

电力变换的种类

输出 \ 输入	交流 (AC)	直流 (DC)
直流 (DC)	整流	直流斩波
交流 (AC)	交流电力控制 变频、变相	逆变

电力电子技术的应用范围

几乎所有需要电能变换的地方

■ 按照能够被控制电路信号所控制的程度

◆ 半控型器件

- ☞ 主要是指晶闸管（Thyristor）及其大部分派生器件。
- ☞ 器件的关断完全是由其在主电路中承受的电压和电流决定的。

◆ 全控型器件

- ☞ 目前最常用的是 IGBT 和 Power MOSFET。
- ☞ 通过控制信号既可以控制其导通，又可以控制其关断。

◆ 不可控器件

- ☞ 电力二极管（Power Diode）
- ☞ 不能用控制信号来控制其通断。

■按照驱动信号的性质

◆电流驱动型

✎通过从控制端注入或者抽出**电流**来实现导通或者关断的控制。

◆电压驱动型

✎仅通过在控制端和公共端之间施加一定的**电压**信号就可实现导通或者关断的控制。

■按照驱动信号的波形（电力二极管除外）

◆脉冲触发型

✎通过在控制端施加一个电压或电流的**脉冲**信号来实现器件的开通或者关断的控制。

◆电平控制型

✎必须通过**持续**在控制端和公共端之间施加一定电平的电压或电流信号来使器件开通并**维持**在导通状态或者关断并维持在阻断状态

■ 正向平均电流 $I_{F(AV)}$

◆ 指电力二极管长期运行时，在指定的管壳温度（简称壳温，用 T_C 表示）和散热条件下，其允许流过的最大**工频正弦半波电流**的平均值。

◆ $I_{F(AV)}$ 是按照电流的发热效应来定义的，使用时应按**有效值相等**的原则来选取电流定额，并应留有一定的裕量。

■ 对于周期性函数 $f(t)$

平均值的定义

$$F_d = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) d(\omega t)$$

有效值的定义

$$F = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T f^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f^2(\omega t) d(\omega t)}$$

1. 静特性

PN结特性

2. 开关特性

电容效应引起:

关断过程---反向峰值电流 I_{RR} , 反向恢复时间 t_{rr}

开通过程---正向恢复

3. 分类和适用场合

普通二极管: 1kHz 以下

快/超快恢复二极管: 高频

肖特基二极管: 高频低压 ($\leq 200V$)

4. 参数

额定正向平均电流 I_F

反向重复峰值电压

反向恢复时间

正向导通压降

第1章 电力电子器件

1.1 概述

1.2 电力二极管

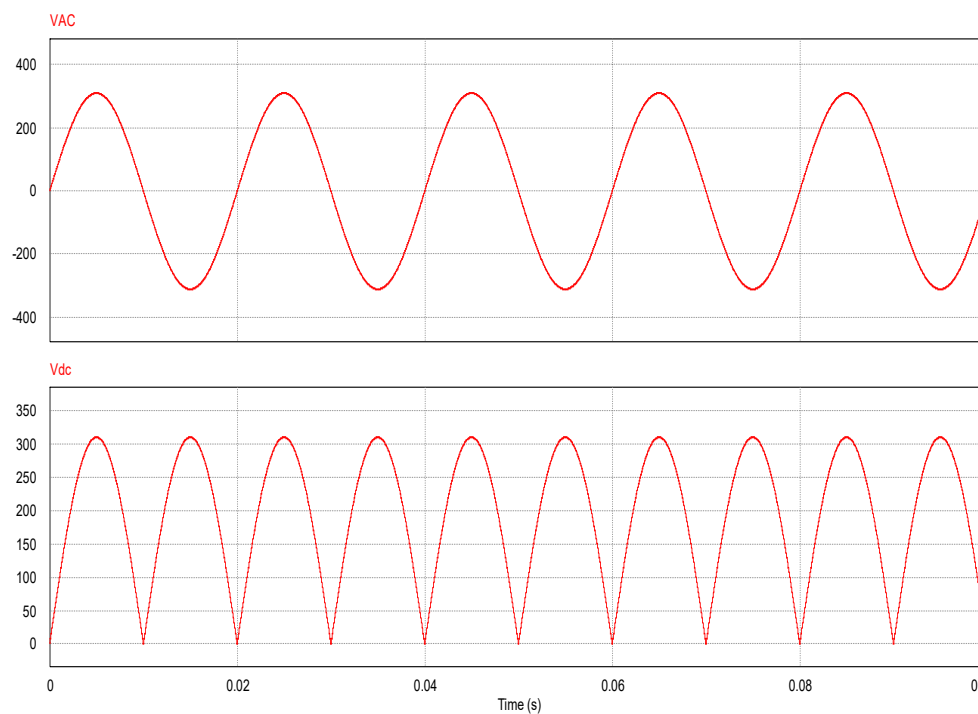
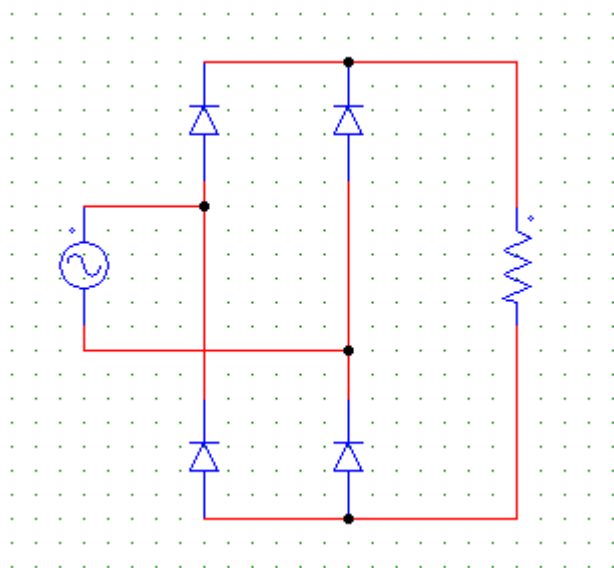
1.3 晶闸管

1.4 可关断器件

- 1.3.1 晶闸管的结构与工作原理
- 1.3.2 晶闸管的基本特性
- 1.3.3 晶闸管的主要参数
- 1.3.4 晶闸管器件的电压电流定额计算

■ 如何实现调压？

🔑 不控整流电路



🔑 电力二极管

- 晶闸管（Thyristor）是**晶体闸流管**的简称，又称作**可控硅整流器**（**Silicon Controlled Rectifier——SCR**），以前被简称为可控硅。
- 1956年美国贝尔实验室（Bell Laboratories）发明了晶闸管，到1957年美国通用电气公司（General Electric）开发出了世界上第一只晶闸管产品，并于1958年使其商业化。
- 由于其能承受的**电压和电流容量**仍然是目前电力电子器件中最高的，而且工作可靠，因此在**大容量**的应用场合仍然具有比较重要的地位。

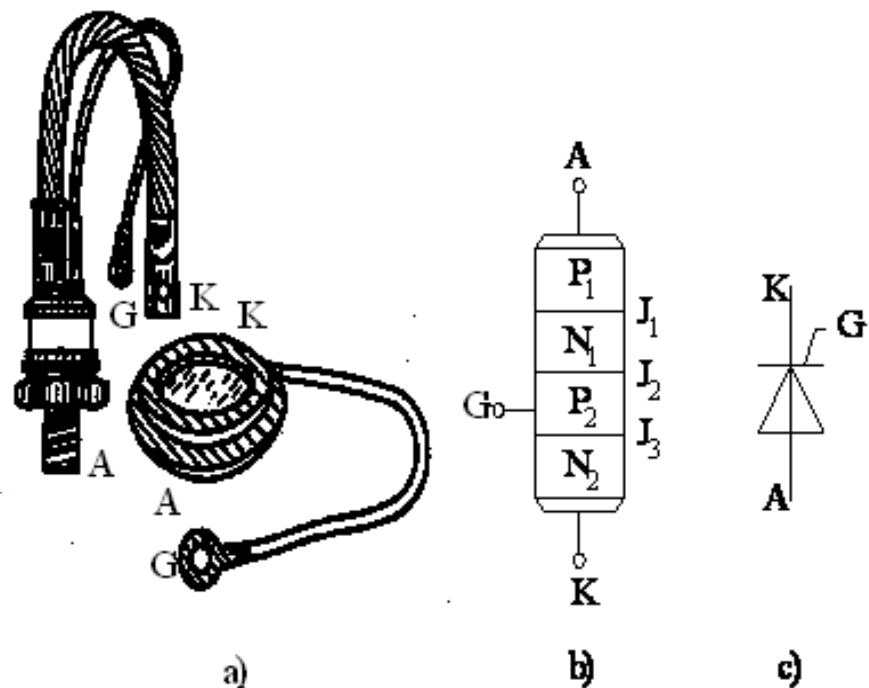


■ 晶闸管的结构

◆ 从外形上来看，晶闸管也主要有**螺栓型**和**平板型**两种封装结构。

◆ 引出**阳极A**、**阴极K**和**门极（控制端）G**三个联接端。

◆ 内部是**PNPN**四层半导体结构。





D²Pak (SMD-220)



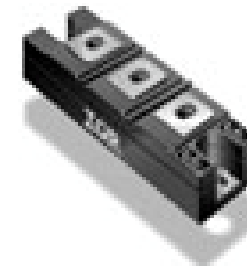
TO-247AC



TO-200AB (A-Puk)

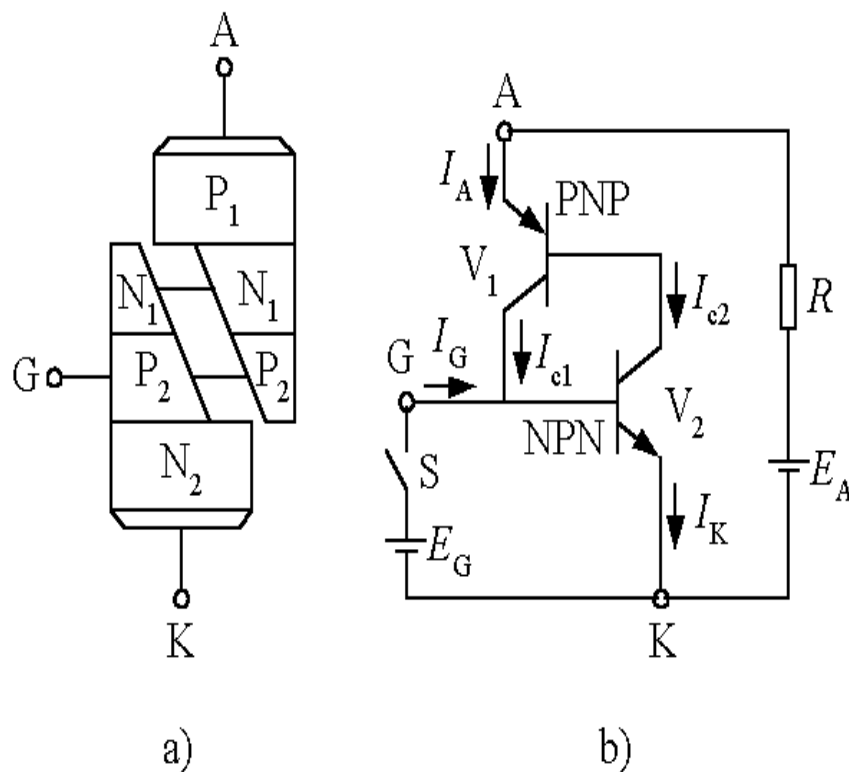


TO-118



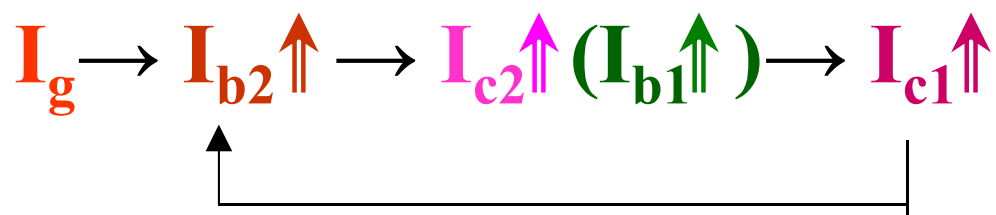
INT-A-PAK

<http://www.irf.com/package/pkthyristors.html>

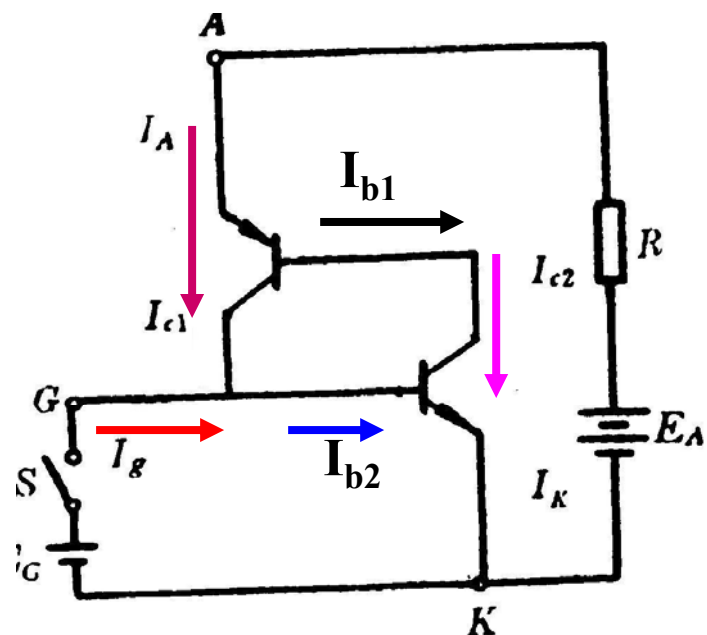


等效电路

导通过程



正反馈, 自锁



关断过程:

打破自锁条件 \leftarrow 令 $I_A = 0$

■ 静态特性

◆ 正常工作时的特性

☞ 当晶闸管承受**反向电压**时，不论门极是否有触发电流，晶闸管都不会导通。

☞ 当晶闸管承受**正向电压**时，仅在**门极有触发电流**的情况下晶闸管才能开通。

☞ 晶闸管一旦导通，门极就失去控制作用，不论门极触发电流是否还存在，晶闸管都保持导通。

☞ 若要使已导通的晶闸管关断，只能利用外加电压和外电路的作用使流过晶闸管的**电流降到接近于零的某一数值以下**。

★ 晶闸管的通断条件

脉冲触发

- 断 → 通** 1. 阳极和阴极之间加正向阳极电压
且
2. 门和阴极之间加适当的正向门极电压

维持导通: 阳极和阴极之间的电流大于维持
电流(此时门极电压不起作用)

通 → 断: 阳极和阴极之间的电流小于维持电流

◆晶闸管的伏安特性

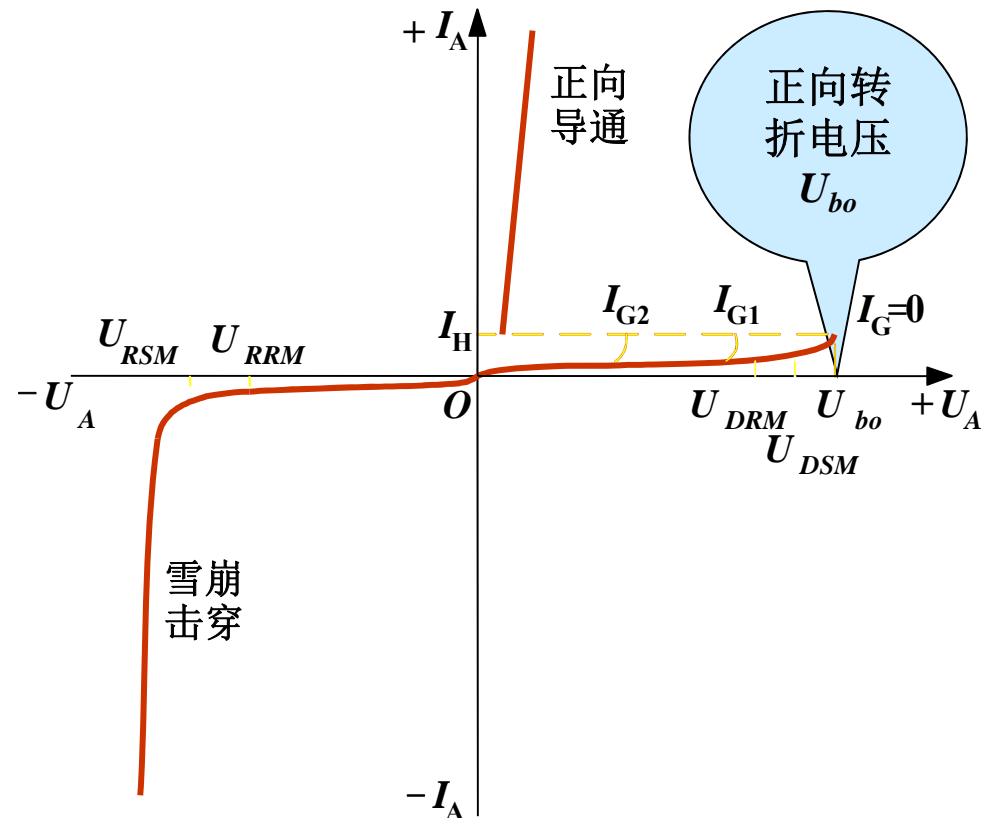
☞正向特性

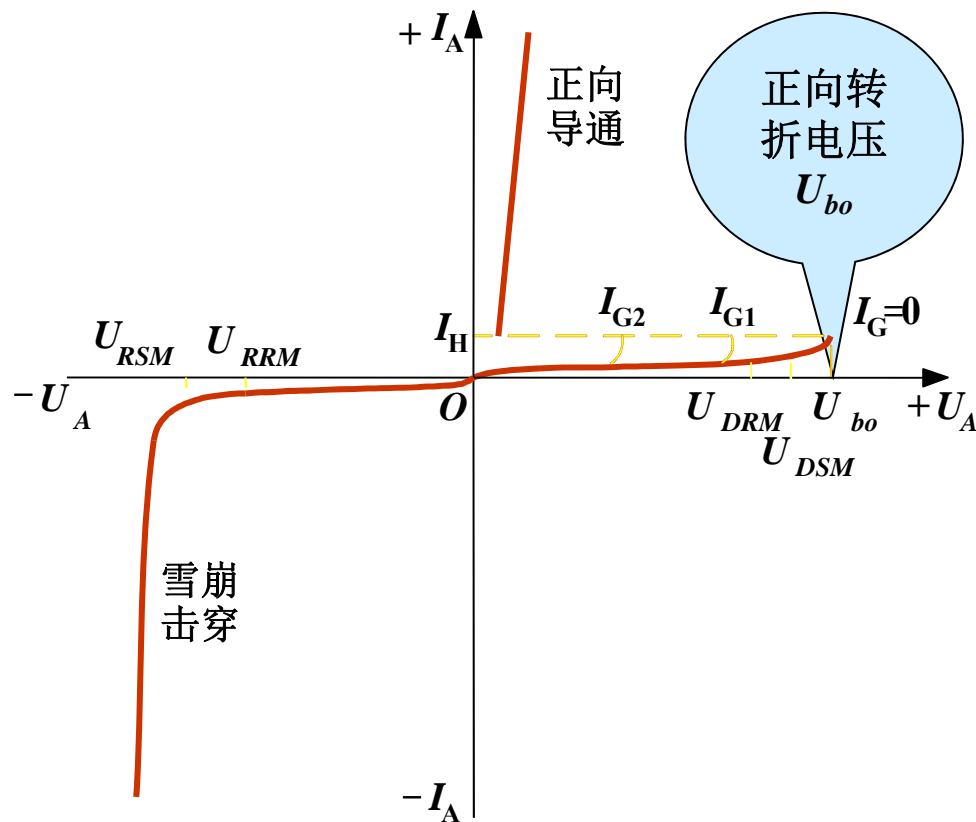
✓当 $I_G=0$ 时，如果在器件两端施加正向电压，则晶闸管处于正向**阻断状态**，只有很小的正向漏电流流过。

✓如果正向电压超过临界极限即**正向转折电压** U_{bo} ，则漏电流急剧增大，器件**开通**。

✓随着门极电流幅值的增大，**正向转折电压**降低，晶闸管本身的压降很小，在1V左右。

✓如果门极电流为零，并且阳极电流降至接近于零的某一数值 I_H 以下，则晶闸管又回到**正向阻断状态**， I_H 称为**维持电流**。





反向特性

✓ 其伏安特性类似二极管的反向特性。

✓ 晶闸管处于反向阻断状态时，只有极小的反向漏电流通过。

✓ 当反向电压超过一定限度，到反向击穿电压后，外电路如无限制措施，则反向漏电流急剧增大，导致晶闸管发热损坏。

■ 动态特性

◆ 开通过程

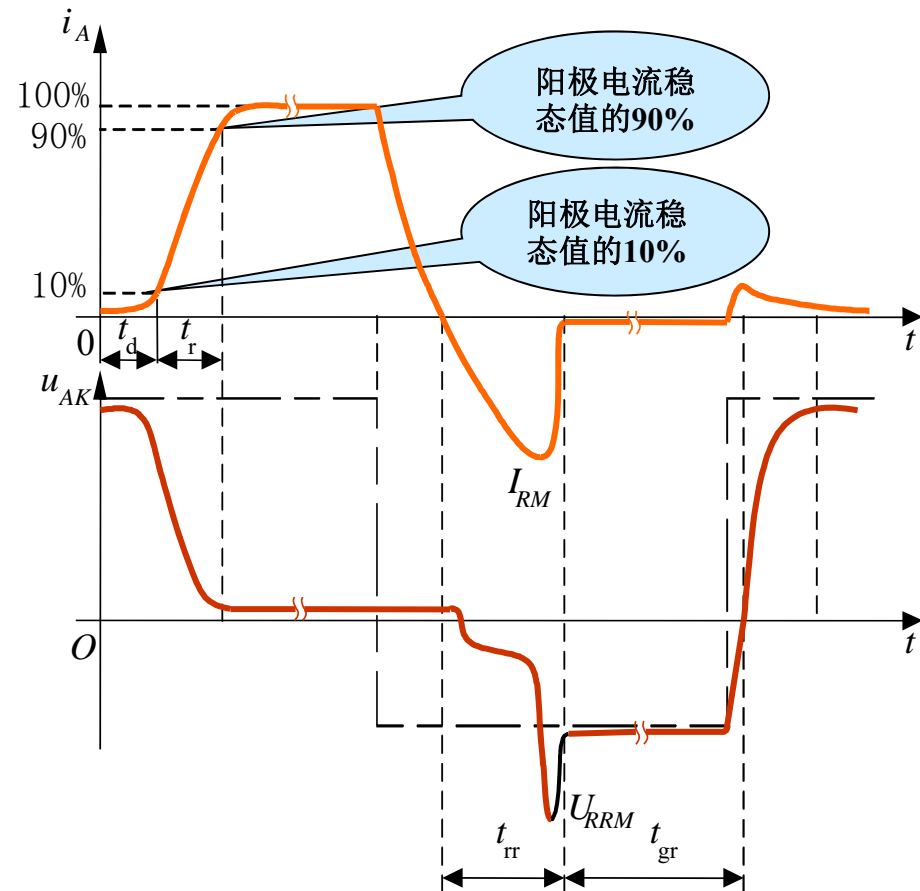
由于晶闸管内部的正反馈过程需要时间，再加上外电路电感的限制，晶闸管受到触发后，其阳极电流的增长不可能是瞬时的。

延迟时间 t_d ($0.5 \sim 1.5 \mu s$)

上升时间 t_r ($0.5 \sim 3 \mu s$)

开通时间 $t_{gt} = t_d + t_r$

延迟时间随门极电流的增大而减小，上升时间除反映晶闸管本身特性外，还受到外电路电感的严重影响。提高阳极电压，延迟时间和上升时间都可显著缩短。



◆ 关断过程

由于外电路电感的存在，原处于导通状态的晶闸管当外加电压突然由正向变为反向时，其阳极电流在衰减时必然也是有过渡过程的。

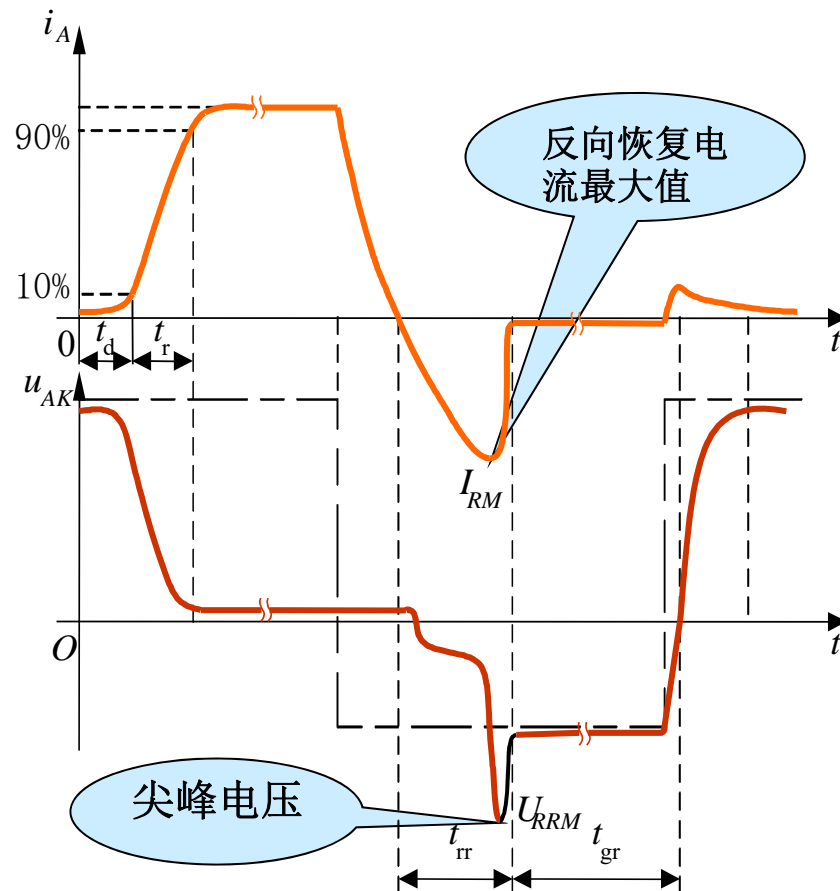
反向阻断恢复时间 t_{rr}

正向阻断恢复时间 t_{gr}

关断时间 $t_q = t_{rr} + t_{gr}$

关断时间约几百微秒。

在正向阻断恢复时间内如果重新对晶闸管施加正向电压，晶闸管会重新正向导通，而不是受门极电流控制而导通。



这些参数代表：1) 安全工作范围；或2) 正常工作时的特性

1. 电压参数: P23

重要：额定电压; 通态平均电压（通态正向压降）

2. 电流参数: P23

重要：通态平均电流; 维持电流; 掣住电流

3. 动态参数: P24

电流电压变化率; 开通关断时间

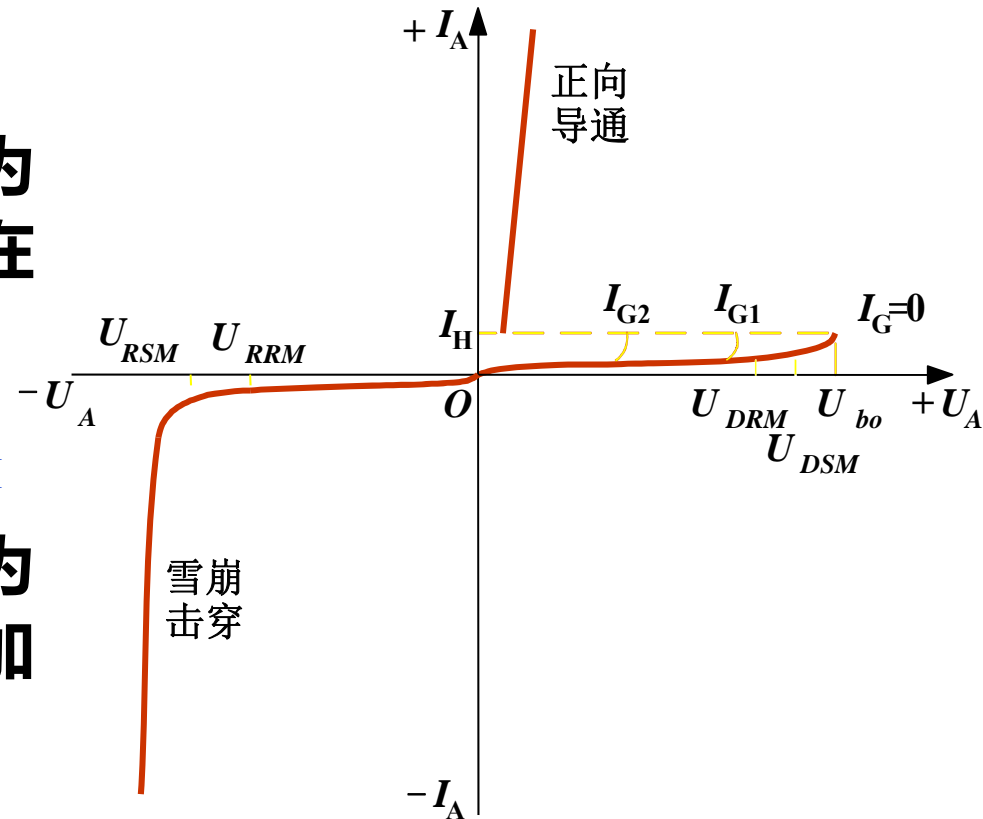
■ 电压参数

● 断态重复峰值电压 U_{DRM}

——在门极断路而结温为额定值时，允许重复加在器件上的**正向**峰值电压

● 断态不重复峰值电压 U_{DSM}

——在门极断路而结温为额定值时，允许不重复加在器件上的**正向**峰值电压



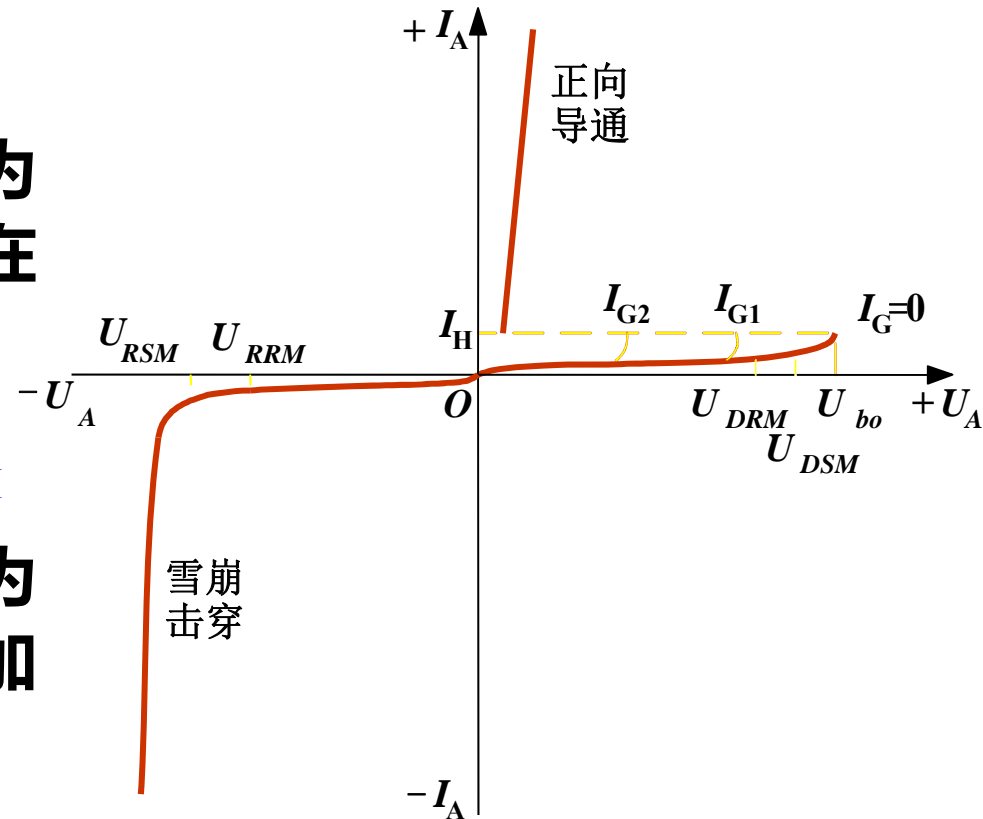
■ 电压参数

● 反向重复峰值电压 U_{RRM}

——在门极断路而结温为额定值时，允许重复加在器件上的**反向**峰值电压

● 反向不重复峰值电压 U_{RSM}

——在门极断路而结温为额定值时，允许不重复加在器件上的**反向**峰值



U_{DSM} —断态不重复峰值电压

U_{DRM} —断态重复峰值电压

U_{RSM} —反向不重复峰值电压

U_{RRM} —反向重复峰值电压

额定电压: $\min(U_{DRM}, U_{RRM})$ 取整

◆通态（峰值）电压 U_T

✎晶闸管通以某一规定倍数的额定通态平均电流时的瞬态峰值电压。

◆通常取晶闸管的 U_{DRM} 和 U_{RRM} 中较小的标值作为该器件的**额定电压**。选用时，一般取额定电压为正常工作时晶闸管所承受峰值电压**2~3倍**。

■ 电流定额

◆ 通态平均电流 $I_{T(AV)}$

☞ 国标规定通态平均电流为晶闸管在环境温度为 **40°C** 和规定的 **冷却状态** 下，稳定结温不超过额定结温时所允许流过的最大工频正弦半波电流的平均值。

☞ 按照正向电流造成的器件本身的通态损耗的 **发热效应** 来定义的。

☞ 一般取其通态平均电流为按发热效应相等（即有效值相等）的原则所得计算结果的 **1.5~2** 倍。

之所以通态平均电流来标定是因为整流电路输出端常用平均电流来表征

正弦半波的电流平均值与有效值

设电流峰值为 I_m ，则通态平均电流

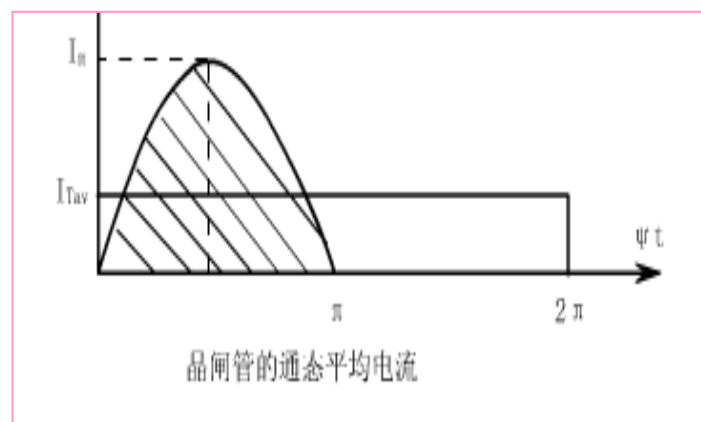
$$\begin{aligned} I_{Tav} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} I_m \sin \omega t d(\omega t) \\ &= \frac{I_m}{2\pi} (-\cos \omega t) \Big|_0^{\pi} \\ &= \frac{I_m}{\pi} \end{aligned}$$

该电流波形的有效值

$$\begin{aligned} I_T &= \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} (I_m \sin \omega t)^2 d(\omega t)} \\ &= I_m \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} \left(\frac{1}{2} - \frac{\cos \omega t}{2} \right) d(\omega t)} \\ &= \frac{I_m}{2} \end{aligned}$$

正弦半波电流波形系数 K_f 应有

$$K_f = \frac{I_T}{I_{Tav}} = \frac{I_m/2}{I_m/\pi} = 1.57$$



通过非正弦波形的电流时晶闸管额定电流如何计算？

电流有效值相等即发热相同的原则

**将非正弦半波电流的有效值 I_T 折合成
等效的正弦半波电流平均值去选择晶闸管额定值**

$$I_T = K_f I_d$$

$$I_{Tav} = I_T / 1.57$$

在实际选用时，一般取1.5—2倍的安全裕量

可以认为，额定有效值电流为 $1.57 I_{Tav}$

- 用法一: 对于任意波形应用, 在知道具体电流大小, 求解晶闸管的额定电流取值
- 用法二: 对于任意波形应用, 给定晶闸管的额定电流后, 求解任意波形的平均值最大允许值

◆ 维持电流 I_H

✎ 维持电流是指使晶闸管维持导通所必需的最小电流，一般为几十到几百毫安。

✎ 结温越高，则 I_H 越小。

◆ 擎住电流 I_L

✎ 擎住电流是晶闸管刚从断态转入通态并移除触发信号后，能维持导通所需的最小电流。

✎ 对于同一个晶闸管来说，约为 I_H 的 2~4 倍

◆ 浪涌电流 I_{TSM}

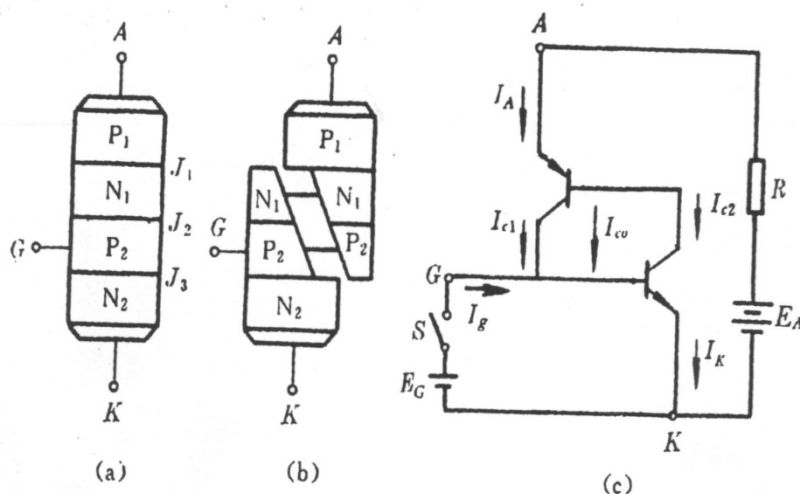
✎ 指由于电路异常情况引起的并使结温超过额定结温的不重复性最大正向过载电流。

■ 动态参数

du/dt ---断态电压临界上升率

条件：额定结温，门极开路

使SCR保持断态所能承受的最大电压上升率



超过会误导通：

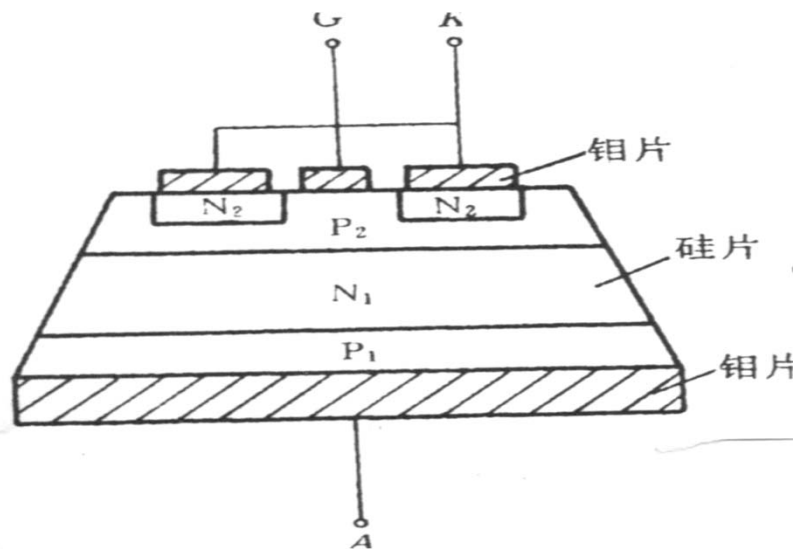
J_2 结电容效应---位移电流

限制方法：

在SCR A-K两端并RC
(防止截止期间误导通)

● di/dt ---通态电流临界上升率

在规定条件下，SCR门极触发开通时，SCR能承受的不会导致损坏的通态电流最大上升率



di/dt 超过会引起过热损坏：
电流集中！

限制方法：

在阳极电路串一小电感；
快速上升的强触发脉冲可提高
 di/dt 承受能力

器件手册上所给的器件定额参数:

- 额定电压 U_{RM}
- 正弦半波条件下的平均电流 I_{Tav}

Major Ratings and Characteristics

Parameters	IRKUN71	IRKUN91	Units
$I_{T(AV)} @ 85^{\circ}\text{C}$	75	95	A
$I_{T(RMS)}$	115	150	A
$I_{TSM} @ 50\text{Hz}$	1665	1785	A
$@ 60\text{Hz}$	1740	1870	A
$I^2t @ 50\text{Hz}$	13.86	15.91	KA^2s
$@ 60\text{Hz}$	12.56	14.52	KA^2s
$I^2\sqrt{t}$	138.6	159.1	$\text{KA}^2\sqrt{\text{s}}$
V_{RRM} range	400 to 1600		V
T_{STG}	-40 to 125		$^{\circ}\text{C}$
T_J	-40 to 125		$^{\circ}\text{C}$



1. 电压 参数计算

器件承受的最大正/反向电压

2. 电流参数计算

电流过大则过热烧毁，所以要限制电流有效值 I_T

依据“任何波形下电流有效值相等即发热相同的原理”，
将非正弦半波电流的有效值 I_T 或平均值 I_d 折合成等效的正弦半波电流平均值-----据此计算电流定额

电流定额的计算过程:

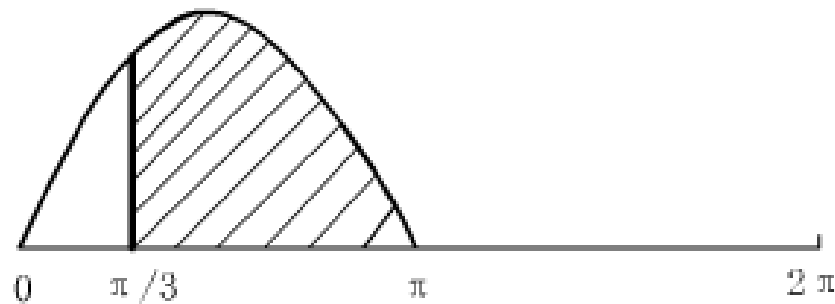
确定晶闸管在具体电路条件下（即某种波形下）的电流有效值 I_T

计算该 I_T 对应的额定电流（即在正弦半波条件下的平均电流）： $I_{tav} = 1.57 I_T$

• 留裕量；查手册选器件

例1 -- 流经晶闸管的电流波形如图所示

- (1) 试计算该电流波形的平均值、有效值及波形系数。
- (2) 若取安全系数为2，问额定电流为100A的晶闸管，其允许通过的该波形电流平均值和最大值为多少？
- (3) 若该波形的平均值为50A，则需要选取多大额定电流的晶闸管？



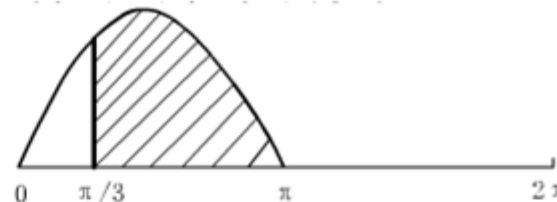
例1 -- 流经晶闸管的电流波形如图所示

(1) 试计算该电流波形的平均值、有效值及波形系数。

解

电流平均值

$$I_d = \frac{1}{2\pi} \int_{\pi/3}^{\pi} I_m \sin \omega t d(\omega t) = \frac{3}{4\pi} I_m = 0.24 I_m$$



电流有效值

$$I_T = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\pi/3}^{\pi} I_m^2 \sin^2 \omega t d(\omega t)} = I_m \sqrt{\frac{1}{6} + \frac{\sqrt{3}}{16\pi}} = 0.46 I_m$$

波形系数

$$K_f = \frac{0.46 I_m}{0.24 I_m} = 1.92$$

例1 -- 流经晶闸管的电流波形如图所示

(2)若取安全系数为2，问额定电流为100A的晶闸管，其允许通过的该波形电流平均值和最大值为多少？

$$K_f = \frac{0.46I_m}{0.24I_m} = 1.92$$

100A的晶闸管允许通过的电流平均值

$$I_d = \frac{1.57 \times 100}{2 \times 1.92} = 41 \text{ (A)}$$

电流最大值

$$I_m = \frac{I_d}{0.24} = \frac{41}{0.24} = 171 \text{ (A)}$$



例1 -- 流经晶闸管的电流波形如图所示

(3)若该波形的平均值为50A，考虑安全系数为2，则需要选取多大额定电流的晶闸管？

$$I_d = 0.24I_m \quad (1)$$

$$I_T = 0.46I_m \quad (2)$$

由(1)，均值50A对应的峰值：

$$I_m = 50 / 0.24 = 208(A)$$

代入(2)，得有效值 $I_m = 95.8A$

对应的所需额定电流 $I_{dTav} = 95.8 / 1.57 = 61.0(A)$

留两倍裕量后： $61.0 \times 2 = 122.2A$

查手册，满足要求的晶闸管其电流定额为？？ A

掌握晶闸管的：

电工符号，三个极名称；

基本特性；开通和关断条件

伏安特性

主要参数；额定电流，额定电压

选择和使用中应注意的一些问题

了解：

内部结构构成及工作原理；

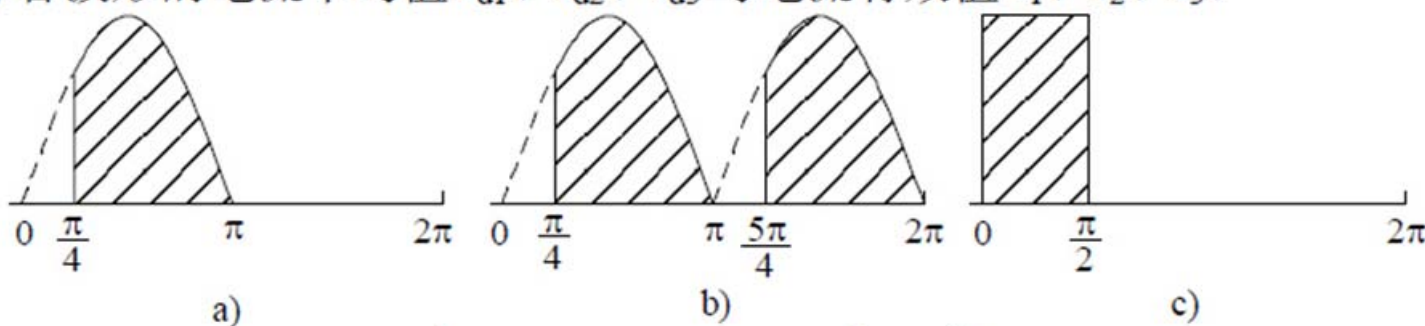
门极可靠触发区选取 -- 自学

晶闸管的选取方法

- 主要包括额定电压、额定电流参数两部分。额定电压参数的选取主要是根据晶闸管所承受的最大电压，再根据要求乘以电压安全裕量系数；
- 额定电流参数的选取主要是根据晶闸管电流的通态平均值，再根据要求乘以电流安全裕量系数即可。
- 根据计算的电压和电流的数值，及生产厂家提供的晶闸管的参数表，就可确定所选晶闸管的型号。

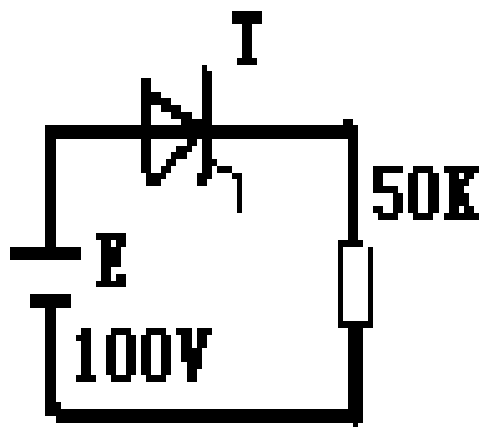
作业:

1. 使晶闸管导通的条件是什么?
2. 维持晶闸管导通的条件是什么? 怎样才能使晶闸管由导通变为关断?
3. 图 1-43 中阴影部分为晶闸管处于通态区间的电流波形, 各波形的电流最大值均为 I_m , 试计算各波形的电流平均值 I_{d1} 、 I_{d2} 、 I_{d3} 与电流有效值 I_1 、 I_2 、 I_3 。

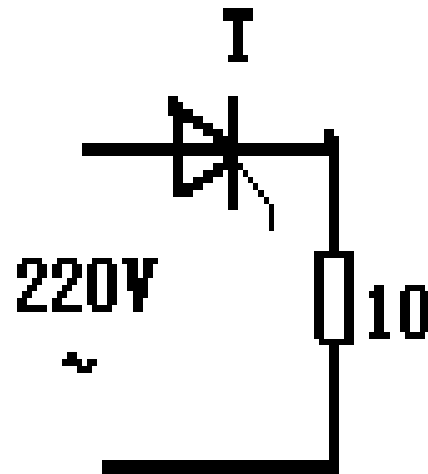


4. 上题中如果不考虑安全裕量,问 100A 的晶闸管能送出的平均电流 I_{d1} 、 I_{d2} 、 I_{d3} 各为多少? 这时, 相应的电流最大值 I_{m1} 、 I_{m2} 、 I_{m3} 各为多少?

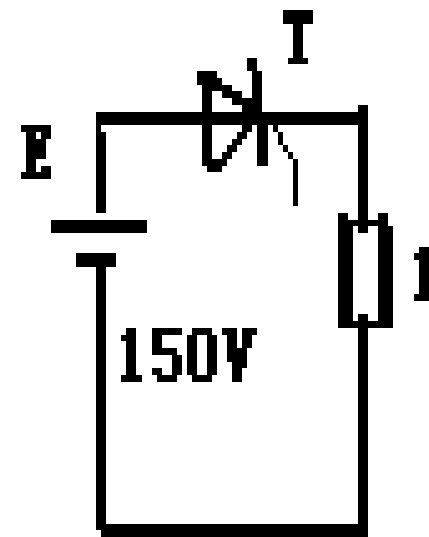
型号KP-100-3 ($I_{Tav}=100A$, 额定电压300V) 的晶闸管, 维持电流 $I_H=4mA$,用在以下电路中是否合适?



a



b



c