



银领工程系列

电力电子技术

王廷才 主编



高等教育出版社
Higher Education Press

银领工程系列

电力电子技术

王廷才 主编

高等教育出版社

内容提要

本书是银领工程系列教材之一。

本书介绍电力二极管、晶闸管、GTO、GTR、电力 MOSFET、IGBT、IGCT 和 IPM 等电力电子器件的工作原理、特性、参数及其选择、驱动与保护方法。并从应用的角度出发,以定性分析为主,介绍相控整流、交流变换、直流变换、逆变电路的工作原理及电量计算;对各种变换电路都列举了典型的应用实例;提供了部分实验电路的实验指导。本书内容注重理论与实际相结合并突出应用。

本书可作为高等职业院校、高等专科学校、成人高校、民办高校及本科院校举办的二级职业技术学院电气自动化技术、电气技术、电子技术、机电技术及相关专业的教学用书,也适用于五年制高职相关专业,并可作为相关社会从业人员的业务参考书及培训用书。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术/王廷才主编. —北京:高等教育出版社, 2006. 4

ISBN 7-04-019273-X

I. 电... II. 王... III. 电力电子学-高等学校: 技术学校-教材 IV. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 016515 号

策划编辑 孙杰 责任编辑 许海平 封面设计 王凌波 责任绘图 朱静
版式设计 王艳红 责任校对 金辉 责任印制 孔源

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市西城区德外大街 4 号

邮政编码 100011

总 机 010-58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司

印 刷 北京铭成印刷有限公司

开 本 787×1092 1/16

印 张 15

字 数 360 000

购书热线 010-58581118

免费咨询 800-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

<http://www.hep.com.cn>

网上订购 <http://www.landaco.com>

<http://www.landaco.com.cn>

畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2006 年 4 月第 1 版

印 次 2006 年 4 月第 1 次印刷

定 价 19.10 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 19273-00

目 录

绪言	1	习题四	117
第一章 电力二极管与晶闸管	5	第五章 交流变换电路	118
第一节 电力二极管	5	第一节 交流开关及其应用电路	118
第二节 晶闸管	8	第二节 单相交流调压电路	125
第三节 晶闸管派生器件	15	* 第三节 三相交流调压电路	129
本章小结	18	* 第四节 交-交变频电路	134
习题一	18	本章小结	139
第二章 相控整流电路	20	习题五	140
第一节 单相半波相控整流电路	20	第六章 逆变电路	142
第二节 单相桥式全控整流电路	26	第一节 有源逆变的工作原理	142
第三节 单相桥式半控整流电路	32	第二节 有源逆变应用电路	147
第四节 三相半波相控整流电路	35	第三节 无源逆变及基本电路	150
第五节 三相桥式全控整流电路	46	* 第四节 电压型与电流型逆变电路	153
第六节 晶闸管的保护与串、并联使用	51	* 第五节 脉宽调制型逆变电路	156
* 第七节 变压器漏抗对整流电路的影响	58	第六节 逆变电路的应用	162
第八节 晶闸管相控整流电路供电的直流 电动机调速	61	本章小结	166
本章小结	64	习题六	167
习题二	65	第七章 直流电压变换电路	168
第三章 晶闸管的触发电路	67	第一节 直流电压变换电路的工作原理 及分类	168
第一节 单结晶体管触发电路	67	第二节 晶闸管直流电压变换电路	169
第二节 同步电压为锯齿波的触发电路	72	第三节 降压式和升压式直流电压变换 电路	171
第三节 集成触发电路	76	* 第四节 升降压式直流电压变换电路	175
* 第四节 数字触发电路	81	* 第五节 复合直流电压变换电路	177
第五节 触发电路与主电路电压的同步	83	第六节 直流电压变换电路的应用实例	181
本章小结	85	本章小结	183
习题三	85	习题七	183
第四章 全控型电力电子器件	88	* 第八章 电力电子技术典型应用 ..	186
第一节 门极可关断晶闸管	88	第一节 晶闸管直流调速系统实例	186
* 第二节 电力晶体管	93	第二节 开关稳压电源	188
第三节 电力场效晶体管	98	第三节 软开关技术	195
第四节 绝缘栅双极晶体管	104	第四节 不间断电源	199
* 第五节 其他新型电力电子器件	109	第五节 有源功率因数校正器	206
本章小结	116		

本章小结	210	实验三 锯齿波触发电路与三相桥式全控整	
习题八	210	流电路的研究	216
第九章 实验指导	211	*实验四 单相交流调压电路的研究	220
实验一 晶闸管的简易测试及导通、关断条		*实验五 GTR 单相并联逆变器的研究	222
件实验	211	实验六 IGBT 斩波电路的研究	224
*实验二 单结晶体管触发电路与单相桥式		附录	227
半控整流电路的研究	213	参考文献	233

绪 言

电力电子技术(power electronics), 是利用电力半导体器件、应用电路和设计理论以及分析开发工具, 实现对电能的有效变换和控制的一门技术, 它包括电压、电流、频率和波形等方面的变换。

电力电子技术本是电力学、电子学、控制学三项技术领域之间的交叉学科, 但随着科学技术的发展, 电力电子技术已逐步发展成为多学科互相渗透的综合性技术学科, 成为高科技的一个重要分支。

当代许多高新技术均与电源的电流、电压、频率和相位等基本参数的转换与控制相关。电力电子技术能够实现对这些参数的转换、精确控制和高效率的处理, 从而为多项高新技术的发展提供了有力的支持。电力电子技术及其产业的进一步发展必将为大幅度节约电能、降低材料消耗以及提高生产效率提供重要的手段, 并对现代生产和现代生活带来深远的影响。

一、电力电子器件

电力电子器件是电力电子技术发展的基础。自美国 1956 年生产出硅整流二极管(SR)和 1958 年生产出晶闸管(thyristor)以来, 在近 50 年里, 电力电子器件的制造技术不断提高, 概括起来可大致分为三个发展时期。

第一时期是以整流二极管、晶闸管为代表的发展时期。这一时期的半导体器件在低频、大功率变流领域中的应用占有优势, 很快便完全取代了汞弧整流器。

晶闸管发展的特点是派生器件越来越多, 功率越来越大, 性能越来越好。截止 1980 年, 普通晶闸管衍生出了快速晶闸管、逆导晶闸管、双向晶闸管、不对称晶闸管、门极关断晶闸管等, 从而形成了一个晶闸管的大家族。与此同时, 各类晶闸管的电压、电流、电压变化率、电流变化率等参数定额均有很大提高, 开关特性也有很大改善。但由于晶闸管控制功能的欠缺, 只能通过门极控制开通而不能控制关断, 所以称之为半控器件。要想关断晶闸管必须另加用电感、电容和辅助开关器件组成的强迫换流电路, 这样使整机体积增大、重量增加、效率降低。此外, 晶闸管的工件频率一般在 400 Hz 以下, 因而大大限制了它的应用范围。

第二时期是以全控型器件为代表的发展时期。以 GTO、GTR 为代表的双极型全控器件虽仍使用电流控制模式, 但其使变流器控制电路得以简化, 变换频率得以提高; 以电力 MOSFET 为代表的单极型全控器件, 采用电压控制模式, 控制电路更为简单, 而且功耗小、抗干扰能力强, 工作频率达到 500 kHz 以上; 以绝缘栅双极晶体管(IGBT)为代表的混合型全控器件, 是用 GTR、GTO 或 SCR 等双极型器件作为主导器件, 用 MOSFET 单极型器件作为控制器件混合集成之后制成的, 这种器件既具有双极型器件电流密度高、导通压降低的优点, 又具有单极型器件输入阻抗高、响应速度快的优点。

第三时期是以智能化功率集成电路(SPIC)、智能功率模块(IPM)和高压集成电路(HVIC)

等器件为代表的发展时期。这一阶段中，电力电子技术与微电子技术更紧密地结合在了一起，所使用的半导体器件是将全控型电力电子器件与驱动电路、控制电路、传感电路、保护电路、逻辑电路等集成在一起的高度智能化的功率集成电路，它实现了器件与电路的集成，强电与弱电、功率流与信息流的集成，成为机和电之间的智能化接口、机电一体化基础单元。预计功率集成电路(PIC)的发展将会使电力电子技术实现第二次革命，进入全新的智能化时代。

所有这一切为高频变换技术的开发，为变流器实现高频化、小型化、轻量化和节能、节材、提高效率与可靠性奠定了基础。

下表列出了各个发展时期有代表性的电力电子器件。

发展时期	器件类型		器件名称	器件代号
第一代	不可控器件		电力二极管(diode)	D
	半控型器件		晶闸管(thyristor)，又称可控硅(silicon controlled rectifier)	T, SCR
第二代	全控型器件	电流控制器件	电力晶体管(giant transistor)	GTR
			门极可关断晶闸管(gate turn-off thyristor)	GTO
	电压控制器件	电力场效晶体管(power mos field-effect transistor)	P-MOSFET	
		绝缘栅双极晶体管(insulated gate bipolar transistor)	IGBT	
		集成门极换流晶闸管(integrated gate commutated thyristor)	IGCT	
		MOS控制晶闸管(mos controlled thyristor)	MCT	
		静电感应晶体管(static induction transistor)	SIT	
		静电感应晶闸管(static induction thyristor)	SITH	
第三代	功率集成模块		高压集成电路(high voltage integrated circuit)	HVIC
			智能化功率集成电路(smart power integrated circuit)	SPIC
			智能功率模块(intelligent power module)	IPM

二、电力变流技术

1. 电力变流技术的类型

电力电子技术是实现电能有效变换和控制的一门技术，其变换方式大致分为五种类型。

- ① 整流：将交流电变换为直流电(AC/DC变换)。
- ② 逆变：将直流电变换为交流电(DC/AC变换)。
- ③ 交流调压或变频：实现交流电的电压变换或频率变换。
- ④ 斩波：将直流电压的大小进行变换(DC/DC变换)。
- ⑤ 交、直流开关：作为交流或直流电路的无触点开关、实现断路器的功能，控制电路的通断。

2. 电力变流技术的发展历程

电力变流技术的发展可概括为以下三个阶段。

① 第一阶段是使用真空器件电子管、离子管(闸流管、汞弧整流器、高压汞弧阀)的发展与应用阶段,此时的变流技术仅限于整流变换。

② 第二阶段是半导体功率器件硅整流二极管、晶闸管的发展与应用阶段,主要指晶闸管及其派生器件的应用。随着半导体功率器件制造水平的不断提高,变流装置保护措施的不断完善,使得硅整流二极管、晶闸管在变流装置中的应用技术日趋成熟。大容量的整流电源、交流调速电源、直流调速电源以及中频感应加热、熔炼、淬火电源等均得到迅猛的发展。

③ 第三阶段是全控型电力半导体器件的发展与应用阶段,是半导体电力变流器向高频化发展的阶段,也是变流装置的控制方式由移相控制(phase shift control)向时间比率控制(time ratio control,TRC)发展的阶段。

时间比率控制方式一般有三种,即脉冲宽度调制(pulse width modulation,PWM)、脉冲频率调制(pulse frequency modulation,PFM)和混合调制(PWM + PFM)。PWM方式因为调制频率固定,即保持周期 T 恒定(或基本不变),通过改变控制脉冲的占空比进行调节,从而使滤波电路的设计比较简单,所以常用的TRC是PWM方式。

这一阶段的发展是随着全控型器件的发展而逐渐展开的。初期GTO、GTR等双极型全控器件的应用使逆变、变频、斩波变换电路的结构大为简化,使变换的频率可以提高到20kHz左右,为电气设备的高频化、小型化、高效、节能、节材奠定了基础。但是GTO、GTR是电流型控制器件,控制电路功率大,且变换频率也不能很高。随着电力MOSFET、IGBT等电压型全控器件的应用,特别是智能化功率集成电路(SPIC)的开发应用,使变换频率达到100~500kHz甚至更高,为电力电子设备更加智能化、高频化、小型化、高效、节能、节材和高可靠性创造了条件。

现在电力电子技术的应用范围已经十分广泛,在电力系统、通信系统、计算机网络系统、交通运输系统、新能源系统和家用电器等领域均发挥着重要作用,成为我国进行社会主义现代化建设的重要技术支撑。电力电子技术的发展方兴未艾,今后必将在更广泛的领域得到更多、更重要的应用。

由于电力电子器件是用半导体材料制作,其自身特性存在天然的不足,在变流技术应用中不可避免地存在一些缺点。例如:变流设备过载能力(过电压、过电流)较差;某些工作条件下功率因数较低;电力电子设备对同一电网中其他用电设备会带谐波干扰,被称为“电力公害”等。但随着电力电子技术的发展,这些缺点会得到不断地克服。

三、本课程的教学要求

“电力电子技术”是电气类专业主干课程之一,其课程内容与实际联系紧密,因此,教学中应加强实践操作教学,有条件的学校应尽量多安排实验和实训操作。

通过本课程的学习应达到以下要求:

- ① 掌握电力电子器件的基本结构、外部特性及其主要参数,会对器件进行简单测试。
- ② 掌握电力电子器件所组成的变流电路的工作原理、波形分析、电路中主要物理量的计算。
- ③ 掌握晶闸管、电力MOSFET、IGBT等器件的额定参数选择,能查阅器件手册选取所需的器件。

- ④ 能正确选择电力电子器件的驱动电路。
- ⑤ 熟悉各种器件组成的变流电路所必要的保护设施的选取方法。
- ⑥ 熟悉常用电力电子器件组成的基本电路的实验、调试方法，具有初步故障分析与处理的能力。

电力电子器件、变流电路、控制技术都在不断发展与不断更新，所涉及的知识面广、内容丰富多彩。在本课程的学习中，还应注意与“电工基础”、“电子技术基础”、“电机及拖动基础”等课程的知识复习与联系；在讲授和学习中，应着重于物理概念的理解，掌握不同问题的分析方法；重视实验、识图等应用能力的培养。

第一章

电力二极管与晶闸管

学习目标

1. 掌握电力二极管的结构、伏安特性、主要参数、测试方法和选用方法。
2. 了解晶闸管的结构、工作原理及伏安特性。
3. 掌握晶闸管的导通条件和关断条件。
4. 熟练掌握晶闸管的主要参数、测试方法和选用方法。
5. 掌握双向晶闸管的结构、主要参数及选用测试方法。

第一节 电力二极管

电力二极管是指可以承受高电压、大电流及具有较大耗散功率的二极管，在电路中常作为整流、续流、电压隔离、钳位或保护元件。

一、结构与伏安特性

1. 结构

电力二极管的内部结构是PN结，是通过扩散工艺制作的。电力二极管和普通中、小功率二极管一样，具有单向导电性。电力二极管引出两个极，分别称为阳极A和阴极K。图1-1a所示为电力二极管的结构，图1-1b所示为电力二极管的图形符号。

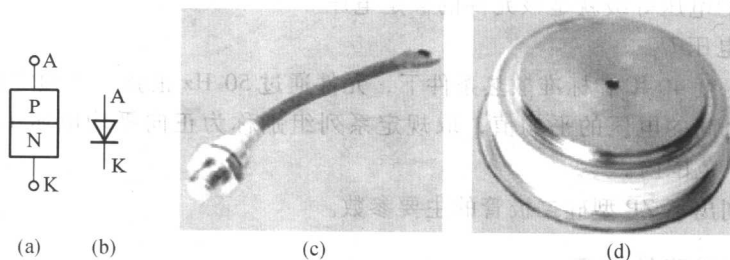


图1-1 电力二极管的结构、符号和外形

(a) 结构 (b) 符号 (c) 螺旋式外形 (d) 平板式外形

由于电力二极管功耗较大，它的外形有螺旋式和平板式两种。螺旋式二极管的阳极紧栓在散热器上。平板式二极管又分为风冷式和水冷式，它的阳极和阴极分别由两个彼此绝缘的散热器紧紧夹住。图 1-1c 所示为螺旋式电力二极管的外形，图 1-1d 所示为平板式电力二极管的外形。

2. 伏安特性

电力二极管的阳极和阴极间的电压 u_{AK} 与流过管子的电流 i_A 之间的关系称为伏安特性，其伏安特性曲线如图 1-2 所示。

当对电力二极管加从零逐渐增大的正向电压时，开始阳极电流很小，这一段特性曲线很靠近横坐标轴，称为死区。当正向电压大于 0.5 V 时，正向阳极电流急剧上升，管子正向导通，阳极和阴极两端电压维持在 1 V 以下，如果电路中不接限流元件，电力二极管将被烧毁。

当对电力二极管加上反向电压时，起始段的反向漏电流也很小，而且随着反向电压增加，反向漏电流只略有增大，但当反向电压增加到反向不重复峰值电压值 U_{RSM} 时，反向漏电流开始急剧增加。如果对反向电压不加限制的话，二极管将被击穿而损坏。

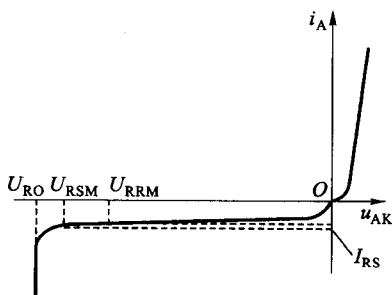


图 1-2 电力二极管的伏安特性曲线

电力二极管常用于将交流电变换为直流电的整流电路中，也用于具有回馈或续流的逆变电路中。

按电力二极管的关断特性，电力二极管可分为普通电力二极管和快速恢复电力二极管。快速恢复电力二极管在开通和关断过程中，正向和反向恢复时间比普通电力二极管短得多，所以通常用于高频逆变器、高频整流器和缓冲电路中。

二、主要参数

1. 额定正向平均电流 I_F

在规定的环境温度为 40 °C 和标准散热条件下，PN 结温度稳定且不超过 140 °C 时，所允许长时间连续流过 50 Hz 正弦半波的电流平均值称为额定正向平均电流 I_F 。将此电流值取规定系列的电流等级，即为元件的额定电流。

2. 反向重复峰值电压 U_{RRM}

在额定结温条件下，元件反向不重复峰值电压值 U_{RSM} 的 80% 称为反向重复峰值电压 U_{RRM} 。将 U_{RRM} 值取规定的电压等级就是该元件的额定电压。

3. 正向平均电压 U_F

在规定环境温度 40 °C 和标准散热条件下，元件通过 50 Hz 正弦半波额定正向平均电流时，元件阳极和阴极之间的电压的平均值，取规定系列组别称为正向平均电压 U_F ，简称管压降，一般在 0.45 ~ 1 V 范围内。

附录中表 1 列出了 ZP 型硅二极管的主要参数。

三、电力二极管的选用

1. 选择额定正向平均电流 I_F 的原则

在规定的室温和冷却条件下，所选管子的额定电流有效值 I_{DN} 大于管子可能在电路中可能流过的最大有效值电流 I_{DM} 即可。考虑到元件的过载能力较小，因此选择时要留有 1.5 ~ 2 倍的安全裕量，即

$$I_{DN} = 1.57I_F = (1.5 \sim 2)I_{DM}$$

式中 1.57——正弦半波电流的有效值与平均值之比，称为波形系数。所以

$$I_F = (1.5 \sim 2) \frac{I_{DM}}{1.57} \quad (1-1)$$

选用时取相应标准系列值即可。

2. 选择反向重复峰值电压 U_{RRM} 的原则

选择电力二极管的反向重复峰值电压 U_{RRM} 的原则应为管子所在电路中可能承受到的最大反向瞬时值电压 U_{DM} 的 2 ~ 3 倍，即

$$U_{RRM} = (2 \sim 3)U_{DM} \quad (1-2)$$

选用时取相应标准系列值。

3. 电力二极管的测试及使用注意事项

由于电力二极管的内部结构为 PN 结，因此用万用表的 $R \times 100 \Omega$ 挡测量阳极 A 和阴极 K 两端的正、反向电阻，可以判断电力二极管的好坏。一般电力二极管的正向电阻在几十欧至几百欧，而反向电阻在几千欧至几十千欧以上为好的电力二极管；若正、反向电阻都为零或都为无穷大，说明电力二极管已经损坏。注意：严禁用兆欧表测试电力二极管。

电力二极管使用时必须保证规定的冷却条件，如不能满足规定的冷却条件，必须降低容量使用。如规定风冷的元器件在自冷条件下使用，只允许用到额定电流的 1/3 左右。

四、电力二极管的主要类型

不同类型的电力二极管在性能上有所不同，这是由于制作时半导体物理结构和工艺上的差别造成的。

1. 整流二极管

整流二极管多用于开关频率不高(1 kHz 以下)的整流电路中。其反向恢复时间较长，一般在 $5 \mu s$ 以上。但其正向电流定额和反向电压定额却可以达到很高，分别可达数千安和数千伏以上。

2. 快恢复二极管

恢复过程很短，特别是反向恢复过程很短(一般在 $5 \mu s$ 以内)的二极管称为快恢复二极管。可用于要求很短恢复时间的电路中。

3. 肖特基二极管

肖特基二极管是以金属和半导体接触形成的势垒为基础的二极管，其反向恢复时间很短(10 ~ 40 ns)，正向恢复过程中也不会有明显的电压过冲；在反向耐压较低的情况下，其正向压降也很小，明显低于快恢复二极管。因此，其开关损耗和正向导通损耗都比快恢复二极管还要小，效率高。肖特基二极管的弱点在于：当所能承受的反向耐压提高时，其正向压降也会高得不能满足要求，因此多用于 200 V 以下的低压场合；反向漏电流较大且对温度敏感，因此反向稳态损耗不能忽略，而且必须更严格地限制其工作温度。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。

第二节 晶 闸 管

晶闸管(thyristor), 曾称为可控硅(silicon controlled rectifier, SCR)。晶闸管作为大功率的半导体器件, 只需用几十至几百毫安的电流, 就可以控制几百至几千安的大电流, 实现了弱电对强电的控制。

一、晶闸管的结构

晶闸管是四层($P_1N_1P_2N_2$)三端(阳极 A、阴极 K、门极 G)器件, 其内部结构和等效电路如图 1-3 所示。

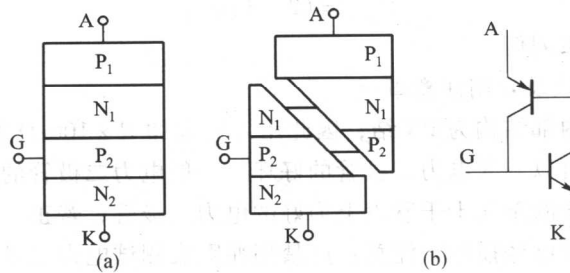


图 1-3 晶闸管的内部结构和等效电路

(a) 内部结构 (b) 以互补晶体管等效

晶闸管的符号及外形如图 1-4 所示, 图 1-4a 所示为晶闸管的符号。晶闸管的外形大致有三种: 塑封型、螺栓型和平板型。塑封型多见于额定电流 10 A 以下; 图 1-4b 所示为螺栓型, 额定电流一般为 10~200 A; 图 1-4c 所示为平板型, 用于 200 A 以上。晶闸管工作时, 由于器件损耗而产生热量, 需要通过散热器降低管芯温度, 器件外形是为便于安装散热器而设计的。

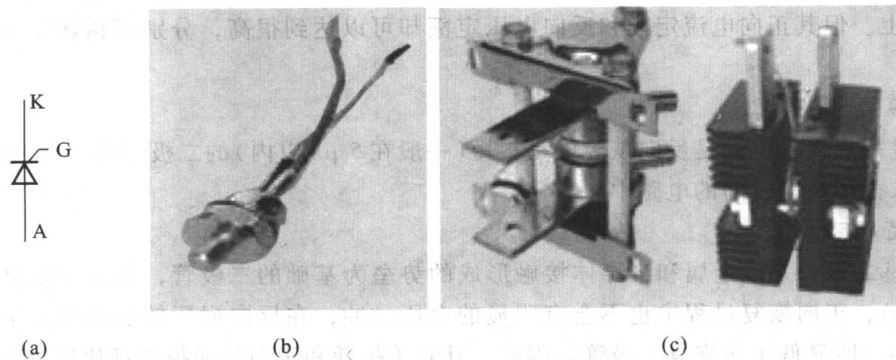


图 1-4 晶闸管的符号及外形

(a) 晶闸管的符号 (b) 螺栓型晶闸管的外形 (c) 带有散热器的平板型晶闸管的外形

二、晶闸管的导通与关断条件

晶闸管是单向可控的开关元件，它的导通和关断条件可通过图 1-5 所示的实验线路来说明。主电源 U_A 和门极电源 U_G 通过双刀双掷开关 Q_1 和 Q_2 正向或反向闭合接通晶闸管的有关电极，用指示灯 EL 和电流表来观察晶闸管的通断情况。实验步骤如下：

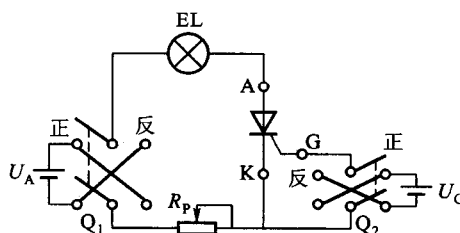


图 1-5 晶闸管的导通与关断实验电路

① 当 Q_1 向右反向闭合时，晶闸管承受反向阳极电压，不论门极承受何种电压，指示灯都不亮，说明晶闸管处于关断状态。

② 当 Q_1 向左正向闭合时，晶闸管承受正向阳极电压，仅当 Q_2 正向闭合即门极也承受正向电压时指示灯才亮。

③ 晶闸管一旦导通， Q_2 不论正接、反接或者断开，晶闸管保持导通状态不变。说明门极失去了控制作用。

④ 要使晶闸管关断，可以去掉阳极电压，或者给阳极加反向电压；也可以降低正向阳极电压数值或增大回路电阻，使流过晶闸管的电流小于一定数值。

由以上实验结果，可得到如下结论：

① 晶闸管的导通条件：在晶闸管的阳极和阴极两端加正向电压，同时在它的门极和阴极两端也加正向电压，两者缺一不可。

② 晶闸管一旦导通，门极即失去控制作用，因此门极所加的触发电压一般为脉冲电压。晶闸管从阻断变为导通的过程称为触发导通。门极触发电流一般只有几十毫安到几百毫安，而晶闸管导通后，可以通过几百、几千安培的电流。

③ 晶闸管的关断条件：使流过晶闸管的阳极电流小于维持电流 I_H 。

维持电流 I_H 是保持晶闸管导通的最小电流。

三、晶闸管的工作原理

晶闸管的 PNPN 结构又可以等效为两个互补连接的晶体管，其中 N_1 和 P_2 区既是一个晶体管的集电极同时又是另一个管子的基极，如图 1-6 所示，晶闸管的工作原理可依此解释。

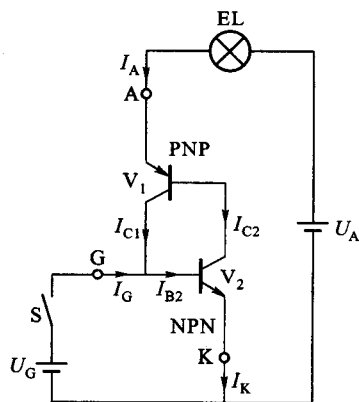


图 1-6 晶闸管的工作原理示意图

当给晶闸管加正向阳极电压，门极也加上足够的门极电压时，则有电流 I_G 从门极流入 NPN 管的基极，即 I_{B2} ，经 NPN 管放大后的集电极电流 I_{C2} 流入 PNP 管的基极，再经 PNP 管的放大，其集电极电流 I_{C1} 又流入 NPN 管的基极，如此循环，产生强烈的正反馈过程，即

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

使两个晶体管很快饱和导通，从而使晶闸管由阻断迅速地变为导通。流过晶闸管的电流将取决于外加电源电压和主回路的阻抗的大小。

晶闸管一旦导通后，即使 $I_G = 0$ ，但因 I_{C1} 的电流在内部直接流入 NPN 管的基极，晶闸管仍将继续保持导通状态。若要晶闸管关断，只有降低阳极电压到零或对晶闸管加上反向阳极电压，使 I_{C1} 的电流减少至 NPN 管接近截止状态，即流过晶闸管的阳极电流小于维持电流，晶闸管才可恢复阻断状态。

四、晶闸管的阳极伏安特性

晶闸管的阳极与阴极间的电压 u_A 和阳极电流 i_A 之间的关系，称为阳极伏安特性。其伏安特性曲线如图 1-7 所示。

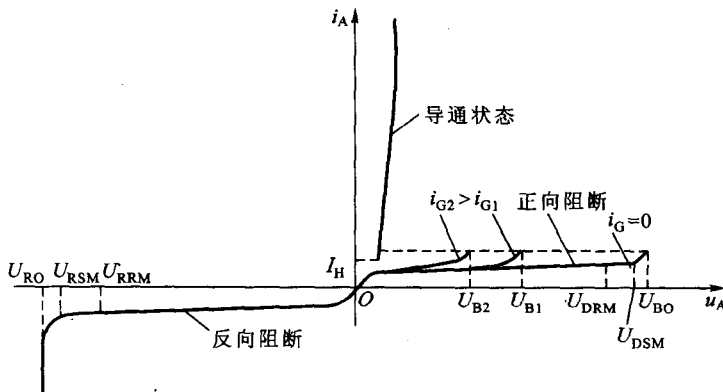


图 1-7 晶闸管的伏安特性曲线

图 1-7 中第 I 象限为正向特性，当 $I_G = 0$ 时，如果在晶闸管两端所加正向电压 u_A 未增到正向转折电压 U_{B0} 时，器件都处于正向阻断状态，只有很小的正向漏电流。当 u_A 增到 U_{B0} 时，漏电流急剧增大，器件导通（称为硬开通），正向电压降低，其特性和二极管的正向伏安特性相仿。通常不允许采用这种方法使晶闸管导通，因为这样的多次导通会造成晶闸管损坏。一般采用对晶闸管的门极加足够大的触发电流使其导通，门极触发电流越大，正向转折电压越低。

晶闸管的反向伏安特性曲线如图 1-7 中第 III 象限所示，它与电力二极管的反向伏安特性相似。处于反向阻断状态时，只有很小的反向漏电流，当反向电压超过反向击穿电压 U_{R0} 后，反向漏电流急剧增大，造成晶闸管反向击穿而损坏。

五、晶闸管主要参数

为了正确选择和使用晶闸管，需要理解和掌握晶闸管的主要参数。晶闸管的主要参数在附录的表 2 中列出。

1. 额定电压 U_{Tn}

由图 1-7 所示晶闸管的阳极伏安特性曲线可见，当门极开路，元件处于额定结温时，根据所测定的正向转折电压 U_{B0} 和反向击穿电压 U_{R0} ，由制造厂家规定减去某一数值（通常为 100 V），分别得到正向不可重复峰值电压 U_{DSM} 和反向不可重复峰值电压 U_{RSM} ，再各乘以 0.9，

即得正向断态重复峰值电压 U_{DRM} 和反向阻断重复峰值电压 U_{RRM} 。将 U_{DRM} 和 U_{RRM} 中较小的那个值按百位取整后作为该晶闸管的额定电压值。例如，一个晶闸管实测 $U_{DRM} = 840 \text{ V}$ ， $U_{RRM} = 720 \text{ V}$ ，将二者较小的 720 V 取整得 700 V ，该晶闸管的额定电压为 700 V 即 7 级。表 1-1 所列为晶闸管额定电压的等级与额定电压的关系。

表 1-1 晶闸管额定电压的等级与额定电压

级 别	额定电压/V	说 明
1、2、3、…、10	100、200、300、…、1 000	额定电压 1 000 V 以下，每增加 100 V，级别数加 1
12、14、16、…	1 200、1 400、1 600、…	额定电压 1 200 V 以上，每增加 200 V，级别数加 2

使用晶闸管时，若外加电压超过反向击穿电压，会造成器件永久性损坏。若超过正向转折电压，器件就会误导通，经数次这种导通后，也会造成器件损坏。此外器件的耐压还会因散热条件恶化和结温升高而降低。因此，选择时应注意留有充分的裕量，一般应按工作电路中可能承受到的最大瞬时值电压 U_{TM} 的 2~3 倍来选择晶闸管的额定电压，即

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

2. 额定电流 $I_{T(AV)}$

晶闸管的额定电流也称为额定通态平均电流，即在环境温度为 40°C 和规定的冷却条件下，晶闸管在导通角不小于 170° 的电阻性负载电路中，当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。将该电流按晶闸管标准电流系列取值（见附录中表 2），称为该晶闸管的额定电流。

按照规定条件，流过晶闸管的工频正弦半波电流波形如图 1-8 所示。

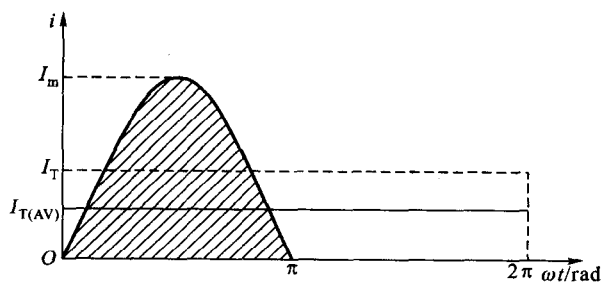


图 1-8 流过晶闸管的工频正弦半波电流波形

设电流峰值为 I_m ，则通态平均电流

$$I_{T(AV)} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi I_m \sin \omega t d(\omega t) = \frac{I_m}{\pi} \quad (1-4)$$

该电流波形的有效值

$$I_T = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi (I_m \sin(\omega t))^2 d(\omega t)} = \frac{I_m}{2} \quad (1-5)$$

正弦半波电流的有效值与通态平均值之比为

$$\frac{I_T}{I_{T(AV)}} = \frac{\pi}{2} = 1.57 \quad (1-6)$$

晶闸管的额定电流用通态平均电流来表示, 是因为晶闸管是可控的单向导通器件。但是, 决定晶闸管结温的是管子损耗的发热效应。表征热效应的电流是以有效值表示的, 不论流经晶闸管的电流波形如何, 导通角有多大, 只要电流有效值相等, 其发热就是相同的。由式(1-6)知, 额定电流 $I_{T(AV)} = 100 \text{ A}$ 的晶闸管, 其允许通过的电流有效值 $I_T = 157 \text{ A}$ 。

对于不同的电路、不同的负载、不同的导通角, 流过晶闸管的电流波形不一样, 导致其电流平均值和有效值的关系也不一样。选择晶闸管额定电流时, 要依据实际波形的电流有效值等于按照规定流过工频正弦半波电流时的电流有效值的原则(即管芯温升结温一样)进行换算, 即

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

$$I_{T(AV)} = I_T / 1.57$$

由于晶闸管的过载能力差, 一般在选用时取(1.5~2)的安全裕量, 即

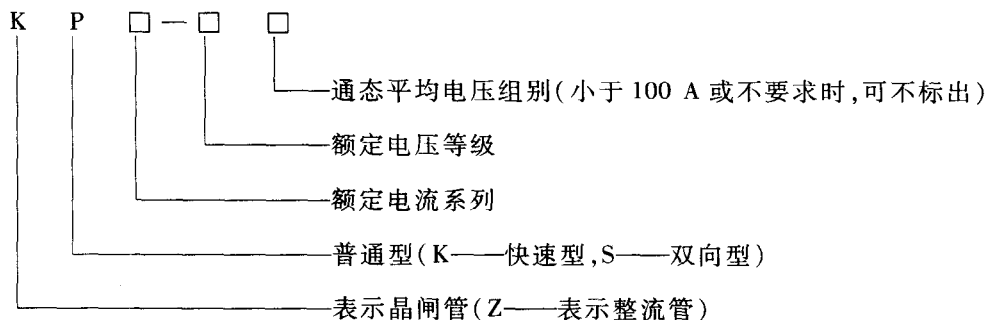
$$I_{T(AV)} = (1.5 \sim 2) I_T / 1.57$$

3. 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, 称为通态平均电压。当额定电流大小相同而通态平均电压较小时, 晶闸管耗散功率也较小, 则该管子的质量较好。

通态平均电压 $U_{T(AV)}$ 分为 A~I 共 9 个组别, 对应为 0.4~1.2 V, 如 A 组的 $U_{T(AV)} = 0.4 \text{ V}$ 、F 组的 $U_{T(AV)} = 0.9 \text{ V}$ 、I 组的 $U_{T(AV)} = 1.2 \text{ V}$ 等。

以上三个参数是选择晶闸管的主要技术数据, 国产普通晶闸管型号的命名含义如下:



例 1-1 一晶闸管接在 220 V 交流回路中, 通过器件的电流有效值为 100 A, 问选择什么型号的晶闸管?

解 选择晶闸管额定电压

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

按晶闸管参数系列取 800 V, 即 8 级。

选择晶闸管的额定电流

$$I_{T(AV)} = (1.5 \sim 2) I_T / 1.57 = [(1.5 \sim 2) \times 100 / 1.57] \text{ A} = 95 \sim 127 \text{ A}$$

按晶闸管参数系列取 100 A, 所以选取晶闸管型号 KP100-8E。

例 1-2 现有晶闸管型号为 KP50-7, 用于某电路中时, 流过的电流波形如图 1-9 所