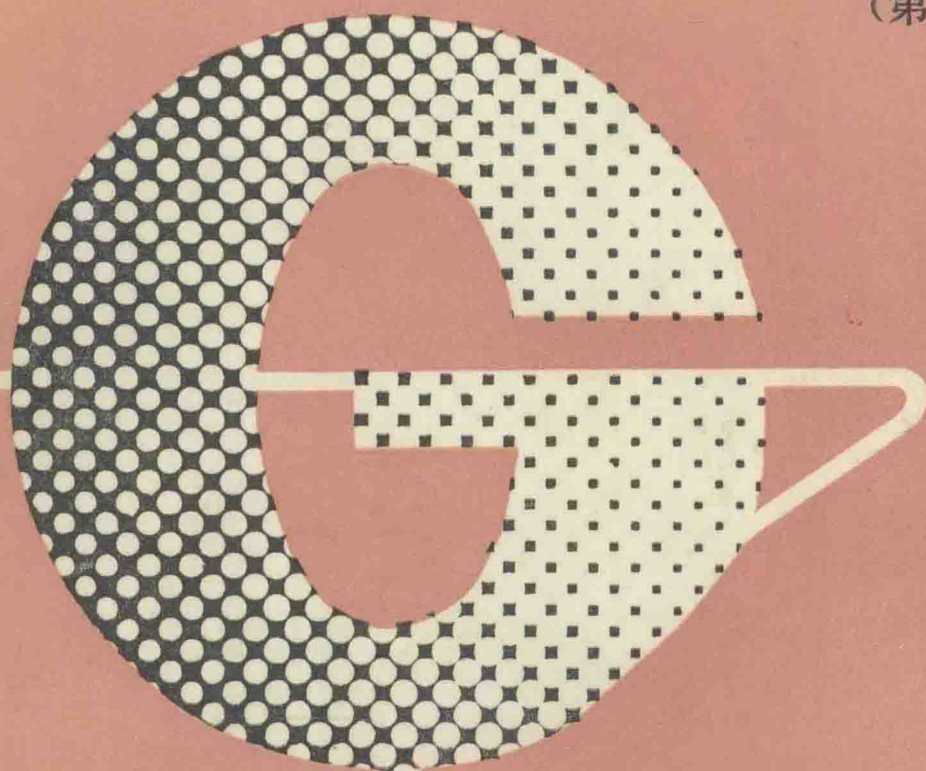


高等专科学校教材

半导体变流技术

(第2版)



上海机械高等专科学校 莫正康 主编

机械工业出版社

高等专科学校教材

半导体变流技术

(第 2 版)

上海机械高等专科学校 莫正康 主编



机械工业出版社

前 言

本书是在1985年出版的高等专科学校试用教材《晶闸管变流技术》的基础上,根据1989年在广西南宁制订的变流技术课程教学大纲,并吸取了兄弟学校在使用原教材时的意见,进行全面修订的。

本书主要内容为:晶闸管可控整流电路、有源逆变电路、晶闸管的选择和保护、晶闸管的触发电路、晶闸管的交流开关、交流调压、变频电路与斩波电路以及新型全控功率电子器件的介绍。最后,还附有相应的实验内容。本书可作为高等专科学校电气技术、电气自动化等专业的教材,也适用于职工大学、电视大学,并可供其它有关专业师生及工程技术人员参考。

本书在修订中力求做到“注重基础、精选内容、逐步更新、利于教学”,基本上保持原书的体系与风格,并对陈旧的内容作了删除,有的内容作了精简,增加了新型元器件的介绍,如集成触发器、固态开关、三相变频调速等。为了反映电力电子的飞速发展,增加了第九章新型全控型功率半导体器件。

由于变流技术的发展已超出晶闸管范围,根据教材编审委员会的意见,本书修订后,书名改为《半导体变流技术》。

本书由上海机械高等专科学校莫正康副教授主编。第九章第四节由曹鸿富编写,其余由莫正康编写。

限于编者的水平和经验,疏漏及错误之处在所难免,恳切希望广大读者批评指正。

编 者

1992年2月

目 录

前言

主要符号说明

绪论1

第一章 晶闸管 (Thyristor)3

第一节 晶闸管的可控单向导电性3

第二节 晶闸管的工作原理与特性6

第三节 晶闸管的主要特性参数9

小结15

思考题与习题15

第二章 单相可控整流电路 (Single-phase Controlled Rectification Circuit)13

第一节 单相半波 (Half-Wave) 可控整流电路18

第二节 单相全波 (Full-Wave) 可控整流电路25

第三节 单相桥式 (Bridge) 可控整流电路30

小结38

思考题与习题40

第三章 三相可控整流电路 (Three-Phase Controlled Rectification Circuit)42

第一节 三相半波可控整流电路42

第二节 三相桥式全控整流电路49

第三节 三相桥式半控整流电路51

第四节 带平衡电抗器 (Balanced Reactor) 的双反星形可控整流电路54

第五节 整流电路的换相压降与外特性58

第六节 晶闸管可控整流供电的直流电动机机械特性 (Mechanical Characteristic)62

小结65

思考题与习题66

第四章 晶闸管整流主电路计算及保护 (Protection)69

第一节 整流变压器参数计算69

第二节 晶闸管电压电流的计算与选择73

第三节 晶闸管的过电压保护 (Overvoltage Protection)76

第四节 晶闸管的过电流保护与电压、电流上升率的限制 (Overcurrent Protection)84

第五节 晶闸管的串联和并联89

第六节 平波电抗器电感值的计算92

小结95

思考题与习题95

第五章 晶闸管触发电路 (Trigger Circuit) 及应用实例97

第一节 对触发电路 (Trigger Circuit) 的要求97

第二节 简单触发电路98

第三节 单结晶体管触发电路104

第四节 正弦波同步触发电路110

第五节 锯齿波同步触发电路115

第六节 集成电路触发器120

第七节 触发脉冲与主电路电压的同步 (定相)126

第八节 脉冲变压器与防止误触发的措施131

第九节 晶闸管可控整流应用实例134

小结137

思考题与习题138

第六章 晶闸管有源逆变 (Active Reverse) 电路140

第一节 有源逆变的工作原理140

第二节 逆变失败与逆变角的限制145

第三节 晶闸管直流可逆拖动 (Reversible Drive) 的工作原理146

第四节 绕线转子异步电动机的串级调速153

第五节 晶闸管装置的功率因数与对电网的影响156

小结160

思考题与习题160

第七章 晶闸管交流开关与交流调压	162	第二节 大功率晶体管(Giant Transistor)	
第一节 双向晶闸管(Bidirectional Thyristor)	162	变流技术	213
第二节 晶闸管交流开关	165	第三节 功率场效应晶体管变流技术	219
第三节 单相交流调压电路	170	第四节 绝缘门极晶体管(IGBT)及其应用	221
第四节 三相交流调压	176	实验	227
小结	182	实验一 晶闸管的简易测试及其导通、关断条件	227
思考题与习题	182	实验二 单结管触发电路及单相半控桥式整流电路三种负载的研究	229
第八章 变频电路与直流斩波电路	185	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	233
第一节 变频电路的基本概念	185	实验四 锯齿波同步触发电路与三相全控桥式整流电路的研究	238
第二节 并联谐振与串联谐振逆变器	188	实验五 三相半控桥式整流电路的研究	242
第三节 强迫换流式逆变电路(三相逆变器)	191	实验六 三相半波(零式)有源逆变电路的研究	245
第四节 晶闸管中频装置(KGP系列)	198	新旧图形符号和文字代号对照表	248
第五节 直流斩波电路(Chopper)	202	附录	252
小结	207	主要参考文献	254
思考题与习题	207		
第九章 可关断晶闸管、大功率晶体管、功率场效应晶体管与绝缘门极晶体管简介	209		
第一节 可关断晶闸管变流技术	209		

主要符号说明

电 压 符 号

u	电压瞬时值	U_{TM}	晶闸管承受的最大正反向电压
u_1	整流变压器一次电压瞬时值	U_c	直流控制电压
u_2	整流变压器二次电压瞬时值	U_b	直流偏置电压
u_d	整流输出电压瞬时值	U_P	单结晶体管峰点电压
u_g	晶闸管门极触发电压波形	U_V	单结晶体管谷点电压
u_r	可逆系统环流电压瞬时值	U_e	晶体管、单结晶体管发射极电压
u_L	电感两端电压瞬时值	U_{bb}	单结晶体管 b_1 与 b_2 之间的电压
u_s	同步电压、合成电压瞬时值	U_n	整流输出电压 n 次谐波分量有效值
u_o	输出电压瞬时值	U_R	电阻上电压有效值
u_i	输入电压瞬时值	U_{nM}	整流输出电压 n 次谐波分量最大值
u_T	晶闸管两端电压瞬时值	ΔU_d	变压器漏感引起的换相压降平均值
u_D	二极管两端电压瞬时值	ΔU	晶闸管导通管压降
U_d	整流输出电压平均值	U_{di}	变压器的短路电压比
U_{d0}	$\alpha = 0^\circ$ 时整流输出电压平均值	E	电动机反电动势、直流电源
U	电压有效值、整流输出电压有效值	U_{BO}	晶闸管正向转折电压
U_2 或 $U_{2\phi}$	变压器二次相电压有效值	U_{RO}	晶闸管反向击穿电压
U_{2L}	变压器二次线电压有效值	U_{DSM}	晶闸管正向阻断不重复峰值电压
U_{Tn}	晶闸管额定电压	U_{DRM}	晶闸管正向阻断重复峰值电压
$U_{T(AV)}$	晶闸管通态平均电压	U_{RSM}	晶闸管反向阻断不重复峰值电压
U_G 或 u_g	晶闸管门极触发脉冲电压	U_{RRM}	晶闸管反向阻断重复峰值电压

电 流 符 号

i	电流瞬时值	I_{dT}	流过晶闸管的平均电流
i_1	变压器一次电流瞬时值	I_T	流过晶闸管的电流有效值
i_2	变压器二次电流瞬时值	I_{Tm}	流过晶闸管的电流最大有效值
i_d	整流输出电流瞬时值	I_{dD}	流过二极管的平均电流
i_T	流过晶闸管电流的瞬时值	I_D	流过二极管的电流有效值
i_D	流过二极管电流的瞬时值	I_1	变压器一次电流有效值
i_r	可逆电路环流瞬时值	I_2	变压器二次电流有效值
i_{11}	变压器一次电流基波分量瞬时值	I_{Tn}	晶闸管的额定有效值电流
$i_{d\sim}$	整流输出电流交流分量瞬时值	$I_{T(AV)}$	晶闸管的额定通态平均电流，即额定电流
I	电流有效值、整流输出电流有效值		流
I_d	整流电路的直流输出平均电流	I_n	额定电流

I_P	单结晶体管的峰点电流	I_{CT}	晶闸管门极触发电流
I_V	单结晶体管的谷点电流	I_{CD}	晶闸管门极不触发电流
I_H	晶闸管的维持电流	I_{11}	变压器一次基波电流有效值
I_L	晶闸管的擎住电流	I_{2D}	变压器二次电流直流分量值
I_{dK}	负载电流连续的临界平均电流	I_{TSM}	晶闸管允许的浪涌电流
I_e	单结晶体管发射极电流	I_{RS}	晶闸管反向不重复平均电流

其 它 符 号

$\cos \phi$	功率因数、基波分量电压电流相位差的余弦	X_b	平衡电抗器的电抗值
α	晶闸管的控制角、晶体管共基电流放大系数	L_b	平衡电抗器
β	晶闸管的逆变角、晶体管共发电流放大系数	m	相数、一周期的脉波（波头）数
θ_T	晶闸管的导通角	P_d	整流输出的直流功率
θ_D	整流管的导通角	P_D	直流电动机的反电动势功率
γ	换相重叠角	P_R	电阻上消耗的功率
δ	晶闸管关断时间所对应的电角度	S	视在功率、变压器容量
η	单结晶体管的分压比、效率	R_T 或 r_T	从二次侧计算变压器的线圈电阻
ω	角频率	R_d	直流负载电阻
t	时间	R_L	负载电阻
s	脉动系数	R_i	整流装置等效内阻
t_q	晶闸管的关断时间	R_D	直流电动机电枢电阻
t_{gt}	晶闸管的开通时间	R_Σ	回路总电阻
L_d	直流平波电抗器	K_f	波形系数
X	电抗器的电抗值	f	频率
X_T	从二次侧计算变压器的漏抗	T	周期、电磁转矩
		Φ	磁通、相
		φ	阻抗角

绪 论

晶闸管全称为晶体闸流管,是一种功率半导体器件。由于它具有容量大、效率高、控制特性好、寿命长以及体积小等优点,因此,自60年代以来,获得了迅猛发展。以晶闸管为主体的一系列功率半导体器件的应用技术已形成独立的电力电子学科。目前由传感电子、信息电子和电力电子三部分组成的大电子技术的概念,已被科技界正式接受。

电力半导体器件是一系列固态高电压大电流开关器件,其应用技术的基本功能是对电能的整流、逆变、斩波、变频、开关等的控制。它是信息产业和传统产业之间的主要接口,是弱电控制和被控强电之间的桥梁。从节能的观点出发,电力电子技术被誉为80年代的新电气技术。我国的能源利用率极低,按国民生产单产能耗计算,是法国的4.98倍、日本的4.43倍、印度的1.65倍,因此,迅速生产与使用功率半导体器件是当务之急。

我国在近20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,单个元件容量已达电压4000 V以上、电流2000 A以上,派生的晶闸管元件如双向、快速、可关断、逆导等品种均有供应,其它如大功率晶体管(GTR)、功率MOS场效应管、绝缘门极晶体管(IGBT)等也正在积极开发生产。本书结合国情,仍以晶闸管的应用为主。

变流技术是电能的变换,包括电压、电流和频率的变换技术。

晶闸管元件在工农业生产和民用方面的应用,按其变换功能,大致可分为下列五个方面。

1. 可控整流

晶闸管组成的整流器可以在交流电压不变的情况下,方便地改变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到可变直流之间的变换。

晶闸管可控整流已取代直流发电机组用作直流拖动调速装置,广泛用于机床、轧钢、造纸、纺织、电解、电镀、光电、励磁等领域。

2. 逆变与变频

利用晶闸管特性,将直流变换成交流的过程称为逆变。如果把直流电变换成50 Hz的交流电并将直流电能反馈给交流电网,这种逆变称为有源逆变,主要用于线绕式电动机串级调速与直流高压输电。把电网的交流电变换成频率与大小可调的交流电称为变频。变频电源主要用于交流电动机变频调速、中频加热熔炼、不停电电源等,这是很有发展前途的应用领域。

3. 交流调压

利用晶闸管的开关特性代替老式的接触调压器、感应调压器和电抗器调压,用晶闸管实现交流到可变交流之间的变换称为交流调压。其主要用于灯光亮度控制、温度控制以及交流电动机的调压调速等。

4. 直流斩波调压

利用晶闸管作直流开关,控制晶闸管的通断比和通断频率,将固定的直流电压变换成可调的直流电压称为斩波调压又称脉冲调压。其主要用于采用直流电源的车辆调速传动,如城市电车、电气机车、电瓶搬运车和铲车,以及开关直流电源等。

5. 无触点功率静态开关

晶闸管作为功率开关元件,代替接触器与继电器用于操作频繁与开关频率高的场合。如轧机的辊道传动、机床频繁的正反转、高精度温度控制等,其工作频率有时高达每小时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。而晶闸管无触点功率开关具有无声、无火花、开关频率高、电磁干扰小以及寿命长等优点,虽然一次投资较大,但使用可靠、维护方便,因此应用日益广泛,在易燃易爆等特殊场合,采用晶闸管功率开关更为适合。

晶闸管组成的交流装置有以下优点:

- (1) 装置功率放大倍数大,可达 10^4 以上,与直流发电机组相比,要高三个数量级。
- (2) 快速响应好,变流机组为秒级而晶闸管为毫秒级。
- (3) 功耗低、效率高,节能效果显著。
- (4) 它是静止式电子装置,体积小,重量轻,无噪声,无火花磨损,维护方便,可靠性高。

缺点:

- (1) 晶闸管元件的电压电流过载能力差,必须设置可靠的保护措施。
- (2) 晶闸管采用移相触发时,出现非正弦电压与电流,使电网波形畸变产生高次谐波,导致电网质量下降。
- (3) 移相控制在控制角大时,功率因数低。

以上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。

电力半导体变流技术的发展方向为:

(1) 进一步提高晶闸管器件的性能,除普通晶闸管向高电压大电流发展外,还大力研制生产特殊的晶闸管,如双向、可关断、逆导、场控、光控晶闸管等。

(2) 功率器件由单个结构向模块结构发展,即由几个功率器件芯片组成一个模块,缩小体积,减少连线,以方便使用。

(3) 近几年国际上已发展了功率集成电路(PIC),功能上含有逻辑、控制、功率、保护以及传感与测量等部分,更进一步的则含有微机控制部分。

(4) 新型功率器件发展迅速。晶闸管与大功率晶体管一类是靠门极(基极)的电流变化来实现器件的工作的,目前已出现靠电场来改变基区中空间电荷层的宽度的器件,以便控制电流通道的夹断或打开,这类器件有静电感应晶体管(SIT)和静电感应晶闸管(SITH)。另一类是靠电场来改变沟道的导电类型使器件开关,这类器件有功率MOS管(VDMOS)和绝缘门极晶体管(IGBT)。这两类器件已完全进入生产实用阶段。

“半导体变流技术”在工业企业电气化与自动化专业中,是一门专业基础性质较强且与生产紧密联系的课程,主要介绍晶闸管元件、可控整流电路、触发控制电路、晶闸管有源逆变电路、交流调压、直流斩波以及变频电路的工作原理及过压、过流保护方法,另外还介绍各种典型生产实例,以加深对晶闸管变流技术应用的了解。在学习本课程时,要着重物理概念与基本分析方法,要理论联系生产实际,做到元件、电路、应用三方面相结合。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。由于此课程实践性很强,要特别重视实验,提高接线、测量、调整以及故障分析的能力。

此课程内容丰富,涉及高等数学、电工基础、电子技术基础、电机与拖动等课程的知识,需要学习时复习相关课程与进行综合运用。

第一章 晶 闸 管 (Thyristor)

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 晶闸管的可控单向导电性

晶闸管是一种大功率PNPN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的，如图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，如图1-2 b、c 所示，这样两面散热效果比螺栓式一面散热好，目前电流在200 A 以上的晶闸管，通常都采用平板式结构。

晶闸管的内部原理性结构，如图1-3所示。管芯由四层半导体 ($P_1N_1P_2N_2$) 组成，有三个引出端 (A、K、G)，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 结处于反向阻断状态；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，才能从正向阻断状态转变为正向导通状态呢？在什么条件下又从导通状态恢复为阻断状态呢？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 经过双向刀开关 (Q_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。流过晶闸管阳极的电流称阳极电流 I_a 。晶闸管阳、阴极两端

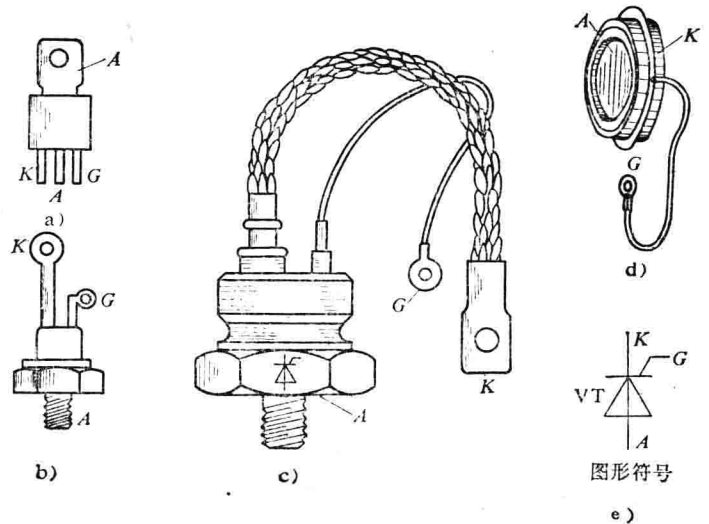


图1-1 晶闸管的外形及符号

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 e) 图形符号

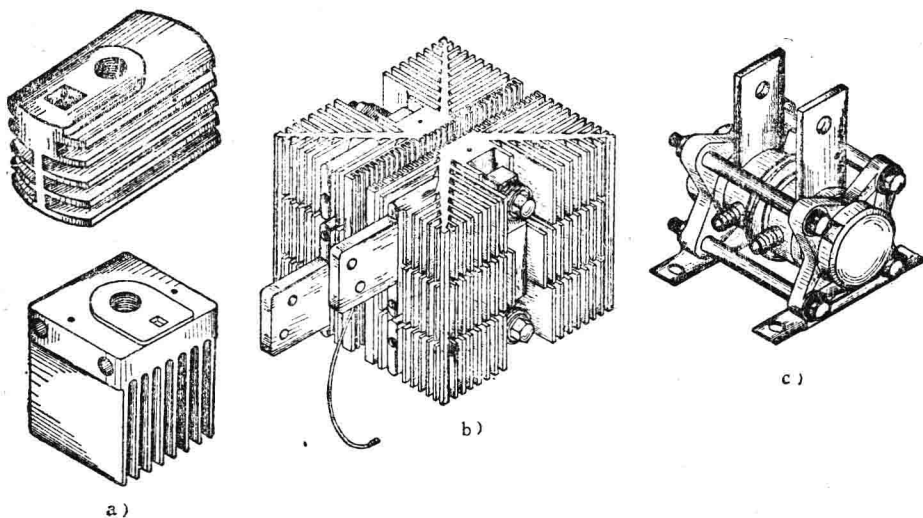


图1-2 晶闸管的散热器

a) 自冷 b) 风冷 c) 水冷

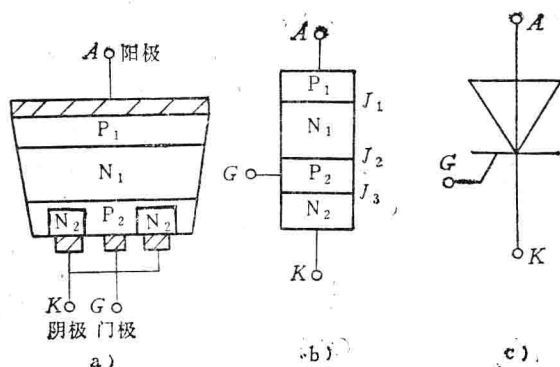


图1-3 晶闸管的内部结构

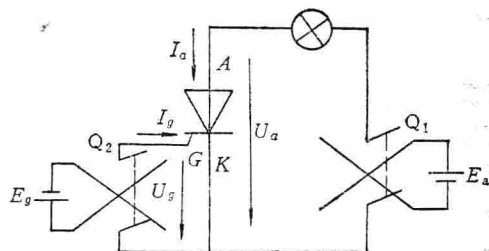


图1-4 晶闸管导通关断实验

的电压，称阳极电压 U_a 。门极电源 E_g 经双向刀开关（ Q_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。流过门极的电流称门极电流 I_g ，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

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	暗	反 向	反 向	暗	晶闸管在反向阳极电压作用下, 不论门极为何种电压, 它都处于关断状态
	2	暗	反 向	零	暗	
	3	暗	反 向	正 向	暗	
	1	暗	正 向	反 向	暗	晶闸管同时在正向阳极电压与正向门极电压作用下, 才能导通
	2	暗	正 向	零	暗	
	3	暗	正 向	正 向	亮	
关断实验	1	亮	正 向	正 向	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
	2	亮	正 向	零	亮	
	3	亮	正 向	反 向	亮	
	4	亮	正 向 (逐渐减小到接近于零)	(任意)	暗	晶闸管在导通状态时, 当 E_a 减小到接近于零时, 晶闸管关断

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, 称之为触发电压。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, 可以认为在波形正半周过零点时, 晶闸管就自行关断了。

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 Q , t_4 时刻开关 Q 断开, 求电阻 R_d 上电压波形 u_d 。

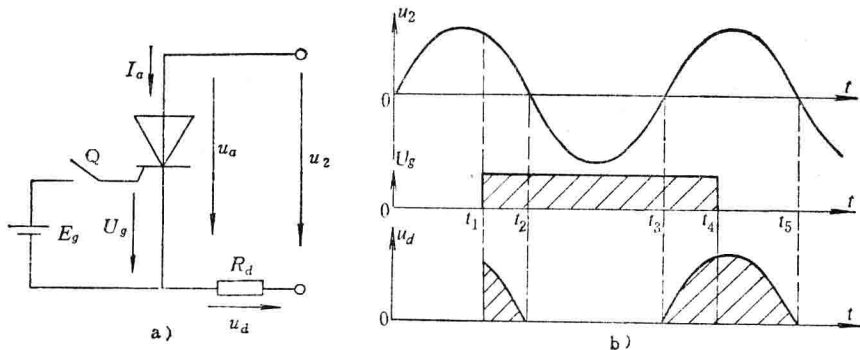


图1-5 例题电路和波形

解 t_1 时刻, 晶闸管阳极电压 U_a 为正, 开关 Q 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。 R_d 上的电压过渡过程波形 u_d 如图1-5所示。

第二节 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结可等效看成由两个晶体管 V_1 ($P_1-N_1-P_2$) 与 V_2 ($N_1-P_2-N_2$) 组成, 如图1-6所示。

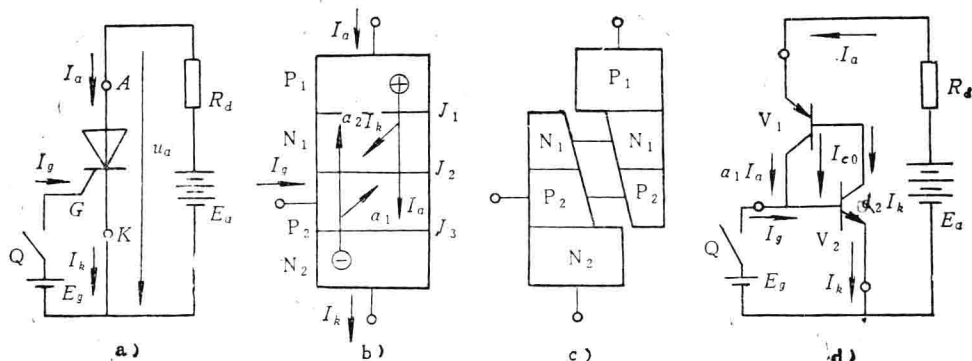


图1-6 晶闸管的工作原理

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, V_1 的集电极电流同时又是 V_2 的基极电流; V_2 集电极电流同时又是 V_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 V_1 管与 V_2 管的集电极电流分别为 I_{c1} 、 I_{c2} , 发射极电流分别为 I_a 和 I_k ; 共基极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 $\alpha_1 I_a$; 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

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

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

$$I_{a0} = \frac{I_{c0}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (1-2)$$

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} 大。

当门极流入 I_g 时, 则阴极电流为

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

把式 (1-3) 代入式 (1-1) 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 的值由阳极电源电动势 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, 晶闸管才恢复阻断。如果晶闸管加反向阳极电压, 此时 V_1 、 V_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 (V-A Characteristic)

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, 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。

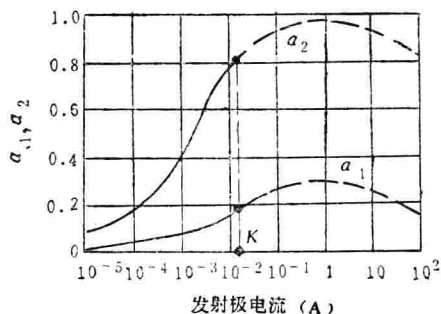


图1-7 两个晶体管的电流放大系数与发射极电流的关系

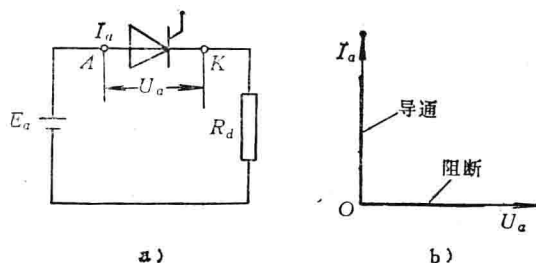


图1-8 晶闸管理想开关的伏安特性

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 U_{BO} 时, 漏电流也相应增大到一定数值, J_1 、 J_3 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, 晶闸管由阻断状态突然变为导通状态, 对应曲线的 A 点突变到 B 点。 U_{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:

$$I_g = 0, \quad U_{BO} = 800 \text{ V}$$

$$I_g = 5 \text{ mA}, \quad U_{BO} = 200 \text{ V}$$

$$I_g = 15 \text{ mA}, \quad U_{BO} = 5 \text{ V}$$

$$I_g = 30 \text{ mA}, U_{BO} = 2 \text{ V}$$

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,元件又从正向导通状态返回正向阻断状态。

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 U_{RO} 时,元件反向击穿, U_{RO} 为晶闸管反向击穿电压。

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的反向漏电流稍

大,且随着管子正向阳极电压的升高而增大。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状态转为导通状态,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。晶闸管像接触器一样,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)的晶闸管的导通,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 小于维持电流 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地关断,通常在管子阳极电压降为零之后,加一段时间的反向电压。

对于晶闸管的三个电极,可从外观判断也可用万用表来测量并粗测其好坏。根据元件内部的三个PN结可知,阳极与阴极间、阳极与门极间的正反向电阻均应在数百千欧以上,门极与阴极间的电阻通常为几十到几百欧,因元件内部门极间有旁路电阻,通常正反向阻值相差很小。注意:在测门极与阴极间的电阻时,不能使用万用表的高阻(10 k)档,以防表内高压电池击穿门极的PN结。至于元件能否可靠触发导通,可用直流电源串联电灯与晶闸管,当门极与阳极接触一下后,如管子导通灯亮,则说明管子是可触发的。

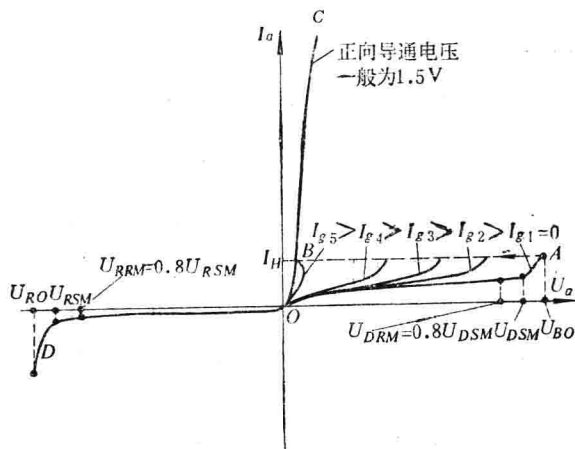


图1-9 晶闸管阳极伏安特性

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

* 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 U_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

第三节 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 U_{Tn} ——额定电压

从图1-9所示的伏安特性可见，当门极断开、元件处在额定结温时，管子阳极电压 U 升到正向转折电压 U_{Bo} 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，称为正向阻断不重复峰值电压，用 U_{DSM} 表示（此电压是不可连续施加的）。我们取80%的 U_{DSM} 电压值，称为正向阻断重复峰值电压，用 U_{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，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 U_{RSM} 表示，其值的80%称为反向重复峰值电压，用 U_{RRM} 表示。

晶闸管铭牌标出的额定电压，通常是元件实测 U_{DRM} 与 U_{RRM} 中较小的值，取相应的标准电压等级，电压等级见表1-2。

表1-2 晶闸管元件的正反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		

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

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时即可造成永久损坏，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，特别在使用时会出现各种过电压，因此选用元件的额定电压值应比实际工作时的最大电压大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通态平均电流，称之为元件的额定电流。

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TR二次电压 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_2 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TS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,电流表读数即为允许的最大通态平均电流,再按表1-5通态平均电流取相应的电流等级,即为管子的额定电流 $I_{T(AV)}$ 。

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 U_T 小些;阻断和反向时的损耗,希望漏电流小些,以减少此损耗;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。

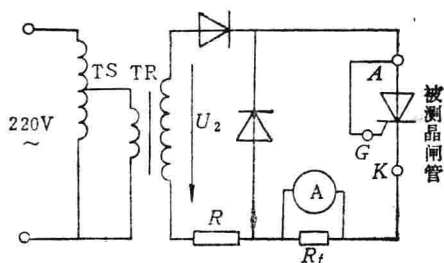


图1-10 晶闸管额定电流测量原理图

影响晶闸管散热的因素有: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,元件有单向整流特性,因此元件的额定电流用一定条件下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,如认为元件导通时的管芯电阻不变,则其发热由电流有效值 $\ominus$ 决定。因此要先经过换算,根据管子的额定电流(额定通态平均电流) $I_{T(AV)}$,求出元件允许流过的最大有效电流,称为晶闸管的额定有效值,用 I_{Tn} 表示(此值在元件铭牌上不提供)。在实际使用时,不论流过晶闸管的电流波形如何、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_{Tn} ,散热冷却在规定条件下,则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(一个周期内波形面积的平均),也都有一个电流有效值(均方根值)。现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,如整流器的负载电流波形系数为

- ① 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

$$Q_{DC} = 0.24 I^2 R T$$

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

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