

文章编号: 1001-0920(2001)03-371-03

# 模糊时间 Petri 网的时间推理及其 在过程监测中的应用

高梅梅, 吴智铭

(上海交通大学 自动化研究所, 上海 200030)

**摘要:** 针对传统分析方法的不足, 提出用线性逻辑给出模糊时间 Petri 网描述和时间推理的方法。该方法能清楚地分析模糊时间 Petri 网的运行行为, 具体例子说明了其在系统过程监测和诊断中的应用。

**关键词:** 模糊时间 Petri 网; 线性逻辑; 时间推理

**中图分类号:** TP 301 **文献标识码:** A

## The Temporal Reasoning of Fuzzy Time Petri Nets and Its Application in Process Supervision

GAO Mei-mei, WU Zhi-ming

(Institute of Automation, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** A translation from fuzzy time Petri nets to linear logic with the objective of enhancing the presentation and reasoning ability of fuzzy time Petri nets is proposed. Rules in fuzzy time Petri net are defined using linear logic. The behavior of fuzzy time Petri nets can be constructed and temporal reasoning can be realized using the rules defined. The application in fuzzy process supervision and diagnosis is illuminated through an example.

**Key words:** fuzzy time Petri nets; linear logic; temporal reasoning

### 1 引言

在实际系统中, 经常存在不确定的因素, 例如不确定的事件发生时间和不确定的过程进行时间, 这就需要处理模糊时间问题。一些文献<sup>[1,2]</sup>提出用模糊时间 Petri 网表达不确定时间和时间区间问题, 但未能提出有效的推理方法。

本文基于模糊时间 Petri 网模型和线性逻辑理论<sup>[3]</sup>, 提出一种系统描述和时间推理的方法。用线性逻辑描述模糊时间 Petri 网结构, 定义了模糊时间 Petri 网中变迁之间的各种触发关系和规则。在此基

础上, 可全面而准确地证明模糊时间 Petri 网的推理运行过程, 提高对系统的描述和分析能力, 用于系统的过程监测和诊断。

### 2 模糊时间 Petri 网及线性逻辑描述

模糊时间 Petri 网可以定义为 6 元组

$$FTPN = (P, T, Pre, Post, M_0, \theta) \quad (1)$$

其中, 所有库所的集合  $P \neq \emptyset$ , 所有变迁的集合  $T \neq \emptyset$ ,  $P$  的后向关联函数  $Pre: P \rightarrow T$ ,  $P$  的前向关联函数  $Post: T \rightarrow P$ ,  $M_0$  为  $P$  上的初始标识,  $\theta$  为模糊

收稿日期: 1999-11-01; 修回日期: 2000-02-22

作者简介: 高梅梅(1974—), 女, 安徽蚌埠人, 博士生, 从事离散事件系统理论及应用研究; 吴智铭(1936—), 男, 江苏苏州

人, 教授, 博士生导师, 从事离散事件动态系统和混杂系统等研究。All rights reserved. <http://www.cnki.net>

静态时间区间。模糊时间区间如图 1 所示。

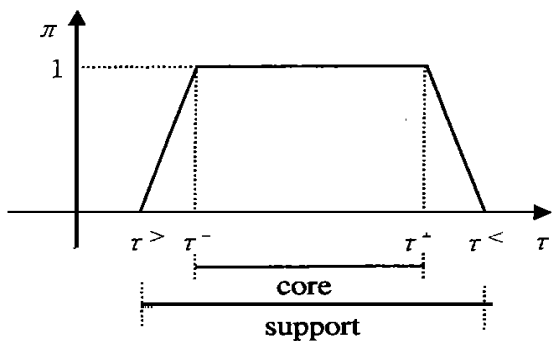


图 1 模糊时间区间

任何 Petri 网都可用线性逻辑算式进行描述。首先,用线性逻辑表示 Petri 网中的 token 分布,即表示 Petri 网的标识。对于一 Petri 网,其当前标识可由并符符号  $\otimes$  表示为

$$M = \bigotimes_{k \in \text{set of marked places}} P_k^{m_k} \quad (2)$$

其中,  $P_k$  为库所名称,  $m_k$  表示库所  $P_k$  中有  $m_k$  个 token。

另外, Petri 网中的变迁表示输入库所和输出库所之间的因果关系,可用线性逻辑中的符号 “-o” 描述 Petri 网中的变迁。对于模糊时间 Petri 网中的每个变迁  $t_j$ ,可表示为

$$t_j: \text{pre}(t_j) - o \text{post}(t_j), \theta(t_j) \quad (3)$$

### 3 变迁之间不同的触发规则及模糊时间推理

在线性逻辑的基础上,我们定义了 4 种规则,分别表示变迁触发的顺序、并发和两种冲突关系以及对应的时间运算关系。

首先给出几个模糊时间概念。对于由图 1 表示的两个模糊时间区间  $l_i$  和  $l_j$ , 则

$$l_i = [l_i^{\bar{>}}, l_i^{\bar{<}}, l_i^{\bar{+}}, l_i^{\bar{-}}], \quad l_j = [l_j^{\bar{>}}, l_j^{\bar{<}}, l_j^{\bar{+}}, l_j^{\bar{-}}] \quad (4)$$

1) 加和时间(additive date)  $l_k = \text{ad}(l_i, l_j)$ , 则

$$\begin{cases} l_k^{\bar{>}} = l_i^{\bar{>}} + l_j^{\bar{>}}, & l_k^{\bar{<}} = l_i^{\bar{<}} + l_j^{\bar{<}} \\ l_k^{\bar{+}} = l_i^{\bar{+}} + l_j^{\bar{+}}, & l_k^{\bar{-}} = l_i^{\bar{-}} + l_j^{\bar{-}} \end{cases} \quad (5)$$

2) 较晚时间(later date)  $l_k = \text{ld}(l_i, l_j)$ , 则

$$\begin{cases} l_k^{\bar{>}} = \max(l_i^{\bar{>}}, l_j^{\bar{>}}), & l_k^{\bar{<}} = \max(l_i^{\bar{<}}, l_j^{\bar{<}}) \\ l_k^{\bar{+}} = \max(l_i^{\bar{+}}, l_j^{\bar{+}}), & l_k^{\bar{-}} = \max(l_i^{\bar{-}}, l_j^{\bar{-}}) \end{cases} \quad (6)$$

3) 择一时间(alternative date)  $l_k = l_i$  (或  $l_j$ ), 记作  $l_k = l_i | l_j$ 。

定义 1 (SEQ 规则) 对于模糊时间 Petri 网中的两个变迁  $t_1: M - o K, \theta(t_1)$  和  $t_2: K - o L, \theta(t_2)$ , 若

$t_2$  的触发以  $t_1$  的触发为条件, 则  $t_1$  和  $t_2$  是顺序触发关系。SEQ 规则为

$$\frac{t_1: M - o K, \theta(t_1) \quad t_2: K - o L, \theta(t_2)}{t_1 \bullet t_2: M - o L, \text{ad}(\theta(t_1), \theta(t_2))} \text{SEQ}$$

其中, 连接符 “ $\bullet$ ” 表示变迁顺序触发,  $\text{ad}(\theta(t_1), \theta(t_2))$  表示  $t_1 \bullet t_2$  以加和时间触发。

定义 2 (PAR 规则) 对于模糊时间 Petri 网中的两个变迁  $t_1: M - o K, \theta(t_1)$  和  $t_2: L - o N, \theta(t_2)$ , 它们的触发互不相关是并行独立触发关系, 满足 PAR 规则

$$\frac{t_1: M - o K, \theta(t_1) \quad t_2: L - o N, \theta(t_2)}{t_1 | t_2: M \otimes L - o K \otimes N, \text{ld}(\theta(t_1), \theta(t_2))} \text{PAR}$$

定义 3 (ALT1 规则) 对于模糊时间 Petri 网中的两个变迁  $t_1: M - o K, \theta(t_1)$  和  $t_2: M - o K, \theta(t_2)$ , 若  $\text{pre}(t_1) = \text{pre}(t_2)$ , 且  $\text{post}(t_1) = \text{post}(t_2)$ , 则  $t_1$  和  $t_2$  是一种并发冲突关系, 满足 ALT1 规则

$$\frac{t_1: M - o K, \theta(t_1) \quad t_2: M - o K, \theta(t_2)}{t_1 / t_2: M - o K, \theta(t_1) \quad \theta(t_2)} \text{ALT1}$$

ALT1 是一种无法明显区分的冲突。连接符 “/” 表示变迁并发冲突, 为集合学中或的关系。

定义 4 (ALT2 规则) 对于模糊时间 Petri 网中的两个变迁  $t_1: M - o K, \theta(t_1)$  和  $t_2: M - o L, \theta(t_2)$ , 若  $\text{pre}(t_1) = \text{pre}(t_2)$ , 但  $\text{post}(t_1) \neq \text{post}(t_2)$ , 则  $t_1$  和  $t_2$  是一种并发冲突关系, 满足 ALT2 规则

$$\frac{t_1: M - o K, \theta(t_1) \quad t_2: M - o L, \theta(t_2)}{t_1 \uparrow t_2: M - o K \oplus L, \theta(t_1) | \theta(t_2)} \text{ALT2}$$

其中连接符 “ $\uparrow$ ” 表示变迁并发冲突, 系统选择其一触发, 以符号  $\oplus$  表示。选择不同的变迁, 触发后得到不同的标识, 连接符前后时间具有对应关系。

### 4 应用举例

现以工业生产中的一段过程为例, 说明本文方法的具体应用。加工设备加工完一种工件 ( $t_1$ ) 后, 有如下过程:

1) AGV 来取工件 ( $p_2$ ), 并将加工好的工件运到缓冲区 ( $t_2$ ); AGV 在缓冲区处放下已加工好的工件, 并取走待加工的工件 ( $t_3$ ); AGV 把待加工的工件运到机床 ( $t_4$ ); 待加工工件在机床上安装完毕 ( $t_5$ ), 待加工工件等待加工 ( $p_7$ )。

2) 若两个加工过程所需刀具相同, 则机床等待加工下一工件 ( $t_6$ )。

3) 若两个加工过程所需刀具不同, 则机械手来取刀具 ( $t_7$ ); 机械手取走已用刀具, 并取来所需刀具 ( $t_8$ ); 安装刀具完成 ( $t_9$ ), 机床等待加工工件 ( $p_{10}$ )。

4) 待加工工件和刀具都准备好后, 机床开始加工待加工工件( $t_{10}$ )。

根据模糊时间 Petri 网的定义, 可得本例的模糊时间 Petri 网模型如图 2 所示, 其中没有标注时间区

间的变迁表示该变迁使能后可立即触发, 即时间区间  $[0, 0, 0, 0]$ 。认为系统的初始时刻为 0, 系统的初始标识  $M_0 = p_1$ 。

用本文方法对此加工过程进行推理, 得

$$\frac{t_2: p_2 - \circ p_4, [3, 5, 6, 8] \quad t_3: p_4 - \circ p_5, [1, 1, 1, 2] \quad t_4: p_5 - \circ p_6, [2, 3, 4, 5] \quad t_5: p_6 - \circ p_7, [1, 2, 4, 5]}{t_2 \cdot t_3 \cdot t_4 \cdot t_5: p_2 - \circ p_7, [7, 11, 15, 20]} \text{SEQ}$$

同理可得

$$\frac{t_7 \cdot t_8 \cdot t_9: p_3 - \circ p_{10}, [10, 12, 16, 18] \quad t_6: p_3 - \circ p_{10}, [10, 12, 16, 18]}{t_6 / (t_7 \cdot t_8 \cdot t_9): p_3 - \circ p_{10}, [0, 0, 0, 0] \quad [10, 12, 16, 18]} \text{ALT}$$

为了简化表示, 令  $s_1 = t_2 \cdot t_3 \cdot t_4 \cdot t_5, s_2 = t_6 / (t_7 \cdot t_8 \cdot t_9)$ , 即

$$\frac{s_1: p_2 - \circ p_7, [7, 11, 15, 20] \quad s_2: p_3 - \circ p_{10}, [0, 0, 0, 0] \quad [10, 12, 16, 18]}{s_1 \quad s_2: p_2 \otimes p_3 - \circ p_7 \otimes p_{10}, [7, 11, 15, 20] \quad [10, 12, 16, 20]} \text{PAR}$$

即

$$s_1 \quad s_2: p_2 \otimes p_3 - \circ p_7 \otimes p_{10}, [7, 11, 16, 20]$$

$$\frac{t_1: p_1 - \circ p_2 \otimes p_3 \quad s_1 \quad s_2: p_2 \otimes p_3 - \circ p_7 \otimes p_{10}, [7, 11, 16, 20]}{t_1 \cdot (s_1 \quad s_2): p_1 - \circ p_7 \otimes p_{10}, [7, 11, 16, 20]} \text{SEQ}$$

则

$$\frac{t_1 \cdot (s_1 \quad s_2): p_1 - \circ p_7 \otimes p_{10}, [7, 11, 16, 20] \quad t_{10}: p_7 \otimes p_{10} - \circ p_{11}}{t_1 \cdot (s_1 \quad s_2) \cdot t_{10}: p_1 - \circ p_{11}, [7, 11, 16, 20]} \text{SEQ}$$

令  $s_3 = t_1 \cdot (s_1 \quad s_2) \cdot t_{10}$ , 则在初始标识  $M_0 = p_1$  下, 系统的运行行为为

$$p_1, s_3 | - p_{11}, [7, 11, 16, 20]$$

可见, 整个 Petri 网的运行时间为  $[7, 11, 16, 20]$ 。

如果令机床加工完一种工件到开始加工下一

工件需要延迟的时间为  $t$ , 则当  $11 \leq t \leq 16$  时, 系统工作正常; 当  $7 \leq t < 11$  或  $16 < t \leq 20$  时, 系统非正常工作, 但未出现致命故障; 当  $t < 7$  或  $t > 20$  时, 系统出现故障。

## 5 结 语

本文将基于资源概念的线性逻辑用于 Petri 网推理, 定义了模糊时间 Petri 网中的变迁之间的各种触发规则及时间推理方法。该方法能清楚地表达模糊时间 Petri 网运行中变迁序列的触发顺序和时间关系, 优于传统的时间 Petri 网分析方法。

### 参考文献:

- [1] Cardoso J, Kunzle L A, Valette R. Petri net based reasoning for the diagnosis of dynamic discrete event systems [A]. 6th Int Fuzzy Systems Association World Cong[C]. Sao Paulo, 1995. 333-336.
- [2] Jorge C A, Figueiredo D, Perkusich A. Fault and timing analysis in real-time distributed systems: A fuzzy time Petri-net based approach[J]. Int J Fuzzy Sets and Systems, 1996, 83(3): 143-168.
- [3] Girard J Y. Linear logic[J]. Theoretical Computer Science, 1987, 50(1): 1-102.

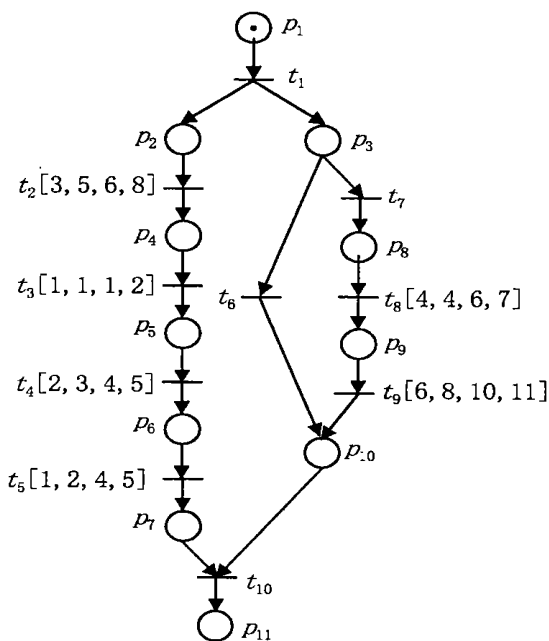


图 2 本例的模糊时间 Petri 网模型