

随机高级 Petri 网在异构系统中的应用

李雅娟, 林 闯

(清华大学计算机科学与技术系, 北京 100084)

摘 要: 传统的随机高级 Petri 网 (Stochastic high-level Petri nets, SHLPNs) 通过将多个同构子系统压缩成一个子系统, 并将具有相同标记分布的多个标识压缩成一个标识 (复合标识), 从而有效地减小模型规模和状态空间。但该方法仅适用于若干同构子系统组成的系统中, 本文将这种方法扩展, 通过引入非对称的变迁实施谓词和扩展的复合标识, 精确地模型并分析异构系统, 同时也保持了 SHLPNs 在化简模型和状态空间方面的优越性。

关键词: 随机高级 Petri 网; 同构子系统; 异构子系统; 扩展的复合标识; 扩展的复合标识可达图

中图分类号: TNTP391. 7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 11-1839-05

Application of Stochastic High-Level Petri Nets in Inhomogeneous Systems

LI Ya-juan, LIN Chuang

(Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Traditional Stochastic High-Level Petri Nets (SHLPNs) can efficiently simplify system models by folding more than one homogeneous subsystem into one subsystem, and obviously reduce state space size by grouping more than one marking with the same token distribution into one marking. The grouped marking is called as Compound Markings (CMs). However, this method can only be applied to the systems consisting of homogeneous subsystems. This paper extends the traditional method to solve this problem that traditional SHLPNs are only limited to homogeneous systems, by proposing asymmetrical transition-firing predication and extended compound marking concept. The new method can model and analyze inhomogeneous systems exactly. Furthermore, it retains the SHLPNs advantages of simplifying models and reducing state space size.

Key words: stochastic high-level Petri nets; homogeneous subsystems; inhomogeneous subsystems; extended compound markings; extended compound marking reachability graphs

1 引言

随机高级 Petri 网 (Stochastic high-level Petri nets, SHLPNs)^[1,2] 的基本思想是把指数分布的变迁实施时间变量引入到高级 Petri 网 (high-level Petri nets, HLPNs)^[3~5] 的变迁集中, 使之既继承和保留 HLPNs 在描述和分析系统方面原有的特点和性质, 又具有随机 Petri 网 (Stochastic Petri nets, SPNs)^[6,7] 的状态空间与马尔可夫链 (Markovian chains, MCs) 同构的特性, 为系统性能模型求解提供强有力的数学基础。SHLPNs 不仅保持了 HLPNs 将多个相同结构子系统压缩成一个子系统的特性, 而且进一步将具有相同标记分布的多个标识压缩成一个标识, 即复合标识 (Compound markings, CMs), 显著地简化网模型的图形表示, 减小系统的状态空间。

但这种方法仅适用于由若干同构子系统组成的系统中, 本文将这种方法扩展, 对系统中存在异构子系统的系统进行

模型和分析。首先对模型进行简化, 对模型中对称部分和非对称部分分别进行处理: 如果处理单元在不同的数据 (资源) 上执行相同或类似的计算 (或任务), 则与传统 SHLPNs 类似, 将表示此类处理单元行为的多个子网压缩成一个子网; 如果处理单元对不同的数据 (资源) 表现的行为不同, 但可用一个数学通式表达, 也可将表示此类处理单元行为的多个子网压缩成一个子网, 不同之处仅在于此类处理单元的行为对应的变迁联系一个非对称的变迁实施谓词。此类模型的可达图中, 仍将具有相同标记分布的多个标识压缩成一个复合标识; 只有当该复合标识所包含的个体标识中存在可实施的非对称变迁, 才给该复合标识附加一些相关信息进行表示, 从而有效地化简状态空间。

本文首先通过实例说明传统 SHLPNs 的局限性, 从而引出扩展方法的基本思想; 然后给出扩展的复合标识可达图 (Extended compound marking reachability graphs, ECMRGs) 的构造方

收稿日期: 2003-10-23; 修回日期: 2004-05-20

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 (973 计划) 项目 (No. G1999032707, No. 2003CB314804); 国家自然科学基金项目 (No. 90104002, No. 60173012); 高等学校博士学科点专项科研基金项目 (No. 20020003027)

法;从而进行性能求解.在文章最后对扩展方法进行总结.

2 扩展方法的基本思想

在介绍扩展方法之前,首先给出三个概念:

定义 1 类(class),静态子类(Static subclass),动态子类(Dynamic subclass)

- (1) 类是具有相同属性的个体集合;
- (2) 静态子类是类中具有相同行为的个体集合;
- (3) 动态子类是类中具有相同分布的个体集合.

例如,在一个系统中有三个进程 p_1, p_2, p_3 ,因此可以定义一个 Process 类表示这三个进程: $Process = \{ p_1, p_2, p_3 \}$.假设 p_1 和 p_2 之间可以交互, p_3 相对独立、不与其他进程交互信息,因此 Process 类可以分为两个静态子类: $Interactive = \{ p_1, p_2 \}$, $Batch = \{ p_3 \}$.在某一状态中 p_1 处于位置 s_1 中, p_2 和 p_3 处于位置 s_2 中,因此在此状态中 Process 类分为两个动态子类: $Z_1 = \{ p_1 \}$, $Z_2 = \{ p_2, p_3 \}$.一个复合标识可以看作是个体标识的等价类^[8,9],属于同一个等价类的个体标识可以相互置换.

2.1 实例分析

先举一个实例^[10]进行说明.有一个系统由一组进程组成,进程之间相互竞争使用一个临界资源.进程的状态包括:空闲、全局选择、占用临界资源.每个进程都可以发送访问请求、使用临界资源,并知道其他进程的请求情况.当一个进程访问临界资源时,其他进程不能再发送访问请求.设进程具有优先级(下标越大表明优先级越高),若有多个进程发送访问请求,系统可以根据发送访问请求的进程的优先级进行选择,确定哪个进程拥有最终的访问权.

该实例的 SHLPN 模型如图 1 所示.令 C_1 表示由三个进程组成的类, $C_1 = \{ p_1, p_2, p_3 \}$. $C_1^1 = \{ p_1 \}$, $C_1^2 = \{ p_2 \}$, $C_1^3 = \{ p_3 \}$ 是 C_1 的三个静态子类. x 和 y 是定义在 C_1 上的变量, S 表示 C_1 中所有进程, $S - x$ 表示 C_1 中除 x 之外其他的进程.进程的下标越大,其优先级就越高,因此三个进程的优先级关系为 $p_1 < p_2 < p_3$.

该模型中有四个位置,其中“free”和“idle”位置表示进程没有发送访问请求、处于空闲状态;“global select”位置表示进程处于请求队列中;“critical section”位置表示进程正在访问临界资源.初始条件中,所有进程都处于 free 和 idle 位置. t_1, t_2, t_3, t_4 均是时间变迁,其实施时间呈指数分布;其中 t_3 的实施速率最

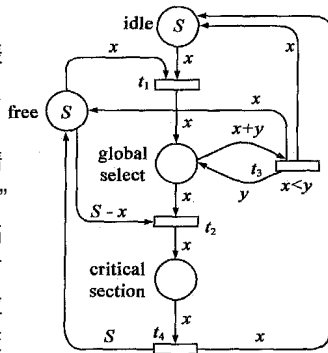


图 1 竞争临界资源

大,即实施的优先级最高.变迁 t_1 的实施表示进程 x 发送一个访问临界资源的请求,变迁 t_2 的实施表示系统接受进程 x 的访问请求,进程 x 进入访问临界资源的状态,并且不允许其他进程再发送访问请求;变迁 t_3 用于解决进程之间的访问冲突,对应的实施谓词为: $x < y$,表示当请求队列中有两个不

同的进程时将保留优先级大的进程,而优先级小的进程返回到 free 和 idle 位置,可见,只有当“global select”位置中有且仅有一个进程时,变迁 t_2 才可以实施;变迁 t_4 的实施表示访问结束,因此该进程重新置于 free 和 idle 位置,其他进程又可继续发送访问请求.

值得注意的是,该模型中的三个进程只有在变迁 t_3 可实施时表现的行为不同,其他状态中三个进程的行为完全相同. t_3 的实施情况依赖于进程的优先级,而其他变迁的实施与进程的优先级无关.由于 t_3 的实施与进程的优先级有关,因此通过给该变迁联系一个非对称的实施谓词,即谓词函数中包含“ $<$ ”、“ \leq ”、“ $>$ ”、“ \geq ”等非对称操作符,精确地表达异构系统中实体的不同行为.

2.2 ECMRGs 的计算

ECMRGs 的计算包括以下四个具体步骤:

- (1) 首先将变迁划分为两类:对称变迁(对应于相同的行为)和非对称变迁(对应于不同的行为)^[10];
- (2) 为了处理非对称变迁的实施,可以有选择地对复合标识附加一些相关的信息;
- (3) 对于非对称变迁,扩展变迁的实施规则;
- (4) 构造 ECMRGs.

2.2.1 变迁的划分 在实际系统中,处理单元在不同的数据(资源)上执行相同或类似的计算(或任务),这类行为对应于 Petri 网模型中的对称变迁.其余变迁称为非对称变迁,即变迁对于不同进程表现出来的行为不同,变迁的实施结果与具体进程相关.在图 1 中,由于变迁 t_3 的谓词函数为 $x < y$,含有非对称操作符“ $<$ ”,因此该变迁为非对称变迁,其余变迁为对称变迁.

2.2.2 扩展复合标识 为了处理非对称变迁的实施,可以有选择地对复合标识附加一些相关的信息,即将复合标识中包含的所有个体标识作为原复合标识的附加信息,这样得到的标识称为扩展的复合标识(Extended compound markings, ECMs).本文采用动态子类的有序对及动态子类的势(即元素个数)表示复合标识.

例如,表 1(a) 表 1 复合标识及扩展的复合标识的表示

标识	位置索引			
	idle	global select	critical section	free
M_2	$(Z_1, Z_2, 0, Z_1)$ $ Z_1 =1, Z_2 =2$			

(a) 复合标识

和 (b) 分别给出了图 1 模型中的一个复合标识及其对应的扩展复合标识 (M 表示一般的复合标识, Me 表示扩展的复合标识).其中,扩展的复合标识由两部分组成:复合标识(阴影部分所示)及复合标识中所包含的所有个体标识.

标识	位置索引			
	idle	global select	critical section	free
Me_2	$M_2: (Z_1, Z_2, 0, Z_1)$ $ Z_1 =1, Z_2 =2$			
	$E_1: Z_1 = \{p_3\}, Z_2 = \{p_1, p_2\}$			
	$E_2: Z_1 = \{p_2\}, Z_2 = \{p_1, p_3\}$			
$E_3: Z_1 = \{p_1\}, Z_2 = \{p_2, p_3\}$				

(b) 扩展的复合标识

⑧ 复合标识: C_1 类分解成的两个动态子类 Z_1 和 Z_2 , 它们的势分别为 1 和 2, 即 $|Z_1| = 1, |Z_2| = 2$, 表明有两个进程

发送了访问请求,处于 global select 位置,另有一个进程没有发送请求、处于空闲状态,因此处于 free 和 idle 位置.

® 复合标识中所包含的所有个体标识:将 Z_1 和 Z_2 两个动态子类展开,有三种可能的情况,即(1) p_3 处于空闲状态, p_1 和 p_2 发送了访问请求;(2) p_2 处于空闲状态, p_1 和 p_3 发送了访问请求;(3) p_1 处于空闲状态, p_2 和 p_3 发送了访问请求.注意,并不是任何情况下复合标识都要展开;只有满足下列任意一个条件,复合标识才需要展开:

(1) 复合标识中至少有一个个体标识使得非对称变迁可实施;

(2) 复合标识中有一些个体标识不可达.

为了便于构造 ECMs,引入饱和 (saturation) 和均匀 (uniformity) 的概念.

定义 2 饱和的 ECMs 和均匀的 ECMs:

(1) 一个 ECM 是饱和的当且仅当它的所有个体标识均可达;

(2) 一个 ECM 是均匀的当且仅当一个类中的所有标记汇集在同一个位置中.

简单起见,本文的实例中初始 ECMs 都是均匀的.显然,在下面两种情况中对 ECMs 进行扩展是无用的.

性质 1 当一个 ECM 满足下面任意一个条件时,该 ECM 可以用一般的复合标识表示,而不必展开:

(1) 该 ECM 是饱和的,且在这个状态中没有可实施的非对称变迁;

(2) 该 ECM 是均匀的.

证明:

(1) 因为一个 ECM 需要展开,当且仅当该标识满足下列任意一个条件:即该标识中至少有一个个体标识使得非对称变迁可实施,或者该标识中存在不可达的个体标识.一个 ECM 是饱和的,当且仅当该标识中不存在不可达的个体标识;如果该标识中所有个体标识中非对称变迁均不可实施,则该标识不必展开.

(2) 如果 ECM 是均匀的,由于一个类中的所有标记汇集在同一个位置中,复合标识仅包含一个个体标识,因此可用一般的复合标识表示.

2.2.3 扩展变迁的实施规则 与一般的复合标识可达图类似,在 ECMRGs 中变迁的实施包括四个步骤:(1) 首先确定源标识是一般的复合标识还是个体标识;(2) 根据源标识类型确定变迁实施时相关的标记采用标记变量还是个体标记;(3) 实施变迁;(4) 将具有相同分布的标记合并为一个动态子类,进而将可达标识的表示规范化.由于在 ECMRGs 中,复合标识可以展开成一组个体标识,因此 ECMs 之间的弧有四类:一般的复合标识到一般的复合标识;一般的复合标识到个体标识;个体标识到个体标识;个体标识到一般的复合标识.

一般的复合标识可达图中,变迁的实施规则仅考虑对称变迁的实施、且源标识和目的标识均为一般的复合标识,但在 ECMRGs 中,还需要考虑从个体标识出发对称变迁的实施情况以及非对称变迁的实施情况.因此 ECMRGs 中变迁的实施规则可以分为三类:

(1) 一般的对称变迁的实施:如果当前的 ECM 是饱和的,且实施的是对称变迁,那么实施前后的标识均可用一般的复合标识表示;

(2) 实例化对称变迁的实施:这种情况也是针对对称变迁而言的,但当前的 ECM 是非饱和的.在这种情况下,从可达个体标识出发到达个体标识或一般的复合标识.由于变迁的对称特性,当前 ECM 中所有的可达个体标识经过对称变迁实施后到达相同的标识,且转移速率都相同;

(3) 非对称变迁的实施:这种情况是针对非对称变迁而言的,从可达个体标识出发到达个体标识或一般的复合标识.由于变迁的非对称特性,ECMs 中的可达个体标识向其他标识转移的速率可能不同,且目的标识也有可能不同.

可见,变迁的实施规则由变迁类型和源 ECMs 属性确定.下表总结了 ECMRGs 中变迁的实施规则:

表 2 扩展的变迁实施规则

变迁类型 / 源 ECM 属性	对称变迁	非对称变迁
饱和	一般的对称变迁的实施	非对称变迁的实施
非饱和	实例化对称变迁的实施	非对称变迁的实施

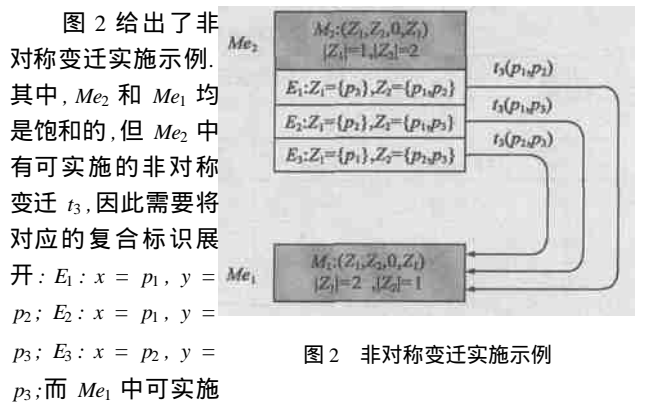


图 2 非对称变迁实施示例

图 2 给出了非对称变迁实施示例.其中, Me_2 和 Me_1 均是饱和的,但 Me_2 中有可实施的非对称变迁 t_3 ,因此需要将对应的复合标识展开: $E_1: x = p_1, y = p_2$; $E_2: x = p_1, y = p_3$; $E_3: x = p_2, y = p_3$; 而 Me_1 中可实施的变迁均是对称变迁,只需用一般的复合标识表示即可.从 Me_2 中的可达个体标识出发,经过非对称变迁 t_3 的实施到达 Me_1 ,属于变迁实施规则中的第三类情况.

2.2.4 构造 ECMRGs 通过扩展的复合标识及变迁实施规则,可以直接构造 ECMRGs.图 3 给出了图 1 所示模型的 ECMRG,其中,有两类弧:粗线弧连接两个一般的复合标识,细线弧从个体标识出发到达个体标识或一般的复合标识. Z_i 表示 Z_1 中的一个子项.图中所有的 ECMs 都是饱和的,但只有 Me_2 中有可实施的非对称变迁,因此 Me_2 到 Me_1 之间用细线弧连接,其他用粗线弧连接.由图可知,这个 ECMRG 中共有四个结点,但是包含的个体标识共有十个,可见,扩展方法在很大程度上简化了状态空间,保持了 SHLPNs 的优越性.

2.3 稳定状态概率的求解

基于 ECMRGs 可以求解系统的稳定状态概率,从而进一步分析系统的性能.扩展复合标识的稳定状态概率求解方法与传统的 SHLPNs 相同,并且是它所包含的个体标识的稳定状态概率之和.但与传统的 SHLPNs 不同之处在于,扩展复合

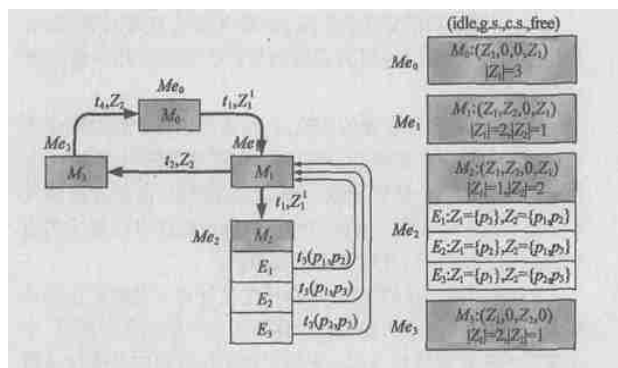


图3 图1所示模型的ECMRG

识中每个个体标识的稳定状态概率不一定相同,不能简单地通过复合标识的稳定概率除以所包含的个体标识数得到.欲得到个体标识的稳定概率,需将含有可实施非对称变迁标识的最小子网(即仅由含有可实施非对称变迁的复合标识及其相邻的复合标识组成)展开进行求解.下面通过实例进行说明.

考虑图1所示的模型,假设指数变迁 t_1, t_2, t_3 和 t_4 的实施速率分别为 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 和 λ_4 ,个体标识分别记为 $m_0, m_1 \sim m_1, m_2 \sim m_2, m_3 \sim m_3$ (见表3).

表3 个体标识对应表

状态	位置索引			
	idle	g. s.	c. s.	free
m_0	$\{p_1, p_2, p_3\}$	0	0	$\{p_1, p_2, p_3\}$
m_1	$\{p_2, p_3\}$	$\{p_1\}$	0	$\{p_2, p_3\}$
m_1	$\{p_1, p_3\}$	$\{p_2\}$	0	$\{p_1, p_3\}$
m_1	$\{p_1, p_2\}$	$\{p_3\}$	0	$\{p_1, p_2\}$
m_2	$\{p_3\}$	$\{p_1, p_2\}$	0	$\{p_3\}$
m_2	$\{p_1\}$	$\{p_2, p_3\}$	0	$\{p_1\}$
m_2	$\{p_2\}$	$\{p_1, p_3\}$	0	$\{p_2\}$
m_3	$\{p_2, p_3\}$	0	$\{p_1\}$	0
m_3	$\{p_1, p_3\}$	0	$\{p_2\}$	0
m_3	$\{p_1, p_2\}$	0	$\{p_3\}$	0

可见,个体标识 m_0 就是 ECMRG 中的标识 Me_0 ;个体标识 $m_1 \sim m_1$ 用扩展的复合标识 Me_1 表示;个体标识 $m_2 \sim m_2$ 用扩展的复合标识 Me_2 表示;个体标识 $m_3 \sim m_3$ 用扩展的复合标识 Me_3 表示.从状态 Me_0 到 Me_1 的个体标识有三种可能,每一种可能的转移速率都为 λ_1 ,所以从 Me_0 到 Me_1 的转移速率为 $3\lambda_1$.从 Me_1 的任意一个个体标识到 Me_2 的个体标识仅有两种可能,每一种可能的转移速率为 λ_2 ,因此从 Me_1 到 Me_2 的转移速率为 $2\lambda_2$.同理,从 Me_1 到 Me_3 的转移速率为 $2\lambda_3$;从 Me_2 到 Me_0 的转移速率为 λ_4 ;从 Me_2 到 Me_1 的转移速率为 $3\lambda_3$.

通过求解下列方程组,可得 ECMRG 中每个扩展复合标识的稳定状态概率 $P\{Me_i\} = x_i (0 \leq i \leq n)$,其中 n 是扩展复合标识的个数, Q 是转移速率矩阵.

$$\begin{cases} XQ = 0 \\ \sum_i x_i = 1, 0 \leq i < n \end{cases}$$

对于图1所示模型,相应地可以列出如下方程组:

$$\begin{cases} 3\lambda_1 x_0 = 4\lambda_3 x_3 \\ (2\lambda_1 + 2\lambda_2)x_1 = 3\lambda_1 x_0 + 3\lambda_2 x_2 \\ 3\lambda_2 x_2 = 2\lambda_1 x_1 \\ x_0 + x_1 + x_2 + x_3 = 1 \end{cases}$$

解此方程组可得:

$$\begin{cases} P\{Me_0\} = x_0 = \frac{2\lambda_2\lambda_3\lambda_4}{(2\lambda_2\lambda_3\lambda_4 + 3\lambda_1\lambda_3\lambda_4 + 6\lambda_1^2\lambda_4 + 3\lambda_1\lambda_2\lambda_3)} \\ P\{Me_1\} = x_1 = \frac{3\lambda_1\lambda_3\lambda_4}{(2\lambda_2\lambda_3\lambda_4 + 3\lambda_1\lambda_3\lambda_4 + 6\lambda_1^2\lambda_4 + 3\lambda_1\lambda_2\lambda_3)} \\ P\{Me_2\} = x_2 = \frac{6\lambda_1^2\lambda_4}{(2\lambda_2\lambda_3\lambda_4 + 3\lambda_1\lambda_3\lambda_4 + 6\lambda_1^2\lambda_4 + 3\lambda_1\lambda_2\lambda_3)} \\ P\{Me_3\} = x_3 = \frac{3\lambda_1\lambda_2\lambda_3}{(2\lambda_2\lambda_3\lambda_4 + 3\lambda_1\lambda_3\lambda_4 + 6\lambda_1^2\lambda_4 + 3\lambda_1\lambda_2\lambda_3)} \end{cases}$$

欲求个体标识

的稳定概率,需讨论 Me_2 及其相邻标识组成的子网.由于 Me_0 只包含一个个体标识 m_0 ,故 Me_0 的稳定概率即为 m_0 的稳定概率.子网展开图如图4虚线部分所示.

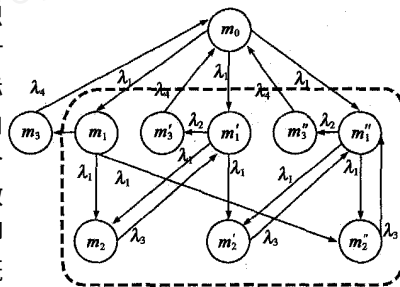


图4 个体标识可扩图

对于展开的子网,根据流平衡关系^[11]可列出下列方程组:

$$\begin{cases} (2\lambda_1 + 2\lambda_2)P\{m_1\} = \lambda_1 x_0 \\ (2\lambda_1 + 2\lambda_2)P\{m_1'\} = \lambda_1 x_0 + 3\lambda_2 P\{m_2\} \\ (2\lambda_1 + 2\lambda_2)P\{m_1''\} = \lambda_1 x_0 + 3\lambda_2 P\{m_2\} + 3\lambda_3 P\{m_2\} \\ 3\lambda_2 P\{m_2\} = \lambda_1 (P\{m_1\} + P\{m_1'\}) \\ 3\lambda_2 P\{m_2\} = \lambda_1 (P\{m_1\} + P\{m_1''\}) \\ 3\lambda_2 P\{m_2\} = \lambda_1 (P\{m_1\} + P\{m_1''\}) \end{cases}$$

由上述六个方程求解可得:

$$\begin{cases} P\{m_1\} = \frac{1\lambda_2\lambda_3\lambda_4}{(2\lambda_2\lambda_3\lambda_4 + 3\lambda_1\lambda_3\lambda_4 + 6\lambda_1^2\lambda_4 + 3\lambda_1\lambda_2\lambda_3)(2\lambda_1 + 2\lambda_2)} \\ P\{m_1'\} = \frac{1\lambda_2\lambda_3\lambda_4(3\lambda_1 + \lambda_2)}{(2\lambda_2\lambda_3\lambda_4 + 3\lambda_1\lambda_3\lambda_4 + 6\lambda_1^2\lambda_4 + 3\lambda_1\lambda_2\lambda_3)(\lambda_1 + 2\lambda_2)(2\lambda_1 + 2\lambda_2)} \\ P\{m_1''\} = \frac{1\lambda_3\lambda_4(3\lambda_1 + \lambda_2)}{(2\lambda_2\lambda_3\lambda_4 + 3\lambda_1\lambda_3\lambda_4 + 6\lambda_1^2\lambda_4 + 3\lambda_1\lambda_2\lambda_3)(\lambda_1 + 2\lambda_2)} \\ P\{m_2\} = \frac{2\lambda_1^2\lambda_2\lambda_4}{(2\lambda_2\lambda_3\lambda_4 + 3\lambda_1\lambda_3\lambda_4 + 6\lambda_1^2\lambda_4 + 3\lambda_1\lambda_2\lambda_3)(\lambda_1 + 2\lambda_2)} \\ P\{m_2\} = \frac{2\lambda_1^2\lambda_4(3\lambda_1 + \lambda_2)}{(2\lambda_2\lambda_3\lambda_4 + 3\lambda_1\lambda_3\lambda_4 + 6\lambda_1^2\lambda_4 + 3\lambda_1\lambda_2\lambda_3)(2\lambda_1 + 2\lambda_2)} \\ P\{m_2\} = \frac{2\lambda_1^2\lambda_4(3\lambda_1^2 + 3\lambda_1\lambda_2 + \lambda_2^2)}{(2\lambda_2\lambda_3\lambda_4 + 3\lambda_1\lambda_3\lambda_4 + 6\lambda_1^2\lambda_4 + 3\lambda_1\lambda_2\lambda_3)(\lambda_1 + 2\lambda_2)(\lambda_1 + 2\lambda_2)} \end{cases}$$

可见, $P\{m_1\} + P\{m_1'\} + P\{m_1''\} = x_1, P\{m_2\} + P\{m_2\} = x_2$

+ $P\{m_2\} = x_2$. 其他个体标识可以很容易从已求解的这些个体标识中得到. 例如, $P\{m_5\}$ 、 $P\{m_3\}$ 及 $P\{m_3\}$ 可以通过求解 ${}_4P\{m_3\} = {}_2P\{m_1\}$, ${}_4P\{m_3\} = {}_2P\{m_1\}$, ${}_4P\{m_3\} = {}_2P\{m_1\}$ 得到.

3 总结与展望

SHLPNs 通常用于由若干同构子系统组成的系统中, 本文将这种方法扩展, 对存在异构子系统的系统进行模型和分析. 这种方法的基本思想是将系统中对称部分和非对称部分分别进行处理. 建模时将对称部分折叠, 非对称部分的行为通过给对应变迁联系一个非对称实施谓词进行表示, 从而简化模型的表达. 构造可达图时, 将具有相同标记分布的多个标识压缩成一个复合标识, 如果复合标识所包含的个体标识中存在可实施的非对称变迁, 则给复合标识附加个体标识信息进行表示. 基于扩展的复合标识可达图, 进一步求解稳定状态概率, 从而进行性能分析. 根据转移概率矩阵求解复合标识概率, 再将包含可实施非对称变迁的最小标识子网展开求解相应的个体标识概率, 从而得到其他个体标识的稳定概率.

本文提出的扩展方法在处理有少量非对称行为的系统时, 能够有效地简化模型和状态空间. 但若系统中包含了大量的异构子系统, 则不能显著地简化模型和状态空间; 当系统中无同构子系统时, SHLPNs 退化为一般的 SPNs. 因此该方法有待于进一步完善.

参考文献:

- [1] LIN C, Marinescu D C. On the analysis of stochastic high level petri net models[J]. Microelectronics and Reliability, 1991, 31(4): 747 - 767.
- [2] 林闯. 计算机网络和计算机系统的性能评价[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001. 203 - 221.
- [3] 林闯. 计算机网络和计算机系统的性能评价[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001. 168 - 171.
- [4] Elisabeth Pelz, Hans Fleischhack. Compositional high level petri nets with timing constraints—a comparison[A]. Third International Conference on Application of Concurrency to System Design (ACSD '2003) [C]. California: IEEE Computer Society Press, 2003. 132 - 141.
- [5] Victor Khomenko, Maciej Koutny. Branching processes of high-level petri nets[A]. Garavel H, Hatcliff J (Eds.). Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems (TACAS 2003), 9th International Conference, Part of ETAPS 2003, Lecture Notes in Computer Science 2619[C]. New York: Springer Verlag, 2003. 458 - 472.
- [6] 林闯. 随机 Petri 网和系统性能评价[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [7] Ian Davies. Symbolic techniques for the performance analysis of genera-

lised stochastic petri nets[R]. South Africa: University of Cape Town, 2001.

- [8] Chiola G, Dutheillet C, Franceschinis G, Haddad S. On well-formed coloured nets and their symbolic reachability graph[A]. Jensen K, Rozenberg G (Eds.). High-Level Petri Nets. Theory and Application [C]. New York: Springer Verlag, 1991. 373 - 396.
- [9] Dutheillet C, Haddad S. Aggregation and disaggregation of states in coloured stochastic petri nets: application to a multiprocessor architecture [A]. Proceedings of the 3rd International Workshop on Petri Nets and Performance Models [C]. Kyoto: IEEE Computer Society Press, 1989. 40 - 49.
- [10] Haddad S, Ilie J M, Taghelit M, Zouari B. Symbolic reachability graph and partial symmetries[A]. Proceeding of the 16th International Conference on Application and Theory of Petri Nets, Lecture Notes in Computer Science 935 [C]. London: Springer Verlag, 1995. 238 - 257.
- [11] E Allen Emerson, Richard J Trefler. From asymmetry to full symmetry: new techniques for symmetry reduction in model checking[A]. Laurence Pierre, Thomas Kropf (Eds.). CHARME99: 10th IFIP WG10. 5 Advanced Research Working Conference on Correct Hardware Design and Verification Methods, Lecture Notes in Computer Science 1703 [C]. New York: Springer Verlag, 1999. 142 - 156.
- [12] 林闯. 计算机网络和计算机系统的性能评价[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001. 76 - 97.

作者简介:



李雅娟 女, 1979 年出生于宁夏, 2002 年毕业于清华大学计算机科学与技术系, 获学士学位, 现为清华大学计算机系网络所博士研究生, 主要研究领域为计算机网络, 系统性能评价, 随机 Petri 网, 网络计算.



林 闯 男, 1948 年出生于辽宁省, 博士, 清华大学计算机系教授, 博士生导师, 计算机系主任, 同时为《计算机学报》编委, 国家自然科学基金重大研究计划“网络和信息安全”的科学指导专家, 中科院网络中心和北京科技大学兼职教授, 主要研究领域为计算机网络, 系统性能评价, 随机 Petri 网, 逻辑推演和推理系统. 曾在美国 Purdue 大学、美国 Texas 大学奥斯汀分校、香港科技大学、香港浸会大学和美国 Florida 大学长期做研究工作, 已在国内外一级期刊上和 IEEE Computer Society 的学术年会上发表论文 90 多篇, 并在国内出版专著 2 本.