感应电机模型预测控制

张永昌 著

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

感应电机模型预测控制

张永昌　著

机械工业出版社

模型预测控制是近些年在交流电机控制领域兴起的一种高性能闭环控制技术，具有概念简单、多变量控制和动态响应快等优点，得到了国内外学者的广泛关注。本书系统介绍了作者近年来在感应电机高性能控制方面的研究成果，包括矢量控制、直接转矩控制和模型预测控制，其中模型预测控制是全书的重点内容。本书首先介绍了感应电机高性能控制中的共性问题，包括逆变器非线性补偿、电机参数辨识和磁链观测器设计等内容，在其基础上介绍了磁场定向矢量控制、直接转矩控制等传统控制策略，在第3部分则对模型预测控制进行了详细介绍。本书突破了有限状态集模型预测控制的理论局限，提出了多矢量模型预测控制的系统思想和框架，并解决了其计算量大、权重优化设计、参数鲁棒性、稳态性能和变开关频率等问题。另外，本书还将无速度传感器控制、弱磁控制以及三电平拓扑和模型预测控制相结合，提高了模型预测控制工程应用价值。最后，本书还介绍了基于模型的设计思想和方法，实现了从概念仿真到代码生成的快速开发。

本书不仅包括理论分析和设计，还配有详细的仿真结果和经作者亲自验证过的实验结果以及大量翔实的数据图表，方便读者深入分析和验证。本书可作为电力电子与电力传动专业高年级本科生和研究生的参考书，也可供电机控制领域的科研工作者和应用开发人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

感应电机模型预测控制/张永昌著. —北京：机械工业出版社，2020.5
（电气自动化新技术丛书）
ISBN 978-7-111-64865-9

Ⅰ.①感… Ⅱ.①张… Ⅲ.①交流电机-预测控制 Ⅳ.①TM34

中国版本图书馆CIP数据核字（2020）第033656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：张俊红 责任编辑：张俊红 翟天睿
责任校对：佟瑞鑫 封面设计：马精明
责任印制：孙 炜
中教科（保定）印刷股份有限公司
2020年5月第1版第1次印刷
184mm×260mm · 14.25印张 · 276千字
标准书号：ISBN 978-7-111-64865-9
定价：59.00元

电话服务
客服电话：010-88361066
010-88379833
010-68326294
封底无防伪标均为盗版

网络服务
机 工 官 网：www.cmpbook.com
机 工 官 博：weibo.com/cmp1952
金 书 网：www.golden-book.com
机工教育服务网：www.cmpedu.com

前　言

感应电机具有容量大、调速范围宽、结构坚固耐用、维修容易等优点，在现代工业中得到了极为广泛的应用。目前，感应电机变频驱动装置正向着高转速、大容量、高效率、高可靠性以及双向能量流动方向发展，在《中国制造 2025》和“工业 4.0”中的先进制造与高端装备领域发挥着重要作用。高性能控制技术是现代交流变频系统的关键技术，其性能指标代表着装备制造领域的技术先进水平，为世界各国所竞相发展。

传统的矢量控制+空间矢量调制技术在现代交流变频系统取得了巨大成功，但级联式的控制结构以及控制和调制割裂设计的思想限制了系统的极限动态响应，难以保证系统的全局最优稳态性能。直接转矩控制虽然结构简单，但存在输出转矩脉动大、低速性能差以及开关频率不固定等问题。随着微处理器计算能力的快速提高，一些更加高级和复杂的控制理论和算法也被引入到交流传动中。模型预测控制就是近年来在电力电子和电力传动领域得到广泛关注和研究的先进控制策略之一。由于其天然的多变量控制、控制目标灵活和动态响应快以及在线优化、滚动实施等特点，模型预测控制有可能取得比现有矢量控制和直接转矩控制更优异的动、静态性能，在未来电气传动领域具有广阔的应用前景，甚至被认为是交流电机控制领域的下一代控制方法。

在国家自然科学基金（项目编号 51577003，51207003）和北京市自然科学基金（项目编号 3162012）等项目的资助下，作者近年来在交流电机模型预测控制领域进行了深入研究和探索，取得了一批原创研究成果，尤其是突破了传统单矢量模型预测控制的理论局限，提出并建立了多矢量模型预测控制的系统思想和框架，在维持传统方法优点的同时极大提高了系统的稳态性能，不仅丰富和完善了模型预测控制的理论体系，而且提高了其实用价值。

本书共有 14 章，具体各章内容安排如下：第 1~3 章是绪论和基础知识，对感应电机的数学模型和高性能电机控制中的共性问题进行了介绍；第 4~5 章介绍了传统的磁场定向矢量控制和直接转矩控制；第 6~12 章是本书的重点内容，在介绍传统模型预测控制的基础上，研究了无权重系数模型预测控制、鲁棒模型预测控制、双矢量和三矢量模型预测控制，以解决权重系数设计、参数鲁棒性、稳态性能和变开关频率等问题，最后介绍了基于无速度传感器技术和三电平拓扑的模型预测控制，提高了其实用价值；第 13 章介绍了基于模型设计思想的软件开发方法及硬件平台；第 14 章则对模型预测控制在电机控制中的前景进行展望。

本书由张永昌撰写。在撰写本书的过程中，杨海涛博士协助校对了第 4、11、12 和 13 章。另外，在作者实验室学习和工作过的研究生对本书也做出了很大的贡献，他们是张博越、白宇宁、夏波和李政学，在此一并表示感谢。

本书可供电机控制领域的科研工作者和工业实践开发人员参考，也可以作为电力电子与电力传动专业高年级本科生和研究生的参考书。由于作者水平有限，且编写时间仓促，而交流电机闭环控制尤其是模型预测控制技术仍在快速发展之中，故书中难免存在不当甚至是错误之处，敬请广大读者批评指正。

目　录

前言

第 1 部分　绪论和基础知识

第 1 章　概述 …… 1
1.1　研究背景及意义 …… 1
1.2　高性能感应电机控制策略简述 …… 2
1.2.1　矢量控制 …… 2
1.2.2　直接转矩控制 …… 2
1.2.3　模型预测控制 …… 3
1.2.4　无速度传感器控制 …… 5
1.3　本书主要内容 …… 6

第 2 章　三相感应电机数学模型 …… 9
2.1　三相静止坐标系下的数学模型 …… 9
2.2　三相系统的空间矢量描述 …… 10
2.3　两相坐标系下感应电机的数学模型 …… 13
2.4　电机参数及常用公式 …… 14
2.5　本章小结 …… 16

第 3 章　高性能电机控制中的基本问题 …… 17
3.1　逆变器非线性特性辨识与补偿 …… 17
3.2　电机参数辨识 …… 19
3.3　磁链观测器 …… 23
3.3.1　传统磁链观测方法 …… 23
3.3.2　全阶观测器 …… 24
3.3.3　转速自适应律 …… 25
3.3.4　观测器的离散化 …… 26
3.3.5　增益矩阵设计 …… 28
3.4　本章小结 …… 32

第 2 部分　传统控制策略

第 4 章　磁场定向矢量控制 …… 34
4.1　基本原理 …… 34
4.2　电流调节器设计 …… 35
4.2.1　线性 PI 调节器设计 …… 36
4.2.2　复矢量调节器设计 …… 38
4.2.3　离散域调节器设计 …… 40
4.3　外环调节器设计 …… 42
4.3.1　磁链环设计 …… 42
4.3.2　转速环设计 …… 43
4.4　仿真和实验结果 …… 44
4.4.1　仿真结果 …… 44
4.4.2　实验结果 …… 46
4.5　本章小结 …… 49

第 5 章　直接转矩控制 …… 50
5.1　直接转矩控制概述 …… 50
5.2　单矢量直接转矩控制 …… 50
5.2.1　基本原理 …… 51
5.2.2　仿真结果 …… 52
5.2.3　实验结果 …… 53
5.3　双矢量直接转矩控制 …… 54
5.3.1　基本原理 …… 54
5.3.2　仿真结果 …… 56
5.3.3　实验结果 …… 57
5.4　考虑转速影响的双矢量直接转矩控制 …… 58
5.4.1　转速变化对转矩斜率的影响 …… 58
5.4.2　新型占空比计算方法 …… 59
5.4.3　仿真和实验结果 …… 61
5.5　本章小结 …… 64

第 3 部分　模型预测控制

第 6 章　传统模型预测控制 …… 65
6.1　模型预测控制概述 …… 65
6.2　模型预测转矩控制 …… 66
6.2.1　基本原理 …… 66

6.2.2 计算简化 …… 67
6.2.3 控制延迟补偿 …… 68
6.2.4 起动电流抑制 …… 68
6.2.5 仿真和实验结果 …… 69
6.3 本章小结 …… 71

第7章 无权重系数模型预测控制 …… 72
7.1 模型预测磁链控制 …… 72
7.1.1 基本原理 …… 72
7.1.2 仿真和实验结果 …… 74
7.1.3 磁链控制与转矩控制的实验对比 …… 76
7.2 级联式模型预测控制 …… 78
7.2.1 级联模型预测控制 …… 78
7.2.2 广义级联模型预测控制 …… 79
7.2.3 仿真对比 …… 80
7.2.4 实验对比 …… 82
7.3 本章小结 …… 87

第8章 鲁棒模型预测控制 …… 88
8.1 鲁棒模型预测控制策略概述 …… 88
8.2 基于超局部模型的无模型预测电流控制 …… 89
8.3 基于扩张状态观测器的无模型预测电流控制 …… 90
8.4 实验对比 …… 92
8.4.1 动态性能 …… 92
8.4.2 稳态性能 …… 93
8.4.3 参数鲁棒性 …… 94
8.5 本章小结 …… 100

第9章 双矢量模型预测控制 …… 101
9.1 双矢量模型预测控制介绍 …… 101
9.1.1 传统双矢量预测转矩控制 …… 101
9.1.2 改进双矢量预测转矩控制 …… 102
9.1.3 广义双矢量预测转矩控制 …… 102
9.1.4 广义双矢量预测磁链控制 …… 104
9.1.5 开关点优化预测磁链控制 …… 105
9.2 仿真和实验结果 …… 106
9.2.1 仿真结果 …… 106
9.2.2 实验结果 …… 112
9.3 性能比较和量化分析 …… 117
9.3.1 双矢量 MPC 之间的对比 …… 117
9.3.2 双矢量 MPC 与传统方法的对比 … 118
9.4 本章小结 …… 122

第10章 三矢量模型预测控制 …… 123
10.1 三矢量模型预测控制概述 …… 123
10.2 开关点优化模型预测磁链控制 …… 123
10.2.1 整体框图 …… 123
10.2.2 矢量选择 …… 124
10.2.3 矢量占空比优化 …… 124
10.2.4 仿真结果 …… 125
10.2.5 实验结果 …… 126
10.3 基于 SVM 的模型预测磁链控制 …… 127
10.3.1 整体框图 …… 127
10.3.2 电压参考值计算 …… 127
10.3.3 基于固定矢量合成的 SVM …… 128
10.3.4 仿真结果 …… 130
10.3.5 实验结果 …… 131
10.4 统一多矢量模型预测控制 …… 132
10.4.1 控制框图 …… 132
10.4.2 定子磁链无差拍控制 …… 132
10.4.3 单矢量 MPC …… 133
10.4.4 双矢量 MPC …… 134
10.4.5 广义双矢量 MPC …… 135
10.4.6 仿真结果 …… 136
10.4.7 实验结果 …… 138
10.5 本章小结 …… 143

第11章 无速度传感器运行及弱磁控制 …… 144
11.1 无速度传感器控制 …… 144
11.1.1 基本原理 …… 145
11.1.2 仿真结果 …… 149
11.1.3 实验结果 …… 150
11.2 弱磁区模型预测控制 …… 152
11.2.1 弱磁控制概述 …… 152
11.2.2 恒功率区弱磁控制 …… 152
11.2.3 恒电压区弱磁控制 …… 156
11.3 本章小结 …… 159

第12章 三电平模型预测控制 …… 160
12.1 三电平逆变器原理 …… 160

12.1.1 数学模型 …… 160
12.1.2 中点电位波动原因 …… 162
12.1.3 调制策略 …… 164
12.2 三电平模型预测转矩控制 …… 171
12.2.1 状态预测 …… 172
12.2.2 目标函数 …… 172
12.2.3 仿真结果 …… 173
12.3 三电平模型预测磁链控制 …… 175
12.3.1 基本原理 …… 175
12.3.2 优化矢量表 …… 176
12.3.3 权重系数调试 …… 178
12.3.4 实验验证 …… 178
12.3.5 无速度传感器运行 …… 183
12.4 基于 SVM 的模型预测控制 …… 187
12.4.1 模型预测磁链控制 …… 187
12.4.2 模型预测电压控制 …… 191
12.4.3 实验结果对比分析 …… 195
12.5 本章小结 …… 199

第 13 章 感应电机调速系统设计过程 …… 200
13.1 硬件设计 …… 200
13.2 软件设计 …… 201
13.2.1 仿真框架 …… 202
13.2.2 实验框架 …… 203
13.2.3 代码自动生成及程序执行时间 …… 204
13.3 本章小结 …… 205

第 14 章 展望 …… 206

参考文献 …… 207

第1部分　绪论和基础知识

第1章　概　　述

1.1　研究背景及意义

据统计，我国60%左右的用电量由电动机消耗，其中多数为感应电机。感应电机结构简单，可靠性高又易于维护，能够适应各种复杂的环境，在各种工业领域得到广泛应用。随着电力电子器件、数字处理器等技术的发展，变频控制技术已成为提高电机运行效率和传动性能的主要技术手段。

在过去几十年，由于交流调速系统性能以及效率的提升，其应用领域和范围越来越广泛。高性能感应电机调速控制系统不仅能满足节电需求，提高能源效率，还可以适应工业生产的工艺需求，提高我国的自动化水平。目前变频器已渗透到各行各业，其主要应用目的为节能以及工艺控制需求。对于风机水泵等性能要求一般的节能调速场合，采用简单的变压变频（VVVF）即可满足需求。但是很多工业应用场合对转速和转矩的控制准确度以及响应时间都有严格要求，比如交通运输行业的电力牵引、冶金行业的轧钢系统、建筑行业的电梯驱动等。随着现代工业应用对调速系统的性能以及控制准确度要求越来越高，变频系统难以通过单纯提升硬件设备的性能来满足，更通用和灵活的做法是从控制即软件的角度予以考虑解决，因此非常有必要在传统控制策略的基础上研究更为先进的控制方案。

高性能调速控制系统的设计可以视为求解一个优化问题，通常情况下，可能包含以下几个重点优化目标[1]：

1）快速的动态响应以及尽量小的稳态跟踪误差；

2）较高的运行效率以节约能源；

3）较小的电流THD及谐波以满足相关法规要求；

4）电磁辐射以及电磁兼容问题以满足法规要求；

5）共模电压抑制以提高系统的安全性以及运行寿命等；

6）在整个调速范围内均能满足以上要求。

目前，变频器行业在国内的市场规模逐年扩大，市场容量已超过500亿元。从品牌数量上来看，内资品牌占70%以上，但市场份额却不到30%，尤其在高性能应用场合，内资品牌的技术积累与国外品牌还存在一定的差距，因此深入研究变频驱动技术有助于提升我国在该产业的竞争力。

1.2 高性能感应电机控制策略简述

1.2.1 矢量控制

当前主流的高性能闭环调速系统控制方法主要有矢量控制（Field Oriented Control，FOC）[2] 和直接转矩控制（Direct Torque Control，DTC）[3,4]。矢量控制通过磁场定向将定子电流分解成励磁分量和转矩分量，然后采用比例积分（Proportional Integral，PI）调节器在同步旋转坐标系上对其分别进行调节，最后利用空间矢量调制（Space Vector Modulation，SVM）等脉宽调制策略合成参考电压矢量。FOC 能取得较好的动静态性能，在中小功率场合得到了广泛的应用，但是其性能严重依赖于调节器参数的整定。由于传统的线性 PI 调节器加前馈解耦的结构存在着诸多缺陷，尤其是当系统的开关频率较低或者电机转速较高时，系统甚至不能稳定运行[5,6]。为解决这一问题，国内外不少学者采用包括系统控制延迟在内的精确复矢量数学模型来设计复矢量电流调节器[7,8]，但是调节器参数基于连续域设计依然存在进一步改进的空间。考虑到实际数字控制系统的离散化特性，参考文献［9］直接在离散域设计电流内环调节器，保证了系统具有良好的稳定裕度与动态特性。在矢量控制中逆变器环节仅仅被当作一个增益系统，这种上层控制算法与底层 PWM 独立分离设计的结构，使得系统的整体性能存在进一步优化的空间。这是因为不同的 PWM 策略对应不同的稳态性能以及逆变器开关损耗[10]，由于系统多个控制目标之间相互耦合，单纯地从 PWM 层面来优化系统的性能很难得到大幅度的改进。因此，如果在上层控制算法中就考虑逆变器不同开关状态组合对系统整体性能的影响，则能够在更大的可行解空间内获取更优的控制性能。

1.2.2 直接转矩控制

不同于 FOC，DTC 没有独立的 PWM 环节，它将电机与逆变器当作一个整体，直接根据磁链以及转矩的误差信号选择合适的电压矢量作用于电机。与 FOC 相比，DTC 能够以简洁的控制结构实现快速的动态性能。但是由于 DTC 中的启发式开关表以及 Bang-Bang 控制器只考虑了误差方向而未精确考虑误差的大小，因此必须依靠高采样率才能将稳态性能维持在可接受的水平[11,12]。为解决这些问题，一些改进的 DTC 通过引入 SVM 来提高稳态性能[13,15]。但是这类方法大都使得系统更加复杂并且使用了更多的电机参数，因而失去了 DTC 结构简单、参数鲁棒性强等优点[14]。另外一类改进方法则在维持 DTC 基本结构的同时引入占空比控制的概念[16-19]，即在一个控制周期内作用两个电压矢量，通常为一个非零矢量和一个零矢量，然后再根据某种占空比优化原则来计算矢量的最优作用时间。最近在二矢量的基础上又发展出基于三矢量的控制策略[12,20]，即在一个控制周期内采用两个非零矢量和一个零矢量来进一步提高稳态性能。但值得注意的是，这些方法中的矢量组合类型始终固定不变，例如这类矢量组合中的某个电压矢量始终固定为零矢量，但是零矢量的选择并非经过严格的理论化设计，只是对 DTC 的基本矢量表进行简单拓展得来的，因而难以保证多矢量序列的最优性。总体来说，多矢量 DTC 从一定程度上解决了基本 DTC 存在的开关频率不固定、稳态性能差的问题，但是在矢量选择上依然采用与基本 DTC 类似的启发式开关表，缺乏系统化的最优选择机制，因此系统的控制性能有待进一步提高。

1.2.3　模型预测控制

模型预测控制（Model Predictive Control，MPC）是 20 世纪 70 年代后期在工业过程控制领域中出现的一类新型计算机控制算法[21]，由于其具有原理简单、鲁棒性好、多变量控制和容易处理非线性约束等优点，一出现就受到国内外工程界的重视，目前已经在全球炼油、化工等行业中得到了广泛应用，被视为流程工业实现节能减排、提高生产率、降低能耗的关键技术[22]。MPC 算法的核心包括：可预测未来的动态模型，在线反复优化计算并滚动实施的控制作用和基于模型误差的反馈校正。其本质是求解一个开环最优控制问题，因此计算量较大，过去仅在石油化工等时间常数较大的过程工业中得到应用。而电力电子装置采用高速导通和关断的电力电子器件来实现电能的变换，通常需要在微秒级别完成控制算法，对实时性要求很高，因此过去 MPC 在电力电子控制领域鲜有应用。直到近年来，随着微处理器计算能力的提高，MPC 在电力电子控制领域才引起了国内外学者的广泛关注[23]。

1983 年德国学者 Holtz 教授首次将 MPC 的思想应用于感应电机高性能闭环控制并取得了成功，这是电力电子领域关于 MPC 研究的最早文献，研究结果在当年的国际电力电子会议（IPEC）上发表[24]。论文结果表明，MPC 能够以很低的开关频率（额定转速时开关频率仅为 170 Hz[25]）实现快速的动态响应，同时具有优异的稳态性能。尽管 MPC 原理简单，并且具有很好的性能，但计算量较大。受制于当时的硬件条件，在很长一段时间内 MPC 并未在电力电子领域得到广泛关注和研究。直到 2000 年以后，在智利学者 Jose Rodriguez 和德国学者 Ralph Kennel 等人的推动下，MPC 在电力电子领域的研究重新兴起并迅速成为研究热点。IEEE 在工业电子期刊和多个国际会议上组织了多次关于 MPC 的专题，甚至专门成立了关于 MPC 在电力电子与电机控制中应用的国际研讨会，起名为 Symposium on Predictive Control of Electrical Drives and Power Electronics（PRECEDE），自 2011 年开始每两年举办一次，目前已经举办了四届，极大地推动了 MPC 在电力电子领域的研究和应用。目前，MPC 被广泛认为是继矢量控制和直接转矩控制之后最有可能在电力电子和电机控制领域得到广泛应用的第三种高性能控制策略。

按照对电力电子变换器开关状态控制的直接程度，一般来讲可以把 MPC 分为两类[26]，即连续控制集 MPC（Continuous-Control-Set MPC，CCS-MPC）和有限控制集 MPC（Finite-Control-Set MPC，FCS-MPC）。第一类方法采用 MPC 理论设计控制器来得到指令电压或占空比信号，然后借助 PWM 分解得到开关驱动信号[27,28]，计算复杂而且稳态性能受制于 PWM。目前这类方法主要在矢量控制框架下实现，利用 MPC 来设计电流控制器，可以取得比传统 PI 控制更好的快速性能和解耦效果。但是 MPC 只是作为一个子环节替代矢量控制中传统的 PI 控制器，并没有用于整个控制系统的优化设计，从而没有充分发挥 MPC 在处理约束非线性控制系统和多目标同时优化方面的优点。另外，由于底层脉冲依然采用 PWM 环节，因此稳态性能相比矢量控制难以有本质的超越。

有限状态集 MPC 承认并充分利用逆变器存在有限个开关状态这个事实，从而把满足优化目标的搜索范围缩小到所有可能的开关状态，其中使得目标函数最小的开关状态即为最佳开关状态[29]。该目标函数可以包含任何非线性约束，比如开关频率降低[30]、共模电压抑制[31] 等，具有很强的扩展性和灵活性。通过模型预测和目标函数评价就可以选出满足优化目标要求的最佳开关矢量。目前 FCS-MPC 已经在多个电力电子领域得到广泛研究和应

用，是一种当前受学术界和工业界广泛关注的控制方法。

虽然 MPC 在电压矢量选择上更加有效，但是逆变器的离散开关状态毕竟有限，只在一个控制周期作用单个电压矢量使得其稳态性能仍然不足。另外与 DTC 类似，其开关频率随着系统运行状态的改变而改变，而在实际应用中，受限于散热设计等原因，控制系统必须经过严格的测试以确保在任何状态下最大开关频率均不会超过允许值，这给实际应用带来很多麻烦。与 DTC 类似，在 MPC 中也可以引入占空比控制的概念。但是现有的一些方法只是简单地将 DTC 中双矢量的概念引入到 MPC[32,33]，虽然取得了一定的性能提升，但是很显然 MPC 结构的柔性使得 MPC 能够在更广的可行解空间内取得更大的性能提升。也就是说在 MPC 中，矢量的选择方法、矢量作用时间的优化以及它们的处理顺序均存在着优化空间，仔细研究这些因素对系统性能以及计算复杂度的影响是获得优化性能的关键。另外，由于传统 MPC 的权重系数依然缺乏有效的理论设计方法[1]，但是权重系数对 MPC 的性能又有着重要的影响，因此如何确定权重系数是 MPC 在实际应用中必须解决的一个难点。此外，有限状态集 MPC 多采用一拍步长预测，当采用多步预测时，则有可能获得更好的稳态性能[34]，或者进一步降低开关频率，但随之也会带来计算量过大和在线实施困难等问题。

国内近年来针对电力电子 MPC 也展开了研究，在权重系数设计、计算量简化、稳态性能提高、多步长 MPC 等方面取得了诸多进展。

针对权重系数设计，MPC 用于感应电机的磁链和转矩控制时，由于目前尚缺乏通用的理论设计方法来确定磁链和转矩的权重系数，因此为保证调速系统在不同的运行点具有良好的动静态性能，在实际应用中需要通过大量的仿真或实验来确定权重系数的大小。为此，国内学者提出一种无需权重系数设计的改进 MPC[35,36]。通过深入推导磁链和转矩之间的解析关系，将定子磁链幅值和电磁转矩的同时控制转换为等效的定子磁链矢量的控制，从而消除了传统方法中繁琐的权重设计，而且算法简单，容易实现。

传统的 FCS-MPC 通过枚举法来选择最优电压矢量，需要对所有电压矢量作用下的系统动态行为进行预测，因此算法的计算量较大，不利于在线实施。通过分析无差拍控制和 MPC 之间的内在联系，首先按照无差拍控制得到参考电压，然后选择离参考电压矢量最近的电压矢量为最优矢量，从而得到更加本质的快速矢量选择方法，研究结果在 PWM 整流器和永磁电机中得到应用[37-39,40]。

针对稳态性能提高，传统 FCS-MPC 由于在一个控制周期只施加一个电压矢量，因此不可避免地存在采样频率高、开关频率不固定等缺点。为解决该问题，国内学者提出并建立了多矢量 MTC 的系统创新方法，先后提出了非零矢量+零矢量的二矢量 MTC、矢量选择和矢量时间同时优化的改进二矢量 MPC、基于任意双矢量的广义 MPC 和三矢量 MPC 等改进方法[41-44]，能够以降低一半的采样频率获得 30%以上的稳态性能提升，同时开关频率恒定且更低，提高了系统效率。

针对多步长 MPC，国内学者在三电平驱动感应电机控制上进行了积极探索，验证了多步长 MPC 在降低开关频率和提高稳态性能方面的有效性[45]，但主要以仿真验证为主，尚缺乏实验的验证。

总之，国外在电力电子模型预测控制领域起步较早，研究也相对比较深入，基本上涵盖了 AC-DC、DC-AC、DC-DC 和 AC-AC 等四种电能转化方式的各个领域，应用包括新能源发电、电能质量、交流传动、UPS 等，拓扑从普通的两电平拓扑到级联 H 桥、飞跨电容多电

平、三电平、矩阵变换器、Z 源变换器等复杂拓扑，功率从几十瓦的直流电源到兆瓦级的交流传动，可以说 MPC 已经渗透到电力电子的几乎每一个应用领域。国内在该领域起步相对较晚，但在中国巨大电力电子市场的推动和众多科研单位及工作者的努力下，在各个研究方向和应用领域都有涉足。可以说，在 MPC 的研究广度方面国内外差异并不大，但在研究深度和推广应用方面，国内与国外还有较大差距。尤其是在低开关频率大功率电力电子应用领域差距较大，国内基本上还处于跟踪研究阶段；而国外在该方向研究时间较长且较深入，并在工业产品中得到应用。

1.2.4　无速度传感器控制

无速度传感器技术具有降低系统硬件成本、增强系统环境适应性和提高系统可靠性等优点[46-50]，在现代交流调速系统中得到了广泛应用，包括 FOC[51,52] 和 DTC[3,53]，但将其与 MPC 结合在一起的研究尚不多见。为了促进 MPC 在电机传动中的实用化，必须研究适用于 MPC 的无速度传感器技术。相比应用于 FOC 和 DTC 的无速度传感器技术，用于 MPC 的无速度传感器技术存在一些特殊问题需要解决。MPC 的模型预测中用到电机转速的信息，而转速信息又来自速度观测器，为此对速度估计和模型预测都提出了更高的要求。目前无速度传感器算法较多，其中最简单的一种是直接计算法。其基本原理是电机的转速 ω_r 等于同步电角频率 ω_e 与转差频率 ω_{sl} 的差，但是这种直接计算法对参数准确性的依赖较高。在这种方法中，为避免速度估计误差对磁链观测的影响，可采用电压模型磁链观测器。但是这种方法存在直流偏置以及初始值设置问题，并且在低速运行时对定子电阻值特别敏感[54-57]。

模型参考自适应法是当前应用比较广泛的一种速度估算方法，其基本原理如图 1.1 所示。这种方法也可以分为两种：第一种方法是同时使用不包含转速的参考模型以及包含转速的可调模型对同一变量进行观测，并利用二者的误差构成转速自适应率对转速进行估计[58-60]；第二种以电机本体作为参考模型，其典型代表是速度自适应全阶观测器[50,61,62]，如图 1.2 所示。在第一种方法中，由于参考模型不可避免地受到电机参数准确度的影响，因此以电机本体作为参考模型的准确度从理论上要比第一种方法的准确度要高。另外，由于全阶观测器中引入了电流闭环反馈环节，因此其观测准确度以及参数鲁棒性相比开环观测器均有一定程度的提高。但是全阶观测器系统的实现比较复杂，在实际应用中必须解决以下几个问题：

1）为确保系统具有良好的稳定性和收敛速度，必须设计合适的反馈矩阵[62]。

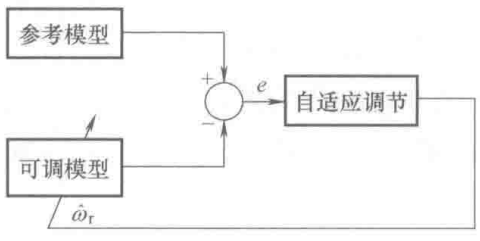


图 1.1　模型参考自适应结构图

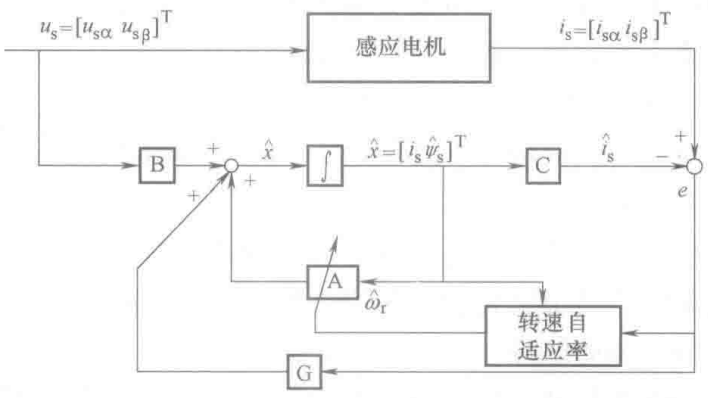


图 1.2　速度自适应全阶观测器

2）在数字控制系统中实施观测器算法，必须采用合适的离散化方法对观测器进行离散化。传统的一阶前向欧拉离散化方法虽然算法简单，但是随着转速的增加离散化误差也越来越大，甚至不能稳定运行[63]。

3）当系统需要在低速发电区域进行无速度传感器运行时，需要考虑稳定性问题[50,64]。其他方法，如卡尔曼滤波[65-67]以及滑模观测器[68,69]在实际中也有一定的应用。但是卡尔曼滤波在实际应用中的计算量太大，对处理器的运算性能要求较高。滑模观测器能在很宽的速度范围内实现较好的动态性能，但是由于抖振的存在使得它在实际中的应用受到一定的限制。

1.3 本书主要内容

本书对感应电机高性能控制尤其是模型预测控制进行了深入研究。在介绍感应电机动态数学模型的基础上，首先针对实际应用中的逆变器非线性特性补偿、电机参数辨识以及磁链观测等基本问题进行了分析，并在前人工作的基础上提出了一些解决方案。然后对传统的高性能控制策略——FOC 和 DTC 进行了研究：①分析了三种 FOC 电流内环调节器结构和设计方法，在充分考虑数字控制系统延迟的基础上给出了调节器优化参数的解析表达式，并通过仿真和实际实验进行了验证；②为了解决 DTC 稳态转矩纹波大的问题，引入了双矢量 DTC，分析了四种矢量作用时间的优化方法，显著地改善了传统 DTC 存在的一些缺陷。最后在 FOC 和 DTC 研究的基础上对 MPC 在高性能感应电机调速系统中的应用进行了深入研究，着重分析和解决现有 MPC 存在的稳态性能不足、开关频率不固定、权重系数设计复杂以及无速度传感器运行等问题。另外还将 MPC 扩展到三电平逆变器电机系统，在实现电机高性能转矩控制的同时重点解决中点平衡、电压跳变和低开关频率运行等问题。全书内容包括四大部分，共 14 章，具体内容安排如下：

第 1 部分：绪论和基础知识，包括第 1~3 章。

第 1 章首先论述了本书的选题意义；然后介绍了高性能感应电机控制策略和无速度传感器在国内外的研究现状，并着重阐述了传统控制方案存在的一些缺陷，介绍了 MPC 的一些优点和需要解决的问题；最后介绍了本文研究工作的主要内容。

第 2 章对感应电机的数学模型进行了介绍，在两相任意转速旋转坐标系下建立了感应电机的状态方程，状态变量组合包括定子磁链和定子电流、转子磁链和定子电流以及定子磁链和转子磁链；最后对感应电机控制中的其他常用公式进行了总结，为后文的分析和研究建立了良好的数学基础。

第 3 章对感应电机调速控制系统在实际中会遇到的问题进行了研究。首先详细分析了逆变器的非线性特性，并给出了一种简单的辨识与补偿方案；然后对感应电机在静止条件下的参数辨识进行了研究，在综合前人工作的基础上给出了一种简单有效的参数辨识方法；最后分析研究了速度自适应全阶观测器的反馈矩阵设计、离散化方法以及低速发电区域稳定性等问题，通过总结现有观测器的极点配置思路，提出一种新型的设计方法，实现了极点移动类配置方法的统一。

第 2 部分：传统控制策略，包括第 4 章和第 5 章。

第 4 章对矢量控制的基本原理进行了介绍，着重对电流内环调节器的设计进行了分析，

包括传统 PI 线性调节器、复矢量调节器以及基于离散域设计的调节器，并对调节器参数设计方法进行了研究，提出了一种优化的离散域调节器参数设计方法。最后通过仿真和实验对理论分析进行了验证，并基于第 3 章中的速度自适应观测器给出了无速度传感器运行的实验结果。

第 5 章对 DTC 进行了相关研究，首先简单综述了 DTC 的研究现状；然后着重介绍了基于占空比优化控制的双矢量 DTC，对双矢量 DTC 和传统 DTC 的性能进行了比较，并通过仿真和实验对算法进行了验证。

第 3 部分：模型预测控制，包括第 6~12 章。

第 6 章介绍传统的模型预测控制。首先对模型预测控制的现状进行概述；然后对传统模型预测转矩控制（MPTC）的基本原理进行介绍，并提出了一种减小系统计算量的方法，对控制延迟补偿和起动电流抑制这两个实际问题进行了研究；最后通过仿真和实验进行了验证。

第 7 章研究了无权重系数模型预测控制。针对权重系数设计复杂的问题，提出将转矩与磁链幅值控制转换为等效定子磁链矢量的模型预测磁链控制，从而消除了权重系数的使用；另外还介绍了一种级联式模型预测控制，将一个目标函数拆分成两个不同的目标函数并级联执行，从而避开了权重系数的使用。这两种无模型预测控制方法的有效性通过仿真和实验得到了验证。

第 8 章介绍鲁棒模型预测控制，重点解决模型预测控制受参数变化影响的问题，研究提出了基于超局部模型和基于扩展状态观测器的鲁棒预测控制。超局部模型仅需系统输入输出数据，无需电机参数。扩张状态观测器可以观测系统总扰动，并作为反馈对模型和未知扰动进行补偿。通过仿真和实验对以上两种鲁棒预测电流控制进行了验证，结果表明显著提高了系统的参数鲁棒性。

第 9 章为解决传统 MPC 稳态效果一般的缺陷，重点研究了双矢量 MPC，对矢量选择方式、占空比优化方法以及它们的处理顺序进行详细分析和对比研究，最后通过仿真和实验对所有算法进行了验证和比较。

第 10 章在双矢量 MPC 的基础上进一步对三矢量 MPC 进行了研究。首先介绍了一种新型三矢量模型预测磁链控制，显著提高了系统的稳态性能；其次介绍了一种无扇区判断空间矢量脉宽调制模型预测磁链控制，并通过仿真与实验来验证其有效性；最后介绍了一种基于 SVM 无差拍控制的统一多矢量模型预测控制，通过对 SVM 无差拍控制得到的电压矢量和占空比进行组合来得到目前各种改进 MPC 算法，包括单矢量 MPC、双矢量 MPC 以及广义双矢量 MPC。本章从理论上证明了这种新型统一多矢量 MPC 与单矢量 MPC、双矢量 MPC 以及广义双矢量 MPC 中的矢量选择和占空比完全等效，并且能够在线实现多种 MPC 之间的任意切换。

第 11 章主要介绍了模型预测控制的无速度传感器运行及弱磁控制策略。首先从全阶观测器中估计转速的收敛性条件出发，推导出一种新型增益矩阵。即使起动前电机旋转速度大小以及运行方向未知，也能保证估计转速快速收敛到实际转速，从而能够在没有转速传感器的情况下快速平稳地起动正在高速旋转的感应电机。然后介绍了 MPC 在基速以上运行时的弱磁控制方法，通过调整磁链幅值以及转矩给定限幅，保证了在电压以及电流限制下能够输出最大转矩。本章通过仿真与实验测试验证了无速度传感器 MPC 及其弱磁控制方法的有

效性。

第 12 章介绍了三电平模型预测控制。首先对三电平逆变器驱动感应电机系统的基本问题进行讨论，分析了不同电压矢量对中点电位的影响，总结了前人在 SVM 调制方面的成果，简述了一种适用于 SPWM 的新型零序分量注入调制方法；然后针对三电平 MPC 展开了研究，介绍了一种低开关频率 MPC 和两种不同的矢量表，并进一步分别在有速度传感器和无速度传感器的条件下进行了详细的实验验证；最后，针对三电平 MPC 提出了两种无权重系数的 MPC 方法。实验结果证明，这两种方法比 FOC 有更好的动态和稳态性能。

第四部分：感应电机调速系统设计，包括第 13 章和 14 章。

第 13 章简要介绍实验平台的软件及硬件设计，包括本书所采用的仿真框架与实验框架。首先通过仿真框架验证控制算法，然后把实验框架中的核心算法换掉，即可利用 MATLAB/Embedded coder 工具箱自动生成 C 代码来验证仿真的正确性，实现了仿真到实验之间的无缝链接，极大地提高了控制算法的开发效率。

第 14 章对 MPC 未来的研究方向和发展趋势进行展望和总结。

第 2 章　三相感应电机数学模型

高性能控制算法通常依赖于控制对象的动态数学模型，此外为了用数字控制系统实现控制算法，该模型应当能够以离散形式表示。本书的控制系统主要由数字信号处理器（Digital Signal Processor，DSP）、两电平或三电平电压源型逆变器、笼型三相交流感应电机及其转子轴上的增量式正交光电速度编码器组成。本章将建立三相感应电机的数学模型。

精确的感应电机数学模型是一个高阶非线性且各变量相互耦合的复杂系统[70]。在实际应用中为了研究方便，通常忽略感应电机的非理想因素，做如下理想化假设：

1）定、转子三相绕组在空间内完全对称，互差 120°电角度；

2）各绕组表面光滑，无齿槽效应；

3）气隙磁动势在空间中按正弦规律分布且无谐波；

4）磁路线性且无铁心损耗；

5）忽略频率变化及温度对定、转子电阻的影响。

本章的结构如下：2.1 节介绍感应电机在三相静止坐标系下的数学模型；2.2 节介绍三相系统的空间矢量描述；2.3 节给出感应电机在两相坐标系下的数学模型；2.4 节给出感应电机分析中常用的数学公式和本书用到的电机参数；2.5 节对本章进行总结。

2.1　三相静止坐标系下的数学模型

1. 电压方程

定、转子绕组的电压方程为

$$\boldsymbol{u}=\boldsymbol{R}\boldsymbol{i}+\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\psi}}{\mathrm{d}t} \tag{2.1}$$

式中　$\boldsymbol{u}=[\boldsymbol{u}_{\mathrm{s}}\quad \boldsymbol{u}_{\mathrm{r}}]^{\mathrm{T}}$，$\boldsymbol{i}=[\boldsymbol{i}_{\mathrm{s}}\quad \boldsymbol{i}_{\mathrm{r}}]^{\mathrm{T}}$，$\boldsymbol{\psi}=[\boldsymbol{\psi}_{s}\quad \boldsymbol{\psi}_{\mathrm{r}}]^{\mathrm{T}}$；

$\boldsymbol{u}_{\mathrm{s}}=[u_{\mathrm{sa}}\quad u_{\mathrm{sb}}\quad u_{\mathrm{sc}}]$，$\boldsymbol{u}_{\mathrm{r}}=[u_{\mathrm{ra}}\quad u_{\mathrm{rb}}\quad u_{\mathrm{rc}}]$，$\boldsymbol{i}_{\mathrm{s}}=[i_{\mathrm{sa}}\quad i_{\mathrm{sb}}\quad i_{\mathrm{sc}}]$，$\boldsymbol{i}_{\mathrm{r}}=[i_{\mathrm{ra}}\quad i_{\mathrm{rb}}\quad i_{\mathrm{rc}}]$；

$\boldsymbol{\psi}_{\mathrm{s}}=[\psi_{\mathrm{sa}}\quad \psi_{\mathrm{sb}}\quad \psi_{\mathrm{sc}}]$，$\boldsymbol{\psi}_{\mathrm{r}}=[\psi_{\mathrm{ra}}\quad \psi_{\mathrm{rb}}\quad \psi_{\mathrm{rc}}]$；

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix}R_{\mathrm{s}}\boldsymbol{I} & \boldsymbol{O}\\ \boldsymbol{O} & R_{\mathrm{r}}\boldsymbol{I}\end{bmatrix},\ \boldsymbol{I}=\begin{bmatrix}1&0&0\\0&1&0\\0&0&1\end{bmatrix},\ \boldsymbol{O}=\begin{bmatrix}0&0&0\\0&0&0\\0&0&0\end{bmatrix}。$$

式中　$\bullet^{\mathrm{T}}$ 表示矩阵 $\bullet$ 的转置；

u_{sx}（$x=a$，b，c）表示定子 x 相绕组电压的瞬时值；

u_{rx}（$x=a$，b，c）表示转子 x 相绕组电压的瞬时值；

i_{sx}（$x=a$，b，c）表示定子 x 相绕组电流的瞬时值；

i_{rx}（$x=a$，b，c）表示转子 x 相绕组电流的瞬时值；

ψ_{sx}（$x=a$，b，c）表示定子 x 相绕组磁链的瞬时值；

ψ_{rx}（$x=a$，b，c）表示转子 x 相绕组磁链的瞬时值。

2. 磁链方程

每个绕组的磁链由本身的自感磁链和其他绕组对它的互感磁链组成，可以表述成如下形式：

$$\boldsymbol{\psi}^{\mathrm{T}}=\boldsymbol{L}\boldsymbol{i}^{\mathrm{T}} \tag{2.2}$$

式中

$$\boldsymbol{L}=\begin{bmatrix} L_{AA} & L_{AB} & L_{AC} & L_{Aa} & L_{Ab} & L_{Ac} \\ L_{BA} & L_{BB} & L_{BC} & L_{Ba} & L_{Bb} & L_{Bc} \\ L_{CA} & L_{CB} & L_{CC} & L_{Ca} & L_{Cb} & L_{Cc} \\ L_{aA} & L_{aB} & L_{aC} & L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{bA} & L_{bB} & L_{bC} & L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{cA} & L_{cB} & L_{cC} & L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix}$$

对角元素 L_{AA}、L_{BB}、L_{CC}、L_{aa}、L_{bb}、L_{cc} 是各绕组的自感，大写字母的下标表示定子绕组，小写字母的下标表示转子绕组，其余的各项为绕组间的互感。

3. 转矩方程

根据机电能量转换原理，可以推导出电磁转矩 T_e 如下[70]：

$$\begin{aligned} T_e=-n_p L_{ms}\Big[&(i_{sa}i_{ra}+i_{sb}i_{rb}+i_{sc}i_{rc})\sin\theta+(i_{sa}i_{rb}+i_{sb}i_{rc}+i_{sc}i_{ra})\sin\left(\theta+\frac{2}{3}\pi\right) \\ &+(i_{sa}i_{rc}+i_{sb}i_{ra}+i_{sc}i_{rb})\sin\left(\theta-\frac{2}{3}\pi\right)\Big] \end{aligned} \tag{2.3}$$

式中 θ 表示转子的位置；

L_{ms} 对应于定转子绕组间的最大互感值；

n_p 表示极对数。

4. 运动方程

感应电机的运动方程可以表述为

$$\frac{\mathrm{d}\omega_r}{\mathrm{d}t}=\frac{T_e-T_L}{J} \tag{2.4}$$

从式（2.1）~式（2.4）可以看出，感应电机在三相坐标系下的数学模型极为复杂，难以实际应用。为进一步简化数学表达式，通常采用坐标变换的方法将其转换到两相参考坐标系。

2.2 三相系统的空间矢量描述

空间矢量描述又称复矢量描述，这种描述方式使得交流电路变得简单，易于理解和分析。1959 年学者 P. K. Kovacs 和 I. Racz 首次将这种描述方式应用到电机的数学模型中，1995 年德国学者 J. Holtz 将复矢量应用到电力电子领域[71]。目前，空间矢量描述被广泛用于交流电机的数学建模，已经有许多学者对其进行了深入的研究。当感应电机使用传统分量形式建模时是一个四阶系统，分析和计算均十分复杂；而当使用复矢量建模时，感应电机降阶为二