



智能制造与装备制造业转型升级丛书  
MADE IN CHINA

# 交流电机 数字控制系统

李永东 郑泽东 编著

第3版

电气自动化新技术丛书



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



智能制造与装备制造业转型升级丛书

电气自动化新技术丛书

# 交流电机数字控制系统

第3版

李永东 郑泽东 编著



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详细的介绍。

本次修订，第2章，增加一些最新的硬件设计方案，如 CPLD 和 FPGA 的方案等。第3章增加最近在高铁和地铁中用得比较多的特定消谐 PWM、中间 60°调制 PWM、SVPWM 过调制、方波调制等。第4章，增加最近研究比较多的模糊控制、模型预测控制（MPC）、多相电机矢量控制、双馈电机控制等。第6章，对永磁同步电机 PMSM 部分的内容进行较大修订。

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，郑泽东编著. —3版. —北京：机械工业出版社，2016.10

（智能制造与装备制造转型升级丛书·电气自动化新技术丛书）

ISBN 978-7-111-54831-7

I. ①交… II. ①李…②郑… 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（2016）第 217220 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：罗莉 责任编辑：罗莉 责任校对：肖琳

封面设计：陈沛 责任印制：常天培

北京机工印刷厂印刷（三河市南杨庄国丰装订厂装订）

2017 年 2 月第 3 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 20.5 印张 · 415 千字

0001 — 3000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-54831-7

定价：69.00 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

服务咨询热线：010-88361066

机工官网：[www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)

读者购书热线：010-68326294

机工官博：[weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

010-88379203

金书网：[www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

封面无防伪标均为盗版

教育服务网：[www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

## 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：牛新国 赵光宙 孙 跃 阮 毅 何湘宁 霍永进  
韩芙华

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 张 兴 张 浩 张华强 张承慧 张彦斌  
何湘宁 赵光宙 赵 杰 赵争鸣 赵荣祥 查晓明  
徐殿国 常 越 韩芙华 霍永进 戴先中

秘书：王 欢 林春泉

# 《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

# 前 言

交流电机控制系统由于不存在直流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于一体的新兴学科。因此，了解和掌握交流电机数字控制系统的工作原理和设计方法，不但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。

全书共分 6 章及 3 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，增加了一些最新的硬件设计方案，如 CPLD 和 FPGA 方案等。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，增加了在高铁和地铁中用得比较多的特定消谐 PWM、中间  $60^\circ$  调制 PWM、SVPWM 过调制、方波调制等。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，增加了最近研究比较多的模糊控制、模型预测控制（MPC）、多相电机矢量控制、双馈电机控制等。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，对永磁同步电机 PMSM 部分的内容进行较大修订。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 为自动控制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。新增附录 C 为变频器控制下的异步电机参数测量。

在本书的第 1 版中，本人的同事和研究生参与完成了大量的整理和编辑工作。其中，冬雷完成了第 2 章大部分内容的编写工作及第 3 章的部分内容；陈杰完成了第 4 章大部分内容的编写工作及第 1 章的部分内容；李明才完成了第 1 章大部分内容；曾毅完成了第 5 章大部分内容；侯轩完成了第 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很多章节的整理、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。

本书的第 2 版和第 3 版的修订工作主要由郑泽东副教授完成，李永东教授进行整体筹划和审定，在 DSP 控制软硬件、异步电机双馈控制和永磁电机控制方面增加了不少内容。

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

2016 年 10 月于清华园



# 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

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 .....	4
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控制 .....	19
1.2.4 数字PID控制的改进 .....	22
1.3 数字控制系统的 $z$ 变换分析 .....	25
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 .....	28
1.4 数字控制系统的离散化设计 .....	30
1.4.1 最少拍系统的设计 .....	30
1.4.2 最少拍无纹波系统的设计 .....	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 量化误差与比例因子 .....	46
1.6.3 数据处理及数字滤波 .....	48
参考文献 .....	52

<b>第 2 章 交流电机数字控制系统硬件基础</b> .....	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) .....	60
2.3.3 精简指令集计算机 (RISC) .....	62
2.3.4 并行处理器和并行 DSP .....	64
2.3.5 专用集成电路 (ASIC) .....	64
2.4 交流电机数字化控制系统构成 .....	67
2.4.1 总线系统 .....	67
2.4.2 接口和外围设备 .....	69
2.4.3 实时控制 .....	72
2.4.4 信号检测 .....	74
2.5 系统开发和集成 .....	77
2.5.1 对开发系统的要求 .....	77
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 .....	79
参考文献 .....	82
<b>第 3 章 电压型 PWM 变频调速异步电机数字控制系统</b> .....	83
3.1 概述 .....	83
3.2 变频调速的基本原理 .....	83
3.2.1 变压变频 (VVVF) 控制原理 .....	83
3.2.2 异步电机变压变频时的机械特性 .....	85
3.3 电压型 PWM 变频器 .....	87
3.3.1 电压型 PWM 变频器的主电路 .....	87
3.3.2 PWM 技术分类 .....	89
3.3.3 PWM 性能指标 .....	90
3.4 正弦 PWM 技术 .....	92
3.4.1 电压正弦 PWM 技术 .....	92
3.4.2 电流正弦 PWM 技术 .....	95
3.4.3 磁通正弦 PWM 技术 .....	96
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 SVPWM 过调制技术 .....	110

3.5.4	同步调制 PWM 技术	114
3.5.5	小结	115
3.6	PWM 变频调速异步电机开环控制	117
3.6.1	开环变频调速系统	117
3.6.2	开环通用变频器的软件设计	121
3.7	异步电机转速闭环控制系统	124
3.7.1	转差频率控制系统构成	124
3.7.2	转差频率控制系统的起动过程分析	125
3.7.3	转差频率控制系统的特点	126
	参考文献	127
<b>第4章 全数字化异步电机矢量控制系统</b>		129
4.1	概述	129
4.2	异步电机矢量控制原理	130
4.2.1	异步电机数学模型	130
4.2.2	转子磁场定向矢量控制原理	132
4.2.3	转差频率矢量控制原理	133
4.2.4	气隙磁场定向矢量控制原理	135
4.2.5	定子磁场定向矢量控制原理	136
4.2.6	定子电压定向矢量控制系统	137
4.2.7	双馈电机矢量控制系统	138
4.2.8	异步电机矢量控制系统的基本环节	144
4.3	全数字化矢量控制系统设计	149
4.3.1	转子磁场定向矢量控制系统调节器设计	149
4.3.2	矢量控制中的电流调节器	156
4.3.3	基于模型预测控制的矢量控制	163
4.3.4	全数字化矢量控制系统硬件和软件构成	170
4.4	矢量控制中的磁通观测	177
4.4.1	开环观测模型	178
4.4.2	闭环观测模型	181
4.5	无速度传感器异步电机矢量控制系统	186
4.5.1	动态速度估计器法	187
4.5.2	基于 PI 调节器的自适应法	188
4.5.3	自适应速度观测器	190
4.5.4	转子齿谐波法	193
4.5.5	高频注入法	194
4.5.6	神经网络法	199
	参考文献	200
<b>第5章 全数字化异步电机直接转矩控制系统</b>		204
5.1	概述	204

5.2	直接转矩控制基本原理	205
5.2.1	电机数学模型	205
5.2.2	空间矢量 PWM 逆变器	206
5.2.3	磁链和转矩闭环控制原理	207
5.3	磁链和转矩控制性能分析	208
5.3.1	磁链控制性能分析	208
5.3.2	转矩控制性能分析	210
5.3.3	磁通和转矩的估算和观测	212
5.4	全数字化控制系统的实现	213
5.4.1	电压矢量的选择	213
5.4.2	控制系统硬件的实现	216
5.4.3	低速控制性能分析	216
5.4.4	改进算法	222
5.5	无速度传感器直接转矩控制	225
5.5.1	直接计算法	225
5.5.2	模型参考自适应法 (MRAS)	230
	参考文献	234
<b>第 6 章</b>	<b>全数字化同步电机控制系统</b>	<b>236</b>
6.1	概述	236
6.2	电励磁同步电机数学模型	237
6.3	电励磁同步电机高性能闭环控制	238
6.4	永磁同步电动机及其数学模型	239
6.4.1	永磁同步电机结构	239
6.4.2	永磁同步电机数学模型	240
6.4.3	永磁同步电机的电磁转矩方程	250
6.4.4	永磁同步电机的机械传感器	251
6.5	PMSM 数字控制系统	254
6.5.1	永磁同步电机电流控制策略	258
6.5.2	数字化 PMSM 伺服系统总体设计	262
6.5.3	全数字 PMSM 伺服系统的性能	263
6.6	永磁同步电机无机械传感器控制	265
6.6.1	永磁同步电机无机械传感器技术概述	265
6.6.2	利用定子端电压和电流计算的方法	266
6.6.3	观测器基础上的估算方法	268
6.6.4	模型参考自适应法	273
6.6.5	基于高频信号注入的估算方法	275
6.6.6	人工智能理论基础上的估算方法	281
6.7	转子初始位置的检测策略	281
	参考文献	283

附录	287
附录 A 交流异步电机多变量数学模型及广义派克方程	287
A.1 三相电机模型	287
A.2 坐标变换	289
A.3 广义派克方程及其复变形式	293
A.4 在同步旋转坐标系上的数学模型及状态方程	297
A.5 静止 $\alpha$ - $\beta$ 坐标系下的异步电机数学模型	302
附录 B 自动控制系统的工程设计法	302
B.1 工程设计方法的基本思路和要求	302
B.2 典型系统	303
B.3 典型系统参数和性能指标的关系	305
B.4 非典型系统的典型化	310
附录 C 变频器控制下的异步电机参数测量	312
C.1 定子电阻测量方法说明	312
C.2 短路实验方法	313
C.3 空载实验方法	315
参考文献	316

# 绪论

## 0.1 交流电机控制系统的发展和现状

电机<sup>⊙</sup>控制系统主要可分为转矩控制、速度控制和位置控制等。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、水泥等领域。在电动汽车、地铁、电力机车等电气化交通领域，多采用转矩控制系统。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至今，全世界使用的电力能源中，除了少部分的光伏发电，其余绝大部分的电能由同步电机和双馈风力发电机等电机发出，而60%~70%的电能通过各种电机加以利用。未来电能终端能源消费中所占的比例要提高到80%以上，其中绝大部分的电能都用来驱动电机，包括各种工业自动化系统、电气化交通、风机水泵、空调等。在电机用电中，交流电机占比超过80%，其中大多数为异步电机直接拖动。永磁同步电机因为其功率密度和效率比较高，在近年来也得到了快速的发展，在伺服控制、电动汽车等领域得到了广泛的应用。直流电机由于控制简单、调速平滑、性能良好，在电力传动领域曾经一度占据主导地位。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。

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

⊙ 书中所述未指明的电机均指电动机。

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开始出现，经过近十几年的不断努力，性能得到很大改善，成本不断下降。随着技术的不断成熟，交流调速系统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，我国也从 20 世纪 90 年代开始，逐步形成了完善的变频器产业，但是普遍为低控制性能产品，对于高性能应用领域，我国的产品尚不及国外产品，特别是在工业机器人、冶金轧机、电气化交通等领域，我国的核心技术还存在较大差距。为进一步提高交流电机控制系统的性能，需要真正掌握以下几个部分的核心技术：

### 1. 采用新型电力电子器件的变换器和脉宽调制（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，尤其是可关断器件的出现，如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）、集成门极换流晶闸管（IGCT）的实用化，使得数字化脉宽调制（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动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，有源钳位型多电平变频器等也开始进入实用阶段。随着宽禁带电力电子半导体技术的发展，电力电子器件的工作电压、效率、开关频率等方面的指标都有飞速提升，未来市场化之后，会给变频器、电力传动领域、甚至电力系统带来新的变革。

### 2. 应用矢量控制技术是现代控制理论

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。尤其自从高性能微处理器用于实时控制之后,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、模糊控制、基于神经网络的自学习控制、模型预测控制(MPC)等,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、数字信号处理器为控制核心的全数字化控制系统取代了传统的模拟器件控制系统。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,可采用微处理机加数字信号处理器(DSP)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。可编程逻辑器件如CPLD、FPGA的大量应用,也使硬件电路的设计更加灵活、功能更加丰富,并且通过与DSP芯片的配合,可以提高控制系统的运算速度。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,可用于指导系统设计。全数字仿真技术、半物理仿真技术的不断发展,也大大加快了交流控制系统的研究进程。

### 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,开关变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,同时因为其结构可靠,所以可以应用于工作环境比较恶劣的场合。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,须用光电码盘(增量式或绝对式)、旋转变压器等来检测反馈量。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一个研究热点,并在实际中逐步得到应用。该技术是在电机转子和机座上不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，一般可应用于除伺服系统之外的大多数场合。

## 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，系统性能均大大提高，可完全取代直流电机在电气控制领域中的主导地位。目前典型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电，整流及逆变部分均由晶闸管构成，利用同步电机电流可以超前电压的特点，使逆变器的晶闸管工作在自然换相状态。同时检测转子磁极的位置，用以选通逆变器的晶闸管，使电机工作在自同步状态，故又称为自控式同步电机控制系统。其特点是直接采用普通同步电机和普通晶闸管构成系统，容量可以做得很大，电机转速也可做得很高，如法国早期的高速列车即采用此方案，技术比较成熟。其缺点是由于电流采用方波供电，而电机绕组为正弦分布，产生的低速转矩脉振较大。目前主要在一些大容量同步机调速中应用。近年来逐步被 IGBT、IGCT 逆变器所取代。

(2) 交-交变频供电同步电机控制系统 逆变器采用普通晶闸管组成的交-交循环变流电路，提供三相正弦电流给普通同步电机。采用矢量控制后可对励磁电流进行瞬态补偿，因此系统动态性能优良，已广泛应用在轧机主传动控制系统中。其特点是容量可以很大，但调速范围有一定限制，只能从  $1/2$  同步速往下调。

(3) 采用 IGCT 的交-直-交变频供电同步电机控制系统 逆变器采用集成门极换流晶闸管 (IGCT) 组成的交-直-交变频器，提供变压变频交流电给同步电机，容量可以做得比较大。同步电机采用矢量控制，因此转矩和转速控制精度比较高，应用在轧机主传动控制系统中。

(4) 正弦波永磁同步电机控制系统 电机转子采用永磁材料，定子绕组仍为正弦分布绕组。如通以三相正弦交流电，可获得较理想的旋转磁场，并产生平稳的电磁转矩。采用矢量控制技术使  $d$  轴电流分量为零，用  $q$  轴电流直接控制转矩，系统控制性能可以达到很高水平。缺点是需要使用昂贵的绝对位置编码器，采用普通增量式码盘实现上述要求虽有一些限制，但采取一定措施后仍是可能的。

(5) 方波永磁同步电机控制系统 又称为无刷直流电机控制系统，转子采用永磁材料，定子为整矩集中绕组，以产生梯形波磁场和感应电动势，如通以三相方波交变电流，当电流和感应电动势同相位时，理论上可产生平稳的电磁转矩。其主要特点是磁极位置检测和无换向器电机一样，非常简单，选通及系统控制容易实现。其缺点是由于定子电感的存在，实际上电流达不到理想的方波，在换相时刻的