



教育部职业教育与成人教育司推荐教材
五年制高等职业教育电类专业教学用书

电力电子技术

李瑞荣 主编

电力电子技术

李瑞荣 主编

中国铁道出版社



中国铁道出版社

CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE



中国电力科学研究院
国家电网公司电力科学研究院
中国电力出版社

电力电子技术

第 10 卷 第 1 期



中国电力出版社 2010 年 1 月

电力电子技术

李瑞荣 主 编
姚存治 副主编
汤钰鹏 马祥兴 主 审

中 国 铁 道 出 版 社
2006年·北京

内 容 简 介

本教材立足于培养应用型技术人才,以能力培养为目标,本着理论适度够用为止的原则,力求反映电力电子技术器件、电路、应用方面的新技术,注重实用电路及其应用的介绍。内容包括:电力电子器件、整流电路、有源逆变电路、直流斩波电路、无源逆变电路、交流变换电路及软开关电路。在每章后附有复习思考题,供读者进行学后自测。

本书是教育部职业教育与成人教育司推荐教材,可供高职高专自动化专业、供用电技术专业及相关机电类专业教学使用,也可供从事相关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/李瑞荣主编. —北京:中国铁道出版社,2006.8

教育部职业教育

ISBN 7-113-07168-6

I. 电… II. 李… 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 062828 号

书 名:电力电子技术

作 者:李瑞荣 主编

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街8号)

责任编辑:赵 静

封面设计:冯龙彬

印 刷:中国铁道出版社印刷厂

开 本:787×1092 1/16 印张:8.75 字数:213 千

版 本:2006 年 8 月第 1 版 2006 年 8 月第 1 次印刷

印 数:1~3 000 册

书 号:ISBN 7-113-07168-6/TB·89

定 价:11.50 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。

编辑部电话:(010)51873133 发行部电话:(010)51873124

前 言

电力电子技术是高职高专自动化专业、供用电技术专业及相关机电类专业的一门重要专业基础课。本教材立足于培养应用型技术人才,以能力培养为目标,本着理论适度、够用为止的原则,力求反映电力电子技术器件、电路、应用方面的新技术,注重实用电路及其应用的介绍。

本教材由三大部分构成。第一部分是第一章,以电力电子器件为核心,介绍了功率二极管、晶闸管、GTR、GTO、功率 MOSFET、IGBT 等器件的工作原理、参数、驱动与保护;第二部分是各种电力电子电路,包括第二~七章,分别详细介绍可控整流、逆变、直流斩波、交流变换、软开关等电力电子应用电路的工作原理、计算方法和应用范围;第三部分是第八章,从应用的角度出发,介绍了开关电源、不间断电源、无功补偿装置等典型装置的组成、工作原理和实际应用。

本书在文字叙述和配备图例方面尽量结合目前职业学院学生的文化程度,力求通俗易懂,深入浅出,每章末附有复习思考题,供读者学习后进行自测。

本书由广州铁路职业技术学院李瑞荣主编,郑州铁路职业技术学院姚存治任副主编。第一、四、五章由广州铁路职业技术学院李瑞荣编写,第二、三章由郑州铁路职业技术学院姚存治编写,第六、七、八章由北京电气化学校赵立恒编写。

本书由教育部推荐专家北京交通大学汤钰鹏和苏州机电高等职业技术学校马祥兴主审。北京电气化学校林宏裔老师、广州铁路职业技术学院赵华军老师对本书的编写提出了宝贵的意见,在此一并表示衷心的感谢。

本书可作为高职高专自动化专业、供用电技术专业、电气技术应用专业及其他机电类专业教材,也可供相关专业的工程技术人员参考使用。

本课程是一门实践性很强的课程,但考虑到各校的实验设备均不相同,这里没有列出实验指导书,希望各学校在使用本教材时,根据自身设备编制具体的实验指导书,以配合本课程的教学。

由于编者的水平所限,书中难免存在缺点和谬误,诚恳欢迎读者提出宝贵意见。

编 者

2006 年 3 月于广州

目 录

绪 论	1
-----	---

第一章 电力电子器件

第一节 电力二极管	4
第二节 晶闸管	8
第三节 门极可关断晶闸管(GTO)	17
第四节 电力晶体管(GTR)	20
第五节 电力场效应晶体管	24
第六节 绝缘栅双极型晶体管(IGBT)	27
第七节 电力电子器件的驱动	29
第八节 电力电子器件的保护	39
第九节 电力电子器件的串并联	43
本章小结	44
复习思考题	45

第二章 整流电路

第一节 单相可控整流电路	48
第二节 三相可控整流电路	57
第三节 变压器漏感对整流电路的影响	65
本章小结	67
复习思考题	68

第三章 有源逆变电路

第一节 单相有源逆变电路	70
第二节 三相有源逆变电路	72
第三节 逆变失败与最小逆变角的限制	74
第四节 有源逆变电路应用	76
本章小结	78
复习思考题	78

第四章 直流斩波电路

第一节 基本斩波电路	80
第二节 复合斩波电路	86

本章小结 89

复习思考题 89

第五章 无源逆变电路

第一节 无源逆变电路的工作原理 91

第二节 电压型逆变电路 93

第三节 电流型逆变电路 98

第四节 脉宽调制(PWM)控制电路 101

本章小结 106

复习思考题 107

第六章 交流变换电路

第一节 交流调压电路 108

第二节 交交变频电路 113

本章小结 115

复习思考题 116

第七章 软开关电路

第一节 开关的基本概念 117

第二节 典型的软开关电路 119

本章小结 123

复习思考题 123

第八章 电力电子装置举例

第一节 开关电源 124

第二节 不间断电源 127

第三节 无功补偿装置 130

本章小结 132

复习思考题 132

参考文献 133

绪 论

一、电力电子技术研究领域

电力电子技术是应用于电力领域的电子技术,具体来说,就是应用电力电子器件对电能进行变换与控制的技术,它使来自工频电网或直流电网的电能最终变换成不同频率、性质和用途的电能,以适应不同的用电装置的需要。

电力电子技术包括电力电子器件制造技术、应用技术和控制技术,本书主要介绍电力电子器件的应用与控制技术。电力电子器件的应用技术以前又称为变流技术,它的研究对象是电力电子器件的应用、电力电子器件构成的电力变换电路及控制技术、电力电子装置和电力电子系统的开发与应用等。

二、电力电子技术的发展历史

电力电子技术的物理基础是电力电子器件。如果没有晶闸管、电力晶体管、电力场效应管等电力电子器件,也就没有电力电子技术。电力电子技术的发展历史可追溯到 19 世纪初,但革命性的发展始自晶体管发明以后。1947 年美国著名的贝尔实验室发明了晶体管,引发了电子技术的一场革命,半导体固态电子学从此诞生。最先应用于电力变换领域的半导体器件则是硅二极管,它在 20 世纪 50 年代出现后,在大功率的电力变换领域,很快取代了汞弧整流器(引燃管)。以硅二极管为代表的电力半导体器件及其相应的变流装置在世界范围内很快发展起来,1957 年美国通用电气公司研制出第一只可控型的电力电子器件——晶闸管(SCR),由于其优越的电气性能和控制性能,使之很快在电化学工业、钢铁工业(轧钢用电气传动、感应加热等)、电力工业(直流输电、无功补偿等)以及轨道交通(电传动机车、地铁列车等)等领域得到应用,开创了电力电子技术的新时代。半导体固态电子学此后就向两个方向发展:一支是以晶体管集成电路为核心,形成对信息处理的微电子技术;另一支是以晶闸管为核心,形成对电能变换与控制的电力电子技术。

晶闸管是一种半控型器件,通过对晶闸管门极的控制能够使其导通,但不能通过对门极的控制使其关断。而晶闸管的关断通常依靠电网电压过零来实现,或者需添加复杂的辅助电路才能使晶闸管强制关断,这就使晶闸管的应用受到了局限。

20 世纪 70 年代后期,在 SCR 基础上研制成功的可关断晶闸管(GTO)与在晶体管基础上研制成功的电力晶体管(GTR)及其模块相继进入实用化。这些通过对控制极控制既可使其开通又使其关断的全控型电力电子器件自身具有可关断性能,且具有较高的开关速度,使其可用于开关频率较高的电路,在整流、逆变、斩波、变频电路中得到广泛应用。尤其是采用 PWM 控制技术的变频调速装置,实现了对大功率交流电机的大范围无级调速控制,为电力电子技术的应用开辟了广阔的前景。

在 20 世纪 80 年代后期,绝缘栅双极型晶体管(IGBT)、MOS 控制晶闸管(MCT)、静电感应晶体管(SIT)、静电感应晶闸管(SITH)等全控型电力电子器件相继问世。它们的共同特点是由前述器件的电流型控制改变为电压型控制,集 MOSFET 的驱动功率低、开关速度快的优

点和 GTO、GTR 通态压降小、载流能力大的优点于一身,性能十分优越,成为现代电力电子技术的主导器件。另一方面,又出现了一批多功能的控制模块,诸如各种 PWM(脉冲宽度调制)模块以及新型全控型器件模块(如 IGBT)的栅极驱动与保护模块等。

从 20 世纪 90 年代起,电力电子技术与微电子技术的进一步结合,使电力电子器件朝着大容量、智能化方向迅速发展,其代表是智能功率模块(IPM),如国产蓝箭列车的主变流器采用了单个容量为 4 500 V/1 500 A 的 IPM 模块。目前,在 GTO、IGBT 的基础上发展起来的新型大功率电力电子器件,如集成门极换流晶闸管(IGCT)、发射极关断晶闸管(ETO)、电子注入增强型门极晶体管(IEGT)等,容量普遍达到 4 500 V/3 000 A 的水平,有的已达到 6 000 V/6 000 A。

三、电力电子技术的用途

电力电子系统的根本任务是实现电力变换。电力变换通常可分为四大类:

1. AC-DC 变换,即将交流电变换为直流电,一般称为整流。可由二极管整流器(不可控整流)或晶闸管整流器(可控整流)实现。

2. DC-AC 变换,一般称为逆变,是将直流电变换为交流电。根据其负载性质的不同,可分成有源逆变和无源逆变两种。

3. DC-DC 变换,指一种电压的直流变为另一种电压的直流,可用直流斩波器实现。

4. AC-AC 变换,即把交流电的参数(幅值、频率)加以转换,又称交流变换。

另外,利用高压、大电流电力电子器件可以组成无触点开关,实现电路在高频率条件下的通断,而且具有无磨损、无噪声、寿命长、易控制的特点。

电力电子技术的应用领域十分广泛。它不仅用于一般工业生产,也广泛用于交通运输、电力系统、新能源系统等,以及用于通信系统、计算机系统和医疗设备的高品质供电。在照明、空调、楼宇等民用领域也有着广泛的使用。

1. 一般工业

电力电子装置广泛应用于电力拖动的交、直流调速系统上,如各种机床、轧钢机等。一些调速要求不高的设备,如大型风机、水泵、压缩机等,为了实现节能降耗,也使用了变频装置。电解、电镀等电化学工业都大量使用整流电源。

2. 交通运输

电气化铁道中广泛采用电力电子技术。直流传动电力机车采用整流或斩波装置,交流传动电力机车采用变频装置。部分城市电车也采用了斩波或变频装置。一些大型舰艇的推进系统也采用了电力电子装置。

3. 电力系统

在一些发达国家,电能的 60%要经过电力电子技术的处理。直流输电在长距离、大容量输电时有很大的优势,而送电端的整流站和受电端的逆变站都采用晶闸管变流装置。晶闸管控制电抗器、晶闸管投切电容器都是重要的无功补偿器,可以取代旋转式的同步补偿机。近年来出现的静止无功发生器、有源电力滤波器等新型电力电子装置具有更为优越的无功补偿和谐波抑制性能。

4. UPS 与开关稳压电源

通信系统、自动控制系统、计算机等需要高精度直流源的系统,现在都广泛使用体积小、重量轻、效率高的高频开关电源,取代了旧式的线性电源。UPS 在这些系统中也被广泛使用。

5. 家用电器

变频空调、电子节能灯是家用电器应用电力电子技术的典型例子,在一些微波炉、洗衣机、电冰箱等家用电器中,也应用了电力电子技术。

电力电子技术作为电力、电子、控制三大电气工程技术之间的边缘学科,涉及电气工程中的很多领域,几乎电气工程领域的任何一门学科的发展,都会直接或间接促进电力电子技术的发展。社会生产发展对电力电子技术的需求,也不断促进了电力电子技术的发展。随着科学技术的发展,新型电力电子器件和控制技术将会不断涌现,电力电子装置将朝着大容量、智能化、模块化、小型化、高可靠性的方向发展。

本书着重介绍了目前应用较广泛的电力电子器件及其应用电路。本着理论适度、应用为主的原则,没有过多地讨论器件内部的详细结构,也没有太多烦琐的公式推导,而是对电力电子技术的典型应用领域和典型电路作了较大篇幅的重点讨论,以满足电气类高职学生学习本课程的需要。

第一章 电力电子器件

从控制方式上来说,电力电子器件可分为:不能自由控制开通和关断的不可控型电力电子器件;可由控制信号控制开通,但不能由控制信号控制关断的半控型电力电子器件;可完全由控制信号控制开通和关断的全控型电力电子器件。本章主要介绍目前应用范围较广的典型电力电子器件以及这些器件的驱动与保护电路,为后面的学习打下基础。

第一节 电力二极管

电力二极管(Power Diode)是最早获得应用的电力电子器件。虽然是不可控器件,但其结构和原理简单,工作可靠,目前仍广泛应用于从交流到直流的不可控整流电路,以及在斩波器、逆变器中用作反馈、续流电路。

一、电力二极管的工作原理

制造电力二极管的基本材料是硅半导体,它是单个PN结的结构,一般用扩散工艺制造。电力二极管实际上是由一个面积较大的PN结和两端引线及封装组成,它的外形、结构和电气符号见图1-1。图中,A极又称为阳极,K极又称为阴极。电力二极管主要有螺栓型和平板型两种封装方式。

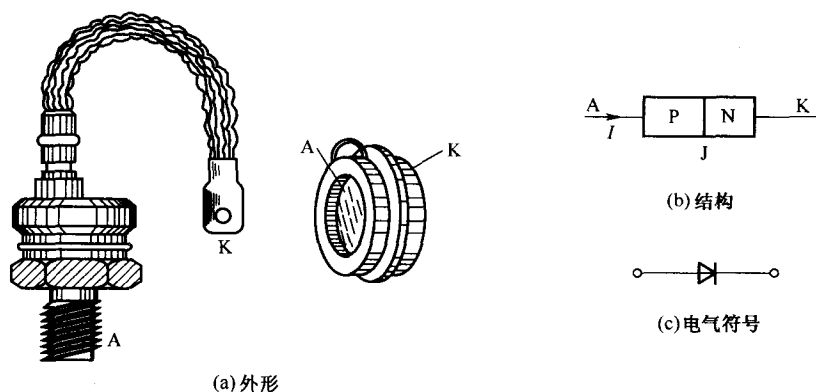


图 1-1 电力二极管的外形、结构和电气符号

PN 结具有单向导电性。当电力二极管外加正向电压,即阳极(A 极)加正电压,阴极(K 极)加负电压时,PN 结处于正向偏置状态,此时有从 P 向 N 的正向电流流过,PN 结呈现为低电阻,这种状态被称为正向导通状态,此时电力二极管两端只有 1 V 左右的电压降。当电力二

极管外加反向电压,即阳极加负电压,阴极加正电压时,PN 结处于反向偏置状态,PN 结呈现为高电阻,这种状态被称为反向截止状态,此时只有极小的反向漏电流流过 PN 结。

PN 结具有一定的反向耐压能力,但当施加的反向电压过大时,PN 结反向截止的状态被破坏,反向电流将会急剧增大,发生反向击穿。反向击穿发生时,若外电路采取了保护措施,将反向电流限制在一定的范围内,则当反向电压降低后 PN 结仍可恢复原来的状态。但如果反向电流未被限制住,使得反向电流发热超过 PN 结容许的耗散功率,就会因热量散发不出去而导致 PN 结温度上升,直至过热而被烧毁,这种情况称为热击穿。

电力二极管一般都工作在大电流、高电压的场合。因此二极管本身耗散功率大、发热多,使用时必须配备合适的散热器,并采用合适的冷却措施,以使器件的温度不超过规定值,确保器件安全运行。

二、电力二极管的特性与参数

1. 电力二极管的伏安特性

电力二极管的伏安特性如图 1-2 所示。当外加电压大于门坎电压 U_{TO} 时,正向电流开始明显增加,进入稳定导通状态。图中 I_F 为二极管的正向电流,与之对应的二极管两端的正向压降 U_F 即为二极管的正向电压降。稳定导通时,电力二极管的管压降一般为 1 V 左右,并且这个值基本上不随电流大小变化,在应用计算时,可以认为它是一个固定值。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,器件处于反向截止状态。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。

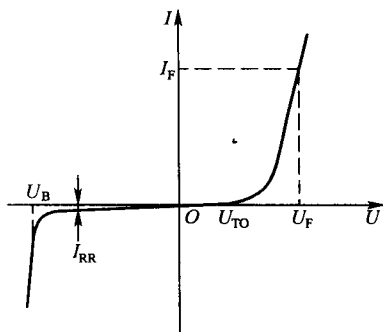


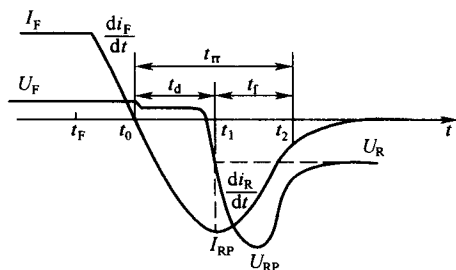
图 1-2 电力二极管的伏安特性

2. 电力二极管的开关特性

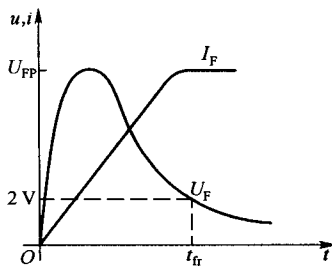
电力二极管的开关特性指电力二极管在零偏置、正向偏置和反向偏置这三种工作状态转换时呈现的动态特性。

(1) 关断特性

关断特性指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、电流随时间变化的关系,其波形如图 1-3(a)所示。



(a) 正向偏置转换为反向偏置



(b) 零偏置转为正向偏置

图 1-3 电力二极管的开关过程

当原来处于正向导通的电力二极管的外加电压在 t_F 时刻突然从正向变为反向时,在此反向电压作用下,正向电流 I_F 开始下降,下降速率由反向电压的大小和电路中的电感决定,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数载流子(少子),器件并没有恢复反向阻断能力,这些少子在反向电压作用下被抽出电力二极管,形成较大的反向电流,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 时刻后二极管开始恢复反向阻断,反向恢复电流迅速下降,在外电路电感的作用下会在器件两端产生比外加反向电压大得多的反向过冲电压 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等于外加电压的 U_R ,电力二极管完全恢复反向阻断能力。

图 1-3 中,时间 $t_d = t_1 - t_0$ 称为延迟时间, $t_f = t_2 - t_1$ 称为电流下降时间,而 $t_{rr} = t_d + t_f$ 称为电力二极管的反向恢复时间。

(2) 开通特性

开通特性为电力二极管由零偏置转换为正向偏置的通态过程的电压、电流随时间变化的关系,其波形如图 1-3(b)所示。开通过程中电力二极管两端也会出现一个过冲电压 U_{FP} 。经过一段时间才接近稳态压降值。这个过程的时间 t_{tr} 称为正向开通时间。

3. 电力二极管的主要参数

(1) 额定正向平均电流 $I_{F(AV)}$

器件长期运行时,在规定的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,用 $I_{F(AV)}$ 表示。正向平均电流是按照电流的发热效应来定义的,应用中应按照流过电力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电流定额,并应留有一定的裕量。通过对正弦半波电流的换算可知,正向平均电流 $I_{F(AV)}$ 对应的有效值为 $1.57 I_{F(AV)}$ (注:电力二极管与晶闸管的电流定额换算方法相同,具体见本章第二节)。

(2) 正向压降 U_F

指器件在指定温度下,流过某一指定的稳态正向电流时对应的管子两端正向压降(习惯称为管压降)。有时候,其参数表中也给出在指定温度下流过某一瞬态正向大电流时电力二极管的最大瞬时正向压降。

(3) 反向重复峰值电压 U_{RRM}

指对器件能重复施加的反向最高峰值电压。此电压通常为其雪崩击穿电压 U_B 的 $2/3$ 。

(4) 反向漏电流 I_{RR}

指器件对应于反向重复峰值电压时流过器件的反向电流。

(5) 最高工作结温 T_{JM}

指在 PN 结不至于损坏的前提下所能承受的最高平均温度,用 T_{JM} 表示。 T_{JM} 通常在 $125 \sim 175^\circ\text{C}$ 范围内。

(6) 浪涌电流 I_{FSM}

指器件所能承受的最大的一个或连续几个工频周期的过电流。

4. 电力二极管的主要类型

电力二极管在许多电力电子电路中有着广泛的应用。电力二极管可在整流电路中作整流元件,可在感性负载电路中作续流元件,还可在各种变流电路中作电压隔离、箝位或保护元件。

下面根据电力二极管的正向压降、反向耐压、反向电流、反向恢复特性的不同,介绍几种常用的电力二极管。

(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。其反向恢复时间较长,一般在5 μ s以上。正向电流定额和反向电压定额可以达到很高,分别可达数千 A 和数千 V 以上。

(2) 快恢复二极管

恢复过程很短,特别是反向恢复过程很短(反向恢复时间在5 μ s以下)的二极管称为快恢复二极管(Fast Recovery Diode,简称 FRD),简称快速二极管。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 ns 或以上,后者则在100 ns以下,甚至达 20~30 ns,多用于高频整流和逆变电路中。

(3) 肖特基二极管

以金属和半导体接触形成的势垒为基础的二极管称为肖特基二极管。肖特基二极管的优点在于其反向恢复时间很短,为 10~40 ns,正向恢复过程中不会有明显的电压过冲,正向压降也很小,但当其反向耐压提高时正向压降会提高而不能满足要求,因此多用于200 V以下低压场合,另外,其反向漏电流较大且对温度敏感,必须严格限制其工作温度。

表 1-1 列出了常见电力二极管的主要性能参数。

表 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
ZP1~4000	1~4 000	50~5 000	1~40 mA	0.4~1		
ZK3~2000	3~2 000	100~400	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	
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	50	600	50 μ A	1.4	<400 ns	
MUR10020CT 超快恢复功率二极管	50	200	25 μ A	1.1	<50 ns	
MBR30045CT 肖特基功率二极管	150(单支)	45	0.8 mA	0.78	≈ 0	

第二节 晶 闸 管

晶闸管(Thyristor)是硅晶体闸流管的简称,俗称可控硅(SCR)。它是一种开通时刻可以控制的半控型电力电子器件,它所能承受的电压和电流容量是目前电力电子器件中最高的(目前可达4 500 A/6 500 V的水平)。从1957年诞生以来到现在,晶闸管一直广泛应用于各种低频大功率的电力变流装置上。

晶闸管有多种派生类型,但由于普通晶闸管历史最长、应用最广,晶闸管一词通常专指普通晶闸管。

一、晶闸管的结构与工作原理

晶闸管是一种大功率PNPN四层半导体元件,其外形和电气符号如图1-4所示。从外形上看,跟电力二极管一样,也主要有螺旋式和平板式两种封装结构。它有三个引出极,分别是阳极A、阴极K和门极G。

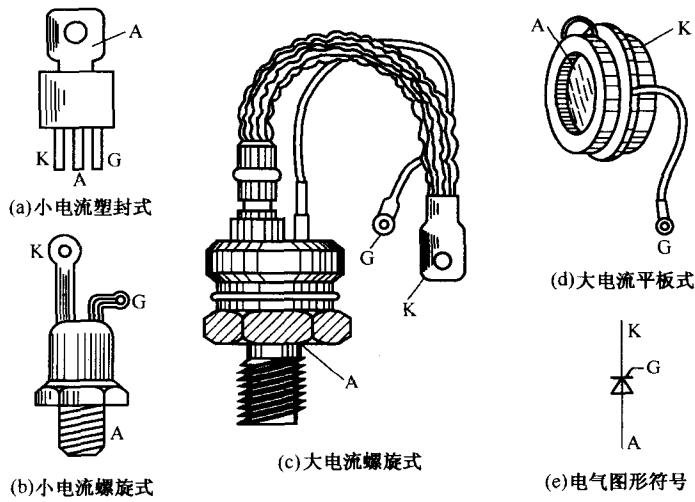


图1-4 晶闸管的外形和电气图形符号

大功率晶闸管工作时产生大量的热量,因此必须安装散热器。螺旋式晶闸管紧拴在铝制散热器上,如图1-5(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,以获得较好的散热效果,如图1-5(b)所示。

图1-6(a)是晶闸管内部结构简图,它是一个PNPN四层半导体结构,分别命名为 P_1 、 N_1 、 P_2 、 N_2 四个区。 P_1 区引出阳极A, N_2 区引出阴极K, P_2 区引出门极G。四个区形成 J_1 、 J_2 、 J_3 三个PN结。如果正向电压(阳极电压高于阴极电压)加到器件上,则 J_2 处于反向偏置状态,器件A、K两端之间处于阻断状态,只能流过很小的正向漏电流。如果反向电压加到器件上,则 J_1 和 J_3 反偏,器件也处于阻断状态,仅有极小的反向漏电流通过。

晶闸管导通的工作原理可以用双晶体管模型来解释。如图1-6(b)所示,如在器件上取一倾斜的截面,则晶闸管可以看做由 $P_1N_1P_2$ 和 $N_1P_2N_2$ 构成的两个晶体管 V_1 、 V_2 组合而成。其等效电路及工作原理如图1-6(c)所示。当晶闸管阳极施加正向电压时,若给门极G也加正

向电压,门极电流 I_G 注入 V_2 基极,经三极管 V_2 放大后产生集电极电流 I_{C2} , I_{C2} 又构成三极管 V_1 的基极电流,放大后成为集电极电流 I_{C1} ,又进一步增大 V_2 的基极电流,如此形成强烈的正反馈,即

$$I_G \uparrow \rightarrow I_{B2} \uparrow \rightarrow I_{C2}(=\beta_2 I_{B2}) \uparrow \rightarrow I_{B1} \uparrow \rightarrow I_{C1}(=\beta_1 I_{B1}) \uparrow$$

最后两个三极管 V_1 、 V_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。此时若撤除门极电压, V_1 、 V_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。

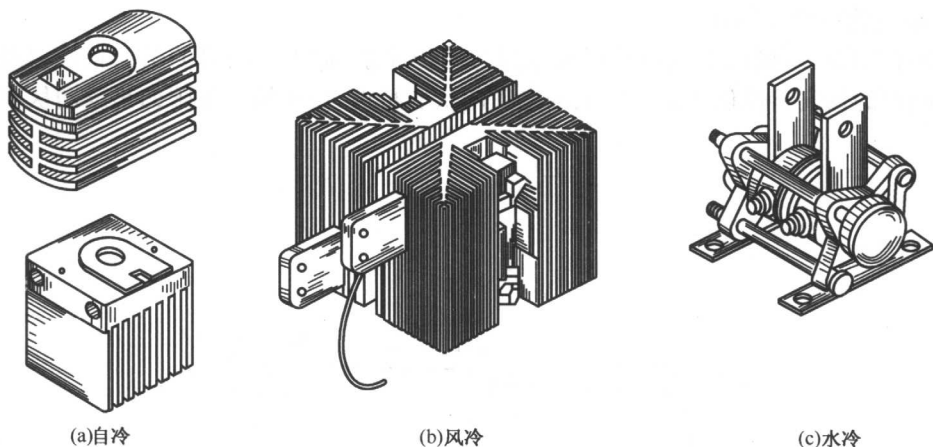


图 1-5 晶闸管的散热器

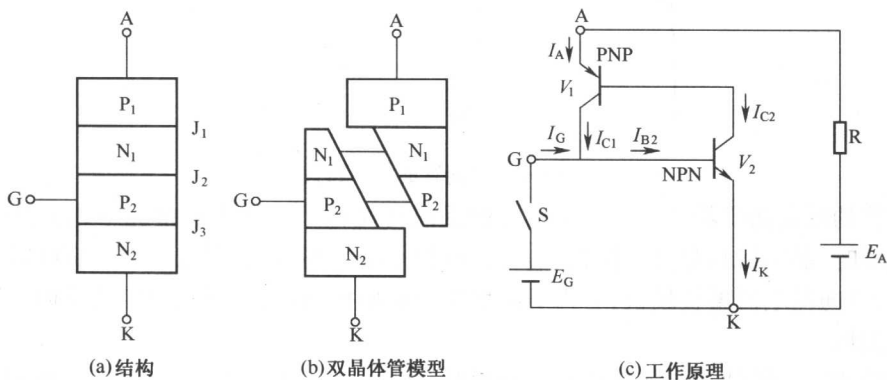


图 1-6 晶闸管的内部结构和工作原理

晶闸管导通后,即使撤除门极驱动电压,晶闸管仍维持导通,只有设法使阳极电流 I_A 减小到维持电流 I_H (约十几 mA) 以下, V_1 、 V_2 退出饱和导通状态,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,晶闸管都不能导通。综上所述,晶闸管导通必须同时具备以下两个基本条件:

- (1) 在晶闸管的阳极和阴极之间加上一定大小的正向电压 U_{AK} ;
- (2) 在门极和阴极之间加上一定的正向触发电压 U_{GK} 。

晶闸管像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,即使阳极已加正向电压,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,因而晶闸管又称为半控型电力电子器件。

根据晶闸管的特性,我们可以很方便地用万用表测试小型晶闸管的好坏。用万用表的 $R \times 1K$ 或 $R \times 100$ 挡测量阳极与阴极的正、反向电阻都应很大,然后用黑表笔接阳极,红表笔接阴极,再用黑表笔碰门极,若正向电阻大幅下降,且黑表笔离开门极后正向电阻不会变大,说明晶闸管能正常触发和工作。对于小型的双向晶闸管,可也以用类似的方法进行测试。

二、晶闸管的特性

1. 晶闸管的伏安特性

晶闸管阳极、阴极间的电压和阳极电流之间的关系,称为晶闸管的伏安特性,如图 1-7 所示。晶闸管的伏安特性位于第一象限的是正向伏安特性,位于第三象限的是反向伏安特性。

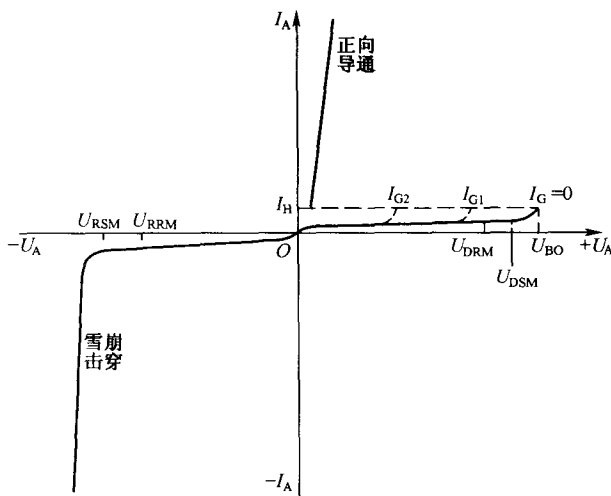


图 1-7 晶闸管的伏安特性

晶闸管的反向伏安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数值时,反向漏电流增长较快,若再继续增加反向阳极电压,会导致晶闸管反向击穿,造成晶闸管永久损坏。

晶闸管的正向特性又有阻断状态和导通状态之分。当 $I_G = 0$ 时,逐渐增大阳极电压 U_A ,晶闸管先是处于阻断状态,只有很小的正向漏电流;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,晶闸管由正向阻断状态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”。“硬开通”会使晶闸管损坏,所以通常不允许发生这种情况。随着门极电流 I_G 的增大,晶闸管的正向转折电压 U_{BO} 降低。当 I_G 足够大时,晶闸管的正向转折电压很小,可以看成与二极管一样,一旦加上足够的正向阳极电压,器件立即导通。

导通状态下的晶闸管特性与二极管的正向特性相似,能通过较大的阳极电流,而本身的管压降却很小。当晶闸管导通后,要使晶闸管恢复阻断状态,只有逐步减少阳极电流 I_A ,当 I_A