

交流电机 数字控制系统

李永东 主编

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

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。

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. —北京:机械工业出版社, 2002.4

(电气自动化新技术丛书)

ISBN 7-111-09891-9

I. 交… II. 李… III. 交流电机—数字控制—自动控制
系统 IV. TM340.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 009497 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:孙流芳 版式设计:霍永明 责任校对:李汝庚

封面设计:姚毅 责任印制:路琳

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2002 年 5 月第 1 版·第 1 次印刷

850mm×1168mm¹/₃₂·13 印张·345 千字

0 001-5 000 册

定价:25.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010)68993821、68326677-2527
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

《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会成员

主任：黄席樾

副主任：王兆安 王志良 赵相宾

委员：王 炎 王正元 王兆安 王志良
刘宗富 孙武贞 孙流芳 许广锡
许宏纲 朱稚清 陈伯时 陈敏逊
李永东 李序葆 赵光宙 张 浩
张敬民 周国兴 徐殿国 涂 健
夏德钤 蒋静坪 黄席樾 舒迪前
彭鸿才 霍勇进 戴先中 赵相宾

秘 书：刘凤英

《电气自动化新技术丛书》

出版基金资助单位

机械工业部天津电气传动设计研究所

深圳华能电子有限公司

北京电力电子新技术研究开发中心

天津普辰电子工程有限公司

中国电工技术学会

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为一体的新兴学科。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 控制技术（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史不衰的领域。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及工作期间，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、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、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 于清华大学

2001年9月

目 录

《电气自动化新技术丛书》序言

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	5
0.3 交流电机数字控制系统的特点	9
0.4 数字控制系统的一般问题	12
第 1 章 数字控制系统的理论基础	21
1.1 概述	21
1.2 连续域等效设计法	22
1.2.1 数字控制系统的性能要求	22
1.2.2 连续域离散化的方法	23
1.2.3 数字 PID 控制	26
1.2.4 数字 PID 控制的改进	31
1.3 数字控制系统的 z 变换分析	35
1.3.1 z 变换及其性质	36
1.3.2 数字控制系统的脉冲传递函数	40
1.4 数字控制系统的离散化设计	41
1.4.1 最少拍控制系统的设计	42
1.4.2 最少拍无纹波控制系统的设计	45
1.4.3 数字控制器的实现	48
1.5 数字控制系统的状态空间分析和设计	51
1.5.1 数字控制系统的状态空间方程	51
1.5.2 数字控制系统的一般性质	52
1.5.3 状态空间设计法	54
1.5.4 状态观测器	56
1.6 数字控制系统软件设计的实际考虑	61

X

1.6.1	数字控制系统软件设计	61
1.6.2	量化误差和比例因子	64
1.6.3	数据处理和数字滤波	66
	参考文献	71
第2章	交流电机数字控制系统硬件基础	72
2.1	概述	72
2.2	微机控制系统硬件设计的一般问题	73
2.2.1	交流电机数字控制系统的设计方法和步骤	73
2.2.2	交流电机的数字控制系统总体方案的确定	75
2.2.3	微处理芯片的选择	78
2.3	微处理器和控制芯片简介	79
2.3.1	单片机	79
2.3.2	数字信号处理器 (DSP)	82
2.3.3	精简指令集计算机 (RISC)	87
2.3.4	并行处理器和并行 DSP	87
2.3.5	专用集成电路 (ASIC)	88
2.4	交流电机数字化控制系统构成	92
2.4.1	总线系统	92
2.4.2	接口和外围设备	94
2.4.3	实时控制	103
2.4.4	信号检测	108
2.5	系统开发和集成	112
2.5.1	对开发系统的要求	113
2.5.2	通用数字化开发平台	113
2.5.3	硬件系统设计中的抗干扰问题	117
	参考文献	121
第3章	电压型 PWM 变频调速异步电机数字控制系统	122
3.1	概述	122
3.2	变频调速的基本原理	122
3.2.1	变压变频 (VVVF) 控制原理	122
3.2.2	异步电机变压变频时的机械特性	125
3.3	电压型 PWM 变频器	128
3.3.1	电压型 PWM 变频器的主电路	128

3.3.2	PWM 控制技术分类	129
3.3.3	PWM 控制性能指标	133
3.4	正弦 PWM 控制技术	135
3.4.1	电压正弦 PWM 技术	135
3.4.2	电流正弦 PWM 技术	137
3.4.3	磁通正弦 PWM 技术	139
3.5	其他 PWM 控制技术	150
3.5.1	优化 PWM 技术	150
3.5.2	随机 PWM 技术	153
3.5.3	小结	160
3.6	PWM 变频调速异步电机开环控制	161
3.6.1	开环变频调速系统	161
3.6.2	开环通用变频器的软件设计	168
3.7	异步电机转速闭环控制系统	171
3.7.1	转差频率控制系统构成	172
3.7.2	转差频率控制系统的起动过程分析	172
3.7.3	转差频率控制系统的特点	174
	参考文献	175
第 4 章	全数字化异步电机矢量控制系统	177
4.1	概述	177
4.2	异步电机矢量控制原理	179
4.2.1	异步电机数学模型	179
4.2.2	转子磁场定向矢量控制原理	180
4.2.3	转差频率矢量控制原理	182
4.2.4	气隙磁场定向矢量控制原理	184
4.2.5	定子磁场定向矢量控制原理	185
4.2.6	电压定向矢量控制系统	186
4.2.7	异步电机矢量控制系统的基本环节	189
4.3	全数字化矢量控制系统设计	192
4.3.1	转子磁场定向矢量控制系统调节器设计	192
4.3.2	全数字化矢量控制系统的硬件和软件构成	201
4.4	磁通观测和电流控制	219
4.4.1	矢量控制的磁通观测	219

4.4.2	矢量控制中的电流调节器	232
4.5	无速度传感器异步电机矢量控制系统	240
4.5.1	动态转速估计器	241
4.5.2	基于 PI 自适应控制器法	243
4.5.3	自适应转速观测器	245
4.5.4	转子齿谐波法	250
4.5.5	高频注入法	251
4.5.6	基于人工神经网络的方法	254
	参考文献	256
第 5 章	全数字化异步电机直接转矩控制系统	260
5.1	概述	260
5.2	直接转矩控制基本原理	261
5.2.1	电机数学模型	261
5.2.2	空间矢量 PWM 逆变器	262
5.2.3	磁通和转矩闭环控制原理	263
5.3	磁通和转矩控制性能分析	266
5.3.1	磁通控制性能分析	266
5.3.2	转矩控制性能分析	268
5.3.3	磁通和转矩的估算和观测	271
5.4	全数字化控制系统的实现	273
5.4.1	电压矢量的选择	273
5.4.2	控制系统硬件的实现	276
5.4.3	低速控制性能分析	276
5.4.4	改进算法	284
5.5	无速度传感器直接转矩控制	290
5.5.1	直接算法	290
5.5.2	模型参考自适应法 (MRAS)	298
	参考文献	303
第 6 章	全数字化同步电机控制系统	306
6.1	概述	306
6.2	自控式同步电机控制系统原理	308
6.2.1	自控式同步电机基本结构和工作原理	308
6.2.2	自控式同步电机基本关系分析	310

6.3 典型同步电机数字控制系统设计	312
6.3.1 系统结构设计	312
6.3.2 控制功能的数字化实现	327
6.4 永磁同步电机数字控制系统	337
6.4.1 永磁同步电机及其数学模型	337
6.4.2 PMSM 数字控制系统	339
6.4.3 数字化 PMSM 伺服系统总体设计	340
6.4.4 数字化 PMSM 伺服系统的性能	341
6.4.5 无速度传感器 PMSM 系统	343
6.4.6 转子初始位置的检测策略	358
参考文献	360
附录	365
附录 A 交流异步电机多变量数学模型及广义派克方程	365
附录 B 连续系统的工程设计法	384
参考文献	397

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

⊖ 书中所述电机均指电动机。

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) 控制技术
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