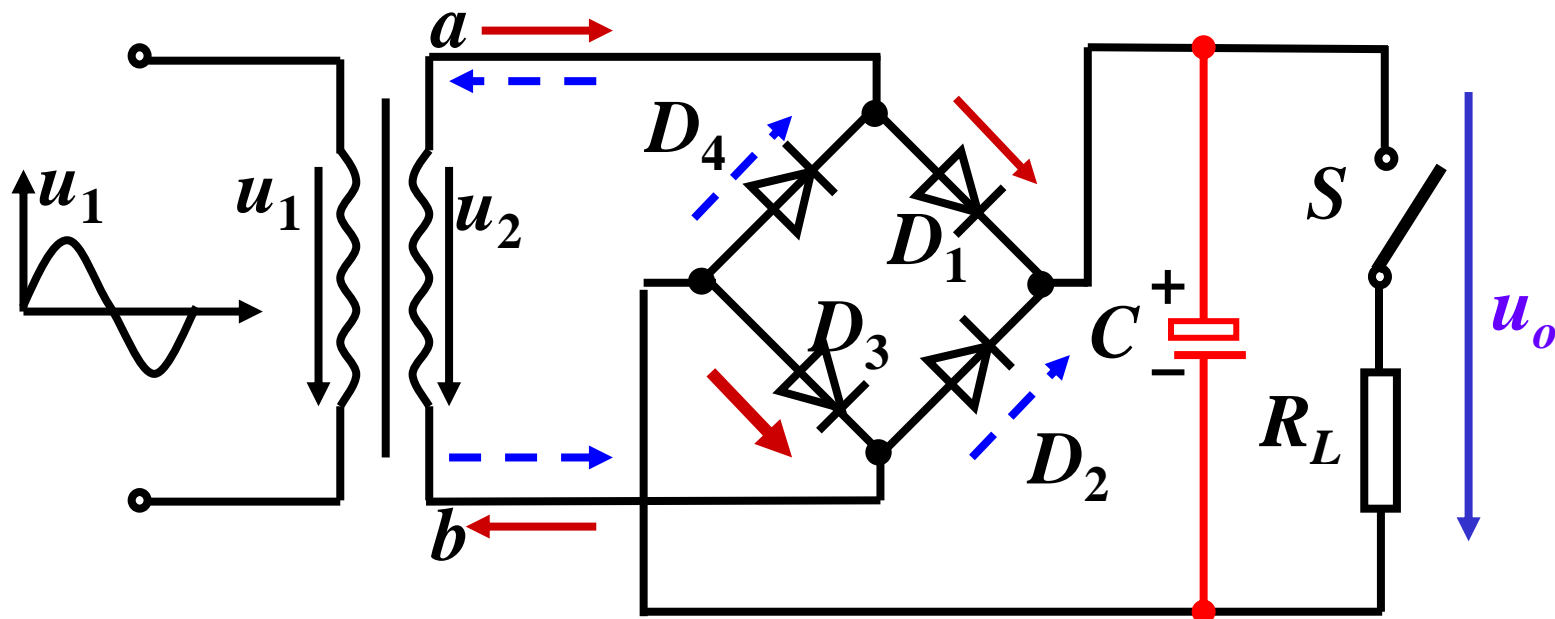
1. 电容滤波电路

(1) 电容滤波原理

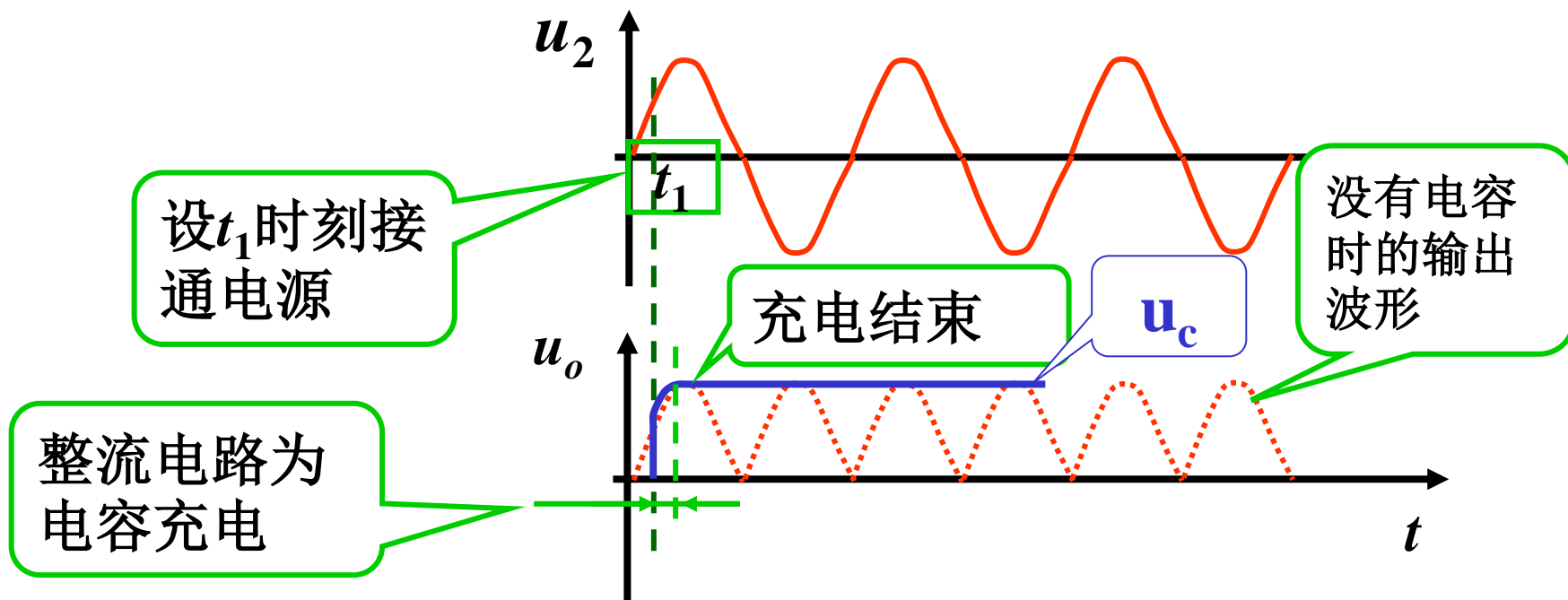
以单向桥式整流电容滤波为例进行分析，其电路如图所示。

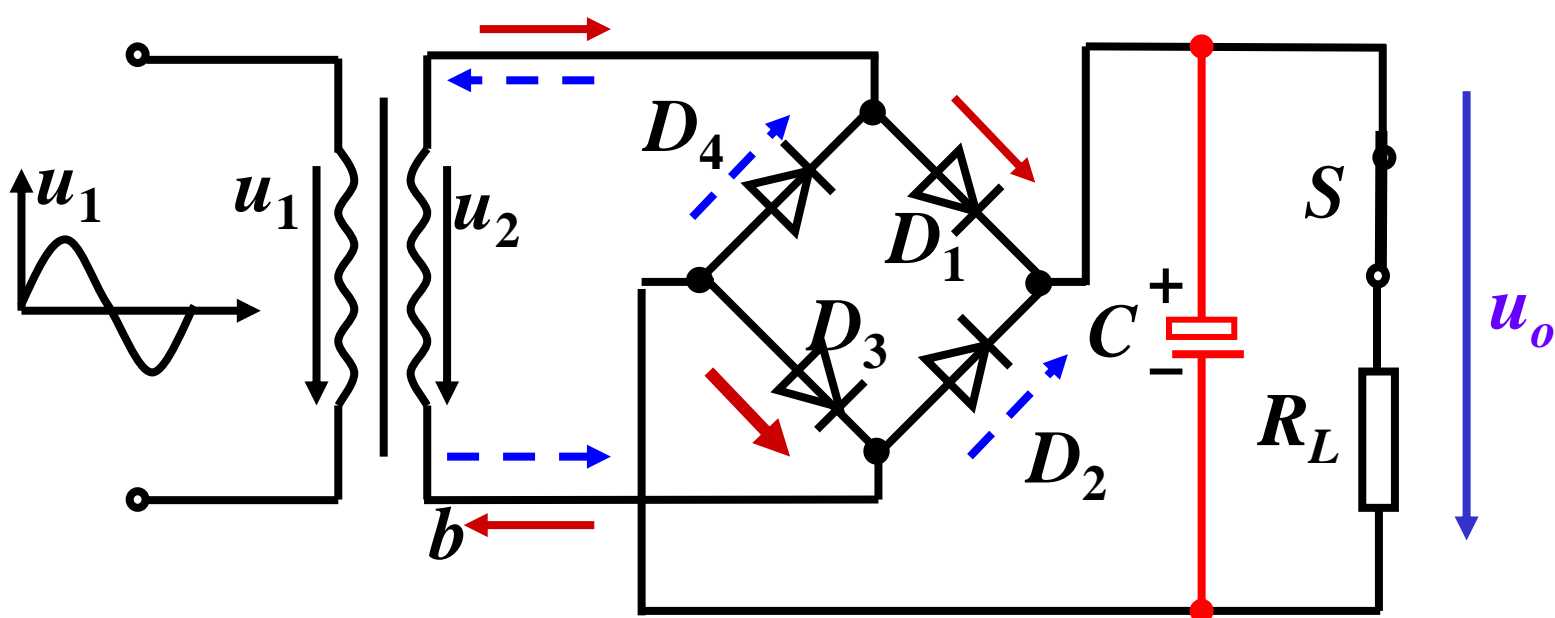


桥式整流电容滤波电路

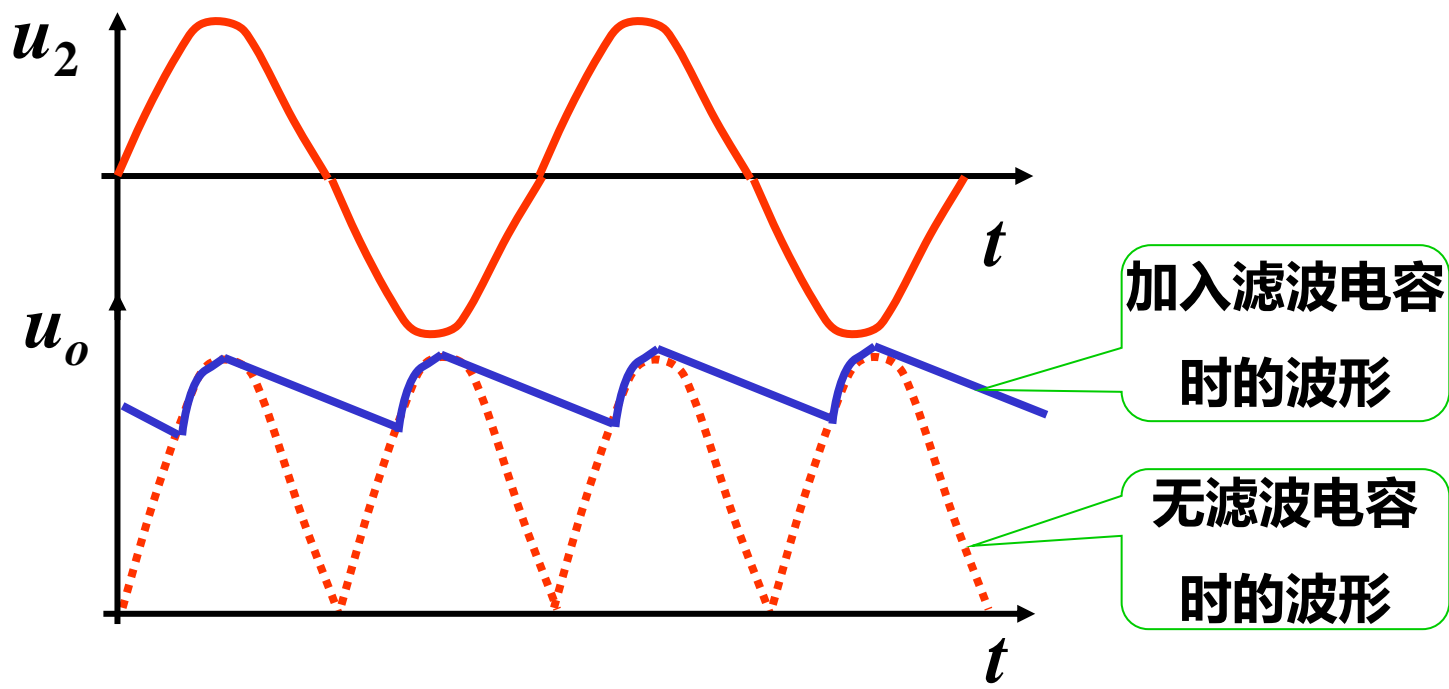


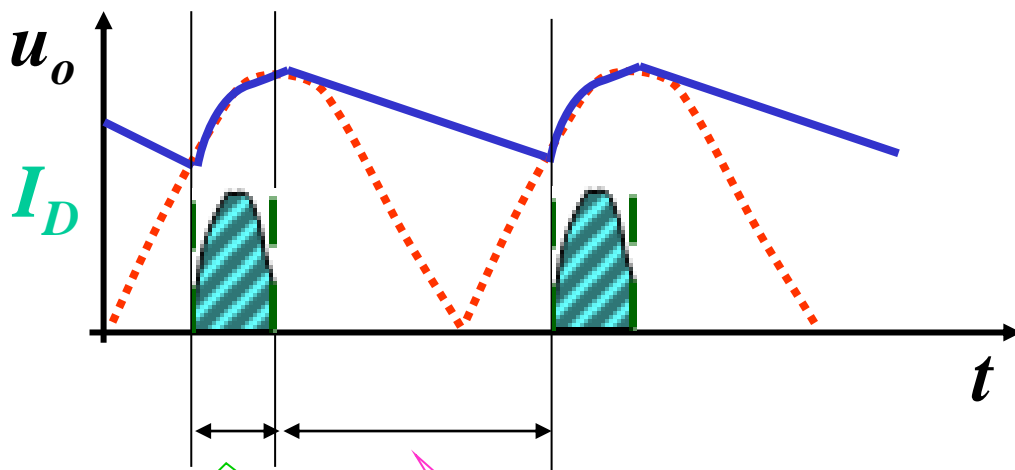
R_L 未接入时(忽略整流电路内阻)





R_L 接入（且 $R_L C$ 较大）时（忽略整流电路内阻）





u_2 上升, $u_2 > u_c$,

u_2 对电容充电,

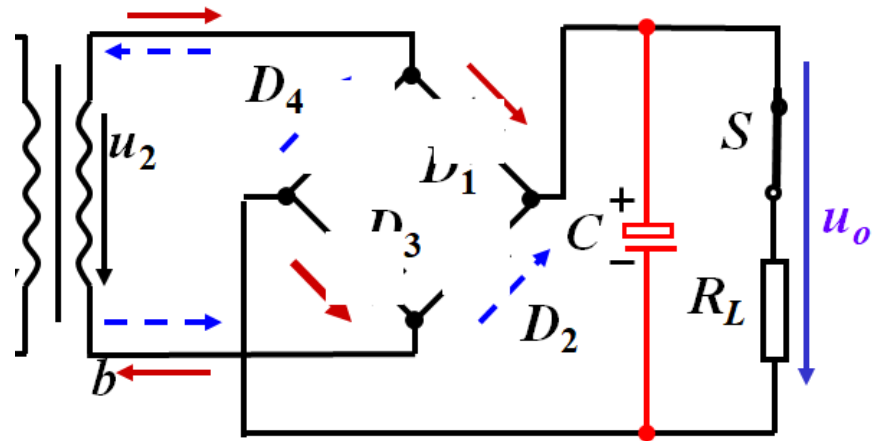
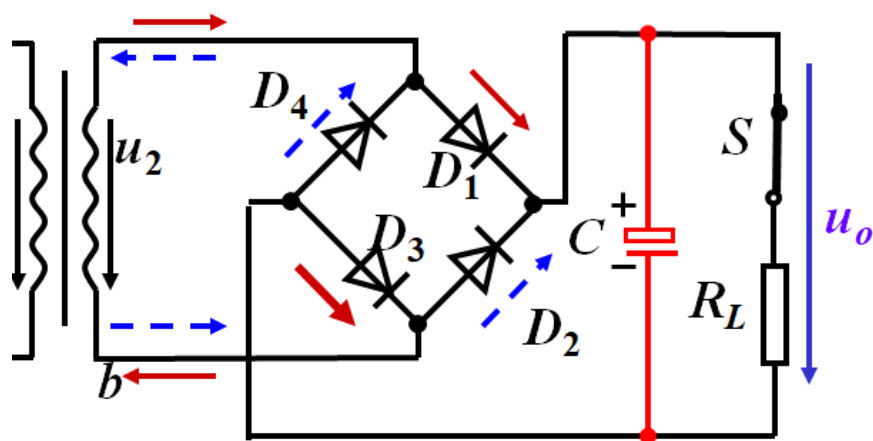
$$u_o = u_c \approx u_2$$

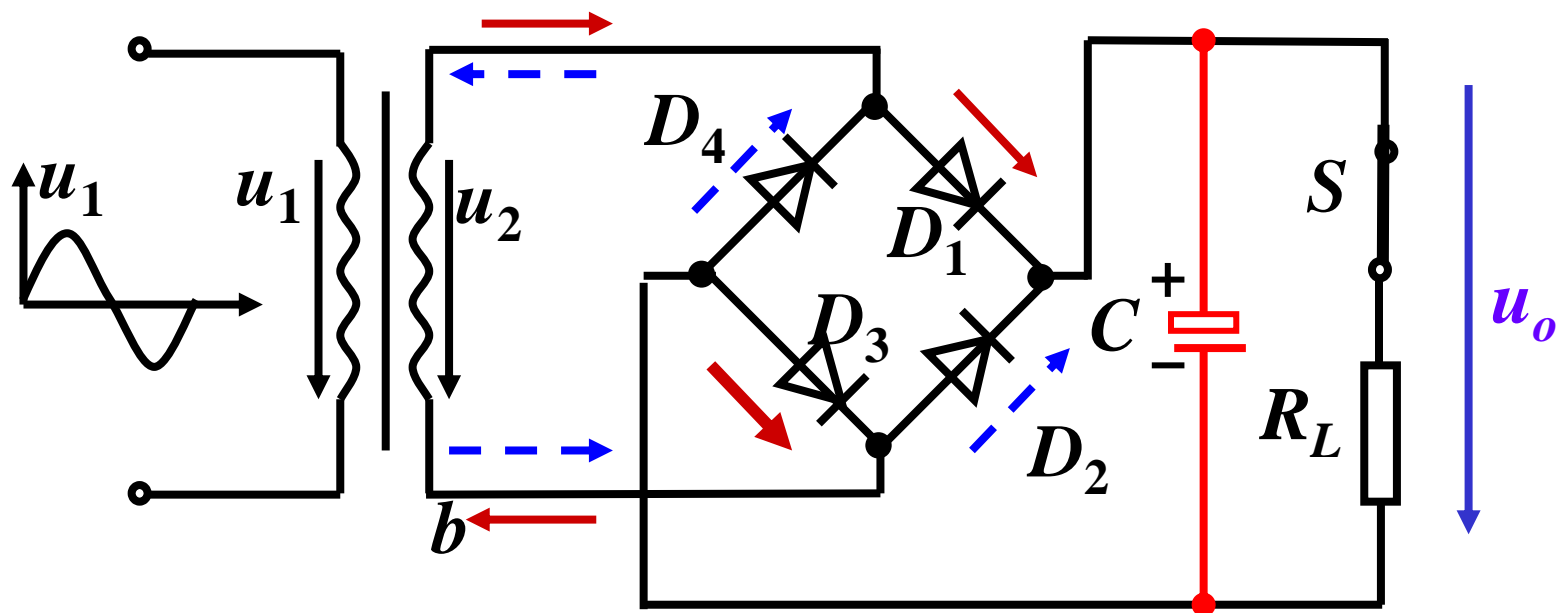
u_2 下降, $u_2 < u_c$,

二极管承受反向电压而截止。

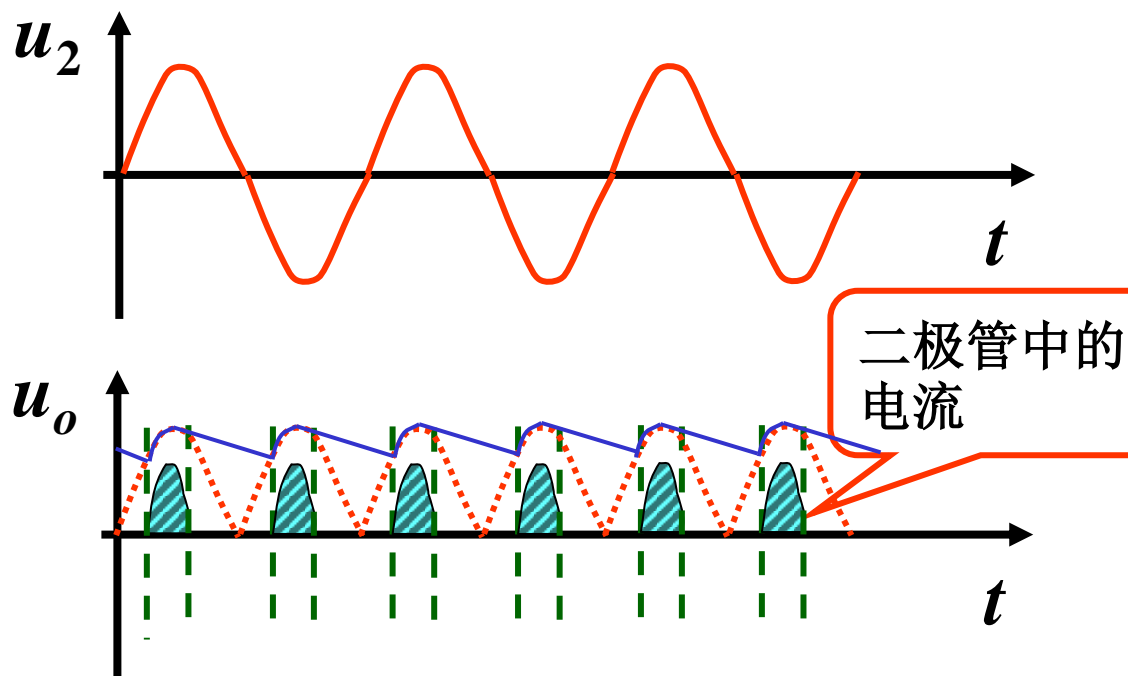
电容C通过 R_L 放电, u_c 按指数

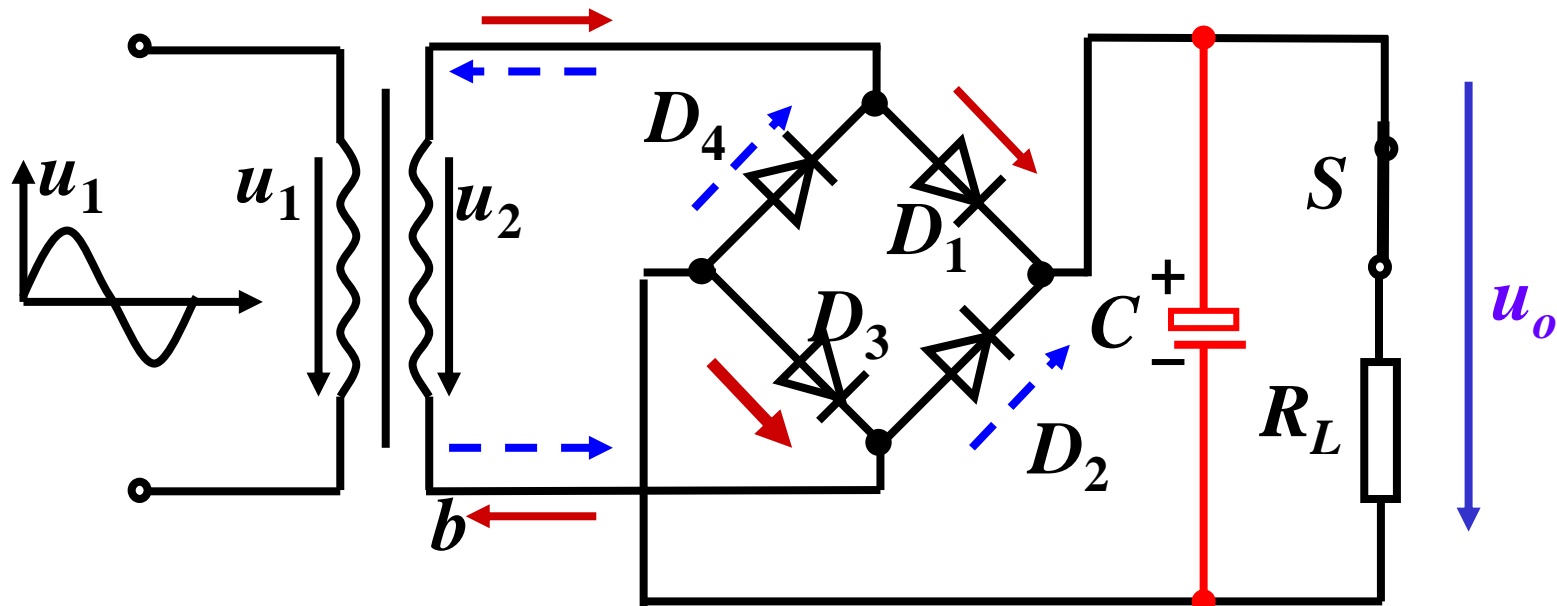
规律下降, 时间常数 $\tau = R_L C$





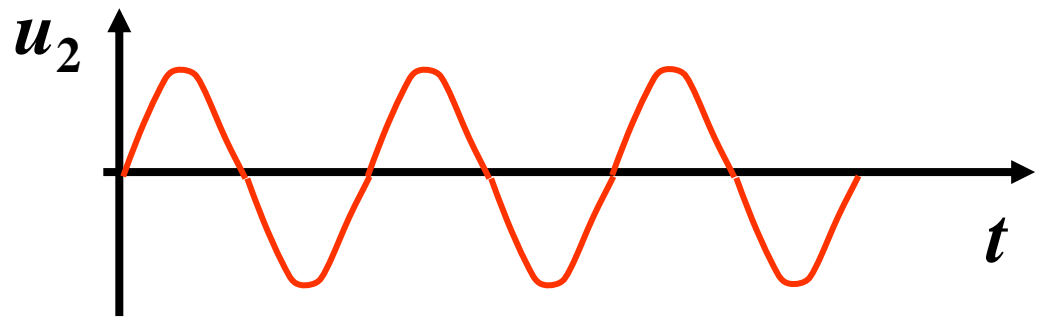
只有整流电路输出电压大于 u_c 时，才有充电电流。因此二极管中的电流是脉冲波。



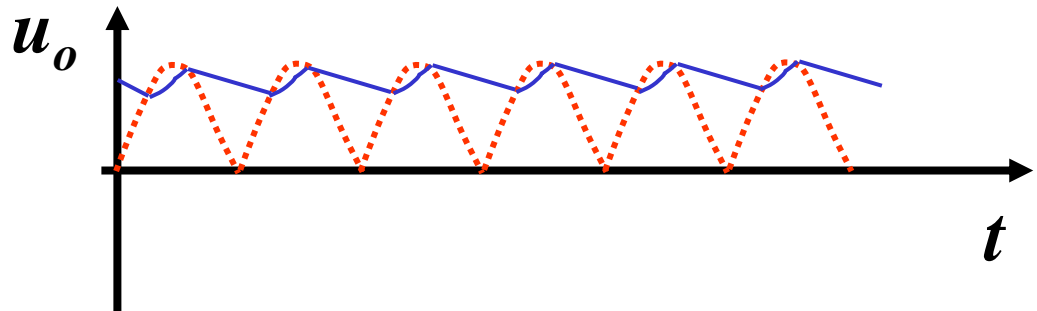


R_L 接入（且 $R_L C$ 较大）时（考虑整流二极管电路内阻）

电容充电时，
电容电压滞后
于 u_2 。



$R_L C$ 越小，输
出电压越低。



(2) 电容滤波电路的特点

(a) 输出电压 平均值 U_o 与时间常数 $R_L C$ 有关

$R_L C$ 愈大 \rightarrow 电容器放电愈慢 $\rightarrow U_o$ (平均值) 愈大

一般取 $\tau = R_L C \geq (5-10)T$ (T : 电源电压的周期)

$$\text{近似估算: } U_o = 1.2U_2 \quad I_o = U_o / R_L$$

(b) 流过二极管瞬时电流很大

$R_L C$ 越大 $\rightarrow U_o$ 越高 \rightarrow 负载电流的平均值越大;

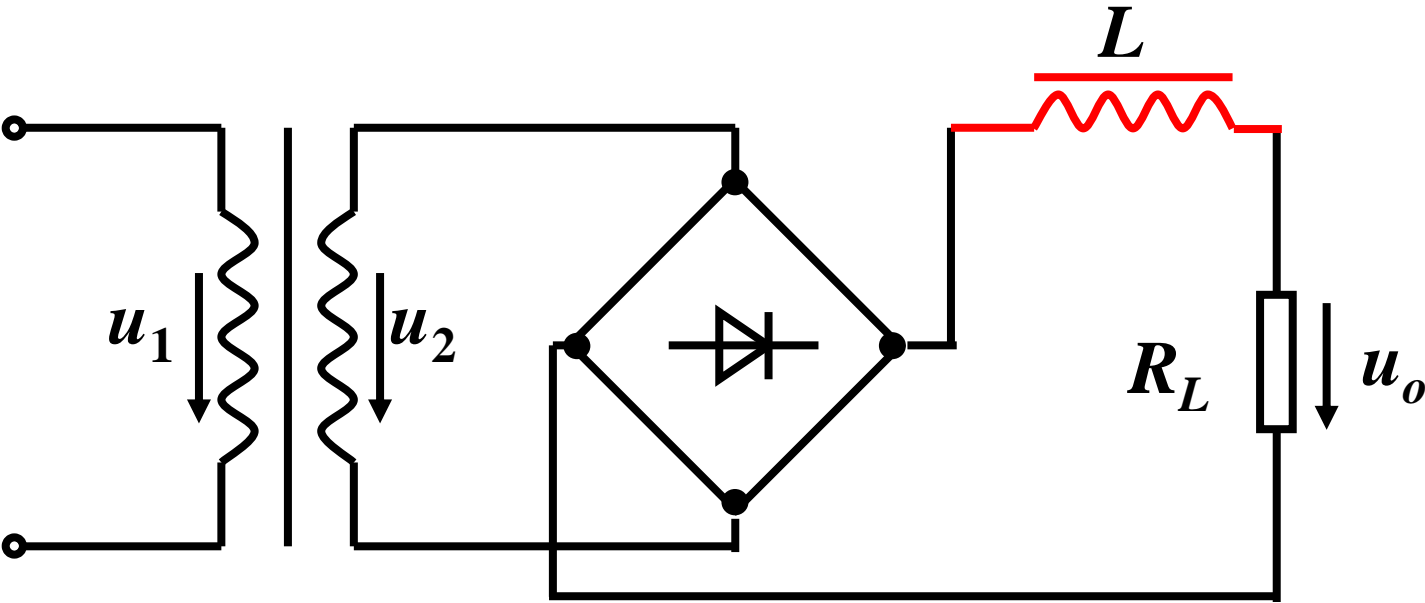
整流管导电时间越短 $\rightarrow i_D$ 的峰值电流越大

(c) 二极管承受的最高反向电压

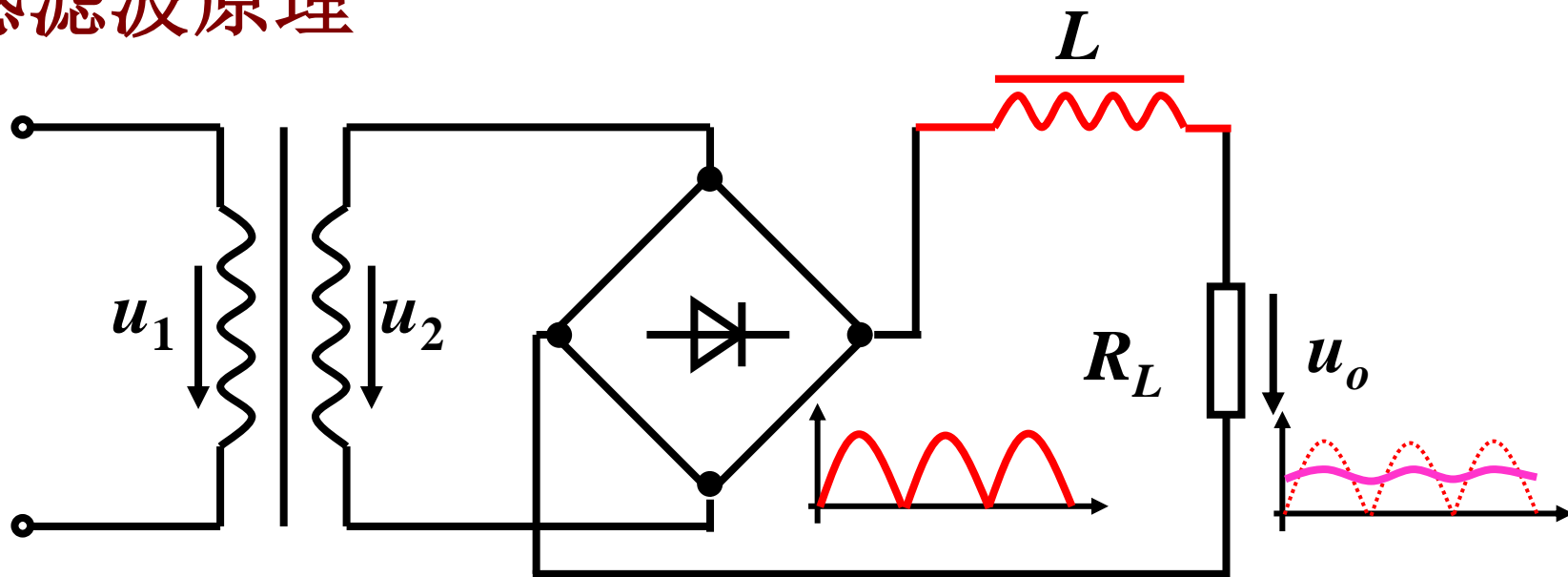
$$U_{RM} = \sqrt{2}U_2$$

2. 电感滤波电路

电路结构：在桥式整流电路与负载间串入一电感 L 就构成了电感滤波电路。



电感滤波原理



对直流分量: $X_L=0$ 相当于短路,电压大部分降在 R_L 上

对谐波分量: f 越高, X_L 越大,电压大部分降在 X_L 上。

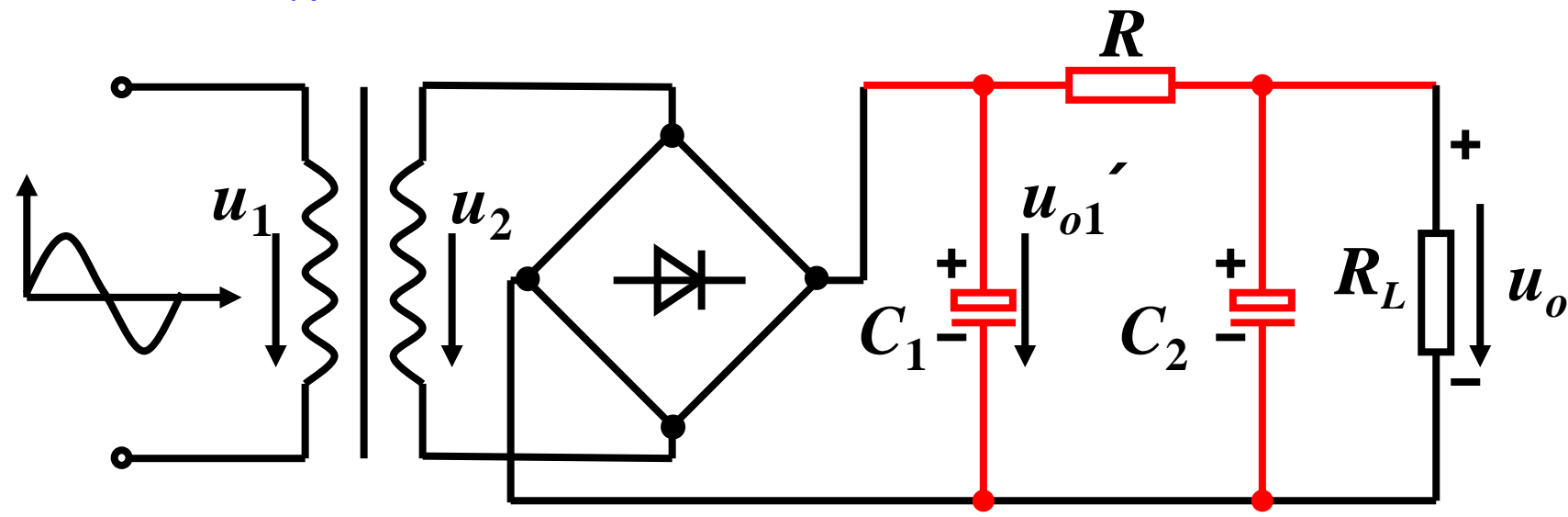
因此, 在输出端得到比较平滑的直流电压。

当忽略电感线圈的直流电阻时, 输出平均电压
约为: $U_o=0.9U_2$

3. $RC - \pi$ 型滤波器

改善滤波特性的方法：采取多级滤波

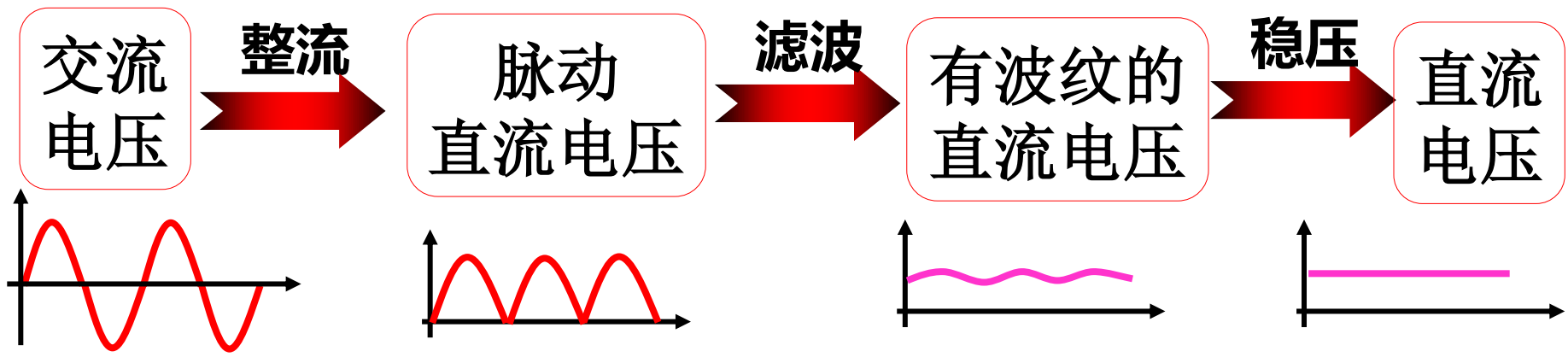
$RC - \pi$ 型滤波器



将 $RC - \pi$ 型滤波器中的电阻换为电感，
变为 $LC - \pi$ 型滤波器

7.2 串联式稳压电路

稳压电路的作用：



稳压电源类型:

常用稳压电路 (小功率设备)

稳压管
稳压电路

电路最简单，
但是带负载能力差，一般只提供基准电压，不作为电源使用。

线性
稳压电路

以下主要讨论线性稳压电路。

开关型
稳压电路

效率较高，目前用的也比较多，但因学时有限，这里不做介绍。

一. 稳压电路的主要性能指标

输出电压变化量 $\Delta V_O = K_V \Delta V_I + R_o \Delta I_O + S_T \Delta T$

稳压系数

$$\gamma = \frac{\Delta V_O / V_O}{\Delta V_I / V_I} \bigg|_{\substack{\Delta I_O = 0 \\ \Delta T = 0}}$$

输出电阻

$$R_o = \frac{\Delta V_O}{\Delta I_O} \bigg|_{\substack{\Delta V_I = 0 \\ \Delta T = 0}}$$

温度系数

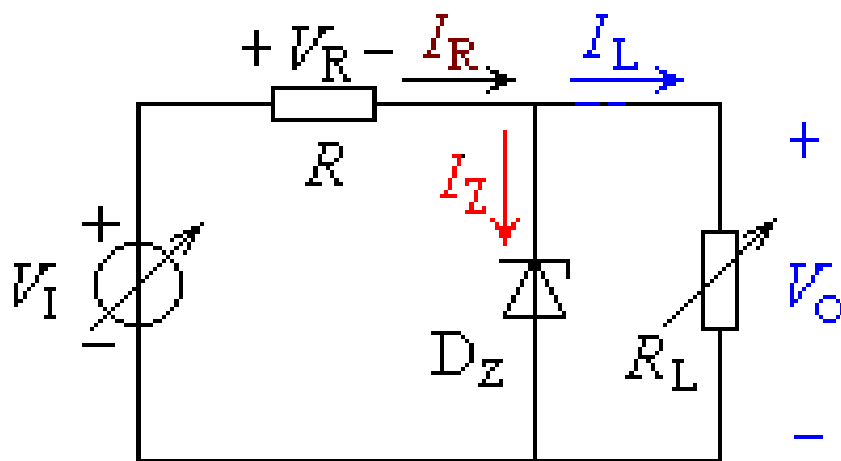
$$S_T = \frac{\Delta V_O}{\Delta T} \bigg|_{\substack{\Delta V_I = 0 \\ \Delta T = 0}}$$

二. 硅稳压二极管稳压电路

1. 稳压原理

利用稳压二极管的反向击穿特性。

由于反向特性陡直，较大的电流变化，只会引起较小的电压变化。



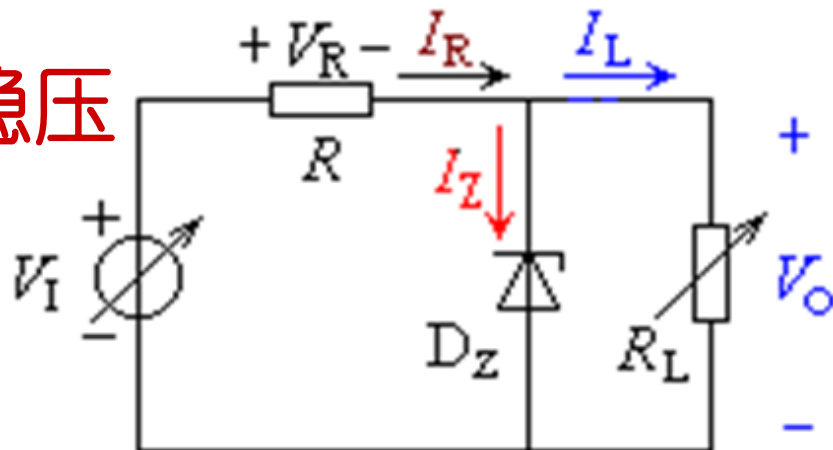
硅稳压二极管稳压电路

(1) 当输入电压变化时如何稳压

根据电路图可知

$$V_O = V_Z = V_I - V_R = V_I - I_R R$$

$$I_R = I_L + I_Z$$



输入电压 V_I 的增加，必然引起 V_O 的增加，即 V_Z 增加，从而使 I_Z 增加， I_R 增加，使 V_R 增加，从而使输出电压 V_O 减小。这一稳压过程可概括如下：

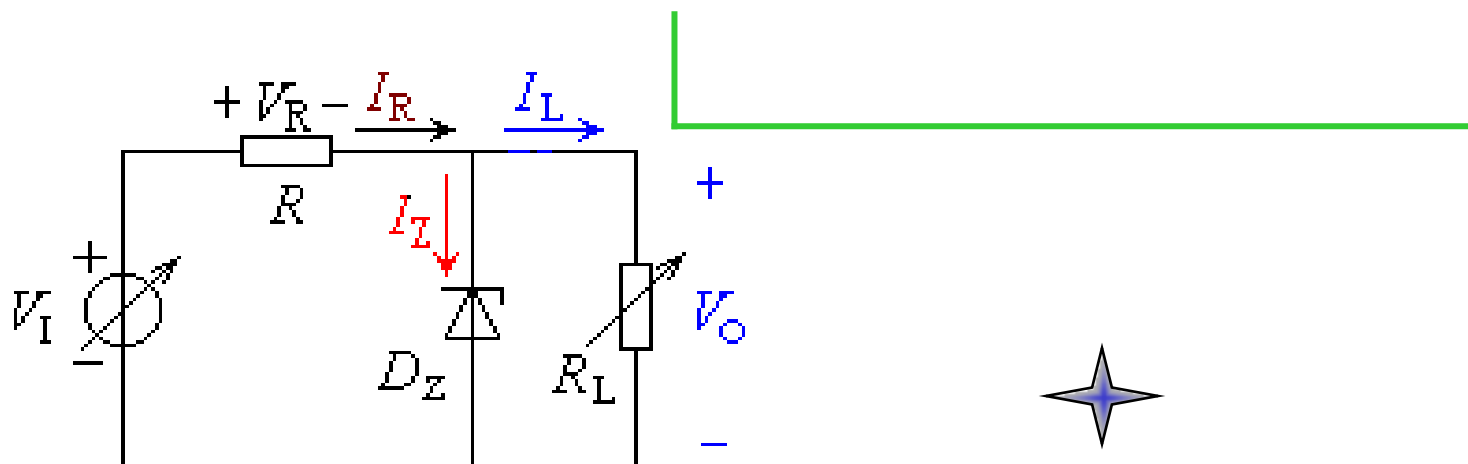
$$V_I \uparrow \rightarrow V_O \uparrow \rightarrow V_Z \uparrow \rightarrow I_Z \uparrow \rightarrow I_R \uparrow \rightarrow V_R \uparrow \rightarrow V_O \downarrow$$

这里 V_O 减小应理解为，由于输入电压 V_I 的增加，在稳压二极管的调节下，使 V_O 的增加没有那么大而已。 V_O 还是要增加一点的，这是一个有差调节系统。

(2) 当负载电流变化时如何稳压

负载电流 I_L 的增加，必然引起 I_R 的增加，即 V_R 增加，从而使 $V_Z=V_O$ 减小， I_Z 减小。 I_Z 的减小必然使 I_R 减小， V_R 减小，从而使输出电压 V_O 增加。这一稳压过程可概括如下：

$$I_L \uparrow \rightarrow I_R \uparrow \rightarrow V_R \uparrow \rightarrow V_Z \downarrow (V_O \downarrow) \rightarrow I_Z \downarrow \rightarrow I_R \downarrow \rightarrow V_R \downarrow \rightarrow V_O \uparrow$$



2. 稳压电阻的计算

稳压二极管稳压电路的稳压性能与稳压二极管击穿特性的动态电阻有关，与稳压电阻 R 的阻值大小有关。

稳压二极管的动态电阻越小，稳压电阻 R 越大，稳压性能越好。

稳压电阻 R 的作用

将稳压二极管电流的变化转换为电压的变化，从而起到调节作用，同时 R 也是限流电阻。

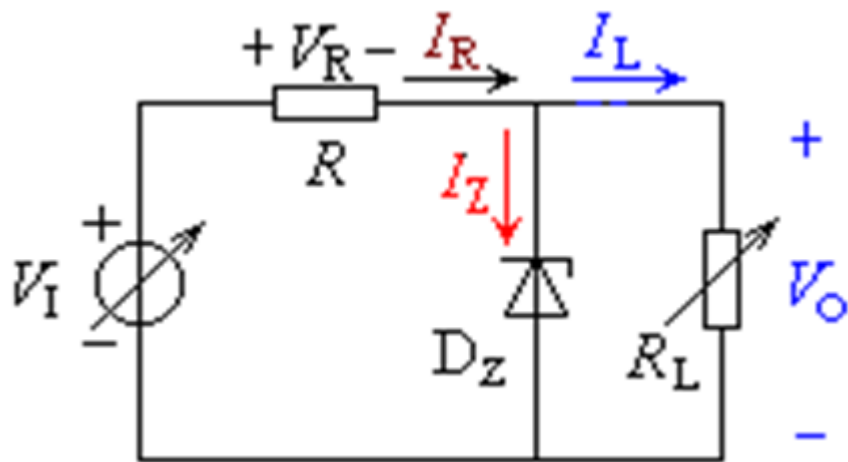
显然 R 的数值越大，较小 I_Z 的变化就可引起足够大的 V_R 变化，就可达到足够的稳压效果。

但 R 的数值越大，就需要较大的输入电压 V_I 值，损耗就要加大。

稳压限流电阻的计算如下

(1) 当输入电压最小，负载电流最大时，流过稳压二极管的电流最小。此时 I_Z 不应小于 $I_{Z\min}$ ，由此可计算出稳压电阻的最大值，实际选用的稳压电阻应小于最大值。即

$$R_{\max} = \frac{V_{I\min} - V_Z}{I_{Z\min} + I_{L\max}}$$



(2) 当输入电压最大，负载电流最小时，流过稳压二极管的电流最大。此时 I_Z 不应超过 $I_{Z\max}$ ，由此可计算出稳压电阻的最小值。即

$$R_{\min} = \frac{V_{I\max} - V_Z}{I_{Z\max} + I_{L\min}}$$

所以稳压限流电阻大小选择如下：

$$R_{\min} < R < R_{\max}$$

稳压二极管在使用时一定要串入限流电阻，不能使它的功耗超过规定值，否则会造成损坏！

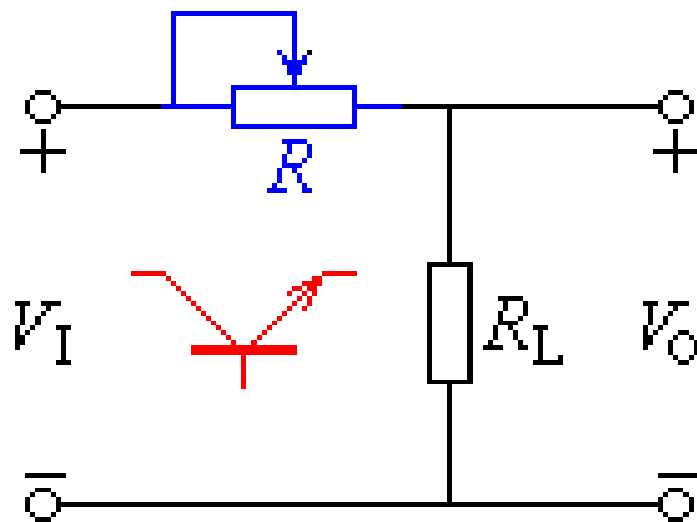
三. 串联型稳压电源

1. 串联型稳压电源的构成

$$V_O = V_I - V_R,$$

当 $V_I \uparrow \rightarrow R \uparrow \rightarrow V_R \uparrow \rightarrow$ 在一定程度上抵消了 V_I 增加对输出电压的影响。

若负载电流 $I_L \uparrow \rightarrow R \downarrow \rightarrow V_R \downarrow \rightarrow$ 在一定程度上抵消了因 I_L 增加，使 V_I 减小，对输出电压减小的影响

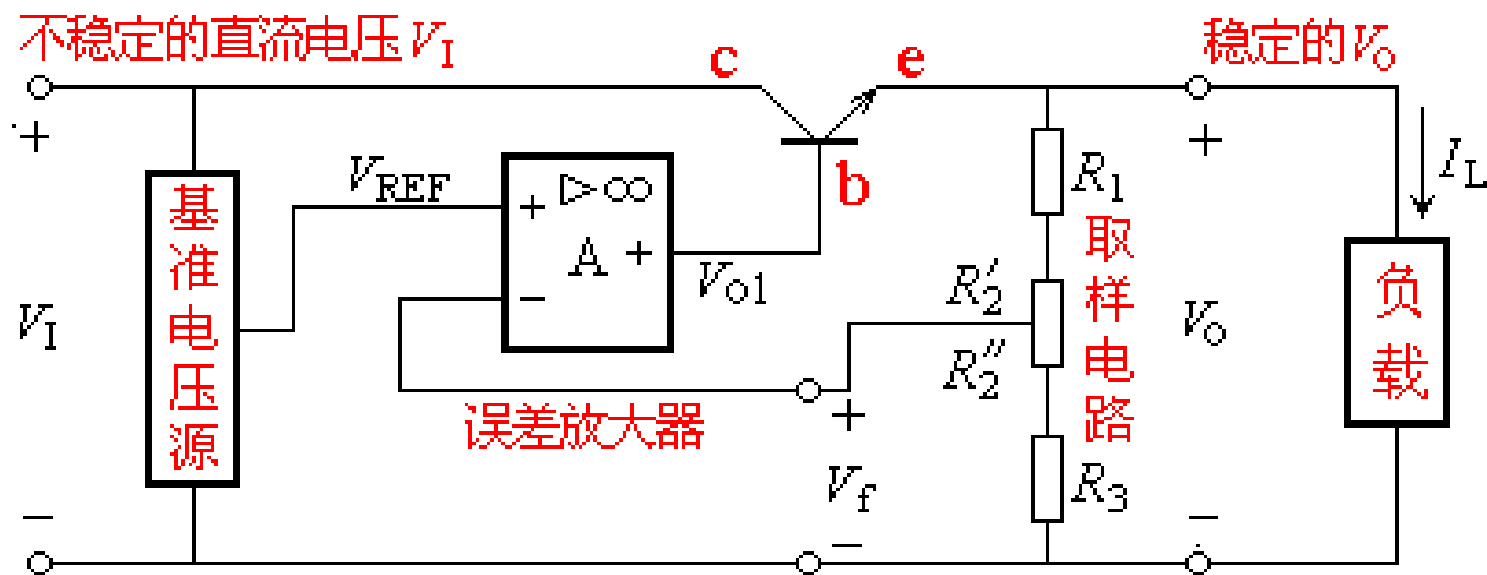


串联稳压电源示意图

在实际电路中，可变电阻 R 是用一个三极管来替代的，控制基极电位，从而就控制了三极管的管压降 V_{CE} ， V_{CE} 相当于 V_R 。

串联型稳压电源的构成：

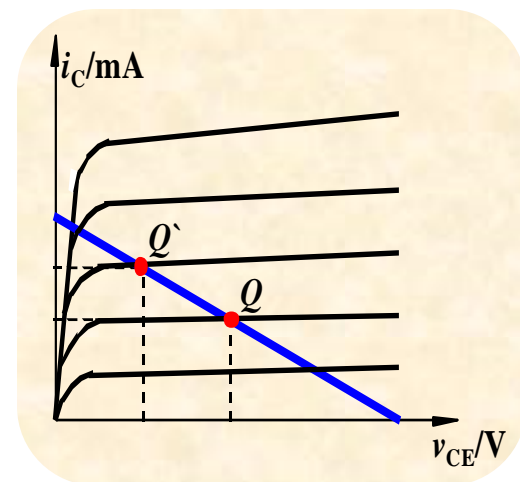
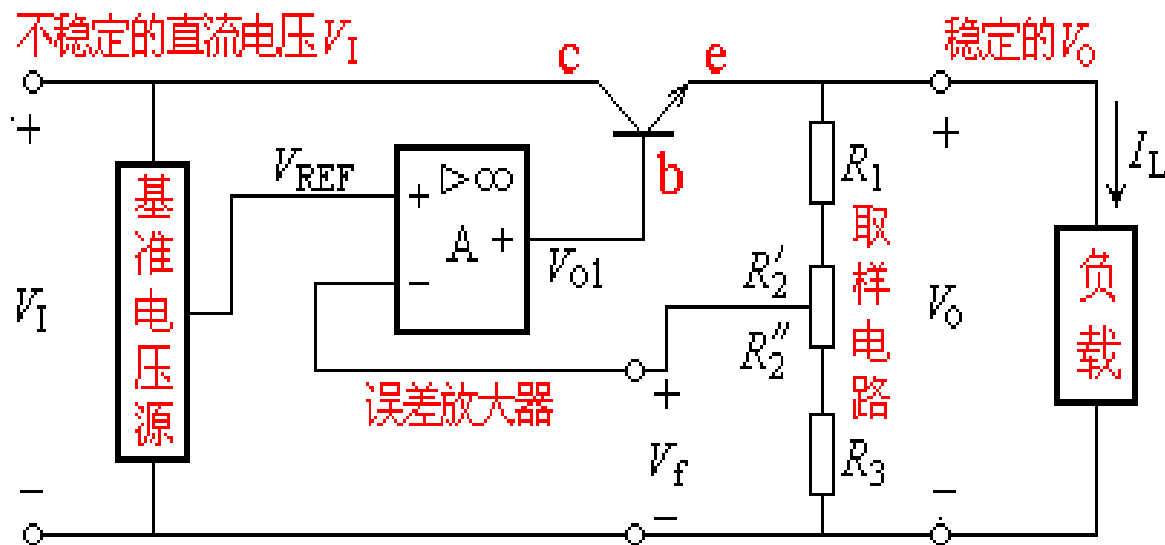
调整管、放大环节、比较环节、基准电压源



串联型稳压电路方框图

2. 工作原理

实质：电压负反馈



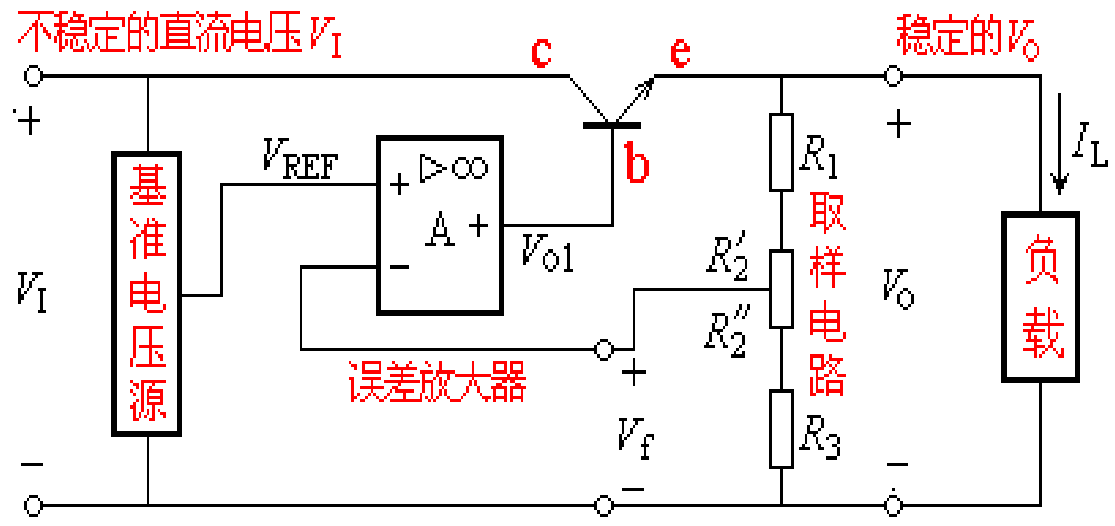
1. 输入电压变化时

$$V_I \uparrow \rightarrow V_O \uparrow \rightarrow V_f \uparrow \rightarrow V_{O1} \downarrow \rightarrow V_{CE} \uparrow \rightarrow V_O \downarrow$$

2. 负载电流变化时

$$I_L \uparrow \rightarrow V_O \downarrow \rightarrow V_f \downarrow \rightarrow V_{O1} \uparrow \rightarrow V_{CE} \downarrow \rightarrow V_O \uparrow$$

3. 输出电压调节范围的计算



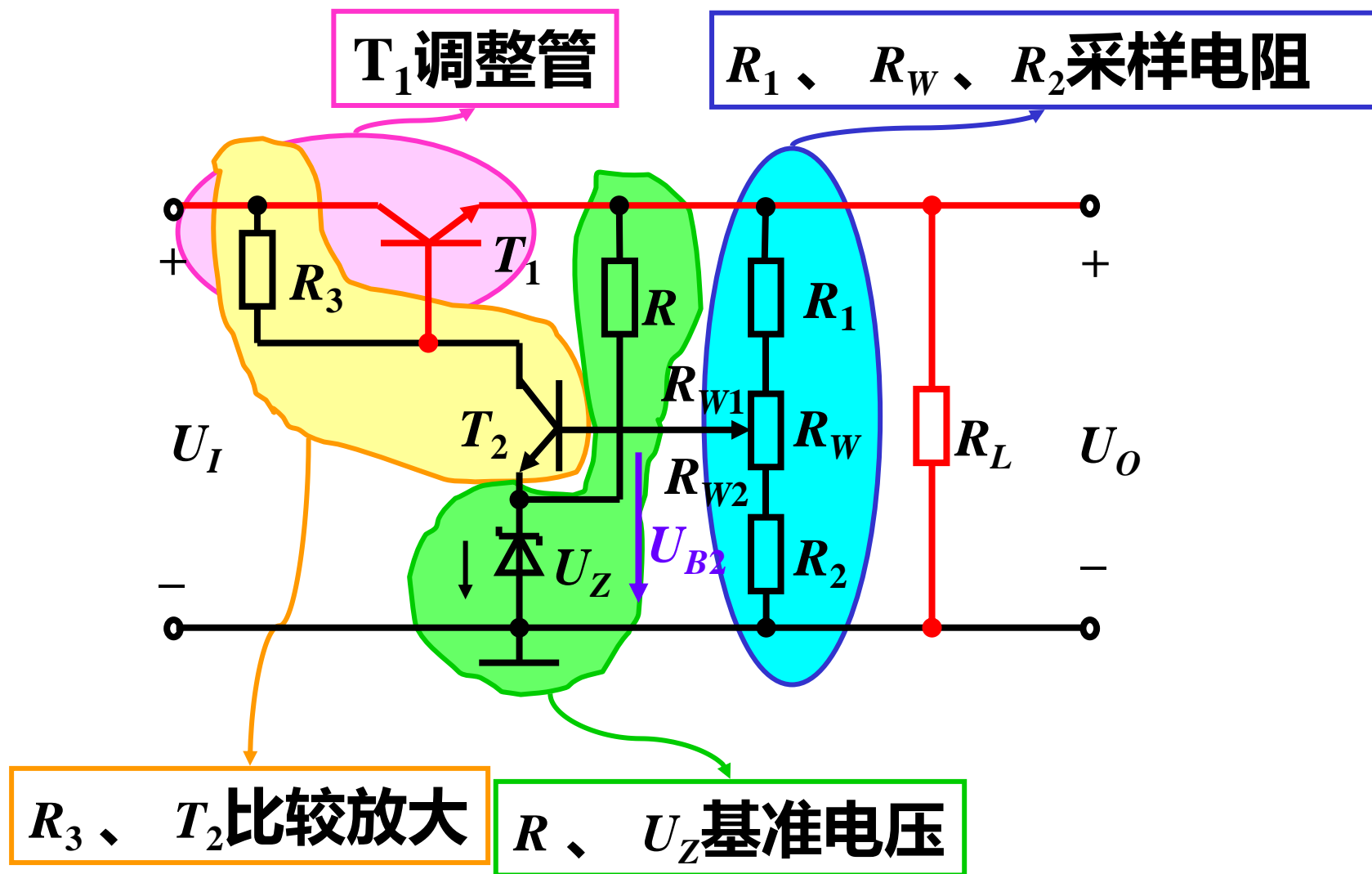
根据“虚短” $V_f \approx V_{REF}$

$$\because V_f = \frac{R_2'' + R_3}{R_1 + R_2 + R_3} V_o = F_v V_o \qquad \therefore V_o = \frac{V_f}{F_v} \approx \frac{V_{REF}}{F_v}$$

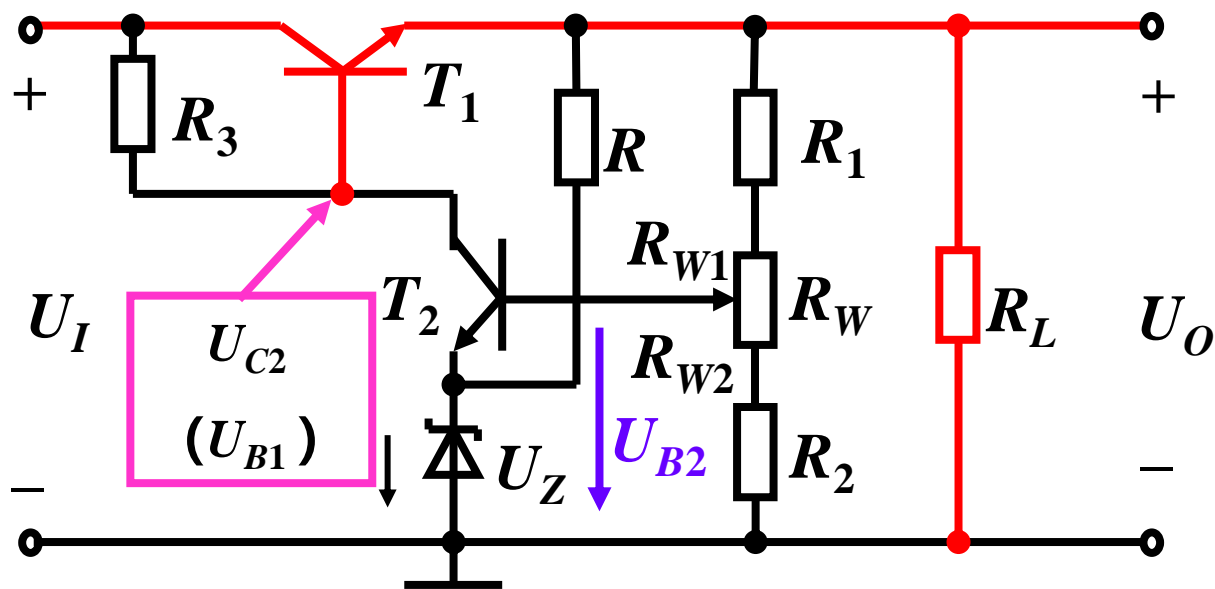
$$V_o = \left(1 + \frac{R_1 + R_2'}{R_3 + R_2''}\right) V_{REF}$$

可见，调节 R_2 可以改变输出电压。

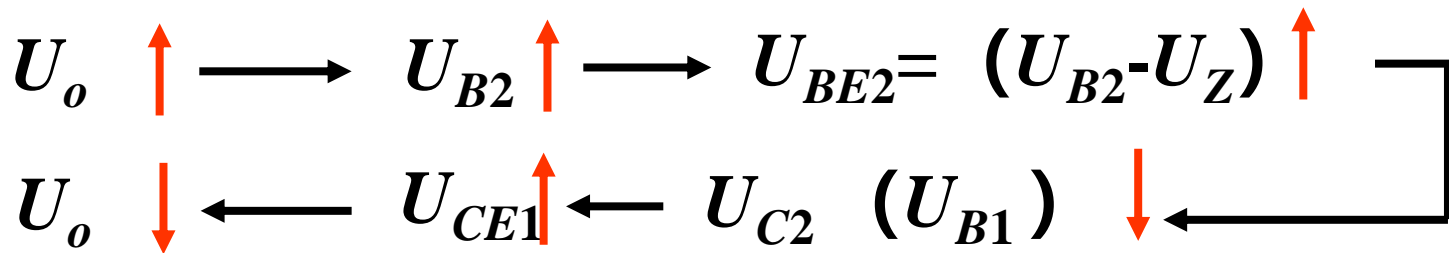
3. 分立元件组成的串联式稳压电源



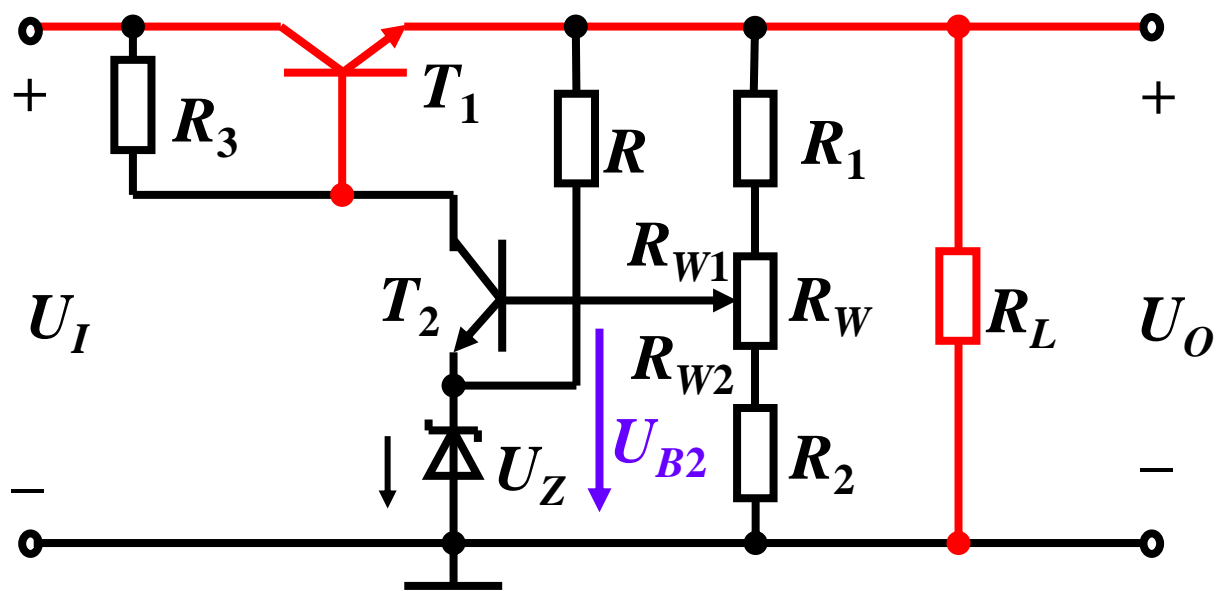
稳压原理



当 U_I 增加或输出电流减小使 U_O 升高时



(3) 输出电压的确定和调节范围

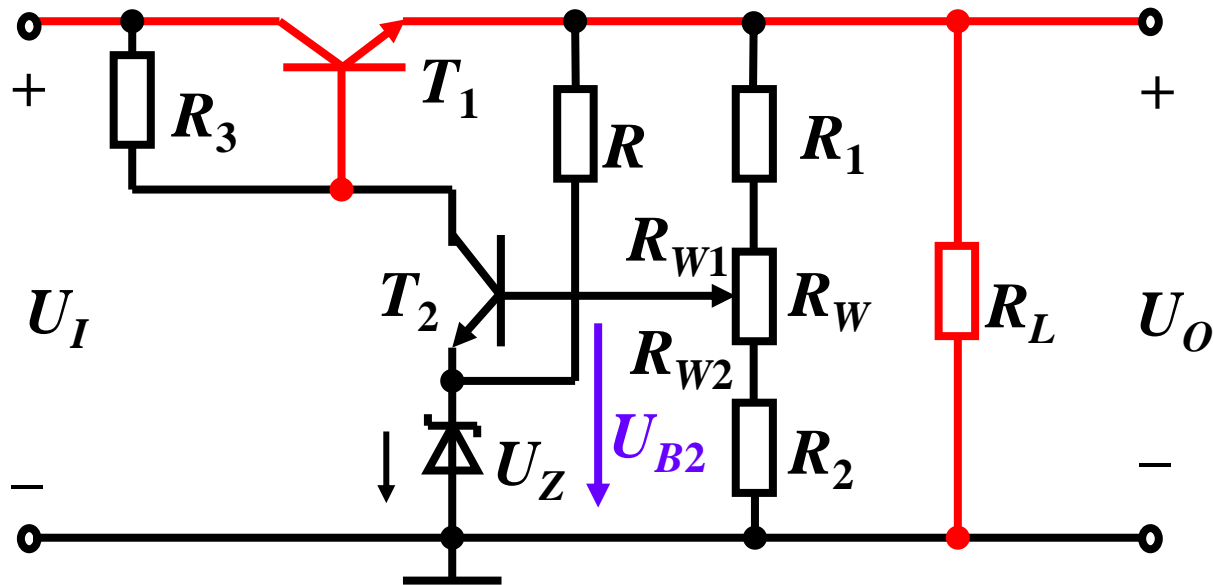


因为:
$$U_Z + U_{BE2} = \frac{R_{W2} + R_2}{R_1 + R_2 + R_W} U_O$$

所以:
$$U_O = \frac{R_1 + R_2 + R_W}{R_{W2} + R_2} (U_Z + U_{BE2}) = \frac{R_1 + R_2 + R_W}{R_{W2} + R_2} U_Z$$

忽略 U_{BE2}

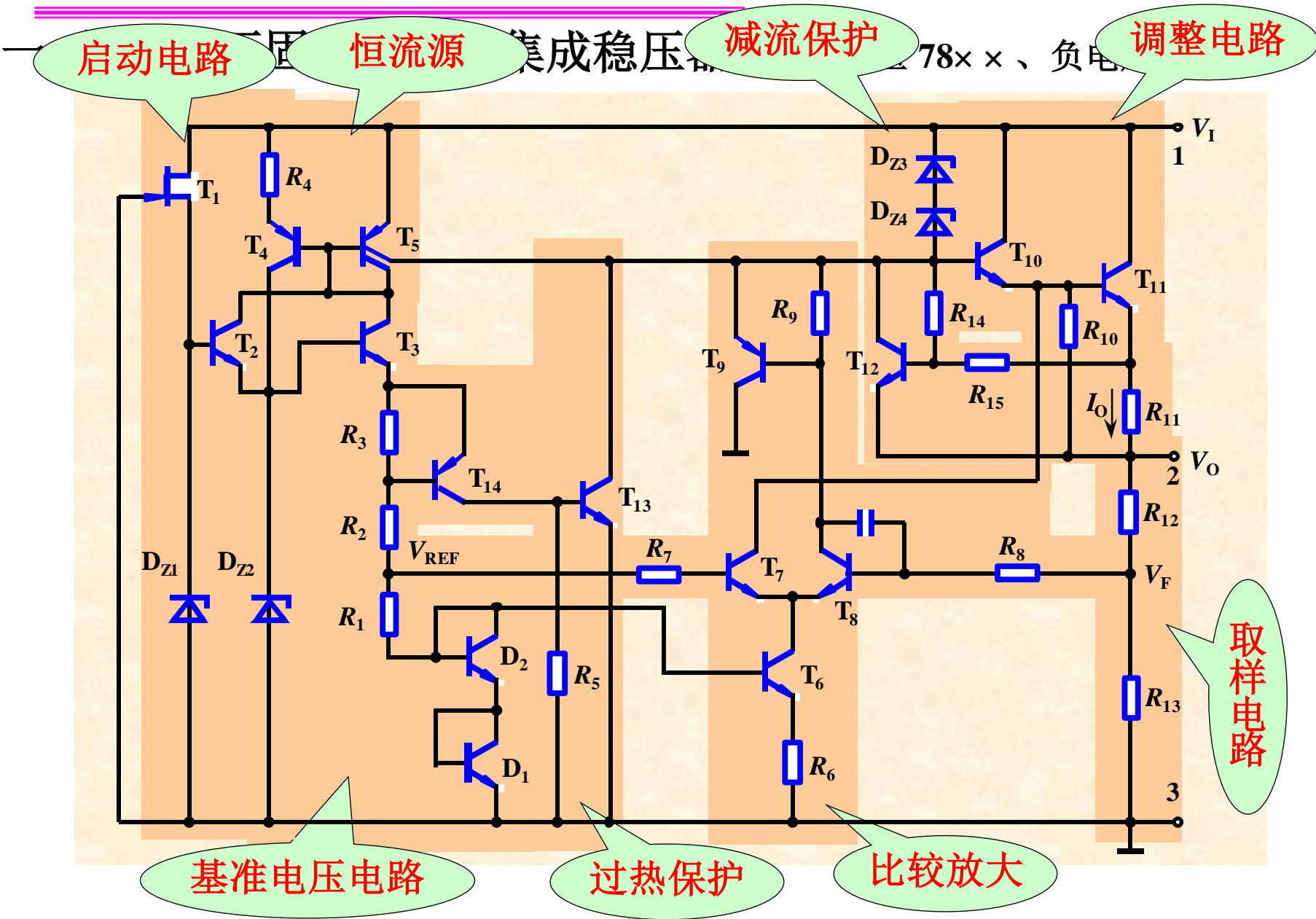
例： $U_I=18V$ ， $U_Z=4V$ ， $R_1=R_2=R_W=4.7k\Omega$ ， 求输出电压的调节范围。



$$U_{Omin} = \frac{R_1 + R_2 + R_W}{R_W + R_2} U_Z = \frac{4.7 + 4.7 + 4.7}{4.7 + 4.7} \times 4 = 6V$$

$$U_{Omax} = \frac{R_1 + R_2 + R_W}{R_2} U_Z = \frac{4.7 + 4.7 + 4.7}{4.7} \times 4 = 12V$$

7.3 三端集成稳压器



常用的集成三端稳压器的类型

类型： **W7800系列** —— 稳定正电压

W7805 输出+5V

W7809 输出+9V

W7812 输出+12V

W7815 输出+15V

W7900系列 —— 稳定负电压

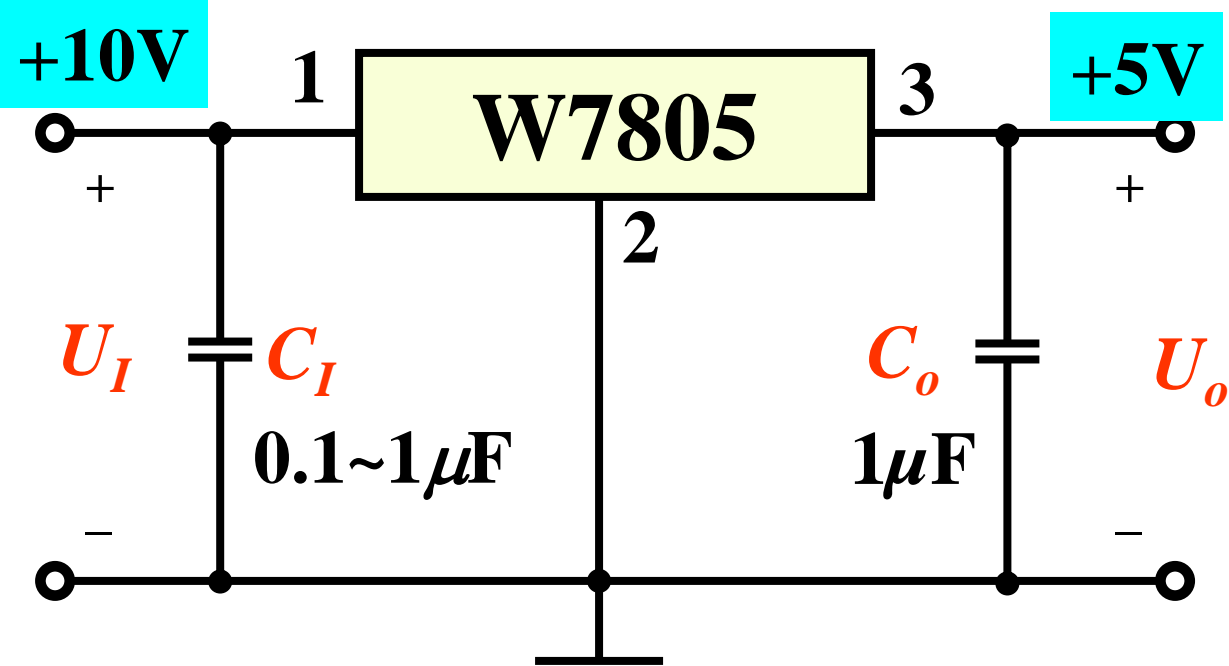
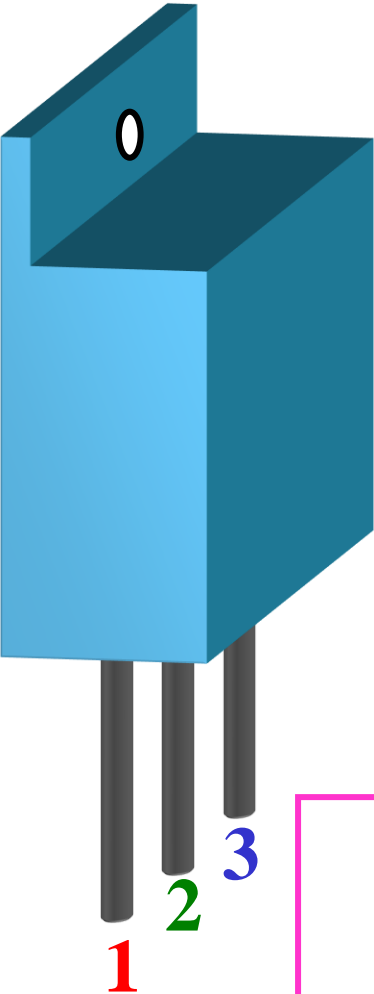
W7905 输出-5V

W7909 输出-9V

W7912 输出-12V

W7915 输出-15V

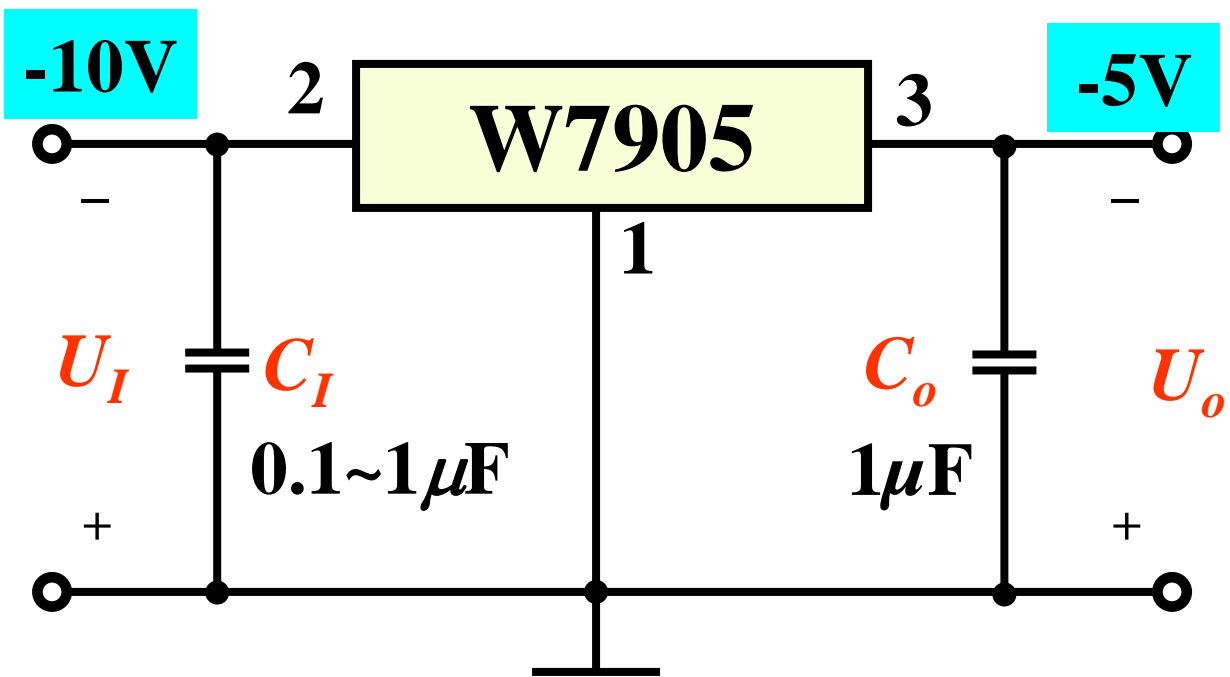
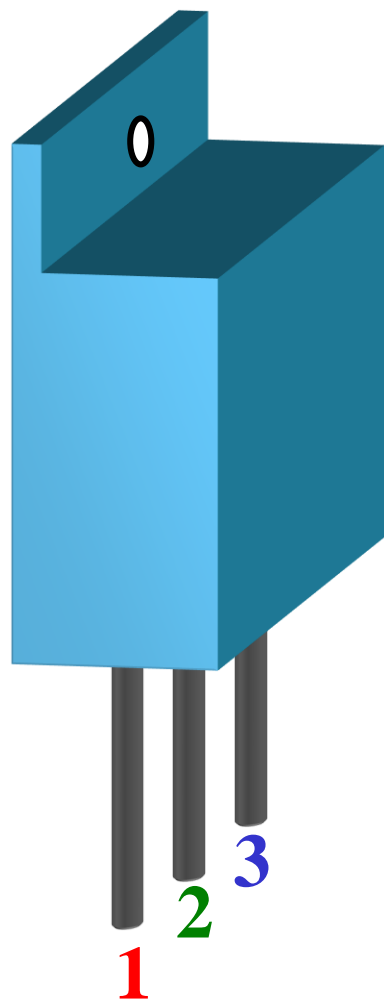
W7800系列稳压器外形及典型接线图



1端：输入端
 2端：公共端
 3端：输出端

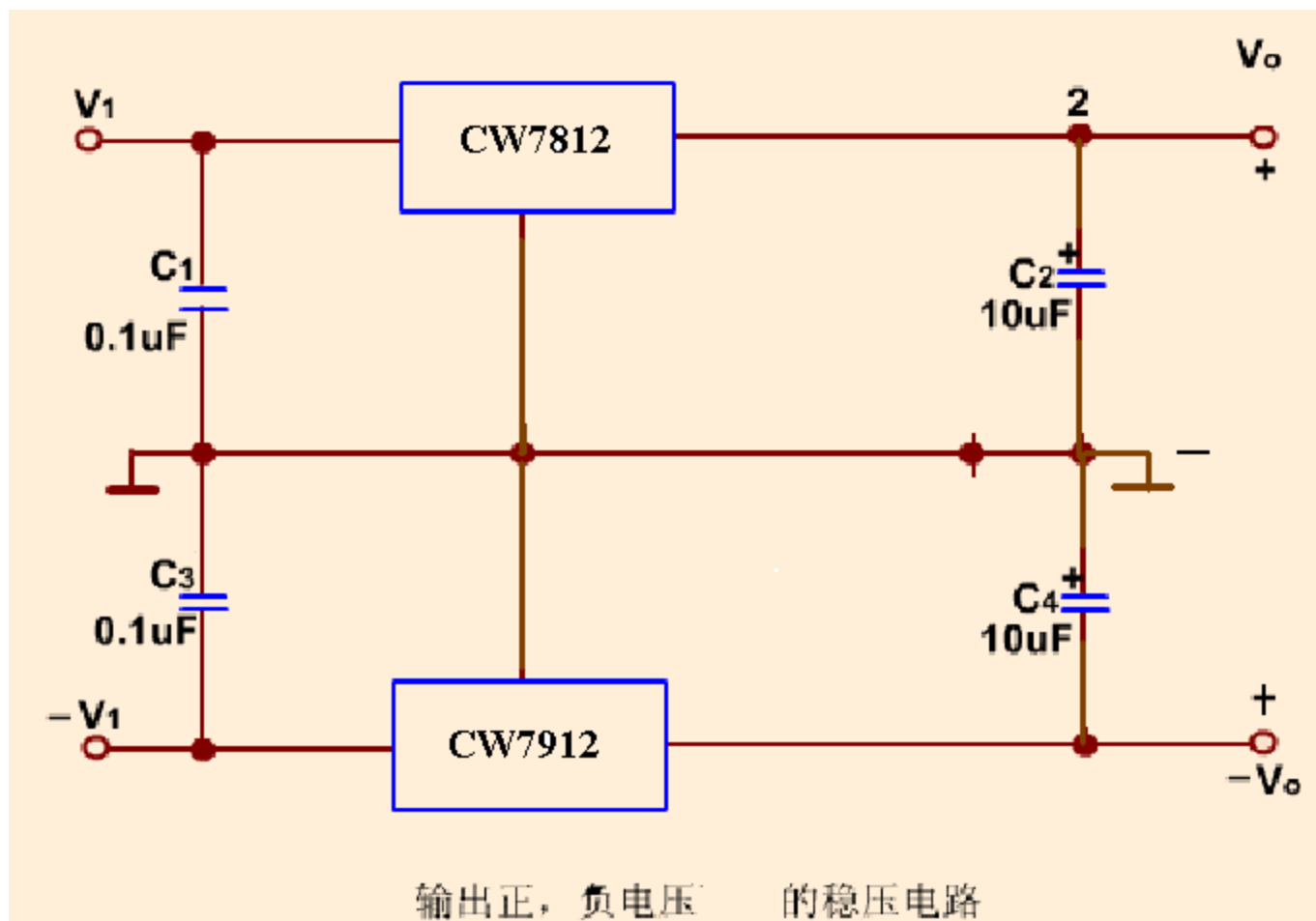
注意： 输入与输出端之间的电压不得低于3V！

W7900系列稳压器外形及典型接线图



- 1端: 公共端
- 2端: 输入端
- 3端: 输出端

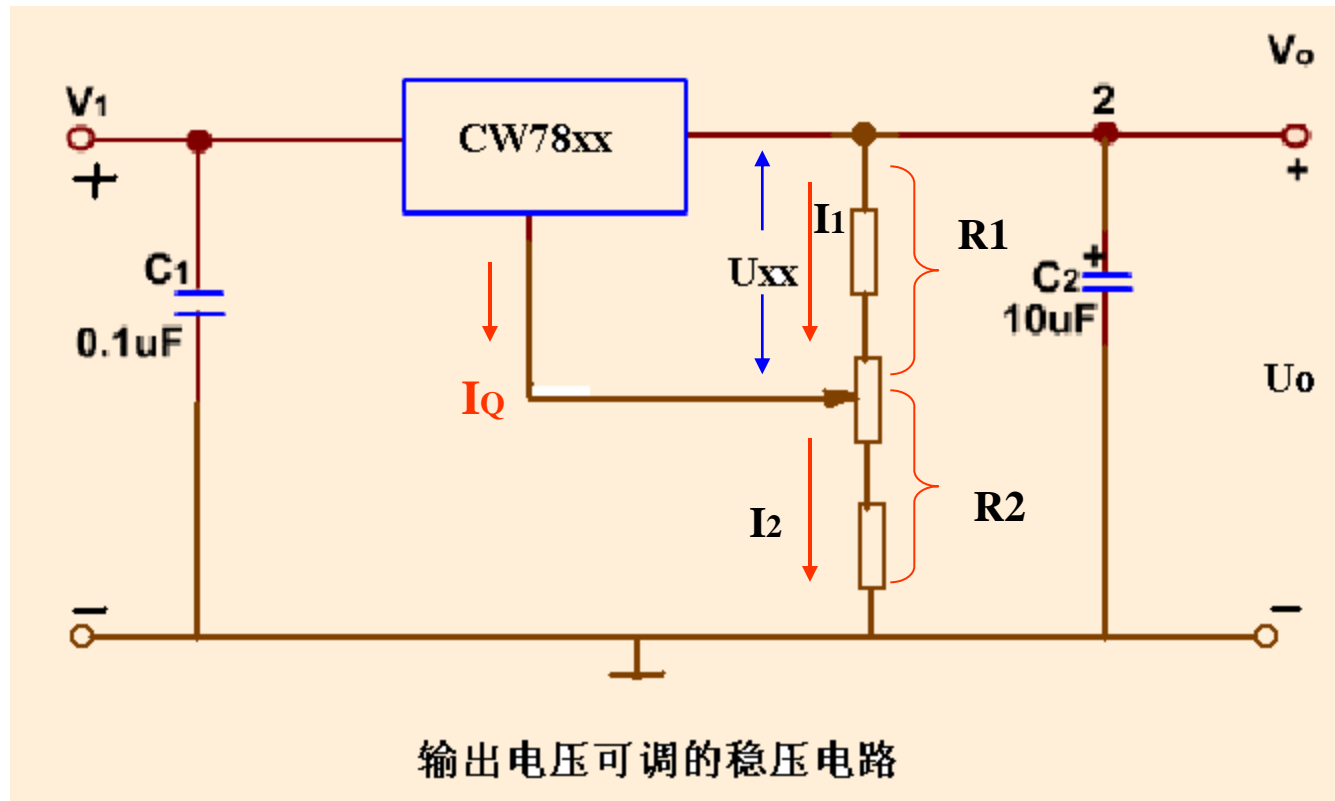
输出正、负电压的稳压电路



输出电压可调的稳压电路

$$\therefore I_1 = \frac{U_{XX}}{R_1}$$

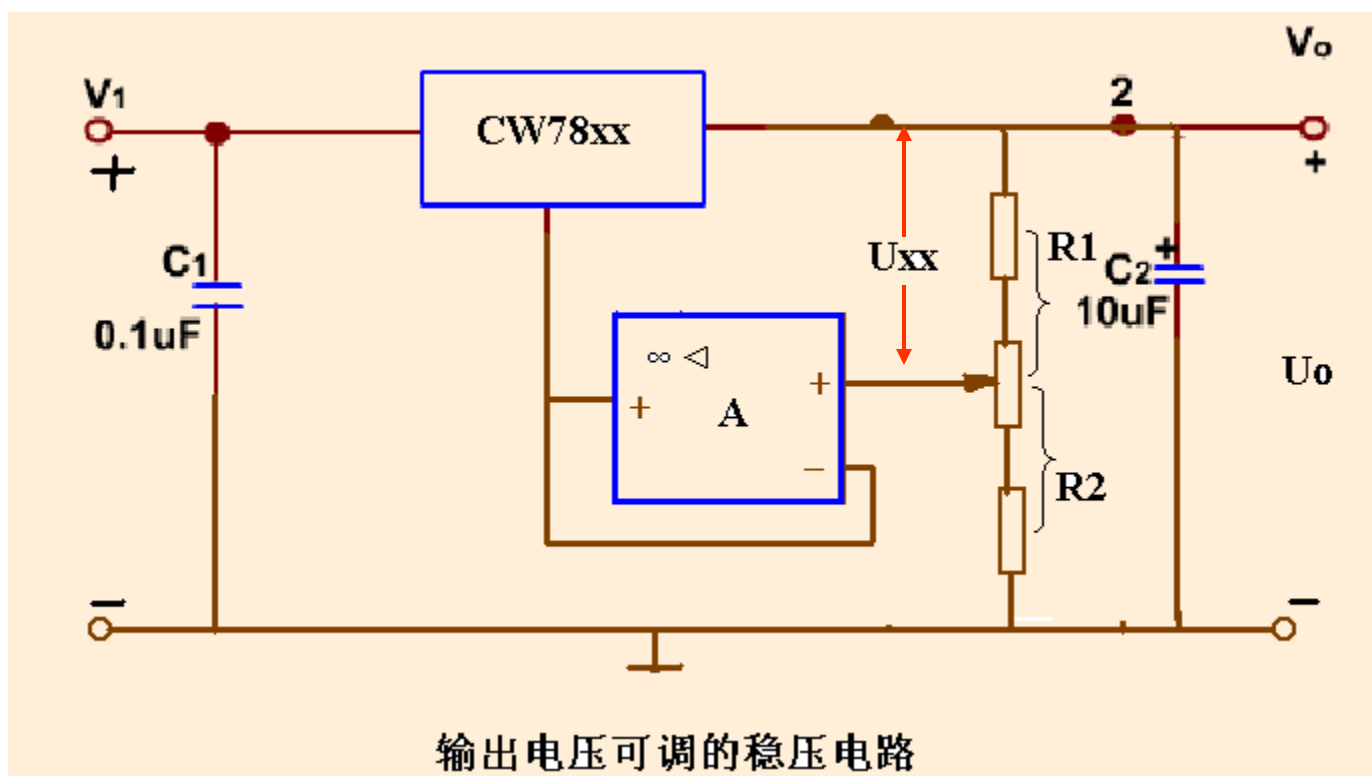
$$I_2 = I_1 + I_Q$$



$$\therefore U_0 = U_{XX} + I_2 \cdot R_2 = U_{XX} + \left(\frac{U_{XX}}{R_1} + I_Q \right) \cdot R_2$$

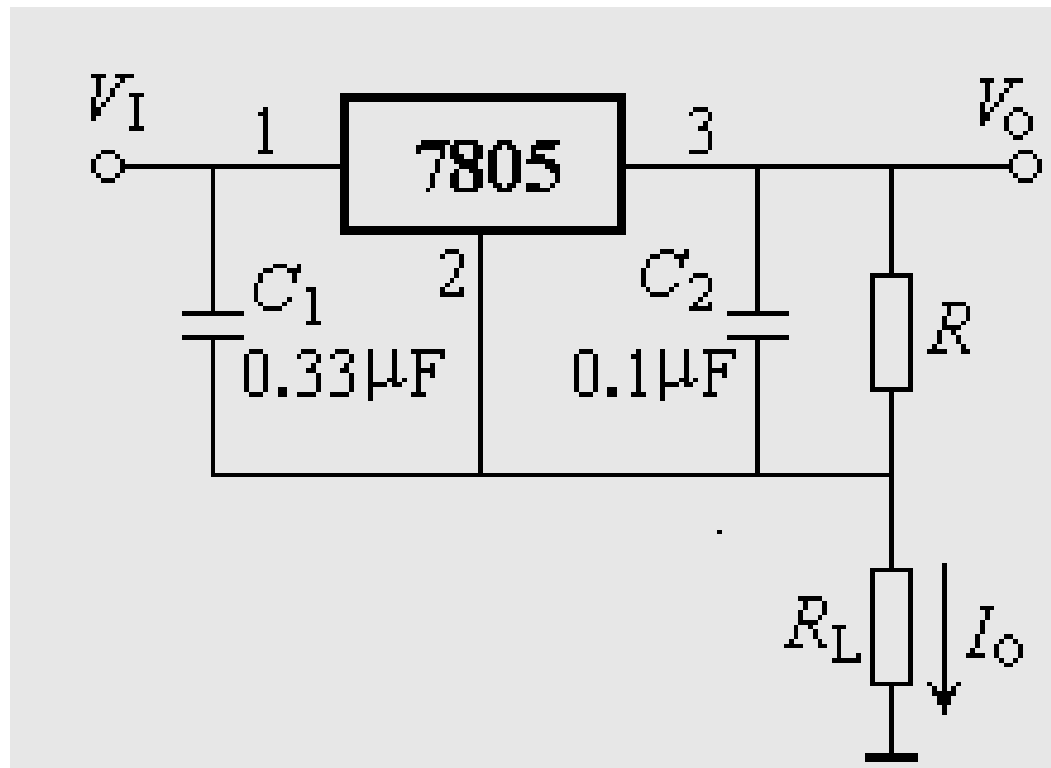
$$= \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \cdot U_{XX} + I_Q \cdot R_2$$

如何消除 I_Q 的影响呢？



$$U_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot U_{xx}$$

作恒流源使用



$$I_O \approx \frac{5V}{R}$$

本章小结

1. 在电子系统中，一般都要有直流电源供电。获得直流电源的最常用的方法是由交流电网转换为直流电压。这要通过整流，滤波和稳压等环节来实现。对直流电源的要求是：输出电压尽量不受电网电压波动、输出负载变化和温度变化的影响，输出电压中脉动和噪声成分小，转换效率高。
2. 利用二极管的单向导电性可以构成整流电路，将交流电变为脉动直流电。在整流电路的输出端接上各种滤波电路，可以大大减小输出电压中的脉动成分。滤波电路有电容滤波和电感滤波两大类。使用较多的是电容滤波电路。
3. 为了保证直流电源的输出电压不发生波动，需要在整流滤波电路的后面再接上稳压电路。最常用的稳压电路是串联式稳压电路。串联式稳压电路是一种带有负反馈的闭环调节系统。它的调整管工作在线性放大状态，通过控制调整管的压降来调整输出电压的大小。串联式稳压电路早已实现了集成化。输出电压固定和输出电压可调的集成串联式稳压器已经大量使用。
4. 开关式稳压电源是一种转换效率高的稳压电路。其调整管工作在开关状态，通过控制调整管导通和截止的占空比来稳定输出电压。