

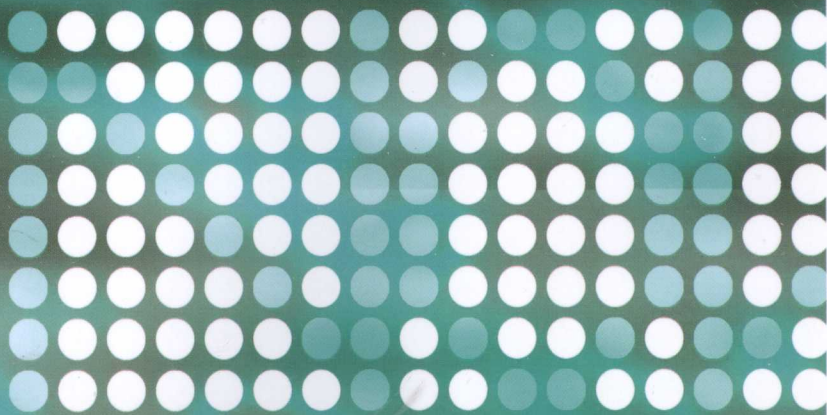


普通高等教育“十一五”国家级规划教材
高等职业技术教育机电类专业规划教材

变频器原理及应用

第2版

王廷才 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



赠电子课件



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
高等职业技术教育机电类专业规划教材

变频器原理及应用

第 2 版

主 编 王廷才
副主编 胡雪梅
参 编 王崇文 霍大勇
 马 林
主 审 宋峰青



机械工业出版社

本书采用理论与应用相结合的方式,深入浅出地阐述了变频器常用电力电子器件,变频器的基本组成原理和控制方式,电动机变频调速机械特性,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、空气压缩机、水泵、中央空调及提升机等方面的应用实例等内容。

本书内容通俗易懂、注重实用,没有高深的理论分析及数学运算,从实用的角度列举了多种应用实例,具有很高的参考价值。

本书可作为高职高专院校自动化类、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。

为方便教学,本书配有免费电子课件,凡选用本书作为教材的学校,均可来电索取,咨询电话:010-88379375, E-mail: cmpgaozhi@sina.com。

图书在版编目(CIP)数据

变频器原理及应用/王廷才主编. —2版. —北京:
机械工业出版社, 2009.7

普通高等教育“十一五”国家级规划教材. 高等职业
技术教育机电类专业规划教材

ISBN 978-7-111-27593-0

I. 变… II. 王… III. 变频器—高等学校: 技术
学校—教材 IV. TN773

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 116473 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 于宁 责任编辑: 王宗锋 版式设计: 霍永明

责任校对: 陈延翔 封面设计: 鞠杨 责任印制: 李妍

北京铭成印刷有限公司印刷

2009 年 8 月第 2 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 14.5 印张 · 354 千字

0001—4000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-27593-0

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

销售服务热线电话:(010)68326294

购书热线电话:(010)88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010)88379758

封面无防伪标均为盗版

前 言

本书是《变频器原理及应用》的修订版，为普通高等教育“十一五”国家级规划教材、高等职业技术教育机电类专业规划教材，可作为高职高专院校自动化类、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。

变频器是电气传动控制系统的重要组成部分，由于其具有低功耗、高效率和控制电路简单等显著优点，被广泛应用于多种电气设备的传动系统中。《变频器原理及应用》自2005年由机械工业出版社出版以来，被全国诸多院校选为教材，得到众多从事电气设备和电气自动化的工程技术人员的高度评价，同时他们也提出了许多很好的建议。随着科学技术的高速发展，具有更佳性能指标的新型变频器不断涌现，本书就是根据最新的变频器技术对原书中的部分内容加以修订，同时，为方便高职高专院校进行工学结合教学改革，添加了7个应用性强的实训项目指导。

本书内容主要包括：变频器常用电力电子器件，变频器组成原理，电动机变频调速机械特性，变频器的控制方式，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、空气压缩机和物料传送等方面的应用实例，变频器技术实训指导等。

本书由河南工业职业技术学院王廷才任主编，胡雪梅任副主编。其中第1~2章由胡雪梅编写，第3~5章由霍大勇编写，第6、12章由马林编写，第7~8章由北京理工大学王崇文编写，其余由王廷才编写。深圳技师学院宋峰青高级技师在百忙中仔细认真地审阅了全书，提出了许多宝贵的意见。在编写过程中，作者参考了多家变频器制造企业提供的产品资料，参阅了许多同行专家的编著文献，在此一并表示诚挚谢意。

编 者

目 录

前言

第 1 章 概述	1
1.1 变频器技术的发展	1
1.1.1 电力电子器件是变频器发展的基础	1
1.1.2 计算机技术和自动控制理论是变频器发展的支柱	1
1.1.3 市场需求是变频器发展的动力	1
1.1.4 变频器的发展趋势	2
1.2 变频器的分类	2
1.2.1 按原理分类	3
1.2.2 按控制方式分类	4
1.2.3 按用途分类	5
1.3 变频器的应用	5
1.3.1 在节能方面的应用	5
1.3.2 在自动化系统中的应用	6
1.3.3 在提高工艺水平和产品质量方面的应用	6
本章小结	6
习题 1	7
第 2 章 变频器常用电力电子器件	8
2.1 功率二极管	8
2.1.1 功率二极管的结构与伏安特性	8
2.1.2 功率二极管的主要参数	9
2.1.3 功率二极管的选用	9
2.1.4 功率二极管的分类	10
2.2 晶闸管	10
2.2.1 晶闸管的结构	10
2.2.2 晶闸管的导通和阻断控制	11
2.2.3 晶闸管的阳极伏安特性	11
2.2.4 晶闸管的参数	12
2.2.5 晶闸管的门极伏安特性及主要参数	12
2.2.6 晶闸管触发电路	13
2.2.7 晶闸管的保护	13
2.3 门极可关断(GTO)晶闸管	15
2.3.1 GTO 晶闸管的结构与工作原理	15
2.3.2 GTO 晶闸管的特性与主要参数	15
2.3.3 GTO 晶闸管的门极控制	16
2.3.4 GTO 晶闸管的缓冲电路	17
2.4 电力晶体管(GTR)	18
2.4.1 GTR 的结构	18
2.4.2 GTR 的参数	18
2.4.3 二次击穿现象	19
2.4.4 GTR 的驱动电路	19
2.4.5 GTR 的缓冲电路	20
2.5 功率 MOS 场效应晶体管(P-MOSFET)	21
2.5.1 P-MOSFET 的结构	21
2.5.2 P-MOSFET 的工作原理	21
2.5.3 P-MOSFET 的特性	21
2.5.4 P-MOSFET 的主要参数	23
2.5.5 P-MOSFET 的栅极驱动	23
2.5.6 P-MOSFET 的保护	24
2.6 绝缘栅双极型晶体管(IGBT)	25
2.6.1 IGBT 的结构与基本工作原理	25
2.6.2 IGBT 的基本特性	25
2.6.3 IGBT 的主要参数	26
2.6.4 IGBT 的驱动电路	27
2.7 集成门极换流晶闸管(IGCT)	27
2.7.1 IGCT 的结构与工作原理	27
2.7.2 IGCT 的特点	28
2.7.3 IGCT 变频器	29
2.8 智能功率模块(IPM)	30
2.8.1 IPM 的结构	30
2.8.2 IPM 的主要特点	30



2.8.3 IPM 选择的注意事项	30	5.1.3 高(中)压变频器的应用	54
本章小结	32	5.1.4 高(中)压变频器的技术要求	55
习题 2	32	5.2 高(中)压变频器的主电路结构	56
第 3 章 交-直-交变频技术	33	5.2.1 晶闸管电流型变频器	56
3.1 整流电路	33	5.2.2 GTO 晶闸管电流型变频器	57
3.1.1 不可控整流电路	33	5.2.3 IGBT 并联多重化 PWM 电压型变频器	57
3.1.2 可控整流电路	34	5.2.4 IGBT 三电平高(中)压变频器	58
3.2 中间电路	36	5.2.5 五电平高(中)压变频器	60
3.2.1 滤波电路	36	5.2.6 IGBT 功率单元多级串联电压型变频器	61
3.2.2 制动电路	37	5.3 高压变频器对电动机的影响及防治措施	62
3.3 逆变电路的工作原理及基本形式	38	5.3.1 输出谐波对电动机的影响及防治措施	63
3.3.1 逆变电路的工作原理	38	5.3.2 输出电压变化率对电动机的影响及防治措施	63
3.3.2 逆变电路的基本形式	39	5.3.3 共模电压对电动机的影响及防治措施	63
3.4 SPWM 控制技术	40	本章小结	64
3.4.1 概述	40	习题 5	64
3.4.2 SPWM 控制的基本原理	40	第 6 章 变频器的组成与功能	65
3.4.3 SPWM 逆变电路的控制方式	42	6.1 变频器的组成及接线端子	65
3.4.4 SPWM 逆变器的调制方式	43	6.1.1 变频器的外形	65
3.4.5 SPWM 波形成的方法	43	6.1.2 变频器的结构	65
本章小结	44	6.1.3 变频器的外部连接端子	68
习题 3	44	6.2 变频器的主要功能参数及预置	73
第 4 章 交-交变频技术	46	6.2.1 变频器运行前的功能参数预置	73
4.1 单相输出交-交变频电路	46	6.2.2 变频器的运行功能参数	74
4.1.1 电路组成及基本工作原理	46	6.2.3 优化特性功能及预置	76
4.1.2 感性负载时的相控调制	47	6.2.4 变频器的保护功能及预置	79
4.1.3 输入输出特性	48	6.3 变频器的频率参数及预置	81
4.2 三相输出交-交变频电路	49	6.3.1 各种基本频率参数	81
4.2.1 公共交流母线进线方式	49	6.3.2 变频器的其他频率参数	82
4.2.2 输出星形联结方式	49	本章小结	84
4.3 矩形波交-交变频	50	习题 6	84
4.3.1 矩形波交-交变频工作原理	50	第 7 章 变频调速拖动系统	85
4.3.2 换相与换组过程	51	7.1 异步电动机变频调速的原理	85
本章小结	52		
习题 4	52		
第 5 章 高(中)压变频器	53		
5.1 高(中)压变频器概述	53		
5.1.1 高(中)压变频器的分类	53		
5.1.2 高(中)压变频调速系统的基本形式	53		

7.1.1 异步电动机变频调速工作 原理	85	习题 8	108
7.1.2 三相异步电动机的机械特性	85	第 9 章 变频调速系统的选择与 操作	110
7.1.3 三相异步电动机的起动	86	9.1 变频器的选择	110
7.1.4 三相异步电动机的制动	86	9.1.1 笼型电动机	110
7.2 异步电动机的调速方式	87	9.1.2 绕线转子异步电动机	112
7.2.1 异步电动机的调速	87	9.1.3 变频器专用电动机	112
7.2.2 异步电动机的调速方式	88	9.2 变频调速系统的主电路及电器 选择	113
7.3 对不同负载类型变频器的选择	90	9.2.1 断路器	115
7.3.1 恒转矩负载变频器的选择	90	9.2.2 接触器	116
7.3.2 恒功率负载变频器的选择	91	9.2.3 输入交流电抗器	116
7.3.3 二次方律负载变频器的选择	92	9.2.4 无线电噪声滤波器	117
7.3.4 直线律负载变频器的选择	93	9.2.5 制动电阻及制动单元	117
7.3.5 特殊性负载变频器的选择	94	9.2.6 直流电抗器	118
本章小结	95	9.2.7 输出交流电抗器	119
习题 7	95	9.3 变频调速系统的控制电路	119
第 8 章 变频器的控制方式	96	9.3.1 变频器控制电路的主要组成	119
8.1 U/f 控制	96	9.3.2 正转控制电路	119
8.1.1 U/f 控制原理	96	9.3.3 正、反转控制	121
8.1.2 恒 U/f 控制方式的机械特性	96	9.3.4 升速与降速控制	122
8.1.3 对额定频率 f_N 以下变频调速 特性的修正	98	9.3.5 变频与工频切换的控制电路	122
8.1.4 U/f 控制的功能	99	9.3.6 变频器的程序控制	123
8.2 转差频率控制	100	9.4 外接给定电路	125
8.2.1 转差频率控制原理	101	9.4.1 频率给定信号的方式和电路	125
8.2.2 转差频率控制的系统构成	101	9.4.2 频率给定线	126
8.3 矢量控制	102	9.5 变频器与 PLC 的连接	127
8.3.1 直流电动机与异步电动机调速 上的差异	102	9.5.1 PLC 与变频器连接时要注意的 问题	127
8.3.2 矢量控制中的等效变换	103	9.5.2 PLC 与变频器连接实现多档转速 控制	129
8.3.3 直角坐标/极坐标变换	105	9.6 变频器“1 控 X”切换技术	131
8.3.4 变频器矢量控制的基本思想	105	9.6.1 “1 控 X”工作过程	131
8.3.5 使用矢量控制的要求	106	9.6.2 “1 控 3”供水电路原理图	131
8.3.6 矢量控制系统的优点和应用 范围	107	9.7 变频器与 PC 的通信	132
8.4 直接转矩控制	107	9.7.1 计算机与变频器的通信连接	132
8.4.1 直接转矩控制系统	107	9.7.2 SB70 变频器的通信协议	132
8.4.2 直接转矩控制的优势	108	9.7.3 变频器的数据格式	133
本章小结	108	9.7.4 变频器的波特率	133



9.7.5 变频器参数编址	133	11.1 变频调速技术在风机上的应用	156
9.7.6 通信中的数据类型	134	11.1.1 风机变频调速驱动机理	156
9.7.7 通信举例	134	11.1.2 风机变频调速系统设计	157
本章小结	135	11.1.3 节能计算	160
习题9	135	11.2 空气压缩机的变频调速及应用	160
第10章 变频器的安装与维护	136	11.2.1 空气压缩机变频调速机理	160
10.1 变频器的储存与安装	136	11.2.2 空气压缩机加、卸载供气 控制方式存在的问题	161
10.1.1 变频器的储存	136	11.2.3 空气压缩机变频调速控制方式 的设计	161
10.1.2 装设场所	136	11.2.4 空气压缩机变频调速控制方式 的安装调试	165
10.1.3 使用环境	136	11.2.5 空气压缩机变频调速后的 效益	165
10.1.4 安装方向与空间	137	11.3 变频器在供水系统节能中的 应用	166
10.1.5 安装方法	137	11.3.1 恒压供水的控制目的	166
10.1.6 接线	138	11.3.2 水泵调速节能原理	166
10.2 变频器的抗干扰	142	11.3.3 变频调速恒压供水系统	167
10.2.1 变频器运行对电网的影响	142	11.3.4 变频调速恒压供水系统 设计	169
10.2.2 变频器对电网影响的抑制	143	11.3.5 经济效益分析	173
10.2.3 变频器对其他设备的干扰及 抑制	143	11.4 中央空调的变频技术及应用	174
10.2.4 电网对变频器干扰的防止	145	11.4.1 中央空调系统的组成	174
10.3 变频器系统的调试	146	11.4.2 水泵节能改造的方案	176
10.3.1 通电前的检查	146	11.4.3 节能分析	178
10.3.2 通电检查	146	11.5 中压变频器在潜水电泵中的 应用	178
10.3.3 空载试验	147	11.5.1 潜水电泵传统供电方式的 不足	178
10.3.4 带负载测试	147	11.5.2 潜水电泵改为变频调速的 优点	179
10.4 变频器的维护与检查	148	11.5.3 潜水电泵变频调速改造 方案	179
10.4.1 维护注意事项	148	11.6 矿用提升机变频调速系统	181
10.4.2 日常检查与维护	148	11.6.1 使用矿用提升机系列变频器的 优点	181
10.4.3 定期检查	149	11.6.2 矿用提升机变频调速系统的 原理	181
10.4.4 零部件更换	149	11.6.3 变频调速系统对原调速系统的	
10.4.5 变频器基本检测和测量 方法	149		
10.4.6 测量仪表简介	150		
10.4.7 变频器主电路的测量	151		
10.5 变频器的常见故障与处理	153		
10.5.1 变频器常见故障的诊断	153		
10.5.2 变频器事故的处理	154		
本章小结	155		
习题10	155		
第11章 变频器应用实例	156		

改造	182	12.3 U/f 控制曲线测试	192
11.6.4 现场应用情况及运行效果	183	12.4 外端子控制正、反转及点动运行 操作	193
11.7 变频器在液态物料传输中的 应用	183	12.5 变频器正、反转运行控制电路的 安装与调试	194
11.7.1 液态物料上下传输系统组成 及其传输程序	183	12.6 变频—工频切换电路的安装与 调试	195
11.7.2 变频器控制液态物料上下传输 系统	183	12.7 变频器—PLC 控制电路的安装与 调试	196
11.7.3 应用范围及效果	185	12.8 综合实训	198
本章小结	185	附录	199
习题 11	186	附录 A 森兰变频器	199
第 12 章 变频器技术实训	187	附录 B 风光变频器	213
12.1 变频器的基本认识	187	参考文献	221
12.2 变频器的基本参数及预置	191		

第 1 章 概 述

变频器是将固定电压、固定频率的交流电变换为可调电压、可调频率的交流电的装置。变频器的问世，使电气传动领域发生了一场技术革命，即交流调速取代直流调速。交流电动机变频调速技术具有节能、改善工艺流程、提高产品质量和便于自动控制等诸多优势，被国内外公认为最有发展前途的调速方式。

1.1 变频器技术的发展

变频器是随着微电子学、电力电子技术、计算机技术和自动控制理论等的不断发展而发展起来的。

1.1.1 电力电子器件是变频器发展的基础

变频器的主电路不论是交-直-交变频或是交-交变频形式，都是采用电力电子器件作为开关器件。因此，电力电子器件是变频器发展的基础。

早期的变频器由晶闸管等分立电子元器件组成，还未采用计算机控制技术，不仅可靠性差、频率低，而且输出的电压和电流的波形是方波。

当电力晶体管(GTR)和门极可关断(GTO)晶闸管问世并成为逆变器的功率器件时，脉宽调制(PWM)技术也进入到应用阶段，这时的逆变电路能够得到相当接近正弦波的输出电压和电流，同时 8 位微处理器成为变频器的控制核心，按压频比(U/f)控制原理实现异步电动机的变频调速，在工作性能上有了很大提高。

后来人们研制出绝缘栅双极晶体管(IGBT)和集成门极换流晶闸管(IGCT)，其优良的性能很快取代了 GTR，进而广泛采用的是性能更为完善的智能功率模块 IPM，使得变频器的容量和电压等级不断扩大和提高。

1.1.2 计算机技术和自动控制理论是变频器发展的支柱

现在，16 位乃至 32 位微处理器取代了 8 位微处理器，使变频器的功能也从单一的变频调速功能发展为包含算术、逻辑运算及智能控制的综合功能；自动控制理论的发展使变频器在改善压频比控制性能的同时，推出了能实现矢量控制、直接转矩控制、模糊控制和自适应控制等多种模式。现代的变频器已经内置有参数辨识系统、PID 调节器、PLC 控制器和通信单元等，根据需要可实现拖动不同负载、宽调速和伺服控制等多种应用。

1.1.3 市场需求是变频器发展的动力

直流调速系统具有良好的调速性能，因此在过去很长一段时间内被广泛使用。直流调速系统的优点主要表现在调速范围广、性能稳定和过载能力强等技术指标上，特别是在低速时仍能得到较大的过载能力，是其他调速方法无法比拟的。但直流调速系统也有着不可避免的

弱点，主要表现在直流电动机结构复杂，要消耗大量有色金属，且换向器及电刷维护保养困难、寿命短、效率低等。

交流电动机结构简单，造价低廉，运行控制比较方便，在工农业生产中得到广泛应用。但在过去很长一段时间内，由于没有变频电源，异步电动机只能工作在不要求变速或对调速性能要求不高的场合。

变频器的问世为交流电动机的调速提供了契机，不仅要取代结构复杂、价格昂贵的直流电动机调速，而且原来由交流电机拖动的负载实现变频调速后能节省大量的能源。

据调查统计，全国各类电动机耗电量约占全国发电量的70%。其中80%为异步电动机，大多数电动机长时间处于轻载运行状态，特别是风机、泵类负载的电动机。若在此类负载上使用变频调速装置，将可节电30%左右。

目前，变频器作为商品在国内的销售额呈逐年增加趋势，销售前景十分看好，据有关资料报道，在过去几年内中国变频器市场保持着12%~15%的增长率，这一速度远远超过了近几年GDP的增长速度，变频器已逐步进入全面推广应用的年代。

1.1.4 变频器的发展趋势

在进入21世纪的今天，电力电子的基片已从Si(硅)变换为SiC(碳化硅)，使电力电子新器件进入到高电压大容量化、高频化、组件模块化、微型化、智能化和低成本化，多种适宜变频调速的新型电气设备正在开发研制之中，IT技术的迅猛发展，以及控制理论不断创新，这些与变频器相关的技术的发展将影响其发展的趋势。

(1) 智能化 智能化的变频器安装到系统后，不必进行那么多的功能设定，就可以方便地操作使用，有明显的工作状态显示，而且能够实现故障诊断与故障排除，甚至可以进行部件自动转换。利用互联网可以遥控监视，实现多台变频器按工艺流程联动，形成最优化的变频器综合管理控制系统。

(2) 专门化 根据某一类负载的特性，有针对性地制造专门化的变频器，这不但利于对负载的电动机进行经济有效的控制，而且可以降低制造成本。例如：风机、水泵用变频器、起重机械专用变频器、电梯控制专用变频器、张力控制专用变频器和空调专用变频器等。

(3) 一体化 变频器将相关的功能部件，如参数辨识系统、PID调节器、PLC控制器和通信单元等有选择地集成到内部组成一体化机，不仅使功能增强，系统可靠性增加，而且可有效缩小系统体积，减少外部电路的连接。据报道，现在已经研制出变频器和电动机的一体化组合机，使整个系统体积更小，控制更方便。

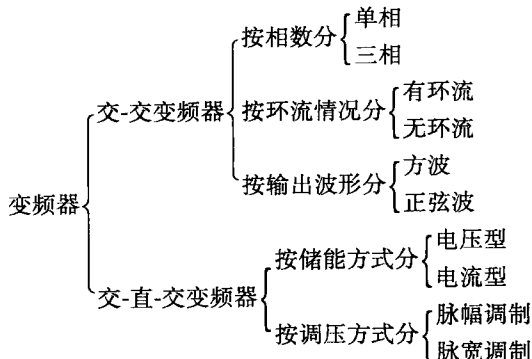
(4) 环保化 保护环境，制造“绿色”产品是人类的新理念。今后的变频器将更侧重于节能和低公害，即尽量减少使用过程中的噪声和谐波对电网及其他电气设备的污染干扰。

总之，变频器技术的发展趋势是朝着智能、操作简便、功能健全、安全可靠、环保低噪、低成本和小型化的方向发展。

1.2 变频器的分类

变频器的种类很多，下面根据不同的分类方法进行简单介绍。

1.2.1 按原理分类



1. 交-交变频器

交-交变频器只有一个变换环节，即把恒压恒频(CVCF)的交流电源转换为变压变频(VVVF)电源，称为直接变频器，或称为交-交变频器。

2. 交-直-交变频器

交-直-交变频器又称为间接变频器，它是先将工频交流电通过整流器变成直流电，再经逆变器将直流电变成频率和电压可调的交流电。图 1-1 所示为交-直-交变频器的原理框图。

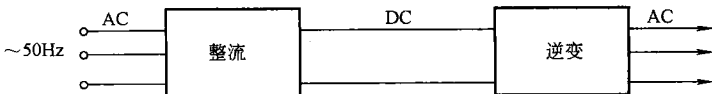


图 1-1 交-直-交变频器的原理框图

1) 交-直-交变频器根据直流环节的储能方式，又分为电压型和电流型两种，如图 1-2 所示。

① 电压型变频器。在电压型变频器中，整流电路产生的直流电压，通过电容进行滤波后供给逆变电路。由于采用大电容滤波，故输出电压波形比较平直，在理想情况下可以看成是一个内阻为零的电压源，逆变电路输出的

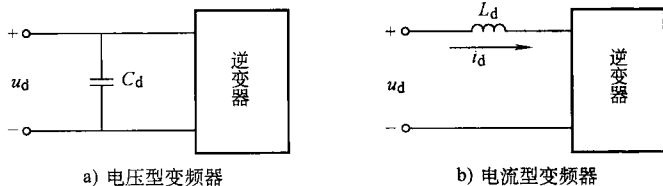


图 1-2 电压型和电流型变频器的主电路结构

电压为矩形波或阶梯波。电压型变频器多用于不要求正反转或快速加减速的通用变频器中。电压型变频器的主电路结构如图 1-2a 所示。

② 电流型变频器。当交-直-交变频器的中间直流环节采用大电感滤波时，直流电流波形比较平直，因而电源内阻很大，对负载来说基本上是一个电流源，逆变电路输出的交流电流是矩形波。电流型变频器适用于频繁可逆运转的变频器和大容量的变频器。电流型变频器的主电路结构如图 1-2b 所示。

2) 根据调压方式的不同，交-直-交变频器又分为脉幅调制和脉宽调制两种。

① 脉幅调制(PAM)。PAM(Pulse Amplitude Modulation)方式，是一种改变电压源的电压 E_d 或电流源的电流 I_d 的幅值进行输出控制的方式。因此，在逆变器部分只控制频率，整流器部分只控制输出电压或电流。采用 PAM 调节电压时，变频器的输出电压波形如图 1-3 所示。

② 脉宽调制(PWM)。PWM(Pulse Width Modulation)方式，指变频器输出电压的大小是

通过改变输出脉冲的占空比来实现的。目前使用最多的是占空比按正弦规律变化的正弦波脉宽调制，即 SPWM 方式。用 PWM 方式调压输出的波形如图 1-4 所示。

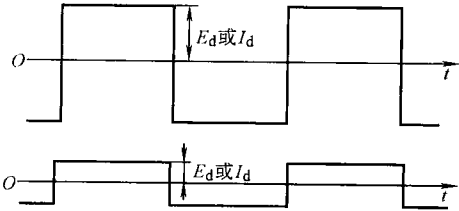


图 1-3 用 PAM 方式调压

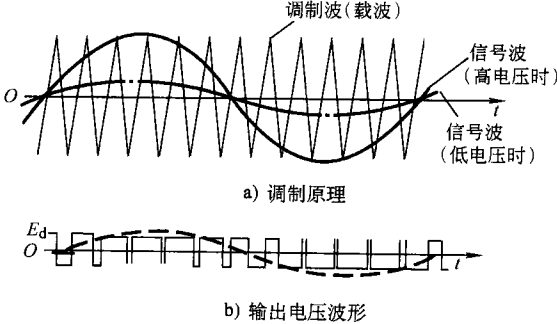


图 1-4 用 PWM 方式调压输出的波形

1.2.2 按控制方式分类

1. U/f 控制变频器

U/f 控制又称为压频比控制。它的基本特点是对变频器输出的电压和频率同时进行控制。在额定频率以下，通过保持 U/f 恒定使电动机获得所需的转矩特性。这种方式的控制电路成本低，多用于精度要求不高的通用变频器。

2. 转差频率控制变频器

转差频率控制也称为 SF 控制，是在 U/f 控制基础上的一种改进方式。采用这种控制方式，变频器通过电动机、速度传感器构成速度反馈闭环调速系统。变频器的输出频率由电动机的实际转速与转差频率之和来自动设定，从而达到在调速控制的同时也使输出转矩得到控制。该方式是闭环控制，故与 U/f 控制相比，调速精度与转矩特性较优。但是由于这种控制方式需要在电动机轴上安装速度传感器，并需依据电动机特性调节转差，故通用性较差。

3. 矢量控制变频器

矢量控制 (Vector Control) 简称 VC，是 20 世纪 70 年代由德国人 Blaschke 首先提出来的对交流电动机一种新的控制思想和控制技术，也是异步电动机的一种理想调速方法。矢量控制的基本思想是将异步电动机的定子电流分解为产生磁场的电流分量 (励磁电流) 和与其垂直的产生转矩的电流分量 (转矩电流)，并分别加以控制。由于在这种控制方式中必须同时控制异步电动机定子电流的幅值和相位，即控制定子电流矢量。这种控制方式被称为矢量控制。

矢量控制方式使异步电动机的高性能成为可能。矢量控制变频器不仅在调速范围上可以与直流电动机相匹敌，而且可以直接控制异步电动机转矩的变化，所以已经在许多需精密或快速控制的领域得到应用。

4. 直接转矩控制

直接转矩控制 (Direct Torque Control) 简称 DTC，它是把转矩直接作为控制量来控制。直接转矩控制的优越性在于：控制转矩是控制定子磁链，在本质上并不需要转速信息；控制上对除定子以外的所有电动机参数变化，有良好的鲁棒性；所引入的定子磁链观测器能很容易

估算出同步速度信息，因而能方便地实现无速度传感器化。

1.2.3 按用途分类

对一般用户来说，更为关心的是变频器的用途，根据用途的不同，对变频器进行如下分类。

1. 通用变频器

顾名思义，通用变频器的特点是其通用性。随着变频技术的发展和市场需要的不断扩大，通用变频器也在朝着两个方向发展：一是低成本的简易型通用变频器；二是高性能多功能的通用变频器。它们分别具有以下特点：

简易型通用变频器是一种以节能为主要目的而简化了一些系统功能的通用变频器。它主要应用于水泵、风扇、鼓风机等对于系统调速性能要求不高的场合，并具有体积小、价格低等方面的优势。

高性能通用变频器在设计过程中充分考虑了在变频器应用中可能出现的各种需要，并为满足这些需要在系统软件和硬件方面都做了相应的准备。在使用时，用户可以根据负载特性选择算法并对变频器的各种参数进行设定，也可以根据系统的需要选择厂家所提供的各种备用选件来满足系统的特殊需要。

2. 专用变频器

(1) 高性能专用变频器 随着控制理论、交流调速理论和电力电子技术的发展，异步电动机的矢量控制得到发展，矢量控制变频器及其专用电动机构成的交流伺服系统的性能已经达到和超过了直流伺服系统。此外，由于异步电动机还具有环境适应性强、维护简单等诸多直流伺服电动机所不具备的优点，因此在要求高速、高精度的控制中，这种高性能交流伺服变频器正在逐步代替直流伺服系统。

(2) 高频变频器 在超精密机械加工中常要用高速电动机。为了满足其驱动的需要，出现了采用 PAM 控制的高频变频器，其输出主频可达 3kHz，驱动两极异步电动机时的最高转速为 18000r/min。

(3) 高压变频器 高压变频器一般是大容量的变频器，最大功率可做到 5000kW，电压等级为 3kV、6kV 和 10kV。

高压大容量变频器主要有两种结构形式：一种是用低压变频器通过升降压变压器构成，称为“高-低-高”式变压变频器，亦称为间接式高压变频器。另一种采用大容量 IGBT 绝缘栅双极晶闸管或 IGCT 集成门极换流晶闸管串联方式，不经变压器直接将高压电源整流为直流，再逆变输出高压，称为“高-高”式高压变频器，亦称为直接式高压变频器。

1.3 变频器的应用

变频调速已被公认为是最理想、最有发展前途的调速方式之一，它的应用主要在以下几个方面。

1.3.1 在节能方面的应用

风机、泵类负载采用变频调速后，节电率可以达到 20%~60%，这是因为风机、泵类负

载的耗电功率基本与转速的三次方成比例。当用户需要的平均流量较小时, 风机、泵类采用变频调速使其转速降低, 节能效果非常可观。而传统的风机、泵类采用挡板和阀门进行流量调节, 电动机转速基本不变, 耗电功率变化不大。在此类负载上使用变频调速装置具有非常重要的意义。以节能为目的变频器的应用, 在最近十几年来发展非常迅速。由于风机、水泵、压缩机在采用变频调速后, 可以节省大量电能, 所需的投资在较短的时间内就可以收回, 因此, 在这一领域中变频调速应用得最多。目前应用较成功的有恒压供水、各类风机、中央空调和液压泵的变频调速。特别值得指出的是恒压供水, 由于使用效果很好, 现在已形成典型的变频控制模式, 广泛应用于城乡生活用水、消防、喷灌等。恒压供水不仅可节省大量电能, 而且延长了设备的使用寿命, 使用操作也更加方便。一些家用电器, 如冰箱、空调采用变频调速后, 节能也取得了很好的效果。

1.3.2 在自动化系统中的应用

由于变频器内置有 32 位或 16 位的微处理器, 具有多种算术逻辑运算和智能控制功能, 输出频率精度高达 0.1%~0.01%, 还设置有完善的检测、保护环节, 因此在自动化系统中获得广泛的应用。例如, 化纤工业中的卷绕、拉伸、计量、导丝; 玻璃工业中的平板玻璃退火炉、玻璃窑搅拌、拉边机、制瓶机; 电弧炉自动加料、配料系统以及电梯的智能控制等。

1.3.3 在提高工艺水平和产品质量方面的应用

变频器还可以广泛应用于传送、起重、挤压和机床等各种机械设备控制领域, 它可以提高工艺水平和产品质量, 减少设备的冲击和噪声, 延长设备的使用寿命。采用变频调速控制后, 使机械系统简化, 操作和控制更加方便, 有的甚至可以改变原有的工艺规范, 从而提高了整个设备的功能。例如, 纺织和许多行业用的定型机, 机内温度是靠改变送入热风的多少来调节的。输送热风通常用的是循环风机, 由于风机速度不变, 送入热风的多少只有用风门来调节。如果风门调节失灵或调节不当就会造成定型机失控, 从而影响成品质量。循环风机高速起动, 传送带与轴承之间磨损非常厉害, 使传送带变成了一种易耗品。在采用变频调速后, 温度调节可以通过变频器自动调节风机的速度来实现, 解决了产品质量问题; 此外, 变频器很方便地实现风机在低频低速下起动减少了传送带与轴承的磨损, 延长了设备的寿命, 同时可以节能 40%。

本章小结

1. 变频器的发展

电力电子器件是变频器发展的基础, 计算机技术和自动控制理论是变频器发展的支柱。电力电子器件由最初的晶闸管半控器件, 发展为全控器件 GTO、GTR、MOSFET、IGBT、IGCT, 以及智能功率模块 IPM, 单个器件的电压和电流值的定额越来越大, 工作速度越来越高, 驱动功率和管耗越来越小。变频器内部的核心控制由 CPU 完成, 最初是 8 位处理器, 后来发展为 16 位处理器甚至 32 位处理器, 这些新技术和自动控制新理论使变频器的容量越来越大, 功能越来越强。

有效利用和节约能源是关系到国民经济长远发展的战略问题, 推广应用变频器技术意义重大, 近年来, 变频器市场保持着 12%~15% 的增长率。

变频器的发展趋势为：智能化、专门化、一体化和环保化。

2. 变频器的分类

1) 按变频的原理分类：交-交变频器、交-直-交变频器。

2) 按变频器的控制方式分类：压频比控制变频器(U/f)、转差频率控制变频器(SF)、矢量控制(VC)和直接转矩控制变频器等。

3) 按用途分类：通用变频器、专用变频器。

3. 变频器的应用

变频器主要应用在节能、自动化系统及提高工艺水平和产品质量等方面。

习 题 1

1. 什么叫变频器？变频器有哪些应用？
2. 为什么说电力电子器件是变频器技术发展的基础？
3. 为什么说计算机技术和自动控制理论是变频器发展的支柱？
4. 变频器的发展趋势如何？
5. 按工作原理变频器分为哪些类型？按用途变频器分为哪些类型？
6. 交-交变频器与交-直-交变频器在主电路的结构和原理方面有何区别？
7. 按控制方式变频器分为哪几种类型？

第2章 变频器常用电力电子器件

电力电子器件是组成变频器的关键器件，表2-1列出了变频器常用电力电子器件。

表2-1 变频器常用电力电子器件

类型	器件名称	简称	
不可控器件	功率二极管(Diode)	D	
半控器件	晶闸管(Thyristor)，旧称可控硅(Silicon Controlled Rectifier)	T, SCR	
全控器件	电流控制器件	双极型晶体管(Bipolar Junction Transistor)，电力晶体管(Power Transistor)	BJT, GTR
		门极可关断晶闸管(Gate Turn-Off Thyristor)	GTO
	电压控制器件	功率场效应晶体管(Power MOS Field-Effect Transistor)	P-MOSFET
		绝缘栅双极晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistor)	IGBT
		集成门极换流晶闸管(Integrated Gate Commutated Thyristor)	IGCT
电力电子模块	智能功率模块(Intelligent Power Module)	IPM	

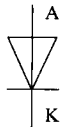
2.1 功率二极管

功率二极管是指可以承受高电压大电流具有较大耗散功率的二极管。功率二极管与普通二极管的结构、工作原理和伏安特性相似，但它的主要参数和选择原则等不尽相同。

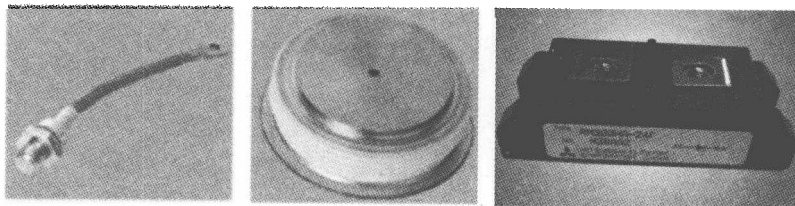
2.1.1 功率二极管的结构与伏安特性

1. 结构

功率二极管的内部是PN或PIN结构，是通过扩散工艺制作的。功率二极管引出两个极，分别称为阳极A和阴极K。功率二极管和普通二极管一样，具有单向导电性。图2-1a所示为功率二极管的电路符号，图2-1b为常见的功率二极管外形。



a) 功率二极管的电路符号



b) 常见的功率二极管外形

图2-1 功率二极管的符号和外形

2. 伏安特性

功率二极管的阳极和阴极间的电压和流过管子的电流之间的关系称为伏安特性，其伏安特性曲线如图2-2所示。