



普通中等专业教育机电类规划教材

电力电子变流技术

郑忠杰 吴作海 编

第2版

机械工业出版社





中国中等专业教育机电教材系列

电力电子变流技术

陈维平 廖文海 编

第2版



机械工业出版社



普通中等专业教育机电类规划教材

电力电子变流技术

第 2 版

郑忠杰 吴作海 编



机械工业出版社

本书是在1989年出版的中等专业学校试用教材《晶闸管交流技术》的基础上修订的。

本书主要内容为晶闸管、单相可控整流与触发电路、三相可控整流与触发电路、有源逆变电路、交流开关与交流调压、新型全控功率电力电子开关器件及其应用、变频器与斩波器、主电路的选择与保护以及实验指导等。全书针对中专的教学，精选内容，以定性分析为主，具有理论联系实际与突出实用的特点。

本书可作为中等专业学校工业企业电气化、电气技术、电子应用等专业的教材，亦可供中等职业技术学校有关专业师生及工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力电子变流技术/郑忠杰, 吴作海编. —2 版

—北京: 机械工业出版社, 1999.10

普通中等专业教育机电类规划教材

ISBN 7-111-05576-4

I. 电… II. ①郑…②吴… III. 变流器—专业学校—教材 IV. TM46

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 14255 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 王玉鑫 贡克勤 版式设计: 张世琴 责任校对: 熊天荣

封面设计: 郭景云 责任印制: 洪汉军

北京中兴印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2004 年 7 月第 2 版第 20 次印刷

787mm×1092mm $1/16$ ·17.5 印张·423 千字

定价: 22.50 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

前 言

本书是在原中等专业学校试用教材《晶闸管变流技术》的基础上,根据新制定的机械中专“电力电子变流技术”课程大纲;进行全面修订的,可作为中等专业学校工业企业电气化专业教材,也可供各类中等职业技术教育相关专业师生及电气工程技术人員参考。

本教材主要内容包括晶闸管元件、可控整流主电路及触发电路、主电路计算与保护、有源逆变、交流调压、逆变器和直流斩波等。为适应新技术发展,对自关断电力电子器件及其应用也做了适当介绍。书末还附有课程实验指导书及有关附录等。

编者在全书修订中力求体现中专教学特点,做到“注重基础、精选内容、定性为主、方便教学”。在总体保留原书体系的基础上,对部分内容做了适当精简,其中第七章做了较大变动,增加了大功率晶体管、可关断晶闸管、场效应晶体管以及绝缘门极晶体管等全控型变流器件的介绍,补充了这些器件在逆变、直流斩波中的应用实例,尤其对脉宽调制逆变器做了适当讲解。书中注有*部分,各校可根据学时选讲。

现阶段半导体变流技术已远远超出了应用晶闸管的范围。参照机械中专电类专业教学指导委员会提出的“工业企业电气化”专业教学计划,为与当前学科名称一致,本书书名改为《电力电子变流技术》。

本书由福建高级工业专门学校郑忠杰高级讲师编写第一、二、三、四、七、八章及附录并对全书进行了审校。山东省机械工业学校吴作海高级讲师编写第五、六章。北京机械工业学院栗书贤副教授主审。参加审稿的还有申鸿光、王文郁、石玉、刘致舜等同志。他们对本书提出了许多宝贵意见,编者对此表示衷心感谢。

限于水平与经验,疏漏与错误之处在所难免,恳切希望广大读者批评指正。

编 者

目 录

前言		第四章 主电路的计算和保护	105
绪论	1	第一节 晶闸管的查表选择法	105
第一章 晶闸管	4	第二节 整流变压器额定参数计算	109
第一节 晶闸管的结构和工作原理	4	第三节 平波电抗器电感量的计算	113
第二节 晶闸管的阳极伏安特性和主要参数	8	第四节 晶闸管的过电压保护	115
第三节 晶闸管的门极伏安特性及主要参数	13	第五节 晶闸管的过电流保护及电压、电流上升率的限制	123
第四节 晶闸管的测试与使用	14	第六节 晶闸管的串联与并联	126
思考题与习题	15	思考题与习题	129
第二章 单相可控整流电路	17	第五章 有源逆变电路	130
第一节 单相半波可控整流电路	17	第一节 有源逆变的基本工作原理	130
第二节 单相全波和全控桥可控整流电路	26	第二节 三相有源逆变电路	133
第三节 单相半控桥可控整流电路	30	第三节 逆变失败原因及最小逆变角的确定	140
第四节 对触发电路的要求	36	第四节 晶闸管直流可逆拖动系统	143
第五节 单结晶体管触发电路	37	第五节 绕线转子异步电动机的串级调速与高压直流输电	157
第六节 简易触发电路	46	第六节 变流装置的功率因数	162
第七节 单相可控整流应用实例	51	思考题与习题	167
思考题与习题	56	第六章 交流开关与交流调压电路	168
第三章 三相可控整流电路	58	第一节 双向晶闸管	168
第一节 三相半波可控整流电路	58	第二节 晶闸管交流开关	176
第二节 三相全控桥可控整流电路	66	第三节 单相交流调压	181
第三节 三相半控桥可控整流电路	70	第四节 三相交流调压	185
第四节 带平衡电抗器的双反星形可控整流电路	74	思考题与习题	191
第五节 变压器漏抗对可控整流电路的影响	78	第七章 自关断器件与变频、斩波电路	193
第六节 晶闸管可控整流供电的直流电动机机械特性	81	第一节 自关断电力电子器件	193
第七节 同步电压为正弦波的触发电路	85	第二节 自关断器件的驱动电路	198
第八节 同步电压为锯齿波的触发电路	90	第三节 自关断器件的保护	202
第九节 集成触发器和计数式触发器	94	第四节 变频器的基本概念	204
第十节 触发电路与主电路电压的同步	98	第五节 负载谐振式逆变器	206
第十一节 脉冲变压器与防止误触发的措施	101	第六节 三相逆变器	209
思考题与习题	102	第七节 脉宽调制 (PWM) 型逆变电路	215
		第八节 KGP 系列晶闸管中频装置	220
		第九节 直流斩波电路	226

思考题与习题	232	实验七 单相交流调压电路的研究	253
第八章 电力电子变流技术实验	233	实验八 单相并联逆变器的研究	255
实验一 晶闸管的简易测试及其导通、 关断条件	234	附录	258
实验二 单结晶体管触发电路及单相半 控桥整流电路三种负载的研究	236	附录 A ZP 型硅整流二极管	258
实验三 正弦波同步触发电路与三相半波 可控整流电路的研究	239	附录 B GTR 与 GTO 主要参数	259
实验四 锯齿波同步触发电路与三相全 控桥电路的研究	245	附录 C 自关断模块器件的型号及参数	260
实验五 三相半控桥整流电路的研究	248	附录 D 电力电子变流技术实验装置 简介	264
实验六 三相半波（零式）有源逆变电路 的研究	251	附录 E 本书常用图形符号与文字符号 表	266
		附录 F 本书主要符号说明	270
		参考文献	271

绪 论

晶闸管是一种大功率半导体器件，它的最大特点是容量大、电压高、损耗小、控制灵便、易实现自动控制，是大功率电能变换与控制的较理想器件。电能的变换技术，包括电压、电流和频率的变换，统称“变流技术”。

电力电子器件，是由半导体材料制成的一系列固态高电压大电流开关器件，晶闸管仅是系列中最早研制成功，当今应用最广泛的一种。它的问世，使电子技术进入了强电领域，这不仅使强电变流更带来了方便和可靠，而且节约了大量电能。自 60 年代以来，这一技术获得迅速发展，形成了电力电子学科，并成为当今电力电子变流技术发展的基础。可以认为，电力电子学就是应用在电力技术领域中的电子学，它是电气技术中三大主要领域——电力、电子和控制相结合的边缘学科。

一、电力电子变流技术发展概况

1958 年，美国通用电气公司首先研制成功第一个工业用的普通晶闸管，它标志着电力电子技术的诞生，并进入了以电力电子器件为主的变流技术时代。

普通晶闸管存在着无法控制关断的缺点，这给有些变流领域带来使用不方便、电路复杂、工作频率低等欠缺。30 多年来，随着半导体制造技术和变流技术的发展，相继研制成功了电力晶体管 (GTR)、可关断晶闸管 (GTO)、大功率场效应晶体管 (MOSFET) 以及绝缘门极晶体管 (IGBT) 等具有自关断、高电压、大电流、频率高的全控型电力电子器件，推进了变流技术进一步向前发展。当今交流变频高新技术正在蓬勃发展，电力牵引直流电动机的直流斩波调速也得到了迅猛发展。电力电子器件还将向着更大电流、更高电压、更高频率、更容易控制和更低管耗方向发展。

目前各类电力电子器件已达到的水平为：

普通晶闸管	12kV、1kA；4kV、3kA。
可关断晶闸管	9kV、1kA；4.5kV、4.5kA。
逆导晶闸管	4.5kV、1kA。
光控晶闸管	6kV、2.5kA；4kV、5kA。
大功率晶体管	1kV、200A。
大功率场效应晶体管	1kV、38A。
绝缘门极晶体管	1.6kV、1.6kA。

我国自 1962 年首次研制成功晶闸管以来，以晶闸管为主体的电力电子变流技术同样也得到了迅猛发展，目前已有许多专业厂家大规模生产各种类型的晶闸管，单管电流可达 2000A，电压可达 4000V 以上。派生的晶闸管器件如双向晶闸管、快速晶闸管、可关断晶闸管、逆导晶闸管等系列产品均有供应。还有如大功率晶体管 (GTR)、大功率场效应晶体管 (MOSFET) 等也都在积极开发生产。电力电子变流技术已普及到我国国民经济的各个领域，不仅有许多定点生产厂、专业人才以及专门的科研机构，而且还有许多专业化的变流装置正在朝着标准化、系列化、可靠性更高的方向发展。

二、电力电子变流技术应用的几个方面

（一）可控整流

把不变的交流电压变换成可调的直流电压。例如，直流电动机的调压调速、电镀、电解电源均可采用可控整流电源供电。

（二）有源逆变

把直流电变换成与交流电网同频率的交流电，并将直流电能回馈给交流电网。例如，目前世界许多国家正在迅速发展的高压直流输电工程，即将三相高压交流电先变换成高压直流电，再进行远距离或海底输电，输送到目的地后再利用晶闸管有源逆变技术变换成与当地电网同频率的交流电。又如，绕线转子异步电动机的串级调速，不仅可实现无级调速，而且还可节约大量电能。

（三）交流调压

把不变的交流电压变换成电压有效值可调的交流电压。例如，用于灯光控制、温度控制以及交流电动机的调压调速就是利用交流调压技术。

（四）逆变器（变频器）

把电网的交流电变换成频率和幅度均可调的交流电供给负载，通常是先将电网的交流电变换成直流电（可控或不可控），然后再变换成电压、频率均可调的交流电。例如，晶闸管中频电源、不停电电源、异步电动机变频调速等。

（五）直流斩波

把固定的直流电压变换成可调的直流电压。例如，由直流架空线供电的城市电车斩波调速、电气机车、地铁牵引直流电动机斩波调速等。它与以往串电阻调速相比，不仅控制方便而且节省电能。

（六）无触点功率静态开关

用晶闸管取代接触器、继电器用于操作频繁的场所。例如，用在电动机频繁地正反转、防爆防火的场合。

三、本课程的任务与要求

本课程是工业企业电气化专业基础性很强的主干专业课之一。本课程主要介绍普通晶闸管、可控整流、触发电路、有源逆变、交流调压、各种逆变器和直流斩波等电路的基本理论知识，同时对晶闸管电路的过电流、过电压等保护也给予了适当介绍。对自关断电力电子器件如 GTO、GTR、IGBT 及 MOSFET 以及由其组成的逆变器、斩波器都作了介绍。通过实验、实习等实践环节，培养具有对变流装置实验调试和维修的初步能力，对一般可控整流电路具有设计计算能力。学完本课程应达到下列要求：

- 1) 掌握晶闸管的基本原理及主要参数。
- 2) 掌握常用的可控整流电路和有源逆变电路的基本原理、波形画法、各电物理量计算以及过电压、过电流等保护方案的选择。
- 3) 掌握常用的触发电路工作原理、波形分析，并能根据不同要求选择合适的触发电路。
- 4) 对一般可控整流电路能正确接线、正确掌握同步定相方法、并具有调试和排除一般故障的能力。对于一般的变流装置，能根据产品说明书，对照实物弄清原理，正确使用。
- 5) 熟悉无源逆变（即变频）、交流调压、直流斩波等电路的基本工作原理。
- 6) 对自关断电力电子器件能有一般了解，对自关断电力电子器件的逆变器与直流斩波器

工作原理应有较熟悉的了解。

本课程内容丰富，涉及到高等数学、电工基础、电子技术基础、电机与拖动基础等多学科的基础知识，因此，学习本课程要注意基础知识的复习和综合运用。在讲授和学习方法上要特别着重物理概念与电路的基本分析方法。要重视实验、识图等应用能力的培养。

第一章 晶 闸 管

晶闸管原称可控硅，是硅晶体闸流管的简称。它是近 30 年发展起来的一种较理想的大功率变流新器件。它的出现使大功率变流技术进入一个新时代。

晶 闸 管 包 括 普 通 晶 闸 管 (Conventional Thyristor)、双 向 晶 闸 管 (Bidirectional Thyristor)、快 速 晶 闸 管 (Fast Switching 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，故本章着重介绍普通晶闸管。其它晶闸管将在有关章节作简要介绍。本书如不特别说明，则所说的晶闸管就指普通晶闸管。

第一节 晶闸管的结构和工作原理

一、晶闸管的结构

目前大功率的晶闸管，外形结构有螺旋式和平板式两种，如图 1-1 所示。平板式又分为风冷式和水冷式。

晶闸管有三个电极：阳极 A、阴极 K 和门极 G。螺旋式晶闸管的阳极是紧栓在铝制散热器上的，而平板式是由二个彼此绝缘的相同形状散热器把管子的阳极与阴极紧紧夹住，如图 1-2 所示。

螺栓式的安装、更换管子方便，但仅靠阳极散热器散热效果较差。平板式由于阳极、阴极均装有散热器，散热效果好，但安装、更换管子较困难。两者比较见表 1-1。

晶闸管的内部结构、原理结构如图 1-3 所示。它的管芯由四层 ($P_1N_1P_2N_2$) 三端 (A、K、G) 半导体器件构成，具有三个 PN 结，即 J_1 、 J_2 和 J_3 。因此管芯可以用三个二极管串联来等效，如图 1-3b 所示。也可以把图 1-3a 中间层的 N_1 和 P_2 分为两部分，构成一个 $P_1N_1P_2$ 型三极管和另一个 $N_1P_2N_2$ 型三极管的互补作用来等效，如图 1-3c 所示。

二、晶闸管是怎样工作的

为了弄清晶闸管导通和关断条件，可按图 1-4 电路做实验。

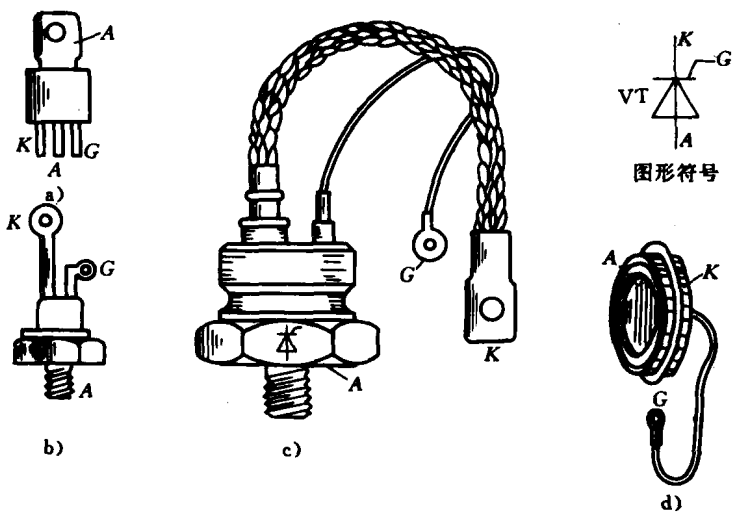


图 1-1 晶闸管的结构及符号
a) 小电流塑封式 b) 小电流螺旋式
c) 大电流螺旋式 d) 大电流平板式

晶闸管的阳极 A 经负载（白炽灯）、变阻器 R 、双向刀开关 Q_1 （已接通正向）接至电源 E_a 的正极，元件的阴极 K 经毫安表、双向刀开关 Q_1 接至电源 E_c 的负极，组成晶闸管主电路，用粗线表示。流过晶闸管阳极的电流为 I_a 。晶闸管阳、阴极两端电压，称阳极电压 U_a 。

晶闸管门极 G 经双向刀开关 Q_2 （未合上）接至门极电源 E_g ，元件的阴极 K 经 Q_2 与 E_g 另一端连接，组成晶闸管的触发电路，用细线表示。流过门极的电流为 I_g ，门极与阴极之间的电压称门极电压 U_g 。

在门极不加正向电压时（ Q_2 刀开关未投向正），灯是不亮的，说明晶闸管处在阻断状态（Blocking state）。若 Q_2 接通正向，门极就承受正向电压，当流入一定的电流 I_g （称触发电流）时，灯就亮了，这表明晶闸管已导通。一旦晶闸管导通后，即使再断开门极刀开关 Q_2 ，灯仍然亮着。由此可见，晶闸管一旦被触发导通后，门极就失去控制作用。如果改变电源 E_a 的极性（ Q_1 投合反向），或者门极加反向电压（ Q_1 投合反向），灯是不会亮的，此时说明晶闸管处在截止状态。

以上实验说明，晶闸管像整流二极管一样，具有单向导电特性，电流只能从阳极流向阴极，当元件阳极加上反向电压时，只有微小的反向漏电流从阴极流向阳极，晶闸管处于反向阻断状态。另外晶闸管又不同于整流二极管，它具有正向导通的可控特性。当元件阳极加上正向电压时，元件还不能导通，仍处于正向阻断状态，这是整流二极管不具有的。要使晶闸管导通

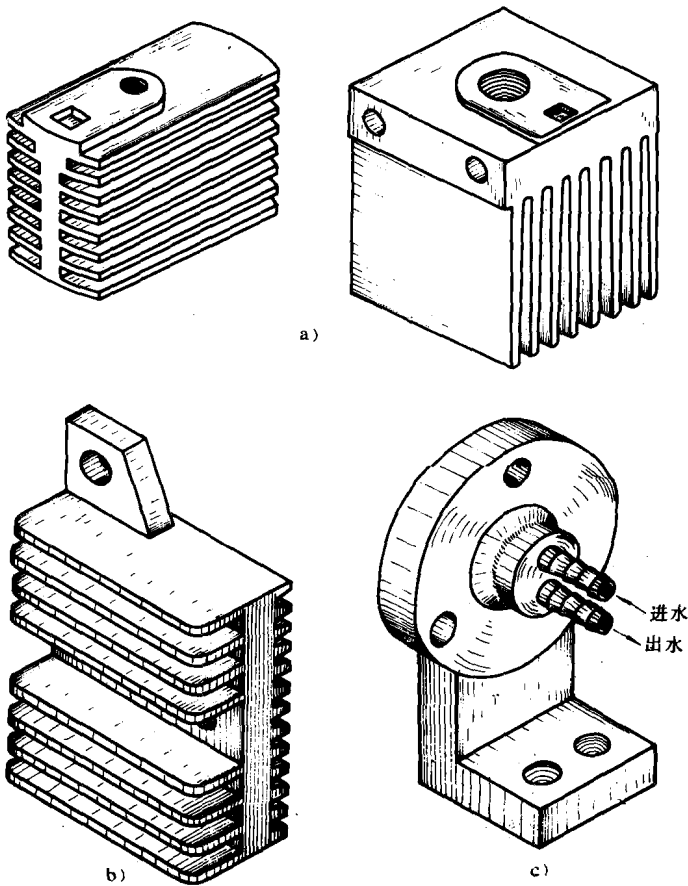


图 1-2 晶闸管的散热器

a) 螺旋式散热器 b) 平板式风冷散热器 c) 平板式水冷散热器

表 1-1 螺栓式与平板式晶闸管的比较项目

型 式 比 较	螺 栓 式	平 板 式	
		风 冷	水 冷
阳 极	带散热器	阳、阴极都装有相同的风冷散热器	阳、阴极都装有相同的水冷散热器
阴 极	不带散热器		
门 极	细小硬导线或软线引出	用细小软导线引出，并且比较靠近阴极	
优 缺 点	易安装和更换但散热差	散热好，但安装、交换麻烦，还须安装冷却装置	
适 用 场 合	一般用于 100A 以下	一般用于超过 200A 时	

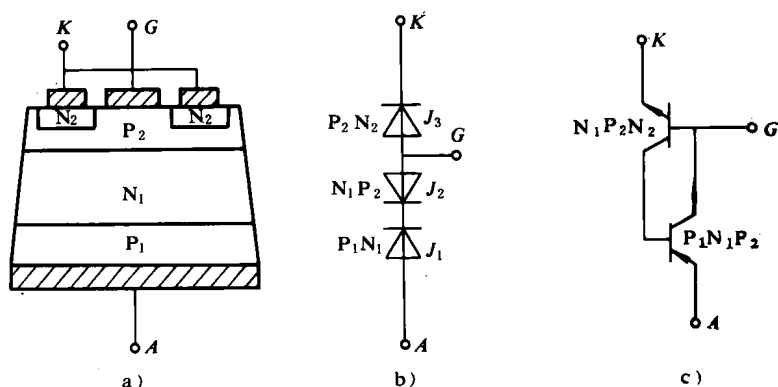


图 1-3 晶闸管内部芯片及等效电路

a) 芯片原理结构 b) 以三个 PN 结等效 c) 以互补三极管等效

除了阳极加正向电压外，同时还必须加上适当的正向门极电压 U_g ，让门极流入足够的触发电流 I_g 。

由于晶闸管导通后压降很小，一般在 1V 以下，通常可以忽略，所以晶闸管是实现变流技术较理想的可控开关器件。

晶闸管导通后又如何被关断呢？仍按图 1-4 电路做如下实验：

在灯亮的情况下，逐渐调节变阻器 R ，使流过负载（灯泡）的电流逐渐减少，这时应按下常闭按钮 SB ，注意观察毫安表的指针，当阳极电流降到某数值，毫安表的指针突然回到零，说明晶闸管已关断。毫安表所观察到的最小阳极电流称晶闸管的维持电流 I_H 。

上述实验表明导通后的晶闸管，只要流过的阳极电流减小到小于维持电流，元件就立即被关断，恢复了阻断状态。

如何理解晶闸管的导通和关断条件，可用它的一对互补三极管等效电路（如图 1-5 所示）来解释。

从图 1-5 看到，晶闸管阳极必须承受正向电压是管子导通的先决条件，因为只要阳极电压是正向的，互补三极管才能得到正确接法的工作电源，否则是无法工作的。在满足先决条件

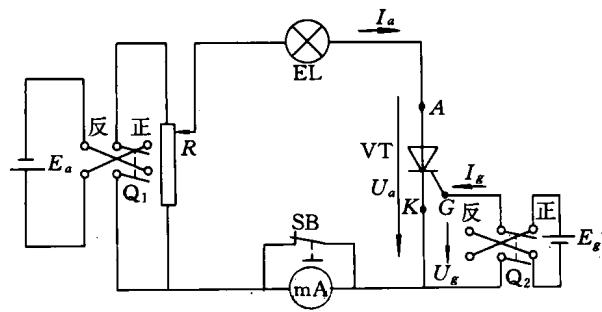


图 1-4 晶闸管导通、关断条件实验电路

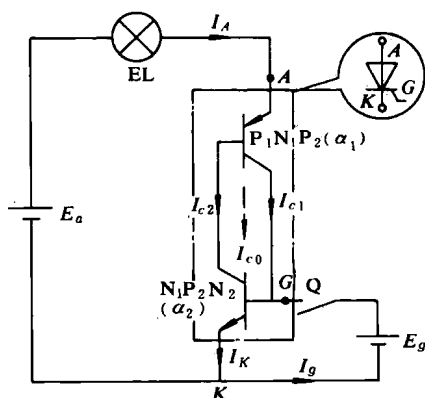


图 1-5 用一对互补三极管说明晶闸管的工作原理

下,再闭合门极刀开关Q,于是触发电流 I_g 就流入门极,它相当于给 $N_1P_2N_2$ 型三极管的基极输入电流,经过互补强烈的正反馈即

$$E_g \rightarrow I_g \rightarrow I_{b2} \rightarrow I_{c2} \uparrow (= \beta_2 I_{b2}) = I_{b1} \rightarrow I_{c1} (= \beta_1 I_{b1})$$

↑
强烈正反馈

瞬时使互补三极管迅速达到饱和导通。即晶闸管由阻断状态转变成导通状态。

设 $P_1N_1P_2$ 管和 $N_1P_2N_2$ 管的集电极电流分别为 I_{c1} 和 I_{c2} ;发射极电流相应为 I_A 和 I_K ;电流放大系数相应为 $\alpha_1 = I_{c1}/I_A$ 和 $\alpha_2 = I_{c2}/I_K$; I_{c0} 为 J_2 结的反向漏电流。

若把两管分别看成广义节点,运用基尔霍夫电流定律,写出电流关系式为

$$I_A = I_{c1} + I_{c2} + I_{c0} = \alpha_1 I_A + \alpha_2 I_K + I_{c0} = \alpha_1 I_A + \alpha_2 (I_A + I_g) + I_{c0}$$

经整理得

$$I_A = \frac{I_{c0} + \alpha_2 I_g}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (1-1)$$

由晶体管知识可知,晶体管的电流放大系数 α 随着管子发射极电流 I_e 的增大而增大,如图1-6所示。从式(1-1)和图1-6中曲线可得下列结论:

1) 正常情况晶闸管阳极电压 U_a 不得超过额定电压,正向漏电流 I_{c0} 很小,所以 $\alpha_1 + \alpha_2 \ll 1$,式(1-1)的 $I_A \approx I_{c0}$,晶闸管就处在正向阻断状态。

2) 若在晶闸管阳极承受正向电压的同时,合上门极开关Q,门极流入触发电流 I_g ,门极电流 I_g 增大到一定程度,发射极电流也增大,互补三极管的 α_1 与 α_2 随着增大,当 $(\alpha_1 + \alpha_2)$ 增大到接近1时,(即图1-6中的临界点K),式(1-1)中阳极电流 I_A 急剧增加到无穷大,这表明晶闸管已完全导通。这时 I_A 的值应由阳极电源电压 E_a 及负载电阻(即灯泡)所决定。由于元件导通后 I_A 已大大超过 I_g ,此时即使将门极电流降为零或负值,也不能使晶闸管关断,也就是说一旦晶闸管被触发导通,门极就失去控制能力。

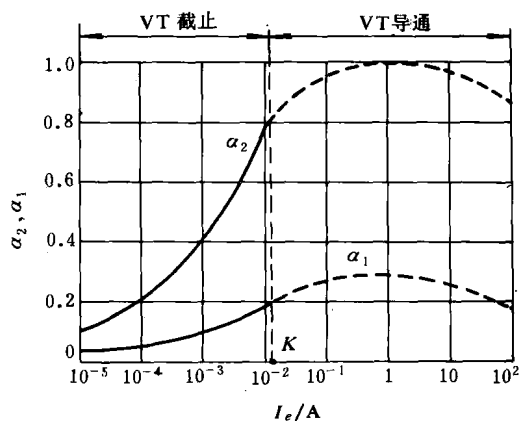


图1-6 两管电流放大系数与发射极电流关系

3) 晶闸管导通后,逐渐减小阳极电流 I_A ,一旦减小到维持电流以下, $\alpha_1 + \alpha_2 \ll 1$,式(1-1)的 $I_A = I_{c0}$,说明晶闸管已关断。这就是晶闸管关断条件,必须是阳极电流小于维持电流的原理。

4) 如果不流入触发电流,而是增大晶闸管的正向阳极电压 U_a ,由晶体管知识可知,正向漏电流 I_{c0} 随着 U_a 上升而增大, α_1 与 α_2 也随着增大。当 U_a 上升到某程度, I_{c0} 已增大到使 $\alpha_1 + \alpha_2$ 接近于1时,晶闸管也会完全导通。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_{B0} (Forward Breakover Voltage)。

5) 由于半导体少数载流子所引起的阳极正向漏电流 I_{c0} ,不仅与 U_a 大小有关,同时与温度也有关系。随着温度的升高,漏电流 I_{c0} 也增大。可见在晶闸管正向电压不变的情况下,要使晶闸管导通,温度愈高,触发电流愈小,反之则相反。

第二节 晶闸管的阳极伏安特性和主要参数

一、晶闸管的阳极伏安特性 (V-A Characteristic)

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, 如图 1-7 所示。

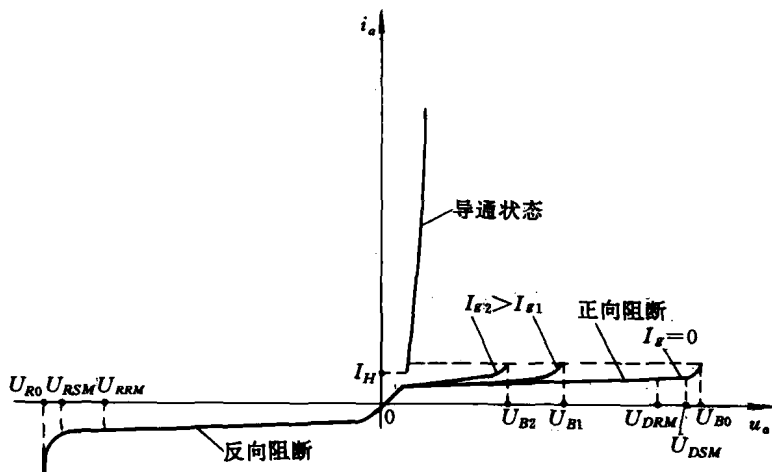


图 1-7 晶闸管阳极伏安特性

U_{R0} —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_{B0} —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

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_{B0} 时, 元件都处在正向阻断状态, 其正向漏电流随着阳极电压 u_a 增大而逐渐增大, 当 u_a 增到 U_{B0} 时, 晶闸管就被导通。导通后元件的阳极伏安特性与整流二极管正向伏安特性相似。 $I_g = 0$ 的这条特性曲线, 称为晶闸管的自然伏安特性曲线。通常是不允许正向电压增加到自然转折电压使管子导通。因为用这种方法使管子导通是不可控的, 而且多次这样导通会损坏管子。一般是给门极输入足够的触发电流, 使转折电压明显降低来导通晶闸管。如图 1-7 所示, 由于 $I_{g2} > I_{g1} > I_g$, 相应的 $U_{B2} < U_{B1} < U_{B0}$ 。晶闸管一旦导通后, 其阳极伏安特性与整流二极管的正向伏安特性相似。

反向伏安特性曲线如图 1-7 第 III 象限所示, 它与整流二极管的反向伏安特性相似。若反向电压增大到反向击穿电压 U_{R0} 时, 晶闸管将造成永久性的损坏, 使用时晶闸管两端可能承受的最大峰值电压, 都必须小于管子的反向击穿电压, 否则管子将被损坏。

二、晶闸管的阳极主要参数

要正确地使用晶闸管, 不仅需要了解晶闸管的工作原理及特性, 更重要是要理解晶闸管的主要参数含义。现就经常提到的阳极主要参数介绍如下 (见表 1-2)。

(一) 额定电压 U_{Tn}

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_{B0} , 击穿电压 U_{R0} 的差值, 一般由晶闸管制造厂自定。

表 1-2 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 $U_{DRM} \quad U_{RRM}$	断态正反向重 复峰值电流 $I_{DRM} \quad I_{RRM}$	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_{Tm}			
A	V	mA	mA	V	℃	V/ μs	A/ μs	kA			
1	50~1600	≤ 3	≤ 10	≤ 2.0				L 级 0.12	H 级 0.20		
3	100~2000	≤ 8	≤ 30	≤ 2.2	-40~+100	25~800	25~50	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	100~3000	≤ 40	≤ 200	≤ 2.6		-40~+125		100~1000	25~100	1.3	1.9
200									2.5	3.8	
300		≤ 50	≤ 300		50~200		3.8		5.6		
400					50~300		5.0		7.5		
500		6.3	9.4								
600		7.6	11								
800		50~500	10				15				
1000			13		18						

所谓元件的额定电压 U_{Tn} , 是指 U_{DRM} 与 U_{RRM} 中较小的值, 再取相应于标准电压等级表 1-3 中偏小的电压值。例如, 某晶闸管实测 $U_{DRM}=734V$, $U_{RRM}=810V$, 取两者其中小的数值 734V, 按表 1-3 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

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

(1-2)

取表 1-3 相应电压标准等级。

表 1-3 晶闸管的断态正反向重复峰值电压标准等级

级 别	断态正反向重复峰值电压/V	级 别	断态正反向重复峰值电压/V	级 别	断态正反向重复峰值电压/V
1	100	8	800	20	2000
2	200	9	900	22	2200
3	300	0	1000	24	2400
4	400	2	1200	26	2600
5	500	14	1400	28	2800
6	600	16	1600	30	3000
7	700	18	1800		

(二) 额定电流 $I_{T(AV)}$ (元件的额定通态平均电流)^②

在室温为 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、导通角不大于 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 $I_{T(AV)}$ 。将此电流按晶闸管标准电流系列取相应的电流等级 (见表 1-2), 称为元件的额定电流。

按上述 $I_{T(AV)}$ 的定义, 由图 1-8 可分别求得正弦半波电流平均值 $I_{T(AV)}$ 、电流有效值 I_T 和电流最大值 I_m 三者的关系

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

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

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

$$K_f = \frac{I}{I_d} \quad (1-5)$$

因此, 在正弦半波情况下电流波形系数为

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

例如, 对于一只额定电流 $I_{T(AV)} = 100 \text{ A}$ 的晶闸管, 按式 (1-6) 可知其允许的电流有效值应为 157 A。

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^②。因此在实际中选择晶闸管额定电流 $I_{T(AV)}$ 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_{Tm} 。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

$$I_{Tn} = 1.57 I_{T(AV)} = (1.5 \sim 2) I_{Tm}$$

$$I_{T(AV)} = (1.5 \sim 2) \frac{I_{Tm}}{1.57} \quad (1-7)$$

取表 1-2 相应标准系列值。

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, 只要遵循式 (1-7) 来选择管子的额定电流, 管子的发热就不会超过允许范围。典型例子如表 1-4 所示。

在使用中, 当散热条件不符合规定要求时, 如室温超过 40℃、强迫风冷的出口风速不足

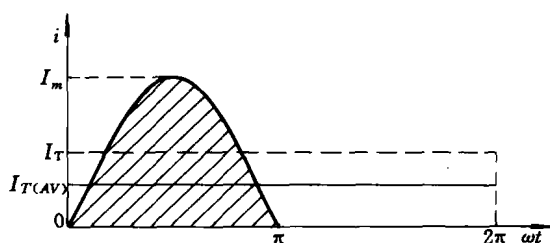


图 1-8 晶闸管的通态平均电流、有效值及最大值三者间的关系

② 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。