



“十四五”职业教育国家规划教材

变频器原理 与应用技术

BIANPINQI YUANLI
YU YINGYONG JISHU

主 编 李成良 徐秀萍

副主编 窦学田 王 亮

航空工业出版社

北京

内 容 提 要

本书详细介绍了西门子 MM4 和 6SE70 系列变频器应用技术，重点讲解了在生产过程自动化监控项目中的交流变频调速应用技术。全书总体分为三篇，理论篇以西门子 MM4 系列变频器为例，分析变频器的发展、分类、原理和使用操作；实训篇以西门子 MM 系列变频器为学习对象，介绍拖动电动机的各种运行状态、保护、报警、故障等；应用篇以西门子变频器的现场实际应用为例，引导学生熟悉变频器的应用领域，了解学习变频器的意义。

本书适用于以工作过程为导向、以项目教学为手段的理论实践一体化教学，可作为电气自动化、机电一体化、自动化生产设备应用、智能楼宇等专业的教材，也可作为变频器应用技术的工程培训教材和广大工程技术人员的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

变频器原理与应用技术 / 李成良，徐秀萍主编 . —

北京：航空工业出版社，2021.8

ISBN 978-7-5165-2716-0

I . ①变… II . ①李… ②徐… III . ①变频器 IV .

① TN773

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2021) 第 147491 号

变频器原理与应用技术

Bianpinqi Yuanli yu Yingyong Jishu

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区京顺路 5 号曙光大厦 C 座四层 100028)

发行部电话：010-85672666 010-85672683

北京荣玉印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2021 年 8 月第 1 版

2021 年 8 月第 1 次印刷

开本：787 毫米 ×1092 毫米 1/16

字数：195 千字

印张：10

定价：42.00 元

前言

当前，在智能装备制造、工厂自动化等领域，交流变频调速技术获得了广泛应用。为提高电气自动化等专业学生在交流变频调速方面的专业知识、操作技能，提升项目应用和职业能力，开设变频器应用技术课程是非常必要的。目前国内变频器种类很多，尽管各有特点，但它们应用的基本原理和方法是相似的。本书详细介绍了西门子 MM4 和 6SE70 系列变频器应用技术，按项目递进和任务驱动的方式组织内容进行编写，适用于以工作过程为导向、以项目教学为手段的理论实践一体化教学，可满足电气自动化、机电一体化、自动化生产设备应用、智能楼宇等专业学生学习交流变频调速技术的要求。

本书落实立德树人根本任务，既紧扣思想的核心要义，又注重案例的使用，确保习近平新时代中国特色社会主义思想和党的二十大精神进教材落实到位，发挥铸魂育人实效。本书特点是理论和实践相结合，突出项目应用性，全书总体分为三篇：理论篇、实训篇和应用篇。理论篇主要分为三部分内容：变频器概述、变频器理论基础、西门子变频器简介；实训篇分为五部分内容：通用变频器的基本操作和基本参数，变频器的控制，变频器的调速控制，变频器的故障、报警与维护，PLC 与变频器组网控制电动机；应用篇主要内容是变频器的应用实例，围绕核心内容变频器应用技术，涉及 S7-300/200 PLC 控制及工控机 WinCC/ 触摸屏 WinCC Flexible 组态技术等相关项目。党的二十大报告提出推进数字化教育，建设全民终身学习的学习型社会、学习型大国。数字化教育是未来发展的必然趋势，本书配有电子教案、习题答案、拓展阅读等数字资源，扫描书中二维码即可获得，方便学生随时随地查阅学习。

本书由变频器应用技术课程教学团队编写而成，由副教授、高级工程师李成良和高级实验师徐秀萍担任主编，于吉鲲、苗百春、卫广太、程晖担任副主编，那馥、刘国雨担任编委。其中，理论篇和部分实训篇由李成良编写，部分实训篇和应用篇由高级实验师徐秀萍编写，于吉鲲、苗百春、卫广太、程晖负责资料整理与校正工作。全书由李成良统稿，徐秀萍审稿，全国劳模、瓦房店轴承厂高级工程师那馥和瓦房店市益鼎润数控设备制造有限公司刘国雨总经理对本书的编写提出了许多宝贵的意见和建议。

本书在编写过程中，得到了范振禄教授、石国栋工程师的大力支持和帮助，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中若有不足之处，敬请广大读者批评指正。

此外，本书作者还为广大一线教师提供了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。

编 者

2021 年 5 月

课程概论

1. 课程性质

专业必修课。

2. 课时数

48 课时。

3. 课程内容

课程内容有理论篇、实训篇和应用篇三个部分，其中理论篇主要分为三部分内容：变频器概述、变频器理论基础、西门子变频器简介；实训篇分为五部分内容：通用变频器的基本操作和基本参数，变频器的控制，变频器的调速控制，变频器的故障、报警与维护，PLC 与变频器组网控制电动机；应用篇主要内容是变频器的应用实例。

4. 课程教学目标

(1) 知识目标。

了解变频调速的基本原理，了解“交一直一交”通用变频器的基本结构、控制方式、基本工作原理及应用变频器的技术优势。

掌握中小容量通用变频器的应用条件、选型原则，变频器选择方法、参数设定、维护知识和检修知识。

熟悉变频器的各种功能，熟练掌握变频器基本的功能码设定，控制方法的选择，变频器拖动的基本知识。

(2) 能力目标。

掌握变频器的安装工艺，基本接线工艺，初步的调试方法，要具有安装调试能力；

掌握变频器各种基本运行方式的参数设定方法，基本应用运行曲线的设定，要具有根据负载运行的要求应用变频器拖动的能力；

熟悉变频器的故障码，具有检修、排除故障的能力；

熟悉各种常用变频器的特性，具有日常维护，保养变频器的能力。

(3) 素质目标。

坚持自信自立，坚持守正创新；

努力成为有理想、敢担当、能吃苦、肯奋斗的新时代好青年。

目录

CONTENTS

理论篇

第1章 变频器概述 / 1

1.1 认识变频器	2
1.1.1 变频器概念	2
1.1.2 变频器外形	2
1.1.3 变频器生产厂家	2
1.2 变频器的功能	3
1.3 变频器的用途	3
1.4 使用变频器的好处	3
1.5 变频器的历史	5
1.6 变频器控制方式的历史	5

第2章 变频器理论基础 / 7

2.1 异步电动机理论基础	8
2.2 变频器理论基础	9
2.2.1 通用变频器的发展概况	9
2.2.2 通用变频器的工作原理	10
2.2.3 通用变频器的控制方式	16
2.2.4 变频器的选择	26
2.2.5 变频器的安装	29

第3章 西门子变频器简介 / 33

3.1 变频器的硬件及其说明	34
3.2 变频器的铭牌	36

3.3 西门子 MM420 变频器的结构原理与端子说明	38
3.4 安装注意事项	41

实训篇

第4章 通用变频器的基本操作和基本参数 / 43

4.1 实训注意事项	44
4.2 变频器接线和控制面板操作	44
4.2.1 主电路接线	44
4.2.2 控制电路接线	46
4.2.3 控制面板的认识	46
4.2.4 状态显示板 (SDP) 的调试和操作	47
4.2.5 BOP 面板按键说明	48
4.2.6 基本操作面板 (BOP) 修改设置参数值	49
4.2.7 变频器复位到工厂设定的缺省参数值	50
4.2.8 BOP 操作实训	51
4.3 变频器功能参数快速调试	51
4.3.1 变频器的接线示意图	51
4.3.2 复位操作	52
4.3.3 变频器快速调试	52
4.3.4 参数说明	54
4.3.5 项目实训	54



4.3.6 技能训练及思考	56	6.3.2 无级调速	84
4.4 变频器的参数操作	56	6.3.3 模拟量输入功能	84
4.4.1 参数结构	56	6.3.4 项目实训	88
4.4.2 参数的分组	57	6.3.5 技能训练及思考	91
4.4.3 参数组切换命令源	57	6.4 变频器频率跳转(抑制共振频率)	91
4.4.4 用户访问级别的设定	58	6.4.1 变频器跳转频率的概念	91
4.4.5 用户访问参数的过滤	58	6.4.2 变频器跳转频率的设定	91
4.4.6 驱动装置的显示控制	59	6.4.3 项目实训	92
4.4.7 技能训练及思考	60	6.4.4 技能训练及思考	94

第 5 章 变频器的控制 / 61

5.1 外部端子点动控制	62
5.1.1 变频器的数字输入端口	62
5.1.2 数字输入端口功能	62
5.1.3 命令源选择	63
5.1.4 相关参数	64
5.1.5 项目实训	65
5.1.6 技能训练及思考	67
5.2 变频器控制电机正、反转	68
5.2.1 电动机启动和停车	68
5.2.2 项目实训	70
5.2.3 技能训练及思考	72

第 6 章 变频器的调速控制 / 73

6.1 变频器调速设置	74
6.2 变频器多段速度调速	75
6.2.1 MM420 变频器的多段速控制方法选择	75
6.2.2 频率源控制方式选择参数 P1000	77
6.2.3 项目实训	78
6.2.4 技能训练及思考	83
6.3 变频器无级调速	83
6.3.1 调速方式	83

第 7 章 变频器的故障、报警与维护 / 95

7.1 变频器瞬时停电自动再启动控制	96
7.1.1 电源消隐和电源中断的概念	96
7.1.2 参数 P1210 自动再启动、P1211 再启动重试的次数	96
7.1.3 项目实训	97
7.1.4 技能训练及思考	99
7.2 变频器的保护、报警与诊断	100
7.2.1 保护、报警	100
7.2.2 诊断	100
7.2.3 项目实训	103
7.2.4 技能训练及思考	106

第 8 章 PLC 与变频器组网控制电动机 / 107

8.1 基于 PLC 控制变频器外部端子的电机正、反转	108
8.1.1 PLC 控制变频器的四种方法	108
8.1.2 项目实训	110
8.1.3 技能训练及思考	112
8.2 基于 PLC 变频器组网实现数字量方式多段速电动机控制	113

8.2.1 电路图	113	9.3 西门子 MM440 变频器在电梯上 的运用	128
8.2.2 变频器的调试	114	9.4 西门子 MM440 变频器在氧化铝 厂工艺沉没泵中的应用	131
8.2.3 编写梯形图	115	9.5 西门子 MASTERDRIVES 系列变频 器在钢厂板坯连铸机及其辅助传动 设备上的应用	132
8.2.4 项目实训	117	9.6 西门子 MM440 变频器在汽车玻璃 加工行业中的应用	135
8.2.5 技能训练及思考	117	9.7 变频器组合控制某生产机械运行 实例	138
8.3 基于 PLC 模拟量方式的变频器 开环调速控制	118	9.8 PLC 与变频器组合的电动机正、 反转控制电路	140
第 9 章 变频器的应用实例 / 121		9.9 PLC 与变频器控制电动机 15 段 速度	142
9.1 变频器在恒压自动供水中的 应用	122	参考文献	150
9.2 西门子 MM440 变频器在铣床上的 应用	126		

应用篇

第 9 章 变频器的应用实例 / 121

9.1 变频器在恒压自动供水中的 应用	122
9.2 西门子 MM440 变频器在铣床上的 应用	126



理论篇

第1章

变频器概述

知识目标 >

- ① 了解变频器的结构、分类、性能；
- ② 掌握变频器的工作原理、控制方式。

能力目标 >

- ① 能够维护变频器的常见故障；
- ② 能够根据负载特点选择变频器的类型。

素质目标 >

- ① 具备继续研究学习变频器的素养；
- ② 坚持自信自立，坚持守正创新；
- ③ 努力成为有理想、敢担当、能吃苦、肯奋斗的时代好青年。

重点与难点 >

重点：变频器控制方式的分类和原理。

难点：变频器的功能、用途、好处。

笔记

1.1 认识变频器

1.1.1 变频器概念

直观的说法，变频器（Variable-Frequency Drive, VFD）是变换频率的设备，就是通过改变频率，调节电机转速的设备。

变频器是利用软硬件控制系统将工频电源（50Hz 或 60Hz）变换为另一频率的交流电施加在电机定子绕组上，使交流电动机实现无级调速的电力控制设备，一般称为变频调速，变频器控制系统框图如图 1-1 所示。

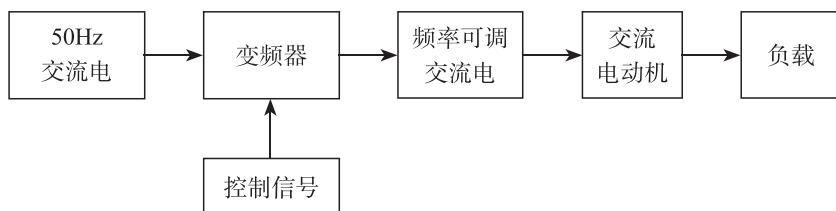


图 1-1 变频器控制系统框图

变频器的控制对象：三相或单相交流异步电动机、三相交流同步电机。

1.1.2 变频器外形

常见的几种变频器的外形如图 1-2 所示。



图 1-2 常见的几种变频器外形图

1.1.3 变频器生产厂家

国际：ABB、西门子、施耐德、丹佛斯、LG 等等。

国内：英威腾、汇川、森兰、山宇、惠丰、雷诺尔等；中国台湾省的台达、东元。



钟兆琳——“中国电机之父”



1.2 变频器的功能

变频器的主要功能：变频器具有调压、调频、稳压、调速等基本功能，另外一项重要功能就是节能。

其他功能还有：

- (1) 可以减少对电网的冲击，避免峰谷差值过大的问题。
- (2) 加速功能可控，根据用户的需要进行平滑加速。
- (3) 电机和设备停止方式可控，使整个设备和系统更加安全，寿命也会相应增加。
- (4) 控制电机的启动电流，使电机的维护成本降低。
- (5) 减少机械传动部件，提高了系统稳定性。
- (6) 降低电动机启动电流，提供更可靠的可变电压和频率。
- (7) 减少无功损耗，增加电网的有功功率。
- (8) 能通过远控 PLC 或其他控制器来实现智能控制和远程控制。
- (9) 提高生产设备自动化程度，通过其他控制设备和仪器，实现系统化组网的集中实时监视和控制。

1.3 变频器的用途

1. 变频器在日常生活中的应用

变频器在日常生活生产中的用途十分广泛，比如我们日常生活中的家用变频空调、变频冰箱、变频洗衣机，企业电力拖动需要速度调节场合：流水线、电梯、供水、供暖、供油、送风等。

2. 变频器在工业生产中的应用

变频器根据化工厂、化纤厂、冶金厂、铸造厂、印染厂、纺织厂、制药厂、塑料厂、水泥厂、矿井等不同的工艺要求，会发挥不同的作用。提升机、皮带传送、送风机、引风机、给料系统、注塑机、挤塑机、油田磕头机等等，可以说每一个行业的诸多生产工艺中，都能用上变频器。

1.4 使用变频器的好处

使用变频器的好处及注意事项见表 1-1。

表 1-1 使用变频器的好处及注意事项

序号	好处	技术内容	主要注意事项	风机	泵	搅拌机	离心机	传送带	送料带	行走台	升降装置	研削研磨机	印刷机	注塑机
1	已有的电机调速	改变鼠笼型电机端子的电压和频率，其转速也改变	标准电机低速时温升变化大，应根据频率降低力矩使用	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
2	能够软启动、停止	加减速时间可任意设定	带负载运行，设定合适的加减速时间				△		△	△				
3	高频率起制动	起动电流小，电机发热小	加速容量决定时，应提高电机和变频器容量等级，调整加减速时间和负载 GD^2				△		△	△	△			
4	无接触器可进行正反转	由于半导体进行转向切换，所以原来的接触器那样的损耗消失，并且能够进行可靠的联锁运行	用于升降机时要用带抱闸电机，变转向时应有机械保持机构				△		△	△				
5	可电动制动	由于在加减速时将机械能在变频器内转换成电能，电机将自动刹车。在零速附近给电机直流，可将自由运转的电机停止	制动力只有变频器的 20%，增加外部制动电阻可增加制动力，要注意电阻容量				△	△		△	△			
6	可进行恶劣环境下的电机速度控制	由于可使用鼠笼型电机，可方便地采用防爆型、防水型或特殊形状的电机	防爆电机应和变频器配套进行防爆试验认定	△	△			△	△			△	△	
7	可进行高速运行	若是工频电源，最高转速是 3 600rpm 或 3 000rpm，变频器可达 650Hz，速度可达 39 000rpm	通用电机只提高频率是无法实现高速化的，还必须考虑机械强度。高速时变频器载波频率高，变频器必须降容运行									△		



表 1-1 (续)

序号	好处	技术内容	主要注意事项	风机	泵	搅拌机	离心机	传送带	送料带	行走台	升降装置	研削研磨机	印刷机	注塑机
8	一台变频器能够对多台电机进行速度控制	变频器能够对多台电机进行速度控制	同一频率下因异步电机特性和负载不同，转速也有不同	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
9	电机启动时的电源容量不必太大	不像工频电源时有大的启动电流(电机额定电流的5~6倍)，低频启动时最大不超过100%~150%电流	变压器容量是电机功率的1.5倍以上					△		△	△			

1.5 变频器的历史

直流电动机拖动和交流电动机拖动先后产生于 19 世纪，并已成为动力机械的主要驱动装置。由于当时的技术问题，在很长一段时间内，需要进行调速控制的拖动系统基本上采用的是直流电动机。但直流电动机存在诸多缺点，如存在换向火花、需要定期更换电刷和换向器、结构复杂、造价高等。

20 世纪 60 年代以后，电力电子器件普遍应用了晶闸管及其升级产品。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) 调速的研究得到突破，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实现。

20 世纪 80 年代中后期，凭借现代电力电子器件研发的成功，美、日、德、英等发达国家的 VVVF 变频器技术，得到了广泛应用。

步入 21 世纪后，中国生产的变频器逐步崛起，现已逐渐抢占高端市场。

科技的进步会影响相关的产业，进而影响人们的生活，作为青年学子，我们应发扬不怕困难的精神，为国家的科学进步贡献一份力量。

1.6 变频器控制方式的历史

变频器发展的各个阶段如图 1-3 所示。

笔记



图 1-3 变频器发展的各个阶段

第一代： V/f 控制方式——变频器输出电压和输出频率都可以调节的控制方式。其特点是控制电路结构简单、成本较低，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，由于输出电压较低，转矩受定子电阻压降的影响比较显著，使输出最大转矩减小，且系统性能不高、控制曲线会随负载的变化而变化；转矩响应慢、电机转矩利用率不高，低速时性能下降，稳定性变差等，因此人们又研究出矢量控制变频调速。

第二代：矢量控制（VC）方式。矢量控制变频调速其实质是将交流电动机等效为直流电动机，分别对速度、磁场两个分量进行独立控制。通过控制转子磁链，分解定子电流，从而获得转矩和磁场两个分量，经坐标变换，实现正交或解耦控制。

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。

第三代：直接转矩控制（DTC）方式。1985年，德国鲁尔大学的Depenbrock教授首先提出了直接转矩控制变频技术。

直接转矩控制在定子坐标系下，利用空间矢量概念，通过检测的定子电流电压，直接在定子坐标系下计算与控制电动机的磁链和转矩，获得高动态性能的转矩。

第2章

变频器理论基础

知识目标 >

- ① 熟练掌握 MM 系列变频器的结构、外部端子、参数；
- ② 掌握操作变频器基本操作键盘（BOP）的使用。

能力目标 >

- ① 能够熟练各种变频器端子的使用；
- ② 会正确对变频器接线、操作键盘。

素质目标 >

- ① 增加学习其他变频器的理论素养；
- ② 坚定学生努力学习专业知识和技能的自信。

重点与难点 >

重点：

- ① 变频调速的基本控制方式。
- ② 变频器的基本构成。
- ③ 正弦脉宽调制基本原理。
- ④ 变频器的控制方式及其应用范围。

难点：

正弦脉宽调制原理和变频器控制方式。

笔记

2.1 异步电动机理论基础

1. 异步电动机的分类

异步电动机根据定子电源的相数可以分为单相和三相两类；从转子结构上，三相电动机又分为笼式和绕线式两类。

2. 异步电动机的基本结构

三相异步电动机的结构示意图如图 2-1 所示。

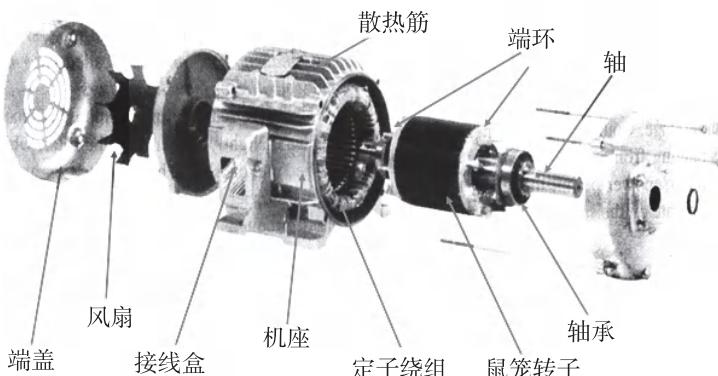


图 2-1 三相异步电动机结构示意图

3. 旋转磁场

(1) 在三相对称绕组中通入三相对称电流，会在气隙中形成一个旋转磁场。

(2) 旋转磁场的转速（同步转速）：

$$n_0=60f_1/p$$

式中 f_1 —— 电网频率

p —— 电机的极对数

n_0 —— 旋转磁场转速

三者之间的关系见表 2-1。

表 2-1 三者之间关系

电网频率 (Hz)	电机磁极对数	同步转数 (rps)
50	1	3 000
50	2	1 500
60	1	3 600
80	1	4 800
30	1	1 800



(3) 改变通入电流的相序(对调任意两根电源线)就可以改变旋转磁场的转向,从而改变电机的转向。

4. 转差率

(1) 三相感应电动机的实际转速 n 恒小于磁场同步转速 n_0 ,即 $n < n_0$,故称异步电机。

(2) 转差: 旋转磁场的同步转速 n_0 与转子转速 n 之差 n_0-n 称为转差,它是异步电动机工作时的必要条件。

(3) 转差率定义为转差与同步转速 n_0 之比,用 s 表示。

$$s = (n_0 - n) / n_0$$

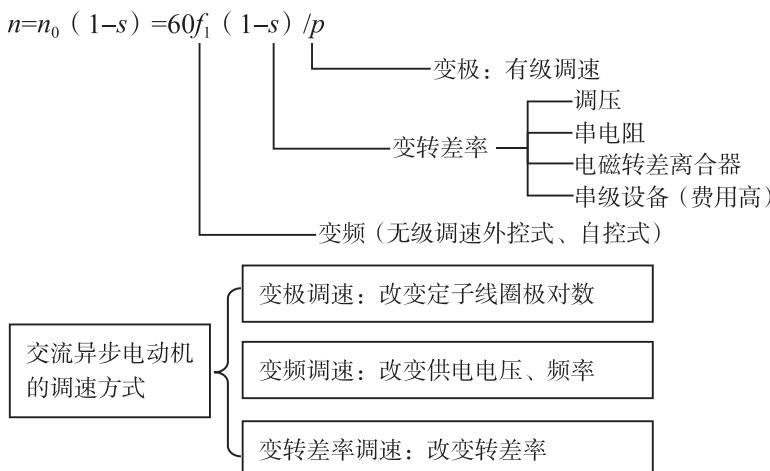
对公式进行变换, $n = n_0 (1-s)$

因此,转差率大小反映了电机的转速。

5. 三相异步电动机的调速原理

$$n = n_0 (1-s) = 60f_1 (1-s) / p$$

改变电机转数的方法:



本课程的研究内容就是改变供电电压频率来实现对交流异步电动机的调速,简称变频调速。

2.2 变频器理论基础

2.2.1 通用变频器的发展概况

自 20 世纪 80 年代初通用变频器问世以来,它已经更新换代了五次:

第一代是 20 世纪 80 年代初的模拟式通用变频器;

第二代是 20 世纪 80 年代中期的数字式通用变频器;

笔记 

第三代是 20 世纪 90 年代初的智能型通用变频器；
 第四代是 20 世纪 90 年代中期的多功能通用变频器；
 第五代是 21 世纪初研制上市的集中型通用变频器。
 通用变频器的发展情况可以从以下几个方面来说明。

1. 通用变频器的应用范围不断扩大

通用变频器的产品正向三个方面发展变化：

其一，向无须调整便能达到最佳运行的多功能与高性能型变频器方向发展；
 其二，向通过简单控制就能运行的小型及操作方便的变频器方向发展；
 其三，向大容量、高起动转矩及具有环境保护功能的变频器方向发展。

2. 通用变频器使用的功率器件不断更新换代

门极可关断晶闸管 (Gate Turn-Off Thyristor, GTO)、双极型晶体管 (Bipolar Junction Transistor, BJT)、绝缘栅双极晶体管 (Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT) 及智能模块 (Intelligent Power Module, IPM)、集成门极换流晶闸管 (Integrated Gate Commutated Thyristor, IGCT)。

3. 控制方式不断发展

第一阶段：20 世纪 80 年代初日本学者提出了基本磁通轨迹的电压空间矢量 (或称磁通轨迹法)。

第二阶段：20 世纪 70 年代初由西德 F.Blasschke 等人提出的矢量控制。

第三阶段：1985 年德国鲁尔大学 Depenbrock 教授首先提出直接转矩控制理论。

4.PWM 控制技术进一步发展

PWM 控制技术一直是变频技术的核心技术之一。由于 PWM 可以同时实现变频变压及反抑制谐波的特点，因此在交流传动乃至其他能量变换系统中得到广泛应用。从最初采用模拟电路完成三角调制波和参考正弦波比较，产生正弦脉宽调制 SPWM 信号以控制功率器件的开关开始，到目前采用全数字化方案，完成优化的实时在线的 PWM 信号输出，PWM 在各种应用场合仍占主导地位，并一直是人们研究的热点。

变频器的应用场景十分广阔，变频器的发展也会影响很多基础设施，进而影响人们的生活。作为青年学子，我们应提高自己的知识和能力，为促进人们生活水平的进步出一份力。

2.2.2 通用变频器的工作原理

1. 变频器的基本外形结构

常见几种变频器的外形结构在前文已经展示，如图 1-2 所示。

2. 变频器内部框图

变频器内部结构组成如图 2-2 所示。

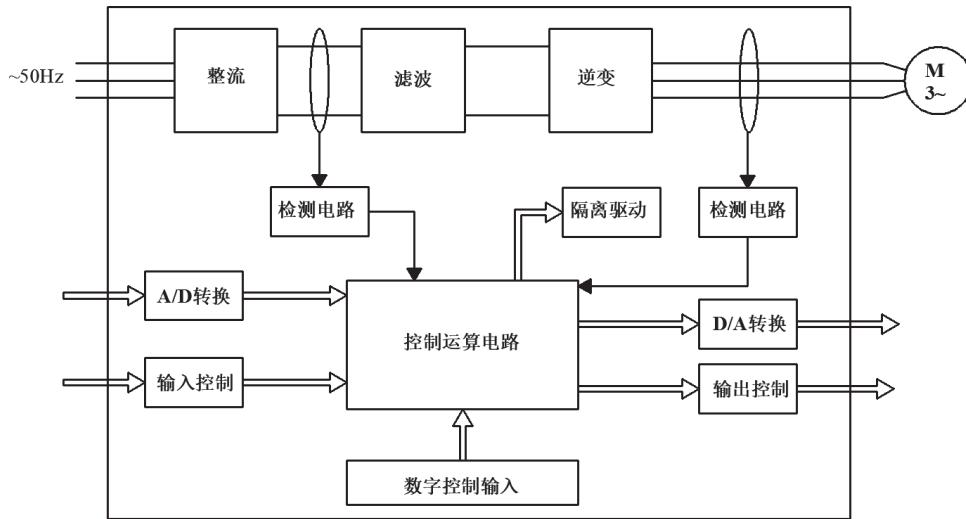


图 2-2 变频器内部结构示意图

3. 变频器的分类

(1) 按电路结构分为下面两种。

①交—交变频器。把频率固定的交流电源直接变换为频率连续可调的交流电源。其主要优点是没有中间环节，故变换效率高。但其连续可调的频率范围窄，一般为额定频率的 1/2 以下，故它主要用于容量较大的低速拖动系统中。六脉冲无环流交—交变频器主电路图如图 2-3 所示。

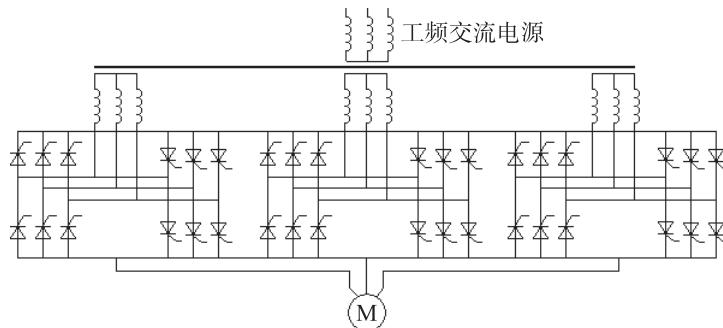


图 2-3 六脉冲无环流交—交变频器主电路

②交直—交变频器。先把频率固定的交流电整流成直流电，再把直流电逆变成频率连续可调的三相交流电。在这类装置中，用不可控整流，则输入功率因数不变；用 PWM 逆变，则输出谐波可以减小。

(2) 按滤波方式分为下面两种。

①电压源型变频器。在电路中，中间直流环节采用大电容滤波，直流电

笔记

压波形比较平直，使施加于负载上的电压值基本不受负载的影响，基本保持恒定，类似于电压源，故称为电压源型变频器。

②电流源型变频器。电流源型变频器与电压型变频器在主电路结构上基本相似，不同的是电流源型变频器的中间直流环节采用大电感滤波，电压源变频器和电流源变频器示意图，如图 2-4 所示。直流电流波形比较平直，使施加于负载上的电流基本不受负载的影响，其特性类似于电流源，故称为电流源型变频器。

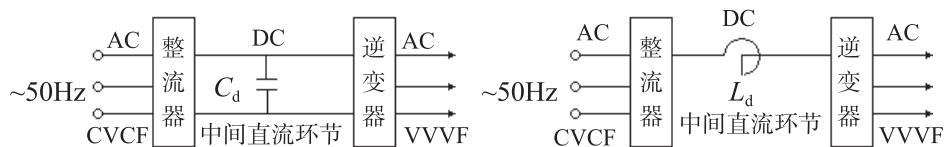


图 2-4 电压源变频器和电流源变频器示意图

(3) 按控制方式分为下面三种。

① U/f 控制： U/f 控制是指同时控制变频器输出电压和频率，通过保持 U/f 比值恒定，使得电动机的主磁通不变，在基频以下实现恒转矩调速，基频以上实现恒功率调速。它是一种转速开环控制，无需速度传感器，控制电路简单，多应用于精度要求不高的场合。

②矢量控制：矢量控制变频器主要是为了提高变频调速的动态性能。模仿直流电动机的控制方式，对异步电动机的磁场和转矩分别进行控制，以获得类似于直流调速系统的动态性能。

③直接转矩控制变频器。直接转矩控制变频器是一种新型的变频器。它省掉了复杂的矢量变换与电动机数学模型的简化处理。该系统的转矩响应迅速，无超调，是一种具有高静态性能和高动态性能的交流调速方法。

(4) 按变频器的用途分类分为下面两种。

①通用变频器。通用变频器特点是通用性，是变频器家族中应用最为广泛的一种。通用变频器主要包含两大类：节能型变频器和高性能通用变频器。

a. 节能型变频器。是一种以节能为主要目的而简化了其他一些系统功能的通用变频器，控制方式比较单一，一般为 U/f 控制，主要应用于风机、水泵等调速性能要求不高的场合，具有体积小、价格低等优势。

b. 高性能通用变频器。是一种在设计中充分考虑了变频器应用时可能出现的各种需要，并为这些需要在系统软件和硬件方面都做了相应的准备，使其具有较丰富的功能。如：PID 调节、PG 闭环速度控制等。高性能通用变频器除了可以应用于节能型变频器的所有应用领域之外，还广泛用于电梯、数控机床等对调速性能要求较高的场合。

②专业变频器。专业变频器是针对某一种特定应用场合而设计的变频器，为满足某种需要，这种变频器在某一方面具有较为优良的性能。如电梯及起重机用变频器等，还包括一些高频、大容量、高压等变频器。

4. 变频器的额定值和频率指标

(1) 输入侧的额定值。

①输入电压 U_N 。

②输入电流 I_N 。

(2) 输出侧的额定值。

①输出电压 U_N 。

②输出电流 I_N 。

③输出容量 (kVA)。

④配用电动机容量 (kW) P_N 。

⑤过载能力。

(3) 频率指标。

①频率范围。

②频率精度。

③频率分辨率。

5. 电压型交一直一交变频器的主电路

电压型交一直一交变频器主电路结构示意如图 2-5 所示。

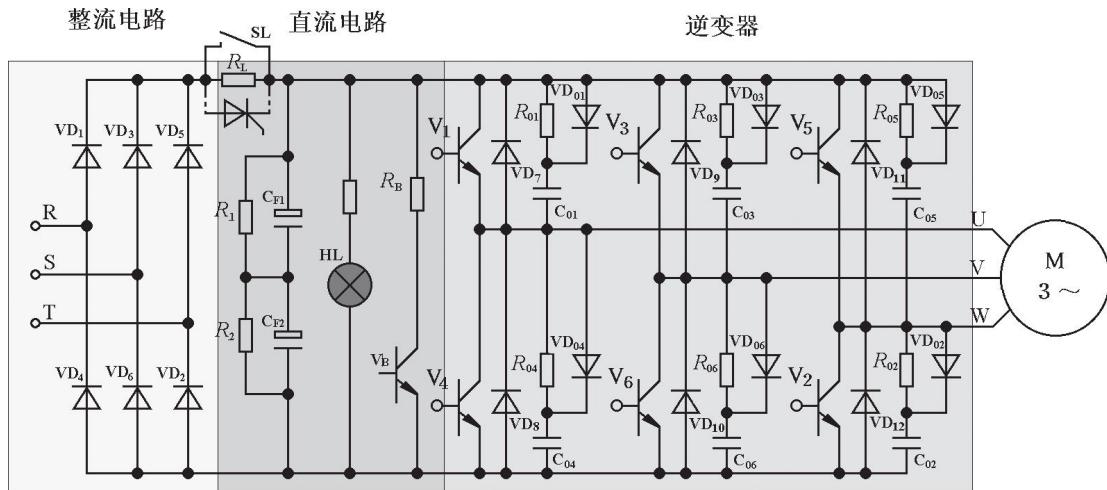


图 2-5 电压型交一直一交变频器主电路结构示意

(1) 交一直部分。

①整流电路：整流电路由 $VD_1 \sim VD_6$ 组成三相不可控整流桥，它们将电源的三相交流全波整流成直流。整流电路因变频器输出功率大小不同而异。小

笔记

功率的变频器，其输入电源多用单相 220V，整流电路为单相全波整流桥；功率较大的变频器则一般用三相 380V 电源，整流电路为三相桥式全波整流电路。

设电源的线电压为 U_L ，那么三相全波整流后平均直流电压：

$$U_D = 1.35 U_L = 1.35 \times 380V = 513V$$

②滤波电容器 C_F ：整流电路输出的整流电压是脉动的直流电压，必须加以滤波。滤波电容 C_F 的作用除了滤除整流后的电压纹波外，还在整流电路与逆变器之间起去耦作用，以消除相互干扰，这就给作为感性负载的电动机提供必要的无功功率。因而，中间直流电路电容器的电容量必须较大，起到储能作用，所以中间直流电路的电容器又称储能电容器。滤波电容器 C_1 和 C_2 两端各并联了一个电阻，是为了使两只电容器上的电压基本相等，防止电容器在工作中损坏。目前，由于技术的进步，低压（380V）变频器的电解电容大多数可以不需要串联使用了。

③限流电阻 R_L 与开关 SL。由于储能电容大，同时在接入电源时电容器两端的电压为零，而电源电压为 380V 时的整流电压峰值是 537V，故当变频器刚接通电源的瞬间，滤波电容器 C_F 的充电电流是很大的。过大的冲击电流可能会使三相整流桥的二极管损坏。为了保护整流桥，在变频器刚接通电源后的一段时间里，电路内串入限流电阻，其作用是将电容器 C_F 的充电电流限制到允许的范围以内。开关 SL 的功能是：如果限流电阻 R 始终接在电路内，其电压降将影响变频器的输出电压，也会降低变频器的电能转换效率，因此，当 C_F 充电到一定程度后令 SL 接通，将 R_L 短路掉，使之退出运行。另外，端电压为 0 的滤波电容器会使整流电压瞬间降低至 0，形成对电源网络的干扰。

④电源指示灯 HL。HL 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_F 上的电荷是否已经释放完毕。

由于 C_F 的容量较大，而切断电源又必须在逆变电路停止工作的状态下进行，所以 C_F 没有快速放电的回路，其放电时间往往长达数分钟。又由于 C_F 上的电压较高，如电荷不放完，在维修变频器时将对人身安全构成威胁，所以 HL 完全熄灭后才能接触变频器内部的导电部分。

（2）直一交部分。

①逆变管 $V_1 \sim V_6$ 。 $V_1 \sim V_6$ 组成逆变桥，把 $VD_1 \sim VD_6$ 整流后的直流电再“逆变”成频率、幅值都可调的交流电。这是变频器实现变频的执行环节，因而是变频器的核心部分。当前常用的逆变管有绝缘栅双极晶体管（IGBT）、大功率晶体管（GTR）、可关断晶闸管（GTO）及功率场效应晶体管（MOSFET）等。



②续流二极管 $VD_7 \sim VD_{12}$ 。续流二极管 $VD_7 \sim VD_{12}$ 的主要功能有：

- 电动机的绕组是感性的，其电流具有无功分量， $VD_7 \sim VD_{12}$ 为无功电流返回直流电源提供“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 $VD_7 \sim VD_{12}$ 返回直流电路。
- $V_1 \sim V_6$ 进行逆变的基本工作过程：同一桥臂的两个逆变管处于不停的交替导通和截止的状态，在这交替导通和截止的换相过程中，也不时地需要 $VD_7 \sim VD_{12}$ 提供通路。

③缓冲电路。在不同型号的变频器中，缓冲电路的结构也不尽相同。图 2-3 所示的是比较典型的一种，其功能如下。

逆变管 $V_1 \sim V_6$ 每次由导通状态切换成截止状态的关断瞬间，集电极（C 极）和发射极（E 极）间的电压 U_{CE} 将极为迅速地由近乎 0V 上升至直流电压值 U_D 。过高的电压增长率将导致逆变管的损坏，因此， $C_{01} \sim C_{06}$ 的功能便是降低 $V_1 \sim V_6$ 在每次关断时的电压增长率。

$V_1 \sim V_6$ 每次由截止状态切换成导通状态的接通瞬间， $C_{01} \sim C_{06}$ 上所充的电压（等于 U_D ）将向 $V_1 \sim V_6$ 放电。此放电电流的初始值是很大的，并且将叠加到负载电流上，导致 $V_1 \sim V_6$ 的损坏。因此， $R_{01} \sim R_{06}$ 的功能是限制逆变管在接通瞬间 $C_{01} \sim C_{06}$ 的放电电流。

$R_{01} \sim R_{06}$ 的接入又会影响 $C_{01} \sim C_{06}$ 在 $V_1 \sim V_6$ 关断时降低电压增长率的效果。 $VD_{01} \sim VD_{06}$ 接入后，在 $V_1 \sim V_6$ 的关断过程中使 $R_{01} \sim R_{06}$ 不起作用；而在 $V_1 \sim V_6$ 的接通过程中，又迫使 $C_{01} \sim C_{06}$ 的放电电流流经 $R_{01} \sim R_{06}$ 。

（3）制动电阻和制动单元。

①制动电阻 R_B 。在电动机在工作频率下降过程中，异步电动机的转子转速将超过此时的同步转速，处于再生制动状态，拖动系统的动能会反馈到直流电路中，使直流电压 U_D 不断上升，甚至可能达到危险的地步。因此，必须将再生到直流电路的能量消耗掉，使 U_D 保持在允许范围内，制动电阻 R_B 就是用来消耗这部分能量的。

②制动单元 VB。制动单元 VB 由大功率晶体管 GTR 及其驱动电路构成，其功能是控制流经 R_B 的放电电流 I_B 。

6. 主电路的对外连接端子

各种变频器主电路的对外连接端子大致相同，如图 2-6 所示为变频器主电路对外连接端子。其中，R、S、T 是变频器的电源端子，接至交流三相电源；U、V、W 为变频器的输出端子，接至电动机；P+ 是整流桥输出的 + 端，出厂时 P+ 端与 P 端之间用一块截面积足够大的铜片短接，当需要接入直流电抗器

笔记

DL 时，拆去铜片，将 DL 接在 P+ 和 P 之间；P、N 是滤波后直流电路的 +、- 端子，可以连接制动单元和制动电阻；PE 是接地端子。

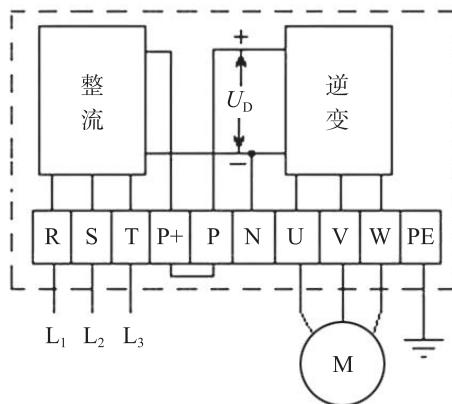


图 2-6 变频器主电路对外连接端子

2.2.3 通用变频器的控制方式

1.U/f 控制方式

改变频率就能改变电动机的转速，但是在实际实验中发现单纯改变电动机的频率会烧坏电动机，为什么？

$$E_1 = 4.44 k_{rl} f_1 N_1 \Phi_M$$

式中 E_1 ——电机电动势

k_{rl} ——电动机常数

f_1 ——电动机工作频率

N_1 ——电动机绕组匝数

Φ_M ——电动机气隙磁通量

如果 $f_1 > f_{IN}$ 时， f_{IN} 为电机的额定频率，那么气隙磁通量 Φ_M 就会小于额定气隙磁通量 Φ_{MN} ， $\Phi_M < \Phi_{MN}$ 。其结果是尽管电机的铁芯没有得到充分利用是一种浪费，但是在机械条件允许的情况下长期使用不会损坏电机。

如果 $f_1 < f_{IN}$ 那么气隙磁通量 Φ_M 就会大于额定气隙磁通量 Φ_{MN} ， $\Phi_M > \Phi_{MN}$ 。其结果是电机的铁芯产生过饱和，从而导致过大的励磁电流，严重时会因绕组过热而损坏电机。

解决办法：要实现变频调速，在不损坏电机的条件下，充分利用电机铁芯，发挥电机转矩的能力，最好在变频时保持每极磁通量 Φ_M 为额定值不变。变频装置必须在改变输出频率的同时改变输出电压的幅值，保证 $U_1/f_1=C$ ，才能满

足对异步电动机变频调速的基本要求。

采用这种控制方式的装置通称变压变频 U/f 变频器，也叫 VVVF 变频，其中 VVVF 是英文 Variable Voltage and Variable Frequency 的缩写。

对于直流电机，励磁系统是独立的，尽管存在电枢反应，但只要对电枢反应作适当的补偿，保持 Φ_M 不变是很容易做到的。在交流异步电机中，磁通是定子和转子磁动势合成产生的。

2. 变频器的转差频率控制方式

转差频率控制需要检出电动机的转速，构成速度闭环，速度调节器的输出为转差频率，然后以电动机速度与转差频率之和作为变频器的给定输出频率，变频器控制电动机转速闭环控制框图如图 2-7 所示。



图 2-7 变频器控制电动机转速闭环控制框图

由于通过控制转差频率来控制转矩和电流，与 U/f 控制相比其加减速特性和限制过电流的能力得到提高。另外它有速度调节器，利用速度反馈进行速度闭环控制，速度的静差小，适用于自动控制系统。转差频率控制方式通常用于单机运转。

由电机理论可知：如果保持电动机的气隙磁通一定，则电动机的转矩及电流由转差角频率决定；如果增加控制电动机转差角频率的功能，那么异步电动机产生的转矩就可以控制。

转差频率是施加于电动机的交流电压频率与电动机速度（电气角频率）的差频率，在电动机轴上安装测速发电机（TG）等速度检测器可以检测出电动机的速度。检测出的转子速度加上转差频率（与产生所要求的转矩相对应）就是逆变器的输出频率。在电动机允许的过载转矩 T_{em} （额定转矩的 150%~200%）以下即在 $T_{em} \sim T_{sm}$ （最大电磁转矩）以内，大体上可以认为产生的转矩与转差频率成比例，如图 2-8 所示为转矩与转差频率成比例特性曲线。另外，电流随转差频率的增加而单调增加，所以如果给出的转差频率不超过允许过载时的转差频率，就可以具有限制电流的功能。

笔记

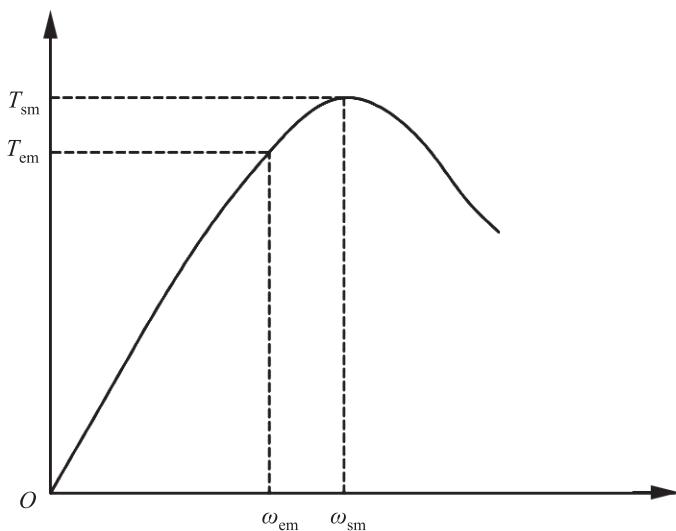


图 2-8 转矩与转差频率成比例特性曲线

一种实现上述转差频率控制的变压变频调速系统结构如图 2-9 所示。

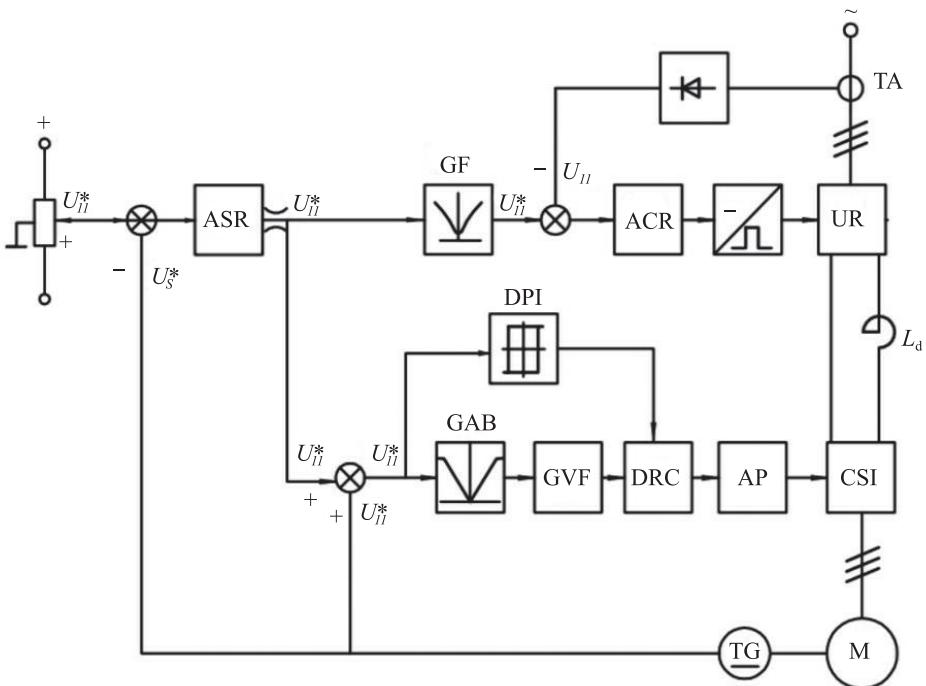


图 2-9 转差频率控制的变压变频调速系统结构原理图

UR—整流器；CSI—逆变器；ACR—电流调节器；GF—函数发生器；ASR—转速调节器；GAB—绝对值变换器；DPI—极性鉴别器；TVF—压频变换器；DRC—环形分配器；AP—脉冲放大器



该系统有以下特点：

(1) 采用电流源型变频器，使控制对象具有较好的动态响应，而且便于回馈制动，实现四象限运行，这是提高系统动态性能的基础。

(2) 和直流电动机双闭环调速系统一样，外环是转速环，内环是电流环。转速调节器 ASR 的输出是转差频率给定值 $U_{\omega_{\text{sm}}}$ ，代表转矩给定。

(3) 转差频率信号分两路分别作用在可控整流器 UR 和逆变器 CSI 上，前者通过定子电流 $i_1=f(\omega_s)$ 函数发生器 GF，按 U_{ω_s} 的大小产生相应的 U_{i1} 信号，再通过电流调节器 ACR 控制定子电流，以保持气隙磁通 Φ_M 为恒值。另一路按 $\omega_s + \omega = \omega_1$ (转差频率 + 转子频率 = 定子频率) 的规律产生对应于定子频率 ω_1 的控制电压 U_{ω_1} ，决定逆变器的输出频率。这样就形成了在转速外环内的电流频率协调控制。

(4) 转速给定信号 $U_{\omega_{\text{sm}}}$ 反向时， U_{ω_s} 、 U_{ω} 、 U_{ω_1} 都反向。用极性鉴别器 DPI 判断 U_{ω_1} 的极性，以决定环形分配器 DRC 的输出相序，而 U_{ω_1} 信号本身则经过绝对值变换器 GAB 决定输出频率的高低，从而实现可逆运行。

转差频率控制系统的突出优点就在于频率控制环节的输入频率信号是由转差信号和实测转速信号相加后得到的，即 $U_{\omega_1} = U_{\omega_s} + U_{\omega}$ 这样，在转速变化过程中，实际频率 ω_1 随着实际转速 ω 同步而上升或下降。与转速开环系统中频率给定信号与电压成正比的情况相比，加、减速更平滑，且容易稳定。

一般来说，转速闭环转差频率控制的频率调速系统基本上具备了直流电动机双闭环控制系统的优点，是一个比较优越的控制策略，结构也不算复杂，有广泛的应用价值。然而，如果认真考查一下它的静、动态性能，就会发现一些不完善之处，主要有以下几个方面：

(1) 在分析转差频率控制规律时，重要的理论根据是“保持气隙磁通 Φ_M 恒定”。实际上这只能在电动机稳态情况下才能成立，而在动态情况下， Φ_M 肯定不会恒定，这会影响系统的实际动态性能。

(2) 电流调节器 ACR 只控制了定子电流的幅值，并没有控制到电流的相位，而在动态情况下，电流相位如果不能及时赶上去，将延缓动态转矩的变化。

(3) 以模拟运算放大器为核心组成的函数发生器 GF，存在一定的误差，如果精度过高，则又增加了调试的难度。

(4) 在频率控制环节中，测速环节、反馈环节如果存在误差和干扰，都会以正反馈形式毫无衰减地传递到频率控制信号上来。

3. 矢量控制方式

采用转速闭环转差频率控制的变频调速系统，在动态性能上仍赶不上直流双闭环调速系统，这主要是因为直流电动机与交流电动机有着很大的差异，而在数学模型上有着本质上的区别。

笔记

(1) 交—直流电动机数学模型的差异。

直流电动机的动态数学模型只有一个输入变量——电枢电压，一个输出变量——转速，在控制对象中含有机电时间常数 T_M 和电枢回路电磁时间常数 T_1 以及晶闸管的滞后时间常数 T_s ，在工程上能够允许的一些假定条件下，可以描述成单变量（单输入、单输出）的三阶线性系统。异步电动机在变频调速时需要进行电压（或电流）和频率的协调控制，有电压（或电流）和频率两种独立的输入变量，如果是三相交流电，实际的输入变量数目会更多。在输出变量中，除转速外，磁通也要算作一个独立的输出变量。因为电动机只有一个三相电源，磁通的建立和转速的变化是同时进行的，为了获得良好的动态性能，还希望对磁通施加某种控制，使它在动态过程中尽量保持恒定，才能产生较大的转矩。在异步电动机中，电压（或电流）、频率、磁通、转速之间相互都有影响，是强耦合的多变量系统。另外磁通乘以电流产生转矩，转速乘以磁通得到旋转感应电动势，它们都是同时变化的，在数学模型中就含有两个变量的乘积项，这样即使不考虑磁饱和等因素，数学模型也是非线性的。再考虑三相异步电动机定子有三个绕组，转子也可等效为三个绕组，每个绕组产生磁通时都有自己的电磁惯性，再加上运动系统的机电惯性，至少也是一个七阶系统。总之，异步电动机的数学模型是一个高阶、非线性、强耦合的多变量系统，以它为对象的变频调速系统可以用如图 2-10 所示的多变量系统来表示。

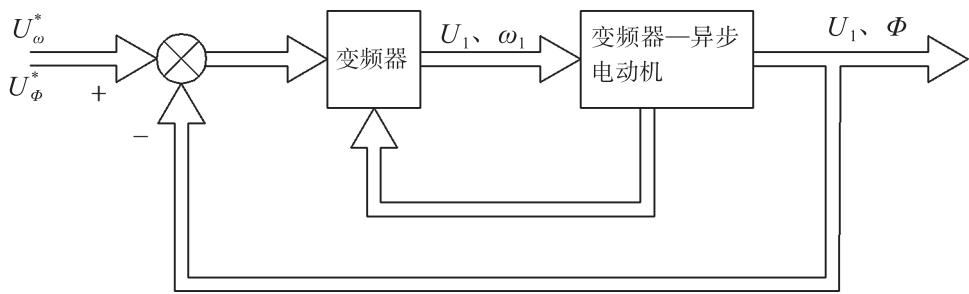


图 2-10 多变量的异步电动机变压变频调速系统控制结构图

(2) 交流、直流电动机物理模型的比较。

在研究交流异步电动机的物理模型时，常将下述条件理想化：

- ①忽略空间谐波。设三相绕组对称（在空间互差 120° 电角度），所产生的磁动势沿气隙圆周按正弦规律分布。
 - ②忽略磁路饱和，各绕组的自感和互感都是恒定的。
 - ③忽略铁芯损耗。
 - ④不考虑频率和温度变化对绕组电阻的影响。
- 无论电动机转子是绕线型还是笼型的，都将它等效成绕线转子，并折算

到定子侧，折算后的每相绕组匝数都相等。这样实际电动机绕组就等效成如图 2-11 所示的三相异步电动机的物理模型，图中定子三相绕组轴线 A 、 B 、 C 在空间是固定的，以 A 轴为参考坐标轴；转子绕组轴线 a 、 b 、 c 随转子旋转，转子 a 轴和定子 A 轴间的电角度 θ 为空间角位移变量。规定各绕组电压、电流、磁链的正方向符合电动机惯例和右手螺旋定则。

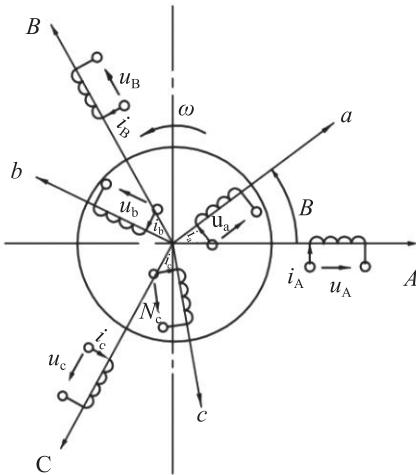


图 2-11 三相异步电动机的物理模型

直流电动机的物理模型则比较简单，如图 2-12 绘出了 2 极直流电动机的物理模型，图中 F 为励磁绕组， A 为电枢绕组、 C 为补偿绕组。 F 和 C 都在定子上，只有 A 是在转子上。把 F 的轴线称作直轴或 d 轴，主磁通 Φ 的方向就在 d 轴上； A 和 C 的轴线则称为交轴或 q 轴。虽然电枢本身是旋转的，但是电枢磁动势的轴线始终被电刷限定在 q 轴位置上，与一个在 q 轴上静止绕组的效果一样。但它实际上旋转的，会切割 d 轴的磁通而产生旋转电动势，这又与真正的静止绕组不一样，通常把这种等效的静止绕组叫作“伪静止绕组”。电枢磁动势的作用可以用补偿绕组磁动势抵消，或者由于其作用方向与 d 轴垂直而对主磁通影响甚微，所以直流电动机的主磁通唯一的决定因素是励磁电流，这是直流电动机的数学模型及控制系统比较简单根本原因。

笔记

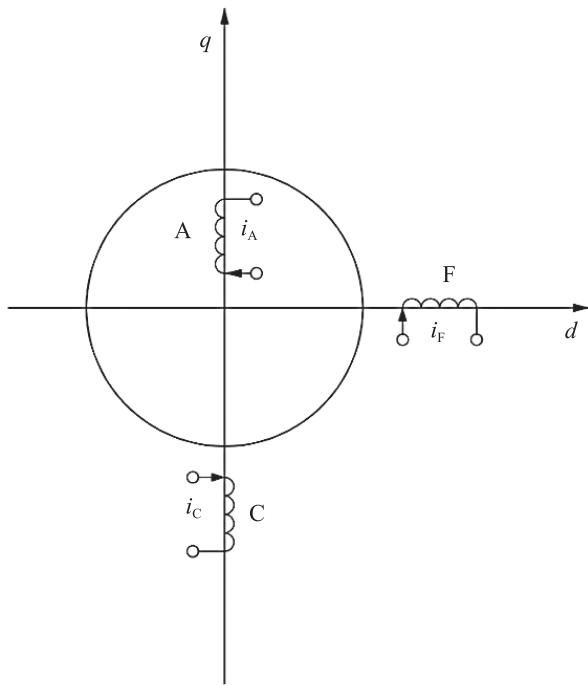
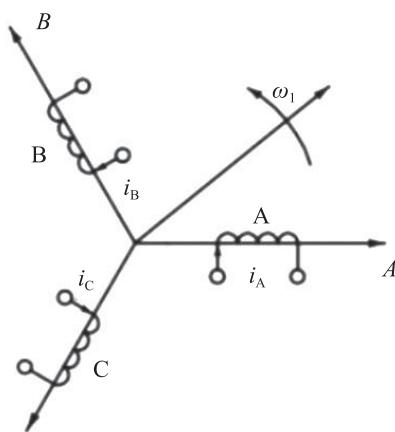


图 2-12 2 极直流电动机的物理模型
F—励磁绕组；A—电枢绕组；C—补偿绕组

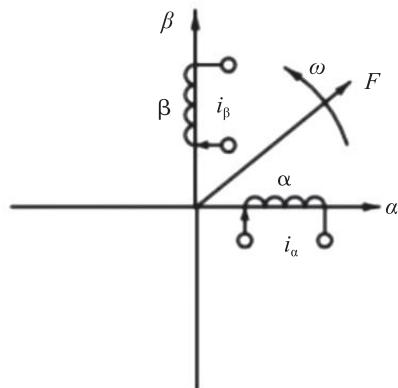
(3) 坐标变换。

异步电动机的动态数学模型十分复杂，莫说求解，即使要画出很清晰的结构也并非易事。如果能将交流电动机的物理模型等效地转换成类似直流电动机的模式，分析和控制问题就可以大为简化，坐标变换正是按照这条思路进行的。这里，不同电动机模型彼此等效的原则是在不同的坐标下所产生的磁动势完全一致。

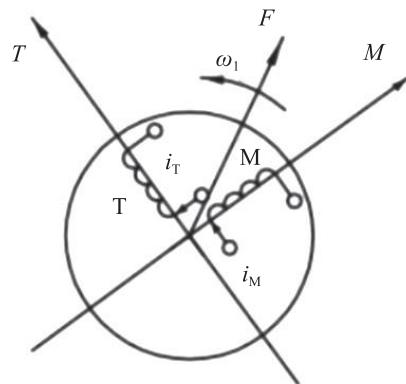
交流电动机三相对称的静止绕组 A、B、C 通过三相平衡的正弦电流 i_A 、 i_B 、 i_C 时，所产生的合成磁动势是旋转磁动势 F ，它在空间呈正弦分布，以同步转速 ω_1 （即电流的角频率）顺着 A → B → C 的顺序旋转，这样的物理模型如图 2-13 (a) 所示，它就是图 2-12 中的定子部分。产生同样的旋转磁动势 F 不一定必须要三相，用如图 2-13 (b) 所示的两个互相垂直的静止绕组 α 和 β ，通入两相对称电流同样可以产生相同的旋转磁动势 F ，可以认为如图 2-13 (b) 所示的两相绕组与如图 2-13 (a) 所示的三相绕组等效。



(a) 三相交流绕组



(b) 两相交流绕组



(c) 旋转的直流绕组

图 2-13 等效的交流电动机绕组和直流电动机绕组物理模型

笔记

图 2-13 (c) 中的两个匝数相等且互相垂直的绕组 M 和 T，分别通以直流电流 i_M 和 i_T ，产生合成磁动势 F，其位置相对于绕组来说是固定的。如果使包含两个绕组在内的整个铁芯以同步转速 ω_1 旋转，则磁动势 F 也随之旋转，成为旋转磁动势。把这个旋转磁动势的大小和转速也控制成与如图 2-13 (a) 和图 2-13 (b) 所示绕组的磁动势一样，则这套旋转的直流绕组与前两套固定的交流绕组都等效。当观察者也站到铁芯上和绕组一起旋转时，看到 M 和 T 是两个通以直流而相互垂直的静止绕组。如果控制磁通 Φ 在 M 位置上，就和如图 2-12 所示的直流电动机物理模型没有本质上的区别了。这时绕组 M 相当于励磁绕组，绕组 T 相当于伪静止电枢绕组。

这就解决了交流异步电动机数学模型化简的难题。以产生同样的旋转磁动势为准则，图 2-13 (a) 所示的三相交流绕组，图 2-13 (b) 所示的两相交流绕组和图 2-13 (c) 所示的整体旋转的直流绕组彼此等效。或者说，在三相坐标系下的 i_A 、 i_B 、 i_C ，在两相坐标下的 i_α 、 i_β 和在旋转两相坐标系下的直流磁动势 i_M 、 i_T 是等效的，它们能产生相同的旋转磁动势。就如图 2-13 (c) 所示的 M、T 绕组，当观察者站在地面上看上去，它们是与三相交流绕组等效的旋转直流绕组；如果跳到旋转着的铁芯上看，就是一个直流电动机的物理模型。这样，通过坐标变换，可以找到与交流三相绕组等效的直流电动机模型。至于如何解出 i_A 、 i_B 、 i_C 与 i_α 、 i_β 和 i_M 、 i_T 之间准确的等效关系，那是纯数学问题，是坐标变换的任务，解决的难度也被减轻了许多。

(4) 矢量控制系统。

1971 年德国西门子公司 F.Blaschke 等人提出“感应电机磁场定向的控制原理”，美国 P.C. Custman 和 A.A.Clark 申请专利“感应电机定子电压的坐标变换控制”，这两项科研成果奠定了矢量控制的理论基础，在此后实践中经过不断改进，形成目前最常用的按转子磁场定向的矢量控制系统。

如前所述，以产生同样的旋转磁动势为准则，通过坐标变换，可将三相坐标系下的交流电动机等效为两相旋转坐标系下的直流电动机，其坐标变换结构如图 2-14 所示。从整体上看，输入为 A、B、C 三相电压，输出为转速 ω ，是一台异步电动机。而从内部看，经过等效变换和同步旋转变换，变成一台由 i_{M_1} 、 i_{T_1} 输入， ω 输出的直流电动机。

既然异步电动机经过坐标变换可以等效成直流电动机，那么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，就能控制异步电动机。由于进行坐标变换的是电流（代表磁动势）的空间矢量，所以此控制系统称作矢量变换控制系统或矢量控制系统。

4. 直接转矩控制方式

直接转矩控制系统是十余年来继矢量控制系统之后发展起来的另一种高


 笔记

动态性能的交流变频调速系统。一般认为是德国鲁尔大学 Depenbrock 教授于 1985 年发明的，其实磁链转矩直接调节的思想早在 1977 年就由 A.B.Plunket 首先提出来了，但需要直接检测定子磁链，这在当时是很困难的，因此未能获得实际应用。Depenbrock 教授提出的直接转矩控制系统采用的主要技术措施现在已获得推广应用并取得成功。其后，国际上又开发了一些不同的具体控制方案，但基本特点没有改变。

(1) 直接转矩控制系统的原理和特点。

如图 2-14 所示为按定子磁场控制的直接转矩控制系统原理框图。与矢量控制系统一样，该系统也是分别控制异步电动机的转速和磁链，而且采用在转速环内设置转矩内环的方法，以抑制磁链变化对转子系统的影响，因此转速与磁链子系统也是近似独立的。

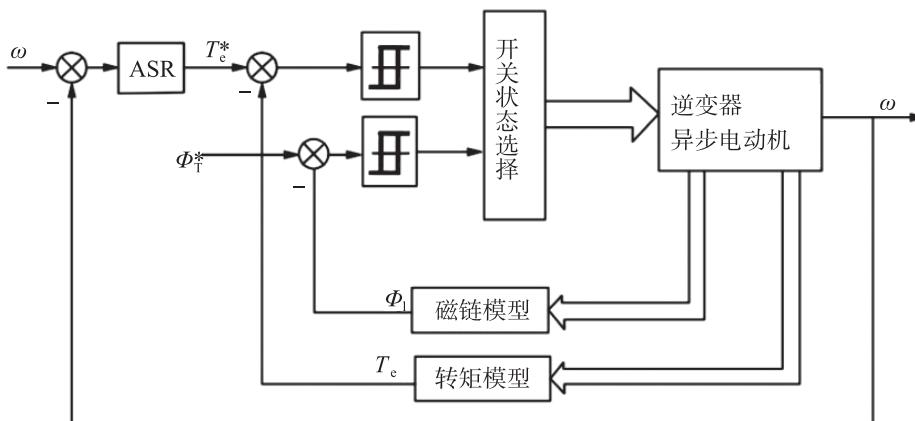


图 2-14 按定子磁场控制的直接转矩控制系统原理框图

当前推广应用的直接转矩控制系统还具有以下特点：

- ① 转矩和磁链都采用直接反馈的双位式砰砰控制（继电器控制），从而避开将定子电流分解成转矩和励磁分量，省去了旋转坐标变换，简化了控制器的结构。其缺点是带来了转矩脉动，因而限制了调速范围。
- ② 选择定子磁链作为被控制的磁链，而不像矢量控制系统那样选择转子磁链。这样一来，稳态的机械特性虽然差一些，却使控制性能不受转子参数变化的影响，这是它优于矢量控制系统的主要方面。
- ③ PWM 逆变器采用磁链跟踪控制方式，性能优越。

(2) 直接转矩控制系统和矢量控制系统的比较。

直接转矩控制系统和矢量控制系统都是已经获得实际应用的高性能异步电动机调速系统，两者都采用转矩和磁链分别控制，符合异步电动机数学模型所需要的控制要求。但两者在性能上各有千秋，矢量控制系统强调转矩 T_e 与转子磁链 Ψ_2 的解耦，有利于分别设计转速与磁链调节器；且实行连续控制，调

笔记

速范围宽，可达 1:100 以上；但按 Ψ_2 定向时，受电动机转子参数影响，降低了适应性。直接转矩控制系统则直接进行转矩砰砰控制，避开了旋转坐标变换；控制定子磁链 Ψ_2 ，而不是转子磁链，所以不受转子参数的影响；但不可避免地产生转矩脉动，降低了调速性能。因此只适用于风机、水泵以及牵引传动等对调速范围要求不高的场合。

直接转矩控制系统和矢量控制系统的特性和性能比较见表 2-2。

表 2-2 直接转矩控制系统和矢量控制系统的特性和性能比较

特点与性能	直接转矩控制系统	矢量控制系统
磁链控制	定子磁链	转子磁链
转矩控制	砰砰控制，脉动	连续控制，平滑
旋转坐标变换	不需要	需要
转子参数变化影响	无	有
调速范围	不够宽	较宽

2.2.4 变频器的选择

1. 按照调速范围选择变频器控制方式

(1) U/f 恒值控制变频器。

U/f 恒值控制是指在改变变频器输出频率的同时控制变频器的输出电压，使两个量保持固定的比例，使得电动机的定子磁通保持恒定，在较宽的电动机速度调节范围内，电动机的力矩、效率功率因数保持不变。因为控制的是电压和频率的比值，所以称为 U/f 恒值控制。但在输出频率较低的场合，需要进行输出电压的修正，否则会影响其性能。由于 U/f 恒值控制是开环控制，不采用速度传感器，控制电路较简单，因而是目前通用型变频器中使用最多的一种控制方式。可以看出，此方法控制的实质是交流电动机的同步转动速度（电动机的定子旋转磁场速度），对于负载等因素引起的速度减小（电动机转载实际速度）并未加以考虑，只能用于控制精度要求不高的场合，而且这种方法可以实现的速度调节范围不会超过 1:40。

(2) 转差频率控制变频器。

转差频率控制变频器也可以称为 U/f 恒值控制加速度负反馈控制变频器。这种变频器需要检测电动机的实际转动速度，构成速度的闭环。速度调节器的输出为转差频率，变频器的控制电路利用转差频率作为修正变频器输入信号的依据，使得变频器能够输出完全符合目标要求的转动速度。因为有了速度负反馈控制，使速度的控制精度有了很大的提高，所以可以用于有一定精度要求的场合。但这种方法可以实现的速度调节范围同样不会超过 1:40。



(3) 矢量控制方式变频器。

矢量控制变频器是建立在将交流电动机转化成直流电动机模型的基础上，利用直流电动机磁场和电枢相互独立且具有较好调速控制性能的控制思想，采用数学方法将交流电动机的定子和转子的耦合关系分解，通过矩阵运算，用两个相互垂直的交流电流，产生和三相交流电同样的旋转磁场，并通过控制这两个等效的交流电流达到控制三相交流电的目的。由于采用了直流电动机的控制思想，可以采用直流电动机中转子电流和负载力矩的关系来修正输入控制信号，达到没有速度反馈同样可以考虑负载对速度影响的效果，从而实现较高的控制精度，现在高控制精度的变频器大都采用此方式。这种控制方法可以实现的电动机速度调节范围达到1~100r/min，如果在矢量控制变频器的系统上再加速度传感器，速度调节范围更宽，可以达到1~1000r/min。

必须注意， U/f 控制在低速时具有控制的死区，一般的矢量控制变频器虽然低速的控制死区较小，但还是存在。所以如果需要在零至最高速度范围都具有较好性能，就一定要选择带速度负反馈的矢量控制变频器。

2. 按照用途来选择变频器的种类

(1) 通用型变频器。

可以在较低的频率下输出大力矩的功能，具有较强的抗干扰能力、噪声较小，控制方式采用矢量随机PWM方式；还可以实现固定的三段速、四段速、八段速；还具有模拟量、数字量输入控制通道，能够满足一般自动化生产设备的基本要求，而且价格较为便宜，是自动化生产线的首选。

风机、泵类专用变频器。这类变频器由于其负载的机械特性具有力矩和转速的平方成正比的特性，所以防止过载方面的功能特别优秀，同时还具有其他完善的保护措施。水泵控制时可采用“一拖一”“一拖二”控制模式，还经常构成变频—工频转换系统。电路内都具有PID调节器和软件制动等功能模块，可以保护变频器及生产机械不受损害。

(2) 注塑机专业变频器。

最主要的特点就是具有更高的过载能力，有更高的稳定性和更快的响应速度，而且抗干扰的性能特别强，控制较灵活。具有模拟量输入输出补偿的电流补偿功能，可以提供更多补偿方法和补偿参数。

(3) 其他特殊用途的专用变频器。

如电梯专业变频器、能量回馈变频器、纺织机专用变频器等。

选择变频器，第一，考虑变频器的功能；第二，考虑变频器的控制精度；第三，考虑变频器的控制系统；第四，考虑变频器的价格。

一般仅有变速要求而精度并不是很重要的场合应考虑通用型变频器，基本无精度要求场合可考虑选用 U/f 控制变频器。

 笔记

具有一定控制精度要求的场合，在经费充裕情况下可以考虑矢量控制变频器，在经费较为紧张的场合可考虑选用转差率控制变频器。

在控制精度要求高，调速范围要求也高的场合选用带有负反馈的矢量控制变频器。

只有在一般通用变频器不能满足要求的地方，才考虑专用型变频器，因为专用型变频器的价格相对要高得多。

3. 根据安装位置的环境选择变频器的防护结构

变频器的防护结构主要有以下四种。

(1) 开放型。这种对环境的要求相对较高，是一种正常情况下，人体不能触摸到变频器内部带电部分的结构，所以此类变频器一般应安装于电气控制柜的内部，或是控制室的屏、盘上，尤其是相对集中的安装。

(2) 封闭型。有些类型的变频器具有自带的外罩，可以单独地安装于建筑屋内。由于具有外部的壳罩，所以其散热受到一定的影响。

(3) 密封型。变频器自身外壳的保护更加完善，但散热更受影响，应考虑使用专用于散热的风扇。

(4) 密闭型。具有防尘、防水的结构。可以独立使用于有水淋、粉尘、腐蚀性甚至于可燃可爆的气体的工业现场，但应该考虑能力超过风扇的冷却方式。

4. 按照控制功率选择变频器的容量

变频器对于电动机而言，相当于供电电源，其负载能力用容量来描述。

变频器的容量选择是一个重要而复杂的问题，首先要考虑的是变频器和电动机的功率容量相匹配的问题。如果变频器的容量小于电动机的功率对应的容量，会使得电动机的有效力矩输出值变小，影响电动机拖动系统的正常运行，甚至会损害变频器装置；而变频器的容量选择过大，则输出电流的谐波分量就会增加，增加线路的电压损失和功率损耗，同时设备的投资也会增加很多。

按照常规，一个电气控制系统中，处在控制系统上游的设备的功率绝对不能小于处在控制系统下游的设备的功率。根据变频器和电动机在电气上的连接关系：变频器接受电源的固定工频交流电，转换成其他频率的交流电，供给电动机使用以满足工艺过程的不同速度要求。电动机是控制系统中的下游设备，所以变频器的容量一定要大于电动机的功率。

变频器的容量可以从三个方面进行考虑：后方电动机的额定电流、电动机的额定功率、电动机的额定容量。但对于一台电动机而言，正常情况下电流功率和容量是相互关联的，同时电动机拖动机械变换速度也有两种方式，即恒力矩调速和恒功率调速，所以这里的电动机功率就不再是固定不变的值，而相对电动机的电流在恒力矩调速的过程中是一个不变化的数值。用电动机的电流作



为选择变频器容量的依据是保证变频器正常工作的有效方法，原因如下。

在变频器—电动机调速控制系统中，变频器和电动机是串联的关系，电动机工作时的电流必然是变频器输出的电流。但变频器输出的电流是包含了基本频率及高次谐波的全部，而电动机用于产生拖动力矩的只是其中的基本频率电流，所以应该考虑必要的余量系数（一般取1.1~1.3）。

变频器在输出频率变化的过程中，输出电压有时是变化的。但在变频器制造时，是以所有变化中数值最大的电流来作为选择变频器内部功率元件的依据。如果以功率、容量这两个和电流电压乘积表示的量来选择变频器，在电压变化时，其选择结果就是不准确的。

当然，变频器在不同的温度环境、不同的散热条件、不同的海拔高度工作时，应考虑不同容量的余量系数。

2.2.5 变频器的安装

要正确使用变频器，必须认真地考虑散热的问题。变频器的故障率随温度升高而呈指数上升，使用寿命随温度升高而呈指数下降，环境温度升高10℃，变频器使用寿命减半。因此，我们要重视散热问题，在变频器工作时，流过变频器的电流是很大的，变频器产生的热量也是非常大的，不能忽视其发热所产生的影响。

1. 变频器安装在控制柜中

我们要了解一台变频器的发热量大概是多少，可用以下公式估算：

$$\text{发热量的近似值} = \text{变频器容量 (kW)} \times 55[\text{W}]$$

在这里，如果变频器容量是以恒转矩负载为准的（过流能力 $150\% \times 60\text{s}$ ），变频器带有直流电抗器或交流电抗器，并且也在机柜里面，这时发热量会更大一些。电抗器安装在变频器侧面或侧上方比较好。这时可以进行如下估算：变频器容量 (kW) $\times 60[\text{W}]$ ，因为各变频器厂家的硬件都差不多，所以此式可以用于各品牌的产品。如果有制动电阻，因为制动电阻的散热量很大，因此制动电阻的安装位置最好和变频器隔离开，如装在机柜上面或旁边等。那么，怎样才能降低控制柜内的发热量呢？当变频器安装在控制机柜中时，要考虑变频器发热值的问题。根据机柜内产生热量值的增加，要适当地增加机柜的尺寸，因此，要使控制机柜的尺寸尽量减小，就必须使机柜中产生的热量值尽可能地减少。如果在变频器安装时，把变频器的散热器部分放到控制机柜的外面，将会使变频器有70%的发热量释放到控制机柜的外面，由于大容量变频器有很大的发热量，所以对大容量变频器更加有效，还可以用隔离板把本体和散热器隔开，使散热器的散热不影响变频器本体，这样效果也很好。变频器散热设计中都是以垂直安装为基础的，横向安装会导致散热效果变差，一般功率稍微大一

笔记

点的变频器都带有冷却风扇，同时，也建议在控制柜上的出风口安装冷却风扇，进风口要加装滤网以防止灰尘进入控制柜，注意控制柜和变频器上的风扇都是要安装的，二者不可相互替代。

另外，散热问题还要注意以下几个问题。

(1) 在海拔高于 1000m 的地方，因为空气密度降低，应加大柜子的冷却风量以改善冷却效果。理论上变频器也应考虑降容，每升高 1000m 降 5%。但由于变频设计器的负载能力和散热能力一般比实际使用的要大，所以要考虑具体应用，比如海拔 1500m 的地方，周期性负载（电梯），就没有必要降容。

(2) 冷却介质（自然冷却、强迫风冷却的环境温度）。在大部分运用场合，变频器工作过程中产生的热量，必然是散发到周围的空气中，如果周围的环境温度比较高，那么这种散热的效果就较差，换言之，变频器的工作温度升高，变频器内部的元件性能就会受到影响。变频器是按照周围环境不超过 40℃来进行设计的，当环境温度超过此值时应降低负载的容量。当环境温度超过 50℃时，就不能可靠地进行工作（允许的输出为 0），在这种情况下，若利用空气流动来散热，空气流动量越大，元件和电路的温度就越高，所以必须采取其他的冷却方法（油冷却、氢气冷却、水冷却）。

(3) 变频器在安装时应注意环境的温度和湿度，通用等级的变频器工作环境温度为 0℃ ~ 40℃，特殊耐温的变频器工作环境温度为 -10℃ ~ 50℃。如果不能满足，就要考虑其他的降温措施，变频器工作环境的湿度要求是 90% 以下，如果湿度过高，在金属物件的表面就会产生凝露，就会降低电气的绝缘性能。所以环境的湿度过高时，应给予除湿，也可以采用对流加热器的方法解决。

(4) 在安装时，面板必须在电柜前门的方向，不能横向，更不能倒置，在电柜内部的安装应留有散热的空间。变频器和电柜在几个方向上（除固定安装的面）应有一定要求尺寸的通风空间（不同容量不同规格的变频器留有通风尺寸不同）。在装有强制通风的电柜内，风流一定要穿越变频器，不能以直线的方式绕过变频器；在同一个电柜内安装两台变频器时，应采用并列方法，以防止从电柜底部进入的冷风流经一台变频器后，再经过另一台变频器，从而把一台变频器的热量带给另一台变频器。如果确实由于位置关系不能进行并排安装，应在两台变频器之间安装隔离风流的挡板，防止上述情况的发生。

2. 变频器安装时的连接用线

(1) 主电路安装连接用线的选择。

变频器的主回路是指连接电源、变频器、电动机的主电流经过的路径，在电源侧应能满足电压、电流的要求，所以连接线的电压等级不低于 500V，通过电流的能力不低于变频器的额定电流。由于变频器一般距离电源不会太远，



所以其电流密度可以按 4A/mm^2 来考虑。在变频器的输出侧连接线同样应该满足电动机的电压、电流的要求，所以连接线的电压等级不低于 500V ，通过电流的能力不低于电动机的额定电流，由于变频器一般情况下距离电动机不会太近，其线路的电流密度可以按 2.5A/mm^2 来考虑。有一点必须说明的是，电动机的电流是按正弦电流来进行计算，但变频器输出的电流除了正弦基频电流外，还有许多高次谐波电流，所以在选择线路时应对电动机的电流考虑一定的裕量。

变频器的主回路接线端分为进线端和出线端，通常采用电气控制中的常规标注方法，如采用英文字母 R、S、T 或 L_1 、 L_2 、 L_3 来表示进线端，有时也会用 U、V、W 来表示进线，但一般会用 U_1 、 V_1 、 W_1 ，即带下标为 1 的符号来表示，而输出接线端通常用 U_2 、 V_2 、 W_2 来表示。

如果变频器的接线端分别在变频器的上部和下部，一般上部的接线端是进线接线端，下部的接线端是出线接线端。如果变频器的接线端分布在变频器的左右侧，一般在左边的是进线接线端，右边的是出线接线端。

变频器的进、出线接线端必须正确接线，否则对变频器的功能和安全都是严重的威胁。

由于变频器的输出线路中含有大量的高次谐波，具有较强的发送性，所以对周围的设备和线路具有较强的干扰，一般可以在输出线的外部穿上一根钢管，并将钢管和大地进行连接。

为了防止其他设备对变频器产生干扰，特别是电网电源中的谐波造成的电压波形畸变，有时在变频器和电源之间连接滤波用电抗器。

(2) 控制电路的连接用线选择。

变频器的控制回路中传递的信号可以分为两个大类：模拟量信号和数字量信号。

①模拟量信号，其电压值一般在几十伏特以下，所以没有特别的电压等级要求，电流值一般在毫安级别，最大不会超过安培，所以线路的通流能力也不成问题。这里的关键是模拟信号容易受到外来信号的干扰，所以应采取相应的抗干扰措施。一般情况下，线路选择带屏蔽的信号线，而屏蔽层应进行接地，考虑到模拟电压信号在传递的过程中，容易产生电压的损耗，所以在信号传输距离较远的线路，一般不采用电压的形式传递信号，而是采用电压先转换成电流信号，传输到目的地后再转换成电压信号的形式（原因是电流在传输过程中不会有损耗）。

模拟量信号线路不能和电力线路长距离平行布设，如果必须交叉，一定要垂直交叉，且在变频器进线侧应相距 10cm 以上，在变频器的出线侧应相距 20cm 以上。

笔记 

②数字量信号，在变频器中，标准的数字量电压信号为 24V，标准的数字量电流信号为 4mA~20mA，也就是说线路的选择不需要考虑电压等级和载流能力的问题。而数字量信号本身具有较强的抗干扰能力，所以传输数字量信号的线路可以不考虑使用带屏蔽的线路，仅用一般的双绞线就可以了。

数字量信号线最好不要和动力线平行布设，交叉时尽量采用垂直交叉的方式，在空间上应相距不低于 10cm。