

General Education

普通高等教育“十一五”规划教材  
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI (高职高专教育)



DIANLI DIANZI JISHU

# 电力电子技术

刘立平 主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

普通高等教育“十一五”规划教材  
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI (高职高专教育)



DIANLI DIANZI JISHU

# 电力电子技术

主编 刘立平  
编写 朱 琼 史 辉  
主审 高镛年



中国电力出版社  
<http://jc.cepp.com.cn>

General Education

## 内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”规划教材（高职高专教育）。

本书共分九章，主要内容为电力电子器件、单相可控整流电路、三相可控整流电路、晶闸管的串并联及保护、晶闸管触发与驱动电路、有源逆变电路、交流开关与交流调压电路、无源逆变与变频电路、直流斩波电路。书后附录了10个电力电子技术实验。本书遵循“理解概念、掌握基础；利于教学、注重实践；培养能力、提高素质”的原则，注重基本理论的掌握，摒弃了繁杂的公式推导过程，同时增加了一些实例电路的分析，力求做到知识点与能力点的结合与统一。

本书可作为高职高专应用电子技术、供用电技术、发电厂及电力系统等工科专业的教学用书，也可作为函授和自考的辅导教材，还可作为相关技术人员的参考用书。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

电力电子技术/刘立平主编. —北京: 中国电力出版社, 2007  
普通高等教育“十一五”规划教材. 高职高专教育  
ISBN 978-7-5083-5871-0

I. 电... II. 刘... III. 电力电子学—高等学校: 技术  
学校—教材 IV. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 094299 号

中国电力出版社出版、发行  
(北京三里河路6号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)  
汇鑫印务有限公司印刷  
各地新华书店经售

\*  
2007年8月第一版 2007年8月北京第一次印刷  
787毫米×1092毫米 16开本 12.75印张 305千字  
印数 0001—3000册 定价 19.60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

# 前 言

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神，加强教材建设，确保教材质量，中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校，满足学科发展和人才培养的需求，坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为新编教材。

本书以保定电力职业技术学院朱琼编写的《电力电子技术》和刘立平、孙玉宝合编的《电力电子实习实践指导书》为基础，基于学院高职高专应用电子技术、供用电技术和发电厂运行与检修等主要专业教学计划和教学大纲对《电力电子技术》课程的教学要求，结合学院几年来在高职高专教学过程中的经验重新编写而成。本书各章节内容之间既相互独立又相互联系，在教学过程中，具体讲授内容可根据不同专业的要求进行合理的选择与组织。

本书在编写过程中，突出了电力行业高职高专的特点，同时兼顾其他行业的需要，遵循“理解概念、掌握基础；利于教学、注重实践；培养能力、提高素质”的原则，注重基本理论的掌握，摒弃了繁杂的公式推导过程，同时增加了一些实例电路的分析，并在本书最后附录了10个典型的电力电子技术实验，力求做到知识点与能力点的结合与统一，达到高职高专学生“学以致用”的目的。

本书由保定电力职业技术学院刘立平担任主编并负责统稿工作，朱琼和史辉参与编写。其中，刘立平编写了绪论和第1、3、4、6、7、8章，朱琼编写了第2章，史辉编写了第5、9章，朱琼和刘立平合编了附录部分。华北电力大学的高饒年教授担任主审，认真审阅了全书并提出了许多宝贵的修改意见，在此表示衷心感谢。此外，对本书所附参考文献的作者也致以衷心的感谢。

由于作者教学水平和经验有限，同时因工作繁忙、时间紧迫等因素，书中错误及不妥之处在所难免，殷切希望广大同行和读者给予批评指正。

编 者

2007年5月

## 目 录

前言	
绪论	1
<b>第1章 电力电子器件</b>	<b>3</b>
1.1 晶闸管的结构和工作原理	3
1.2 晶闸管的伏安特性	5
1.3 晶闸管的主要参数	7
1.4 晶闸管的测试与使用	12
1.5 双向晶闸管	15
1.6 可关断晶闸管	21
1.7 功率晶体管	23
1.8 功率场效应晶体管	25
1.9 绝缘栅双极晶体管	27
1.10 其他电力电子器件简介	28
本章小结	32
思考题与习题	32
<b>第2章 单相可控整流电路</b>	<b>35</b>
2.1 单相半波可控整流电路	35
2.2 单相全控桥式整流电路	38
2.3 单相半控桥式整流电路	43
本章小结	45
思考题与习题	46
<b>第3章 三相可控整流电路</b>	<b>48</b>
3.1 三相半波可控整流电路	48
3.2 三相全控桥式整流电路	55
3.3 三相半控桥式整流电路	60
3.4 可控整流电路的应用实例	64
本章小结	67
思考题与习题	68
<b>第4章 晶闸管的串并联及保护</b>	<b>70</b>
4.1 晶闸管的过电压保护	70
4.2 晶闸管的过电流保护与电压和电流上升率的限制	75
4.3 晶闸管的串并联使用	78
本章小结	80
思考题与习题	81

<b>第 5 章 晶闸管触发电路与驱动电路</b>	82
5.1 对触发电路的要求	82
5.2 单结晶体管触发电路	82
5.3 同步电压为锯齿波的晶闸管触发电路	86
5.4 集成化晶闸管移相触发电路	91
5.5 触发脉冲与主电路电压的同步及防止误触发的措施	95
本章小结	97
思考题与习题	97
<b>第 6 章 有源逆变电路</b>	99
6.1 有源逆变的工作原理	99
6.2 三相有源逆变电路	102
6.3 逆变失败及最小逆变角的确定	105
6.4 有源逆变电路的应用	109
本章小结	115
思考题与习题	116
<b>第 7 章 交流开关与交流调压电路</b>	118
7.1 晶闸管交流开关	118
7.2 单相交流调压电路	123
7.3 三相交流调压电路	127
本章小结	132
思考题与习题	132
<b>第 8 章 无源逆变与变频电路</b>	135
8.1 变频的基本概念	135
8.2 负载谐振式逆变器	138
8.3 三相逆变器	140
8.4 脉宽调制型变频电路	145
本章小结	151
思考题与习题	151
<b>第 9 章 直流斩波电路</b>	153
9.1 降压式斩波电路	153
9.2 升压式斩波电路	157
9.3 升降压式斩波电路	160
本章小结	163
思考题与习题	164
<b>附录 电力电子技术实验</b>	166
概述	166
实验一 单结晶体管触发电路和单相半波可控整流电路	168
实验二 单相桥式半控整流电路	170
实验三 单相桥式全控整流及有源逆变电路	173

实验四	三相桥式全控整流及有源逆变电路	175
实验五	单相并联逆变电路	177
实验六	直流斩波电路	179
实验七	单相交流调压电路	182
实验八	三相交流调压电路	183
实验九	单闭环晶闸管直流调速系统	185
实验十	正弦脉宽调制(PWM)变频调速系统	188
	实验报告实例	192
<b>参考文献</b>		196

## 绪 论

20 世纪 50 年代, 电力电子器件主要有汞弧整流管和大功率电子真空管。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, 因而在电力电子电路中得到了广泛的应用, 70 年代初期, 它已逐步取代了汞弧整流管。随着电子技术和半导体材料与工艺水平的迅速发展, 电力电子器件的性能和电流、电压等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。

传统的电力电子器件主要是晶闸管及由它派生的器件。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各自发展的基础上相结合而产生了一代高频化、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由传统的电力电子技术跨入现代电力电子技术的新时代。

现代电力电子技术与其他学科的关系, 如图 0-1 所示。电力电子技术包括电力电子器件、变流电路和控制电路 3 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。从图中可以看出, 电力电子技术是电力、电子、控制三大电气工程领域的交叉学科。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学科, 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, 主要有以下几种类型:

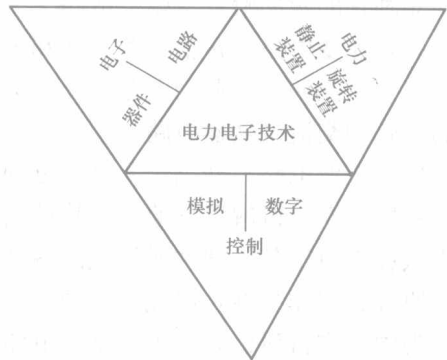


图 0-1 现代电力电子技术与其他学科的关系

(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、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)、变频调速等设备。

(5) 直流斩波 (DC—DC), 把固定或变化的直流电压变化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, 其基本控制方式主要有



相位控制、通断控制和脉冲宽度调制 (PWM)。不论是相控技术还是脉冲宽度调制 (PWM) 技术, 都在实际的应用中不断地完善、改进, 并涌现出许多专用集成触发 (驱动) 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学化的方向发展。

由电力半导体器件构成的变流电路, 具有以下优点:

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

但是电力电子器件也存在着过载能力 (过电压、过电流) 低, 在某些工作条件下功率因数低, 对电网会造成谐波污染等缺点和不足。随着电力电子技术的不断发展, 这些问题定将克服和解决。

“电力电子技术”是应用电子技术、企业供用电、发电厂运行与控制、电气运行与控制等高职高专电气工程类专业的主干课程之一。该课程可分为以下几个模块。

- (1) 电力电子器件。介绍了 SCR、GTO、GTR、MOSFET、IGBT 等电力电子器件。
- (2) 可控整流电路。包括单相可控整流电路和三相可控整流电路。
- (3) 晶闸管的使用与触发控制。包括晶闸管串并联使用与过电压过电流保护方法以及常见的晶闸管的脉冲触发与驱动电路。
- (4) 逆变电路。包括有源逆变和无源逆变变频器电路。
- (5) 交流调压和调功电路。介绍了相位控制方式的单相和三相的交流调压电路以及通断控制方式的交流调功器电路。
- (6) 斩波电路。介绍了几种常见的直流变换电路。

总体上看, 讲解器件原理、特性的目的是为了正确、安全地应用器件组成电路。本课程的重点在于讨论各类器件所构成的各种变流电路。本书首先系统地讲解各种电力电子器件的基本原理、工作特性, 以此为基础, 在分析不同的变流电路中, 分别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, 在无源逆变与变频器电路中将以 GTR、GTO 和 MOSFET 器件为主。

同模拟电子技术和数字电子技术一样, 电力电子技术也具有很强的实践性。学习本课程要以掌握基本器件的工作特点、伏安曲线及其参数为基础, 以电力电子器件的导通与关断变化过程为出发点, 以波形分析为主要手段, 学习掌握不同器件所组成的变流电路的工作原理、波形画法以及电路中主要物理量的计算。同时, 努力培养读图与分析能力, 并通过实验实训环节加深对各种电路工作情况的理解, 掌握器件选择、电路调整及故障分析与解决方法, 初步具有对电力电子主电路进行故障分析与处理的能力, 最终使学生具备高职高专层次的理论知识与实践技能等。

电力电子器件、变流电路、控制技术都在不断地发展与更新, 所涉及的知识面广、内容丰富多彩。在学习本课程前, 要求学生已经学习和掌握了“电工基础”、“电子技术基础”等课程。在学习过程中还应随时复习电工基础、电子技术基础、电机及拖动基础等知识并注意其与本课程的联系。

## 第1章 电力电子器件

电力电子器件（Power Electronic Device）又称为功率半导体器件或功率电子器件。它是用于对大功率电能进行变换和控制的大功率（通常指电流为数十安至数千安，电压为数百伏以上）电子器件。

各种电力电子器件均具有导通和阻断两种工作特性。根据其导通与阻断的可控性，电力电子器件可分为3类。功率二极管（又称电力二极管）是二端（阴极和阳极）器件，其器件电流由伏安特性决定，除了改变加在其两端间的电压外，无法控制其阳极电流，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、功率晶体管等器件，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普遍，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 晶闸管的结构和工作原理

晶闸管（Thyristor）是硅晶体闸流管的简称，最初被称作可控硅（Silicon Controlled Rectifier, SCR）。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。

#### 1.1.1 晶闸管的结构

晶闸管人们习惯称之为可控硅，是用N型单晶硅片，按一定的工艺要求，分别进行扩散及烧结处理后，形成PNPN四层结构的一种大功率半导体器件。其内部结构、结构示意图和电气符号如图1-1所示。其内部PNPN四层结构形成3个PN结，分别从 $P_1$ 、 $P_2$ 和 $N_2$ 这3个区引出3个电极A、K和G，分别称为阳极（A）或正极、阴极（K）或负极和门极（G）或控制极。

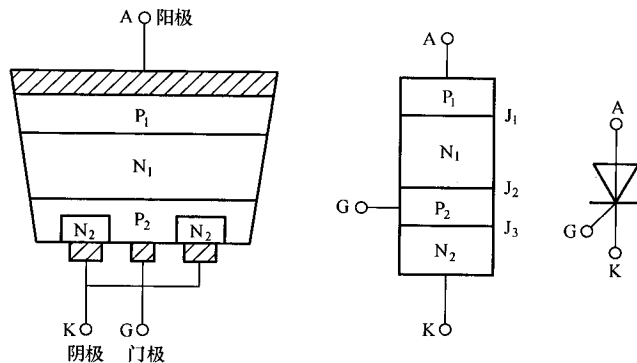


图1-1 晶闸管内部结构、示意图与电气图形符号

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、小电流螺旋式、大电流螺旋式和大电流平板式（额定电流在200A以上），分别如图1-2所示。

晶闸管是大功率器件，工作时产生大量的热，因此必须安装散热器。对于螺栓形晶闸

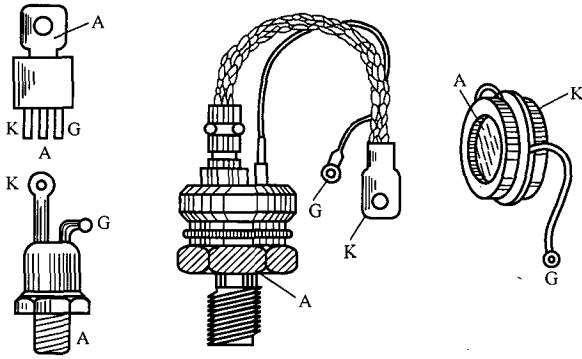


图 1-2 晶闸管的外形及符号

管，粗辫子线是晶闸管的阴极 K，细辫子线是门极 G，螺栓是晶闸管的阳极 A，它与铝制散热器紧密连接，采用自然散热冷却方式。平板式晶闸管的两个平面分别是阳极和阴极，而细辫子线则是门极。对平板形晶闸管的冷却，一般用两个彼此绝缘的散热器紧夹在中间，散热方式可以采用风冷或水冷，以获得较好的散热效果。

### 1.1.2 晶闸管的工作原理

为了弄清晶闸管的工作条件，可按图 1-3 做几个实验。主电源  $E_A$ （可为 3~6V）和门极电源  $E_G$ （一般为 1.5~3V）通过双掷双刀开关  $S_1$  和  $S_2$  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，可得晶闸管导通和阻断的规律如下。

(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，门极就失去控制作用，不论门极电压是正还是负，晶闸管保持导通，故导通的控制信号只需短暂的正向脉冲电压，称之为触发脉冲。

(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。这个能保持晶闸管导通的最小电流，称为维持电流。

(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。

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、阴极接电源负，形成主电路。

(2) 门极加适当的正向电压，即门极接电源正、阴极接电源负，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  $I_H$ ，一般称为不可靠关断条件。

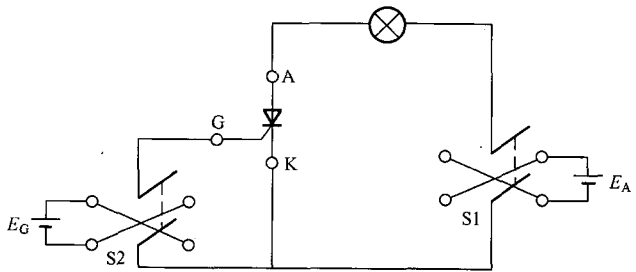


图 1-3 晶闸管工作条件的实验电路

(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 管集电极上有正的电压。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。

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

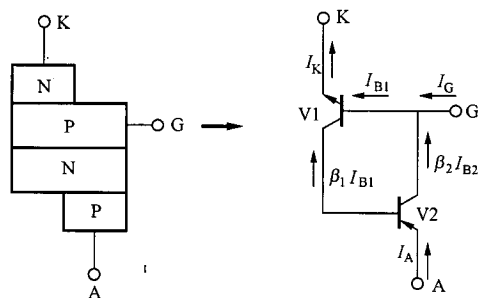


图 1-4 晶闸管等效电路图

作用, V2 管的集电极电流  $I_{C2} = \beta_2 I_{B2} = \beta_1 \beta_2 I_{B1}$ , 这电流又注入 V1 管的基极, 并再次得到放大。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, 这一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, 即便失去触发电压, 晶闸管仍保持导通, 门极失去控制作用。

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, 所以门极不管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。

## 1.2 晶闸管的伏安特性

导通和关断是晶闸管的两种工作状态, 它们随阳极电压、阳极电流及门极电压(电流)等的改变而相互转化。在实际应用中常用电压与电流的关系曲线来表示它们之间的关系, 这就是晶闸管的伏安特性曲线。

### 1.2.1 晶闸管的阳极伏安特性

晶闸管阳极伏安特性曲线如图 1-5 所示, 横轴表示阳极电压, 纵轴表示阳极电流。

在门极电流  $I_G = 0$  的情况下, 当阳极和阴极间的正向电压小于某一数值时, 阳极电流保持一个很小的数值, 这个电流称为正向漏电流。这时晶闸管的阳极和阴极间表现出很大的内阻, 一般称为正向阻断状态。当正向电压升到某一数值时, 虽然  $I_G = 0$ , 但漏电流突然增大, 晶闸管由正向阻断状态突然转化为正向导通, 这时的正向阳极电压称为正向转折电压

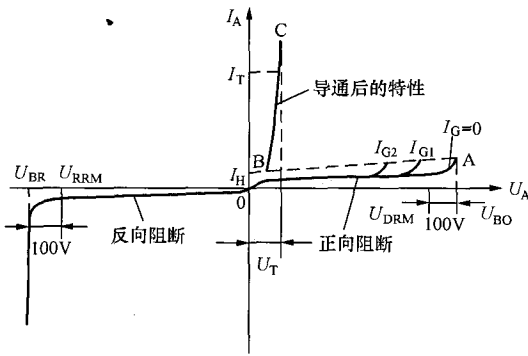


图 1-5 晶闸管阳极伏安特性曲线

$U_{BO}$ 。这种依靠增大阳极电压而强迫晶闸管导通的方式称为“硬开通”。“硬开通”对晶闸管可造成一定损伤，会减少晶闸管的使用寿命，甚至会造成晶闸管永久性损坏，因此通常不允许发生这种情况，一般晶闸管要求“硬开通”次数应少于 20 次。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称为维持电流  $I_H$ 。

晶闸管的反向伏安特性与一般二极管的类似，当反向电压在某一数值以下时，只有很小的反向漏电流，晶闸管处于反向阻断状态。当反向电压增加到某一数值时，反向漏电流急剧增大，使晶闸管反向导通，这时所对应的电压称为反向转折电压  $U_{BR}$ 。晶闸管一旦反向击穿就会永久损坏，这在实际应用时是严格不允许的。

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：一是门极未加触发电压 ( $I_G = 0$ )，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的不可恢复性击穿而使管损坏，在正常工作时是不允许的；另一种是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。

### 1.2.2 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  $J_3$ ，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 0D 为低阻极限伏安特性，曲线 0G 为高阻极限伏安特性，为使加于门极的信号不超过其

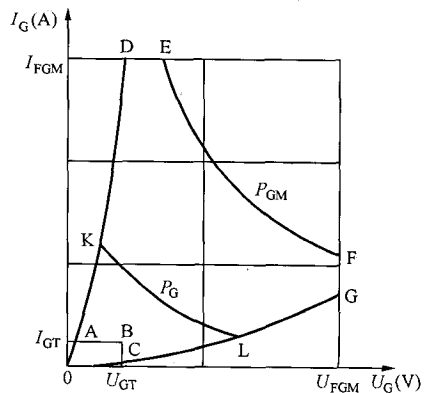


图 1-6 晶闸管门极伏安特性曲线

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 OABC 特性区域放大, 如图 1-7 所示。图中 OHIJ 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。

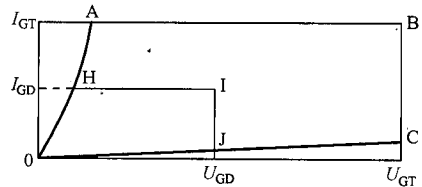


图 1-7 晶闸管门极特性曲线 OABC 区域局部放大

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  $J_3$  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  $J_3$  的击穿, 损坏晶闸管。

### 1.3 晶闸管的主要参数

为了正确选用晶闸管, 必须了解它的主要参数及其意义。晶闸管手册中载入的工作参数较多, 在生产实践中, 人们最关心的是它的外特性参数, 即要考虑到它在阻断状态下能够承受多大的正向与反向电压, 也要考虑它在导通时能够通过多大的电流, 还要考虑使它触发导通门极需要加多大的电压和电流, 而要使它关断, 就要考虑晶闸管的维持电流为多少等。晶闸管有如下几个方面的主要参数。

#### 1.3.1 晶闸管的电压参数

##### 1. 断态重复峰值电压 $U_{DRM}$

该电压为在额定结温 (100A 以上为 115°C, 50A 以下为 100°C)、门极断路和晶闸管正向阻断的条件下, 允许重复加在阳极和阴极间的最大正向峰值电压, 一般取正向转折电压  $U_{BO}$  的 80%。它反映了晶闸管在正向阻断状态下能够承受的正向电压。

##### 2. 反向重复峰值电压 $U_{RRM}$

该电压为在额定结温和门极断路的情况下, 允许重复加在阳极和阴极间的反向峰值电压, 一般取反向转折电压  $U_{BR}$  的 80%。它反映了晶闸管在反向阻断状态下能承受的反向电压。通常  $U_{DRM}$  和  $U_{RRM}$  数值大致相等, 习惯上统称峰值电压。

通常, 将晶闸管断态重复峰值电压  $U_{DRM}$  和反向重复峰值电压  $U_{RRM}$  实测值中较小的一个值, 作为晶闸管铭牌标出的额定电压  $U_{Te}$ 。

##### 3. 通态平均电压 $U_{T(AV)}$

该电压为晶闸管正向通过正弦半波额定平均电流, 结温稳定时的阳极和阴极间的电压平均值, 习惯上称为导通时的管压降。这个电压当然越小越好, 出厂时规定的上限值即该型合格产品的最大管压降。

##### 4. 门极触发电压 $U_{GT}$

该电压为在室温下, 阳极和阴极间加 6V 正向电压, 使晶闸管从关断变为完全导通时所

需的最小门极直流电压一般为  $1\sim 5\text{V}$ 。为保证可靠触发,  $U_{\text{GT}}$  实际值应大于额定值。

### 1.3.2 晶闸管的电流参数

#### 1. 通态平均电流 $I_{\text{T(AV)}}$

该电流也称为晶闸管的额定电流。在环境温度不大于  $40^\circ\text{C}$  和标准散热及全导通条件下, 结温稳定且不超过额定值时, 晶闸管在电阻性负载时允许通过的工频正弦半波电流在一个周期内的最大平均值称为通态平均电流, 简称正向电流。通常所说多少安的晶闸管就是指这个电流。

根据晶闸管额定电流的定义, 其额定电流是工频正弦半波电流波形的平均值。若电流峰值为  $I_m$ , 则其额定电流为

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

相应情况下的额定电流有效值为

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

由于晶闸管首先是在可控整流电路中的应用, 其额定电流自然就按电流的平均值来标定, 但是晶闸管也和其他电气设备一样, 决定其允许电流大小的标准是温度的高低。造成晶闸管发热的原因主要是晶闸管管芯中的 3 个 PN 结结温, 如果认为其管芯通态时电阻不变, 则其发热的多少就和通过的电流有效值有关。所以需要根据晶闸管通态平均电流  $I_{\text{T(AV)}}$  求出其相应的电流有效值, 根据有效值与热效应对等的原则, 来合理地选择晶闸管的额定电流值。

为了表明各种不同波形电流的有效值与平均值之间的关系, 一般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  $K_f$  来表示, 即

$$K_f = \frac{I}{I_d} \quad (1-3)$$

式中:  $I$  为某波形电流的有效值 (均方根值);  $I_d$  为该波形电流的相应的平均值。

对于工频正弦半波的情况, 可知其波形系数  $K_f$  为

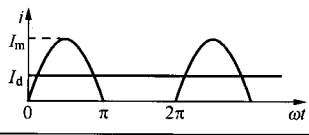
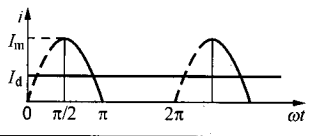
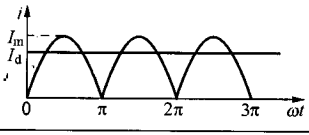
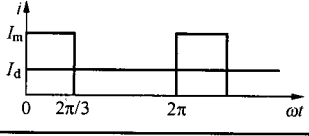
$$K_f = \frac{I_{\text{Tc}}}{I_{\text{T(AV)}}} = \frac{\pi}{2} \quad (1-4)$$

可见, 正弦半波工作时, 电流有效值为  $I_m/2$ , 电流平均值为  $I_m/\pi$  ( $I_m$  为峰值), 其电流有效值与平均值之比为  $\pi/2$ 。这就是说, 对额定平均电流  $I_{\text{T(AV)}}$  为  $100\text{A}$  的晶闸管, 在半波全导通时相当于  $157\text{A}$  的有效值电流的发热量。

这里需要指出, 上述波形系数是对晶闸管正弦半波全导通情况下的分析, 而由于晶闸管移相控制的关系, 导通角总是小于  $180^\circ$  的。如果晶闸管导通时间短, 则晶闸管实际允许的平均电流与通态平均电流不同。若仍然要使平均电流和通态平均电流一样, 则必须使导通期内电流峰值增大才行, 这样电流的有效值和发热量均随之增加。所以, 当晶闸管的导通角变小时, 其允许的平均电流值要降低。

实际工作中, 晶闸管的波形系数随着其所通过的电流的波形及导电角的不同而不同, 表 1-1 为额定电流  $I_{\text{T(AV)}}$  为  $100\text{A}$  的晶闸管, 在 4 种典型情况下的波形系数及允许的电流平均值。

表 1-1 4 种波形的  $K_f$  值与 100A 晶闸管允许的电流平均值

波 形	平均值与有效值计算公式	波形系数 $K_f$	允许电流平均值
	$I_d = \frac{I_m}{\pi}$ $I = \frac{I_m}{2}$	1.57	$I_{dn} = 100A$
	$I_d = \frac{I_m}{2\pi}$ $I = \frac{I_m}{2\sqrt{2}}$	2.22	$I_{dn} = 70.7A$
	$I_d = \frac{2}{\pi} I_m$ $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$	1.11	$I_{dn} = 141.4A$
	$I_d = \frac{I_m}{3}$ $I = \frac{I_m}{\sqrt{3}}$	1.73	$I_{dn} = 90.7A$

## 2. 维持电流 $I_H$ 和擎住电流 $I_L$

在室温和门极断路的情况下，晶闸管已触发导通时，从较大的通态电流降至维持通态所必需的最小电流称为维持电流  $I_H$ 。它是由通态到断态的临界电流，要使导通中的晶闸管关断，必须使管子的正向阳极电流低于  $I_H$ 。

给晶闸管的门极加上触发脉冲电压，当晶闸管刚刚从阻断状态转为导通状态后就撤除触发电压，此时晶闸管维持导通所需要最小阳极电流，称为擎住电流  $I_L$ ，一般擎住电流是维持电流的 2~4 倍。

## 3. 门极触发电流 $I_{GT}$

在室温下，阳极和阴极间加 6V 正向电压，使晶闸管从关断变为完全导通所需的最小门极直流电流为  $I_{GT}$ ，一般为几十毫安到几百毫安。为保证可靠触发， $I_{GT}$  实际值应大于额定值。

## 4. 浪涌电流 $I_{TSM}$

结温为额定值时，在工频正弦半周内晶闸管能承受的短时最大过载峰值电流为浪涌电流  $I_{TSM}$ 。浪涌时，允许门极暂时失控，而反向应能承受 1/2 反向峰值电压。

我们在前面讨论阳极伏安特性时，知道在门极断路情况下，阳极电压超过转折电压  $U_{BO}$  时晶闸管会失控，导致硬开通，如果电流过大将对晶闸管造成损害，这就是一种浪涌。浪涌是故障状态，浪涌电流是不能重复的。在晶闸管寿命期内，忍受浪涌的次数有一定限制，一般为 20 次，浪涌电流约为  $6\pi I_{T(AV)}$ 。

### 1.3.3 晶闸管的动态参数

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，外电路所加电压在某一时刻突然由正向变为反



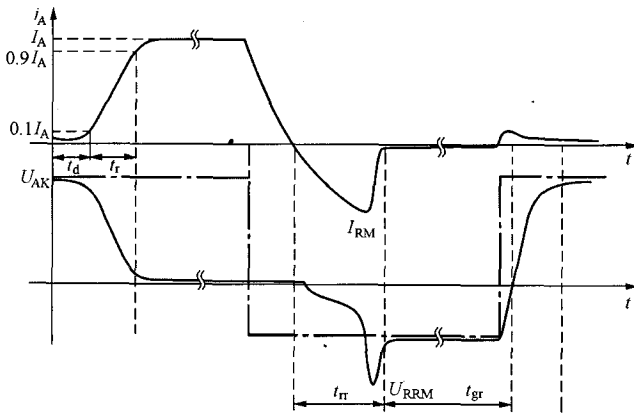


图 1-8 晶闸管的开通与关断过程

上升到稳态值的 90% 所需的时间称为上升时间  $t_r$ 。

开通时间  $t_{gt}$  定义为两者之和，即  $t_{gt} = t_d + t_r$ 。普通晶闸管的延迟时间为  $0.5 \sim 1.5 \mu s$ ，上升时间为  $0.5 \sim 3 \mu s$ ，总的开通时间  $t_{gt}$  约为  $6 \mu s$ 。其延迟时间随门极电流的增大而减小。上升时间除反映晶闸管本身特性外，还与主回路中的电感量等有关。延迟时间和上升时间还与阳极电压的大小有关。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。另外，如果触发脉冲不够宽，晶闸管就不可能触发导通。一般说来，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。

### 2. 关断过程与关断时间 $t_q$

原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。同电力二极管的动态关断过程类似，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，这叫做正向阻断恢复时间  $t_{gr}$ 。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，使晶闸管充分恢复其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以及所加反压的大小有关。普通晶闸管的  $t_q$  约为几十微秒到几百微秒。

### 3. 通态电流临界上升率 $di/dt$

在规定条件下，晶闸管能承受的最大通态电流上升率称为通态电流临界上升率。

门极流入触发电流后，晶闸管开始只在靠近门极附近的小区域内导通，随着时间的推移，导通区逐渐扩大到 PN 结的全部面积。如果阳极电流上升得太快，则会导致门极附近的 PN 结因电流密度过大而烧毁，使晶闸管损坏。

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。

### 1. 开通过程与开通时间 $t_{gt}$

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，晶闸管受到触发后，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%