

# 含有非马尔可夫过程的排队 Petri 网模型和性能分析

林 闯,郑 波

(清华大学计算机科学与技术系,北京 100084)

**摘 要:** 本文提出了一种新的高级性能模型技术,称作 NM-QPN (含有非马尔可夫过程的排队 Petri 网, Queuing Petri Net including Non-Markovian processes),它综合了排队网、随机 Petri 网以及模拟求解各自的特点. NM-QPN 以模拟模型为总体框架,发挥排队网和随机 Petri 网各自的优势对系统进行建模. 提出了一套完整的 NM-QPN 模型求解方案,通过流等价方法将模型中的马尔可夫过程进行化简,这样可以大大减少模型的状态,最后再用模拟求解方法求解剩下的非马尔可夫过程.

**关键词:** 随机 Petri 网; 非马尔可夫过程; 排队网; NM-QPN

**中图分类号:** TP302 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 02-0166-05

## A Model of Queuing Petri Net Including Non-Markovian Process and Performance Analysis

LIN Chuang, ZHENG Bo

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

**Abstract:** The technique of Stochastic Petri Nets (SPN) was widely used in the field of performance evaluation in the past 20 years. But the SPN model is still in face of the problem of explosion of the state space. And if in stochastic modeling the idealized assumption of exponential distribution is removed, the resulting stochastic process is non-Markovian. In this paper, we present Queuing Petri Net including Non-Markovian processes (NM-QPN), a novel high level modeling technique, which is based on the former research. This modeling technique integrates the characteristics of Queuing Nets, Stochastic Petri Nets and simulation solving. A complete solving scheme of NM-QPN was presented. The algorithm of Flow Equivalent is used to analyze and simplify the Markovian processes parts in the model so that the state space will be greatly reduced, and then simulation technique to solve the remaining non-Markovian processes was used.

**Key words:** stochastic Petri Net; non-markovian process; queuing net; NM-QPN

### 1 引言

近二十年来, SPN 的理论、分析技术和应用已经得到了很大的发展, SPN 作为研究离散事件动态系统的有力工具被广泛应用在性能评价<sup>[1]</sup>、计算机网络<sup>[2]</sup>等方面. 但是仍然有三个问题在困扰着它. 其一是状态空间爆炸问题, 即随着系统模型复杂性的增加, 状态空间呈指数增长; 其二是随机模型的局限性, SPN 中“善意”的假定各种服务的速率服从负指数分布, 而现实中常常会遇到不服从负指数分布的情况; 最后一个问题是建模难度的问题, 并不是所有的系统或者系统的所有部分用 SPN 来建模都很方便.

从上面的分析不难想到, 既然模型的分析求解和模拟求解各有优缺点, 再加上排队网络对某些系统建模的方便性, 我们何不把这三者结合到一起, 取长补短发挥各自的优点. 可以这样考虑, 首先, 对于要模型的系统那些便于用排队网进行

建模的部分, 特别是有乘积形式解<sup>[3,4]</sup> (product-form solution) 的部分我们利用排队网络来建模, 这样做的好处是: 建模和求解相对简单, 在有乘积形式解的情况下更是有利于解决状态空间爆炸的问题. 然后, 把系统中那些服从 (或近似服从) 指数分布的部分用广义随机 Petri 网<sup>[5]</sup> (GSPN) 进行建模. 最后, 剩下的那些非马尔可夫过程的部分用含有一般分布的 Petri 网来建模.

Matthias Becker 和 Helena Szczerbicka 曾经对排队网和随机 Petri 网的结合做出过不少贡献, 提出了一种称作 PNQ<sup>[6]</sup> (Petri Nets including Queuing Networks) 的模型, 在他们工作的基础上我们提出了 NM-QPN (含有非马尔可夫过程的排队 Petri 网, Queuing Petri Net include Non-Markovian processes) 模型, 对前面所提到的三者进行了有机结合, 并提供了一套完整的自底向上的近似求解方法.

收稿日期: 2002-06-06; 修回日期: 2002-08-20

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 90104002, 60173012); 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 课题 (No. 2001AA112080); 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 (No. G1999032707)

在过去的研究中,当一个系统不能用排队网络来模型时,通常采用连续时间马尔可夫链 (CTMC) 直接求解或者是和 GSPN 相结合的办法,这也可以算是一种将排队网和 GSPN 相结合的例子. 同样,当一个系统含有非马尔可夫过程时也有不少结合 Petri 网的分析和模拟用以解决某些特定的模型问题的例子<sup>[7]</sup>. 然而,并没有一个通用的结合这三者的组合网络的定义,也没有一个可以更容易和更正确的建模和近似求解的方法可以模型其他问题. 此外, Petri 网和排队网的图形化的描述的优越性也没有得到充分的开发和利用.

## 2 NM-QPN 组合模型

在这里我们假定读者具有随机 Petri 网、排队网络和系统性能评价的基本知识. 对此不熟悉的读者可以参阅文献 [3, 5].

我们提出 NM-QPN 模型的概念的目的主要有两点,一是提供一个形式化的结合排队网、GSPN 和模拟的组合模型;二是继承和发展 Petri 网和排队网络图形化的优点. 为此我们引入了第三类结点,并对 GSPN 原有的变迁类型作了扩充(即 ESPN, Extended Stochastic Petri Net, 扩展随机 Petri 网,允许 GSPN 中存在一般分布的变迁). 第三类结点是由一定数量队列组成的单输入多输出排队网络. 来自 ESPN 的标记可以通过第三类结点中的唯一的输入队列进入到排队网中. 在某一排队网中的标记可以在本网中从一个队列移动到另一个队列,也可以从输出队列移动到 ESPN 中的某一位置或者是其他排队网的输入队列中去. 禁止弧可以是整个排队网的输入或输出弧. 变迁的类型除了服从指数分布的时间变迁和瞬时变迁之外,增加了一种非指数分布的变迁. 我们参考了 Matthias Becker 和 Helena Szczerbicka 提出的模型<sup>[6]</sup>,并对其进行了扩充. 下面给出 NM-QPN 的形式化定义.

**定义 1** NM-QPN 是一个 9 元组  $(P, T, S, I, O, H, W, \dots, m_0)$ , 其中

- ①  $P$  是位置的集合.
- ②  $T$  是变迁的集合,  $T = T_E \cup T_I \cup T_G$ .  
 $T_E$  是服从指数分布的时间变迁的集合  
 $T_I$  是瞬时变迁的集合  
 $T_G$  是不服从指数分布的时间变迁的集合  
 $T_E \cap T_G = \emptyset, T_E \cap T_I = \emptyset, T_G \cap T_I = \emptyset$
- ③  $S$  是单一类型排队网的集合.  
 每一个排队网  $q_{n_i}$   $S$  包含  
 一个队列的集合  $Q_i = \{q_{i,0}, q_{i,1}, \dots, q_{i,k}\}$ ,  $q_{i,0}$  为输入队列,  $k_i + 1$  是排队网  $q_{n_i}$  队列的个数  
 $Q^0 := \{q_{i,0} \mid i = 1, \dots, |s|\}$  是所有输入队列的集合.  
 $Q := \cup_i Q_i$  是所有队列的集合.  
 $p_i(x, y); q_{i,x}q_{i,y}$   $q_{n_i}$  是  $q_{n_i}$  内部的选道概率,  
 $p_i(x, p); q_{i,x} q_{n_i}, p \in (P \setminus Q^0)$  是一个任务经过队列  $q_{i,x}$  服务之后离开  $q_{n_i}$  进入后继位置或者输入队列  $p$ .  
 $r_i$  是标记可以离开排队网  $q_{n_i}$  的队列的数目, 这些队列就是前面提到的输出队列.
- ④  $I: T \rightarrow \text{bag}(P)$  是输入函数(从位置到变迁的弧,  $\text{bag}(P)$  表

示集合  $P$  的幂集).

⑤  $O: T \rightarrow \text{bag}(P \setminus Q^0)$  是输出函数(表示从变迁或队列到位置或输入队列的弧).

⑥  $H: T \rightarrow \text{bag}(P \setminus S)$  是禁止函数(从位置或者排队网到变迁或者排队网的带有圆圈的弧).

⑦  $W: (A, \dots)$ .

⑧  $A: T \rightarrow \text{alphabet}$  是变迁的类型,对时间变迁来说是它的分布类型,对瞬时变迁定义  $A = I$ .

⑨  $\lambda: T \rightarrow R$  定义了时间变迁情况下平均实施速率以及在瞬时变迁情况下的权重.

⑩  $\sigma: T \rightarrow R$  定义了时间变迁的概率分布的方差对于瞬时变迁令  $\sigma(I) = 0$ .

⑪ 在不引起歧义的情况下,  $T_E \cup T_I$  对应的  $W$  可以简化为只用  $\lambda$  来表示.

⑫  $\rho: T \rightarrow Q \cup N$  是优先级函数. 时间变迁和队列的优先级是 0, 瞬时变迁的优先级大于 0.

⑬  $m_0: P \setminus S \rightarrow N$  是初始标记(initial marking). 排队网的初始标记定义为初始条件下排队网中所有标记的数目.

从输出函数的定义可知,来自变迁或队列的标记只能一个接一个地从仅有的一个队列(输入队列)进入排队网. 经一个排队网服务的标记只能根据选道概率由输出队列中的一个输出,即队列不能复制标记(变迁可以服务一个标记送出多个标记). 而且它遵循从队列到位置的弧有两个标签的原则,一个标签是弧的容量,另一个是选道概率(Routing Probability). 如果弧的容量超过一个,那么对于每一个离开队列到位置的标记就应该有和弧的容量一样多的标记被放进目标位置.

禁止函数的语义上的解释是:如果一条从排队网到变迁的禁止弧存在,那么变迁只能在排队网总标记数严格小于禁止弧的容量的条件下才能实施. 如果一个排队网被一条禁止弧所禁止,那么排队网中没有标记能够移动,排队网中的任何活动都被禁止. 排队网中各个队列之间标记的初始分布与 NM-QPN 的行为是无关的. 可以看出第三类节点  $S$ , 即排队网具有很大的灵活性,在有禁止弧从它发出或者指向它的时候排队网被看作一个整体,对于普通的弧则由输入和输出队列来处理.

根据 NM-QPN 的定义,某些弧是不允许存在的,例如,从位置到队列的弧,从队列到变迁的弧,以及从单个队列发出的或者指向单个队列的禁止弧都是不允许的.

## 3 模型的化简和分析

在这一节中我们主要介绍利用 Petri 网和排队网络的知识和技术对 NM-QPN 进行结构化的分析和化简方法.

### 3.1 排队网的化简和分析

利用流等价思想对排队网进行化简, Matthias Becker 和 Helena Szczerbicka 已经做了大量的工作,对此有兴趣的读者可以查阅参考文献 [6], 在此不再赘述. 通过对排队网的流等价化简,我们把 NM-QPN:  $PN = (P, T, S, I, O, H, W, \dots, m_0)$  化简为一个等价的 ESPN:  $PN = (P, T, I, O, H, W, \dots, m_0)$ .

### 3.2 GSPN子网的化简和分析

经过上一步化简,我们得到了一个 ESPN,也就是含有实施速率是非指数分布的变迁.如果 ESPN 中含有 GSPN 子网那我们还可以对其进行化简.当前已经有不少对 GSPN 进行分解,压缩和精化的方法和技术<sup>[8,9]</sup>,化简的思想可以是流等价<sup>[10]</sup>,也可以利用基本的几种 Petri 网自底向上对 GSPN 子网进行性能等效化简.我们主要就流等价化简作具体介绍.

由于随机 Petri 网与排队论模型在求解上等价,我们不难想到流等价方法也适用于 GSPN 的等效化简.但是由于 GSPN 比排队模型具有更强的模型描述能力,因此我们要对它作一些限制,使得它能够用流等价方法进行化简.基于这一点,非形式化的对 GSPN 的化简分析思想介绍如下:如果 GSPN 子网具有和排队网相似的性质,即标记在子网内既不复制也不消失,那么我们可以用同样的方法对其进行流等价化简.流等价化简后的 GSPN 子网  $pn$  相对于原有的 GSPN  $pn$  来说包含一个输入位置  $ip$  和一个输出位置  $op$ . 瞬时选道变迁  $\pi_r, r = 1, \dots, R$ , 以及一个流等价时间变迁  $fet$ . 实施速率等于  $pn$  的吞吐量.要离开  $pn$  的标记都聚集在  $op$  中,它们可以通过瞬时选道变迁  $\pi_r$  离开输出位置,其中  $\pi_r$  的权重根据访问比率和输出队列  $r$  的选道概率调整.输出队列的访问比率对不同标记总数的同一排队网是相同的,因此选道变迁的权重是标记数无关的.需要指出的是由流等价的子网代替只有在排队网有乘积解的时候是精确的,在多数情况下,流等价之后的时间变迁  $fet$  的实施速率不再是指数分布,而是服从超指数分布,而超指数分布是由若干个指数分布叠加得到的,其性质与指数分布十分相似,因此将其近似看作指数分布不会对后面的模拟造成太大的误差.

形式化的定义和分析方法介绍如下:

如果在 ESPN  $PN$  中存在这样的 GSPN 子网  $N_k = (P_k, T_k, I_k, O_k)$ , 其中  $P_i \subseteq P, T_k \subseteq T, I_k = I \setminus (P_k \times T_k), O_k = O \setminus (T_k \times P_k)$ . 位置  $p \in P_k$  是一个输入(输出)位置,当且仅当存在  $t \in T_k (p \in P)$  且  $t \in T_k (p$  是  $p$  的前置集,  $p$  是  $p$  的后置集). 我们定义  $T_k^{input} = (t_{k,1}^{ip} \dots t_{k,m}^{ip})$  为子网  $N_k$  的输入变迁集,  $T_k^{output} = (t_{k,1}^{op} \dots t_{k,n}^{op})$  为子网  $N_k$  的输出变迁集.  $T_k = T_k^{input} \cup T_k^{output}$ , 定义完全子网  $N_k = (P_k, T_k, P_k \times T_k, T_k \times P_k)$ .

定义流定价网 FEN(Flow Equivalent Net) 如下:  $FEN = (P, T, I, O)$  是一个 GSPN, 其中  $P = \{p_k^i, p_k^o\}, T = \{fet_k\} \cup \{t_{k,1}^{op} \dots t_{k,m}^{op}\}, I = P \times T, O = T \times P$ . 它满足  $E\{time\ in\ N_k\} = E\{time\ in\ FEN\}$ , 且

$$\begin{aligned} & \text{Prob}(N_k)\{\text{token leaves through } t_{k,l}^{op} \text{ entered at } p_k^i\} \\ &= \text{Prob}(FEN)\{\text{token leaves through } t_{k,l}^{op} \text{ entered at } p_k^i\} \end{aligned}$$

图 1 展示了单输入情况下 FEN 的结构.  $N_k$  要能够进行流等价化简还必须满足以下四个条件(我们只作直观的描述,形式化的描述可以参考参考文献[10]):

- (1) 一个标记进入完全子网  $N_k$  后,最终将从子网的一个输出变迁离开子网;
- (2) 在子网内部,标记既不会被复制也不会被吸收;

(3) 每一个离开子网的标记,我们都可以通过知道它是从哪一个输入位置进入子网的;

(4) 输出变迁的选道概率不受子网之外的 marking 影响.

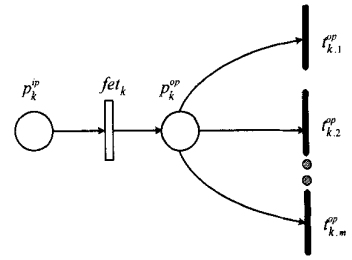


图 1 通常情况下的 FEN

FEN 的构造: 根据 FEN 的定义可知,

只要变迁  $fet_k$  的实施速率和  $t_{k,1}^{op} \dots t_{k,m}^{op}$  的选道概率确定了, FEN 也就随之确定了. 由完全子网构造等效的 FEN 关键在上述二者的计算. 下面就对流等价时间变迁  $fet_k$  的实施速率  $k(i)$  (注:  $k(i)$  表示输入位置的标记数为  $i$  时  $fet_k$  的实施速率) 和  $t_{k,1}^{op} \dots t_{k,m}^{op}$  的选道概率  $p_{k,1} \dots p_{k,m}$  的计算方法作简单介绍.

在计算的时候我们仍然要将完全子网  $N_k$  变形为一个闭环(反馈)网,具体做法是将输出变迁  $t_{k,l}^{op}$  直接连接到离开它的标记源自的那个输入位置上,根据前面的四个条件对于每个输出变迁都存在唯一的一个反馈输入位置. 由于变迁  $fet_k$  的实施速率是标记数相关的,为此我们还必须先计算出 FEN 的最大总标记数  $\maxpop_k$ . 计算方法简单介绍如下:将 FEN 替代完全子网  $N_k$  得到一个新的 ESPN  $PN$ , 这个 ESPN  $PN$  与我们化简之后得到的 ESPN 在拓扑上完全一致,只是变迁  $fet_k$  的实施速率和  $t_{k,1}^{op} \dots t_{k,m}^{op}$  的选道概率还没有赋值,但是整个 ESPN 的  $P$ -不变量已经确定了, FEN 的最大总标记数可以通过包含变迁  $fet_i$  的  $P$ -不变量计算:

$$\maxpop_k = \min\{k | fet_k \text{ } P\text{-不变量, 而且该 } P\text{-不变量 } k\text{-有界}\} \quad (1)$$

现在我们就可以利用反馈完全子网来计算变迁  $fet_k$  的实施速率和  $t_{k,1}^{op} \dots t_{k,m}^{op}$  的选道概率,计算的公式如下:

$$k(i) = \begin{cases} (fet_k, \text{ if } \# p_k^i = i), & i = 1, \dots, \maxpop_i \\ (t_{k,l}^{op}) / k, & l = 1, \dots, n \end{cases} \quad (2)$$

$$p_{k,l} = \begin{cases} (t_{k,l}^{op}) / k, & l = 1, \dots, n \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

即: FEN 中变迁  $fet_k$  是标记数相关的,实施速率等于其在不同标记数下的实施速率(或吞吐量);  $p_{k,1} \dots p_{k,m}$  的选道概率  $p_{k,1} \dots p_{k,m}$  是标记数无关的,它们的值是  $t_{k,l}^{op}$  的吞吐率和  $fet_k$  吞吐量(也就是总吞吐量)的比值.

至此, FEN 就已经完全确定了,用它替换 ESPN  $PN$  中的完全子网  $N_k$  就得到化简后的 ESPN  $PN$ .

下面总结一下 ESPN 流等价化简算法:

- (1) 在 ESPN 中找到 GSPN 子网;
- (2) 检查该 GSPN 子网是否满足前面的四个条件;
- (3) 把完全子网构成反馈网进行分析;
- (4) 构造等价的 FEN, 并根据公式(1~3)计算变迁:  $fet_k$  的实施速率和  $t_{k,1}^{op} \dots t_{k,m}^{op}$  的选道概率;
- (5) 用 FEN 替代完全子网  $N_k$  得到化简后的 ESPN  $PN$ .

我们仍然用一个例子来对 GSPN 的等效化简做一个图解,如图 2 所示.

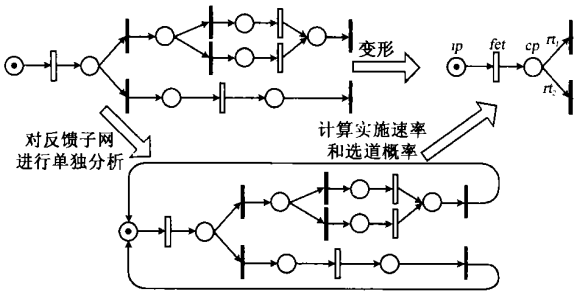


图 2 GSPN 流等价化简算法图解

经过上面的两部化简,我们得到了一个相对原有系统模型来说简单得多的 ESPN 模型.显然,现在再利用模拟求解软件对系统模型进行求解,模型的状态空间要比原有的模型的状态空间小得多,状态空间爆炸的问题得到了解决.

### 3.3 非马尔可夫过程的分析及模拟

对非马尔可夫过程的分析求解虽然比较困难,但是国际上仍然有不少学者在从事这方面的研究,近年来也涌现出不少成果<sup>[11]</sup>,提出了不少对某些特定的非马尔可夫过程的分析方法.但是目前还没有一个对所有非马尔可夫过程都通用的分析方法,因此在撰写本文的过程中,我们利用模拟软件对非马尔可夫过程进行模拟.

## 4 例子

在这一节里,举一个实际的例子来进一步说明 NM-QPN 的特点.大家将会看到利用 NM-QPN 进行建模是十分方便的,求解也不复杂.

假设一个路由器中,分组的到达是速率为  $\lambda$  的泊松过程,进入该路由器之后,分组先经过分类器被分为两类——高优先级类和低优先级类,分类后的分组从不同的输出端输出接受不同的服务;由于它们共享同一块内存区域,在某一时刻只能有一个服务员对内存进行访问,而且高优先级的分组享有抢占式的高优先级,因此只要有高优先级的分组在享受服务,低优先级分组的服务就被禁止;经过不同的服务之后,两种优先级的分组都进行分组头的处理,这一处理对每一个分组所花费的时间都是定长的,最后,分组被发送出去.

NM-QPN 模型如图 3 所示.其中,  $P_0$  表示可用的 MAC 缓冲资源;  $P_1$  表示可用的处理器资源;  $T_0$  模拟分组的到达,它

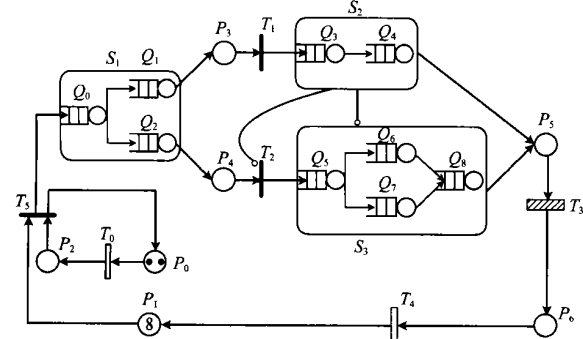


图 3 一个路由器系统的 NM-QPN 模型

服从指数分布,到达率为  $\lambda$ ;  $T_4$  表示对分组发送的处理,它们也服从指数分布,处理速率为  $\mu_4$ ;  $T_3$  代表对分组头的处理,它的实施速率是一个定值,即  $W(T_3) = (D, \tau_3, 0)$ ;排队网  $S_1$  描述的是分类操作;  $S_2$  描述的是高优先级分组得到的服务,  $S_3$  描述的是低优先级分组得到的服务;它们之间的禁止弧表示只有当  $S_2$  中没有分组接受服务时  $S_3$  才能得到资源并对低优先级分组服务.

我们先对排队网进行等效化简,我们可以得到图 4 中的 ESPN.

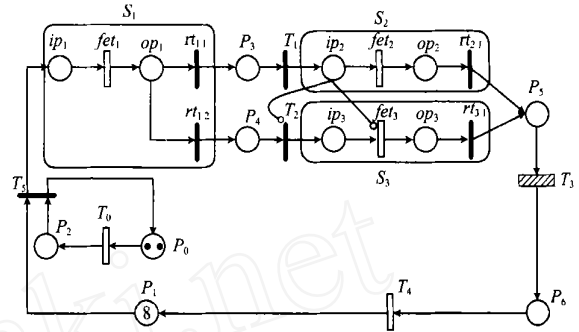


图 4 对排队网进行流等价化简之后的模型

接下来我们再对图 4 中的 GSPN 子网进行等效化简,化简之后的模型如图 5 所示.可以看到图 5 中的模型已经十分简单了,我们就可以很方便的用模拟求解工具对它进行模拟求解.我们取队列的服务速率和变迁的实施速率为以下值:  $\lambda_0 = \lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = \lambda_5 = \lambda_6 = \lambda_7 = \lambda_8 = 1.0$ ;  $\mu_3 = \mu_6 = 2.0$ ;  $\mu_7 = \mu_4 = 0.5$ .选道概率  $P_{Q1} = 0.8$ ;  $P_{Q2} = 0.2$ ;  $P_{Q6} = P_{Q7} = 0.5$ .计算结果如表 1.

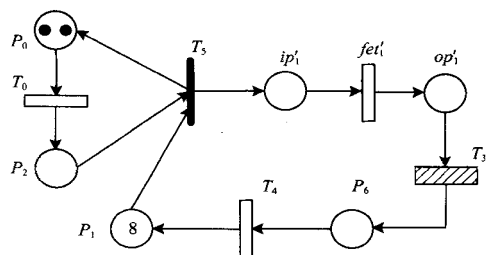


图 5 对 GSPN 子网进行等效化简之后的模型

表 1 计算结果及分析

	状态数	系统总吞吐率	误差
原模型(图 3)	234806	0.443586	5.34 %
化简后的模型(图 5)	255	0.467265	

可见,经过两部化简模型的状态数大大的减少了,而化简所造成的误差还是可以接受的.

## 5 结论

本文提出了一种新的模型技术——NM-QPN,并讨论了它对 NM-QPN 的两个层次的化简以及求解方法. NM-QPN 继承并发展了 Petri 网和排队网图形化模型的优点,能够方便的对复杂模型建模;我们提出的化简以及求解技术可以使得模型的状态

态空间大大减少,而且这些化简方法在 GSPN 以及排队网模型中也是适用的.对模型的等效化简以及对非马尔可夫的过程的研究这两个问题都是尚待探讨的问题,我们的研究也还处在初步阶段,仍然有许多工作要做,对更广泛的模型进行等效化简和对非马尔可夫过程的分析求解是笔者的下一步工作方向.

#### 参考文献:

- [ 1 ] Lin C, Sheng L J, Wu J P, Xu M W. An integrative scheme of differentiated service: modeling and performance analysis [J]. Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems, 2000. Proceedings. 8th International Symposium on, 2000: 441 - 448.
- [ 2 ] Lin C, Shan Z, Yang Y. Integrated schemes of request dispatching and selecting in web server clusters [A]. Proceedings of International Conference on Software: Theory and Practice, 16<sup>th</sup> IFIP World Computer Congress (WCC2000) [C]. Beijing, China: Publishing House of Electronics Industry, 2000. 922 - 930.
- [ 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.
- [ 4 ] Lazar A A, Robertazzi T G. Markovian Petri net protocols with product form solution [A]. IEEE INFOCOM '87 [C]. San Francisco, CA, March 1987. Journal version appears in Performance Evaluation, 1991. 67 - 77.
- [ 5 ] 林闯. 随机 Petri 网和系统性能评价 [M]. 北京:清华大学出版社, 2000.
- [ 6 ] Matthias Becker, Helena Szczerbicka. PNiQ-A concept for performability evaluation [A]. Erol Gelenbe. System Performance Evaluation: Methodologies and Applications [C]. 263 - 274.
- [ 7 ] Peter Buchholz. Hybrid analysis of non-markovian stochastic Petri nets [A]. Erol Gelenbe, System Performance Evaluation: Methodologies and Applications [C]. 291 - 301.
- [ 8 ] 林闯. 随机 Petri 网的分解和压缩技术 [J]. 软件学报, 1997, 8 (7): 541 - 548.
- [ 9 ] 林闯. 随机 Petri 网模型的精化设计 [J]. 软件学报, 2000, 11 (1): 104 - 109.
- [ 10 ] Hauke Jungnitz, Alan A Desrochers. Flow equivalent nets for the performance analysis of generalized stochastic Petri nets [A]. Proceedings of the IEEE Robotics and Automation Conference [C]. 1991. 122 - 127.
- [ 11 ] Reinhard German. Non-markovian analysis [A]. Ed. Brinksma Holger Hermanns, Joost-Pieter Katoen (Eds), Lectures On Formal Methods and Performance Analysis [C]. 156 - 182.

#### 作者简介:



林 闯 男, 1948 年生于辽宁省沈阳市, 1994 年获得清华大学计算机系博士学位, 清华大学计算机科学与技术系教授, 博士生导师, 计算机学报编委, 中国科学院计算及网络信息中心和北京科技大学信息工程学院兼职教授, 已出版两本专著, 在国内外有影响的期刊及会议上发表论文 120 多篇. 主要研究领域是系统性能评价、计算机网络、随机 Petri 网、逻辑推理模型等.

郑 波 男, 1978 年生于福建省漳州市, 清华大学计算机科学与技术系博士研究生, 2001 年毕业于清华大学计算机科学与技术系, 获学士学位, 感兴趣的研究方向是计算机网络、随机 Petri 网和系统性能评价.