

高等学校试用教材

半导体变流技术

西安交通大学黄俊 主编

机械工业出版社

73-7322
579

高等学校试用教材

半导体变流技术

西安交通大学黄俊 主编



机械工业出版社

1109649

0107/08

半 导 体 变 流 技 术
西安交通大学黄俊 主编

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

重庆印制一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本787×1092 1/16·印张21·字数515千字

1980年7月重庆第一版·1981年5月重庆第二次印刷

印数17,001—32,000·定价2.15元

*

统一书号: 15033·4865

前 言

《半导体变流技术》是根据1978年4月第一机械工业部召开的高等学校对口专业座谈会制订的教学计划及同年5月召开的工业电气自动化专业教材编写会议所制订的编写大纲编写的。

本书主要包括：晶闸管元件，单相可控整流电路，三相可控整流电路，逆变电路，变频电路，斩波器和交流调压器，主电路元件的选择与保护，晶闸管的触发电路。书末还有附录，包括晶闸管的一些派生元件，整流变压器结构计算，电抗器的结构计算和脉冲变压器结构计算等。

本书可作为高等工业院校电力类专业和自动控制类专业的试用教材，也可供其他有关专业师生及工程技术人员参考。

本书由西安交通大学工业自动化教研室的同志编写，黄俊同志任主编。本书的第一章，第七章和附录（脉冲变压器结构计算除外）由朱仁初同志编写，第四章由葛文运同志编写，第五章由王溥仁同志编写，第六章、第八章以及附录中的脉冲变压器结构计算由伍恩华同志编写，其余由黄俊同志编写。

在编写过程中，西安整流器研究所、西安电力整流器厂提供不少资料，西安电力整流器厂金子康工程师提出了很多宝贵的修改意见，谨致以衷心的感谢。本书由成都科学技术大学自动控制教研室的同志初审，由贺星钊同志任主审，参加初审的还有王绳镰、龚才豪等同志。书稿经1979年5月在成都召开的审稿会议上讨论通过。在审稿时清华大学、天津大学、合肥工业大学、南京工学院、陕西机械学院，安徽农机学院、镇江农机学院、上海市业余工业大学以及西安整流器研究所和西安电力整流器厂的一些代表提出不少宝贵的意见，谨致以衷心的感谢。

由于我们的学识有限以及编写时间仓促，错误在所难免，希望使用本教材的师生和其他读者提出批评改进意见。

1979年6月

目 录

概 述	1
第一章 晶闸管	9
§ 1-1 晶闸管及其工作原理	9
§ 1-2 晶闸管的特性	12
§ 1-3 晶闸管的主要参数	14
第二章 单相可控整流电路	22
§ 2-1 单相半波可控整流电路	23
§ 2-2 单相桥式全控整流电路	32
§ 2-3 单相桥式半控整流电路	39
第三章 三相可控整流电路	50
§ 3-1 三相半波可控整流电路	50
§ 3-2 三相桥式全控整流电路	56
§ 3-3 整流电压的谐波分析	65
§ 3-4 三相桥式半控整流电路	76
§ 3-5 变压器漏抗对整流电路的影响	81
§ 3-6 可控整流电路带反电势负载时的工作情况	84
§ 3-7 大功率供电可控整流主电路接线型式及其特点	90
§ 3-8 整流装置的功能指标	100
第四章 逆变电路	117
§ 4-1 逆变的概念	117
§ 4-2 三相半波逆变电路	120
§ 4-3 三相桥式逆变电路	124
§ 4-4 逆变失败与控制角的限制	130
§ 4-5 逆变工作状态的电动机机械特性	133
§ 4-6 有源逆变的应用举例	136
第五章 变频电路	143
§ 5-1 变频电路的概念	143
§ 5-2 并联谐振式逆变器	145
§ 5-3 串联谐振式逆变器	154
§ 5-4 脉冲换流式逆变器的特点	163
§ 5-5 电压型脉冲换流逆变器	164
§ 5-6 电流型脉冲换流逆变器	178
§ 5-7 直-交逆变器的电压控制	181
§ 5-8 交流-交流变频电路	186
第六章 斩波器和交流调压器	195
§ 6-1 斩波器	195
§ 6-2 交流调压器	209

第七章 主电路元件的选择和保护	221
§ 7-1 整流变压器额定参数计算	221
§ 7-2 整流元件的选择	231
§ 7-3 晶闸管的串联和并联	233
§ 7-4 晶闸管的保护	238
§ 7-5 电抗器参数的计算	255
第八章 晶闸管的触发电路	266
§ 8-1 对触发电路的要求	266
§ 8-2 阻容移相桥触发电路	267
✓ § 8-3 单结管移相触发电路	268
§ 8-4 同步信号为正弦波的触发电路	280
§ 8-5 同步信号为锯齿波的触发电路	285
§ 8-6 触发脉冲与主回路电压的同步问题	294
§ 8-7 变频装置的触发电路	296
§ 8-8 防止误触发的措施	300
附 录	302
一 其他晶闸管	302
二 整流变压器的结构计算	306
三 电抗器的结构计算	314
四 脉冲变压器的结构计算	319
符号说明	327
参考文献	328

概 述

一、晶闸管发展概况

晶闸管（可控硅）是一种大功率的半导体器件。1956年在国外某实验室制成了晶闸管的雏型，并于1958年在此基础上正式研制成功世界上第一个晶闸管。由于它效率高、控制特性好、反应快、寿命长、体积小、重量轻、可靠性高、容易维护等优点，使它获得了强大的生命力，引起世界各国的重视，得到飞速的发展。其电流定额愈来愈大，其电压定额愈来愈高。近来为提高其结温和电压上升率，为改进电流上升率，提出发射极和门极的结构，进行结构和工艺多方面的研究工作，国外已制成4000安3000伏的硅整流管和2500安4000伏的晶闸管。在寻找新材料方面，国外已研制成碳化硅材料制成的元件，它可在高达500℃的温度下工作。尽管目前试制成的还是小功率元件，却显示其重要意义，将来有待向大功率发展。一旦成功，变流装置不需要冷却设备，可显著地减小体积、重量、降低成本及提高单柜输出容量。

目前晶闸管变流技术是半导体变流技术的主要内容，它属于电力电子学学科，而该科是横跨“电力”、“电子”和“控制”三个领域的，是用电力半导体器件（目前以晶闸管为主）进行电力变换和控制的技术领域。

当前晶闸管变流技术所用的各种装置和设备（简称器）按其功能可分成下列几种类型：

整流器，把交流电压变为固定的或可调的直流电压。

逆变器，把固定直流电压变成固定或可调的交流电压。

斩波器，把固定直流电压变成可调的直流电压。

交流调压器，把固定交流电压变成可调的交流电压。

周波变换器，把固定交流频率变成可调的交流频率或可调的交流电压等。

目前国外晶闸管变流技术采用的各种装置不断向固体化、小型化、高速化、功能化和高可靠性的方向发展。

我国于1960年试制成功硅整流管，1962年试制成功晶闸管以来，晶闸管和硅整流技术有了很大的发展，形成了一支比较庞大的器件生产队伍，产量大幅度上升，元件质量也有较大的提高。派生晶闸管元件，如快速、双向、可关断和逆导元件，无论从品种或数量来说，亦都有了较快的发展。半导体器件制造工艺是现代科学技术的综合成就，其技术改造在我国大有发展。几年来，我国对晶闸管装置，硅整流装置（两种装置统称整机）的生产有了迅速发展，品种、质量都有很大提高。

二、晶闸管的优缺点及其应用概况

晶闸管是静止型的，既是一般所谓的电子元件，又是大功率器件，具有一系列如快速、小体积等的突出优点。这种电力半导体器件组成的装置与旋转式的机组相比，无噪音，无磨损。与水银整流器相比，无毒，使用维护方便。由于晶闸管的导通可以控制，通过改变控制角能够控制负载上的电压和电流，它具备了弱电控制、强电输出的特点以及发展到今天的集成电路放大器-晶闸管控制系统，能在很大程度上满足现代生产工艺对控制系统提出的要求。

以下几种主要指标, 比较几种不同类型的变流器, 以显示晶闸管的优越性。

1. 功率放大倍数 晶闸管的放大倍数在 10^4 以上, 比机组 (10^1) 高三个数量级, 比水银整流器 (10^2) 高一个数量级。

2. 快速响应性 机组是秒级, 晶闸管和水银整流器为毫秒级, 比机组快三个数量级。

3. 功耗小、效率高 晶闸管整流器的正向压降小 (约 1 伏), 损耗小, 效率高, 其空载损耗约 0.6%, 满载损耗小于 1%。

今以 8400 千瓦轧钢机的电力拖动作为比较实例。电动机为三台 2800 千瓦, 700 伏, 450 转/分的直流电动机, 其电源为 13800 伏的交流电网, 其功耗及效率如图 0-1 所示

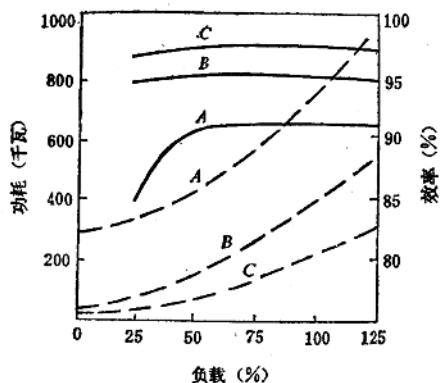


图0-1 各种变流装置的功耗和效率

——功耗 ——效率 A—机组 B—水银整流器
C—晶闸管

4. 晶闸管是静止式电子型器件, 体积小, 重量轻, 可靠性高, 和旋转型机组相比, 由于取消了电刷、整流子, 维护方便并实现了无噪音。与静止型水银整流器相比, 不会产生逆弧事故。

5. 提高了技术经济指标 例如在 1970 年, 西德 AEG 公司为法国提供 6000 千瓦卷扬机电力拖动, 对两种电力拖动作了技术经济分析。指出晶闸管装置所需费用比机组低得多, 二者费用之比为 1:1.7, 实测数据如表 0-1 所示。

而两个系统所有机电设备费用之比为 1:1.25, 见表 0-2。

晶闸管装置的主要缺点是过载能力小, 工作在深调速时产生较大的无功功率, 致使装置

表0-1 两种拖动运行费用比较

项 目 拖动方案	平 均 效 率	提 升 一 次 用 电 量	空 载 损 耗
晶 闸 管 供 电	86.5%	106度/次	55.4千瓦
同 步 机 拖 动	79.7%	115度/次	240千瓦

表0-2 两种拖动, 其机电设备费用比较

项 目 拖动方案	晶 闸 管 整 流 器 100%	变 流 机 组 125%
变流器 (包括备品)	26	44
卷扬电动机	23	23
调节和控制装置	5	5
电 缆	3	3
矿井信号装置	4	4
机械部分	15	15
机房 (包括起重机)	24	31

的功率因数降低,并产生高次谐波,引起电网波形畸变。对此,各国都采取措施来克服,并取得良好效果。而晶闸管的前述优点,使其在六十年代中期以来迅速地取代了机组和水银整流器。在七十年代国外的直流电力拖动中,有90%以上采用晶闸管供电。有些国家生产的卷扬机直流电力拖动,轧机的直流拖动,在七十年代已全部采用晶闸管供电。

我国整机的生产系列品种不断增加,应用范围愈来愈广,用量愈来愈大。近几年来,由于各部门,各地区的重视以及硅整流管和晶闸管容量和质量提高,目前晶闸管装置已经在我国国民经济各部门起到积极的作用:如冶金、机械、煤炭、石油、铁道、化工、轻工、水电、国防等方面广泛应用;在农业、医疗卫生事业方面,也开展了应用,一些比较成熟和已普遍推广的有:充电、电镀、电解化工、同步机励磁、电源合闸等电源,其它领域的应用范围也不断扩大和发展。兹举下面几个方面加以说明。

(一) 晶闸管直流拖动在轧机上的应用

晶闸管在轧机上的应用日趋广泛,500千瓦以上大容量的晶闸管供电设备,冶金系统已有多台。从目前国内大功率晶闸管供电装置在轧机上运行情况来看,无论是板材轧机还是线材轧机,其电力拖动必须具有相当高的动态和静态指标,如转速稳定,动态速降小,恢复时间短,起动惯量小等,为此,需进一步提高晶闸管装置的质量和可靠性,注意晶闸管供电装置的标准化、系列化和通用化。至于轧机中采用晶闸管励磁已比较成熟,已在推广应用。

(二) 晶闸管脉冲调速在矿山牵引和交通运输方面的应用。

硅元件和晶闸管在矿山牵引和交通运输方面的应用可分为两个方面:一方面是作牵引和运输车辆的直流电源,例如矿山机车、地铁车辆、城市电车和电瓶车等的直流电源,即牵引整流站;另一方面是直流电送到车上后,利用晶闸管调速,一般称为直流脉冲调速,或称斩波调速。前一方面主要是用硅整流装置代替水银整流器。这方面的应用已非常普及。

直流脉冲调速是利用晶闸管作为直流开关,控制晶闸管的通断比和通断频率,实现直流电压调节以改变电动机转速,与用电阻调速比较,具有节电、起动制动平稳、提高粘着牵引力、实现无火花断流、维护简单和操作灵活等优点。下面分别介绍晶闸管在直流脉冲调速中的应用情况。

1. 矿山架线式电机车晶闸管脉冲调速

中小功率架线式矿山电机车,用晶闸管进行脉冲调速,已在许多矿上使用,目前主要问题是高参数的逆导型晶闸管较少,迫切需要2500伏以上的逆导元件。

2. 地下铁道电机车晶闸管脉冲调速

地铁电机车,电动机 4×76 千瓦750伏,采用逆导型晶闸管进行脉冲调速,无论是牵引和再生制动,均能达到性能稳定。

地铁电机车采用晶闸管脉冲调速与用电阻调速相比,有以下二方面显著优点:

(1) 地铁站距短,起制动频繁,起制动快。用电阻调速时,在加减速过程中消耗的电能占的比例很大。用晶闸管斩波调速,可节电30%左右,加入再生制动后,节电更多。

(2) 地铁在隧道中运行,电阻调速消耗在电阻上的电能变为热能散发在隧道中,经长期热积累,将使地铁环境温度增高,有碍于乘客的舒适和健康,用晶闸管脉冲调速可避免这一问题。

3. 蓄电池叉车晶闸管脉冲调速

蓄电池叉车(铲车)及一般短距离用的电瓶车采用晶闸管脉冲调速,是低压晶闸管(一

一般为300伏以下)应用的一个较大领域。叉车和电瓶车广泛用于矿井、车站、码头、仓库及工厂内部作为搬运工具。用电阻调速费电,维修工作量大。用晶闸管调速节电优点突出,因为蓄电池容量有限,节电就能增加运行时间,有利于生产和提高劳动生产率。

4. 城市电车晶闸管脉冲调速

城市电车运输负荷率高,调速装置要求可靠,晶闸管脉冲调速是很有发展前途的一种调速方法。

(三) 中小功率晶闸管直流拖动电源

容量在1000千瓦以下的中小型功率晶闸管直流拖动电源。由于技术上比较成熟,近年在冶金、矿山、机床、造纸、纺织、印染、制糖等部门得到广泛应用。1977年全国中小功率晶闸管拖动装置的统一设计其规格如表0-3所示。

表0-3 我国中小功率晶闸管拖动系列设计规格

功率范围 (千瓦)	线路型号	输出电流 (安)	输出电压 (伏)	进线电源 (伏)	冷却方式
0.4~4	单相全控桥 (不可逆)	5	110、160	单相 220	自 冷
		10			
0.4~4	单相全控桥 (有环流可逆)	25	160	单相 220	自 冷
		50、80			
5.5~200	三相全控桥 (不可逆)	100、125	220、440	3 相 380	50、80
		160、200	220、440		100
5.5~200	三相全控桥 (无环流可逆)	300、400	220、440		自冷
		500	220、440		其余风冷
5.5~200	三相全控桥 (有环流可逆)				

其基本性能如下:

1. 装置适用于连续工作制的负载。
2. 在长期额定负载下,允许的最大过载为 150%额定负载,持续时间 2 分钟,其重复周期不小于 1 小时。
3. 当交流进线电压为380伏 (+ 5%, -10%),可保证装置输出额定电压、额定电流。电网电压下降超过10%的范围时,装置的额定输出电压将与电源电压成比例下降。
4. 当采用转速反馈时,调速范围 20:1,电动机负载在 10~100%额定电流变化时,转速的静差度在最高转速时为0.5% (最高转速包括电动机弱磁后的转速)。
5. 当采用电势反馈时(电压负反馈、电流正反馈),调速范围为10:1,负载电流在10~100%额定电流变化时,转速的静差度在最高转速时为 5% (最高转速包括电动机弱磁后的转速)。
6. 装置要求的稳压电源精度,在电源电压波动 10%,温度变化±10℃时,其精度为 1%。

上述设计仅适用于一般拖动,对于工作条件恶劣,过载倍数大(2.5 倍额定电流)的轧机拖动用系列则需按具体工作情况另行设计。

调压调速用的可控直流电源,有多种接线方式,适用于各种不同容量的电动机,各种不

同的调速范围和控制要求,如表 0-4 所示,供选用参考,表中调速范围系指一般情况下,如采用其他特殊措施,可以更高。

表0-4 调压调速的各种接线及其指标

接线方式 指 标	单相半控桥	单相全控桥	三相半波	三相半控桥	三相全控桥
适用功率范围	1千瓦以下	4千瓦以下	20~30千瓦以下	100千瓦以下	100~1000千瓦以下
适用调速范围	10:1 以下	10:1 以下	10:1 以下	10:1 以下	50:1 以下
滞后时间	10 毫 秒	10 毫 秒	6.6毫秒	6.6毫秒	3.3毫秒
输出波形	差	差	比单相好	较 好	好

(四) 晶闸管交流调速

交流电动机具有结构简单,价格低廉,运行可靠,维修容易等优点,但是由于交流电动机的固有调速性能差,因此在应用中受到一定的限制。晶闸管在交流调速方面的应用,对交流电机的调速是一个有力的推动。目前国内出现的一些交流调速方法有:

1. 绕线式异步电动机串级调速

电阻法调速是在绕线式异步电动机的转子回路中串入不同的电阻来改变电动机转速。转差功率以热的形式消耗在转子回路的电阻上,所以效率低,而且低速时机械特性很软。而串级调速是在转子回路中加入反电势来改变电动机的转速的。具体做法是把转子电压整流后,经晶闸管逆变为交流电,把转差能量送回电网,该逆变器可视为加在转子回路中的反电势,通过改变逆变角来改变反电势进行调速。我国一些钢厂的不可逆轧机上,功率大至 1900 千瓦,采用串级调速后能节电、增产,而且减轻了工人劳动强度。国内已有一些专业生产厂,生产交流串级调速装置,供拖动水泵、油泵、泥浆泵、风机、球磨机、交流轧机等负载使用。

2. 晶闸管变频调速

晶闸管交流变频调速装置可以实现直流电动机不能胜任的大容量、高速拖动。在多电机拖动中,它的精度高,易于协调速度,但是采用的线路比较复杂,成本高,因而近 10 年来在我国发展缓慢。

采用变频变压电源对同步电动机或异步电动机供电是理想的能在四象限运行的高效率的交流调速方案。最早的变频调速是用变频机组作为电源的,例如轧机辊道、磨床等,它们至今还在使用。由于机组变频设备庞大,效率较低,性能较差,现逐步为晶闸管静止变频器所取代。

晶闸管变频装置的主要功能是采用晶闸管将一种频率(通常为 50 赫的工频)的电能不能或者是直流电能转变成所需频率和电压的电,并为负载电动机提供必要的能量通道(实现电动、再生),以实现所需性能的调速。

从发展过程来看,静止变频调速,首先是解决逆变器的问,它在很大程度上决定变频调速的性能、可靠程度以及能否实用的问题。随着逆变器的应用和推广,提出了该逆变器调速方案的功能指标问题,稳定性问题,使逆变器得到进一步的发展,同时也对电动机提出

了相应的要求,进一步是解决调速的静态、动态的性能指标问题。以上三个问题是互相关联着,都在发展着,为了获得高性能的变频调速,三者是个统一的整体。

目前,高性能的包括主要是变频的交流调速拖动都是用静止的电子开关来取代直流电动机的机械换向器。所以它的发展与电子器件的发展是密切相关的,在晶闸管及相应的电子控制器件(集成电路)出现以前,高性能的交流调速拖动几乎无法实用。但是,自从晶闸管出现,短短的十几年时间内,交流调速拖动的发展出现了一个飞跃,特别是集成电路的应用,保证了复杂系统的可靠性。在国外,60年代后期,基本上解决了工业应用的关键技术问题。70年代则走上了扩大应用、系列化、进一步提高性能指标以及向高压、大容量发展的新阶段。电子器件的高速发展,为交流拖动的发展铺平了道路。

我国一些研究所、设计院已研制出中小功率的变频装置。结合我国的具体情况,无论从技术领域出发,还是从现实可能条件出发,大力发展交流调速的电力拖动是有根据的,在这方面一定会结丰硕之果。

3. 晶闸管超同步串级调速

晶闸管超同步串级调速是将晶闸管变频器(交流变交流)与绕线式异步电动机结合起来对交流电机进行调速的一种方法。它是在电机转子回路中接入一个三相可变频率的电源,其控制系统可使变频器的频率、相位和相序与电机转子转差电压一致,幅值可调。调节其幅值可使转子电流与转差电压同相或反相,这样电机就可能在同步速以上和以下按电动或制动方式运行。在反转时也可实现电动或制动。它与一般串级调速相比,因电机可以在同步速以上和以下调节,扩大了调速范围,而且可以再生制动,调节的快速性好,对于同调速范围和同负载容量的电机作比较,本系统的装置容量小,效率高,功率因数高,对电网的谐波影响也小。

这种调速方法主要用在挤压机、泵、压缩机、鼓风机、卷扬机、轧机、水泥窑和加速器等需要调速的拖动上。

(五) 晶闸管中频装置

晶闸管中频装置是一种将三相工频电能转变为单相中频电能的装置,实际上是一个交流一直流一交流的变流器。其基本工作原理是通过三相桥式整流电路,把50赫的工频交流电整流成直流,经过滤波,再把直流电逆变为单相中频交流电,通过感应圈施加到负载上。金属负载在交流的电磁场中,产生感应电流,由于其本身具有电阻,引起工件发热,在加热过程中,由于集肤效应,磁场变化的频率愈高,功率就愈加集中于工件表面。这种感应加热的方法,目前国内已应用于熔炼、透热、热处理、弯管、钎焊等方面。晶闸管中频装置现正朝着部分取代中频发电机组和弥补中频机组性能不足的方向发展。晶闸管中频装置比中频机组省电,制造方便,不需工夹模具,能节约大量钢和铜,能随负载的变化而自动调频和适于加热过程自动化。

晶闸管中频装置目前主要应用在熔炼,其次为工件透热和弯管,热处理和焊接等方面应用亦在推广中。

在熔炼方面目前应用最多的装置,其规格是1000赫、100千瓦。我国晶闸管中频装置正朝着提高频率和增大容量方向发展。

(六) 电解化工用直流电源

电解化工方面用硅整流管、晶闸管装置代替水银整流器供电已取得显著效果。避免了水

银中毒,且达到节电、提高生产率,改善电解质量,减轻劳动强度。这是大功率整流装置的主要应用场合。

(七) 交流电子开关

按其功能可分为晶闸管交流调压(移相触发)、调功(过零触发)和使异步电动机正反向运转三个方面。晶闸管交流调压器和调功器可以代替感应调压器,应用于机场、摄影棚和舞台灯光调光用,亦可在各种电阻性负载的加热和自动控温装置中应用,特别在各种电子器件制造中作加热体的精密温度控制。

调功器控制交流电源通断周波数,就是电子开关,控制交流电路的通断。如用三个双向晶闸管对异步电动机进行单向调速控制,它就是交流调压器。用五个双向晶闸管(也可用一般晶闸管反并联)代替有触点的可逆交流接触器,就是电子开关,实际上是属于同一类型,仅功率不同而已。电子开关用于交流电动机正反向工作较频繁的场合。如用200安双向元件,可控制22千瓦以下的异步电动机,用500安元件,可控制60千瓦以下的异步电动机,一般冶金企业可以大量采用,它是晶闸管量大面广的应用项目。

钢厂的交流接触器动作极其频繁,有些生产机械上,要求每小时动作1500~3000次,有触点开关一星期就要损坏,用电子开关则寿命大大延长,维修工作量可以大大减少,为增加钢铁生产创造了有利条件。

(八) 不停电电源

不停电电源主要用作要求严格连续供电的保险电源。在正常情况下将电网电能浮充在蓄电池内,当电网发生故障时,立即将蓄电池电能逆变成交流电供一些不能断电的要害部门使用,并能维持几十分钟供操作人员采取措施。目前主要用于电站、化工厂、通讯中心、电子计算机等方面,对可靠性要求较高。目前我国有不少单位都在研制不停电电源,功率从几千瓦至数十千瓦。

(九) 其他方面的应用

如高压静电装置、电加工整流电源,晶闸管低频电源,大功率直流石墨化电炉电源、蓄电池快速充电电源以及农用的晶闸管调温调速装置等不胜枚举。

三、本课程的任务与要求

在实现我国工业、农业、国防与科学技术现代化的进程中,半导体变流技术(以晶闸管为主)的应用范围还会不断扩大。研究这门课的基础理论,主要是整流、逆变、变频、斩波和交流调压等方面,它是本书的主要内容。由于各类变流装置及其线路日益发展,从而推动电力拖动及工业自动化装置的有关领域。因而学习这门课程的意义是十分重要的。

半导体变流技术是工业电气自动化专业的专业基础课。主要研究有关各类变流装置中发生的电磁过程、基本原理、控制方法、设计计算以及它们的技术经济指标。

按现行的教学计划,本课程的教学时数为60学时,除第一章至第四章必须讲授外,其余各章各校可根据自己的情况选择其中的若干部分讲授。

半导体变流技术课程的基本要求是:

1. 熟悉和掌握可控整流电路、逆变电路基本原理及参数计算。
2. 了解晶闸管变频电路工作原理及换流参数计算。
3. 了解晶闸管直流斩波器、交流调压器的工作原理。
4. 熟悉晶闸管在有关电路中工作特点,并能正确地、合理地进行选择。

5. 熟悉常用晶闸管触发电路的特点,并能对有关型式主电路选择适当的触发电路。
6. 对一些晶闸管常用的保护线路具有一定的分析能力。
7. 在设计线路时,对其可靠性问题具有初步分析能力。
8. 对可控整流、逆变电路等具有一定的科学实验能力。

“半导体变流技术”是“电子技术基础”的后续课,要求通过“电子技术基础”的学习,能达到比较熟练地分析常用晶体管线路及其参数计算。“半导体变流技术”作为专业基础课,主要是基础理论的内容,有关应用部分由下一门课“自动控制系统”来解决。

学习这门课程时,要着重基本概念和基本训练,也要加强计算和调试能力,做到器件、电路、应用三个方面结合。由于半导体变流技术近年来的迅速发展,晶闸管电路的类型愈来愈多,在教材中只能对一些典型的基本的电路作介绍,为学习“自动控制系统”等专业课程打下基础。

第一章 晶 闸 管

晶闸管就是硅晶体闸流管。晶闸管是包括普通晶闸管（即可控硅整流元件，简称可控硅）、双向晶闸管、可关断晶闸管和逆导通晶闸管等半导体元件的总称。由于普通晶闸管被大量和广泛地使用，因此通常用晶闸管这总称来代替普通晶闸管的名称。以下所述的晶闸管都是指普通晶闸管，至于几种“其他晶闸管”的简单概念，将在附录一中介绍。

在分析、讨论晶闸管的各种电路以前，对于晶闸管本身应该有一些基本的认识。本章从使用晶闸管的角度出发，简单地说明它的结构、工作原理、伏安特性和主要参数。

§ 1-1 晶闸管及其工作原理

一、晶闸管的结构

我国目前生产的晶闸管，从外形上来分，有两种形式：螺栓式和平板式，示于图1-1a和b。晶闸管KP具有三个电极：阳极A、阴极K和门极（或称控制极）G。它的符号如图1-1c所示。

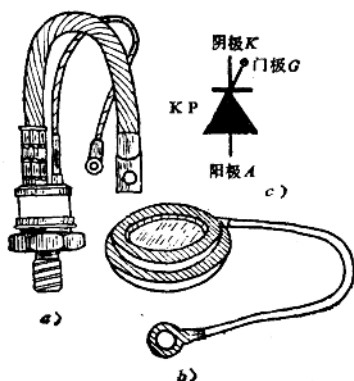


图1-1 晶闸管的外形及符号

晶闸管是大功率半导体器件，它在工作过程中会有损耗，因而产生大量的热。依靠与晶闸管紧密接触的散热器，将这些热量传递给冷却介质。

对于螺栓式晶闸管来说，螺栓是晶闸管的阳极A（它与散热器紧密连接）；粗辫子线是晶闸管的阴极K；细辫子线是门极G。螺栓式晶闸管在安装和更换时比较方便，但散热效果较差。因此，仅在部分200安和100安以下的晶闸管中采用螺栓式结构。

对于平板式晶闸管来说，它的两个平面分别是阳极和阴极，而细辫子线则是门极。使用时，两个互相绝缘的散热器把晶闸管紧紧地夹在中间。

平板式晶闸管的散热效果较好，但安装和更换时比较麻烦。目前，200安以上的晶闸管都采用平板式结构。

晶闸管的内部有一个由硅半导体材料做成的管芯。管芯是一个圆形薄片，它是四层（P、N、P、N）三端（A、K、G）器件（图1-2），它决定晶闸管的性能。

二、晶闸管的工作原理

晶闸管KP在工作过程中，它的阳极A和阴极K与电源和负载连接，组成晶闸管的主电路；晶闸管的门极G和阴极K与控制晶闸管的装置连接，组成晶闸管的控制电路。

为了弄清晶闸管工作的条件，现按图1-3连接实验线路。主电路以灯泡作为负载。主电

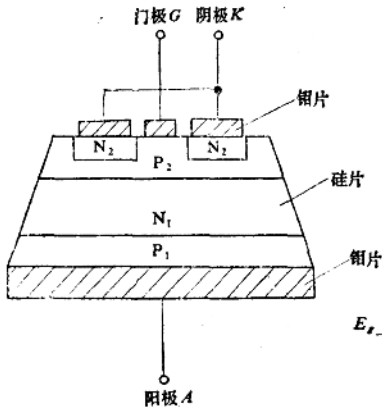


图1-2 晶闸管的结构

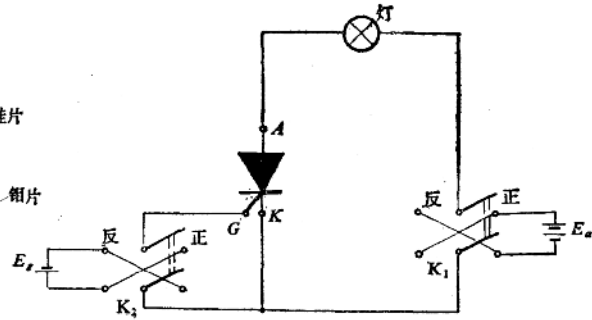


图1-3 晶闸管工作条件的实验线路

路和控制电路分别由双刀双掷开关 K_1 和 K_2 进行控制，它们都有“正”、“零”、“反”三个位置。并且规定，当主电源 E_a （6伏）通过负载作用于晶闸管的电位为 $A(+)$ 、 $K(-)$ 时，称晶闸管承受正向阳极电压；当 $A(-)$ 、 $K(+)$ 时，称反向阳极电压。当门极电源 E_g （3伏）作用于 $G(+)$ 、 $K(-)$ 时，称门极受正向电压；当 $G(-)$ 、 $K(+)$ 时，称门极受反向电压。

现在，把10个实验的条件和所得结论列于表1-1内。

表1-1 晶闸管导通和关断实验

实验序号		实验前 灯的情况	实验时晶闸管条件		实验后 灯的情况	结 论
			阳极电压	门极电压		
导 通 实 验	1	暗	反 向	反 向	暗	当晶闸管受反向阳极电压，不论门极受何种电压，晶闸管都处于关断状态
	2	暗	反 向	零	暗	
	3	暗	反 向	正 向	暗	
	4	暗	正 向	反 向	暗	当晶闸管受正向阳极电压，仅在门极受正向电压时，晶闸管才能被导通，即正向阳极电压和正向门极电压必须同时具备
	5	暗	正 向	零	暗	
	6	暗	正 向	正 向	亮	
关 断 实 验	1	亮	正 向	正 向	亮	晶闸管在导通情况下，只要仍受一定的正向阳极电压，不论门极电压如何，晶闸管仍然导通，即导通后，门极就失去控制作用
	2	亮	正 向	零	亮	
	3	亮	正 向	反 向	亮	
	4	亮	正 向 逐渐减小到接近于零	(任何)	暗	晶闸管在导通情况下，当主回路电压（或电流）减小到接近于零时，晶闸管关断

晶闸管在导通后的管压降很小。晶闸管一旦导通以后，门极失去控制作用。所以，为了使晶闸管导通，加到门极和阴极之间的电压，只要是一个正向的脉冲电压就可以了，这个电压常叫做触发脉冲电压。在晶闸管导通情况下，随着主回路电源电压的降低，主回路电流降低到某一数值以下时晶闸管就关断了。这个能保持晶闸管导通的最小电流称为维持电流。

从晶闸管实验中得到的结论, 阐明了晶闸管导通和关断的条件。在实际应用的晶闸管电路中, 晶闸管就是按照这些条件不断地导通和关断。但是, 从晶闸管内部来分析, 它的工作过程究竟如何?

晶闸管是四层三端器件, 它有 J_1 、 J_2 和 J_3 三个 PN 结示于图 1-4a。可以把它中间的 N_1 和 P_2 分为两部分, 构成一个 PNP 型三极管和一个 NPN 型三极管的复合作用管如图 b 和 c 所示。

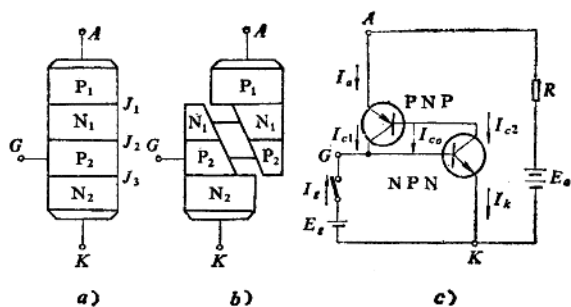


图1-4 用两个晶体管说明晶闸管的工作原理

当晶闸管承受正向阳极电压时, 为使晶闸管导通, 必须使承受反向电压的 PN 结 J_2 失去阻挡作用。图 1-4c 清楚表明: 每个晶体管的集电极电流同时就是另一个晶体管的基极电流。因此, 两个互相复合的晶体管电路, 当有足够的门极电流 I_g 流入时, 就会形成强烈的正反馈, 造成两晶体管饱和导通, 即晶闸管饱和导通。

设 PNP 管和 NPN 管的集电极电流相应为 I_{c1} 和 I_{c2} , 发射极电流相应为 I_e 和 I_k , 电流放大系数相应为 $\alpha_1 = \frac{I_{c1}}{I_e}$ 和 $\alpha_2 = \frac{I_{c2}}{I_k}$ 。设流过 J_2 结的反向漏电流为 I_{c0} 。

晶闸管的阳极电流等于两管的集电极电流和漏电流的总和:

$$I_a = I_{c1} + I_{c2} + I_{c0} \quad (1-1)$$

或

$$I_a = \alpha_1 I_e + \alpha_2 I_k + I_{c0} \quad (1-2)$$

若门极电流为 I_g , 则晶闸管的阴极电流为:

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

从式(1-2)和式(1-3), 可以得出晶闸管的阳极电流为:

$$I_a = \frac{I_{c0} + I_g \alpha_2}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (1-4)$$

硅 PNP 管和硅 NPN 管相应的电流放大系数 α_1 和 α_2 随其发射极电流改变而急剧变化, 其关系如图 1-5 所示。

当晶闸管承受正向阳极电压, 而门极未受电压的情况下, 式(1-4)中 $I_g = 0$, $(\alpha_1 + \alpha_2)$ 很小, 故晶闸管的阳极电流 $I_a \approx I_{c0}$ 。晶闸管处于正向阻断状态。

当晶闸管在正向阳极电压下, 从门极 G 流入电流 I_g , 由于足够大的 I_g 流经 NPN 管的发射结, 从而提高其电流放大系数 α_2 , 产生足够大的集电极电流 I_{c2} 流过 PNP 管的发射结, 并提高了 PNP 管的电流放大

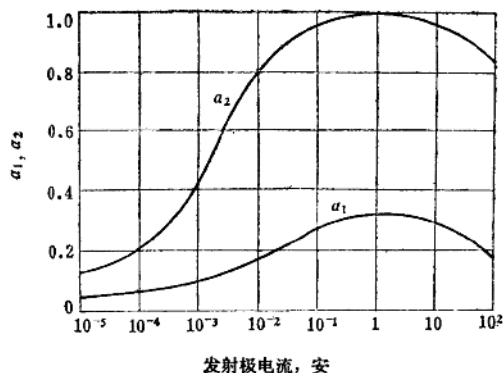


图1-5 两个晶体管的电流放大系数与发射极电流的关系