



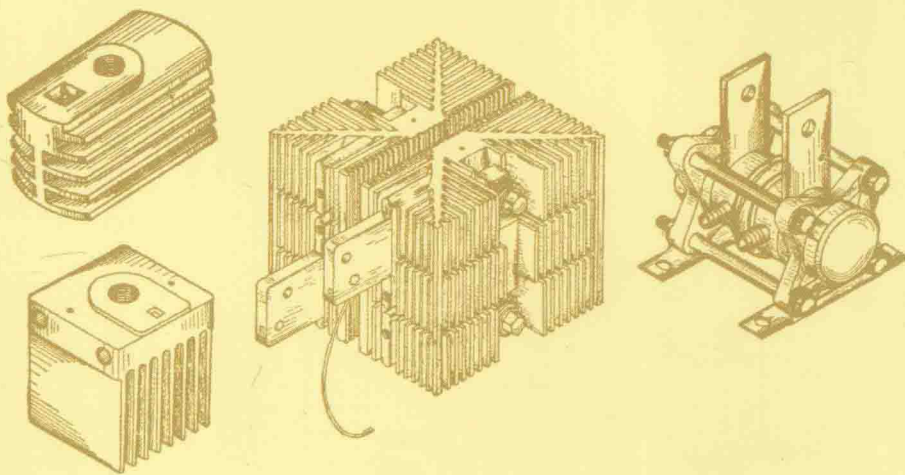
高职高专“十二五”规划教材

机电专业系列

变频器技术与应用

BIANPINQI JISHU YU YINGYONG

主编 周 斐 主审 梁南丁



南京大学出版社



高职高专“十二五”规划教材

机电专业系列

变频器技术与应用

主 编 周 斐
副主编 付 军 杨 卓
陈永利 刘学芹
参 编 孔令雪 赵玉朋
王 峰
主 审 梁南丁



南京大学出版社

内容摘要

本书主要包括:电力电子器件简介,变频器的基本组成原理和控制方式,变频调速系统主要电器的选用,变频器的操作、运行、安装、调试、维护及抗干扰,变频器在风机、水泵、中央空调、空气压缩机和液态物料传送等方面的应用实例等。本书淡化了高深的理论分析及数学运算,列举了多种应用实例,具有很高的参考价值。

本书可作为高等职业学校机电类及相关专业的教材,也可供从事机电技术和电气技术的人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

变频器技术与应用/周斐主编. —南京:南京大学出版社,2012.8

高职高专“十二五”规划教材. 机电专业系列

ISBN 978-7-305-10438-1

I. ①变… II. ①周… III. ①变频器—高等职业教育—教材 IV. ①TN773

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 189918 号

出版发行 南京大学出版社

社 址 南京市汉口路 22 号 邮编 210093

网 址 <http://www.NjupCo.com>

出 版 人 左 健

丛 书 名 高职高专“十二五”规划教材·机电专业系列

书 名 变频器技术与应用

主 编 周 斐

责任编辑 王秉华 编辑热线 025-83592146

照 排 江苏南大印刷厂

印 刷 江苏凤凰数码印务有限公司

开 本 787×1092 1/16 印张 13 字数 319 千

版 次 2012 年 8 月第 1 版 2012 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-305-10438-1

定 价 28.00 元

发行热线 025-83594756

电子邮件 Press@NjupCo.com

Sales@NjupCo.com(市场部)

* 版权所有,侵权必究

* 凡购买南大版图书,如有印装质量问题,请与所购

图书销售部门联系调换

前 言

本书结合我国高等职业教育的特点,以培养机电一体化应用型人才为目标,在注重基础理论教育的同时,针对实际工作中经常面对的实践操作内容,突出实用性和先进性,在内容叙述上,力求通俗易懂、由浅入深地阐明问题。全书以变频器的实际应用为重点内容,淡化了理论计算内容。

本书依据高等职业教育“以就业为导向,以职业能力培养为重点”的原则,注重实践操作训练,主要有以下特点:

1. 以实用技能培养为主,由浅入深,循序渐进,帮助学生掌握变频器应用的基本技术理论和技术基础。

2. 吸收当前较为先进、应用较为广泛的变频器应用实例,使教学过程与生产生活实际更加贴近。

3. 书中给出了变频器在多个不同行业领域的应用案例,可以供不同专业学生根据专业需要选学。

本书由平顶山工业职业技术学院周斐任主编,湖南机电职业技术学院付军、郑州旅游职业学院杨卓、济源职业技术学院陈永利、湖南石油化工职业技术学院刘学芹任副主编,平顶山工业职业技术学院梁南丁教授任主审。参加教材编写的还有平顶山工业职业技术学院孔令雪、洛阳三隆安装检修有限公司赵玉朋和中平能化集团安培中心王峰,平煤集团的现场工程技术人员周先锋、徐其祥也提出了许多宝贵意见,在此谨表示诚挚的感谢。

全书编写分工如下:周斐负责编写第1章、第2章、第7章的7.8—7.10节;付军和刘学芹共同负责编写第6章;杨卓负责编写第5章;陈永利负责编写第7章的7.1—7.6节;孔令雪负责编写第7章的7.7节、7.11节和附录;赵玉朋负责编写第4章;王峰负责编写第3章。

在编写过程中,编者参阅了国内外许多专家、同行的教材、著作、论文,对此,谨致诚挚的谢意!

由于编者水平有限,书中难免有不足之处,敬请读者批评指正。

编者

2012年6月16日

目 录

第 1 章 概 述	1
1.1 变频技术的概念及其应用的历史	1
1.2 变频技术的基本类型	2
1.3 变频技术的发展	2
1.4 变频器的发展趋势	3
1.5 变频器的功能	4
1.6 我国变频器应用范围及市场分析	5
第 2 章 常用电力电子器件	8
2.1 电力电子器件概述	8
2.2 晶闸管(SCR)	9
2.2 可关断晶闸管(GTO)	17
2.3 功率晶体管(GTR)	20
2.4 功率场效晶体管(MOSFET)	25
2.5 绝缘栅双极晶体管(IGBT)	26
2.6 智能功率模块(IPM)	28
第 3 章 变频器的工作原理及控制方式	31
3.1 变频调速原理及变频器的分类	31
3.2 PWM(脉冲宽度调制)控制技术	33
3.3 变频器主电路	36
3.4 变频器的控制电路	41
3.5 变频器对异步电动机的控制方式	42
3.6 中、高压变频器	48
第 4 章 变频器的功能选择与参数设定	53
4.1 三菱 FR - A540 系列变频器简介	53
4.2 三菱 FR - A540 系列变频器的接线原理	54
4.3 变频器的操作模式	58
4.4 变频器常用控制功能与参数设定	60

第 5 章 变频控制系统的组成	87
5.1 电力拖动系统的组成	87
5.2 生产机械的负载特性	90
5.3 拖动系统的运行状态	92
5.4 变频调速系统主电路及外接电器的选择	94
5.5 变频调速系统控制电路	100
5.6 变频器与 PLC 的连接	102
5.7 SINE003 系列通用型变频器基本接线及参数设定	104
第 6 章 变频器系统的选择与操作	117
6.1 变频器的选择	117
6.2 变频器的安装	122
6.3 变频器的抗干扰	125
6.4 变频调速系统调试方法	129
6.5 变频调速系统的维护与维修	131
6.6 变频器使用要点	134
第 7 章 变频器在调速系统中的应用	137
7.1 变频技术应用综述	137
7.2 变频器在风机控制中的应用	138
7.3 变频器在恒压供水系统中的应用	141
7.4 变频器在中央空调控制系统中的应用	151
7.5 变频器在起重设备中的应用	155
7.6 变频器在电梯控制中的应用	162
7.7 变频器在啤酒灌装生产线上的应用	166
7.8 变频器在龙门刨床上的应用	169
7.9 高压变频器在炼铁厂除尘系统中的应用	172
7.10 防爆变频技术在钢缆皮带中的应用	176
7.11 变频技术在家用电器上的应用	182
附录 1 森兰 SB61 系列变频器	187
附录 2 安川 G7 系列变频器	191
主要参考文献	199

5. 中频电源

主要用于金属冶炼、精密铸造过程中的感应加热。

1.2 变频技术的基本类型

变频技术的类型有下面几种：

1. 整流技术

通过由二极管组成的不可控整流器或者由晶闸管组成的可控整流器，将工频交流电转换成频率为 0 的直流电，称为整流技术。

2. 直流斩波技术

通过改变电力半导体器件的通断时间，也就是脉冲频率（定宽变频），或者改变脉冲的宽度（定频调宽）达到调节直流平均电压的目的。

3. 逆变技术

在变频技术中，逆变器是利用半导体器件的开关特性，将直流电转换成不同频率的交流电。

4. 交—交变频技术

通过控制电力半导体器件的导通与关断时间，将工频交流电转换成频率连续可调的交流电。

5. 交—直—交变频技术

先将交流电经过整流器转换成直流电，再将直流电逆变成频率可调的交流电。

1.3 变频技术的发展

变频技术是在电力电子技术、交流调速控制理论和计算机技术基础上发展起来的，是应交流异步电动机无级调速和节能需求诞生的。人们把根据变频技术制造出用于交流异步电动机调速的电气设备称为变频器，其外形如图 1-1 所示。

变频技术是应交流电机无级调速的需要而诞生的。20 世纪 60 年代后半期开始，电力电子器件从 SCR（晶闸管）、GTO（门极可关断晶闸管）、BJT（双极型功率晶体管）、MOSFET（金属氧化物场效应管）、SIT（静电感应晶体管）、SITH（静电感应晶闸管）、MCT（MOS 控制晶体管）、MCT（MOS 控制晶闸管）发展到今天的 IGBT（绝缘栅双极型晶体管）、HVIGBT（耐高压绝缘栅双极型晶闸管），器件的更新促使电力变换技术的不断发展。20 世纪 70 年代开始，脉宽调制变压变频（PWM - VVVF）



图 1-1 变频器的外形

调速研究引起了人们的高度重视。20 世纪 80 年代,作为变频技术核心的 PWM 模式优化问题吸引着人们的浓厚兴趣,并得出诸多优化模式,其中以鞍形波 PWM 模式效果最佳。20 世纪 80 年代后半期开始,美、日、德、英等发达国家的 VVVF 变频器已投入市场并广泛应用。

VVVF 控制方式的变频器属于第一代变频器,这类变频器控制相对简单,机械特性硬度也较好,能够满足一般传动的平滑调速要求,已在产业的各个领域得到广泛应用。但是,这种控制方式在低频时由于输出电压较小,受定子电阻压降的影响比较显著,故造成输出最大转矩减小。另外,其机械特性终究没有直流电动机硬,动态转矩能力和静态调速性能都还不尽如人意,因此人们又研究出第二代变频器——矢量控制方式的变频器,实现矢量控制变频调速。

矢量控制变频调速的做法是:将异步电动机在三相坐标系下的定子交流 I_A 、 I_B 、 I_C 通过三相——二相变换,等效成两相静止坐标系下的交流电流 i_α 、 i_β ,再通过按转子磁场定向旋转变换,等效成同步旋转坐标系下的直流电流 I_M 、 I_T (I_M 相当于直流电动机的励磁电流, I_T 相当于与转矩成正比的电枢电流)。然后模仿直流电动机的控制方法,求得直流电动机的控制量,经过相应的坐标反变换,实现对异步电动机的控制。

矢量控制方法的提出具有划时代的意义。然而在实际应用中,由于转子磁链难以准确观测,系统特性受电动机参数的影响较大,且在等效直流电动机控制过程中所用矢量旋转变换较复杂,使得实际的控制效果难以达到理想分析的结果。

1985 年,德国鲁尔大学的 Dopenbrock 教授首次提出了直接转矩控制变频技术。该技术在很大程度上解决了上述矢量控制的不足,并以新颖的控制思想、简洁明了的系统结构、优良的动静态性能得到了迅速发展。日前,该技术已成功地应用在电力机车牵引的大功率交流传动上。

直接转矩控制直接在定子坐标系下分析交流电动机的数学模型。控制电动机的磁链和转矩。它不需要将交流电动机转化成等效直流电动机,因而省去了矢量旋转变换中的许多复杂计算;它不需要模仿直流电动机的控制,也不需要为解耦而简化交流电动机的数学模型。

VVVF 变频、矢量控制变频、直接转矩控制变频都是交—直—交变频中的一种。其共同缺点是输入功率因数低,谐波电流大,直流回路需要大的储能电容,再生能量又不能反馈回电网,即不能进行四象限运行。为此,矩阵式交—交变频应运而生。由于矩阵式交—交变频省去了中间直流环节,从而省去了体积大、价格贵的电解电容。它能实现功率因数为 1,输入电流为正弦且能四象限运行,系统的功率密度大。该技术目前虽尚未完全成熟,但仍吸引着众多的学者深入研究。

1.4 变频器的发展趋势

变频器是利用电力半导体器件的通断作用将工频电源变换为另一频率的电能控制装置,能实现对交流异步电机的软起动、变频调速、提高运转精度、改变功率因数、过流/过压/过载保护等功能。变频器是运动控制系统中的功率变换器。当今的运动控制系统包含多种

学科的技术领域,总的发展趋势是:驱动的交流化、功率变换器的高频化、控制的数字化、智能化和网络化。因此,变频器是运动控制系统的重要功率变换部件,并因变频器能提供可控的高性能变压、变频的交流电而在交流传动领域得以迅猛发展。

变频器经历了大约 30 年的研发与应用实践,随着新型电力、电子器件和高性能微处理器的应用及控制技术的发展,变频器的性能价格比越来越高,体积越来越小,而厂家仍然在不断地提高变频器的可靠性,以实现变频器的进一步小型轻量化、高性能化、多功能化及无公害化等。衡量一台变频器性能的优劣:一要看其输出交流电压的谐波对负载的影响;二要看对电网的谐波污染和输入功率因数;三要看本身的能量损耗(即效率)。

1. 变频器主电路开关元件

目前,低压小容量变频器普遍采用的功率开/关器件是功率 MOSFET、IGBT(绝缘栅双极型晶体管)和 IPM(智能功率模块)。中压大容量变频器采用的功率开关器件有:GTO(门极可关断晶闸管)、IGCT(集成门极换流晶闸管)、SGCT(对称门极换流晶闸管)、IEGT(注入增强栅晶体管)和高压 IGBT。由于新型开关元件的应用,使开关频率不断提高,开关损耗进一步降低。变频器主电路开关元件的发展方向是:自关断化、模块化、集成化及智能化。

2. 变频器主电路的拓扑结构

目前,变频器主电路的拓扑结构为:变频器的网侧变流器对于低压、小容量的常采用 6 脉冲变流器;对中压、大容量的常采用多重化 12 脉冲以上的变流器;负载侧变流器对低压、小容量的常采用两电平的桥式逆变器;对中压、大容量的采用多电平逆变器。值得注意的是:对于四象限运行的传动系统,为实现变频器再生能量向电网回馈而节约能量,网侧变流器应为可逆变流器。而功率可双向流动的双 PWM 变频器,对网侧变流器加以适当控制可使输入电流接近正弦波,并使系统的功率因数接近于 1,减少对电网的公害。

公用直流母线技术的采用,使由多台电动机(或多轴)构成的传动系统能量得以更好地利用,提高系统的整体运行效率,并可降低变频器本身的价格。公用直流母线也分再生型和非再生型。探索采用谐振直流环技术使变频器的功率开关工作在软开关状态,可使器件损耗进一步下降,开关频率也可进一步提高,因电压和电流尖峰引起的 EMI 问题也得到有效抑制,故也可取消缓冲电路。

3. 变频器的控制方式

变频器的控制方式正由标量控制(V/F 控制和转差频率控制)向高动态性能的矢量控制和直接转矩控制发展。微处理器技术的进步使数字控制成为现代控制器的发展方向,数字控制使硬件简化。柔性的控制算法使控制具有很大的灵活性,可实现复杂控制规律,使现代控制理论在运动控制系统中应用成为现实,易于与上层系统连接进行数据传输,便于故障诊断,加强保护和监视功能,使系统智能化(如有些变频器具有自调整功能)。

1.5 变频器的功能

变频器已经成为交流异步电动机最理想的调速设备。它的功能与应用主要有以下几个

方面:

1. 节能

传统的风机和泵类是用挡板和阀门来调节风量和流量,其拖动电动机在额定电压下工作,功率也为额定功率。风机和泵类负载采用变频器调速以后,当用户需要的风量或液体流量较小时,采用变频器将风机或泵的转速控制在较低的转速范围,此时电动机在低电压下工作,实际功率远小于电动机额定功率。节电效果十分显著,节电可达20%~60%。

据有关资料表明,风机和泵类电动机的用电量占全国电动机用电量的30%左右,占工业用电量的50%,因此,这类负载使用变频器调速具有非常重要的节能意义。以节能为目的,采用变频器对风机和泵类进行的技术改造,发展非常迅速。全国每年因此而节约电能的数量相当可观,因此在这类负载中变频器应用最多。目前应用比较成熟的有恒压供水系统、各类风机、中央空调等系统的变频调速。近年来,家用电器也开始广泛采用变频技术。变频家电已经成为新一代家用电器的发展趋势。变频器的生产与应用,已成为最具发展前景的高新技术产业之一。

2. 自动控制

变频器的控制核心是微型计算机。目前,变频器已经广泛采用16位机或32位机实施控制。它具有多种算术和逻辑运算、存储记忆和智能控制功能,所控制的变频器输出频率的精度高达0.1%~0.01%,而且还具有完善的检测、报警及保护功能,因此,在自动控制系统中获得了广泛应用。

3. 提高产品质量

电气传动控制系统通常由电动机、控制装置和信息装置三部分组成。电气传动关系到控制运行状态、合理使用电动机和节能,以实现电能与机械能的高效转换。如今变频技术和变频器已经成为提高工业产品质量的有效手段之一,如应用在注塑设备、轧钢设备、造纸设备、灌装设备以及各类机床等中,可使它们的产品质量获得明显提高。

在家电产品的研制与开发中,变频器也得到应用,如应用在家用空调与中央空调设备、电梯设备、洗衣机、冰箱、电磁炉等中,可降低设备的噪声,延长设备的使用寿命,使设备控制方便,使用效率明显提高。

1.6 我国变频器应用范围及市场分析

自上世纪80年代被引进中国以来,变频器作为节能应用与速度工艺控制中越来越重要的自动化设备,得到了快速发展和广泛的应用。在电力、纺织与化纤、建材、石油、化工、冶金、市政、造纸、食品饮料、烟草等行业以及公用工程(中央空调、供水、水处理、电梯等)中,变频器都在发挥着重要作用。变频器主要用于交流电动机(异步电机或同步电机)转速的调节,是公认的交流电动机最理想、最有前途的调速方案,除了具有卓越的调速性能之外,变频器还有显著的节能作用,是企业技术改造和产品更新换代的理想调速装置。

(1) 变频器与节能

变频器产生的最初用途是速度控制,但目前在国内应用较多的是节能。中国是能耗大

国,能源利用率很低,而能源储备不足。在 2003 年的中国电力消耗中,60%~70%为动力电,而在总容量为 5.8 亿千瓦的电动机总容量中,只有不到 2000 万千瓦的电动机是带变频控制的。据分析,在中国,带变动负载、具有节能潜力的电机至少有 1.8 亿千瓦。因此国家大力提倡节能措施,并着重推荐了变频调速技术。

应用变频调速,可以大大提高电机转速的控制精度,使电机在最节能的转速下运行。以风机水泵为例,根据流体力学原理,轴功率与转速的三次方成正比。当所需风量减少,风机转速降低时,其功率按转速的三次方下降。因此,精确调速的节电效果非常可观。与此类似,许多变动负载电机一般按最大需求来生产电动机的容量,故设计裕量偏大。而在实际运行中,轻载运行的时间所占比例却非常高。如采用变频调速,可大大提高轻载运行时的工作效率。因此,变动负载的节能潜力巨大。

以节能为目的的变频器广泛应用于电力、冶金、石油、化工、市政、中央空调、水处理等行业。以电力行业为例,由于中国大面积缺电,电力投资将持续增长;同时,国家电改方案对电厂的成本控制提出了要求,降低内部电耗成为电厂关注焦点。因此变频器在电力行业有着巨大的发展潜力,尤其是高压变频器和大功率变频器。研究显示,仅电力行业,2003 年的变频器市场规模就达到了 2.5 亿元。因此,变频器的节能应用前景非常广阔。

(2) 变频器与工艺控制(速度控制)

目前,中国的设备控制水平与发达国家相比还比较低,制造工艺和效率都不高,因此提高设备控制水平至关重要。由于变频调速具有调速范围广、调速精度高、动态响应好等优点,在许多需要精确速度控制的应用中,变频器正在发挥着提升工艺质量和生产效率的显著作用。

以纺织行业为例,中国具有世界最大的纺织产品生产能力,市场范围遍及全球,产业规模庞大。纺织与化纤行业也是变频器应用最多、使用密度最高的行业。在最常见的化纤机械设备中,选用变频器的设备有螺杆挤出机、纺丝机和后加工机等。选用变频器较多的棉纺设备主要有细纱机、粗纱机、精梳机等。这些设备都要求精确速度控制、多单元同步传动或比例同步(牵伸)传动等。应用变频器可以提高工艺要求、提升产品质量,同时减轻了人工的劳动强度、提高了生产效率,可以说,变频器是纺织行业增强国际竞争能力的重要装备。市场调查显示,2003 年变频器在纺织与化纤行业的市场规模超过了 10 亿元。

此外,在食品、饮料、包装、造纸、机床、电梯等行业,国内的企业需要扩大生产规模,提高生产技术,因此变频器的应用前景和发展潜力都不可小觑。

(3) 变频家电

除了工业相关行业,在普通家庭中,节约电费、提高家电性能、保护环境等受到越来越多的关注,变频家电成为变频器的另一个广阔市场和应用趋势。带有变频控制的冰箱、洗衣机、家用空调等,在节电、减小电压冲击、降低噪音、提高控制精度等方面有很大的优势。目前,中国是世界上最主要的家电供应国,但家电采用变频器的比例很低,而在日本,90%以上的家电是变频控制。据调查,2003 年,中国的变频家电同比增长超过 200%,但体现在市场中的变频家电并不多见,因此,变频家电具有非常好的发展潜力。

(4) 前景广阔的中国变频器市场

变频器在我国经过了 20 余年的高速发展,无论从行业规模、应用领域,还是产品自身的功能、集成度和系统化程度都有了质的飞跃,其市场规模也从 1993 年的 4 亿元,1999 年的

28 亿元,增长到了 2008 年的接近 140 亿元及 2010 年的突破 200 亿元。

目前,我国变频器市场仍处于一个较为快速的增长时期,并在冶金、水泥、印刷、电梯、电力、化工、医疗、机械、交通、通讯、建材等行业得到了广泛应用。2011 年,我国整个变频器市场的增长率在 13.5%左右。

习题 1

1. 什么叫变频技术?
2. 什么叫变频器?
3. 学习变频技术的意义是什么?
4. 变频技术有哪几种类型?
5. 简述变频技术的发展历程。
6. 变频技术的发展方向如何?

第2章 常用电力电子器件

学习目标

1. 掌握晶闸管的结构、导通与关断条件。
2. 了解各种电力半导体器件的应用特点。
3. 熟悉智能功率模块的结构与应用。

2.1 电力电子器件概述

用于电能变换和电能控制电路的大功率(通常指电流为数十安至数千安、电压为数百伏以上)半导体器件,称为电力电子器件,或称功率电子器件。

1. 电力电子器件具有如下特征

1) 电力电子器件一般都工作开关状态,往往用理想开关模型来代替。导通时它的阻抗很小,接近于短路,管压降接近于零,流过它的电流由外电路决定;阻断时它的阻抗很大,接近于开路,流过它的电流几乎为零,而管子两端电压由电源决定。

2) 电力电子器件的开关状态往往需要由外电路来控制。即所谓的弱电对强电控制。在主电路和控制电路之间,需要中间电路根据控制电路的信号控制电力电子器件开通和关断,用来控制电力电子器件导通和关断的电路称为驱动电路。

3) 处理的电功率大,也就是电力电子器件能够承受高电压和通过大电流。因此电力电子器件的功率损耗通常远远大于信息电子器件,因而为了保证不至于因损耗散发的热量导致器件温度过高而损坏,不仅在器件封装上比较讲究散热设计,而且在其工作时一般都还需要安装散热器。

4) 在实际应用中,电力电子器件往往需要由信息电子电路控制,而且两者之间应采取一定的隔离措施。

2. 电力电子器件的分类

1) 按照驱动电路加在器件控制端和公共端之间信号的性质,分为以下两类:

(1) 电流控制型: 通过门极注入或者抽出电流来控制其导通或者关断的器件,属于这类器件的有晶闸管,电力晶体管 GTR、GTO 等。

(2) 电压控制型: 通过在门极施加一定的电压信号就可以控制其导通与关断的器件,静态时几乎没有门极电流。由于电压控制型器件实际上是通过门极电压在器件内部产生可控的电场来改变流过器件的电流大小和通断状态的,所以又称为场控器件,如 IGBT、

MCT 等。

2) 按照器件内部电子和空穴两种载流子参与导电的情况可分为三类:

(1) 单极型器件: 有一种载流子参与导电。此种器件具有输入阻抗高、响应速度快的特点, 如 MOSFET、SIT 两种。

(2) 双极型器件: 由电子和空穴两种载流子参与导电, 此种器件具有通态压降低、阻断电压高、电流容量大的特点, 如 GTR、GTO、SITH、IGCT 等。

(3) 复合型器件: 由单极型器件和双极型器件混合而成的器件。该器件兼备了两者的优点, 如 IGBT、MCT、IEGT 等。

3) 按照器件的可控性分类又将电力半导体器件分为不可控型、半控型和全控型三种。

(1) 不可控型: 如电力二极管, 其特点是由电源主回路控制其通断状态。

(2) 半控型: 如普通晶闸管, 其特点是由触发信号控制其导通, 但需由主回路的外部条件(负电压和小于维持电流)控制关断, 通常采用换相电压的自然关断或强迫关断方法。

(3) 全控型: 如电力开关器件, 其特点是由触发信号控制导通和关断两种状态。包括可关断晶闸管(GTO)、大功率双极型晶体管(BJT)、MOS 场效应晶体管(MOSFET)、绝缘栅双极晶体管(IGBT)、MOS 控制晶闸管(MCT), 以及静电感应晶闸管(SITH)和静电感应晶体管(SIT)等。

变频器的核心元件就是电力半导体开关器件。自 1948 年美国贝尔实验室发明第一只晶体管以来, 到现代的电力电子器件“智能化开关模块(IPM)”的应用, 使得变频器性能产生了质的飞跃。下面详细介绍几种常用电力半导体开关器件。

2.2 晶闸管(SCR)

晶闸管又称作可控硅整流管, 简称可控硅(SCR)。晶闸管包括普通晶闸管及其所有派生器件; 快速晶闸管(FST)、双向晶闸管(TRIAC)、逆导晶闸管(RCT)、可关断晶闸管(GTO)和光控晶闸管等。由于普通晶闸管面世早, 应用极为广泛, 因此无特别说明的情况下所说的晶闸管都为普通晶闸管。

晶闸管具有硅整流器件的特性, 能在高电压、大电流条件下工作, 且其工作过程可以控制, 被广泛应用于可控整流、交流调压、无触点电子开关、逆变及变频等大功率电子电路中。

2.2.1 晶闸管的结构和工作原理

1. 晶闸管的结构

晶闸管是一种大功率 PNP 四层半导体变流器件, 它具有三个引出极, 阳极 A、阴极 K 和门极 G(也称控制极)。常用的晶闸管有螺栓式和平板式两种外形, 其外形、结构和电气图形符号、文字符号如图 2-1 所示。

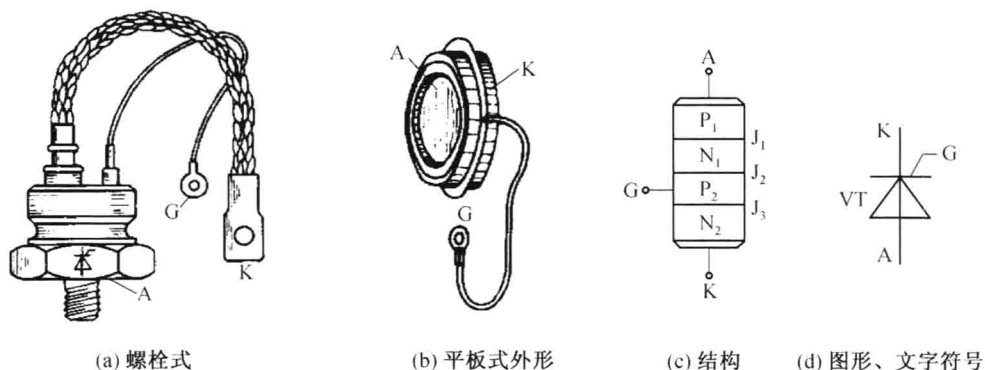


图 2-1 晶闸管的外形、结构和图形、文字符号

由于大功率晶闸管在工作过程中会因损耗而发热,因此必须安装散热器。螺栓式晶闸管是靠阳极(螺栓)拧紧在铝制散热器上,可自然冷却;平板式晶闸管由两个相互绝缘的散热器把晶闸管紧紧夹在中间,靠冷风冷却。目前额定电流在 200 A 以上的晶闸管,通常都采用平板式结构。常用的晶闸管散热器如图 2-2 所示。

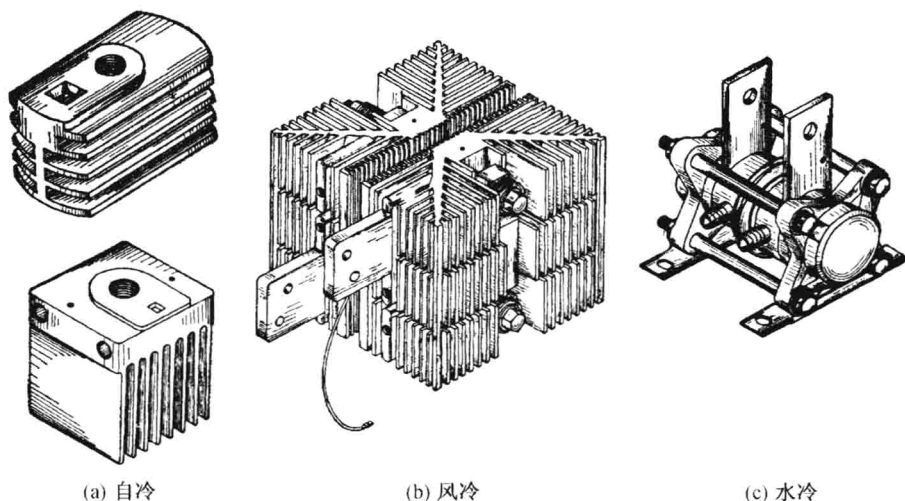


图 2-2 晶闸管的散热器

2. 晶闸管的工作原理

晶闸管内部是由四层半导体(P_1 、 N_1 、 P_2 、 N_2)组成,如图 2-1(c)所示。由 P_1 引出阳极 A, N_2 引出阴极 K, P_2 引出门极 G, 形成 J_1 、 J_2 、 J_3 三个 PN 结。当 A、K 之间施加正向电压(阳极高于阴极), 则 J_2 处于反向偏置状态, 晶闸管处于正向阻断状态, 只能流过很小的正向漏电流。当 A、K 之间施加反向电压时, J_1 和 J_2 反偏, 晶闸管处于反向阻断状态, 仅有极小的反向漏电流通过。

1) 晶闸管的导通

晶闸管导通的工作原理可以用晶闸管的等效电路——双晶体管模型来解释, 如图 2-3 所示。将晶闸管可以看作由一个 $P_1N_1P_2$ 和 $N_1P_2N_2$ 构成的两个晶体管 V_1 、 V_2 组合而成。当晶闸管承受正向阳极电压, 而门极未施加电压的情况下, $I_G = 0$, 晶闸管处于正向阻断状

态。如果门极施加正向电压且门极注入电流 I_G 足够大时, I_G 流入晶体管 V_2 的基极, 即产生集电极电流 $I_{C2} (\approx I_K)$, I_{C2} 同时又是晶体管 V_1 的基极电流, 经 V_1 放大成集电极电流 $I_{C1} (\approx I_A)$, I_{C1} 又进一步增大 V_2 的基极电流, 如此形成强烈的正反馈, 使 V_1 和 V_2 迅速进入完全饱和状态, 即晶闸管导通。其正反馈过程如下:

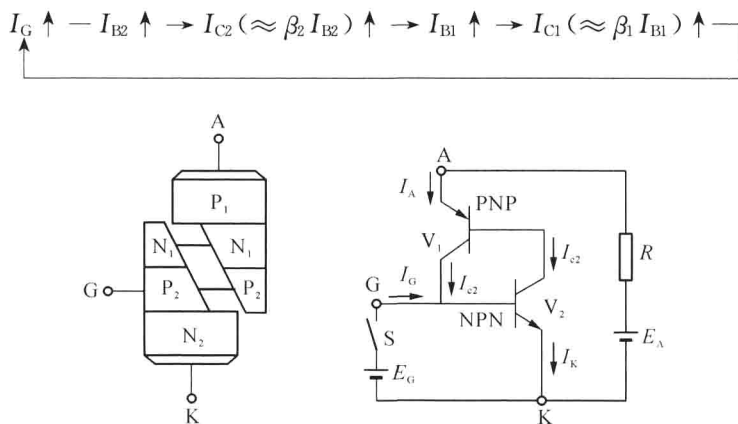


图 2-3 晶闸管工作原理

当晶闸管导通后, 即使 $I_G = 0$, 因 I_{C1} 直接流入 V_2 的基极, 晶闸管内部已形成了强烈的正反馈会仍然维持导通状态。

2) 晶闸管的关断

晶闸管导通后, 由于内部正反馈的作用, 即使门极电压降为零或为负值, 也不能使管子关断, 即门极在晶闸管导通后就失去控制作用, 要使导通的管子关断, 只有通过外电路降低管子的阳极所加的正向电压或给阳极施加反压, 从而减小阳极电流, 当阳极电流减小到低于某一数值(该数值一般为几十毫安)时, 管子内部的正反馈已无法维持, 晶闸管才能关断。我们把晶闸管导通时能维持晶闸管导通的最小阳极电流称为维持电流, 用 I_H 表示。

由于晶闸管的门极只能控制其开通, 不能控制其关断, 所以晶闸管才被称为半控型器件。

综上所述, 可得出如下结论:

(1) 晶闸管承受反向阳极电压时, 不管门极加不加电压及承受何种电压, 晶闸管都处于关断状态。即晶闸管具有反向阻断能力。

(2) 晶闸管承受正向阳极电压而门极不加触发电压时, 晶闸管仍处于阻断状态, 即晶闸管具有正向阻断能力。正向阻断特性是一般二极管所不具备的。

(3) 晶闸管导通的条件是: 阳极加正向电压的同时门极加足够大的触发电压。

需要注意的是, 如果门极触发电压不够大, 则不会产生足够大的触发电流, 也就不会使管子触发导通。

(4) 晶闸管在导通情况下, 只要有一定的正向阳极电压, 不论门极电压如何, 晶闸管总保持导通, 即晶闸管导通后, 门极失去控制作用。

(5) 晶闸管在导通情况下, 要使晶闸管关断只有设法使管子的阳极电流减小到维持电流 I_H 以下, 可通过减小阳极电压来实现。为保证晶闸管迅速可靠地关断, 通常在管子的阳极电压降为零后再给阳极加一段时间的反向电压。

使晶闸管触发导通的方法很多,归纳为以下几种方法:

(1) 门极加触发电压 这是一种最通用最有效的方法。

(2) 阳极加较大电压 当阳极电压足够大时, J_2 在强电压作用下,漏电流会急剧增大形成雪崩效应,又通过正反馈放大漏电流,最终使晶闸管导通。但这种方法很容易导致晶闸管损坏,且不易控制,因此很少采用。

(3) 阳极电压上升率 du/dt 作用 如果阳极电压上升很快即 du/dt 很大,就会在 J_2 电容中产生位移电流 $i=Cdu/dt$,使发射极电流增大,最终使晶闸管导通。过大的 du/dt 会使晶闸管损坏,因此要采取保护措施限制 du/dt 。

(4) 温度作用 在较高的温度作用下,晶闸管中漏电流增大,可引起晶闸管导通。

(5) 光触发 当光照射在硅片上,会在硅片中产生自由电子空穴对,在电场作用下,产生的电流可触发晶闸管导通。用光触发的晶闸管是专门设计的光控晶闸管,常用在高压直流输电中,使用时把器件用串并联方法连接起来,从而保证了控制电路和主电路的良好绝缘。

2.2.2 晶闸管的检测

对于晶闸管的三个电极,可从外观判断也可用万用表来测量并粗测其好坏。根据元件内部的三个 PN 结可知,阳极与阴极间、阳极与门极间的正反向电阻均应在数百千欧以上,门极与阴极间的电阻通常为几十到几百欧,因元件内部门阴极间有旁路电阻,通常正反向阻值相差很小。注意:在测门极与阴极间的电阻时,不能使用万用表的高阻(10 k)挡,以防表内高压电池击穿门极的 PN 结。至于元件能否可靠触发导通,可用直流电源串联电灯与晶闸管,当门极与阳极接触一下后,如管子导通灯亮,则说明管子是可触发的。

晶闸管的伏安特性是晶闸管阳极与阴极间的电压 U_{AK} 和阳极电流 I_A 之间的关系特性。图 2-4 所示即为晶闸管阳极伏安特性曲线,包括正向特性(第一象限)和反向特性(第三象限)两部分。

晶闸管的正向特性又有阻断状态和导通状态之分。在正向阻断状态时,晶闸管的伏安特性是一组随门极电流 I_G 的增加而不同的曲线簇。当 $I_G=0$ 时,逐渐增大阳极电压 U_A ,只有很小的正向漏电流,晶闸管正向阻断;随着阳极电压的增加,当达到正向转折电压 U_{BO} 时,漏电流突然剧增,晶闸管由正向阻断突变为正向导通状态。这种在 $I_G=0$ 时,依靠增大阳极电压而强迫晶闸管导通的方式称为“硬开通”。多次“硬开通”会使晶闸管损坏,因此正常情况下是不允许的。

随着门极电流 I_G 的增大,晶闸管的正向转折电压 U_{BO} 迅速下降,当 I_G 足够大时,晶闸管的正向转折电压降至极小,此时晶闸管像整流二极管一样,只要很小的正向阳极电压就能使晶闸管导通,我们称这种导通为触发导通。导通后的晶闸管的伏安特性与二极管的正向特性相似,即流过管子的阳极电流大,而晶闸管的正向压降很小。

晶闸管正向导通后,要使晶闸管恢复阻断,只有逐步减小阳极电流 I_G ,当 I_G 下降到小于维持电流 I_H (维持晶闸管导通的最小电流)时,晶闸管由正向导通状态变为正向阻断状态。

图 2-4 中各物理量的含义如下:

U_{DRM} 、 U_{RRM} ——正、反向断态重复峰值电压;

U_{DSM} 、 U_{RSM} ——正、反向断态不重复峰值电压;