



新编21世纪高等职业教育电子信息类规划教材

· 电气自动化技术专业

电力电子技术

· 张 涛 主 编

· 汪临伟 霍 平 副主编

· 李雅轩 主 审



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

新编 21 世纪高等职业教育电子信息类规划教材·电气自动化技术专业

电力电子技术

张 涛 主 编

汪临伟 副主编

霍 平

李雅轩 主 审

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

电力电子技术是高职高专电气自动化技术专业的一门主干专业课程。本书的内容包括：晶闸管的工作原理、特性参数；自关断器件；单相、三相可控整流电路；电力电子器件的串、并联及保护；晶闸管触发电路；交流电力控制电路；有源逆变电路；无源逆变电路；脉宽调制（PWM）电路及斩波电路等。

本书可作为高职高专电气自动化技术专业的专业课教材，也可作为电气类相关专业教材或参考书。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究。

图书在版编目（CIP）数据

电力电子技术/张涛主编. —北京：电子工业出版社，2003.9

新编 21 世纪高等职业教育电子信息类规划教材·电气自动化技术专业

ISBN 7-5053-8725-1

I. 电… II. 张… 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（2003）第 080334 号

责任编辑：周光明 特约编辑：程清源

印 刷：北京东光印刷厂

出版发行：电子工业出版社 <http://www.phei.com.cn>

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销：各地新华书店

开 本：787×1092 1/16 印张：11.5 字数：295 千字

版 次：2003 年 9 月第 1 版 2003 年 9 月第 1 次印刷

印 数：6 000 册 定价：15.00 元



凡购买电子工业出版社的图书，如有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系。联系电话：（010）68279077。质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

出版说明

高等职业教育是我国高等教育的重要组成部分。其根本任务是培养和造就适应生产、建设、管理、服务第一线需要的德、智、体、美全面发展的高等技术应用型人才。近年来,高等职业教育发展迅猛,其宏观规模发生了历史性变化。为适应我国社会进步和经济发展的需要,高等职业教育的教学模式、教学方法需要不断改革,高职教材也必须与之相适应,进行重新调整与定位,突出自身的特色。为此,在国家教育部、信息产业部有关司局的支持、指导和帮助下,电子工业出版社在全国范围内筹建成立“全国高职高专教育教材建设领导小组”,下设“应用电子技术”、“机电一体化技术”、“电气自动化技术”和“通信技术”等专业的多个编委会。各专业编委会成员由电子信息战线辛勤耕耘、功绩卓著的专家、教授、高工和富有高职教学经验的一线优秀教师组成。

2002年10月,“应用电子技术”、“机电一体化技术”、“电气自动化技术”和“通信技术”等四个专业的编委会精心组织全国范围内的优秀一线教师编写了《新编21世纪高等职业教育电子信息类规划教材》60余种。这批教材的主要特点是:

1. 在编写方法上打破了以往教材过于注重“系统性”的倾向,摒弃了一些一般内容和烦琐的数学推导,采用阶跃式、有选择的编写模式,强调实践和实践属性,精炼理论,突出实用技能,内容体系更加合理;
2. 注重现实社会发展和就业需求,以培养职业岗位群的综合能力为目标,充实训练模块的内容,强化应用,有针对性地培养学生较强的职业技能;
3. 教材内容的设置有利于扩展学生的思维空间和学生的自主学习;着力于培养和提高学生的综合素质,使学生具有较强的创新能力,促进学生的个性发展;
4. 教材内容充分反映新知识、新技术、新工艺和新方法,具有超前性、先进性。

首批教材共有60余种,将于2003年8月陆续出版。所有参加教材编写的高职院校都有一个共同的愿望:希望通过教材建设领导小组、编委会和全体作者的共同努力,使这批教材在编写指导思想、编写内容和编写方法上具有新意,突出高等职业教育的特点,满足高职学生学习和就业的需要。

高等职业教育改革与教材建设是一项长期的任务,不会一蹴而就,而是要经历一个发展过程。这批高职教材的问世,还有许多不尽人意之处。随着教育的不断深化,我国经济和科学技术的不断发展,高职教材的改革与开发将长期与之相伴而行。在教育部和信息产业部的指导和帮助下,我们将一如既往地依靠本行业的专家,与科研、教学第一线的教研人员紧密联系,加强合作,与时俱进,不断开拓,逐步完善各类专业课教材、专业基础课教材、实训指导书、电子教案、电子课件及配套教材,为高等职业教育提供优质的教学资源和服务。

电子工业出版社高职高专教育教材事业部的全体成员殷切地希望全国高职高专院校的教师们能够踊跃投稿,提出选题建议,并对已出版的教材从多方面提出修改建议。除以上四个专业外,我们还设立了“计算机技术”、“电子商务”、“物流管理”、“会计类”、“金融类”、“环保类”等专业的编委会。我们衷心欢迎更多的志士仁人加入到各个编委会中来。

电子工业出版社的全体员工将竭诚为教育服务,为高等职业教育战线的广大师生服务。

参加“新编 21 世纪高等职业教育电子信息类规划教材”

编写的院校名单（排名不分先后）

桂林工学院南宁分院

江西信息应用职业技术学院

江西蓝天职业技术学院

吉林电子信息职业技术学院

保定职业技术学院

安徽职业技术学院

杭州中策职业学校

黄石高等专科学校

天津职业技术师范学院

福建工程学院

湖北汽车工业学院

广州铁路职业技术学院

台州职业技术学院

重庆工业高等专科学校

济宁职业技术学院

四川工商职业技术学院

吉林交通职业技术学院

连云港职业技术学院

天津滨海职业技术学院

杭州职业技术学院

重庆职业技术学院

重庆工业职业技术学院

广州大学科技贸易技术学院

湖北孝感职业技术学院

江西工业工程职业技术学院

四川工程职业技术学院

广东轻工职业技术学院

西安理工大学

辽宁大学高职学院

天津职业大学

天津大学机械电子学院

九江职业技术学院

包头职业技术学院

北京轻工职业技术学院

黄冈职业技术学院

郑州工业高等专科学校

泉州黎明职业大学

浙江财经学院信息学院

南京理工大学高等职业技术学院

南京金陵科技学院

无锡职业技术学院

西安科技学院

西安电子科技大学

河北化工医药职业技术学院

石家庄信息工程职业学院

三峡大学职业技术学院

桂林电子工业学院高职学院

桂林工学院

南京化工职业技术学院

湛江海洋大学海滨学院

江西工业职业技术学院

江西渝州科技职业学院

柳州职业技术学院

邢台职业技术学院

漯河职业技术学院

太原电力高等专科学校

苏州工商职业技术学院

金华职业技术学院

河南职业技术师范学院

新乡师范高等专科学校

绵阳职业技术学院

成都电子机械高等专科学校

河北师范大学职业技术学院

常州轻工职业技术学院

常州机电职业技术学院

无锡商业职业技术学院

河北工业职业技术学院

天津中德职业技术学院

安徽电子信息职业技术学院

浙江工商职业技术学院

河南机电高等专科学校

深圳信息职业技术学院

河北工业职业技术学院

湖南信息职业技术学院

江西交通职业技术学院

沈阳电力高等专科学校

温州职业技术学院

温州大学

广东肇庆学院

湖南铁道职业技术学院

宁波高等专科学校

南京工业职业技术学院

浙江水利水电专科学校

成都航空职业技术学院

吉林工业职业技术学院

上海新侨职业技术学院

天津渤海职业技术学院

驻马店师范专科学校

郑州华信职业技术学院

浙江交通职业技术学院

前 言

本书是根据高职电气自动化技术专业的《电力电子技术教学基本要求》，并参照有关行业的职业技能鉴定规范及高级技术工人等级考核标准编写的。

本教材在编写过程中，遵循注重基础、定性为主、理论联系实际、突出能力培养的原则，注意融合电力电子新器件及其应用技术。全书共九章：晶闸管概述，可控整流电路，电力电子器件的串、并联及保护，晶闸管的触发电路，交流电力控制电路，有源逆变电路，无源逆变电路，直流斩波电路和电力电子技术实验。每章后面都附有习题，以帮助学生巩固所学知识。

本书适用于电气自动化技术专业及相近专业、学制 3 年的高等职业教育的教学，建议课时分配如下表所示。

序号	内 容	总学时	讲课	实验	机动
1	绪论	2	2		
2	第 1 章 晶闸管概述	14	14		
3	第 2 章 可控整流电路	16	12	4	
4	第 3 章 电力电子器件的串、并联及保护	4	4		
5	第 4 章 晶闸管的触发电路	10	6	4	
6	第 5 章 交流电力控制电路	6	4	2	
7	第 6 章 有源逆变电路	10	8	2	
8	第 7 章 无源逆变电路	6	6		
9	第 8 章 直流斩波电路	6	4	2	
总 计		80	60	14	6

本书由江苏省常州轻工职业技术学院张涛副教授担任主编，江西九江职业技术学院汪临伟（第 7, 8 章）、成都电子机械高等专科学校霍平（第 1 章）担任副主编。全书由张涛统稿，由天津职业大学李雅轩教授审订。

本书在编写体系和内容取舍方面做了一些新的尝试。由于编者水平有限，错误之处在所难免，敬请读者批评指正。

编者
2003 年 5 月



Contents

绪论	(1)
第1章 晶闸管概述	(3)
1.1 晶闸管的结构和工作原理	(3)
1.1.1 晶闸管的结构	(3)
1.1.2 晶闸管的工作原理	(4)
1.2 晶闸管的特性	(5)
1.2.1 晶闸管的阳极伏安特性	(5)
1.2.2 晶闸管的门极伏安特性	(5)
1.3 晶闸管的主要参数	(6)
1.3.1 晶闸管的电压参数	(6)
1.3.2 晶闸管的电流参数	(7)
1.3.3 晶闸管的动态参数	(10)
1.3.4 器件的型号	(10)
1.4 晶闸管的测试与使用	(11)
1.4.1 测试晶闸管的简易方法	(11)
1.4.2 晶闸管的正确使用	(12)
1.5 双向晶闸管	(12)
1.5.1 双向晶闸管的基本结构和伏安特性	(13)
1.5.2 双向晶闸管的主要参数	(13)
1.6 功率晶体管	(14)
1.6.1 功率晶体管的结构与工作原理	(14)
1.6.2 功率晶体管的特性	(16)
1.7 功率场效应晶体管	(17)
1.7.1 功率场效应晶体管的结构与工作原理	(17)
1.7.2 功率场效应晶体管的特性	(18)
1.8 绝缘栅双极晶体管	(20)
1.8.1 绝缘栅双极晶体管的结构与工作原理	(20)
1.8.2 绝缘栅双极晶体管的特性	(21)
本章小结	(23)
思考题和习题 1	(24)



第2章 可控整流电路	(26)
2.1 单相半波可控整流电路	(26)
2.1.1 电阻性负载	(27)
2.1.2 电感性负载及续流二极管	(30)
2.1.3 反电动势负载	(33)
2.2 单相全波和单相全控桥式可控整流电路	(34)
2.2.1 单相全波可控整流电路	(34)
2.2.2 单相全控桥式整流电路	(37)
2.3 单相半控桥式整流电路	(37)
2.3.1 电阻性负载	(38)
2.3.2 电感性负载	(40)
2.3.3 反电动势负载	(42)
2.4 三相半波可控整流电路	(44)
2.4.1 三相半波不可控整流电路	(44)
2.4.2 三相半波可控整流电路	(44)
2.4.3 共阳极三相半波可控整流电路	(51)
2.4.4 共用变压器的共阴极、共阳极三相半波可控整流电路	(51)
2.5 三相全控桥式整流电路	(52)
2.5.1 工作原理	(53)
2.5.2 对触发脉冲的要求	(54)
2.5.3 对大电感负载的分析	(54)
2.6 三相半控桥式整流电路	(56)
2.6.1 电阻性负载	(56)
2.6.2 电感性负载	(57)
2.7 可控整流电路的应用实例	(59)
本章小结	(60)
思考题和习题 2	(60)
第3章 晶闸管的串、并联及保护	(63)
3.1 晶闸管的过电压保护	(63)
3.1.1 晶闸管的关断过电压及其保护	(63)
3.1.2 晶闸管交流侧过电压及其保护	(64)
3.1.3 晶闸管直流侧过电压及其保护	(66)
3.2 晶闸管的过电流保护与电压、电流上升率的限制	(67)
3.2.1 晶闸管的过电流保护	(67)
3.2.2 电压与电流上升率的限制	(68)
3.3 晶闸管的串联和并联	(69)
3.3.1 晶闸管的串联	(69)
3.3.2 晶闸管的并联	(70)
本章小结	(71)

思考题和习题 3	(71)
第 4 章 晶闸管的触发电路	(73)
4.1 对触发电路的要求	(73)
4.2 单结晶体管触发电路	(74)
4.2.1 单结晶体管	(74)
4.2.2 单结晶体管弛张振荡电路	(76)
4.2.3 单结晶体管的同步和移相触发器	(77)
4.3 同步电压为锯齿波的晶闸管触发电路	(78)
4.3.1 触发脉冲的形成与放大	(78)
4.3.2 锯齿波的形成及脉冲移相	(79)
4.3.3 锯齿波同步电压的形成	(80)
4.3.4 双窄脉冲形成环节	(81)
4.3.5 强触发电路	(81)
4.4 集成化晶闸管移相触发电路	(82)
4.4.1 KC04 移相触发电路	(82)
4.4.2 KC42 脉冲列调制形成器	(82)
4.4.3 KC41 六路双脉冲形成器	(82)
4.4.4 由集成元件组成的三相触发电路	(84)
4.5 触发脉冲与主电路电压的同步及防止误触发的措施	(85)
4.5.1 触发电路同步电源电压的选择	(85)
4.5.2 防止误触发的措施	(87)
本章小结	(87)
思考题和习题 4	(88)
第 5 章 交流电力控制电路	(89)
5.1 晶闸管交流开关	(89)
5.1.1 简单交流开关	(89)
5.1.2 由过零触发开关电路组成的单相交流调功器	(91)
5.1.3 固态开关	(93)
5.1.4 交流开关电路的应用实例	(93)
5.2 单相交流调压	(95)
5.2.1 电阻性负载	(95)
5.2.2 电感性负载	(97)
5.2.3 晶闸管交流稳压电路	(99)
5.3 三相交流调压电路	(100)
5.3.1 星形连接带中线的三相交流调压电路	(100)
5.3.2 晶闸管与负载连接成内三角形的三相交流调压电路	(101)
5.3.3 用三对反并联晶闸管连接成三相三线交流调压电路	(101)
本章小结	(102)



思考题和习题 5	(103)
第 6 章 有源逆变电路	(104)
6.1 有源逆变的工作原理	(104)
6.1.1 电网与直流电动机间的能量转换	(104)
6.1.2 有源逆变的工作原理	(105)
6.2 三相有源逆变电路	(107)
6.2.1 三相半波有源逆变电路	(107)
6.2.2 三相桥式有源逆变电路	(108)
6.3 逆变失败及最小逆变角的确定	(110)
6.3.1 逆变失败的原因	(110)
6.3.2 最小逆变角的确定及限制	(113)
6.4 有源逆变电路的应用	(114)
6.4.1 用接触器控制直流电动机正反转的电路	(114)
6.4.2 采用两组晶闸管反并联的可逆电路	(115)
6.4.3 绕线转子异步电动机的串级调速	(119)
本章小结	(122)
思考题与习题 6	(123)
第 7 章 无源逆变电路	(124)
7.1 变频的基本概念	(124)
7.1.1 变频的作用	(124)
7.1.2 变频器的分类	(124)
7.1.3 变频器的基本原理与换流方式	(125)
7.2 负载谐振式逆变器	(126)
7.2.1 并联谐振逆变器	(127)
7.2.2 串联谐振逆变器	(128)
7.3 三相逆变器	(130)
7.3.1 电压型三相逆变器	(131)
7.3.2 电流型三相逆变器	(133)
7.4 脉宽调制型逆变电路	(136)
7.4.1 脉宽调制型变频电路的基本原理	(137)
7.4.2 脉宽调制型变频电路的调制、控制方式	(141)
本章小结	(143)
思考题与习题 7	(143)
第 8 章 直流斩波电路	(145)
8.1 降压式斩波电路	(145)
8.1.1 基本斩波器的工作原理	(145)
8.1.2 电流连续工作方式	(146)
8.1.3 电流断续工作方式	(146)



8.2 升压式斩波电路	(148)
8.2.1 电流连续工作方式	(148)
8.2.2 电流断续工作方式	(150)
8.3 升降压式斩波电路	(151)
8.3.1 电路连续工作方式	(151)
8.3.2 电流断续工作方式	(152)
8.3.3 输出电压的纹波	(153)
本章小结	(153)
思考题与习题 8	(154)
第 9 章 电力电子技术实验	(156)
实验 1 单晶体管触发电路及单相半控桥式整流电路实验	(156)
实验 2 锯齿波触发电路与三相全控桥式整流电路实验	(159)
实验 3 单相交流调压电路实验	(163)
实验 4 三相半波有源逆变电路的研究	(165)
实验 5 IGBT 斩波电路实验	(167)
参考文献	(171)

绪 论

电力电子技术是电力、电子和控制技术相结合的边缘学科，自 1958 年第一个工业用普通晶闸管诞生以来，电力电子技术有了很大的发展，由各种电力电子器件组成的功率变换装置，应用于从航空航天到家用电器的各个领域。

电力电子技术主要是电力半导体器件及其应用技术，随着电子技术的不断发展，新型电力半导体器件不断涌现。例如，普通晶闸管已有 1kA/12kV, 3kA/4kV 产品；可关断晶闸管 GTO 已有 1kA/9 kV, 4.5kA/4.5kV 产品；功率晶体管 GTR 已有 400A/1.2kV（单管），800A/2kV 和 100A/1800V（模块）产品；功率 MOS FET 已有 38A/1000V 产品；静电感应晶闸管 SITH 已有 2.5kA/4.5kV 产品；绝缘栅双极晶体管 IGBT 已有 400A/1.2kV 产品；MOS 控制晶闸管 MCT 已有 100A/1kV 产品。目前更是充分地利用现代控制技术和微电子技术，使电力半导体器件向高频、高效、小型及智能化方面发展。例如，IGBT 模块正在向智能模块方向发展，模块内主要设置的功能有连接功率器件和控制电路的接口电路、过热与过流保护电路、上下支路的信号分配电路以及电路用电源等，它在电机控制、中频（50 kHz 以上）开关电源及要求快速低损耗的应用领域逐步取代 MOS FET 和 GTR。功率集成电路 PIC 实现了集成电路功率化，功率器件集成化，使功率和信息相统一，作为机电一体化的接口电路，已进入实用化阶段。电力电子设备发展的特点是：

（1）微机和现代控制理论的应用，使电力电子设备走出了过去仅进行将交、直流变换用做一般工业直流电源的初级阶段，开拓了高科技领域的应用。

（2）完善的电路理论及新的设计方法，使产品性能更先进、更符合生产实际的需要。

（3）微电子技术与电力电子技术开始相互渗透结合，使电力电子设备效率提高、速度更快、使用更方便。

（4）电路拓扑技术和结构标准化加快了新产品的开发步伐。

变流电路是以电力半导体器件为核心，通过不同电路的拓扑和控制方法来实现对电能的转换和控制。它的基本功能是使交流（AC）和直流（DC）电能互相转换。它有以下几种类型：

可控整流器 AC/DC。把交流电压变换成固定或可调的直流电压，如应用于直流电动机的调压调速、电解与电镀设备等。

有源逆变器 DC/AC。把直流电压变换成为频率固定或可调的交流电压，如应用于直流输电、牵引机车制动时的电能回馈等。

变频器 AC/AC。把频率固定或变化的交流电变换成频率可调或固定的交流电，应用于变频电源、不间断电源 UPS、变频调速等设备。

直流斩波器 DC/DC。把固定或变化的直流电压变为可调或固定的直流电压，应用于电气机车、城市电车牵引等。

无触点功率静态开关。接通或切断交流、直流电流通路，用于取代接触器、继电器。

总之，由于电力半导体器件制造技术的发展，主电路结构和控制技术的开发，以及设备应用技术的开发，使电力电子技术在大功率整流、直流传动、交流传动、直流输电、功率变换、



晶闸管电源、电力电子开关等方面的应用日益扩大。

电力电子技术课程是高职电气自动化专业的一门主干专业课程。它的任务是：讲授晶闸管（SCR）等电力电子器件的工作原理、特性参数及应用技术的基本理论知识，并通过实践环节，培养学生具有安装、调试和维修电力电子器件组成的各种设备的能力，使学生掌握电力电子技术的基本知识和基本技能，为学习其他专业知识和职业技能打好基础，增强以后对职业变化的适应能力。

学生通过理论学习与实践训练，应达到以下要求：

- （1）掌握电力电子技术中的基本概念和基本分析方法。
- （2）掌握常用电力电子器件的特性、主要参数、选用方法及应用范围。
- （3）理解基本电路的原理、结构和用途。
- （4）能独立完成教学基本要求中规定的实验与实训项目。
- （5）能正确使用常用电子仪器仪表观察实验现象，记录有关数据，并能通过分析比较得出正确结论。
- （6）能阅读和分析常见的电力电子电路原理图及电力电子设备的电路方框图。
- （7）具有借助工具书和设备铭牌、产品说明书、产品目录（手册）等资料，查阅电子元器件及产品的有关数据、功能和使用方法的能力。
- （8）能正确选用电力电子器件并组成常用电路。
- （9）能初步判断和分析由电力电子器件为主所构成的设备的一般故障，并能处理此类设备的简单故障。

电力电子技术所涉及的知识面广、内容多，在学习时应注意复习电工基础、电子技术、电机与电气控制等课程的内容，在讲授和学习中要着重于物理概念及分析问题的方法，重视实验和读图等应用能力的培养。

第1章 晶闸管概述



内容提要

晶闸管是晶体闸流管的简称,按照 IEC (国际电工委员会) 的定义,晶闸管是指具有三个以上的 PN 结,其主电压—电流特性至少在一个象限内具有导通、阻断两个稳定状态,且可在这两个稳定状态之间进行转换的半导体器件。晶闸管是由多种器件组成的家族,而被广泛使用的普通晶闸管则是这个家族中的一员,俗称可控硅整流器 (SCR, Silicon Controlled Rectifier),简称可控硅,其规范术语是反向阻断三端晶闸管。晶闸管诞生以来,电力电子技术发展迅速,新型电力电子器件不断涌现,并得到广泛应用。本章着重介绍普通晶闸管、双向晶闸管、功率晶体管、功率场效应晶体管、绝缘栅双极晶体管等元件。

1.1 晶闸管的结构和工作原理

晶闸管是一种既具有开关作用,又具有整流作用的大功率半导体器件,应用于可控整流、变频、逆变及无触点开关等多种电路。对它只需提供一个弱电触发信号,就能控制强电输出。所以说,它是半导体器件从弱电领域进入强电领域的桥梁。

1.1.1 晶闸管的结构

如图 1.1 所示,晶闸管是具有三个 PN 结的四层三端器件,器件外部有三个电极:阳极 A、阴极 K 和门极 G。其内部由四层半导体 (P_1, N_1, P_2, N_2)、三个 PN 结 J_1, J_2, J_3 组成。

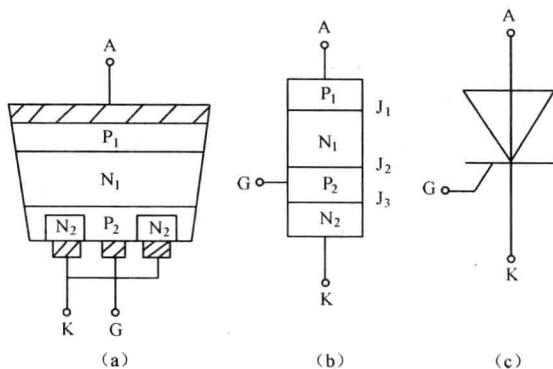


图 1.1 晶闸管的内部结构

1.1.2 晶闸管的工作原理

为了弄清晶闸管是怎样工作的，可按图 1.2 电路做实验。

晶闸管的阳极 A 经负载（白炽灯）、变阻器 RP、双向刀开关 Q_1 接至电源 E_a 的正极，元件的阴极 K 经毫安表、双向刀开关 Q_2 接至电源 E_g 的负极，组成晶闸管主电路，用粗线表示。流过晶闸管阳极的电流为 I_a 。晶闸管阳、阴极两端电压 U_a ，称阳极电压。

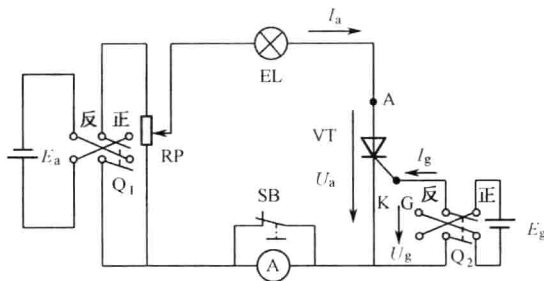


图 1.2 晶闸管导通、关断实验电路图

晶闸管门极 G 经双向刀开关 Q_2 接至门极电源 E_g ，元件的阴极 K 经 Q_2 与 E_g 另一端连接，组成晶闸管的触发电路，用细线表示。流过门极的电流为 I_g （也称触发电流），门极与阴极之间的电压称门极电压 U_g 。

当 Q_1 拨向反向， Q_2 无论拨向何位置，灯都不会亮，这说明晶闸管处在阻断状态。当 Q_1 拨向正极， Q_2 断开，灯还是不亮，说明晶闸管仍处在阻断状态。若 Q_2 拨向正向，灯就亮了，这表明晶闸管已导通。此时再断开门极刀开关 Q_2 ，灯仍然亮着。由此可见，要使晶闸管导通，必须在阳极与阴极之间加正向电压 U_a ，同时在门极与阴极之间加正向电压 U_g （此时有一触发电流 I_g 流入门极）。晶闸管一旦触发导通后，门极就失去控制作用。要想使晶闸管重新恢复阻断状态将怎样做呢？请继续下面的实验：在灯亮的情况下，逐渐调节变阻器 RP，使流过负载（灯泡）的电流逐渐减少，这时应按下按钮 SB，注意观察毫安表的指针，当阳极电流降到某数值，毫安表的指针突然回到零，说明晶闸管已关断。从毫安表所观察到的最小阳极电流称做晶闸管的维持电流 I_H 。

如何理解晶闸管的导通与关断呢？可用其互补三极管等效电路来解释。如图 1.3 所示，当在晶闸管的阳极、阴极之间加反向电压时，由于 J_1 和 J_3 的 PN 结呈反向阻断状态，所以几乎没有电流流通。相反，即使在阳极、阴极之间加正向电压，而门极不加电压时，由于中间的 PN 结 J_2 呈反向阻断状态，所以晶闸管也不会导通。只有当阳极、阴极之间加上正向电压，同时门极、阴极之间也施加正向电压，门极有足够的电流流入时，就形成强烈的正反馈，即

$$I_g \uparrow \rightarrow I_{b2} \uparrow \rightarrow I_{c2} \uparrow (= \beta_2 I_{b2}) \uparrow = I_{b1} \uparrow \rightarrow I_{c1} \uparrow (= \beta_1 I_{b1}) \rightarrow I_g \uparrow$$

瞬时使两晶体管饱和导通即晶闸管导通。

若要使已导通的晶闸管恢复阻断，只有设法使晶闸管的阳极电流减少到小于维持电流 I_H ，使其内部正反馈无法维持，晶闸管才会恢复阻断，常用的方法是在晶闸管两端加反向电压。

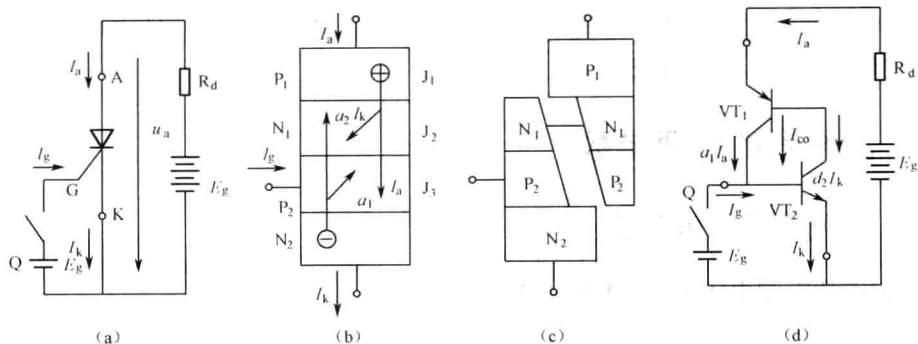


图 1.3 晶闸管的工作原理示意图

1.2 晶闸管的特性

1.2.1 晶闸管的阳极伏安特性

晶闸管的阳极伏安特性是指阳极与阴极之间电压和阳极电流的关系如图 1.4 所示。

当门极电流 $I_g=0$ 时，即使正向电压上升也不导通，然而当电压上升到转折电压 U_{BO} 时，晶闸管就被导通。导通后元件的阳极伏安特性与整流二极管正向伏安特性相似。 $I_g=0$ 的这条特性曲线，称为晶闸管的自然伏安特性曲线。一般是给门极输入足够的触发电流，使转折电压明显降低来导通晶闸管。如图 1.4 所示，由于 I_g 从 I_{g1} 到 I_{g5} 逐渐增大，相应的电压逐渐降低。晶闸管一旦导通，则其阳极伏安特性与整流二极管的正向伏安特性相似。

反向伏安特性曲线如图第Ⅲ象限所示，它与整流二极管的反向伏安特性相似。若反向电压增大到反向击穿电压 U_{RO} 时，晶闸管将造成永久性的损坏，因此，使用时晶闸管两端可能承受的最大峰值电压都必须小于管子的反向击穿电压，否则管子将被损坏。

1.2.2 晶闸管的门极伏安特性

晶闸管的门极和阴极间有一个 PN 结 J_3 ，见图 1.1 (b)，它的伏安特性称为门极伏安特性。如图 1.5 所示。它的正向特性不像普通二极管具有很小的正向电阻及较大的反向电阻，有时它的正、反向电阻是很接近的。在这个特性中表示了晶闸管确定产生导通门极电压、电流的范围。

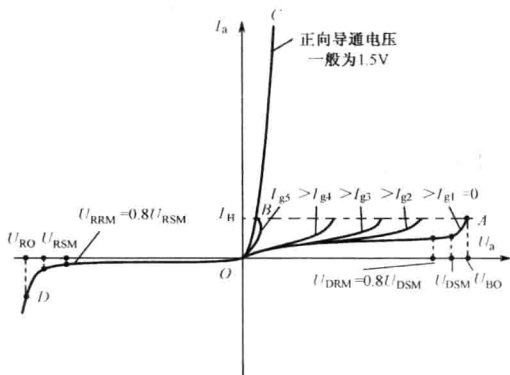


图 1.4 晶闸管阳极伏安特性示意图

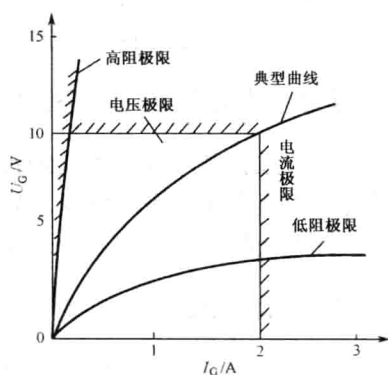


图 1.5 晶闸管门极伏安特性示意图