



全国煤炭高职高专“十一五”规划教材

电力 电子技术

主编 周景龙
刘兰波
崔承杰

煤炭工业出版社

全国煤炭高职高专“十一五”规划教材

电力电子技术

主 编 周景龙 刘兰波 崔承杰
副主编 姜宏勋 郭宗跃
主 审 梁南丁

煤炭工业出版社

·北 京·

内 容 提 要

本书是全国煤炭高职高专“十一五”规划教材。全书分为两部分共八章,第一部分为电力电子技术基础,包括电力电子器件、整流电路、直流斩波电路、交流开关与交流调压、开关电源和交流软启动技术的应用、逆变电路与 PWM 控制技术;第二部分为电力电子技术应用,包括直流斩波和交流调压技术的应用、变频调速技术的应用、电力电子技术综合实训等。

本书是高职高专矿山电气(自动化)、煤矿机电、机电一体化等专业的规划教材,也可作为应用本科、成人高校、高级技师学院、中等专业学校相关专业的教材,以及工矿企业从事电气控制工程技术人员培训、复训的教材和参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术/周景龙,刘兰波,崔承杰主编. —北京:
煤炭工业出版社,2009.1

全国煤炭高职高专“十一五”规划教材

ISBN 978-7-5020-3434-4

I. 电… II. ①周…②刘…③崔 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(2008)第 162155 号

煤炭工业出版社 出版
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)
网址:www.cciph.com.cn
北京京科印刷有限公司 印刷
新华书店北京发行所 发行

*

开本 787mm×1092mm¹/₁₆ 印张 14
字数 341 千字 印数 1—3,000
2009 年 1 月第 1 版 2009 年 1 月第 1 次印刷
社内编号 6239 定价 27.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,本社负责调换

全国煤炭高职高专矿山电气(自动化)类“十一五”规划教材

编审委员会

主 任: 邓开陆 訾贵昌

副主任: 王怀群 孔祥春 杨建康 韩 莉

委 员 (以姓氏笔画为序):

王中显 王成旺 王进野 王艳红

宋 鹏 刘莉宏 李 明 李荣生

李德俊 张 博 张名忠 张春芝

陆 红 庞元俊 周景龙 荆 珂

赵青梅 郭立新 章小印 聂国伦

高 专 蒋彦国 梁南丁 魏 良

前 言

本书是全国煤炭高职高专“十一五”规划教材之一,是由中国煤炭教育协会和中国矿业大学北京教材编审室共同组织编写的。

新型电力电子器件的不断涌现和控制思想、控制方法的不断创新,使电力电子技术得以迅速发展,在节能环保、技术革新诸领域得到日益广泛的应用,对于教材亦提出了新的要求。

本教材充分注意高职教育的要求,理论知识以必须、够用为度,突出实际应用技术的介绍。本教材的特点是:

1. 内容较新,介绍了新型电力电子器件的特点及应用方法,选用了大量的实用电路。
2. 尽量回避烦琐的理论推导,简化了器件内部结构的介绍,突出介绍器件的应用特点。
3. 注重实用性,介绍了开关型稳压电源、UPS 不间断电源和中频电源的基本工作原理及应用。
4. 加强了实践性教学内容,详细地介绍了变频器和软启动器的应用方法。

本书由周景龙、刘兰波、崔承杰任主编,姜宏勋、郭宗跃任副主编。编写分工如下:河南平顶山工业职业技术学院郭宗跃编写第一章,内蒙古科技大学高等职业技术学院李宇编写第二章,安徽能源技术学校姜宏勋编写第三章,河北能源职业技术学院周景龙编写绪论、第四章、第七章、第八章及附录,黑龙江鸡西大学刘兰波编写第五章,辽宁石油化工大学职业技术学院崔承杰、于水编写第六章。全书由周景龙统稿,河南平顶山工业职业技术学院教授梁南丁主审。

在编写过程中,参阅了许多同行和专家们的论著和文献,在此一并表示真诚感谢。

限于编者的学识水平及实践经验,书中的错误和疏漏在所难免,恳请读者提出批评和建议。

联系邮箱:zhoujl52@163.com

编 者
2008 年 7 月 5 日

目 录

绪论	(1)
第一章 电力电子器件	(4)
第一节 电力二极管	(4)
第二节 晶闸管	(6)
第三节 全控型器件	(16)
第四节 其他新型电力电子器件	(23)
第五节 电力电子器件的保护及串并联使用	(25)
小结	(30)
思考题与习题	(30)
实验 IGBT 器件、晶闸管的认识与简易检测	(32)
第二章 整流电路	(38)
第一节 单相可控整流电路	(38)
第二节 三相可控整流电路	(48)
第三节 相控电路的驱动控制	(56)
第四节 多脉波整流电路	(58)
小结	(61)
思考题与习题	(62)
实验 三相桥式全控整流电路的性能研究	(63)
第三章 直流斩波电路	(65)
第一节 基本斩波电路	(65)
第二节 复合斩波电路	(73)
小结	(76)
思考题与习题	(77)
实验 串联型升降压开关稳压电源	(77)
第四章 交流开关与交流调压	(80)
第一节 晶闸管交流开关	(80)
第二节 单相交流调压电路	(82)
第三节 三相交流调压电路	(89)
第四节 交流调功电路	(96)
小结	(98)
思考题与习题	(99)
实验 交流调压实验	(99)

第五章 逆变电路与 PWM 控制技术	(103)
第一节 逆变的基本概念与原理	(103)
第二节 SPWM 逆变电路及其控制方法	(113)
第三节 PWM 整流电路及其控制方法	(121)
小结	(128)
思考题与习题	(129)
第六章 开关电源和交流软启动技术的应用	(130)
第一节 开关式稳压电源	(130)
第二节 有源功率因数校正装置	(136)
第三节 UPS 不间断电源	(139)
第四节 交流软启动技术的应用	(145)
思考题与习题	(157)
第七章 变频调速技术的应用	(158)
第一节 变频器概述	(158)
第二节 变频器的控制盘及外围电路	(161)
第三节 变频器主要运行参数的设置	(165)
第四节 变频器的应用宏	(169)
思考题与习题	(176)
第八章 综合实训	(177)
实训一 风机变频调速系统的设计、安装和调试	(177)
实训二 恒压供水系统的设计、安装和调试	(180)
实训三 变频器、软启动器的运行维护及故障诊断	(191)
附录	(202)
附录 1 ACS510 变频器完整参数表	(202)
附录 2 变频器及控制盘外观图	(215)
参考文献	(216)

绪 论

电力电子技术是应用于电力技术领域的电子技术,是电子学、电力学和控制理论相结合的边缘学科。现代电力电子技术是一项高新技术,在工业、农业、国防和科技领域得到了广泛的应用。

电力电子技术是一门利用电力电子器件对电能进行控制和转换的技术,它可分为电力电子器件制造技术和电力变换技术应用两个方面。电力电子器件的制造技术是电力电子技术的基础,电力变换技术是电力技术的核心。二者相辅相成、互相促进,近年来得到了快速的发展。

一、电力电子器件发展过程

1904 年出现了电子管。电子二极管具有单向导电性,主要应用于整流电路;电子三极管及多极管具有可控放大作用,用于通信和无线电技术领域。在 20 世纪 30 年代到 50 年代,是水银整流器发展迅速并大量应用的时期。它广泛用于电化学工业、电气铁道直流变电和轧钢用直流电动机的传动,甚至用于直流输电。这一时期,各种整流电路、逆变电路、周波变流电路的理论已经发展成熟并广为应用。

1947 年美国的贝尔实验室发明了晶体管,最先用于电力领域的半导体器件是硅整流管。20 世纪 50 年代晶闸管出现后,实现了弱电对以晶闸管为核心的强电变换电路的控制,使电子技术步入了功率领域,在工业上引起一场技术革命。70 年代后期,以门极可关断晶闸管(GTO)、电力双极型晶体管(GTR)电流控制型和电力场效应晶体管(Power-MOS-FET)电压控制型为代表的全控型器件迅速发展,这些器件的开关速度普遍高于普通晶闸管,应用于开关频率较高的电路。

在 20 世纪 80 年代后期,以绝缘栅极双极型晶体管(IGBT)为代表的复合型器件异军突起。IGBT 是 MOSFET 和 GTR 的复合。它把 MOSFET 的驱动功率小、开关速度快的优点和 GTR 通态压降小、载流能力大的优点集于一身,性能优越,使之成为现代电力电子技术的主导器件。与 IGBT 相对应,MOS 控制晶闸管(MCT)和集成门极换流晶闸管(IGCT)都是 MOSFET 和 GTO 的复合,它们既具有 GTO 晶闸管及 SCR 器件的电流密度高、导通压降低的优点,又具有 MOSFET 型器件输入阻抗高、响应速度快的优点。新型的静电感应晶体管(SIT)具有工作频率高,输出功率大、线性度好、失真小、输入阻抗高、开关特性好、热稳定性好和抗辐射能力强等优点,所以在雷达通信设备、超声波功率放大、开关电流、脉冲功率放大和高频感应加热等方面获得广泛的应用。静电感应晶闸管(SITH),正向压降小、开关速度快,其 di/dt 和 du/dt 的承受能力很高,可达 $3\,000\text{A}/\mu\text{s}$ 和 $1\,000\text{V}/\mu\text{s}$,对缓冲电路的要求降低,应用于高压直流输电(HVDC)系统、高频感应加热装置及高频逆变器。电子注入增强型栅极晶体管(IEGT)是近年来发展起来的一种 IGBT 派生器件,融合了 IGBT 与 GTO 的优点,开关特性与 IGBT 相当,正向压降比普通晶闸管低,关断时尾部电流比 IGBT 小,因而克服了 IGBT 耐压提高、

关断特性与通态压降之间的矛盾,代替 GTO 用于高压大容量领域。

为了使电力电子装置的结构紧凑、体积减小,常常把若干个电力电子器件及必要的辅助元件做成模块的形式,这给应用带来了很大的方便。随着集成工艺的提高和突破,又把驱动、控制、保护电路和功率器件集成在一起,构成功率集成电路(PIC)。有的器件还有放大、调制、振荡及逻辑运算功能,使强电和弱电的结合更趋完美。

二、电力变换电路与应用

电力变换电路是以电力半导体器件为核心,通过不同的电路和控制方法来实现对电能的转换和控制。它的基本功能是使交流(AC)和直流(DC)电能互相转换,常见的类型有:

(1) 可控整流器(AC-DC) 把交流电压变换成为固定或可调的直流电压,应用于直流电动机的调压调速、电解、电镀、蓄电池充电设备等。

(2) 直流斩波器(DC-DC) 把直流电压变换成为可调或固定的直流电压,应用于电气机车、直流升/降压器等。

(3) 无触点电力开关 接通或切断交流或直流电流通路,可取代接触器、继电器,应用于通/断时无火花要求的场合。新型的开关磁阻电动机所需要的脉冲式工作电源,亦由直流电源通过电力开关的控制得到。

(4) 交流调压器(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,常应用于灯光控制、温度控制及交流电动机的软启动等。

(5) 有源逆变器(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。

(6) 无源逆变器(AC-DC-AC) 把直流电或交流电变换成频率可调的或恒定的交流电,如应用于变频电源、UPS、变频调速等设备。

(7) 无功补偿和谐波抑制 晶闸管控制电抗器(TCR)、晶闸管投切电容器(TSC)以及近年来出现的静止无功发生器(SVG)、有源电力滤波器(APF)等新型电力电子装置具有优越的无功功率补偿和谐波抑制的性能。

电力电子技术的应用范围十分广泛,在工业生产、电力系统、通信系统、计算机系统、新能源系统及在照明、居民生活等领域均发挥其重要作用。

电力电子技术对节省电能有重要意义,大型风机、水泵采用变频调速后的节能效果十分显著,已得到了广泛的推广应用。

三、控制技术

控制技术是电力变换电路的基本技术之一,关键是提高变换电路的性能和效率。对于晶闸管而言,其控制方法是调整器件的导通角,即控制触发脉冲与主电路之间的相移角,称为相控技术。由全控型器件组成的变流电路中,多采用脉宽调制(PWM)技术,由于 PWM 技术可以有效地抑制谐波,动态响应速度快,使变流电路的性能大大提高。

无论是相控技术还是 PWM 技术,都在应用中不断地完善、改进,并涌现出许多专用集成触发(驱动)电路,给实际应用电路带来了简便、工作稳定和体积小等优点。与此同时,变流电路的控制技术正朝着数字化的方向发展。

四、本课程的任务与要求

1. 任务

电力电子技术课程是高职矿山电气(自动化)、煤矿机电、机电一体化等专业的一门主干

专业课程。它的任务是：

- (1) 介绍晶闸管和 IGBT 及 GTO、GTR、MOSFET 等电力电子器件的工作原理、特性参数；
- (2) 介绍各种器件的驱动电路及保护电路；
- (3) 介绍整流、直流斩波、交流调压及逆变等变流电路；
- (4) 重点介绍交流软启动技术和变频技术的应用，以及开关电源、有源功率因数校正、UPS 技术的应用。

2. 要求

通过理论学习与实践训练，应使学生达到以下要求：

- (1) 掌握常用电力电子器件的特性、主要参数、选用方法及应用范围，能够用万用电表判断常用电力电子器件的电极及性能。
- (2) 理解基本变换电路的工作原理、结构和用途。
- (3) 独立完成教学要求中规定的实验与实训项目。能正确使用常用电子仪器、仪表观察实验现象，记录有关数据，并能通过分析比较得出正确结论。
- (4) 具有借助工具书和设备铭牌、产品说明书、产品目录(手册)等资料，查阅电子元器件及产品的有关数据、功能和使用方法的能力。
- (5) 能初步判断、分析和处理电力变换设备的一般故障。
- (6) 掌握变频器、软启动器在风机、恒压供水变频调速系统中的设计、安装、调试、运行维护及故障诊断方法。

电力电子技术所涉及的知识面广、内容多，电力电子器件、变换电路、控制技术都在不断发展与不断更新，是电气工程学科中的一个最为活跃的分支。在学习中应注意复习电工基础、电子技术、电机与电气控制等课程的内容。要着重于物理概念及分析问题的方法，重视实训环节，突出对应用能力的培养。为适应电力电子技术的不断发展，应注意加强自学能力的培养。

第一章 电力电子器件

电力电子器件种类繁多,按其开关控制性能可分为不可控型器件、半控型器件和全控型器件。

(1) 不可控型器件为无控制端的二端器件。如电力二极管就不具备可控开关性能。

(2) 半控型器件为具有控制端的三端器件,但其控制端只能控制器件导通,即无自关断能力。如晶闸管及其大部分派生器件均属这一类。

(3) 全控型器件为具有控制端的三端器件,其控制端有控制器件开通和关断的双重功能,也称自关断器件。如可关断晶闸管 GTO、电力晶体管 GTR 及绝缘栅双极晶体管 IGBT 等。

在全控型电力电子器件中,根据器件内部载流子参与导电的种类不同可分为三大类型:单极型、双极型和混合型。器件内只有一种载流子参与导电的称为单极型,如功率 MOSFET 和 SIT 等;器件内电子与空穴两种载流子都参与导电的称为双极型,如 GTR 和 GTO;由双极型器件与单极型器件复合而成的称为复合型,如 IGBT、SITH 和 MCT 等。

第一节 电力二极管

一、电力二极管的结构外形

电力二极管是允许电流较大、电压较高的二极管,与信息电子电路中的二极管一样以半导体 PN 结为基础,由一个面积较大的 PN 结和两端引线以及封装组成,外形上看,主要有螺栓型和平板型两种封装,如图 1-1 所示。为了缩小体积和减少连线,常把几个管子集成封装为一个器件,即二极管模块。

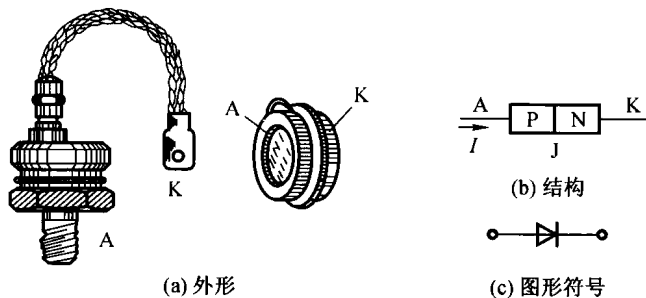


图 1-1 电力二极管的外形、结构和图形符号

电力二极管本身消耗功率较大,发热多,使用时应安装传热良好的散热器。目前功率电子器件常用的散热器冷却方式有自冷、风冷、液冷和沸腾冷(热管)四种。电力二极管的正常

运行,在很大程度上取决于散热器的合理选配以及器件与散热器之间的装配质量。

二、电力二极管的伏安特性

电力二极管的伏安特性如图 1-2 所示,当外加正向电压大于 U_{T0} (门槛电压)即克服 PN 结内电场后管子才开始导通,正向导通后其压降随电流的增加而略有增大。反向工作时,当反向电压增大到 U_B (击穿电压),使 PN 结内电场达到雪崩击穿强度时,反向漏电流 I_{RR} 剧增,若无限流措施将会导致二极管击穿损坏。

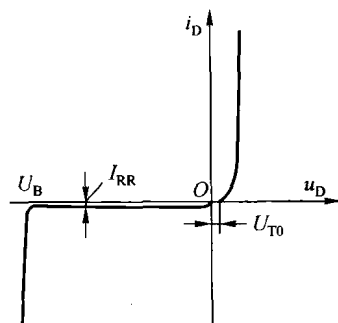


图 1-2 电力二极管的伏安特性

三、电力二极管的主要参数

(1) 额定正向平均电流 I_F (额定电流) 是指管子长期运行在规定的环境温度为 40°C 和散热条件下,器件 PN 结温度稳定且不超过 140°C 时,所允许长时间连续流过 50 Hz 正弦半波的电流平均值,将此电流值配规定系列的电流等级即为管子的额定电流。 I_F 受发热限制,因此在使用中按有效值相等来选取管子电流定额。对应额定电流 I_F ,其有效值为 $1.57I_F$ 。选用器件时应考虑 1.5~2 倍的电流安全余量。

(2) 反向重复峰值电压 U_{RRM} (额定电压) 是指管子反向能重复施加的最高峰值电压,此值通常为击穿电压 U_B 的 2/3。选用器件时应考虑 2~3 倍的电压安全余量。

(3) 正向平均电压 U_F 在规定的条件下,管子流过额定正弦半波电流时,管子两端的正向平均电压,亦称管压降,此值比直流压降小。管压降越大,管子导通时的功率损耗越大。

(4) 反向漏电流 I_{RR} 对应于反向重复峰值电压时的漏电流。

(5) 最高工作结温 T_{JM} 在 PN 结不受损坏的前提下,二极管所能承受的最高平均温度。一般在 $125^\circ\text{C} \sim 175^\circ\text{C}$ 范围内。

(6) 反向恢复时间 t_{rr} 二极管由导通到截止,并恢复到自然阻断状态所需的时间。反向恢复时间是描述二极管高频开关特性的一个重要参数,若选用的二极管此项参数偏大不能满足要求,将会使二极管过热烧毁。

四、电力二极管的主要类型

电力二极管的主要类型有普通二极管、快恢复二极管和肖特基二极管。

(1) 普通二极管(整流二极管) 多用于开关频率不高(1 kHz 以下)的整流电路中,反向恢复时间长。一般在 $5\mu\text{s}$ 以上,正向电流定额和反向电压定额很高,分别可达数千安和数千伏以上。

(2) 快恢复二极管 恢复过程很短,特别是反向恢复过程很短($5\mu\text{s}$ 以下)的二极管,正向压降也很低(约 0.9 V),反向耐压多在 1 200 V 以下。快恢复二极管从性能上可分为快速恢复二极管和超快速恢复二极管两种。前者反向恢复时间为数百纳秒以上,后者则在 100 ns 以下,其容量可达 1 200 V/200 A,多用于高频整流和逆变电路中。

(3) 肖特基二极管 以金属和半导体接触形成整流特性的单极型器件。其导通压降的典型值为 0.4 V~0.6 V,反向耐压在 200 V 以下。反向恢复时间为 10 ns~40 ns,不会有明显的电压过冲。缺点是当提高反向耐压时,正向压降也会提高,反向漏电流也很大。

第二节 晶 闸 管

一、晶闸管的结构与工作原理

1. 晶闸管的结构外形

晶闸管有三个引出极:阳极(A)、阴极(K)、门极(G)。常用的有螺栓式与平板式,外形与符号如图 1-3 所示。晶闸管工作时发热量大,必须安装散热器。图 1-3(a)为小电流塑封式,电流稍大时 also 需紧固在散热板上,图 1-3(b)为螺栓式,使用时必须紧栓在散热器上,图 1-3(c)为平板式,使用时由两个彼此绝缘的散热器把其紧夹在中间。

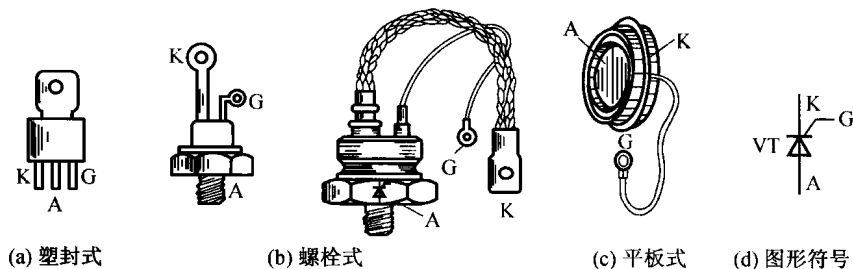


图 1-3 晶闸管的外形与图形符号

图 1-4 为晶闸管散热器,图 1-4(a)适用于螺栓式,图 1-4(b)、(c)用于平板式。平板式散热效果好,电流在 200 A 以上的管子都采用平板式结构。

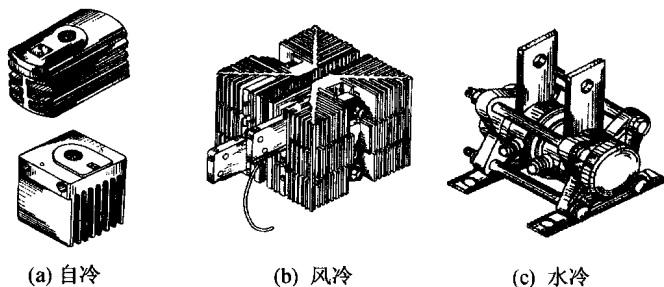


图 1-4 晶闸管的散热器及外形

2. 晶闸管的工作原理

晶闸管内部原理性结构如图 1-5(a)所示,管芯由四层半导体($P_1N_1P_2N_2$)组成,形成三个 PN 结(J_1 、 J_2 、 J_3),可等效成三个二极管串联,或等效成两个晶体管 $V_1(P_1-N_1-P_2)$ 与 $V_2(N_1-P_2-N_2)$ 连接,如图 1-5(b)、(c)所示。当管子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,管子仍不导通。若此时门极与阴极间加上正向电压 U_g 使门极 G 流入一定大小的电流 I_g ,晶闸管就会像二极管一样正向导通。晶闸管通入门极电流 I_g 使其导通的过程称为触发,其触发导通的原理如图 1-6 所示。

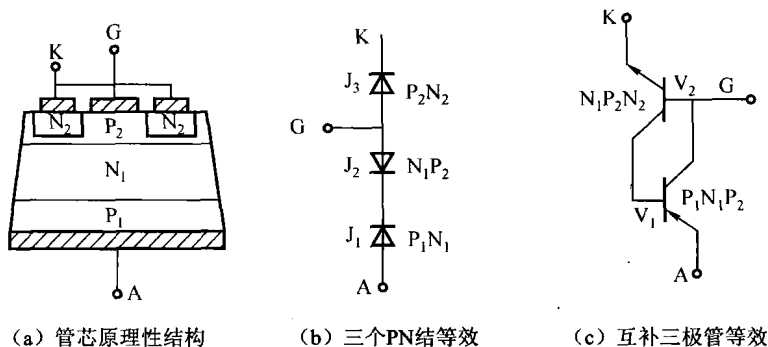


图 1-5 晶闸管原理性结构图

当管子阳极加上正向电压后,要使管子正向导通的关键是使 J_2 结反向失去阻挡作用,从图 1-6(b)可见,当 S 闭合时 V_1 管的集电极电流 I_{C1} 即为 V_2 管的基极电流 I_{B2} ; V_2 管集电极电流 I_{C2} 又是 V_1 的基极电流 I_{B1} ,当 S 合上时有足够的门极电流 I_g 流入,通过两管的电流放大立即形成强烈的正反馈,过程为

$$I_g \uparrow \rightarrow I_{B2} \uparrow \rightarrow I_{C2} (= \beta I_{B2}) \uparrow = I_{B1} \uparrow \rightarrow I_{C1} (= \beta I_{B1}) \uparrow$$

瞬时使两管饱和导通,此时 I_A 值由电源电压 E_A 与负载电阻 R_d 来决定,晶闸管正向导通压降约为 1.5 V。由于正反馈的作用,导通的管子即使门极电流降为零或负值,也不能使管子关断。要使已导通的晶闸管关断,可降低阳极电源电压或增加阳极回路电阻,使流过管子的阳极电流 I_A 减小到一定值(一般为几十毫安)时,内部正反馈无法维持, I_A 突然降为零,管子才可恢复正向阻断状态。当门极断开时,能维持管子导通

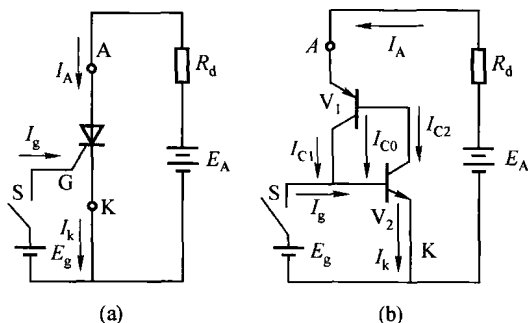


图 1-6 晶闸管的工作原理

所需的最小阳极电流称为维持电流 I_H 。因此管子关断的条件是 $I_A < I_H$,为了保证晶闸管可靠与迅速地关断,通常在管子阳极电流降为零之后,加一段时间的反向电压。

由此可见,晶闸管与二极管一样具有单向导电特性,但晶闸管还具有正向阻断特性,只加上正向电压时管子还不能导通,必须同时加上正向门极电压,有足够的门极电流流入后才能使晶闸管正向导通。管子一旦触发导通后门极就失去控制作用,这种门极可触发导通但无法使其关断的器件称为半控器件。

二、晶闸管的伏安特性与主要参数

1. 晶闸管的伏安特性

晶闸管伏安特性如图 1-7 所示。第一象限中,当 $I_g = 0$ 晶闸管正向电压 U_A 增大到正向转折电压 U_{BO} 前,器件处于正向阻断状态,其正向漏电流随 U_A 电压增高而逐渐增大;当 U_A 达到 U_{BO} 时管子突然从阻断状态转为导通,称为正向转折或硬开通,多次硬开通会损坏

管子。当通入门极电流 I_g 足够大时,正向转折电压降至极小,使晶闸管像整流二极管一样,一加上正向阳极电压就导通,这种导通称为触发导通;导通后器件的特性与整流二极管正向伏安特性相似;当已导通的管子其阳极电流 I_A 减小到 I_H (维持电流)以下时,管子又从导通返回正向阻断。第三象限中,晶闸管加反向阳极电压时,只流过很小的反向漏电流,当反向电压升高到 U_{RO} 时管子反向击穿可能导致损坏, U_{RO} 称为反向击穿电压。

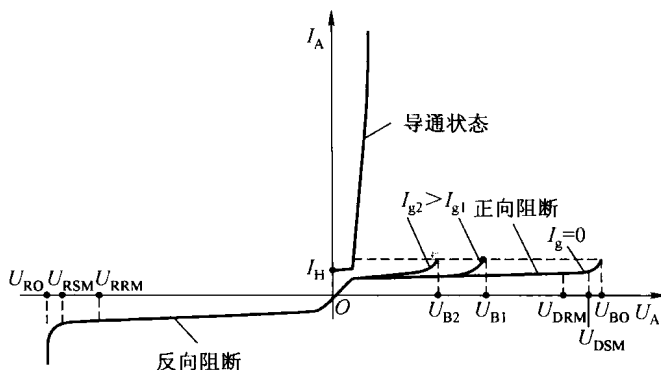


图 1-7 晶闸管伏安特性

2. 晶闸管的主要特性参数

1) 额定电压 U_{Tn}

从图 1-7 的伏安特性可见,当门极断开、器件处于额定结温时,正向阻断曲线出现漏电流显著增加的电压 U_{DSM} 为正向不重复峰值电压,同理 U_{RSM} 为反向不重复峰值电压。各乘 0.9 所得的值 U_{DRM} 与 U_{RRM} 为正向与反向重复峰值电压。器件的额定电压 U_{Tn} 即为 U_{DRM} 与 U_{RRM} 中较小值再靠取相近标准电压等级。

由于晶闸管工作时温度会升高,在使用中也会出现各种不可避免的瞬时过电压,因此在选用管子的额定电压时,应比工作电路中加在管子上的最大瞬时电压值 U_{TM} 大 2~3 倍,即

$$U_{Tn} \geq (2 \sim 3) U_{TM}$$

2) 额定电流 $I_{T(AV)}$

$I_{T(AV)}$ 亦称额定通态平均电流,在室温 40℃ 和规定的冷却条件下,器件在电阻负载流过正弦半波(导通角不小于 170°)电路中,结温不超过额定结温时所允许的最大通态平均电流值,将此值靠取相近电流等级即为器件的额定电流 $I_{T(AV)}$ 。

晶闸管额定电流是以通态平均电流来标定,而发热应由流过晶闸管电流的有效值来决定。为此可根据管子额定电流 $I_{T(AV)}$ 换算出额定有效电流 I_{Tn} (此值制造厂不提供),在实际使用时不论流过管子电流波形如何、导通角多大,只要其最大电流有效值 $I_{Tm} \leq I_{Tn}$,散热冷却符合规定,则晶闸管的发热与温升就能限制在允许范围。

各种有直流分量(成分)的电流波形都有一个电流平均值(一个周期内电流波形面积的平均,即直流电流表的读数)和一个有效值(均方根值)。现定义电流波形的有效值与平均值之比称为该波形的波形系数,用 K_f 表示。如整流电路直流输出负载电流 I_d 的波形系数为

$$K_f = \frac{I}{I_d} = \frac{\text{负载电流有效值}}{\text{负载电流平均值}}$$

流过晶闸管电流的波形系数为

$$K_{IT} = \frac{I_T}{I_{aT}} = \frac{\text{晶闸管电流有效值}}{\text{晶闸管电流平均值}}$$

根据晶闸管额定电流 $I_{T(AV)}$ 的定义, 流过管子为正弦半波电流波形, 如半波正弦电流峰值为 I_m , 则

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

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

因此在额定状态时, 管子电流波形系数为

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

这说明额定电流为 100 A 的管子, 其额定有效电流为 $K_f I_{T(AV)} = 1.57 \times 100 \text{ A} = 157 \text{ A}$ 。

不同电流波形有不同的波形系数, 表 1-1 列出四种常用电流波形的波形系数 K_f 值与额定电流为 100 A 晶闸管在流过表中波形时允许通过的平均值。表中计算说明, 额定电流为 100 A 的晶闸管, 只有在正弦半波(额定情况)时, 其波形系数 $K_f = 1.57$, 允许流过最大平均电流为 100 A, 在其他波形时都不是 100 A, 这在选用晶闸管时必须注意。

表 1-1 四种波形的 K_f 值与 100 A 晶闸管允许电流平均值

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

由于晶闸管的电流过载能力极小,在选用时要至少考虑(1.5~2)倍的电流裕量,即

$$1.57I_{T(AV)} = I_{Tn} \geq (1.5 \sim 2)I_{Tm}$$

所以

$$I_{T(AV)} \geq (1.5 \sim 2)I_{Tm}/1.57$$

式中 I_{Tm} ——流过管子的最大有效电流。

3) 门极触发电流与门极触发电压

在室温下施加 6 V 正向阳极电压,使管子完全导通所必须的最小门极电流,称门极触发电流 I_{GT} ,对应的门极触发电压为 U_{GT} 。

U_{GT} 、 I_{GT} 值受温度影响很大,在冬天使用管子时, U_{GT} 、 I_{GT} 值会增大,使用时要注意。

4) 通态平均电压 $U_{T(AV)}$

在规定环境温度和标准散热条件下,管子流过额定正弦半波电流时,阳、阴极之间的平均电压称为通态平均电压,简称管压降。其标准值分组列于表 1-2 中, $U_{T(AV)}$ 值小管子功耗亦小。

表 1-2 标准值分组表

组别	A	B	C	D	E
通态平均电压/V	$U_T \leq 0.4$	$0.4 < U_T \leq 0.5$	$0.5 < U_T \leq 0.6$	$0.6 < U_T \leq 0.7$	$0.7 < U_T \leq 0.8$
组别	F	G	H	I	
通态平均电压/V	$0.8 < U_T \leq 0.9$	$0.9 < U_T \leq 1.0$	$1.0 < U_T \leq 1.1$	$1.1 < U_T \leq 1.2$	

5) 维持电流和掣住电流

在标准室温且门极断开时,管子从较大通态电流降至刚能保持导通的最小阳极电流,称为维持电流 I_H 。额定电流大的管子其 I_H 值亦大,结温降低时 I_H 会增大。

晶闸管加上触发脉冲使其开通的过程中,当脉冲消失时仍要保持管子维持导通所需的最小阳极电流值,称为掣住电流 I_L 。如管子在开通过程中阳极电流 I_A 未上升到 I_L 值,当触发脉冲去除后管子又会恢复阻断。对同一晶闸管来说,通常 I_L 约为 I_H 的 2~4 倍。

6) 晶闸管的开通时间与关断时间

普通晶闸管的开通时间 t_{gt} 在 6 μs 左右,快速晶闸管开通时间可达 1 μs 。为了缩短开通时间,常采用触发脉冲前沿陡、幅度大的窄脉冲来触发,称为强触发。

在额定结温时,管子从切断正向电流到恢复正向阻断能力,这段时间称为晶闸管关断时间 t_q ,普通晶闸管的 t_q 约在几十微秒到几百微秒,快速晶闸管的关断时间可短至 1 μs 。

3. 国产晶闸管的型号

国产晶闸管的型号及其含义如下:

