

文章编号: 1000-8152(2011)02-0173-06

资源配置混杂Petri网的混杂系统生产过程动态调度

杨欣¹, 陈谋¹, 费树岷²

(1. 南京航空航天大学自动化学院, 江苏南京 210016; 2. 东南大学自动化学院, 江苏南京 210096)

摘要: 为了增强混杂生产过程应对突发事件的能力, 以一种新的混杂Petri网(资源配置混杂Petri网)为研究模型, 给出了相应的使能和激发规则. 并在资源配置混杂Petri网建立的仿真模型的基础上, 融入事件逻辑网和逻辑规划, 提出一种适用于混杂系统动态生产调度建模和优化的方法. 以典型的混杂生产过程为例, 研究混杂系统生产过程建模及优化. 研究表明, 资源配置混杂Petri网模型描述能力强, 能够有效描述混杂系统生产过程, 所提出的动态调度方案切实有效.

关键词: 资源配置混杂Petri网; 混杂系统; 生产过程动态调度

中图分类号: TP11 **文献标识码:** A

Dynamic scheduling of production process of hybrid systems based on resource distribution in hybrid Petri nets

YANG Xin¹, CHEN Mou¹, FEI Shu-min²

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing Jiangsu 210016, China;

2. School of Automation, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China)

Abstract: To enhance the ability of hybrid Petri nets in handling the emergence in production process, we define a new extended Petri net model called the resource distribution hybrid Petri net(RDHPN). The enabling and firing rules of transitions of the RDHPN are discussed. Combining the simulation model, the event logic net and logic programming models, we propose the modeling and optimizing method. The application to a typical hybrid system shows that the proposed formalism is effective in modeling and optimization.

Key words: resource distribution hybrid Petri nets; hybrid systems; dynamic scheduling of production

1 引言(Introduction)

混杂系统是由连续变量动态系统和离散事件动态系统相互混杂、相互作用而形成的统一的动态系统. 混杂系统生产过程是现代化生产中具有普遍意义的一种加工方式, 解决其生产调度问题有重要的实际价值. 实际生产中, 混杂系统生产调度就是要针对装置实际生产状态, 解决不同生成装置之间、生产装置与存储装置之间的平衡, 使得整个生产过程能够稳定运行. 然而, 设备故障、停风、停电等突发事件经常打乱正常的生产秩序, 使得原来的调度性能变坏或者不可再行. 因此, 混杂系统中动态调度是不可避免的. 目前, 应用于动态调度的方法主要包括数学优化方法^[1~3]、事件触发^[4,5]、基于规则^[6,7]和基于仿真的方法^[8~12]. 数学优化方法能较好的满足调度决策的优化性要求, 但由于模型规模和求解的限制, 往往不能满足生产的实时性要求, 也不能充分反映生产环境的复杂性、随机性和动态性; 基于仿真的方法虽然可以反映生产过程中的实际情况,

获得动态生产数据, 但由于缺乏决策机制和优化机制, 也不能单独使用; 基于规则方法虽然实时性较好, 但却没有充分发挥数学模型强大的优化优势, 较难得到令决策者信任满意的决策方案. 由于上述问题的存在, 导致了目前动态调度理论难以应用的现状. 混杂Petri网(hybrid petri nets, HPN)是近年来发展起来的一类新的Petri网模型, 它由连续Petri网和普通Petri网组成, 是连续部分和离散部分在同一层次上的直接交互. 混杂Petri网为混杂动态系统的描述提供了统一的模型框架. 在该框架中, 连续系统的演变通过连续变迁的激发及连续库所的标识变化来实现, 离散事件的发生由离散变迁的激发和离散库所的标识变化来实现, 离散时间系统和离散事件系统的交互部分则通过相应的有向弧来完成. 目前, 针对不同的应用领域, 人们对基本混杂Petri网进行了扩展, 出现了微分Petri网^[13]、一阶混杂Petri网^[14]、资源配置混杂Petri网(RDHPN)^[15]等高级混杂Petri网. 混杂Petri网通过库所和变迁之间的连接形式的变换可

收稿日期: 2009-06-02; 收修改稿日期: 2010-01-11.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60905009, 60835001); 高等学校博士学科点专项科研基金资助课题(20093218120015); 东南大学复杂工程系统测量与控制教育部重点实验室开放课题(2010A005).

以实现对混杂系统生产调度过程的仿真建模,但在建模过程时还有一些问题需要解决:如何通过Petri网建模实现统一的过程仿真模型;如何反映过程仿真模型中的突发事件对调度优化模型产生的影响;如何将各种优化策略和优化算法集成在模型中等.针对这些问题,需要对基本混杂Petri网进行扩展,丰富其内容和表达形式,使其能够与混杂过程生产调度优化模型紧密结合.

本文在文献[15]的基础上针对在混杂生产过程中经常出现的设备故障停机等突发事件,构建了基于资源配置混杂Petri网和事件逻辑网的动态调度模型结构.该模型结构将资源配置混杂Petri网建立的过程仿真模型、基于经验规则建立的事件逻辑网模型和逻辑规划模型有机结合在一起,解决了连续过程中应对突发事件的动态调度问题.资源配置混杂Petri网定义了新的库所和变迁,更加方便地解决资源冲突和资源瓶颈.

2 RDHPN模型^[15](Model of RDHPN)

RDHPN为一个8元组:

$$RAHPN = (P, T, A, W_1, W_0, h, \tau, v),$$

其中: P 为有限库所集, T 为有限变迁集,且满足 $P \cap T = \emptyset$; A 表示有向弧集合; W_1 和 W_0 用来表示前向/后向关联函数; $h: P \cup T \rightarrow \{C, D\}$ 用于指示库所和变迁是离散的(用 D 表示)还是连续的(用 C 表示); τ 表示变迁激发的时延, v 表示连续变迁的激发速度.

下面对以上变量作详细说明:

1) $P = P_d \cup P_c \cup P_{ad} \cup P_{ac} \cup P_E$ 是 m 个库所的集合,它由5部分组成:离散库所 P_d 、连续库所 P_c 、离散控制库所 P_{ad} 、连续控制库所 P_{ac} 和事件输出库所 P_E (如图1所示).



图1 库所的表达方法
Fig. 1 Expression of places

2) $T = T_d \cup T_c \cup T_{sn} \cup T_{cd} \cup T_{rd} \cup T_{rr}$ 是 n 个变迁的集合,它由6部分组成:离散变迁 T_d 、连续变迁 T_c 、同步变迁 T_{sn} 、连续离散转换变迁 T_{cd} 、资源配置变迁 T_{rd} 和资源释放变迁 T_{rr} (如图2所示).



图2 变迁的表达方法
Fig. 2 Expression of transitions

其中: $T_d = T_1 \cup T_s$ 是离散变迁的集合. T_1 是固定

时延离散变迁, T_s 是随机时延离散变迁. T_{rd} 和 T_{rr} 用来控制资源在发生冲突时的资源分配和释放情况.

3)

$$W_1 : \begin{cases} P_d \times T \rightarrow \mathbb{N}, \\ P_{ad} \times T \rightarrow \{0, 1\}, \\ P_{ac} \times T \rightarrow \{0, 1\}, \\ P_E \times T \rightarrow \{0, 1\}, \\ P_c \times T \rightarrow \mathbb{R}_0^+ \end{cases}$$

为前向关联函数,表示输入库所与变迁之间的有向弧权重;

$$W_0 : \begin{cases} P_d \times T \rightarrow \mathbb{N}, \\ P_{ad} \times T \rightarrow \{0, 1\}, \\ P_{ac} \times T \rightarrow \{0, 1\}, \\ P_E \times T \rightarrow \{0, 1\}, \\ P_c \times T \rightarrow \mathbb{R}_0^+ \end{cases}$$

为前后关联函数.

Post为输出关联映射,若 $h(P) = D$,则 $\text{Post}: P \cup T \rightarrow \mathbb{N}^+$,若 $h(P) = C$,则 $\text{Post}: P \cup T \rightarrow \mathbb{R}^+$.

4) $A = \{(P \times T) \cup (T \times P)\}$ 是库所和变迁之间的有向弧集合,表示变迁和库所之间的联系.模型中有向弧分为:普通弧、使能弧、抑制弧和控制弧(如图3所示).



图3 有向弧表示

Fig. 3 Expression of directional arcs

5) τ 表示变迁激发的时延.对于固定时延离散变迁($t_j \in T_1$),它的固定激发延迟 $\delta_j = \tau(t_j)$,一般情况下 $\tau(t_j)$ 默认为零.令随机时延离散变迁的平均激发速度 $\lambda_i = \tau(t_i)$,则平均激发延迟为 $1/\lambda_i$.

6) v 为连续变迁的激发速度函数,在固定时间段内,对 $t_i \in T_c$, $v(t_i) = v_i$ 均为常数, $0 \leq v_{i\min} \leq v_i \leq v_{i\max}$,即所有连续变迁是匀速激发的. $v_{i\min}$ 和 $v_{i\max}$ 分别表示最小和最大激发速度.

下面给出RDHPN的标识定义:

定义1 RDHPN的标识

$$m : \begin{cases} \text{if type}(P_i) = P_d, m \rightarrow \mathbb{N}, \\ \text{if type}(P_i) = P_{ad}, m \rightarrow \{0, 1\}, \\ \text{if type}(P_i) = P_E, m \rightarrow \{0, 1\}, \\ \text{if type}(P_i) = P_c, m \rightarrow \mathbb{R}_0^+, \\ \text{if type}(P_i) = P_{ac}, m \rightarrow \mathbb{R}_0^+ \end{cases}$$

是一个函数,其中 $\text{type}(P_i)$ 表示库所的类型, m 表示库所的标识.离散库所中的标识为自然数,离散控制

库所和事件输出库所中的标识为整数0或1, 连续库所和连续控制库所中的标识为非负实数. 在时刻 t , 系统的标识记为 $m(t)$, 初始标识记为 $m(\tau_0)$. 对于任意连续库所 $p_{ci} \in P_c$ 都有实数 $M_{i \min}$ 和 $M_{i \max}$, 使得

$$M_{i \min} \leq m_{p_{ci}} \leq M_{i \max}$$

始终满足. $M_{i \min}$ 和 $M_{i \max}$ 分别称为 p_{ci} 的标识上限和下限.

定义 2 RDHPN中, 对于离散变迁 t_d , 如果所有 $p_d \in \cdot t_d$, 有 $m_{p_d} \geq W_I(p_d, t_d)$, 则离散变迁 t_d 在标识 m 下是使能的. 使能的变迁 t_1 在经过时间延迟 τ 后激发.

定义 3 源配置混杂Petri网中, 对于连续离散转换变迁 t_{cd} , 如果所有 $p_c \in \cdot t_{cd}$, 有 $m_{p_c} \geq W_I(p_c, t_{cd})$, 且两者之间为使能弧, 则 t_{cd} 在标识 m 下是使能的. 如果所有 $p_c \in \cdot t_{cd}$, 有 $m_{p_c} \leq W_I(p_c, t_{cd})$, 且两者之间为抑制弧, 则称 t_{cd} 在标识 m 下是使能的. 使能的变迁 t_{cd} 立即激发.

定义 4 RDHPN中, 同步变迁 t_{sn} 使得事件输出库所中的标识与离散输入库所中的标识同步, 因此 t_{sn} 始终是使能的, 只要离散输入库所中的标识发生变化时, t_{sn} 激发, 事件输出库所中的标识发生同样的变化.

定义 5 RDHPN中, 资源配置变迁 t_{rd} 用于解决资源冲突或资源瓶颈, 对于 $p \in \cdot t_{rd}$, 如果有 $m_p \geq W_I(p, t_{rd})$, 则资源配置变迁 t_{rd} 在标识 m 下是使能的.

定义 6 RDHPN中, 资源释放变迁 t_{rr} 用于释放资源, 如果资源是可循环的, 对于 $p \in \cdot t_{rd}$, $p \in \cdot t_{rr}$, 如果资源配置变迁 t_{rd} 在标识 m 下是使能的, 则 t_{rr} 在下一个标识中是使能的.

定义 7 RDHPN中, 对于连续变迁 t_c , 当所有离散库所

$$p_d \in \cdot t_c, m_{p_d} \geq W_I(p_d, t_c)$$

时, 若所有连续库所 $p_c \in \cdot t_c$, $m_{p_c} \geq 0$, 则连续变迁 t_c 使能.

定义 8 若离散库所 p_d 和连续变迁 t_c 构成一个环, 即

$$t_c \in \cdot p_d \cap p_d \cdot,$$

则离散库所 p_d 对连续变迁 t_c 的激发是必要的, 但不是消耗性的.

定义 9 在 t 时刻, t_{cj} 连续变迁的瞬时激发速度 v_j 为

$$v_j \begin{cases} = 0, & \text{如果 } t_{cj} \text{ 不使能,} \\ \in [V_j \min, V_j \max], & \text{如果 } t_{cj} \text{ 强使能,} \\ \in [V_j \min, \bar{V}_j], \bar{V}_j \leq V_j \max, & \text{如果 } t_{cj} \text{ 弱使能.} \end{cases}$$

3 基于 RDHPN 的混杂生产过程仿真模型 (Simulation model of hybrid production process based on RDHPN)

典型的混杂生产过程由3部分组成: 1) 离散生产过程, 该过程包括若干个离散生产单元; 2) 中间存储罐, 存储离散生产过程生产的产品; 3) 连续生产过程组成, 加工来自中间存储过程的产品. 一个典型的混杂生产过程如图4所示, 它包括3种生产装置、2种中间存储装置(对应2种中间产品)、3种原材料和1种最终产品, 其中原料2是可循环资源.

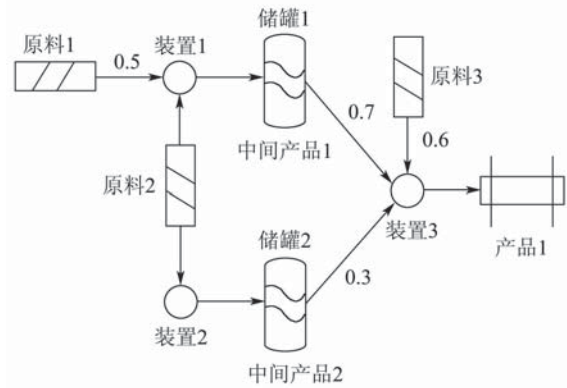


图4 典型混杂生产过程

Fig. 4 Typical hybrid production process

对于混杂生产过程而言, 整个生产过程是在生产装置、存储装置及管线内进行, 生产装置主要包括合成、分离等装置, 存储装置主要包括存储各种原料、中间产品和最终产品的储罐. 离散过程主要体现在对生产装置和存储装置的控制. 将装置分为加工装置和存储装置两大类, 分别采用前一部分的RDHPN建立仿真模型.

3.1 生产装置的 RDHPN 仿真模型(RDHPN model of production device)

生产装置的仿真模型如图5所示, 模型中的输入连续库所 p_{c1} , p_{c2} 和 p_{c3} 代表各种输入的原料, 其中原料2为可循环资源, p_{c2} 与资源配置变迁 t_{rd} 相连, 通过控制弧来确定装置1或装置2首先获取到资源2. 连续输出库所 p_{c4} , p_{c5} , p_{c6} 表示各种输出的产品或者半成品, p_{c6} 与资源释放变迁 t_{rr} 相连, 实现对可重复利用资源2的释放. $\alpha_i (i = 1, 2, 3)$ 代表各种原料的输入比例, $\beta_i (i = 1, 2, 3)$ 代表各种产品或半成品的产出率. 装置的加工速度是调度模型的优化变量, 通过连续控制库所 p_{ac1} 来控制. 两个随机时延离散变迁 t_{s1} 和 t_{s2} , 分别表示装置发生故障和装置故障得到修复事件, 离散库所 p_{d1} 表示设备处于故障停机这一状态; 同步变迁 t_{sn1} 使得事件输出库所 p_{E1} 中的标识与 p_{d1} 中的标识保持同步更新.

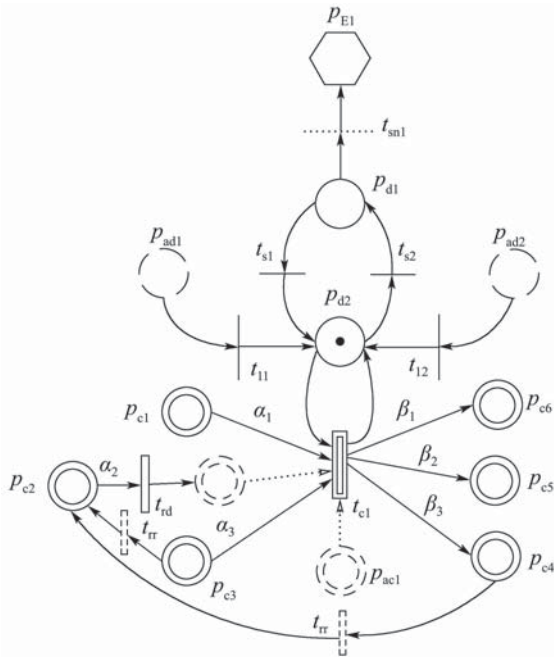


图5 生产装置的RDHPN模型

Fig. 5 RDHPN model of production devices

3.2 存储装置的RDHPN仿真模型(RDHPN model of storing device)

对于各种原料、中间产品和最终产品,其存储装置都具有基本相同的结构,都可以表示成如图6所示的RDHPN模型. p_c 表示存储装置, m 表示存储装置中物料的当前存储量,且满足 $M_{\min} \leq m \leq M_{\max}$, M_{\min} 表示存储容量的下限, M_{\max} 表示存储容量的

上限, t_{c1} , t_{c2} 和 t_{c3} 表示生产该物料的装置, t_{c4} 和 t_{c5} 表示消耗这种物料的装置,调度通过对该存储装置相连的各个生产装置的瞬时加工速度优化,使得存储装置的物料始终位于存储容量的上下限之间.连续离散转换变迁 t_{cd1} 和 t_{cd2} 用于对存储装置的物料存储量 m 进行监控,当存储容量 m 超过存储上限 M_{\max} 或低于存储下限 M_{\min} 时, t_{cd1} 和 t_{cd2} 触发,通过在事件输出库所 p_{E1} 或 p_{E2} 中放置一个离散标识通知外界.

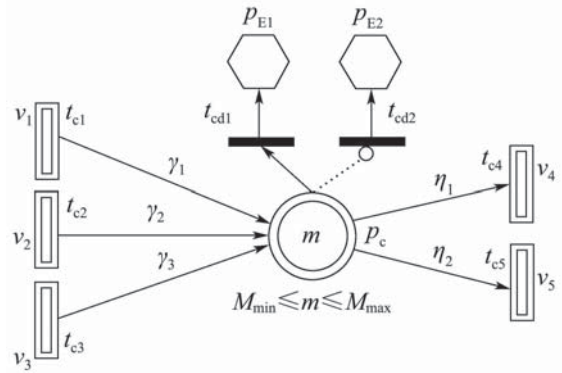


图6 存储装置的RDHPN模型

Fig. 6 RDHPN model of storing devices

3.3 混杂生产过程的RDHPN模型(RDHPN model of hybrid production process)

综合上述生产装置和存储装置的RDHPN模型,可以得出该生产过程的受控混杂Petri网模型如图7所示.

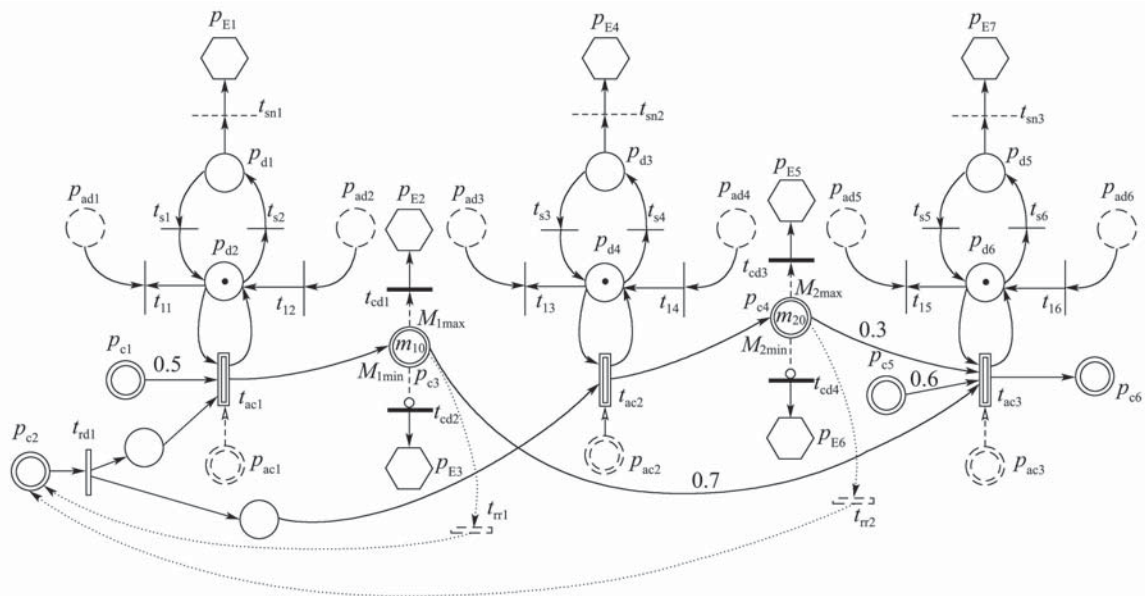


图7 RDHPN仿真模型

Fig. 7 Emulation model of RDHPN

连续变迁 t_{ac1} , t_{ac2} 和 t_{ac3} 分别代表生产装置1, 2和3.连续库所 p_{c1} , p_{c2} 和 p_{c3} 分别代表原材料1~3,并且假设原材料能够满足生产需要. p_{c5} 代表最终产品.连续库所 p_{c3} 和 p_{c4} 分别代表存储装置1和2,

其最初存储量分别为 m_{10} 和 m_{20} ,存储容量的下限和上限表示为 $M_{i \min}(i=1, 2)$ 和 $M_{i \max}(i=1, 2)$.变迁 t_{rd1} 表示原料2在装置1和装置2之间的资源配置,变迁 t_{rr1} 和 t_{rr2} 表示对可循环资源(原料2)的释放.

4 基于 RDHPN 的动态调度(Dynamic scheduling based on RDHPN)

4.1 混杂生产过程的逻辑规划模型(Logic programming models of hybrid production process)

$$\max(\sum_k \alpha_k v_k - \sum_{m \neq 2} \beta_m v_m - \beta_2 - \sum_n \gamma_n v_n) \Delta \tau, \quad (1)$$

其中: α_k 是最终产品的价格系数, v_k 是最终产品加工速度, β_m 是原材料的价格系数, β_2 是原材料2的价格, v_m 是原材料消耗速度, γ_n 是装置的加工成本系数, v_n 是装置的加工运行速度. $\Delta \tau$ 是连续运行时间长度. 因为原材料2是可循环资源, 不存在消耗问题, 因此这里将其单独出来.

对于RDHPN, 所有的连续库所都要满足

$$M_{\min} \leq m \leq M_{\max}.$$

因此, 可以用如下约束条件来表示:

$$\begin{cases} M_{i \min} \leq \sum_{t_j \in T_{ce}} C(p_i, t_j) \Delta \tau + m_{i0}(\tau) \leq M_{i \max}, \\ \forall p_i \in P_c, \end{cases} \quad (2)$$

其中: $C(p_i, t_j)$ 为关联函数, T_{ce} 代表RDHPN中使能的连续变迁. m_{i0} , $M_{i \min}$, $M_{i \max}$ 分别表示连续库所 p_i 的初始标识数、最小标识数和最大标识数.

另外, 对于每个使能的连续变迁, 其瞬时激发速度应满足其取值范围的限制, 即

$$V_{j \min} \leq v_j(\tau) \leq V_{j \max}, \quad (3)$$

其中: $V_{j \min}$ 和 $V_{j \max}$ 为常数, 分别代表瞬时加工速度的最大值和最小值. 根据表1、表2和表3中的数据, 可以建立生产过程的逻辑规划模型:

$$\begin{cases} \max \left(\begin{matrix} \alpha_6 v_3 - 0.5 \beta_1 v_1 - \beta_2 - 0.6 \beta_5 v_3 \\ -\gamma_1 v_1 - \gamma_2 v_2 - \gamma_3 v_3 \end{matrix} \right) \Delta \tau, \\ \text{s.t. } M_{1 \min} \leq (v_1 - 0.7 v_3) \Delta \tau \leq M_{1 \max}, \\ M_{2 \min} \leq (v_2 - 0.3 v_3) \Delta \tau \leq M_{2 \max}. \end{cases} \quad (4)$$

表 1 原料与产品价格

Table 1 Price of materials and products

原料1/ (元·m ⁻³)	原料2/ (元·m ⁻³)	原料3/ (元·m ⁻³)	产品1/ (元·m ⁻³)
20	40	20	200

表 2 存储罐容量上下限

Table 3 Upper/lower capacity limit of storage pot

项目	存储容量上限/m ³	存储容量下限/m ³
储罐1	60000	2000
储罐2	80000	3000

表 3 装置加工成本系数及瞬时加工速度上下限

Table 2 Cost coefficient of devices and the upper/lower limit of instantaneous speed

项目	加工成本系数/ (元·h ⁻¹)	上限 V_{\max} / (m ³ ·h ⁻¹)	下限 V_{\min} / (m ³ ·h ⁻¹)
装置1	1.2	300	150
装置2	1.4	350	200
装置3	2.4	300	200

4.2 混杂生产过程的动态调度(Dynamic scheduling of hybrid production process)

在建立了Petri网模型和规划模型后, 可以实现动态调度, 具体过程如下:

1) 初始状态下, $\tau = 0$ 时, 储罐的存储量分别为: $m_{10} = 3000$, $m_{20} = 3600$.

所有的储罐容量均在允许范围内, 所有的加工装置均无故障, 则逻辑规划模型在模型(4)的基础上增加:

$$\begin{cases} V_{1 \min} \leq v_1 \leq V_{1 \max}, \\ V_{2 \min} \leq v_2 \leq V_{2 \max}, \\ V_{3 \min} \leq v_3 \leq V_{3 \max}. \end{cases} \quad (5)$$

求解模型可以得出初始调度方案.

2) 装置2故障停机.

在时刻 $\tau = 100$ 时, 装置2出现故障, 必须停机维修, 这时根据经验, 将装置2的加工速度设为0, 装置4的加工速度调整到下限, 因此, 得到非线性模型为:

$$\begin{cases} V_{1 \min} \leq v_1 \leq V_{1 \max}, \\ v_2 = 0, \\ v_3 = V_{3 \min}. \end{cases} \quad (6)$$

求解该模型可到装置2故障停机情况下的调度方案, 得出系统可以稳定运行 $\Delta \tau$, 在该时间段内, 装置2如果还未修好, 这会造成某些存储装置达到极限, 这种状态下需要增加新的储罐等方式使得生产继续进行. 因此, 在实际生产中, 需要在 $\Delta \tau$ 时间内保障装置2检修成功, 以保证生产的顺利进行.

5 结论(Conclusions)

RDHPN模型描述能力强, 能有效地描述和分析复杂混杂系统. 为了增强混杂生产过程应对突发事件的能力, 在RDHPN建立的仿真模型的基础上, 配合基于经验规则的事件逻辑网和逻辑规划, 形成混杂生产过程动态调度方案, 解决生产过程中出现的资源冲突以及装置停机等突发事件. 该

模型可以用于解决连续过程中出现突发事件后的动态调度问题,也可以有效分析复杂的混杂系统生产过程。但在后续的研究中还需要对RDHPN模型提出优化方案。

参考文献(References):

- [1] ZHAO X Q, RONG G. Blending scheduling under uncertainty based on particles warm optimization[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2005, 13(4): 535 – 541.
- [2] FERRER N S, MENDEZ C A, GRAELLS M, et al. Optimal reactive scheduling of manufacturing plants with flexible batch recipes[J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2007, 46(19): 6273 – 6283.
- [3] CAFARO D C, CERDA J. Dynamic scheduling of multiproduct pipelines with multiple delivery due dates[J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2008, 32(4/5): 728 – 753.
- [4] IERAPTRITOU M G, FLOUDA C A. Effective continuous-time formulation for short-term scheduling multi-purpose batch processes[J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 1998, 37(11): 4341 – 4359.
- [5] 梁峰, 江志斌, 陶俐言, 等. 基于事件驱动的制造资源冲突实时消解法[J]. *计算机集成制造系统*, 2007, 13(2): 356 – 362.
(LIANG Feng, JIANG Zhibin, TAO Liyan, et al. Real-time manufacturing resource conflict resolution based on event-driven mechanism[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2007, 13(2): 356 – 362.)
- [6] 李建祥, 唐立新, 吴会江, 等. 基于规则的热轧钢管调度[J]. *钢铁*, 2004, 39(9): 39 – 42.
(LI Jianxiang, TANG Lixin, WU Huijiang, et al. Scheduling the production of hot rolling steel tube: a rule-based heuristics[J]. *Iron and Steel*, 2004, 39(9): 39 – 42.)
- [7] SUN R L, DING H, XIONG Y L, et al. Iterative learning scheduling: a combination of optimization and dispatching rules[J]. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 2004, 15(3): 298 – 305.
- [8] LIU H R, JIANG Z B, LEE Y F, et al. Real time scheduler for wafer foundry fab with object-oriented petra nets[C] //2003 *IEEE International Symposium on Semiconductor Manufacturing*. New York: IEEE, 2003: 319 – 322.
- [9] BAREDUAN S A, HASAN S H, ARIFFIN Saparudin. Finite scheduling of collaborative design and manufacturing activity: a petri net approach[J]. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 2008, 19(2): 274 – 288.
- [10] DAHMS M, SCHMIDT M. Modeling of dispatching-rules for job shop scheduling in manufacturing systems—a petri net approach[C] //2005 *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. New York: IEEE, 2005: 2025 – 2030.
- [11] GRADISAR D, MUSIE G. Production-process modeling based on production-management data: a petri-net approach [J]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2007, 20(8): 794 – 810.
- [12] 汪小澄, 张海艳, 万涛. 基于受控Petri网的物流实验系统的研究[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2005, 38(2): 123 – 127.
(WANG Xiaocheng, ZHANG Haiyan, WAN Tao. Research of experimental logistics system based on controlled Petri net[J]. *Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering*, 2005, 38(2): 123 – 127.)
- [13] ISABEL D, NICK T K. Differential Petri nets: representing continuous systems in a discrete-event world[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1998, 43(4): 573 – 579.
- [14] BALDUZZI F, GIUA A, MENGA G. First-order hybrid Petri nets: a model for optimization and control[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2000, 16(4): 382 – 399.
- [15] 杨欣, 杨蒲, 费树岷. 基于资源配置混杂Petri网的混杂系统生产过程建模[J]. *控制与决策*, 2009, 24(12): 1831 – 1835.
(YANG Xin, YANG Pu, FEI Shumin. Modeling for hybrid system based on resource distribution hybrid Petri nets[J]. *Control and Decision*, 2009, 24(12): 1831 – 1835.)

作者简介:

杨欣 (1978—), 男, 副教授, 博士, 目前研究方向为智能控制、模式识别, E-mail: yangxin@nuaa.edu.cn;

陈谋 (1975—), 男, 副教授, 目前研究方向为智能控制、鲁棒控制, E-mail: chenmou@nuaa.edu.cn;

费树岷 (1961—), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为非线性控制、智能控制、模式识别, E-mail: smfei@seu.edu.cn.