

高职高专电气自动化技术专业规划教材

GAOZHI GAOZHUAN DIANQI ZIDONGHUA JISHU ZHUANYE GUIHUA JIAOCAI



电力电子技术

牛广文 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

教育部高等学校电气工程及其自动化专业教学指导分委员会 组织编写
教育部高等学校电气工程及其自动化专业教学指导分委员会 组织编写



电力电子技术

第2版



清华大学出版社

高职高专电气自动化技术专业规划教材

GAOZHI GAOZHUAN DIANQI ZIDONGHUA JISHU ZHUANYE GUIHUA JIAOCAI



电力电子技术

主 编 牛广文
编 写 李双科 边玉国 王 岩
主 审 刘雨棣



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为高职高专电气自动化技术专业规划教材。

本书共分9章, 主要介绍电力电子器件、单相可控整流电路、三相可控整流电路、晶闸管的正确使用及保护、晶闸管触发电路、有源逆变电路、交流开关与交流调压电路、变频电路和直流斩波电路。

本书突出了高职高专电类专业的特点, 强化基本概念的掌握, 没有繁杂公式的推导, 增加了一些实用电路分析, 并在书后附了6个实验, 强化了实践环节, 更加满足高职高专技术应用性的需要。

本书可作为高职高专电气自动化技术、供用电技术、电力系统自动化等相关专业教材, 也可作为电力电子技术应用领域内工程技术人员的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力电子技术/牛广文主编. —北京: 中国电力出版社, 2011. 6

高职高专电气自动化技术专业规划教材

ISBN 978 - 7 - 5123 - 1753 - 6

I. ①电… II. ①牛… III. ①电力电子技术—高等职业教育—教材 IV. ①TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 101824 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2011 年 8 月第一版 2011 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 12 印张 282 千字

定价 20.50 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签, 加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

高职高专电气自动化技术专业规划教材

编 委 会

主 任 吕景泉

副主任 狄建雄 凌艺春 谭有广 周乐挺 郝汉琪

秘书长 李兆春

委 员 (按姓氏笔画排序)

丁学恭 马伯华 王 燕 王 薇 王永红

刘玉娟 刘玉梅 刘保录 孙成普 孙忠献

何 颖 何首贤 张 池 张永飞 张学亮

张跃东 李方园 陆锦军 陈 赵 姚永刚

姚庆文 郭 健 钱金法 常文平 韩 莉

前言

电力电子技术是 20 世纪发展起来的新兴技术，是高新技术产业发展的主要方向之一，也是传统产业改造的重要手段之一。随着各种新型电力电子器件的不断涌现，电力电子技术在国民经济发展中将发挥越来越重要的作用。为适应当前高职高专人才培养的需求，编者结合多年的教学经验，参考相关教材和文献资料，编写了本书。

本书是基于高职高专电气自动化、供用电技术、电力系统自动化等专业教学大纲对电力电子技术课程的教学要求，结合多年高职高专的教学经验，融入近年电力电子新技术、新器件编写而成。教材内容注重理论与实际相结合，加强了工程技术相关内容的讲解，各章节内容既有联系，又相对独立，在实际教学使用时，讲授内容可根据不同专业及教学需要进行合理选择与组织。

本书突出了高职高专电类专业的特点，遵循“理解概念、注重实践，培养能力、提高素质”的原则，强化基本概念的掌握，没有繁杂公式的推导，增加了一些实用电路分析，并在附录中给出了 6 个实验，强化了实践环节，更加适应高职高专技术应用性的需要。

本书可作为高职高专电气自动化、供用电技术、电力系统自动化和相关专业的教材，也可作为从事电力电子技术应用领域的工程技术人员的参考用书。

本书由兰州工业高等专科学校的牛广文主编，李双科、边玉国、王岩参与编写。其中，牛广文编写了绪论和第 1、3、4 章，王岩编写了第 2、5、6 章，边玉国编写了第 7~9 章，李双科编写了实验部分并负责统稿。本书承西安航空技术高等专科学校刘雨棣教授主审，在此表示衷心感谢。

由于编者水平和经验所限，书中的缺点和不足在所难免，恳请广大同行和读者批评指正。

编者

2011 年 6 月

目 录

前言	
绪论	1
第 1 章 电力电子器件	3
1.1 晶闸管	3
1.2 双向晶闸管	13
1.3 可关断晶闸管	18
1.4 功率晶体管	21
1.5 功率场效应晶体管	23
1.6 绝缘栅双极晶体管	25
1.7 其他电力电子器件简介	26
本章小结	30
思考与练习题	30
第 2 章 单相可控整流电路	32
2.1 单相半波可控整流电路	32
2.2 单相全控桥式整流电路	36
2.3 单相半控桥式整流电路	42
本章小结	45
思考与练习题	45
第 3 章 三相可控整流电路	47
3.1 三相半波可控整流电路	47
3.2 三相全控桥式整流电路	54
3.3 三相半控桥式整流电路	59
3.4 整流电路的谐波和功率因数	63
本章小结	64
思考与练习题	65
第 4 章 晶闸管的正确使用及保护	67
4.1 晶闸管的正确使用	67
4.2 晶闸管的保护	68
4.3 晶闸管的串并联使用	72
本章小结	74

思考与练习题	75
第 5 章 晶闸管触发电路	76
5.1 对触发电路的要求	76
5.2 单结晶体管触发电路	76
5.3 锯齿波同步触发电路	80
5.4 集成化晶闸管移相触发电路	85
5.5 触发脉冲与主电路电压的同步及防止误触发的措施	89
本章小结	91
思考与练习题	92
第 6 章 有源逆变电路	93
6.1 有源逆变电路的工作原理	93
6.2 三相有源逆变电路	96
6.3 逆变失败及最小逆变角的确定	100
6.4 有源逆变电路的应用	103
6.5 晶闸管装置的功率因数及对电网的影响	110
本章小结	113
思考与练习题	114
第 7 章 交流开关与交流调压电路	116
7.1 晶闸管交流开关	116
7.2 单相交流调压电路	121
7.3 三相交流调压电路	126
本章小结	131
思考与练习题	131
第 8 章 变频电路	133
8.1 变频的基本概念	133
8.2 负载谐振式逆变器	136
8.3 三相逆变器	139
8.4 脉宽调制型变频电路	144
本章小结	149
思考与练习题	150
第 9 章 直流斩波电路	151
9.1 降压式斩波电路	151
9.2 升压式斩波电路	155
9.3 升降压式斩波电路	158
本章小结	161
思考与练习题	162

附录 实验	164
实验 1 单结晶体管触发电路和单相半波可控整流电路实验	165
实验 2 单相桥式半控整流电路实验	167
实验 3 单相桥式全控整流及有源逆变电路实验	170
实验 4 三相桥式全控整流及有源逆变电路实验	172
实验 5 直流斩波电路实验	175
实验 6 单相交流调压电路实验	177
参考文献	179

绪 论

电力电子技术是应用于电力领域的电子技术。具体地说,就是使用电力电子器件对电能进行变换和控制的技术。目前所用的电力电子器件均用半导体制成,故也称为电力半导体器件。

20世纪60年代发展起来的晶闸管,因其工作可靠、寿命长、体积小、开关速度快,在电力电子电路中得到了广泛的应用。随着电子技术和半导体材料及工艺水平的迅速发展,电力电子器件的性能和参数均有很大的提高,目前单只普通晶闸管的容量已达8000V、6000A。

自1957年第一只晶闸管(Thyristor)出现之后,陆续衍生了快速晶闸管(FST)、逆导晶闸管(RCT)、双向晶闸管(TRIAC)、光控晶闸管(LTT)等器件。20世纪80年代以来,微电子技术与电力电子技术在各自发展的基础上相结合而产生了新一代高频化、全控型的功率集成器件,主要有可关断晶闸管(GTO)、电力晶体管(GTR)、绝缘栅双极晶体管(IGBT)、大功率场效应晶体管(MOSFET)等。当代电力电子器件的发展趋势是大容量、高频化、模块化、功率集成化,从而使电力电子技术也由传统的电力电子技术跨入了现代电力电子技术的新时代。

将电子技术与控制技术应用到电力领域,通过电力电子器件组成各种电力变换电路,实现电能的转换与控制,称为电力电子技术,或电力电子学。

电力电子技术包括电力电子器件、变流电路和控制电路三个部分,其中电力电子器件是基础,变流技术是电力电子技术的核心。电力电子技术是电力、电子、控制三大工程技术领域的交叉学科。它是以电力为对象,利用电力电子器件,采用适当的控制方法对电能进行控制和转换的综合性技术,突出了对“电力”的变换与控制。这种对电能进行变换的装置称为变流电路,其基本功能是使交流(AC)和直流(DC)电能互相转换。变流电路主要有以下五种类型:

(1) 可控整流(AC—DC)。把交流电压变换成为固定或可调的直流电压,如应用于直流电动机的调压、调速,用于电解、电镀设备等。

(2) 有源逆变(DC—AC)。把直流电压变换成为频率固定或可调的交流电压,如应用于直流输电、牵引机车制动时的电能回馈等。

(3) 交流调压(AC—AC)。把固定或变化的交流电压变换成为可调或固定的交流电压,如应用于灯光控制、温度控制等。

(4) 无源逆变(AC—DC—AC)。把固定或变化频率的交流电变换成频率可调或恒定的交流电,如应用于变频电源、不间断电源(UPS)、变频调速等。

(5) 直流斩波(DC—DC)。把固定或变化的直流电压变换成为可调或固定的直流电压,如应用于电气机车、城市电车牵引等。

在电能变换过程中,无论采用半控型还是全控型电力电子器件,其基本控制方式都相

同，主要有相位控制、通断控制和脉冲宽度调制（PWM）。不论是相位控制技术还是脉冲宽度调制技术，都在实际应用过程中不断地完善、改进，并涌现出许多专用集成触发（驱动）电路。这些电路具有使用简便、电路工作稳定和体积小等优点。变流电路的控制技术正朝着数字化的方向发展。

采用电力电子器件构成的变流装置具有以下优点：

- (1) 响应快（毫秒级或微秒级）、动态时间短。
- (2) 功率增益高、控制灵活。
- (3) 体积小、重量轻、无磨损、无噪声，维修方便。
- (4) 效率高、节约能源等。

主要缺点是：

- (1) 过载能力低，必须有保护措施。
- (2) 移相控制在控制角较大时，功率因数低。
- (3) 采用移相触发时，会出现高次谐波，引起电网电压、电流波形畸变。

随着电力电子技术的不断发展和保护措施的不断完善，这些问题必将被逐渐解决。

“电力电子技术”是供用电技术、电力系统自动化、电气技术等高职高专电气工程类专业的主干课程之一。本课程的基本要求是：

- (1) 了解电力电子技术的应用范围和发展动向。
- (2) 熟悉和掌握晶闸管、功率 MOSFET、IGBT 等电力电子器件的结构、工作原理、特性和使用方法。
- (3) 熟练掌握单相、三相整流电路的基本原理、波形分析和各种负载对电路工作的影响，并能进行电路设计计算。
- (4) 熟练掌握逆变电路的工作原理、波形分析和参数计算。
- (5) 掌握交流调压器、直流斩波器电路的工作原理。

本课程的重点在于讨论各类器件所构成的各种变流电路。本教材首先系统地讲解各种电力电子器件的基本原理、工作特性，在此基础上分析不同的变流电路，以不同电力电子器件的应用为中心进行讨论，如可控整流电路以普通型晶闸管为主，交流调压变换电路以反并联普通晶闸管和双向晶闸管器件为主，而无源逆变与变频器电路目前主要采用 IGBT。

“电力电子技术”既是一门技术基础课程，也是一门实用性很强的课程。本教材正文后附有“实验”部分，通过这些实验，使学生对电力电子装置有一定的感性认识，并锻炼学生的动手能力。

在学习本课程前，要求学生已经学过“电工基础”、“电子技术基础”两门课程，并已熟练掌握示波器等电子仪器的使用方法。

本课程的目的和任务是使学生通过学习后，掌握电力电子技术必要的基本理论、基本分析方法，培养和训练学生的基本技能，为学习后续课程及从事相关专业有关的技术工作和科学研究打下一定的基础。

电 力 电 子 器 件

电力电子器件是构成电力电子设备的基本元件,是电力电子技术的基础,其原理、特性、应用方法及典型电路决定着电力电子电路及控制系统的性能和可靠性。

电力电子器件(Power Electronic Device)是指在电能变换与控制电路中,实现电能的变换或控制的电子器件。电力电子器件有真空器件和半导体器件两大类。自晶闸管等新型半导体电力电子器件问世以来,除了在频率很高的大功率高频电源中还使用真空管外,其他电能变换和控制领域中几乎全部使用基于半导体材料的各种电力电子器件,这类器件已成为电能变换和控制领域的绝对主力。

各种电力电子器件均具有导通和阻断两种工作特性。根据对导通与阻断的可控性,电力电子器件可分为三类。功率二极管(又称电力二极管)是二端(阴极和阳极)器件,器件电流由伏安特性决定。除了改变加在两端间的电压外,无法控制阳极电流,故称为不可控型器件;普通晶闸管是三端器件,其门极信号能控制元件的导通,但不能控制其关断,所以称之为半控型器件。可关断晶闸管、绝缘栅双极晶体管等器件,其控制极的信号既能控制器件的导通,又能控制其关断,所以称之为全控型器件。

由于半控型电力电子器件中普通晶闸管的应用最为广泛,本章先对其作重点介绍,然后再简单介绍其他类型的晶闸管。

1.1 晶 闸 管

晶闸管(Thyristor)是晶体闸流管的简称,早期称作可控硅整流器(Silicon Controlled Rectifier, SCR),简称为可控硅。它是一种较理想的大功率变流器件,主要应用在可控整流、交流调压、无触点交直流开关、逆变和直流斩波等方面。晶闸管的种类很多,包括普通晶闸管、双向晶闸管、快速晶闸管、可关断晶闸管、光控晶闸管和逆导晶闸管等。本节主要介绍普通晶闸管的工作原理、基本特性和主要参数。

1.1.1 晶闸管的结构

目前国内外生产的晶闸管,根据额定电流或功率的不同,其外形封装形式可分为小电流塑封式、小电流螺栓式、大电流螺栓式和大电流平板式(额定电流在200A以上),如图1-1所示。

晶闸管主要有螺栓型和平板型两种封装结构,均引出阳极A、阴极K和门极(控制端)G三个连接端。对于螺栓型封装,通常螺栓是其阳极,做成螺栓状是为了能与散热器紧密连接且安装方便。另一侧较粗的引线为阴极,细的引线为门极。功率更大的晶闸管多采用平板型封装,可用两个散热器将晶闸管夹在中间,更利于散热。其两个平面分别是阳极和阴极,由中间金属环引出的细长端子为门极,靠门极引线金属环较近的平面是阴极。

晶闸管是一种四层三端结构的大功率半导体器件,是用N型单晶硅片,按一定的工艺

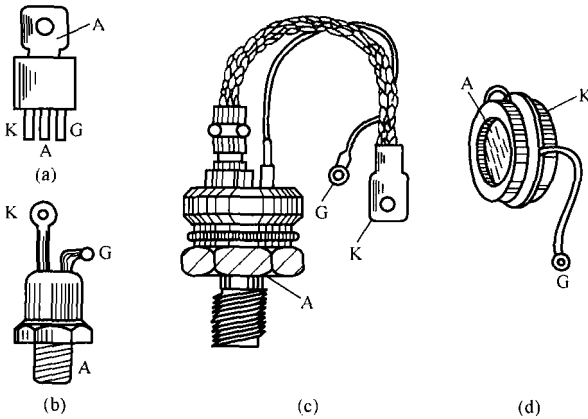


图 1-1 晶闸管的外形及电极表示
(a) 小电流塑封式；(b) 小电流螺栓式；
(c) 大电流螺栓式；(d) 大电流平板式

要求，分别进行扩散及烧结处理后，形成的PNPN四层结构。其内部结构、示意图和电气图形符号如图 1-2 所示。其内部PNPN四层结构形成3个PN结，分别从P1、P2和N2这3个区引出3个电极A、K、G，分别称为阳极(A)或正极、阴极(K)或负极、门极(G)或控制极。

1.1.2 晶闸管的工作原理

为了理解晶闸管的工作条件，可按图 1-3 做实验。主电源 E_A (为 3~6V) 和门极电源 E_G (一般为 1.5~3V) 通过双刀双掷开关 S1 和 S2 正向或反向作用于晶闸管的有关电极，主

电路的通断由灯泡显示。通过实验可得出下述晶闸管导通和阻断的规律。

(1) 当晶闸管承受反向阳极电压时，不论门极承受何种电压，晶闸管都处于关断状态。

(2) 当晶闸管承受正向阳极电压时，仅在门极承受正向电压的情况下晶闸管才能导通，正向阳极电压和正向门极电压两者缺一不可。晶闸管导通后的管压降为 1V 左右，电源电压 E_A 几乎全加到灯泡上，灯泡燃亮。

(3) 晶闸管一旦导通，门极就失去了控制作用，之后不论门极电压是正还是负，晶闸管都保持导通，故导通的控制信号只需短暂的正向脉冲电压，称为触发脉冲。

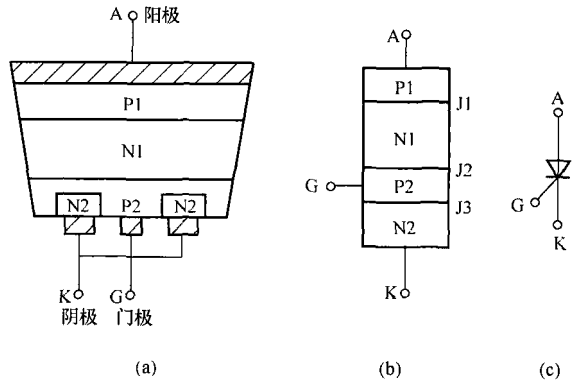


图 1-2 晶闸管内部结构、示意图与电气图形符号
(a) 内部结构；(b) 示意图；(c) 电气图形符号

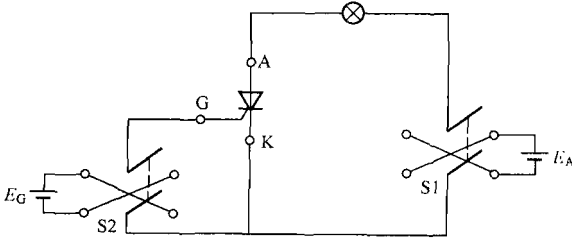


图 1-3 晶闸管工作条件的实验电路

通过上面的实验可以看出，如果要使晶闸管由阻断状态进入导通状态，必须同时具备下面两个条件：

(1) 晶闸管的阳极与阴极间加正向电压，即阳极接电源正极、阴极接电源负极，形成主

(4) 要使晶闸管关断，必须去掉阳极正向电压，或者给阳极加反压，或者降低正向阳极电压，使通过晶闸管的电流降低到一定数值以下。使晶闸管保持导通的最小电流，称为维持电流 I_H 。

(5) 当门极未加触发电压时，晶闸管具有正向阻断能力，这是一般二极管不具备的。

电路。

(2) 门极加适当的正向电压, 即门极接电源正极、阴极接电源负极, 形成控制回路。在实际工作中, 门极加正触发脉冲信号。

同样, 从上述过程可以看出, 如果要使晶闸管由导通状态进入阻断状态, 必须具备下面两个条件之一:

- (1) 减小阳极电流, 使之小于晶闸管的维持电流 I_H , 这一般称为不可靠关断条件。
- (2) 在晶闸管上加反向阳极电压, 这称为可靠关断条件。

为了说明上述实验中的现象, 我们可以把晶闸管等效成由一个 NPN 型三极管和一个 PNP 型三极管组成的组合器件, 中间的 PN 结两管共用, 如图 1-4 所示。

晶闸管加正向电压 U_{AK} 时, 通过 V2 管发射结的正向导通作用使 V1 管集电极上有正电压。在门极没有加正向电压时, $I_{B1} = 0$, V1 管不导通, 晶闸管处于关断状态, 这时两管共用的 PN 结承受反向电压。

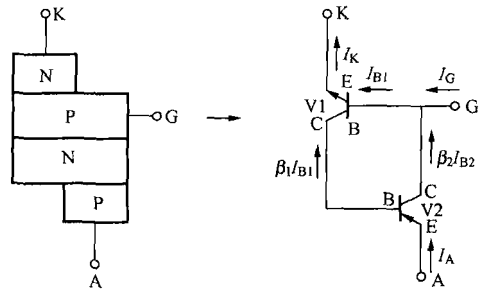


图 1-4 晶闸管等效电路图

如果门极 G 加上一个正向电压, 相当于 V1 管基极有了一个基极电流 I_{B1} , V1 管导通。由于 V1 管的放大作用, 产生集电极电流 $I_{C1} = \beta_1 I_{B1}$, 这就是 V2 管的基极电流 I_{B2} , 通过 V2 管的放大作用, V2 管的集电极电流 $I_{C2} = \beta_2 I_{B2} = \beta_1 \beta_2 I_{B1}$ 。 I_{C2} 电流再次注入 V1 管的基极, 又一次得到放大, 这样循环下去, 形成了强烈的正反馈, 使两只三极管都快速进入饱和状态, 最终使晶闸管完全导通。上述过程称为触发导通过程, 门极上所加的使晶闸管触发导通的正向电压称为触发电压。

晶闸管触发导通后, V1 管基极始终有 V2 管的集电极电流流过, 因此, 即使失去触发电压, 晶闸管仍保持导通, 此时门极失去了控制作用。

若减小阳极电压, 当阳极电流 I_A 减小到使之不能维持正反馈过程时, 晶闸管便转为关断。当阳极和阴极间加反向电压时, V1 和 V2 管都处于反向电压下, 它们都没有放大作用, 所以门极不论加什么样的控制电压, V1 和 V2 管都不能导通, 晶闸管处于关断状态。

综上所述, 我们可以得到如下结论:

(1) 晶闸管与硅二极管相似, 都具有单向导通特性, 相当于单向导电开关。所不同的是, 晶闸管还具有正向阻断能力, 而且正向导电受门极控制, 具有单相可控导通特性。

(2) 晶闸管一旦导通, 门极即失去控制作用。要重新关断晶闸管, 必须将阳极电流减小到使之不能维持正反馈过程, 或者将阳极电源断开, 或者在晶闸管的阳极和阴极间加一个反向电压。

另须注意: 晶闸管除了在门极电压触发下可以导通外, 在以下几种情况下也可能出现导通: 阳极电压升高至相当高的数值造成雪崩效应; 阳极电压上升率 du/dt 过高; 结温过高等。这些情况都属于不正常的导通方式, 工作时应当尽量避免。

1.1.3 晶闸管的基本特性

1.1.3.1 晶闸管的静态伏安特性

一、晶闸管的阳极伏安特性

图 1-5 所示为在静态运行情况下晶闸管的阳极伏安特性。位于第 I 象限的是正向特性,

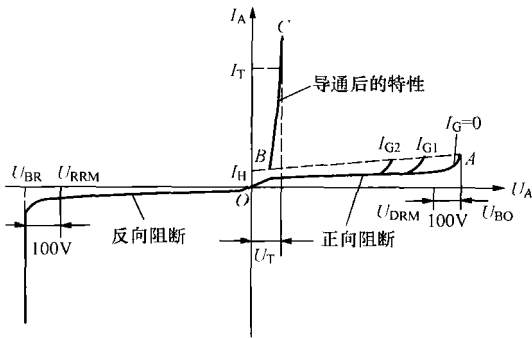


图 1-5 晶闸管阳极伏安特性曲线

位于第三象限的是反向特性。

(1) 正向伏安特性。由于晶闸管具有正向可控导通的特性，所以其正向伏安特性与二极管不同。晶闸管在门极开路 ($I_G=0$) 的情况下，在阳极与阴极间施加一定的正向阳极电压，器件也仍处于正向阻断状态，只有很小的正向漏电流流过。随着正向阳极电压的升高，正向漏电流随之加大。当正向阳极电压升高到器件允许的最高临界极限电压，即正向转折电压 U_{BO} 时，内部 J2 结被击穿，导致电流急剧增大，晶闸管由正向阻断状态突然转化为正向导通状态。这是一种非正常状态，称为“硬开通”，通常不允许发生这种情况。晶闸管导通后，就可以通过很大的电流，它本身的压降只有 1V 左右，曲线由 A 处跳到 B 处，以后的特性曲线靠近纵轴， I_A 沿 BC 段曲线变化，其特性与二极管正向特性相似。

当门极加有正向电压，即 $I_G > 0$ 时，晶闸管仍有一定的正向阻断能力，但此时使它从正向阻断状态转化为正向导通状态所需的阳极电压值比 U_{BO} 要低，且 I_G 越大相应的阳极电压比 U_{BO} 降低得越多。晶闸管导通后，如果减小阳极上的正向电压，正向电流 I_A 就逐渐减小，当 I_A 小到某一数值时，晶闸管从导通状态转变为阻断状态，这时所对应的最小电流为维持电流 I_H 。

(2) 反向伏安特性。晶闸管承受反向阳极电压时，由于 J1、J3 结（见图 1-2）处于反向偏置状态，晶闸管流过的电流仅由各区少数载流子形成，只有极小的反向漏电流通过，这就是器件的反向阻断状态。随着反向电压的增加，穿过 J2 结的少数载流子稍有增加，反向漏电流逐渐增大。一般情况下，反向偏置电压主要由 J1 结承担，一旦阳极反向电压超过允许值时，J1 结将被反向击穿，反向漏电流增加较快，外电路如无限制措施，则反向漏电流急剧增大，造成晶闸管的永久性损坏。

当阳极施加反向电压时，门极一般不起作用，其反向特性与二极管反向特性相似。但此时若在门极施加足够高的正向电压，将使 J3 结由反向偏置变为正向偏置，引起内部载流子浓度增加，反向电流增加，从而造成器件功耗增大，结温上升，阻断能力降低，对器件工作十分不利，必须避免。

综上所述，晶闸管从正向阻断转变为正向导通可以在两种情况下发生：①门极未加触发电压 ($I_G=0$)，但阳极电压超过正向转折电压 U_{BO} ，造成晶闸管硬开通，这种导通方法很容易造成管子不可恢复性击穿而使管损坏，在正常工作时是不允许的；②阳极正向电压虽然低于正向转折电压 U_{BO} ，但在门极上加有适当的触发电压，使晶闸管触发导通，这正是我们可以利用的晶闸管的可控单向导电性。一般规定，当晶闸管的阳极与阴极之间加上 6V 直流电压时，能使晶闸管导通的门极最小电流或电压称为触发电流或电压。由于制造工艺上的原因，同一型号晶闸管的触发电压和触发电流也不一定相同，一般只规定了在常温下各种规格的晶闸管的触发电压和触发电流的范围。

二、晶闸管的门极伏安特性

晶闸管在正向阳极电压作用下,当门极加入适当的电流或电压信号时,可使晶闸管由阻断变为导通。从内部结构可得知,晶闸管的门极和阴极间具有一个PN结J3,这个PN结的伏安特性即为晶闸管的门极特性。图1-6所示是晶闸管门极伏安特性曲线,横轴表示门极电压,纵轴表示门极电流。

因为晶闸管实际产品的门极特性有较大分散性,故通常以门极伏安特性的区域来代表同类产品的门极特性。图中曲线OD为低阻极限伏安特性,曲线OG为高阻极限伏安特性,为使加于门极的信号不超过其允许功率,曲线EF为其最大功率曲线。而曲线中DE线及FG线则分别标明允许的正向门极峰值电流及峰值电压值。正常工作的晶闸管,门极所获得的触发电压与触发电流都应处于图中ADEFGCBA区域内,这个区域称为可靠触发区。

将门极伏安特性曲线中OABCO特性区域放大,如图1-7所示。图中OHIJO范围称为不触发区,任何合格的器件在额定结温时,此区域内的所有触发电压和电流值对晶闸管的导通均不起作用,故应把可能作用于门极的干扰信号限制在上述区域内。图中ABCJIHA的范围是触发的过渡区域,在该区域内,触发呈现出不可靠的性质。在设计晶闸管的触发电路时,应对上述特性给予充分的考虑。

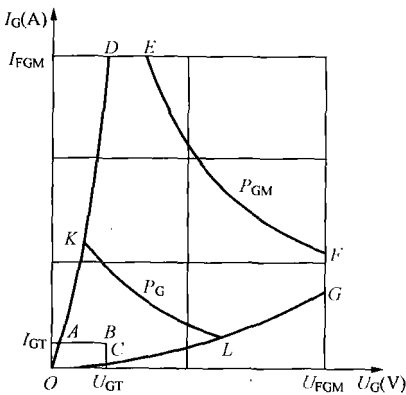


图1-6 晶闸管门极伏安特性曲线

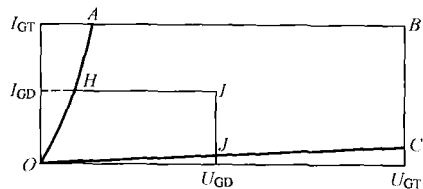


图1-7 晶闸管门极特性曲线OABCO
区域局部放大

在应用晶闸管时,为防止误触发干扰,人们往往在门极上预加一定的负电压。但晶闸管门极和阴极间的PN结J3的特性较软,正向和反向电阻值不像普通二极管差别较大,所以门极负电压值应小于5V,否则将造成PN结J3的击穿,损坏晶闸管。

1.1.3.2 晶闸管的动态伏安特性

晶闸管的开通和关断的动态过程的物理机理是很复杂的,图1-8给出了晶闸管开通和关断过程的波形。其开通过程描述的是在坐标原点时刻,门极得到理想阶跃触发电流的情况;而关断过程描述的是对已导通的晶闸管的外电路所加电压在某一时刻突然由正向变为反向的情况。可见,晶闸管由导通状态到阻断状态和由阻断状态到导通状态都需要一定的时间。

一、开通过程

由于晶闸管内部的正反馈过程需要时间,再加上外电路电感的限制,晶闸管被触发后,

其阳极电流的增长不可能是瞬时的。从门极电流阶跃时刻开始，到阳极电流上升到稳态值的10%，这段时间称为延迟时间 t_d 。与此同时，晶闸管的正向压降也在减小。阳极电流从10%上升到稳态值的90%所需的时间称为上升时间 t_r 。

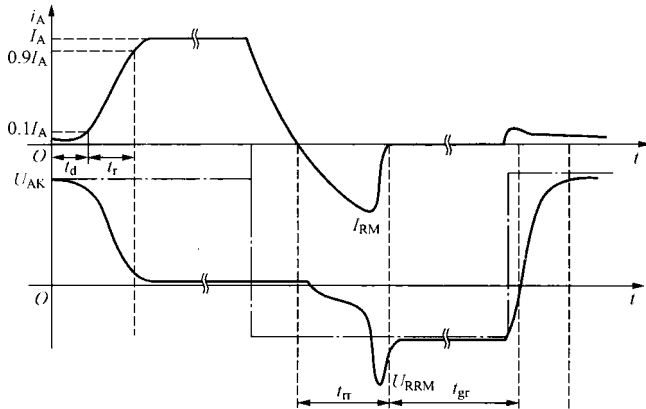


图 1-8 晶闸管的开通与关断过程

开通时间 t_{gt} 定义为延迟时间和上升时间两者之和，即 $t_{gt} = t_d + t_r$ 。普通晶闸管的延迟时间为 $0.5 \sim 1.5 \mu\text{s}$ ，上升时间为 $0.5 \sim 3 \mu\text{s}$ ，总的开通时间 t_{gt} 约为 $6 \mu\text{s}$ 。上升时间除反映晶闸管本身特性外，还与主回路中的感性负载等有关。另外，延迟时间和上升时间还与阳极电压的大小有关，时间随门极电流的增大而减小。为了缩短开通时间，常采用实际触发电流比规定触发电流大 $3 \sim 5$ 倍、前沿陡的窄脉冲来触发，称为强触发。如果触发脉冲不够宽，晶闸管就不可能触发导通。一般来说，要求触发脉冲的宽度稍大于开通时间 t_{gt} ，以保证晶闸管可靠触发。

二、关断过程

处于导通状态的晶闸管，当外加电压突然由正向变为反向时，由于外电路电感的存在，同时晶闸管导通时内部存在大量的载流子，当阳极电流刚好下降到零时，晶闸管内部各 PN 结附近仍然有大量的载流子未消失，在反方向会流过反向恢复电流，到达最大值 I_{RM} 后，再反方向衰减。同样，在恢复电流快速衰减时，由于外电路电感的作用，会在晶闸管两端引起反向的尖峰电压 U_{RRM} 。最终反向恢复电流衰减至接近于零，晶闸管恢复其对反向电压的阻断能力。从正向电流降为零，到反向恢复电流衰减至接近于零的时间，就是晶闸管的反向阻断恢复时间 t_{rr} 。反向恢复过程结束后，由于载流子的复合过程比较慢，晶闸管要恢复其阻断能力还需要一段时间，这段时间称为正向阻断恢复时间 t_{gr} 。在正向阻断恢复时间内，如果重新对晶闸管施加正向电压，晶闸管会重新正向导通，而不是受门极电流控制而导通。所以实际应用中，应对晶闸管施加足够长时间的反向电压，使晶闸管充分恢复对正向电压的阻断能力，电路才能可靠工作。

晶闸管的电路换向关断时间 t_q 定义为 t_{rr} 与 t_{gr} 之和，即 $t_q = t_{rr} + t_{gr}$ 。晶闸管的关断时间与元件结温、关断前阳极电流的大小及所加反向电压的大小有关。普通晶闸管的 t_q 约为几十微秒到几百微秒。

1.1.4 晶闸管的主要参数

为了更好地使用晶闸管，不仅要定性地了解晶闸管的伏安特性，还要定量地掌握晶闸管