

智能制造基础技术系列教材
“互联网+”新形态一体化教材

变频与伺服 控制技术

主编◎刘 彤 刘红兵



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

智能制造基础技术系列教材
“互联网+”新形态一体化教材

变频与伺服 控制技术

主编 刘 彤 刘红兵



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书以西门子 SINAMICS V20 变频器和 SINAMICS V90 伺服驱动器为对象，内容主要包括变频器的结构和原理，变频器和伺服驱动器常用接线、参数配置、运行与操作等。本书通过 5 个项目完成对西门子变频器和伺服驱动器的学习和训练，每个项目的知识点和技能点以任务的形式体现和实施，技能训练强化知识点的实际操作能力。本书内容实用性强，结构清晰合理，言简意赅，对实际操作有很强的指导和借鉴意义。本书可以作为高职院校自动化相关专业的教学用书，也适用于自动化相关行业的广大从业人员。

图书在版编目 (CIP) 数据

变频与伺服控制技术 / 刘彤, 刘红兵主编. -- 上海:
上海交通大学出版社, 2024.1
ISBN 978-7-313-30218-2

I . ①变… II . ①刘… ②刘… III . ①变频器—教材
②伺服系统—教材 IV . ① TN773 ② TP275

中国国家版本馆 CIP 数据核字 (2024) 第 006239 号

变频与伺服控制技术
BIANPIN YU SIFU KONGZHI JISHU

主 编: 刘 彤 刘红兵	地 址: 上海市番禺路 951 号
出版发行: 上海交通大学出版社	电 话: 021-6407 1208
邮政编码: 200030	
印 制: 北京荣玉印刷有限公司	经 销: 全国新华书店
开 本: 787 mm × 1092 mm 1/16	印 张: 17.5
字 数: 375 千字	
版 次: 2024 年 1 月第 1 版	印 次: 2024 年 1 月第 1 次印刷
书 号: ISBN 978-7-313-30218-2	
定 价: 56.00 元	

版权所有 侵权必究
告读者: 如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系
联系电话: 010-6020 6144

前言

由于“双碳”发展目标的要求，各类高耗能企业持续推进工艺优化和节能降耗，这就需要更多电机从传统、低效的运行和调速模式，转向以变频为驱动模式。变频器承担着电机调速的功能，具有节能降耗、改善生产工艺流程、提高产品质量等重要作用。越来越多的变频器产品被应用在工业领域，尤其是迫切需要实施节能改造的制造企业。

国家《关于加强新时代高技能人才队伍建设的意见》中指出，技能人才是支撑中国制造、中国创造的重要力量。加强高级工以上的高技能人才队伍建设，对巩固和发展工人阶级先进性，增强国家核心竞争力和科技创新能力，缓解就业结构性矛盾，推动高质量发展具有重要意义。要加大高技能人才培养力度，到“十四五”时期末，技能人才占就业人员的比例达到 30% 以上，高技能人才占技能人才的比例达到三分之一。

目前，变频器与伺服控制技术已经广泛应用在智能制造领域的现场控制，成为高校自动化专业核心课程，是必须掌握的一项技能。本书采用项目式教学模式，循序渐进安排教学知识点，通过任务分解技能点，将知识点和技能点相互融合。

本书具有以下特色。

第一，强调技能的培养，“学中做，做中学”。打牢变频与伺服的基础，突出技能训练的特点，大部分任务点都配有技能训练，且给出详细的实施步骤，为教师教学过程和学生学习过程提供参考，为后续复杂任务的应用打下坚实基础。

第二，以典型的控制平台为教学对象，适应性广泛。西门子驱动装置在我国占有较大的市场份额，得到了广泛的应用，书中以西门子 SINAMICS V20、SINAMICS V90 主流变频器和伺服驱动器为教学对象，替换较早的 MICROMASTER 系列变频器。

第三，教学资源丰富，适应对象广泛。本书提供了丰富的教学多媒体资源、习题答案、微课视频等服务于本书的教学资源库，有需要者可致电 13810412048 或发邮件至 2393867076@qq.com。此外，本书还建立了课程教学平台，通过平台直接引入教学。本书可以作为高职院校自动化相关专业的教学用书，也适用于自动化相关行业的广大从业人员。

第四，落实课程思政要求，全方位育人。本书落实立德树人根本任务，贯彻《高等学校课程思政建设指导纲要》和党的二十大精神，将专业知识与思政教育有机结合，推动价值引领、知识传授和能力培养紧密结合。

本书由湖南铁道职业技术学院刘彤、刘红兵、杨梦勤、张蕾、陈庆等编写，本书由湖

南铁道职业技术学院段树华主审。刘彤、陈庆撰写了项目 4 和项目 5，刘红兵撰写了项目 1，并对本书的编写提出了宝贵意见，杨梦勤编写了项目 2，张蕾编写了项目 3。

本书在撰写的过程中，得到了学校领导和同事的鼓励和帮助，感谢中国石油集团渤海石油装备制造有限公司张骅、张衡的参与和支持，也衷心感谢在本书出版过程中给予帮助的人们。

由于编者的学术水平有限，书中存在的疏漏之处，敬请读者批评指正。



目 录

项目 1 变频器选用与安装	001
任务 1.1 变频器认知	002
1.1.1 变频器概念	002
1.1.2 变频器主流品牌	003
1.1.3 变频器功能及用途	004
1.1.4 变频器发展趋势及思考	005
问题与思考	006
任务 1.2 变频器选用	007
1.2.1 交流异步电动机调速原理	007
1.2.2 变频调速原理	010
1.2.3 变频器常用控制方式	013
1.2.4 变频器的选用	015
问题与思考	017
任务 1.3 变频器安装	018
1.3.1 变频器硬件结构	019
1.3.2 变频器件	023
1.3.3 变频器分类	027
1.3.4 变频器的安装要求和安装方式	031
1.3.5 变频器的主电路及配线	032
1.3.6 SINAMICS V20 变频器的安装	034
问题与思考	038
拓展阅读	039
项目 2 SINAMICS V20 变频器的基本操作	041
任务 2.1 SINAMICS V20 变频器端子和面板操作	042
2.1.1 主电路端子及接线	042

2.1.2 控制电路端子及接线	044
2.1.3 SINAMICS V20 变频器操作面板认识	046
2.1.4 SINAMICS V20 变频器的菜单结构	049
2.1.5 变频器恢复出厂默认设置	051
2.1.6 BOP 修改设置参数	052
技能训练	055
问题与思考	058
任务 2.2 SINAMICS V20 BOP 控制电动机运行	059
2.2.1 通过设置菜单进行快速调试	059
2.2.2 通过参数菜单进行快速调试	063
技能训练	065
问题与思考	068
拓展阅读	069
项目 3 SINAMICS V20 变频器端子控制电动机运行与调试	071
任务 3.1 变频器端子控制电动机正反转运行	072
3.1.1 数字输入端子	072
3.1.2 数字输出端子	074
3.1.3 数字输出端子状态查看方法	075
3.1.4 变频器的启动和停止过程	077
3.1.5 变频器的停车方式	078
技能训练	081
问题与思考	085
任务 3.2 变频器二线 / 三线制控制电动机运行	086
3.2.1 变频器数字输入信号的控制方式	086
3.2.2 变频器的二线控制	087
3.2.3 变频器的三线控制	089
技能训练	091
问题与思考	099
任务 3.3 变频器固定频率控制电动机运行	100
3.3.1 变频器的运转指令给定方式	100
3.3.2 变频器的频率给定方式	101
3.3.3 SINAMICS V20 变频器的运行方式	103

3.3.4 SINAMICS V20 变频器的固定频率运行方式	104
技能训练	107
问题与思考	114
任务 3.4 变频器模拟量调节电动机转速	115
3.4.1 模拟量输入 / 输出端子	115
3.4.2 模拟量的标定	117
技能训练	119
问题与思考	123
任务 3.5 SINAMICS V20 变频器的 PID 控制	124
3.5.1 PID 控制原理	124
3.5.2 SINAMICS V20 变频器 PID 控制	128
3.5.3 恒压供水控制原理和调节过程	129
3.5.4 电力拖动负载类型选择	130
3.5.5 SINAMICS V20 变频器 PID 控制恒压供水	132
技能训练	137
问题与思考	141
拓展阅读	142
项目 4 PLC 与 SINAMICS V20 变频器的联机控制	143
任务 4.1 PLC 与变频器端子控制电动机运行	144
4.1.1 数字输入端子的接口方式	144
4.1.2 PLC 与变频器的连接	146
技能训练	147
问题与思考	160
任务 4.2 基于 PLC 的变频器 USS 通信控制	160
4.2.1 PLC 与变频器的 RS-485 网络构建	161
4.2.2 SINAMICS V20 变频器的 USS 通信	161
4.2.3 S7-1200 USS 通信指令	163
技能训练	168
问题与思考	178
任务 4.3 基于 PLC 的变频器 Modbus 通信	178
4.3.1 Modbus 协议通信	178
4.3.2 S7-1200 PLC 与 SINAMICS V20 变频器的 Modbus 通信	181

技能训练	185
问题与思考	193
拓展阅读	194
项目 5 SINAMICS V90 伺服驱动系统运行与调试	195
任务 5.1 SINAMICS V90 PN 伺服驱动器基本操作	196
5.1.1 伺服驱动原理	196
5.1.2 伺服电机	199
5.1.3 编码器	200
5.1.4 SINAMICS V90 伺服系统的组成	202
5.1.5 SINAMICS V90 伺服驱动器的尺寸及安装	204
5.1.6 SINAMICS V90 伺服驱动器的接口及连线	205
5.1.7 伺服驱动器的基本操作面板	211
技能训练	213
问题与思考	215
任务 5.2 SINAMICS V90 PN 速度模式的调试与运行	216
5.2.1 控制器概述	216
5.2.2 循环通信	218
5.2.3 SINA_SPEED (FB285) 程序块功能	221
5.2.4 使用报文的控制字和状态字实现速度控制	224
技能训练	225
问题与思考	233
任务 5.3 SINAMICS V90 PN 位置控制的调试与运行	234
5.3.1 运动控制概述	234
5.3.2 SINAMICS V90 PN 伺服驱动安装	234
5.3.3 S7-1200 PLC 的轴工艺对象 (TO)	238
5.3.4 SINA_POS (FB284) 程序块	239
5.3.5 EPOS 模式下的主动回零方式	244
技能训练	245
问题与思考	268
拓展阅读	269
参考文献	270

项目 1

变频器选用与安装

知识目标

- (1) 了解变频器的基本概念及功能。
- (2) 了解变频器的主要发展趋势。
- (3) 了解主要的变频器件。
- (4) 掌握变频器工作原理和常用控制方式。
- (5) 掌握变频器的硬件结构。

能力目标

- (1) 能认识变频器的外形、品牌、功能用途等。
- (2) 会根据采用变频目的、负载类型、电流电压匹配及应用场合等因素选用变频器。
- (3) 会根据散热问题、电磁干扰问题、防护问题选择正确的安装环境和接线方式。

素质目标

- (1) 培养正确的世界观、人生观、价值观。
- (2) 遵纪守法，诚信做人、踏实做事。
- (3) 具有安全意识、责任意识。



项目概述

随着工业科技的发展，变频器成为工业自动化和机械自动化的主角，不仅能实现控制要求，而且更加安全、节能、高效，相应的，对电气工程技术人員也提出了更高的维护应用要求。在机床主轴上采用变频器可实现无级变速，从而使磨具或刀具以较小的磨损产生较高的光洁度和加工精度。机床工作台由变频器取代液压传动，可缩短传动响应时间。变频器的调速范围宽、控制精度高，且具有很多自动功能，可有效提高机床的加工效率。

摆在工程师面前的问题是：①电机负载类型极多，对所配变频器的性能要求也是千差万别，如何根据需要给电机选择合适的变频器；②变频器对安装环境有何要求。本项目将从变频器的认知、选用、安装等几个方面进行介绍。

任务 1.1 变频器认知

任务引入

21 世纪人类社会已经跨入了自动化、数字化和智能化时代。变频器（variable-frequency drive, VFD）作为控制交流电动机的电力控制设备，随着工业自动化程度的不断提高得到了广泛的应用。

本任务的学习目标是了解变频器的基本概念，熟悉变频器型号铭牌及外形，掌握变频器的不同类型及功能用途，了解其发展历程，为后续全面理解变频器结构原理、控制方式，以及掌握选型、安装、接线等操作技能夯实基础。

1.1.1 变频器概念

通常，变频器是指把电压和频率固定不变的交流电变换为电压或频率可变的交流电的装置，是通过改变电机工作电源频率的方式来控制交流电动机的电力控制设备。与变压器相比，变频器不仅可以改变电压，还可以改变频率以满足 V/F 控制规律。

利用软硬件控制系统将工频电源（50 Hz 或 60 Hz）变换为另一频率的交流电并施加在电机定子绕组上，使交流电动机实现无级调速的过程，称为变频调速。变频控制系统如图 1-1 所示。

那么，变频器是如何实现变频的呢？总体上就是：交流 - 直流 - 交流（先整流再逆变），经过这种处理过程的变频器也叫交直交变频器，目前也是各个行业使用比较多的一种。此外，还有一种交流 - 交流变换的，这种也称为交

交变频器。变频器的控制对象主要是三相交流异步电动机和三相交流同步电动机。

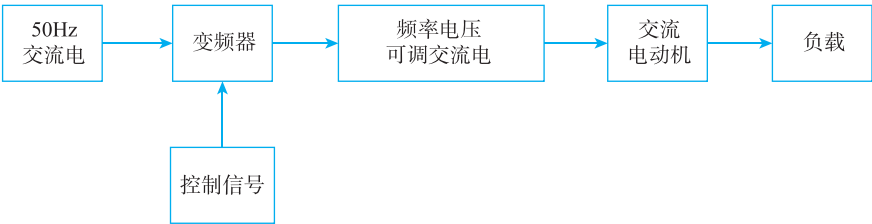


图 1-1 变频器控制系统

1.1.2 变频器主流品牌

变频器外形结构总体上大致相同，主要区别体现在尺寸、颜色、布局等方面。综合起来常用的变频器有上百种品牌，生产厂家遍布全球。我国变频器市场主要分为本土、日本以及欧美三类厂商。本土厂商主要代表有汇川技术、英威腾、合康新能等，日本厂商代表企业主要有三菱、安川、富士、日立、东芝等，欧美代表企业主要有 ABB、西门子、施耐德等。表 1-1 归纳了国产品牌、欧美品牌、日本品牌等常用经典品牌变频器。

表 1-1 常用经典型号变频器外形特点

主流品牌	生产厂商	外形
国产品牌	英威腾变频器：由深圳市英威腾电气股份有限公司研发、生产、销售的国内变频器品牌，主要用于控制和调节三相交流异步电机的速度，以其稳定的性能、丰富的组合功能、高性能的矢量控制技术、低速高转矩输出、良好的动态特性及超强的过载能力，在变频器市场占据着重要的地位	
	汇川变频器：由深圳市汇川技术股份有限公司研发、生产、销售的国内变频器品牌，主要用于控制、调节三相交流异步电机和三相交流永磁电机的速度和转矩，可用于纺织、造纸、拉丝、机床、包装、食品、风机、水泵及各种自动化生产设备的驱动	
	台达变频器：中国台湾品牌，是台达自动化的开山之作，也是台达自动化销售额最大的产品。在竞争激烈的市场中，台达变频器始终保持着强劲的增长势头，在高端产品市场和经济型产品市场均斩获颇丰。在应用领域，台达变频器将目光投向了更广阔的领域——电梯、起重、空调、冶金、电力、石化以及节能减排项目	



笔记

续表

主流品牌	生产厂商	外形
欧美品牌	ABB 变频器：由瑞典 ABB 集团研发、生产、销售的知名变频器品牌，主要用于控制和调节三相交流异步电机的速度，并以其稳定的性能、丰富的组合功能、高性能的矢量控制技术、低速高转矩输出、良好的动态特性及超强的过载能力，在变频器市场占据着重要的地位	
	SINAMICS 变频器：由德国西门子研发、制造和销售的变频器品牌。西门子变频器具有较高的灵活性、功能性和工程舒适性，覆盖了所有性能级别，可完成简单变频器任务、协调变频器任务直至运动控制任务，广泛应用于各工业领域，尤其是泵机、风机、压缩机、传送带、搅拌机、轧钢机或挤压机等领域	
日本品牌	三菱变频器：由三菱电机株式会社生产，在世界各地占有率比较高。三菱变频器来到中国有 20 多年的历史，在国内市场上，三菱因为其稳定的质量和强大的品牌影响力，有着相当广阔的市场，并已广泛应用于各个领域。三菱变频器目前在市场上用量较多的是 A700 系列和 E700 系列，A700 系列为通用型变频器，适合高启动转矩和高动态响应场合的使用	
	安川变频器：由安川电机株式会社生产，主要用于三相异步交流电机，用于控制和调节电机速度。安川变频器以其卓越的控制性能和优异的产品品质，依靠“以独特的技术，为社会和公共事业做贡献”的理念得到全球工业领域的认可。安川变频器代表着高性能、高可靠性和高安全性	

1.1.3 变频器功能及用途

变频器的主要功能：调压、调频、稳压、调速等基本功能，以及一项重要功能——节能。变频器的具体功能作用与用途如表 1-2 所示。

表 1-2 变频器的具体功能作用与用途

功能作用	用途
变频节能	变频器节能主要表现在风机、泵类的应用上。因为风机、泵类负载的实际消耗功率基本与转速的三次方成比例。据统计，风机、泵类电动机用电量占全国用电量的 31%，占工业用电量的 50%。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

续表



功能作用	用途
在自动化系统中的应用	由于变频器内置 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，输出频率精度为 0.1%~0.01%，且设置有完善的检测、保护环节，因此，在自动化系统中获得广泛应用。例如，化纤工业中的卷绕，玻璃工业中的平板玻璃退火，电弧炉自动加料、配料系统，以及电梯的智能控制等
在提高工艺水平和产品质量方面的应用	变频器广泛应用于传送、起重、挤压和机床等各种机械设备控制领域，可以提高工艺水平和产品质量。如纺织和许多行业用的定型机，输送热风通常用的是循环风机，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
实现电机软启动	电机硬启动会对电网造成严重的冲击，而使用变频器后，变频器的软启动功能将使启动电流从零开始变化，最大值也不超过额定电流，减轻了对电网的冲击和对供电容量的要求，延长了设备和阀门的使用寿命，同时也节省了设备的维护费用
机车牵引	轨道交通机车牵引的交流传动系统中，由于要满足恒磁通控制的要求，一些机车和动车组上采用了电压型逆变器供电，并具有电流反馈和转差闭环的双闭环控制系统。采用新型的三点式电压型逆变器，则可使用耐电压等级低一半的器件，而且还可以有效地减少谐波电流，抑制电磁噪声

1.1.4 变频器发展趋势及思考

变频器的诞生背景是交流电机无级调速的广泛需求。传统的直流调速技术因体积大、故障率高而应用受限。变频技术的发展阶段如表 1-3 所示。

表 1-3 变频技术发展的不同阶段

发展时间	技术更迭	时代应用
20 世纪 60 年代以后	电力电子器件晶闸管及其升级产品普遍应用，但其调速性能远远无法满足需要	1968 年以丹佛斯为代表的高技术企业开始批量化生产变频器，开启了变频器工业化的新时代
20 世纪 70 年代开始	脉宽调制变压变频（PWM—VVVF）的研究得到突破	20 世纪 80 年代以后微处理器技术的完善使得各种优化算法得以容易实现
20 世纪 80 年代中后期	VVVF（变频调速）技术实用化	最早的变频器是日本买了英国专利研制的，但美国和德国凭借电子元件生产和电子技术的优势，迅速抢占高端产品市场



笔记

电力电子器件的基片已从 Si (硅) 变换为 SiC (碳化硅), 这使电力电子新元件具有耐高压、低功耗、耐高温的优点, 并可制造出体积小、容量大的驱动装置。随着永磁电动机得到广泛应用, 计算机技术和芯片技术的迅速发展突破和普及应用, 变频器相关技术也得到了迅速发展, 未来主要向网络智能化、专门化和一体化、高性能化、节能环保无公害以及适应新能源等几个方面发展。相较于国外变频器的发展状况, 我国的变频器应用起步较晚, 直到 20 世纪 90 年代末期才得到较为广泛的推广。国内变频技术发展状况可以概括为: 变频器的整体技术相对落后, 和国外在变频调速研究上取得的先进成果比还存在差距, 但是正在逐步赶上。

问题与思考

1. 变频器是将工频交流电变为_____和_____可调的交流电的电器设备。

2. 变频器是一种 () 装置。

A. 驱动直流电机

B. 滤波

C. 驱动步进电机

D. 电源变换

3. 请查阅相关资料回答。

(1) 通过实例说明使用变频器有哪些好处?

(2) 了解国内外变频器的发展状况, 说出国产变频器现状及未来发展趋势。

任务 1.2 变频器选用



任务引入

一般根据企业工程实际需求选用变频器的类型，按照生产机械的类型、调速范围、静态速度精度、启动转矩的要求，判断选用哪种控制方式的变频器最合适。所谓合适是既要好用，又要经济，以满足工艺和生产的基本条件和要求。

本任务学习目标是理解变频调速原理，并在此基础上掌握变频器工作原理与过程，熟悉变频器控制方式及其特点，掌握变频器选用原则和方法，为后续学习根据采用变频目的、负载类型、电流电压匹配及应用场合等因素选用变频器奠定基础。

1.2.1 交流异步电动机调速原理

交流电动机是用于实现将交流电能转换为机械动能的装置。由于交流电力系统的巨大发展，交流电动机已成为最常用的电动机。交流电动机与直流电动机相比，由于没有换向器，因此结构简单，制造方便，比较牢固，容易做成高转速、高电压、大电流、大容量的电动机。

直流电动机通过调节电压或调节励磁，可以方便地实现平滑连续的无级调速。交流异步电动机的调速原理更复杂，调速方式更多，诸如调压调速、变级调速、串级调速、滑差调速等，而变频调速优于上述任何一种调速方式，是当今国际上广泛采用的效益高、性能好、应用广的新技术。

当在鼠笼型交流异步电动机定子绕组上通入三相交流电时，在定子与转子之间的空气隙内将产生一个旋转磁场，旋转磁场与转子绕组产生相对运动，使转子绕组产生感应电势，出现感应电流，此电流与旋转磁场相互作用，即产生电磁转矩，使电动机转动起来。异步交流电动机的转速公式：

$$n=n_0(1-s)=\frac{60f_1}{p}(1-s) \tag{1-1}$$

式中：

f_1 ——异步电动机定子绕组上交流电源的频率 (Hz)；

p ——异步电动机的磁极对数；

s ——异步电动机的转差率；

n ——异步电动机的转速 (rpm)^①；

n_0 ——异步电动机的同步转速 (rpm)。

① rpm 的规范用法为 r/min，因本书软件中使用 rpm 且需要图文对应，故全书使用 rpm。



笔记

根据式 (1-1) 可知, 交流异步电动机有下列三种基本调速方法:

- ① 改变定子绕组的磁极对数 p , 称为变极调速;
- ② 改变转差率 s , 其方法有改变定子电压调速、绕线式异步电动机转子串电阻调速和串级调速;
- ③ 改变电源频率 f_1 , 称为变频调速。

1. 变极调速

在电源频率 f_1 不变的条件下, 改变电动机的磁极对数 p , 电动机的同步转速 n_1 就会变化, 从而改变电动机的转速 n 。若磁极对数减少一半, 同步转速就升高一倍, 电动机的转速也几乎升高一倍。通过改变电动机定子绕组的接法来改变磁极对数的电动机称为多速电动机, 这类电动机均采用笼型转子, 转子感应的磁极对数能自动与定子相适应, 一般会从定子绕组中抽出一些线头, 以便使用时调换。下面以一相绕组来说明变极调速的原理。如图 1-2 所示, 先将 U 相绕组中的 2 个半相绕组 a_1x_1 与 a_2x_2 采用顺向串联, 产生 2 对磁极。若将 U 相绕组中的一半相绕组 a_2x_2 反向串联或反向并联 (见图 1-3), 则产生 1 对磁极。

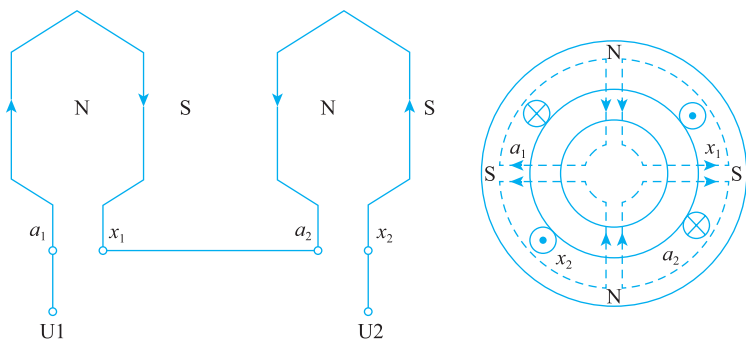


图 1-2 绕组变极调速图 ($p=2$)

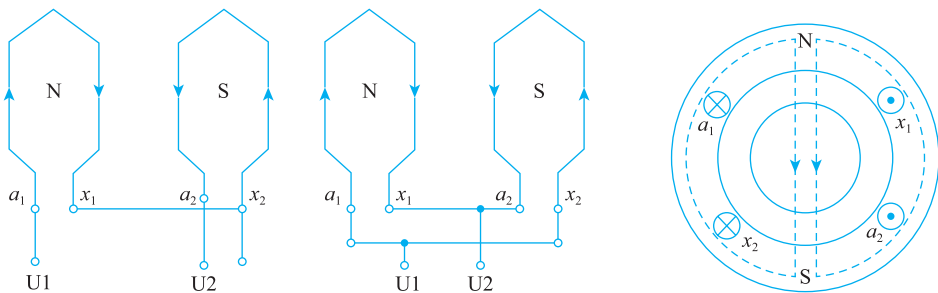


图 1-3 绕组变极调速图 ($p=1$)

2. 变转差率调速

改变定子电压调速、转子串电阻调速和串级调速都属于改变转差率调速。这



些调速方法的共同特点是在调速过程中都会产生大量的转差功率。前两种调速方法都是把转差功率消耗在转子电路里，很不经济，而串级调速则能将转差功率加以吸收或大部分反馈给电网，提高了经济性能。

(1) 改变定子电压调速。由异步电动机电磁转矩和机械特性方程可知，在一定转速下，异步电动机的电磁转矩与定子电压的平方成正比。因此改变定子外加电压就可以改变其机械特性的函数关系，从而改变电动机在一定输出转矩下的转速。当改变电动机的定子电压时，可以得到一组不同的机械特性曲线，从而获得不同转矩特性。如图 1-4 所示，曲线 1 代表电动机的固有机械特性，曲线 2 代表定子电压是额定电压的 0.7 倍时的机械特性。

从图 1-4 可以看出，同步转速 n_0 不变，最大转差或临界转差率 S_m 不变。当负载为恒转矩负载 T_L 时，随着电压由 U_N 减小到 $0.7U_N$ ，转速相应地从 n_1 减小到 n_2 ，转差率增大，显然可以认为调压调速方法属于改变转差率的调速方法。改变定子电压调节电动机转速，调速范围较小，低压时机械特性太软，转速变化大。为改善调速特性，可采用带速度负反馈的闭环控制系统来解决该问题，例如采用晶闸管交流调压电路来实现定子调压调速。

(2) 转子串电阻调速。绕线式异步电动机转子串电阻调速的机械特性如图 1-5 所示。转子串电阻时最大转矩 T_m 不变，临界转差率增大。转子串接电阻越大，运行段机械特性斜率越大。

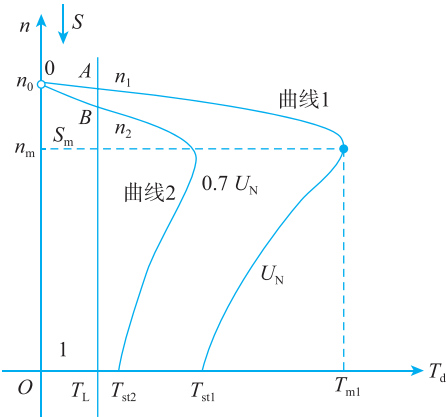


图 1-4 改变定子电压调速的机械特性

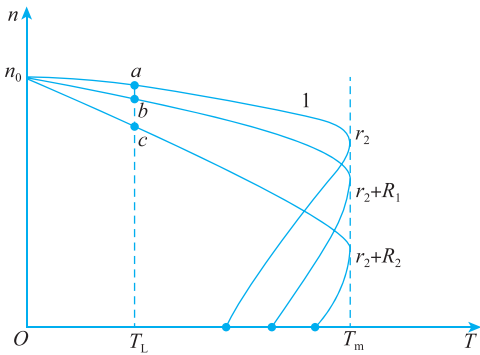


图 1-5 转子串电阻调速的机械特性

电动机带动恒转矩负载，若原来运行在固有特性曲线 1 的 a 点上，在转子串电阻 R_1 后，就运行在 b 点上，转速由 n_a 变为 n_b ，依此类推。转子串电阻调速的优点是设备简单，可用于中、小容量的绕线式异步电动机，如桥式起重机等；缺点是转子绕组需经过电刷引出，属于有级调速，平滑性差。由于转子中电流很大，在串接电阻上产生很大损耗，所以电动机的效率很低，机械特性较软，调速精度差。

(3) 串级调速。串级调速方式是指有绕线式异步电动机转子回路中串入可



调节的附加电势来改变电动机的转差，从而达到调速的目的。其优点是可以通过某种控制方式，使转子回路的能量回馈到电网，从而提高效率，在适当的控制方式下，可以实现低同步或高同步的连续调速；缺点是只能适应于绕线式异步电动机，且控制系统相对复杂。

3. 变频调速

变频调速一般通过改变电动机定子绕组供电的频率来达到调速的目的。交流变频调速技术就是把工频 50 Hz 或 60 Hz 的交流电转换成频率和电压可调的交流电，通过改变交流异步电动机定子绕组的供电频率，在改变频率的同时也改变电压，从而达到调节电动机转速的目的（即 VVVF 技术）。交流变频调速系统一般由三相交流异步电动机、变频器及控制器组成。

变频调速技术已深入我们生活的每个角落，应用已经从高性能应用领域扩展至通用驱动及专用驱动场合，乃至变频空调、冰箱、洗衣机等家用电器。变频器已在工业机器人、自动化出版设备、加工工具、传输设备、电梯、压缩机、轧钢、风机泵类、电动汽车、起重设备等领域中得到广泛应用。随着半导体技术的飞速发展，MCU（微控制单元）的处理能力愈加强大，处理速度不断提升，变频调速系统完全有能力处理更复杂的任务，实现复杂的观测、控制算法，传动性能也因此达到前所未有的高度。

1.2.2 变频调速原理

1. 变频调速的条件

从式（1-1）来看，只要改变定子绕组的电源频率 f_1 就可以调节转速大小，但是如果只改变电源频率 f_1 并不能正常调速，而且可能导致电动机运行性能的恶化。其原因分析如下。

由电动机学原理知，三相异步电动机定子绕组的反电动势 E_1 的表达式为

$$E_1 = 4.44 f_1 N_1 K_{M1} \Phi_m \quad (1-2)$$

式中：

E_1 ——气隙磁通在定子每相中感应电动势的有效值（V）；

N_1 ——每相定子绕组的匝数；

K_{M1} ——与绕组结构有关的常数；

Φ_m ——电动机每极气隙磁通。

由于式（1-2）中的 4.44、 N_1 、 K_{M1} 均为常数，所以定子绕组的反电动势可表示为

$$E_1 = f_1 \Phi_m \quad (1-3)$$

根据三相异步电动机的等效电路知， $E_1 = U - \Delta U$ ，当 E_1 和 f_1 的值较大时，定子的漏阻抗相对较小，漏阻抗压降可以忽略不计，即可认为电动机的定子电压

$U_1 \approx E_1$ ，因此可将式 (1-3) 写成：

$$U_1 \approx E_1 \propto f_1 \Phi_m \quad (1-4)$$

若电动机的定子电压 U_1 保持不变，则 E_1 也基本保持不变，但是，异步电动机定子绕组中的感应电动势 E_1 无法直接检测和控制，由于 $U_1 \approx E_1$ ，所以，可以通过控制定子电压 U_1 达到控制 E_1 的效果。

以电动机的额定频率 f_{1N} 为基准频率，称为基频。变频调速时，可以从基频向上调频，也可以从基频向下调频。

2. 恒磁通（恒转矩）基频以下变频调速

由式 (1-4) 可知，当定子绕组的交流电源频率 f_1 由基频 f_{1N} 向下调节时，即 $f_1 < f_{1N}$ 时，将会引起主磁通 Φ_m 的增加。当达到额定频率时电动机的磁通已经接近饱和， Φ_m 继续增大，将会使电动机磁路过分饱和，从而导致励磁电流过大，严重时会使绕组过热而损坏电动机。

为了维持电动机输出转矩不变，希望在调节频率的同时能够维持主磁通 Φ_m 不变，即恒磁通控制方式。为了保证 Φ_m 不变，根据式 (1-3)，就需要 E_1/f_1 为一常数：

$$\frac{E_1}{f_1} = \frac{U_1}{f_1} = C \text{ (常数)} \quad (1-5)$$

当定子电源频率 f_1 很低时， U_1 和 E_1 都变得很小，定子阻抗压降所占的比例相对此时 U_1 的大小来说就比较显著，不能被忽略，此时，该阻抗压降降低了电动机的输出转矩。因此，在低电压的低频区，可以采用电压补偿措施，适当地提高定子绕组电压 U_1 使得 E_1 的值增加，从而保证 E_1/f_1 为常数，主磁通 Φ_m 就会基本不变，最终使电动机的输出转矩得到补偿。这种方法是通过提高 U_1/f_1 的比，使电动机的输出转矩得到补偿的，称为 U/f 控制电压补偿，也称为转矩提升。定子电源频率 f_1 越低，定子绕组电压就需要补偿得越大，带定子压降补偿控制的恒压频比控制特性如图 1-6 所示。

图 1-6 中，曲线 1 为 $U_1/f_1 = \text{常数}$ 时的电压与频率关系曲线，曲线 2 为有电压补偿时，即近似的 E_1/f_1 为常数时的电压与频率关系曲线。实际上变频器装置中相电压 U_1 和频率 f_1 的函数关系并不简单地如曲线 2 一样，通用变频器有几十种电压与频率函数关系曲线，可以根据负载性质和运行状况加以选择。

在基频以下调速，保持 $U_1/f_1 = \text{常数}$ 进行调节时，电动机的机械特性曲线如图 1-7 中 f_{1N} 。

如果电动机在不同转速下具有相同的额定电流，则电动机都能在温升允许的条件下长期运行。若保持主磁通 Φ_m 恒定，则电磁转矩 T 恒定，电动机带动负载的能力不变，转速差基本不变，所以调速后的机械特性从 f_{1N} 向下平移，电动机的输出转矩不变，属于恒转矩调速。



笔记



笔记

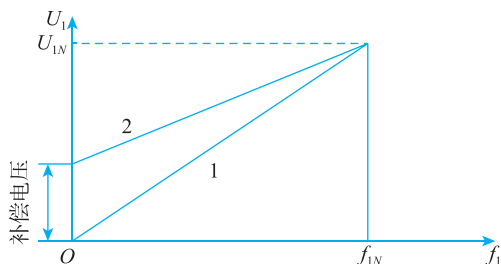


图 1-6 基频以下变频器调速电压补偿示意图

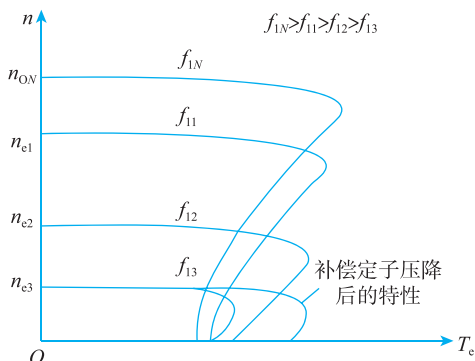


图 1-7 基频以下调速时的机械特性曲线

3. 恒功率（恒电压）基频以上变频调速

从式 (1-3) 可以看出, 定子绕组的反电动势不变, 从基频 f_{1N} 向上调节频率, 主磁通 Φ_m 将减少, 铁芯利用不充分, 同样的转子电流下, 电磁转矩 T 下降, 电动机的负载能力下降, 电动机的容量也得不到充分利用。

若按照 $U_1/f_1 = \text{常数}$ 的规律, 使定子绕组的交流电源频率 f_1 由基频 f_{1N} 向上调节, 则控制电压也必须增大, 但是受到电动机额定电压 U_{1N} 的限制不能再升高, 只能保持 $U_1 = U_{1N}$ 不变。这必然使主磁通 Φ_m 与频率 f_1 成反比地降低, 频率越高, 主磁通 Φ_m 下降得越多, 由于 Φ_m 与电流或转矩成正比, 因此电磁转矩 T 也变管越小, 这时的电磁转矩应该比负载转矩大, 否则会出现电动机的堵转。在这种控制方式下, 转速越高, 转矩越低, 但转速与转矩的乘积 (输出功率) 基本不变。所以, 基频以上调速属于弱磁恒功率调速。其机械特性曲线如图 1-8 所示。

4. 变频调速的两个阶段

把基频以下和基频以上两种情况结合起来, 可得如图 1-9 所示的异步电动机变频调速的控制特性曲线。如果电动机在不同转速下都具有额定电流, 则电动机都能在温升允许的条件下长期运行, 这时转矩基本上随磁通变化, 在基频以下, 属于恒转矩调速的性质, 而在基频以上, 属于恒功率的调速性质。

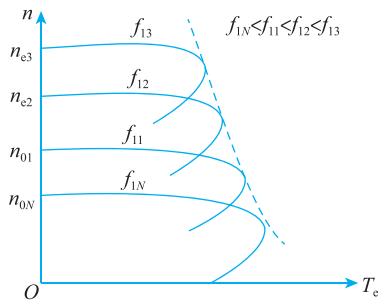


图 1-8 基频以上调速时的机械特性曲线

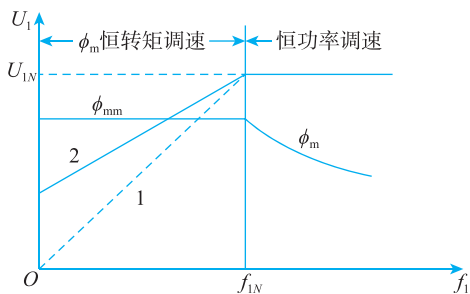


图 1-9 变频调速控制特性曲线

(1) 恒转矩的调速特性。恒转矩是指在转速的变化过程中, 电动机具有输



出恒定转矩的能力。在 $f_1 < f_{1N}$ 的范围内变频调速时, 经过补偿后, 各条机械特性的临界转矩基本为一定值, 因此该区域基本为恒转矩调速区域, 适合带恒转矩负载。从另一方面来看, 经补偿以后的 $f_1 < f_{1N}$ 的调速, 可以基本认为 $E/f =$ 常数, 即 Φ_m 不变, 在负载不变的情况下, 电动机输出电磁转矩基本为一定值。

(2) 恒功率的调速特性。恒功率是指在转速的变化过程中, 电动机具有输出恒定功率的能力, 在 $f_1 > f_{1N}$ 下, 频率越高, 主磁通 Φ_m 必然相应下降, 电磁转矩 T 也越小, 而电动机的功率 $P = T(\downarrow) \omega(\uparrow) =$ 常数, 因此 $f_1 > f_{1N}$ 时, 电动机具有恒功率的调速特性, 适合带恒功率负载。

1.2.3 变频器常用控制方式

1. 非智能控制方式

在交流变频器中使用的非智能控制方式有 V/f 控制、转差频率控制、矢量控制、直接转矩控制等。

(1) V/f 控制。 V/f 控制是为了得到理想的转矩 - 速度特性, 基于在改变电源频率进行调速的同时, 又要保证电动机的磁通不变的思想而提出的, 通用型变频器基本上都采用这种控制方式。 V/f 控制变频器结构非常简单, 但是这种变频器采用开环控制方式, 不能达到较高的控制性能, 而且, 在低频时, 必须进行转矩补偿, 以改变低频转矩特性。 V/f 控制主要应用在低成本、性能要求较低的场合。

(2) 转差频率控制。转差频率控制是一种直接控制转矩的控制方式, 在 V/f 控制的基础上, 按照异步电动机的实际转速对应的电源频率, 并根据希望得到的转矩来调节变频器的输出频率, 可以使电动机具有对应的输出转矩。这种控制方式, 需要在控制系统中安装速度传感器, 有时还需要加装电流反馈装置, 来对频率和电流进行控制, 因此, 这是一种闭环控制方式, 可以使变频器具有良好的稳定性, 并对急速的加减速和负载变动有良好的响应特性。

(3) 矢量控制。矢量控制通过矢量坐标电路控制电动机定子电流的大小和相位, 达到对电动机在坐标轴系中的励磁电流和转矩电流分别进行控制, 进而达到控制电动机转矩的目的; 通过控制各矢量的作用顺序和时间以及零矢量的作用时间, 又可以形成各种 PWM (脉冲宽度调制) 波, 达到各种不同的控制目的。例如形成开关次数最少的 PWM 波以减少开关损耗。目前在变频器中实际应用的矢量控制方式主要有基于转差频率控制的矢量控制方式和无速度传感器的矢量控制方式两种。

①基于转差频率的矢量控制方式与转差频率控制方式两者的定常特性一致, 但是基于转差频率的矢量控制还要经过坐标变换对电动机定子电流的相位进行控制, 使之满足一定的条件, 以消除转矩电流过渡过程中的波动。因此, 基于转差



频率的矢量控制方式比转差频率控制方式在输出特性方面能得到很大的改善。但是,这种控制方式属于闭环控制方式,需要在电动机上安装速度传感器,因此,应用范围受到限制。

②无速度传感器矢量控制是通过坐标变换处理分别对励磁电流和转矩电流进行控制,然后通过控制电动机定子绕组上的电压、电流辨识转速,达到控制励磁电流和转矩电流的目的。这种控制方式调速范围宽,启动转矩大,工作可靠,操作方便,但计算比较复杂,一般需要专门的处理器来进行计算,因此,实时性不是太理想,控制精度受到计算精度的影响。

(4)直接转矩控制。直接转矩控制利用空间矢量坐标的概念,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,通过检测定子电阻来达到观测定子磁链的目的,因此省去了矢量控制等复杂的变换计算,系统直观、简洁,计算速度和精度都比矢量控制方式更高,即使在开环的状态下,也能输出100%的额定转矩,对于多拖动具有负荷平衡功能。

(5)最优控制。最优控制在实际中的应用根据要求的不同而有所不同,可以根据最优控制理论对某一个控制要求进行个别参数的最优化。例如在高压变频器的控制应用中,就成功地采用了时间分段控制和相位平移控制两种策略,实现了一定条件下的电压最优波形。

(6)其他非智能控制方式。在实际应用中,还有一些非智能控制方式在变频器的控制中得以实现,例如自适应控制、滑模变结构控制、差频控制、环流控制、频率控制等。

2. 智能控制方式

智能控制方式主要有神经网络控制、模糊控制、专家系统、学习控制等。在变频器的控制中采用智能控制方式在具体应用中有一些成功的范例。

(1)神经网络控制。神经网络控制方式应用在变频器的控制中,一般用来进行比较复杂的系统控制,由于这时对于系统的模型了解甚少,因此神经网络既要完成系统辨识的功能,又要进行控制。而且神经网络控制方式可以同时控制多个变频器,因此在多个变频器级联时进行控制比较合适。但是神经网络的层数太多或者算法过于复杂都会在具体应用中带来不少实际困难。

(2)模糊控制。模糊控制算法用于控制变频器的电压和频率,使电动机的升速得到控制,避免升速过快对电机使用寿命产生影响以及升速过慢影响工作效率。模糊控制的关键在于论域、隶属度以及模糊级别的划分,这种控制方式尤其适用于多输入单输出的控制系统。

(3)专家系统。专家系统是利用所谓“专家”的经验进行控制的一种控制方式,因此,专家系统中一般要建立一个专家库,存放一定的专家信息,另外还要有推理机制,以便于根据已知信息寻求理想的控制结果。专家库与推理机



制的设计是尤为重要的，关系着专家系统控制的优劣。应用专家系统既可以控制变频器的电压，又可以控制其电流。

(4) 学习控制。学习控制主要用于重复性的输入，而规则的 PWM 信号（例如中心调制 PWM）恰好满足这个条件，因此学习控制也可用于变频器的控制中。学习控制不需要了解太多的系统信息，但是需要 1~2 个学习周期，因此快速性相对较差，而且，学习控制的算法中有时需要实现超前环节，这用模拟器件是无法实现的，同时，学习控制还涉及稳定性的问题，在应用时要特别注意。

1.2.4 变频器的选用

变频器有着不同类型、不同品牌，也有不同的标准规格和技术参数。选择变频器时，应根据用户自身的实际情况与要求，选择出性价比最好的变频器，才是最合适的。选用变频器时既要考虑变频器的种类、用途、性价比的评估等因素，也要考虑变频器容量、售后服务等条件。

变频器的类型要根据负载类型要求来选择。变频器的防护等级与其安装环境相适应，变频器能否长期、安全、可靠运行关系重大，需要考虑环境温度、湿度、粉尘、酸碱度、腐蚀性气体等因素。

1. 变频器额定电流的选择

变频器的容量选择需要考虑许多因素，如电动机的容量、电动机额定电流、电动机加速时间和减速时间等，其中最主要的是电动机额定电流。变频器容量的选择应考虑以下原则。

(1) 轻载启动或连续运行时变频器的容量计算。电动机接入变频器运行与直接接入工频电源运行相比，由于变频器的输出电压、电流中会有高次谐波，电动机的功率因数、效率有所下降，电流约增加 10%，因此变频器的容量（电流）可计算为

I_{fe} ≥ 1.1 I_e (1-6)

I_{fe} ≥ 1.1 I_{max} (1-7)

式中：

I_{fe}——变频器的额定输出电流（A）；

I_e——电动机的额定电流（A）；

I_{max}——电动机实际运行中的最大电流（A）。

(2) 重载启动、频繁启动或制动运行时变频器的容量计算。重载启动、频繁启动或制动运行时，变频器的容量

I_{fe} ≥ (1.2~1.3) I_e (1-8)

(3) 对于风机、泵类负载，变频器的容量计算。对于风机、泵类负载，变频器的容量按式（1-5）计算。



笔记

(4) 加速、减速时变频器的容量计算。异步电动机在额定电压、额定功率下通常具有输出 200% 左右最大转矩的能力。但是变频器的最大输出转矩由其允许的最大输出电流决定, 此最大电流通常为变频器额定电流的 130%~150% (持续时间为 1 min), 所以电动机中流过的电流不会超过此值, 最大转矩也被限制在 130%~150%。

如果实际加速、减速时的转矩较小, 则可以减少变频器的容量, 但也应留有 10%。

频繁加速、减速运转的变频器容量计算, 先计算出负载等效电流 I_{jf} :

$$I_{jf} = \frac{I_1 t_1 + I_2 t_2 + \cdots + I_n t_n}{t_1 + t_2 + \cdots + t_n} \quad (1-9)$$

式中:

$I_1, I_2, \cdots, I_n$ ——各运行状态下的平均电流 (A);

$t_1, t_2, \cdots, t_n$ ——各运行状态下的时间 (s)。

然后计算变频器的额定输出电流:

$$I_{fe} = k I_{jf} \quad (1-10)$$

$$I_{fe} \geq \frac{I_q}{k_f} = \frac{k_q I_e}{k_f}$$

式中:

I_q ——电动机直接启动电流 (A);

k_q ——电动机直接启动电流倍数, 一般为 5~7;

k_f ——变频器的允许过载倍数, 产品手册可查, 一般取 1.5。

(5) 根据负载性质选择变频器的容量。即使相同功率的电动机, 负载性质不同, 所需的变频器的容量也不相同。其中, 二次方转矩负载所需的变频器容量比恒转矩负载的低。

(6) 多台电动机共用一台变频器的容量计算。除前面所讲内容需要注意之外, 还要按各电动机的电流总值来选择变频器的容量。若所有电动机容量均相等, 有部分电动机直接启动时, 可计算变频器容量:

$$I_{fe} \geq \frac{N_2 I_q + (N_1 - N_2) I_e}{k_f} \quad (1-11)$$

式中:

N_1 ——电动机总台数;

N_2 ——直接启动电动机总台数。

(7) 注意变频器的过载容量。通用变频器的过载容量通常为 125% (持续 1 min) 或 150% (持续 1 min), 需要超过此值的过载容量就必须增加变频器的容量。

2. 变频器额定功率的选择

(1) 一台变频器拖动一台电动机。当用一台变频器拖动一台电动机时, 变频器的额定功率大于等于电动机的额定功率即可:

$$P_{fe} \geq P_e \tag{1-12}$$

式中：

P_{fe} ——变频器额定功率 (kW)；

P_e ——电动机额定功率 (kW)。

(2) 一台变频器拖动多台电动机。当用一台变频器拖动多台电动机时，且多台电动机功率相等并在相同的工作环境和工况下同时启动运行时，可按式 (1-13) 选择变频器额定功率，节省投资成本。

$$P_{fe} \geq P_{e1}+P_{e2}+\cdots+P_{en} \tag{1-13}$$

(3) 多台电动机功率差别大且不允许同时启动运行。当多台电动机功率差别大且不允许同时启动运行时，不宜采用一台变频器拖动多台电动机，否则变频器的功率会很大，在经济上不合算。

(4) 变频器重载启动运行。在转动惯量大，启动转矩大，或电动机带负载且要正反转运行的情况下，变频器的功率 (容量) 应放大一级。

3. 变频器额定电压和频率的选择

变频器的额定电压一般可按电动机的额定电压选择。

对于通用变频器的频率可选用 0~240 Hz 或 0~400 Hz，对于风机、泵类专用变频器的频率可选用 0~120 Hz。

问题与思考

- 1. 依据交流电动机转速公式，交流电动机的调速方法有_____、_____和_____。
- 2. 变极调速就是改变定子的_____，使异步电动机的同步转速改变，从而得到转速的调节。
- 3. 变极调速通常采用改变定子_____的方法，最常用的三相绕组接法是_____和_____。
- 4. 转子电路串接电阻调速、改变定子电压调速和串级调速都属于_____调速。
- 5. 变频器是一种将交流电源整流成直流后再逆变为_____、_____可变的交流电源的专用装置。
- 6. 改变定子绕组接法从 Δ 变 YY 并联时，电动机极对数_____，同步转速_____。
- 7. 采用恒压频比 (U/f) 控制方式变频调速时，基频以下属于 () 调速，基频以上属于 () 调速。
 - A. 恒转矩
 - B. 恒功率
 - C. 恒电压
 - D. 恒电流





笔记

8. 变频器在恒压频比 (U/f) 控制方式下, 输出频率比较低时, 会出现输出转矩不足的情况, 要求变频器具有 () 功能。

- A. 电压补偿 B. 电流补偿
C. 功率补偿 D. 转速补偿

9. 在 U/f 控制方式下, 当输出频率比较低时会出现输出转矩不足的情况, 要求变频器具有 () 功能。

- A. 频率偏置 B. 转差补偿
C. 转矩补偿 D. 段速控制

10. 变频调速过程中, 为了保持磁通恒定, 必须保持 ()。

- A. 电压 U 不变 B. 频率 f 不变
C. U/f 不变 D. 以上均可

11. 对电动机从基本频率向上的变频调速属于 () 调速。

- A. 恒功率 B. 恒转矩
C. 恒磁通 D. 恒转差率

12. 为什么变极调速改变绕组接法后需要交换两个出线端?

13. 变频器常用的控制方式有哪些? 简要说明。

14. 异步电动机进行变频调速时, 为什么希望保持主磁通恒定?

任务 1.3 变频器安装

任务引入

不同变频器的安装步骤方法类似, 主要涉及安装现场的环境、温度, 包括是否无腐蚀、无易燃易爆气体和液体, 是否无灰尘、漂浮性的纤维及金属颗粒; 所安装场所的基础、墙壁应坚固无损伤、无震动、无阳光直射、无电磁干扰等要求。而在变频器安装中, 要注意根据不同变频器的特点来进行测试、检查、接线等。所以, 可以通过学习变频器硬件结构、变频器件、端子结构来掌握不同变频器的安装方法。

本任务学习目标是了解变频器件、熟悉变频器硬件结构、掌握变频器安装与接线方法。

1.3.1 变频器硬件结构



目前中小功率变频器大部分采用交 - 直 - 交方式，先把工频交流电源通过整流器转换成直流电源，然后再把直流电源转换成频率、电压均可控制的交流电源以供给电动机。

电网和电动机之间的能流变换通过主电路完成，控制电路负责能流变换过程中的信号检测、功率驱动、开关控制、电路保护和人机交互的操作显示等功能。变频器内部结构如图 1-10 所示，变频器结构框图如图 1-11 所示。

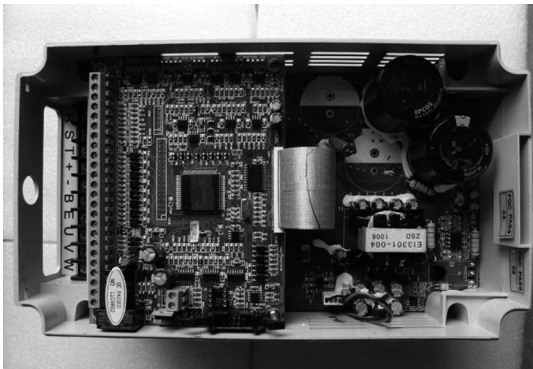


图 1-10 变频器内部结构

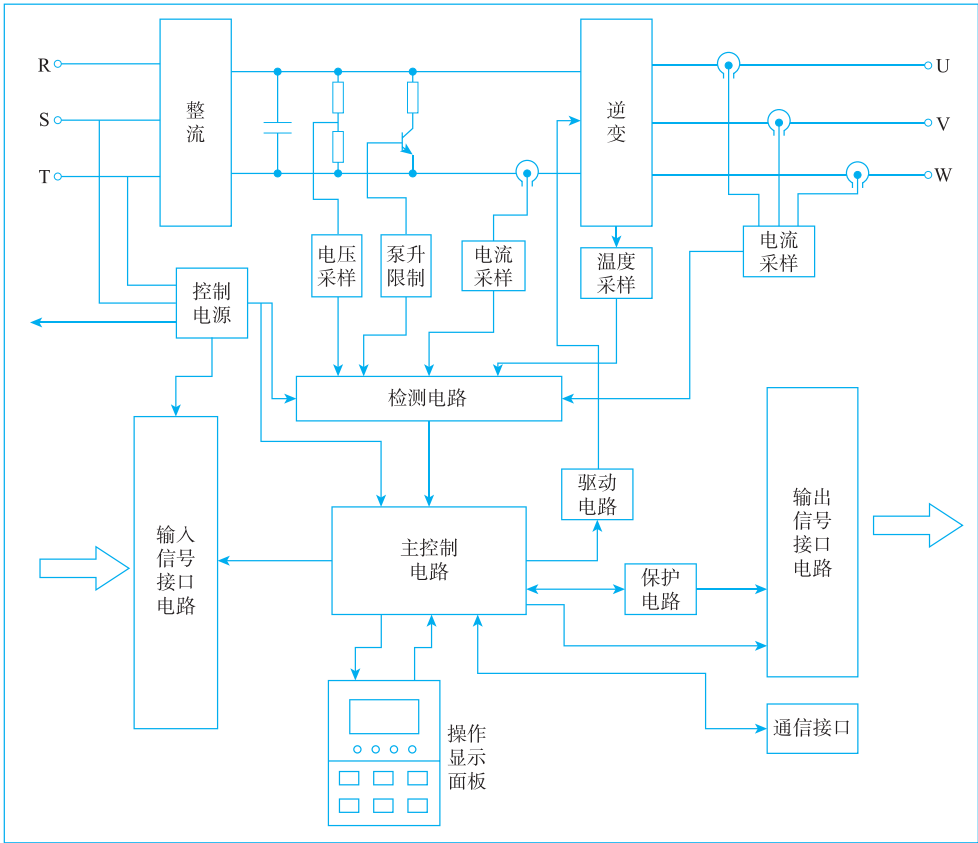


图 1-11 变频器结构框图

1. 变频器主电路

通用变频器一般都是采用交 - 直 - 交的电能量转换方式，其主电路基本构造



笔记

如图 1-12 所示。通用变频器的主回路包括整流部分、直流环节、逆变部分、制动或回馈环节等。

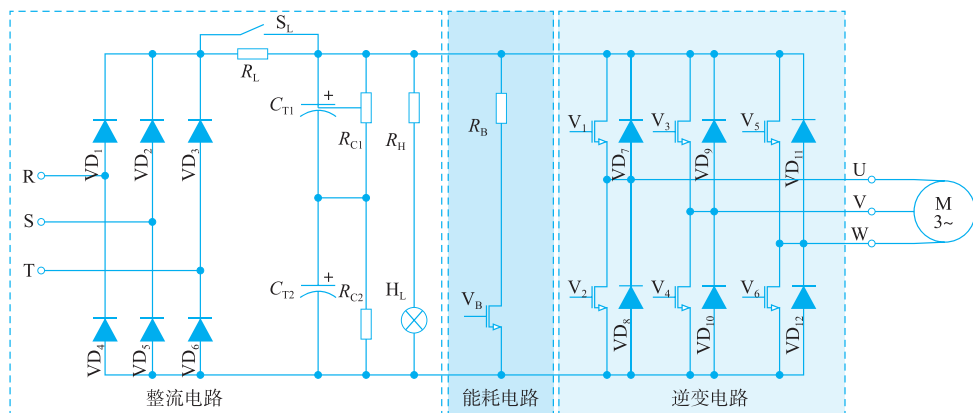


图 1-12 通用变频器的主电路基本构造

(1) 整流部分。整流电路一般采用由整流二极管组成的三相或单相整流桥，将工频交流电整流变成直流电。小功率通用变频器的整流桥输入多为单相 220 V，较大功率的整流桥输入均为三相 380 V 或 440 V。进线用 R、S、T 或 L1、L2、L3 标识。

图 1-12 中的二极管 $VD_1 \sim VD_6$ 组成三相整流桥，将电源的三相交流电全波整流成直流电。输入电源的线电压为 U_L ，则三相全波整流后平均直流电压 U_D 的大小为

$$U_D = 1.35 \times U_L \quad (1-14)$$

三相电源的线电压为 380 V，故全波整流后的平均电压 $U_D = 1.35 \times 380 \text{ V} = 513 \text{ V}$ 。

(2) 直流环节。三相整流桥输出的电压和电流属直流脉动电压和电流。为了减小直流电压和电流的波动，直流滤波电路起到对整流电路的输出进行滤波的作用，同时还兼有补偿无功功率的作用。

①滤波电容 C_{T1} 和 C_{T2} 。通用变频器直流滤波电路的大容量铝电解电容，通常是采用电容器串联和并联构成的电容器组，如图 1-12 中电容 C_{T1} 和 C_{T2} 串联，以得到所需的耐压值和容量。另外，由于电解电容器容量有较大的离散性，这将使它们的电压不相等，因此，电容器要各并联一个阻值相等的匀压电阻，如图 1-12 中电阻 R_{C1} 和 R_{C2} 用以消除离散性的影响。

②限流电阻 R_L 和开关 S_L 。为避免大电容在通电瞬间产生过大的充电电流（浪涌电流），一般还要在直流回路串入一个限流电阻 R_L ，在变频器初始接通交流电时，限制瞬间充电电流，待几十毫秒后，充电电流减小，再由开关 S_L 闭合短接限流电阻 R_L ，以免影响电路正常工作。开关 S_L 可以是接触器触头，也可以是功率开关器件，如晶闸管等。



③电源指示灯 H_L 。电源指示灯 H_L 除了表示电源是否接通以外,还有一个十分重要的功能,即在变频器切断电源后,显示滤波电容器 C_T 上的电荷是否已经释放完毕。

(3) 逆变部分。逆变电路的作用是在控制电路的作用下,将直流电源转换成频率和电压都可以调节的交流电源。逆变电路的输出就是变频器的输出,所以逆变电路是变频器的核心电路之一,起着非常重要的作用。最常见的逆变电路结构形式是利用六个功率开关器件 $V_1 \sim V_6$, 常用 IGBT (绝缘栅双极型晶体管) 组成的三相桥式逆变电路,有规律地控制逆变器中功率开关器件的导通与关断,可以得到频率改变的三相交流输出。

逆变电路中都设置有续流电路,由续流二极管 $VD_7 \sim VD_{12}$ 组成。电动机的绕组是电感性的,其电流具有无功分量。 $VD_7 \sim VD_{12}$ 为无功电流返回直流电路时提供“通道”。当频率下降、电动机处于再生制动状态时,再生电流将通过 $VD_7 \sim VD_{12}$ 整流后返回直流电路。 $V_1 \sim V_6$ 进行逆变工作过程时,同一桥臂的两个逆变管处于不停地交替导通和截止的状态,在这个交替和截止的换相过程中,也不时地需要 $VD_7 \sim VD_{12}$ 提供通路。

(4) 制动或回馈环节。当电动机快速减速时,感应电动机及其负载由于惯性很容易使转差频率 $s < 0$,电动机进入再生制动,电流经逆变器的续流二极管整流成直流对滤波电容充电。由于用变频器的整流桥是由单向导电的二极管组成的,不能吸收电动机回馈的电流,因此,若电动机原来的转速较高,再生制动时间较长,直流母线电压会一直上升,成为对主电路开关元件和滤波电容形成威胁的过高电压,即所谓的泵生电压。

通用变频器一般通过制动电阻 R_B 来消耗这些能量,即将一个大功率开关器件 V_B 和一个制动电阻 R_B 相串联,跨接在中间直流环节正、负母线两端,如图 1-12 中能耗电路所示。大功率开关器件 V_B 在变频器内,而制动电阻 R_B 通常作为附件放在变频器外。当直流电压达到一定值时,该大功率开关器件被导通,制动电阻就接入电路,从而消耗掉电动机回馈的能量,以维持直流母线电压基本不变。

2. 控制电路

控制电路是变频器中最复杂、最关键的部分,具有设定和显示运行参数、信号检测、系统保护、计算与控制、驱动逆变管等作用。

(1) 微处理器。控制电路大都是以高性能微处理器和专用集成电路 (application specific integrated circuit, ASIC) 为核心的数字电路。ASIC 的应用,把控制软件和系统监控软件以及部分逻辑电路全部集成在芯片中,使控制电路板更简洁,具有良好的保密性。数据计算由数字信号处理器 (digital signal processing, DSP) 完成,计算结果和数据经过数据总线和 ASIC 中的 CPU (中央



处理器) 进行交换, ROM (只读存储器)、RAM (随机存储器) 存放程序或中间数据。

变频器控制的核心部分由单片机构成的中央处理单元组成, 包括控制程序、控制方式等。外部的控制信号、内部的检测信号以及用户的参数设定等送到 CPU, 并经 CPU 处理后, 对变频器进行相关的控制。频率设定信号和系统检测信号的电压、电流等经 A/D (模拟数字转换器) 变换送入控制电路。

(2) PWM 信号生成部分。PWM 信号生成部分主要由专用大规模集成电路 (ASIC) 或专用芯片完成, 即 ASIC 根据微处理器的指令值和一些必要的信号, 实时输出按一定规律变化的 PWM 信号。大多数通用变频器的基本运行方式是频率开环控制, 必要时可以引入若干信号的反馈, 实现转差闭环控制或矢量变换控制, 以适应高精度调速的需要。

(3) 驱动电路。变频器的功率器件主要是 IGBT 模块或 IPM (智能功率) 模块, 驱动电路将 PWM 驱动信号进行隔离放大, 输出相应的导通、关断脉冲, 驱动主电路的半导体器件导通、关断。

(4) 检测电路。检测电路主要是对整个变频器系统的输入电压、输入电流, 中间直流电压、直流电流, 逆变器输出电压、输出电流, 温升以及电动机转速等进行信号采集。经采样电路取得的电压、电流、温度、转速等信号经信号处理电路进行分压、光电隔离、滤波、放大等处理后进入 A/D 转换器, 然后作为反馈信号输入 CPU, 作为控制算法的依据和供显示用, 或者作为一个开关量或电平信号输入至故障保护电路。

(5) 故障保护。故障保护有欠电压、缺相、过电压、过电流、过载、短路以及温度过高等保护。变频器控制回路中的保护, 可对变频器和异步电动机实施保护。由于变频器负载侧短路等, 变频器的电流瞬时突变超过允许值时, 通过瞬时过电流保护, 立即停止变频器运转, 切断电流。变频器的输出电流达到异常值时, 也同样停止变频器运转。

变频器过载保护可以在变频器输出电流超过额定值, 且持续流通达到规定的时间以上时, 为了防止变频器元件、电线等损坏而停止运转。采用变频使电动机快速减速时, 由于再生功率使直流电路电压升高, 有时超过允许值, 再生过电压保护可以停止变频器, 防止过电压。瞬时停电保护对于数毫秒以内的瞬时停电, 控制回路工作正常, 但当瞬时停电达数十毫秒以上时, 通常不仅控制回路误动作, 主回路也不能供电, 所以检出停电后使变频器停止运转。变频器负载侧接地时, 为了保护变频器设有接地过电流保护功能。变频器装有冷却风机, 当风机异常时装置内温度将上升, 采用风机热继电器或元件散热片温度传感器, 检测异常温度后可以停止变频器运转。

为防止低速运转的过热, 通过在异步电动机内安装温度检测装置, 或者利



用装在变频器内的电子热保护来检测过热。动作频繁时，可以考虑减轻电动机负载、增加电动机及变频器容量等。变频器的输出频率或者异步电动机的速度超过规定值时，停止变频器运转。对于自通风的普通异步电动机，一旦电动机过热，应立即封锁逆变器 PWM 信号并断开电动机电路。

（6）外部接口电路。外部接口电路主要指从外部电路输入控制信号，或将变频器的正常运转信号（如频率、电压、电流等）以及故障信号输出供外部电路使用，又或将转速等信号反馈至变频器以构成闭环系统的输入和输出接线端子。键盘操作即通过面板上的键盘输入操作指令，大多数变频器的面板都可以取下，安置到操作方便的地方，面板和变频器之间用延长线连接，实现远距离控制。外部端子包括主电路端子和控制电路端子。其中，控制电路端子又分为输入控制端和输出控制端。输入控制端既可以接收模拟量输入信号，又可以接收开关量输入信号；输出控制端有用于报警输出的端子、指示变频器运行状态的端子以及用于指示各种输出数据的测量端子。通信接口用于变频器和其他控制设备的通信。

1.3.2 变频器件

变频技术建立在电力电子技术基础之上。电力电子器件（power electronic device）是用于电能变换和电能控制电路中的大功率（通常指电流为数十至数千安，电压为数百伏以上）电子器件，又称功率电子器件。变频器的主电路都采用电力电子器件作为开关器件，电力电子器件是变频器发展的基础。

按电力电子器件的可控性分类，电力电子器件可以分为不可控型、半控型和全控型三大类；按照驱动方式分类，可分为电流驱动和电压驱动两种，如图 1-13 所示。

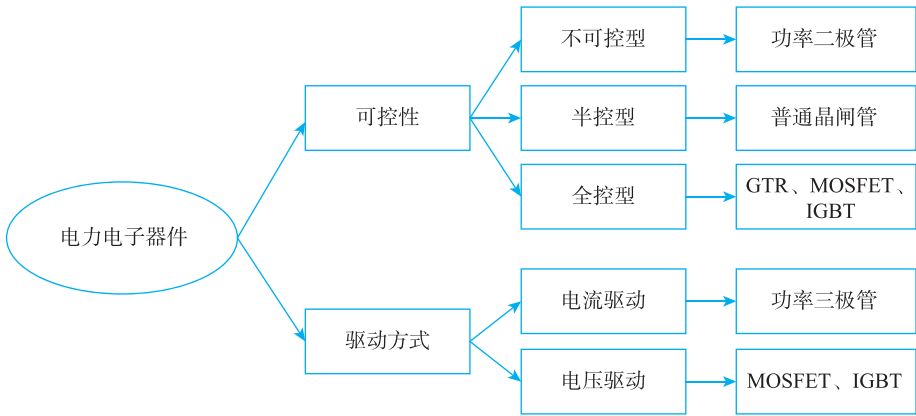


图 1-13 常用电力电子器件分类

1. 不可控型器件

功率整流二极管是电力电子器件中结构较简单、使用较广泛的一种器件，通



笔记

常用在变频器主电路的整流电路当中，属于二端器件。功率整流二极管特性与普通二极管相似，只要在二极管两端施加足够大的正向阳极电压，二极管就会导通，施加反向电压则截止。由于导通时，无法控制二极管阳极电流，因此称为不可控器件。功率整流二极管外形如图 1-14 所示。



图 1-14 功率整流二极管外形

2. 半控型器件

半控型器件的典型代表是晶闸管（silicon controlled rectifier, SCR），晶闸管是一种三端器件，有三个极：阳极、阴极和门极。晶闸管的工作条件是在晶闸管的阳极、阴极两端施加正向电压后，通过门极输入触发信号，控制晶闸管导通。普通晶闸管可以控制导通，但却不能控制关断，工作频率较低，因此称为半控型器件，其外形如图 1-15 所示。晶闸管的派生器件有快速晶闸管、双向晶闸管、逆导晶闸管、光控晶闸管等。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，广泛应用于可控整流、交流调压、无触点电子开关、逆变及变频等电子电路中。



图 1-15 普通晶闸管外形

晶闸管智能模块指的是一种特殊的模块，其采用全数字移相触发集成电路，实现了控制电路和晶闸管主电路集成一体化，使模块具备了弱电控制强电的电力调控功能。

3. 全控型器件

门极信号既能使晶闸管导通，又能使其关断，故该类晶闸管称为全控器件，也称为自关断器件。如图 1-16 所示，门极可关断晶闸管（gate-turn-off thyristor, GTO）、功率（电力）晶体管（giant transistor, GTR）、电力场效应晶体管（power MOSFET）和绝缘栅双极型晶体管（insulated gate bipolar transistor, IGBT）等器件都属于全控型电力电子器件。

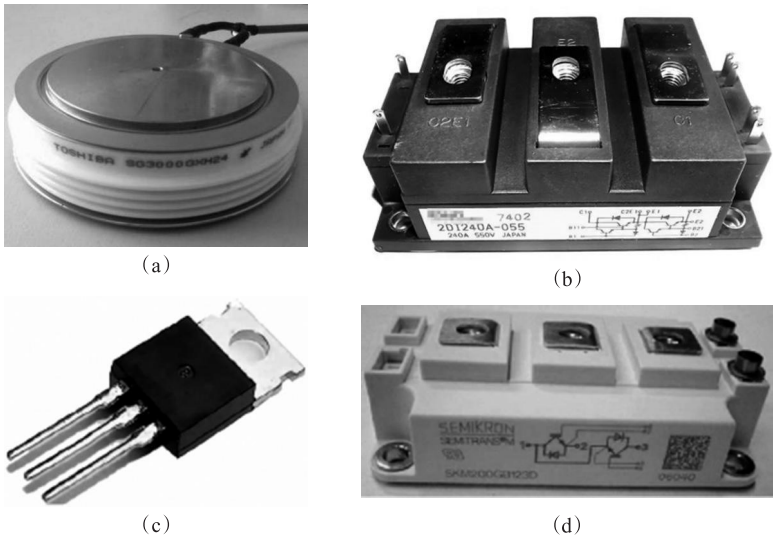


图 1-16 常用全控型器件外形

- (a) 门极可关断晶闸管 (GTO); (b) 功率晶体管 (GTR);
(c) 电力场效应晶体管 (power MOSFET); (d) 绝缘栅双极型晶体管 (IGBT)

4. 绝缘栅型晶体管

现代电力电子器件仍然在向大功率、高频化和易驱动方向发展。电力电子模块化是提升功率密度的重要一步。电力电子器件的制造工艺连续迭代，性能指标不断提高。

(1) IGBT 工作原理。IGBT 是由 BJT（bipolar junction transistor，双极结型晶体三极管）和 MOSFET（metal oxide semiconductor FET，绝缘栅型场效应管）组成的复合全控型功率半导体器件，其具有自关断的特征，兼有功率 MOSFET 和双极性器件的优点。IGBT 具有高输入阻抗、电压控制、驱动功率小、开关频率高、饱和压降低、耐高压、大电流、安全工作频率宽等优点。

IGBT 是由 GTR 与 MOSFET 组成的达林顿结构，是一个由 MOSFET 驱动的厚基区 PNP 晶体管， R_N 为晶体管基区内的调制电阻，IGBT 的驱动原理与电力 MOSFET 基本相同，是一个场控器件，通断由栅射极电压 U_{GE} 决定，其外部有三个电极，分别为栅极（G）、集电极（C）、发射极（E），如图 1-17 所示。



笔记

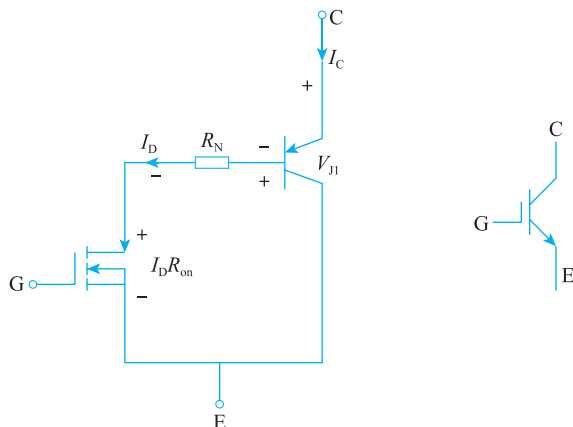


图 1-17 IGBT 等效电路及符号

U_{CG} 大于开启电压 $U_{CE(th)}$ 时, MOSFET 内形成沟道, 为晶体管提供基极电流, IGBT 导通。电导调制效应使电阻 R_N 减小, 使通态压降小。栅射极间施加反压或不加信号时, MOSFET 内的沟道消失, 晶体管的基极电流被切断, IGBT 关断。

(2) IGBT 分类。按照使用电压范围, 可以将 IGBT 分为超低压、低压、中压和高压几大类产品, 不同电压范围对应着不同的应用场景; IGBT 从封装形式分类可以分为 IGBT 单管 (分立器件)、IGBT 模块和 IGBT-IPM 智能功率模块三大类产品, 如图 1-18 所示。

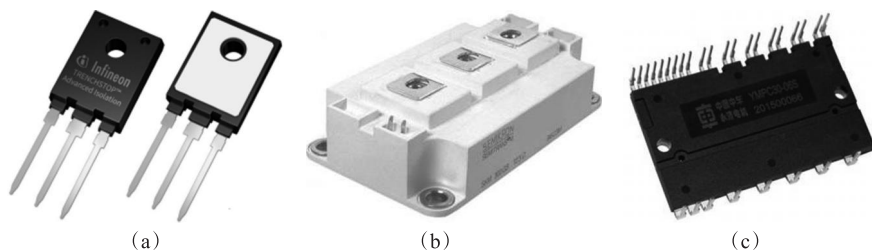


图 1-18 IGBT 的不同封装形式

(a) 单管封装; (b) 模块封装; (c) IGBT-IPM 封装

① IGBT 单管: 为一个 N 沟道增强型绝缘栅双极晶体管结构, 通过加正向栅极电压形成沟道, 给 PNP 晶体管提供基极电流, 使 IGBT 导通。

② IGBT 模块: 在单管的基础上加入了 IC 驱动和各种驱动保护电路, 采用更先进的封装技术。

③ IGBT-IPM: 是 IGBT 模块进一步发展的产物, 集成了逻辑、控制、检测和保护电路, 缩小了系统体积, 增强了系统的可靠性。

(3) IGBT 应用领域。IGBT 是能源转换与传输的核心器件, 是电力电子装置的“CPU”。IGBT 已广泛应用于工业、4C (通信、计算机、消费电子、汽车

电子)、航空航天、国防军工等传统产业领域，以及轨道交通、新能源、智能电网、新能源汽车等战略性新兴产业领域。



5. 智能功率模块

智能功率模块（intelligent power module，IPM）一般以 IGBT 为基本功率开关元件，构成单相或三相逆变器的专用功能模块，是一种先进的功率开关器件，具有 IGBT 的所有优点。IPM 将主开关器件、续流二极管、驱动电路、过电流保护电路、过热保护电路和短路保护电路以及驱动电源不足保护电路、接口电路等集成在同一封装内，形成高度集成的智能功率集成电路，如图 1-19 所示。

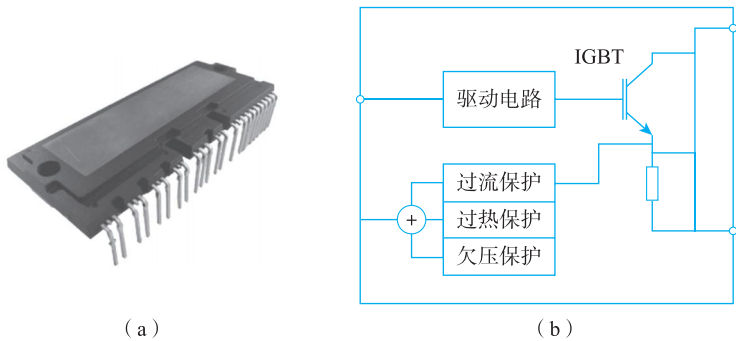


图 1-19 IPM 实物封装及内部结构
(a) IPM 实物封装；(b) IPM 内部结构

智能功率模块将功率开关和驱动电路集成在一起，内置有过电流保护、短路保护、控制电源欠电压保护、过热保护等故障检测电路，可输出警报信号。内置 IGBT 驱动电路和保护电路的控制 IC，容易设计外围电路，从而能够保证系统的高可靠性，具有体积小、功能多、功耗小、使用方便等优点，适用于 AC 伺服系统、空调机、升降机等。

1.3.3 变频器分类

变频器的种类繁多，可以按照电压等级、有无直流环节、中间直流环节储能方式、调制方式、控制方式和用途进行分类。

1. 按照电压等级分类

在实际应用中，低压变频器具有基本统一的拓扑结构，而高压变频器则因实现高压的方式不同而出现多种主电路拓扑结构。按照电压等级划分，低压变频器主要是指 380 V 等级，而中高压变频器通常指驱动电压等级在 1 kV 以上交流电动机的中、大容量变频器，我国主要为 6 kV 和 10 kV 等级。

2. 按照有无直流环节分类

变频器按照有无直流环节可分为交 - 交变频器和交 - 直 - 交变频器。



笔记

(1) 交-交变频器。交-交变频器没有中间直流环节，每相都由两个相互反并联的整流电路组成，正桥提供正向相电流，反桥提供负向相电流。三相共六个整流桥，一般采用晶闸管进行可控整流。晶闸管采用自然换流方式。整流桥可以工作在整流状态，也可以工作在逆变状态，当电动机工作在发电状态时，可以实现能量向电网的直接回馈。逆变电路可控，主要功能是将直流电变成交流电输出给电动机。当电动机工作在发电状态时（如制动），逆变电路可以工作在整流状态，将电动机的能量送到直流回路，如图 1-20 (a) 所示。

电路由接在同一交流电源上的 P（正）组和 N（负）组反并联的两组晶闸管变流电路组成，负载相同。两组变流器采用相控电路，P 组工作时，负载电流自上而下，设为正向；N 组工作时，负载电流自下而上，设为负向。让两组变频器按一定的频率交替工作，负载就可以得到该频率的交流电，如图 1-20 (b) 所示。改变两组变流器的切换频率，负载上的交流电压频率就可以得到改变。改变交流电路工作时的触发延迟角 α ，就可以改变交流输出电压的幅值。

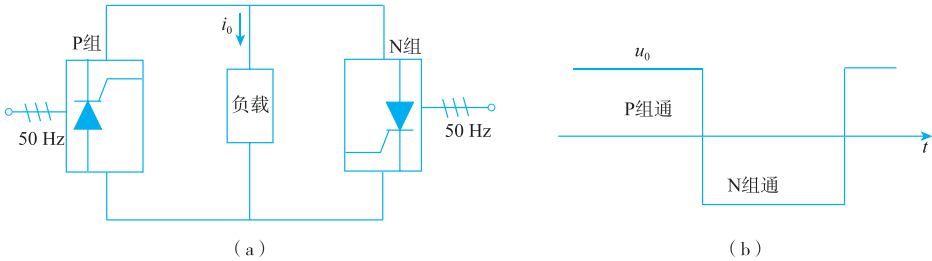


图 1-20 交-交变频器一相电路结构及驱动波形

(a) 单相结构图；(b) 单相驱动图

(2) 交-直-交变频器。与交-交变频器相比，交-直-交变频器具有中间直流环节，先将电网交流电用整流电路变成直流电，再用逆变电路将直流电转换为频率及电压可变的交流电。整流电路、直流环节、逆变电路是交-直-交变频器的三个基本组成部分，整流电路一般采用二极管全波整流，固定直流电压输出，只需要完成直流到交流的逆变控制，即能实现频率及电压的调节，如图 1-21 所示。

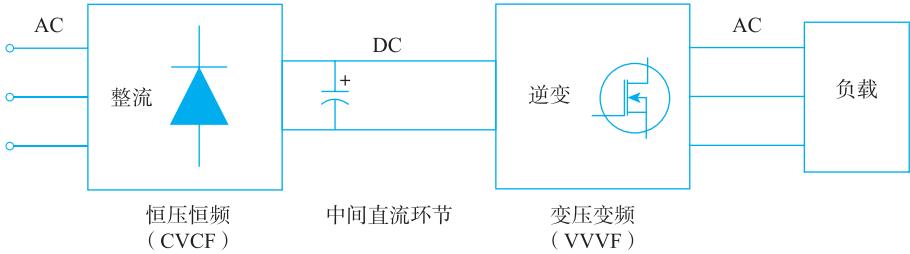


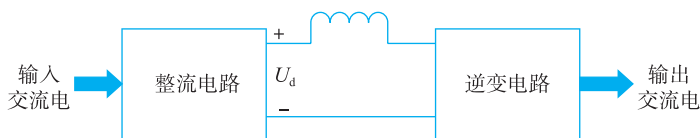
图 1-21 交-直-交变频器原理

3. 按照直流环节储能方式分类

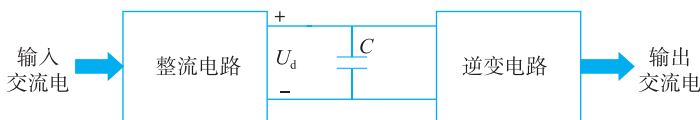
交-直-交变频器具有中间直流环节，按照直流环节储能方式的不同，变

变频器可分为电流源型变频器和电压源型变频器。

(1) 电流源型变频器。电流源型变频器输入端一般采用可控整流控制电流的大小,中间采用大电感对电流进行平滑控制,逆变桥将直流电转换为频率可变的交流电,供给交流电动机,如图 1-22 所示。由于电流可控,电流源型变频器具有很好的抗过电流能力,甚至负载短路都不会导致变频器损坏。同时由于电流源型变频器是可控移相整流,尽管电流方向不变,但整流桥输出电压可以为负,从而进入逆变状态工作,实现能量由变频器向电网的回馈,使电动机实现四象限运行,可用于频繁正反转或需要制动的场合。



(2) 电压源型变频器。电压源型变频器输入端一般不可控，大多采用二极管进行全波整流，中间采用大电容滤波，对电压进行平滑控制，如图 1-23 所示。逆变桥采用 PWM 控制技术，既控制电压输出波形中交流基波的幅值大小，又控制交流基波电压的频率。



电压源型变频器直流回路的电压大小基本是不变的。逆变桥直接对直流电压进行 PWM 控制，不直接控制电流。电动机侧得到的是幅值恒定、占空比和频率可变的方波电压。电动机的电流实际上是其在变频器输出电压控制下运行时所产生的，为正弦波形式。

由于整流桥不可控，输出电压和电流的方向均确定不变，不能实现能量回馈，因而这种变频器不适用于频繁正反转或需要制动的场合。但由于整流桥不可控，不会造成电流相位的滞后，因此其网侧功率因数较高，并且不随输出频率而变化。

电压源型变频器的输入端如果也采用 PWM 控制，则可以在具有能量回馈功能的同时，也具有较高的功率因数。

4. 按照调制方式分类

通用变频器为了保证电动机主磁通的恒定，需要同时调节逆变器的输出电压和频率。按输出电压调节方式不同，变频器可分为脉冲幅值调节方式（pulse amplitude modulation, PAM）和脉冲宽度调节方式（pulse width modulation, PWM）。

(1) 脉冲幅值调节方式。脉冲幅值调节方式是通过改变直流电压的幅值进行

 笔记



笔记

调压的方式。在变频器中，逆变电路只负责调节输出频率，而输出电压的调节则由相控整流器或直流斩波器通过调节直流电压 E_d 或 I_d 的幅值去实现。变频器的输出电压波形如图 1-24 所示。

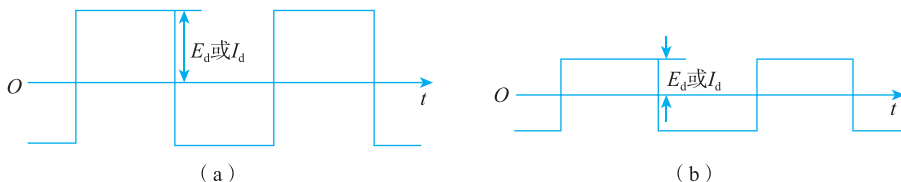


图 1-24 PAM 方式调节输出的电压波形

(a) 调压前; (b) 调压后

(2) 脉冲宽度调节方式。在变频器的逆变电路中，脉冲宽度调节方式同时对输出电压（电流）的幅值和频率进行控制，以较高频率对逆变电路的半导体开关元器件进行通断，改变输出脉冲的宽度（占空比），来达到控制电压（电流）的目的。此方式通常采用参考电压与载频三角波互相比，产生开关器件的导通时间，改变输出脉冲的占空比。

为了使电动机的调速更加平滑，可以采用正弦波 u_r 作为调制波，三角波 u_c 作为载波，将调制波正弦波与载波三角波相比较，得到脉冲宽度按照正弦规律变化的输出脉冲 u_o ，使输出电压的平均值接近于正弦波，这种控制方式称为正弦 PWM (SPWM) 控制。图 1-25 为单极性 SPWM 波形，在正弦波的正半周期，PWM 只有一种极性，在正弦波的负半周期，PWM 同样只有一种极性，但是与正半周期相反。采用 SPWM 控制方式的变频器可以减少高次谐波带来的各种不良影响，转矩波动小，而且具有控制电路简单、成本低等特点，是通用变频器采用最多的一种逆变电路控制方式。

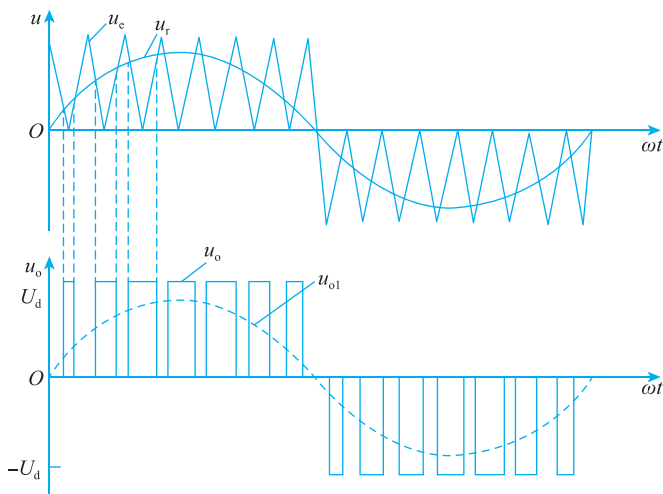


图 1-25 单极性 SPWM 波形

5. 按照控制方式分类

变频器按照控制方式可分为压频比（ U/f ）控制变频器、矢量控制变频器、直接转矩控制变频器等。

6. 按照用途分类

（1）通用变频器。通用变频器具有通用性，可以应用于标准异步电动机传动、工业生产及民用各个领域。通用变频器频率调节范围宽，输出力矩大，动态性能好。因此，绝大多数变频器都可当作通用变频器使用。

（2）风机、水泵用变频器。针对风机、泵类设计的变频器，符合其运行特性，其主要特点是过载力较低，具有闭环控制 PID（比例、积分、微分）调节功能，并具有“1 控 X”的切换功能。

（3）高性能变频器。高性能变频器基本采用了矢量控制方式，能进行四象限运行，驱动对象通常是变频器厂家指定的专用电动机，主要用于对机械特性和动态响应要求较高的场合。

（4）具有电源再生功能的变频器。当变频器中直流母线上的再生电压过高时，能将直流电源逆变成三相交流电反馈给电网，这种变频器主要用于电动机长时间处于再生状态的场合，如起重机械的吊钩电动机等。

（5）其他专业变频器。这类变频器是指应用在专业行业领域的变频器，如电梯专业变频器、纺织专业变频器、张力控制专业变频器、中频变频器等。



1.3.4 变频器的安装要求和安装方式

1. 变频器安装要求

（1）变频器安装环境温度。温度是影响变频器寿命及可靠性的重要因素，变频器与其他电子设备一样，对周围环境温度有一定的要求，一般为 $-10\sim 50^{\circ}\text{C}$ 。如散热条件好，环境温度上限可提高到 50°C ，超过此上限，温度每升高 10°C ，变频器的寿命减少一半。在控制箱中，变频器一般应安装在箱体上部，并严格遵守产品说明书中的安装要求，绝对不允许把发热元件或易发热的元件紧靠变频器的底部安装。

（2）变频器安装环境湿度。变频器对环境湿度有一定要求，变频器的周围空气相对湿度要求不大于 $90\%\text{RH}$ （表面无凝露）。湿度太高且湿度变化较大时，变频器内部易出现结露现象，其绝缘性能就会大大降低，甚至可能引发短路事故。必要时，必须在箱中增加干燥剂和加热器。

（3）变频器安装场所无水滴、蒸汽、酸、碱、腐蚀性气体及导电粉尘。对导电性粉尘场所，采用封闭结构。对可能产生腐蚀性气体的场所，使用环境如果腐蚀性气体浓度大，不仅会腐蚀元器件的引线、印刷电路板等，还会加速塑料器件



的老化,降低绝缘性能,因此要对控制板进行防腐蚀处理。

(4) 变频器安装避免电磁干扰。变频器在工作中由于整流和变频,周围会产生干扰电磁波,这些高频电磁波对附近的仪表、仪器有一定的干扰。因此,柜内仪表和电子系统,应该选用金属外壳,屏蔽变频器对仪表的干扰。所有的元器件均应可靠接地,除此之外,各电气元件、仪器及仪表之间的连线应选用屏蔽控制电缆,且屏蔽层应接地。如果处理不好电磁干扰,往往会使整个系统无法工作,导致控制单元失灵或损坏。

(5) 变频器安装避免强烈振动。装有变频器的控制柜受到机械振动和冲击时,会引起电气接触不良甚至造成短路等严重故障。除了提高控制柜的机械强度、远离振动源和冲击源外,还应使用抗震橡皮垫固定控制柜内外电磁开关之类产生振动的元器件。一般在设备运行一段时间后,应对其进行检查和维护。

(6) 变频器的安装需要远离高温且无阳光直射。

(7) 变频器的安装禁止在易燃、易爆环境。

(8) 变频器安装在海拔高度 1000 m 以下可以输出额定功率。但海拔高度超过 1000 m 时,其输出功率会下降。海拔高度超过 1000 m 时,变频器输出电流减少,海拔高度为 4000 m 时,输出电流为 1000 m 时的 40%。

2. 变频器的安装方式

(1) 壁挂式安装。变频器的外壳设计比较牢固,一般情况下,允许直接安装在墙壁上,称为壁挂式。为了保证通风良好,所有变频器都必须垂直安装,变频器与周围物体之间的距离应满足下列条件:两侧大于 100 mm、上下大于 150 mm,而且为了防止杂物掉进变频器的出风口阻塞风道,在变频器出风口的上方最好安装挡板。

(2) 柜式安装。当现场的灰尘过多,湿度比较大,或变频器外围配件比较多,需要和变频器安装在一起时,可以采用柜式安装。变频器柜式安装是目前最好的安装方式,因为这种方式可以起到屏蔽辐射干扰的作用,同时也可以起到防灰尘、防潮湿、防光照等作用。

变频器采用柜内冷却方式时,变频柜顶端应安装抽风式冷却风扇,并尽量装在变频器的正上方(这样便于空气流通);多台变频器安装应尽量并列安装,如必须采用纵向方式安装,应在两台变频器间加装隔板。

1.3.5 变频器的主电路及配线

变频器安装除了考虑安装环境、安装方式外,在控制柜内安装时,还需要考虑电磁干扰、配线方式等因素。常用变频器电气连接如图 1-26 所示。

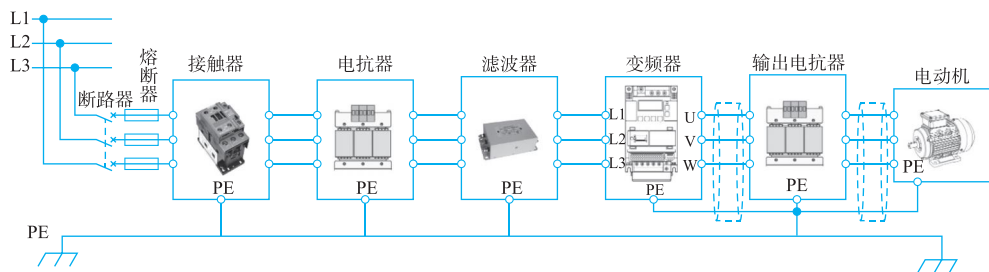


图 1-26 常用变频器电气连接

1. 回路器件

（1）断路器。断路器的主要功能是接通和断开变频器电源，对变频器进行过电流、欠电压保护。

①隔离作用。当变频器维修时，或长时间不用时，将其切断，使变频器与电源隔离以确保安全。

②保护作用。低压断路器具有过电流及欠电压等保护功能，当变频器的输入侧发生短路或电源电压过低时，可迅速进行保护。

（2）熔断器。熔断器用来对变频器进行过电流保护，选用熔断器的额定电流时，一般选用大于电动机额定电流的 1.1~2.0 倍。

（3）交流接触器。交流接触器的功能是在变频器出现故障时切断主电路，并防止掉电及故障后的再启动。按照安装位置的不同，交流接触器可分为输入侧交流接触器和输出侧交流接触器。

输入侧交流接触器安装在变频器的输入端，可以远距离接通和分断三相交流电源。

输出侧交流接触器仅用于和工频切换等特殊情况，一般并不采用，并且输出侧交流接触器动作前需要先停止变频器运行，即变频器没有输出。

（4）交流电抗器。交流电抗器是一个带铁芯的三相电感器。交流电抗器的主要作用是，抑制谐波电流，提高变频器的电能利用效率（可提高功率因数）；在接通变频器的瞬间降低浪涌电流，减小电流对变频器的冲击；减小三相电源不平衡对变频器的影响。

（5）滤波器。输入侧滤波器也就是噪声滤波器，用来削弱高频率的谐波电流，以防止变频器对其他设备的干扰。滤波器主要由滤波电抗器和电容器组成。

（6）制动电阻 R_B 。制动电阻及制动单元的功能是当电动机因频率下降或重物下降（如起重机械）而处于再生制动状态时，避免在直流回路中产生过高的泵升电压。

（7）输出电抗器。变频器增加输出电抗器的作用是平衡出线电缆的分布容性负载，增大出线主回路的短路阻抗，并能抑制变频器输出的谐波，起到减小变频



笔记



器噪声的作用。输出电抗器还能够延长变频器的有效传输距离，有效抑制变频器的 IGBT 模块开关时产生的瞬间高压，降低电机的噪声，降低涡流损耗，保护变频器内部的功率开关器件。

2. 电缆配线

变频器主回路电压高、电流大，所以选择主回路连接导线时，应考虑电流量、短路保护、电缆压降等因素。一般情况下，变频器输入电流的有效值比电动机电流大。

变频器与电动机之间的连接电缆要尽量短，因为此电缆若距离长，则电压降大，可能会引起电动机转矩的不足。特别是变频器输出频率较低时，其输出电压也较低，线路电压损失所占百分比加大。变频器与电动机之间的线路压降规定不能超过额定电压的 2%。采用专用变频器时，如果有条件对变频器的输出电压进行补偿，则线路压降损失允许值可取为额定电压的 5%。

3. 变频器接地

为了防止漏电和干扰信号侵入或向外辐射，变频器必须良好接地。在接地时，应采用较粗的短导线将变频器的接地端子 PE 端与地连接。当变频器和多台设备一起使用时，每台设备都应分别接地。当变频器为单体型安装时，接地电缆与变频器的接地端子连接；当变频器被设置在配电柜中时，接地电缆则与配电柜的接地端子或接地母线相接。

1.3.6 SINAMICS V20 变频器的安装

1. SINAMICS V20 变频器的特点

SINAMICS V20 变频器是西门子驱动家族的低压变频器，是随着技术的发展，西门子推出的新一代变频器，用来替代即将结束生命周期的 SINAMICS G110 和 MICROMASTER 变频驱动系列，这种替换非常简单，即提供更多的产品优势。SINAMICS V20 系列变频器是基本运动变频器，紧凑、耐用的 V20 变频器适用于泵送、通风、压缩、移动和处理等应用场景，特点是调试时间短，操作简单，具有节能功能和九种规格，功率范围为 0.12~30 kW，适合基本应用的解决方案，简单、耐用和高效，除此之外还具有以下特点。

(1) 易于安装。

- ① 穿墙式安装和壁挂式安装均允许并排安装；
- ② 具有 USS（通用串行通信接口）和 Modbus RTU（一种开放的串行传输协议）通信端子；
- ③ 7.5~30 kW 变频器集成制动单元；
- ④ 符合电磁兼容性（EMC）C1/C2 等级。



- (2) 易于使用。
- ①无须连接主电源即可实现参数载入和拷贝；
 - ②内置应用宏与连接宏；
 - ③异常不停机模式可以实现无间断运行；
 - ④手机、平板等移动设备可以轻松地通过无线连接 V20，调试操作直观高效；
 - ⑤较宽的电压范围、先进的冷却设计以及涂层 PCB 板大大提升了变频器的稳定性。
- (3) 节约成本。
- ①具有用于 V/f 、 V^2/f 的节能模式和休眠模式；
 - ②支持能耗和流量监控；
 - ③具有针对外形尺寸 E 的重载模式和轻载模式。

2.SINAMICS V20 变频器的构成

SINAMICS V20 变频器是广泛用于控制三相异步电动机转速的变频器系列，按照供电电压等级可以分为三相交流 400 V 和单相交流 230 V 两种。

(1) SINAMICS V20 三相交流 400 V 变频器有 FSA、FSB、FSC、FSD 和 FSE 五种外形尺寸，支持 0.37~30 kW 功率范围，其外形尺寸和功率对应如表 1-4 所示。

表 1-4 外形尺寸功率对照表 1

外形尺寸	额定功率 /kW	额定输入电流 /A	额定输出电流 /A
FSA（不带风扇）	0.37	1.7	1.3
	0.55	2.1	1.7
	0.75	2.6	2.2
FSA（带风扇）	1.1	4.0	3.1
	1.5	5.0	4.1
	2.2	6.4	5.6
FSB（带一个风扇）	3.0	8.6	7.3
	4.0	11.3	8.8
FSC（带一个风扇）	5.5	15.2	12.5
FSD（带两个风扇）	7.5	20.7	16.5
	11	30.4	25
	15	38.1	31



笔记

续表

外形尺寸	额定功率 /kW	额定输入电流 /A	额定输出电流 /A
FSE (带两个风扇)	18.5	45	38
	22	54	45
	30	72	60

(2) SINAMICS V20 单相交流 230 V 变频器有 FSAA、FSAB、FSAC、FSB 和 FSC 五种外形尺寸, 支持 0.17~3.0 kW 功率范围, 其外形尺寸和功率对应如表 1-5 所示。

表 1-5 外形尺寸功率对照表 2

外形尺寸	额定功率 /kW	额定输入电流 /A	额定输出电流 /A
FSAA (不带风扇)	0.12	2.3	0.9
	0.25	4.5	1.7
	0.37	6.2	2.3
FSAB (不带风扇)	0.55	7.7	3.2
	0.75	10	4.2
FSAC (带一个风扇)	1.1	14.7	6.0
	1.5	19.7	7.8
FSB (带一个风扇)	1.1	14.7	6.0
	1.5	19.7	7.8
FSC (带一个风扇)	2.2	27.2	11
	3.0	32	13.6

3. SINAMICS V20 变频器的安装

SINAMICS V20 变频器应当安装在一个封闭的电气操作环境或电气箱中工, 其安装方位应该垂直于安装平面, 并确保平面为非易燃平面, 如图 1-27 所示。

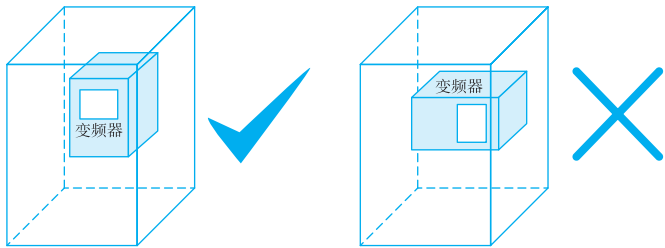


图 1-27 SINAMICS V20 变频器安装方向

SINAMICS V20 变频器可以并排安装, 但变频器对箱体边侧的距离有要求:



笔记

距离箱体左右两侧距离不小于 15 mm，距离上侧边至少 100 mm，带有风扇外形尺寸 A 的变频器距离下侧边至少 85 mm，不带风扇外形尺寸 A 的变频器和外形尺寸 B 至 E 的变频器距离下侧边至少 100 mm，并且保证箱体内空气可以自下而上流动，如图 1-28 所示。

变频器可以选择不同的安装方式，主要有壁挂式安装、穿墙式安装和导轨式安装三种安装方式。壁挂式安装允许变频器直接安装在电气柜的壁柜底板上，外形尺寸 A 至 D 的变频器都可以采用壁挂式安装。外形尺寸为 B 至 D 的变频器可采用穿墙式安装，也就是变频器装好后散热器可以延伸至电气柜外。通过可选的 DIN 导轨安装套件，用户可以将外形尺寸 AA、AB、AC、A 或 B 的变频器安装到 DIN 轨上。外形尺寸 AA/AB 的壁挂式安装示意图如图 1-29 所示，安装尺寸单位为 mm，安装方法为底板对角线开孔，采用 M4 螺钉紧固安装，安装扭矩为 $1.8 \text{ N} \cdot \text{m} \pm 10\%$ 。

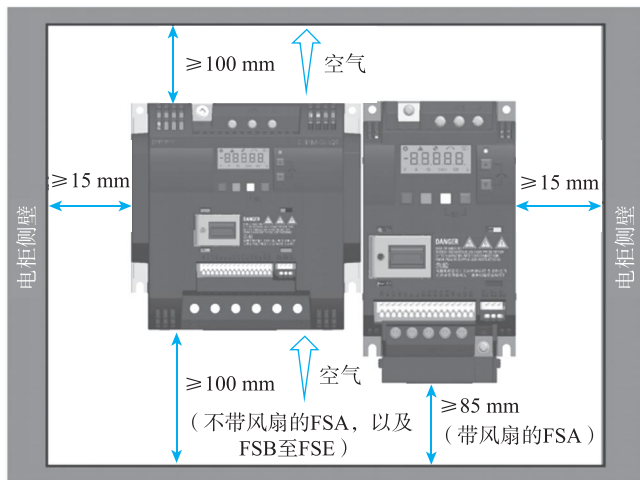


图 1-28 SINAMICS V20 变频器的安装间距示意图

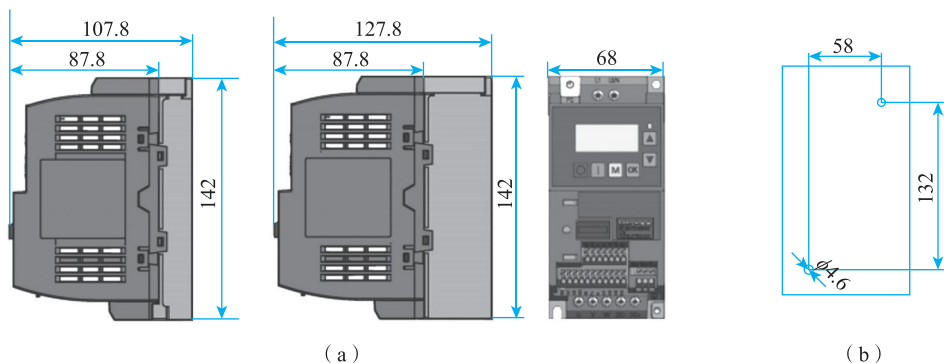


图 1-29 外形尺寸 AA/AB 的壁挂式安装示意图

(a) 安装尺寸；(b) 底板开孔尺寸



笔记

问题与思考

1. 功率二极管按照控制方法分类, 属于()器件。
 - A. 不可控
 - B. 半控
 - C. 全控
 - D. 以上都对
2. 晶闸管按照控制方法分类, 属于()器件。
 - A. 不可控
 - B. 半控
 - C. 全控
 - D. 以上都对
3. IGBT 按照驱动方式分类, 属于()器件。
 - A. 电压驱动
 - B. 电流驱动
 - C. 电阻驱动
 - D. 电桥驱动
4. IGBT 就是()。
 - A. 门极可关断晶闸管
 - B. 电力场效应管
 - C. 绝缘栅型晶体管
 - D. 功率晶体管
5. 变频器就是把工频交流电转换成()、电压均可变的交流电源以供给电动机。
 - A. 电流
 - B. 电阻
 - C. 频率
 - D. 相位
6. 通用变频器的 main 回路包括整流电路、直流环节、()、制动或回馈环节等。
 - A. 稳压电路
 - B. 放大电路
 - C. 逆变电路
 - D. 控制电路
7. 电动机快速减速时, 感应电动机及其负载由于惯性很容易使转差频率 $s < 0$, 电动机进入()。
 - A. 整流
 - B. 再生制动
 - C. 发电
 - D. 逆变
8. 交-直-交变频器具有中间直流环节, 按照直流环节储能方式不同, 变频器可分为()和()变频器。
 - A. 电流源型 电压源型
 - B. 电阻型 电感型
 - C. 电阻型 电流源型
 - D. 电感型 电压源型
9. 变频器按输出电压调节方式不同, 可分为()方式和()方式。
 - A. PPM PMA
 - B. PAM PWM
 - C. PAM PPM
 - D. PMA PWM
10. 采用正弦波作为调制波, 三角波作为载波, 调制波正弦波与载波三角波相比较, 得到脉冲宽度按照正弦规律变化的输出脉冲, 使输出电压的平均值接近于正弦波, 这种控制方式称为()控制。



- A. SPWM
- B. PAM
- C. PWM
- D. PPI

11. 变频器三相整流电路经过二极管整流后的直流母线电压是 () V。

- A. 220
- B. 380
- C. 513
- D. 400

12. 图 1-30 为变频器主电路结构。

- (1) 请计算直流母线 U_D 的电压, $u_0=()V$ 。
- (2) 请在相应的括号里标出整流、能耗制动和逆变电路。
- (3) 请在对应的位置标出电源输入 R、S、T。
- (4) 请在对应的位置标出输出 U、V、W。

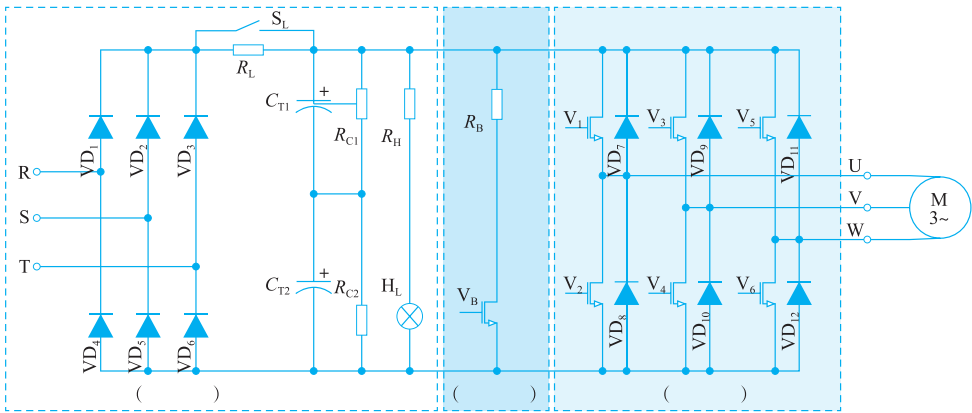


图 1-30 变频器主电路结构图

拓展阅读

IGBT 的中国芯！

工业控制领域、消费电子领域、通信领域等市场虽然占据功率半导体器件市场中较大的份额，但是增速平稳；而光伏风电、新能源汽车等领域在未来的增速比较快，将在功率半导体增量市场中占据比较大的权重。

2017 年京沪线上的复兴号终于成功用上了中车株洲的 IGBT 模块，中国高铁自此实现了全面的自主化。通过收购海外公司与技术引进吸收，我国成功将高铁 IGBT 技术掌握在了自己手中。

新能源汽车的成本构成中，动力电池占比最高，其次则是 IGBT。作为与动力电池电芯齐名的“双芯”之一，IGBT 占整车成本的 7%~10%，是除电池外成本最高的元件。IGBT 属于汽车功率半导体的一种，因设计门槛高、制造技术难、投资大，被业内称为电动车核心技术的“珠穆朗玛峰”。

自从 2009 年成功推出第一代 IGBT 芯片，成功打破国外技术垄断之后，



笔记

2018 年比亚迪再接再厉推出 IGBT 4.0 芯片，2021 年，比亚迪更是推出了 IGBT 6.0 芯片，其采用 90 nm 工艺，成功进入高端汽车芯片领域。

IGBT 获得成功后，比亚迪已投入巨资布局第三代半导体材料 SiC，并将整合材料（高纯碳化硅粉）、单晶、外延、芯片、封装等 SiC 基半导体全产业链，致力于降低 SiC 器件的制造成本，加快其在电动车领域的应用（见图 1-31）。

2019 年，比亚迪就有 SiC 产品用于新能源汽车电控领域，并着手在旗下所有电动车中，实现 SiC 基车用半导体对硅基 IGBT 半导体的全面替代，将整车性能在现有基础上再提升 10%。

比亚迪 SiC 基车用半导体的推出和大规模应用，将有助于提高比亚迪的新能源汽车在国际上的竞争力。



图 1-31 汽车半导体