

文章编号: 1001-0920(2001)04-0385-07

非线性模型预测控制的现状与问题

陈虹¹, 刘志远², 解小华¹

(1. 吉林大学 控制科学与工程系, 吉林 长春 130025; 2. 哈尔滨工业大学 控制科学与工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 模型预测控制的一个主要优点是能显式并优化处理控制量和状态量的约束。为此, 主要围绕非线性预测控制的算法、稳定性和鲁棒性、对偶问题和滚动时域估计的最新研究成果进行综述, 并阐述了理论与应用方面有待进一步研究的几个主要问题。

关键词: 非线性预测控制; 约束; 稳定性; 鲁棒性; 流动时域估计

中图分类号: TP 13 **文献标识码:** A

Nonlinear Model Predictive Control: The State and Open Problems

CHEN Hong¹, LIU Zhi-yuan², XIE Xiao-hua¹

(1. Department of Control Science and Engineering, Jilin University of Technology, Changchun 130025, China;

2. Department of Control Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: An important advantage of model predictive control (MPC) is its ability to cope with constraints on controls and states in an explicit and optimal way. For nonlinear MPC, recent results on approaches, stability, robustness and the dual problem moving horizon estimation are reviewed. Some open problems concerning the theoretical and practical properties of nonlinear MPC are also discussed.

Key words: nonlinear MPC; constraints; stability; robustness; moving horizon estimation

1 引言

大部分工业控制都带有约束, 并具有非线性特性。以往常采用工作点附近的线性化模型来设计控制器。但对产品质量和产量要求的不断提高, 对生产经济效益的不断追求, 以及环境保护的日趋严格, 都使得工业过程越来越复杂, 并使工作点越来越接近约束的边缘。此时, 若不考虑约束和非线性特性的控制方法则难以达到性能要求。模型预测控制(MPC)的主要优点是能在线处理约束并使其动态得到满足; 对非线性动态的考虑也相当方便——采用非线

性模型来预测未来动态。因此, 非线性MPC在工业控制中具有广阔的应用前景, 并引起了人们的普遍关注^[1~3]。如果不考虑约束, 线性MPC(MPHC, MAC, DMC等)则有统一的状态空间表达式^[4,5], 可基于线性理论进行分析和设计。

目前, 线性MPC理论已较成熟^[1,4,6~8]; 近年来, 对约束线性MPC和非线性MPC的研究也取得了可喜的成果。因此, 本文将从算法、稳定性与鲁棒性、输出反馈及滚动时域估计等方面, 讨论非线性MPC的研究现状及存在的问题, 其中也包含了对约束MPC的相关内容。

收稿日期: 2000-06-07; 修回日期: 2000-12-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(69804004); 教育部骨干教师基金项目; 黑龙江省自然科学基金项目

作者简介: 陈虹(1963—), 女, 浙江桐乡人, 教授, 博士, 从事预测控制、最优控制、鲁棒控制等研究; 刘志远(1957—), 男, 山东蓝都人, 教授, 博士, 从事机器人控制、预测控制及高精度伺服控制等研究。

2 非线性MPC算法

通常,非线性MPC在 t 时刻初始条件为 $x(t)$ 的开环优化问题可描述为:

$$\text{问题 1 } \min_{u \in \mathbf{U}} J(x(t), u, T) \quad (1)$$

$$J(x(t), u, T) := \int_t^{t+T} F(x(\tau), u(\tau)) d\tau \quad (2)$$

$$\text{s.t. } \dot{x}(\tau) = f(x(\tau), u(\tau)) \quad (3)$$

$$x(\tau) \in X, \quad t \leq \tau \leq t+T \quad (4)$$

其中, \mathbf{U} 为所有允许控制序列(即满足控制约束的控制序列)的集合, X 为状态约束集。非线性MPC的基本原理与线性MPC相同,但预测模型(3)和/或目标函数(2)是非线性的。对于MPC的模型而言,重要的是其预测系统未来动态的功能。因此,预测模型可以是机理或实验的,时间连续或离散的,确定性或随机的。

2.1 基于机理模型的非线性MPC

机理模型即根据被控对象的物理特性所建立的微分方程模型。建立机理模型需对被控对象有透彻的了解,但若系统(特别是连续生产过程)工艺复杂,关联因素多,则机理模型的建立往往难度较大。对非线性MPC稳定性与鲁棒性的研究主要是基于机理模型,相应的控制方法将在第3节和第4节中讨论。

2.2 基于实验模型的非线性MPC

实验模型通常指结构确定而参数需经实验辨识的模型,如Volterra模型^[9~11],Hammerstein模型^[12,13]和Wiener模型^[14,15],描述的是系统输入输出之间的关系。Volterra模型即非线性脉冲响应模型,描述系统动态的精度取决于所取Volterra序列的阶次,但高阶次的Volterra序列需要大量的实验来获取Volterra系数。文献[9]对基于二阶Volterra模型描述的非线性系统,研究了带终端条件、输入输出约束和输入增量约束的非线性DMC问题,并针对模型参数不确定性讨论了鲁棒稳定性和性能。[10]系统地讨论了基于Volterra模型的非线性系统分析、综合和设计方法。[11]在[10]的基础上研究了多变量Volterra模型参数确定,及从原理模型获取Volterra模型的方法。

Hammerstein模型描述的是一类可分为静态非线性和动态线性的系统。这类模型结构简单,可用于描述PH过程和具有幂函数、死区、开关等非线性特性的过程。选择合适的性能指标,采用Hammerstein

模型预测,可将控制问题分解为线性模型的动态优化问题和非线性模型的静态求根问题^[13]。与Hammerstein模型类似,Wiener模型也可描述一类能进行动态线性和静态非线性分离的系统,不同的是Wiener模型的线性动态环节在非线性的静态增益的前面。[15]讨论了一种基于Wiener模型的非线性MPC方案,并将其应用于PH和过程控制。[16]比较了基于Hammerstein模型和Wiener模型的非线性MPC方法。

2.3 基于智能模型的非线性MPC

智能模型如Fuzzy模型^[17]、神经网络模型^[18],描述的也是系统输入输出之间的关系。经过训练的神经网络可以逼近许多非线性系统,因而产生了基于神经网络的MPC方法^[19,20]。文献[21]利用类似于RBF网络的CNLS网络作为预测模型,提出一种非线性MPC的二时间尺度方案,其对象输出及控制指令以高采样速率变化,但在预测模型中使用多个采样周期的平均值,形成多步预测以减小计算量。[22]利用递归神经网络作为预测模型,提出一种带约束的多变量预测控制方法,其优点是能够处理系统变量约束和强非线性。[23]讨论了利用神经网络模型的扩展DMC方法。

尽管如此,将神经网络引入非线性MPC还存在许多问题,主要是对多步预测缺乏有效的方法;进行网络训练与实时修正耗时较多,不利于实现;理论分析(如模型收敛性和闭环稳定性等)较为困难。

2.4 基于线性化模型的非线性MPC

文献[24]提出一种非线性QDMC方法,其原理是将非线性机理模型在每个采样时刻线性化,用线性化模型构成QDMC。[25]用时变稳态Kalman滤波改进了[24]的方法,并将其用于开环不稳定反应器。[26]将系统的非线性影响看作DMC模型的加性干扰,由非线性估计器在线估计,讨论了一种基于扩展DMC模型的非线性DMC,并将其用于半间歇式反应器。[27,28]将系统的操作区域分为多个子区域,用不同的线性化模型描述子区域内的系统动态,并讨论了由多个线性MPC构成的非线性MPC。

基于线性化模型的非线性MPC优化计算简单,实时性好,但也存在不足之处。在非线性的QDMC中,尽管每个采样时刻都采用新的线性化模型,但系统动态信息的丢失是难免的;由于在线更换模型,很难保证每个采样时刻优化问题的可行性。在线性化多模型MPC中,操作区域的划分与多少将直接影响算法的实时性及控制性能。

3 MPC 名义稳定性

为了实现约束 MPC 和提高其实时性, 预测时域往往是有限的, 因此, MPC 的最优性并不代表闭环系统的稳定性^[29]。下面讨论的非线性 MPC 算法具有保证稳定性。

1) 无限时域 MPC。保证闭环稳定最直接的方法是将有限预测时域延长至无限, 这样, 优化问题有解便意味着稳定性^[30]。但是一般而言, 约束非线性优化问题很难有解析解, 而采用无限时域又使数值寻优几乎不可能, 即使采用工程意义上的无限即足够大时域和应用于缓慢的过程控制系统, 也会使 MPC 算法缺乏实时性而无法应用。

2) 终端等式约束 MPC。为保证有限时域 MPC 的稳定性, 人们在开环优化问题(如问题 1) 中加入一阶等式约束 $x(t+T) = 0$, 强制终端状态回到平衡点^[31-33]。文献[32] 基于 Lyapunov 理论证明了终端等式约束非线性 MPC 的稳定性。同样的思想也可用于基于输入输出模型(如 Volterra 模型) 的 MPC^[9], 但获得的仅是输入输出稳定性。采用终端等式约束的优点是 MPC 的数学描述简单明了, 几乎没有离线计算工作量。但终端等式约束是为获得闭环稳定而人为加入的状态约束(故称稳定性约束), 这将大大增加在线优化计算量, 并且这样的约束将使非线性优化问题只在很小的范围内有可行解。

3) 双模变时域 MPC。用数值方法求解非线性优化问题时, 终端等式约束只能近似满足。显然, 在此近似范围内系统将失去稳定性。为此, 文献[34] 用终端不等式约束 $x(t+T) \in \Omega$ 代替终端等式约束, 提出了系统在平衡点的一个邻域 Ω 之外由 MPC 控制, 在该邻域之内则由状态反馈 $u = Kx$ 控制的双模变时域 MPC 方法。终端不等式约束将强制系统在可变时域的终端到达 Ω 的边缘, 因此约束优化问题 1 的式(1) 变为 $\min_{u \in U, T} J(x(t), u, T)$, 即 T 也是一个优化独立变量。这样, 只要约束优化问题有解(不一定是最优解), 系统就能到达邻域 Ω 。闭环稳定性可由线性控制器保证。由于不等式约束容易处理, 双模变时域 MPC 的在线计算明显优于终端等式约束 MPC, 并且优化问题有可行解的范围也较大。但双模变时域 MPC 的实现需要在 MPC 控制器与线性控制器之间在线切换, 这往往是工程应用所不希望的。

4) 收缩 MPC。文献[35] 在开环优化问题中引入状态收缩约束

$$x(t+T)^2 \leq \alpha^2 x(t)^2, \quad \alpha \in (0, 1) \quad (5)$$

强制终端状态进入一个逐渐收缩的区域。这里, 时域 T 也是一个优化独立变量, 求解优化问题所得到的控制序列将完整地作用于系统, 因此闭环稳定性可由收缩约束(5) 直接导出。显然, 所得到的指数稳定性, 但每个采样时刻收缩 MPC 约束优化问题的可行性却无法保证, 而这对工程应用来说是至关重要的。

5) 反馈线性化 MPC。若非线性系统可反馈线性化, 则可将具有保证稳定性的线性 MPC 方法应用于反馈线性化系统^[36, 37]。但这种方法存在以下问题: 线性化反馈律是状态变量的函数且通常是非线性的, 因此原来为线性的控制约束将转化为非线性状态约束, 而后者在数值求解优化问题时很难处理, 且需要大量的计算时间; 在新坐标空间里描述的控制性能对原系统来说缺乏透明度; 反馈线性化的条件非常苛刻, 许多非线性系统无法满足, 致使这一方法的应用受到限制。

6) 准无限时域 MPC。文献[38, 39] 在有限时域目标函数(2) 中引入终端惩罚项 $E(x(t+T))$, 其基本思想是将预测时域近似延伸至无限。考虑无限时域目标函数, 将 $[t+T, \infty)$ 区间的控制固定为 $u = k(x)$, 选择终端域 Ω 和终端惩罚项, 使得

$$E(x(t+T)) = \int_{t+T}^{\infty} F(x(\tau), k(x(\tau))) d\tau \quad \forall x(t+T) \in \Omega \quad (6)$$

$$\min_{u \in U} J(x(t), u, \infty) = \min_{u \in U} J(x(t), u, T) \quad (7)$$

这样, 预测时域便可延伸至无限。采用局部反馈和终端不等式约束的思路来自双模变时域 MPC, 但准无限时域 MPC 不需要在两个控制器间切换且实时性较好。关于闭环稳定性的证明及离线求取 Ω 和 E 函数的几种方法参见[39, 40]; 对离散系统的类似讨论参见[41]。

7) 基于 LM I 的非线性 MPC。在一定条件下, 可用线性多面体系统描述非线性动态, 因此可基于线性矩阵不等式理论构成非线性 MPC。其本质与鲁棒 MPC 的综合相同, 将在下面讨论。

4 MPC 鲁棒性

受篇幅所限, 本文只讨论鲁棒 MPC 综合。在设计鲁棒 MPC 时, 对不确定性的描述将显式地包含在约束优化问题中, 较常用的方法是用 min-max 问题代替 min 问题, 其数学描述为

$$\text{问题 2} \quad \min_{u \in U} \max_{w \in W} J(x(t), u, w, T) \quad (8)$$

$$\text{s t } \dot{x}(\tau) = f(x(\tau), u(\tau), w(\tau)) \quad (9)$$

其中 \mathbf{W} 是所有允许不确定性的集合。由于不确定性的存在,采用开环和反馈 min-max 问题在控制策略上有质的区别。

4.1 开环 min-max MPC

在开环 min-max MPC中,控制序列为一时间序列

$$u = \{u_i(t), u_i(t+1), \dots, u_i(t+T-1)\} \quad (10)$$

1) 参数不确定性 min-max MPC。首先基于FR模型,将不确定性描述为脉冲响应系数的上下界。文献[42]用无穷范数作为目标函数讨论了基于FR模型的鲁棒MPC;类似的讨论如[43]。由于没有考虑不确定性反馈,这些算法实际上并没有闭环鲁棒性。为此,[44]讨论了开环和反馈 min-max 问题,并建议采用无限时域 min-max MPC以获取鲁棒稳定性。[45,46]在 min-max 问题中包含了无限时域的概念,并给出相应的鲁棒稳定性条件。为能考虑积分系统,[47]提出一种基于状态空间模型的 min-max MPC方法,其中所考虑的不确定性仅为控制矩阵中的时变或时不变参数。

2) 鲁棒性约束MPC。与稳定性约束相对应,文献[48]将一鲁棒性约束

$$J_i(x(t), u(\bullet), T) \leq J_i(x(t), \tilde{u}(\bullet), T) \quad \forall i = 1, 2, \dots, p \quad (11)$$

引入MPC的 min 问题,并要求对所考虑模型集 $\{f_1, f_2, \dots, f_p\}$ 都成立(max 的概念),其中 $\tilde{u}(\bullet)$ 是前次解的平移。显然,如果鲁棒性约束是可行的,则对所考虑模型集中的任何模型系统目标函数将是不增的,由此导出鲁棒稳定性。

3) 非线性 H 预测控制。也称非线性滚动时域 H 控制或非线性动态对策MPC。为了充分利用 H 和预测控制的优点,文献[49]提出一种约束非线性动态对策MPC方法。该方法推广应用了准无限时域预测MPC的基本思想,即局部反馈、终端域和终端惩罚。为使终端域成为非线性系统在局部反馈律作用下的一个鲁棒不变域,对非线性系统进行线性 H 预补偿,因此该方法类似于串级控制的系统结构。与常规MPC方法相同,每个采样时刻的控制量由在线求解有限时域约束动态对策问题所获得。鲁棒稳定性的详细证明及仿真例子参见[40]。

4.2 反馈 min-max MPC

在开环 min-max MPC中,允许不确定性反馈而控制没有反馈功能,可能比较保守。因此,文献[29]建议用控制策略

$$u = \{u_i(t), k_{i,1}(\bullet), \dots, k_{i,T}(\bullet)\} \quad (12)$$

代替控制序列(10)。其中 $u_i(t)$ 为控制量, $k_{i,i}(\bullet)$ 为反馈控制律。

1) 基于LM I的鲁棒MPC。文献[50]分别以多面体系统和范数有界系统描述不确定系统,提出一种基于LM I理论的鲁棒MPC综合方法。鉴于在线直接求解 min-max 问题的困难,对所考虑的不确定系统导出了标准二次目标函数的上界,并将 min-max 问题转化为包含LM I的 min 问题。由于在整个预测时域内采用相同的状态反馈律,该方法也有保守性。为此,[51]采用类似于式(12)的控制策略,即从第二步以后采用相同的状态反馈律,并讨论了相应的LM I描述及闭环鲁棒稳定性。

2) H 预测控制。对于无约束线性时变系统,文献[52]利用Riccati方程正定解的不增性讨论了零终端约束 H 预测控制;[53,54]则讨论了终端加权 H 预测控制,其中前者仍利用Riccati方程解的不增性,后者则利用目标函数的不增性,但在本质上并没有差别。对于约束线性系统,[55]讨论了反馈 min-max MPC的数学描述,并推广了双模MPC的基本思想:在终端域之外由MPC控制,在终端域之内由状态反馈 $u = Kx$ 控制。

5 基于观测状态非线性MPC及滚动时域估计

前面讨论的稳定MPC方法基本都假设系统状态可测,但是实际系统的某些状态往往是不可测的,此时常用估计的状态作反馈。研究观测状态非线性MPC的困难,不仅在于分离原理不成立,而且在于非线性状态观测器的设计。

文献[35]讨论了基于最小二乘估计的收缩非线性MPC的闭环稳定性。这里,由收缩非线性MPC的指数稳定性和观测器的局部渐近稳定性可得出闭环系统的局部稳定性,当然,初始观测误差必须在观测器的收敛范围之内。[56]讨论了基于非线性滚动时域观测器的双模变时域MPC及闭环稳定性。[57]将MPC与SM状态估计方法相结合,给出了对输入和状态约束系统有保证稳定性的控制方法,但未对非线性情况进行讨论。

滚动时域估计(MHE)是预测控制的对偶问题,它为了解决非线性优化估计提供了一种较实用的方法。基于滚动优化原理,MHE能充分利用不断变化的系统信息及各种约束信息更准确地估计系统状

态, 不仅可作为状态观测器组成输出反馈 MPC, 而且可用于系统监控、设备检漏等。对于无约束线性系统, [58] 较早讨论了 MHE 问题, [59] 讨论了没有考虑扰动和约束的非线性 MHE。[60] 利用不动点定理讨论了无约束 MHE 的稳定性。[56] 基于 Lyapunov 理论讨论了无约束非线性 MHE 问题及其稳定性。对于离散非线性系统, [61] 讨论了不等式状态约束 MHE 及稳定性条件。[62] 就全信息估计及其滚动时域近似问题讨论了具有保证稳定性的非线性 MHE。[63] 在 1999 年欧洲控制会议专题讲座上引导性地总结了对 MHE 问题的研究。

6 需要进一步研究的几个问题

尽管非线性 MPC 的理论研究近年来有了较大进展, 但仍有不少问题有待于进一步研究。

1) 稳定性问题: 在优化问题中加入稳定性约束(如终端等式或不等式约束、收缩约束)和终端惩罚, 似乎从理论上解决了 MPC 的稳定性问题, 但从工程应用意义上说, 还没有一种完全令人满意的方法。首先, 稳定性约束是人为附加的, 可能会影响控制性能指标的实现; 另一方面, 尽管稳定性约束只是点约束, 但毕竟是非线性约束, 它将影响算法的实时性。其次, 稳定性约束将引起优化问题的可行性问题。另外, 所得到的稳定性条件也只是充分条件。

2) 鲁棒性问题: 由于数值求解 LM I 的成功, 使得基于 LM I 的鲁棒 MPC 方法在实现上具有明显的优点, 但如何有效地用线性多面体系统描述一个非线性系统的理论问题仍需探讨。基于 H 的鲁棒 MPC 方法的思想简单明了, 但其理论部分尚需进一步完善, 合适的数学描述也有待于进一步开发。另外, 控制性能的鲁棒性几乎没有讨论。

3) 跟踪问题: 如果能根据希望的输出轨迹计算出相应的状态轨迹, 则前面讨论的非线性 MPC 方法就能处理跟踪问题, 但对非线性系统, 状态轨迹的生成往往较为困难, 尤其是存在系统约束时。

4) 输出反馈问题: 对于工程应用而言, 输出反馈尤为重要。前面提到的只是一些基于观测状态 MPC 的初步研究结果, 而非线性观测器的设计本身仍是一个尚未解决的问题。

5) 滚动时域估计: 这是解决非线性优化估计较实用的一种方法, 研究工作刚刚开始。

6) 实时性: 一般说, 采用优秀的商用优化子程序, 约束线性 MPC 方法能基本满足实时控制的要求。

但是大部分现有的非线性 MPC 方法只能用于较慢的过程控制, 尤其是存在系统状态约束时。因此, 开发出实时性好的非线性 MPC 方法, 对于工程应用是十分迫切的。

本文从非线性 MPC 算法、闭环稳定性和鲁棒性、输出反馈及相关的滚动时域估计等方面, 讨论了非线性 MPC 的研究现状及存在的问题。有关 MPC 其它方面的讨论可参阅文献 [63 ~ 65]。

参考文献:

- [1] Qin S J, Badgwell T A. An overview of industrial model predictive control technology [A]. Chemical Process Control- V [C]. CACHE, AICHE, 1997. 232-256
- [2] Mayne D Q. Nonlinear model predictive control: An assessment [A]. Chemical Process Control- V [C]. CACHE, AICHE, 1997. 217-231.
- [3] Chen H, Allgower F. Nonlinear model predictive control schemes with guaranteed stability. Nonlinear Model Based Process Control [M]. Kluwer Academic Publishers, Netherlands 1998. 465-494.
- [4] Morari M, Lee J H. Model predictive control: The good, the bad and the ugly [A]. Chemical Process Control- IV [C]. CACHE, AICHE, 1991. 419-444.
- [5] Ricker N L. Model predictive control: State of the art [A]. Chemical Process Control- IV [C]. CACHE, AICHE, 1991. 271-296.
- [6] Lee J H. Recent advances in model predictive control and other related areas [A]. Chemical Process Control- V [C]. CACHE, AICHE, 1997. 201-216.
- [7] 席裕庚. 关于预测控制的进一步思考 [J]. 控制理论与应用, 1994, 11(2): 219-221.
- [8] 徐立鸿. 预测控制的研究现状及问题 [J]. 控制理论与应用, 1994, 11(1): 121-125.
- [9] Genceli H, Nikolaou M. Design of robust constrained model predictive controllers with Volterra series [J]. AICHE J, 1995, 41(9): 2098-2107.
- [10] Doyle F J, Ogunnaik B A, Pearson R K. Nonlinear model-based control using second-order Volterra models [J]. Automatica, 1995, 31(5): 697-714.
- [11] Maner B R, Doyle F J, Ogunnaik B A *et al*. Nonlinear model predictive control of a simulated multivariable polymerization reactor using second-order Volterra models [J]. Automatica, 1996, 32(9): 1285-1301.
- [12] Zhu X F, Seborg D E. Nonlinear predictive control based on Hammerstein models [J]. 控制理论与应用, 1994, 11(5): 564-575.
- [13] Wang W. Generalized predictive control of nonlinear

- systems of the Hammerstein forms[J]. 控制理论与应用, 1994, 11(6): 672-680
- [14] Anders E, Nordsjö O. Cramer-Rao bounds for a class of systems described by Wiener and Hammerstein models[J]. Int J Contr, 1997, 68(5): 1067-1083
- [15] Norquay S L, Palazoglu A, Romagnoli J A. Nonlinear model predictive control of PH neutralization using Wiener models[A]. Proc 13th IFAC World Cong[C]. San Francisco, 1996 31-36
- [16] Rohit S, Patwardhan S, Laksh M. Constrained nonlinear MPC using Hammerstein and Wiener models: PLS framework[J]. AICHE J, 1998, 44(7): 1611-1622
- [17] Roubos J A F, Molloy S, Babuska B *et al*. Fuzzy model-based predictive control using Takagi-Sugeno models[J]. Int J Approx Reas, 1999, 22: 3-30
- [18] 王殿辉, 柴天佑. 基于ANN模型的非线性自校正预测控制器[J]. 自动化学报, 1997, 23(3): 396-399
- [19] Andy Yendi Tsen, Jang Shi Shang, David Shan, *et al*. Predictive control of quality in batch polymerization using hybrid ANN model[J]. AICHE J, 1996, 42(2): 455-465
- [20] 刘保坤, 王慧, 曹明, 等. 基于NN模型的直接优化预测控制[J]. 信息与控制, 1998, 27(5): 386-390
- [21] Buescher K L, Baum C C. A two-timescale approach to nonlinear model predictive control[A]. Proc Amer Contr Conf[C]. Seattle, 1995 2250-2256
- [22] Zamarrero J M, Vega P. Neural predictive control: Application to a highly nonlinear system[A]. Proc 13th IFAC World Cong[C]. San Francisco, 1996 19-24
- [23] 刘军, 赵霞, 许晓鸣. 基于NN非线性模型的扩展DMC预测控制[J]. 信息与控制, 1998, 27(5): 391-393
- [24] Garcia C E. Quadratic dynamic matrix control of nonlinear processes: An application to a batch reaction process[A]. AICHE Annual Meeting[C]. San Francisco, 1984
- [25] Gattu G, Zafirium E. Nonlinear quadratic dynamic matrix control with state estimation[J]. Ind Eng Chem Res, 1992, 31(4): 1096-1104
- [26] Peterson T, Hernandez E, Arkun Y *et al*. A nonlinear DMC algorithm and its application to a semibatch polymerization reactor[J]. Chem Eng Sci, 1992, 47(4): 737-753
- [27] Chow C M, Kuznetsov A G, Clarke D W. Using multiple models in predictive control[A]. Proc 3rd Euro Contr Conf[C]. Rome, 1995 1732-1737
- [28] Xi Y G, Wang F, Wu G H. Nonlinear multimodel predictive control[A]. Proc 13th IFAC World Cong[C]. San Francisco, 1996 485-490
- [29] Mayne D Q. Optimization in model predictive control[A]. Proc IFAC DYCORS[C]. Helsinki, 1995 229-242
- [30] Bitmead R R, Gevers M, Wertz V. Adaptive optimal control—The thinking man's GPC[M]. New York: Prentice Hall, 1990
- [31] Keerthi S S, Gilbert E G. Optimal infinite-horizon feedback laws for a general class of constrained discrete-time systems: Stability and moving horizon approximations[J]. J Opt Theory and Appl, 1988, 57(2): 265-293
- [32] Mayne D Q, Michalska H. Receding horizon control of nonlinear systems[J]. IEEE Trans on Autom Contr, 1990, 35(7): 814-824
- [33] Rawlings J B, Muske K R. The stability of constrained receding horizon control[J]. IEEE Trans on Autom Contr, 1993, 38(10): 1512-1516
- [34] Michalska H, Mayne D Q. Robust receding horizon control of constrained nonlinear systems[J]. IEEE Trans on Autom Contr, 1993, 38(11): 1623-1633
- [35] Yang T H, Polak E. Moving horizon control of nonlinear systems with input saturation, disturbances and plant uncertainty[J]. Int J Contr, 1993, 58(4): 875-903
- [36] Nevistic V, Morari M. Constrained control of feedback-linearizable systems[A]. Proc 3rd Euro Contr Conf[C]. Rome, 1995 1726-1731
- [37] Kurtz M J, Henson M A. Input-output linearizing control of constrained nonlinear processes[J]. J Process Contr, 1997, 7(1): 3-17
- [38] Chen H, Allgower F. A quasi-infinite horizon predictive control scheme for constrained nonlinear systems[A]. 第16届中国控制会议论文集[C]. 青岛, 1996 309-316
- [39] Chen H, Allgower F. A quasi-infinite horizon nonlinear model predictive control scheme with guaranteed stability[J]. Automatica, 1998, 34(10): 1205-1217
- [40] Chen H. Stability and robustness consideration in nonlinear model predictive control[M]. Guesseldorf: VDI Verlag, 1997
- [41] De Nicolao G, Magni L, Scattolini R. Stabilizing nonlinear receding horizon control via a nonquadratic terminal state penalty[A]. Proc MACS Multiconf CESA[C]. Hille, 1996 185-187
- [42] Campo P J, Morari M. Robust model predictive control[A]. Proc Amer Contr Conf[C]. Minneapolis, 1987. 1021-1026
- [43] Allwright J C, Papavasiliou G C. On linear

- programming and robust model predictive control using impulse responses[J]. *Syst & Contr Lett*, 1992, 18: 159-164
- [44] Lee J H, Yu Z H. Worst-case formulations of model predictive control for systems with bounded parameters[J]. *Automatica*, 1997, 33(5): 763-781.
- [45] Zheng A, Morari M. Robust stability of constrained model predictive control[A]. *Proc Amer Contr Conf [C]*. San Francisco, 1993 379-383
- [46] Zheng A, Morari M. Robust control of linear time-varying systems with constraints[A]. *Proc Amer Contr Conf [C]*. Baltimore, 1994 2416-2420
- [47] Lee J H, Cooley B L. Minimax predictive control techniques for a linear state-space system with a bounded set of input matrices[J]. *Automatica*, 2000, 36(3): 463-473
- [48] Badgwell T A. A robust model predictive control algorithm for stable nonlinear plants[A]. *Proc IFAC ADCHEM [C]*. Banff, 1997. 477-481.
- [49] Chen H, Scherer C W, Allgower F. A game theoretic approach to nonlinear robust receding horizon control of constrained systems[A]. *Proc Amer Contr Conf [C]*. Albuquerque, 1997. 3073-3077.
- [50] Kothare M V, Balakrishnan V, Morari M. Robust constrained model predictive control using linear matrix inequalities[J]. *Automatica*, 1996, 32(10): 1361-1379
- [51] Lu Y, Arkun Y. Quasiminimax MPC algorithms for LPV systems[J]. *Automatica*, 2000, 36(4): 527-540
- [52] Tadmor G. Receding horizon revisited: An easy way to robustly stabilize an LTV system[J]. *Syst & Contr Lett*, 1992, 18: 285-299
- [53] Lall S, Glover K. A game theoretic approach to moving horizon control [A]. *Advances in ModelBased Predictive Control [C]*. London: Oxford University Press, 1994 131-144
- [54] Lee J W, Kwon W H, Lee J H. Receding horizon H tracking control for time-varying discrete linear systems[J]. *Int J Contr*, 1997, 68(2): 385-399.
- [55] Scokaert P O M, Mayne D Q. Minimax feedback model predictive control for constrained linear systems[J]. *IEEE Trans on Autom Contr*, 1998, 43(8): 1136-1142
- [56] Michalska H, Mayne D Q. Moving horizon observers and observer-based control[J]. *IEEE Trans on Autom Contr*, 1995, 40(6): 995-1006
- [57] Benporad A, Garulli A. Output-feedback predictive control of constrained linear systems via set-membership state estimation[J]. *Int J Contr*, 2000, 73(8): 655-665.
- [58] Thomas Y A. Linear quadratic optimal estimation and control with receding horizon[J]. *Electr Lett*, 1975, 11: 19-21.
- [59] Jang S S, Joseph B, Mukai H. Comparison of two approaches to on-line parameter and state estimation of nonlinear systems[J]. *Ind Eng Chem Proc Des Dev*, 1986, 25: 809-814
- [60] Zimmer G. State observation by on-line minimization[J]. *Int J Contr*, 1994, 60(4): 595-606
- [61] Muske K R, Rawlings J B. Nonlinear moving horizon state estimation[A]. *Methods of Model Based Process Control [C]*. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1995 349-365
- [62] Rao C V, Rawlings J B. Nonlinear moving horizon estimation [A]. *Nonlinear Model Predictive Control [C]*. Berlin: Springer, 1998 45-69
- [63] Allgower F, Badgwell T A, Qin J S *et al*. Nonlinear predictive control and moving horizon estimation—An introduction overview [A]. *Advances in Control, Highlights of ECC 99 [C]*. Berlin: Springer, 1999 391-449
- [64] Mayne D Q, Rawlings J B, Rao C V *et al*. Constrained model predictive control: Stability and optimality[J]. *Automatica*, 2000, 36(4): 789-814
- [65] 席裕庚, 耿晓军, 陈虹. 预测控制性能研究的新进展[J]. *控制理论与应用*, 2000, 17(4): 469-475