

高职高专“十五”规划教材

GAOZHI
GAOZHUAN
SHIWU
GUIHUA JIAOCAI

电力电子技术

李雅轩 杨秀敏 李艳萍 编



中国电力出版社

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

┌
└

高职高专“十五”规划教材

GAOZHI
GAOZHUAN
SHIWU
GUIHUA JIAOCAI

电力电子技术

李雅轩 杨秀敏 李艳萍 编
孙鹤旭 主审



中国电力出版社

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

内 容 提 要

本书为高职高专“十五”规划教材。

本书主要内容包括：电力电子器件、单相可控整流电路、三相可控整流电路、触发电路与驱动电路、有源逆变电路、交流开关与交流调压电路、逆变电路与变频电路、直流斩波电路及实训等。

本书可供工业电气自动化专业、供用电技术专业、电气技术专业、机电工程专业、应用电子专业的师生使用，也可作为函授和自考的辅导教材，还可作为电力行业技术人员的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力电子技术/李雅轩, 杨秀敏, 李艳萍编. —北京:
中国电力出版社, 2004

高职高专“十五”规划教材

ISBN 7 - 5083 - 1697 - 5

I. 电… II. ①李…②杨…③李… 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 (2004) 第 010119 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

*

2004 年 4 月第一版 2005 年 2 月北京第二次印刷
787 毫米 × 1092 毫米 16 开本 16.25 印张 375 千字
印数 3001—6000 册 定价 22.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)

序

随着新世纪的到来,我国进入全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。新世纪新阶段的新任务,对我国高等职业教育提出了新要求。我国加入世界贸易组织和经济全球化迅速发展的新形势,也要求高等职业教育必须开创新局面。

高职高专教材建设是高等职业教育的重要组成部分,是一项极具重要意义的基础性工作,对高等职业教育培养目标的实现起着举足轻重的作用。为贯彻落实《国务院关于大力推进职业教育改革与发展的决定》精神,进一步推动高等职业教育的发展,加强高职高专教材建设,根据教育部关于通过多层次的教材建设,逐步建立起多学科、多类型、多层次、多品种系列配套的教材体系的精神,中国电力教育协会会同中国高等职业技术教育研究会和中国电力出版社,组织有关专家对高职高专“十五”教材规划工作进行研究,在广泛征求各方面意见的基础上,制订了反映电力及相关行业特点、体现高等职业教育特色的高职高专“十五”教材规划。同时,为适应电力体制改革和电力高等职业教育发展的需要,中国电力教育协会筹备组建全国电力高等职业教育教材建设指导委员会,以便更好地推动新世纪电力高职高专教材的研究、规划与开发。

高职高专“十五”规划教材紧紧围绕培养高等技术应用性专门人才开展编写工作。基础课程教材注重体现以应用为目的,以必需、够用为度,以讲清概念、强化应用为教学重点;专业课程教材着重加强针对性和实用性。同时,“十五”规划教材不仅注重内容和体系的改革,还注重方法和手段的改革,以满足科技发展和生产实际的需求。此外,高职高专“十五”规划教材还着力推动高等职业教育人才培养模式改革,促进高等职业教育协调发展。相信通过我们的不断努力,一批内容新、体系新、方法新、手段新,在内容质量上和出版质量上有突破的高水平高职高专教材,很快就能陆续推出,力争尽快形成一纲多本、优化配套,适用于不同地区、不同学校、特色鲜明的高职高专教育教材体系。

在高职高专“十五”教材规划的组织实施过程中,得到了教育部、国家电力公司、中国电力企业联合会、中国高等职业技术教育研究会、中国电力出版社、有关院校和广大教师的大力支持,在此一并表示衷心的感谢。

教材建设是一项长期而艰巨的任务,不可能一蹴而就,需要不断完善。因此,在教材的使用过程中,请大家随时提出宝贵的意见和建议,以便今后修订或增补。(联系方式:100761 北京市宣武区白广路二条1号综合楼9层 中国电力教育协会教材建设办公室 010-63416237)

中国电力教育协会

前 言

本书是中国电力教育协会根据教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》精神组织的高职高专“十五”规划教材之一,可供高职高专院校用作电力电子技术、半导体变流技术等相关课程的教材。

本书主要内容包括:电力电子器件(晶闸管、电力晶体管、可关断晶闸管、功率场效应晶体管、绝缘栅双极晶体管)、单相可控整流、三相可控整流、触发电路与驱动电路、晶闸管有源逆变、交流电力控制、变频、直流斩波技术。

为符合高职高专院校培养目标的要求,本书在编写中突出了以下特点:

(1) 以能力培养为中心,突出针对性。针对高职高专学生的特点,重点介绍电力电子技术的基本概念、基本原理、主要结论与典型应用。叙述深入浅出,简化了深奥的理论分析与复杂的数学计算,并力求将知识点与能力点紧密结合,从而有助于学生工程应用能力的培养。

(2) 以常规电力电子器件及其应用电路的讲授为基础,注重先进性。在保证必需的基础理论与常规技术的同时,引入一些最新的成熟技术,如新型器件 IGBT 及其应用等,从而做到紧跟电力电子技术的发展步伐。

(3) 以器件、电路与应用三者的有机结合为主线,注重实用性。全书紧紧围绕电力电子器件及其电路的工程应用展开讲述,重点介绍了一些典型线路的工作原理与应用技术,同时还适当介绍了微机测控技术在电力电子装置中的应用。

本书由李艳萍(编写第一、二、三章及实训一、二、三)、李雅轩(编写第四、五、六章及实训四、五)、杨秀敏(编写第七、八章及实训六、七)编写,李雅轩负责全书统稿。河北工业大学孙鹤旭教授担任主审,并对本书初稿提出了许多宝贵意见,在此表示衷心的感谢。

同时,在本书完稿之际,对书末所附参考文献的作者也致以衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中难免有疏漏及错误之处,恳请有关专家及广大读者批评指正。

编 者

目 录

序	
前言	
绪论	1
第一章 电力电子器件	4
第一节 晶闸管的结构与工作原理	4
第二节 晶闸管的特性	7
第三节 晶闸管的主要参数	11
第四节 晶闸管的派生器件	15
第五节 其它新型电力电子器件	18
小结	31
习题及思考题	31
第二章 单相可控整流电路	33
第一节 单相半波可控整流电路	33
第二节 单相桥式全控整流电路	39
第三节 单相桥式半控整流电路	45
小结	51
习题及思考题	52
第三章 三相可控整流电路	54
第一节 三相半波可控整流电路	54
第二节 三相桥式全控整流电路	64
第三节 带平衡电抗器的双反星形可控整流电路	72
第四节 变压器漏抗对整流电路的影响	77
第五节 可控整流电路供电的电动机机械特性	80
第六节 晶闸管可控整流应用实例	83
小结	86
习题及思考题	86
第四章 触发电路与驱动电路	89
第一节 对触发电路的要求及简易触发电路介绍	89

第二节	单结晶体管触发电路	92
第三节	同步电压为锯齿波的触发电路	96
第四节	集成触发器和数字触发电路	102
第五节	触发电路与主电路电压的同步	106
第六节	全控型电力电子器件的驱动电路	110
第七节	电力电子器件的保护	123
小结	.....	134
习题及思考题	.....	134
第五章	有源逆变电路	137
第一节	有源逆变的工作原理	137
第二节	三相有源逆变电路	140
第三节	逆变失败与逆变角的限制	142
第四节	有源逆变电路的应用	144
小结	.....	153
习题及思考题	.....	153
第六章	交流开关与交流调压电路	155
第一节	晶闸管交流开关	155
第二节	单相交流调压	159
第三节	三相交流调压	162
小结	.....	167
习题及思考题	.....	168
第七章	逆变电路与变频电路	170
第一节	电力变流器换相方式	170
第二节	单相无源逆变电路	171
第三节	三相无源逆变电路	176
第四节	脉宽调制 (PWM) 型逆变电路	183
第五节	交—直—交变频电路	199
第六节	交—交变频电路	203
小结	.....	210
习题及思考题	.....	211
第八章	直流斩波电路	213
第一节	概述	213
第二节	电力晶体管斩波电路	214

第三节	晶闸管斩波电路	217
第四节	直流斩波器的 PWM 控制	224
	小结	232
	习题及思考题	232
实训		234
实训一	晶闸管的简易测试与导通、关断条件实训	234
实训二	单结晶体管触发电路及单相半控桥整流电路实训	236
实训三	锯齿波触发电路及三相全控桥整流电路实训	238
实训四	三相半波有源逆变电路实训	242
实训五	单相交流调压电路实训	244
实训六	SPWM 型逆变器变频电路实训	246
实训七	PWM 直流斩波电路实训	248
参考文献		251

绪 论

一、电力电子技术的概述

1. 什么是电力电子技术

以电力为对象的电子技术称为电力电子技术。它是一门利用电力电子器件对电能进行电压、电流、频率和波形等方面控制和变换的学科，是电力、电子与控制三大电气工程技术之间的交叉学科。电力电子技术是目前最活跃、发展最快的一门新兴学科，随着科学技术的发展，电力电子技术又与现代控制理论、材料科学、电机工程、微电子技术等许多领域密切相关，已逐步发展成为一门多学科互相渗透的综合性技术学科。

2. 电力电子技术的发展

电力电子技术的发展是以电力电子器件为核心发展起来的。

从 1957 年第一只晶闸管诞生至 20 世纪 80 年代为传统电力电子技术阶段。此期间主要器件是以晶闸管为核心的半控型器件，由最初的普通晶闸管逐渐派生出快速晶闸管、逆导晶闸管、双向晶闸管、不对称晶闸管等许多品种，形成一个晶闸管大家族。器件的功率越来越大，性能越来越好，电压、电流、 di/dt 、 du/dt 等各项技术参数均有很大提高。目前，单只普通晶闸管的容量已达 8000V、6000A。

晶闸管是静止型的电子元件，又是大功率的开关器件。它一问世便迅速淘汰了当时盛行的旋转变流机组和离子变流器，应用范围扩大到整个电力技术领域。

然而有两个因素使上述传统电力电子器件的应用范围受到限制。一是控制功能上的欠缺，此类器件通过门极只能控制其开通，而不能控制其关断，这类器件通常是依靠电网电压等外部条件来实现其关断的，因而称之为半控型器件。二是工作频率上的欠缺，由于它们立足于分立元件结构，工作频率难有较大提高。

尽管以晶闸管为核心的电力电子器件存在上述欠缺，但由于这类器件价格低廉，在高电压、大电流应用中的发展空间依然较大，尤其是在大功率应用场合，用其它器件尚不易替代。因此，在许多应用场合仍然使用着以晶闸管为核心的电力电子应用设备。晶闸管及其相关知识目前仍是初学者的基础。

20 世纪 80 年代以后进入了现代电力电子技术阶段。随着大规模和超大规模集成电路技术的迅猛发展，将微电子技术与电力电子技术相结合，研制出了新一代高频率、全控型、多功能的功率集成器件。这些新型器件主要有电力晶体管 (GTR)、可关断晶闸管 (GTO)、功率场效应晶体管 (功率 MOSFET)、绝缘栅双极晶体管 (IGBT) 和 MOS 门极晶闸管 (MCT)

等。目前被认为最有发展前途的是 IGBT 和 MCT, 两者均为场控复合器件, 工作频率可达 20kHz, 它们的出现为工业应用领域的高频化开辟了广阔的前景。据美国预测, 至少在比较广泛的范围内, IGBT 有取代 GTR、MOSFET 的趋势, MCT 有取代 GTO 的趋势。

功率集成电路 (PIC) 是在模块化与复合化思路的基础上发展起来的又一类新型器件。PIC 是在制造过程中将功率器件与驱动电路、控制电路以及保护电路集成在一个芯片上, 或是封装在一个模块内, 包括高压功率集成电路 (HVIC) 和智能功率集成电路 (SPIC)。PIC 目前主要用于汽车电子、家用电子等中小功率领域, 工作电压和工作电流分别在 50 ~ 1000V 和 1 ~ 100A 之间, 实际传送功率可达几千瓦。

传统电力电子技术以整流为主导, 以移相触发、PID 模拟控制方式为主。高频全控型器件的出现, 使逆变、斩波电路的应用日益广泛。在逆变、斩波电路中, 斩控形式的脉宽调制 (PWM) 技术大量应用, 使变流装置的功率因数提高、谐波减少、动态响应加快。随着新型电力电子器件的开发, 现代电力电子技术正向着高频化、大容量化、模块化、功率集成化和智能化的方向发展。

3. 电力电子技术的功能

电力电子技术的功能是以电力电子器件为核心, 通过对不同电路的控制来实现对电能的转换和控制。其基本功能如下:

(1) 可控整流。把交流电变换为固定或可调的直流电, 亦称为 AC/DC 变换。

(2) 逆变。把直流电变换为频率固定或频率可调的交流电, 亦称为 DC/AC 变换。其中, 把直流电能变换为 50Hz 的交流电返送交流电网称为有源逆变, 把直流电能变换为频率固定或频率可调的交流电供给用电器则称为无源逆变。

(3) 交流调压。把交流电压变换为大小固定或可调的交流电压。

(4) 变频 (周波变换)。把固定或变化频率的交流电变换为频率可调的交流电。交流调压与变频亦称为 AC/AC (或 AC/DC/AC) 变换。

(5) 直流斩波。把固定的直流电变换为固定或可调的直流电, 亦称为 DC/DC 变换。

(6) 无触点功率静态开关。接通或断开交直流电流通路, 用于取代接触器、继电器。

上述变换功能统称为变流, 故电力电子技术通常也称为变流技术。实际应用中, 可将上述各种功能进行组合。

二、电力电子技术的应用

电力电子技术的应用领域十分广泛。它不仅用于一般工业, 也广泛应用于交通、通信、电力、新能源、汽车、家电等各个领域。下面就几个主要应用领域作一介绍。

(1) 一般工业。交直流电动机是一般工业中大量使用的动力设备。直流电动机有良好的调速性能, 为其供电的可控整流电源或直流斩波电源都是电力电子装置; 另外, 由于电力电子技术中的变频技术迅速发展, 使得交流电机的变频调速性能足可与直流电机的调速性能相媲美, 因而得到广泛的应用; 有些设备如大型鼓风机, 也采用变频装置, 以达到节能的目的; 有些电动机为了减少启动时的电流冲击而采用的软启动装置也是电力电子装置; 电解、电镀用整流电源、冶金工业中高频或中频感应炉、直流电弧炉等电源均为电力电子装置。

(2) 交通运输。DC/DC 变换技术被广泛用于无轨电车、地铁列车、电动车的无级变速和

控制,同时使上述被控制设备获得加速平稳、快速响应的性能,且有节约电能的效果;此外,车辆中的各种辅助电源也都离不开电力电子技术;高级汽车中有许多控制电机,它们要靠变频器或斩波器驱动或控制;飞机、轮船需要很多不同要求的电源,因此也离不开电力电子技术。

(3) 电力系统。据估计,在发达国家,用户最终使用的电能中,有60%以上的电能至少经过一次以上电力电子变流装置的处理;离开电力电子技术,电力系统的现代化是不可想像的。直流输电系统送电端的整流阀和受电端的逆变阀均为晶闸管变流装置;晶闸管控制电抗器、晶闸管投切电容器是重要的无功功率补偿装置;近年来出现的静止无功发生器、有源电力滤波器等新型电力电子器件具有更为优越的无功补偿和谐波补偿性能;在配电系统中,电力电子装置可用于防止电网瞬时停电、瞬时电压跌落、闪变等,以提高供电质量。

(4) 电子装置电源。各种电子装置,如程控交换机、计算机、电视机、音响设备等,以前大量采用线性稳压电源供电的,现都采用了体积小、重量轻、效率高的高频开关电源。

(5) 家用电器。变频空调器是应用电力电子技术最典型的例子;此外,洗衣机、电冰箱、微波炉等也应用了电力电子技术。

(6) 不间断电源(UPS)。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,降低了电源噪声,提高了效率和可靠性。目前,在线式UPS的最大容量已达到 $600\text{kV}\cdot\text{A}$ 。

(7) 其它。风力发电和太阳能发电由于环境的制约,发出的电能质量较差,需要储能装置缓冲,需要改善电能质量,这就需要电力电子技术;抽水储能发电站中的大型电动机启动和调速需要电力电子技术;核聚变反应堆在产生强大磁场和注入能量时需要大容量的脉冲电源,超导储能需要强大的直流电源,航天飞行器中各种电子仪器需要的电源,这些电源都是电力电子装置。

总之,电力电子技术的应用范围十分广阔。从国民经济的各个领域,到我们的衣食住行,电力电子技术都在发挥着十分重要的作用。

三、课程性质与学习方法

电力电子技术是一门专业基础课程,它与生产实际应用紧密相连,在高职高专电气工程专业中为主干课程。

学习本课程要掌握基本物理概念与分析方法,注重理论联系实际,特别要重视电路波形与相位的分析,抓住电力电子器件导通与截止的变化过程,从波形分析中加深电路工作情况的理解,注意培养读图与分析能力,掌握器件选择、电量测量、电路调整、故障分析等方面的实践技能。

学习本课程前,要具备电工技术、电子技术等方面的知识。

第一章

电力电子器件

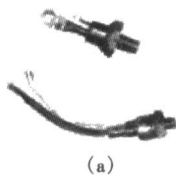
包括晶闸管在内的电力电子器件是电力电子技术的核心，是电力电子电路的基础。因此，掌握各种常用电力电子器件的特性及使用方法将是我们学好电力电子技术的关键。本章将重点介绍晶闸管元件的结构、工作原理、特性及主要参数，以及双向晶闸管的特性及工作原理。最后分别介绍几种新型电力电子器件。

第一节 晶闸管的结构与工作原理

晶闸管 (Thyristor) 是硅晶体闸流管的简称，又称可控硅整流器 SCR (Silicon Controlled Rectifier)，以前又简称可控硅。在电力二极管开始得到应用后不久，1956 年美国贝尔实验室 (Bell Laboratories) 发明了世界上第一只实验用晶闸管，它标志着电力电子技术的开端。1957 年美国通用电气公司 (General Electric Company) 首次研究成功工业用晶闸管，由于其开通时刻可以控制，因此大大扩展了半导体器件功率控制的范围。其后，以晶闸管为核心形成对电力处理的电力电子技术，其发展特点是晶闸管的派生器件越来越多，功率越来越大，性能越来越好，已形成了一个晶闸管大家族。包括普通晶闸管 (Conventional Thyristor)、快速晶闸管 (Fast Switching Thyristor)、逆导晶闸管 (Reverse Conducting Thyristor)、双向晶闸管 (Bidirectional Thyristor 或 Triode AC Switch)、可关断晶闸管 (Gate Turn Off Thyristor) 和光控晶闸管 (Light Triggered Thyristor)。本章将首先重点介绍普通晶闸管，如不特别说明，则本书所说晶闸管就是指普通晶闸管。

一、晶闸管的结构

目前常用的大功率的晶闸管，外形结构有螺栓式和平板式两种，如图 1-1 所示。每种形式的晶闸管从外部看都有三个引出电极，即阳极 A、阴极 K 和门极 G。



(a)



(b)

图 1-1 晶闸管的外形

(a) 螺栓式；(b) 平板式

螺栓式晶闸管的螺栓是阳极 A，粗辫子线是阴极 K，细辫子线是门极 G。螺栓式晶闸管的阳极是紧栓在散热器上的，其特点是安装和更换容易，但由于仅靠阳极散热器散热，散热效果较差，一般只适用于额定电流小于 200A 的晶闸管。

平板式晶闸管又分为凸台形和凹台形。对于凹台形的晶闸管，夹在两台面中间的金属引出端

为门极，距离门极近的台面是阴极，距离门极远的台面是阳极。平板式的阴极和阳极都带散热器，将晶闸管夹在中间，其散热效果好，但更换麻烦，一般用于额定电流为200A以上的晶闸管。

晶闸管的内部结构及符号如图1-2所示。它是PNPN四层半导体结构，分别标为 P_1 、 N_1 、 P_2 、 N_2 四个区，具有 J_1 、 J_2 、 J_3 三个PN结。因此，晶闸管可以用三个二极管串联电路来等效，如图1-3(a)所示。另外，为了方便后面分析晶闸管工作原理，还可将晶闸管的四层结构中的 N_1 和 P_2 层分成两部分，则晶体管可用一个PNP($P_1N_1P_2$)管和一个NPN($N_1P_2N_2$)管来等效，如图1-3(b)所示。

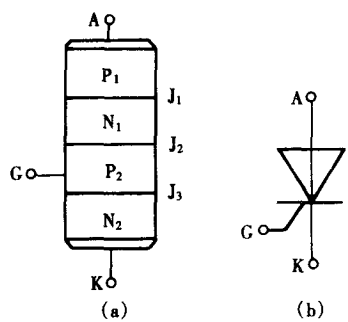


图1-2 晶闸管的结构和图形符号
(a) 内部结构；(b) 图形符号

二、晶闸管的单向可控导电性

晶闸管的导电特性可用实验说明。实验电路如图1-4所示。

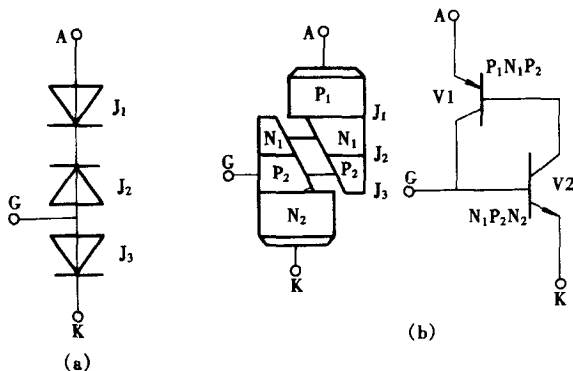


图1-3 晶闸管的等效电路
(a) 二极管等效电路；(b) 三极管等效电路

图1-4中，由电源 E_A 、双掷开关 S_1 、灯泡和晶闸管的阳极、阴极组成了主回路；而电源 E_G 、双掷开关 S_2 经由晶闸管的门极和阴极形成了晶闸管的触发电路。

晶闸管的阳极、阴极加反向电压时(S_1 合向左边)，即阳极为负、阴极为正时，不管门极如何(断开、负电压、正电压)，灯泡都不会亮，即晶闸管均不导通。

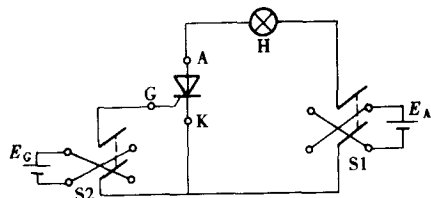


图1-4 晶闸管导电特性实验电路

当晶闸管的阳极、阴极加正向电压时(S_1 合向右边)，即晶闸管阳极为正、阴极为负时，若晶闸管门极不加电压(S_2 断开)或加反向电压(S_2 合向右边)，灯泡也不会亮，晶闸管还是不导通。但若此时门极也加正向电压(S_2 合向左边)，则灯泡就会亮了，表明晶闸管已导通。

一旦晶闸管导通后，再去掉门极电压，灯泡仍

然会亮,这说明此时门极已失去作用了。只有将 S1 合向左边或断开,灯才会灭,即晶闸管才会关断。

上面这个实验说明,晶闸管具有单向导电性,这一点与二极管相同;同时它还具有可控性,就是说只有正向的阳极电压还不行,还必须有正向的门极电压,才会令晶闸管导通。

由此,我们可以知道晶闸管的导通条件是:①要有适当的正向阳极电压;②还要有适当的正向门极电压,且晶闸管一旦导通,门极将失去作用。

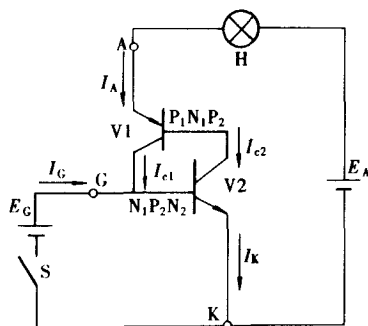


图 1-5 晶闸管的工作原理

要使导通的晶闸管关断,只能利用外加电压和外电路的作用使流过晶闸管的电流降到接近于零的某一数值(称为维持电流)以下,因此可以采取去掉晶闸管的阳极电压,或者给晶闸管阳极加反向电压,或者降低正向阳极电压等方式来使晶闸管关断。

三、晶闸管的工作原理

晶闸管导通的工作原理可以用一对互补三极管代替晶闸管的等效电路来解释,如图 1-3 (b)所示。

按照上述等效原则,将上图 1-4 改画为图 1-5 的形式。图中用 V1 和 V2 管代替了图 1-4 中的晶闸管 VT。在晶闸管承受反向阳极电压时, V1 和 V2 处于反压状态,是无法工作的,所以无论有没有门极电压,晶闸管都不能导通。只有在晶闸管承受正向阳极电压时, V1 和 V2 才能得到正确接法的工作电源,同时为使晶闸管导通必须使承受反压的 J₂ 结失去阻挡作用。由图 1-5 可清楚地看出,每个晶体管的集电极电流同时又是另一个晶体管的基极电流,即有 $I_{c2} = I_{b1}, (I_G) + I_{c1} = I_{b2}$ 。在满足上述条件的前提下,再合上开关 S,于是门极就流入触发电流 I_G ,并在管子内部形成了强烈的正反馈过程:

$$I_G \uparrow \rightarrow I_{b2} \uparrow \rightarrow I_{c2} (= \beta_2 I_{b2}) \uparrow \rightarrow I_{b1} \uparrow \rightarrow I_{c1} (= \beta_1 I_{b1}) \uparrow \rightarrow I_{b2} \uparrow$$

从而使 V1、V2 迅速饱和,即晶闸管导通。而对于已导通的晶闸管,若去掉门极触发电流,由于晶闸管内部已完成了强烈的正反馈,所以它仍会维持导通。

若把 V1、V2 两管看成广义节点,且设 α_1 和 α_2 分别是两管的共基极电流增益, I_{CBO1} 和 I_{CBO2} 分别是 V1 和 V2 的共基极漏电流,晶闸管的阳极电流为 I_A , 阴极电流为 I_K , 则可根据节点电流方程,列出如下电流方程

$$I_A = I_{c1} + I_{c2} \quad (1-1)$$

$$I_K = I_A + I_G \quad (1-2)$$

$$I_{c1} = \alpha_1 I_A + I_{CBO1} \quad (1-3)$$

$$I_{c2} = \alpha_2 I_K + I_{CBO2} \quad (1-4)$$

由上面式 (1-1) ~ 式 (1-4) 可以推出

$$I_A = \frac{\alpha_2 I_G + I_{CBO1} + I_{CBO2}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (1-5)$$

我们知道,晶体管的电流放大系数 α 随着管子发射极电流的增大而增大,我们可以由

此来说明晶闸管的几种状态。

(1) 正向阻断。当晶闸管加正向电压 E_A ，且其值不超过晶闸管的额定电压，门极未加电压的情况下，即 $I_G = 0$ 时，正向漏电流 I_{CBO1} 和 I_{CBO2} 很小，所以 $(\alpha_1 + \alpha_2) \ll 1$ ，上式中的 $I_A \approx I_{CBO1} + I_{CBO2}$ 。

(2) 触发导通。加正向阳极电压 E_A 的同时加正向门极电压 E_G ，当门极电流 I_G 增大到一定程度，发射极电流也增大， $(\alpha_1 + \alpha_2)$ 增大到接近于 1 时， I_A 将急剧增大，晶闸管处于导通状态， I_A 的值由外接负载限制。

(3) 硬开通。若给晶闸管加正向阳极电压 E_A ，但不加门极电压 E_G ，此时若增大正向阳极电压 E_A ，则正向漏电流 I_{CBO1} 和 I_{CBO2} 也会随着 E_A 的增大而增大，当增大到一定程度时， $(\alpha_1 + \alpha_2)$ 接近于 1，晶闸管也会导通，这种使晶闸管导通的方式称为硬开通。多次硬开通会造成管子永久性损坏。

(4) 晶闸管关断。当流过晶闸管的电流 I_A 降低至小于维持电流 I_H 时， α_1 和 α_2 迅速下降，使得 $(\alpha_1 + \alpha_2) \ll 1$ ，式 (1-5) 中 $I_A \approx I_{CBO1} + I_{CBO2}$ ，晶闸管恢复阻断状态。

(5) 反向阻断。当晶闸管加反向阳极电压时，由于 V1、V2 处于反压状态，不能工作，所以无论有无门极电压，晶闸管都不会导通。

另外，还有几种情况可以使晶闸管导通。如：温度较高；晶闸管承受的阳极电压上升率 du/dt 过高；光的作用，即光直接照射在硅片上等，都会使晶闸管导通。但在所有使晶闸管导通的情况中，除光触发可用于光控晶闸管外，只有门极触发是精确、迅速、可靠的控制手段，其他均属非正常导通情况。

第二节 晶闸管的特性

一、晶闸管的静态特性

1. 晶闸管的阳极伏安特性

晶闸管的阳极和阴极间的电压与晶闸管的阳极电流之间的关系，称为晶闸管的阳极伏安特性，简称伏安特性，如图 1-6 所示。

第 I 象限为晶闸管的正向特性，第 III 象限为晶闸管的反向特性。当门极断开即 $I_G = 0$ 时，若在晶闸管两端施加正向阳极电压，由于 J_2 结受反压阻挡，则晶闸管元件处于正向阻断状态，只有很小的正向漏电流流过。随着正向阳极电压的增大，漏电流也相应增大。至正向电压的极限即正向转折电压 U_{BO} 时，漏电流急剧增大，特性由高阻区到达低阻区，晶闸管元件即由断态转到通态。导通状态时的晶闸管特性和二极管的正向特性相似，即通过较大的

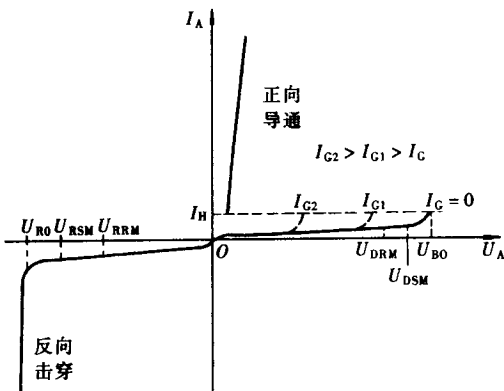


图 1-6 晶闸管的伏安特性

极电流，而元件本身的压降却很小。

正常工作时，不允许把正向阳极电压加到正向转折电压 U_{BO} ，而是给门极加上正向电压，即 $I_G > 0$ ，则元件的正向转折电压就会降低。 I_G 越大，所需转折电压就会越低。当 I_G 至足够大时，晶闸管的正向转折电压就很小了。此时其特性可以看成与整流二极管一样。

导通后的晶闸管其通态压降很小，在 1V 左右。若导通期间的门极电流为零，则当元件阳极电流降至维持电流 I_H 以下时，晶闸管就回到正向阻断状态。

晶闸管加反向阳极电压（第Ⅲ象限特性）时，晶闸管的反向特性与一般二极管的伏安特性相似。由于此时晶闸管的 J_1 、 J_3 均为反向偏置，因此元件只有很小的反向漏电流通过，元件处于反向阻断状态。但当反压增大到一定程度，超过反向击穿电压 U_{RO} 后，则会由于反向漏电流的急剧增大而导致元件的发热损坏。

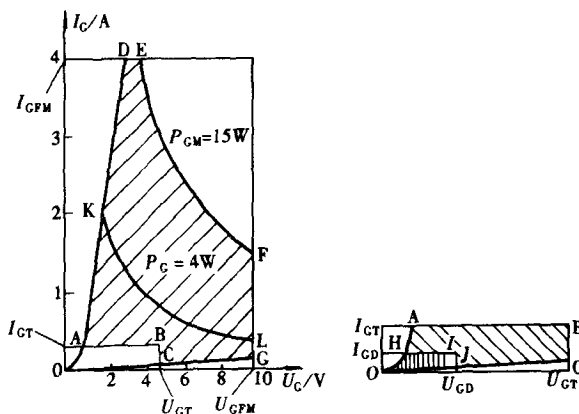


图 1-7 晶闸管的门极伏安特性

图中的曲线 OD 和 OG 分别为极限低阻伏安特性和极限高阻伏安特性；EF 线为触发瞬时功率极限即门极所允许的最大瞬时功率 P_{CM} ；FG 线为触发电压极限即门极正向峰值电压 U_{GFM} ；DE 线为触发电流极限即门极正向峰值电流 I_{GFM} ；KL 线为触发平均功率极限 P_C 。下面介绍门极伏安特性的几个区域。

(1) 可靠触发区。指 ADEFGCBA 所围成的区间，对于正常使用的晶闸管元件，其门极的触发电压、电流及功率都应处于这个区域内。当门极加上一定的功率后，会引起门极附近发热，当加入过大功率时，会使晶闸管整个结温上升，直接影响到晶闸管的正常工作，甚至会烧坏门极。所以施加于门极的电压、电流和功率是有一定限制的。可靠触发区的上限就是由门极正向峰值电流 I_{GFM} 、门极正向峰值电压 U_{GFM} 和允许的最大瞬时功率 P_{CM} 所确定的。可靠触发区的下限是这样定义的：在室温下元件的阳极加 6V 的直流电压，对于同规格的晶闸管元件均能由阻断状态转为通态所必需的最小门极触发电压 U_{GT} 和门极电流 I_{GT} 。

(2) 不可靠触发区。指 ABCJIHA 围成的区间，如图 1-7 (b) 的放大区域所示。指在室温下，对于同型号的晶闸管，在此区域内有些器件能被触发，而有些触发电压和电流较高的器件，触发是不可靠的。它是合格晶闸管所允许的范围。

(3) 不触发区 OHUJO。指任何合格器件在额定结温时，若门极信号在此区域内时，晶闸

2. 晶闸管的门极伏安特性

晶闸管的门极和阴极间有一个 PN 结 J_3 ，见图 1-2。它的伏安特性称为晶闸管的门极伏安特性。由于实际产品的门极伏安特性分散性很大，因此为了应用方便，对于同一型号的晶闸管，常以一条极限高阻伏安特性和一条极限低阻伏安特性之间的区域来代表所有器件的伏安特性，称为门极伏安特性区域。如图 1-7 所示。

图中的曲线 OD 和 OG 分别为极限低阻伏安特性和极限高阻伏安特性；EF 线为触发瞬时功率极限即门极所允许的最大瞬时功率 P_{CM} ；FG 线为触发

管均不会被触发导通。图 1-7 (b) 为放大后所示, 图中标出的 U_{GD} 和 I_{GD} 分别是门极不触发电压和电流, 指未能使晶闸管从阻断状态转入通态, 门极所加的最大电压和电流。

晶闸管出厂时所给出的是能够保证触发该型号器件的最小触发电流和电压。为使触发电路通用于同型号的晶闸管, 在设计触发电路时, 应使其产生的触发脉冲的电压和电流必须大于标准规定的门极触发电压 U_{GT} 和电流 I_{GT} , 才能保证任何一个合格的器件都能正常工作。而在器件不触发时, 触发电路输出的漏电压和漏电流应低于晶闸管规定的门极不触发电压和不触发电流。有时为了提高抗干扰能力, 避免误触发, 可在晶闸管门极上加一定的负偏压。

因此, 元件的触发电压、电流太小, 触发将不可靠, 造成触发困难; 而触发电压、电流太大又会造成损耗增大, 且易造成晶闸管的损坏。另外, 在设计晶闸管触发电路时还要考虑到温度的影响, 因为晶闸管的触发电压、电流受温度影响较大, 温度升高, U_{GT} 和 I_{GT} 的值会降低, 反之则会增大。

二、晶闸管的动态特性

电力电子器件在电力电子电路中主要起开关管的作用, 而由晶闸管的伏安特性可知, 当晶闸管正向导通时其导通压降约为 1V 左右, 反向电压特性与二极管相似, 因此, 它在电路中也常用作开关。晶闸管作为开关, 虽然在理想情况下, 可以假定它的开通与关断是瞬时完成的, 但在实际情况中, 两种状态间的转换是需要有一定过程的。由于晶闸管的开通和关断时间很短, 当工作频率低时, 一般假定晶闸管是瞬时开通和关断的, 不需要考虑其开关时间和动态损耗。但当工作频率高时, 晶闸管的开通、关断时间以及其动态损耗就不能不考虑了。

晶闸管的开通与关断过程的物理机理是很复杂的, 我们在这里只对其动态过程作一简单介绍。晶闸管的动态特性就是指晶闸管在开通和关断的动态过程中阳极电流和阳极电压的变化规律。图 1-8 给出了晶闸管的开通与关断过程的波形。

1. 开通过程

在图 1-8 中, 我们假设门极在坐标原点就开始受到理想阶跃信号的触发。由于晶闸管开通时的内部正反馈过程的完成需要一定的时间, 以及回路中电感的存在, 使得其阳极电流的增大并不可能是瞬时完成的。我们一般把从门极加上阶跃信号的时刻起, 到阳极电流升高到稳态值的 10% 的这段时间, 称为延迟时间, 用 t_d 来表示。把阳极电流从稳态值的 10% 升高到稳态值的 90% 的这段时间称之为上升时间, 用 t_r 来表示。开通时间就定义为两者之和, 即

$$t_{on} = t_d + t_r \quad (1-6)$$

普通晶闸管延迟时间 t_d 约为 $0.5 \sim 1.5 \mu s$, 其上升时间 t_r 为 $0.5 \sim 3 \mu s$ 。

阳极电压的大小直接影响到开通时间的长短。在导通前, 晶闸管承受的正向阳极电压的增大可使内部正反馈过程加速, 延迟时间和上升时间都可显著缩短。而门极电流的增大也可缩短延迟时间。除晶闸管本身的特性外, 主回路电感的存在也将严重影响上升时间长短。另外, 门极脉冲的陡度、元件的结温、导通后的阳极电流的稳定值都会影响到开通时间的长短。

2. 关断过程