



全国教育科学“十一五”规划课题研究成果

# 电力电子技术

---

王卓 编著  
王振和 主审



全国教育科学“十一五”规划课题研究成果

# 电力电子技术

D i a n l i   D i a n z i   J i s h u

王 卓 编著  
王振和 主审



高等教育出版社·北京

HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

## 内容简介

本书共分十章,主要内容包括:电力电子器件、相位控制的整流电路、有源逆变电路、交-交变换电路;PWM控制技术、PWM整流电路、PWM无源逆变电路、PWM变频电路、PWM调压电路等变换原理及其主要参数。还讲述了器件的驱动及保护电路。附录中介绍了整流变压器额定参数的计算及电抗器电感量的计算。本书体系新颖、重点突出、实用性强,为便于读者学习,每章均附有思考与习题。

本书可作为电气工程及其自动化专业、自动化专业的本科生教材,也可作为研究生的主要参考教材,并可供相关专业工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术 / 王卓主编. — 北京:高等教育出版社, 2014.2

ISBN 978-7-04-039053-7

I. ①电… II. ①王… III. ①电力电子技术-高等学校-教材 IV. ①TM1

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第300548号

策划编辑 王勇莉  
插图绘制 尹莉

责任编辑 王勇莉  
责任校对 胡晓琪

封面设计 赵阳  
责任印制 毛斯璐

版式设计 马敬茹

出版发行 高等教育出版社  
社址 北京市西城区德外大街4号  
邮政编码 100120  
印刷 北京中科印刷有限公司  
开本 787mm × 1092mm 1/16  
印张 23.75  
字数 570千字  
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598  
网址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>  
网上订购 <http://www.landaco.com>  
<http://www.landaco.com.cn>  
版次 2014年2月第1版  
印次 2014年2月第1次印刷  
定价 37.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换  
版权所有 侵权必究  
物料号 39053-00

# 前 言

## (1) 本教材体系新、内容新

本教材讲述了晶闸管相位控制电力电子变换电路和全控器件 PWM 控制电力电子变换电路,即晶闸管相位控制的 AC/DC、DC/AC、DC/DC 和 AC/AC 等四类电力电子变换电路的工作原理及其参数关系;全控型器件 PWM 控制的上述四类变换电路工作原理及其参数关系。

虽然晶闸管相位控制的电力电子变换电路存在谐波多、对电网污染、深控时功率因数低等缺点。但目前在我国工程上,电力电子变换电路仍是主流,特别是大功率整流系统仍占据主导地位。以 IGBT 为代表的 PWM 控制的全控型电力电子器件变换电路不仅能克服晶闸管相位控制电力电子变换电路的缺点,而且能实现晶闸管相位控制难以实现的功能,特别是在无源逆变、变频电路中应用广泛。本书基本覆盖了电力电子变换电路的全部内容。相控晶闸管变换电路是基础,PWM 控制全控器件变换电路是发展方向。这样使本教材的科学性、先进性和系统性更加突显。

## (2) 本教材以器件应用为目的,突显了实用性

教材介绍了晶闸管、绝缘栅双极型晶体管等典型电力电子器件的结构、工作原理、主要特性和应用原则。在开、关频率一定的条件下,用线性理论分析了开、关非线性变换电路的工作原理及其参数关系,但基本没有涉及器件的制造工艺问题。仍以变换电路为主要内容,以器件应用为目的,突显了变换电路的实用性。

本书由北华大学王卓副教授编著,并负责统稿。由北华大学王振和教授主审。

对书末所附参考文献的作者,表示衷心感谢。

由于作者学识有限,时间仓促,书中不妥之处一定存在,殷切希望指正。编者 Email: 360211658@qq.com。

编 者

2013 年 5 月

# 目 录

绪论 .....	1	2.2.5 大功率供电相控整流电路 .....	91
思考与习题 .....	3	2.2.6 同相逆并联整流技术 .....	103
第1章 电力电子器件 .....	4	思考与习题 .....	104
1.1 电力二极管(Power Diode) .....	4	第3章 有源逆变电路 .....	108
1.1.1 电力二极管的结构、工作原理 .....	4	3.1 有源逆变的概念 .....	108
1.1.2 电力二极管的主要参数 .....	5	3.2 三相半波有源逆变电路 .....	110
1.1.3 电力二极管的主要类型 .....	6	3.2.1 三相半波逆变电路的工作原理 .....	110
1.2 晶闸管(Thyristor) .....	6	3.2.2 逆变角 $\beta$ .....	111
1.2.1 晶闸管的结构、分类及导通 条件 .....	6	3.3 三相桥式有源逆变电路 .....	112
1.2.2 晶闸管导通的工作原理 .....	7	3.3.1 三相桥式逆变电路的工作原理 .....	112
1.2.3 晶闸管的伏安特性与主要参数 .....	8	3.3.2 晶闸管两端电压波形分析 .....	112
1.2.4 晶闸管的派生器件 .....	11	3.4 逆变失败和逆变角 $\beta$ 的限制 .....	114
1.3 全控型电力电子器件 .....	12	3.4.1 逆变失败的原因 .....	115
1.3.1 门极可关断晶闸管(GTO) .....	13	3.4.2 逆变角 $\beta$ 的限制 .....	115
1.3.2 电力晶体管(GTR或BJT) .....	16	3.5 逆变状态下电动机的机械 特性 .....	118
1.3.3 电力场效应晶体管 (Power MOSFET) .....	20	3.5.1 电流连续时的电动机机械特性 .....	118
1.3.4 绝缘栅双极晶体管(IGBT) .....	24	3.5.2 电流断续时电动机的机械特性 .....	119
思考与习题 .....	32	3.6 晶闸管可逆电路 .....	121
第2章 相位控制的整流电路 .....	34	3.6.1 三相桥式反并联可逆电路 .....	121
2.1 单相相控整流电路 .....	34	3.6.2 三相桥式交叉连接可逆电路 .....	124
2.1.1 单相半波相控整流电路 .....	34	3.7 有源逆变的应用举例 .....	126
2.1.2 单相全控桥式整流电路 .....	45	3.7.1 直流可逆拖动系统 .....	126
2.1.3 单相半控桥式整流电路 .....	56	3.7.2 绕线型电机串级调速系统 .....	127
2.2 三相相控整流电路 .....	63	3.7.3 高压直流输电介绍 .....	129
2.2.1 三相半波相控整流电路 .....	63	思考与习题 .....	130
2.2.2 三相全控桥式整流电路 .....	73	第4章 相位控制的交-交变换电路 .....	132
2.2.3 变压器漏抗对整流电路的影响 .....	81	4.1 晶闸管交流无触点开关 .....	132
2.2.4 相控整流电路带反电势负载时的 工作情况分析 .....	84	4.1.1 简单的晶闸管交流无触点开关 及应用 .....	132
		4.1.2 三相晶闸管交流无触点开关 .....	133

4.1.3	无触点晶闸管开关实际应用	134	5.4	电压空间矢量 PWM 控制	178
4.1.4	固态开关	135	5.4.1	三相电压空间矢量的概念	178
4.2	晶闸管交流调压电路	137	5.4.2	电压空间矢量(SVPWM)对功率器件的控制	178
4.2.1	电阻性负载	137	5.5	PWM 波形的分类	181
4.2.2	电阻-电感性负载	138		思考与习题	183
4.2.3	单相交流调压电路的谐波分析	141	<b>第 6 章 PWM 整流电路</b>		184
4.3	三相交流调压电路	141	6.1	概述	184
4.3.1	负载带中线的三相交流调压电路	141	6.1.1	相控晶闸管整流电路存在的缺点	184
4.3.2	三相三线交流调压电路	142	6.1.2	PWM 整流电路的优越性能	185
4.3.3	晶闸管交流调压电路在低电压、大电流场合的应用	143	6.1.3	PWM 整流电路的分类	186
4.3.4	晶闸管相位控制的软起动器	147	6.2	PWM 整流主电路	186
4.4	晶闸管交流调功电路	151	6.2.1	电压型(VSR)PWM 整流主电路	186
4.4.1	交流调功的基本概念	152	6.2.2	三相三电平 VSR 整流主电路	188
4.4.2	模拟触发调功电路	152	6.2.3	电流型(CSR)PWM 整流主电路	189
4.4.3	数字触发控制的调功电路	155	6.3	桥式电压型(VSR)PWM 整流电路	190
4.5	相控交-交变频电路	156	6.3.1	单相全桥式电压型(VSR)PWM 整流主电路	191
4.5.1	方波型交-交变频电路	156	6.3.2	三相桥式电压型(VSR)PWM 整流主电路	201
4.5.2	正弦波型交-交变频电路	159	6.3.3	三相桥式(VSR)PWM 整流电路的控制电路	211
4.5.3	三相交-交变频具体电路	163	6.4	桥式电流型(CSR)PWM 整流电路	215
	思考与习题	164	6.4.1	单相桥式电流型(CSR)PWM 整流电路	215
<b>第 5 章 PWM 控制技术</b>		166	6.4.2	三相桥式电流型(CSR)PWM 整流电路	218
5.1	PWM 控制的基本原理	166		思考与习题	228
5.1.1	PWM 技术的基本原理	167	<b>第 7 章 PWM 无源逆变电路</b>		229
5.1.2	正弦波脉宽调制(SPWM)原理	168	7.1	电压型 PWM 无源逆变电路	229
5.2	调制法生成的 SPWM 波形	168	7.1.1	单相 PWM 电压型逆变电路	229
5.2.1	单极性 SPWM 波形的生成	169	7.1.2	三相 PWM 电压型逆变电路	233
5.2.2	双极性 SPWM 波形的生成	169	7.2	电流型 PWM 无源逆变电路	240
5.2.3	双极性三相 SPWM 波形的生成	170	7.2.1	电流型 PWM 逆变电路的主要	
5.2.4	异步调制和同步调制	170			
5.3	软件生成 SPWM 波形	172			
5.3.1	自然采样法	172			
5.3.2	规则采样法	173			
5.3.3	三相 SPWM 波形软件生成法	174			
5.3.4	低次谐波消去法	175			
5.3.5	SPWM 控制举例	176			

特点	240	思考与习题	295
7.2.2 单相电流型桥式逆变电路	240	<b>第9章 PWM调压电路</b>	297
7.2.3 三相电流型桥式逆变电路	241	9.1 直流PWM控制技术基础	297
7.3 PWM逆变电路的控制	241	9.1.1 直流斩波的基本原理	297
7.3.1 电压瞬时值单闭环控制	242	9.1.2 直流PWM波形的生成方法	298
7.3.2 电压滞环控制	244	9.2 PWM直流调压电路	299
7.3.3 电压、电流双闭环控制	245	9.2.1 降压斩波电路	299
思考与习题	248	9.2.2 升压斩波电路	302
<b>第8章 PWM变频电路</b>	249	9.2.3 升降压斩波电路	305
8.1 SPWM控制的变频电路	249	9.2.4 库克升降压斩波电路	307
8.1.1 交-直-交变频主电路	249	9.2.5 复合斩波电路	309
8.1.2 交-直-交变频电路的SPWM 控制	250	9.2.6 多相多重斩波电路	313
8.2 电压空间矢量PWM控制的变频 电路	251	*9.3 PWM交流调压电路	315
8.2.1 电压空间矢量控制的概述	251	9.3.1 交流斩波调压原理	315
8.2.2 交-直-交逆变电路的SVPWM 控制	252	9.3.2 交流斩波控制	317
8.3 交-直-交电压型通用变频 电路设计	259	思考与习题	318
8.3.1 变频主电路结构及功能	260	<b>第10章 电力电子器件的驱动、保护     电路及串、并联应用</b>	321
8.3.2 主电路主要元器件的选择	262	10.1 电力电子器件的驱动电路	321
8.3.3 电压型变频电路控制方式	267	10.1.1 概述	321
8.4 双PWM变频电路设计	270	10.1.2 晶闸管的触发电路	322
8.4.1 概述	270	10.1.3 GTO电流型驱动电路	343
8.4.2 双PWM变频电路的工作原理	270	10.1.4 IGBT电压型驱动电路	345
8.4.3 三相VSR双PWM变频电路的 数学模型	271	10.2 电力电子器件的保护电路	348
8.4.4 双PWM变频电路控制电路的 设计	279	10.2.1 晶闸管的保护电路	348
8.4.5 双PWM控制系统	284	10.2.2 IGBT的保护电路	355
8.5 矩阵式变换电路(Matrix Converter)简介	292	10.3 电力电子器件的选择及串、 并联应用	356
8.5.1 矩阵式变换电路的结构	292	10.3.1 晶闸管的选择及串、并联应用	356
8.5.2 矩阵式变换电路的控制原理	292	10.3.2 绝缘栅双极型晶体管(IGBT)的 选择及串、并联应用	360
8.5.3 矩阵式变换电路的应用	294	思考与习题	360
		<b>附录A 整流变压器额定参数计算</b>	362
		<b>附录B 电抗器电感量的计算</b>	366
		<b>参考文献</b>	368

\* 为电气类硕士研究生选用,其他为本科生(应用型)选用

# 绪 论

## 1. 什么是电力电子变流技术

用电力电子器件构成各种电力变换电路和对这些电路进行控制的技术,称为电力电子变流技术,也称为电力电子器件的应用技术。“变流”不仅包含交流-直流间变换,也包含直流变直流和交流变交流的变换,是对电能的变换与控制的一门学科。

电力电子器件目前均由半导体制成,其理论基础是半导体物理学,故称电力半导体器件。在各种电力变换电路中,它作为开、关元件,不同于信息中的微电子器件。微电子器件可处于放大状态或开关状态,而电力电子器件总是工作在开关状态。电力电子器件是电力变换的基础。

“变流”是电力变换的核心,其理论基础是电路理论。当今,电力变换通常可分为四大类,即交流变直流(AC/DC)、直流变交流(DC/AC)、直流变另一种可调的直流电压(或电流)(DC/DC)和交流变可调电压频率(或相数)的交流电(AC/AC)。

电力电子电路与信息电子电路,虽然许多分析方法相同,但应用目的不同,电力电子电路用于电力变换(如 AC/DC 等),信息电子电路用于信息处理(如通信信号处理等)。但两者的器件制造工艺、理论基础却是同根同源。

通常的电力电子技术分为电力电子器件制造技术和变流技术两个分支。不同于信息电子技术,高等学校所讲述的模拟电子技术和数字电子技术都属于信息电子技术,它是处理信息的电子技术;而电力电子技术是处理电力变换的电子技术,是弱电控制强电的技术。

## 2. 电力变换器件的发展概况

### (1) 变流机组、水银整流器时期

这一时期是在 1957 年晶闸管诞生之前的年代,由于电力机车、轧钢机用直流电动机拖动等,迫切期望可控的直流电源,因而出现了由交流电动机作为直流发电机的原动机,从而获得可变的直流电压的直流电源,实现了交流变直流的电力变换和控制。这是旋转变流机组,它存在体积大、功耗大、效率低、噪声高等缺点。后来出现了把水银封于管内,利用对其蒸汽的点弧,产生离子对其电流进行控制,将交流电变为可控的直流电,称为水银整流器。它存在通态压降大,水银毒气大等缺点。然而水银整流器是静止的电力变换与控制器件,比旋转式机组电力变换与控制前进了一步。

### (2) 晶闸管时期

以 1957 年美国通用电气公司研制出世界第一个晶闸管为标志,电力电能的变换和控制由旋转变流机组、离子(水银)整流器时代迈进了电力电子变流时代。晶闸管具有体积小、重量轻、效率高、无噪声、易于驱动等特点,因而在电力变换领域得到了快速发展。在电力变换和控制的 AC/DC、DC/AC、DC/DC 和 AC/AC 等四大领域都有足迹。

晶闸管是通过门极控制能够使其导通,而不能通过门极控制使其关断的器件,属于半控型电



力电子器件。对晶闸管电路的控制方式是相位控制方式,简称相控方式。而采用 PWM 控制受晶闸管开关频率(约在 1 kHz 以下)限制,不能获得 PWM 控制的优越性能。因此,晶闸管组成的电力电子变换和控制电路仍存在以下缺点:

- ① 晶闸管换相引起网侧电压波形畸变;
- ② 网侧谐波电流对电网产生谐波“污染”;
- ③ 深控时网侧功率因数降低;
- ④ 闭环控制时动态响应相对较慢。

然而晶闸管及其电力变换电路和相位控制却为电力电子变流技术的诞生和发展立下了不可磨灭的功劳。

### (3) 半控型、全控型器件时期

为了克服晶闸管及其电力变换电路和相位控制存在的上述缺欠,满足日益迫切的需要出现了不仅导通可控,而且关断也可控的器件,即全控型器件。20 世纪 70 年代后期,以门极可关断晶闸管(GTO)、电力双极型晶体管(GTR)和电力场效应晶体管(MOSFET)为代表的全控型器件迅速发展。特别是 20 世纪 80 年代后期,将 MOSFET 的驱动功率小、开关速度快等优点与 GTR 的通态压降小、载流能力大、可承受电压高等优点集于一身,成为现代电力电子技术的主导器件的绝缘栅双极型晶体管(IGBT)的出现,应用于逆变、直流斩波、整流、交流-交流等电力变换各种电路中,采用 PWM 脉宽控制方式,使晶闸管相位控制方式难以实现的功能得以实现。采用 IGBT 组成的 PWM 控制的电力电子技术,具有如下优越性能:

- ① 网侧电流为正弦波;
- ② 网侧功率因数可控,甚至可实现单位功率因数控制;
- ③ 电能可双向传递;
- ④ 较快的动态控制响应。

它把电力电子技术推进一个新的发展阶段。

虽然晶闸管的应用受到全控型器件与 PWM 控制方式的冲击,目前晶闸管在电力变换领域里,尤其是大功率电力变换领域中的支配地位仍然是相当稳固的。因此本书仍以晶闸管及其组成的电力变换电路,即相位控制的电力电子变换电路作为基础,而把全控型器件组成的 PWM 控制的电力电子变换电路作为发展方向,基本包含了全部电力电子变流技术内容。

电力电子技术今后的发展,在向着高电压、大电流、快速、易于驱动复合化(如 IGBT 复合器件);模块化(即把若干个电力电子器件及必要的辅助元件做成模块形成);集成化[即再进一步把驱动、控制、保护电路与电力电子器件集成在一起,构成电力电子集成电路(PIC)]的方向发展,使得电力电子装置结构紧凑、体积减小、安装简化、可靠性提高,方便了用户。

### 3. 电力电子变流技术的应用

下面介绍电力电子变流技术在工业、交通、电力、家电和新能源领域的应用。

#### (1) 一般工业

电解、冶金、化工、机床、造纸、轧钢、机器人等行业中,如电解铝、电解铜、电解食盐水,直流电弧炉冶炼,交、直流伺服机和电动机等均要由可变直流电源变频电源供电。

上述电源是经过晶闸管或全控型 IGBT、MOSFET 等电力电子器件组成的电力电子变换电路获得的。

## (2) 交通运输

电气机车中的直流机车采用整流电源供电,交流机车如“高速铁路”、“地铁”等采用变频电源供电。

电动汽车、飞机、船舶等也要依靠电力电子变换装置进行电力变换和驱动控制,其蓄电池高级电容的充电也离不开电力电子装置。

近年来电梯交流变频调速在电梯中已成为主流。

## (3) 电力系统

在频率变换、直流输电、无功补偿、交直流操作等电源中,电力电子变流技术获得广泛的应用。电力系统在通向现代化的进程中,电力电子变流技术是其关键技术之一。

另外,开关电源、UPS 不停电电源都离不开电力变换电路。

## (4) 新能源领域

太阳能发电、风力发电、燃料电能等新能源领域是离不开电力电子变流技术的,如受到自然环境、恶劣气候的影响,太阳能、风力发电发出的电力质量较差,需要储能装置缓冲,需要斩波技术改善电能质量。

## (5) 家电领域

空调、冰箱、洗衣机、节能灯、微波炉、录像机等电器均采用电力电子变流技术,提高了我们的生活质量。

总之,电力电子变流技术的应用范围十分广泛,从国民经济的各个领域,再到我们的日常生活,都有电力电子变流技术的应用。

## 思考与习题

- 1-1 阐述电力技术、电子技术与电力电子技术三者在学习内容上的联系与差别。
- 1-2 为什么电力电子器件都工作在开关状态?
- 1-3 电力电子电路有哪几种基本类型?
- 1-4 电力电子技术在国民经济建设中有何重要作用?
- 1-5 试举例说明电力电子技术的应用。

# 第 1 章 电力电子器件

## 1.1 电力二极管 (Power Diode)

### 1.1.1 电力二极管的结构、工作原理

#### 1. 电力二极管的结构

电力二极管的基本结构和工作原理与模拟电子技术课所讲的信息电子电路中的二极管是一样的,都是以半导体 PN 结为基础。电力二极管是由一个面积较大的 PN 结和两端引线(阳极 A, 阴极 K)以及封装构成,如图 1.1 所示。

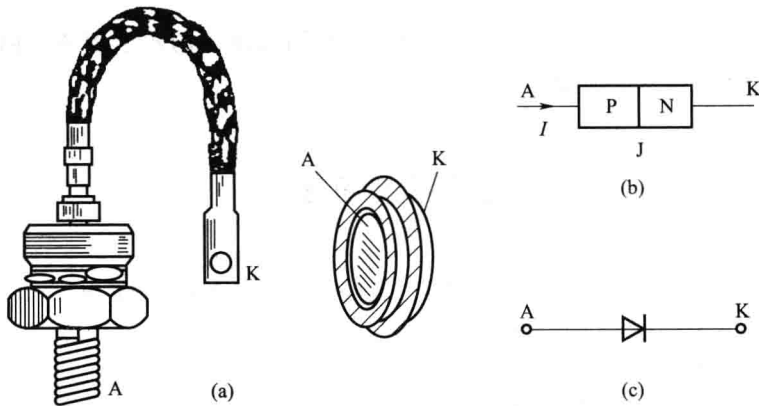


图 1.1 电力二极管的外形、基本结构和电气图形符号  
(a) 外形 (b) 结构 (c) 符号

电力二极管分为螺栓型、平板型;又可分为单管型、组合型以及自然冷却、风冷和水冷等类型。

#### 2. 电力二极管与信息二极管的区别

##### (1) 电力二极管的通流能力大

电力二极管比信息二极管通流能力大,电力二极管可达万安培。这是因为电力二极管是垂直硅片表面方向导电;而信息二极管是与硅片表面平行方向导电。垂直导电结构使得硅片中通过电流的有效面积增大,提高了通流能力。

##### (2) 电力二极管的承受电压高

电力二极管在 P 区和 N 区之间多了一层低掺杂 N 区(漂移区)。此区掺杂浓度低,接近于无

掺杂的半导体材料,故电力二极管的结构也称为 P-i-N 结构。由于掺杂浓度低就可以承受很高的电压而不至于被击穿,提高了承受高电压的能力。

### (3) 电力二极管具有电导调制效应

电力二极管的电阻主要是低掺杂 N 区的欧姆电阻。当电力二极管正向电流较小时,低掺杂 N 区阻值较高,且为常量;当正向电流较大时,由 P 区注入掺杂 N 区的空穴浓度增大,使得低掺杂 N 区的电阻率明显下降,电导率增大,这就是电导调制效应。因此,电力二极管正向电流较大时压降可维持 1 V 左右。

### 3. 伏安特性、工作原理

电力二极管为二层半导体,即一个 PN 结,其伏安特性见图 1.2 所示。 $U_{T0}$  为门槛电压, $U_D$  为二极管 A、K 间的电压, $I_D$  为流过 A、K 间的二极管电流。

当  $U_D \geq U_{T0}$  时,PN 结受正偏,二极管导通,因此称为不可控电力电子器件;当  $U_D < U_{T0}$  时,PN 结受反偏或处于 PN 结死区,二极管截止。

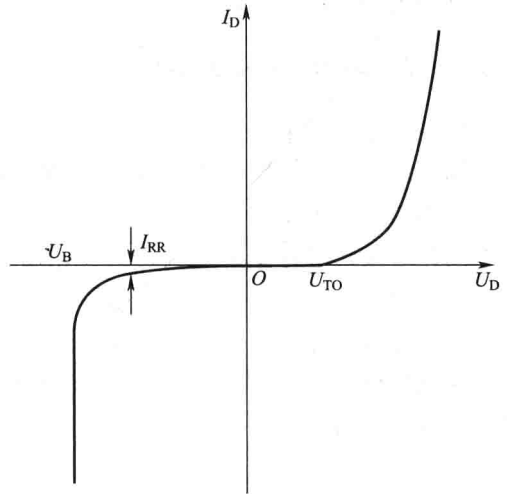


图 1.2 电力二极管的伏安特性

## 1.1.2 电力二极管的主要参数

### 1. 正向平均电流 $I_{D(AV)}$

指电力二极管长期工作时,在指定的管壳温度规定的散热条件下,PN 结温度不超过最高允许结温 ( $T_{jm} = 125^\circ\text{C} \sim 175^\circ\text{C}$ ),其流过的最大工频正弦半波电流的平均值,用  $I_{D(AV)}$  表示。 $I_{D(AV)}$  是电力二极管的额定电流。

选择电力二极管额定电流  $I_{D(AV)}$  依据“有效值相等”的原则。因为发热取决于电流有效值,但还应考虑安全裕量。如要求通态电流  $I_D = 200\text{ A}$ ,工频整流电力二极管应选多大  $I_{D(AV)}$ ?

即

$$I_{D(AV)} = (1.5 \sim 2) \frac{I_D}{1.57} \quad (1-1)$$

式中 (1.5 ~ 2)——电流的安全裕量;

$I_D$ ——负载电流最大有效值,此例中  $I_D = 200\text{ A}$ 。

波形系数  $K_i = \frac{I_D}{I_{D(AV)}} = 1.57$ 。 $K_i$  在额定  $I_{D(AV)}$  条件下,对应的电流有效值  $I_D$ 。这说明额定电

流  $I_{D(AV)} = 100\text{ A}$  的电力二极管,其额定电流有效值  $I_D = K_i I_{D(AV)} = 157\text{ A}$ 。

### 2. 正向压降 $U_D$

稳态正向电流为  $I_{D(AV)}$  时对应的正向压降,设计时按 1 V 计算。

### 3. 反向重复峰值电压 $U_{RRM}$

指管子反向能重复施加的最高峰值电压,此值通常为反向击穿电压  $U_B$  的 2/3。

$$U_{RRM} = (2 \sim 3) U_{DM} \quad (1-2)$$

式中 (2~3)——电压安全裕量;

$U_{DM}$ ——二极管承受最大峰值电压。

其他参数见产品说明资料。

### 1.1.3 电力二极管的主要类型

#### 1. 普通整流二极管

用于 1 kHz 以下的整流电路,反向恢复时间在 5  $\mu$ s 以上。

#### 2. 快恢复二极管

工艺上采用了掺金措施,仍为 PN 结型结构,一般反向恢复时间在 5  $\mu$ s 以下。

#### 3. 肖特基二极管

以金属与半导体接触形成的势垒为基础的二极管,称为肖特基势垒二极管。它与普通以 PN 结为基础二极管不同,肖特基二极管反向恢复时间很短(10~40 ns)。它通常应用于 PWM 高频斩波控制主电路上。

## 1.2 晶闸管 (Thyristor)

晶闸管也称可控硅,用 SCR 表示。技术成熟,应用广泛。

### 1.2.1 晶闸管的结构、分类及导通条件

#### 1. 晶闸管的结构、分类

晶闸管的外形、结构如图 1.3(a)、(b)所示。

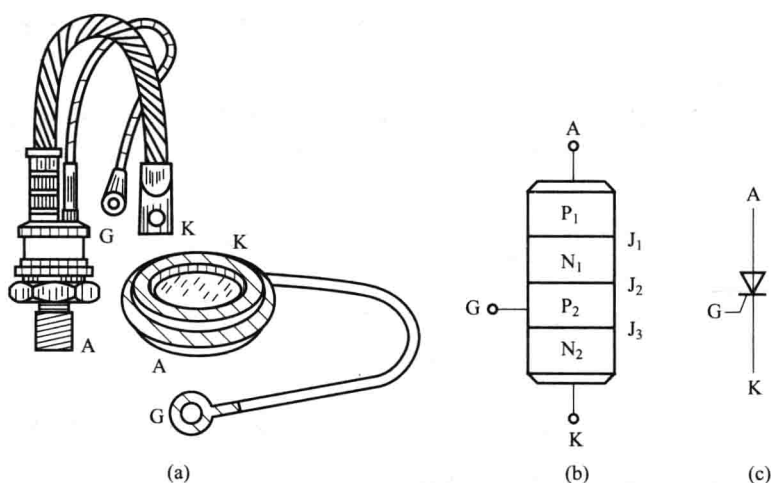


图 1.3 晶闸管的外形、结构和电气图形符号

(a) 外形 (b) 结构 (c) 电气图形符号

由图 1.3(b)可见,晶闸管内部是 P<sub>1</sub>N<sub>1</sub>P<sub>2</sub>N<sub>2</sub> 四层半导体;三个 PN 结(J<sub>1</sub>、J<sub>2</sub>、J<sub>3</sub>);三个引出极(阳极 A、阴极 K、门极 G)构成的电力电子器件。电气图形符号如图 1.3(c)所示。晶闸管可分

为螺栓式[如图 1.3(a)所示]、平板式,也可分为自然冷却、风冷和水冷式。

## 2. 晶闸管导通条件

由实验得知,当晶闸管 A、K 间承受反向电压时,不论门极 G 是否有触发电流  $I_G$ ,晶闸管都不会导通。

当晶闸管 A、K 间施加正向电压时,与此同时又在门极 G 有触发电流  $I_G$ 时,晶闸管才能导通。

晶闸管一旦导通,门极 G 就失去了控制作用,不论门极触发电流  $I_G$ 是否存在,晶闸管都保持导通。

晶闸管欲关断,必须对 A、K 间施加反压(阳极 A 电位低于阴极 K 电位);或 A、K 间正向电压降到零;或增大阻抗,使流过 A、K 间电流接近于零的某一数值以下(一般为几十毫安)。

综上,有晶闸管导通条件是:

- (1) 晶闸管 A、K 间施加正向电压(阳极 A 电位高于阴极 K 电位);
- (2) 与此同时门极 G 与阴极 K 间流过触发电流  $I_G$ 。

两条同时具备时,晶闸管从关断变导通,而关断是不能控制的,故称晶闸管为半控型电力电子器件。

### 1.2.2 晶闸管导通的工作原理

晶闸管为什么会有上述导通条件呢?须从内部四层半导体结构分析,见图 1.4(a)、(b)所示。

如在器件上取一倾斜的截面,则晶闸管可以等效看成为  $P_1N_1P_2$ 和  $N_1P_2N_2$ 两个互补的晶体管

V1 和 V2,如图 1.4(a)所示。该图中 V1 和 V2 的电流放大倍数为:V1 的  $\beta_1 = \frac{I_{c1}}{I_{b1}}, \alpha_1 = \frac{I_{c1}}{I_{e1}}$ ; V2 的  $\beta_2 = \frac{I_{c2}}{I_{b2}}, \alpha_2 = \frac{I_{c2}}{I_{e2}}$ 。

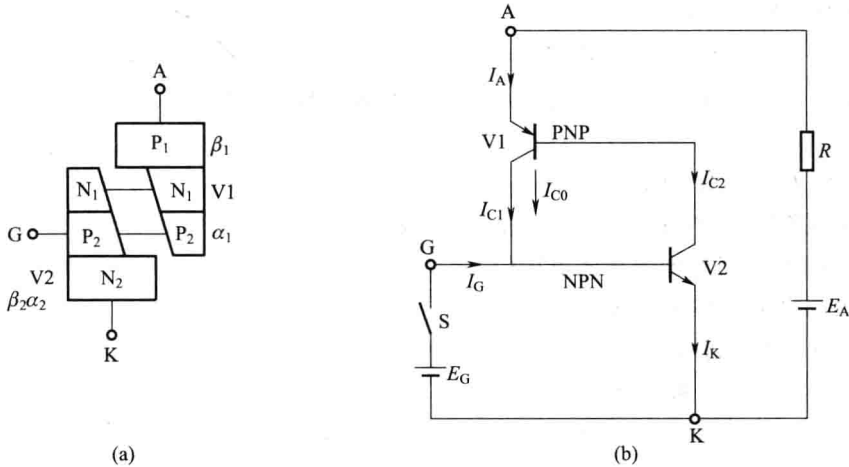
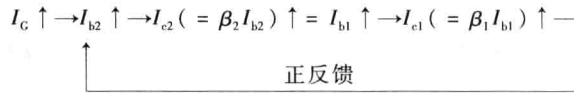


图 1.4 晶闸管的双晶体管模型及其工作原理

(a) 双晶体管模型 (b) 工作原理

从图 1.4(b)可见,当触发电路开关 S 闭合时,触发电流  $I_G$ 流入 V2 晶体管的基极  $b_2$ ,产生 V2 集电极电流  $I_{c2} = \beta_2 I_{b2}$ ,而  $I_{c2}$ 恰是 V1 管的基极  $b_1$ 的基极电流  $I_{b1} = I_{c2} = \beta_2 I_{b2}$ 。产生 V1 晶体管集

电极电流  $I_{c1} = \beta_1 I_{b1} = \beta_1 I_{c2} = \beta_1 \beta_2 I_{b2}$ , 而  $I_{c1}$  又恰是 V2 晶体管基极电流  $I_{b2}$  形成的正反馈, 其过程为



瞬间使 V1 和 V2 饱和导通也就是晶闸管导通。

依照晶体管工作原理, 有

$$I_A = \alpha_1 I_A + \alpha_2 I_K + I_{C0} \quad (1-3)$$

$$I_K = I_A + I_G \quad (1-4)$$

将式(1-4)代入式(1-3)得

$$I_A = \frac{\alpha_2 I_G + I_{C0}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (1-5)$$

式中  $I_{C0}$ ——流过  $J_2$  结反向漏电流

$$\alpha_1 I_A = I_{c1}, \alpha_2 I_K = I_{c2}。$$

从晶体管工作原理可知, 共基极电流放大倍数  $\alpha$  随发射极电流  $I_e$  增大而逐渐增加, 当  $I_e$  增大到一定值使 V1、V2 两管的  $I_{c1}$  和  $I_{c2}$  也相应增大, 且使  $(\alpha_1 + \alpha_2)$  增大到接近 1 时, 式(1-5)中管子的阳极电流  $I_A$  将急剧增大成为不可控, 此时  $I_A$  值由电源电压  $E_A$  与负载电阻  $R$  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  $I_G \downarrow = 0$  或负值, 也不能使管子关断, 只有使管子的阳极电流  $I_A$  减小到维持电流  $I_H$  以下, 此时  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  也相应减小, 导致内部正反馈无法维持时晶闸管才恢复阻断。

### 1.2.3 晶闸管的伏安特性与主要参数

#### 1. 晶闸管的伏安特性

晶闸管的伏安特性如图 1.5 所示。当  $I_G = 0$  时晶闸管正向电压  $U_A$  至正向转折电压  $U_{B0}$  段即 OA 段, 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  $U_A$  增大到  $U_{B0}$  时, 管子突然从阻断状态经虚线转为导通, 导通后特性与整流二极管正向伏安特性相似。这样导通, 是不允许的。

当触发电流  $I_G$  增大时, 正向转折电压减小, 这种使晶闸管经虚线到导通状态 BC 段上工作, 称为触发导通, 它是在  $I_G$  作用下的导通, 属于正常触发导通。

门极 G 与阴极 K 间施加的正向电压(门极 G 电位高于阴极 K 电位)称为触发电压  $U_G$ ; 对应的门极 G 流入的电流  $I_G$  称为触发电流。

当其阳极电流  $I_A$  减小到维持电流  $I_H$  (几十毫安) 以下时, 管子又从导通返回正向阻断, 所以晶闸管只能稳定工作在阻断或导通两个状态。

晶闸管加反向阳极电压时(阳极 A 电位低于阴极 K 电位), 只流过很小的反向漏电流, 即 OD 段。

#### 2. 晶闸管的主要参数

##### (1) 额定电压 $U_{Tn}$

由图 1.5 可见, 当门极断开, 器件处于额定结温时, 正向阻断曲线 OA 段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

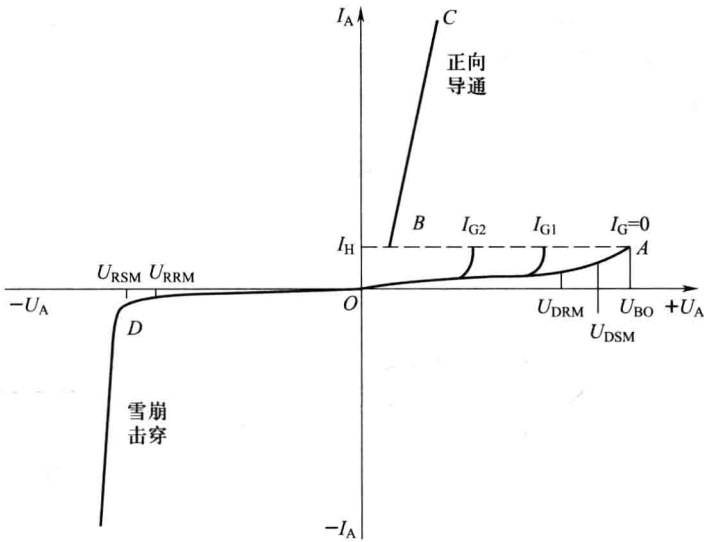


图 1.5 晶闸管的伏安特性 (\$I\_{G2} > I\_{G1} > I\_G\$)

$U_{DRM}$ 、 $U_{RRM}$  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,再取整数标准电压等级。

由于晶闸管工作时,温度升高,又不可避免地瞬时过电压,因此在选用管子的额定电压时,应留有安全裕量 2~3 倍。即

$$U_{Tn} \geq (2 \sim 3) U_{TM} \quad (1-6)$$

$$U_{TM} = \begin{cases} \text{单相整流} \sqrt{2} U_2 \\ \text{三相整流} \sqrt{6} U_2 \end{cases}$$

式中  $U_2$ ——整流器输入的交流相电压有效值。

## (2) 额定电流

$I_{T(AV)}$  亦称额定通态平均电流,它是指在室温 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,PN 结温不超过额定结温时允许的最大通态平均电流值,并取整数的电流等级为器件的额定电流  $I_{T(AV)}$ 。如图 1.6 所示。

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

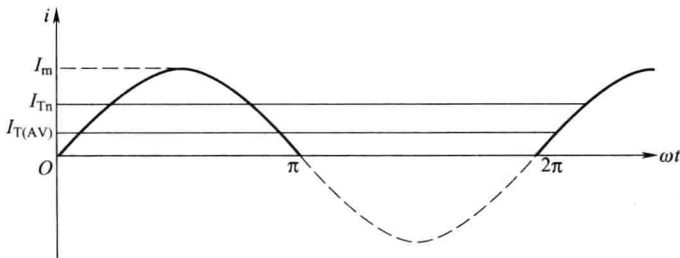


图 1.6 正弦半波



晶闸管额定电流是以通态平均电流来标定,而发热是由流过的电流的有效值来决定。额定有效值电流  $I_{Tn}$  (此值产品说明书上不提供) 实际使用时不论流过管子的电流波形如何、导通角多大,都要保证最大电流有效值  $I_{Tm} \leq I_{Tn}$ ,  $I_{Tn}$  为均方根值,即

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

在额定状态下,电流波形系数为

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

如  $I_{T(AV)} = 100 \text{ A}$  的管子,其额定有效电流  $I_{Tn} = k_f I_{T(AV)} = 1.57 \times 100 \text{ A} = 157 \text{ A}$ 。

由于晶闸管的电流过载能力极小,在选用时,要至少考虑到 1.5 ~ 2 倍安全裕量,即

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

所以

$$I_{T(AV)} \geq (1.5 \sim 2) \frac{I_{Tm}}{1.57} \tag{1-7}$$

式中  $I_{Tm}$ ——流过管子的最大有效电流值。

(3) 门极触发电流  $I_{GT}$  与触发电压  $U_{GT}$

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

在产品说明书中给出的最大触发电压和最大触发电流是直流值。 $U_{GT}$ 、 $I_{GT}$  值受温度影响很大,随温度不同,实际的  $U_{GT}$ 、 $I_{GT}$  是不同的,冬天使用管子时, $U_{GT}$ 、 $I_{GT}$  值会比夏天大。

(4) 通态平均电压  $U_{T(AV)}$

在规定环境温度和散热条件下,管子流过额定正弦半波电流时,阳极 A 与阴极 K 间的平均电压称通态平均电压也称管压降,其标准值列于表 1-1 中。

表 1-1 晶闸管通态平均电压组别

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  $I_H$

在标准室温且门极断开时,管子维持导通的最小阳极电流称维持电流  $I_H$ 。

(6) 掣住电流  $I_L$

管子从关断到撤去触发脉冲能维持继续导通所需的最小阳极电流称掣住电流  $I_L$ 。通常  $I_L$  比  $I_H$  要大,即  $I_L = (2 \sim 4) I_H$ 。

(7) 浪涌电流  $I_{TSM}$

由于电路异常情况引起的、使结温超过额定结温的不重复最大正向过载电流。这个参数是设计过载保护电路的依据。