

基于模糊逻辑的CCPN瞬时引发速率求解方法

廖伟志^{1,3}, 古天龙²

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

摘要: 瞬时引发速率是连续Petri网模型分析的基础和关键。引入模糊理论提出了一种基于模糊决策的迁移优先权的模糊综合评价模型, 实现了迁移优先权的动态计算。提出了基于线性规划方法的瞬时引发速率的求解算法, 解决了有效冲突情形下瞬时引发速率的求解问题。实例表明了所提出方法的有效性。

关键词: 连续Petri网; 模糊逻辑; 瞬时引发速率; 有效冲突

Method for IFS Determination of Constant Speed Continuous Petri Nets Based on Fuzzy Logic

LIAO Weizhi^{1,3}, GU Tianlong²

(1. Department of Information Technology, Guangxi Teacher Education University, Nanning 530001; 2. School of Computer Science, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004; 3. School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071)

【Abstract】 As the traditional iterate algorithm found out, the instant firing speed (IFS) of CCPN may not be used when there is actual conflict, Z.Hanzalek has proposed a method to find the IFS for maximal speed CCPN based on the resolution of actual conflicts by global priorities. Since the priority of transition is constant, it could not be variable with the dynamic parameters of CCPN. Also, the proposed method does not comply with the semantic of CCPN. This paper makes following contributions: (1)proposes a fuzzy decision model to determine the priority of a transition; (2) develops a resolution of actual conflicts according to the semantic of CCPN; (3)gives an efficient way to determine the instant firing speed of CCPN based on linear programming.

【Key words】 Continuous Petri nets; Fuzzy logic; Instant firing speed; Effective conflict

1 概述

连续Petri网(Continuous Petri nets, CPN)的概念和理论首先由H.Alla和R.David等人提出,其最初的目的是利用连续Petri网来近似离散Petri网以减少状态数目从而解决可达状态爆炸问题^[1,2]。随着人们对连续Petri网研究的深入,目前连续Petri网无论是在理论还是在应用方面的研究均取得了很大的进展,已在实际领域如化工生产、制造系统、交通控制中得到应用,另外以连续Petri网为基础建立了各种混杂Petri网模型,用于混杂系统的建模与分析^[3-7]。

瞬时引发速率(Instant firing speed, IFS)是连续Petri网和混杂Petri网模型行为分析的基础和关键。根据CCPN的语义,文献[2]利用迭代思想给出了一个求解CCPN瞬时引发速率的算法,但该算法仅适用于CCPN无有效冲突的情形^[8]。然而在实际系统中却经常产生有效冲突,需要对冲突进行消解。优先权法是一种常用的冲突消解方法,其主要思想是当产生有效冲突时优先给高优先级的迁移分配连续流量。文献[8]利用多面体来描述CCPN的瞬时引发速率,并给出了自由速率CCPN(Free Speed CCPN)和基于全局优先权有效冲突消解策略的最大速率CCPN(Maximal Speed CCPN)的瞬时引发速率求解方法。然而已有方法存在如下问题:(1)各个迁移的优先权是静态的,不能根据模型参数的改变而改变,从而不能正确描述和分析一些实际系统;(2)不能根据模型语义正确求解有效冲突情形下的瞬时引发速率。

基于上述分析,本文引入模糊理论,根据迁移的最大引发速率、迁移的优先值和迁移的0输入库所个数3个因素建

立CCPN弱使能迁移优先权的模糊综合评价模型,通过评价模型来动态确定各个迁移的优先权。同时,根据CCPN模型语义提出了相应的有效冲突策略,并给出了基于线性规划方法的CCPN瞬时引发速率的有效求解方法。最后通过实例进行了分析和讨论。

2 基本概念^[2]

定义1 恒定速率连续Petri网为一六元组 $R = \langle P, T, V, Pre, Post, m(0) \rangle$, 其中:

- (1) P 、 T 、 Pre 、 $Post$ 的定义和离散Petri网相似。
- (2) $m(0)$ 为连续Petri网的初始标识,且有 $m(0) \rightarrow 0 \cup R^+$ 。
- (3) $V: T \rightarrow 0 \cup R^+$ 为最大引发速率向量。迁移 t_j 的最大引发速率用 V_j 来表示。

定义2 库所 p_i 在时刻 τ 被填充,当且仅当至少存在 t_j 中的一个使能迁移 t_j , 其中 t_j 为库所 p_i 的输入迁移集。

定义3 若 t_j 中的任意库所 p_i 至少满足如下两个条件中的一个:

- (1) 库所 p_i 在时刻 τ 的标识 $m_i(\tau) > 0$
- (2) 库所 p_i 在时刻 τ 被填充

则称 t_j 在时刻 τ 是使能迁移,特别是 t_j 中的所有库所 p_i 均满足

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60563005); 广西青年科学基金资助项目(桂科青 0640032, 桂科基 0448072); 广西教育厅自筹项目(200508174)

作者简介: 廖伟志(1974-),男,讲师、博士生,主研方向:形式化技术及其应用,混杂系统建模与控制等;古天龙,教授、博导

收稿日期: 2006-06-14 **E-mail:** liaowz@gxtc.edu.cn

条件(1), 则 t_j 为强使能迁移, 否则 t_j 为弱使能迁移。其中 \cdot 为迁移 t_j 的输入库所集。

性质 1 时刻 τ 的强使能迁移 t_j 的瞬时引发速率 $v_j(\tau)$ 为其最大引发速率 V_j 。

性质 2 时刻 τ 的弱使能迁移 t_j 的瞬时引发速率 $v_j(\tau)$ 以尽可能大的速率引发且满足 $0 \leq v_j(\tau) \leq V_j$, 同时任意被填充的 0 库所 p_i 满足

$$\sum_{t_j \in \cdot p_i} \text{post}(p_i, t_j) \cdot v_j(\tau) - \sum_{t_k \in p_i} \text{pre}(p_i, t_k) \cdot v_k(\tau) \geq 0 \quad (1)$$

3 迁移优先权的模糊综合评价模型

在这里不再以迁移的优先值作为衡量迁移优先权的唯一标准, 在实际系统当中, 需要综合考虑迁移的最大引发速率和迁移的 0 输入库所个数等诸多因素^[3]。下面给出如何通过模糊决策模型来确定迁移的优先权。

(1) 因素集的确

设因素集 $U = \{x_1, x_2, x_3\}$ 为反映弱使能迁移优先权的主要指标。其中, x_1 为迁移的最大引发速率; x_2 为迁移的优先值; x_3 为迁移的 0 输入库所个数。

(2) 评判集的确

由于强使能迁移总是能以最大引发速率引发, 因此只需考虑对弱使能迁移的优先权进行排序, 于是有评判集 $V = \{t_i | t_i \text{ 为弱使能迁移}\}$ 。弱使能迁移的优先权指标可按表 1 给出。

表 1 弱使能迁移的优先权指标

弱使能迁移	指标 x_1	指标 x_2	指标 x_3
t_{n1}	V_{n1}	y_1	c_1
t_{n2}	V_{n2}	y_2	c_2
...
t_{nk}	V_{nk}	y_k	c_k

(3) 单因素评判矩阵的建立

令

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{j=1}^k x_{ij}} \quad (i=1, 2, 3; \quad j=1, 2, \dots, k) \quad (2)$$

则单因素评判矩阵 $R = (r_{ij})_{3 \times k}$, r_{ij} 表示迁移 t_{nj} 的第 i 个因素的值在所有弱使能迁移的同一因素值的总和中所占的比例。

(4) 综合评判

设各因素的权重分配为 $A = (a_1, a_2, a_3)$, 其中 $a_1 + a_2 + a_3 = 1$ 。于是综合评判 $B = A * R$, 其中 $B = (b_1, b_2, \dots, b_k)$,

$$b_j = \bigvee_{i=1}^3 (a_i \wedge r_{ij}) \quad (j=1, 2, \dots, k) \quad (3)$$

简记为 $M(\wedge^*, \vee^*)$, 具体的各类计算模型如下:

模型 1 主因素决定型 $M(\wedge, \vee)$

$$b_j = \bigvee_{i=1}^3 (a_i \wedge r_{ij}) \quad (j=1, 2, \dots, k) \quad (4)$$

模型 2 主因素突出型 $M(\cdot, \vee)$

$$b_j = \bigvee_{i=1}^3 (a_i \cdot r_{ij}) \quad (j=1, 2, \dots, k) \quad (5)$$

模型 3 主因素突出型 $M(\wedge, \oplus)$

$$b_j = \bigoplus_{i=1}^3 (a_i \wedge r_{ij}) \quad (j=1, 2, \dots, k) \quad (6)$$

模型 4 加权平均型 $M(\cdot, +)$

$$b_j = \sum_{i=1}^3 a_i \cdot r_{ij} \quad (j=1, 2, \dots, k) \quad (7)$$

(5) 优先权的确定

令迁移 t_{nj} 的优先权为 Q_{nj} , 则

$$Q_{nj} = \text{RANK}(b_j, B) \quad (8)$$

其中 $\text{RANK}(b_j, B)$ 为 b_j 在 b_1, b_2, \dots, b_k 中按大到小的排名。

4 有效冲突消解及瞬时引发速率求解

定义 4^[2] 设 $K = \langle p_i, \{t_1, t_2, \dots, t_u\}, m(\tau) \rangle$ 为一结构冲突, 如果以下条件满足, 则 $\langle p_i, \{t_1, t_2, \dots, t_u\}, m(\tau) \rangle$ 为一有效冲突:

(1) t_1, t_2, \dots, t_u 在 $m(\tau)$ 下是使能的;

(2) $m_i(\tau) = 0$;

(3) $0 < \sum v_j(\tau) < \sum V_u$

这里, j 使得 $t_j \in \cdot p_i$; 当除 p_i 外, 没有其它的位置限制引发速率时, t_j 可以其最大速率引发。

有效冲突是 Petri 网及其扩展模型的重要行为, 解决好冲突是正确分析模型动态行为的基础和关键。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、操作柔性等在连续 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。有效冲突的解决, 往往需要人工干预或制定有效可行的冲突解决方案, 如优先权法、按最大速率比例分配法等, 并通过这些方法确定各个迁移的瞬时引发速率。下面以上述优先权模糊综合评价模型为基础并不改变 CCPN 语义为前提实现瞬时引发速率的求解。主要的思想是: 弱使能迁移的优先权根据不变行为状态的初始时刻的相关参数, 利用优先权模糊综合评价模型确定, 其优先权是动态的, 而不是静态的。有效冲突消解策略为: 强使能迁移总是能以最大引发速率引发, 而弱使能迁移则根据迁移优先级的高低来确定并尽可能以最大的速率引发。下面给出基于上述思想的瞬时引发速率求解过程。

设 CCPN 的第 k 个不变行为状态的初始时刻为 τ , 各个迁移在时刻 τ 的瞬时引发速率可通过如下步骤求得。

Step1 根据文献[2]的算法 1 计算在标识向量 $m(\tau)$ 下的强使能迁移集 $S_EN(\tau)$ 和弱使能迁移集 $W_EN(\tau)$ 。 $S_EN(\tau)$ 集合中的各个迁移 t_j 在时刻 τ 的引发速率为 V_j 。

Step2 判定是否产生有效冲突, 若有则转到 Step3, 否则利用文献[2]的算法 1 求迁移的瞬时引发速率。

Step3 根据优先权模糊综合评价模型确定弱使能迁移集 $W_EN(\tau)$ 各个迁移的优先权。

Step4 优先级最高的弱使能迁移 t_{i1} 的瞬时引发速率 $v_{i1}(\tau)$ 通过如下线性规划求出。

$$\begin{cases} \max v_{i1}(\tau) \\ v_j(\tau) = V_j & \forall t_j \in S_EN \quad (1) \\ 0 \leq v_j(\tau) \leq V_j & \forall t_j \in W_EN \quad (2) \\ \sum_{t_j \in \cdot p_i} \text{post}(p_i, t_j) \cdot v_j(\tau) - \sum_{t_k \in p_i} \text{pre}(p_i, t_k) \cdot v_k(\tau) \geq 0 & \forall p_i \in P^0 \quad (3) \end{cases}$$

其中 P^0 为所有被填充的 0 库所集。

Step5 假设经过 Step4 的计算有 $v_{i1}(\tau) = a_1$, 则优先级为第 2 高的弱使能迁移 t_{i2} 的瞬时引发速率 $v_{i2}(\tau)$ 可通过如下线性规划求得

$$\begin{cases} \max v_{i2}(\tau) \\ v_j(\tau) = V_j & \forall t_j \in S_EN \quad (1) \\ v_{i1}(\tau) = a_1 & (2) \\ 0 \leq v_j \leq V_j & \forall t_j \in W_EN - \{t_{i1}\} \quad (3) \\ \sum_{t_j \in \cdot p_i} \text{post}(p_i, t_j) \cdot v_j(\tau) - \sum_{t_k \in p_i} \text{pre}(p_i, t_k) \cdot v_k(\tau) \geq 0 & \forall p_i \in P^0 \quad (4) \end{cases}$$

Step k+3 假设 $v_{i1}(\tau)=a_1, v_{i2}(\tau)=a_2, \dots, v_{i(k-1)}(\tau)=a_{k-1}$, 则优先级为第k高的弱使能迁移 t_{ik} 的瞬时引发速率 $v_{ik}(\tau)$ 可通过如下线性规划求得

$$\begin{aligned} \max \quad & v_{ik}(\tau) \\ \left\{ \begin{array}{l} v_j(\tau)=V_j \quad \forall t_j \in S_EN \quad (1) \\ v_{i1}(\tau)=a_1 \quad (2) \\ v_{i2}(\tau)=a_2 \quad (3) \\ \dots \quad (4) \\ v_{i(k-1)}(\tau)=a_{k-1} \quad (5) \\ 0 \leq v_j(\tau) \leq V_j \quad \forall v_j \in W_EN - \{t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{i(k-1)}\} \quad (6) \\ \sum_{t_j \in P_i} \text{post}(p_i, t_j) \cdot v_j(\tau) - \sum_{t_k \in P_i} \text{pre}(p_i, t_k) \cdot v_k(\tau) \geq 0 \quad \forall p_i \in P^0 \quad (7) \end{array} \right. \end{aligned}$$

按上述步骤可求出各个迁移的瞬时引发速率。

5 实例分析

图1为一CCPN模型, 设 $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6$ 的优先值分别为 8、8、7、6、5、8。根据所给的初始参数, 容易确定在第1个不变行为状态除了迁移 t_1 为强使能迁移外, 其它迁移均为弱使能迁移, 并且模型产生有效冲突。

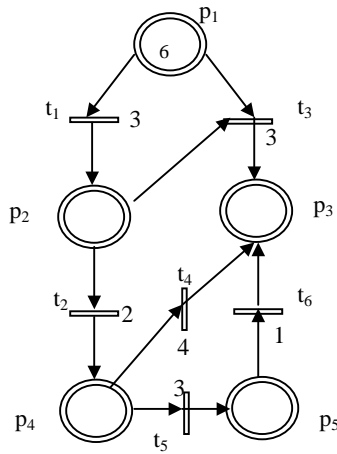


图1 一个CCPN模型

下面给出求解该模型在第1个不变行为状态各个迁移的瞬时引发速率的过程。首先建立模糊综合评价模型。弱使能迁移的优先权指标见表2。

表2 图1弱使能迁移的优先权指标

弱使能迁移	指标 x_1	指标 x_2	指标 x_3
t_2	2	8	1
t_3	3	7	1
t_4	4	6	2
t_5	3	5	1
t_6	1	8	1

根据式(2), 有

$$R = \begin{bmatrix} 2/13 & 8/34 & 1/6 \\ 3/13 & 7/34 & 1/6 \\ 4/13 & 6/34 & 2/6 \\ 3/13 & 5/34 & 1/6 \\ 1/13 & 8/34 & 1/6 \end{bmatrix}$$

假设 $A=(0.4, 0.3, 0.3)$ 并采用加权平均型 $M(\bullet, +)$, 则 $B=A \cdot R=(0.192 \ 1, 0.214 \ 1, 0.276 \ 1, 0.186 \ 4, 0.151 \ 4)$, 按从大到小的次序排序, 5个弱使能迁移 t_2, t_3, t_4, t_5, t_6 的优先权次序为 3, 2, 1, 4, 5。

根据 Step4, 有

$$\begin{aligned} \max \quad & v_4 \\ \left\{ \begin{array}{l} v_1 = 3 \\ 0 \leq v_2 \leq 2 \\ 0 \leq v_3 \leq 3 \\ 0 \leq v_4 \leq 4 \\ 0 \leq v_5 \leq 3 \\ 0 \leq v_6 \leq 1 \\ v_1 - v_2 - v_3 \geq 0 \\ v_2 - v_4 - v_5 \geq 0 \\ v_5 - v_6 \geq 0 \end{array} \right. \end{aligned}$$

解上述线性规划, 有 $v_4=2$, 按照上节所描述的方法可求得各个迁移在初始时刻的瞬时引发速率如下:

$$v_1=3, v_2=2, v_3=1, v_4=2, v_5=0, v_6=0$$

即模型各个迁移在第1个不变行为状态按上述速率引发, 当改变不变行为状态的事件发生时, 行为演变进入第2个不变行为状态, 根据第2个不变行为状态初始时刻的参数, 按上述方法计算即可求得各个迁移在第2个不变行为状态的引发速率, ..., 最终可实现CCPN模型的行为分析。

6 结论

本文通过建立优先权模糊综合评价模型, 提出了迁移优先权动态计算的方法, 其主要优点是能够根据系统相关参数的变化而变化, 增强了模型在实际系统的应用能力。同时, 基于所提出的模型, 采取合理的有效冲突消解策略, 给出了CCPN瞬时引发速率的有效求解方法。文中的方法适用于各种以CCPN为基础的混杂Petri网^[3]、一阶混杂Petri网^[6]及扩展混杂Petri网^[9]等各种混杂Petri网模型。

参考文献

- David R, Alla H. Continuous Petri Nets[C]//Proc. of the 8th European Workshop on Applications and Theory of Petri Nets. 1987: 275-294.
- Alla H, David R. A Modeling and Analysis Tool for Discrete Event Systems[J]. Continuous Petri Nets, Performance Evaluation, 1998, 33(3): 175-199.
- David R, Alla H. On Hybrid Petri Nets[J]. Discrete Event Dynamics: Theory And Applications, 2001, 11(1/2): 9-41.
- Demongodin I, Koussoulas N T. Differential Petri Nets: A New Model for Hybrid Systems[C]//Proc. of Advanced Summer Institute'96. 1996: 61-68.
- Demongodin I, Prunet F. Batches Petri Nets[C]//Proc. of Computer in Design, Manufacturing and Production, France. 1993: 29-37.
- 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.
- Liao Weizhi, Gu Tianlong. Optimization and Control of Production Systems Based on Interval Speed Continuous Petri Nets[C]//Proc. of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Hawaii, USA. 2005: 1212-1217.
- Hanzalek Z. Continuous Petri Nets and Polytopes[C]//Proc. of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. 2003: 1513-1520.
- David R, Caramihai S I. Modeling of Delays on Continuous Flows Thanks to Extended Hybrid Petri Nets[C]//Proc. of the 4th International Conference on Automation of Mixed Processes: Hybrid Dynamic Systems. 2000: 343-350.