

区间速率连续 Petri 网的有效冲突及其消解^{*}

廖伟志^{1,3} 古天龙²

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

摘要 有效冲突是 Petri 网及其扩展模型的重要行为。本文讨论了区间速率连续 Petri 网模型的有效冲突问题。通过划分区间速率连续 Petri 网的标识等价类,提出了区间速率连续 Petri 网在任意标识下的瞬时引发速率的有效求解方法,并提出了区间速率连续 Petri 网最大瞬时引发速率有效冲突的判定及消解方法。最后给出相应的分析例子。

关键词 区间速率连续 Petri 网,有效冲突,瞬时引发速率,标识等价类

Effective Conflict and its Elimination of Interval Speed Continuous Petri Nets

LIAO Wei-Zhi^{1,3} GU Tian-Long²

(School of Electronic Engineering, Xidian University, Xian 710071)¹

(School of Computer Science, Guience, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 54004)²

(Department of Information Technology, Guangxi Teachers Education University, Nanning 530001)³

Abstract The problem of effective conflict for interval speed continuous Petri nets (ICPN) is discussed. Since the instantaneous firing speed (IFS) is one of key parameters in effective conflict analysis, an efficient way to determine the instantaneous firing speed of Interval speed Continuous Petri Nets is presented. The method to determine and eliminate the effective conflict of an ICPN based on maximum firing mode is proposed. Finally, The methods proposed are illustrated by an example.

Keywords Interval speed continuous Petri nets, Effective conflict, Instantaneous firing speed, marking equivalence

1 引言

Petri 网是目前分析动态系统的一种广泛研究和应用的模型,已经建立了坚实的理论基础,并针对具体问题提出了多种扩展模型。为了解决 Petri 网可达状态爆炸问题, H. Alla 和 R. David 提出了连续 Petri 网(Continuous Petri nets, 简称 CPN)的概念和理论^[1]。根据瞬时引发速率计算方法的不同,可把连续 Petri 网分为 CCPN(Constant speed CPN)、VCPN(Variable speed CPN)及 ACPN(Asymptotic CPN)等^[1~4]。

目前,连续 Petri 网理论已应用于工业过程控制、制造系统、交通控制及离散事件系统等^[5~10]。基于近似时间 Petri 网的目的, Gu 提出了区间速率连续 Petri 网(Interval speed Continuous Petri Nets, 简称 ICPN), 研究结果表明区间速率连续 Petri 网模型的描述能力比其它连续 Petri 网模型的能力更强, CCPN、VCPN 等只是区间速率连续 Petri 网模型的一种特殊情形^[11,12]。文^[13]给出了基于区间速率连续 Petri 网模型的制造系统的优化与控制策略。

冲突是 Petri 网及其扩展模型的重要行为, 又称有效冲突(Effective conflict-EC)^[14~16], 解决好冲突是正确分析模型动态行为的基础和关键。在经典 Petri 网中, 有效冲突指两个迁移均为使能, 但只有一个能引发的关系。连续 Petri 网的有效冲突表现为两个迁移均为使能, 但只有一个能以非 0 速率引发的关系。当连续 Petri 网为实际系统建立模型时, 系统中的冲突现象不可避免地要反映在模型中, 如制造或装配系统中的资源竞争、操作柔性在连续 Petri 网就表现为网中的冲突。

有效冲突的存在使得网中使能迁移的引发产生不确定性, 在很多实际情况下需要消除这种不确定性, 即冲突消解。在区间速率连续 Petri 网中要消除这种不确定性, 只有通过外部控制才能消解, 而区间速率连续 Petri 网模型的使能和引发语义比其它连续 Petri 网模型的语义更复杂, 这就使得消解变得复杂和困难。本文就区间速率连续 Petri 网模型的有效冲突问题进行讨论。

本文第 2 部分根据区间速率连续 Petri 网的语义提出任意标识下的瞬时引发速率的有效求解方法; 第 3 部分在给出有效冲突一般定义的基础上讨论最大瞬时引发速率的有效冲突问题; 第 4 部分是给出最大瞬时引发速率的有效冲突消解算法。最后是举例分析。

2 区间速率连续 Petri 网的瞬时引发速率

瞬时引发速率(Instantaneous Firing Speed, 简称 IFS)是连续 Petri 网模型行为、性质等分析的基础和关键。连续 Petri 网的冲突表现为迁移的瞬时引发速率的冲突, 因此区间速率连续 Petri 网的瞬时引发速率是讨论冲突的基础。为此, 本节先提出区间速率连续 Petri 网的瞬时引发速率的有效求解方法。

2.1 区间速率连续 Petri 网的瞬时引发速率集

定义 2.1^[11,12] 区间速率连续 Petri 网为一个五元组 $N = \langle P, T, Pre, Post, F \rangle$, 其中 $P, T, Pre, Post$ 等含义见文^[11,12]。

对任意的迁移 t_j , 记 $F(t_j) = [V_j^{\min}, V_j^{\max}]$, V_j^{\min}, V_j^{\max} 分别为 t_j 的最小、最大引发速率, $V_j^{\min} \leq V_j^{\max}$ 。迁移 t_j 的所有输

^{*} 国家自然科学基金项目(60243002)、广西科学基金项目(桂科基 0448072)。廖伟志 讲师, 博士研究生, 主要从事形式化技术及其应用、混杂系统建模与控制方面的研究; 古天龙 教授, 博士生导师, 主要从事形式化技术、混杂系统及实时系统理论及应用等方面的研究。

人、输出库所分别用 t_j, t_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。时刻 τ 库所 p_i 的标识记为 $m_i(\tau)$;所有库所标识记为 $m(\tau) = (m_1(\tau), m_2(\tau), \dots, m_k(\tau))$, 其中 $k = |P|$; 迁移 t_j 在时刻 τ 的瞬时引发速率记为 $v_j(\tau)$; 时刻 τ 所有迁移的瞬时引发速率记为 $v(\tau) = (v_1(\tau), v_2(\tau), \dots, v_n(\tau))$, 其中 $n = |T|$ 。用 $\langle N, m_0 \rangle$ 表示具有初始标识 m_0 的区间速率连续 Petri 网, 并把 0 标识的库所简称为 0 库所。

定义 2.2 令向量集 $F = \{e = (e_1, e_2, \dots, e_n) | e_j \in \{-1, 0, 1, 2\}, 1 \leq j \leq n\}$, 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 为区间率连续 Petri 网在标识 m 下的一个使能矢量, 对应的瞬时引发速率(IFS)集记为 $SP(N, m, e)$, 并把区间速率连续 Petri 网在标识 m 下的使能矢量集记为 $EN(N, m)$ 。

性质 2.1 设 $e = (e_1, e_2, \dots, e_n)$ 为区间速率连续 Petri 网在标识 m 下的一个使能矢量, 根据区间速率连续 Petri 网的语义及性质, 在 e 下各个迁移的 IFS 满足如下约束集:

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

其中 D_i 为:

$$\sum_k Pre(p_i, t_k) \cdot v_k(\tau) - \sum_{k \neq j} Post(p_i, t_k) \cdot v_k(\tau), 1 \leq j \leq n,$$

特别地把该约束集记为 $LC(N, m, e)$ 。该约束集可化为方程组 $Ax = b$, 因此使能矢量 e 的瞬时引发速率集就是该方程组的解。

性质 2.2 对于 $\langle N, m \rangle$ 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 $e \notin EN(N, m)$ 。

2.2 标识等价类划分及其应用

定义 2.3 设区间速率连续 Petri 网的标识集 $M = \{m = (m_1, \dots, m_k) | m_i \in \{0\} \cup \mathbb{R}^+, 1 \leq i \leq k\}$, 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, 首先 $\forall m \in M, m \sim m$; 其次 $\forall m_1, m_2 \in M, m_1 \sim m_2 \Rightarrow m_2 \sim m_1$; 最后 $\forall m_1, m_2, m_3 \in M, (m_1 \sim m_2) \wedge (m_2 \sim m_3) \Rightarrow m_1 \sim m_3$ 。

设 $m \in M$, 把区间速率连续 Petri 网在标识 m 下所有具有输出迁移的库所标识矢量记为 $m[1]$, 而把区间速率连续 Petri 网在标识 m 下所有无输出迁移的库所标识矢量记为 $m[0]$, 我们有如下定理。

定理 2.1 设 $m_1, m_2 \in M$, 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, 若区

间速率连续 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, 根据区间速率连续 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 $m_1[1] \sim m_2[1]$, 那么对于 $EN(N, m_1)$ 中任意的使能矢量 $e, e \in EN(N, m_2)$, 再由性质 2.1 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 2.4 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 2.3 设区间速率连续 Petri 网具有 p_1, p_2, \dots, p_k 共 k 个库所, 根据等价关系 \sim 区间速率连续 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 2.1 区间速率连续 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 2.1 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。

根据性质 2.3 和推论 2.1 不难得出如下结论:

结论 2.1 区间速率连续 Petri 网的标识是无穷的, 而区间速率连续 Petri 网的使能矢量及其瞬时引发速率集是有限的。

结论 2.2 只要利用性质 2.1 和 2.2 确定区间速率连续 Petri 网在各个 0-1 标识下的使能矢量及对应的瞬时引发速率集就能够确定区间速率连续 Petri 网在任意标识下的使能矢量及其瞬时引发速率集。

3 区间速率连续 Petri 网的有效冲突及判定

首先给出区间速率连续 Petri 网有效冲突的一般定义。

定义 3.1 设 $K = \langle p_i, \{t \in p_i\} \rangle, \tau$ 为一区域状态(regional state)的初始时刻, $m(\tau)$ 为其初始标识, 若存在 $v_k(\tau) = (v_{j_1}(\tau), v_{j_2}(\tau), \dots, v_{j_s}(\tau))$ 满足下列条件:

- (1) $m_i(\tau) = 0$,
- (2) $\forall v_j \in p_i, \sum_{t_k \in \cdot p_i} v_k(\tau) \geq V_j^{\min}$,
- (3) $\sum_{t_k \in \cdot p_i} v_k(\tau) < \sum_{t_j \in p_i} V_j^{\min}$,

则称 K 在 $m(\tau)$ 下产生有效冲突, 其中 $v_{j_1}(\tau), v_{j_2}(\tau), \dots, v_{j_s}(\tau) \in \{SP(N, m(\tau), e) | e \in EN(N, m(\tau))\}, p_i = \{t_{j_1}, t_{j_2}, \dots, t_{j_s}\}$ 。

图 1 列出了产生/不产生有效冲突的典型情形。

• 在图(a)情形的标识下, $K = \langle p, \{t_2, t_3\} \rangle$ 不会产生有效冲突。

• 在图(b)情形的标识下, $K = \langle p, \{t_2, t_3\} \rangle$ 产生有效冲突完全取决于迁移 t_1 的瞬时引发速率。根据定义 3.1 不难知道, 当迁移 t_1 的瞬时引发速率大于等于 0.4 且小于 0.5 时, $K = \langle p, \{t_2, t_3\} \rangle$ 产生有效冲突; 而当迁移 t_1 的瞬时引发速率大于等于 0.5 时, $K = \langle p, \{t_2, t_3\} \rangle$ 不会产生有效冲突。

• 在图(c)情形的标识下, $K = \langle p, \{t_2, t_3\} \rangle$ 不会产生有效冲突。

• 在图(d)情形的标识下, 无论迁移 t_1 的瞬时引发速率

如何, $K = \langle p, \{t_2, t_3\} \rangle$ 均产生有效冲突。

最大引发模式, 即系统以最大的引发速率工作, 是一种常用的引发模式。下面对最大瞬时引发速率的有效冲突进行讨论。

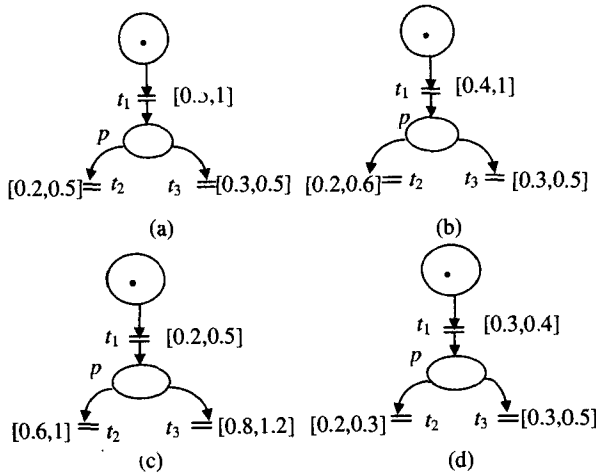


图1 产生/不产生有效冲突的典型情形

定义 3.2 设 τ 为一区域状态的初始时刻, $m(\tau)$ 为其初始标识, 区间速率连续 Petri 网在标识 $m(\tau)$ 下的瞬时引发速率集表示为 $SP(N, m(\tau))$ 且 $v(\tau) \in SP(N, m(\tau))$, 若 $SP(N, m(\tau))$ 不存在任一不等于 $v(\tau)$ 的引发速率 $u(\tau)$, 使得 $u(\tau)$ 的每一分量 $u_j(\tau)$ 满足 $u_j(\tau) \geq v_j(\tau) (1 \leq j \leq n)$, 则称 $v(\tau)$ 为区间速率连续 Petri 网在标识 $m(\tau)$ 下的一个最大瞬时引发速率。

定义 3.3 设 $K = \langle p_i, \{t | t \in p_i\} \rangle$, τ 为一区域状态的初始时刻, $m(\tau)$ 为其初始标识, 若存在最大瞬时引发速率 $v(\tau) \in SP(N, m(\tau))$ 满足下列条件:

- (1) $m_i(\tau) = 0$,
- (2) $\forall t_j \in p_i, \sum_{t_k \in \cdot p_i} v_k(\tau) \geq V_j^{\min}$,
- (3) $\sum_{t_k \in \cdot p_i} v_k(\tau) < \sum_{t_j \in p_i} V_j^{\min}$,

则称 K 在 $m(\tau)$ 下产生基于最大瞬时引发速率的有效冲突, 其中 $v_k(\tau)$ 为迁移 t_k 的最大瞬时引发速率。

定义 3.4 设区间速率连续 Petri 网在标识 $m(\tau)$ 下的使能向量集为 $EN(N, m(\tau))$ 且 $e \in EN(N, m(\tau))$, 若 $EN(N, m(\tau))$ 不存在任一不等于 e 的使能向量 f , 使得 f 的每一非 0 分量 f_j 满足 $f_j \geq e_j (1 \leq j \leq n)$, 则称 e 为区间速率连续 Petri 网在标识 $m(\tau)$ 下的一个最大使能向量。

定义 3.5 设 τ 为一区域状态的初始时刻, $m(\tau)$ 为其初始标识, e 为区间速率连续 Petri 网在标识 $m(\tau)$ 下的使能向量且 $v(\tau) \in SP(N, m(\tau), e)$, 若 $SP(N, m(\tau), e)$ 不存在任一不等于 $v(\tau)$ 的引发速率 $u(\tau)$, 使得 $u(\tau)$ 的每一分量 $u_j(\tau)$ 满足 $u_j(\tau) \geq v_j(\tau) (1 \leq j \leq n)$, 则称 $v(\tau)$ 为区间速率连续 Petri 网在使能向量 e 下的最大瞬时引发速率。

定理 3.1 设 τ 为一区域状态的初始时刻, $m(\tau)$ 为其初始标识, 区间速率连续 Petri 网在最大使能向量下的最大瞬时引发速率必为区间速率连续 Petri 网在标识 $m(\tau)$ 下的一个最大瞬时引发速率。

证明:(反证法) 设 $v(\tau)$ 为区间速率连续 Petri 网在最大使能向量 e 下的最大瞬时引发速率。若 $v(\tau)$ 不是区间速率连续 Petri 网在标识 $m(\tau)$ 下的一个最大瞬时引发速率, 则存在不等于 $v(\tau)$ 的瞬时引发速率 $u(\tau)$, 使得 $u(\tau)$ 的每一分量 $u_j(\tau)$

(τ) 满足 $u_j(\tau) \geq v_j(\tau) (1 \leq j \leq n)$ 。显然 $u(\tau) \in SP(N, m(\tau), e)$, 否则与 $v(\tau)$ 为区间速率连续 Petri 网在最大使能向量 e 下的最大瞬时引发速率相矛盾。因此必存在不等于 e 的使能向量 f , 使得 $u(\tau) \in SP(N, m(\tau), f)$ 。下面分两种情况讨论。(1) 若 f 为最大使能向量, 由于 e 为最大使能向量, 因此存在 e, f 的分量, 使得 $e_j > f_j$ 且 $e_k < f_k$, 即有 $e_j = 1$, 而 $f_j = 0$ 或 -1 , 于是 $v_j(\tau) > 0$, 而 $u_j(\tau) = 0$, 与假设相矛盾。(2) 若 f 不为最大使能向量, 则存在 e, f 的分量, 使得 $e_j > f_j$, 即有 $e_j = 1$, 而 $f_j = 0$ 或 -1 , 于是 $v_j(\tau) > 0$, 而 $u_j(\tau) = 0$, 与假设相矛盾。因此不存在不等于 $v(\tau)$ 的引发速率 $u(\tau)$, 使得 $u(\tau)$ 的每一分量 $u_j(\tau)$ 满足 $u_j(\tau) \geq v_j(\tau) (1 \leq j \leq n)$, 于是 $v(\tau)$ 为区间速率连续 Petri 网在标识 $m(\tau)$ 下的一个最大瞬时引发速率。命题得证。

定理 3.2 设 $K = \langle p_i, \{t | t \in p_i\} \rangle$, τ 为一区域状态的初始时刻, $m(\tau)$ 为其初始标识, 若 K 在 $m(\tau)$ 下产生基于最大瞬时引发速率的有效冲突, 则至少存在两个最大瞬时引发速率 $v(\tau)$ 和 $u(\tau)$, 使得 $v_j(\tau) < u_j(\tau)$ 且 $v_k(\tau) > u_k(\tau)$, 其中 $v(\tau), u(\tau) \in SP(N, m(\tau))$, $v_j(\tau), v_k(\tau), u_j(\tau), u_k(\tau)$ 为 $v(\tau)$ 和 $u(\tau)$ 的分量。

证明: 由于 K 在 $m(\tau)$ 下产生基于最大瞬时引发速率的有效冲突, 则根据定义 3.3 可知:

- (1) $m_i(\tau) = 0$,
- (2) $\forall t_j \in p_i, \sum_{t_k \in \cdot p_i} v_k(\tau) \geq V_j^{\min}$,
- (3) $\sum_{t_k \in \cdot p_i} v_k(\tau) < \sum_{t_j \in p_i} V_j^{\min}$ 。

由(3)可知, 在所有 p_i 的迁移中至少存在一个迁移, 不妨设为迁移 t_i 是不能引发的, 即其最大瞬时引发速率 $v_i(\tau) = 0$ 。另一方面, 由(2)可知, 只要分配给迁移 t_i 足够的流量, 迁移 t_i 是能够引发的。因此区间速率连续 Petri 网在标识 $m(\tau)$ 下的最大使能向量不是唯一, 根据定理 3.1 可知至少存在两个最大瞬时引发速率 $v(\tau)$ 和 $u(\tau)$, 再由定义 3.2 易知存在 $v(\tau)$ 和 $u(\tau)$ 的分量 $v_j(\tau), v_k(\tau), u_j(\tau), u_k(\tau)$ 满足 $v_j(\tau) < u_j(\tau)$ 且 $v_k(\tau) > u_k(\tau)$ 。证毕。

4 最大瞬时引发速率有效冲突的消解

由定理 3.2 可知, 当区间速率连续 Petri 网存在基于最大瞬时引发速率的有效冲突时, 区间速率连续 Petri 网具有多个最大瞬时引发速率。而在实际系统中, 基于最大瞬时引发速率的区间速率连续 Petri 网行为分析则要求确定系统的唯一最大瞬时引发速率。本节讨论最大瞬时引发速率有效冲突的一种解决方法。

定义 4.1 具有全局优先级迁移的区间速率连续 Petri 网为一六元组 $N' = \langle P, T, Pre, Post, F, Q \rangle$, 其中

- (1) $P, T, Pre, Post, F$ 等含义同定义 2.1;
- (2) $Q: T \rightarrow \{0, N^+\}$ 为迁移全局优先级向量, 其中迁移 t_j 的优先级表示为 Q_j 并且不同迁移具有不同的优先级。

定义 4.2 设 $v \in G$, 若对任意 $u \in G (v \neq u)$, 存在一些迁移 t_j 使得 $v_j < u_j$, 那么存在迁移 t_k 使得 $Q_k > Q_j$ 且 $v_k > u_k$, 则称 v 为基于全局优先级的最大瞬时引发速率, 其中 G 为最大瞬时引发速率集。

性质 4.1 设 e 为区间速率连续 Petri 网在标识 m 下的一个使能矢量, 下列约束集记为 $MLC(N, m, e)$

$$\begin{cases} (a) v_j = V_j^{\max} & \forall e_j = 2 \\ (b)(c)(d)(e)(f) \text{同性质 2.1} \end{cases} \quad (2)$$

若 v 为区间速率连续 Petri 网在标识 m 的一个最大瞬时引发

速率,则 v 必满足 $MLC(N, m, e)$ 。

结合瞬时引发速率的求解方法及全局优先级策略,我们给出最大瞬时引发速率下的有效冲突的求解方法,即给出区间速率连续 Petri 网唯一最大瞬时引发速率的求解算法。

4.1 符号及其含义

(1) 设 $T_i = \{t_i | \forall p_i \in T, m_i > 0, m_i \text{ 为 } m(\tau) \text{ 的分量}\}$ 为区间速率连续 Petri 网在标识 $m(\tau)$ 下的强使能迁移集;

(2) EN 为区间速率连续 Petri 网在标识 $m(\tau)$ 下的使能矢量集,相应的 IFS 集用 SP 表示;而 $SP(e)$ 为区间速率连续 Petri 网在使能矢量 e 下的 IFS 集;

(3) M_v 为基于全局优先级的最大瞬时引发速率数组;

(4) 数组 $PRI-EN$ 存放使能矢量集 EN 中的非强使能迁移的优先级并按照优先级从高到低存放迁移下标;

(5) $EN-A, EN-B$ 为临时存储使能矢量的集合。

4.2 算法的基本思想

本文采取在迁移中引入全局优先级策略,在确定非强使能迁移最大瞬时引发速率的过程中首先让高优先级迁移的瞬时引发速率最大,然后再让低优先级迁移的瞬时引发速率达到最大。根据迁移的优先级和性质 2.1,利用线性规我们可以计算各个迁移的最大瞬时引发速率。

4.3 算法描述

算法 1 基于全局优先级的最大瞬时引发速率有效冲突求解算法

输入:具有一定标识的全局优先级迁移的区间速率连续 Petri 网

输出:各个迁移的最大瞬时引发速率

Step1 初始化: $EN \leftarrow \emptyset, SP \leftarrow \emptyset$;

Step2 $F = \{e | e = (e_1, e_2, \dots, e_n), \text{若 } t_i \in T_s, \text{则 } e_i = 2, \text{否则 } e_i \text{ 等于 } 0 \text{ 或 } 1 \text{ 或 } -1\}$;

Step3 若 $F = \emptyset$ 则转至 Step6, 否则任取 F 中的任一模式 $e, F \leftarrow F - \{e\}$;

Step4 按照性质 4.1 建立方程组 $Ax = b$, 求出方程组的解 X ;

Step5 若 $X \neq \emptyset$, 则 $EN \rightarrow EN \cup \{e\}, SP \leftarrow SP \cup \{X\}$, 转至 Step3;

Step6 $\forall t_j \in T_s, M_v[j] = V_j^{\max}; i \leftarrow i + 1; EN-B \leftarrow EN$; 构造优先级数组 b ;

Step7 若 $i > |T| - |T_s|$ 则结束, 否则 $EN-A \leftarrow EN-B, EN-B \leftarrow \emptyset$;

Step8 任取 $EN-A$ 中一使能矢量 $e, EN-A \leftarrow EN-A - \{e\}$;

Step9 利用线性规划计算迁移 $t_{b[i]}$ 在 $SP(e)$ 中的最大引发速率 Max_speed ;

Step10 $EN-B \leftarrow EN-B \cup \{e\}, M_v[b[i]] \leftarrow Max_speed$;

Step11 若 $EN-A = \emptyset$ 则 $i \leftarrow i + 1$ 转至 Step7, 否则任取 $EN-A$ 中的任一使能矢量 $e, EN-A \leftarrow EN-A - \{e\}$;

Step12 利用线性规划计算迁移 $t_{b[i]}$ 在 $SP(e)$ 中的最大引发速率 Max_speed ;

Step13 若 $Max_speed > M_v[b[i]]$, 则

$M_v[b[i]] \leftarrow Max_speed, EN-B \leftarrow \emptyset, EN-B \leftarrow EN-B \cup \{e\}$; 转至 Step11;

若 $Max_speed = M_v[b[i]]$, 则

$EN-B \leftarrow EN-B \cup \{e\}$; 转至 Step11;

4.4 时间复杂度分析

根据算法可知,算法的时间复杂度由 Step3 至 Step5 的循环语句, Step7 至 Step11 以及 Step11 至 Step13 的循环语句所决定。设区间速率连续 Petri 网的迁移个数为 n , 在标识下的强使能迁移的个数为 s , 则这些循环语句的单个语句执行的频度至多为 2^{n-s} , 因此算法最坏情况下的时间复杂度为 $O(2^n)$, 而最好情况下的时间复杂度为 $O(1)$ 。时间复杂度的大小取决于区间速率连续 Petri 网的标识。

5 分析举例

图 2 所示为具有 4 台机器的化工生产系统。机器 M_1, M_2 生产的半成品送入缓冲区 B3, 两台机器的速率分别限定在速率区间 $[2, 3]$ 和 $[3, 5]$ 。机器 M_3 加工的产品送入缓冲区 4, 其速率限定在速率区间 $[4, 6]$ 。缓冲区 4 的产品分别送入机器 M_4, M_5 进行加工, 两台机器的速率分别限定在速率区间 $[3, 4]$ 和 $[1, 2]$ 。设缓冲区 3 的最大容量为 30, 其初始值为 10, 其它缓冲区的容量为无限大。对应的区间速率连续 Petri 网模型如图 3 所示。

试分析如下问题: (1) 该生产系统的各个机器在标识 $(m_1, 0, m_3)$ 下的速率集, 其中 $m_1, m_3 > 0$; (2) 系统基于全局优先级在各个标识下的最大瞬时引发速率的冲突消解。

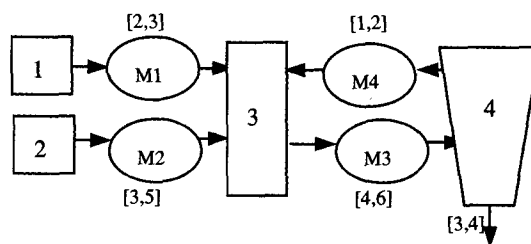


图 2 一个化工生产系统

(1) 由于标识 $(m_1, 0, m_3)$ 与 $0-1$ 标识 $(1, 0, 1)$ 等价, 其中 $m_1, m_3 > 0$, 因此只需求出机器在标识 $(1, 0, 1)$ 下的速率集即可求出结果。由性质 2.1 及性质 2.2 可求出该生产系统的各个机器在标识 $(m_1, 0, m_3)$ 下的使能向量集及其相应的瞬时引发速率集如下:

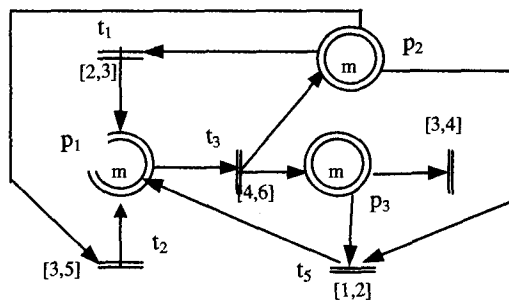


图 3 生产系统的区间速率连续 Petri 网模型

$EN(N, m) = \{(1, 1, 2, 2, 1), (1, 1, 2, 2, 0), (1, 1, 2, 2, -1), (0, 1, 2, 2, 1), (-1, 1, 2, 2, 1), (1, 0, 2, 2, 1), (1, -1, 2, 2, 1), (0, 1, 2, 2, 0), (1, 0, 2, 2, 0), (-1, 1, 2, 2, -1)\}$,

$SP(N, m, (1, 1, 2, 2, 1)) = \{v_1 = 2, v_2 = 3, v_3 = 6, 3 \leq v_4 \leq 4, v_5 = 1\}$,

$SP(N, m, (1, 1, 2, 2, 0)) = \{2 \leq v_1 \leq 3, 3 \leq v_2 \leq 5, 4 \leq v_3 \leq 6, 3 \leq v_4 \leq 4, v_5 = 0 | 0 < v_3 - v_2 - v_1 < 1\}$,

$SP(N, m, (1, 1, 2, 2, -1)) = \{2 \leq v_1 \leq 3, 3 \leq v_2 \leq 5, 4 \leq v_3 \leq 6, 3 \leq v_4 \leq 4, v_5 = 0 | v_3 = v_2 + v_1\}$,

(下转封四)

(上接第 224 页)

$$SP(N, m, (0, 1, 2, 2, 1)) = \{v_1 = 0, 3 \leq v_2 \leq 5, 4 \leq v_3 \leq 6, 3 \leq v_4 \leq 4, 1 \leq v_5 \leq 2 | 0 < v_3 - v_2 - v_5 < 1\},$$

$$SP(N, m, (-1, 1, 2, 2, 1)) = \{v_1 = 0, 3 \leq v_2 \leq 5, 4 \leq v_3 \leq 6, 3 \leq v_4 \leq 4, 1 \leq v_5 \leq 2 | v_3 - v_2 - v_5 = 0\},$$

$$SP(N, m, (1, 0, 2, 2, 1)) = \{2 \leq v_1 \leq 3, v_2 = 0, 4 \leq v_3 \leq 6, 3 \leq v_4 \leq 4, 1 \leq v_5 \leq 1 | 0 < v_3 - v_1 - v_5 < 3\},$$

$$SP(N, m, (1, -1, 2, 2, 1)) = \{2 \leq v_1 \leq 3, v_2 = 0, 4 \leq v_3 \leq 6, 3 \leq v_4 \leq 4, 1 \leq v_5 \leq 1 | v_3 - v_1 - v_5 = 0\},$$

$$SP(N, m, (0, 1, 2, 2, 0)) = \{v_1 = 0, 3 \leq v_2 \leq 5, 4 \leq v_3 \leq 6, 3 \leq v_4 \leq 4, v_5 = 0 | 0 < v_3 - v_2 < 1\},$$

$$SP(N, m, (1, 0, 2, 2, 0)) = \{2 \leq v_1 \leq 3, v_2 = 0, 4 \leq v_3 \leq 6, 3 \leq v_4 \leq 4, v_5 = 0 | 0 < v_3 - v_1 < 1\},$$

$$SP(N, m, (-1, 1, 2, 2, -1)) = \{v_1 = 0, 3 \leq v_2 \leq 5, 4 \leq v_3 \leq 6, 3 \leq v_4 \leq 4, v_5 = 0 | v_3 - v_2 = 0\}.$$

(2) 设图 3 的区间速率连续 Petri 网迁移的优先级关系为: t_1 的优先级高于 t_2 的优先级, t_2 的优先级高于 t_3 的优先级, t_3 的优先级高于 t_4 的优先级, t_4 的优先级高于 t_5 的优先级, 根据算法 1 可求出区间速率连续 Petri 网在此优先级关系下所有的最大瞬时引发速率即机器的最大运行速率。

若标识 m 与 0-1 标识(1, 1, 1)等价, 其最大瞬时引发速率为: $v_1 = 3, v_2 = 5, v_3 = 6, v_4 = 4, v_5 = 2$;

若标识 m 与 0-1 标识(1, 1, 0)等价, 其最大瞬时引发速率为: $v_1 = 3, v_2 = 5, v_3 = 6, v_4 = 4, v_5 = 2$;

若标识 m 与 0-1 标识(1, 0, 1)等价, 其最大瞬时引发速率为: $v_1 = 3, v_2 = 3, v_3 = 6, v_4 = 4, v_5 = 0$;

若标识 m 与 0-1 标识(1, 0, 0)等价, 其最大瞬时引发速率为: $v_1 = 3, v_2 = 3, v_3 = 6, v_4 = 4, v_5 = 0$;

若标识 m 与 0-1 标识(0, 1, 1)等价, 其最大瞬时引发速率为: $v_1 = 3, v_2 = 5, v_3 = 6, v_4 = 4, v_5 = 2$;

若标识 m 与 0-1 标识(0, 1, 0)等价, 其最大瞬时引发速率为: $v_1 = 3, v_2 = 5, v_3 = 6, v_4 = 4, v_5 = 2$;

若标识 m 与 0-1 标识(0, 0, 1)等价, 其最大瞬时引发速率为: $v_1 = 0, v_2 = 0, v_3 = 0, v_4 = 4, v_5 = 0$;

若标识 m 与 0-1 标识(0, 0, 0)等价, 其最大瞬时引发速率为: $v_1 = 0, v_2 = 0, v_3 = 0, v_4 = 0, v_5 = 0$ 。

结束语 由于区间速率连续 Petri 网模型描述能力涵盖了其它连续 Petri 网模型描述能力, 同时其语义更复杂, 有必要对区间速率连续 Petri 网模型的行为、性质及其应用等进行研究。本文讨论了区间速率连续 Petri 网的有效冲突及

其消解问题, 提出了瞬时引速率的有效求解方法, 并给出了最大瞬时引发速率有效冲突的判定及其消解方法, 为模型动态分析的正确性提供了技术保障。这些方法对于动态系统可靠性、安全性建模与分析都是非常重要的。

参考文献

- David R, Alla H. Continuous Petri Nets. In: 8th European Workshop on Applications and Theory of Petri Nets, Saragosse (E), Juin 1987. 275~294
- LE Ball J, Alla H, David R. Asymptotic Continuous Petri Nets. J Discrete Event Dynamic Systems; Theory and Applications, 1993, 2: 235~263
- Haounani M, Lefebvre D. Variable Speed Continuous Petri Net. In: Proc of the 17th IASTED Int Conf. Modeling, Identification And Control. Gringdeld, Switzerland, February 1998
- 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
- Alla H, David R. A Modeling and Analysis Tool for Discrete Event Systems; Continuous Petri Nets. Performance Evaluation, 1998, 33: 175~199
- 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
- Allam M, Alla H. Modeling and Simulation of An Electronic Component Manufacturing System Using Hybrid Petri Nets. IEEE Transition on Semiconductor Manufacturing, 1998, 11(3): 374~383
- Amrah A, Zerhouni N. On the Control of Manufacturing Lines Modeled by Controlled Continuous Petri Nets. Journal of Systems Sciences, 1998, 29(2): 127~137
- Droste M, Short R M. Continuous Petri Nets and Transition System, Unifying Petri Nets 2001. Lecture Notes in Computer Science, 2128. 457~484
- Febbraro A D, Giglio D, Sacco N. Modular Representation of Urban Traffic Systems Based on Hybrid Petri Nets. IEEE Intelligent Transportation Systems Conference Proceedings, Oakland, USA, 2001
- Gu Tianlong, Dong Rongsheng, Tian Yu-Chu. Continuous Petri Nets Augmented with Maximal and Minimal Firing Speeds. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC), 2003
- Gu Tianlong, Dong Rongsheng. Novel Continuous Model to Approximate Time Petri Nets: Modeling And Analysis. Journal of Application Mathematic and Computer Science, 2005, 15(1): 141~150
- Liao Weizhi, Gu Tianlong. Optimization and Control of Production Systems Based On Interval Speed Continuous Petri Nets. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC), Hawaii, USA, 2005
- Chiola G, Marsan M A, et al. Generalized Stochastic Petri Nets, A Definition at the Net Level And Its Application. IEEE Transaction on Software Engineer, 1993, 19(2): 89~107
- Ciarlo G, German R, Lindemann C. A Characterization of the Stochastic Process Underlying a Stochastic Petri Net. IEEE Transaction on Software Engineer, 1994, 20(7): 506~515
- 金光. HPN 基于网结构的冲突关系[J]. 国防科技大学学报, 2002, 24(4): 86~90

计算机科学

(1974 年 1 月创刊)

第 33 卷第 10 期 (月刊)

2006 年 10 月 25 日出版

国际标准连续出版物号 ISSN 1002-137X

国内统一连续物出版号 CN50-1075/TP

定价: 30.00 元 国外定价: 5 美元

邮发代号: 78-68

发行范围: 国内外公开

主管单位: 国家科学技术
 主办单位: 国家科技部西南信息
 编辑出版: 《计算机科学》杂志
 重庆市渝中区胜利路 132 号 邮政编码:
 电话: (023) 63500828 E-mail: jsjkk@
 网址: www.jsjkk.com

社 长: 牟炳林
 总 编: 彭 丹
 主 编: 朱宗元
 主编助理: 徐书令
 印刷者: 重庆科情印务有限公司
 总发行处: 重 庆 市 邮 政 局
 订购处: 全 国 各 地 邮 政 局
 国外总发行: 中国国际图书贸易总公司 (北京 399 信箱)
 国外代号: 6210-MO

