

# 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

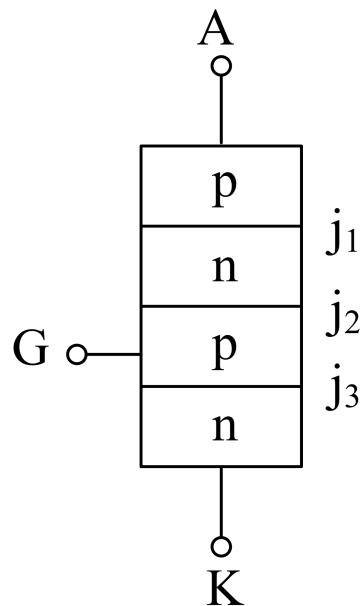
1.1.4 晶闸管主要参数

# 何谓“普通晶闸管”

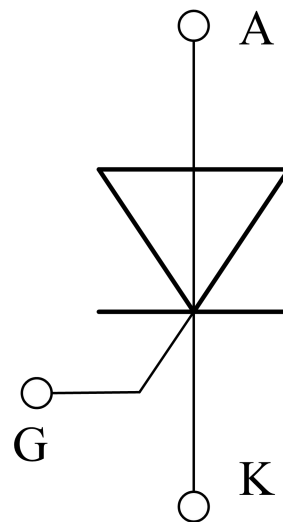
晶闸管（thyristor）是具有可控开关特性的半导体器件的总称。包括多类。

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



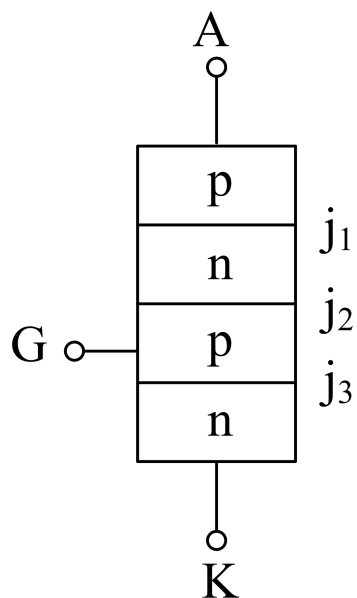
结构



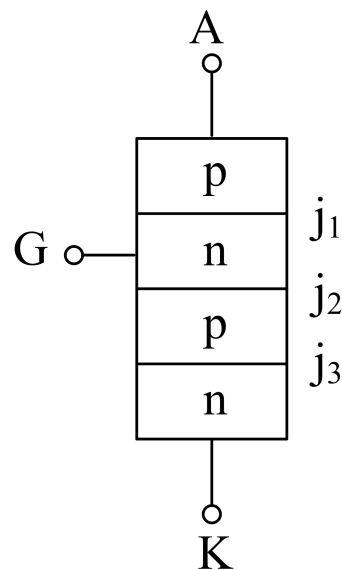
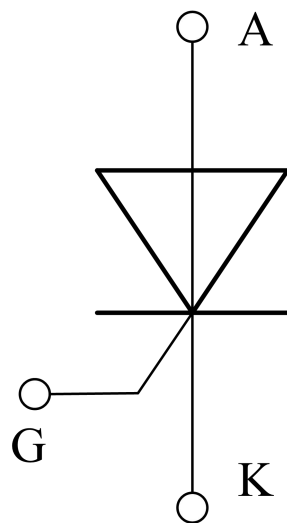
电路符号

- 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)

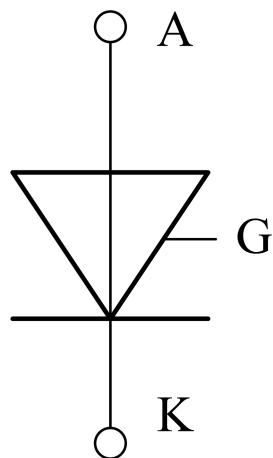
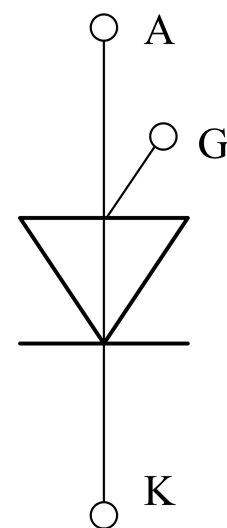
# 晶闸管的电路符号



**P型门极、阴极侧受控**



**N型门极、阳极侧受控**

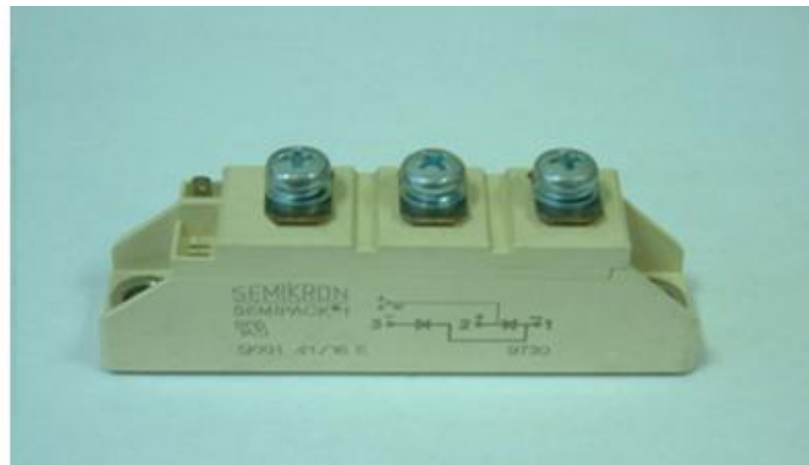


**不规定控制极类型**

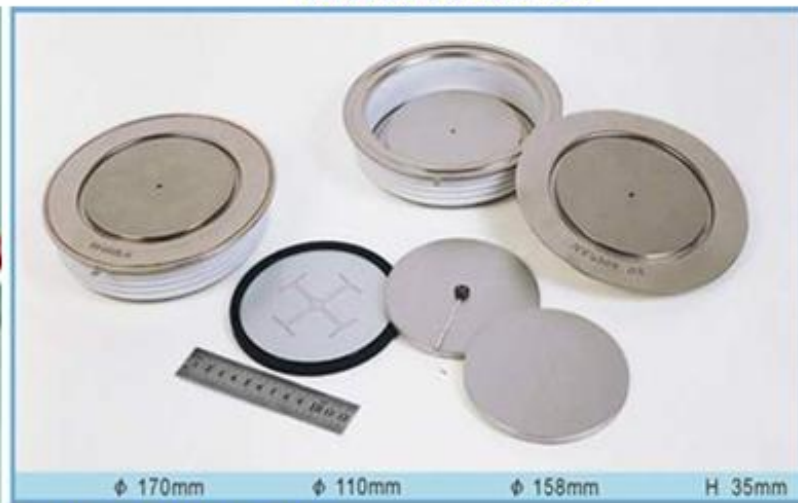
# 晶闸管的外形



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**

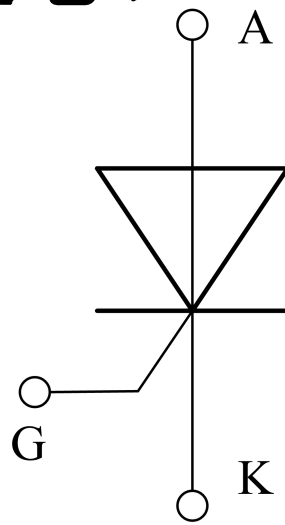
➤ 反向始终能承受电压，具有反向阻断特性。

➤ 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）

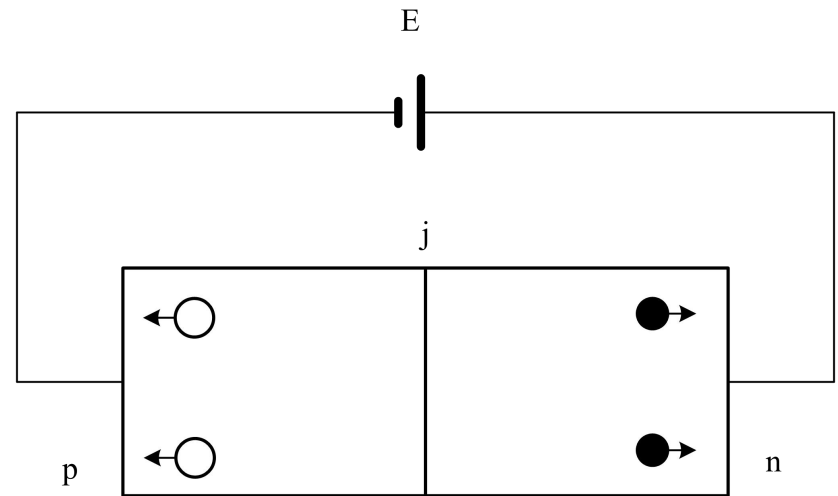
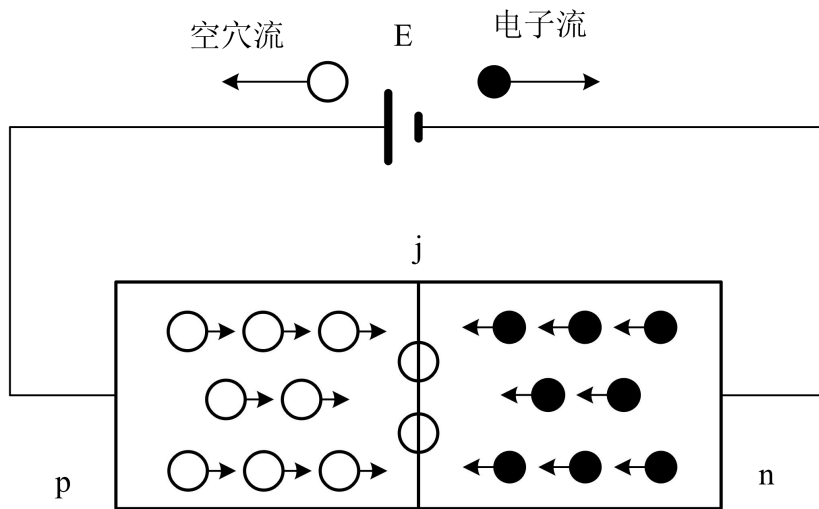
下面分析为何会有上述特性。





# p-n结（简单回顾）

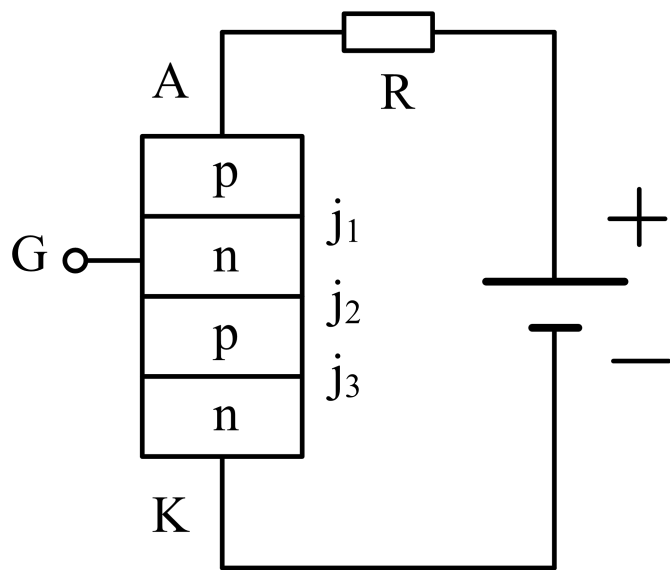
- 正向偏置时导通
- 反向偏置时阻断，只有很小的漏电流



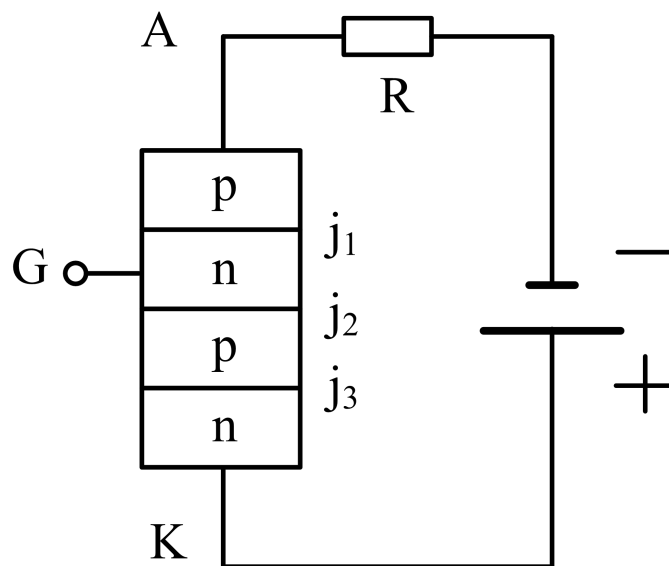
## 2) 晶闸管的阻断工作状态

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



正向偏置

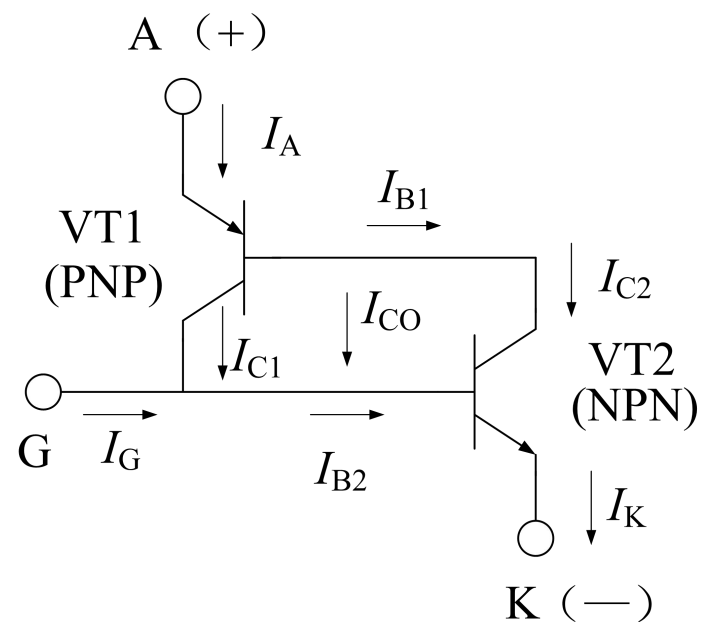
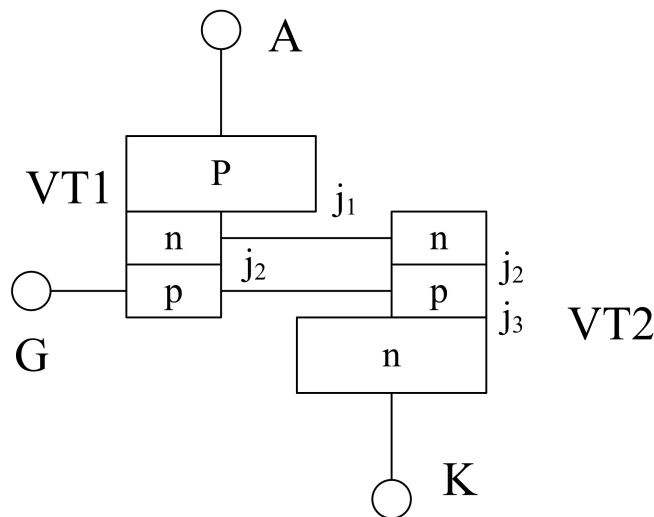
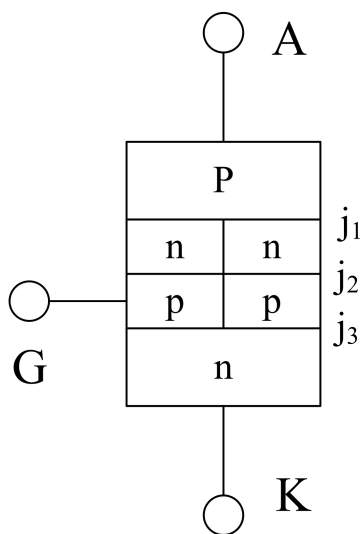


反向偏置

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。



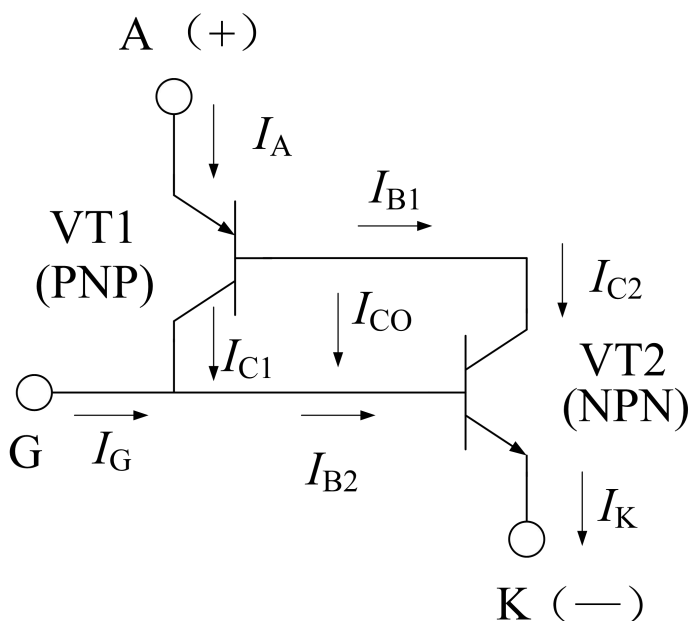
两个复合晶体三极管：

➤ 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;

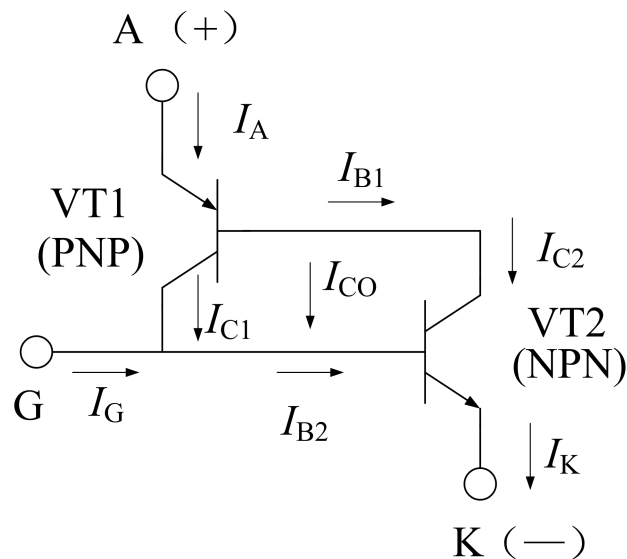
$I_{CO}$ : VT1、VT2的漏电流;

$I_{C1}$ 、 $I_A$ : 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。

$\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 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

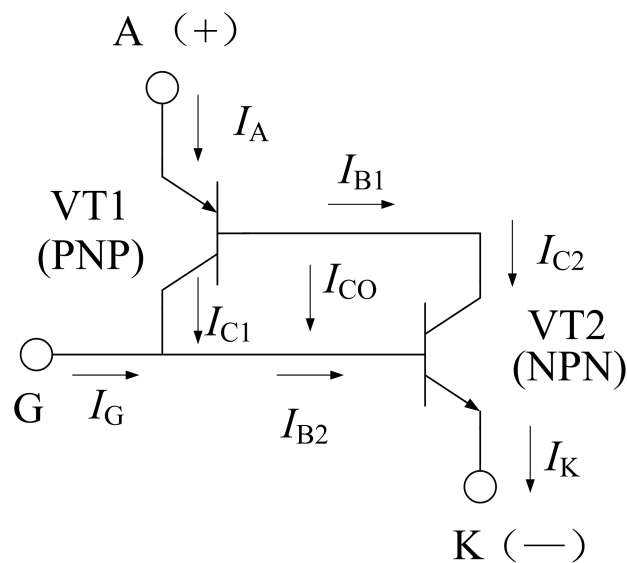
$$I_A = \frac{I_{CO}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}$$

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



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

存在 $I_G$ 时。

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

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

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

一个强烈的正反馈过程。

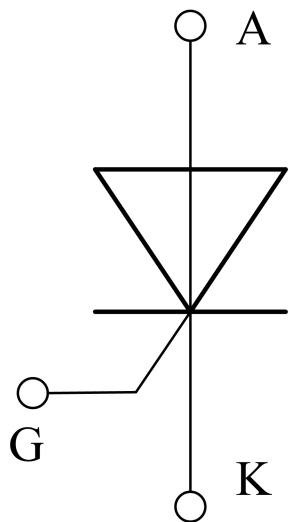
电流 $\uparrow$ 时， $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 随之 $\uparrow$ 。

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 $\rightarrow$ 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）

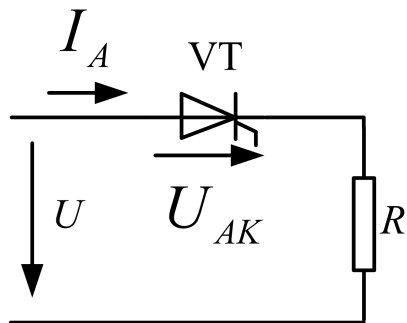
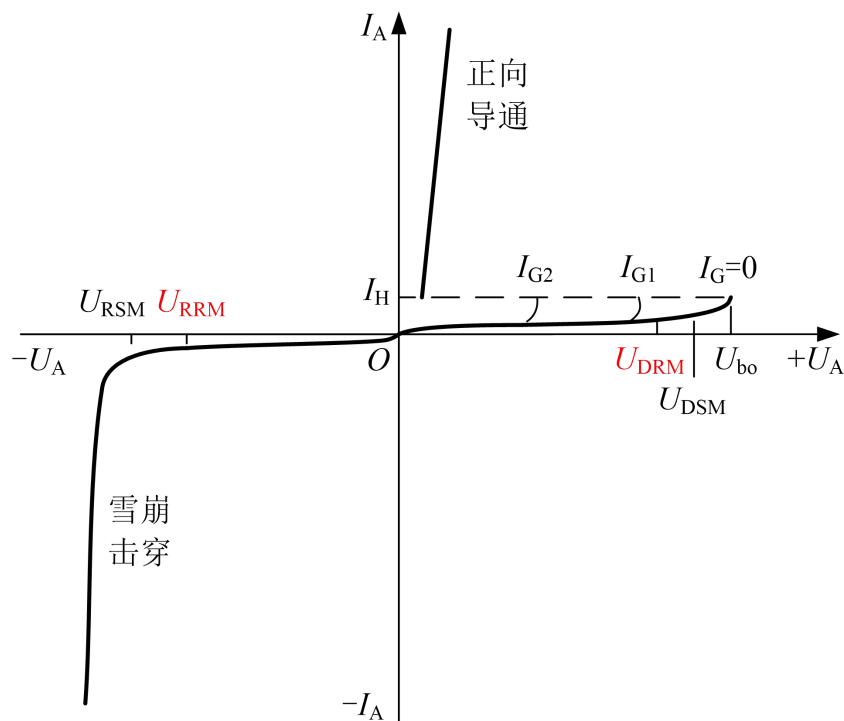
- 门极没有控制信号时，无论正偏、反偏，均阻断。
- 正偏时，门极信号可使其导通。一旦导通，即使失去门极信号，仍然保持导通。
- 反偏时，即使存在门极电流，也不能使其导通。



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



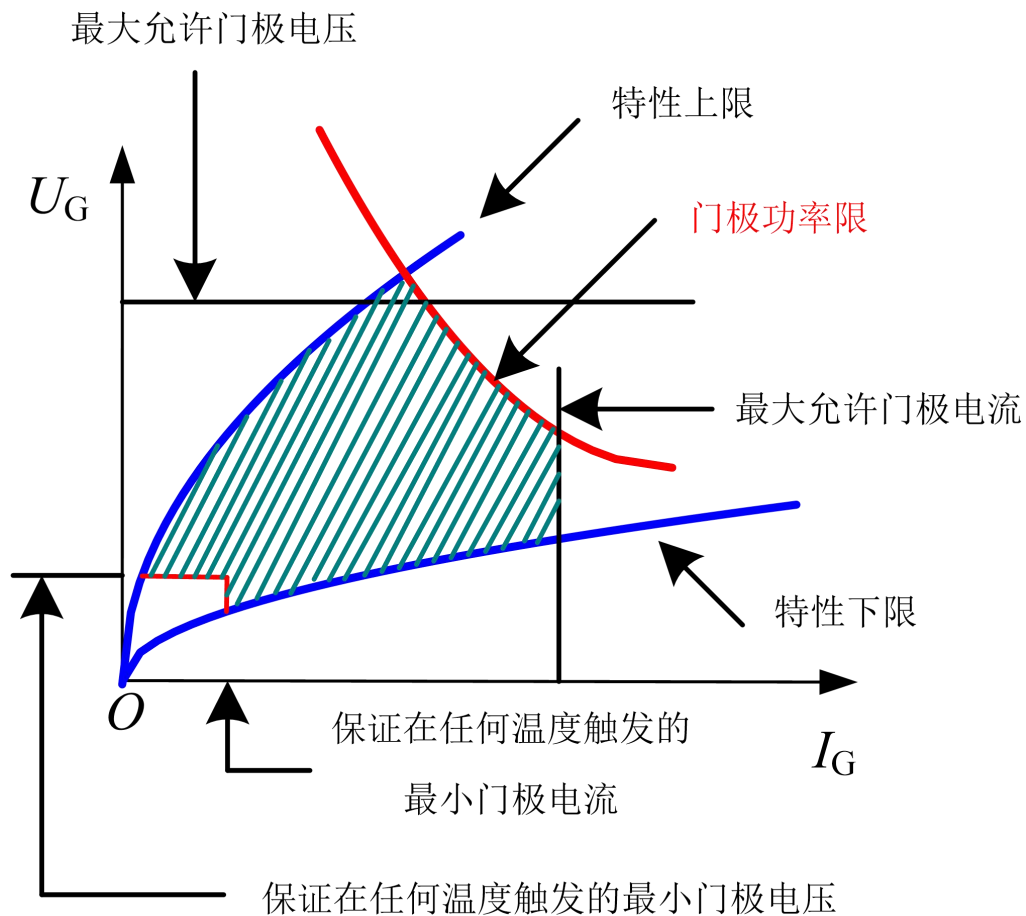
- 特性在I、III象限
- $I_G=0A$ 时，正向转折电压
- 转折点越低，所需 $I_G$ 越大
- 反向特性，击穿
- 正向偏置时，可在断态、通态间互相转化，且与门极电流、阳极电压和阳极电流有关
- 反向偏置时，只能工作在阻断状态，绝对不能超过击穿电压



# 1.1.3 晶闸管特性

## 2) 晶闸管的门极特性

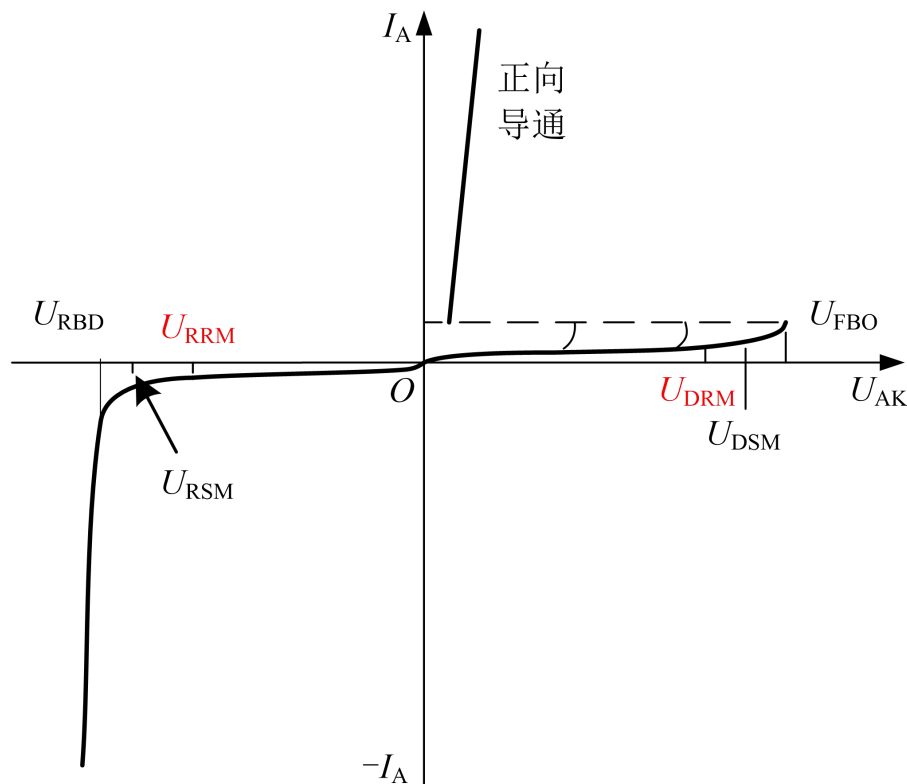
### ➤ 门极特性极限



# 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  $2 \sim 3$  倍的储备。

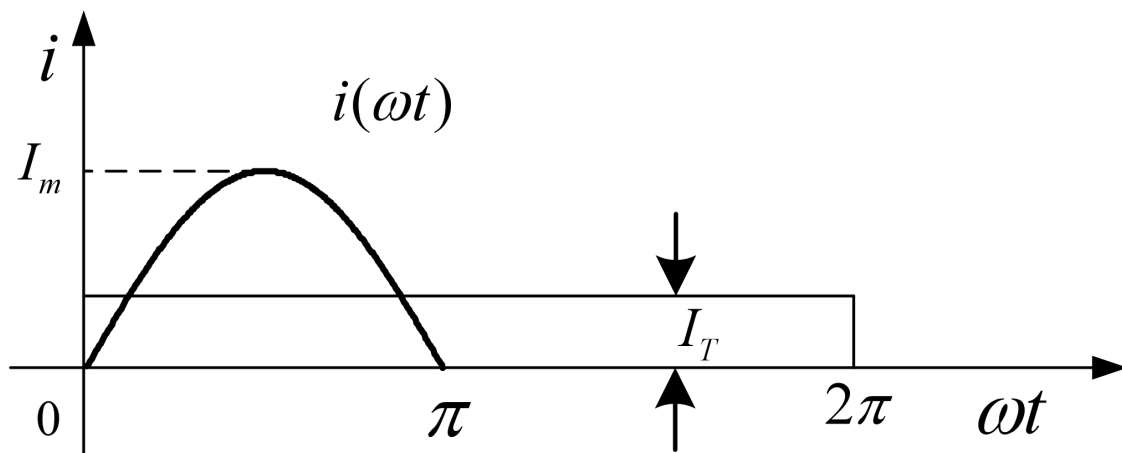
## 1.1.3 晶闸管的主要参数

### 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 $170^{\circ}\text{C}$ ，当结温稳定并不超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：

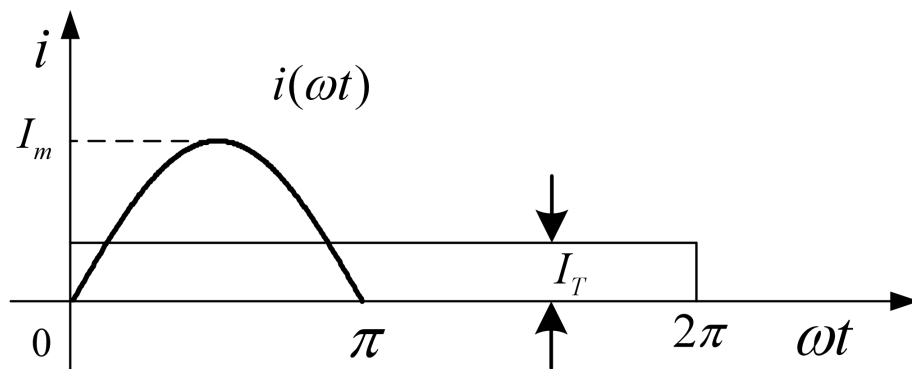
$$I_T = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i(\omega t) d\omega t = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} I_m \sin \omega t d\omega t = \frac{I_m}{\pi}$$

➤ 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 $I_T=100\text{A}$ ，  
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）。

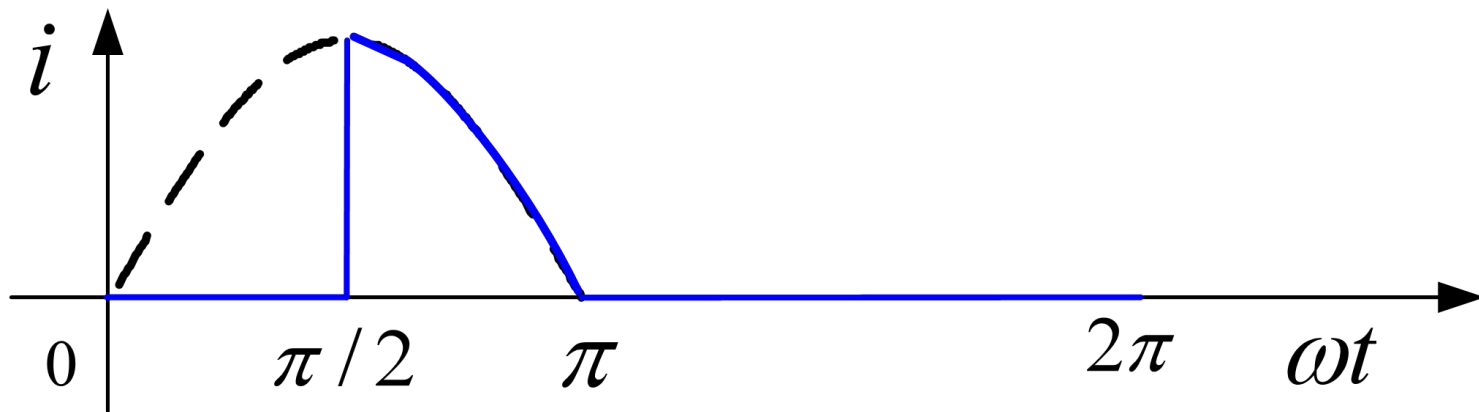


图1.10

## 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。

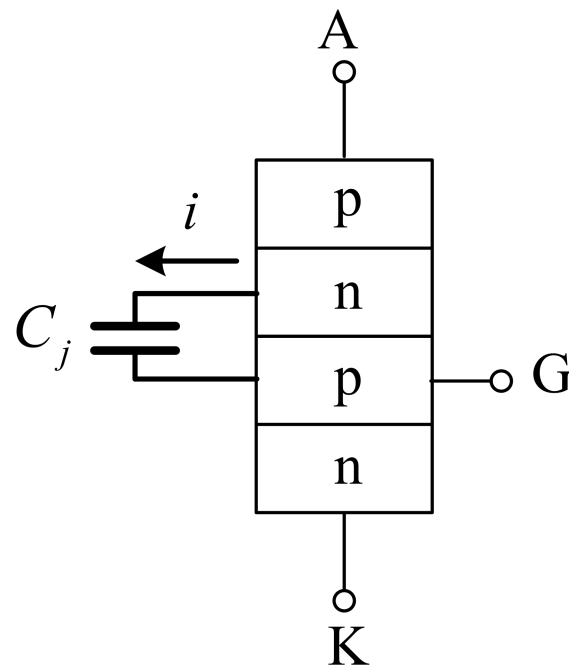


表1.2