

研究论文

大型聚丙烯生产装置牌号切换滚动时域控制

何德峰, 邹 涛, 俞 立

(浙江工业大学信息工程学院, 浙江 杭州 310032)

摘要: 基于滚动时域优化控制策略, 提出了一种大型双环管聚丙烯生产过程最优牌号切换控制方法。首先结合机理分析, 以 Hammerstein 模型描述聚丙烯牌号切换过程中质量指标动态特性; 其次, 根据牌号切换的性能指标, 滚动优化计算每个时刻各反应器中聚合温度、氢气与丙烯浓度比、共聚单体乙烯与丙烯浓度比等操作变量。进一步结合双层控制结构和状态观测器设计, 实现聚丙烯产品牌号切换的滚动优化闭环控制, 并预测聚合物产品各质量指标的动态轨迹。最后, 通过给出多个牌号切换实例仿真验证本文结果的有效性和实用性。

关键词: 聚丙烯; 牌号切换; Hammerstein 模型; 滚动时域控制; 状态观测器

中图分类号: TP 273

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2010) 02-0405-08

Receding horizon control for grade transition of large-scale polypropylene production plants

HE Defeng, ZOU Tao, YU Li

(School of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, Zhejiang, China)

Abstract: Based on the receding horizon optimized control strategy, an optimal control method of grade transition was presented for the large-scale bi-tubular polypropylene production process. Firstly, with mechanism analysis, the Hammerstein model was used to represent the dynamics of resin quality in the grade transition process. Secondly, by receding optimization of the performance index of grade transition, the controlled variables in all reactors were computed in each sampling time, such as polymerization temperature, ratio of hydrogen to propylene and ratio of ethylene to propylene. Moreover, introducing the two-tier control structure and design of state estimator yielded receding optimized closed-loop control of polypropylene grade transition and predicted the dynamic trajectories of the polymer quality in all bi-tubular reactors. Finally, an example of simulation of multi-grade transition control was used to illustrate the effectiveness of the result in this paper.

Key words: polypropylene; grade transition; Hammerstein models; receding horizon control; state estimator

引 言

为满足市场对聚丙烯 (PP) 产品性能的多样性需求和良好的经济效益, 聚合装置需要频繁地切换牌号生产, 即由一组聚合工艺条件切换到另一

组^[1]。然而, 牌号切换过程呈现出强非线性、耦合性和不确定性等特点, 使得切换操作伴随着大量的过渡时间和不合格料即废料的产生, 影响聚合装置生产效益^[2]。因此, 聚丙烯牌号切换问题已成为当今丙烯聚合工业先进生产技术的其中一个重要研究

2009-05-13 收到初稿, 2009-07-08 收到修改稿。

联系人及第一作者: 何德峰 (1979—), 男, 博士, 讲师。

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目 (2006AA04Z178, 2008AA04Z647)。

Received date: 2009-05-13.

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

Foundation item: supported by the High-tech Research and Development Program of China (2006AA04Z178, 2008AA04Z647).

内容。

最优牌号切换应在保证装置安全生产的前提下,由切换操作所引起的过渡时间和废料数量最少,即经济损耗最小^[2]。因此,最直接的切换方法是基于聚合机理模型离线优化切换性能指标,并根据计算的最优切换轨迹指导实际牌号切换操作^[3-8]。但离线最优切换法在本质上是一种开环策略,很难及时补偿由于切换操作引起的工况波动及原料变动等因素的不利影响。对此,部分学者结合反馈思想提出了牌号切换闭环控制方法,如文献[9-10]利用双环管聚合工艺机理模型^[11],分别采用控制向量参数化法和线性混合整数规划预测控制,提出了双环管工艺牌号切换控制策略,但控制量在线计算复杂;文献[12]采用双层控制结构,考虑切换扰动和模型适配的影响,运用非线性预测控制跟踪离线计算的最优切换轨迹;文献[13]利用最优性必要条件,考虑过程扰动对牌号切换的影响,设计实时最优切换控制器以消除扰动的不利影响;文献[14]利用通用模型控制算法和参数自适应跟踪实现聚丙烯实验装置的牌号切换闭环控制,但只适用于输入输出等维系统。

滚动时域控制(RHC)是一类基于过程模型的在线优化控制算法^[15],在每个采样控制周期内,以滚动推移的方式在线对过程状态进行有限时域的预测、优化和控制。因此 RHC 算法可以及时补偿各种扰动对过程产生的影响,并在复杂工业过程控制中显示出了良好的控制性能^[16]。本文以 RHC 算法为基础,考虑工业双环管串联的聚丙烯生产装置牌号切换控制,并以熔融指数(MI)和乙烯含量(Et)作为聚合物牌号质量指标。通过机理分析,建立牌号切换质量指标动态 Hammerstein 模型,并结合状态观测器技术和约束 Hammerstein 模型

滚动时域控制算法,通过滚动优化各环管反应器聚合反应温度、氢气丙烯比、共聚单体乙烯丙烯比等关键操作变量,控制牌号切换过程聚合物 MI 和 Et 的轨迹,实现工业双环管聚丙烯装置牌号切换闭环控制,以及同步在线预报切换过程各种状态信息。最后,以多个实际生产牌号的切换控制仿真验证本文结果的有效性和实用性。

1 过程描述

聚丙烯双环管工艺采用液相预聚合、液相本体均聚和/或气相共聚相结合的方式生产丙烯均聚和/或共聚牌号产品,其聚合单元如图 1 所示。催化剂、助催化剂和给电子体进入预聚合反应器 R200 中,同时加入少量液态丙烯 C_3H_6 和氢气 H_2 ,在反应器内经过预聚合后,R200 的反应产物输送到环管反应器 R201 中,与新鲜液态丙烯、分子量调整剂 H_2 共同进入 R201 中,在循环泵的强制循环作用下,丙烯在 R201 内发生聚合反应,反应热由环管反应器夹套冷却水撤走。剩下未反应的液态丙烯和聚合物淤浆混合一起进入第二环管反应器 R202,完成剩下的聚合反应并出料至后系统。如果是生产均聚物或无规共聚物聚丙烯产品,则聚合反应在 R201 和 R202 中完成;如果是生产抗冲共聚物聚丙烯,则还需要在流化床反应器 R401 内进行气相共聚反应。

在整个聚合反应过程中,本文假设丙烯、共聚单体乙烯、氢气、催化剂等各进料量由 PID 控制器调节,且控制平稳,而牌号切换控制器则实时给定这些进料量控制回路的设定值(即聚合反应条件),从而整个牌号生产切换系统具有两层控制结构^[12]:回路控制层和牌号切换控制层。

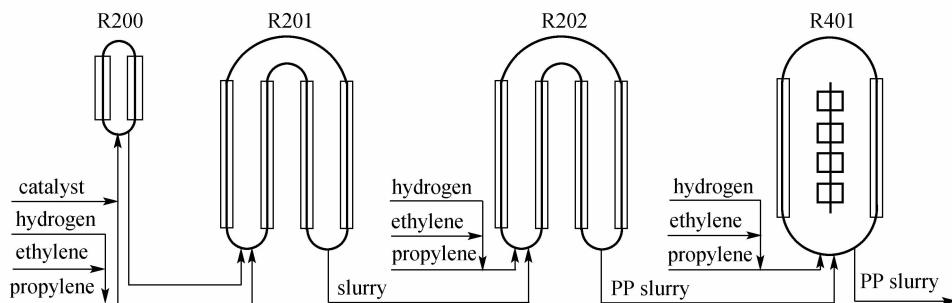


图 1 双环管聚丙烯工艺聚合单元简图

Fig. 1 Simplified schematic of bi-tubular polypropylene plants

2 质量指标模型

在大型双环管聚丙烯生产工艺中,聚合物的分子量和共聚组成通常用 MI 和/或 Et 表征。由聚合反应动力学原理可知,丙烯聚合反应属于配位聚合,聚合反应体系由催化剂活化、链引发、链增长、链转移和链终止等基元反应组成。根据文献[11, 17]的研究成果和装置的实际运行工况,将环管反应器简化为连续搅拌反应器,并假设聚合过程采用单活性中心聚合动力学、链增长步骤采用拟稳态、忽略活性位的激活和失活,则建立各环管 MI 和 Et 半机理瞬时模型如下

$$\ln MI_{i,k} = \theta_{k,1} + \theta_{k,2}/T_k + \theta_{k,3} \ln(\theta_{k,4} + \theta_{k,5} [H_2]_k / [C_3]_k + \theta_{k,6} [C_2]_k / [C_3]_k) \quad (1)$$

$$\ln MI_{i,k} = \theta_{k,1} + \theta_{k,2}/T_k + \theta_{k,3} \{ \ln(\theta_{k,4} + \theta_{k,5} [H_2]_k / [C_3]_k + \theta_{k,6} [C_2]_k / [C_3]_k) - \ln(1 + \theta_{k,7} [C_2]_k / [C_3]_k) \} \quad (2)$$

$$Et_{i,k} = \frac{\theta_{k,8} + \theta_{k,9} [C_2]_k / [C_3]_k}{\theta_{k,10} + \theta_{k,11} [C_2]_k / [C_3]_k + \theta_{k,12} [C_3]_k / [C_2]_k} \quad (3)$$

其中,式(1)为均聚及无规共聚牌号瞬时 MI 模型,式(2)为抗冲共聚牌号瞬时 MI 模型; $MI_{i,k}$ 、 $Et_{i,k}$ 、 T_k 、 $[H_2]_k/[C_3]_k$ 、 $[C_2]_k/[C_3]_k$ 分别为第 k 个反应器熔融指数、乙烯含量、反应温度、氢烯浓度比、乙丙烯浓度比; $\theta_{k,l}$ ($k=1, 2, 3; l=1, \dots, 12$) 为聚合物质量模型参数,可用工业数据辨识得到^[17-18]。又考虑到聚合物在反应器内具有停留时间分布,式(1)~式(3)描述的是各反应器中聚合物的瞬时性质,各反应器内变化的聚合物质量指标还应建立组合工艺累积质量模型。

对于双环管工艺,假设反应器内混合物性质满足线性叠加性,且内部颗粒和淤浆混合均匀、组分浓度和温度均一^[11, 17]。令 t 时刻第 k 个反应器的聚合速率、聚合物累积量和排放速率分别为 $R_{p,k}(t)$ 、 $H_{p,k}(t)$ 和 $E_{p,k}(t)$,则在充分小的时间段 Δt 内,第 k 个反应器新生成瞬时聚合物 $R_{p,k}(t)\Delta t$,出料累积聚合物 $E_{p,k}(t)\Delta t$ 。根据物料质量守恒,经过 Δt 时间段后第 k 个反应器内的聚合物累积量满足

$$H_{p,k}(t+\Delta t) = H_{p,k}(t) + R_{p,k}(t)\Delta t - E_{p,k}(t)\Delta t + E_{p,k-1}(t)\Delta t \quad (4)$$

则 $t+\Delta t$ 时刻第 k 个反应器内的聚合物质量指标满足^[11]

$$\ln X_{c,k}(t+\Delta t) = \frac{R_{p,k}(t)\Delta t}{H_{p,k}(t+\Delta t)} \ln X_{i,k}(t) + \frac{E_{p,k-1}(t)\Delta t}{H_{p,k}(t+\Delta t)} \ln X_{c,k-1}(t) +$$

$$\frac{H_{p,k}(t) - E_{p,k}(t)\Delta t}{H_{p,k}(t+\Delta t)} \ln X_{c,k}(t) \quad (5)$$

其中, $X_{i,k}$ 和 $X_{c,k}$ 分别表示第 k 个反应器聚合物瞬时质量和累积质量指标。对式(4)和式(5)取 $\Delta t \rightarrow 0$ 可得

$$\frac{dH_{p,k}(t)}{dt} = R_{p,k}(t) - E_{p,k}(t) + E_{p,k-1}(t) \quad (6)$$

$$\frac{dH_{p,k}(t) \ln X_{c,k}(t)}{dt} = R_{p,k}(t) \ln X_{i,k}(t) + E_{p,k-1}(t) \ln X_{c,k-1}(t) - E_{p,k}(t) \ln X_{c,k}(t) \quad (7)$$

又考虑稳态生产、忽略放空等因素,令 $R_{p,k}(t) \approx E_{p,k}(t)$,则将式(6)代入式(7)整理得

$$\frac{d \ln X_{c,k}(t)}{dt} = \frac{1}{\tau_k} \ln X_{i,k}(t) + \frac{1}{\tau_{k-1}} \ln X_{c,k-1}(t) - \left(\frac{1}{\tau_k} + \frac{1}{\tau_{k-1}} \right) \ln X_{c,k}(t) \quad (8)$$

其中,常数 $\tau_k = H_{p,k}(t) / R_{p,k}(t)$ 为聚合物在第 k 个反应器内的平均停留时间。在双环管聚丙烯生产工艺中满足 $\tau_1 = 1.15$ h、 $\tau_2 = 0.85$ h 和 $\tau_3 = 0.6$ h。

结合式(1)~式(3)和式(7),可建立双环管聚丙烯质量指标 (MI 和 Et) 动态模型如下

$$\begin{cases} \frac{d \ln X_{c,k}(t)}{dt} = \frac{1}{\tau_k} \ln X_{i,k}(t) + \frac{1}{\tau_{k-1}} \ln X_{c,k-1}(t) - \left(\frac{1}{\tau_k} + \frac{1}{\tau_{k-1}} \right) \ln X_{c,k}(t) \\ \ln X_{i,k} = g_k(T_k, [H_2]_k/[C_3]_k, [C_2]_k/[C_3]_k) \end{cases} \quad (9)$$

其中, X 表示聚丙烯 MI 和 Et ,函数 g_k 表示瞬时质量指标与聚合条件 $\{T_k, [H_2]_k/[C_3]_k, [C_2]_k/[C_3]_k\}$ 的非线性函数式(1)~式(3)。对于均聚物牌号生产,共聚单体乙烯没有加入反应器,即反应器内 $[C_2]_k/[C_3]_k \equiv 0$,因此乙烯含量始终为零,此时由 MI 表征聚合物牌号。

若以聚合条件 $\{T_k, [H_2]_k/[C_3]_k, [C_2]_k/[C_3]_k\}$ 作为质量指标动态过程的输入, $\{MI_{c,k}, Et_{c,k}\}$ 为输出,则式(9)是一标准的多输入、多输出 Hammerstein 系统。于是,利用基于 Hammerstein 模型的各种优化控制策略,设计大型双环管聚丙烯牌号切换最优控制器,实现聚丙烯装置牌号切换闭环优化自动控制。本文采用约束 Hammerstein 系统非线性预测控制策略^[19]设计双环管聚丙烯牌号切换滚动优化控制器。

3 牌号切换控制器设计

3.1 模型变换

当切换目标牌号为均聚物或无规共聚物时,聚合反应单元由环管 R201 和 R202 组成,此时定义

切换过程状态变量 $\mathbf{x}$ 、输入变量 $\mathbf{u}$ 和输出变量 $\mathbf{y}$ 如下

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ln MI_{c,1} \\ \ln MI_{c,2} \\ Et_{c,1} \\ Et_{c,2} \end{bmatrix}, \mathbf{u} = \begin{bmatrix} T_1 & T_2 \\ [H_2/C_3]_1 & [H_2/C_3]_2 \\ [C_2/C_3]_1 & [C_2/C_3]_2 \end{bmatrix}, \mathbf{y} = \begin{bmatrix} \ln MI_{c,2} \\ Et_{c,2} \end{bmatrix} \quad (10)$$

则由式 (9) 建立目标牌号为均聚物或无规共聚物时切换过程状态空间模型如下

$$\begin{cases} \mathbf{x}(t+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{g}(\mathbf{u}(t)), \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t), t = 0, 1, \dots \\ \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 - T_s/\tau_1 & 0 & 0 & 0 \\ T_s/\tau_1 & 1 - T_s/\tau_1 - T_s/\tau_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 - T_s/\tau_1 & 0 \\ 0 & 0 & T_s/\tau_1 & 1 - T_s/\tau_1 - T_s/\tau_2 \end{bmatrix} \\ \mathbf{B} = \begin{bmatrix} T_s/\tau_1 & 0 \\ T_s/\tau_2 & 0 \\ 0 & T_s/\tau_1 \\ 0 & T_s/\tau_2 \end{bmatrix}, \mathbf{g}(\mathbf{u}) = \begin{bmatrix} \ln(MI_{i,1}) \\ \ln(MI_{i,2}) \\ Et_{i,1} \\ Et_{i,2} \end{bmatrix} \\ \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (11)$$

其中, T_s 为切换采样控制周期。同理, 当切换目标牌号为抗冲共聚物时, 由 R201、R202 和 R401 组成聚合单元, 对应的状态变量 $\mathbf{x}$ 、输入变量 $\mathbf{u}$ 和输出变量 $\mathbf{y}$ 为

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ln MI_{c,1} \\ \ln MI_{c,2} \\ \ln MI_{c,3} \\ Et_{c,3} \end{bmatrix}, \mathbf{u} = \begin{bmatrix} T_1 & T_2 & T_3 \\ [H_2]_1/[C_3]_1 & [H_2]_2/[C_3]_2 & [H_2]_3/[C_3]_3 \\ [C_2]_1/[C_3]_1 & [C_2]_2/[C_3]_2 & [C_2]_3/[C_3]_3 \end{bmatrix}, \mathbf{y} = \begin{bmatrix} \ln MI_{c,3} \\ Et_{c,3} \end{bmatrix} \quad (12)$$

则由式 (9) 建立目标牌号为抗冲共聚物时切换过程状态空间模型为

$$\begin{cases} \mathbf{x}(t+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{g}(\mathbf{u}(t)), \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t), t = 0, 1, \dots \\ \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 - T_s/\tau_1 & 0 & 0 & 0 \\ T_s/\tau_1 & 1 - T_s/\tau_1 - T_s/\tau_2 & 0 & 0 \\ 0 & T_s/\tau_2 & 1 - T_s/\tau_2 - T_s/\tau_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 - T_s/\tau_3 \end{bmatrix} \\ \mathbf{B} = \begin{bmatrix} T_s/\tau_1 & 0 \\ T_s/\tau_2 & 0 \\ T_s/\tau_3 & 0 \\ 0 & T_s/\tau_3 \end{bmatrix}, \mathbf{g}(\mathbf{u}) = \begin{bmatrix} \ln(MI_{i,1}) \\ \ln(MI_{i,2}) \\ \ln(MI_{i,3}) \\ Et_{i,3} \end{bmatrix} \\ \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (13)$$

式 (11) 和式 (13) 控制周期 T_s 的选择既要考虑回路控制器的调节时间及其设定值即聚合反应条件不能频繁改变, 又能使切换控制器及时根据工况的变化补偿各种不确定性因素对切换过程的不利影响, 如可令 $T_s = 30 \text{ min}$ 等。为便于描述, 将式 (11) 和式 (13) 统一简写为

$$\mathbf{x}(t+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{g}(\mathbf{u}(t)),$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t), t = 0, 1, \dots \quad (14)$$

据此设计双环管聚丙烯装置牌号切换滚动优化控制器。

3.2 控制器设计

考虑牌号切换过程质量模型 [式 (14)], 假设原点为控制平衡点, 令 $\mathbf{v} = \mathbf{g}$, 并给定牌号切换操作一次性能指标

$$J_1(\mathbf{x}(t)) = \sum_{j=t}^{\infty} [\mathbf{x}(j)^T \mathbf{Q} \mathbf{x}(j) + \mathbf{v}(j)^T \mathbf{R} \mathbf{v}(j)] \quad (15)$$

其中, $\mathbf{Q} \geq 0$ 和 $\mathbf{R} > 0$ 为状态 $\mathbf{x}$ 和变量 $\mathbf{v}$ 的加权矩阵。极小化性能指标式 (15), 求得线性系统 $\mathbf{x}(t+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{v}(t)$ 的二次型最优控制律

$$\mathbf{v}^{\text{opt}}(t) = -(\mathbf{R} + \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{A} \mathbf{x}(t) \triangleq \mathbf{K} \mathbf{x}(t), t = 0, 1, \dots \quad (16)$$

其中, 矩阵 $\mathbf{P}$ 为 Riccati 方程

$$\mathbf{P} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} - \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} (\mathbf{R} + \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{A} + \mathbf{Q} \quad (17)$$

的对称正定解。为了计算实际控制输入量 $\mathbf{u}$, 求解非线性方程组 $\mathbf{g}(\mathbf{u}(t)) - \mathbf{v}^{\text{opt}}(t) = 0$ 确定, 但这不可避免引入了解误差。文献 [19] 通过预测非线性方程组解误差, 并极小化解误差性能指标求解实际控制量。

定义非线性代数方程解算误差

$$\Delta \mathbf{v}(t) = \mathbf{g}(\mathbf{u}(t)) - \mathbf{v}^{\text{opt}}(t), t = 0, 1, 2, \dots \quad (18)$$

令 $\mathbf{x}(t+k|t)$ 、 $\mathbf{u}(t+k|t)$ 和 $\Delta \mathbf{v}(t+k|t)$ 分别为式 (14) 在 t 时刻对 $t+k$ 时刻状态、输入和解误差的预测变量, 则

$$\Delta \mathbf{v}(t+k|t) = \mathbf{g}(\mathbf{u}(t+k|t)) - \mathbf{K} \mathbf{x}(t+k|t), \forall k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (19)$$

其中, $N > 0$ 为预测时域。考虑牌号切换过程, 定义 N 步滚动优化性能指标

$$J_2(N, \mathbf{x}(t|t)) = \sum_{k=0}^{N-1} [\Delta \mathbf{v}(t+k|t)^T \Delta \mathbf{v}(t+k|t) + \mathbf{u}(t+k|t)^T \mathbf{W} \mathbf{u}(t+k|t)] \quad (20)$$

其中, $\mathbf{W} > 0$ 为输入加权矩阵。环管 R201 或/和 R202 的质量指标不能直接测量, 因此运用极点配置法设计状态观测器如下

$$\hat{\mathbf{x}}(t) = (\mathbf{A} - \mathbf{L} \mathbf{C}) \hat{\mathbf{x}}(t-1) + \mathbf{B} \mathbf{g}(\mathbf{u}(t-1)) + \mathbf{L} \mathbf{y}(t-1), t = 1, 2, \dots \quad (21)$$

其中, $\hat{\mathbf{x}}$ 为状态 $\mathbf{x}$ 的观测值; 矩阵 $\mathbf{L}$ 为观测器增益矩阵, 可由直接法、Ackermann 公式法等计算^[20]。则在 t 时刻基于状态观测器的牌号切换有限时域优化控制问题为

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{u}(t;N)} \quad & J_2(N, \mathbf{x}(t|t)), \mathbf{x}(t|t) = \hat{\mathbf{x}}(t) \\ \text{s. t.} \quad & \mathbf{x}(t+k+1|t) = \mathbf{A} \mathbf{x}(t+k|t) + \mathbf{B} \mathbf{g}(\mathbf{u}(t+k|t)), \\ & \mathbf{g}(\mathbf{u}(t+k)) = \mathbf{K} \mathbf{x}(t+k|t), \\ & \mathbf{u}(t+k|t) | t \in M_u, \mathbf{g}(\mathbf{u}(t+k|t)) \in M_v \\ & \mathbf{x}(t+k+1|t) \in M_x, k = 0, 1, \dots, N-1 \end{aligned} \quad (22)$$

其中, $\mathbf{u}(t;N)$ 表示 N 步优化输入变量, 矩阵 $\mathbf{K}$ 为式 (16) 给定, M_x 、 M_v 和 M_u 分别为牌号切换过程累积质量指标、瞬时质量指标和实际输入的约束集。

应用数值规划算法或随机搜索优化算法求解优化命题式 (22), 得最优控制序列 $\mathbf{u}(t;N)^*$

$$\mathbf{u}(t;N)^* = \{\mathbf{u}(t|t; \hat{\mathbf{x}}(t))^*, \dots, \mathbf{u}(t+N-1|t; \hat{\mathbf{x}}(t))^*\} \quad (23)$$

根据滚动优化原理与前景控制策略^[15], 定义基于状态观测器的牌号切换预测控制器如下

$$\mathbf{u}^{\text{mpc}}(t) = \mathbf{u}(t|t; \hat{\mathbf{x}}(t))^*, t = 0, 1, \dots \quad (24)$$

即牌号切换控制器在每个采样时刻通过状态观测器观测系统状态, 据此更新优化控制问题式 (22) 的初始条件, 然后滚动优化计算当前时刻的预测控制量, 周而复始, 直到牌号切换过程过渡到目标牌号并稳定生产为止。可以证明, 上述基于状态观测器的牌号切换预测控制器是指数渐进稳定的^[19]。

3.3 控制器设计步骤

基于状态观测器的牌号切换滚动优化控制器的设计步骤如下:

① 根据切换目标建立牌号切换过程质量指标动态模型式 (12) 或式 (13);

② 给定牌号切换一次性能指标设计参数 ($\mathbf{Q}$, $\mathbf{R}$), 离线计算 Riccati 方程式 (17) 得二次型最优控制律式 (16);

③ 给定观测器期望极点, 应用直接法或 Ackermann 法计算状态观测器增益矩阵 $\mathbf{L}$;

④ 给定牌号切换二次性能指标设计参数 (N , $\mathbf{W}$);

⑤ 测量牌号切换过程 R202 或 R401 质量指标输出, 运用状态观测器观测 t 时刻的状态 $\hat{\mathbf{x}}(t)$;

⑥ 基于 t 时刻的状态观测信息, 应用数值规划算法或随机搜索优化算法求解优化命题式 (22), 得当前预测控制量 $\mathbf{u}^{\text{mpc}}(t)$;

⑦ 令 $t=t+1$, 回到第⑤步。

4 仿真实例

以某厂实际生产的 4 个牌号为例, 验证本文算法应用于多牌号切换控制的可行性和实用性。选择均聚牌号 A、B 和抗冲共聚牌号 C、D 及牌号切换顺序 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D$ 。采用双层控制结构作为切换控制器组态^[12], 即由切换控制器优化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。各牌号规格、反应条件及切换约束如表 1 和表 2 所示, 其中上标 c 和 i 分别表示质量指标累积量和瞬时量约束。

表 1 牌号指标及切换约束

Table 1 Grade indexes and transition constraints

Grade	$MI/g \cdot (10min)^{-1}$			$Et/\%$
	R201	R202	R401	R401
A	43.10	39.0	—	—
B	2.34	2.70	—	—
C	2.00	1.60	1.90	7.5
D	31.16	10.7	10.0	13.5
A→B	[2.0, 50.0] ^c [2.0, 50.0] ⁱ	[2.0, 45.0] ^c [2.0, 45.0] ⁱ	— —	— —
B→C	[1.60, 2.5] ^c [1.60, 2.5] ⁱ	[1.20, 2.8] ^c [1.20, 2.8] ⁱ	[0.0, 2.30] ^c [0.0, 2.30] ⁱ	[0.0, 9.0] ^c [0.0, 9.0] ⁱ
C→D	[1.8, 38.0] ^c [1.8, 38.0] ⁱ	[1.4, 13.0] ^c [1.24, 8.0] ⁱ	[1.6, 12.0] ^c [1.6, 12.0] ⁱ	[7.0, 15.0] ^c [6.0, 15.0] ⁱ

表 2 聚合条件及切换约束

Table 2 Polymerization conditions and transition constraints

Grade	$T/^\circ C$			$[H_2]/[C_3]/\%$		$[C_2]/[C_3]/\%$	
	R201	R202	R401	R201	R202	R401	R401
A	70	70	—	0.33	0.30	—	—
B	70	70	—	0.05	0.045	—	—
C	70	70	75	0.01	0.01	4.0	82.0
D	70	70	75	0.30	0.27	5.0	92.0
A→B	[68, 72]	[68, 72]	—	[0.035, 0.40]	[0.035, 0.40]	—	—
B→C	[68, 72]	[68, 72]	[73, 77]	[0.007, 0.06]	[0.007, 0.06]	[0.0, 6.5]	[0.0, 100]
C→D	[68, 72]	[68, 72]	[73, 77]	[0.007, 0.40]	[0.007, 0.40]	[3.5, 6.5]	[75, 100]

仿真中取切换控制周期为 0.5 h，并初始化设计参数为 $Q=I$ ， $R=5I$ ， $W=0.1I$ ， $N=4$ 及观测器期望极点为 $\{0.1, 0.1, 0.1, 0.1\}$ ，同时将各变量对其约束范围作标量化处理。又假设生产装置在第 5 h、第 20 h 和第 35 h 分别进行 A→B 切换、B→C 切换及 C→D 切换，则仿真切换控制结果如图 2、图 3 所示。图 2 中实线为牌号切换过程累积量响应曲线，点线为瞬时量响应曲线。由表 1 和表 2 可知，对于上述牌号切换过程，环管 R201 和 R202 都不加共聚单体乙烯，故在图 3 中没有给出 R201 和 R202 中操作变量 $[C_2]/[C_3]$ 随时间变化曲线；而对于均聚物 A→B 牌号切换，只有环管 R201 和 R202 投入生产，故在图 2 和图 3 流化床反应器 R401 子图中对应的曲线为一水平线（等于零）。

由表 1 可知，牌号 A、B、C 和 D 的质量指标相差较大，且每个反应器各不相同。牌号切换滚动时域控制就是通过滚动优化聚合反应条件，减少切换过渡时间和不合格料排放，切换至目标牌号时聚合条件稳定在目标牌号工艺条件（见表 2），同时

切换过程满足约束条件（见表 1 和表 2）。由图 3 可知，对于牌号 A→B 切换，主要调节氢烯浓度比 $[H_2]/[C_3]$ 实现。环管 R201 和 R202 中 MI 由大变小，在切换过程中需要减少 $[H_2]/[C_3]$ 以降低聚合过程链终止反应速度，从而降低淤浆 MI [见图 3 (d)、(e)]，同时聚合物 MI 瞬时值和累积值平稳过渡到目标值附近。而对于牌号 B→C 切换，属于均聚牌号切换至抗冲共聚牌号，此时首先要对流化床 R401 作开车前准备，如待反应温度稳定后再调节氢气、乙烯等浓度开始牌号切换操作。因此，图 3 (c) 中前 40 个时刻的 R401 温度未给出，而是默认 R401 正常开车后进行牌号切换操作。由图 3 (d) ~ (g) 可知，主要通过调节 R201、R202 和 R401 氢烯浓度比及 R401 乙丙烯浓度比完成牌号 B→C 切换操作，其中抗冲牌号乙烯含量的调节主要靠 R401 中乙丙烯浓度比实现。同理，对于牌号 C→D 切换操作，除主要调节 R201、R202 和 R401 氢烯浓度比及 R401 乙丙烯浓度比外，还需调整各反应器温度 [见图 3 (a) ~ (c)]，但切换过渡过程结束后各操作变量稳定在目标牌号聚合

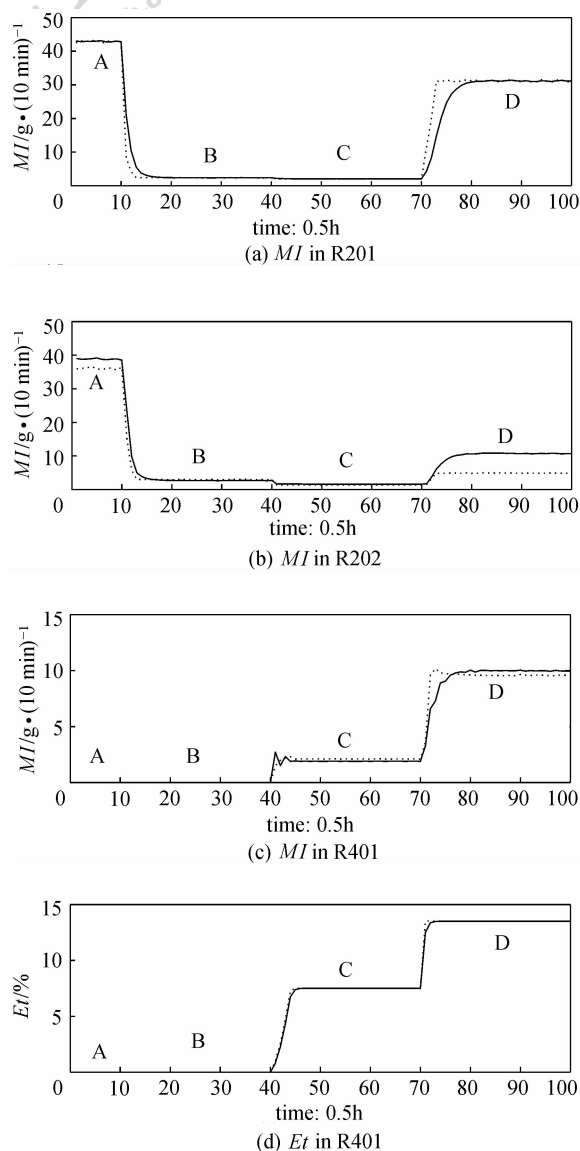


图2 牌号切换过程质量指标响应曲线

Fig. 2 Response trajectories of resin quality in process of grade transition

工艺条件附近。在整个牌号切换控制过程中，聚合物质量指标和操作变量（聚合条件）都满足如表1和表2所示的切换约束条件。

如果以聚合物质量指标和操作变量偏差的 $\pm 5\%$ 作为切换目标牌号的合格检验标准，及R201、R202和R401中聚合物同时达到合格要求作为一次牌号切换过渡过程结束的标志，则由图2和图3可以看出，当切换开始后各反应器内聚合物 MI 和 Et 离开起始牌号的合格品区进入不合格品生产区；而当切换开始后5 h (A→B)、3.5 h (B→C) 和5.5 h (C→D) 时，各反应器中聚合物进入目标牌号合格品区，同时各操作变量都满足切换

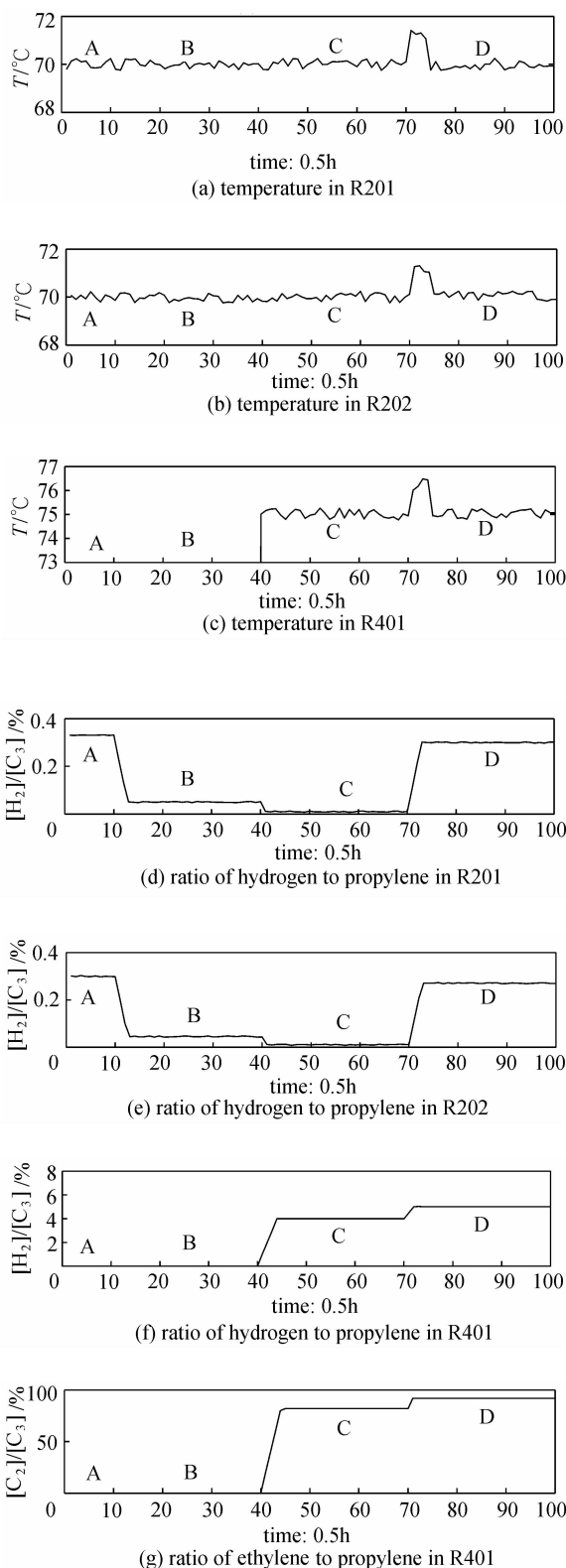


图3 牌号切换过程操作变量输入曲线

Fig. 3 Input profiles of manipulated variables in process of grade transition

约束。因此，由A→B、B→C和C→D的切换过渡时间分别为5 h、3.5 h和5.5 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, 影响牌号切换的正常操作。因此, 本文策略在平稳牌号切换操作的同时可大幅缩短切换时间, 从而降低切换过程不合格品数量, 节约能源、提高装置生产效益。

5 结 论

针对工业双环管工艺聚丙烯生产装置, 本文结合状态观测器设计和约束 Hammerstein 系统滚动时域控制算法, 以熔融指数和乙烯含量表征聚合物牌号切换关键质量指标, 通过滚动优化各反应器聚合反应温度、氢气丙烯比、共聚单体乙烯丙烯比等操作变量, 实现最优牌号切换闭环控制和同步在线预报切换过程各种状态信息。多个实际生产牌号的切换控制仿真结果表明, 本文方法在平稳牌号切换操作的同时可大幅缩短切换时间, 从而减少切换过程不合格品量排放, 节约能源、提高装置生产效益。

References

- [1] Xie Tuyu, McAuley K B. Gas phase ethylene polymerization: production process, polymer properties, and reactor modeling. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 1994, **33**: 449-479
- [2] 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. *Chemical Industry and Engineering Process (化工进展)*, 2006, **25**: 780-784
- [3] McAuley K B, MacGregor J F. Optimal grade transition in a gas phase polyethylene reactor. *AIChE J.*, 1992, **38**: 1564-1576
- [4] Heui-Seok Yi, Jeong Hwan Kim, Chonghun Han, Jinsuk L, Sang-Seop Na. Plant-wide optimal grade transition for an industrial high-density polyethylene plant. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2003, **42**: 91-98
- [5] Cheng Weishu (成卫戌), Huai Gaiping (怀改平), Xu Yongmao (徐用懋). Application of dynamic model of polymerization in grade transition. *Control and Instruments in Chemical Industry (化工自动化及仪表)*, 2004, **31**: 19-21
- [6] Nystrom R H, Franke R, Harjunkoski I, Kroll A. Production campaign planning including grade transition sequencing and dynamic optimization. *Computers and Chemical Engineering*, 2005, **29**: 2163-2179
- [7] Jin Xuelan (金学兰), Yuan Pu (袁璞), Hu Pinhui (胡品慧), Dong Shouping (董守平). Dynamic modeling of propylene polymerization: applications in grade transition. *Journal of System Simulation (系统仿真学报)*, 2006, **18**: 2089-2091
- [8] Huang Hua (黄骅), Yu Li (俞立), Zhang Guijun (张贵军), Chen Qiuxia (陈秋霞). A modified differential evolution algorithm and its application to optimal grade transition in polypropylene. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China) (化工学报)*, 2008, **59**: 1711-1714
- [9] Makoto Takeda, Ray W H. Optimal-grade transition strategies for multistage polyolefin reactors. *AIChE J.*, 1999, **45**: 1776-1793
- [10] Feather D, Harrell D, Lieberman R, Doyle F J. Hybrid approach to polymer grade transition control. *AIChE J.*, 2004, **50**: 2502-2513
- [11] Zacca J J, Ray W H. Modelling of the liquid phase polymerization of olefins in loop reactors. *Chemical Engineering Science*, 1993, **48**: 3743-3765
- [12] Wang Y, Seki H, Ohyama S, Akamatsu K, Ogawa M, Ohshima M. Optimal grade transition control for polymerization reactors. *Computer and Chemical Engineering*, 2000, **24**: 1555-1561
- [13] Kadam J V, Marquardt W, Srinivasan B, Bonvin D. Optimal grade transition in industrial polymerization processes via NCO tracking. *AIChE J.*, 2007, **53**: 627-639
- [14] Ali M A, Betlem B, Weickert G, Roffel B. Non-linear model based control of a propylene polymerization reactor. *Chemical Engineering and Processing*, 2007, **46**: 554-564
- [15] Qian Jixin (钱积新), Zhao Jun (赵均), Xu Zuhua (徐祖华). Predictive Control (预测控制). Beijing: Chemical Industry Press, 2007
- [16] Qin S J, Badgwell T A. A survey of industrial model predictive control technology. *Control Engineering Practice*, 2003, **11**: 733-764
- [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. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities (高校化学工程学报)*, 2008, **22**: 100-105
- [18] Xia Luyue (夏陆岳), Yu Li (俞立). Melt index prediction of polypropylene based on SNNs-RR. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China) (化工学报)*, 2008, **59**: 1631-1634
- [19] He Defeng (何德峰), Yu Li (俞立), Zou Tao (邹涛). Output feedback nonlinear predictive control for constrained Hammerstein systems. *Control Engineering of China (控制工程)*, 2009, **16** (4): 416-418, 422
- [20] Chen Chi-Tsong. Linear Systems Theory and Design. 3rd ed. New York: Oxford University Press, 1999