

电力电子技术

电 力 电 子 技 术

主 编 任国光

编 委 (以姓氏笔划为序)

孙保义 邹听钮 陆一军

陈玉良 奚仁德 郭润杰

高琴妹

上海科学技术文献出版社

(沪)新登字301号

内 容 提 要

本书适用于电类专业三年制大专和四年制本科(少学时)学生作为电力电子技术、电力电子技术、半导体变流技术、功率电子学等课程的教材,也可供自学考试、职业大学、职工大学学生使用。主要适用电气自动化及电气技术等专业,授课学时在60~70学时,实验学时10学时。本书也可供有关工程技术人员参考。

本书前八章为半控电力电子器件及其变流电路,包括普通晶闸管、可控整流电路、有源逆变电路、触发电路、变频电路、交流调压电路以及晶闸管主电路的设计和保护等。后三章为全控电力电子器件及其变流电路,包括门极可关断晶闸管(GTO)及其变流电路、功率晶体管(GTR)及其变流电路、功率场效应管(MOSFET)及其变流电路等。

电 力 电 子 技 术

任国光 主编

上海科学技术文献出版社出版发行

(上海市武康路2号)

全国各书店经销 上海联昌印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 16.5 字数 411,000

1992年7月第1版 1992年7月第1次印刷

印数: 1—3,000

ISBN 7-5439-0070-X/T·254

定 价: 9.00元

前 言

本书参照电气自动化专业、电气技术专业三年制大专和四年制本科(少学时)的教学大纲和教学基本要求编写,同时根据本课程所涉技术领域近年来的发展作了删节和补充。

全书篇幅按每学时3500字左右编写,旨在缩小篇幅,以便有可能在学时较少的情况下系统地讲授和阅读本教材。

本书由八所院校合作编写,任国光副教授任主编。第一章由孙保义副教授编写,第二章由陈一军同志编写,第三章、第五章由邹听钮副教授编写,绪论、第四章、第十一章及附录由任国光同志编写,第六章、第十章第一节及第二节由奚仁德同志编写,第七章由郭涓杰同志编写,第八章由陈玉良同志编写,第九章由高琴妹同志编写,第十章第三节由邹听钮、奚仁德同志合作编写。

本书由陈伯时教授任主审,蒋洪瑶副教授任副主审,参加审校工作的还有邵兴南副教授,赵修科副教授,危允琨副教授,俞近新工程师和王奎堂老师。

在本书的出版工作中,得到了中国职业大学电类专业研究会的热情支持和帮助,江南大学电气自动化专业A8801班部分同学参加了本书的校订工作,在此一并致谢。

由于编者学识浅薄,疏误之处敬请读者不吝指正。来信请寄:无锡江南大学电子系任国光收,邮政编码:214063。

编 者

1991.9

绪 论

电力电子技术是研究利用半导体器件对电能进行控制和转换的技术,是电子技术在大功率领域中的应用。

电力电子技术在机器制造业、电力工业、交通运输业、航天航空工业以及冶金、化工、纺织、轻工、家用电器和计算机工业等许多领域中有着广泛的应用。它不仅是一项实用性很强的高技术,而且在非常广泛的领域内支持了多项高技术的发展。它是信息产业和传统产业之间的重要接口,是弱电控制和被控强电之间的桥梁,是大幅度节约电能和原材料消耗的重要技术手段,也是实现机电一体化、智能化和精密控制的重要技术依托。

电力电子技术是电气工程三大主要领域——电力、电子和控制之间的边缘学科,它的发展将对电气工程技术产生重大而深远的影响。

电力电子装置体积小、重量轻、能耗低、易控制、反应快、寿命长、工作可靠、维修方便,它的应用迅速被深入到国民经济的各个领域。

自从1956年美国贝尔电话公司完成了晶闸管的实验室研究工作,1957年美国通用电气公司制造出了晶闸管的商品元件,1958年该公司研制成功第一只工业用的晶闸管以来,电力电子器件和装置的生产正以极高的速度发展着。

电力电子器件和装置的发展过程,大致可以划分为三个阶段。

第一个阶段(1958~1975年)主要是普通晶闸管(SCR)的生产,并在此基础上发展了快速晶闸管、双向晶闸管、光控晶闸管、逆导晶闸管等器件。在这一阶段中,各种汞弧器件被晶闸管彻底取代了。以普通晶闸管构成的整流装置的广泛应用是这一阶段的主要标志。

第二个阶段(1975~1985年)是以门极可关断晶闸管(GTO)、功率晶体管(GTR)构成的逆变器为主的阶段,也是功率场效应管(POWER MOSFET)获得成功发展的阶段,这一阶段也可认为是以发展交流传动为核心的阶段。在一个相当长的时期内,宽范围、高精度的调速系统几乎无例外地采用直流调速系统。以GTO、GTR构成的性能良好的变频器的出现,为交流传动的发展创造了极好的条件。现在交流传动的优越性不仅表现在经济性、可靠性、长寿命、体积小、易维护等方面,而且调速范围、调速精度和其它调速指标均可与直流调速系统相抗衡,同时也突破了直流传动无法进入的高速禁区。目前,直流调速系统被交流调速系统取代的趋势已经不可逆转。除了变频调速,其它交流调速方式诸如串级调速、调压调速、无换向器电机调速均与电力电子技术密切相关。

第三个阶段(1985年以后)是绝缘栅晶闸管、(IGT或IGBT)静电感应晶体管、(SIT)静电感应晶闸管(SITH)等功率场效应器件获得迅速发展的阶段。在这一阶段中,还出现了功率集成电路(PIC),它把功率输出单元和驱动、保护、检测单元集成在一块芯片上,使应用更为方便。

表 0-1 是1990年电力电子器件可达到的最大容量。

表 0-1 1990年电力电子器件可达到的最大容量

器 件	$U(V)$	$I(A)$	$t_{off}(\mu s)$	$P_{max}(kVA) \cdot$	频率范围 (kHz)
双极型晶体管	1200	300	15~25	180	0.5~5
	550	480	5~10	130	0.5~5
SIRET	1000	80	1~3	40	2~20
IGBT	1000	200	1~4	100	2~20
MOSFET	1000	28	0.3~0.5	14	5~100
SIT	1400	25	0.1~0.3	18	30~300
GTO	4500	3000	10~25	3300	0.2~1
SITH	2000	600	2~4	300	1~10

• 三相桥式联结(每臂一只器件)时变流器最大输出功率

器件的容量还在不断地提高,并继续向高频化、组合化、智能化、模块化的方向发展。

上面提到的三个发展阶段,不能单纯看作是一个阶段取代前一阶段的过程,而应理解为后一阶段是前一阶段的发展和补充,各种器件有它们各自的主要工作领域,例如场效应器件目前仅用于高频中小功率的范畴,功率晶体管多用于频率较高的中小功率装置,在中、低频大功率的领域内则使用晶闸管和可关断晶闸管。

电力电子装置是用于电能的变换和控制的装置,就变换而言,包括电压、电流、波形、频率和相数的变换,主要采用整流、逆变、变频、调压、斩波等技术手段。

整流技术是将交流电压变换成直流电压的一种技术手段(AC→DC)。由于电能的生产和输送采用交流形式,而在总用电量中却有很大一部分是以直流形式消耗的,这就需要将交流整流为直流。

在化工系统、电冶金系统中需用大量的直流电能,电解、电镀必须使用直流,在工业直流传动系统和干线电机车,城市地铁,城市电车,矿山机车等交通运输设备中也需使用大量的直流电能。

在晶闸管未投入工业应用之前,直流供电主要依靠直流发电机和汞弧整流器,在某些装置中,采用热阴极充气二极管、闸流管作为整流元件,也有的采用硒整流器供电。

有源逆变技术是将直流转变为交流然后送入交流电网的技术,(DC→AC)主要用于直流可逆拖动系统、高压直流输电、绕线式异步电动机的串级调速等系统中。

无源逆变技术是将直流转变为交流的技术,(DC→AC)变换所得的交流供负载使用,例如应急电源,不停电电源(UPS)等装置就是把贮存在蓄电池中的直流电能需要时转变为交流电能供负载使用。目前许多UPS装置也采用了高频脉宽调制(PWM)技术。

变频技术是将一种频率的交流电能转变为其他频率或可调频率交流电能的手段,(AC→AC)广泛应用于交流异步电动机的变频调速和中频感应加热装置中。

在中、低频的变频调速系统中,主要使用普通晶闸管、快速晶闸管和可关断晶闸管。变频电路输出矩形波或阶梯波,工作频率一般在几千赫兹以下。采用正弦脉宽调制(SPWM)可使变频器的输出波形接近正弦,调制频率愈高波形愈接近正弦。常使用的调制频率在1~20 kHz之间。当采用的调制频率很高时,由于晶闸管、快速晶闸管和可关断晶闸管等器件因开关速度太慢,无法胜任工作,应选用功率晶体管和开关速度更快的场效应管(MOSFET, IGBT, SIT等)。但由功率晶体管和场效应管构成的变频装置因受限于元件的电流和电压定额,目前还不能做得很大。用于感应加热的变频装置,使用SIT或MOSFET已可制出频率为

kHz50~300kHz 的变流器。而在采用异步机的大型工业传动和电气列车中,使用 SCR 和 GTO 器件制成了兆瓦级的 PWM 交流装置,脉冲调制频率约为几百赫兹。

交流调压是将固定的交流电压转换成另一交流电压或转换成可调的交流电压。(AC→AC)变换时频率不变,可用于异步电动机的调压调速、温控系统以及调光装置中。使用电力电子器件构成的调压装置调节方便,反应迅速,还可作为无触点的交流开关使用。

斩波技术是将固定的直流电压转换成另一直流电压或可调直流电压的技术手段,(DC→DC)广泛应用于城市电车、地铁、矿山机车、蓄电池叉车、电加工机床等各种装置中。采用高频脉宽调制(PWM)技术的斩波器日见增多,调制频率自 1~100kHz 以上,装置功率较小时可采用 MOSFET。由于采用了 PWM 技术,使输出波形改善,滤波简单,因而使装置的体积大为减小。

利用电力电子器件做成的无触点开关可以方便地、可靠地控制和调节电能,传统的继电器、接触器将部分逐步被取代。

我国自 1962 年生产出第一只晶闸管之后,30 年来,已经发展了一批研究和生产电力电子器件与装置的研究单位和骨干企业,已经形成了一个比较完整的生产体系,为我国电力电子工业的发展作出了重要的贡献。

目 录

绪 论

第一章 晶闸管	(1)
第一节 晶闸管的结构	(1)
第二节 晶闸管的工作原理	(2)
第三节 晶闸管的特性	(5)
第四节 晶闸管的主要参数	(6)
习题与思考题	(13)
第二章 可控整流电路	(14)
第一节 单相可控整流电路	(14)
第二节 三相可控整流电路	(27)
第三节 整流电路性能分析	(35)
第四节 晶闸管可控整流器供电的直流电动机系统工作情况	(40)
第五节 多相可控整流电路	(44)
习题与思考题	(48)
第三章 有源逆变电路	(51)
第一节 有源逆变的概念	(51)
第二节 三相逆变电路	(53)
第三节 逆变状态下工作的直流电动机的机械特性	(60)
第四节 应用实例	(63)
习题与思考题	(70)
第四章 触发电路	(71)
第一节 对触发电路的要求	(71)
第二节 同步原理	(72)
第三节 单结晶体管移相触发电路	(75)
第四节 晶体管移相触发电路	(80)
第五节 模拟集成触发电路	(96)
第六节 数字式移相触发电路	(98)
习题与思考题	(101)
第五章 变频电路	(102)
第一节 变频器的基本原理	(102)
第二节 交-直-交变频器	(105)
第三节 交-交变频器	(115)
第四节 应用实例	(119)
习题与思考题	(121)

第六章 斩波电路	(122)
第一节 概述	(122)
第二节 逆阻型斩波器	(126)
第三节 逆导型斩波器	(130)
第四节 应用实例	(133)
第五节 交流斩控式调压原理	(135)
习题与思考题	(137)
第七章 交流调压电路	(139)
第一节 双向晶闸管	(139)
第二节 单相交流调压器	(143)
第三节 三相交流调压器	(147)
第四节 交流调功器	(153)
第五节 应用实例	(156)
习题与思考题	(158)
第八章 晶闸管变流装置主电路的设计和保护	(160)
第一节 主电路型式的选择	(160)
第二节 整流变压器参数的计算	(160)
第三节 晶闸管的选择	(164)
第四节 晶闸管的保护	(173)
第五节 电抗器参数的计算	(184)
第六节 设计实例	(187)
习题与思考题	(191)
第九章 门极可关断晶闸管(GTO)及其变流电路	(193)
第一节 门极可关断晶闸管(GTO)	(194)
第二节 GTO工作电路	(199)
第三节 GTO驱动电路	(203)
第四节 应用实例	(213)
习题与思考题	(216)
第十章 GTR 及其变流电路	(217)
第一节 功率晶体管(GTR)	(217)
第二节 GTR的直流电源	(226)
第三节 GTR的变频器	(237)
习题与思考题	(243)
第十一章 功率场效应管及其变流电路	(244)
第一节 功率场效应管	(244)
第二节 VDMOS 器件的基本工作电路	(247)
第三节 VMOS 变流电路	(248)
习题与思考题	(250)
参考文献	(251)
附录——文字和图形符号	(252)

第一章 晶 闸 管

晶闸管^①，是硅晶体闸流管的简称。晶闸管包括普通晶闸管 (Conventional Thyristor)，快速晶闸管(Fast Switching Thyristor)，双向晶闸管(Bidirectional Thyristor)，可关断晶闸管(Gate Turn Off Thyristor)，光控晶闸管(Light Activated Thyristor)和逆导晶闸管(Reverse Conducting Thyristor)。由于普通晶闸管应用最普遍，故通常用晶闸管总称来代替普通晶闸管的名称。本书如不特别说明，则所说的晶闸管就指普通晶闸管。其它晶闸管将在有关章节作介绍。

第一节 晶闸管的结构

一般生产的晶闸管，从外形上来分，有两种形式：螺栓式和平板式。文字符号用VT(V)表示，电路图形符号如图1-1。

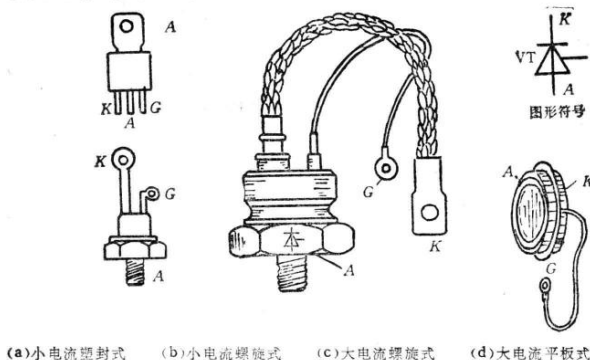


图 1-1 晶闸管的结构及符号

这两种形式的晶闸管都有三个电极：阳极A，阴极K和门极（或称控制极）G。大功率晶闸管工作过程中会有损耗，因而产生热量，功率大产生热量多，因此必须安装散热器，依靠与晶闸管紧密联接的散热器，将热量传递给冷却介质。

螺栓式晶闸管的阳极是一个螺栓，使用时把它拧紧在散热器上，目前100A以下的小容量晶闸管多采用这种结构，有些200A的晶闸管也采用这种结构。平板式晶闸管的中间金属环是门极，二侧面分别为阳极和阴极，区分的方法是阴极距门极比阳极近。使用时，两个彼

^① 也有称为“硅可控元件”的，系取自英文名Silicon Controlled Rectifier，简写作SCR。

此绝缘的槽形形状散热器把管子的阳极与阴极紧紧夹住。这种结构的散热效果好，目前大部分200A 和所有300A 以上的晶闸管多采用这种结构。见图1-2。

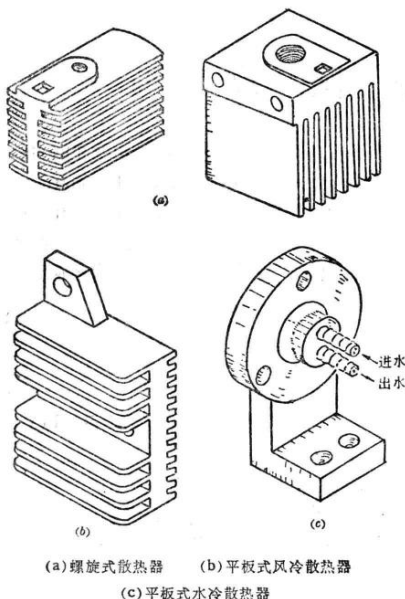


图 1-2 晶闸管的散热器

晶闸管的内部原理性结构，见图1-3所示。它是由四层半导体 (P_1, N_1, P_2, N_2) 形成的三个PN结 (即 J_1, J_2 和 J_3) 和三个引出端 (A, K, G) 构成的半导体器件。上层的 P_1 引出阳极 A，下层的 N_2 引出阴极 K，中间的 P_2 引出门极 G。管芯是由硅半导体材料做成的圆形薄片，它决定了晶闸管的性能。铝片和铜片作为衬底。

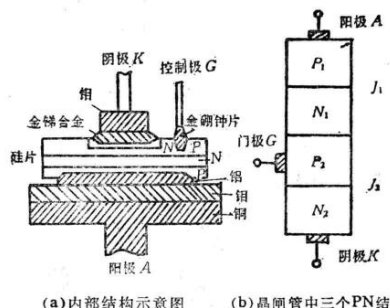


图 1-3 晶闸管的结构

第二节 晶闸管的工作原理

晶闸管 VT 在工作过程中，它的阳极 A 和阴极 K 与电源和负载连接，组成晶闸管主电路；晶闸管的门极 G 和阴极 K 与控制晶闸管的装置连接，组成触发电路。

为了弄清晶闸管工作的条件，现按图1-4 电路做实验。主电源 E_a (6V) 和门极电源 E_g (3V) 通过双刀双掷开关 Q_1, Q_2 可正向或反向作用于晶闸管有关的电极。实验得到的结果，如下：

1. 当晶闸管承受反向电压时，即 Q_1 置于反向位置时，不论门极接上什么样的电压，指示灯都不亮，说明晶闸管不导通。晶闸管这种状态称为反向阻断状态，即关断状态，这与普通二极管的反向截止有些相似。

2. 当晶闸管承受正向电压时，即 Q_1 接通正向。门极电压分三种情况：第一种是门极不接电压，结果灯不亮，晶闸管不导通；第二种是门极接上反向电压，即 Q_2 接通反向，结果灯也不亮，晶闸管也没有导通。通常把晶闸管阳极承受正向电压而不导通的状态称为正向阻断状态；第三种是在门极上接一个数值不大的正向电压，即 Q_2 接通正向，结果灯亮了，

说明晶闸管已导通。

通过以上实验可以看出，晶闸管导通必须具备以下两个条件：第一，晶闸管接正向电压；第二，门极同时接正向电压。

3. 晶闸管一旦导通之后，即使降低门极电压甚至切断门极的电源，晶闸管也不阻断，门极失去控制作用。

4. 晶闸管在导通情况下，逐渐调节变阻器 R ，使主回路电压或流过负载电流逐渐减少，观察毫安表读数，当指针突然回到零，说明晶闸管已关断。毫安表所观察到的最小阳极电流称为晶闸管的维持电流 I_H 。

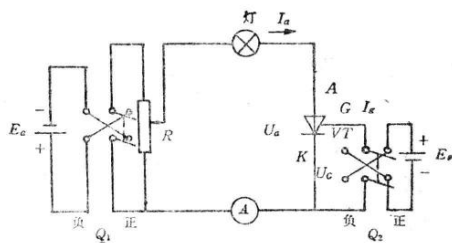


图 1-4 晶闸管 VT 导通关断条件实验电路

晶闸管导通以后的管压降很小，一般在 $1V$ 左右，加到门极的电压一般只有几伏，门极电流也很小，一般只有几到几百毫安，但是经过晶闸管这个开关接通或关断的电流却很大，甚至可以大到千安以上，电压也可以达到几千伏。因此，从功率放大角度来看，它的放大倍数可以大到万倍以上，所以被广泛应用于强电系统。

晶闸管为什么有上述性质？现在从内部结构来进行分析：晶闸管有三个 PN 结，可以把它中间的 N_1 和 P_2 分为两部分，构成一个 PNP 型三极管和一个 NPN 型三极管的复合管，如图 1-5 所示。阳极 A 是 V_2 管的发射极，阴极 K 是 V_1 管的发射极， V_1 的基极和 V_2 的集电极连在一起成为门极 G，而 V_1 的集电极和 V_2 的基极连在一起。

如果能在晶闸管的阳极和阴极之间加正向电压 E_a ，即 A 接电源的正极，K 接负极，则两个晶体管的集电极电压的极性都是正确的。设 PNP 管和 NPN 管的集电极电流相应为 I_{C2} 和 I_{C1} ；发射极电流相应为 I_e 和 I_s 。

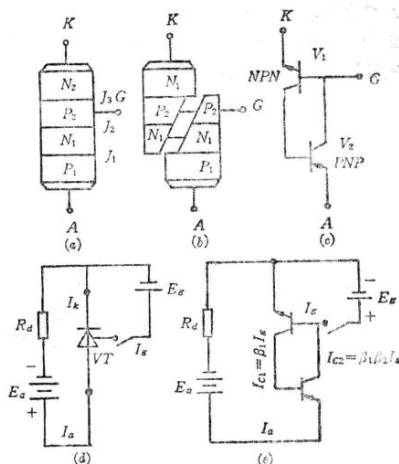


图 1-5 晶闸管的工作原理

按图 1-5 (d)(e)所示接线。当闭合开关 Q 在门极端加上正向电压 E_g 时,就会产生门极触发电流 I_g ,它相当于 V_1 管的基极电流 I_{B1} ,如果 V_1 管的电流放大系数是 β_1 ,那么在 V_1 管集电极中会产生一个放大的电流 $I_{C1} = \beta_1 I_{B1} = \beta_1 I_g$ 。而这个电流就是 V_2 管的基极电流 I_{B2} ,再经 V_2 管放大,在 V_2 管集电极得到更大的电流 $I_{C2} = \beta_2 I_{B2} = \beta_1 \beta_2 I_g$ 。该电流又流入 V_1 管的基极,于是重复上述过程,不断循环,每经过一次循环,管中电流增大 $\beta_1 \beta_2$ 倍。(由晶体管知识可知,晶体管 V_1 、 V_2 的 β 值与通过发射极电流有关,见图 1-6, $\beta = f(I_E)$ 曲线。)当晶闸管 I_g 增大到一定程度满足 $\beta_1 \beta_2 > 1$ 时,即使撤去 I_g ,也会形成强烈的正反馈过程即:

$$I_g \rightarrow I_{B1} \rightarrow I_{C1} (= \beta_1 I_{B1} = \beta_1 I_g) = I_{B2} \rightarrow I_{C2} (= \beta_2 I_{B2} = \beta_1 \beta_2 I_g) \rightarrow \dots$$

瞬时,使二个三极管饱和导通即晶闸管导通,通常把这个过程称为触发导通过程。导通以后,晶闸管的阳极电流 I_a 很大,而管压降又很小(约 1 V 左右),此时外加电压 E_g 基本上都降落在负载电阻 R_d 上。

晶闸管导通以后, V_1 管中的基极电流比原来外加的电流 I_g 大得多,所以即使此时将门极电压去掉,晶闸管仍然导通,因此,为使晶闸管由阻断状态变成导通,门极电压只需一个正的触发脉冲。这个电压常称为触发脉冲电压。

那么,又如何使晶闸管由导通变为阻断的状态呢? 只能通过降低电流电压 E_a 或增加负载电阻 R_d 或改变电源电压极性等方法,使阳极电流 I_a 减小。一旦减小到某一数值就能使晶闸管阻断。这是由于当 I_a 减小时,相当于三极管 V_1 、 V_2 的电流随着减小,由图 1-6 可知,当 I_E 很小时, β 值下降。若 $\beta_1 \beta_2 < 1$ 则图 1-5 中两个三极管不断反复循环,电流将愈来愈小,因而很快使晶闸管阻断。

同时也可知道,若门极不加正向触发电压,正常时晶闸管承受的正向电压 U_a 不得超过额定电压,这时由于正向漏电流很小使 $\beta_1 \beta_2 < 1$,晶闸管处在正向阻断状态。如果使正向电压 U_a 超过额定电压达到某一数值时,由于正向漏电流的增大使 $\beta_1 \beta_2 > 1$,结果也会导致晶闸管导通。此时阳极所加的最大正向电压称为晶闸管的自然正向转折电压 U_{BO} 。

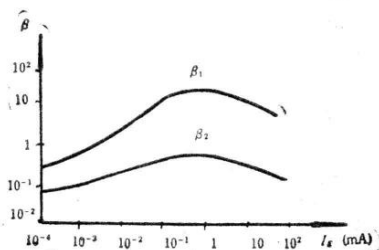


图 1-6

若晶闸管加反向电压时, 由于两个三极管的集电极电压极性反接, 因此都不能放大, 管子中只有较少的反向漏电流, 晶闸管处于阻断状态。

这就是晶闸管导通和关断的物理过程。

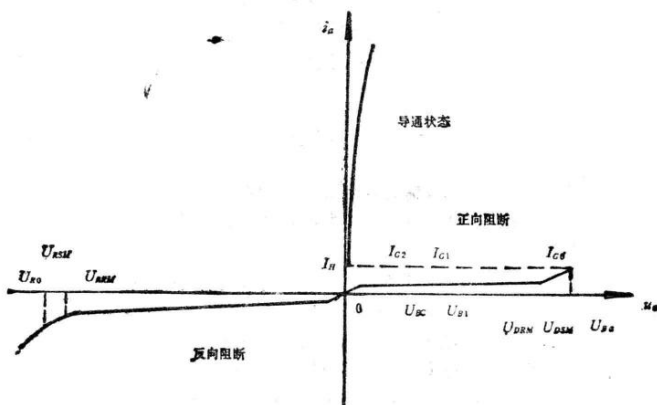
第三节 晶闸管的特性

晶闸管相当于一个可以控制的单向开关。从使用的角度来说, 我们最关心的是它的外部特性, 即在关断状态下能够承受多大电压; 它在导通时能够通过多大电流; 导通时晶闸管本身有多大压降; 要使它由阻断变为导通, 门极需加多大的电压和电流; 晶闸管还有其它哪些基本参数等。

本节先讨论晶闸管的伏安特性和晶闸管门极的伏安特性。下一节再讨论晶闸管的一些主要参数。

一、晶闸管的伏安特性

晶闸管的阳极伏安特性是指阳极与阴极之间电压和阳极电流的关系, 简称晶闸管的伏安特性。如图 1-7 所示。



U_{RO} ——反向击穿电压; U_{RSM} ——断态反向不重复峰值电压; U_{RRM} ——断态反向重复峰值电压;
 U_{BO} ——正向转折电压; U_{DSM} ——断态正向不重复峰值电压; U_{DRM} ——断态正向重复峰值电压。

图 1-7 晶闸管伏安特性

正向伏安特性曲线如图 1-7 的第 I 象限所示。图中当 $I_G=0$, 晶闸管正向电压未增到正向转折电压 U_{BO} 时, 元件都处在正向阻断状态, 其正向漏电流很小, 但随着阳极电压 U_a 增大而增加, 当 U_a 增到 U_{BO} 时, 电流剧增, 特性从高阻区(正向阻断状态), 经负阻区(虚线), 到达低阻区, 晶闸管就被导通。导通后元件的伏安特性与整流二极管正向伏安特性相似。这条 $I_G=0$ 特性曲线, 称为晶闸管的自然伏安特性曲线。正常工作时不允许正向电压增加到自然转折电压使管子导通, 而是靠给门极输入足够的触发电流 I_G , 使晶闸管导通的。门极电流 I_G 愈大, 阳极电压转折点愈低。如图 1-7 所示, $I_{G2} > I_{G1} > I_G$, 相应的 $U_{B2} < U_{B1} < U_{BO}$ 。在

晶闸管导通后，逐步减小阳极电流 I_a ，当 I_a 小于维持电流 I_H 时，晶闸管由导通变为阻断。

反向伏安特性曲线如图 1-7 第三象限所示，它与整流二极管的反向伏安特性相似。若反向电压增加到反向击穿电压 U_{RO} 时，漏电流剧增，会导致反向击穿，造成晶闸管永久性的损坏。使用时晶闸管两端可能承受反向峰值电压必须小于管子的反向击穿电压，否则管子将被损坏。

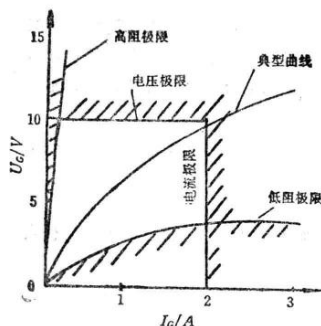


图 1-8 5A 晶闸管门极特性曲线

实际的晶闸管在正向阻断和反向阻断时它的电阻不是无穷大，断态时存在漏电流；正向导通时晶闸管的电阻也不是零，存在管压降；晶闸管在使用时电压不得超过规定值，电流也不能超过允许值（晶闸管的损耗和温升不致超过允许值）。

二、晶闸管门极的伏安特性

晶闸管的门极和阴极间有一个 PN 结 J_3 ，见图 1-3(b)，它的伏安特性称门极伏安特性。它的正向特性不象普通二极管具有很小的正向电阻及较大的反向电阻，有时它的正反向电阻是很接近的。又因为元件存在着较大的离散性，所以同一型号的晶闸管表现出高阻或低阻的不同特性，多数是介于两者之间如图 1-8 所示。

第四节 晶闸管的主要参数

为了正确地使用晶闸管，不仅需要定性地了解晶闸管的伏安特性，更重要的是定量地掌握晶闸管的主要参数。现就经常提到的主要参数介绍如下(见表 1-1)：

一、额定电压 U_r

从图 1-7 中元件自然阳极伏安特性曲线可见，当门极断开，元件处在额定结温时，所测定的正向不重复峰值电压 U_{DSM} ，反向不重复峰值电压 U_{RSM} 各乘 0.9 所得的数值，分别称为元件的正向阻断重复峰值电压 U_{DRM} 和反向阻断重复峰值电压 U_{RRM} 。至于正反向不重复峰值电压和相应的转折电压 U_{RO} ，击穿电压 U_{RO} 的差值，一般由晶闸管制造厂自定。这里的“重复”指重复率为每秒 50 次，能够经受一定限度操作过电压的持续时间不大于 10ms。测试条件的“额定结温”指晶闸管在正常工作条件下允许的 PN 结最高温度。100A 以上的晶闸管为 125°C，50A 以下为 100°C。

所谓元件的额定电压 U_r ，是指 U_{DRM} 与 U_{RRM} 中较小的值，再取相应于标准电压等级表 1-2 中偏小的电压值。例如，某晶闸管实测 $U_{DRM}=734V$ ， $U_{RRM}=810V$ ，取两者中小的数值 734V，按表 1-2 只能取 700V，作为该晶闸管的额定电压 700V 即 7 级。

由于晶闸管的额定电压是瞬时值，若超过反向击穿电压，就会造成元件永久性损坏。若超过正向转折电压，元件就会误导通。同时元件的耐压还会随着结温升高或散热条件恶化而下降，因此，在选择晶闸管的额定电压时应为元件在工作电路中可能承受到的最大瞬时值电压的 2~3 倍较安全，即

$$U_r = (2 \sim 3) U_m$$

表 1-1 晶闸管的主要参数

通态平均电 流 $I_{T(AV)}$	断态正反向重 复峰值电压 $U_{DRM} U_{RRM}$	断态·正反向重 复峰值电流 $I_{DRM} I_{RRM}$	维持电流 I_H	通态峰 值电压 U_{Tm}	工作结温 T_j	断态电压 临界上升 率 du/dt	通态电流 临界上升 率 di/dt	浪涌电流 I_{Tsm}		
A	V	mA	mA	V	℃	V/ μ s	A/ μ s	kA		
1	50~1000	≤ 3	≤ 10	≤ 2.0	-40~ +100	25~800	25~50	L级 H级 0.12 0.20		
3	100~2000	≤ 8	≤ 30	≤ 2.2				0.036 0.056		
5			≤ 60					0.064 0.09		
10		≤ 10	≤ 100					0.12 0.19		
20								0.24 0.38		
30	100~2400	≤ 20	≤ 150	≤ 2.4		50~1000		0.36 0.56		
50									0.64 0.94	
100	100~300	≤ 40	≤ 200	≤ 2.6	-40~ +125	100~1000	25~100	1.3 1.9		
200			50~200				2.5 3.8			
300		≤ 50					3.8 5.6			
400		≤ 300					50~300	5.0 7.5		
500								6.3 9.4		
600							7.6 11			
800							50~500	10 15		
1000								13 18		

取表 1-2 相应电压标准等级。

表 1-2 晶闸管的正反向重复峰值电压标准等级

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)
1	100	8	800	20	2000
2	200	9	900	22	2200
3	300	10	1000	24	2400
4	400	12	1200	26	2600
5	500	14	1400	28	2800
6	600	16	1600	30	3000
7	700	18	1800		

二、通态平均电流 I_T (元件的额定电流)

在室温 40℃ 和规定的冷却条件下, 元件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, 当结温不超过额定结温且稳定时, 所允许的最大通态平均电流, 称为额定通态平均电流 I_T 。将此电流按晶闸管标准电流系列取相应的电流等级(见表 1-1), 称为元件的额定电流。

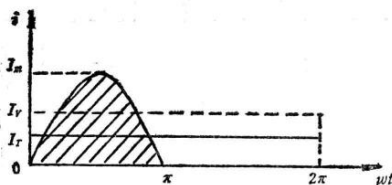


图 1-9 晶闸管的通态平均电流、有效值及最大值三者之间关系

按上述 I_T 的定义, 由图 1-9 可分别求得正弦半波电流平均值 I_T , 电流有效值 I_V 和电流最大值 I_m 的三者关系

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

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

各种有直流分量的电流波形, 其电流波形的有效值 I_V 与平均值 I_{Va} 之比, 称为这个电流的波形系数, 用 K_f 表示为

$$K_f = \frac{I_V}{I_{Va}} \quad 1-4$$

因此, 在正弦半波情况下电流波形系数为

$$K_f = \frac{I_V}{I_T} = \frac{\pi}{2} = 1.57 \quad 1-5$$

例如, 对于一只额定电流 $I_T = 100A$ 的晶闸管, 按 1-5 式其允许的电流有效值应为 157A。

晶闸管允许流过电流的大小主要取决于元件的结温, 在规定的室温和冷却条件下, 结温的高低仅与发热有关, 造成元件发热的主要因素是流过元件的电流有效值和元件导通后管芯的内阻, 一般认为内阻不变, 则发热取决于电流有效值^①。因此在实际中选择晶闸管额定电流 I_T 应按以下原则:

所选的晶闸管额定电流有效值 I_{Tn} 大于元件在电路中可能流过的最大电流有效值 I_{Vm} 。考虑到元件的过载能力比一般电机电器产品小得多, 因此, 选择时考虑 1.5~2 倍的安全余量是必要的, 即

$$I_{Tn} = 1.57 I_T = (1.5 \sim 2) I_{Vm}$$

所以取表 1-1 相应的标准系列值

$$I_T = (1.5 \sim 2) \frac{I_{Vm}}{1.57} \quad 1-6$$

可见在实际使用时, 不论元件流过的电流波形如何, 导通角有多大, 只要遵循 1-6 式来

^①为什么不用电流有效值来衡量晶闸管的电流容量, 这是由于整流装置额定输出的电流习惯上都用直流平均值来标定。在实际产品检验中, 使用直流电表测试工频正弦半波情况下的晶闸管负载能力比较方便直观。所以, 晶闸管的额定电流用一定条件下的最大通态平均电流来考核较为有利。