

# 混杂Petri网系统中同步距离的确定及同步控制器的设计

方欢<sup>1,2</sup>, 陆阳<sup>1</sup>, 黄镇谨<sup>1</sup>, 杨娟<sup>1</sup>

(1. 合肥工业大学 计算机与信息学院, 安徽 合肥 230009; 2. 安徽理工大学 理学院, 安徽 淮南 232001)

**摘要:** 目前, 对于广义混杂Petri网的变迁公平关系和同步距离都只有极少结论, 本文对广义混杂Petri网, 给出了两个变迁(组)之间公平关系和同步距离的形式定义, 并通过修剪的不变行为状态(invariant behavior, IB)演化图给出确定变迁同步距离的方法, 得出了判定变迁公平关系的充要条件, 还证明了变迁公平关系、同步距离和修剪的IB演化图之间的联系. 本文的方法对简单离散Petri网不仅能得到已有的相关结论, 而且推广了同步距离概念适用的范围. 最后, 以混杂运输控制系统为例, 以同步距离为基础设计同步控制器, 说明同步距离在实现同步控制结构设计上的有效性.

**关键词:** 广义混杂Petri网; 变迁公平关系; 同步距离; 同步控制器; 性质判定

**中图分类号:** TP301 **文献标识码:** A

## Synchronization distance determination and synchronization controller design for hybrid Petri nets

FANG Huan<sup>1,2</sup>, LU Yang<sup>1</sup>, HUANG Zhen-jin<sup>1</sup>, YANG Juan<sup>1</sup>

(1. School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei Anhui 230009, China;

2. College of Science, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China)

**Abstract:** There are rare conclusions so far in studies of transition fairness and synchronization distance for general hybrid Petri nets. On the basis of the definition of general hybrid Petri nets, we formally define the transition fairness and the synchronization distance, and propose the method for determining the synchronization distance by using the pruned invariant behavior (IB) evolution graph. Sufficient and necessary conditions for fairness determination are developed, and the relationships among the fairness, synchronization and pruned IB evolution graph are confirmed. The proposed method not only gives existing results in simple Petri nets, but also extends the application scope in the determination of the synchronization distance. A synchronization controller is designed on the basis of the synchronization distance for a hybrid transportation control system, the performance of which demonstrates the valid application of the synchronization distance to the realization of the synchronization control

**Key words:** general hybrid Petri nets; fairness relationship of transitions; synchronization distance; synchronization controller; properties determination

### 1 引言(Introduction)

在离散事件动态系统中, 同步距离<sup>[1-3]</sup>(synchronization distance)是描述两个事件(或事件集)之间同步的一个重要的系统恒定性质, 它反映出两个变迁(变迁集)之间的相互独立程度, 不仅可以对两个(组)事件同步程度给出定量描述, 而且也可以更加精确地刻画系统动态行为.

同步距离的研究是一个NP难的问题, 在离散事件动态系统研究范畴中, 目前仅有针对部分特别子网的同步距离和加权同步距离有了比较成熟的结论<sup>[1,3]</sup>, 如条件/事件系统(C/E系统)、具有唯一的复制向量的Petri网子类、标识S-网、标识T-网、进程网等等. 在这些相关的研究中, 主要是针对两组变

迁(集)求出同步距离, 从而分析两组变迁(集)的独立程度. 目前, 利用同步距离在实际的应用中比较成功的应用主要是 workflow 模型<sup>[3-5]</sup>, 在这类研究中, 主要使用同步距离对 workflow 模型进行分析, 通过设计相关流程的同步器, 可以达到对 workflow 进行流程检验和控制的目的. 除此之外, 还未有研究将同步距离这一重要的度量指标用于工业生产控制系统的协调结构设计<sup>[6]</sup>, 若可以通过预先设定相应的同步距离, 从而对工业生产过程进行控制, 这种同步距离的应用可能比求出一些Petri网子网类的同步距离具有更大的实际应用价值.

然而, 在现代复杂的工业生产过程中, 如交通运输系统、柔性制造系统以及环境系统等, 都涉及了

大量随机事件的发生, 系统随时间的演化受到不同动力学因素的驱动, 主要包含两种变量, 即离散变量和连续变量. 这类既包含离散变量驱动, 又包含连续变量驱动的复杂系统称之为混杂系统. 混杂Petri网 (hybrid Petri net, HPN) 是混杂系统模拟和分析的有效工具之一, 由R. David和H. Alla提出<sup>[7]</sup>. 研究人员针对不同的应用领域对HPN进行了不同层次的扩展和补充, 主要有一阶混杂Petri网<sup>[8]</sup> (first-order hybrid Petri net, FOHPN)、微分Petri网<sup>[9]</sup> (differential Petri net, DPN)、间歇Petri网<sup>[10]</sup> (batch Petri net)、广义混杂Petri网<sup>[11]</sup> (general hybrid Petri net, GHPN) 等等. 将各种HPN应用于工业过程的建模, 基于模型的模拟只是研究的出发点, 通过建模达到性质分析和结构控制才是应用的最终目的, 现有的研究主要针对变迁使能语义<sup>[7-11]</sup> (enable and firing)、变迁瞬时引发速率集<sup>[7-8, 11]</sup> (instantaneous firing speed, IFS)、行为演变状态演变过程<sup>[7-11]</sup> (evolution of invariant behavior state, IBS Evolution)、状态可达性<sup>[11]</sup> (state reachability), 而针对相对复杂的性质, 如活性、公平性、有界性等等, 只出现在相对简单的连续Petri网的研究中<sup>[13-14]</sup>. 另外, 有关混杂Petri网的应用研究主要体现在建模的语义完备性以及行为状态演变过程图的构造<sup>[15-21]</sup>上, 在工业生产<sup>[18]</sup>、运输管理<sup>[15, 17, 19, 21]</sup>、物流管理<sup>[16, 20]</sup>等方面取得了比较完善的结论, 然而基于模型的控制器设计和监控器<sup>[22]</sup>还是很少涉及. 因此, 如何对混杂Petri网的活性、公平性及有界性等其他性质的研究和应用是混杂Petri网的一个创新点和难点.

本文在广义混杂Petri网定义的基础上, 给出任意两个变迁或变迁集公平关系的定义, 并通过变迁公平关系定义同步距离, 给出同步距离的求解算法; 通过与简单离散Petri网系统的已有结论相比较, 证明了本文提出的同步距离求解方法不仅可以适用已有结论, 而且拓展了同步距离的适用范围, 并通过例子进行了说明; 最后通过变迁同步距离给出变迁协调控制器的设计案例, 从而说明利用同步距离实现生产控制的有效性.

## 2 广义混杂Petri网 (General hybrid Petri nets)

### 2.1 广义混杂Petri网和网系统 (General hybrid Petri net and system)

**定义 1** 广义混杂Petri网模型为七元组<sup>[11]</sup>  $GHPN = (P, T, F, W, S_t, S_{dc}, S_f)$ , 其中:

1)  $P = P_d \cup P_c$ , 其中  $P_d, P_c$  分别表示离散库所集合和连续库所集合, 且满足  $P_d \cap P_c = \emptyset$ . 离散库所用圆圈表示, 而连续库所用双圆圈表示.

2)  $T = T_d \cup T_c$ , 其中:  $T_d = T_1 \cup T_D \cup T_E \cup T_T$  表示离散变迁集,  $T_c$  表示连续变迁集 (相应的变迁用白

盒子表示). 离散变迁集包含4种类型的离散变迁:  $T_1$  为瞬时变迁集 (相应的变迁用单横线表示),  $T_D$  为常数延时变迁集 (相应的变迁用双横线表示),  $T_E$  为指数分布延时变迁集 (相应的变迁用双白盒子表示),  $T_T$  为具有时间戳迁移的变迁集 (用带斜阴影的白盒子表示).

3)  $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$  为Petri网的库所和变迁之间的关系函数.

4)  $W$  为Petri网中边的权值函数, 满足  $(P \times T_d) \cup (T_d \times P) \rightarrow \mathbb{Z}^+$  ( $\mathbb{Z}^+$  为正整数) 和  $(P \times T_c) \cup (T_c \times P) \rightarrow \mathbb{R}^+$  ( $\mathbb{R}^+$  为正实数).

5)  $S_t : T_T \rightarrow (\mathbb{R}^+ \cup \{0\}) \times (\mathbb{R}^+ \cup \{0\})$  为时间戳迁移的时间戳函数;

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

7)  $S_f : T_c \rightarrow (\mathbb{R}^+ \cup \{0\}) \times (\mathbb{R}^+ \cup \{0\})$  为连续变迁的引发速率区间,  $\forall t_i \in T_c$ , 令  $S_f(t_i) = (V_i^{\min}, V_i^{\max})$ , 其中  $V_i^{\min} \leq V_i^{\max}$  分别为最小引发速率和最大引发速率.

在定义1中, 连续变迁的引发速率  $V_i^{\min}, V_i^{\max}$  的取值不同可以对应几种不同的连续变迁定义方式: 若  $V_i^{\min} = V_i^{\max} = \text{Const}$ , 则连续变迁对应最大速度恒定的连续Petri网 (constant continuous Petri nets, CCPN)<sup>[13]</sup> 的情形; 若  $V_i^{\min} < V_i^{\max}$ , 则连续变迁对应着区间速率连续Petri网 (interval speed continuous Petri nets, ICPN)<sup>[23]</sup> 的情形. 已经有研究证明, 最大速度可变的连续Petri网 (variable continuous Petri nets, VCPN)<sup>[14]</sup> 是 ICPN 的一个特例<sup>[23]</sup>. 因此定义1中的GHPN为一个通用的广义混杂Petri网模型, 包含了几种连续变迁的引发语义.

变迁  $t_j$  的所有输入、输出库所记为  ${}^*t_j$  和  $t_j^*$ ; 类似地, 库所  $p_i$  的所有输入、输出变迁记为  ${}^*p_i$  和  $p_i^*$ ; 变迁  $t$  的所有输入离散 (连续) 库所、输出离散 (连续) 库所分别用  ${}^{(d)}t^{(c)}$ ,  $t^{(d)}(t^{(c)})$  表示.

**定义 2** 若  $N$  是一个广义混杂Petri网, 令  $m : \begin{cases} P_d \rightarrow N, \\ P_c \rightarrow \mathbb{R}^+ \cup \{0\} \end{cases}$  为时刻  $\tau$  各库所的标识函数, 简记  $\langle N, m(\tau) \rangle$  或  $\langle N, m \rangle$  为  $\tau$  时刻具有标识  $m$  的混杂Petri网系统.

### 2.2 变迁的使能和引发语义 (Enable conditions and firing of transition)

**定义 3** (离散变迁的使能<sup>[8, 11]</sup>) 若  $\langle N, m \rangle$  为广义混杂Petri网系统,  $t \in T_d$ . 若  $\forall p \in {}^*t$  满足  $m(p) \geq W(p, t)$ , 则称变迁  $t$  为使能变迁.

**定义 4** (离散变迁的使能和引发时间区间<sup>[11]</sup>)

若 $\langle N, m \rangle$ 广义混杂Petri网系统,  $t \in T_d$ . 若变迁 $t$ 的使能时间记为 $\text{enable-time}(t)$ , 引发时间记为 $\text{firing-time}(t)$ , 则记区间 $[\text{enable-time}(t), \text{firing-time}(t)]$ 为变迁 $t$ 的使能和引发时间区间. 其中4种不同的离散变迁使能后相应的引发时间定义如下:

- 1) 若 $t \in T_I$ , 则 $\text{firing-time}(t) = \text{enable-time}(t)$ ;
- 2) 若 $t \in T_D \cup T_E$ , 则 $\text{firing-time}(t) = \text{enable-time}(t) + S_{ac}(t)$ ;
- 3) 若 $t \in T_T$ , 则 $\text{firing-time}(t) = \text{enable-time}(t) + \zeta$ ,  $\zeta \in S_t(t)$ .

**定义5** (连续变迁的强使能<sup>[8,11]</sup>)  $\langle N, m \rangle$ 广义混杂Petri网系统,  $t \in T_c$ . 若 $\forall p \in {}^{(d)}t$ 满足 $m(p) \geq W(p, t)$ , 且 $\forall p \in {}^{(c)}t$ 满足 $m(p) \geq 0$ , 则称连续变迁 $t$ 是强使能的.

**定义6** (变迁的引发<sup>[11]</sup>) 若离散变迁 $t$ 引发, 则

$$\begin{cases} m'(p) = m(p) - W(p, t), \forall p \in {}^{\cdot}t - t^{\cdot}, \\ m'(p) = m(p) + W(t, p), \forall p \in t^{\cdot} - {}^{\cdot}t. \end{cases}$$

若连续变迁 $t$ 在强使能状态下以速率 $v$ 引发, 则

$$\begin{cases} m'(p) = m(p) - W(p, t), \forall p \in ({}^{\cdot}t - t^{\cdot}) \cap P_d, \\ m'(p) = m(p) + W(t, p), \forall p \in (t^{\cdot} - {}^{\cdot}t) \cap P_d, \\ m'(p) = m(p) - v \cdot \Delta, \forall p \in ({}^{\cdot}t - t^{\cdot}) \cap P_c, \\ m'(p) = m(p) + v \cdot \Delta, \forall p \in (t^{\cdot} - {}^{\cdot}t) \cap P_d, \end{cases}$$

其中:  $\Delta$ 为连续变迁 $t$ 引发的时间长度,  $v \in [V_i^{\min}, V_i^{\max}]$ .

分别引入记号来表示离散变迁和连续变迁的引发: 记 $\text{fire}(t) = \{t, [\zeta_1, \zeta_2]\}$ 为离散变迁 $t$ 的引发,  $\zeta_1 = \text{enable-time}(t)$ ,  $\zeta_2 = \text{firing-time}(t)$ ; 记 $\text{fire}(t) = \{t, v, [\zeta_1, \zeta_2]\}$ 为连续变迁 $t$ 的引发,  $\zeta_1, \zeta_2$ 分别为连续变迁 $t$ 引发的开始时间和引发结束时间,  $v$ 是变迁 $t$ 的引发速率.

**定义7** 若 $\langle N, m \rangle$ 广义混杂Petri网系统, 顺序引发变迁序列 $\sigma = \{\text{fire}(t_{i1}), \text{fire}(t_{i2}), \dots, \text{fire}(t_{ij}), \dots, \text{fire}(t_{ik})\}$  ( $k \geq 1$ ) 经过时间 $\tau_{k-1}$ 后, 系统的标识变为 $m'$ , 则记 $m(\tau_0)[\sigma > m'(\tau_{k-1})]$ ,  $\sharp(t_{ij}/\sigma)$ 为变迁 $t_{ij}$ 在 $\sigma$ 中出现的次数.

值得注意的是, 对于连续变迁 $t$ , 若其两次引发 $\text{fire}(t) = \{t, v_1, [\zeta_1, \zeta_2]\}$ 和 $\text{fire}(t) = \{t, v_2, [\zeta_3, \zeta_4]\}$ 满足条件 $((\zeta_2 = \zeta_3) \vee (\zeta_1 = \zeta_4)) \wedge (v_1 = v_2)$ , 则两次引发须合并成一次引发 $\text{fire}(t) = \{t, v_1, [\zeta_1, \zeta_4]\}$ 或 $\text{fire}(t) = \{t, v_1, [\zeta_3, \zeta_2]\}$ . 若 $\sigma$ 中出现了引发变迁 $\{t, v_1, [\zeta_1, \zeta_2]\}$ 和 $\{t, v_2, [\zeta_3, \zeta_4]\}$ 满足 $((\zeta_2 = \zeta_3) \vee (\zeta_1 = \zeta_4)) \wedge (v_1 = v_2)$ , 则变迁 $t$ 的这两次引发只能算一次, 即 $\sharp(t, \sigma) = 1$ .

**定义8** 若 $\langle N, m \rangle$ 广义混杂Petri网系统,  $|T| = p$ . 向量 $X = [x_1, x_2, \dots, x_p]$ 称为 $\langle N, m \rangle$ 的变

迁使能向量, 当且仅当在时刻 $\tau$ 满足条件 $(m(\tau)[t_i > \Leftrightarrow x_i = 1]) \wedge ((-m(\tau)[t_i >] \Leftrightarrow x_i = 0))$ , 其中 $i \in [1, p]$ .

### 3 变迁(组)之间的公平关系(Fairness relationship between transitions (or transition sets))

#### 3.1 公平性和同步距离的定义(Definitions of fairness and synchronization distance)

在离散事件驱动和普通Petri网系统中, 研究变迁(组)的公平关系主要是建立在变迁之间发生次数的基础上, 而且一般都不考虑时间因素<sup>[1-3]</sup>, 但是在混杂Petri网系统中, 不仅需要考虑到时间因素, 还要考虑变迁的类型(离散变迁和连续变迁并存), 因此已有的离散Petri网系统中的公平性分析方法已不再适用, 因此本节主要给出混杂Petri网系统中变迁(组)公平关系的定义及其相关的性质判定方法.

**定义9** 若 $\langle N, m \rangle$ 广义混杂Petri网系统, 变迁组 $T_1 \subseteq T, T_2 \subseteq T$ 且 $T_1 \cap T_2 = \emptyset$ . 若 $\forall \sigma : m(\tau_{i-1})[\sigma > m'(\tau_{k-1})]$ , 其中 $\sigma = \{\text{fire}(t_{i1}), \text{fire}(t_{i2}), \dots, \text{fire}(t_{ij}), \dots, \text{fire}(t_{ik})\}$  ( $k \geq 1$ )且 $t_{ij} \notin T_2$  ( $j \in [1, k]$ ), 满足条件 $\forall t_i : m'(\tau_{k-1})[t_i > \Rightarrow t_i \in T_2]$ , 则称变迁组 $T_1$ 依赖 $T_2$ , 且依赖系数 $k_1 = \min_{\sigma} \sum_{\alpha} \sharp(t_{ij}/\sigma)$ , 其中:  $\alpha : j \in [1, k], t_{ij} \in T_1$ .

**定义10** 若 $\langle N, m \rangle$ 广义混杂Petri网系统, 变迁组 $T_1 \subseteq T, T_2 \subseteq T$ 且 $T_1 \cap T_2 = \emptyset$ . 若变迁组 $T_1$ 依赖 $T_2$ , 且变迁组 $T_2$ 也依赖 $T_1$ , 则称变迁组 $T_1$ 和 $T_2$ 是公平的.

**定义11** 若 $\langle N, m \rangle$ 广义混杂Petri网系统, 若 $t_i \in T_c : m(\tau_{i-1})[t_i > m(\tau_i)]$ , 则称 $NS(t_i, \tau_{i-1}, \tau_i) = \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} v(t_i)dt$ 为连续变迁 $t_i$ 在时间段 $[\tau_{i-1}, \tau_i]$ 上的激发量, 其中 $v(t_i)$ 为 $t_i$ 的变迁引发速率.

**定义12** 若 $\langle N, m \rangle$ 广义混杂Petri网系统, 变迁组 $T_1 \subseteq T, T_2 \subseteq T$ 且 $T_1 \cap T_2 = \emptyset$ , 则变迁组 $T_1$ 和 $T_2$ 的同步距离为 $sd(T_1, T_2)$ :

1)  $sd(T_1, T_2) = \infty$ , 若变迁组 $T_1$ 和 $T_2$ 不是公平的;

2)  $sd(T_1, T_2) = \max\{k_1, k_2\}$ , 其中:  $k_1$ 为变迁组 $T_1$ 依赖 $T_2$ 的依赖系数,  $k_2$ 为变迁组 $T_2$ 依赖 $T_1$ 的依赖系数.

#### 3.2 公平性的判定和同步距离的计算算法 (Determination of fairness and computation algorithm of synchronization distance)

为了计算变迁组 $T_1$ 和 $T_2$ 的同步距离 $sd(T_1, T_2)$ , 利用修剪的不变行为状态(invariant behavior, IB)演化图可以更直观地显示变迁公平关系的表象特征及相应的同步距离计算.

关于IB演化图的计算, 参见文献[7, 11]的计算步骤, 在这里主要提出修剪的IB演化图概念.

**定义 13** 若  $\langle N, m \rangle$  为广义混杂Petri网系统, 变迁组  $T_1, T_2$  是两个变迁子集,  $T_1 \cap T_2 = \emptyset$ . 称删除  $\forall t \in T_2$  的边而形成的IB演化图为关于  $T_2$  的修剪IB演化图.

**算法** 混杂Petri网系统中同步距离求解算法.

输入: 广义混杂Petri网系统  $\langle N, m \rangle$ , 变迁组  $T_1 \subseteq T, T_2 \subseteq T$  且  $T_1 \cap T_2 = \emptyset$ .

输出:  $sd(T_1, T_2)$ .

**步骤:**

**Step 1** 按照文献[7]的IB演化图算法求出  $\langle N, m \rangle$  进行状态演变的计算, 其中状态转变的弧标注使用  $\text{fire}(t) = \{t, [\zeta_1, \zeta_2]\}$  (离散变迁  $t$  的引发), 或  $\text{fire}(t) = \{t, v, [\zeta_1, \zeta_2]\}$  (连续变迁  $t$  的引发) 表示, 得到IB演化图  $E$ ;

**Step 2** 删除  $\forall t \in T_2$  的弧标注, 得到关于  $T_2$  的修剪IB演化图  $E_1$ ;

**Step 3** 除  $\forall t \in T_1$  的弧标注, 得到关于  $T_1$  的修剪IB演化图  $E_2$ ;

**Step 4** 按照时间区间的连续性, 求得  $E_1$  中变迁  $T_1$  出现次数最多的变迁序列  $\sigma_1$ , 和  $E_2$  中变迁  $T_2$  出现次数最多的变迁序列  $\sigma_2$ ;

**Step 5**  $sd(T_1, T_2) = \max\{|\sigma_1|, |\sigma_2|\}$ , 其中  $|\cdot|$  表示 “.” 的长度;

**Step 6** 结束.

**定义 14** 设  $\langle N, m \rangle$  为广义混杂Petri网系统, 变迁组  $T_1 \subseteq T, T_2 \subseteq T$  且  $T_1 \cap T_2 = \emptyset$ . 若关于  $T_2$  的修剪IB演化图在  $\tau_{k-1}$  时刻的状态  $m(\tau_{k-1})$  满足条件  $\neg \exists t \in T - T_2 : m(\tau_{k-1})[t >$ , 则称  $m(\tau_{k-1})$  为死终态型.

**定义 15** 设  $\langle N, m \rangle$  为广义混杂Petri网系统, 变迁组  $T_1 \subseteq T, T_2 \subseteq T$  且  $T_1 \cap T_2 = \emptyset$ , 关于  $T_2$  的修剪IB演化图中两个IB状态  $m(\tau_{k-1})$  和  $m(\tau_{i-1})$  是两个等价状态, 当且仅当以下3个条件成立:

- 1)  $m(\tau_{k-1})(\cdot T_1) = m(\tau_{i-1})(\cdot T_1)$ ;
- 2) 变迁集  $T_X = T - T_1 - T_2$  在时刻  $\tau_{k-1}$  和  $\tau_{i-1}$  下的使能向量  $X_{T_X}(\tau_{k-1}) = X_{T_X}(\tau_{i-1})$ ;
- 3) 变迁集  $T_1$  中所有连续变迁的引发速率在时刻  $\tau_{k-1}$  和  $\tau_{i-1}$  下相等, 即  $v(\tau_{k-1}) = v(\tau_{i-1})$ .

**定理 1**  $\langle N, m \rangle$  为广义混杂Petri网系统, 若关于  $T_2$  的修剪IB演化图中存在两个IB状态  $m(\tau_{k-1})$  和  $m(\tau_{i-1})$  的一条强连通路, 则  $\langle N, m \rangle$  关于  $T_2$  的修剪IB演化图一定不是死终态型.

**定理 2**  $\langle N, m \rangle$  为广义混杂Petri网系统, 若关于  $T_2$  的修剪IB演化图中演化图中存在回路, 则至

少存在两个IB状态  $m(\tau_{k-1})$  和  $m(\tau_{i-1})$  等价.

定理1和定理2的证明都可以从定义14和定义15直接得出, 证明过程从略.

**定义 16** 设  $\langle N, m \rangle$  为广义混杂Petri网系统, 变迁组  $T_1 \subseteq T, T_2 \subseteq T$  且  $T_1 \cap T_2 = \emptyset$ , 关于  $T_2$  的修剪IB演化图中两个IB状态  $m(\tau_{k-1})$  和  $m(\tau_{i-1})$  是两个等价状态, 则称  $m(\tau_{k-1})$  为活终态型.

**定义 17** 设  $\langle N, m \rangle$  为广义混杂Petri网系统, 变迁组  $T_1 \subseteq T, T_2 \subseteq T$  且  $T_1 \cap T_2 = \emptyset$ , 关于  $T_2$  的修剪IB演化图在任意时刻  $\tau_{k-1}$  的状态  $m(\tau_{k-1})$  既不属于死终态型, 也不属于活终态型, 则称  $m(\tau_{k-1})$  为无穷态型.

**定理 3**  $\langle N, m \rangle$  为广义混杂Petri网系统, 变迁组  $T_1 \subseteq T, T_2 \subseteq T$  且  $T_1 \cap T_2 = \emptyset$ , 关于  $T_2$  的修剪IB演化图一定是死终态型、活终态型和无穷态型中的一种.

**定理 4**  $\langle N, m \rangle$  为广义混杂Petri网系统, 变迁组  $T_1 \subseteq T, T_2 \subseteq T$  且  $T_1 \cap T_2 = \emptyset$ , 若关于  $T_2$  的修剪IB演化图  $E_1$  和关于  $T_1$  的修剪IB演化图  $E_2$  都属于死终态型, 则  $sd(T_1, T_2) = \lfloor \max\{\text{state}(E_1), \text{state}(E_2)\} / 2 \rfloor$ , 其中  $\text{state}(E_i)$  ( $i = 1, 2$ ) 为  $E_i$  中边  $t \in T_i$  可达状态的个数, 否则  $sd(T_1, T_2) = \infty$ .

**证** 首先, 当关于  $T_2$  的修剪IB演化图  $E_1$  和关于  $T_1$  的修剪IB演化图  $E_2$  都属于死终态型时, 根据定义9和定义14可知,  $T_1$  对  $T_2$  的依赖系数为  $E_1$  中边  $t \in T_1$  状态的个数, 同时  $T_2$  对  $T_1$  的依赖系数为  $E_2$  中边  $t \in T_2$  状态的个数, 由于在状态演化图中, 一条边关联两个状态, 因此根据定义12可知, 这种情形下两组变迁集的同步距离为  $sd(T_1, T_2) = \lfloor \max\{\text{state}(E_1), \text{state}(E_2)\} / 2 \rfloor$ . 同时由于两者的修剪演化图属于死终态型, 因而两个演化图中的状态个数一定有限, 从而证明了  $sd(T_1, T_2) < \infty$ .

其次, 若关于  $T_2$  的修剪IB演化图  $E_1$  和关于  $T_1$  的修剪IB演化图  $E_2$  不都属于死终态型时, 此时主要以下情形需要考虑:

1)  $E_1$  和  $E_2$  中有一个为死终态型, 另一个要么是活终态型, 要么是无穷态型. 不妨假设  $E_1$  为死终态型, 而  $E_2$  为非死终态型. 根据定义14, 16和17易知,  $T_1$  依赖于  $T_2$ , 但  $T_2$  不依赖于  $T_1$ , 则  $sd(T_1, T_2) = \infty$ ;

2)  $E_1$  和  $E_2$  中任何一个都不是死终态型, 根据根据定义16和17易知,  $T_1$  不依赖于  $T_2$ , 且  $T_2$  不依赖于  $T_1$ , 则  $sd(T_1, T_2) = \infty$ . 证毕.

定理4将同步距离和可达性结合在一起进行分析, 而混杂Petri网系统的可达性已经在相关文献[7, 11-14]中已经具有成熟的求解思路, 因而使得同步距离的求解思路更加简单.

**定理 5**  $\langle N, m \rangle$  为广义混杂Petri网系统, 变迁组  $T_1 \subseteq T, T_2 \subseteq T$  且  $T_1 \cap T_2 = \emptyset$ . 变迁组  $T_1$  和  $T_2$  处于公平关系, 当且仅当  $sd(T_1, T_2) < \infty$ .

**证** 从定义10和定理3可以很容易得出, 证明从略.

**4 同步距离求解式适用范围范围的讨论(Discussion about the application scope of synchronization distance)**

广义混杂Petri网系统是对Petri网形式的一般形式化表示, 从定义1可以看出, 不带时间因素的离散Petri网系统、P-time的时间Petri网以及T-time的时间Petri网、连续Petri网都是广义混杂Petri网的特例. 因此, 对于同步距离的求解, 也希望在本文中定义的同步距离求解方法可以适用于简单的离散Petri网, 即用本文的求解方法得到的同步距离应该与简单离散Petri网的已有结论具备一致性.

**定理 6<sup>[1]</sup>** 设  $\Sigma = (S, T, F; M_0)$  为一个Petri网,  $t_1, t_2 \in T$ , 那么  $t_1$  和  $t_2$  之间的同步距离  $sd(t_1, t_2)$  计算规则如下:

- 1)  $sd(t_1, t_2) = \infty$ , 当  $t_1$  和  $t_2$  在  $\Sigma$  中不处于公平关系;
- 2)  $sd(t_1, t_2) = \max\{\#(t_j/\sigma) \mid \exists M \in R(M_0) : M[\sigma > \wedge (\#(t_i/\sigma) = 0) \wedge (i, j \in \{1, 2\})] (i \neq j)\}$ , 当  $t_1$  和  $t_2$  在  $\Sigma$  中处于公平关系;

由定理6可知, 这个同步距离的定义含义为: 只需要找出其中一个变迁不发生的情况下, 另一个变迁可以发生的最大次数即可. 推广到一般情形, 可以得出两个变迁组  $T_1$  和  $T_2$  之间的同步距离求解方法:

**定理 7** 设  $\Sigma = (S, T, F; M_0)$  为一个Petri网,  $T_1 \subseteq T, T_2 \subseteq T$  且  $T_1 \cap T_2 = \emptyset$ , 则  $T_1$  和  $T_2$  之间的同步距离  $sd(T_1, T_2)$  计算规则如下:

- 1)  $sd(T_1, T_2) = \infty$ , 当  $T_1$  和  $T_2$  在  $\Sigma$  中不处于公平关系;
- 2)  $sd(T_1, T_2) = \max\{\#(t_k/\sigma)_{t_k \in T_j} \mid \exists M \in R(M_0) : M[\sigma > \wedge (\#(t_m/\sigma)_{t_m \in T_i} = 0) \wedge (i, j \in \{1, 2\})] (i \neq j)\}$ , 当  $T_1$  和  $T_2$  在  $\Sigma$  中处于公平关系;

**证** 首先, 根据一般Petri网的公平性定义, 若  $T_1$  和  $T_2$  在  $\Sigma$  中处于公平关系, 则存在正整数  $k$ , 对于  $\forall M \in R(M_0)$  和  $\sigma \in T^* : M[\sigma >$  都有式(1)成立:

$$\sum_{t \in T_i} \#(t/\sigma) = 0 \rightarrow \sum_{t \in T_j} \#(t/\sigma) \leq k, \quad (1)$$

$$i, j \in \{1, 2\} \wedge i \neq j,$$

因此,  $T_1$  和  $T_2$  在  $\Sigma$  中处于公平关系, 结论明显成立.

反之, 若  $T_1$  和  $T_2$  在  $\Sigma$  中不处于公平关系, 则对于任意正整数  $k$ , 都  $\exists M \in R(M_0)$  和  $\sigma \in T^* : M[\sigma >$  满

足  $\sum_{t \in T_i} \#(t/\sigma) = 0 \rightarrow \sum_{t \in T_j} \#(t/\sigma) > k$ , 其中  $i, j \in \{1, 2\} \wedge i \neq j$ . 由于  $k$  的任意性, 从可达图的观点来看待上述条件, 则可达图上可表现这样的特征, 即不引发  $T_i$  中的任何变迁, 在可达图中总能找到一个变迁引发序列使得  $\sum_{t \in T_j} \#(t/\sigma) > k$ , 因此  $sd(t_1, t_2) = \infty$ .

由此, 命题得证.

**定理 8** 定理7是定理4的一个特例.

**证** 首先, 定理4的适用范围是广义混杂Petri网 GHPN(general hybrid Petri net), 而定理7的适用范围是简单Petri网 SPN(simple Petri net), 根据定义1, 若GHPN中变迁只含有即时离散变迁  $T_1$ , 库所只有离散库所  $P_d$ , 所有弧的权重均为1, 则此时的GHPN退化成一个SPN.

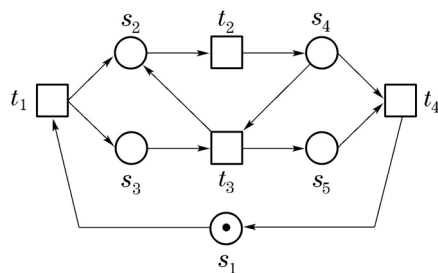
根据定理4的同步距离计算方法, 若关于  $T_2$  的修剪IB演化图  $E_1$  和关于  $T_1$  的修剪IB演化图  $E_2$  都属于死终态型, 则表示两个变迁组  $T_1$  和  $T_2$  满足条件: 存在正整数  $k$ , 对于  $\forall M \in R(M_0)$  和  $\sigma \in T^* : M[\sigma >$  都有  $\sum_{t \in T_i} \#(t/\sigma) = 0 \rightarrow \sum_{t \in T_j} \#(t/\sigma) \leq k, i, j \in \{1, 2\} \wedge i \neq j$  成立, 即两者属于公平关系, 定理4的计算规则与定理7的计算规则(式(2)和(3)所示)都表示  $T_i$  中的变迁不发生时,  $T_j$  中的变迁最多发生的次数, 因此两者的求解结果一致.

$$sd(T_1, T_2) = \lfloor \max\{\text{state}(E_1), \text{state}(E_2)\} / 2 \rfloor, \quad (2)$$

$$sd(T_1, T_2) = \max\{\#(t_k/\sigma)_{t_k \in T_j} \mid \exists M \in R(M_0) : M[\sigma > \wedge (\#(t_m/\sigma)_{t_m \in T_i} = 0) \wedge (i, j \in \{1, 2\})] (i \neq j)\}. \quad (3)$$

其次, 当关于  $T_2$  的修剪IB演化图  $E_1$  和关于  $T_1$  的修剪IB演化图  $E_2$  不都属于死终态型时, 不妨假设  $E_1$  不属于死终态型, 按照修剪IB演化图的定义(定义13), 则对于任意正整数  $k$ , 都  $\exists M \in R(M_0)$  和  $\sigma \in T^* : M[\sigma >$  满足  $\sum_{t \in T_i} \#(t/\sigma) = 0 \rightarrow \sum_{t \in T_j} \#(t/\sigma) > k$ , 其中  $i, j \in \{1, 2\} \wedge i \neq j$ . 则  $T_1$  和  $T_2$  肯定不属于公平关系, 这种情况下  $sd(t_1, t_2) = \infty$ , 定理4和定理7的求解结果一致.

综合以上, 命题得证.



(a) 一个简单网系统  $\Sigma$

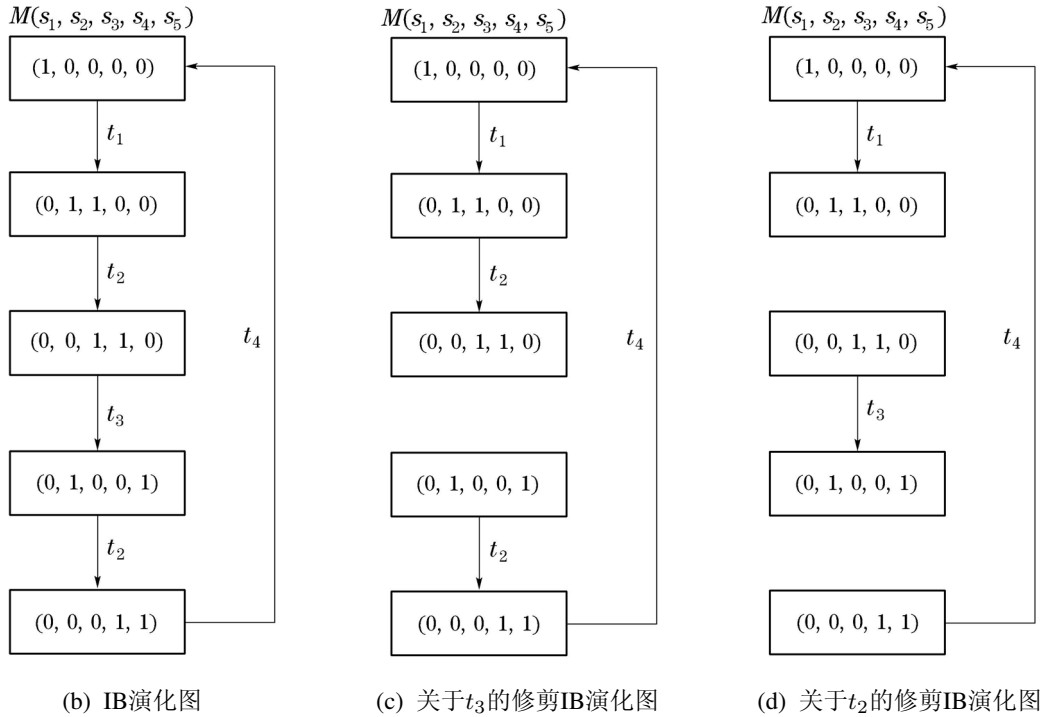


图 1 一个SPN的网系统 $\Sigma$ 的修剪IB演化图

Fig. 1 A simple Petri net system and its pruned IB evolution graph

图1<sup>[1]</sup>给出了一个SPN网系统 $\Sigma$ 按照定义13得到的修剪IB演化图, 从中可看出, 变迁 $t_2$ 和 $t_3$ 属于公平关系(因为关于 $t_2$ 和 $t_3$ 的修剪IB演化图都是死终态型), 根据定理4,  $sd(t_2, t_3) = \lfloor \max\{5, 2\} / 2 \rfloor = 2$ , 这与文献[1]求精确加权同步距离也是一致的。

综上所述, 由于定理6和定理7是定理4的特例, 从而保证了同步距离的概念在GHPN和SPN中的连续性, 由于在其他类型的Petri网中还未见同步距离的一般式, 但是基于可达树概念的同步距离求解是同步距离概念的出发点, 因此也适用于其他任意类型的Petri网形式。

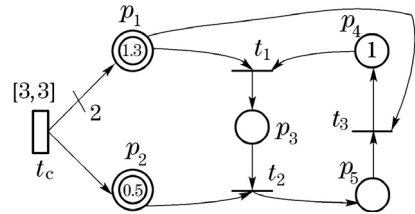
### 5 应用案例及同步控制器的设计(Case study and the design of synchronization controller)

#### 5.1 混杂系统的同步距离求解举例(Example of synchronization distance solving for hybrid system)

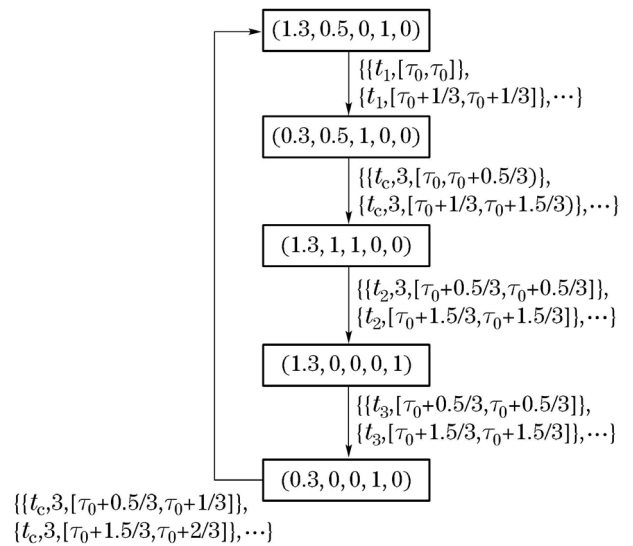
以文献[12]中出现的一个典型混杂Petri网系统为例(如图2(a)所示), 其对应的IB行为演化图为图2(b)。根据算法1, 按照时间顺序可以将变迁序列进行整理, 则可得出

$$sd(t_i, t_j) = 1, \quad sd(t_c, t_j) = \infty,$$

其中  $i, j \in \{1, 2, 3\} \wedge i \neq j$ 。



(a) 文献 [12]中的混杂Petri网系统



(b) 对应的IB演化图

图 2 文献[12]中的混杂Petri网系统及其IB演化图

Fig. 2 A hybrid Petri net system in [12] and its IB evolution graph

### 5.2 同步控制器设计应用案例(Case study of synchronization controller design)

以井下机车运输调度系统为例,说明本文提出的同步距离概念如何应用到实际的生产过程的控制器设计中.图3给出了某矿井底巷道运输简易图,其中标号1-9表示运输区段,CH1表示井底车场,CH2,CH3表示采区车场,X1,X2,X3,X4,X5是指示信号灯.在井下机车运输系统中,主要有两类需要考虑的问题:1)如何控制采区的开采速度,使得每辆运输机车在采区无需等待即可装车运输?2)如何控制不同采区方向的机车发车频率,使得各个采区的开采工作能够协调?

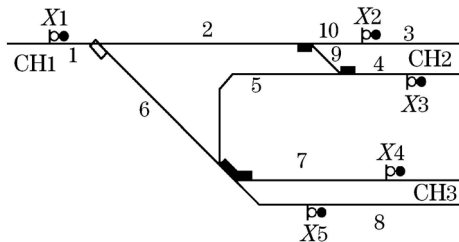
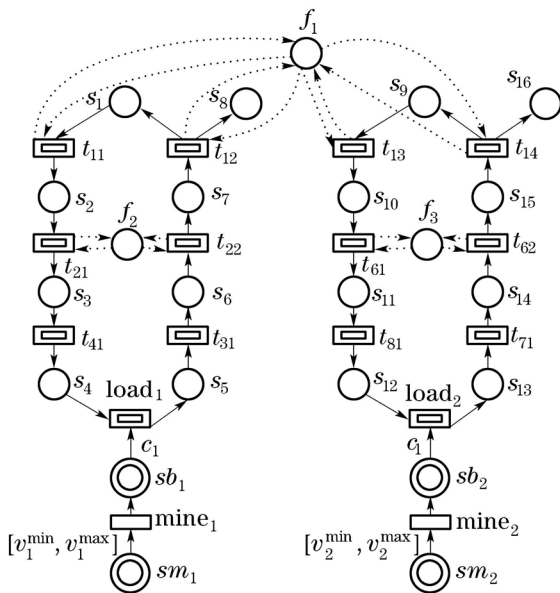


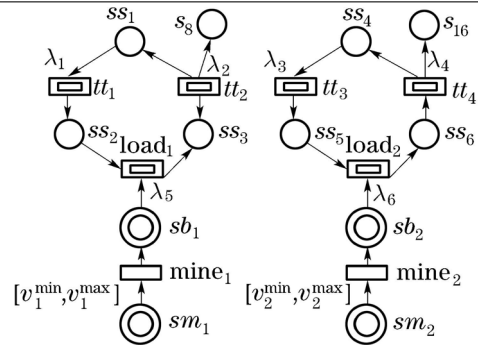
图3 一个简易运输巷道图

Fig. 3 A simple transportation route graph

假设每辆机车的运输容量为 $c_1$ ,机车通过每个区段的时间与该区段的长度成正比,服从负指数分布,采区的开采速度 $v = [v^{\min}, v^{\max}]$ 是一个区间速率.首先对运输调度建立逻辑模型,如图4(a)所示,其中库所 $s_1 - s_{16} \in P_d$ 表示区段或车场缓冲区,连续库所 $sb_i, sm_i (i = 1, 2)$ 表示采区缓存和采区煤储量;离散变迁 $t_{ij} \in T_E (i \in [1, 8] \wedge j \in [1, 4] \wedge i, j \in \mathbb{Z}^+)$ 表示通过区段 $i$ ,连续变迁 $mine_1, mine_2$ 表示两个采区的开采动作;库所 $f_i (i \in \{1, 2, 3\})$ 及其相关联的弧(点线)表示对公用区段的互斥使用.



(a) 混杂Petri网模型



(b) 简化后的宏模型

图4 机车运输调度逻辑混杂Petri网模型及简化后的宏模型

Fig. 4 Logic hybrid Petri net model of transportation

dispatching and its simplified macro model

在图4(a)中,将机车对区段的竞争使用部分进行抽象,得到简化后的宏模型(图4(b)),其中参数 $\lambda_i (i \in \{1, 2, 3, 4\})$ 表示两个机车到达采区和离开采区回到车场平均时间(服从参数为 $\lambda_i$ 的指数分布),参数 $\lambda_i (i \in \{5, 6\})$ 表示机车1,2在采区装载的平均时间,这些时间参数值的设定需要利用资源调度模型的优化算法进行,这部分内容将另文描述.

1) 利用同步距离控制采区的开采速度,保证机车在采区的零等待时间.

以图4(b)的左半部分机车1的调度运行为例,离散变迁 $tt_1$ 是机车从井底车场出发,连续变迁 $mine_1$ 表示采区的开采动作.设库所 $ss_1$ 和 $sm_1$ 的标识为 $m(ss_1)$ 和 $m(sm_1)$ (两者均大于0),由于这部分模型中只存在一个简单回路,因此显而易见 $sd(tt_1, mine_1) = \max\{1, m(ss_1)\}$ ,其中1表示连续变迁的一次激发(由于变迁 $mine_1$ 一直处于强使能状态,直至 $m(sm_1) = 0$ ),激发的时间长度 $\Delta t$ 取决于 $m(sm_1) - \int_t^{t+\Delta t} v dt = 0$ ( $t$ 为某一常数时间),可见这个同步距离对于机车发车动作与开采动作之间的协调没有控制作用.

为此,假定每当采区开采量处于一个阈值范围内时,才进行发车动作,记这个阈值范围为 $[L^{\min}, L^{\max}]$ (阈值范围的计算取决于机车调度周期).对图4(b)添加了控制库所的控制Petri网模型如图5所示,其中库所 $con_i (i \in \{1, 2, 3, 4\})$ 是控制库所,相关联的弧(虚线表示)为控制弧,从图5可以看出此时 $sd(tt_1, mine_1) = 1$ ,变迁的发生以彼此为条件,从而很好地实现了同步控制.

2) 利用同步距离控制不同机车之间的发车动作.

在实际的生产过程中,有时候为了实现各个采区开采行为的公平性,因而对发往不同采区的机车的调度也存在一定的限制,如两个采区的发车

次数相差不差过 $N(N \in \mathbb{Z}^+)$ 次. 对于这样的需求图4(b)是无法实现的, 因为 $sd(tt_1, tt_3) = \infty$ . 同样可以通过添加控制库所的方法实现 $sd(tt_1, tt_3) = N$ , 如图6所示, 其中控制库所为 $con_i(i \in \{5, 6\})$ , 初始标识为 $N$ . 添加了控制库所后 $sd(tt_1, tt_3) = N$ , 从而实现了不同机车发车次数的限制问题.

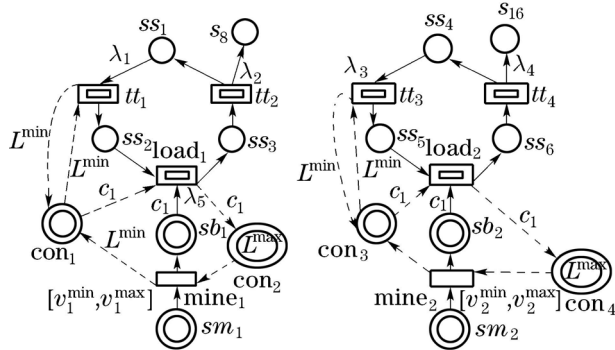


图 5 实现了机车运输与开采行为同步控制的Petri网模型  
Fig. 5 Petri net model realizing synchronic control between transporting and mining behaviors

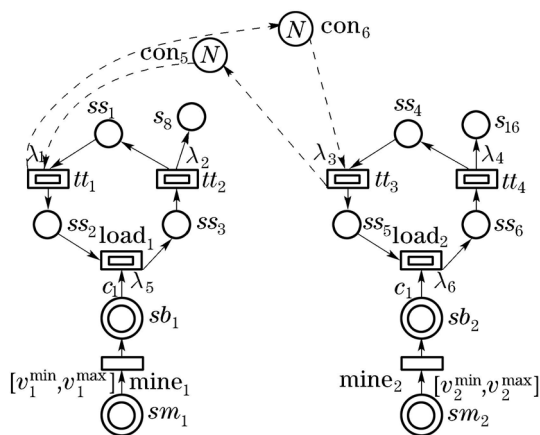


图 6 实现了不同机车运输次数公平性的同步控制的Petri网模型  
Fig. 6 Petri net model realizing synchronic transporting times control between different locomotives

## 6 总结(Conclusions)

针对广义混杂Petri网的变迁公平关系以及同步距离未有研究结论的情况, 本文从广义混杂Petri网的定义出发, 给出两个变迁(组)公平关系以及同步距离的形式化定义, 证明了变迁组公平关系判断的充要条件. 另外, 在IB演化图的基础上, 给出广义混杂Petri网系统中变迁组同步距离的求解算法, 证明该求解算法拓展了一般简单离散Petri网系统中同步距离求解方法的已有结论. 最后, 通过两个典型的例子说明了同步距离的求解过程, 并以混杂交通运输控制系统中的控制需求为案例, 说明利用同步距离设计同步器方法的有

效性. 本文针对广义混杂Petri网的同步距离的研究, 拓展了同步距离在Petri网系统中的应用和控制结构设计的作用, 对广义混杂Petri网的研究拓展了研究空间, 下一步将考虑将同步器设计的内容融入到大系统的设计过程当中, 实现其软件架构框架.

## 参考文献(References):

- [1] 吴哲辉. Petri网导论 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 285 – 300. (WU Zhehui. *Introduction of Petri Nets* [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2006: 285 – 300.)
- [2] 王丽丽, 吴哲辉, 方欢. 标识T-网中同步距离的计算 [J]. 计算机科学, 2008, 35(10): 100 – 103,169. (WANG Lili, WU Zhehui, FANG Huan. Computation of synchronic distance in marked T-net [J]. *Computer Science*, 2008, 35(10): 100 – 103,169.)
- [3] 袁崇义. Petri网原理与应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 120 – 137. (YUAN Chongyi. *Theory and Application of Petri Nets* [M]. Beijing: Publish House of Electronics Industry, 2005: 120 – 137.)
- [4] 孙满囤, 李俊山, 韩先锋. 基于扩展计算网的分层动态网格 workflow 研究 [J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(3): 444 – 447. (SUN Mandun, LI Junshan, HAN Xianfeng. Layered dynamic grid workflow application based on extended computing net [J]. *System Engineering and Electronics*, 2006, 28(3): 444 – 447.)
- [5] 闫哲, 赵文, 袁崇义, 等. 基于同步网的工作流过程变动问题研究 [J]. 电子学报, 2006, 34(2): 226 – 231. (YAN Zhe, ZHAO Wen, YUAN Chongyi, et al. Research on workflow process change based on synchronization net [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2006, 34(2): 226 – 231.)
- [6] 洪奕光, 翟超. 多智能体系统动态协调与分布式控制设计 [J]. 控制理论与应用, 2011, 28(10): 1506 – 1512. (HONG Yiguang, ZHAI Chao. Dynamic coordination and distributed control design of multi-agent systems [J]. *Control Theory & Applications*, 2011, 28(10): 1506 – 1512.)
- [7] DAVID R, ALLA H. *Discrete, Continuous, and Hybrid Petri Nets*(Second edition) [M]. Beilin: Springer, 2010.
- [8] 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(14): 382 – 399.
- [9] DEMONGODIN I, KOUSSOULA S N T. Differential Petri nets: representing continuous systems in discrete event world [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1998, 43(4): 573 – 579.
- [10] DEMONGODIN I, AUDRY N, PRUNET F. Batches Petri nets [C] // *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. Le Touquet, France: IEEE, 1993: 607 – 616.
- [11] 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 Weizhi, GU Tianlong. Modeling and control for hybrid system based on general hybrid Petri nets [J]. *Control and Decision*, 2007, 22(4): 366 – 372.)
- [12] 廖伟志, 古天龙. 一种新的混杂Petri网可达性分析方法 [J]. 小型微型计算机系统, 2009, 30(8): 1651 – 1655. (LIAO Weizhi, GU Tianlong. Novel analysis method for reachability of hybrid Petri nets [J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2009, 30(8): 1651 – 1655.)
- [13] 赵义军, 王培良. 最大速度恒定的连续Petri网(CCPN)的性质及判定方法 [J]. 系统工程学报, 2000, 15(1): 107 – 111. (ZHAO Yijun, WANG Peiliang. Properties and determining methods of constant continuous Petri net(CCPN) [J]. *Journal of Systems Engineering*, 2000, 15(1): 107 – 111.)



- [14] 叶志宝, 赵义军, 董焕河. 最大速度变化的连续Petri网(VCPN)的动态演变及性质判定 [J]. 计算机研究与发展, 2002, 39(3): 330 – 334.  
(YE Zhibao, ZHAO Yijun, DONG Huanhe. Dynamic development and properties determination for variable continuous Petri net(VCPN) [J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2002, 39(3): 330 – 334.)
- [15] 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(工学版), 2007, 41(6): 930 – 933.  
(LU Yanjun, DAI Huaping. Hybrid Petri net modeling for urban traffic network [J]. *Journal of Zhejiang University(Engineering Science)*, 2007, 41(6): 930 – 933.)
- [16] 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.)
- [17] 叶阳东, 程少芬, 王旭, 等. 基于一种混合Petri网的列车运行系统的建模与分析 [J]. 铁道学报, 2009, 31(5): 42 – 49.  
(YE Yangdong, CHENG Shaofen, WANG Xu, et al. Modeling and analyzing of train operation systems based on a kind of hybrid Petri net [J]. *Journal of The China Railway Society*, 2009, 31(5): 42 – 49.)
- [18] WU N Q, CHU F, CHU C B, et al. Hybrid Petri net modeling and schedulability analysis of high fusion point oil transportation under tank grouping strategy for crude oil operation in refinery [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 2010, 40(2): 159 – 175.
- [19] ANGELA D F, DAVIDE G, NICOLA S. Urban traffic control structure based on hybrid Petri nets [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2004, 5(4): 224 – 237.
- [20] MARIAGRAZIA D, FANTI M P, GIORGIO I, et al. A first-order hybrid Petri net model for supply chain management [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2009, 6(4): 744 – 758.
- [21] FATEH K, SAID H, ABDELLAH E M. A hybrid Petri nets-based simulation model for evaluating the design of railway transit stations [J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2007, 15: 935 – 969.
- [22] 王飞, 罗继亮. 连续计时离散事件系统监控及其客观性 [J]. 控制理论与应用, 2010, 27(12): 1731 – 1736.  
(WANG Fei, LUO Jiliang. Supervisory control for continuous-time discrete-event systems and its observability [J]. *Control Theory & Application*, 2010, 27(12): 1731 – 1736.)
- [23] 廖伟志, 古天龙, 王汝凉. 区间速率连续Petri网模型行为分析研究 [J]. 小型微型计算机系统, 2006, 27(8): 1490 – 1494.  
(LIAO Weizhi, GU Tianlong, WANG Ruliang. Behavior analysis of interval speed continuous Petri nets [J]. *Mini-Micro Systems*, 2006, 27(8): 1490 – 1494.)

### 作者简介:

方欢 (1982–), 女, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向为Petri网理论及应用、离散事件动态系统的建模与分析、智能控制等, E-mail: fanghuan0307@163.com;

陆阳 (1967–), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为分布式控制技术、无线传感器网络, E-mail: luyang.hf@126.com;

黄镇谨 (1975–), 男, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向为离散系统性能分析、智能控制, E-mail: schzj@163.com;

杨娟 (1983–), 女, 博士研究生, 主要研究方向为人工智能、神经网络, E-mail: yangjuan6985@163.com.