

模型预测控制工程 应用导论

MPC: An Introduction To Industrial Applications

邹涛 丁宝苍 张端 编著



化学工业出版社

本书获浙江工业大学专著与研究生教材出版基金资助(基金编号20100106)

模型预测控制工程 应用导论

邹涛 丁宝苍 张端 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书全面介绍工业模型预测控制及相关建模、优化、性能评估的理论与方法，侧重于模型预测控制技术实施的完整性。主要由四部分内容组成：一是概述了模型预测控制的机理、特征，细致描述了它的典型算法、技术细节，并进行了稳定性分析；二是系统性地介绍了工业过程的模型化方法，以系统辨识方法为主，展示了工程中常用建模方法的基本原理及存在问题；三是介绍了模型预测控制上层的工业过程实时优化与稳态目标计算方法，其中详尽地给出了软约束调整方法中的优先级策略，并首次使用“点”模型概念解决了积分过程的稳态目标计算问题；四是介绍了模型预测控制的性能评估，突出了约束与经济性能这两大特征。

本书可作为高等学校化学工程、自动化类专业的研究生教材，预测控制理论研究者 and 工程技术人员的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

模型预测控制工程应用导论/邹涛, 丁宝苍, 张端
编著. —北京: 化学工业出版社, 2010. 6
ISBN 978-7-122-08237-4

I. 模… II. ①邹… ②丁… ③张… III. 工程模
型-预测控制 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 068866 号

责任编辑: 李彦玲
责任校对: 吴静

文字编辑: 丁建华
装帧设计: 关 飞

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮 政编码 100011)
印 刷: 北京市振南印刷有限责任公司
装 订: 三河市宇新装订厂
787mm×1092mm 1/16 印张 14½ 字数 386 千字 2010 年 8 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 35.00 元

版权所有 违者必究

前 言

模型预测控制是 20 世纪 70 年代在工业过程控制领域中出现的一类新型计算机控制算法，是继 PID 控制之后在过程控制应用中使用最广泛最有效的控制算法，已经成为处理复杂约束多变量控制问题的公认标准。作为先进过程控制的典型代表，它的出现对复杂工业过程的优化控制产生了深刻影响，在全球炼油、化工等行业数千个复杂装置中的成功应用及由此取得的巨大经济效益，使之成为工业过程控制领域最受青睐的先进控制算法。具体地，多变量控制功能能够最大限度地抑制控制系统的波动，保持控制系统的平稳，降低控制系统的方差。虽然某些多变量控制算法也具有高超的多变量控制能力，但模型预测控制更胜一筹之处在于它能够在平稳地将系统操作在多约束条件的某些边界上，使控制系统卡边运行，这是模型预测控制能够产生经济效益的关键。

目前，国际上专门从事模型预测控制技术服务的公司有 50 多家，很多大型石油公司都有专业的技术人员负责模型预测控制/先进过程控制的工作，很多国外的商品化软件包无论在技术体系上还是工程经验上都有独到之处。然而，模型预测控制在我国的应用深度和广度与国外相比有较大差距。本书的撰写，就是为了适应这方面的需要，通过全面介绍模型预测控制实施过程中相关的理论与方法，使读者全面了解模型预测控制应用中技术细节，从而推动模型预测控制在我国的研究与应用，使模型预测控制对我国国民经济的发展和自动化水平的提高产生积极的影响。

模型预测控制工程实施是一个系统工程，涉及了几乎控制科学与工程的所有问题，包括了滤波、工业过程的稳态优化、多变量的集成优化控制、状态估计等诸多难点问题，项目成功的关键在于相关 MPC 工程技术的完备性以及工程实施人员的经验。另一方面，与其说模型预测控制技术是一种控制技术不如说是一种优化技术，这是它与其他类反馈控制的主要区别所在。本书系统地论述了 MPC 与系统辨识、全局稳态优化、局部动态优化、性能评估的关系及技术细节，这也是本书区别于其他预测控制书籍的特色之一。“十一五”国家发展规划中，将节能减排定为国策，而集成了稳态优化操作的模型预测控制技术正是流程工业企业实现节能减排、提高生产率、降低消耗的关键技术。

本书力图从多方面对模型预测工程应用作出描绘，全书主要由邹涛提供初稿，丁宝苍对全书内容进行了认真审读并提出了修改意见，张端参与了本书内容的论证。全书内容主要由四部分组成：一是概述了模型预测控制的机理、特征，细致描述了它的典型算法、技术细节，并进行了稳定性分析（第 1、6、7、9 章）；二是系统性地介绍了工业过程的模型化方法，以系统辨识方法为主，展示了工程中常用建模方法的基本原理及存在问题（第 2、3 章）；三是介绍了模型预测控制上层的工业过程实时优化与稳态目标计算方法，其中详尽地给出了软约束调整方法中的优先级策略，并首次使用“点”模型概念解决了积分过程的稳态目标计算问题（第 4、5 章）；四是介绍了模型预测控制系统的性能评估，突出了约束与经济性能这两大特征（第 8 章）。这四个部分分别侧重于总体概念、基础算法及技术细节，以系统工程的全局观揭示了模型预测控制工程应用中所面对的科学问题，这有助于读者跳出单纯“控制”观点的束缚，加深对模型预测控制科学本质的理解，正确认识模型预

测控制工程应用中的关键问题和难点问题，拓宽视野，开辟思路。

本书作者目前都处在 MPC 相关理论与科学研究的第一线，积累了较多的理论知识与工程经验，同时也深深感受到 MPC 的科研与实践之难点所在。撰写本书的目的在于为致力于模型预测控制工程应用的技术人员搭建理论与工程实践之间的桥梁，以此促进模型预测控制在我国的研究与应用。

本书最主要的创新性工作（稳态目标计算方法）是我在上海交通大学博士、博士后期间的工作基础上完成的，全书的主体内容来自于上海交通大学学习与科研工作的积累。这里，首先要感谢上海交通大学席裕庚教授，如果没有他率先将预测控制引入到国内并做出大量开创性工作，这本书将不会问世。其次，我要感谢我的博士生导师李少远教授，在我的博士学习和博士后工作期间，他给了我许多宝贵的支持与鼓励。我还要感谢 Biao Huang 教授在博士后期间给我到加拿大 Alberta 大学交流与访问的机会，虽然只有三个月时间，但耳目一新的学术氛围使我终身受益。最后，我要感谢浙江大学苏宏业教授对我近期的科研工作给予的支持与指导。

另外，为了确保本书在理论与技术上的领先性和全面性，充分展现 MPC 控制理论与技术的最新研究动态，书中选择性地将几篇最具应用价值的 MPC 研究文献编入本书，在此谨向相关作者表示感谢。中国石油大学（华东）赵东亚博士，中国海洋大学杨华博士，中国电子科技集团第五十四研究所张强博士、Aspen Tech（上海研发中心）高级工程师朱晓军参与了本书的部分稿件撰写和修改工作，在此表示感谢。此外，本书中的研究工作还受到国家自然科学基金（60604017、60874046、60604015、60934007、60736021）、国家 863 高科技计划（2009AA04z138、2008AA042902）和浙江工业大学专著与研究生教材出版基金资助（基金编号 20100106）的资助，作者在此一并表示感谢。

由于水平所限，书中会有不尽人意之处，衷心希望广大读者提出宝贵意见。

邹 涛

2010 年 6 月于浙江工业大学

目 录

| | |
|------------------------------|----|
| 第 1 章 模型预测控制概述 | 1 |
| 1.1 先进过程控制 | 1 |
| 1.2 模型预测控制的基本原理 | 2 |
| 1.2.1 预测模型 | 2 |
| 1.2.2 滚动优化 | 2 |
| 1.2.3 反馈校正 | 4 |
| 1.2.4 参考轨迹 | 4 |
| 1.3 模型预测控制的应用场合 | 5 |
| 1.4 模型预测控制的发展历史及趋势 | 6 |
| 1.4.1 理论路线 | 6 |
| 1.4.2 技术路线 | 7 |
| 第 2 章 工业过程的模型化 | 11 |
| 2.1 工业过程的数学模型 | 11 |
| 2.1.1 模型的含义 | 11 |
| 2.1.2 时域模型与频域模型及信号谱 | 12 |
| 2.1.3 动态模型与稳态模型 | 14 |
| 2.1.4 工业过程的多输入多输出模型 | 17 |
| 2.1.5 机理建模与系统辨识 | 19 |
| 2.1.6 模型的可视化输出 | 20 |
| 2.1.7 小结 | 21 |
| 2.2 工业过程的测试 | 21 |
| 2.2.1 工业过程的预测试（模型辨识环节） | 21 |
| 2.2.2 测试信号 | 22 |
| 2.2.3 过程测试的几个原则 | 25 |
| 2.2.4 数据采集 | 26 |
| 2.2.5 数据预处理 | 27 |
| 2.3 线性模型及辨识 | 28 |
| 2.3.1 线性叠加原理与线性系统的卷积响应 | 28 |
| 2.3.2 FIR 模型及辨识 | 29 |
| 2.3.3 FSR 模型及辨识 | 36 |
| 2.3.4 离散传递函数模型及辨识 | 40 |
| 2.3.5 状态空间模型及辨识（简述） | 44 |
| 2.3.6 小结 | 45 |
| 2.4 非线性模型与辨识 | 45 |
| 2.4.1 非线性输入输出模型与辨识 | 46 |

| | | |
|------------|-------------------------------|-----------|
| 2.4.2 | 非线性状态空间模型与辨识 | 47 |
| 2.4.3 | 非线性机理模型的建立 | 47 |
| 2.5 | 本章总结 | 48 |
| 第3章 | 状态空间模型的辨识——子空间方法 | 49 |
| 3.1 | 引言 | 49 |
| 3.1.1 | 状态空间模型的一般描述 | 49 |
| 3.1.2 | Kalman 滤波 | 49 |
| 3.1.3 | 子空间模型辨识的基本思想 | 51 |
| 3.2 | 几何工具 | 52 |
| 3.2.1 | 正交投影 | 52 |
| 3.2.2 | 斜向投影 | 53 |
| 3.3 | 子空间矩阵描述 | 54 |
| 3.3.1 | Hankel 矩阵 | 54 |
| 3.3.2 | 系统矩阵 | 55 |
| 3.3.3 | 系数矩阵 | 55 |
| 3.4 | 子空间矩阵的线性回归方法 | 56 |
| 3.5 | 子空间辨识算法基本步骤 | 57 |
| 3.5.1 | 能观性矩阵/状态序列估计 | 58 |
| 3.5.2 | 状态空间模型计算 | 59 |
| 3.6 | 本章总结 | 60 |
| 第4章 | 工业过程实时优化技术 | 62 |
| 4.1 | 引言 | 62 |
| 4.2 | 过程优化基础 | 63 |
| 4.2.1 | 过程优化的应用领域 | 63 |
| 4.2.2 | 过程优化问题的数学模型 | 64 |
| 4.3 | 化工过程实时优化技术 | 65 |
| 4.3.1 | 化工过程实时优化技术特点与现状 | 66 |
| 4.3.2 | 化工过程实时优化的关键技术 | 70 |
| 4.3.3 | 化工过程实时优化的工程化 | 73 |
| 4.4 | 本章总结 | 75 |
| 第5章 | 稳态目标计算方法 | 76 |
| 5.1 | 引言 | 76 |
| 5.2 | 稳态目标计算问题描述 | 77 |
| 5.2.1 | 线性过程的稳态数学模型 | 77 |
| 5.2.2 | 稳态目标计算的自优化方法 | 82 |
| 5.2.3 | 稳态目标计算的目标跟踪方法 | 90 |
| 5.2.4 | 稳态目标计算的推广 | 92 |
| 5.3 | 稳态目标计算的可行性判定与软约束调整 | 92 |
| 5.3.1 | 可行性判定与软约束调整的加权方法 | 93 |
| 5.3.2 | 可行性判定与软约束调整的优先级方法 | 99 |
| 5.3.3 | 软约束调整与优化目标的协调 | 108 |
| 5.4 | 一种基于状态空间模型的稳态目标计算方法 | 109 |
| 5.5 | 本章总结 | 110 |

| | |
|--------------------------------------|------------|
| 知识链接 1. 数学规划与最优性条件 | 111 |
| 2. 线性规划与二次规划 | 112 |
| 第 6 章 模型预测控制算法 | 115 |
| 6.1 引言 | 115 |
| 6.2 DMC | 116 |
| 6.2.1 单变量 DMC 算法 | 116 |
| 6.2.2 适用于一阶积分过程的 DMC 算法 | 119 |
| 6.2.3 多变量 DMC 算法 | 123 |
| 6.2.4 QDMC | 127 |
| 6.2.5 集成稳态目标计算的 DMC 算法 | 129 |
| 6.2.6 DMC 处理可测扰动的方法 | 130 |
| 6.3 状态空间模型预测控制算法 | 131 |
| 6.3.1 最优控制 | 131 |
| 6.3.2 线性状态空间模型预测控制算法 | 133 |
| 6.4 无静差线性模型预测控制的扰动建模方法 | 140 |
| 6.4.1 模型预测控制问题描述 | 140 |
| 6.4.2 不可测扰动的建模 | 141 |
| 6.4.3 控制系统的可检测性 | 142 |
| 6.4.4 状态估计 | 147 |
| 6.4.5 被控变量的目标跟踪 | 148 |
| 6.4.6 无静差控制 | 149 |
| 6.4.7 仿真 | 150 |
| 6.4.8 小结 | 154 |
| 6.5 非线性模型预测控制算法 | 156 |
| 6.6 模型预测控制稳定性的研究现状及常用方法 | 157 |
| 6.6.1 几种典型的模型预测控制描述形式 | 157 |
| 6.6.2 原始形式及 Kleinman 控制器的稳定性研究 | 160 |
| 6.6.3 终端零约束和终端等式约束预测控制 | 161 |
| 6.6.4 终端约束的放松和终端约束集 | 162 |
| 6.6.5 终端代价函数的引入 | 164 |
| 6.6.6 具有终端约束集和终端代价函数的稳定预测控制算法 | 164 |
| 6.6.7 预测控制稳定性研究的常用方法 | 165 |
| 6.7 总结 | 167 |
| 知识链接 控制系统的能控性、可镇定性、能观性、可检测性 | 167 |
| 第 7 章 模型预测控制工程化的更多细节 | 170 |
| 7.1 模型预测控制工程化的一些实用方法 | 170 |
| 7.1.1 模型预测 | 170 |
| 7.1.2 非线性变换处理方法 | 172 |
| 7.2 模型预测控制的项目实施流程 | 177 |
| 7.2.1 效益分析与初步设计 | 177 |
| 7.2.2 预测试 | 178 |
| 7.2.3 动态响应测试与模型辨识 | 179 |

| | | |
|--------------|-----------------------------|------------|
| 7.2.4 | 控制器离线仿真与参数整定 | 179 |
| 7.2.5 | 控制器投运与培训 | 179 |
| 7.2.6 | 控制器维护 | 180 |
| 第 8 章 | 模型预测控制系统的性能评估 | 181 |
| 8.1 | 引言 | 181 |
| 8.2 | 控制系统性能评估的研究概述 | 183 |
| 8.2.1 | 基于最小方差基准的性能评估方法 | 183 |
| 8.2.2 | 性能评估的其他方法 | 186 |
| 8.3 | 约束模型预测控制系统的性能评估 | 187 |
| 8.3.1 | 概述 | 187 |
| 8.3.2 | 最小方差控制器设计中的预测方法 | 187 |
| 8.3.3 | 有限时域最小方差控制器 | 189 |
| 8.3.4 | 约束最小方差控制器 | 191 |
| 8.3.5 | 约束模型预测控制系统的性能评估 | 192 |
| 8.3.6 | 小结 | 196 |
| 8.4 | 模型预测控制关于变化性和约束调整的性能评估 | 196 |
| 8.4.1 | 概述 | 196 |
| 8.4.2 | 问题描述 | 198 |
| 8.4.3 | 优化问题的求解 | 203 |
| 8.4.4 | 一种系统性方法 | 206 |
| 8.4.5 | 案例研究 | 207 |
| 知识链接 | 最小方差控制 | 209 |
| 8.4.6 | 小结 | 210 |
| 第 9 章 | 讨论与总结 | 211 |
| | 中英文对照表 | 213 |
| | 参考文献 | 215 |

模型预测控制概述

模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)是20世纪70年代产生于工业过程控制领域的一类计算机控制算法。在分类上MPC属于先进过程控制(Advanced Process Control, APC),所以在概述MPC技术之前,首先了解什么是APC。

1.1 先进过程控制

APC是对那些不同于常规单回路控制,并具有比常规PID控制更好的控制效果的控制策略的统称,而非专指某种计算机控制算法。由于APC的内涵丰富,同时带有强烈的时代特征。因此,至今对APC还没有严格的、统一的定义。尽管如此,APC的任务是明确的,即用来处理那些采用常规控制效果不好,甚至无法控制的复杂工业过程控制的问题。

APC由多种过程控制技术组成,包括:

- 模型预测控制 Model Predictive Control(MPC)
- 统计过程控制 Statistical Process Control(SPC)
- Run to Run (R2R)
- 故障检测与分类 Fault Detection and Classification(FDC)
- 传感器控制

通常,APC系统与分布式控制系统(DCS,又称集散控制系统)相连接,APC的计算结果通过OPC(OLE for Process Control)接口发送到控制端口上。

APC主要应用于石化行业,因为该行业包含了大量的复杂多变量控制问题。由于控制器包含了变量之间的动态关系,就可以预测变量在未来如何变化。基于预测而计算的控制动作可以保证变量位于它们的限制范围内。APC通常被用于模型可以被估计且变化不大的场合。在复杂的半导体工业中,APC在整条生产线的控制中起到非常重要的作用。目前,APC也越来越多地被其他工业所使用,例如,在矿山工业有很多成功应用(通常结合模糊逻辑控制)。

APC中常用的一些技术术语包括:

过程的输入指过程的“自变量”(Independent Variable),即在过程运行中它的数值不受过程中其他变量的影响,包括操纵变量(Manipulated Variable, MV,又称控制输入;本书沿袭国内习惯,在实时优化中,将该变量称为操纵变量,在稳态目标计算和MPC中将之称为控制输入)与扰动变量(Disturbance Variable, DV,又称扰动输入),扰动输入亦可划分为可测扰动和不可测扰动两种;过程的输出指过程的“因变量”(Dependent Variable, DV),是指过程输入产生变化时会发生相应变化的变量,亦称被控变量(Controlled Variable, CV)。

1.2 模型预测控制的基本原理

MPC 是 APC 的核心技术，主要应用于过程工业，例如炼油或化工过程。MPC 技术产生于 20 世纪 70 年代末 80 年代初。MPC 使用过程的动态模型，模型通常是由系统辨识方法获得的线性经验模型。

MPC 使用模型对过程输出在输入变化下的未来行为进行预测。在石化过程中，控制输入通常是某些调节控制回路的设定值，而输出变量通常是与约束有关的变量。MPC 使用模型和当前过程的测量值来计算操纵变量的未来动作，并保证所有的输入输出满足约束条件，而后 MPC 将计算好的多个控制输入值下载到调节器控制回路中，由调节器完成基础的控制作用。尽管大多数的实际过程仅在有限的操作区间内才可以近似为线性过程，但线性 MPC 被使用在绝大多数的 MPC 工程项目中，这是因为 MPC 中的反馈机制可以补偿模型与过程之间的预测误差。在线性 MPC 框架下，线性叠加原理可以轻松地处理多输入多输出过程的预测问题，将控制问题转化为快速有效的矩阵运算。

当过程存在较强的非线性时，线性模型可能无法充分精确地描述过程，这时可使用非线性 MPC。非线性 MPC 直接使用由数据拟合方法或机理方法获得的非线性模型，对于状态不可测的情况，非线性模型可用于非线性滚动时域估计。在对非线性模型进行线性化处理，也可使用线性 MPC 方法。在过程控制中，非线性模型的用处很大，例如，非线性模型可用于数据校正、将非线性模型进行稳态化处理后可用于实时优化。

实用过程中，MPC 的形式多种多样，技术细节差异很大，但无论 MPC 采用何种形式，各类 MPC 技术都有一些共同特点，归结起来有下述基本特征(席裕庚，1993)。

1.2.1 预测模型

MPC 是一种基于模型的控制算法，对于 MPC 来讲，只注重模型的功能，而不注重模型的形式。预测模型的功能就是根据对象的历史信息和未来输入，预测其未来输出。从方法的角度讲，只要是具有预测功能的信息集合，无论其具有什么样的表现形式，均可以作为预测模型。因此，状态方程、传递函数这类传统的模型都可以作为预测模型。对于线性稳定对象，脉冲响应、阶跃响应这类非参数模型，也可以作为预测模型使用。此外，非线性系统、分布参数系统的模型只要具备上述功能，也可以作为预测模型使用。因此，MPC 打破了之前的控制算法或策略对模型结构的严格要求，更着眼于在信息的基础上根据功能要求按最方便的途径建立模型。例如，在动态矩阵控制(Dynamic Matrix Control, DMC)、模型算法控制(Model Algorithmic Control, MAC)等 MPC 策略中，采用在实际工业中容易获得的阶跃响应、脉冲响应等非参数模型，而广义预测控制(Generalized Predictive Control, GPC)等 MPC 策略则选择受控自回归积分滑动平均(CARIMA)模型等参数模型。

预测模型具有展示系统未来动态行为的功能。这样，就可以利用预测模型为 MPC 的优化提供先验知识，从而决定采用何种控制输入，使未来时刻被控对象的输出变化符合预期的目标。

在系统仿真时，任意地给出未来的控制策略，观察对象在不同控制策略下的输出变化(如图 1.1 所示)，可为比较这些控制策略的优劣提供基础。

1.2.2 滚动优化

如果说 MPC 与其他控制理论或方法只有一个特色性的不同，那么这个不同就在于 MPC

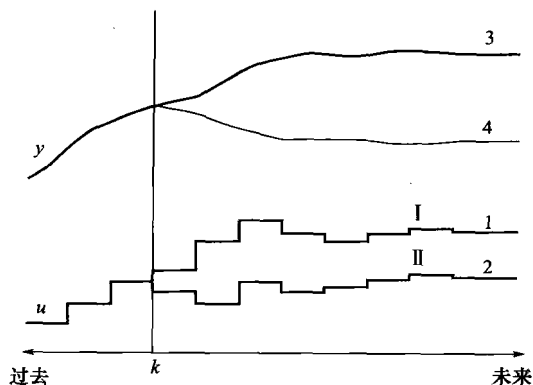


图 1.1 基于模型的预测

1—控制量序列 I；2—控制量序列 II；3—对应于 I 的输出；4—对应于 II 的输出

实现控制作用的方式：滚动优化、滚动实施。

在工业应用和理论研究中，MPC 通常是采用在线优化方法。MPC 是通过某一性能指标的最优来确定未来的控制作用的。这一性能指标涉及系统未来的性能，例如通常可取对象在未来的采样点上跟踪某一期望轨迹的方差最小，但也可采取更广泛的形式，例如要求控制能量最小等。性能指标中涉及系统未来的行为，是根据预测模型由未来的控制动作决定的。但是，MPC 中的优化与通常的最优控制算法有很大的差别。这主要表现在 MPC 中的优化不是采用一个不变的全局优化指标，而是采用滚动式的、通常是有限时域的优化策略。在每一采样时刻，优化性能指标通常只涉及未来的有限的时间，而到下一采样时刻，这一优化时域向前推移（如图 1.2 所示）。因此，MPC 在每一时刻有一个相对于该时刻的优化性能指标。不同时刻优化性能指标的相对形式是相同的，但其绝对形式，即所包含的时间区域，则是不同的。

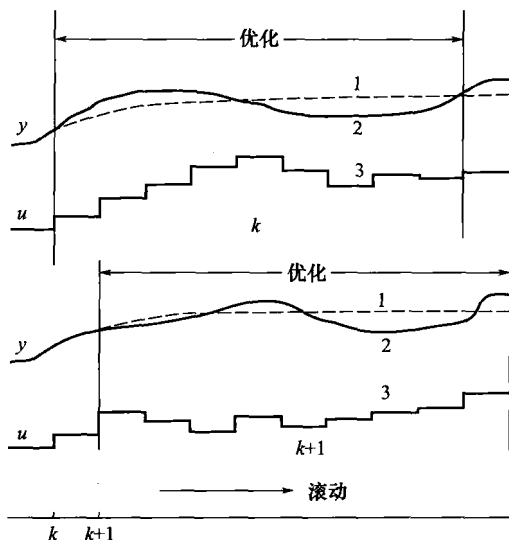


图 1.2 滚动优化

1—参考轨迹；2—最优预测输出；3—最优控制作用

在 MPC 中，通常优化不是一次离线进行、而是反复在线运行，这就是滚动优化的含义，也是 MPC 区别于传统最优控制的根本特点。这种有限时域优化目标的局限性在于理想情况下只能得到全局的次优解，但优化的滚动实施却能应对由于模型失配、时变、干扰等引起的不确定性，及时进行弥补，始终把新的优化建立在实际的基础上，使控制保持实际上的

最优。对于实际的复杂工业过程来说，模型失配、时变、干扰等引起的不确定性是不可避免的，因此建立在有限时域上的滚动优化策略反而更加有效。

近来，在状态空间模型的 MPC 方法中常使用准无穷时域优化指标(Scokaert & Rawlings, 1998)以获得稳定性保证，其本质上是将无穷时域划分两个部分：有限时域和之后的无穷时域，滚动优化计算同传统的 MPC 相一致，但后无穷时域的引入使解具有更好的全局最优性。该理念已经成为状态空间模型 MPC 的设计基础。

1.2.3 反馈校正

众所周知，反馈在克服干扰和不确定性的影响、获得闭环稳定性方面有着基本的、不可替代的作用。MPC 发展至今，可以说不仅没有放弃反馈，而是更充分地利用反馈；不仅不能否定和替换反馈的作用，而是不断证实反馈的意义。

MPC 算法在进行滚动优化时，优化的基点应与系统实际情况一致。但作为算法基础的预测模型，只是对象动态特性的粗略描述，由于实际系统中存在的非线性、时变、模型失配、干扰等因素，基于不变模型的预测不可能和实际情况完全吻合，这就需要附加的预测手段补充模型预测的不足，或者对基础模型进行在线修正。滚动优化只有建立在反馈校正的基础上，才能体现出优越性。因此，MPC 算法在通过优化确定了一系列未来的控制作用后，为了防止模型失配和环境干扰引起控制对理想状态的偏离，并不是将这些控制作用逐一全部实施，而只是实现本时刻的控制作用。到下一采样时刻，首先监测对象的实际输出，并通过各种反馈策略，修正预测模型或加以补偿，然后再进行新的优化(如图 1.3 所示)。

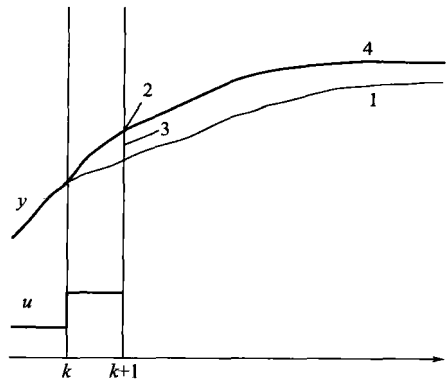


图 1.3 误差校正

1— k 时刻的预测输出；2— $k+1$ 时刻的实际输出；
3—预测误差；4— $k+1$ 时刻校正的预测输出

反馈校正的形式是多样的，可以在保持模型不变的基础上，对未来的误差做出预测并加以补偿，也可以采用在线辨识的方法直接修改预测模型。无论采用何种校正形式，MPC 都把优化建立在系统实际的基础上，并力图在优化时对系统未来的动态行为做出较准确的预测。因此，MPC 中的优化不仅基于模型，而且利用了反馈信息，因而构成了闭环优化。

反馈校正的形式是多样的，可以在保持模型不变的基础上，对未来的误差做出预测并加以补偿，也可以采用在线辨识的方法直接修改预测模型。无论采用何种校正形式，MPC 都把优化建立在系统实际的基础上，并力图在优化时对系统未来的动态行为做出较准确的预测。因此，MPC 中的优化不仅基于模型，而且利用了反馈信息，因而构成了闭环优化。

1.2.4 参考轨迹

在 MPC 中，考虑到过程的动态特性，为了避免过程出现输入和输出的剧烈变化，往往要求过程由当前输出值 $y(k)$ 沿着一条期望的、平缓的曲线达到设定值 y_r 。这条曲线常被称为参考轨迹 $y_r(k)$ 。它是设定值经过在线柔化的产物。最广泛采用的参考轨迹为一阶指数变化形式

$$y_r(k+i) = \alpha^i y(k) + (1 - \alpha^i) y_r \quad (1.1)$$

其中

$$\alpha = e^{-\frac{T_s}{T}}$$

式中， T_s 为采样周期； T 为参考轨迹的时间常数；下标 r 指示参考值(Reference Value)； $y(k)$ 为当前时刻的实际输出测量值； y_r 为设定值。

显然， T 越小，则 α 越小，参考轨迹就能很快地达到设定值 y_r 。 α 是 MPC 中一个非常重要的参数，它对闭环系统的动态特性和鲁棒性都有重要影响。

1.3 模型预测控制的应用场合

最近的一篇关于 MPC 技术应用的综述是美国著名的过程控制专家秦泗钊教授(S. Joe Qin)教授的论文《工业预测控制技术的调查》(Qin & Badgwell, 2003)。文中指出：在石油、化工、造纸、食品加工、汽车制造、航空等主要行业都可以找到 MPC 的应用，但是应用的程度并不相同。Qin & Badgwell(2003)就线性 MPC 和非线性 MPC 的具体应用情况进行了汇总(按领域进行了划分)，结果见表 1.1 和表 1.2。

表 1.1 线性 MPC 应用情况汇总

| 领域 | Aspen Technology | Honeywell Hi-Spec | Adersa | Invensys | SGS | 总数 |
|---------|---|--------------------------|-----------------------------|----------|------|------|
| 炼油 | 1200 | 480 | 280 | 25 | | 1985 |
| 石化 | 450 | 80 | — | 20 | | 550 |
| 化工 | 100 | 20 | 3 | 21 | | 144 |
| 造纸 | 18 | 50 | — | — | | 68 |
| 气体加工 | — | 10 | — | — | | 10 |
| 能源 | — | 10 | — | 4 | | 14 |
| 冶金 | 8 | 6 | 7 | 16 | | 37 |
| 食品加工 | — | — | 41 | 10 | | 51 |
| 聚合物 | 17 | — | — | — | | 17 |
| 加热炉 | — | — | 42 | 3 | | 45 |
| 航空/国防 | — | — | 13 | — | | 13 |
| 汽车 | — | — | 7 | — | | 7 |
| 未分类 | 40 | 40 | 1045 | 26 | 450 | 1601 |
| 总数 | 1833 | 696 | 1438 | 125 | 450 | 4542 |
| 第一个应用 | DMC; 1985 IDCOM-M; 1987 OPC; 1987 | PCT; 1984 RMPCT; 1991 | IDCOM; 1973 HIECON; 1986 | 1984 | 1985 | |
| 最大的应用规模 | 603×283 | 225×85 | — | 31×12 | — | |

表 1.2 非线性 MPC 应用情况汇总

| 领域 | Adersa | Aspen Technology | Continental Controls | DOT Products | Pavilion Technologies | 总数 |
|------|--------|---------------------|-------------------------|-----------------|--------------------------|----|
| 气体加工 | | | 18 | | | 18 |
| 化工 | 2 | | 15 | | 5 | 22 |
| 食品加工 | | | | | 9 | 9 |
| 聚合物 | | 1 | | 5 | 15 | 21 |
| 造纸 | | | | | 1 | 1 |
| 炼油 | | | | | 13 | 13 |
| 能源 | | 5 | 2 | | | 7 |
| 未分类 | 1 | | 1 | | | 2 |
| 总数 | 3 | 6 | 36 | 5 | 43 | 93 |

从上述两个汇总表中可以看出 MPC 最大的应用领域是在炼油, 占有 67% 的比例, 这是 MPC 的传统优势领域。其他石化和化工领域的 MPC 应用项目也非常多, 说明 MPC 已经成功打入该领域。快速增长的领域包括造纸、食品加工、汽车制造、航空等行业, 这些工业是 MPC 的新兴应用领域。

为什么 MPC 最适合于炼油工业? 这与炼油工业的特点有关, 也与 MPC 的特点有关。炼油工业最主要的目标是将过程稳定在期望的操作点上, 而不是快速由一个工作点变化到另一个工作点。过程在操作点附近的动态可近似使用线性模型描述, 这样就可以使用线性 MPC 对其实施控制。如果过程经常性地大范围变化, 则此类过程通常无法使用一个简单的线性模型进行描述, 需要考虑更为复杂的控制策略。

企业生产的目的在于生产出合格的产品并使效益最大化。多数情况下, 最大化效益就是使产量最大化, 但前提是增加的产量所产生的价值要大于增加的原材料消耗和能源消耗的成本, 而且还要满足产品质量要求。由上述分析可知, 经济效益的最大化与生产过程的操作区间有关, 而操作区间与生产过程或装置的一系列约束条件有关。一般地, 位于操作区间的中心位置时, 将使系统具有较强的操作能力, 例如抑制扰动, 但由优化理论可知系统最佳的操作条件往往位于约束条件的交叉点上。这就要控制系统既能够将过程精确地控制在约束边界上(或边界内), 又能够快速抑制干扰的影响, 还能够处理复杂多变量系统的强耦合。MPC 技术是解决上述问题的最佳方案, 其最大特点就是利用预测模型和优化方法来解决多变量有约束的控制问题。

可以说, MPC 最大的亮点就是 MPC 可以降低控制系统的方差, 可将控制系统推近至最有价值的约束边界附近, 从而达到增加经济效益的目的。所以, 最适宜 MPC 的场合就是那些有潜力可挖的生产过程, 而且是多变量有约束的。炼油、石化企业有很多装置都具有这样的特点。很多炼油装置规模巨大, 产量如果能够增加一些, 就会产生巨大的经济效益; 某些装置产品的价值较原料高很多, 例如催化裂化, 如能将目标产品转化率提高, 也会产生巨大的经济效益; 某些装置能耗很高, 例如分馏塔, 在分馏塔中为了避免扰动对产品质量造成影响, 常将回流比设置很大, 这种过度提纯造成了能量的浪费, 如果能够有效地抑制干扰, 可节省大量能耗开支。

1.4 模型预测控制的发展历史及趋势

本小节将从理论发展和技术发展这两条主线来讲述 MPC 的发展史, 重点强调技术的发展。

1.4.1 理论路线

MPC 发展的历史就是其理论与技术的发展史, 理论与技术发展的过程是不对称的, 交叉的, 相互促进的。一般认为 MPC 是先有技术后有理论, 即 20 世纪 70 年代后期产生的 DMC 和模型预测启发控制(Model Predictive Heuristic Control, MPHHC, 又称模型算法控制, MAC)是 MPC 技术诞生的标志, 但早在 70 年代初期就有关于滚动时域控制(MHC, Moving Horizon Control)的研究。80 年代, 英国学者 Clarke 提出了 GPC, 进一步推进了 MPC 的理论研究。

到了 20 世纪 90 年代, 国际上对 MPC 的理论研究主要转向综合方法的研究, 逐渐形成了以最优控制为理论基础的具有稳定性保证的 MPC 的概略性思路。综合型 MPC 的早期形式就是 70 年代初的那些滚动时域控制方法。90 年代初, 已有一些学者评价 DMC、MAC 和

GPC 在稳定性方面具有试凑特征，主要原因在于这些方法的稳定性研究非常困难，在应用中只能是在线调整方法，那些理论推导结果具有较大的局限性。

MPC 的综合方法已得到一些很好的结果，但到目前为止，还没形成非常成熟的技术体系。究其原因，最主要的是综合方法主要采用状态空间模型；而 20 世纪 70 年代后期提出 MPC 时，正是为了克服基于状态空间模型的“现代控制理论”的某些不足。综合型 MPC 的一个大问题就是状态的不可测问题，采用状态估计器的 MPC 综合方法目前还很保守；另一个大问题是关于模型的自适应问题，这个问题国际上已有少量研究成果，仍在发展中。DMC、MAC、GPC 都不涉及状态不可测问题，而 Clarke 提出 GPC 时就是将其作为一种自适应控制方法的。

由前面的分析可知，MPC 的主要应用场合在流程工业过程，这是由 MPC 的自身特点决定的。因为 MPC 的复杂性导致了较大的在线计算量，所以它适用于慢过程的控制，即过程控制。然而，随着 MPC 研究的不断进展，出现了很多的快速 MPC 方法，使得 MPC 在快速随动系统中得到了应用。其中，最具有代表性的方法是预测函数控制(PFC, Predictive Functional Control)(Richalet, ed al, 1997)。该方法与一般 MPC 的区别在于：PFC 将控制输入的结构视为关键问题，认为在输入频谱有限的情况下，控制输入只能属于一组与设定轨线和对象性质有关的特定的函数族。因此，它在预测优化的具体做法上与一般的 MPC 算法有所不同。每一时刻的控制输入被看作是由若干事先选定的基函数组合而成，通过它们的已知响应合成系统的输出，在此基础上通过优化求出线性加权系数，再由此算出控制输入。关于 PFC 的细节，请参阅由 PFC 的创造者 Richalet 于 2009 年 5 月出版的关于 PFC 的权威性著作(Richalet & O'Donovan, 2009)，该论著全面揭示了 PFC 的技术原理和应用情况。此外，近年来出现的一种新的 MPC 策略也开始得到重视，这就是离线 MPC(Ding & Huang, 2007)，该策略的基本出发点是将在线优化计算转变为离线优化计算，利用离线计算得到的规律重组在线控制律，使复杂的在线寻优计算转变为简单的代数运算。虽然这种方法的应用还处在萌芽期，但可以预见，随着研究的不断深入该方法将得到广泛地应用。

1.4.2 技术路线

总的来说，当前的商品化 MPC 软件包通常包含以下模块：模型辨识与分析、控制设计与整定以及控制器性能评估模块。通常，MPC 功能越强大，其性能越好，但不可否认“人”的因素在 MPC 项目实施中起到的至关重要的作用。下面通过 MPC 技术阶段性发展历程来说明 MPC 的演变历程。Qin & Badgwell(2003)将 MPC 的技术发展划分为四个阶段。

第一阶段，以 IDCOM 和 DMC 算法为代表，主要处理无约束过程。

(1)IDCOM[IDentification and COMmand, 由 Richalet, et al(1976)提出] 问题描述中包含了有限时域脉冲响应(线性)模型，二次型性能指标，以及过程的输入输出约束条件。该方法使用最小二乘法进行 FIR 模型参数估计，开环最优控制问题的求解也是采用最小二乘法。IDCOM 的核心是模型预测启发控制(Model Predictive Heuristic Control, MPHIC, 又称 MAC)算法。IDCOM 的主要特点有：

- ① 被控对象的数学模型为有限脉冲响应(FIR, Finite Impulse Response)模型；
- ② 采用有限时域上的二次型性能指标；
- ③ 以参考轨迹为对象的输出目标轨线；
- ④ 输入输出约束(注：采用计算后验证的方法)；
- ⑤ 与辨识对偶，采用启发式迭代算法计算最优输入值。

IDCOM 采用离散 FIR 模型来描述过程输入输出之间的关系。对于单输入单输出系统，

FIR 模型为

$$y_{k+j} = \sum_{i=1}^N h_i u_{k+j-i} \quad (1.2)$$

式中, y_{k+j} 为 $k+j$ 时刻的模型预测输出; h_i 为第 i 个脉冲响应系数; u_{k+j-i} 为 $k+j-i$ 时刻的过程控制输入。

MPHC 算法尽量使预测的过程输出逼近期望的目标轨迹。目标轨迹通常是当前时刻输出到期望的设定点之间的一条一阶曲线。闭环系统的响应速度可由目标轨迹的时间常数决定。

IDCOM 被成功地运用于过程对象中, 如催化裂化装置的主分馏塔等, 取得了很好的利润。然而, IDCOM 使用脉冲响应模型, 即使在无模型误差的情况下, 系统仍会存在静差, 且 IDCOM 在处理约束问题方面没有好的方法。

(2)DMC 壳牌石油公司的工程师们在 20 世纪 70 年代初开发了一种 MPC 技术软件包, 于 1973 年投入使用。Cutler & Ramaker(1979, 1980)在 1979 年的 AIChE 会议和 1980 年的 ACC 会议上正式提出了无约束的多变量控制算法。

DMC 的主要特征有:

- ① 使用有限阶跃响应(FSR, Finite Step Response)模型;
- ② 采用有限时域上的二次型性能指标;
- ③ 对象的未来输出尽可能跟踪设定值;
- ④ 优化解是最小二乘解。

对于 SISO 系统, FSR 形式为

$$y_{k+j} = \sum_{i=1}^{N-1} a_i \Delta u_{k+j-i} + a_N u_{k+j-N} \quad (1.3)$$

式中, a_i 是阶跃响应系数。

DMC 的目标是在最小二乘意义下将预测输出推向设定值, 而且带有对控制量的惩罚项。这样, 系统的输入和输出变化不会过于激烈。与 IDCOM 相比, DMC 对模型误差鲁棒性更强, 且由于 DMC 采用增量形式算法, 无建模误差和噪声等不确定时不存在稳态误差。

IDCOM 和 DMC 被称为第一代 MPC 技术, 它们对工业过程控制产生了巨大的影响, IDCOM 和 DMC 被认为是 MPC 技术的典范。

第二阶段, 以 QDMC(Quadratic Dynamic Matrix Control; Garcia & Morshedi, 1986)为代表。与第一代 MPC 相比, QDMC 提供了系统性地解决输入输出约束的方法, 也就是将滚动优化描述为一个 QP 问题。采用二次规划方法在系统是线性、目标为二次型、约束为线性不等式条件的前提下求解有约束的开环优化问题。QDMC 采用了成熟的 QP 算法, 由于对于一般实际存在的问题来说, QP 问题的 Hessian 矩阵是正定的, 这样 QDMC 的优化问题就可表示为凸函数, 因此可使用标准优化程序得到最优解。

QDMC 算法在约束问题上的处理具有独到之处。在实际过程中, 过程输入输出常受到限制, 具体可以归结为以下四类约束: 执行器约束条件、设备约束条件、操作约束条件和产品质量约束条件。其中一些约束条件不允许违反, 这类约束条件被称为硬约束; 另外一些条件允许暂时地超出约束范围, 这类约束条件被称为软约束。QDMC 要求在一定的预测时域内保证变量满足约束条件。如果在整个预测时域内考虑所有变量的约束条件, 在线计算将变得非常庞大。Garcia 和 Morshedi 提出了约束窗的概念, 只要在预测时域的一段上满足约束要求就可以了。约束窗一般从将来的某一点开始一直到稳态。对于非最小相位系统, 约束窗