

高等学校教材

电力电子技术基础

上海交通大学 金如麟 主编

机械工业出版社

(京)新登字 054 号

本书是电机及其控制专业全国教学指导委员会所定的〔八五〕规划的教材之一。全书着重介绍各类基本的和新一代的电力电子元器件的性能、特点;各种不同功能的主电路结构和基本工作原理;可靠实用的保护与驱动电路。本书内容广泛,重点突出,反映了电力电子技术领域中的新技术、新动向,在编排次序上强调不同功能变流器的内在联系,并附有必要的思考题和习题。

本书适合高等院校电工类专业学生作教材之用,也可供电工行业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术基础/上海交通大学金如麟主编. -北京:机械工业出版社,1995.7

高等学校教材

ISBN 7-111-04624-2

I. 电… II. 金… III. 电力电子学-电子器件;电子元件-高等学校-教材 IV. ①TN103②TN6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(94)第 15928 号

出版人:马九荣(北京市百万庄南街1号 邮政编码 100037)

责任编辑:赖尚元 版式设计:王颖 责任校对:贾立萍

封面设计:姚毅 责任印制:卢子祥

三河永和印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

1995年7月第1版·1995年7月第1次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·11.5印张·278千字

0 001—2 400册

定价:14.00元

前 言

近年来,电力电子技术的飞速发展使电机控制技术发生了日新月异的变化,也使全国高等工业学校电机专业的专业方向上发生了重大变化。1991年全国高等工业学校电机专业教学指导委员会第五次全体扩大会议上正式通过将电机专业面拓宽和将专业名改为“电机及其控制”,并修订了相应的培养方案,《电力电子技术基础》列为本专业的必修课之一。1992年9月的第六次全体扩大会议上讨论本专业“八五”教材规划,确定《电力电子技术基础》教材为“八五”规划教材之一,会上讨论制定了该教材的编写大纲并确定了主编。本书是按这次会议所讨论的编写大纲编写的。

本书共分七章。第一章介绍了电力电子技术中所用的主要电力半导体开关元件的性能、特点,同时也介绍了近年出现的新一代电力电子元件,这是全书的学习基础,第二章和第三章阐述的各类变流器电路均是工作在交流电网上的,其开关元件均采用晶闸管,这类晶闸管电路能利用电网的交流电压实现电路的自然换流;相控调压、相控整流、有源逆变、反并联可逆电路一直到交-交变频电路的安排顺序能清楚地反映出这些功能截然不同的变流器电路本质上的共性。第四章、第五章和第六章所述的各种变流器乃是另一大类型,它们的工作电源是直流电源,如仍用晶闸管作开关元件,则此时变流器电路中的换流势必采用复杂而花钱多的强迫换流措施,因而这一大类型的变流器最适宜采用具有自关断能力的各类器件作开关元件,例如可关断晶闸管(GTO)、双极型大功率晶体管(GTR)、功率场效应管(MOSFET)等。对于这类变流器的主电路,我们按斩波器、二象限斩波器、四象斩波器、单相逆变器和三相逆变器的顺序依次叙述,将这些不同功能的变流器的主电路按内在关系有机地联系起来,可以加深读者对各种变流器的学习理解。第七章较详细地阐述了电力电子技术中一些常用的驱动控制电路和保护电路,这对正确设计和应用各类变流器是十分必要的。

本书第一章和第七章中第二节至第五节由上海交通大学谭弗娃教授编写,第二章、第三章中第九节和第七章中第一节部分由华中理工大学马志源副教授编写,第三章中第一节~第七节由华中理工大学贾正春副教授编写,主编负责其余章节的编写和全书的统稿,浙江大学贺益康教授作为主审认真地审阅了全书,浙江大学许大中教授、华中理工大学许锦兴教授和清华大学周明宝副教授参加了本书编写大纲的讨论、制定工作。本书编写过程还得到了中科院院士汪耕教授、上海交通大学白同朔教授、上海电器科学研究所秦和高级工程师、上海上普电力电子有限公司范钦德高级工程师等的大力支持,他们提出了许多宝贵的意见,编者在此表示由衷的感谢。

由于编者的经验、水平有限,书中难免有不妥甚至错误之处,恳请读者批评指正。

编者

1994年5月

目 录

前 言		
绪 论	1	
第一章 电力半导体器件	6	
第一节 电力半导体器件种类	6	
第二节 大功率二极管	6	
第三节 晶闸管	9	
第四节 特种晶闸管	16	
第五节 双极型大功率晶体管	20	
第六节 功率场效应管	24	
第七节 新型复合场控器件简介	28	
第二章 交流调压器	32	
第一节 交流调压器概述	32	
第二节 相控单相交流调压器	32	
第三节 相控三相交流调压器	36	
第三章 可控整流电路	39	
第一节 单相可控整流电路	39	
第二节 三相半波可控整流电路	52	
第三节 三相桥式可控整流电路理想 工作状态	60	
第四节 三相桥式全控整流的换流过程	67	
第五节 有源逆变电路	71	
第六节 负载性质对整流器的影响和 整流器的功率因数	78	
第七节 可控整流器主电路的参数选择	86	
第八节 两组晶闸管反并联的可逆电路	90	
第九节 交-交变频电路	92	
第四章 直流斩波电路	98	
第一节 直流斩波调压电路	98	
第二节 二象限直流斩波电路	102	
第三节 四象限直流斩波电路	105	
第四节 斩波器的控制方式	106	
第五章 逆变电路	109	
第一节 单相逆变电路	110	
第二节 三相逆变电路	113	
第三节 逆变器的多重化	125	
第六章 正弦脉宽调制 技术(SPWM 技术)	132	
第一节 正弦脉宽调制原理	132	
第二节 电流型逆变器的 PWM 技术	136	
第三节 晶体管 VVVF 变频器举例	136	
第七章 电力电子器件的驱动和 保护	141	
第一节 晶闸管触发电路	141	
第二节 大功率晶体管基极驱动电路	153	
第三节 GTO 门极驱动电路	159	
第四节 功率 MOSFET 的驱动电路	161	
第五节 电力电子器件的保护	161	
附录 A 电力电子技术常用专业名词 术语的中英文对照	173	
附录 B 思考题与习题	174	
参考文献	178	

绪 论

一、电力电子技术的任务和内容

近 30 年来,电子技术的发展突飞猛进,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。在这种发展过程中,十分引人注目的发展是:微电子技术和大规模集成电路的发展,以及电力电子技术的发展。前者的飞跃发展是人所共知的,而后的迅猛发展对许多人来说还是陌生的,但其发展势头和影响决不亚于前者,我们必须首先对电力电子技术作一概述性的介绍。

所谓的电力电子技术,是指使用现代可控的大功率半导体开关器件(例如 SCR、GTO、GTR、MOSFET、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 这种电能变换称之为整流。
- (2) 直流电→交流电 人们称这种变换为逆变。
- (3) 恒压直流电→大小可调的直流电 此种变换称为直流变换。
- (4) 恒频、恒压的交流电→频率、大小可调的交流电 可称为交流变换。

图 0-1 是电力电子技术作用示意图。从图可知,电力电子技术应包含下述诸方面内容:

1. 电力电子器件 主要研究在电能变换中所应用的各种大功率半导体开关器件的工作原理、特性以及设计、制造的技术。

2. 电力电子电路部分 用各类大功率半导体开关器件构成不同的电能变换主回路。这些基本主回路的构成、工作原理和设计计算等乃属电力电子技术的基础理论。

3. 控制和驱动部分 包括驱动主回路工作的触发电路和满足各种要求的控制电路。这部分内容涉及微电子技术、数字控制、检测反馈等信息处理与信号控制。

同样的电力电子电路,由于控制技术的改进,可使主电路性能大大提高。所以新控制方式的研究和新控制工具的应用亦是电力电子技术的重要内容。

4. 各种特殊应用 由能实现各类基本功能的电力电子电路组合起来,加上一定的微电子控制手段,籍以实现某种需要的电能变换或组成以控制为目的的工业应用装置,这是电力电子技术的应用领域。

由上述可知,电力电子技术是介于电气工程三大主要领域“电力”、“电子”和“控制”之间的交叉学科。

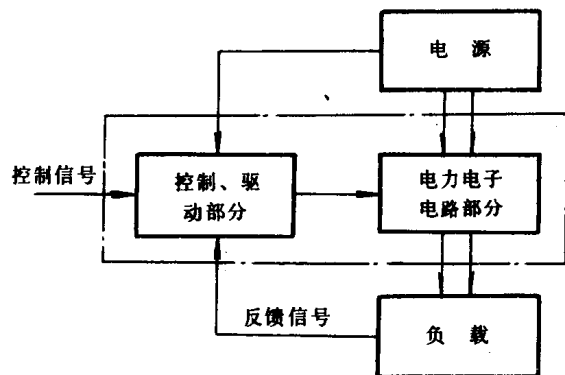


图 0-1 电力电子技术作用框图

二、电力电子技术的发展和意义

现代电力电子技术是从“变流技术”发展而来的，而这种变流技术的发展至今已有近百年的历史了。自电能开发后，人们就一直在寻求变换和控制电能的方法。早在本世纪初，为了使交流电源能给蓄电池充电，人们开始研究最简单的变流器，即不可控整流器。最初人们用周期性动作的机械开关来达到整流作用，其不足之处是不言而喻的。1902年，世界上第一只汞弧整流器制造成功，使变流技术出现了第一次飞跃。经过不断的改进提高，到30年代，用汞弧整流器件做成的各种可控和不可控整流器已在兆瓦级的功率范围内得到了广泛应用（例如充电设备、直流机车驱动、电解工业等）。此时的汞弧整流器件，工作电流最大达几千安，电压可达几千伏。

除上述汞弧整流器件外，人们还发展热阴极整流器件。这种器件充有惰性气体（主要是氩气），称之为闸流管（Thyratron）。这种闸流管在整流电流为20A时，工作电压可达15kV。

一直到50年代初，这种技术已趋于成熟，以汞弧整流器、闸流管等电真空器件为代表的器件一直是变流技术中的主要基本器件。变流技术的最大成就则在于整流技术。人们曾尝试研究从三相50Hz交流电网来产生50/3Hz单相交流电，以供电力机车牵引之用，但终因当时的技术限制而无法达到实用阶段。当时，变流技术的最大困难在于用当时可提供的元件来产生所需要的触发脉冲并非易事。

1957年，世界上第一只晶闸管（Thyristor）诞生，当时称之为“可控的硅整流器”（Silicon Controlled Rectifier——SCR）。这种新型的可控功率半导体的出现，使变流技术得到了第二次的飞跃发展，其重要性可以同晶体管的发明对通信技术发展的重要意义相提并论。在60年代，人们对它投入了很大力量进行开发研究，功率半导体元件和有关线路不断改进，新的应用不断出现。例如，晶闸管可控整流电路在大型直流拖动中的应用；静止变频器在交流拖动中的应用；新型无换向器电动机的研制成功等等。这里有两点决定性的因素：其一是半导体晶闸管比以往的汞弧整流器等器件在电性能上有了极大的提高，例如，它有较低的导通压降、良好的动态开关性能等，其体积、成本也更非汞弧整流器件等所能相比；其二是这期间在控制和调节部分所应用的半导体元器件性能有了飞快的进步，使得有可能容易实现广泛的控制和调节任务。

晶闸管作为第一代大功率半导体开关器件，给变流技术带来了革命性的转变，但它的最大不足之处是没有自关断能力。在许多应用场合，如静止变频器、直流斩波器等，必须采用强迫关断措施，从而大大增加了变流装置的成本和体积，也限制了它在不少场合的推广应用。另一方面，晶闸管的开关频率还是较低的，普通晶闸管仅适合在工频情况下应用，即便是所谓的快速晶闸管，一般也只能工作在1kHz以下，在一些性能要求较高的场合，它无法满足要求。

70年代，新一代的有自关断能力的大功率半导体开关器件问世，它们是可关断晶闸管（GTO）、双极型大功率晶体管（GTR）、大功率场效应管（Power-MOSFET）等。它们的自关断能力、高的开关频率（可达几~几十kHz）和简单的控制方法大大地扩大了电力电子技术的应用范围，尤其是在各种大功率的自动控制装置中得到了广泛的应用。这期间各种交流调速装置得到了很好的开发应用，各种系列的变频装置产品相继问世。

第二代功率半导体器件在应用中还有不足之处，例如GTO、GTR的开关频率较低（一般为几kHz），GTR的电压等级较低（一般在1.2kV以下）且容易发生二次击穿，MOSFET的

开关频率虽然高，但容量、耐压等级更低等等。这些不足限制了它们应用的进一步扩大。

80年代，世界上出现了第三代大功率半导体开关器件，这是各种复合型的场控功率半导体器件，典型的有：

SIT——高频大功率静电感应式晶体管；

SITH——静电感应式晶闸管；

IGBT——绝缘门极双极型晶体管；

MCT——MOS控制的晶体管等。

它们具有更高的开关频率（可达几十kHz~几百kHz）、更高的耐压等级，除了能更出色地完成GTO、GTR等元器件的功能外，还将应用领域扩大到了诸如高频感应加热（取代迄今为止所使用的庞大的电真空器件）、高质量的节能照明灯等场合。后者尤为引人注目，目前日本各主要公司对这方面的开发都已投入了极大的人力、物力。预计在几年之内新一代的照明灯具将全面推向市场，取代现有的照明灯，其影响将无法估量。对于这种第三代功率半导体器件的开发和应用研究，我国刚刚起步，不少方面还是空白。

当前，世界上的一些先进国家已在开发第四代功率半导体器件，即所谓集成功率半导体器件（PID）。

当然，新一代电力电子器件的出现并不意味着老一代产品的淘汰。确切地说，SCR、GTO和GTR这些产品更成熟了。目前，世界上SCR产量仍占电力电子器件的一半以上；日本东芝、富士、山肯等公司的GTR变频调速装置年产量都在数万台以上；GTO的应用技术上也已成熟，已有6000V、3000A的GTO供应市场。这些老一代的电力电子器件，仍在不同容量等级、不同场合下发挥着重要作用。

综上所述，从60年代以来，由于电力电子器件的发展，“变流技术”已逐渐扩大到了“电力电子技术”领域。经过30年的飞速发展，“电力电子技术”已发展成为横跨电力、电子和控制三大电工学科的一门范围广泛的新学科。电力电子技术的应用已在工农业生产、交通运输、科技领域以及人们的日常生活之中普及，而且正在发挥出越来越巨大的技术和经济效益。这里特别要指出是电力电子技术在节能方面的巨大意义。电能紧张是阻碍我国工农业生产发展的极大障碍，解决这一矛盾的方法有两个：一是建新电厂，二是节能。据统计资料，每建1kW的发电能力，平均投资如下：

火电	2700元；
水电	4000元；
核电	5300~8500元；
太阳能发电	23000~45000元。

如果在各种节能场合广泛地采用电力电子技术，则每节约1kW的电力平均可节约投资约600~1200元。再如日本，目前国民生产总值中的单产能耗是世界最低的，但日本科学技术厅的一份报告说：靠电力电子技术的广泛应用，可以把全日本总发电量的10%再节约下来。这是极其可观的数字。目前，发达国家发出的电能已有75%要经过各类电力电子技术变换后供用户使用，预计到下个世纪初这个百分比将达95%。而能源极其紧张的我国，目前却只有30%左右，所以，可以肯定地说，电力电子技术对我国国民经济的发展有着极其重要的意义。

三、电力电子技术对电机调速控制的作用

众所周知，电机控制归根结底就是对电机转矩和转速的控制。从电机原理的学习已知，直

流电动机的最大优点是具有良好的调速性能，控制也比较简单，通过对电枢电压和励磁电流的分别控制，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，直流电动机起着主要作用。但直流电压的改变在过去也非易事。在交流供电的场合，过去常采用电动-发电机组为直流电动机供电，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台电机构成直流调速系统，投入的设备多，机构庞大，不经济。电力电子技术发展后，改用晶闸管可控整流装置供电组成晶闸管电动机调速系统，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。

对由直流电网供电的直流电动机（例如机车牵引用直流电动机）需要调速时，过去常采用在电枢回路串电阻的调速方法。这种调速既浪费了大量电能，又是有级调速。如今我们可采用半导体电力电子器件作直流开关，构成所谓的直流斩波器，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，则电动机起动平稳，操纵灵活，可实现无级调速和四象限运行，也大大提高了调速装置的效率。实践证明，采用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%或更多，十分可观。这种调速方法已在地铁电机车、矿山电机车、城市电车和工业电瓶车等上广泛应用。

直流电动机应用电力电子技术后，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，它所引起的磨损、维护及火花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。而工业生产中最大量使用的交流电动机，特别是笼型异步电动机，有着价廉、坚固耐用、无须维护等优点，但其固有的调速困难使它长期以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，随电力电子技术的飞速发展，使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的大功率半导体器件的出现，大规模集成电路和计算机技术的迅速发展，以及现代控制理论的应用，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、变频调速在电力电子装置的配合下已容易实现；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调速范围宽、调速精度高、动态响应快以及能在四象限作可逆运行的良好技术性能，其调速系统的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和社会效益。特别是交流调速拖动，作为节能的一个重要手段，引起了人们的高度重视，这是因为交流拖动负荷在各国的总用电量中占有很大比重（在工业发达的国家，大多占一半以上）。以工业上大量使用的风机、泵、压缩机为例，这类机械都是采用异步电动机拖动，其用电量约占工业用电的50%左右。过去，这些机械在需要时大多靠调节风门、阀门来改变其流量，使得大量电能被白白浪费掉。如果采用电机调速方法来改变风机等的流量，则其效率可大为提高，至少可以减少10%的电能消耗，这对我国来说，就意味着每年节约近百亿度电。

由此可知，现代的电机控制装置和电力电子技术是紧密结合在一起的，有着广阔的发展前景。它既能使各类电机具备优良的调速性能，还可带来节约能源、减少维修费用、节省占地面积等好处，尤其在高速、大容量或工作在恶劣环境中的电机控制装置中更显示出它的优

点。目前，世界各国对电机的控制，特别是对交流电机调速技术的研究都给予了很大重视，使得交流调速电机在各个工业领域中的应用不断扩大。

对“电机及其控制”专业来说，电力电子技术是一门重要的必修课。然而，电力电子技术在现代工业中的应用又远不止在电机控制上，在高压直流输电、高频加热、不间断 UPS 电源、高频节能灯等方面均可应用。可以毫不夸张地说，电力电子技术是所有电工类专业的重要基础课。

第一章 电力半导体器件

第一节 电力半导体器件种类

一、第一代产品

第一代电力半导体器件的主要特征是没有自关断能力，如：

- ①二极管：其特点为单方向导通，且无法控制。
- ②晶闸管：有普通晶闸管、快速晶闸管、光触发晶闸管，其共同特点是能控制单方向导通，但无法控制关断。
- ③双向晶闸管：能控制双方向导通，但无法控制关断。

二、第二代产品

第二代电力半导体器件的主要特征是具有自关断能力，如：

- ①可关断晶闸管 GTO：其特点为能控制单方向导通，并能控制关断。
- ②大功率晶体管 GTR。
- ③大功率场效应管 Power-MOSFET。

三、第三代产品

第三代电力半导体器件是指一些性能优异的复合器件，如：

- ①静电感应式晶体管 SIT。
- ②静电感应式晶闸管 SITH。
- ③绝缘门极双极型晶体管 IGBT。
- ④MOS 控制的晶体管 MCT。

四、第四代产品

指功率集成器件 PID。

第二节 大功率二极管

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，即加上正向阳极电压时，PN 结正向偏置，二极管导通，呈现较小的正向电阻；加上反向阳极电压时，PN 结反向偏置，二极管阻断，呈现极大的反向电阻。

二、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 1-1 所示。

第 I 象限正向特性区，表现了正向导通状态。当加上小于约 0.5V 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约 0.5V 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 $0.4 \sim 1.2V$ 。

第Ⅲ象限为反向特性区, 表现了反向阻断状态。当二极管加上反向阳极电压时, 开始只有极小的反向漏电流, 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击穿而损坏。

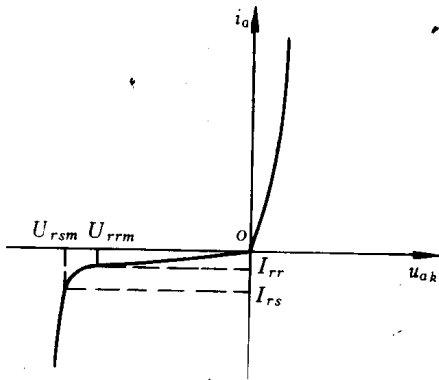


图 1-1 二极管的伏安特性

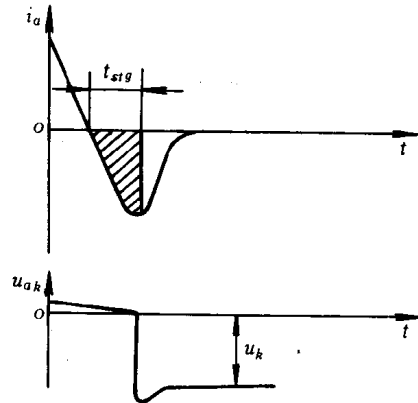


图 1-2 大功率半导体二极管的切除

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 (当然是很小的) 才能流过导通电流, 这是因为载流子必须首先从高掺杂部分注入 PN 结, 这称之为导通惯性。切除正向电压, 再施加反向电压时, 电流减小到零后, 还会在负的方向上继续流过, 直至基区的载流子释放完, 可以承受反向电压后, 反向电流才急剧地降低到零值附近, 管子两端才接受阻断电压, 这现象称之为阻断惯性。由于载流子释放而造成反向电流的这段时间称之为存储时间 t_{sg} (见图 1-2)。图中阴影线部分所示的电流-时间面积的大小为储存电荷 Q_{sg} 。储存电荷的大小随阻断层温度、导通电流和换流电流的陡度的增加而增大。

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; 关断过程中出现的瞬时反向电流, 这使它有别于普通的二极管。

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:

(一) 额定正向平均电流 (额定电流) I_p

指在规定 $+40^\circ C$ 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, 允许长时间连续流过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 的有效值为 $1.57I_p$ 。

(二) 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_{rrm} 。反向不重复峰值电压值的 80% 称为反向重复峰值电压 U_{rrm} 。再

将 U_{rm} 取整到等于或小于该值的电压等级,即为元件的额定电压。电压等级的规定与下面的晶闸管相同。

(三) 反向漏电流

反向不重复峰值电压 U_{rrm} 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 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} (A)	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} (°C)	额定结温升 ΔT_{jM} (°C)
ZP1	1		≤ 1	≤ 1	40			
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	100~3000	≤ 6	≤ 6	2200	0.4~1.2	140	100
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			

(四) 正向平均电压 U_F

在规定的 $+40^\circ\text{C}$ 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。

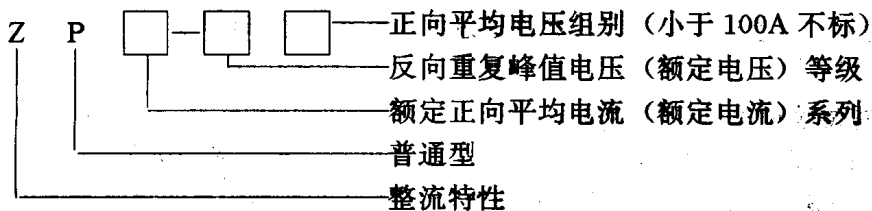
表 1-2 正向平均电压分组

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、损耗与 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

根据第一机械工业部标准 JB1144—75 规定, ZP 型大功率硅二极管型号及含义如下:



第三节 晶 闸 管

一、晶闸管的工作原理

晶闸管内部结构如图 1-3 所示,是一个四层 ($P_1-N_1-P_2-N_2$) 三端 (A、K、G) 的功率半导体器件。它是在 N 型的硅基片 (N_1) 的两边扩散 P 型半导体杂质层 (P_1 、 P_2), 形成了两个 PN 结 J_1 、 J_2 。再在 P_2 层内扩散 N 型半导体杂质层 N_2 , 形成第 3 个 PN 结 J_3 。然后在相应位置放置铝片作电极, 引出阳极 A、阴极 K 及门极 G, 形成一个四层三端的大功率半导体器件。

晶闸管的四层 ($P_1-N_1-P_2-N_2$) 结构, 在内部形成的三个 PN 结 J_1 、 J_2 和 J_3 可以看成是一个 PNP 型三极管和一个 NPN 型三极管的复合连接, 如图 1-4 所示。

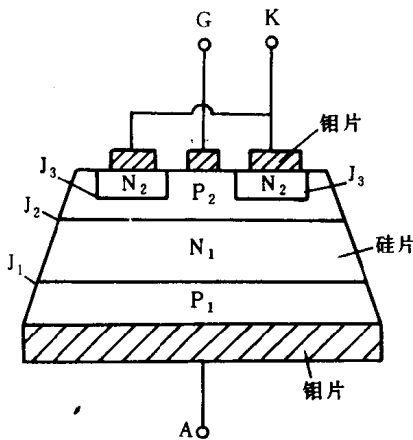


图 1-3 晶闸管结构

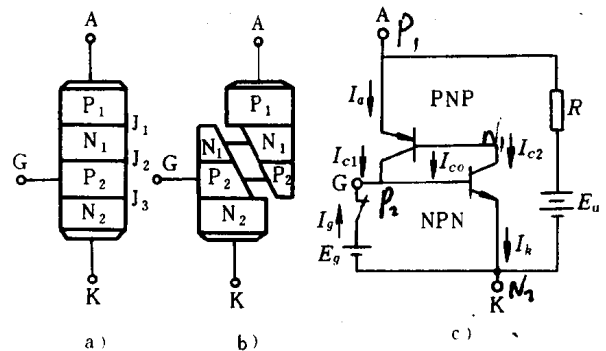


图 1-4 晶闸管工作原理图

可见, 一个晶体管的集电极电流就是另一个晶体管的基极电流, 如给门极注入足够的电流 I_g , 则两个复合连接的晶体管电路就会形成强烈的正反馈, 直至两个晶体管进入饱和导通, 即晶闸管导通。

设二个复合连接的晶体管的共基极电流放大系数为

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

正的阳极电压时, 处于反压状态下的 J_2 结反向漏电流为 I_{c0} , 则晶闸管阳极电流为

$$I_a = I_{c1} + I_{c2} + I_{c0} = \alpha_1 I_a + \alpha_2 I_k + I_{c0} \quad (1-1)$$

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

$$I_a = \frac{I_{c0} + \alpha_2 I_g}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (1-2)$$

两个等效晶体管的共基极电流放大系数 α_1 、 α_2 是随发射极电流作非线性变化的, 发射极电流较小时, α 小, 发射极电流增大时, α 显著增大。当 $\alpha_1 + \alpha_2$ 增大到近似等于 1 时, 阳极电流 I_a 将急剧增大, 变得无法从晶闸管内部进行控制, I_g 不再起作用, I_a 的大小仅由外加电压和负载电阻决定。此时即使 $I_g = 0$, 甚至为负, 都不能改变晶闸管的导通状态。为使晶闸管关

断，只能设法使导通晶闸管的阳极电流减小到所谓的维持电流 I_H 以下，系数 α_1 、 α_2 随之迅速减小。当 α_1 、 α_2 减小到 $1 - (\alpha_1 + \alpha_2) \approx 1$ 时， $I_a \approx I_{c0}$ ，晶闸管恢复阻断状态。

通过上述分析可知，四层结构的晶闸管具有如下特性：

①晶闸管导通的条件是：阳阴极间必须施加正向电压，控制极对阴极施加正的控制极电流。

②晶闸管在正向电压时是可控的，在反向电压时则完全处于关断状态，也就是说它具有单向导电性质。

③晶闸管一旦触发导通，控制极便失去作用，即元件的可控性是不可逆的。

二、晶闸管的伏安特性

晶闸管阳、阴极间电压与晶闸管阳极电流之间关系称作晶闸管伏安特性，如图 1-5 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 III 象限反向特性区。

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，特性曲线很靠近横轴并与横轴平行。当 u_{ak} 增大到正向转折电压 U_{B0} 时，晶闸管由阻断突然变成导通，即从阻断状态的高阻区③（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①（低电压、大电流）。

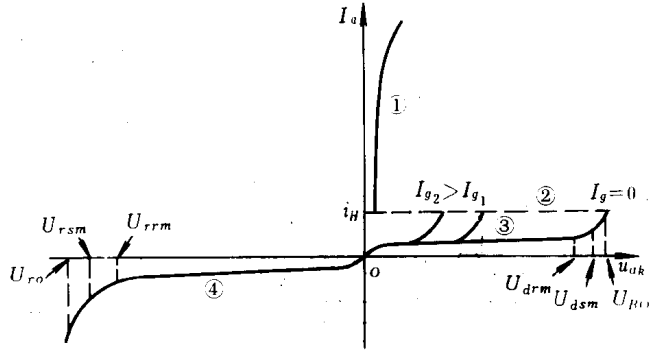


图 1-5 晶闸管伏安特性

- ①—正向导通低阻区
- ②—负阻区
- ③—正向阻断高阻区
- ④—反向阻断高阻区

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。

而当加上门极电压使 $I_g > 0$ 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，要关断管子，必须使阳极电流 I_a 减小。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。

第 III 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。因为在反向阳极电压作用下， J_1 、 J_3 结反向偏置，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，靠近并平行于横轴。但当反向阳极电压升高大于 U_{R0} ，即大于反向击穿电压时，反向漏电流剧烈增加，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, 对晶闸

表 1-3 晶闸管的主要参数

通态平均电流 I_{Ta}	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_{Tsm}		
单位	A	V	mA	mA	V	°C	V/ μ s	A/ μ s	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	0.036	0.056	
5			≤ 60					0.064	0.09	
10		≤ 10	≤ 100					0.12	0.19	
20			0.24					0.38		
30	100~2400	≤ 20	≤ 150	≤ 2.4	B, C, D, E, F, G	A, B, C	0.36	0.56		
50			≤ 200				0.64	0.94		
100	100~3000	≤ 40	≤ 300	≤ 2.6	-40~125	C, D, E, F, G	A, B, C	1.3	1.9	
200								B, C, D, E	2.5	3.8
300		≤ 50	≤ 300				B, C, D, E, F	3.8	5.6	
400							B, C, D, E, F	5.0	7.5	
500		—	—				—	B, C, D, E, F, G	6.3	9.4
600								7.6	11	
800								B, C, D, E, F, G	10	15
1000								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

管的常用参数简介如下:

(一) 晶闸管的电压定额

1. 断态重复峰值电压 U_{drm} 指门极开路, 元件结温为额定值, 允许重复加在元件上的正向峰值电压。重复峰值电压是指运行中操作过电压。对应的还有断态不重复峰值电压 U_{dsm} , “不重复”表示不可长期重复施加这个电压。不重复峰值电压通常由外因引起, 如雷击、断

表 1-6 晶闸管的门极参数

通态平均电流 I_{Ta} (A)	门极触发电流 I_{GT} (mA)	门极触发电压 U_{GT} (V)	门极不触发电压 U_{GD} (V)	门极正向峰值电流 I_{fgm} (A)	门极反向峰值电压 U_{rgm} (V)	门极正向峰值电压 U_{fgm} (V)	门极平均功率 $P_{g(av)}$ (W)	门极峰值功率 P_{gm} (W)				
1	≤ 20	≤ 2.5				6						
3	≤ 60											
5												
10	≤ 100	≤ 3.0				10						
20												
30												
50												
100	≤ 250	≤ 3.5				≥ 0.2			1	5	0.5	4
200						2			2	8		
300	≤ 350	≤ 4.0				3			3	15		
400												
500												
600												
800	≤ 450		4	16	4	20						
1000												

路等。 U_{dsm} 应比正向转折电压 U_{BO} 小，留的余量大小由生产厂定。而断态重复峰值电压 U_{drm} 则规定为断态不重复峰值电压 U_{dsm} 的 90%。

2. 反向重复峰值电压 U_{rrm} 指门极开路，元件额定结温时，允许重复加在元件上的反向峰值电压。同样规定反向重复峰值电压 U_{rrm} 为反向不重复峰值电压 U_{rrm} 的 90%。

3. 额定电压值 U_R 通常用 U_{drm} 和 U_{rrm} 中较小的那个数值，并取整至等于或小于该值的规定电压等级上，作为该晶闸管的额定电压。电压等级不能任意选定。在 1000V 以下，每 100V 一个等级，1000~3000V，则是每 200V 一个等级，选用晶闸管时，应取其额定电压为正常工作电压峰值的 2~3 倍，以便耐操作过电压。

(二) 晶闸管的电流定额

1. 通态平均电流 I_{Ta} 指在环境温度为 +40℃ 和规定的冷却条件下，晶闸管元件在电阻性负载的单相工频正弦半波电路中，导通角不小于 170°，稳定结温不超过额定值时，所允许的最大平均电流，并按标准取其整数作为该元件的额定电流。

晶闸管的额定电流用一定条件下的最大通态平均电流来标定，这是由于以往晶闸管较多地用于可控整流装置，而整流输出电流常需用平均电流衡量其性能。但规定平均电流作为电流定额不一定能保证晶闸管的安全使用，这是因为管芯的发热取决于流过管子的电流有效值。为了从发热角度保证晶闸管的安全运行，必须由额定平均电流求出对应的电流有效值。

根据通态平均电流 I_{Ta} (见图 1-6) 的定义可知，当正弦波电流的峰值为 I_m 时，

$$I_{Ta} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} I_m \sin \omega t d(\omega t) = \frac{I_m}{\pi} \quad (1-3)$$

而正弦半波的电流有效值为

$$I = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} (I_m \sin \omega t)^2 d(\omega t)} = \frac{I_m}{2} \quad (1-4)$$

令波形系数 K_f 为电流有效值和平均值之比, 则在正弦半波情况下, K_f 为

$$K_f = \frac{I}{I_{Ta}} = \frac{\pi}{2} = 1.57 \quad (1-5)$$

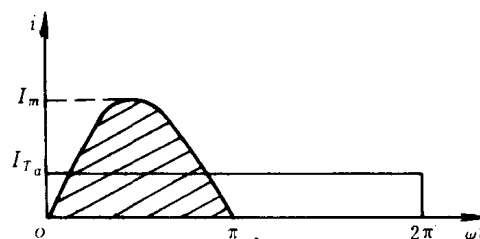


图 1-6 晶闸管通态平均电流

例如, 对一只额定电流 $I_{Ta}=100\text{A}$ 的晶闸管, 其允许的电流有效值应为 157A 。

晶闸管实际运行中流过的电流往往并不是正弦半波, 但不论流过晶闸管的电流波形如何, 只要实际电流的有效值等于与额定电流 I_{Ta} 对应的电流有效值, 则管芯的发热是等效的和允许的。

表 1-7 给出了几种不同波形时的波形系数, 可见它们与正弦半波时的波形系数 $K_f=1.57$ 相差很大。

表 1-7 几种不同波形时的波形系数

波 形	平均值 I_d 与有效值 I	波形系数 $K_f=I/I_d$
	$I_d = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} I_m \sin \omega t d(\omega t) = I_m/2\pi$ $I = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} (I_m \sin \omega t)^2 d(\omega t)} = I_m/2 \sqrt{2}$	2.22
	$I_d = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} I_m \sin \omega t d(\omega t) = 2I_m/\pi$ $I = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} (I_m \sin \omega t)^2 d(\omega t)} = I_m/\sqrt{2}$	1.11
	$I_d = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi/3} I_m d(\omega t) = I_m/3$ $I = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi/3} I_m^2 d(\omega t)} = I_m/\sqrt{3}$	1.73

对额定电流为 I_{Ta} 的管子, 其允许的有效值为 $I=1.57I_{Ta}$ 。不同波形系数时, 允许的有效值不变, 则其允许的平均电流应按

$$I_d = \frac{1.57I_{Ta}}{K_f} \quad (1-6)$$

来计算。当 $K_f > 1.57$ 时, 则该波形电流流过的晶闸管所允许的电流平均值应小于管子的额定电流 I_{Ta} ; 当 $K_f < 1.57$ 时, 该波形电流流过的晶闸管所允许的平均电流可大于管子的额定电