

• 高等专科学学校教学用书 •

电力电子 变流技术

曲永印 主编

G AODENG

ZHUANKE

XUEXIAO

JIAOXUE

YONGSHU

冶金工业出版社

高等专科学校教学用书

电力电子变流技术

吉林电气化高等专科学校 曲永印 主编

北 京
冶金工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

电力电子变流技术/曲永印主编. —北京: 冶金工业出版社, 1997. 11 (1999. 7重印)

高等专科学校教学用书

ISBN 7-5024-2042-8

I. 电… II. 曲… III. 变流器-高等学校: 专业学校-教材 IV. TM46

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 19575 号

出版人 卿启云 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

北京市梨园彩印厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

1997 年 11 月第 1 版, 1999 年 7 月第 2 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 13 印张; 315 千字; 202 页; 2501-4500 册

18.00 元

前 言

本书是在1986年昆明冶金、有色冶金系统专科院校教材工作会议所制订的《晶闸管变流技术》一书编写大纲的基础上,根据电专业类1996年吉林电专教材工作会议精神编写的。

考虑到电力电子器件和变流技术的发展,使用《晶闸管变流技术》书名已不能全面概括和准确反映本学科的内容,故将本书改名为《电力电子变流技术》。

本次编写的原则是:面向大专学生,面向实际,面向发展,重视基础,加强技能,利于教学。力求做到理论叙述准确,文字精炼,富有逻辑性,符号统一,插图规范。

本书主要包括:晶闸管及其他电力电子器件,单相可控整流电路,三相可控整流电路,有源逆变电路,晶闸管触发电路,主电路元件选择与保护,晶闸管交流调压和调功,晶闸管无源逆变电路和脉宽调制型逆变电路等。

本书可作为高等专科学校电类专业教材,也可供一般职工大学中、高级专业教师 and 现场工程技术人员参考使用。

全书由曲永印任主编,谢树林任副主编,参加本书编写工作的有:吉林电气化高等专科学校曲永印(概述、第七章、第九章),谢树林(第三章、第四章),沈阳工业高等专科学校张焕君(第一章、第二章),昆明冶金高等专科学校龙志文(第六章、第八章),吉林电气化高等专科学校宋宏(第五章)。

全书由王振和任主审,王会群、邢学文对本教材编写提出了许多建设性意见,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者的水平所限,加之编写时间较仓促,错误和疏漏之处在所难免,恳请广大读者和有识之士批评指正。来信请寄:吉林市吉林电气化高等专科学校自动化研究所。邮编:132021。

编 者

1996年于吉林

目 录

概述	(1)
第一章 晶闸管	(5)
第一节 晶闸管及其工作原理	(5)
第二节 晶闸管的伏安特性	(9)
第三节 晶闸管的主要参数	(11)
第四节 晶闸管的派生系列	(17)
习 题	(21)
第二章 单相可控整流电路	(23)
第一节 单相半波可控整流电路	(23)
第二节 单相全控桥式整流电路	(32)
第三节 单相半控桥式整流电路	(40)
习 题	(46)
第三章 三相可控整流电路	(48)
第一节 三相半波可控整流电路	(48)
第二节 三相全控桥式整流电路	(56)
第三节 变压器漏抗对整流电路的影响	(62)
第四节 可控整流电路带反电势负载时的工作情况分析	(64)
第五节 大功率供电可控整流主电路	(70)
习 题	(76)
第四章 有源逆变电路	(78)
第一节 逆变的概念	(78)
第二节 三相半波有源逆变电路	(80)
第三节 三相桥式有源逆变电路	(81)
第四节 逆变失败和逆变角 β 的限制	(83)
第五节 逆变状态下电动机机械特性	(86)
第六节 晶闸管可逆电路	(89)
第七节 有源逆变的应用举例	(93)
习 题	(96)
第五章 晶闸管触发电路	(98)
第一节 对触发电路的要求	(98)
第二节 单结晶体管触发电路	(99)
第三节 同步信号为锯齿波的触发电路	(105)
第四节 集成电路触发器	(113)

第五节	晶闸管整流触发电路应用举例	(119)
习 题		(125)
第六章	主电路元件选择与保护	(127)
第一节	整流变压器额定参数计算	(127)
第二节	晶闸管元件选择	(130)
第三节	晶闸管的串并联	(131)
第四节	晶闸管电路的保护	(133)
第五节	电抗器电感量的计算	(139)
习 题		(141)
第七章	晶闸管的其它应用	(142)
第一节	晶闸管交流无触点开关	(142)
第二节	晶闸管交流调压器	(145)
第三节	三相交流调压器	(149)
第四节	晶闸管交流调功器	(153)
习 题		(156)
第八章	晶闸管无源逆变电路	(158)
第一节	无源逆变的概念	(158)
第二节	电压型和电流型逆变电路	(160)
第三节	单相并联逆变电路	(161)
第四节	串联电感式电压型逆变电路	(164)
第五节	串联二极管式电流型逆变电路	(167)
第六节	逆变电路的多重化技术	(171)
习 题		(173)
第九章	脉宽调制 (PWM) 型逆变电路	(175)
第一节	自关断器件	(176)
第二节	驱动电路	(186)
第三节	PWM 脉宽调制原理	(189)
第四节	微机控制的正弦波 SPWM 脉宽调制方法	(194)
第五节	PWM 脉宽调制型变频器主电路	(197)
习 题		(201)
参考文献		(202)

概 述

电力电子变流技术 (Power Electronics Convert), 就是利用电力电子器件进行电能变换的一门技术。其中包括电压、电流、频率和相数等的变换。

电力电子变流技术的应用, 在电能变换领域几乎产生了一次“革命”, 使电能变换技术产生了一次飞跃。电力电子变流技术与老式的旋转变流机组相比, 具有反应快、体积小、重量轻、噪声低、能量损耗小、容易驱动、易于同微处理器结合实现高级自动控制 (如自适应控制、最优控制和智能控制等) 和可靠性高等优点。它主要应用于电化学、电冶炼、直流牵引、直传动、交流传动、中频感应加热、高压静电除尘、直流输电和无功补偿等领域。目前, 随着电力电子器件自身技术的不断发展和性能的日益提高, 加之与最新控制技术的有效结合, 其应用已深入到工业生产和社会生活的各个领域, 正在向着应用面更广、应用水平更高的方向发展。

一、电力电子器件及其发展概况

1. 半控型器件 (晶闸管)

1948 年, 普通晶体管的发明引起了一场电子工业革命。晶体管首先应用于小功率领域, 如通讯、信息处理等。10 年后, 即 1958 年, 美国通用电气公司研制成功了世界上第一只工业用普通晶闸管。从那时起, 电子技术的应用开始迈入强电领域并得到了迅猛的发展。电能的变换和控制从旋转变流机组、离子变流器时代进入电力电子变流时代。晶闸管依其体积小、重量轻、功耗低、效率高、无噪声、响应快和易于驱动等特点, 加上组成装置后具有可靠性高和寿命长等优点。因而在电能变换领域得到了迅猛的发展。尤其是超大功率电能变换领域中占有举足轻重的位置。尽管近年来随着全控型器件技术的不断发展和性能的不断提高, 使晶闸管的应用领域受到了一定程度的冲击, 但晶闸管在电能变换领域, 尤其是大功率电能变换领域中的支配地位仍然是相当稳固的。因此, 本书仍以晶闸管及其组成的各种电能变换电路作为重点, 详细研究晶闸管器件及其组成的各种电能变换电路的工作原理和分析方法。

2. 全控型器件

随着电能变换技术的不断发展和应用的日益广泛。晶闸管的应用在某些场合上受到一定限制, 如交流变频调速、计算机不间断电源等场合的应用。因此, 迫切需要一种不仅导通可控, 而且关断也可控的器件, 即全控型器件。根据这种需要, 世界各大电力电子器件制造公司相继研制成功了电力晶体管 (GTR)、可关断晶闸管 (GTO) 和电力场效应管 (MOSFET), 这些器件可称为第二代电力电子器件。它们在交流变频调速、计算机不间断电源和一些高性能电能变换场合取得了很好的应用。但第二代电力电子器也存在着一些不足, 如驱动功率大、导通压降大、关断困难和功耗大等。针对这些不足, 各大电力电子器件生产国本着扬长避短、优势互补的原则对电力电子器件进行组合, 如 GTR 虽驱动功率大, 但导通压降低。而电力场效应管 (MOSFET) 恰好与 GTR 相反, 两者组合起来就可以达到克服

缺点发挥长处的目的。相继研究成功了一批复合型器件。如 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) 便是在 GTR 和 MOSFET 基础上, 经过扬长避短、复合而成的新器件。它兼有了 MOSFET 输入阻抗高、驱动功率小和 GTR 导通压降低的双重优点。而 MCT (MOS Controlled Thyristor) 则是 MOSFET 驱动晶闸管的复合型器件, 它集场效应管和晶闸管的优点于一身, 具有驱动电流小、器件电流大的特点。复合型电力电子器件的问世, 使电力电子器件的性能提高了一大步。由于这些复合型器件具有电流密度大、工作频率高、控制功率小、易于驱动和可以采用低成本集成驱动电路控制等优点。因此, 在相当范围内有取代 MOSFET、GTR、GTO 和 SCR 的趋势。复合型器件可称为第三代电力电子器件。

在电力电子器件和电能变换控制技术发展过程中, 由于电能变换主电路型式相对较为典型。为组成装置后尽可能使装置小型化和简化安装接线, 按照典型接线方式, 将几只元件封装在一个模块内。如双管、单相桥和三相桥模块等。器件的模块化不仅缩小了装置体积, 而且也降低了成本。同时提高了可靠性和方便了用户。

在模块化和复合化思路的基础上, 很自然的发展便是功率集成电路 PIC (Power Integrated Circuit)。在 PIC 中, 不仅是主电路的器件, 而且把驱动电路、过压过流保护、电流检测、甚至温度保护等作用的电路都集成到一起, 形成一个整体。具有上述功能的产品, 称为 “Smart” 功率装置。它的应用可使设备更加简化和小型化。同时使设计简化并进一步提高设备装置的可靠性。因此功率 PIC 可称为第四代电力电子器件。

3. 电力电子器件目前技术水平

目前使用的电力电子器件主要有: 普通晶闸管、双向晶闸管、逆导晶闸管、光触晶闸管、可关断晶闸管、电力晶体管、电力场效应管、绝缘栅双极型晶体管、静电感应晶闸管和场控晶闸管, 其主要技术指标如下:

- (1) 普通晶闸管: 12kV、1kA; 4kV、3kA。
- (2) 双向晶闸管: 2.5kV、500A。
- (3) 逆导晶闸管: 4.5kV、1kA。
- (4) 光触晶闸管: 6kV、2.5kA; 4kV、5kA。
- (5) 可关断晶闸管: 9kV、1kA; 4.5kV、4.5kA。
- (6) 电力晶体管: 单管 1kV、200A; 模块: 1.2kV、800A; 1.8kV、100A。
- (7) 电力场效应管: 1kV、38A。
- (8) 绝缘栅双极型晶体管: 1.2kV、400A; 1.8kV、100A。
- (9) 静电感应晶闸管: 4.5kV、2.5kA。
- (10) 场控晶闸管: 1kV、100A。

4. 电力电子器件的今后发展

早期的电力电子器件主要追求高电压、大电流, 也就是大容量器件。以适合大功率场合的需要。今后的发展将主要有以下几个方面:

(1) 由半控型器件向全控型器件转移。由于全控型器件组成装置后的电性能明显优于半控型器件, 同时, 在全控型器件自身生产成本降低以后, 对装置成本也会有很大降低。因此, 无论在电性能方面, 还是价格方面, 都显示出明显优势。这就迫使器件使用逐步由半控型器件转向全控型器件。

(2) 向高频快速方向发展。第一, 有些生产设备要求变流装置输出高频, 如快速压缩

机、储能飞轮、机床主轴、研磨机等调速和高频感应加热以及超声波发生装置等，都需要高频输出，一般可达几兆到几十兆赫。这就要求开关频率大大提高；第二，有些装置虽然要求输出低频，但要求装置内部高频，如变频调速装置等设备，一般可达几十千赫到几百千赫。装置内高频有利于改善波形，降低电机的运行噪声，减小电机的脉动转矩和改善系统性能。这也要求器件有较高的开关频率。

(3) 向着高电压、大电流、快速、易驱动、复合化和智能化方向发展。

二、电力电子变流技术及其应用

电力电子变流技术就是利用电力电子器件组成相应电路同控制技术有效结合实现电能变换的一门技术。按其电能变换功能划分，主要有以下几种类型：

整流器——把交流电变为固定或可调的直流电。

逆变器——把直流电变为频率和幅值固定或可调的交流电。

斩波器——把固定的直流电压变为可调的直流电压。

交流调压器——把幅值固定的交流电压变为幅值可调的交流电压。

周波变换器——把幅值和频率固定的交流电压变为幅值和频率可调的交流电压。

由于晶闸管是静止型的电力电子器件，它自问世之日起，就在上述领域中得到了迅速推广，很快便淘汰了旋转变流机组和离子整流器。并把其应用迅速扩大到电力技术领域。目前，它在整流器、有源逆变器、交流调压和周波变换器中仍占有主导地位。

近年来，随着全控型器件技术的不断发展和性能的不断提高，其应用也得到了迅猛的发展。如交流变频调速、不间断电源和一些对电能变换性能要求较高的场合，而且在有些领域对晶闸管产生了冲击。目前，已到了电力电子技术全面发展、共争“天下”的时代。其电力电子变流技术在工业领域中的应用主要有以下几个方面：

(1) 电解、电冶炼、化工用直流电源

电解、电冶炼和化工领域（如电解铝、电解铜、直流电弧炉、电解食盐等）用直流电源的共同特点是低电压、大电流。一般电压在 1000V 以内，电流在几千到几十万安培。供电型式多为高压交流——整流变压器——整流器，完成相应的交流——直流变换功能。整流器一般采用二极管或晶闸管整流方式。在这一领域，使用晶闸管整流器是晶闸管的最典型应用之一。

(2) 直流传动装置

目前，在我国对传动装置要求较高场合，还多数采用直流电动机拖动。原因是直流电动机具有良好的起制动和调速性能。而直流电动机几种调速方式中，以调压调速性能为最好。使用晶闸管整流器对电动机供电，通过改变触发角控制整流器的输出电压，从而达到电机调压调速的目的。再结合相应的电流、转速闭环控制和逻辑控制，使其组成装置后具有非常优良的性能。近年来，在直流传动调速装置中使用微处理器，去完成相应的触发、计算、控制、保护和自诊断功能，使装置的控制灵活性、控制精度、可靠性和智能化程度都得以大大提高。使用微处理器的调速装置称为全数字直流调速装置。它已具有完全取代模拟控制直流调速装置的趋势。在冶金领域中的轧机和传动、有色金属加工、机械加工和造纸等领域中获得了广泛的应用。

(3) 变频传动装置

目前，在我国传动领域中，以交流电动机的传动，尤其是交流笼型电动机的传动在数

量上占有绝对优势。主要原因是交流电动机具有结构简单、价格便宜、易于维护和适合恶劣工作环境等特点。传动多以恒速或机械变速传动为主。在有些场合,很难满足生产工艺要求,同时带来很大的能量浪费。而交流电动机的几种调速中,以变频调速性能为最优。早期,由于高性能、高效率的静止变频器无法实现,所以,交流变频调速几乎只是一种理论上的调速。通过使用电力电子器件,尤其是全控型器件,结合16位微处理器的先进控制技术,组成交流——直流——交流变频装置(也称变频器)对电动机供电,可获得与直流调速相媲美的调速性能。因此近年来得到了迅速的推广和应用。它是全控型器件应用最活跃的领域之一。

(4) 晶闸管中频装置

晶闸管中频装置是一种将三相工频电能变成单相中频电能的装置。它实际上是一个交流——直流——交流的变流器。它广泛应用于电加热和电工艺领域。使用中频装置可以节约电能,提高产品质量和改善工作环境。目前我国生产的中频装置频率为400~1200Hz,单机容量可达1000kW。

(5) 其他应用

电力电子变流技术除上述应用外,还有其他许多应用。如用于温度控制的交流调压器和调功器,代替交流接触器的交流电子开关,直流牵引电源,电加工整流电源,高精度稳压电源,蓄电池充电电源,高压静电除尘等。它的应用几乎深入到了工业及社会生活的各个领域。

三、本课程任务及要求

电力电子变流技术是工业电气化、自动化专业的一门专业基础课。它主要研究各种器件原理及组成各类变流装置的基本原理、工作过程、控制要求、分析方法以及经济技术指标。学习电力电子变流技术的基本要求是:

- 1) 了解本门课在本专业中的地位、作用及服务对象。
- 2) 掌握各种电力电子器件的工作原理、工作特性及使用方法。
- 3) 熟练掌握单相、三相整流电路和有源逆变电路的基本原理,不同性质负载下的各种波形的分析方法和定量计算。
- 4) 掌握无源逆变电路、PWM 逆变电路的基本原理、换向过程、控制及波形分析方法。
- 5) 掌握交流调压、交流调功、交流无触点开关的基本原理、波形分析方法和应用等。
- 6) 掌握电力电子变流技术的工程设计方法,能依据实际要求,完成器件电路选型及控制方法的确定。
- 7) 掌握各种变流电路的测试手段和调整方法。

第一章 晶 闸 管

晶闸管也称可控硅，是硅晶体闸流管的简称。它又分为普通晶闸管 (Reverse blocking triode thyristor)、双向晶闸管 (Bidirectional triode thyristor)、可关断晶闸管 (Turn-off triode thyristor)、快速晶闸管 (Fast switching thyristor)、逆导晶闸管 (Reverse conducting triode thyristor) 和光控晶闸管 (Light activated triode thyristor)。由于普通晶闸管应用普遍，故本章着重介绍普通晶闸管，其它晶闸管仅作以简要介绍。本书如不特别说明，所说的晶闸管均指普通晶闸管。

第一节 晶闸管及其工作原理

一、晶闸管的结构

晶闸管是一种大功率半导体交流器件，常用的有螺栓式与平板式两种，其外形示于图 1-1 (a) 和 (b)。它有三个引出极：阳极 A，阴极 K 和门极（或称控制极）G。其电气符号如图 1-1 (c) 所示。

晶闸管在工作过程中会因损耗而发热，因此必须安装散热器。螺栓式晶闸管，螺栓端是阳极，它与散热器紧密地拧接在一起，粗辫子是阴极，细辫子是门极。平板式晶闸管是由两个彼此绝缘的散热器把晶闸管紧紧地夹在中间的，晶闸管元件呈圆饼形，两侧分别是阳极和阴极，细辫子线为门极，离门极较近的一端为阴极。由于两侧加装散热器，因而它比螺栓式晶闸管散热效果好。目前额定电流 200A 以上的晶闸管，通常都采用平板式结构。图 1-2 示出了几种散热器的外形。

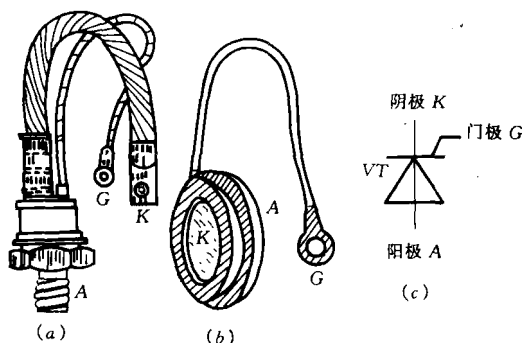


图 1-1 晶闸管的外形及符号
(a) 螺栓型；(b) 平板型；(c) 符号

晶闸管管芯内部结构如图 1-3 所示。管芯由四层半导体 ($P_1N_1P_2N_2$)、三个 PN 结 (J_1 、 J_2 、 J_3) 组成，并有三个引出端 (A、K、G)。晶闸管的结构决定了晶闸管的性能。

二、晶闸管的工作原理

晶闸管在什么条件下从正向阻断状态转变为正向导通状态呢？又在什么条件下，再从导通状态转变为阻断状态呢？现以灯泡作负载，按图 1-4 连接晶闸管的导通、关断实验电路。阳极电源 E_a 经双刀双掷开关 S_1 、白炽灯、晶闸管的阳极、阴极组成晶闸管主电路。流过晶闸管阳极的电流称阳极电流 I_a 。晶闸管阳、阴极间的电压称阳极电压 U_a 。门极电源 E_g 经双刀双掷开关 S_2 连接门极 G 与阴极 K，组成控制电路也称触发电路。流过门极的电流称门极

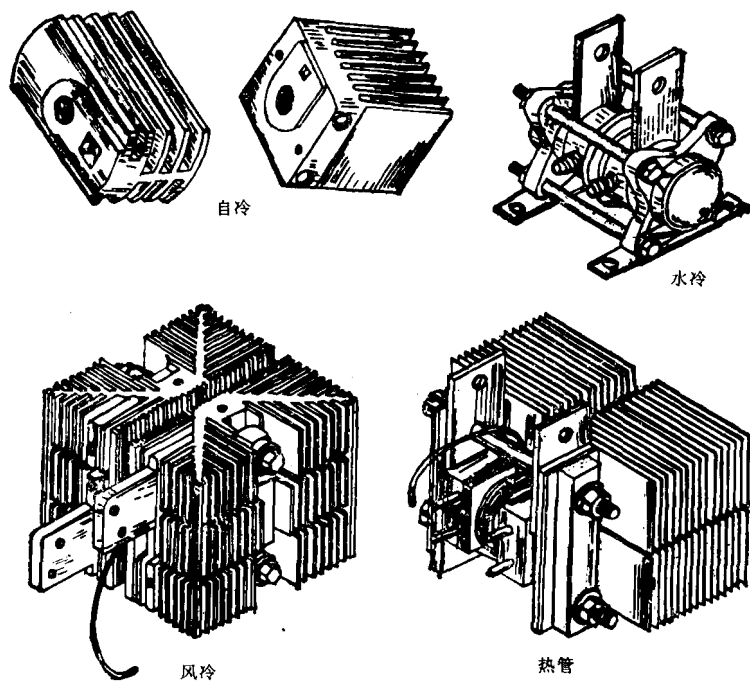


图 1-2 晶闸管的散热器

电流 I_g 。门极、阴极间的电压称门极电压 U_g 。通过此电路对晶闸管进行导通与关断实验，其结果见表 1-1。

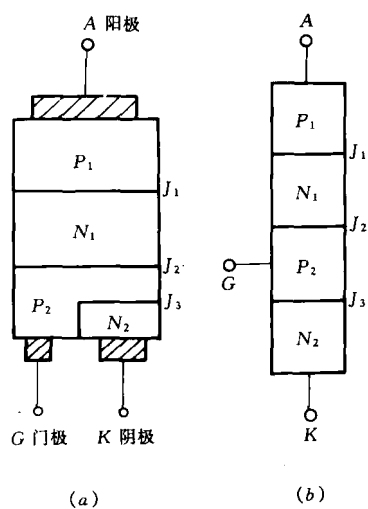


图 1-3 晶闸管管芯结构

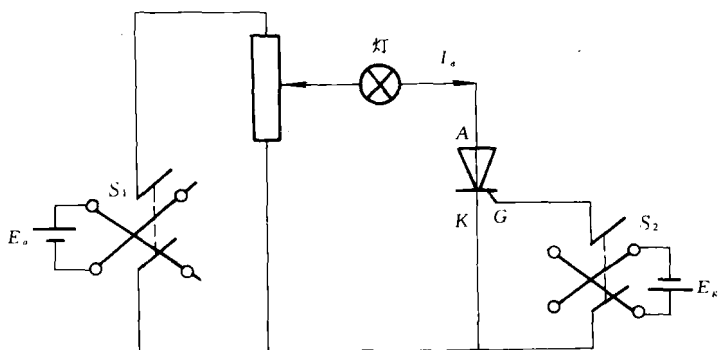


图 1-4 晶闸管导通关断实验电路

表 1-1 晶闸管导通和关断实验

实验序号		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	门极电压		
导通实验	1	暗	反向	反向	暗	当晶闸管受反向阳极电压, 不论门极受何种电压, 晶闸管都处于关断状态
	2	暗	反向	零	暗	
	3	暗	反向	正向	暗	
	4	暗	正向	反向	暗	当晶闸管受正向阳极电压, 仅在门极受正向电压时, 晶闸管才能被导通, 即正向阳极电压和正向门极电压必须同时具备
	5	暗	正向	零	暗	
	6	暗	正向	正向	亮	
关断实验	1	亮	正向	正向	亮	晶闸管在导通情况下, 只要仍受一定的正向阳极电压, 不论门极电压如何, 晶闸管仍然导通, 即导通后, 门极就失去控制作用
	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)	(任何)	暗	晶闸管在导通情况下, 当主回路电压(或电流)减小到接近于零时, 晶闸管关断

从表 1-1 可见, 晶闸管具有闸流特性, 电流 I_a 只能从阳极流向阴极, 即具有单向导电性质。晶闸管从关断变为导通必须使阳、阴极间承受正向电压; 与此同时, 还必须在门、阴极间加正向门极电压, 亦称触发电压, 两条件同时具备时, 晶闸管从关断变为导通。晶闸管一旦导通后, 门极便失去控制作用。可见门极在上述条件下触发晶闸管导通, 但不能控制晶闸管关断, 因而普通晶闸管也称半控型变流元件。

那么晶闸管从导通怎样才能变为关断呢？可降低阳极电压或增大负载电阻，使阳极电流 I_a 小于晶闸管维持电流 I_H 时便可关断。 I_H 是维持晶闸管导通的最小阳极电流（约几十 mA）。

晶闸管为什么具有上述导通与关断特性呢？这就要从晶闸管内部结构来分析。晶闸管是四层半导体 ($P_1N_1P_2N_2$)，三个PN结 (J_1 、 J_2 、 J_3) 器件，可以将 N_1 和 P_2 分为两部分，构成一对互补三极管的电路。如图 1-5 所示为一个三极管 V_1 ($P_1-N_1-P_2$) 与另一个三极管 V_2 ($N_1-P_2-N_2$) 相接图。从图 1-5 可见，一个三极管的集电极电流恰是另一个三极管的基极电流。当晶闸管的阳极加上正向电压，门极流入足够的触发电流 I_g 时，就会产生 V_1 和 V_2 两个三极管集电极电流 I_{c1} 和 I_{c2} 及发射极电流 I_a 和 I_k 。共基极接法的电流放大倍数 $\alpha_1 = I_{c1}/I_a$ 和 $\alpha_2 = I_{c2}/I_k$ 。流过 J_2 结的反向漏电流为 I_{c0} 。晶闸管阳极电流 I_a 为：

$$\begin{aligned} I_a &= I_{c_1} + I_{c_2} + I_{c_0} = \alpha_1 I_a + \alpha_2 I_g + I_{c_0} \\ &= \alpha_1 I_a + \alpha_2 (I_a + I_g) + I_{c_0} \\ I_a &= \frac{\alpha_2 I_g + I_{c_0}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \end{aligned} \quad (1-1)$$

晶体管的电流放大倍数 (α_1, α_2) 与发射极电流的关系如图 1-6 所示。当门极开路时, $I_g = 0$, $I_a = I_k$, α_1, α_2 很小, 由式 (1-1) 可知, $I_a \approx I_{c_1}$, 管子处于正向阻断状态。

当门极流入足够大的触发电流 I_g 时, 将形成正反馈过程:

$$I_g \xrightarrow{\quad} I_k = (I_{c_1} + I_g + I_{c_2}) \xrightarrow{\alpha_2} I_{c_2} = (\alpha_2 I_k) \xrightarrow{\quad} \\ \uparrow \quad \quad \quad \uparrow \quad \quad \quad \uparrow \quad \quad \quad \uparrow \quad \quad \quad \uparrow \\ I_{c_1} = (\alpha_1 I_a) \xleftarrow{\alpha_1} I_a = (I_{c_1} + I_{c_2}) \xleftarrow{\quad}$$

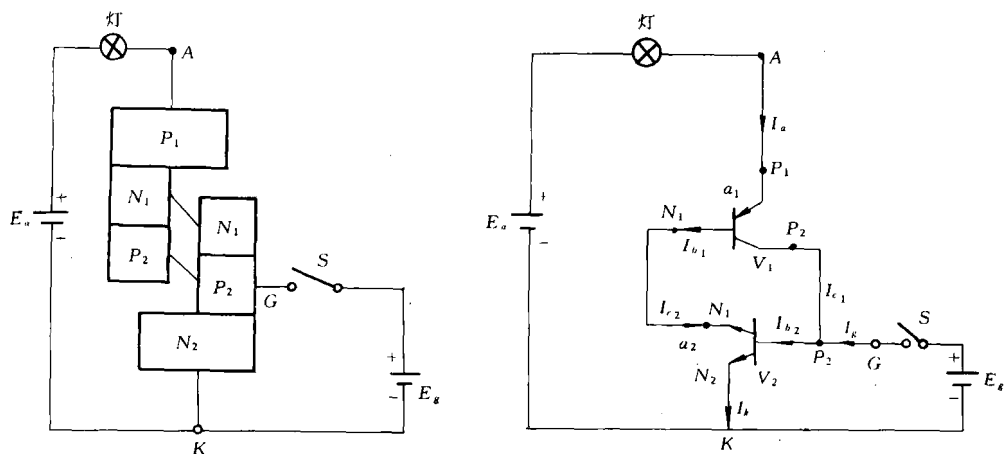


图 1-5 晶闸管的工作原理

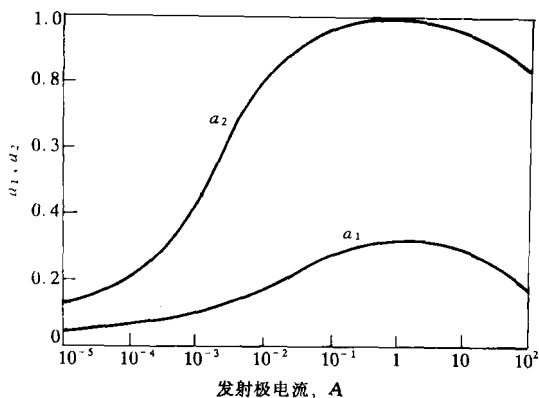


图 1-6 两个晶体管电流放大系数与发射极电流关系

随着 α_1 、 α_2 的增大达到 $(\alpha_1 + \alpha_2) \approx 1$ 时, 由式 (1-1) 可知, I_a 将急剧增大, 这时流过晶闸管的电流 I_a 由电源电压和回路电阻所决定。晶闸管处于正向导通状态。

从式 (1-1) 可见, 晶闸管导通后, $1 - (\alpha_1 + \alpha_2) \approx 0$, 即使 $I_g = 0$, I_a 仍不变, 管子继续导通。即门极失去控制作用。

如果使晶闸管阳极电流 I_a 减小, 则 α_1 、 α_2 随之减小, 当 $I_a < I_H$, 即 $(\alpha_1 + \alpha_2) \approx 0$ 时, 由式 (1-1) 可知, 晶闸管恢复阻断状态。

例 1 图 1-7 所示主电路加正弦交流电源 u_2 , 门极开关 S 在 t_1 时闭合, t_4 时打开, 求负载灯上的电压波形 u_d 。

解: 分析 u_2 、 u_g 波形可得 u_d 波形, 在 $t = 0 \sim t_1$ 区间, 管子承受正向阳极电压, 但门极电压为零, 管子处于阻断状态, $u_d = 0$; 在 $t = t_1 \sim t_2$ 区间, 阳极电压为正, 门极有触发电压, 管子处于导通状态, 忽略管压降, 则 $u_d = u_2$; 在 $t = t_2 \sim t_3$ 区间, 阳极电压过零反向, I_a 减

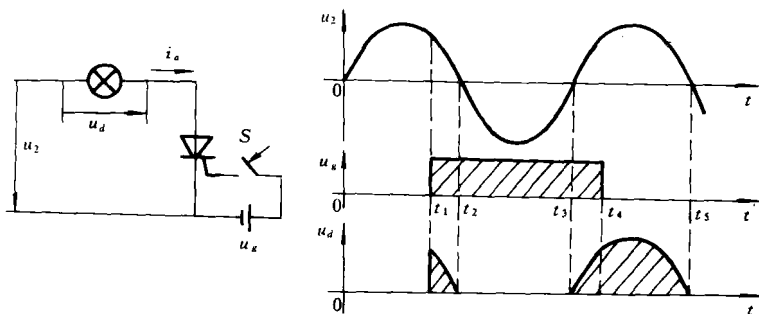


图 1-7 例题电路和波形

小至 $I_a < I_H$ ，管子恢复阻断状态， $u_d = 0$ ；在 $t = t_3 \sim t_4$ 区间，管子又符合导通条件， $u_d \approx u_2$ ；在 $t = t_4 \sim t_5$ 区间，管子已导通，尽管 $u_g = 0$ ，管子仍能继续导通， $u_d = u_2$ 。

第二节 晶闸管的伏安特性

一、晶闸管的阳极伏安特性

晶闸管阳极与阴极间的电压 U_a 与阳极电流 I_a 的关系，称为阳极伏安特性。为了正确使用晶闸管就必须了解晶闸管伏安特性。

一个最简单的晶闸管主电路，如图 1-8 所示。

晶闸管实际阳极伏安特性如图 1-9 所示。正向特性位于第 I 象限，反向特性位于第 III 象限。正向特性分为阻断特性和导通特性。当门极电流 $I_g = 0$ 时，逐渐增大阳极电压 U_a ，由于 J_2 结受反压阻挡，只有很小的正向漏电流。当 U_a 增加到 U_{B0} 时，漏电流剧增，特性从正向阻断特性（OA 段）经负阻区（虚线）过渡到正向导通特性（BC 段）。 U_{B0}

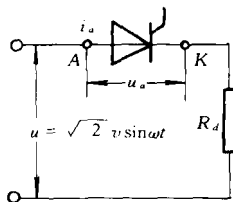


图 1-8 晶闸管主电路

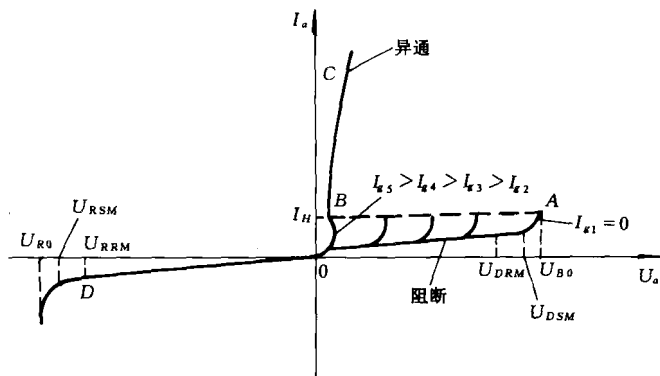


图 1-9 晶闸管阳极伏安特性

称元件的正向最大转折电压。这种使晶闸管从关断变导通称“硬导通”。多次“硬导通”会损坏管子，所以正常工作时不允许将 U_a 升到 U_{B0} 。当 $I_a > 0$ 时，使晶闸管导通，而且 I_a 愈大，阳极转折电压愈低；见图 (1-9) 所示。在晶闸管导通后，逐渐减小阳极电流 I_a ，当 $I_a < I_H$ 时，晶闸管由导通变为阻断。晶闸管的反向特性是对晶闸管施加反向阳极电压，使 J_1 、 J_3 结受反向偏置，流过很小的反向电流，对应特性 OD 段，当反向电压增加到 U_{R0} 时 J_1 、 J_3 结反向击穿。 U_{R0} 称为反向击穿电压。

二、晶闸管门极的伏安特性

晶闸管的门极和阴极间的 PN 结 J_3 ，见图 1-3 (b)，它的伏安特性称为门极伏安特性。实际产品，即使是同一厂家同一型号的元件，其门极伏安特性也很分散。因此，常以两条典型特性——极限低阻值门极伏安特性 OD 和极限高阻值门极伏安特性 OG 之间的区域来代表同一规格元件的伏安特性，称为门极伏安特性区域。图 1-10 给出了 500 安培晶闸管的门极伏安特性区域。在门极伏安特性区域中， $OHIO$ 区为不触发区， $ABCJIHA$ 区为不可靠触发区，见图 1-10 (b) 所示。 $ABGGFEDA$ 区为可靠触发区，正常使用时，门极的触发电流和触发电压应处于该区内。

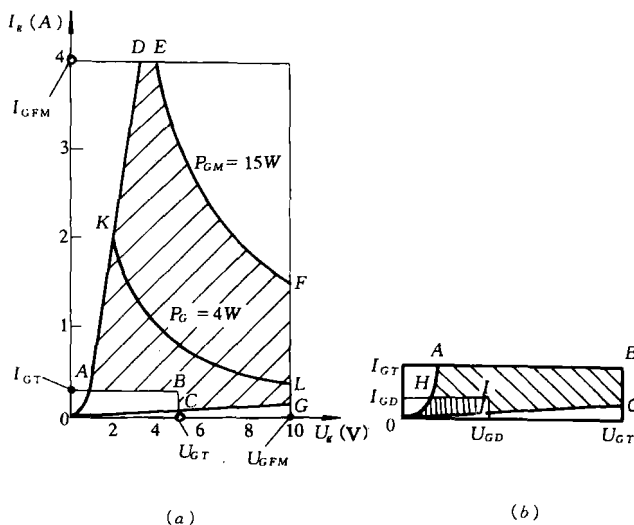


图 1-10 晶闸管的门极伏安特性

为了保证晶闸管正常工作而不被烧坏，加于门极的电压、电流和功率有一定的限度 (表 1-4)。因此，可靠触发区的上限是由门极正向峰值电流 I_{GFM} 、正向峰值电压 U_{GFM} 和允许的最大瞬时功率 P_{GM} 确定的。在可靠触发区内，门极的平均功率损耗不应超过规定的平均功率 P_G 。如图 1-10 (a) 中的曲线 KL 。

可靠触发区的下限是这样确定的，在室温下元件的阳极加 6 伏直流电压，同规格的元件均能由阻断状态转为通态所必须的最小门极直流电流 I_{GT} 和门极电压 U_{GT} 值。元件触发电压、电流太小，触发不可靠，造成触发困难；触发电压、电流太大会造成损耗增大，易损坏控制结。触发电压、电流受温度影响较大，温度升高， U_{GT} 、 I_{GT} 值会降低，反之则需要增大。设计触发电路时应加以考虑。

第三节 晶闸管的主要参数

为了正确使用晶闸管，不仅需要了解晶闸管的伏安特性，而且还要知道晶闸管的主要参数。

一、晶闸管的电压定额

1. 断态正向重复峰值电压 U_{DRM}

从图 1-9 所示的伏安特性可见，当门极开路，元件处于额定结温时在阳极伏安特性曲线开始上翘处所对应的阳极电压，称为断态正向不重复峰值电压 U_{DSM} （此电压不可连续或重复施加）， $U_{DSM} < U_{BO}$ 。取 80% 的 U_{DSM} 电压值，用 U_{DRM} 表示，称为正向重复峰值电压。

2. 反向重复峰值电压 U_{RRM}

当门极开路，元件处于额定结温时，施加反向电压，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，取其值的 80% 称为反向重复峰值电压，用 U_{RRM} 表示，见图 1-9 所示。

3. 额定电压 U_{Te}

实测的 U_{DRM} 与 U_{RRM} 中数值较小者，取相应的标准电压等级，标在出厂元件铭牌上，为该元件额定电压 U_{Te} 。电压等级标准见表 1-2。

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 U_{Te} (V)	级 别	正反向重复峰值电压 U_{Te} (V)	级 别	正反向重复峰值电压 U_{Te} (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		

由于瞬时过电压也会使晶闸管元件造成永久损坏，因而选用晶闸管的额定电压时，应比实际工作时的峰值电压大 2~3 倍，做为安全裕量。

例 2 某晶闸管实测得 $U_{DSM} = 960V$ ， $U_{RSM} = 1100V$ ，则 $U_{DRM} = 0.8 \times 960 = 768V$ ， $U_{RRM} = 0.8 \times 1100V = 880V$ 。取 U_{RRM} 和 U_{DRM} 中较小者为 768V，按表 1-2 中电压等级标准为 8 级， $U_{Te} = 800V$ 。

例 3 图 1-7 中电压 $U_2 = 220V$ ，正常峰值电压为 $U_{TM} = \sqrt{2}U_2 = 311V$ ，则选用元件的 $U_{Te} = (2 \sim 3)U_{TM} = (2 \sim 3) \times 311V = 622 \sim 933V$ ，实选 $U_{Te} = 800V$ 。

4. 通态平均电压 U_{Ta}

流过正弦半波的额定通态平均电流和稳定的额定结温时，元件阳、阴极间电压降的平均值，称通态平均电压 U_{Ta} 亦称管压降。 U_{Ta} 愈小愈好， U_{Ta} 等级标准见表 1-3。