



教育部高职高专规划教材

电力电子技术

第 二 版

● 郝万新 主编
毕卫红 主审



化学工业出版社

教育部高职高专规划教材

电力电子技术

第二版

郝万新 主编

毕卫红 主审



化学工业出版社

· 北京 ·

全书共分七章, 主要介绍电力电子器件、晶闸管相控整流主电路、晶闸管触发电路、晶闸管有源逆变电路、交流开关与交流调压电路、变频电路、电源变换技术等内容。

内容叙述力求简明扼要, 以电力电子器件为核心, 介绍晶闸管、GTR、GTO、功率 MOSFET、IGBT、IPM 等器件的工作原理、参数、驱动与保护。从应用的角度, 结合先进的控制技术, 强调电力电子器件在相控整流技术、交流开关与调压技术、逆变技术和电源变换技术方面的典型应用。避开繁琐的公式推导, 强化概念, 突出应用, 对典型应用电路作详细叙述, 增强学生分析问题和解决问题的能力。

本书可作为高职高专、成人高校、职工大学的工业电气自动化、电气技术、机电一体化及应用电子技术等电类专业的教材, 也可供企业有关工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力电子技术/郝万新主编. —2 版. —北京: 化学工业出版社, 2008. 6
教育部高职高专规划教材
ISBN 978-7-122-03336-9

I. 电… II. 郝… III. 电力电子学-高等学校: 技术学院-教材 IV. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 103624 号

责任编辑: 张建茹 王丽娜
责任校对: 周梦华

文字编辑: 廉 静
装帧设计: 郑小红

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 装: 三河市延风印装厂
787mm×1092mm 1/16 印张 11¼ 字数 289 千字 2008 年 9 月北京第 2 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 20.00 元

版权所有 违者必究

出版说明

高职高专教材建设工作是整个高职高专教学工作中的重要组成部分。改革开放以来,在各级教育行政部门、有关学校和出版社的共同努力下,各地先后出版了一些高职高专教育教材。但从整体上看,具有高职高专教育特色的教材极其匮乏,不少院校尚在借用本科或中专教材,教材建设落后于高职高专教育的发展需要。为此,1999年教育部组织制定了《高职高专教育专门课课程基本要求》(以下简称《基本要求》)和《高职高专教育专业人才培养目标及规格》(以下简称《培养规格》),通过推荐、招标及遴选,组织了一批学术水平高、教学经验丰富、实践能力强的教师,成立了“教育部高职高专规划教材”编写队伍,并在有关出版社的积极配合下,推出一批“教育部高职高专规划教材”。

“教育部高职高专规划教材”计划出版500种,用5年左右时间完成。这500种教材中,专门课(专业基础课、专业理论与专业能力课)教材将占很高的比例。专门课教材建设在很大程度上影响着高职高专教学质量。专门课教材是按照《培养规格》的要求,在对有关专业的人才培养模式和教学内容体系改革进行充分调查研究和论证的基础上,充分吸取高职、高专和成人高等学校在探索培养技术应用性专门人才方面取得的成功经验和教学成果编写而成的。这套教材充分体现了高等职业教育的应用特色和能力本位,调整了新世纪人才必须具备的文化基础和技术基础,突出了人才的创新素质和创新能力的培养。在有关课程开发委员会组织下,专门课教材建设得到了举办高职高专教育的广大院校的积极支持。我们计划先用2~3年的时间,在继承原有高职高专和成人高等学校教材建设成果的基础上,充分汲取近几年来各类学校在探索培养技术应用性专门人才方面取得的成功经验,解决新形势下高职高专教育教材的有无问题;然后再用2~3年的时间,在《新世纪高职高专教育人才培养模式和教学内容体系改革与建设项目计划》立项研究的基础上,通过研究、改革和建设,推出一大批教育部高职高专规划教材,从而形成优化配套的高职高专教育教材体系。

本套教材适用于各级各类举办高职高专教育的院校使用。希望各用书学校积极选用这批经过系统论证、严格审查、正式出版的规划教材,并组织本校教师以对事业的责任感对教材教学开展研究工作,不断推动规划教材建设工作的发展与提高。

教育部高等教育司

第二版前言

根据教育部高等教育司的要求,化学工业出版社在2001年陆续出版了电类专业教材共20种。此套教材立足高职高专教育培养目标,遵循社会的发展需求,突出应用性和针对性,加强实践能力的培养,为高职高专教育事业的发展起了很好的推动作用。一些教材多次重印,受到了广大院校的好评。为了满足全国高等职业教育如何适应各院校各学科体制的整合、专业调整的需求,对此套教材组织了修订工作。

随着高等职业技术教育的不断发展,“工学结合”教学模式改革的不断深入,要求学生在具有必备的基础理论和专业知识的基础上,重点掌握从事专业领域实际工作的基本技能和高新技术。

编者在本书第一版的基础上,总结了多年教学和科研的经验,本着立足基础、浓缩精华、简化理论和侧重应用的原则,对教材进行了修订,特色如下。

① 增加了适量的应用实例,使教材的内容与职业衔接更加密切。引入了晶闸管模块、过零触发应用实例、双向晶闸管调压调速装置、多电平电压源型逆变器等内容。

② 以典型案例应用为切入点,解决实践教学在不同地区差异较大,教学规范性不强,内容繁杂,缺乏统一的标准之间的矛盾,将实训能力的培养与实际应用相统一。

本书修订工作由主编负责整体规划并执笔,其余编写人员冯微,高文习及所在院校教师提出了许多宝贵意见和建议,在教材修订中做了大量工作。

由于编者水平有限,书中难免有不足之处,恳请有关专家和广大读者批评指正。

编者

2008年6月

第一版前言

根据教育部《关于加强高职高专教育人才培养工作的意见》精神,为满足高职高专电类相关专业教学基本建设的需要,在教育部高教司和教育部高职教育教学指导委员会的关心和指导下,全国石油和化工高职教育教学指导委员会广泛开展调研,召开多次高职高专电类教材研讨会,组织编写了20本面向21世纪的高职高专电类专业系列教材,供工业电气化技术、工业企业电气化、工业电气自动化、应用电子技术、机电应用技术及工业仪表自动化、计算机应用技术等相关专业使用。

本套教材立足高职高专教育人才培养目标,遵循主动适应社会发展需要、突出应用性和针对性、加强实践能力培养的原则,组织编写了专业基础课程的理论教材和与之配套的实训教材。实训教材集实验、设计与实习、技能训练与应用能力培养为一体,体系新颖,内容可选择性强。同时提出实训硬件的标准配置和最低配置,以方便各校选用。

由于本套教材的整体策划,从而保证了专业基础课与专业课内容的衔接,理论教材与实训教材的配套,体现了专业的系统性和完整性。力求每本教材的讲述深入浅出,将知识点与能力点紧密结合,注重培养学生的工程应用能力和解决现场实际问题的能力。

本书编写时注重体现如下特色。

1. 以能力培养为目标,突出实际、实用、实践的原则,贯彻重概念、重结论、重应用的指导思想,注重内容的典型性、针对性,加强理论联系实际。

2. 以电力电子器件为核心,介绍晶闸管、GTR、GTO、功率 MOSFET、IGBT、IPM 等器件的工作原理、参数、驱动与保护。体现了技术的先进性,跟上了电力电子技术的发展。

3. 从应用的角度,介绍典型电力电子线路的工作原理与实用技术,同时介绍了微机控制在电力电子装置的应用,使教材具有实用性,符合高职高专学生毕业后的工作需求。

本书前言、绪论及第一、五、六、七章由郝万新编写;第二章由冯微编写;第三、四章由高文习编写。全书由郝万新统稿并担任主编,由燕山大学毕卫红教授担任主审。

由于编者水平有限,书中难免有不当或错误之处,恳请有关专家和广大读者批评指正。

编者

2001年9月1日

目 录

绪论	1	第四章 晶闸管有源逆变电路	107
第一章 电力电子器件	5	第一节 有源逆变的基本工作原理	107
第一节 晶闸管	5	第二节 逆变失败与逆变角的限制	111
第二节 电力晶体管	14	第三节 晶闸管直流可逆拖动方案与 工作原理	113
第三节 门极可关断晶闸管	22	第四节 绕线式异步电动机的串级 调速系统	117
第四节 功率场效应晶体管	27	小结	125
第五节 绝缘栅双极晶体管	33	思考题与习题	125
第六节 智能功率模块	41	第五章 交流开关与交流调压电路	127
第七节 其他新型电力电子器件	46	第一节 交流开关电路	127
小结	48	第二节 交流调压电路	133
思考题与习题	49	小结	140
第二章 晶闸管相控整流主电路	50	思考题与习题	140
第一节 单相相控整流主电路	50	第六章 变频电路	142
第二节 三相相控整流主电路	65	第一节 单相逆变电路	142
第三节 相控整流电路供电-电动机 系统的机械特性	75	第二节 三相逆变器与控制模式	147
第四节 晶闸管的保护	77	第三节 多电平电压源型逆变器	151
小结	82	第四节 变频器在变频调速中的应用	155
思考题与习题	83	小结	157
第三章 晶闸管触发电路	85	思考题与习题	158
第一节 对触发电路的要求与简单 触发电路	85	第七章 电源变换技术	159
第二节 同步电压为锯齿波的触发电路	91	第一节 开关电源	159
第三节 触发电路与主电路电压同步 配合与调试	99	第二节 不间断电源	165
第四节 晶闸管直流调速系统实例	103	第三节 加热电源	173
小结	105	小结	179
思考题与习题	105	思考题与习题	179
		参考文献	181

绪 论

一、电力电子技术的概念

以电力为对象的电子技术称为电力电子技术 (Power electronics)，它包括电力电子器件、变流电路和控制电路三个部分，是电力、电子、控制三大电气工程技术领域之间的交叉学科。电力电子技术能够实现对电流、电压、频率和相位等基本参数的精确控制和高效处理，是一项高新技术。当前，电力电子作为节能、节材、自动化、智能化、机电一体化的基础，正朝着应用技术高频化、硬件结构模块化、产品性能绿色化的方向发展。在不远的将来，电力电子技术将使电源技术更加成熟、经济、实用，为实现高效率和高品质用电打下基础。

二、电力电子技术的发展

现代电力电子技术的发展是以电力电子器件的发展为核心,是从以低频技术处理问题为主的传统电力电子技术,向以高频技术处理问题为主的现代电力电子技术方向转变。电力电子技术起始于 20 世纪 50 年代末 60 年代初的硅整流器件,其发展先后经历了整流器时代、逆变器时代和变频器时代,并促进了电力电子技术在许多新领域的应用。80 年代末期和 90 年代初期发展起来的、以功率 MOSFET 和 IGBT 为代表的,集高频、高压和大电流于一身的功率半导体复合器件,表明传统电力电子技术已经进入现代电力电子时代。

(一) 电力电子器件

如图 0-1 所示为电力电子器件“树”，电力电子器件在应用中一般工作在开关状态，根据器件不同，开关特性可分为两大类：半控型器件和全控型器件。通过门极信号只能控制其导通而不能控制其关断的器件，称为半控型器件；通过门极信号既能控制其导通又能控制其关断的器件，称为全控型器件。图 0-1 中普通晶闸管及派生器件，如逆导晶闸管（RCT）、不对称晶闸管（ASCR）和双向晶闸管（TRIAC）为半控型器件。其余三端器件为全控型器件。

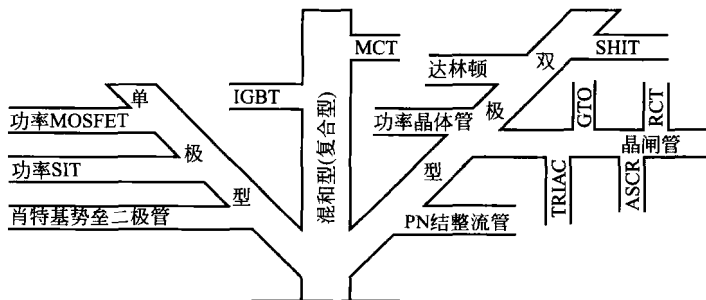


图 0-1 电力电子器件“树”

根据半导体器件内部电子和空穴两种载流子参与导电的情况，众多的电力电子器件可以分为单极型、双极型和混合型。凡由一种载流子参与导电的称为单极型器件，如图中功率 MOSFET、静电感应晶体管 (SIT)；凡由电子和空穴两种载流子参与导电的称为双极型器

件,如图中 PN 结整流管、普通晶闸管及其派生器件、功率晶体管和静电感应晶闸管(SITH)等;由单极型和双极型两种器件组成的复合器件称为混合型器件,如绝缘栅双极型晶体管(IGBT)和 MOS 门极晶闸管(MCT)。

根据控制极信号的不同性质,电力电子器件还被分成电流控制型和电压控制型两类器件。电流控制型器件是通过控制极注入或抽出电流的方式来实现对器件导通和关断的控制,如双极型器件基本上是电流控制型;而电压控制型器件是利用场控原理控制的电力电子器件,其导通和关断是由控制极上的电压信号控制的,控制电流极小,如单极型器件功率 MOSFET 和 SIT 为电压控制型。

(二) 电力电子技术的发展

1. 整流器时代

大功率的工业用电由工频(50Hz)交流发电机提供,但是大约 20% 的电能是以直流形式消耗的,其中最典型的是电解(有色金属和化工原料需要直流电解)、牵引(电气机车、电传动的内燃机车、地铁机车、城市无轨电车等)和直传动(轧钢、造纸等)三大领域。大功率硅整流器能够高效率地把工频交流电转变为直流电,因此在 20 世纪 60 年代和 70 年代,大功率硅整流管和晶闸管的开发与应用得以很大发展。

2. 逆变器时代

20 世纪 70 年代出现了世界范围的能源危机,交流电机变频调速因节能效果显著而迅速发展。变频调速的关键技术是将直流电逆变为 0~100Hz 的交流电。在 70 年代到 80 年代,随着变频调速装置的普及,大功率逆变用的晶闸管、巨型功率晶体管(GTR)和门极可关断晶闸管(GTO)成为当时电力电子器件的主角。类似的应用还包括高压直流输电,静止式无功功率动态补偿等。这时的电力电子技术已经能够实现整流和逆变,但工作频率较低,仅局限在中低频范围内。

3. 变频器时代

进入 20 世纪 80 年代,大规模和超大规模集成电路技术的迅猛发展,为现代电力电子技术的发展奠定了基础。将集成电路技术的精细加工技术和高压大电流技术有机结合,出现了一批全新的全控型功率器件,首先是功率 MOSFET 的问世,导致了中小功率电源向高频化发展,而绝缘门极双极晶体管(IGBT)的出现,又为大中型功率电源向高频发展带来机遇。MOSFET 和 IGBT 的相继问世,是传统的电力电子向现代电力电子转化的标志。新型器件的发展不仅为交流电机变频调速提供了较高的频率,使其性能更加完善可靠,而且使现代电子技术不断向高频化发展,为用电设备的高效节材、节能,实现小型轻量化,机电一体化和智能化提供了重要的技术基础。

三、现代电力电子的应用领域

1. 开关电源技术

高速发展的计算机技术带领人类进入了信息社会,同时也促进了电源技术的迅速发展。20 世纪 80 年代,计算机全面采用了开关电源,率先完成计算机电源换代。接着开关电源技术相继进入了电子、电气设备领域,高频小型化的开关电源及其技术已成为现代通信供电系统的主流。在通信领域中,通常将整流器称为一次电源,而将直流-直流(DC/DC)变换器称为二次电源。一次电源的作用是将单相或三相交流电网变换成标称值为 48V 的直流电源。目前在程控交换机用的一次电源中,传统的相控式稳压电源已被高频开关电源取代,高频开

关电源（也称为开关型整流器 SMR）通过 MOSFET 或 IGBT 的高频工作，开关频率一般控制在 $50\sim 100\text{kHz}$ 范围内，实现高效率和小型化。近几年，开关整流器的功率容量不断扩大，单机容量已从 $48\text{V}/12.5\text{A}$ 、 $48\text{V}/20\text{A}$ 扩大到 $48\text{V}/200\text{A}$ 、 $48\text{V}/400\text{A}$ 。

2. 直流-直流 (DC/DC) 变换器

DC/DC 变换器将一个固定的直流电压变换为可变的直流电压，这种技术被广泛应用于无轨电车、地铁列车、电动车的无级变速和控制，同时使上述控制获得加速平稳、快速响应的性能，并同时收到节约电能的效果。用直流斩波器代替变阻器可节约电能 $20\%\sim 30\%$ 。直流斩波器不仅能起调压的作用（开关电源），同时还能起到有效地抑制电网侧谐波电流噪声的作用。

3. 不间断电源 (UPS)

不间断电源 (UPS) 是计算机、通信系统以及要求提供不能中断场合所必须的一种高可靠、高性能的电源。交流市电输入经整流器变成直流，一部分能量给蓄电池组充电，另一部分能量经逆变器变成交流，经转换开关送到负载。为了在逆变器故障时仍能向负载提供能量，另一路备用电源通过电源转换开关来实现。

现代 UPS 普遍采用了脉宽调制技术和功率 MOSFET、IGBT 等现代电力电子器件，电源的噪声得以降低，而效率和可靠性得以提高。微处理器软、硬件技术的引入，可以实现对 UPS 的智能化管理，进行远程维护和远程诊断。

目前在线式 UPS 的最大容量已可作到 $600\text{kV}\cdot\text{A}$ 。超小型 UPS 发展也很迅速，已经有 $0.5\text{kV}\cdot\text{A}$ 、 $1\text{kV}\cdot\text{A}$ 、 $2\text{kV}\cdot\text{A}$ 、 $3\text{kV}\cdot\text{A}$ 等多种规格的产品。

4. 变频器电源

变频器电源主要用于交流电机的变频调速，其在电气传动系统中占据的地位日趋重要，已获得巨大的节能效果。变频器电源主电路均采用交流-直流-交流方案。工频电源通过整流器变成固定的直流电压，然后由大功率晶体管或 IGBT 组成的 PWM 高频变换器，将直流电压逆变成电压、频率可变的交流输出，电源输出波形近似于正弦波，用于驱动交流异步电动机实现无级调速。

国际上 $400\text{kV}\cdot\text{A}$ 以下的变频器电源系列产品已经问世。20 世纪 80 年代初期，日本东芝公司最先将交流变频调速技术应用于空调器中。至 1997 年，其占有率已达到日本家用空调的 70% 以上。变频空调具有舒适、节能等优点。中国于 90 年代初期开始研究变频空调，1996 年引进生产线生产变频空调器，逐渐形成变频空调开发生产热点。变频空调除了变频电源外，还要求有适合于变频调速的压缩机电机。优化控制策略、精选功能组件是空调变频电源研制的进一步发展方向。

5. 高频逆变式整流焊机电源

高频逆变式整流焊机电源是一种高性能、高效、省材的新型焊机电源，代表了当今焊机电源的发展方向。由于 IGBT 大容量模块的商用化，这种电源更有着广阔的应用前景。

逆变焊机电源大都采用交流-直流-交流-直流 (AC-DC-AC-DC) 变换的方法。 50Hz 交流电经全桥整流变成直流，IGBT 组成的 PWM 高频变换部分将直流电逆变成 20kHz 的高频矩形波，经高频变压器耦合，整流滤波后成为稳定的直流，供电弧使用。

6. 大功率开关型高压直流电源

大功率开关型高压直流电源广泛应用于静电除尘、水质改良、医用 X 光机和 CT 机等大型设备。电压高达 $50\text{kV}\sim 159\text{kV}$ ，电流达到 0.5A 以上，功率可达 100kW 。

自从 20 世纪 70 年代开始,日本的一些公司开始采用逆变技术,将市电整流后逆变为 3kHz 左右的中频,然后升压。进入 80 年代,高频开关电源技术迅速发展。德国西门子公司采用功率晶体管做主开关元件,将电源的开关频率提高到 20kHz 以上。并将干式变压器技术成功地应用于高频高压电源,取消了高压变压器油箱,使变压器系统的体积进一步减小。

国内对静电除尘高压直流电源进行了研制,市电经整流变为直流,采用全桥零电流开关串联谐振逆变电路将直流电压逆变为高频电压,然后由高频变压器升压,最后整流为直流高压。在电阻负载条件下,输出直流电压达到 55kV,电流达到 15mA,工作频率为 25.6kHz。

7. 电力有源滤波器

传统的交流-直流 (AC-DC) 变换器在投运时,将向电网注入大量的谐波电流,引起谐波损耗和干扰,同时还出现装置网侧功率因数恶化的现象,即所谓“电力公害”,例如,不可控整流加电容滤波时,网侧三次谐波含量可达 70%~80%,网侧功率因数仅有 0.5~0.6。

电力有源滤波器是一种能够动态抑制谐波的新型电力电子装置,能克服传统 LC 滤波器的不足,是一种很有发展前途的谐波抑制手段。滤波器由桥式开关功率变换器和具体控制电路构成。

第一章

电力电子器件

电力电子器件是电力电子技术的核心，是电力电子技术的物质基础和关键。电力电子器件根据其开关特性的不同可分为两大类型：半控型器件和全控型器件。通过门极信号只能控制其导通而不能控制其关断的器件称为半控型器件，如普通晶闸管、双向晶闸管等；通过门极信号既能控制其导通又能控制其关断的器件，称为全控型器件，如 GTR、GTO、功率 MOSFET 及 IGBT 等。根据其控制极（包括门极、栅极或基极）信号的性质不同，电力电子器件还可分成：电流控制型和电压控制型两种类型。电流控制型器件一般通过从控制极注入或抽出控制电流的方式来实现对导通或关断的控制，如晶闸管、GTR、GTO 等；而电压控制型器件是指利用场控原理控制的电力电子器件，其导通或关断是由控制极上的电压信号控制的，控制极电流极小，如功率 MOSFET、IGBT 等。近几年来，又推出了 IGBT 智能功率模块（IPM），在小容量的变频器得到应用。本章着重介绍晶闸管、双向晶闸管、GTR、GTO、功率 MOSFET 及 IGBT 等器件的工作原理、驱动电路与保护。

第一节 晶 闸 管

晶闸管（Thyristor）全称晶体闸流管，是一种大功率半导体器件，自从 1957 年问世以来，晶闸管器件的制造和应用技术迅猛发展，除器件的性能与电压、电流容量不断提高外，还派生出快速晶闸管、可关断晶闸管、逆导晶闸管、光控晶闸管、双向晶闸管等，形成了晶闸管系列。目前晶闸管已在各个领域得到了广泛的应用，其应用按工作原理大致可分为四类。

- ① 整流 将交流电转变为大小可调的直流电。
- ② 逆变 将直流电变换为交流电或将交流电转换为另一种频率的交流电。
- ③ 直流开关 用于直流回路开关或直流调压。
- ④ 交流开关 用于交流回路开关或交流调压。

本节主要介绍普通晶闸管、双向晶闸管。

一、普通晶闸管

（一）普通晶闸管的结构和工作原理

普通晶闸管简称晶闸管。如图 1-1 所示为普通晶闸管的内部结构和图形符号。普通晶闸管是一种功率四层半导体（ $P_1N_1P_2N_2$ ）器件，由三个 PN 结 J_1 、 J_2 、 J_3 组成。有三个电极

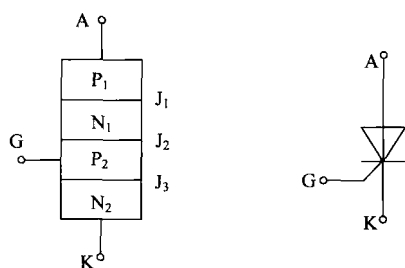


图 1-1 普通晶闸管的内部结构与图形符号

为：阳极（A）、阴极（K）、门极（G）。从外部结构上看有塑封式、螺栓式、平板式，目前有的厂家将多个晶闸管做在一个模块内形成了模块式结构。对于大功率晶闸管使用时必须安装散热器，其冷却方式有自冷、风冷、水冷等形式。

晶闸管与二极管一样具有单向导电特性，电流只能从阳极流向阴极，与二极管不同的是晶闸管具有正向阻断特性，即晶闸管阳极与阴极之间加上正向电压，管子不能正常导通，必须在门极和阴极间加上门极电压，有足够的门极电流流入后才能使晶闸管正向导通。

因此晶闸管具有可控单向导电特性，是一种以电流控制导通的电流控制型功率器件。

晶闸管承受正向电压的同时门极流入足够的电流 I_g 使其导通的过程称为触发导通，管子一旦被触发导通后门极就失去了控制作用，无法通过门极的控制使晶闸管关断，这种门极可触发导通但无法使其关断的器件称为半控型器件。

要使导通的晶闸管恢复为阻断状态，可降低阳极的电源电压或增加阳极回路的电阻，使流过管子的阳极电流 I_a 减小，当阳极电流 I_a 减小到一定数值（一般为几十毫安）时，阳极电流 I_a 会突然降为零，之后即使再调高阳极电压或减小阳极回路的电阻，阳极电流 I_a 也不会增加，说明管子已恢复正向阻断。当门极断开时，能维持晶闸管导通所需的最小阳极电流称为维持电流 I_H ，因此晶闸管关断的条件为： $I_a < I_H$ 。

晶闸管的这种工作特性可用如图 1-2 所示等效电路来分析。将晶闸管的四层半导体等效为两个晶体管 VT_1 ($P_1-N_1-P_2$) 与 VT_2 ($N_1-P_2-N_2$) 互连。当外接电源电压通过负载电阻使晶闸管阳极、阴极间承受正向电压时，要使晶闸管正向导通关键在于使 J_2 (N_1-P_2) 这个承受反向电压的 PN 结失去阻挡作用，从图中可以看出 VT_1 、 VT_2 每个晶体管的集电极电流，同时为另一个晶体管的基极电流。当有足够的门极电流流入时就形成强烈的正反馈，即

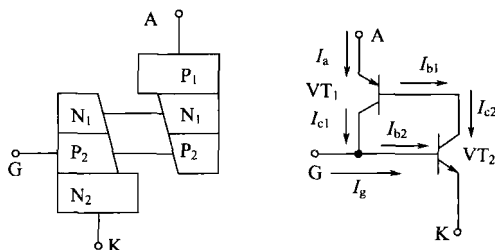


图 1-2 晶闸管等效电路

$$I_g \rightarrow I_{b2} \uparrow \rightarrow I_{c2} (= I_{b1}) \uparrow \rightarrow I_{c1} \uparrow \rightarrow I_a \uparrow \uparrow$$

这样使两个晶体管均饱和导通。导通后使阳极电流 I_a 与 I_g 无关，此时 I_a 值由阳极外接电源电压和负载电阻决定。很明显，晶闸管导通后 I_g 就失去了控制作用，正向阻断时如果没有 I_g 的作用也就无法形成强烈的正反馈；如果阳极、阴极间承受反向电压，此时两个晶体管处于反向电压下，无论有无门极电流，晶闸管不可能正常导通工作。所以，晶闸管导通必须同时具备以下两个基本条件：

- ① 在阳极和阴极之间加上一定大小的正向电压 U_{AK} ；
- ② 在门极和阴极间加上一定的正向触发电压 U_{GK} 。

欲使晶闸管关断，需使阳极电流小于维持电流或阳极、阴极间加反向电压。

(二) 晶闸管的阳极伏安特性与主要参数

1. 晶闸管阳极伏安特性 (V-A Characteristic)

晶闸管的阳极伏安特性是指阳极与阴极之间电压和阳极电流的关系, 如图 1-3 所示。

正向伏安特性曲线如图 1-3 第 I 象限所示, 当 $I_g = 0$ 且晶闸管正向阳极电压未增加到正向转折电压 U_{BO} 时, 晶闸管处于正向阻断状态, 其正向漏电流随阳极电压 u_a 增加而逐渐增大, 当 u_a 增加到转折电压 U_{BO} 时, 晶闸管就被“硬导通”, 导通后元件的阳极伏安特性与整流二极管的正向伏安特性相似。 $I_g = 0$ 时的这条特性曲线称为晶闸管的自然伏安特性曲线。很明显, 晶闸管在自然特性下的硬导通是不可控的, 多次这样的硬导通会损坏管子。正常的导通是给门极输入足够的触发电流, 则转折电压将明显地减小, 使管子触发导通, 如图 1-3 中当门极电流 $I_{g2} > I_{g1} > I_g$, 则相应的正向转折电压 $U_{B2} < U_{B1} < U_{BO}$ 。同样晶闸管被触发导通后其阳极伏安特性与整流二极管的正向伏安特性相似。

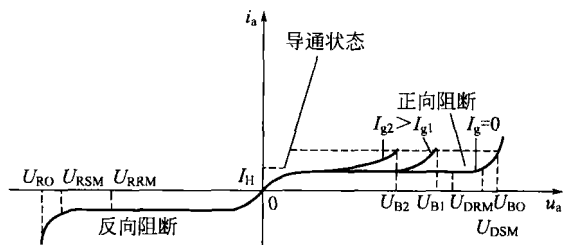


图 1-3 晶闸管的阳极伏安特性

U_{RO} —反向击穿电压; U_{RSM} —断态反向不重复峰值电压;

U_{RRM} —断态反向重复峰值电压; U_{BO} —正向转折电压;

U_{DSM} —断态正向不重复峰值电压;

U_{DRM} —断态正向重复峰值电压

反向伏安特性曲线如图 1-3 第 III 象限所示, 它与整流二极管的反向伏安特性相似。若反向电压增加到反向击穿电压 U_{RO} 时, 晶闸管将永久性损坏。因此使用晶闸管时其两端可能承受的最大峰值电压都必须小于管子的正、反方向的击穿电压。

2. 晶闸管的主要参数

(1) 额定电压 U_{Tn} 如图 1-3 晶闸管阳极伏安特性曲线所示, 当 $I_g = 0$ 、晶闸管处于额定结温时, 使阳极漏电流显著增加的阳极电压 U_{DSM} 称为正向不重复峰值电压, 同理 U_{RSM} 为反向不重复峰值电压。这两个数值分别乘以 0.9 所得的数值定义为正向重复峰值电压 U_{DRM} 和反向重复峰值电压 U_{RRM} 。晶闸管的额定电压 U_{Tn} 即为 U_{DRM} 与 U_{RRM} 中较小值在靠近标准电压等级所对应的电压值。

考虑晶闸管工作中结温可能会升高等各种因素, 防止各种不可避免的瞬时过电压而造成晶闸管损坏, 选择管子的额定电压时, 应比管子在电路中实际承受的最大瞬时电压 U_{TM} 大 2~3 倍, 即

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

(2) 额定电流 $I_{T(AV)}$ 也称为额定通态平均电流是指在室温 40°C 和规定的冷却条件下, 晶闸管在电阻负载流过正弦半波电流 (导通角不小于 170°) 电路中, 结温不超过规定结温时, 所允许的最大通态平均电流值, 将此值取相近电流等级, 即为晶闸管的额定电流 $I_{T(AV)}$ 。

实际应用中限制晶闸管最大电流的是晶闸管的工作温度, 而晶闸管工作时的温度主要由流过电流的有效值决定。因此需将厂家提供的额定电流 $I_{T(AV)}$ 换算成额定有效电流 I_{Tn} , 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不会超过允许范围。

根据晶闸管额定电流 $I_{T(AV)}$ 的定义, 设流过管子的正弦半波电流的峰值为 I_m , 依据电

流平均值、有效值的定义有

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

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

现定义电流波形的有效值与平均值之比称为电流波形系数。则管子的电流波形系数为

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

这说明额定电流为 100A 的晶闸管，它可以流过有效值为 $K_f I_{T(AV)} = 1.57 \times 100 = 157A$ 的正弦半波电流。由于晶闸管的电流过载能力极小，在选用时至少要考虑 (1.5~2) 倍的电流裕量。即

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

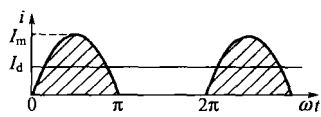
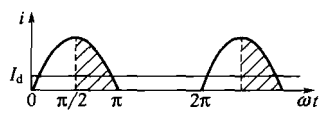
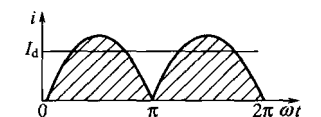
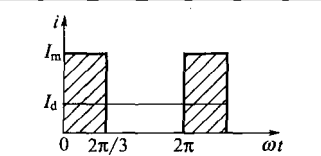
所以

$$I_{T(AV)} = (1.5 \sim 2) \frac{I_{TM}}{1.57}$$

式中 I_{TM} ——流过晶闸管的电流最大有效值。

要注意不同的电流波形其波形系数不同，同样额定电流为 100A 的晶闸管，只有在正弦半波其波形系数 $K_f = 1.57$ 时，允许流过的最大平均电流为 100A，其他波形时都不是 100A。如表 1-1 所示，额定电流为 100A 的晶闸管在四种不同电流波形时，管子允许的电流平均值不同。

表 1-1 四种波形的 K_f 值与 100A 晶闸管允许的电流平均值

波 形	平均值 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	$I_{dn} = \frac{100A \times 1.57}{1.57} = 100A$
	$I_d = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_m \sin \omega t d(\omega t) = \frac{I_m}{2\pi}$ $I = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi/2} (I_m \sin \omega t)^2 d(\omega t)} = \frac{I_m}{2\sqrt{2}}$	2.22	$I_{dn} = \frac{100A \times 1.57}{2.22} = 70.7A$
	$I_d = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi I_m \sin \omega t d(\omega t) = \frac{2}{\pi} I_m$ $I = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^\pi (I_m \sin \omega t)^2 d(\omega t)} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$	1.11	$I_{dn} = \frac{100A \times 1.57}{1.11} = 141.4A$
	$I_d = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2/3\pi} I_m d(\omega t) = \frac{I_m}{3}$ $I = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2/3\pi} I_m^2 d(\omega t)} = \frac{I_m}{\sqrt{3}}$	1.73	$I_{dn} = \frac{100A \times 1.57}{1.73} = 90.7A$

(3) 通态平均电压 $U_{T(AV)}$ 在规定的环境温度和标准散热条件下，当晶闸管正向通过正弦半波额定电流时，元件阳极、阴极两端的电压降在一个周期内的平均值，称为通态平均电压 $U_{T(AV)}$ 又称管压降，一般在 0.6~1.2V 范围内。

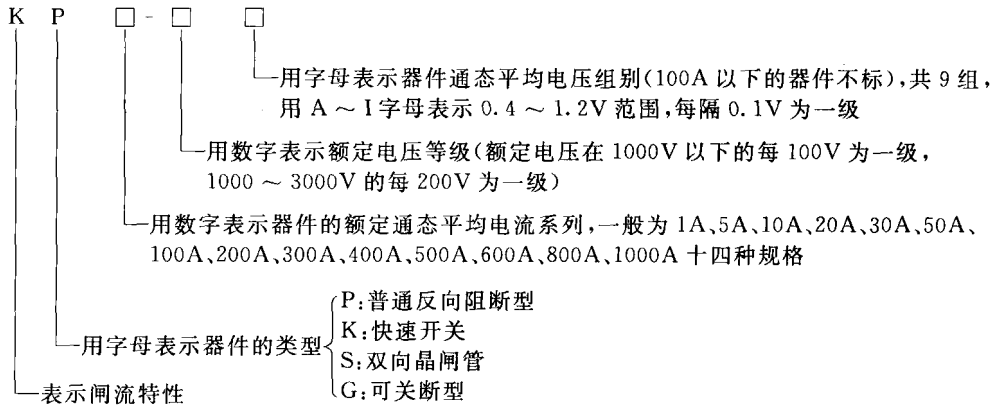
(4) 维持电流 I_H (Holding Current) 在室温且门极断开时，晶闸管由通态到断态的最

小阳极电流称为维持电流 I_H 。

(5) 门极最大触发电压 U_{GT} (Gate Trigger Voltage) 和门极最大触发电流 I_{GT} (Gate Trigger Current) 在规定的环境温度下, 阳极和阴极加上一定的正向电压 (一般为 6V), 使晶闸管从阻断状态转为导通状态, 门极所需要的最大直流触发电压称为门极最大触发电压 U_{GT} , 此时对应的门极所需要的最大直流触发电流称为门极最大触发电流 I_{GT} 。

3. 国产晶闸管的型号

按国家有关部门的规定, 晶闸管的型号及其含义如下:



如 KP100-12G 表示额定电流为 100A, 额定电压为 1200V, 通态平均压降为 1V 的普通晶闸管。如表 1-2 所示为晶闸管的型号与参数。

表 1-2 晶闸管的型号与参数

参数	通态平均电流	断态重复峰值电压、反向重复峰值电压	断态不重复平均电流、反向不重复平均电流	额定结温	门极触发电流	门极触发电压	断态电压临界上升率	通态电流临界上升率	浪涌电流
型号	$I_T(AV)$ /A	U_{DRM}, U_{RRM} /V	$I_{DS(AV)}, I_{RS(AV)}$ /mA	T_{IM} /°C	I_{GT} /mA	U_{GT} /V	du/dt /(V/ μ s)	di/dt /(A/ μ s)	I_{TSM} /A
KP1	1	100~3000	≤ 1	100	3~30	≤ 2.5	25~1000	25~500	20
KP5	5	100~3000	≤ 1	100	5~70	≤ 3.5			90
KP10	10	100~3000	≤ 1	100	5~100	≤ 3.5			190
KP20	20	100~3000	≤ 1	100	5~100	≤ 3.5			380
KP30	30	100~3000	≤ 2	100	8~150	≤ 3.5			560
KP50	50	100~3000	≤ 2	100	8~150	≤ 3.5			940
KP100	100	100~3000	≤ 4	115	10~250	≤ 4			1880
KP200	200	100~3000	≤ 4	115	10~250	≤ 4			3770
KP300	300	100~3000	≤ 8	115	20~300	≤ 5			5650
KP400	400	100~3000	≤ 8	115	20~300	≤ 5			7540
KP500	500	100~3000	≤ 8	115	20~300	≤ 5			9420
KP600	600	100~3000	≤ 9	115	30~350	≤ 5			11160
KP800	800	100~3000	≤ 9	115	30~350	≤ 5			14920
KP1000	1000	100~3000	≤ 10	115	40~400	≤ 5			18600

(三) 晶闸管的简易测试

① 测试时注意不要使用万用表的 $R \times 10k\Omega$ 挡去测量。

② 用 $R \times 1k\Omega$ 电阻挡, 测晶闸管的阳极与阴极、阳极与控制极间的正反电阻, 若阻值在数百千欧姆以上 (表指针只动一点点), 说明阳极与阴极, 阳极与控制极间是好的, 如果阻值不大或为 0, 说明元件性能不好或内部短路。一般正向电阻约为 $500k\Omega$, 反向电阻大于 $500k\Omega$ 。

③ 用 $R \times 1\Omega$ 挡, 检测阴极与控制极间的电阻, 正反向电阻在数十欧姆时, 说明正常。若阻值为 0 或无穷大, 说明阴极与控制极已经短路或断路。一般正向电阻为数十欧姆到十几千欧姆, 反向电阻略大于正向电阻, 则认为控制极是好的。

④ 用 $R \times 1k\Omega$ 挡, 黑表笔接晶闸管的阳极, 红表笔接晶闸管的阴极, 表的指示值应为几百千欧姆, 此时人为将控制极与阳极短路, 表指示值应变小, 且阳极与控制极之间短路消除后, 表指示值不变, 说明控制极的控制正常。

二、双向晶闸管

一般晶闸管只能正向控制时导通, 反向时阻断, 因此, 在交流电路控制中必须采用两个反并联的晶闸管、两套散热器及两套彼此绝缘的触发电路, 装置十分复杂。双向晶闸管正是为了解决这个问题而出现的晶闸管派生器件。双向晶闸管主要用于交流电路的控制。

(1) 移相控制 通过改变双向晶闸管的导通角, 从而改变负载的平均功率。

(2) 零电压开关 用改变设定周期内通断比的方法来调节输出功率的大小, 所以又称调功器。

(3) 静态开关 比起机械开关来不存在触点跳动、不存在关断时的电弧或瞬态电压等。

(一) 双向晶闸管的基本结构与伏安特性

双向晶闸管的基本结构与图形符号如图 1-4 所示, 它具有 NPNPN 五层半导体结构。有四个 PN 结, 它有三个电极: 第一阳极 T_1 、第二阳极 T_2 和门极 G 。它可看作是由两只普通晶闸管 $KP_1(N_3P_1N_1P_2)$ 和 $KP_2(N_2P_2N_1P_1)$ 反向并联而成。

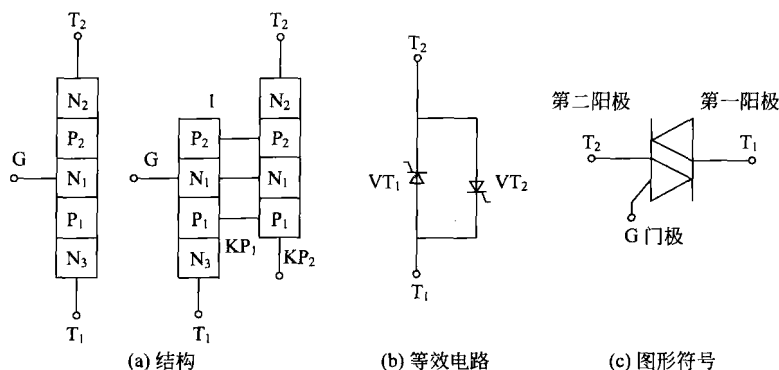


图 1-4 双向晶闸管的结构与符号

如图 1-5 所示。图中 u 为两个阳极 T_1 、 T_2 之间的电压, i 为流过 T_1 与 T_2 的电流。该门极具有短路发射极结构, 使两个阳极的正、反两个方向均可用交流或直流触发导通。所以双向晶闸管在第 I 和 III 象限有对称的伏安特性。

门极加入触发电压后, 当阳极 T_1 对 T_2 的电压为正值时, 电流自 T_1 流入, 经过 $KP_1(N_3P_1N_1P_2)$ (即 VT_1), 从 T_2 流出。当阳极 T_1 对 T_2 的电压为负值时, 电流自 T_2 流入, 经过 $KP_2(N_2P_2N_1P_1)$ (即 VT_2), 从 T_1 流出。当电流减小到零时, 双向晶闸管自然关断。