

第十章 电力电子学——晶闸管及其基本电路

- 晶闸管的基本工作原理
- 基本整流电路及其工作原理
- 基本逆变电路及其工作原理
- 触发电路的基本工作原理

晶闸管 (Thyristor)

别名: 可控硅 (SCR) (Silicon Controlled Rectifier)

是一种大功率半导体器件，出现于60年代。它的出现使半导体器件由弱电领域扩展到强电领域。

特点: 体积小、重量轻、无噪声、寿命长、容量大
(正向平均电流达千安、正向耐压达数千伏)。

优点:

- **功率放大倍数大:** 用很小的触发脉冲就可以控制很大的功率 (电流: 几十A---几千A, 电压几百V—几千V)，功率放大倍数达几十万倍。
- **控制灵敏:** 导通和关断时间很短 (微秒级)。
- **效率高:** 晶闸管的管压降很小，所以发热损耗小，效率达97.5%。
- **体积小，重量轻。**

缺点:

- 过载能力差。
- 抗干扰能力差（就是因为放大倍数大引起的）。
- 容易导致电网电压波形畸变。
- 控制电路复杂。

应用领域:

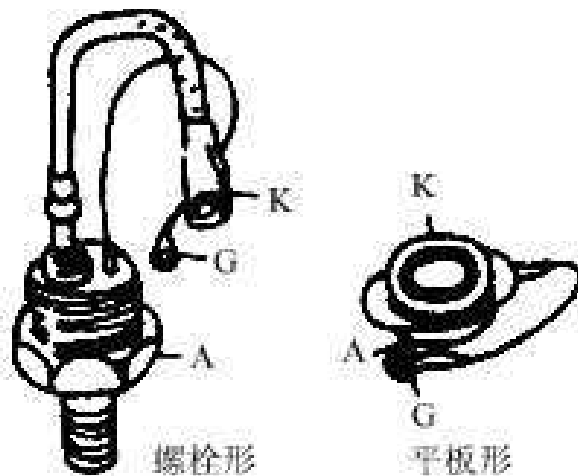
- 整流（交流 → 直流）
- 逆变（直流 → 交流）
- 变频（交流 → 交流）
- 斩波（直流 → 直流）

此外还可作无触点开关等。

10.1 电力半导体器件

10.1.1 晶闸管

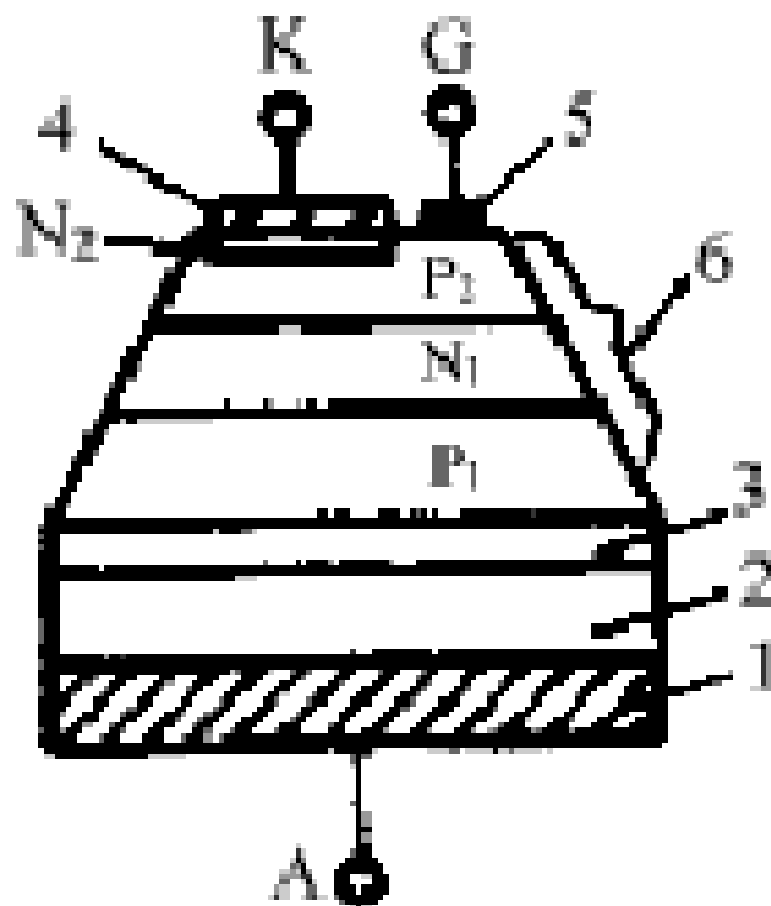
晶闸管的外形:螺栓形和平板形两种



螺栓形带有螺栓的那一端是阳极A，
它可与散热器固定，
另一端的粗引线是阴极K，
细线是控制极(又称门极)G，
这种结构更换元件很方便，用于电流
较小(100A以下)的元件。

平板形，中间的金属环是控制极G，离控制极远的一面是
阳极A，近的一面是阴极K，这种结构散热效果比较好，用于
电流较大的元件(200A以上)

晶闸管的内部结构



1-铜底座

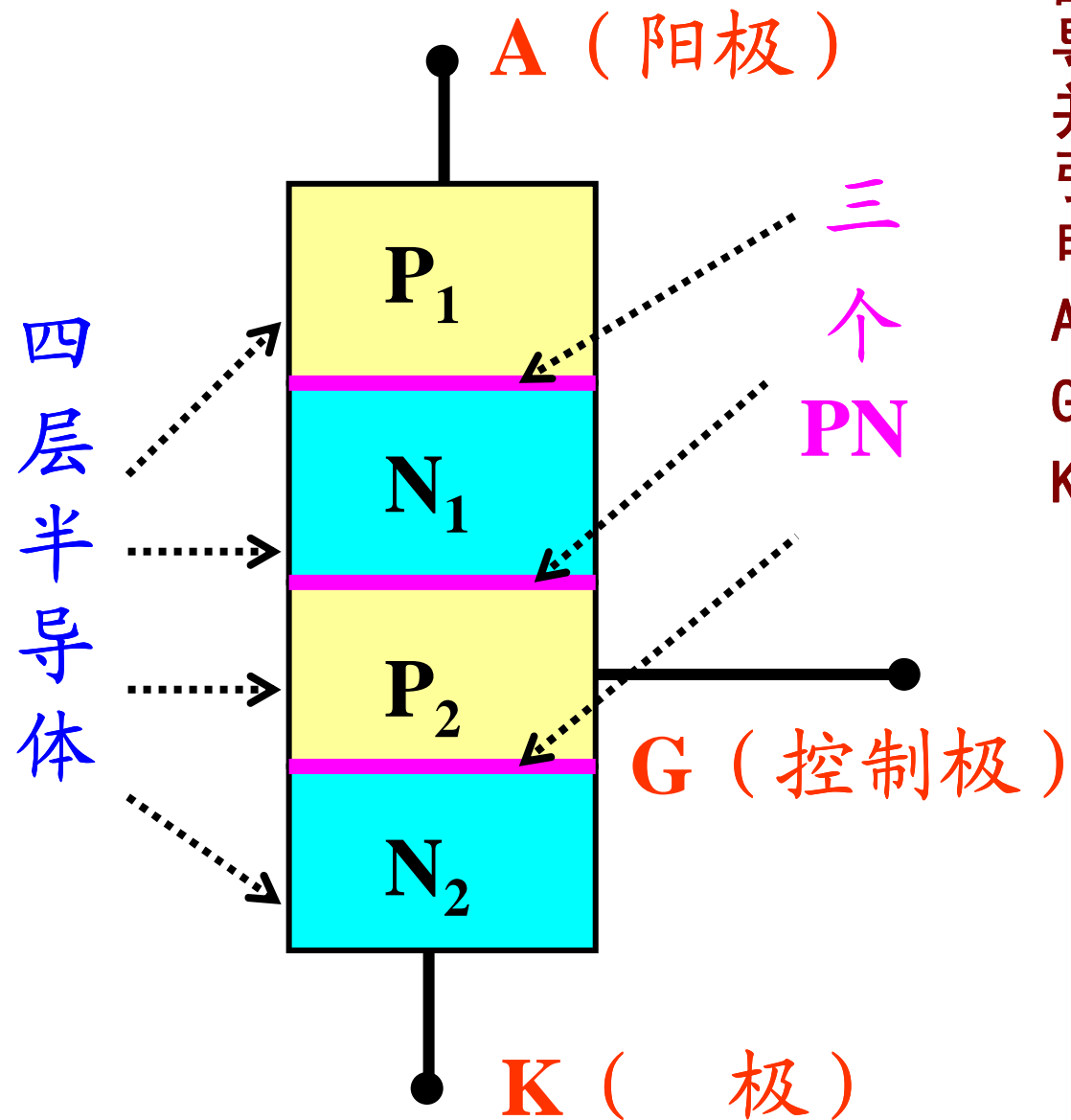
2-钼片

3-铝片

4-金锡合金片

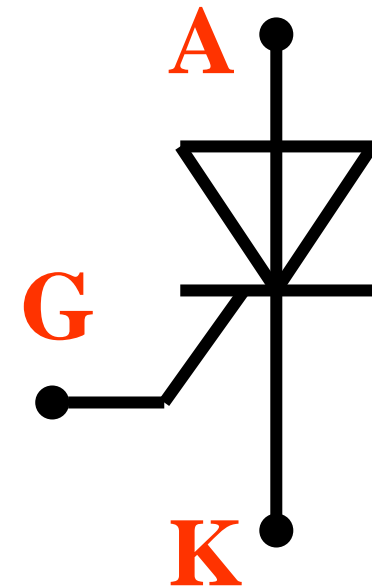
5-金硼钨片

6-硅片

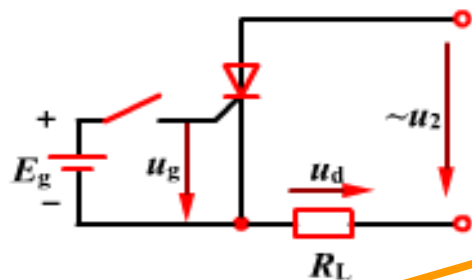


晶闸管的结构是由四层半导体材料叠成三个PN结，并在对应的半导体材料上引出了三个电极。这三个电极分别称为：

A—阳极，
G—控制极，
K—阴极。

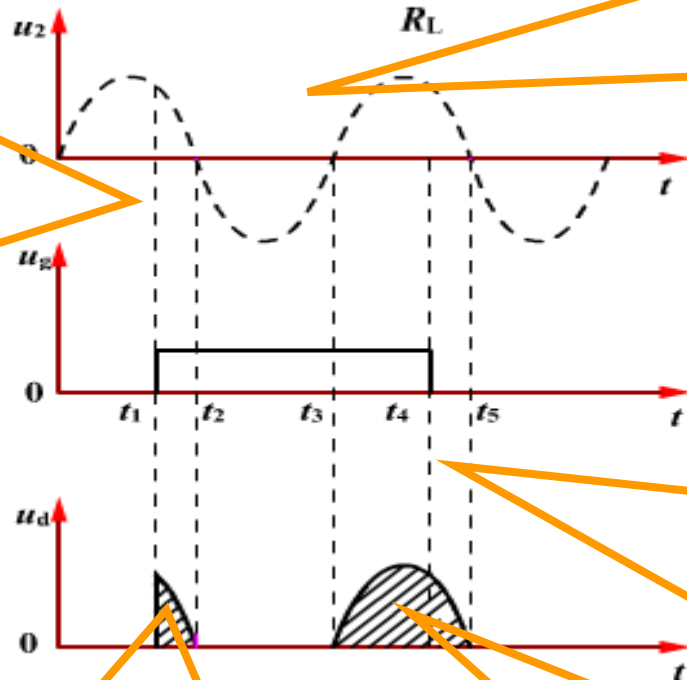


晶闸管试验



0-t₁: 开关未合上, 控制极对阴极的电压为0, 尽管阳极对阴极的电压为正, 晶闸管未导通.

t₂-t₃: 阳极对阴极的电压为负, 尽管控制极对阴极的电压也为正, 晶闸管关断

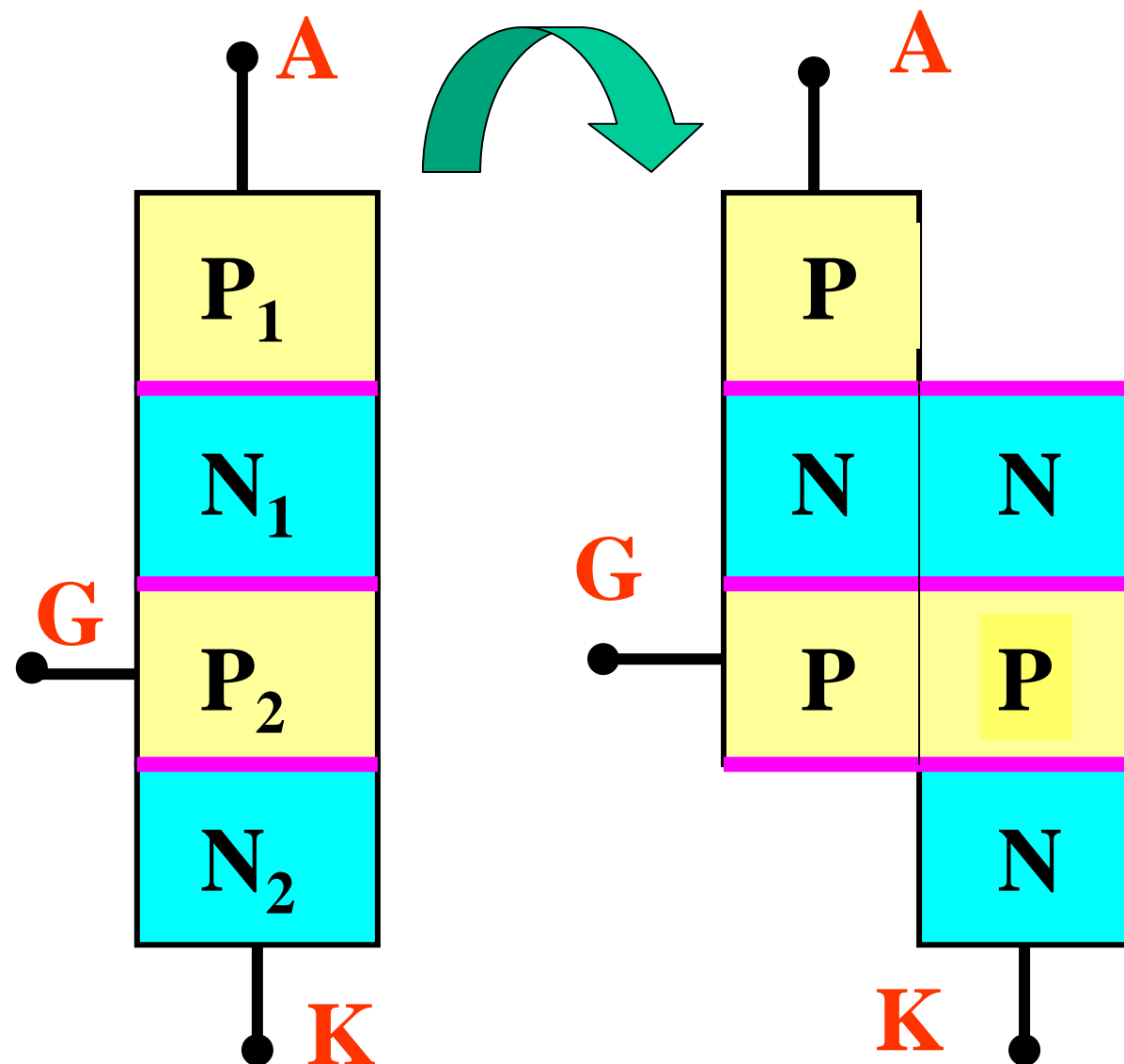


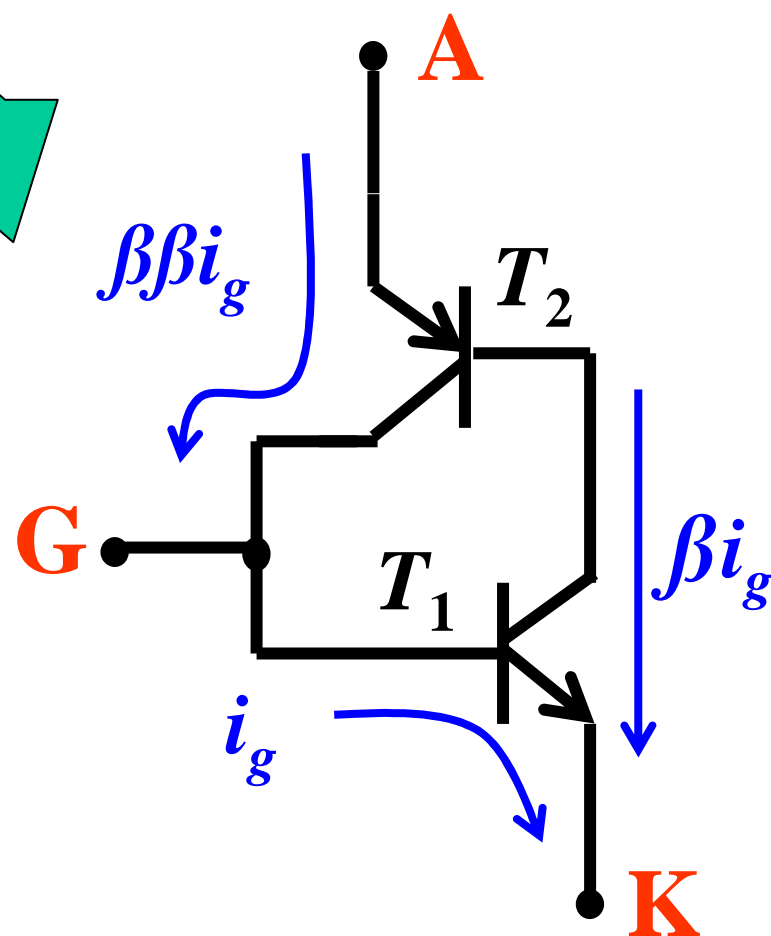
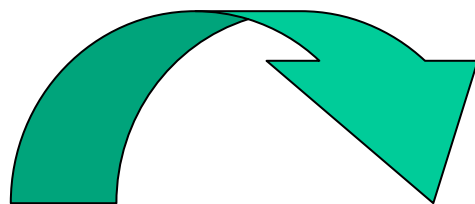
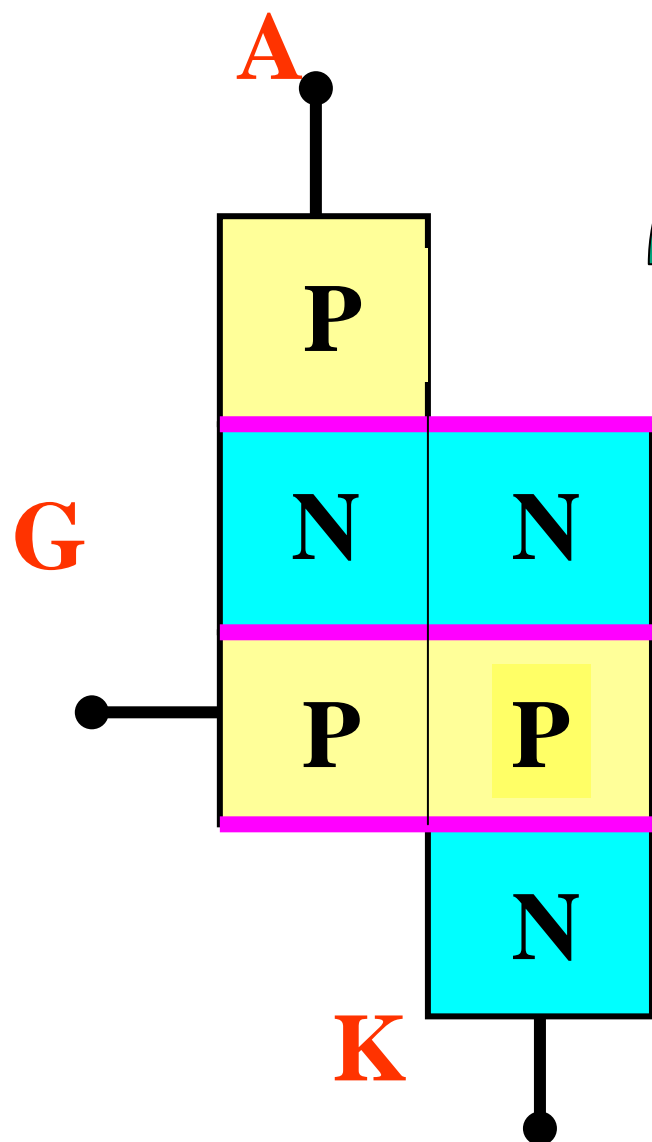
t₄-t₅: 由于这时晶闸管处于导通状态, 则维持导通; 当 $t=t_5$ 时, 由于, 晶闸管关断, 晶闸管处于阻断状态。

t₁-t₂: 阳极对阴极的电压为正, 由于开关合上, 使得控制极对阴极的电压也为正, 即晶闸管导通, 晶闸管压降很小, 电源电压加于电阻上

t₃-t₄: 晶闸管的阳极对阴极又开始承受正向电压, 这时, 控制极对阴极有正电压, 所以, 晶闸管又导通, 电源电压再次加于上

工作原理





由二个三极管组成的等效电路

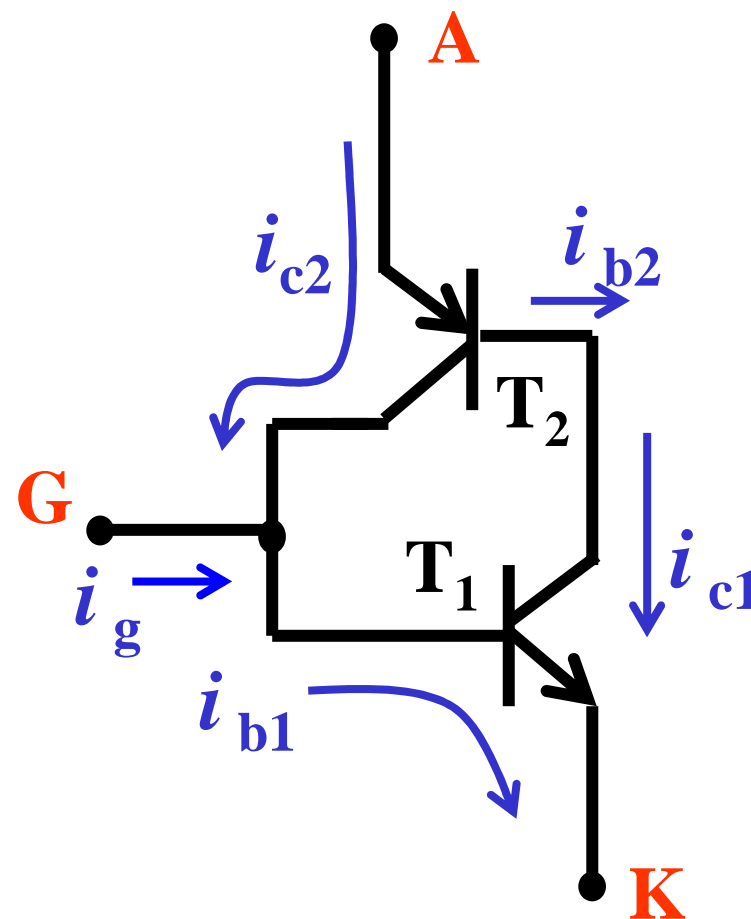
导通过程

1. 若只加 U_{AK} 正向电压，控制极不加触发电压，两三极管均不能导通，即晶闸管不通。

2. 当 $U_{AK} > 0$ 且 $U_{GK} > 0$ 时，晶闸管迅速导通。 U_{GK} 开始加入时， T_1 首先导通，

$i_{b1} = i_g$ 、 $i_{c1} = \beta i_{b1}$ ；然后 T_2 导通， $i_{b2} = i_{c1} = \beta i_{b1}$ 、

$i_{c2} = \beta i_{b2} = \beta\beta i_{b1}$ ，此后 T_1 进一步导通，
形成正反馈，A、k两极间迅速导通。

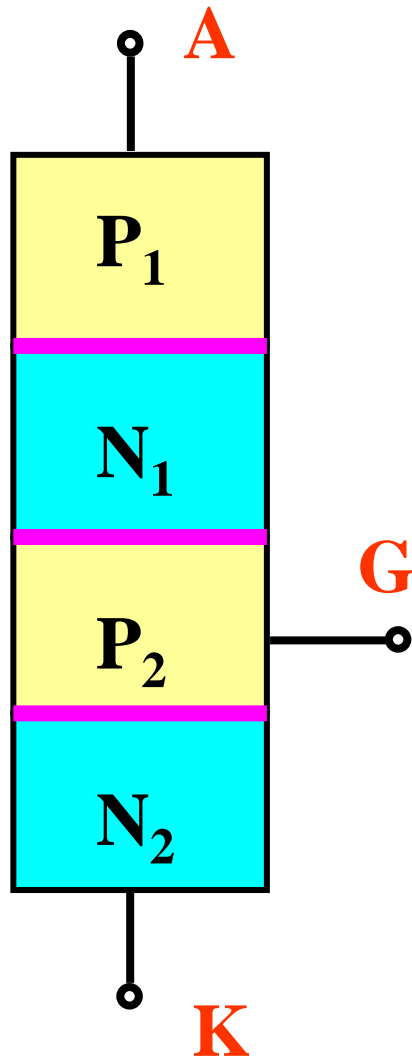


3. 晶闸管导通后，去掉电压 U_{GK} ，依靠正反馈，晶闸管仍维持导通状态；

4. 晶闸管截止的条件：

- (1) 晶闸管的A、K两极间加反向电压，或开始工作时就不加触发信号（即令 $U_{GK} = 0$ ），晶闸管则不能导通；
- (2) 晶闸管正向导通后，欲令其截止，必须减小 U_{AK} ，或加大回路电阻，致使晶闸管中的电流减小到维持电流（ I_H ）以下，正反馈失效，晶闸管截止。

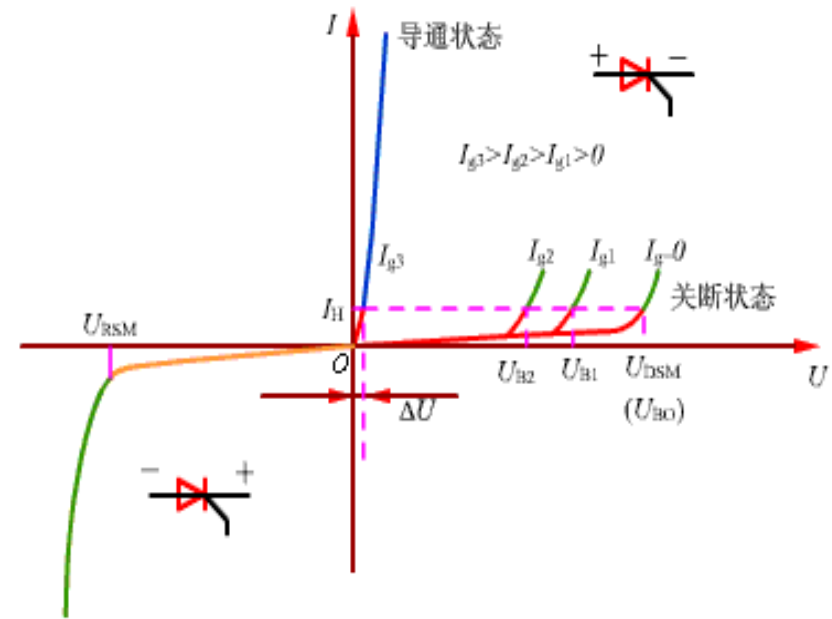
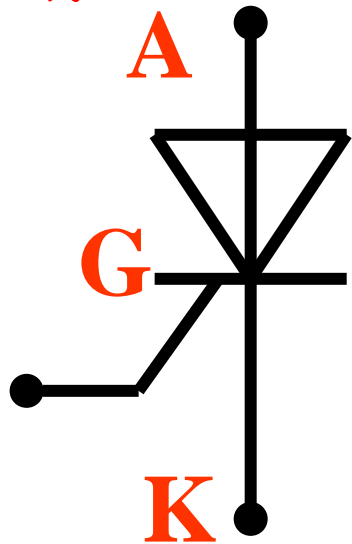
晶闸管特性



- (1) 若控制极不加正向电压，则不论阳极加正向电压还是反向电压，晶闸管均不导通，这说明晶闸管具有正、反向阻断能力；
- (2) 晶闸管的阳极和控制极同时加正向电压时才能使晶闸管导通，这是晶闸管导通必须同时具备的两个条件；
- (3) 在晶闸管导通之后，其控制极就失去控制作用，欲使晶闸管恢复阻断状态，必须把阳极正向电压降低到一定值（或断开，或反向）。
- (4) 晶闸管导通后，两只三极管饱和导通，阳极与阴极间的管压降为1V左右，而电源电压几乎全部分配在负载电阻上。晶闸管的PN结可通过几十安~几千安的电流。晶闸管触发导通的时间为几微秒。

晶闸管的伏安特性

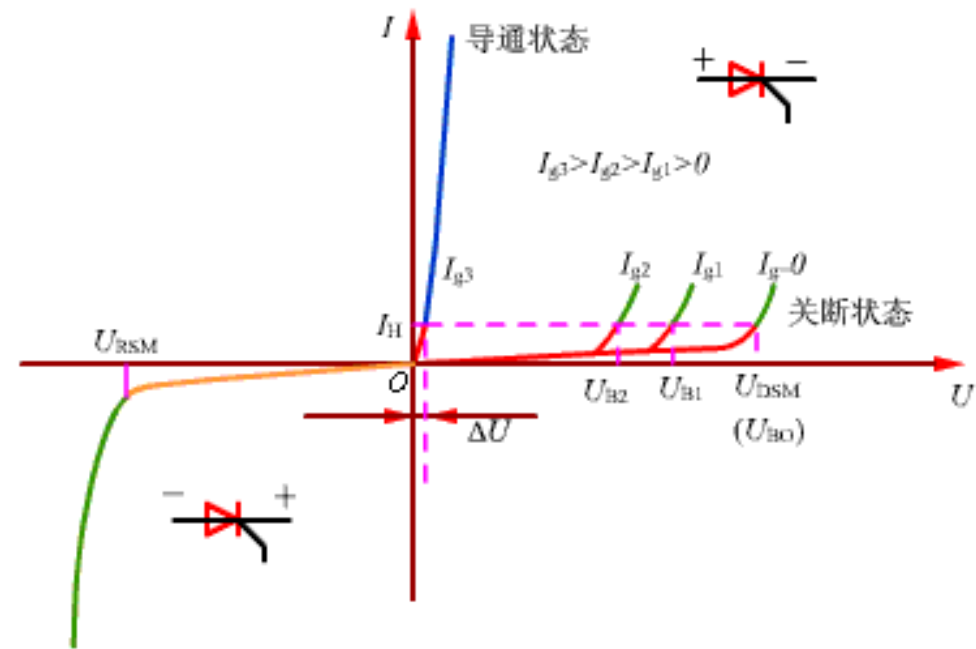
(1) 正向阻断状态：晶闸管的阳极与阴极间加上正向电压，而晶闸管控制极开路 ($I_g=0$) 情况下，开始元件中有很小的电流（称为正向漏电流）流过，晶闸管阳极与阴极间表现出很大的电阻，处于截止状态（称为正向阻断状态），简称断态。图中第一象限红色段曲线。



(2) 正向击穿：在控制极开路的情况下，当阳极电压上升到某一数值时，晶闸管突然由阻断状态转化为导通状态。阳极这时的电压称为断态不重复峰值电压 (U_{DSM})，或称正向转折电压 (U_{BO})。导通后，元件中流过较大的电流，其值主要由限流电阻（使用时由负载）决定。图中第一象限绿色段曲线。

晶闸管的伏安特性

(3) **正向导通状态：**晶闸管的阳极与阴极间加上正向电压，晶闸管控制极加上正向电压的情况下，晶闸管导通，阳极电流的大小由负载决定，阳极和阴极间的管压降很小。图中第一象限蓝色段曲线。



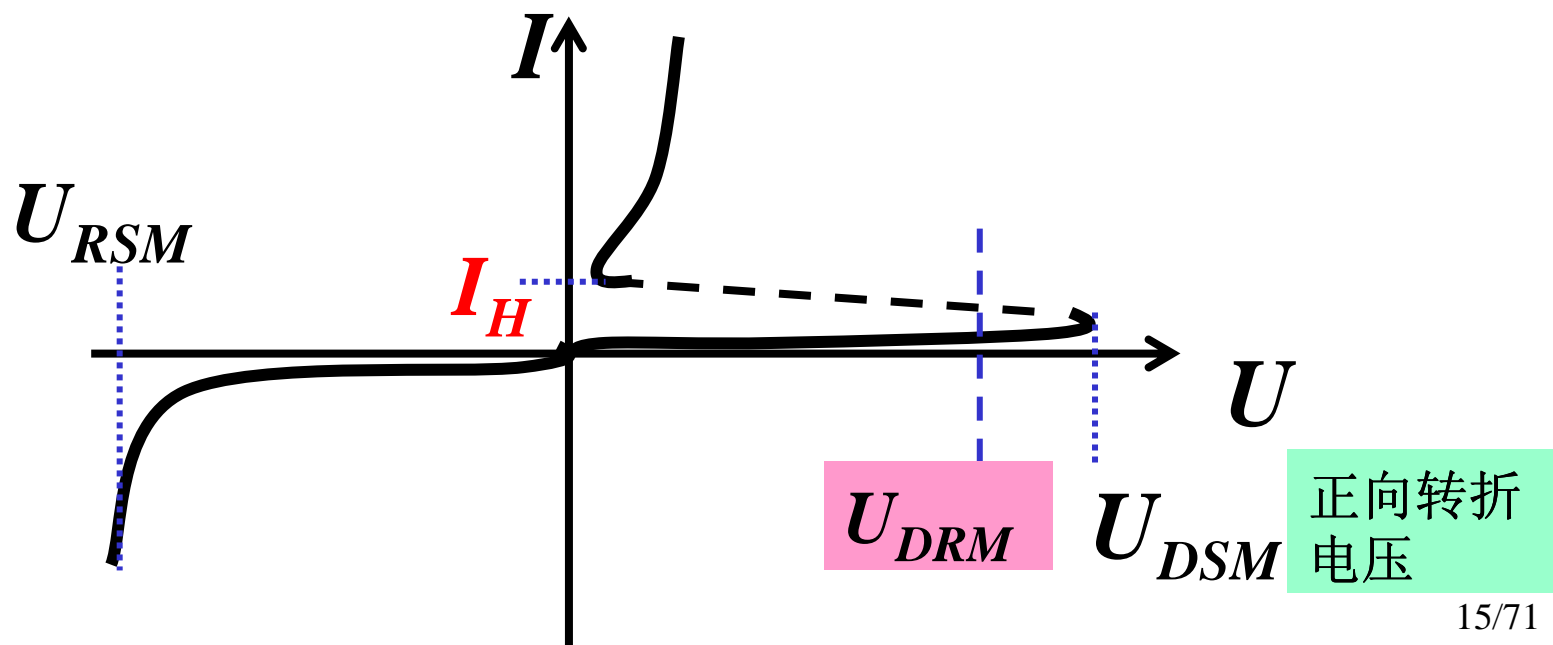
(4) **反向截止状态：**在晶闸管阳极与阴极间加上反向电压时，开始晶闸管处于反向阻断状态，只有很小的反向漏电流流过。图中第三象限黄色段曲线。

(5) **反向击穿：**当反向电压增大到某一数值时，反向漏电流急剧增大，这时，所对应的电压称为反向不重复峰值电压 (U_{RSM})，或称反向转折（击穿）电压 (U_{RR})。图中第三象限绿色段曲线。

晶闸管的主要参数

1. 断态重复峰值电压 U_{DRM}

在控制极断路和晶闸管正向阻断的条件下，可以重复加在晶闸管两端的正向峰值电压，其数值规定比实测正向转折电压小100V。

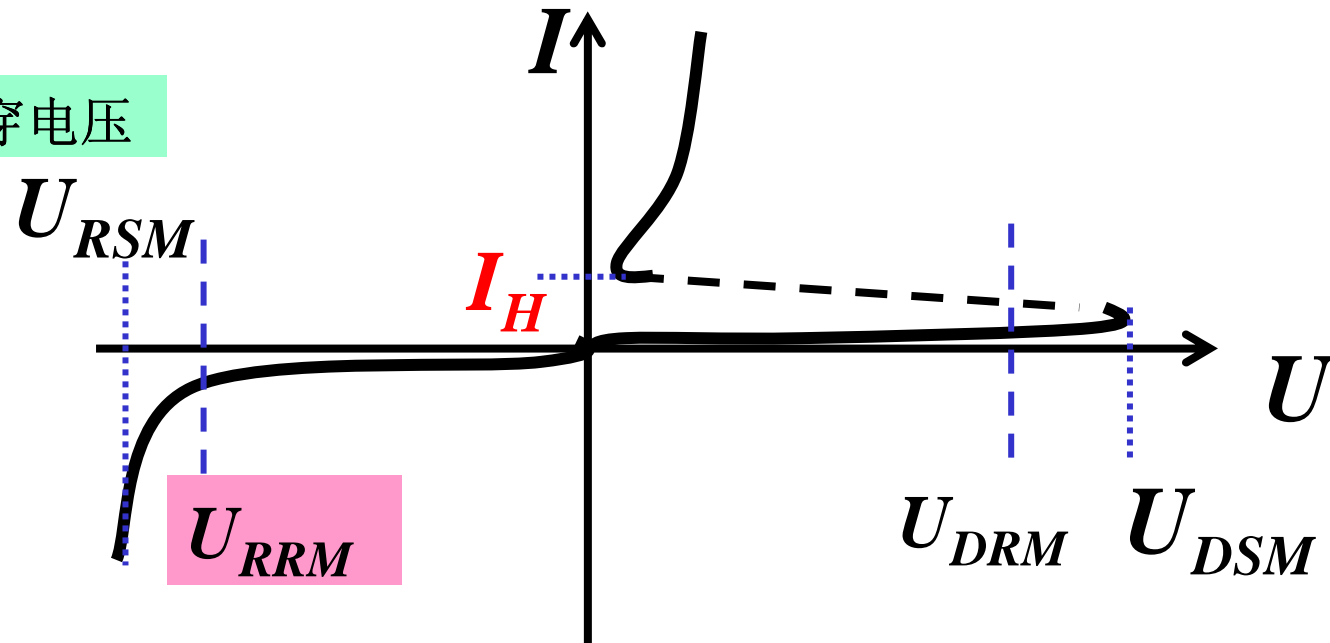


晶闸管的主要参数

2) 反向重复峰值电压 U_{RRM}

在控制极断路时，可以重复加在晶闸管元件上的反向峰值电压，此电压数值规定比实测反向击穿电压小100V。

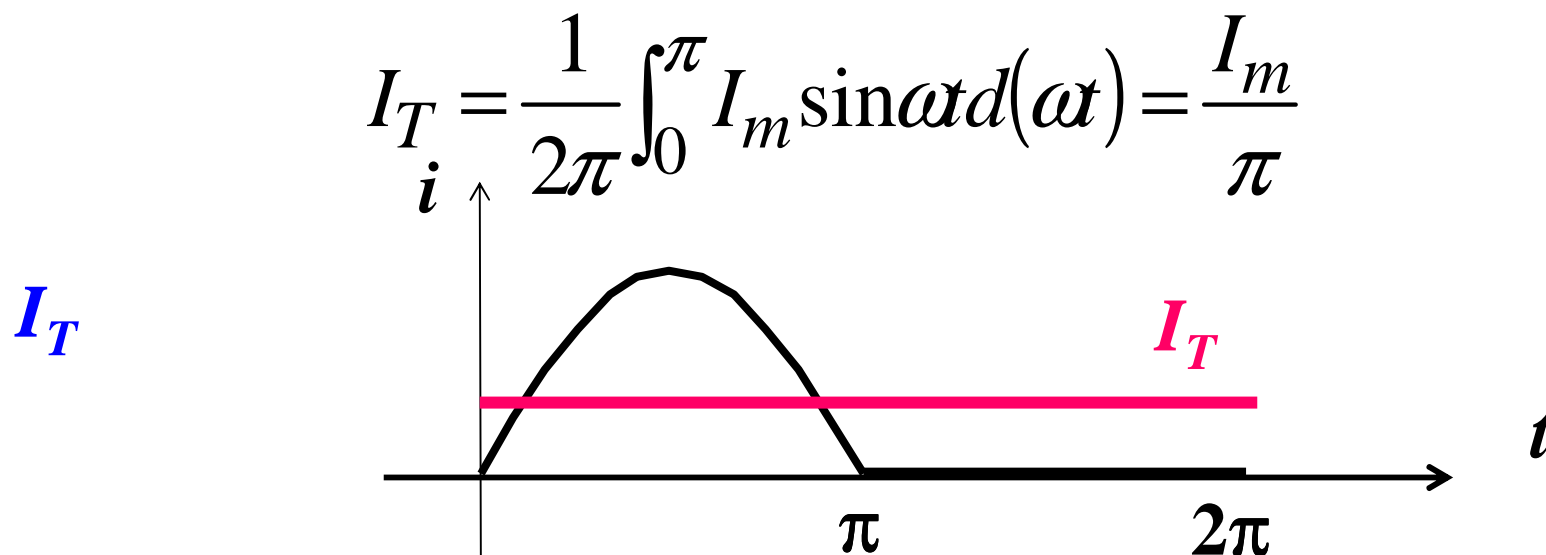
反向击穿电压



晶闸管的主要参数

3. 额定通态平均电流（额定正向平均电流） I_T

在环境温度不大于40度和标准散热及全导通的条件下，晶闸管元件可以连续通过的工频正弦半波电流（在一个周期内）的平均值，称为额定通态平均电流，简称为额定电流。即：



通常，在晶闸管型号中标示了这个参数。我们所说的多少安的晶闸管，就是指这个。

晶闸管的主要参数

3. 额定通态平均电流（额定正向平均电流） I_T

需要指出的是，晶闸管的发热主要是由通过它的电流的有效值决定的，所以，在选择晶闸管时，应考虑流过晶闸管的电流的有效值是否在允许范围内。

因为有效值
$$I_e = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi I_m^2 \sin^2 \omega t d(\omega t)} = \frac{I_m}{2}$$

故
$$\frac{I_e}{I_T} = K = \frac{\left(\frac{I_m}{2}\right)}{\left(\frac{I_m}{\pi}\right)} = \frac{\pi}{2} = 1.57$$

式中 K 称为波形系数。

晶闸管的主要参数

3. 额定通态平均电流（额定正向平均电流） I_T

可见，当晶闸管流过的电流为工频正弦半波时，晶闸管允许正向通过的电流有效值 I_e 和它的额定通态平均电流 I_T 之间的数量关系为

$$I_e = 1.57 I_T$$

这就是说，对于一个额定电流 I_T 为 100A 的晶闸管，其允许通过电流的有效值为 157A。

综上所述，在具体选择晶闸管电流定额时，应根据实际流过晶闸管的电流的有效值来间接得到晶闸管额定通态平均电流 I_T 的大小。并考虑安全裕量，一般按下式来选晶闸管，即

$$I_T = (1.5 \sim 2) \frac{I_e}{1.57}$$

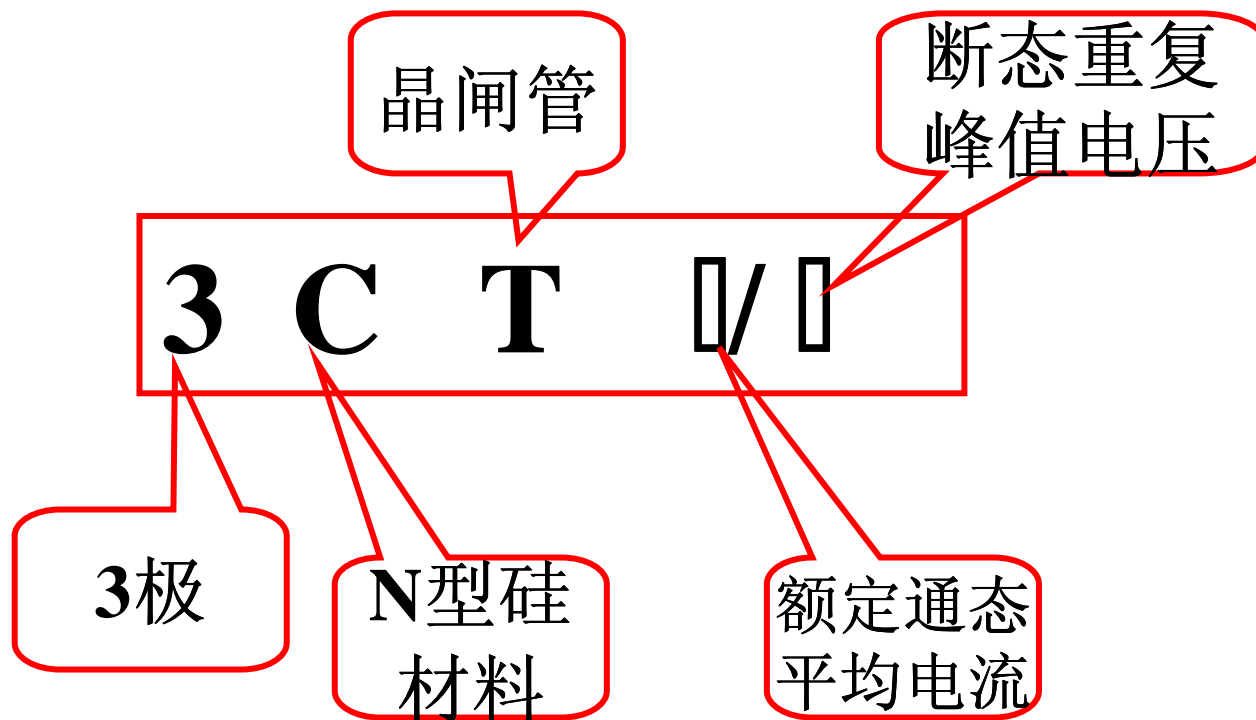
式中， I_e ——实际通过晶闸管的电流有效值。

晶闸管的主要参数

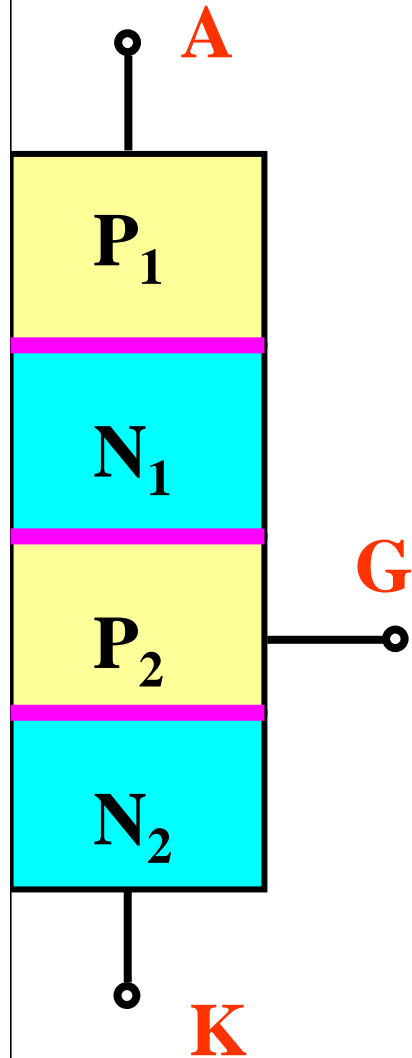
4.维持电流 I_H

在规定的环境温度和控制极断路时，维持元件继续导通的最小电流称维持电流 I_H 。一般为几 mA~一百多 mA，其数值与元件的温度成反比，在 120°C 时的维持电流约为 25°C 时的一半。当晶闸管的正向电流小于这个电流时，晶闸管将自动关断。

晶闸管的型号及其含义



晶闸管好坏的判断方法



测试点	表内电池极性	表测量范围	测量结果
A---K	顺向或逆向均可	1K档	高阻抗 (电阻无穷大)
A---G	顺向或逆向均可	1K档	高阻抗 (电阻无穷大)
K---G	顺向电压: “+”接G, “-”接K 逆向电压: “-”接G, “+”接K	1 Ω 档	10-100 Ω 50-500 Ω

10.1.2 其它功率器件

1. 双向晶闸管 NPNPN

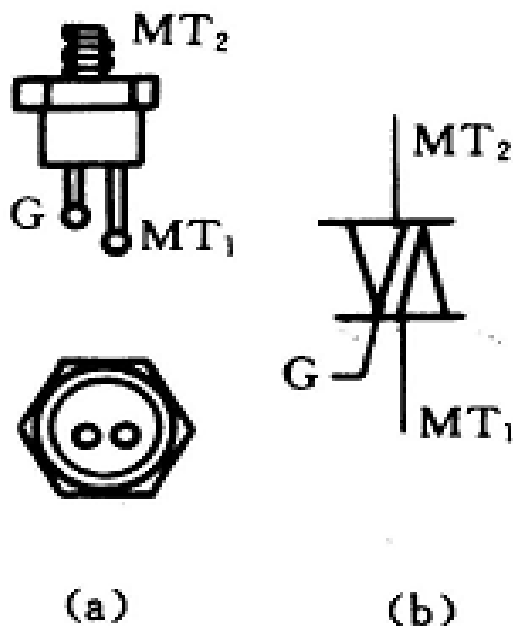


图 10.6 双向晶闸管

(a) 外形图 (b) 电路符号

特点：控制极对于电源的两个半周都有触发控制作用，即双方向均可由控制极触发导通，相当于两只普通的晶闸管反并联

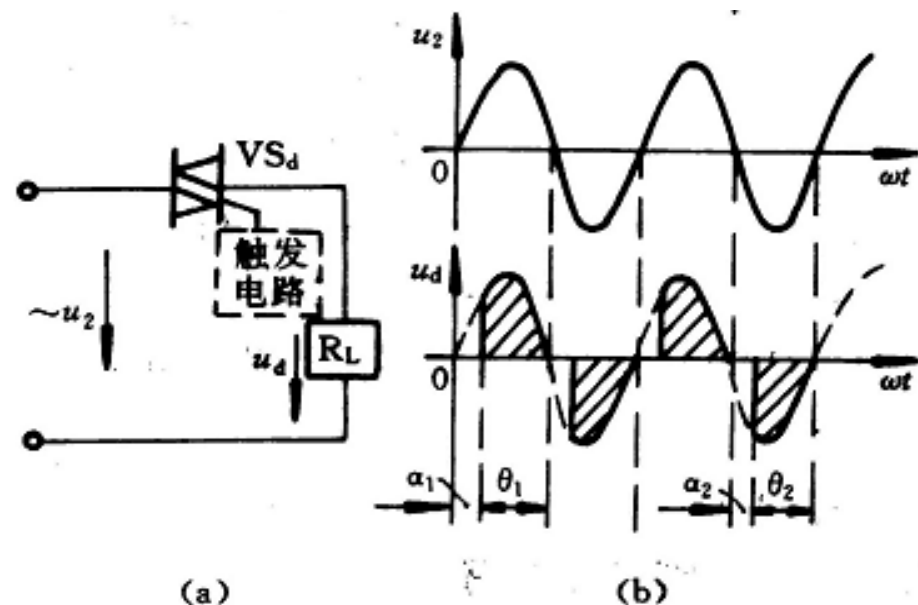
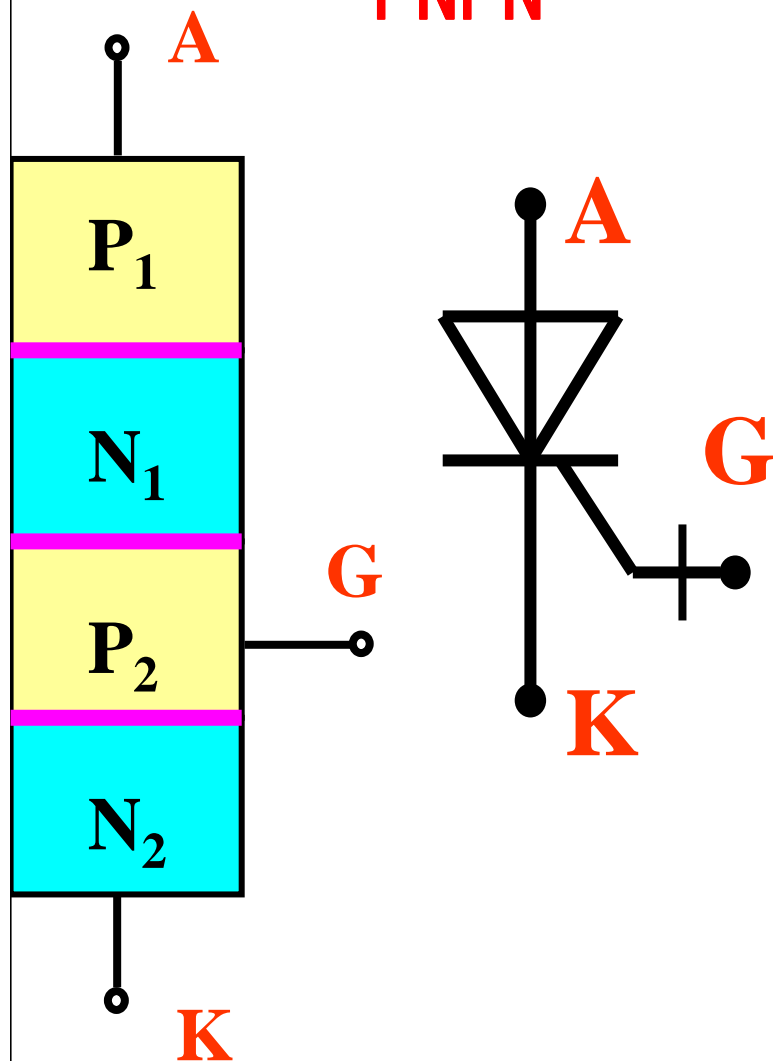


图 10.7 双向晶闸管控制电路及电压波形

2. 可关断晶闸管 (GTO)

PNPN



特点:

1. GTO的控制极可以控制元件的导通和关断（通过改变控制极性），而晶闸管只能控制元件的导通，但GTO控制电流比晶闸管大。

2. GTO的动态特性较晶闸管好:

两者导通时间相差不多

但断开时间: GTO: 1 μ s

晶闸管: (5-30) μ s

3. 功率晶体管

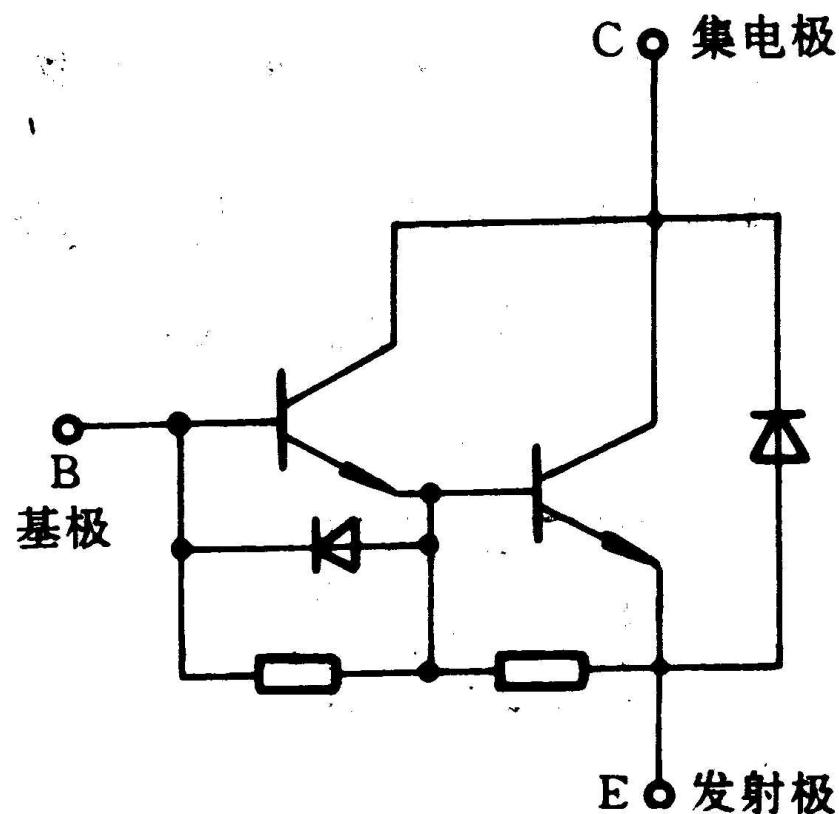


图 10.9 达林顿晶体管

特点:

功率晶体管可在高电压和强电流下使用，最大定额为：1400V和400A。

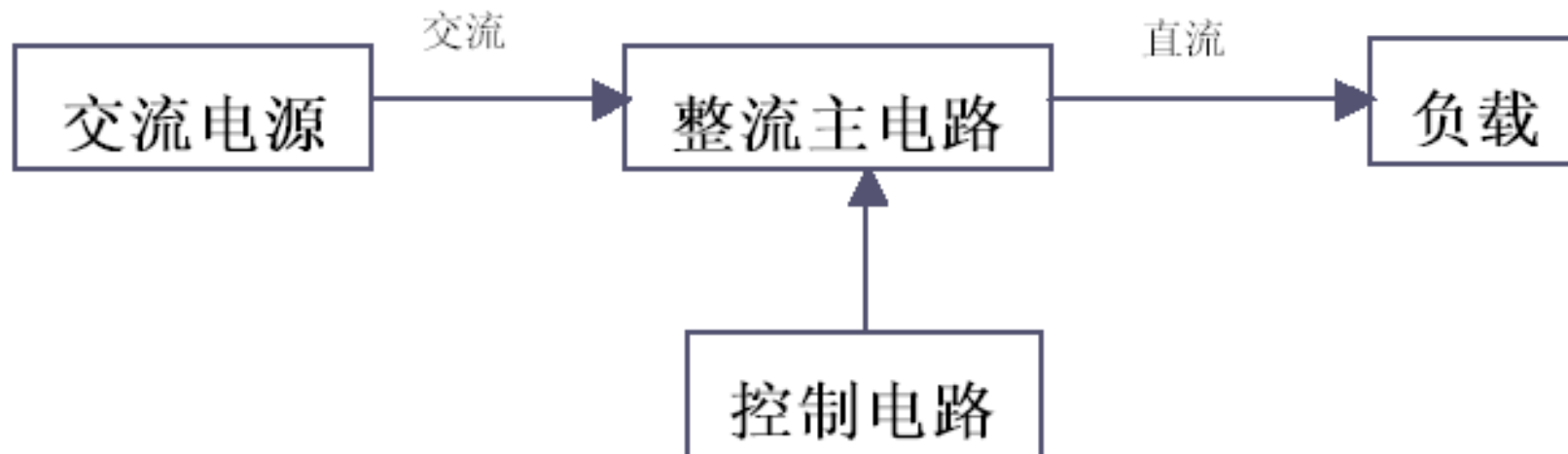
但不能达到晶闸管那样高的电压和电流额定值。

4. 大功率二极管

加正向电压，导通；

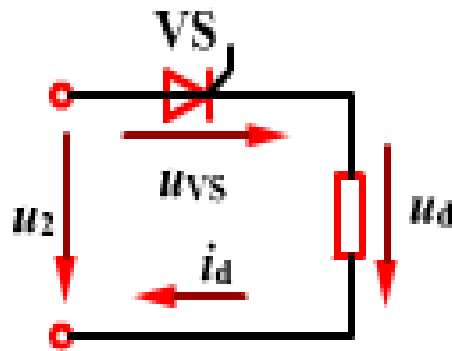
加反向电压，截止。

10.2 单相可控硅整流电路



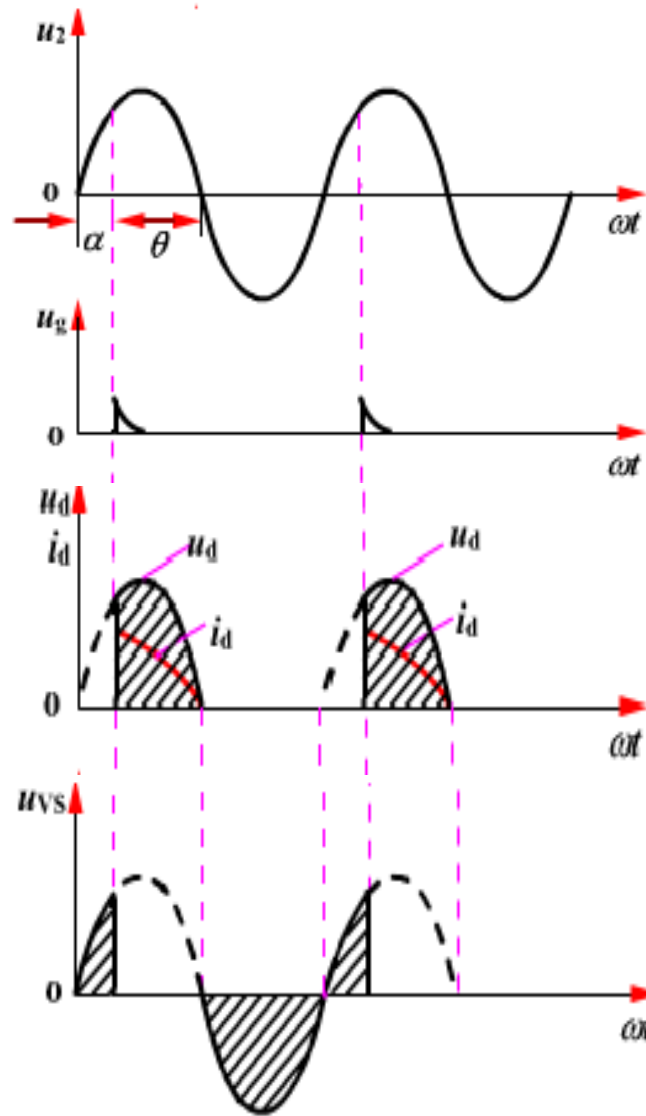
10. 2. 1单相半波可控硅整流电路

1. 电阻负载



α 为控制角：晶闸管从承受正向电压起始点到触发脉冲的作用点之间的电角度

范围： $[0, \pi]$



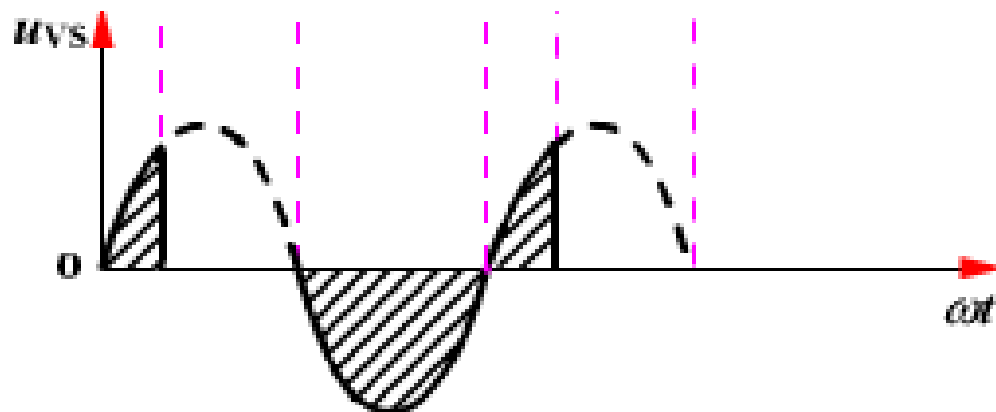
θ 为导通角：

晶闸管在一个周期时间内导通的电角度

范围： $[\pi, 0]$

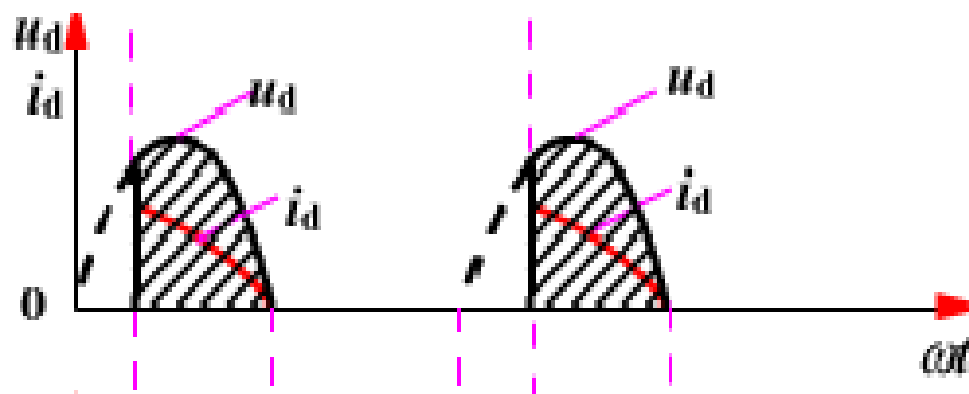
$$\alpha + \theta = \pi$$

晶闸管承受的最高正向和反向电压：



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

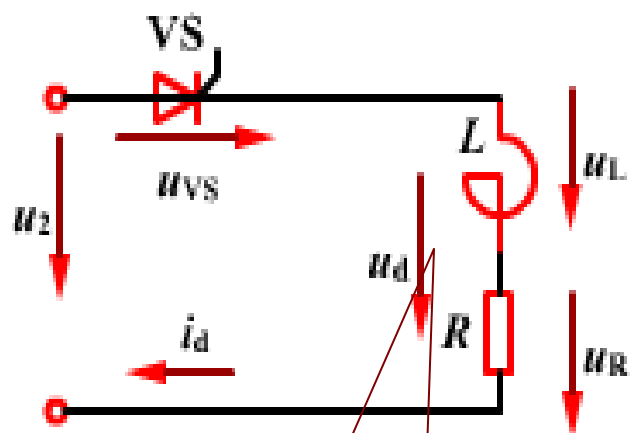
输出电压及电流的平均值



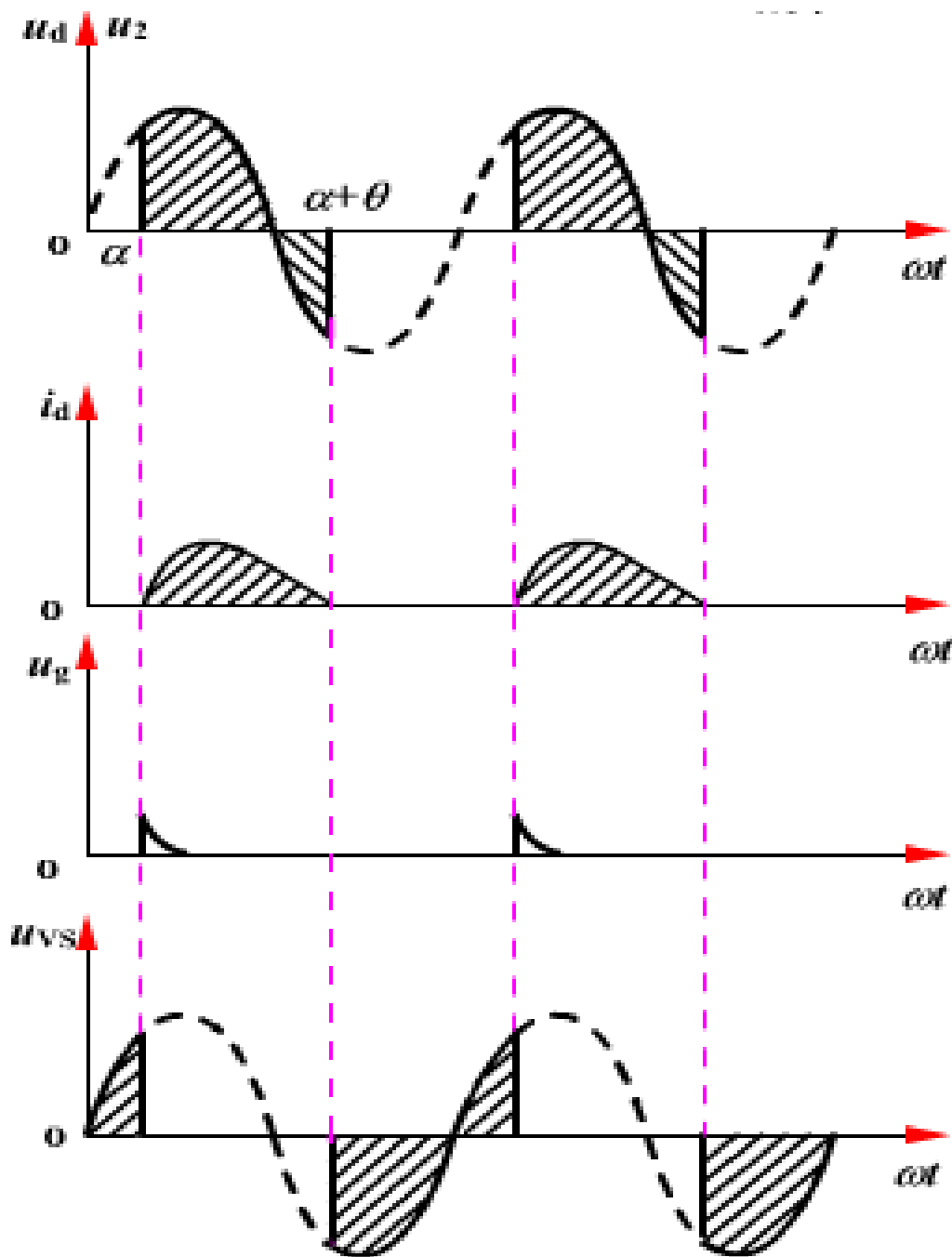
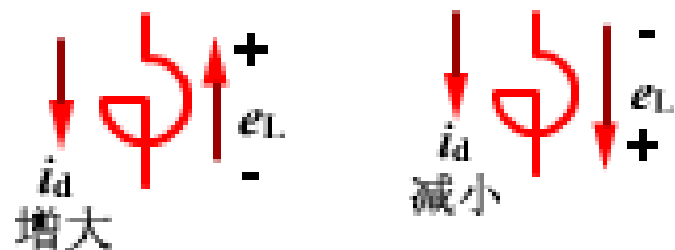
$$U_d = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t d(\omega t)$$
$$= 0.45U_2 \frac{1 + \cos \alpha}{2}$$

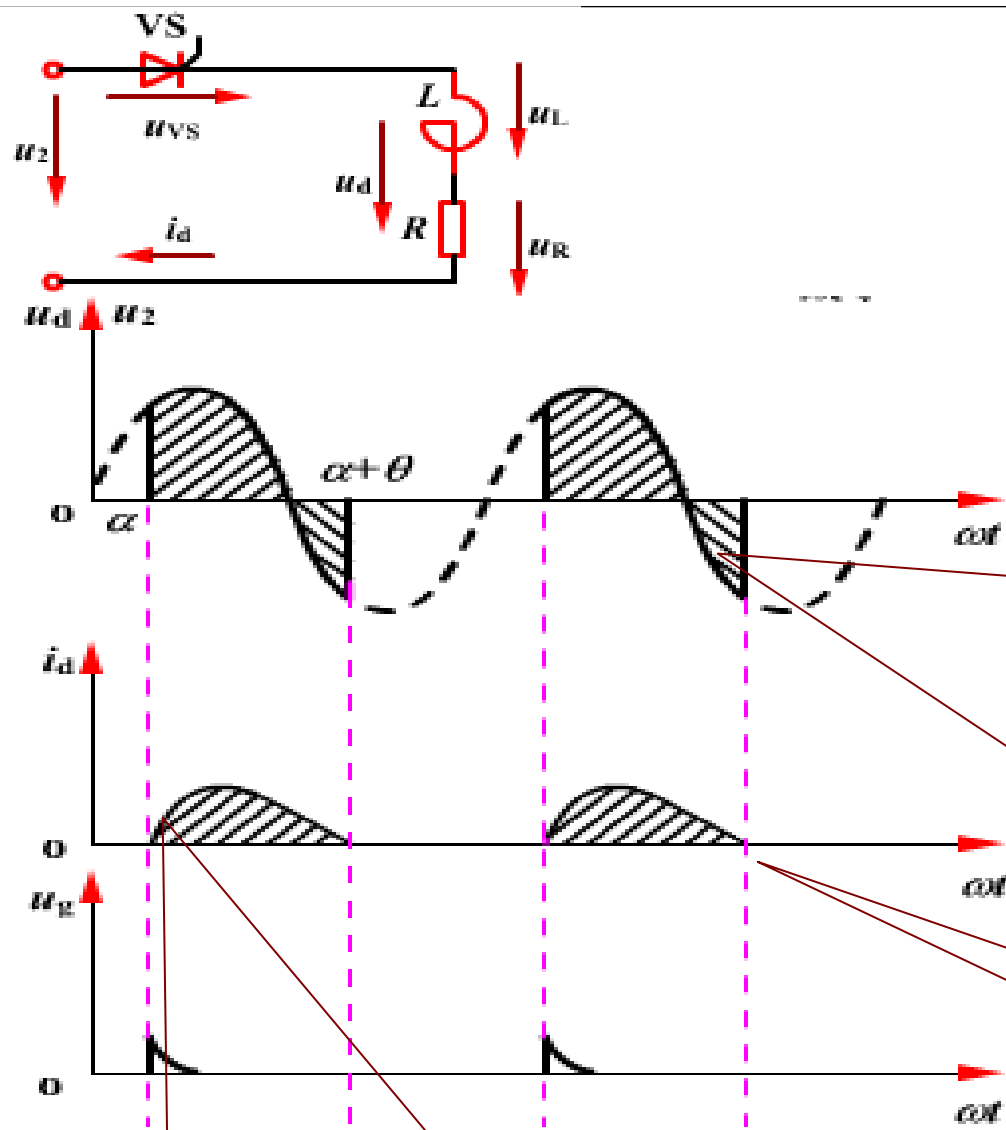
$$I_d = \frac{U_d}{R}$$

2. 电感性负载



电感具有阻碍电流变化的作用



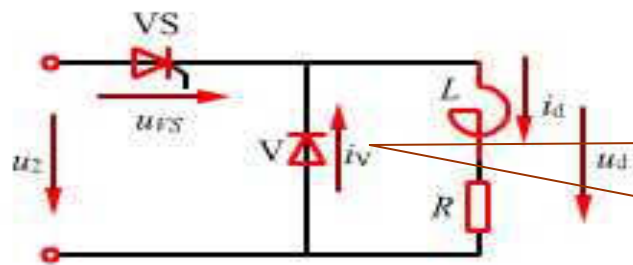


当电源电压下降以及过零变负时，电感产生的自感电势 e_L 阻碍电流减小。

只要 e_L 大于电源的负电压，负载上电流将继续流通，晶闸管继续导通，这时，电感中储存的能量放出来，一部分消耗在电阻上，一部分回送到电源去，因此，负载上电压瞬时值出现负值。

当电流上升时，电感两端的自感电势 e_L 阻碍电流的上升，所以，晶闸管触发导通时，电流要从零逐渐上升。电感储存能量。

到某一时刻，当流过晶闸管的电流小于维持电流时，晶闸管关断，并且立即承受反向电压。



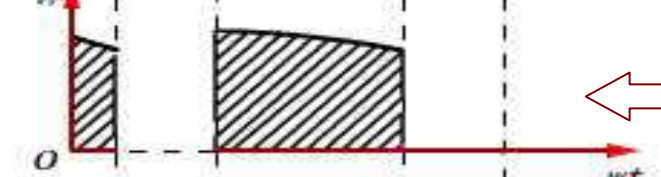
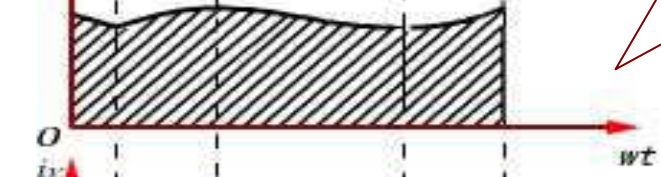
加续流二极管 D ，用于消除反电动势的影响，使晶闸管在 u_2 过零后关断。



输出电压 u_d 与 α 的关系也与电阻性负载一样。



负载电流的波形与电阻性负载时有很大不同：在晶闸管导通期间负载电流 i_d 由电源提供，而当晶闸管关断时，则由电感通过续流二极管来提供。



流过二极管平均电流：

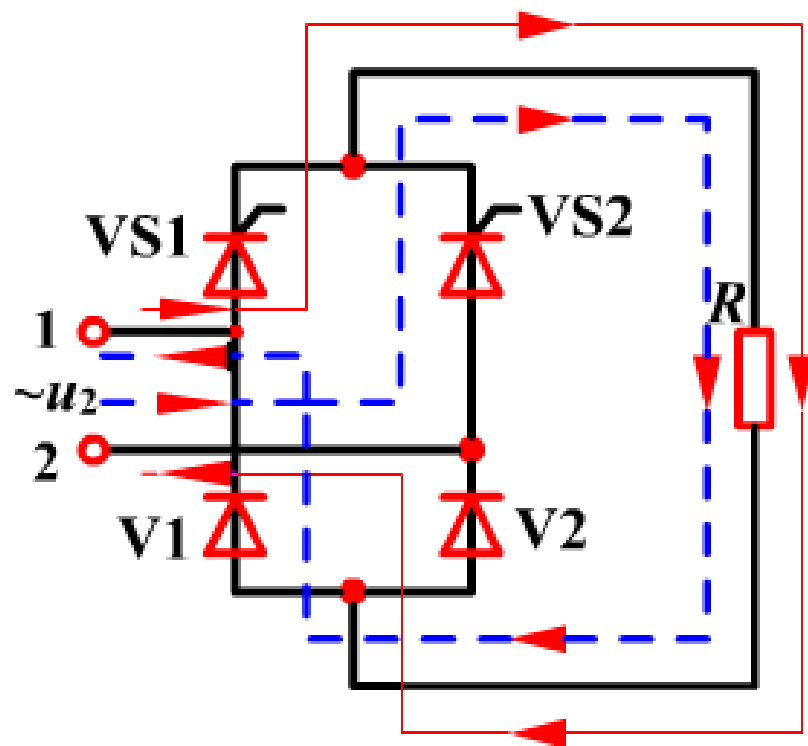
$$I_V = \frac{2\pi - \theta}{2\pi} I_d$$

流过晶闸管平均电流： $I_{VS} = \frac{\theta}{2\pi} I_{d1}$



10.2.2 单相桥式可控硅整流电路

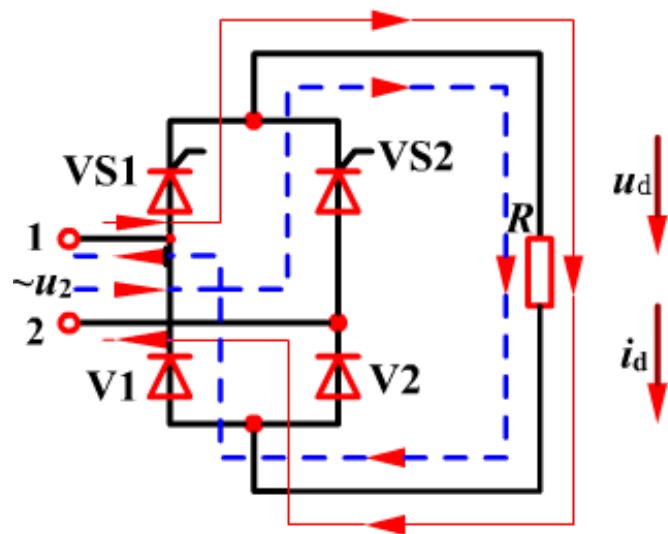
1. 单相半控整流桥——电阻性负载



VS1和VS2是晶闸管，
V1和V2是不可控的二极管

U_2 在正半周时的电流：
VS1→R→V2

U_2 在负半周时的电流：
VS2→R→V1



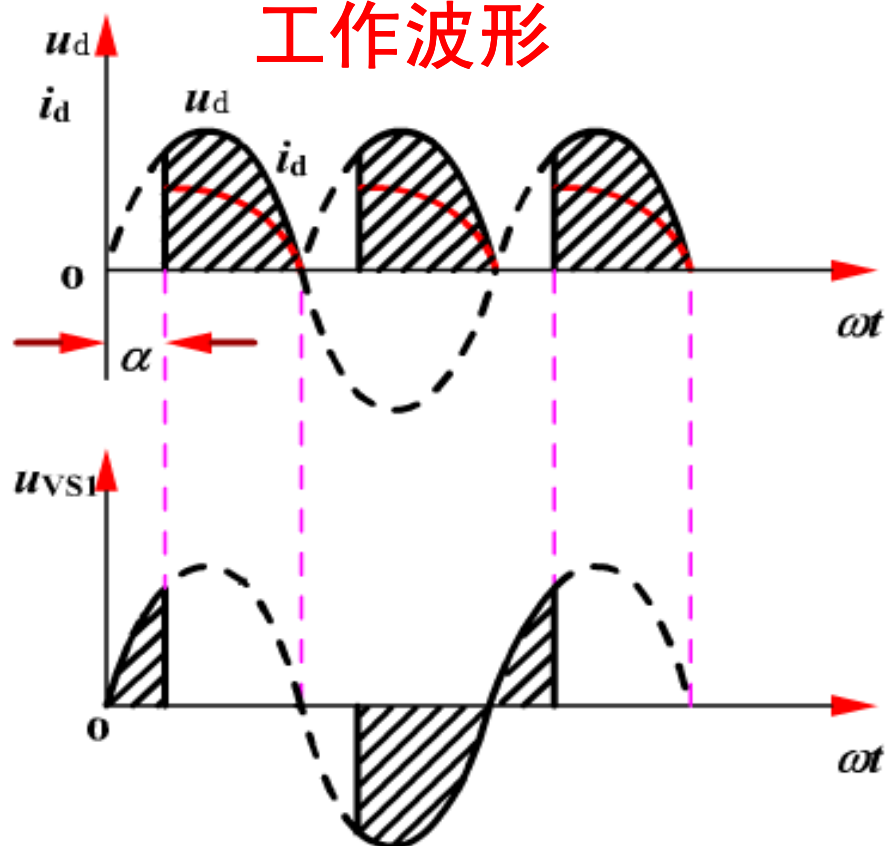
输出电压及电流的平均值

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

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

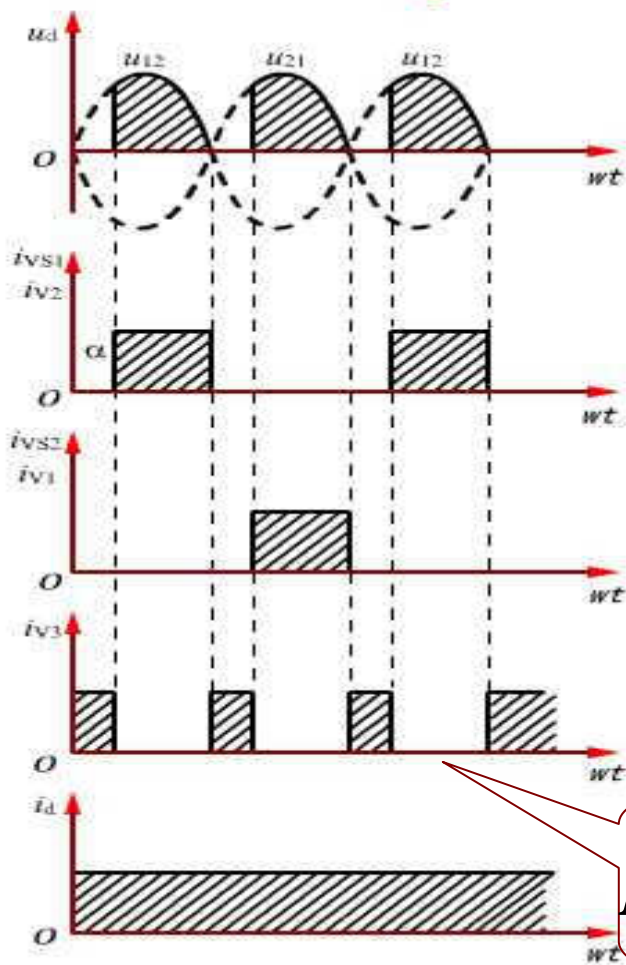
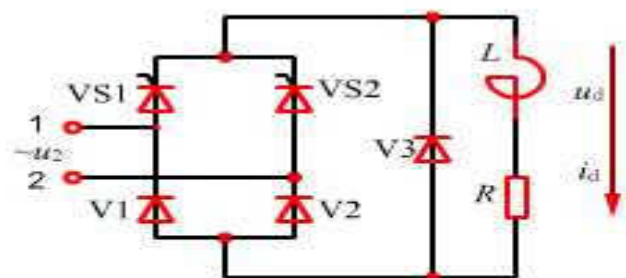
$$I_d = \frac{U_d}{R}$$

工作波形

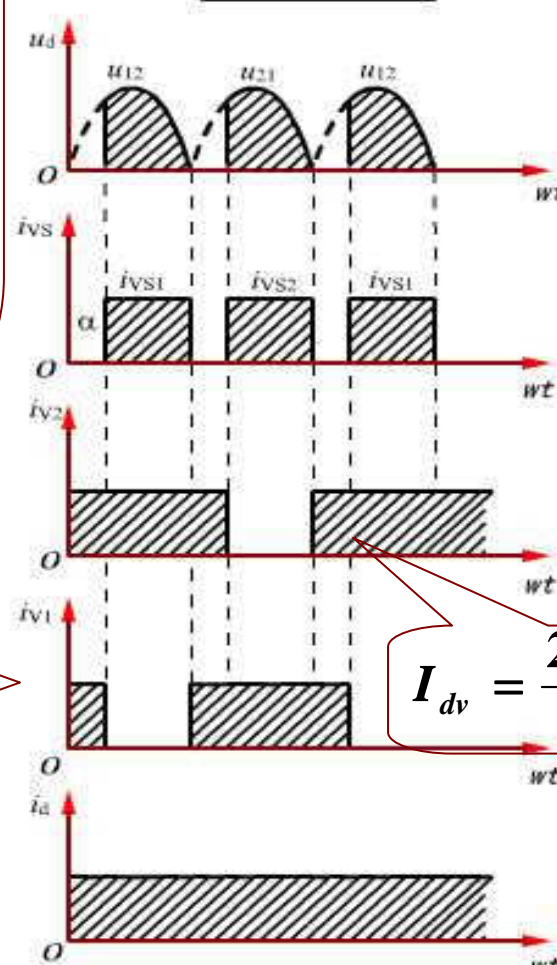
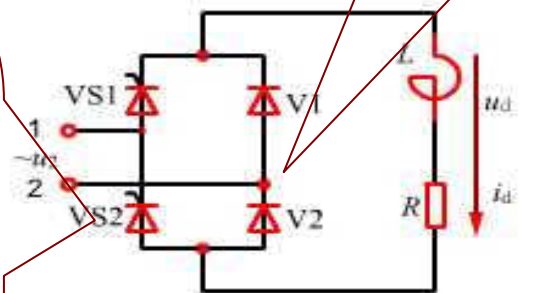


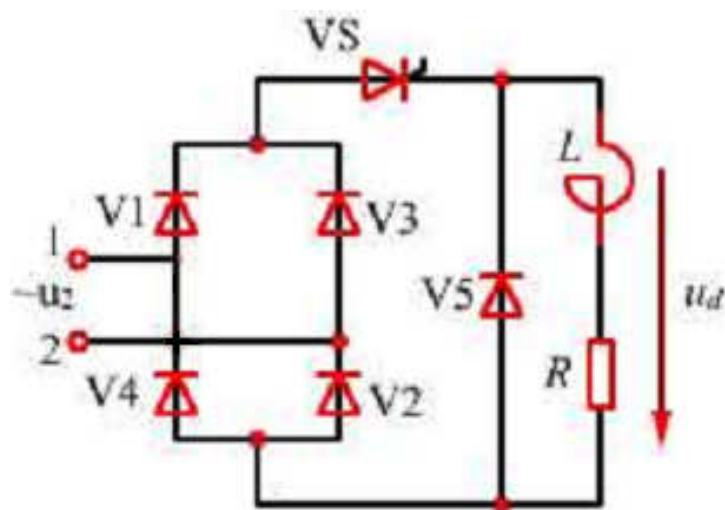
元件承受的最高正反向电压为电源电压的最大值： $\sqrt{2}U_2$

2. 单相半控整流桥——电感性负载



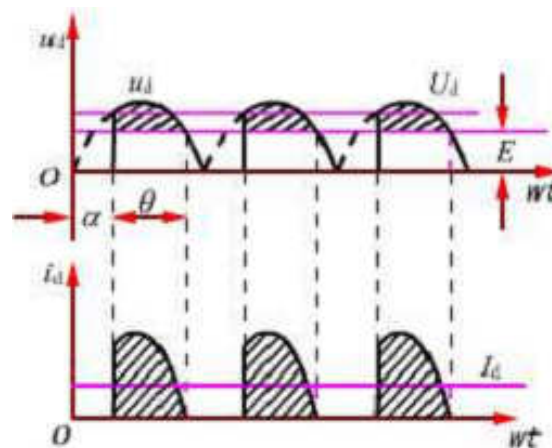
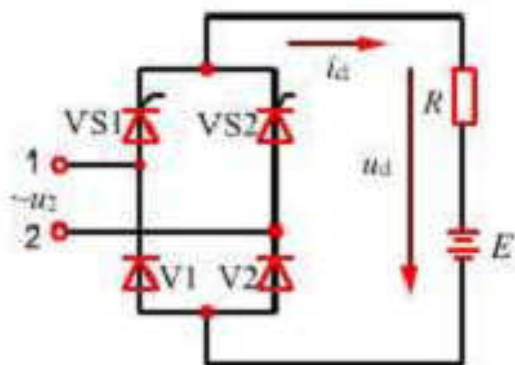
V1、V2形成
续流





四只整流二极管组成单相桥式电路，将交流电整流成脉动的直流电；用一只晶闸管进行控制，改变晶闸管的控制角，即可改变其输出电压。本电路带电阻性负载时，其输出电压平均值的计算公式与半控桥一样；带电感性负载时，为了避免晶闸管失控，必须在负载两端并接续流二极管，否则，电感性电流会在电源电压为零时维持晶闸管导通，而使晶闸管无法关断，造成失控。

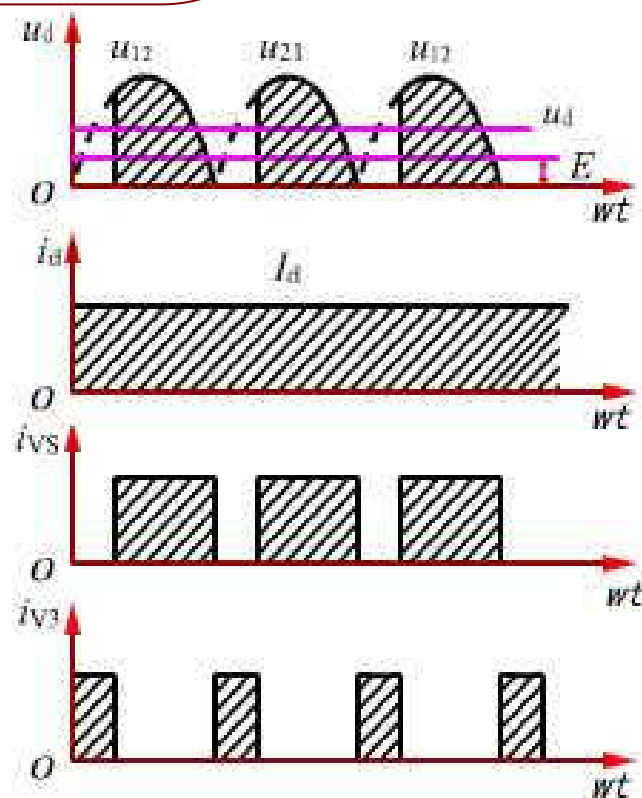
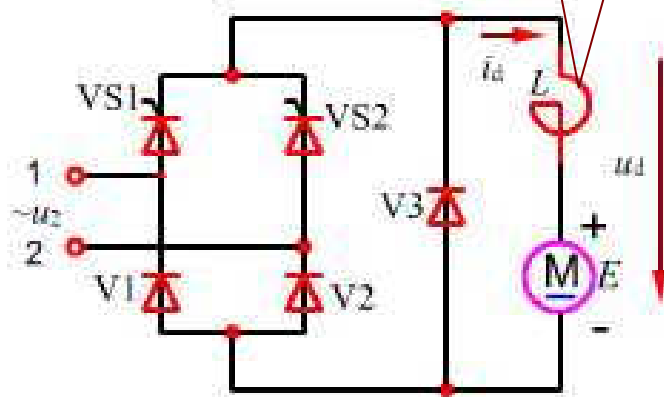
3. 单相半控整流桥——反电势负载



- 电源电压高于反电势，有触发脉冲，晶闸管才导通
- 晶闸管截止时，负载上的电压等于反电动势
- 反电势负载上的平均电压可能高于纯电阻负载
- 平均输出电流： $I_d = (U_d - E) / R$
- 电流的幅值与平均值之比相当大，晶闸管元件工作条件差，晶闸管必须降低电流定额使用

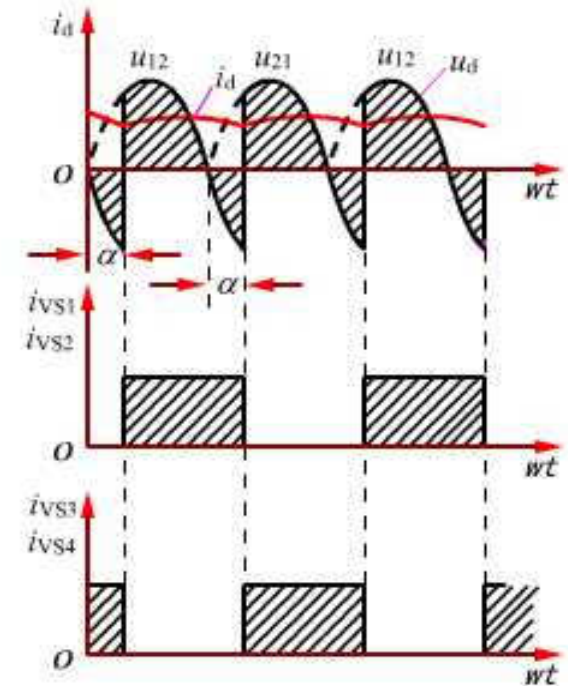
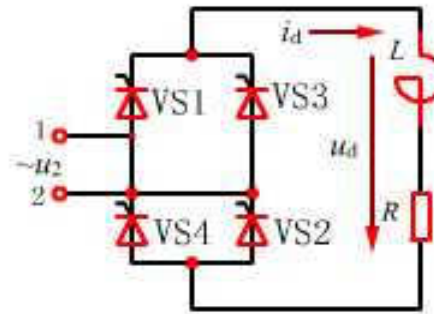
4. 单相半控整流桥——反电势+电抗负载

串联电抗器，用以平滑电流的脉动



5. 单相全控整流桥

- 电阻性负载和半控整流相同，控制角范围为：
[0, π]
- 电感性负载时，如果有续流二接管也和半控整流一样
- 无续流二极管时，可以逆变，即电压为负。

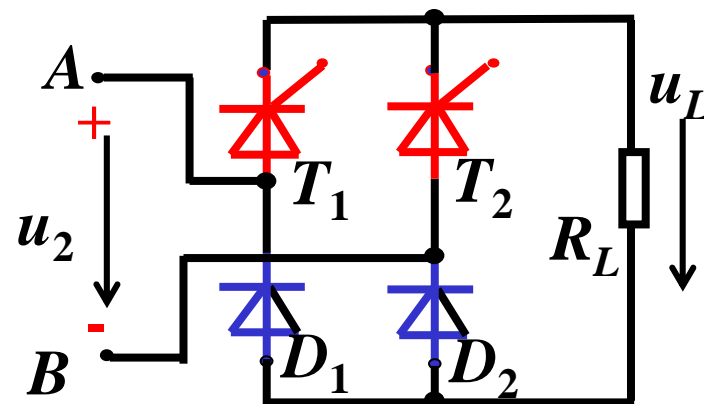


$$U_d = \frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} \sqrt{2}U_2 \sin wtd (wt)$$

$$= \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 \cos \alpha = 0.9U_2 \cos \alpha$$

主要用于需要正反转的逆变电路中；
一般采用半控桥电路。

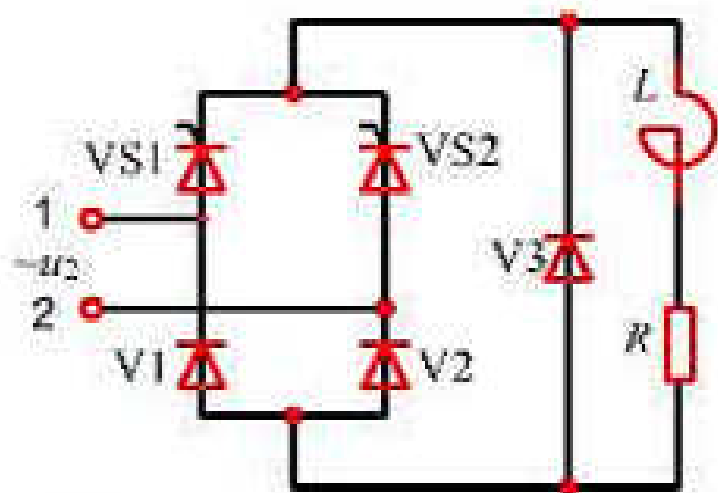
例：桥式可控整流电路中，
 $U_2=220\text{V}$ ， $R_L=3\Omega$ ，可控硅
 控制角 $\alpha=15\sim 180^\circ$ ，求输
 出电压平均值 U_d 的调节范
 围，以及可控硅（包括二
 极管）的电流平均值的最
 大值和承受的最大反向电
 压。



$$U_d = 0.9U_2 \frac{1 + \cos \alpha}{2} \quad \left\{ \begin{array}{l} = 191\text{V}, \quad \alpha = 15^\circ \\ = 0\text{V}, \quad \alpha = 180^\circ \end{array} \right.$$

$$I_d = \frac{U_d}{R_L} = 191/3 = 64\text{A}$$

承受的最高反向电压： $U_{DRM} = \sqrt{2}U_2 = 311\text{V}$



如图所示， $R=5\Omega$ ，电源电压 $U_2=220V$ ，晶闸管控制角 α 为 60° ，试求：

- 1) 输出直流电压和负载电流
- 2) 晶闸管和二极管V1、V2的导通角、电流平均值和有效值、V3的导通角？

解：1) 输出直流电压

$$U_d = 0.9U_2 \frac{1 + \cos \alpha}{2} = 0.9 * 220 * (1 + \cos 60^\circ) / 2 = 148.5(V)$$

3) 晶闸管的最大正反向电压

2) 负载电流 $I_d=U_d/R \approx 30A$

晶闸管与二极管V1、V2导通角 $\theta = 180^\circ - \alpha = 120^\circ$

续流二极管V3导通角 $\theta_{V3} = 2\pi - 2\theta = 360^\circ - 240^\circ = 120^\circ$

晶闸管与二极管V1、V2电流平均值 $I_{dVS} = (\theta / 2\pi) * I_d = 10A$

晶闸管与二极管V1、V2电流有效值

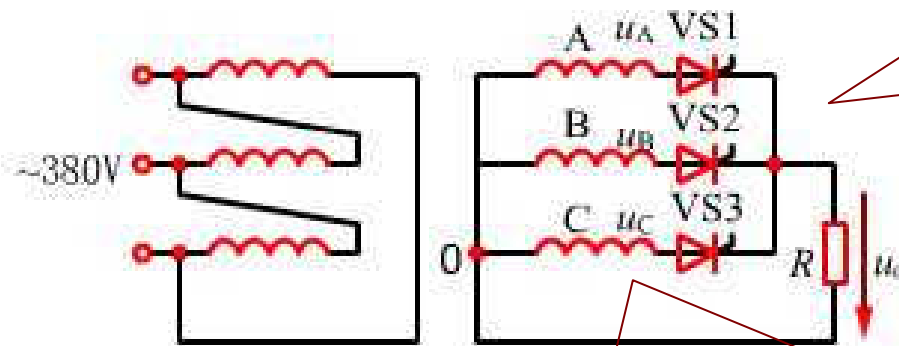
$$I_e = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\pi/3}^{\pi} I_d^2 d(\omega t)} = 17.3A$$

3) 晶闸管的最大正反向电压为 $\sqrt{2}U_2 = 311V$

10.3 三相可控整流电路

10.3.1 三相半波可控整流电路

1. 电阻性负载



整流变压器副边接成星形，有个公共零点“0”，所以也叫三相零式电路

U_A 、 U_B 、 U_C 分别表示三相对“0”点的相电压，有效值为 U_{2p}

触发顺序：VS1、VS2、VS3，

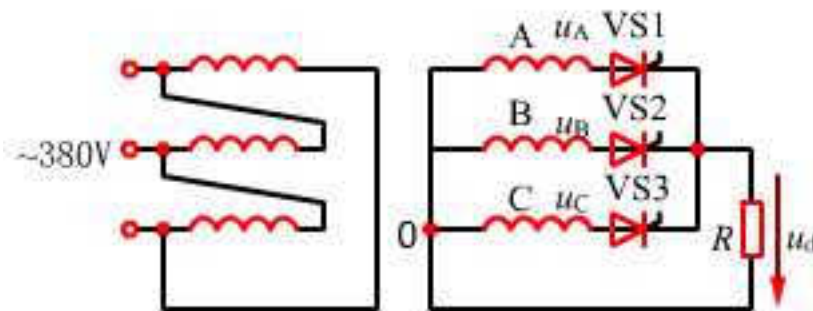
触发脉冲的间隔为 $2\pi/3$ （120度）

晶闸管承受的最大正向电压为：相电压最大值 $\sqrt{2}U_{2p}$

晶闸管承受的最大反向电压为：线电压最大值 $\sqrt{3} * \sqrt{2}U_{2p} = \sqrt{6}U_{2p}$

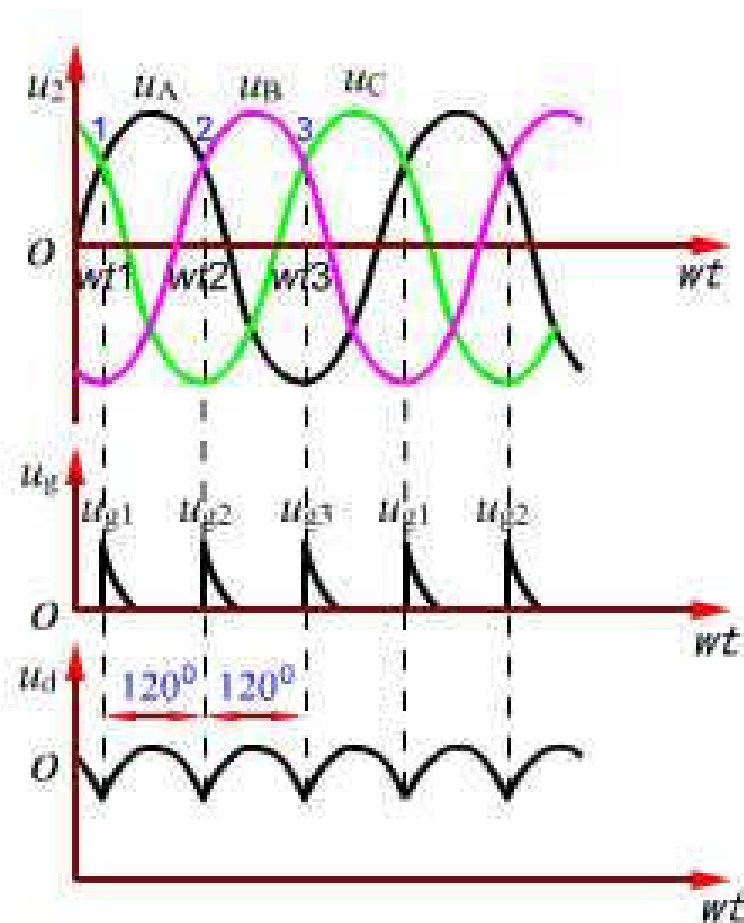
三相半波可控整流电路--电阻性负载

$\alpha=0$ 的情况



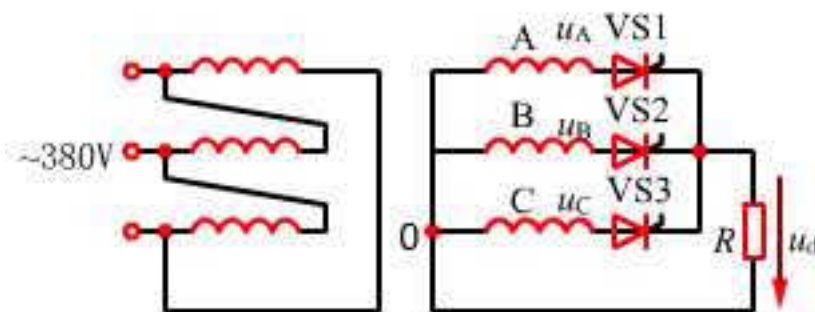
$\alpha = 0$, 输出电压和三相不控半波整流回路一样, 每个晶闸管轮流导通 $2\pi/3$, 其平均电压为:

$$U_d = \frac{1}{2\pi/3} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} \sqrt{2}U_{2p} \sin wtd \quad (wt)$$
$$= 1.17U_{2p}$$



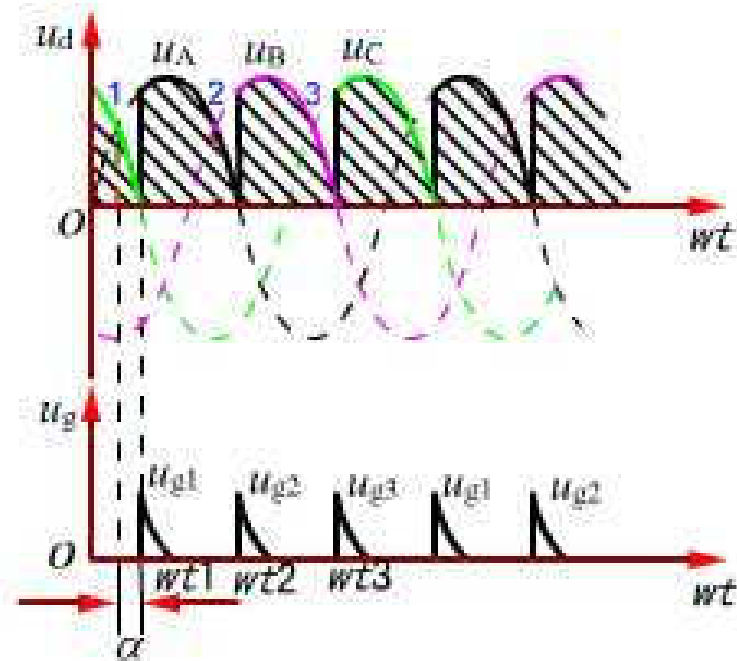
三相半波可控整流电路—电阻性负载

$0 < \alpha \leq \pi/6$ 的情况



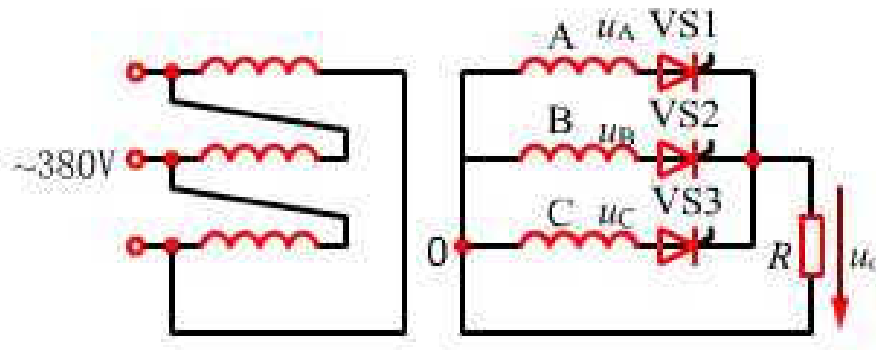
$0 < \alpha \leq \pi/6$, 输出电压为每个晶闸管轮流导通 $2\pi/3$, 其平均电压为:

$$U_d = \frac{1}{2\pi/3} \int_{\pi/6+\alpha}^{5\pi/6+\alpha} \sqrt{2}U_{2p} \sin wtd \quad (wt)$$
$$= 1.17U_{2p} \cos \alpha$$



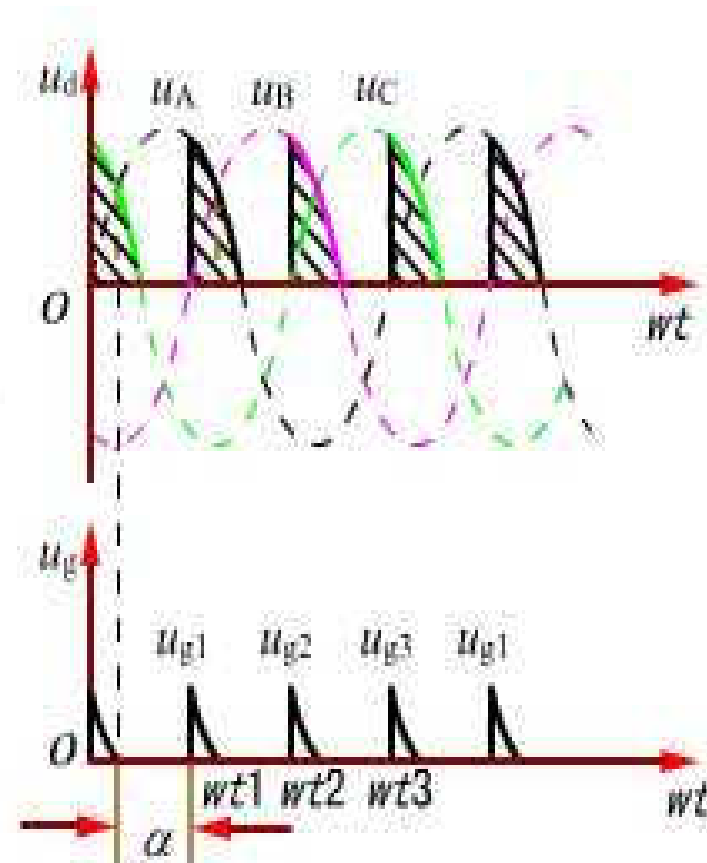
三相半波可控整流电路—电阻性负载

$\pi/6 < \alpha \leq 5\pi/6$ 的情况



当 $\pi/6 < \alpha \leq 5\pi/6$, 输出电压为每个晶闸管轮流导通小于 $2\pi/3$, 其平均电压为:

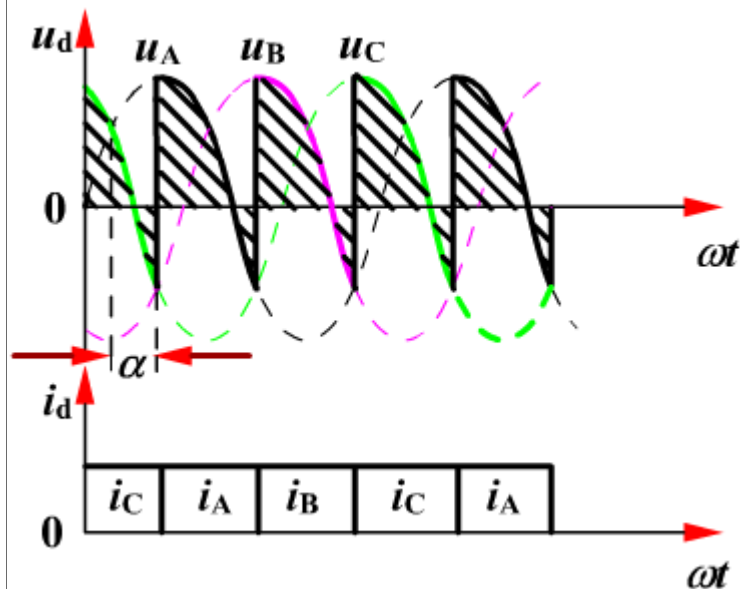
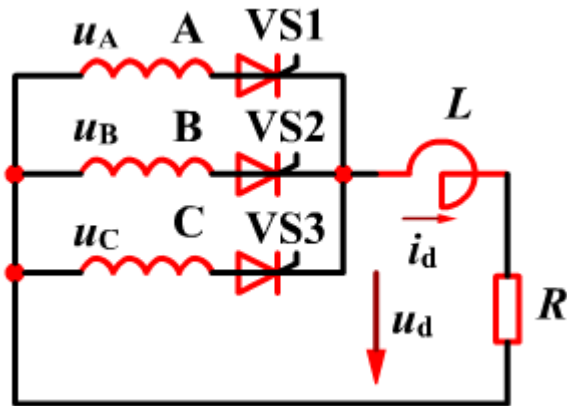
$$U_d = \frac{1}{2\pi/3} \int_{\pi/6+\alpha}^{\pi} \sqrt{2}U_{2p} \sin wtd \quad (wt)$$
$$= 1.17U_{2p} \frac{1+\cos(\alpha+\frac{\pi}{6})}{\sqrt{3}}$$



结论：三相半波可控整流电路带电阻性负载 α 范围：
 $[0, 5\pi/6]$

三相半波可控整流电路

2. 电感性负载



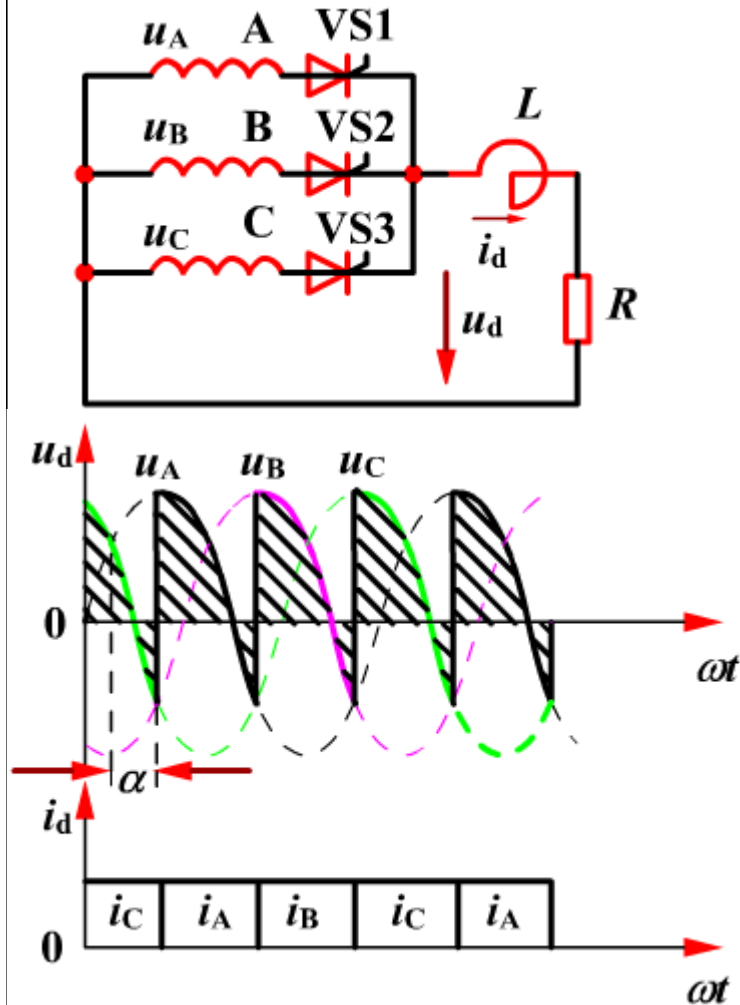
$0 < \alpha \leq \pi/6$, 输出电压为每个晶闸管轮流导通 $2\pi/3$, 其输出电压为连续波形, 此时电感使得电流波形变得平滑。

$\pi/6 < \alpha \leq \pi/2$, 由于电感的续流作用, 使得虽然电压的瞬时值会变负, 但输出电压为每个晶闸管轮流导通 $2\pi/3$, 其输出电压为连续波形, 此时电感使得电流波形变得平滑。

$\alpha = \pi/2$ 时, 平均电压为 0, 所以其导通角小于 $\pi/2$ 。

三相半波可控整流电路

2. 电感性负载



输出电压平均电压为：

$$U_d = \frac{1}{2\pi/3} \int_{\pi/6+\alpha}^{5\pi/6+\alpha} \sqrt{2}U_{2p} \sin wtd \quad (wt)$$
$$= 1.17U_{2p} \cos \alpha$$

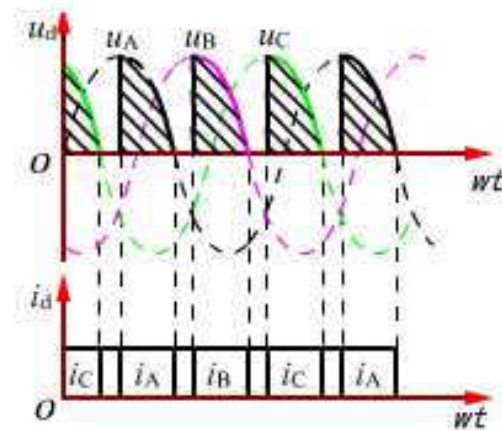
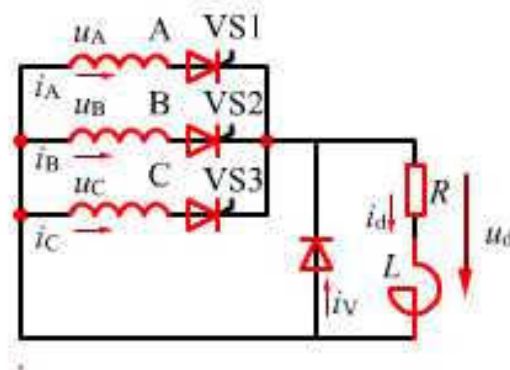
晶闸管承受的最大正向电压和最大反向电压相同，为 $\sqrt{6}U_{2p}$

结论：三相半波可控整流电路带电感性负载， α 范围： $[0, \pi/2]$

三相半波可控整流电路

3. 电感性负载, 有续流二极管

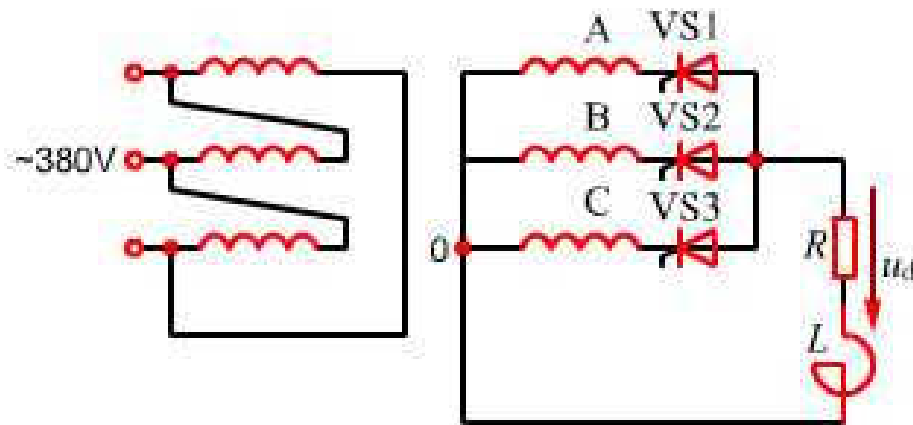
- 由于续流二极管的作用, 负载上的电压波形同电阻性负载, 电流波形同电感性负载
- 导通角同电阻性负载



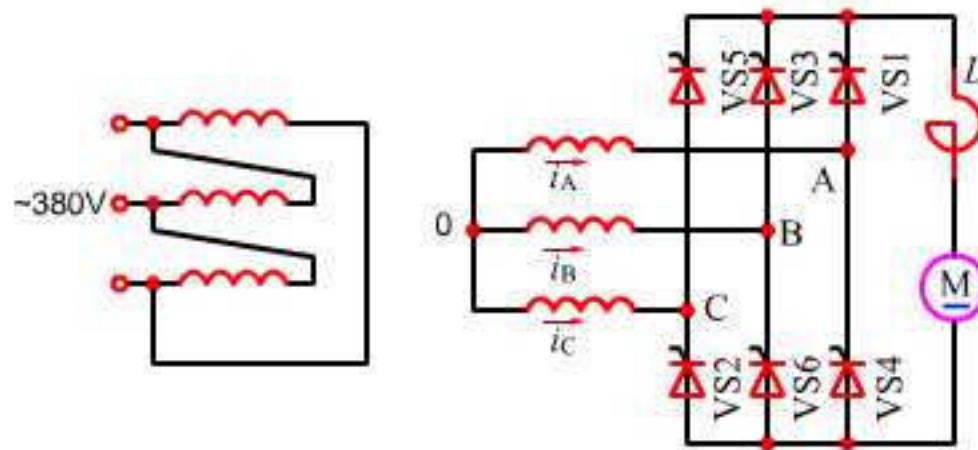
三相半波可控整流电路优缺点

- 比较容易实现220V直流只需三只晶闸管
- 晶闸管承受反向电压高
- 变压器每相绕组只有1/3时间通电, 利用效率低
- 变压器通过单方向电流, 产生直流磁势, 造成铁芯饱和, 附加损耗和发热

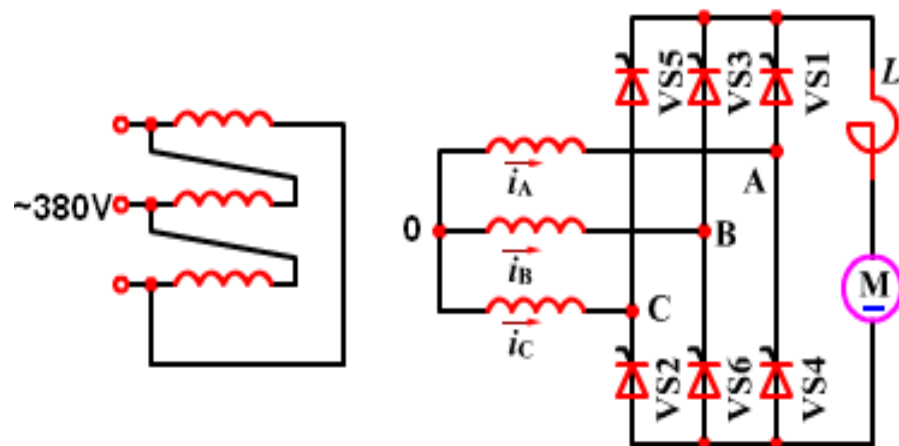
作共阳极组整流电路



共阴、共阳串联的三相桥式整流电路

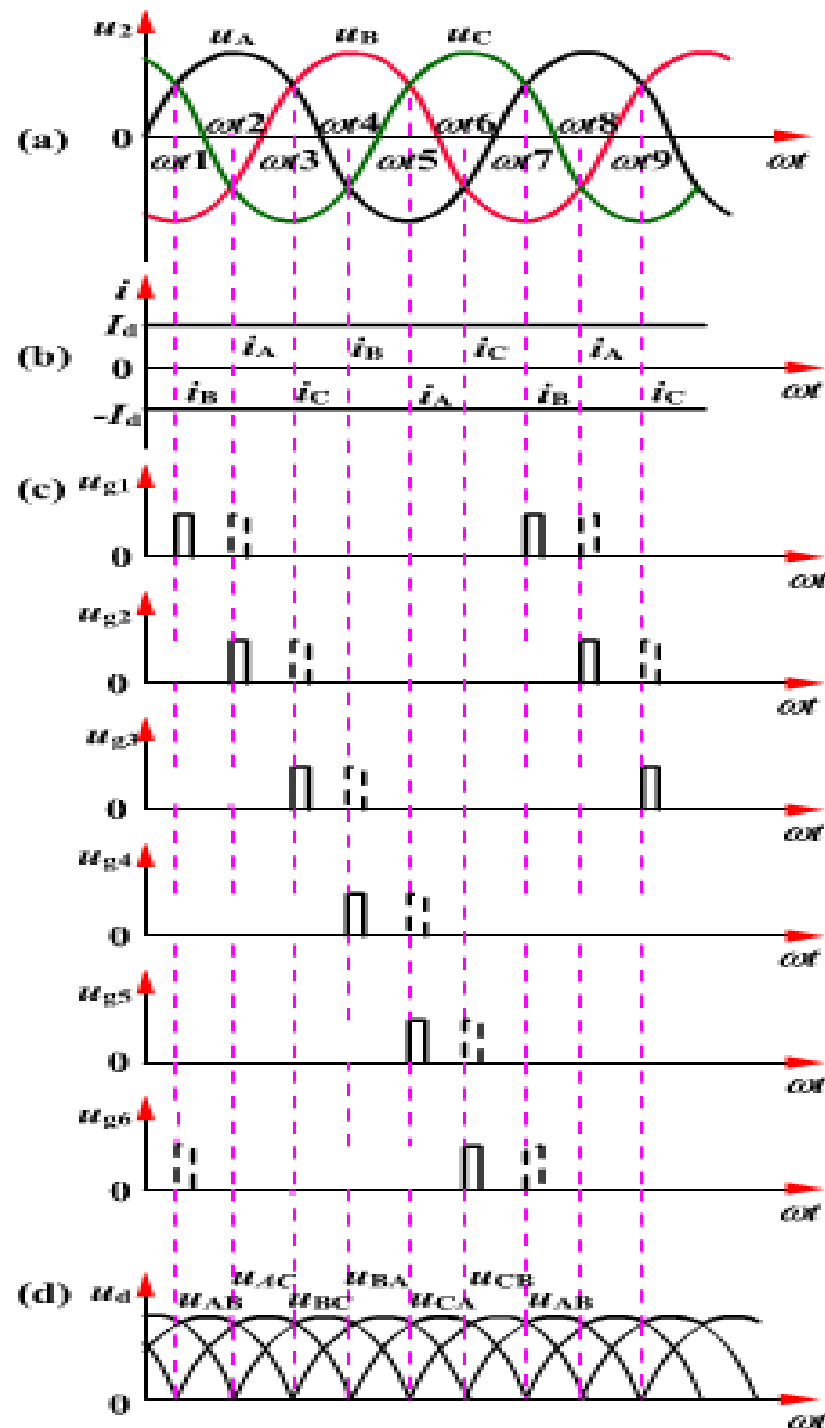


三相桥式全控整流电路



输出电压平均为:

$$U_d = 2.34U_{2p} \cos \alpha \dots \alpha \in [0, \pi / 3)$$



各种整流方式比较

电路名称	特点	适应范围
单相半波电路	电路最简单，各项指标都较差	只适用于小功率和输出电压波形要求不高的场合
单相桥式电路	各项性能较好，电压脉动频率较大	最适合于小功率的电路
直流负载侧的单相桥式电路	只用一只晶闸管，接线简单，各项性能较好	一般用于小功率的反电势负载
三相半波可控整流电路	各项指标都一般	用得不多
三相桥式可控整流电路	各项指标都好，元件承受的峰值电压最低	最适合于大功率高压电路

10.4 逆变器

- 整流：把交流电变成直流电
- 逆变：把直流电变成交流电
- 变流器：一套装置可以实现整流和逆变双向过程，叫变流器
- 有源逆变：变流器的交流侧接到电源，把直流电变成同频率的交流电反馈到电网中。
- 无源逆变：交流侧接负载，把直流电变成频率可变的交流电驱动负载。

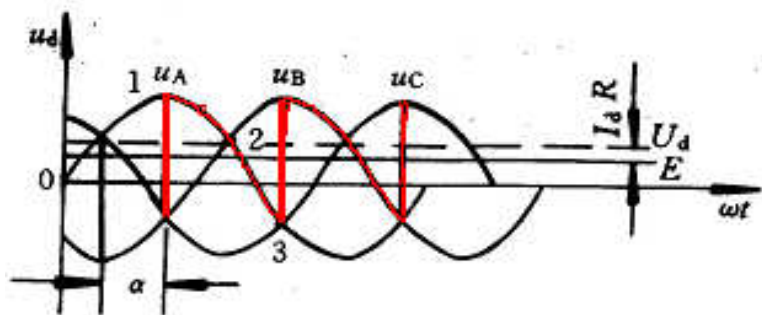
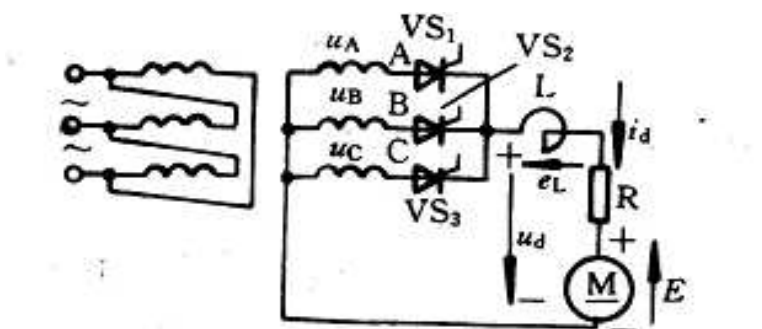
10.4.1 有源逆变电路

常用的变流器，一边连着交流源，另一边连着直流源。

整流：电能由交流侧传送到直流侧；

逆变：电能由直流侧传送到交流侧。

1. 整流状态 ($0 < \alpha < \pi/2$)



(a) 整流状态

电压平衡方程式：

$$u_d = E + I_d R + L \frac{di_d}{dt}$$

$$U_d = E + I_d R$$

$$L \frac{di_d}{dt} = u_d - U_d$$

$$\text{整流时, } U_d \geq E \geq 0,$$

$$\text{逆变时, } 0 > U_d \geq E$$

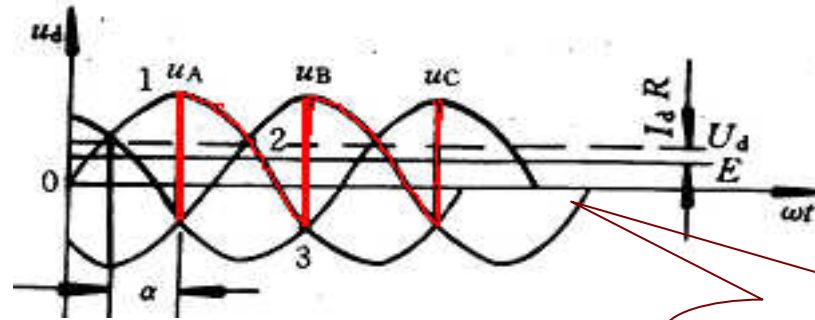
$$U_d \geq E, I_d > 0$$

电压平衡方程式:

$$u_d = E + I_d R + L \frac{di_d}{dt}$$

$$U_d = E + I_d R$$

$$L \frac{di_d}{dt} = u_d - U_d$$



交流电源输出能量:
整流状态

整流（假设 $\alpha = \pi/3$ ）：

1、 ωt_1 时刻触发 VS_1 使之导通， $u_d = u_A$ ，在 1 ~ 2区间，

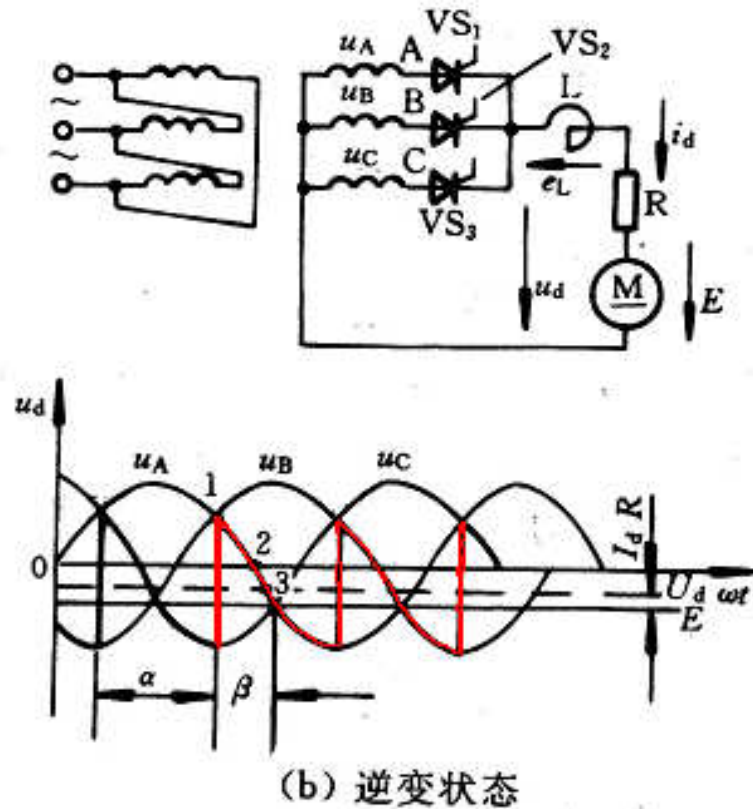
$u_d > U_d$ ， i_d 增加， $L \frac{di_d}{dt} = u_d - U_d > 0$ ，电感储存能量。

2、到 2点， $u_d = U_d$ ， $\frac{di_d}{dt} = 0$ ， i_d 到达最大值

3、过 2点后， $u_d < U_d$ ， i_d 减小， $L \frac{di_d}{dt} = u_d - U_d < 0$ ，电感释放能量。

在 $u_d < E$ 时仍能保持 VS_1 导通直到触发 VS_2 或能量耗尽。

2. 逆变状态 ($\pi/2 < \alpha < \pi$)



电压平衡方程式:

$$u_d = E + I_d R + L \frac{di_d}{dt}$$

$$U_d = E + I_d R$$

$$L \frac{di_d}{dt} = u_d - U_d$$

整流时, $U_d \geq E \geq 0,$

逆变时, $0 > U_d \geq E$

$$U_d \geq E, I_d > 0$$

电压平衡方程式($E \leq U_d < 0$):

$$u_d = E + I_d R + L \frac{di_d}{dt}$$

$$U_d = E + I_d R$$

$$L \frac{di_d}{dt} = u_d - U_d$$

逆变 (假设 $\alpha = 2\pi / 3$) :

1、 ωt_1 时刻触发 VS_1 使之导通,

$u_d = u_A$, 在1~2区间, $u_d > 0$,

i_d 增加, $L \frac{di_d}{dt} = u_d - U_d > 0$,

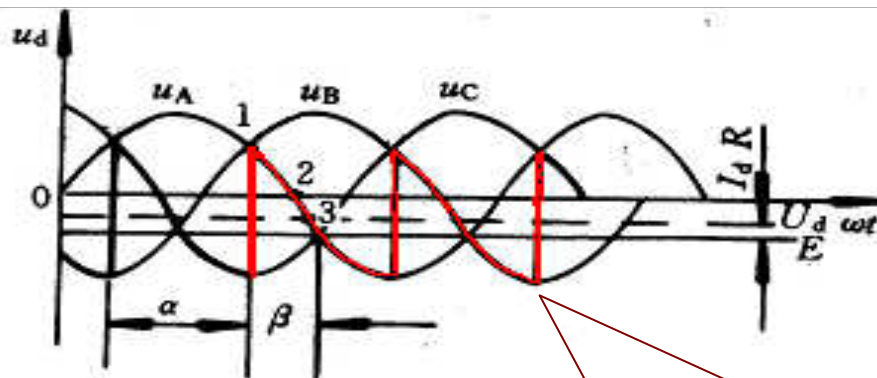
电感储存能量, 交流电源和电机释放能量.

2、在2~3点, $u_d < 0$, 但 $|u_d| < |U_d|$, $L \frac{di_d}{dt} = u_d - U_d > 0$,

电感和交流电源吸收能量, 电机释放能量

3、在3点, $u_d = U_d$, $L \frac{di_d}{dt} = 0$, 电流达到最大值

4、过3点后, $u_d < U_d$, $L \frac{di_d}{dt} = u_d - U_d < 0$, 电感和电机释放能量, 交流电源吸收能量.



(b) 逆变状态

交流电源吸收能量：逆变状态

为了方便，引入参数逆 变角 β ，它与控制角 α 的关系为： $\alpha + \beta = \pi$

$$U_d = 1.17U_{2p} \cos \alpha$$

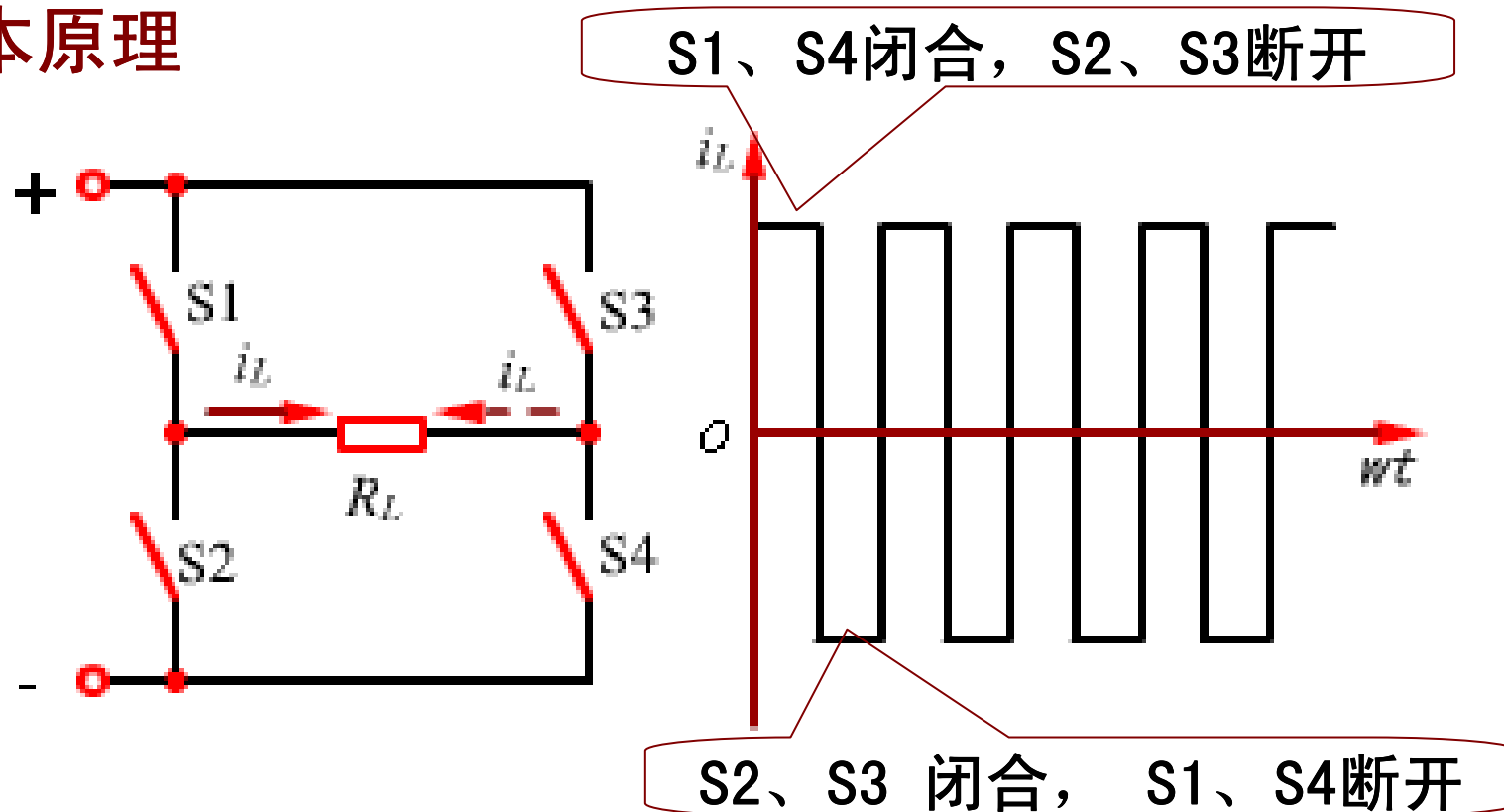
$$U_d = -1.17U_{2p} \cos \beta$$

结论：

整流和逆变，交流和直流，在晶闸管变流器中互相联系着，并在一定的条件下互相转化。当变流器工作在整流状态，就是整流电路；当变流器工作在逆变状态，就是逆变电路。

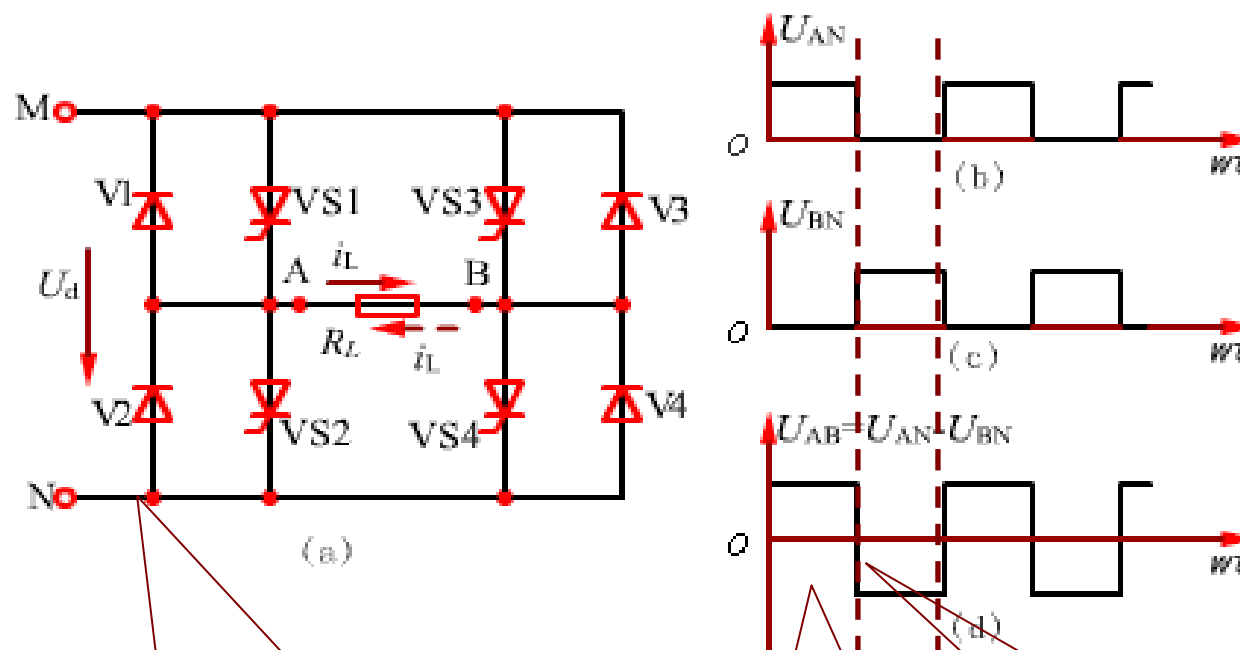
10.4.2 无源逆变电路

基本原理



交流电的频率取决于两组开关每秒内闭合与断开的次数
要得到高频率交流电，用触点开关是不能实现的。

单相晶闸管桥式逆变器



二极管的作用：

- 1、将无功能量反馈回电网
- 2、续流保护和限压作用

VS1、VS4通
VS2、VS3断

VS2、VS3通
VS1、VS4断

单相无源逆变器的电压控制

- 通过控制输入直流电压（外部）
- 通过控制脉冲宽度

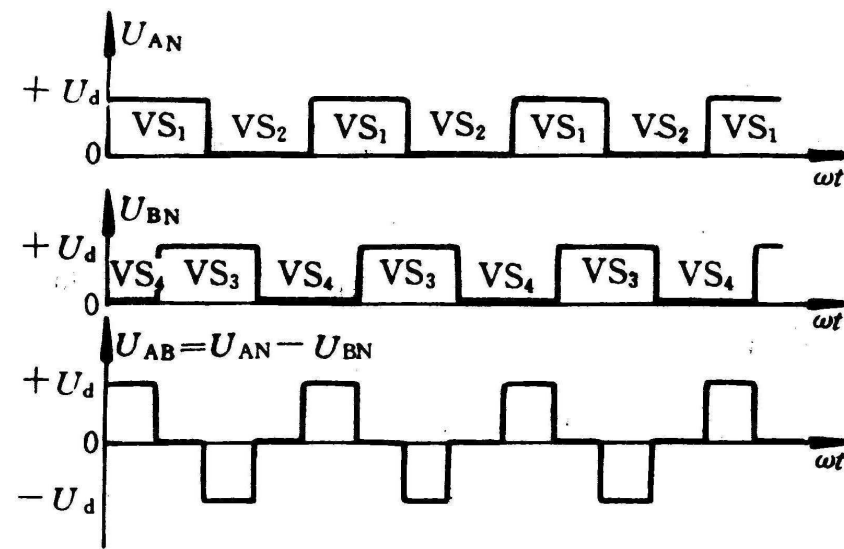
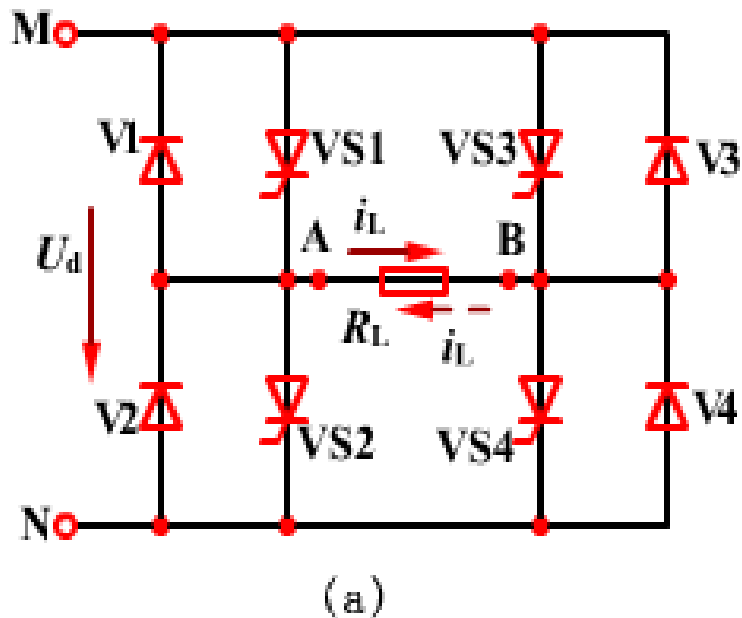
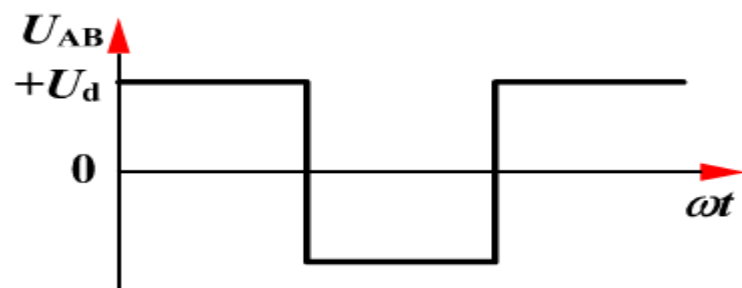


图 10.34 脉宽控制电压波形

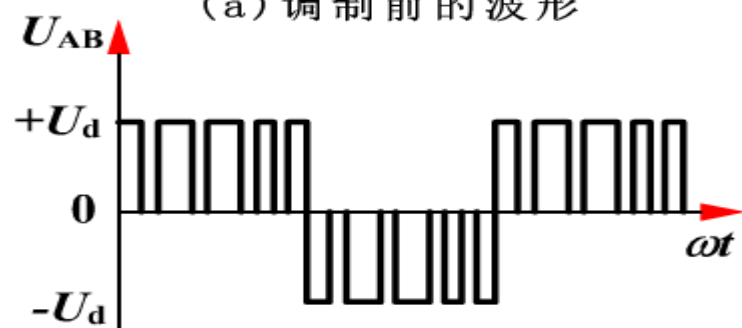
缺点：谐波分量大

• 脉冲宽度调制 (PWM)

VS1、VS4与VS2、VS3通过高频调制控制

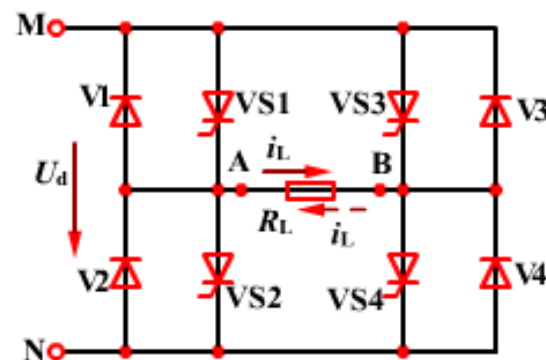


(a) 调制前的波形



(b) 调制后的波形

可以实现频率和电压协调控制；
谐波分量没有得到抑制



(a)

改进措施：使半个周期内多个脉宽以接近正弦规律变化

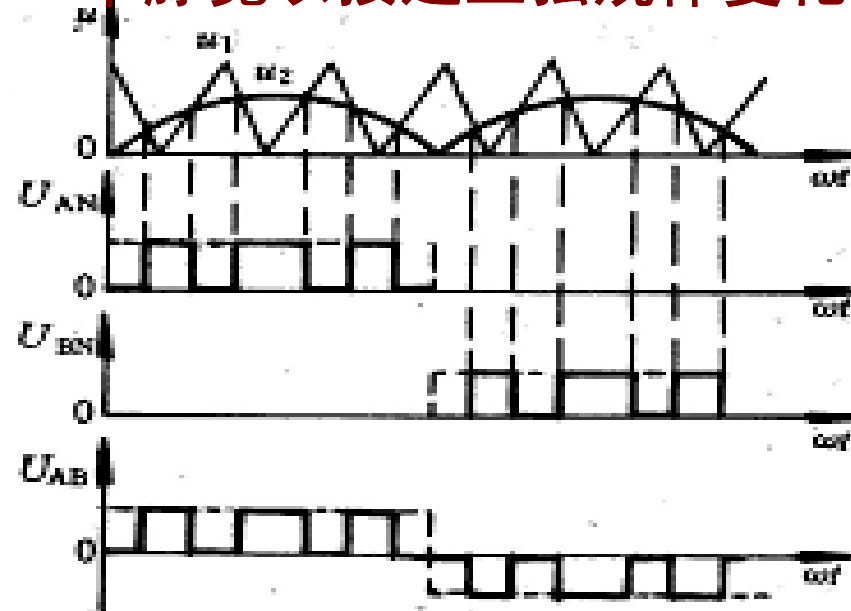
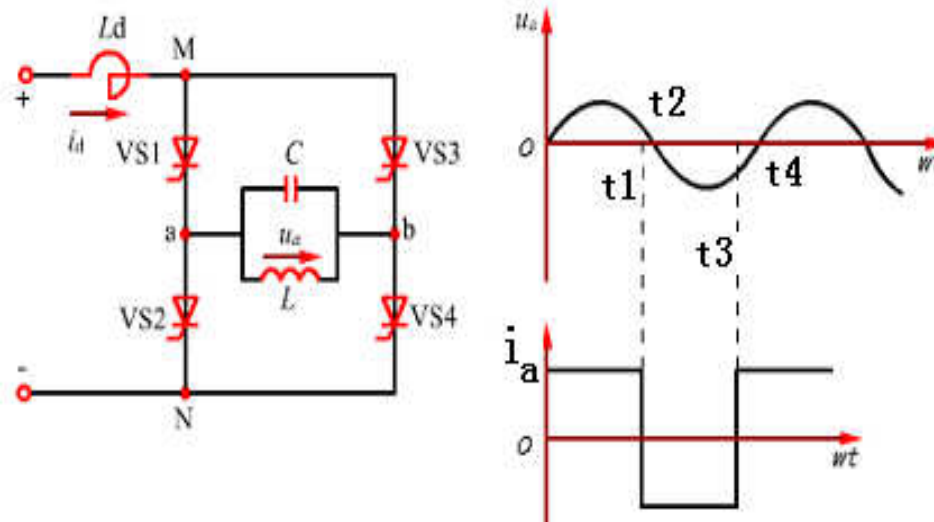


图 10.36 输出正弦波电压波形
大大减小高次谐波成分^{61/71}

无源逆变器的换相（换流）

- 在 t_1 时刻， VS_1 、 VS_4 已导通， u_a 为正，触发 VS_2 、 VS_3
- 由于 VS_2 、 VS_3 导通， a 点的电势为 b 点的电势加 u_a 高于 M 点，所以 VS_1 截止。

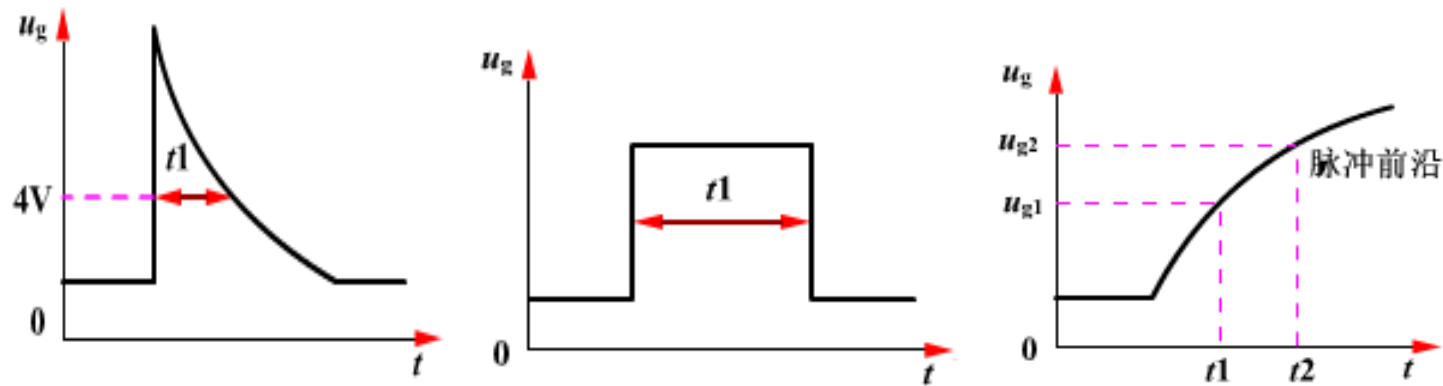


- 所以必须保证 U_a 为正时从 VS_1/VS_4 切换到 VS_2/VS_3 ， U_a 为负时从 VS_2/VS_3 切换到 VS_1/VS_4 ，要求开关频率和LC振荡器频率同步。

10.5 闸管触发电路

要求：

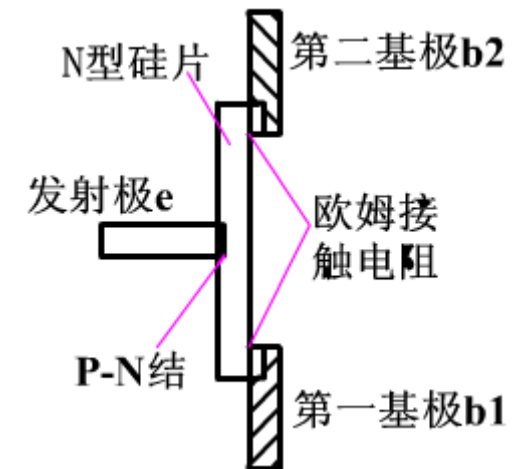
- 提供足够大的触发电压和电流，4-10V
- 足够的触发脉冲宽度（10 μ s以上）
- 不触发时，电压要足够低
- 触发脉冲的前沿要低
- 触发脉冲要和主电路同步



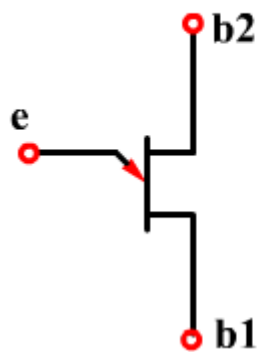
单结晶体管

单结晶体管是一种特殊的半导体器件，它有三个电极，其中一个发射极和两个基极，故又叫双基极二极管。它的外形与普通三极管相似，但特性与晶体三极管不同，其结构如图。

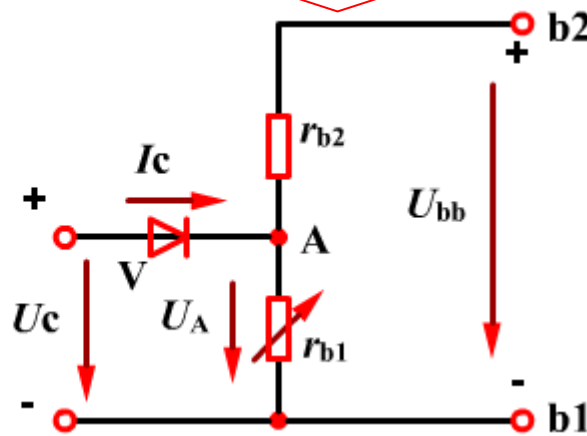
结构



图形符号



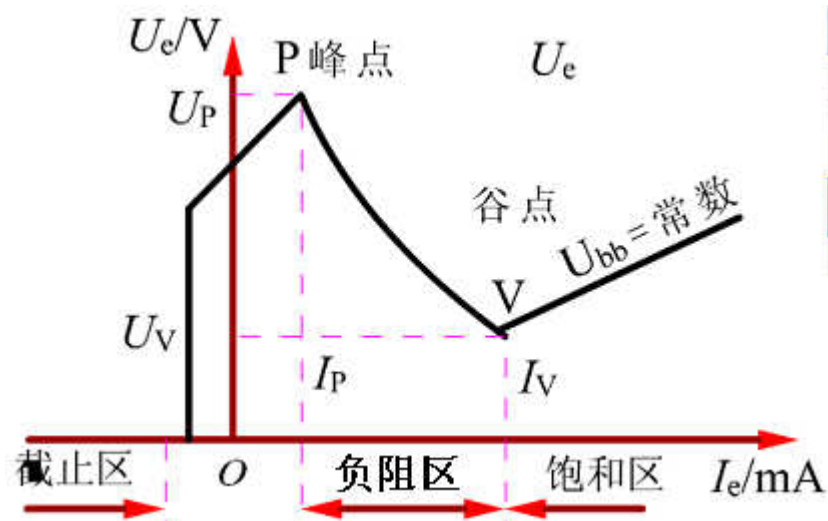
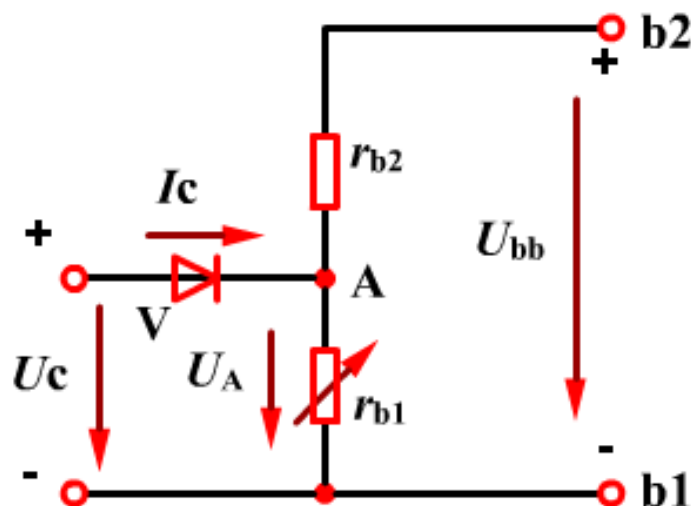
等效电路



$$U_A = U_{bb} \cdot \frac{R_{b1}}{R_{b1} + R_{b2}} = \eta U_{bb}$$

η : 分压比 (与管子结构有关 (0.3 -- 0.9))

单结晶体管工作原理



1. 当 $u_e < U_A$ 时,

PN结反偏, R_{b2} 呈高阻

单结晶体管处于截止区

2. 当 $u_e < U_A + U_D = U_P$ 时

PN结反偏, i_e 很小;

单结晶体管处于截止区

3. 当 $u_e \geq U_P$ 时

PN结正向导通, R_{b1} 减小,

i_e 迅速增加, u_e 减小

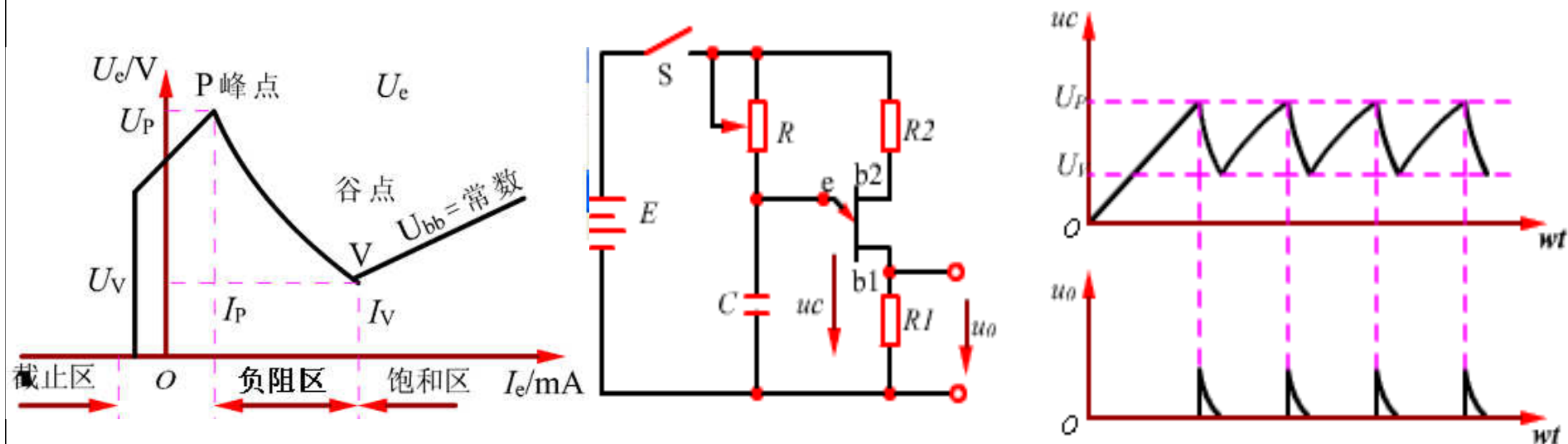
单结晶体管处于负阻区

4. 当 u_e 下降到 V 点 时

R_{b1} 不再变化, u_e 不再下降, 随 i_e 按线性增加。

单结晶体管处于饱和区

单结晶体管的自振荡电路



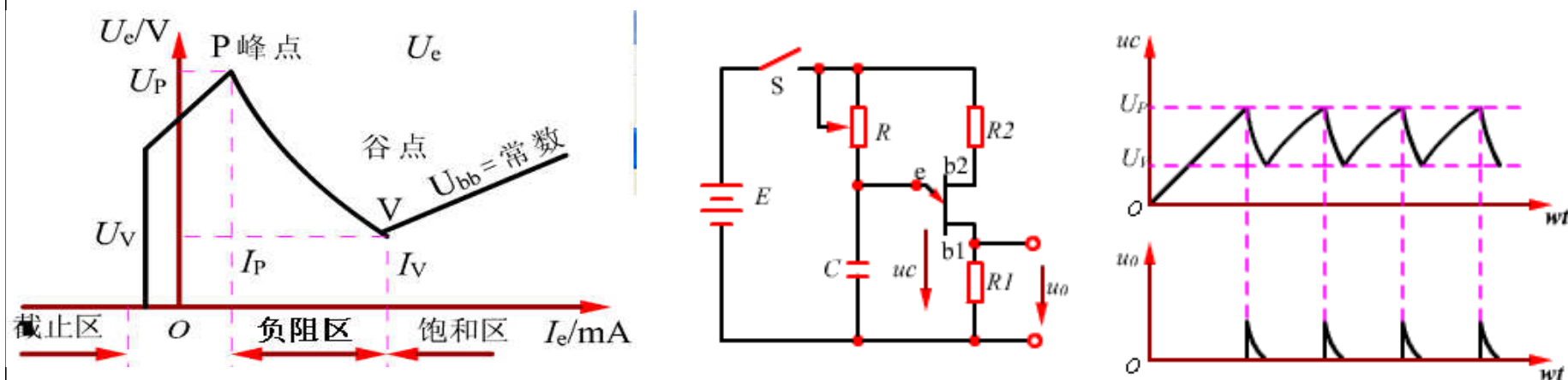
在接通电源前，电容C上的电压为零。

合上电源开关S时：

电源 E 一方面通过 R_1 和 R_2 加于单结晶体管的b1和b2上，
电源 E 又通过充电电阻 R 向电容 C 充电，电压便按指数曲线
逐渐升高。

U_c 在较小时，发射极电流极小，单结晶体管的发射极e和
第一基极之间处于截止状态；

单结晶体管的自振荡电路



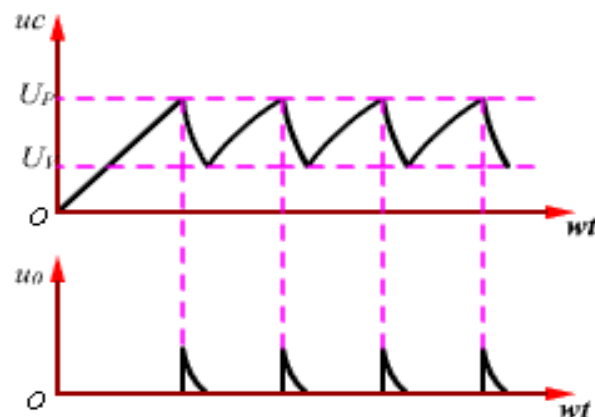
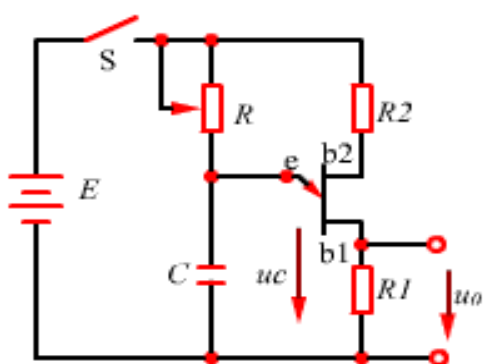
U_c 充电到单结晶体管的峰点电压时，e和b1间由截止变为导通，电容C通过发射极e与第一基极迅速向电阻放电；

由于 R_1 阻值较小，而导通后e与b1之间的电阻更小，因此，电容C的放电速度很快，于是在 R_1 上得到一个尖峰脉冲输出电压。

由于 R 的阻值较大，当电容上的电压降到谷点电压时，经 R 供给的电流便小于谷点电流，不能满足导通的要求，于是e与b1之间电阻迅速增大，单结晶体管便恢复截止。

此后电源 E 又对电容C充电，这样电容C反复进行充电放电，结果在电容C上形成锯齿波电压，在 R_1 上则形成脉冲电压，

振荡电路参数



1. $U_c = U_P$ 时，为保证晶体管导通，通过R流入晶体管的电流必须大于峰点电流 I_P

$$I'_P = \frac{E - U_P}{R} > I_P$$

2. $U_c = U_V$ 时，为保证晶体管截止，通过R流入晶体管的电流必须小于谷点电流 I_V

$$I'_V = \frac{E - U_V}{R} < I_V$$

R必须满足

$$\frac{E - U_P}{I_P} > R > \frac{E - U_V}{I_V}$$

$$T = RC \ln \frac{1}{1 - \eta}$$

U_o 的振荡周期主要决定于C的充电时间常数RC

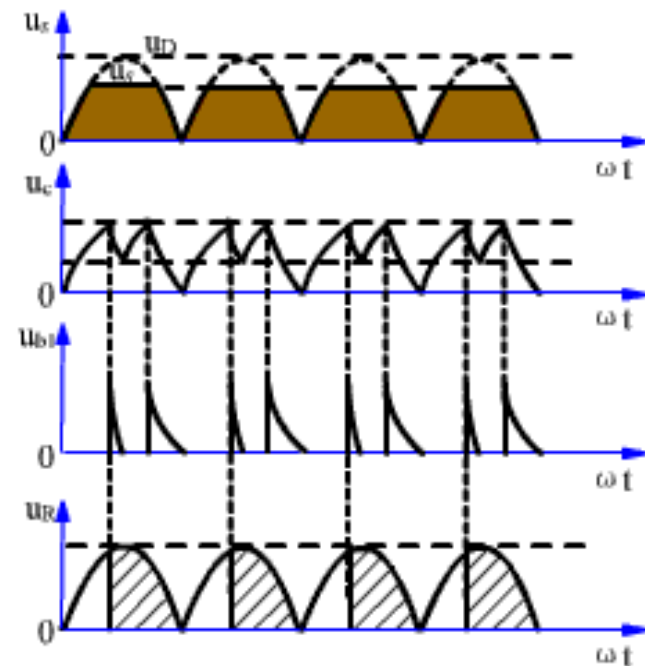
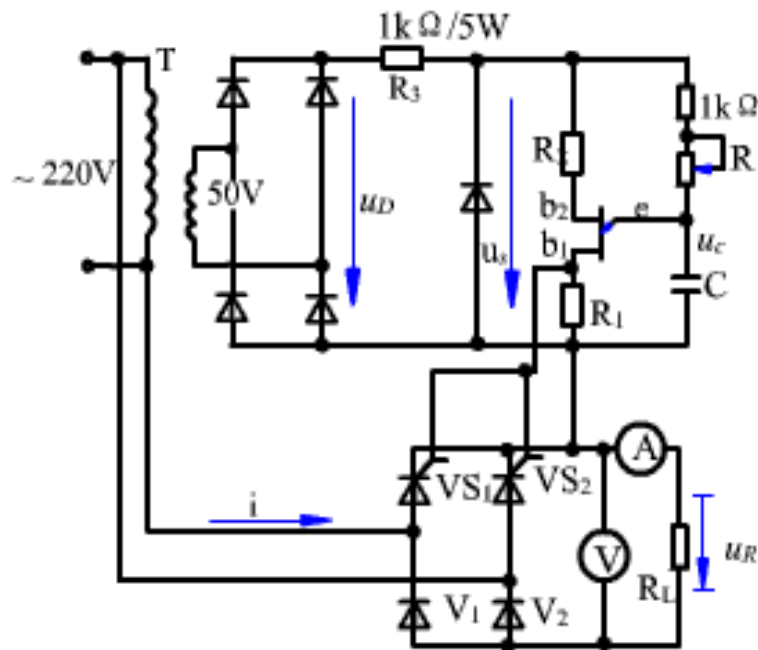
U_o 的脉冲宽度主要决定于C的放电时间常数 R_1C

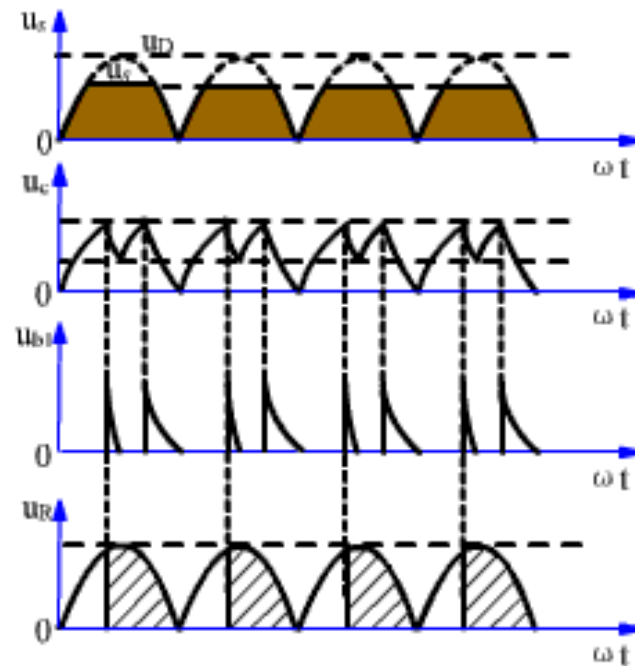
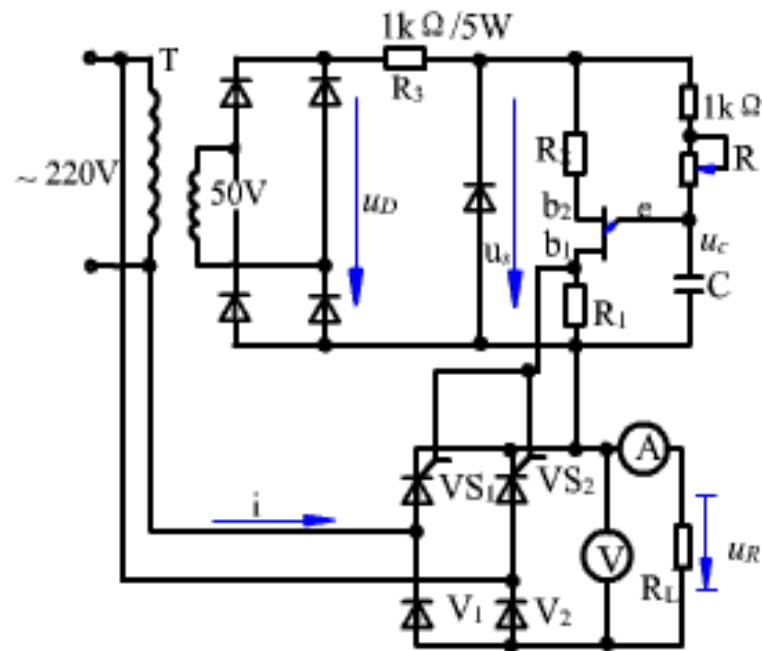
单结晶体管触发电路

前面的单结晶体管振荡电路，不能直接用来作晶闸管的触发电路，因为，晶闸管的主电路是接在交流电源上的，二者不能同步。

实际应用的晶闸管触发电路，要求在晶闸管承受正向电压的半周内，控制极获得第一个正向触发脉冲的时刻(α)都相同。

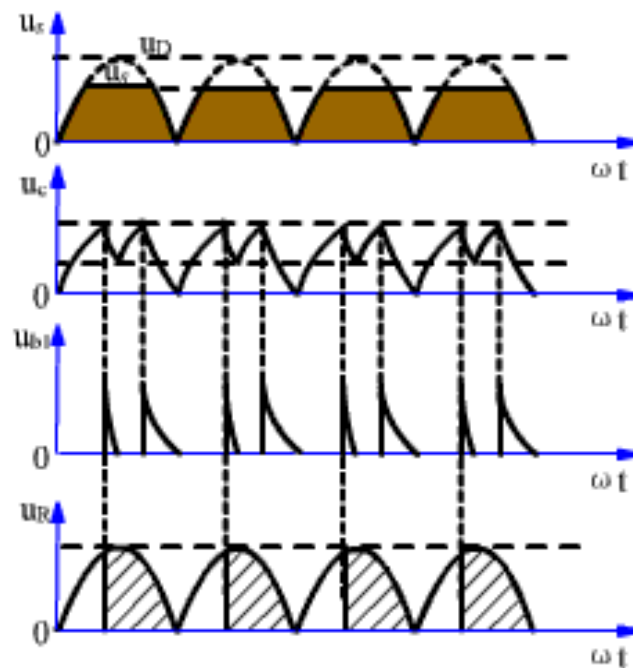
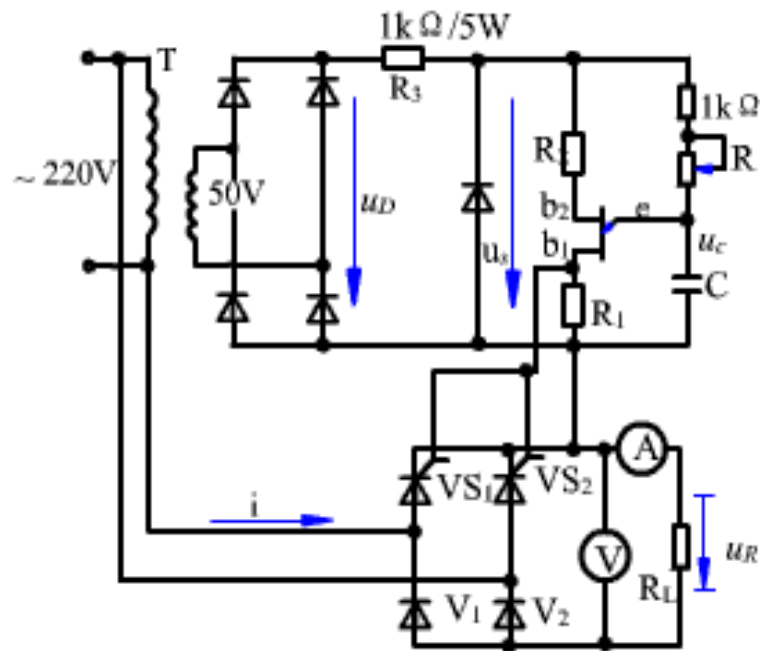
在电源电压正半周经过零点时，触发电路的电容C 必须把电全部放掉，在下一个正半周再重新从零开始充电，





电源 U_s 供电给单结晶体管触发电路，则每当电源电压过零时， b_1 —— b_2 之间电压也降到零。 e —— b_1 之间导通，电容 C 上的电压通过 e —— b_1 及 R_1 回路很快地放掉，使电容每次均能从零开始充电，从而获得与主电路的同步。

触发电路每周期工作两个循环，每次发出的第一个脉冲同时送到两只晶闸管的控制极，但只能使其中承受正向电压的晶闸管导通。



第一个脉冲发出后，振荡电路仍在工作，电容继续充电和放电，可能发出第二个或第三个或更多的脉冲，但由于晶闸管已因第一个脉冲触发而导通，所以，后面的脉冲就不起作用了。

当电压过零反向时，晶闸管将自行关断。移相控制时只要改变R，就可以改变电容电压上升到峰值电压的时间，亦即改变电容开始放电产生脉冲使晶闸管触发导通的时刻，从而达到移相的目的。