

交流电机 数字控制系统

李永东 主编

第2版

电气自动化新技术丛书



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



电气自动化新技术丛书

交流电机数字控制系统

第 2 版

李永东 主编



机械工业出版社

本书全面系统地介绍了现代交流电机控制系统的基本原理、设计方法和数字控制技术,在介绍了交流电机数字控制系统的理论基础和硬件基础之后,分别阐述了交流电机控制系统的不同控制方法及其数字化的实现,重点介绍了已得到广泛应用的矢量控制系统、直接转矩控制系统的控制原理、控制规律和设计方法,并对无速度传感器控制系统和同步电机控制系统也给予了一定的介绍。

这次修订删除了一些陈旧的内容,增加对 32 位 DSP 及主流单片机的介绍,并按最新 DSP 对电机控制相关功能模块的使用方法作了修订,还用 C 语言代替汇编语言对数字化矢量控制系统的软件构成重新进行编写,对自控式电励磁同步电机的控制电路部分进行了简化,重新修订了永磁同步电机控制部分的内容等,使本书内容更符合当前技术发展的水平。

本书适宜于从事电气传动自动化、电机及其控制、电力电子技术的科技人员阅读,也可作为大专院校有关教师、研究生和高年级本科生的教学参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

交流电机数字控制系统/李永东主编. —2 版. —北京:
机械工业出版社, 2012. 7
(电气自动化新技术丛书)
ISBN 978 - 7 - 111 - 38928 - 6

I. ①交… II. ①李… III. ①交流电机 - 数字控制系统
IV. ①TM340. 12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 137564 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: 孙流芳 责任编辑: 孙流芳 罗 莉
版式设计: 纪 敬 责任校对: 陈秀丽
封面设计: 姚 毅 责任印制: 杨 曦
北京京丰印刷厂印刷
2012 年 9 月第 2 版 · 第 1 次印刷
169mm × 239mm · 18.25 印张 · 363 千字
0 001—3 000 册
标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 38928 - 6
定价: 39.90 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010)88361066

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010)68326294

机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010)88379649

机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010)88379203

封面无防伪标均为盗版

《电气自动化新技术丛书》

序 言

科学技术的发展，对于改变社会的生产面貌，推动人类文明向前发展，具有极其重要的意义。电气自动化技术是多种学科的交叉综合，特别在电力电子、微电子及计算机技术迅速发展的今天，电气自动化技术更是日新月异。毫无疑问，电气自动化技术必将在建设“四化”、提高国民经济水平中发挥重要的作用。

为了帮助在经济建设第一线工作的工程技术人员能够及时熟悉和掌握电气自动化领域中的新技术，中国自动化学会电气自动化专业委员会和中国电工技术学会电控系统与装置专业委员会联合成立了《电气自动化新技术丛书》编辑委员会，负责组织编辑《电气自动化新技术丛书》。丛书将由机械工业出版社出版。

本丛书有如下特色：

一、本丛书是专题论著，选题内容新颖，反映电气自动化新技术的成就和应用经验，适应我国经济建设急需。

二、理论联系实际，重点在于指导如何正确运用理论解决实际问题。

三、内容深入浅出，条理清晰，语言通俗，文笔流畅，便于自学。

本丛书以工程技术人员为主要读者，也可供科研人员及大专院校师生参考。

编写出版《电气自动化新技术丛书》，对于我们是一种尝试，难免存在不少问题和缺点，希广大读者给予支持和帮助，并欢迎大家批评指正。

《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会

第6届《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会成员

- 主任:** 王永骥
- 副主任:** 赵相宾 牛新国 赵光宙 孙 跃
阮 毅 何湘宁 霍永进
- 顾问委员:** 王 炎 孙流芳 陈伯时 陈敏逊
彭鸿才 尹力明
- 委 员:** (按姓氏笔画为序)
- | | | | |
|-----|-----|-----|-----|
| 王永骥 | 王 旭 | 王志良 | 牛新国 |
| 许宏纲 | 孙 跃 | 刘国海 | 李永东 |
| 李崇坚 | 阮 毅 | 陈息坤 | 汪 镭 |
| 沈安文 | 杜少武 | 张 浩 | 张承慧 |
| 张彦斌 | 何湘宁 | 赵相宾 | 赵光宙 |
| 赵 杰 | 赵争鸣 | 赵华强 | 赵荣祥 |
| 查晓明 | 徐殿国 | 常 越 | 霍永进 |
| 戴先中 | | | |
- 秘 书:** 刘 娟 林春泉

第6届《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会的话

自1992年本丛书问世以来，在中国自动化学会电气自动化专业委员会和中国电工技术学会电控系统与装置专业委员会学会领导和广大作者的支持下，在前5届编辑委员会的努力下，至今已发行丛书53种55多万册，受到广大读者的欢迎，对促进我国电气自动化新技术的发展和传播起到了巨大作用。

许多读者来信，表示这套丛书对他们的工作帮助很大，希望我们再接再厉，不断地推出介绍我国电气自动化新技术的丛书。本届编委决定选择一些大家所关心的新选题，继续组织编写出版，欢迎从事电气自动化研究的学者就新选题积极投稿；同时对受读者欢迎的已经出版的丛书，我们将组织作者进行修订再版，以满足广大读者的需要。为了更加方便读者阅读，我们将对今后新出版的丛书进行改版，扩大了开本。

我们诚恳地希望广大读者来函，提出您的宝贵意见和建议，以使本丛书编写得更好。

在本丛书的出版过程中，得到了中国电工技术学会、天津电气传动设计研究所等单位提供的出版基金支持，在此我们对这些单位再次表示感谢。

第6届《电气自动化新
技术丛书》编辑委员会
2011年10月19日

第2版前言

本书自第1版出版以来，受到读者的热烈欢迎，虽已重印但也早已脱销，因此出版社建议是否可以进行一次修订。考虑到第1版图书出版至今已10年，在这10年间，交流电机数字控制系统发生了很大的变化，尤其是微处理器技术的发展，使更多更先进的控制算法得到应用，原有的程序得到简化。

和第1版相比，本书所做的修改如下：

第2章对最新的32位数字信号处理器（DSP）和一些新的主流单片机做了介绍。因为随着控制器技术的发展，早期的8位和16位单片机已经不再被用来作为电力电子变流器的主控芯片。16位的定点DSP芯片业已逐步被32位的定点和浮点DSP芯片取代，其运算速度也更快，外围设备也更加丰富和完善。

第3章中也按最新的DSP，对PWM的实现方法的介绍进行了修订。

第4章对4.3.2节“全数字化矢量控制系统的硬件和软件构成”中的“数字化矢量控制系统的软件构成”部分进行了重新编写，去掉了之前的汇编语言程序，用最新的浮点C语言程序来替代，这样一方面适应了最新的控制器芯片的编程环境，另一方面也增加了这部分内容的可读性，便于读者更好地理解这部分的内容。

第6章对于自控式励磁同步电机的控制电路部分内容进行了简化，重新修订了永磁同步电机控制部分的内容。

在过去的10年里，交流电机数字控制理论并未发生革命性的变化，最近10年的工作主要集中在对原有控制算法的不断完善和对控制性能的提高上。所以本书中对于交流电机控制理论和方法的介绍在本次修订中没有做较大的变动，只是对部分原有的错误进行了校正，对部分细节内容做了微调，整体结构不变。

本次修订工作主要由郑泽东博士完成，李永东负责文字的校正。

衷心感谢读者对本书的支持，我们会继续吸收大家的意见，对本书内容不断进行修订，以使大家能够更好地掌握和应用交流电机数字控制方法，推动我国交流电机高性能控制技术的不断进步。

作者

2012年8月于清华园

第1版前言

交流电机控制系统由于不存在直接电机控制系统维护困难和难以实现高速驱动等缺点,近年来发展很快。其突出的优点是:电机制造成本低,结构简单,维护容易,可以实现高压大功率及高速驱动,适宜在恶劣条件下工作,系统成本将不断下降,并能获得和直流电机控制系统相媲美或更好的控制性能。欧美及日本在20世纪80年代初已经推出一系列商品化的高性能全数字化交流电机控制系统和产品。我国也有不少单位在研究、开发和引进交流电机控制系统的技术、元器件和装备,取得了一些有价值的研究成果,推广了一批较成熟的交流电机控制技术,引起了国家有关部门的重视,初步形成了研究、推广、应用交流电机控制系统的热潮。

交流电机控制技术虽然经过了多年的迅速发展,但至今仍是国内外学者和工业界研究的重要课题。尤其是微处理器应用于交流电机控制系统以来,控制系统结构发生了很大变化,硬件大大简化,软件实现的功能不但越来越复杂,而且日新月异。目前,交流电机控制已经成为一门集电机、电力电子、自动化、计算机控制和数字仿真的一体的新兴学科。因此,了解和掌握交流电机系统数字控制系统的工作原理和设计方法,不仅可以根据实际需要选择合理的控制方案,以达到投资和收益最佳,而且对消化吸收国外引进技术不无裨益,同时对进一步深入研究和交流电机的控制理论和方法也是必不可少的。

近20年来,关于交流电机数字控制系统的研究发展迅速,积累了大量的文献,研究成果也极为丰硕。国外虽有一些交流电机系统微机控制方面的书刊出版,但适合我国高等院校师生和科技人员参考的,既有理论系统性又有可指导实际设计的书刊则为数不多。本书的任务就是,一方面较为系统地介绍这些研究成果的基本原理和分析规律,为读者进一步深入研究交流电机控制理论和方法打下基础,另一方面较为全面地介绍了这类控制系统的控制及设计方法,以使读者在解决实际问题中加以利用。此外,对目前国际上较新的研究课题和方法,如无速度传感器交流电机控制系统等内容,本书也给予了一定的篇幅。希望读者在掌握基本内容的同时,对新的动向给予关注,从而推动交流电机控制系统进一步向前发展。

全书共分6章及2个附录。绪论简述了交流电机控制系统的发展和基本类型,及数字控制系统的一般问题和交流电机数字控制系统的特点。第1章主要介绍数字控制系统的理论基础,给出这些理论的一般性结论,并试图在以后各章中把它们应用到实际系统的设计中。第2章介绍微机控制系统的硬件基础和一些系统设计方法。第3章介绍电压型PWM变频调速异步电机控制系统的基本原理,重点是获得

广泛应用的 PWM 技术（尤其是空间电压矢量 PWM 技术）和通用变频器的数字化实现。第 4 章介绍了异步电机矢量控制系统及其数字化实现，重点是得到广泛应用的磁场定向矢量控制系统及其他高性能控制方法，内容涉及磁通观测、电流调节和无速度传感器系统。第 5 章介绍全数字化直接转矩控制系统的最新发展和硬软件结构。第 6 章介绍同步电机数字控制系统的实现。在研究和应用交流电机数字控制系统时，必须了解交流电机多变量强耦合的本质及其动态描述方程，并找出各种坐标变换下电机动态方程的本质联系及电机动态过程中输入（电压、电流）和输出（转矩及转速）之间的关系，但这方面的推导和内容对工程技术人员来讲略显繁杂，故将其放入附录 A 中。附录 B 为连续系统的经典设计方法，在设计交流电机调速系统中也是必须知道的。总之，读者可根据不同的控制目标和要求，决定采用何种控制方法及其数字化实现方案。控制目标和方法的不同，导致控制算法和系统硬软件结构的很大差别。

在本书的选题和出版过程中，得到《电气自动化新技术丛书》编辑委员会和机械工业出版社的大力支持，特别对上海大学陈伯时教授、天津电气传动设计研究所喻士林教授级高工等老前辈的鼓励和帮助，作者深表感谢。我还要感谢我的导师法国图卢兹国家理工学院电气工程及自动化系主任 B. de FORNEL 教授，是他在 20 世纪 80 年代初，把我带入现代电力电子及交流电机数字控制这一神奇而历久不衰的领域。德国布伦瑞克大学 W·LEONHARD 教授的开创性工作及每次见面时的热情而平等的讨论，使作者感觉着实受益匪浅。此外，作者在清华大学从事博士后研究工作期间及留校任教以来，电机系的很多老前辈给予了热情的关心和大力支持，他们是高景德先生和杨秉寿、李发海、朱东起、姜建国等教授，作者在这里向他们表示深深的敬意。

在本书的写作过程中，本人的同事和研究生也参与和完成了很多章节的整理和编写工作，并承担了大量的文字录入及图表的绘制工作。因为许多章节是经过多人相互讨论及修改多次而完成的，这里只能粗粗地列出每位的主要贡献。他们是冬雷博士后，完成第 2 章大部分内容的编写工作及第 3 章的部分内容；陈杰，完成第 4 章大部分内容的编写工作及第 1 章的部分内容；李明才，完成第 1 章大部分内容；曾毅，完成第 5 章大部分内容；侯轩，完成第 6 章大部分内容；孙涓涓参与了第 2 章的编写和第 4 章及附录 B 的整理工作；此外，谭卓辉、胡虎、曲树笋、李敏、梁艳、苑国锋和刘永恒等同学也参与了所有章节的整理、录入及编辑工作。李永东和王长江制订了本书最初的编写大纲，李永东并负责前言、绪论、第 3~5 章的初稿及附录 A 的撰写和全书的统一修改、润色和审定工作。

作者还要感谢一道承担相关课程的黄立培、王健、卢海惟老师，他们也为本书的成文提供了很多资料。对曾经在本实验室从事研究工作，现已毕业并分布在全国及世界各地的学生，作者也要表示深深的谢意，他们是丁永汀、肖鸿、徐砚星、胡

军、姬志艳、罗本东、曹江涛、张学、邵剑文、张东胜、司保军、汪传阳、吴佳、刘波、东伟、倚鹏、陈杰、王光辉、付旬、刘军、吴继雄、王文森等。最后，我还要感谢我的父母和妻儿，尽管他们对交流电机调速毫不知情，但还是给予了我一贯的支持。

由于作者学识所限和时间紧迫，在交流电机数字控制系统方面一定还有很多内容没有得到反映，恳请读者谅解；书中内容也难免有不当和错误之处，敬请有关专家和各位读者给予批评指正。

李永东

2001年9月于清华大学

目 录

《电气自动化新技术丛书》序言

第6届《电气自动化新技术丛书》编辑委员会的话

第2版前言

第1版前言

绪论	1
0.1 交流电机控制系统的发展和现状	1
0.2 交流电机控制系统的类型	3
0.3 交流电机数字控制系统的特点	6
0.4 数字控制系统的一般问题	9
第1章 数字控制系统的理论基础	15
1.1 概述	15
1.2 连续域等效设计法	15
1.2.1 数字控制系统的性能要求	15
1.2.2 连续域离散化的方法	16
1.2.3 数字PID调节器	19
1.2.4 数字PID调节器的改进	22
1.3 数字控制系统的 z 变换分析	26
1.3.1 z 变换及其性质	26
1.3.2 数字控制系统的脉冲传递函数	29
1.4 数字控制系统的离散化设计	30
1.4.1 最少拍控制系统的设计	30
1.4.2 最少拍无纹波控制系统的设计	32
1.4.3 数字调节器的实现	34
1.5 数字控制系统的状态空间分析和设计	37
1.5.1 数字控制系统的状态空间方程	37
1.5.2 数字控制系统的一般性质	38
1.5.3 状态空间设计法	39
1.5.4 状态观测器	41
1.6 数字控制系统软件设计的实际考虑	44
1.6.1 数字控制系统软件设计	44
1.6.2 量化误差和比例因子	46
1.6.3 数据处理和数字滤波	48

参考文献	52
第 2 章 交流电机数字控制系统硬件基础	53
2.1 概述	53
2.2 微机控制系统硬件设计的一般问题	53
2.2.1 交流电机数字控制系统的设计方法和步骤	54
2.2.2 交流电机的数字控制系统总体方案的确定	55
2.2.3 微处理器芯片的选择	57
2.3 微处理器和控制芯片简介	58
2.3.1 单片机	58
2.3.2 数字信号处理器 (DSP)	61
2.3.3 精简指令集计算机 (RISC)	63
2.3.4 并行处理器和并行 DSP	65
2.3.5 专用集成电路 (ASIC)	65
2.4 交流电机数字化控制系统构成	68
2.4.1 总线系统	68
2.4.2 接口和外围设备	69
2.4.3 实时控制	73
2.4.4 信号检测	75
2.5 系统开发和集成	78
2.5.1 对开发系统的要求	78
2.5.2 通用数字化开发平台	78
2.5.3 硬件系统设计中的抗干扰问题	82
参考文献	84
第 3 章 电压型 PWM 变频调速异步电机数字控制系统	85
3.1 概述	85
3.2 变频调速的基本原理	85
3.2.1 变压变频 (VVVF) 控制原理	85
3.2.2 异步电机变压变频时的机械特性	87
3.3 电压型 PWM 变频器	89
3.3.1 电压型 PWM 变频器的主电路	89
3.3.2 PWM 技术分类	91
3.3.3 PWM 性能指标	92
3.4 正弦 PWM 技术	94
3.4.1 电压 SPWM 技术	94
3.4.2 电流 SPWM 技术	95
3.4.3 磁通 SPWM 技术	97
3.5 其他 PWM 技术	104
3.5.1 优化 PWM 技术	104

3.5.2	随机 PWM 技术	107
3.5.3	小结	112
3.6	PWM 变频调速异步电机开环控制	112
3.6.1	开环变频调速系统	112
3.6.2	开环通用变频器的软件设计	117
3.7	异步电机转速闭环控制系统	120
3.7.1	转差频率控制系统构成	120
3.7.2	转差频率控制系统的起动过程分析	121
3.7.3	转差频率控制系统的特点	122
	参考文献	123
第 4 章	全数字化异步电机矢量控制系统	125
4.1	概述	125
4.2	异步电机矢量控制原理	126
4.2.1	异步电机数学模型	126
4.2.2	转子磁场定向矢量控制原理	127
4.2.3	转差频率矢量控制原理	129
4.2.4	气隙磁场定向矢量控制原理	130
4.2.5	定子磁场定向矢量控制原理	131
4.2.6	定子电压定向矢量控制系统	132
4.2.7	异步电机矢量控制系统的基本环节	134
4.3	全数字化矢量控制系统设计	136
4.3.1	转子磁场定向矢量控制系统调节器设计	136
4.3.2	全数字化矢量控制系统的硬件和软件构成	144
4.4	磁链观测和电流控制	152
4.4.1	矢量控制的磁链观测	152
4.4.2	矢量控制中的电流调节器	161
4.5	无速度传感器异步电机矢量控制系统	166
4.5.1	动态转速估计器法	167
4.5.2	基于 PI 调节器的自适应法	169
4.5.3	自适应转速观测器法	170
4.5.4	转子齿谐波法	174
4.5.5	高频注入法	175
4.5.6	神经网络法	177
	参考文献	178
第 5 章	全数字化异步电机直接转矩控制系统	182
5.1	概述	182
5.2	直接转矩控制基本原理	183
5.2.1	电机数学模型	183

5.2.2	空间矢量 PWM 逆变器	183
5.2.3	磁链和转矩闭环控制原理	184
5.3	磁链和转矩控制性能分析	186
5.3.1	磁链控制性能分析	186
5.3.2	转矩控制性能分析	188
5.3.3	磁链和转矩的估算和观测	190
5.4	全数字化控制系统的实现	191
5.4.1	电压矢量的选择	191
5.4.2	控制系统硬件的实现	194
5.4.3	低速控制性能分析	194
5.4.4	改进算法	200
5.5	无速度传感器直接转矩控制	203
5.5.1	直接计算法	204
5.5.2	模型参考自适应法 (MRAS)	209
	参考文献	213
第 6 章 全数字化同步电机控制系统		215
6.1	概述	215
6.2	自控式同步电机控制系统原理	216
6.2.1	自控式同步电机的基本结构及工作原理	216
6.2.2	自控式同步电机基本关系分析	218
6.3	典型自控式同步电机数字控制系统设计	219
6.3.1	系统结构设计	220
6.3.2	控制功能的数字化实现	221
6.4	永磁同步电机数字控制系统	227
6.4.1	永磁同步电机及其数学模型	227
6.4.2	PMSM 数字控制系统	228
6.4.3	全数字化 PMSM 伺服系统总体设计	229
6.4.4	全数字化 PMSM 伺服系统的性能	230
6.4.5	无速度传感器 PMSM 系统	231
6.4.6	转子初始位置的检测策略	243
	参考文献	245
附录		248
附录 A	交流异步电机多变量数学模型及广义派克方程	248
附录 B	自动控制系统的工程设计法	264
	参考文献	274

绪 论

0.1 交流电机控制系统的发展和现状

电机[⊖]控制系统主要分速度控制和位置控制两大类。传统的电气传动系统一般指速度控制系统，广泛地应用于机械、矿山、冶金、化工、纺织、造纸、水泥、交通等工业部门。对于位置控制（伺服）系统，目前国际上较多采用运动控制这一名称。运动控制系统通过伺服驱动装置将给定指令变成期望的机构运动，一般功率较小，并有定位要求和频繁起制动的特点，在导航系统、雷达天线、数控机床、加工中心、机器人、打印机、复印机、磁记录仪、磁盘驱动器、自动洗衣机等领域得到广泛应用。

从19世纪90年代初第一条三相输电线路建成到20世纪60年代末，电力工业的发展大体形成这样的格局，即99.999%的电能由同步发电机发出，60%~70%的电能通过各种电机加以利用。在电机用电中，交流电机占80%左右，其中大多数为异步电机直接拖动。在其余20%需要变速运行的高性能传动系统中，直流电机由于控制简单、调速平滑、性能良好，一直占据主导地位。然而，直流电机结构上存在的机械换向器和电刷，使它具有一些难以克服的固有缺点，如造价偏高，维护困难，寿命短，单机容量和最高电压都受到一定限制等等。事实上，从20世纪30年代起，不少国家就开始进行无换向器电机控制系统的研究，但由于条件限制，进展不大。

20世纪70年代初，一场石油危机席卷全球，工业发达国家投入大量人力、财力研究节能措施。人们发现，占电机用电量一半以上的风机、泵类负载是靠阀门和挡板来调节流量或压力的，其拖动电机一般工作在恒速状态，从而造成了大量的电能浪费。如用改变电机转速的方法调节风量或流量，在压力保持不变的情况下，一般可节电20%~30%。在工业化国家，经济型交流电机调速装置已大量地使用在这类负载中，成为重要的节能手段。同时，随着电力电子技术和微电子技术的迅速发展，高性能的交流电机控制系统也出现了，经过近十几年的不断努力，性能得到很大改善，成本还在下降。人们期望随着技术的不断成熟，它将在几乎所有工业应用领域中取代直流电机控制系统。

由于交流电机控制系统的种种突出优点，国外大学和公司投入大量人力、财力

⊖ 书中所述未指明的电机均指电动机。

加以研究，并在 20 世纪 80 年代已经推出了一系列商品化的交流电机控制系统，我国也有许多单位在研究、开发和引进交流电机控制系统的技术、元器件和装备。为进一步提高交流电机控制系统的性能，有关研究工作正围绕以下几个方面展开：

1. 采用新型电力电子器件和脉宽调制 (PWM) 技术

电力电子器件的不断进步，为交流电机控制系统的完善提供了物质保证，尤其是新的可关断器件，如双极结型晶体管 (BJT)、金属氧化物半导体场效应晶体管 (MOSFET)、绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 的实用化，使得高频化 PWM 技术成为可能。目前电力电子器件正向高压、大功率、高频化、组合化和智能化方向发展。如果说计算机是现代生产设备的大脑的话，那么上述电力电子器件及其装置则是支配手足 (电机) 动作的肌肉和神经，即实现弱电控制强电的关键所在。典型的电力电子变频装置有电流型、电压型和交-交型三种。电流型变频器的优点在于给同步电机供电时可实现自然换相，并且容量可以做得很大。但对于应用广泛的中小型异步电机来说，其强迫换相装置则显得过于笨重。因此，PWM 电压型变频器在中小功率电机控制系统中无疑占主导地位。目前已有采用 MOSFET 和 IGBT 的成熟产品，开关频率可达 15 ~ 20kHz，实现无噪声驱动。值得注意的是，目前国外正在加紧研制新型变频器，如矩阵式变频器，串、并联谐振式变频器等也开始进入实用阶段，预示着新一代电机控制系统即将产生。

2. 应用矢量控制技术及现代控制理论

交流电机是一个多变量、非线性的被控对象，过去的电压/频率 (V/F) 恒定控制都是从电机稳态方程出发研究其控制特性的，动态控制效果均不理想。20 世纪 70 年代初提出的用矢量变换的方法研究电机的动态控制过程，不但控制各变量的幅值，同时控制其相位，并利用状态重构和估计的现代控制概念，巧妙地实现了交流电机磁通和转矩的重构和解耦控制，从而促进了交流电机控制系统走向实用化。目前国外用变频电源供电的异步电机采用矢量控制技术已成功地应用于轧机主传动、电力机车牵引系统和数控机床等中。此外，为解决系统复杂性和控制精度之间的矛盾，又提出了一些新的控制方法，如直接转矩控制、电压定向控制和定子磁场定向控制等。尤其自从计算机用于实时控制之后，使得现代控制理论中各种控制方法得到应用，如二次型性能指标的最优控制和双位模拟调节器控制，可提高系统的动态性能，滑模 (Sliding Mode) 变结构控制可增强系统的鲁棒性，状态观测器和卡尔曼滤波器可以获得无法实测的状态信息，自适应和鲁棒控制则能全面地提高系统的性能。

3. 广泛应用计算机技术

随着微电子技术的发展，数字式控制处理芯片的运算能力和可靠性得到很大提高，这使得以单片机为控制核心的全数字化控制系统取代以前的模拟器件控制系统成为可能。计算机的应用主要体现在两个方面：一是控制用微机，交流电机数字控

制系统既可用专门的硬件电路，也可以采用总线形式。对高性能运动控制系统来说，由于控制系统复杂，要求存储多种数据和快速实时处理大量的信息，可采用微处理器加数字信号处理器（DSP，如 TMS320、NEC7720 等）的方案，除实现复杂的控制规律外，也便于故障监视、诊断和保护、人机对话等功能的实现。计算机的第二个应用就是数字仿真和计算机辅助设计（CAD）。仿真时如发现系统性能不理想，则可用人机对话的方式改变控制器的参数、结构以至控制方式，直到满意为止。这样得到的参数可直接加在系统上，避免了实际调试的盲目性及发生事故的可能性。目前已有多种软件包，可用于指导系统的设计。

4. 开发新型电机和无机械传感器技术

各种交流控制系统的发展对电机本身也提出了更高的要求。电机设计和建模有了新的研究内容，诸如三维涡流场的计算、考虑转子运动及外部变频供电系统方程的联解、电机阻尼绕组的合理设计及笼条的故障检测等问题。为了更详细地分析电机内部过程，如绕组短路或转子断条等问题，多回路理论应运而生。为了对电机实现计算机实时控制，一些简化模型也脱颖而出。目前在小功率运动控制系统中得到重视和广泛应用的是永磁同步电机，其物质基础是具有较大剩磁和矫顽磁力的新型永磁材料（钕钴、钕铁硼）的迅速发展。此外，开关磁阻理论及新材料的发展使开关磁阻电机迅速发展。开关磁阻电机与反应式步进电机相类似，在加了转子位置检测后可有效地解决失步问题，可方便地起动、调速或点控，成为未来伺服系统的一颗新星。一般来说，为了满足高性能交流传动的需要，转速闭环控制是必不可少的。为了实现转速和位置的反馈控制，须用测速发电机或光电码盘（增量式或绝对式）来检测反馈量，对于方波同步电机控制系统来说，还需要检测磁极位置。目前，同时满足上述全部要求的传感器件无疑是旋转变压器加解算器（Resolver）了。但由于速度传感器的安装带来了系统成本增加、体积增大、可靠性降低、易受工作环境影响等缺陷，使得成本合理、性能良好的无速度传感器交流调速系统成为近年来的一个研究热点。该技术是在电机转子和机座上安装电磁或光电传感器的情况下，利用检测到的电机电压、电流和电机的数学模型推测出电机转子位置和转速的技术，具有不改造电机、省去昂贵的机械传感器、降低维护费用和不怕粉尘与潮湿环境的影响等优点。

0.2 交流电机控制系统的类型

不论是同步电机还是异步电机，采用矢量控制技术及新的控制方法后，系统性均大大提高，可望取代直流电机在电气控制领域中的主导地位。目前典型的已经应用或正在研究的高性能交流电机控制系统有以下几种。

1. 同步电机控制系统

(1) 无换向器电机控制系统 采用交-直-交电流型逆变器给普通同步电机供