

文章编号: 1001-0920(2010)06-0884-05

一类混合生产过程的混杂Petri网建模与调度

廖伟志¹, 古天龙^{2,3}

(1. 广西师范学院 信息技术系, 南宁 530001; 2. 西安电子科技大学 电子工程学院, 西安 710071; 3. 桂林电子科技大学 计算机与控制学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 针对混合整数线性规划方法在解决混合生产过程调度中存在的问题, 提出一种混合间歇/连续生产过程的时间约束混杂Petri网模型, 该模型能够对间歇操作时间可变和连续速率可变的混合生产过程进行有效描述. 结合模型行为演变和遗传算法提出一种新的混合生产过程调度方法. 实验结果表明了所提出方法的有效性.

关键词: 时间约束混杂Petri网; 遗传算法; 混合生产过程; 调度

中图分类号: TP271

文献标识码: A

Scheduling and modeling of mixed production processes based on hybrid Petri nets

LIAO Wei-zhi¹, GU Tian-long^{2,3}

(1. Department of Information Technology, Guangxi Teachers Education University, Nanning 530001, China; 2. School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China; 3. School of Computer and Control, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China. Correspondent: LIAO Wei-zhi, E-mail: liaowz@gxtc.edu.cn)

Abstract: To the shortcoming of the scheduling of a mixed production processes based on mixed integer linear programming, time constraint hybrid Petri nets(TCHPNs) is developed, which allows the formulation of variable cycle time and variable flow rate in a mixed batch/continuous production processes. An efficient scheduling algorithm for mixed production processes is presented combining with modeling behavior evolution and genetic algorithm. Experiment results show the effectiveness of the proposed method.

Key words: Time constraint hybrid Petri nets; Genetic algorithm; Mixed production processes; Scheduling

1 引言

生产调度是生产过程领域中工业应用和学术研究人员一直关注的焦点问题, 主要原因在于有效的生产调度技术可以带来显著的经济效益回报. 混合间歇/连续生产过程是一类重要的生产过程模式, 如: 制糖生产、精细化工、食品加工等. 这类生产过程的运行行为包含了具有离散事件特征的离散间歇操作和具有连续时间变量特征的连续操作, 即属于一典型混杂系统. 这一特征为该类生产过程的调度带来了许多极富挑战性的问题. 文献[1-3]研究了基于混合整数线性规划的混合间歇/连续生产过程的调度技术; 文献[4]以间歇操作时间可变的糖产品压榨系统为研究对象, 提出了基于混合间歇/连续生产过程分层结

合的混合整数线性规划调度算法, 即优化控制法, 该方法有效地改善了传统基于混合整数线性规划方法的性能. 这些技术中所采用的连续时间离散化或事件时间点和约束的0-1变量, 严重制约了这类生产过程中的操作时间和单元容量的不确定性、复杂中间存储策略、多资源共享约束、混杂离散/连续操作行为等的描述, 容易造成调度解的丢失, 而且混合整数线性规划求解的复杂度较大.

混杂Petri网是混杂系统模拟和分析的有效工具之一, 它可以结合图形和分析描述评估混杂系统的动态行为^[5-9]. 文献[10]提出了混合间歇/连续生产过程——糖产品压榨系统的混杂Petri网模型, 在定义迁移引发决策模型基础上, 通过模型行为分析实现了糖

收稿日期: 2008-12-27; 修回日期: 2009-03-31.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60864001); 广西省自然科学基金项目(桂科自0991105); 广西高校优秀人才计划项目(桂教人才0820).

作者简介: 廖伟志(1974—), 男, 广西凤山人, 副教授, 博士, 从事形式化技术、混杂系统等研究; 古天龙(1964—), 男, 山西芮城人, 教授, 博士生导师, 从事形式化技术、混杂系统等研究.

产品压榨系统可行调度的求解. 由于所定义的迁移引发决策模型复杂度高, 其求解效率较低, 且该方法只能给出糖产品压榨系统可行调度解的求解, 而不能实现最优调度或次优调度的求解, 从而无法与混合整数线性规划和优化控制方法进行性能上的比较. 文献[5]所提出的混杂Petri网模型不能有效地描述具有可变操作时间的间歇生产过程, 并且语义较复杂, 不利于调度算法的实现. 为此, 本文提出一种能够有效描述间歇操作时间可变或固定的混合生产过程的混杂Petri网模型, 并基于模型行为演变和遗传算法实现了混合生产过程最优调度解或次优调度解的求解. 实验结果表明了所提出方法的有效性.

2 时间约束混杂Petri网(TCHPN)

2.1 时间约束混杂Petri网定义

定义1 时间约束混杂Petri模型为七元组 $TCHPN = (P, T, W, G, S_1, S_2, f)$. 其中: 库所集 P 包括离散库所和连续库所, 离散库所用圆圈表示, 连续库所用双圆圈表示; 迁移集 T 包括连续迁移和离散迁移, 连续迁移用白盒子表示, 离散迁移用单线表示; $W : (P \times T) \cup (T \times P) \rightarrow Z^+$ 为弧的权值函数; $G \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ 为库所和迁移的关系函数; $s_1 : \text{离散库所集} \rightarrow (R^+ \cup \{0\}) \times (R^+ \cup \{0\})$ 为离散库所的时间戳函数, 缺省值为 $[0, +\infty]$; $S_2 : \text{离散迁移} \rightarrow R^+$ 为迁移的时间延时函数, 缺省值为 0 ; $f : t_c \rightarrow \{R^+ \cup \{0\}\} \times \{R^+ \cup \{0\}\}$ 为连续迁移 t_c 的引发速率区间. 对于任一连续迁移 t_i , 令 $f(t_i) = (V_i^{\min}, V_i^{\max})$. 其中: $V_i^{\min} \leq V_i^{\max}$, V_i^{\min} 为最小引发速率, V_i^{\max} 为最大引发速率.

2.2 迁移的使能与引发语义

定义2 设 $\langle N, m \rangle$ 为时间约束混杂Petri网, t 为连续迁移, 若 t 的任一输入离散库所 p_i 满足 $m_i \geq W(p_i, t)$, 且 t 中的任一输入连续库所 p_i 满足 $m_i > 0$, 使得 $m_i = 0$, 则称迁移 t 为强使能迁移.

定义3 设 $\langle N, m \rangle$ 为时间约束混杂Petri网, t 为离散迁移, 若 t 的任一输入 p_i 满足 $m_i \geq W(p_i, t)$, 则称迁移 t 为使能迁移.

定义4 设 $\langle N, m \rangle$ 为时间约束混杂Petri网, t_j 为连续迁移, 若 t_j 中的输入库所 p_i 使得 $m_i = 0$, 则称迁移 t_j 为弱使能迁移.

定义5 设 $\langle N, m \rangle$ 为时间约束混杂Petri网, $t_j \in T_d$ 且 $ET(t_j)$ 为 t_j 的使能时间, 则其引发时间 $FT(t_j) = ET(t_j) + S_2(t_j)$.

性质1 若离散迁移 t 引发, 则 $\forall p_i \in (\bullet t - t^\bullet)$, $m'_i = m_i - W(p_i, t)$; $\forall p_i \in (t^\bullet - \bullet t)$, $m'_i = m_i + W(p_i, t)$. 其中 $\bullet t$ 和 t^\bullet 表示迁移 t 的所有输入、输出库所.

性质2 若迁移 t_j 为强使能迁移, 则 $v_j(\tau) \in [V_j^{\min}, V_j^{\max}]$.

性质3 若迁移 t_j 为弱使能迁移, 则 $v_j(\tau) \in [V_j^{\min}, V_j^*]$. 其中 $V_j^* \leq V_j^{\max}$, 其大小取决于流入 t_j 的输入库所标识为 0 的库所流量.

性质4 若连续迁移 t 以速率 v 引发, 则 $\forall p_i \in (\bullet t - t^\bullet) \cap P_d$, $m'_i = m_i - W(p_i, t)$; $\forall p_i \in (t^\bullet - \bullet t) \cap P_d$, $m'_i = m_i + W(p_i, t)$; $\forall p_i \in (\bullet t - t^\bullet) \cap P_c$, $m'_i = m_i - v \bullet \Delta$; $\forall p_i \in (t^\bullet - \bullet t) \cap P_c$, $m'_i = m_i + v \bullet \Delta$. 其中: $v \in [V^{\min}, V^{\max}]$, P_d 为离散库所集.

3 混合生产过程及其TCHPN模型

如图1所示的混合生产过程简易模型就是一个典型的混合间歇/连续生产过程.

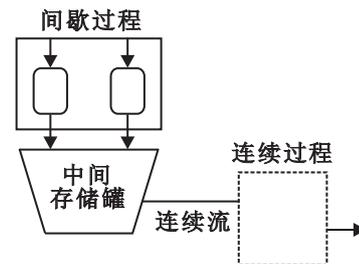


图1 混合生产过程

生产过程由3部分组成: 1) 间歇生产过程, 由若干个间歇生产单元组成; 2) 中间存储罐, 存储间歇生产过程生产的产品; 3) 连续生产过程, 加工来自中间存储罐的产品. 其中: 间歇生产单元的间歇操作时间往往不是固定的常数, 而是属于时间区间 $[l_1, l_2]$ 内的一个值, 即间歇操作时间可变; 中间存储罐中的产品数量要求限定在一定范围之内; 连续生产过程的连续操作速率的范围为 $[V_{\min}, V_{\max}]$. 如何进行调度才能使该混合生产过程在给定的时间范围 TH 内符合下面的要求: 1) 保持连续生产的连续性, 即连续操作速率保持在其规定的速率范围之内; 2) 间歇生产单元的产品必须在规定时间范围内处理; 3) 中间存储罐中的产品数量保持在一定范围之内; 4) 连续生产产量达到最大. 满足上述要求的1)~3)称为可行调度, 满足全部4个要求则称为最优调度.

根据上节定义的时间约束混杂Petri网能够对上述混合间歇/连续生产过程进行有效描述. 下面给出混合生产过程的时间约束混杂Petri网模型的构造算法.

算法1 混合生产过程的时间约束混杂Petri网模型构造算法

Step1 对于间歇生产过程 i 的生产单元 j , 分别定义迁移 t_{sij} 和 t_{fij} 来表示生产单元 j 的开始和结束; 定义离散库所 p_{rij} 来表示生产单元 j 可接受原料的数量; 定义库所 p_{ij} 并规定其初始标识 $m_0(p_{ij}) = 0$,

若 $[l_1, l_2]$ 为间歇生产过程 i 的生产单元 j 的可变间歇操作时间, 则定义库所 p_{ij} 的时间戳为 $[l_1, l_2]$.

Step 2 定义迁移到库所、库所到迁移的连接为 $\bullet(p_{ij}) = \{t_{sij}\}, (p_{ij})^\bullet = \{t_{fij}\}, (p_{rij})^\bullet = \{t_{sij}\}$.

Step 3 对于间歇生产过程 i 的生产单元 j , 定义具有初始标识为 1 的离散库所 p_j , 且定义如下连接: $\bullet(t_{sij}) = \{p_j\}$ 和 $\bullet(t_{fij}) = \{p_j\}$.

Step 4 若间歇生产过程 i 的生产单元 j 接受来自间歇生产过程 h 的生产单元 k 的半成品, 则增加如下连接: $(t_{fjk})^\bullet = \{p_{rij}\}$.

Step 5 为连续生产定义连续迁移 t_c 和定义连续库所 p_{c1}, p_{c2} 和 p_{c3} , 且 $m_0(p_{c1}) = (S_0 - S_1), m_0(p_{c2}) = (S_2 - S_0), S_f(t_c) = [V_{\min}, V_{\max}]$. 其中: $[V_{\min}, V_{\max}]$ 为连续操作速率区间, $[S_1, S_2]$ 为中间存储罐的存储约束, S_0 为存储罐的初始存储量.

Step 6 定义库所 p_{c1}, p_{c2} 和 p_{c3} 与连续迁移 t_c 的连接为 $\bullet(p_{c2}) = \{t_c\}, (p_{c1})^\bullet = \{t_c\}, \bullet(p_{c3}) = \{t_c\}$.

Step 7 定义迁移 t_{fij} 与库所 p_{c1}, p_{c2} 的连接为 $(t_{fij})^\bullet = \{p_{c1}\}, (p_{c2})^\bullet = \{t_{fij}\}$, 且 $W(t_{fij}, p_{c1}) = W(p_{c2}, t_{fij}) = B_j$, 其中 B_j 为间歇生产过程 i 的生产单元 j 的存储容量.

假设如图 1 的混合生产过程中有两个间歇单元, 其中一个间歇单元的间歇操作时间为 $[3, 5]$, 其存储容量为 8; 而另一个间歇单元的间歇操作时间为 $[4, 6]$, 其存储容量为 10. 中间存储罐的存储约束为 $[2, 15]$, 其初始值为 10; 而连续生产单元的连续操作速率区间为 $[2.5, 5]$. 根据算法 1 可求出该混合生产过程的时间约束混杂 Petri 网模型 (见图 2). 其中: 用离散库所 p_{11} 和 p_{12} 表示两个间歇单元, 其对应的时间约束表示间歇操作时间; 而离散库所 p_1 和 p_2 则表示两个间歇过程的开始; 用连续库所 p_{c1} 和 p_{c2} 表示中间存储罐; 用连续迁移 t_c 表示连续操作, 其引发速率区间为连续操作速率区间; 用迁移 t_{f11} 和 t_{f12} 表示两个间歇操作.

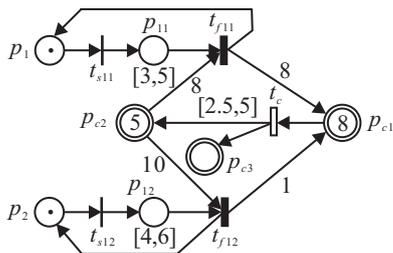


图 2 混合生产过程的 TCHPN 模型

4 混合生产过程的调度算法

求出混合生产过程的时间约束混杂 Petri 网模型后, 混合生产过程的动态行为演变则完全由混

杂 Petri 网模型的库所标识和相关参数进行描述. 因为连续操作速率和时间戳均为实数, 时间约束混杂 Petri 网的可达标识是无穷的, 所以不可能像传统的 Petri 网那样通过构造可达树来实现生产过程的分析. 为此, 本文给出基于不变行为状态的时间约束混杂 Petri 网模型行为演变算法, 通过该算法能够有效地求解混合生产过程可行调度解.

定义 6 不变行为状态定义为 $IB = (m^d, m^c, v, [\tau_1, \tau_2])$. 其中: m^d, m^c 分别为时刻 τ_2 的离散库所标识向量和连续库所标识向量; v 为连续迁移在时间区间 $[\tau_1, \tau_2]$ 的引发速率, 且满足: 在时间区间 $[\tau_1, \tau_2]$ 内 v 为恒常数; 离散库所标识向量 m^d 的大小在时间区间 $[\tau_1, \tau_2]$ 内不发生变化.

定理 1 若 IB 状态序列 $SIB = (m^d(\tau_0), m^c(\tau_0), v_1, [\tau_0, \tau_1]), (m^d(\tau_1), m^c(\tau_1), v_2, [\tau_1, \tau_2]), \dots, (m^d(\tau_{k-1}), m^c(\tau_{k-1}), v_k, [\tau_{k-1}, \tau_k])$ 满足下面条件: 1) $\tau_k \geq TH$; 2) 在 TH 期间, 对于任意的离散迁移 t_j , 总能在 $ET(t_j) + S_2(t_j)$ 引发. 则 IB 状态序列 SIB 为时间约束混杂 Petri 网在时间范围 $[0, TH]$ 的一个可行调度策略.

证明 根据定义 6 不难知道, 在时间范围 $[0, TH]$ 内能保证连续生产的连续性, 即连续操作速率保持在其规定的速率范围之内; 其次, 根据所满足的条件 2) 可知, 间歇生产单元的产品能在规定的时间内处理; 再次, 根据所构造的 TCHPN 模型可知, 当离散迁移引发时, 库所 p_{c1} 增加的标识与库所 p_{c2} 减少的标识相等, 同时连续迁移的引发也使得库所 p_{c1} 增加的标识与库所 p_{c2} 减少的标识相等. 于是有 $\forall \tau \in [0, TH], m_{c1}(\tau) + m_{c2}(\tau) = S_2 - S_1$, 即在时间范围 $[0, TH]$ 内, 中间存储罐中的产品数量保持在规定范围之内. 其中: $[S_1, S_2]$ 为中间存储罐的存储约束, $m_{c1}(\tau)$ 和 $m_{c2}(\tau)$ 分别为连续库所 p_{c1} 和 p_{c2} 在时刻 τ 的标识. □

算法 2 时间约束混杂 Petri 网模型行为演变算法

Step 1 输入时间约束混杂 Petri 网模型的参数和时间范围 TH, 初始化 $IB = (0, 0, 0, [0, 0])$ 且将 IB 插入表 LIST.

Step 2 从列表 LIST 中取出不变行为状态 $IB = (m^d, m^c, v, [\tau_1, \tau_2])$, 令 IB 为当前状态, 同时将 IB 插入表 LIST0.

Step 3 如果 $\tau_2 < TH$, 则对 $\bullet(t_c)^\bullet \cap T_d$ 中的任意迁移 t , 计算其可能的最早引发时间 $\tau_m(t)$; 否则算法结束.

Step 4 选择满足 $\tau_m(t_e) = \min\{\tau_m(t) | t \in \bullet(t_c)^\bullet \cap T_d\}$ 的离散迁移 t_e .

Step 5 对于与连续库所 p_s 相连接的 $\bullet(t_c)\bullet \cap T_d$ 中的任意迁移 t , 计算 $\Phi_1 = \tau_m(t_e) - \tau_2$, $\Phi_2 = W(p_s, t_e) - m^c(p_s)$, $\Phi_3 = \Phi_1 * V_2$, 其中 $[V_1, V_2]$ 为连续迁移 t_c 的引发速率区间。

Step 6 若 $\Phi_2 \geq \Phi_3$, 则计算 $\Phi = \Phi_2 / V_2$. 对 IB 进行更新: $\tau_1 := \tau_2$, $\tau_2 := \tau_1 + \Phi$, $v = V_2$. 对于 $\bullet t_e \cap P_d$ 中的任意库所 p , $m^d(p) := m^d(p) - 1$, $m^c(p_s) := m^c(p_s) - \Phi$, $m^c(\bullet t_c) := m^c(\bullet t_c) + \Phi$. 将 $IB = (m^d, M^c, v, \tau_1, \tau_2)$ 插入表 LIST, 转至 Step 2.

Step 7 对 IB 进行更新: $\tau_1 := \tau_2$, $\tau_2 := \tau_1 + \Phi_1$, $v = \min(m^c(\bullet t_c) / \Phi_1, V_2)$. 对于 $\bullet t_e \cap P_d$ 中的任意库所 p , $m^d(p) := m^d(p) - 1$, $m^c(p_s) := m^c(p_s) + v\Phi_1 - W(p_s, t_e)$, $m^c(\bullet t_c) := m^c(\bullet t_c) - v\Phi_1 + W(p_s, t_e)$. 将 $IB = (m^d, m^c, v, [\tau_1, \tau_2])$ 插入表 LIST, 转至 Step 2.

类似定理1的证明不难看出, 利用算法2能有效地求出混合生产过程的可行调度解, 但算法2不能给出混合生产过程的最优或次优调度解. 为此, 下面以算法2求出的可行调度解作为基础, 利用遗传算法实现混合生产过程的最优或次优调度的求解. 遗传算法的主要过程如下:

1) 群体的初始化. 确定种群规模 M , 杂交概率 P_c , 变异概率 P_m 及最大进化代数 $\max \text{gen}$. 利用算法2求出混合生产过程的可行调度解, 即 IB 状态序列 SIB. 随机改变 SIB 的各个 IB 状态的引发速率和时间区间, 得到新的 IB 状态序列 SIB*. 根据定理1对 SIB* 进行判定, 若 SIB* 为可行调度解, 则将 SIB 加入初始种群.

2) 适应度函数

$$J(\text{SIB}) = \sum_{i=1}^{k-1} \nu_i(\tau_i - \tau_{i-1}) + \nu_k(\text{TH} - \tau_{k-1}). \quad (1)$$

其中: J 为混合生产过程生产产量, SIB 为可行调度.

3) 选择操作. 采用以正比于适应度的赌轮随机选择方式, 每个个体适应度值为 f_i , 则 i 被选中的概率为

$$P_{si} = f_i / \sum_{i=1}^n f_i. \quad (2)$$

4) 交叉操作. 交叉概率为 P_c . 具体操作是在种群中随机取两个个体 SIB1 和 SIB2, 并随机交换 SIB1 和 SIB2 的第 k 个 IB 状态, 得到两个新的个体 SIB1* 和 SIB2*. 根据定理1对 SIB1* 和 SIB2* 进行判定, 若 SIB1* 和 SIB2* 均为可行调度解, 则交叉成功; 否则, 放弃该次交叉.

5) 变异操作. 变异概率为 P_m . 随机地从种群中选出要变异的个体 SIB, 并随机地在该个体上选出变异位置, 即某个 IB 状态. 改变其引发速率(在规定的引发速率范围内), 则得到新的个体 SIB*. 根据定理1对 SIB* 进行判定, 若 SIB* 为可行调度解, 则将其加入种群; 否则, 放弃该次变异.

5 实验结果

为了验证本文提出的混合生产过程调度方法的有效性, 以9个混合生产过程为对象进行仿真和实验(时间范围 TH=25). 9个混合生产过程的具体参数见表1. 其中: Num_U 表示混合生产过程的间歇单元数; B 表示间歇单元的存储容量; $\min P$, $\max P$ 分别表示间歇操作的最短、最长时间; $\min X$, $\max X$ 分别表示连续操作的最小、最大速率; $\min S$, $\max S$ 分别表示需要存储在中间存储罐的最小和最大的产品数量; S_0 为存储在中间存储罐的初始产品数量.

表2给出了上述9个混合生产过程分别在混合整数线性规划、文献[4]的优化控制方法和本文调度方法下的最大生产产量和所花费的时间(时间单位为s). 实验的运行环境为: 操作系统 Windows XP, CPU 为 PIV, 内存为 256 MB. 在遗传算法中取种群的大小最多为 20, 概率 $P_c = 0.8$, $P_m = 0.1$, 进化代数为 200 代. 由表2中的实验结果可以看出, 混合整数线性规划和优化控制方法无法求解一些混合生产过程的最优调度(包括可行调度), 而本文的调度方法则能有效地求解所有混合生产过程的最优调度或次优调度解; 混合整数线性规划求解所花费的时间通常要比其他两种方法大很多; 优化控制方法在一些较为简单的混合生产过程的求解时间比本文方法所花费的时间要短, 但对于较为复杂的混合生产过程则不然.

表1 9个混合生产过程的具体参数

问题	Num_U	B	$\min P$	$\max P$	$\min X$	$\max X$	$\min S$	$\max S$	S_0
1	2	8,10	3,4	5,6	2.5	5.0	2	15	10
2	2	10,10	3,4	3,4	2.5	5.0	2	15	10
3	3	10,10,10	3,4,2	5,6,6	2.5	10.0	2	20	10
4	3	10,10,10	3,4,4	5,6,6	2.5	7.5	2	20	10
5	2	8,10	3,4,5	5,6,5	2.5	5.0	2	15	10
6	2	8,10	2,3	4,5	2.5	5.0	2	15	10
7	2	8,10	2,3	5,5	2.5	4.0	4	20	20
8	3	10,10,10	2,4,5	5,6,8	2.5	10	2	20	10
9	2	8,10	3,4	5,6	2.5	5.0	2	15	10

表 2 混合生产过程的调度结果

问题	混合整数线性规划		优化控制方法		本文方法	
	产量	时间	产量	时间	产量	时间
1	110	1041	110	2.5	110	15
2	118	143	118	3	116	10.5
3	216	75.2	216	3.8	211	21.7
4	143	15917.3	143	27	143	23.1
5	-	超时	-	超时	112	13.2
6	110	4545.3	110	26.6	110	20.6
7	89	12	89	6	89	17.4
8	-	超时	-	超时	208	29.2
9	110	364.2	110	3	110	9.8

6 结 论

本文提出了间歇操作时间可变和连续操作速率可变混合生产过程的时间约束混杂 Petri 网模型,并结合混杂 Petri 网模型行为演变和遗传算法给出了混合生产过程调度的求解方法. 研究表明,通过所提出的混杂 Petri 网模型能够简单、准确地对间歇操作时间可变或固定的混合生产过程进行描述,与基于混合整数线性规划方法相比,大大减少了对问题描述的复杂度. 另外,结合混杂 Petri 网行为演变和遗传算法给出的调度方法能够给出所有混合生产过程调度的最优调度或次优调度,从而克服了基于混合整数线性规划方法由于连续时间离散化和求解复杂度太高而可能造成的可行调度解丢失或无法求出最优调度解的缺陷,为间歇操作时间可变的混合生产过程的调度提供了一种新的途径.

关于如何在时间约束混杂 Petri 网模型中描述混合生产过程的复杂存储策略,如何改进遗传算法从而提高调度算法的效率等问题,将是下一步研究的重点.

参考文献(References)

[1] Kondili E, Pantelides C. A general algorithm for short-term scheduling of batch-I. MILP formulation[J]. Computer and Chemical Engineering, 1993, 17(2): 211-227.

- [2] Pinto J M, Grossmann I E. A continuous time mixed integer linear programming model for short term scheduling of multistage batch plans[J]. Industrial Engineering Chemical Research, 1995, 34(11): 3037-3051.
- [3] Zhang X, Sargent R W H. The optimal operation of mixed production facilities – A general formulation and some approaches for the solution[J]. Computer and Chemical Engineering, 1996, 20(6): 897-904.
- [4] Nott H P, Lee P. An optimal control approach for scheduling mixed batch/continuous process plants with variable cycle time[J]. Computers and Chemical Engineering, 1999, 23(7): 907-917.
- [5] 廖伟志, 古天龙. 基于一种新型混杂 Petri 网的混杂系统建模与控制[J]. 控制与决策, 2007, 22(4): 366-372. (Liao W Z, Gu T L. Modeling and control for hybrid system based on general hybrid Petri nets[J]. Control and Decision, 2007, 22(4): 366-372.)
- [6] 卢燕俊, 戴华平. 城市交通网络的混杂 Petri 网建模[J]. 浙江大学学报, 2007, 41(6): 930-933. (Lu Y J, Dai H P. Hybrid Petri net modeling for urban traffic network[J]. J of Zhejiang University, 2007, 41(6): 930-933.)
- [7] Peng S C, Chang H M, Hsu D F, et al. Modeling signal transaction of neural system by hybrid Petri net representation[C]. Operations Research Proceedings. Berlin Heidelberg: Springer, 2005: 271-279.
- [8] David R, Alla H. Hybrid Petri nets[C]. European Control Conf. Grenoble, 1991: 1472-1477.
- [9] Demongodin I, Koussoulas N T. Differential Petri nets: Representing continuous systems in discrete event world[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1998, 43(4): 573-579.
- [10] Liao W Z, Wang R L, Gu T L. Scheduling and control of mixed batch/continuous processes based on general hybrid Petri net[C]. Proc of the 4th Int Conf on Machine Learning and Cybernetics. Guangzhou, 2005, 2: 981-987.

(上接第883页)

[11] 尹志武. 数据流挖掘若干问题的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007. (Yin Z W. Algorithms for data stream mining[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2007.)

[12] 王雪松, 程玉虎, 易建强. 一种自适应模糊 Actor-Critic

学习[J]. 控制与决策, 2006, 21(9): 1068-1072. (Wang X S, Cheng Y H, Yi J Q. A kind of adaptive fuzzy Actor-Critic learning[J]. Control and Decision, 2006, 21(9): 1068-1072.)