



21 世纪高职高专规划教材
高等职业教育规划教材编委会专家审定

YUNDONG KONGZHI XITONG ANZHUANG
TIAOSHI YU WEIXIU

运动控制系统安装、调试与维修

——直流传动系统的安装与调试

主 编 王名杰
副主编 王述奇



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

21 世纪高职高专规划教材

高等职业教育规划教材编委会专家审定

运动控制系统安装、调试与维修

——直流传动系统的安装与调试

主 编 王名杰
副主编 王述奇
参 编 白 静 席 艳
孙丽君 刘晓磊

北京邮电大学出版社
·北京·

内 容 简 介

结合目前高职高专教育人才模式(基于工作过程的工学结合一体化教学模式)的改革,编写了《运动控制系统安装、调试与维修》。本书共分为四个项目:可控整流装置的安装与调试、晶闸管单闭环直流电动机调速系统的安装与调试、晶闸管双闭环直流调速系统的安装与调试和 IGBT 脉宽直流调速系统的安装与调试。本书涉及的内容有直流电机、晶闸管、IGBT、单片机控制技术和自动控制系统等多门知识,是一门综合性较强的专业核心课程。在编书过程中尽力做到理论与实践的有机结合,重点突出了如何提高学生综合能力。

本书结构紧凑,内容由浅到深,逐步递进,前后内容连贯为一体,突出实用性和可操作性。适用于普通高职高专自动化和机电一体化类学生使用,也可作为应用型本科自动化和机电一体化类学生或工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

运动控制系统安装、调试与维修:直流传动系统的安装与调试/王名杰主编. --北京:北京邮电大学出版社,2009.7

ISBN 978-7-5635-2086-2

I. ①运… II. ①王… III. ①自动控制系统—安装②自动控制系统—调试③自动控制系统—维修
IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 140677 号

书 名: 运动控制系统安装、调试与维修——直流传动系统的安装与调试

主 编: 王名杰

责任编辑: 王晓丹 刘洪来

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号(邮编:100876)

发 行 部: 电话:010-62282185 传真:010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京源海印刷有限责任公司

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 14.75

字 数: 364 千字

印 数: 1—3 000 册

版 次: 2010 年 7 月第 1 版 2010 年 7 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-2086-2

定 价: 28.00 元

如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系。

序

2004年始,通过组织学习美国哈佛大学教育研究院的心理发展学家霍华德·加德纳(Howard Gardner)的多元智能理论,学习教育部职业技术教育研究所职教专家姜大源教授基于能力本位的教育观、基于多元智能的人才观、基于全面发展的能力观、基于工作过程的课程观,学习有关高等职业教育教学理论,认识到了高职教育改革的必要性,进而在理论适度、实践加强思想的指导下,使教学计划中的实践教学比重逐年增加,取得了较好的教学效果;2006年,教育部发布了《关于全面提高高等职业教育教学质量的若干意见》(教高[2006]16号文件),为进一步深化高等职业教育教学改革指明了方向,为了探索实践校内学习与将来工作一致性的要求,我们组织了部分骨干教师北上长春汽车工业高等专科学校,南下南京工业职业技术学院,深入企业调查研究,在充分学习借鉴兄弟院校专业建设、课程建设经验的基础上,开始了基于工作过程的一体化教学模式的构建。

一体化教学模式是一种什么样的教学模式?把授课的教室与实训室建设在一起,就能实现一体化教学吗?答案是否定的。我们认为,讲完理论再讲操作的教学过程与传统本科压缩式的教学过程没有多少区别,不能算是一体化教学。教育部[2006]16号文件提出了“要积极推动与生产劳动和社会实践相结合的学习模式,把工学结合作为高等职业教育人才培养模式改革的重要切入点,带动专业调整与建设,引导课程设置、教学内容和教学方法改革”,这一要求使我们找到了一体化教学改革的切入点就是工学结合。工学结合要求把将来的企业工作与现在的在校学习结合起来,既要求理论与实践的结合,还要求学习环境与工作环境的结合;既要培养学生的知识和技能,还要培养学生的综合素养。我们所要构建的正是基于工作过程的工学结合的一体化教学模式。

为了实现这种教学模式,我们在教学内容及教学环境方面进行了一系列的改革。在硬件方面,建成了“电工操作”、“电子产品安装与检测”、“数字产品设计安装与调试”、“电气设备安装与运行维护”、“PLC应用设计”、“单片机应用开发”、“运动控制系统运行维护”、“过程控制系统运行维护”、“自动线运行维护”等实训工作间,在工作间里布置工作台,放置器件柜,为学生提供真实的劳动工具、真实的设备器件;在教学内容方面,将传统的学科知识体系改革为易于学习与操作的、基于工作过程的课程体系,把现实中典型的工作项目加工整合为教学内容,形成了《电工技术》、《电子产品制作与测试》、《数字产品设计与调试》、《电气设备安装与故障诊断》、《PLC应用设计》、《单片机应用开发》、《直流传动系统的运行与维护》、《交流伺服系统的运行与维护》、《过程控制系统的运行与维护》以及《自动线的运行与维护》10门课程的课程标准及相关教学资料;在教学实施的过程中,为学生创建仿真企业的工作环境,组建工作团队,安排工作任务,教师按照资讯、决策、计划、实施、检验及评价六个工作步骤组织教学活动,学生按任务要求开展学

习性工作,在工作中完成知识的学习、实现技能的增长、获得经验的积累,同时制定类似于企业的各种管理制度,使学生通过教学过程得到全面的教育和培养。

本系列教材,在各课程组与相关企业技术人员的共同努力下,经过多年的实践,已初步成型,主要包括两部分:一部分为教学文件,即各门课程的课程标准,它规定了课程的培养目标、教学内容及教学实施方案,从宏观的课程设计到微观的课程实施进行了规范,为从事各门课程的教学提供了指导意见;另一部分为教学参考资料,包括教材、学习指导书等。

电气自动化技术专业群工作过程系统化系列教材编审委员会

2009年8月

前 言

高等职业教育的培养目标是为社会培养动手能力强、工程应用能力强的生产一线技术人员。为了满足社会对实用型人才的要求,把多年来在教育教学中积累的新思想、新观念、新方法创造性地融汇到教材中去,本教材根据高职高专的培养目标,结合高职高专的教学改革和课程改革,本着“工学结合、项目引导、‘教学做’一体化”的原则而编写的。根据运动控制技术的发展状况,在深入调查和多年的教学经验的基础上,充分考虑到高等职业技术教育的特点,从选材到内容结构的安排上力求做到简明、实用。理论内容以应用为目的,强调针对性和实用性。

本书结合“运动控制系统安装、调试和维修”课程的改革和建设,由学校、企业、行业专家组成教材编写组合作开发。本书在内容上为“双证融通”的专业培养目标服务,在方法上适合“教学做”一体化的教学模式改革。

本书可作为高等职业技术教育、大中专及职工大学电气自动化专业和机电一体化专业等相关专业的教材,也可作为维修电工资格考试参考用书。

本书由烟台职业学院王名杰副教授主编,副主编为烟台职业学院白静老师,参编有席艳老师、孙丽君老师、刘晓磊老师、王述奇高级工程师和宁寿辰高级工程师,并备有教学PPT课件以供索取。

作者在编写过程中主要参考了由许晓峰主编的《电机及拖动》、栗书贤主编的《电力电子变流技术实验》、郑忠杰和吴作海主编《电力电子变流技术》和钱平主编的《交直流调速控制系统》,由于时间和精力关系,摘录了部分内容,在此谨向参考文献的作者及出版社表示诚挚的谢意!

由于编者的知识水平有限,加之编写时间仓促,选编的内容和原理的阐述难免处理不当和疏漏,甚至错误。敬请读者,特别是同行专家提出批评和修改意见。

编 者
2009年8月

目 录

第 1 章 可控整流装置的安装与调试	1
1.0 概述	1
1.1 晶闸管的结构及原理	5
1.1.1 晶闸管的外形结构和散热片	5
1.1.2 晶闸管的工作原理	7
1.1.3 晶闸管的阳极伏安特性.....	10
1.1.4 晶闸管的门极伏安特性及主要参数.....	16
1.1.5 晶闸管的测试与使用.....	18
1.1.6 晶闸管对触发电路的要求.....	19
1.2 单相可控整流电路的安装与调试.....	21
1.2.1 单相半波可控整流电路(电阻性负载).....	21
1.2.2 单相全控桥式整流电路.....	25
1.2.3 单相半控桥可控整流电路.....	26
1.2.4 单结晶体管触发电路的原理与调试.....	32
1.2.5 整流主电路的器件选择与晶闸管的保护.....	42
1.3 三相可控整流装置的安装与调试.....	61
1.3.1 三相半波可控整流电路.....	61
1.3.2 三相全控桥可控整流电路.....	66
1.3.3 同步电压为锯齿波的触发电路.....	71
1.3.4 集成触发器和计数式触发器.....	75
1.3.5 脉冲变压器与防止误触发的措施.....	79
本章小结	80
思考题与习题	81
第 2 章 晶闸管单闭环直流电动机调速系统的安装与调试	85
2.0 概述.....	86
2.1 直流电动机的运行原理.....	86
2.1.1 直流电机的结构及基本工作原理.....	86
2.1.2 直流电动机的基本方程.....	96
2.1.3 他励直流电动机的机械特性.....	98
2.1.4 他励直流电动机的起动	102
2.1.5 他励直流电动机的调速	104

2.1.6 他励直流电动机的制动	109
2.1.7 他励直流电动机的反转	116
2.2 转速负反馈单闭环直流调速系统的运行原理	117
2.2.1 他励直流电动机转速负反馈有静差单闭环系统组成及工作原理	117
2.2.2 转速负反馈单闭环无静差系统	128
2.3 带电流截止负反馈环节的转速负反馈单闭环调速系统	134
2.4 转速负反馈单闭环直流调速系统的安装调试	137
2.4.1 三相全控桥式整流电路单元的测试与接线	140
2.4.2 三相桥式整流电路的控制电路单元调试和步骤	143
2.4.3 转速负反馈单闭环系统的安装与调试	160
本章小结	165
思考题与习题	167
第3章 晶闸管双闭环直流调速系统的安装与调试	169
3.0 概述	169
3.1 转速电流双闭环直流调速系统组成和原理分析	173
3.1.1 双闭环系统组成和运行原理	173
3.1.2 双闭环系统的抗扰性能	177
3.2 转速电流负反馈双闭环系统的安装与调试	181
3.2.1 ACR 单元调试维修	181
3.2.2 双闭环调速系统的调试步骤	184
本章小结	186
思考题与习题	187
第4章 IGBT 脉宽直流调速系统的安装与调试	188
4.0 概述	188
4.1 绝缘栅双极晶体管(IGBT)工作原理与特性参数	189
4.2 IGBT 的驱动电路和保护电路	197
4.2.1 IGBT 的驱动电路	197
4.2.2 IGBT 的保护电路	203
4.3 直流电动机 PWM 调速控制器的组成及原理	207
4.4 单片机控制直流电动机双环调速硬件系统	217
本章小结	223
思考题与习题	223
参考文献	225

可控整流装置的 安装与调试

第 1 章

一、学习目标

1. 会正确选用和使用晶闸管。
2. 会使用万用表粗略判断晶闸管的好坏。
3. 对由双基极三极管组成的触发电路能够调试和快速准确地维修。
4. 能够正确安装和调试晶闸管组成单相半波整流电路。
5. 会使用示波器判别晶闸管的工作状态,正确区分其工作正常还是不正常。
6. 能够正确安装和调试晶闸管组成单相全波半控桥式整流电路。
7. 能够快速准确地维护和维修单相全波半控桥式整流电路。
8. 能够正确安装和调试同步电压为锯齿波的触发电路。
9. 能够快速准确地维护和维修同步电压为锯齿波的触发电路。
10. 能够正确安装和调试采用 KJ04 组成的集成触发电路。
11. 能够快速准确地维护和维修采用 KJ04 组成的集成触发电路。
12. 能够正确安装和调试晶闸管组成的三相全控桥式整流电路。
13. 能够快速准确地维护和维修三相全控桥式整流电路。

二、工作任务

1. 会使用万用表粗略判断晶闸管的好坏。
2. 能够根据原理图正确连接线路判断晶闸管的正确导通的条件。
3. 能够根据原理图正确连接单相晶闸管触发电路,并且会正确调试及检修。
4. 能够根据原理图正确连接单相半波整流电路,并且会正确调试及检修。
5. 能够根据原理图正确连接单相半控桥式整流电路,并且会正确调试及检修。
6. 能够根据原理图正确连接同步电压为锯齿波的触发电路,并且会正确调试及检修。
7. 能够根据原理图正确连接集成触发电路,并且会正确调试及检修。
8. 能够根据原理图正确连接整流变压器和同步变压器,并且会正确调试及检修。
9. 能够根据原理图正确连接三相桥式全控桥式整流电路,并且会正确调试及检修。

1.0 概 述

晶闸管是一种大功率半导体器件,它的最大特点是容量大、电压高、损耗小、控制灵便、易实现自动控制,是大功率电能变换与控制的较理想器件。电能的变换技术,包括电压、电

流和频率的变换,统称“变流技术”。电力电子器件,是由半导体材料制成的一系列固态高电压大电流开关器件,晶闸管仅是系列中最早研制成功、当今应用最广泛的一种。它的问世,使电子技术进入了强电领域,这不仅使强电变流,更带来了方便和可靠,而且节约了大量电能。自 20 世纪 60 年代以来,这一技术获得迅速发展,形成了电力电子学科,并成为当今电力电子变流技术发展的基础。可以认为,电力电子学就是应用在电力技术领域中的电子学,它是电气技术中三大主要领域——电力、电子和控制——相结合的边缘学科。

1. 电力电子变流技术发展概况

1958 年,美国通用电气公司首先研制成功第一个工业用的普通晶闸管,它标志着电力电子技术的诞生,并进入了以电力电子器件为主的变流技术时代。

普通晶闸管存在着无法控制关断的缺点,这给有些变流领域带来使用不方便、电路复杂、工作频率低等欠缺。随着半导体制造技术和变流技术的发展,相继研制成功了电力晶体管(GTR)、可关断晶闸管(GTO)、大功率场效应晶体管(MOSFET)以及绝缘门极晶体管(IGBT)等具有自关断、高电压、大电流、高频率特性的全控型电力电子器件,推进了变流技术进一步向前发展。当今交流变频高新技术正在蓬勃发展,电力牵引直流电动机的直流斩波调速也得到了迅猛发展。电力电子器件还将向着更大电流、更高电压、更高频率、更容易控制和更低管耗方向发展。

我国自 1962 年首次研制成功晶闸管以来,以晶闸管为主体的电力电子变流技术同样也得到了迅猛发展,目前已有许多专业厂家大规模生产各种类型的晶闸管,单管电流可达 2 000 A,电压可达 4 000 V 以上。派生的晶闸管器件(如双向晶闸管、快速晶闸管、可关断晶闸管、逆导晶闸管等系列产品)均有供应。还有如大功率晶体管(GTR)、大功率场效应晶体管(MOSFET)等也都在积极开发生产。电力电子变流技术已普及到我国国民经济的各个领域,不仅有许多定点生产厂、专业人才以及专门的科研机构,而且还有许多专业化的变流装置正在朝着标准化、系列化、可靠性高的方向发展。

晶闸管原称可控硅(SCR),是硅晶体(如图 1.0.1 所示)闸流管的简称。它是一种较理想的大功率变流新器件。它的出现使大功率变流技术进入一个新时代。普通晶闸管(Conventional Thyristor)具有与大功率整流二极管相同的特性——单向导电特性,但也存在着与大功率整流二极管不同的特性,即普通晶闸管具有可控的导通性和无法控制的关断性,这给有些变流领域带来应用不方便、控制电路复杂、工作频率较低等缺点。随着半导体制造技术和变流技术的发展,相继研制成功了大功率电力电子器件,如电力晶体管(GTR 或 BJT)、双向晶闸管(Bidirectional Thyristor)、快速晶闸管(Fast Switching Thyristor)、可关断晶闸管(Gate Turn Off Thyristor)、大功率场效应晶体管(MOSFET)、绝缘门极晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistor)、光控晶闸管(Light Activated Thyristor)和逆导晶闸管(Reverse Conducting Thyristor)、SITH 静电感应晶闸管、功率集成电路(PIC)、智能功率模块(Smart Power)、用户专用功率模块(ASPM)、集成门极换流晶闸管(IGCT)和功率集成器(Power IC)件等。

2. 多品种晶片

由 2007 年 3 月 6 日中国电子报报道,天津市环欧半导体材料技术有限公司在半导体材料领域,大直径区熔硅单晶($\Phi 3\sim 6$ 英寸)是目前国际区熔硅单晶市场的主流产品,尤其是 $\Phi 5\sim 6$ 英寸的区熔硅单晶,目前国内只有环欧公司掌握其生产技术,并能够进行批量生产。

在区熔硅单晶领域,环欧公司独占鳌头。 $\Phi 6$ 英寸区熔硅单晶的生产技术是目前国际先进水平,全球掌握此技术的同行业企业不超过三家。环欧公司的 $\Phi 6$ 英寸区熔硅单晶的生产技术具有自主知识产权,2006年获国家知识产权局授予的生产发明专利,并有偿向国外公司进行过技术转让。天津市环欧半导体材料技术有限公司6英寸单晶如图1.0.2所示。

用区熔硅单晶制作的各类半导体功率器件、功率集成器件、半导体集成电路、多种探测器和特殊器件的主要应用领域为:绿色照明设施(节能灯、电子镇流器);大、小及重型电力拖动装置(机车、战车及舰船)的高频调速;高频、中频炉的大功率振荡管的固态化;大型工业用鼓风机的驱动电机调速;巨型水力、火力发电站的远距离、超高压交直流输变电;国防尖端领域(PIN管)、红外光学器件;汽车电子领域;高效太阳能电池领域等。

自从1967年2英寸晶闸管代替汞弧阀之后,每一次晶闸管面积的扩大,都带来了输送容量提高、损耗降低、阀结构简化、可靠性提高的优越性。因此,随着直流输电容量的不断增大和电力电子技术的进步,直流输电用晶闸管从最初的2英寸发展到现在的6英寸。ABB半导体公司推出的6英寸晶闸管已进入中国市场,如图1.0.3所示。据《电网技术》2007年02期报道,基于5英寸换流阀晶闸管的设计和工艺技术平台,通过优化杂质扩散工艺、光刻版设计和台面造型保护工艺,保证了掺杂分布的均匀性、重复性和可控性,以及器件良好的阻断特性,确保器件获得较高的电流上升率、电压上升率,研制出了6英寸4000 A/8000 V高压晶闸管样品,并采用电子辐照技术得到进一步优化。另据《湖南日报》2007年11月8日报道,在株洲举行的“国家特高压换流阀6英寸晶闸管阶段成果验收”会上获悉,由株洲南车时代电气股份有限公司自主创新研制的特高压直流输电换流阀核心部件——6英寸晶闸管——通过专家验收。据悉,这是世界上目前诞生的最大直径、最高电流电压容量的晶闸管,标志着我国通过自主创新已经达到了国际大功率半导体器件技术的顶尖水平。

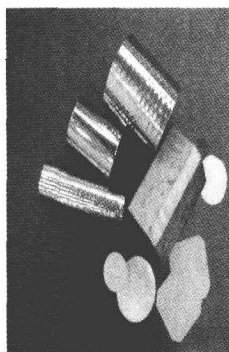


图 1.0.1 硅单晶

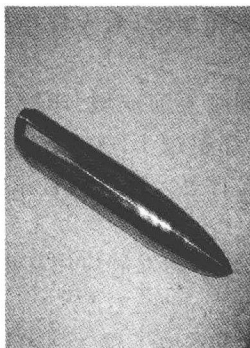


图 1.0.2 6英寸单晶

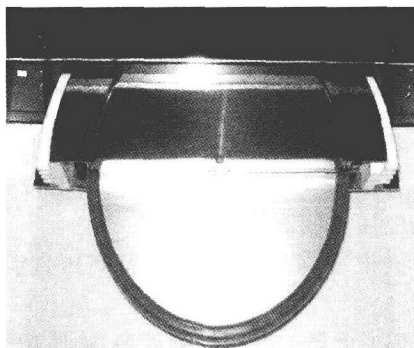


图 1.0.3 6英寸晶闸管

3. 电力电子变流技术应用的几个方面

(1) 整流器

整流电路可以分为不可控整流和可控整流。不可控整流电路的整流器件为整流二极管;可控整流电路的整流器件为晶闸管。所谓可控整流电路就是把不变的交流电压转换成幅值可连续变化的脉动直流电压。例如,直流电动机的调压调速、电镀、电解电源、手机电池的充电器等均采用可控整流电源供电。

(2) 有源逆变

把幅值不变的直流电转换成与交流电网同频率的交流电,并将直流电能回馈给交流电网。例如,目前世界上许多国家正在迅速发展的高压直流输电工程,即将三相高压交流电先转换成高压直流电,再进行远距离或海底输电,输送到目的地后再利用晶闸管有源逆变技术转换成与当地电网同频率的交流电。又如,绕线转子异步电动机的串级调速,不仅可实现无级调速,而且还可节约大量电能。

(3) 交流调压

把幅值和频率都保持不变的交流电压(主要指工频电源,如我国的工频电源幅值为 380 V/220 V,频率为 50 Hz)转换成电压有效值可调的交流电压。例如,用于灯光控制、温度控制以及交流电动机的调压调速就是利用交流调压技术。

(4) 逆变器

把电网的交流电转换成频率和幅值均可调的交流电供给负载或者是将直流电转换成电压幅值、频率大小均可调的交流电。例如,晶闸管中频电源、不停电电源、异步电动机变频调速等都采用逆变器来实现。

(5) 直流斩波

把固定的直流电压转换成可调的直流电压。例如,由直流架空线供电的城市电车斩波调速、电气机车、地铁牵引直流电动机斩波调速等。它与以往串电阻调速相比,不仅控制方便,而且节省电能。

(6) 无触点功率静态开关

用晶闸管取代接触器、继电器用于操作频繁的场所,如固态继电器。例如,用在电动机频繁地正反转、防爆防火的场所。

(7) 特高压直流输电

随着社会的发展和环境的变化,能源基地的集约化开发、大规模远距离输送已经成为当前电力生产和消费的最主要模式。电压等级和规模,对大规模的应用有极大的经济意义和工程价值。

从国际上看,在巴西亚马逊河盆地、非洲刚果河流域、印度东部等将陆续出现大规模的能源基地,这些能源基地距离负荷中心一般都超过 1 500 km,都在积极论证采用 ± 800 kV、输送容量为 6 000 MW 的直流输电方式。发展更大规模的直流输电技术在世界范围内有巨大的应用空间和市场。

据报道,截至 2007 年,特高压直流输电技术的发展应用和电网发展方式已创造 18 项世界第一:

- (1) 世界上电压等级最高、输送功率最大的输电工程(± 800 kV、额定输送功率 6 400 MW、最大连续输送功率 7 000 MW);
- (2) 世界上额定电流最大的直流输电工程(4 000 A);
- (3) 世界上首次使用电触发 6 英寸晶闸管;
- (4) 世界上可靠性指标最高的直流输电工程(双极停运率 0.05 次/年,单极停运率每极每年 2 次);
- (5) 世界上输送距离最远的直流输电工程(约 2 000 km);
- (6) 世界上首次采用三换流站共用接地极,投资最省;
- (7) 世界上容量最大的换流器(约 1 750 MW);

- (8) 世界上电压等级最高、单台容量最大的换流变(800 kV、321 MVA);
- (9) 世界上电压等级最高、通流容量最大的干式平波电抗器(800 kV、4 292 A);
- (10) 世界上通流能力最大的接地极;
- (11) 世界上单位走廊输送能力最大的输电工程(超过 84 MW/m);
- (12) 世界上单位输送容量公里输电损耗最低的直流输电工程;
- (13) 世界上单位输送容量公里运行维护费用最低的输电工程;
- (14) 世界上单位输送容量公里造价最低的直流输电工程;
- (15) 世界上单位换流容量占地最少的换流站;
- (16) 世界上单位换流容量造价最低的换流站;
- (17) 世界上单位换流容量损耗最低的换流站;
- (18) 世界上单位换流容量运行维护费用最低的换流站。

4. 可控整流装置的组成

可控整流装置的结构框图如图 1.0.4 所示,由图可以看出,该装置主要由整流变压器、晶闸管组成的整流电路、同步变压器和晶闸管的触发电路 4 部分组成,其中晶闸管是新型器件。

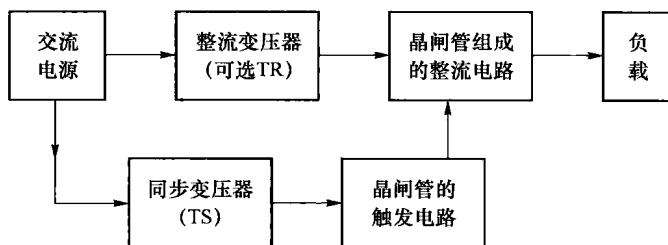


图 1.0.4 可控整流装置的结构框图

1.1 晶闸管的结构及原理

晶闸管原称可控硅,是硅晶体闸流管的简称。它的出现使大功率变流技术进入一个新时代。晶闸管包括普通晶闸管(Conventional Thyristor)、双向晶闸管(Bidirectional Thyristor)、快速晶闸管(Fast Switching Thyristor)、可关断晶闸管(Gate Turn Off Thyristor)、光控晶闸管(Light Activated Thyristor)和逆导晶闸管(Reverse Conducting Thyristor)。由于普通晶闸管应用最普遍,着重介绍普通晶闸管。本书如不特别说明,则所说的晶闸管就指普通晶闸管。

1.1.1 晶闸管的外形结构和散热片

目前晶闸管的外形结构有塑封、螺旋式和平板式 3 种,如图 1.1.1 所示为塑封晶闸管,结构如同塑封三极管,一般为低电压小电流的晶闸管,共有 3 个极:

- A——晶闸管的阳极;
- K——晶闸管的阴极;
- G——晶闸管的门极。

由于晶闸管本身带有散热片,一般情况下不需要增加散热片,但如工作在满负荷时,应

根据额定电流的大小添加相应面积的平板散热片,以满足晶闸管正常工作的需要。

如图 1.1.2 所示为螺旋式中小功率晶闸管和与它相配套的散热器,它的额定电流要大于塑封晶闸管。如图 1.1.3 所示为螺旋式中功率晶闸管和与它相配套的散热器,它的额定电流要大于中小功率晶闸管。它们如同塑封晶闸管一样也有 3 个极。在一般情况下需要增加散热片,散热片的面积和结构根据额定电流的大小来进行选择,通常采用自然风冷却的散热片。

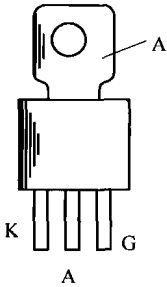


图 1.1.1 塑封晶闸管

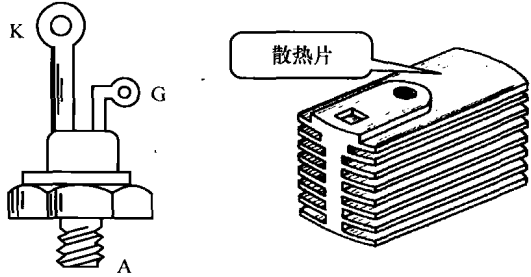


图 1.1.2 螺旋式中小功率晶闸管

如图 1.1.4 所示为平板式晶闸管和散热器,为大功率晶闸管,能够承受高电压和大电流,在正常工作时,将有较大的功率损耗,使晶闸管本身发热,因此,大功率的晶闸管本身散热是非常重要的。常用的散热器如图 1.1.4 所示,(b)为平板式晶闸管风冷式散热器,(c)为平板式晶闸管水冷式散热器。平板式晶闸管如同塑封晶闸管一样也有 3 个极。在一般情况下需要增加散热片,散热片的面积和冷却方式根据额定电流的大小来进行选择,以满足晶闸管正常工作的需要。在绘制原理图时,不是画其实际图形而是采用国际通用符号如图 1.1.5 所示,

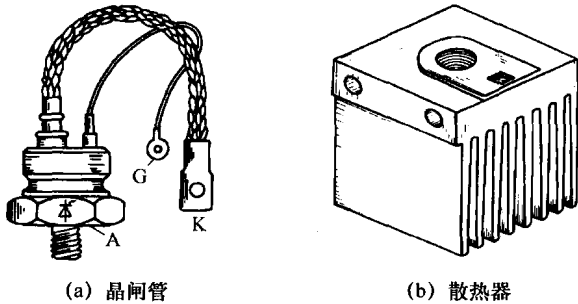


图 1.1.3 螺旋式中功率晶闸管

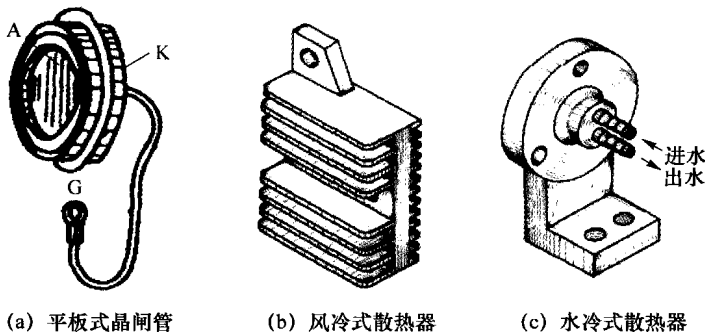


图 1.1.4 平板式晶闸管和散热器

目前大功率的晶闸管,外形结构有螺旋式和平板式两种。平板式晶闸管根据冷却方式的不同又分为风冷式和水冷式。螺旋式晶闸管的阳极是紧拴在铝制散热器上的,而平板式是由两个彼此绝缘的相同形状散热器把管子的阳极与阴极紧紧夹住。螺旋式的安装、更换管子方便,但仅靠阳极散热器散热效果较差。平板式由于阳极、阴极均装有散热器,散热效果好,但安装、更换管子较困难,两者比较见表 1.1.1。

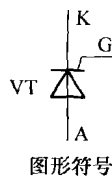


图 1.1.5 晶闸管的图形符号

表 1.1.1 螺旋式晶闸管和平板式晶闸管的比较

形式 比较	螺旋式	平板式	
		风冷	水冷
阳极	带散热器		
阴极	不带散热器	阳极、阴极都装有相同的风冷散热器	阳极、阴极都装有相同的水冷散热器
门极	细小硬导线或软线引出	用细小导线引出,并且比较靠近阳极	
优、缺点	易安装,更换散热差	散热较好,安装较麻烦,需安装冷却装置	
使用场合	一般用于 100 A 以下	一般用于超过 200 A 时	

晶闸管的内部结构、原理结构如图 1.1.6 所示。它的管芯由四层($P_1N_1P_2N_2$) 三端(A、K、G)半导体器件构成,具有 3 个 PN 结,即 J_1 、 J_2 和 J_3 。因此管芯可以用 3 个二极管串联来等效,如图 1.1.6(b)所示。也可以将图 1.1.6(a)中间层的 N_1 和 P_2 分为两部分,构成一个 $P_1N_1P_2$ 型三极管和另一个 $N_1P_2N_2$ 型三极管的互补作用来等效,如图 1.1.6(c)所示。由以上可以看到晶闸管的外形结构,那它是怎样工作的?

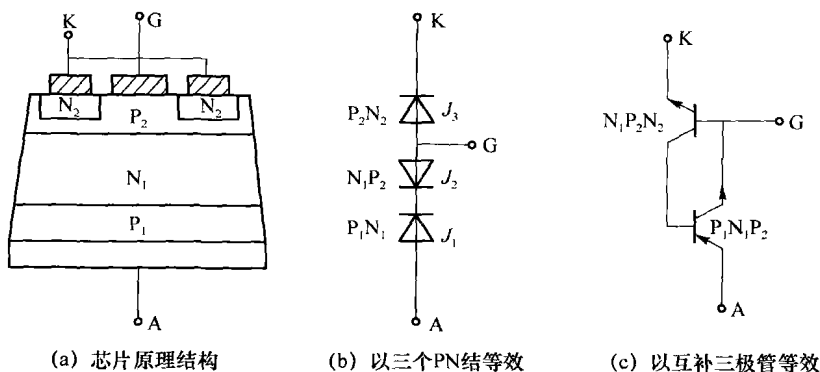


图 1.1.6 晶闸管内部芯片及等效电路

1.1.2 晶闸管的工作原理

为了弄清晶闸管导通和关断条件,下面通过几个实验观察一下晶闸管是怎样工作的。

实验一:晶闸管的阳极 A 经负载(白炽灯)、变阻器 R 、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_1 接至电源 E_a 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 。晶闸管阳极、阴极两端之间的电压,称阳极电压,用 U_a 表示。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 ,门极与阴极之间的

电压称门极电压 U_g 。如图 1.1.7 所示。门极加上反向电压时,灯不亮,说明晶闸管处在阻断状态(Block-instated)不导通。

实验二:晶闸管的阳极 A 经负载(白炽灯)、变阻器 R 接通至电源 E_a 的负极,元件的阴极 K 经毫安表接至电源 E_a 的正极,在门极加正向电压时,灯不亮,如图 1.1.8 所示,说明晶闸管的阳极承受反向电压,晶闸管也处在阻断状态(Block-instated)不导通。

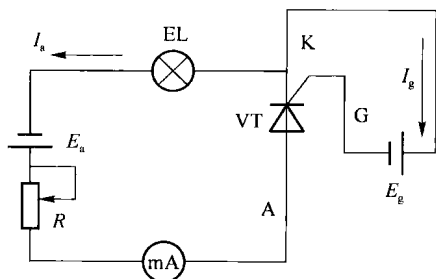


图 1.1.7 晶闸管门极加反向电压处在阻断状态

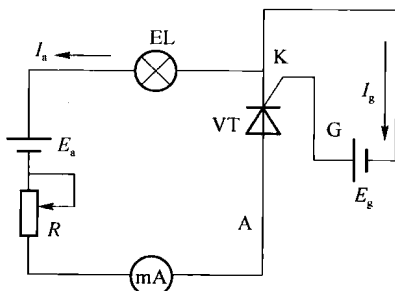


图 1.1.8 晶闸管的阳极加反向电压阻断状态

实验三:晶闸管的阳极 A 经负载(白炽灯)、变阻器 R 接通至电源 E_a 的正极,元件的阴极 K 经毫安表接至电源 E_a 的负极。若门极承受正向电压,当流入一定的电流 I_g (称触发电流)时,灯点亮,如图 1.1.9 所示,这表明晶闸管已导通。一旦晶闸管导通后,即使再断开门极,灯仍然亮着。由此可见,晶闸管一旦被触发导通后,门极就失去控制作用。如果改变电源 E_a 的极性,或者门极加反向电压,灯不亮,此时说明晶闸管处在截止状态。

以上实验说明,晶闸管像整流二极管一样,具有单向导电特性,电流只能从阳极流向阴极,当元件阳极加上反向电压时,只有微小的反向漏电流从阴极流向阳极,晶闸管处于反向阻断状态。另外,晶闸管又不同于整流二极管,它具有正向导通的可控特性。当元件阳极加上正向电压时,元件还不能导通,仍处于正向阻断状态,这是整流二极管不具有的。要使晶闸管导通除了阳极加正向电压外,还必须加上适当的正向门极电压 U_g ,让门极流入足够的触发电流 I_g 。由于晶闸管导通后压降很小,一般在 1 V 以下,通常可以忽略,所以晶闸管是实现变流技术较理想的可控开关器件。

晶闸管导通后又如何被关断呢?仍按图 1.1.9 电路做如下实验。

在灯亮的情况下,逐渐调节变阻器 R ,使流过负载(灯泡)的电流逐渐减少,注意观察毫安表的指针,当阳极电流降到某数值时,毫安表的指针突然回到零,说明晶闸管已关断。毫安表所观察到的最小阳极电流称为晶闸管的维持电流 I_H 。

上述实验表明,导通后的晶闸管,只要流过的阳极电流减小到小于维持电流,元件就立即被关断,恢复了阻断状态。

如何理解晶闸管的导通和关断条件,可用它的一对互补三极管等效电路(如图 1.1.10 所示)来解释。

从图 1.1.10 看到,晶闸管阳极必须承受正向电压是管子导通的先决条件,因为只要阳极电压是正向的,互补三极管才能得到正确接法的工作电源,否则是无法工作的。在满足先决条件下,再闭合门极刀开关 Q_2 ,于是触发电流 I_g 就流入门极,它相当于给 $N_1P_2N_2$ 型三极管的基极输入电流,经过互补强烈的正反馈即

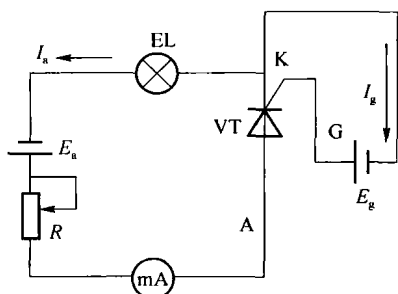


图 1.1.9 晶闸管的阳极和门极加正向电压

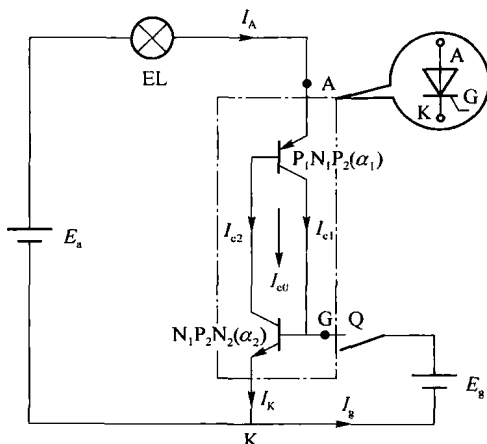


图 1.1.10 用一对互补三极管等效晶闸管

$$I_A = I_{c1} + I_{c2} + I_{c0} = \alpha_1 I_A + \alpha_2 I_K + I_{c0} = \alpha_1 I_A + \alpha_2 (I_A + I_g) + I_{c0}$$

经整理得

$$I_A = \frac{I_{c0} + \alpha_2 I_g}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (1-1-1)$$

此电流瞬时使互补三极管迅速达到饱和,从而导通,即晶闸管由阻断状态转变成导通状态。设 $P_1N_1P_2$ 管和 $N_1P_2N_2$ 管的集电极电流分别为 I_{c1} 和 I_{c2} ;发射极电流相应为 I_A 和 I_K ;电流放大系数相应为 $\alpha_1 = I_{c1}/I_A$ 和 $\alpha_2 = I_{c2}/I_K$; I_{c0} 为 J_2 结的反向漏电流。若把两管分别看成广义节点,运用基尔霍夫电流定律,写出电流关系式为

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

↑
强烈正反馈

由晶体管知识可知,晶体管的电流放大系数 α 随着管子发射极电流 I_e 的增大而增大,如图 1.1.11 所示。从式(1-1-1)和图 1.1.11 中曲线可得下列结论。

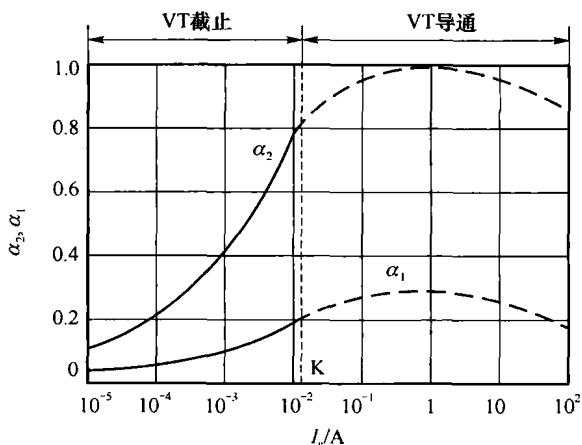


图 1.1.11 两管电流放大系数与发射极电流关系

(1) 正常情况下,晶闸管阳极电压 U_a 不得超过额定电压,正向漏电流 I_{c0} 很小,所以