

非线性离散时间系统的准无限时域 NMPC

于树友, 陈 虹, 赵海艳

(吉林大学 通信工程学院, 长春 130022)

摘 要: 非线性模型预测控制(NMPC)的优点是能显式并优化处理控制量和状态量的约束。文献[6]提出的准无限时域 NMPC 是保证 NMPC 稳定性的主要算法。在文献[6]的基础上, 讨论了约束离散时间系统的准无限时域 NMPC 算法。最后通过一个具体的数值算例验证了算法的有效性。

关键词: 自动控制技术; 非线性模型预测控制; 约束; 稳定性; 离散时间系统

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-5497(2009)04-1002-05

Quasi-infinite horizon NMPC for nonlinear discrete-time systems

YU Shu-you, CHEN Hong, ZHAO Hai-yan

(College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: An important advantage of nonlinear model predictive control (NMPC) is its ability to cope with control and states constraints in an explicit and optimal way. Quasi-infinite horizon NMPC [6] is the main algorithm to guarantee stability of NMPC. Here we extended quasi-infinite horizon NMPC scheme [6] to discrete-time systems. A numerical example is given to illustrate the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: automatic control technology; nonlinear model predictive control; constraints; stability; discrete-time systems

模型预测控制(Model Predictive Control, MPC), 又称为滚动时域控制(Moving Horizon Control)和后退时域控制(Receding Horizon Control), 是近年来被广泛讨论的一种控制策略。MPC的机理可以描述为: 在每一采样时刻, 根据当前量测信息, 在线求解一个有限时域开环最优控制问题, 并将得到的控制序列的第一个元素作用于被控制对象; 在下一个采样周期, 重复上述过程。对于非线性并且有约束的系统, 由于无法通过直接求取系统的 Hamilton-Jacobi-Bellman 方程来获得其精确解析解, 所以这种依赖实时数值优化的方法获得了广泛的关注。目前已初步建立

了分析模型预测控制稳定性、鲁棒性和最优性的理论框架^[1], 并且相关的成果被大量应用于化工、冶金制造等过程控制领域^[2]。

为保证非线性 MPC 的稳定性, 最直观的方法是采用无限时域^[3], 但这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, 也会使 MPC 算法因缺乏实时性而无法应用。文献[4]在开环优化问题中加入等式约束条件 $x(t+T)=0$, 强制系统的终端状态回到平衡点。采用终端等式约束的缺点是: 为满足终端等式约束条件, 要求在非线性规划中无限次迭代计算, 这将大大增加在线优化计算量, 并且这样的约束将

收稿日期: 2008-02-25.

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(60725311); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(2004).

作者简介: 于树友(1974-), 男, 博士研究生, 研究方向: 模型预测控制. E-mail: yushuyou@126.com

使非线性优化问题只在很小的范围内有可行解。文献[5] 用终端不等式约束代替终端等式约束, 提出了在系统终端域之外由 MPC 控制, 在终端域之内则由状态反馈控制的双模变时域 MPC 方法。双模变时域 MPC 是一种切换控制系统, 并没有解决预测控制的稳定性问题。文献[6] 提出的准无限时域 MPC 通过在非线性优化问题中引入满足一定条件的终端代价和终端不等式约束(终端域), 解决了非线性 MPC 的稳定性问题^[1]。由于准无限时域 MPC 只要求在每一采样时刻开环优化问题存在可行解, 不依赖于最优解, 并且控制性能更接近无限时域的最优化问题, 因而相应的设计方法成为保证 MPC 稳定的主要方法^[1, 7]。

作者在文献[6] 的基础上, 讨论了约束离散时间系统的准无限时域 NMPC 算法, 并用三容系统的数值仿真验证了算法的有效性。

1 离散时间准无限时域 NMPC

1.1 问题描述

考虑如下非线性离散系统

$$x(t+T)=f(x(k),u(k)),x(0)=x_0\quad (1)$$

式中: $x(k)\in R^n,u(k)\in R^m$ 分别表示 k 时刻系统的状态和输入。

系统的输入和状态量约束分别为

$$\begin{cases} x(k)\in X,k\geqslant 0\\ u(k)\in U,k\geqslant 0 \end{cases}\quad (2)$$

式中: U 是控制输入的可行解集合; X 是系统状态的可行解集合。

在本文中, 假设系统的状态完全可测, 系统的模型是精确已知的, 并且不考虑外部扰动对系统的影响。

假设系统满足下面的条件:

A1: $f:R^n\times R^m\rightarrow R^n$ 是连续的, 且 $f(0,0)=0$, 即 $0\in R^n$ 是系统的平衡点。

A2: $U\subset R^m$ 是紧的、凸的, $X\subset R^n$ 是连通的, 点 $(0,0)$ 包含于集合 $X\times U$ 的内部。

首先讨论无限时域的最优化问题, 在此基础上引入离散系统准无限时域 NMPC 算法的基本要素和设计思想。无限时域最优化问题要求最小化性能指标

$$\min_{u(\cdot)}J^\infty(x_0,u(\cdot)),J^\infty(x_0,u(\cdot))=\sum_{i=0}^\infty F(x(i),u(i))\quad (3)$$

式中, $F(\cdot,\cdot)$ 满足如下条件:

A3: $F(x,u):R^n\times U\rightarrow R$ 关于自变量 x 和 u 均连续, 并满足 $\beta(\|x\|)\leqslant F(x,u)\leqslant \alpha(\|x\|)$, 其中 $\alpha(\|\cdot\|),\beta(\|\cdot\|)$ 是 k 类函数。

对于约束的非线性最优化问题(3), 求解系统相应的 Hamilton-Jacobi-Bellman 方程是一件非常困难的工作。即使对于线性系统, 由于约束的存在, 目前也无法给出通用的求解方法。

可以将式(3)改写成如下的形式

$$J^\infty(x_0,u(\cdot))=\sum_{i=0}^{N-1}F(x(i),u(i))+\sum_{i=N}^\infty F(x(i),u(i))$$

设 Ω 是平衡点的某一邻域

$$\Omega_\alpha=\{x\in R^n\mid E(x)\leqslant \alpha,\alpha>0\}\quad (4)$$

在 Ω 内假设存在一个局部渐近稳定的控制器 $u=k(x)$ 满足下面的条件:

B1: $\Omega\subset X$ 。

B2: 对于所有的 $x\in\Omega$ 有 $k(x)\in U$ 。

B3: 对于所有的 $x\in\Omega$ 正定函数 $E(x)$ 满足 Hamilton-Jacobi-Bellman 不等式

$$E(x(s))-E(x(j))\leqslant -\sum_{i=j}^sF(x(i),u(i))\\ 0\leqslant j\leqslant s\leqslant N\quad (5)$$

则称 Ω 是非线性系统的一个终端域。

注 1 上述条件表明在终端域内, 局部控制器 $u=k(x)$ 使得控制系统满足约束(2), 且是正不变的^[6], 即系统始于 Ω 的所有轨迹保持在 Ω 中。

在 Ω 内, 由于 $\sum_{i=N}^\infty F(x(i),u(i))\leqslant E(x(N))$, 可以考虑用性能指标(3)的上界

$$J(x_0,u)=\sum_{i=0}^{N-1}F(x(i),u(i))+E(x(N))$$

来代替性能指标(3), 同时将无限时域的优化问题转化为有限时域的优化问题。

问题 1 设 k 时刻系统的状态为 $x(k)$, 离散系统准无限时域非线性模型预测控制的优化问题可描述为

$$\min_{u(\cdot)}J(x(k),\bar{u}(\cdot))\quad (6)$$

式中: $J(x(k),\bar{u}(\cdot))=$

$$\sum_{i=0}^{N-1}F(\bar{x}(k+i),\bar{u}(k+i))+E(\bar{x}(k+N))$$

同时满足

$$\bar{x}(k+i)=f(\bar{x}(k),\bar{u}(k)),\bar{x}(k;x(k),k)=x(k)\quad (7a)$$

$$\bar{u}(\tau)\in U,\tau\in\{k,\cdots,k+N-1\}\quad (7b)$$

$$\bar{x}(\tau; x(k), k) \in X, \tau \in \{k, \dots, k+N-1\} \tag{7c}$$

$$\bar{x}(k+N; x(k), k) \in \Omega \subseteq U \tag{7d}$$

式中: N 为有限的预测时域; $\bar{x}(\tau; x(k), k)$ 为在控制 $\bar{u}(\cdot)$ 的作用下系统起始于 $x(k)$ 的预测状态轨迹; $E(\cdot)$ 称为终端代价函数。

1.2 系统的稳定性分析

定理 1 对于非线性系统(1): ①假设 A1 ~ A3 成立; ②存在局部渐近稳定的控制器 $u = k(x)$, 平衡点的邻域 Ω 和正定函数 $E(x)$ 满足条件 B1 ~ B3; ③在 $k=0$ 时刻开环最优控制问题 1 有可行解; 则在不考虑外部扰动和模型误差的情况下, 有

(a) 对于任意时刻 $k > 0$, 最优控制问题 1 有可行解。

(b) 闭环系统是渐近稳定的。

证明 (a) 假设在 k 时刻测得的系统状态为 $x(k)$, 由假设知, 此时开环最优化问题 1 有可行解, 记为 $U^*(k) = [\bar{u}^*(k/k), \bar{u}^*(k+1/k), \dots, \bar{u}^*(k+N-1/k)]^T$, 对应的在 $[k, k+N]$ 区间的状态序列为 $X^*(k) = \{\bar{x}^*(k/k), \bar{x}^*(k+1/k), \dots, \bar{x}^*(k+N/k)\}$ 。

按照模型预测控制的原理, 将开环控制序列 $U^*(k)$ 的第一个元素作用于系统, 得到 $k+1$ 时刻系统的状态 $x(k+1)$ 。在不考虑外部干扰和模型误差的情况下, 有 $x(k+1) = \bar{x}^*(k+1/k)$, 在 $k+1$ 时刻选择开环最优问题 1 的一组解为

$$U(k+1) = \{\bar{u}^*(k+1/k), \dots, \bar{u}^*(k+N-1/k), k(\bar{x}^*(k+N/k))\} \tag{8}$$

对应的预测状态序列为

$$\begin{cases} X(k+1) = \\ \bar{x}(k+i/k+i) = \bar{x}^*(k+i/k), i \in [1, N] \\ \bar{x}(k+N+1/k+1) = f(\bar{x}^*(k+N/k), k(\bar{x}^*(k+N/k))) \end{cases}$$

则显然 $\bar{x}(k+i/k+i) \in X, i \in [1, N]$ 。考虑到 Ω 的不变性, 有 $x(k+N+1/k+1) \in \Omega$, 所以 $U(k+1)$ 是 $k+1$ 时刻开环最优控制问题 1 的一组可行解。

(b) 记 k 时刻目标函数的最优值为

$$J_k^* = \sum_{i=0}^{N-1} F(\bar{x}^*(k+i/k), \bar{u}^*(k+i/k)) + E(\bar{x}^*(k+N/k)) \tag{9}$$

$k+1$ 时刻考虑可行解 $U(k+1)$ 的目标函数值为

$$J_{k+1} = \sum_{i=0}^{N-1} F(\bar{x}(k+1+i/k+1), \bar{u}(k+1+i/k+1)) + E(\bar{x}(k+1+N/k+1)) =$$

$$\begin{aligned} & \sum_{i=0}^{N-2} F(\bar{x}^*(k+1+i/k+1), \bar{u}^*(k+1+i/k+1)) + \\ & F(\bar{x}(k+N/k+1), \bar{u}(k+N/k+1)) + \\ & E(\bar{x}(k+1+N/k+1)) = \\ & \sum_{i=0}^{N-1} F(\bar{x}^*(k+i/k), \bar{u}^*(k+i/k)) + \\ & E(\bar{x}^*(k+N/k)) - F(\bar{x}^*(k/k), \bar{u}^*(k/k)) + \\ & F(\bar{x}(k+N/k+1), \bar{u}(k+N/k+1)) + \\ & E(\bar{x}(k+1+N/k+1)) - E(\bar{x}^*(k+N/k)) = \\ & J_k^* + E(\bar{x}(k+1+N/k+1)) - E(\bar{x}^*(k+N/k)) - \\ & F(\bar{x}^*(k/k), \bar{u}^*(k/k)) + F(\bar{x}(k+N/k+1), \bar{u}(k+N/k+1)) \end{aligned}$$

因为 $E(\bar{x}^*(k+N/k)) = E(\bar{x}(k+N/k))$, 那么有

$$\begin{aligned} & F(\bar{x}^*(k/k), \bar{u}^*(k/k)) + F(\bar{x}(k+N/k+1), \bar{u}(k+N/k+1)) + \\ & E(\bar{x}(k+1+N/k+1)) - E(\bar{x}^*(k+N/k)) = F(\bar{x}^*(k/k), \bar{u}^*(k/k)) + \\ & F(\bar{x}(k+N/k+1), \bar{u}(k+N/k+1)) + \\ & E(\bar{x}(k+1+N/k+1)) - E(\bar{x}(k+N/k+1)) \end{aligned}$$

由式(6), 同时考虑到最优解不会差于可行解, 所以有

$$J_{k+1}^* \leq J_{k+1} \leq J_k^* - F(\bar{x}^*(k/k), \bar{u}^*(k/k)) \tag{10}$$

由式(10)知 J_k^* 是不增的, 由式(9)知 $J_k^* \geq 0$, 同时考虑到最优值函数 J_k^* 关于自变量 $\bar{x}^*$ 和 $\bar{u}^*$ 连续(根据 A3 和 B3), J_k^* 是系统一个 Lyapunov 函数。由于单调不增有下界的序列必有极限, 所以当 $i \rightarrow \infty$ 时, J_k^* 收敛。对式(10)两边分别取极限, 得 $\lim_{k \rightarrow \infty} (F(\bar{x}^*(k/k), \bar{u}^*(k/k))) \leq \lim_{k \rightarrow \infty} J_k^* - \lim_{k \rightarrow \infty} J_{k+1}^* = 0$ 。又因为 $\beta(\|x\|) \leq F(x, u) \leq \alpha(\|x\|)$, 所以有 $\lim_{k \rightarrow \infty} x(k) = 0$ 。因为 $\lim_{k \rightarrow \infty} x(k) = 0$, J_k^* 是系统的一个 Lyapunov 函数, 因而闭环系统是渐近稳定的^[7], 证毕。

2 基于二次型终端惩罚的准无限时域 NMPC 设计

通常称局部稳定的控制器 $k(x)$ 为终端控制, 正定函数 $E(\cdot)$ 为终端惩罚。终端控制、终端域和终端惩罚是准无限时域 NMPC 离线设计的关键要素。本节中首先给出平衡点局部线性化后得到的线性系统是可稳定的非线性系统, 阶段代价

为 $E(x, u) = x^T Q x + u^T R u$ ($Q \geq 0, R > 0$) 时终端要素的一种求解方法; 在此基础上讨论基于二次型终端惩罚的准无限时域 NMPC 的设计方法。

定理 2 考虑非线性系统(1)在原点的线性化形式

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \tag{11}$$

假设式(11)是可稳定的, 则存在线性状态反馈控制

$$u(k) = Kx(k) \tag{12}$$

使得 $A_k := A + BK$ 渐近稳定。记 $Q^* = Q + K^T R K \in R^{n \times n}$, $\kappa > 0$ 为常数, 则

(a) 离散 Lyapunov 方程

$$A_k^T P A_k - P + \kappa Q^* = 0 \tag{13}$$

有唯一正定对称解。

(b) 存在一个常数 $\alpha \in (0, \infty)$, 使得平衡点的某一邻域

$$\Omega = \{x(k) \in X \mid x^T(k) P x(k) \leq \alpha\} \tag{14}$$

是非线性系统(1)的一个终端域, $u(k) = Kx(k)$ 和 $x^T(k) P x(k)$ 是对应的终端控制器和终端惩罚函数。

证明 (a) 因为 A_k 渐近稳定, 所以 A_k 的所有特征值均具有负实部。对于给定的正定对称矩阵 Q^* 和参数 $\kappa > 1$, 离散系统 Lyapunov 方程(13)存在唯一正定对称解。

(b) 因为 $(0, 0) \subset X \times U$, 所以总可以找到一个常数 $\alpha_1 \in (0, \infty)$ 和域 Ω_1 , 使其满足式(14)的形式; 并且对于所有 $x(k) \in \Omega_1$, 有 $u(k) \in U$, 即系统在域 Ω_1 内可以看作是无约束的。

定义 $W(x(k)) = x^T(k) P x(k)$, 沿着系统(1)的轨迹对其进行差分

$$\begin{aligned} W(x(k+1)) - W(x(k)) &= \\ x^T(k+1) P x(k+1) - x^T(k) P x(k) &= \\ (A_k x(k) + \phi(x(k)))^T P (A_k x(k) + \phi(x(k))) - \\ x^T(k) P x(k) &= x^T(k) A_k^T P A_k x(k) + \\ 2x^T(k) A_k^T P \phi(x(k)) - x^T(k) P x(k) + \\ \phi^T(x(k)) P \phi(x(k)) \end{aligned} \tag{15}$$

式中: $\phi(x(k)) := f(x(k), Kx(k)) - A_k x(k)$ 。

将 Lyapunov 方程(13)代入式(15), 有

$$W(x(k+1)) - W(x(k)) = 2x^T(k) A_k^T P \phi(x(k)) - \kappa x^T Q^* x(k) + \phi^T(x(k)) P \phi(x(k)) \tag{16}$$

在 Ω_1 内定义参量 L_ϕ 满足 $L_\phi := \sup \left\{ \frac{\|\phi(x(k))\|}{\|x(k)\|} \mid x(k) \in \Omega_1, x(k) \neq 0 \right\}$ (由于 f 是连续的, 所以 L_ϕ 一定存在), 式(16)的上界为

$$W(x(k+1)) - W(x(k)) \leq \{2L_\phi \|P\| \|A_d\| + L_\phi^2 \|P\|\} \|x(k)\|^2 - \kappa x^T(k) Q^* x(k)$$

为了得到 $W(x(k+1)) - W(x(k)) \leq -x^T(k) Q^* x(k)$ (即局部满足 Hamilton-Jacobi-Bellman 不等式(5)), 只需要使

$$\{2L_\phi \|P\| \|A_d\| + L_\phi^2 \|P\|\} \|x(k)\|^2 \leq (\kappa - 1) x^T Q^* x \tag{17}$$

由于 $\kappa > 1$ 且当 $\alpha_1 \rightarrow 0$ 时, $L_\phi \rightarrow 0$, 所以存在 $\alpha \in (0, \alpha_1]$, 使得 $\forall x \in \Omega = \{x(k) \in X \mid x^T(k) P x(k) \leq \alpha\}$ 式(17)成立; 也即对于 $\forall x \in \Omega$

$$W(x(k+1)) - W(x(k)) \leq -x^T(k) (Q + K^T R K) x(k) \tag{18}$$

由于 $Q \geq 0, R > 0$, 同时考虑到在 Ω 内有 $u = Kx(k) \in U$, 则 Ω 是终端域。

对于终端域 Ω 内的任意状态 x_1 , 将不等式(18)从 k_1 到 ∞ 时刻进行求和, 并设初值 $x(k_1) = x_1$, 得到 $\sum_{s=k_1}^{\infty} (W(x(s+1)) - W(x(s))) \leq -$

$\sum_{s=k_1}^{\infty} (x^T(s) Q^* x(s))$, 由于 $u(k) = Kx(k)$ 渐近稳定, 所以 $W(x(\infty)) = 0$, 于是有 $J^\infty(x(k_1), u) \leq x^T(k_1) P x(k_1)$ 。因此 $u(k) = Kx(k)$ 和 $x^T(k) P x(k)$ 是对应的终端控制器和终端惩罚函数。证毕。

综合考虑定理 1 和定理 2, 可推得非线性系统(1)基于二次型终端惩罚的准无限时域 NMPC 的设计方法。

推论 1 对于 Jacobin 线性化系统是可稳定的非线性系统(1): ①假设 A1 ~ A3 成立; ②选择局部渐近稳定的控制器 $u = Kx$, 平衡点的邻域 $\Omega = \{x(k) \in X \mid x^T(k) P x(k) \leq \alpha\}$ 和正定函数 $E(x) = x^T P x$ 分别作为准无限时域 NMPC 的终端控制、终端域和终端惩罚; ③在 $k=0$ 时刻开环最优控制问题 1 有可行解; 则在不考虑外部扰动和模型误差的情况下有:

(a) 对于任意时刻, 最优控制问题 1 有可行解。

(b) 闭环系统是渐近稳定的。
证明略。

3 三容系统的应用

三容系统是模拟多容器流程系统的典型实验装置, 是一个开环稳定、动态响应比较缓慢的装置^[7]。

在不考虑泄漏时, 三容控制对象的物理过程

用微分方程描述如下

$$\begin{cases} Sdh_1/dt = Q_1 - Q_{13} \\ Sdh_2/dt = Q_2 + Q_{32} - Q_{20} \\ Sdh_3/dt = Q_{13} - Q_{32} \end{cases} \quad (19)$$

式中： $Q_{13}=a_{z1}S_n\operatorname{sgn}(h_1-h_3)(2g|h_1-h_3|)^{1/2}$;
 $Q_{32}=a_{z3}S_n\operatorname{sgn}(h_3-h_2)(2g|h_3-h_2|)^{1/2}$;
 $Q_{20}=a_{z2}S_n(2gh_2)^{1/2}$, $i=1,2,3$; h_i 为容器的液位; Q_{ij} 是从容器 i 到容器 j 的水流量, 由 Torricelli 规则 $Q=a_zS_n\operatorname{sgn}(\Delta h)(2g|\Delta h|)^{1/2}$ 得到。式 (19) 中 S 为容器的截面积, $\operatorname{sgn}(z)$ 为变量的符号函数; a_{zi} ($i=1,2,3$) 为流量系数; Q_i ($i=1,2$) 为水泵注入容器的水流量。表 1 给出了上述公式中的物理参数, 其中 a_{z1} 、 a_{z2} 、 a_{z3} 是由实验数据辨识出来的。

在本文中, 选择目标液位 $h_{o1}=45$, $h_{o2}=25$ 。考虑到三容系统物理结构的限制, 三容系统存在液位和水泵流量的约束。其中, 液位的高度 $0\leq h_1\leq 58$, 水泵流量 $0\leq S_i\leq 166$ 。

取目标值: $h_1=h_{o1}$, $h_2=h_{o2}$ ($h_{o2}<h_{o1}<58$ cm), 相应的系统平衡点 $x_o(h_{o1}, h_{o2}, h_{o3})$ 和系统在平衡点的控制量 $u(Q_{o1}, Q_{o2})$ 。选择采样周期 $T_s=1$ s, 对系统离散化。定义(归一化, 无量纲化): $x_i=(h_i-h_{o1})/h_{a1}$, $i=1,2,3$; $u_i=(Q_i-Q_{oi})/Q_{ai}$, $i=1,2$, 得到系统的差分方程 $x(k+1)=f(x(k), u(k))$ 。

表 1 三容实验的物理参数

Table 1 Parameters of three-tank system			
S/cm	154	S_H/cm^2	0.5
$H_{\max}/\text{cm}$	58	$Q_{\max}/(\text{mL}\cdot\text{s}^{-1})$	166
$g/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-2})$	980	α_{z1}	0.4116
α_{z2}	0.7261	α_{z3}	0.4536

选择二次阶段代价函数 $F(x,u)=x^T\Pi x+u^T R u$, 其中 $\Pi=\operatorname{diag}\{2,0,5,0,10,0\}$, $R=0.081I$ 。按照 1.3 节介绍的方法求取系统的终端域 $\Omega=\{x/x^T P x\leq\alpha\}$, 其中

$$\alpha=37.7339$$

$$P=10^4\begin{bmatrix} 1.1467 & 0.0668 & 0.4293 \\ 0.0668 & 0.0194 & 0.0375 \\ 0.4293 & 0.0375 & 0.2095 \end{bmatrix}$$

选择 $N_c=N_p=50$ 得到系统的仿真曲线如图 1 所示。

由图 1 可知, 在开始阶段水泵以所能够提供的最大流量向容器供水。水泵流量和容器液位都在允许的范围内变化, 并且系统响应无超调。

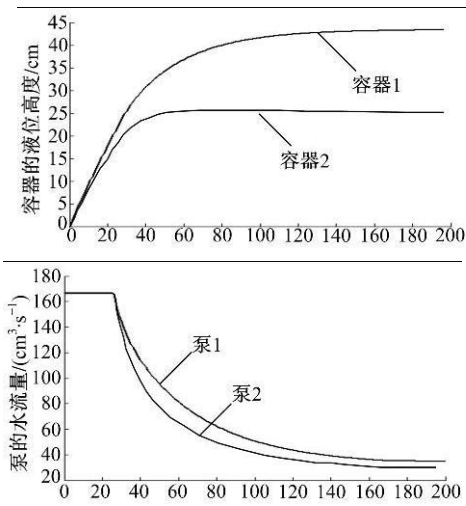


图 1 三容系统的 QNMPC 仿真结果

Fig. 1 Simulation results of QNMPC of a three-tank system

4 结束语

在文献 [6] 的基础上, 讨论了约束离散时间系统的准无限时域 NMPC 算法。三容系统的数值仿真验证了算法的有效性: 在保证约束满足和系统稳定性的基础上使闭环系统具有期望的动态性能。

参考文献:

[1] Mayne D Q, Rawlings J B, Rao C V, et al. Constrained model predictive control: stability and optimality[J]. Automatica, 2000, 36(6): 789-814.

[2] Qin S J, Badgwell T A. A survey of industrial model predictive control technology[J]. Control Engineering Practice, 2003, 11(7): 733-764.

[3] Bitmead R, Gevers M, Wertz V. Adaptive Optimal Control—the Thinking Man’s GPC[M]. New York: Prentice Hall, 1990.

[4] Mayne D Q, Michalska H. Receding horizon control of nonlinear systems[J]. IEEE Trans Automat Contr, 1990, 35(7): 814-824.

[5] Michalska H, Mayne D. Robust receding horizon control of constrained nonlinear systems[J]. IEEE Trans Automat Contr, 1993, 38(11): 1623-1633.

[6] Chen H, Allgower F. A quasi-infinite horizon nonlinear model predictive control scheme with guaranteed stability[J]. Automatica, 1998, 34(10): 1205-1217.

[7] 高兴泉, 刘淳, 马苗苗, 等. 基于非线性静态反馈解耦的三容系统 PI 控制[J]. 控制工程, 2004, 11: 352-355.