



高 等 学 校
工 科 电 子 类 规 划 教 材

电 力 电 子 变 换 技 术

郁伯康



东 南 大 学 出 版 社

电力电子变换技术

郁伯康

东南大学出版社

内 容 简 介

本教材是根据电子工业部应用电子技术专业(大专)教材编审委员会所制定的《电力电子变换技术》课程的教学编写大纲要求而编写的。教材内容包括电力电子器件、单相和三相可控整流电路、有源逆变电路、晶闸管触发电路、无源逆变电路、变频电路和交流调压电路、直流斩波电路和交流主电路的计算及器件的保护等。

为符合大专层次的教学需要,在编写本教材时对数学推导以必要够用为原则,着重讨论各种变换电路的基本工作原理和基分析方法,理论联系应用实际。目的是使学生对当今迅速发展的电力电子变换技术有较为全面的理解,并为今后从事此项工作打下较扎实的基础。它适用于应用电子技术专业及其它相近专业,如电气技术、工业自动化等大专教学层次的要求。本书也可作为本科相应专业少学时(36学时)的选修课教材。

责任编辑 雷家煜

电力电子变换技术

郁伯康

东南大学出版社出版发行

(南京四牌楼2号 邮编 210018)

江苏省新华书店经销 丹徒县印刷厂印刷

*

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 13.5 字数 328 千

1996年10月第1版 2000年4月第2次印刷

印数 2001—3000 册

ISBN 7—81050—143—7/TN·17

定价:20.00 元

(凡因印装质量问题,可直接向我社发行科调换)

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作的规定,我部承担了全国高等学校和中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力,有关出版社的紧密配合,从1978~1990年,已编审、出版了三个轮次教材,及时供给了高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要,贯彻国家教委《高等教育“八五”期间教材建设规划纲要》的精神,“以全面提高教材质量水平为中心,保证重点教材,保持教材相对稳定,适当扩大教材品种,逐步完善教材配套”,作为“八五”期间工科电子类专业教材建设工作的指导思想,组织我部所属的九个高等学校教材编审委员会和四个中等专业学校专业教学指导委员会,在总结前三轮教材工作的基础上,根据教育形势的发展和教学改革的需要,制定了1991~1995年的“八五”(第四轮)教材编审出版规划。列入规划的,以主要专业主干课程教材及其辅助教材为主的教材约300多种。这批教材的评选推荐和编审工作,由各编委会或教学指导委员会组织进行。

这批教材的书稿,其一是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐,由编审委员会(小组)评选择优产生出来的,其二是在认真遴选主编人的条件下约编的,其三是经过质量调查在前几轮组织编写出版的教材中修编的。广大编者、各编审委员会(小组)、教学指导委员会和有关出版社,为保证教材的出版和提高教材的质量,作出了不懈的努力。

限于水平和经验,这批教材的编审、出版工作还可能有缺点和不足之处,希望使用教材的单位,广大教师和同学积极提出批评和建议,共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

前 言

本教材是根据电子工业部制定的工科电子类专业教材 1991~1995 年编审出版规划,由应用电子技术(大专)教材编审委员会征稿评选,推荐出版。责任编委是西安电子科技大学傅丰林教授,由南京航空航天大学丁道宏教授担任主审。

本书是由作者在杭州电子工业学院所使用的讲义基础上,根据应用电子技术(大专)教材编审委员会对该教材的编写大纲要求,并采纳了同行专家们的评审意见和教材编审委员会的建议后改写而成的。全书共分 9 章,内容包括电力电子器件、单相和三相可控整流电路、有源逆变电路、晶闸管触发电路、无源逆变电路、变频电路和交流调压电路、直流斩波电路和变流主电路的计算及器件的保护等。

在编写本书时,考虑到大专层次教学的特点,对数学推导以必要够用为限。书中在讨论了电力电子器件的工作原理和主要参数后,着重研究各类电力电子变换电路的基本概念、基本工作原理、基本分析方法和典型应用。力求理论联系实际,并使全书内容的深广度符合工科电子类应用电子技术(大专)或相近专业的教学需要。

电力电子变换技术是介于“电力”、“电子”与“控制”之间的边缘学科。新颖电力半导体器件的相继问世,以脉冲宽度调制(PWM)为代表的各类变换技术的日臻完善,以及其与微电子技术、传感技术、计算机控制技术的密切结合,使电力电子变换技术得到了迅速的发展,并必将开辟出更多崭新而又诱人的应用领域。因此,我国许多高等工科院校已将该课程列为电类专业学生的必修课或选修课。

本书是 54 学时的大专教材,使用本书时,读者应具备物理、电路分析基础、模拟电路、数字电路和电机与控制电器等基础知识。此外它还可作为本科少学时(例如 36 学时)选修课的教材。

丁道宏教授对全书进行了认真细致的审阅,提出了许多宝贵意见;西北工业大学的马慎兴副教授、西安电子科技大学的沈耀忠副教授和责任编委傅丰林教授,也提出了许多修改意见;我院裘明信教授始终关心和支持该书的编写工作,杨茂昌同志为全书描绘了插图,在此表示诚挚的感谢。

由于作者水平有限,加之时间仓促,书中难免还存在一些缺点和错误,敬请广大读者批评指正。

郁伯康

1995 年 5 月于杭州

目 录

0	绪论	1
0.1	电力电子技术学科的形成	1
0.2	电力半导体器件的发展	1
0.3	电力电子技术的应用概况	1
0.4	电力电子变流装置的优缺点	2
1	电力电子器件	4
1.1	晶闸管的工作原理和特性	4
1.2	晶闸管的主要参数	10
1.3	晶闸管派生器件概述	17
1.4	功率二极管和大功率晶体管	22
	习题及思考题 1	28
2	单相可控整流电路	29
2.1	单相半波可控整流电路	29
2.2	单相桥式全控整流电路	36
2.3	单相桥式半控整流电路	44
	习题及思考题 2	47
3	三相可控整流电路	49
3.1	三相零式可控整流电路	49
3.2	三相桥式全控整流电路	56
3.3	双反星形可控整流电路	56
3.4	十二相可控整流电路	65
3.5	变压器漏感对整流电路的影响	65
3.6	电动机负载电路	69
3.7	整流电路的谐波分析	72
	习题及思考题 3	75
4	有源逆变电路	76
4.1	有源逆变的概念	76
4.2	三相有源逆变电路	81
4.3	逆变失败与控制角的限制	87
4.4	逆变工作时电动机的机械特性	90
4.5	有源逆变的应用举例	92
	习题及思考题 4	98
5	晶闸管触发电路	100
5.1	对触发电路的要求	100

5.2	单结晶体管触发电路	101
5.3	晶体管正弦波移相触发电路	106
5.4	锯齿波移相触发电路	111
5.5	集成化晶闸管移相触发电路	116
5.6	触发脉冲与主回路电压的同步问题	125
	习题及思考题 5	130
6	无源逆变电路	131
6.1	无源逆变器的基本工作原理	131
6.2	单相串联无源逆变电路	135
6.3	单相并联无源逆变电路	138
6.4	脉冲调制逆变电路	145
6.5	三相逆变电路	152
6.6	不停电电源系统(UPS)的工作原理	154
	习题及思考题 6	158
7	变频电路和交流调压电路	159
7.1	交流—交流直接变频电路	159
7.2	交流调压器	163
7.3	交流稳压电路	170
	习题及思考题 7	171
8	直流斩波电路	172
8.1	斩波器的工作原理	172
8.2	斩波器电路	177
8.3	斩波器的结构型式	180
	习题及思考题 8	182
9	晶闸管变流主电路的计算及器件的保护	183
9.1	整流变压器的参数计算	183
9.2	晶闸管电压电流的计算和选择	187
9.3	晶闸管的串并联	188
9.4	晶闸管的保护	191
9.5	功率晶体管的缓冲电路和驱动电路	198
	习题及思考题 9	205
	附录 电力电子器件型号的命名	206
	参考文献	209

0 绪 论

0.1 电力电子技术学科的形成

众所周知,1948年晶体管的发明引起了电子工业革命,半导体器件首先被用于小功率领域,如通信、雷达、电视和计算机等。1958年美国通用电气公司研制成功晶闸管,并投入工业使用,晶闸管的诞生大大扩展了半导体器件功率控制的范围。以晶闸管为主的电力半导体器件具有反应快、重量轻、体积小、能量消耗低、可靠性高、使用寿命长以及容易维修等优点。晶闸管和它的各种派生器件使电能的变换和控制从旋转变流机组、离子变换器等庞大设备转而迈入以半导体器件等组成的静止变换器时代。它标志着电力电子技术的诞生,并逐渐形成了电力电子技术学科,国际电气和电子工程师协会(IEEE)将电力电子技术定义为:有效地使用电力半导体器件,应用电路和设计理论以及分析开发工具,实现对电能的高效率变换和控制的一门技术,它包括了电压、电流、频率和波形等方面的变换。因而它是电气工程三大领域即电力、电子和控制之间的边缘学科。

0.2 电力半导体器件的发展

电力半导体器件是电力电子技术的基础和核心,它的发展过程可大致分成三个阶段。第一阶段从1958~1975年,以生产普通晶闸管(Thyristor)为主,除单只晶闸管的功率容量等指标有很大提高外,还研制成功了晶闸管的多种派生器件,如快速晶闸管(FST)、双向晶闸管(TRIAC)、光控晶闸管(LTT)及逆导晶闸管(RCT)等。

第二阶段大体从1976~1985年,此时以有自关断能力的门极可关断晶闸管(GTO)、大功率晶体管(GTR)和功率场效应晶体管(Power FET)为标志,这些新器件的开关频率可大大提高,它们的出现为交流传动的发展创造了良好的条件。

1986年以后的第三阶段,出现了复合型器件,以绝缘栅功率晶体管(IGBT)和MOS控制的晶闸管(MCT)为代表。IGBT实际上是用MOSFET驱动的双极型晶体管,因而兼有MOS的高输入阻抗和晶体管的低导通压降两方面的优点。

最近研制成功的高压功率集成器件(Power IC或Smart Power),将功率输出电路和驱动、检测、保护等电路集成在同一芯片上,从而使应用更加方便。

0.3 电力电子技术的应用概况

电力电子变换技术的各种变流装置按其功能不同,可分为如下几类:

可控整流器 把交流电压变换成固定或可调的直流电压。

逆变器 把直流电压变换成频率固定或可调的交流电压。

斩波器 把固定或变化的直流电压变换成可调或恒定的直流电压。

交流调压器 把固定或变化的交流电压变换成可调或固定的交流电压。

周波变换器 把固定频率的交流电变换成频率可调的交流电。

电力半导体器件的主要特点是能用较小的信号输入功率来控制很大的功率输出,这就使电力电子变换设备成为强电和弱电之间的接口。另外,电力半导体器件工作在开关状态,工作时器件上的正向压降很低,且反向漏电流又小,这一特性使电力电子变换设备具有的共同优势是节约能源。电力电子技术的应用极为广泛,国防军事、工业农业、交通运输、商业、医药乃至家用电器都有它宽广的用武之地。例如,电解和电镀等必须用直流电源,在工业直流传动系统和电机车、地铁、电车、矿山机车等交通运输中也使用直流电源;有源逆变技术用于直流可逆拖动系统、高压直流输电和绕线式异步电动机的串级调速等领域;无源逆变技术用于应急电源和不停电电源(UPS)等设备;变频技术主要用于交流异步电动机的变频调速;将工频电流变为中频(例如 800Hz~10kHz)的中频电源用于中频感应加热;交流调压可用于电炉调温或舞台调光系统;斩波技术常用于电车、地铁、叉车等设备;由电力半导体器件做成的无触点开关将逐步替代传统的继电器和接触器。事实上,由电力半导体器件做成的各种电路,已广泛应用于变光台灯、调速风扇、电视机、洗衣机、电冰箱等家用电器中。

随着电力电子变换技术与微电子技术、传感技术、计算机控制技术的密切结合,还将不断开辟出崭新的应用领域,诸如能量储存设备、超导磁浮铁道系统、电子化汽车等。

0.4 电力电子变流装置的优缺点

以晶闸管或功率晶体管为核心的各种电力电子变换设备的优点可大致归纳如下:

1) 晶闸管或功率晶体管为静止型的电力半导体器件,具有体积小、重量轻、寿命长、可靠性高等优点。因而由它构成的变换装置与旋转变流机组相比,没有旋转机械部分的磨损,无噪声,维护方便。

2) 功率增益高,只需很小的输入信号(几伏电压和数百毫安电流),就能控制数百安、数千伏以上的工作电流和电压,即功率增益可高达数万倍以上。

3) 控制的动态特性好,晶闸管装置的响应为毫秒级,功率晶体管则为微秒级,快速性好。

4) 效率高,节省能源。晶闸管或晶体管工作在开关状态,是理想的无触点开关器件,经济指标好。

晶闸管或功率晶体管变换装置的主要缺点是:

1) 过电压和过电流的能力低,在过电压和过电流时晶闸管和晶体管容易损坏。

2) 在电动机负载低速运行时,功率因数低,从而要求电网的容量较大。

3) 因晶闸管和晶体管工作在开关状态,会使交流侧电流含有高次谐波,从而使交流电网波形发生畸变,并影响到电网上的其它负载。

我国自 1962 年研制成第一只晶闸管以来,目前已有一批研究和生产电力半导体器件和电力电子变换装置的科研院所及工厂企业,并形成了一个较为完整的生产体系,为我国电力电子工业的发展打下了坚实的基础。如西安电力电子技术研究所、北京整流器厂等所生产的 KP 型晶闸管,其电流定额已能达到 2500A,电压定额可达 4000~5000V。北京椿树整流器厂和上海

海燕半导体厂等所生产的 GTR ,其电流定额已达 800A,电压定额已达 1kV 。

由于近 20 年来电力电子器件和电力电子变换技术的飞速发展,目前已形成了由传感电子、信息电子和电力电子三足鼎立的大电子技术格局。特别是世界性的能源危机,使得节能技术成为当今世界的重要研究课题。结合我国的具体国情,由于我国的能源利用率大大落后于世界发达国家的水平,因而能有效地节约能源、降低成本和提高劳动生产率的电力电子变换技术已被我国国家科委列为重点发展的领域之一。

为使我国早日实现四个现代化,跻身于世界强国之列,需要培养大量的跨世纪的科技人材,因而在各个高等院校,都将每个大学生熟练掌握和使用电子计算机作为基本要求之一。与此相类似,对于电类专业的学生,掌握一定的电力电子变换技术的知识也必将成为基本要求之一。

电力电子变换技术是应用电子技术专业的一门专业基础课,它应包括电力半导体器件、电力电子电路和电力电子装置及其控制系统。电力电子技术的发展日新月异,它的应用领域不断拓展,应用前景十分诱人。从应用电子技术专业的培养目标出发,只能讲述其中最基础部分,如电力半导体器件的基本工作原理,而重点是讨论应用这些电力半导体器件所构成的各种变换电路的基本工作原理及其变换电路的大体应用。在学习本课程时,要着重物理概念的正确理解和掌握基本的分析方法,注意理论联系实际,特别要注意理解各种变换电路中的波形分析。要重视实验环节,以提高观察问题、分析问题和解决实际问题的能力。

1 电力电子器件

电力电子器件与普通晶体管相类似,是以 P 型及 N 型半导体材料为基础而制成的静止功率器件。它们是各种电力电子电路,如变换电流种类(交流变直流、直流变交流)、调节电压高低以及改变电流大小的电力电子变换电路中的核心。随着半导体材料和管子设计及制造工艺的不断完善,电力电子器件发展迅速,品种繁多,目前已形成与小功率半导体器件相并列的一大分支。电力电子器件大致可分为三大类:即整流二极管(包括标准“工频”型整流管、快速恢复整流管和肖特基整流管)、晶闸管和它的各种派生器件以及大功率晶体管。

在上述电力电子器件中,整流二极管是常见的不可控器件,而晶闸管和大功率晶体管既是可控的,又是电力电子变换电路中最重要器件,特别是晶闸管和它的派生器件的工作原理、伏安特性及主要参数等是本章研究的重点。

1.1 晶闸管的工作原理和特性

晶闸管(Thyristor)是用硅半导体材料做成的晶体闸流管的简称,它又是具有 PNPN 四层结构的各种开关器件的总称,按照 IEC(国际电工委员会)的定义,晶闸管是指那些具有三个以上的 PN 结,主电压——电流特性至少在一个象限内具有导通、阻断两个稳定状态,且可在这两个稳定状态之间进行转换的半导体器件。晶闸管又分为普通型晶闸管和特殊型晶闸管(包括快速晶闸管、双向晶闸管、逆导晶闸管和门极可关断晶闸管等)。目前被大量和广泛使用的主要是普通型晶闸管,以后书中提到的晶闸管(特殊注明者除外)都是指普通型晶闸管(Conventional Thyristor),普通型晶闸管俗称可控硅(Silicon Controlled Rectifier(SCR))。

晶闸管是一种既具有开关作用,又具有整流作用的大功率半导体器件,被广泛应用于可控整流、变频、逆变、斩波调压以及无触点功率静态开关等多种场合。对它只需施加一个弱电触发信号,就能获得强电输出。因而它是联系弱电和强电之间的接口。

1.1.1 晶闸管的结构

从外形上分,晶闸管有塑封式、螺栓式和平板式三种结构形式,如图 1-1(a)、(b)、(c)和(d)所示。晶闸管 VT 有三个电极,分别是阳极 A、阴极 K 和门极(或称控制极)G。它的符号如图 1-1(e)所示。用于家用电器的小容量晶闸管常采用塑封式,额定电流小于 200A 的晶闸管采用螺栓式,大于 200A 的采用平板式。对于螺栓式晶闸管,螺栓是晶闸管的阳极 A,它与散热器紧密连接。粗辫子线是晶闸管的阴极 K,细辫子线是门极 G。对于平板式晶闸管,它的两个平面分别是阳极 A 和阴极 K,而细辫子则是门极 G。使用时两个互相绝缘的散热器把晶闸管紧紧地夹在一起。对于器件使用者而言,散热器的设计主要是根据选定器件的额定参数和工作特性,计算在典型工作状态下为使结温不超过额定值时所需的接触电阻和散热器热阻,以便合理选用散热器和正确安装散热器。有关散热器的设计计算请参阅有关资料。

晶闸管的内部是一个圆形薄片状的管芯,它是由铝片作衬底的由半导体硅为材料的四层(P_1, N_1, P_2, N_2)三端(A, G, K)器件。其结构如图 1-2(a)所示,该图亦可画成如(b)、(c)所示的

等效图。显而易见,晶闸管中包含有 J_1 、 J_2 、 J_3 三个 PN 结。

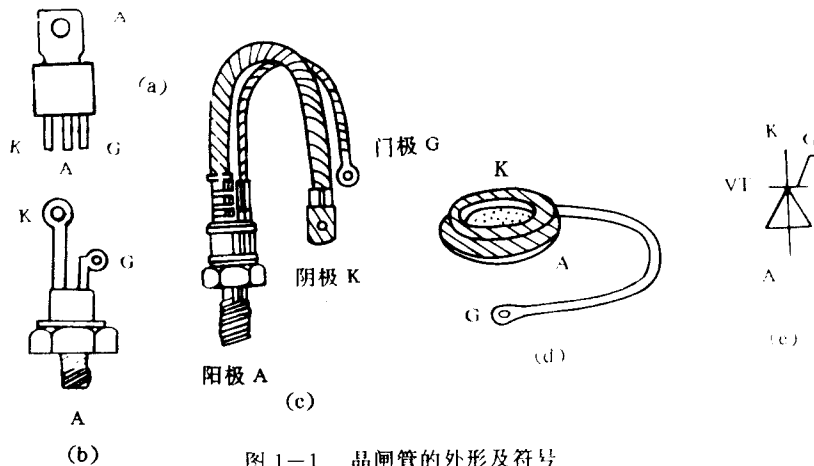


图 1-1 晶闸管的外形及符号
(a) 小电流密封式 (b) 小电流螺栓式 (c) 大电流螺栓式 (d) 大电流平板式 (e) 图形符号

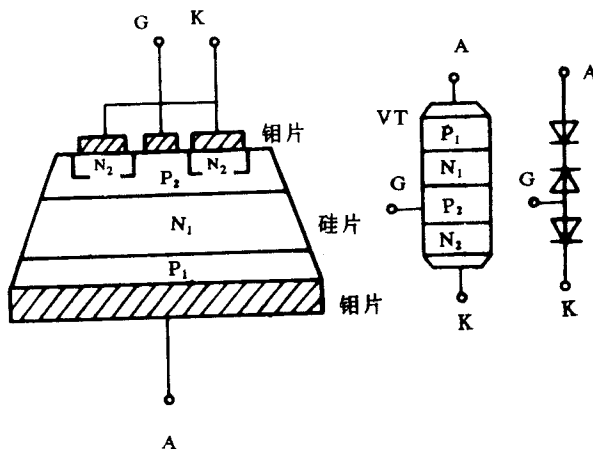


图 1-2 晶闸管的内部结构

1.1.2 晶闸管的工作原理

1) 导通及关断条件

晶闸管在工作时,其阳极 A 和阴极 K 与电源及负载相连接,组成主电路;其门极 G 和阴极 K 与控制晶闸管的触发电路相连,组成控制电路。为了弄清晶闸管的导通和关断条件,可按图 1-3 连接实验线路。主电源 E_a (6V) 和门极电源 E_g (3V) 通过双刀双掷开关 S_1 和 S_2 分别作用于有关电极,主电路的通断状态可由灯泡显示。

(1) 用 S_1 对阳极 A 加反向电压,即 E_a 的负极由灯泡接至 A,正极接至 K,阳极电位低于阴极电位。再用 S_2 使门极电压先后置于反向 ($U_g < U_K$)、零 ($U_g = U_K$) 及正向 ($U_g > U_K$) 三种状态,可见主电路中的灯泡始终不亮。由此说明,当晶闸管的阳极 A 与阴极 K 之间是反向电压时,无论门极 G 加什么信号,晶闸管均处于关断状态。

(2) 用 S_1 对阳极加正向电压 ($U_a > U_K$),用 S_2 使门极 G 先后加反向电压、零及正向电压三种状态,可见只有当门极 G 加正向电压时,灯泡才会亮。由此说明,只有当在阳极加正向电压的同时,门极也加正向电压,晶闸管才能导通。晶闸管导通后的管压降不到 1V,电源电压 E_a 几乎

018351135

乎全部加在灯泡上,所以灯就亮了。也即是说,晶闸管从关断状态转变为导通状态必须同时满足正向阳极电压和正向门极电压两个条件,缺一不可。

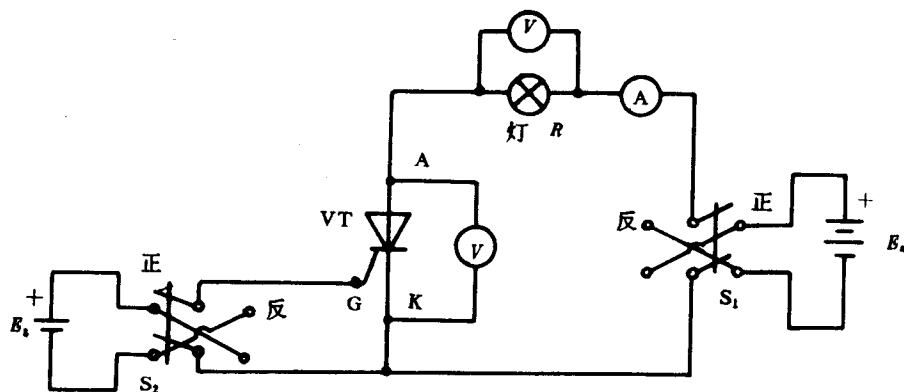


图 1-3 晶闸管的导通和关断实验电路

(3) 晶闸管在原先已导通的情况下,只要保持一定的正向阳极电压,不论门极电压如何(正向、零及反向),晶闸管仍保持导通,即晶闸管导通后,门极就失去了控制作用。这是晶闸管中的门极与晶体管中的基极或场效应管中的栅极作用的显著差异之处,需特别注意。所以,为了使晶闸管导通,加到门极和阴极之间的电压,只要是一个有一定宽度的正向脉冲电压就可以了,该电压常称为触发脉冲电压。

(4) 晶闸管在导通情况下,将正向阳极电压逐步减小到零,主电路电流也随之减小到零或接近零的极小值,此时灯泡熄灭,晶闸管被关断。由此说明使晶闸管关断的必要条件是:只要在外界条件作用下能使主电路的电流减小到零或接近零的极小值。在此需要指出,晶闸管的关断需要一定的时间,这一问题留待晶闸管的参数一节讨论。

2) 工作原理分析

为什么晶闸管具有上述的导通和关断特性呢?这主要是由其内部结构所决定的。晶闸管的工作原理示意图如图 1-4 所示。晶闸管是四层三端器件,它有 J_1 、 J_2 和 J_3 三个 PN 结。若将中间的 N_1 和 P_2 分为两部分,则可构成一个 $P_1N_1P_2$ 和一个 $N_1P_2N_2$ 的复合作用管,如图 1-4(b) 所示。

(1) 导通原理

① 当阳极承受反向电压时($U_A < U_K$),则 J_1 和 J_3 两个 PN 结均处于反向偏置,此时晶闸管处于逆向阻断状态。

② 当阳极承受正向电压但没有施加门极正向触发电压时,如图 1-4(a) 所示。 J_1 和 J_3 两个 PN 结上加有正向电压,此时 P_1 区的多数载流子空穴通过 J_1 结流向 N_1 区(图中实线箭头所示),这些空穴中的一部分在 N_1 区同电子复合,另一部分则到达 J_2 结,成为 J_2 结 N_1 侧的少数载流子。同理, N_2 区的多数载流子电子通过 J_3 结流向 P_2 区(图中虚线箭头所示),一部分电子与在 P_2 区的空穴复合,另一部分则到达 J_2 结,成为 J_2 结 P_2 侧的少数载流子。与此同时,处于中间的 J_2 结因承受反向电压而形成阻挡层,只有少数载流子形成的漏电流 I_0 从 N_1 流向 P_2 。在正向电压的作用下, J_1 和 J_3 结使 J_2 结两侧聚集的少数载流子增加,从而使通过 J_2 结的漏电流比没有 J_1 和 J_3

结时会增加许多。但此时晶闸管只流过漏电流,因而晶闸管处于正向阻断状态。

③ 当阳极承受正向电压,且在门极施加合适的正向脉冲电压时,如图 1-4(b)所示,当门极电流 I_g 流过时,相当于 J_3 结上另外附加上一正向电压,促使 J_3 结注入效应增强。 N_2 区一开始就有大量电子注入 P_2 区,注入的电子一部分在 P_2 区复合,构成门极电流的一部分,另一部分扩散到 J_2 结侧,被 J_2 结空间电荷区的强电场拉向 N_1 区,引起 N_1 区电子的积累,使 J_1 结正偏压升压,空穴注入亦增强,从而建立起载流子运动的再生反馈机制。随着 J_1 和 J_3 结的注入越来越占优势,结果导致 J_2 结两侧有足够的载流子积累,最终使 J_2 结失去阻挡作用,晶体管由阻断态转入导通态。

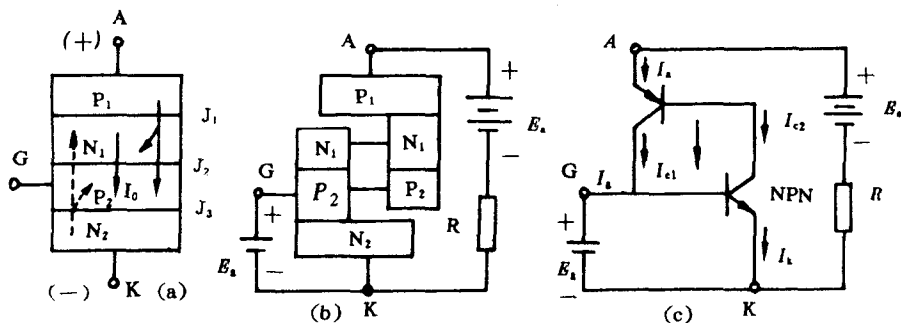


图 1-4 晶闸管的工作原理示意图

(a)管芯结构和电流情况 (b)分成两个等效三极管 (c)导通时的电流情况

(2) 电流正反馈放大作用

下面以图 1-4(c)所示导通时的电流情况图来推导各电流间的相互关系。设 $P_1N_1P_2$ 管的集电极电流为 I_{c1} , 发射极电流为 I_s , $N_1P_2N_2$ 管的集电极电流为 I_{c2} , 发射极电流为 I_b , 共基极电流放大倍数分别为 α_1 和 α_2 , 流过 J_2 结的反向漏电流为 I_0 , 则

$$\alpha_1 = \frac{I_{c1}}{I_s} \quad \alpha_2 = \frac{I_{c2}}{I_b} \quad (1-1)$$

晶闸管的阳极电流等于两管集电极电流 I_{c1} 和 I_{c2} 以及 J_2 结漏电流 I_0 三者之和, 即

$$I_a = I_{c1} + I_{c2} + I_0 \quad (1-2)$$

而晶闸管的阴极电流为

$$I_k = I_s + I_b \quad (1-3)$$

将式(1-1)和式(1-3)代入式(1-2), 可得晶闸管的阳极电流为

$$I_a = \frac{I_0 + \alpha_2 I_g}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (1-4)$$

众所周知, 共基极电流放大系数 α_1 和 α_2 随各自发射极电流的增加而增大, 且因门极 G 靠近 N_2 区, 使 $\alpha_2 > \alpha_1$ 。 α_1 和 α_2 随发射极电流的变化曲线如图 1-5 所示。

由式(1-4)可见, 当门极电流 $I_g = 0$ 时, 则由于漏电流 I_0 较小, 使 α_1 和 α_2 也很小, 所以 $I_a \approx I_0$, 此时晶闸管处于正向阻断状态。随着阳极电压的增加, 漏电流 I_0 、电流放大系数 α_1 和 α_2 以及阳极电流 I_a 都缓慢增加, 晶闸管仍处于正向阻断状态。但当阳极电压达到足够大时, 由于中间的 J_2 结两侧积累的空穴和电子数大量增加, 使漏电流 I_0 加速增大, 随着 I_0 的增大, 由图 1-5 所示曲线可见 α_1 和 α_2 也上升较快, 当 $(\alpha_1 + \alpha_2) \approx 1$ 时, 式(1-4)的分母趋近于 0, 这就意味着 I_a 会

大大增加,当然 I_a 的数值最终会受到外部阳极电压大小和负载电阻值的限制,此时晶闸管从正向阻断状态转入正向导通状态。这种未加门极正向触发信号时使晶闸管从阻断转为导通的情况称为误导通。这种误导通通常出现在阳极电压过高或阳极电压上升太快(即 du/dt 过大)等情况下,由于这是误导通,故在实际使用中必须避免出现。

式(1-4)还表明,当加门极正向触发电压后,就有门极输入电流 I_g ,此时将使 I_a 的变化加快。由于 I_g 流经 $N_1P_2N_2$ 管的发射结,使 α_2 增大,并产生足够大的集电极电流 I_{c2} , I_{c2} 作为基极电流又流过 $P_1N_1P_2$ 管的发射结,使 α_1 增大,产生了更大的集电极电流 I_{c1} ,并流过 $N_1P_2N_2$ 管的发射结。在这种强烈的正反馈过程作用下,将使阳极电流 I_a 迅速增加。当 α_1 、 α_2 随发射结电流上升而增加到 $(\alpha_1 + \alpha_2) \approx 1$ 时,晶闸管就转为正向导通状态。而阳极电流 I_a 的大小也由阳极电压 E_a 与负载电阻所限定。

在晶闸管正向导通后,因两个复合的三极管互相提供基极电流,因此即使去掉 I_g ,仍能保持饱和导通。在晶闸管饱和导通时,晶闸管两端的饱和压降很小(约 1V),故很容易想到晶闸管能作开关使用。

3) 晶闸管的关断

在晶闸管导通后,若逐渐减小阳极电压或设法增大主回路的负载电阻,都将使阳极电流 I_a 逐渐减小,此时将使 α_1 和 α_2 也随之下降,若 α_1 和 α_2 下降到使 $1 - (\alpha_1 + \alpha_2) \approx 1$ 时,则 I_a 会变成仅是很小的漏电流。由于阳极电流 I_a 的量变导致质变,晶闸管不能维持导通状态而被关断。

1.1.3 晶闸管的特性

晶闸管是受门极信号控制的单向导电开关,具有导通和阻断两种状态。以下讨论晶闸管的伏安特性和门极伏安特性。

1) 晶闸管的伏安特性

晶闸管阳极与阴极间的电压 u_{AK} 与阳极电流 i_a 的关系,称为晶闸管的伏安特性,如图 1-6 所示。

由图可见,晶闸管的伏安特性位于第 I 象限(正向特性)和第 III 象限(反向特性)。晶闸管的反向特性是指在反向阳极电压的作用下阳极电压与阳极漏电流的关系曲线,它与一般二极管的反向特性相似。在正常情况下,

当晶闸管承受反向阳极电压时,晶闸管总是处于阻断状态。当反向电压增加到一定数值时,反向漏电流增加较快。再继续增大反向阳极电压,会导致晶闸管反向击穿,造成晶闸管的损坏。晶闸管的正向特性又有阻断状态和导通状态(简称断态和通态)之分。在门极电流 $I_g = 0$ 的情

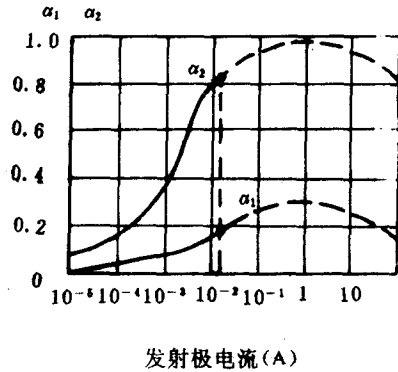


图 1-5 等效三极管电流放大系数 α 与发射极电流的关系

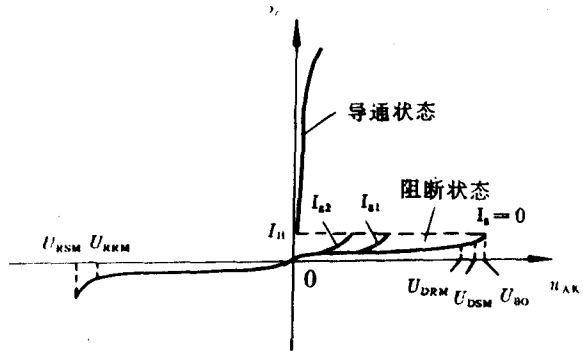


图 1-6 实际的晶闸管伏安特性

况下,逐渐加大晶闸管的正向阳极电压,这时晶闸管处于断态,只有很小的正向漏电流;随着正向阳极电压的增加,当达到正向转折电压 U_{B0} 时,漏电流剧增,伏安特性将从大电压小电流的高阻区(阻断状态),经负阻区(电压减小、电流增大的虚线区)到达低阻区(导通状态)。导通状态时,晶闸管特性又和二极管的正向特性相类似。

在实际工作时,不能将正向阳极电压加到等于转折电压 U_{B0} 使晶闸管导通,而是采用加正向门极电压 U_{gk} ,即由门极触发电流 I_g ,使晶闸管导通。且门极电流 I_g 越大,阳极电压转折点越低。

在晶闸管导通后,若逐渐减小阳极电流,当 i_a 小到等于 I_H 时,晶闸管便由导通状态变为阻断状态,因而称维持晶闸管为导通状态时的最小电流 I_H 为维持电流。

2) 晶闸管门极的伏安特性

门极伏安特性是指门极电流 i_g 与门极电压 u_{gk} 的特性曲线。晶闸管在 K, G 之间为 PN 结 J_3 , 因而其特性与二极管特性相类似。门极伏安特性曲线如图 1-7 所示。

由于晶闸管的导通是通过门极加触发信号来完成的,因此,门极特性是晶闸管的重要特性之一。实际晶闸管的门极伏安特性的离散性很大,为应用方便,常以一条典型的极限高阻门极伏安特性(图中 $OCLG$ 所示)和一条极限低阻门极伏安特性(图中 $OAKD$ 所示)之间的区域来表示,如图 1-7(a) 所示。将接近坐标原点处的门极伏安特性区域加以放大,示于图 1-7(b)。图(b)中 $OHJO$ 范围内的区域称为不触发区,在额定结温时,合格晶闸管的门极所受触发电压在此区域内时均不会被触发。图(b)中 $ABCJHA$ 的范围称为不可靠触发区,在室温时,合格晶闸管中只有那些触发电压或电流较低的才能被触发。

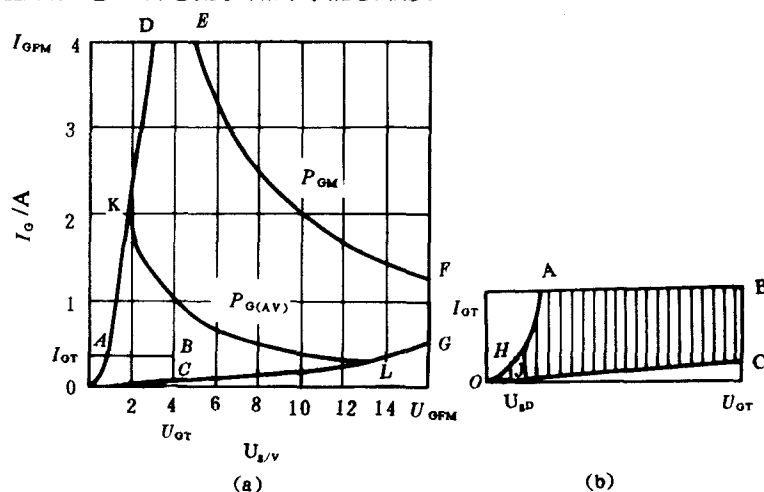


图 1-7 晶闸管的门极伏安特性

图 1-7(a)中 $ADEFGCBA$ 的范围称为可靠触发区,在正常使用时,由触发电路加到晶闸管门极上的触发电压和电流应处在这个区域内。门极在触发时所加入的功率,会引起门极附近发热,导致结温升高。如所加触发功率过大,可能使门极烧毁。因此门极参数不应超过可靠触发区中门极正向峰值电流 I_{gPM} 、正向峰值电压 U_{gPM} 以及允许的门极瞬时最大损耗功率 P_{GM} , 同时,门极的平均损耗功率不应超过允许的门极平均功率 $P_{G(AV)}$ 。当然,门极所加的触发电压应大于不可靠触发区的 U_{gT} ,触发电流应大于 I_{gT} ,以防止不可靠触发的产生。

3) 晶闸管的初步测量

晶闸管的三个电极可以从其外形作初步判断,对螺栓式晶闸管,阳极为螺栓形,两辫子形的为阴极和门极,因阴极所流过的电流大,故粗辫子为阴极,细的为门极。对平板式晶闸管,细引出线为门极,门极引出端离阴极近,离阳极远。

由于晶闸管是四层三端器件,当用万用表 $R \times 10$ 档来测量 A、K 极间或 A、G 极间的正向电阻和反向电阻时,因总是有某个 PN 结处于反偏状态,使阻值都在几百千欧以上。而 G、K 极间的 PN 结不是理想的二极管特性,其正向电阻为几十欧,反向电阻为几百欧,由此可方便的找到门极。用万用表分别测量门极对阳极和阴极的电阻值,门极与阴极间的电阻小,门极与阳极间的电阻大。

此外,将万用表黑表笔(万用表内部电池正极)接阳极 A,红表笔(万用表内部电池负极)接阴极 K,再将门极 G 与黑表笔接通一下,因此时相当于加上了门极触发信号,晶闸管应导通,这时 A、K 极间的电阻值应下降,万用表的指针应发生偏转。当用万用表来初步测量晶闸管时,注意不要使用高阻档,以免万用表内电池电压过高而击穿 PN 结。

1.2 晶闸管的主要参数

晶闸管的参数较多,包括各种状态下的电压、电流、门极参数及动态参数。即使同一规格的产品,其参数大小也不相同。为了正确使用晶闸管,不仅要了解它的伏安特性,而更重要的是定量掌握它的主要参数。

下面介绍 KP 型晶闸管的一些主要参数及含义。这些参数列在表 1-1 和表 1-2 内,并可参照图 1-6 和图 1-7 的特性曲线。由于这些参数的离散性很大,因而每个管子的实测参数值,应在产品的出厂合格证上注明。

为了正常使用晶闸管,我们首要注意的是:它能承受多大的正向电压而不转折(没有触发脉冲,不自行导通);承受多大的反向电压而不击穿;在晶闸管导通以后能允许通过多大的电流而不致烧毁;另外还要注意该管的触发电压和触发电流是多大;导通后的管压降是多少;维持电流和掣住电流是多大等等。以上这些都是晶闸管的主要参数。

1.2.1 晶闸管的电压定额

1) 断态不重复峰值电压 U_{DSM}

U_{DSM} 是指在门极开路时,当加在晶闸管上的正向阳极电压上升到使晶闸管的正向伏安特性急剧弯曲时所对应的电压值(见图 1-6)。它是一个不能重复且每次持续时间不大于 10ms 的断态最大脉冲电压。断态不重复峰值电压 U_{DSM} 应低于正向转折电压 U_{B0} , 所留余量的大小由生产厂规定。

2) 断态重复峰值电压 U_{DRM}

U_{DRM} 是指当晶闸管的门极开路且结温为额定值时,允许重复加在晶闸管上的正向峰值电压,如图 1-6 所示。规定断态重复峰值电压 U_{DRM} 为断态不重复峰值电压 U_{DSM} 的 80%。

晶闸管在整流电路中工作时,由于开关接通或断开时的过渡过程,会有瞬间的超过正常工作值的正、反向电压加到晶闸管上,称为“操作过电压”。晶闸管必须能够重复地经受一定限度的操作过电压,而不影响其正常工作。这就是“重复峰值电压”这一参数的意义。按规定,重复率为每秒 50 次,脉冲电压的持续时间不大于 10ms。