

李颖晖 祝晓辉 徐浩军 袁国强 郑无计 著

非线性观测器的 设计及应用



科学出版社

非线性观测器的设计及应用

李颖晖 祝晓辉 徐浩军 袁国强 郑无计 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书应用非线性系统微分几何理论分析了定义在微分流形上的永磁同步电机模型方程的局部弱能观性及全局能观性,设计了非线性系统的滑模变结构观测器、基于流形变换的非线性观测器、非线性高增益观测器及其相应的转子角位置与速度估计算法。针对永磁同步电机运行状态准周期性的特点,提出了基于有限样本数据序列关联与泛化、数据挖掘的转子信息智能估算方法;开发了一类适用于具有强耦合性的内插式永磁同步电机的有限样本数据挖掘转子信息预测估计算法;研究了电流控制器对状态观测的适应性问题,从定性和定量两个方面分析了传统控制器和预测控制器调节电机电流的特点;提出了一种新型的小波控制器设计方法,以提高控制器的稳定性及可靠性。

本书可供控制科学与工程、电气工程等学科相关研究方向的科研人员及高年级本科生、研究生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

非线性观测器的设计及应用 / 李颖晖等著. —北京: 科学出版社, 2019.3

ISBN 978-7-03-060750-8

I. ①非… II. ①李… III. ①非线性器件-测磁仪器 IV. ①TM936

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第043126号

责任编辑: 张海娜 赵微微 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 师艳茹 / 封面设计: 蓝 正

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年3月第一版 开本: 720×1000 1/16

2019年3月第一次印刷 印张: 15

字数: 300 000

定价: 120.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

制造业是现代工业的基石，为了推进智能制造的发展，加快我国从制造业大国向制造业强国转变，中国发布了《中国制造 2025》，全面推进制造强国战略。智能制造战略的“五大工程”涵盖了经济、社会、国防、民生等方方面面，它们都离不开基础的制造装备及集成制造系统，其中以伺服电机和控制器为核心的高档数控机床和机器人开发最为关键。现代电力电子技术、微芯片技术及先进控制理论的发展使开发高效集成的永磁同步电机无传感器控制系统需求迫切。

永磁同步电机作为高性能运动控制、高精度加工控制及高功率伺服驱动的执行单元，以其调速性能好、体积小、重量轻、维护方便、运行可靠、单位功率密度大、效率高等独特优点，成为交流调速系统的首选。在发达国家，交流伺服电机的市场占有率已经超过 80%。作为一种自控变频的电动机，其控制严格取决于永磁转子位置信息的获取，逆变器功率器件导通及关断取决于转子空间位置信息的获取。各种先进控制策略在交流调速系统的应用(如电流环、转速环及转矩环的调节)最终要依靠逆变器实现。从控制器集成化、一体化设计的角度考虑，可将控制器与位置及速度检测单元进行整合设计，构成复合控制器。综合电流环、转速环、位置环的三环全数字控制产品不断涌现，数字信号处理芯片的应用使软件伺服技术成为可能，各种现代控制理论先进算法得以在调速伺服系统中获得实际应用。同时，伺服系统控制器的集成化也大大拓展了交流伺服系统的应用范围，控制器的集成化不仅体现为速度伺服单元与位置伺服单元的集成化，也体现为控制单元与位置及速度反馈单元的集成化。

为了获得转子位置及速度信息，早期的方法是在定、转子上加装电磁式、光电式以及霍尔磁敏式等外置式传感器进行检测。电磁式位置传感器有开口变压器、铁磁谐振电路等，体积大且安装复杂。光电式位置传感器的体积也较大，尤其是正弦型位置传感器，价格昂贵、结构可靠性差。霍尔磁敏式位置传感器的体积小、使用方便，但往往存在一定程度的磁不敏感区且位置检测的分辨率较低。外置式传感器增大了电机体积及成本，不能适应高温、高湿、污浊空气等恶劣的工作环境，更不适合一些需要微型控制的场合。外置式传感器使电机连线增多，抗干扰性能变差。考虑到高危、航空、航天等特殊场合电机的余度控制问题，永磁同步电机无外置传感器控制技术日益受到研究者的关注。

无传感器是指无须借助光电编码器等物理传感器，通过对电机终端电气信号

的处理间接获得精确的转子位置及速度信息。这样，永磁同步电机的速度、位置估计问题可以转化为非线性系统状态观测器的设计与应用问题。

非线性系统状态观测器的研究背景是近似线性化方法日益显示出其不足。近似线性化方法将系统在选定的某一平衡点处加以近似线性化，当系统实际状态偏离设计中选定的平衡状态甚远时，控制效果会大大削弱甚至起相反作用；而现代数学、控制科学以及计算机技术的发展为非线性系统及其状态观测器设计提供了客观条件，特别是微分几何理论在非线性系统的应用，使人们能够从数学的角度对非线性系统开展普遍意义上的研究。

本书是作者近几年对非线性观测器设计以及在永磁同步电机速度、位置状态估计方面研究工作的总结。第 1 章介绍永磁同步电机调速系统的基本工作原理及控制策略与技术基础，阐述转子信息估计的技术体系、关键技术及发展趋势。第 2 章围绕非线性系统能观性与构造非线性状态观测器的关系，应用微分几何理论研究非线性系统能观性的若干概念，分析永磁同步电机系统局部弱能观性及全局能观性，介绍非线性状态观测器的基本理论及主要设计方法。永磁同步电机转子磁链定向全阶模型是非弱能观及非全局能观的，因此直接基于此动态方程无法应用非线性观测器获取转子位置及速度信息。其降阶模型方程是局部弱能观及全局能观的，这为应用非线性观测器重构转子状态信息提供了必要的理论依据。第 3 章应用非线性系统流形变换方法设计有确定模型的一般高阶非线性系统的状态观测器，通过构造适当的非线性映射，使变换后的系统具有完全可观测的线性等价形式或有利于构造收敛观测器的具有一定规范型的等价形式，并给出一般非线性系统方程的矩阵描述形式、确定各阶 Taylor 系数矩阵的方法以及单输入单输出系统化为二次能观规范型的变换矩阵。第 4 章探讨一般非线性系统基于扰动的滑模观测器设计的基本方法：如果非线性系统经过坐标变换或输入输出浸入等方法能使其化为线性部分能观的特殊系统，则滑模观测器的设计问题就转化为输出反馈的滑模变结构控制系统的设计问题。基于扰动滑模观测器的思想设计建立在 α - β 坐标系上正弦波无刷直流电机的永磁转子的位置及速度状态观测器，考虑具有变截止频率相位补偿策略及自适应转速估计的具体技术指标。第 5 章基于对永磁同步电机转子磁链定向系模型方程的能观性分析，设计全局能观降阶子系统基于非线性坐标变换后能观规范型的高增益观测器，研究适用于永磁同步电机模型方程非线性观测器设计的坐标变换方法，设计三类内核形式的高增益速度观测器并对比分析其性能特点；转子位置估计采用基于直轴电流微分插值校正方法，结合所提出的高增益速度观测器算法，重点分析两套估计算法结合到一起的相互收敛校正机制。第 6 章应用灰色系统理论和支持向量机方法研究一类基于有限样本数据序列关联与泛化的转子信息估计问题，提出基于支持向量机的分类细化特性曲线区，

提高用灰色 GM(1,1)预测建模数据的指数光滑度,改善转子信息估计精度的灰色近似支持向量机分类预测算法。电流控制器对位置及速度估计算法或状态观测的适应性问题是一个较新的研究领域。从状态估计与控制的内在联系来看,一方面需要控制的精确性,即实测电流准确跟踪指令电流,永磁转子实现空间自同步精确定位,位置/速度估计单元与控制指令生成单元组成的闭环反馈系统稳定协调运行;另一方面需要控制的平稳性,即电机出线端电流平滑,除基频以外谐波成分较少。据此,第7章基于电流控制器对状态观测适应性的思想研究比例积分电流控制器以及预测电流控制器的主要性能,分析电流控制器设计中误差电流低频及高频反馈成分对预测电流控制器稳定性及指令电流跟踪性能的影响。具体研究一类适应于永磁同步电机无传感器矢量控制(PMSM sensorless vector control, PMSM-SVC)系统,能对电机终端电流跟踪性能及频谱分布进行有效控制的小波控制器设计。第8章针对永磁同步电机无传感器矢量控制稳定性及可靠性对电流调节环节的性能需求,分析并设计两类对终端响应电流时频域进行改进的小波控制器。多分辨率小波 PID(multi-resolution wavelet base PID, MRW-PID)控制器通过对偏差信号的多分辨率分析,在不同尺度上解析出信号低频趋近系数及中高频细节系数,能够实现控制器带宽对观测器带宽的动态匹配,对改善系统状态估计的动态特性具有显著作用;多分辨率小波预测电流(multi-resolution wavelet based predictive current controller, MRW-PCC)控制器在预测电流控制器前端相应频率成分提取环节采用小波分辨率分析方法,在保证低频段能量分布集中的前提下具有一般数字滤波器的平坦通频特性,且具有较小相位延迟,可显著抑制状态估计的高频发散,提高了稳态过程状态估计的精度及稳定性。

本书的出版得到了国家重点基础研究发展计划项目(编号:2015CB755805)、国家自然科学基金项目(编号:61074707)的联合资助。

由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,恳请专家、读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 永磁同步电机无位置/速度传感器技术的发展	1
1.1 永磁同步电机调速系统及其发展现状	1
1.1.1 永磁同步电机的基本结构及工作原理	1
1.1.2 永磁同步电机调速系统的组成及发展	3
1.1.3 永磁同步电机调速系统的控制技术	4
1.2 永磁同步电机位置及速度估计方法研究现状	7
1.2.1 位置及速度估计的基本技术体系	8
1.2.2 位置及速度估计所涉及的关键技术	13
1.2.3 永磁同步电机无传感器控制的发展方向	16
1.3 本书主要内容	17
第 2 章 非线性状态观测器理论基础及永磁同步电机系统能观性分析	19
2.1 引言	19
2.2 非线性状态观测器理论基础	20
2.2.1 非线性状态观测器的基本概念	20
2.2.2 非线性状态观测器的设计方法	20
2.3 基于微分几何理论的永磁同步电机能观性分析	25
2.3.1 微分几何数学方法简介	25
2.3.2 非线性系统能观性基础	29
2.3.3 永磁同步电机系统局部能观性分析	30
2.3.4 永磁同步电机系统全局能观性分析	34
2.4 非线性系统能观性与构造状态观测器关系探讨	36
2.4.1 观测器存在性定理	36
2.4.2 数值仿真算例	37
2.5 本章小结	39
第 3 章 基于流形变换的非线性观测器设计	40
3.1 问题描述	40
3.2 自治系统的流形变换	42
3.2.1 系统的矩阵化描述	42

3.2.2	目标系统选定及相应流形变换	44
3.3	单输入单输出系统二阶流形变换	46
3.3.1	二次等价系统及其流形变换	46
3.3.2	线性部分能观测系统的正则形	48
3.3.3	线性部分不能观测系统的正则形	50
3.4	正弦波无刷直流电机基于流形变换观测器设计的初步展望	52
3.5	本章小结	53
第 4 章	基于非线性滑模观测器的永磁同步电机虚拟传感器设计	54
4.1	引言	54
4.2	滑模变结构控制原理	54
4.2.1	基本概念	55
4.2.2	鲁棒性及自适应性分析	58
4.2.3	静止逆变器实例仿真	60
4.3	基于扰动的滑模观测器设计	62
4.3.1	基本原理	62
4.3.2	设计方法	63
4.3.3	旋转式倒立摆扰动 SMO 设计	65
4.4	永磁同步电机虚拟位置/速度传感器设计	71
4.4.1	永磁同步电机简介	72
4.4.2	虚拟传感器设计	73
4.4.3	基于虚拟传感器的矢量控制仿真实验	78
4.5	本章小结	93
第 5 章	非线性高增益观测器设计及其在永磁同步电机位置与速度估计的应用	95
5.1	引言	95
5.2	NTOCF-HGO 设计原理及结论	96
5.2.1	坐标变换设计基础	96
5.2.2	观测器设计及分析	99
5.2.3	算例数值仿真结论	103
5.3	基于 NTOCF-HGO 的位置及速度估计	105
5.3.1	永磁同步电机观测器设计及内核验证	105
5.3.2	速度估计及自适应增益律设计	112
5.3.3	位置估计及算法交联收敛证明	114
5.3.4	参数摄动状态估计鲁棒性分析	118
5.4	永磁同步电机无位置传感器运行仿真及实验	119

5.4.1	PMSM-SVC 系统仿真及性能分析	119
5.4.2	PMSM-SVC 物理实验及性能分析	128
5.4.3	本案优势及算法外环控制改进方向	130
5.5	本章小结	131
第 6 章	基于灰色近似分类支持向量机预测的永磁同步电机位置及速度估计	132
6.1	引言	132
6.2	理论基础	133
6.2.1	灰色预测基本理论及算法	133
6.2.2	近似分类支持向量机算法	138
6.3	转子位置及速度预测有效灰关联因子选定	143
6.3.1	永磁同步电机控制系统因子集组成及分类	143
6.3.2	SGMPH-15A1A2B 型电机灰关联曲线测定	144
6.4	转子位置及速度灰色预测一般原理及算法步骤	146
6.4.1	转子位置实时灰色预测算法	146
6.4.2	转子速度实时灰色预测算法	147
6.4.3	仿真实验结论	148
6.5	引入近似分类支持向量机算法的转子位置信息提取	151
6.5.1	基于磁特性曲线相关度的分类方案	151
6.5.2	有限元分析法磁特性曲线簇样本数据获取	152
6.5.3	PSVMC-GMP 算法设计及仿真实验	156
6.6	本章小结	161
第 7 章	电流控制器对观测算法适应性分析及控制器改进设计	162
7.1	引言	162
7.2	估计算法与系统其他要素关联性概念	163
7.2.1	PMSM-SVC 关联建模	164
7.2.2	PMSM-SVC 关联分析	168
7.3	电流控制器性能研究及其对估计算法适应性分析	170
7.3.1	PMSM-PID 电流控制器特性	170
7.3.2	PMSM-PCC 电流控制器特性	176
7.3.3	控制器对观测器适应性比较及仿真验证	187
7.4	本章小结	193
第 8 章	基于多分辨率小波分析的速度/位置估计预测电流控制器设计	194
8.1	引言	194
8.2	适应于 PMSM-SVC 两类小波控制器设计	194

8.2.1	小波控制器设计的基本原理及目的	194
8.2.2	小波基函数及分解级数选取原则	201
8.2.3	MRW-PID 控制器设计及分析	205
8.2.4	MRW-PCC 控制器设计及分析	207
8.3	基于小波硬软阈值折中消噪的观测器前置滤波	210
8.3.1	小波阈值消噪算法原理及步骤	211
8.3.2	小波硬软阈值折中消噪算法	212
8.3.3	小波硬软阈值折中消噪算例	212
8.4	改进后的 PMSM-SVC 对比仿真实验结果及分析	214
8.5	本章小结	218
参考文献		219

第 1 章 永磁同步电机无位置/速度传感器技术的发展

近年来,随着具有高磁能积稀土永磁材料技术、电力电子变换技术以及数字信号处理芯片技术的快速发展,利用电子换相代替机械换相的永磁同步电机交流调速控制系统已经在工业、军事等领域得到了广泛应用。常规的永磁同步电机驱动系统需要外置机械位置传感器来获取转子位置及速度信息以实现永磁同步电机的自同步驱动,但从电机的结构空间、环境适应性、可靠性、集成化及系统成本等方面考虑,外置式传感器的存在一定程度上限制了其进一步普及与应用,因此,永磁同步电机无机械式位置传感器控制成为研究热点之一。

1.1 永磁同步电机调速系统及其发展现状

1.1.1 永磁同步电机的基本结构及工作原理

众所周知,电机是以磁场为媒介进行机械能与电能相互转换的电磁装置。宏观上,电机可以用一组麦克斯韦方程组的数学模型来描述;微观上,其满足一切由电子运动产生的磁矩效应^[1]。为了在电机内建立进行机电能量转换所必需的气隙磁场,可以有两种方法:一种是在转子绕组内通以电流产生磁场(如普通直流电机与同步电机),这种电励磁的电机既需要有专门的绕组和相应的装置,又需要不断供给能量以维持电流流动;另一种是由永磁体产生磁场,由于永磁材料的固有特性(高剩磁密度、高矫顽力及高磁能积),它经过预先磁化以后不再需要外加能量就能在其周围空间建立磁场,这既可简化电机结构又可节约能量。定子绕组通以对称三相正弦交流电时产生旋转磁势矢量 F_s ,它与转子产生的转子磁势矢量 F_r 相互作用,就产生了转子的旋转运动。

当由永磁转子组成的电动机在没有转子位置传感器及速度传感器的情况下开环运行时,只需要改变供电电源的频率便可调节电动机的转速。由于此时电动机的转速和电源频率严格保持一致,因此称这样的调速永磁电机为永磁同步电机(permanent-magnet synchronous motor, PMSM)。如果变频器供电的永磁同步电动机加上转子位置检测组成闭环控制系统,便构成自同步永磁同步电机。本书研究的对象就是由转子空间位置决定逆变器工作状态的闭环型永磁同步电机。进一步地,按照永磁同步电机气隙磁场的分布情况,本书研究的是一类气隙磁场呈正弦

分布的正弦波永磁同步电机, 简称永磁同步电机^{[2]①}。

按照永磁体在转子安装位置的不同, 永磁同步电机转子磁路结构可分为三种: 表面式永磁同步电机(surface permanent-magnet synchronous motor, SPMSM)、内置式永磁同步电机(inner permanent-magnet synchronous motor, IPMSM)及爪极式永磁同步电机。表面式永磁同步电机转子磁路结构又分为表面凸出式与表面插入式。内置式永磁同步电机转子磁路结构又分为内置径向式与内置切向式。以上介绍的典型的永磁同步电机结构径向剖面如图 1.1 所示。

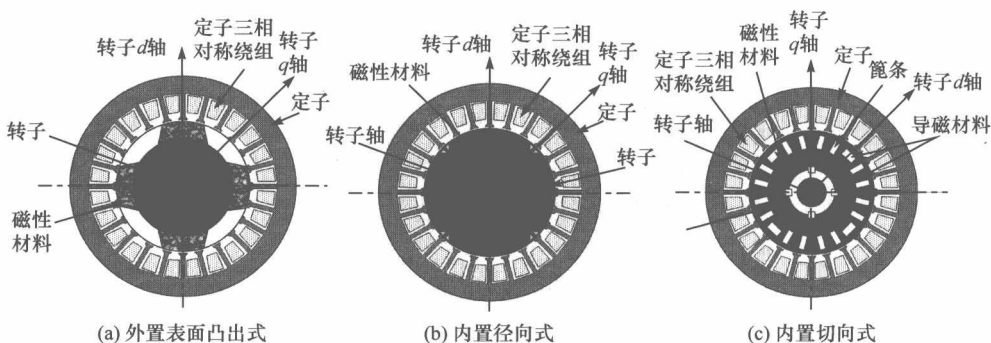


图 1.1 永磁同步电机径向剖面图(24 槽 2 对极)

对于采用稀土永磁材料的永磁同步电机, 由于永磁材料的相对回复磁导率接近 1(即永磁体的磁导率很小), 故表面式转子结构在电磁性能上属于隐极转子结构; 而内置式转子结构相邻两永磁磁极间存在磁导率很大的铁磁材料, 故在电磁性能上属于凸极转子结构。一般用建立在转子旋转坐标系上的等效直轴电感 L_d 及交轴电感 L_q 表征这种凸极性, 且通常 $L_q > 2L_d$ 。

随着人们对永磁材料的机理、构成及制造技术的深入研究, 永磁同步电机的磁性材料不断得到升级换代。最初使用的碳钢、钨钢的最大磁能积约为 2.7kJ/m^3 , 钴钢的最大磁能积约为 7.2kJ/m^3 , 20 世纪 30 年代出现的铝镍钴永磁材料的最大磁能积现可达 85kJ/m^3 , 而 50 年代出现的铁氧体永磁材料的最大磁能积可达 40kJ/m^3 。这些永磁材料的面世, 使各种微型和小型电机纷纷采用永磁体励磁。

铝镍钴永磁材料的矫顽力偏低($36\sim 160\text{kA/m}$), 铁氧体永磁材料的剩磁密度不高($0.2\sim 0.44\text{T}$), 这限制了永磁同步电机向高功率化、高性能化方向发展。直到 20 世纪 60 年代及 80 年代稀土永磁材料的发明, 才改变了永磁同步电机的应用现状。稀土永磁材料具有高剩磁密度、高矫顽力、高磁能积及线性退磁曲线等优异

① 气隙磁场呈正弦分布的永磁同步电机调速性能好、转矩脉动小, 特别适合精密伺服系统的应用, 但其控制也相对复杂, 需要获取转子较高精度的连续位置信息; 而气隙磁场呈矩形分布的永磁同步电机具有较大的转矩纹波, 其控制仅需要知道间隔 60° 电角度的 6 个位置信息。

的磁性能,这使其特别适用用来制造电机。1967年问世的钐钴永磁材料为第一代稀土永磁材料,其最大磁能积已超过 199kJ/m^3 ;1973年问世的第二代稀土永磁材料的最大磁能积已达 258.6kJ/m^3 ;而1983年日本住友特殊金属有限公司与美国通用汽车有限公司研制成功的第三代稀土永磁材料——钕铁硼永磁材料的最大磁能积高达 431.3kJ/m^3 (见图1.2)。这些新型永磁材料的出现,使永磁同步电机的研究开发与使用达到全新的阶段,永磁同步电机正向大功率化(高转速、高转矩)、高功能化及微型化方向并行发展。目前,永磁同步电机单台容量已经超过 1000kW ,最高转速已超过 300000r/min ,最低转速低于 0.1r/min ,最小电机的外径只有 0.8mm ^[2]。

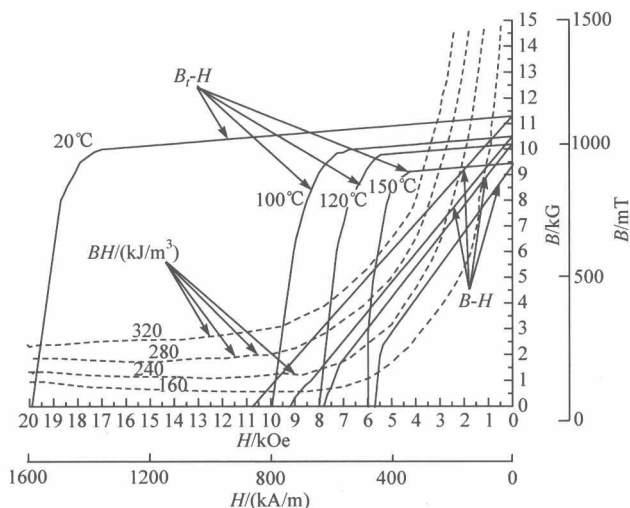


图1.2 不同温度下钕铁硼永磁材料的内禀退磁曲线和退磁曲线(NTP-256H)

1.1.2 永磁同步电机调速系统的组成及发展

高性能永磁材料的出现及永磁同步电机设计生产技术的不断提高,使由永磁同步电机本体及变频器组成的交流调速系统正逐步取代传统的直流调速系统乃至异步电机调速系统^[3]。作为高性能运动控制、高精度加工控制及高功率伺服驱动的执行单元,永磁同步电机以其调速性能好、体积小、重量轻、维护方便、运行可靠、单位功率密度大、效率高等独特优点,成为交流调速系统的首选元件。

作为一种自控变频的电动机,其控制严格取决于永磁转子位置信息的获取,也就是说逆变器功率器件导通及关断完全取决于转子空间位置信息的获取;同时,各种先进控制策略在交流调速系统的应用(如电流环、转速环及转矩环的调节)最终也要靠逆变器对精细控制信号实现较为完整的复现。从这个意义上说,逆变器单元是永磁同步电机调速系统中的最直接执行器,而永磁同步电机则成为次级执

行器，逆变单元与永磁同步电机构成一个复合执行器。从控制器集成化、一体化设计的角度考虑，可将控制器与位置及速度检测单元进行整合设计，构成复合控制器。从这一层面阐述永磁同步电机调速系统的基本组成，其构成如图 1.3 所示。

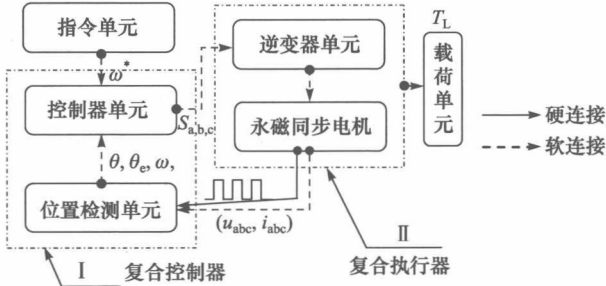


图 1.3 永磁同步电机调速系统的基本组成

指令单元用来设定期望的转速及相关操作动作；复合控制器用来检测永磁同步电机转子的空间位置及速度信息并由控制器生成逆变器主功率器件的开关信号，其中，位置与速度的获取既可通过同转子轴硬连接的物理传感器完成，也可以通过输入电机终端电气信号的软连接实时解算完成。

从交流调速系统的发展趋势来看，交流化、数字化、高度集成化日益成为主流方向。目前，国际伺服市场几乎所有的新产品都是交流伺服系统。在工业发达国家，交流伺服电机的市场占有率已经超过 80%。高速数字信号处理芯片的发展，极大地提升了交流伺服系统的数字化率。理论层面上的矢量控制策略在数控芯片的推动下已经成为控制器设计的行业标准。综合电流环、速度环、位置环的三环全数字控制产品不断涌现。数字信号处理芯片的应用使软件伺服技术成为可能。各种现代控制理论先进算法(如最优控制、人工智能控制、模糊控制、自适应控制、滑模变结构控制、预测控制等)得以在调速伺服系统中获得实际应用。同时，伺服系统控制器的集成化也大大拓展了交流伺服系统的应用范围，控制器的集成化不仅体现在速度伺服单元与位置伺服单元的集成化上，也体现在控制单元与位置及速度反馈单元的集成化上^[4,5]。

1.1.3 永磁同步电机调速系统的控制技术

永磁同步电机调速系统的控制策略是决定其性能优异的关键组成部分。目前，应用在永磁同步电机调速伺服系统的控制技术主要有如下几种。

1. 矢量控制技术^[6,7]

矢量控制技术是由德国西门子的 Blaschke 于 1971 年提出的，其基本思

想是先以转子磁链这一旋转空间矢量为参考坐标，将定子电流 i 分解为相互正交的两个分量：一个与转子磁链同方向，代表定子电流的励磁分量，称为直轴分量 (part of direct axis)；另一个则与励磁方向正交，代表定子电流的转矩分量，称为交轴分量 (part of quadrature axis)。然后分别对其进行独立的解耦控制，可以获得像直流电机一样良好的动态特性 (见图 1.4)。

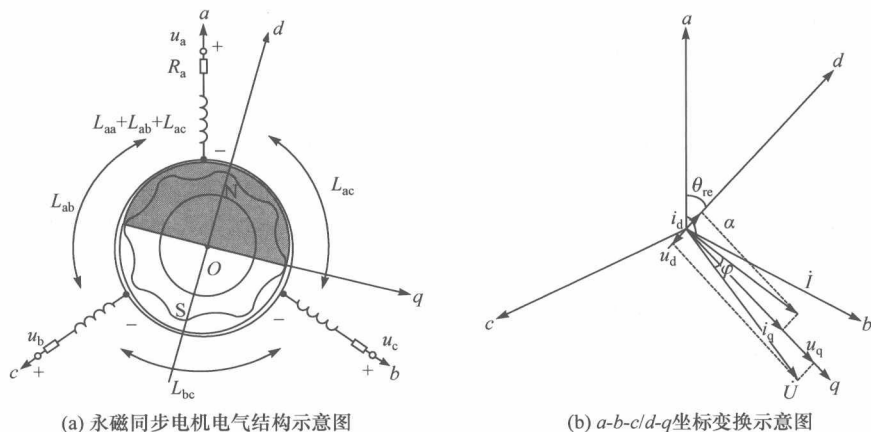


图 1.4 永磁同步电机以转子磁链定向的旋转坐标系

由于转子磁链空间定位对定子电流矢量正交分解、逆变器触发信号生成以及控制效果的实现具有决定作用，因此转子位置角信息的获取在永磁同步电机矢量控制中具有重要作用。

永磁同步电机矢量控制的核心思想在于对电流变换 ($i_{dq} \rightarrow i_{abc}$) 的调节，电流变换可以采用不同的策略，如 $i_d=0$ 策略、力矩电流比最大策略及 $\cos\varphi=1$ 策略等，不同的策略对力矩的调节方式是不同的。电流变换的概念与内部电流环控制的概念是截然不同的。内部电流环控制是在外部电流变换的基础上，直接针对逆变器功率器件及永磁同步电机本体采取的控制方式，其控制特性直接影响到外环的实际控制效果，对无传感器控制的实现具有重要的技术支撑作用。第 4、5 章将重点研究其控制方式与控制方法。

2. 直接转矩控制技术^[8-10]

直接转矩控制 (direct torque control, DTC) 是由德国的 Depenbrolk 于 1985 年提出的一种新型交流电机调速控制方法。根据电机统一理论，定子电流产生定子磁势矢量 F_s ，转子产生转子磁势矢量 F_r ，二者合成得到合成磁势矢量 F_Σ ， F_Σ 产生磁链矢量 Ψ_m 。电动机的电磁转矩 T_e 是由这些磁势矢量的相互作用产生的，即等于它们中任何两个矢量的矢量积：

$$\begin{aligned}
 T_e &= C_m (\mathbf{F}_s \times \mathbf{F}_r) = C_m F_s F_r \sin \angle(\mathbf{F}_s, \mathbf{F}_r) \\
 &= C_m (\mathbf{F}_s \times \mathbf{F}_\Sigma) = C_m F_s F_\Sigma \sin \angle(\mathbf{F}_s, \mathbf{F}_\Sigma) \\
 &= C_m (\mathbf{F}_r \times \mathbf{F}_\Sigma) = C_m F_r F_\Sigma \sin \angle(\mathbf{F}_r, \mathbf{F}_\Sigma)
 \end{aligned} \tag{1.1}$$

通过控制两磁链矢量的幅值与两磁势矢量之间的夹角就可以达到对电机转矩的瞬时控制。直接转矩控制将矢量控制中的以转子磁链定向更换为以定子磁链定向,通过转矩偏差与定子磁通偏差来确定电压矢量,没有复杂的坐标变换,在线计算量比较小,实时性比较强。直接转矩控制不需要将交流电动机与直流电动机进行比较、等效、转化等程序,不需要为解耦而简化交流电动机的数学模型。它只是在定子坐标系下分析交流电动机的数学模型,强调对电机的转矩进行直接控制,省掉了矢量旋转变换等复杂的变换和计算过程。因此直接转矩控制从诞生起,就以其新颖的控制思路、简洁明了的系统结构、优良的静态与动态性能受到人们的普遍关注。

直接转矩控制技术最初是应用到异步电机调速系统的,近几年逐渐有学者将其应用到永磁同步电机调速控制系统,其研究领域主要集中在如何改善 DTC 系统的动态及稳态性能,提高转矩响应速度,减少转矩在低速时的脉动以及如何实现永磁同步电机直接转矩控制(permanent-magnet synchronous motor direct torque control, PMSM-DTC)系统无速度传感器运行^[11-13]。

3. 非线性控制技术

从本质上说,永磁同步电机是一类非线性多变量系统,所以应用非线性控制理论研究其控制策略应该更能揭示问题的本质,控制效果也应该更好^[14]。基于微分几何理论的反馈线性化控制通过非线性状态反馈及非线性坐标变换实现系统的动态解耦与全局线性化^[15]。文献[16]应用微分几何理论实现了永磁同步电机混沌运动控制;文献[17]和文献[18]应用微分几何反馈线性化理论实现了永磁同步电机线性化解耦控制。滑模变结构控制依据系统的状态使系统的结构以阶跃方式有目的地变化。当滑动模态发生时,系统被强制在开关平面附近滑动,因此滑模控制对系统耦合、外部扰动及参数摄动等因素均不敏感,表现出良好的鲁棒性,并且滑模变结构控制不需要任何在线辨识,很容易实现^[19,20]。文献[21]和文献[22]根据矢量控制永磁同步电机调速系统的特点,设计了一种易于实现的滑模控制器(sliding mode controller, SMC),较大地提高了系统的鲁棒性与快速性,有效地改善了电机的动静态特性。自适应控制所需要的关于模型与扰动的先验知识比较少,需要在线获取这些信息,不断在系统运行过程中提取有关模型的信息,因此它对模型参数的依赖性比较小,可以克服参数变化对控制精度的影响。电机控制领域的自适应控制方法有模型参考自适应系统(model reference adaptive system, MRAS)、

参数辨识自校正控制及非线性自适应控制^[23,24]。

4. 智能控制技术

以上各种控制技术基本上是根据经典及现代控制理论提出的,其特点是依赖电机的精确模型,当模型受到参数摄动与扰动作用影响时,系统性能将受到很大的影响。一般来说,自适应控制与滑模变结构控制可在一定程度上解决这个问题,但其本质决定了它们各自有其不足之处。而智能控制能摆脱对控制对象数学模型的依赖,能够在处理不精确性和不确定性的问题中获得可处理性、鲁棒性,因此近年来智能控制得到了迅速的发展。以模糊控制及人工神经网络为代表的智能控制在永磁同步电机参数在线辨识、速度控制及电机效率优化控制等方面进行了积极的研究与探讨^[25-27]。

5. 预测控制技术^[28,29]

预测控制将人类通过对未来情况的把握来确定当前行动的能力引入控制领域。在控制领域,如何恰当地利用未来信息并因此提高控制系统的性能方面已经在理论上取得了许多引人注目的进展。在数控机床、交流伺服调速等机电领域中,可以利用未来目标值等未来信息的情况是很多的,在这种情况下,根据当前目标值,以及未来目标值与未来外部干扰等信息来共同确定当前的控制方案,无疑是一个很有价值的思路。预测伺服控制系统就是希望通过对目标信号及干扰信号的未来信息的利用来改善系统的控制性能。从结构上来看,采用预测控制技术的伺服系统就是在通常采用的控制策略的伺服系统上增加一个利用未来信息的前馈预测补偿环节,因此,可望使系统在保持原有稳定性及鲁棒性的同时,通过对未来信息的利用使系统的性能指标得到进一步改善。

1.2 永磁同步电机位置及速度估计方法研究现状

早期获得转子位置及速度信息的方法是在定、转子上加装电磁式、光电式以及霍尔磁敏式等各种外置式传感器进行检测。电磁式位置传感器有开口变压器、铁磁谐振电路等,体积大而且安装复杂。光电式位置传感器体积也较大,尤其是正弦型位置传感器,价格昂贵、结构可靠性差。霍尔磁敏式位置传感器体积小、使用方便,但往往存在一定程度的磁不敏感区且位置检测的分辨率较低。外置式传感器增大了电机的体积及成本,不能适应高温、高湿、污浊空气等恶劣的工作环境,更不适合一些需要微型控制的场合;外置式传感器使电机连线增多,抗干扰性能变差;同时考虑到高危、航空、航天等特殊场合电机的余度控制问题,永