

---

## 第十章

# 直流稳压电源

# 第十章 直流稳压电源

§10.1 直流稳压电源的组成和功能

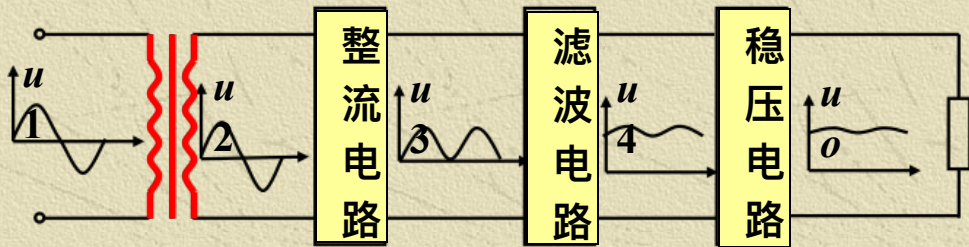
§10.2 整流电路

§10.3 滤波电路

§10.4 稳压二极管稳压电路

§10.5 串联型稳压电路

## §10.1 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 $u_0$ 的稳定。

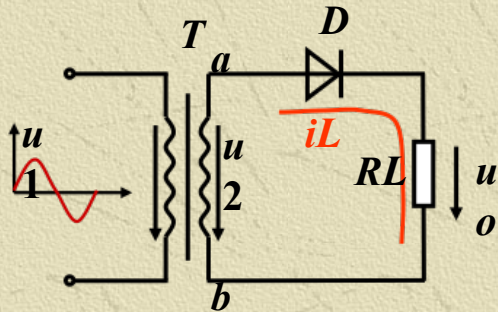
## §10.2 单相整流电路

整流电路的任务：把交流电压转变为直流脉动的电压。

常见的小功率整流电路，有单相半波、全波、桥式和倍压整流等。

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。

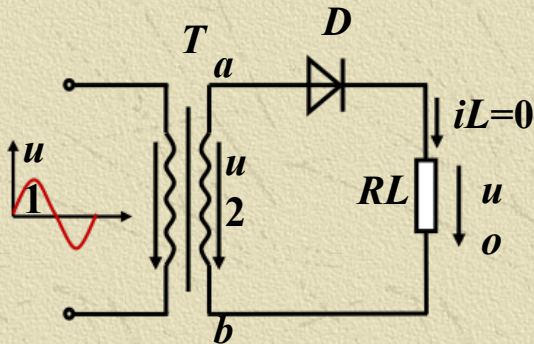
## §10.2.1 单相半波整流电路的工作原理



$u_2 > 0$  时，二极管导通。

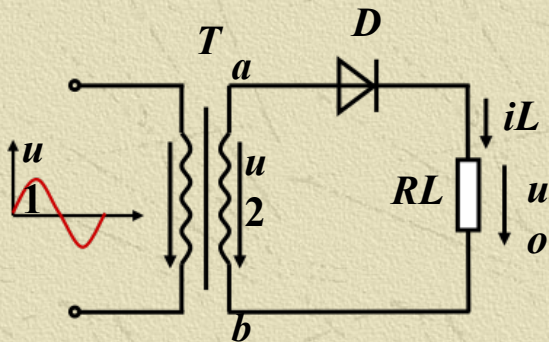
忽略二极管正向压降：

$$u_o = u_2$$

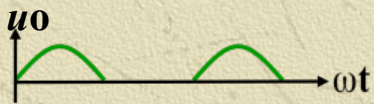


$u_2 < 0$  时，二极管截止，输出电流为0。

$$u_o = 0$$



(1) 输出电压波形:



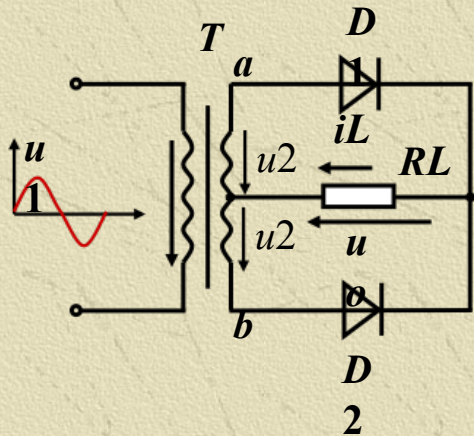
(2) 二极管上的平均电流:  
 $I_D = I_L$

(3) 二极管上承受的最高电压:  $U_{RM} = \sqrt{2}U_2$

(4) 输出电压平均值 ( $U_o$ ):

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

## §10.2.2 单相全波整流电路的工作原理



(1) 输出电压波形:



(2) 二极管上承受的最高电压:

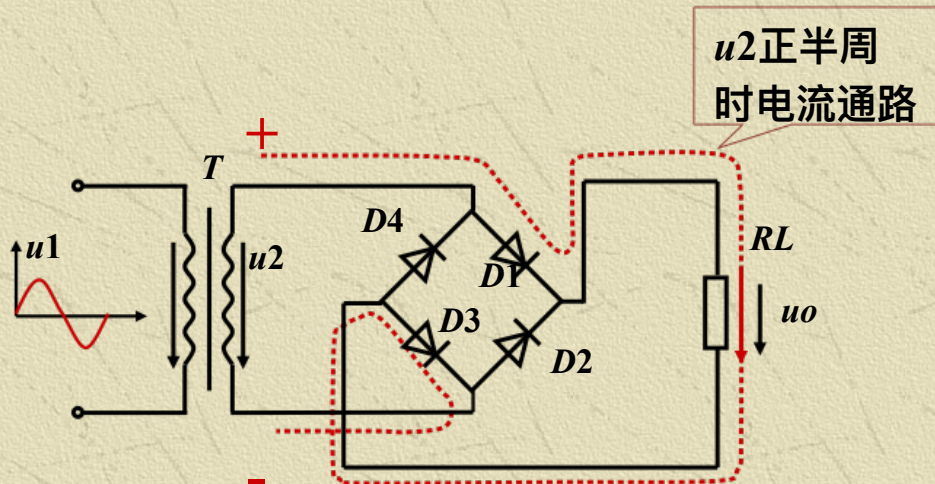
$$U_{RM} = 2\sqrt{2}U_2$$

(3) 二极管上的平均电流:

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

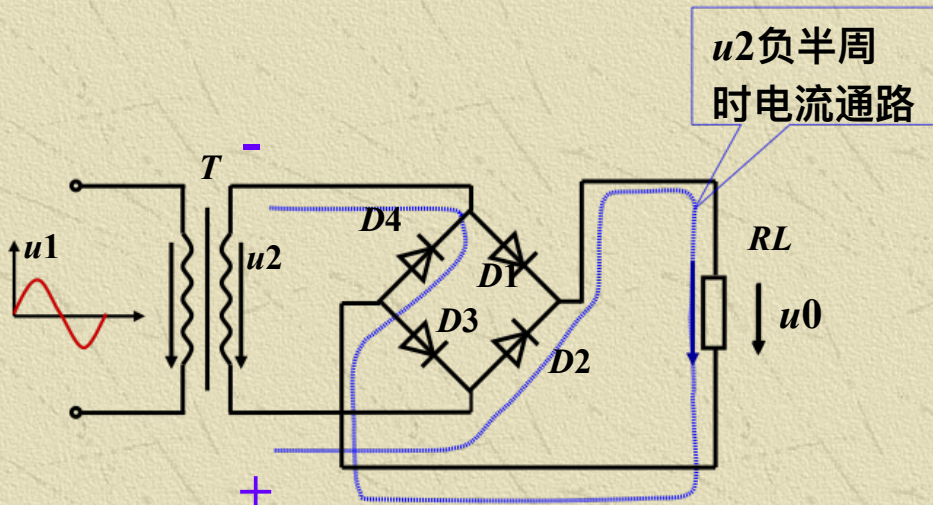
(4)  $u_0$  平均值  $U_0$ :  $U_0 = 0.9U_2$

## §10.2.3 单相桥式整流电路的工作原理



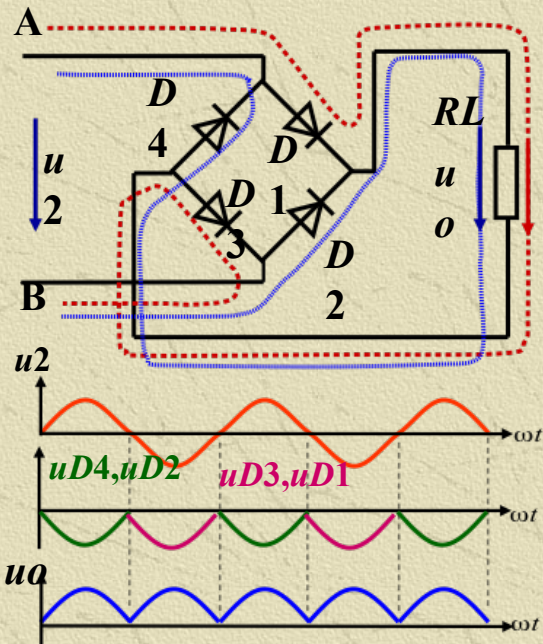
桥式整流电路





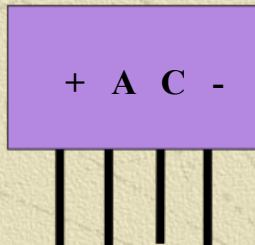
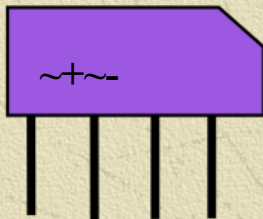
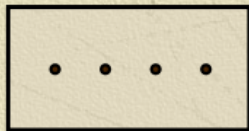
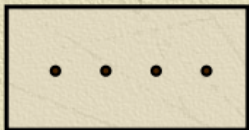
桥式整流电路

# 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
$D1, D3$ 导通 $D2, D4$ 截止 电流通路: $A \rightarrow D1 \rightarrow RL \rightarrow D3 \rightarrow B$	$D2, D4$ 导通 $D1, D3$ 截止 电流通路: $B \rightarrow D2 \rightarrow RL \rightarrow D4 \rightarrow A$
输出是脉动的直流电压!	

## 几种常见的硅整流桥外形：



## §10.2.4 整流电路的主要参数

### 一、整流输出电压的平均值与脉动系数

整流输出电压的平均值  $U_o$  和输出电压的脉动系数  $S$  是衡量整流电路性能的两个主要指标。

#### 1. 整流输出电压平均值 ( $U_o$ )

全波整流时，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: 
$$I_L = \frac{0.9U_2}{R_L}$$

## 2. 脉动系数 $S$

**S定义**: 整流输出电压的基波峰值  $U_{o1m}$  与平均值  $U_o$  之比。

用傅氏级数对全波整流的输出  $u_o$  分解后可得:

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

$$S = \frac{U_{o1m}}{U_o} = \frac{\frac{4\sqrt{2}U_2}{3\pi}}{\frac{2\sqrt{2}U_2}{\pi}} = \frac{2}{3} \approx 0.67$$

## 二、平均电流与反向峰值电压

平均电流( $I_D$ )与反向峰值电压( $U_{RM}$ )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。

$$I_D = \frac{1}{2} I_o = 0.45 \frac{U_2}{R_L}$$

二极管截止时两端承受的最大反向电压：

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

## §10.3 滤波电路

交流  
电压

整流

脉动  
直流电压

滤波

直流  
电压

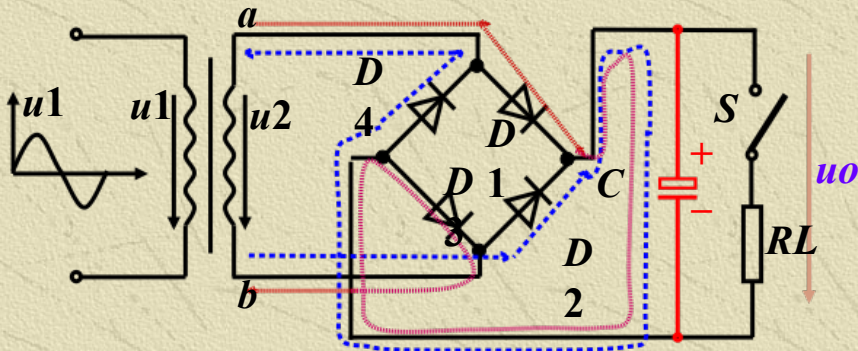
滤波电路的结构特点: 电容与负载  $RL$  并联,  
或电感与负载  $RL$  串联。

原理: 利用储能元件 **电容** 两端的电压(或通过 **电感** 中的电流)不能突变的特性, 滤掉整流电路输出电压中的交流成份, 保留其直流成份, 达到平滑输出电压波形的目的。

## §10.3.1 电容滤波电路

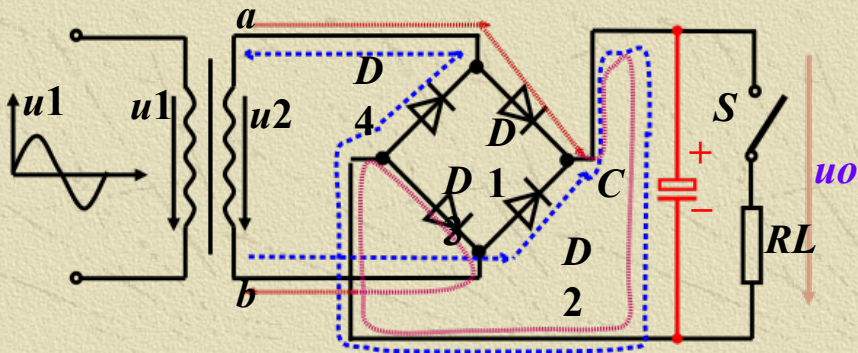
### 一、滤波原理

以单向桥式整流电容滤波为例进行分析，其电路如图所示。

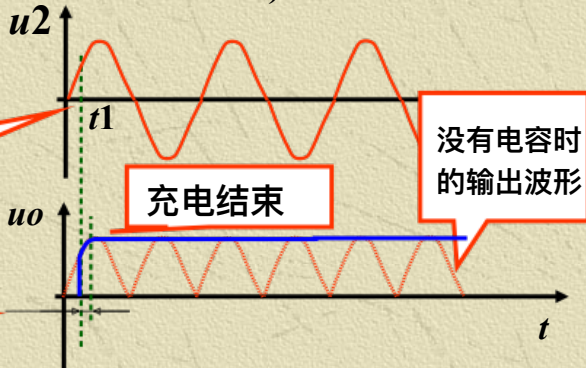


桥式整流电容滤波电路





# 1. $RL$ 未接入时(忽略整流电路内阻)

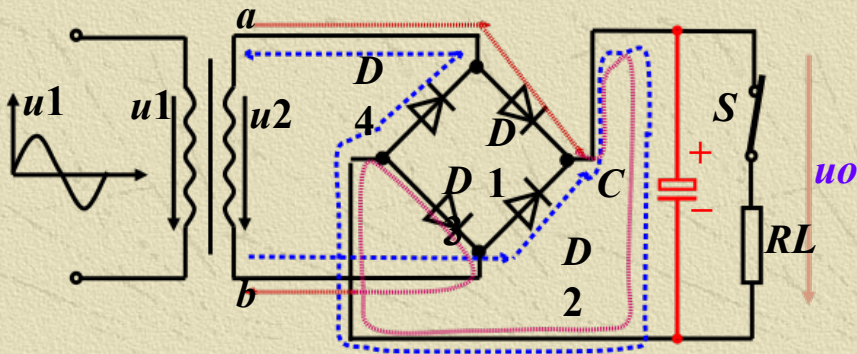


设 $t_1$ 时刻接通电源

充电结束

没有电容时的输出波形

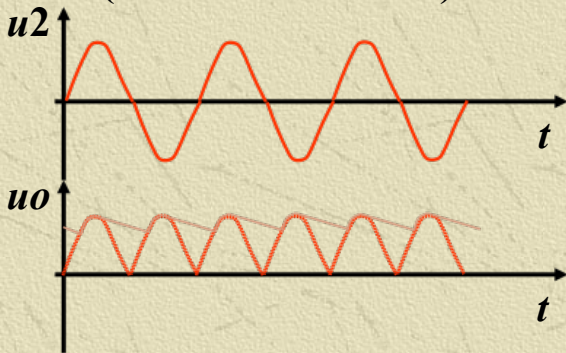
整流电路为电容充电

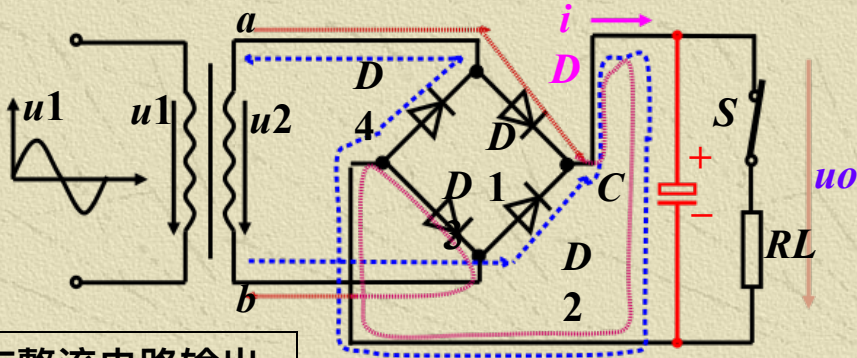


## 2. $RL$ 接入（且 $RLC$ 较大）时（忽略整流电路内阻）

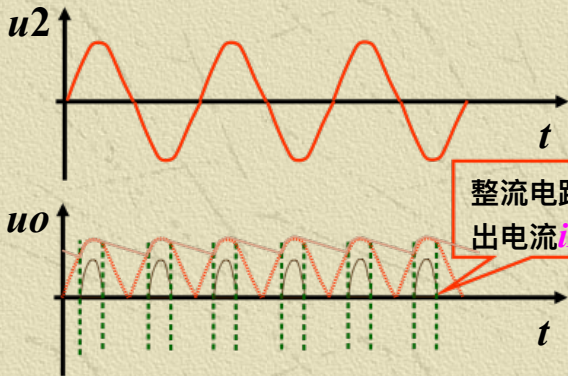
电容通过 $RL$ 放电，  
在整流电路电压小  
于电容电压时，二  
极管截止，整流电  
路不为电容充

电。 $u_o$ 会逐渐下

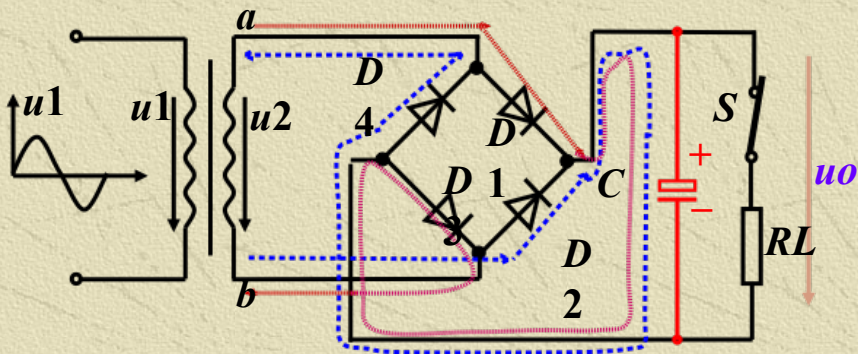




只有整流电路输出电压大于 $u_o$ 时，才有充电电流 $i_D$ 。因此整流电路的输出电流是脉冲波。  
可见，采用电容滤波时，整流管的导通角较小。



整流电路的输出电流 $i_D$

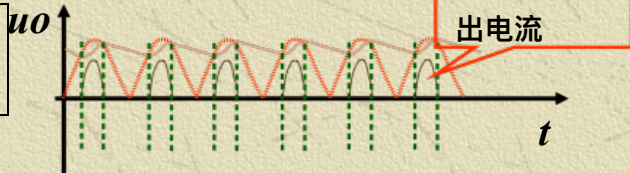


### 3. $RL$ 接入（且 $RLC$ 较大）时（考虑整流电路内阻）

电容充电时，电容电压滞后于 $u_2$ 。



$RLC$ 越小，输出电压越低。



## 二、电容滤波电路的特点

(1) 输出电压  $U_o$  与放电时间常数  $RLC$  有

关。 $RLC$  愈大  $\square$  电容器放电愈慢  $\square U_o$  (平均值) 愈大

一般取  $\tau_d = R_L C \geq (3-5) \frac{T}{2}$  ( $T$ : 电源电压的周期)  
近似估

算:  $U_o = 1.2 U_2$   
(2) 流过二极管瞬时电流很大。

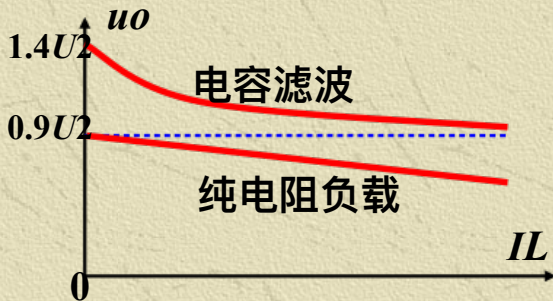
$RLC$  越大  $\square U_o$  越高

$\square$  负载电流的平均值越大; 整流管导电时间越短

$\square i_D$  的峰值电流越大

故一般选管时, 取  $I_{DF} = (2 \sim 3) \frac{I_L}{2} = (2 \sim 3) \frac{1}{2} \frac{U_o}{R_L}$

### (3) 输出特性(外特性)



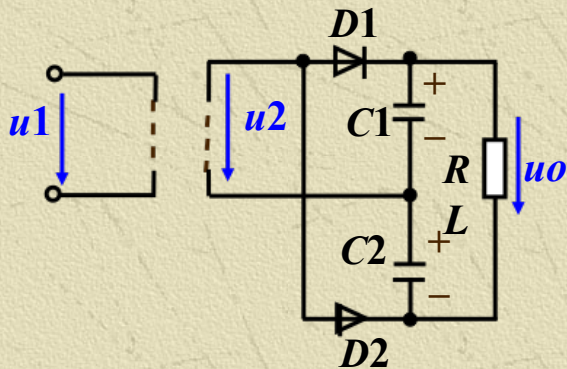
输出波形随负载电阻  $R_L$  或  $C$  的变化而改变,  $U_o$  和  $S$  也随之改变。

如:  $R_L$  愈小(  $I_L$  越大),  $U_o$  下降多,  $S$  增大。

**结论:** 电容滤波电路适用于输出电压较高, 负载电流较小且负载变动不大的场合。

## §10.3.2 倍压整流电路的工作原理

### 一、二倍压整流电路



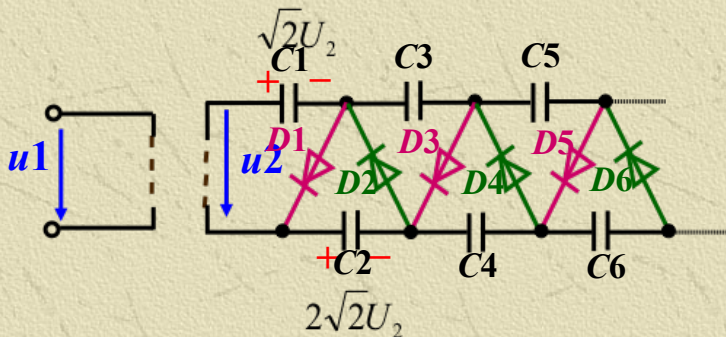
$u_2$ 的正半周时:  $D_1$ 导通,  $D_2$ 截止, 理想情况下, 电容 $C_1$ 的电压充到:  $\sqrt{2}U_2$

$u_2$ 的负半周时:  $D_2$ 导通,  $D_1$ 截止, 理想情况下, 电容 $C_2$ 的电压充到:  $\sqrt{2}U_2$

负载上的电压:  $u_o = 2\sqrt{2}U_2$



## 二、多倍压整流电路



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

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



### §10.3.3 其他形式的滤波电路

改善滤波特性的方法：采取多级滤波。如：

**$RC-\square$  型滤波电路：**在电容滤波后再接一级 $RC$ 滤波电路。

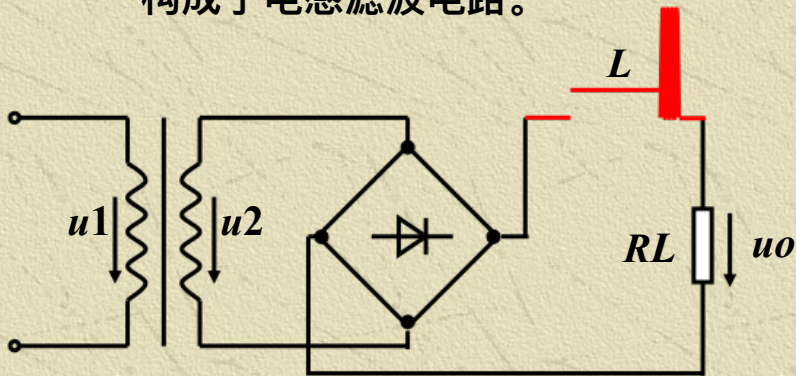
**$L-C$  型滤波电路：**在电感滤波后面再接一电容。

**$LC-\square$  型滤波电路：**在电容滤波后面再接 $L-C$  型滤波电路。

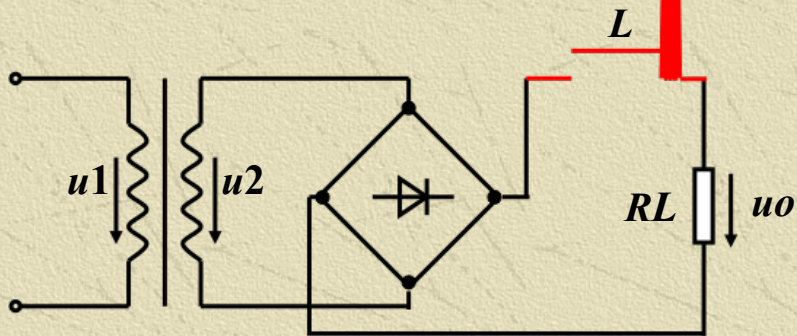
性能及应用场合分别与电容滤波和电感滤波相似。

# 1) 电感滤波

**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。



电感滤波电路



## 一、滤波原理

对直流分量:  $XL=0$  相当于短路,电压大部分降在 $RL$ 上。

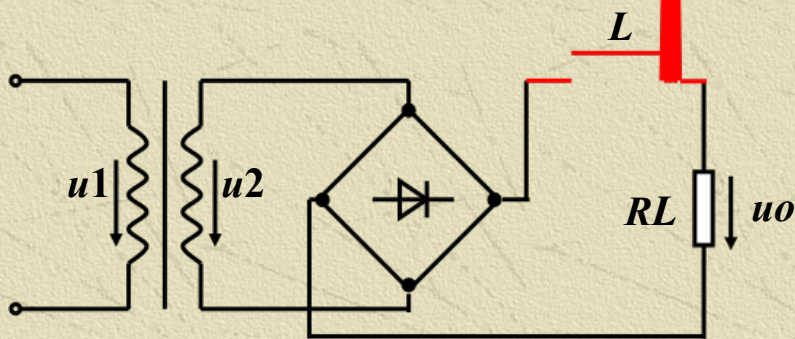
对谐波分量:  $f$  越高,  $XL$  越大,电压大部分降在 $XL$ 上。

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:

$$U_o = 0.9U$$

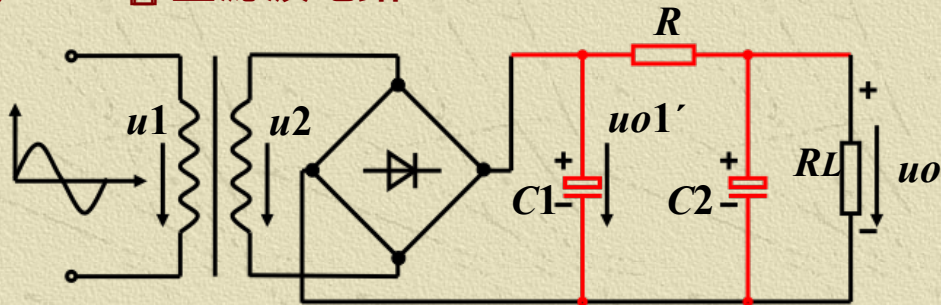
2



## 二、电感滤波的特点

整流管导电角较大，峰值电流很小，输出特性比较平坦，适用于低电压大电流( $RL$ 较小)的场合。缺点是电感铁芯笨重，体积大，易引起电磁干扰。

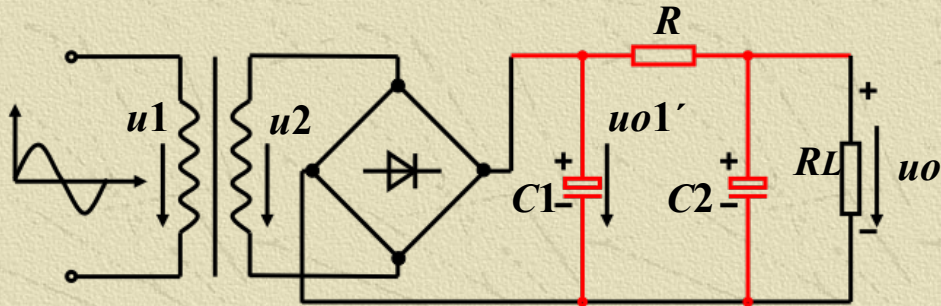
## 2) RC-□ 型滤波电路



设 $u_{o1}$ 的直流分量为 $U'_{O}$ ，交流分量的基波的幅值为 $U'_{O1m}$ ，则：

$u_o$ 的直流分量：

$$U_o = \frac{R_L}{R + R_L} U'_o$$



$u_o$ 的交流分量的基波的幅值:

$$U_{o1m} = \frac{R_L // (-jX_{C2})}{R + R_L // (-jX_{C2})} U'_{o1m}$$

$$U_{o1m} = \frac{R_L}{R + R_L} \cdot \frac{1}{\omega C_2} \cdot \frac{1}{\sqrt{(R // R_L)^2 + \left(\frac{1}{\omega C_2}\right)^2}} U'_{o1m}$$

$$U_{olm} = \frac{R_L}{R + R_L} \cdot \frac{\frac{1}{\omega C_2}}{\sqrt{(R // R_L)^2 + (\frac{1}{\omega C_2})^2}} U'_{olm}$$

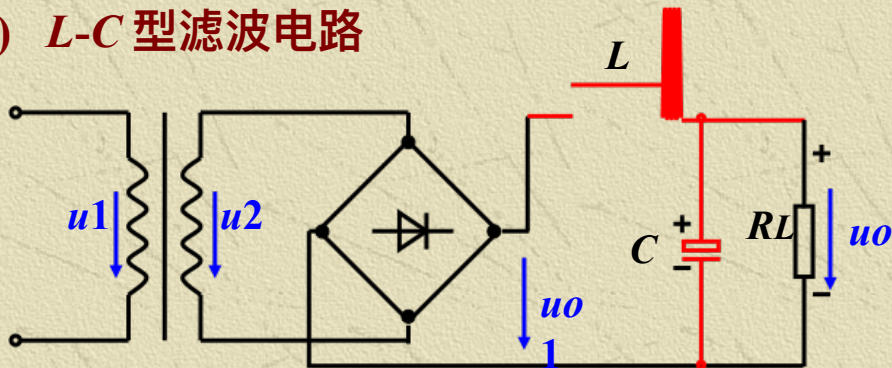
通常选择滤波元件的参数使得： $\frac{1}{\omega C_2} \ll (R // R_L)$

$$U_{olm} \approx \frac{R_L}{R + R_L} \cdot \frac{1}{\omega C_2 (R // R_L)} U'_{olm}$$

$u_o$ 的脉动系数 $S$ 与 $u_{o1}$ 的脉动系数 $S'$ 的关系：

$$S = \frac{U_{olm}}{U_o} \approx \frac{1}{\omega C_2 (R // R_L)} \frac{U'_{olm}}{U'_o} = \frac{1}{\omega C_2 (R // R_L)} S'$$

### 3) $L$ - $C$ 型滤波电路



设  $u_{o1}$  的直流分量为  $U'_O$ ，交流分量的基波的幅值为  $U'_{O1m}$ ， $\therefore S' = 0.67$   $U_o \approx U'_o = 0.9U_2$

$$U'_{O1m} = \frac{R_L // (-jX_C)}{jX_L + R_L // (-jX_C)} U'_{O1m}$$



$$U_{o1m} = \frac{R_L // (-jX_C)}{jX_L + R_L // (-jX_C)} U'_{o1m}$$

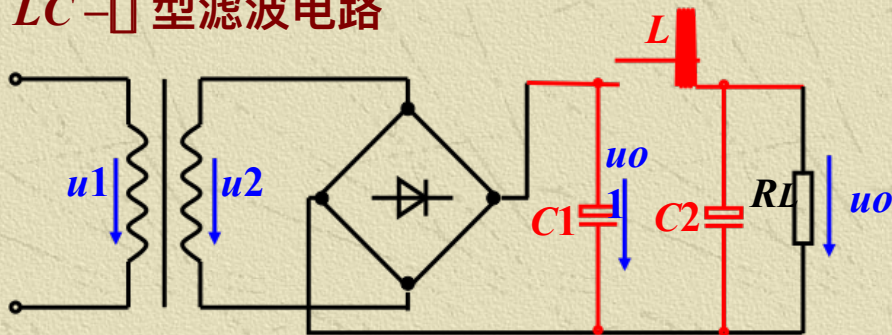
通常选择滤波元件的参数使得：  $\frac{1}{\omega C} \ll R_L$

$$U_{o1m} \approx \left| \frac{-jX_C}{jX_L - jX_C} \right| U'_{o1m} = \frac{1}{|1 - \omega^2 LC|} U'_{o1m}$$

$u_o$ 的脉动系数 $S$ 与 $u_{o1}$ 的脉动系数 $S'$ 的关系：

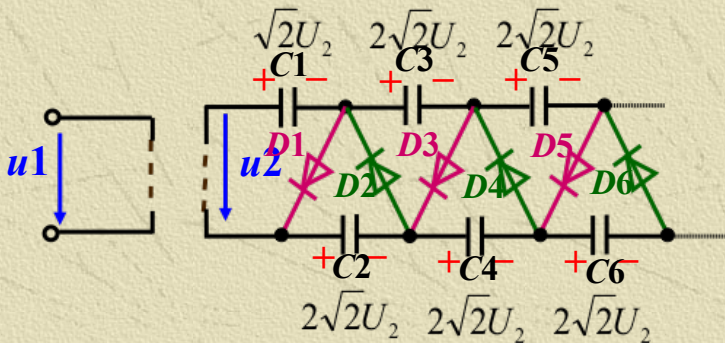
$$S = \frac{U_{o1m}}{U_o} \approx \frac{1}{|1 - \omega^2 LC|} \frac{U'_{o1m}}{U'_o} = \frac{1}{|1 - \omega^2 LC|} S'$$

#### 4) $LC-\pi$ 型滤波电路



显然， $LC-\pi$  型滤波电路输出电压的脉动系数比只有 $LC$ 滤波时更小，**波形更加平滑**；由于在输入端接入了电容，因而较只有 $LC$ 滤波时，**提高了输出电压**。

请自行分析 $LC-\pi$  型滤波电路的输出电压和脉动系数等基本参数。



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

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

**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。**

## §10.5 串联型稳压电路

### 常用稳压电路 (小功率设备)

```
graph TD; A[常用稳压电路  
(小功率设备)] --> B[稳压管  
稳压电  
路]; A --> C[线性  
稳压电  
路]; A --> D[开关型  
稳压电  
路]; B --- B_desc[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。]; C --- C_desc[以下主要讨论线性稳压  
电路。]; D --- D_desc[效率较高，  
目前用的也比较多，但  
因学时有限，这里不  
做介绍。];
```

#### 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。

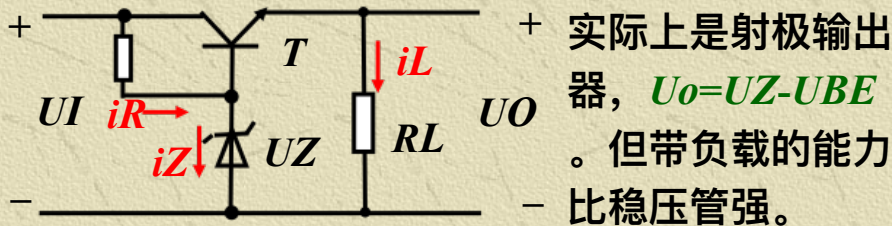
#### 开关型 稳压电 路

效率较高，  
目前用的也比较多，但  
因学时有限，这里不  
做介绍。

## §10.5.1 串联反馈式稳压电路

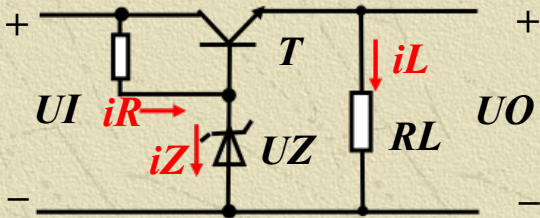
### 一、电路结构的一般形式

#### 1. 串联式直流稳压电路的基本形式



$$\Delta i_R = 0, \quad \Delta i_Z = \Delta i_B \Rightarrow \Delta i_L = \Delta i_E = (1 + \beta) \Delta i_B$$

负载电流的变化量可以比稳压管工作电流的变化量扩大  $(1 + \beta)$  倍。



## 串联式直流稳压电路的基本形式

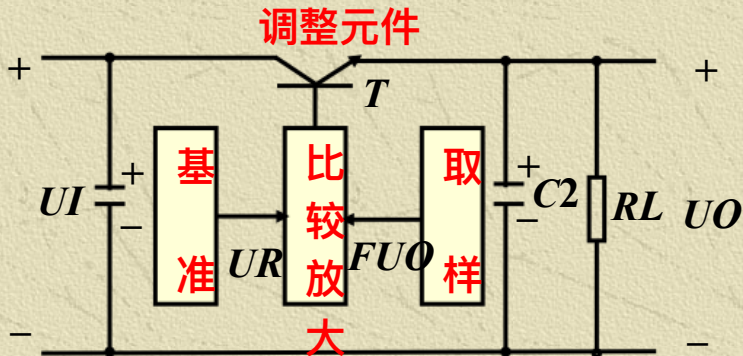
### 两个主要缺点：

- (1) 稳压效果不好。  $U_o = U_Z - U_{BE}$
- (2) 输出电压不可调。

**改进的方法：**在稳压电路中引入带电压负反馈的放大环节。

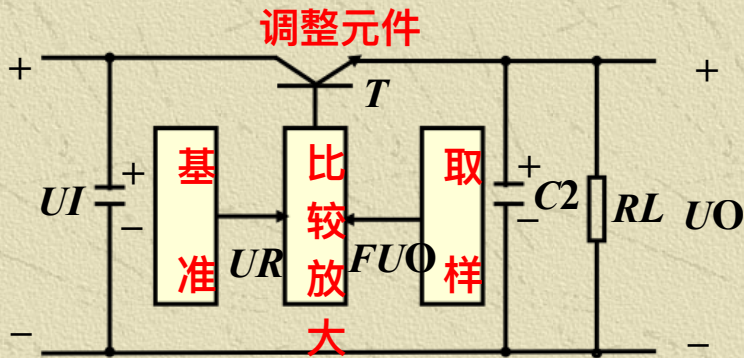
## 2. 具有放大环节的串联型稳压电路

串联式稳压电路由基准电压、比较放大、取样电路和调整元件四部分组成。



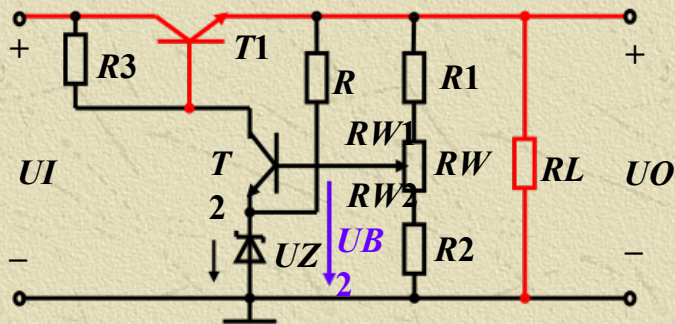
**基准电压：**可由稳压管稳压电路组成。取样电路取出输出电压 $U_O$ 的一部分和基准电压相比较。





因调整管与负载接成射极输出器形式，  
为深度串联电压负反馈，故称之为**串联**  
**反馈式稳压电路**。

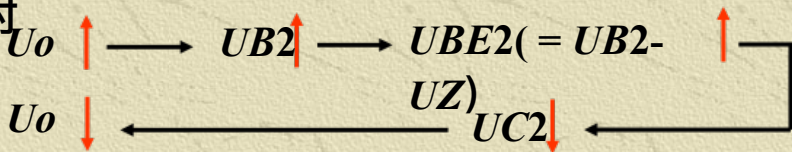
## 一种实际的串联式稳压电源

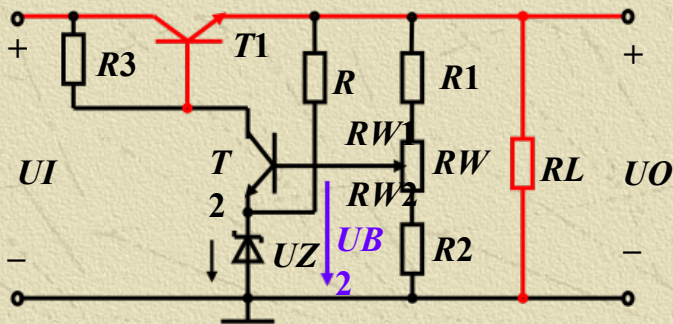


## 二、稳压原理

当  $U_I$  增加或输出电流减小使  $U_O$  升高

时



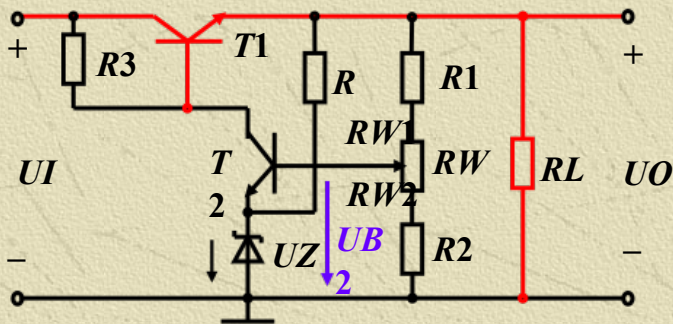


### 三、输出电压的确定和调节范围

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

$$U_{O\max} = \frac{R_1 + R_2 + R_W}{R_2} (U_Z + U_{BE2})$$

$$U_{O\min} = \frac{R_1 + R_2 + R_W}{R_W + R_2} (U_Z + U_{BE2})$$



## 四、影响稳压特性的主要因素

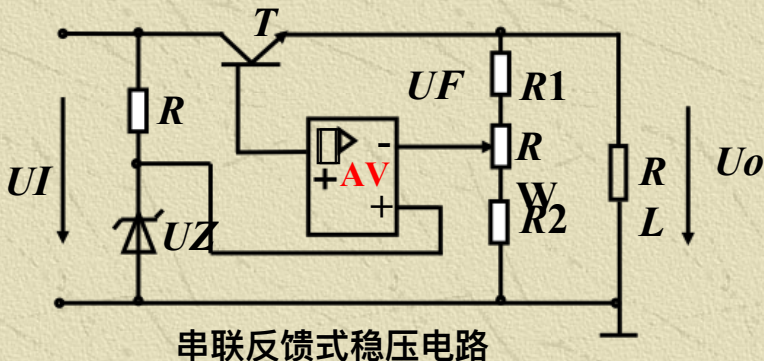
1. 电路对电网电压的波动抑制能力较差。

例：  $UI \propto VC2 \propto Uo$

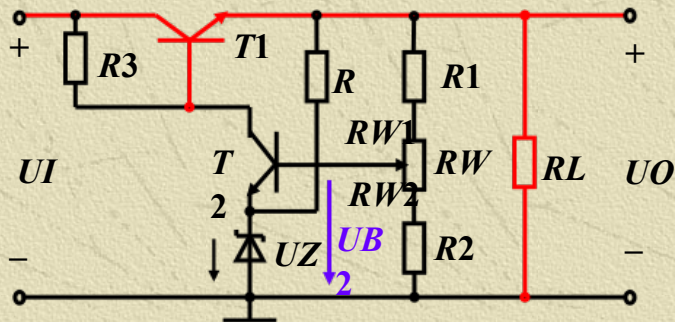
2. 流过稳压管的电压随  $UI$  波动，使  $UZ$  不稳定，降低了稳压精度。
3. 温度变化时，  $T2$  组成的放大电路产生零点漂移，时输出电压的稳定度变差。

## 五、改进措施

1. 选用差动放大器或运放构成的放大器代替 $T2$ 管构成的放大器，可以解决零点漂移的问题。



在运放理想条件下: 
$$U_o = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \cdot U_R = \frac{1}{F} U_R$$



1.

采用辅助电源(比较放大部分的电源)。

2.

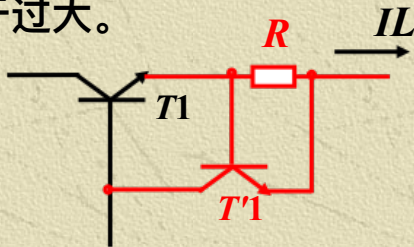
用恒流源负载代替集电极电阻以提高增益。

4. 调整管采用复合三极管以扩大输出电流的范围。

## \*六、过流保护

为避免使用中因某种原因输出短路或过载，致使调整管流过很大的电流，使之烧坏故需有快速保护措施。常见保护电路有两类——

1. **限流型**：当调整管的电流超过额定值时，对调整管的基极电流进行分流，使发射极电流不至于过大。

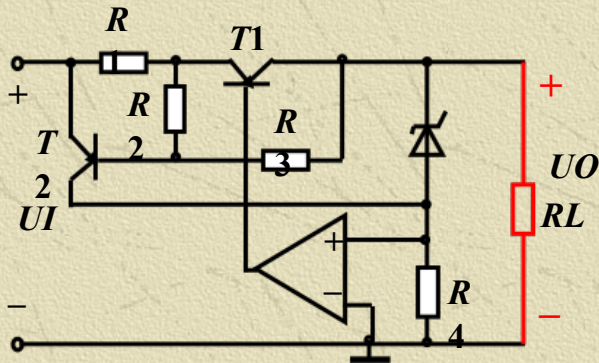


当 $I_L$ 不超过额定值时， $T'1$ 截止；

当 $I_L$ 超过额定值时， $T'1$ 导通，其集电极从 $T1$ 的基极分流

$R$ 为一小电阻，用于检测负载电流。

**2. 截流型：**过流时使调整管截止或接近截止。

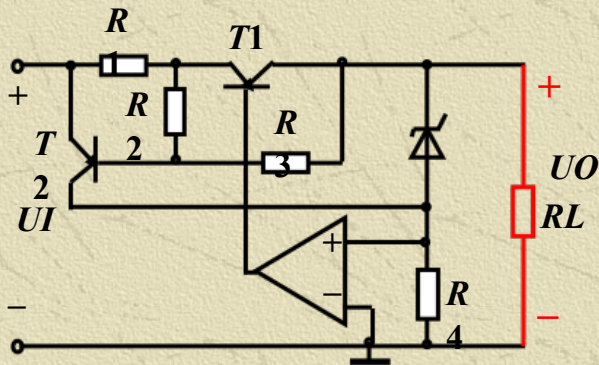


输出电流在额定值以内时：

三极管 $T2$ 截止，  
这时，电压负反  
馈保证电路正常  
工作。

$$\begin{array}{ccc}
 U_O & \Rightarrow & U^+ \\
 \square & & \square \\
 U_O & \Leftarrow & U_{B1} \\
 \square & & \square
 \end{array}$$





输出电流超出额定值时:

因输出电压降低, 三极管  $T_2$  逐渐导通,  $U_+ \square$ , 稳压管截止, 电压负反馈被切断。这样

$$\begin{array}{c}
 U_+ \Rightarrow U_{B1} \Rightarrow U_{C1} \\
 \square \\
 U_+ \xleftarrow{\square} I_{C2} \xleftarrow{U_{B2}} (=U_O) \square \\
 \square \qquad \qquad \qquad \square
 \end{array}$$

最终  $U_O$  降低到零。

## 七、串联反馈式稳压电路缺点

调整管工作在线性放大区，当负载电流较大时：

损耗 ( $P=U_{CE} \cdot I_L$ ) 大

电源的效率 ( $\eta = P_o/P_i = U_o I_L / U_i I_i$ ) 较低

为了提高效率，可采用开关型稳压电源。

## 2) 稳压电路的主要性能指标

### 一、稳压系数 $S$

稳压系数 $S$ 反映电网电压波动时对稳压电路的影响。定义为当负载固定时，输出电压的相对变化量与输入电压的相对变化量之比。

$$S = \frac{\Delta U_o}{U_o} \bigg/ \frac{\Delta U_I}{U_I}$$

### 二、输出电

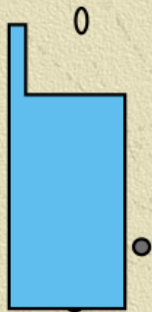
**阻  $R_o$**  输出电阻用来反映稳压电路受负载变化的影响。定义为当输入电压固定时输出电压变化量与输出电流变化量之比。它实际上就是电源戴维南等效电路的内阻。

## §10.5.2 集成稳压电源

随着半导体工艺的发展，现在已生产并广泛应用的单片集成稳压电源，具有体积小，可靠性高，使用灵活，价格低廉等优点。最简单的集成稳压电源只有输入，输出和公共引出端，故称之为三端集成稳压器。

本节主要介绍常用的**W7800系列**三端集成稳压器，其内部也是串联型晶体管稳压电路。

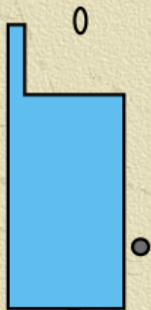
该组件的外形如下图，稳压器的硅片封装在普通功率管的外壳内，电路内部附有短路和过热保护环节。



1端: 输入端  
2端: 公共端  
3端: 输出端

1 2 3

W7800系列稳压器外形



1端: 公共端  
2端: 输入端  
3端: 输出端

1 2 3

W7900系列稳压器外形

# 1) 集成稳压电源的分类

三端集成 稳压器	可调式	
		负稳压W79XX
	固定式	正稳压W78XX

**注：**型号后XX两位数字代表输出电压值

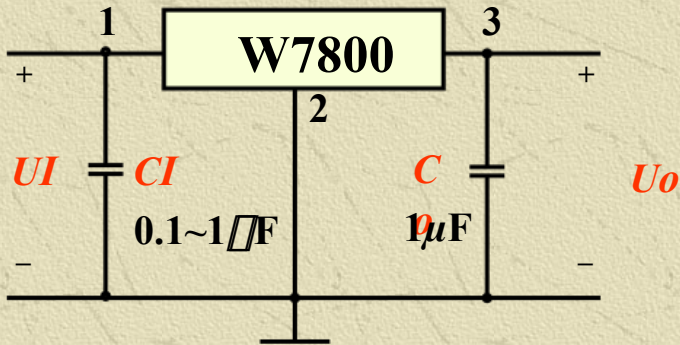
输出电压额定电压值有：

5V、9V、12V、18V、24V等。

## 2) 应用电路

### 一、输出为固定电压的电路

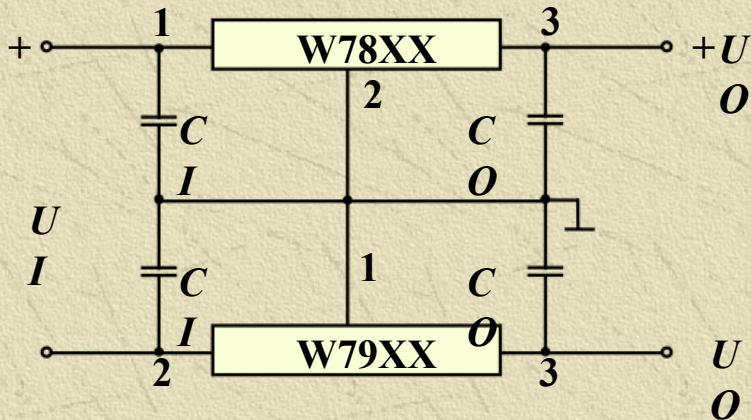
输出为固定正压时的接法如图所示。



W7800系列稳压器 基本接线图

**注意：**输入与输出端之间的电压不得低于3V！

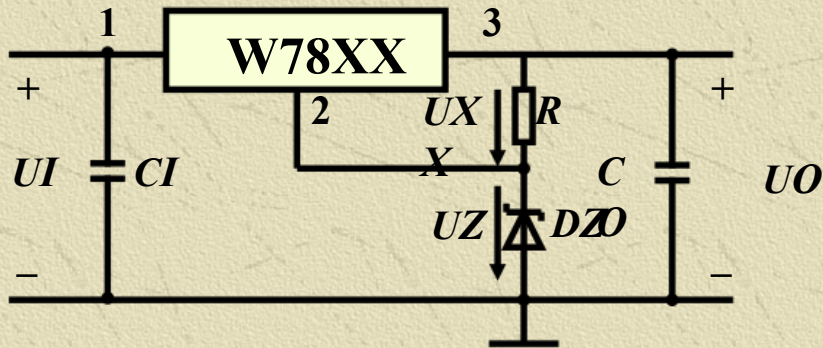
## 二、输出正负电压的电路



正负电压同时输出电路



### 三、提高输出电压的电路

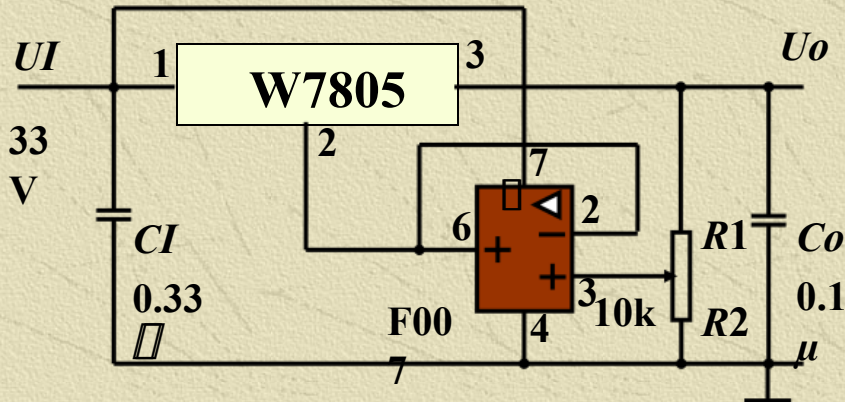


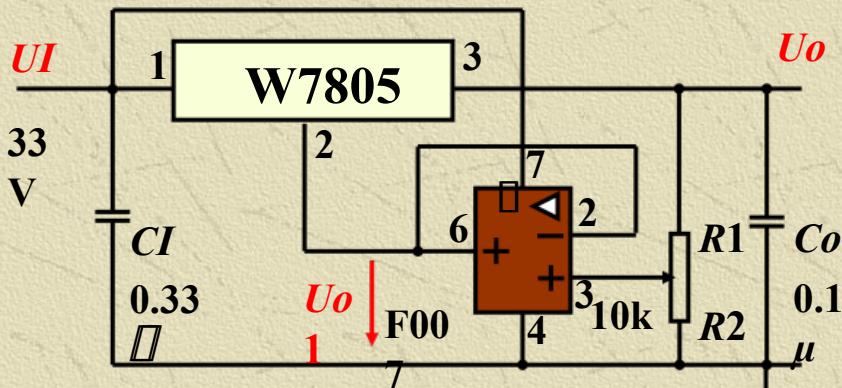
$U_{XX}$ : 为W78XX固定输出电压

$$U_O = U_{XX} + U_Z$$

## 四、输出电压可调式电路

用三端稳压器也可以实现输出电压可调，下图是用W7805组成的7-30V可调式稳压电源。





运算放大器作为电压跟随器使用, 它的电源就借助于稳压器的输入直流电压。由于运放的输入阻抗很高, 输出阻抗很低, 可以克服稳压器受输出电流变化的影响。

$$U_{o1} = U_- = U_+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_o \quad \rightarrow \quad U_o = U_{XX} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

$$U_o = U_{o1} + U_{XX} \quad (U_{XX} = 5V)$$

模拟电路

# 第十章 结束