第 10 期　　电　子　学　报　　Vol.34　No.10
2006 年 10 月　　ACTA ELECTRONICA SINICA　　Oct.　2006

一种价格时间 Petri 网的状态空间计算

刘显明[1,2] ,李师贤[1] ,李文军[1] ,潘　理[1]
(1. 中山大学计算机科学系,广东广州 510275;2. 江西省电力信息通讯公司,江西南昌 330077)

摘　要: 价格时间 Petri 网是对 web 服务过程和工作流模型等进行时间和成本分析的一种新工具. 而价格时间自动机则是一种相对成熟的工具. 提出一种状态空间计算方法,可以将价格时间 Petri 网的状态空间构造为一个价格时间自动机. 该方法的核心思想是在扩展状态类中增加价格参数. 进一步证明了构造出的价格时间自动机和初始的价格时间 Petri 网是双相似的.

关键词: 价格时间 Petri 网; 价格时间自动机; 状态空间计算
中图分类号: TP301　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 0372-2112 (2006) 10-1778-05

State Space Computation of a Price Time Petri Net

LIU Xian-ming[1,2] ,LI Shi-xian[1] ,LI Wen-jun[1] ,PAN Li[1]
(*1. Department of Computer Science, Sun Yat-Sen University, Guangzhou, Guangdong* 510275, *China;*
2. Jiangxi Electric Power Information and Communication Company, Nanchang, Jiangxi 330077, *China)*

Abstract: Price time Petri net is an emerging tool to analyze time and cost attributes of web service process and workflow model. Correspondingly the priced timed automata is a mature tool. We propose a method of state space computing which can compute the state space of a price time Petri net as a priced timed automata. The idea of this method is to add a price attribute in extended state class. Furthermore, we prove that the generated priced timed automata is bisimilar to the initial price time Petri net.

Key words: price time Petri net; priced timed automata; state space computing

1　引言

目前在 web 服务过程和工作流领域,国内外研究人员已经显示出了对成本分析的兴趣. Cardoso. J 等人提出了包括时间和成本等指标的 QoS 模型[1]. W. M. P. van der Aalst 和 H. A. Reijers 等人则指出:他们没有对成本分析做深入研究的原因在于目前的 Petri 网还不能很方便地建模和价格信息有关的应用系统[2]. 所以本文作者提出一种扩展了价格信息的时间 Petri 网-价格时间 Petri 网(Price Time Petri Net, PTPN). 研究人员可以用价格时间 Petri 网来分析 web 服务过程和工作流模型的时间和成本等 QoS 指标.

非常值得注意的是,2005 年刘卫东及林闯教授等提出一种价格时间 Petri 网(priced timed Petri net)[3]. 可以把文[3]中的价格时间 Petri 网看作是赋时 Petri 网(timed Petri net)的扩展. 而本文中的价格时间 Petri 网则是时间 Petri 网(time Petri net)的扩展.

在时间自动机研究领域也有相关工作. 如 R. Alur 等人提出权重时间自动机(Weighted Timed Automata)[4], G. Behrmann 和 K. Larsen 等也提出价格时间自动机(Priced Timed Automata, PTA)[5,6],并进一步提出了价格时间博弈自动机. 这些时间自动机领域的研究工作从另一个方面说明了为时间 Petri 网扩展价格信息的必要性和可能性.

状态空间分析是 Petri 网的一种主要分析方法. D. Lime 等人构造了一种状态类自动机[7],可以显著减少时钟数量. 本文在文[7]中扩展状态类方法基础上,提出一种扩展了价格参数的价格时间状态类方法,将价格时间 Petri 网的状态空间构造为一个价格时间自动机. 这样就可以讨论新模型和现有模型之间的关系. 另外,我们注意到 F. Cassez 和 O. Roux 在文[8]中讨论了时间 Petri 网和时间自动机之间的关系.

本文的其余部分以如下方式组织:第 2 节讨论价格时间 Petri 网的基本定义;第 3 节提出一种状态空间计算方法,将价格时间 Petri 网的状态空间构造为一个价格时间自动机;第 4 节是应用例子;第 5 节是结论和将来的工作.

2　基本定义

定义 1　一个价格时间 Petri 网是一个九元组 $PTPN = (P, T, B, F, \alpha, \beta, \mu, \nu, m_0)$,其中:

(1) $P = \{p_1, p_2, \cdots, p_m\}$是有穷非空的位置集; $T = \{t_1, t_2, \cdots, t_n\}$是有穷非空的变迁集,且 $P \cap T = \varnothing$; $B: T \times P \to N$ 是向后关联函数; $F: P \times T \to N$ 是向前关联函数;

收稿日期:2005-12-05;修回日期:2006-08-13
基金项目:高校博士点基金(No. 20030558004);广东省自然科学基金(No. 04009863);广东省科技攻关计划(No. 2003A1030403)

(2) $\alpha: T \to Q^+$ 是最早实施时间函数; $\beta: T \to (Q^+ \cup \{\infty\})$ 是最迟实施时间函数;

(3) $m_0: P \to N$ 是初始标识;

(4) $\mu: T \to Q^+$ 是变迁的使能价格函数; $\nu: T \to Q^+$ 是变迁的实施价格函数.

一个价格时间 Petri 网的标识是一个映射 $M: P \to N$. 一个标识由向量 $(M(p_1), M(p_2), \cdots, M(p_n))$ 表示. 第 i 个元素表示位置 p_i 中的托肯数. 如果 $M(p) \geq B(t)$, 则称变迁 $t \in T$ 在标识 M 下是使能的(enabled), 用 $t \in enable(M)$ 表示. 如果在标识 M 下变迁 t_i 的实施使变迁 t_k 成为新的使能变迁, 用 $t_k \in newly\_en(M, t_i)$ 表示. 对所有的变迁 $t \in T$, $g: t \to R^+$ 表示变迁 t 使能以后流逝的时间. 定义 g_0 为初始状态时的空值, 对所有的 $t \in enable(M)$, $g_0(t) = 0$. 一个价格时间 Petri 网的具体状态表示为 (m, g), 初始状态为 (m_0, g_0).

接下来讨论价格时间 Petri 网的语义, 这里引入价格时间变迁系统(Priced Timed Transition Systems, PTTS)的概念[6]. 一个价格时间变迁系统 PTTS 是一个偶对 $(S, Cost)$, 其中 $S = (F, f_0, \to)$ 是一个时间变迁系统, $Cost$ 是一个从 $\to$ 映射到 R^+ 的成本函数, 一个成本为 $Cost(f \xrightarrow{d} f')$ 的变迁 $f \xrightarrow{d} f'$ 记做 $f \xrightarrow{d,p} f'$, 其中 $p = Cost(f \xrightarrow{d} f')$. 并且成本是可累加的.

定义 2　一个价格时间 Petri 网 $PTPN$ 的语义定义为一个价格时间变迁系统 $PTTS_{PTPN} = ((F, f_0, \to), Cost)$, 其中:

(1) $F = N^P \times (R^+)^T$,

(2) $f_0 = (m_0, g_0)$,

(3) $\to \in F \times (R^+ \cup T) \times R^+ \times F$ 为变迁关系, 包括了连续和离散的变迁.

连续的变迁关系定义为: $\forall d \in R^+$:

$$(m, g) \xrightarrow{d, p_d} (m, g') \text{ iff } \begin{cases} g' = g + d, \\ \forall t_k \in T, m \geq B(t_k) \Rightarrow g'(t_k) \leq \beta(t_k), \\ p_d = Cost((m, g) \xrightarrow{d} (m, g')) \\ \quad = \sum_{\forall t_k \in T, m \geq B(t_k)} \mu(t_k) * d. \end{cases}$$

离散的变迁关系定义为: $\forall t_i \in T$:

$$(m, g) \xrightarrow{t_i, p_{t_i}} (m', g') \text{ iff } \begin{cases} m \geq B(t_i) \wedge m' = m - B(t_i) + F(t_i), \\ \alpha(t_i) \leq g'(t_i) \leq \beta(t_i), \\ g'(t_k) = \begin{cases} 0, & \text{if } t_k \in newly\_en(m, t_i), \\ g(t_k), & \text{otherwise} \end{cases} \\ p_{t_i} = Cost((m, g) \xrightarrow{t_i} (m', g')) \\ \quad = \nu(t_i). \end{cases}$$

一个价格时间 Petri 网的行为被定义为一个价格时间变迁序列 $\delta = (t_1, d_1, p_1)(t_2, d_2, p_2) \cdots (t_n, d_n, p_n)$. 其中 (t_i, d_i, p_i) 表示变迁 t_i 在延迟 d_i 个时间单位后实施, 成本为 $p_i = p_{d_i} + p_{t_i}$. 这里 p_{d_i} 为使能成本, p_{t_i} 为实施成本. 所以 $\sum_{k=1}^{n} d_k$ 为 δ 实施后总的延迟时间, $\sum_{k=1}^{n} p_k$ 为 δ 实施后总的成本. 如果有一个价格时间变迁序列 δ 能够从 m_0 导出 m_i, 则称标识 m_i 是可到达的.

一个价格时间 Petri 网 $PTPN$ 可接受的价格时间语言为它所有的价格时间变迁序列的集合. 已经证明时间 Petri 网是价格时间 Petri 网的子类, 即价格时间 Petri 网扩充了经典时间 Petri 网的建模能力.

本部分定义的风格和文[9]保持一致.

3　状态空间计算

本节提出一种价格时间状态类方法来进行状态空间计算, 核心思想是为文[7]中的扩展状态类增加价格参数. 关于状态类[10]和扩展状态类的内容, 可参见相关文献[7,10]. 下面定义一种价格时间状态类, 相应的价格时间状态类图可以转换为一个价格时间状态类自动机, 这样就可以接受价格时间语言. 本文有关 χ 和 $trans$ 的定义、计算和转换规则均取自文献[7].

3.1　价格时间状态类方法

定义 3　对于一个 $PTPN$, 一个扩展了时钟集和价格参数的价格时间状态类 PTC 是一个五元组 $(M, D, \chi, trans, ep)$, 其中:

(1) M 是一个标识,

(2) D 是状态类的实施域. 实施域中的不等式有两种类型[11]:

$$\begin{cases} \alpha_i \leq \theta_i \leq \beta_i & \forall t_i \in enable(M), \\ -\gamma_{kj} \leq \theta_j - \theta_k \leq \gamma_{jk} & \forall t_j, t_k \in enable(M) \wedge j \neq k. \end{cases}$$

这里 θ_i 是使能变迁 t_i 相对于当前状态类的实施时间.

(3) χ 是时钟集合; $trans \in (2^T)^\chi$ 将时钟映射到变迁集上[8];

(4) $ep = \sum_{t_i \in enable(M)} \mu(t_i)$ 是 PTC 的使能价格.

定义 4　给定一个 $PTC = (M, D, \chi, trans, ep)$ 和可实施变迁 t_f, 变迁 t_f 的实施会到达一个 $PTC' = (M', D', \chi', trans', ep')$, PTC 的计算规则如下:

·$M' = M - B(t_f) + F(t_f)$.

·D 按照下列规则计算, 记为 $next(D, t_f)$[10]:

(1) 对所有在 M' 下继续使能的变迁 t_i: $\theta_i = \theta_f + \theta'_i$, 且令所有的 $\theta'_i \geq 0$;

(2) 对所有在 M' 下不使能的变迁 t_j: 去掉所有相关的约束;

(3) 对所有在 M' 下新使能的变迁 t_k: 增加 $\alpha(t_k) \leq \theta'_k \leq \beta(t_k)$ 以及相应的约束关系.

·χ 和 $trans$ 按照下列规则计算, 记为 $next(\chi, trans, t_f)$[7]:

(1) 对 χ 中的每个时钟 x, 从 $trans(x)$ 中移去所有在 M' 下不使能的变迁 t_j;

(2) 对 χ 中的每个时钟 x, 如果 $trans(x)$ 为空, 则从 χ 中移去;

(3) 如果在 M' 下有新使能的变迁 t_k, 那么:

(a) 如果 χ 中有一个时钟 x 的值为 0,那么将 t_k 加入 $trans(x)$;

(b) 如果 χ 中没有一个时钟 x 的值为 0,那么在 χ 中加入一个时钟 y,将 t_k 加入 $trans(y)$.

·ep 按下面规则计算,记为 $next(ep, t_f)$:

$$ep = \sum_{t_i \in enable(M - B(t_f) + F(t_f))} \mu(t_i)$$

对于一个 PTPN 的状态类 (M, D),变迁 t_f 被称为可实施的,当且仅当满足条件:$\alpha_f \leq \min_{t_j \in enable(M)} \beta_j$. 记作 $t_f \in firable(M, D)$. 接下来讨论价格时间状态类图的计算.

定义 5 对于一个 PTPN,价格时间状态类图 PTCG 是一个变迁系统 $TS_{PTCG} = (PTC, ptc_0, \rightarrow)$,其中:

(1) $PTC = N^P \times (R^+)^T \times \chi \times (2^T)^{\chi} \times Q^+$,

(2) $ptc_0 = (M_0, D_0, \chi_0, trans_0, ep_0)$,

(3) $\rightarrow \in PTC \times T \times PTC$ 为变迁关系,定义如下:

$$(M, D, \chi, trans, ep) \xrightarrow{t_f} (M', D', \chi', trans', PD')$$

$$iff \begin{cases} t_f \in firable(M, D), \\ M' = M - B(t_f) + F(t_f), \\ D' = next(D, t_f), \\ (\chi', trans') = next(\chi, trans, t_f), \\ ep' = next(ep, t_f) \end{cases}$$

下面定义价格时间状态类的等价关系和包含关系,作为后面价格时间状态类自动机计算时的收敛规则.

定义 6 两个价格时间状态类 $PTC = (M, D, \chi, trans, ep)$ 和 $PTC' = (M', D', \chi', trans', ep')$ 是价格时间相似的,当且仅当它们有相同的标识,相同的使能价格和相同的时钟数量,并且这些时钟映射到同样的变迁上.

定义 7 一个价格时间状态类 $PTC = (M, D, \chi, trans, ep)$ 被另一个价格时间状态类 $PTC' = (M', D', \chi', trans', ep')$ 包含,当且仅当 PTC 和 PTC 是价格时间相似的,并且 D 是 D 的子集.

如果 PTC 被 PTC 包含,那么就不需要计算 PTC 的后继节点. 因为计算 PTC 得到的图 G 肯定是计算 PTC 得到的图 G 的子图.

3.2 价格时间状态类自动机

先给出时间约束的概念.

把 $H(K)$ 定义为时钟集合 K 上的时间约束集合,这里 $H(K)$ 是形如 $k \sim a$ 的布尔表达式集合. 其中 k 是 K 中的一个时钟,$\sim \in \{<, \leq, \geq, >, =\}$, a 为常量.

下面根据文献[7]中的方法来讨论如何根据一个价格时间 Petri 网 Y 的价格时间状态类图 PTCG,来构造一个价格时间状态类自动机 $W(PTCG)$. 价格时间自动机的语法和语义参见文献[5,6].

定义 8 一个价格时间状态类自动机是一个价格时间自动机 $W(PTCG) = (L, l_0, K, A, E, I, \rho)$,按下面规则从价格时间状态类图 PTCG 得到:

·L 是 PTCG 中所有价格时间状态类 $(M, D, \chi, trans, ep)$ 的集合,l_0 是初始价格时间状态类 $(M_0, D_0, \chi_0, trans_0, ep_0)$,

·K 是 PTCG 中所有价格时间状态类 $(M, D, \chi, trans, ep)$ 中时钟集 χ 的集合,

·A 是 PTCG 中所有变迁的集合,

·E 是边的集合,按下面规则[7]得到:

对 PTCG 中所有的价格时间状态类 $ptc = (M, D, \chi, trans, ep)$ 和 $ptc' = (M', D', \chi', trans', ep')$,如果存在 $ptc \xrightarrow{t} ptc'$,那么就构造一条边 $e = (l, h, a, r, n, l')$,其中:$l = (M, D, \chi, trans, ep)$; $h = (trans^{-1}(t) \geq \alpha(t))$; $a = t$; $r = trans'^{-1}(newly\_en(M, t))$; $trans'(x') \subset trans(x) \wedge x' \notin r \Rightarrow n(x) = x'$; $l' = (M', D', \chi', trans', ep')$.

·I 是不变量的集合,按下面规则[7]得到:

对 PTCG 中所有的价格时间状态类 $ptc = (M, D, \chi, trans, ep) = l$, $I(l) = \wedge_{x \in \chi, t \in trans(x)} (x \leq \beta(t))$.

·ρ 是价格的集合,按下面规则得到:

$\rho(l) = ep$, $\rho(e) = v(a) = v(t)$. 这表示所有位置的价格等于相应价格时间状态类的使能价格,所有边的价格等于边上动作 a 所对应变迁 t 的实施价格.

接下来给出价格时间状态类自动机的构造算法. 在算法中使用了定义 6 和 7 中的收敛规则.

算法 1 $W(PTCG)$ 的构造算法.

对于 PTCG 每一个计算出的节点 N_n:

(1) 如果 N_n 和所有已存在的节点 N_a 不是价格时间相似的,那么按照定义 8 为 N_n 创建一个位置 L_n 以及相应的边;

(2) 如果 N_n 和某个已存在的 N_a 是价格时间相似的,且 N_n 被 N_a 包含,那么创建从 L_a 到 N_n 父节点对应位置 L_p 的边,这里 L_a 是 N_a 对应的位置;

(3) 如果 N_n 和某个已存在的 N_a 是价格时间相似的,且 N_n 不被 N_a 包含,那么创建从 L_a 到 N_n 父节点对应位置 L_p 的边,这里 L_a 是 N_a 对应的位置,并将 $N_a = (M_a, D_a, \chi_a, trans_a, ep_a)$ 中的 D_a 改为 $D_a \cup D_n$,然后按定义 5 再次计算 N_a 的后继节点.

因为一个有界的 PTPN 的标识 M 和实施域 D 的数量是有限的[10];且同时使能的变迁数也是有限的,所以 χ 和 $trans$ 的数量也是有限的;根据定义 3,显然 ep 的数量是有限的. 所以对于一个有界的 PTPN 来说,算法 1 一定会终止.

最后简单总结一下价格时间状态类方法的特点. 因为这里 χ 和 $trans$ 的定义、计算和转换规则均取自文献[7],所以该方法创建的时钟数量和文献[7]中保持一致. 可以这样认为,价格时间状态类方法为扩展状态类[7]增加了价格信息. 至于该方法将 PTPN 转换到 PTA 的合理性,我们给出一个定理来证明构造出的 PTA 和初始的 PTPN 是双相似的(bisimilar).

定理 1 S_y 为 PTPN Y 的状态集合,S_w 为 PTA W 的状态集合. 令 $R \subset S_y \times S_w$ 为二元关系,如果:

$\forall y = (m_y, g_y) \in s_y$, $\forall w = (l_w, b_w) \in s_w$, $yRw \Leftrightarrow (m_y = m_w) \wedge (\forall t \in enable(m_y), \exists k \in K, g_y(t) = b_w(k))$,

这里 m_w 是 l_w 对应的标识. 那么 R 是一个双模拟关系.

证明:在文[7]中 D. Lime 等人已经证明 TPN 和使用扩展状态类方法构造的 TA 是双相似的. 根据 PTPN 和 PTA 的语义,很明显变迁的成本并不影响变迁的实施和时间约束,所以

文[7]中关于双模拟的结论可以在本文中使用.我们只需要考虑新增加的成本因素.

1. 令 $y \xrightarrow{d, yp_d} y'$ 是 $PTPN$ 的连续变迁,这里 $yp_d = \sum_{t_i \in enable(m_y)} \mu(t_i) * d$,使用 d 来计算 PTA 的连续变迁 $w \xrightarrow{d, wp_d} w'$ 计算出 $wp_d = \rho(l_w) * d = \sum_{t_i \in enable(m_y)} \mu(t_i) * d = yp_d$.因为 $m_y = m_w$,且连续变迁没有对标识作改变,所以有 $m'_y = m'_w$.已知 $\forall t \in enable(m_y), \exists k \in K, g_y(t) = b_w(k)$,再根据文[7]中 TPN 和相应 TA 双相似的结论,肯定能满足条件 $\forall t \in enable(m'_y), \exists k \in K, g'_y(t) = b'_w(k)$.所以有 $y' R w'$.

2. 令 $y \xrightarrow{t, yp_t} y'$ 是 $PTPN$ 的离散变迁,这里 $yp_t = v(t)$.那么使用 t 对应的 a 来计算 PTA 的离散变迁 $w \xrightarrow{a, wp_a} w'$ 可以计算出 $wp_a = v(a) = v(t) = yp_t$.因为 $m_y = m_w$,且 t 和 a 是一一对应的,所以有 $m'_y = m'_w$.因为这里没有时间的流逝,那么肯定能够满足条件 $\forall t \in enable(m'_y), \exists k \in K, g'_y(t) = b'_w(k)$.所以有 $y' R w'$.

3. 令 $w \xrightarrow{d, yp_d} w'$ 是 PTA 的连续变迁,那么使用 d 来计算 $PTPN$ 的连续变迁 $y \xrightarrow{d, yp_d} y'$ 参照 1 即可得出 $y' R w'$.

4. 令 $w \xrightarrow{a, yp_a} w'$ 是 PTA 的离散变迁,那么使用 a 对应的 t 来计算 $PTPN$ 的离散变迁 $y \xrightarrow{t, yp_t} y'$ 参照 2 即可得出 $y' R w'$.

综合 1,2,3,4 可知 R 是一个双模拟关系.(证毕)

4　价格时间状态类方法的应用

本部分通过一个简单的例子来讨论价格时间状态类方法的应用.图 1 是对一个业务流程建立的价格时间 Petri 网模型.这里首先对业务流程模型做一个简单解释:位置 p_0 中的一项业务必须分解为位置 p_1 和 p_3 中的两个子任务 A 和 B;变迁 t_1 实施后子任务 A 即执行完毕;而子任务 B 在变迁 t_2 实施后进入位置 p_4,此时子任务的执行可以同时使用变迁 t_3 和 t_4,只有成功实施的那个变迁才被认为有效地参与了业务流程;分别执行两个子任务后,该流程使用变迁 t_5 进行业务合成,进入位置 p_6,从而完成业务.

显然这样一个业务流程执行后的总成本不是一个确定的值.接下来使用第 3 部分提出的状态空间计算方法来计算图 1 中价格时间 Petri 网对应的价格时间状态类自动机,结果如图 2 所示.这里令目标标识 $m_g = (0000001)$,对应的位置是 L_6,进一步可以计算出该业务流程的最小成本.从这个例子可以看出,本文提出的价格时间状态类方法是可行的.

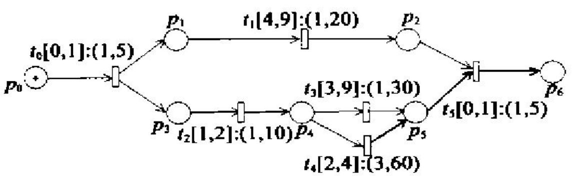

图 1　一个业务流程的价格时间 Petri 网模型

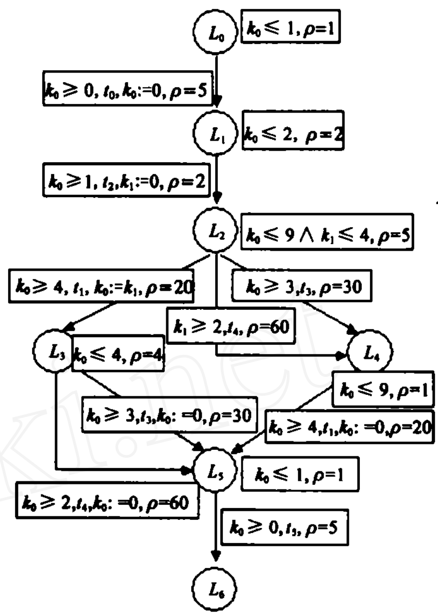

图 2　价格时间状态类自动机

5　结论和将来的工作

本文提出一种价格时间状态类方法来进行价格时间 Petri 网的状态空间计算.得出的结论是:使用价格时间状态类方法可以将价格时间 Petri 网的状态空间构造为一个价格时间自动机,并证明了构造出的价格时间自动机和初始的价格时间 Petri 网是双相似的.进一步的工作为:使用基于区域图(zone graph)的方法计算价格时间 Petri 网的状态空间,该方法已在价格时间自动机的状态空间计算中得到成功应用,并开始用于时间 Petri 网的状态空间计算[11].

致谢　感谢电子学报审稿专家的宝贵意见和中山大学计算机科学系宋华梅硕士的大力帮助.

参考文献:

[1] J Cardoso,A Sheth,J A,Miller,et al. Modeling quality of service for workflows and web service processes[J]. Journal of Web Semantics. 2004,1(3):281 - 308.

[2] H A Reijers. Design and Control of Workflow Wrocesses[M]. 1st ed.,Berlin:Springer-Verlag. 2003. 32 - 59.

[3] 刘卫东,宋佳兴,林闯. 基于价格时间 Petri 网的网格计算应用模型及分析[J]. 电子学报,2005,33(8):1416 - 1420.
W D Liu,J X Song,C Lin. Modeling and analysis of Grid computing application based priced timed Petri net[J]. Acta Electronica Sinica,2005,33(8):1416 - 1420. (in Chinese)

[4] R Alur,S L Torre,G J Pappas. Optimal paths in weighted timed automata[J]. Theoretical Computer Science,2004,318:297 - 322.

[5] G Behrmann,A Fehnker,T Hune,et al. Minimum-cost reachability for priced timed automata[A]. In:Benedetto MDD. Sangiovanni-Vincentelli A. eds. Lecture Notes in Computer Science

2034[C]. Berlin:Springer-Verlag,2001.147 - 161.

[6] G Behrmann, K Larsen,J Rasmussen. Optimal scheduling using priced timed automata[J]. ACM Sigmetrics Performance Evaluation Review. 2005.32(4):34 - 40.

[7] D Lime,O H Roux. State class timed automaton of a time Petri net[A]. Proceedings of 10th International Workshop on Petri nets and Performance Models[C]. Washington DC. USA:IEEE Computer Society. 2003.1 - 10.

[8] F Cassez,O Roux. Structural translation from time Petri Nets to timed automata[J]. Electronic Notes in Theoretical Computer Science. Vol.128.2005.145 - 160.

[9] O H Roux,D Lime. Time Petri nets with inhibitor hyperarcs: formal semantics and state space computation[A].J Cortadella, W Reisig eds. Proceedings of International Conference of Application and Theory of Petri Nets 2004[C]. Berlin:Springer-Verlag.2004.371 - 390.

[10] B Berthomieu,M Diaz. Modeling and verification of time dependent systems using time Petri nets[J]. IEEE Transactions on Software Engineering. 1991.17(3):259 - 273.

[11] G Gardey,O H Roux,O F Roux. Using zone graph method for computing the state space of a time Petri net[A]. K Larsen,P Niebert eds. Lecture Notes in Computer Science 2791[C]. Berlin:Springer-Verlag,2004.246 - 259.

作者简介:

刘显明 男,1977 年生,博士,主要研究领域为 Petri 网,业务流程管理.
E-mail:ecopnlab@yahoo.com.cn

李师贤 男,1944 年生,教授,博士生导师,主要研究领域为形式语义学、软件工程经济学.

李文军 男,1966 年生,副教授,硕士生导师,主要研究领域为分布计算、Petri 网.

潘 理 男,1975 年生,硕士,主要研究领域为 Petri 网.