



国际电气工程先进技术译丛

WILEY

大功率变换器及工业传动 模型预测控制

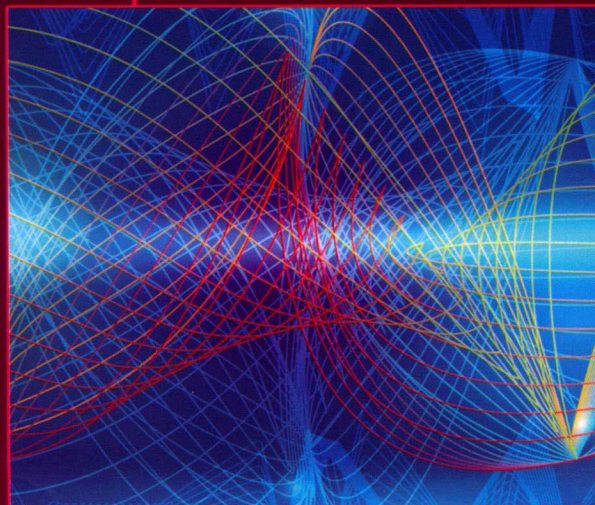
**Model Predictive Control of High Power
Converters and Industrial Drives**

[瑞士] 托拜厄斯·盖尔 (Tobias Geyer) 著

张永昌 宋文祥 徐伟 译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



技术译丛

大功率变换器及工业 传动模型预测控制

Model Predictive Control of High Power Converters and Industrial Drives

[瑞士] 托拜厄斯·盖尔 (Tobias Geyer) 著
张永昌 宋文祥 徐伟 译



机械工业出版社

本书首先介绍了工业电力电子系统市场和相关技术的发展趋势,坐标变换、空间矢量、功率半导体器件等基础知识,以及矢量控制、直接转矩控制、载波调制和优化脉冲调制等经典控制和调制方法,为后续内容提供了合适的基础。本书的核心部分则介绍了适用于低开关频率大功率变换器和电机驱动领域的几种控制算法,解释了长预测范围预测控制的概念,介绍了基于滞环的模型预测转矩控制和基于脉冲调制的模型预测控制的控制方法,以及各种方法的优化。采用本书介绍的方法可以使大功率变换器系统在低开关频率下仍然具有优异的动态和稳态性能,从而能够提高大功率变换器的功率输出、降低电流畸变、减小滤波器体积、获得极快的动态响应并保证在安全工作区域限制内的可靠运行。本书适合电力电子与电力传动领域的研究生、教师、工程师和实践者阅读,尤其是对大功率变换器和工业传动的从业人员具有较大的参考价值。

Copyright © 2017 John Wiley and Sons, Ltd

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled Model Predictive Control of High Power Converters and Industrial Drives, ISBN: 978-1-119-01090-6, by Tobias Geyer, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文简体字版由 Wiley 授权机械工业出版社出版,未经出版者书面允许,本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。版权所有,翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记 图字:01-2017-4413 号。

图书在版编目 (CIP) 数据

大功率变换器及工业传动模型预测控制/ (瑞士) 托拜厄斯·盖尔 (Tobias Geyer) 著; 张永昌, 宋文祥, 徐伟译. —北京: 机械工业出版社, 2018. 12

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文: Model Predictive Control of High Power Converters and Industrial Drives

ISBN 978-7-111-61558-3

I. ①大… II. ①托…②张…③宋…④徐… III. ①大功率-变换器-预测控制
IV. ①TN624

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 279378 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: 闫洪庆

责任校对: 王 延 封面设计: 马精明

责任印制: 郜 敏

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2019 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 25 印张 · 791 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-61558-3

定价: 149.00 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

读者购书热线: 010-68326294

机工官博: weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网: www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网: www.cmpedu.com

译者序

自1983年德国学者Holtz教授首次将模型预测控制(MPC)应用于异步电机控制以来,受制于微处理器硬件的发展,很长一段时间MPC在电力电子与电力传动领域并未引起广泛关注。直到2000年以后,MPC在电力电子领域的研究才重新兴起并迅速成为学术界和工业界的研究热点。由于MPC具有原理简单、动态响应快、易于处理非线性约束和多变量控制等优点,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,在各种功率等级场合都得到了广泛研究。

由ABB高级科学家Tobias Geyer博士完成的本书系统介绍了MPC在大功率电力电子与电力传动领域的研究成果和最新进展,涵盖了电机驱动控制、功率变换器控制、优化脉冲调制等多个领域。书中所展现的多步长模型预测控制、模型预测脉冲模式控制等方法有效解决了低开关频率下电力电子系统动态性能较差和电流谐波较大的问题。本书是基于原作者近十年来从事科研和工程应用的经历与所取得的成果整理编撰而成,其中包括了模型预测控制方法的各个主要分支,从理论分析到仿真验证,再经过实验验证,最后成功地应用于ABB公司的相关产品中,实现了从科学研究到实际应用的转化,对于从事大功率电力电子与电力传动研究的各个层次的研发人员都有非常重要的指导意义。

本书由张永昌翻译第1~4、8、10、11、15章,宋文祥翻译第9、12~14章,徐伟翻译第5~7章,全书由张永昌负责统筹和定稿。在本书的翻译过程中,译者的研究生做了大量编辑和校对工作,他们是北方工业大学的白宇宁、徐东林、刘杰、蔡倩、张博越、焦健、黄兰兰、金家林、黄朋、李冰玉、刘家利,上海大学的冯九一、林宏民、赵凌云、杨坤,华中科技大学的邹剑桥、余开亮、胡冬、董定昊、佃仁俊、赵启,译者的同事张晓光和他的研究生张亮、王克勤也参与了部分章节的校对工作,在此一并表示感谢。

目前,MPC的研究方兴未艾,而中国已经成为电力电子最大的应用市场。本书三位译者均从事MPC在电机控制领域的研究,希望借本书的出版为推广MPC在国内电力电子与电力传动领域的应用起到推动作用。本书的翻译和出版得到了国家自然科学基金(51207003、51577003)的资助,在此深表谢意。由于译者水平有限,书中难免出现不当甚至错误之处,敬请广大读者批评指正。

张永昌
2019年春

原书前言 >>

本书主要讲述了模型预测控制 (MPC) 方法在工业电力电子方面的应用, 尤其是三相交流—直流、直流—交流变换系统在 1MVA 及以上大功率场合的应用。这些系统主要是基于开关频率在 1kHz 以下的多电平电压源变换器。书中主要考虑中压 (MV)、变速驱动系统, 以及少量的中压并网逆变器。书中所提出的控制方法也可以应用于工作在低脉冲数 (即开关频率与基波频率的比值小) 的低压功率变换器。

对于大功率变换器, 脉冲数通常在 5~15 之间。由此带来的后果是, 电力电子系统中用于掩盖开关特性对控制问题影响的“平均值”概念会导致低脉冲下的性能恶化。一般来说, 为了实现大功率变换器的最优性能必须避免“平均”, 传统方法中的电流控制环和调制应该由一个单独控制部分来代替。

本书提出并回顾了开发大功率变换器性能潜力的各种控制方法, 确保在非常低的开关频率和低谐波畸变下实现快速控制。为了实现这一点, 控制和调制问题需要在一个计算周期得到解决。为了达到良好的稳态性能, MPC 控制器需要较长的预测步长。由此产生的优化问题在计算上是非常具有挑战性的, 但这可以采用分支定界算法实时求解。或者, 用于稳态运行的最优开关切换序列, 即所谓的优化脉冲模式 (OPP), 可以预先离线计算并在线优化以实现快速闭环控制。

为此, 研究目标是将无差拍控制 (如直接转矩控制) 的优点与 OPP 的最优稳态性能相结合, 并解决两者之间的矛盾。本书详细介绍了针对此问题的三种 MPC 方法。

缩略语中英文对照表

英文缩写	英文全称	中文释义
AC	alternating current	交流电
A/D	analog - to - digital	模 - 数转换
AFE	active front end	有源前端
ANPC	active neutral - point - clamped	有源中点钳位
CB - PWM	carrier - based pulse width modulation	载波脉宽调制
CPU	central processing unit	中央处理器
DB	deadbeat dc direct current	无差拍直流电
DC	direct current	直流电
DFE	diode front end	二极管前端
DFT	discrete Fourier transform	离散傅里叶变换
DPC	direct power control	直接功率控制
DSC	direct self - control	直接自控制
DSP	digital signal processor	数字信号处理器
DTC	direct torque control	直接转矩控制
EMF	electromotive force	电动势
FACTS	flexible ac transmission system	柔性交流传输系统
FC	flying capacitor	飞跨电容
FCS	finite control set	有限控制集
FOC	field - oriented control	磁场定向控制
FPGA	field - programmable gate array	现场可编程门阵列
GCT	gate - commutated thyristor	门极换流晶闸管
IGBT	insulated - gate bipolar transistor	绝缘栅双极型晶体管
IGCT	integrated - gate - commutated thyristor	集成门极换流晶闸管
IM	induction machine	感应电机
LQR	linear quadratic regulator	线性二次型调节器
MIMO	multiple - input multiple - output	多输入多输出
MLD	mixed logical dynamical	混合逻辑动态
MMC	modular multilevel converter	模块化多电平变换器
MPC	model predictive control	模型预测控制
MPDBC	model predictive direct balancing control	模型预测直接平衡控制
MPDCC	model predictive direct current control	模型预测直接电流控制



(续)

英文缩写	英文全称	中文释义
MPDPC	model predictive direct power control	模型预测直接功率控制
MPDTC	model predictive direct torque control	模型预测直接转矩控制
{ MP ³ C }	model predictive pulse pattern control	模型预测脉冲模式控制
MV	medium - voltage	中压
NPC	neutral - point - clamped	中点钳位
OPP	optimized pulse pattern	优化脉冲模式
PCC	point of common coupling	共同耦合点
PI	proportional - integral	比例 - 积分
PMSM	permanent magnet synchronous machine	永磁同步电机
pu	per unit	标么化
PWM	pulse width modulation	脉冲宽度调制
QP	quadratic program	二次规划
rms	root - mean - square	二次方均根
SHE	selective harmonic elimination	特定谐波消除
SISO	single - input single - output	单输入单输出
SVM	space vector modulation	空间矢量调制
TDD	total demand distortion	总需求畸变
THD	total harmonic distortion	总谐波畸变
VC	vector control	矢量控制
V/f	volts per frequency	压频比
VOC	voltage - oriented control	电压定向控制
VSD	variable - speed drive	变速驱动
VSI	voltage source inverter	电压源型逆变器

书中变量及符号等释义 >>

变量

i, v	变量关于时间函数的瞬时值
\vec{i}, \vec{v}	空间矢量
I, V	方均根值
x	列向量
x^T	行向量
X	矩阵
S	数集

符号

$O_{n \times m}$	$n \times m$ 阶零矩阵
A	系统矩阵 (离散时间)
B	输入矩阵 (离散时间)
c	系数
C	电容 (F)
C	输入矩阵 (连续或离散时间)
d	脉冲数
D	行列式
e, E	能量 (J 或 pu)
f	频率 (Hz 或 pu)
F	系统矩阵 (连续或离散时间)
G	输入矩阵 (连续或离散时间)
H	Hessian 矩阵
i, i, I	电流 (A 或 pu)
I_n	$n \times n$ 阶单位矩阵, $I_n = \text{diag}(1, 1, \dots, 1)$
j	虚数单位, $\sqrt{-1}$
J	代价函数



k	离散时间步长
K	变换矩阵
ℓ	离散时间步长 (相对于 k)
L	电感 (H)
m	调制系数
M	转动惯量 (kgm^2 或 pu)
n	谐波次数, 模块数
N	开关序列长度
p	极对数
pf	功率因数
P	(瞬时) 有功功率 (W 或 pu)
Q	(瞬时) 无功功率 (var 或 pu)
q, Q	惩罚矢量或矩阵
R	电阻 (Ω 或 pu)
sl	转差
S	视在功率 (VA 或 pu)
t	时间 (s 或 pu)
T	转矩 (Nm 或 pu)
u, u	开关位置, 输入 (或控制) 变量
$\Delta u, \Delta u$	开关位置的变化
U, U	开关位置 (开关序列)
v, v, V	电压 (V 或 pu)
V	生成矩阵
x, x	状态变量
X	电抗 (pu)
y, y	输出变量
Z	阻抗 (Ω 或 pu)
α	脉冲模式中的开关角 (rad)
γ	负载角, 即定子和转子磁通矢量之间的夹角 (rad)
δ	(半个) 边界宽度
ε, ε	越界程度 (在一个时间步长内)
ϵ, ϵ	越界方均根 (超过预测范围)
λ	标量惩罚权重
λ	磁链矢量 (Wb)
ϕ	相位角 (rad)

ρ	球体半径
σ	总泄漏因子
θ	脉冲模式中的角度 (幅角) (rad)
ν, ν	插入索引
φ	参考坐标系中的角位置 (rad)
ψ, ψ	磁通 (磁链) (pu)
Ψ	磁通 (磁链) 幅值 (pu)
τ	时间常数 (s 或 pu)
ω	旋转速度或角频率 (rad/s 或 pu)
ξ, ξ, ζ, ζ	松弛变量或辅助变量

下标

c_{on}, c_{off}, c_{rr}	开通、关断和反向恢复能量损失系数 (J/(VA))
C_m	模块电容 (F)
f_c	载波频率
f_{DL}	死锁频率
f_{sw}	开关频率
i_1	基波电流
i_a, i_b, i_c, a, b, c	三相电流
i_α, i_β	电流的实部和虚部 (在静止参考系中)
i_B	基极电流
i_c	变换器电流矢量
i_{circ}	循环电流矢量
i_d, i_q	电流的实部和虚部 (在旋转参考系中)
i_{err}	电流误差矢量
i_g	电网电流矢量
i_n	中性点电流
i_r	转子电流矢量
i_R	额定电流
i_{rip}	纹波电流矢量
i_s	定子电流矢量
i_T	阳极电流
I_{TDD}	电流总畸变率 (TDD)
L_{br}	分支器
L_{ls}	定子漏感



L_{lr}	转子漏感
L_m	主（或磁化）电感
L_σ	总漏电感
N_p	预测范围（时间步长数）
N_s	开关数（开关切换次数）
T_e	机电转矩
$T_{e,\min}$	电磁转矩的下限
$T_{e,\max}$	电磁转矩的上限
T_l	负载转矩
T_p	预测步长（时间长度）
θ_p	预测步长（角度间隔）
T_s	采样时间
u_{opt}	最优控制输入（或控制变量）
v_{dc}	瞬时直流母线电压
V_{dc}	标称直流母线电压
$v_{\text{dc,lo}}, v_{\text{dc,up}}$	瞬时直流母线下半段电压，瞬时直流母线上半段电压
v_n	中性点电位
v_{ph}	相电压
ω_1	基波频率
ω_{fr}	参考系角速度
ω_g	电网频率
ω_m	机械转速
ω_r	转子电角速度
ω_s	定子频率
ω_{sl}	转差频率

上标

i^*	参考电流
\vec{i}	电流空间矢量
\hat{i}_n	n 次谐波电流幅值
i'	电流 i 的缩放值，例如，当变成标么值系统时
\underline{u}	开关位置与生成矩阵 \mathbf{V} 之积

运算

dx/dt	变量 x 对时间的导数
---------	---------------

$\exp(x)$; e^x	变量 x 的指数
$\Re\{x\}$	复变量 x 的实部
$\Im\{x\}$	复变量 x 的虚部
$\text{conj}\{x\}$	复变量 x 的复共轭
$\mathbf{x} \times \mathbf{y}$	向量 \mathbf{x} 和 \mathbf{y} 的积
$x \in S$	变量 x 属于集合 S
\mathbf{x}^T	向量 \mathbf{x} 的转置
\mathbf{X}^{-1}	矩阵 \mathbf{X} 的逆
$ x $	标量 x 的绝对值
$\ \mathbf{x}\ _1$	向量 \mathbf{x} 的 1 范数 (绝对值的和)
$\ \mathbf{x}\ _2$	向量 \mathbf{x} 的 2 范数 (平方和的平方根, 欧几里得范数)。为简化符号, 常简写为 $\ \mathbf{x}\ $
$\ \mathbf{x}\ _\infty$	向量 \mathbf{x} 的无穷范数 (最大绝对值)

目 录 >>

译者序	
原书前言	
缩略语中英文对照表	
书中变量及符号等释义	
第 1 篇 引言	1
第 1 章 概述	3
1.1 工业电力电子	3
1.1.1 中压变速传动	3
1.1.2 市场趋势	4
1.1.3 技术趋势	5
1.2 控制和调制策略	5
1.2.1 要求	5
1.2.2 最新策略	6
1.2.3 挑战	7
1.3 模型预测控制	8
1.3.1 控制问题	9
1.3.2 控制原理	9
1.3.3 优点及挑战	12
1.4 研究前景和动机	13
1.5 主要成果	14
1.6 本书概要	15
1.7 预备知识	17
参考文献	18
第 2 章 工业电力电子	21
2.1 预备知识	21
2.1.1 三相系统	21
2.1.2 标幺值系统	23
2.1.3 静止坐标系	24
2.1.4 旋转坐标系	26
2.1.5 空间矢量	29
2.2 感应电机	30
2.2.1 电机模型的空间矢量表示	30
2.2.2 电机模型的矩阵表示	32
2.2.3 电机模型的标幺值表示	33
2.2.4 电机模型的状态空间表示	34
2.2.5 电机谐波模型	36
2.3 功率半导体器件	37
2.3.1 集成门极换流晶闸管	37
2.3.2 功率二极管	38
2.4 多电平电压源型逆变器	38
2.4.1 中点钳位逆变器	39
2.4.2 五电平有源中点钳位逆变器	44
2.5 案例分析	49
2.5.1 中点钳位逆变器驱动系统	49
2.5.2 有缓冲约束的中点钳位逆变器 驱动系统	51
2.5.3 五电平有源中点钳位逆变器 驱动系统	51
2.5.4 并网中点钳位变换器系统	52
参考文献	54
第 3 章 经典控制与调制策略	56
3.1 控制与调制策略的要求	56
3.1.1 与电机相关的要求	56
3.1.2 与电网相关的要求	57
3.1.3 与变换器相关的要求	59
3.1.4 总结	60
3.2 控制与调制策略框图	60
3.3 基于载波的脉冲宽度调制	61
3.3.1 单相脉宽调制	62



3.3.2	三相载波脉宽调制	67	4.2.7	关于范数的选择	126
3.3.3	总结与特性	72	4.2.8	延迟补偿	128
3.4	优化脉冲调制	74	4.3	三相异步电机的预测转矩控制	132
3.4.1	脉冲模式与谐波分析	75	4.3.1	案例研究	133
3.4.2	三电平变换器的优化问题	77	4.3.2	控制问题	133
3.4.3	五电平变换器的优化问题	81	4.3.3	控制器模型	134
3.4.4	总结与特性	84	4.3.4	优化问题	134
3.5	脉宽调制的性能权衡	85	4.3.5	控制算法	135
3.5.1	电流总谐波畸变与开关损耗	85	4.3.6	代价函数分析	135
3.5.2	转矩总谐波畸变与开关损耗	86	4.3.7	转矩与电流控制器的代价函数比较	136
3.6	感应电机驱动控制方法	88	4.3.8	性能评估	138
3.6.1	标量控制	88	4.4	总结	140
3.6.2	磁场定向控制	89		参考文献	140
3.6.3	直接转矩控制	93	第5章	多步长预测控制	142
附录3.A	单相OPP的谐波分析	99	5.1	预备知识	142
附录3.B	数学优化	101	5.1.1	案例研究	142
3.B.1	一般优化问题	101	5.1.2	控制器模型	143
3.B.2	混合整数优化问题	102	5.1.3	代价函数	144
3.B.3	凸优化问题	103	5.1.4	优化问题	144
	参考文献	104	5.1.5	基于穷举搜索的控制算法	145
			5.2	整数二次规划描述	146
第2篇	基于参考值跟踪的直接模型预测控制	109	5.2.1	优化问题的向量描述	146
第4章	短步长预测控制	111	5.2.2	无约束最小化求解	146
4.1	单相阻感负载电路的预测电流控制	111	5.2.3	整数二次规划	147
4.1.1	控制问题	112	5.2.4	预测步长为1的直接模型预测控制	148
4.1.2	电流轨迹预测	112	5.3	一种求解优化问题的有效方法	149
4.1.3	优化问题	113	5.3.1	准备知识和关键特性	149
4.1.4	控制算法	113	5.3.2	改进的球形解码算法	149
4.1.5	性能评估	114	5.3.3	一个预测范围为1的例子	150
4.1.6	多步长预测	116	5.3.4	一个预测范围为2的例子	152
4.1.7	总结	118	5.4	计算负担	153
4.2	三相感应电机的预测电流控制	118	5.4.1	离线计算	154
4.2.1	案例研究	118	5.4.2	在线预处理	154
4.2.2	控制问题	119	5.4.3	球形解码	154
4.2.3	控制器模型	120	附录5.A	状态空间模型	155
4.2.4	优化问题	121	附录5.B	向量形式的代价函数推导	155
4.2.5	控制算法	121		参考文献	157
4.2.6	性能评估	123	第6章	多步长预测控制性能评估	158
			6.1	中点钳位逆变器驱动系统性能评估	158

6.1.1	性能评估框架	158	7.4.1	定义	193
6.1.2	开关频率为 250Hz 时的性能对比	160	7.4.2	优化问题的简化	194
6.1.3	闭环成本	163	7.4.3	开关时域的概念	194
6.1.4	相对电流总谐波畸变率	164	7.4.4	搜索树	198
6.1.5	暂态运行	168	7.4.5	基于穷举的 MPDTC 算法	200
6.2	基于直接求整的次优化模型预测控制	169	7.5	扩展方法	201
6.3	带 LC 滤波器的中点钳位逆变器驱动 系统性能评估	171	7.5.1	对状态轨迹和输出轨迹进行分析	201
6.3.1	案例研究	171	7.5.2	线性拟合方法	202
6.3.2	控制器模型	173	7.5.3	二次拟合方法	203
6.3.3	优化问题	173	7.5.4	二次插值拟合法	205
6.3.4	稳态运行	174	7.6	总结和讨论	206
6.3.5	暂态运行	177	附录 7.A	NPC 型逆变器驱动系统的 控制器模型	208
6.4	总结与讨论	178	参考文献		209
6.4.1	稳态性能	178	第 8 章 模型预测直接转矩控制的 性能评估		210
6.4.2	暂态性能	179	8.1	中点钳位逆变器驱动系统的性能评估	210
6.4.3	代价函数	179	8.1.1	仿真设置	210
6.4.4	控制目标	179	8.1.2	稳态运行	211
6.4.5	计算复杂度	180	8.1.3	暂态运行	216
附录 6.A	状态空间模型	180	8.2	ANPC 逆变器驱动系统的性能评估	218
附录 6.B	输出参考向量计算	180	8.2.1	控制器模型	219
6.B.1	第一步: 定子频率	180	8.2.2	改进的 MPDTC 算法	220
6.B.2	第二步: 逆变器电压	181	8.2.3	仿真设置	221
6.B.3	第三步: 输出参考向量	182	8.2.4	稳态运行	221
参考文献		182	8.2.5	暂态运行	227
第 3 篇 有边界的直接模型预测控制		183	8.3	总结和讨论	228
第 7 章 模型预测直接转矩控制		185	附录 8.A	ANPC 型逆变器驱动系统的 控制器模型	229
7.1	引言	185	参考文献		230
7.2	预备知识	186	第 9 章 模型预测直接转矩控制的 分析与可行性		232
7.2.1	案例分析	186	9.1	目标集	232
7.2.2	控制问题	188	9.2	状态反馈控制律	233
7.2.3	控制器模型	188	9.2.1	预备知识	234
7.2.4	开关动作	190	9.2.2	给定转子磁链矢量的控制律	235
7.3	控制问题的描述	190	9.2.3	目标集边缘的控制律	241
7.3.1	简单优化问题	191	9.3	死锁现象分析	242
7.3.2	约束条件	191	9.3.1	死锁的根本原因分析	242
7.3.3	代价函数	192	9.3.2	死锁的位置	244
7.4	模型预测直接转矩控制	193	9.4	死锁的解决方法	246



9.5 死锁的避免	247	附录 11. A MPDCC 中使用的控制器模型	295
9.5.1 死锁避免策略	247	附录 11. B 有功和无功功率	296
9.5.2 性能评估	249	附录 11. C MPDPC 中使用的控制器模型	297
9.6 总结和讨论	252	参考文献	298
9.6.1 状态反馈控制律的推导与分析	252		
9.6.2 死锁的分析、解决与避免	253		
参考文献	253		
第 10 章 高效模型预测直接转矩控制 ..	255	第 4 篇 基于脉冲宽度调制的	
10.1 预备知识	255	模型预测控制	301
10.2 基于分支定界法的 MPDTC	256	第 12 章 模型预测脉冲模式控制	303
10.2.1 概念和原理	256	12.1 最新控制方法	303
10.2.2 分支定界法的特性	257	12.2 优化脉冲模式	304
10.2.3 限制最大计算数	259	12.2.1 概要、性能及计算	304
10.2.4 高效 MPDTC 算法	259	12.2.2 磁链幅值与调制度的关系	305
10.3 性能评估	260	12.2.3 时间与角度的关系	306
10.3.1 案例研究	260	12.2.4 定子磁链参考轨迹	306
10.3.2 稳态运行时的性能标准	261	12.2.5 查表法	308
10.3.3 稳态运行时的计算指标	263	12.3 定子磁链控制	308
10.4 总结和讨论	267	12.3.1 控制目标	308
参考文献	268	12.3.2 控制原理	308
第 11 章 模型预测直接转矩		12.3.3 控制问题	309
控制的推演	269	12.3.4 控制方法	309
11.1 模型预测直接电流控制	269	12.4 MP ³ C 算法	310
11.1.1 案例研究	270	12.4.1 观测器	311
11.1.2 控制问题	271	12.4.2 速度控制器	312
11.1.3 定子电流边界的描述	271	12.4.3 转矩控制器	312
11.1.4 控制器模型	274	12.4.4 磁链控制器	312
11.1.5 控制问题的描述	275	12.4.5 脉冲模式加载器	312
11.1.6 MPDCC 算法	276	12.4.6 参考磁链	313
11.1.7 性能评估	277	12.4.7 脉冲模式控制器	313
11.1.8 整定	282	12.5 MP ³ C 求解方法	315
11.2 模型预测直接功率控制	283	12.5.1 基于二次规划的 MP ³ C	316
11.2.1 案例研究	284	12.5.2 基于无差拍控制的 MP ³ C	318
11.2.2 控制问题	285	12.6 脉冲插入	319
11.2.3 控制器模型	286	12.6.1 定义	320
11.2.4 控制问题的描述	286	12.6.2 算法	320
11.2.5 性能评估	287	附录 12. A 二次规划	322
11.3 总结和讨论	292	附录 12. B 无约束求解	323
11.3.1 模型预测直接电流控制	292	附录 12. C 无差拍 MP ³ C 的转换	324
11.3.2 模型预测直接功率控制	293	参考文献	324
11.3.3 目标集	293	第 13 章 模型预测脉冲模式控制	

性能评估	325	14.4.1 系统和控制参数	352
13.1 NPC 逆变器驱动系统性能评估	325	14.4.2 稳态运行	354
13.1.1 仿真设置	325	14.4.3 瞬态运行	355
13.1.2 稳态运行	326	14.5 参数设计	361
13.1.3 瞬态运行	331	14.5.1 开环预测偏差	362
13.2 ANPC 逆变器驱动系统实验结果	335	14.5.2 闭环性能	362
13.2.1 实验设置	335	14.6 总结和讨论	363
13.2.2 分层控制结构	337	附录 14.A 动态电流方程	364
13.2.3 稳态运行	338	附录 14.B 变换器系统的控制器模型	365
13.3 总结和讨论	340	参考文献	366
13.3.1 与现有先进控制方法的区别	340		
13.3.2 讨论	342		
参考文献	343		
第 14 章 模块化多电平变换器的模型		第 5 篇 总结	369
预测控制	344	第 15 章 结论和总结	371
14.1 引言	344	15.1 直接模型预测方法的性能比较	371
14.2 预备知识	345	15.1.1 案例研究	371
14.2.1 拓扑	345	15.1.2 性能权衡曲线	372
14.2.2 变换器非线性模型	346	15.1.3 总结与讨论	376
14.3 模型预测控制	348	15.2 控制和调制方法的评估	379
14.3.1 控制问题	348	15.2.1 基于 SVM 的 FOC 和 VOC	379
14.3.2 控制器结构	348	15.2.2 DTC 和 DPC	380
14.3.3 线性预测模型	349	15.2.3 基于参考值跟踪的直接 MPC	380
14.3.4 代价函数	349	15.2.4 带边界的直接 MPC	381
14.3.5 硬约束与软约束	350	15.2.5 基于 OPP 的 MP ³ C	381
14.3.6 优化问题	351	15.2.6 间接 MPC	382
14.3.7 多电平载波脉宽调制	351	15.3 结论	383
14.3.8 平衡控制	352	15.4 展望	383
14.4 性能评估	352	参考文献	384