



# 项目1

## 晶闸管调光灯电路设计、安装与调试

### 1.1 项目定义



#### 项目描述

晶闸管作为开关器件,广泛应用于各种电子设备和电子产品电路中。家用电器中的调光灯、调速风扇、空调、热水器、电视、冰箱、洗衣机、照相机、声控电路、定时控制器、感应灯、自动门电路、无线电遥控电路等都大量使用了晶闸管器件。本项目主要介绍家用晶闸管调光灯电路的各组成部分和工作原理,以及调光灯电路的设计、制作与调试方法。



#### 项目目标

通过本项目的学习,同学们应掌握组成调光灯电路的开关元器件——晶闸管,以及单相晶闸管触发电路的关键器件——单晶体管的结构、特性及工作原理;了解晶闸管衍生器件的结构、特性及应用等;了解电力二极管的原理及应用。通过本项目的训练,同学们应掌握晶闸管和单晶体管在调光灯电路中的应用,学会用软件进行电路仿真,学会安装和调试电力电子电路。



#### 技能要求

(1) 熟悉晶闸管及单晶体管外形以及型号的编制规则,能根据外形、型号及符号识别器件,会用仪表检测器件。

- (2) 能看懂单相调光灯应用线路及工作过程,正确选择相关元器件。
- (3) 会用仿真软件进行电路仿真。
- (4) 能按照电路图完成调光灯电路的安装,并对安装完毕的晶闸管调光电路进行通电调试。



### 安全规范

- (1) 工作台面清洁,没有金属碎屑(如导线、元器件引脚、焊锡等)。
- (2) 严格按照所使用仪器的操作规程和步骤进行操作。
- (3) 电烙铁应独立放置,金属外壳可靠接地,长时间不用时应断开电源。
- (4) 拆装线路板元件时,必须断开电源。
- (5) 实训结束,应断开所有实训设备、仪器的电源。

## 1.2 项目分析

调光灯在日常生活中的应用非常广泛,其种类也多。图 1-1 所示是常见的调光台灯。旋动调光钮,可以调节灯泡的亮度。图 1-2 所示是晶闸管可控整流装置的原理框图。该装置主要由整流变压器、晶闸管、触发电路、负载等几部分组成。本调光灯项目电路采用单相半波可控整流电路为主电路,触发电路采用单结晶体管触发电路。整流装置的输入端一般接在交流电网上,输出端的负载可以是电阻性负载(如电炉、电热器、电焊机和白炽灯等)、电感性负载(如直流电动机的励磁绕组、滑差电动机的电枢线圈等)或者反电动势负载(如直流电动机的电枢反电动势、充电状态下的蓄电池等)。以上负载要求整流电路能输出可在一定范围内大小可调的直流电压。相控整流电路的工作原理是通过改变触发电路提供的触发脉冲出现时刻,来改变晶闸管在交流电压  $u_2$  一个周期内导通的时间,从而调节负载上得到的直流电压平均值的大小,调光灯就实现了调光。



图 1-1 调光台灯

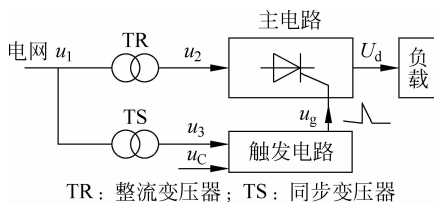


图 1-2 晶闸管可控整流装置原理框图

## 1.3 项目知识

### 1.3.1 电力电子器件

电力电子器件(Power Electronic Device)是指可直接用于处理电能的主电路中,实现电能的变换或控制的电子器件。就像学习电子技术基础时,晶体管和集成电路等电子器件是模拟和数字电子电路的基础一样,电力电子器件是电力电子电路的基础。

实际上,电力电子器件种类很多,并且各有特点。按器件的开关控制特性,分为以下3类。

#### (1) 不可控器件

本身没有导通、关断控制功能,需要根据外电路条件决定其导通、关断状态的器件称为不可控器件。电力二极管就属于此类器件。

#### (2) 半控型器件

通过控制信号只能控制其导通,不能控制其关断的电力电子器件称为半控型器件,例如晶闸管及其大部分派生器件等。

#### (3) 全控型器件

通过控制信号,既可以控制其导通,又可以控制其关断的器件称为全控型器件。例如,门极可关断晶闸管(GTO)、功率场效应晶体管(MOSFET)、绝缘栅双极型晶体管(IGBT)等。

### 1. 电力二极管

#### 1) 电力二极管的工作原理和特性

电力二极管的基本结构和工作原理与信息电子电路中的二极管一样,都是以半导体PN结为基础的。它实际上就是由一个面积较大的PN结和两端引线封装组成的。电力二极管的外形、结构及电气符号如图1-3所示。从外形看,电力二极管主要有螺栓型和平板型两种封装形式。

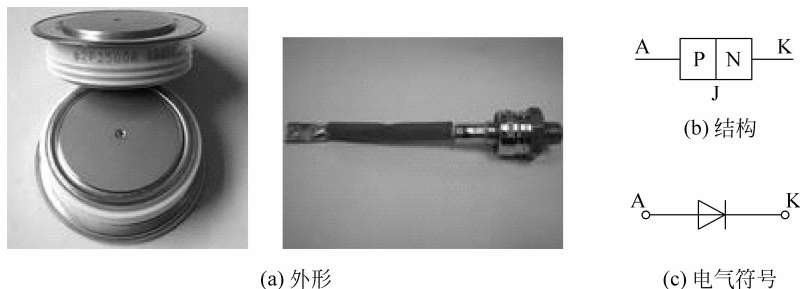


图 1-3 电力二极管的外形、结构及电气符号

电力二极管和电子电路中的二极管工作原理一样。若二极管处于正向电压作用下,PN结正向导通,此时的正向管压降很小;反之,若二极管处于反向电压作用下,反向偏置的PN结表现为高阻态,几乎没有电流流过,此时PN结截止,仅有极小的可忽略的漏电

流流过二极管。

## 2) 电力二极管的主要类型

下面按照正向压降、反向耐压、反向漏电流等性能,特别是反向恢复特性的不同,介绍几种主要的电力二极管类型。

### (1) 普通二极管(General Purpose Diode)

普通二极管又称整流二极管(Rectifier Diode),多用于开关频率不高(1kHz 以下)的整流电路中,其反向恢复时间较长,正向电流定额和反向电压定额可以达到很高。

### (2) 快恢复二极管(Fast Recovery Diode,FRD)

快恢复二极管简称快速二极管,从性能上分为快速恢复和超快速恢复两个等级。前者  $t_{rr}$  为数百纳秒或更长;后者在 100ns 以下,甚至达到 20~30ns。

### (3) 肖特基二极管

以金属和半导体接触形成的势垒为基础的二极管称为肖特基势垒二极管(Schottky Barrier Diode,SBD)。肖特基二极管的优点很多。例如,其反向恢复时间很短(10~40ns),在正向恢复过程中也不会有明显的电压过冲;当反向耐压较低时,其正向压降明显低于快恢复二极管。另外,肖特基二极管效率高,其开关损耗和正向导通损耗都比快速二极管小。但是肖特基二极管也存在很多不足,比如当其反向耐压能力提高时,正向压降会提高。综上所述,肖特基二极管适用于较低输出电压和要求较低正向管压降的换流器电路中。

## 2. 晶闸管

晶闸管是一种理想的大功率变流电子器件,其引脚如图 1-4 所示。它能以较小的电流控制上千安的电流和数千伏的电压,主要用于大功率的交流电能和直流电能的相互转换。它是晶闸管变流技术的重要成员,现已发展成一个大家族,其中以普通晶闸管应用最为广泛。

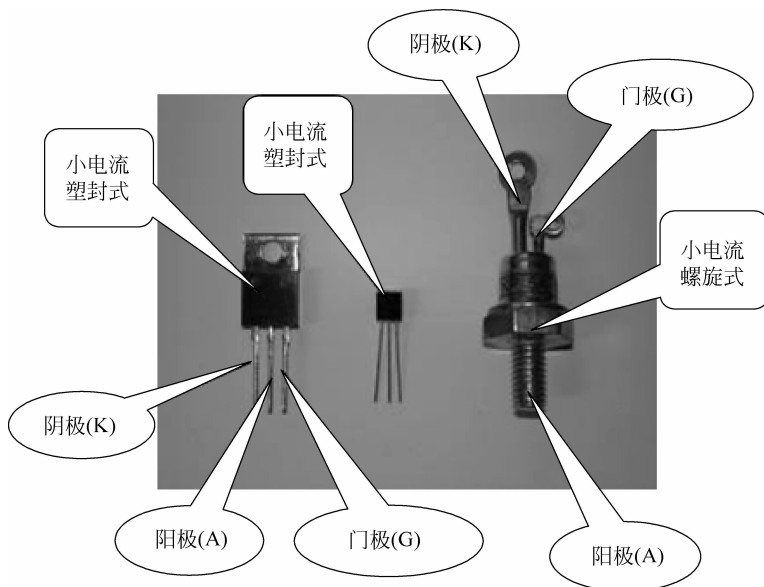


图 1-4 晶闸管的引脚

### 1) 晶闸管的外形

目前常用的晶闸管有螺栓式和平板式两种封装形式,如图 1-5 所示,均引出阳极 A、阴极 K 和门极(控制极)G 三个极端。对于螺栓型封装,通常螺栓一端是其阳极,能与散热器紧密相连且安装方便;另一侧较粗的一端为阴极,细的为门极。平板型晶闸管可由两个散热器将其夹在中间,散热方式采用风冷或水冷,其两个平面分别是阳极和阴极,引出的细长端子为门极,如图 1-6 所示。

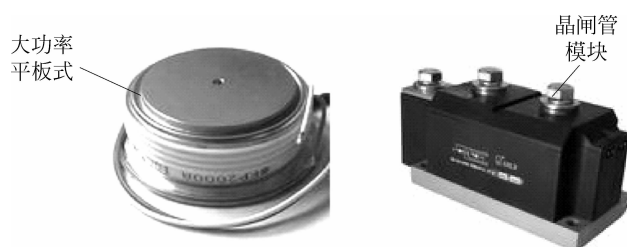


图 1-5 晶闸管的外形

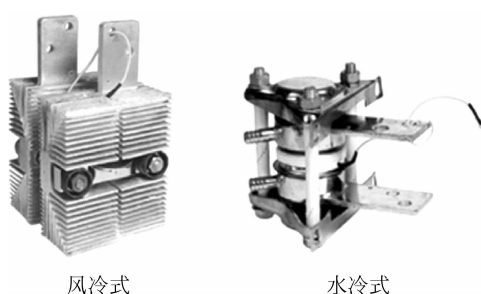


图 1-6 晶闸管的散热封装

### 2) 晶闸管的符号

晶闸管的符号如图 1-7 所示。

### 3) 晶闸管结构、原理及参数

#### (1) 晶闸管的结构

普通晶闸管由四层半导体( $P_1$ 、 $N_1$ 、 $P_2$ 、 $N_2$ )组成,形成三个 PN 结  $J_1$  ( $P_1N_1$ )、 $J_2$  ( $N_1P_2$ )、 $J_3$  ( $P_2N_2$ ); 由最外层  $P_1$  和  $N_2$  层引出两个电极,分别为阳极 A 和阴极 K; 由中间  $P_2$  层引出门极(控制极)G,如图 1-8 所示。



图 1-7 晶闸管的符号

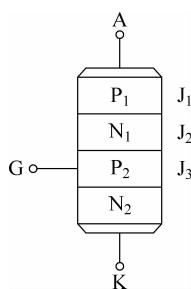


图 1-8 晶闸管的结构

## (2) 晶闸管的工作原理

下面通过图 1-9 所示的电路来说明晶闸管的工作原理。阳极电源  $E_a$  连接负载(白炽灯),并接到晶闸管的阳极 A 与阴极 K,组成晶闸管的主电路。流过晶闸管阳极的电流称为阳极电流  $I_a$ 。晶闸管阳极和阴极两端的电压称为阳极电压  $U_a$ 。门极电源  $E_g$  连接晶闸管的门极 G 与阴极 K,组成控制电路,称为触发电路。流过门极的电流称为门极电流  $I_g$ ,门极与阴极之间的电压称为门极电压  $U_g$ 。通过灯泡亮灭情况来观察晶闸管的通断。该实验分 9 个步骤。

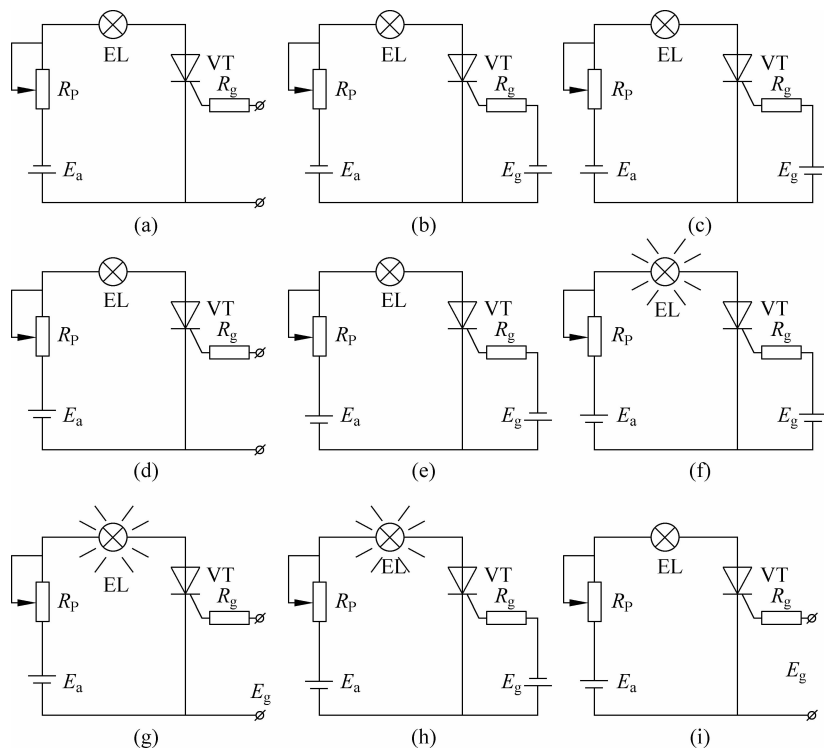


图 1-9 晶闸管导通、关断条件实验电路

第 1 步: 按图 1-9(a)所示接线,阳极和阴极之间加反向电压,门极和阴极之间不加电压,指示灯不亮,晶闸管不导通。

第 2 步: 按图 1-9(b)所示接线,阳极和阴极之间加反向电压,门极和阴极之间加反向电压,指示灯不亮,晶闸管不导通。

第 3 步: 按图 1-9(c)所示接线,阳极和阴极之间加反向电压,门极和阴极之间加正向电压,指示灯不亮,晶闸管不导通。

第 4 步: 按图 1-9(d)所示接线,阳极和阴极之间加正向电压,门极和阴极之间不加电压,指示灯不亮,晶闸管不导通。

第 5 步: 按图 1-9(e)所示接线,阳极和阴极之间加正向电压,门极和阴极之间加反向电压,指示灯不亮,晶闸管不导通。

第 6 步: 按图 1-9(f)所示接线,阳极和阴极之间加正向电压,门极和阴极之间也加正

向电压,指示灯亮,晶闸管导通。

第 7 步: 按图 1-9(g)所示接线,去掉触发电压,指示灯亮,晶闸管仍导通。

第 8 步: 按图 1-9(h)所示接线,门极和阴极之间加反向电压,指示灯亮,晶闸管仍导通。

第 9 步: 按图 1-9(i)所示接线,去掉触发电压,将电位器阻值加大,晶闸管阳极电流减小。当电流减小到一定值时,指示灯熄灭,晶闸管关断。

实验现象与结论列于表 1-1。

表 1-1 晶闸管导通和关断实验现象与结论

| 实验顺序 |   | 实验前灯的情况 | 实验时晶闸管条件      |            | 实验后灯的情况 | 结 论                             |
|------|---|---------|---------------|------------|---------|---------------------------------|
|      |   |         | 阳极电压 $U_a$    | 门极电压 $U_g$ |         |                                 |
| 导通实验 | 1 | 不亮      | 反向            | 反向         | 不亮      | 晶闸管在反向阳极电压作用下,不论门极为何电压,它都处于关断状态 |
|      | 2 | 不亮      | 反向            | 零          | 不亮      |                                 |
|      | 3 | 不亮      | 反向            | 正向         | 不亮      |                                 |
|      | 4 | 不亮      | 正向            | 反向         | 不亮      | 晶闸管同时在正向阳极电压与正向门极电压作用下,才能导通     |
|      | 5 | 不亮      | 正向            | 零          | 不亮      |                                 |
|      | 6 | 不亮      | 正向            | 正向         | 亮       |                                 |
| 关断实验 | 1 | 亮       | 正向            | 正向         | 亮       | 已导通的晶闸管在正向阳极作用下,门极失去控制作用        |
|      | 2 | 亮       | 正向            | 零          | 亮       |                                 |
|      | 3 | 亮       | 正向            | 反向         | 亮       |                                 |
|      | 4 | 亮       | 正向(逐渐减小到接近于零) | 任意         | 灭       | 晶闸管在导通状态下,当阳极电压减小到接近于零时,晶闸管关断   |

实验说明:

① 当晶闸管承受反向阳极电压时,无论门极是否有正向触发电压或者承受反向电压,晶闸管不导通。这种状态称为反向阻断状态。说明晶闸管像整流二极管一样,具有单向导电性。

② 当晶闸管承受正向阳极电压时,门极加上反向电压或者不加电压,晶闸管不导通。这种状态称为正向阻断状态。

③ 当晶闸管承受正向阳极电压时,门极加上正向触发电压,晶闸管导通。这种状态称为正向导通状态。

④ 晶闸管一旦导通后,维持阳极电压不变,将触发电压撤除,管子依然处于导通状态,即门极对管子不再具有控制作用。从这个意义上来讲,晶闸管称为半控型器件。

结论:

① 晶闸管导通条件为阳极加正向电压,门极加适当正向电压。

② 关断条件为流过晶闸管的电流小于维持电流。可采用的方法有将阳极电源断开,或者在阳极和阴极间加反向电压。

下面通过晶闸管的互补三极管等效电路,进一步说明晶闸管的工作原理。由于采用扩散工艺,具有四层三端结构的普通晶闸管可以等效是由一个 PNP 型和一个 NPN 型晶

体管连接而成的,连接形式如图 1-10 所示。阳极 A 相当于 PNP 型晶体管  $VT_1$  的发射极,阴极 K 相当于 NPN 型晶体管  $VT_2$  的发射极。

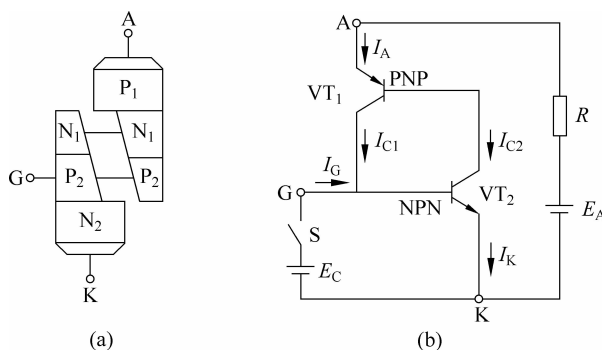


图 1-10 晶闸管工作原理等效电路

当晶闸管阳极承受正向电压,控制极也加正向电压时,晶体管  $VT_2$  处于正向偏置状态, $E_C$  产生的控制极电流  $I_G$  就是  $VT_2$  的基极电流  $I_{B2}$ ,  $VT_2$  的集电极电流  $I_{C2} = \beta_2 I_G$ 。而  $I_{C2}$  是晶体管  $VT_1$  的基极电流,  $VT_1$  的集电极电流  $I_{C1} = \beta_1 I_{C2} = \beta_1 \beta_2 I_G$  ( $\beta_1$  和  $\beta_2$  分别是  $VT_1$  和  $VT_2$  的电流放大系数)。电流  $I_{C1}$  流入  $VT_2$  的基极,再一次放大。这样循环下去,形成了强烈的正反馈,使两个晶体管很快达到完全饱和状态,这就是晶闸管的导通过程。导通后,晶闸管上的正向压降为 1.5V 左右,通常可以忽略。

在晶闸管导通之后,如果控制极电流消失,由于晶闸管内部已经形成强烈的正反馈,晶闸管仍将处于导通状态。要想关断晶闸管,最根本的方法就是必须将阳极电流减小到使之不能维持正反馈的程度,即设法将晶闸管的阳极电流减小到维持电流以下。可采用的方法有:将阳极电源断开,或者在阳极和阴极间加反向电压。因此,控制极的作用仅是触发晶闸管使其导通;导通之后,控制极就失去了作用,不能令其关断。从这个意义上讲,晶闸管称为半控型器件。

### (3) 晶闸管的主要参数

晶闸管的各项额定参数在其生产后,由厂家经过严格测试而确定。作为使用者来说,只需要正确地选择管子就可以了。表 1-2 列出了晶闸管的一些主要参数。

表 1-2 晶闸管的主要参数

| 型 号  | 通态平均电流/A | 通态峰值电压/V   | 断态正反向重复峰值电流/mA | 断态正反向重复峰值电压/V | 门极触发电流/mA | 门极触发电压/V | 断态电压临界上升率/(V/ $\mu$ s) | 推荐用散热器 | 安装力/kN | 冷却方式   |
|------|----------|------------|----------------|---------------|-----------|----------|------------------------|--------|--------|--------|
| KP5  | 5        | $\leq 2.2$ | $\leq 8$       | 100~2000      | $< 60$    | $< 3$    |                        | SZ14   |        | 自然冷却   |
| KP10 | 10       | $\leq 2.2$ | $\leq 10$      | 100~2000      | $< 100$   | $< 3$    | 250~800                | SZ15   |        | 自然冷却   |
| KP20 | 20       | $\leq 2.2$ | $\leq 10$      | 100~2000      | $< 150$   | $< 3$    |                        | SZ16   |        | 自然冷却   |
| KP30 | 30       | $\leq 2.4$ | $\leq 20$      | 100~2400      | $< 200$   | $< 3$    | 50~1000                | SZ16   |        | 强迫风冷水冷 |

续表

| 型 号    | 通态平<br>均电<br>流/A | 通态峰<br>值电<br>压/V | 渐态正<br>反向重<br>复峰值<br>电流/mA | 断态正反<br>向重复峰<br>值电压/V | 门极触<br>发电流<br>/mA | 门极<br>触发<br>电压/V | 断态电<br>压临界<br>上升率<br>/(V/ $\mu$ s) | 推荐<br>用散<br>热器 | 安装<br>力/kN | 冷却方式       |
|--------|------------------|------------------|----------------------------|-----------------------|-------------------|------------------|------------------------------------|----------------|------------|------------|
| KP50   | 50               | $\leq 2.4$       | $\leq 20$                  | 100~2400              | $< 250$           | $< 3$            | 100~1000                           | SL17           |            | 强迫风冷<br>水冷 |
| KP100  | 100              | $\leq 2.6$       | $\leq 40$                  | 100~3000              | $< 250$           | $< 3.5$          |                                    | SL17           |            | 强迫风冷<br>水冷 |
| KP200  | 200              | $\leq 2.6$       | $\leq 0$                   | 100~3000              | $< 350$           | $< 3.5$          |                                    | L18            | 11         | 强迫风冷<br>水冷 |
| KP300  | 300              | $\leq 2.6$       | $\leq 50$                  | 100~3000              | $< 350$           | $< 3.5$          |                                    | L18B           | 15         | 强迫风冷<br>水冷 |
| KP500  | 500              | $\leq 2.6$       | $\leq 60$                  | 100~3000              | $< 350$           | $< 4$            |                                    | SF15           | 19         | 强迫风冷<br>水冷 |
| KP800  | 800              | $\leq 2.6$       | $\leq 80$                  | 100~3000              | $< 350$           | $< 4$            |                                    | SF16           | 24         | 强迫风冷<br>水冷 |
| KP1000 | 1000             | $\leq 2.6$       | $\leq 80$                  | 100~3000              | $< 350$           | $< 4$            |                                    | SF16           | 30         | 强迫风冷<br>水冷 |
| KP1500 | 1500             | $\leq 2.6$       | $\leq 80$                  | 100~3000              | $< 350$           | $< 4$            |                                    | SS14           | 43         | 强迫风冷<br>水冷 |
| KP2000 | 2000             | $\leq 2.6$       | $\leq 80$                  | 100~3000              | $< 350$           | $< 4$            |                                    | SS14           | 50         | 强迫风冷<br>水冷 |

晶闸管的电压说明如下。

① 正向断态重复峰值电压  $U_{\text{DRM}}$ ：在额定结温下，在控制极断路和晶闸管正向阻断的条件下，可重复加在晶闸管两端的正向峰值电压称为正向重复峰值电压  $U_{\text{DRM}}$ （国际规定重复频率为 50Hz，每次持续时间不超过 10ms）。

② 反向重复峰值电压  $U_{\text{RRM}}$ ：在额定结温下，控制极断路时，可以重复加在晶闸管两端的反向峰值电压称为反向重复峰值电压  $U_{\text{RRM}}$ 。

③ 晶闸管额定电压  $U_{\text{Tn}}$ ：晶闸管额定电压通常是这样标定的，取实测  $U_{\text{DRM}}$  和  $U_{\text{RRM}}$  中的较小值，按规定的标准电压等级就低取整数，作为该晶闸管的额定电压。例如，一只晶闸管实测  $U_{\text{DRM}}=812\text{V}$ ， $U_{\text{RRM}}=756\text{V}$ ，将两者较小的 756V 取整得 700V，则该晶闸管的额定电压为 700V。

在晶闸管的铭牌上，额定电压是以电压等级的形式给出的。通常标准电压等级规定为电压在 1000V 以下，每 100V 为一级；1000~3000V，每 200V 为一级，用百位数或千位和百位数表示级数。电压等级如表 1-3 所示。

表 1-3 晶闸管标准电压等级

| 级别 | 正反向重复峰值电压/V | 级别 | 正反向重复峰值电压/V |
|----|-------------|----|-------------|
| 1  | 100         | 12 | 1200        |
| 2  | 200         | 14 | 1400        |
| 3  | 300         | 16 | 1600        |
| 4  | 400         | 18 | 1800        |
| 5  | 500         | 20 | 2000        |
| 6  | 600         | 22 | 2200        |
| 7  | 700         | 24 | 2400        |
| 8  | 800         | 26 | 2600        |
| 9  | 900         | 28 | 2800        |
| 10 | 1000        | 30 | 3000        |

在使用过程中,环境温度的变化、散热条件以及出现的各种过电压都会对晶闸管产生影响,因此在选用元件额定电压时,应取正常工作时晶闸管所承受峰值电压的 2~3 倍,即考虑 2~3 的安全余量,  $U_{Tn} = (2 \sim 3) U_{TM}$ 。

晶闸管的电流定额说明如下。

① 通态平均电流  $I_{T(AV)}$ : 在环境温度为 40℃ 和标准散热的条件下,晶闸管在导通角不小于 170° 的电阻性负载电路中,当结温不超过额定结温且稳定时,所允许通过的工频正弦半波电流的平均值称为额定通态平均电流  $I_{T(AV)}$ ,简称额定电流。按照标准,取其整数作为该器件的额定电流。但是决定晶闸管结温的是管子损耗的发热效应,表征热效应的电流以有效值表示,两者的关系为

$$I_{Tn} = 1.57 I_{T(AV)}$$

例如,额定电流为 100A 的晶闸管,其允许通过的电流有效值为 157A。

由于电路不同、负载不同、导通角不同,流过晶闸管的电流波形不同,其电流平均值和有效值的关系也不同。在实际选择晶闸管时,一般按以下原则确定其额定电流: 管子在额定电流时的电流有效值大于其所在电路中可能流过的最大电流的有效值,同时取 1.5~2 倍的余量,即

$$1.57 I_{T(AV)} = I_T \geq (1.5 \sim 2) I_{Tm}$$

所以

$$I_{T(AV)} \geq (1.5 \sim 2) \frac{I_{Tm}}{1.57}$$

**例 1-1** 一只晶闸管接在 220V 交流电路中,通过晶闸管电流的有效值为 50A。问如何选择晶闸管的额定电压和额定电流?

**解:** 晶闸管额定电压为

$$U_{Tn} \geq (2 \sim 3) U_{TM} = (2 \sim 3) \times \sqrt{2} \times 220 = 622 \sim 933(\text{V})$$

按晶闸管参数系列,取 800V,即 8 级。

晶闸管的额定电流为

$$I_{T(AV)} \geq (1.5 \sim 2) \frac{I_{Tm}}{1.57} = (1.5 \sim 2) \times \frac{50}{1.57} = 48 \sim 64(\text{A})$$