



模拟电子技术基础

Fundamentals of Analog Electronic

主讲教师：张静秋

第8章 直流电源

教学内容（教学重点）：

8.1 概述（小功率直流电源组成）

8.2 单相整流滤波（单相桥式整流电容滤波电路）

8.3 稳压电路（三端集成稳压器和调压器的应用）

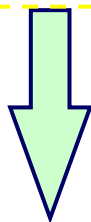
8.4 开关型稳压电路

8.5 直流电源仿真案例研讨

8.1 概述

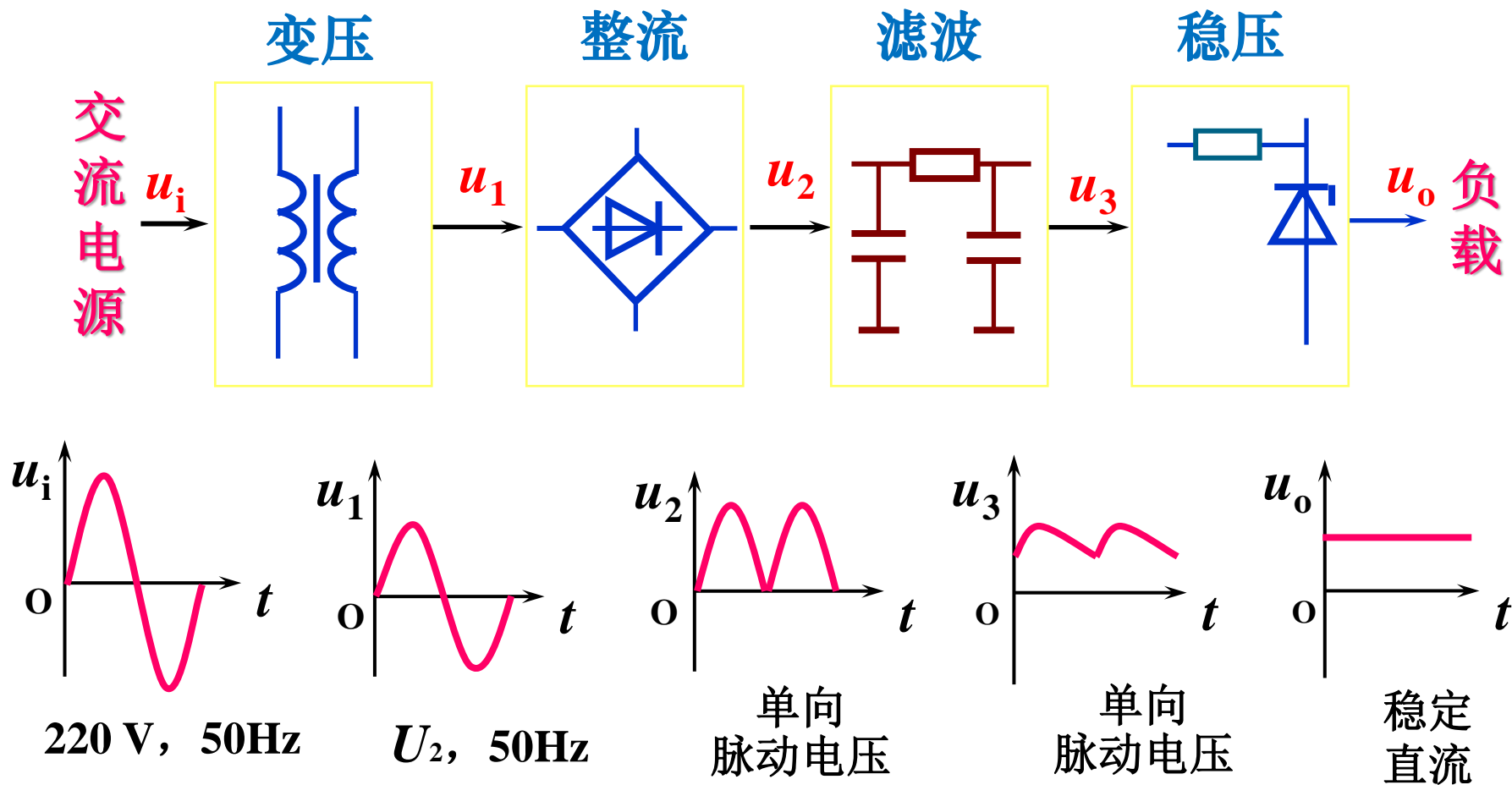
直流稳压电源的功能

将50Hz、220V 单相交流电



小功率 (1.5A以下, 35V以下)
直流稳压电源

直流稳压电源的组成



8.2 单相整流滤波电路

8.2.1 单相半波整流电路

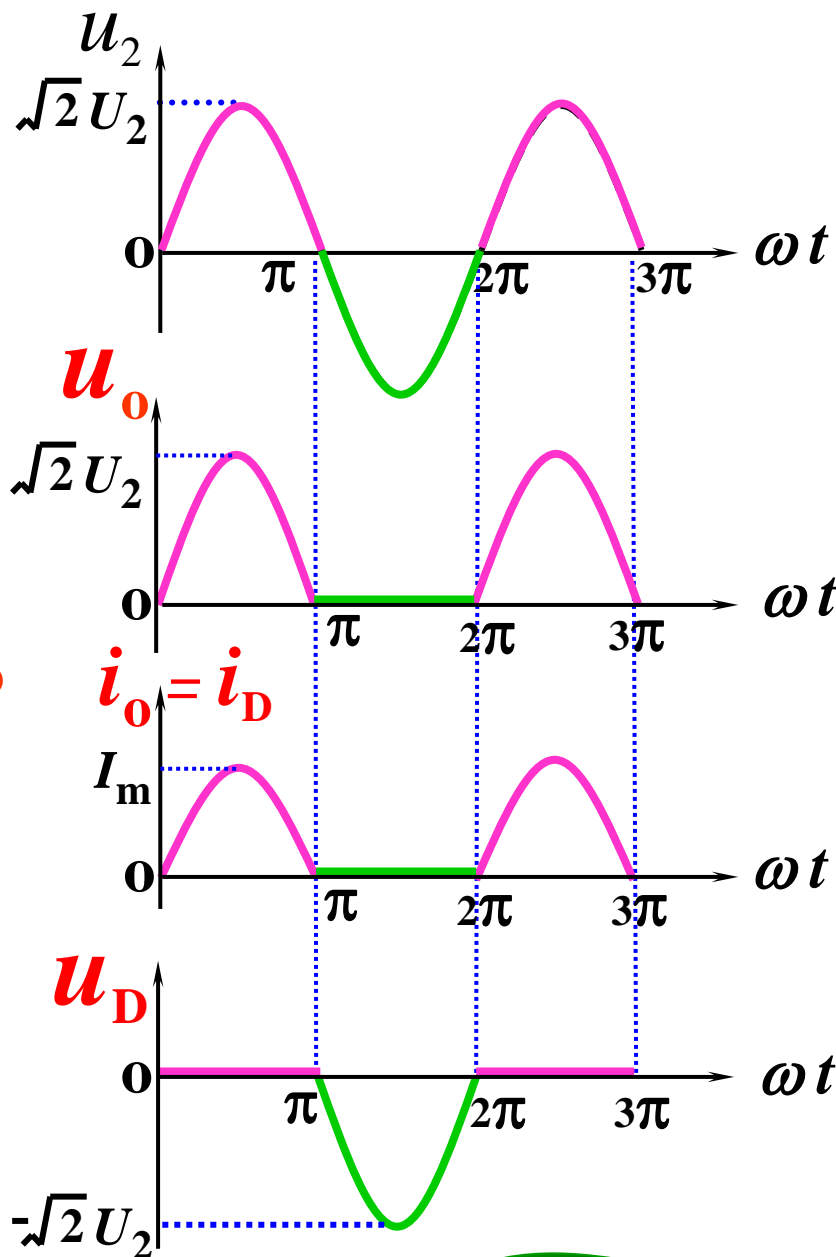
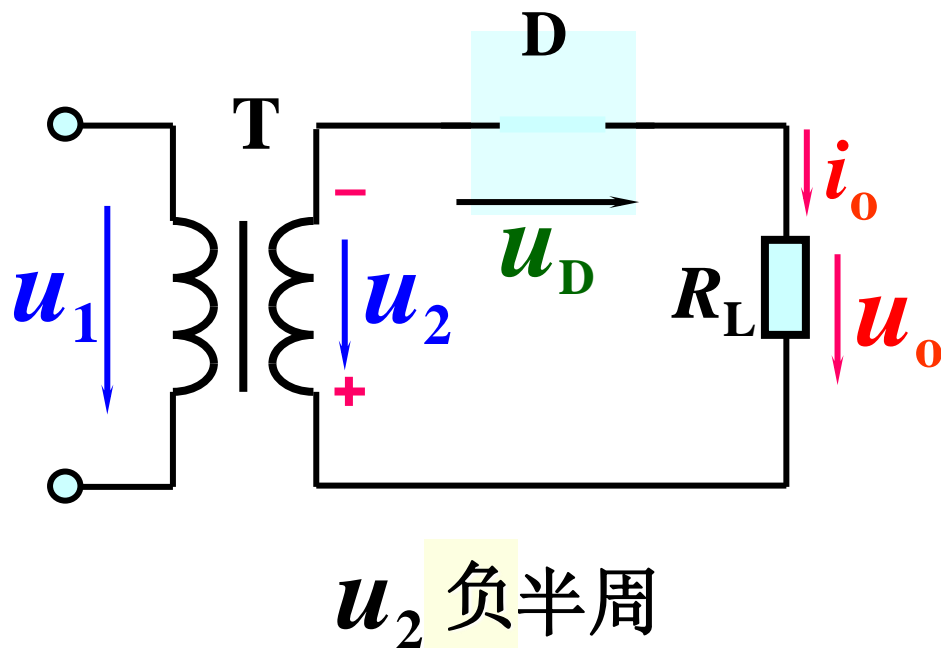
8.2.2 单相桥式整流电路

8.2.3 桥式整流+电容滤波

8.2.4 电感滤波与复合滤波

8.2.1 单相半波整流电路

1. 电路组成原理



8.2.1 单相半波整流电路

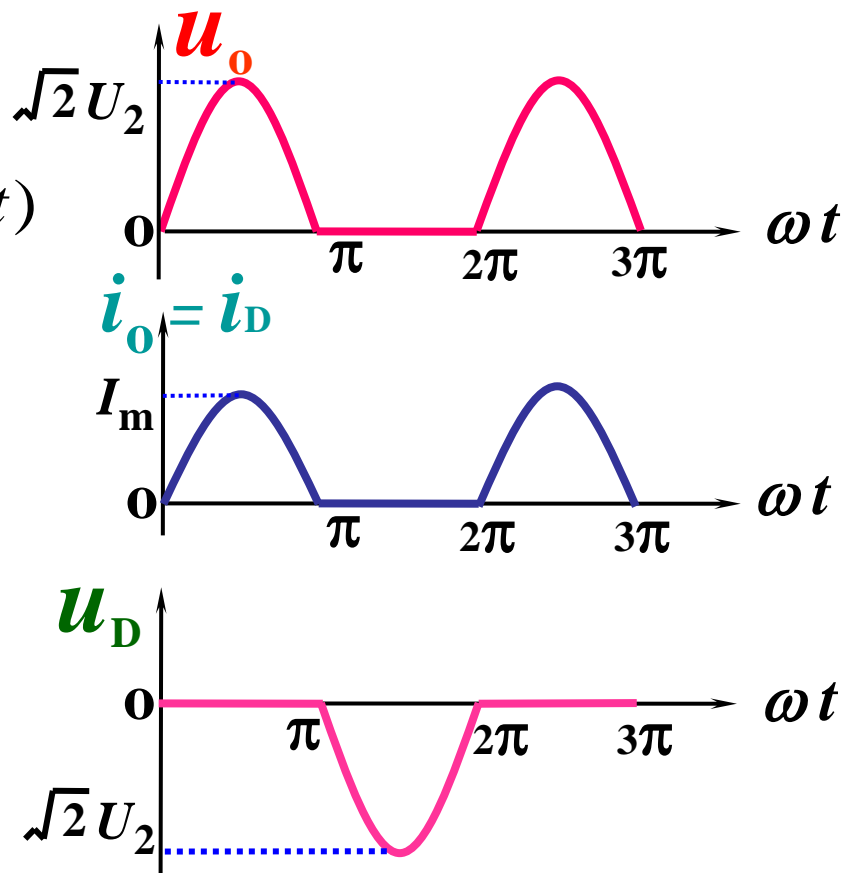
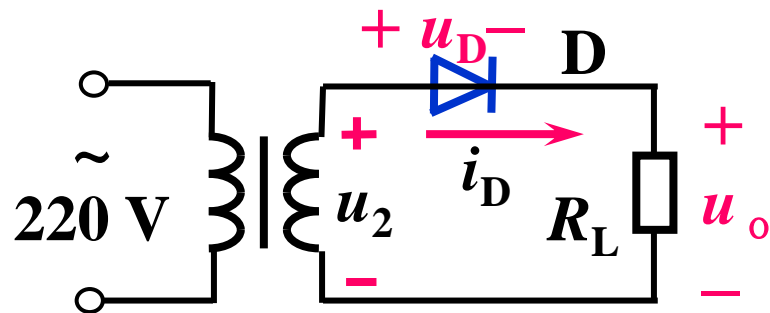
2. 电路参数估算

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

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

$$I_D = I_{O(AV)} = 0.45 \frac{U_2}{R_L}$$

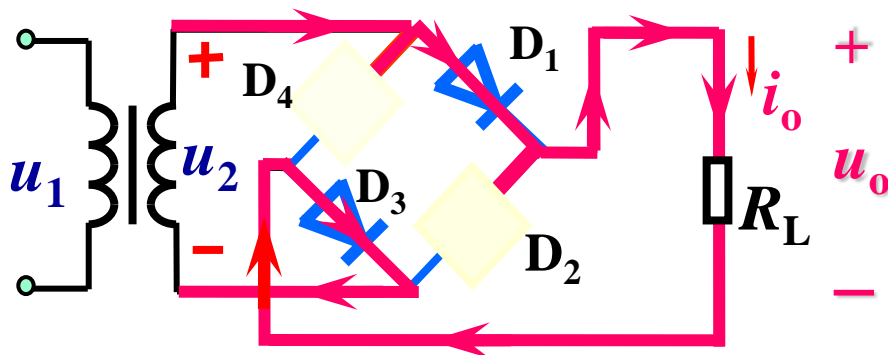
$$U_{RM} = \sqrt{2}U_2$$



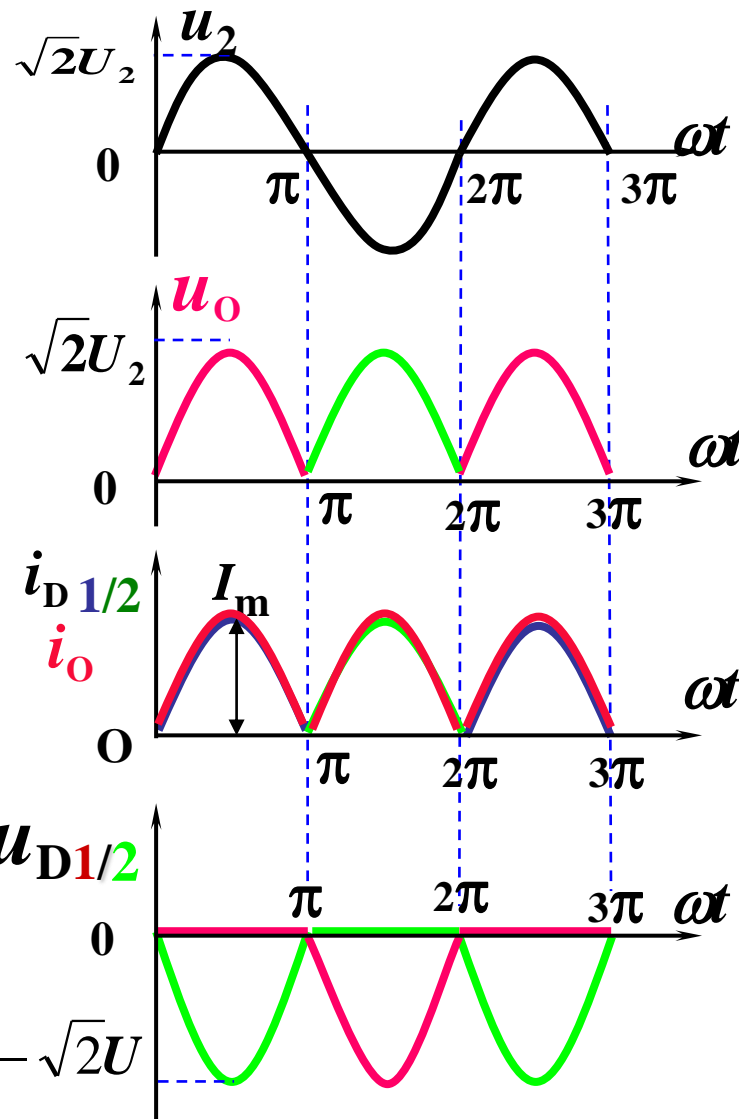
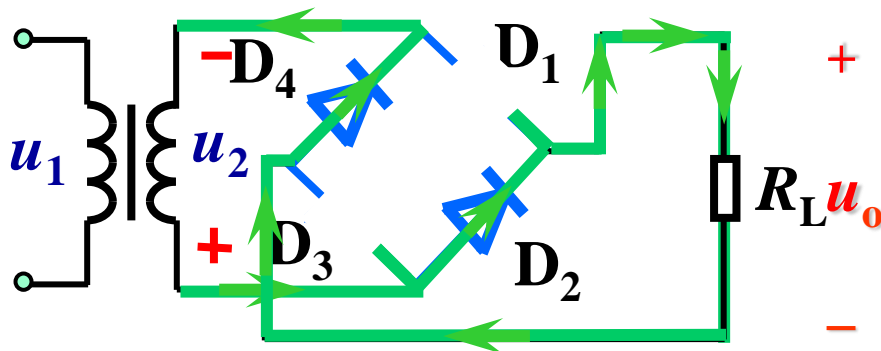
8.2.2 单相桥式整流电路

1. 电路组成原理

输入正半周



输入负半周



8.2.2 单相桥式整流电路

2. 电路参数估算

1) 整流输出电压/电流平均值

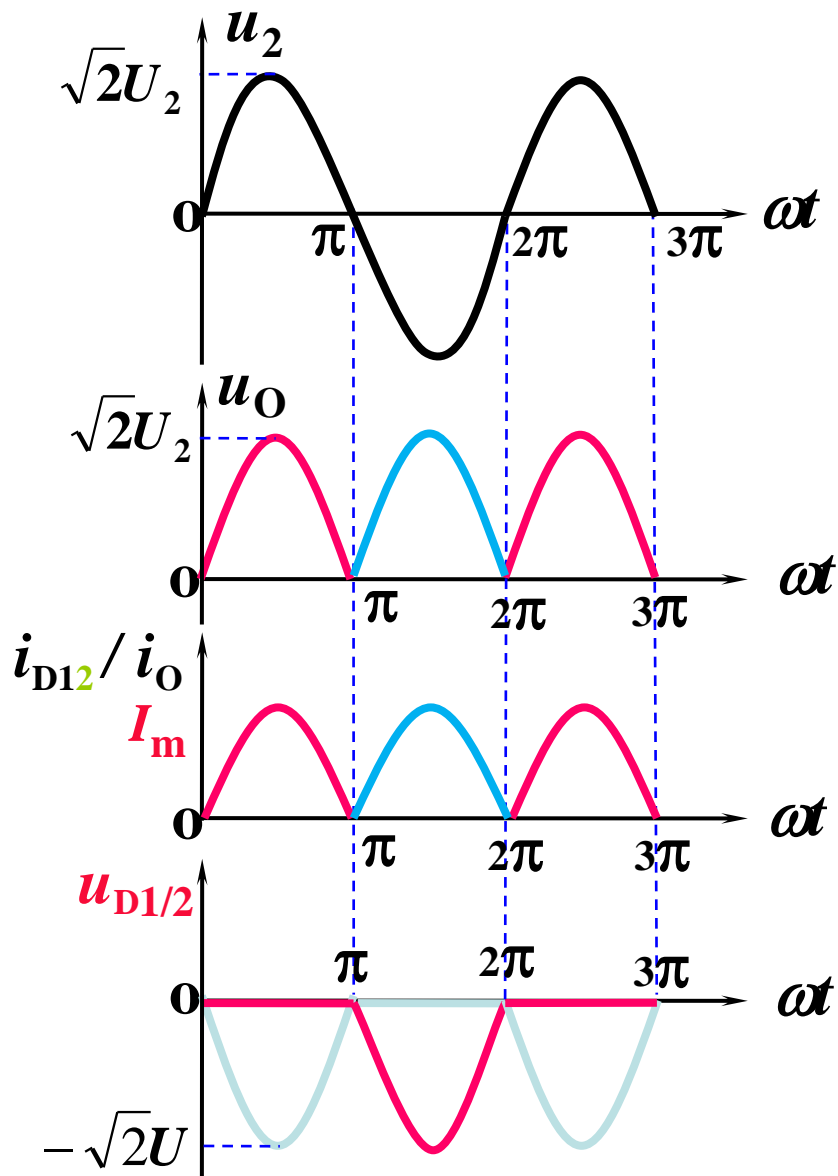
$$U_{O(AV)} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2}U_2 \sin(\omega t) d(\omega t) \\ = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 = 0.9U_2$$

$$I_{O(AV)} = \frac{U_{O(AV)}}{R_L} = \frac{0.9U_2}{R_L}$$

2) 二极管平均电流/最大反向电压

$$I_D = \frac{1}{2} I_{O(AV)} = \frac{U_{O(AV)}}{2R_L} = 0.45 \frac{U_2}{R_L}$$

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



8.2.2 单相桥式整流电路

2. 电路参数估算

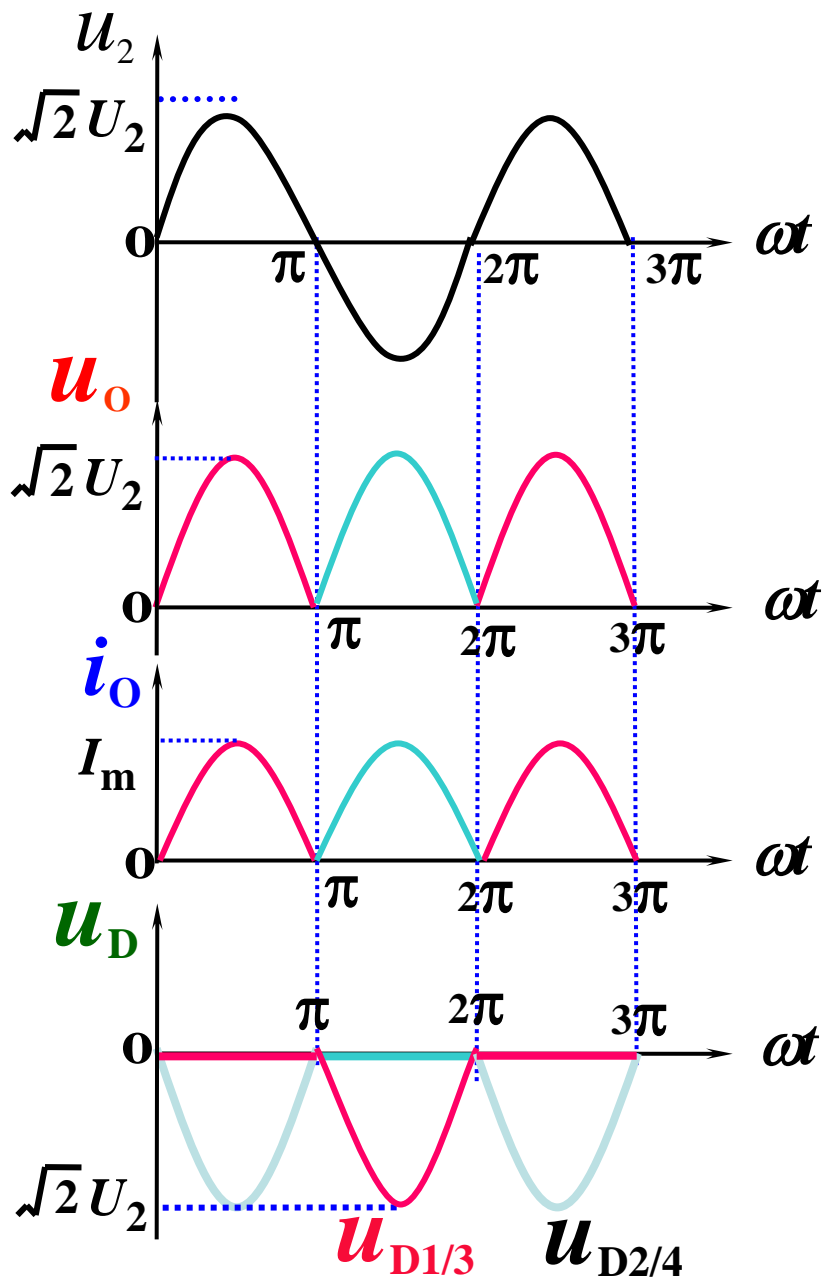
➤ 选用二极管的依据:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_F \text{ (最大整流电流)} \\ = 1.1 I_D \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} U_R \text{ (最高反向工作电压)} \\ = 1.1 U_{\text{DRM}} \end{array} \right.$$

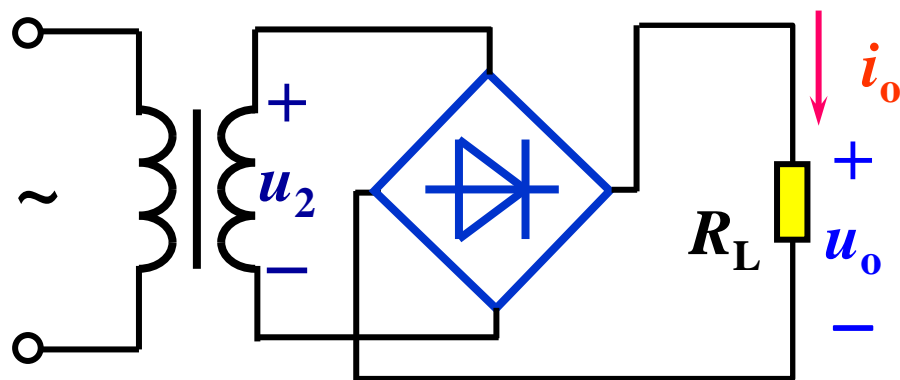
➤ 选用变压器的依据:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_2 = 1.11 I_O \text{ (AV)} , \\ U_2 = 1.11 U_O \text{ (AV)} \end{array} \right.$$

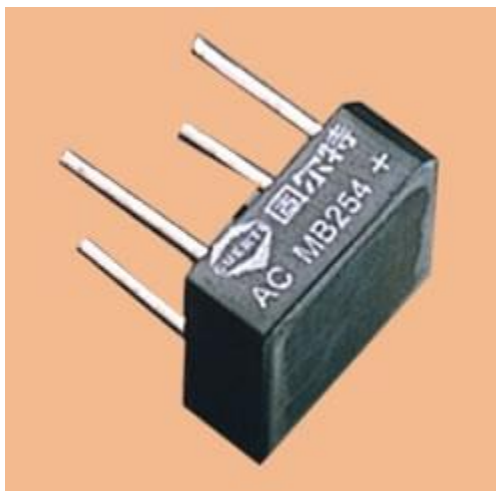
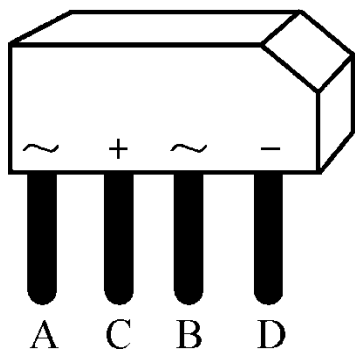


8.2.2 单相桥式整流电路

3. 简化画法



4. 整流桥：把四只二极管封装在一起。



5. 桥式整流电路的特点

优点:

- 1) 输出电压高;
- 2) 纹波电压小;
- 3) 管子承受的反向压降小;
- 4) 电源变压器的利用率高。

缺点:

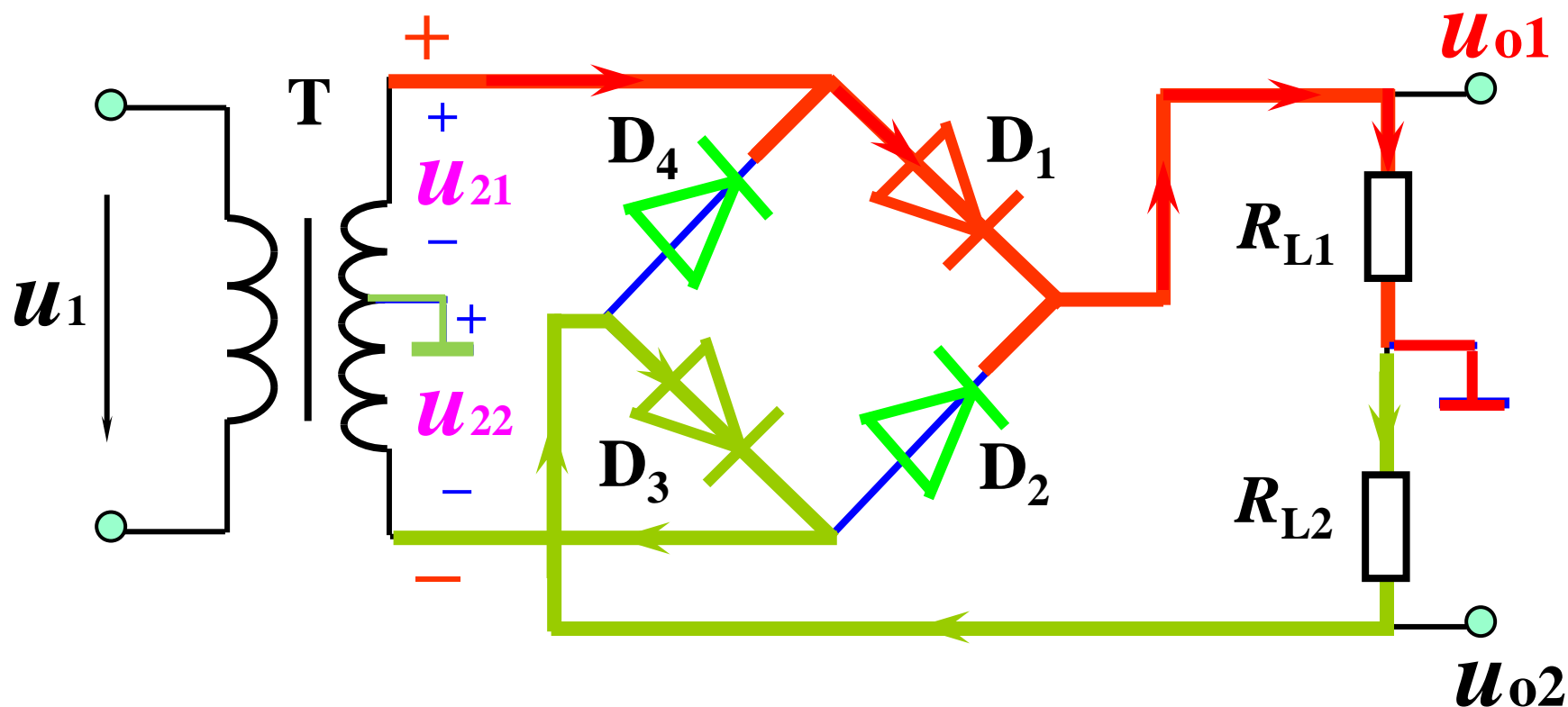
使用较多的二极管。

注意: 整流电路中的二极管是作为开关运用的。

- 输入（交流）—用有效值 U_2 或最大值 U_{2m} ；
- 输出（脉动直流）—用平均值 $U_{o(AV)}$ ；
- 整流管正向电流—用平均值 $I_{D(AV)}$ ；
- 整流管反向电压—用最大值 U_{RM} 。

例1. 可输出正/负两路直流的桥式整流电路。

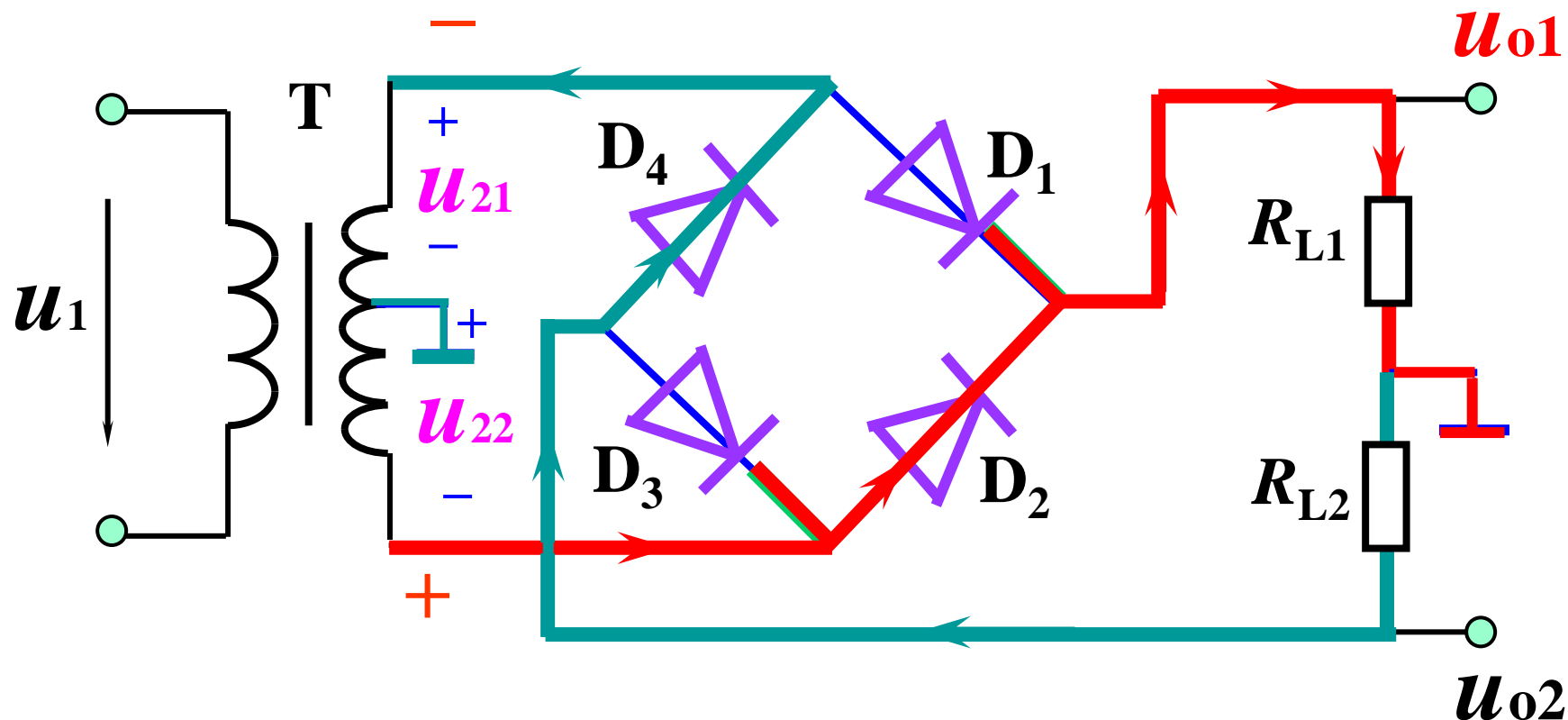
➤ u_2 正半周时:



● 在 u_i 的正半周, u_{o1} 对地为正; u_{o2} 对地为负。

例1. 可输出正/负两路直流的桥式整流电路。

➤ u_2 负半周时



- 在 u_i 的负半周， u_{o1} 对地为正； u_{o2} 对地为负。
- u_{o1} 对地始终为正； u_{o2} 对地始终为负。

例1. 可输出正/负两路直流的桥式整流电路。

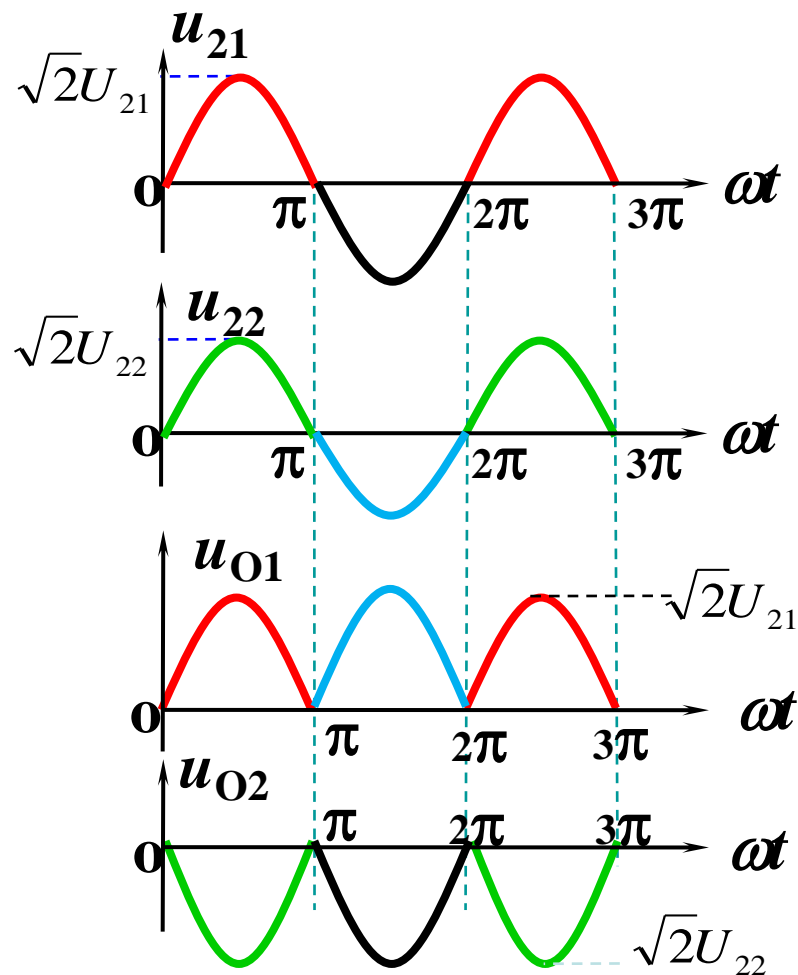
解:

$$U_{O1(AV)} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \sqrt{2}U_{21} \sin \omega t d\omega t + \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \sqrt{2}U_{22} \sin \omega t d\omega t$$

$$U_{O1(AV)} = 0.45(U_{21} + U_{22})$$

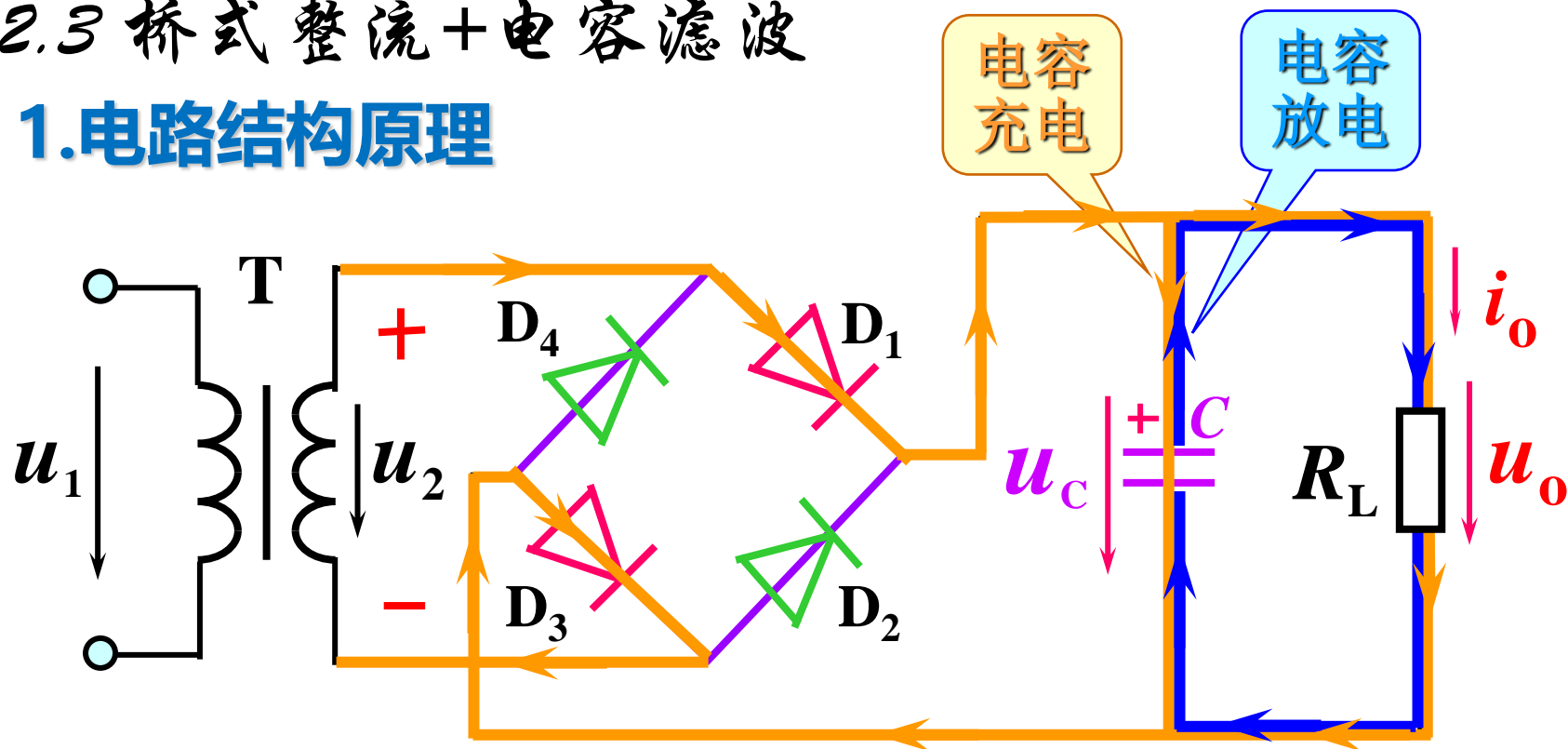
$$U_{O2(AV)} = -0.45(U_{21} + U_{22})$$

- u_i 为极性周期性变化的交流电；
- u_{o1} 和 u_{o2} 对地极性不变，均为直流电。



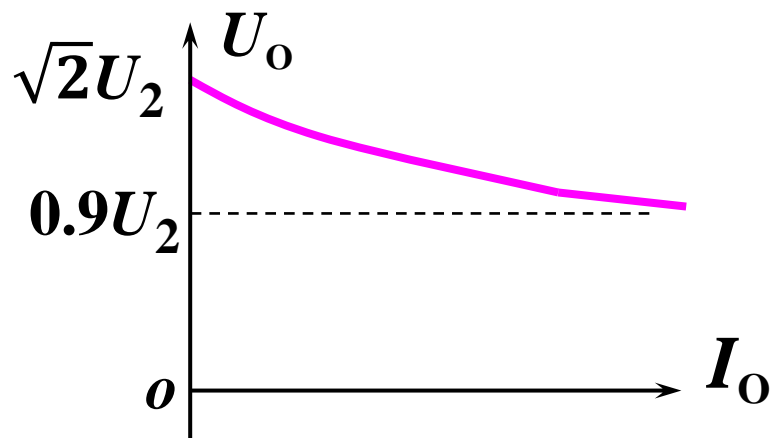
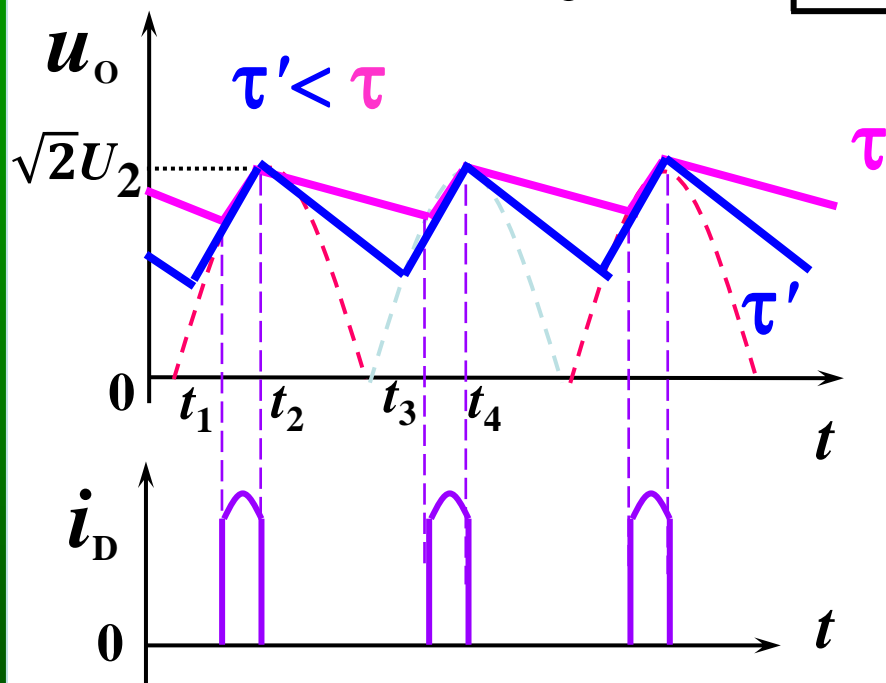
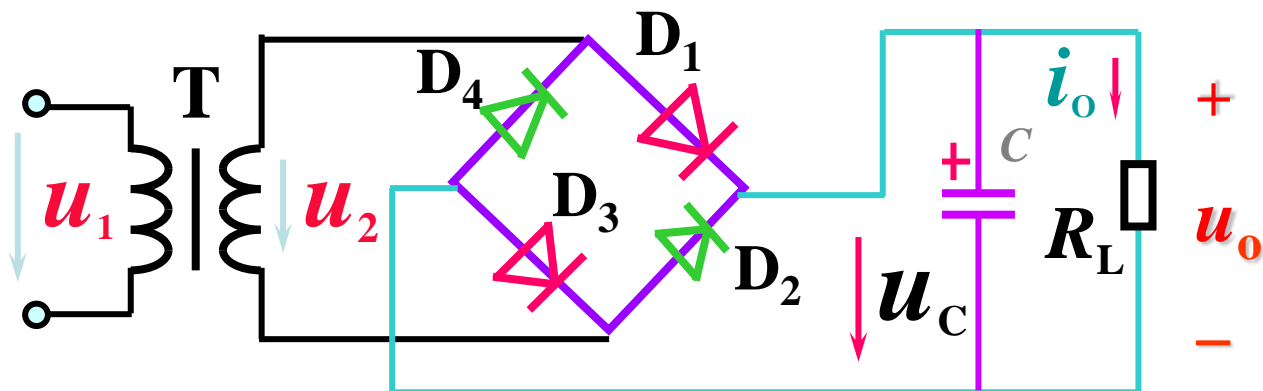
8.2.3 桥式整流+电容滤波

1. 电路结构原理



- u_2 正半周, D_1 和 D_3 导通, 给 R_L 供电同时给 C 充电;
- u_2 负半周, D_2 和 D_4 导通, 给 R_L 供电同时给 C 充电;
- 电容充电回路时间常数很小可以忽略;
- 电容放电回路时间常数 $R_L C$ 很大。

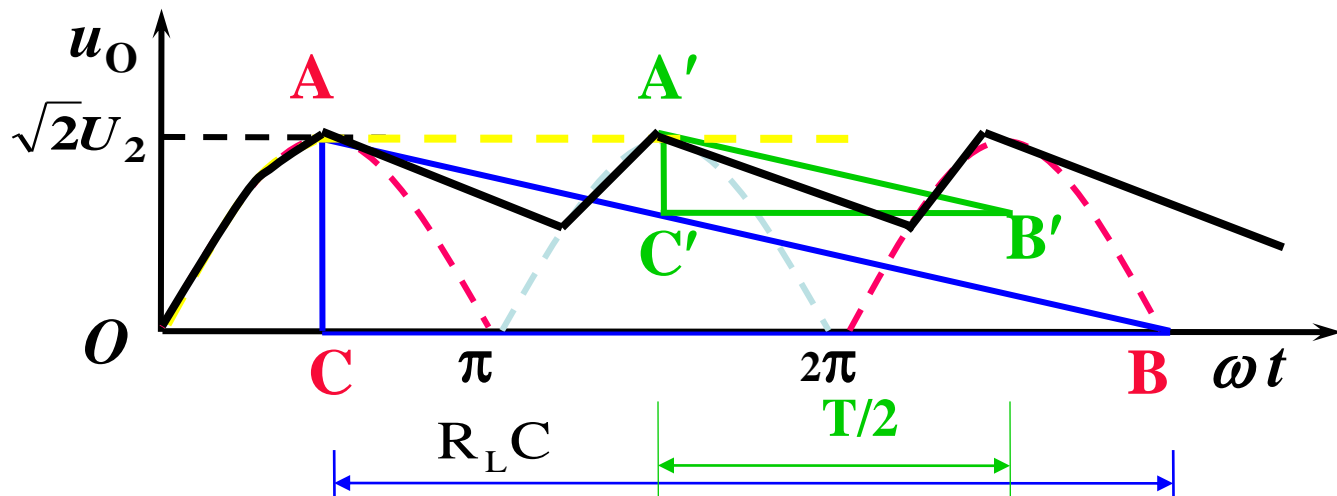
2. 电路波形



全波整流电容滤波电路外特性

- 电容滤波适合于负载输出电流较小且变化也较小的情况。
- 二极管导通时间很短，输出电流平均值更大，在元件选择时需要留有更大的余地。

3. 参数估算



$$\Delta ABC \sim \Delta A'B'C'$$

$$U_{O(AV)} = \frac{1}{2} (U_{Omax} + U_{Omin})$$

$$\frac{U_{Omax} - U_{Omin}}{U_{Omax}} = \frac{T/2}{R_L C}$$

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

$$U_{O(AV)} = \sqrt{2}U_2 \left(1 - \frac{T}{4R_L C}\right)$$

$$R_L = \infty \text{ 时: } U_O = \sqrt{2}U_2$$

$$R_L C = (3 \sim 5) \frac{T}{2} \text{ 时: } U_O \approx 1.2U_2$$

例 2. 单相桥式电容滤波整流, $R_L = 40 \Omega$, 要求直流输出电压

$U_{O(AV)} = 20 \text{ V}$, 试选择整流二极管及滤波电容。

[解] 1. 选二极管 $U_2 = \frac{U_{O(AV)}}{1.2} = \frac{20}{1.2} = 17 \text{ V}$

➤ 负载电流平均值

$$I_{O(AV)} = \frac{U_{O(AV)}}{R_L} = \frac{20}{40} = 0.5 \text{ A}$$

➤ 二极管最高反压

$$U_{RM} = \sqrt{2}U_2 = 24 \text{ V}$$

2. 选滤波电容

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50} = 0.02 \text{ s}$$

$$\text{取 } R_L C = 4 \times \frac{T}{2} = 0.04 \text{ s}$$

$$C = \frac{0.04 \text{ s}}{40 \Omega} = 1000 \mu\text{F}$$

即:
$$\begin{cases} I_F \geq (2 \sim 3) I_{O(AV)} \\ U_{RM} > 1.1 \sqrt{2} U_2 \end{cases}$$

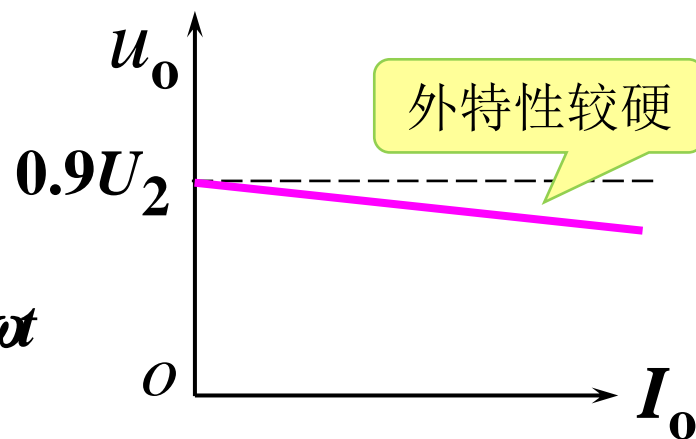
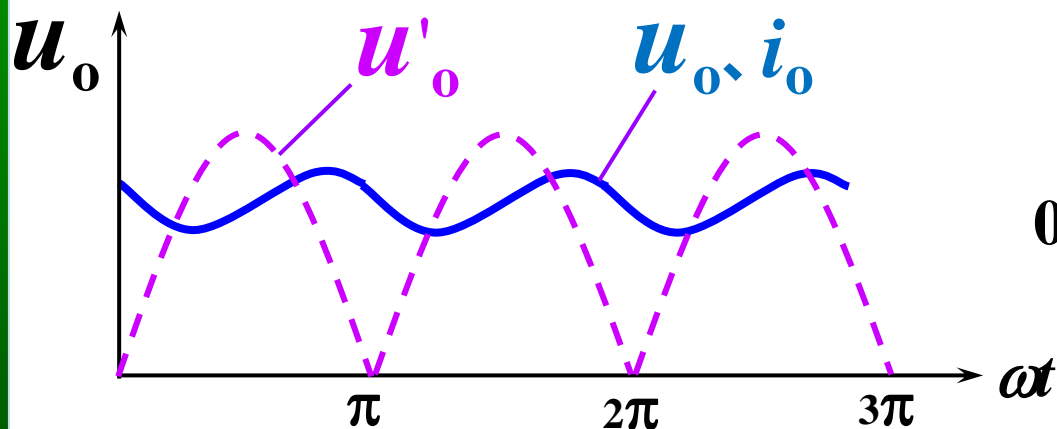
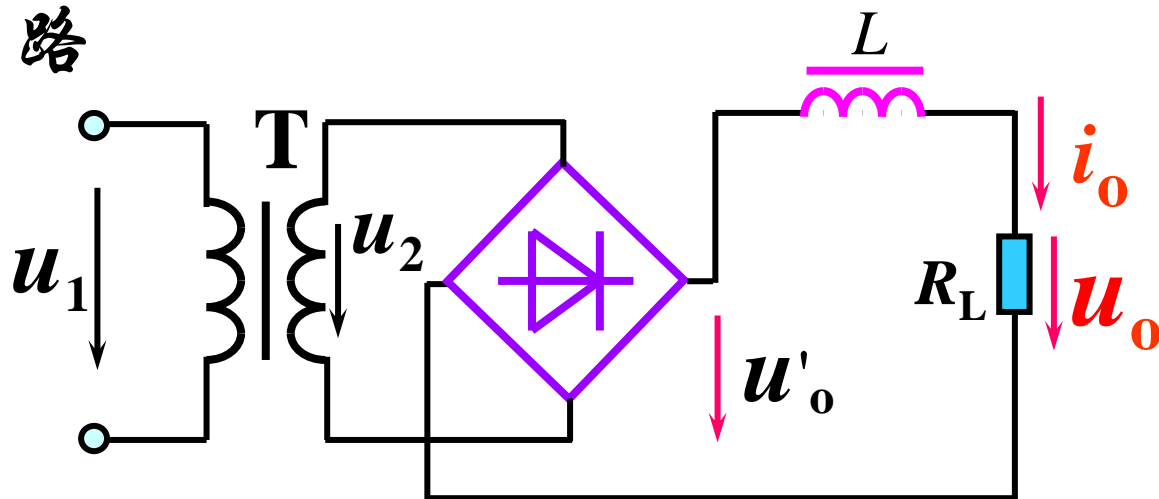
可选: **2CZ55C** (I_F 1 A, U_{RM} 100 V)

或选: **整流桥** (1 A/100 V)

可选: **电解电容**
1000 μF /耐压 50 V

8.2.4 其他滤波电路

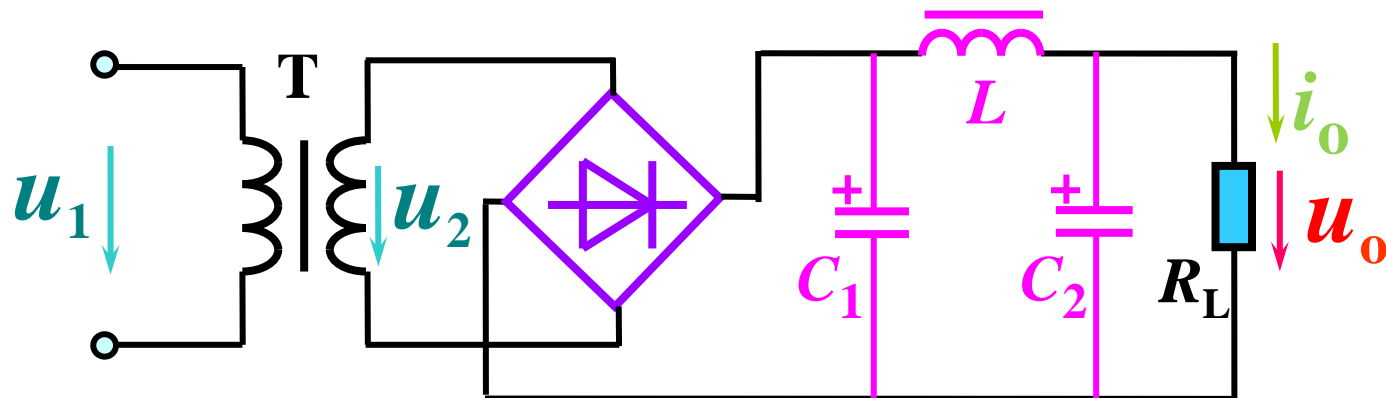
1、电感滤波



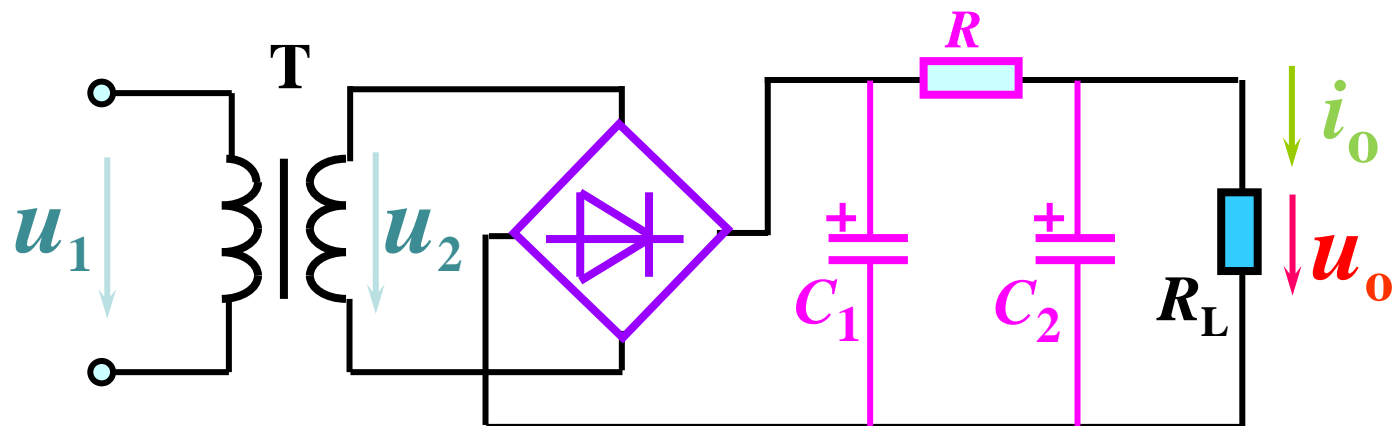
- 直流分量被电感 L 短路；交流分量主要降在 L 上。
- 电感 L 越大，滤波效果越好。

8.2.4 其他滤波电路

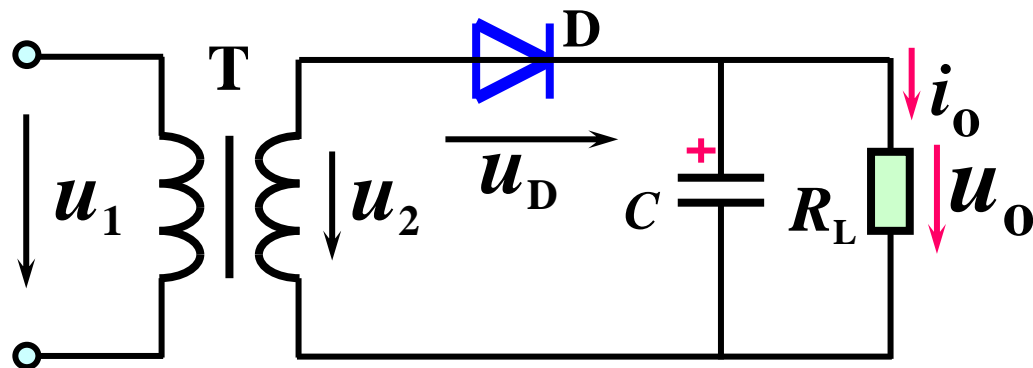
2、CLC π 滤波器



3. CRC滤波器—适合于负载电流小的场合

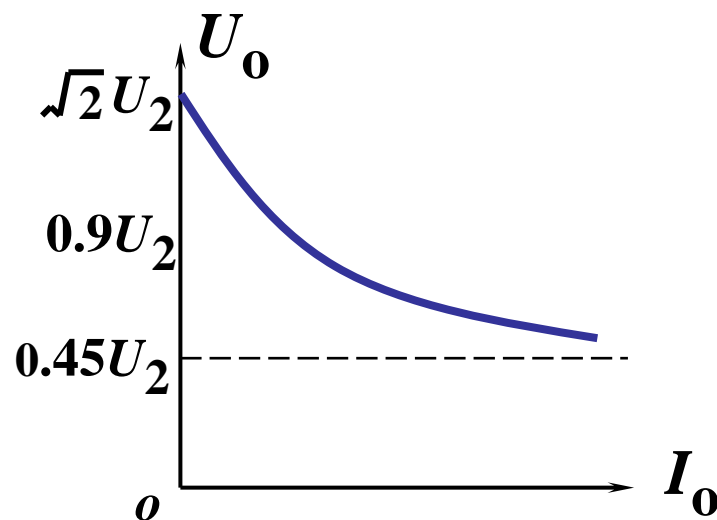
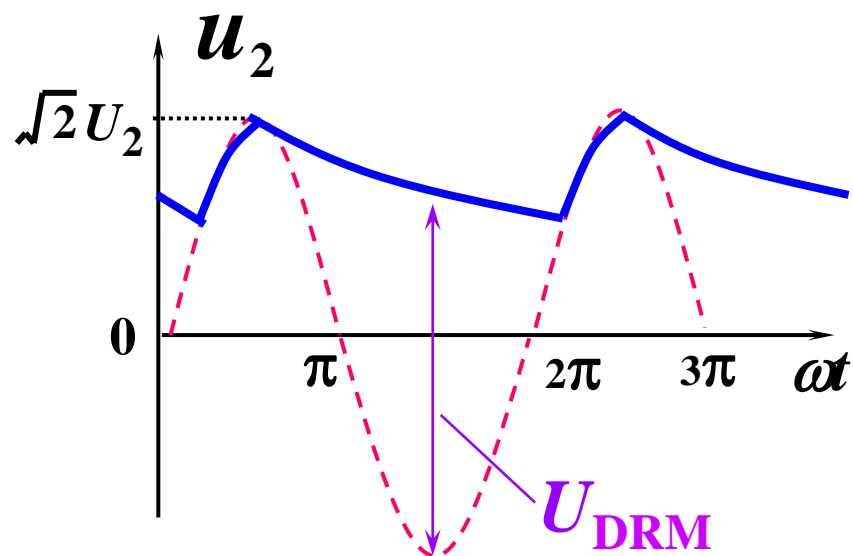


例3. 半波整流电容滤波电路



估算公式: $U_o = 1.0U_2$

注意: $U_{\text{DRM}} = 2\sqrt{2}U_2$



半波整流电容滤波
电路外特性

例4. 若已知变压器副边电压有效值 U_2 为10V, $R_L C \geq \frac{3T}{2}$

(T 为电网电压的周期)。测得输出电压平均值 $U_{O(AV)}$ 可能的数值为 **A. 14V** **B. 12V** **C. 9V** **D. 4.5V**
选择合适答案填入空内。

(1) 正常情况 $U_{O(AV)} \approx$ ___ ；

(2) 电容虚焊时 $U_{O(AV)} \approx$ ___ ；

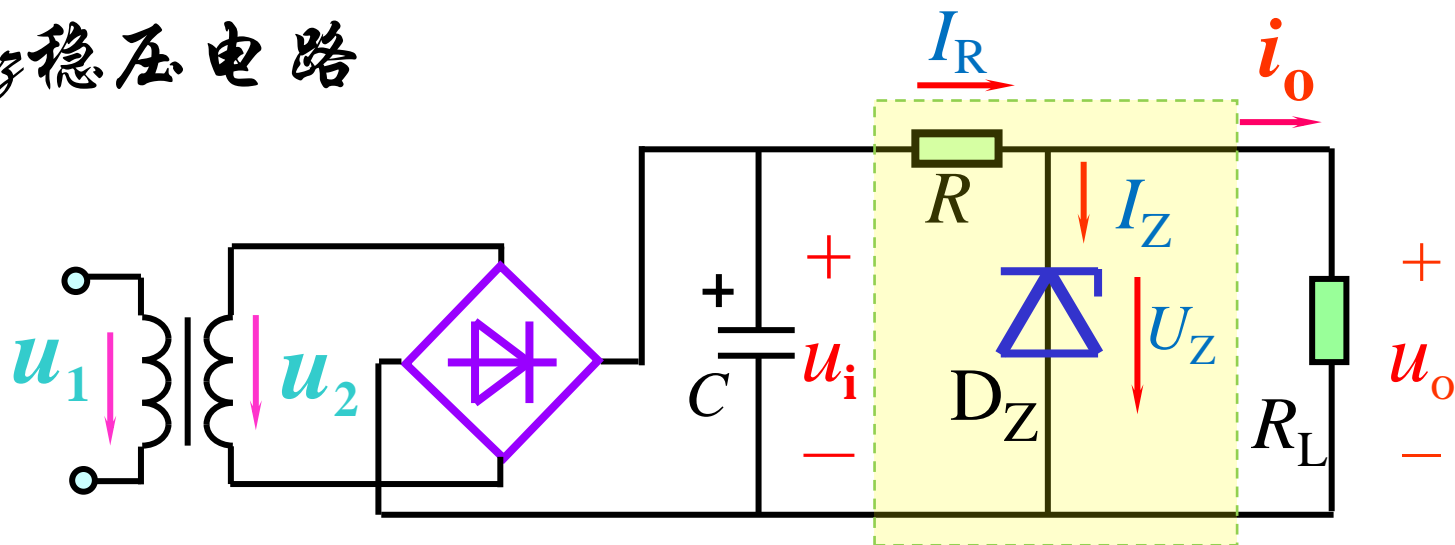
(3) 负载电阻开路时 $U_{O(AV)} \approx$ ___ ；

(4) 一只整流管和滤波电容同时开路, $U_{O(AV)} \approx$ ___ 。

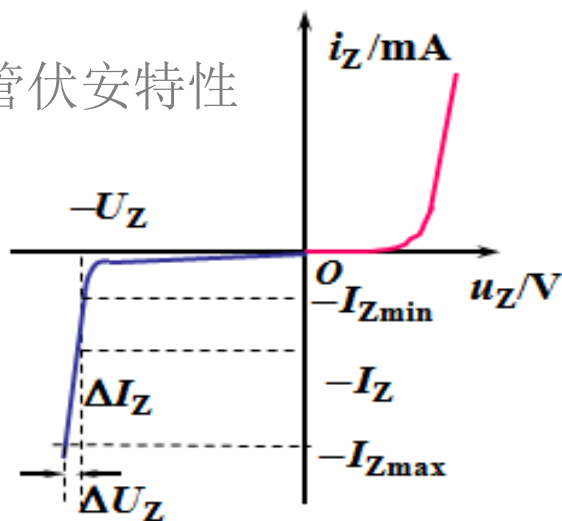
解: (1) B (2) C (3) A (4) D

8.2.5 R - D_Z 稳压电路

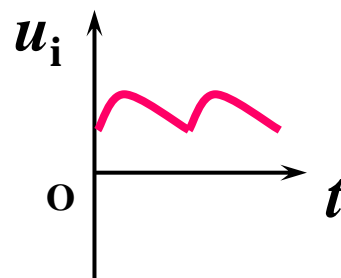
1. 组成



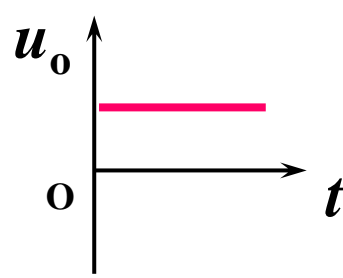
稳压管伏安特性



滤波电路输出



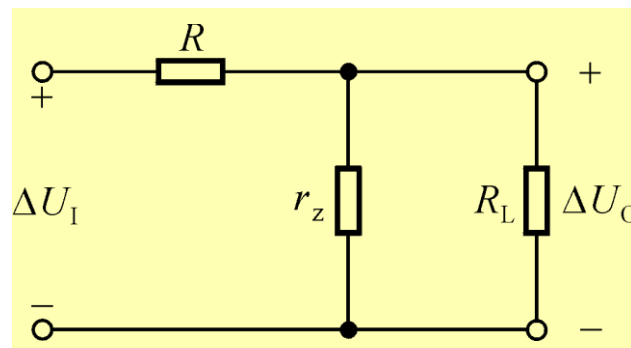
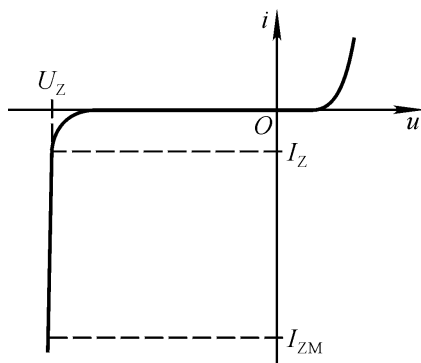
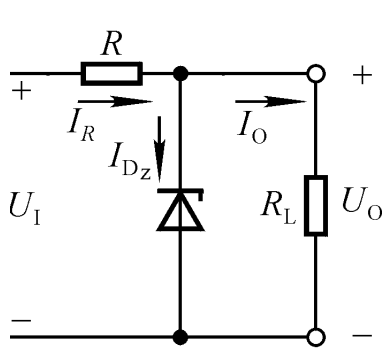
稳压电路输出



● 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。

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

(3) 稳压系数

$$S_r = \frac{\Delta U_O}{\Delta U_I} \cdot \frac{U_I}{U_O} \bigg|_{R_L} = \frac{r_z // R_L}{R + r_z // R_L} \cdot \frac{U_I}{U_O} \approx \frac{r_z}{R} \cdot \frac{U_I}{U_O}$$

(4) 输出电阻 $R_O = r_z // R \approx r_z$

- 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。

8.2.5 R-D_Z稳压电路

3.稳压管稳压电路的设计

- 1) U_I 的选择 $U_I = (2 \sim 3) U_Z$
- 2) 稳压管的选择 $U_Z = U_O$ $I_{ZM} - I_Z > I_{Lmax} - I_{Lmin}$
- 3) 限流电阻的选择 保证稳压管既稳压又不损坏。

$$I_{D_Zmin} > I_Z \text{ 且 } I_{D_Zmax} < I_{ZM}$$

➤ 电网电压最低且负载电流最大时，稳压管的电流最小。

$$I_{D_Zmin} = \frac{U_{Imin} - U_Z}{R} - I_{Lmax} > I_Z$$

$$R < \frac{U_{Imin} - U_Z}{I_Z + I_{Lmax}}$$

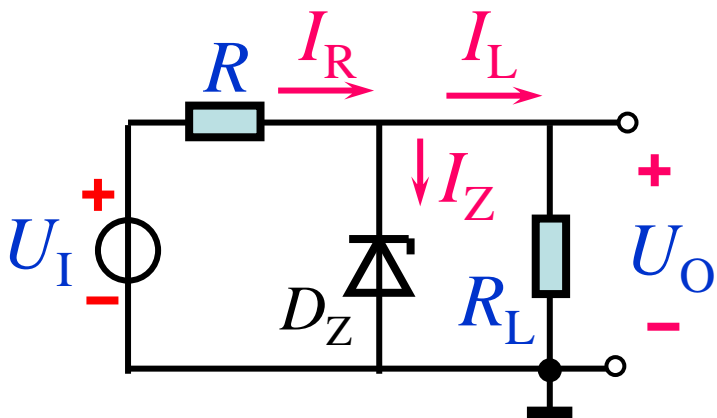
➤ 电网电压最高且负载电流最小时，稳压管的电流最大。

$$I_{D_Zmax} = \frac{U_{Imax} - U_Z}{R} - I_{Lmin} < I_{ZM}$$

$$R > \frac{U_{Imax} - U_Z}{I_{ZM} + I_{Lmin}}$$

例5. 已知稳压管的稳定电压 U_Z 为6V，最小稳定电流 $I_{Z\min}$ 为5mA，最大稳定电流 $I_{Z\max}$ 为40mA；输入电压 U_I 为15V，波动范围为 $\pm 10\%$ ；限流电阻 R 为 $200\ \Omega$ 。

- 1) 电路是否能空载？ 2) 负载电流 I_L 的范围为多少？



**电路
不能空载!**

解：

- 1) 空载时稳压管的最大电流

$$I_{D_Z \max} = I_{R \max} = \frac{U_{I \max} - U_Z}{R} = 52.5\text{mA} > I_{Z \max} = 40\text{mA}$$

例5. 2) 求负载电流 I_L 的范围?

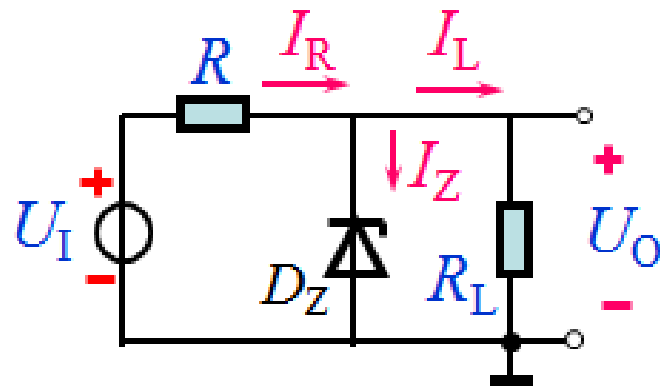
根据
$$I_{D_Z \min} = \frac{U_{I \min} - U_Z}{R} - I_{L \max}$$

得:
$$I_{L \max} = \frac{U_{I \min} - U_Z}{R} - I_{D_Z \min} = 32.5 \text{mA}$$

根据
$$I_{D_Z \max} = \frac{U_{I \max} - U_Z}{R} - I_{L \min}$$
 得:
$$I_{L \min} = \frac{U_{I \max} - U_Z}{R} - I_{D_Z \max} = 12.5 \text{mA}$$

所以, 负载电流的范围为: $12.5 \sim 32.5 \text{mA}$ 。

- I_L 的变化范围是针对不同负载来说的。不改变 R_L 情况下, I_L 变化不大, 可以忽略其变化。
- I_L 增大时, 稳压电路阻 上的压降增大, 使 U_O 减小, I_Z 大大减小, 可知 I_L 变化趋势与 I_Z 相反。
- 电网电压波动时, I_Z 变化趋势与 I_R 一致。



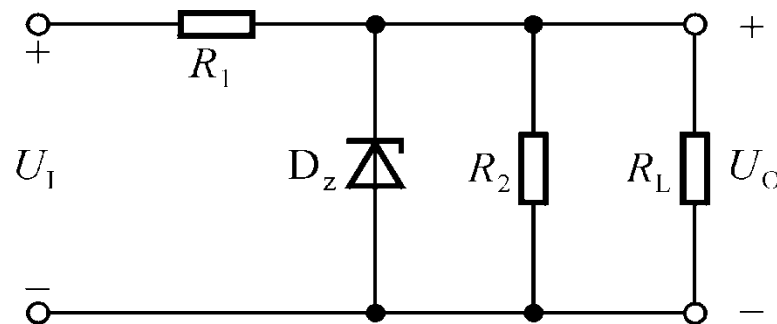
例6. 已知稳压管的稳定电压为6V，最小稳定电流为5mA，允许耗散功率为240mW；输入电压为20~24V， $R_1=360\Omega$ 。试问：

- (1) 为保证空载时稳压管能够安全工作， R_2 应选多大？
- (2) 当 R_2 按上面原则选定后，负载电阻允许的变化范围是多少？

解：

$$I_{R1} = \frac{U_I - U_Z}{R_1} \approx 39 \sim 50\text{mA}$$

$$I_{Z\max} = \frac{P_{ZM}}{U_Z} = 40\text{mA}$$



为保证空载时稳压管安全工作

$$R_2 = \frac{U_Z}{(I_{R1\max} - I_{Z\max})} = 600\Omega$$

负载电流的最大值

$$I_{L\max} = I_{R1\min} - I_{R2} - I_{Z\min} = 24\text{mA}$$

负载电阻的变化范围

$$R_{L\min} = \frac{U_Z}{I_{L\max}} = 250\Omega \quad R_{L\max} = \infty$$

8.3 串联型线性稳压电路

交流电经过整流滤波可得到平滑的直流电压。
当电网电压波动和负载变化时输出电压将随之变化。
稳压电路的作用就是在这两种情况下，
将输出电压稳定在一个固定的数值上。

8.3.1 串联型稳压电路的性能指标

8.3.2 串联型稳压电路的工作原理

8.3.3 三端固定集成稳压器

8.3.4 三端可调输出集成稳压器

8.3.1 串联型稳压电路的性能指标

- 1、**稳压系数** S_V —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，输出与输入电压的相对变化量之比。
 S_V 越小，输出电压的稳定性越好，纹波电压越小。

$$S_V = \frac{\Delta U_o / U_o}{\Delta U_I / U_I} \bigg|_{\substack{\Delta I_o = 0 \\ \Delta T = 0}}$$

- 2、**输出电阻** R_o —反映稳压电路受负载变化的影响。

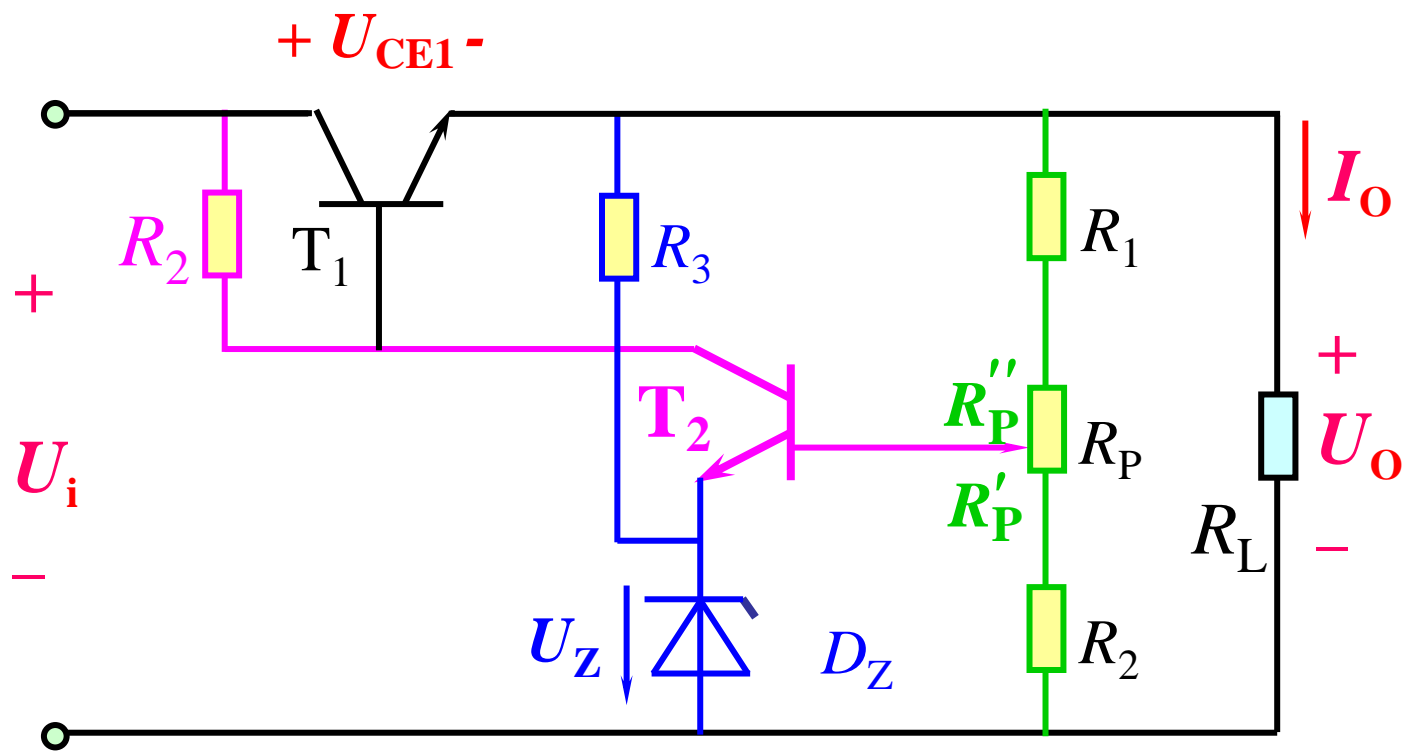
定义为：当输入电压固定时，输出电压变化量与输出电流变化量之比。
实际上就是电源戴维南等效电路的内阻。

- 3、**温度系数** S_T —反映温度变化对稳压电路的影响。

$$S_T = \frac{\Delta U_o}{\Delta T} \bigg|_{\substack{\Delta U_I = 0 \\ \Delta I_o = 0}}$$

8.3.2 串联型稳压电路的工作原理

1. 串联稳压电路组成



- 四个环节：调整管、基准电压、误差放大器、采样电路。

8.3.2 串联型稳压电路的工作原理

2、稳压原理：

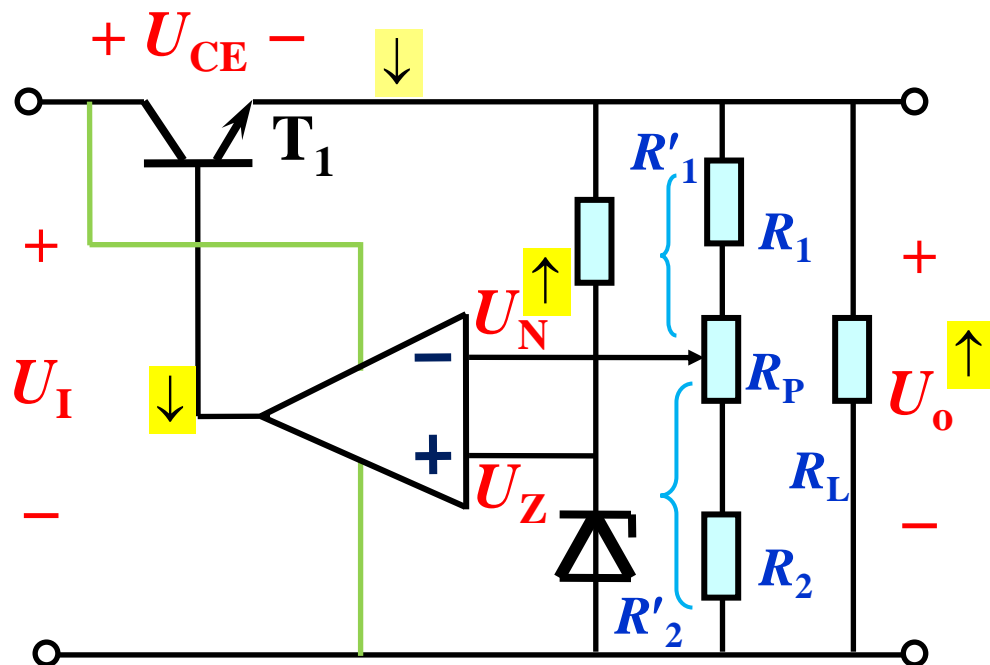
若某种原因使 U_O 增大，
则：

$$U_O \uparrow \rightarrow U_N \uparrow \rightarrow U_B \downarrow \rightarrow U_O \downarrow$$

3. 输出电压范围

$$U_N = \frac{U_O R_2'}{R_1 + R_2 + R_p} = U_Z$$

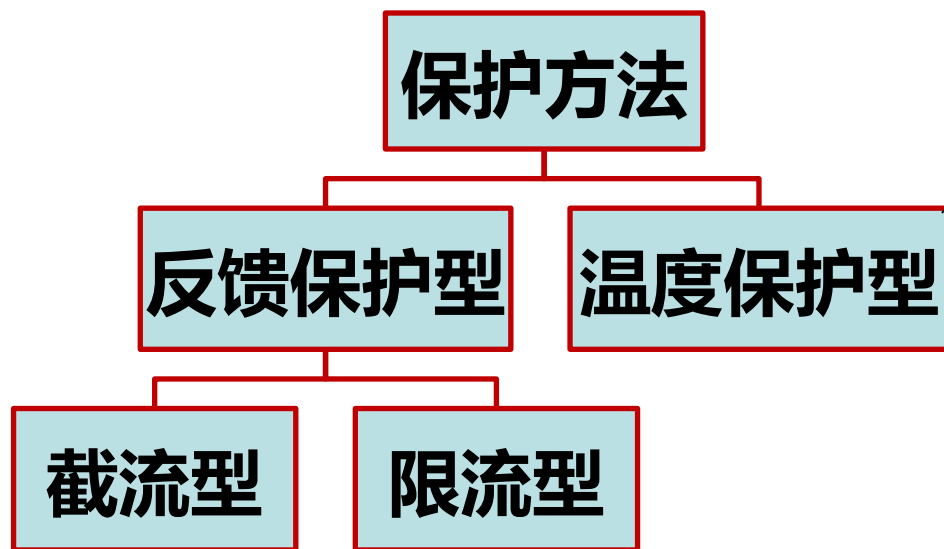
$$\frac{R_1 + R_2 + R_p}{R_2 + R_p} U_Z \leq U_O \leq \frac{R_1 + R_2 + R_p}{R_2} U_Z$$



8.3.2 串联型稳压电路的工作原理

4. 稳压电路的保护环节

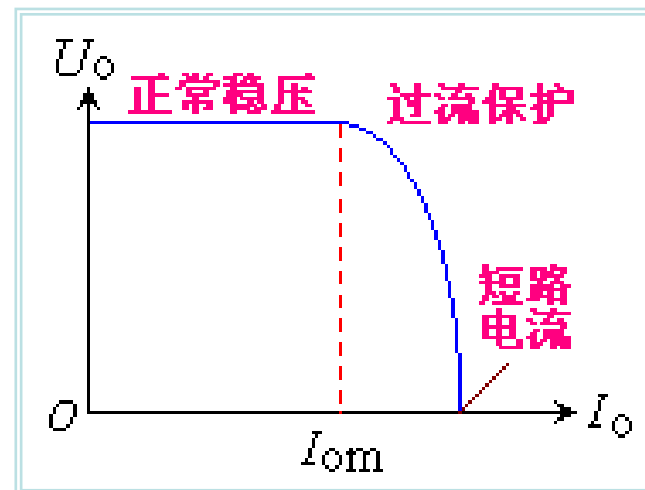
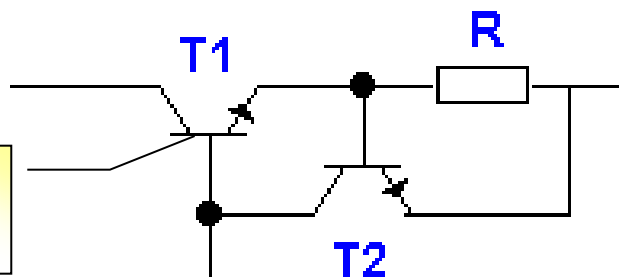
在串联型稳压电路中，调整管与负载串联，故 $I_C \approx I_L$ 。当输出电流过大或输出短路时，调整管会因为电流过大而使管耗过大而损坏。因此，有必要对调整管加以保护。



利用集成电路制造工艺，在调整管旁制作PN结温度传感器。当温度超标时，启动保护电路工作，工作原理与反馈保护型相同。

➤ 限流型保护电路

调整管

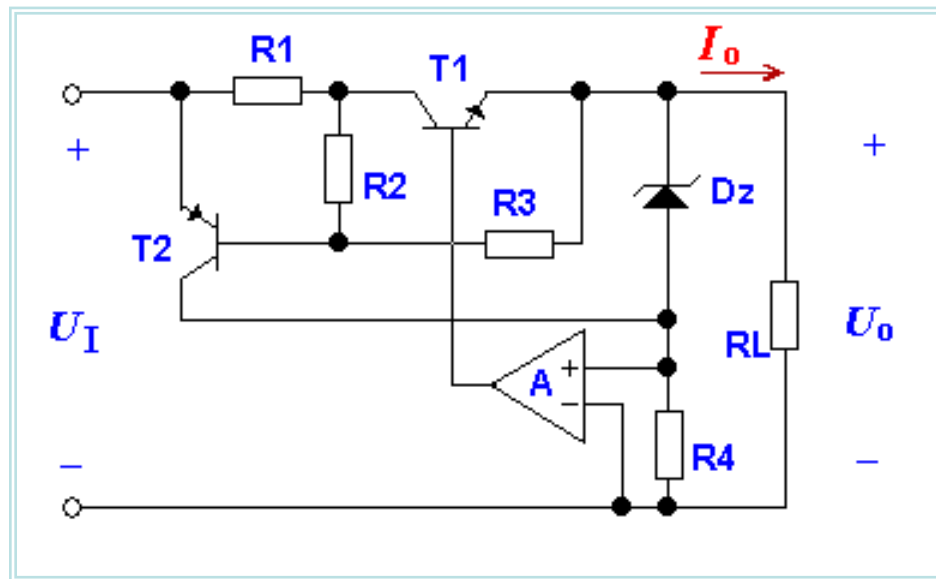
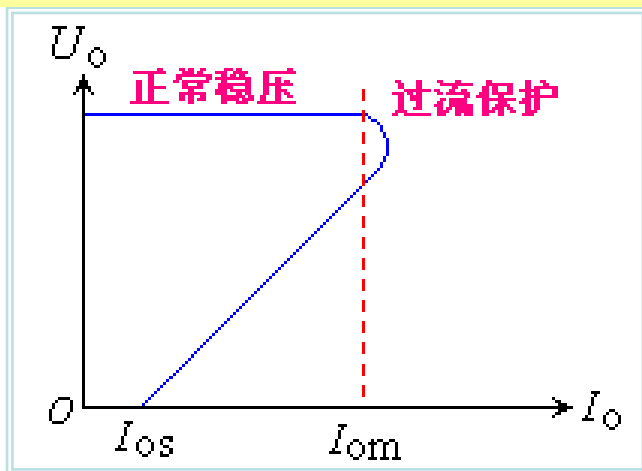


当调整管电流超过一定限度时，对它的基极电流进行分流，以限制调整管的发射极电流不至于太大。

电阻 R 检测调整管的电流，当电流在额定范围内时 U_R 不足以使 T_2 导通；而当电流超过额定值后， T_2 导通，将 T_1 的基极电流分走一部分，削弱了负反馈作用。

从这电路的外特性曲线可知，即使在输出短路的情况下电流也不会太大。

➤ 截流型保护电路



1) 当正常工作时, T_2 处于截止状态, 即:

若 $U_I \uparrow \rightarrow U_o \uparrow \rightarrow U_+ \uparrow \rightarrow U_{b1} \uparrow \rightarrow I_C \downarrow (I_o \downarrow) \rightarrow U_o \downarrow$

2) 当 I_o 超过额定值时, 保护管 T_2 导通, 引起 U_+ 上升:

稳压管因端电压下降而截止, 切断了负反馈回路。

$U_+ \uparrow \rightarrow U_{b1} \uparrow \rightarrow U_{c1} (U_o) \downarrow \rightarrow U_{b2} \downarrow \rightarrow I_{c2} \uparrow \rightarrow U_+ \uparrow \uparrow$

这样最终导致 U_o 接近于零, 实现了截流作用。

8.3.3 三端集成稳压器

1.分类

1) 三端**固定**输出集成稳压器

国标型号为CW78××(正压), CW79××(负压),

×× 输出电压: 5V, 9V、12V、15V、18V、24V

输出电流: 1.5A、0.5A(M)、0.1A(L)

2) 三端**可调**输出集成稳压器

国标型号为CW117×、CW217×、CW317×(正压)

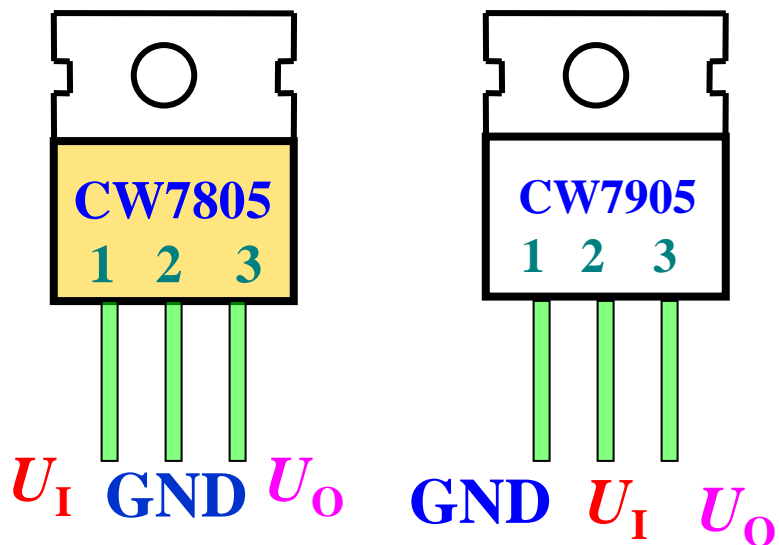
国标型号为CW137×、CW237×、CW337×(负压)

1---为军品级; 2---为工业品级; 3---为民品级。

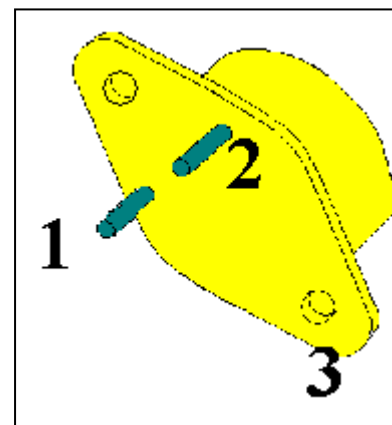
8.3.3 三端集成稳压器

2.封装

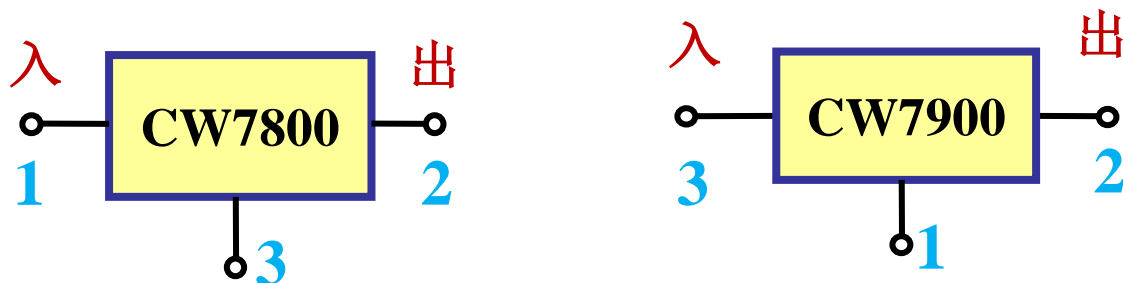
塑料封装



金属封装



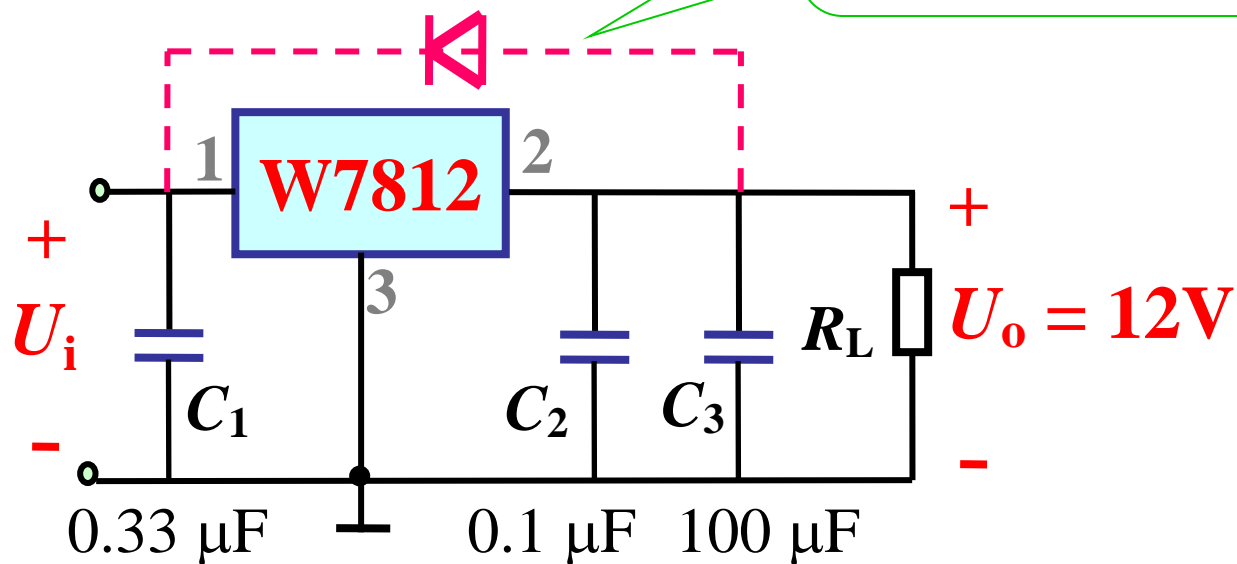
3.符号



8.3.3 三端集成稳压器

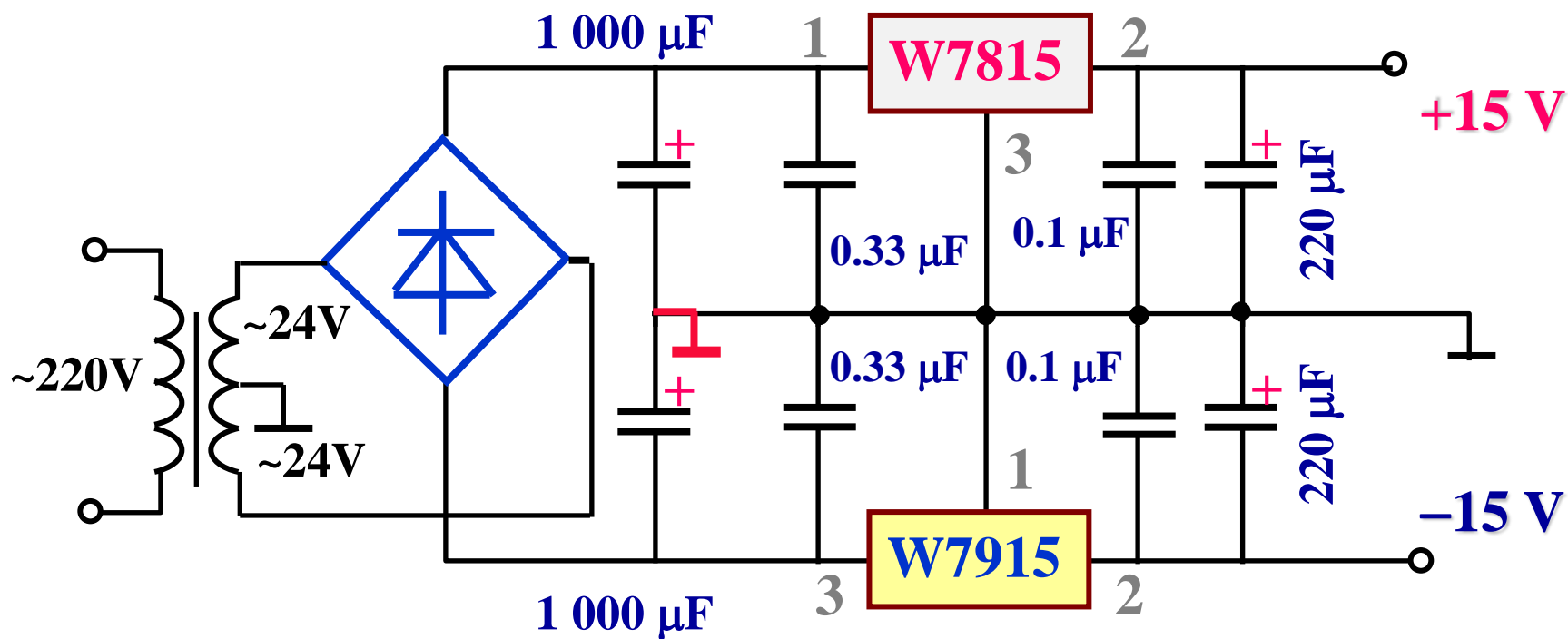
4. 三端集成稳压器应用举例

1) CW7800 的基本应用电路



4.三端集成稳压器应用举例

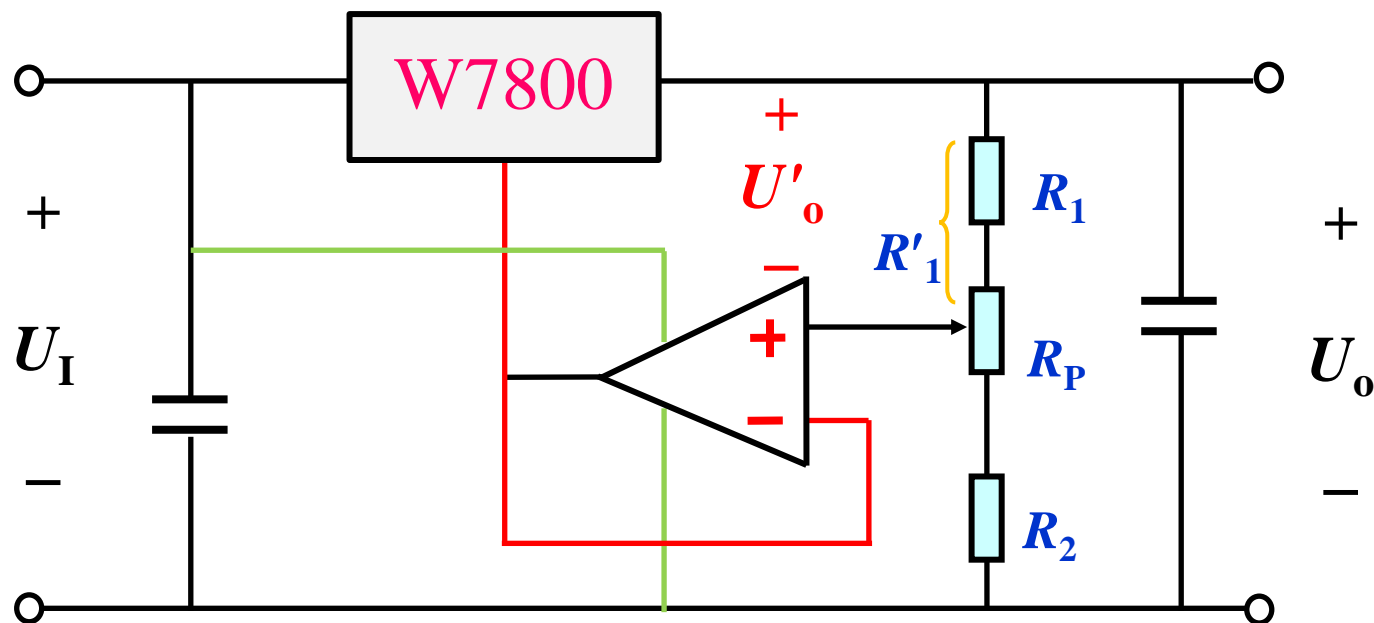
2)输出 $\pm V_{CC}$ 的电路



- 经过（降压→整流→滤波→稳压），获得 $\pm 15V$ 直流输出。

4.三端集成稳压器应用举例

3) 扩大输出电压的电路

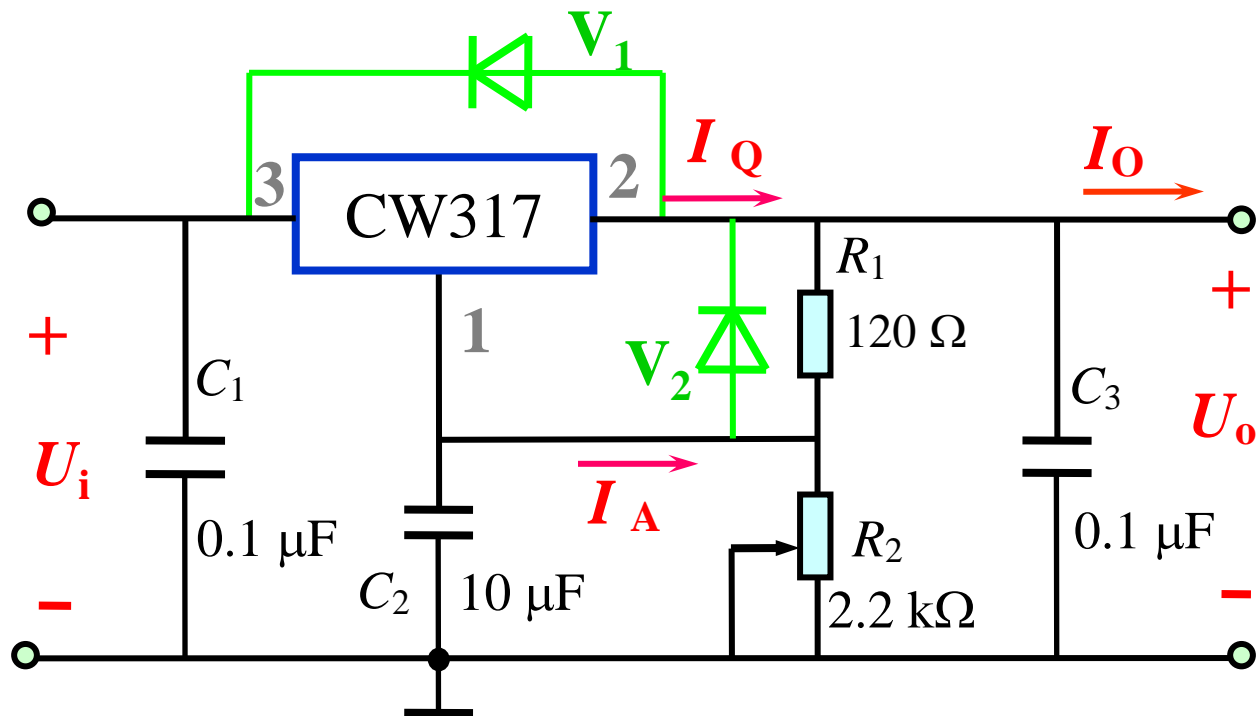


●输出电压范围:

$$U_o = \frac{R_1 + R_2 + R_p}{R_1 + R_p} U'_o \sim \frac{R_1 + R_2 + R_p}{R_1} U'_o$$

4.三端集成稳压器应用举例

4) CW117典型应用电路



$$U_{\text{REF}} = 1.25 \text{ V}$$

$$I_{\text{A}} \approx 50 \mu\text{A}$$

$$I_{\text{R1}} = 5 \sim 10 \text{ mA}$$

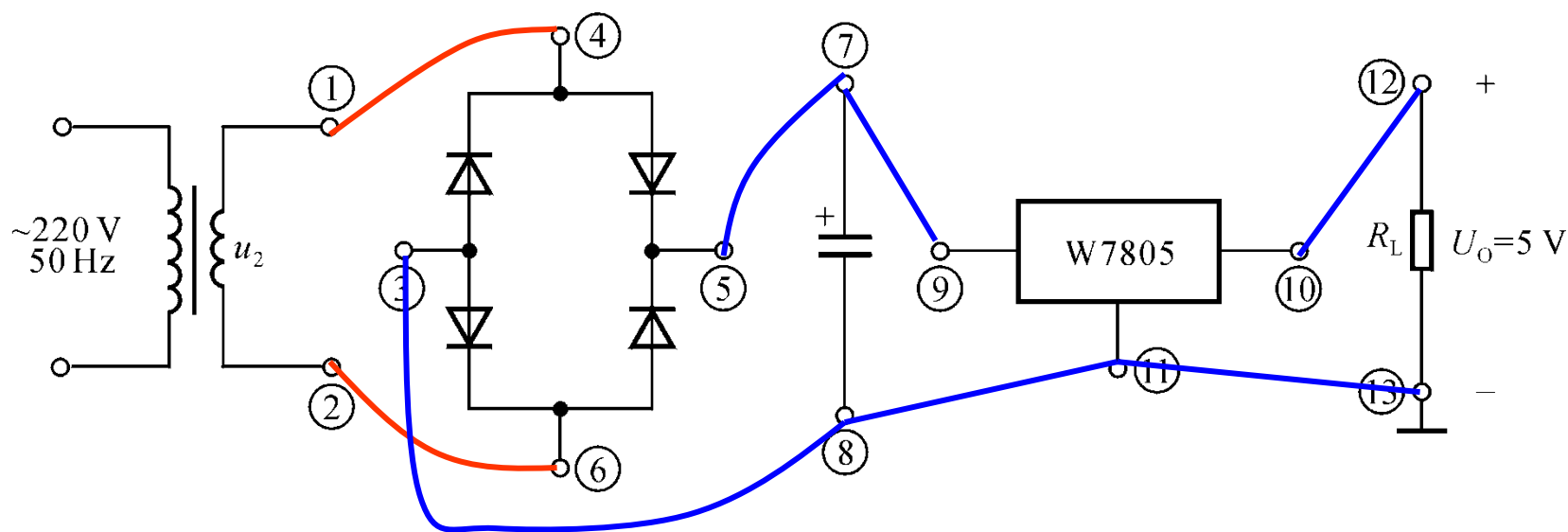
$$U_{\text{O}} = U_{\text{REF}} + \left(\frac{U_{\text{REF}}}{R_1} + I_{\text{A}} \right) R_2 \approx 1.25(1 + R_2 / R_1)$$

$$\text{取: } R_1 = U_{\text{REF}} / I_{\text{R1}} = 125 \Omega$$

$$R_2 = 0 \sim 2.2 \text{ k}\Omega \text{ 时}$$

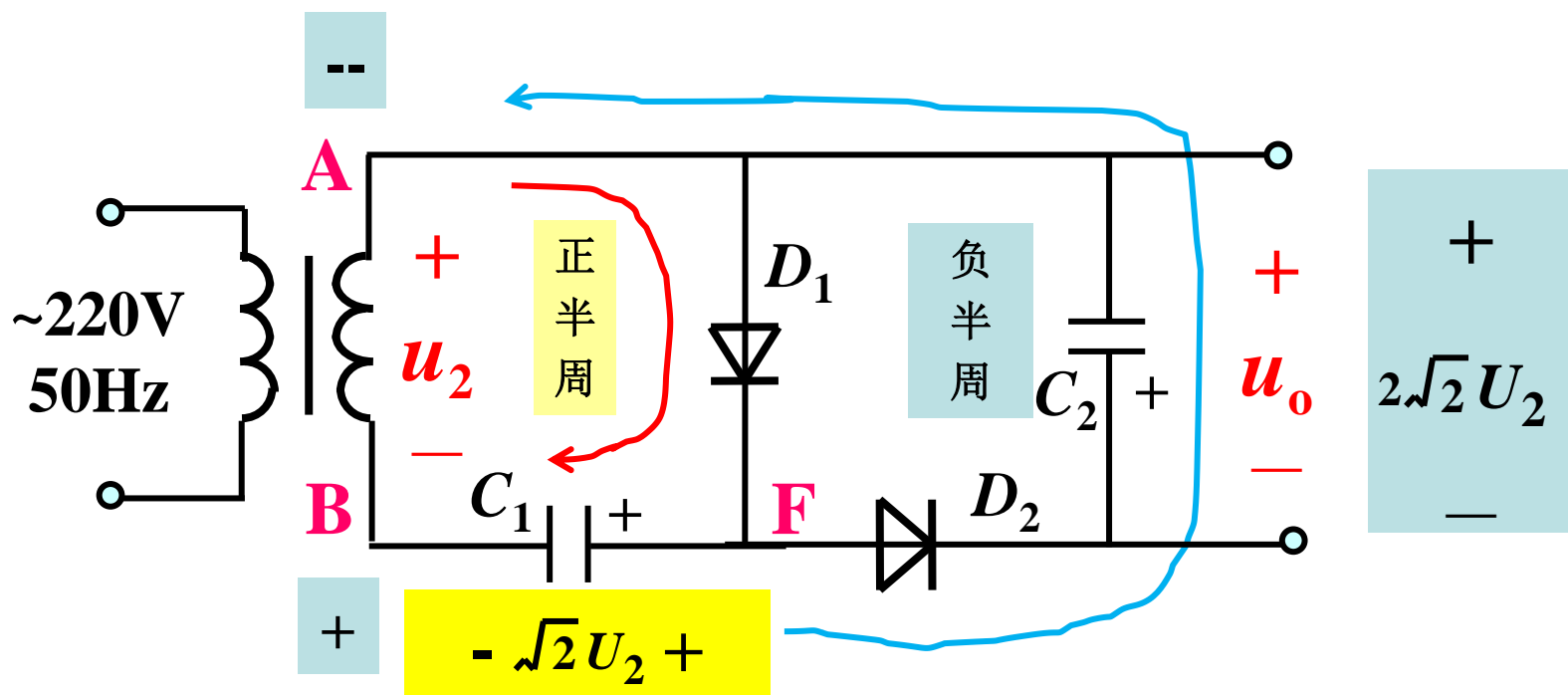
$$U_{\text{O}} = 1.25 \sim 24 \text{ V}$$

例7. 合理连线，构成5V的直流电源。



- 经过（降压→整流→滤波→稳压），获得+5V直流输出。

例8: 分析倍压整流电路输出电压值为多少?

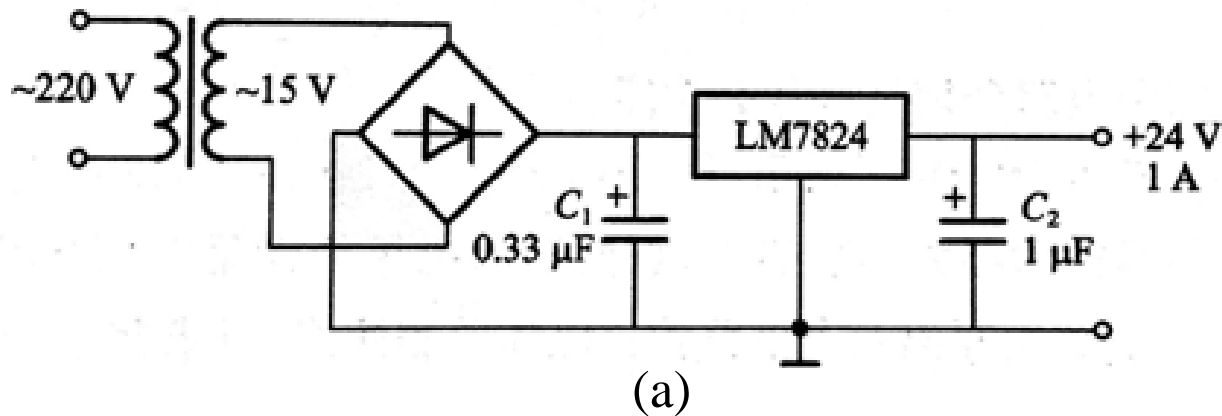


分析要点: 1) 负载开路; 2) 电路进入稳态。

➤ u_2 正半周对 C_1 充电: $A \rightarrow D_1 \rightarrow C_1 \rightarrow B$;

➤ u_2 负半周, u_2 串联 u_C 对 C_2 充电: $F \rightarrow D_2 \rightarrow C_2 \rightarrow A$ 。

例9. 试分析下列两个直流稳压电源，指出其错误。



解答： (a) 电路有两处错误：

1) 滤波电容太小，效果很差。

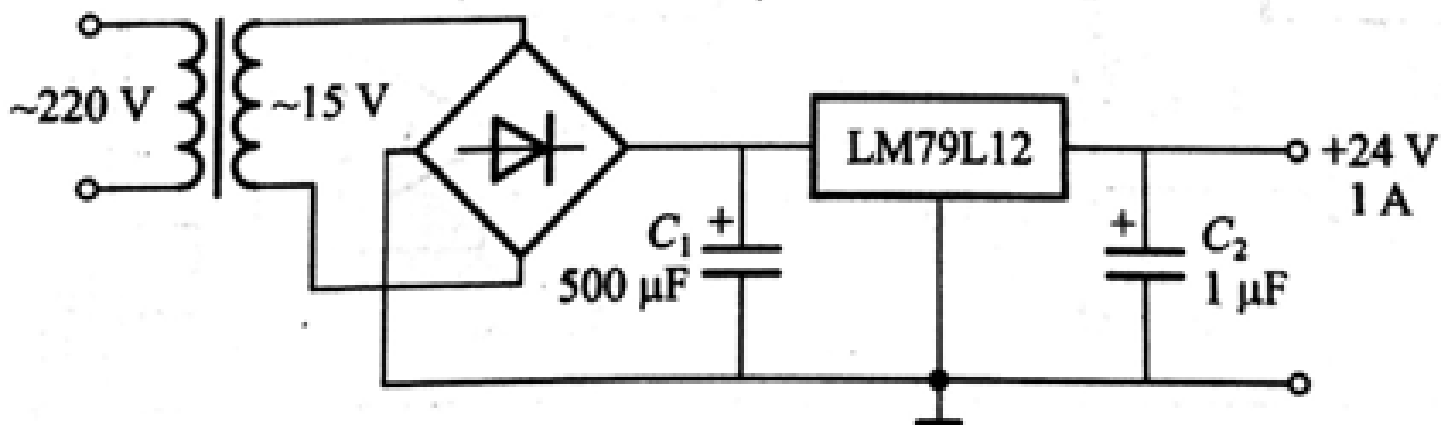
稳压电路的输入电阻 $R \approx (U_o + 3V) / I_o = 27\Omega$

滤波电路放电时间常数 $RC \geq (3 \sim 5)T/2$,

取 $RC = 2T = 0.04\text{ms}$ ，得 $C = 1481\mu\text{F}$ 。

2) 变压器副边的电压 U_2 过小。考虑(直流输出 U_o + 调整管 U_{CES})
以及电网电压波动： $U_2 > 1.1 * (24 + 3) / 1.2 \approx 25\text{V}$ 。

例9. 试分析下列两个直流稳压电源，指出其错误。



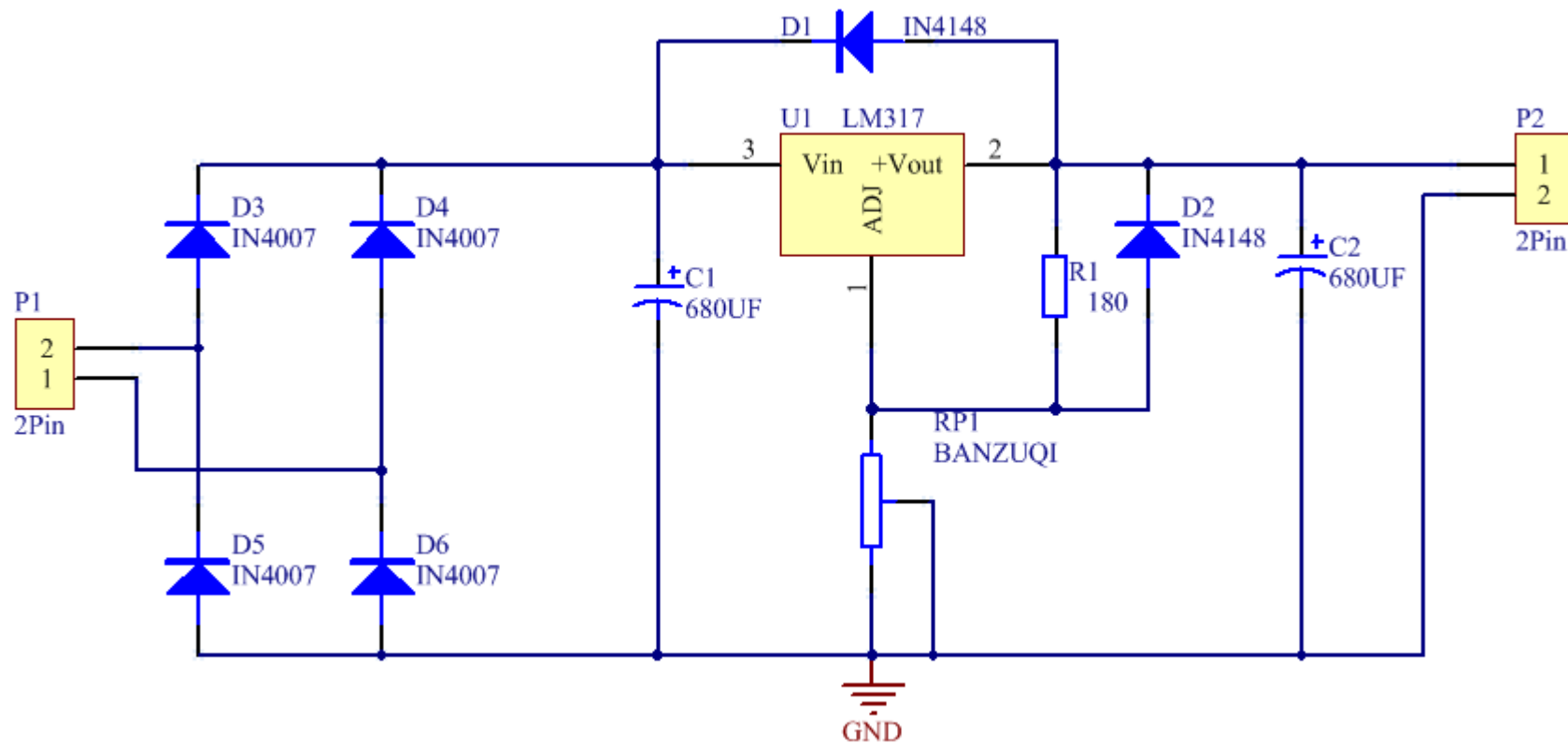
(b)

解答： (b) LM79L12应该换成LM7812。

电路有两处错误：

- 1) 三端集成稳压器79系列是 $-V_{cc}$ ，应该是78系列。
- 2) LM79L12输出电流只有 0.1 A 。

制作—基于LM317的12V可调直流稳压电源



12V可调直流稳压电源原理图



8.4 开关型稳压电源

- 为解决线性稳压电源功耗较大的缺点，研制了开关型稳压电源。
- 开关型稳压电源效率可达90%以上，造价低，体积小。
- 开关型稳压电源的缺点是纹波较大，用于小信号放大电路时，还应采用第二级稳压措施。

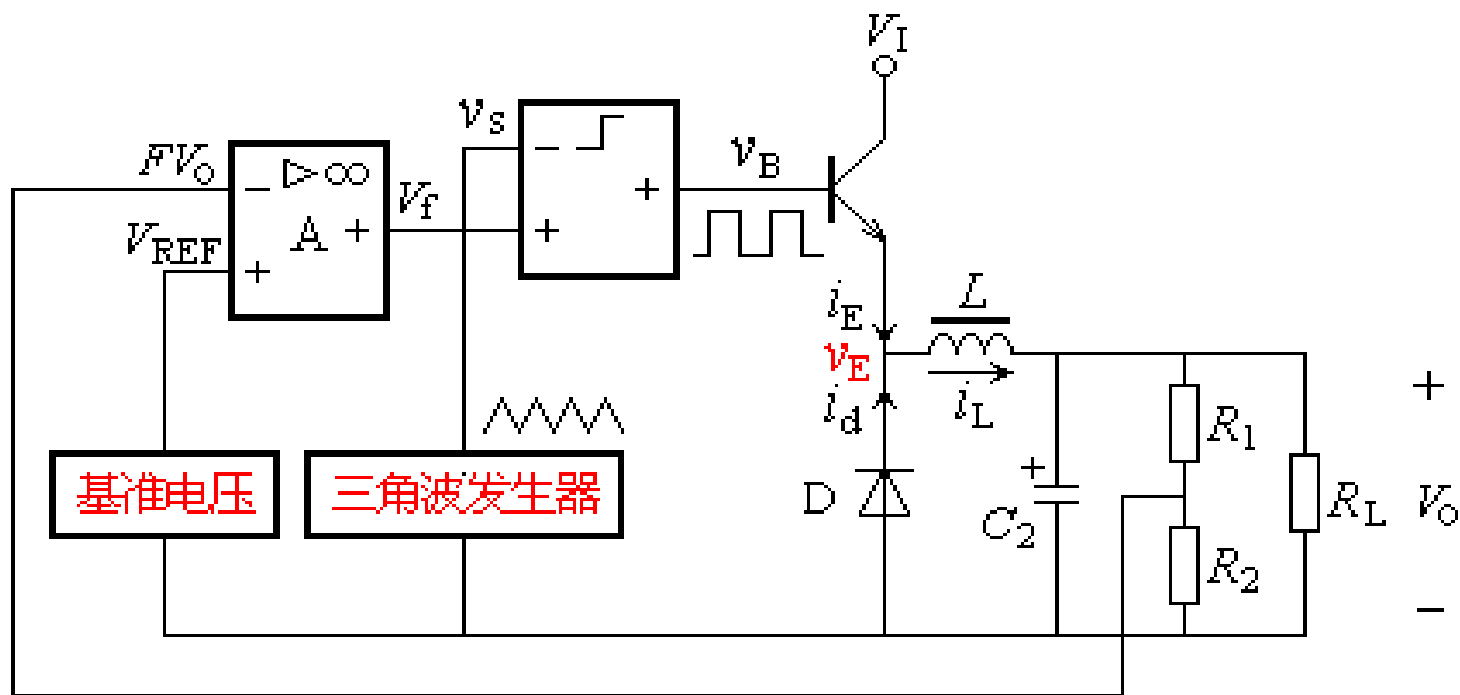
8.4.1 开关型稳压电路的工作原理

8.4.2 集成开关型稳压器

8.4.1 开关型稳压电路的结构原理

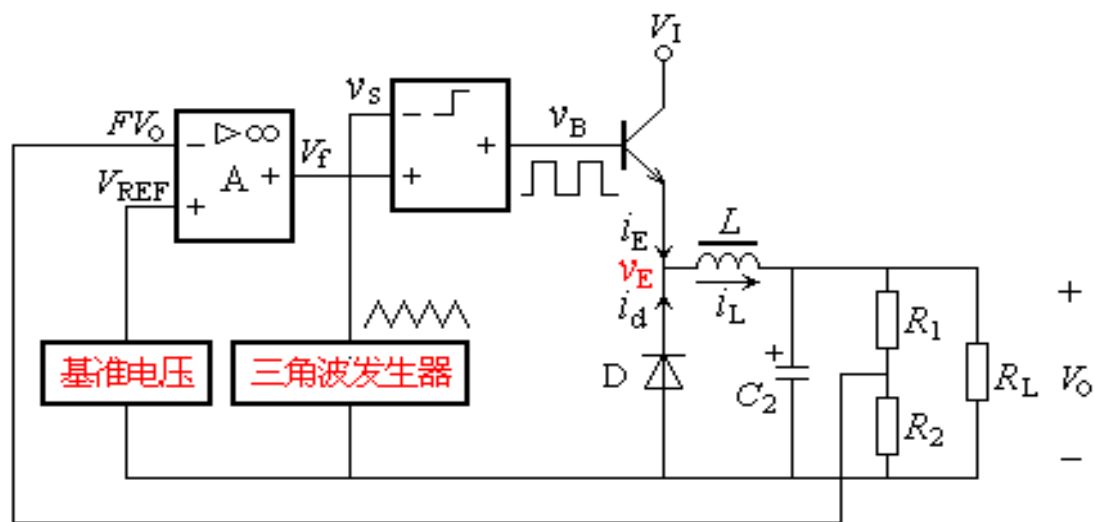
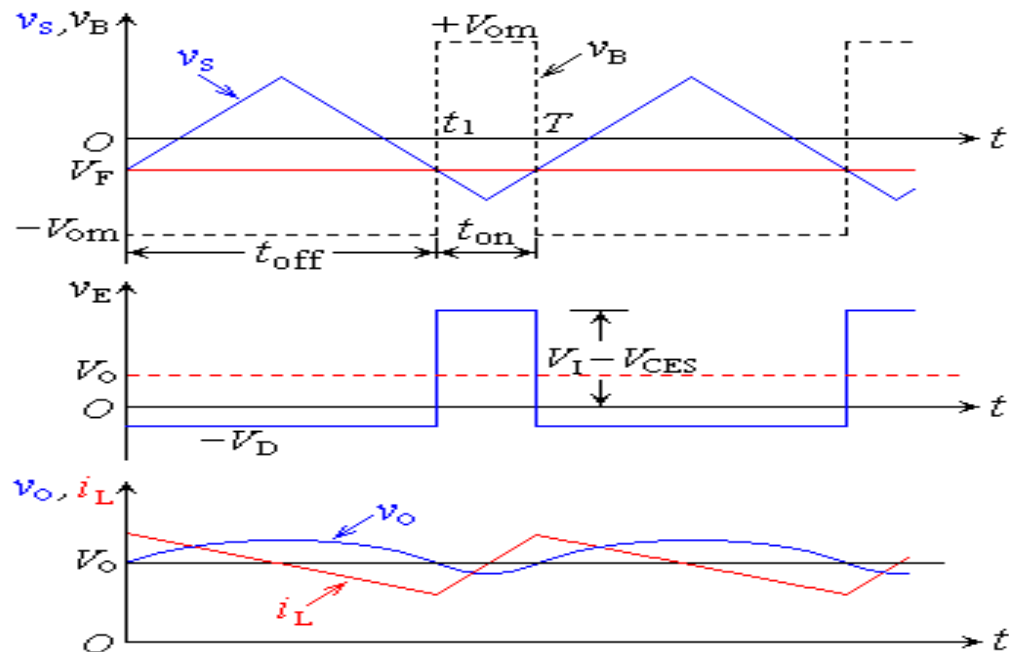
1、结构

开关型稳压电源由调整管、滤波电路、比较器、三角波发生器、比较放大器和基准源等部分构成。



2、原理

$$\begin{aligned}
 V_O &= \frac{1}{T} \int_0^{t_1} v_E dt + \frac{1}{T} \int_{t_1}^T v_E dt \\
 &= \frac{1}{T} (-V_D) t_{\text{off}} + \frac{1}{T} (V_I - V_{\text{CES}}) t_{\text{on}} \\
 &\approx V_I \frac{t_{\text{on}}}{T} = V_I q
 \end{aligned}$$



3、结论

- 1) 调整管工作在开关状态，电源效率大为提高；
- 2) 为得到直流输出，必须在输出端加滤波器；
- 3) 可通过脉冲宽度的控制方便地改变输出电压值；
- 4) 在许多场合可以省去电源变压器；
- 5) 开关频率较高可极大减小滤波电容和电感的体积。

8.4.2 集成开关型稳压器

1、开关稳压电源概述

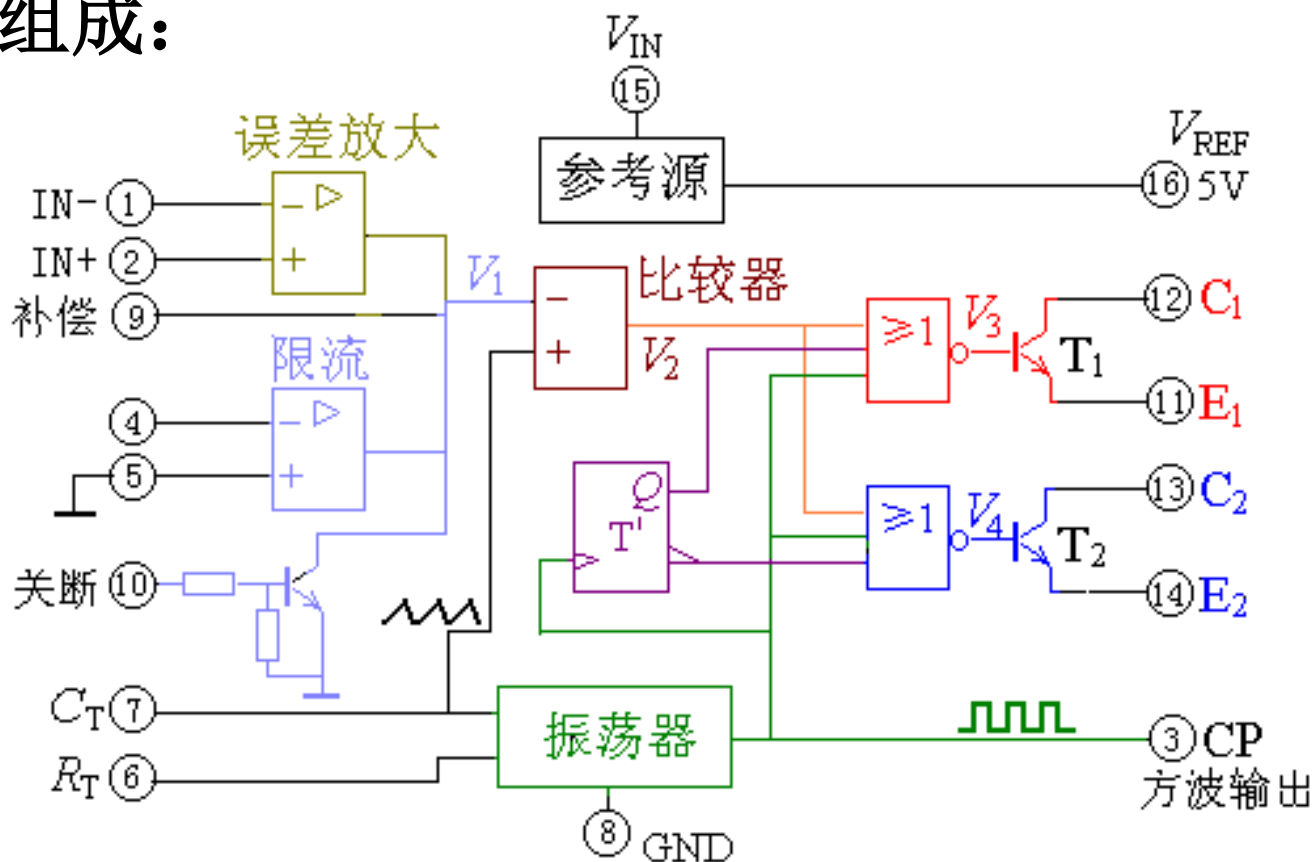
集成开关稳压器一般有两大大类型：

- 集成开关稳压器，包括调整管在内；
- 开关电源控制器，实际上是一个PWM控制器。

型号	电源范围/V	最大输出电流 /A	内部参考源 /V	输出级形式
TL494	7~40	0.2	5	推挽或单端
SG3524	8~35	0.1	5	推挽
SG3525	8~35	0.5	5	推挽
LM2575	3.5~35	1	1.23	

2、开关稳压电源控制器SG3524

1) 组成:

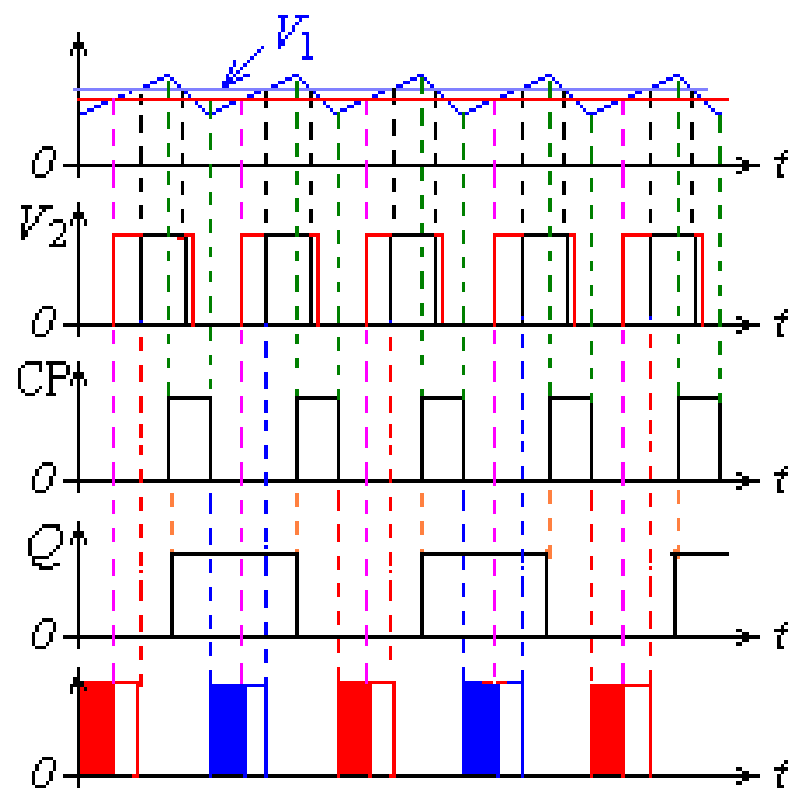
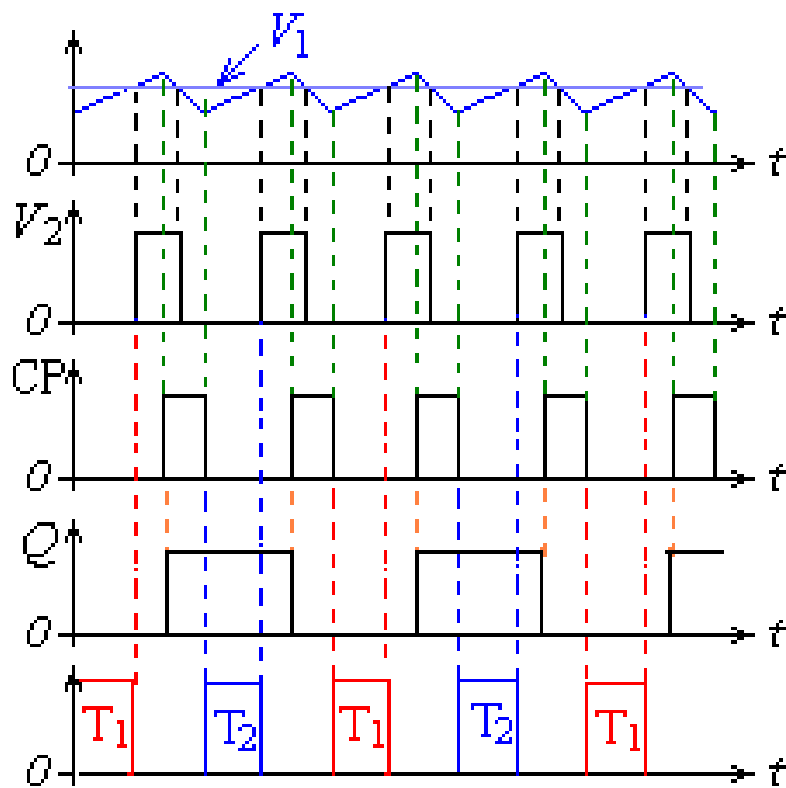


- 由误差放大器、限流保护环节、比较器、振荡器、触发器、输出逻辑控制电路和输出三极管等环节。

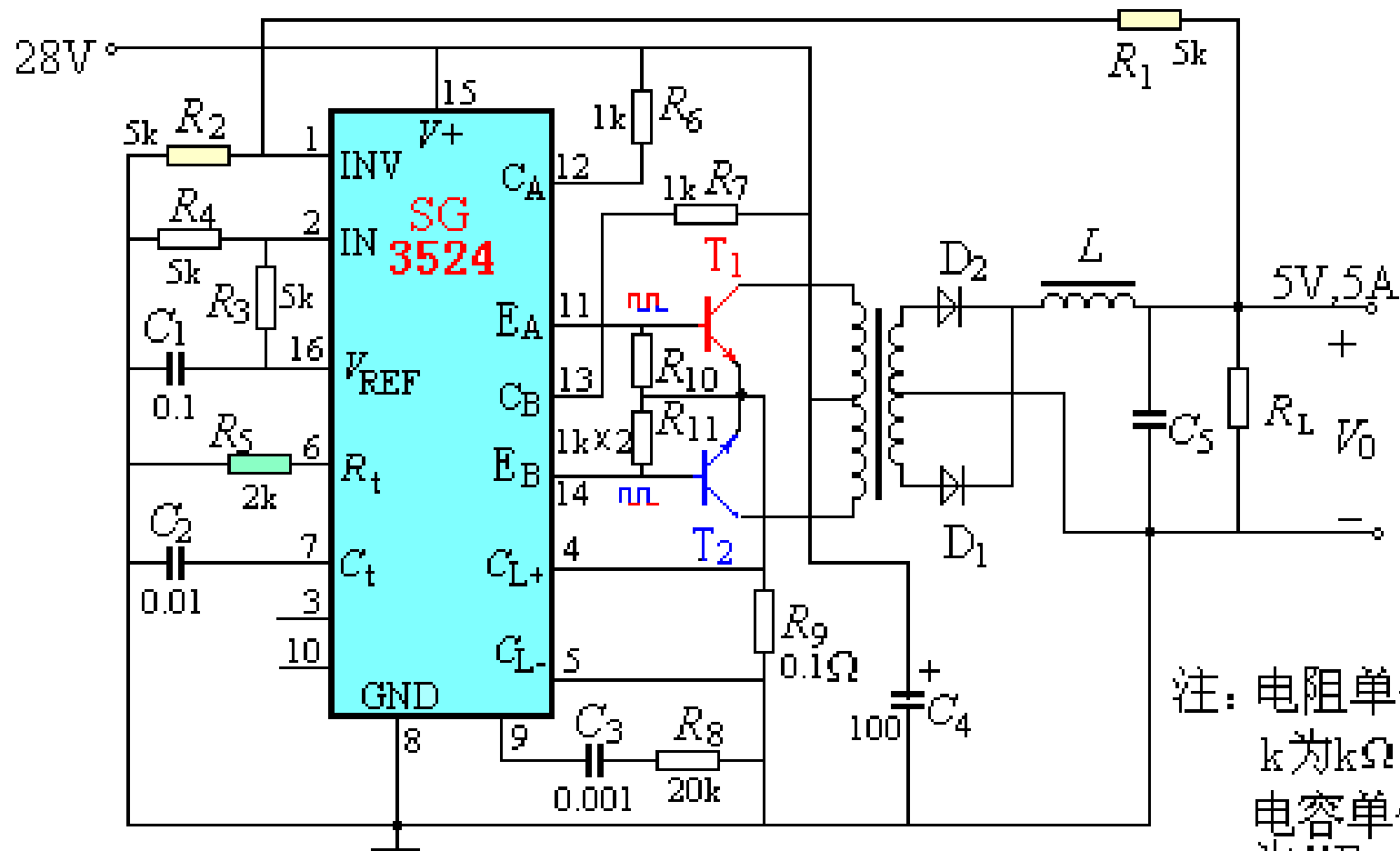
2、SG3524电路控制过程的波形

当 V_1 降低时， V_2 加宽， T_1 和 T_2 的宽度变窄，导通时间减小。

反之，当 V_1 增加时， T_1 和 T_2 的导通时间增加。



3、SG3524构成开关稳压电源的典型电路



注:电阻单位
k为 $k\Omega$;
电容单位
为 μF 。

完