

项目 3

电力电子技术项目应用

任务 11 可调光台灯电路的设计

学习任务

1. 正确理解晶闸管的结构和工作原理；
2. 掌握晶闸管的可控整流电路。

11.1 任务提出

图 11-1 是家用调光台灯外形。图 11-2 是家用调光台灯的电路原理图,VS 是单向可控硅,VT 是单结晶体管。电阻 R_2 、 R_P 和电容 C 构成 RC 充电回路。当电容两端电压 u_c 达到单结晶体管峰点电压 U_P 时,VT 导通,电容通过 R_4 放电,并在 R_4 上产生脉冲电压,触发可控硅 VS 导通。如图 11-2 所示,家用调光台灯降到谷点电压 U_V 时,VT 截止, C 再次充电,循环往复。调节 R_w 可改变充电时间,从而改变可控硅 VS 的触发角,以达到调光的目的。



图 11-1 调光台灯外形

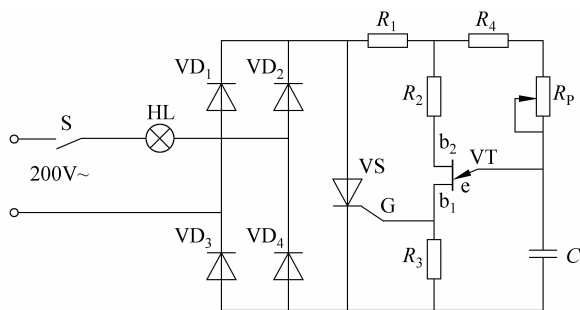


图 11-2 调光台灯电路原理图

11.2 知识链接

11.2.1 晶闸管的结构和工作原理

1. 晶闸管的结构

晶闸管是最基本的电力电子器件,其全称是晶体闸流管,又称可控硅,简称 SCR,是一种“以小控大”的功率(电流)型器件。普通晶闸管的内部有一个由硅半导体材料做成的管芯。管芯是一个圆形薄片,它是由 PNPN 4 层半导体材料构成的三端半导体器件,3 个引出端分别为阳极 A、阴极 K 和门极(控制端)G。图 11-3 是其电路图形符号。晶闸管外形有螺栓形和平板形两种封装方式,图 11-4 是其常见封装外形。螺栓形晶闸管螺栓一端是阳极 A,另一端粗线是阴极 K,细线是控制极 G。平板形封装的晶闸管中间金属环是控制极 G,远的一面是阳极 A,近的一面是阴极 K。额定电流小于 200A 的晶闸管才用螺栓形,大于 200A 的采用平板形。

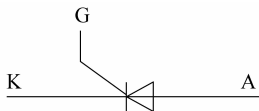


图 11-3 晶闸管电路图形符号



图 11-4 晶闸管的外形

2. 晶闸管的工作原理

为了更清楚地说明工作原理,晶闸管可以看做是两个三极管 PNP(V_1)管和 NPN(V_2)管组合而成,电路模型如图 11-5 所示。

设在阳极和阴极之间接上电源 U_A ,在控制极和阴极之间接入电源 U_G ,如图 11-6 所示。

- (1) 晶闸管加阳极负电压 $-U_A$ 时,处于反向阻断状态。
- (2) 晶闸管加阳极正电压 U_A ,控制极不加电压时,晶闸管处于正向阻断状态。
- (3) 晶闸管加阳极正电压 $+U_A$,同时也加控制极正电压 $+U_G$,晶闸管导通。

(4) 要使导通的晶闸管截止,必须将阳极电压降至零或为负,使晶闸管阳极电流降至维持电流 I_H 以下。

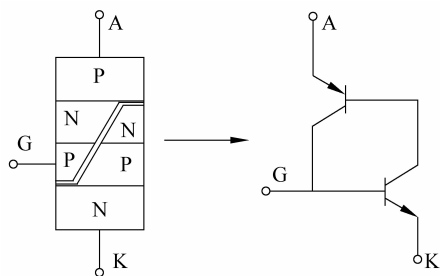


图 11-5 晶闸管电路模型

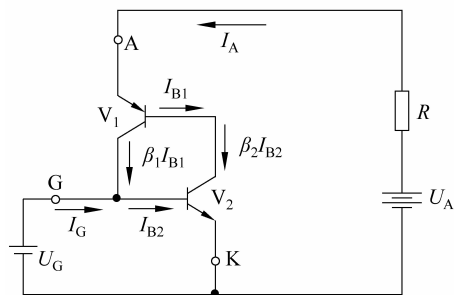


图 11-6 晶闸管工作原理

综上所述,可得如下结论。

(1) 晶闸管与硅整流二极管相似,都具有反向阻断能力,但晶闸管还具有正向阻断能力,即晶闸管正向导通必须具有一定的条件:阳极加正向电压,同时控制极也加正向触发电压。

(2) 晶闸管一旦导通,控制极即失去控制作用。要使晶闸管重新关断,必须做到以下两点之一:一是将阳极电流减小到小于维持电流 I_H ;二是将阳极电压减小到零或使之反向。

3. 晶闸管的伏安特性

晶闸管的阳极、阴极间的电压 u 和阳极电流 i 以及控制极电流 I 之间的关系称为晶闸管的伏安特性,即 $i = f(u)/I_G$ 。其特性曲线如图 11-7 所示,曲线分为正向特性和反向特性两部分。

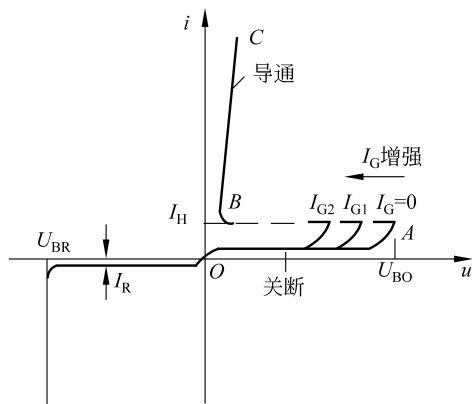


图 11-7 晶闸管的伏安特性曲线

当 $u > 0$ 时对应的曲线是正向特性。晶闸管的正向特性可分为关断状态 OA 段和导通状态 BC 段两个部分。当控制极电流 $I_G = 0$ 时,逐渐增加正向电压 u ,观察阳极电流 i 的变化情况。开始时,3 个 PN 结中有一个为反向偏置,晶闸管处于关断状态,只有很小的正向漏电流。当电压加大到正向转折电压(即 $u = U_{BO}$)时,晶闸管突然导通,进入伏安

特性的BC段。此时晶闸管可通过较大电流,而管压降很小,这种导通方法极易造成晶闸管击穿而损坏,应尽量避免。若在控制极与阴极间加上触发电压,则会降低转折电压。控制极 I_G 越大,转折电压就越低($I_{G2} > I_{G1} > 0$)。导通后,若电流降低到小于维持电流 I_H 时,晶闸管将由导通变为关断。

当 $u < 0$ 时,对应的曲线称为反向特性。当晶闸管加反向电压时,3个PN结中有2个是反向偏置,只有很小的反向漏电流 I_R 。反向电压增加到一定数值后,反向电流急剧增加,使晶闸管反向击穿,将这一电压值称为反向转折电压 U_{BR} 。晶闸管的反向特性与二极管相似,此时,晶闸管状态与控制极上是否加触发电压无关。

4. 主要参数

(1) 额定正向平均电流 I_F : 在环境温度小于 40°C 和标准散热条件下,允许连续通过晶闸管的工频正弦半波电流的平均值。

(2) 维持电流 I_H : 在控制极开路 and 规定环境温度下,维持晶闸管导通的最小阳极电流。当晶闸管正向电流小于维持电流 I_H 时,会自行关断。

(3) 触发电压 U_G 和触发电流 I_G : 在室温时,晶闸管上加 $u=6\text{V}$ 直流电压的条件下,使晶闸管从关断到完全导通所需的最小控制极直流电压和电流。一般 U_G 为 $1\sim 5\text{V}$, I_G 为几十至几百毫安。

(4) 正向转折电压 U_{BO} : 在额定结温和控制极开路条件下,晶闸管从关断转为导通的正弦波半波正向电压峰值。

(5) 正向重复峰值电压 U_{DRM} : 控制极开路的条件下,允许重复作用在晶闸管上的最大正向电压。一般 U_{DRM} 与正向转折电压 U_{BO} 之间的关系为 $U_{DRM}=80\%U_{BO}$ 。

(6) 反向重复峰值电压 U_{RRM} : 控制极开路的条件下,允许重复作用在晶闸管上的最大反向电压。一般 U_{RRM} 与反向转折电压 U_{BR} 之间的关系为 $U_{RRM}=80\%U_{BR}$ 。

5. 型号及其含义

国产晶闸管的型号命名(JB1144-75部颁发标准)主要由4部分组成,第1部分用字母“K”表示主称为晶闸管;第2部分用字母表示晶闸管的类别;第3部分用数字表示晶闸管的额定通态电流值;第4部分用数字表示重复峰值电压级数。

例如:

(1) KP1-2(1A 200V 普通反向阻断型晶闸管)含义如下:

K——晶闸管;P——普通反向阻断型;1——通态电流1A;2——重复峰值电压。

(2) KS5-4(5A 400V 双向晶闸管)含义如下:

K——晶闸管;S——双向管;5——通态电流5A、200V;4——重复峰值电压400V。

(3) KP5-7 含义如下:

K——晶闸管;P——普通型;额定电流5A;额定电压700V。

6. 判别管子的好坏

用万用表的欧姆挡来判别管子的好坏,分析如表11-1所示。

表 11-1 用万用表测试晶闸管各引脚之间的电阻

测试点	表内电池极性	测量范围	测试结果
A-K	顺向或逆向	$R \times 1000$	高电阻(表针不动)
A-G	同上	同上	同上
K-G	顺向: G“+”, K“-”	$R \times 1$	10~100
	逆向: G“-”, K“+”	$R \times 1$	50~500

注: 当 A-K 间为高阻值, 而 K-G 间逆向电阻大于顺向电阻时, 管子良好。

11.2.2 晶闸管可控整流电路

1. 单相半波可控整流电路

图 11-8 是一个带电阻性负载的单相半波可控整流电路及电路波形。图中, T 为整流变压器, 用来变换电压。引入整流变压器后将能使整流电路输入、输出电压间获得合理的匹配, 以提高整流电路的性能指标, 尤其是整流电路的功率因数。在生产实际中属于电阻性的负载, 如电解、电镀、电焊、电阻加热炉等。电阻性负载情况下的最大特点是负载上的电压、电流同相位, 波形相同。

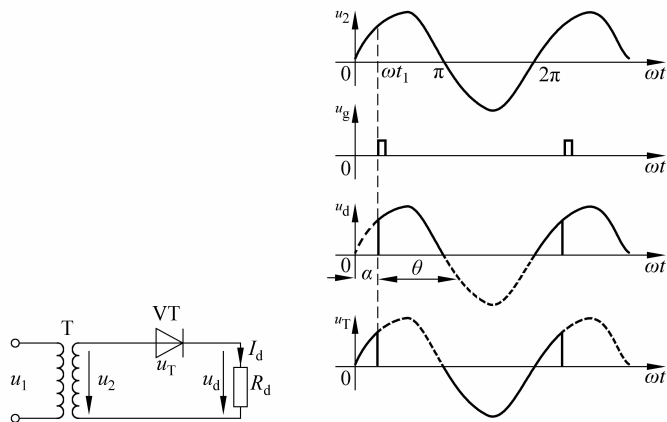


图 11-8 单相半波可控整流电路(电阻性负载)

晶闸管从开始承受正向阳极电压起至开始导通时刻为止的电角度称为控制角, 以 α 表示; 晶闸管导通时间按交流电源角频率折算出的电角度称为导通角, 以 θ 表示。改变控制角 α 的大小, 即改变门极触发脉冲出现的时刻, 也即改变门极电压相对正向阳极电压出现时刻的相位, 称为移相。

整流电路输出直流电压 u_d 为

$$\begin{aligned}
 U_d &= \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d(\omega t) = \frac{\sqrt{2} U_2}{2\pi} (1 + \cos \alpha) \\
 &= 0.45 U_2 \frac{1 + \cos \alpha}{2}
 \end{aligned} \quad (11-1)$$

可以看出, U_d 是控制角 α 的函数。当 $\alpha = 0$ 时, 晶闸管全导通, $U_d = U_{d0} = 0.45 U_2$, 直

流平均电压最大。当 $\alpha = \pi$ 时,晶闸管全关断, $U_d = 0$, 直流平均电压最小。输出直流电压总的变化规律是 α 由小变大时, U_d 由大变小。可以看出,单相半波可控整流电路的最大移相范围为 180° 。由于可控整流是通过触发脉冲的移相控制来实现的,故也称相控整流。

单相半波可控整流电路结构简单,元件少,调整容易,但输出电压小且脉动程度很大,变压器利用率低,因此,除了对电压波形要求不高的小功率整流设备外,已较少采用。

2. 单相桥式可控整流电路

为了克服单相半波整流电路的缺点,在小功率可控整流电路中多采用单相桥式整流电路,可控整流电路的作用是把交流电转变为电压可调节的直流电。

图 11-9 所示为带阻性负载时的单相桥式可控整流电路,在单相桥式全控整流电路中,晶闸管 VT_1 和 VT_4 组成一对桥臂, VT_2 和 VT_3 组成另一对桥臂。

在 u_2 正半周(即 a 点电位高于 b 点电位),若 4 个晶闸管均不导通,负载电流 i_d 为零, u_d 也为零, VT_1 、 VT_4 串联承受电压 u_2 , 设 VT_1 和 VT_4 的漏电阻相等,则各承受 u_2 的一半。若在触发角 α 处给 VT_1 和 VT_4 加触发脉冲, VT_1 和 VT_4 即导通,电流从电源 a 端经 VT_1 、 R 、 VT_4 流回电源 b 端。当 u_2 过零时,流经晶闸管的电流也降到零, VT_1 和 VT_4 关断。

在 u_2 负半周,仍在触发角 α 处触发晶闸管 VT_2 、 VT_3 (VT_2 和 VT_3 的 $\alpha = 0$ 位于 $\omega t = \pi$ 处) VT_2 和 VT_3 导通,电流从电源 b 端流出,经 VT_3 、 R 、 VT_2 流回电源 a 端。到 u_2 过零时,电流又降为零, VT_2 和 VT_3 关断。此后又是 VT_1 和 VT_4 导通,如此循环地工作下去,晶闸管承受的最大正向电压和反向电压分别为 $\frac{\sqrt{2}}{2}U_2$ 和 $\sqrt{2}U_2$ 。具体带电阻性负载的单相桥式可控整流电路工作波形如图 11-10 所示。

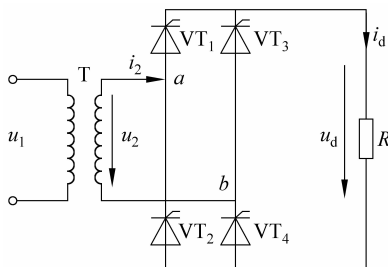


图 11-9 单相桥式可控整流电路

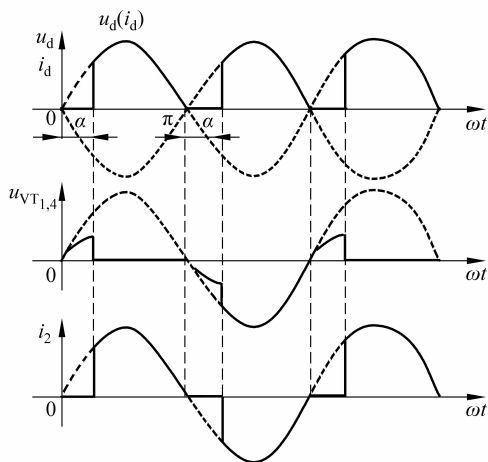


图 11-10 单相桥式可控整流电路工作波形

由于在交流电源的正负半周都有整流输出电流流过负载,故该电路为全波整流。在 u_2 一个周期内,整流电压波形脉动 2 次,脉动次数多于半波整流电路,该电路属于双脉波

整流电路。变压器二次绕组中,正负两个半周电流方向相反且波形对称,平均值为零,即直流分量为零,如图 11-10 所示。

其整流电压平均值为

$$\begin{aligned} U_d &= \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d(\omega t) = \frac{2\sqrt{2}U_2}{2\pi} \frac{1 + \cos \alpha}{2} \\ &= 0.9 U_2 \frac{1 + \cos \alpha}{2} \end{aligned} \quad (11-2)$$

$\alpha=0$ 时, $U_d=U_{d0}=0.9U_2$ 。 $\alpha=180^\circ$ 时, $U_d=0$ 。可见, α 角的移相范围为 180° 。

向负载输出的直流电流平均值为

$$I_d = \frac{U_d}{R} = \frac{2\sqrt{2}U_2}{\pi R} \frac{1 + \cos \alpha}{2} = 0.9 \frac{U_2}{R} \frac{1 + \cos \alpha}{2} \quad (11-3)$$

晶闸管 VT_1 、 VT_4 和 VT_2 、 VT_3 轮流导电,流过晶闸管的电流平均值只有输出直流电流的一半,即

$$I_{dVT} = \frac{I_d}{2} = 0.45 \frac{U_2}{R} \frac{1 + \cos \alpha}{2} \quad (11-4)$$

11.3 任务实施

1. 元器件选择与检测

按表 11-2 元件清单表的要求清点各类元件配备数量,并按正确的方法检测各类元件。如有不合格元器件,设法调换。

表 11-2 元件清单表

序号	型 号 规 格	数 量	编 号	说 明
1	220V 电源线	1	无	接插座
2	30k Ω /2W	1	R_1	金属膜电阻器
3	2k Ω /4W	1	R_2	金属膜电阻器
4	10k Ω /4W	1	R_3	金属膜电阻器
5	100k Ω /4W	1	R_4	金属膜电阻器
6	47k Ω	1	R_P	合成膜电位器
7	1N4007	4	$D_1 \sim D_4$	整流
8	0.1 μ F/50V	1	C	电容
9	9V/1W	1	VS	硅稳压二极管
10	3A、600V	1	VT	TLC336A 型双向晶闸管

2. 焊接与安装

图 11-11 所示是该调光台灯的电气装配图。将元器件按图 11-14 进行插装,插装顺序按“先小后大”原则进行。插装时各元器件均不能插错,特别要注意有极性元件不能插反,如二极管、三极管、集成电路和电解电容等。元器件的焊接与整理。细心处理好每一个焊点,保证焊接质量,焊好后剪掉多余的引线。

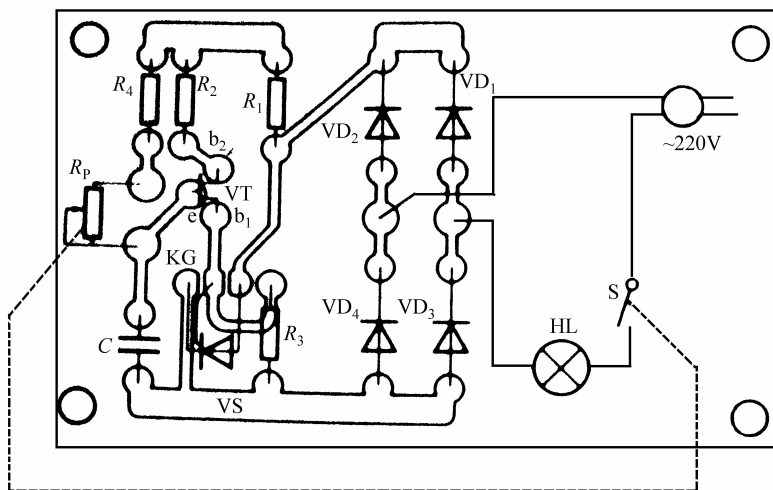


图 11-11 调光台灯的电路板

3. 整机调试

电路装接完毕,经检查无误后,可接通电源进行调试。改变 R_p 阻值观察灯亮度变化是否正常,如不正常进行调试。

11.4 知识拓展

11.4.1 双向晶闸管

双向晶闸管(TRIAC)是由 NPNPN 5 层半导体材料构成的,相当于 2 只普通晶闸管反相并联,它也有 3 个电极,分别是主电极 T_1 、主电极 T_2 和门极 G 。图 11-12 是双向晶闸管的结构和等效电路,图 11-13 是其电路图形符号。

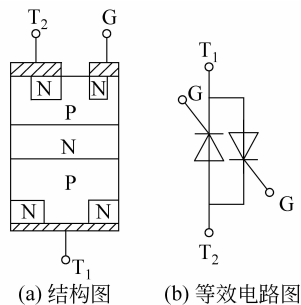


图 11-12 双向晶闸管的结构图和等效电路图

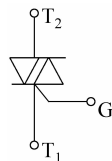


图 11-13 双向晶闸管的电路图形符号

双向晶闸管可以双向导通,即门极加上正或负的触发电压,均能触发双向晶闸管正、反两个方向导通。当门极 G 和主电极 T_2 相对于主电极 T_1 的电压为正($V_{T2} > V_{T1}$ 、 $V_G > V_{T1}$)或门极 G 和主电极 T_1 相对于主电极 T_2 的电压为负($V_{T1} < V_{T2}$ 、 $V_G < V_{T2}$)时,晶闸管

的导通方向为 $T_2 \rightarrow T_1$, 此时 T_2 为阳极, T_1 为阴极。

当门极 G 和主电极 T_1 相对于主电极 T_2 为正 ($V_{T1} > V_{T2}$ 、 $V_G > V_{T2}$) 或门极 G 和主电极 T_2 相对于主电极 T_1 为负 ($V_{T2} < V_{T1}$ 、 $V_G < V_{T1}$) 时, 则晶闸管的导通方向为 $T_1 \rightarrow T_2$, 此时 T_1 为阳极, T_2 为阴极。

双向晶闸管的主电极 T_1 与主电极 T_2 间, 无论所加电压极性是正向还是反向, 只要门极 G 和主电极 T_1 (或 T_2) 间加有正、负极性不同的触发电压, 满足其必须的触发电流, 晶闸管即可触发导通呈低阻状态。此时, 主电极 T_1 、 T_2 间压降约为 $1V$ 。

双向晶闸管一旦导通, 即使失去触发电压, 也能继续维持导通状态。当主电极 T_1 、 T_2 电流减小至维持电流以下或 T_1 、 T_2 间电压改变极性, 且无触发电压时, 双向晶闸管阻断, 只有重新施加触发电压, 才能再次导通。

11.4.2 可关断晶闸管

可关断晶闸管 (Gate Turn-Off Thyristor, GTO) 也称门控晶闸管。其主要特点为: 当门极加负向触发信号时晶闸管能自行关断。普通晶闸管靠门极正信号触发之后, 撤掉信号也能维持通态, 欲使之关断, 必须切断电源, 使正向电流低于维持电流 I_H , 或施以反向电压强迫关断。这就需要增加换向电路, 不仅使设备的体积重量增大, 而且会降低效率, 产生波形失真和噪声。可关断晶闸管克服了上述缺陷, 既保留了普通晶闸管耐压高、电流大等优点, 也具有自关断能力, 使用方便, 是理想的高压、大电流开关器件。

可关断晶闸管也属于 PNP 4 层 3 端器件, 其结构及等效电路和普通晶闸管相同, 图 11-14 仅绘出 GTO 典型产品的外形及符号。

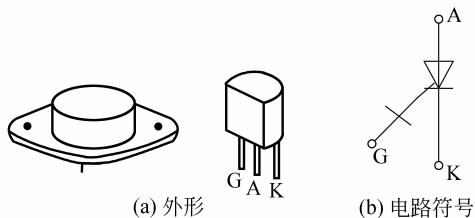


图 11-14 GTO 外形和电路符号

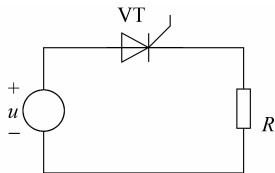
11.5 阶段小结

电力电子技术研究的是以晶闸管为主体的一系列功率半导体器件的应用技术。晶闸管自问世以来, 由于具有容量大、效率高、控制特性好、寿命长、体积小、使用方便等优点, 获得了迅速的发展。电力电子器件主要可用于可控整流、交流调压、无触点开关以及大功率变频控制和逆变控制等场合。

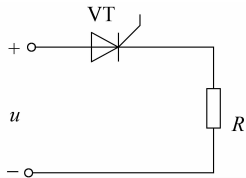
晶闸管俗称可控硅, 是一种新型大功率半导体器件, 晶闸管在弱电控制与强电输出之间起桥梁作用。

习 题

- 11.1 有一个功率二极管,其通态平均电流为 100A ,问最大允许通过的电流有效值是多少? 该有效值与电流的波形是否有关?
- 11.2 如果晶闸管与 RC 电路串联,在使用时应特别注意晶闸管的哪一个参数? 为什么?
- 11.3 晶闸管是大功率器件,工作电流和电压都很大,可否将其做成线性放大器使用? 为什么?
- 11.4 从晶闸管的等效电路看,它是由一个 NPN 型晶体管和一个 PNP 型晶体管连接而成的。可不可用上述两个分立元件构成具有晶闸管功能的电路? 要注意哪些问题?
- 11.5 某一电阻性负载,需要直流电压 60V ,电流 30A 。今采用单相半波可控整流电路,直接由 220V 电网供电。试计算晶闸管的导通角、电流的有效值,并选用晶闸管。
- 11.6 有一晶闸管整流电路,接负载后,输出电压正常,但去掉负载后,在控制电路正常通电的情况下,却测不到输出电压,这是什么原因?
- 11.7 决定晶闸管承受正向电压的能力的参数是什么? 决定晶闸管承受反向电压能力的参数是什么? 两个参数有什么区别?
- 11.8 一个晶闸管,一个 100Ω 的电阻,一个有效电阻为 220V 的正弦交流电源相串联构成一个回路,如题 11.8 图,问晶闸管的电压定额如何选择?



题 11.8 图



题 11.9 图

- 11.9 有一型号为 KP20-3 的晶闸管,将其接成题 11.9 图的电路,如果暂不考虑晶闸管电流和电压的余量,下列情况下电路是否可以安全运行? 为什么?
- (a) u 为有效值为 220V 的正弦交流电, $R=200\Omega$ 。
- (b) u 为有效值为 100V 的正弦交流电, $R=2\Omega$ 。
- (c) u 为有效值为 100V 的正弦交流电, $R=50\Omega$ 。
- 11.10 有一电阻性负载,它需要可调的直流电压 $U_o=0\sim 60\text{V}$,电流 $I_o=0\sim 10\text{A}$ 。现采用半控桥式整流电路,试计算变压器副边的电压,并选用整流元件。如果不用变压器,而将整流电路的输出端直接接在 220V 的交流电源上,试计算输入电流的有效值,并选用整流元件。
- 11.11 GTO 的物理结构模型与晶闸管相似,都是 PNPN 4 层结构,3 个 PN 结。在制造工艺上两者有哪些区别?
- 11.12 电力电子技术装置上使用的大功率晶体管 GTR 与在普通模拟电子电路中使用的普通型晶体管在结构上是否类似? 在考虑其开关过程时, GTR 有哪些特殊问题?