



高等学校 规划教材
电子信息类

电力电子技术基础

徐以荣 冷增祥



东南大学出版社

TM1
146

高等学校电子信息类规划教材

电力电子技术基础

徐以荣 冷增祥

东南大学出版社
·南京·

内 容 提 要

本书介绍了电力半导体器件的原理和特性,以及由这些器件组成的各种电力电子电路。器件除普通晶闸管及派生元件外,着重介绍了全控型器件,包括功率场效应晶体管(P-MOSFET)、电力晶体管(GTR)、可关断晶闸管(GTO)及复合型器件绝缘栅双极晶体管(IGBT)等;电路则以可控整流和逆变、变频为重点,亦介绍了直流变换和交流调压;还对电力半导体器件的串、并联和保护,以及电力电子技术的应用作了介绍。

本书可作为自动控制、自动化、电气工程及其自动化、机电一体化等专业的《电力电子技术》课程的教材,亦可供有关工程技术人员和研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术基础/徐以荣主编. —南京:东南大学出版社,1999.11
高等学校工科电子类规划教材
ISBN 7-81050-584-X

I. 电… II. 徐… III. 半导体技术-高等学校-教材 IV. TN3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 45678 号

东南大学出版社出版发行
(南京四牌楼 2 号 邮编 210096)

出版人:宋增民

江苏省新华书店经销 南京雄州印刷有限公司印刷
开本:787mm×1092mm 1/16 印张:17 字数:435 千字

1999 年 12 月第 1 版 2004 年 9 月第 5 次印刷

印数:13001-16000 册 定价:22.00 元

(凡因印装质量问题,可直接向发行科调换。电话:025-83795601)

出版说明

为做好全国电子信息类专业“九五”教材的规划和出版工作,根据国家教委《关于“九五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》和《普通高等教育“九五”国家级重点教材立项、管理办法》,我们组织各有关高等学校、中等专业学校、出版社、各专业教学指导委员会,在总结前四轮规划教材编审、出版工作的基础上,根据当代电子信息科学技术的发展和面向 21 世纪教学内容和课程体系改革的要求,编制了《1996~2000 年全国电子信息类专业教材编审出版规划》。

本轮规划教材是由个人申报,经各学校、出版社推荐,由各专业教学指导委员会评选,并由我部教材办协商各专指委、出版社后,审核确定的。本轮规划教材的编制,注意了将教学改革力度较大,有创新精神、特色风格的教材和质量较高、教学适用性较好、需要修订的教材以及教学急需,尚无正式教材的选题优先列入规划。在重点规划本科、专科和中专教材的同时,选择了一批对学科发展具有重要意义,反映学科前沿的选修课、研究生课教材列入规划,以适应高层次专门人才培养的需要。

限于我们的水平和经验,这批教材的编审、出版工作还可能存在不少缺点和不足,希望使用教材的学校、教师、同学和广大读者积极提出批评和建议,以不断提高教材的编写、出版质量,共同为电子信息类专业教材建设服务。

电子工业部教材办公室

前 言

本教材系按电子工业部的《1996~2000年全国电子信息类专业教材编审出版规划》，由自动控制专业教学指导委员会编审、推荐出版。本教材由东南大学徐以荣担任主编，主审陈敏逊，责任编委谢剑英。

本教材的参考学时数 50 学时，其主要内容有：第 1 章晶闸管及其可控整流电路，讲述普通晶闸管及其交、直流变换电路；第 2 章变流器运行，介绍有源逆变及交、直流变换实际运行的有关问题；第 3 章门极触发电路，通过对分立元件电路的介绍以便进一步掌握集成和数字触发器的使用；第 4 章交流调压和直流变换，分别介绍交、直流电压幅值变换的原理和方法及双向晶闸管和逆导晶闸管；第 5 章逆变和变频，着重介绍单相和三相的直-交变频，简介了交-交变频；第 6 章全控型电力半导体器件，介绍已广泛使用的 GTO、GTR、P-MOSFET、IGBT 及一些新型器件 MCT、SIT、SITH；第 7 章电力半导体器件的串、并联和保护，重点介绍了电压和电流的保护；第 8 章电力电子技术应用，介绍了在电力传动及其他领域的一些应用。

使用本教材时应注意学时的合理分配，第 1 章至第 5 章是基本内容，占大部分学时。在各章也应有所侧重，比如逆变和变频重点在电压型变频器，电流型变频器可少讲或不讲。第 6 章可着重介绍广泛使用的 GTO、GTR、P-MOSFET、IGBT，其余可留作自学，在学时不多的情况下，第 7、8 章大部分内容可留作自学，但直流电动机可逆电路应作适当介绍。另外还应配以必要的实验。

本教材由冷增祥编写绪论和第 4、5、6、7 章，由徐以荣编写第 1、2、3、8 章。上海交通大学陈敏逊认真审阅了全书，提出了许多宝贵意见，在此表示诚挚的感谢。由于编者水平有限，书中难免还存在一些缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

编 者

1999 年 8 月

目 录

0 绪 论	(1)
0.1 电力电子技术的内容	(1)
0.2 电力电子技术的发展	(2)
0.3 电力电子技术的重要作用	(3)
0.4 本课程的性质、分析方法和学习要求	(3)
1 晶闸管及其可控整流电路	(5)
1.1 普通晶闸管	(5)
1.1.1 晶闸管结构	(5)
1.1.2 晶闸管的工作原理	(5)
1.1.3 晶闸管特性	(8)
1.1.4 晶闸管主要参数	(9)
1.2 单相桥式可控整流电路	(14)
1.2.1 单相全控桥式整流电路	(15)
1.2.2 单相半控桥式整流电路	(19)
1.3 三相半波可控整流电路	(20)
1.3.1 三相半波不可控整流电路	(20)
1.3.2 三相半波电阻负载可控整流电路	(22)
1.3.3 三相半波感性负载可控整流电路	(24)
1.4 三相桥式可控整流电路	(26)
1.4.1 共阴极接法与共阳极接法	(26)
1.4.2 三相全控桥式整流电路	(26)
1.4.3 三相半控桥式整流电路	(33)
1.5 反电势负载的特点	(38)
1.5.1 晶闸管整流电路反电势负载时的工作情况	(38)
1.5.2 反电势负载的特点	(39)
习题和思考题	(40)
2 变流器运行	(43)
2.1 换流重叠角	(43)
2.1.1 交流侧电感对三相不可控整流的影响	(43)
2.1.2 三相半波可控整流电路的换流重叠角	(46)
2.1.3 其他整流电路的换流重叠角	(47)
2.2 有源逆变	(48)
2.2.1 有源逆变产生的条件	(48)
2.2.2 三相半波可控整流电路的有源逆变	(50)
2.2.3 三相全控桥式电路的逆变工作状态	(53)
2.3 变流器外特性	(54)

2.3.1	整流器外特性	(54)
2.3.2	有源逆变器外特性	(55)
2.4	谐 波	(56)
2.4.1	谐波分析	(56)
2.4.2	负载谐波的影响	(60)
2.4.3	电源中谐波的影响	(62)
2.5	功率因数	(64)
2.5.1	功率因数的基本概念	(64)
2.5.2	整流电路的功率因数	(64)
2.5.3	提高功率因数的途径	(67)
	习题和思考题	(69)
3	门极触发电路	(71)
3.1	概 述	(71)
3.1.1	门极触发信号的种类	(71)
3.1.2	晶闸管对门极触发电路的要求	(71)
3.2	单结晶体管触发电路	(73)
3.2.1	单结晶体管(UJT)	(73)
3.2.2	单结晶体管脉冲形成电路	(74)
3.2.3	用电位控制移相的单结晶体管触发电路	(75)
3.3	晶体管触发电路	(77)
3.3.1	锯齿波移相的晶体管触发电路	(77)
3.3.2	触发器的定相	(82)
3.4	集成触发器	(84)
3.4.1	集成触发器原理及应用	(84)
3.4.2	集成触发器类型	(87)
3.5	数字触发器	(88)
3.5.1	由硬件构成的数字触发器	(88)
3.5.2	微机数字触发器	(90)
	习题和思考题	(92)
4	交流调压和直流变换	(94)
4.1	交流调压	(94)
4.1.1	单相交流调压	(94)
4.1.2	三相交流调压	(99)
4.1.3	晶闸管调压器	(102)
4.1.4	双向晶闸管	(103)
4.2	直流变换器	(105)
4.2.1	斩波器的工作原理	(105)
4.2.2	斩波器的控制方式	(108)
4.2.3	直流电动机负载时的斩波器结构	(109)
4.2.4	输入与输出隔离的直流变换器	(113)
4.2.5	直流 PWM 的控制	(117)

4.3 直流电路中的晶闸管换流问题	(122)
4.3.1 晶闸管的换流	(122)
4.3.2 晶闸管斩波器的换流	(123)
4.3.3 逆导晶闸管	(123)
习题和思考题	(124)
5 逆变和变频	(126)
5.1 概 述	(126)
5.1.1 逆变与变频的含义	(126)
5.1.2 逆变和变频的两种类型	(127)
5.2 负载换流逆变器	(128)
5.2.1 RLC 串联谐振逆变器	(129)
5.2.2 并联谐振逆变器	(133)
5.3 强迫换流电压型逆变器	(135)
5.3.1 串联电感式逆变器	(135)
5.3.2 串联二极管式逆变器	(140)
5.3.3 具有辅助换流晶闸管的逆变器	(142)
5.3.4 集中换流逆变器	(144)
5.4 强迫换流电流型逆变器	(144)
5.4.1 串联二极管式逆变器	(144)
5.4.2 辅助晶闸管换流逆变器	(147)
5.5 逆变器的谐波、调压方法和多重化	(148)
5.5.1 输出波形中的谐波含量	(148)
5.5.2 输出电压的调节	(148)
5.5.3 多重化	(149)
5.6 脉宽调制(PWM)逆变器	(153)
5.6.1 正弦脉宽调制(SPWM)原理及其优点	(154)
5.6.2 同步调制和异步调制	(158)
5.6.3 调制信号的波形	(159)
5.6.4 PWM 波形的软件生成	(161)
5.6.5 指定谐波消除法	(163)
5.6.6 微机控制和专用集成电路	(164)
5.6.7 跟踪型 PWM	(165)
5.7 交交变频器	(167)
5.7.1 正弦波交交变频器	(167)
5.8 软开关技术	(174)
习题和思考题	(177)
6 全控型电力半导体器件	(179)
6.1 可关断晶闸管(GTO)	(179)
6.1.1 结构特点和关断原理	(179)
6.1.2 特性和参数	(180)
6.1.3 缓冲电路	(181)

6.1.4	对门极信号的要求	(183)
6.1.5	门极驱动电路	(185)
6.2	大功率晶体管(GTR)	(186)
6.2.1	特性和参数	(186)
6.2.2	安全工作区	(188)
6.2.3	缓冲电路	(190)
6.2.4	开关特性	(193)
6.2.5	驱动电路	(195)
6.2.6	GTR 模块	(201)
6.3	电力场效应晶体管(P-MOSFET)	(202)
6.3.1	结构和工作原理	(202)
6.3.2	静态特性和参数	(203)
6.3.3	动态特性和参数	(204)
6.3.4	功率 MOSFET 的特点	(206)
6.3.5	功率 MOSFET 的驱动电路	(207)
6.4	静电感应晶体管(SIT)和静电感应晶闸管(SITH)	(209)
6.4.1	静电感应晶体管(SIT)	(209)
6.4.2	静电感应晶闸管(SITH)	(210)
6.5	复合电力半导体器件	(211)
6.5.1	绝缘栅双极晶体管(IGBT)	(211)
6.5.2	金属氧化物可控晶闸管(MCT)	(216)
6.6	电力电子技术发展概貌	(217)
6.6.1	90 年代电力半导体器件的水平	(217)
6.6.2	电力半导体器件的发展	(218)
6.6.3	各种装置的容量-频率范围	(220)
	习题和思考题	(220)
7	电力半导体器件的串并联和保护	(222)
7.1	电力半导体器件的串并联	(222)
7.1.1	晶闸管器件的串联运行	(222)
7.1.2	晶闸管器件的并联运行	(223)
7.2	电力半导体器件和装置的保护	(225)
7.2.1	常规的过压、过流保护	(226)
7.2.2	用电子线路实施保护	(231)
	习题和思考题	(237)
8	电力电子技术的应用	(238)
8.1	直流电动机调速及其可逆电路	(238)
8.1.1	直流电动机调速	(238)
8.1.2	可逆电路	(238)
8.2	交流电动机调速	(240)
8.2.1	交流电动机的调压调速	(240)
8.2.2	串级调速	(241)

8.2.3 变频调速	(241)
8.3 非电动机方面的一些应用	(244)
8.3.1 无触点开关	(244)
8.3.2 电加热	(245)
8.3.3 电压调节	(247)
8.3.4 不间断电源	(249)
8.3.5 电化学	(250)
8.3.6 高压直流输电	(250)
8.3.7 蓄电池充电机	(251)
8.3.8 开关电源	(252)
8.3.9 电子镇流器	(254)
8.4 其他应用领域、发展趋势及新动向	(255)
8.4.1 其他应用领域	(255)
8.4.2 发展趋势	(255)
8.4.3 发展的新动向	(256)
习题和思考题	(257)
参考文献	(259)

0 绪 论

0.1 电力电子技术的内容

电力电子技术,又称功率电子学(Power Electronics)。它主要研究各种电力半导体器件,以及由这些电力电子器件来构成各式各样的电路或装置,以高效地完成对电能的变换和控制,其功能如图 0.1 所示。它既是电子学在强电(高电压、大电流)或电工领域的一个分支,又是电工学在弱电(低电压、小电流)或电子领域的一个分支,或者说是强弱电相结合的新领域。

大家知道,电有直流(DC)和交流(AC)两大类。前者有电压幅值的不同,后者除电压幅值外,还有频率和相位两个要素。实际应用中,常常需要在两种电能之间,或对同种电能的一个或多个参数(如电压、电流、频率和相位等)进行变换。不难看出,这些变换共有四种基本类型,它们各可通过相应的变流器或变换器(Converter)来实现,这就是:

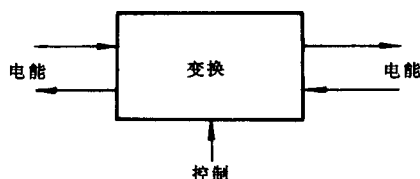


图 0.1 电力电子装置的功能

AC→DC,即交流电转换为直流电。这种变换称为整流,所用的装置叫整流器(Rectifier),用于如充电、电镀、电解和直流电动机的速度调节等。

DC→AC,即直流电转换为交流电。这是与整流相反的变换,称为逆变。逆变器(Inverter)的输出可以是恒频,用于如恒压恒频(CVCF)电源或不间断供电电源(UPS),也可以变频(这时变流器叫变频器),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。

AC→AC,这是将交流电能的参数(幅值或频率)加以转换。其中:交流电压有效值的调节称为交流电压控制或简称交流调压,用于如调温、调光、交流电动机的调压调速等;而将50Hz工频交流电直接转换成其他频率的交流电,称为交交变频,所用装置叫做周波变换器(Cycloconverter),主要用于交流电动机的变频调速。

DC→DC,这是将直流电的参数(幅值或极性)加以转换。即将恒定直流变成断续脉冲形状,以改变其平均值。此种变流器谓之斩波器(Chopper)或直流变换器,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。

可见,电力电子技术在工农业生产、交通运输、邮电通讯等国民经济各部门以至家用电器各方面都有着广泛的应用。

为了实现上述各种转换,必须对它们进行控制(control)。目前实现电能转换的控制方式主要有“相位控制”、“通断控制”和“脉冲宽度调制(PWM)”。

因此,可以说电力电子学是横跨“电子”、“电力”和“控制”三个领域的一个新兴工程技术学科。正是依据这一特征,我国电力电子学会设计了如图 0.2 所示的会标。

0.2 电力电子技术的发展

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。1946年晶体管的诞生开始形成固体电子学。电力电子学也正是在 1957 年第一只晶闸管(thyristor)——一种可控的大功率半导体器件(也称可控硅(SCR))问世后,逐步建立和发展起来的。

在这之前,电能的转换是依靠旋转机组来实现的。例如,将一台交流电动机拖动一台直流发电机可将交流电变换为直流电,调节直流发电机的励磁便可改变直流输出电压;如将一台直流电动机拖动一台交流发电机便可实现相反的转换,只要调节直流电动机的转速便可改变交流电的频率。与这些旋转式的变流机组比较,利用电力半导体器件组成的电能变换器是静止的,具有体积小、重量轻、无机械噪声和磨损、效率高、放大倍数大、易于控制、响应快及使用方便等一系列优点。因此,在变流领域内,自 20 世纪 60 年代开始进入了晶闸管的时代。在这期间,除普通晶闸管本身的电压、电流容量和 du/dt 、 di/dt 承受能力及开关特性不断提高外,还发展了一些派生元件,如快速晶闸管、高频晶闸管、双向晶闸管、逆导晶闸管、门极辅助关断晶闸管、光控晶闸管、非对称晶闸管等。这些元件各有某一方面的特长,更适于某一种变换电路。

70 年代以后,国际上电力半导体技术突飞猛进,其特征是,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(P-MOSFET)和绝缘栅双极晶体管(IGBT)等。这样,就突破了以普通晶闸管半控型器件为主体的单一局面,而形成一个庞大的电力半导体器件家族。

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。新的器件出现能开拓许多新的应用领域,做出新的装置;应用中出现的问题又对器件提出新的要求,推动新器件的研制。例如,只有半控型器件时,它用于整流比较成熟,所制作的整流器性能优良,但用于逆变器便带来技术上的复杂和体积庞大、成本昂贵等问题,而当自关断型器件出现后,这些问题就比较容易解决,使电力电子技术进入了一个新时期,有人称为逆变器的时代。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,且它们的位数成倍增加,运算速度随之提高,功能不断完善,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、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,可以使电路或装置达到更为完善的水平。所以,将新的控制理论和方法在实践中取得应用也是电力电子技术的一个重要内容。

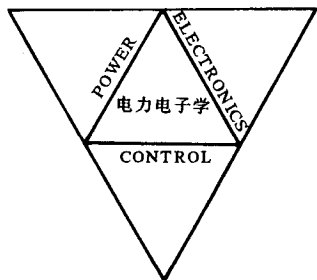


图 0.2 电力电子学会会标

综上所述可以看出,电力电子技术的发展有赖于电力电子器件的发展,电力电子技术发展的每一次飞跃都是以新器件的出现为契机的。电力电子器件是电力电子技术的基础。一代器件孕育着一代装置,一代装置产生一批新的应用领域。而微电子技术、电力电子器件和控制理论则是现代电力电子学缺一不可的发展动力。

0.3 电力电子技术的重要作用

电力电子技术在国民经济和科学技术的发展中正在并将要发挥愈来愈重要的作用。

(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、高效和节约,实现了电能使用最佳化。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 14 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%,国家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。1995 年,发达国家电能中有 75% 左右经过电力电子技术变换或控制后才能使用,据预测,电能中有 75% 左右经过电力电子技术变换或控制后才能使用,据到 2000 年以后,将有 95% 的电能须经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桥梁,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) 电力电子器件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几倍、几十倍,响应速度达到高速化,并能适应任何基准信号,实现无噪音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。

0.4 本课程的性质、分析方法和学习要求

电力电子技术对自动化、自动控制、电气技术、电力工程及其自动化、机电一体化、电机电器与控制等专业既是一门技术基础课,又是一门专业课。因为它不仅分析各种基本的变换电路,而且结合生产实际,介绍在各方面的应用。

波形分析是电力电子电路的基本分析方法。只有画出各种状态下的波形,才能在此基础上对各量进行定量分析。为了分析简化,在画波形和计算时常对电路某些元件作理想化的假设。

在电力电子电路中,为了减少器件本身的损耗、提高装置效率,各电力电子器件均是工作在开关状态。它们用作可控开关,每导通一次就出现一次过渡过程。但是更多地是处于周期性工作状态(或者说是相邻两次过渡过程完全一致的稳定工作状态)。因此对这类电路作定量分析时,主要是解过渡过程的微分方程和分析与计算富里叶级数。

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,特别是各种基本电路中的电磁过程,掌握其分析方法;了解各种开关元件的控制和保护,以及各种电路的特点、性能指标和使用场合;还要掌握基本实验方法与训练基本实验技能。

在各种电气控制设备中,能够实现弱电控制强电的关键是电力电子装置。如果说,计算机是现代化生产设备的大脑,电动机和各种电磁执行元件是手足,那么电力电子装置就是支配手足动作的肌肉和神经。作为一种应用技术,电力电子技术的特点是:综合性强、应用涉及面广、与工程实践联系密切。本课程仅是在这方面打一个基础。

1 晶闸管及其可控整流电路

晶闸管(thyristor)是具有可控开关特性的半导体器件的总称。它包括普通晶闸管(通常称为可控硅)及各种派生元件,如双向晶闸管、逆导晶闸管、快速晶闸管、光控晶闸管、可关断晶闸管、静电感应晶闸管等。在这些器件中出现最早和目前应用得最广泛的是可控硅(silicon controlled rectifier, SCR),因此习惯上不加说明的晶闸管就指的是普通晶闸管,即可控硅。

1.1 普通晶闸管

1.1.1 晶闸管结构

晶闸管是一种功率半导体器件,如图 1.1(a)所示。它的管心由半导体材料构成 p-n-p-n 四层结构,在这四层结构间形成三个 p-n 结 j_1 、 j_2 、 j_3 ;有三个引出端,其中两个是功率引出端,分别称阳极 A(anode)和阴极 K(cathode),另一个是控制引出端,称门极 G(gate)。图 1.1 中 (b)和(c)分别是 P 型门极、阴极侧受控和 N 型门极、阳极侧受控晶闸管的电路符号,当没有必要规定控制极的类型时,可用图(d)符号表示三极晶体闸流管(即晶闸管)。

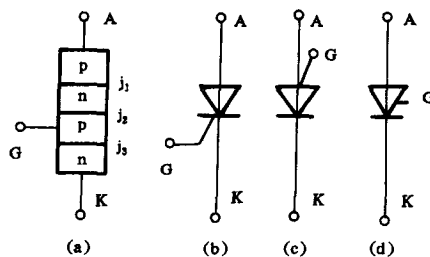


图 1.1 晶闸管结构及电路符号

晶闸管的外壳有螺旋型、模块型和平板型等多种形式,前者多为小容量(200A 以下),后者用于大容量。使用时都必须配装合适的散热器或适当的冷却措施,如风冷却或水冷却等。

1.1.2 晶闸管的工作原理

晶闸管是一种可控的单向导电开关,其反向始终能承受电压,即具有反向阻断特性;正向则可以有二个稳定的工作状态,即呈高阻抗的阻断工作状态(简称断态)和呈低阻抗的导通工作状态(简称通态)。那么,这两种工作状态在什么条件下成立以及它们在什么条件下相互转换,这是我们首先要讨论的问题。

1) p-n 结

p 型半导体材料的多数载流子是空穴;n 型半导体材料的多数载流子是电子。它们的结合面形成 p-n 结,如图 1.2(a)。

当外加一个电压 E , 若其正端接 p , 负端接 n (图 1.2(b)), 则在外电压的作用下, 空穴和电子流向结 j 。在结 j 处, 空穴和电子相结合而中和。失去的空穴和电子由电源 E 得到补充。这样不断结合和补充的过程形成电流, p - n 结呈低阻导通特性, 或者说, p - n 结正向偏置时导通。

当外加电源 E 正端接 n , 负端接 p 时, 在外加电压作用下, p 型的空穴和 n 型的电子均背离结 j , 它们不可能在那里结合, 于是 p 型、 n 型中的主要载流子被耗尽 (图 1.2(c)), 在这种情况下, p - n 结呈高阻阻断状态, 或者说 p - n 结反向偏置时阻断, 只有很小的漏电流。

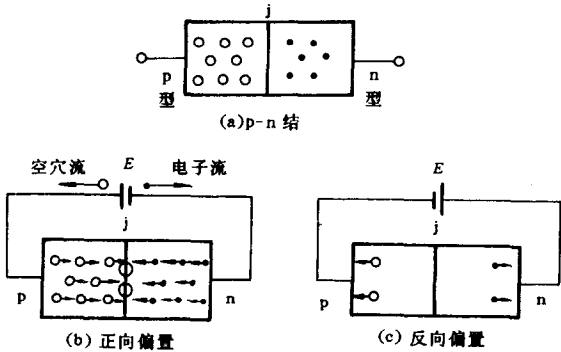


图 1.2 p - n 结

2) 晶闸管的阻断工作状态

当晶闸管门极 G 与外电路断开时, 则晶闸管在它的两个方向上均呈阻断工作状态 (图 1.3(a)、(b))。图 1.3(a) 晶闸管阳极 A 加正电压, 阴极 K 加负电压 (称晶闸管正向偏置)。具

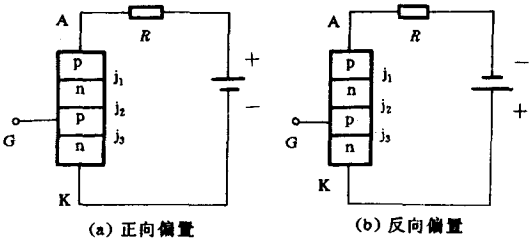


图 1.3 晶闸管阻断工作状态

有四层结构的晶闸管可以看成是三个二极管的串联, 即三个结 j_1 、 j_2 、 j_3 可以看成是三个二极管, 这时 j_1 、 j_3 正偏, 而 j_2 反偏, 故晶闸管呈阻断状态。图 1.3(b) 是阳极加负电压, 阴极加正电压 (称晶闸管反向偏置), 这时是 j_2 正偏, 而 j_1 、 j_3 是反偏, 故晶闸管亦呈阻断状态。

由此可见, 当晶闸管门极没有控制信号时 (无注入电流), 不论晶闸管是加正向偏置还是反向偏置, 晶闸管均呈高阻阻断工作状态, 相当于开关断开。

3) 晶闸管的导通工作状态

对晶闸管正向导通工作状态的解释, 可用晶闸管的双晶体三极管模型分析。图 1.4(a) 为晶闸管结构, 若将其中间部分分为两部分并用导体连接起来, 则变为图 1.4(b)。图 1.4(b) 可视为两只复合晶体三极管, 即 p - n - p 型晶体三极管 $VT1$ 和 n - p - n 型晶体三极管 $VT2$, 见图

1.4(c)。在正向偏置下,由图可得电流方程

$$I_A = I_{C1} + I_{C2} + I_{CO} = \alpha_1 I_A + \alpha_2 I_K + I_{CO} \quad (1.1)$$

$$I_K = I_A + I_G \quad (1.2)$$

式中: α_1 ——VT1 的共基极电流放大系数($\alpha_1 = I_{C1}/I_A$);

α_2 ——VT2 的共基极电流放大系数($\alpha_2 = I_{C2}/I_K$);

I_G ——门极电流。

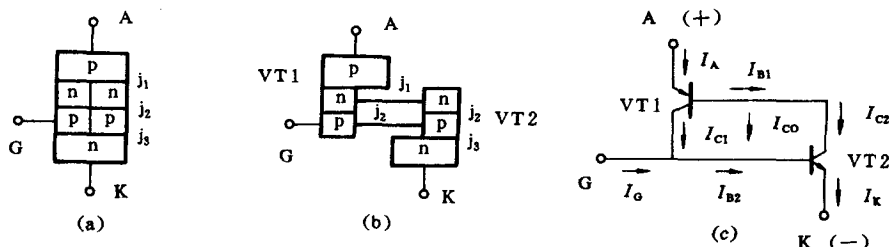


图 1.4 晶闸管等效电路

I_{CO} 为 VT1、VT2 的漏电流; I_{C1} 、 I_A 分别为 VT1 的集电极和发射极电流; I_{C2} 、 I_K 分别为 VT2 的集电极和发射极电流。将式(1.2)代入式(1.1)可得

$$I_A = \frac{I_{CO} + \alpha_2 I_G}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (1.3)$$

α_1 、 α_2 由晶闸管制造工艺所决定,并随 I_A 、 I_K 变化,其关系曲线如图 1.5 所示。从式(1.3)可见,当门极电流为零时,则

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

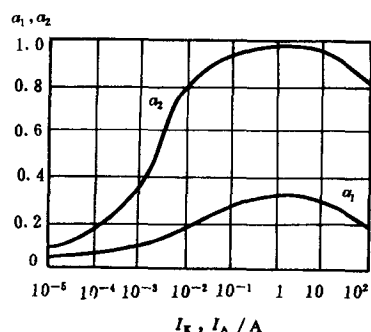


图 1.5 α_1 、 α_2 与发射极电流变化关系

由于 I_{CO} 很小,在很小漏电流情况下, $(\alpha_1 + \alpha_2) \ll 1$, 则 $I_A \approx I_{CO}$, 电路处于阻断状态,这与前述载流子运动的原理一致。

当存在门极电流 I_G 时,从图 1.4(c) 可看出, I_G 注入将使 I_K 增加,从而使 I_{C2} 增加; I_{C2} 的增加则相继引起 I_A 和 I_{C1} 的增加,而 I_{C1} 的增加又使 I_{B2} 和 I_K 增加,这是一个强烈的正反馈过程。在电流增加的同时, α_1 、 α_2 也随之增加,当 $(\alpha_1 + \alpha_2) \approx 1$, 则两晶体三极管处于饱和导通,即晶闸管由阻断转为导通。晶闸管导通以后,由于两晶体三极管间的正反馈作用,仍然保持导通,且处于深度饱和状态($\alpha_1 + \alpha_2 \approx 1.15$),而与门极电流 I_G 是否继续提供无关。即门极信号只需控制晶闸管的正向导通时刻,而一旦导通,门极信号即使失去了,晶闸管仍然保持导通。

当晶闸管加反向偏置时,由于晶体管 VT1、VT2 在反偏时的电流放大系数很小,即使存在门极电流 I_G 也不能使其导通。

由于两个等效晶体管的电流放大系数较小,可使用较厚的基片。因此可获得比普通晶体三极管高得多的耐压(最高可达 10kV);又由于晶闸管对门极电流有正反馈(再生)作用,因