约束 Hammerstein 系统非线性预测控制及其在聚丙烯牌号切换中的仿真研究

何德峰 [1] 俞 立 [1]

摘 要 对状态和输入受约束的 Hammerstein 系统, 提出一种新的可保证闭环指数稳定的非线性模型预测控制策略. 基于线性子系统镇定的最优控制律, 滚动预测非线性代数方程的解算误差, 继而在线优化计算满足约束的预测控制量. 进一步, 得到闭环系统指数稳定的解算误差上界. 从而闭环系统不仅满足约束而且对解算误差具有鲁棒性. 最后以工业聚丙烯牌号切换控制为例, 仿真验证本文算法的有效性.

关键词 Hammerstein 系统, 约束预测控制, 指数稳定性, 聚丙烯, 牌号切换
中图分类号 TP273.15

Nonlinear Predictive Control of Constrained Hammerstein Systems and Its Research on Simulation of Polypropylene Grade Transition

HE De-Feng[1] YU Li[1]

Abstract A new nonlinear model predictive control (NMPC) scheme to guarantee closed-loop exponential stability is presented for Hammerstein systems subject to constraints on the state and input. Solving errors of the nonlinear algebra equation are predicted recedingly based on stabilized and optimal control laws of the linear subsystem. And then predictive control actions are computed to satisfy the constraint via online optimization. Moreover, the bound of solving errors is obtained to ensure the exponential stability of the closed-loop system. Hence, the closed-loop system not only satisfies the constraint but also has robustness property with respect to the solving error. Finally, a simulation example of industrial polypropylene grade transition control is used to illustrate the effectiveness of the algorithm proposed here.

Key words Hammerstein systems, constrained predictive control, exponential stability, polypropylene, grade transition

Hammerstein 系统由一个静态非线性函数加上一个动态线性子系统组成. 由于 Hammerstein 系统模型结构简单, 并能描述如 pH 中和、聚烯烃树脂牌号切换[1] 等许多非线性化工过程, 使得基于 Hammerstein 系统的非线性模型预测控制 (Nonlinear model predictive control, NMPC) 得到了较多的研究[2−9], 大体上可分为整体法 NMPC 和两步法 NMPC.

在整体法 NMPC 策略[2−3] 中, 非线性函数和线性子系统都纳入目标函数, 直接优化求解控制量. 尽管整体法能统一处理各种实际约束, 但由于附加稳定约束, 通常使得在线控制量计算非常困难. 因此, 许多学者利用 Hammerstein 系统的特殊结构, 提出了两步法 NMPC 策略[4−9], 即先对线性子系统设计中间量 MPC, 然后求非线性代数方程与解饱和反算实际控制量. 两步法具有计算量小、实现方便等优点, 但非线性方程的求解不可避免地引入解算误差[6−7], 且约束系统的输入往往与所要求的输入存在较大偏差, 从而反解得到的实际控制量可能违反系统的约束, 进而影响闭环系统的稳定性和最优性; 其次, 据笔者所知, 目前两步法 NMPC 策略通常考虑具有饱和约束的 Hammerstein 系统; 最后, 在两步法优化过程中忽略对实际输入的加权, 从而降低控制器设计的可调性, 并可导致系统输入变化过大, 影响系统平稳运行.

聚丙烯牌号切换即为聚合装置从一种稳态切换到另一种稳态的过程[1, 10]. 通常, 牌号切换涉及装置多个输入量的调整, 且切换时间越长产生的不合格品越多, 经济损失越大. 本文以此为背景, 研究输入时变的、状态和输入约束的多变量 Hammerstein 系统 NMPC 策略. 通过对非线性代数方程解算误差做多步预测, 在线滚动优化跟踪线性子系统的镇定的最优控制律, 计算满足系统约束的 NMPC. 同时, 利用 Lyapunov 方法得到保证闭环系统指数稳定的解算误差的上界. 因此, 新算法不仅可以处理系统各种约束而且对解算误差具有鲁棒性. 最后通过对工业丙烯聚合装置牌号切换控制的仿真研究, 验证本文

收稿日期 2008-08-29 收修改稿日期 2009-01-12
Received August 29, 2008; in revised form January 12, 2009
国家高技术研究发展计划 (863 计划) (2006AA04Z178) 资助
Supported by National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2006AA04Z178)
1. 浙江工业大学信息工程学院 杭州 310032
1. College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032
DOI: 10.3724/SP.J.1004.2009.01558

算法的有效性和实用性.

1　约束 Hammerstein 系统 NMPC

1.1　系统描述

考察如下离散时间多变量 Hammerstein 系统

$$\begin{aligned}&\boldsymbol{x}(t+1)=A\boldsymbol{x}(t)+B\boldsymbol{v}(t)\\&\boldsymbol{v}(t)=\boldsymbol{f}(\boldsymbol{u}(t),t),\ \ t=0,1,2,\cdots\end{aligned}\tag{1}$$

其中, 向量 $\boldsymbol{x}\in\mathbf{R}^n$、$\boldsymbol{v}\in\mathbf{R}^r$ 和 $\boldsymbol{u}\in\mathbf{R}^m$ 分别是系统状态、中间变量和输入; $\boldsymbol{f}$ 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 $\boldsymbol{f}(0,t)=\mathbf{0}$. 不失一般性, 假设原点为系统的平衡点. 定义系统的状态和输入约束为

$$\begin{aligned}&\boldsymbol{x}(t)\in M_x\subseteq\mathbf{R}^n,\quad \boldsymbol{v}(t)\in M_v\subseteq\mathbf{R}^r\\&\boldsymbol{u}(t)\in M_u\subseteq\mathbf{R}^m,\quad t=0,1,2,\cdots\end{aligned}\tag{2}$$

假设约束集合 M_x、M_v 和 M_u 分别是包含原点为内点的紧凸集. 进一步, 假设系统 (1) 是能控的且状态是完全可测的.

1.2　NMPC 算法设计

设最优反馈律 $\boldsymbol{v}^{\rm opt}(t)=K\boldsymbol{x}(t)$ 是线性子系统 $\boldsymbol{x}(t+1)=A\boldsymbol{x}(t)+B\boldsymbol{v}(t)$ 的一个镇定控制律, 则传统两步法[4−9] 通过求解非线性代数方程组 $\boldsymbol{v}^{\rm opt}(t)-\boldsymbol{f}(\hat{\boldsymbol{u}}(t),t)=\mathbf{0}$ 计算相应的实际输入 $\hat{\boldsymbol{u}}(t)$. 然而, 这将不可避免地引入解算误差或甚至不存在可行解, 特别是对于时变非线性函数和系统约束共存时更是如此. 因此, 在实际应用中控制量 $\hat{\boldsymbol{u}}(t)$ 通常不能复现 $\boldsymbol{v}^{\rm opt}(t)$ 而可能违反系统约束, 影响闭环系统的稳定性和最优性. 下面通过滚动预测解算误差并在线优化误差目标函数, 计算满足系统约束的实际输入, 提高闭环稳定性能和最优性能.

定义非线性代数方程解算误差为

$$\triangle\boldsymbol{v}(t)=\boldsymbol{f}(\boldsymbol{u}(t),t)-\boldsymbol{v}^{\rm opt}(t),\ t=0,1,2,\cdots\tag{3}$$

令 $\boldsymbol{x}(t+i|t)$、$\boldsymbol{u}(t+i|t)$ 和 $\triangle\boldsymbol{v}(t+i|t)$ 分别为系统 (1) 在时刻 t 对时刻 $t+i$ 状态、输入和解算误差的预测变量, 则

$$\begin{aligned}\triangle\boldsymbol{v}(t+i|t)=&\boldsymbol{f}(\boldsymbol{u}(t+i|t),t+i)-K\boldsymbol{x}(t+i|t)=\\&-KA^i\boldsymbol{x}(t|t)+\boldsymbol{f}(\boldsymbol{u}(t+i|t),t+i)-\\&\sum_{j=0}^{i-1}KA^{i-j-1}B\boldsymbol{f}(\boldsymbol{u}(t+j|t),t+j)\\&\forall\, i=0,1,\cdots,N-1\end{aligned}\tag{4}$$

其中 $N>0$ 为预测时域. 将等式组 (4) 简写为

$$\triangle\boldsymbol{v}(t;N)=G\boldsymbol{x}(t|t)+H\boldsymbol{f}(\boldsymbol{u}(t;N))\tag{5}$$

其中,

$$\triangle\boldsymbol{v}(t;N)=\begin{bmatrix}\triangle\boldsymbol{v}(t|t)\\\triangle\boldsymbol{v}(t+1|t)\\\vdots\\\triangle\boldsymbol{v}(t+N-1|t)\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{u}(t;N)=\begin{bmatrix}\boldsymbol{u}(t|t)\\\boldsymbol{u}(t+1|t)\\\vdots\\\boldsymbol{u}(t+N-1|t)\end{bmatrix},\ G=\begin{bmatrix}K\\KA\\\vdots\\KA^{N-1}\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{f}(\boldsymbol{u}(t;N))=\begin{bmatrix}\boldsymbol{f}(\boldsymbol{u}(t|t))\\\boldsymbol{f}(\boldsymbol{u}(t+1|t+1))\\\vdots\\\boldsymbol{f}(\boldsymbol{u}(t+N-1|t))\end{bmatrix}$$

$$H=\begin{bmatrix}I&0&\cdots&0\\-KB&I&\cdots&0\\\vdots&\vdots&\ddots&\vdots\\-KA^{N-2}B&\cdots&-KB&I\end{bmatrix}$$

对约束系统 (1) 和 (2), 定义 N 步滚动优化目标函数

$$\begin{aligned}&J(N,\boldsymbol{x}(t|t))=\\&\sum_{i=0}^{N-1}\left[\|\triangle\boldsymbol{v}(t+i|t)\|^2+\|\boldsymbol{u}(t+i|t)\|_W^2\right]=\\&\boldsymbol{x}(t|t)^{\rm T}G^{\rm T}G\boldsymbol{x}(t|t)+2\boldsymbol{x}(t|t)^{\rm T}G^{\rm T}H\boldsymbol{f}(\boldsymbol{u}(t;N))+\\&\boldsymbol{f}(\boldsymbol{u}(t;N))^{\rm T}H^{\rm T}H\boldsymbol{f}(\boldsymbol{u}(t;N))+\\&\boldsymbol{u}(t;N)^{\rm T}W\boldsymbol{u}(t;N)\end{aligned}\tag{6}$$

其中 $W>0$ 为输入加权矩阵, 则在时刻 t 有限时域优化问题为

$$\begin{aligned}&\min_{\boldsymbol{u}(t;N)}\ J(N,\boldsymbol{x}(t|t)),\ \boldsymbol{x}(t|t)=\boldsymbol{x}(t)\\\text{s.t.}\quad&\boldsymbol{u}(t+i|t)\in M_u,\ \boldsymbol{f}(\boldsymbol{u}(t+i|t))\in M_v\\&\boldsymbol{x}(t+i+1|t)\in M_x,\ i=0,1,\cdots,N-1\end{aligned}\tag{7}$$

应用数值规划算法或随机搜索优化算法求解问题 (7), 得最优控制律 $\boldsymbol{u}(t;N)^*$. 但 MPC 采用滚动优化与前景控制策略, 即在时刻 t 施加控制量 $\boldsymbol{u}(t)=\boldsymbol{u}(t|t)^*$, 在时刻 $t+1$ 重复优化问题 (7) 得到 $\boldsymbol{u}(t+1)=\boldsymbol{u}(t+1|t+1)^*$.

注 1. 为了保证最优反馈律 $\boldsymbol{v}^{\rm opt}(t)$ 是线性子系统 $\boldsymbol{x}(t+1)=A\boldsymbol{x}(t)+B\boldsymbol{v}(t)$ 的镇定控制律, 令 $\boldsymbol{v}^{\rm opt}(t)$ 为线性二次型最优控制律 $\boldsymbol{v}^{\rm lq}(t)$, 即

$$\boldsymbol{v}^{\rm opt}(t)=\boldsymbol{v}^{\rm lq}(t)=-(R+B^{\rm T}PB)^{-1}B^{\rm T}PA\boldsymbol{x}(t) \tag{8}$$

其中, 矩阵 $R>0$, 对称矩阵 $P>0$ 为 Riccati 方程

$$P=A^{\rm T}PA-A^{\rm T}PB(R+B^{\rm T}PB)^{-1}B^{\rm T}PA+Q \tag{9}$$

的解, 则控制律 (8) 是线性子系统对应如下优化命题

$$\min_{\boldsymbol{v}}\left\{J(\boldsymbol{x}(t))=\sum_{i=t}^{\infty}\left[\|\boldsymbol{x}(i)\|_Q^2+\|\boldsymbol{v}(i)\|_R^2\right]\right\} \tag{10}$$

的最优控制.

给定线性子系统 $\boldsymbol{x}(t+1)=A\boldsymbol{x}(t)+B\boldsymbol{v}(t)$ 的最优反馈律 (8), 并定义此时 Hammerstein 系统 NMPC 律为 $\boldsymbol{u}^{\rm mpc}(t)=\boldsymbol{u}(t|t)^*$ 及 $\boldsymbol{v}^{\rm mpc}(t)=\boldsymbol{f}(\boldsymbol{u}^{\rm mpc}(t),t)$, 则 NMPC 闭环系统为

$$\begin{aligned}\boldsymbol{x}(t+1)=A\boldsymbol{x}(t)+B\boldsymbol{v}^{\rm mpc}(t)=\\ [A-B(R+B^{\rm T}PB)^{-1}\times\\ B^{\rm T}PA]\boldsymbol{x}(t)+B\triangle\boldsymbol{v}(t)\end{aligned} \tag{11}$$

注 2. 最优反馈律 $\boldsymbol{v}^{\rm opt}(t)$ 只要求是线性子系统的镇定控制律, 因此可以采用其他的理论和方法设计. 例如, 利用带终端约束的线性 MPC 设计[7] 或结合 H_∞ 控制理论和线性矩阵不等式 (Linear matrix inequality, LMI) 技术实现复合预测控制算法设计.

1.3 稳定性分析

定义 1. 设集合 $M\subseteq\mathbf{R}^n$ 是包含原点的闭集, 若系统 (11) 的解满足 $\boldsymbol{x}(t+1;\boldsymbol{x}(t))\in M$, $\forall\boldsymbol{x}(t)\in M$, $t=0,1,\cdots$, 则集合 M 称为系统 (11) 的不变集.

定义 2. 考虑系统 (11) 的不变集 $M\subseteq\mathbf{R}^n$, 如果系统解 $\boldsymbol{x}(t;\boldsymbol{x}(0))$ 满足约束 (2) 及

$$\forall\boldsymbol{x}(0)\in M\Longrightarrow\lim_{t\to\infty}\boldsymbol{x}(t;\boldsymbol{x}(0))=\boldsymbol{0} \tag{12}$$

则称系统 (11) 在集合 M 上区域渐近稳定, 且 M 为系统的吸收域.

定理 1. 考虑闭环系统 (11), 如果存在一个不变集 $M\subseteq\mathbf{R}^n$ 且解算误差 $\triangle\boldsymbol{v}(t)$ 满足如下条件

$$\triangle\boldsymbol{v}(t)^{\rm T}(R+B^{\rm T}PB)\triangle\boldsymbol{v}(t)\le\boldsymbol{v}^{\rm mpc}(t)^{\rm T}R\boldsymbol{v}^{\rm mpc}(t) \tag{13}$$

则系统在集合 M 上区域指数渐近稳定, 而 M 为系统的吸收域.

证明. 定义如下一个非空集合 M_0

$$M_0=\{\boldsymbol{x}\in\mathbf{R}^n:\boldsymbol{v}^{\rm lq}(\boldsymbol{x})\in M_v,\forall\boldsymbol{x}\in M_x\}$$

其中 $\boldsymbol{v}^{\rm lq}(\boldsymbol{x})$ 由式 (8) 给定. 因为集合 M_x 和 M_v 是包含原点的紧的凸集, 故集合 M_0 总是存在且非空. 定义正定函数 $V(t)=\boldsymbol{x}(t)^{\rm T}P\boldsymbol{x}(t)$, 其中矩阵 P 为 Riccati 方程 (9) 的解. 沿闭环系统轨迹对 $V(t)$ 作差分运算, 得

$$\begin{aligned}&V(t+1)-V(t)=\\ &\quad[(A+BK)\boldsymbol{x}(t)+B\triangle\boldsymbol{v}(t)]^{\rm T}P\times\\ &\quad[(A+BK)\boldsymbol{x}(t)+B\triangle\boldsymbol{v}(t)]-\boldsymbol{x}(t)^{\rm T}P\boldsymbol{x}(t)=\\ &\quad\boldsymbol{x}(t)^{\rm T}[A-B(R+B^{\rm T}PB)^{-1}B^{\rm T}PA]^{\rm T}P\times\\ &\quad[A-B(R+B^{\rm T}PB)^{-1}B^{\rm T}PA]\boldsymbol{x}(t)-\\ &\quad\boldsymbol{x}(t)^{\rm T}P\boldsymbol{x}(t)+2\boldsymbol{x}(t)^{\rm T}[A-B(R+B^{\rm T}PB)^{-1}\times\\ &\quad B^{\rm T}PA]^{\rm T}PB\triangle\boldsymbol{v}(t)+\triangle\boldsymbol{v}(t)^{\rm T}B^{\rm T}PB\triangle\boldsymbol{v}(t)\end{aligned}$$

将 Riccati 方程 (9) 代入上式, 整理可得

$$\begin{aligned}&V(t+1)-V(t)=\\ &\quad\boldsymbol{x}(t)^{\rm T}[-Q-A^{\rm T}PB(R+B^{\rm T}PB)^{-1}R\times\\ &\quad(R+B^{\rm T}PB)^{-1}B^{-1}PA]\boldsymbol{x}(t)+\\ &\quad2\boldsymbol{x}(t)^{\rm T}[A-B(R+B^{\rm T}PB)^{-1}B^{\rm T}PA]^{\rm T}\times\\ &\quad PB\triangle\boldsymbol{v}(t)+\triangle\boldsymbol{v}(t)^{\rm T}B^{\rm T}PB\triangle\boldsymbol{v}(t)=\\ &\quad\boldsymbol{x}(t)^{\rm T}(-Q)\boldsymbol{x}(t)-\boldsymbol{v}^{\rm lq}(t)^{\rm T}R\boldsymbol{v}^{\rm lq}(t)-\\ &\quad2\boldsymbol{v}^{\rm lq}(t)^{\rm T}R\triangle\boldsymbol{v}(t)+\triangle\boldsymbol{v}(t)^{\rm T}B^{\rm T}P\triangle\boldsymbol{v}(t)=\\ &\quad-\boldsymbol{x}(t)^{\rm T}Q\boldsymbol{x}(t)-\boldsymbol{v}^{\rm mpc}(t)^{\rm T}R\boldsymbol{v}^{\rm mpc}(t)+\\ &\quad\triangle\boldsymbol{v}(t)^{\rm T}(R+B^{\rm T}PB)\triangle\boldsymbol{v}(t)\end{aligned}$$

结合条件 (13), 函数 $V(t)$ 满足

$$\begin{aligned}V(t+1)-V(t)\le-\boldsymbol{x}(t)^{\rm T}Q\boldsymbol{x}(t)\le\\ -\lambda_{\min}(Q)\|\boldsymbol{x}(t)\|^2\end{aligned} \tag{14}$$

其中, $\lambda_{\min}(Q)$ 表示矩阵 Q 的最小特征值, 则 $V(t)$ 为闭环系统的 Lyapunov 函数. 由于集合 M_0 不一定是闭环系统的不变集, 因此定义非空集合 $M(c)$ 为

$$M(c)=\{\boldsymbol{x}\in\mathbf{R}^n:V(\boldsymbol{x})\le c,c>0\}\subseteq M_0 \tag{15}$$

同理, 集合 $M(c)$ 总是存在. 增大 c 值至 $M(c)$ 最大程度地逼近 M_0, 此时记 $M=M(c^*)$. 因为 M 是 Lyapunov 函数 $V(t)$ 定义的一水平集, 所以由不等式 (14) 可知, 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 (11) 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, 所以系统 (11) 在吸收域 M 上区域指数稳定. □

推论 1. 考虑闭环系统 (11) 及由式 (15) 定义的集合 $M(c)$, 当 $R=\lambda I$ ($\lambda>0$) 时, 如果解算误差 $\triangle\boldsymbol{v}(t)$ 满足

$$\begin{aligned}[\lambda+\sigma_{\max}(B^{\rm T}PB)]\|\triangle\boldsymbol{v}(t)\|^2<\\ \lambda\|\boldsymbol{v}^{\rm mpc}(t)\|^2+\lambda_{\min}(Q)\|\boldsymbol{x}(t)\|^2\end{aligned} \tag{16}$$

其中, $\sigma_{\max}(B^{\mathrm{T}}PB)$ 为矩阵 $B^{\mathrm{T}}PB$ 的最大奇异值, 则闭环系统在吸收域 $M(c)$ 上区域渐近稳定. 进一步, 如果

$$\|\triangle \boldsymbol{v}(t)\| \leq \frac{\lambda\|\boldsymbol{v}^{\mathrm{mpc}}(t)\|}{\lambda+\sigma_{\max}(B^{\mathrm{T}}PB)} \tag{17}$$

则闭环系统在吸收域 $M(c)$ 上区域指数渐近稳定.

1.4 NMPC 算法实现

约束 Hammerstein 系统 NMPC 算法的实施步骤如下:

步骤 1. 初始化设计参数 (Q, R, W, N);

步骤 2. 离线求解 Riccati 方程 (9), 并计算二次型最优控制律 (8);

步骤 3. 读入时刻 t 的状态测量值 $\boldsymbol{x}(t)$, 应用数值优化算法或进化算法求解优化问题 (7), 当时刻 t 解算误差满足条件 (13) 时, 得当前时刻的最优控制 $\boldsymbol{u}(t;N)^*$, 并将控制量 $\boldsymbol{u}(t|t)^*$ 作用于系统 (1);

步骤 4. 令 $t=t+1$, 转步骤 3.

注 3. 传统两步法 NMPC 策略[4−8] 中, MPC 律是在第 1 步计算, 即针对中间变量设计, 因此会忽略非线性代数方程解算误差对实际控制满足约束的影响; 而新算法 MPC 律是在第 2 步直接对实际输入计算, 内在地考虑了解算误差对控制满足约束的要求, 从而提高系统的稳定性能. 其次, 通过调整预测时域的步长可以减小优化问题 (10) 的在线计算量, 但并不影响闭环系统的稳定性. 最后, 由于直接对实际输入设计, 可以处理系统更一般的约束, 同时在优化过程中可以对实际输入加权以平缓系统运行, 利于安全平稳生产.

2 实例仿真

在工业生产中, 一般用熔融指数 (Melt index, MI) 描述均相聚丙烯 (均聚物) 的牌号, 而用 MI 和乙烯含量 (Et) 表征共相聚丙烯 (共聚物) 的牌号[1, 10−11]. 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. 考虑环管反应器聚丙烯牌号切换过程, 并假设环管反应器为连续搅拌反应器 (Continuous stirred tank reactor, CSTR)[12], 建立物性动态机理模型如下:

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}\lg MI_c(s)}{\mathrm{d}s} = \dfrac{\lg MI_i(s)-\lg MI_c(s)}{\tau} \\ \dfrac{\mathrm{d}Et_c(s)}{\mathrm{d}s} = \dfrac{Et_i(s)-Et_c(s)}{\tau} \end{cases} \tag{18}$$

其中, 常数 τ 表示丙烯在反应器内的平均停留时间 ($\tau=2\,\mathrm{h}$); MI_c 和 Et_c 表示聚合物的累积熔融指数和累积乙烯含量; MI_i 和 Et_i 为瞬时熔融指数和瞬时乙烯含量, 满足

$$\lg MI_i(s) = k_1(s) + \frac{k_2(s)}{T(s)} + k_3(s) \times \lg\left[k_4(s) + \frac{k_5(s)C_{\mathrm{H}_2}(s)}{C_m(s)} + \frac{k_6(s)C_{m2}(s)}{C_m(s)}\right]$$

$$Et_i(s) = \frac{2\left[r_2(s)\dfrac{C_{m2}(s)}{C_m(s)}+1\right]}{3r_1(s)\dfrac{C_m(s)}{C_{m2}(s)} + r_2(s)\dfrac{C_{m2}(s)}{C_m(s)} + 4}$$

式中, T、C_{H_2}、C_m 和 C_{m_2} 分别为反应温度、氢气浓度、丙烯浓度和乙烯浓度; 模型参数 k_i 和 r_j ($i=1, \cdots, 6$; $j=1,2$) 通常随生产牌号变化, 可用工业数据辨识计算[10−12].

令 $\boldsymbol{x}=[\lg MI_c,\ Et_c]^{\mathrm{T}}$, $\boldsymbol{v}=[\lg MI_i,\ Et_i]^{\mathrm{T}}$, $\boldsymbol{u}=[T, C_{\mathrm{H}_2}/C_m, C_{m_2}/C_m]^{\mathrm{T}}$, $f_1(\boldsymbol{u}(t),t)=\lg MI_i(t)$ 及 $f_2(\boldsymbol{u}(t),t)=Et_i(t)$, 并设控制周期 $T_s=0.5\,\mathrm{h}$, 则式 (18) 对应的离散时间模型为

$$\begin{cases} x_1(t+1) = \left(1-\dfrac{T_s}{\tau}\right)x_1(t) + \dfrac{T_s}{\tau v_1(t)} \\ x_2(t+1) = \left(1-\dfrac{T_s}{\tau}\right)x_2(t) + \dfrac{T_s}{\tau v_2(t)} \\ v_1(t) = f_1(\boldsymbol{u}(t),t),\ v_2(t) = f_2(\boldsymbol{u}(t),t) \end{cases} \tag{19}$$

选择均聚牌号 A, B 和无规共聚牌号 C 及切换顺序 A→B→C, 采用双层控制结构作为切换控制组态[1], 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见表 1, 其中上标 c、i 和 $\triangle$ 分别表示累积量、瞬时量和增量约束.

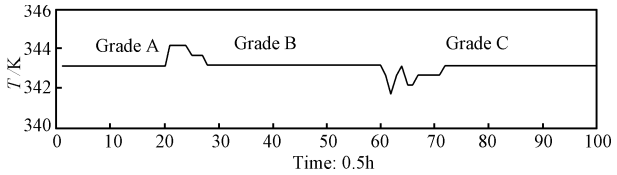
仿真中初始化设计参数 (Q, R, W, N) 为

$$Q=\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix},\ R=5Q,\ N=4$$

$$W=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 10^6 & 0 \\ 0 & 0 & 10^6 \end{bmatrix}$$

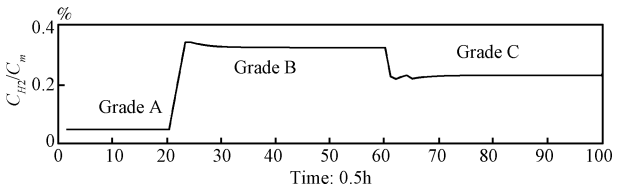
又假设生产装置在第 10 小时由 A→B 切换, 在第 30 小时由 B→C 切换, 则仿真切换控制结果如图 1 和图 2 所示. 如果以规格指标的 5 % 作为切换目标牌号的合格检验标准, 那么由图可以看出, 当切换开始后聚合物的 MI 和 Et 离开起始生产牌号的

合格品区而进入废料生产区; 而当切换开始后 8.5 h (A→B) 或 7.0 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 8.5 h 和 7.0 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.



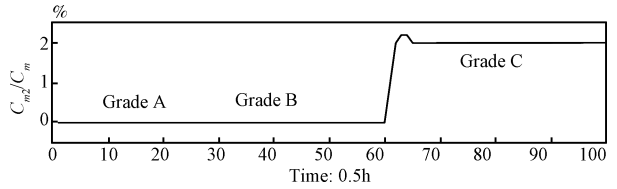
(a) 反应温度

(a) Reaction temperature



(b) 氢气丙烯浓度比

(b) Concentration ratio of hydrogen to propylene

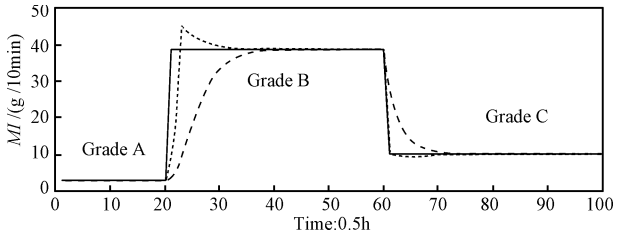


(c) 乙烯丙烯浓度比

(c) Concentration ratio of ethylene to propylene

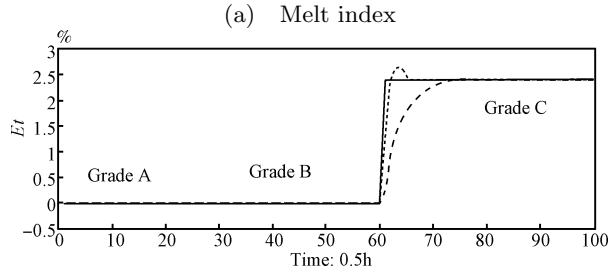
图 1 牌号切换过程输入曲线

Fig. 1 Input profiles of grade transition processes



(a) 熔融指数

(a) Melt index



(b) 乙烯含量

(b) Concentration of ethylene in polypropylene

图 2 牌号切换过程输出轨迹
(实线为设定值, 点线为瞬时值, 虚线为累积值)

Fig. 2 Output trajectories of grade transition processes
(Solid line is the set-point, dotted lined the instantaneous, and dashed line the cumulative.)

3 结论

以聚丙烯树脂牌号切换过程为研究背景, 针对输入时变的约束多变量 Hammerstein 系统, 本文提出了保证闭环指数稳定的 NMPC 策略. 新策略集成了两步法和整体法 Hammerstein 系统 NMPC 的优点, 即分两步计算, 但可以处理系统各种实际约束以及在优化过程中直接考虑系统实际输入加权以平缓系统运行. 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, 并得到了解算误差的界以提高系统的稳定性能. 最后通

表 1 牌号规格及切换约束表

Table 1 Grade indices and transition constraints

Grade indices	MI (g/10min)	Et (%)	T (K)	$C_{\mathrm{H_2}}$ (%)	C_{m2}/C_m (%)
A	2.7	–	343.15	0.050	–
B	39	–	343.15	0.330	–
C	10	2.4	343.15	0.236	1.99
A→B	$[2.4, 42.0]^c$	–	$[341.15, 345.15]$	$[0.02, 0.35]$	–
	$[2.0, 45.0]^i$	–	–	$[-0.1, 0.10]^{\triangle}$	–
B→C	$[8.0, 42.0]^c$	$[0.0, 2.5]^c$	$[341.15, 345.15]$	$[0.20, 0.35]$	$[0.0, 2.5]$
	$[6.0, 45.0]^i$	$[0.0, 2.6]^i$	–	$[-0.1, 0.10]^{\triangle}$	$[-0.1, 0.10]^{\triangle}$

过对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 He De-Feng, Yu Li, Xue Mei-Sheng. Online operation guidance for grade transition in propylene polymerization plants. In: Proceedings of the 19th Chinese Process Control Conference. Beijing, China: Chemical Industry Press, 2008. 339–342
(何德峰, 俞立, 薛美盛. 丙烯聚合装置牌号切换的在线操作指导. 第 19 届中国过程控制会议. 北京, 中国: 化学工业出版社, 2008. 339–342)

2 Bloemen H H J, van de Boom T J J, Verbruggen H B. Model-based predictive control for Hammerstein systems. In: Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control. Sydney, Australia: IEEE, 2000. 4963−4968

3 Bloemen H H J, van de Boom T J J, Verbruggen H B. Model-based predictive control for Hammerstein-wiener systems. *International Journal of Control*, 2001, **74**(5): 482−495

4 Zhu Xue-Feng, Seborg D E. Nonlinear predictive control based on Hammerstein models. *Control Theory and Applications*, 1994, **11**(5): 564−575

5 Ding Bao-Cang, Xi Yu-Geng, Li Shao-Yuan. Stability analysis on predictive control of discrete-time systems with input nonlinearity. *Acta Automatica Sinica*. 2003, **29**(6): 827−834

6 Xu Xiang-Yuan, Mao Zong-Yuan. The analysis and research of predictive control based on Hammerstein model. *Control Theory and Applications*, 2000, **17**(4): 529−532
(徐湘元, 毛宗源. 基于 Hammerstein 模型的预测控制的分析与研究. 控制理论与应用, 2000, **17**(4): 529−532)

7 Ding Bao-Cang, Li Shao-Yuan. Design and analysis of Hammerstein nonlinear control systems with constraints. *Control and Decision*, 2003, **18**(1): 24−28
(丁宝苍, 李少远. 具有约束的 Hammerstein 非线性控制系统的设计与分析. 控制与决策, 2003, **18**(1): 24−28)

8 Ding B C, Xi Y G. A two-step model predictive control of Hammerstein model. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2006, **16**(7): 353−367

9 Zhang H T, Li H X, Chen G R. Dual-model predictive control algorithm for constrained Hammerstein systems. *International Journal of Control*, 2008, **81**(10): 1609−1625

10 Jia Liang, Liang Jun, Wang Wen-Qing, Wang Jing-Dai. Review of grade transition in continuous polylefin production process. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2006, **25**(7): 780−785
(荚亮, 梁军, 王文庆, 王靖岱. 聚烯烃连续生产过程中产品牌号切换的研究述评. 化工进展, 2006, **25**(7): 780−785)

11 Richards J R, Congalidis J P. Measurement and control of polymerization reactors. *Computers and Chemical Engineering*, 2006, **30**(10-12): 1447−1463

12 Zacca J J, Ray W H. Modeling of the liquid phase polymerization of olefins in loop reactors. *Chemical Engineering Science*, 1993, **48**(32): 3743−3765

何德峰 浙江工业大学信息工程学院讲师. 2008 年获中国科学技术大学自动化系博士学位. 主要研究方向为模型预测控制, 非线性控制和鲁棒控制. 本文通信作者. E-mail: hdfzj@zjut.edu.cn

(**HE De-Feng** Lecturer at the School of Information Engineering, Zhejiang University of Technology. He received his Ph. D. degree in the Department of Automation, University of Science and Technology of China in 2008. His research interest covers model predictive control, nonlinear control, and robust control. Corresponding author of this paper.)

俞 立 浙江工业大学信息工程学院教授. 主要研究方向为鲁棒控制, 模型预测控制和网络控制系统.
E-mail: lyu@zjut.edu.cn

(**YU Li** Professor at the School of Information Engineering, Zhejiang University of Technology. His research interest covers robust control, model predictive control, and networked control systems.)