

高职高专“十一五”规划教材

江苏省高等学校立项建设精品教材



# 电力电子技术基础

曹丰文 刘振来 祁春清 编著



中国电力出版社

[www.infopower.com.cn](http://www.infopower.com.cn)

高职高专“十一五”规划教材  
江苏省高等学校立项建设精品教材

# 电力电子技术基础

曹丰文 刘振来 祁春清 编著



中国电力出版社  
www.infopower.com.cn

江苏出版“十一五”专项教材

### 内容提要

本书是2005年江苏省高等学校重点立项精品教材。本书主要内容包括电力半导体器件、DC/DC变换器、DC/AC变换器、谐振开关变换器、AC/DC变换器、AC/AC变换器、电力电子技术的应用、单片开关电源模块和综合实训等，且每章后面都附有习题和实验。

本书适用于高等专科学校、高等职业学校、成人学校以及本科院校的二级职业技术学院和民办高校电类专业教育，也可供从事电力电子技术的工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术基础 / 曹丰文, 刘振来, 祁春清编著. 北京: 中国电力出版社, 2007.8  
高职高专“十一五”规划教材  
ISBN 978-7-5083-5656-3

I. 电… II. ①曹… ②刘… ③祁… 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(2007)第088767号

丛 书 名: 高职高专“十一五”规划教材

书 名: 电力电子技术基础

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市三里河路6号

邮政编码: 100044

电 话: (010) 68362602

传 真: (010) 68316497, 88383619

服务电话: (010) 58383411

传 真: (010) 58383267

E-mail: infopower@cepp.com.cn

印 刷: 汇鑫印务有限公司

开本尺寸: 185mm×233mm 印 张: 19.75 字 数: 454千字

书 号: ISBN 978-7-5083-5656-3

版 次: 2007年8月北京第1版

印 次: 2007年8月第1次印刷

印 数: 0001—4000册

定 价: 29.00元

### 敬告读者

本书封面贴有防伪标签, 加热后中心图案消失  
本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

# 前 言

近几年来电力电子技术有了更新的发展,应用成果层出不穷。在此期间我国高等教育教学改革也在不断深入,本着使课程紧跟新技术和教学改革的思想。我们编写了此书。目前,本书被列为江苏省高等学校重点立项精品教材。

本书在每章后增加了实验,特别是增加了专门的综合实训一章。综合实训将选择几个典型的电力电子装置让学生组装、调试,进一步加深学生对本课程的掌握。

本书的主要内容包括:电力半导体器件、DC/DC 变换器、DC/AC 变换器、谐振开关变换器、AC/DC 变换器、AC/AC 变换器、电力电子技术的应用、单片开关电源模块和综合实训等,且每章后面附有习题和实验。对于带“\*”的部分内容可以根据学时进行适当删减。本书一般可以满足 60~80 学时的教学使用。本书所介绍的实验都是在电力电子技术中比较典型的实验,还有一些实验限于篇幅并未列于其中。综合实训的内容可以作为此课程的课程设计来加强学生对技术知识学习能力的培养。

本书前言、绪论及第 8~10 章内容由曹丰文编写,第 5~7 章由刘振来编写,第 1~4 章由祁春清编写,全书由曹丰文统稿。

索迹老师提供了大量的插图以及实验、实训内容的开发、验证,为本书的编写提供了重要帮助,相会杰与季翼鹏老师对本书的文字校对作了大量工作,在此表示衷心的感谢。同时,对于书末所列参考文献的作者也表示衷心的感谢。

限于编者的学识水平,书中疏漏之处在所难免,在此殷切期望使用本书的读者批评指正。

编 者  
2007 年

# 目 录

前 言	
第 1 章 绪论	1
1.1 电力电子技术的定义	1
1.2 电力电子技术的内容	1
1.3 电力电子技术的形成与发展	2
1.4 电力电子技术的特点及应用	3
1.5 教学要求	4
第 2 章 电力半导体器件	5
2.1 概述	5
2.2 功率二极管	5
2.3 普通晶闸管	6
2.4 双向晶闸管	18
2.5 大功率晶体管 (GTR)	21
2.6 功率场效应晶体管	31
2.7 绝缘栅双极晶体管 (IGBT)	39
2.8 可关断晶闸管 (GTO)	49
实验一 电力晶体管 (GTR) 特性及其驱动电路的研究	57
实验二 绝缘栅双极晶体管 (IGBT) 特性与驱动电路的研究	64
习题	68
第 3 章 DC/DC 变换器	69
3.1 DC/DC 变换电路及其控制	69
3.2 降压式变换电路	70
3.3 升压式 (boost) 变换电路	77
3.4 升降压式 (buck-boost) 变换电路	81
3.5 库克 DC/DC 变换电路	85
3.6 全桥 DC/DC 变换电路	86
3.7 各种变换电路的比较	90
实验一 直流斩波电路 (升压、降压) 的性能研究	91
实验二 半桥型开关稳压电源的性能研究	93
习题	95
第 4 章 DC/AC 变换器	97
4.1 脉宽调制 (PWM) 技术	97

4.2	单相逆变器	102
4.3	三相逆变器	106
4.4	PWM 芯片的原理分析	111
	实验一 单相桥式有源逆变电路实验	125
	实验二 单相交直交变频电路的性能研究	127
	习题	129
<b>第 5 章</b>	<b>谐振开关变换器</b>	<b>130</b>
5.1	概述	130
5.2	基本谐振电路	133
5.3	负载谐振变换电路	136
5.4	谐振开关变换电路	149
5.5	零电压开关谐振直流环逆变电路	159
5.6	高频环整半周变换电路	161
	习题	162
<b>第 6 章</b>	<b>AC/DC 变换器</b>	<b>163</b>
6.1	单相半波整流电路	163
6.2	单相桥式可控整流电路	167
6.3	三相整流电路	176
6.4	高频脉冲整流电路	200
6.5	有源功率因数矫正器 (APFC)	202
	实验一 单结晶体管触发电路及单相半波可控整流电路	219
	实验二 单相桥式全控整流电路实验	222
	习题	224
<b>第 7 章</b>	<b>AC/AC 变换器</b>	<b>227</b>
7.1	交流调压变换器	227
7.2	交-交变频器	230
	实验一 单相交流调压电路实验	234
	实验二 三相交流调压电路实验	237
	习题	238
<b>第 8 章</b>	<b>电力电子技术的应用</b>	<b>240</b>
8.1	开关稳压电源	240
8.2	不间断电源	245
8.3	电子镇流器	249
8.4	蓄电池充电器	250
8.5	直流电动机调速及其可逆电路	252
8.6	交流电动机调速	254
	习题	258

*第9章 单片开关电源模块 .....	259
9.1 TOPSwitch 模块及其应用 .....	259
9.2 TinySwitch 模块及其应用 .....	289
第10章 电力电子技术实训.....	303
实训一 声光控延时开关实现.....	303
实训二 一种直流斩波器的设计 .....	303
实训三 灯光调节电路.....	304
参考文献.....	306

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 电力电子技术的定义

电力电子技术，又称功率电子学（Power Electronics），是一门利用电力半导体器件对电能进行控制和转换的学科。它包括电力电子器件、变流电路和控制电路三个部分，是现代控制理论、材料科学、电机工程、微电子技术等许多领域相互渗透的综合性新型工程技术学科。我国电力电子技术学会的会标如图 1-1 所示，非常形象地说明了电力电子技术是横跨“电力”、“电子”和“控制”三个领域的综合性学科。

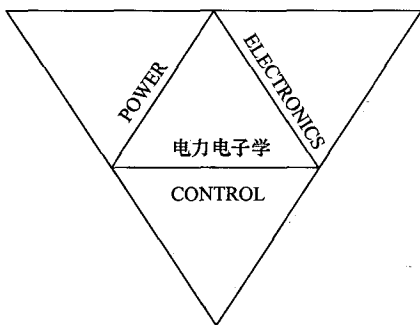


图 1-1 电力电子学会会标

## 1.2 电力电子技术的内容

电力电子技术主要研究各种电力半导体器件以及由这些电力电子器件所构成的各种电路和装置，其目的是高效地完成对电能的不同变换和控制。电力电子装置的功能如图 1-2 所示。

电力电子电路的根本任务是完成交流（AC）和直流（DC）的相互转换，它们之间的转换关系可以用图 1-3 形象地说明。这种转换可通过相应的变换器（Convertor）来实现。下面对其基本的转换形式分别加以说明。

(1) AC/DC 变换，即将交流电能转换为直流电能，也称为整流，所用的装置叫整流器（Rectifier）。晶闸管组成的整流器可将不变的交流电压变换为大小可控的直流电压，即实现可控整流。晶闸管可控整流能取代传统的直流发电机组实现直流电机的调速，广泛应用于机床、轧钢、造纸、纺织、充电、电解、电镀等领域。



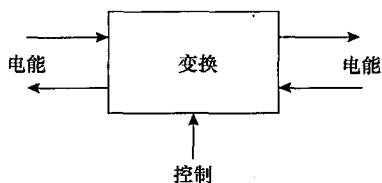


图 1-2 电力电子装置的功能

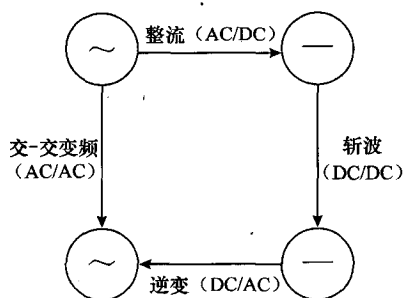


图 1-3 变流电路的基本功能

(2) DC/DC 变换，即将不可控的直流电能转换为可控的直流电能，也称为直流斩波。完成这一任务的电力电子电路称为斩波器 (Chopper) 或直流变换器，它主要用于直流电压变换，开关电源和电车、地铁、矿车、搬运车等直流电动机的牵引传动。

(3) DC/AC 变换，即将直流电能变换为交流电能，这是与整流相反的变换，也称为逆变。完成逆变的电力电子装置叫逆变器 (Inverter)。如果将逆变电路的交流侧接到交流电网上，把直流电逆变成同频率的交流电反送到电网中去，称为有源逆变，它用于直流电机的可逆调速、绕线型异步电机的串级调速、高压直流输电和太阳能发电等方面。如果逆变器的交流侧直接接到负载，则称为无源逆变，输出可以是恒频，用于如恒压恒频 (CVCF) 电源或不间断供电电源 (UPS)，也可以是变频 (这时变换器叫变频器)，如用于各种变频电源、中频感应加热和交流电动机的变频调速等。

(4) AC/AC 变换，即把交流电能的参数 (幅值、频率) 加以转换，称为交流变换电路。根据变换参数的不同，交流变换电路可以分为交流调压电路和交-交变频电路。交流调压电路是维持频率不变，仅改变输出电压的幅值，它广泛应用于电炉温度控制、灯光调节、异步电机的软启动和调速等场合。交-交变频电路也称直接变频电路或周波变流器 (Cycloconverter)，是不通过中间直流环节把电网频率的交流电直接变换成不同频率的交流电的变换电路，主要用于大功率交流电机调速系统。

### 1.3 电力电子技术的形成与发展

电子学的发展史表明，一种新器件的出现将对整个技术领域产生深刻的影响。由于 1946 年晶体管的诞生，开始形成固体电子学。1956 年晶闸管 (Thyristor) 的问世标志了电力电子技术的开端。以晶闸管为核心形成了对电力处理的电力电子技术，其发展的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。至 1980 年，传统的电力电子器件已由普通晶闸管 (又称可控硅 SCR) 衍生出了快速晶闸管、逆导晶闸管 (RCT)、双向晶闸管 (TRIAC)、不对称晶闸管 (ASCR) 等等，从而形成了一个 SCR 大家族。与此同时，各类 SCR 的电压、电流、 $du/dt$ 、 $di/dt$  等参数定额均有很大提高，开关特性也有很大改善，传统的电力电子器件已发展到相当成熟的地步。但由于它通过门极只能控制开通而不能控制关断，所以称之为半控

型器件；要想关断这种器件必须另加用电感、电容和辅助开关器件组成的强迫换流电路，这样将使整机体积增大，重量增加，效率降低，而且它立足于分立元件结构，工作频率难以提高，一般情况下难以高于 400Hz，因而大大地限制了它的应用范围。由于上述原因，以半控型器件 SCR 为代表的传统电力电子器件的发展已处于停滞状态，而一代新型电力电子器件正在迅速发展。

20 世纪 70 年代以后，国际上电力半导体技术突飞猛进，出现了通和断或开和关都能控制的全控型电力电子器件（亦称自关断型器件），如门极可关断晶闸管（GTO）、大功率或巨型晶体管（GTR）、功率场效应晶体管（Power MOSFET）和绝缘栅双极晶体管（IGBT）等。这就突破了以普通晶闸管半控型器件为主体的单一局面，从而形成了一个庞大的电力半导体器件家族。

20 世纪 80 年代以来，微电子技术与电力电子技术在各自发展的基础上相结合产生了一代高频化、全控型的功率集成器件，从而使电力电子技术由传统的电力电子技术跨入现代电力电子技术的新时代。

电力电子技术包括器件及其应用，即器件和电路或元件和装置两个方面，它们的发展是相辅相成、互相促进的。新器件的出现能开拓许多新的应用领域，产生新的装置；应用中出现的问题又对器件提出了新的要求，从而推动了新器件的研制。新一代器件的问世使得电力电子变换电路及其控制系统不断革新。例如，各种各样的脉宽调制（PWM）电路、零电流零电压开关谐振电路以及高频斩波电路等已成为现代电力电子技术的重要组成部分。这些新型电路的主要作用是使零频率的直流逆变成各种工作频率的交流，因此电力电子技术已由当年的顺变时代进入今天的逆变时代，而且新的电力电子器件还在不断出现，它的应用领域也日益广泛。

电力电子技术的发展还与控制技术的发展紧密相关。控制电路经历了由分立元件到集成电路（IC）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，使电力电子装置的控制电路大为简化。特别是微处理器和微型计算机的引入和网络技术的应用，使控制技术发生了根本的变化，即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，可使各种新颖的、复杂的控制策略和方案得到实现，并具有自诊断功能，甚至能获得有一定智能的电力电子装置。总之，同一电子电路或装置由于控制技术的提高，可以使电路或装置更加完善。

## 1.4 电力电子技术的特点及应用

电力电子技术的基本特点之一是能以小信号输入控制大功率的输出，放大倍数极大，这就是电力电子设备成为强、弱电之间接口的基础。微电子技术和计算机技术的新成就可以通过这一接口移植到传统工业上，进而可以促使传统产品的更新换代。如今，机电产品技术上的突破主要方向是电子化。电力电子器件的另一个基本特点是工作于开关状态，正向压降低而反向漏电流小，从而在理论上保证了各类电力电子设备所共有的节能性能。

电力电子技术应用非常广泛，国防军事、工业交通、农业商业、文体医药以至家用电器无不渗透着电力电子技术的新成就。

### 1. 电机的调速技术

过去的研究仅限于直流电机的控制与调速，与其相配套的是晶闸管可控整流。全控功率器件的发展推动了交流电动机变频调速技术的发展。交流电动机——异步机或同步机采用变频调速，将能带来巨大的节能效益。我国大型风机和泵类负荷占全国用量的 1/3，若采用变频调速可平均节能 20%，每年可节电 400 亿度，经济价值十分可观。

### 2. 照明

我国照明用电占总发电量的 12%。由于白炽灯发光效率低、热损耗大，所以现在广泛采用了日光灯。但是日光灯必须要有扼流圈（电感），起辉后，全部电流要流过扼流圈，无功电流大，功率因数低。近年来，电子镇流器的广泛使用较好地解决了这个问题。电子镇流器就是一个 AC/DC/AC 变换器，其体积要比相应功率的扼流圈小，可以减少有功损耗，功率因数可提高到 0.9 以上，其节能效益十分明显。

### 3. 高频开关电源

高频开关电源是一种 DC/DC，采用高频开关技术可以有效地缩小电源体积、减轻重量、提高功率密度和效率、提高输入功率因数，节能效果十分显著。例如，通信用电源、计算机电源等都采用高频开关电源。特别是手提式电脑的逐渐普及和移动通信用户的迅速增加，低压、小功率、微型化开关的电源将会有非常大的市场。

另外，电力电子技术在高压直流输电、电网净化技术、三相交流电网输入功率因数校正技术、不停电电源（UPS）、高频逆变焊机电源、汽车电子、家用电器等许多领域有着越来越广泛的应用。大力推广电力电子技术具有广泛的现实意义，和深远的、潜在的巨大经济和社会意义。

## 1.5 教 学 要 求

电力电子技术是自动化、自动控制、电气技术、电力系统及自动化、机电一体化、电机电气与控制等专业的一门技术基础课，又是一门专业课，其内容包括器件、电路、应用三个方面，但以电路为主。学习器件是为了应用器件组成电路，组成实际的电力电子装置。

学习本课程的基本要求是：了解各种功率开关器件的特性和参数，能正确选择和使用它们；了解各种交流电路的工作原理；了解各种开关元件的控制、驱动和保护电路的特点、性能指标和使用场合，掌握常用芯片的工作原理和使用方法；掌握常用的电力电子装置的结构、工作原理和一般故障分析与检修方法。

# 第2章 电力半导体器件

## 2.1 概 述

电力电子技术的核心和龙头是处于开关工作状态的电力半导体器件,器件特性的每一步新发展都引起了变换电路技术的相应突破。在电力半导体器件中,不能用控制信号控制其通断,器件的导通与截止完全是由自身在电路中承受的电压和电流来决定的,这类器件称为不可控器件,如功率二极管;通过控制信号能控制其导通而不能控制其关断的器件称为半控型器件,如晶闸管等;通过控制信号既能控制其导通,又能控制其关断的器件称为全控型器件。这类器件的品种很多,目前常用的有电力晶体管、功率场效应晶体管、门极可关断晶闸管和绝缘栅双极晶体管等。

全控型的电力半导体器件也被称做现代电力电子器件,根据器件内部载流子参与导电的种类的不同,又可分为单极型、双极型和复合型三类。只有一种载流子参与导电的称为单极型,如 Power MOSFET;器件内有电子和空穴两种载流子导电的称为双极型器件,如 GTR 和 GTO 等;由双极型器件与单极型器件复合而成的新器件称为复合型器件,如 IGBT 等。本章主要介绍已获广泛应用的电力半导体器件。

## 2.2 功率二极管

功率二极管 (Power Diode) 也称为半导体整流器 (Semiconductor Rectifier, SR), 属于不可控电力电子器件, 是 20 世纪最早获得应用的电力电子器件, 直到现在仍在高、中频整流及逆变等领域发挥着积极的作用。功率二极管是由一个面积较大的 PN 结和两端引线以及封装组成的, 现在也有做成模块式结构的。由于功率二极管流过很大的电流, 所以其中引线、焊接电阻压降等都有明显影响; 同时为了提高耐压, 掺杂浓度也造成较大的压降。功率二极管一般工作在大电流、高电压场合, 二极管本身耗散功率大、发热多, 使用时必须配备良好的散热器, 以使器件的温度不超过规定值, 确保运行安全。它的外形、结构、电气符号如图 2-1 中所示。

PN 结具有单向导电性。功率二极管的伏安特性如图 2-2 所示。正向偏置时, 当加于二极管的正向电压上升到一定值以后, 正向电流才开始明显增加, 表明二极管已经导通, 此时所对应的正向电压叫做二极管的门槛电压  $U_{T0}$ 。二极管导通时的正向电流  $I_F$  由外部电路决定, 与  $I_F$  相对应的二极管两端间的电压  $U_F$  即为正向通态压降。二极管导通时的正向通态压降很小, 约 1V。反向偏置时, 所加反向电压未超过反向转折电压  $U_B$  时, 只有很小的漏电流  $I_{RR}$ 。实际应用时, 所加反压不能超过反向转折电压  $U_B$ , 否则 PN 结内将产生雪崩击穿, 反向电流急剧

增大,从而导致二极管击穿损坏。与工作电路中通过二极管的电流及工作电压相比,二极管的漏电流和通态压降非常小,因此可认为二极管为理想器件。采用这种理想伏安特性可以对变换器拓扑结构进行理论分析,但不能用于实际设计。

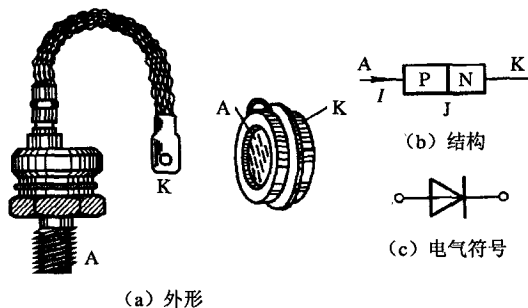


图 2-1 功率二极管的外形、结构和电气符号

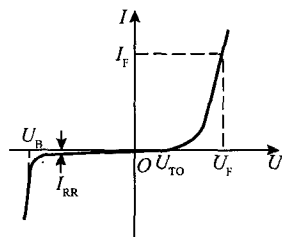


图 2-2 功率二极管的伏安特性曲线

二极管的导通时间很短,可以认为是瞬时完成,但关断时电流反向需要反向恢复时间,如图 2-3 所示。在感性负载电路中,这个反向恢复电荷可能导致电路中的过电压,但一般不影响变换器的特性。因此,关断瞬间可认为二极管为理想器件。

变换电路中常用的二极管有工频整流二极管、肖特基二极管和快恢复二极管。整流二极管就是普通二极管,多用于 1kHz 以下的整流电路中;由于工作频率低,反向恢复时间并不重要,一般为 25 $\mu$ s 左右,在参数表中甚至不列出这一参数。电流定额由小于 1A 到数百安,电压等级从 50V~5kV。肖特基二极管是肖特基势垒二极管的简称,又称为面垒二极管,常用 SBD 表示。它的通态压降很低,约 0.3V,漏电流较大,电压定额较低,反向电压也较低,为 50~100V,用于低压输出电路中。快恢复二极管也称为开关二极管,这类二极管的反向恢复时间短,通常小于 5 $\mu$ s,适用作高频电路中的可控开关。

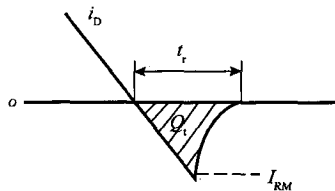


图 2-3 二极管的关断波形

## 2.3 普通晶闸管

晶闸管是能承受高电压、大电流的半控型电力半导体器件,它的家族中出现最早和目前应用最广的器件是普通晶闸管,通常称为可控硅 (Silicon Controlled Rectifier, SCR),从 20 世纪 60 年代开始研制并生产,到现在已被广泛应用于可控整流、逆变、交流调压、直流变换等领域,成为特大功率、低频 (200Hz 以下) 装置中的主要器件。一般而言,不加以说明的晶闸管就是指普通晶闸管,即可控硅。

### 2.3.1 结构与工作原理

目前,国内外生产的晶闸管,其外型封装形式可分为小电流塑封式、小电流螺旋式、大电

流螺旋式和大电流平板式（额定电流在 200A 以上），如图 2-4 中所示。晶闸管有三个引出电极，它们是阳极 A，阴极 K 和门极（或称栅极）G，其电气符号如图 2-4 (e) 所示。

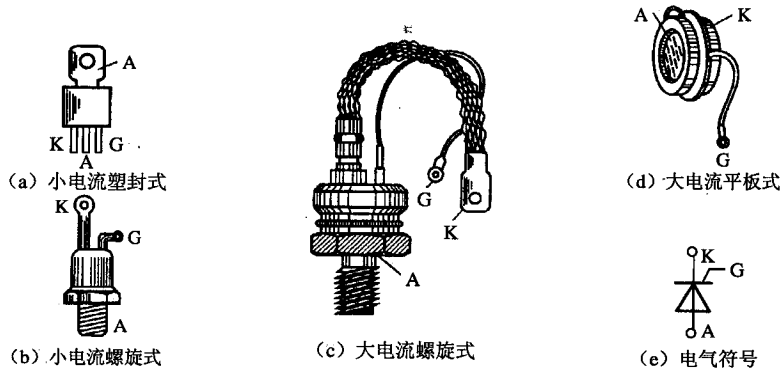


图 2-4 晶闸管的外形及符号

晶闸管是大功率器件，工作时产生大量的热，因此必须安装散热器。螺旋式晶闸管紧拴在铝制散热器上，采用自然散热冷却方式，如图 2-5 (a) 所示。平板式晶闸管由两个彼此绝缘的散热器紧夹在中间，散热方式可以采用风冷或水冷，以获得较好的散热效果，如图 2-5 (b)、(c) 所示。

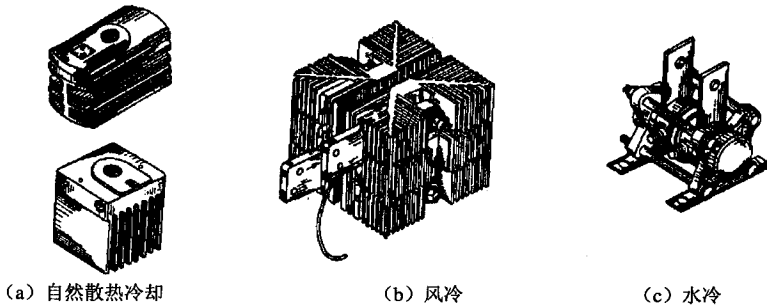


图 2-5 晶闸管的散热器

晶闸管是一种大功率 PNP 四层半导体元件，内部原理性结构如图 2-6 所示。它是先在 N 型硅基片的两面扩散铝或硼（P 型杂质）形成  $P_1N_1P_2$  结构，然后在其中一面的大部分区域，扩散磷或锑（N 型杂质）作阴极，在同一面的另外小区域引出作门极。在另一方面，放置铝片（P 型金属片）与  $P_1$  型层构成欧姆接触作阳极，这样阳极与阴极之间形成 PNP 四层结构，具有三个 PN 结  $J_1$ 、 $J_2$ 、 $J_3$ ，如图 2-7 (a) 所示。当晶闸管阳极与阴极加上反向电压时， $J_1$ 、 $J_3$  结处于反偏状态，如图 2-7 (b) 所示；当加上正向电压时， $J_2$  结处于反向阻断状态，如图 2-7 (c) 所示。若这时在门极加足够的触发电流，晶闸管就变为导通状态。

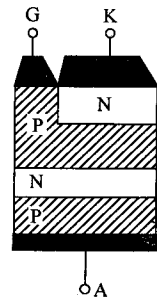


图 2-6 晶闸管内部结构

晶闸管的 PNP 结构可以等效为由 PNP 与 NPN 两个晶体管组成，如图 2-7 (d) 所示。若

门极施加触发电流  $I_G$ ，因  $I_G$  相当于  $V_2$  的基极电流，经  $V_2$  放大为电流  $I_{C2}$ ， $I_{C2}$  可看作是  $V_1$  的基极电流，经  $V_1$  放大为电流  $I_{C1}$ 。设  $V_1$ 、 $V_2$  的电流放大系数为  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$ ，由图 2-7 (d) 可知：  
 $I_{C2} = \alpha_2 I_K$ ， $I_{C1} = \alpha_1 I_A$ ， $I_G + I_A = I_K$ ， $I_{C1} + I_{C2} = I_A$ 。

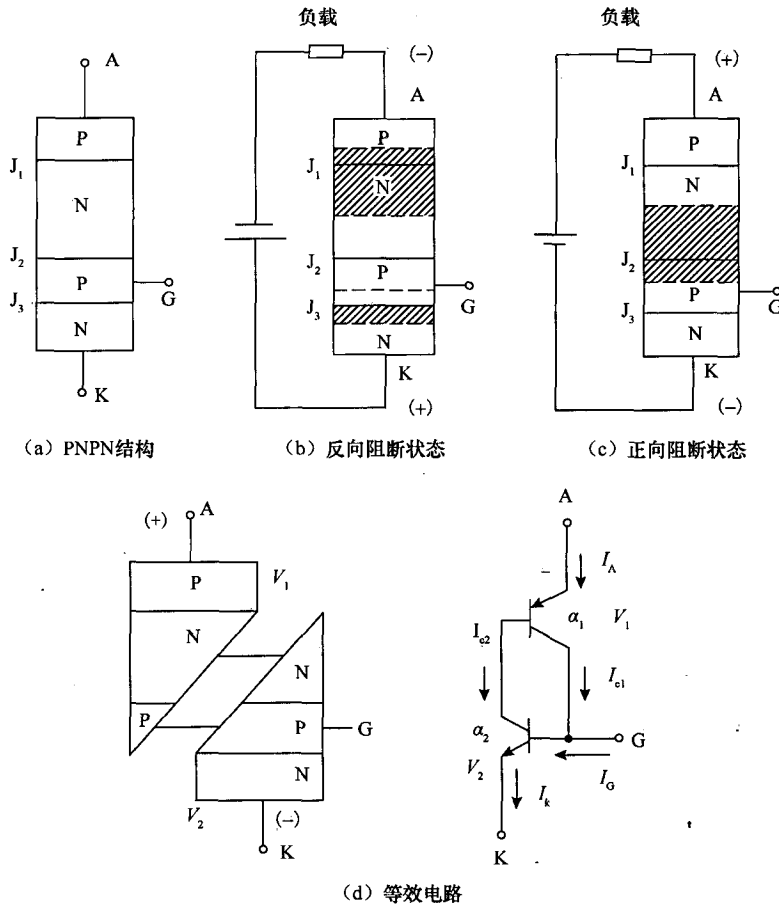


图 2-7 晶闸管工作原理

把上式进行整理，则有：

$$I_A = \frac{\alpha_2 I_G}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}$$

若  $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ ，由上式可知， $I_A$  为无限大，则晶闸管变为导通状态，实际上  $I_A$  的数值由负载大小决定。

## 2.3.2 伏安特性和主要参数

### 2.3.2.1 晶闸管的伏安特性

晶闸管阳极与阴极之间的电压  $V_A$  与阳极电流  $I_A$  的关系称为晶闸管的伏安特性。晶闸管的基本应用电路如图 2-8 所示；伏安特性如图 2-9 所示，包括正向特性（第一象限）和反向特性（第三象限）两部分。

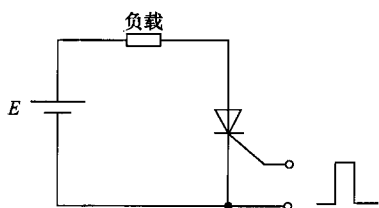


图 2-8 晶闸管基本应用电路图

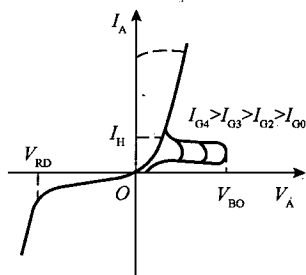


图 2-9 晶闸管伏安特性

图 2-9 中各物理量的定义如下：

- $I_G$ —— 门极电流；
- $V_A$ —— 阳极电压；
- $I_A$ —— 阳极电流；
- $V_{BO}$ —— 正向转折电压；
- $I_H$ —— 维持电流；
- $V_{RD}$ —— 反向击穿电压。

晶闸管的反向特性与一般二极管的反向特性相似。在正常情况下，当晶闸管承受反向阳极电压时， $J_1$ 、 $J_3$  结为反向偏置，晶闸管总是处于阻断状态，只有很小的反向漏电流流过。当反向电压增加到  $V_{RD}$  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，造成晶闸管永久性损坏。

晶闸管的正向特性又有阻断状态和导通状态之分。在正向阻断状态，晶闸管的伏安特性是一组随门极电流  $I_G$  的增加而不同的曲线簇。 $I_G=0$  时，逐渐增大阳极电压  $V_A$ ，由于  $J_2$  结受反压阻挡，元件中只有很小的正向漏电流，晶闸管正向阻断。随着阳极电压的增加，当  $V_A$  升高到正向转折电压  $V_{BO}$  时，漏电流也相应增大一定数值， $J_1$ 、 $J_2$  结内电场削弱较多， $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  也相应增大，使得电子扩散电流  $\alpha_2 I_K$  和空穴电流  $\alpha_1 I_A$  分别与内电场中的空穴与电子复合，导致  $J_2$  内电场消失，因此晶闸管由正向阻断突变为正向导通状态。这种在  $I_G=0$  时依靠增大阳极电压而强迫晶闸管导通的方式称为“硬开通”，多次“硬开通”会使晶闸管损坏，所以通常不允许这样做。

当加上门极电压，使门极电流  $I_G > 0$  时，元件的正向转折电压  $V_{BO}$  就降低。当  $I_G$  足够大时，晶闸管正向转折电压很小，可看成与二极管一样，一加上正向阳极电压管子就导通了。晶闸管正向导通状态的伏安特性又与二极管的正向特性相似，即当流过较大的阳极电流时，晶闸管的



压降很小。

在使用晶闸管时，通常都是利用这一特性，即先加上一定的正向阳极电压（最小为 6V），然后在门极与阴极加上足够大的触发电压，使晶闸管的正向转折电压下降到很小而导通的。由于门极控制信号只在导通时刻起一下作用，晶闸管一旦导通后，只要阳极电流大于擎住电流  $I_L$  就可以一直保持导通状态，而与门极信号是否存在无关。所以，可用脉冲电压作为控制信号（通常称触发电压或触发脉冲）而不用直流电压控制，这样可以减少门极损耗和控制功率。

当晶闸管正向导通后，要使晶闸管恢复阻断，只有逐步减小阳极电流，当阳极电流  $I_A$  下降到维持电流  $I_H$  以下时，晶闸管便由正向导通状态变为正向阻断状态。使  $I_A < I_H$ ，可以使阳极电压降至管压降以下，或加反向电压，或在回路内串入很大电阻来实现。

### 2.3.2.2 晶闸管的主要参数

要想正确使用晶闸管，必须掌握晶闸管的主要特性参数，主要包括电压参数、电流参数、门极参数和动态参数。

#### 1. 电压参数

晶闸管的几个电压参数在伏安特性曲线上的位置如图 2-10 所示。先来说明一下参数下标的含义。电压、电流参数中，T 表示通态；D 表示断态；R 在第一位时表示反向，在第二位时表示重复；S 表示不重复的；M 表示最大值。

(1) 正向不重复峰值电压  $V_{DSM}$ 。也称为断态不重复峰值电压。晶闸管在门极开路时，施加于晶闸管的正向阳极电压上升到正向伏安特性曲线急剧弯曲处所对应的电压值称为断态不重复峰值电压，它是一个不能重复且每次持续时间不大于 10ms 的断态最大脉冲电压。 $V_{DSM}$  值小于转折电压  $V_{BO}$ 。

(2) 正向重复峰值电压  $V_{DRM}$ 。也称为断态重复峰值电压。晶闸管在门极开路及额定结温下，允许每秒 50 次，每次持续时间不大于 10ms，重复施加在晶闸管上的正向断态最大脉冲电压。 $V_{DRM}=80\%V_{DSM}$ 。

(3) 反向不重复峰值电压  $V_{RSM}$ 。是指晶闸管门极开路，而阳极施加反向并对应于反向伏安特性曲线急剧弯曲处的反向峰值电压值。它是一个不能重复且每次持续时间不大于 10ms 的最大反向脉冲电压。

(4) 反向重复峰值电压  $V_{RRM}$ 。是指晶闸管门极开路且在额定结温下，允许每秒 50 次，每次持续时间不大于 10ms，重复施加在晶闸管上的反向最大脉冲电压， $V_{RRM}=80\%V_{RSM}$ 。

(5) 额定电压  $U_T$ 。通常将  $V_{DRM}$  和  $V_{RRM}$  中较小的一个数值取整后作为该晶闸管的额定电压值，然后根据表 2-1 所示的标准电压等级标定器件的额定电压。晶闸管铭牌标注的是额定电压。

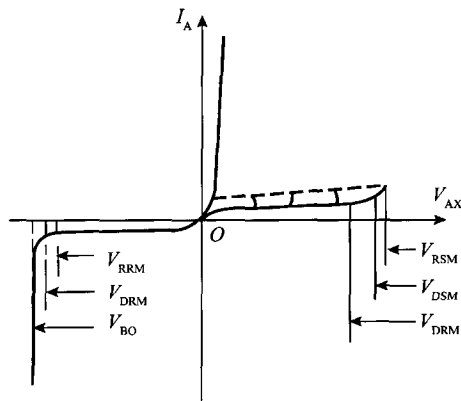


图 2-10 晶闸管的几个电压参数在伏安特性上的位置