

文章编号: 1001-0920(2013)02-0299-04

模拟移动床过程的混杂系统建模方法

李凌¹, 袁德成¹, 井元伟²

(1. 沈阳化工大学 信息工程学院, 沈阳 110142; 2. 东北大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110819)

摘要: 模拟移动床过程中连续变量与离散变量并存, 属于典型的混杂系统. 对此, 从混杂系统的角度出发, 在简化模拟移动床过程平衡扩散模型的基础上, 探索一种新的模型表示方法. 通过应用一些近似处理方法, 导出了一类混合整数动态模型, 并通过对一种混杂非线性的 Benchmark 模型的仿真实验验证了所建立的混合逻辑动态模型的有效性.

关键词: 模拟移动床; 混杂系统; 混合逻辑动态模型; 平衡扩散模型

中图分类号: TP29

文献标志码: A

Hybrid system modeling method research of simulated moving bed process

LI Ling¹, YUAN De-cheng¹, JING Yuan-wei²

(1. School of Information Engineering, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110142, China;

2. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Correspondent: LI Ling, E-mail: lengleng0604@163.com)

Abstract: The simulated moving bed process is a typical hybrid system with both continuous and discrete variables. Based on the simplified SMB process balance diffusion model, a new modeling method is explored and a kind of mixed integer dynamic model is by using some approximation methods. A hybrid non-linear benchmark model simulation shows the effectiveness of the mixed logical dynamic model.

Key words: simulated moving bed; hybrid system; mixed logical dynamic model; balance diffusion model

0 引言

混杂系统是指同时存在相互作用的连续动态特性和离散事件动态特性的系统, 它是连续过程与离散事件过程并存且相互交换信息的动态系统. 其特点是随时间连续变化, 受离散突发事件的驱动, 因此混杂系统表现出更加复杂的系统行为. 目前, 国际控制界关于混杂系统的研究内容主要包括混杂系统的模型描述、性能分析、控制与优化和应用等. 但是, 迄今为止还没有一种通用的混杂系统分析和控制器设计方法^[1], 人们往往针对某一类混杂子系统研究建立其相应的分析和设计方法. 混杂系统的常用建模方法分为两大类: 1) 基于离散事件动态系统 (DEDS) 的建模方法, 包括自动机模型、层次结构模型和混杂 Petri 网等; 2) 基于连续变量动态系统 (CVDS) 的建模方法, 包括切换系统模型和混合逻辑动态系统模型 (MLD) 等^[2].

模拟移动床色谱分离技术是在继承传统固定床

吸附分离操作和真实移动床色谱分离技术基础上发展起来的一类新型分离技术^[3-5]. 其目的是将多个色谱柱串联, 通过不断切换进料和出料口的位置实现固液两相的相对移动来达到物质的连续分离. 由于过程切换机制的存在, 系统具有连续和离散状态并存的混杂动态特性.

迄今为止, 国内外采用混杂系统对模拟移动床色谱吸附分离过程进行描述的报道甚少, 在此框架下进行其他方面的研究尚未见报道. 为此, 本文针对模拟移动床色谱吸附分离过程, 从混杂系统的角度建立模拟移动床过程模型. 根据物料质量和能量平衡推导出的模拟移动床系统模型是一组偏微分方程组或偏微分代数方程组, 将这些方程用于构造各类基于模型的控制算法时过于复杂, 而且没有现成可用的设计理论和支持工具. 由于操作单元之间存在本质上的耦合, 而且可控手段少, 要从根本上解决模拟移动床过程的

收稿日期: 2011-09-23; 修回日期: 2012-03-23.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60874057); 国家863计划重点项目(2008AA042902).

作者简介: 李凌(1972-), 女, 副教授, 博士, 从事复杂系统建模、优化以及先进控制方法的研究; 井元伟(1957-), 男, 教授, 博士生导师, 从事复杂控制系统等研究.

最优控制问题必须构造面向全装置的控制系統. 观察模拟移动床过程模型会发现包含逻辑关系, 由此可以联想到近几年发展并引起关注的混合逻辑动态系統 (MLD). 混合整数线性规划和二次规划 (MIQP) 支持这类系統优化问题的求解, 具有广泛的适用范围. 将模拟移动床模型简化成混合逻辑动态系統的形式, 借助已有的研究成果探索新的模拟移动床过程建模和优化途径是本文研究的目的.

1 混合逻辑动态模型形式及建模方法

1.1 混合逻辑动态模型形式

在过程控制系统中, 除了连续变量外, 还有许多逻辑变量和关系. 如果采用计算推理方法建立包括逻辑变量的模型, 并将它们化成线性不等式, 则可以将连续 (或离散时间) 变量和离散 (二值逻辑) 变量统一到一个模型框架下. Bemporad 等^[6]提出了一个混合逻辑动态系統 (MLD) 的通用模型, 并证明了过程顺序控制中的许多逻辑表达式可以转化为这样一个模型形式. MLD 是一般混杂系統中形式比较简单的一种, 但它与过程控制系统密切相关. 基于这样的模型可以构造最优控制和模型预测控制等.

混合逻辑动态系統的一般形式如下:

$$x(t+1) = Ax(t) + B_1u(t) + B_2\delta(t) + B_3z(t), \quad (1)$$

$$y(t) = Cx(t) + D_1u(t) + D_2\delta(t) + D_3z(t), \quad (2)$$

$$E_2\delta(t) + E_3z(t) \leq E_1u(t) + E_4x(t) + E_5. \quad (3)$$

其中: x 是系統的状态, 它含有连续变量 x_c 和逻辑变量 x_v , $x = \begin{bmatrix} x_c \\ x_v \end{bmatrix}$, $x_c \in R^{n_c}$, $x_v \in \{0, 1\}^{n_v}$, $n \triangleq n_c + n_v$; y 是输出矩阵, $y = \begin{bmatrix} y_c \\ y_v \end{bmatrix}$, $y_c \in R^{p_c}$, $y_v \in \{0, 1\}^{p_v}$, $p \triangleq p_c + p_v$; u 是控制输入, 包括连续控制作用 u_c 和二值控制作用 u_v , $u = \begin{bmatrix} u_c \\ u_v \end{bmatrix}$, $u_c \in R^{m_c}$, $u_v \in \{0, 1\}^{m_v}$, $m \triangleq m_c + m_v$; $\delta \in \{0, 1\}^{r_v}$ 且 $z \in R^{r_c}$, 它们分别表示辅助逻辑变量和辅助连续变量.

1.2 混合逻辑动态模型的建模方法

混合逻辑动态模型是由相互依赖的物理规律、逻辑法则和操作约束所描述的系統, 并在建模时充分考虑了系統的定性知识和专家经验. 建模方法可通过以下步骤完成.

Step 1: 对系統所有的逻辑约束、定性知识建立命题逻辑, 命题 S_i 的真假用逻辑变量 $\delta_i \in \{0, 1\}$ 表示. 通过合取 \wedge 、析取 \vee 、蕴含 \rightarrow 、异或 \oplus 等将简单命题 S_1, S_2, \dots, S_q 转化为复合命题, 并表示为相应二进制变量 $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_q$ 之间的整数线性不等式的形式.

Step 2: 逻辑变量和连续变量之间的耦合关系可

通过引入连续的辅助变量 $Z = \delta f(x)$ 表示, 并采用下式将线性函数与逻辑变量之间的乘积关系转化为混合整数线性不等式的形式:

$$Z = \delta f(x) \Leftrightarrow \begin{cases} Z \leq M\delta, \\ Z \geq m\delta, \\ Z \leq f(x) - m(1 - \delta), \\ Z \geq f(x) - M(1 - \delta). \end{cases} \quad (4)$$

其中: $M = \max f(x)$, $m = \min f(x)$.

Step 3: 将通过以上转换得到的不等式组作为系統的约束条件, 同时在状态方程中引入逻辑变量和辅助变量, 则整个系統的描述便成为混合逻辑动态模型的形式, 如式 (1)~(3) 所示.

MLD 模型具有一般性, 适用于描述许多类型的动态系統. 此方法可将系統的所有描述集成在一个统一的框架内, 有利于消除模型切换所引起的抖动, 减轻震荡, 增强系統的鲁棒性.

1.3 混合逻辑动态系統优化控制的 MIQP 方法

对于系統模型的一个最基本的要求是系統模型的良好性, 即只要给定 $x(t_0)$ 和 $u(t_0)$, 则 $x(t)$ 和 $y(t)$ 的轨迹便能够唯一地确定. 这也是混杂系統存在最优控制解的必要条件. 通常, 由物理存在的真实系統所导出的系統模型 (并不是纯粹数学意义上的模型) 能够满足模型的良好性要求.

假设已经建立混杂系統 MLD 模型, 并假设模型是良好的, 则 MLD 系統的最优控制问题的提法如下: 给定混杂系統的初态 x_0 、终止时刻 t 和终态 x_f , 寻求最优控制序列 $u = \{u(0), u(1), \dots, u(t-1)\}$, 使得在该控制序列的作用下, 系統从初态 x_0 转移至 t 时刻终态 x_f , 并使如下二次型性能指标最小化:

$$J(u_0^{T-1}, x_0) = \sum_{t=0}^{T-1} \{ \|u(t) - u_f\|_{Q_1}^2 + \|\delta(t) - \delta_f\|_{Q_2}^2 + \|z(t) - z_f\|_{Q_3}^2 + \|x(t) - x_f\|_{Q_4}^2 + \|y(t) - y_f\|_{Q_5}^2 \}, \quad (5)$$

同时满足约束条件 $x(t, x_0, u_0^{T-1}) = x_f$ 和式 (1)~(3). u_f, x_f, δ_f, z_f 满足系統方程 (3), 且通常为系統的一个平衡状态.

由式 (1) 可以得到

$$x(t) = A^t x_0 + \sum_{i=0}^{t-1} A^i [B_1 u(t-1-i) + B_2 \delta(t-1-i) + B_3 z(t-1-i)]. \quad (6)$$

并定义

$$\Omega = [u^T(0) \quad u^T(1) \quad \dots \quad u^T(T-1)]^T,$$

$$\begin{aligned} \Delta &= [\delta^T(0) \ \delta^T(1) \ \dots \ \delta^T(T-1)]^T, \\ \Psi &= [z^T(0) \ z^T(1) \ \dots \ z^T(T-1)], \\ \gamma &= [\Omega^T \ \Delta^T \ \Psi^T]^T. \end{aligned}$$

将式(6)代入(5)、(2)和(3), 经推导、整理可得

$$\begin{aligned} \min \gamma' S_1 \gamma + 2(S_2 + x'_0 S_3) \gamma, \\ F_1 v \leq F_2 + F_3 x_0. \end{aligned} \quad (7)$$

而典型的混合整数二次规划MIQP问题的形式为

$$\min 0.5x^T Hx + f^T x, \quad (8)$$

应满足的约束条件为

$$Ax \leq b, A_{eq}x \leq b_{eq}, v_{lb} \leq x \leq v_{ub}. \quad (9)$$

通过变量代换, 有

$$\begin{aligned} H &= 2 * S_1, f = (2 * (S_2 + x'_0 * S_3))', \\ A &= F_1, b = F_2 + F_3 * x_0. \end{aligned}$$

将式(7)表示成形如式(8)的形式, 并满足约束条件要求, 则可以直接应用MIQP求解器进行求解.

2 基于混合逻辑动态模型的简化模拟移动床模型建立

基于上述命题逻辑到数值逻辑转换的等价关系, 下面建立模拟移动床过程的MLD模型. 为简单起见, 假设模拟移动床系统为标准的四区结构.

针对双组分($i = A, B$)采用平衡扩散模型, 其色谱动力学方程

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \theta \frac{\partial q_i^*}{\partial t} = -u_k \frac{\partial C_i}{\partial x} + D_{ap,i} \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2}, \quad (10)$$

线性吸附等温线方程

$$q_i^* = H_i C_i. \quad (11)$$

其中: $\theta = (1 - \epsilon)/\epsilon$ 为固液相比, H_i 为 i 组分的亨利常数. 将式(11)代入(10)并整理, 得

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -\frac{u_k}{1 + \theta H_i} \frac{\partial C_i}{\partial x} + \frac{D_{ap,i}}{1 + \theta H_i} \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2}, \quad (12)$$

节点平衡方程

$$Q_F + Q_D = Q_R + Q_E, \quad (13)$$

其中 Q_D, Q_E, Q_F, Q_R 为4个出入口处的流量.

式(12)和(13)为偏微分代数方程形式. 通常, 对PDAE模型方程进行离散化有以下两种方法.

方法1(单离散化方法): 采用有限差分方法仅对空间离散化, 然后进行时间积分.

方法2(全离散化方法): 首先对空间变量进行中心有限差分离散化, 然后对时间变量进行正交配置有限元方法离散化. 该方法与方法1相比, 无需时间积分, 计算量小.

这里采用全离散化方法, 首先分别对其中的一阶偏导数(对流相)、二阶偏导数(轴向扩散项)进行中心有限差分离散化, 并为避免引入柱外虚点, 对边界附

近的点进行调整, 最后将其写成如下向量形式:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} C_{i,1} \\ C_{i,2} \\ \vdots \\ C_{i,N+1} \end{bmatrix} = -\frac{u_k}{1 + \theta H_i} \cdot M \cdot \begin{bmatrix} C_{i,1} \\ C_{i,2} \\ \vdots \\ C_{i,N+1} \end{bmatrix} + \frac{D_{ap,i}}{1 + \theta H_i} \cdot N \cdot \begin{bmatrix} C_{i,1} \\ C_{i,2} \\ \vdots \\ C_{i,N+1} \end{bmatrix}, \quad (14)$$

其中矩阵 M 和矩阵 N 为微分系数矩阵. 然后, 对式(14)的时间变量进行正交配置有限元方法离散化, 可以将其整理成如下形式:

$$x(n+1) = Ax(n) + u_k Bx(n). \quad (15)$$

其中: $A = \frac{D_{ap,i}}{1 + \theta H_i} \cdot N$, $B = -\frac{1}{1 + \theta H_i} \cdot M$; x 代表 i 组分在各空间离散点的浓度; u_k 代表第 k 个色谱柱内流动相流速, $u_k = Q_k/S_A$, S_A 为单色谱柱的横截面积, Q_k 为柱内流量, $k=1, 2, 3, 4$, 由节点平衡方程和质量平衡关系可将 Q_k 转换成外部流量, 用 Q_R, Q_E, Q_D, Q_F 表示. 这样便可以将其视为逻辑变量加以处理, 将其处理成不等式约束形式, 进而表示为混合逻辑动态模型的形式.

3 仿真研究

为了验证模拟移动床过程MLD模型的简明有效性, 采用文献[7]中的Benchmark模型进行仿真分析. Benchmark模型具有周期、非稳态、非线性特性, 可以用来描述结构切换、状态跳变、离散设定值控制等混杂系统特性.

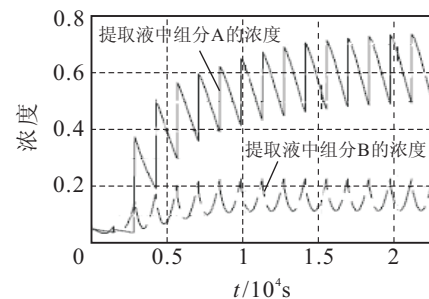


图1 提取液出口处的浓度变化

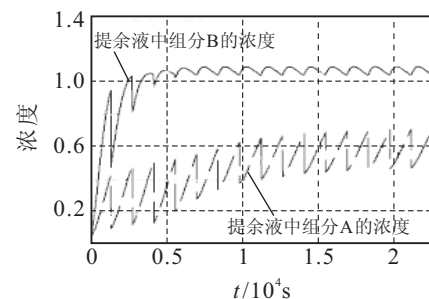


图2 提余液出口处的浓度变化

图 1 和图 2 分别给出了系统两组分出口浓度的变化趋势. 从仿真结果可以看出: 输出浓度值在离散状态跳变时产生跳变; 提取液浓度由较小值跳变到较大值, 而提余液浓度则与之相反; 随着切换的增加, 输出浓度值也不断增加; 经过一定次数的切换后进入周期稳定状态.

4 结 论

本文从混杂系统的角度出发, 提出用混合逻辑动态模型的统一框架描述模拟移动床的连续变量与逻辑变量共存的混杂特性, 探索了一种新的模拟移动床模型表示方法, 并通过仿真实验验证了所建立的混杂模型的有效性, 对进一步模拟移动床过程的控制与优化具有一定的指导作用.

参考文献(References)

- [1] Schutter B, Heemels W. Modeling and control of hybrid systems[R]. Berlin: Lecture Notes of the DISC Course, 2004.
- [2] Sebastian Engell, Stefan Kowaleski. Continuous-discrete interactions in chemical processing plants[J]. Proc of the IEEE, 2000, 88(7): 1050-1068.
- [3] GuoMing Zhong, Georges Guio Chon. Analytical solution for the linear ideal model of simulated moving bed chromatography[J]. Chemical Engineering Science, 1996, 51(18): 4307-4319.
- [4] Guiochon G, Shirazi S G, Katti A. Fundamentals of preparative and nonlinear chromatography[M]. Boston: Academic Press, 1994: 89-624.
- [5] Guoming Zhong. Effect of the flow rates in linear, ideal, simulated moving-bed chromatography[J]. AIChE J, 1997, 43(11): 2960-2969.
- [6] Bemporad A, Morari M. Control of systems integrating logic, dynamics and constraints[J]. Automatica, 1999, 35(3): 407-427.
- [7] Mazen Alamir. A benchmark for optimal control problem solvers for hybrid nonlinear[J]. Automatica, 2006, 42(9): 1593-1598.
- [8] 邱占芝, 张庆灵. 一类多输入多输出网络控制系统的稳定性分析[J]. 控制与决策, 2005, 20(5): 525-528.
(Qiu Z Z, Zhang Q L. Stability analysis of a class of networked control systems with multi input and multi output[J]. Control and Decision, 2005, 20(5): 525-528.)
- [9] 邓玮璋, 费敏锐. 基于带有随机时滞的多通信通道的网络控制系统镇定[J]. 控制与决策, 2009, 24(11): 1635-1640.
(Deng W H, Fei M R. Stabilization of networked control system based on multiple communication channels with random delays[J]. Control and Decision, 2009, 24(11): 1635-1640.)
- [10] Du Dajun, Fei Minrui. Brief survey and prospect of networked control system[J]. Chinese J of Scientific Instrument, 2011, 32(3): 713-720.
- [11] Wang X, Lemmon M. Event-triggering in distributed networked control systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2011, 56(3): 586-601.
- [12] Guan Z H, Huang J, Chen G R. Stability analysis of networked impulsive control systems[C]. 2006 Chinese Control Conf. New York: IEEE, 2006: 1160-1163.
- [13] Zhao X L, Fei S M, Sun C Y. Impulsive controller design for singular networked control systems with packet dropouts[J]. Int J of Control Automation and Systems, 2009, 7(6): 1020-1025.
- [14] Naghshtabrizi P, Hespanha J P, Teel A R, et al. Stability of delay impulsive systems with application to networked control systems[J]. Trans of the Institute of Measurement and Control, 2010, 32(5): 511-528.
- [15] Walsh G C, Beldiman O, Bushnell L. Asymptotic behavior of networked control systems[C]. Proc of the 1999 IEEE Int Conf on Control Applications, 1999, 2: 3146-3151.
- [16] Peng Chen, Yue Dong. Networked-based robust control of systems with state-delay and uncertainty[J]. Acta Automatic Sinica, 2007, 33(10): 1093-1096.
- [17] Zhao Y B, Liu G P, David Rees. A predictive control-based approach to networked hammerstein systems: Design and stability analysis[J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics, 2008, 38(3): 700-708.
- [18] Yang Tao. Impulsive control theory[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2001: 1-2.
- [19] Sun Y G, Qin S Y. Stability analysis and controller design for networked control systems with random time delay[J]. Int J of Systems Science, 2011, 42(3): 359-367.

(上接第298页)