

1 晶闸管及其可控整流电路 (AC/DC变换)

4种电力电子电路 {

- AC→DC (整流)
- DC→AC (逆变)
- DC→DC (直流变换)
- AC→AC (交流电力控制)

3类电力电子器件:

- 不可控器件
- 半控型器件
- 全控型器件

第1章 晶闸管及其可控整流电路

1.1 普通晶闸管

1.1.1 晶闸管结构

1.1.2 晶闸管的工作原理

1.1.3 晶闸管特性

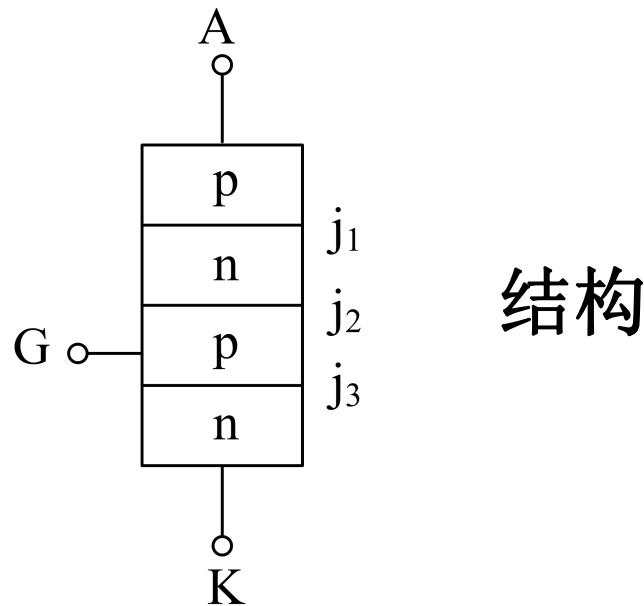
1.1.4 晶闸管主要参数

何谓“普通晶闸管”

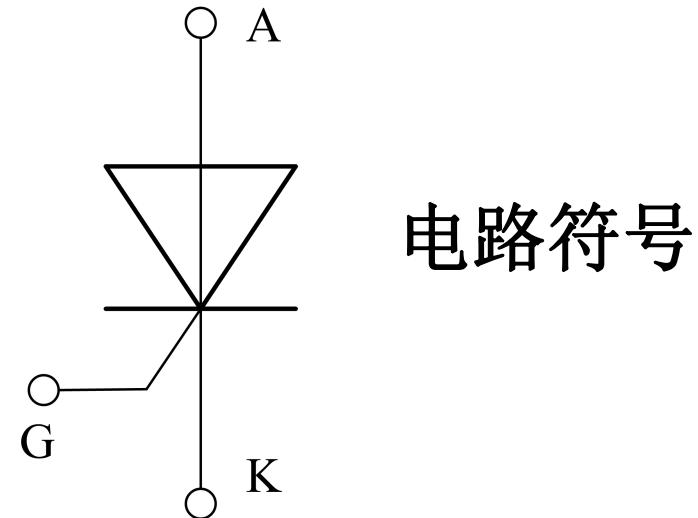
晶闸管（thyristor）是具有可控开关特性的半导体器件的总称。包括多类。

其中出现最早，应用最广泛的是**普通晶闸管**，即可控硅，SCR（Silicon Controlled Rectifier）

1.1.1 晶闸管结构



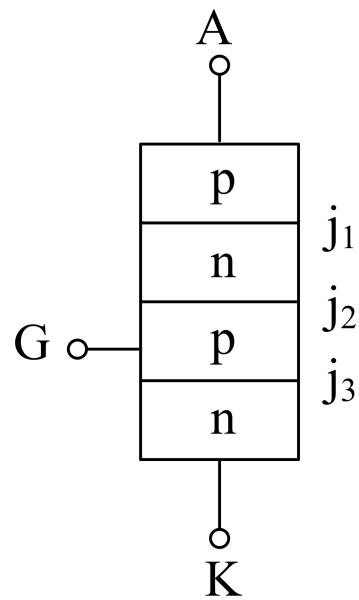
结构



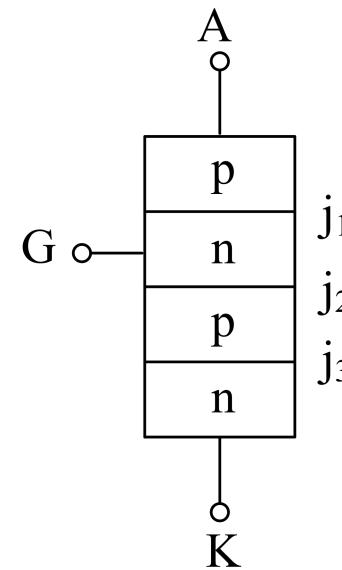
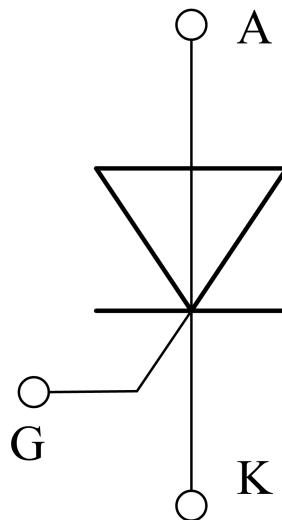
电路符号

- 管心由半导体材料构成**p-n-p-n**四层结构。
- 三个**p-n**结: j_1 、 j_2 、 j_3 。
- 三个引出端:
 - 两个**功率引出端**: 阳极A (**anode**) ; 阴极K (**cathode**)
 - 一个**控制引出端**: 门极G (**gate**)

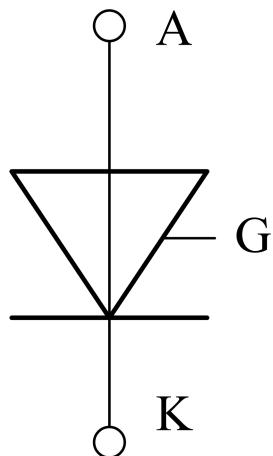
晶闸管的各种电路符号



P型门极、阴极侧受控



N型门极、阳极侧受控

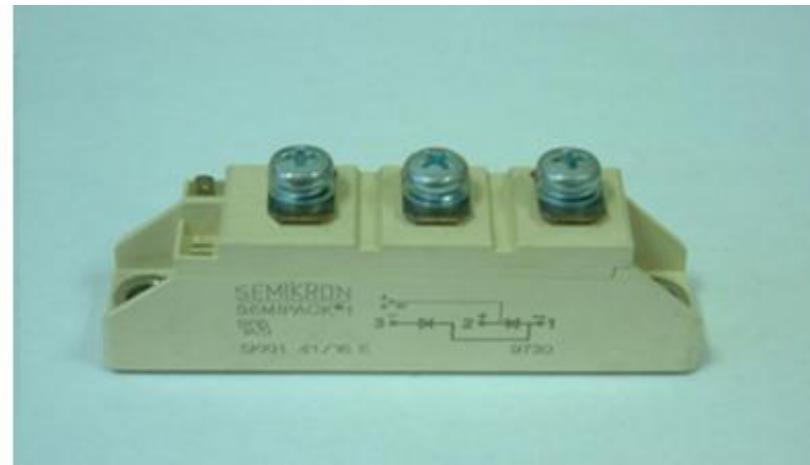


不规定控制极类型

晶闸管的外形



螺栓型晶闸管



晶闸管模块



平板型晶闸管外形及结构



晶闸管的封装

- 螺栓型封装，通常螺栓是其阳极，能与散热器紧密连接且安装方便。多用于小容量（200A以下）。
- 平板型晶闸管可由两个散热器将其夹在中间。用于大容量。



螺栓型



平板型



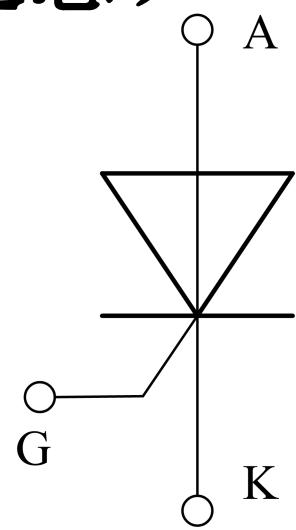
模块型

1.1.2 晶闸管的工作原理

一种**可控的单向导电开关**

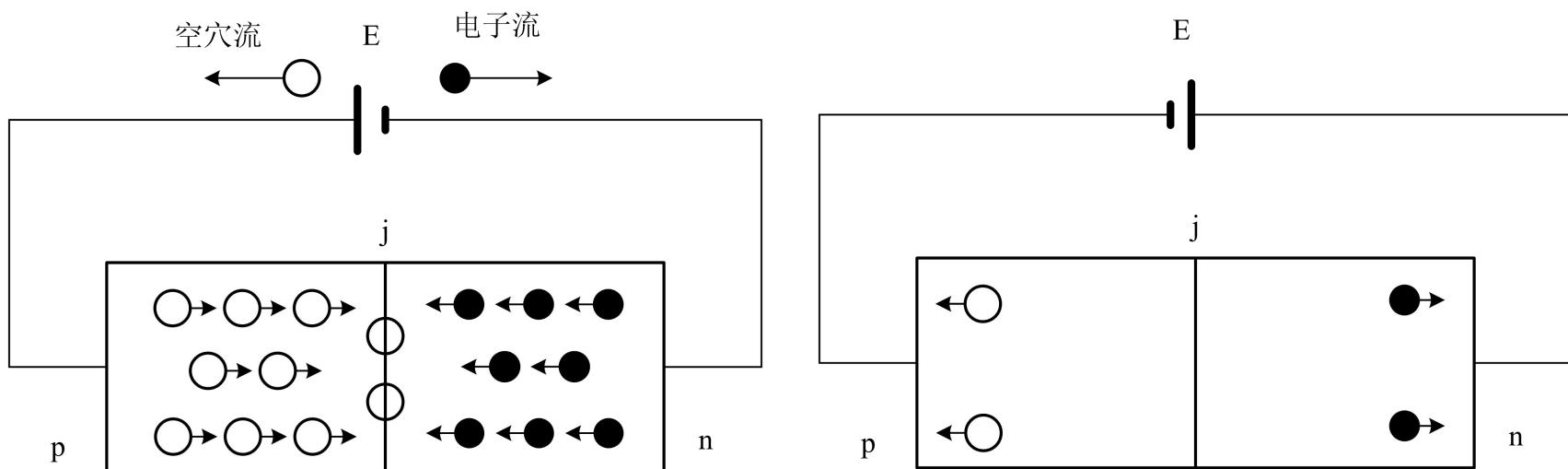
- 反向始终能承受电压，具有反向阻断特性。
- 正向可以有两个稳定的工作状态：
 - ◆ 呈高阻抗的**阻断**工作状态（**断态**）
 - ◆ 呈低阻抗的**导通**工作状态（**通态**）

下面分析为何会有上述特性。



p-n结（简单回顾）

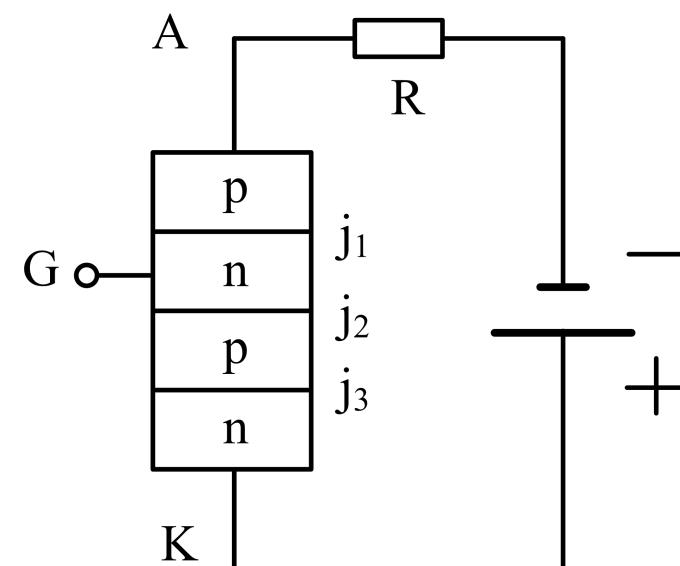
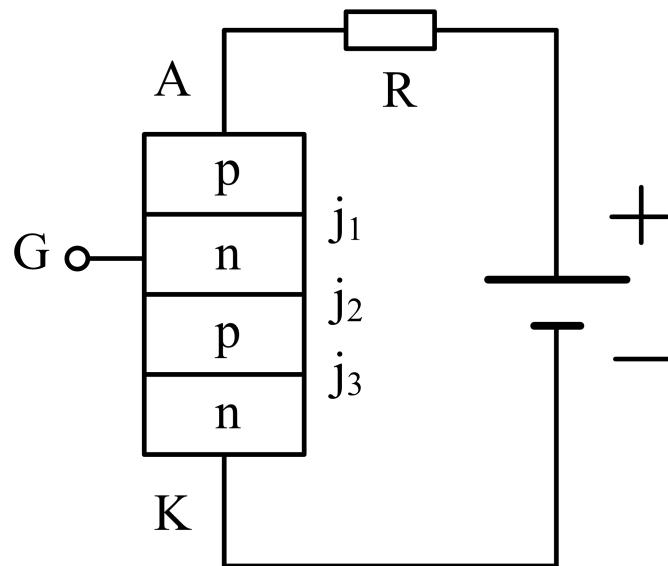
- 正向偏置时导通
- 反向偏置时阻断，只有很小的漏电流



2) 晶闸管的阻断工作状态

当晶闸管门极G与外电路断开时，晶闸管在它的两个方向上均呈阻断工作状态。

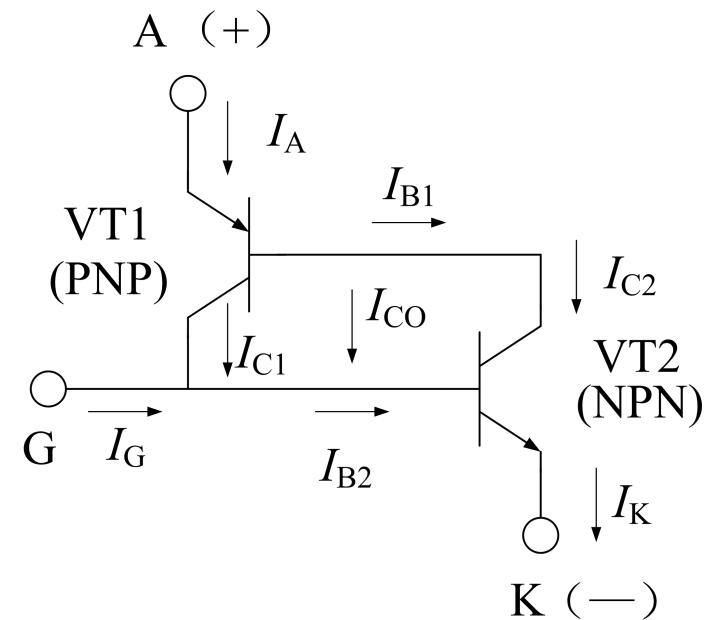
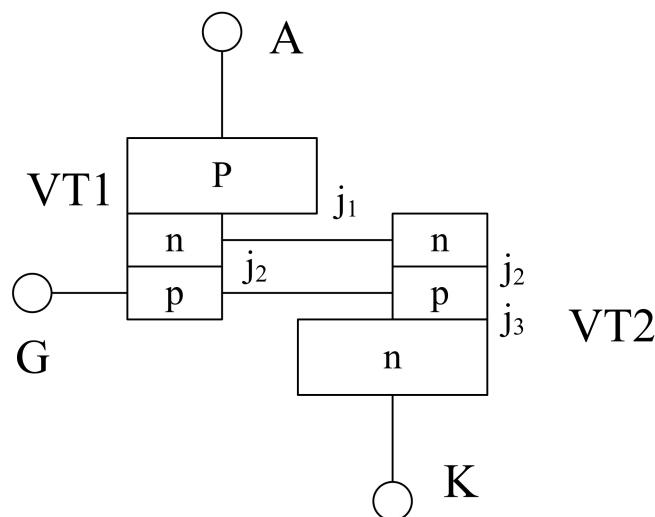
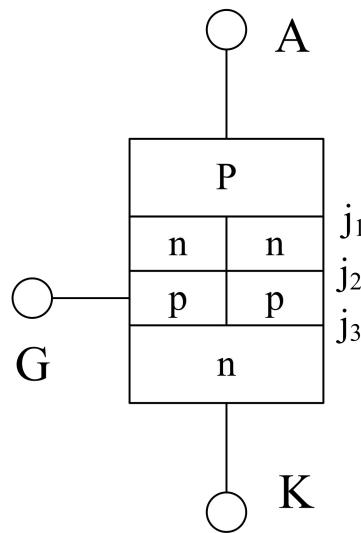
晶闸管可以看成是三个二极管的串联



至少有一个为反向偏置

3) 晶闸管的导通工作状态

用晶闸管的双晶体三极管模型分析。

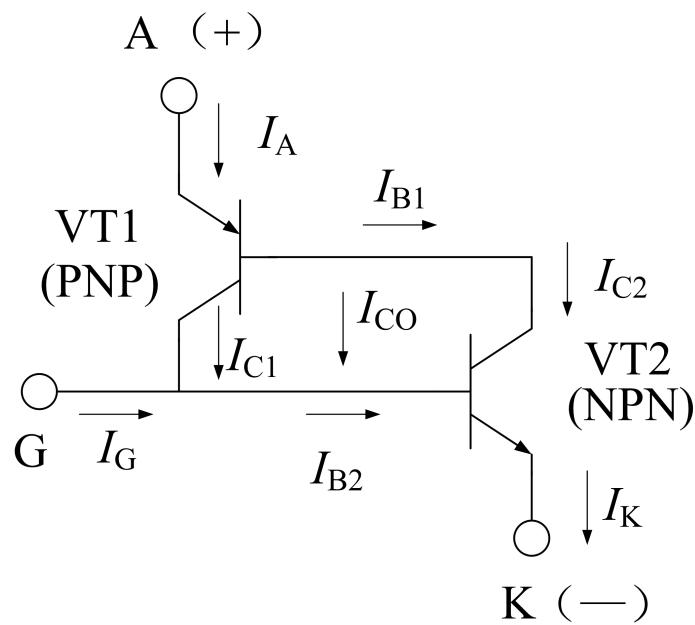


两个复合晶体三极管：

- pnp型VT1
- npn型VT2

3) 晶闸管的导通工作状态

正向偏置下



$$I_A = I_{C1} + I_{C2} + I_{CO} = \alpha_1 I_A + \alpha_2 I_K + I_{CO}$$

$$I_K = I_A + I_G$$

$\alpha_1 = I_{C1} / I_A$: VT1的共基极电流放大倍数;

$\alpha_2 = I_{C2} / I_K$: VT2的共基极电流放大倍数;

I_G : 门极电流;

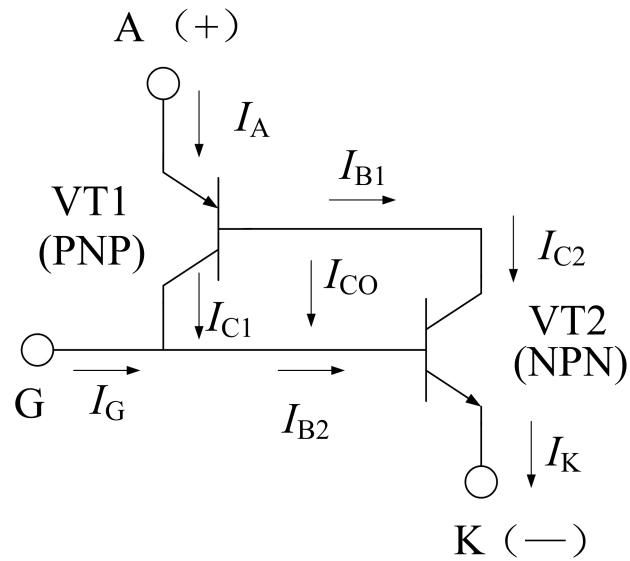
I_{CO} : VT1、VT2的漏电流;

I_{C1} 、 I_A : VT1的集电极和发射极电流;

I_{C2} 、 I_K : VT2的集电极和发射极电流。

α_1 、 α_2 由晶闸管的制造工艺决定，并随 I_A 、 I_K 变化。

3) 晶闸管的导通工作状态



$$I_A = \frac{I_{CO} + \alpha_2 I_G}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}$$

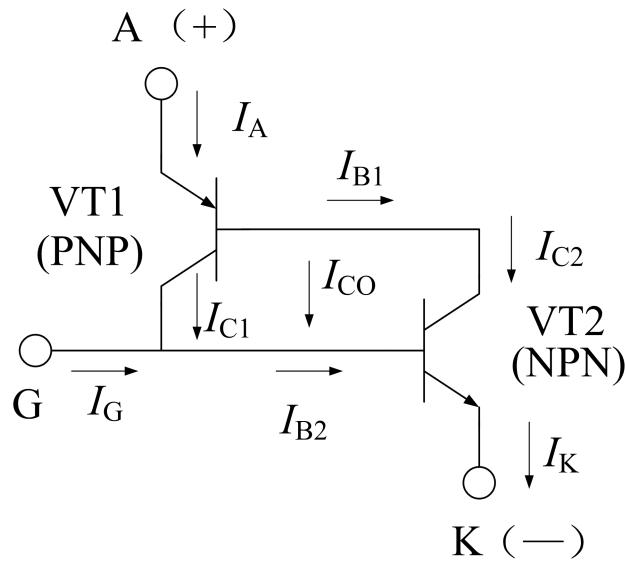
当门极电流为零时

$$I_A = \frac{I_{CO}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}$$

由于 I_{CO} 很小，在很小漏电流情况下，
 $(\alpha_1 + \alpha_2) \ll 1$ ，则 $I_A = I_{CO}$ ，电路处于阻断状态。

与前面的分析结果一致。

3) 晶闸管的导通工作状态



存在 I_G 时。

I_G 注入 $\Rightarrow I_K \uparrow \Rightarrow I_{C2} \uparrow$;

$I_{C2} \uparrow \Rightarrow I_A \uparrow, I_{C1} \uparrow$;

$I_{C1} \uparrow \Rightarrow I_{B2} \uparrow, I_K \uparrow$ 。

一个强烈的正反馈过程。

电流↑时， α_1, α_2 随之↑。

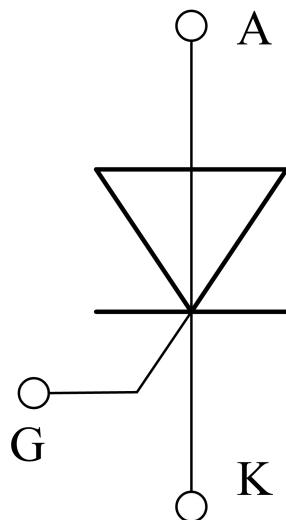
当 $(\alpha_1 + \alpha_2) \approx 1$ 时，两晶体三极管饱和导通，即晶闸管由阻断→导通。

反向偏置时，由于晶体管VT1、VT2反偏时的电流放大系数很小，故而即使有门极电流也不导通。

导通后，由于正反馈作用，即便无门极电流，依旧保持导通。

1.1.2 晶闸管的工作原理（小结）

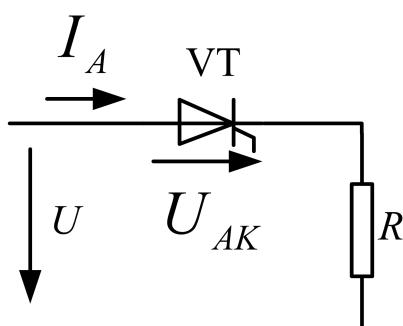
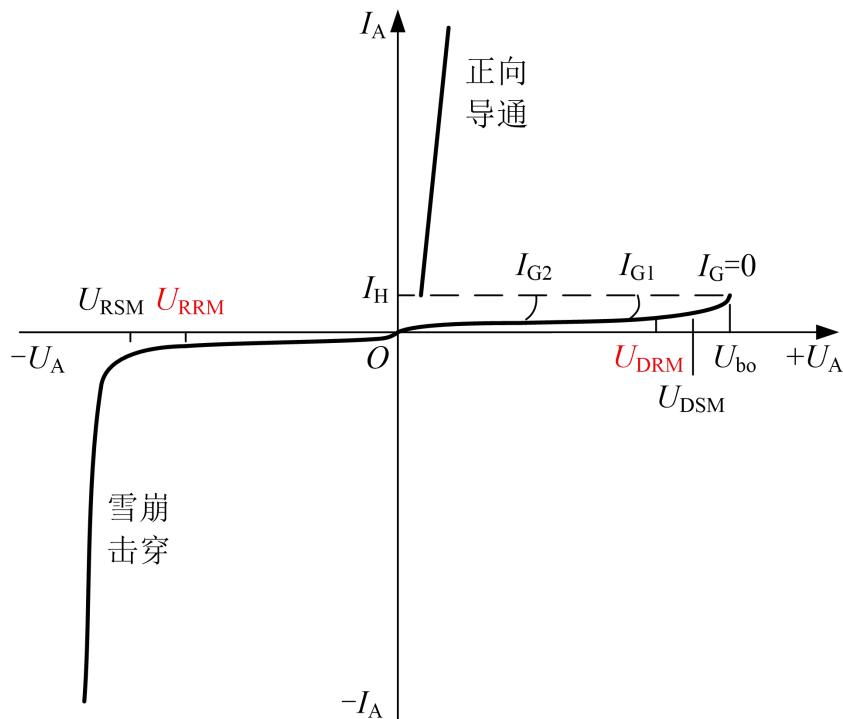
- 门极没有控制信号时，无论正偏、反偏，均阻断。
- 正偏时，门极信号可使其导通。一旦导通，即使失去门极信号，仍然保持导通。
- 反偏时，即使存在门极电流，也不能使其导通。



一种可控的单向导电开关

1.1.3 晶闸管特性

1) 晶闸管的伏安特性



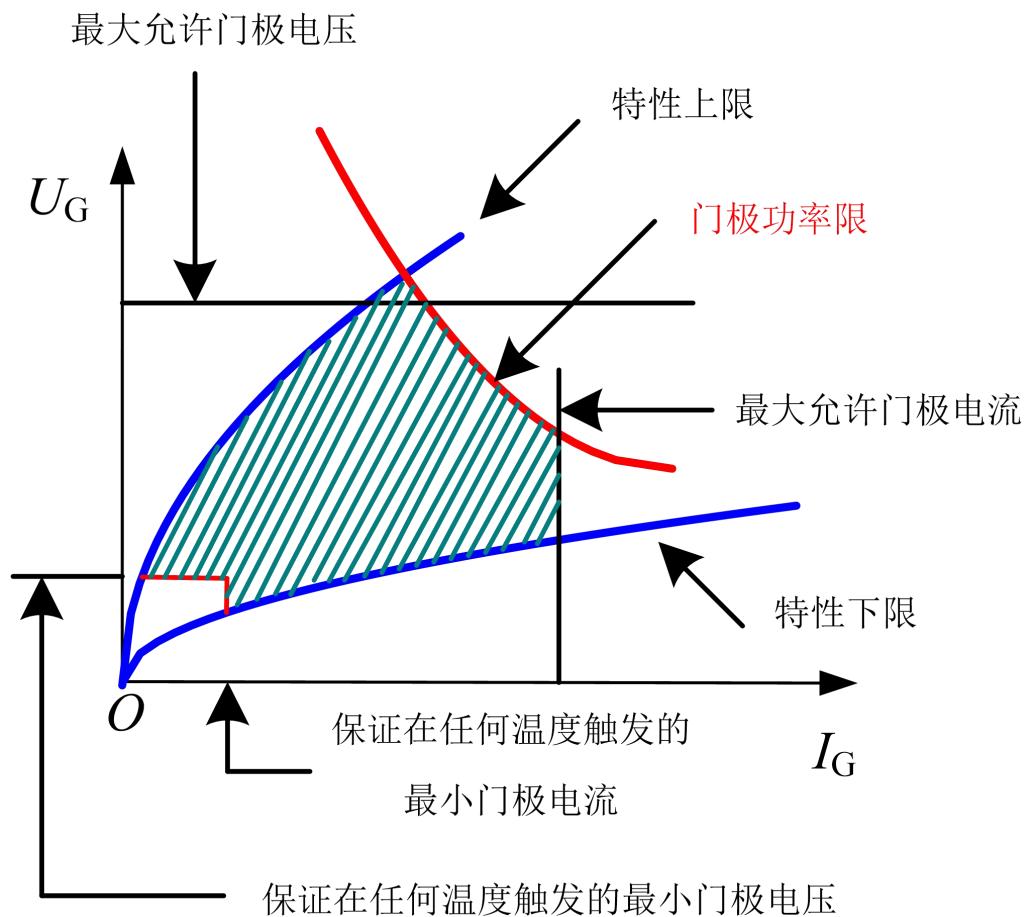
- 特性在I、III象限
- $I_G=0A$ 时，正向转折电压
- 转折点越低，所需 I_G 越大
- 反向特性，击穿

- 正向偏置时，可在断态、通态间互相转化，且与门极电流、阳极电压和阳极电流有关
- 反向偏置时，只能工作在阻断状态，绝对不能超过击穿电压

1.1.3 晶闸管特性

2) 晶闸管的门极特性

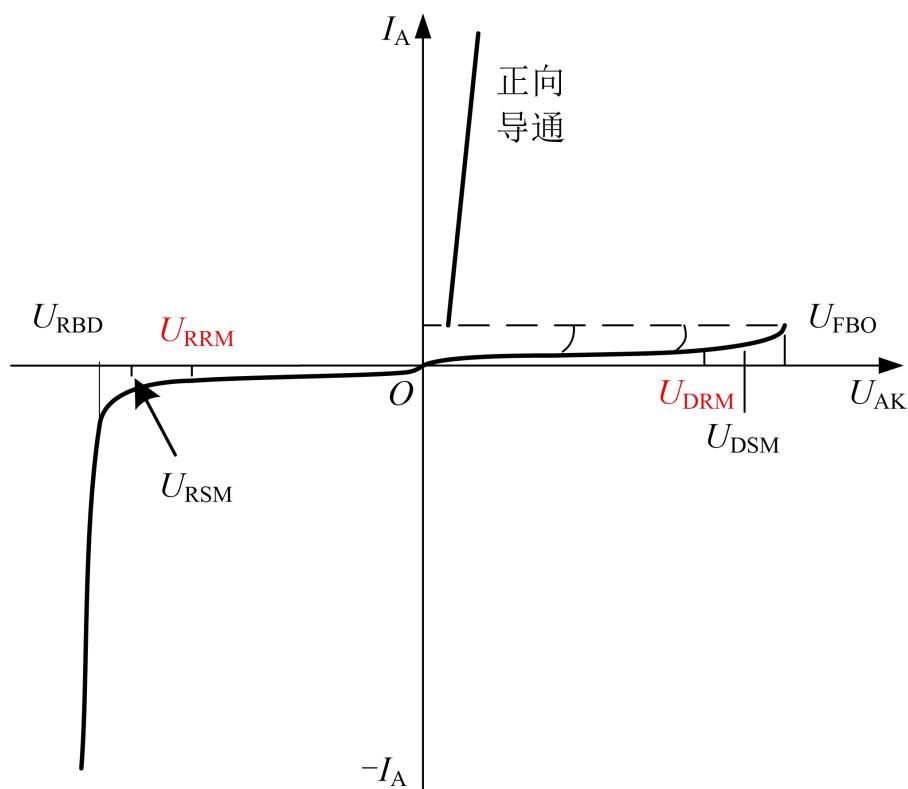
➤ 门极特性极限



1.1.3 晶闸管的主要参数

1) 晶闸管阳极电压和电流参数

(1) 额定电压



➤ 额定电压取 U_{DRM} (正向重复峰值电压) 和 U_{RRM} (反向重复峰值电压) 中较小的值 (为峰值电压)

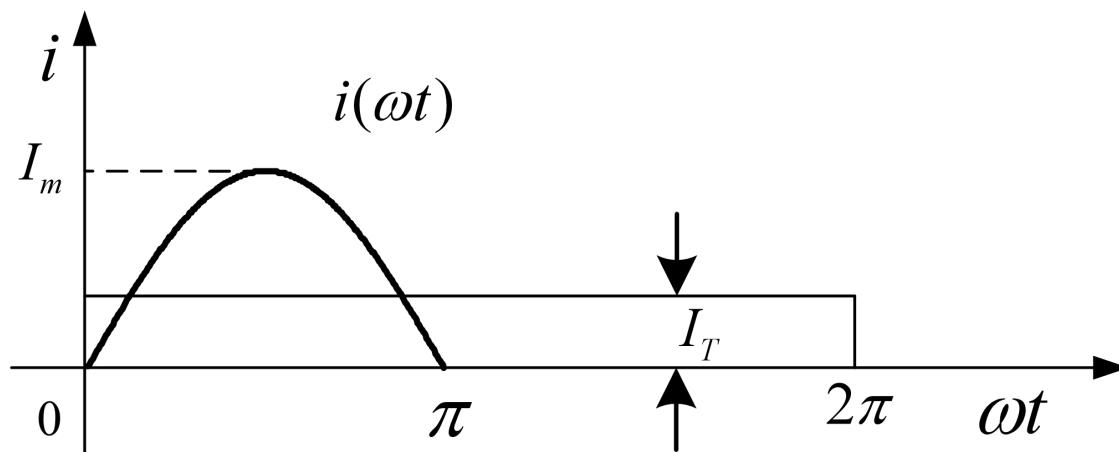
➤ 额定电压必须比使用时的正常工作电压 (峰值) 有2~3倍的储备。

1.1.3 晶闸管的主要参数

1) 晶闸管阳极电压和电流参数

(1) 通态平均电流 I_T

- 也即额定电流
- 在环境温度 $+40^{\circ}\text{C}$ 和规定的冷却条件下，元件在电
阻性负载的单相正弦半波电路中，导通角不小于
 170°C ，当结温稳定并不过额定结温时所允许的最
大（通态）平均电流。



通态平均电流（额定电流）

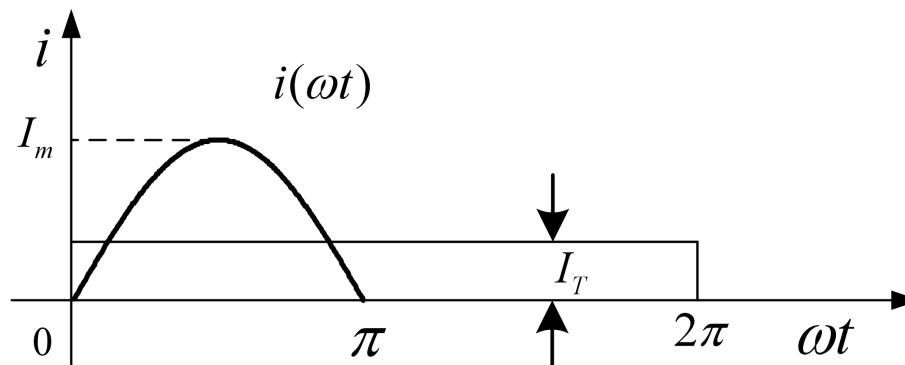
I_T 到底是什么意思？

- 对于图示波形，晶闸管允许流过的平均电流为 I_T 。
- 平均电流与电流峰值的关系：

$$I_T = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i(\omega t) d\omega t = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} I_m \sin \omega t d\omega t = \frac{I_m}{\pi}$$

- 问题：如果不是这样的波形呢？
- 根据有效值相等的原则确定。
- 有效值电流与额定电流 I_T 的关系：

$$I = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} [i(\omega t)]^2 d\omega t} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} [I_m \sin \omega t]^2 d\omega t} = \frac{I_m}{2} = \frac{\pi I_T}{2} = 1.57 I_T$$



通态平均电流（额定电流）

➤对于不一样的波形，其有效值应

$$\leq 1.57 I_T$$

➤其有效值也可定义为

$$K_f I_d$$

其中

➤ K_f 为晶闸管电流有效值与负载电流平均值之比

➤ I_d 为负载电流平均值

一般，所选用元件的额定电流需要有2倍左右的储备。

例1.1

晶闸管通态平均电流 $I_T = 100A$,
当流过晶闸管的实际电流如图1.10所示
时, 求允许平均电流 I_d 的值 (不考虑环
境温度与安全储备)。

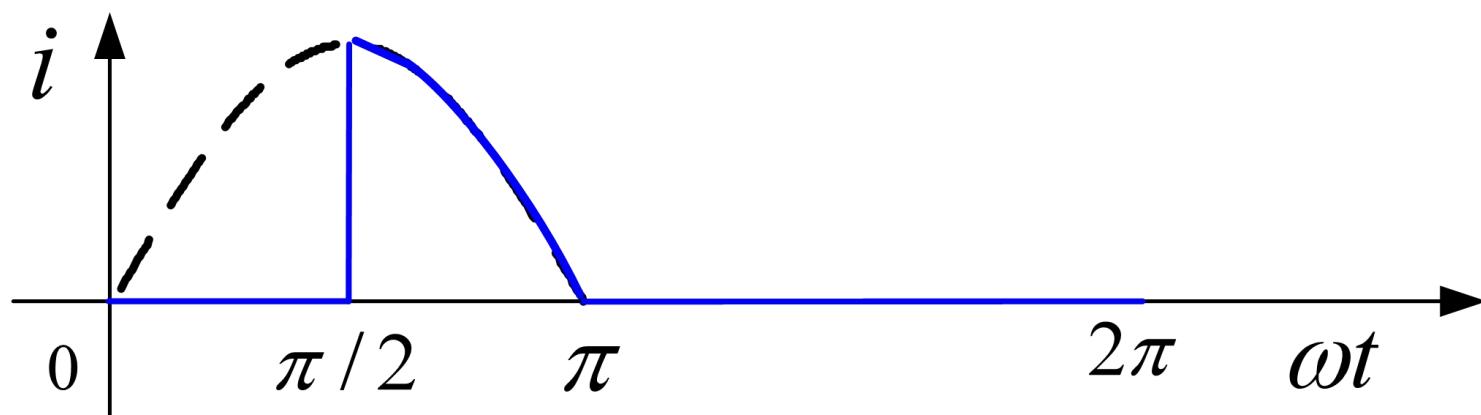


图1.10

1.1.3 晶闸管的主要参数

2) 晶闸管门极参数

3) 晶闸管动态参数

(1) 开通时间 t_{on}

加上足够的触发信号后，晶闸管不会立即开通。

(2) 关断时间 t_{off}

若在阳极电流为零后立即施加正向电压，仍可能开通。因此，必须有一段恢复阻断能力的时间。

1.1.3 晶闸管的主要参数

3) 晶闸管动态参数

(3) 通态电流临界上升率 di/dt

如果刚一导通时，就通过很大的电流，即 di/dt 太大，电流会集中在门极附近很小的区域内，造成**局部过热**。

(4) 断态电压临界上升率 du/dt

➤pn结耗尽层相当于一个结电容
➤如果正向电压 du/dt 很大，则会通过电容对门极充电（类似于门极触发电流的作用），使**误导通**。

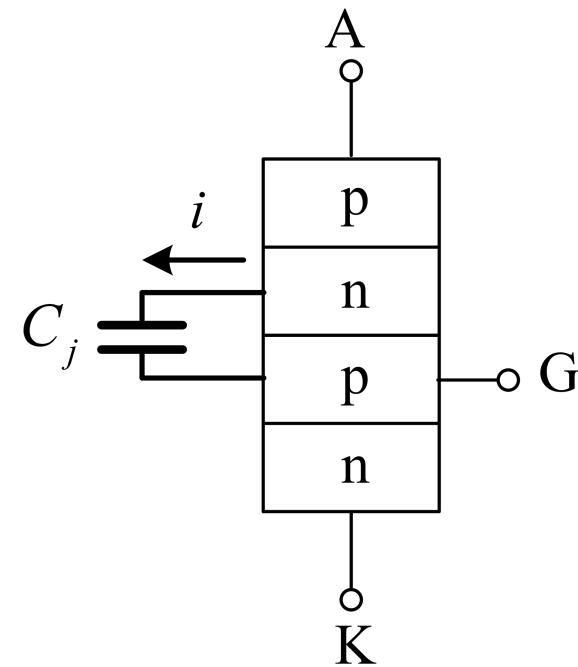


表1.2