

交流伺服系统

设计指南

孙宇 王志文 孔凡莉 兰振平 编著

JIAOLIUSIFUXITONGSHEJIZHINAN



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

交流伺服系统设计指南

孙 宇 王志文 孔凡莉 兰振平 编著



机械工业出版社

本书以指导设计为目的,从伺服电动机及其模型开始,逐步展开到主电路、PWM 驱动控制、电流和位置传感器、闭环控制结构,再展开到控制策略、控制算法、控制器、滤波器和观测器。全书共 10 章,第 2、3、4、6 章讲述了伺服系统的硬件结构;第 5、7、8、9、10 章讲述了伺服系统的控制结构、控制策略,以及实际伺服系统中不可缺少的控制器,滤波器和观测器的设计方法。书中对引用的相关理论、论文成果没有繁琐的推导和证明,而是提取了精髓,作了归纳总结,指出了运用这些成果的方法和条件。

本书可作为高等院校电气传动自动化、机电一体化、电机及其控制、电力电子技术等专业的研究生和高年级本科生的教材用书,特别适合工程技术人员从事相关设计和研发时用做指导性参考书。

图书在版编目(CIP)数据

交流伺服系统设计指南/孙宇,王志文,孔凡莉等编著. —北京:机械工业出版社, 2013. 8

ISBN 978 - 7 - 111 - 43641 - 6

I. ①交… II. ①孙… ②王… ③孔… III. ①交流伺服系统 - 系统设计 - 指南 IV. ①TM921.54 - 62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 185331 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

版式设计:常天培 责任校对:张玉琴

封面设计:赵颖喆 责任印制:杨曦

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2013 年 11 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 13.5 印张 · 329 千字

0001—3000 册

标准书号:ISBN 978 - 7 - 111 - 43641 - 6

定价:49.90 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

前 言

交流伺服系统涉及数控产业、装备制造业、信息产业以及材料学等诸多行业，它的发展直接关系到整体数控设备的性能发挥，及相关多产业的联动发展。交流伺服技术及相关产业的发展已经引起我国政府及相关部门的高度重视，在《国务院关于加快振兴装备制造业的若干意见》中已明确提出对于伺服驱动系统技术发展的要求。

随着国内伺服系统的发展，大多数工程类大学已经开设了这样的课程，公司不定期地举办相关的培训，遗憾的是大多数从事工程控制行业人员对伺服控制系统设计的知识并未感到满意，这可能是由于我国对交流伺服系统的研究起步较晚，又受到国外技术的封锁；参考资料内容过于传统，缺乏新技术；过多关注先进控制技术的数学推导及研究，忽略通常用于工业的控制方法；过多关注国外产品使用操作等。

本人具有基于交流永磁同步电动机的伺服系统开发经验，并结合此经验编写本书，书中比较系统、全面地介绍了交流伺服系统设计方面的知识，内容涉及永磁电动机基础知识及控制技术、数字控制系统应用技术、逆变技术及数字滤波设计等。在组织内容方面，遵循从工程应用出发，理论结合实际，重点讲述工业已接受的或具有前景的技术和实现方法。

编写这本书是一项艰巨的任务，需要许多人的支持，在此我要感谢他们。首先感谢我的家人，是他们的理解和支持，使我有充足的业余时间来完成本书。其次感谢我的父母，是他们的决定，使我选择并完成了自动化专业的大学教育。再次感谢梁中华导师，他的教导和鼓励，不仅使我打下了坚实的基础，还使我对今后从事电气工程类工作充满信心。最后特别感谢党存禄导师，是他最早给我提供了实践应用方向。我对每个人都怀有诚挚的感激之情。

书中部分内容由兰州理工大学王志文副教授、沈阳黎明航空发动机（集团）有限责任公司孔凡莉翻译、大连工业大学兰振平讲师执笔，全书内容最后由我统一整理、编写完成。沈阳工业大学的梁中华教授仔细审校了本书全部内容，并提供了宝贵的意见。

鉴于编者水平有限，书中不免存在错误和不当之处，恳请读者批评指正。

孙宇

中科院沈阳计算技术研究所
高精数控技术有限公司

目 录

前言

第 1 章 绪论 1

- 1.1 交流伺服系统的国内外现状与发展趋势 1
- 1.2 交流伺服系统的分类和特点 3
- 1.3 交流伺服系统在国内相关行业中的应用及研发意义 7
- 1.4 本书主要涉及的内容和安排 9

第 2 章 三相交流永磁同步电动机 11

- 2.1 永磁同步电动机转子的结构和特征 11
- 2.2 永磁同步电动机的数学模型 12
 - 2.2.1 坐标变换的原则和基本思路 13
 - 2.2.2 坐标变换阵 14
 - 2.2.3 建立 dq 坐标系下的数学模型 17
- 2.3 永磁同步电动机的特性常数 21
 - 2.3.1 转矩常数和反电动势常数 21
 - 2.3.2 机械时间常数、电气时间常数和机电时间常数 23
- 2.4 永磁同步电动机转矩波动 26
 - 2.4.1 纹波转矩 26
 - 2.4.2 齿槽转矩 27
- 2.5 永磁同步电动机控制系统 28
 - 2.5.1 基本电磁关系轨迹 29
 - 2.5.2 矢量控制策略 32
 - 2.5.3 基于 $i_d = 0$ 控制策略的伺服系统基本结构 37

第 3 章 电动机驱动电源和功率器件 39

- 3.1 逆变电路 39
 - 3.1.1 基本工作原理 39
 - 3.1.2 三相桥式电压型逆变电路 40
 - 3.1.3 多电平逆变电路 42
- 3.2 重要的辅助电路 43
 - 3.2.1 整流单元 43
 - 3.2.2 预充电电路 44
 - 3.2.3 泵升电压保护电路 45
- 3.3 功率器件 47
 - 3.3.1 功率器件的种类和发展 47

- 3.3.2 IGBT 49
- 3.3.3 器件的驱动 50
- 3.3.4 器件的保护 53

3.4 智能功率模块 (IPM) 56

- 3.4.1 接口电路 56
- 3.4.2 电压自举电路 57
- 3.4.3 保护功能 59

第 4 章 PWM 控制技术 60

- 4.1 PWM 控制的基本原理 60
- 4.2 三种典型的 PWM 控制技术 61
 - 4.2.1 正弦波 PWM 技术 61
 - 4.2.2 电流跟踪 PWM 技术 63
 - 4.2.3 电压空间矢量 PWM 技术 65
- 4.3 逆变器品质评价 67
 - 4.3.1 谐波成分 67
 - 4.3.2 直流电压利用率与过调制 72
 - 4.3.3 三种 PWM 控制技术的小结 76
- 4.4 数字化伺服系统中 SVPWM 的实现 76

第 5 章 数字控制系统 83

- 5.1 基础知识 83
 - 5.1.1 信号采样和香农采样定理 83
 - 5.1.2 信号复现和零阶保持器 86
 - 5.1.3 量化误差和极限环 89
 - 5.1.4 系统中的延迟 91
 - 5.1.5 z 变换及离散化方法 92
- 5.2 数字控制器研究方法 96
 - 5.2.1 模拟化研究方法概述 96
 - 5.2.2 数字化研究方法概述 97
- 5.3 微处理器选择 97
 - 5.3.1 选择处理器的基本原则 97
 - 5.3.2 伺服控制系统要求的处理器性能 98
 - 5.3.3 数字信号处理器 (DSP) 99
- 5.4 系统中的混合地设计 103

第 6 章 传感器技术和检测数据处理 106

- 6.1 电流传感器 106
 - 6.1.1 利用霍尔元件检测 106
 - 6.1.2 利用分流电阻检测 107

6.2 速度传感器	110	8.2.3 积分饱和与抗饱和设计	162
6.3 位置传感器	110	8.2.4 PI+控制	165
6.3.1 光电式增量型编码器	111	8.3 PID 控制器的人工调试	166
6.3.2 光电式绝对型编码器	112	8.3.1 Ziegler - Nichols 法	166
6.3.3 旋转变压器与 R - D 变换器	114	8.3.2 按“典型 I 型和 II 型系统的工程 设计”法	166
6.4 检测数据处理	118	8.3.3 手动调整	170
6.4.1 过采样和 A - D 分辨率	118	8.4 PID 控制器的自动调试	171
6.4.2 转速估计和编码器分辨率	121	8.4.1 离线自整定	172
6.4.3 数据标么化和定标	123	8.4.2 在线自校正	173
第 7 章 三闭环控制系统	127	第 9 章 数字滤波器	175
7.1 三闭环系统构成	127	9.1 伺服系统中的滤波器	175
7.2 系统的基本研究内容	128	9.2 低通和陷波滤波器	176
7.2.1 系统的稳定性及稳态裕度	128	9.2.1 滤波器特征	176
7.2.2 典型系统	129	9.2.2 基于模拟方式的实现	179
7.2.3 指令响应和扰动响应	131	9.2.3 基于 IIR 方式的实现	180
7.2.4 误差与稳态误差	134	9.3 抗混叠滤波器	182
7.3 电流/速度环控制策略	135	9.3.1 混叠	183
7.3.1 反电动势补偿	136	9.3.2 开关电容滤波器的实现	184
7.3.2 PI 控制与 IP 控制	138	9.4 转速估计滤波器	186
7.3.3 扰动解耦	140	9.4.1 转速估计方法的介绍	186
7.4 位置环控制策略	142	9.4.2 基于 FIR 方式的实现	188
7.4.1 电子齿轮比设计	142	9.5 位置指令滤波器	191
7.4.2 前馈控制	143	9.5.1 S 形曲线加减速	191
7.4.3 半闭环与全闭环	146	9.5.2 基于 2 次卷积法的实现	193
7.5 抑振控制策略	147	第 10 章 观测器	196
7.5.1 振动模型	148	10.1 系统中的观测器	196
7.5.2 不稳定分析	149	10.2 Luenberger 观测器	198
7.5.3 被动式抑振和主动式抑振	151	10.2.1 观测器的模型构建	198
第 8 章 控制器	155	10.2.2 观测器的运行分析	199
8.1 伺服控制系统中的控制器	155	10.2.3 观测器的应用设计	201
8.2 PID 控制器实现	156	10.3 观测器在加速度反馈中的应用	203
8.2.1 数字积分和微分	156	参考文献	206
8.2.2 数字 PID 表达式	161		

第 1 章 绪 论

伺服来自英文单词 Servo，是指系统跟随外部指令进行人们所期望的运动，运动要素包括位置、速度和转矩。伺服系统的发展经历了从液压、气动到电气的过程，而电气伺服系统包括伺服电动机、反馈装置和控制器。在 20 世纪 60 年代，最早是直流电动机作为主要执行部件，在 70 年代以后，交流伺服电动机的性价比不断提高，逐渐取代直流电动机成为伺服系统的主导执行电动机。控制器的功能是完成伺服系统的闭环控制，包括扭矩、速度和位置等。我们通常说的伺服驱动器已经包括了控制器的基本功能和功率放大部分。虽然在 90 年代所谓的经济型数控领域采用功率步进电动机直接驱动的开环伺服系统曾经获得广泛使用，但是迅速被交流伺服所取代。

自 20 世纪 80 年代以来，随着现代电机技术、现代电力电子技术、微电子技术、控制技术 & 计算机技术等支撑技术的快速发展，交流伺服控制技术的发展得到极大的迈进，使得先前困扰着交流伺服系统的电动机控制复杂和调速性能差等问题取得了突破性的进展，交流伺服系统的性能日渐提高和价格趋于合理，使得交流伺服系统逐渐取代直流伺服系统，尤其是在高准确度、高性能要求的伺服驱动领域中成为电伺服驱动系统的一个发展趋势。目前交流伺服技术已成为工业自动化的支撑技术之一。

伺服控制技术是决定交流伺服系统性能好坏的关键技术之一，是国外交流伺服技术封锁的主要部分。随着国内交流伺服运用电动机等硬件的技术逐步成熟，以软件形式存在于控制芯片中的伺服控制技术成为制约我国高性能交流伺服技术及产品发展的瓶颈。研究具有自主知识产权的高性能交流伺服控制技术是非常必要的，尤其是最具应用前景的永磁同步电动机伺服控制技术。

1.1 交流伺服系统的国内外现状与发展趋势

进入 20 世纪 50 年代，微电子制造工艺的日益完善，使得数字信号处理器（DSP）运算速度呈几何级数上升，达到伺服环路高速实时控制的要求，一些运动控制芯片制造商还将电动机控制所必需的外围电路（如 A - D 转换器、位置/速度检测倍频计数器、PWM 发生器等）与 DSP 内核集成为一体，使得伺服控制回路采样时间达到 $100\mu\text{s}$ 以内，由单一芯片实现加减速自动控制，电子齿轮同步控制以及位置、速度和电流三环的数字化补偿控制。一些新的控制算法，如速度前馈、加速度前馈、低通滤波和陷波滤波等得以实现。另一方面，电力电子技术的发展，使得伺服系统主电路功率器件的开关频率由 $2 \sim 5\text{kHz}$ 提升到 $15 \sim 20\text{kHz}$ ，绝缘栅极双型晶体管（IGBT）及智能功率模块（IPM）均是这一时代的产物，从而提高了系统的稳定性，降低了系统的噪声。以上两个方面不仅是交流伺服实现数字化的基础，而且使得交流伺服趋于小型化。

无人化、规模化生产对加工设备提出了高速度、高准确度和高效率的要求，交流伺服系统具有高响应、免维护（无电刷、换向器等磨损元部件）和高可靠性等特点，正好满足这

一需求。例如日本 FANUC 公司、三菱电机公司、安川电机公司、德国 Siemens 公司、美国 AB 公司及 GE 公司等分别在 1984 年前后将交流伺服系统付诸实用。目前,一些工业发达国家的伺服系统生产厂商基本上均能提供全数字交流伺服系统或者可以与自己的计算机数控 (CNC) 系统相配套,如日本 FANUC 公司、三菱电机公司、安川电机公司、松下公司、三洋电机公司以及德国 Siemens 公司等。

我国从 20 世纪 70 年代开始跟踪开发交流伺服技术,主要研究力量集中在高等院校和科研单位,以军工和宇航卫星为主要应用方向,不考虑成本因素。主要研究机构有北京机床研究所、西安微电机研究所以及中科院沈阳自动化研究所等。80 年代以后开始进入工业领域,直到 2000 年,国产伺服停留在批量小、价格高、应用面狭窄的状态,技术水平和可靠性难以满足工业需要。2000 年以后,随着中国变成世界工厂,制造业的快速发展为交流伺服提供了越来越大的市场空间,国内几家单位开始推出自己品牌的交流伺服产品。目前,国内主要的伺服品牌或厂商有森创(和利时电机)、华中数控、广州数控、南京埃斯顿、兰州电机厂和沈阳高精度数控等厂商。其中华中数控和广州数控等主要集中在数控机床领域。

总结国内外伺服厂商的技术路线和产品路线,结合市场需求的变化,可以看到以下一些最新发展趋势:

(1) 高效率化

尽管这方面的工作早就在进行,但是仍需要继续加强。主要包括电动机本身的高效率化,如永磁材料性能的改进和更好的磁铁安装结构设计,同时也包括驱动系统的高效率化、逆变器驱动电路的优化、加减速运动的优化、再生制动和能量反馈以及更好的冷却方式等。

(2) 直接驱动

直接驱动包括采用盘式电动机的转台伺服驱动和采用直线电动机的线性伺服驱动,由于消除了中间传递误差,从而实现了高速化和高定位准确度。直线电动机容易改变形状的特点可以使采用线性直线机构的各种装置实现小型化和轻量化。

(3) 高速、高精度、高性能化

采用更高精度的编码器(每转百万脉冲级),更高采样精度和数据位数、速度更快的 DSP,无齿槽效应的高性能旋转电动机、直线电动机,以及应用自适应、人工智能等各种现代控制策略,不断将伺服系统的性能指标提高。

(4) 一体化和集成化

电动机和反馈、控制、驱动、通信的纵向一体化成为当前小功率伺服系统的一个发展方向。我们称这种集成了驱动和通信功能的电动机叫智能化电动机(Smart Motor),我们把集成了运动控制和通信功能的驱动器叫做智能化伺服驱动器(Smart Servo Driver)。电动机、驱动和控制的集成使三者从设计、制造到运行、维护都更紧密地融为一体。但是这种方式面临更大的技术挑战(如可靠性)和工程师使用习惯的挑战,因此很难成为主流,在整个伺服市场中是一个很小但有特色的部分。

(5) 通用化

通用型驱动器配置有大量的参数和丰富的菜单功能,便于用户在不改变硬件配置的条件下,方便地设置成 V/F 控制、无速度传感器开环矢量控制、闭环磁通矢量控制、永磁无刷交流伺服电动机控制及再生单元五种工作方式,适用于各种场合,可以驱动不同类型的电动

机, 比如异步电动机、永磁同步电动机、无刷直流电动机、步进电动机, 也可以适应不同的传感器类型, 甚至无位置传感器。可以使用电动机本身配置的反馈环节构成半闭环控制系统, 也可以通过接口与外部的位置或速度或力矩传感器构成高精度全闭环控制系统。

(6) 智能化

现代交流伺服驱动器都具备参数记忆、故障自诊断和分析功能, 绝大多数进口驱动器都具备负载转动惯量测定和自动增益调整功能, 有的可以自动辨识电动机的参数, 自动测定编码器零位, 有的则能自动进行振动抑止。将电子齿轮、电子凸轮、同步跟踪、插补运动等控制功能和驱动结合在一起, 则为伺服用户提供了更好的体验。

(7) 网络化和模块化

将现场总线和工业以太网技术、甚至无线网络技术集成到伺服驱动器当中, 已经成为欧洲和美国厂商的常用做法。现代工业局域网发展的重要方向和各种总线标准竞争的焦点就是如何适应高性能运动控制对数据传输实时性、可靠性、同步性的要求。随着国内对大规模分布式控制装置需求的上升, 高档数控系统的开发成功, 网络化数字伺服的开发已经成为当务之急。模块化不仅指伺服驱动模块、电源模块、再生制动模块和通信模块之间的组合方式, 而且指伺服驱动器内部软件和硬件的模块化和可重用性。

(8) 从故障诊断到预测性维护

随着机器安全标准的不断发展, 传统的故障诊断和保护技术(问题发生的时候判断原因并采取避免故障扩大化)已经落伍, 最新的产品嵌入了预测性维护技术, 使得人们可以通过 Internet 及时了解重要技术参数的动态趋势, 并采取预防性措施。比如: 关注电流的升高, 负载变化时评估尖峰电流, 外壳或铁心温度升高时监视温度传感器, 以及对电流波形发生的任何畸变保持警惕。

(9) 专用化和多样化

虽然市场上存在通用型伺服产品系列, 但是为某种特定应用场合专门设计制造的伺服系统比比皆是。利用磁性材料不同性能、不同形状、不同表面粘接结构, 电动机转子出现了表面式永磁(SPM)和内置式永磁(IPM)结构。分割式铁心结构工艺在日本的使用使永磁无刷伺服电动机的生产实现了高效率、大批量和自动化, 并引起国内厂商的研究。

(10) 小型化和大型化

无论是永磁无刷伺服电动机还是步进电动机都积极向更小的尺寸发展, 比如 20mm、28mm 和 35mm 外径等; 同时也在发展更大功率和尺寸的机种, 已经看到 500kW 永磁伺服电动机的出现。体现了电动机向两极化发展的倾向。

1.2 交流伺服系统的分类和特点

伺服系统中, 采用各种各样的驱动电动机, 如直流电动机、感应电动机、电励磁同步电动机、永磁无刷直流电动机、永磁励磁同步电动机, 开关磁阻电动机和步进电动机等, 如图 1-1 所示。伺服系统根据不同的电动机类型可以分为以下几种:

1. 直流电动机控制系统

直流电动机由于励磁磁场和电枢磁场的完全解耦, 可以独立控制, 因此具备良好的调速性能, 且出力大、调速范围宽和易于控制, 广泛应用于电力拖动系统中, 如车辆牵引直流电

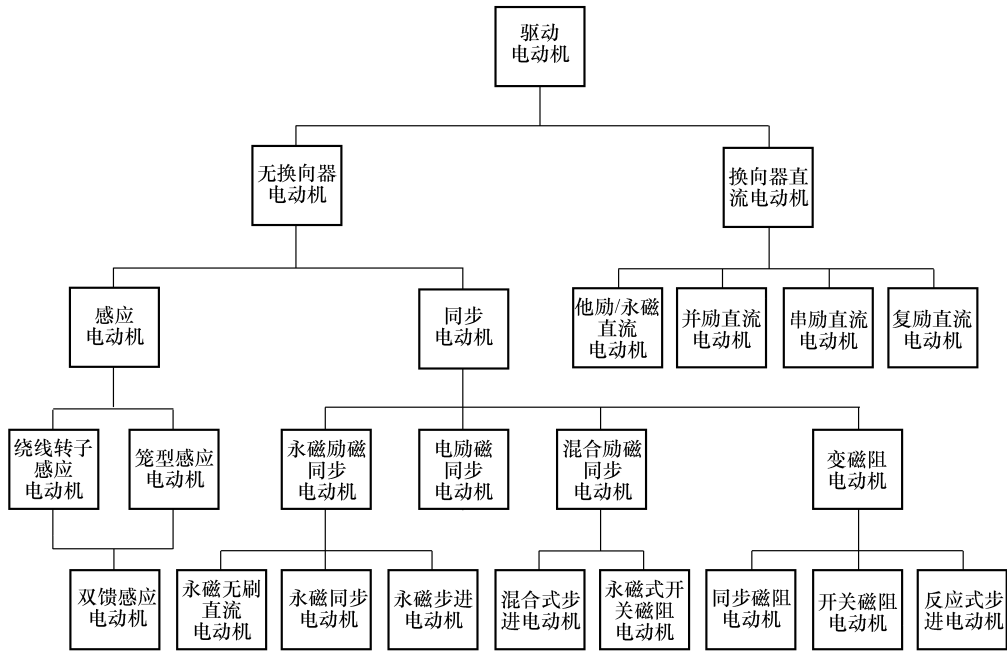


图 1-1 驱动电动机分类

动机、轧钢用直流电动机、港口起重用直流电动机以及小功率直流位置伺服系统用直流伺服电动机等。传统的调速方法主要是电枢回路串联电阻调速、调压调速和改变励磁磁通调速等，20 世纪 70 年代以前，直流电动机控制系统在电动机控制系统中占有绝对的主导地位，现在除了老式直流电动机控制设备以外，在某些场合仍然采用直流电动机控制系统。

2. 感应电动机控制系统

感应电动机定子一般为对称多相绕组，转子可以是绕线转子，也可以是笼型转子。由于转子结构的不同，就有不同的控制策略，如绕线转子感应电动机可以实现转子回路串联电阻调速、串级调速和变频双馈调速控制等，而笼型感应电动机可以实现定子变频、变极调速和变极变频平滑控制等。现代交流感应电动机控制主要有以下几种：

(1) 矢量变换控制系统

矢量变换控制也称为磁场定向控制 (Field - Oriented Control)。所谓矢量变换控制，就是对电压、电流和磁链等物理量经过一系列矢量变换，将感应电动机数学模型变换至正交的旋转坐标系中，并对各物理量的幅值和相位实现解耦控制。1971 年德国学者 F. Blascheke 提出的矢量变换控制方式中，正交旋转坐标系的直轴为励磁轴与转子磁场重合，交轴为转矩轴。转子磁场的交轴分量为零，电磁转矩方程得到简化，即在磁场恒定的情况下，电磁转矩与交轴电流分量成正比，因此感应电动机的机械特性与他励直流电动机的机械特性完全一样，实现磁场与转矩的解耦控制。由于直轴与转子磁场重合，因此也称为转子磁场定向控制。为了保持转子磁场的恒定控制，必须观测转子磁场实现反馈控制，因此利用转子电压方程构成磁通观测器，但由于转子参数（特别是电阻）受温度的影响较大，在一定程度上影

响了系统的控制性能。目前有很多转子参数辨识的方法,实现实时补偿,从而提高系统动态性能。除了转子磁场定向控制外,还有气隙磁场定向控制和定子磁场定向控制。

(2) 转差频率矢量控制系统

感应电动机稳态运行时存在转差率,而转差率对感应电动机的性能有很大的影响,转差率越小,效率越高,控制感应电动机转差率或转子的转差频率就能高效率地控制感应电动机。转差频率矢量控制系统是对传统矢量控制系统的简化,人们采用忽略转子磁链幅值的动态变化的方法,认为转子磁链是稳定的,这样在转子磁场定向坐标系中,可以确定定子电流的直轴分量,而交轴分量可以由电磁转矩表达式确定。因为当转差率很小时,电磁转矩与转差率成正比关系。当感应电动机进行调速控制时,利用给定速度信号与实际速度值的差,由速度调节器确定感应电动机的电磁转矩及相应的转差率,进一步可知转差频率的大小,只要控制转差频率就可以很好地控制感应电动机调速。这类简单、高效的调速系统在节能的风力机、泵类负载中应用得相当广泛。

(3) 直接转矩控制系统

直接转矩控制(Direct Torque Control, DTC)是在20世纪80年代中期提出的新的交流电动机控制理论。直接转矩控制是在定子坐标系统中计算磁通和电磁转矩的大小和位置角,通过磁通幅值和转矩的直接跟踪来实现高性能动态控制。由于磁链的幅值限制在较小的误差范围内,对转矩控制性能不会有大的影响,因此直接转矩控制方法对电动机参数变化不敏感,与转子参数无关;同时,由于对电压空间矢量的优化控制,降低了逆变器的开关频率和开关损耗,从而提高了控制系统的效率。

(4) 空间矢量调制控制系统

空间矢量调制(Space Vector Modulation)控制技术是为了提高气隙磁场稳定性、减少谐波、优化功率控制器开关模式、降低开关损耗所采用的控制技术。根据定子磁场的运动规律,选择合适的基本电压空间矢量进行合成,以产生其他所需要的电压空间矢量。这种空间矢量调制方法产生的基波电压幅值要高于正弦波脉宽调制(SPWM)产生的基波电压幅值,提高了电源电压的利用率。

(5) 智能控制系统

智能控制(Intelligent Control)系统主要根据人工智能理论,如模拟人脑物理模型的人工神经网络(Artificial Neural Network),模拟人脑不确定思维或推理过程的模糊逻辑理论(Fuzzy Logic Theory)等,更准确地模拟电动机的非线性,以此确定智能控制模型输出量的大小,进而确定功率控制器的开关模式。电动机的智能控制系统算法极其复杂,需要具有高速、实时计算能力的微机或DSP芯片来实现,目前仍处于实验室研究阶段,但是智能控制系统将是电动机控制的发展方向。

3. 同步电控控制系统

(1) 电励磁同步电动机控制系统

普通电励磁同步电动机采用交-直-交流型逆变器供电,整流和逆变电路均采用晶闸管,利用同步电动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,同时检测转子磁极位置,用来确定逆变器晶闸管的导通与关断,使电动机工作在自同步状态。这种控制系统也称为自控式同步电动机控制系统。这种系统的特点是容量大且转速高,技术比较成熟;缺点是三相正弦分布绕组由电流型逆变器供电,电动机低速运行时转矩波动大。

此外，电励磁同步电动机也可以采用变频器供电驱动。

(2) 永磁无刷直流电动机控制系统

永磁交流电动机根据驱动电源波形分为方波和正弦波，前者成为永磁无刷直流电动机，而后者称为永磁同步电动机。方波驱动永磁无刷直流电动机控制系统，转子采用永磁材料，定子为集中绕组，这样气隙磁场和定子绕组中反电动势是梯形波，当定子绕组通过方波电流，且电流与反电动势同相位时，理论上可以产生恒定的电磁转矩。但是由于定转子齿槽效应，电枢电流存在换相，因此转矩是脉动的。永磁无刷直流电动机的主要特点是磁极位置检测与无换向电动机一样非常简单，通常采用磁敏式霍尔位置传感器，驱动控制易于实现，主要用于恒速驱动、调速驱动系统和准确度要求不高的位置伺服系统。其缺点是定子绕组存在电感，电流不可能是方波，以及在换相时刻的电流变化会造成转矩脉动，对系统低速性能存在一定影响。

(3) 永磁同步电动机控制系统

正弦波驱动永磁同步电动机控制系统中，电动机转子采用永磁材料，定子绕组与普通同步电动机一样，为对称多相正弦分布绕组。如果通以对称的多相交流电，会产生恒定的旋转磁场和平稳的电磁转矩。采用矢量控制技术可以使直轴电枢电流等于零，达到直接控制交轴电枢电流与电磁转矩的目的。也可以利用单位电流电磁转矩最大的方式控制，增大出力；对于气隙较小的永磁同步电动机，可以采用直轴电枢电流为负值的方式实现弱磁控制，扩大调速范围。

永磁同步电动机转子磁路结构的不同，则电动机的运行特性、控制系统等不同。根据永磁体在转子上位置的不同，永磁同步电动机主要可分为：表面式和内置式。在表面式永磁同步电动机中，永磁体通常呈瓦片形，并位于转子铁心的外表面上，这种电动机的重要特点是直、交轴的主电感相等；而内置式永磁同步电动机的永磁体位于转子内部，永磁体外表面与定子铁心内圆之间有铁磁物质制成的极靴，可以保护永磁体。这种永磁电动机的重要特点是直、交轴的主电感不相等。因此，这两种电动机的性能有所不同。

永磁同步电动机主要用于恒速驱动、调速驱动系统和高准确度位置伺服系统，如机器人、数控机床和其他加工行业。目前研究的重点主要是削弱齿槽效应、转矩波动和无位置传感器技术等。

4. 变磁阻电动机控制系统

变磁阻电动机 (Variable Reluctance Motor) 的定子有多个磁极，磁极上有集中绕组，一旦通以电流就产生励磁磁场，而转子无励磁绕组或永磁体只有齿槽结构。变磁阻电动机转子运动时，气隙磁阻是不断变化的。其工作原理是利用气隙磁场使得转子齿与定子磁场磁极位置对齐，磁阻以最小或磁场最强的方式运行。由于转子是磁阻性质的结构，因此工作电流的方向与运行状态无关。变磁阻电动机主要有同步磁阻电动机、反应式步进电动机和开关磁阻电动机等。

(1) 步进电动机控制系统

步进电动机是一种电磁式增量运动执行元件，它将输入的电脉冲信号转换成机械角位移或线位移信号，因其输入是脉冲信号，执行机构运动是断续的，故又称为脉冲电动机。

步进电动机种类很多，其结构和原理也不尽相同。根据结构可分为3类：反应式步进电动机、永磁步进电动机和混合式步进电动机。永磁步进电动机与永磁无刷直流电动机类似，

转子为永磁体，定子为集中绕组。反应式步进电动机定子磁极表面开有齿距与转子齿距相同的小齿槽，根据步进电动机的相数确定导通方式，如三相单拍等。混合式步进电动机转子既有永磁又有齿槽。由于步进电动机的步距不受外加电压波动、负载变化和条件变化的影响，其起动、停止或反转都是由脉冲信号控制的，因此在不丢步的情况下，其运行的角位移或线位移误差不会长期积累。这也是步进电动机特别适合简单、可靠的开环数字控制系统应用的原因，如打印机、复印机等应用的驱动步进电动机。

(2) 开关磁阻电动机控制系统

开关磁阻电动机雏形在 19 世纪 40 年代就已问世，但直到 20 世纪 60 年代大功率晶闸管应用，开关磁阻电动机才得以深入研究。1967 年英国 Leeds 大学对开关磁阻电动机的研究表明，开关磁阻电动机可以实现四象限运行，性能成本可以与同容量感应电动机媲美。1975 年英国 Nottingham 大学和 Leeds 大学联合，成功研制出 50kW 开关磁阻电动机驱动系统，并用于蓄电池供电的电动车辆，研究成果表明开关磁阻电动机具有宽范围的调速性能和宽范围、高效率曲线，性能要优于同类感应电动机驱动系统。1980 年，Leeds 大学的 P. J. Lawrenson 教授发表的论文《Variable - speed Switched Reluctance Motors》标志着开关磁阻电动机的研究进入了新的阶段。

开关磁阻电动机的结构与反应式步进电动机相似，但在结构上，开关磁阻电动机定子齿数较少，而且定子齿数与转子齿数一般不同，如 6/4、8/6、12/8 等组合。定子磁极上有集中绕组，通以励磁电流产生转矩，转子存在齿槽、无绕组和永磁励磁，结构简单可靠。在控制方法上，开关磁阻电动机根据转子位置反馈信息进行电流换相控制。在运行性能方面，开关磁阻电动机由于转子坚固可以高速运行，且适当控制导通角和关断角就可以使其运行在电动机状态或发电电动机状态，因此广泛用于高速航空发动机、电动车辆驱动等领域。开关磁阻电动机的绕组电流只需要单方向控制，而且相数少，因此控制系统主电路拓扑结构简单。开关磁阻电动机主要存在转矩脉动、振动和噪声，以及需要转子位置传感器实现闭环控制等问题。

5. 小结

由此可以看出，永磁同步电动机结构简单、体积小、重量轻、损耗小、效率高，和直流电动机相比，它没有直流电动机的换向器和电刷等缺点。和感应电动机相比，它由于不需要无功励磁电流，因而效率高、功率因数高、力矩转动惯量比大、定子电流和定子电阻损耗减小、且转子参数可测、控制性能好。和普通同步电动机相比，它省去了励磁装置，简化了结构，提高了效率。永磁同步电动机矢量控制系统能够实现高准确度、高动态性能、大范围的调速或定位控制，因此永磁同步电动机矢量控制系统引起了国内外学者的广泛关注。目前，基于磁场定向矢量控制的永磁同步电动机交流伺服系统，已经成为伺服系统的主流之选。

1.3 交流伺服系统在国内相关行业中的应用及研发意义

现代交流伺服系统最早被应用到宇航和军事领域，比如火炮、雷达控制，逐渐进入到工业领域和民用领域。工业应用主要包括高准确度数控机床、机器人和其他广义的数控机械、比如纺织机械、印刷机械、包装机械、医疗设备、半导体设备、邮政机械、冶金机械、自动化流水线以及各种专用设备等。其中伺服用量最大的行业依次是：机床、食品包装、纺织、

电子半导体、塑料、印刷和橡胶机械，合计超过 75%。

20 世纪 90 年代以来，在数控领域，欧美日各国争相开发应用新一代高速数控机床，高速电主轴单元转速在 30000 ~ 100000r/min，工作台的进给速度在分辨率为 1 μ m 时达到 100m/min，甚至 200m/min 以上，在分辨率为 0.1 μ m 时，达到 24m/min 以上。当今数控机床突出高转速、高准确度、高动态和高刚性的特点，对位置系统的要求包括：定位速度和轮廓切削进给速度；定位准确度和轮廓切削准确度；在外界干扰下的稳定性。能否满足这些要求主要取决于伺服系统的静态和动态特性。我们已经看到的国产伺服系统，比如广州数控的产品在经济型数控机床上的广泛应用，但是在中高档数控机床采用国产伺服系统仍然面临困难，性能是一个重要方面，还有就是稳定性和可靠性，或许品牌效应也是难以在短时间内逾越的障碍。

在机器人领域，永磁无刷伺服系统得到大量应用。工业机器人拥有多个自由度，每台工业机器人需要的电动机数量在 10 台以上。目前世界范围内工业机器人拥有量超过 100 万台，机器人的需求量年增长率在 30% 以上。国际上工业机器人采用的伺服系统属于专用系统，多轴合一、模块化、特殊的散热结构、特殊的控制方式以及对可靠性要求极高。国际机器人巨头都有自己的专属伺服系统配套，比如安川、松下和 ABB 公司。国产工业机器人厂商仍然在采用标准的进口交流伺服系统，想进入工业机器人配套领域，就更加遥远。不过，我们也看到在一些特殊机器人领域，比如反恐防爆机器人、矿井救灾机器人等轻便移动机器人获得了成功。当然，在更广泛的机器人领域，需要的不仅仅是交流伺服电动机，还包括各种其他微特电动机，如直线电动机、力矩电动机等。

纺织行业当前应用伺服系统的比例很低，但却是未来交流伺服系统大批量应用的重要行业之一。从 20 世纪 90 年代初期至今已经过 20 多年，纺织行业技术进步主要是依靠变频化和可编程控制器（PLC）化。只有少量纺织机械采用了高档伺服技术，用于提高准确度和效率。无梭织机和印染设备上用到了伺服系统，这些设备每年的伺服系统用量约为 2 ~ 3 万套，且几乎全部是进口产品。国产产品虽然价格上有一定优势，但是性能指标、可靠性和环境适应性等方面存在欠缺，还需要不断改进。值得高兴的是，我们在工业缝纫机上看到了国产伺服系统成功的应用案例。近 10 年，国产伺服控制器逐渐取代台湾和其他进口品牌，在缝纫机市场成为主流，凭借其低成本的电动机，简单的低线数编码器，以及集成控制和驱动，同时解决了批量稳定性，像上海鲍麦克斯这样的国内品牌获得了成功，每年达到数十万台的产量。

无轴（电子轴）传动技术在印刷机上应用，也是目前全球印刷企业和机械制造厂商的焦点。无轴传动就是用多个单独的伺服电动机取代传统的机械传动链，伺服驱动器之间依靠高速现场总线进行联系，通过软件保证各伺服轴对内部的虚拟数字电子轴保持严格同步。采用无轴传动技术为印刷机的生产制造、为印刷业服务革命带来了最佳解决方案，目前欧洲 50% 的凹印机采用了无轴技术，日本也有 30% 以上采用。其他采用无轴传动的机械包括卷筒纸印刷机、柔印机、上光机、烫金机和模切机等各类印刷设备。国内目前仅有北人和松德等个别厂商进行无轴传动印刷机的开发，部分规格的性能指标接近国际水平。国产伺服和控制系统要达到这个领域的要求，看来还有漫长的路要走。

包装设备上，采用伺服控制可以提高单位时间的产量、提高资源利用率、增加品种适应性和提高产品质量，因此交流伺服系统在包装机械上的广泛使用只是时间问题。采用数字伺

服技术的电子齿轮和电子凸轮将代替传统机械部件，随着价格的下降，成本也逐渐接近纯机械的方案。

总之，对我国来说，永磁同步电动机有很好的应用前景。充分发挥我国稀土资源丰富的优势，大力研究和推广应用以稀土永磁电动机为代表的各种永磁电动机及伺服系统，对实现我国社会主义现代化具有重要的理论意义和实用价值。

1.4 本书主要涉及的内容和安排

本书主要以基于磁场定向矢量控制的交流永磁同步电动机伺服系统为例，对交流伺服系统的设计进行了较为全面和详细的阐述。如图 1-2 所示，交流伺服系统通常由全数字驱动器、永磁同步电动机及含机械传动机构的负载组成。伺服驱动器内部结构主要分为控制和驱动两部分，控制技术部分通常基于 DSP 芯片的数字控制系统实现，驱动技术部分通常建立在电压型桥式逆变器拓扑结构下工作。系统的控制对象为永磁同步电动机，但是由于联结电动机与负载的机械传动机构具有柔性，大多数情况下需要对电动机与含机械传动结构的负载作为整体进行振动研究和采取抑振措施。因此，本书会对图里面出现的永磁同步电动机、机械系统、SVPWM 技术、控制器、滤波器、逆变器以及传感器等关键部分逐一展开介绍，内容包括基本原理、技术难点和实现等方面，力求能够达到借一斑以窥全豹的目的。

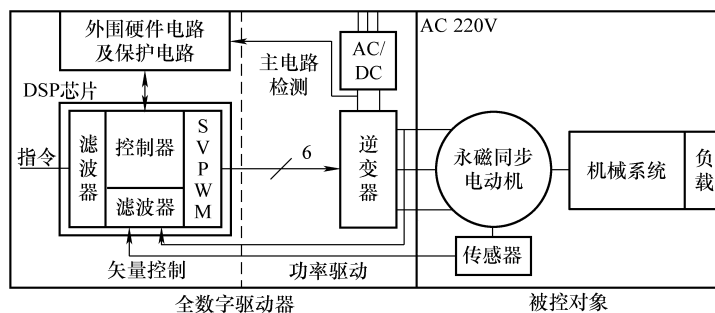


图 1-2 伺服系统组成结构框图

图 1-3 所示为本书的编排与章节顺序。此图会对理解书中各章节的关系有帮助。第 1 章是单独的一章，不依赖于其他任何章节，有了这一章的知识，实际上已经了解了交流伺服系统。第 2 章是设计的起点，介绍被控对象及对象建模，它是基础，阅读完第 2 章就可以开始

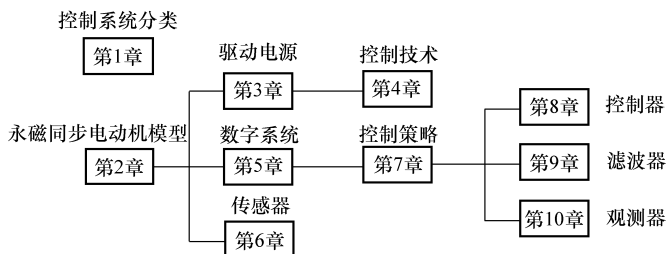


图 1-3 本书的编排与章节顺序

设计伺服系统了。此时可以开始阅读第3章、第5章或第6章，这3章关系是并列的，无顺序排列。阅读完第3章后，如果进一步了解交流伺服系统是如何工作的，可以阅读第4章。在了解了伺服系统的硬件设计后，接下来就是软件设计，开始阅读第7章，在理解了第7章内容后，可以进入第8章、第9章和第10章的阅读，深入了解与提高性能相关的设计。

第1章 绪论

本章介绍了交流伺服系统的国内外现状、发展趋势及行业应用等情况。从系统的分类及特点得出，基于磁场定向矢量控制的永磁同步电动机交流伺服系统，是目前伺服系统的主流之选。

第2章 三相交流永磁同步电动机

本章介绍了作为伺服系统控制对象的永磁同步电动机的转子结构和特征，通过坐标变换建立了电动机的数学模型，依据模型对电动机的特性常数和转矩波动进行了分析，最后建立了基于永磁同步电动机交流伺服控制系统的基本结构。

第3章 电动机驱动电源和功率器件

本章介绍了驱动电源的主电路和三个重要辅助电路的工作原理及设计，并对驱动电源中主要器件——功率器件IGBT和IPM进行了详细的介绍。

第4章 PWM控制技术

本章介绍了PWM控制的基本原理以及三种典型的PWM控制技术。从逆变器品质主要指标——谐波成分和直流电压利用率上对这三种PWM控制技术进行了比较，最后给出SVPWM技术实现数字化的方法。

第5章 数字控制系统

本章介绍了数字控制系统的一些基础理论知识、系统研究方法以及数字控制器的选择原则等。对照伺服控制系统对数字化性能要求，介绍了一种常用数字控制芯片——数字信号处理器（DSP），最后对数字系统硬件设计的难点——数字地与模拟地问题给出了实用的解决方法。

第6章 传感器技术和检测数据处理

本章介绍了伺服系统中常见的传感器以及检测原理，最后对检测的数据提出了一定的要求，主要包括过采样、转速估计和数据标幺化等。

第7章 三闭环控制系统

本章介绍了基于永磁同步电动机的三闭环控制系统——电流环、速度环和位置环的控制策略，以及连接含机械传动结构负载的抑振控制策略等。

第8章 控制器

本章介绍了伺服系统中关键模块——控制器的PID结构、表达形式以及参数调试和整定等。

第9章 数字滤波器

本章介绍了伺服系统中常见模块——滤波器的特征、功能以及数字结构实现等。

第10章 观测器

本章介绍了伺服系统中可选模块——观测器的结构、运行特性、创建以及应用条件等。

第 2 章 三相交流永磁同步电动机

现今，永磁同步电动机按电动势波形主要分为两大类。一类是无刷直流电动机（Brushless DC Motor, BDCM），另一类是三相永磁同步电动机（Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM）。

BDCM 的本质是用装有永磁体的转子取代有刷直流电动机的定子磁极，将原直流电动机的电枢变为定子。有刷直流电动机是依靠机械换向器将直流电流转换为近似梯形波的交流，而 BDCM 是将方波电流（实际也是梯形波）直接输入定子，每相感应出梯形波电动势。

PMSM 的本质是用永磁体取代绕线转子同步电动机转子中的励磁绕组，从而省去了励磁绕组、集电环和电刷。PMSM 的定子与绕线转子同步电动机基本相同，要求输入定子的电流仍然是三相正弦的，每相感应出正弦波电动势。

事实上，我们能将正弦电流输入 PMSM，但却不能将方波电流输入 BDCM，即方波电流与梯形波电动势不会严格同步。因此，由电流换相引起的转矩纹波是无法消除的。特别在低速区，BDCM 的脉动转矩会引起转速的波动，将严重影响伺服系统的定位和重复准确度。所以，对高性能和位置伺服应用，如机器人或数控机床，最好采用 PMSM，而不采用 BDCM。本章及书中以后讨论的交流伺服系统都是针对 PMSM 的。

2.1 永磁同步电动机转子的结构和特征

一般而言，交流永磁同步电动机上分布三相或多组对称绕组。绕组结构与一般同步或感应电动机相同，转子上装有产生永磁励磁磁场的高性能稀土永磁材料。不同转子永磁的安装方式将对电动机磁路产生不同的影响，从而改变电动机的参数。图 2-1 所示为永磁同步电动机具有代表性的转子结构。

图 2-1 中，a 和 b 是在转子表面粘贴永久磁铁的表面磁铁结构的同步电动机（简称 SPMSM）。图 a 称为凸出式，即永磁体凸装在转子表面，形状为瓦片形，该几何形状常被使用，另外还有圆套筒形的和扇形的。图 b 称为插入式，即永磁体嵌于转子表面下。

图 c ~ f 是把永久磁铁嵌入转子内部的嵌入磁铁结构的同步电动机（简称 IPMSM）。图 c 称为径向式，即永磁体径向充磁，气隙磁通密度在一定程度上会受到永磁体供磁面积的限制。在某些电动机中，可能要求气隙磁通很高，在这种情况下，可利用另一种结构的永磁转子，如图 d 所示。图 d 称为切向式，即它将永磁体横向充磁，为将磁极表面的磁通集中起来，相邻磁极表面的极性应相同（扩大供磁面积），这样可以得到比 SPMSM 结构更高的气隙磁通。图 e 和 f 称为混合式，即它的永磁体既不完全是径向放置，又不完全是横向放置，或者永磁体既有径向充磁的，又有横向充磁的，目的都是更有效地集中磁通。

SPMSM 结构可以使转子做得直径小、惯量低，特别是将永磁体直接粘接在转轴上，还可以获得低电感，有利于改善动态性能。正因为如此，图 a 一直是伺服电动机最常用的结构。IPMSM 由于是将永磁体埋装在转子铁心内部，每个永磁体都被铁心所包围，因此机械