

晶
闸
管
变
流
技
术
高 等 专 科 学 校 试 用 教 材

晶 闸 管 变 流 技 术

莫 正 康 编

机 械 工 业 出 版 社

GAOZHUANJIAOCAI

高等专科学校试用教材

晶 闸 管 变 流 技 术

莫 正 康 编



机 械 工 业 出 版 社

晶闸管变流技术

莫正康 编

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第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 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $15 \frac{1}{2}$ · 插页 1 页 · 字数 388 千字

1985年6月北京第一版·1985年6月北京第一次印刷

印数 00,001—12,200 · 定价 2.65元

*

统一书号: 15033·5803

前 言

本书是高等专科学校“工业企业电气化”专业的试用教材，是根据机械工业部教育局初步审定的招收高中毕业生，学制为三年的教学大纲组织编写的。本书也适用于职工大学、业余大学。中等专业学校也可选用，并可供电气工程技术人员参考。

本书内容包括：晶闸管元件、单相及三相可控整流电路、晶闸管主电路及其计算、晶闸管触发电路、交流调压、晶闸管交直流开关、有源逆变电路、可逆电路概念以及斩波与无源逆变电路。

本书在编写时尽量简化繁琐的数学运算，以定性分析为主，增加测量、调试以及故障分析方面的内容，并提供各种类型的实用线路，力图做到元件→线路→应用三结合。对于晶闸管新元件、新的应用领域，本书也作适当的介绍，以开阔思路。为了培养学生的思考分析能力，每章都附有一定数量的思考题与习题。学习本书时，需具备电子技术、电机及拖动基础以及微积分与富氏级数方面的知识。

本书由上海机械专科学校莫正康同志主编，实验部分由栗书贤与郑忠杰两同志共同编写，由西安交通大学黄俊副教授主审。参加审稿的还有：王佩珠、黄家麟、栗书贤、郑忠杰、王文郁、申鸿光、于济全、吴作海、石玉、李玉贵、李秉象、刘振东等同志，他们对本书提出了不少宝贵的意见，对此表示衷心的感谢。

限于编者的水平与经验，疏漏及错误之处在所难免，恳切希望广大读者批评指正。

目 录

绪论	1	第五章 晶闸管触发电路及应用实例	91
第一章 晶闸管	3	§ 5-1 对触发电路的要求	91
§ 1-1 晶闸管的可控单向导电性	3	§ 5-2 简单触发电路	92
§ 1-2 晶闸管的工作原理与特性	5	§ 5-3 单结晶体管触发电路	95
§ 1-3 晶闸管的主要特性参数	8	§ 5-4 正弦波同步触发电路	102
小结	14	§ 5-5 锯齿波同步触发电路	107
思考题与习题	15	§ 5-6 触发脉冲与主电路电压的同步 (定相)	111
第一章附录 ZP 型硅整流二极管	16	§ 5-7 脉冲变压器与防止误触发的措施	116
第二章 单相可控整流电路	19	§ 5-8 晶闸管可控整流应用实例	121
§ 2-1 单相半波可控整流电路	19	小结	131
§ 2-2 单相全波可控整流电路	25	思考题与习题	131
§ 2-3 单相桥式可控整流电路	29	第六章 晶闸管有源逆变电路	135
小结	36	§ 6-1 有源逆变的工作原理	135
思考题与习题	38	§ 6-2 逆变失败与逆变角的限止	140
第三章 三相可控整流电路	40	§ 6-3 晶闸管直流可逆拖动的工作 原理	141
§ 3-1 三相半波可控整流电路	40	§ 6-4 线绕式异步电动机的串级调速	147
§ 3-2 三相桥式全控整流电路	46	§ 6-5 晶闸管装置的功率因数与对 电网的影响	148
§ 3-3 三相桥式半控整流电路	49	小结	151
§ 3-4 带平衡电抗器的双反星形可控 整流电路	51	思考题与习题	151
§ 3-5 整流电路的换相压降与外特性	55	第七章 晶闸管交流开关与交流调压	153
§ 3-6 晶闸管可控整流供电的直流电 动机机械特性	58	§ 7-1 双向晶闸管与晶闸管交流开关	153
小结	62	§ 7-2 单相交流调压	158
思考题与习题	62	§ 7-3 三相交流调压	162
第四章 晶闸管整流主电路计算及 保护	65	§ 7-4 过零触发电路和晶闸管调功器	168
§ 4-1 整流变压器参数计算	65	小结	170
§ 4-2 晶闸管电压电流的计算与选择	68	思考题与习题	172
§ 4-3 晶闸管的过电压保护	71	第八章 直流斩波器与逆变器	173
§ 4-4 晶闸管的过电流保护与电压、 电流上升率限止	80	§ 8-1 晶闸管直流开关与直流斩波器	173
§ 4-5 晶闸管的串联和并联	84	§ 8-2 并联谐振与串联谐振逆变器	182
§ 4-6 平波电抗器的计算	87	§ 8-3 三相逆变器	186
小结	89	§ 8-4 晶闸管中频装置 (KGPS-100- 1.0 型)	191
思考题与习题	90	小结	191

思考题与习题	197	实验七 锯齿波同步触发电路的研究	223
晶闸管变流技术实验须知	199	实验八 三相桥式全控整流电路的研究	226
实验一 晶闸管测试导通关断条件	200	实验九 三相桥式有源逆变电路的研究	230
实验二 单结管触发电路及单相半波可控 整流电路的研究	202	实验十 单相桥式有源逆变电路的研究	232
实验三 阻容移相桥触发的单相半控桥整流 电路三种负载的研究	208	实验十一 单相交流调压电阻性、电感性 负载的研究	235
实验四 正弦波同步触发电路的研究	211	实验十二 单相并联逆变器的研究	237
实验五 三相半波整流电路的研究	214	主要符号说明	240
实验六 三相桥式半控整流电路的研究	220	主要参考资料	241

绪 论

晶闸管原名可控硅,是一种功率半导体器件,由于它效率高、控制特性好、寿命长、体积小等优点,自六十年代以来,获得迅猛发展,已形成独立学科。“晶闸管交流技术”是一门专门研究晶闸管元件在生产上应用的课程,它属于电力电子学科,横跨“电力”、“电子”与“控制”三个领域,晶闸管的出现,使电子进入强电领域,是强电与弱电的桥梁。从节能的观点出发,电力电子技术被誉为八十年代的新电气技术,它能在节能方面起重要的作用。

我国在近十几年来,晶闸管制造与应用技术发展迅速,目前已能大规模生产各种类型的晶闸管元件,单个晶闸管容量已达电压 2500 V 以上、电流 1000 A 以上。派生的晶闸管元件如双向、快速、逆导、可关断等品种均有供应,晶闸管的应用已日益遍及到生产与民用的各个领域。

晶闸管的应用技术主要是进行电力变换与控制,按其变换功能,大致可分为下列五个方面的应用:

一、可控整流

晶闸管组成的整流器不但象整流二极管整流器一样,可以把交流整流为直流,而且可以在交流电压不变的情况下,方便地控制直流输出电压的大小即可控整流,所以可控整流是实现交流→可变直流之间的变换。

在晶闸管问世之前,大多是采用由交流电动机带动直流发电机来获得可调的直流电压,称为变流机组。静止的晶闸管可控整流装置与变流机组相比,不但无噪音、无磨损、响应快(发电机调节激磁电流输出直流电压随之改变的快慢)投资省,而且功耗小效率高,以 100kW 直流发电机与晶闸管装置比较,发电机组与控制设备总投资与晶闸管投资之比约为 2:1;发电机效率为 0.6 左右,而晶闸管为 0.8。发展的趋势晶闸管装置正逐步取代变流机组。

二、交流调压与调功

利用晶闸管的开关特性代替老式的接触调压器、感应调压器和饱和电抗器调压,用晶闸管实现交流→可变交流之间的变换,较多用于灯光控制、温度控制以及交流电机的调压调速。为了消除晶闸管交流调压产生高次谐波的影响,发展一种过零触发,实现负载交流功率的无级调节即晶闸管调功器。据统计,每 100kVA 晶闸管交流调压装置与电磁式调压设备比较,一年约可节电 1.76 万度。

三、逆变与变频

直流→交流之间的变换称为逆变,交流→频率可变交流之间的变换称为变频。应用在直流输电(将三相高压交流整流为高压直流,由高压直流远距离输送以减少损耗增加电力网的稳定,然后由逆变器将直流高压逆变为 50Hz 三相交流的方法称为直流输电)、中频加热和交流电动机的变频调速、串激调速等场合,这是很有发展前途的应用领域。

四、斩波调压(脉冲调压)

斩波调压是直流→可变直流之间的变换,广泛用于采用直流电源的车辆调速传动上,如城市电车、电气机车、电瓶搬运车、铲车(叉车)、电气汽车等,比串大容量电阻进行切换

调速不但控制方便而且节能显著。另外，在电火花加工的高频电源装置方面，斩波器亦有应用。

五、无触点功率静态开关

晶闸管作为功率开关元件，代替接触器、继电器用于频繁操作与开关频率高的场合。有的生产机械如辊道传动、机床正反转控制、温度控制，要求每小时开关 1500~3000 次，一般电磁接触器工作一星期就达到正常使用寿命而损坏，采用晶闸管无触点功率开关具有无声、触点无熔损、开关频率高以及电磁干扰小等优点，虽然一次投资较贵，但使用可靠，维护方便，开关速度快，因此应用愈来愈多。

晶闸管组成的变流装置是静止型，与变流机组比较有以下主要优缺点：

优点：

1. 装置功率放大倍数大，通常在 10^4 以上，比变流机组高三个数量级。
2. 快速响应好。机组是秒级晶闸管装置为毫秒级。
3. 功耗小、效率高、投资省。
4. 体积小、重量轻、可靠性高。

缺点：

1. 电压电流过载能力差，晶闸管装置必须设置可靠的保护措施。
2. 晶闸管采用移相触发时，使波形畸变产生高次谐波分量影响电网质量，在要求高的场合要增设滤波环节。
3. 功率因数较低。

以上的不足随着元件质量的提高、保护措施的成熟以及电路设计的改进正在逐步被克服。

晶闸管的发展方向：

1. 除了提高普通晶闸管性能、向高压大电流方向发展外，还大力发展特殊晶闸管，如双向、逆导、可关断、场控、光控等，扩大晶闸管的应用领域。

2. 结构形式向小型、集成方向发展。如集成触发器、元件采用模块结构即几个管子安装在一个外壳中，甚至触发电路与主电路组合在一起，大大缩小体积，减轻重量，简化接线，提高可靠性。

“晶闸管变流技术”在工业电气化与自动化专业中，是一门专业基础性质较强与生产紧密联系的课程。在学习本课程时要着重物理概念与基本的分析方法，要理论联系生产实际，做到元件、电路、应用三方面结合。在学习方法上要特别注意各种电路的波形与相位分析，从波形分析中进一步理解电路工作情况，同时要注意读图与分析线路能力的培养。由于本课程实践性很强，要特别重视实验，提高接线、测量、调整以及故障分析的能力。

第一章 晶 闸 管

晶闸管是硅晶体闸流管的简称，它包括普通晶闸管（即可控硅整流元件，简称可控硅）、双向晶闸管、可关断晶闸管和逆导晶闸管等。由于普通晶闸管应用最普遍，如不特别说明，通常所说的晶闸管就是指普通晶闸管。

§ 1-1 晶闸管的可控单向导电性

晶闸管是一种大功率 PNP 四层半导体元件，常用的有螺栓式与平板式两种。它有三个引出极，阳极（A）、阴极（K）和门极（G），外形与符号如图 1-1 所示。大功率晶闸管工作时发热较大，因此必须安装散热器。螺栓式晶闸管是紧栓在铝制散热器上，图 1-2 a 所示。平板式则由二个彼此绝缘的散热器把晶闸管紧紧夹在中间，图 b、c 所示，这样两面散热效果比螺栓式一面散热好，目前通常 200 A 以上的晶闸管，都采用平板式结构。

晶闸管的内部原理性结构，如图 1-3 所示。先在 N 型硅基片的两面扩散铝或硼（P 型杂质）形成 $P_1N_1P_2$ 结构，然后在其中一面的大部分区域，扩散磷或锑（N₂ 型杂质）作阴极，在同一面的另外小区域引出作门极。在另一面，放置

铝片（P 型金属片）与 P_1 型层构成欧姆接触，作阳极。这样阳极与阴极之间形成了 PNP 四层结构，具有三个 PN 结， J_1 、 J_2 、 J_3 。当晶闸管阳极与阴极加上反向电压时， J_1 、 J_3 结处于反向状态；当加上正向电压时， J_2 结处于反向阻断状态。那么晶闸管在什么条件下，才能从正向阻断转变为正向导通呢？在什么条件下又从导通恢复为阻断呢？下面按图 1-4 连接实验电路，进行晶闸管的导通关断实验。阳极电源 E_a ，经过双向闸刀（ K_1 ），连接负载（白炽灯）接到晶闸管的阳极（A）与阴极（K），组成晶闸管的主电路，用粗线表示。流过晶闸管阳极电流 I_a 。晶闸管阳、阴极两端的电压，称阳极电压 U_a 。门极电源 E_g 经双向闸刀（ K_2 ）连接晶闸管的门极（G）与阴极（K）组成控制电路亦称触发电路，用细线表示，流过门极电流，门极与阴极之间的电压称门极电压 U_g ，实验现象与结论列于表 1-1。

以上实验结论说明，晶闸管象二极管一样，具有单向导电特性，电流只能从阳极流向阴极，当元件加上反向电压时，只有极小的反向漏电流从阴极流向阳极，晶闸管处于反向阻断

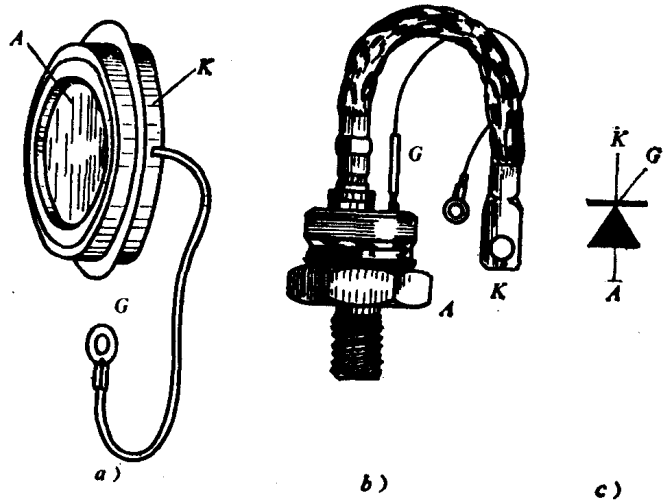


图1-1 晶闸管的外形及符号

a) 平板式 b) 螺栓式 c) 符号

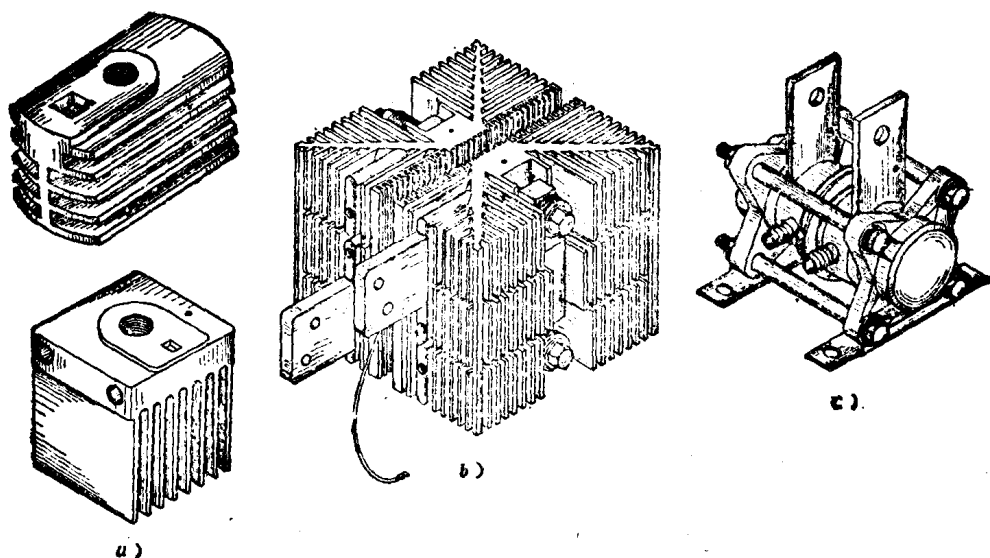


图1-2 晶闸管的散热器

a) 自冷 b) 风冷 c) 水冷

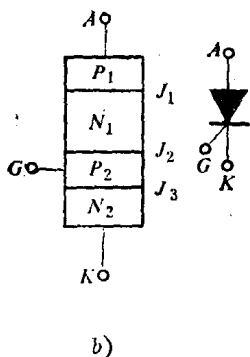
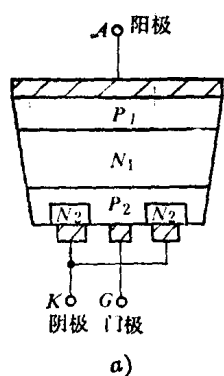


图1-3 晶闸管的内部结构

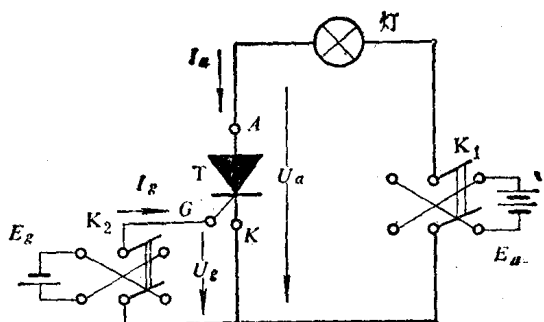


图1-4 晶闸管导通关断实验

表1-1 晶闸管导通和关断实验

实验顺序		实 验 前 灯 的 情 况	实 验 时 晶 闸 管 条 件		实 验 后 灯 的 情 况	结 论
			阳 极 电 压 U_a	门 极 电 压 U_g		
导通实验	1 2 3	暗 暗 暗	反 反 反 向 向 向	反 零 向 正 向	暗 暗 暗	当晶闸管受反向阳极电压时，不论门极为何种电压，晶闸管都处于关断状态
	1 2 3	暗 暗 暗	正 正 正 向 向 向	反 零 向 正 向	暗 暗 亮	当晶闸管同时具备正向阳极电压与正向门极电压时，晶闸管才能导通
关断实验	1 2 3	亮 亮 亮	正 正 正 向 向 向	正 零 向 反 向	亮 亮 亮	已导通的晶闸管在正向阳极电压作用下，门极失去控制作用
	4	亮	正 向 (逐渐减小到接近于零)	(任意)	暗	晶闸管在导通时，当 E_a 减小到接近于零时，晶闸管关断

状态。晶闸管不同于二极管，还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，元件呈正向阻断状态，这是二极管不具有的。要使晶闸管正向导通除了阳极加上正向电压外，还必须同时在门极与阴极之间加上一定的正向门极电压 U_g ，有足够的门极电流 I_g 流入，门极对元件能否正向导通起控制作用。好象一条有闸门的河流，有水位差，河水还不能流通，还必须控制闸门打开，门极就是起闸门控制作用，这就是晶闸管所特有的闸流特性。也就是可控特性。

当晶闸管加上正向阳极电压后，门极加上适当的正向门极电压，使晶闸管导通的过程称为触发。晶闸管一旦触发导通后，门极就对它失去控制作用，因此通常在门极只要加上一个正向脉冲电压即可，称为触发电压。门极在一定条件下可触发晶闸管导通，但无法使其关断。

要使已经导通的晶闸管恢复阻断，可降低阳极电源 E_a 或增大负载电阻，使流过晶闸管的阳极电流 I_a 减小，当电流 I_a 减至一定值时（约几十毫安），电流会突然降到零，之后再调高电压或减小负载电阻，电流不会再增大，说明晶闸管已经恢复阻断。当门极断开时，维持晶闸管导通所需的最小阳极电流叫维持电流（ I_H ）。因此，只要晶闸管的阳极电流小于维持电流（ I_H ），元件就关断了。当阳极电源是交流电压，负载是纯电阻时，在波形正半周过零点，晶闸管就自行关断了。

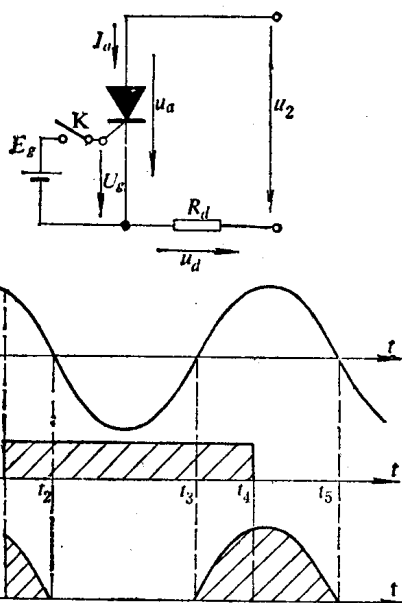


图1-5 例题电路和波形

例 如图1-5所示，阳极电源为交流电压，门极在 t_1 瞬间合上开关K， t_4 时刻开关K断开，求电阻 R_d 上电压波形 u_d 。

解 t_1 时刻，晶闸管阳极电压 U_a 为正，开关K合上使得门极电压也为正，所以晶闸管触发导通，忽略管子导通电压降，电源电压 u_2 全部加于负载 R_d ，当 t_2 时刻由于 u_2 过零反向，流过晶闸管的电流 $I_a < I_H$ （维持电流），管子关断，之后因承受反向电压不会导通。 t_3 时刻， u_2 从零开始变正，晶闸管再次承受正压，使管子又导通， t_4 时刻， $u_g = 0$ ，由于晶闸管已处于导通状态，维持导通。 t_5 时刻开始，晶闸管关断。所以 R_d 上的电压过渡过程波形 u_d 如图所示。

§ 1-2 晶闸管的工作原理与特性

一、晶闸管触发导通原理

晶闸管为什么有上述性质，现从其内部结构来进行分析。晶闸管由P型半导体与N型半导体交替叠成。P型半导体多数载流子是空穴，带正电荷；N型半导体多数载流子是电子，带负电荷，在其接触界面上形成三个PN结。晶闸管的三个PN结可等效看成两个晶体管 $BG_1(P_1-N_1-P_2)$ 与 $BG_2(N_1-P_2-N_2)$ 组成，图1-6所示。

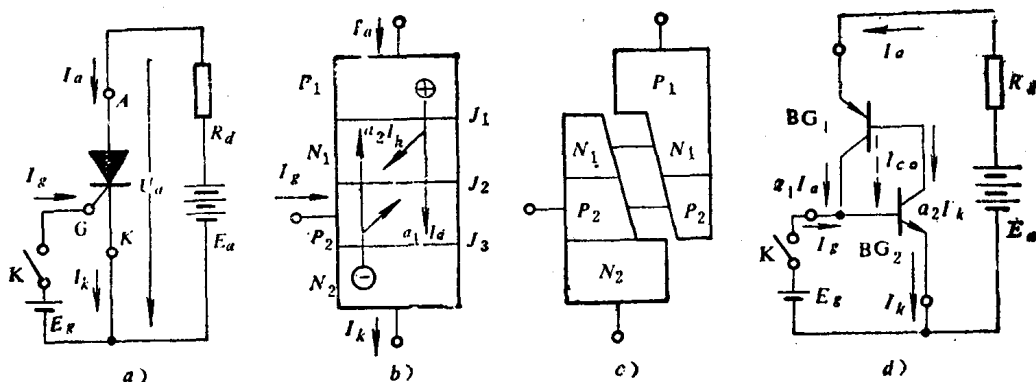


图1-6 晶闸管的工作原理

当晶闸管阳极加上正向电压后，要使管子正向导通，关键是使 J_2 这个承受反向电压的 PN 结失去阻挡作用。从图中不难看出， BG_1 的集电极电流同时又是 BG_2 的基极电流； BG_2 集电极电流同时又是 BG_1 的基极电流，当晶闸管阳极加正向电压，一旦有足够的门极电流流入时，就形成强烈的正反馈即：

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

瞬时使两晶体管饱和导通即晶闸管导通。

设 BG_1 管与 BG_2 管的集电极电流分别为 I_{c1} 、 I_{c2} ，发射极电流分别为 I_o 和 I_k ；共基接法的电流放大系数为 α_1 与 α_2 ，流过 J_2 结的反向漏电流为 I_{c0} 。阳极电流 I_a 进入 P_1 区形成空穴扩散电流，它到达 J_2 结的电流为 $\alpha_1 I_o$ ，而阴极电流 I_k 在 N_2 区是电子扩散电流，它到达 J_2 结的电子流为 $\alpha_2 I_k$ 。因此流过 J_2 结的总电流也是阳极电流 I_a 为下面三部分之和：

$$I_a = \alpha_1 I_o + \alpha_2 I_k + I_{c0} \quad (1-1)$$

当 $I_g = 0$ 时， $I_o = I_k$ ，晶闸管流过正向漏电流为：

$$I_o = \frac{I_{c0}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (1-2)$$

由上式可见，晶闸管正向漏电流由于受 J_1 、 J_3 结影响，要比单个 J_2 结的反向漏电流 I_{c0} 来得大。

当门极流入 I_g 时，则阴极电流为：

$$I_k = I_o + I_g \quad (1-3)$$

把 (1-3) 式代入 (1-1) 式得：

$$I_a = \frac{I_{c0} + \alpha_2 I_g}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (1-4)$$

由晶体管知识可知，晶体管的电流放大系数 α 随管子发射极电流的增大而增大如图 1-7 所示。当门极电流 I_g 增大到一定程度，发射极电流也增大，当 $(\alpha_1 + \alpha_2)$ 增大到接近 1 时（即图中的临界点 K ），式 (1-4) 中阳极电流 I_a 将急剧增大成为不可控，这时 I_a 的值由阳极电源电压 E_a 及负载电阻 R_d 来决定，晶闸管的正向导通压降约为 1.5 V 左右。由于正反馈的作用，此时即使门极电流降为零或负值，也不能使晶闸管关断，只有设法使晶闸管阳极电流 I_a 减小到维持电流 I_H （约几十毫安），此时 α_1 、 α_2 也相应减小，导致内部正反馈无法维持，晶

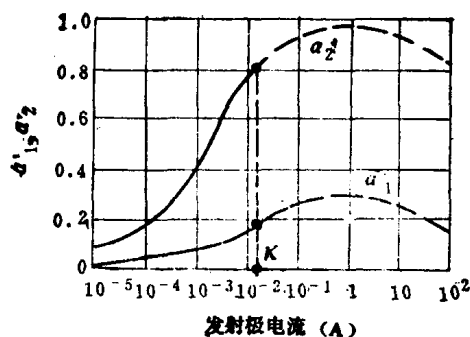


图1-7 PNP、NPN两个晶体管的
电流放大系数与发射极电流的关系

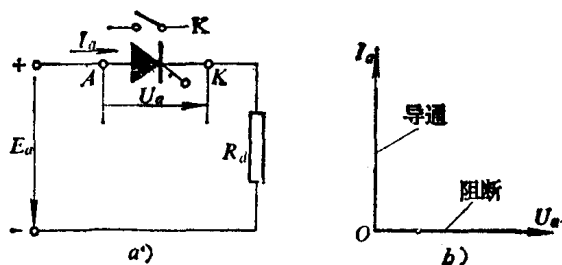


图1-8 晶闸管理想开关
伏安特性

闸管才恢复阻断。如果晶闸管加反向阳极电压，此时 BG_1 、 BG_2 处于反压状态，不能工作，故无论有无门极电压，晶闸管都不能导通。

二、晶闸管的阳极伏安特性

晶闸管阳极与阴极之间的电压 U_a 与阳极电流 I_a 的关系，称为元件的伏安特性。

晶闸管作为一个可以控制的单向无触点开关，最简单的电路如图 1-8 a 所示。作为理想的开关，要求晶闸管关断时，其 A 与 K 之间电阻无穷大，阳极漏电流为零，这时，电压 E_a 全部降在晶闸管上，特性曲线与横轴重合。如门极加足够的触发电压，使晶闸管转为正向导通时，要求其 A 与 K 之间的电阻降为零，电源电压 E_a 全部降到负载电阻上，特性曲线与纵轴重合，理想的开关伏安特性如图 1-8 b 所示。

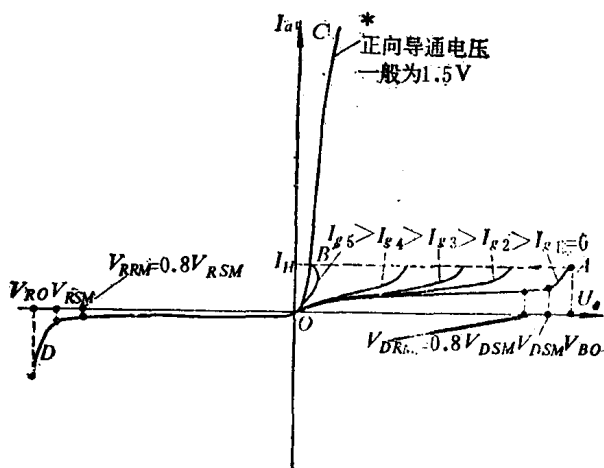


图1-9 晶闸管阳极伏安特性

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

* 当晶闸管流过较大的恒定直流电流 I_a 时，其直流正向导通电压约为 1.5 V。而元件出厂时定义的晶闸管正向通态平均电压 V_T 是指管子流过额定正弦半波电流时的正向平均电压，其值如表 1-4 所示，比 1.5 V 要小。

晶闸管实际的伏安特性如图 1-9 所示。门极断开 $I_g = 0$ 时，逐渐增大阳极电压 U_a ，由于 J_2 结受反压阻挡，元件中只有很小的正向漏电流。当 U_a 升高到数值 V_{BO} ，漏电流也相应增大到一定数值， J_1 、 J_2 结内电场削弱较多， α_1 、 α_2 也相应增大。使得电子扩散电流 $\alpha_2 I_k$ 与空穴扩散电流 $\alpha_1 I_a$ 分别与 J_2 中的空穴与电子相复合，导致 J_2 结的内电场消失，因此，晶闸管由阻断突然变为导通，对应曲线的 A 点突变到 B 点。 V_{BO} 称元件的正向转折电压。

当加上门极电压，使门极电流 $I_g > 0$ 时，元件的正向转折电压就大大降低，以某元件为例：

$$I_g = 0,$$

$$V_{BO} = 800 \text{ V}$$

$I_g = 5\text{mA}$ 正向转折电压 = 200 V

$I_g = 15\text{mA}$ 正向转折电压 = 5 V

$I_g = 30\text{mA}$ 正向转折电压 = 2 V

当 I_g 足够大 (上例中 $I_g > 30\text{mA}$) 时, 晶闸管正向转折电压很小, 可以看成与整流二极管一样, 一加上正向阳极电压, 管子就导通了。在使用晶闸管时, 通常都是利用这一特性, 即先加上一定的正向阳极电压, 然后在门极与阴极加上足够大的触发电压, 使晶闸管的正向转折电压下降到很小而导通的。导通特性为图 1-9 中 BC 段曲线, 与正向二极管特性相似。当阳极电流 $I_a < I_H$ (维持电流) 时, 元件又从正向导通返回正向阻断状态。

晶闸管加反向阳极电压时, J_1 、 J_3 结为反向偏置, 因此元件只流过很小的反向漏电流, 对应特性曲线 OD 段, 当反压升高到 V_{RO} 时, 元件反向击穿。

所以晶闸管的正向伏安特性与理想开关特性十分接近, 是一种比较理想的无触点功率开关元件。

综上所述, 可得出如下结论:

1. 门极断开时, 晶闸管的正向漏电流比一般硅二极管反向漏电流大, 且随着管子正向阳极电压升高而增大。当阳极电压升到足够大时, 会使晶闸管导通, 称为正向转折或“硬开通”。多次“硬开通”会损坏管子, 晶闸管通常不允许这样工作。

2. 晶闸管加上正常阳极电压后, 还必须加上触发电压 U_g 产生足够的触发电流 I_g , 才能使晶闸管从阻断转为导通, 称为触发导通。如 I_g 不够大, 管子还不会导通, 但此时正向漏电流随 I_g 的增大而显著增加。由于正反馈的作用, 晶闸管只能稳定工作在“关断”与“导通” (对内部晶体管来说是饱和导通) 二个状态, 中间状态不能停留, 具有双稳开关特性。像接触器一样, 可以用很小的门极电流 (毫安级) 控制很大的阳极电流 (几十至几百安培) 的导通, 而且晶闸管阻断时漏电流小, 导通时压降小, 是一种理想的无触点功率开关元件。

3. 晶闸管一旦被触发导通后, 门极完全失去控制作用。要关断已经导通的晶闸管, 必须使阳极电流 $I_a < \text{维持电流 } I_H$, 对于电阻负载, 只要使管子阳极电压降为零即可。为了保证晶闸管可靠与迅速关断, 通常在管子阳极电压降为零之后, 加一段时间的反向电压。

§ 1-3 晶闸管的主要特性参数

为了正确使用晶闸管, 不仅需要定性了解晶闸管的伏安特性, 而且要定量地掌握晶闸管的主要参数。

一、晶闸管的重复峰值电压——额定电压

从图 1-9 元件伏安特性可见, 当门极断开、元件处在额定结温时, 管子阳极电压 U_a 升到正向转折电压 V_{RO} 之前, 管子的正向漏电流开始急剧增大即特性曲线急剧弯曲处, 此时对应的阳极电压, 称为断态正向不重复电压, 用 V_{DSM} 表示 (此电压是不可连续施加的)。我们取 80% 的 V_{DSM} 电压值, 称为断态正向重复峰值电压, 用 V_{DRM} 表示 (此电压可连续施加, 其重复频率为 50Hz, 每次持续时间不大于 10ms)。元件承受反向电压时, 同样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, 用 V_{RRM} 表示, 其值的 80% 称为反向重复峰值电压 V_{RRM} 表示。

晶闸管铭牌标出的额定电压, 通常是元件实测 V_{DRM} 与 V_{RRM} 中较小的值, 取相应的标准

电压等级，电压等级见表 1-2。

如某晶闸管，测得其正向重复峰值电压值为 840 V，反向重复峰值电压为 960 V，取小者为 840 V，按表 1-2 相应电压等级为 800 V，此元件铭牌上即标出额定电压 800 V，为 8 级。

表 1 2 晶闸管元件的正向重复峰值电压等级

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		

由于晶闸管工作时，外加电压峰值瞬时超过反向不重复峰值电压，即可造成晶闸管永久损坏，并且由于环境温度升高或散热不良，均可能使正反向转折电压值下降。因此选用元件的额定电压值应比实际工作时的可能最大电压大 2~3 倍。

二、晶闸管的额定通态平均电流 $I_{T(AV)}$ ——额定电流

在环境温度为 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、导通角不小于 170° 的电路中，当结温稳定且不超过额定结温时，所允许的最大通态平均电流，称为额定通态平均电流，用 $I_{T(AV)}$ 表示。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，称为元件的额定电流。

元件出厂时，额定电流测量原理性电路如图 1-10 所示。在标准测试条件下，被测晶闸管加上正弦半波电压，阳极与门极直接相连，当元件未导通时，其门极电压 u_g 等于阳极电压 u_a 。根据晶闸管工作原理，当变压器 B 次级电压 U_2 由零变正时，被测元件就导通了，相当于整流二极管一样（实际上晶闸管是在 u_a 电压过零点后一段时间才导通的）。因此流过晶闸管的电流，基本上是正弦半波，分流器 R_f 两端直流电流表的读数为正弦半波的平均值。测量时，逐步提高自耦变压器 ZOB 的输出电压，流过被测管的电流值也随着相应增大，元件温度也相应增高。当管子达到最大允许结温并且稳定时，此时电流表读数，即为允许的最大通态平均电流 $I_{T(AV)}$ ，再按表 1-5 取相应的电流等级，即为管子的额定电流。

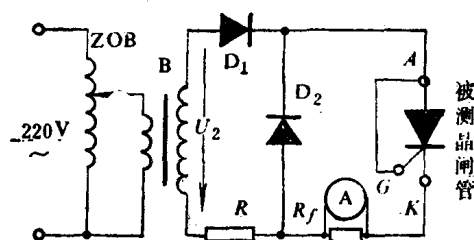


图 1-10 晶闸管额定电流测量电路

晶闸管也和其它电气设备一样，决定其允许电流大小的是温度。晶闸管管芯（三个 PN 结）的温度称结温，结温的高低由发热和冷却两方面的条件所决定。造成晶闸管发热的原因是损耗，它主要有以下几个部分：导通时的损耗，这是引起管子发热最主要的原因，为了减少发热，一般希望导通管压降 V_T 小些。阻断和反向时的损耗，希望漏电流小些，开关时的损耗，工作在频率较高时必须考虑；门极的损耗较小，可忽略。

影响晶闸管散热的有：元件与散热器的接触状况和散热器的大小，冷却方式（自冷、风冷和水冷等）和冷却介质的流速；环境温度或冷却介质的温度。因此，根据晶闸管发热和冷却条件不同，其允许的通态平均电流也不一样。

普通晶闸管由于整流输出端所接负载常用直流平均电流衡量其性能,故元件额定电流用一定条件下的最大通态平均电流来标定。但是,从晶闸管管芯发热的角度来考虑,如果认为元件导通时管芯电阻不变,则其发热与电流有效值 Θ 有关。因此,要先经过换算,根据晶闸管的额定电流(额定通态平均电流) $I_{T(AV)}$,求出元件允许流过电流最大有效值,称晶闸管的额定有效值,用 I_{Te} 表示。在实际使用时,不论晶闸管电流波形如何,导通角多大,只要流过元件实际电流的最大有效值 I_{Tm} 小于或等于管子的额定有效值 I_{Te} ,管子的发热就能限制在允许范围内。

各种有直流分量的电流波形,都有一个电流平均值 I_d (一个周期内波形面积的平均),晶闸管额定情况的平均电流用 $I_{T(AV)}$ 表示;也都有一个电流有效值 I (均方根值),定义某电流波形的有效值与平均值之比,称为这个电流的波形系数,用 K_f 表示:

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

那么晶闸管额定电流有效值 I_{Te} 多大呢?根据晶闸管额定电流的定义,此时流过元件的电流波形是正弦半波,额定电流是正弦半波电流波形的平均值,如电流波形峰值为 I_m ,则额定电流为:

$$I_{T(AV)} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} I_m \sin \omega t d(\omega t) = \frac{I_m}{\pi} \quad (1-6)$$

额定电流有效值为:

$$I_{Te} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} (I_m \sin \omega t)^2 d(\omega t)} = \frac{I_m}{2} \quad (1-7)$$

因此,在额定情况下,波形系数 K_f 为:

$$K_f = \frac{I_{Te}}{I_{T(AV)}} = \frac{\pi}{2} = 1.57$$

说明一只额定电流 $I_{T(AV)} = 100 \text{ A}$ 的晶闸管,其额定有效值 I_{Te} (即管子允许最大电流有效值)为 $K_f \cdot I_{T(AV)} = 157 \text{ A}$ 。

不同的电流波形,有不同的平均值与有效值,波形系数 K_f 也不同,表1-3列出四种常用的电流波形的 K_f 值与100 A晶闸管通过下列电流波形时允许通过的电流平均值 I_{dco} 。

表中计算说明:额定电流 $I_{T(AV)} = 100 \text{ A}$ 的晶闸管,只有在正弦半波时(额定情况),其

⊖ 对于时刻在变化的交流电,应用“等效”的概念,把和交流电流有相同热效应的直流电流值称为交流电的有效值。使某交流电 i 流过电阻 R ,在一周期内产生的热量为

$$Q_{AC} = \int_0^T 0.24 i^2 R dt$$

某直流电流 I 通过同一电阻 R 在同样 T 内产生的热量为

$$Q_{DC} = 0.24 I^2 RT$$

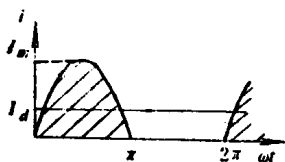
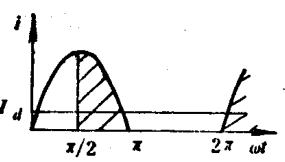
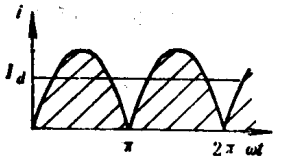
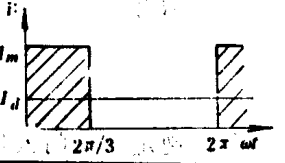
如两个热量相等,则这个直流电流值 I 即为交流电 i 的有效值,相互间数学关系为:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}$$

所以有效值亦称均方根值,对于正弦交流,有效值为

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (I_m \sin \omega t)^2 d\omega t} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0.707 I_m$$

表1-3 四种波形的 K_f 值与100A晶闸管容许电流平均值

波 形	平均值 I_d 与有效值 I	波形系数 $K_f = \frac{I}{I_d}$	允许电流平均值 $I_{de} = \frac{I_{re}}{K_f}$
	$I_d = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi I_m \sin \omega t d(\omega t) = \frac{I_m}{\pi}$ $I = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi (I_m \sin \omega t)^2 d(\omega t)} = \frac{I_m}{2}$	1.57	$I_{de} = \frac{100 \times 1.57}{1.57}$ $= 100 \text{ A}$
	$I_d = \frac{1}{2\pi} \int_{\pi/2}^\pi I_m \sin \omega t d(\omega t) = \frac{I_m}{2\pi}$ $I = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\pi/2}^\pi (I_m \sin \omega t)^2 d(\omega t)} = \frac{I_m}{2\sqrt{2}}$	2.22	$I_{de} = \frac{100 \times 1.57}{2.22}$ $= 70.7 \text{ A}$
	$I_d = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi I_m \sin \omega t d(\omega t) = \frac{2}{\pi} I_m$ $I = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^\pi (I_m \sin \omega t)^2 d(\omega t)} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$	1.11	$I_{de} = \frac{100 \times 1.57}{1.11}$ $= 141.4 \text{ A}$
	$I_d = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi/3} I_m d(\omega t) = \frac{I_m}{3}$ $I = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi/3} I_m^2 d(\omega t)} = \frac{I_m}{\sqrt{3}}$	1.73	$I_{de} = \frac{100 \times 1.57}{1.73}$ $= 90.7 \text{ A}$

波形系数 $K_f = 1.57$, 允许流过的最大平均电流为 100 A, 在其它波形时, 允许流过的电流平均值都不是 100 A。

由于晶闸管的电流过载能力比一般电机电器小得多, 因而选用晶闸管额定电流时, 根据实际最大电流计算后还至少要乘以 1.5~2 倍, 使其有一定的电流裕量。

三、门极触发电流 I_{GT} , 门极触发电压 U_{GT}

在室温下, 晶闸管施加 6 V 正向阳极电压时, 使元件完全开通所必须的最小门极电流, 称门极触发电流 I_{GT} 。对应于门极触发电流时的门极电压, 称门极触发电压 U_{GT} 。

同一工厂同一型号的晶闸管, 由于门极特性的差异, 其触发电流、触发电压相差很大。元件触发电压、电流太小, 容易受干扰, 造成误触发; 触发电压、电流太大会造成触发困难。所以对不同系列的元件都规定了最大与最小触发电压、电流的范围。例如 100 A 的晶闸管合格证上标明了触发电压、电流不应超过 4 V、250 mA, 也不应小于 0.15 V、1 mA。通常为了保证晶闸管可靠触发, 外加门极电压的幅值要比 U_{GT} 大好几倍。

触发电压、电流受温度影响很大, 而元件铭牌上是常温下测得的数据。当元件工作时, 温度升高, U_{GT} , I_{GT} 值会显著降低, 在冬天使用时 U_{GT} 、 I_{GT} 值会增大, 使用时要注意。

四、通态平均电压 $U_{T(AV)}$

在规定环境温度、标准散热条件下, 元件通以额定电流即额定正弦半波时, 阳极和阴极间电压降的平均值, 称通态平均电压一般称作管压降, 其数值按表 1-4 分组。从减小损耗和元件发热来看, 应选择 $U_{T(AV)}$ 较小的管子。