

文章编号: 1001-0920(2007)04-0366-07

基于一种新型混杂 Petri 网的混杂系统建模与控制

廖伟志^{1,2}, 古天龙³

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

摘要: 为了增强混杂 Petri 网模型描述能力和克服一阶混杂 Petri 网模型语义错误的问题, 定义一种新的混杂 Petri 网模型——广义混杂 Petri 网, 提出了相应的迁移使能和迁移引发语义. 通过划分标识等价类提出了广义混杂 Petri 网连续迁移瞬时引发速率的有效求解方法和模型行为演变分析方法. 给出了广义混杂 Petri 网模型的混杂系统建模实例, 同时结合模型行为演变和线性规划实现了混杂系统的优化控制. 研究表明, 所定义的模型描述能力更强, 模型语义正确合理, 能够有效描述和分析混杂系统.

关键词: 混杂 Petri 网; 混杂系统; 建模; 控制; 瞬时引发速率

中图分类号: TP271 **文献标识码:** A

Modeling and control for hybrid system based on general hybrid Petri nets

LIAO Wei-zhi^{1,2}, GU Tian-long³

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

Abstract: Motivated by the need for the effective modeling and optimization of hybrid system, a type of hybrid Petri nets model called general hybrid Petri nets (GHPNs) is defined. The enabling and firing semantics of transitions of the GHPNs are discussed, and an efficient way to calculate the instantaneous firing speed is presented. Net dynamic behavior is also developed. An application example shows how the proposed formalism is applied to modeling and optimization of flexible manufacturing system.

Key words: Hybrid Petri nets; Hybrid system; Modeling; Control; Instantaneous firing speed

1 引言

混杂系统自 1986 年在美国高级控制会议提出以来, 已成为离散事件系统研究和过程控制应用中一个新的热点. 由于混杂系统内含有连续动态和离散动态, 如何描述系统以及如何应用于实际过程就成为混杂系统研究中最困难, 同时也是最富创造性的活动^[1].

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. 混杂 Petri 网 (HPN) 首先由 David 和 Alla 提出, 在混杂 Petri 网中离散事件系统部分利用离散 Petri 网描述, 而连续变量系统用连续 Petri

网描述, 它们之间的相互作用则通过定义适当的迁移来实现^[2]. 在此之后, 许多研究人员针对不同的应用领域提出了各种混杂 Petri 网的扩展模型, 主要有微分 Petri 网^[3]、间歇 Petri 网^[4]、一阶混杂 Petri 网^[5]、混杂高级网^[6]、流随机 Petri 网^[7]、 p -时间混杂 Petri 网^[8]、区间速率连续 Petri 网^[9,10]等. 文献[5]提出了一阶混杂 Petri 网的形式化定义、迁移的使能和引发语义, 并给出了基于一阶混杂 Petri 网的混杂系统建模与分析的实例. 与其他混杂 Petri 网相比, 一阶混杂 Petri 网是一种描述能力较强的混杂 Petri 网模型. 然而一阶混杂 Petri 网模型存在如下问题: 1) 模型中没有定义时间迁移 (离散), 不能对

收稿日期: 2005-12-05; 修回日期: 2006-04-30.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60243002); 广西科学基金项目 (桂科基 0448072).

作者简介: 廖伟志 (1974—), 男, 广西凤山人, 讲师, 博士生, 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.

具有时间迁移的系统进行描述和分析;2) 迁移的使能和引发语义不能正确描述实际系统;3) 模型中语义的问题限制了模型描述能力(详见 2.4 节)。

本文定义了一种新的混杂 Petri 网模型,提出了正确的模型语义,并通过划分标识等价类给出了瞬时引发速率的有效求解方法和模型行为演变的分析方法,最后给出了基于新模型的混杂系统建模与优化控制的实例。

2 广义混杂 Petri 网模型

2.1 形式化定义

定义 1 广义混杂 Petri 模型为 7 元组 $GHPN = (P, T, F, W, S_i, S_{dc}, S_f)$, 其中:

1) 库所集 $P = P_d \cup P_c$, 其中 P_d 为离散库所集(离散库所用圆圈表示), 而 P_c 为连续库所集(连续库所用双圆圈表示);

2) 迁移集 $T = T_d \cup T_c$, T_c 为连续迁移集(连续迁移用白盒子表示), 离散迁移集 $T_d = T_I \cup T_D \cup T_E \cup T_T$, 其中 T_I 为瞬时迁移集(相应的迁移用单横线表示), T_D 为常数延时迁移集(相应的迁移用双横线表示), T_E 为指数分布延时迁移集(相应的迁移用双盒子表示), T_T 为具有时间戳迁移的迁移集(相应的迁移用黑盒子表示);

3) $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ 为 Petri 网的边与其库所和迁移的关系函数;

4) $W: (P \times T_d) \cup (T_d \times P) \rightarrow Z^+$ (正整数) 为边权的值函数;

5) $S_i: T_T \rightarrow (R^+ \setminus \{0\}) \times (R^+ \setminus \{0\})$ 为迁移的时间戳函数;

6) $S_{dc}: T_D \setminus T_E \rightarrow R^+$ 为迁移的时间延时函数, $\forall t_i \in T_D$, 其引发延时为 $\tau_i = S_{dc}(t_i)$, $\forall t_i \in T_E$, 其平均引发速率为 $\lambda_i = S_{dc}(t_i)$;

7) $S_f: T_c \rightarrow (R^+ \setminus \{0\}) \times (R^+ \setminus \{0\})$ 为连续迁移的引发速率区间, $\forall t_i \in T_c$, 令 $S_f(t_i) = (V_i^{\min}, V_i^{\max})$, 其中 $V_i^{\min} > 0, V_i^{\max} > 0, V_i^{\min}$ 为最小引发速率, V_i^{\max} 为最大引发速率。

迁移 t_j 的所有输入、输出库所分别用 i_j, j_j 表示;类似地分别用 p_i, p_i 表示库所 p_i 的所有输入和输出迁移;迁移 t 的所有输入离散(连续)库所、输出离散(连续)库所分别用 ${}^{(d)}t, {}^{(c)}t, t^{(d)}, t^{(c)}$ 表示。假设 t 为离散迁移, 则 $i \cap P_c = \emptyset$ 。

定义如下库所标识函数:

$$m_i = \begin{cases} P_d & N, \\ P_c & R^+ \setminus \{0\}. \end{cases} \quad (1)$$

用 m_i 表示库所 p_i 的标识, $m_i(\cdot)$ 为时刻 \cdot 的库所标识并用 $N, m(\cdot)$ 或 N, m 表示具有初始标识 $m(\cdot)$ 的广义混杂 Petri 模型。

2.2 离散迁移的使能与引发语义

定义 2 设 N, m 为广义混杂 Petri 网, t 为离散迁移, 若 i 中的任一库所 p_i 满足 $m_i \geq W(p_i, t)$, 则称迁移 t 为使能迁移。

定义 3 设 N, m 为广义混杂 Petri 网, $t_j \in T_d$ 且 $\text{enabling-time}(t_j)$ 为 t_j 的使能时间, 则有:

1) 若 $t_j \in T_I$, 则其引发时间 $\text{firing-time}(t_j) = \text{enabling-time}(t_j)$;

2) 若 $t_j \in T_D$, 则其引发时间 $\text{firing-time}(t_j) = \text{enabling-time}(t_j) + \tau_j$;

3) 若 $t_j \in T_E$, 则其引发时间 $\text{firing-time}(t_j) = \text{enabling-time}(t_j) + \tau_j$;

4) 若 $t_j \in T_T$, 则其引发时间 $\text{firing-time}(t_j) = \text{enabling-time}(t_j) + S_i(t_j)$ 。

性质 1 若离散迁移 t 引发, 则 $\forall p_i(i \in t), m_i = m_i - W(p_i, t); \forall p_i(t \in i), m_i = m_i + W(p_i, t)$ 。

2.3 连续迁移的使能与引发语义

定义 4 设 N, m 为广义混杂 Petri 网, t 为连续迁移, 若 ${}^{(d)}t$ 中的任一库所 p_i 满足 $m_i \geq W(p_i, t)$, 且 ${}^{(c)}t$ 中的任一库所 p_i 满足 $m_i > 0$, 则称迁移 t 为强使能迁移或 2 级使能迁移。

定义 5 设 N, m 为广义混杂 Petri 网, t_j 为连续迁移, 若 ${}^{(d)}t_j$ 中的任一库所 p_i 在时刻 \cdot 满足 $m_i \geq W(p_i, t_j)$, 且 $\forall p_i \in \{p_j | m_j(\cdot) = 0, p_j \in {}^{(c)}t_j\}$ 满足

$$W(t_k, p_i) \cdot v_k(\cdot) - \sum_{k \in j} W(p_i, t_k) \cdot v_k(\cdot) > W(p_i, t_j) \cdot V_j^{\min}, \quad (2)$$

则称迁移 t_j 为 1 级使能迁移。

定义 6 设 N, m 为广义混杂 Petri 网, t_j 为连续迁移, 若 ${}^{(d)}t_j$ 中的任一库所 p_i 在时刻 \cdot 满足 $m_i \geq W(p_i, t_j)$, 且满足 $\exists p_i \in \{p_j | m_j(\cdot) = 0, p_j \in {}^{(c)}t_j\}$ 使得

$$0 < \sum_{k \in j} W(t_k, p_i) \cdot v_k(\cdot) - \sum_{k \in j} W(p_i, t_k) \cdot v_k(\cdot) < W(p_i, t_j) \cdot V_j^{\min}, \quad (3)$$

并且 $\forall p_h \in \{p_j | m_j(\cdot) = 0, p_j \in {}^{(c)}t_j\} - \{p_i\}$ 满足

$$\sum_{k \in j} W(t_k, p_h) \cdot v_k(\cdot) - \sum_{k \in j} W(p_h, t_k) \cdot v_k(\cdot) > 0, \quad (4)$$

则称迁移 t_j 为 0 级使能迁移。

定义 7 若 t_j 不为强使能、1 级使能、0 级使能迁移, 那么称 t_j 为非使能迁移。

性质 2 若迁移 t_j 在时刻 \cdot 为 2 级使能迁移, 则

$$v_j(\cdot) \in [V_j^{\min}, V_j^{\max}]$$

性质3 若迁移 t_j 在时刻 t 为1级使能迁移,则

$$v_j(\cdot) \in [V_j^{\min}, \min(V_j^{\max}, V_j^*)], \text{ 其中}$$

$$V_j^* = \min_i \left\{ \left(\sum_k W(t_k, p_i) \cdot v_k(\cdot) - \sum_{k,j} W(p_i, t_k) \cdot v_k(\cdot) \right) / W(p_i, t_j) \mid p_i = t_j \text{ 且 } m_i(\cdot) = 0 \right\}$$

性质4 若迁移 t_j 在时刻 t 为0级使能迁移,则其瞬时引发速率 $v_j(\cdot) = 0$,若在时刻 $t + d_j$ 迁移没有变为非使能迁移,那么经过时间延时 d_j ,迁移 t_j 的瞬时引发速率 $v_j(\cdot) \in [V_j^{\min}, V_j^{\max}]$,其中 $d_j = 1/V_j^{\min}$.

性质5 若连续迁移 t 以速率 v 引发,则 $\forall p_i$

$$\begin{aligned} (t - t') \in P_d, m_i &= m_i - W(p_i, t), \forall p_i \\ (t' - t) \in P_d, m_i &= m_i + W(p_i, t); \forall p_i \\ (t' - t') \in P_c, m_i &= m_i - v \cdot \tau, \forall p_i \\ (t' - t) \in P_c, m_i &= m_i + v \cdot \tau, \text{ 其中 } v \in [V^{\min}, V^{\max}]. \end{aligned}$$

2.4 讨 论

与文献[5]所定义的一阶混杂 Petri 网模型相比,本文所定义的广义混杂 Petri 网模型具有如下特点:

1) 广义混杂 Petri 网模型引入了离散时间迁移.

2) 广义混杂 Petri 网模型连续迁移的使能级别定义为强使能、1级使能、0级使能,使得模型语义正确合理.

不妨以图1的混杂 Petri 网模型为例.根据文献[5]所定义的模型语义,在初始时刻 $t = 0$ 迁移 t_2 为弱使能迁移,以最小引发速率3引发.事实上,由于库所 p_2 的标识为0,而迁移 t_1 的最大引发速率为2,单位时间内流入库所 p_2 的标识最大为2,也就是说单位时间内流出库所 p_2 的标识不能超过2,所以迁移 t_2 不可能以其最小引发速率3引发,与所定义的语义相矛盾.

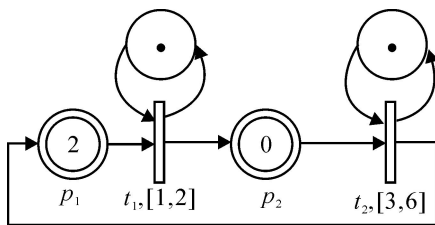


图1 混杂 Petri 网模型

根据本文所定义的语义,在初始时刻迁移 t_2 为0级使能迁移,不可能在时刻 $t = 0$ 引发.经过一段时延,库所 p_2 的标识不再为0,相应地迁移 t_2 也由弱使能迁移变为强使能迁移,从而变为可引发迁移.

3) 广义混杂 Petri 网模型描述能力更强.由于模型语义的问题,一阶混杂 Petri 网模型描述能力受到了限制.事实上,文献[5]在用一阶混杂 Petri 网模型描述和分析混杂系统时是基于如下假设进行的:混杂 Petri 网的任一连续迁移 t_i 满足下列两个条件中的任一个: $V_i^{\min} = 0$; $\forall p \in {}^{\circ}t_i, m_p > 0$.广义混杂 Petri 网模型不受该假设的约束,增强了模型描述能力.

由于广义混杂 Petri 网模型的语义比其他混杂 Petri 网模型的语义更复杂,需要提出相应的模型分析技术,下面就新模型的行为分析的相关技术进行讨论.

3 瞬时引发速率及行为演变分析

3.1 广义混杂 Petri 网的瞬时引发速率集

定义8 令向量集 $F = \{e = (e_1, e_2, \dots, e_n) \mid e_j \in \{-1, 0, 1, 2\}, 1 \leq j \leq n\}$. 设 $e \in F$, 若 $e_j = 2$, 则迁移 t_j 在标识 m 下为强使能迁移;若 $e_j = 1$, 则迁移 t_j 在标识 m 下为1级使能迁移;若 $e_j = 0$, 则迁移 t_j 在标识 m 下为0级使能迁移;若 $e_j = -1$, 则迁移 t_j 在标识 m 下为非使能迁移,那么称 e 为广义混杂 Petri 网在标识 m 下的一个使能向量,对应的瞬时引发速率 (IFS) 集记为 $SP(N, m, e)$, 并将广义混杂 Petri 网在标识 m 下的使能向量集记为 $EN(N, m)$.

性质6 设 $e = (e_1, e_2, \dots, e_n)$ 为广义混杂 Petri 网在标识 m 下的一个使能向量,根据广义混杂 Petri 网的语义及性质,在 e 下各个连续迁移的 IFS 满足如下约束集:

$$\left\{ \begin{aligned} & (a) V_j^{\max} - v_j = 0, \forall e_j, e_j \in \{1, 2\}; \\ & (b) v_j - V_j^{\min} = 0, \forall e_j, e_j \in \{1, 2\}; \\ & (c) v_j = 0, \forall e_j, e_j \in \{0, 1\}; \\ & (d) D_i = W(p_i, t_j) \cdot V_j^{\min}, \\ & \quad \forall e_j, e_j = 1, p_i = t_j, m_i = 0; \\ & (e) D_i < W(p_i, t_j) \cdot V_j^{\min}, \\ & \quad D_h > 0, D_i > 0, \\ & \quad \forall e_j, e_j = 0, \\ & \quad p_i = t_j, \forall p_h \in {}^{\circ}t_j - \{p_i\}, \\ & \quad m_i = m_h = 0; \\ & (f) D_i = 0, \exists p_i = t_j, e_j = -1, m_i = 0. \end{aligned} \right. \quad (5)$$

其中

$$D_i = \sum_k W(t_k, p_i) \cdot v_k(\cdot) - \sum_{k,j} W(p_i, t_k) \cdot v_k(\cdot), 1 \leq j \leq n$$

特别地,将该约束集记为 $LC(N, m, e)$,并可化为方程组 $Ax = b$,使能向量 e 的瞬时引发速率集就是该方程组的解.

性质 7 对于 N, m 和任意 $e \in F$, 若约束集 $LC(N, m, e)$ 对应的方程组 $Ax = b$ 有解, 则 $e \in EN(N, m)$, 否则 $e \notin EN(N, m)$.

3.2 标识等价类划分及其应用

定义 9 设广义混杂 Petri 网的标识集 $M = \{m = (m_1, \dots, m_k) \mid m_i \in \mathbb{R}^+, 1 \leq i \leq k\}$, 对任意的两个标识 $m_1 \in M$ 和 $m_2 \in M$, 若 m_1 的分量 $m_i > 0$, 则对应 m_2 的分量 m_i 也大于 0; 若 $m_i = 0$, 则 m_i 亦等于 0, 那么 $m_1 \sim m_2$. 容易证明 \sim 为等价关系.

设 $m \in M$, 将广义混杂 Petri 网在标识 m 下所有具有输出迁移的库所标识矢量记为 $m[1]$, 则有如下定理:

定理 1 设 $m_1, m_2 \in M$, 广义混杂 Petri 网在标识 m_1, m_2 下具有相同的使能矢量集及相同的瞬时引发速率集的充分条件为 $m_1[1] \sim m_2[1]$.

证明 首先证明对于 $EN(N, m_1)$ 中任意的使能矢量 $e, e \in EN(N, m_2)$. 由于 $m_1[1] \sim m_2[1]$, 根据使能语义, 若广义混杂 Petri 网的迁移 t_j 在标识 m_1 下为强使能迁移, 则迁移 t_j 在 m_2 下亦为强使能迁移; 同时若迁移 t_j 在标识 m_1 下为非强使能迁移, 则迁移 t_j 在 m_2 下亦为非强使能迁移. 另外, 根据广义混杂 Petri 网使能语义及引发性质, 在已知强使能迁移的条件下非强使能迁移的使能级别及瞬时引发速率与非 0 库所标识的大小无关. 而仅与强使能迁移的速率大小有关. 因此, 当 $m_1[1] \sim m_2[1]$ 时, 对于 $EN(N, m_1)$ 中任意的使能矢量 $e, e \in EN(N, m_2)$, 再由性质 6 可知其相应的瞬时引发速率集亦相同.

同理可证, 对于 $EN(N, m_2)$ 中任意的使能矢量 $e, e \in EN(N, m_1)$, 并有相同的瞬时引发速率集. 命题得证.

定义 10 当且仅当标识 m 中的任意分量 m_i 或者为 1 或者为 0, 标识 m 称为 0_1 标识.

性质 8 设广义混杂 Petri 网具有 p_1, p_2, \dots, p_k 共 k 个库所, 根据等价关系 \sim 广义混杂 Petri 网共有 2^k 个不同的标识等价类, 并且不同的 0_1 标识属于不同的标识等价类.

推论 1 广义混杂 Petri 网在同一等价类的各个标识下具有相同的使能矢量及瞬时引发速率集.

证明 设 m_1, m_2 为同一等价类的任意两个标识, 因此有 $m_1 \sim m_2$, 所以 $m_1[1] \sim m_2[1]$. 根据定理 1 可知, 区间速率连续 Petri 网在标识 m_1, m_2 下具有相同的使能矢量及瞬时引发速率集, 考虑到 m_1, m_2 的任意性, 命题得证.

3.3 模型动态行为演变

定义 11 设 $rs = (m(i-1), v_{i-1}, [i-1, i])$, 如

果它满足下面的两个条件: 1) 时间区间 $[i-1, i)$ 内, 连续迁移的引发速率 v_{i-1} 为恒常数; 2) 在时刻 i , 由于某个连续库所标识变为 0 或某个离散迁移引发或某个 0 级使能迁移的时延时间到 (在时刻 $i-1$ 和 i 之间不会发生). 则称 rs 为广义混杂 Petri 网的一个区域状态.

性质 9 令 $k = k - k_{-1}$ 为区域状态 $(m(k_{-1}), v_{k-1}, [k_{-1}, k])$ 的时间区间大小, 则:

1) $\forall p_i \in P_c, B_i(k_{-1}) = 0$ 且 $T_E^d(k_{-1}) = \emptyset, ET_0(k_{-1}) = \emptyset$, 则:

$$k = \text{FAST_FIRING};$$

无改变当前区域状态的事件发生.

2) 若 $\forall p_i \in P_c, B_i(k_{-1}) = 0$ 且 $T_E^d(k_{-1}) = \emptyset, ET_0(k_{-1}) = \emptyset$, 则:

$$k = \text{FAST_FIRING};$$

改变当前区域状态的事件为某个离散迁移引发 (取决于 k 的大小).

3) 若 $\exists p_i \in P_c, B_i(k_{-1}) > 0$ 且 $T_E^d(k_{-1}) = \emptyset, ET_0(k_{-1}) = \emptyset$, 则:

$$k = \text{FAST_0_MARKING};$$

改变当前区域状态的事件为某个连续库所的标识变为 0 (取决于 k 的大小).

4) 若 $\exists p_i \in P_c, B_i(k_{-1}) > 0$ 且 $T_E^d(k_{-1}) = \emptyset, ET_0(k_{-1}) = \emptyset$, 则:

$$k = \min(\text{FAST_0_MARKING}, \text{FAST_FIRING});$$

改变当前区域状态的事件为某个连续库所的标识变为 0 或某个离散迁移引发 (取决于 k 的大小).

5) 若 $\forall p_i \in P_c, B_i(k_{-1}) = 0$ 且 $T_E^d(k_{-1}) = \emptyset, ET_0(k_{-1}) = 0$, 则:

$$k = \text{MIN_DELAY};$$

改变当前区域状态的事件为某个 0 级使能迁移的时延时间到 (取决于 k 的大小).

6) 若 $\forall p_i \in P_c, B_i(k_{-1}) = 0$ 且 $T_E^d(k_{-1}) = \emptyset, ET_0(k_{-1}) = \emptyset$, 则:

$$k = \min(\text{MIN_DELAY}, \text{FAST_FIRING});$$

改变当前区域状态的事件为某个 0 级使能迁移的时延时间到或某个离散迁移引发 (取决于 k 的大小).

7) 若 $\exists p_i \in P_c, B_i(k_{-1}) > 0$ 且 $T_E^d(k_{-1}) = \emptyset, ET_0(k_{-1}) = \emptyset$, 则:

$$k = \min(\text{FAST_0_MARKING}, \text{MIN_DELAY});$$

改变当前区域状态的事件为某个连续库所的标识变为 0 或某个 0 级使能迁移的时延时间到

(取决于 k 的大小).

8) 若 $\exists p_i \in P_c, B_i(k-1) > 0$ 且 $T_E^d(k-1) \neq \emptyset, ET_0(k-1) \neq \emptyset$, 则:

$$k = \min(\text{FAST_0_MARKING}, \text{MIN_DELAY}, \text{FAST_FIRING});$$

改变当前区域状态的事件为某个连续库所标识变为 0 或某个离散迁移引发或某个 0 级使能迁移的时延时间到 (取决于 k 的大小). 其中

$$B_i = \frac{W(p_i, t_k) \cdot v_k(k-1) - W(t_k, p_i) \cdot v_k(k-1)}{k}$$

为连续库所 p_i 的动态平衡量, $T_E^d(k-1)$ 为时刻 $k-1$ 所有使能离散迁移的集合, $ET_0(k-1)$ 为时刻 $k-1$ 所有 0 级使能迁移的集合,

$$\text{FAST_0_MARKING} =$$

$$\min_i \left\{ \frac{m(k-1)}{B_i(k-1)} \mid B_i(k-1) < 0 \right\},$$

$$\text{FAST_FIRING} =$$

$$\min_j \{ \text{firing-time}(t_j) \mid t_j \in T_E^d(k-1) \},$$

$$\text{MIN_DELAY} = \min_j \{ 1/V_j^{\min} \mid e_j = 0, t_j \in ET_0(k-1) \}.$$

根据上述语义及性质可求出广义混杂 Petri 网的动态行为演变过程如下:

Step1: 初始化: $0 \leq k \leq 0$, 演变时间 TH, 初始标识 $m(0)$;

Step2: 若 $k = TH$, 则转至 Step11;

Step3: 利用性质 6, 性质 7 和推论 1 计算 $EN(N, m(k))$ 和 $SP(N, m(k))$;

Step4: 根据引发模式从 $SP(N, m(k))$ 中选出引发速率向量 v , 令 $v(k) = v$;

Step5: 根据性质 9 计算区域状态 $(m(k), v_k, [k, k+1])$ 的时间区间 $k+1$ 的大小;

Step6: $k+1 = k+1 + k$;

Step7: 若 $k+1 =$, 则转至 Step11;

Step8: 根据性质 9 确定改变当前区域状态的事件 $event_{k+1}$;

Step9: 根据性质 1 和性质 5 计算 $m^c(k+1)$, $m^d(k+1)$;

Step10: $k = k+1$, 转至 Step2;

Step11: 行为演变结束.

其中 $SP(N, m(k)) = \{ SP(N, m(k), e) \mid e \in EN(N, m(k)) \}$, $m^c(k+1)$ ($m^d(k+1)$) 为时刻 $k+1$ 的连续 (离散) 库所标识.

4 基于广义混杂 Petri 网的混杂系统建模与控制

4.1 混杂系统的广义混杂 Petri 网模型

图 2 为具有混杂特征的制造系统. 该制造系统

具有 5 个缓冲区和 6 台机器. 缓冲区 B_1, B_2 的原料分别送入机器 M_1, M_2 进行加工, 然后把产品送入缓冲区 B_3 . 缓冲区 B_4 接受来自机器 M_3 加工的产品. 机器 M_4, M_5 加工的产品分别送入缓冲区 B_5, B_3 . 最后, 机器 M_6 对缓冲区 B_5 的产品进行加工得到最后的产品.

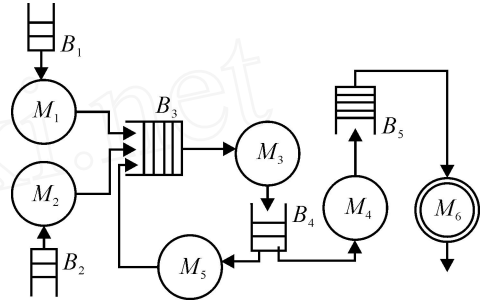


图 2 具有混杂特征的制造系统

假设在生产过程中缓冲区 B_1, B_2 的原料总能及时地供应给机器 M_1 和 M_2 . 设缓冲区 B_3 的容量为 30, 其初始产品数为 10. 设缓冲区 B_4 的容量无限大, 而缓冲区 B_5 的容量为 40, 其初始产品数为 0. 假设机器 $M_1 \sim M_5$ 在生产过程中不需维修, 而机器 M_6 在运行 3 个时间单位后进入维修状态, 维修时间为 3 ~ 4 个时间单位. 机器 $M_1 \sim M_6$ 的最小生产速率分别为 2, 3, 4, 3, 1, 0, 最大的生产速率分别为 3, 5, 6, 4, 2, 5.

利用一阶混杂 Petri 网无法正确描述和分析如图 2 的混杂系统, 其广义混杂 Petri 网模型如图 3 所示. 其中:

- 1) 机器 $M_1 \sim M_6$ 用迁移 $t_1 \sim t_6$ 表示.
- 2) 机器 M_6 的维修 / 运行状态模型用两个离散库所和两个离散迁移来描述. 库所 p_6 的标识为 1 表示机器处于运行状态, 库所 p_7 的标识为 1 表示机器处于维修状态. 迁移 t_7 (t_8) 引发表示机器由运行 (维修) 状态转入维修 (运行) 状态.
- 3) 已假设在生产过程中缓冲区 B_1, B_2 的原料总能及时地供应给机器 M_1 和 M_2 , 因此在广义混杂 Petri 网模型中无须对这两个缓冲区进行描述.

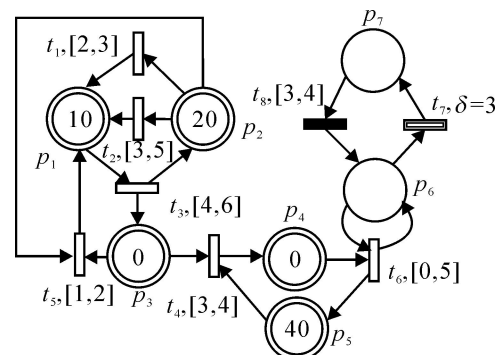


图 3 制造系统的广义混杂 Petri 网模型

4) 每个有限缓冲区用一对连续库所来描述,其中缓冲区 B_3 用库所 p_1 和 p_2 表示,而缓冲区 B_5 用库所 p_4 和 p_5 表示.

5) 每个无限缓冲区用一个连续库所来描述,图 3 的库所 p_3 表示缓冲区 B_4 .

4.2 基于广义混杂 Petri 网的混杂系统优化与控制

下面讨论上述混杂系统机器利用率的最大化问题.在混杂 Petri 网模型中机器的利用率被描述成迁移的引发速率,因此机器利用率的最大化问题对应于混杂 Petri 网流的最大化问题,即优化目标函数 $J = \sum_j C_j \cdot v_j$. 本文采取短视策略(myopic scheme) 优化方案(一种局部优化方案)^[5,10],即如何选择当前区域状态各个连续迁移的引发速率,使得目标函数达到最优,从而保证系统在每个区域状态下目标函数均达到最优.

设广义混杂 Petri 网当前区域状态的初始时刻为 t_i ,对应的标识为 $m(t_i)$,目标函数 $\sum_j C_j \cdot v_j$ 在当前区域状态下的最优值可从如下模型求得:

$$J = \max_{e \in \text{EN}(N, m(t_i))} \left\{ \max_j C_j \cdot v_j, \right. \\ \left. \text{s. t. } v_i \in \text{SP}(N, m_i, e) \right\}. \quad (6)$$

因 $\text{SP}(N, m, e)$ 为线性集,最优解可通过线性规划方法求得.最后结合行为演变和线性规划来考察上述制造系统在短视优化方案下的优化控制策略.

[RS₀]: 设初始时刻 $t_0 = 0, m^d(t_0) = [m_6(t_0) \ m_7(t_0)] = [1 \ 0]^T, m^c(t_0) = [m_1(t_0) \ m_2(t_0) \ m_3(t_0) \ m_4(t_0) \ m_5(t_0)] = [10 \ 20 \ 0 \ 0 \ 40]^T$,根据性质 6 和性质 7 可求出标识 $m(t_0)$ 下的使能集和瞬时引发速率集

$$\text{EN}(N, m(t_0)) = \\ \{ (2, 2, 2, 1, 1, 1), (2, 2, 2, 1, 0, 0), \\ (2, 2, 2, 1, -1, -1), (2, 2, 2, 0, 1, 1) \}, \\ \text{SP}(N, m(t_0), (2, 2, 2, 1, 1, 1)) = \\ \{ 2 \ v_1 \ 3, 3 \ v_2 \ 5, 4 \ v_3 \ 6, \\ 3 \ v_4 \ 4, 1 \ v_5 \ 2, \\ v_6 \ v_4 / v_3 - v_4 \ 1, v_3 - v_5 \ 3 \}, \\ \text{SP}(N, m(t_0), (2, 2, 2, 1, 0, 0)) = \\ \{ 2 \ v_1 \ 3, 3 \ v_2 \ 5, 4 \ v_3 \ 6, \\ 3 \ v_4 \ 4, v_5 = 0, \\ v_6 \ v_4 / 0 < v_3 - v_4 < 1 \}, \\ \text{SP}(N, m(t_0), (2, 2, 2, 1, -1, -1)) = \\ \{ 2 \ v_1 \ 3, 3 \ v_2 \ 5, v_3 = 4, \\ v_4 = 4, v_5 = 0, v_6 \ 4 \}, \\ \text{SP}(N, m(t_0), (2, 2, 2, 0, 1, 1)) =$$

$$\{ 2 \ v_1 \ 3, 3 \ v_2 \ 5, 4 \ v_3 \ 6, \\ v_4 = 0, 1 \ v_5 \ 2, v_6 \ 4 / 0 < v_3 - v_5 < 1 \}.$$

根据短视策略优化方案,求出系统在初始区域状态下的机器利用率的最大值,其最优化模型为

$$J_0 = \max_{e \in \text{EN}(N, m(t_0))} \left\{ \max_{v_i=1}^6 v_i, \right. \\ \left. \text{s. t. } v \in \text{SP}(N, m(t_0), e) \right\}. \quad (7)$$

可求出最优解 $J_0 = 23, v_0 = [3 \ 5 \ 6 \ 4 \ 1 \ 4]^T, e_0 = (2, 2, 2, 1, 1, 1)$,即得到系统在初始区域状态的最优控制策略.在时刻 $t_1 = 3$ 迁移 t_7 引发,即机器 M_6 进入维修状态.

[RS₁]: 一旦改变初始区域状态的事件发生,系统进入第 2 个区域状态,其初始时刻为 t_1 ,根据性质 1 和性质 5 可求出 $m^d(t_1) = [0 \ 1]^T, m^c(t_1) = [19 \ 11 \ 3 \ 0 \ 40]^T$. 标识 $m(t_1)$ 下的使能集和瞬时引发速率集为

$$\text{EN}(N, m(t_1)) = \{ (2, 2, 2, 2, 2, 0) \}, \\ \text{SP}(N, m(t_1), (2, 2, 2, 2, 2, 0)) = \\ \{ 2 \ v_1 \ 3, 3 \ v_2 \ 5, 4 \ v_3 \ 6, \\ 3 \ v_4 \ 4, 1 \ v_5 \ 2, v_6 = 0 \},$$

最优化模型为

$$J_1 = \max_{e \in \text{EN}(N, m(t_1))} \left\{ \max_{v_i=1}^6 v_i, \right. \\ \left. \text{s. t. } v \in \text{SP}(N, m(t_1), e) \right\}, \quad (8)$$

最优解 $J_1 = 20, v_1 = [3 \ 5 \ 6 \ 4 \ 2 \ 0], e_1 = (2, 2, 2, 2, 2, 0)$. 机器 M_6 进入维修状态,即其引发速率为 0,因此缓冲区 B_3 和 B_5 的产品数量增加.而缓冲区 B_3 的容量有限,因此经过 $t = 11 / (v_1 + v_2 + v_5 - v_3) = 11 / 4 = 2.75$ 时间单位后,缓冲区 B_3 的产品数量将达到其最大容量.机器 M_6 最小的维修时间为 3,因此在时间区间 $[t_1, t_1 + 2.75)$ 内没有离散迁移引发,于是改变该区域状态的事件为缓冲区 B_3 满.

[RS₂]: 系统进入第 3 个区域状态,其初始时刻为 $t_2, m^d(t_2) = [0 \ 1]^T, m^c(t_2) = [30 \ 0 \ 3 \ 11 \ 29]^T$,其最优解 $J_2 = 16, v_2 = [2 \ 3 \ 6 \ 4 \ 1 \ 0], e_2 = (1, 1, 2, 2, 1, -1)$. 在时间区间 $[5.75, 6]$ 内,缓冲区中的产品数量增加的速率为 4. 假设机器 M_6 在时刻 6 维修结束,即迁移 t_8 引发,系统进入下一个区域状态.按上述方法可求出系统在指定时间范围内的局部最优解.限于篇幅,在此仅给出前 3 个区域状态的优化控制策略的求解过程.

5 结 语

与已有的混杂 Petri 网模型相比,本文所定义的广义混杂 Petri 网模型语义更复杂,描述能力更强,能有效地描述和分析复杂混杂系统.然而,关于

广义混杂 Petri 网模型的理论及其应用仍需做进一步研究,还需对其结构性质、稳定性等理论进行研究.如何在模型中描述系统的复杂存储策略,如何实现全局最优化控制算法等将是广义混杂 Petri 网模型在混杂系统应用中所要解决的关键问题.

参考文献(References)

- [1] 吴锋,刘文煌,郑应平,等. 混杂系统研究综述[J]. 系统工程,1997,15(2): 1-7.
(Wu F, Liu W H, Zheng Y P, et al. An overview on hybrid system research[J]. System Engineer, 1997, 15(2): 1-7.)
- [2] David R, Alla H. Hybrid Petri nets [C]. European Control Conf. Grenoble, 1991: 1472-1477.
- [3] 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.
- [4] Demongodin I, Prunet F. Batches Petri nets[C]. Proc of Computer in Design, Manufacturing and Production. Paris, 1993: 29-37.
- [5] Balduzzi F, Gúa A, Menga G. First-order hybrid Petri nets: A model for optimization and control [J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 2000, 16(14): 382-399.
- [6] Wieting R. Hybrid high-level nets[C]. Proc of the 1996 Water Simulation Conf. Coronado, 1996: 848-855.
- [7] Gribaudo M. Model-checking based on fluid petri nets for the temperature control system of the ICARO Cogenerative plant [C]. Int Conf on Computer Safety, Reliability and Security. Catania: Springer-Verlag, 2002: 273-283.
- [8] Julia S, de Oliveira F F. A p-time hybrid Petri net model for the scheduling problem of workflow management systems [C]. Systems, Man and Cybernetics. Hague: IEEE Press, 2004: 4947-4952.
- [9] Gu T L, Dong R S. Novel continuous model to approximate time Petri nets: Modeling and analysis[J]. J of Application Mathematic and Computer Science, 2005, 15(1): 141-150.
- [10] Liao W Z, Gu T L. Optimization and control of production systems based on interval speed continuous Petri nets[C]. IEEE Int Conf on Systems, Man and Cybernetics. Hawaii: IEEE Press, 2005: 1212-1217.
- (上接第 365 页)
- [22] 邹涛,李少远. 带有输出区域控制目标特性的多变量预测控制算法[J]. 控制与决策, 2005, 20(2): 203-206.
(Zou T, Li S Y. Multi-variables predictive control with output zone goals [J]. Control and Decision, 2005, 20(2): 203-206.)
- [23] Zou T, Li S Y, Ding B C. A dual-mode nonlinear model predictive control with the enlarged terminal constraint sets[J]. Acta Automatica Sinica, 2006, 32(1): 21-27.
- [24] De Schutter B, De Moor B. The extended linear complementarity problem [J]. Mathematical Programming, 1995, 71(3): 289-325.
- [25] Bemporad A, Borrelli F, Morari M. Optimal controllers for hybrid systems: Stability and piecewise linear explicit form[C]. Proc of the 39 IEEE Conf on Decision and Control. Sydney, 2000: 1810-1815.
- [26] Lazar M, Heemels W P M H, Weiland S, et al. On the stability of quadratic forms based model predictive control of constrained PWA systems [C]. Proc of American Control Conf Portland, 2005: 575-580.
- [27] Leyla Ö, Mayuresh V K. Stability analysis of a multi-model predictive control algorithm with application to control of chemical reactors[J]. J of Process Control, 2006, 16(2): 81-90.
- [28] Lazar M, Heemels W P M H, Weiland S, et al. Stabilization condition for MPC of constrained PWA systems[C]. Proc of the 43rd IEEE Conf on Decision and Control. Paradise Island, 2004: 4595-4600.
- [29] Lazar M, Heemels W P M H, Weiland S, et al. Hybrid systems: Computation and control [M]. Berlin: Springer, 2005.
- [30] Necoara I, De Schutter B, Van den Boom T J J, et al. Robustly stabilizing MPC for perturbed PWL systems [C]. Proc of the 44th IEEE Conf on Decision and Control and European Control Conf 2005. Seville: IEEE Press, 2005: 3759-3764.
- [31] Van den Boom T J J, De Schutter B. MPC for max-plus-linear systems: Closed-loop behavior and tuning [C]. Proc of the American Control Conf. Arlington, IEEE Press, 2001: 325-330.
- [32] 邹涛,李少远. 复杂系统 CMMO 问题的软约束调整与目标协调[J]. 控制与决策, 2005, 20(4): 388-391.
(Zou T, Li S Y. Constraints adjustment and objectives coordination of CMMO problem for complex system [J]. Control and Decision, 2005, 20(4): 388-391.)
- [33] Torrisi F D, Bemporad A. HYSDEL-A tool for generating computational hybrid models [J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2004, 12(2): 235-249.