

研究论文

约束 Hammerstein 系统构造性预测控制及其在聚丙烯牌号切换控制中的应用

何德峰, 宋秀兰, 俞 立

(浙江工业大学信息工程学院, 浙江 杭州 310023)

摘要: 针对具有状态、输入和中间变量约束的连续时间 Hammerstein 系统, 提出了一种多变量构造性模型预测控制策略。首先, 基于 Hammerstein 系统的特殊结构, 利用 Raccati 方程构造线性环节的控制 Lyapunov 函数, 进而设计其一族可凋控制律 (即稳定控制类)。其次, 对约束 Hammerstein 系统定义一个有限时域滚动优化控制问题, 通过在线优化计算实际预测控制量。利用 Lyapunov 稳定性定理建立闭环系统渐近稳定的充分条件。最后, 以工业聚丙烯装置牌号切换控制为例, 仿真验证本文结果的有效性。

关键词: 约束 Hammerstein 系统; 模型预测控制; 控制 Lyapunov 函数; 聚丙烯; 牌号切换

DOI: 10.3969/j.issn.0438-1157.2011.08.016

中图分类号: TP 273.1

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (2011) 08-2182-06

Constructive predictive control of constrained Hammerstein systems and its application to grade transition control of polypropylene

HE Defeng, SONG Xiulan, YU Li

(School of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China)

Abstract: One multi-variables constructive model predictive control strategy is developed for continuous-time Hammerstein systems with constraints on the state, input and intermediate variable. Firstly, based on the special structure of Hammerstein systems, one control Lyapunov function is constructed for the linear subpart *via* the Raccati equation. This leads to a class of adjustable control law (*i. e.* stable control class) of the linear subpart. Secondly, a finite receding horizon optimal control problem is defined for the constrained Hammerstein system, which is computed on-line to derive the actual predictive control actions. The sufficient condition for asymptotically stability of the closed-loop system is obtained by the Lyapunov's theorem. Finally, the simulation example of the grade transition control of industrial polypropylene plants is used to illustrate the effectiveness of the results obtained here.

Key words: constrained Hammerstein systems; model predictive control; control Lyapunov functions; polypropylene; grade transition

引 言

大多数工业过程都具有非线性和约束限制。对

于非线性因素, 通常可以利用局部线性化方法处理或建模成具有特定结构的非线性函数^[1-5]。其中, Hammerstein 模型是一类具有特定结构的典型非

2011-05-01 收到初稿, 2011-05-16 收到修改稿。

联系人及第一作者: 何德峰 (1979—), 男, 博士, 副教授。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60904040); 高校博士点专项科研基金 (20093317120002); 浙江省自然科学基金项目 (Y1100911)。

Received date: 2011-05-01.

Corresponding author: HE Defeng, hdfzj@zjut.edu.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (60904040), the Specialized Research Fund for Doctoral Program of Higher Education of China (20093317120002) and the Natural Science Foundation of Zhejiang Province (Y1100911).

线性系统, 由静态非线性函数和动态线性环节串联而成, 具有结构简单、参数易于辨识等优点, 可描述如聚合过程牌号切换、热交换器、pH 中和等一大类非线性工业过程^[4-5]。而对于系统约束因素, 非线性模型预测控制 (NMPC) 技术成为了首选的先进控制策略^[6]。因此, 约束 Hammerstein 系统的 NMPC 得到了较多的研究^[7-12]。例如, 文献 [7] 直接利用滚动优化原理, 提出约束 Hammerstein 系统 NMPC 策略。虽然该策略能处理各种约束, 但非线性函数的存在增加了 NMPC 的在线计算量。对此, 文献 [8-11] 利用 Hammerstein 模型的特殊结构, 先对线性环节设计线性 MPC 策略, 再求解非线性代数方程组与解饱和运算确定实际控制量, 从而降低在线优化的计算量。但该策略通常会引入代数方程组求解误差, 且通常只考虑饱和和约束。在综合上述各策略优点的基础上, 文献 [12] 先对线性环节作二次最优控制设计, 再在线滚动优化跟踪线性二次最优控制律, 从而实现约束 NMPC 策略设计。

本文以工业聚丙烯牌号切块控制问题为背景, 对具有状态、输入和中间变量约束的 Hammerstein 系统设计构造性 NMPC 策略。在文献 [12] 的研究基础上, 利用 Raccati 方程构造线性环节的控制 Lyapunov 函数, 进而设计其一族可控制律 (即稳定控制类)^[13], 其中可调参数反映了闭环子系统的衰减程度。通过对线性闭环子系统的跟踪, 定义有限时域滚动优化控制问题, 并通过在线求解确定实际预测控制量。进一步, 利用 Lyapunov 稳定性理论给出闭环系统渐近稳定的充分条件, 从而控制器对解算误差具有一定的鲁棒性。最后用聚丙烯牌号切换控制仿真验证本文结果的有效性。

1 系统描述

考虑如下连续时间多变量 Hammerstein 系统

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bv(t), \quad v(t) = g(u(t), t), \\ u(t) &= Cx(t), \quad t \geq 0\end{aligned}\quad (1)$$

其中, $x \in R^n$ 、 $v \in R^r$ 和 $u \in R^m$ 分别是系统状态、中间变量和输入向量; A 、 B 和 C 是具有相应维数的常数矩阵; g 是连续可微的非线性函数向量, 表示系统输入和中间变量之间的静态非线性环节, 满足 $g(0, t) = 0$ 。定义系统的状态、中间变量和输入约束如下

$$x(t) \in M_x \subseteq R^n, v(t) \in M_v \subseteq R^r,$$

$$u(t) \in M_u \subseteq R^m, \quad t \geq 0 \quad (2)$$

其中, 约束集合 M_x 、 M_v 和 M_u 分别是包含原点为内点的紧凸集。不失一般性, 假设原点为系统的平衡点。

假设 1: 系统 (1) 线性环节 (A, B) 是完全能控的, 且状态是完全可测的。

定义 1: 考虑系统 $\dot{x} = f(x) + g(x)u$, 如果存在一个光滑正定且径向无穷大函数 $V(x)$ 满足

$$L_g V(x) = 0, x \neq 0 \Rightarrow L_f V(x) \leq 0 \quad (3)$$

其中, 导数 $L_f V(x) = [\partial V(x)/\partial x] f(x)$ 及 $L_g V(x) = [\partial V(x)/\partial x] g(x)$, 则函数 $V(x)$ 称为该系统的一个控制 Lyapunov 函数 (CLF)^[14]。

定义 2: 考虑系统 $\dot{x} = f(x) + g(x)u$, 给定一族控制律 $u = K(x, \mu)$, 其中 $\mu \in R^q$ 为可调向量。如果存在一个非空数值集合 $S_1 \subseteq R^q$, 使得对任意 $\mu \in S_1$ 闭环系统原点全局渐近稳定, 则 $K(x, \mu)$ 称为该系统的一个稳定控制类^[13]。

注 1: 系统“稳定控制类”的定义是系统辨识领域中“模型类”概念在控制领域内的延伸。一旦系统的稳定控制类找到, 就可以通过滚动优化原理构造相应的预测控制算法。

定义 3: 给定一个包含原点的闭集 $M \subseteq R^n$, 如果系统 $\dot{x} = f(x)$ 的解满足 $\forall x(t; x(0)) \in M, \forall x(0) \in M, t \geq 0$, 则集 M 称为该系统的一个不变集^[6]。

定义 4: 考虑系统 $\dot{x} = f(x)$ 的一个不变集 $M \subseteq R^n$, 如果系统解 $x(t; x(0))$ 满足约束 (2) 及

$$\forall x(0) \in M \Rightarrow \lim_{t \rightarrow \infty} x(t; x(0)) = 0 \quad (4)$$

则称该系统在集 M 上区域渐近稳定, 且 M 为系统的吸收域^[12]。

2 构造性 MPC 算法

考虑系统 (1) 的线性子系统 (A, B, C)

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bv(t), \quad y(t) = Cx(t), \quad t \geq 0 \quad (5)$$

当假设 1 成立时, 对任意给定的正定矩阵 Q , 如下 Raccati 方程

$$A'P + PA - PBB'P = -Q \quad (6)$$

存在唯一的正定对称矩阵解 P , 则定义函数 $V(x) = x'Px$, 对系统 (5) 有如下结论。

定理 1: 对于线性子系统 (5), 矩阵 P 为式 (6) 的正定对称解, 则①函数 $V(x) = x'Px$ 为系统的一个 CLF; ②由 $V(x)$ 可构造一个可控制律

$$v(x, \mu) = -\frac{\alpha(x) + \mu \sqrt{\alpha(x)^2 + \|\beta(x)\|^4}}{\|\beta(x)\|^2} \beta(x)' \quad (7)$$

其中, $\alpha(x) = 2x'PAx$, $\beta(x) = 2x'PB$ 和可调参数 $\mu \in (0, D]$, D 为一有限正数。该控制律可全局镇定线性子系统 (5), 从而是该系统的一个稳定控制类。

证明: 求解式(6), 得唯一正定对称解 P , 定义函数 $V(x) = x'Px$ 。

(1) 令 $f(x) = Ax$, $g(x) = B$, 则 $L_f V(x) = \alpha(x) = 2x'PAx$, $L_g V(x) = \beta(x) = 2x'PB$ 。又由式(6)可得

$$L_f V(x) = -x'Qx + x'PBB'Px \quad (8)$$

则根据 CLF 定义, 当 $L_g V(x) = 0$, $x \neq 0$ 时, 函数 $V(x)$ 满足

$$L_f V(x) = -x'Qx < 0 \quad (9)$$

从而函数 $V(x) = x'Px$ 为系统的一个 CLF。

(2) 令函数 $V(x)$ 为闭环系统 (5) 和 (7) 的一个备选 Lyapunov 函数。对 $V(x)$ 沿闭环系统轨迹求导并考虑式(7), 整理得

$$\dot{V}(x) = \alpha(x) + \beta(x)v(x, \mu) = -\mu \sqrt{\alpha(x)^2 + \|\beta(x)\|^4} < 0, \quad \forall \mu > 0 \quad (10)$$

即对任意有限可调参数 $\mu \in (0, D]$, 闭环系统 (5) 和 (7) 原点是全局渐近稳定的。从而根据定义 2 可知, 可控制律 (7) 也是线性子系统的一个稳定控制类。证毕。

注 2: 由不等式(10)可知, 可调参数 μ 可表征闭环线性子系统的衰减程度, 即可以通过调整参数 μ 实现闭环系统期望的响应^[13]。另一方面, 控制律 (7) 并不是系统 (1) 的实际控制输入, 而是一个期望的中间变量值。因此, 为了计算实际控制量 $u(t)$, 通常可以解非线性方程组 $g(u, t) - v(x, \mu) = 0$ 获得。但这不可避免地引入了计算误差, 特别是对于全约束 Hammerstein 系统, 继而影响闭环系统的稳定性和控制性能。下面借鉴文献 [12] 提出的方法, 给出构造性 MPC 设计以求解实际系统 (1) 的控制输入 $u(t)$ 。

考虑系统 (1), 离线仿真可调参数 μ 使得线性子系统具有理想的系统响应 $x_r(t)$, 并令参数为 μ^* 。据此, 定义系统状态误差 $\epsilon_x(t) = x_r(t) - x(t)$ 。令 $T_p > 0$ 为预测时域, 对约束系统 (1) 和 (2) 定义滚动优化目标函数

$$J(t) = \int_0^{T_p} \{ \|\epsilon_x(t+s|t)\|_{R_1} + \|u(t+s|t)\|_{R_2} \} ds \quad (11)$$

其中, $R_1 > 0$ 为误差加权矩阵, $R_2 > 0$ 为输入加权矩阵, $u(t+s|t)$ 和 $\epsilon(t+s|t)$ 分别为系统 (1) 在 t

时刻对 $t+s$ 时刻输入和系统误差的预测变量。则在时刻 t 有限时域优化问题为

$$\begin{aligned} \min_{u(t|T_p)} J(t) \\ \text{s. t.} \quad & \dot{x}(s|t) = Ax(s|t) + Bg(u(s|t), s), \\ & \dot{x}_r(s|t) = Ax_r(s|t) + Bv(x_r(s|t), \mu^*), \\ & x(s|t) \in M_x, g(s|t) \in M_v, u(s|t) \in M_u, \\ & x(t|t) = x(t), x_r(s|t) = x(t), \forall s \in [t, t+T_p] \end{aligned} \quad (12)$$

应用序列二次规划算法或遗传算法等非线性规划法在线计算优化问题 (12), 得最优控制解

$$u(t; T_p)^* = u(s; x(t))^*, \quad \forall s \in [t, t+T_p] \quad (13)$$

令 $\delta > 0$ 为系统一充分小采样周期, 则由滚动优化原理可得在 t 时刻预测控制量为

$$u(s)^{\text{mpc}} = u(s; x(t))^*, \quad \forall s \in [t, t+\delta] \quad (14)$$

则对应闭环 Hammerstein 系统为

$$\begin{aligned} \dot{x}(s) &= Ax(s) + Bg(u(s)^{\text{mpc}}, s) \\ &= (A + BK)x(s) + B\epsilon_u(s), \\ &\quad \forall s \in [t, t+\delta], \quad t \geq 0 \end{aligned} \quad (15)$$

其中, 非线性解算误差 $\epsilon_u = g(u^{\text{mpc}}, t) - v(x, \mu^*)$, 增益 K 为

$$K = -2B'P \frac{\alpha(x) + \mu \sqrt{\alpha(x)^2 + \|\beta(x)\|^4}}{\|\beta(x)\|^2}$$

对于闭环系统 (15) 有如下的稳定性结论。

定理 2: 考虑闭环系统 (15), 如果假设 1 成立, 且存在一个不变集 M 及其定义在 M 上的预测控制量 u^{mpc} 满足如下条件

$$\beta(x)g(u^{\text{mpc}}, t) < \beta(x)v(x, \mu^*) + \mu \sqrt{\alpha(x)^2 + \|\beta(x)\|^4} \quad (16)$$

其中, $\alpha(x) = 2x'PAx$, $\beta(x) = 2x'PB$ 及 P 为式(6)的正定对称解。则闭环系统在 M 上区域指数渐近稳定, 且 M 为系统的吸收域。

证明: 定义如下一个非空集合 M_0

$$M_0 = \{x \in R^n : v(x, \mu^*) \in M_v, \forall x \in M_x\}$$

其中, $v(x, \mu^*)$ 由式(7)给定。由于集合 M_x 和 M_v 都为包含原点的紧的凸集, 故集 M_0 总是存在且非空。定义正定函数 $V(t) = x(t)'Px(t)$, 其中矩阵 P 为 Riccati 方程式(6)的解。沿闭环系统 (15) 轨迹对 $V(t)$ 作求导运算, 得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= 2x'P(Ax + BKx + B\epsilon_u) \\ &= \alpha(x) + \beta(x)v(x, \mu^*) + \beta(x)\epsilon_u \end{aligned} \quad (17)$$

将式(7)和式(16)代入式(17), 得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= -\mu^* \sqrt{\alpha(x)^2 + \|\beta(x)\|^4} + \beta(x)\epsilon_u \\ &= -\mu^* \sqrt{\alpha(x)^2 + \|\beta(x)\|^4} + \beta(x)[g(u^{\text{mpc}}, t) - v(x, \mu^*)] < 0 \end{aligned} \quad (18)$$

即 $V(t)$ 为闭环系统的一个 Lyapunov 函数。

由于集合 M_0 不一定是闭环系统的不变集，故定义如下非空集合 $M(c)$

$$M(c) = \{x \in R^n : V(x) \leq c, c > 0\} \subseteq M_0 \tag{19}$$

同理，集合 $M(c)$ 总是存在。增大 c 值直到 $M(c)$ 最大程度逼近 M_0 ，并记 $M=M(c^*)$ 。又因为 M 是 Lyapunov 函数 $V(t)$ 定义的一个水平集，所以由不等式(18)可知，集 M 是闭环系统的一个不变集合。综合集 M_0 和 M 的定义，可得闭环系统 (15) 在集 M 上区域渐近稳定，且 M 为闭环系统的一个吸收域。又注意到该闭环系统是一线性定常系统，所以闭环系统在吸收域 M 上也是区域指数稳定的。证毕。

约束 Hammerstein 系统构造性预测控制算法实现步骤如下：

- (1) 离线仿真可调参数 μ 使得线性子系统具有理想响应，令参数为 μ^* ；
- (2) 离线求解 Riccati 方程式(6)，并构造稳定控制类 (7)；
- (3) 初始化设计参数 (R_1, R_2, T_p) 及采样周期 $\delta>0$ ；
- (4) 读入时刻 t 的状态测量值 $x(t)$ ，应用数值优化算法求解优化问题式(12)，得当前时刻的最优控制解 $u(t; T_p)$ ；
- (5) 将控制律 $u(t; T_p)$ 作用于系统 (1)，并在下个采样周期到达时令 $t=t+\delta$ ，转入步骤 (4)。

3 数值仿真

以工业聚丙烯牌号切换控制为例，验证本文算法的有效性和实用性。

在工业生产中，一般用熔融指数 (MI) 描述均相聚丙烯 (均聚物) 的牌号，而用 MI 和乙烯含量 (E_i) 表征共相聚丙烯 (共聚物) 的牌号^[15-18]。因此，聚丙烯牌号切换过程的关键是控制聚合物熔融指数和乙烯含量的动态响应。基于丙烯聚合反应

机理，建立牌号切换过程质量指数动态机理模型如下^[12]

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1/\tau & 0 \\ 0 & -1/\tau \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/\tau & 0 \\ 0 & 1/\tau \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_1(u,t) \\ g_2(u,t) \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} g_1(u,t) \\ g_2(u,t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 + \frac{k_2}{u_1} + k_3 \lg(k_4 + k_5 u_2 + k_6 u_3) \\ \frac{k_7 u_2 + 1}{k_8 / u_3 + k_9 u_3 + k_{10}} \end{bmatrix} \\ y(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} x(t), \quad t \geq 0 \end{cases} \tag{20}$$

其中，状态 x_1 和 x_2 分别为聚丙烯累积 $MI_c[g \cdot (10 \text{ min})^{-1}]$ 和 $E_{tc}(\%)$ ；中间量 g_1 和 g_2 分别表示聚丙烯瞬时 $MI_i[g \cdot (10 \text{ min})^{-1}]$ 和 $E_{ti}(\%)$ ；输入量 $u_1、u_2$ 和 u_3 分别为反应温度 $T(K)$ 、氢气丙烯浓度比 $C_{H_2}/C_m(\%)$ 和乙烯丙烯浓度比 $C_{m_2}/C_m(\%)$ ； τ 为聚合物平均停留时间 ($\tau=2 \text{ h}$)；参数 $k_i(i=1, \dots, 10)$ 由工业数据辨识得到。

仿真中，选择均聚牌号 A、B 和无规共聚牌号 C 及切换顺序 $A \rightarrow B \rightarrow C$ ，采用双层控制结构作为切换控制组态^[5]，即由切换控制器计算回路控制层的最优设定值以完成整个牌号切换过程的控制。注意均聚牌号 A 和 B 生产工艺中不含乙烯输入量。牌号规格及切换约束如表 1 所示，其中上角标 $c、i$ 和 Δ 分别表示累积量、瞬时量和增量约束。

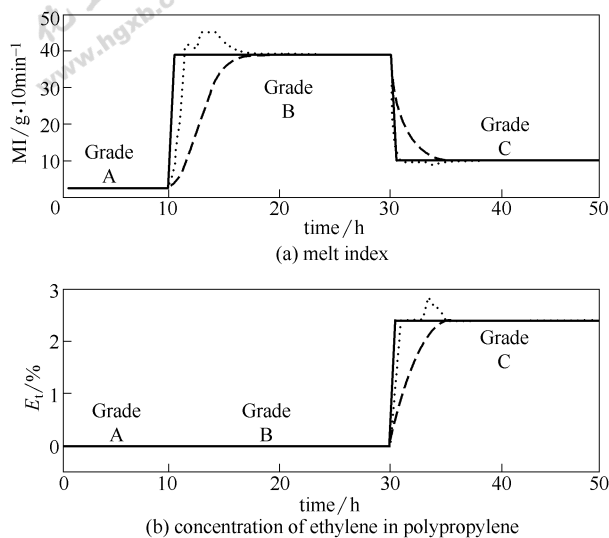
初始化设计参数 (R_1, R_2, T_p) = ($I, I, 5 \text{ h}$) 和采样周期 $\delta=0.5 \text{ h}$ ；令 $Q=I$ ，则求解 Raccati

方程式(6)，得矩阵 $P=\begin{bmatrix} 2\sqrt{2}-2 & 0 \\ 0 & 2\sqrt{2}-2 \end{bmatrix}$ ，则

稳定控制类为 $v(x, \mu) = -(1.2968\mu - 1) \times [x_1 \ x_2]'$ ，其中离线仿真得线性环节 $\mu^*=1.0$ 。又假设生产装置在第 10 h 由 $A \rightarrow B$ 切换，在第 30 h 由 $B \rightarrow C$ 切换，则仿真切换控制结果如图 1、图 2 所示。如果以规格指标 5% 作为切换目标牌号的合格检验标准，那么由图可以看出，当切换开始后聚

表 1 牌号规格与切换约束
Table 1 Grade indices and transition constraints

Grade	MI/g · (10 min) ⁻¹	E _i /%	T/K	(C _{H₂} /C _m)/%	(C _{m₂} /C _m)/%
A	2.7	—	343.15	0.050	—
B	39.0	—	343.15	0.330	—
C	10.0	2.4	343.15	0.236	1.99
A→B	[2.4,42.0] ^c	—	[341.15,345.15]	[0.02,0.35]	—
	[2.0,45.0] ⁱ	—	—	[−0.1,0.10] ^Δ	—
B→C	[8.0,42.0] ^c	[0.0,2.5] ^c	[341.15,345.15]	[0.20,0.35]	[0.00,2.50]
	[6.0,45.0] ⁱ	[0.0,2.6] ⁱ	—	[−0.1,0.10] ^Δ	[−0.1,0.10] ^Δ

图 1 牌号切换过程 MI 和 E_t 输出轨迹Fig. 1 MI and E_t output trajectories of grade transition processes

— set-point; ... instantaneous; --- cumulative

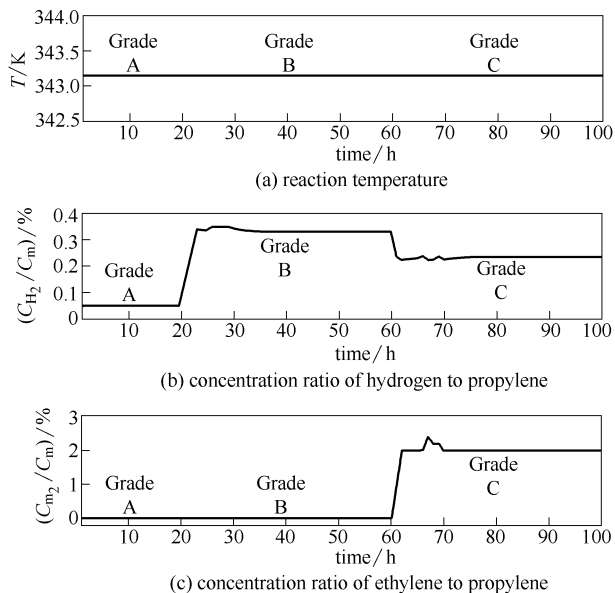


图 2 牌号切换过程输入曲线

Fig. 2 Input profiles of grade transition processes

合物的 MI 和 E_t 离开起始生产牌号的合格品区而进入废料生产区；而当切换开始后 7.0 h (A→B) 或 5.0 h (B→C) 时，聚合物进入目标牌号合格品区，同时操作变量都满足切换约束。因而 A→B 和 B→C 的切换时间分别为 7.0 h 和 5.0 h，而现场实际切换时间通常在 10 h 以上甚至 20 h，并伴随各操作变量剧烈变动而可能违反约束。因此，本文策略在平稳切换操作的同时降低了切换过程生产的废料量，节约了能源，提高了经济效益。

4 结 论

以聚丙烯树脂牌号切换过程为研究背景，对约束多变量 Hammerstein 系统提出了一种构造性预测控制策略。新策略分两步计算，可以处理系统各种实际约束和在优化过程中直接加权系统实际输入以平缓系统运行。特别地，新策略内在地考虑了非线性代数方程解算误差对实际输入满足系统约束的影响。同时，文中给出了保证闭环系统渐近稳定的充分条件，并通过聚丙烯牌号切换过程的仿真控制，验证了本文策略的有效性和实用性。

References

- [1] Isidori A. Nonlinear Control Systems [M]. 3rd ed. Berlin: Springer, 1995
- [2] Su Chengli (苏成利), Wang Shuqing (王树青). A nonlinear predictive control algorithm based on Winner model [J]. *Information and Control* (信息与控制), 2007, **36** (1): 86-92
- [3] Doyle F J, Ogunnaike B A, Pearson R K. Nonlinear model-based control using second-order Volterra models [J]. *Automatica*, 1995, **31** (5): 697-714
- [4] Bhandari N, Rollins D. Continuous-time Hammerstein nonlinear modeling applied to distillation [J]. *AIChE Journal*, 2004, **50** (2): 530-533
- [5] He Defeng (何德峰), Yu Li (俞立), Xue Meisheng (薛美盛). Online operation guidance for grade transition in propylene polymerization plants//Proceedings of the 19th Chinese Process Control Conference [C]. Beijing, China: Chemical Industry Press, 2008: 339-342
- [6] Kerrigan E C. Robust constraints satisfaction: invariant sets and predictive control [D]. UK: University of Cambridge, 2000
- [7] Bloemen H H J, Boom van de T J J, Verbruggen H B. Model-based predictive control for Hammerstein-Wiener systems [J]. *International Journal of Control*, 2001, **74** (5): 482-495
- [8] Zhu X F, Seborg D E. Nonlinear predictive control based on Hammerstein models [J]. *Control Theory and Applications*, 1994, **11** (5): 564-575
- [9] Ding Baocang (丁宝苍), Li Shaoyuan (李少远). Design and analysis of Hammerstein nonlinear control systems with constraints [J]. *Control and Decision* (控制与决策), 2003, **18** (1): 24-28
- [10] Ding B C, Xi Y G. A two-step model predictive control of Hammerstein model [J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2006, **16** (7): 353-367
- [11] Zhang H T, Li H X, Chen G R. Dual-model predictive control algorithm for constrained Hammerstein systems [J]. *International Journal of Control*, 2008, **81** (10): 1609-1625
- [12] He Defeng (何德峰), Yu Li (俞立). Nonlinear predictive

- control of constrained Hammerstein systems and its research on simulation of polypropylene grade transition [J]. *Acta Automatica Sinica* (自动化学报), 2009, **35** (12): 1558-1563
- [13] Defeng H, Haibo J. Constructive model predictive control for constrained nonlinear systems [J]. *Optim. Control Appl. Meth.*, 2008, **29** (6): 467-481
- [14] Sontag E D. A universal construction of Artstein's theorem on nonlinear stabilization [J]. *Systems & Control Letters*, 1989, **13** (2): 117-123
- [15] Jia Liang (荚亮), Liang Jun (梁军), Wang Wenqing (王文庆), Wang Jingdai (王靖岱). Review of grade transition in continuous polyolefin production process [J]. *Chemical Industry and Engineering Process* (化工进展), 2006, **25** (7): 780-785
- [16] Richards J R, Congalidis J P. Measurement and control of polymerization reactors [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2006, **30** (10/11/12): 1447-1463
- [17] Li Wenyi (李文义), Chen Guo (陈果), Wang Jingdai (王靖岱), Yang Yongrong (阳永荣). Mathematical modeling of polypropylene quality for Spheripol process [J]. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities* (高校化学化工学报), 2008, **22** (1): 100-105
- [18] He Defeng (何德峰), Zou Tao (邹涛), Yu Li (俞立). Receding horizon control for grade transition of large-scale polypropylene production plants [J]. *CIESC Journal* (化工学报), 2010, **61** (2): 405-412