



教育部高职高专规划教材
Jiaoyubu Gaozhi Gaozhuan Guihua Jiaocai

电力电子技术

浣喜明 姚为正 主编

高等教育出版社

HIGHER EDUCATION PRESS



电力电子技术

浣喜明 姚为正 主编

高等教育出版社

教育部高职高专规划教材

电力电子技术

浣喜明 姚为正 主编

高等教育出版社

内容提要

本书是教育部高职高专规划教材。全书共分3部分,第1至第2章介绍了常用电力电子器件(如SCR、GTO、VDMOS、IGBT、SIT、SITH、MCT等)的工作原理、特性、参数、驱动电路及保护方法;第3至第6章详细介绍了包括晶闸管可控整流、直流变换、逆变、交流变换等电路在内的常用电力电子电路的工作原理、计算方法和应用范围;第7章从应用的角度出发,介绍了几种典型的电力电子装置的组成、工作原理和实际应用。为了便于教学,本书还编排了适当的例题和大量的习题。

本书语言简练,既注重电力电子理论的完整性、严密性和先进性,又突出了应用技术。

本书可作为高等职业学校、高等专科学校、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院和民办高校电类专业教材,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/浣喜明,姚为正主编. —北京:高等教育出版社,2001

教育部高职高专规划教材

ISBN 7-04-009276-X

I. 电… II. ①浣…②姚… III. 电力电子学—高等学校:技术学校—教材 IV. TN01

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第10488号

电力电子技术

浣喜明 姚为正 主编

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市东城区沙滩后街55号

邮政编码 100009

电 话 010-64054588

传 真 010-64014048

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所

印 刷 中国农业出版社印刷厂

开 本 787×1092 1/16

版 次 2001年6月第1版

印 张 9.25

印 次 2001年6月第1次印刷

字 数 220 000

定 价 8.50 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

出版说明

教材建设工作是整个高职高专教育教学工作中的重要组成部分。改革开放以来,在各级教育行政部门、学校和有关出版社的共同努力下,各地已出版了一批高职高专教育教材。但从整体上看,具有高职高专教育特色的教材极其匮乏,不少院校尚在借用本科或中专教材,教材建设仍落后于高职高专教育的发展需要。为此,1999年教育部组织制定了《高职高专教育基础课程教学基本要求》(以下简称《基本要求》)和《高职高专教育专业人才培养目标及规格》(以下简称《培养规格》),通过推荐、招标及遴选,组织了一批学术水平高、教学经验丰富、实践能力强的教师,成立了“教育部高职高专规划教材”编写队伍,并在有关出版社的积极配合下,推出一批“教育部高职高专规划教材”。

“教育部高职高专规划教材”计划出版500种,用5年左右时间完成。出版后的教材将覆盖高职高专教育的基础课程和主干专业课程。计划先用2~3年的时间,在继承原有高职、高专和成人高等学校教材建设成果的基础上,充分汲取近几年来各类学校在探索培养技术应用型专门人才方面取得的成功经验,解决好新形势下高职高专教育教材的有无问题;然后再用2~3年的时间,在《新世纪高职高专教育人才培养模式和教学内容体系改革与建设项目计划》立项研究的基础上,通过研究、改革和建设,推出一大批教育部高职高专教育教材,从而形成优化配套的高职高专教育教材体系。

“教育部高职高专规划教材”是按照《基本要求》和《培养规格》的要求,充分汲取高职、高专和成人高等学校在探索培养技术应用型专门人才方面取得的成功经验和教学成果编写而成的,适用于高等职业学校、高等专科学校、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院和民办高校使用。

教育部高等教育司

2000年4月3日

前 言

本书是教育部高职高专规划教材。全书共分为三部分,第1至第2章介绍了常用电力电子器件(如SR、SCR、GTO、VDMOS、IGBT、SIT、SITH等)的工作原理、特性、参数、驱动电路及保护方法;第3至第6章详细地介绍了包括晶闸管可控整流、直流变换、逆变、交流变换等电路在内的基本电力电子电路的工作原理、计算方法和应用范围;第7章从应用的角度出发,介绍了开关电源、有源功率因数校正装置、不间断电源、静止无功补偿装置以及变频器等几种典型的电力电子装置的组成、工作原理和实际应用。为了便于教学,本书还编排了适当的例题和大量的习题。

本书由浣喜明和姚为正共同担任主编。概述部分、第1至第4章由浣喜明编写,第5至第7章由姚为正编写。全书由浣喜明统稿。

本书由西安交通大学王兆安教授主审。王兆安教授在审稿中提出了许多宝贵的意见,在此谨致衷心的感谢。

由于作者学识水平有限,书中一定有很多疏漏和错误之处,期望使用本书的师生批评指正。

编 者

2000年9月

于湖南工程学院

责任编辑	韩颖
封面设计	杨立新
责任绘图	尹莉
版式设计	周顺银
责任校对	戈捷
责任印制	杨明

目 录

概述	1	2.5.1 SIT 的工作原理	43
第 1 章 电力二极管与晶闸管	4	2.5.2 SIT 的特性	43
1.1 电力二极管	4	2.6 静电感应晶闸管(SITH)	44
1.1.1 电力二极管的工作原理	4	2.6.1 SITH 的工作原理	44
1.1.2 电力二极管的特性与参数	5	2.6.2 SITH 的特性	44
1.2 晶闸管	7	思考题与习题	45
1.2.1 晶闸管的工作原理	7	第 3 章 晶闸管可控整流电路	46
1.2.2 晶闸管的特性与参数	9	3.1 单相可控整流电路	46
1.3 晶闸管的派生器件	15	3.1.1 单相半波可控整流电路	46
1.3.1 快速晶闸管	15	3.1.2 单相全桥式整流电路	51
1.3.2 双向晶闸管	15	3.1.3 单相半控桥式整流电路	54
1.3.3 逆导晶闸管	16	3.2 三相可控整流电路	57
1.3.4 光控晶闸管	17	3.2.1 三相半波可控整流电路	57
思考题与习题	17	3.2.2 三相全控桥式整流电路	60
第 2 章 全控型电力电子器件	20	3.3 可控整流电路的换相压降	62
2.1 门极可关断晶闸管(GTO)	20	3.4 晶闸管的触发电路	64
2.1.1 GTO 的工作原理	20	3.4.1 对触发电路的要求	64
2.1.2 GTO 的特性	21	3.4.2 晶闸管触发电路	65
2.2 电力晶体管	22	3.4.3 触发脉冲与主电路电压的同步	72
2.2.1 电力晶体管的工作原理	22	思考题与习题	74
2.2.2 电力晶体管的特性与参数	23	第 4 章 直流变换电路	76
2.2.3 电力晶体管的基极驱动电路 及保护	26	4.1 降压变换电路	76
2.3 电力场控晶体管	30	4.2 升压变换电路	79
2.3.1 VDMOS 的工作原理	30	4.3 升降压变换电路	81
2.3.2 VDMOS 的特性与参数	31	4.4 库克变换电路	83
2.3.3 VDMOS 的安全工作区	33	4.5 全桥直流变换电路	85
2.4 绝缘栅双极型晶体管(IGBT)	34	4.5.1 双极性电压开关 PWM 控制方式	86
2.4.1 IGBT 的工作原理	34	4.5.2 单极性电压开关 PWM 控制方式	87
2.4.2 IGBT 的特性与参数特点	35	思考题与习题	87
2.4.3 IGBT 功率模块	37	第 5 章 逆变电路	89
2.4.4 IGBT 的栅极驱动电路及保护	39	5.1 电力器件的换流方式	89
2.5 静电感应晶体管(SIT)	42		

5.2 有源逆变电路	90	6.1.2 三相交流调压电路	113
5.2.1 有源逆变的工作原理	90	6.2 交-交变频电路	113
5.2.2 三相半波有源逆变电路	92	6.2.1 单相输出交-交变频电路	114
5.2.3 三相桥式有源逆变电路	92	6.2.2 三相输出交-交变频电路	116
5.2.4 有源逆变最小逆变角 $\beta_{\min}$ 的限制	93	6.2.3 交-交变频电路输出频率上限的限制	117
5.3 无源逆变电路	94	6.2.4 交-交变频器的优缺点	117
5.3.1 无源逆变电路的工作原理	94	思考题与习题	118
5.3.2 无源逆变电路的分类	95	第7章 电力电子装置举例	119
5.3.3 无源逆变器的用途	95	7.1 开关电源	119
5.4 电压型逆变电路	95	7.1.1 开关电源的工作原理	119
5.4.1 电压型单相半桥逆变电路	95	7.1.2 隔离式高频变换电路	121
5.4.2 电压型单相全桥逆变电路	96	7.1.3 开关电源的应用	123
5.4.3 电压型三相桥式逆变电路	97	7.2 有源功率因数校正装置	126
5.4.4 电压型逆变电路的特点	99	7.2.1 有源功率因数校正的工作原理	127
5.5 电流型逆变电路	100	7.2.2 PFC 集成控制电路 UC3854 及其应用	127
5.5.1 电流型单相桥式逆变电路	100	7.3 不间断电源	130
5.5.2 电流型三相桥式逆变电路	100	7.3.1 UPS 的分类	130
5.5.3 电流型逆变电路的特点	101	7.3.2 UPS 中的整流器	131
5.6 负载换流式逆变电路	102	7.3.3 UPS 中的逆变器	132
5.6.1 并联谐振式逆变电路	102	7.3.4 UPS 的静态开关	133
5.6.2 串联谐振式逆变电路	104	7.4 静止无功补偿装置	134
5.7 脉冲宽度调制(PWM)型逆变电路	105	7.4.1 晶闸管控制电抗器(TCR)	134
5.7.1 PWM 控制的基本原理	105	7.4.2 晶闸管投切电容器(TSC)	135
5.7.2 单相 PWM 逆变电路	105	7.4.3 静止无功发生器(SVG)	136
5.7.3 三相桥式 PWM 逆变电路	107	7.5 变频调速装置	137
5.7.4 PWM 逆变电路的优点	108	7.5.1 变频调速的基本控制方式	137
思考题与习题	108	7.5.2 变频调速装置的分类	138
第6章 交流变换电路	109	7.5.3 SPWM 变频调速装置	139
6.1 交流调压电路	109	参考文献	141
6.1.1 单相交流调压电路	109		

概 述

电力电子技术是以电力为对象的电子技术,具体地说,就是利用电力电子器件对电能进行控制、转换和传输的技术。它的研究对象是电力电子器件的应用、电力电子电路的电能变换原理以及电力电子装置的开发与应用。

电力电子技术的发展取决于电力电子器件的研制与应用。

20 世纪初至 50 年代,从 Grzetz 发明汞弧闸流管单相桥式整流器以来,用于功率变换的主要器件是汞弧闸流管和硒整流器。1947 年美国著名的贝尔实验室发明晶体管,引发了电子技术的一场革命。最先用于电力领域的半导体器件是硅二极管。

1957 年美国通用电气(GE)公司研制出第一只晶闸管(SCR),它标志着电力电子技术的诞生。随着晶闸管进入实用阶段,以晶闸管为主要器件的电力电子技术很快在电化学工业、铁道电气机车、钢铁工业(感应加热)、电力工业(直流输电、无功补偿)中获得了广泛的应用。然而,由于晶闸管是只能通过门极电压控制其开通,不能控制其关断的半控型器件,这就使它的应用范围受到了极大的限制。

20 世纪 70 年代末期,可关断晶闸管(GTO)、电力晶体管(GTR)、电力场效应管(MOSFET)相继进入实用化。这些通过门极既可控制其开通又可控制其关断的全控型器件在逆变、斩波、整流、变频电路中得到了广泛的应用。尤其是采用 PWM 控制技术的 GTR 变频调速装置研制成功,实现了对交流大电机的大范围无级变速控制,为电力电子技术的应用开辟了广阔的前景。

20 世纪 80 年代后期,绝缘栅双极型晶体管(IGBT)、静电感应晶体管(SIT)、静电感应晶闸管(SITH)等全控型高频电力器件相继问世。它们集 MOSFET 管驱动功率小、开关速度快和 GTR(或 GTO)载流能力大的优点于一身,在大容量、高频率的电力电子电路中表现出非凡的性能。近年来,为了提高电力电子装置的功率密度并减小体积,把功率等级不同的大功率器件与驱动、保护、检测电路集成一体,构成了功率集成电路(PIC)。PIC 的应用更方便、更可靠,代表着电力器件的发展方向。先进的电力电子器件与计算机控制技术相结合,在工业、能源、交通、空间技术等各方面发挥了重要作用,给电力电子技术注入了强大的生命力。

电力电子电路的根本任务是完成交流(AC)和直流(DC)电能的转换。其基本的转换形式可分为如下四种:

1. AC/DC 变换,即将交流电能转换为直流电能,也称为整流。完成整流任务的电力电子电路称为整流器。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、电解、电镀等领域。

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直流斩波器。它主要用于直流机车的调速传动(如电车、电气机

车、电瓶车等)以及直流开关电源、焊接电源等。

3. DC/AC 变换,即将直流电能变换为交流电能,也称为逆变。完成逆变的电力电子装置叫逆变器。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,即将直流电逆变成某一频率或可变频率的交流电供给负载,则叫无源逆变,它在交流电机变频调速、感应加热、不间断电源等方面应用十分广泛,是构成电力电子技术的重要内容。

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),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。

另外,利用高压、大电流电力电子器件可以组成无触点开关,这种电力电子开关克服了传统的有触点开关在高频率操作情况下,触头的磨损使得机械寿命短和可靠性差的缺陷,具有无电弧、无噪声、无机械磨损、寿命长、操作频率高、开关损耗小、易控制的特点,是理想的无触点开关。然而,目前电力电子器件的开通压降大、容量有限阻碍了它的发展。

要让电力电子电路完成各种工作任务,必须为功率变换主电路配以提供门极驱动信号的控制电路。门极驱动信号的产生依赖于特定的控制策略和控制算法。最常用的是相控方式,即采用延时脉冲控制功率器件导通的相位。它在半控型器件的整流、逆变、交流调压等电路中获得了广泛的应用。除此之外,在大量采用全控型器件的电力电子电路中,为了减小输出电能中的谐波分量,把通信工程中脉冲宽度调制理论(PWM)应用到电力变换装置中,从而使其具有功率因数高、能同时实现变频变压及抑制谐波等优点,成为了功率变换电路中的核心控制技术,被广泛应用到整流、斩波、逆变、交-交变换等电路。同时,脉冲幅度调制(PAM)和脉冲频率调制(PFM)也得到了广泛的应用。

对于动态性能和稳态精度要求较高的场合,还必须广泛采用自动控制技术和理论。例如对线性负载常采用比例加积分加微分(PID)控制方法;对非线性负载(如交流电机)常常采用矢量控制方法。

为了提高电力电子装置的功率密度,必须提高功率器件的开关频率,同时器件的开关损耗也随之加大。为了减小开关损耗,提高效率,软开关技术应运而生。在逆变电路中,开关器件工作于零电压(ZVS)和零电流(ZCS)模式,在很大程度上减小了开关损耗。

针对生产、生活提出的实际问题,选择合适的电力电子电路,并采用传感技术、现代控制理论、微处理机以及大规模集成电路实现特定的控制方式,组成完成特定任务的电力电子装置。

电力电子装置在一般工业、交通运输、电力系统、通信系统、计算机系统、新能源系统以及日常生活中得到了广泛的应用,成为当今发展迅速、引人注目的学科。

电力电子技术是节能技术。由于电力电子装置的电能变换效率高,完成相同的工作任务要比传统方法节约电能 10%~40%。我国大型风机和泵类负荷占全国用电量的 1/3,若采用交流

变频调速可实现平均节电 20%，每年可节电 400 亿 kW·h，经济价值十分可观。

电力电子技术是发展高技术的基础，它拓宽了微电子技术、信息技术与传感器技术的应用领域，推动了新技术与高精技术的发展。随着科学技术的发展，新型功率器件将会不断涌现，电力电子装置将朝着智能化、模块化、小型化、大容量、高效率、高可靠性的方向发展。

第 1 章

电力二极管与晶闸管

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。这类器件主要是指晶闸管(Thyristor)，它由普通晶闸管 SCR 及其派生器件(快速晶闸管 FST、双向晶闸管 TRIAC、逆导晶闸管 RCT、光控晶闸管 LTT 等)组成。

在电力电子器件中，电力二极管 SR 被称为不可控器件，它不能用控制信号控制其通断，器件的导通与截止完全由自身在电路中承受的电压和电流来决定。

1.1 电力二极管

电力二极管(Power Diode)也称为半导体整流器(Semiconductor Rectifier, 简称 SR)，属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，直到现在它在高、中频整流、逆变等领域仍发挥着积极的作用。

1.1.1 电力二极管的工作原理

电力二极管的基本结构是半导体 PN 结，它的外形、结构和电气符号如图 1.1.1 (a)、(b)、(c)所示。

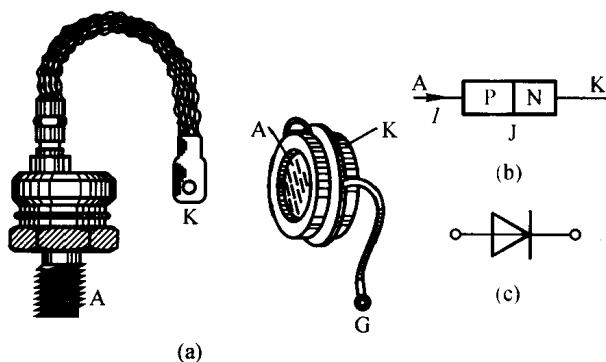


图 1.1.1 电力二极管的外形、结构和电气符号

PN 结具有单向导电性。当它外加正向电压(P 正 N 负)时，有从 P 向 N 的正向电流流过，此时 PN 结表现为低电阻，电力二极管电压降只有 1 V 左右，称为正向导通。当 PN 结加反向

电压(P 负 N 正)时, 只有极小的反向漏电流流过 PN 结, PN 结表现为高电阻, 称为反向截止。

电力二极管一般都工作在大电流、高电压场合。因此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, 确保安全运行。

1.1.2 电力二极管的特性与参数

1. 电力二极管的伏安特性

图 1.1.2 是电力二极管的伏安特性曲线。当外加电压大于门槛电压 U_{TO} 时正向电流开始迅速增加, 二极管开始导通。正向导通时其管压降仅 1 V 左右, 且不随电流的大小而变化。当电力二极管承受反向电压时, 只有很小的反向漏电流 I_{RR} 流过, 器件反向截止。但当反向电压增大到 U_B 时, PN 结内产生雪崩击穿, 反向电流急剧增大, 可导致二极管击穿损坏。

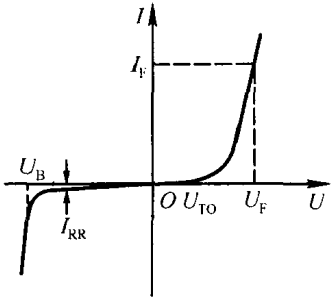


图 1.1.2 电力二极管的伏安特性曲线

2. 电力二极管的开关特性

电力二极管工作状态转换时的特性称为开关特性。

(1) 关断特性

电力二极管由正向偏置的通态转换为反向偏置的断态过程中电压、电流的波形如图 1.1.3 (a) 所示。当原来处于正向导通的电力二极管外加电压在 t_F 时刻突然从正向变为反向时, 正向电流 I_F 开始下降, 到 t_0 时刻二极管电流降为零, 此时 PN 结两侧存有大量的少子, 器件并没有恢复反向阻断能力, 直到 t_1 时刻 PN 结内储存的少子被抽尽时, 反向电流达到最大值 I_{RP} 。 t_1 后二极管开始恢复反向阻断, 反向恢复电流迅速减小。外电路中电感产生的高感应电势使器件承受很高的反向电压 U_{RP} 。当电流降到基本为零的 t_2 时刻, 二极管两端的反向电压才降到外加反压 U_R , 电力二极管完全恢复反向阻断能力。

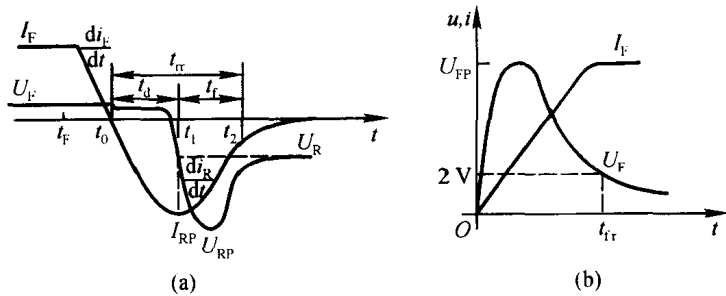


图 1.1.3 电力二极管的开关过程波形

延迟时间 $t_d = t_1 - t_0$

下降时间 $t_f = t_2 - t_1$

电力二极管的反向恢复时间 $t_{rr} = t_d + t_f$

(2) 开通特性

电力二极管由零偏置转换为正向偏置的通态过程的电压、电流波形如图 1.1.3 (b) 所示。开通过程中二极管两端也会出现峰值电压 U_{FP} (几伏 ~ 几十伏)。经过一段时间才接近稳态值

U_F (约 2 V 左右)。上述时间被称为正向恢复时间。

电力二极管的应用范围广，种类也很多，主要有如下类型。

① 普通二极管

普通二极管又称整流管(Rectifier Diode)多用于开关频率在 1 kHz 以下的整流电路中，其反向恢复时间在 5 μ s 以上，额定电流达数千安，额定电压达数千伏以上。

② 快恢复二极管

反向恢复时间在 5 μ s 以下的称为快恢复二极管(Fast Recovery Diode 简称 FRD)。快恢复二极管从性能上可分为快速恢复和超快速恢复二极管。前者反向恢复时间为数百纳秒以上，后者则在 100 ns 以下，多用于高频整流和逆变电路中。

③ 肖特基二极管

反向恢复时间为 10~40 ns，反向耐压在 200 V 以下。

3. 电力二极管的主要参数

(1) 额定正向平均电流 $I_{F(AV)}$

器件长期运行在规定管壳温度和散热条件下允许流过的最大工频正弦半波电流的平均值定义为额定正向平均电流。应用中应按照流过二极管实际波形电流与工频正弦半波平均电流的热效应相等(即有效值相等)的原则，来选取电力二极管的额定电流，并应留有一定的裕量。

(2) 反向重复峰值电压 U_{RRM}

指器件能重复施加的反向最高峰值电压(额定电压)。此电压通常为击穿电压 U_B 的 2/3。

(3) 正向压降 U_F

指规定条件下，流过稳定的额定电流时，器件两端的正向平均电压(又称管压降)。

(4) 反向漏电流 I_{RR}

指器件对应于反向重复峰值电压时的反向电流。

(5) 最高工作结温 T_{JM}

指器件中 PN 结不至于损坏的前提下所能承受的最高平均温度。 T_{JM} 通常在 125~175℃ 范围内。

表 1.1.1 列出了几种常用电力二极管的主要性能参数。

表 1.1.1 部分电力二极管主要性能参数

型 号	额定正向平均 电流 I_F/A	反向重复峰值 电压 U_{RRM}/V	反向电流 I_R	正向平均电压 U_F/V	反向恢复时间 t_{rr}	备 注
ZP1~4 000	1~4 000	50~5 000	1~40 mA	0.4~1		
ZK3~2 000	3~2 000	100~4 000	1~40 mA	0.4~1	<10 μ s	
10DF4	1	400		1.2	<100 ns	
31DF2	3	200		0.98	<35 ns	
30BF80	3	800		1.7	<100 ns	
50WF40F	5.5	400		1.1	<40 ns	
10CTF30	10	300		1.25	<45 ns	
25JPF40	25	400		1.25	<60 ns	

续表

型 号	额定正向平均 电流 I_F/A	反向重复峰值 电压 U_{RRM}/V	反向电流 I_R	正向平均电压 U_F/V	反向恢复时间 t_{rr}	备 注
HFA90NH40	90	400		1.3	<140 ns	模块结构
HFA180MD60D	180	600		1.5	<140 ns	模块结构
HFA75MC40C	75	400		1.3	<100 ns	模块结构
MR876 快恢复功率二极管 (美国 MOTOROLA 公司)	50	600	50 μA	1.4	<400 ns	
MUR10020CT 超快恢复功率二极管 (美国 MOTOROLA 公司)	50	200	25 μA	1.1	<50 ns	
MBR30045CT 肖特基功率二极管 (美国 MOTOROLA 公司)	150 (单支)	45	0.8 mA	0.78	≈ 0	

1.2 晶 闸 管

晶闸管(Thyristor)是能承受高电压、大电流的半控型电力电子器件,它包括普通晶闸管(SCR)、快速晶闸管(FST)、双向晶闸管(TRIAC)、逆导晶闸管(RCT)和光控晶闸管(LTT)等。由于普通晶闸管面世早,应用极为广泛,因此在无特别说明的情况下,本书所说的晶闸管都为普通晶闸管。

1.2.1 晶闸管的工作原理

普通晶闸管也称可控硅整流管(Silicon Controlled Rectifier)简称 SCR,从 20 世纪 60 年代开始研制并生产,到现在已成为电力器件中品种最多的一种,由于它电流容量大、电压耐量高以及开通的可控性(目前生产水平:4 500 A/6 500 V)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(200 Hz 以下)装置中的主要器件。

1. 晶闸管的结构

目前国内外生产的晶闸管,其外形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 200 A 以上),分别如图 1.2.1(a)、(b)、(c)、(d)所示。晶闸管有三个电极,它们是阳极 A、阴极 K 和门极(或称栅极)G,其电气符号如图 1.2.1(e)所示。

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 1.2.2(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 1.2.2(b)、(c)所示。

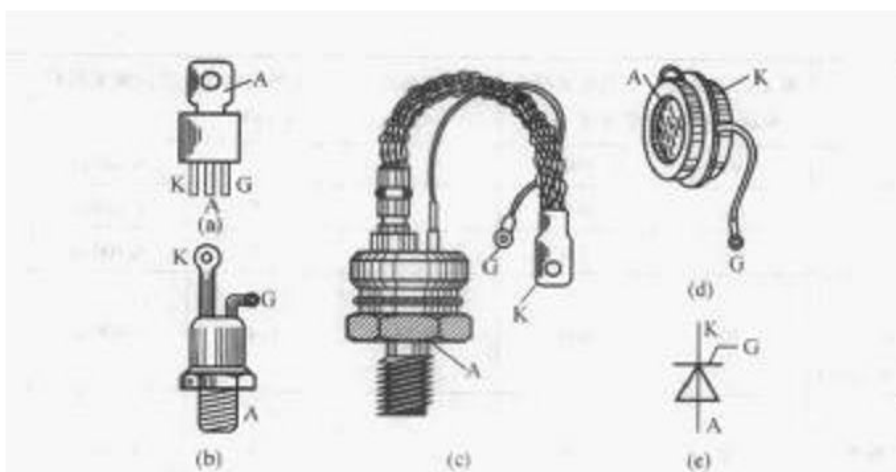


图 1.2.1 晶闸管的外形及符号

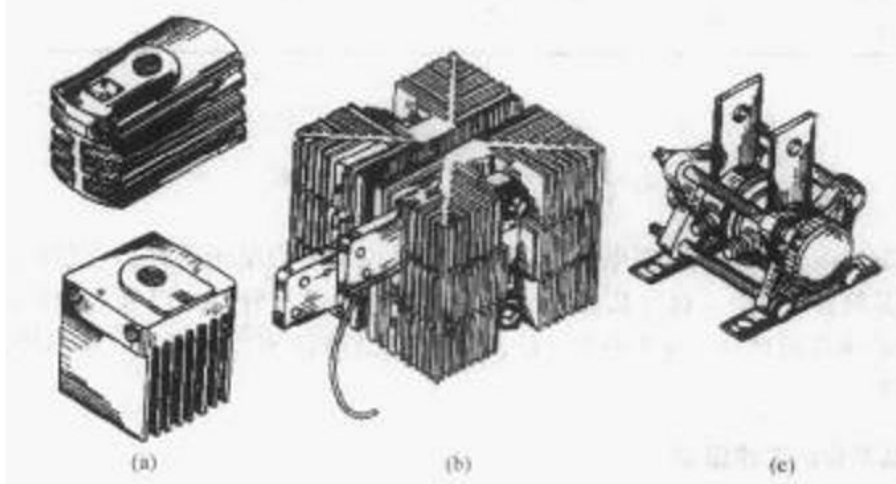


图 1.2.2 晶闸管的散热器

2. 晶闸管的工作原理

普通晶闸管由四层半导体(P_1 、 N_1 、 P_2 、 N_2)组成, 形成三个结 J_1 (P_1N_1)、 J_2 (N_1P_2)、 J_3 (P_2N_2), 并分别从 P_1 、 P_2 、 N_2 引出 A、G、K 三个电极, 如图 1.2.3 (a) 所示。

具有三结四层结构的普通晶闸管可以等效成如图 1.2.3 (b) 所示的由两个三极管 T_1 ($P_1 - N_1 - P_2$) 和 T_2 ($N_1 - P_2 - N_2$) 组成的等效电路。

当晶闸管阳极施加正向电压时, 若给门极 G 也加正向电压 U_g , 门极电流 I_g 经三极管 T_2 放大后成为集电极电流 I_{c2} , I_{c2} 又是三极管 T_1 的基极电流, 放大后的集电极电流 I_{c1} 进一步使 I_{gk} 增大且又作为 T_2 的基极电流流入。重复上述正反馈过程, 两个三极管 T_1 、 T_2 都快速进入饱和状态, 使晶闸管阳极 A 与阴极 K 之间导通。此时若撤除 U_g , T_1 、 T_2 内部电流仍维持原来的方向, 只要满足阳极正偏的条件, 晶闸管就一直导通。

当晶闸管 A、K 间施加正向电压, 而门极电流 $I_g = 0$ 时, 上述 T_1 和 T_2 之间的正反馈不能建立起来, 晶闸管 A、K 间只有很小的正向漏电流, 它处于正向阻断状态。

综上所述,晶闸管的导通条件可定性地归纳为阳极正偏和门极正偏。晶闸管导通后,即使撤除门极驱动信号 U_g ,也不能使晶闸管关断,只有设法使阳极电流 I_a 减小到维持电流 I_H (约十几毫安)以下,导致内部已建立的正反馈无法维持,晶闸管才能恢复阻断状态。很明显,如果给晶闸管阳极加反向电压,无论有无门极电压 U_g ,晶闸管都不能导通。

晶闸管象二极管一样具有单向导电性,但它又与二极管不同。当门极没有加上正向电压时,尽管阳极已加正向电压,晶闸管仍处于正向阻断状态,在门极电压的触发下,晶闸管立即导通。这种门极电压对晶闸管正向导通所起的作用叫闸流特性,也称为晶闸管的可控单向导电性。门极电压只能触发晶闸管开通,不能控制它的关断,从这个意义上讲,晶闸管又称为半控型电力电子器件。

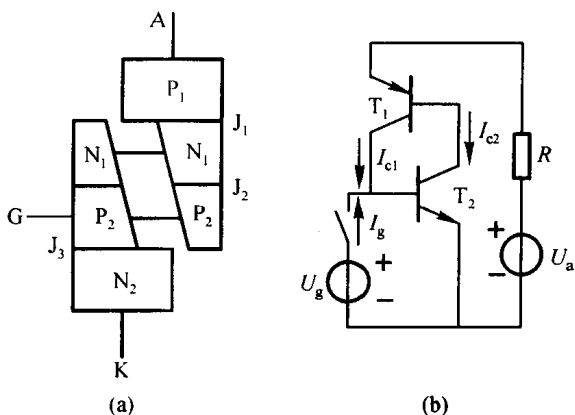


图 1.2.3 晶闸管的内部结构和等效电路

1.2.2 晶闸管的特性与参数

1. 晶闸管的伏安特性

晶闸管阳、阴之间的电压 U_a 与阳极电流 I_a 的关系,称为晶闸管的伏安特性。实际的晶闸管伏安特性如图 1.2.4 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 1.2.4 中各物理量的定义如下:

U_{DRM} 、 U_{RRM} ——正、反向断态重复峰值电压($U_{DRM}=0.8 U_{DSM}$, $U_{RRM}=0.8 U_{RSM}$);

U_{DSM} 、 U_{RSM} ——正、反向断态不重复峰值电压;

U_{BO} ——正向转折电压;

U_{RO} ——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,晶闸管总是处于阻断状态,只有很小的反向漏电流流过。当反向电压增加到一定值时,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 U_a ,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,当达到正向转折电压 U_{BO} 时,漏电流突然剧增,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

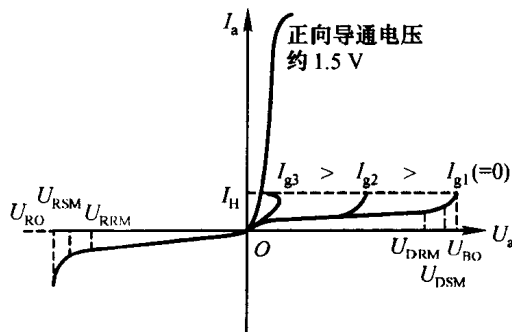


图 1.2.4 晶闸管阳极伏安特性