

# 第8章 功率电子电路

8.1 低频功率放大电路

8.2 直流稳压电路

8.3 功率半导体器件和变流电路



# 功率电子电路的分类

功率电子电路一般可分为两种类型：

1. 将信号加以放大，使负载获得所需的信号功率，常称功率放大器；
2. 进行交直流的电能变换，向负载提供直流功率或交流功率，即直流稳压电源及变流电路。





## 8.1 低频功率放大电路

---

### 8.1.1 概述

### 8.1.2 基本功率放大电路

### 8.1.3 集成功率放大器举例





## 8.1.1 概述

对功放电路的要求:

- (1) 输出功率尽可能大, 即输出电流和输出电压都要尽可能大, 因此功率管通常工作在近于极限状态;
- (2) 非线性失真尽可能小, 通常用负反馈等措施来实现;
- (3) 效率要高。

$$\eta = \frac{P_o}{P_s} \times 100\%$$

集电极功耗要尽可能小

$$P_C = \frac{1}{T} \int_0^T u_{CE} i_c dt$$



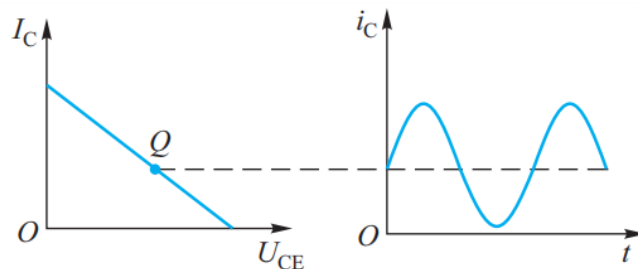
## 8.1.1 概述

晶体管的工作状态

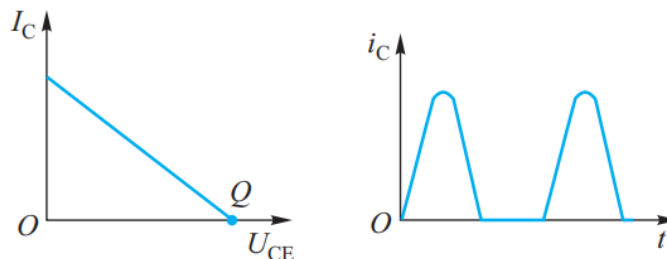
(a)甲类：波形好，但管耗大，效率低。

(b)乙类： $I_C$ 为零，管耗小，但波形严重失真。

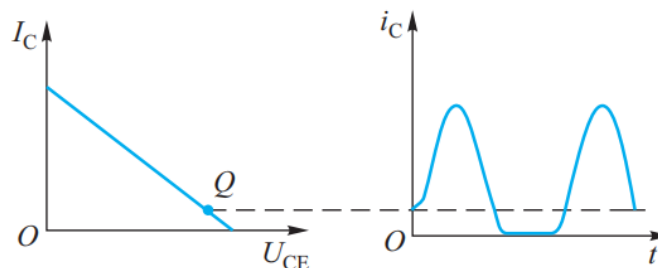
(c)甲乙类：介于甲、乙类之间，可消除交越失真，功放电路常用的工作状态。



(a)

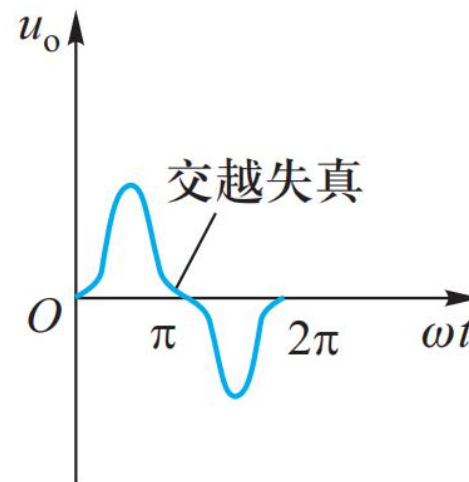
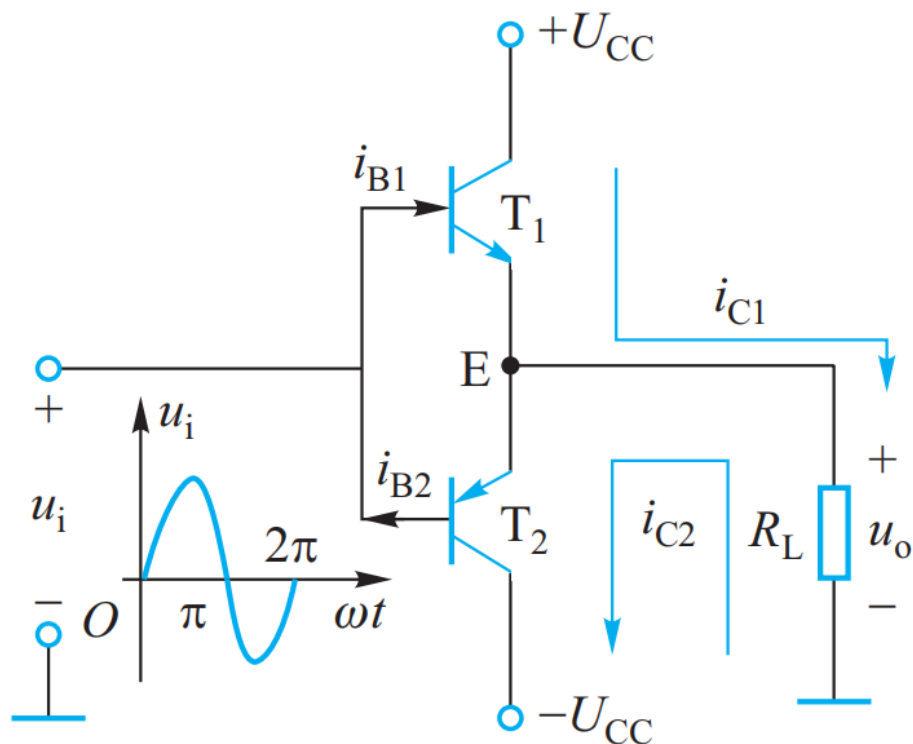


(b)



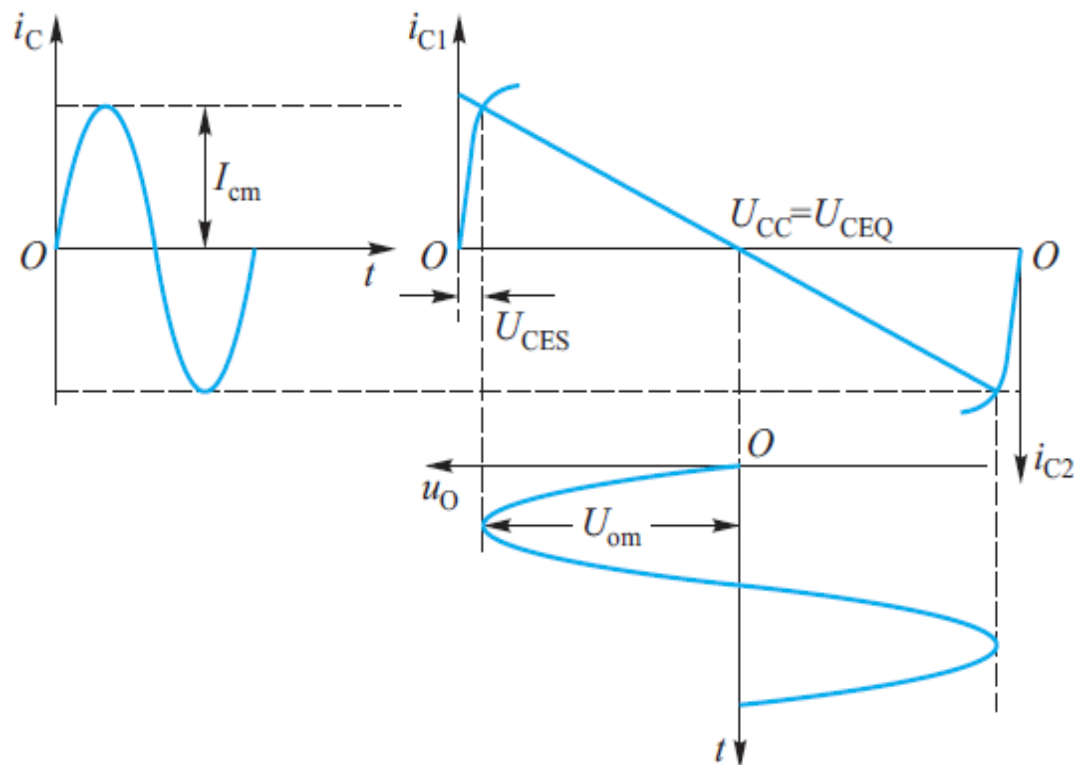
## 8.1.2 基本功率放大电路

### (1) OCL电路 (Output Capacitorless)



## 8.1.2 基本功率放大电路

### OCL电路工作波形图



## 8.1.2 基本功率放大电路

### OCL电路的最大输出功率和效率

- 最大输出功率 
$$P_{\text{omax}} = \frac{(U_{\text{om}} / \sqrt{2})^2}{R_L} = \frac{1}{2} \frac{(U_{CC} - U_{CES})^2}{R_L}$$
- 直流电源功率 
$$P_S = P_{S+} + P_{S-} = 2 \times \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi U_{CC} I_{cm} \sin \omega t d(\omega t)$$
$$= \frac{2}{\pi} \frac{U_{CC} (U_{CC} - U_{CES})}{R_L}$$
- 效率 
$$\eta_{\text{max}} = \frac{P_{\text{omax}}}{P_S} \times 100\% = \frac{\pi}{4} \times \frac{U_{CC} - U_{CES}}{U_{CC}} \times 100\%$$
- 若忽略饱和压降 
$$\eta_{\text{max}} = \frac{\pi}{4} \times 100\% = 78.5\%$$





## 8.1.2 基本功率放大电路

### OCL功率放大电路

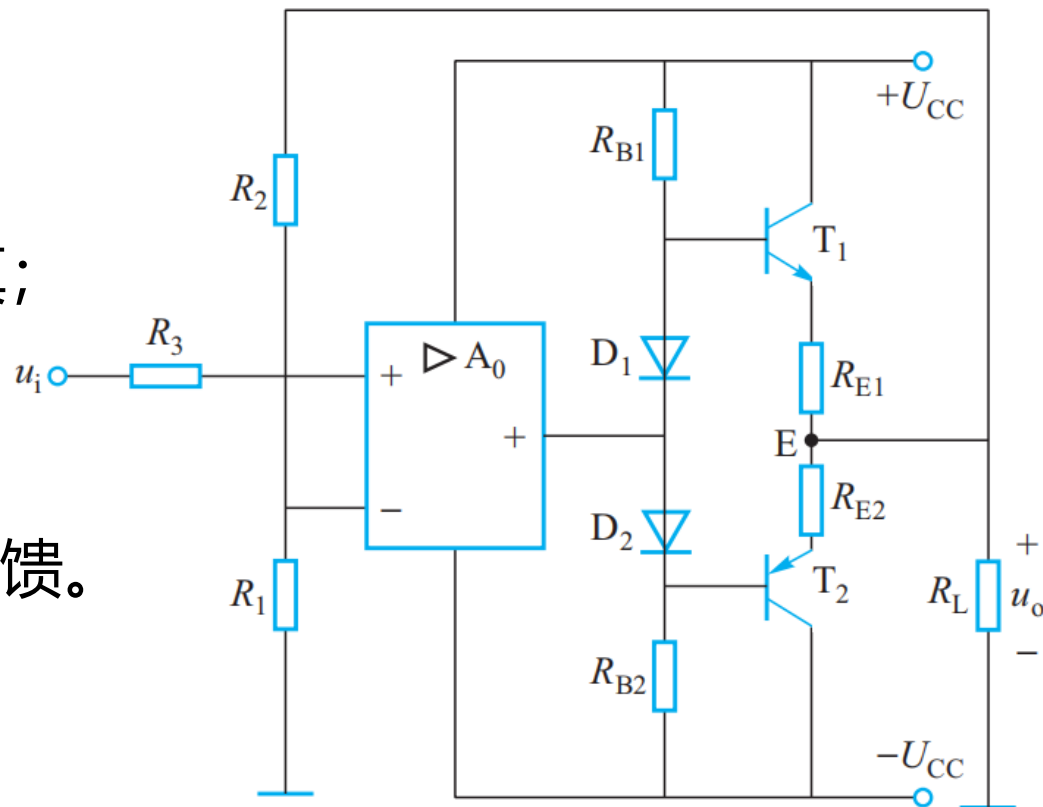
其中：

(1)  $D_1$ 、 $D_2$ 用来消除交越失真；

(2)  $R_1$ 、 $R_2$ 引入电压串联负反馈。

电压放大倍数：

$$A_f \approx 1 + \frac{R_2}{R_1}$$



## 8.1.2 基本功率放大电路

### (2) OTL电路 (Output Transformerless)

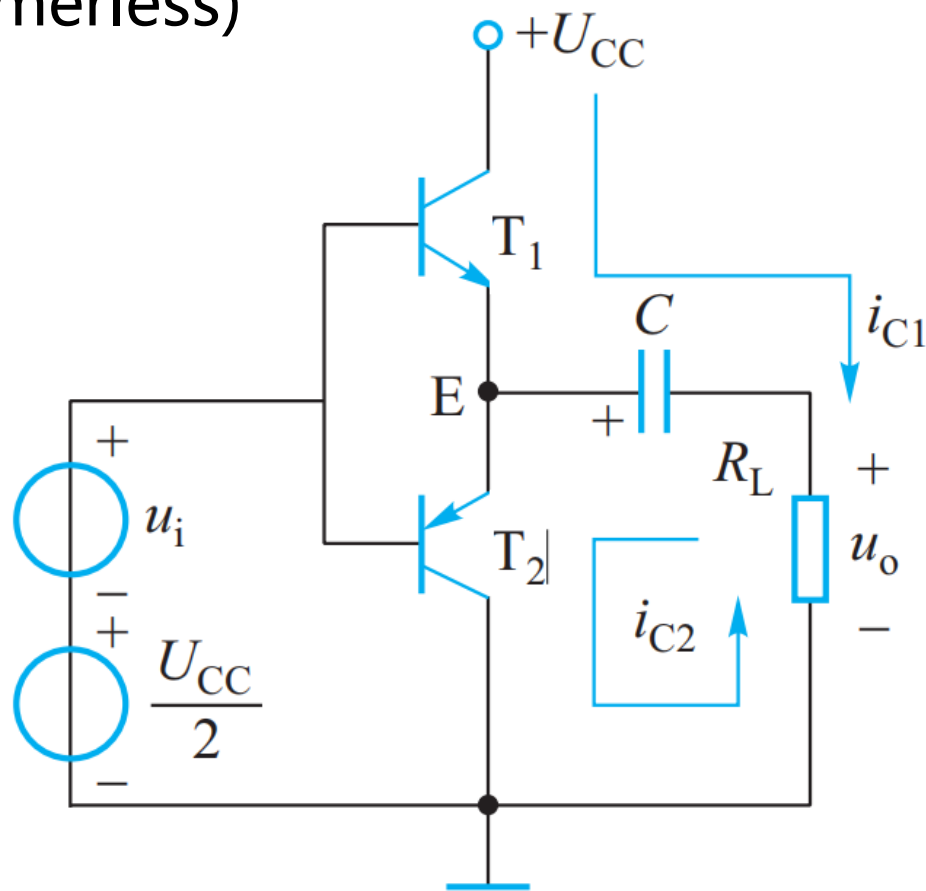
特点:

(1) 单电源供电, 电容C起到负电源的作用;

(2) 只能放大交流信号, 不能放大直流信号;

(3) 静态时基极电位:

$$U_B = U_{CC} / 2。$$



## 8.1.2 基本功率放大电路

### OTL电路的最大输出功率和效率

- 最大输出功率 
$$P_{\text{omax}} = \frac{\left(\frac{U_{CC}/2 - 2U_{CES}\right)^2}{\sqrt{2} R_L} = \frac{1}{8} \frac{(U_{CC} - 2U_{CES})^2}{R_L}$$
- 直流电源功率 
$$P_S = \frac{1}{\pi} U_{CC} I_{cm} = \frac{1}{\pi} \frac{U_{CC} \left(\frac{1}{2} U_{CC} - U_{CES}\right)}{R_L}$$
$$= \frac{1}{2\pi} \frac{U_{CC} (U_{CC} - 2U_{CES})}{R_L}$$
- 效率 
$$\eta_{\text{max}} = \frac{P_{\text{omax}}}{P_S} \times 100\% = \frac{\pi}{4} \times \frac{U_{CC} - U_{CES}}{U_{CC}} \times 100\% \approx 78.5\%$$



## 8.1.2 基本功率放大电路

### OTL功率放大电路

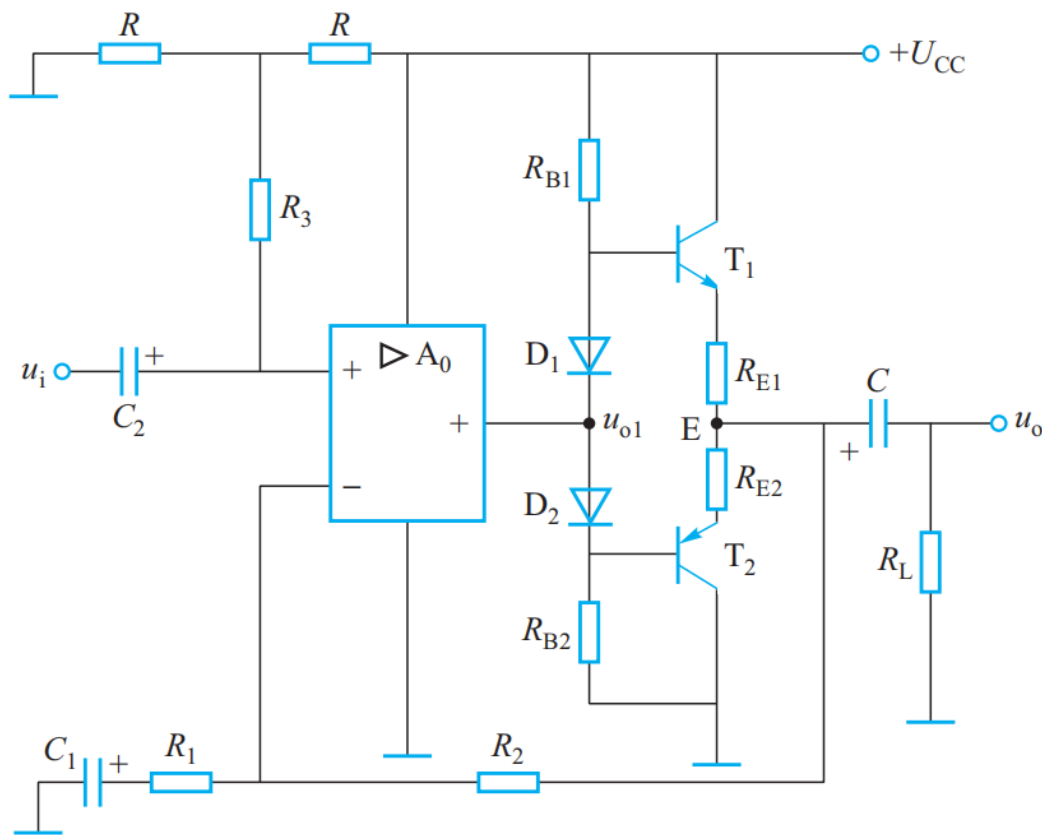
其中：

(1)  $C_1$ 、 $C_2$ 为隔直电容；

$R_3$ 用来增加输入电阻；

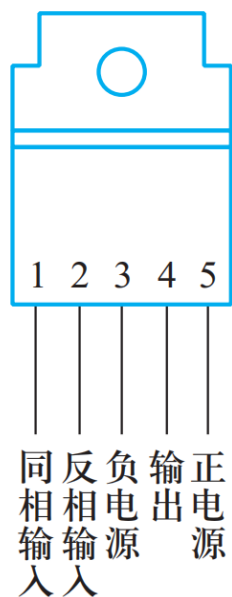
(2) 动态时，电路的电压  
放大倍数：

$$A_u \approx 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

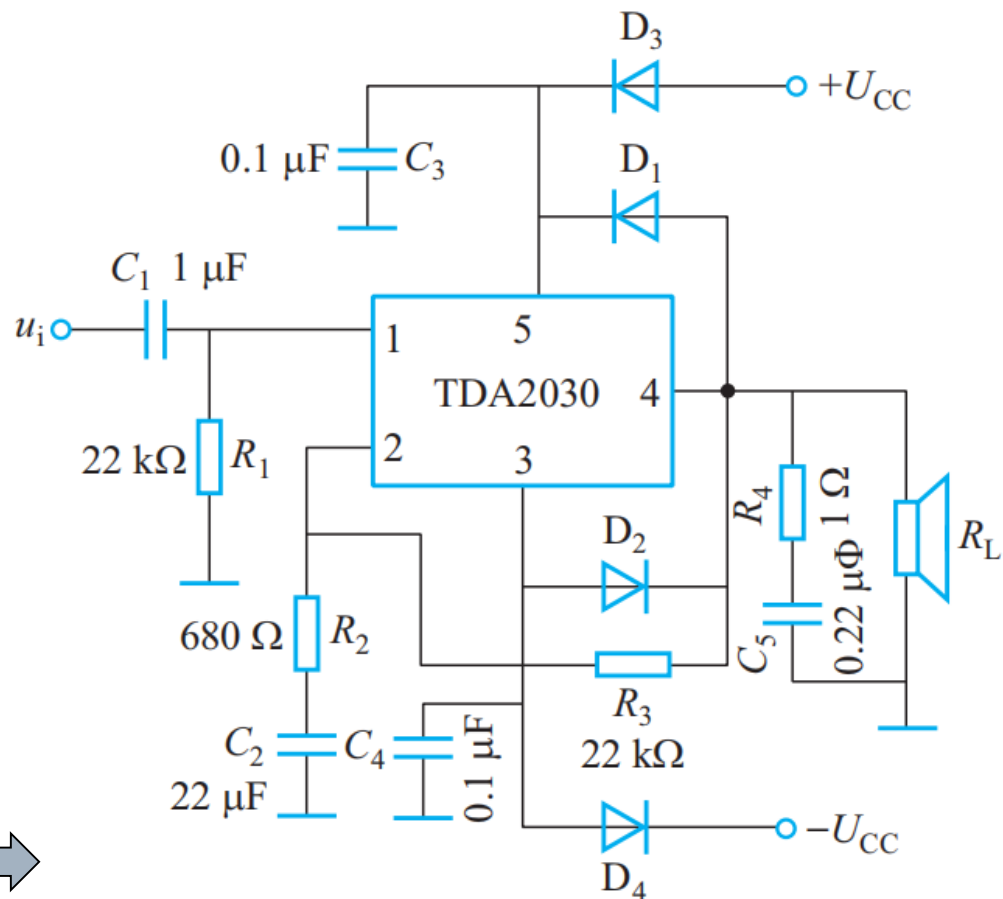


## 8.1.3 集成功率放大器举例

TDA2030管脚图

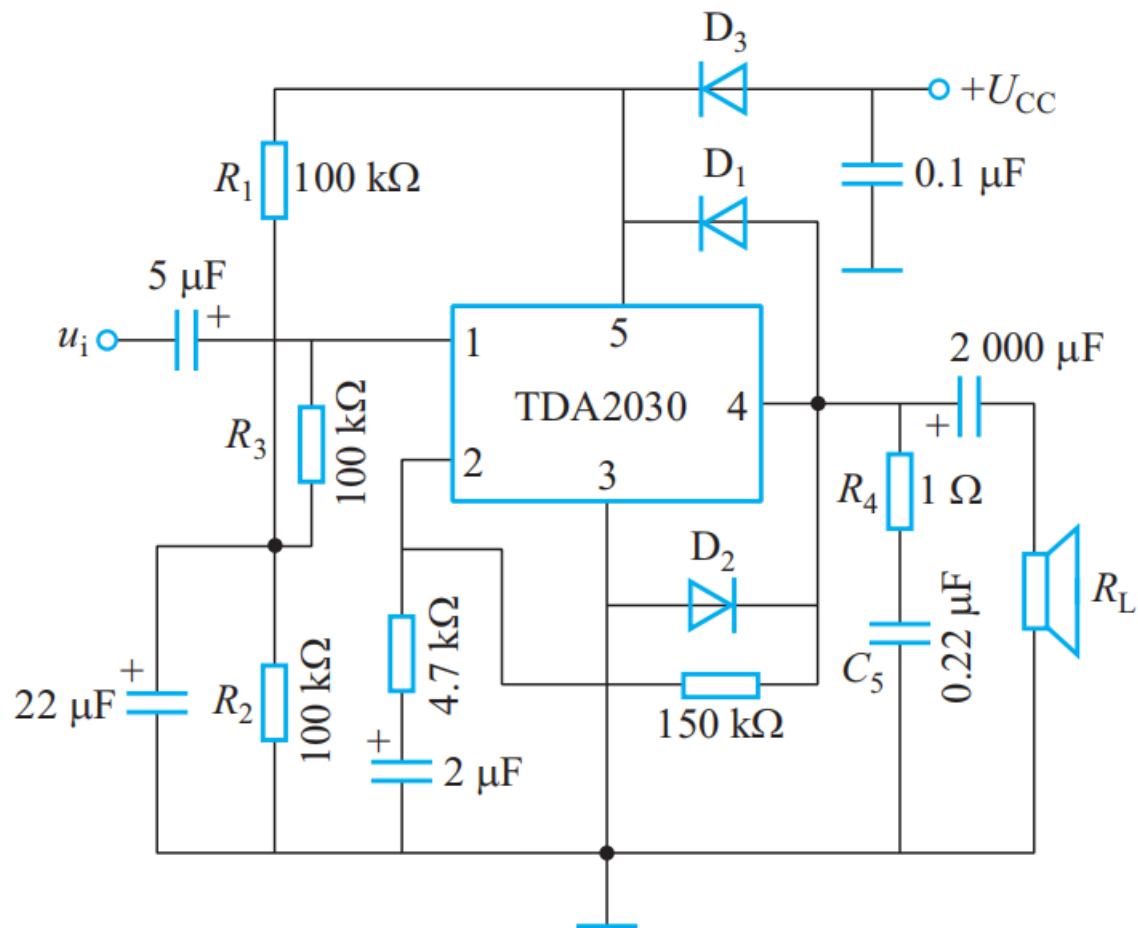


TDA2030接成OCL电路 →



## 8.1.2 基本功率放大电路

### TDA2030接成OTL电路





## 8.2 直流稳压电源

---

8.2.1 单相桥式整流电路

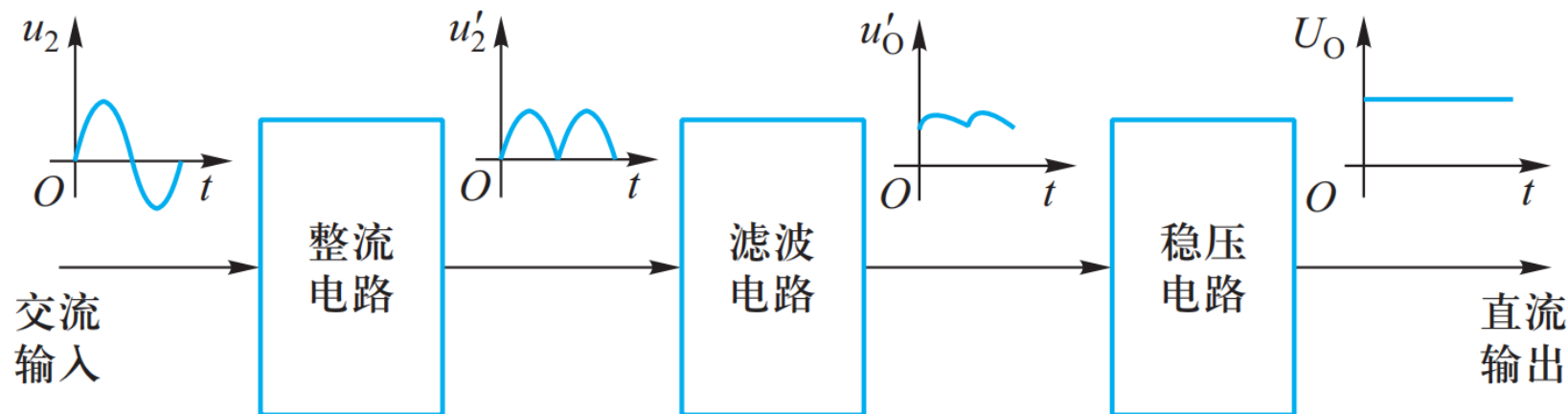
8.2.2 滤波电路

8.2.3 串联型稳压电路

8.2.4 开关型稳压电路



# 直流稳压电路的原理框图



- 整流电路作用：将交流电变换成直流电。
- 滤波电路作用：将整流后脉动的单向电压、电流变换为比较平滑的电压、电流。
- 稳压电路作用：使输出直流电压稳定。

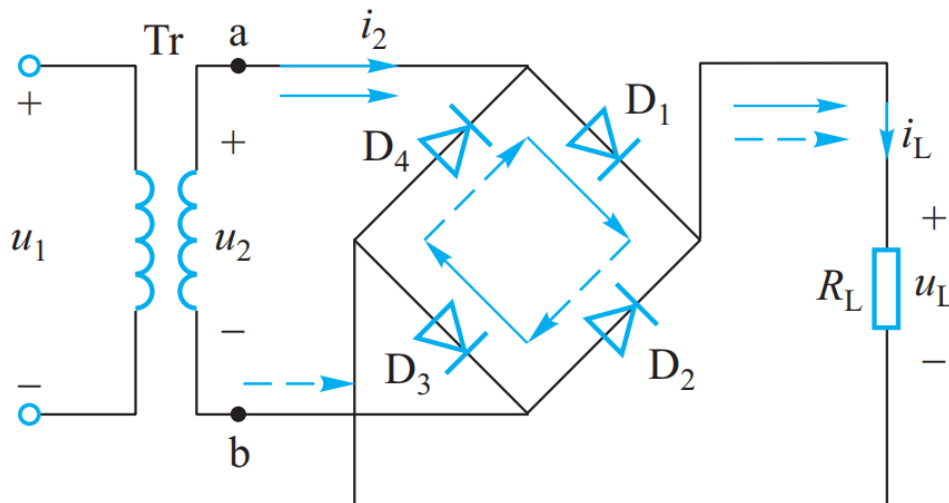




## 8.2.1 单相桥式整流电路

(1)  $U_2$  在正半周时,  $D_1$ 、 $D_3$  导通而  $D_2$ 、 $D_4$  截止, 电流如图中实线所示;

(2)  $U_2$  在负半周时,  $D_2$ 、 $D_4$  导通而  $D_1$ 、 $D_3$  截止, 电流如图中虚线所示。



由此,  $u_2$  是交变的, 而  $u_L$  是大小变化而方向不变。



## 8.2.1 单相桥式整流电路

单相脉动电压的平均值

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

$$= \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 \approx 0.9U_2$$

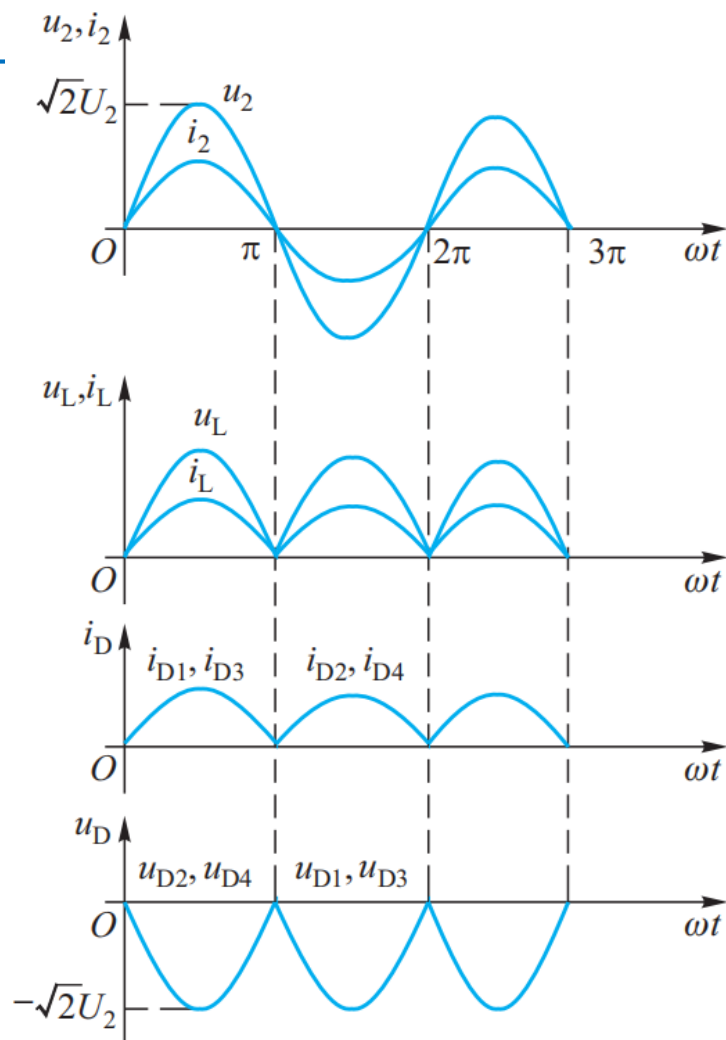
负载电流的平均值

$$I_L = \frac{U_L}{R_L} = 0.9 \frac{U_2}{R_L}$$

每个二极管的电流平均值

$$I_D = \frac{1}{2} I_L = 0.45 \frac{U_R}{R_L}$$

最大反向电压  $U_{DRM} = \sqrt{2}U_2$



单相桥式整流电路的波形图



## 例题

[例8.2.1] 某一负载需要18V, 1A的直流电源供电, 如采用单相桥式整流电路, 试计算:

- (1) 变压器二次侧的电压和电流有效值及变压器容量;
- (2) 流过整流二极管的平均电流和承受的反向电压最大值。

解: (1) 变压器二次侧的电压和电流有效值

$$U_2 = U_L / 0.9 = 1.11U_L = 1.11 \times 18 = 20(V)$$

$$I_2 = 1.11I_L = 1.11 \times 1 = 1.11(A)$$

$$\text{变压器容量 } S = U_2 I_2 = 20 \times 1.11 = 22.2(VA)$$

(2) 流过每个二极管的电流平均值

$$I_D = I_L / 2 = 0.5 \times 1 = 0.5(A)$$

每个二极管所承受的最大反向电压

$$U_{DRM} = \sqrt{2}U_2 = \sqrt{2} \times 20 = 28(V)$$



## 例 题

[例8.2.2] 有一额定电压为24V，阻值为1KΩ的直流负载，  
采用单相桥式整流电路供电，求：

- (1) 变压器付绕组的电压和电流值 ( $U_2, I_2$ ) ；
- (2)  $U_{DRM}$  并选择二极管的型号。

解： (1) 变压器付绕组的电压和电流分别为

$$U_2 = U_L / 0.9 = 1.11U_L = 1.11 \times 24 = 26.6(V)$$

$$I_2 = 1.11I_L = 1.11 \times 24 = 26.6(mA)$$

$$(2) \quad U_{DRM} = \sqrt{2}U_2 = \sqrt{2} \times 26.6 = 27.5(V)$$

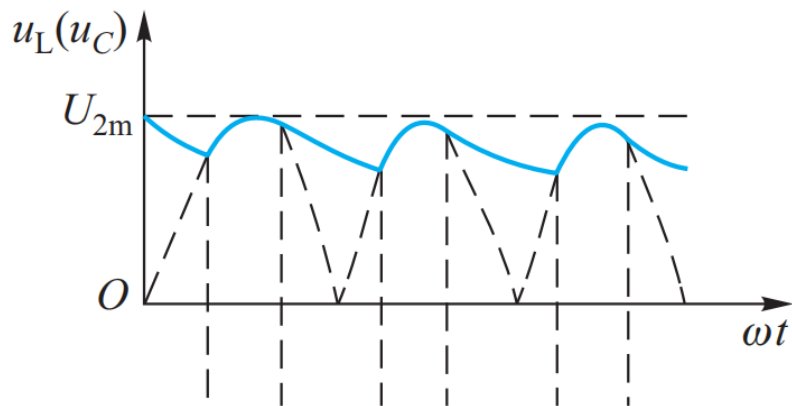
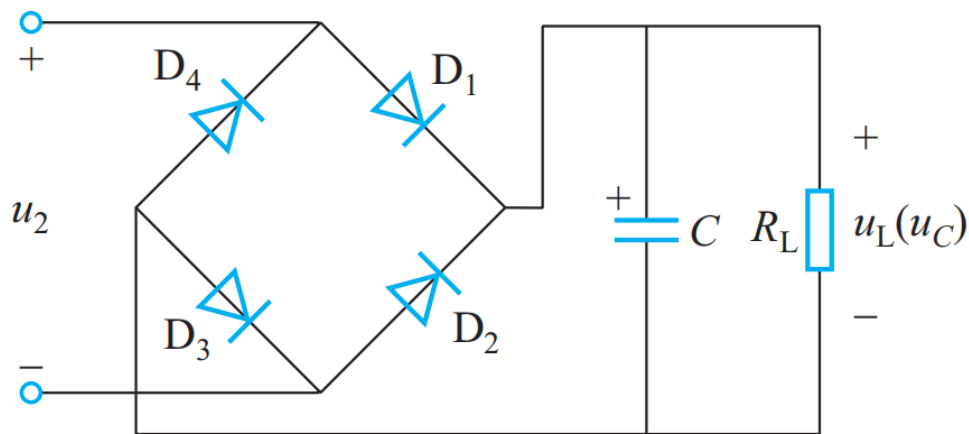
$$I_D = I_L / 2 = 0.5 \times 24 = 12(mA)$$

查附录，二极管可选用2CP11，最大整流电流为100mA，  
最高反向工作电压为50V。



## 8.2.2 滤波电路

### 电容滤波



当  $u_2$  为正半周且  $u_2 > u_c$  时,  $D_1$ 、 $D_3$  导通,  $C$  充电, 达到最大值  $U_{2m}$  后,  $u_2$  开始下降, 电容放电, 当  $u_c > u_2$ ,  $D_1$ 、 $D_3$  截止,  $u_c$  按指数规律下降; 当  $u_2$  为负半周时, 情况类似。

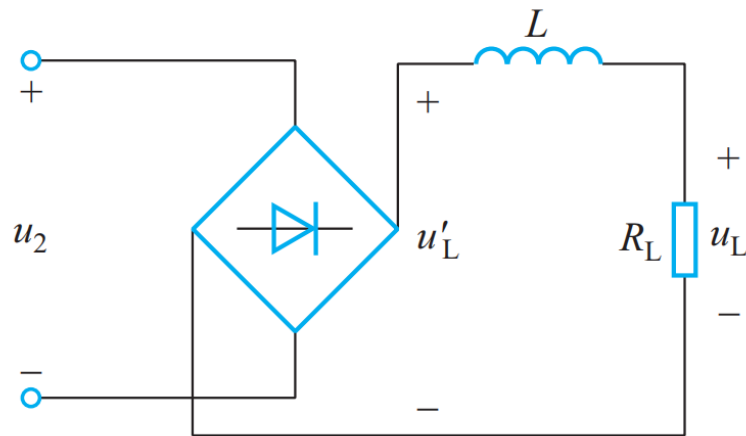
由图可见, 滤波后,  $u_L$  脉动减少, 平均值提高。  $U_L \approx 1.2U_2$



## 8.2.2 滤波电路

### 其它形式的滤波电路

- 电容滤波的特点是电路简单，适用于输出电压高、负载电流小且负载变化不大的场合。
- 除电容滤波外，还有电感滤波、RC滤波、LC滤波和 $\pi$ 型滤波等多种形式。
- 电感滤波的特点是带负载能力强，适用于大电流或负载变化大的场合，但电感体积大且笨重。



电感滤波





## 8.2.3 串联型稳压电路

稳压电路的主要质量指标：

1) 稳压系数（电压调整率） $S_V$ ：

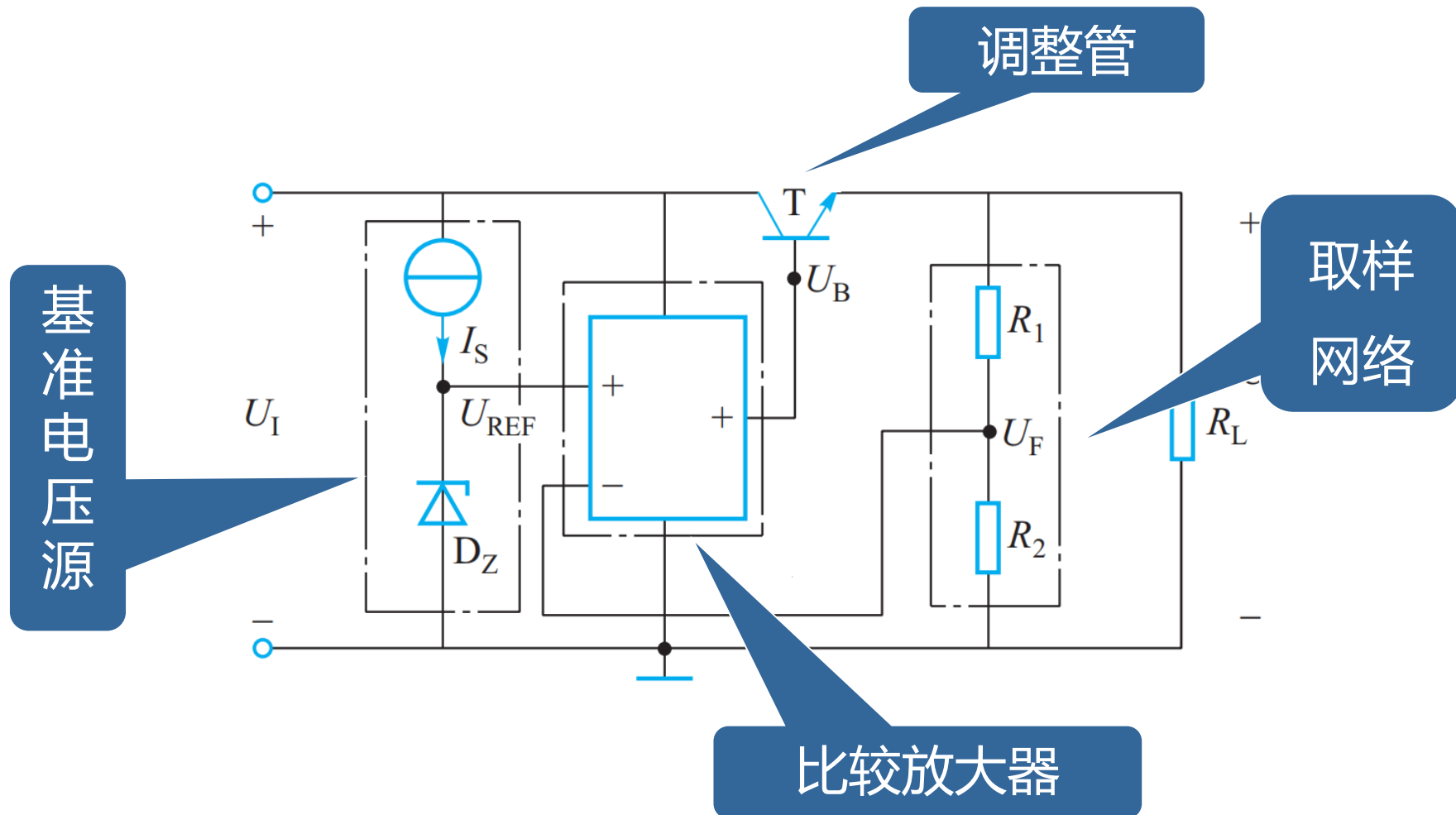
$$S_V = \frac{\Delta U_o / U_o}{\Delta U_I / U_I} \bigg|_{R_L = \text{常数}}$$

2) 输出电阻（动态电阻） $R_o$ ：

$$R_o = \frac{\Delta U_o}{\Delta I_o} \bigg|_{U_I = \text{常数}}$$



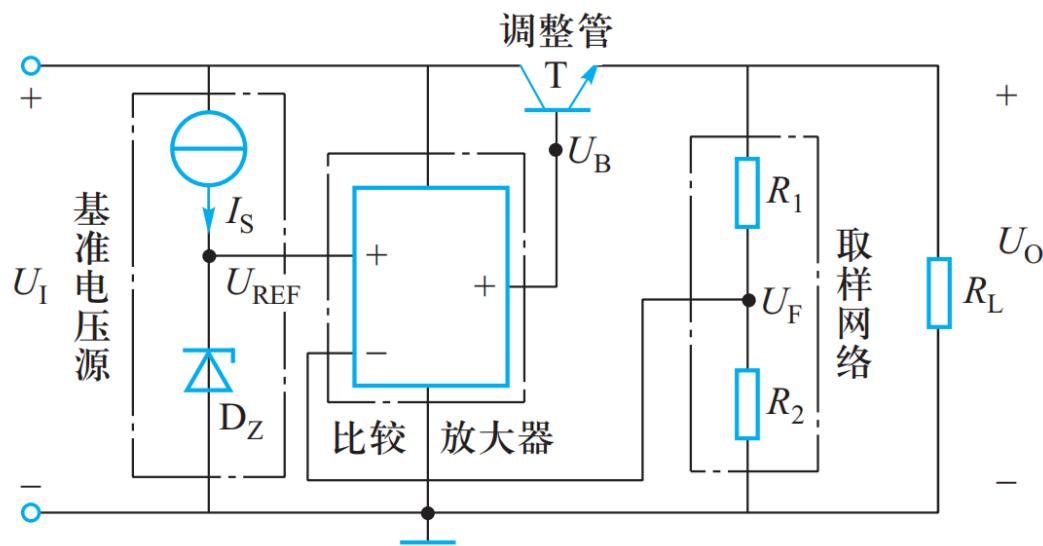
## 8.2.3 串联型稳压电路





## 8.2.3 串联型稳压电路

### 1. 串联型稳压电路的工作原理



$$U_O \uparrow \rightarrow U_F \uparrow \rightarrow U_B \downarrow \rightarrow I_B \downarrow \rightarrow I_C \downarrow$$

$$U_O \downarrow \rightarrow U_F \downarrow \rightarrow U_B \uparrow \rightarrow I_B \uparrow \rightarrow I_C \uparrow$$

$$U_F = U_{REF} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_O$$

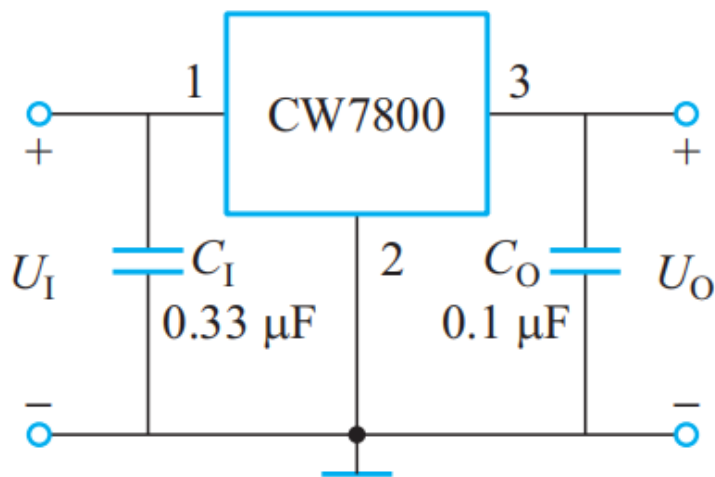
$$U_O = \frac{R_1 + R_2}{R_2} U_{REF}$$



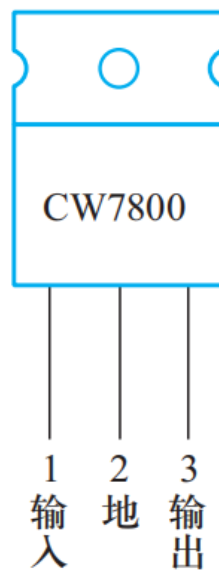
## 8.2.3 串联型稳压电路

### 2. 集成稳压电路

#### 固定输出三端集成稳压器CW7800系列



固定输出的接法



引脚图

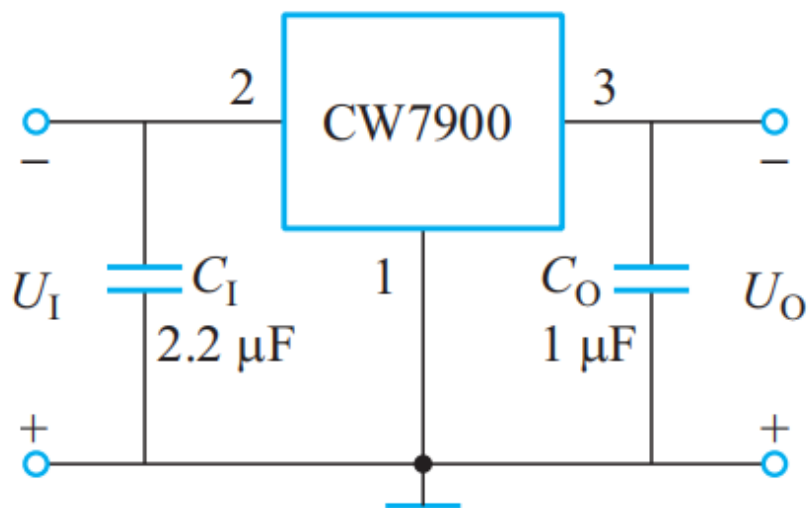
该系列输出正电压，其中符号“00”用数字代替，表示输出电压值。



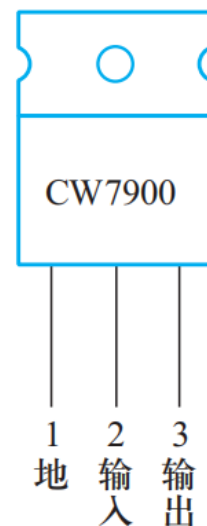
## 8.2.3 串联型稳压电路

### 2. 集成稳压电路

#### 固定输出三端集成稳压器CW7900系列



固定输出的接法



引脚图

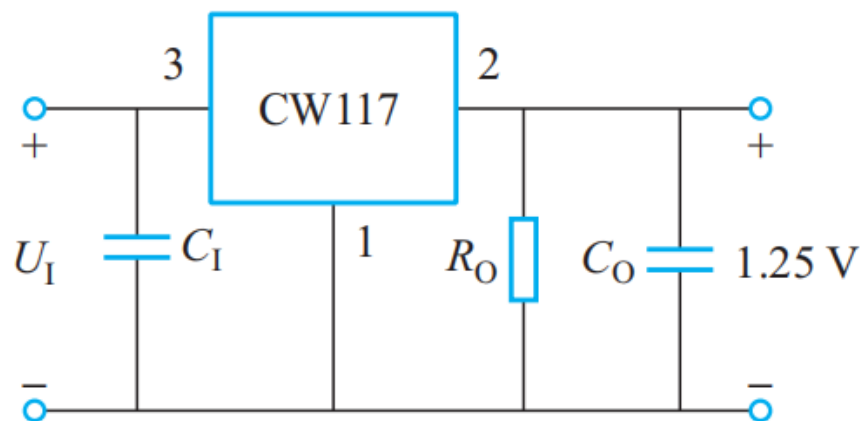
该系列输出负电压，其中符号“00”用数字代替，表示输出电压值。



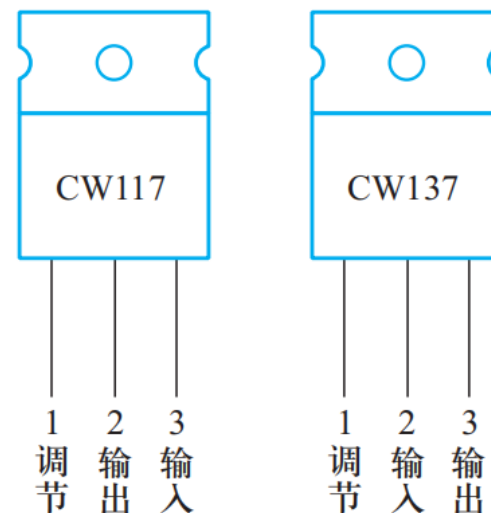
## 8.2.3 串联型稳压电路

### 2. 集成稳压电路

#### 可调式三端集成稳压器CW117和CW137



1.25V固定输出的接法



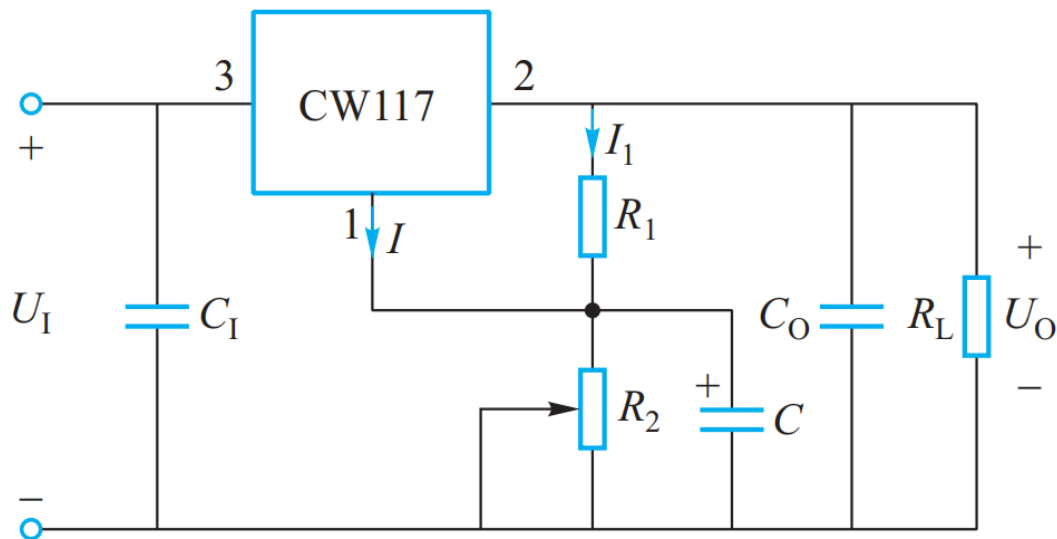
引脚图

该系列的输出端和调节端之间的电压为1.25V，并在1.25~37V的范围内连续可调。



## 8.2.3 串联型稳压电路

### CW117输出电压可调的基本电路

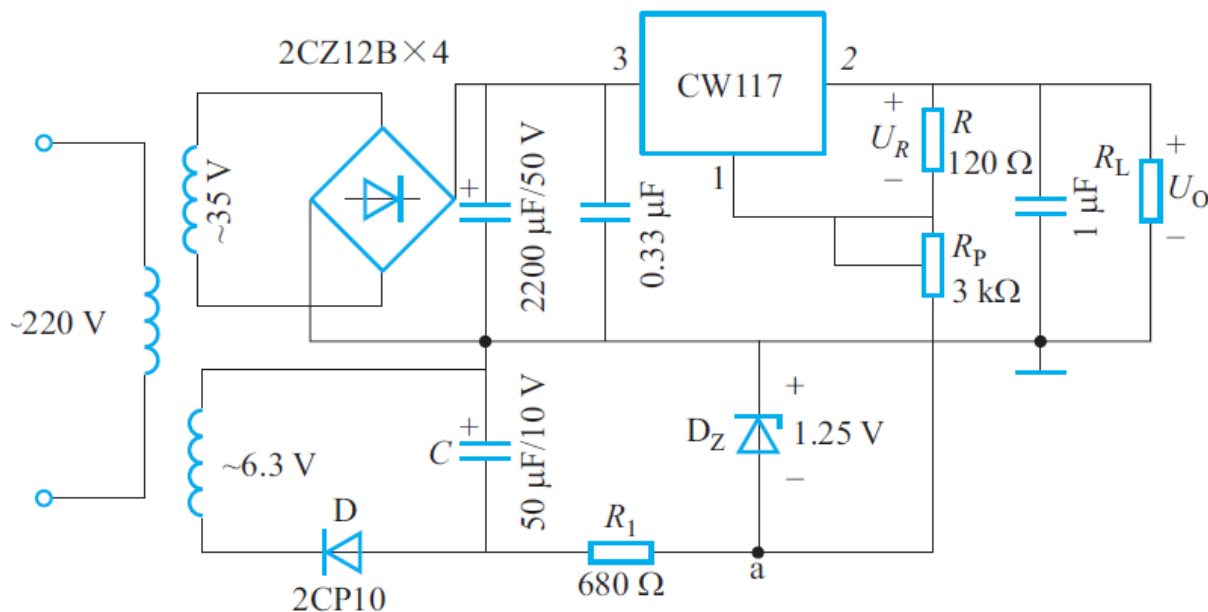


$$\because U_{R1} = U_{21} = 1.25\text{V}, \text{ 且 } I_1 \gg I$$

所以输出电压 
$$U_O \approx U_{R1} + I_1 R_2 = 1.25 \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$



## [例题8.2.2]



解：由图可知  $U_a = -1.25V, U_R = 1.25V$

$$\text{所以 } U_O = U_R \left(1 + \frac{R_p}{R}\right) + U_a = 1.25 \left(1 + \frac{R_p}{R}\right) - 1.25 = 1.25 \frac{R_p}{R}$$

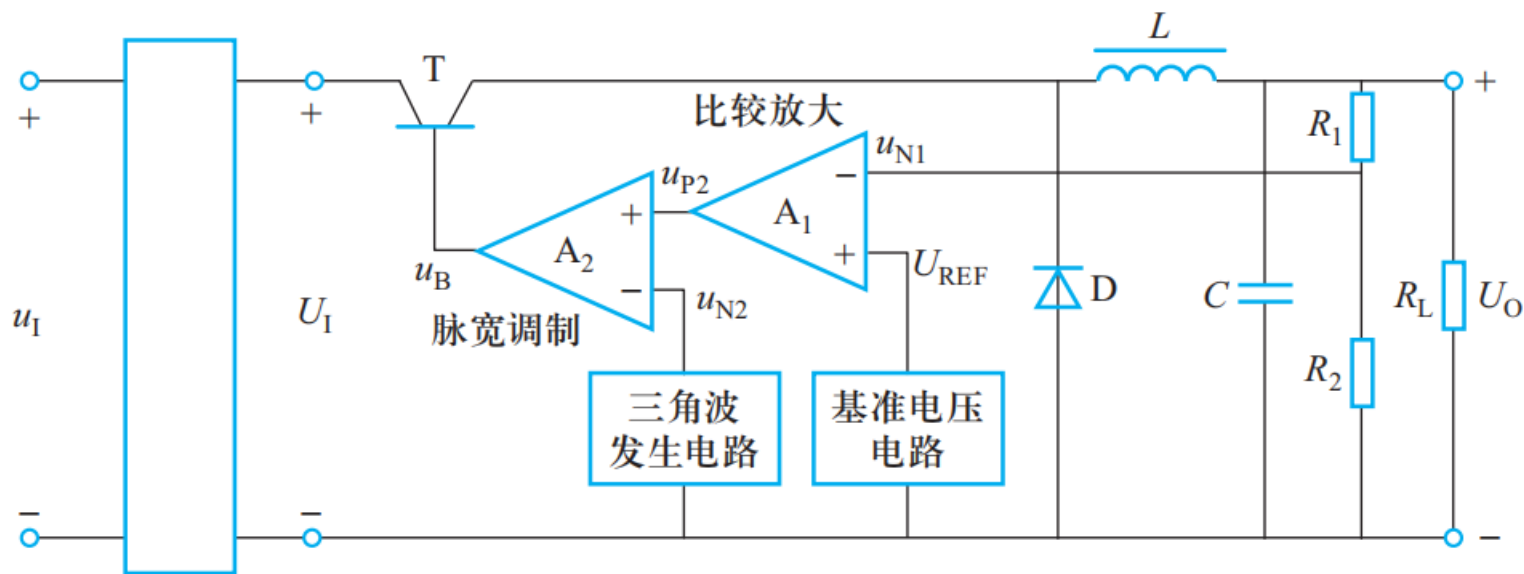
故  $R_p = 0$  时,  $U_O = 0V$ ;  $R_p$  调到最大值时,  $U_O \approx 30V$ 。



## 8.2.4 开关型稳压电路

按调制方式：脉宽调制型、脉频调制型及混合调制型；

按功率管和负载的连接方式：串联型和并联型。



串联脉宽调制开关型稳压电路的结构框图

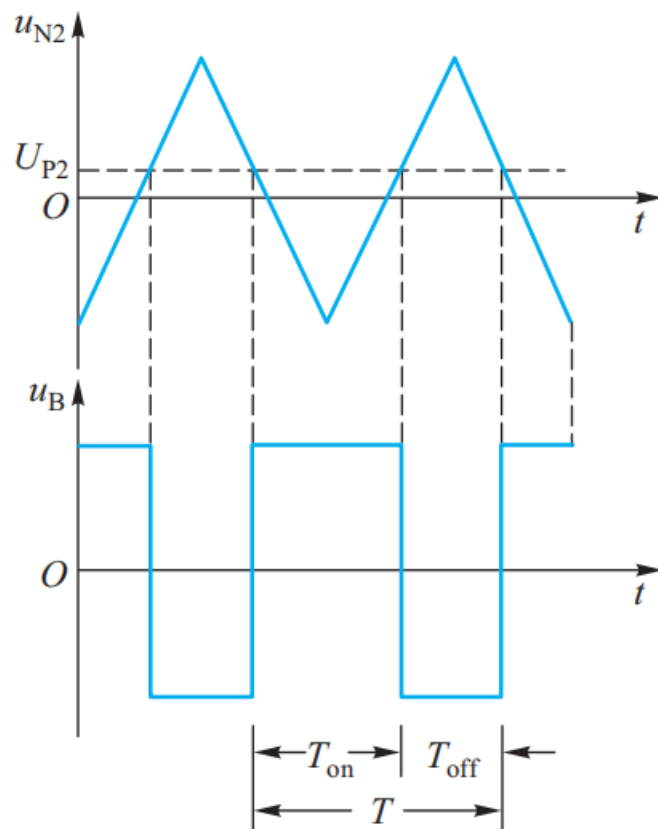


## 8.2.4 开关型稳压电路

### 工作原理

当  $U_O$  升高时,  $U_{P2}$  下降, 从而使  $U_B$  和  $T_{on}$  减小、 $T_{off}$  增大, 占空比变小。这样使调整管 T 的截止时间  $T_{off}$  变长, 故输出电压随之减小, 使  $U_O$  趋于不变。

占空比  $q = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}}$







## 8.3 功率半导体器件和变流电路

---

8.3.1 功率半导体器件

8.3.2 可控整流电路

8.3.3 交流调压和变频电路

8.3.4 直流调压电路



## 8.3.1 功率半导体器件

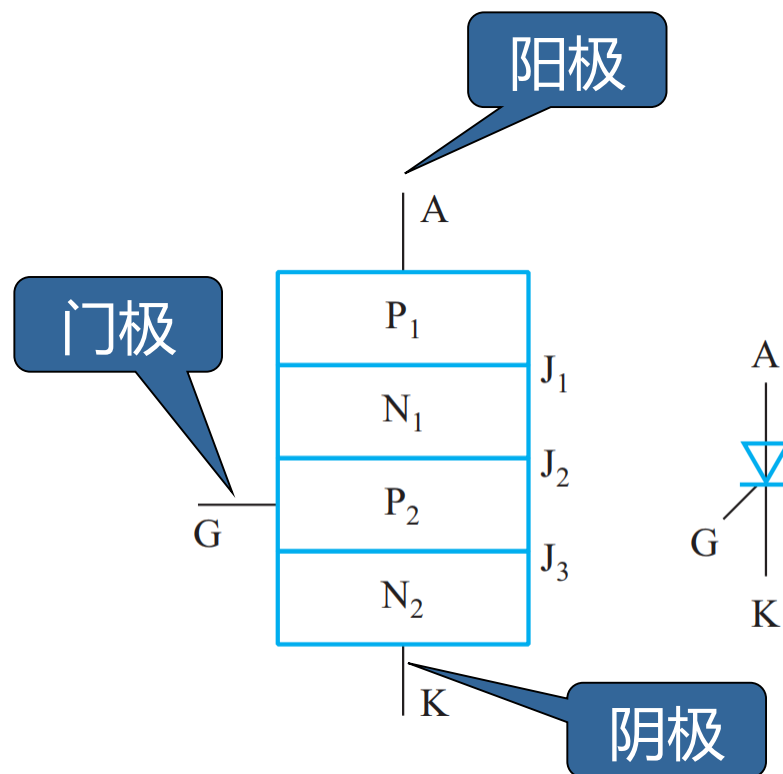
### 1. 晶闸管（可控硅）

晶闸管的导通条件：

- 1)  $U_{AK} > 0$ ;
- 2) 门极和阴极之间加一定大小的正向触发电压。

晶闸管维持导通必须：

$$I_A > I_H \text{ (维持电流) 。}$$



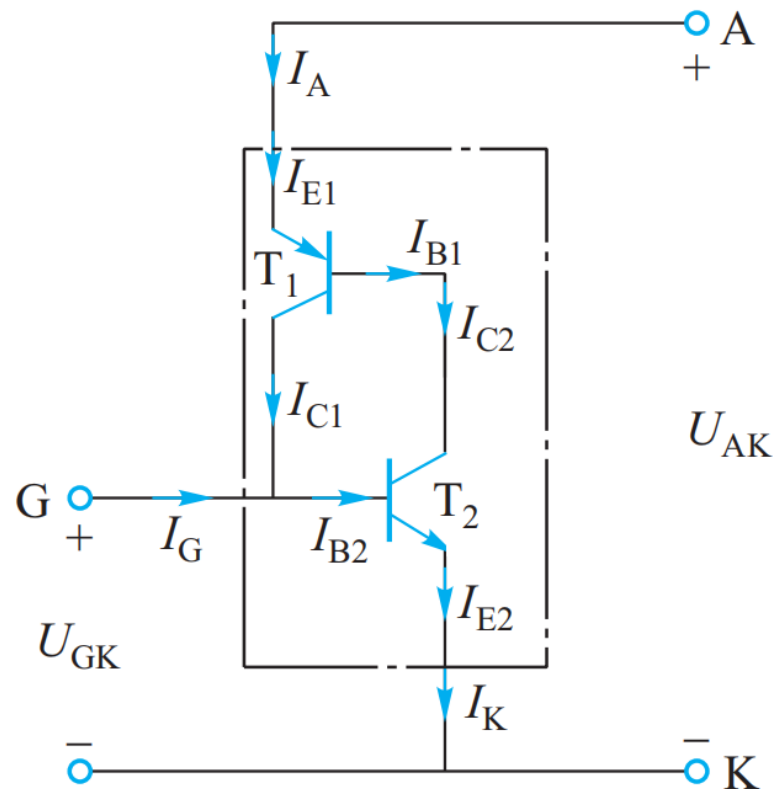
结构示意图及图形符号



## 8.3.1 功率半导体器件

工作原理：

- 1) 当  $U_{AK} > 0$ 、 $U_{GK} \leq 0$  时，由于  $T_2$  反偏，晶闸管处于正向阻断状态；
- 2) 当  $U_{AK} > 0$ 、 $U_{GK} > 0$  时，产生电流  $I_G$ ，又  $I_{C2} = \beta_2 I_{B2}$ ， $I_{C2} = I_{B1}$ ， $I_{C1} = \beta_1 \beta_2 I_{B2}$ ，...使  $T_1$ 、 $T_2$  迅速饱和导通，即晶闸管全导通；此时若去掉  $U_{GK}$ ，晶闸管依然导通。



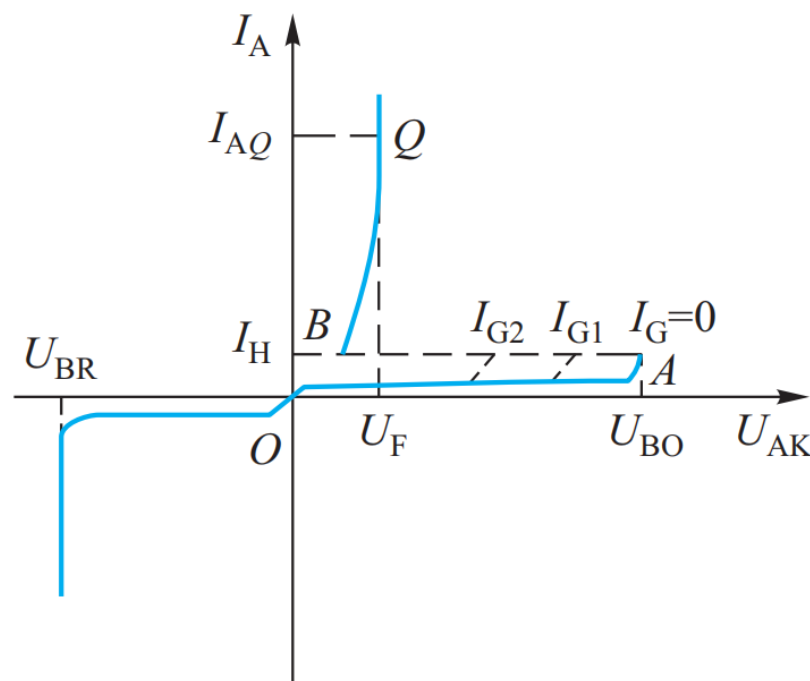
晶闸管的等效模型



## 8.3.1 功率半导体器件

### 晶闸管的特性参数

- (1) 正向转折电压  $U_{BO}$ ;
- (2) 正向阻断峰值电压  $U_{DRM}$ ;
- (3) 反向转折电压  $U_{BR}$ ;
- (4) 反向阻断峰值电压  $U_{RRM}$ ;
- (5) 正向平均管压降  $U_F$ ;
- (6) 额定正向平均电流  $I_F$ ;
- (7) 维持电流  $I_H$ 。



晶闸管的伏安特性

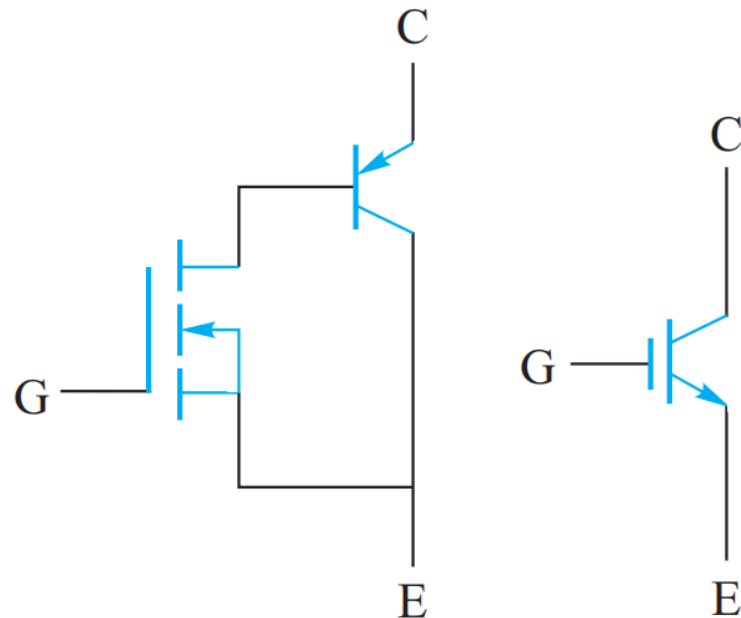


## 8.3.1 功率半导体器件

### 2. 绝缘门极双极晶体管 (IGBT)

晶闸管属半控型器件，因为它只能控制其导通，而不能控制其关断；

IGBT属全控型器件，通过在门极加正向和反向电压来控制管子的导通和截止。

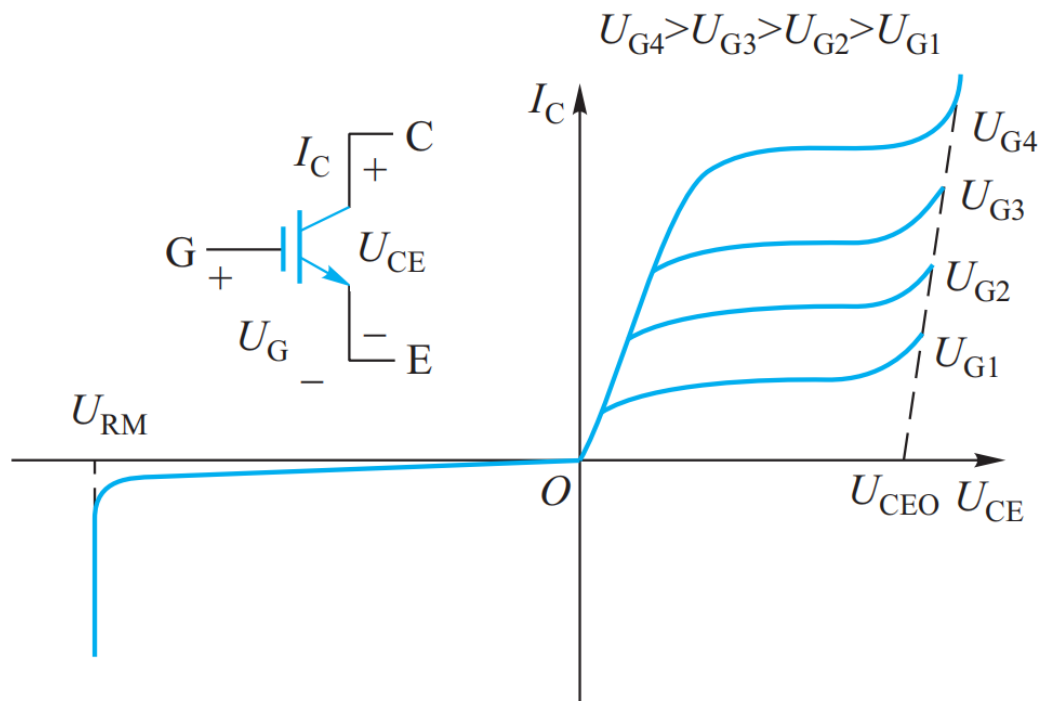


原理示意图及图形符号

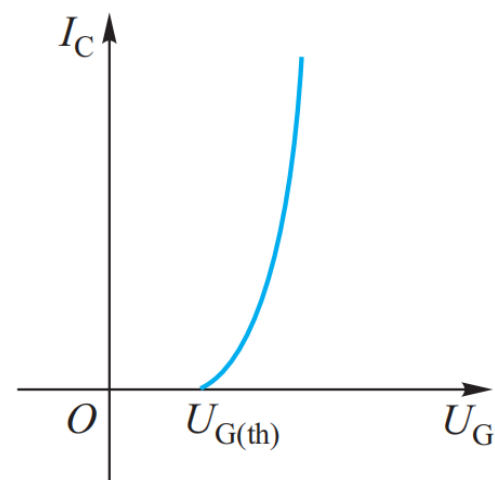


## 8.3.1 功率半导体器件

### IGBT的特性



(a) 输出特性



(b) 转移特性

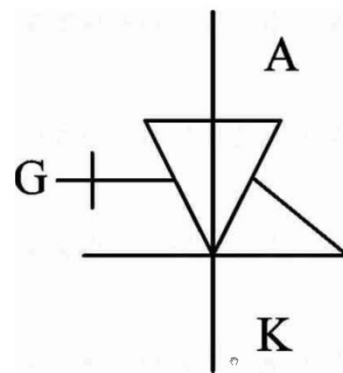


## 8.3.1 功率半导体器件

### 3. 集成门极换流晶闸管 (IGCT)

IGCT 是20世纪90年代开发的全控型半导体功率器件，正向导通时其机理与普通晶闸管相同；关断时，它能使阳极电流快速地由阴极转移至门极（故称为门极换流晶闸管），瞬间地从导通状态转为阻断状态。

特点：主回路接线简单、门极控制方便、大电流、高电压、工作频率高、开关速度快、开关能耗小等。比IGBT更适用于高电压、大容量的场合。



IGCT的电路符号



## 8.3.2 可控整流电路

➤ 变流电路的四种基本类型：

整流 (AC – DC) 、 逆变 (DC – AC) 、

直流调压 (DC - DC) 、 交流调压及变频 (AC - AC)

➤ 可控整流电路的功能是将交流电能转换成电压大小可调的直流电能。

➤ 可控整流电路的结构形式：

单相半波、单相桥式、三相半波、三相桥式。

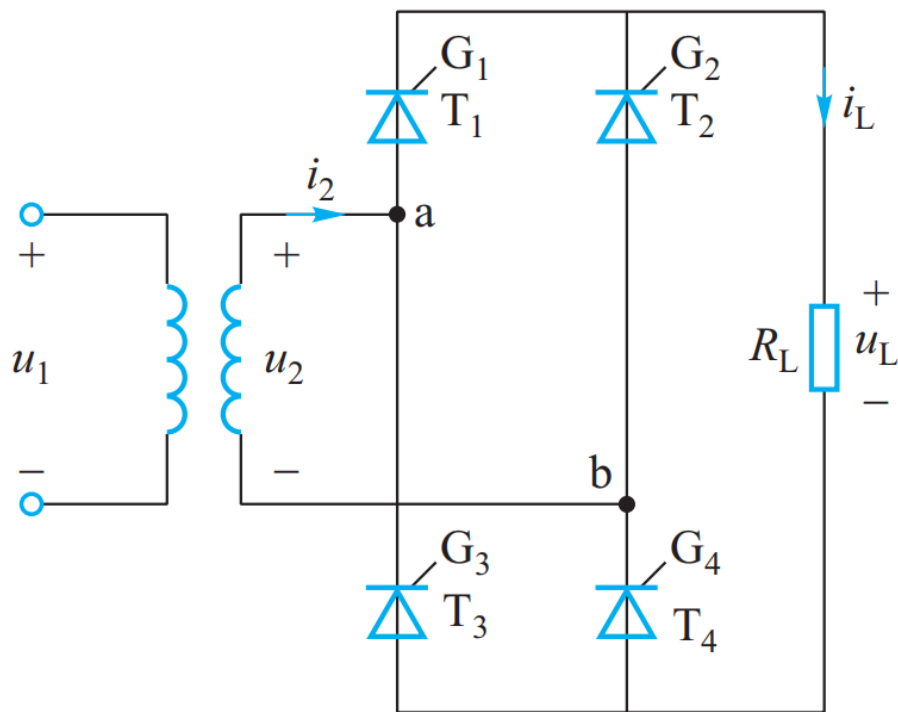




## 8.3.2 可控整流电路

### 单相桥式全控整流电路

与8.2.1中的单相桥式整流电路的区别在于用4个晶闸管代替二极管，从而实现可控整流，即当晶闸管处于正向偏置时，还必须在其门极加正向触发脉冲，才能使其导通。



单相桥式全控整流电路



## 8.3.2 可控整流电路

1) 负载电压  $U_L$  的平均值

$$U_L = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d(\omega t)$$

$$= 0.9 U_2 \frac{1 + \cos \alpha}{2}$$

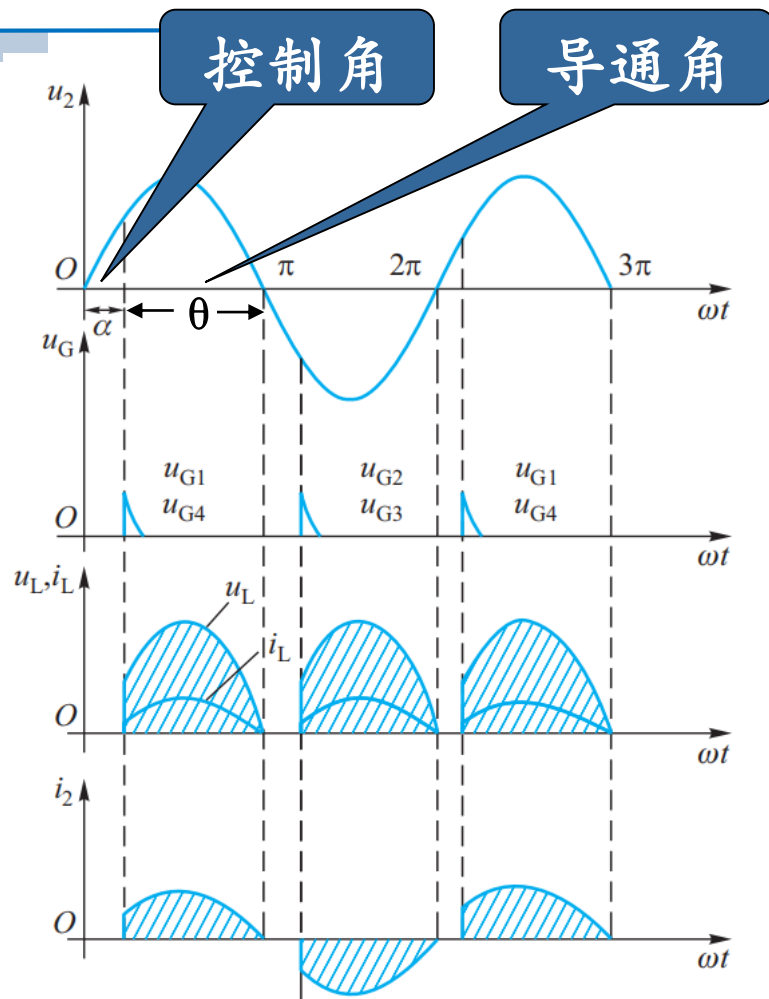
2) 负载电流  $i_L$  的平均值

$$I_L = \frac{U_L}{R_L} = 0.9 \frac{U_2}{R_L} \times \frac{1 + \cos \alpha}{2}$$

3) 变压器二次侧绕组  $i_2$  的有效值

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \left( \frac{\sqrt{2} U_2}{R_L} \sin \omega t \right)^2 d(\omega t)}$$

$$= \frac{U_2}{R_L} \sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{\pi}}$$



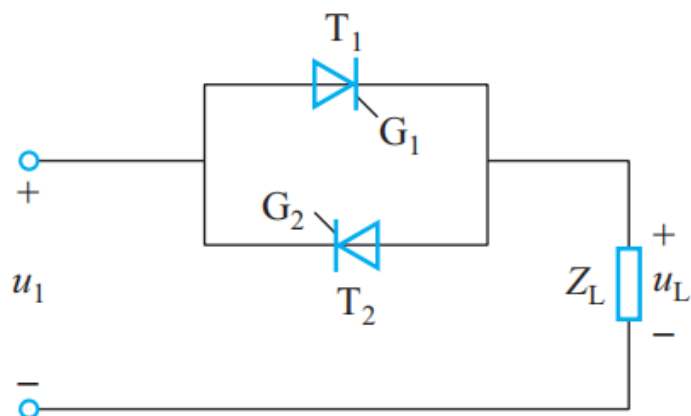
单相桥式全控整流电路波形图



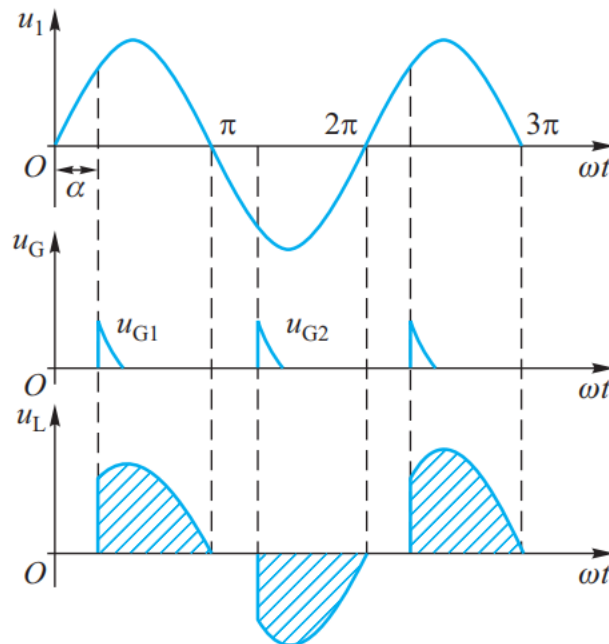
## 8.3.3 交流调压和变频电路

### 1. 交流调压

#### 1) 相控式交流调压电路



单相相控式交流调压电路



$U_L$ 的有效值:

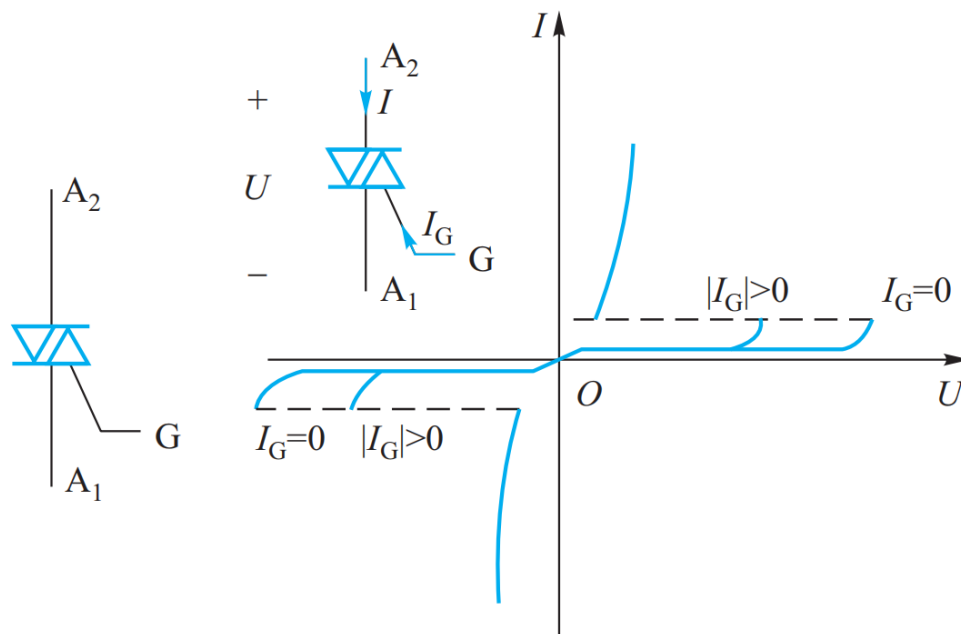
$$U_L = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (\sqrt{2}U_1 \sin \omega t)^2 d(\omega t)} = U_1 \sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{\pi}}$$



## 8.3.3 交流调压和变频电路

### 双向晶闸管

双向晶闸管相当于两只晶闸管反向并联，但同用一个门极，触发脉冲（可正可负）加在 $G$ 和 $A_1$ 之间。则根据外加电压极性的不同，在触发脉冲的作用下，导通方向可从 $A_2$ 到 $A_1$ ，或反之。



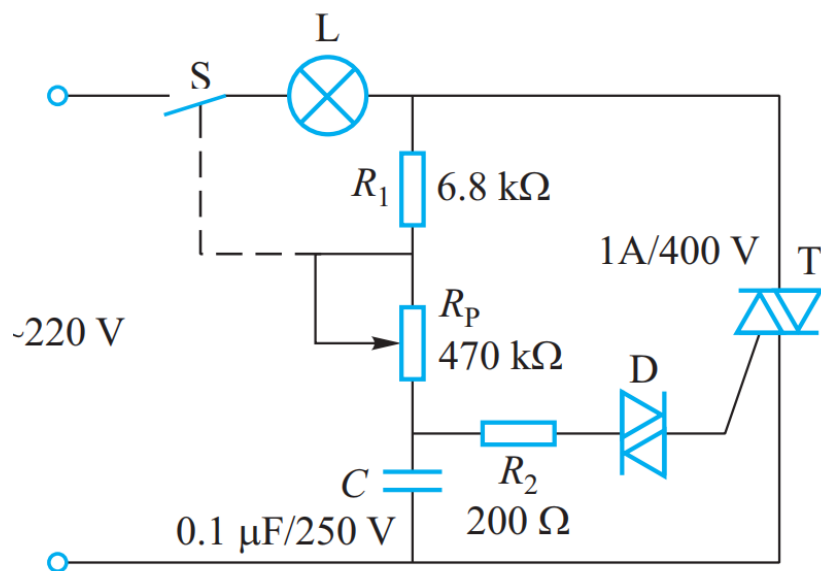
双向晶闸管的图形符号及伏安特性



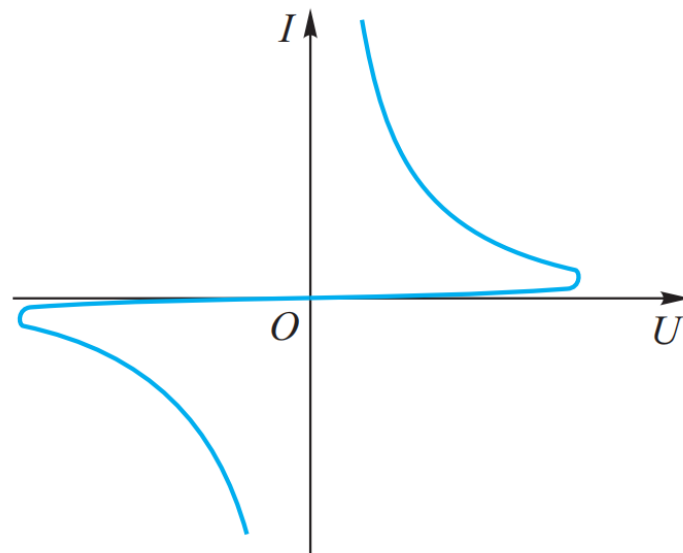
# 例 题

## [例题8.3.1]

下图是用双向晶闸管等原件构成的调光台灯电路，试分析其工作原理。



调光台灯电路



触发二极管的伏安特性



## [例题8.3.1]

工作原理：

接通电源后，电路电源经 $L$ 、 $R_l$ 、 $R_p$ 和 $C$ 形成通路， $C$ 充电，当电容 $C$ 两端的电压上升到触发二极管 $D$ 的导通电压时，双向晶闸管被触发导通，灯亮。当交流电压过零时，双向晶闸管自行关断。

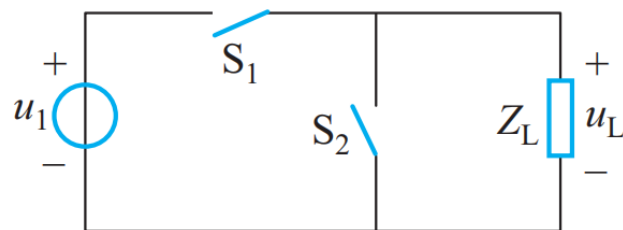
调节 $R_p$ 可以改变 $C$ 的充电时间，以改变触发二极管 $D$ 的导通时间，从而改变双向晶闸管在交流电源正、负半周的导通角，实现灯光亮度的调节。



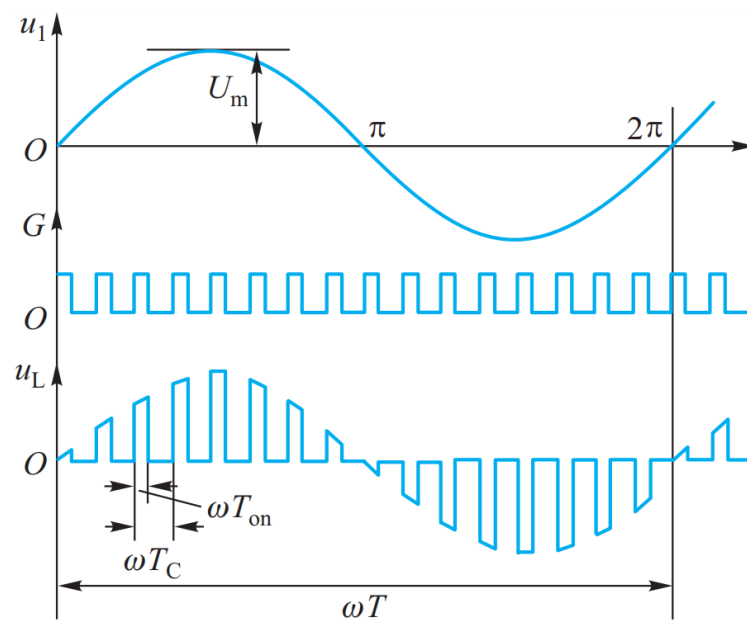
## 8.3.3 交流调压和变频电路

### 2) 斩控式交流调压电路

右图为单相斩控式交流调压电路。其中  $S_1$ 、 $S_2$  为全控型功率器件（如IGBT），可以双向导通，并且双向都可以控制开通和关断。



原理图

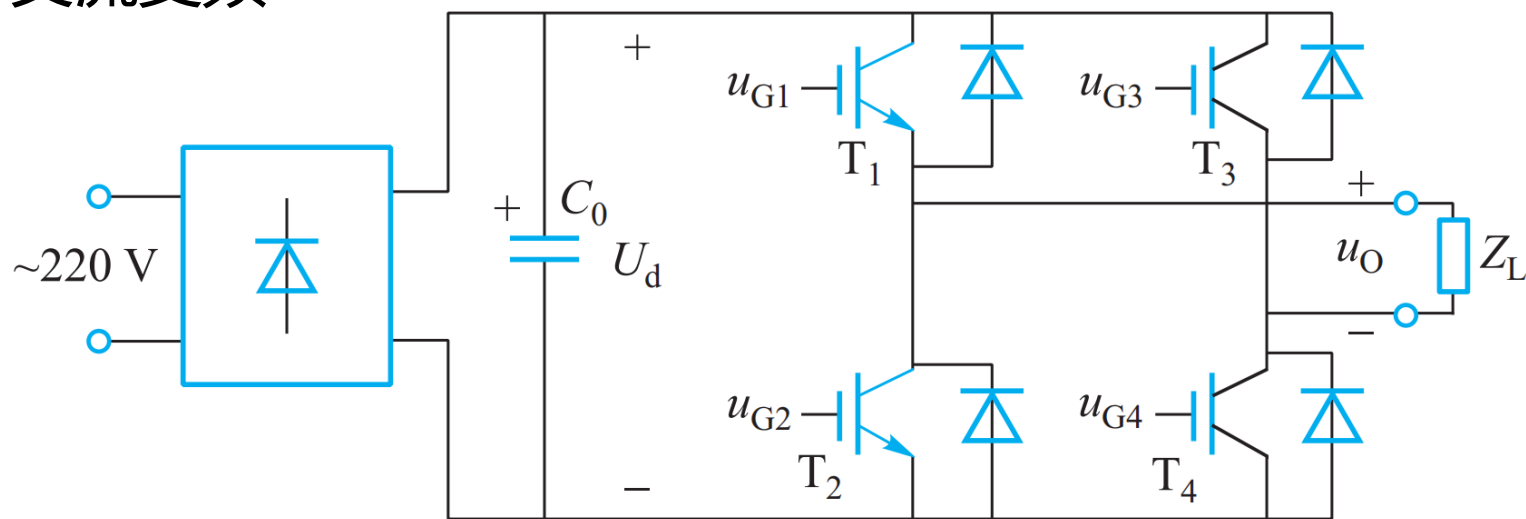


波形图



## 8.3.3 交流调压和变频电路

### 2. 交流变频



变频电路原理图

交流变频是指将一种频率（如工频）的交流电变换成另一种频率的交流电。

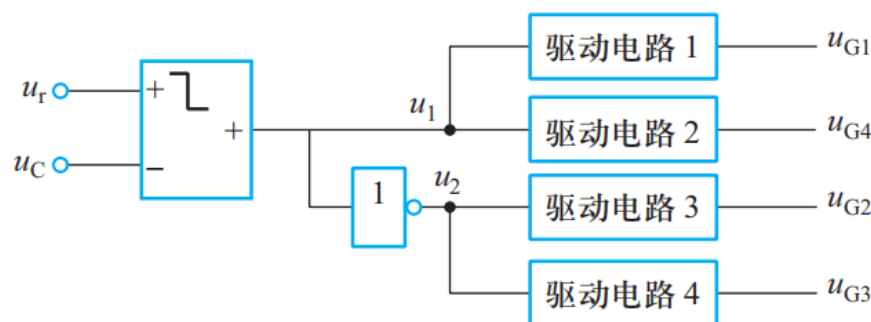
常用于交流电动机的变频调速、中频电源、高频电源等。



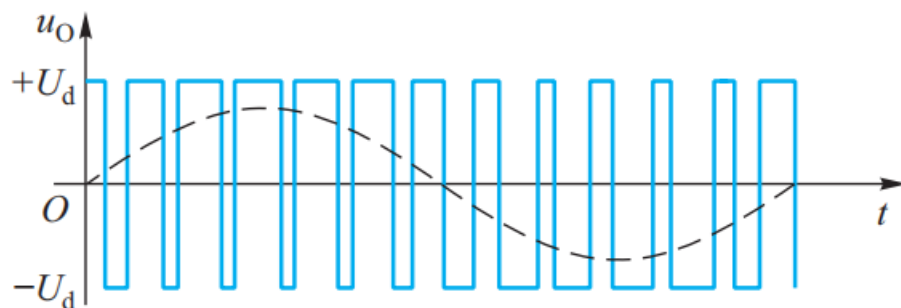


## 8.3.3 交流调压和变频电路

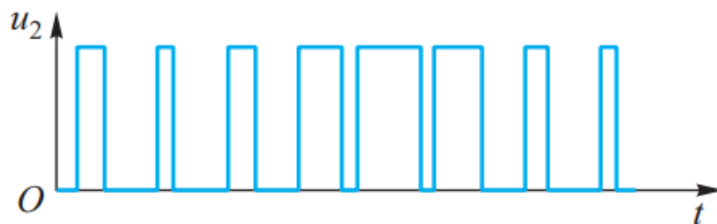
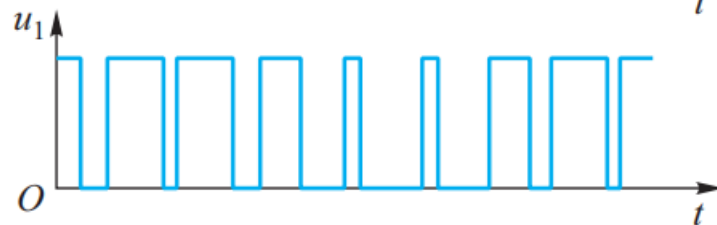
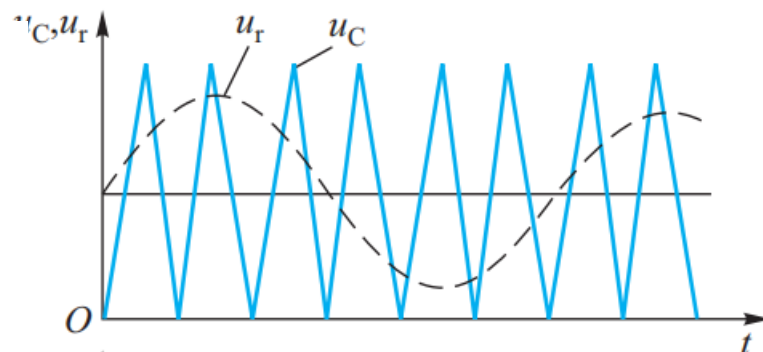
### 正弦波脉宽调制方式 (SPWM)



单相SPWM调制原理框图



单相变频电路输出电压



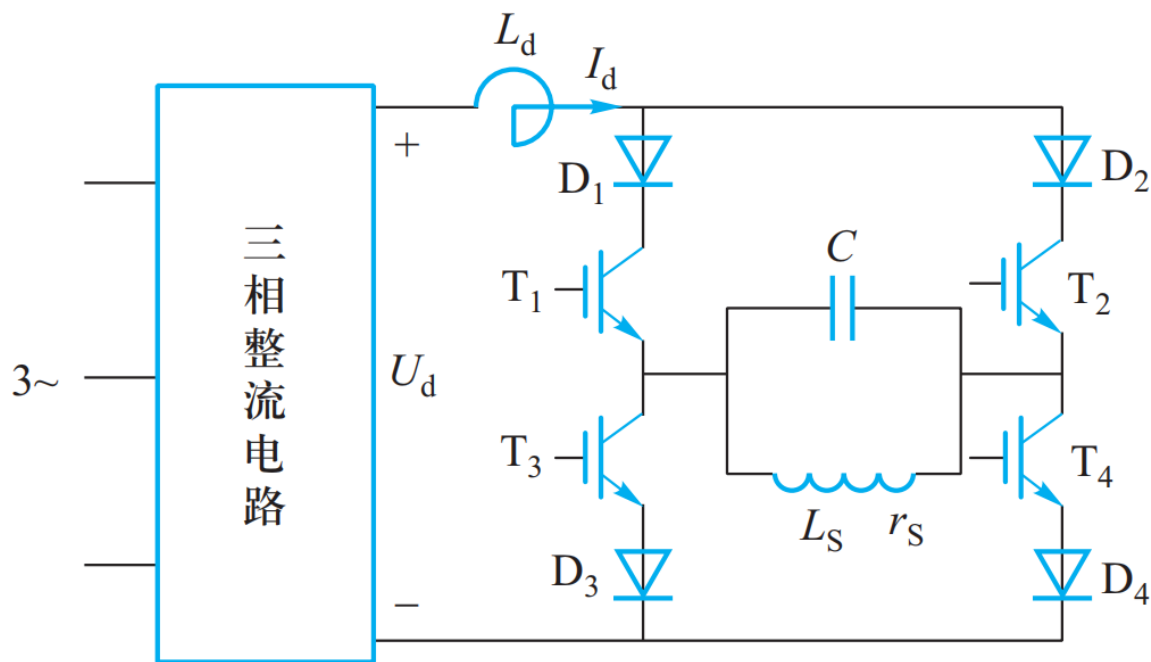
正弦波脉宽调制信号的产生



# 例题

## [例题8.3.2]

下图是一并联逆变器原理图，这种逆变器被广泛地应用于中频感应加热电源上，试分析其工作原理。



# 例 题

[解]  $U_d$ : 经三相整流后的直流电压

$L_d$ : 滤波电抗器, 使  $I_d$  平滑, 限制中频电流进入工频电网, 起交流隔离作用。

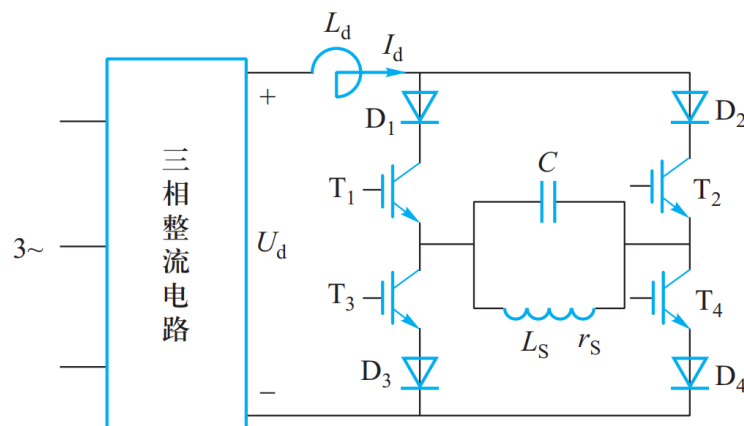
导通过程:

$T_1$ 、 $T_4$ 导通时,  $I_d$  经  $D_1$ 、 $T_1$ 、负载、 $T_4$ 、 $D_4$  流回电源;

$T_2$ 、 $T_3$ 导通时,  $I_d$  经  $D_2$ 、 $T_2$ 、负载、 $T_3$ 、 $D_3$  流回电源, 流经负载的方向与前相反;

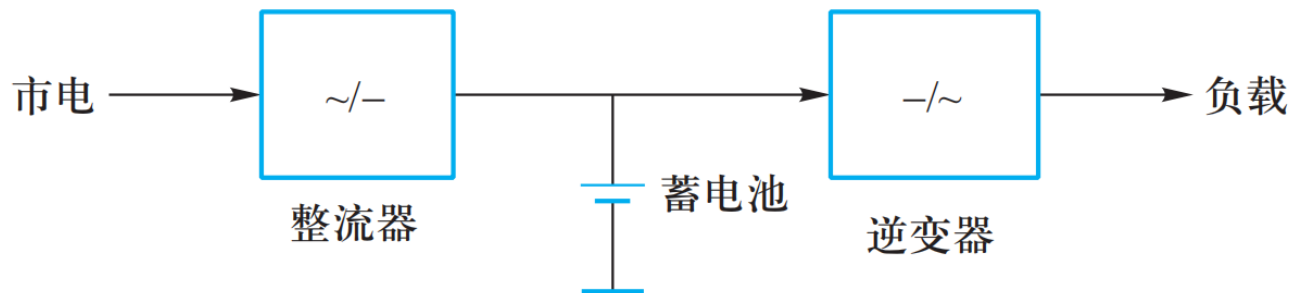
负载: 由加热线圈  $L_s$ 、 $r_s$  和补偿电容  $C$  并联, 工作时的频率恰好使  $L_s$  和  $C$  处于并联谐振状态;

当流过感应加热线圈的电流所产生的中频磁场穿过金属加热件时, 会在此金属中产生足够大的感应电动势, 形成电流, 使金属发热, 从而进行热处理或熔炼。



### [例题8.3.3]

下图是不间断电源（UPS）的原理框图，试说明其工作原理。



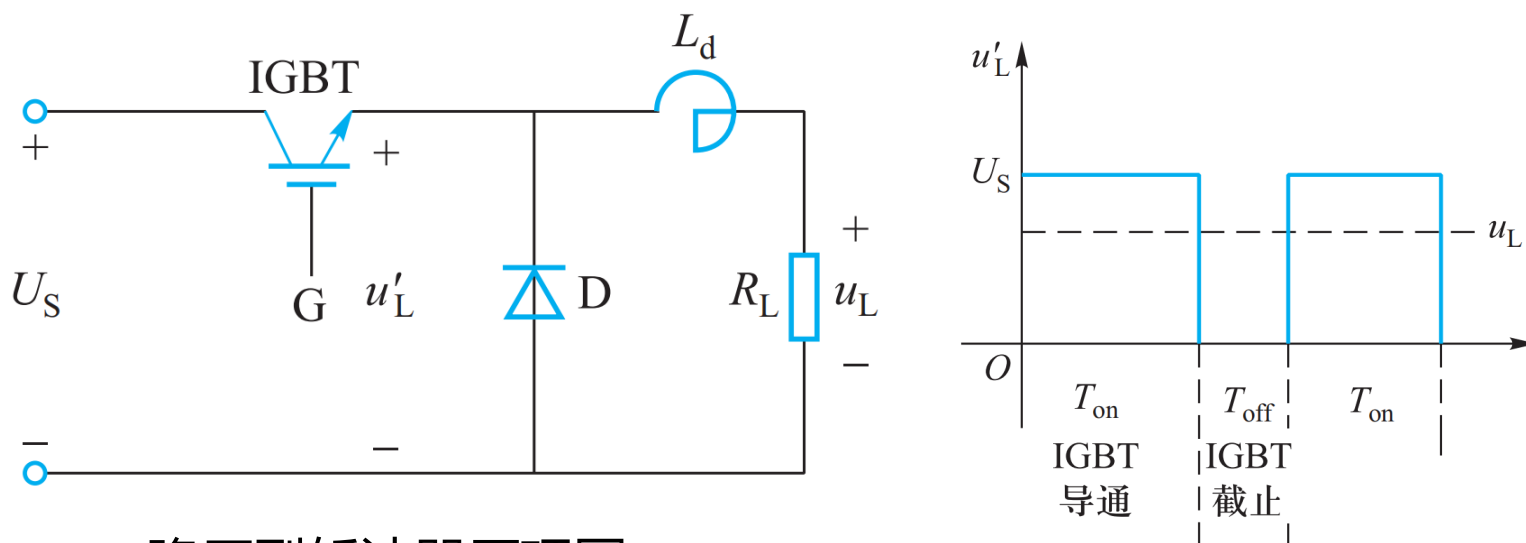
基本UPS的原理框图

[解] 图中市电经整流器变为直流后，分为两路：  
一路通过逆变重新变为工频交流电供给负载；  
一路对蓄电池进行充电，使市电中断时，UPS仍能保证负载的供电。



## 8.3.4 直流调压电路

直流调压电路也称斩波调压器，它利用半导体器件作直流开关，通过调节矩形波电压的占空比来改变输出电压的平均值。



降压型斩波器原理图

负载电压  $U_L$  的平均值：

$$U_L = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} U_S$$



## 8.3.4 直流调压电路

### 升压型斩波器

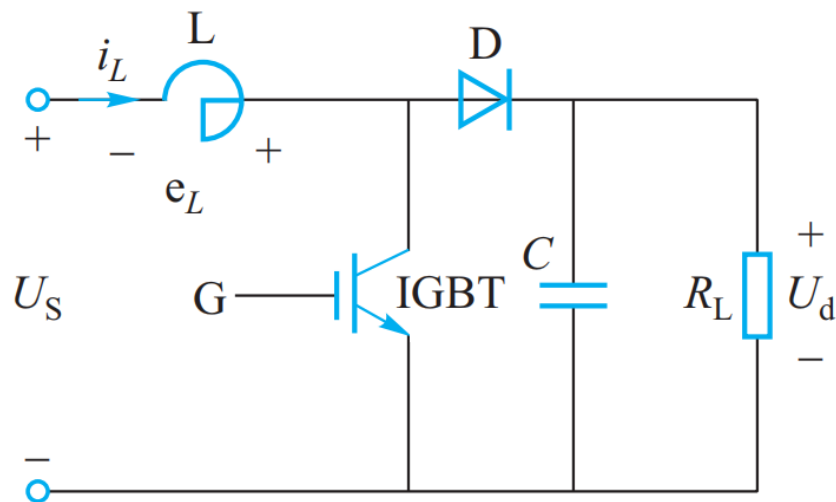
升压型斩波器是利用电感储能释放时所产生的电压来提高输出电压。

如图IGBT导通时由电源输入电感的能量为： $W_{in} = U_S I_L T_{on}$

IGBT关断时电感释放至负载的能量为：

$$W_{out} = E_L I_L T_{off} f = (U_d - U_S) I_L T_{off}$$

假定： $W_{in} = W_{out}$  可得： $U_d = \frac{T_{on} + T_{off}}{T_{off}} U_S > U_S$



升压型斩波器原理图





本章结束 返回目录

第9章 变压器和电动机

