

高等工科院校系列教材

# 电力电子技术

杨 威 张金栋 主编



重庆大学出版社

YD27/01

# 电力电子技术

杨 威 张金栋 主编

重庆大学出版社

## 内 容 简 介

本书介绍晶闸管、单相可控整流电路、三相可控整流电路、晶闸管有源逆变电路、晶闸管变频电路、晶闸管斩波电路及交流调压电路、触发电路、晶闸管主电路的参数计算及保护。

本书在有关章节还介绍了新型电力电子器件,如GTO、GTR,对某些先进的控制方式如集成触发、SPWM调制也作了介绍。

## 电力电子技术

杨威 张金栋 主编

责任编辑 黄开植

\*

重庆大学出版社出版发行

新华书店经销

重庆建筑大学印刷厂印刷

\*

开本:787×1092 1/16 印张: 13 字数:322 千

1995年6月第1版 1997年9月第3次印刷

印数:12001—16000

ISBN 7-5624-0980-3/TM·39 定价:12.00 元

## 序

近年来我国高等专科教育发展很快,各校招收专科生的人数呈逐年上升趋势,但是专科教材颇为匮乏,专科教材建设工作进展迟缓,在一定程度上制约了专科教育的发展。在重庆大学出版社的倡议下,中国西部地区14所院校(云南工学院、贵州工学院、宁夏工学院、新疆工学院、陕西工学院、广西大学、广西工学院、兰州工业高等专科学校、昆明工学院、攀枝花大学、四川工业学院、四川轻化工学院、渝州大学、重庆大学)联合起来,编写、出版机类和电类专科教材,开创了一条出版系列教材的新路。这是一项有远见的战略决策,得到国家教委的肯定与支持。

质量是这套教材的生命。围绕提高系列教材质量,采取了一系列重要举措:

第一,组织数十名教学专家反复研究机类、电类三年制专科的培养目标和教学计划,根据高等工程专科教育的培养目标——培养技术应用型人才,确定了专科学生应该具备的知识和能力结构,据此制订了教学计划,提出了50门课程的编写书目。

第二,通过主编会议审定了50门课程的编写大纲,不过分强调每门课程自身的系统性和完整性,从系列教材的整体优化原则出发,理顺了各门课程之间的关系,既保证了各门课程的基本内容,又避免了重复和交叉。

第三,规定了编写系列专科教材应该遵循的原则:

1. 教材应与专科学生的知识、能力结构相适应,不要不切实际地拔高;
2. 基础理论课的教学应以“必须、够用”为度,所谓“必须”是指专科人才培养规格之所需,所谓“够用”是指满足后续课程之需要。
3. 根据专科的人才培养规格和人才的主要去向,确定专业课教材的内容,加强针对性和实用性;
4. 减少不必要的数理论证和数学推导;
5. 注意培养学生解决实际问题的能力,强化学生的工程意识;
6. 教材中应配备习题、复习思考题、实验指示书等,以方便组织教学;
7. 教材应做到概念准确,数据正确,文字叙述简明扼要,文、图配合适当。

第四,由出版社聘请学术水平高、教学经验丰富、责任心强的专家担任主审,严格把住每门教材的学术质量关。

出版系列专科教材堪称一项“浩大的工程”。经过一年多的艰苦努力,系列专科教材陆续面市了。它汇集了中国西部地区14所院校专科教育的办学经验,是西

部地区广大教师长期教学经验的结晶。

纵观这套教材,具有如下的特色:它符合我国国情,符合专科教育的教学基本要求和教学规律;正确处理了与本科教材、中专教材的分工,具有很强的实用性;与出版单科教材不同,有计划地成套推出,实现了整体优化。

这套教材立足于我国西部地区,面向全国市场,它的出版必将对繁荣我国的专科教育发挥积极的作用。这套教材可以作为大学专科及成人高校的教材,也可作为大学本科非机类或非电类专业的教材,亦可供有关工程技术人员参考。因此我不揣冒昧向广大读者推荐这套系列教材,并希望通过教学实践后逐版修订,使之日臻完善。

吴云鹏

1993年  
仲夏

## 前 言

《电力电子技术》教材的编写,是针对工科院校专科的教学实际,确定了与专科学生知识、能力结构相适应的原则,注意培养学生理论联系实际,强化学生工程意识的宗旨而编写的。

本书编写中注意突出利用电力电子器件对电能进行变换和控制这一主题。其主要内容为:晶闸管可控整流、有源逆变、变频、交流调压及直流斩波、晶闸管的触发电路、晶闸管的选择与保护。为了反映电力电子技术的飞速发展,在有关章节中还介绍了新型电力电子器件,如GTO、GTR等,同时对某些先进的控制方法如:集成触发、SPWM调制等也作了相应介绍。本书可作为大学专科电气技术,工业电气自动化等专业的教材,也适合职工大学、电视大学及其它有关专业师生、工程技术人员参考。

本书由昆明工学院杨威、兰州工业高等专科学校张金栋担任主编。参加编写的有:第一、四章由杨威编写,第二、三章由张金栋编写,第五章由攀枝花大学赵来贞编写,第六章由陕西工学院惠毅编写,第七章由云南工学院何凭编写,第八章由新疆工学院马奇环编写。全书由缪尔康担任主审。在编写过程中,得到了重庆大学侯振程教授的悉心指导,在此表示衷心的感谢。

鉴于编者的水平及经验所限,错误及疏漏之处难以避免,切望广大读者批评指正。

编 者

一九九四年六月于昆明

# 目 录

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 绪论                       | 1  |
| 第一章 晶闸管                  | 4  |
| 内容提要                     | 4  |
| § 1-1 晶闸管的结构及可控特性        | 4  |
| § 1-2 晶闸管的工作原理           | 6  |
| § 1-3 晶闸管的伏安特性及主要特性参数    | 8  |
| § 1-4 晶闸管的现场测试方法         | 13 |
| 习题及思考题                   | 16 |
| 第二章 单相可控整流电路             | 18 |
| 内容提要                     | 18 |
| § 2-1 单相半波可控整流电路         | 18 |
| § 2-2 单相全波可控整流电路         | 23 |
| § 2-3 单相半控桥式整流电路         | 29 |
| 习题及思考题                   | 33 |
| 第三章 三相可控整流电路             | 36 |
| 内容提要                     | 36 |
| § 3-1 三相半波可控整流电路         | 36 |
| § 3-2 三相全控桥式整流电路         | 41 |
| § 3-3 三相半控桥式整流电路         | 44 |
| § 3-4 大容量可控整流主电路的接线型式及特点 | 46 |
| § 3-5 变压器漏电抗对整流电路的影响     | 51 |
| § 3-6 整流电路的谐波分析          | 53 |
| 习题及思考题                   | 58 |
| 第四章 晶闸管有源逆变电路            | 60 |
| 内容提要                     | 60 |
| § 4-1 逆变概念               | 60 |
| § 4-2 三相半波逆变电路           | 64 |
| § 4-3 三相桥式逆变电路           | 66 |
| § 4-4 逆变失败原因分析及逆变角的限制    | 68 |
| § 4-5 有源逆变应用实例           | 69 |
| § 4-6 变流装置的功率因数及对电网的影响   | 73 |
| 习题及思考题                   | 76 |
| 第五章 晶闸管变频电路              | 78 |
| 内容提要                     | 78 |

|                                       |            |
|---------------------------------------|------------|
| § 5-1 变频概念及晶闸管换流方式 .....              | 78         |
| § 5-2 并联谐振变频电路 .....                  | 80         |
| § 5-3 串联电感式变频电路 .....                 | 84         |
| § 5-4 三相串联电感式变频电路——三相异步电机变频调速原理 ..... | 85         |
| § 5-5 交流-交流变频电路 .....                 | 88         |
| § 5-6 新型电力电子器件简介 .....                | 92         |
| § 5-7 正弦波脉宽调制(SPWM)型晶体管逆变电路 .....     | 96         |
| 习题及思考题 .....                          | 100        |
| <b>第六章 晶闸管斩波电路及交流调压电路 .....</b>       | <b>101</b> |
| 内容提要 .....                            | 101        |
| § 6-1 晶闸管斩波器的工作原理与分类 .....            | 101        |
| § 6-2 几种直流斩波电路的分析 .....               | 104        |
| § 6-3 晶闸管交流调压电路及双向晶闸管的应用 .....        | 113        |
| § 6-4 晶闸管过零调功电路 .....                 | 123        |
| 习题及思考题 .....                          | 130        |
| <b>第七章 触发电路 .....</b>                 | <b>131</b> |
| 内容提要 .....                            | 131        |
| § 7-1 触发电路的技术指标 .....                 | 131        |
| § 7-2 简单触发电路 .....                    | 133        |
| § 7-3 单结晶体管触发电路 .....                 | 136        |
| § 7-4 同步信号为正弦波的晶体管触发电路 .....          | 141        |
| § 7-5 同步信号为锯齿波的晶体管触发电路 .....          | 146        |
| § 7-6 触发电路中的同步 .....                  | 151        |
| § 7-7 集成触发器及数字触发器简介 .....             | 156        |
| 习题及思考题 .....                          | 160        |
| <b>第八章 晶闸管主电路的参数计算及保护 .....</b>       | <b>161</b> |
| 内容提要 .....                            | 161        |
| § 8-1 晶闸管电压电流参数的选择 .....              | 161        |
| § 8-2 晶闸管过电压保护 .....                  | 163        |
| § 8-3 晶闸管过电流保护及电流上升率、电压上升率的限制 .....   | 171        |
| § 8-4 晶闸管串并联运行 .....                  | 177        |
| 习题及思考题 .....                          | 182        |
| <b>附录 .....</b>                       | <b>183</b> |
| 附录一 整流变压器参数计算 .....                   | 183        |
| 附录二 平波电抗器参数计算 .....                   | 190        |
| 附录三 脉冲变压器设计 .....                     | 193        |
| <b>主要参考文献 .....</b>                   | <b>200</b> |

## 绪 论

电力电子技术目前已发展为一门新兴的学科。该学科横跨“电力”、“电子”及“控制”3个领域,国际电气和电子工程师协会(IEEE)中的电力电子学会对电力电子技术具体表述为:应用电路理论及有关设计分析方法,使用电力半导体器件,实现对电能高效能的变换及控制的一门技术,这种变换及控制包括电压、电流、频率等几方面内容。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等。其中,普通型晶闸管(可控硅)目前应用十分广泛。它也是出现较早的电力半导体器件,由于晶闸管的出现,使弱电对强电的有效控制成为现实。特别从本世纪80年代以来,晶闸管的派生器件及功率晶体管制作水平不断提高,其应用领域日渐广阔,电力电子技术已被公认为当今最先进的电气技术,它的发展标志着人类对电能有效与合理的应用进入了一个更高的水平。

本世纪早些时候,人们为了对电能进行变换和控制,主要应用电机机组、汞弧整流器、闸流管等功率器件,这些器件普遍存在着功率放大倍数低、响应特性差、体积大、效率低,有的还存在噪音或者有毒等一系列缺点,从而限制了电能变换控制技术水平的提高和推广应用。自1956年美国贝尔电话公司实验室制成了世界上第一支晶闸管后,仅用了两年时间,该公司就生产出具有工业用途的晶闸管产品,从而使电能的变换与控制技术进入了一个全新的时代。晶闸管以其响应特性好、重量轻、体积小、消耗能量低、功率放大倍数高等特点在工业领域应用日益广泛。当前以晶闸管(可控硅)为主体的电力半导体器件已成为电力电子技术发展的基础。为适应电能变换及控制技术领域不断扩大,技术要求水平的不断提高,随着半导体平面工艺技术的发展,目前除普通型晶闸管外,还相继研制出了满足特殊需要的快速晶闸管、逆导晶闸管、双向晶闸管及可关断晶闸管等一批晶闸管派生器件,同时还有功率晶体管,功率场效应晶体管,以及将功率开关与控制电路集成在同一块半导体芯片上的新一代的功率集成电路,从而进一步推动了电力电子技术的迅猛发展。

我国自1962年研制成功晶闸管以来,产品的产量、质量以及相应的派生器件历年均有较快的发展,特别是近十年来,设计、工艺、测试及工艺装备等方面都有了长足的进步,从而使我国制造的电力半导体器件无论从器件本身的容量定额或是其动静态特性方面都有了很大的提高和改善。为我国电力电子技术的发展奠定了较坚实的物质基础。

目前,国外普通型晶闸管的生产水平已达到1000A、4000V,研制水平达到3000A、6500V。快速晶闸管的生产水平已达到1500A、1200V、20 $\mu$ s,研制水平达到1000A、2500V、30 $\mu$ s。双向晶闸管的生产水平为500A、1000V,研制水平达到1000A、1800V。功率晶体管的生产水平为200A、900V,研制水平为400A、1000V。

国内普通型晶闸管的生产水平已达到1000A、2600V,研制水平为1000A、3000V。快速晶闸管的生产水平为500A、1600V、40 $\mu$ s,研制水平达到1000A、1200V、30 $\mu$ s。双向晶闸管的生产水平为300A、1000V,研制水平达到1000A、1200V。功率晶体管的生产水平为50A、600V,研制水平为100A、600V。

由电力半导体器件构成的变流装置,一般均具有以下的特点:

1. 体积小、重量轻,与机组相比,无噪声,没有机械旋转部分的磨损,维护方便。
2. 功率放大倍数高。只需几伏电压和几百毫安电流的小信号,即可控制数百安及数千伏的大功率电能,其放大倍数可达数万倍。
3. 控制动态特性好。机组的快速响应为秒级,而晶闸管变流装置可达毫秒级。
4. 功耗小、效率高,节能效果显著。
5. 可提高技术经济指标。

晶闸管变流装置的缺点主要表现为:

1. 过载能力差。主要表现在过电压及过电流能力低。
2. 工作在深控状态时装置的功率因数降低,并产生较强的高次谐波,引起电网波形畸变,造成对电网上其它电器设备的干扰。

我国已将电力电子技术列为重点发展的高技术领域之一,电力电子技术的地位已被充分加以肯定。

电力电子技术的应用按其功能可分为下述几种类型:

1. 可控整流器:把交流电压变换为固定或者大小可调的直流电压。
2. 逆变器:把直流电变换为频率固定或可调的交流电。
3. 交流调压器:把固定的交流电压变换成大小可调的交流电压。
4. 周波变换器:把固定频率的交流电变换为频率可调的交流电。
5. 斩波器:把固定的直流电压变换成大小可调的直流电压。
6. 无触点功率静态开关:用以代替接触器、继电器,用于频繁操作与开关频率较高的场合。

围绕上述几种类型,电力电子技术在国民经济的许多领域应用极其广泛,下面通过几个应用实例来加深理解。

#### (一)直流调速装置

对直流电机的调速,可通过改变电枢电压或激磁电压来实现。以往采用电动-发电机组,需要多台电机,设备庞大。控制复杂而且维护工作量大。改用晶闸管可控整流器供电的直流调速系统,只需一台电机,结构简单,易于实现自动控制,而且系统的动、静特性好。目前该技术已在冶金、机械、造纸、轻纺等部门广泛采用。

采用晶闸管斩波器对直流电机供电,可以实现直流电机的直流脉冲调速。其技术性能在调速、启动、平稳制动、操纵灵活等方面均明显优于传统的直流电机电阻调速方式,而且可节能30~40%左右,该技术已用于地铁电机车、矿山电机车、城市无轨电车及电瓶车的控制系统。

#### (二)交流调速系统

利用变流装置,通过改变交流电机供电频率实现对交流电机无级调速的交流变频调速技术,以其调速范围宽、功率因数高及性能可靠的特点受到世界各国的重视,并成为电力电子技术近期的一个发展重点。交流变频调速将逐渐取代直流调速,是当今电力拖动发展的必然。

应用晶闸管可逆整流电路,将绕线式异步电动机转子中的能量经过变换后送回电网,以实现对其转速调节的串级调速,则是交流调速的另一种类型。它具有明显的节能效果,结构简单、控制方便而且调速范围宽,特别适用于提升设备及泵和风机类负载。

#### (三)晶闸管中频电源

它是利用晶闸管变流装置,将工频交流电经整流后再逆变为中频交流电供给中频交流负

载的设备。目前有 1000Hz、1500Hz、2500Hz 等型的中频电源用于熔炼和热处理的感应加热。还有 400~800Hz 供电的仪器设备电源,从而逐渐取代了传统的中频发电机组。

#### (四)不停电电源

在通信中心、计算机房、气象站,医院及国防重要部门,通常是不允许发生停电事故的。利用晶闸管或其它功率器件所组成的逆变器,在出现交流电网断电时,把事先充好的蓄电池的直流电逆变为交流电并自动投入供电。目前我国已生产中小容量的系列化的不停电电源。

#### (五)交流灯光控制及电炉温度调节电源

利用晶闸管的交流调压与调功装置,可以方便地实现不同场合灯光的控制,例如影剧院及舞台灯光的调节,使之适应场景及环境气氛的要求。当其用于电炉温度调节系统时,可以方便地实现自动控制,易维护,操作方便,较之老式的感应调压器和饱和电抗器有不可比拟的优点。

电力电子技术还应用于高压直流输电、有源滤波、无功补偿等许多方面。可以肯定,随着电力电子技术的进一步发展,定将在国民经济的各个部门发挥更大作用。

“电力电子技术”在工业电气化与自动化等专业中,是一门专业基础性质较强并与生产联系紧密的课程。该课程包含器件、电路及有关应用三方面内容,其中应以电路为主,在电路的分析中,要格外重视各种与电路有关的波形的分析,从波形的分析中进一步理解电路的工作原理。此外,还应注意掌握适应电能不同的变换控制功能的主电路结构,不同负载对电路工作的影响以及主电路元件参数的计算和选择。讲解器件工作原理及特性的目的,是为了应用它来组成有关电路,所以应注意掌握器件的外部特性和各种表征其特性的电参数的含义。此外还应了解并熟悉一些较典型的触发电路的组成、工作原理及其特点。由于本书内容编排均按章节分单元进行,读者应特别注意在掌握一定的单元内容后,提高自己对整个装置的系统的认识及分析水平,最终达到灵活运用所学知识,对晶闸管变流装置具备初步的设计计算能力。

# 第一章 晶 闸 管

## 内 容 提 要

晶闸管包括普通晶闸管、快速晶闸管、可关断晶闸管、双向晶闸管等电力半导体器件。由于普通晶闸管应用广泛,通常就用晶闸管来代替普通晶闸管的名称。本章所述的晶闸管专指普通晶闸管,其内容主要讨论晶闸管的结构及工作特点,晶闸管的伏安特性,晶闸管的主要参数,了解晶闸管以便更好地应用它。至于普通晶闸管以外的其它晶闸管,将在本书有关章节中结合应用加以介绍。

## § 1-1 晶闸管的结构及可控特性

晶闸管即人们习惯称之为可控硅的器件,是用 N 型单晶硅片,按一定的工艺要求,分别进行扩散及烧结处理后,形成 PNPN 4 层结构的一种大功率半导体器件。常用的有螺栓式和平板式两种封装形式。晶闸管有 3 个引出电极,分别称为阳极(A)、阴极(K)和门极(G),其外形和电气符号如图 1-1 所示。

晶闸管属于大功率的半导体器件,导通工作时自身发热量大,必须采用相应的散热措施,否则将由于晶闸管温升过高而损坏。一般均安装铝制散热器来达到降温的目的。根据散热方式分为自冷、强迫风冷及水冷和热管散热等几种类型。螺栓式晶闸管的散热器直接安装在阳极螺栓上,平板式的晶闸管则由互相绝缘的两个散热器将其夹固在中间,两面散热,其效果比螺栓式好,一般容量在 200A 以上的晶闸管,都采用平板式结构。

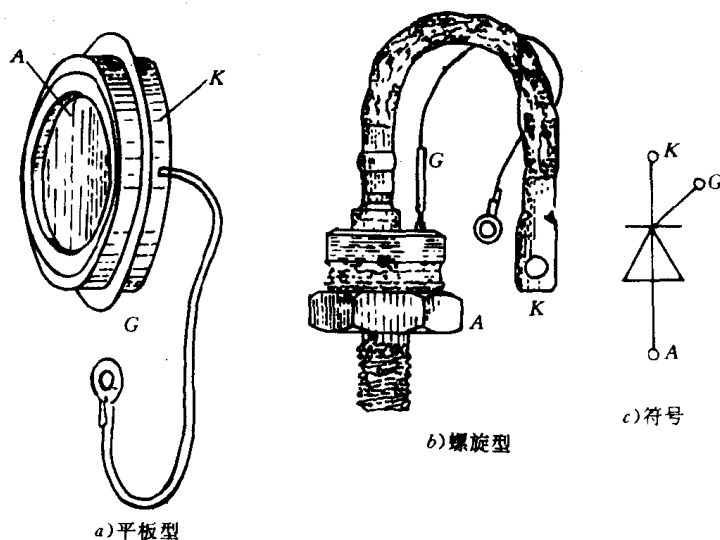


图 1-1 晶闸管外形及符号

a) 平板型    b) 螺栓型    c) 符号

晶闸管的核心部分称为管芯,如前所述,它是用磨制好的 N

型单晶硅片作为基片,在高温密封状态下,进行铝或硼(P 型杂质)双面扩散,形成  $P_1N_1P_2$  结构,然后在  $P_2$  面用烧结的办法在其大部分区域扩散锑或磷(N 型杂质),最终形成  $P_1N_1P_2N_2$  4 层 3 个 PN 结的结构, $P_1$  层引出线作为阳极 A, $N_2$  层引出线作为阴极 K, $P_2$  层剩下的小部分区域引出线为门极 G。螺栓式和平板式的管芯分别如图 1-2(a)、(b)所示。管芯内部 4 层 3 结

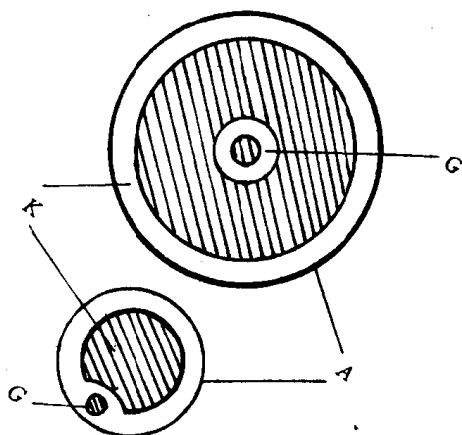


图 1-2 晶闸管管芯

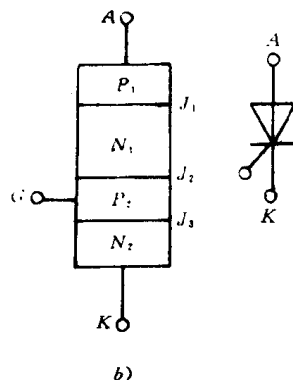
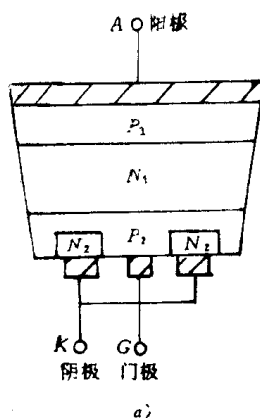


图 1-3 晶闸管内部结构

的结构示意如图 1-3 所示。当晶闸管的阳极与阴极间加上  $u_{AK} > 0$  的正向电压时,  $J_2$  结处于反向偏置, 当加上  $u_{AK} < 0$  的反向电压时,  $J_1$ 、 $J_3$  结处于反向偏置, 均呈现高电阻状态, 即阻断状态。这是晶闸管与二极管根本的差异。

晶闸管在什么条件下, 才能够从阻断状态转变为导通状态或者反之呢? 可以照图 1-4 连结实验线路, 分别就有关情况进行实验观察。图中,  $E_a$  为直流电源, 经过双向闸刀开关( $K_1$ ), 将负载(白炽灯)与晶闸管连接成一个实验电路。该电路称主电路, 用粗线表示。门极电源  $E_g$  经双向闸刀开关( $K_2$ )与晶闸管的门极和阴极连接, 称为控制电路, 用细线表示。白炽灯的明或暗分别表示晶闸管的导通或关断。通过实验可得出如下结论:

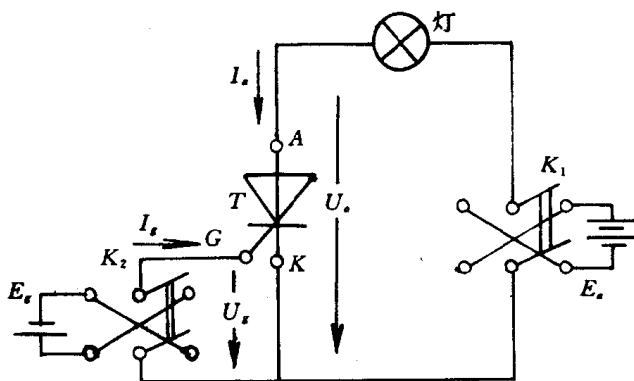


图 1-4 晶闸管导通关断实验

(1) 当晶闸管承受正向阳极电压时, 只有当门极与阴极间施加适当的正向电压并有一定  $I_g$  的情况下, 晶闸管才能导通。

(2) 当晶闸管承受反向电压时, 则不论门极与阴极间施加何种极性的电压, 晶闸管均处于阻断状态。

(3) 晶闸管在导通的情况下, 只要保持承受一定的正向阳极电压, 则不论门极与阴极间电压如何, 晶闸管均仍然导通, 即晶闸管导通后, 门极就失去对它的控制作用。

(4) 晶闸管在导通情况下, 只有当其正向阳极电压减少到一定值或者阳极电压为负值, 晶闸管才从导通状态恢复为阻断状态。

综上所述, 晶闸管欲从阻断转变为导通状态, 必须同时具备正向阳极电压和正向门极电流两个条件。晶闸管一旦导通, 门极即失去对它的控制作用。因此, 通常在门极只要施加一个正向脉冲电压即可, 称为触发电压。当晶闸管承受正向阳极电压时, 只要控制施加触发电压的时

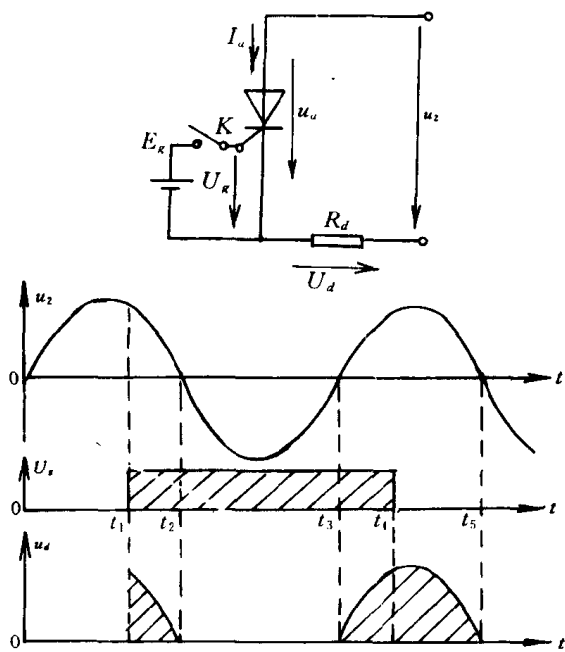


图 1-5 例题电路及波形

时刻, 管子承受正向阳极电压  $u_a$ , 虽然  $u_g=0$ , 由于晶闸管已处于导通状态, 故将继续导通直至  $t_5$  时刻关断。  $R_d$  上的电压波形  $u_d$  如图 1-5 所示。

刻, 则晶闸管导通工作的时间即可控制, 这正是晶闸管的可控特性。正是这种特性, 使晶闸管在电能的变换和控制中获得了广泛应用。

**例 1-1** 有电路如图 1-5 所示, 晶闸管阳极承受正弦交流电  $u_2$ , 门极开关在  $t_1$  时刻合上,  $t_4$  时刻断开, 在上述过程中, 负载电阻  $R_d$  上的波形如何?

**解** 晶闸管阳极承受电压波形及门极电压变化情况如图 1-5 所示。规定电源的正半周即晶闸管承受正向阳极电压的区域, 门极开关在  $t_1$  时刻合上时, 刚好晶闸管阳极电压  $U_a$  为正, 同时满足其导通工作的两个条件, 故此时晶闸管导通, 由于晶闸管导通压降很小, 电源电压  $u_2$  几乎全部加于负载  $R_d$  上, 到  $t_2$  时刻, 因电源  $u_2$  开始过零并反向, 如上述实验晶闸管即关断, 一直到  $t_3$  时刻, 晶闸管重新承受正向阳极电压且有正向门极电压存在, 故晶闸管又导通工作;  $t_4$

## § 1-2 晶闸管的工作原理

如上所述, 晶闸管的有关特性, 是由其内部的结构所决定的。前节内容已说明晶闸管为具有 4 层 3 个 P-N 结的器件, 在 P 型半导体中, 带正电的空穴为多数载流子, N 型半导体中则

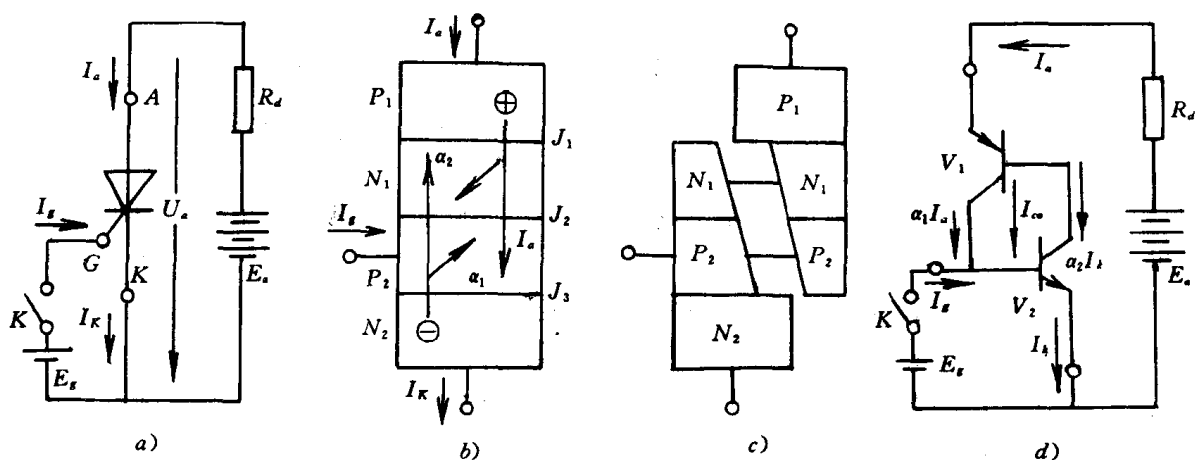


图 1-6 晶闸管工作原理

是带负电的电子为多数载流子。为便于分析, 可按照图 1-6 所示, 将晶闸管的中间层  $N_1$  和  $P_2$

分为两部分,即可认为晶闸管等效为一个PNP 和一个NPN 组合的复合管,这样就可以采用三极管的工作原理来进行分析。

当晶闸管承受正向阳极电压时, $J_1$  和  $J_3$  结均处于正向偏置,而  $J_2$  结则处于反向偏置,欲使晶闸管导通,必须设法消除  $J_2$  结的阻挡作用。图 1-6 中三极管  $V_1$  的集电极同三极管  $V_2$  的基极相接,只要有相应的门极电流  $I_g$  流入,就会形成强烈的正反馈,造成复合三极管的饱和导通,即晶闸管导通。

设  $V_1$  管与  $V_2$  管的集电极电流分别为  $I_{c_1}$  及  $I_{c_2}$ ,发射极电流分别为  $I_a$  及  $I_K$ ,共基极电流放大系数分别为  $\alpha_1 = \frac{I_{c_1}}{I_a}$  和  $\alpha_2 = \frac{I_{c_2}}{I_K}$ 。晶闸管的工作过程可简单表示如下

流入  $I_g$  时,

$$I_g \uparrow \rightarrow I_{b_2} \uparrow \rightarrow I_{c_2} \uparrow = I_{b_1} \uparrow \rightarrow I_{c_1} \uparrow$$

设流过  $J_2$  结的反向漏电流为  $I_{co}$ ,阳极电流  $I_a$  进入  $P_1$  区形成空穴扩散电流,到达  $J_2$  结的电流为  $\alpha_1 I_a$ ,而阴极电流  $I_K$  在  $N_2$  区为电子扩散电流,它到达  $J_2$  结的电流值为  $\alpha_2 I_K$ ;因此,流过  $J_2$  结的总电流也就是阳极电流应由上述 3 部分组成

$$I_a = \alpha_1 I_a + \alpha_2 I_K + I_{co} \quad (1-1)$$

当  $I_g = 0$ ,即门极无触发电流时  $I_a = I_K$ 。代入(1-1)式,晶闸管流过的正向漏电流为

$$I_a = \frac{I_{co}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (1-2)$$

此时,因无  $I_g$  的注入,  $(\alpha_1 + \alpha_2)$  很小,故晶闸管的正向漏电流  $I_a \approx I_{co}$ ,它处于正向阻断状态。

注入门极电流  $I_g$ ,则阴极电流为

$$I_K = I_a + I_g \quad (1-3)$$

从而可得

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

因为晶体三极管的电流放大系数  $\alpha$  随其发射极电流的增大而增大,其曲线如图 1-7 所示。当门极电流  $I_g$  达到一定值时,随着发射极电流的增大,  $(\alpha_1 + \alpha_2)$  将增大到接近 1,则公式(1-4)中的阳极电流急剧增加,  $I_a$  的大小由阳极电源电压及负载电阻的比值来确定,此时,即使  $I_g$  降为零或者出现负值,由于晶体管强烈正反馈作用,也能保持  $I_a$  值不变,即晶闸管仍继续导通。只有设法使晶闸管阳极电流减少到一定程度(约几十毫安),此时  $\alpha_1$  及  $\alpha_2$  相应减小,导致其内部正反馈无法维持时,晶闸管才恢复阻断。

如果晶闸管施加反向阳极电压,则由于此时  $V_1$  及  $V_2$  均处于反压状态,无论有否门极电压,晶闸管都处于阻断状态。

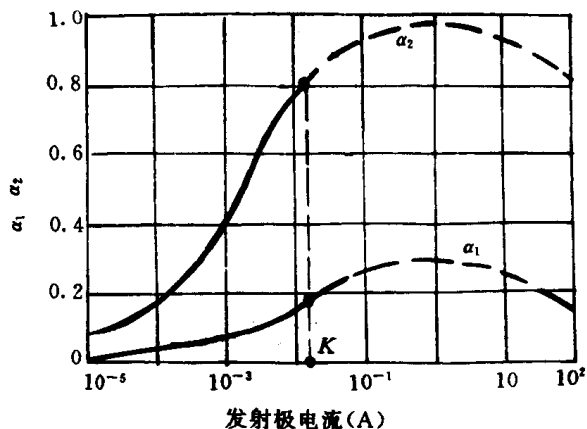


图 1-7 等效晶体管  $\alpha$  变化曲线

### § 1-3 晶闸管的伏安特性及主要特性参数

所谓晶闸管的伏安特性,即是其阳极和阴极之间的电压  $U_a$  与阳极电流  $I_a$  一一对应的关系,掌握晶闸管的上述关系,才能正确可靠地应用它。

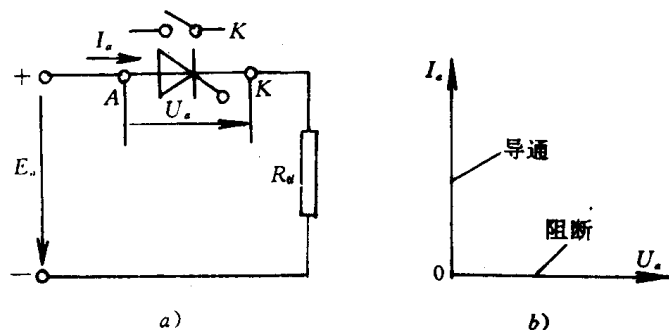


图 1-8 晶闸管理想开关伏安特性

作为一只理想的晶闸管,要求其关断时,阳极  $A$  与阴极  $K$  之间电阻无穷大,阳极漏电流为零,如门极加足够的触发电压,使晶闸管转为正向导通时,则要求  $A$  与  $K$  之间的电压降为零。上述理想晶闸管的特性如果用直角坐标中相应曲线来表示即如图 1-8 (a)、(b) 所示。

图中,横轴代表  $A$  与  $K$  之间的电压,纵轴代表阳极电流。当理想晶闸管关断时,其特性曲线即与横轴重合;当理想晶闸管转为正向导通时,特性曲线则与纵轴重合。

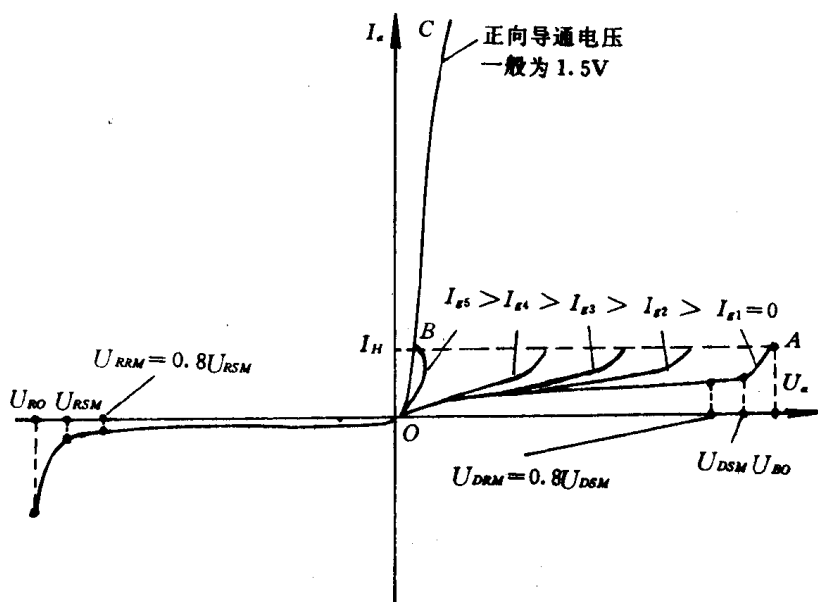


图 1-9 晶闸管阳极伏安特性

实际晶闸管的伏安特性曲线则如图 1-9 所示。当门极无触发信号  $I_g = 0$  时,逐渐增大阳极电压  $U_a$ ,由于受内部  $J_2$  结的阻挡作用,元件中存在着很小的漏电流。当  $U_a$  上升到电压  $U_{BO}$  数值时,由于  $J_1$ 、 $J_3$  结内电场削弱显著,  $\alpha_1$  及  $\alpha_2$  相应增加,促使扩散电流  $\alpha_2 I_K$  与  $\alpha_1 I_a$  分别和  $J_2$  结中的载流子复合,导致  $J_2$  结内部电场的消失,从而使晶闸管突然从阻断变为导通,  $A$  与  $K$  之间的大部分电压降到负载上,特性曲线也突变到接近纵轴的位置。电压  $U_{BO}$  称为晶闸管的转折电压。晶闸管导通后的特性和一般整流二极管的正向特性是一致的。

随着门极供给触发电流  $I_g$  的逐渐加大,晶闸管转折电压也将逐渐减小。实际使用中,一般让晶闸管在足够大的  $I_g$  电流作用下,较低的转折电压状态导通。 $I_g=0$  时元件处于较高  $U_{BO}$  值导通多次后,会大大影响其性能以致将其损坏,因此上述“硬开通”是不允许的。

晶闸管导通后,其阳极与阴极间的管压降是很小的,其值如特性曲线中的  $U_{T(AV)}$  所示。当阳极电流  $I_a$  减小达到曲线中的  $I_H$  电流以下时,晶闸管又从导通返回到正向的阻断状态。

晶闸管施加反向阳极电压时,由于  $J_1$ 、 $J_3$  结均为反向偏置,因此元件只流过很小的反向漏电流,曲线处于靠近横轴的位置;但是,当反向电压升高到  $U_{RO}$  时,反向电流急剧增加,元件即被反向击穿。实际工作时,决不允许元件承受的反向电压达到  $U_{RO}$  值。

理想晶闸管实质上就是一种理想的无触点功率开关,将实际晶闸管的伏安特性与它比较,不难看出,实际晶闸管相当于一支较理想的无触点功率开关元件。

为了正确使用晶闸管,除了上述对晶闸管的伏安特性作定性了解外,还必须以此为基础对晶闸管的主要特性参数作深入的研究。

### 1. 晶闸管的电压定额

晶闸管工作时,必须能够重复承受一定的电压而不影响其性能,这种电压的极限值就叫晶闸管的“重复峰值电压”。在特殊情况下,晶闸管偶然承受不影响其性能的较高电压,但该电压不能重复施加,这就是晶闸管“不重复峰值电压”的含义。显然,该电压为小于转折电压  $U_{BO}$  的值。

(1) 转折电压  $U_{BO}$ : 门极开路,漏电流突然增加,晶闸管从正向阻断状态转入导通状态的最小瞬态电压。

(2) 反向击穿电压  $U_{RO}$ : 晶闸管承受反向阳极电压,其漏电流突然增加,晶闸管反向阻断作用消失的最小瞬态电压。

(3) 断态不重复峰值电压  $U_{DSM}$ : 不允许重复加于晶闸管 A 与 K 之间的正向瞬态电压。 $U_{DSM}$  小于  $U_{BO}$ ,具体值由厂家确定。

(4) 反向不重复峰值电压  $U_{RSM}$ : 不允许重复加于晶闸管 A 与 K 之间的反向瞬态电压。该电压小于  $U_{RO}$ ,具体值由厂家确定。

(5) 断态重复峰值电压  $U_{DRM}$ : 规定断态重复峰值电压  $U_{DRM}$  为断态不重复峰值电压  $U_{DSM}$  的 80%。 $U_{DRM}=80\%U_{DSM}$

(6) 反向重复峰值电压  $U_{RRM}$ : 规定反向重复峰值电压  $U_{RRM}$  为反向不重复峰值电压  $U_{RSM}$  的 80%。 $U_{RRM}=80\%U_{RSM}$

(7) 额定电压  $U_T$ : 该电压即为晶闸管铭牌标出的额定电压,一般为晶闸管实测值  $U_{DRM}$  与  $U_{RRM}$  中较小的一个值,取相应的标准电压等级,电压等级如表 1-1 所示。

如某晶闸管实测的  $U_{DRM}$  为 768V,  $U_{RRM}$  为 880V,按上述规定,额定电压应取 768V,按照表 1-1 的电压等级,可取  $U_T$  为 700V,即该晶闸管铭牌标出的额定电压为 700V,属于 7 级。

因晶闸管工作时,外加电压峰值如果超过其反向不重复峰值电压,将造成晶闸管永久性损坏,或者由于环境温度升高或散热不良使其耐压等级下降。所以考虑上述因素,选用元件的额定电压应比实际工作的电压峰值大 2~3 倍,作为晶闸管工作时的安全裕量。

如某晶闸管工作电源为工频交流 220V,则晶闸管的额定电压  $U_T$  应选择为  $(2\sim3)U_M$ ,  $U_M$  为晶闸管实际工作电压的峰值,即  $U_M$  为  $\sqrt{2} \times 220V = 311V$ ,则  $U_T = (2\sim3) \times 311V = 622V \sim 933V$ ,可选择其范围内某电压等级即可。