



工业和信息化部高职高专“十二五”规划教材立项项目



21世纪高职高专机电工程类规划教材

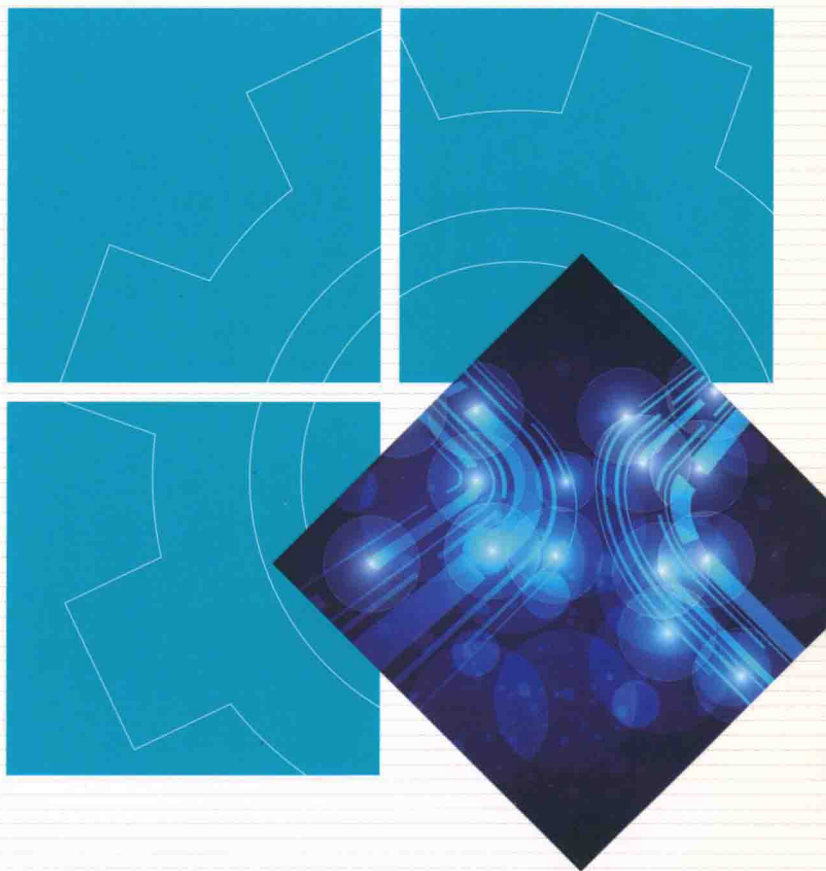
21 SHIJI GAOZHIGAOZHUAN JDIANGONGCHENGLEI GUIHUA JIAOCAI

交流伺服与变频 技术及应用

J

iaoliu Sifu Yu Bianpin
Jishu Ji Yingyong

■ 龚仲华 编著



 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



工业和信息化部高职高专“十二五”规划教材立项项目

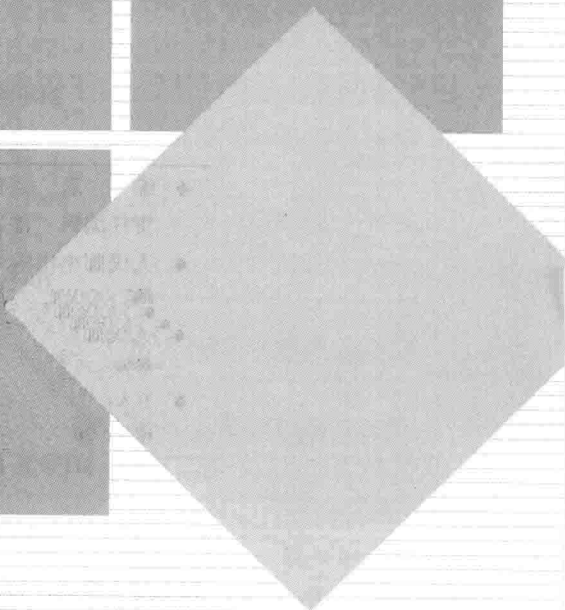
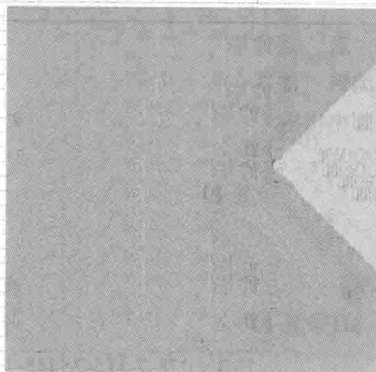
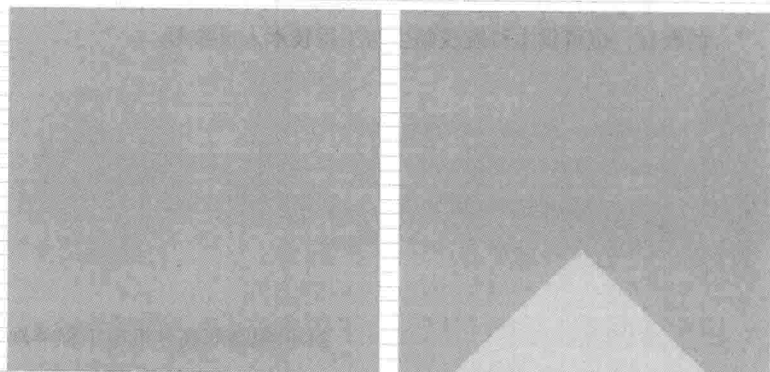


21世纪高职高专机电工程类规划教材

21 SHIJI GAOZHIGAOZHUAN JDIANGONGCHENGLI GUIHUA JIAOCAI

交流伺服与变频 技术及应用

■ 龚仲华 编著



人民邮电出版社

北京

图书在版编目(CIP)数据

交流伺服与变频技术及应用 / 龚仲华编著. — 北京:
人民邮电出版社, 2011.8
21世纪高职高专机电工程类规划教材
ISBN 978-7-115-25448-1

I. ①交… II. ①龚… III. ①交流电机—伺服系统—
高等职业教育—教材②交流电机—变频调速—高等职业教
育—教材 IV. ①TM921.54②TM340.12

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第118126号

内 容 提 要

本书系统介绍交流伺服与变频技术应用所涉及的知识与技能,内容包括交流伺服和变频器工程设计、应用维修所涉及的产品性能、电路设计、运行控制、功能应用、调试维修等技术以及最新的电力电子器件、12脉冲整流与三电平逆变技术、网络与自适应控制功能等。

书中的案例均取自工程实际,并采用国际先进的技术标准与设计思想。

本书可作为高等职业院校、高等专科学校自动控制、机电一体化、数控维修、设备维护等相关专业的教材,也可供本科院校师生与工程技术人员参考。

21世纪高职高专机电工程类规划教材

交流伺服与变频技术及应用

-
- ◆ 编 著 龚仲华
责任编辑 潘新文
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号
邮编 100061 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京艺辉印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 20.5 2011年8月第1版
字数: 515千字 2011年8月北京第1次印刷

ISBN 978-7-115-25448-1

定价: 37.00元

读者服务热线: (010)67170985 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

广告经营许可证: 京崇工商广字第0021号

前 言

交流伺服和变频器是用于位置、速度、转矩控制的新型交流调速装置，在机床、自动生产线、纺织、包装等众多的行业得到了广泛应用。

交流伺服和变频器的理论与原理相同、结构与功能类似，在变频技术与应用课程的基础上补充交流伺服内容，其知识更全面、内容更系统、层次更清晰、教学更方便。本课程可以与电工电子等前期课程和数控原理与系统、数控维修、机电设备维护、自动生产线等后续课程紧密衔接，起到承上启下的作用。

本书从高技能型人才培养的实际要求出发，以广泛使用的安川公司最新 ΣV 系列交流伺服和CIMR-G7系列变频器为载体，在简要介绍交流调速原理的基础上，重点对交流伺服和变频器工程设计、应用维修所必需的电路设计、运行控制、功能应用、调试维修技术及最新的电力电子器件、12脉冲整流与三电平逆变技术、网络与自适应控制功能等方面内容进行了全面深入的阐述。书中的全部设计图与案例均来自工程实际，并广泛采用了国际先进的技术标准与设计思想。本书编写力求做到技术先进、知识综合，内容全面、重点突出，选材典型、案例具体。

全书分为交流调速基础、交流伺服及应用、变频技术及应用3个学习领域，10个项目，30个任务，每一任务均有明确的能力目标、工作内容与教学环节。根据工作内容的实际需要，任务中由浅入深地安排了相关知识、实践指导、拓展学习、技能训练等教学环节，较好地体现了“理实一体、以学为主”的高等职业教育理念。

为保证教材能做到思路清晰、层次分明、循环渐进、易教易学，教材对“任务”的内容设计如下。

能力目标：能力目标不仅包括完成工作任务所需的实践能力，而且还包括需要通过学习达到的知识理解、分析问题、解决问题等方面的要求。

工作内容：工作内容不仅包括完成工作任务所进行的实践活动，而且还包括需要通过学习去回答、解释问题的思考与练习以及为了解决工程问题需要进行的分析计算、设计验证等方面内容。

相关知识：相关知识是对工作任务所涉及的基本概念、理论知识、实践知识等进行的综合性介绍与说明。

实践指导：实践指导是对实践教学所涉及的产品性能、控制要求、安装条件、使用方法、操作步骤等进行的针对性说明。

拓展学习：拓展学习是对与工作任务相关的最新理论、最新技术、先进功能以及其他相关内容、同类产品等所进行的介绍。

技能训练：教材中的技能训练是为解决工程实际问题所需要进行的计算设计、实践操作等方面的内容。

以上教学环节在不同任务中将按实际需要设置与选择，不拘泥于教条。

全书由龚仲华编著，编写过程中得到了安川公司的大力支持，并参阅了该公司的产品说明书与技术资料，在此表示感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在不足与错误，恳请广大读者批评指正。

编 者

2011年6月

目 录

导论	1	任务 2 熟悉 PWM 逆变原理	31
一、交流电机控制系统概述	1	能力目标	31
二、交流调速系统的性能与比较	4	工作内容	31
思考与练习	7	相关知识	31
学习领域一 交流调速基础	8	一、逆变的基本形式	31
项目一 交流调速原理	9	二、PWM 逆变原理	35
任务 1 掌握电机控制的基本理论	9	拓展学习	38
能力目标	9	一、双 PWM 逆变与 12 脉冲整流	38
工作内容	9	二、三电平逆变与矩阵控制变频	39
相关知识	10	任务 3 掌握整流电路的分析方法	40
一、电磁感应定律与电磁力	10	能力目标	40
二、电机运行的力学基础	11	工作内容	40
三、调速方式与稳定运行	14	相关知识	40
任务 2 了解伺服电机的运行原理	15	一、整流电路	41
能力目标	15	二、单相桥式整流	41
工作内容	15	三、三相桥式整流	42
相关知识	16	学习领域二 交流伺服及应用	45
一、伺服电机的运行原理	16	项目三 交流伺服产品与性能	46
二、伺服电机的输出特性	18	任务 1 了解交流伺服驱动产品	46
任务 3 了解感应电机的运行原理	19	能力目标	46
能力目标	19	工作内容	46
工作内容	19	相关知识	47
相关知识	19	一、交流伺服的分类	47
一、旋转磁场的产生	19	二、伺服系统的结构	49
二、感应电机的运行原理	21	实践指导	50
三、V/f 变频控制原理	22	一、安川产品简介	51
拓展学习	23	二、三菱产品简介	52
一、感应电机的等效电路	23	三、松下产品简介	53
二、感应电机的机械特性	24	拓展学习	54
项目二 交流逆变技术	26	一、PMSM 伺服系统的原理	54
任务 1 熟悉电力电子器件	26	二、直线电机驱动系统	55
能力目标	26	任务 2 熟悉 ΣV 系列伺服驱动	56
工作内容	26	能力目标	56
相关知识	26	工作内容	56
一、交流逆变概述	27	相关知识	57
二、电力电子器件	28	一、 ΣV 驱动器	57
		二、伺服电机	58

实践指导	60	二、基本参数计算实例	102
一、 ΣV 驱动器规格	60	三、DI/DO 功能及定义	103
二、 ΣV 系列电机规格	61	技能训练	106
项目四 交流伺服的连接技术	64	任务 2 掌握驱动器的操作技能	106
任务 1 掌握主回路连接技术	64	能力目标	106
能力目标	64	工作内容	107
工作内容	64	实践指导	107
相关知识	64	一、操作单元说明	107
一、伺服系统组成	65	二、参数的设定与修改	109
二、主回路连接技术	66	三、驱动器状态的检查	111
实践指导	68	任务 3 掌握驱动器的调试技能	114
一、 ΣV 驱动器连接总图	68	能力目标	114
二、主回路连接要求	70	工作内容	114
拓展学习	71	实践指导	114
一、主回路器件选择	71	一、驱动器试运行	114
二、主回路设计实例	72	二、驱动器的快速调试	117
任务 2 掌握控制回路连接技术	74	三、驱动器的在线自动调整	121
能力目标	74	任务 4 掌握驱动器的维修技能	123
工作内容	74	能力目标	123
相关知识	75	工作内容	123
一、DI/DO 信号与连接	75	实践指导	123
二、给定与反馈连接	76	一、驱动器的初始化	123
实践指导	78	二、无电机试运行	124
一、 ΣV 驱动器信号规格	78	三、驱动器故障分析与处理	126
二、控制回路设计实例	79	学习领域三 变频技术及应用	132
拓展学习	80	项目六 变频器产品与性能	133
一、绝对编码器的连接	80	任务 1 了解变频器产品	133
二、拓展练习	82	能力目标	133
任务 3 识读伺服驱动系统工程图	82	工作内容	133
能力目标	82	相关知识	134
工作内容	82	一、变频器分类与特点	134
相关知识	87	二、变频调速系统的结构	135
一、工程图识读	87	实践指导	136
二、原理分析	88	一、变频器分类	136
三、电气元件明细表	89	二、典型变频器产品	138
技能训练	90	拓展学习	139
项目五 交流伺服的调试与维修	92	任务 2 熟悉 CIMR 系列变频器	142
任务 1 熟悉驱动器的功能与参数	92	能力目标	142
能力目标	92	工作内容	142
工作内容	92	相关知识	142
相关知识	92	一、安川变频器概述	142
一、驱动器结构与控制方式	93	二、主要技术性能	143
二、位置指令输入与匹配	95	实践指导	146
三、基本功能与参数	97	一、CIMR-G7 变频器规格	146
实践指导	100	二、CIMR-G7 变频器选件	147
一、 ΣV 驱动器基本参数	100		

项目七 变频器的连接技术	149	技能训练.....	189
任务 1 掌握主回路连接技术.....	149	任务 2 掌握给定与加减速调整技术 ..	189
能力目标.....	149	能力目标.....	189
工作内容.....	149	工作内容.....	190
相关知识.....	149	相关知识.....	190
一、变频调速系统的组成.....	150	一、给定选择与调整.....	190
二、主回路连接技术.....	151	二、加减速控制.....	191
实践指导.....	153	实践指导.....	193
一、CIMR-G7 变频器连接总图.....	153	一、CIMR-G7 的给定选择.....	193
二、主回路连接要点.....	154	二、CIMR-G7 的给定调整.....	194
任务 2 掌握控制回路连接技术.....	155	三、CIMR-G7 的加减速控制.....	196
能力目标.....	155	拓展学习.....	198
工作内容.....	156	一、重载加减速.....	198
相关知识.....	156	二、自适应加减速.....	199
一、DI/DO 信号与连接.....	156	技能训练.....	201
二、AI/AO 信号与连接.....	159	任务 3 熟悉变频器停止与制动过程 ..	201
实践指导.....	160	能力目标.....	201
一、CIMR-G7 的 DI/DO 连接.....	160	工作内容.....	201
二、CIMR-G7 的 AI/AO 连接.....	163	相关知识.....	202
拓展学习.....	165	一、变频器的停止方式.....	202
一、闭环控制系统的连接.....	165	二、直流制动与初始励磁.....	203
二、DI/DO 功能定义.....	168	三、瞬时断电与重新启动.....	205
三、AI/AO 信号功能定义.....	170	实践指导.....	206
四、PI/PO 功能定义.....	171	一、CIMR-G7 的停止与制动.....	206
任务 3 识读变频调速系统工程图.....	172	二、CIMR-G7 的重新启动.....	207
能力目标.....	172	拓展学习.....	209
工作内容.....	172	一、伺服锁定和高转差制动.....	209
相关知识.....	172	二、速度搜索.....	210
一、变频器控制.....	174	技能训练.....	213
二、CNC 连接.....	174	任务 4 掌握变频器的运行保护技术 ..	213
技能训练.....	175	能力目标.....	213
项目八 变频器的运行与控制	176	工作内容.....	213
任务 1 掌握变频器的运行控制技术 ..	176	相关知识.....	214
能力目标.....	176	一、软件保护功能.....	214
工作内容.....	176	二、硬件保护功能.....	215
相关知识.....	176	实践指导.....	217
一、变频控制的基本方式.....	177	一、CIMR-G7 的过载保护.....	217
二、变频器的运行与控制.....	178	二、CIMR-G7 的过热保护.....	218
三、输出频率的范围设定.....	180	项目九 变频器的功能与应用	221
实践指导.....	181	任务 1 掌握速度与转矩调整技术.....	221
一、CIMR-G7 的基本设定.....	181	能力目标.....	221
二、CIMR-G7 的运行控制.....	183	工作内容.....	221
三、CIMR-G7 的频率设定.....	184	相关知识.....	222
拓展学习.....	185	一、机械特性的调整.....	222
一、多级变速与点动运行.....	185	二、转矩调节与限制.....	223
二、远程调速.....	187	实践指导.....	225

一、CIMR-G7 的机械特性调整	225	能力目标	260
二、CIMR-G7 的转矩调节与限制	226	工作内容	260
拓展学习	227	实践指导	261
一、速度调节与控制	227	一、操作单元说明	261
二、动态性能的调整	230	二、变频器基本操作	263
三、转矩控制功能	231	三、参数显示与设定	267
任务 2 熟悉其他变频器的实用功能	234	四、状态显示与监控	269
能力目标	234	拓展学习	270
工作内容	234	一、参数的初始化	270
拓展学习	234	二、参数的保护与复制	272
一、工频切换功能与应用	235	三、操作单元的功能设定	274
二、升降负载控制功能与应用	236	四、变频器的 AO/PO 监控	275
三、机械制动功能与应用	238	任务 2 掌握变频器的调试技能	276
任务 3 了解变频器的 PID 调节功能	241	能力目标	276
能力目标	241	工作内容	276
工作内容	241	实践指导	276
相关知识	242	一、变频器点动试运行	276
一、PID 调节原理与特点	242	二、变频器的快速调试	278
二、变频器 PID 调节系统	244	三、变频器的自动调整	281
三、PID 系统监控与保护	245	拓展学习	283
实践指导	246	一、自动调整的要点	283
一、CIMR-G7 的 PID 系统结构	246	二、自动调整实例	284
二、CIMR-G7 的 PID 参数与控制	248	任务 3 掌握变频器的维修技能	287
任务 4 了解变频器的通信功能	249	能力目标	287
能力目标	249	工作内容	287
工作内容	250	实践指导	287
相关知识	250	一、变频器故障及处理	287
一、通信与接口	250	二、变频器警示及处理	290
二、通通信过程	251	三、操作错误及处理	291
实践指导	252	拓展学习	292
一、CIMR-G7 的通信设定	252	一、不能正常工作的故障诊断	292
二、CIMR-G7 的数据格式	253	二、运行不良的故障诊断	294
三、CIMR-G7 的通信控制	255	附录 A 安川 $\Sigma V/\Sigma II$ 系列驱动器	
拓展学习	256	参数总表	295
一、CIMR-G7 的运行与监控	256	附录 B 安川 CIMR-7/1000 系列变频器	
二、CIMR-G7 通信实例	258	参数总表	302
项目十 变频器的调试与维修	260	参考文献	320
任务 1 掌握变频器的操作技能	260		

一、交流电机控制系统概述

1. 交流传动与交流伺服

交流电机控制系统是以交流电动机为执行元件的位置、速度或转矩控制系统的总称。按照传统的习惯,只进行转速控制的系统称为“传动系统”,而能实现位置控制的系统称为“伺服系统”。

交流传动系统通常用于机械、矿山、冶金、纺织、化工、交通等行业,其使用最为普遍。交流传动系统一般以感应电机^[1]为对象,变频器是当前最为常用的控制装置。交流伺服系统主要用于数控机床、机器人、航天航空等需要大范围调速与高精度位置控制的场合,其控制装置为交流伺服驱动器,驱动电机为专门生产的交流伺服电机。

调速是交流传动与交流伺服系统的共同要求。交流电机的调速方法有很多种,常用的有图 0-1.1 所示的变极调速、调压调速、串级调速、变频调速等。

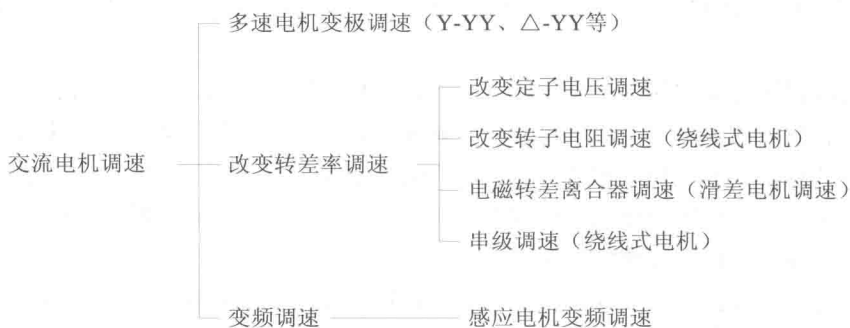


图 0-1.1 交流电机调速的分类

变极调速通过转换感应电机的定子绕组的接线方式 (Y-YY、 Δ -YY), 变换了电机的磁极

[1] 为了从原理上区分各类交流电机,异步电机一词国外已被感应电机取代,本书采用国际通用名词。

数,改变的是电机的同步转速,它只能进行有限级(一般为2级)变速,故只能用于简单变速或辅助变速,且需要使用专门的变极电机。

变转差调速系统配套的定子调压、转子变阻、滑差调节、串级调速等装置均为大功率部件,其体积大、效率低、成本高,且调速范围、调速精度、经济性等指标均较低。因此,随着变频器、交流伺服驱动器的应用与普及,常用变频调速已经成为交流电机调速技术的发展趋势。

交流伺服系统的速度调节同样采用变频技术,但使用的是中小功率交流永磁同步电机,可实现电机位置(转角)、转速、转矩的综合控制。与感应电机相比,交流伺服电机的调速范围更大、调速精度更高、动态特性更好。但是,由于永磁同步电机的磁场无法改变,因此,原则上只能用于机床的进给驱动、起重机等恒转矩调速的场合,而很少用于诸如机床主轴、卷取控制等恒功率调速的场合。

交流伺服系统具有与直流伺服系统相媲美的优异性能,而且其可靠性更高、高速性能更好、维修成本更低,产品已在数控机床、工业机器人等高速、高精度控制领域全面取代传统的直流伺服系统。

2. 发展概况

与直流电机^[1]相比,交流电机具有转速高、功率大、结构简单、运行可靠、体积小、价格低等一系列优点,但从控制的角度看,交流电机是一个多变量、非线性对象,其控制远比直流电机复杂。因此,在一个很长的时期内,直流电机控制系统始终在电气传动、伺服控制领域占据主导地位。

对交流电机控制系统来说,无论速度控制还是位置或转矩控制,都需要调节电机转速,因此变频是所有交流电机控制系统的基础,而电力电子器件、晶体管脉宽调制(Pulse Width Modulated, PWM)技术、矢量控制理论则是实现变频调速的共性关键技术。

利用PWM技术实现变频调速所需要的交流逆变(以下简称PWM变频),是目前公认的最佳控制方案。20世纪70年代初,随着微电子技术的迅猛发展与第二代“全控型”电力电子器件的实用化,使得高频、低耗的晶体管PWM变频成为了可能,基于传统电机模型与经典控制理论的方波永磁同步电机(Brush Less DC Motor, BLDCM,亦称为无刷直流电机)交流伺服驱动系统与 V/f 控制^[2]的变频调速系统被迅速实用化,交流伺服与变频器从此进入了工业自动化的各领域。

早期的交流伺服与变频器都是基于传统的电机模型与控制理论,从电机的静态特性出发所进行的控制,它较好地解决了交流电机的平滑调速问题,为交流控制系统的快速发展奠定了基础,同时由于其结构简单、控制容易、生产成本低,至今仍有所应用。但 V/f 控制的变频调速的最大缺点是无法实现转矩的控制,特别在电机低速工作时的转矩输出较小,因而不能用于高精度、大范围调速、恒转矩调速的情况。

随着对电机控制理论研究的深入,20世纪70年代德国F.Blaschke等人提出了感应电机的磁场定向控制理论,美国P.C.Cushman&A.A.Clark等人申请了感应电机定子电压的坐标变换控

[1] 电机包括“电动机”与“发电机”两类,本书中的电机专指“电动机”。

[2] V/f 应为英文电压/频率(Voltage/frequency)首字母的缩写,在国外无一例外地以 V/f 表示,但在国内常被表示为 U/f 控制,本书所采用的是国际通用表示法。

制专利，交流电机控制开始采用全新的矢量控制理论，而微电子技术的迅速发展，则为矢量控制理论的实现提供了可能。20 世纪 80 年代初，采用矢量控制的正弦波永磁同步电机（Permanent-Magnet Synchronous Motor, PMSM）伺服驱动系统与矢量控制的变频器产品相继在 SIEMENS（德）、YASKAWA（日）、ROCKWELL（美）等公司研制成功，并被迅速推广与普及。

经过 30 多年的发展，交流电机的控制理论与技术已经日臻成熟，各种高精度、高性能的交流电机控制系统不断涌现，特别是交流伺服驱动系统已经在数控机床、机器人上全面取代直流伺服驱动系统。

3. 共性技术

“变流”与“控制”是交流调速的两大共性关键技术，前者主要涉及电力电子器件应用与电路拓扑结构问题；后者是感应电机控制理论研究与控制技术实用化问题，图 0-1.2 所示为交流电机控制技术的应用与发展简图。



图 0-1.2 交流电机控制技术的应用与发展简图

在控制理论方面，当代交流伺服与变频器已从最初的 BLDCM 与 V/f 控制发展到了今天的 PMSM 与矢量控制、直接转矩控制；在控制技术上，则从模拟量控制发展到了全数字控制与网络控制，交流电机的速度控制范围与精度得到大幅度提高，转矩控制与位置控制功能进一步完善，并开始大范围替代直流电机控制系统。

在电力电子器件的应用上，交流伺服与变频器主要经历了第二代“全控型”器件（主要为 GTR）、第三代“复合型”器件（主要为 IGBT）与第四代功率集成电路（主要为 IPM）三个阶段，IGBT 与 IPM 为当代交流伺服与变频器的主流器件。在电路拓扑结构（主电路的结构形式）上，中小容量的交流伺服与变频器目前仍以“交-直-交”PWM 控制型逆变为主；但 12 脉冲整流、双 PWM 变频、三电平逆变等技术已在大容量变频器上应用；新一代“交-交”逆变、矩阵控制的变频器（Matrix Converter）已经被实用化。

4. 变频器与伺服驱动

在以感应电机、交流伺服电机等为控制对象的交流电机速度控制系统中，尽管有开环 V/f 控制、闭环 V/f 控制、转差频率控制、开环磁通矢量控制、开环或闭环电流矢量控制等多种控制方式，但其本质都是通过改变供电频率来达到改变电机转速的目的，从这一意义上说，当前

的交流调速装置都可以称为“变频器”。但是，考虑到交流伺服电机控制装置的主要功能是实现位置跟随控制，速度、转矩控制服务于位置控制，因此，习惯上将其称为“伺服驱动器”；而“变频器”则专指用于通用感应电机变频调速的控制器。

变频器作为一种通用控制装置，其控制对象是来自不同厂家生产、不同参数的感应电机。从后述的交流电机调速原理可知，建立电机的数学模型是实现精确控制的前提，它直接决定了调速系统的性能。依靠当前的技术还不能做到用一个通用控制装置来精确控制任意控制对象，因此变频器被分为通用型与专用型两类。

通用型变频器就是人们平时常说的“变频器”，它可以用于不同厂家生产、不同参数的感应电机控制。通用变频器在设计时由于无法预知控制对象的各种参数，电机模型需要进行大量的简化与近似处理，因此其调速范围一般较小，调速性能也较差。矢量控制变频器一般可通过“自动调整（自学习）”操作来自动测试一些简单的电机参数，在有限范围内提高模型的准确性，改善控制性能。

为了实现大范围、高精度变频调速控制，就必须预知控制对象（电机）的精确参数，因此，只能通过配套专用感应电机的专用变频器才能实现。专用变频器所配套的感应电机由变频器生产厂家专门设计，并经过严格的测试与试验，其数学模型十分精确，采用闭环矢量控制后的调速性能大大优于通用变频器，且能够实现较为准确的转矩与位置控制。此类变频器的价格高、性能好，通常用于数控机床主轴的大范围、精确调速，故称“交流主轴驱动器”。

二、交流调速系统的性能与比较

1. 主要技术指标

变频器与交流伺服是新型的交流电机速度调节装置，传统意义上的“调速指标”已经不能全面反映调速系统的性能，需要从静、动态两方面来重新定义技术指标。调速系统不但要满足工作机械稳态运行时对转速调节与速度精度的要求，而且还应具有快速、稳定的动态响应特性。因此，除功率因数、效率等经济指标外，衡量交流调速系统技术性能的主要指标有调速范围、调速精度与速度响应性能三方面。

（1）调速范围

调速范围是衡量系统变速能力的指标，一般以系统在一定的负载下实际可以达到的最低转速与最高转速之比（如 1 : 100）或以最高转速与最低转速的比值（如 $D = 100$ ）来表示。

通用变频器的调速范围需要注意以下两点。

① 调速范围不是变频器参数中的频率控制范围。变频器的调速范围要远远小于频率控制范围，因为当变频器输出频率小于 2Hz 时，电机无法输出正常运行所需的转矩。因此，即使像三菱公司最先进的 FR-A740 系列变频器，虽然其频率控制范围可达 0.01~400Hz（1 : 40000），但有效的调速范围只有 1 : 200。

② 通用变频器的调速范围不能增加传统“额定负载”的转矩约束条件。因为，当变频器采用 V/f 控制时只能在额定频率的点上才能输出额定转矩。定义通用变频器调速范围的转矩条件有所不同，三菱公司一般以变频器能短时输出 150% 转矩的范围定义为调速范围；安川等公司则以连续输出转矩大于规定值的范围定义为调速范围。

(2) 调速精度

交流调速系统的调速精度在开环与闭环控制系统中有不同的含义。开环系统的调速精度是指调速装置控制 4 极标准电机、在额定负载下所产生的转速降与电机额定转速之比，其性质与传统的静差率类似，计算式如下：

$$\delta = \frac{\text{空载转速} - \text{满载转速}}{\text{额定转速}} \times 100\%$$

对于闭环控制的调速系统或交流伺服系统，计算式中的“额定转速”应为系统的最高转速。调速精度与调速系统的结构密切相关，一般而言，对于同样的控制方式，采用闭环控制后的调速精度可比开环控制提高 10 倍。

(3) 速度响应

速度响应是交流调速系统新增的技术指标，它是指系统在负载惯量与电机惯量相等的前提下，速度指令以正弦波形式给定时，输出可以完全跟踪给定变化的正弦波频率值。“速度响应”有时也称“频率响应”，分别用 rad/s 或 Hz 两种不同的单位表示，转换关系为 $1\text{Hz} = 2\pi\text{rad/s}$ 。

速度响应是衡量交流调速系统的动态跟随性能的重要指标，也是各种交流调速系统的主要差距（见表 0-2.1）。

表 0-2.1 变频器、主轴驱动器与伺服驱动器的速度响应比较表

控制装置		速度响应 (rad/s)	频率响应 (Hz)
通用变频器	V/f 控制	10~20	1.5~3
	闭环 V/f 控制	10~20	1.5~3
	开环矢量控制	20~30	3~5
	闭环矢量控制	200~300	30~50
主轴驱动器		300~500	50~80
交流伺服驱动器		3000~4500	500~700

2. 性能比较

通用变频器、交流主轴驱动器、交流伺服三大类调速系统的性能有很大的差别，具体如下。

(1) 输出特性

图 0-2.1 所示为国外某著名公司在变频器控制 60Hz/4 极标准感应电机（V/f 控制，矢量控制时性能有所提高）、交流主轴驱动器控制专用感应电机、交流伺服驱动器控制 PMSM 电机时的输出特性实测结果。

由图可见，采用 V/f 控制的通用感应电机只能在额定频率的点上才能输出 100% 转矩；使用专用感应电机的交流主轴驱动可在额定转速以下区域均输出 100% 转矩；而交流伺服驱动则可以在全范围输出 100% 转矩。因此，通用变频器控制恒转矩负载时必须“降额”使用。

引起通用变频器低速输出转矩下降的一个重要原因是通用电机只能依靠转子轴上的风机进行“自通风”冷却，无独立的冷却风机，随着转速的下降，其冷却能力将显著下降，导致了电机工作电流的下降。为此，在通用感应电机上安装独立的冷却风机是提高通用变频器低速输出转矩的有效措施。

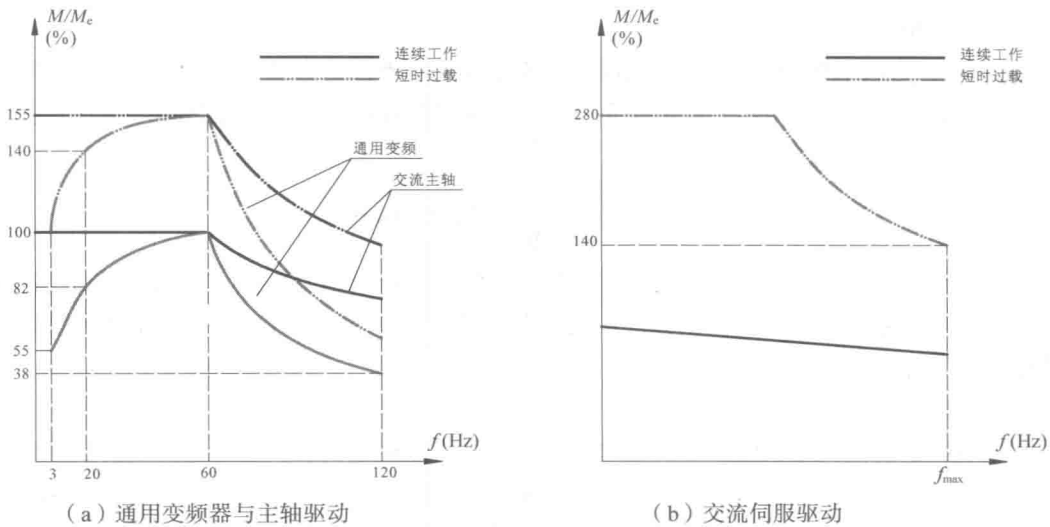


图 0-2.1 交流电机控制系统的输出特性

(2) 控制对象

交流伺服电机的转子磁场（永久磁铁）不能调节，它是一种全范围恒转矩调速的驱动器，特别适合于恒转矩负载调速（如机床进给驱动），一般不能用于恒功率调速（如不能作为机床主轴控制）。

交流主轴驱动的控制对象是专用感应电机，它可以通过定子磁链的控制进行弱磁升速，这是一种额定转速以下具有恒转矩调速特性、额定转速以上具有恒功率特性的调速系统，比较适合于机床主轴的调速控制。

变频器的输出特性无规律，在整个调速范围上，电机实际可保证的输出转矩与功率只有额定输出的 50% 左右。因此，无论对于恒转矩负载还是恒功率负载，在选用时必须留有足够的余量。一般而言，当采用通用变频器进行恒转矩调速时，宜按照负载连续转矩的 2 倍来选择电机与变频器。

(3) 功率范围

通用变频器可控制的电机功率在三类产品中为最大，目前已可达 300~630kW；交流主轴驱动多用于数控机床的主轴控制，根据实际需要，功率范围一般在 100kW 以下；而交流伺服则是用于高速、高精度位置控制的驱动器，电机的功率范围一般在 15kW 以下。

此外，由于交流主轴与交流伺服是针对特定电机的专用控制器，驱动器与电机原则上需要一一对应；而变频器是一种通用产品，对电机的参数无太多要求，因此，只要变频器容量允许，它可以用于不同功率电机的控制。如利用 7.5kW 的变频器控制 3.7kW 或 5.5kW 的电机不但可行而且还经常使用；在需要时还可以通过电路切换利用同一变频器来控制多台电机（称 1:n 控制）。

(4) 过载特性

通用变频器、交流主轴驱动器、交流伺服的过载性能有较大差别，通常而言，三者可以承受的短时过载能力依次为 100%~150%、150%~200%、200%~350%。

(5) 制动性能

交流伺服电机的转子安装有永久磁铁，停电时可以通过感应电势的作用在定子绕组中产生短路电流，输出一定的制动转矩；而交流主轴与变频器控制的是感应电机，一旦停电旋转磁场即消失，因此在停电制动要求较高的场合应使用机械制动器。

此外,由于交流伺服电机的转子永久磁铁可以产生固定的磁场,只要定子绕组加入电流,即使在转速为零时仍能输出转矩,即具有所谓“零速锁定”功能。而感应电机的输出转矩需要通过定子旋转磁场与转子间的转差产生,故交流主轴驱动器与变频器在电机停止时无转矩输出。但对于具有闭环位置控制功能的交流主轴驱动器来说,由于位置调节器的增益可以做得很高,因此如果电机在零位附近产生位置偏移,可以产生较大的恢复力矩。

3. 技术性能

目前市场上各类交流调速装置的产品众多,由于控制方式、电机结构、生产成本与使用要求的不同,调速性能的差距较大。表 0-2.2 所示为通用变频器、交流主轴驱动器、交流伺服的技术性能表,使用时应根据系统的要求选择合适的控制装置。

表 0-2.2 交流调速系统技术性能表

项目	伺服驱动器	变频器				主轴驱动器
电机类型	永磁同步电机	通用感应电机				专用感应电机
适用负载	恒转矩	无明确对应关系,选择时应考虑 2 倍余量				恒转矩/恒功率
控制方式	矢量控制	开环 V/f 控制	闭环 V/f 控制	开环矢量控制	闭环矢量控制	闭环矢量控制
主要用途	高精度、大范围速度/位置/转矩控制	低精度、小范围变速; $1:n$ 控制	小范围、中等精度变速控制	小范围、中等精度变速控制	中范围、中高精度变速控制	恒功率变速; 简单位置/转矩控制
调速范围	$\geq 1:5000$	$\approx 1:20$	$\approx 1:20$	$\leq 1:200$	$\geq 1:1000$	$\geq 1:1500$
调速精度	$\leq \pm 0.01\%$	$\pm 2\sim 3\%$	$\pm 0.3\%$	$\pm 0.2\%$	$\pm 0.02\%$	$\leq \pm 0.02\%$
最高输出频率	—	400~650Hz	400~650Hz	400~650Hz	400~650Hz	200~400Hz
最大启动转矩/最低频率(转速)	200%~350%/0 (r/min)	150%/3Hz	150%/3Hz	150%/0.3~1Hz	150%/0 (r/min)	150%~200%/0 (r/min)
频率响应	400~600Hz	1.5~3Hz	1.5~3Hz	3~5Hz	30~50Hz	50~80Hz
转矩控制	可	不可	不可	不可	可	可
位置控制	可	不可	不可	不可	简单控制	简单控制
前馈、前瞻控制等	可	不可	不可	不可	可	可



思考与练习

1. 什么叫交流传动系统?它与交流伺服系统有何不同?
2. 简述变频器、交流主轴驱动、交流伺服驱动在结构与用途上的主要区别。
3. 什么叫交流调速系统的调速范围?定义变频器调速范围需要注意哪些问题?
4. 交流调速系统的速度响应是怎样定义的?它与频率响应间存在怎样的转换关系?
5. 试比较变频器、交流主轴驱动、交流伺服在主要技术指标上的区别。

学习领域一

交流调速基础

电机是进行电能与机械能转换的机器，其能量变换通过电磁场实现，电磁感应定律与电磁力定律是实现交流电机控制的理论基础；伺服电机与感应电机的结构与运行原理的区别是导致交流伺服与变频调速系统性能差异的根本原因；而电力电子器件、交流逆变技术等则是交流伺服与变频器的共性关键技术。本学习领域将完成以上内容的系统学习。