



国际电气工程先进技术译丛

WILEY

功率变换器和电气传动的 预测控制

**Predictive Control of Power Converters and
Electrical Drives**

[智]

Jose Rodriguez

Patricio Cortes

著

陈一民 周京华 卫三民 苏位峰 等译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



本书特色

模型预测控制（MPC）的应用对使用功率变换器的电气设备进行控制，并可以很好地对调制器和线性控制器的使用进行灵活选择。这种新方法考虑到了功率变换器和传动装置的离散与非线性特性，并且将对未来几十年的功率变换器控制产生很强的影响。



国际电气工程先进技术译丛

功率变换器和电气 传动的预测控制

[智] Jose Rodriguez 著
Patricio Cortes

陈一民 周京华 卫三民 苏位峰 等译



机械工业出版社

在半导体变流技术、电气传动与电机拖动领域应用预测控制理论等智能控制理论与方法，是对该领域中传统控制技术手段与方法的巨大变革，代表了这一领域今后控制理论与技术应用的一个发展方向。本书详细介绍了预测控制理论在电力电子与电气传动领域的最新理论发展与技术应用，既全面详细地介绍了此领域基本的理论，同时也包含了较多使用 MATLAB 编写的应用示例。

本书适合许多类型的读者，特别是工作在电气工程领域并对预测控制理论有一定了解的读者群，包括从事电力电子与电气传动的研究人员、工程技术人员、研究生和高年级本科生。

译者序

预测控制是近年来发展起来的一类新型的计算机控制算法。由于它采用多步测试、滚动优化和反馈校正等控制策略，因而控制效果好，适用于难以建立精确数字模型且比较复杂的工业生产过程。所以，它一出现就受到国内外工程界的重视，并已在石油、化工、电力、冶金、机械等工业部门的控制系统中得到了成功应用。

在半导体变流技术、电气传动与电机拖动领域，应用预测控制理论等智能控制理论与方法是对该领域中应用传统控制技术手段与方法的巨大变革，代表了这一领域今后控制理论与技术应用的一个发展方向。而我国在这一领域中的理论支持还比较欠缺，相关理论的实际应用水平也亟待提高，这与我国在这一领域中的巨大需求形成了明显的反差。当前，我国的科研工作者和工程技术人员迫切需要了解并掌握国际上包括预测控制等智能控制理论及应用的最新发展，使我国在电气传动领域智能控制的理论与应用方面达到国际先进水平。

本书详细介绍了预测控制理论在电力电子与电气传动领域的最新理论发展与技术应用，既包含了大量的理论叙述，同时也包含了较多的应用示例 [本书配套网站 (www.wiley.com/go/rodriguez-control) 还给出了应用示例的 MATLAB 程序]，因此特别适合工程技术人员参考，也适合高校师生和科研机构研发人员进行学习和研究。

本书是机械工业出版社丛书《国际电气工程先进技术译丛》中的一本。机械工业出版社的这套丛书涉及了当前电气工程领域科技前沿相关的理论和技术，很好地传播了国际最新技术成果，为我国电气工程领域的研究人员、学者、工程技术人员及广大师生提供了坚实的技术平台。

本书的翻译工作得到译者之一北京西电华清科技有限公司总经理卫三民博士的积极支持。卫博士以其坚实的理论研究基础和丰富的实践经验使本书的引进和翻译工作得以顺利进行。

本书共分四部分，第一部分（第 1~3 章）由卫三民博士翻译，第二部分（第 4~7 章）由陈一民翻译，第三部分（第 8、9 章）及附录由周京华博士翻译，第四部分（第 10~13 章）由苏位峰博士和张东升博士共同翻译，全书由陈一民统稿。

本书的翻译与出版得到了许多同仁和朋友的支持与帮助，特别是张少军教授、史晓霞博士、马鸿雁博士、周渡海高级工程师、王荣民高级馆员、陈湧工程

IV 功率变换器和电气传动的预测控制

师，以及樊清、庄俊华、龚静、李壮举也参与本书部分内容的翻译。机械工业出版社顾谦编辑为本书的出版做了大量辛勤的工作，译者在此深表谢意！

译者希望本书的出版能为国内电力电子与电气传动领域应用模型预测控制提供有益的参考。本书虽然经过多次审阅校正，但由于译者能力有限，不当与疏漏之处在所难免，恳请广大读者予以批评指正。

译 者

原 书 序

为了使未来的能量处理和控制系统的性能更为先进，本书在现代方法的研究上做了十分必要的工作。通过使用所谓的“开关模式运行”，即通过 ON/OFF 模式（消除在动态区域的运行状态）控制功率半导体器件，可以获得现代功率电子变换器的一些主要特性，包括频率高、尺寸小、重量轻、运行快和功率密度高等特性。这产生了不同类型的脉宽调制（Pulse Width Modulation, PWM）技术，成为应用于电力电子系统的基本能量处理。PWM 模块不仅可以控制功率变换器，同时也可以使功率变换器线性化，因而可以将其看作线性功率放大器（执行器）。因此，传统上，在由比例积分（Proportion Integrate, PI）调节器构成的级联多环路系统对功率变换器和驱动系统进行控制。

模型预测控制（Model Predictive Control, MPC）提供了一种与众不同的方法进行能量处理，就是将功率变换器当做离散和非线性的执行器。在 MPC 系统中，通过单一的控制实现控制动作，这一控制器可以从所有可能的状态中在线选择状态，并在可以使代价函数最小的离散时间预测模型中计算控制动作。因此，通过合适的代价函数形式，MPC 可以满足更高的灵活性，并同时可以对许多重要的参数（如开关次数、开关损耗、无功功率控制、电机转矩纹波等）实现最优化。这样，预测控制器可以取代传统系统中的 PWM 模块和级联多环路 PI 控制，同时可以提供在多目标必须被同时满足的场合所需的工业灵活性、简化性和基于软件的优化解决方案。使用预测控制器所付出的代价是需要进行大量计算。然而，由于信号处理器性能飞速提高和工业信息科学的快速发展，此问题将迎刃而解。

通过本书四部分、13 章的内容，本书作者给出了预测控制的基本原理，并十分系统地向读者介绍了应用于功率变换器和交流（Alternating Current, AC）电机传动领域 MPC 系统的分析与设计方法。本书具有一本专著所应具有的典型特性，本书结构严谨，并具有较强的可读性。作者根据自己的研究成果，对一些主题进行了独创性的讨论和描述。本书所给出的仿真示例对电气工程和机电工程设备领域的研究者、工程师、本科生和研究生十分有益。

最后，我衷心地对作者在这一控制系统领域所进行的坚持不懈的研究工作表示祝贺。我非常希望本书不仅会很好地满足这一领域图书市场的空白，同时也能够推动电力电子和交流驱动领域对预测控制器的进一步研究和实际应用。

Marian P. Kazmierkowski
华沙工业大学，波兰

原 书 前 言

虽然模型预测控制（MPC）技术已经历了数十年的发展历程，但由于控制电气变量需要非常快的处理速度，因此将该技术应用于电力电子和电气传动领域的时间并不长。

随着处理速度快且性能先进的微处理器的出现，使得以较低的成本实现大量的数据计算变成了现实。因此，将 MPC 技术应用到电力电子和电气传动领域已不再是遥不可及的梦想。该技术的简单、直观、易于操作、具有非线性控制和限值控制功能等一系列特点，使其颇具吸引力。

MPC 技术极有可能显著改变目前功率变换器控制电能所使用的方式。

本书由四大部分组成，涉及了功率变换器、电气传动和控制的基本原理，MPC 技术在功率变换器上的应用，MPC 技术在电机驱动系统上的应用以及 MPC 技术应用中存在的一些一般性和实际性问题。另外，本书网站（http://www.wiley.com/go/rodriguez_control）还提供了仿真文件供读者下载，为读者学习、运行本书涉及的示例创造了便利条件。

经过多年的研究，并考虑到相关期刊和会议文献数量的增加，我们认识到这一课题正备受关注。这些年来，我们收集了大量的相关文献，不仅在一些大学组织了一系列讲座，还在一些国际会议上做了专题报告。我们从各种资料中选择了一些非常有趣的示例作为本书的某些章节，力求为读者提供一个简单易懂的读本。

本书适用于在电力电子及电气传动领域工作，并要进一步探索使用 MPC 技术的工程人员、研究人员和学生；也同样适用于致力控制理论研究，并要进一步探索这一控制策略新应用的相关人员。另外，也可以考虑将本书用作研究生或本科生研究功率变换器和电气传动装置的高级控制技术的参考用书。

我们希望在本书的帮助下，越来越多的人会参与其中，并在未来几年获得新突破。

原书致谢

作者诚恳地对以下机构和人士所提供的帮助表示感谢，他们使本书的出版成为可能，并在相关研究工作中的不同阶段提供了帮助。

本书中的绝大多数研究成果是由以下机构进行资助的：智利圣玛丽亚 Federico 技术大学、智利国家科学技术发展基金（FONDECYT[⊖]）（基金号 1101011, 100404），智利基础研究项目 FB021 “瓦尔帕莱索（Valparaiso）科学与技术中心”，Anillo 计划 ACT-119 和卡塔尔基金会（卡塔尔国家研究基金项目 NPRP、#4-077-2-028）。

作者特别感谢 Samir Kouro, Monina Vasquez, Rene Vargas, Hector Young, Marco Rivera, Christian Rojas, Cesar Silva, Marcelo Perez, Juan Villarroel, Juan Carlos Jarur, Sabina Torres, Mauricio Trincado, Alexis Flores。同时感谢为相关工作贡献力量量的所有学生和研究人员，他们的工作促成了本书的顺利出版。

最后，对在本书准备过程中我们的家庭所给予的鼓励、耐心和支持表示由衷的感谢。

⊖ FONDECYT, Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico, 智利国家科学技术发展基金。

目 录

译者序
原书序
原书前言
原书致谢

第一部分 绪 论

第 1 章 绪论	1
1.1 功率变换器和传动装置的应用	1
1.2 功率变换器的类型	3
1.2.1 通用传动系统	3
1.2.2 功率变换器的分类	3
1.3 功率变换器和传动装置的控制	6
1.3.1 早期的功率变换器控制	6
1.3.2 目前的功率变换器控制	8
1.3.3 控制要求和面临的挑战	9
1.3.4 数字控制平台	10
1.4 预测控制技术特别适用于电力电子领域的原因	11
1.5 本书内容	11
参考文献	13
第 2 章 功率变换器和传动装置的传统控制方法	14
2.1 传统电流控制方法	14
2.1.1 滞环电流控制	14
2.1.2 基于脉宽调制或空间矢量调制的线性控制	17
2.2 传统电气传动装置控制方法	21
2.2.1 磁场定向控制	22
2.2.2 直接转矩控制	23
2.3 总结	26

参考文献	27
第3章 模型预测控制	28
3.1 功率变换器和传动装置的预测控制方法	28
3.2 模型预测控制的基本原理	29
3.3 电力电子和传动装置的模型预测控制	31
3.3.1 控制器设计	31
3.3.2 实现	34
3.3.3 通用控制方案	34
3.4 总结	35
参考文献	35

第二部分 应用于功率变换器的模型预测控制

第4章 三相逆变器的预测控制	37
4.1 引言	37
4.2 预测电流控制	37
4.3 代价函数	38
4.4 变换器模型	38
4.5 负载模型	42
4.6 预测的离散时间模型	42
4.7 工作原理	43
4.8 预测控制策略实施	45
4.9 与传统控制策略进行比较	53
4.10 总结	56
参考文献	56
第5章 三相三电平中性点钳位逆变器的预测控制	57
5.1 引言	57
5.2 系统建模	57
5.3 应用脉宽调制的线性电流控制方法	61
5.4 预测电流控制方法	62
5.5 实现	64
5.5.1 开关频率降低	64

5.5.2 电容电压平衡	68
5.6 总结	70
参考文献	71
第6章 有源前端整流器的控制	72
6.1 引言	72
6.2 整流器模型	74
6.2.1 空间矢量模型	74
6.2.2 离散时间模型	76
6.3 在有源前端整流器中的预测电流控制	77
6.3.1 代价函数	77
6.4 预测功率控制	80
6.4.1 代价函数和控制方案	80
6.5 AC-DC-AC 变换器的预测控制	84
6.5.1 逆变器侧控制	84
6.5.2 整流器侧控制	85
6.5.3 控制方案	85
6.6 总结	88
参考文献	88
第7章 矩阵变换器的控制	90
7.1 引言	90
7.2 系统的模型	90
7.2.1 矩阵变换器模型	90
7.2.2 矩阵变换器工作原理	92
7.2.3 开关的转换	93
7.3 经典控制: Venturini 方法	93
7.4 矩阵变换器的预测电流控制	96
7.4.1 为预测控制产生的矩阵变换器模型	96
7.4.2 输出电流控制	98
7.4.3 在输入无功功率最小条件下的输出电流控制	99
7.4.4 输入无功功率控制	103
7.5 结论	104
参考文献	104

第三部分 应用于电机传动的模型预测分析

第 8 章 感应电机预测控制	105
8.1 引言	105
8.2 感应电机动态模型	106
8.3 利用预测电流控制对由矩阵变换器供电的感应电机进行磁场定向控制	108
8.3.1 控制方案	108
8.4 对由电压源逆变器供电的感应电机进行预测转矩控制	111
8.5 对由矩阵变换器供电的感应电机进行预测转矩控制	115
8.5.1 转矩与磁链控制	115
8.5.2 采用输入最小化无功功率的转矩与磁链控制	117
8.6 总结	118
参考文献	119
第 9 章 永磁同步电机预测控制	121
9.1 引言	121
9.2 电机方程	121
9.3 采用预测电流控制的磁场定向控制	123
9.3.1 离散时间模型	123
9.3.2 控制方案	123
9.4 预测速度控制	126
9.4.1 离散时间模型	127
9.4.2 控制方案	127
9.4.3 转子速度估算	128
9.5 总结	130
参考文献	130

第四部分 模型预测控制的设计与实现

第 10 章 代价函数的选择	131
10.1 引言	131

10.2	参考跟踪	131
10.2.1	示例	131
10.3	驱动约束条件	132
10.3.1	开关频率最小化	134
10.3.2	开关损耗最小化	135
10.4	约束条件	138
10.5	频谱含量	140
10.6	总结	143
	参考文献	144
第 11 章	权重系数设计	145
11.1	引言	145
11.2	代价函数分类	145
11.2.1	未包含权重系数的代价函数	146
11.2.2	包含次要项的代价函数	146
11.2.3	包含同等重要项的代价函数	147
11.3	权重系数调整	147
11.3.1	包含次要项的代价函数	147
11.3.2	包含同等重要项的代价函数	148
11.4	示例	149
11.4.1	降低开关频率	149
11.4.2	降低共模电压	150
11.4.3	输入无功功率降低	150
11.4.4	转矩与磁链控制	151
11.4.5	电容电压平衡	155
11.5	总结	156
	参考文献	157
第 12 章	延时补偿	158
12.1	引言	158
12.2	计算时间导致的延时影响	158
12.3	延时补偿方法	160
12.4	未来参考值预测	164
12.4.1	采用外推法的未来参考值计算	164
12.4.2	采用矢量角补偿法的未来参考值计算	166

12.5 总结	168
参考文献	168
第 13 章 模型参数误差影响	169
13.1 引言	169
13.2 三相逆变器	169
13.3 采用脉宽调制的比例积分控制器	170
13.3.1 控制方案	170
13.3.2 模型参数误差影响	170
13.4 采用脉宽调制的无差拍控制	171
13.4.1 控制方案	171
13.4.2 模型参数误差影响	172
13.5 模型预测控制	173
13.5.1 负载参数变化影响	173
13.6 比较结果	174
13.7 总结	179
参考文献	179
附录	180
附录 A 预测控制仿真——三相逆变器	180
A.1 三相逆变器的预测电流控制	180
A.1.1 仿真参数的定义	183
A.1.2 预测电流控制的 MATLAB®代码	184
附录 B 预测控制仿真——由两电平逆变器驱动的感应电机的转矩控制	186
B.1 预测转矩控制仿真参数的定义	189
B.2 预测转矩控制仿真的 MATLAB®代码	190
附录 C 预测控制仿真——矩阵变换器	192
C.1 直接矩阵变换器的预测电流控制	192
C.1.1 仿真参数的定义	194
C.1.2 具有瞬时无功功率最小化的预测电流控制的 MATLAB®代码	196

第一部分 绪 论

第 1 章 绪 论

在过去的几十年里，功率变换器和高性能可调速传动装置在各个领域都得到了越来越多的应用，这主要是由于其性能得到了改善，效率有所提高，可提高生产效率。由此可见，在大多数工业部门中功率变换器和传动装置，成为基本技术并可应用于各种各样的系统中。考虑到日益增长的能源需求，以及现阶段对电能质量和效率方面的新要求，利用电力电子技术来转换、控制电能成为一个非常重要的课题。为了满足这些需求，人们推出了新型半导体器件、拓扑结构，并设计了多种先进的控制方案。

本章为那些想了解功率变换器、电机传动装置及其应用的读者给出了基本的介绍和一些有用的参考文献；对功率变换器最常见的应用方式进行了介绍，并对常规的传动系统控制方案进行了说明。同时，还按照最简单的分类方式对工业领域常见的功率变换器拓扑结构进行了介绍。本章分别对功率变换器的控制方案及其基本概念进行了简要的说明，对当前常用的数字实现技术进行了讨论。

最后，为了便于读者理解本书的内容，本章简要介绍了本书的脉络结构，并简单介绍了使用预测控制技术的目的。

1.1 功率变换器和传动装置的应用

从工业到住宅等不同应用领域都会用到功率变换器和传动装置^[1,2]。图 1.1 给出了这些装置在不同领域的一些应用示例。同时，对每个分类里的一个示例给出了相应的系统结构框图，用 * 标出。

对于工业领域内使用的传动装置而言，泵和风机通常是耗能大户，它们的额定功率常高达数兆瓦。对于这类系统，使用可调速传动装置可在性能和效率方面带来巨大的好处。还有一些大功率传动装置可应用于采矿业，如下坡的带式输送机。图 1.1 给出了这类系统的框图，其中使用了具有有源前端整流器的三电平变换器作为能量回馈装置，实现了把能量从电机输送到电网^[3,4]。

2 功率变换器和电气传动的预测控制

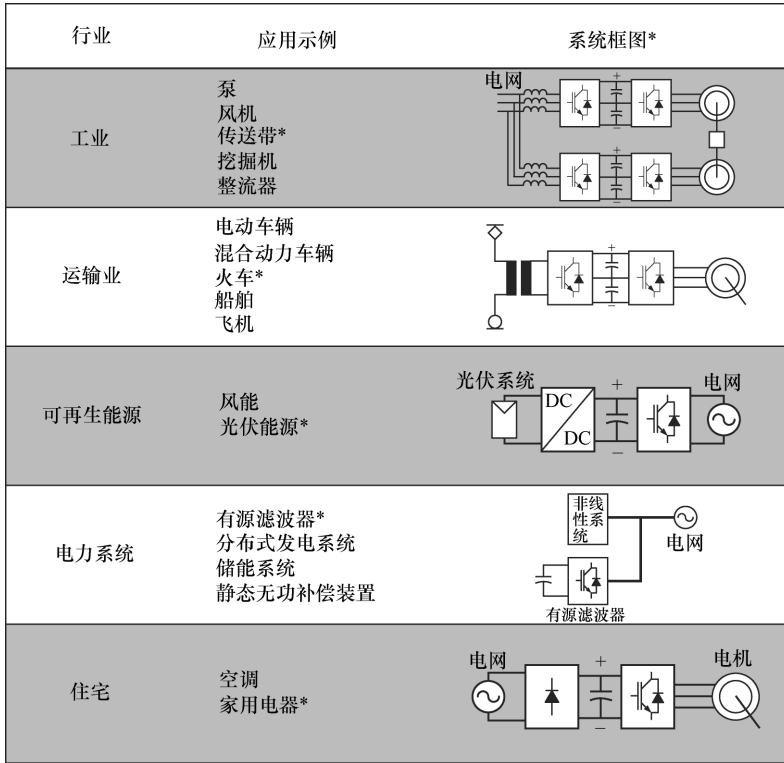


图 1.1 功率变换器的应用

传动装置广泛应用于运输行业，其中电机主要用于牵引和推进。在电气化列车系统中，常使用图 1.1 所示的功率变换器将能量由架空线输送至电机。这种变换器可产生所需电压，进而实现对电机转矩和转速的控制。大功率传动装置常见于船舶系统，一般使用柴油发电机，再通过电机产生推进动力。电动汽车、混合动力汽车及飞机也大量采用了这些功率变换器。

近年来，功率变换器在可再生能源系统中的应用不断增加，这主要是由于能源需求逐渐增加，同时人们对环境更加关注。在众多的可再生能源中，功率变换器在光伏（Photovoltaic, PV）发电系统中的应用最值得关注，因为 PV 电池板到电网之间的功率传输必须通过功率变换器才能实现。图 1.1 给出了一个适用于 PV 系统的功率变换器的示例，采用了直流 - 直流（DC - DC）变换器。它可保证 PV 电池板和逆变器处于最佳运行状态，进而将正弦波电流注入电网中。功率变换器和传动装置同样适用于风能发电系统，不仅能实现对风能获取量的最优控制，还可满足新电网规范对电能质量和系统性能方面的强制性要求^[5]。

使用功率变换器有助于改善电能质量和提高电网的稳定性。应用于电力系统的一些功率变换器例子包括有源滤波器、分布式发电系统能量变换器、储能系