

基于冲突检测的一阶混杂 Petri 网动态行为演变方法

廖伟志^{1,2} 李文敬³ 陆建波³

(嘉兴学院数理与信息工程学院 嘉兴 314001)¹ (广西大学广西理工科学实验中心 南宁 530004)²
(广西师范学院计算机与信息工程学院 南宁 530023)³

摘要 讨论了基于冲突检测的一阶混杂 Petri 网动态行为演变方法,首先给出用于一阶混杂 Petri 网冲突检测的瞬时迁移、延时迁移、指数迁移及区间速率连续迁移等 4 类迁移间的冲突判定定理;然后给出基于冲突检测的一阶混杂 Petri 网动态行为演变方法;最后通过混杂系统的一阶混杂 Petri 网模型说明冲突检测对行为演变分析正确性的重要作用。

关键词 一阶混杂 Petri 网,冲突检测,动态行为演变,冲突消解

中图分类号 TP271 **文献标识码** A

Dynamic Behavior Evolution for First-order Hybrid Petri Nets Based on Conflict Checking

LIAO Wei-zhi^{1,2} LI Wen-jing³ LU Jian-bo³

(College of Mathematics Physics and Information Engineering, Jiaying University, Jiaying 314001, China)¹

(Guangxi Experiment Centre of Science and Technology, Guangxi University, Nanning 530004, China)²

(School of Computer and Information Engineering, Guangxi Teachers Education University, Nanning 530023, China)³

Abstract The problem of dynamic behavior evolution for a First-Order Hybrid Petri Nets(FOHPN) was discussed. The theorem to determine the conflict of a FOHPN was proposed firstly. Secondly, a dynamic behavior evolution for FOHPN based on conflict checking and resolution was presented. Finally, through case study, the effectiveness of the developed approach was illustrated.

Keywords First-order hybrid petri nets, Conflict checking, Dynamic behavior evolution, Conflict resolution

1 引言

混杂系统是由连续变量动态系统与离散事件动态系统相互混杂、相互作用而形成的统一动态系统。混杂 Petri 网是混杂系统描述和分析的有效工具。为此,人们用混杂 Petri 网来实现包括柔性制造系统、间歇生产过程、电子元件制造系统、生物系统、软件系统、管理系统、铁路系统、运输系统及城市交通网络系统等各种混杂系统的建模与分析^[1]。一阶混杂 Petri 网(First-Order Hybrid Petri Nets)是 R. David 和 H. Alla 所提出的混杂 Petri 网的扩展模型^[2],它包含了瞬时迁移、延时迁移、指数迁移等 3 种离散迁移和区间速率连续迁移,因此它的描述能力更强。文献[2-9]对基于一阶混杂 Petri 网的混杂系统建模与分析进行了研究。

混杂 Petri 网所描述的混杂系统动态行为的变化过程则通过构造混杂 Petri 网的动态行为演变图(Evolution Graph)得到。因此,混杂 Petri 网演变图构造的正确与否决定着基于混杂 Petri 描述的混杂系统行为分析的正确性,而混杂系统行为分析是混杂系统实现控制、调度与优化的关键,其重要性是不言而喻的。用 Petri 网对系统描述后,系统行为的冲突就映

射为 Petri 网的冲突,解决好冲突是正确分析模型动态行为的基础和关键^[10-12]。文献[11]给出了自治混杂 Petri 网(Autonomous Hybrid Petri Nets)的瞬时迁移(离散迁移)与连续迁移(非区间速率连续迁移)冲突的例子,但没有给出相关判定定理或判定算法。文献[12]给出了区间速率连续 Petri 网的连续迁移之间冲突判定定理及消解算法。

与自治混杂 Petri 网相比,一阶混杂 Petri 网所包含的迁移种类更多,因此描述能力更强。但正是由于所包含的迁移种类多,一阶混杂 Petri 网行为演变分析也变得更复杂,因此如何保证所给一阶混杂 Petri 网行为演变的正确性显得非常重要,而其中尤为关键的问题是如何正确地检测一阶混杂 Petri 网各种迁移之间的冲突并采取相应的消解策略。文献[2]给出了基于线性规划的一阶混杂 Petri 网动态行为演变方法,该方法有效地解决了连续迁移间的有效冲突,但未考虑一阶混杂 Petri 网模型中其它迁移之间的冲突判定及其对行为演变正确性的影响。文献[3-9]在分析基于一阶混杂 Petri 网的混杂系统行为中仍沿用文献[2]的行为演变方法,这种不考虑所有迁移冲突检测及消解的行为演变方法难以确保系统行为分析的正确性,从而必然成为一阶混杂 Petri 网有效应用于

到稿日期:2013-01-04 返修日期:2013-06-04 本文受广西理工科学实验中心经费(LGZXKF201108)资助。

廖伟志(1974—),男,博士,教授,主要研究方向为形式化技术及其应用、混杂 Petri 网理论及其应用,E-mail: weizhiliao2002@yahoo.com.cn;李文敬(1964—),男,教授,主要研究方向为 Petri 网理论及其并行化、并行计算;陆建波(1977—),男,硕士,副教授,主要研究方向为 Petri 网理论及其并行化。

混杂系统的主要障碍。

为此,本文就基于冲突检测的一阶混杂 Petri 网动态行为演变方法进行讨论,首先给出用于一阶混杂 Petri 网冲突检测的瞬时迁移、延时迁移、指数迁移及区间速率连续迁移等 4 类迁移间的冲突判定定理;然后给出基于冲突检测的一阶混杂 Petri 网动态行为演变方法;最后通过实例说明冲突检测对行为演变分析正确性的重要作用。

2 一阶混杂 Petri 网^[2]

2.1 形式化定义

定义 1 一阶混杂 Petri 模型为六元组 $FOHPN = (P, T, F, W, S_d, S_f)$, 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(连续迁移用双白盒子表示), 离散迁移集 $T_d = T_I \cup T_D \cup T_E$, 其中 T_I 为瞬时迁移集(相应的迁移用单横线表示), T_D 为延时迁移集(相应的迁移用黑盒子表示), T_E 为指数迁移集(相应的迁移用白盒子表示);

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) 为边的权值函数;

5) $S_d: T_D \setminus T_E \rightarrow R^+$ 为迁移的时间延时函数, $\forall t_i \in T_D$, 其引发延时为 $\delta_i = S_d(t_i)$, $\forall t_i \in T_E$, 其引发时间服从参数为 $\lambda_i = S_d(t_i)$ 的指数分布。

6) $S_f: t_c \rightarrow \{R^+ \cup \{0\}\} \times \{R^+ \cup \{0\}\}$ 为连续迁移 t_c 的引发速率区间。 $\forall t_i \in T_c$, 令 $S_f(t_i) = (V_i^{\min}, V_i^{\max})$, 其中 $V_i^{\min} \leq V_i^{\max}$, 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 $\cdot t_j, t_j \cdot$ 表示; 类似地分别用 $\cdot p_i, p_i \cdot$ 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 ${}^{(d)}t^{(c)}$ 、 $t^{(d)}$ ($t^{(c)}$) 表示。假设 t 为离散迁移, 则 $\cdot t \cap P_c = \emptyset$ 。

定义如下库所标识函数:

$$m: \begin{cases} P_d \rightarrow N \\ P_c \rightarrow R^+ \cup \{0\} \end{cases} \quad (1)$$

式中, m_i 表示库所 p_i 的标识, $m_i(\tau)$ 为时刻 τ 的库所标识并且用 $(N, m(\tau_0))$ 表示具有初始标识 $m(\tau_0)$ 的一阶混杂 Petri 模型。

2.2 使能与引发

定义 2 设 (N, m) 为一阶混杂 Petri 网, t 为离散迁移, 若 $\cdot t$ 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。

一阶混杂 Petri 网离散迁移的引发规则与离散 Petri 网的引发规则相同。

定义 3 设 (N, m) 为一阶混杂 Petri 网, t 为连续迁移, 若 ${}^{(d)}t^{(c)}$ 中的任一库所 p_i 满足 $m_i \geq W(p_i, t)$, 则称 t 为使能迁移。

若一阶混杂 Petri 网的连续迁移 t 为使能迁移, 则若 ${}^{(c)}t$

中的任一库所 p_i 满足 $m_i > 0$, 则称迁移 t 为强使能迁移; 若 $\exists p_i \in {}^{(c)}t$ 使得 $m_i = 0$, 则称迁移 t 为弱使能迁移。

性质 1 若连续迁移 t_j 为非使能迁移, 则其引发速率 $v_j = 0$ 。

性质 2 若连续迁移 t_j 为强使能迁移, 则其引发速率 $v_j \in [V_j^{\min}, V_j^{\max}]$ 。

性质 3 若连续迁移 t_j 为弱使能迁移, 则其引发速率 $v_j \in [V_j^{\min}, V_j]$ 。其中 $V_j \leq V_j^{\max}$, V_j 的大小取决于流进空的连续库所的标识总量。

3 一阶混杂 Petri 网的冲突判定定理

本节根据一阶混杂 Petri 网的使能和引发规则给出一阶混杂 Petri 网瞬时迁移、延时迁移、指数迁移及连续迁移间的冲突判定定理, 定理中出现的符号含义为: $m_i(\tau)$ 为库所 p_i 在时刻 τ 的标识; $W(p_i, t_k)$ 为库所 p_i 到迁移 t_k 的弧的权重; $delay(t_k)$ 为延时迁移 t_k 的延时时间; $exp(t_s)$ 为指数迁移 t_s 的率参数; $\cdot t$ 为迁移 t 的输入库所集; ${}^{(d)}t$ 为迁移 t 的离散输入库所集; $\cdot p$ 为库所 p 的输出库所集。

定理 1 设 t_k, t_s 为一阶混杂 Petri 网的瞬时迁移, 则瞬时迁移 t_k, t_s 在时刻 τ 产生冲突的充分必要条件为: (1) $\forall p_u \in \cdot t_k, m_u(\tau) \geq W(p_u, t_k)$; (2) $\forall p_v \in \cdot t_s, m_v(\tau) \geq W(p_v, t_s)$; (3) 至少存在库所 $p_i \in \cdot t_k \cap \cdot t_s$, 其满足 $m_i(\tau) < W(p_i, t_k) + W(p_i, t_s)$ 。

证明: (充分性) 由 $\forall p_u \in \cdot t_k, m_u(\tau) \geq W(p_u, t_k)$ 可知迁移 t_k 在时刻 τ 使能; $\forall p_v \in \cdot t_s, m_v(\tau) \geq W(p_v, t_s)$ 可知迁移 t_s 在时刻 τ 使能; 而由于存在库所 $p_i \in \cdot t_k \cap \cdot t_s$, 其满足 $m_i(\tau) < W(p_i, t_k) + W(p_i, t_s)$, 因此 t_k, t_s 在时刻 τ 产生冲突。

(必要性) 若瞬时迁移 t_k, t_s 产生冲突, 则必至少存在库所 $p_i \in \cdot t_k \cap \cdot t_s$ 满足 $m_i(\tau) < W(p_i, t_k) + W(p_i, t_s)$, 否则不会有冲突发生; 另外, 迁移 t_k, t_s 在时刻 τ 都是使能的, 即 $\forall p_u \in \cdot t_k, m_u(\tau) \geq W(p_u, t_k)$ 且 $\forall p_v \in \cdot t_s, m_v(\tau) \geq W(p_v, t_s)$, 否则只要任一迁移不使能就不存在冲突。证毕。

定理 2 设 t_k, t_s 为一阶混杂 Petri 网的延时迁移, 且 $delay(t_k) = d_k, delay(t_s) = d_s$, 则延时迁移 t_k, t_s 在时刻 τ 产生冲突的充分必要条件为: (1) $\forall p_u \in \cdot t_k, m_u(\tau) \geq W(p_u, t_k)$, 其中 $\tau - d_k \leq \tau \leq \tau$; (2) $\forall p_v \in \cdot t_s, m_v(\tau) \geq W(p_v, t_s)$, 其中 $\tau - d_s \leq \tau \leq \tau$; (3) 至少存在库所 $p_i \in \cdot t_k \cap \cdot t_s$, 其满足 $m_i(\tau) < W(p_i, t_k) + W(p_i, t_s)$ 。

证明: (充分性) 由于 $\forall p_u \in \cdot t_k, m_u(\tau) \geq W(p_u, t_k)$, 其中 $\tau - d_k \leq \tau \leq \tau$, 因此迁移 t_k 在时刻 $\tau - d_k$ 是使能且可在时刻 τ 引发; 同理由于 $\forall p_v \in \cdot t_s, m_v(\tau) \geq W(p_v, t_s)$, 其中 $\tau - d_s \leq \tau \leq \tau$, 因此迁移 t_s 在时刻 $\tau - d_s$ 是使能且可在时刻 τ 引发; 而存在库所 $p_i \in \cdot t_k \cap \cdot t_s$, 其满足 $m_i(\tau) < W(p_i, t_k) + W(p_i, t_s)$, 因此延时迁移 t_k, t_s 不能同时在时刻 τ 引发, 即在时刻 τ 产生冲突。

(必要性) 若延时迁移 t_k, t_s 在时刻 τ 产生冲突, 则这两个迁移在时刻 τ 可引发, 根据延时迁移的使能规则和引发规则可知 $\forall p_u \in \cdot t_k, m_u(\tau) \geq W(p_u, t_k)$; $\forall p_v \in \cdot t_s, m_v(\tau) \geq W(p_v, t_s)$, 其中 $\tau - d_k \leq \tau \leq \tau, \tau - d_s \leq \tau \leq \tau$; 显然至少存在库所 $p_i \in \cdot t_k \cap \cdot t_s$, 其满足 $m_i(\tau) < W(p_i, t_k) + W(p_i, t_s)$,

否则不可能产生冲突。证毕。

定理 3 设瞬时迁移 t_k 、延时迁移 t_s 为一阶混杂 Petri 网的迁移,且 $delay(t_s)=d_s$,则瞬时迁移 t_k 与延时迁移 t_s 在时刻 τ 产生冲突的充分必要条件为:(1) $\forall p_u \in \cdot t_k, m_u(\tau) \geq W(p_u, t_k)$; (2) $\forall p_v \in \cdot t_s, m_v(\tau) \geq W(p_v, t_s)$,其中 $\tau - d_s \leq \gamma \leq \tau$; (3) 至少存在库所 $p_i \in \cdot t_k \cap \cdot t_s$,其满足 $m_i(\tau) < W(p_i, t_k) + W(p_i, t_s)$ 。

证明:(充分性)由 $\forall p_u \in \cdot t_k, m_u(\tau) \geq W(p_u, t_k)$ 可知迁移 t_k 在时刻 τ 使能;同时由于 $\forall p_v \in \cdot t_s, m_v(\tau) \geq W(p_v, t_s)$,其中 $\tau - d_s \leq \gamma \leq \tau$,因此迁移 t_s 在时刻 $\tau - d_s$ 是使能且可在时刻 τ 引发;而存在库所 $p_i \in \cdot t_k \cap \cdot t_s$,其满足 $m_i(\tau) < W(p_i, t_k) + W(p_i, t_s)$,因此延时迁移 t_k, t_s 不能同时在时刻 τ 引发,即在时刻 τ 产生冲突。

(必要性)若延时迁移 t_k, t_s 在时刻 τ 产生冲突,则这两个迁移在时刻 τ 可引发,根据延时迁移的使能规则和引发规则可知 $\forall p_u \in \cdot t_k, m_u(\tau) \geq W(p_u, t_k)$ 且 $\forall p_v \in \cdot t_s, m_v(\tau) \geq W(p_v, t_s)$,其中 $\tau - d_s \leq \gamma \leq \tau$;至少存在库所 $p_i \in \cdot t_k \cap \cdot t_s$,其满足 $m_i(\tau) < W(p_i, t_k) + W(p_i, t_s)$,否则不可能产生冲突。证毕。

定理 4 设瞬时迁移 t_k 、指数迁移 t_s 为一阶混杂 Petri 网的迁移,且 $exp(t_s)=\lambda_s$,则瞬时迁移 t_k 与指数迁移 t_s 在时刻 τ 有概率为 $\int_d^\infty \lambda_s e^{-\lambda_s x} dx$ 的冲突的充分必要条件为:(1) $\forall p_u \in \cdot t_k, m_u(\tau) \geq W(p_u, t_k)$; (2) $\forall p_v \in \cdot t_s, m_v(\tau) \geq W(p_v, t_s)$,其中 $\tau - d \leq \gamma \leq \tau$; (3) 至少存在库所 $p_i \in \cdot t_k \cap \cdot t_s$,其满足 $m_i(\tau) < W(p_i, t_k) + W(p_i, t_s)$ 。

证明:(充分性)首先,由 $\forall p_u \in \cdot t_k, m_u(\tau) \geq W(p_u, t_k)$ 可知迁移 t_k 在时刻 τ 使能;其次由条件(2)可知迁移 t_s 从时刻 $\tau - d$ 起是使能的,由于其引发时间服从指数分布规律,因此迁移 t_s 从时刻 $\tau - d$ 使能后经过时间段 d 引发的概率等于 $\int_d^\infty \lambda_s e^{-\lambda_s x} dx$;最后,由于至少存在库所 $p_i \in \cdot t_k \cap \cdot t_s$,其满足 $m_i(\tau) < W(p_i, t_k) + W(p_i, t_s)$,因此两个迁移产生冲突的概率为迁移 t_s 从时刻 $\tau - d$ 使能后经过时间段 d 引发的概率,即 $\int_d^\infty \lambda_s e^{-\lambda_s x} dx$ 。

(必要性)若瞬时迁移 t_k 与指数迁移 t_s 在时刻 τ 冲突的概率为 $\int_d^\infty \lambda_s e^{-\lambda_s x} dx$,则瞬时迁移 t_k 在时刻 τ 使能,即有 $\forall p_u \in \cdot t_k, m_u(\tau) \geq W(p_u, t_k)$,否则在时刻 τ 冲突的概率必为 0;另外,由于迁移 t_s 引发时间服从参数为 λ_s 的指数分布,而冲突的概率为 $\int_d^\infty \lambda_s e^{-\lambda_s x} dx$,因此有 $\forall p_v \in \cdot t_s, m_v(\tau) \geq W(p_v, t_s)$,其中 $\tau - d \leq \gamma \leq \tau$;最后,显然至少存在库所 $p_i \in \cdot t_k \cap \cdot t_s$,其满足 $m_i(\tau) < W(p_i, t_k) + W(p_i, t_s)$,否则不可能产生冲突。证毕。

定理 5 设瞬时迁移 t_k 、连续迁移 t_s 为一阶混杂 Petri 网的迁移,则瞬时迁移 t_k 与连续迁移 t_s 时刻 τ 产生冲突的充分必要条件为:(1) $\forall p_u \in \cdot t_k, m_u(\tau) \geq W(p_u, t_k)$; (2) $\forall p_v \in \cdot t_s, m_v(\tau) \geq W(p_v, t_s)$; (3) 至少存在库所 $p_i \in \cdot t_k \cap \cdot t_s$,使得 $m_i(\tau) < W(p_i, t_k) + W(p_i, t_s)$ 。

证明:(充分性)由 $\forall p_u \in \cdot t_k, m_u(\tau) \geq W(p_u, t_k)$ 可知迁

移 t_k 在时刻 τ 使能;由 $\forall p_v \in \cdot t_s, m_v(\tau) \geq W(p_v, t_s)$ 可知迁移 t_s 在时刻 τ 使能;而由于至少存在库所 $p_i \in \cdot t_k \cap \cdot t_s$,使得 $m_i(\tau) < W(p_i, t_k) + W(p_i, t_s)$,因此迁移 t_k, t_s 不能同时在时刻 τ 引发,即在时刻 τ 产生冲突。

(必要性)若瞬时迁移 t_k 与连续迁移 t_s 在时刻 τ 产生冲突,则说明这两个迁移均为可引发迁移,因此根据使能规则有 $\forall p_u \in \cdot t_k, m_u(\tau) \geq W(p_u, t_k)$; $\forall p_v \in \cdot t_s, m_v(\tau) \geq W(p_v, t_s)$;同时必然至少存在库所 $p_i \in \cdot t_k \cap \cdot t_s$,使得 $m_i(\tau) < W(p_i, t_k) + W(p_i, t_s)$,否则不可能产生冲突。证毕。

定理 6 设延时迁移 t_k 、指数迁移 t_s 为一阶混杂 Petri 网的迁移,且 $delay(t_k)=d_k, exp(t_s)=\lambda_s$,则延时迁移 t_k 与指数迁移 t_s 在时刻 τ 具有概率为 $\int_{d_k}^\infty \lambda_s e^{-\lambda_s x} dx$ 的冲突的充分必要条件为:(1) $\forall p_u \in \cdot t_k, m_u(\tau) \geq W(p_u, t_k)$,其中 $\tau - d_k \leq \eta \leq \tau$; (2) $\forall p_v \in \cdot t_s, m_v(\tau) \geq W(p_v, t_s)$,其中 $\tau - d_k \leq \gamma \leq \tau$; (3) 至少存在库所 $p_i \in \cdot t_k \cap \cdot t_s$,其满足 $m_i(\tau) < W(p_i, t_k) + W(p_i, t_s)$ 。

证明:(充分性)根据 $\forall p_u \in \cdot t_k, m_u(\tau) \geq W(p_u, t_k)$ (其中 $\tau - d_k \leq \eta \leq \tau$),可知迁移 t_k 在时刻 $\tau - d_k$ 是使能且可在时刻 τ 引发;其次由 $\forall p_v \in \cdot t_s, m_v(\tau) \geq W(p_v, t_s)$,其中 $\tau - d_k \leq \gamma \leq \tau$ 可知迁移 t_s 从时刻 $\tau - d_k$ 起是使能的,由于其引发时间服从指数分布规律,因此迁移 t_s 从时刻 $\tau - d_k$ 使能后经过时间段 d_k 引发的概率等于 $\int_{d_k}^\infty \lambda_s e^{-\lambda_s x} dx$;最后,由于至少存在库所 $p_i \in \cdot t_k \cap \cdot t_s$,其满足 $m_i(\tau) < W(p_i, t_k) + W(p_i, t_s)$,因此两个迁移产生冲突的概率为迁移 t_s 从时刻 $\tau - d_k$ 使能后经过时间段 d_k 引发的概率,即 $\int_{d_k}^\infty \lambda_s e^{-\lambda_s x} dx$ 。

(必要性)若延时迁移 t_k 与指数迁移 t_s 在时刻 τ 具有概率为 $\int_{d_k}^\infty \lambda_s e^{-\lambda_s x} dx$ 的冲突,则根据延时迁移的使能规则和引发规则不难有 $m_i(\tau) \geq W(p_i, t_k)$,其中 $\tau - d_k \leq \eta \leq \tau$;否则迁移 t_k 不可能在时刻 τ 引发,即不会与迁移 t_s 产生冲突;另外,由于迁移 t_s 引发时间服从参数为 λ_s 的指数分布,而冲突的概率为 $\int_{d_k}^\infty \lambda_s e^{-\lambda_s x} dx$,因此有 $\forall p_v \in \cdot t_s, m_v(\tau) \geq W(p_v, t_s)$,其中 $\tau - d_k \leq \gamma \leq \tau$;最后,显然至少存在库所 $p_i \in \cdot t_k \cap \cdot t_s$,其满足 $m_i(\tau) < W(p_i, t_k) + W(p_i, t_s)$,否则不可能产生冲突。证毕。

定理 7 设延时迁移 t_k 、连续迁移 t_s 为一阶混杂 Petri 网的迁移,且 $delay(t_k)=d_k$,则延时迁移 t_k 与连续迁移 t_s 在时刻 τ 产生冲突的充分必要条件为:(1) $\forall p_u \in \cdot t_k, m_u(\tau) \geq W(p_u, t_k)$,其中 $\tau - d_k \leq \eta \leq \tau$; (2) $\forall p_v \in \cdot t_s, m_v(\tau) \geq W(p_v, t_s)$; (3) 至少存在库所 $p_i \in \cdot t_k \cap \cdot t_s$,使得 $m_i(\tau) < W(p_i, t_k) + W(p_i, t_s)$ 。

证明:(充分性)由于 $\forall p_u \in \cdot t_k, m_u(\tau) \geq W(p_u, t_k)$,其中 $\tau - d_k \leq \eta \leq \tau$,因此迁移 t_k 在时刻 $\tau - d_k$ 是使能且可在时刻 τ 引发;由条件(2)可知迁移 t_s 在时刻 τ 使能;而由于至少存在库所 $p_i \in \cdot t_k \cap \cdot t_s$,使得 $m_i(\tau) < W(p_i, t_k) + W(p_i, t_s)$,因此迁移 t_k, t_s 不能同时在时刻 τ 引发,即在时刻 τ 产生冲突。

(必要性)若延时迁移 t_k 与连续迁移 t_s 在时刻 τ 产生冲突,则两个迁移均可独自在时刻 τ 引发,但又不能同时引发,

根据使能与引发规则不难有 $\forall p_u \in \cdot t_k, m_u(\eta) \geq W(p_u, t_k)$, 其中 $\tau - d_1 \leq \gamma \leq \tau$; 同时有 $\forall p_v \in {}^{(d)} t_s, m_v(\tau) \geq W(p_v, t_s)$; 同时必然至少存在库所 $p_i \in \cdot t_k \cap {}^{(d)} t_s$, 使得 $m_i(\tau) < W(p_i, t_k) + W(p_i, t_s)$, 否则不可能产生冲突。证毕。

定理 8 设指数迁移 t_k 、指数迁移 t_s 为一阶混杂 Petri 网的迁移, 且 $\exp(t_k) = \lambda_k, \exp(t_s) = \lambda_s$, 若满足如下条件: (1) $\forall p_u \in \cdot t_k, m_u(\eta) \geq W(p_u, t_k)$, 其中 $\tau - d_1 \leq \gamma \leq \tau$; (2) $\forall p_v \in {}^{(d)} t_s, m_v(\gamma) \geq W(p_v, t_s)$, 其中 $\tau - d_2 \leq \gamma \leq \tau$; (3) 至少存在库所 $p_i \in \cdot t_k \cap \cdot t_s$, 其满足 $m_i(\tau) < W(p_i, t_k) + W(p_i, t_s)$, 则指数迁移 t_k 与指数迁移 t_s 在时刻 τ 具有概率为 $\int_{d_1}^{\infty} \lambda_s e^{-\lambda_s x} dx \cdot \int_{d_2}^{\infty} \lambda_s e^{-\lambda_s x} dx$ 的冲突。

证明: 由 $\forall p_u \in \cdot t_k, m_u(\eta) \geq W(p_u, t_k)$ (其中 $\tau - d_1 \leq \gamma \leq \tau$), 可知迁移 t_k 从时刻 $\tau - d_1$ 起是使能的, 由于其引发时间服从指数分布规律, 因此迁移 t_k 使能后经过时间段 d_1 在时刻 τ 引发的概率等于 $\int_{d_1}^{\infty} \lambda_k e^{-\lambda_k x} dx$; 再由 $\forall p_v \in {}^{(d)} t_s, m_v(\gamma) \geq W(p_v, t_s)$ (其中 $\tau - d_2 \leq \gamma \leq \tau$), 可知迁移 t_s 从时刻 $\tau - d_2$ 起是使能的, 由于其引发时间服从指数分布规律, 因此迁移 t_s 使能后经过时间段 d_2 在时刻 τ 引发的概率等于 $\int_{d_2}^{\infty} \lambda_s e^{-\lambda_s x} dx$, 因此两者同时在时刻 τ 引发的概率为 $\int_{d_1}^{\infty} \lambda_k e^{-\lambda_k x} dx \cdot \int_{d_2}^{\infty} \lambda_s e^{-\lambda_s x} dx$; 而至少存在库所 $p_i \in \cdot t_k \cap \cdot t_s$, 其满足 $m_i(\tau) < W(p_i, t_k) + W(p_i, t_s)$, 所以指数迁移 t_k 与指数迁移 t_s 在时刻 τ 的冲突概率为 $\int_{d_1}^{\infty} \lambda_k e^{-\lambda_k x} dx \cdot \int_{d_2}^{\infty} \lambda_s e^{-\lambda_s x} dx$ 。

定理 9 设指数迁移 t_k 、连续迁移 t_s 为一阶混杂 Petri 网的迁移, 且 $\exp(t_k) = \lambda_k$, 则指数迁移 t_k 与连续迁移 t_s 冲突概率为 $\int_{d_1}^{\infty} \lambda_k e^{-\lambda_k x} dx$ 的充分必要条件为: (1) $\forall p_u \in \cdot t_k, m_u(\eta) \geq W(p_u, t_k)$, 其中 $\tau - d_1 \leq \gamma \leq \tau$; (2) $\forall p_v \in {}^{(d)} t_s, m_v(\tau) \geq W(p_v, t_s)$; (3) 至少存在库所 $p_i \in \cdot t_k \cap {}^{(d)} t_s$, 使得 $m_i(\tau) < W(p_i, t_k) + W(p_i, t_s)$ 。

证明: (充分性) 由 $\forall p_u \in \cdot t_k, m_u(\eta) \geq W(p_u, t_k)$ (其中 $\tau - d_1 \leq \gamma \leq \tau$), 可知迁移 t_k 从时刻 $\tau - d_1$ 起是使能的, 由于其引发时间服从指数分布规律, 因此迁移 t_k 使能后经过时间段 d_1 在时刻 τ 引发的概率等于 $\int_{d_1}^{\infty} \lambda_k e^{-\lambda_k x} dx$; 而由条件(2)可知迁移 t_s 在时刻 τ 使能且可引发; 但若至少存在库所 $p_i \in \cdot t_k \cap {}^{(d)} t_s$, 使得 $m_i(\tau) < W(p_i, t_k) + W(p_i, t_s)$, 则时刻 τ 就可能产生冲突, 易知产生冲突的概率就是迁移 t_k 使能后经过时间段 d_1 在时刻 τ 引发的概率 $\int_{d_1}^{\infty} \lambda_k e^{-\lambda_k x} dx$ 。

(必要性) 若指数迁移 t_k 与连续迁移 t_s 在时刻 τ 具有概率为 $\int_{d_1}^{\infty} \lambda_k e^{-\lambda_k x} dx$ 的冲突, 根据使能与引发规则不难有 $\forall p_u \in \cdot t_k, m_u(\eta) \geq W(p_u, t_k)$, 其中 $\tau - d_1 \leq \gamma \leq \tau$; 同时 $\forall p_v \in {}^{(d)} t_s, m_v(\tau) \geq W(p_v, t_s)$; 而且必然至少存在库所 $p_i \in \cdot t_k \cap {}^{(d)} t_s$, 使得 $m_i(\tau) < W(p_i, t_k) + W(p_i, t_s)$, 否则若 $m_i(\tau) \geq W(p_i, t_k) + W(p_i, t_s)$, 那么就能保证迁移 t_k 以概率 $\int_{d_1}^{\infty} \lambda_k e^{-\lambda_k x} dx$ 在时刻 τ 引发, 同时连续迁移 t_s 在时刻 τ 亦可引发, 这与两个

迁移冲突是矛盾的。证毕。

关于连续迁移之间的冲突, 作者已在文献[12]做详细阐述, 在此不再赘述。

4 基于冲突检测的一阶混杂 Petri 网动态行为演变方法

在下面所给的一阶混杂 Petri 网动态行为演变方法中, 根据第 3 节所给出的冲突判定定理对一阶混杂 Petri 网进行冲突检测, 若有冲突则要实现冲突消解, 所采取的冲突消解策略如下:

(1) 同类迁移之间、延时迁移与连续迁移之间的冲突消解策略: 给不同的迁移赋予不同的优先权, 在发生冲突时, 高优先权的迁移能够优先执行。

(2) 瞬时迁移与其它迁移之间的冲突消解策略: 默认瞬时迁移的优先权高于其它迁移的优先权, 即当瞬时迁移与其它迁移之间发生冲突时让瞬时迁移引发。

(3) 指数迁移与其它迁移之间的冲突消解策略: 默认指数迁移的优先权低于其它迁移的优先权, 即当指数迁移与其它迁移之间发生冲突时让其它迁移引发。

为此在该方法中需要定义二维数组 A 用于存储迁移之间的冲突(数组元素 A_{ij} 值为 1 则表示迁移 t_i 与迁移 t_j 产生冲突, A_{ij} 值为 0 则表示两者无冲突)、二维数组 B 用于存储迁移优先权(数组元素 B_{ij} 值为 1 则表示迁移 t_i 优先权高于迁移 t_j , B_{ij} 值为 -1 则表示迁移 t_i 优先权低于迁移 t_j)。首先根据冲突判定定理检测基于当前使能迁移集的冲突并存存储在数组 A ; 其次根据迁移优先权数组 B 确定引发迁移集; 然后根据引发迁移集修改使能迁移集并确定改变 Marco 状态的事件集、Marco 状态改变的时间、Marco 状态发生改变后混杂 Petri 网标识向量等动态行为演变信息; 重复上述操作直到使能迁移集不发生改变为止。具体步骤如下。

输入: 一阶混杂 Petri 网

输出: 基于冲突检测的一阶混杂 Petri 网动态行为演变

Step 1 初始化迁移优先权表 $B, \tau_0 \leftarrow 0, i \leftarrow 0$;

Step 2 根据一阶混杂 Petri 网的使能语义确定在 $M(\tau_i)$ 下的使能迁移集 T_{enable} ;

Step 3 按式(2)确定 $V(\tau_i)$;

$$V(\tau_i) = \begin{cases} v_{t_{i1}} \leq V_{t_{i1}}^{\max} \\ \dots \\ v_{t_{im}} \leq V_{t_{im}}^{\max} \\ v_{t_{i1}} \geq V_{t_{i1}}^{\min} \\ \dots \\ v_{t_{im}} \geq V_{t_{im}}^{\min} \\ \sum_{j \in T_1} C(p_{a2k+1}, t_j) \cdot v_j \geq 0 \\ \dots \\ \sum_{j \in T_1} C(p_{a1}, t_j) \cdot v_j \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

Step 4 /* 该步骤实现冲突判定并存存储冲突记录 */

Step 4.1 初始化冲突记录表: 冲突记录表 A 清 0;

Step 4.2 $T_{enable}^* \leftarrow T_{enable}$;

Step 4.3 若 $|T_{enable}^*| \leq 1$, 转至 Step 5;

Step 4.4 任取 T_{enable}^* 中的迁移 t_i , 且 $T_{enable}^* \leftarrow T_{enable}^* - \{t_i\}$;

Step 4.5 $T_{rem} \leftarrow T_{enable}^*$;

Step 4.6 任取 T_{tem} 中的迁移 t_i , 且 $T_{tem} \leftarrow T_{tem} - \{t_i\}$;

Step 4.7 根据冲突判定定理检测迁移 t_i 与 t_j 是否发生冲突, 若有冲突发生或冲突发生的概率不为 0, 则 $A_{ij} \leftarrow 1$;

Step 5 /* 根据冲突记录表 A 及迁移优先权表 B 确定引发迁移集 T_{firing} */

For $i=1$ to n /* n 为混杂 Petri 网的迁移总数 */

For $j=1$ to n

{ 若 A_{ij} 等于 0, 则 continue;

若 A_{ij} 等于 1 且 $B_{ij}=1$, 则 $T_{enable} \leftarrow T_{enable} - \{t_j\}$; 若 A_{ij} 等于 1 且 $B_{ij}=-1$, 则 $T_{enable} \leftarrow T_{enable} - \{t_i\}$;

}

$T_{firing} \leftarrow T_{enable}$;

Step 6 /* 修改使能迁移集 T_{enable} */

Step 6.1 定义集合 $T_{non_enable}, T_{non_enable} \leftarrow T - T_{enable}, T_{pen} \leftarrow T_{enable}$;

Step 6.2 $T_{short_enable} \leftarrow \{t_{j1} | \exists t_{j2} \in T_{non_enable}, \forall t_{j2} \in T_{non_enable}, \text{满足 } \sigma_{enable}(t_{j1}) \leq \sigma_{enable}(t_{j2})\}$;

Step 6.3 $T_{short_nonenable} \leftarrow \{t_{j1} | \exists t_{j2} \in T_{enable}, \forall t_{j2} \in T_{enable}, \text{满足 } \sigma_{non_enable}(t_{j1}) \leq \sigma_{non_enable}(t_{j2})\}$;

Step 6.4 $T^* \leftarrow T_{short_enable} \cup T_{short_nonenable}$;

Step 6.5 $T_{tem_enable} \leftarrow \{t_{j1} | \exists t_{j2} \in T^*, \forall t_{j2} \in T^*, \text{满足 } \sigma(t_{j1}) \leq \sigma(t_{j2})\}$;

Step 6.6 $T_{enable} \leftarrow \{t_{j1} | t_{j1} \in T_{tem_enable} \text{ 且 } t_{j1} \in T_{short_enable} \text{ 或者 } t_{j1} \in T_{firing} \text{ 且 } t_{j1} \notin T_{tem_enable}\}$;

Step 6.7 若 $T_{pen} = T_{enable}$, 则转至 Step 9;

Step 7 记录第 i 个 Macro 状态的信息: $M(\tau_i)$ 和 $V(\tau_i)$ 及改变第 i 个 Macro 状态的事件集 T_{tem_enable} ;

Step 8 $i \leftarrow i+1, \tau_i \leftarrow \sigma(t_{j1})$, 根据引发语义求 $M(\tau_i)$, 转至 Step 3; /* $t_{j1} \in T_{tem_enable}$ */

Step 9 结束

其中 $\sigma_{enable}(t_{j1})$ 为迁移 t_{j1} 基于 $M(\tau_i), V(\tau_i), T_{firing}$ 下最早变为使能迁移的时刻, $\sigma_{non_enable}(t_{j1})$ 为迁移 t_{j1} 基于 $M(\tau_i), V(\tau_i), T_{firing}$ 下最早变为非使能迁移的时刻。

$$\sigma(t_{j1}) = \begin{cases} \delta_{enable}(t_{j1}), & t_{j1} \in T_{short_enable} \\ \delta_{non_enable}(t_{j1}), & t_{j1} \in T_{short_nonenable} \end{cases} \quad (3)$$

$$\sigma(t_{j2}) = \begin{cases} \delta_{enable}(t_{j2}), & t_{j2} \in T_{short_enable} \\ \delta_{non_enable}(t_{j2}), & t_{j2} \in T_{short_nonenable} \end{cases} \quad (4)$$

5 实例分析

最后通过实例进行分析和比较, 以说明冲突检测对行为分析正确性的重要作用。考虑如图 1 所示的一混杂系统的一阶混杂 Petri 网模型, 其中离散库所 P_F 和 P_{CON} 的初始标识均为 1, 离散库所 P_{COFF} 的初始标识为 0, 而连续库所的初始标识均为 0, T_d 和 T_{CON} 为延时迁移, T_{COFF} 为瞬时迁移, 连续迁移 T_C 的最小、最大引发速率分别为 1 和 2。

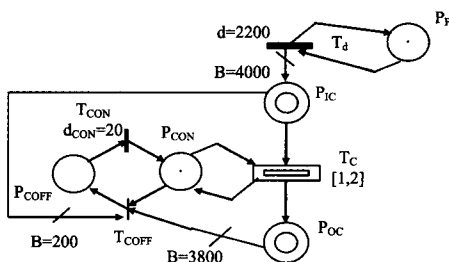


图 1 一阶混杂 Petri 网模型

假设连续迁移总是以可获得的最大速率引发, 根据行为演变方法可知 Macro 状态 $((m_{P_F}, m_{P_{CON}}, m_{P_{COFF}}), (m_{P_{IC}}, m_{P_{OC}}), (v_c))$ 的初始值为 $((1, 1, 0), (0, 0), (0))$, 离散迁移 T_d 是使能的, 经过 2200 个时间单元, T_d 引发, 从而系统行为演变进入第 2 个 Macro 状态 $((1, 1, 0), (4000, 0), (2))$, 在第 2 个状态经过 1900 个时间单元, P_{OC} 的标识变为 3800, P_{IC} 的标识变为 200, 此时 T_{COFF} 变为使能迁移且可以引发, 而 T_C 亦为使能迁移且可以引发, 但实际上只有 1 个迁移能引发。根据冲突判定定理 5 检测到 T_{COFF} 与 T_C 产生了冲突, 此时要根据冲突消解策略决定哪个迁移引发, 假设采取本文瞬时迁移引发优先的策略, 则 T_{COFF} 得以引发, 则系统演变进入第 3 个状态 $((1, 0, 1), (0, 0), (0))$, 在第 3 个状态经过 200 个时间单元, T_{CON} 引发进入第 4 个 Macro 状态 $((1, 1, 0), (0, 0), (0))$, 经过 100 个时间单元 T_d 引发进入第 5 个状态 $((1, 1, 0), (4000, 0), (2))$, ..., 容易判断系统行为具有周期性的演变。具体的行为演变结果可用图 2 来描述。

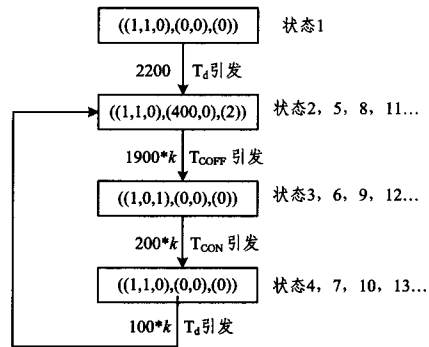


图 2 一阶混杂 Petri 网行为演变图

最后我们来考察用文献[2]的行为演变分析方法所得到的结果。由于文献[2]无法实现瞬时迁移和连续迁移的冲突检测和消解, 因此所得到系统的第 3 个状态将是 $((1, 0, 1), (0, 0), (2))$, 该状态存在明显的错误, 由于 T_{COFF} 的引发使得 P_{IC} 的标识变为 0, 因此 T_C 的引发速率不可能为 2, 即系统中不可能存在这样的状态, 这将导致整个行为分析的错误, 由此可见冲突检测及消解对于保证模型行为分析的正确性极为关键。

结束语 针对一阶混杂 Petri 网动态行为演变分析存在的问题, 根据一阶混杂 Petri 网模型的使能及引发规则给出了一阶混杂 Petri 网各类迁移间的冲突判定定理, 并讨论了基于冲突检测与消解的一阶混杂 Petri 网动态行为演变分析方法。实例分析与比较表明, 无冲突检测与消解的一阶混杂 Petri 网动态行为演变分析结果的正确性得不到保证。本文所提出的理论与方法保证了一阶混杂 Petri 网动态行为演变分析的正确性, 不仅解决了一阶混杂 Petri 网有效应用于混杂系统建模与分析的一个主要问题, 同时对其它混杂 Petri 网的动态行为演变分析也有重要的参考价值。

参考文献

- [1] 廖伟志. 混杂生产过程的混杂 Petri 网建模及分析技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2007
- [2] 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

(下转封三)

节点与目标节点。一共做了 1400 组实验,为了实验的公平性,将地形因子也加入到 HPA* Enhancements 算法和 KM-A* 算法中,提取了遍历点数、搜索时间以及智能体移动所花费的时间作为参照指标,计算各种指标的平均值。表 1 所列为 HPA* Enhancements 算法、KM-A* 算法以及本文算法的实验结果。

表 1 各种方法的参数对比

算法	遍历点数	搜索时间/s	智能体移动时间/s
HPA* Enhancements	102.9006	0.0088	28.5940
KM-A*	89.7791	0.0089	29.9357
本文算法	86.3638	0.0078	27.1365

从表 1 可以看出,与 HPA* Enhancements 算法、KM-A* 算法相比,本文算法在遍历点数上,比 HPA* Enhancements 算法少 26.07%,比 KM-A* 算法少 3.80%;在搜索时间上,比 HPA* Enhancements 算法少 11.36%,比 KM-A* 算法少 12.36%;在智能体的移动时间上,比 HPA* Enhancements 算法少 5.10%,比 KM-A* 算法少了 9.35%。以上实验证明,本算法更加优秀。

最后将本文算法移植到 Android 平台上,采用小米手机 1(高通 MSM8260 1.5GHz CPU、1GB RAM、Adreno 220 GPU),利用 OpenGL ES 图形工具包在 Android 版本号为 4.0.4 的操作系统上实现了本文算法,其中黑色点代表障碍点,灰色点代表地形因子为 2 的点。结果如图 9 所示。

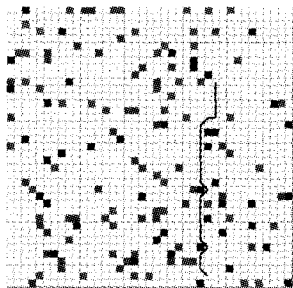


图 9 Android 手机上实现本文算法

结束语 本文研究一种适用于 Android 手机游戏的路径

搜索算法,主要针对 A* 搜索算法在地图模型过大时搜索节点过多而过度消耗手机资源的情况进行研究和改进。对地图进行不均匀划分,形成抽象地图,并分阶段在抽象地图和原始地图上进行搜索。实验结果表明,本文提出的算法减少了搜索时间和遍历点数,较好地解决了寻径算法消耗手机资源较高与 Android 手机资源较为紧张这一矛盾。然而,本算法只是针对静态地图上智能体的寻径,当地图上障碍点临时发生改变时本文算法可能无法得到寻径结果。下一步工作将会在本文算法的基础上充分考虑障碍点变化的因素,提出改进算法。

参考文献

- [1] 宋青,汪小帆. 最短路径算法加速技术研究综述[J]. 电子科技大学学报,2012,41(2):176-184
- [2] 林巧民,林萍,王汝传. 基于 OGRE 的智能游戏引擎的设计与实现[J]. 南京邮电大学学报:自然科学版,2010,30(2):71-76
- [3] 李志建,郑新奇,王淑晴,等. 改进 A* 算法及其在 GIS 路径搜索中的应用[J]. 系统仿真学报,2009,21(10):3116-3119
- [4] 谭德荣,严新平. 变权值加快收敛的路径寻优实时算法[J]. 交通运输工程学报,2004,4(1):118-120
- [5] 李得伟,韩宝明,韩宇. 一种逆向改进型 A* 路径搜索算法[J]. 系统仿真学报,2007,19(22):5175-5177
- [6] Botea A, Muller M, Schaeffer J. Near optimal hierarchical path-finding[J]. Journal of Game Development, 2004, 1: 7-28
- [7] Jansen M R, Buro M. HPA* enhancements[C]//Proceedings of the Third Artificial Intelligence and Interactive Digital Entertainment Conference, Stanford, California, USA, 2007: 84-87
- [8] Li Yan, Chen Cai, Li Wen-liang, et al. KM-Aa*: A pathfinding algorithm for computer games based on Aa* and K-means Clustering[C]//Proceedings of 2010 The 3rd International Conference on Computational Intelligence and Industrial Application, Volume 7, Wuhan, China, 2010: 391-394
- [9] 雷小锋,谢昆青,林帆,等. 一种基于 K-Means 局部最优性的搞笑聚类算法[J]. 软件学报,2008,19(7):1683-1692
- [10] 于海涛,贾美娟,王慧强,等. 基于人工鱼群的优化 K-means 聚类算法[J]. 计算机科学,2012,39(12):60-64

(上接第 303 页)

- [3] Balduzzi F, Febraro D. A Combining Fault Detection and Process Optimization in Manufacturing Systems Using First-Order Hybrid Petri Nets[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2001:40-45
- [4] Lucas R F, Giua A, Piccaluga A. Modeling Production Systems with Inventory Using Hybrid Petri Nets [C]//IEEE International Conference on Control Applications. 2001:434-440
- [5] Giua A, Piloni M T, Seatzu C. Modelling and Simulation of a Bottling Plant Using Hybrid Petri Nets[J]. International Journal of Production Research, 2005, 43(7): 1375-1395
- [6] Dotoli M, Fanti M P, Iacobellis G. An Urban Traffic Network Model by First Order Hybrid Petri nets[C]//IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. 2008: 1929-1934

- [7] Dotoli M, Fanti M P. Fault Monitoring of Discrete Event Systems by First Order Hybrid Petri Nets[OL]. http://dee.poliba.it/labcontrolli/file_pdf/WPNM.pdf
- [8] Dotoli M, Fanti M P. A First-Order Hybrid Petri Net Model for Supply Chain Management[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2009, 6(4): 744-758
- [9] Dotoli M, Fanti M. A Freeway Traffic Control Model by First Order Hybrid Petri Nets[C]//IEEE Conference on Automation Science and Engineering. 2011: 425-431
- [10] 周航,黄志球,胡军,等. 基于 Time Petri Nets 的实时系统资源冲突检测[J]. 计算机研究与发展, 2009, 46(9): 1578-1585
- [11] David R, All H. Discrete, Continuous and Hybrid Petri Nets [M]. Scientific Publishing Services Pvt. Ltd., 2009
- [12] 廖伟志,古天龙. 区间速率连续 Petri 网的有效冲突及其消解[J]. 计算机科学, 2006, 33(10): 221-224