



国家骨干高等职业院校
重点建设专业(电力技术类)“十二五”规划教材

电力电子技术与实践

DIANLI DIANZI JISHU YU SHIJIAN

主编◎王 萍 包 鹏



合肥工业大学出版社
HEFEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

国家骨干高等职业院校

重点建设专业(电力技术类)“十二五”规划教材

电力电子技术与实践

主 编 王 萍 包 鹏

副主编 刘淑红 黄万志 陶为明

合肥工业大学出版社

内容提要

本书包括调光灯的分析与制作、线性直流稳压电源的分析与制作、功率可调电火锅的分析与调试、开关电源的分析与制作、变频器的分析与调试等五个项目,介绍了普通晶闸管、双向晶闸管等半控型电力电子器件、MOSFET 及 IGBT 等全控型电力电子器件、单相可控整流电路、三相可控整流电路、直流斩波电路、有源逆变电路、无源逆变电路、交-交变频电路、脉宽调制型逆变电路、电力电子器件的驱动电路及保护电路等内容。

本书可作为高职高专院校电气类相关专业教材及有关工程技术人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术与实践/王萍,包鹏主编. —合肥:合肥工业大学出版社,2012.12
ISBN 978-7-5650-1050-7

I. ①电… II. ①王…②包 III. ①电力电子技术 IV. ①TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 302372 号

电力电子技术与实践

王萍 包鹏 主编

责任编辑

汤礼广 武理静

出版 合肥工业大学出版社

地址 合肥市屯溪路 193 号

邮编 230009

电话 总编室:0551-62903038

市场营销部:0551-62903198

网址 www.hfutpress.com.cn

E-mail hfutpress@163.com

版次 2012 年 12 月第 1 版

印次 2013 年 2 月第 1 次印刷

开本 787 毫米×1092 毫米 1/16

印张 14.25

字数 312 千字

印刷 合肥学苑印务有限公司

发行 全国新华书店

ISBN 978-7-5650-1050-7

定价:30.00 元

如果有影响阅读的印装质量问题,请与出版社市场营销部联系调换。

国家骨干高等职业院校
重点建设专业(电力技术类)“十二五”规划教材建设委员会

主 任	陈祥明		
副主任	朱 飙	夏玉印	王广庭
委 员	许戈平	黄蔚雯	张惠忠
	朱 志	杨圣春	彭 云
	丛 山	孔 洁	何 鹏



序 言

为贯彻落实《国家中长期教育改革和发展规划纲要》(2010—2020)精神,培养电力行业产业发展所需要的高端技能型人才,安徽电气工程职业技术学院规划并组织校内外专家编写了这套国家骨干高等职业院校重点建设专业(电力技术类)“十二五”规划教材。

本次规划教材建设主要是以教育部《关于全面提高高等教育质量的若干意见》为指导;在编写过程中,力求创新电力职业教育教材体系,总结和推广国家骨干高等职业院校教学改革成果,适应职业教育工学结合、“教、学、做”一体化的教学需要,全面提升电力职业教育的人才培养水平。编写后的这套教材有以下鲜明特色:

(1)突出以职业能力、职业素质培养为核心的教学理念。本套教材在内容选择上注重引入国家标准、行业标准和职业规范;反映企业技术进步与管理进步的成果;注重职业的针对性和实用性,科学整合相关专业知识,合理安排教学内容。

(2)体现以学生为本、以学生为中心的教学思想。本套教材注重培养学生自学能力和扩展知识能力,为学生今后继续深造和创造性的学习打好基础;保证学生在获得学历证书的同时,也能够顺利地获得相应的职业技能资格证书,以增强学生就业竞争能力。

(3)体现高等职业教育教学改革的思想。本套教材反映了教学改革的新尝试、新成果,其中校企合作、工学结合、行动导向、任务驱动、理实一体等新的教学理念和教学模式在教材中得到一定程度的体现。

(4)本套教材是校企合作的结晶。安徽电气工程职业技术学院在电力技术类专业核心课程的确定、电力行业标准与职业规范的引进、实践教学与



实训内容的安排、技能训练重点与难点的把握等方面,都曾得到电力企业专家和工程技术人员的大力支持与帮助。教材中的许多关键技术内容,都是企业专家与学院教师共同参与研讨后完成的。

总之,这套教材充分考虑了社会的实际需求、教师的教学需要和学生的认知规律,基本上达到了“老师好教,学生好学”的编写目的。

但编写这样一套高等职业院校重点建设专业(电力技术类)的教材毕竟是一个新的尝试,加上编者经验不足,编写时间仓促,因此书中错漏之处在所难免,欢迎有关专家和广大读者提出宝贵意见。

国家骨干高等职业院校
重点建设专业(电力技术类)“十二五”规划教材建设委员会



前言

本书是安徽电气工程职业技术学院国家级骨干院校建设项目成果之一,是由从事电力电子教学工作多年的老师与企业从事电力电子相关工作多年的工程技术人员共同编写的。

近年来,电力电子技术的发展非常迅速,应用也越来越广泛,企业需要大量的电力电子技术方面的人才。但由于电力电子技术这门课程的理论性和实践性都很强,而国内高职高专院校关于这门课程的大多数教材在编写时往往出现理论与实际脱节的现象,因此导致学生学习时感到难度较大。基于此,本书在吸收有关同类教材的长处及本领域最新技术的基础上,按照教育部制定的高职高专教育教材应遵循“淡化理论,加强应用,联系实际,突出特色”的编写原则,并根据高职高专院校电气类专业对电力电子技术课程教学的基本要求重新编写。本书通过项目引导、任务驱动的方式,将电力电子技术中基本和常用的知识点分解到各个项目中,通过项目实践环节将相关理论知识应用到具体实践中,使学生在对每个项目的学习及实施项目过程中,初步养成产品设计、器件选购以及保护电路的设计、焊接、调试与编写技术文件等能力。本书结合学生的认知规律,在项目内容编排上由简到难,在语言表述上深入浅出,力求易学易懂。

全书共包含五个项目,每个项目均包含“学习目标”、“项目引入”、“知识链接”、“项目实践”、“项目拓展”、“项目小结”以及“思考与练习”等几个部分。其中项目一是以调光灯作为切入点,引出电力电子技术的基础知识;项目二至项目五分别介绍了单相桥式整流电路、三相整流电路、直流斩波电路、交流调压电路及变频器等相关知识。在知识点的介绍方面,摒弃了以往那种纯理论的介绍,而是将相关的知识点融入到各个项目中,目的是便于学生理解和掌握。



全书由安徽电气工程技术学院王萍和安徽水利水电勘测设计院包鹏担任主编。其中,王萍编写项目一、项目二和项目四;包鹏编写项目五;刘淑红编写项目三;项目一至项目五的“任务拓展”部分由陶为明编写;项目一至项目五中的“项目实践”部分由合肥同智科技公司的黄万志编写。

由于编者水平有限,书中难免存在错误和不妥之处,敬请读者批评指正。

使用本书的单位或个人,如果需要与本书相关的电子课件,可发邮件至 10721894@qq.com 索取,或登录 <http://www.hfutpress.com.cn> 下载。

编 者



目 录

项目一 调光灯的分析与制作	(1)
项目引入	(1)
知识链接	(1)
一、晶闸管的认识	(1)
二、单相半波可控整流电路	(15)
三、晶闸管的触发电路	(19)
项目实施	(25)
知识拓展	(28)
一、单相半波可控整流电路	(28)
二、阻感性负载加续流二极管电路	(30)
项目小结	(33)
项目二 线性直流稳压电源的分析与制作	(36)
项目引入	(36)
知识链接	(37)
一、单相桥式整流电路	(37)
二、单相桥式整流电路的触发电路	(50)
三、滤波电路	(54)
四、稳压电路	(58)
项目实施	(64)
项目小结	(67)
项目三 功率可调电火锅的分析与调试	(71)
项目引入	(71)
知识链接	(72)
一、双向晶闸管的认识	(72)
二、交流调压电路	(75)
三、双向晶闸管触发电路	(87)



项目实施	(89)
知识拓展	(91)
一、单相交-交变频电路	(91)
二、三相交-交变频电路	(94)
项目小结	(95)
项目四 开关电源的分析与制作	(99)
项目引入	(99)
知识链接	(100)
一、全控型电力电子器件的认识	(100)
二、开关型稳压电路	(113)
三、开关电源芯片 LM2576	(123)
项目实施	(130)
知识拓展	(133)
一、基本概念	(133)
二、基本软开关电路	(134)
项目小结	(140)
项目五 变频器的分析与调试	(142)
项目引入	(142)
知识链接	(144)
一、三相桥式整流电路	(144)
二、逆变电路	(167)
三、脉宽调制(PWM)型逆变器	(183)
四、西门子变频器 MM420 的分析及调试	(190)
五、电力电子器件的保护	(195)
项目实施	(202)
知识拓展	(207)
一、变流器的两种工作状态	(207)
二、有源逆变的条件	(208)
三、三相有源逆变电路	(208)
四、逆变失败的原因	(211)
项目小结	(212)
参考文献	(217)



项目一 调光灯的分析与制作

【学习目标】

- (1) 熟悉晶闸管及其派生器件的结构、工作原理。
- (2) 学会用万用表检测晶闸管。
- (3) 掌握单相可控整流电路的原理及基本数量关系。
- (4) 熟悉单结晶体管的工作原理、检测方法以及由其构成的触发电路的工作情况。
- (5) 学会将普通台灯改造成亮度可调的台灯,并在此过程中熟悉电路设计、元器件的选择及焊接工艺和调试方法等。
- (6) 熟悉单相可控整流电路带阻感负载的工作情况。
- (7) 培养不怕苦不怕累的精神以及持续劳动的毅力。

项目引入

调光灯在日常生活随处可见,其外形、功能及调光原理也各不相同,其中最为普遍的是使用可控硅半导体调节技术,来改变灯光的亮度。如图 1-1a 所示为一款简易调光灯实物图,调节旋钮,灯的亮度变化,其调光的控制原理通常如图 1-1b 所示。它是由单向晶闸管可控整流电路和触发电路组成的调压装置,通过改变加在灯泡两端电压平均值的大小来改变灯的亮度,从而实现调光的功能。其调光电路主要包括晶闸管、单相可控整流电路及晶闸管触发电路等技术。

知识链接

一、晶闸管的认识

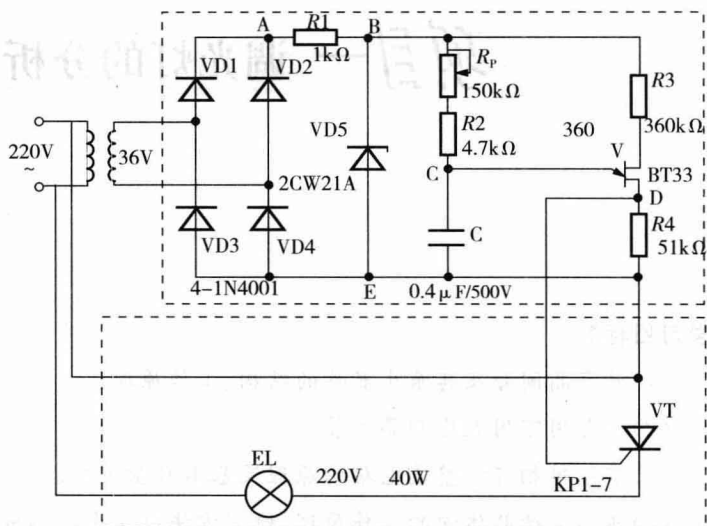
晶闸管(Thyristor)又称晶体闸流管或可控硅整流器(Silicon Controlled Rectifier, SCR),由于它具有体积小、重量轻、效率高、动作迅速、维护简单、操作方便和寿命长等特点,因而在生产实际中获得了广泛的应用,一直以来都是工业上广泛用于大功率变换和控制的传统器件。20 世纪 80 年代后,开始被性能更好的全控型器件取代。但它能承受的电压和电



流容量高,工作可靠,在大容量的场合仍具有很重要的地位。晶闸管一般指普通晶闸管,但晶闸管还包括其他许多类型的派生器件,如快速晶闸管、逆导晶闸管、双向晶闸管。下面主要介绍普通晶闸管工作原理、晶闸管基本特性、晶闸管主要参数等及其派生器件。



a)



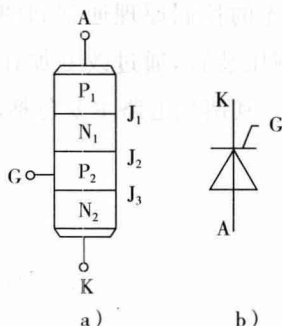
b)

图 1-1 调光灯

a) 调光灯实物图 b) 调光灯原理图

1. 晶闸管基本结构

晶闸管内部的基本结构如图 1-2a 所示,由一个四层半导体材料构成。四层材料由 P 型半导体和 N 型半导体交替组成,即 P_1 、 N_1 、 P_2 、 N_2 ,每两层不同的材料交界面上形成 PN 结,共形成三个 PN 结(J_1 、 J_2 、 J_3),分别引出阳极 A、阴极 K 和门极(控制端)G 三端,其电气图形符号如图 1-2b。



a)

b)

图 1-2 晶闸管的结构及电气符号图

a) 结构示意图 b) 电气符号图

晶闸管外形如图 1-3 所示,一般外形有塑封式、螺栓型和平板型三种封装,每个器件引出阳极 A、阴极 K 和门极(控制端)G。

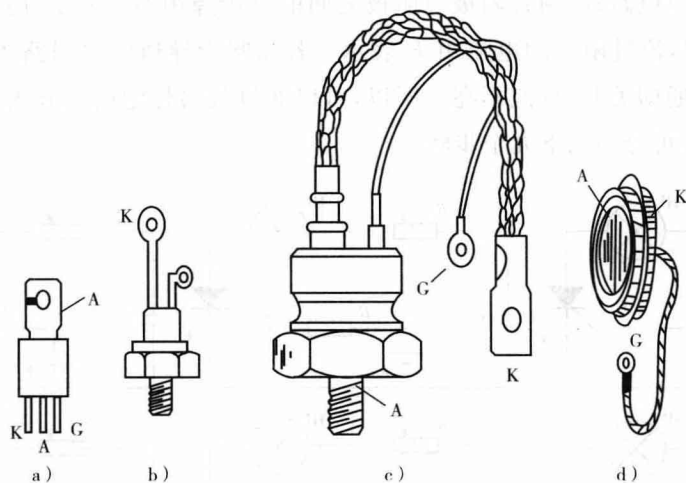


图 1-3 晶闸管外形

a) 小电流塑封式 b) 小电流螺旋式 c) 大电流螺旋式 d) 大电流平板式

晶闸管在工作过程中因损耗会产生大量的热,因此必须安装散热器,如图 1-4 所示。晶闸管必须与散热器配合使用。螺栓式晶闸管连接端为螺栓型封装,通常螺栓是其阳极,能与散热器紧密连接且安装方便,靠阳极(螺栓)拧紧在铝制散热器上,可自然冷却,通常使用在 200A 以下的小容量场合;平板式晶闸管由两个相互绝缘的散热器将阳极阴极夹在中间,靠风或水冷却,散热效果好,通常使用在大容量场合,额定电流大于 200A 的晶闸管都采用平板式外形结构。

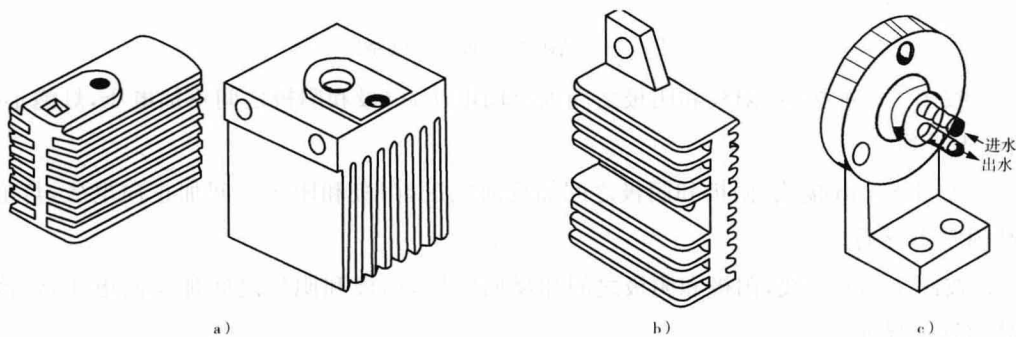


图 1-4 散热器

a) 螺栓式散热器 b) 平板式风冷散热器 c) 平板式水散热器

2. 晶闸管的工作原理

(1) 晶闸管导通、关断的条件

晶闸管在工作时有导通和关断两种状态,为了得到晶闸管导通关断的条件,我们通过下面的这个实验来说明。实验的电路如图 1-5 所示。该电路是由晶闸管、可调电阻器、灯泡、电阻和两个直流电源组成,其中晶闸管的阳极 A 和阴极 K、电源 E_a 、灯泡 HL 和可调电位器 R_p 组成的电路称为主电路;由晶闸管的门极 G 和阴极 K、电源 E_g 和电阻 R 组成的电路称为



控制电路,也称触发电路;晶闸管阳极与阴极之间的电压降用 U_{AK} 表示,门极与阴极之间的电压降用 U_{GK} 表示,流过阳极的电流用 I_A 表示。若晶闸管导通则主回路为闭合回路,灯泡亮;若晶闸管不导通即关断,灯泡不亮。所以,可以通过观察灯泡的亮和灭来判断晶闸管的导通和关断。实验可分为以下九个步骤。

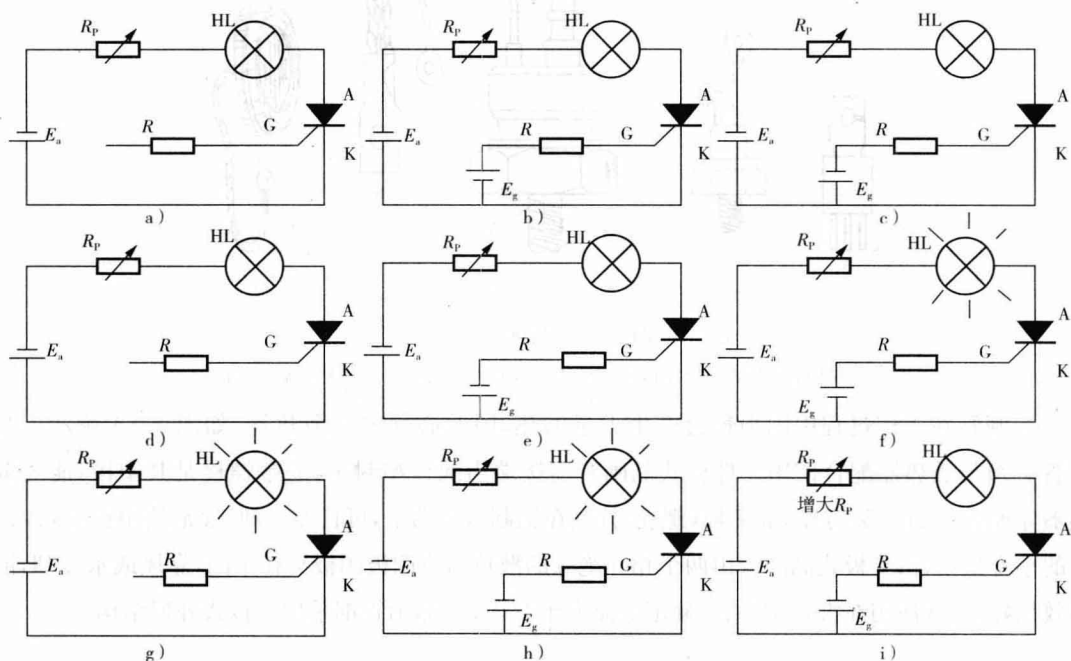


图 1-5 晶闸管导通试验电路图

① 按图 1-5a 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,灯泡不亮,晶闸管不导通。

② 按图 1-5b 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,灯泡不亮,晶闸管不导通。

③ 按图 1-5c 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,灯泡不亮,晶闸管不导通。

④ 按图 1-5d 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,灯泡不亮,晶闸管不导通。

⑤ 按图 1-5e 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,灯泡不亮,晶闸管不导通。

⑥ 按图 1-5f 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,灯泡亮,晶闸管导通。

⑦ 按图 1-5g 接线,在上一步的基础上,去掉触发电压 U_g ,灯泡继续亮,晶闸管仍导通。

⑧ 按图 1-5h 接线,在上一步的基础上,在门极和阴极之间加反向电压,灯泡继续亮,晶闸管仍导通。



⑨ 按图 1-5i 接线,在上一步的基础上,增加可调电位器 R_p 的值,晶闸管阳极电流减小,灯泡逐渐变暗,当电流减小到一定值时,灯泡熄灭,晶闸管关断。

上述实验现象与结论见表 1-1。

表 1-1 晶闸管导通和关断实验

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	a	不亮	反向	零	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
	b	不亮	反向	正向	不亮	
	c	不亮	反向	反向	不亮	
	d	不亮	正向	零	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
	e	不亮	正向	反向	不亮	
	f	不亮	正向	正向	亮	
关断实验	g	亮	正向	零	亮	已导通的晶闸管在正向阳极作用下,门极失去控制作用
	h	亮	正向	反向	亮	
	i	亮	增加 R_p 使 I_A 逐渐减小到零	任意	不亮	晶闸管在导通状态时,门极电流减小到接近于零时,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,只有很小的反向漏电流流过管子,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。这是二极管所不具备的。

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。这就是晶闸管闸流特性,即可控特性。

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。

结论:

① 晶闸管导通条件:阳极加正向电压、门极加适当正向电压。

② 关断条件:流过晶闸管的电流小于维持电流。

(2) 晶闸管导通关断的原理

由晶闸管内部的基本结构图 1-2a 可知,晶闸管由三个 PN 结(J_1 、 J_2 、 J_3)构成,三个 PN 结必须同时导通,晶闸管才能导通,有任一个 PN 结承受反向电压,晶闸管都关断。为了便



于说明,可以把图 1-2a 等效成图 1-6a 所示,由两个晶体管连接而成,其中晶体管 V_1 为 PNP 型,晶体管 V_2 为 NPN 型。PNP 型晶体管 V_1 的发射极引出阳极 A, NPN 型晶体管 V_2 的发射极引出阴极 K, V_2 的基极引出门极 G。

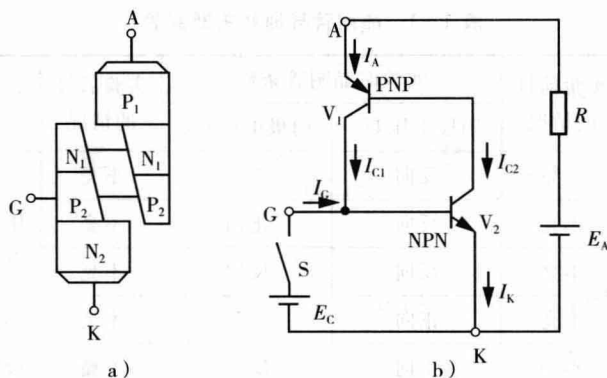


图 1-6 晶闸管的双晶体管模型及其工作原理

a) 双晶体管模型 b) 工作原理

① 导通原理

当晶闸管阳极和阴极间承受反向电压时 J_1 和 J_2 两个 PN 结承受反向电压关断,所以无论门极电压的状态如何,晶闸管都处于关断状态;当晶闸管阳极和阴极间承受正向电压,门极和阴极间的电压为零或者为负时, J_1 和 J_3 两个 PN 结承受正向电压导通,但 PN 结 J_2 承受反向电压而关断,只有很小的反向电流流过,故晶闸管处于关断状态;当晶闸管阳极和阴极间承受正向电压,控制极和阴极间也加正向电压时, J_1 、 J_2 、 J_3 都承受正向电压导通,故晶闸管导通。此时有电流 I_G 从门极流入 V_2 管,形成基极电流 I_{B2} ,在 I_{B2} 的驱动下晶体管 V_2 导通, V_2 的集电极有电流 I_{C2} 。而 I_{C2} 又是晶体管 V_1 的基极电流,驱动 V_1 使其导通。 V_1 的集电极电流 I_{C1} 又流入 V_2 的基极,使 V_2 的基极电流 I_{B2} 增加,又导致 I_{C2} 增加,而 I_{C2} 增加再一次使 I_{B2} 增加。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饱和导通,这就是晶闸管的导通过程,即

$$I_G \uparrow \longrightarrow I_{B2} \uparrow \longrightarrow I_{C2} (= \beta_2 I_{B2}) \uparrow = I_{B1} \uparrow \longrightarrow I_{C1} (= \beta_1 I_{B1}) \uparrow$$

② 关断原理

导通后,晶闸管上的压降很小,晶闸管中流过的电流仅决定于主电路电源电压和负载。在晶闸管导通之后,它的导通状态完全依靠管子本身的正反馈作用来维持,即使控制极电流消失,晶闸管仍将处于导通状态。可见,晶闸管是只能控制导通而不能控制其关断的半控型器件。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,也就是将晶闸管的阳极电流减小到小于维持电流(维持晶闸管导通的最小电流)。上面实验就是采用增加电阻器的阻值来降低阳极电流的方法使晶闸管关断的。



3. 晶闸管的基本特性

(1) 静态特性

上面的实验归纳的结论为晶闸管的静态特性: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;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;要使晶闸管关断,只能使晶闸管的电流降到接近于零的某一数值以下。

(2) 晶闸管的阳极伏安特性

加在晶闸管阳极与阴极间的电压 U_{AK} 和流过晶闸管阳极电流 I_A 的关系称为晶闸管的阳极伏安特性。如图 1-7 所示为晶闸管伏安特性曲线,包括正向特性(第一象限)和反向特性(第三象限)两部分。

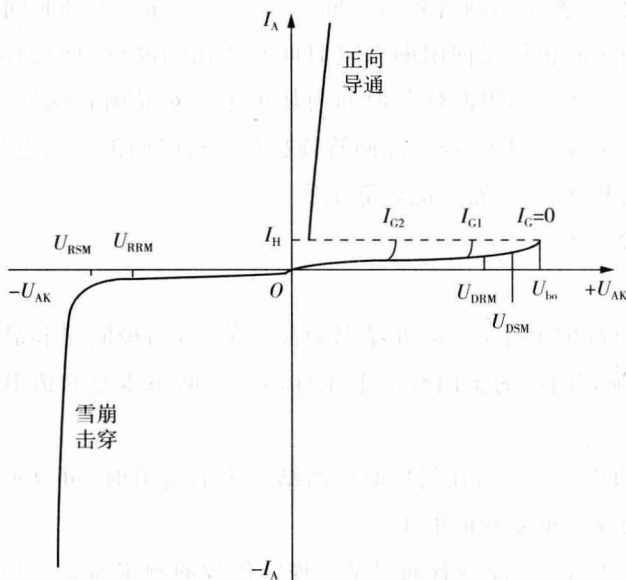


图 1-7 晶闸管的阳极伏安特性

晶闸管的正向特性又有阻断状态和导通状态之分。

在正向阻断状态时,晶闸管的伏安特性是一组随门极电流 I_G 的不同而不同的曲线簇。当晶闸管 $I_G=0$ 时,器件两端施加正向电压,晶闸管呈正向阻断状态,逐渐增大阳极电压 U_{AK} ,只有很小的正向漏电流流过,随着阳极电压的增加,当正向电压超过临界极限即正向转折电压 U_{bo} 时,则漏电流急剧增大,器件开通,晶闸管由正向阻断状态突变为正向导通状态。这种在 $I_G=0$ 时,依靠增大阳极电压而强迫晶闸管导通的方式称为“硬开通”,多次“硬开通”会使晶闸管损坏,一般不允许硬开通。随着门极电流 I_G 的增大,晶闸管的正向转折电压 U_{bo} 迅速下降,当 I_G 足够大时,晶闸管的正向转折电压很小,但是不超过转折电压都为正向阻断状态。

一旦导通,晶闸管正向导通的伏安特性与二极管的正向特性相似,即当流过较大的阳极电流时,晶闸管的压降很小,在 1V 左右。晶闸管正向导通后,要使晶闸管恢复阻断,只有逐