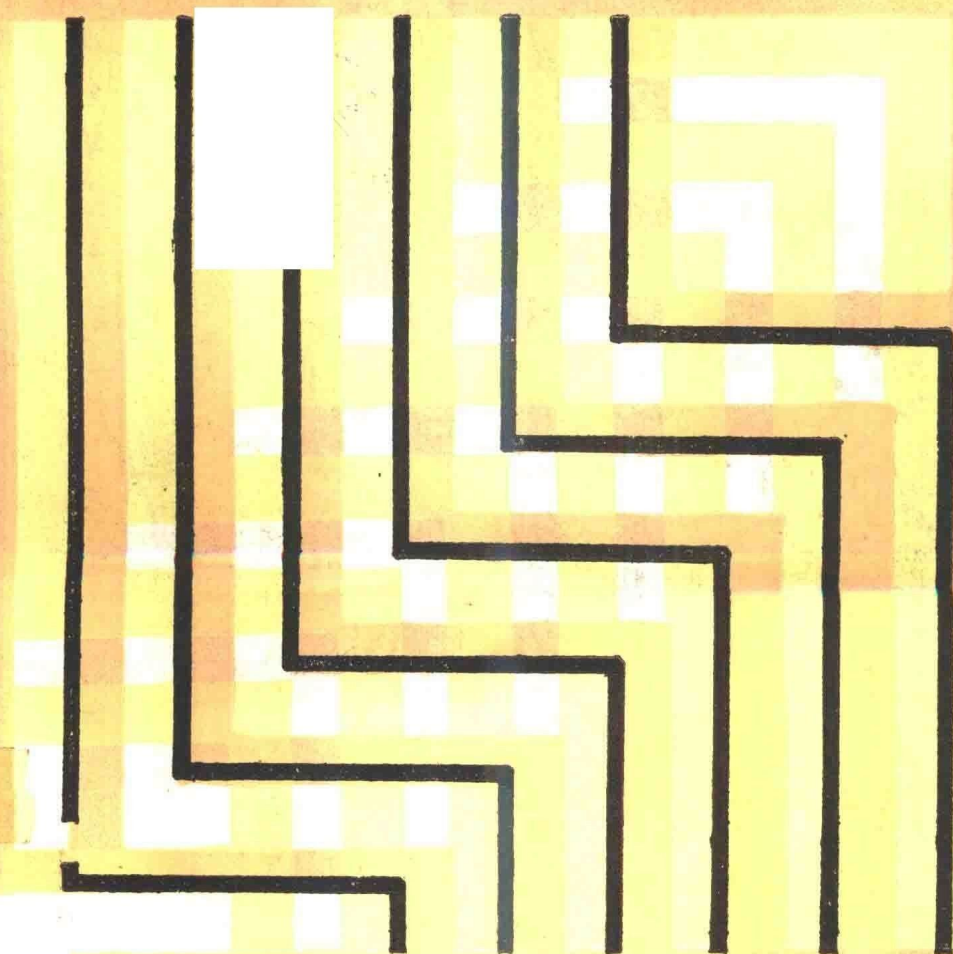


中央广播电视大学教学用书

半导体变流技术

吕家元 主编

天津大学出版社



内 容 提 要

本书主要讲授由功率半导体二极管、晶闸管、大功率晶体管等元件组成的整流电路、逆变电路、变频电路等的工作原理和性能分析、计算，并对晶闸管的触发电路，串、并联保护技术以及斩波器、交流调压器等作专门的讨论。

(津)新登字012号

中央广播电视大学用书
半 导 体 变 流 技 术
吕家元 主编

天津大学出版社出版
(天津大学内)
河北省邮电印刷厂印刷
新华书店天津发行所发行

开本: 787×1092毫米1/16 印张: 13 3/4 字数: 340千字
1988年9月第一版 1995年6月第六次印刷
印数: 38 001—42 000

ISBN 7-5618-0048-7

TM·8

定价: 9.80元

前 言

本书是根据中央广播电视大学(87)电校电字001号文件的要求,由河北省广播电视大学组织编写的。

半导体变流技术的应用日益广泛,它已深入到各种工业电气自动化领域。是机电一体化不可缺少的主要组成部分。

本书共分八章:第一章是功率半导体元件;第二、三章是单相和三相可控整流电路,包括各种负载性质电路的工作原理和性能分析;第四章是逆变电路;第五、六章是晶闸管的触发电路和串、并联以及保护等技术;第七章是变频电路,包括各主要类型的变频电路工作原理和基本性能讨论;第八章介绍斩波器与交流调压器。本书的有关先修课程是高等数学、电路分析和电子技术基础等。

本书为中央广播电视大学电气类专业学生用的教科书。也可作为高等院校有关专业的教学参考书和供各研究所、工厂等工程技术人员的参考用书。

本书由天津大学自动化系吕家元教授、河北省广播电视大学张正伟副教授和天津大学王以直讲师编写,吕家元任主编。其中第一、二、三章由张正伟编写,第五、六、八章由王以直编写,第四、七章及绪论由吕家元编写。河北工学院沈安俊教授负责主审。

由于编写者学识有限,错误和不妥当之处在所难免。恳切希望广大读者提出批评指正意见。

编者

1987年11月

目 录

绪论	(1)
第一章 功率半导体元件	(5)
§ 1-1 晶闸管的结构及其工作原理	(5)
§ 1-2 晶闸管的特性及其主要参数	(7)
§ 1-3 其它功率半导体器件	(14)
习题	(17)
自我检查题	(17)
第二章 单相可控整流电路	(19)
§ 2-1 单相半波可控整流电路	(19)
§ 2-2 单相全波可控整流电路	(38)
习题	(56)
自我检查题	(58)
第三章 三相可控整流电路	(60)
§ 3-1 三相半波(零式)可控整流电路	(60)
§ 3-2 三相桥式可控整流电路	(69)
§ 3-3 变压器漏抗对整流电路的影响	(83)
§ 3-4 晶闸管电路对电网的影响	(86)
习题	(87)
自我检查题	(89)
第四章 逆变电路	(90)
§ 4-1 逆变的含义与产生逆变的条件	(90)
§ 4-2 三相半波逆变电路	(92)
§ 4-3 三相桥式逆变电路	(103)
§ 4-4 有源逆变的应用举例	(112)
习题	(118)
自我检查题	(119)
第五章 晶闸管触发电路	(121)
§ 5-1 对晶闸管触发电路的要求	(121)
§ 5-2 晶闸管触发电路的输出环节	(123)
§ 5-3 触发脉冲的形成	(127)
§ 5-4 实用触发电路举例	(130)
习题	(140)
自我检查题	(141)
第六章 晶闸管的串并联、保护和主电路计算	(142)
§ 6-1 晶闸管的串联和并联	(142)

§ 6-2 晶闸管的保护	(146)
§ 6-3 可控整流电路主电路设计	(151)
习题	(157)
自我检查题	(158)
第七章 变频电路	(159)
§ 7-1 变频电路的基本工作原理	(159)
§ 7-2 并联谐振式与串联谐振式逆变器的工作原理	(174)
§ 7-3 强迫换流式逆变器	(182)
§ 7-4 交-交变频电路	(188)
§ 7-5 脉宽调制型逆变器	(192)
习题	(199)
自我检查题	(200)
第八章 斩波器和交流调压器	(201)
§ 8-1 斩波器	(201)
§ 8-2 交流调压器	(205)
习题	(211)
自我检查题	(211)

绪 论

一、半导体变流技术的发展和运用

当今世界的工业发展已进入电子化和计算机化的时代。各种生产机械和生产过程，一旦与电气自动化技术结合起来，其性能可得到改善、效率也明显地提高。哪个国家的电气自动化技术发展愈快，他的工业产品在世界上愈是占据领先地位。机电一体化的明显特点，就是将计算机、微电子技术和功率电子技术同机电产品有机地结合起来，以产生崭新的功能。各种产品采用了这些电子技术以后，便可迅速地向着高效率、高可靠性和低消耗方面改进、发展。

美国、日本、西德等国均把发展各类电子技术放在重要的战略地位，60%以上的生产总值与电子技术密切相关。电子工业已逐渐成为世界上第一大工业。各种电工、仪表、电机、电器等机电产品均向着集成化和智能化方面发展，并取得了显著的效益。例如，西德BBC公司在原来老产品的基础上，采用脉冲宽度调制(PWM)控制的电压型和电流型逆变器，对普通的交流电动机实现变压变频(VVVF)调速，使原来价值几百美元的低档产品，一跃而为十几倍甚至几十倍于原价的高档产品，而且功能多，用户欢迎，销路好，在国际市场上竞争力强。

国内对电力电子这门新兴学科已开始给予极大重视。在这方面迎头赶上国际先进水平是我国发展电气自动化工业的当务之急。半导体变流技术是电力电子学科中的主要骨干技术。凡是从事电气自动化事业或是使用自动化技术的人员都必须掌握它，这已是必然的趋势。

电气自动化技术以其独特的优越性，一直在工业领域中占首要地位。早在四、五十年代，电机、电器在工业中就成为主要的动力和自动控制手段。钢铁工业中一些大型轧钢机械依靠电气化技术，可以运转自如地将几吨重的钢锭，轧制成各种钢材。到了六十年代，半导体和计算机技术在国际上开始蓬勃发展，所有先进国家在工业中大量应用它们并取得显著经济效益。我国从七十年代初开始在大容量直流拖动系统中设计应用晶闸管变流供电系统，以代替陈旧的电动机——发电机变流装置。十多年的发展历程，证明这种半导体变流技术是一种十分有效的先进技术，是许多产品向现代化发展的重要基础。现在我国已能研制8000KW左右大容量的晶闸管可控供电装置，并在生产中经受了严峻的考验。直流电动机的晶闸管调速装置完全可以保证供应。在冶金、纺织、机床、造纸和电气铁道等工业中已得到广泛应用。交流电动机的变频调速近十几年来，国际上有很大发展，它的关键设备是由功率半导体元件组成的变频装置，它将直流电通过功率半导体元件的开关控制作用逆变成可变频率的交流电。利用这种逆变器还可以研制成各种中频电源。这种晶闸管中频电源也是从六十年代才发展起来的。十几年时间内它已广泛应用于金属熔炼、工件加热、淬火和焊接等领域。利用功率半导体元件制成的逆变器还在不停电电源上广泛应用，保证了计算机用电和其它重要设备用电的可靠性。

晶闸管实际上是一种静态固体开关，它的性能与五、六十年代使用过的闸流管和汞弧整流器相似，比它们有许多优点：

1. 体积小、重量轻、可靠性高、维护方便。

2. 功率放大倍数在 10^4 以上, 比机组变流装置高三个数量级, 比汞弧整流器高一个数量级。

3. 快速性高。晶闸管的响应速度为毫秒级, 与汞弧整流器相仿。比机组变流装置为秒级的响应速度快三个数量级。

4. 由于晶闸管的正向管压降小, 约1V左右, 故功耗小, 效率高。

5. 成本费用低, 技术经济指标高。

图0-1所示为从四、五十年代到七十年代功率变换器的三个阶段的发展概况, 以及主要性能指标(响应时间、效率等)的比较。现在, 各种容量, 包括特大容量的直流拖动电源装置, 绝大多数都已采用晶闸管变流装置。瑞典ASEA公司1982年声称, 该公司的直流拖动装置已有95%以上采用晶闸管变流装置供电。汞弧整流器已完全被取代。直流发电机——电动机组拖动装置仅在个别场合下使用, 少数电气公司还保留系列产品。

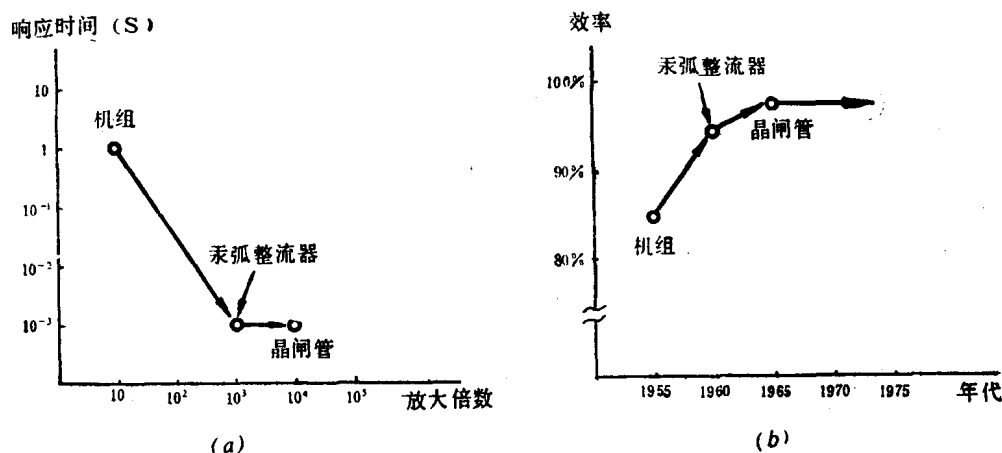


图 0-1 功率变换器发展概况

功率半导体元件发展潜力还很大。国外许多电气公司在对电气变流装置和系统进行研究的同时, 对新型功率半导体元件的研制作了大量工作。因此, 除了晶闸管以外又不断推出新的元器件。一种新型的半导体元器件发展后, 往往很快就有一批新的电气装置用到工业中, 这对于电气类技术人员来说, 必须给予密切关注。目前国外已能生产的各种功率半导体元件的概况列于表0-1。表中列出的是它们的最大额定容量和典型参数。此表是根据1983年国外报导摘录的, 这几年实际上又有所发展。例如, 由于变频电路应用日益广泛, 对逆变用的晶闸管工作频率要求更高。为适应这种要求, 各种更高频率的元件不断出现。采用载流子寿命的分布控制技术和短路发射极结构的快速晶闸管, 目前额定容量可达1200V/1500A, 关断时间 $8 \sim 15\mu\text{s}$; 额定容量2500V/1000A的快速晶闸管关断时间已达到 $30\mu\text{s}$ 。

在许多电压型逆变器中需要将二极管直接与晶闸管反并联连接。这时不再要求晶闸管阻断高的反向电压。为适应这种应用要求设计了一种非对称晶闸管, 把它和一个反并联的整流管集成在同一硅片上就得到逆导晶闸管, 它的关断时间少, 有利于提高工作频率。关断时间 $10\mu\text{s}$ 以下的逆导晶闸管已经研制出来, 用它制成的斩波器, 工作频率可提高到1kHz。

除了表0-1列出的功率半导体元件外, 还有不少新型元件不断开发出来。例如, 门极辅助关断晶闸管(GATT), 关断时间可在 $8\mu\text{s}$ 以下, 工作频率可达10kHz。关断时间 $4\mu\text{s}$ 以下, 工作频率20kHz的元件也已研制出来, 它大多用于感应加热的高频电源。在MOS场效

表0-1

各种功率半导体元件生产概况

元 件 种 类		额定电压、电流	开关时间	工作频率	通态电压通态电阻
整流二极管	普通型	3000V/3500A			~1.6V/10kA
	快速型	3000V/1000A 40V/15~60A	数 μ s 0.15~ 0.23 μ s	数10kHz	3V/3000A 0.55V/15A 0.58V/60A
晶 闸 管	普通逆阻型	4000V/3000A	400 μ s		2.5V/10KA
	快速逆阻型	1200V/1500A	20 μ s	5kHz	2.1V/4500A
		2500V/400A	40 μ s		2.7V/1250A
	逆 导 型	2500V/1000A(晶闸管部分)/400A(二极管部分)	40 μ s		2.1V/1000A
双向晶闸管		1200V/300A(均方根值)			1.5V/420A
可关断晶闸管(GTO)		3600V/600A(可控1000A)	25 μ s		2.5V/1000A
大功率晶体管	单 管 型	400V/250A	9 μ s	~5kHz	~1.0V/250A(饱和)
		400V/40A	6 μ s	数10kHz	~1.5V/49A(饱和)
		630V/50A	~1.7 μ s	~100kHz	~0.3V/20A(饱和)
	达林顿管型	900V/200A	~40 μ s	数kHz	~2.0V(饱和)

应管(MOSFET)元件基础上进一步研制的功率MOSFET也于1975年获得成功,并已在几瓦到几千瓦的功率范围内有了初步产品。10~30A的功率MOSFET开关时间在50~100毫微秒之间。更为理想的元器件还在不断发展。如:静电感应晶闸管(SI晶闸管)、隔离门极晶闸管(IGR)等。

由此可见,功率半导体变流技术在当前正处于蓬勃发展时期,它已是所有电气技术人员的必修知识,这是毫无疑问的。

半导体变流技术的应用范围已渗透到各个领域。如上面谈到的直流拖动装置,广泛用于轧钢、矿山、电力机车以及各种工业部门。200kW以下中小功率的晶闸管直流拖动装置的全国统一设计已于1977~1978年完成,7000kW以下大、中功率直流晶闸管拖动全国统一设计也于1979~1980年完成,它们分别获得了我国的科技进步奖。这就为我国普遍应用半导体变流技术打下了可靠的基础。在交流调速方面,国内虽然起步较晚,也已陆续在异步电动机串级调速、变频调速,以及无换向器电动机上得到应用,并已有了产品。其它,在中频电源、电解加工用电源,不停电电源、电镀电源、充电电源和调压、调温等方面都得到大量应用。

二、本课程的任务和要求

本课程是电气工程类中工业电气自动化、电子技术应用和电子仪器等专业的专业基础课。它的任务是使学生掌握各类变流装置的基本工作原理、控制方法、设计计算以及它们的技术经济性能指标等。从而使工业电气自动化专业的学生具有牢固的半导体变流技术的基础理论知识,并为后续课“自动控制系统”的学习打好坚实的基础;使电子技术应用,电子仪器等专业的学生具有初步设计和调试各种变流装置的能力。

本课程的基本要求是:

1. 熟练掌握单相可控整流电路、三相可控整流电路和有源逆变电路的基本工作原理、

波形分析和各种负载对电路的影响，并能初步设计上述电路及其触发电路和保护环节。

2. 掌握变频的几种典型电路的工作原理。

3. 了解斩波器和交流调压器的工作原理。

与本课程有关的先修课程是高等数学、电路分析和电子技术基础等。

由于半导体变流技术近年来发展很快，变流电路的类型愈来愈多，功率半导体元件的种类也不断增多。本课程以晶闸管变流电路的内容为主。由于授课时数和教材篇幅有限，只能对一些基本的电路作介绍。掌握了这些基本知识可以为学习更多的功率半导体变流技术和后续课程打下基础。

教材中为了学习的便利，在三相可控整流电路一章中分别列入三相半波和三相桥式不可控整流内容。

第一章 功率半导体元件

半导体元件一方面向小型化、集成化方向发展, 另一方面向大容量——高电压、大电流方向发展。后者称为功率半导体元件。本章介绍其中的一部分——晶闸管。晶闸管是硅半导体材料做成的硅晶体闸流管的简称。有时又叫它可控硅整流元件, 简称可控硅。它包括普通晶闸管、双向晶闸管、可关断晶闸管、逆导晶闸管和快速晶闸管等。由于现阶段普通晶闸管应用最普遍, 晶闸管这一名词也就用来表示普通晶闸管。其它晶闸管称为特殊晶闸管。

本章重点讲普通晶闸管。从使用观点简单地介绍它的结构、工作原理、伏安特性和主要参数。最后简单地介绍几种特殊晶闸管。

§ 1-1 晶闸管的结构及其工作原理

一、晶闸管的结构

晶闸管从外形上看, 常用的有螺栓式和平板式两种, 如图1-1所示。晶闸管内部是一个由硅半导体材料做成的管芯, 由管芯引出三个引出极, 称阳极A、阴极K和门极G(或称控制极)。它的文字符号用KP表示。

晶闸管象其它半导体器件一样, 在工作过程中会有损耗, 因而产生热量。晶闸管是大功率半导体器件, 所以损耗大, 产生的热量也多, 因而大多数晶闸管都需要安装与其紧密接触的散热器, 将热量散出去。

螺栓式晶闸管如图1-1(a)所示。螺栓是它的阳极(A), 做成螺栓式是为了方便地与其铝制散热器连接。粗辫子线是晶闸管的阴极(K)。细辫线是晶闸管的门极(G)。螺栓式晶闸管因结构上散热效果差, 多在100A以下小容量晶闸管中采用, 有些200A的晶闸管也采用此结构。

平板式晶闸管如图1-1(b)所示。中间引出的细辫子是门极(G), 两端平面一个是阳极(A), 另一个是阴极(K), 区别的方法是靠元件上标注的字母符号。使用平板式晶闸管时, 用两个相互绝缘的散热器, 从晶闸管的两端将其夹紧。该结构因两面散热, 故散热效果好, 但安装、更换不方便。目前大部分200A和所有300A以上的晶闸管均做成平板式。

晶闸管管芯内部结构示意图如图1-2(a)、(b)所示。由图1-2(a)看出, 去掉与三个引出线(三个极)有关的金属导体后, 余下的是接在一起的P、N、P、N四层半导体。将图进一步简化, 其内部结构示意图就变成图1-2(b)的形式。由该图看出, 四层半导体有 J_1 、 J_2 和 J_3 三个PN结, 三个电极分别由其最外层的P层、N层和中间的P层引出。所以晶闸管是一个四层三端半导体器件。其图形符号如图1-2(c)所示。

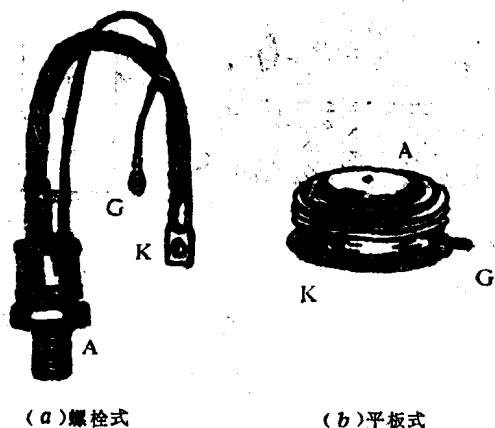


图 1-1 晶闸管的外形

二、晶闸管的工作原理

普通二极管是一个双层 (P、N) 半导体, 只有一个PN结。当二极管接电源使其P层电位高于N层时, 二极管导通, 称为正向接法, 或叫作加正向电压; 反之, 称为反向接法, 或叫作加反向电压。

当晶闸管上加的电压使其阳极A的电位高于阴极K的电位时, 称晶闸管承受正向阳极电压, 由图1-2(b)看出, 该极性电压虽然使晶闸管两端的PN结 J_1 、 J_3 承受正向电压, 但中间的PN结 J_2 承受反向电压, 所以晶闸管不能导通, 称为晶闸管的正向阻断状态, 也称关断状态; 当晶闸管上加的电压使其阳极A的电位低于阴极K的电位时, 称晶闸管承受反向阳极电压, 该极性电压使晶闸管两端的PN结 J_1 和 J_3 承受反向电压, 虽然中间的PN结 J_2 承受正向电压, 晶闸管也不能导通, 称为反向阻断状态, 也称关断状态。

以上是晶闸管门极不加任何电压的情况。由此得出结论: 晶闸管的门极不加电压时, 不论晶闸管阳极和阴极间加何种极性的电压, 正常情况下的晶闸管都不导通, 这点与普通二极管不同, 此时晶闸管具有正、反向阻断能力。

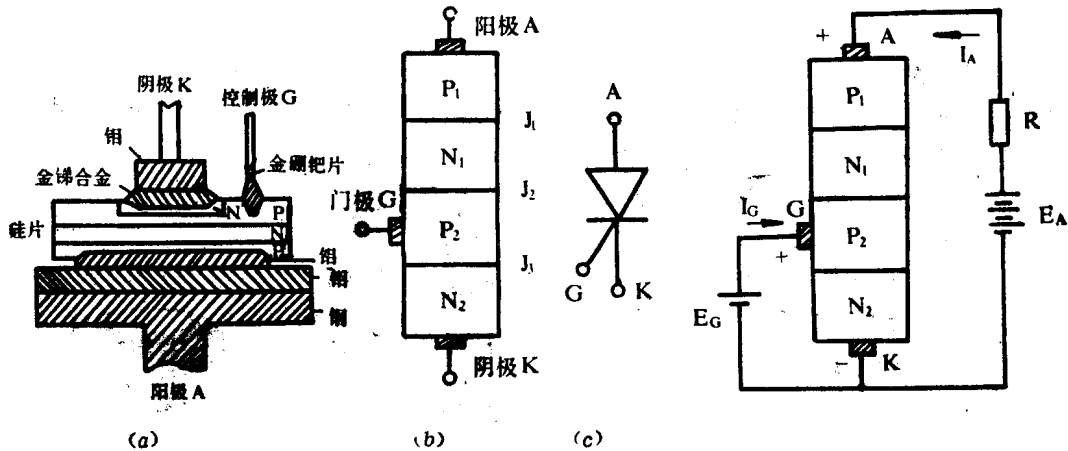


图 1-2 晶闸管结构示意图及图形符号

图 1-3 晶闸管正向导通电路图

晶闸管的阳极与阴极之间加正向阳极电压, 同时在门极G与阴极K之间加电压使门极的电位高于阴极时, 称门极承受正向门极电压, 则有门极电流 I_G 流入门极, 如图1-3所示。 I_G 较小时, 晶闸管仍处于正向阻断状态, 即关断状态。当 I_G 达到一定数值时, 晶闸管由关断状态转为导通状态。这表明, 在晶闸管承受正向电压条件下, 门极对其导通与否有控制作用。导通后的晶闸管类似二极管导通时的情形, 管子电压降较小。

晶闸管一旦导通后, 不论门极是否继续加正向电压, 甚至门极与阴极之间改加反向门极电压, 均不影响晶闸管的导通状态, 也不影响晶闸管中阳极电流的大小。即门极在晶闸管导通后失去了控制作用。

晶闸管承受反向电压时, 门极与阴极之间不论加何种极性的电压, 也不管门极电流的大小, 均不能使晶闸管由关断转变为导通。

当晶闸管导通后的阳极电流 I_A , 减小到某一数值以下时, 阳极电流 I_A 会突然降为零, 说明此时晶闸管由导通转变为关断, 即恢复阻断状态。由此看出, 保持晶闸管导通状态有一个最小阳极电流的限制, 称它为维持电流 I_H 。

晶闸管在正向阳极电压作用下, 当门极加正向门极电压并建立了足够大的门极电流时,

晶闸管由正向阻断转变为导通。这一点单从晶闸管的四层半导体三个PN结串联的结构是很难理解的。为了进一步说明晶闸管的工作原理，我们专门将晶闸管中间的 N_1 层和 P_2 层分成两部分，如图1-4所示。这样，一个晶闸管等效地看成 $P_1N_1P_2$ 型和 $N_1P_2N_2$ 型两个相连的晶体管。其中晶体管 $N_1P_2N_2$ 的基极与晶体管 $P_1N_1P_2$ 的集电极相连； $P_1N_1P_2$ 的基极与 $N_1P_2N_2$ 的集电极相连。 $P_1N_1P_2$ 管的发射极就是晶闸管的阳极A， $N_1P_2N_2$ 的发射极和基极分别是晶闸管的阴极K和门极G，如图1-4(c)所示。晶闸管接上电源后，其等效电路如图1-4(d)所示。这时晶闸管的阳极和阴极加正向阳极电压。当门极电路中的开关闭合后，门极加的是正向门极电压，若门极电流 I_G 达到一定数值时，晶闸管就会迅速导通。其过程如下：门极电流 I_G 做为三极管 $N_1P_2N_2$ 的基极电流流入，经 $N_1P_2N_2$ 管放大后成为其集电极电流 I_{CN} 。 I_{CN} 又做为 $P_1N_1P_2$ 的基极电流被其放大，成为它的集电极电流 I_{CP} 。这时的 I_{CP} 经晶闸管内部两次放大后，远比开始时的门极电流 I_G 大得多。 I_{CP} 又做为 $N_1P_2N_2$ 的基极电流流入，再次放大成 I'_{CN} ，…，重复上述过程形成正反馈，最终两个三极管都很快地进入饱和导通状态，也就是晶闸管由正向阻断状态转变为导通状态。这个过程经几微秒就能完成。

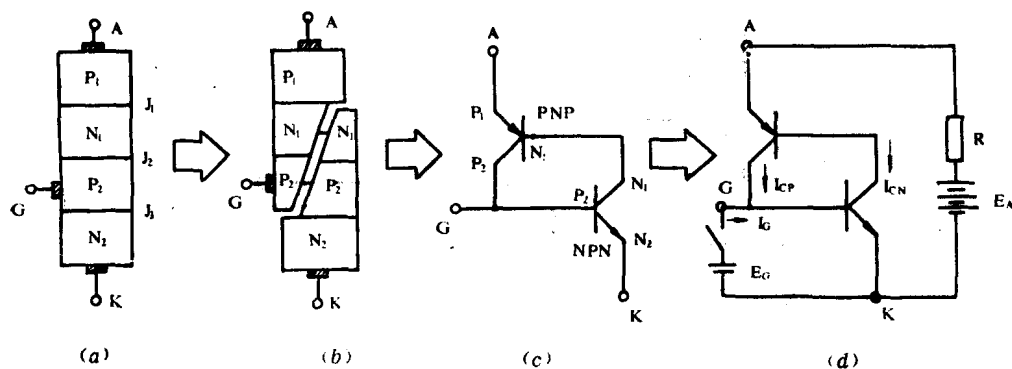


图 1-4 用两个晶体管说明晶闸管的工作原理

由上述过程看出，晶闸管导通后，由于其内部（自身）能供给 $N_1P_2N_2$ 足够大的基极电流，也就不再需要相对较小的门极电流 I_G 。所以，一旦晶闸管导通后，门极即失去控制作用。在晶闸管承受正向电压条件下，需要其导通时，也只是需要门极电流瞬间的出现，这称为触发。通常在门极上加一个适当大小的正向脉冲电压即可，该电压称为触发电压。

由上述分析中也能看出，门极在一定条件下能触发晶闸管导通，但无法使其由导通转变为阻断状态，即关断。想使晶闸管关断必须使晶闸管的阳极电流 I_A 降到维持电流以下。这是因为，三极管集电极电流较小时，其共射极电流放大系数 β 随集电极电流的减少而变小，甚至 β 会小于1。当晶闸管阳极电流 I_A 减小到使 $P_1N_1P_2$ 和 $N_1P_2N_2$ 两个三极管 β 值的乘积小于1以后，像触发导通时发生的正反馈一样，会发生阳极电流迅速减小的正反馈过程，使阳极电流 I_A 降为零，晶闸管由导通转变为关断。

§ 1-2 晶闸管的特性及其主要参数

晶闸管相当于一个由门极电压控制的单向无触点开关。实用中的晶闸管是在一定条件下按需要不断地进行导通和关断。如何正确地使用它，这就需要我们了解晶闸管的特性及其表征它的参数。

一、晶闸管的特性

晶闸管导通与关断两个状态是由其上的阳极电压，阳极电流和门极电流共同决定的，这几个量之间又互有联系。实用中常用伏安特性曲线来描述它们之间的关系。

晶闸管阳极与阴极之间的阳极电压 u_A 与其阳极电流 i_A 的关系，简称为晶闸管伏安特性。

实际测出的晶闸管伏安特性曲线如图1-5所示。门极不加电压($i_g = 0$)，让晶闸管承受正向阳极电压 u_A ，则晶闸管处于正向阻断状态。当 u_A 从零逐渐上升时，阳极电流 i_A 也从零逐渐上升，但其数值很小，上升也缓慢。即使 u_A 值已很大， i_A 也只有几或几十毫安，称为正向漏电流。增加 u_A 值大于 U_{DSM} 以后， i_A 急剧上升。当 u_A 值升到 U_{BO} 时， i_A 突然剧增，晶闸管由关断突然变导通，这在图1-5的伏安特性曲线上是从A点突变到B点。 U_{BO} 称晶闸管的正向转折电压，此时晶闸管上电压降很小，只有1伏左右。晶闸管导通后的伏安特性与二极管的正向特性相似，即通过较大阳极电流时，其本身压降却很小。

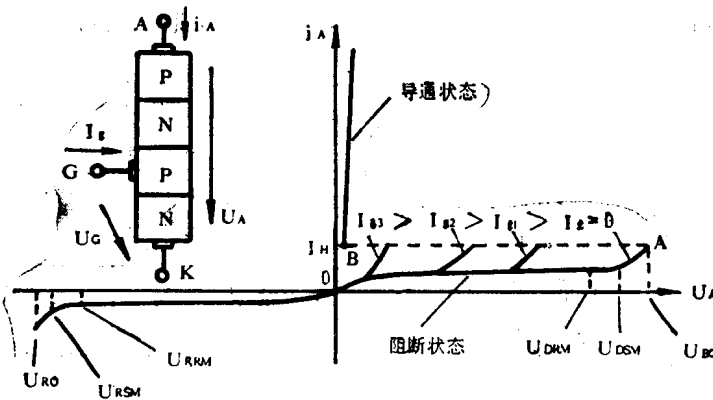


图 1-5 实际晶闸管的伏安特性

正常情况下，是不允许采用将正向阳极电压增加到转折电压 U_{BO} 以后，使晶闸管由关断转为导通的方法，而是靠门极通入触发电流 I_g ，使晶闸管导通。通入门极电流 I_g 后，晶闸管的正向转折电压 U_{BO} 大大降低。其特性曲线如图1-5所示。以某晶闸管为例：

$$\begin{aligned} I_g = 0 & , & U_{BO} = 800 \text{ V} ; \\ I_g = 5 \text{ mA} & , & U_{BO} = 200 \text{ V} ; \\ I_g = 15 \text{ mA} & , & U_{BO} = 5 \text{ V} ; \\ I_g = 30 \text{ mA} & , & U_{BO} = 2 \text{ V} ; \end{aligned}$$

I_g 足够大时，例如 $I_g > 30 \text{ mA}$ ，晶闸管的正向转折电压很小，可以看成与整流二极管一样，加上正向阳极电压管子就导通了。使用晶闸管时，通常是管子先加一定的正向阳极电压，然后在门极上加足够大的触发电压，晶闸管因其正向转折电压下降到很小而导通。

晶闸管加反向阳极电压时，由于其中 J_1 、 J_3 两个PN结承受反向电压，所以其反向特性与一般二极管的反向特性相似。正常情况下，晶闸管承受反向电压时，晶闸管处于反向阻断状态，流有反向漏电流。反向电压增加时，反向漏电流略有增加，但总的来说反向漏电流数值是很小的。当反向电压增加到较高数值后，反向电流剧增，称晶闸管反向击穿，这时会造成晶闸管的损坏，这是不允许的。晶闸管的反向特性如图1-5第三象限曲线所示。

二、晶闸管的主要参数

为了正确地选择和使用晶闸管，必须了解晶闸管的几个主要参数的定义。下面就经常用

到的几个主要参数予以介绍。各参数的名称、符号和数值都参照GB2900, 32-82 和JB1144-75的标准。其中一些主要参数列入表1-1和表1-2内。至于每个晶闸管主要参数的实测值, 均在晶闸管出厂合格证上注明。

(一)晶闸管的电压参数

1. 断态不重复峰值电压 U_{DSM} ——门极开路, 晶闸管额定结温时, 管子阳极电压 u_A 升到正向转折电压 U_{BO} 之前, 即管子正向漏电流开始急剧增大, 伏安特性曲线急剧转弯处, 此时对应的阳极电压称为断态不重复峰值电压 U_{DSM} , 如图1-5所示。

该电压是不可连续施加且持续时间不大于10毫秒的最大脉冲电压。该电压一般小于转折电压 U_{BO} , 两者差多少由晶闸管制造厂定。晶闸管承受的电压若超过断态不重复峰值电压几次即会损坏报废。

2. 反向不重复峰值电压 U_{RSM} ——门极开路, 晶闸管承受反向电压时, 对应反向漏电流开始急剧增大的电压值称为反向不重复峰值电压 U_{RSM} , 如图1-5中所示。

该电压是不可连续施加、持续时间不大于10毫秒的反向最大脉冲电压。当晶闸管承受反向电压超过此值一次即可发生破坏性击穿而损坏。

3. 断态重复峰值电压 U_{DRM} ——取断态不重复峰值电压 U_{DSM} 值的80%定义为断态重复峰值电压 U_{DRM} 。

该电压是晶闸管门极开路时, 可以连续施加、重复频率为每秒50次、持续时间不大于10毫秒的断态最大脉冲电压。

4. 反向重复峰值电压 U_{RRM} ——取反向不重复峰值电压 U_{RSM} 值的80%定义为反向重复峰值电压 U_{RRM} 。

该电压是晶闸管门极开路时, 可以连续施加、重复频率为每秒50次、持续时间不大于10毫秒的反向最大脉冲电压。

5. 额定电压——通常取断态重复峰值电压 U_{DRM} 和反向重复峰值电压 U_{RRM} 中, 小的那个数值, 并按标准电压等级取整数, 作为该晶闸管的额定电压。电压等级见表1-3。

应该说, 所选用晶闸管的额定电压略大于该管工作时管上可能出现的最大电压值即可。不过在实际电路中常会出现瞬时过电压, 或者由于环境温度升高, 散热不良, 使其正向转折电压值降低, 均有可能使外加电压峰值瞬时超过正反向不重复峰值电压, 造成晶闸管误导通或永久性损坏。所以选择晶闸管的额定电压值应比实际工作时管子可能承受的最大电压大2~3倍。

6. 通态平均电压 U_T ——晶闸管通以额定通态平均电流, 待结温稳定时, 阳极与阴极之间电压降的平均值定义为通态平均电压 U_T , 通称管压降。

根据通态平均电压 U_T 的数值不同, 将其按表1-4分成几组。选用时应尽量选择 U_T 值小的晶闸管, 以便减少管的损耗和发热。

(二)晶闸管的电流参数

1. 通态平均电流 I_T ——在环境温度为+40°C和规定冷却条件下, 晶闸管在电阻性负载的单相工频正弦半波, 导通角不小于170°的电路中, 当结温稳定并不超过额定结温时, 所允许通过的最大平均电流。将此电流按晶闸管标准电流系列取相应的电流等级(见表1-5), 称为该晶闸管的额定电流。

晶闸管元件和其它电气设备一样, 决定其允许电流大小的是温度, 即晶闸管管芯的温度, 称为结温。每个系列晶闸管在正常工作条件下所允许的最高PN结温度, 称为额定结温

表1-1 KP型晶闸管元件的主要参数

参 数 列	通态平均 电流	断态重复峰值电 压、反向重复峰值 电压	断态不重复平 均电流、反向 不重复平均电 流	额定 结温	门极触发 电流	门极触 发电压	断态电压 临界上升 率	通态电流 临界上升 率	浪涌电流
	I_T	U_{DRM}, U_{RRM}	I_{DS}, I_{RS}	T_{JM}	I_{GT}	U_{GT}	dv/dt	di/dt	I_{TSM}
	A	V	mA	°C	mA	V	V/ μ s	A/ μ s	A
KP 1	1	100~3000	≤ 1	100	3~30	≤ 2.5	30	—	20
KP 5	5	100~3000	≤ 1	100	5~70	≤ 3.5	30	—	90
KP 10	10	100~3000	≤ 1	100	5~100	≤ 3.5	30	—	190
KP 20	20	100~3000	≤ 1	100	5~100	≤ 3.5	30	—	380
KP 30	30	100~3000	≤ 2	100	8~150	≤ 3.5	30	—	560
KP 50	50	100~3000	≤ 2	100	8~150	≤ 3.5	30	30	940
KP 100	100	100~3000	≤ 4	115	10~250	≤ 4	100	50	1880
KP 200	200	100~3000	≤ 4	115	10~250	≤ 4	100	80	3770
KP 300	300	100~3000	≤ 8	115	20~300	≤ 5	100	80	5650
KP 400	400	100~3000	≤ 8	115	20~300	≤ 5	100	80	7540
KP 500	500	100~3000	≤ 8	115	20~300	≤ 5	100	80	9420
KP 600	600	100~3000	≤ 9	115	30~350	≤ 5	100	100	11160
KP 800	800	100~3000	≤ 9	115	30~350	≤ 5	100	100	14920
KP 1000	1000	100~3000	≤ 10	115	40~400	≤ 5	100	100	18600

表1-2 KP型晶闸管元件的其它参数

参 数 列	断态重复平均电 流、反向重复平 均电流	通态 平均 电压	维持 电流	门极不 触发电 流	门极不触 发电压	门极正向峰 值电流	门极反向峰 值电压	门极正向峰 值电压	门极平 均功率	门极峰 值功率	门极控 制开通 时间	电路换 向关断 时间
	I_{DR}, I_{RR}	U_T	I_H	I_{GO}	U_{OD}	I_{OPM}	U_{GRM}	U_{OPM}	P_O	P_{OPM}	t_{gs}	t_f
	mA	V	mA	mA	V	A	V	V	W	W	μ S	μ S
KP 1	< 1	•	•	0.4	0.3	—	5	10	0.5	—	••	••
KP 5	< 1	•	•	0.4	0.3	—	5	10	0.5	—	••	••
KP 10	< 1	•	•	1	0.25	—	5	10	1	—	••	••
KP 20	< 1	•	•	1	0.25	—	5	10	1	—	••	••
KP 30	< 2	•	•	1	0.15	—	5	10	1	—	••	••
KP 50	< 2	•	•	1	0.15	—	5	10	1	—	••	••
KP 100	< 4	•	•	1	0.15	—	5	10	2	—	••	••
KP 200	< 4	•	•	1	0.15	—	5	10	2	—	••	••
KP 300	< 8	•	•	1	0.15	4	5	10	4	15	••	••
KP 400	< 8	•	•	1	0.15	4	5	10	4	15	••	••
KP 500	< 8	•	•	1	0.15	4	5	10	4	15	••	••
KP 600	< 9	•	•	—	—	4	6	10	4	15	••	••
KP 800	< 9	•	•	—	—	4	5	10	4	15	••	••
KP 1000	< 10	•	•	—	—	4	5	10	4	15	••	••

•: U_T 出厂上限值由各厂根据合格型式试验制订; ••: 同类产品中最有代表性的数值。

表1-3 晶闸管按正反向重复峰值电压分级

级 别	正反向重复峰值电压 (V)	级 别	正反向重复峰值电压 (V)	级 别	正反向重复峰值电压 (V)	级 别	正反向重复峰值电压 (V)
1	100	6	600	12	1200	22	2200
2	200	7	700	14	1400	24	2400
3	300	8	800	16	1600	26	2600
4	400	9	900	18	1800	28	2800
5	500	10	1000	20	2000	30	3000

表1-4 晶闸管按通态平均电压分组

组 别	通态平均电压 (V)	组 别	通态平均电压 (V)	组 别	通态平均电压 (V)
A	$U_T \leq 0.4$	D	$0.6 < U_T \leq 0.7$	G	$0.9 < U_T \leq 1.0$
B	$0.4 < U_T \leq 0.5$	E	$0.7 < U_T \leq 0.8$	H	$1.0 < U_T \leq 1.1$
C	$0.5 < U_T \leq 0.6$	F	$0.8 < U_T \leq 0.9$	I	$1.1 < U_T \leq 1.2$

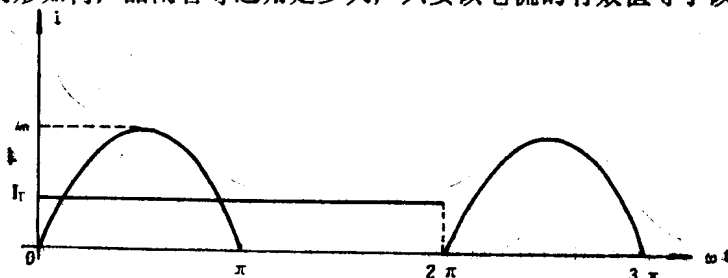
表1-5 晶闸管按额定通态平均电流分系列

系 列	通态平均电流 (A)	系 列	通态平均电流 (A)	系 列	通态平均电流 (A)
KP 1	1	KP 50	50	KP 500	500
KP 5	5	KP 100	100	KP 600	600
KP 10	10	KP 200	200	KP 800	800
KP 20	20	KP 300	300	KP 1000	1000
KP 30	30	KP 400	400		

T_{JM} , 见表1-1。结温的高低由晶闸管的发热与冷却两方面所决定。造成晶闸管发热的原因是损耗, 其中主要是导通时的管子损耗; 另外有阻断和反向时漏电流引起的损耗; 还有开关时的损耗, 这在工作频率较高时才考虑; 门极损耗相对较少, 可以忽略。

影响晶闸管散热的因素也很多, 如晶闸管与散热器接触的紧密程度, 散热器的大小和冷却方式(自冷、风冷和水冷等)、环境温度和冷却介质的温度等。当这些情况不同时, 晶闸管允许通过的通态平均电流也不同。

晶闸管的额定电流是用一定条件下最大通态平均电流来标定的, 其电流波形如图1-6所示。这是因为整流输出端所接负载常用平均电流来衡量其性能。但是, 从晶闸管管芯发热的角度来看, 若把管芯看成恒值电阻, 那么, 其热效应只和电流的有效值有关。因此, 不论流经晶闸管电流的波形如何, 晶闸管导通角是多大, 只要该电流的有效值等于该管额定电流 I_T ,

图 1-6 晶闸管的通态平均电流 I_T

的有效值，管芯的发热就一样。那种波形的电流就允许流过该管。

任一含有直流分量的电流波形，都有一个电流平均值 I_d （一个周期内电流波形面积的平均值），也都有一个电流的有效值 I （均方根值），该电流有效值与平均值之比，称为该电流的波形系数 K_f ，即

$$K_f = \frac{I}{I_d} \quad (1-1)$$

用来定义晶闸管额定电流的电流波形，是图1-6所示的正弦半波，它的波形系数呢？设该正弦波峰值为 I_m ，则其通态平均电流为

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

根据有效值的定义，其有效值为

$$I = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi (I_m \sin \omega t)^2 d(\omega t)} = \frac{I_m}{2}$$

故正弦半波电流的波形系数是

$$\frac{I}{I_T} = \frac{I_m/2}{I_m/\pi} = \frac{\pi}{2}$$

即

$$I = 1.57 I_T \quad (1-2)$$

这就是说，额定电流为100安的晶闸管，其允许通过电流的有效值为157安。

具有相同平均值而波形不同的电流，因波形系数不同而具有不同的有效值，流经同一个晶闸管时，发热也不相同，因而不能按电流的平均值选择晶闸管。而晶闸管的额定电流却是用正弦半波电流的平均值来定义的，所以非正弦半波电流选择晶闸管额定电流时需要折算。根据有效值相等发热相同的道理，可以将非正弦半波电流平均值 I_d 折算成等效的正弦半波电流的平均值 I_T 。

$$1.57 I_T = K_f \cdot I_d$$

即

$$I_T = \frac{K_f I_d}{1.57} \quad (1-3)$$

式中 K_f 为其它非正弦半波电流的波形系数。

由式(1-3)看出，额定电流为100安的晶闸管，只有在正弦半波电流情况下（其波形系数为1.57），允许通过的电流平均值 I_d 才是100安，在其它情况下，允许通过的电流平均值都不是100安。当波形系数 $K_f > 1.57$ 时，由于折算的等效平均电流 I_T 将大于实际的平均电流 I_d ，故该管允许通过的实际电流平均值 I_d 应小于100安；反之当 $K_f < 1.57$ 时，允许通过的电流平均值可大于100安。

由于晶闸管的过载能力比一般电机、电器元件小，因而选用晶闸管时，应使其通态平均电流为实际所需最大电流（折算成正弦半波）的2~3倍，使其有一定裕量。

2. 维持电流 I_H ——晶闸管被触发导通后，在室温和门极开路条件下，晶闸管从较大的通态电流降到恰能保持其导通的最小阳极电流，称维持电流 I_H 。

维持电流的大小与晶闸管结温有关，结温越高，维持电流越小。维持电流大的管子容易关断。同一型号的晶闸管，其维持电流也各不相同。

3. 掣住电流 I_L