

谭弗娃 金如麟 编著

大功率电子学 和电机控制



上海交通大学出版社

TM301.2

T21

上海交通大学“九五”重点教材

大功率电子学和电机控制

56

谭弗娃 金如麟 编著

上海交通大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

大功率电子学和电机控制/谭茆娃,金如麟编著. —上海:上海交通大学出版社,1999

ISBN 7-313-02237-9

I. 大… II. ①谭… ②金… III. ①大功率-电子器件-教材 ②电机-控制-教材 IV. TM301.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 24535 号

大功率电子学和电机控制

谭茆娃 金如麟 编著

上海交通大学出版社出版发行

上海市番禺路 877 号 邮政编码 200030

电话 64281208 传真 64683798

全国新华书店经销

立信会计常熟市印刷联营厂·印刷

开本:787×1092(mm)1/16 印张:15.5 字数:381 千字

版次:1999 年 8 月 第 1 版

印次:1999 年 8 月 第 1 次

ISBN 7-313-02237-9/TM·112

定价:21.00 元

本书任何部分文字及图片,如未获得本社书面同意,
不得用任何方式抄袭、节录或翻印。

(本书如有缺页、破损或装订错误,请寄回本社更换。)

前 言

在校庆 100 周年之际,本书能列入校《庆百年校庆、献百本教材》出版计划之一,感到十分幸运。饮水思源,借本书正式出版之际,我们深深地感谢学校对我们的培育之恩。

80 年代中期我们分别在德国柏林工业大学电机研究所和斯图加特大学电子研究所进修,深切感受到《机电一体化技术》的活力和第三次技术革命对机电一体化的推力。回国后,结合传统电机专业过渡到电机及其控制学科建设需要,我们编写了试用教材并设置了新的课程,受到了欢迎。结合在国外进修的心得、回国后的教学和科研实践以及近年来国内外在这一领域的新发展,我们编著了本书,希望它能对读者有所帮助。

本书共分两大部分:大功率电子学和电机控制。前六章为大功率电子学部分,精练地介绍了大功率电子学的基础理论和发展,包括:大功率半导体元件及其最新发展;功率半导体器件的保护;相控调压电路、可控整流电路、有源逆变和交-交直接变频器;直流电压变换电路及其控制方式;单相和三相逆变电路、正弦脉宽调制技术。以上内容的编排是完全按各类变流器的内在工作规律进行分类的,突出了功能完全不同的变流器其内在的联系,以期读者能更清楚了解各类变流器的工作机理。后七章为电机控制部分,介绍经典的和现代的电动机调速系统原理、组成、应用实例及最新发展,包括:电力拖动系统概论;单、三相异步电动机调压调速系统及其性能分析;电磁转差离合器调速系统;异步电动机变频调速系统的性能分析;直流电动机调速系统;无换向器直流电动机、无刷直流电动机及其调速系统;现代的异步电动机调速系统和永磁同步位置伺服系统。在编写过程中,我们既力求取材先进又兼顾国情,力求切合实际。如我们介绍了在现代机床主轴驱动系统得到普遍应用的异步电动机矢量变换控制系统及 80 年代中期提出的异步电动机转矩直接控制系统;详尽介绍了在位置伺服控制中很有生命力的微机控制永磁同步位置伺服系统及其相关的全部硬件电路。同时对有广泛应用场合的经典调速系统列举了具体的应用实例,并提供了完整的电路及新元件在其中的应用。针对现代生产和控制,对系统动、静态性能的要求,我们强化了理论分析,介绍了异步电动机调压调速系统的数学模型和仿真;介绍了用经典方法分析的异步电动机变频调速系统。对于技术已很成熟的直流调速系统,则介绍了相关的装置,以供读者使用时参考。

本书编写过程中参考了大量国内外文献,详见附录目录。

本书的大功率电子学部分由金如麟教授编写;电机控制部分由谭蓓娃教授编写。李仁定教授为本书的主审,他对本书的提纲进行了认真的推敲,对全书进行了细致的审核并提出了许多宝贵意见,他在这一领域扎实的理论基础和科研实践为本书润色不少,在此我们表示深深的谢意。我们感谢电机系主任倪倬教授、副主任陈立人教授和黄放副教授对出版本书的支持。感谢科学院院士、我校兼职教授汪耕高工和上海先锋电机厂总工程师张庆川高工为本书提供了宝贵的资料。感谢研究生汪海和李祖光为本书提供了某些实例。

由于我们的水平所限,不足之处在所难免,诚恳地希望广大读者、同行和专家们指正。

上海交通大学 谭蓓娃 金如麟

目 录

第一章 大功率电子学和变流器综述	1
§ 1-1 大功率电子学的定义和任务	1
§ 1-2 大功率半导体元件	2
一、半导体功率二极管	2
二、晶闸管	5
三、双极型大功率晶体管(GTR)	12
四、功率场效应晶体管	15
五、绝缘基极双极型大功率晶体管(IGBT)	19
§ 1-3 功率半导体器件的保护	23
一、过压保护	23
二、过流保护	25
三、电压及电流上升率的限制	26
四、晶闸管的串并联保护	27
五、大功率晶体管的缓冲电路	28
六、功率晶体管导通时的过载保护	30
§ 1-4 换流概念和变流器的分类	31
一、换流概念	31
二、变流器的功能和分类	34
第二章 相控调压电路	35
§ 2-1 单相交流调压	35
§ 2-2 三相交流调压	36
§ 2-3 交流调压电路运行时的无功功率和畸变功率	40
第三章 可控整流电路	42
§ 3-1 单相可控整流	42
一、纯电阻负载时的基本关系	42
二、带电阻-电感混合负载的单相可控整流	43
§ 3-2 三相可控整流	45
一、三相半波可控整流电路	45
二、三相桥式全控整流电路	47
§ 3-3 有源逆变	48
§ 3-4 二组晶闸管整流器反并联可逆电路	50

§ 3-5 交-交直接变频器	52
一、交-交直接变频工作原理	52
二、正弦波交-交变频器	54
第四章 直流电压变换电路	56
§ 4-1 单象限直流电压变换电路	56
一、直流降压变换电路	56
二、能量反向传递的直流降压变换电路	59
三、直流升压变换电路	60
§ 4-2 二象限直流电压变换器	61
一、输出电流可反向的二象限直流电压变换器	61
二、输出电压可反向的二象限直流电压变换器	63
§ 4-3 四象限直流电压变换器	65
§ 4-4 直流电压变换器的控制方式	65
一、时间比控制方式	65
二、瞬时值控制方式	67
三、时间比同瞬时值相结合的控制方式	67
第五章 逆变电路	69
§ 5-1 电压型单相半桥逆变电路	70
§ 5-2 电压型单相全桥逆变电路	71
§ 5-3 180°导通电压型三相半桥逆变电路	73
一、输出电压波形	75
二、逆变桥的输入电流	76
三、电感性负载时输出电流波形	77
§ 5-4 逆变器的多重化	78
第六章 正弦脉宽调制技术(SPWM 技术)	82
第七章 电力拖动系统概论	88
§ 7-1 电力拖动系统的基础	88
一、机械特性	88
二、电力拖动系统的运动平衡方程式	89
三、电力拖动系统的稳定运行条件	90
§ 7-2 电动机调速技术的方案选择	91
一、调速技术的分类	91
二、电动机调速系统的性能指标	93
三、自动调速系统的结构	96
四、现代交流调速系统	97

第八章 异步电动机交流调压调速	99
§ 8-1 单相异步电动机交流调压调速	99
一、交流调压调速的原理和组成	99
二、单相异步电动机的调压调速系统	102
§ 8-2 三相异步电动机调压调速系统	105
一、系统的组成	105
二、三相异步电动机调压调速系统	105
三、三相交流调压调速系统的应用	108
§ 8-3 异步电动机的制动	110
一、制动的要求	110
二、电子制动器	111
§ 8-4 异步电动机调压调速系统的性能分析	112
一、调压调速系统的数学模型	112
二、异步电动机调压调速系统的仿真	118
§ 8-5 电磁转差离合器调速系统	126
一、工作原理	126
二、电磁转差离合器控制装置的工作原理	129
三、应用实例	131
第九章 异步电动机的变频调速系统	132
§ 9-1 变频调速的原理和控制方式	132
一、变频调速的原理	132
二、异步电动机变频调速的控制方式	133
§ 9-2 异步电动机频率开环调速系统	135
一、变频器主电路	136
二、单片机控制的 PWM 信号形成	136
三、功率开关元件的驱动电路	141
四、异步电动机频率开环调速系统	145
§ 9-3 异步电动机转差频率控制的变频调速系统	148
一、异步电动机转差频率控制	148
二、采用转差频率控制的变频调速系统	150
§ 9-4 异步电动机闭环变频调速系统	151
一、调速系统的动态性能指标	151
二、异步电动机闭环变频调速系统的组成	152
三、异步电动机闭环变频调速系统的开环、闭环传递函数	153
四、异步电动机闭环变频调速系统的性能分析	156

第十章 直流电动机调速系统	160
§ 10-1 直流电动机调速时的机械特性	160
一、改变电枢电压 U 时的机械特性	160
二、改变电枢电路电阻 R 时的机械特性	161
三、改变励磁磁通 Φ 时的机械特性	162
§ 10-2 通用直流调速装置	162
一、TZS01-□/□-512 系列	163
二、TZS02-□/□-511 系列	163
三、TZS02-□/□-512 系列	163
四、TZS02-□/□-521 系列	163
五、TZS02-□/□-522 系列	164
六、TZS02-□/□-541 系列	164
七、TZS02-□/□-542 系列	164
§ 10-3 通用直流调速装置的典型电路	164
一、TZS01-□/□-512 系列成套装置	164
二、TZS02-□/□-542 系列可逆调速装置	165
三、微机控制晶闸管直流调速装置	167
四、脉宽控制直流调速装置	169
第十一章 无换向器电动机及其调速系统	171
§ 11-1 无换向器电动机的基本原理	172
一、基本原理	172
二、无换向器电动机逆变器的换流问题	172
三、无换向器电动机的起动问题	174
四、无换向器电动机的位置检测	174
§ 11-2 无换向器电动机的特性及调速方法	178
一、转矩公式及调速方法	178
二、转矩公式与机械特性	179
§ 11-3 无换向器电动机调速系统	181
一、无换向器电动机调速系统的基本构成	181
二、无换向器电动机调速系统的设计特点	182
§ 11-4 无刷直流电动机及其调速系统	184
一、工作原理、组成和分类	184
二、正反转控制	186
三、调速和稳速	186
四、制动	191
五、测速脉冲形成	192
六、无刷直流电动机及其调速系统的应用实例	193

第十二章 现代异步电动机调速系统	198
§ 12-1 矢量变换控制的基本思想	198
§ 12-2 矢量变换规律及其实现	200
一、三相——两相变换($3\Phi/2\Phi$)或两相——三相变换($2\Phi/3\Phi$)	200
二、矢量旋转变换(VR)	202
三、直角坐标——极坐标变换(K/P)	203
§ 12-3 异步电动机的矢量变换控制方程式	203
§ 12-4 异步电动机矢量变换控制系统	206
一、转子磁通空间位置的量测	206
二、异步电动机矢量变换控制系统	206
三、应用举例	208
§ 12-5 异步电动机转矩直接控制调速系统	210
一、转矩直接控制的基本工作原理	210
二、异步电动机转矩直接控制系统的结构框图	216
第十三章 永磁同步位置伺服系统	218
§ 13-1 永磁同步位置伺服系统的工作原理	218
一、交流电机电磁转矩的数学模型	218
二、位置伺服系统的磁场定向矢量控制原理	219
§ 13-2 永磁同步位置伺服系统的实现	220
一、框图和组成	220
二、所涉及的 IBM-PC 微机硬件	221
三、接口电路	222
四、脉冲式 PWM 脉宽调制的变频装置	223
五、快速电流检测电路	225
六、位置检测电路	227
七、速度信号检测	228
八、D/A 转换	228
§ 13-3 位置伺服控制的双模调节原理	231
一、双模调节原理	231
二、双模调节结构图	233
参考文献	235

第一章 大功率电子学和变流器综述

§ 1-1 大功率电子学的定义和任务

自 60 年代以来,电子技术突飞猛进,在工农业生产、国防、科学技术乃至人们的日常生活中的影响已是无法估量的了。在这种迅猛发展过程中,有两种趋势十分引人注目:一是微电子技术和大规模集成电路的发展;另一就是大功率电子技术的发展。微电子技术和大规模集成电路的飞跃发展是人所共知的,而大功率电子技术的发展对许多人来说还较为陌生,但其发展的势头和影响决不亚于前者,我们必须首先对大功率电子学的定义作一说明。

大功率电子学的定义是:使用现代可控的大功率半导体开关元件(例如 SCR, GTO, GTR, MOSFET 和 IGBT 等)在负载和电源之间实现可以控制的电能变换。

这种电能变换包括四种类型:

- (1) 交流电→直流电。这种电能变换人们称之为整流;
- (2) 直流电→交流电。人们称其为逆变;
- (3) 恒压直流电→大小可调的直流电。这种变换称为直流电变换;
- (4) 恒频、恒压的交流电→频率、大小可调的交流电。称其为交流电变换。

因为大功率电子技术主要从事不同类型电能的可控变换,故人们亦称其为电力电子技术,

图 1-1 是大功率电子技术作用示意图。从图可知,

大功率电子技术应包括下述几方面的内容:

(1) 大功率电子部分。这部分是用各种大功率半导体开关元件构成不同的电能变换主回路;

(2) 控制和驱动部分。它包括驱动主回路工作的触发电路和满足各种要求的控制回路。

满足不同要求的一个完整的电能变换装置就应该包括大功率主电路和相应的驱动和控制电路,这样的装置人们泛称它为变流器。

现代的工业生产对驱动电动机提出了很高的控制要求,而大功率电子技术的发展恰恰为实现高要求的电机控制提供了必要条件。事实上,自大功率电子技术发展以来,电机的控制技术已发生了巨大的变化。

从电机原理的学习已知,直流电动机的最大优点是有良好的调速特性,控制也比较简单,通过对电枢电压和激磁电压的分别控制,可以实现恒转矩调速和恒功率调速。所以在相当长的一段时间内,在调速范围、调速精度以及动态响应有一定要求的场合,直流电动机拖动起着主要作用。但直流电压的改变也非易事。在交流供电的场合,人们过去常采用电动机-发电机组为被控直流电动机单独供电,也就是由交流电动机、直流发电机、直流电动机以及励磁机等多

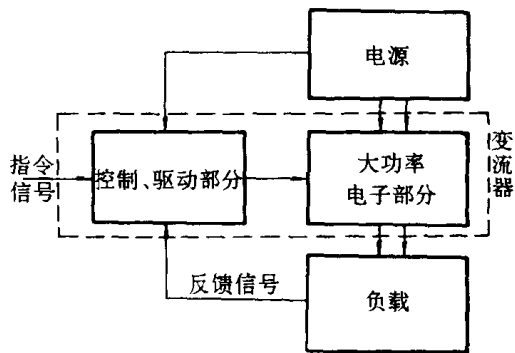


图 1-1 大功率电子技术作用示意图

台电机构成直流调速系统,投入的设备多,机构庞大,且不经济。大功率电子技术发展后,改用晶闸管可控整流装置供电组成晶闸管电动机系统,只需一台直流电动机即可,不仅结构简单,而且系统的动、静态指标都有提高,容易实现自动控制。

通过直流电网供电的直流电动机(例如机车直流电动机)需要调速时,过去常采用在电枢回路串电阻调速的方法,这种调速既浪费大量电能,调速又是有级的。现在可采用大功率半导体器件作直流开关,构成斩波器,对直流电压进行控制和调节。用此种斩波器对直流电动机供电,电动机起动平稳,操纵灵活,可实现无级调速和四象限运行,同时也大大提高了调速装置的效率。据估算,斩波器脉冲调速的电车与电阻器控制的电车相比,可节能 30%~40%以上,十分可观。这种调速方法已在地铁电机车、矿山机车、城市电车和工业电瓶车等交通运输工具上广泛应用。

直流电动机应用了大功率电子技术后,调速方法有了很大提高,但是直流电动机的机械换向器和电刷是它的致命弱点,由其引起的磨损、火花等问题既限制了它的应用场合(例如不能在有易燃、易爆气体的场合使用),又限制了电机向高转速、大容量的方向发展。在工业生产中最大量使用的交流电动机,特别是鼠笼式异步电动机,有着价廉、坚固耐用、无须维护等优点,但其特有的调速困难使它长期来无法取代直流电动机。人们自 30 年代以来就进行过大量的异步电动机的调速研究,亦知道它可以进行调压调速、串级调速和变频调速等,但因无合适的元器件可供使用,所以进展缓慢,能投入使用的交流调速系统极少。自 60 年代后,随大功率电子技术的飞速发展,使得采用半导体变流技术的交流调速系统得以实现。尤其是 70 年代以来,新一代有自关断能力大功率半导体开关元件的出现,以及大规模集成电路和计算机技术的飞速发展,为交流电力拖动的发展创造了极有利的条件。异步电动机的串级调速、变频调速在半导体变流装置的配合下已能轻易实现;新型无换向器调速电动机亦研制成功;特别是矢量变换控制技术的应用,使得交流电力拖动逐步具备了宽的调速范围、高的调速精度、快速的动态响应以及在四象限作可逆运行的良好技术性能。现代的交流调速系统其性能和价格已可与直流拖动系统相媲美。目前,许多技术先进的国家已实现了交流调速装置的系列化,它的广泛应用带来了巨大的经济效益。

由上述可知,现代交流电机的控制是和大功率电子技术紧密结合在一起的,有着广阔的前景。目前,世界各国对拖动技术研究重点都已转向交流调速技术,交流调速在各个工业技术领域中的应用将不断扩大。

然而,大功率电子技术在现代工业中的应用又远不止在电机控制上,例如还可用于高压直流输电、高频感应加热、UPS 电源和高频节能灯等等。作为本书的第一部分,我们首先介绍大功率电子技术的基础知识,以为下一部分电机控制的叙述打好基础。

§ 1-2 大功率半导体元件

一、半导体功率二极管

(一) 工作原理

大功率二极管的工作原理和一般二极管一样,基于 PN 结的单向导电性。当加上正向阳极电压时,PN 结正向偏置,二极管导通,元件呈现很小的正向电阻;加上反向阳极电压时,PN 结

反向偏置,二极管阻断,元件呈现很大的反向电阻。

大功率二极管主要用于交流整流电路中,流过的电流较大,一般都是采用硅材料制作的面结型功率器件。由于结面积较大,结电容也较大,因而工作频率较低,大多在 3kHz 以下。

(二) 功率二极管的伏安特性

二极管阳极和阴极间的电压 u_{ak} 和阳极电流 i_a 间的关系称为伏安特性,如图 1-2 所示。

第 I 象限是正向特性区,表明二极管处于正向导通状态。当加上小于 0.5 V 的正向阳极电压时,二极管只流过微小的正向电流;当正向阳极电压超过 0.5 V 时,正向电流急剧增加,曲线呈现与纵轴平行趋势,此时阳极电流的大小完全由外电路决定,二极管只承受一个很小的管压降 U_F ,约为 0.4~1.2 V。

第 III 象限是反向特性区,表明二极管处于反向阻断状态。当二极管加上反向阳极电压时,开始只有极小的反向电流,特性平行横轴,随着电压增加,反向电流有所增大。当反向电压增加到一定程度时,漏电流开始急剧增加,此时必须对反向电压加以限制,否则二极管将被反向电压击穿而损坏。

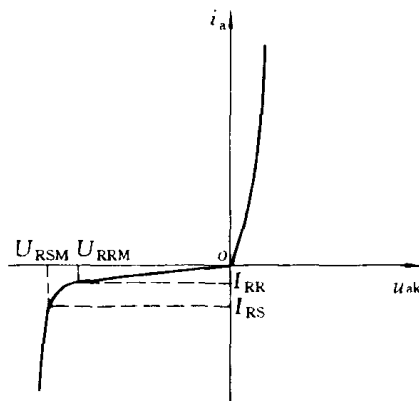


图 1-2 二极管的伏安特性

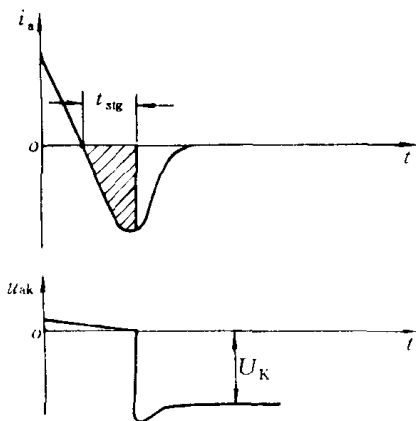


图 1-3 功率半导体二极管的切除

大功率二极管的开关特性的特点是延迟导通和延迟关断。在施加了正向电压后,功率二极管必须经过一定的时间延迟才能导通电流,这是因为载流子必须首先从高掺杂质部分注入 PN 结,只有当 PN 结中载流子达到足够浓度时管子才呈现导通状态,此现象称之为导通惯性。切除时,即施加反向电压时,电流减小到零后,还会在负的方向上继续流过电流,这是由于 PN 结中载流子的释放造成的,直至其中的载流子释放完,可以承受反向电压后,反向电流才急剧地降低到零值附近,管子两端才接受反向阻断电压,此现象称之为阻断惯性。由载流子释放而造成反向电流的这段时间称之为存贮时间 t_{stg} (见图 1-3),普通功率二极管的存贮时间约为 2~5 μs 。图中阴影线部分所示的电流-时间面积的大小为贮存电荷 Q_{stg} 。贮存电荷大小随阻断层温度、导通电流和换流电流的陡度增加而增大。

综上所述,我们在使用大功率二极管时,要注意它的两个特点:延迟导通和延迟关断;关断过程中会出现瞬时反向电流。

(三) 大功率二极管的主要参数

表 1-1 给出了具有普通型整流特性的 ZP 型大功率硅二极管 14 个系列元件的参数,现就其中最主要的参数说明如下:

1. 额定正向平均电流(额定电流) I_F

指在规定 +40℃ 的环境温度和标准散热条件下,元件结温达额定值且稳定时,容许长时间连续流过单相工频正弦半波电流的平均值,将此电流整流化到等于或小于规定的电流等级,则为该二极管的额定电流。

在选用大功率二极管时,应按元件允许通过的电流有效值来选取,对应额定电流 I_P 的管子,其有效值允许为 $1.57I_P$ 。

2. 反向重复峰值电压(额定电压) U_{RRM}

在额定结温条件下,元件反向伏安特性(第Ⅲ象限)急剧拐弯处所对应的反向峰值电压称为反向不重复峰值电压 U_{RSM} 。反向不重复峰值电压值的 80% 定义为反向重复峰值电压 U_{RRM} 。将 U_{RRM} 整化到等于或小于该值的电压等级,即为元件的额定电压。

3. 反向漏电流

反向不重复峰值电压 U_{RSM} 作用下的平均漏电流称为反向不重复平均电流 I_{RS} , 对应于反向重复峰值电压 U_{RRM} 下的平均漏电流称为反向重复平均电流 I_{RR} , 它们必须小于表 1-1 中规定的数值。

表 1-1 ZP 型大功率硅二极管参数

参数 系列	额定正向 平均电流 $I_P(A)$	反向重复 峰值电压 $U_{RRM}(V)$	反向不重复 平均电流 $I_{RS}(mA)$	反向重复 平均电流 $I_{RR}(mA)$	浪涌电流 $I_{PSM}(A)$	正向平均 电压 $U_F(V)$	额定结温 $T_{JM}(^{\circ}C)$	额定结 温升 $\Delta T_{JM}(^{\circ}C)$
ZP1	1	100~3000	≤ 1	≤ 1	40	0.4~1.2	140	100
ZP5	5		≤ 1	≤ 1	180			
ZP10	10		≤ 1.5	≤ 1.5	310			
ZP20	20		≤ 2	≤ 2	570			
ZP30	30		≤ 3	≤ 3	750			
ZP50	50		≤ 4	≤ 4	1260			
ZP100	100		≤ 6	≤ 6	2200			
ZP200	200		≤ 8	≤ 8	4080			
ZP300	300		≤ 10	≤ 10	5650			
ZP400	400		≤ 12	≤ 12	7540			
ZP500	500		≤ 15	≤ 15	9420			
ZP600	600		≤ 20	≤ 20	11160			
ZP800	800		≤ 20	≤ 20	14920			
ZP1000	1000		≤ 25	≤ 25	18600			

4. 正向平均电压 U_F

在规定的 $+40^{\circ}C$ 环境温度和标准的散热条件下,元件通以工频正弦波额定正向平均电流时,元件阳、阴极间电压的平均值,有时亦称为管压降。在大功率二极管的系列中,常按表 1-2 对 U_F 进行分组,并以大写英文字母表示组别。

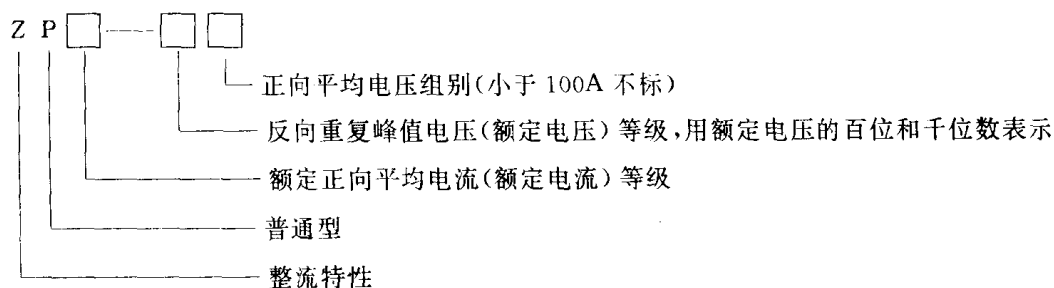
表 1-2 正向平均电压分组

组 别	通态平均电压(V)	组 别	通态平均电压(V)
A	$U_{F(AV)} \leq 0.4$	F	$0.8 \leq U_{F(AV)} \leq 0.9$
B	$0.4 \leq U_{F(AV)} \leq 0.5$	G	$0.9 \leq U_{F(AV)} \leq 1.0$
C	$0.5 \leq U_{F(AV)} \leq 0.6$	H	$1.0 \leq U_{F(AV)} \leq 1.1$
D	$0.6 \leq U_{F(AV)} \leq 0.7$	I	$1.1 \leq U_{F(AV)} \leq 1.2$
E	$0.7 \leq U_{F(AV)} \leq 0.8$		

元件发热与损耗同 U_F 有关,一般应选用管压降小的元件以降低元件的导通损耗。

(四) 大功率二极管的型号

根据机电部部标 JB 1144-75 规定, ZP 型大功率硅二极管型号及含义如下:



二、晶闸管

(一) 工作原理

晶闸管是四层(P, N, P, N)三端半导体器件, 图 1-4 是它的结构示意图, 在阳极 A 和阴极 K 之间形成了三个 PN 结 J_1 、 J_2 、 J_3 。如无控制信号, 则当阳、阴极间加正向电压时, 因 J_2 结处于反偏状态, 管子不能导通; 当加反向电压时, 由于 J_1 和 J_3 结起阻挡作用管子也处于阻断状态。

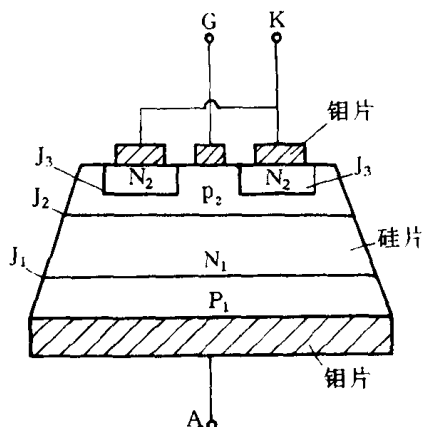


图 1-4 晶闸管的结构

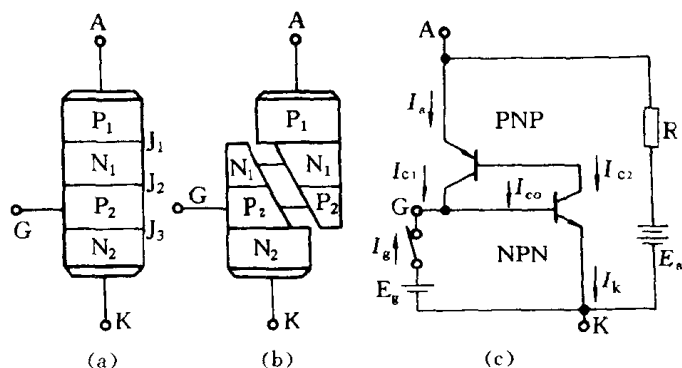


图 1-5 晶闸管等效工作原理

图 1-5 是晶闸管的工作原理图, 晶闸管的四层三端结构可看作一个 PNP 型三极管和一个 NPN 型三极管的复合联结。当阳、阴极间加正向电压, 同时在门极 G 注入正的电流 I_g , 由于二管间的强烈正反馈作用, $I_g \uparrow \rightarrow I_{c2} \uparrow \rightarrow I_a \uparrow \rightarrow I_{c1} \uparrow \rightarrow I_k \uparrow$, 造成两晶体管饱和导通, 即晶闸管的饱和导通。

设两个等效三极管的共基极电流放大系数分别为

$$\alpha_1 = \frac{I_{c1}}{I_a}, \quad \alpha_2 = \frac{I_{c2}}{I_k}$$

J_2 结的漏电流为 I_{co} , 则晶闸管阳极电流:

$$I_a = I_{c1} + I_{c2} + I_{co} = \alpha_1 I_a + \alpha_2 I_k + I_{co} \quad (1-1)$$

如门极加入电流 I_g , 则晶闸管的阴极电流 $I_k = I_a + I_g$, 代入(1-1)式可得

$$I_a = \frac{I_{co} + \alpha_2 I_g}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (1-2)$$

晶体管的共基极电流放大系数是随发射极电流大小而变化的,发射极电流较小时 α 小,而发射极电流增大时, α 则显著增大。在加入门极电流 I_g 时,由于二管的正反馈作用, I_k 、 I_a 迅速增大, α_1 和 α_2 也迅速增大,当 $\alpha_1 + \alpha_2$ 增大到1时, I_a 增大到不可控的程度, I_g 失去作用,这时晶闸管电流仅由外加电压和负载电阻所决定, I_g 为零,甚至为负,都不能改变晶闸管的导通状态。为使晶闸管关断,可以降低外加电压,或者增大回路电阻,使晶闸管的阳极电流降低到所谓的维持电流 I_H 以下,系数 α_1 、 α_2 将迅速下降,晶闸管恢复阻断状态。

综上所述,晶闸管的导通条件是阳极电位比阴极高,同时门极加上正触发脉冲信号,两个条件必须同时满足。一旦导通,电流只能单方向由阳极向阴极流动,而且即使去除门极信号,管子仍继续维持导通。欲使晶闸管关断,可给晶闸管加上反向阳极电压,使流过晶闸管的电流迅速降到维持电流 I_H 以下而关断。

(二) 晶闸管的伏安特性

晶闸管阳极与阴极之间电压同晶闸管阳极电流之间关系称晶闸管伏安特性,如图1-6所示。阳极伏安特性可以划分为两个区域:第Ⅰ象限正向特性区,第Ⅱ象限反向特性区。

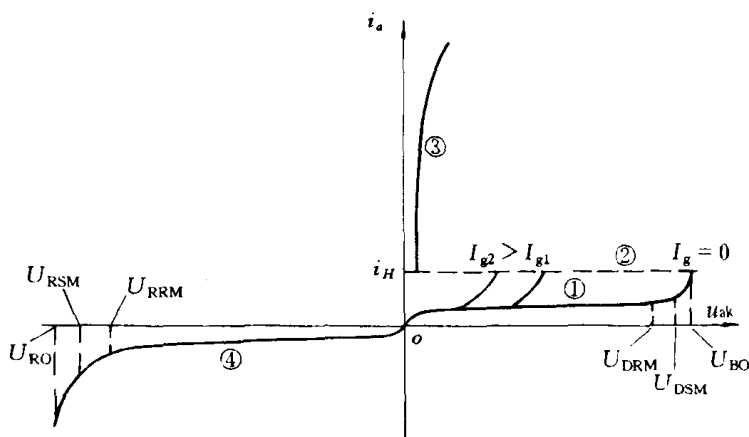


图 1-6 晶闸管阳极伏安特性

第Ⅰ象限的正向特性又可区分为正向阻断状态及正向导通状态。正向阻断状态随着不同的门极电流呈现不同的分支。例如,在 $I_g = 0$ 时,随着正向阳极电压 u_{ak} 的增加,由于 J_2 结处于反压状态,晶闸管处于断态,在很大范围内只有很小的正向漏电流,特性曲线很靠近并与横轴平行。当 u_{ak} 增大到正向转折电压 U_{BO} 时,晶闸管由阻断突然变成导通,即从阻断状态的高阻区

①(高电压、小电流)经过虚线所示的负阻区②(电流增大,电压减小),到达导通状态的低阻区③(低电压、大电流)。

正向导通状态的特性与一般二极管的特性一样,特性曲线靠近并几乎平行于纵轴。

当加上门极电压使 $I_g > 0$ 后,晶闸管的正向转折电压就大大降低,元件在较低的阳极电压下由阻断变为导通。当 I_g 足够大时,晶闸管的正向转折电压很小,一加上正向阳极电压管子就导通,晶闸管的正常导通应采取这种门极触发方式。

晶闸管正向阻断特性与门极电流 I_g 有关,说明门极可以控制晶闸管从正向阻断至正向导通的转化,即控制管子的开通。然而一旦管子导通,晶闸管就工作在与 I_g 无关的正向导通特性上。欲使管子关断,必须减小阳极电流 I_a ,当阳极电流减小到 $I_a < I_H$ 时,晶闸管才能从正向导通的低阻区返回到正向阻断的高阻区, I_H 称晶闸管的维持电流。

第Ⅱ象限的反向特性表达了反向阳极电压与阳极反向漏电流的关系,因在反向阳极电压作用下, J_1 、 J_3 结反向偏置,故元件反向被阻断,只有很小的反向漏电流流过,特性呈现反向高

阻状态,特性曲线靠近并平行于横轴,但当反向阳极电压升高到大于 U_{RO} ,即大于反向击穿电压时,反向漏电流急剧增加,晶闸管反向击穿而损坏。

(三) 晶闸管的主要参数

只有定性地了解晶闸管特性,定量地掌握晶闸管的主要参数,才能正确地使用晶闸管,表 1-3 至表 1-6 给出了 KP 型普通反向阻断型晶闸管 14 个规格的主要参数及门极参数,现简介如下:

表 1-3 晶闸管的主要参数

通态平均电流 $I_{T(AV)}$		断态重复峰值电压,反向重复峰值电压 U_{DRM}, U_{RRM}	断态重复峰值电流,反向重复峰值电流 I_{DRM}, I_{RRM}	维持电流 I_H	通态峰值电压 U_{Tm}	工作结温 T_j	断态电压临界上升率 du/dt	通态电流临界上升率 di/dt	浪涌电流 I_T	
单位	A	V	mA	mA	V	°C	V/ μs	A/ μs	kA	
1		50~1600	≤ 3	≤ 10	≤ 2.0				L 级 0.12	H 级 0.20
3		100~2000	≤ 8	≤ 30	≤ 2.2	-40~+100	A、B、C、D、E、F	A、B	0.35	0.056
5			≤ 10	≤ 60					0.064	0.09
10				0.12					0.13	
20				0.24					0.38	
30		100~2400	≤ 20	≤ 150	≤ 2.4		B、C、D、E、F、G	A、B	0.36	0.56
50			≤ 40	≤ 200					0.64	0.94
100		≤ 50			≤ 300	1.3	1.9			
200						B、C、D、E	2.5	3.8		
300							3.8	5.6		
400						B、C、D、E、F	5.0	7.5		
500							6.3	9.4		
600							7.6	11		
800							10	15		
1000			B、C、D、E、F、G	13		18				

表 1-4 断态电压临界上升率(du/dt)的级别

du/dt	25	50	100	200	500	800	1000
级 别	A	B	C	D	E	F	G

表 1-5 额定通态电流临界上升率(di/dt)的级别

di/dt	25	50	100	150	200	300	500
级 别	A	B	C	D	E	F	G