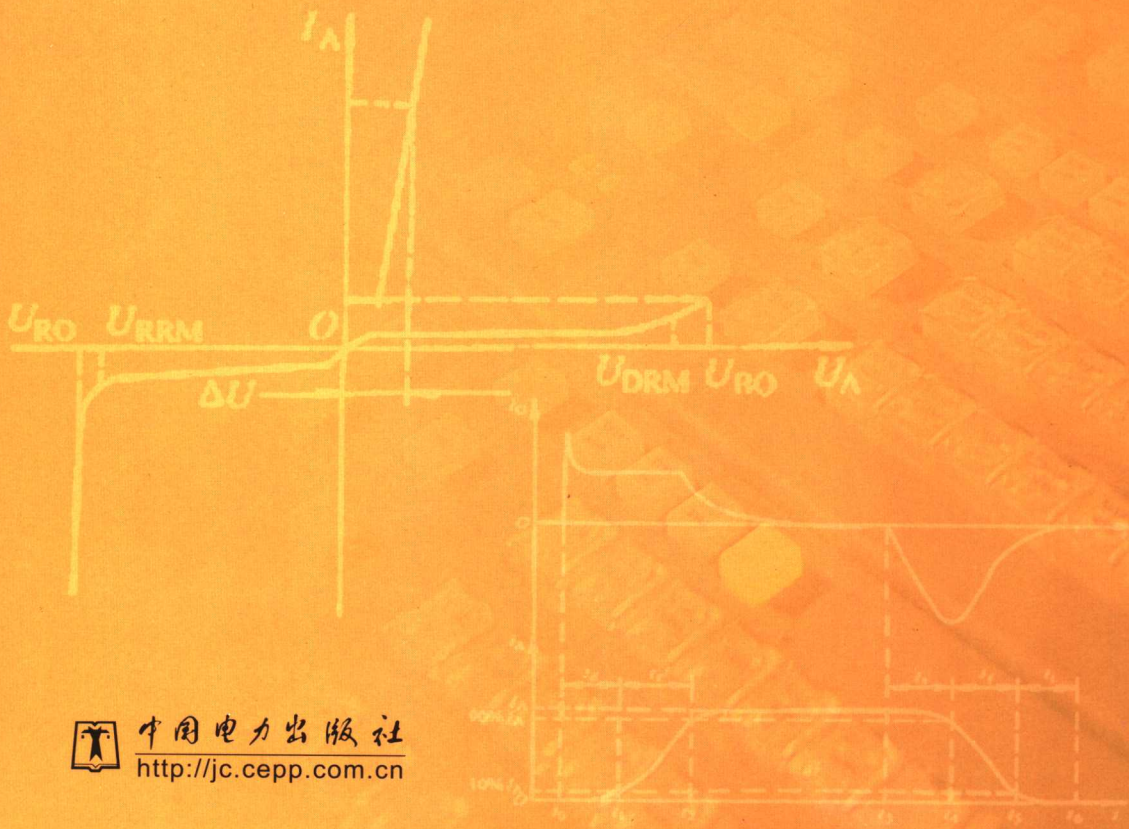




教育部职业教育与成人教育司推荐教材
职业教育电力技术类专业教学用书

电力电子技术

袁 燕 主编
王汉桥 副主编



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>



中国电力科学研究院
CHINA ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE
CHINA ELECTRICITY

电力电子技术

第 33 卷 第 11 期
2019 年 11 月



中国电力科学研究院
CHINA ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE
CHINA ELECTRICITY



教育部职业教育与成人教育司推荐教材
职业教育电力技术类专业教学用书

电力电子技术

主 编 袁 燕
副主编 王汉桥
编 写 刘 玮 宋廷臣
主 审 赵文建 朱 琼 李雅轩



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为教育部职业教育与成人教育司推荐教材。

本书主要包括电力电子器件、晶闸管可控整流电路、触发电路、有源逆变电路、交流变换电路、直流斩波电路以及无源逆变电路，并介绍了几种典型电力电子装置的工作原理和应用。

本书可供普通高等职业院校、高等专科学院、成人高校的供用电技术、发电厂及电力系统运行、继电保护和工业电气自动化等电力技术类专业师生使用，也可供从事电力电子技术专业的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力电子技术/袁燕主编. —北京: 中国电力出版社, 2006
教育部职业教育与成人教育司推荐教材
ISBN 7 - 5083 - 4132 - 5

I. 电... II. 袁... 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 (2006) 第 012284 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>)

航远印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2006 年 3 月第一版 2006 年 3 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 11.75 印张 243 千字
印数 0001—3000 册 定价 15.20 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)

前言

本书为教育部职业教育与成人教育司推荐教材，是根据教育部审定的电力技术类专业主干课程的教学大纲编写而成的，并列入了教育部《2004~2007年职业教育教材开发编写计划》。本书经中国电力教育协会和中国电力出版社组织专家评审，又列为全国电力高等职业教育规划教材，作为高等职业教育电力技术类专业教学用书。

本书体现了职业教育的性质、任务和培养目标；符合职业教育的课程教学基本要求和有关岗位资格和技术等级要求；具有思想性、科学性、适合国情的先进性和教学适应性；符合职业教育的特点和规律，具有明显的职业教育特色；符合国家有关部门颁发的技术标准。本书既可以作为学历教育教学用书，也可作为职业资格和岗位技能培训教材。

本书以培养高等技术应用型人才为主导，注重概念，侧重应用，针对高职学生的特点，力求做到深入浅出，淡化较深的理论分析和复杂的数学推导，体现够用为度，实用为本，以应用为主的特点。在编写过程中，以晶闸管为基础，全面阐述了由晶闸管组成的各种电力电子电路的工作原理及其应用。同时也充分考虑到教材的先进性，介绍了目前应用广泛的全控型电力电子器件及其典型应用，以适应现代电力电子技术发展的需要，为学生学习后续课程或将来从事技术工作打下一定的基础。书中每章后附有大量的习题，以帮助学生巩固所学知识。

本书由武汉电力职业技术学院袁燕任主编，武汉电力职业技术学院王汉桥任副主编，河北工程技术专科学校刘玮和武汉电力职业技术学院宋廷臣为参编。编写分工为：袁燕编写第2、7章，王汉桥编写绪论和第1、3、4章，刘玮编写第5、6章，宋廷臣编写第8章、实训。武汉电力职业技术学院赵文建、保定电力职业技术学院朱琼和天津职业大学李雅轩担任主审，并提出了许多宝贵意见，在此表示衷心的感谢。同时在编写过程中，参阅了大量参考文献，在此也对本书所用参考文献的作者致以衷心的感谢。

由于编者学识水平有限，书中难免有疏漏和错误，恳请同行专家、广大读者批评指正。

编者

2005年11月

目 录

前言	
绪论	1
第1章 电力电子器件	3
1.1 电力二极管	3
1.1.1 电力二极管的结构和工作原理	3
1.1.2 电力二极管的特性与参数	4
1.2 晶闸管	5
1.2.1 晶闸管的结构与工作原理	5
1.2.2 晶闸管的特性和参数	8
1.2.3 晶闸管派生型器件	13
1.3 典型全控型电力电子器件	16
1.3.1 可关断晶闸管(GTO)	16
1.3.2 电力晶体管 GTR	18
1.3.3 电力场效应管(功率 MOSFET)	23
1.3.4 绝缘栅双极晶体管(IGBT)	26
1.3.5 其他新型电力电子器件	28
习题	36
第2章 晶闸管可控整流电路	39
2.1 单相可控整流电路	39
2.1.1 单相半波可控整流电路	39
2.1.2 单相全控桥式整流电路	44
2.1.3 单相半控桥式整流电路	49
2.2 三相可控整流电路	50
2.2.1 三相半波可控整流电路	51
2.2.2 三相桥式全控整流电路	55
2.3 可控整流电路的换相压降	58
2.3.1 换相期间电压电流波形分析	58
2.3.2 换相压降和换相重叠角的计算	59
2.4 晶闸管的保护与容量扩展	60
2.4.1 晶闸管的过电压保护	60
2.4.2 晶闸管的过电流保护与电压、电流上升率的限制	62
2.4.3 晶闸管的串联和并联	63
习题	65
第3章 晶闸管的触发电路	67
3.1 概述	67

3.1.1	对触发电路的要求	67
3.1.2	触发电路的类型	67
3.2	简易触发电路	68
3.2.1	简易触发电路举例	68
3.2.2	应用举例	69
3.3	单结晶体管触发电路	69
3.3.1	单结晶体管	69
3.3.2	单结晶体管自激振荡电路	71
3.3.3	单结晶体管同步触发电路	72
3.4	集成触发电路和数字式移相触发电路	73
3.4.1	KC04 移相集成触发电路	73
3.4.2	KC41C 六路双脉冲形成电路	74
3.4.3	集成三相触发电路	75
3.4.4	数字式移相触发电路	75
3.5	触发脉冲与主电路电压的同步	77
3.5.1	同步的概念与实现的方法	77
3.5.2	同步举例	78
	习题	81
第4章	有源逆变电路	83
4.1	有源逆变电路的工作原理	83
4.1.1	有源逆变电路的基本概念	83
4.1.2	有源逆变的基本工作原理	84
4.2	三相有源逆变电路	86
4.2.1	三相半波有源逆变电路	86
4.2.2	三相桥式有源逆变电路	87
4.3	逆变失败的原因及防止对策	90
4.3.1	逆变失败的原因分析	90
4.3.2	防止有源逆变失败的对策	91
	习题	92
第5章	交流变换电路	93
5.1	交流电力电子开关电路	93
5.2	交流调压电路与交流调功电路	93
5.2.1	单相交流调压电路	94
5.2.2	三相交流调压电路	97
5.3	交交变频电路	102
5.3.1	单相交交变频电路	102
5.3.2	三相交交变频电路	104
	习题	105
第6章	直流斩波电路	106
6.1	基本斩波电路	106
6.1.1	降压型斩波电路	106
6.1.2	升压型斩波电路	108

6.1.3 升-降压型斩波电路	109
6.2 其他斩波电路	111
6.2.1 复合斩波电路	111
6.2.2 多相多重斩波电路	112
习题	113
第7章 无源逆变电路	114
7.1 无源逆变电路的基本概念	114
7.1.1 无源逆变电路的基本工作原理	114
7.1.2 无源逆变电路的换流方式	114
7.1.3 无源逆变电路的分类	115
7.2 单相逆变器	116
7.2.1 单相半桥逆变电路	116
7.2.2 单相全桥逆变电路	117
7.3 三相逆变器	118
7.3.1 电压型三相桥式逆变电路	118
7.3.2 电流型三相桥式逆变电路	120
7.4 脉冲宽度调制 (PWM) 型逆变器	121
7.4.1 SPWM 控制技术的基本原理	121
7.4.2 PWM 逆变电路的控制方式	122
7.4.3 PWM 型逆变电路	123
习题	125
第8章 典型电力电子应用	126
8.1 开关稳压电源	126
8.1.1 开关电源的工作原理	126
8.1.2 IGBT 管的控制与驱动电路	130
8.2 不间断电源 (UPS)	131
8.2.1 UPS 的分类与技术指标	131
8.2.2 单相在线式 UPS 应用实例	133
8.3 变频调速装置	135
8.3.1 变频调速的基本控制方式和分类	136
8.3.2 PWM 变频调速装置	137
* 8.4 三相移相触发集成电路 TC787/TC788 应用	138
8.4.1 TC787 (TC788) 介绍	138
8.4.2 TC787/TC788 应用举例	143
附录	146
实验一 单结晶体管触发电路及单相半控桥式整流电路	146
实验二 锯齿波触发电路与三相全控桥式整流电路	147
实验三 三相半波有源逆变电路的性能研究	151
实验四 IGBT 斩波电路的研究	152
参考文献	155

绪 论

电力电子技术是一门利用电力电子器件进行电能变换和控制的技术,包括电压、电流、波形、频率和相数的变换。它是一门交叉于“电力”、“电子”与“控制”三大领域之间的边缘技术,包含电力电子器件、变流器电路、计算机辅助设计、模拟电子学、数字电子学、微型计算机、控制理论、超大规模集成电路以及高频技术和电磁兼容等。它既是电子学在强电(高电压、大电流)领域的一个分支,又是电工学在弱电(低电压、小电流)领域的一个分支,因此电力电子技术可以说是强电与弱电相结合的新学科。

电力电子技术已渗透到生产、生活、建设、科研、国防、交通、医疗卫生、环保、航空管理、办公自动化等各个领域。虽然这些领域有相当一部分是直接利用工频交流电,但更多领域却是间接使用工频交流电,换句话说,都少不了使用电力电子技术。

1. 电力电子技术的研究内容及应用

电力电子技术就是利用电力电子器件组成相应的电路,同控制技术有效结合,实现电能变换的技术,按其电能变换功能划分,主要有以下几种类型:

整流器:将正弦交流电变换为固定或可调的直流电,简称交流—直流(AC—DC)变换。其主要用于充电、电镀、电解和直流电动机的调速等领域。

逆变器:将直流电变换为频率和幅值固定或可调的交流电,简称直流—交流(DC—AC)变换。其主要用于不间断供电电源(UPS)、各种变频电源、中频感应加热和交流电动机的变频调速等领域。

斩波器:将固定的直流电压变换为可调的直流电压,简称直流—直流(DC—DC)变换。其主要用于直流电压变换、开关电源、电车、地铁、搬运车等电气机车上所用直流电动机的牵引传动等场合。

交流变换器:将幅值和频率固定的交流电压变换为幅值和频率可调的交流电压,简称交流—交流(AC—AC)变换。其中改变交流电压幅值的交流变换器主要用于调温、调光、交流电动机的调压、调速等场合;能将50Hz工频交流电直接转换成其他频率的交流电的交—交变频器(频率变换器)。其主要用于交流电动机的变频调速。

2. 电力电子技术的发展历史及远景

电力电子技术的发展开始于上世纪初汞弧整流器的发明,真正的革命开始于1956年贝尔实验室发明晶闸管。1957年美国通用电气公司制成第一只工业用的晶闸管,这种大功率电力半导体器件的诞生及其性能指标上的优越性为电力电子技术的发展开辟了一条崭新的道路。在这之前,电能转换是依靠旋转机组来实现的。与旋转的变流机组相比较,利用电力电子器件组成静止的电能变换器,具有体积小、重量轻、无机械噪声、无磨损、效率高、易于控制、响应快及使用方便等优点。

经过四十多年的发展,电力电子技术的应用取得了极大进展,从开始的整流、交直流可调电源,到现在已应用了电化学生产、加热和照明控制、电焊接技术、电网无功和谐波补偿、高压直流输电系统、光电池和燃料电池的变换、电机直流调速和交流变频调速系统、固态断路、

感应加热、电机传动、中频电源和超声波电源，还出现了谐振变换技术，其频率达数兆赫兹。

今后，电力电子技术的发展趋势将会以碳化硅（SiC）等新一代半导体材料作为研究方向，这种材料制成的器件导通损耗很小，承受的电压很高，耐受的温度可达 150、250℃甚至 300℃，预计这种新型器件将在 5~10 年内出现。除此之外，做成集成电力电子模块（IPEM）也是个重要趋势。今后 10 年内，变频调速是电力电子装置的主要应用场合之一；电动汽车、航空航天等也一直是电力电子技术发展的推动力。

3. 电力电子技术的重要作用

20 世纪 60 年代的电力电子技术以省工和长寿命为重点。20 世纪 70 年代进入逆变器时代，并把节能放在首位。到了 20 世纪 80 年代，电力电子进入了自关断器件时代，其技术要求是小型、快速和高精度。20 世纪 90 年代是高频电力电子技术时代，而 2000 年以后，则是智能电力电子时代。

控制电路经历了由分立元件到集成电路的发展阶段。现在已有专为各种控制功能设计的专用集成电路，使变换器的控制电路大为简化。而微处理器和微型计算机的引入，特别是它们的位数成倍增加，运算速度不断提高，功能不断完善，使控制技术发生了根本的变化。同时将新的控制理论和方法应用在变换器中，使控制不仅依赖硬件电路，而且可利用软件编程，既方便又灵活。

(1) 优化电能使用。通过电力电子技术对电能的处理，使电能的使用达到合理、高效和节能，实现电能使用最佳化。例如，在节电方面，针对风机水泵、电力牵引、轧机冶炼、轻工造纸、工业窑炉、感应加热、电焊、化工、电解等几个方面的调查，潜在节电总量相当于 1990 年全国发电量的 16%。所以，推广应用电力电子技术是节能的一项战略措施，一般节能效果可达 10%~40%。我国已将许多装置列入节能的推广应用项目。

(2) 改造传统产业和发展机电一体化等新兴产业。据发达国家预测，今后将有 95% 的电能要经过电力电子技术处理后再使用，即工业和民用的各种机电设备中，有 95% 与电力电子产业有关。特别是，电力电子技术是弱电控制强电的媒介，是机电设备与计算机之间的重要接口，它为传统产业和新兴产业采用微电子技术创造了条件，成为发挥计算机作用的保证和基础。

(3) 电力电子技术高频化和变频技术的发展，将使机电设备突破工频传统，向高频化方向发展。实现最佳工作效率，将使机电设备的体积减小为原来的几分之一，甚至几十分之一。响应速度达到高速化，并能适应任何基准信号，实现无噪声且具有全新的功能和用途。

(4) 电力电子智能化的进展，在一定程度上将信息处理与功率处理合二为一，使微电子技术 with 电力电子技术一体化，其发展有可能引起电子技术的重大改革。有人甚至提出，电子学的下一项革命将发生在以工业设备和电网为对象的电子技术应用领域，电力电子技术将把人们带到第二次电子革命的边缘。

4. 学习要求

电力电子技术是电气工程及其自动化、工业电气自动化等专业的一门专业性较强，且与生产实践联系紧密的课程。在学习本课程时，要着重物理概念与基本分析方法，理论联系实际，做到元件、电路、应用三结合。在学习方法上，要以变流装置中的主电路、触发电路、保护电路的工作原理等基本概念为主，抓住波形分析这个重要环节，进一步理解电路的工作特点和分析计算方法。同时在理解原理的基础上，重视实验，加强实践环节，从而培养设计、调试以及故障分析与排除的能力，达到发展创新的目的。

电力电子器件

在电气设备或电力系统中，把直接承担电能变换或控制任务的电路称为主电路。电力电子器件就是指可直接用于主电路中实现电能变换或控制的电子器件，它是电子器件的一大分支，能承受高电压和大电流，是弱电控制强电的纽带。

电力电子器件可分为三大类：通过控制信号能控制其导通而不能控制其关断的电力电子器件称为半控型器件，这类器件主要指晶闸管及其大部分派生器件；通过控制信号既能控制其导通，又能控制其关断的电力电子器件称为全控型器件（又称为自关断器件），这类器件的品种很多，如电力晶体管、功率场效应管、绝缘栅双极晶体管、门极可关断晶闸管等；不能用控制信号控制其通断的电力电子器件称为不可控器件，电力二极管就属于这类器件。

1.1 电力二极管

1.1.1 电力二极管的结构和工作原理

一、电力二极管的结构和符号

电力二极管也称为功率二极管，它是最早问世并得到广泛应用的电力电子器件。其结构和符号如图 1-1(a)、(b) 所示。电力二极管的核心部分就是一个 PN 结，它有两个引出电极，分别称为阳极 A 和

阴极 K，图形符号与中小功率的二极管一样，用 V 表示。它的外形通常有塑封式、螺栓式和平板式三种，如图 1-2 所示。由于电力二极管一般工作在大电流、高电压场合，必然会引起发热，使用时必须配备良好的散热器，以确保器件安全运行。

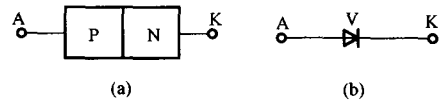


图 1-1 电力二极管的结构和符号

(a) 结构；(b) 符号

和阴极 K，图形符号与中小功率的二极管一样，用 V 表示。它的外形通常有塑封式、螺栓式和平板式三种，如图 1-2 所示。由于电力二极管一般工作在大电流、高电压场合，必然会引起发热，使用时必须配备良好的散热器，以确保器件安全运行。

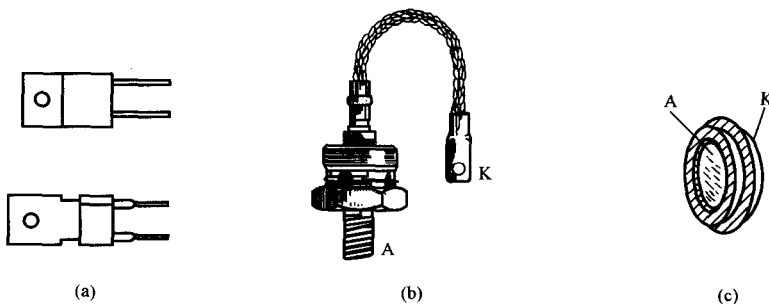


图 1-2 电力二极管的外形

(a) 塑封式；(b) 螺栓式；(c) 平板式

二、电力二极管的工作原理

电力二极管具有单向导电性，当加正向电压时元件导通，正向压降很小，正向电流较

大；当施加反向电压时，元件截止，反向电流很小。其实际伏安特性和理想伏安特性，如图 1-3 所示。

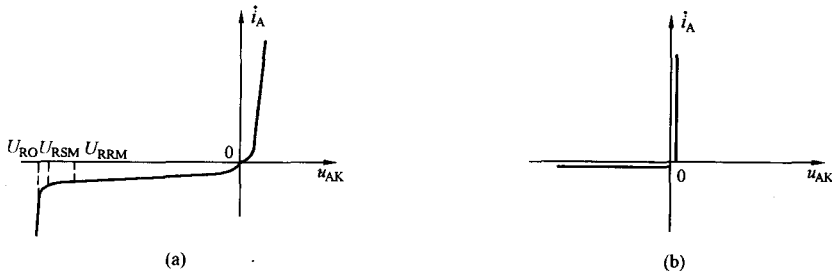


图 1-3 功率二极管的伏安特性
(a) 实际伏安特性；(b) 理想伏安特性

1.1.2 电力二极管的特性与参数

一、伏安特性

电力二极管的阳极和阴极间电压 u_{AK} 和流过管子的阳极电流 i_A 之间的关系称为伏安特性，如图 1-3 (a) 所示。当从零逐渐增大二极管正向电压时，开始阳极电流很小，这一段特性曲线很靠近横坐标轴。当正向电压大于 0.5V 时，正向阳极电流急剧上升，管子正向导通，如果电路中不接限流元件，二极管将被烧毁。

当二极管加上反向电压时，起始段的反向漏电流也很小，而且随着反向电压增加，反向漏电流只略有增大，但当反向电压增加到反向不重复峰值电压值 [图 1-3 (a) 中的 U_{RSM}] 时，反向漏电流开始急剧增加。如果对反向电压不加限制的话，二极管将被击穿而损坏。

二、主要参数

(1) 额定正向平均电流 I_F (额定电流)。若正弦电流的最大值为 I_m ，则正弦半波电流平均值为

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

式中： ω 为正弦波的角频率。

在规定的环境温度为 40°C 和标准散热条件下，元件 PN 结温度稳定且不超过 140°C 时，所允许长时间连续流过 50Hz 正弦半波的电流平均值。将此电流值取规定系列的电流等级，即为元件的额定电流。

(2) 反向重复峰值电压 U_{RRM} 。在额定结温条件下，取元件反向伏安特性不重复峰值电压值 U_{RSM} 的 80% 称为反向重复峰值电压 U_{RRM} 。将 U_{RRM} 值取规定的电压等级就是该元件的额定电压。

(3) 正向平均电压 U_F 。在规定环境温度 $+40^\circ\text{C}$ 和标准散热条件下，元件通过 50Hz 正弦半波额定正向平均电流时，元件阳极和阴极之间的电压的平均值，称为正向平均电压 U_F ，简称管压降，一般在 0.45~1V 范围内。

(4) 最大允许非重复浪涌电流 I_{FSM} 。这是二极管所允许的半周期峰值浪涌电流。该值比二极管的额定电流要大得多。实际上，它体现了二极管抗短路冲击电流的能力。

表 1-1 列出了常用电力二极管 ZP 型硅二极管的主要性能参数。

表 1-1 ZP 型硅二极管主要性能参数

参数 系列	额定正向 平均电流 I_F (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_{FSM} (A)	正向平 均电压 U_F (V)	额定结温 T_{jm} (°C)	额定结温 升 ΔT_{jk} (°C)
ZP1	1	100~300	≤ 1	< 1	10	0.4~1.2	140	100
ZP5	5		≤ 1	< 1	180		140	100
ZP10	10		≤ 1.5	< 1.5	310		140	100
ZP20	20		≤ 2	< 2	570		140	100
ZP30	30		≤ 3	< 3	750		140	100
ZP50	50		≤ 4	< 4	1260		140	100
ZP100	100		≤ 6	< 6	2200		140	100
ZP200	200		≤ 8	< 8	4080		140	100
ZP300	300		≤ 10	< 10	5650		140	100
ZP400	400		≤ 12	< 12	7540		140	100
ZP500	500		≤ 15	< 15	9420		140	100
ZP600	600		≤ 20	< 20	11160		140	100
ZP800	800		≤ 20	< 20	14920		140	100
ZP1000	1000	≤ 20	< 20	18600	140	100		

电力二极管属于功率最大的半导体器件，现在其最大额定电压和最大额定电流分别在 6kV、6kA 以上。额定电压最高的二极管，其额定电流不一定最高，反之亦然。二极管的参数是正确选用二极管的依据。一般半导体器件手册中都给出不同型号二极管的各种参数，以便选用。

1.2 晶 闸 管

晶闸管 (Thyristor) 就是硅晶体闸流管，普通晶闸管也称为可控硅整流器 SCR (Silicon Controlled Rectifier)。普通晶闸管是一种具有开关作用的大功率半导体器件，常简称为晶闸管，目前其容量水平已达 8kV/6kA。

1.2.1 晶闸管的结构与工作原理

一、晶闸管的结构

晶闸管是四层 ($P_1N_1P_2N_2$) 三端 (A 阳极、K 阴极、G 门极) 器件，它的外形及符号如图 1-4 所示。晶闸管的外形大致有塑封形、螺栓形和平板形三种。它有三个引出极：阳极 A、阴极 K 和门极 (也称控制极) G。

图 1-4 (a) 为塑封形，多见于额定电流 10A 以下；图 1-4 (b)、(c) 为螺栓形，螺栓端是阳极，它与散热器紧密地拧在一起，粗辫子是阴极，细辫子是门极。一般为 10A 以上、200A 以下。图 1-4 (d) 是平板形晶闸管，它是由两个彼此绝缘的散热器把晶闸管紧紧地夹在中间的，呈圆饼形，两侧分别是阳极和阴极，细辫子线为门极，离门极较近的一端为阴极，一般用于 200A 以上。

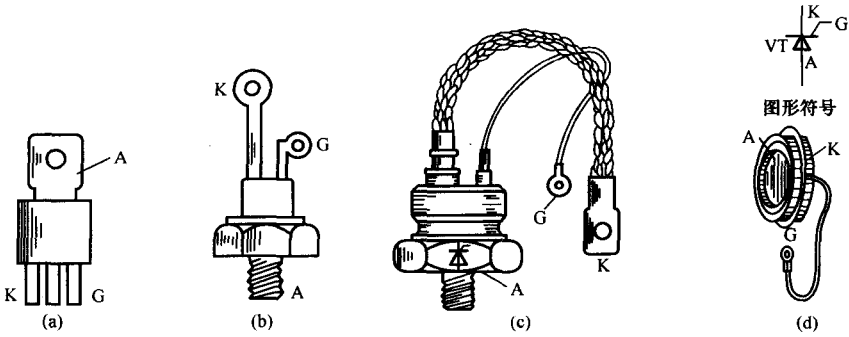


图 1-4 晶闸管的外形及符号

(a) 塑封形；(b)、(c) 螺栓形；(d) 平板形晶闸管

晶闸管的内部结构和等效电路如图 1-5 所示。

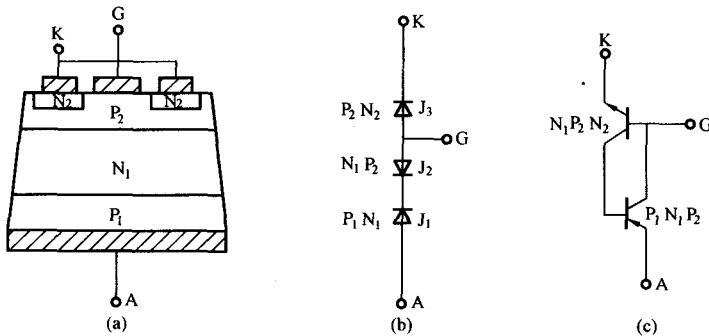


图 1-5 晶闸管的内部结构及等效电路

(a) 芯片原理结构；(b) 三个 PN 结等效电路；(c) 互补三极管等效电路

晶闸管工作时，由于器件损耗而产生热量，需要通过散热器降低管芯温度，器件外形是为便于安装散热器而设计的。图 1-6 给出了几种散热器的外形。

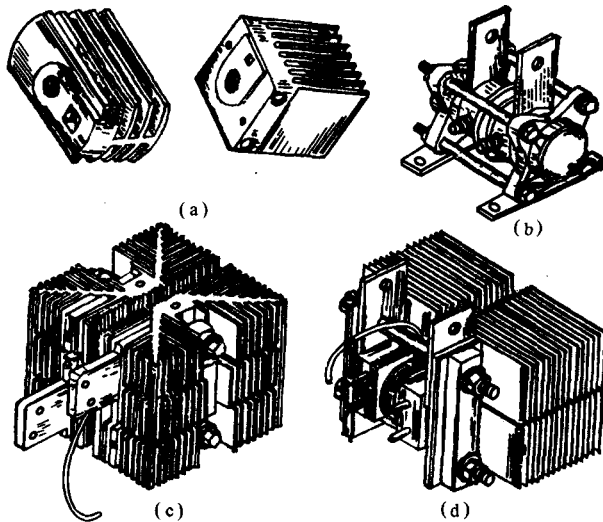


图 1-6 晶闸管的几种散热器

(a) 自冷；(b) 水冷；(c) 风冷；(d) 热管

二、晶闸管的导通和关断条件

晶闸管是具有可控单向导电性的开关元件，它的导通和关断条件可通过图 1-7 所示的实验电路来说明。主电源 E_a 和门极电源 E_g 通过双刀开关 S1 和 S2 正向或反向闭合接通晶闸管的有关电极，用灯泡和电流表来观察晶闸管的通断情况。

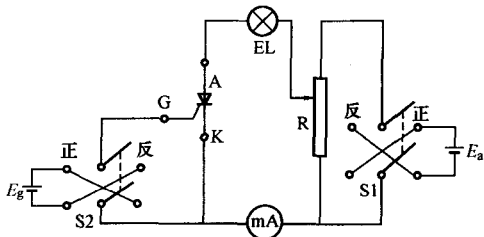


图 1-7 晶闸管的导通关断实验电路

实验步骤如下：

- (1) 当 S1 向左闭合，晶闸管承受反向阳极电压，不论 S2 正向或反向闭合即门极承受何种电压，灯泡都不亮，说明晶闸管处于关断状态。
- (2) 当 S1 向右闭合，晶闸管承受正向阳极电压，仅当 S2 正向闭合即门极也承受正向电压时灯泡才亮。
- (3) 晶闸管一旦导通，S2 不论正接、反接或者断开，晶闸管保持导通状态不变，说明门极失去了控制作用。
- (4) 要使晶闸管关断，可以去掉阳极电压，或者给阳极加反压；也可以降低正向阳极电压数值或增大回路电阻，使流过晶闸管的电流小于一定数值（维持电流）以下。

由以上实验结果，可得到如下结论：

- (1) 晶闸管的导通条件：在晶闸管的阳极和阴极之间加正向电压，同时在它的门极和阴极之间也加正向电压，两者缺一不可。
- (2) 晶闸管一旦导通，门极即失去控制作用，因此门极所加的触发电压一般为脉冲电压。晶闸管从阻断变为导通的过程称为触发导通。门极触发电流一般只有几十毫安到几百毫安，而晶闸管导通后，可以通过几百、几千安培的电流。
- (3) 晶闸管的关断条件：使流过晶闸管的阳极电流小于维持电流。维持电流是保持晶闸管导通的最小阳极电流。

三、晶闸管的工作原理

晶闸管的内部结构可以等效为两个互补连接的三极管，如图 1-5 (c) 所示，其中 N_1 和 P_2 区既是一个三极管的集电极，同时又是另一个管子的基极。晶闸管的工作原理可依此简单分析，如图 1-8 所示。

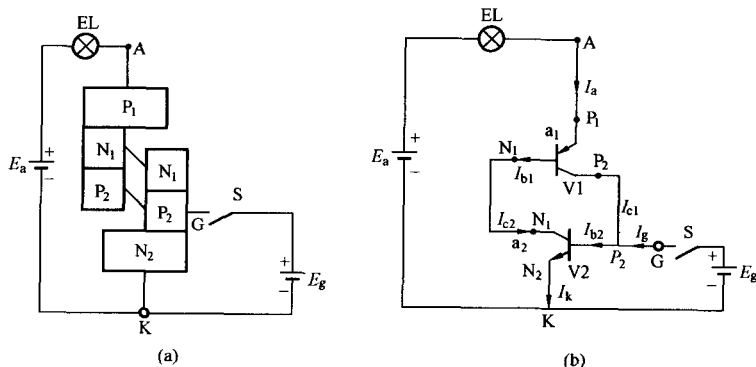


图 1-8 晶闸管的工作原理

(a) 等效成 PNP 和 NPN 管复合作用；(b) 内部电流关系

当晶闸管加上正向阳极电压，门极也加上足够的门极电压时，则有电流 I_g 从门极流入 NPN 管的基极，经 NPN 管放大后的集电极电流 I_{c2} 作为 PNP 管的基极电流，再经 PNP 管的放大，其集电极电流 I_{c1} 又流入 NPN 管的基极，如此循环，产生强烈的正反馈过程：

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

使两个晶体管很快饱和导通，从而使晶闸管由阻断迅速地变为导通。流过晶闸管的电流将取决于外加电源电压和主回路的阻抗的大小。

晶闸管一旦导通后，即使 $I_g = 0$ ，但因 I_{c1} 的电流在内部直接流入 NPN 管的基极，晶闸管仍将保持导通状态。若要晶闸管关断，只有降低阳极电压到零或对晶闸管加上反向阳极电压，使 I_{c1} 减少至 NPN 管接近截止状态，即流过晶闸管的阳极电流小于维持电流，晶闸管方可恢复阻断状态。

1.2.2 晶闸管的特性和参数

一、晶闸管的伏安特性

晶闸管的阳极与阴极间电压 U_{AK} 和阳极电流 I_A 之间的关系，称为晶闸管的伏安特性，

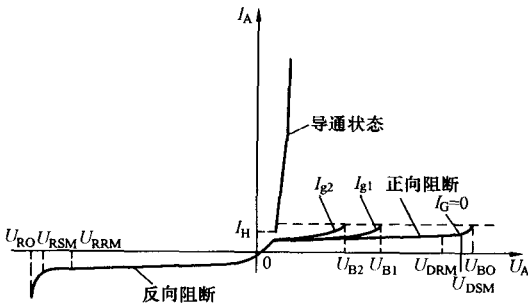


图 1-9 晶闸管的伏安特性

如图 1-9 所示。其特性可分为正向特性（第 1 象限）和反向特性（第 3 象限）。

(1) 正向特性。晶闸管的正向特性又有阻断状态和导通状态之分。在门极电流 $I_G = 0$ 情况下，逐渐增大晶闸管的正向阳极电压，这时晶闸管处于断态，只有很小的正向漏电流；随着正向阳极电压的增加，当达到正向转折电压 U_{BO} 时，漏电流突然剧增，特性从高阻区（阻断状态）经负阻区（虚线）到达低阻区（导通状态）。

导通状态时的晶闸管状态又和二极管的正向特性相似，即通过较大的阳极电流，而晶闸管本身的压降却很小。正常工作时，不允许把正向阳极电压加到转折值 U_{BO} ，而是从门极输入触发电流 I_G ，使晶闸管导通。门极电流愈大，阳极电压转折点愈低（图中 $I_{G2} > I_{G1} > 0$ ）。

(2) 反向特性。晶闸管的反向特性与一般二极管的反向特性相似。当晶闸管承受反向阳极电压时，晶闸管总是处于阻断状态。当反向电压增加到一定数值时，反向漏电流增加较快。再继续增大反向阳极电压，会导致晶闸管反向击穿，造成晶闸管损坏。

二、晶闸管的主要参数

为了正确使用晶闸管，保证其可靠工作，必须掌握晶闸管的主要参数及意义，其中一些主要参数的数值分别列于表 1-2~表 1-4 中。

表 1-2

晶闸管的主要参数

通态平均电流 $I_{T(AV)}/A$	断态正反向 重复峰值电压 $U_{DRM}、U_{RRM}/V$	断态正反向 重复峰值电流 $I_{DRM}、I_{RRM}/mA$	维持 电流 I_H/mA	通态峰 值电压 U_{TM}/V	工作 结温 $T_j/°C$	断态电压 临界上升率	通态电流 临界上升率 $dt/dt/A/\mu s$	浪涌电流 I_{Tm}/kA	
1	50~1600	≤3	≤10	≤2.0				L 级 0.12	H 级 0.20

续表

通态平均电流 $I_{T(AV)}/A$	断态正反向 重复峰值电压 $U_{DRM}、U_{RRM}/V$	断态正反向 重复峰值电流 $I_{DRM}、I_{RRM}/mA$	维持 电流 I_H/mA	通态峰 值电压 U_{TM}/V	工作 结温 T_j/C	断态电压 临界上升率	通态电流 临界上升率 $dt/dt/A/\mu s$	浪涌电流 I_{TM}/kA	
3	100~200	≤ 8	≤ 30	≤ 2.2	-40~+100	25~800	25~50	0.036	0.056
5			≤ 60					0.064	0.09
10		≤ 10	≤ 100					0.12	0.19
20			≤ 150					0.24	0.38
30	100~2400	≤ 20	≤ 150	≤ 2.4	-40~+125	50~1000	25~100	0.36	0.56
50			≤ 200					0.64	0.94
100	100~3000	≤ 40	≤ 200	≤ 2.6	-40~+125	100~1000	25~100	1.3	1.9
200								≤ 50	≤ 300
300		50~300	5.8				5.6		
400			5.0				7.5		
500			6.3				9.4		
600			7.6				11		
800		50~500	10				15		
1000			13				18		

1. 晶闸管的电压定额

(1) 正向断态重复峰值电压 U_{DRM} 。在图 1-9 晶闸管伏安特性中, 当门极开路, 元件处于额定结温时, 所测定的正向转折电压 U_{BO} , 由制造厂家规定减去某一数值 (通常为 100V), 得到正向不重复峰值电压 U_{DSM} (不可连续或重复施加), 将此值再乘以 0.9 即得正向断态重复峰值电压 U_{DRM} 。

(2) 反向阻断重复峰值电压 U_{RRM} 。在图 1-9 中, 当门极断开, 元件处于额定结温时, 所测反向击穿电压 U_{RO} , 同样将 U_{RO} 减去一定数值 (100V) 可得到反向不重复峰值电压 U_{RSM} , 再乘以 0.9 可得到反向重复峰值电压 U_{RRM} 。

(3) 额定电压 U_{TN} 。通常用实测的 U_{DRM} 、 U_{RRM} 中较小值, 按规定的标准电压等级就低取整数, 在晶闸管的型号上标出, 即为该晶闸管的额定电压。规定的标准电压等级: 在 1000V 以下, 每隔 100V 为一级; 1000V 到 3000V, 每隔 200V 为一级, 用百位数或千位和百位数表示级数, 见表 1-3。

表 1-3 晶闸管断态正反向重复峰值电压的等级

级别	断态正反向重复峰值电压 /V	级别	断态正反向重复峰值电压 /V	级别	断态正反向重复峰值电压 /V
1	100	8	800	20	2000
2	200	9	900	22	2200
3	300	10	1000	24	2400
4	400	12	1200	26	2600
5	500	14	1400	28	2800
6	600	16	1600	30	3000
7	700	18	1800		