

# 基于模糊时间知识推理的实时系统冲突研究

田 钊<sup>1,2</sup>, 余 维<sup>1</sup>, 叶阳东<sup>1</sup>

(1. 郑州大学信息工程学院, 郑州 450052; 2. 北京交通大学轨道交通控制与安全国家重点实验室, 北京 100044)

**摘要:** 定义一类模糊时间 Petri 网用于模拟受时间约束的实时系统行为, 通过对模糊时间区间的知识推理, 研究实时系统中带时间因素的冲突问题和时间-空间的冲撞问题, 将时间约束和冲撞发生的概率用于冲突消解。实例分析表明, 相对于已有冲突分析和消解方法, 该方法同时考虑了带有不确定性时间的系统冲突和冲撞行为, 可以更好地模拟和分析现实中的实时系统。

**关键词:** 模糊时间 Petri 网; 冲突检测; 冲突消解; 实时系统

## Research of Real-time System Conflict Based on Fuzzy Time Knowledge Reasoning

TIAN Zhao<sup>1,2</sup>, SHE Wei<sup>1</sup>, YE Yang-dong<sup>1</sup>

(1. School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China;

2. State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**【Abstract】** This paper defines a kind of Fuzzy Time Petri Nets(FTPN) to simulate the behavior of real-time system limited by time. It studies the conflict with time attribute and space-time collision in real-time system and utilizes time constraints property and the collision probability to resolve the conflict through knowledge reasoning of fuzzy time interval. Compared with existing methods of conflict analysis and resolution, it takes into account the uncertainty of the time with the system of conflict and contact behavior, to better simulate and analyze real-time system in reality.

**【Key words】** Fuzzy Time Petri Nets(FTPN); conflict detection; conflict resolution; real-time system

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2011.14.061

### 1 概述

在对实时系统进行建模和分析时, 时间因素的分析是一个非常重要的因素<sup>[1]</sup>。例如, 行车控制专家系统中时间知识推理和时间一致性的验证<sup>[2]</sup>, 密码协议分析过程中重组和扩充<sup>[3]</sup>等问题。资源的有限性导致实时系统对关键资源的竞争形成冲突, 时间-空间的不可重叠性导致对时间-空间的竞争形成冲撞, 时间-空间可以看作特殊的资源形式, 因此, 冲撞也可看作一种特殊形式的冲突<sup>[4]</sup>, 有效地解决冲突问题是分析实时系统动态行为的重要目标。

目前, 对系统冲突的研究主要有: 文献[5]提出一种基于时间 Petri 网进行冲突检测的方法, 该方法能够计算冲突发生的时间区间和变迁触发的概率, 但没有考虑系统中的时间不确定性问题; 文献[6]基于扩展模糊时间 Petri 网描述和分析冲突事件发生的时间不确定性问题, 但没有给出解决冲突问题的方法。本文在文献[7]的基础上, 定义了一类模糊时间 Petri 网(Fuzzy Time Petri Nets, FTPN)用于实时系统的建模与分析, 基于模型对系统冲突进行分析、检测和消解。

### 2 模糊时间 Petri 网

**定义 1** 模糊时间区间是一个带可能性的四元向量:

$$FTI = h[a, b, c, d]$$

其中,  $h$  表示可能性,  $0 < h \leq 1$ ;  $[a, b, c, d]$  表示模糊时间区间,  $0 \leq a < b \leq c < d$ 。在区间  $[b, c]$  下可能性为  $h$ , 在区间  $[a, b]$  和  $[c, d]$  下可能性小于  $h$ , 当  $h=1$  时可省略不写, 本文通常用梯形或三角形的可能性分布表示模糊时间区间<sup>[7]</sup>。

**定义 2** 模糊时间 Petri 网是一个八元组:

$$FTPN = (P, T, I, O, S, OST, PST, M_0)$$

其中,  $P$  为有限库所的集合,  $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ ,  $n$  为库所个

数;  $T$  为有限变迁的集合,  $T = \{T_1, T_2, \dots, T_m\}$ ,  $m$  为变迁个数,  $P \cap T = \emptyset, P \cup T \neq \emptyset$ ;  $I$  为有限入弧的集合,  $I \subseteq (P \times T)$ ;  $O$  为有限出弧的集合,  $O \subseteq (T \times P)$ ;  $S$  为托肯的集合,  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_k\}$ ,  $k$  为托肯的个数;  $OST$  为出弧到模糊时间区间的映射函数, 表示托肯经过出弧到下个库所需要的模糊时间,  $OST : O, S \rightarrow h[a, b, c, d]$ ;  $PST$  为托肯在不同库所到模糊时间区间的映射函数, 表示托肯到达库所的模糊时间,  $PST : P, S \rightarrow h[a, b, c, d]$ ;  $M_0$  为系统初始状态。

**定义 3** 模糊时间 Petri 网系统的状态标识  $M_k$ :

$$M_k = \{(P_i, \{s_j | s_j \in S\}) | P_i \in P\}$$

系统当前状态的表示对应于包含托肯的库所的集合。系统状态  $M_1$  通过变迁  $T$  的触发达到状态  $M_2$ , 表示为:

$$M_1[T > M_2]$$

### 3 模糊时间函数

模糊时间函数是从时间刻度到实数区间  $[0, 1]$  的映射函数。函数值表示事件在时间点  $\tau$  上的可能性度量。

**定义 4** 模糊时间片函数  $\pi(\tau)$  是托肯在模糊时间内到达库所的可能性。 $\pi_{s_i, P_j}(\tau) = h[a, b, c, d]$  表示托肯  $s_i$  在时间区间  $[b, c]$  到达库所  $P_j$  的可能性为  $h$ , 在时间  $[a, b]$  和  $[c, d]$  到达库所  $P_j$  的可能性小于  $h$ 。对应于 FTPN 中的  $PST$ 。

**基金项目:** 国家重点实验室开放课题基金资助项目(RCS2009K003); 湖南省高等学校科学研究基金资助项目(09C1257)

**作者简介:** 田 钊(1985—), 男, 硕士研究生, 主研方向: 模糊时间 Petri 网; 余 维, 副教授; 叶阳东, 教授、博士生导师

**收稿日期:** 2011-02-23 **E-mail:** tianzhao.zzu@gmail.com

**定义 5** 模糊使能时间函数  $e(\tau)$  是变迁在模糊时间内使能的可能性。 $e_{s_i, T_j}(\tau) = latest\{\pi_{s_i, P_k}(\tau) | P_k \in \bullet T_j\}$  表示托肯  $s_i$  使变迁  $T_j$  在模糊时间内使能的可能性。其中,  $latest$  为最迟模糊时间可能性<sup>[2]</sup>;  $\bullet T_j$  为变迁  $T_j$  的输入库所集合。

**定义 6** 模糊触发时间函数  $f(\tau)$  是变迁在模糊时间内触发的可能性。 $f_{s_i, T_j}(\tau) = \min\{e_{s_i, T_j}(\tau), earliest\{e_{s_i, T_k}(\tau)\}\}$  表示托肯  $s_i$  使变迁  $T_j$  在模糊时间内触发的可能性。其中,  $earliest$  为最早模糊时间可能性<sup>[2]</sup>;  $T_k$  为结构上与  $T_j$  冲突的变迁。

**定义 7** 模糊延迟时间函数  $d(\tau)$  是变迁触发模糊延迟时间的可能性。 $d_{s_i, O_i}(\tau) = h[a, b, c, d]$  表示托肯  $s_i$  通过弧  $O_i$  ( $O_i$  为  $T_i$  相关联的输出弧) 到达下一个库所所经历的模糊延迟时间的可能性。对应于  $FTPN$  中的  $OST$ 。

**定义 8** 模糊时间知识推理是指通过以上 4 个模糊时间函数推理计算托肯到达各个库所的模糊时间的可能性:

$$\pi(\tau) = f(\tau) \oplus d(\tau) = h_1[a_1, b_1, c_1, d_1] \oplus h_2[a_2, b_2, c_2, d_2] = \min(h_1, h_2)[a_1 + a_2, b_1 + b_2, c_1 + c_2, d_1 + d_2]$$

**4 冲突的检测与消解**

冲突是指在某一系统状态下, 2 个或多个变迁使能, 但是一个变迁的触发可能使其他变迁因输入库所中托肯的不足而不能触发。若  $M[T_1] > \wedge M[T_2] >$ , 但  $\neg M[\{T_1, T_2\}] >$ , 则在状态  $M$  下  $T_1$  和  $T_2$  相互冲突<sup>[4]</sup>。

冲突在各种 Petri 网模型中时常出现, 在现实中主要体现为有限资源的争夺, 路径选择的不确定性等。本文主要基于模糊时间 Petri 网解决路径选择的不确定性问题。在说明问题的前提下为了减少计算量, 本文选择的 Petri 网均为状态机(每一个变迁都只有一个输入库所和一个输出库所)。在状态机下, 模糊时间片函数、模糊使能时间函数和模糊触发时间函数相等。

**4.1 冲突的检测**

在基础 Petri 网中, 可以依据  $\bullet T_1 \cap \bullet T_2$  中托肯是否满足  $T_1$  和  $T_2$  同时触发判定  $T_1$  和  $T_2$  是否冲突。

**定理 1** 若  $\forall p \in \bullet T_1$ , 则满足  $M(p) > I(p, T_1)$ ,  $\forall p \in \bullet T_2$ , 满足  $M(p) > I(p, T_2)$ , 而  $\exists p \in \bullet T_1 \cap \bullet T_2$  使  $M(p) < I(p, T_1) + I(p, T_2)$ , 则  $T_1$  和  $T_2$  在状态  $M$  下冲突。

证明: 在状态  $M$  下, 因  $\forall p \in \bullet T_1$  有  $M(p) > I(p, T_1)$ ,  $\forall p \in \bullet T_2$  有  $M(p) > I(p, T_2)$ , 所以  $T_1$  和  $T_2$  都可使能触发。如果  $T_1$  先触发,  $M[T_1] > M'$ , 则有  $M'(p) = M(p) - I(p, T_1) < I(p, T_2)$ , 即在状态  $M'$  下  $T_2$  不能触发。同理, 如果  $T_2$  先触发则  $T_1$  不能触发。所以,  $T_1$  和  $T_2$  在状态  $M$  下冲突。

在模糊时间 Petri 网中, 不仅要考虑托肯资源是否满足  $T_1$  和  $T_2$  同时触发, 还要考虑 2 个变迁的模糊触发时间。

**定理 2** 若  $\forall p \in \bullet T_1$ , 则满足  $M(p) > I(p, T_1)$ ,  $\forall p \in \bullet T_2$ , 满足  $M(p) > I(p, T_2)$ , 且  $\exists p \in \bullet T_1 \cap \bullet T_2$  使  $M(p) < I(p, T_1) + I(p, T_2)$ , 若  $f_{T_1}(\tau) \cap f_{T_2}(\tau) \neq \phi$ , 则  $T_1$  和  $T_2$  在状态  $M$  下冲突, 若  $f_{T_1}(\tau) \cap f_{T_2}(\tau) = \phi$ , 则  $T_1$  和  $T_2$  在状态  $M$  下不冲突。

证明: 在定理 1 证明的基础上, 即在状态  $M$  下  $T_1$  和  $T_2$  都可使能, 若  $f_{T_1}(\tau) \cap f_{T_2}(\tau) = \phi$ , 则不存在一个时间区间使  $T_1$  和  $T_2$  同时触发, 即不满足冲突定义中的条件  $M[T_1] > \wedge M[T_2] >$ , 则  $T_1$  和  $T_2$  在状态  $M$  下不冲突。若  $f_{T_1}(\tau) \cap f_{T_2}(\tau) \neq \phi$ , 则一定

存在一个时间区间使  $T_1$  和  $T_2$  同时触发, 则  $T_1$  和  $T_2$  在状态  $M$  下冲突。

因为本文基于状态机的网结构进行研究, 所以有  $f_{T_1}(\tau) = f_{T_2}(\tau)$ , 即由相同库所中的同一托肯推理得到的模糊触发时间是相同的, 即不考虑 2 个冲突变迁因模糊触发时间的先后不同而做出的部分决策。

**4.2 冲突的消解**

在模糊时间 Petri 网模型中, 若检测到冲突的存在, 可以考虑用合理的决策方法将系统引入较好的状态。本文主要从时间约束和冲撞预防 2 个方面考虑冲突消解的策略。

(1) 基于时间约束。在实时系统中普遍存在时间约束。当系统需要在规定的时间内到达相应状态时, 需要对可能存在的冲突进行分析, 推理出系统在这些时间区段内达到特定状态的可能性。对这些系统中存在的可能性进行整体评估, 将有助于在出现冲突时做出更经济有效的决策。

图 1 是一个模糊时间 Petri 网模型,  $P_1$  中的托肯  $s$  可由 2 条路径到达  $P_4$ , 其中,  $\pi_{s, P_1}(\tau) = [1, 2, 3, 4]$ ;  $d_{s, O_1}(\tau) = [1, 2, 2, 3]$ ;  $d_{s, O_2}(\tau) = [2, 3, 4, 5]$ ;  $d_{s, O_3}(\tau) = [1, 3, 3, 5]$ ;  $d_{s, O_4}(\tau) = [1, 2, 3, 4]$ 。变迁  $T_1$  和  $T_2$  形成冲突, 冲突的模糊时间区间为  $f_{T_1}(\tau) \cap f_{T_2}(\tau) = [1, 2, 3, 4]$ 。

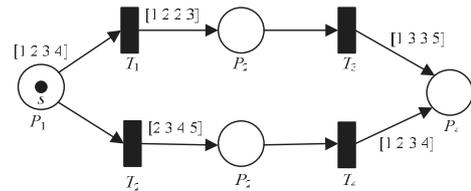


图 1 模糊时间 Petri 网模型

通过时间知识推理可计算得到托肯  $s$  通过  $T_1 T_3$  到达  $P_4$  的模糊时间区间为  $\pi_{s, P_4}(\tau) = [3, 7, 8, 12]$ , 通过  $T_2 T_4$  到达  $P_4$  的模糊时间区间为  $\pi'_{s, P_4}(\tau) = [4, 7, 10, 13]$ 。托肯  $s$  到达  $P_4$  的模糊时间区间如图 2 所示。

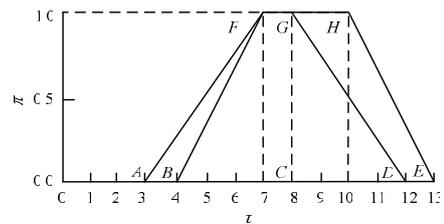


图 2 托肯  $s$  到达  $P_4$  的模糊时间区间

若规定托肯  $s$  在时刻 8 前到达  $P_4$ , 则通过  $T_1 T_3$  在时刻 8 之前到达  $P_4$  的概率为  $p_1 = area(AFGC) / area(AFGD) = 0.6$ , 通过  $T_2 T_4$  在时刻 8 之前到达  $P_4$  的概率为  $p_2 = area(BFGC) / area(BFHE) = 0.42$ 。由上面的计算可得到, 托肯  $s$  选择通过  $T_1 T_3$  到达  $P_4$  的概率为  $p = 0.60 / (0.60 + 0.42) = 0.59$ , 选择通过  $T_2 T_4$  到达  $P_4$  的概率为  $p = 1.00 - 0.59 = 0.41$ 。

(2) 基于冲撞预防。Petri 网中的冲撞是指在某一系统状态下, 2 个或多个变迁使能, 但是一个变迁的触发可能使其他变迁因产生的托肯在输出库所中无法得到空间资源而不能触发。若  $M[T_1] >$  并且  $M[T_2] >$ ,  $T_1 \in \bullet P$ ,  $T_2 \in \bullet P$ ,  $M(P) + O(T_1, P) + O(T_2, P) > K(P)$ , 则在状态  $M$  下  $T_1$  和  $T_2$  的触发使在  $P$  处产生冲撞<sup>[4]</sup>。

冲撞是对空间资源的竞争, 在现实中体现为对有限空间

的争夺。为了防止冲撞的产生, 需要合理地进行资源调度, 避免在同一时间发生对空间资源的过多需求。

在图 3 中, 托肯  $s_1$ 、 $s_2$  和  $s_3$  分别从库所  $P_1$ 、 $P_2$  和  $P_3$  经不同的路径到达库所  $P_6$ 。当  $s_2$  选择路径  $T_2T_5$  到达  $P_6$  时, 可能与  $s_1$  在库所  $P_4$  时产生冲撞, 同理, 当  $s_2$  选择路径  $T_3T_6$  到达  $P_6$  时, 可能与  $s_3$  在库所  $P_5$  时产生冲撞。

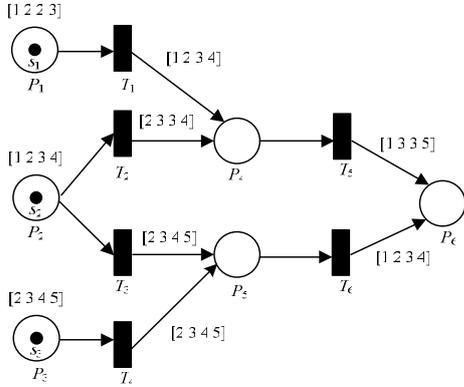


图 3 可能发生冲撞的情况

使用模糊时间知识推理可计算得到  $\pi_{s_1, P_4}(\tau)=[2,4,5,7]$ 、 $\pi_{s_2, P_4}(\tau)=[3,5,6,8]$ 、 $\pi_{s_2, P_5}(\tau)=[3,5,7,9]$ 、 $\pi_{s_3, P_5}(\tau)=[4,6,8,10]$ 。由图 4 可以看出,  $s_1$  和  $s_2$  到达库所  $P_4$  的发生冲撞的模糊时间为  $[2,4,5,7] \cap [3,5,6,8] = [3,5,5,7]$ 。 $s_1$  在模糊时间  $[3,5,5,7]$  内到达库所  $P_4$  的概率为  $p_{1,4} = \text{area}(BFC) / \text{area}(AEFC) = 0.67$ ,  $s_2$  在模糊时间  $[3,5,5,7]$  内到达库所  $P_4$  的概率为  $p_{2,4} = \text{area}(BFC) / \text{area}(BFGD) = 0.67$ 。求得  $s_1$  和  $s_2$  到达库所  $P_4$  发生冲撞的概率为  $p = 0.67 \times 0.67 = 0.45$ , 同理可得,  $s_2$  和  $s_3$  到达库所  $P_5$  发生冲撞的概率为  $p = 0.56$ 。

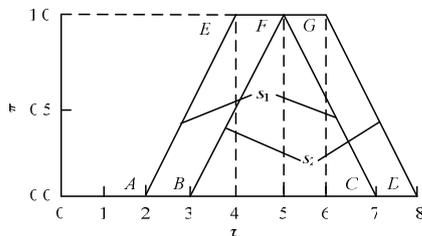


图 4  $s_1$  和  $s_2$  到达库所  $P_4$  的可能性时间

由于  $s_2$  选择不同路径可能遇到的冲撞概率不同, 则可基于各自的冲撞概率求得  $s_2$  选择不同路径的概率。

$s_2$  选择通过  $T_2T_5$  到达  $P_6$  的概率为:  
 $p = (1.00 - 0.45) / [(1.00 - 0.45) + (1.00 - 0.56)] = 0.56$   
 $s_2$  选择通过  $T_3T_6$  到达  $P_6$  的概率为:  
 $p = 1.00 - 0.56 = 0.44$

### 5 实例分析

一个简单的铁路系统如图 5 所示。列车从车站 1~车站 4 发车, 通过隧道 1 或隧道 2 到达车站 5~车站 7。系统的模糊时间 Petri 网模型如图 6 所示。

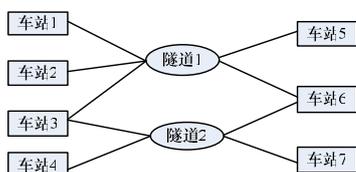


图 5 简单铁路系统

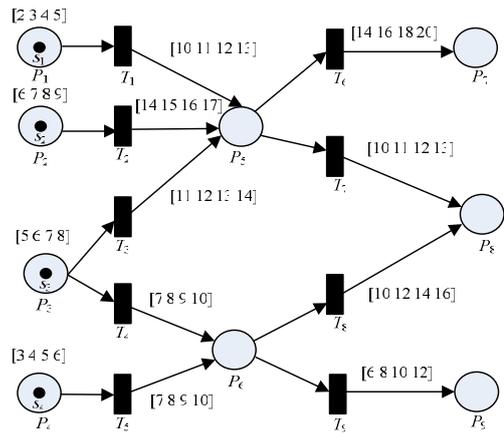


图 6 简单铁路系统的 FTPN 模型

从图 5 可以看出, 当列车 3 从始发车站 3 发车到达终点车站 6 时可有 2 条不同的路径可以选择。可以选择路径 1, 含有关键路段隧道 1, 也可以选择路径 2, 含有关键路段隧道 2。当列车 3 选择路径 1 时, 到达隧道 1 时可能与列车 1 和列车 2 在隧道 1 处发生碰撞, 当列车 3 选择路径 2 时, 到达隧道 2 时可能与列车 4 在隧道 2 处发生碰撞。

由模型可以看出, 该系统的初始状态为  $M_0 = \{(P_1, s_1), (P_2, s_2), (P_3, s_3), (P_4, s_4)\}$ , 即表示列车 1、列车 2、列车 3 和列车 4 分别在车站 1、车站 2、车站 3 和车站 4 准备发车, 发车的模糊时间分别为  $[2,3,4,5]$ 、 $[6,7,8,9]$ 、 $[5,6,7,8]$  和  $[3,4,5,6]$ 。模型中各变迁的出弧都有一个模糊时间属性, 表示列车通过该路段需要花费的模糊时间。例如, 变迁  $T_1$  的出弧上的模糊时间属性为  $[10,11,12,13]$ , 表示列车 1 从始发车站 1 经过路段 1 到达隧道 1 所花费的模糊时间为  $[10,11,12,13]$ 。

通过模糊时间知识推理可以得到  $\pi_{s_1, P_5}(\tau)=[12,14,16,18]$ , 即表示列车 1 到达隧道的模糊时间为  $[12,14,16,18]$ , 同理可以求得  $\pi_{s_2, P_5}(\tau)=[20,22,24,26]$ 、 $\pi_{s_3, P_5}(\tau)=[16,18,20,22]$ 。因为  $[12,14,16,18] \cap [20,22,24,26] = \emptyset$ , 所以表示列车 1 和列车 2 在通过隧道时不发生碰撞问题。但是因为  $[12,14,16,18] \cap [16,18,20,22] \neq \emptyset$ , 且有  $[16,18,20,22] \cap [20,22,24,26] \neq \emptyset$ , 所以表示列车 3 在通过隧道时与列车 1 和列车 2 都可能发生碰撞。计算得到列车 3 与列车 1 在模糊时间  $0.5[16,17,17,18]$  内发生碰撞, 其概率为  $1/64$ , 列车 3 与列车 2 在模糊时间  $0.5[20,21,21,22]$  内发生碰撞, 其概率为  $1/64$ 。总而言之, 如果列车 3 选择路径 1 在通过隧道 1 时可能发生碰撞的概率为  $1/32$ 。同理可求的列车 3 选择路径 2 在通过隧道 2 时可能发生碰撞的概率为  $1/4$ 。基于安全的考虑, 列车 3 选择路径 1 的概率为  $p = (1 - 1/32) / [(1 - 1/32) + (1 - 1/4)] = 0.56$ , 选择路径 2 的概率为  $p = 1.00 - 0.56 = 0.44$ 。

当系统中只有列车 3 时, 选择任何路径都不会有碰撞产生, 这时只考虑效率问题, 即使列车 3 尽可能在规定的时间内到达终点车站 6。由模糊时间知识推理可以得到, 列车 3 选择路径 1 到达车站 6 的模糊时间为  $[26,29,32,35]$ , 选择路径 2 到达车站 6 的模糊时间为  $[22,26,30,34]$ , 若规定列车 3 应在时刻 30 之前到达终点站, 则可计算得到选择路径 1 在时刻 30 之前到达终点站的概率为 0.42, 选择路径 2 在时刻 30 之前到达终点站的概率为 0.75, 则列车 3 选择路径 1 的概率为  $p = 0.42 / (0.42 + 0.75) = 0.36$ , 选择路径 2 的概率为  $p = 1.00 - 0.36 = 0.64$ 。

(下转第 188 页)