

高等学校试用教材

(船舶及工业电气自动化专业用)

唐嘉亨 龙佩芬 编

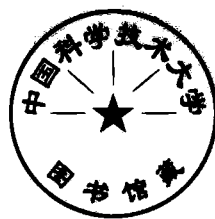
变流 技术

人民交通出版社

内 容 提 要

本书系统地讲述了电力半导体元件、晶闸管可控整流电路、逆变电路、变频电路、晶闸管触发电路的工作原理和分析方法,以及变流主电路元件的保护和参数的设计计算等。

本书为高等工科院校船舶及工业电气自动化专业的教材,也可供其它电气类或自动控制类专业及有关工程技术人员参考。



高等学校试用教材

变流技术

(船舶及工业电气自动化专业用)

唐嘉亨 龙佩芬 编

责任编辑 傅静宏

人民交通出版社出版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经销

人民交通出版社印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 14.75 字数: 360千

1989年6月 第1版

1989年6月 第1版 第1次印刷

印数: 0001—2,230 册 定价: 2.95元

出版说明

根据国务院国发〔1978〕23号文件批转试行的《关于高等学校教材编审出版若干问题的暂行规定》，中国船舶工业总公司承担了全国高等学校船舶类专业教材的编审、出版的组织工作。自1978年以来，完成了两轮教材的编审、出版任务，共出版船舶类专业教材116种，对解决教学急需，稳定教学秩序，提高教学质量起到了积极作用。

为了进一步做好这一工作，中国船舶工业总公司成立了“船舶工程”、“船舶动力”两个教材委员会和“船电自动化”、“惯性导航及仪器”、“水声电子工程”、“液压”四个教材小组。船舶类教材委员会（小组）是有关船舶类专业教材建设的研究、指导、规划和评审方面的业务指导机构，其任务是作好高校船舶类教材的编审工作，并为提高教材质量而努力。

中国船舶工业总公司在总结前两轮教材编审出版工作的基础上，于1986年制订了《1986～1990年全国高等学校船舶类专业教材选题规划》。列入规划的教材、教学参考书等共166种。本规划在教材的种类和数量上有了很大增长，以适应多层次多规格办学形式的需要。在教材内容方面力求做到两个相适应：一是与教学改革相适应；二是与现代科学技术发展相适应。为此，教材编审除贯彻“打好基础，精选内容，逐步更新，利于教学”的原则以外，还注意了加强实践性教学环节，拓宽知识面，注重能力的培养，以适应社会主义现代化建设的需要。

这批教材由各有关院校推荐，同行专家评阅，教材委员会（小组）评议，完稿后又经主审人审阅，教材委员会（小组）复审。本规划所属教材分别由国防工业出版社、人民交通出版社以及各有关高等学校的出版社出版。

限于水平和经验，这批教材的编审出版工作还会有许多缺点和不足，希望使用教材的单位和广大师生积极提出宝贵意见，以便改进工作。

中国船舶工业总公司教材编审室

1988年3月

前 言

本书根据中国船舶工业总公司教材编审室的教材编写计划,按照船电自动化教材小组审定的编写大纲编写。

全书共七章。教学时数为60学时。如果授课时数有限,教学时可主要讲授第一、二、三、四、六各章。第五章为弹性内容或作为学生的自学材料。第七章可采用集中作业或课程设计的形式完成。

在本书编写中,依据教学要求,着重于基本原理的分析和叙述,力求打好基础。对于晶闸管可控整流电路、有源逆变电路的阐述较为详细,并突出了对电动机负载电路的分析,增加了变频电路部分的内容,介绍了晶闸管触发器的典型线路。对有关晶闸管主电路的参数计算与保护也作了简要叙述。本书的绪论较详细地介绍了近代变流技术的发展及应用,以期使学生对电力电子学的技术概况的全貌有所了解。为便于学习、掌握和巩固各章节的内容,本书每章之后均有小结、思考与习题,最后还附有符号说明。

本书由哈尔滨船舶工程学院自动控制系唐嘉亨副教授任主编,参加编写的有武汉水运工程学院龙佩芬(第一、五、六、七章),哈尔滨船舶工程学院唐嘉亨(绪论、第二、三、四章)。

本书主审由哈尔滨工业大学赵昌颢教授担任,哈尔滨船舶工程学院徐惠良副教授、申怀仁副教授和武汉水运工程学院黎明森副教授也对书稿进行了审阅,并提出了宝贵的修改意见。另外,曲秀民和霍淑云同志完成了全书图稿的大量工作。在此一并表示诚挚的谢意。

本书稿于1988年2月经船电自动化教材组审查通过。

由于编者的学识和教学水平有限,书中会有错误和不当之处,恳请读者批评指正,提出宝贵意见。来函请寄哈尔滨船舶工程学院自动控制系。

目 录

绪 论	1
第一章 电力半导体元件	7
§1-1 晶闸管工作原理和特性	7
§1-2 晶闸管的主要参数	14
§1-3 特殊的电力半导体元件概述	19
小结	26
思考与习题	27
第二章 晶闸管可控整流电路	28
§2-1 单相半波可控整流电路及晶闸管整流电路的分析方法	28
§2-2 单相桥式可控整流电路	39
§2-3 三相零式可控整流电路	51
§2-4 三相桥式全控整流电路	60
§2-5 三相桥式半控整流电路	67
§2-6 变压器漏抗对可控整流电路的影响	69
小结	72
思考与习题	73
第三章 电动机负载及有源逆变电路	76
§3-1 电动机负载电路的工作特点	76
§3-2 有源逆变的基本概念	82
§3-3 三相逆变电路	84
§3-4 防止逆变颠覆的措施	90
§3-5 晶闸管可逆电路	92
§3-6 整流装置的性能指标及其改善	96
小结	102
思考与习题	103
第四章 晶闸管变频电路基础	105
§4-1 无源逆变电路的基本概念	105
§4-2 单相逆变器	109
§4-3 三相逆变器	113
§4-4 具有集中换流装置的调宽型逆变器	122
§4-5 可关断晶闸管(GTO)逆变器	127
§4-6 交-交变频器概述	130
小结	134
思考与习题	135

第五章 常用的其它变流电路	136
§5-1 交流调压器	136
§5-2 晶闸管斩波器	144
§5-3 大功率晶体管直流脉宽调制器	155
小结	160
思考与习题	161
第六章 晶闸管触发电路	162
§6-1 概述	162
§6-2 单结晶体管触发电路	163
§6-3 同步信号为锯齿波的触发电路	168
§6-4 同步信号为正弦波的触发电路	173
§6-5 微机控制的晶闸管相对触发电路	175
§6-6 触发脉冲与主电路电压同步的实现	179
§6-7 触发器的输出电路与抗干扰措施	183
§6-8 逆变器的触发电路	188
小结	193
思考与习题	194
第七章 晶闸管主电路计算及保护	195
§7-1 晶闸管容量的选择计算	195
§7-2 整流变压器的参数计算	197
§7-3 电抗器参数计算	201
§7-4 过电流及电流上升率 di/dt 保护	206
§7-5 过电压及电压上升率 du/dt 保护	210
小结	219
思考与习题	219
附录一 符号说明	221
附录二 常用专业名词术语的中英文对照	225
主要参考资料	227

绪 论

一、电力电子学科的形成和发展

晶体闸流管（简称晶闸管）是一种新型的电力半导体器件，它的出现使变流技术发生了根本性变化，目前它已经被广泛地应用于国防和国民经济的各个领域之中。所谓变流技术，就是利用电力半导体器件进行电力变换及控制的一门技术。它包括电压、电流、频率以及波形等方面的变换。电力半导体器件主要有整流二极管、晶闸管及其派生器件、功率晶体管及其派生器件、电力光电器件等。当前，应用最广的电力半导体器件是普通型晶闸管。在国内，人们习惯于称它为“可控硅”，是构成各种变流装置的核心部件。随着技术发展和应用范围的扩大，晶闸管的派生器件和功率晶体管的应用会增多，尤其是可关断晶闸管和大功率晶体管将会获得大量使用。

晶闸管问世只有近三十年的历史。第一只晶闸管于1958年首先在美国研制成功，并投入工业使用。开始时只是十几安培的小功率器件，但由于它具有许多可贵的优点，在电流、电压和频率三个自由度方面有很大发展潜力，因此引起了世界各国的重视，发展很快，为电子学进入功率系统开辟了一个新纪元。在国外，现已研制出耐压6000V以上数千安的晶闸管及其多种派生器件（见表0-1），生产有各种晶闸管变流装置，并且不断地向功率化、高频快速化、组件化以及多功能等多方面继续发展。

表0-1 各种电力半导体器件的制造水平

名 称	水 平	生 产 水 平	研 制 水 平
普通整流管		3500A 3000V, 5000A 1000V	6000A 3000V
快速整流管		1000A 3000V 10kHz	2500A 3000V
普通晶闸管		2500A 4000V 400 μ s	3500A 6500V, 5000A 5000V
快速晶闸管		1500A 1200V 20 μ s	1000A 2500V 30 μ s, 400A 1200V 4 μ s
逆导晶闸管		1000/400A 2500V 30 μ s	—
双向晶闸管		300A 1000V	1000A 1200V
可关断晶闸管		400A 2500V	2400A 4500V
大功率晶体管		200A 900V, 1200A 30V	400A 1000V

我国于60年代初试制成功硅整流管和晶闸管元件，以它们为核心元件的变流装置也相继发展起来。现在国内已经生产有电流1000A 耐压数千伏的大功率晶闸管和整流管，元件质量也有较大提高。除了普通型之外，其它派生型元件，诸如快速、双向、逆导和可关断晶闸管也有较快发展。整机的研制和生产也有很大发展，有关工厂已能提供标准化、系列化的晶闸管变流装置，并且系列品种不断增加，应用范围也日趋广泛。在电力拖动、电源、电热、励磁、牵引、电化学等领域已有近40个系列约千余种规格的各类变流装置产品。

由于晶闸管变流装置具有良好的控制特性，可以大幅度地调节电压、电流和频率，它与各种电子调节器或者电子计算机结合，便能构成各种性能优异的新型控制系统。因此，晶闸管变流技术在工业电气自动化和其它自动控制领域中发展十分迅速，它把电力、电子、控制三个领域融合到一起，形成了一个新学科——电力电子学科。该学科的形成，为工业电气自动化技术开辟了一条新路。

过去，在强电领域中，由于装置容量较大（电压高、电流大），所以实现自动化的难度大，设备复杂。当晶闸管技术运用后，实现了弱电对强电的控制，把电子技术应用扩大到强电领域，结果使强电领域的控制有了很大改观。随着变流技术的发展，许多由电力电子电路构成的变流装置都可用于电动机的控制，这对于电气产品的革新和发展产生了影响。例如出现了晶闸管无整流子电机等新型的电工产品；适合晶闸管供电的新系列电动机也在研制。

这里还要指出，随着电力电子学的不断发展，它与电子计算机技术的关系也日趋密切。在变流装置中，功率变换电路的结构基本不变，而把控制电路和触发单元的功能全部用微计算机代替，可以做到数字化。这不仅使装置结构简单、检测方便，性能提高，而且也易于实现和上级计算机的结合，构成生产自动线或是大型的自动控制系统。显然，如果能在电力电子技术中普遍使用微型计算机，那么它就如虎添翼，将会发挥出更有效的技术威力。

以晶闸管为核心元件的变流技术的历史虽然不长，但其发展迅速，在工业及国防等各方面已经作出贡献。毫无疑问，随着变流技术的进一步发展，它必将在我国社会主义建设事业中发挥出更大的作用。

二、晶闸管的技术应用概况

各种晶闸管变流装置按其功能不同，分为如下几种类型：

可控整流器：把交流电压转变成固定或者可调的直流电压。

逆变器：把直流电压转变成频率固定或可调的交流电压。

斩波器：把固定的直流电压转变成可调的直流电压，也称为直流断续器。

交流调压器：把固定的交流电压转变成可调的交流电压。

周波变换器：把固定频率的交流电转变成频率可调的交流电。

晶闸管变流装置的系统框图如图0-1所示，根据需要，装置可以开环，也可以构成闭环系统。

晶闸管装置具有许多优点，并且在很大程度上与晶闸管元件本身的优点分不开。这些优点归纳起来大致如下：

1. 晶闸管为静止型半导体器件，具有体积小、重量轻、寿命长、可靠性高等优点，由它构成

的装置与机组相比，没有旋转机械部分的磨损，无噪声，维护方便。

2. 功率增益高。只需很小信号（几伏电压和数百毫安电流）即可控制数百安、数千伏以上的工作电流和电压，其功率放大倍数可达数万倍以上。

3. 控制灵敏，快速性好。晶闸管装置的响应为毫秒级，反应迅速，过渡过程时间短。

4. 效率高，节省能源。晶闸管工作在开关状态，为理想的无触点开关元件。工作时压降

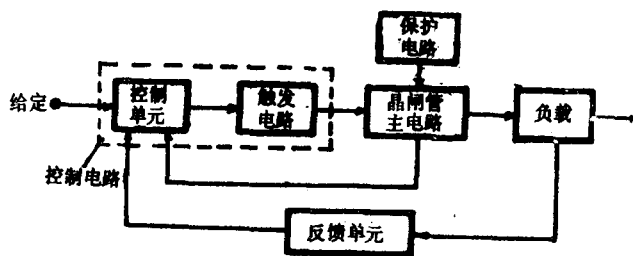


图0-1 变流装置系统框图

低, 损耗少, 故能节省能源消耗, 提高经济效益。

5. 经济指标优异。晶闸管装置使用材料少, 结构紧凑, 占地面积少, 设备投资费用低。

晶闸管元件及其装置也有缺点, 主要是:

1. 过电压、过电流的能力低。晶闸管元件正常使用时寿命长, 但如果处于过压或过流状态时, 元件极易损坏。

2. 某些状态, 如带电动机负载低速运行时, 功率因数低, 要求电网容量增大。

3. 对电网有影响。晶闸管处于开关工作状态, 会使交流侧电流中含有高次谐波分量, 引起电源波形畸变, 也影响到电网上的其它负载。

对于上述缺点, 已有克服办法, 并且随着技术发展和措施的改善, 将会获得更好的效果。

晶闸管的应用极为广泛, 它是近代变流技术的核心。国防军事、工业农业、商业交通和文体医药等各行各业都有晶闸管的用武之地, 可以说, 晶闸管的技术应用大到浩大的高压输电工程、高能加速器、电力机车和轻重工业中的大功率调速装置, 小到貌不惊人的家用电器, 甚至儿童玩具; 从尖端技术到人们日常生活的衣食住行, 几乎无所不包, 处处可见, 无不渗透着电力电子学的新成就。下面只是从工业电气自动化和船舶应用的角度举例说明晶闸管的应用概况。

(一) 晶闸管直流调速

1. 可控整流直流电力拖动

改变电枢电压或激磁电压能够进行直流电机的速度调节。但直流电压的改变比较困难, 过去常采用电动—发电机组供电, 需要由交流电动机、直流发电机、直流电动机以及励磁电机等多台电机构成直流调速系统, 投入的设备多, 机构庞大不经济。改用晶闸管供电后组成的晶闸管电动机系统, 只需一台直流电动机就够了, 不仅结构简单, 而且系统的动、静态指标都有提高, 容易实现自动控制。因此, 世界各主要工业国家的直流调速系统, 除特大容量外, 基本上都改用晶闸管装置供电了。在国内, 中小容量的晶闸管传动装置技术上较为成熟, 有统一设计规格的系列产品, 已在冶金、机床、造纸、纺织等多种部门使用。大功率的晶闸管传动装置近年来逐渐增加, 如已有数千千瓦的晶闸管轧机设备在运行工作。

2. 直流脉冲调速

直流脉冲调速即利用晶闸管作为直流开关, 构成斩波器, 对直流电压控制和调节, 实现直流机的调速。过去采用电阻调速, 损耗大、效率低。改用脉冲调速后, 起、制动平稳, 操纵灵活, 维修方便, 可实现无级调速。由于省去了电阻损耗且能够再生制动, 所以能耗少, 效率高, 节能效果突出。有人计算过, 以斩波器脉冲调速的电车为例, 与电阻器控制的电车相比, 可节能30%~40%以上, 十分可观。这种调速方式已在交通运输和矿山牵引等方面获得了广泛使用, 如地铁电机车、矿山机车、城市电车和蓄电池电瓶车的控制电源。

(二) 晶闸管交流调速

采用晶闸管逆变或变频装置进行交流调速, 可使交流电机的调速性能大大提高, 扩大了它的应用范围。目前, 主要应用有晶闸管变频调速和线绕式异步电动机的串级调速等。

晶闸管变频调速是将直流电或者50Hz工频交流电转变成电压和频率可调的交流电, 供给鼠笼式电动机或同步电动机。应用这种静止变频装置, 频率连续可调, 可实现交流电动机的四象限运行, 且调速性能优异。国内, 中小功率的变频装置已经使用, 但尚未普及, 随着国家建设的需要, 这个领域还有大量的工作要做。许多国家都十分重视变频调速技术, 因其

调速范围宽、功率因数高以及可靠性好等优点,使变频调速的研究已成为变流技术近期的一个发展重点。尤其随着具有自关断能力的元件——可关断晶闸管(简称GTO)的发展,研究生产大功率的GTO逆变器已具备了条件。

线绕式异步电动机的串级调速是在转子回路中加入反电势进行转速调节,这是把转子电压整流后经晶闸管电路逆变为交流电回送电网。采用这种方式调速比用串电阻调速优越得多,它结构简单、调速范围宽、节能效果好,特别适用于泵和风机类负载。

无换向器电动机是一种自控式变频调速的同步电动机,它是通过改变频率来实现调速的。这种电机兼有交、直流电机的优点:结构简单、便于维护,具有良好的控制特性。由于制造上单机容量和转速极限可以提高,所以很有发展前途。

(三)晶闸管中频电源装置

晶闸管中频装置是把工频交流电经整流后再逆变成中频交流电供给交流负载的一种频率变换装置。它用作仪器仪表的电源和生产中的电加工,如用于熔炼、弯管、热处理等。该装置为静止电源,制造方便,节约材料,工作中耗电少,易于实现自动化操作,它已经在许多场合取代了中频发电机组。目前国内生产的中频装置的单机容量已达1000kW,并且继续在提高频率和单机容量以及新的冷却技术等方面进行工作。

(四)不停电应急电源

这是一种应急保险电源装置,主要用于某些不能断电的重要设备和部门。譬如:通信中心,计算机房,气象站,化工厂,医院及国防重要部门等。这种不停电电源实为晶闸管逆变器,能在交流电网断电时把蓄电池里的直流电能转变成工频交流电,自动投入供电,避免造成重大损失。国内已生产有中小容量的不停电电源装置。

(五)电子开关

晶闸管本身就是一个无触点的电子开关元件。它动作快、损耗小、寿命长,可以取代有触点的接触器。在交流系统中,它能代替交流接触器用于异步电动机的正反转运行,特别适合于用在起动频繁的各种泵及风机类负载。它不仅提高了设备运行的可靠性,减少了维修工作量,而且还有明显的节能效果。它还使用在交流调压或调功设备上,代替感应调压器,如各种自动调光装置和自动控温设备等。当用作交流开关时,多采用双向晶闸管使设备结构更加紧凑,例如用三只200A的双向晶闸管元件,便可以控制22kW的异步电动机,如果用普通晶闸管,则需要六只。

(六)晶闸管技术在船舶方面的应用

1. 船舶电力推进

近代船舶大都采用性能良好的电力推进。在船舶推进系统中引入晶闸管技术后,控制灵活,操作简单,调节性能优良,提高了装置的自动化水平。主要应用有:作为发电机—电动机组的激磁电源,通常是由晶闸管整流器或斩波器来完成。在交流推进装置中,用晶闸管变频器作为交流推进电动机的控制设备。这种控制方式特别适用于以蓄电池为能源的水下船舶,如各种潜器和水下潜艇等。目前在国内外,有些深水潜器已经成功地使用晶闸管逆变器作为推进电机的控制设备,使潜器的水下机动性能大为提高。除了主推进系统外,它还可用于垂直和水平方向上辅助推进电机的控制。在某些自动化程度高的船舶和海上各类作业平台上,多装有动力定位系统,系统中各自由度方向上的推进器可以用晶闸管变频器控制。

2. 船舶电站的自动装置

主要有舰船发电机自激恒压装置、轴带直流发电机自动调节器、船用发电机自动并车装

置等。晶闸管恒压装置与过去使用的磁阻调压器或相复励磁装置相比,具有重量轻、体积小、通用性好、静态稳压精度高和动态响应快等优点。

3. 船舶辅机方面的应用

有晶闸管舵机随动系统,如电动舵中用晶闸管整流器给舵机电枢供电,进行调压调速;液压自动舵中用晶闸管装置进行电磁阀门的控制;电磁离合器式自动舵中的离合器控制。有锚机、各种起重升降装置的传动系统和泵的控制。在这些设备中,晶闸管被用作电子开关、可控整流、斩波器等。

4. 其它应用

例如船用柴油主机的晶闸管遥控装置。该装置使船员在驾驶室内直接操纵控制主机,为实现船舶机舱自动化和无人机舱创造了条件。又如,可变螺距随动控制系统。该系统中用晶闸管组成无触点开关,控制油路电磁阀门,利用液压为变距动力,调节螺旋桨的螺距角来改变航速和航向。再如,舰船上的观通、导航仪器设备(如雷达、罗经)的晶闸管中频电源,取代了笨重的旋转式中频发电机组。此外,船上的助航设备也用上了晶闸管技术,诸如航行灯、闪光灯、雾笛等。

5. 在船港及船厂中的应用

在港口电气设备中,象起重、运输机械,提升装置等,也采用晶闸管调速技术。例如,500t浮吊提升机构使用晶闸管逻辑无环流可逆调速系统;交流拖动的起重机采用晶闸管调压调速装置。

在造船厂,为提高造船能力,需要不断进行技术改造和设备更新。在许多新型设备中,晶闸管装置占有一定比重,如直流弧焊机、中频弯管机、光电跟踪气割机等可控硅设备的使用已较普遍。晶闸管技术的应用,减轻了工人的劳动强度,提高了生产效率和船舶制造的自动化程度。

晶闸管的技术应用极为广泛,它是现代变流技术的核心,上面的介绍有局限性,只能从工业自动化的角度给予概括。从目前应用情况看,各类晶闸管装置在电气自动化领域中正在取代某些器件和设备,诸如变压器、饱和电抗器、汞弧整流器、继电器与接触器、起动机与变阻器、机械变速器和电动发电机组等。可以肯定,随着变流技术的进一步发展和推广使用,它将会在国民经济各部门中发挥出更大的作用。

三、教学要求

《变流技术》课是工业电气自动化及船电专业的一门专业基础课。本课程主要研究各类晶闸管变流装置中发生的电磁过程、工作原理、控制方法、设计计算及参数选择等。从内容上看,参见图0-1变流装置的系统框图,主要讲授各种变流装置的主电路的构成及其工作原理,触发电路的组成及工作原理,不同性质负载对变流电路工作的影响,还要介绍主电路元件参数的选择、计算以及变流装置的保护电路等。

变流技术发展迅速,各种变流电路型式繁多,教材中只能介绍一些典型的基本的晶闸管变流电路,为学习专业课打下基础。本课程专业性强,与工程技术联系较紧,学习时既要着重基本概念和原理,又要注意实践性教学环节,加强实验、调试能力。

本课程为工业电气自动化、自动控制及船电类等专业的专业基础课。学习时需要有“电路基础”、“低频电路”、“脉冲数字电路”和“电机与拖动”等方面的基础知识,并为学习“直流拖动控制系统”、“交流调速系统”、“船舶电站自动化”等专业课打下基础。

通过学习，要求：

1. 了解电力电子学的技术应用概况及发展动向。
2. 了解晶闸管元件的结构特点、工作原理和主要参数。
3. 掌握晶闸管可控整流电路、逆变电路的基本工作原理及参数计算；了解晶闸管变频电路及其它常用晶闸管变流电路的基本原理。
4. 熟悉常用触发电路的工作原理，能够合理地选择使用。
5. 能正确进行主电路的设计计算，合理确定晶闸管定额和变压器容量；对常用的保护电路会选择估算。
6. 对一般常用的晶闸管变流电路，具有初步的分析能力和实验技能。

第一章 电力半导体元件

电力半导体元件是以 P 型及 N 型半导体材料为基础制作的静止的功率器件，它是变换电流种类，调节电压高低及改变电流大小的各种变流电路中的主要功率器件。随着半导体材料的不断发展和加工工艺的不断改进，电力半导体元件发展迅速，品种繁多，已形成与小功率电子半导体器件相并列的一大分支。电力半导体器件大致可以分为以下三大类：

一、整流二极管，包括快速恢复整流管和肖特基整流管

二、晶 闸 管

(一)换流关断晶闸管

1. 逆阻晶闸管：包括一般型和快速型。一般型即为普通晶闸管，或称可控硅（简称为 SCR ）。

2. 逆导晶闸管。

3. 光控晶闸管（简称 $LSCR$ ）。

4. 控制极辅助关断晶闸管（简称 $GATT$ ）。

(二)自关断型晶闸管

1. 控制极可关断晶闸管（简称 GTO ）。

2. 场效应晶闸管。

3. 双向晶闸管（简称 $TRIAC$ ）。

三、大功率晶体管（简称 GTR ）

(一)普通大功率晶体管：包括单一型及复合型。

(二)场效应晶体管。

(三)金属氧化物半导体场效应晶体管（简称 $MOSFET$ ）。

在上述的电力半导体元件中，功率整流二极管是简单而极为常见的不可控功率半导体元件。晶闸管及大功率晶体管是可控的功率半导体元件，是变流电路中最重要功率元件。需要换流关断的普通晶闸管应用年代最长，应用面最广泛，为本课程研究的重点。具有自关断能力的可关断晶闸管及大功率晶体管也逐步运用于生产中，前途极为广阔。本课程对它们也将进行适当的分析。

本章将对电力半导体元件的结构、工作原理、伏安特性及主要参数作必要的分析。

§1-1 晶闸管工作原理和特性

以后文中提到的晶闸管（特殊注明者除外）都指普通型晶闸管。

一、晶闸管结构

晶闸管是具有 $PNPN$ 四层的电力半导体开关器件,其主要组成部分是一个由四层硅半导体材料制成圆形薄片的管芯,如图1-1所示。它具有三个电极分别与管芯相连,由三个接线端引出,分别称为阳极 A 、阴极 K 及门极或控制极 G 。采用铝片作衬底。

晶闸管外部常带有散热器,用来散发晶闸管管芯在工作中产生的损耗所转变成的热能,降低管芯温度,提高晶闸管的安全载流量。通常对不同功率的晶闸管采用不同的冷却方式,配用相应形状的散热器,利用传导、对流、辐射等方式将晶闸管管芯在工作中产生的热量散发出去。其冷却方式有自冷却、风冷却、液压冷却和汽化冷却几种。自冷却方式是利用空气自然对流和辐射的原理,通过加装在晶闸管外部的散热器完成散热作用。自冷却采用的散热器制作方便,因而自冷却方式简单,易于实现。但其散热效率低,只适用于小功率元件。风冷却方式是在自冷却方式所具备的散热器的条件下,采用 $6m/s$ 风速进行强迫通风冷却。风冷却使用和维护方便,但使设备的体积和重量都增大,且有噪音,散热效率介于自冷和水冷之间,适用于中等功率晶闸管,并力图扩大用于更大功率的晶闸管元件。液冷却方式(主要是水冷却),其散热器装置紧凑,散热效率高。但必须用去离子树脂处理过的高电阻率净化水做冷却介质,因而只用于大功率晶闸管。汽化冷却是利用置于密封冷却器内的化学冷却剂氟里昂,在管芯温度升高时使其汽化,汽化的氟里昂贴在散热器器壁,通过散热器将热量传递到空气中,散热后的氟里昂由于温度下降后又液化贴近管芯。汽化冷却方式热传递能力很高,散热器较轻,但结构复杂,仅用于大功率元件(单个元件热损耗功率在 $900W$ 以上)和要求重量轻的场合。

散热器常用铝和黄铜等材料制成鳍状或干管状。虽然铜的导热系数比铝高得多,但由于铝较轻且价廉,故仍多采用铝质散热器。

常见的晶闸管的安装方式有螺栓式和平板式。螺栓式晶闸管散热器与阳极 A 紧密连接,安装和更换方便,但散热效果较差,适用于小功率元件。平板式晶闸管采用两个互相绝缘的散热器,将晶闸管紧紧地夹在中间,散热效果好,但安装和更换比较麻烦,适用于中等及大功率元件。

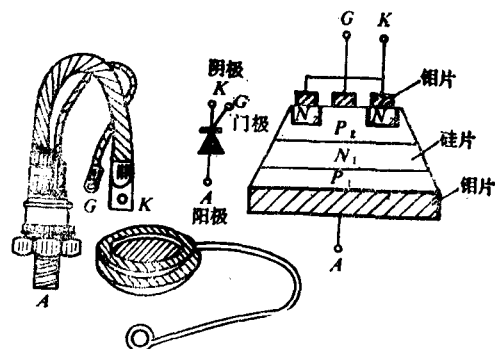


图1-1 晶闸管构造及符号

二、晶闸管工作原理

(一)导通及关断条件

如图1-2所示,将晶闸管的阳极 A 、阴极 K 与电源及负载连接组成主电路,再将门极 G 和阴极 K 与控制晶闸管工作的信号电路连接组成控制电路。从以下四种实验情况可以得出晶闸管导通及关断条件。

1. 用双投开关 K_1 对阳极 A 加反向电压,再利用双投开关 K_2 使门极电压先后置于反向、零、正向三种状态,可以观察到主电路中灯泡不亮。以上实验说明,当晶闸管的阳极 A 与阴极 K 之间承受反向电压时,无论门极施加什么信号,晶闸管都处于关断状态。

2. 用 K_1 对阳极 A 加正向电压, 用 K_2 使门极电压先后置于反向、零、正向三种状态。可以观察到只有当晶闸管的门极 G 加正向电压时, 灯泡才会亮。以上说明当晶闸管的阳极承受正向电压的同时, 门极也承受正向电压, 晶闸管才能导通, 称为触发导通。

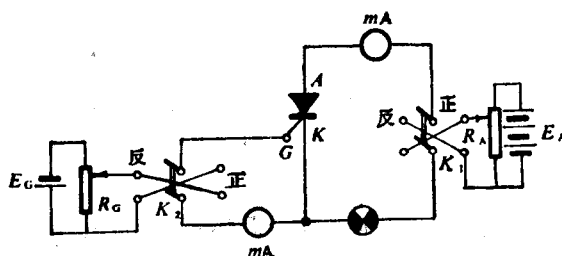


图1-2 晶闸管导通、关断实验电路

3. 在上述条件使晶闸管导通的情况下, 用 K_1 使阳极 A 保持一定的正向电压值, 然后用 K_2 对门极 G 分别接正向、零、反向三种状态, 主电路中灯泡一直亮着。以上说明在晶闸管导通以后, 只要维持正向阳极电压, 门极信号可以去掉, 晶闸管维持导通状态。这一现象说明: 实际上门极所加的正向电压的时间可以极短, 采用微秒级脉宽的脉冲电压信号即可使晶闸管导通。这是在电力半导体电路中能运用电子半导体技术和微型计算机控制的条件。

4. 在已被导通的晶闸管主电路中, 在门极电压保持导通要求的情况下, 将正向阳极电压逐步减小到零, 主电路电流及晶闸管的阳极电流必然会随之减小到零或接近零的极小值, 此时灯泡熄灭, 晶闸管被关断。以上说明晶闸管关断条件是: 在外界条件作用下使主电路电流减小到零或接近零的极小值。当阳极电压过零时也能满足关断要求。

(二) 工作原理分析

1. 导通原理

晶闸管是具有 $P_1N_1P_2N_2$ 四层的再生反馈双稳态半导体器件, 它包括 J_1 、 J_2 、 J_3 三个 PN 结, 如图1-3所示。正常导通过程如下。

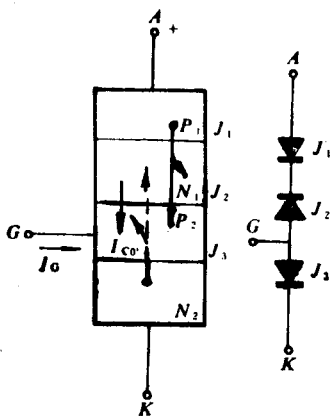


图1-3 晶闸管导通原理

(1) 当阳极承受反向电压时, J_1 、 J_3 结处于反向偏置, 此时晶闸管象普通整流元件一样, 处于逆阻状态。

(2) 当阳极承受正向电压而没有施加门极信号时, J_1 、 J_3 承受正向电压, 空穴自 P_1 区通过 J_2 结流向 N_1 区, 其中一部分空穴在 N_1 区同电子复合, 另一部分则到达 J_2 结, 成为 J_2 结 N_1 侧的少数载流子。同理, 电子自 N_2 区通过 J_3 结流向 P_2 区, 其中一部分在 P_2 区同空穴复合, 另一部分则到达 J_2 结, 成为 J_2 结 P_2 侧的少数载流子。 J_2 结承受反向电压形成阻挡层, 只有少数载流子形成的漏电流从 N_1 流向 P_2 。在施加

的正向电压的作用下, J_1 和 J_3 结使 J_2 结两侧聚集的少数载流子增加, 处于三个 PN 结内的 J_2 结的漏电流比没有 J_1 、 J_3 结时增加许多。但此时晶闸管只流过漏电流处于正向阻断状态。

(3) 当阳极承受正向电压且施加合适的门极信号时, 将在 J_2 结结区产生大量的电子和空穴, 电子进入 N_1 区, 与由 P_1 区注入到 N_1 区的空穴复合, 由于有剩余电子存在, 造成 N_1 区电子积累, 使 N_1 区电位下降。空穴进入 P_2 区, 与由 N_2 区注入的电子复合, 由于有剩余的空穴, 造成 P_2 区空穴积累, 使 P_2 区电位上升。因而 P_2N_1 结的电位差减小, 使 J_2 结阻挡层变窄。在一定的阳极电压作用下, J_2 失去阻挡层作用, 漏电流剧增, 使晶闸管由阻断转变为导通。导通后, 由于 J_2 已失去阻挡层作用, 去掉门极信号晶闸管仍维持导通。

2. 电流放大作用

晶闸管是静止的功率半导体元件，具有很大的电流放大系数。在其门极加上很微弱的控制信号，便可使阳极和阴极流过很大的工作电流。这是晶体管不能相比的。为什么晶闸管能具有很大的电流放大系数呢？可以从图1-4所示的两个晶体管连接模型进行分析。

图1-4将晶闸管元件等效看成由两个三极管构成，即由一个 $P_1N_1P_2$ 和一个 $N_1P_2N_2$ 晶体管相互复合而组成。每个晶体管的集电极电流相互为另一晶体管的基极电流。如图1-4中所示，若有门极电流 I_G 流入，就会按下列规律形成强烈的正反馈：

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

由于强烈的正反馈将造成 $P_1N_1P_2$ 和 $N_1P_2N_2$ 组成的复合管饱和导通，即晶闸管饱和导通。它们的数量关系可分析如下：

图1-4中 $P_1N_1P_2$ 及 $N_1P_2N_2$ 管的电流放大系数 α_1 、 α_2 分别为

$$\alpha_1 = \frac{I_{c1}}{I_{e1}} = \frac{I_{c1}}{I_A} \quad \alpha_2 = \frac{I_{c2}}{I_{e2}} = \frac{I_{c2}}{I_k}$$

式中： I_{c1} 、 I_{c2} ——集电极电流；

I_A 、 I_k ——发射极电流。

$P_1N_1P_2$ 管的发射极电流 I_A 也就是晶闸管阳极流过的电流，它等于两个晶体管集电极电流与 J_2 结漏电流 I_{co} 之和，因而得

$$I_A = I_{c1} + I_{c2} + I_{co} = \alpha_1 I_A + \alpha_2 I_k + I_{co} \quad (1-1)$$

$N_1P_2N_2$ 管的发射极电流 I_k 也就是流过晶闸管阴极的电流，它等于流入复合管的电流 I_A 和 I_G 之和，即晶闸管的阳极电流与门极电流之和，因而得，

$$I_k = I_A + I_G \quad (1-2)$$

式中： I_k ——晶闸管阴极电流；

I_A ——晶闸管阳极电流；

I_G ——晶闸管门极电流。

由式(1-1)及式(1-2)得

$$I_A = \alpha_1 I_A + \alpha_2 (I_A + I_G) + I_{co} \quad (1-3)$$

$$I_A = \frac{I_{co} + I_G \alpha_2}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (1-4)$$

两个等效晶体管电流放大倍数 α_1 、 α_2 随发射极电流 I_{e1} 、 I_{e2} 变化，其变化关系如图1-5所

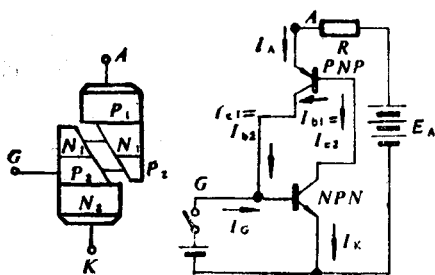


图1-4 两个晶体管连接模型

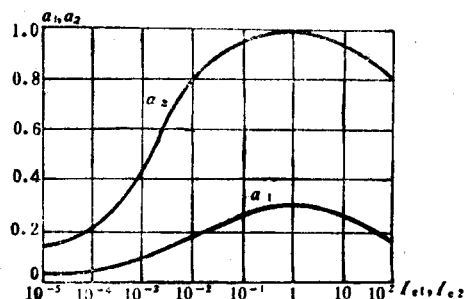


图1-5 两个晶体管 α 与 I_e 的关系

示。根据图中关系及式(1-3)可以分析晶闸管的各工作状况。当门极断路 $I_G = 0$ 时,两个等效晶体管截止, α_1 、 α_2 近似为零,此时阳极电流($I_A \approx I_{co}$)很小,即晶闸管在阻断状态下流过的漏电流。当加上正向阳极电压,且 $I_G > 0$ 时,两管的发射极电流 I_{e1} 、 I_{e2} 增大,从图1-5中曲线看出, α_1 及 α_2 随之增大。当 $(\alpha_1 + \alpha_2) \approx 1$ 时,阳极电流 I_A 将会很大,其数值由外电路的参数决定,晶闸管处于导通状态。如果在此时移去门极信号,但由于两个复合晶体管间产生的再生反馈作用,能使放大倍数 α_1 及 α_2 保持一定的数值,维持复合晶体管继续饱和导通,亦即晶闸管元件仍维持导通。这也是晶闸管与晶体管的区别之一。如果降低电源电压或增大电路阻抗,使阳极电流 I_A 减小到接近零的极小电流值,即晶体管的发射极电流 I_{e1} 和 I_{e2} 下降到零, α_1 和 α_2 随 I_{e1} 和 I_{e2} 减小近似为零,晶闸管又恢复阻断状态。

三、晶闸管特性

晶闸管是受控的无触点电子开关元件,具有导通和阻断两种状态。每种状态下电流和电压的关系可以用伏安特性表示。晶闸管的特性包括元件伏安特性和门极伏安特性。

(一)元件伏安特性

元件伏安特性指阳极电流 I_A 随阳极对阴极电压 V_{AK} 变化关系,即 $i_A = f(V_{AK})$ 。通过实验作出元件伏安特性如图1-6所示,分为正向特性和反向特性。

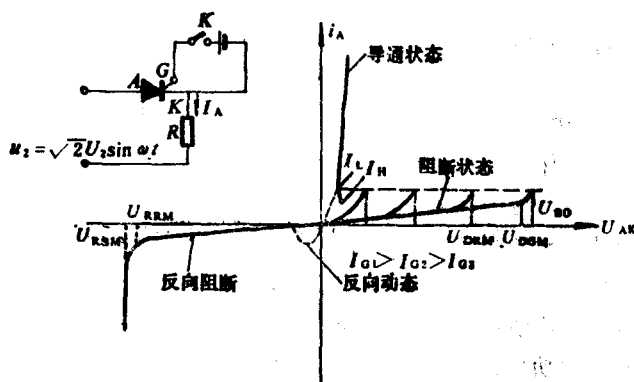


图1-6 晶闸管元件伏安特性

正向特性分为阻断状态和导通状态(简称断态和通态)两部分,处于I象限。当 $I_G = 0$ 时,对晶闸管阳极A和阴极K施加正向电压,晶闸管处于阻断状态。由于A、K极间电阻值不会为无穷大,因而存在正向漏电流 i_A 随 u_{AK} 缓慢上升。如将 u_{AK} 增高到断态不重复峰值电压 u_{DSM} 时, i_A 急剧上升。若继续使 u_{AK} 增高达到转折电压 u_{BO} 值时, i_A 的剧增会使晶闸管由断态进入通态。在晶闸管导通状态下,因A、K极间电阻不会为零,因而存在管压降,使 u_{AK} 下降到1V左右或1V以下。所以元件伏安特性从高阻区经虚线到达低阻区进入导通状态。正常工作时不允许把阳极电压 u_{AK} 增高到转折电压 U_{BO} ,使晶闸管未加门极控制信号而导通,而应该在门极加入适量触发电流 I_G ,在对应的阳极电压 u_{AK} 下触发导通。门极施加的触发电流愈大,晶闸管触发导通时对应的阳极电压愈低。当晶闸管导通以后,特性进入导通状态,类似二极管的伏安特性,A、K极间只存在很小的管压降,电源电压几乎全加在负载上。