

中等专业学校试用教材

晶闸管变流技术

福建机电学校 郑忠杰 主编

ZHONGDENG
ZHUANYE
XUEXIAO
JIAOCAI



机械工业出版社

本书较全面系统地叙述了普通晶闸管及其他晶闸管等器件、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电路、变频器与斩波器、主电路器件的选择与保护以及实验指导等。全书针对中专的教学特点，精选内容，以定性分析为主，在各章又列举了一些应用实例，具有理论联系实际而又着重实用的特色。

本书是中等专业学校“工业企业电气化”专业的教材，亦可供中等职业技术学校有关专业学生及电气工程技术人员参考。

晶 闸 管 变 流 技 术

福建机电学校 郑忠杰 主编

*

责任编辑：黄克勤 版式设计：胡金瑛

封面设计：郭景云 责任编辑：熊天荣

责任印刷：王国光

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可出字第 117 号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092 1/32·印张 17 3/4·字数 487 千字

1989年10月北京第一版·1989年10月北京第一次印刷

印数 0,001—8,400·定价 3.20 元

*

ISBN 7-111-01794-3/TN·37 (课)

前 言

本书是中等专业学校“工业企业电气化”专业的试用教材，是根据原国家机械工业委员会教育局1987年5月制定的中等专业学校教材编审计划，招收初中毕业生，学制为四年的教学大纲以及中专电类专业教材编审委员会审批的编写大纲而编写的。本书也适用于中等职业技术教育学校，亦可供电气工程技术人员参考。

本书主要包括：晶闸管元件、单相及三相可控整流主电路与触发电路、晶闸管主电路计算与保护、有源逆变电路、交流开关及交流调压电路、无源逆变器与直流斩波器。对于晶闸管新的器件、新的触发电路以及新的应用领域也作适当的介绍，以开阔思路。本书附有本课程实验指导书。

本书编写时，针对初中四年中专的教学特点，精选内容，以定性分析为主，理论联系实际。教材中将触发电路分散到各有关章节叙述，这样可以尽早做实验，让学生对所学的理论知识加深理解，既利于教，又利于学。同时在讲授第二章开始，每章均有应用实例电路，体现中专以应用为主的特点，又有利于学生分析问题能力的培养和提高。

本书由福建机电学校郑忠杰主编，其中第五、六章由山东机械工业学校吴作海编写，第四、七章由杭州机械工业学校高文华编写。由上海机械专科学校莫正康副教授主审。参加审稿的还有：申鸿光、栗书贤、王文郁、石玉、李秉象、刘致舜、蒙联光等同志，他们对本书提出了不少的宝贵意见，编者对此表示衷心的感谢。

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

1988年8月

目 录

绪论	1
第一章 晶闸管与大功率整流二极管	3
§ 1-1 晶闸管的结构和工作原理	3
§ 1-2 晶闸管的阳极伏安特性和主要参数	7
§ 1-3 晶闸管的门极伏安特性及主要参数	12
§ 1-4 晶闸管的测试与使用	14
§ 1-5 大功率整流二极管	15
思考题与习题	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 单相全波和全控桥整流电路	28
§ 2-3 单相半控桥整流电路	32
§ 2-4 晶闸管变流器对触发电路的要求	38
§ 2-5 单结晶体管触发电路	39
§ 2-6 简易触发电路	48
§ 2-7 单相可控整流应用实例	53
思考题与习题	60
第三章 三相可控整流电路	64
§ 3-1 三相半波可控整流电路	64
§ 3-2 三相全控桥整流电路	73
§ 3-3 三相半控桥整流电路	78
§ 3-4 带平衡电抗器的双反星形可控整流电路	81
§ 3-5 变压器漏抗对可控整流电路的影响	87
§ 3-6 晶闸管可控整流供电的直流电动机机械特性	90
§ 3-7 同步电压为正弦波的触发电路	93
§ 3-8 同步电压为锯齿波的触发电路	99
§ 3-9 集成触发器、计数式触发器和单通触发器	102
§ 3-10 触发电路与主电路电压同步问题	107
§ 3-11 脉冲变压器与防止误触发的措施	110
§ 3-12 X 2012 A 龙门铣床主拖动晶闸管直流调速系统	112
思考题与习题	116
第四章 主电路的计算和保护	119
§ 4-1 晶闸管额定值选择法	119
§ 4-2 晶闸管的串联和并联	125
§ 4-3 整流变压器额定参数计算	128
§ 4-4 平波电抗器参数计算	132

§ 4-5 晶闸管的过电流保护	135
§ 4-6 晶闸管的过电压保护	138
§ 4-7 电压、电流上升率的限制	148
思考题与习题	150
第五章 有源逆变电路	151
§ 5-1 有源逆变的基本工作原理	151
§ 5-2 常用晶闸管有源逆变电路	154
§ 5-3 逆变失败原因及最小逆变角的确定	161
§ 5-4 晶闸管直流可逆拖动系统	164
§ 5-5 绕线式异步电动机的串级调速	178
§ 5-6 变流装置的功率因数	187
思考题与习题	192
第六章 交流开关与交流调压电路	193
§ 6-1 双向晶闸管	193
§ 6-2 晶闸管交流开关	202
§ 6-3 单相交流调压	207
§ 6-4 三相交流调压	212
思考题与习题	218
第七章 逆变器和斩波器	220
§ 7-1 变频器的基本概念	220
§ 7-2 负载谐振式逆变器	222
§ 7-3 脉冲换流式逆变器	227
§ 7-4 KGP系列晶闸管中频装置	233
§ 7-5 直流斩波器	239
思考题与习题	247
《晶闸管变流技术》实验须知	249
实验一 晶闸管的简易测试及其导通、关断条件	250
实验二 单结管触发电路及单相半控桥整流电路三种负载的研究	252
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	255
实验四 锯齿波同步触发电路与三相全控桥电路的研究	261
实验五 三相半控桥整流电路的研究	265
实验六 三相半波(零式)有源逆变电路的研究	267
实验七 单相交流调压电路的研究	269
实验八 单相并联逆变器研究	271
本书常用图形符号与图形文字符号表	274
本书主要符号说明	278
主要参考资料	279

绪 论

晶闸管原称可控硅，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。是大功率电能变换与控制的较理想器件。电能的变换包括电压、电流和频率的变换，统称变流技术。

晶闸管的问世，使电子技术进入了强电领域，这不仅给强电变流带来方便和可靠，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，已成为当今变流技术发展的基础。

一、晶闸管变流技术发展概况

1958年美国首次研究成功第一个工业用的晶闸管，由于它用于变流技术有一系列的优点，因此发展十分迅速。目前不断向大功率化、快速化、模块化（即几个管安装在一个外壳中）和廉价、可靠方面发展。

我国自1962年首次研制成功晶闸管以来，以晶闸管为主体的变流技术也得到迅猛发展。目前已能大规模生产各种类型的晶闸管，单元晶闸管电流可达1000 A以上、电压可达3000 V以上。派生的晶闸管如双向、快速、逆导、可关断等特殊晶闸管均有生产。晶闸管技术已普及到工业生产及民用的各个领域，不仅有许多定点生产厂，而且有专门的研究机构。有许多专业化的变流装置已朝着标准化、系列化等方向迅速发展。

二、当前晶闸管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，目前正在迅速发展的直流输电，即将三相高压交流电先变换成高压直流，进行远距离输电，输送到目的地后利用晶闸管的有源逆变电路，再将直流高压逆变成与该地区电网同频率的交流电。又如，大容量线绕式异步电动机晶闸管串级调速，不仅实现无级调速，而且还节约了大量的电能。

（三）交流调压

把固定的交流电压变换成可调的交流电压。例如，用于灯光控制、温度控制以及交流电机的调压调速。

（四）无源逆变（变频）

把电网的交流电变换成频率和幅度可调的交流电，即先将50 Hz的交流电变换成直流电，然后再变换成频率和幅度均是可调的交流电。例如，晶闸管中频电源、不停电电源以及笼式异步电动机的晶闸管变频调速。

（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，由直流电源供电的城市电车、电气机

车和电瓶搬运车等若采用晶闸管直流斩波调速，比以往串电阻调速不仅控制方便而且节能显著。

(六) 无触点功率静态开关

晶闸管作为无触点功率静态开关，代替接触器、继电器用于操作频繁与开关频率高的场合。例如，有的生产机械要求电动机频繁的正反转控制、温度控制，其动作频率有时高达每小时1500~3000次，按如此高的动作频率工作，一个接触器只能工作一星期就被损坏。若采用晶闸管作为无触点功率开关，它具有无声、无火花、电磁干扰小以及使用寿命长等优点，虽然一次投资较大，但因使用可靠、维护方便，因此应用愈来愈广。尤其在易燃、易爆的场合，采用晶闸管作无触点功率静态开关更为适合。

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质很强的专业课。本课程主要介绍晶闸管元件，可控整流电路，触发电路，晶闸管有源逆变电路，晶闸管交流调压，晶闸管变频电路以及直流斩波电路等基本理论知识。同时对晶闸管过压保护、过流保护也给于适当介绍。在各章后面都介绍了实例，来加深对晶闸管交流技术应用的了解。通过实验、实习等实践环节，培养具有实验调试、维修和对一般可控整流设备的设计计算能力。学完本课程应达到下列要求：

- 1) 掌握晶闸管元件单向可控导通性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、各电量计算以及晶闸管过压、过流等保护方法。
- 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) 对基本的可控整流电路能正确接线、正确定相，并具有调试和排除一般故障的能力。对于一般的晶闸管装置，能根据产品说明，对照实物弄清原理，正确使用。
- 5) 熟悉晶闸管无源逆变、交流调压、变频以及直流斩波等电路的基本工作原理及其波形分析。

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。为了加深对晶闸管交流技术应用的了解，可参阅《晶闸管交流技术应用图集》辅助教材。在讲授和学习方法上要特别着重物理概念与电路波形的基本分析方法。要重视实验、识图等应用能力的培养。

第一章 晶闸管与大功率整流二极管

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。

§ 1-1 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,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向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 1-3 b 所示。也可以把图 1-3 a 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 1-3 c 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。

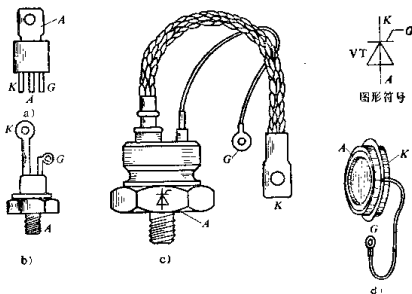


图 1-1 晶闸管的结构及符号

a) 小电流螺栓式 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_s 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_s 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_s 的极性（ Q_1 投合反向），或者门极加反向电压（ Q_2 投合反向），灯是不会亮的，此时说明晶闸管处在截止状态。

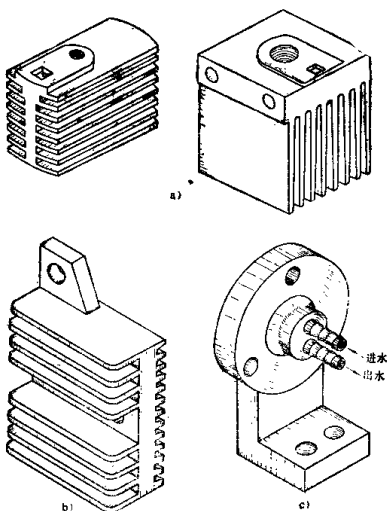


图1-2 晶闸管的散热器

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

以上实验说明，晶闸管象整流二极管一样，具有单向导电特性，电流只能从阳极流向阴极，当元件阳极电压加上反向电压时，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

表1-1 螺旋式与平板式晶闸管的比较项目（或项目）

比 较 型 式	螺 旋 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	易安装和更换散热器	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100 A以下	一般用于200 A以上	

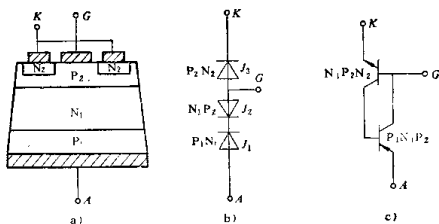


图1-3 晶闸管内部芯片及等效电路

a) 芯片原理结构 b) 以三个PN结等效 c) 以互补三极管等效

晶闸管导通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。所以晶闸管是实现交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线路做如下实验：

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，这时应按下停止按钮 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于导通的先决条件，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。在满足先决条件下，再闭合门极刀开关 Q ，于是就流入门极触发电流 I_g ，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

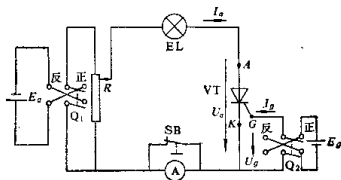


图1-4 晶闸管导通、关断条件实验电路

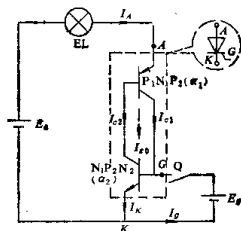


图1-5 用一对互补三极管说明晶闸管的工作原理

$$E_g \rightarrow I_g \rightarrow I_{K1} \rightarrow I_{K2} \uparrow (= \beta_2 I_{K1}) = I_{K1} \rightarrow I_{E1} (= \beta_1 I_{K1}) \uparrow$$

→ 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 $\alpha = f(I_e)$ 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，毫无限流能力。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_K ，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。

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_{BO} （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。

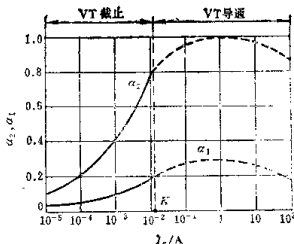


图1-6 两管电流放大系数与发射极电流关系

§ 1-2 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。

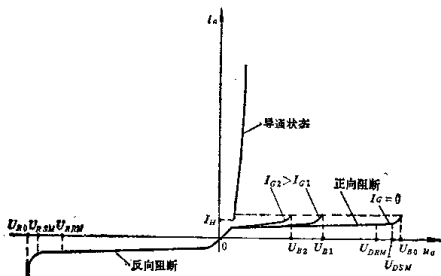


图1-7 晶闸管阳极伏安特性

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 $I_{G1} > I_{G2} > I_g$, 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, 更主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_T

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_{TAV}	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/μs	A/μs	kA	
1	50~1600	≤3	≤10	≤2.0	-40~ +100	25~800	25~50	L级 0.12	H级 0.20
3	100~2000	≤8	≤30	0.035				0.056	
5			≤60	0.064				0.09	
10		≤10	≤100	0.12				0.19	
20	100~2400	≤20	≤150	≤2.4	50~1000			0.24	0.38
30								0.35	0.56
50			≤200	0.64				0.91	
100			≤40	≤300				25~100	1.3
200	100~3000	≤50	≤300	≤2.6	-40~ +125	100~ 1000	50~200	2.5	3.8
300								3.8	5.6
400		50~300	5.0				7.5		
500			6.3				9.4		
600		50~500	7.5				11		
800			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

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

取表 1-3 相应电压标准等级

表1-3 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) 额定电流 $I_{T(AV)}$ (元件的额定通态平均电流)

在室温为40°C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 的三者关系

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

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

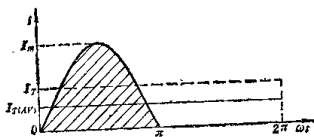


图 1-8 晶闸管的通态平均电流、有效值及最大值三者之间的关系

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 $I_{T(AV)} = 100$ A 的晶闸管, 按式 (1-6) 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 Θ 。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_{Tm} 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

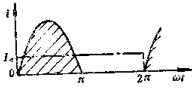
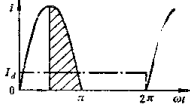
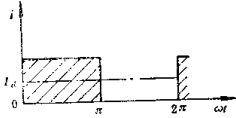
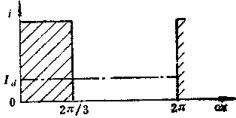
$$I_{Tm} = 1.57 I_{T(AV)} = (1.5 \sim 2) I_{Tm} \\ \therefore I_{T(AV)} = (1.5 \sim 2) \frac{I_{Tm}}{1.57} \text{ 取表 1-2 相应标准系列值} \quad (1-7)$$

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°C、强迫风冷的出口风速不足 5 m/s 等, 则元件的额定电流应立即降低使用, 否则元件会由于结温超过允许值而损坏。譬如, 按规定应采用风冷的元件而采用自冷时, 则电流的额定值应降低到原有值的 30~40%, 反之如果改为采用水冷时, 则电流的额定值可以增大 30~40%。

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的。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。

表1-4 四种电流波形平均值均为100 A, 晶闸管的通态额定平均电流 (暂不考虑余量)

流过晶闸管电流波形	平均值 I_{dT} 与有效值 I_T	波形系数 $K_f = \frac{I_T}{I_{dT}}$	通态额定平均电流 $I_{T(AV)} \geq \frac{I_T}{1.57}$
	$I_{dT} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi I_m \sin \omega t d(\omega t)$ $= \frac{I_m}{\pi}$ $I_T = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi (I_m \sin \omega t)^2 d(\omega t)}$ $= \frac{I_m}{2}$	1.57	$I_{T(AV)} \geq \frac{1.57 \times 100 \text{ A}}{1.57}$ $= 100 \text{ A}$ 选100 A
	$I_{dT} = \frac{1}{2\pi} \int_{\pi/2}^{3\pi/2} I_m \sin \omega t d(\omega t)$ $= \frac{I_m}{2}$ $I_T = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\pi/2}^{3\pi/2} (I_m \sin \omega t)^2 d(\omega t)}$ $= \frac{I_m}{2\sqrt{2}}$	2.22	$I_{T(AV)} \geq \frac{2.22 \times 100 \text{ A}}{1.57}$ $= 141 \text{ A}$ 选200 A
	$I_{dT} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi I_m d(\omega t)$ $= \frac{I_m}{2}$ $I_T = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi I_m^2 d(\omega t)}$ $= \frac{I_m}{\sqrt{2}}$	1.41	$I_{T(AV)} \geq \frac{1.41 \times 100 \text{ A}}{1.57}$ $= 89.7 \text{ A}$ 选100 A
	$I_{dT} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi/3} I_m d(\omega t)$ $= \frac{I_m}{3}$ $I_T = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi/3} I_m^2 d(\omega t)}$ $= \frac{I_m}{\sqrt{3}}$	1.73	$I_{T(AV)} \geq \frac{1.73 \times 100 \text{ A}}{1.57}$ $= 110 \text{ A}$ 选200 A

(三) 通态平均电压 (管压降) $U_{T(AV)}$

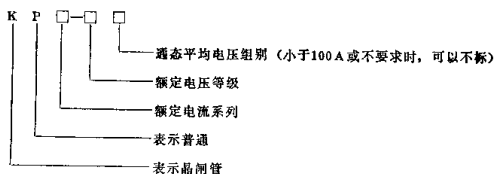
当元件流过正弦半波的额定电流平均值和稳定的额定结温时, 元件阳极与阴极之间电压降的一周平均值简称管压降 $U_{T(AV)}$ 。其标准值分组列于表 1-5 中。

表1-5 晶闸管正向通态平均电压的组别

正向平均电压 V	$U_{T(AV)} \leq 0.4$	$0.4 < U_{T(AV)} \leq 0.5$	$0.5 < U_{T(AV)} \leq 0.6$	$0.6 < U_{T(AV)} \leq 0.7$	$0.7 < U_{T(AV)} \leq 0.8$
组别代号	A	B	C	D	E
正向平均电压 V	$0.8 < U_{T(AV)} \leq 0.9$	$0.9 < U_{T(AV)} \leq 1.0$	$1.0 < U_{T(AV)} \leq 1.1$	$1.1 < U_{T(AV)} \leq 1.2$	
组别代号	F	G	H	I	

管压降愈小,表明元件耗散功率愈小,管子质量就愈好。

以上三个阳极主要参数是选购晶闸管的主要技术数据。按标准,普通晶闸管型号命名含义如下:



例如, KP200-5E, 它表示该元件额定电流 200 A, 额定电压 500 V, 管压降为 0.7~0.8 V 的普通晶闸管。

(四) 其他参数

1. 维持电流 I_H (Holding Current)

在室温与门极断开时, 元件从较大的通态电流降至刚好能保持元件导通所必须的最小通态电流称维持电流 I_H 。

维持电流与元件容量、结温等因素有关, 元件的额定电流愈大, 维持电流也愈大。结温低, 维持电流就大。维持电流大的管子, 容易关断。由于元件的离散性, 同一型号的不同管子, 维持电流也不相同。

2. 擎住电流 I_L (Latching Current)

晶闸管加上触发电压就导通, 去除触发电压, 要使管子仍然维持导通, 所需要的最小阳极电流称擎住电流 I_L 。对同一个晶闸管来说, 通常擎住电流 I_L 比维持电流 I_H 大数倍。

3. 通态电流临界上升率 di/dt

在规定条件下, 元件在门极开通时能承受而不导致损坏的通态电流的最大上升率称通态电流临界上升率。不同系列元件的通态电流临界上升率的级别见表 1-6。

表1-6 额定通态电流临界上升率 (di/dt) 的级别

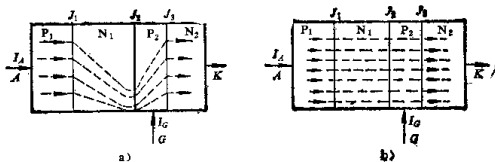
$\frac{di/dt}{A/\mu s}$	25	50	100	150	200	300	500
级 别	A	B	C	D	E	F	G

限制元件通态电流上升率的原因, 当门极输入触发电流, 先在门极 J_2 结附近逐渐形成导通区如图 1-9 a 所示。随时间的增长, J_2 结导通区逐渐扩大, 如果阳极电流上升率过快, 就会造成 J_2 结局部过热而出现“烧焦点”。使用一段时间, 元件将造成永久性损坏。限制电流上升率的有效办法是串接空芯电感。

4. 断态正向电压临界上升率 du/dt

在额定结温和门极断路情况下, 使元件从断态转入通态, 元件所加的最小正向电压上升率称断态正向电压临界上升率。不同系列元件的断态电压临界上升率见表 1-7。

限制元件正向电压上升率的原因, 因为晶闸管在正向阳极电压下, 能阻断是靠 J_2 结, 而

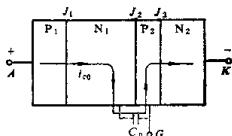
图1-9 J_2 结开通过程电流分布情况

这个结在阻断状态下相当于一个电容 C_0 如图 1-10 所示。如果阳极正向电压突然增大, 便会有充电电流 i_{c0} 流过 C_0 , 这充电电流经 J_3 而起触发电流的作用。阳极电压变化率愈大, 充

表1-7 断态电压临界上升率 (du/dt) 的级别

$\frac{du/dt}{V/\mu s}$	25	50	100	200	500	800	1000
级 别	A	B	C	D	E	F	G

电电流也愈大, 有可能使元件误导通。为了限制断态电压上升率, 可以与元件并联一个阻容支路, 利用电容两端电压不能突变的特点来限制电压上升率。另外利用门极的反向偏置也会达到同样的效果。

图1-10 du/dt 过快将引起晶闸管误导通

§ 1-3 晶闸管的门极伏安特性及主要参数

一、晶闸管的门极伏安特性

晶闸管的门极和阴极间有一个 PN 结 J_3 , 见图 1-3 b, 它的伏安特性称为门极伏安特性。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 1-11 所示。

二、门极的主要参数

(一) 触发电压 U_c 和触发电流 I_c

门极触发电流 (Gate Trigger Current), 是指在室温下, 晶闸管施加 6 V 正向阳极电压时, 使元件由断态转入通态所必须的最小门极电流。对应于触发电流的门极电压, 称门极触发电压 (Gate Trigger Voltage)。

同一工厂制造的同一型号晶闸管, 由于门极

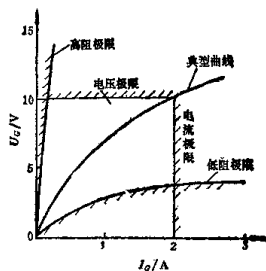


图1-11 5A 晶闸管门极特性曲线