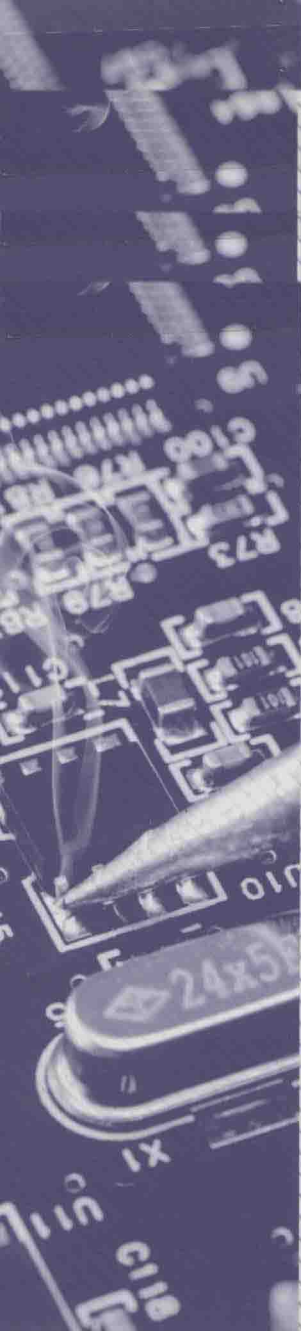




电力电子技术

主 编 吴 硕

副主编 孙英伟 许连阁 赵 东

电力电子技术

主 编 吴 硕

副主编 孙英伟 许连阁 赵 东

中央广播电视大学出版社·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

电力电子技术 / 吴硕主编. —北京: 中央广播电视大学出版社, 2017. 5

ISBN 978-7-304-08532-2

I. ①电… II. ①吴… III. ①电力电子技术 IV. ①TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 091946 号

版权所有, 翻印必究。

电力电子技术

DIANLI DIANZI JISHU

主 编 吴 硕

副主编 孙英伟 许连阁 赵 东

出版·发行: 中央广播电视大学出版社

电话: 营销中心 010-66490011 总编室 010-68182524

网址: <http://www.crtvup.com.cn>

地址: 北京市海淀区西四环中路 45 号 邮编: 100039

经销: 新华书店北京发行所

策划编辑: 沈海哲

版式设计: 赵 洋

责任编辑: 王 普

责任校对: 宋亦芳

责任印制: 赵连生

印刷: 北京七彩京通数码快印有限公司

版本: 2017 年 5 月第 1 版

2017 年 5 月第 1 次印刷

开本: 787mm × 1092mm 1/16

印张: 10

字数: 221 千字

书号: ISBN 978-7-304-08532-2

定价: 21.00 元

(如有缺页或倒装, 本社负责退换)

本书着重讲述了各种电能转换电路的基本工作原理、电路结构、电气性能、波形分析方法和参数计算。通过本课程学习,学生能够理解并掌握电力电子技术领域的相关基础知识,培养分析问题、解决问题的能力,了解电力电子学科领域的发展方向。本书可作为职业院校、成人高校的电气自动化技术、供用电技术、光伏发电技术及应用等专业的课程教材,也可供有关工程技术人员工作时参考。

本书采用项目式教学方法,根据电力电子技术的发展现状,充分结合研究热点,对教学内容进行了合理的规划与调整,共分为6个项目。其中,项目1、项目2、项目3由辽宁装备制造职业技术学院吴硕编写;项目4由辽宁机电职业技术学院许连阁编写,项目5由辽宁省交通高等专科学校孙英伟编写,项目6和附录由辽宁装备制造职业技术学院赵东编写。吴硕任主编并负责全书统稿,孙英伟、许连阁和赵东任副主编。

由于编者学识有限,编写时间仓促,书中难免有疏漏和错误,殷切希望使用本教材的教师和同学批评指正。

编者
2017年1月

项目1 白炽灯调光电路	1
1.1 认知晶闸管的结构、工作原理和参数	2
1.1.1 晶闸管的结构	2
1.1.2 晶闸管的单向可控导电性	2
1.1.3 晶闸管的工作原理	4
1.1.4 晶闸管的伏安特性及主要参数	4
1.1.5 双向晶闸管及其派生器件	9
1.2 晶闸管的触发电路	11
1.2.1 单结晶体管触发电路	11
1.2.2 同步电压为锯齿波的触发电路	14
1.3 晶闸管的保护与容量扩增	22
1.3.1 晶闸管的保护电路	22
1.3.2 晶闸管的容量扩增	26
项目2 小容量电动机的直流能耗制动	31
2.1 单相半波可控整流电路	32
2.1.1 带电阻性负载的工作情况	32
2.1.2 带感性负载的工作情况	35
2.2 单相桥式全控整流电路	38
2.2.1 带电阻性负载的工作情况	38
2.2.2 带感性负载的工作情况	40
2.3 单相桥式半控整流电路	46
项目3 利用可控硅进行整流电镀	52
3.1 三相半波可控整流电路	53
3.1.1 带电阻性负载的工作情况	53
3.1.2 带感性负载的工作情况	56

3.2	三相桥式全控整流电路	59
3.2.1	带电阻性负载的工作情况	59
3.2.2	带感性负载的工作情况	64
3.3	变压器漏感对整流电路的影响	70
3.3.1	电路结构及工作原理	70
3.3.2	基本数量关系	71
3.4	带平衡电抗器的双反星型可控整流电路	72
3.4.1	电路结构	72
3.4.2	工作原理	73
项目4	GTO 直流斩波调速系统	76
4.1	认知门极可关断晶闸管的结构、工作原理和参数	77
4.1.1	GTO 的结构和工作原理	77
4.1.2	GTO 的特性	78
4.1.3	GTO 的主要参数	79
4.2	认知电力晶体管的结构、工作原理和参数	80
4.2.1	GTR 的结构和工作原理	80
4.2.2	GTR 的特性与参数	82
4.3	GTO 和 GTR 的驱动、缓冲电路	84
4.3.1	驱动电路概述	84
4.3.2	GTO 和 GTR 门极驱动电路	85
4.3.3	缓冲电路	86
4.4	基本斩波电路	88
4.4.1	降压斩波电路	89
4.4.2	升压斩波电路	91
4.4.3	升降压斩波电路	93
4.4.4	Cuk 斩波电路	94
项目5	高频感应加热电源	98
5.1	认知电力 MOS 场效晶体管的结构、工作原理、特性和参数	99
5.1.1	电力 MOSFET 的结构和工作原理	99
5.1.2	电力 MOSFET 的特性	100
5.1.3	电力 MOSFET 的主要参数	101
5.2	认知绝缘栅双极晶体管的结构、工作原理、特性和参数	103
5.2.1	IGBT 的结构与工作原理	103

5.2.2	IGBT 的基本特性	104
5.2.3	IGBT 的主要参数	105
5.3	电力 MOSFET 和 IGBT 的栅极驱动电路	107
5.3.1	电力 MOSFET 的栅极驱动电路	107
5.3.2	IGBT 的栅极驱动电路	107
5.4	有源逆变电路	108
5.4.1	有源逆变的工作原理	108
5.4.2	逆变失败的原因及有源逆变应用电路	110
5.5	无源逆变及基本电路	113
5.5.1	无源逆变的工作原理	114
5.5.2	基本逆变器电路	117
5.6	电压型和电流型逆变器	119
5.6.1	电压型逆变器	119
5.6.2	电流型逆变器	120
5.7	脉宽调制型逆变电路	121
5.7.1	PWM 控制的基本思想和控制方式	121
5.7.2	三相桥式 PWM 逆变电路	124
项目 6	无级调光日光灯电路	129
6.1	了解交流开关及其应用电路	130
6.1.1	晶闸管交流开关	130
6.1.2	过零触发开关电路组成的单相交流调功器	131
6.2	认识交流调压电路	134
6.2.1	单相交流调压电路	134
6.2.2	三相交流调压电路	138
附录		143
附录 1	复习题	143
附录 2	部分电力电子器件参数表	150
参考文献		152

项目 1 白炽灯调光电路

学习目标

1. 掌握晶闸管的结构、工作原理及参数特性。
2. 使用万用表测试晶闸管和单晶体管的好坏。
3. 了解单晶体管触发电路的工作原理。
4. 熟悉触发电路与主电路电压同步的基本概念。

项目背景

小功率调光灯在日常生活中的应用非常广泛，种类也很多。图 1-1 (a) 所示为常见的调光灯外部按钮和遥控器，通过旋转按钮或调整遥控器上的按键就可以调整灯泡的亮度。

图 1-1 (b) 所示为调光灯内部电路图。在该电路中，电源插头 XP、灯泡 EL、电源开关 S、整流管 $VD_1 \sim VD_4$ 、单相晶闸管 VT 与电源构成主电路；电位器 R_p 、电容 C 、电阻 R_1 与 R_2 构成 RC 振荡电路，将脉动直流电压变为锯齿波电压。将 XP 插入市电插座，闭合 S，接通 220 V 交流电源， $VD_1 \sim VD_4$ 全桥整流得到脉动直流电压并加至 R_p ，调节 R_p 的阻值，就能改变 C 的充/放电时间常数，即改变 VT 控制触发角，从而改变 VT 的导通程度，使 EL 获得 0~220 V 电压。 R_p 的阻值调得越大，则 EL 越暗，反之越亮，从而达到无级调光的目的。

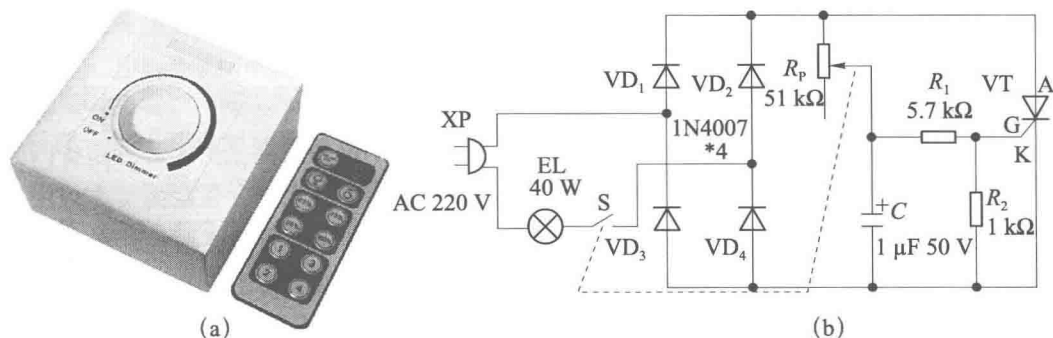


图 1-1 调光灯的外部结构及内部电路

(a) 外部按钮和遥控器；(b) 内部电路

相关知识

1.1 认知晶闸管的结构、工作原理和参数

晶闸管是硅晶体闸流管的简称,又称为可控硅整流器,普通晶闸管也称为可控硅(Silicon Controlled Rectifier, SCR)。晶闸管这个名称往往专指晶闸管的一种基本类型——普通晶闸管。晶闸管能承受的电压和电流容量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下,晶闸管具有比较重要的地位。下面从晶闸管的结构、工作原理、伏安特性及主要参数等方面加以介绍。

1.1.1 晶闸管的结构

晶闸管是由三个 PN 结和三个连接端以及封装组成的。晶闸管的常见封装大致有三种:塑封型、螺栓型和平板型(如图 1-2 所示)。其中,图 1-2 (a) 所示为塑封型,多见于额定电流在 10 A 以下的情况;图 1-2 (b) 和图 1-2 (c) 所示为螺栓型,一般用于额定电流在 10 ~ 200 A 的情况;图 1-2 (d) 所示为平板型,用于额定电流在 200 A 以上的情况。

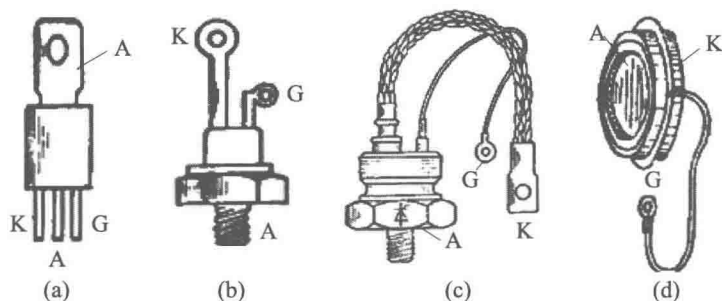


图 1-2 晶闸管的外形图

(a) 塑封型; (b) (c) 螺栓型; (d) 平板型

晶闸管在工作时由于器件损耗而产生热量,需要通过散热器降低管芯温度,因此器件外形是为便于安装散热器而设计的。对于螺栓型封装的晶闸管,通常螺栓是其阳极,能与散热器紧密连接且安装方便;平板型封装的晶闸管可由两个散热器将其夹在中间。

晶闸管具有 4 层结构,即 PNPN,引出阳极 A、阴极 K 和门极 G 三个连接端。晶闸管的结构和电气图形符号如图 1-3 所示,其内部结构如图 1-4 所示。

1.1.2 晶闸管的单向可控导电性

晶闸管(SCR)相当于一个半控的、可开不可关的单向开关。它的导通和关断条件可通过图 1-5 所示的实验电路来说明。图 1-5 中,电源 E_A 、滑动变阻器 R_W 、灯泡和晶闸管的

阳极、阴极组成主回路；电源 E_G 、晶闸管的门极、阴极组成晶闸管的触发电路。

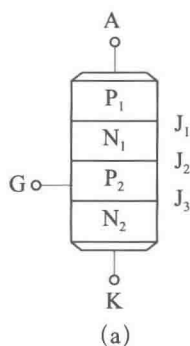


图 1-3 晶闸管的结构和电气图形符号
(a) 结构图；(b) 电气图形符号

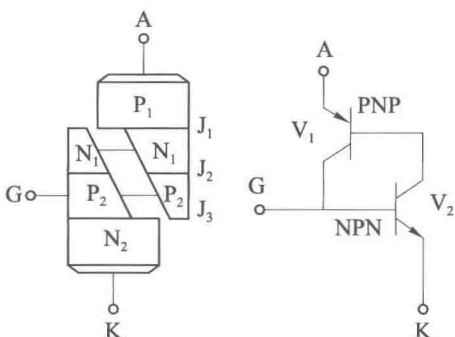


图 1-4 晶闸管内部结构的等效电路

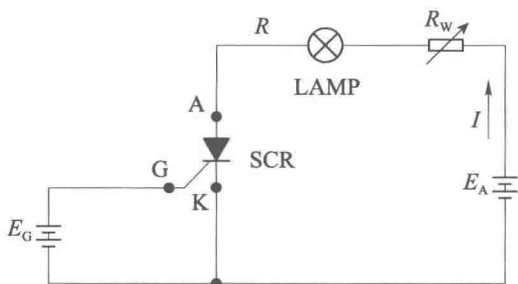


图 1-5 晶闸管在工作条件下的实验电路

当晶闸管的阳极和阴极加反向电压，即阳极为负、阴极为正，电源 E_A 下正上负时，无论门极如何（断开、加负电压、加正电压），灯泡都不会亮，即晶闸管始终处于关断状态。

当晶闸管的阳极和阴极加正向电压，即阳极为正、阴极为负，电源 E_A 上正下负时，若晶闸管的门极不加电压或加反向电压（ E_G 下正上负），灯泡也不会亮，晶闸管还是不导通。但若此时门极也加正向电压，灯泡就亮了，表明晶闸管已导通。晶闸管导通后的管压降为 1 V 左右，主电路中的电流 I 由 R 、 R_w 和 E_A 的大小决定。

晶闸管导通后，如果去掉门极电压，灯泡仍然会亮。这说明此时门极已失去作用，只有使晶闸管阳极和阴极之间的电压不大于 0 ，即 $U_{AK} \leq 0$ ，灯才会灭，即晶闸管才能关断。

由以上实验结果，可以得到以下结论：

- (1) 晶闸管具有单向导电性，这一点与二极管相同。同时，晶闸管还具有可控性，即只有正向的阳极电压还不行，还必须有正向的门极电压，晶闸管才会导通。
- (2) 晶闸管的导通条件是在晶闸管的阳极和阴极之间加正向电压，同时在它的门极和阴极之间也加正向电压，两者必须同时具备。
- (3) 晶闸管一旦导通，门极将失去作用。
- (4) 晶闸管的关断条件是使流过晶闸管的电流降低至维持电流 I_H 以下。 I_H 是保持晶闸

管导通的最小电流。可采取去掉晶闸管的阳极电压、给晶闸管的阳极加反向电压或降低正向阳极电压等措施使晶闸管关断。

1.1.3 晶闸管的工作原理

在分析晶闸管的工作原理时，可以用双晶体管模型来解释，如图 1-6 所示。如在器件上取一倾斜的截面，则晶闸管可以被看作分别由 $P_1N_1P_2$ 和 $N_1P_2N_2$ 构成的两个晶体管 V_1 和 V_2 （两个互补三极管）等效而成。

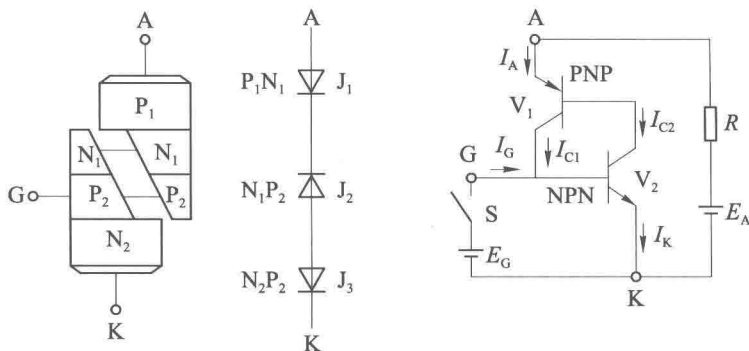


图 1-6 互补三极管等效电路

按照上述等效原则，用 V_1 和 V_2 代替晶闸管 VT。在晶闸管承受反向阳极电压时， V_1 和 V_2 处于反压状态，是无法工作的，所以此时无论有没有门极电压，晶闸管都不能导通。只有在晶闸管承受正向阳极电压时， V_1 和 V_2 才能得到正确接法的阳极电源；同时，为使晶闸管导通，必须使承受反压的 J_2 结失去阻挡作用。

从图 1-6 中可以看出，每个晶体管的集电极电流同时又是另一个晶体管的基极电流，即 $I_{C2} = I_{B1}$ ， $I_G + I_{C1} = I_{B2}$ 。在满足上述条件的前提下，再合上开关 S，于是门极就流入触发电流 I_G ，并在管子内部形成强烈的正反馈过程，即

$U_{CK} > 0 \rightarrow$ 产生 $I_G \rightarrow V_2$ 导通 $\rightarrow$ 产生 $I_{C2} \rightarrow V_1$ 导通 $\rightarrow I_{C1} \nearrow \rightarrow I_{C2} \nearrow \rightarrow$ 出现强烈的正反馈

从而使 V_1 和 V_2 完全饱和，晶闸管饱和导通。通过晶闸管的电流由 R 确定为 E_A/R 。 U_{AK} 之间的压降相当于一个 PN 结加一个三极管的饱和压降，约为 1 V。而对于已导通的晶闸管，若去掉门极触发电流，由于晶闸管内部已经完成了强烈的正反馈，所以它仍会维持导通，门极失去控制作用。

1.1.4 晶闸管的伏安特性及主要参数

1. 晶闸管的阳极伏安特性

晶闸管阳极与阴极之间的电压和阳极电流之间的关系，称为晶闸管的阳极伏安特性，如图 1-7 所示。

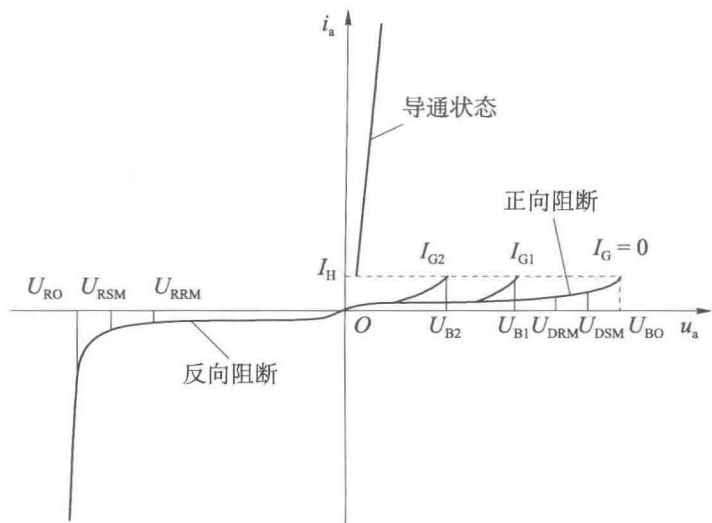


图 1-7 晶闸管的阳极伏安特性

(1) 正向特性：图 1-7 中第 I 象限所示为晶闸管的正向特性。当门极断开时，即 $I_G = 0$ ，若在晶闸管两端施加正向阳极电压，则晶闸管处于正向阻断状态，只有很小的正向漏电流流过；当正向电压超过临界极限时，即正向转折电压 U_{BO} ，漏电流急剧增大，晶闸管由断态转到通态。晶闸管被施加正向电压时，其伏安特性和二极管的正向伏安特性相似。通常在晶闸管正常工作时，不允许把正向阳极电压加大到正向转折电压 U_{BO} ，因为多次导通会造成晶闸管损坏，而是给门极 G 加上正向电压，即 $I_G > 0$ 。随着门极电流 I_G 幅值的增大，正向转折电压降低。晶闸管导通后本身的压降很小，在 1 V 左右。导通期间，如果门极电流为 0，并且阳极电流降低至接近于 0 的某一数值 I_H （维持电流）以下，则晶闸管又回到正向阻断状态。

(2) 反向特性：图 1-7 中第 III 象限所示为晶闸管的反向特性。晶闸管被施加反向电压时，其伏安特性类似于二极管的反向特性。晶闸管处于反向阻断状态时，只有极小的反相漏电流流过。当反向电压超过一定限度，到反向击穿电压 U_{RO} 后，反向漏电流急剧增加，导致晶闸管发热损坏。

2. 晶闸管的主要参数

(1) 电压定额：

① 断态正向重复峰值电压 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。

② 断态反向重复峰值电压 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。

③ 通态峰值电压 U_{TM} ：晶闸管通以某一规定倍数的额定通态平均电流时的峰值电压。

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 U_{Tn} 。选用时，额定电

压要留有一定的裕量，一般取额定电压为正常工作时晶闸管所承受通态峰值电压的 2 ~ 3 倍，即

$$U_{Tn} = (2 \sim 3) U_{TM} \quad (1-1)$$

然后取规定的电压系列等级。表 1-1 列出了晶闸管额定电压等级与额定电压范围的关系。

表 1-1 晶闸管断态正反向重复峰值电压的等级

级别	额定电压/V	说明
1、2、3、…、10	100、200、300、…、1 000	每 100 V 一个等级
12、14、16…	1 200、1 400、1 600…	每 200 V 一个等级

例 1-1 一只晶闸管用于相电压为 220 V 的单相电路中时，器件的电压等级该如何选择？

解：由式 1-1 得

$$U_{Tn} = (2 \sim 3) \times \sqrt{2} U = 622.3 \sim 933.4 \text{ (V)}$$

考虑到既能满足耐压要求，又较经济，按表 1-1 取系列值 $U_{Tn} = 700 \text{ V}$ 。

因此，晶闸管的额定电压等级为 7 级。

(2) 电流定额：

① 通态平均电流 $I_{T(AV)}$ ：在标准的环境温度和规定的散热条件下，晶闸管在带电阻性负载的单相、工频（50 Hz）正弦半波电路中，结温稳定在额定值 125℃ 时所允许通过的工频正弦波电流的平均值。

注意：晶闸管多用于可控整流电路，而整流电路往往按直流的平均值来计算，即它是以电流的平均值而非有效值作为它的电流定额。

晶闸管的通态平均电流 $I_{T(AV)}$ 和正弦电流最大值 I_M 之间的关系表示为：

$$I_{T(AV)} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi I_M \sin \omega t d(\omega t) = \frac{1}{\pi} \times I_M \quad (1-2)$$

正弦半波电流的有效值 I_T 为：

$$I_T = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi (I_m \sin \omega t)^2 d(\omega t)} = \frac{1}{2} I_M \quad (1-3)$$

通态平均电流 $I_{T(AV)}$ 与有效值 I_T 的关系为：

$$\frac{I_T}{I_{T(AV)}} = 1.57 \quad (1-4)$$

流过晶闸管的电流波形不同时，其电流有效值不同，以上比值也不同。实际应用中，应根据电流有效值相同的原则进行换算，并且在选用晶闸管时，电流参数还应取 1.5 ~ 2 倍的安全裕量，即

$$I_{T(AV)} = (1.5 \sim 2) \frac{I_T}{1.57} \quad (1-5)$$

然后取规定的电流系列。式1-5中的 I_T 是流过晶闸管中可能出现的最大电流有效值。

例1-2 某晶闸管的电流额定值 $I_{T(AV)} = 100\text{ A}$ ，电路中流过的电流的波形如图1-8所示，求允许流过的电流峰值 I_M 。

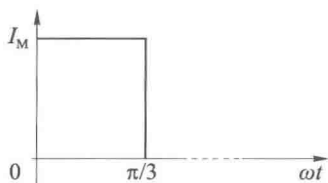


图1-8 例1-2 电流波形

解：由式1-4得 $I_{T(AV)} = 100\text{ A}$ 的晶闸管对应的电流有效值为：

$$I_T = 1.57 \times I_{T(AV)} = 157\text{ (A)}$$

波形对应的电流有效值为：

$$I_T = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{3}} I_M^2 d(\omega t)} = \sqrt{\frac{1}{6}} I_M$$

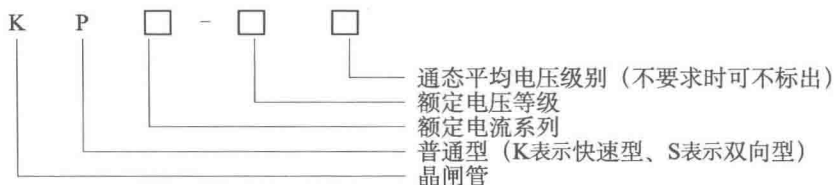
考虑2倍的安全裕量后得

$$I_M = \frac{1}{2} \times \sqrt{6} \times 157 \approx 192.3\text{ (A)}$$

②维持电流 I_H ：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。维持电流与结温有关，结温越高，则 I_H 越小。

③擎住电流 I_L ：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。对同一晶闸管来说，通常 I_L 为 I_H 的2~4倍。

国产普通晶闸管型号的含义如下所示：



(3) 其他参数：

①通态平均电压 $U_{T(AV)}$ ：当晶闸管中流过额定电流并达到稳定的额定结温时，阳极与阴极之间电压降的平均值。通态平均电压 $U_{T(AV)}$ 分为A~I，对应0.4~1.2 V共9个组别。

②断态电压临界上升率 du/dt ：在额定结温和门极开路的情况下，不使器件从断态到通态转换的最大阳极电压上升率。

③通态电流临界上升率 di/dt ：在规定的条件下，晶闸管在门极触发开通时所能承受的不导致损坏的通态电流的最大上升率。

学习活动 1-1 用万用表进行晶闸管的简单测试

【活动目标】

根据 PN 结的单向导电性，用万用表区分晶闸管电极并测试晶闸管的好坏。

【活动时间】

15 分钟

【活动内容及步骤】

1. 准备好实验器材：晶闸管若干、数字万用表等。

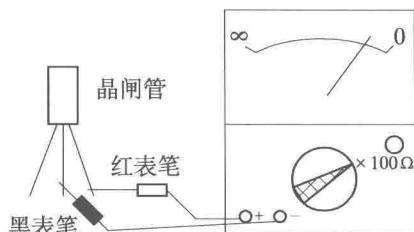


图 1-9 测定晶闸管电极示意图

2. 将万用表拨至 $R \times 100 \Omega$ 挡或 $R \times 1 \text{ k}\Omega$ 挡，测定晶闸管的电极。黑表笔接某一电极，红表笔依次碰触另外两个电极（如图 1-9 所示），观察阻值变化。若两次测出的阻值都很大，将黑表笔改接其他电极进行测试。

3. 用万用表的欧姆挡 $R \times 1 \text{ k}\Omega$ 挡测定晶闸管的阳极 A 和阴极 K 之间、门极 G 和阳极 A 之间的正反向电

阻，观察阻值变化。

4. 用万用表的欧姆挡 $R \times 10 \text{ k}\Omega$ 挡测定晶闸管的门极 G 和阴极 K 之间的正反向电阻，观察阻值变化。

【活动反馈】

1. 极性检测

晶闸管的门极 G、阴极 K 极之间有一个 PN 结，具有单向导电性，而阳极 A 和阴极 K 之间、阳极 A 和门极 G 之间的正反向电阻很大，根据此原则判定晶闸管的电极。将万用表拨至 $R \times 100 \Omega$ 挡或 $R \times 1 \text{ k}\Omega$ 挡，黑表笔接某一电极，红表笔依次碰触另外两个电极，测量电阻的阻值。假如有一次阻值很小（几百欧），另一次阻值很大（几千欧），说明黑表笔接的是门极。在阻值小的那次测量中，接红表笔的是阴极 K；阻值大的那一次，红表笔接的是阳极 A。若两次测出的阻值都很大，说明黑表笔接的不是门极，应改测其他电极。

2. 判断晶闸管好坏

(1) 用万用表的欧姆挡 $R \times 1 \text{ k}\Omega$ 挡测定晶闸管的阳极 A、阴极 K 之间的正反向电阻，好的管子两个阻值均应在几百千欧以上，否则管子是坏的。

(2) 用万用表的欧姆挡 $R \times 1 \text{ k}\Omega$ 挡测定晶闸管的门极 G、阳极 A 之间的正反向电阻，好的管子两个阻值均应在几百千欧以上，否则管子是坏的。

(3) 用万用表的欧姆挡 $R \times 10 \text{ k}\Omega$ 挡测定晶闸管的门极 G、阴极 K 之间的正反向电阻，若阻值没有差异，则管子是坏的。

1.1.5 双向晶闸管及其派生器件

1. 双向晶闸管

(1) 双向晶闸管的外形与结构。双向晶闸管的外形与普通晶闸管类似，有塑封型、螺栓型和平板型，但其内部是一种与层结构，即 NPNPN，并引出三个线端，如图 1-10 所示。

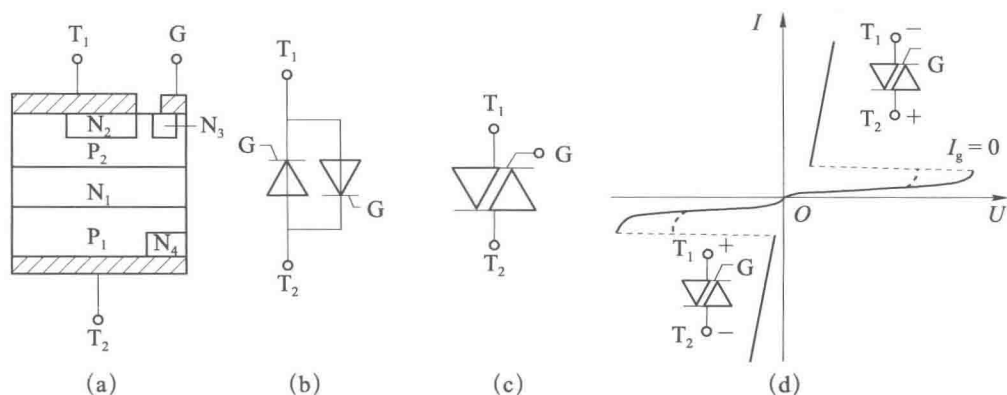


图 1-10 双向晶闸管

(a) 内部结构；(b) 等效电路；(c) 图形符号；(d) 伏安特性

(2) 双向晶闸管的特性与参数。双向晶闸管具有正反向对称的伏安特性曲线。正向部分位于第 I 象限，反向部分位于第 III 象限，如图 1-10 (d) 所示。双向晶闸管电流的均方根值与普通晶闸管平均电流之间的换算关系式为：

$$I_{T(AV)} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} I_{T(RMS)} = 0.45 I_{T(RMS)} \quad (1-6)$$

(3) 双向晶闸管的触发方式。双向晶闸管正、反两个方向都能导通，门极加正、负电压都能触发。主电压与触发电压相互配合，可以得到 4 种触发方式：

- ① I+ 触发方式：T₁ 极为正，T₂ 极为负；门极 G 为正，T₂ 极为负。特性曲线在第 I 象限。
- ② I- 触发方式：T₁ 极为正，T₂ 极为负；门极 G 为负，T₂ 极为正。特性曲线在第 I 象限。
- ③ III+ 触发方式：T₁ 极为负，T₂ 极为正；门极 G 为正，T₂ 极为负。特性曲线在第 III 象限。
- ④ III- 触发方式：T₁ 极为负，T₂ 极为正；门极 G 为负，T₂ 极为正。特性曲线在第 III 象限。

由于双向晶闸管的内部结构原因，4 种触发方式的触发灵敏度各不相同，其中 III+ 触发方式灵敏度最低，使用时要尽量避开，常采用的为 I+ 触发方式和 III- 触发方式。

由双向晶闸管组成的交流开关电路采用本相电压强触发方式，这种触发方式的电路简

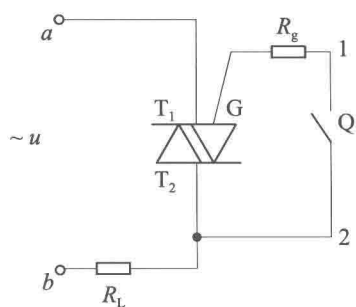


图 1-11 本相电压强触发方式

单、工作可靠，如图 1-11 所示。其中，双向晶闸管的 T_2 极和门极 G 之间通过开关 Q 和 R_g 相连，当 Q 闭合时，交流电源加在 T_1 、 T_2 两极的电压直接加在 T_1 和 G 之间，作为双向晶闸管的触发电压。 T_1 和 G 两端的电压将随电源电压的变化而变化，当该电压形成的电流达到双向晶闸管的触发电流时，双向晶闸管导通。器件导通后， T_1 与 T_2 之间的电压瞬时降至双向晶闸管的导通压降，即 1 V 左右，从而使门极电压也降至很小，不再对双向晶闸管产生影响。本电路双向晶闸管的触发方式为 I+ 触发方式、III- 触发方式。

2. 双向晶闸管的派生器件

(1) 快速晶闸管。快速晶闸管是一个 PNP 四层三端器件，其符号与普通晶闸管一样，只是对管芯结构和制造工艺进行了改进，其开关时间以及 du/dt 和 di/dt 耐量都有明显改善。一种对工作频率有明确标定的快速晶闸管称为高频晶闸管（中国型号为 KG）。普通晶闸管的关断时间为数百微秒，快速晶闸管的关断时间为数十微秒，高频晶闸管的关断时间仅为 $10\text{ }\mu\text{s}$ 左右。高频晶闸管的不足之处在于其电压和电流定额都不易做高，由于工作频率较高，选择通态平均电流时不能忽略其开关损耗的发热效应。

(2) 逆导晶闸管。逆导晶闸管是将晶闸管反并联一个二极管并制作在同一管芯上的功率集成器件，这种器件不具有承受反向电压的能力，一旦承受反向电压即开通。其电气图形符号和伏安特性如图 1-12 所示。

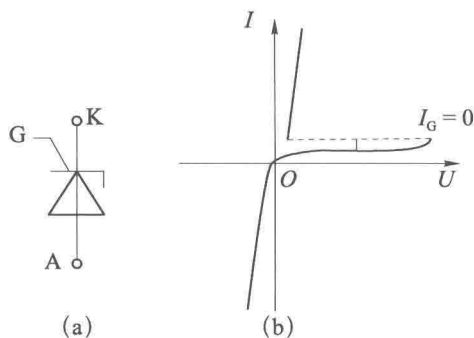


图 1-12 逆导晶闸管的电气图形符号和伏安特性

(a) 电气图形符号；(b) 伏安特性

(3) 光控晶闸管。光控晶闸管又称为光触发晶闸管，是利用一定波长的光照信号触发导通的晶闸管。其电气图形符号和伏安特性如图 1-13 所示。光控晶闸管的伏安特性和晶闸管一样，随着光照信号变强，其正向转折电压逐渐降低。由于光控晶闸管采用了光触发，故保证了主电路和触发电路之间的绝缘，并且可以避免电磁干扰的影响。