

面向21世纪

高职高专系列教材

变频技术 原理与应用

◎吕汀 石红梅 编

◎梁栋 审

51



 **机械工业出版社**
CHINA MACHINE PRESS

面向 21 世纪高职高专系列教材

变频技术原理与应用

吕 汀 石红梅 编
梁 栋 审



机械工业出版社

本书内容主要包括:变频技术的基础知识、电力电子器件、交—直—交变频技术、脉宽调制技术、交—交变频技术、变频技术综合应用、变频器的选用与安装调试等。内容系统、简洁,图文并茂,实用性较强。

本书适用于高职高专院校的师生,也适用于中等职业技术学校的学生使用,同时也可供机电一体化及电气技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

变频技术原理与应用/吕汀,石红梅编. —北京:机械工业出版社,2003.1
(面向21世纪高职高专系列教材)
ISBN 7-111-11364-0

I. 变… II. ①吕…②石… III. 变频调速-高等学校:技术学校-教材 IV. TM921.51

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第099063号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
策 划:胡毓坚 版式设计:冉晓华 责任校对:程俊巧
责任编辑:周艳娟 责任印制:闫 焱
北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行
2003年2月第1版·第1次印刷
1000mm×1400mm B5·10.625印张·437千字
0 001—5 000册
定价:25.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010)68993821、88379646
封面无防伪标均为盗版

面向 21 世纪高职高专 机电专业系列教材编委会成员名单

顾	问	王文斌	陈瑞藻	李 奇	冯炳尧	
主 任 委 员		吴家礼				
副主任委员		朱家健	任建伟	孙希羚	梁 栋	张 华
		帕尔哈提	朱建风			
委	员	刘靖华	韩满林	丛晓霞	朱旭平	陈永专
		吕 汀	刘靖岩	刘桂荣	杨新友	陈剑鹤
		张 伟	何彦廷	陶若冰	陈志刚	
秘 书 长		胡毓坚				
副 秘 书 长		郝秀凯				

出版说明

积极发展高职高专教育,完善职业教育体系,是我国职业教育改革和发展的一项重要任务。为了深化职业教育的改革,推进高职高专教育的发展,培养21世纪与我国现代化建设要求相适应的,并在生产、管理、服务第一线从事技术应用、经营管理、高新技术设备运作的高级职业技术应用型人才,尽快组织一批适应高职高专教学特色的教材,已成为各高职高专院校的迫切要求。为此,机械工业出版社与高职高专计算机专业、电子技术专业和机电专业教材编委会联合组织了全国40多所院校的骨干教师,共同研究开发了一批计算机专业、电子技术专业和机电专业的高职高专系列教材。

各编委会确立了“根据高职高专学生的培养目标,强化实践能力和创新意识的培养,反映现代职业教育思想、教育方法和教育手段,造就技术实用型人才为立足点”的编写原则。力求使教材体现“定位准确、注重能力、内容创新、结构合理和叙述通俗”的编写特色。

本套系列教材是由高职高专计算机专业、电子技术专业、机电专业教材编委会分别会同各院校第一线专业教师针对高职高专计算机、电子技术和机电各专业的教学现状和教材存在的问题开展研讨,尤其针对目前高职高专教学改革的新情况,分别拟定各专业的课程设置计划和教材选题计划。在教材的编制中,将教学改革力度比较大、内容新颖、有创新精神、比较适合教学、需要修编的教材以及院校急需、适合社会经济发展的新选题优先列入选题规划。在广泛征集意见及充分讨论的基础上,由各编委会确定每个选题的编写大纲和编审人员,实行主编负责制,编委会通过责任编辑和主审对教材进行质量监控。

担任本套教材编写的老师们都是来自各高职高专院校教育第一线的教师,他们以高度的责任感和使命感,经过近一年的努力,终于将本套教材呈现在广大读者面前。由于高职高专教育还处于起步阶段,加上我们的水平和经验有限,在教材的选题和编审中可能出现这样那样的问题,希望使用这套教材的教师和学生提出宝贵的意见和建议,以利我们今后不断改进,为我国的高职高专教育事业的繁荣而共同努力。

高职高专系列教材编委会
机械工业出版社

前 言

在现代工业和经济生活中，随着电子技术的应用，自动化、节能化和系统化得到了迅速的发展。伴随着电力电子技术、微电子技术及现代控制理论的发展，变频技术已广泛应用于各个领域，并且日新月异：如从最初的整流、交直流可调电源等已发展到直流输电、不同频率电网系统的连接、静止无功功率补偿和谐波吸收、超导电抗器的电力储存、高频输电；在运输及产业行业正在以交流电动机调速逐步代替直流电动机调速，进而还应用到超导磁悬浮列车、高速铁路、电动汽车、产业用机器人；在家用电器方面有变频空调、变频洗衣机、变频电动自行车等；军事方面则有通信、导航、雷达、宇宙设备的小型轻量化电源等；石油行业已实现了采油的调速、超声波驱动等。

本书共分两大部分：第一部分（第1~5章）主要介绍变频技术概念、电力电子器件、交一直—交变频技术、脉宽调制技术、交—交变频技术等；第二部分（第6~8章）主要介绍变频技术在一些领域的应用、变频器的选择和容量计算、变频器的安装调试等。推荐学时为60~70学时（带*号的章节为选学内容）。

本书第1、6、7、8章由吕汀编写，第2、3、4、5章由石红梅编写，吕汀统稿，由梁栋审稿。

限于水平与经验，疏漏与错误之处在所难免，望广大读者批评指正。

编 者

目 录

出版说明

前言

第 1 章 概述	1
1.1 变频技术	1
1.2 变频技术的发展	1
1.3 小结	3
1.4 习题	4
第 2 章 电力电子器件	5
2.1 半控型电力电子器件	5
2.1.1 晶闸管的特性及参数	5
2.1.2 晶闸管触发电路	12
2.1.3 数字触发器	25
2.1.4 晶闸管的串并联与保护	29
*2.1.5 工程应用实例	44
2.2 门极关断 (GTO) 晶闸管	50
2.2.1 GTO 晶闸管的特性及参数	51
2.2.2 GTO 晶闸管的门极驱动电路	55
2.2.3 缓冲电路	62
*2.2.4 工程应用实例	64
2.3 功率晶体管 (GTR)	67
2.3.1 GTR 的结构及特性参数	67
2.3.2 GTR 的驱动电路	71
2.3.3 GTR 的保护电路	76
2.4 MOS 器件	77
2.4.1 功率 MOSFET	77
2.4.2 MOS 门控晶闸管	90
*2.4.3 工程应用实例	91
2.5 绝缘栅双极型晶体管 (IGBT)	93
2.5.1 IGBT 的结构特点	93
2.5.2 IGBT 的主要参数与基本特性	94
2.5.3 IGBT 的驱动与保护技术	95
*2.5.4 工程应用实例	107
2.6 功率集成电路 (PIC)	110

2.6.1 PIC 技术	110
2.6.2 智能功率模块	114
2.7 小结	119
2.8 习题	120
第3章 交一直一交变频技术	121
3.1 交一直一交变频的基本电路	121
3.1.1 交一直一交电压型变频	121
3.1.2 交一直一交电流型变频	127
3.2 脉冲调制型变频	132
3.3 谐振型变频	133
3.3.1 谐振直环节逆变器的基本原理	133
3.3.2 谐振直环节逆变电路举例	136
* 3.4 工程应用实例	140
3.5 小结	141
3.6 习题	142
第4章 脉宽调制技术	143
4.1 PWM 方法与控制技术	144
4.1.1 PWM 控制的基本原理	144
4.1.2 PWM 型逆变电路的控制方式	148
4.2 SPWM 逆变器的控制技术	150
4.2.1 SPWM 逆变器及其控制模式	150
4.2.2 具有消除谐波功能的 SPWM 控制模式的优化	152
4.2.3 用于 SPWM 控制的专用芯片与微处理器	154
4.3 电流跟踪型 PWM 逆变器控制技术	159
4.3.1 电流跟踪型 PWM 逆变器的运行原理	159
4.3.2 开关频率恒定的电流跟踪型 PWM 控制技术	160
4.4 PWM 变频技术在调速控制系统中的应用	161
4.4.1 PWM 控制信号的产生	162
4.4.2 PWM 逆变器的主电路与驱动电路	164
4.4.3 反馈信号的测取	165
4.4.4 IGBT-SPWM 变频调速系统	167
4.4.5 IGBT 高速变频器	170
4.5 小结	171
4.6 习题	172
第5章 交—交变频技术	173
5.1 交—交变频的工作原理	173
5.1.1 工作原理及运行方式	173
5.1.2 主电路型式及控制方法	177

5.1.3 功率器件的电压、电流容量	185
5.2 交—交变频类型	186
5.2.1 矩形波交—交变频	186
5.2.2 正弦波交—交变频	188
5.3 小结	192
5.4 习题	192
第6章 变频技术综合应用	193
6.1 变频技术应用概述	193
6.2 变频技术在照明和电源设备上的应用	197
6.2.1 高频照明技术	197
6.2.2 高频镇流器类型	200
6.2.3 镇流器鉴别	207
6.2.4 变频电源	208
6.2.5 不间断电源 (UPS)	209
6.2.6 单相在线式 UPS 典型实例	210
6.2.7 UPS 发展方向	214
6.2.8 集成一体化电源	215
6.3 变频技术在空调设备上的应用	217
6.3.1 中央空调	217
6.3.2 用于空调设备的冷水泵	220
6.3.3 家用空调	222
6.4 变频技术在机床设备上的应用	225
6.4.1 数控机床	225
6.4.2 车床	227
6.4.3 磨床	229
6.5 变频技术在电梯设备上的应用	235
6.5.1 概述	235
6.5.2 电梯	236
6.5.3 电梯的控制方式	238
6.5.4 自动扶梯	240
6.6 变频技术在生产线中的应用	241
6.6.1 胶片生产线	241
6.6.2 喷涂生产线的吸排气装置	243
6.7 变频技术在无刷电动自行车上的应用	244
6.7.1 无刷电动机的结构和工作原理	244
6.7.2 变频调速控制器原理	245
6.8 变频技术在洗衣机中的应用	248
6.9 变频调速技术在教学实验设备中的应用	249

6.10	小结	251
6.11	习题	251
第 7 章	变频器的选择和容量计算	252
7.1	变频器的分类	252
7.2	变频器的选择	253
7.2.1	不同控制对象时变频器的选择	254
7.2.2	要求响应快、精度高时变频器的选择	265
7.2.3	负负载及冲击负载时变频器的选择	270
7.3	变频器容量计算	277
7.3.1	根据电动机电流选择变频器容量	277
7.3.2	输出电压	280
7.3.3	输出频率	280
7.3.4	保护结构	280
7.3.5	U/f 模式	281
7.3.6	电网与变频器的切换	281
7.3.7	瞬停再起动	281
7.4	小结	281
7.5	习题	282
第 8 章	变频器的安装接线、调试与维修	283
8.1	变频器的原理框图及接线	283
8.1.1	变频器的基本结构	283
8.1.2	变频器的原理框图和接线图	283
8.2	变频调速系统的主电路	289
8.3	主电路电线	293
8.4	变频器的控制电路	295
8.5	控制电路电线	295
8.6	变频器的安装	298
8.6.1	设置场所	298
8.6.2	使用环境	298
8.6.3	安装环境	299
8.6.4	安装方法	302
8.7	变频器的抗干扰	303
8.8	变频调速系统的调试	304
8.8.1	通电前的检查	304
8.8.2	变频器的功能预置	304
8.8.3	电动机的空载试验	308
8.8.4	调速系统的负载试验	308
8.9	变频器的维修与检查	309

8.9.1 测量变频器电路时仪表类型的选择	309
8.9.2 变频器的维修	309
8.9.3 变频器的检查	310
8.10 变频器的保护功能及故障诊断	313
8.10.1 保护功能	313
8.10.2 保护功能动作时的诊断	315
8.10.3 变频器的故障检修	315
8.11 变频器实例	317
8.11.1 VACON NX 系列变频器	317
8.11.2 中达斯米克电气电子有限公司的 VFD-007V23A 变频器	318
8.11.3 安圣电气有限公司 TD2100 供水专用变频器	323
*8.12 目前我国变频器市场状况	327
8.13 小结	328
8.14 习题	328
参考文献	329

第 1 章 概 述

1.1 变频技术

变频技术, 简单地说就是把直流电逆变成不同频率的交流电, 或是把交流电变成直流电再逆变成不同频率的交流电, 或是把直流电变成交流电再把交流电变成直流电。总之这一切都是电能不发生变化, 而只有频率的变化。

变频技术的类型主要有以下几种:

(1) 交一直变频技术(即整流技术), 它是通过二极管整流、二极管续流或晶闸管、功率晶体管可控整流实现交一直(0Hz)功率转换。这种转换多属于工频整流。

(2) 直一直变频技术(即斩波技术), 它是通过改变电力电子器件的通断时间, 即改变脉冲的频率(定宽变频), 或改变脉冲的宽度(定频调宽), 从而达到调节直流平均电压的目的。

(3) 直—交变频技术, 电子学中称振荡技术, 电力电子学中称逆变技术。振荡器利用电子放大器件将直流电变成不同频率的交流电甚至电磁波。逆变器则利用功率开关将直流电变成不同频率的交流电。如果输出的交流电频率、相位、幅值与输入的交流电相同, 称为有源变频技术; 否则称为无源变频技术。

(4) 交—交变频技术(即移相技术)。它通过控制电力电子器件的导通与关断时间, 实现交流无触点开关、调压、调光、调速等目的。

变频技术随着微电子学、电力电子技术、电子计算机技术、自动控制理论等的不断发展而发展, 现已进入了一个崭新的时代, 其应用也越来越普及。从起初的整流、交直流可调电源等已发展至高压直流输电、不同频率电网系统的连接、静止无功功率补偿和谐波吸收、超导电抗器的电力储存等。在运输业、石油行业、家用电器、军事等领域得到了广泛的应用。如超导磁悬浮列车、高速铁路、电动汽车、机器人; 采油的调速、超声波驱油; 变频空调、变频洗衣机、变频微波炉、变频电冰箱; 军事通信、导航、雷达、宇宙设备的小型化电源等。

1.2 变频技术的发展

纵观变频技术的发展, 其中主要是以电力电子器件的发展为基础的。第一代以晶闸管为代表的电力电子器件出现于 20 世纪 50 年代。1956 年贝尔实验室发明了晶闸管, 1958 年通用电气公司推出商品化产品。它主要是电流控制型开关器件, 以小电流控制大功率的变换, 但其开关频率低, 只能导通而不能自关断。

第二代电力电子器件以电力晶体管(GTR)和门极关断(GTO)晶闸管为代表,

在 20 世纪 60 年代发展起来。它是一种电流型自关断的电力电子器件，可方便地实现变频、逆变和斩波，其开关频率只有 1~5kHz。

第三代电力电子器件以双极性绝缘栅晶体管（IGBT）和电力场效应晶体管（MOSFET）为代表，在 20 世纪 70 年代开始应用。它是一种电压（场控）型自关断的电力电子器件，具有在任意时刻用基极（栅极、门极）信号控制导通和关断的功能。其开关频率达到了 20kHz 甚至 200kHz 以上，为电气设备的高频化、高效化、小型化创造了条件。

第四代电力电子器件，有出现于 20 世纪 80 年代末的智能化功率集成电路（PIC）和 20 世纪 90 年代的智能功率模块（IPM）、集成门极换流晶闸管（IGCT）。它们实现了开关频率的高速化、低导通电压的高性能化及功率集成电路的大规模化，包括了逻辑控制、功率、保护、传感及测量等电路功能。

图 1-1 所示为电力电子器件“树”。图 1-2 所示为电力电子器件图。

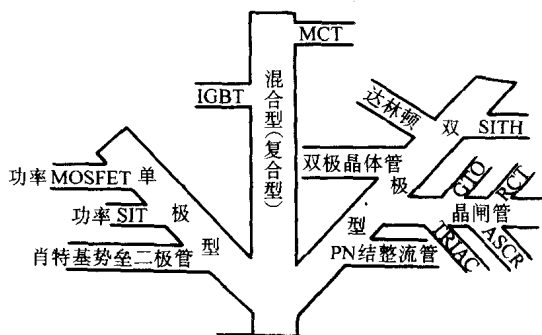


图 1-1 电力电子器件“树”

经过 40 多年的发展，电力电子技术已成为一门多学科的边缘技术，它包含交流电路、电力电子器件、计算机辅助设计、模拟电子学和数字电子学、微型计算机、控制理论、超小规模集成电路、高频技术和电磁兼容等。

电力电子技术的发展方向是：高电压大容量化、高频化、组件模块化、小型化、智能化和低成本化。应用的技术有：脉宽调制（PWM）、滑模控制、非线性变换、功能控制及交流电动机矢量控制、直接转矩控制、模糊控制和自适应控制等。

变频技术应用最广的是变频器。通用变频器发展趋势是：

(1) 数控化。采用新型电脑控制，例如日本富士公司的大于等于 30kW 变频器，采用两个 16 位 CPU，一个用于转矩计算，另一个用于数据处理，实现了转矩限定、转差补偿控制、瞬时停电的平稳恢复、自动加/减速控制及故障自诊断等。对于小于等于 22kW 变频器采用一个 32 位数字信号处理器（DSP），提高了计算、检测和响应的速度，扩充和加强了其处理功能。

(2) 高频化。为适应纺织和精密机械等更多领域的高速需求，变频器的频率已由过去的 0~50~120Hz，发展到 400Hz，目前已提高到 600~1000Hz，甚至 3kHz 以上。

(3) 数显化。由过去的指示灯、发光二极管、LED 数码管，发展到目前的液晶显示 (LCD)，显示行数有 1、2、3、4 行等。

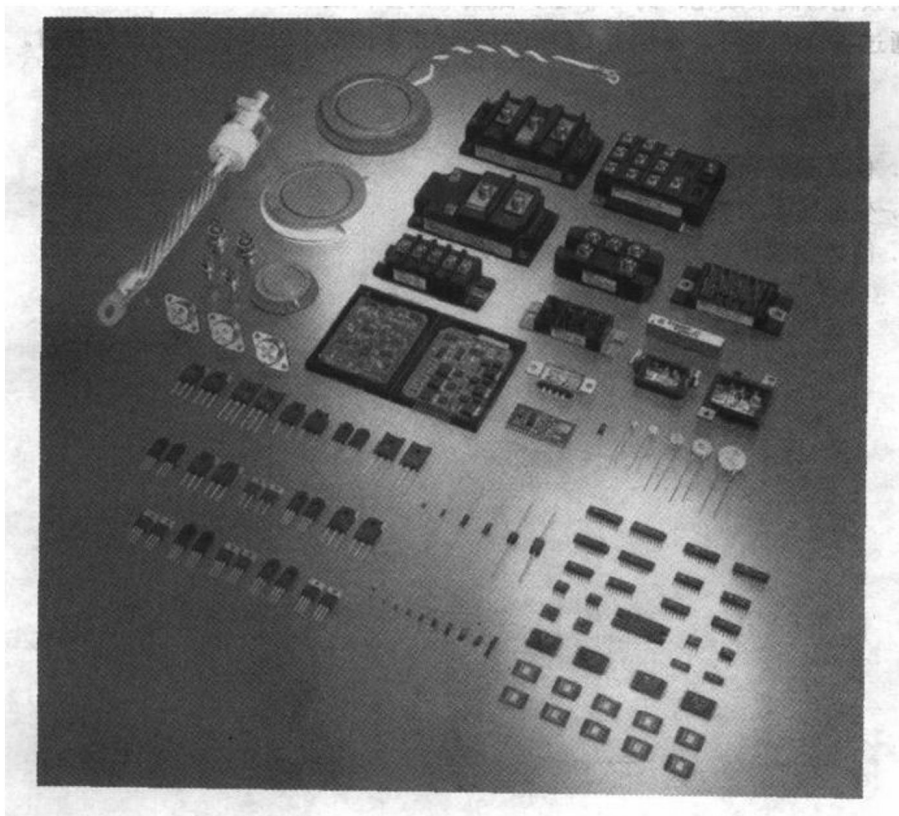


图 1-2 电力电子器件

(4) 高集成化。提高集成片技术及采用表面贴片技术，使装置的容量体积比得到进一步提高。

(5) 强化适应性。允许环境温度由过去普遍的 $0\sim 40^{\circ}\text{C}$ 扩展为 $-10\sim +50^{\circ}\text{C}$ (50°C 时须卸下顶盖板)。允许相对湿度也由过去的 80% 提高到 90% 以上。有些户外场合，特别是军事部门都提出了全天候要求。

总之，变频技术的发展趋势是朝着高度集成化、采用表面安装技术、转矩控制高性能化、保护功能健全、操作简便化、驱动低噪声化、高可靠性、低成本和小型化的方向发展。

1.3 小结

变频技术是一门能够将电信号的频率，按照具体电路的要求，而进行变换的应用型技术。变频技术分为交一直、直一直、直一交、交一交四种变换类型，广泛应

用于不同的领域。

随着电力电子器件的发展，变频技术日新月异。其中，应用最广的是变频器，将向着高频化、高集成化、高可靠性、低成本的方向发展。

通过本章的学习，使学生了解有关变频技术的概念及其发展过程与方向。

1.4 习题

1. 什么是变频技术？
2. 变频技术的类型有哪几种？
3. 简述变频技术的发展趋势。

第 2 章 电力电子器件

电力电子器件是电力电子技术的物质基础和技术关键,通用变频器的发展离不开电力电子器件性能的提高和门类的更新。本章从应用的角度出发,对电力电子器件的种类、性能及应用等加以介绍。

2.1 半控型电力电子器件

半控型电力电子器件主要是指晶体闸流管(简称晶闸管)。“半控”的含义是指晶闸管可以被控制导通,而不能用门极控制关断。由于晶闸管耐压高、电流大、抗冲击能力强,所以即使全控型电力电子器件在飞速地发展,它仍具有很强的生命力。

2.1.1 晶闸管的特性及参数

1. 晶闸管的特性

晶闸管(Thyristor)^①是最早开发的电力电子器件。它相当于一个可以控制接通的导电开关。从使用的角度来说,最关心的是它的特性。

(1) 晶闸管的伏安特性

晶闸管的结构如图 2-1 所示。晶闸管有三个引线端子:阳极 A(anode)、阴极 K(cathode)和门极 G(gate),有三个 PN 结。晶闸管阳极与阴极间的电压和它的阳极电流之间的关系,称为晶闸管的伏安特性,如图 2-2 所示。位于第 I 象限的是正向特性,位于第 III 象限的是反向特性。

当门极电流 $I_G=0$ 时,如果在晶闸管两端施加正向电压,则 J_2 结处于反偏,晶闸管处于正向阻断状态,只流过很小的正向漏电流。如果正向电压超过临界极限即正向转折电压 U_{bo} 时,则漏电流急剧增大,晶闸管导通。随着门极电流幅值的增大,正向转折电压降低。导通后晶闸管特性和二极管的正向特性相仿,即使通过较大的阳极电流,晶闸管本身的压降很小。导通期间,如果门极电流为零,并且阳极电流降到维持电流 I_H 以下,则晶闸管又回到正向阻断状态。当在晶闸管上施加反向电压时,晶闸管的 J_1 、 J_3 结呈现反偏状态,这时伏安特性类似二极管的反向特性。晶闸管处于反向阻断状态时,只有极小的反向漏电流流过,当反向电压超过反向击穿电压后,反向漏电流便急剧增大,导致晶闸管反向击穿而损坏。

① 普通晶闸管(Thyristor)曾称为硅可控整流器(SCR,简称可控硅),但为方便起见,往往仍沿用 SCR 表示普通晶闸管。

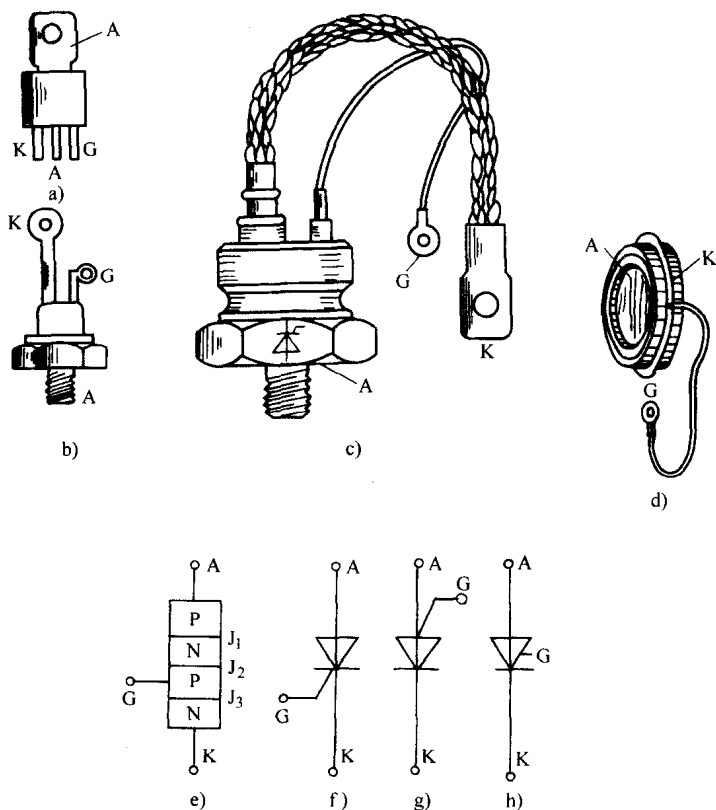


图 2-1 晶闸管的结构及电路图形符号

a) 小电流塑封式 b) 小电流螺旋式 c) 大电流螺旋式 d) 大电流平板式 e) 内部结构 f) P 型门极、阴极侧受控电路图形符号 g) N 型门极、阳极侧受控电路图形符号 h) 晶闸管电路图形符号

(2) 晶闸管的门极伏安特性

在给晶闸管施加正向阳极电压的情况下，若再给门极加入适当的控制信号，可使晶闸管由阻断变为导通。

晶闸管的门极和阴极之间是一个 PN 结 J_3 ，它的伏安特性称为门极伏安特性。实际产品的门极伏安特性分散性很大，为了应用方便，常以一条典型的极限高阻门极伏安特性和一条极限低阻门极伏安特性之间的区域来代表，称之为门极伏安特性区域。图 2-3 示出 500A 晶闸管门极伏安特性区域（右边图为放大图），图中各符号的名称和数值见表 2-1。曲线 OD 和 OG 分别为极限低阻和极限高阻伏安特性。放大图中的 $OHIJO$ 的范围称为不触发区，任何合格器件在额定结温（PN 结温度）时，其门极信号在此区域中都不会被触发。 $OABCO$ 的范围称为不可靠触发区，在室温下，此区域内有些器件被触发，而对于触发电流或电压较高的器件来说，触发是不可靠的。图中 $ADEFGCBA$ 称为可靠触发区，对于正常使用的器件，其门极触发电流和