

# 随机时间 Petri 网综述<sup>\*</sup>

卢光松<sup>1,2</sup> 葛运建<sup>1</sup>

(中国科学院合肥智能机械研究所 合肥230031)<sup>1</sup> (中国科学技术大学自动化系 合肥230026)<sup>2</sup>

**摘要** 随机时间 Petri 网作为一种灵活有力的建模机制,被广泛应用于计算机和通信系统的性能与可靠性评价。综述了随机时间 Petri 网各主要子类的发展历程与研究现状。首先介绍了随机时间 Petri 网的一些基本概念,然后回顾了广义随机 Petri 网,简要总结了处理状态空间爆炸问题的主要途径,讨论了非马尔科夫随机 Petri 网及其分析技术,最后详细分析了流体随机 Petri 网。

**关键词** 广义随机 Petri 网,状态空间爆炸,非马尔科夫随机 Petri 网,流体随机 Petri 网

## Overview of Stochastic Timed Petri Nets

LU Guang-Song<sup>1,2</sup> GE Yun-Jian<sup>1</sup>

(Hefei Institute of Intelligent Machines, The Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)<sup>1</sup>

(Department of Automation, University of Science & Technology of China, Hefei 230026)<sup>2</sup>

**Abstract** Stochastic Timed Petri nets are a powerful modeling formalism, widely used for the performance and dependability evaluation of computer and communication systems. The state of the art of the research for the main subclasses of Stochastic Timed Petri nets as well as their development histories is systematically described. Some of the basic concepts about Stochastic Timed Petri nets are first introduced. General Stochastic Petri nets and the approaches to deal with the state space explosion problems are then reviewed. Non-Markovian Stochastic Petri nets are discussed, along with the analysis techniques. Finally the Fluid Stochastic Petri net formalism and its application are elaborated.

**Keywords** General stochastic petri net, State space explosion, Non-Markovian stochastic petri net, Fluid stochastic petri net

## 1 引言

随着计算机和通信系统的日趋复杂,分析其性能与可靠性越来越重要,这就需要寻求合适的建模机制,以得到反映这些系统行为和性质的数学模型,在此基础上进行性能和可靠性分析。

性能评价领域最普遍使用的状态分析法是将物理系统抽象为连续或离散时间马尔科夫链模型,然后建立描述该模型动态行为的微分方程,最后编制程序对方程进行数值求解。虽然已有自动求解马尔科夫链的软件包,但仍需人工建立马尔科夫链模型,而系统的马尔科夫链模型完全不同于物理系统给设计者的直观感觉,因此将性能评价问题直接转化为马尔科夫链模型的求解问题非常困难,尤其是当状态空间较大时,这个过程特别繁琐且易出错。于是人们开发了许多新的建模机制,用于自动地产生反映系统动态行为的随机过程。

Petri 网作为一种适合于描述和分析那些具有并发、同步和冲突等特征的系统的建模机制,由于其直观的图形表现能力和严密的数学基础,在广泛的领域得到了成功的应用。利用 Petri 网的各种拓展形式,不仅有助于定性理解被建模系统的动态行为,还可以定量地计算各种性能指标,为系统结构的设计和参数的选择提供依据。本文在文[1]的基础上,结合近几年来来的研究成果,系统地描述了随机时间 Petri 网各主要

子类的发展历程与研究现状,内容安排如下:第2节介绍了随机时间 Petri 网的一些基本概念,第3节回顾了广义随机 Petri 网,简要总结了处理状态空间爆炸问题的主要途径,第4节和第5节分别讨论了非马尔科夫随机 Petri 网和流体随机 Petri 网,最后是结束语。

## 2 随机时间 Petri 网

Petri 网由德国科学家 C. A. Petri 于1962年在他的博士论文中首次提出,用于描述具有因果关系的并发系统。Petri 网提出之初,并没有明确考虑时间因素,为了将其用于量化分析,必须引入时间概念(由于 Petri 网主要用于分布式系统的建模,因此有人从相对论的角度反对全局时间概念的引入)。活动的持续期可与库所或托肯关联,这种情况下,变迁的发射是瞬间完成的,仅表示状态的改变。更自然地、也是更多地被采用的是将活动的持续期与变迁关联,这时变迁表示活动,而变迁的使能表示活动的进行,变迁的发射表示活动的结束,活动的持续期即为变迁的发射期(严格地说,为变迁的使能期),表示活动的变迁简称时间变迁。

本文中的随机时间 Petri 网(Stochastic Timed Petri net, STPN)泛指变迁的发射时间为随机的各种赋时 Petri 网,图1描绘了各种随机时间 Petri 网相互之间及与排队系统的关系,图中实线箭头表示直接的子类关系,虚线箭头表示受其影

<sup>\*</sup>国家自然科学基金资助项目(批准号:60175027)。卢光松 博士研究生,研究方向为随机 Petri 网理论及应用。葛运建 研究员,博士生导师,研究方向为机器人学、智能信息处理。

响或相互间有一定的相似性,但不是继承关系。

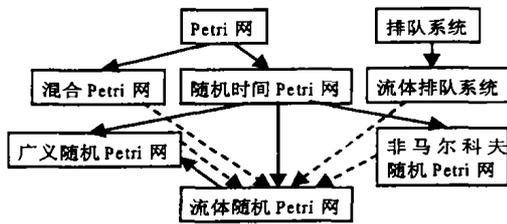


图1 随机时间 Petri 网主要子类之间的关系

随机时间 Petri 网的状态定义为托肯在库所中的分布,即 Petri 网的标识(marking),状态转移则是由变迁的发射引起,状态随时间的演化过程是一个随机过程,称为标识过程,通过对标识过程的分析得到被建模系统的各种量化指标。这方面的理论与应用研究最重要的国际会议每两年举办一届,至今已举办了十届 International Workshop on Petri Nets and Performance Models-PNPM。

为了利用随机时间 Petri 网准确描述实际系统的各种随机行为,对于每个时间变迁需要定义两个连续变量,一个叫时钟变量,用于表示变迁已经被使能的时间,只要变迁处于使能状态,则该变量值随时间同步增长;另一个叫抽样值变量,用于表示变迁的发射时间抽样值。当时钟变量与抽样值变量数值相等,则变迁发射。变迁的使能被中断后,如何处理这两个变量就是所谓的变迁记忆策略(memory policy),目前常用的记忆策略有以下三种:

(1)中断后再继续(preemptive resume,采取此种记忆策略的变迁称为 prs 变迁):变迁使能状态的中断只是中止时钟变量的增长,对抽样值变量没有影响,抽样值变量的重新赋值(即重新抽样)和时钟变量的复位为0仅发生在变迁发射之后。这种记忆策略用于表示活动的中断仅暂停执行现有的工作,活动重新开始后,继续完成被暂停的工作。

(2)中断后以另一值开始(preemptive repeat different, prd 变迁):变迁的使能被中断后,时钟变量复位为0,抽样值变量重新赋值,用于表示活动被中断后,完全抛弃已部分完成的工作。

(3)中断后以相同值开始(preemptive repeat identical, pri 变迁):变迁的使能被中断后,时钟变量复位为0,但抽样值变量不变,其重新赋值仅发生在变迁发射之后。表示活动重新开始后,执行刚才被暂停的同一工作,但已完成的,不算,而是重新开始。

在文[2]中考虑了交错记忆策略(interlaced memory policy),通过引入记忆重置弧(memory resetting arc),允许变迁在不同的标识下具有不同的记忆处理方法,这时根据记忆策略对变迁进行分类需要具体到特定的标识,但分析手段并没有本质的不同,只是更复杂一些。

除记忆策略外,还需考虑发射策略(firing policy),发射策略决定相互冲突的变迁在并发使能时,哪一个变迁先发射。有两种发射策略:竞争策略(race policy)和预选策略(preselection policy),竞争策略指剩余发射时间最少的变迁最先发射,预选策略指预先按照一定的概率随机选取某个变迁发射,各变迁的发射概率与发射时间分布无关,而是在建模时根据实际情况给定的。对于预选策略,可通过在冲突的时间变迁前添加后面提到的立即变迁,从而将表示活动的时间变迁之间的冲突转化为立即变迁之间的冲突,然后就可以按照等同于竞争策略的情况进行分析,因此一般只考虑竞争策略。

### 3 广义随机 Petri 网及其状态空间爆炸问题

#### 3.1 广义随机 Petri 网

如果变迁的发射期是服从指数分布的随机变量且变迁采取 prs 或 prd 记忆策略,这就是随机 Petri 网(Stochastic Petri net),这时 prs 和 prd 记忆策略没有实质上的差别。由于随机 Petri 网中所有变迁的发射时间都假定服从指数分布,因此描述其动态行为的随机过程与排队系统一样,为连续时间马尔科夫链,但在 Petri 网中可允许并发与同步等现象的存在,因此与排队系统相比具有更强的建模能力。

然而,在随机 Petri 网中不能表现纯粹逻辑上的同步,于是引入了立即变迁(immediate transition),立即变迁的发射时间为零,主要用于表示逻辑关系,也可用于表示持续时间很短、相对于问题的时间尺度其持续期可忽略的活动,这种建模机制就是在性能与可靠性评价领域广泛使用的广义随机 Petri 网(General Stochastic Petri net),它也是后来开发其它许多机制的出发点。在广义随机 Petri 网的基础上,引入回报结构就得到随机回报网(Stochastic Reward net)<sup>[3]</sup>,另一个类似的机制是随机活动网(Stochastic Activity network)<sup>[4]</sup>,其中为变迁添加了输入输出条件函数,随机活动网和随机回报网都有表示回报的额外结构,因而特别适合于回报建模,这两种机制本质上都可看作为广义随机 Petri 网。

在排除掉消失标识(vanishing marking)之后,广义随机 Petri 网的潜在随机过程也是连续时间马尔科夫链,广义随机 Petri 网模型与马尔科夫链(回报)模型可以相互转换,而基于广义随机 Petri 网的各种性能评价正是通过对其潜在的马尔科夫链的求解实现的。与随机过程模型相比,利用广义随机 Petri 网建模,不需要穷尽地列举系统的状态空间,所得模型符合直觉,更具有可扩展性。广义随机 Petri 网虽然是一种灵活有力的建模机制,但实际应用中仍存在很大的局限性,主要有两方面:变迁发射时间服从指数分布的假设和状态空间爆炸问题。

#### 3.2 状态空间爆炸问题

广义随机 Petri 网的可达标识数随模型中库所、变迁和托肯数量的增长呈指数增长,导致所谓状态空间爆炸问题,严重限制着此类建模机制在现实中的应用。状态空间爆炸问题主要关系到模型的数值求解,利用仿真方法分析仍然可行,但庞大的状态空间会导致仿真时间很长。已有大量的文献研究状态空间爆炸问题<sup>[1,5,6]</sup>,这里仅对最具代表性的几种途径作简要说明,因为广义随机 Petri 网的定量分析是基于其潜在的马尔科夫链的求解,所以处理大型马尔科夫链问题的各种技术都可用于该类模型的分析。

(1)分解与集成 将满足一定结构要求的大型 Petri 网模型分解为一系列相互作用的子模型,利用不动点迭代法求解每个子模型,再将结果传递到总模型。这方面最典型的是基于 Kronecker 代数的方法,将马尔科夫链的转移概率矩阵表示为若干子矩阵 Kronecker 乘积的和,相应的子模型一般通过同步变迁交互,最近提出的一些改进是将 Kronecker 代数与矩阵图(matrix diagram)等结合使用<sup>[7,8]</sup>。这类方法既可用于稳态分析<sup>[9]</sup>又可用于暂态分析。<sup>[10]</sup>能有效减少存储空间和计算时间,但局限于特定的结构,而且目前分解过程一般只能人工进行。文[11]对一类有色随机 Petri 网提出了一种全自动化分解技术。

与此类似的是构建高级随机 Petri 网(High Level

Stochastic Petri net)模型,如 Stochastic Well-formed net 模型,对这类模型可利用其行为上的对称性,将状态空间集总为等价类空间,不需要产生完整的可达图,直接在集总的马尔科夫链上进行计算。文[12~14]等讨论了 Stochastic Well-formed net 模型的复合与分解技术以及模块化构建方法,对标号广义随机 Petri 网(Labeled General Stochastic Petri net)也可开发等价关系以简化状态空间<sup>[15]</sup>。

另外,近年来的一个趋势是在建模时直接构建层次化、模块化模型,总的系统模型可以是同构的,也即所有子模型都是随机时间 Petri 网类型,也可以是异构的,子模型分别是基于不同的建模机制,以不同机制描述的子模型之间可以相互作用,每个子模型单独求解,结果被传递到上一级子模型,直至总模型。这种自上而下的结构化设计方法直接在建立模型时就避免了单一层次 Petri 网模型规模过大的问题,符合现代复杂系统的设计思想,还可以利用不同建模机制在表现能力和求解方法上各自独特的优势。已开发或正在开发的集成多个建模机制的软件包有 SHARPE<sup>[16]</sup>、Mobius<sup>[17]</sup>和 Os-MoSys<sup>[18]</sup>等。

(2) 寻求乘积形式解 具有乘积形式平稳分布的排队网络已有非常有效的求解方法,广义随机 Petri 网模型中由于允许建模同步、并发、竞争等现象,往往不存在乘积形式解,但乘积形式解的存在与否本质上不取决于建模机制,而是由潜在马尔科夫链的性质决定,为了克服状态空间爆炸问题,很多文献讨论了如何识别并计算具有乘积形式解的随机 Petri 网(Product-Form Stochastic Petri net)<sup>[6]</sup>,以及为非乘积形式随机 Petri 网寻求近似的乘积形式解。文[19]给出了随机 Petri 网具有乘积形式解的必要条件,文[20,21]说明可将满足某些结构约束的广义随机 Petri 网转化为乘积形式随机 Petri 网,文[22]讨论了非乘积形式解随机 Petri 网的近似求解方法。

(3) 计算性能指标边界值 解决性能指标计算问题的一种辅助方法是寻求指标的上下边界值,相对于指标确切值的计算来说,边界的计算要简单得多,一般仅需在随机时间 Petri 网模型层次进行评价,不需要产生完整的可达图,再者,边界的评价不局限于马尔科夫随机系统。文[23]基于操作分析技术提出了边界计算的一般性方法,该方法对模型的定时语义很少限制,只需要变迁发射时间的期望值,对发射时间具体为何种分布不敏感,并且仅具有多项式时间复杂度。

(4) 分布式算法 这种算法既可用于产生可达图又可用于求解马尔科夫链,可极大地减少计算时间,文[24]说明在处理大型的刚性问题时,分布式算法计算连续时间马尔科夫链稳态解比一般的技术具有更高的收敛速率,文[25]指出将分布式算法与决策图、Kronecker 代数等结合应用于复杂随机模型的数值求解是一个重要的研究方向。

解决状态空间爆炸问题的其它途径还有很多,例如将变迁分为快变迁和慢变迁的时间尺度分解法、产生状态空间之前识别并忽略概率值较小的状态的状态约简法、结构性等价化简技术<sup>[26]</sup>等。如果状态空间爆炸的主要原因是 Petri 网模型中某一个库所的托肯数无限增长造成,还可以采用矩阵几何法(Matrix-geometric method)或谱扩张法(Spectral expansion)<sup>[27]</sup>求解。如果是因为模型中某一个或几个库所含有大量的托肯,则可考虑直接用流体随机 Petri 网建模。

## 4 非马尔科夫随机 Petri 网

指数分布特有的无记忆性给随机 Petri 网和广义随机

Petri 网模型的求解带来了很大的方便,但现实系统中的大量活动的持续期并不服从指数分布,勉强用指数分布来表示这些活动的持续期得到的结果往往会有较大的误差。

在拓展广义随机 Petri 网用于建模非马尔科夫随机系统方面,一种方法是利用连续或离散时间阶段型分布(phase-type distribution)近似各种非指数分布,但这种方法是以状态空间的急剧膨胀为代价,所以必须与处理大状态空间技术结合使用,另外目前只能表现 prs 和 prd 记忆策略,该方法的好处是允许任意数量的非指数变迁并发使能,允许 prs 和 prd 记忆策略的任意组合,近似过程可通过软件自动实现,对于分析者来说完全是透明的。早期主要使用连续时间阶段型分布,通过在扩展的状态空间上定义的连续时间马尔科夫链来近似非马尔科夫随机过程,文[28]首先提出了基于离散时间阶段型分布的近似方法,文[29]定义的阶段型延迟 Petri 网(Phased Delay Petri net)允许在模型里同时出现离散和连续阶段型发射时间分布,可获得更高的精确度。

另一种更直接的途径是允许变迁具有非指数分布的发射时间,在这方面首先提出的是确定随机 Petri 网(Deterministic and Stochastic Petri net)<sup>[30]</sup>,允许变迁的发射时间取确定值,后来考虑了更一般的情况,变迁的发射时间可取任意的概率分布,这种变迁叫一般变迁,当然,确定变迁是一般变迁的特殊情况。由于其标识过程不再是一个马尔科夫过程,这类 Petri 网被称为非马尔科夫随机 Petri 网(Non-Markovian Stochastic Petri net)。

在非马尔科夫随机 Petri 网中,如果不允许两个或两个以上的一般变迁同时被使能,则描述其动态行为的随机过程是一个马尔科夫再生过程,相应的 Petri 网叫马尔科夫再生随机 Petri 网(Markov Regenerative Stochastic Petri net)<sup>[31]</sup>。文[32]将率回报(rate reward)和冲量回报(impulse reward)引入马尔科夫再生随机 Petri 网,可用于自动产生马尔科夫再生回报过程。

马尔科夫再生随机 Petri 网主要是通过马尔科夫更新理论求解,文[33]给出了可在模型中集成不同记忆策略的建模框架,并讨论了基于马尔科夫更新理论的暂态和稳态分析方法。也可利用辅助变量法求解<sup>[34]</sup>,即在状态描述中加入一个连续变量用于表示一般变迁的使能时间,使得随机过程仍然是马尔科夫随机过程,但状态空间是离散、连续状态并存的混合状态空间,由于辅助变量的规范性质(仅表示时间,因而其值线性增长),结果的微分方程为一阶常微分方程,可用均匀化技术(uniformization technique)求解。

文[35]对以上的两种解法在暂态分析方面进行了比较,结果显示对于大状态空间情况,辅助变量法计算时间更短些,而如果采取较小的离散化步长,则马尔科夫再生方法更为有效。文[36]讨论了采用 prs 和 prd 策略时,这两种方法在暂态和稳态分析方面的形式关系,表明两种方法所得的结果可互为对方所用。

在建模事件活动时间服从非指数分布的随机系统方面,最近开发的流体随机 Petri 网与非马尔科夫随机 Petri 网相比,具有更大的建模灵活性。

## 5 流体随机 Petri 网

流体随机 Petri 网(Fluid Stochastic Petri net)是将在通信及制造系统建模中使用的随机流体模型引入到广义随机 Petri 网而得到的。一阶流体随机 Petri 网首先被 K. S. Trive-

di 和 V. G. Kulkarni 提出<sup>[37]</sup>,在文[38]中得到进一步的拓展,允许连续标识影响变迁的使能及流体流动速度。在流体随机 Petri 网中存在两类库所:离散库所包含离散的托肯,正如一般的离散 Petri 网;连续(流体)库所包含连续的托肯(流体),也即其标识是非负实数。离散库所的标识在建模中被用来表示系统状态的离散部分,连续库所的标识表示状态的连续部分,标识空间或状态空间则部分连续、部分离散。

M. Gribaudo 等在文[39]引入了清空弧(flush-out arc),使得流体随机 Petri 网可以建模持续时间服从非指数分布的活动。对于仅含有 prd 和 prs 记忆策略的非马尔科夫随机 Petri 网,文[39]通过添加表示非指数变迁时钟变量的连续库所,将其映射为一阶流体随机 Petri 网,而被映射后的模型中仍然只含有指数变迁和立即变迁,其标识过程仍然为马尔科夫过程,直接可利用现有的方法进行求解,这种结构化的表示方法允许同时有多个非指数变迁被使能,并且允许非指数变迁具有交错记忆策略。但该结构化表示方法不能直接处理变迁的使能度大于1或禁止弧的权重大于1等情况,图形表示也较为复杂,对于这些,可考虑利用变迁的使能条件函数来实现。另外,正如文中指出的,该方法目前还不能处理具有 pri 记忆策略的变迁,如何利用连续库所记忆 pri 变迁的抽样值还需进一步研究。

在一阶流体随机 Petri 网中,流体流动速度为常数或为连续标识的确定函数,描述模型动态行为的随机方程是一阶偏微分方程。K. Wolter 在文[40]中,定义流体流动速度为服从正态分布的随机变量,相应的动态方程是二阶偏微分方程,因而这种流体随机 Petri 网被称为二阶流体随机 Petri 网(Second Order Fluid Stochastic Petri net),并在文[41]中加入了流体跳跃弧(jump arc),允许连续标识的跳跃性变化。二阶流体随机 Petri 网是将排队理论中的二阶流体扩散近似引入广义随机 Petri 网而得到的。

另一类带有连续库所的 Petri 网是 H. Alla 和 R. David 首先提出的连续 Petri 网<sup>[42]</sup>和混合 Petri 网<sup>[43]</sup>,混合 Petri 网来自于连续 Petri 网和离散 Petri 网的结合,而连续 Petri 网则可看作是将确定时间 Petri 网中托肯无限分割得到的极限情况。混合 Petri 网和流体随机 Petri 网相比,虽然都含有连续库所,并且混合 Petri 网已被拓展为可具有随机的离散部分<sup>[44]</sup>,但它们在连续标识的处理上有着本质的不同,在混合 Petri 网中,变迁分离离散变迁和连续变迁,连续变迁的发射改变连续标识,但在流体随机 Petri 网中连续标识的改变是通过连续弧的输入和输出流体实现的。

在随机回报网和马尔科夫再生随机回报网等建模机制中,累积回报(accumulated reward)都是被动的,既不能影响系统的动态行为,也不能影响各状态下的回报率,一般情况下只能求出累积回报的期望值,即使对于很简单的模型,计算累积回报的概率分布也几乎是不可能。在文[45]中,率回报被引入流体随机 Petri 网,通过累积回报在模型中的结构化表示,第一次使得累积回报可影响系统行为及回报率本身。文[46]给出了两个例子,说明率回报和冲量回报都可以引入二阶流体随机 Petri 网,并可直接求出累积回报的概率分布。流体随机 Petri 网不仅可用于解决某些离散模型的状态空间爆炸问题和产生非马尔科夫随机(回报)过程,还可用于建模离散成分和连续成分并存的混合系统,文[47]将主流的混合系统建模机制与流体随机 Petri 网进行了比较。

对于流体随机 Petri 网的求解,由于涉及到偏微分方程,

目前数值分析方法的有效性严重局限于连续库所较少的情況<sup>[48~50]</sup>,也可用仿真方法求解<sup>[51,52]</sup>,但现有的仿真方法会影响到二阶扩散近似的随机性,所以还不能应用到二阶流体随机 Petri 网。

**结束语** Petri 网的建模原语很少,具有符合直觉、易于理解的图形表示功能,既能描述系统的状态,又能表现系统的行为,且全局的状态和行为是由局部的状态和行为简单叠加得到的,特别适合于越来越多的分布式系统的建模。本文综述了在性能评价领域广泛使用的几种随机时间 Petri 网的发展历程与研究现状。进一步的研究工作主要有:发展完善现有的各种随机时间 Petri 网机制,在这过程中要注意借鉴、结合其它性能评价方法,比如故障树、可靠图、排队网络、性能评价进程代数等,尤其是与进程代数的结合;开发新的数值分析技术,处理随机时间 Petri 网之类状态分析法共同存在的状态空间爆炸问题、流体随机 Petri 网分析中遇到的偏微分方程的求解问题,以及系统参数存在数量级上的差异而导致的刚性问题等;研究如何根据模型的结构与问题的性质等自动寻找合适的求解方法。

## 参考文献

- 1 Bobbio A, Puliafito A, Telek M, et al. Recent developments in Non-Markovian Stochastic Petri nets. *Journal of Systems Circuits and Computers*, 1998, 8(1): 119~158
- 2 Bobbio A, Puliafito A, Telek M. New primitives for interlaced memory policies in Markov Regenerative Stochastic Petri nets. In: *Proc. of the 7th PNPM*, 1997. 70~75
- 3 Ciardo G, Blakemore A, Chimento P F Jr, et al. Automated generation and analysis of Markov reward models using Stochastic Reward nets. *Linear Algebra, Markov Chains and Queueing Models*, IMA Volumes in Mathematics and its Applications, 1993, 48: 145~191
- 4 Qureshi M A, Sanders W H, van Moorsel A P A, et al. Algorithms for the generation of state-level representations of stochastic activity networks with general reward structures. *IEEE Trans on Software Engineering*, 1996, 22(9): 603~614
- 5 林闯. 随机 Petri 网的分解与压缩技术. *软件学报*, 1997, 8(7): 541~548
- 6 王春江, 王加存, 黄志同. 随机 Petri 网: 研究现状和面临的挑战. *系统工程与电子技术*, 1998, 8: 32~36
- 7 Ciardo G, Miner A S. A data structure for the efficient Kronecker solution of GSPNs. In: *Proc. of the 8th PNPM*, 1999. 22~31
- 8 Miner A S. Computing response time distributions using Stochastic Petri nets and matrix diagrams. In: *Proc. of the 10th PNPM*, 2003. 10~19
- 9 Buchholz P, Ciardo G, Donatelli S, et al. Complexity of memory-efficient Kronecker operations with applications to the solution of Markov models. *INFORMS Journal on Computing*, 2000, 12(3): 203~222
- 10 Miner A S. Data structures for the analysis of large structured Markov models. [PhD thesis]. The College of William and Mary in Virginia, VA, 2000
- 11 Freiheit J, Zimmermann A. A divide and conquer approach for the performance evaluation of large Stochastic Petri nets. In: *Proc. of the 9th PNPM*, 2001. 91~100
- 12 Haddad S, Moreaux P. Evaluation of high level Petri nets by means of aggregation and decomposition. In: *Proc. of the 6th PNPM*, 1995. 11~20
- 13 Delamare C, Gardan Y, Moreaux P. Performance evaluation with asynchronously decomposable SWN: implementation and case study. In: *Proc. of the 10th PNPM*, 2003. 20~29
- 14 Franceschinis G, Vittorini V. SWN client-server composition operators in the OsMoSys framework. In: *Proc. of the 10th PNPM*, 2003. 52~61

- 15 Buchholz P. Equivalence and aggregation of GSPNs with labeled transitions. In: Proc. of the 9<sup>th</sup>PNPM, 2001. 81~90
- 16 Trivedi K S. SHARPE 2002: Symbolic Hierarchical Automated Reliability and Performance Evaluator. In: Proc. of the Int'l Conf. on Dependable Systems and Networks, 2002. 544
- 17 Deavours D, Clark G, Courtney T, et al. The Mobius framework and its implementation. IEEE Trans on Software Engineering, 2002, 28(10): 956~969
- 18 Franceschinis G, Gribaudo M, Iacono M, et al. Towards an object based multi-formalism multi-solution modeling approach. In: Proc. of the 2<sup>nd</sup> Workshop on Modeling of Objects, Components and Agents, 2002. 47~66
- 19 Boucherie R J. A characterization of independence for competing Markov chains with applications to Stochastic Petri nets. IEEE Trans Software Engineering, 1994, 20(7): 536~544
- 20 Balbo G, Bruell S C, Sereno M. Embedded processes in Generalized Stochastic Petri nets. In: Proc. of the 9<sup>th</sup>PNPM, 2001. 71~80
- 21 Balbo G, Bruell S C, Sereno M. On the relations between BCMP queueing networks and product form solution Stochastic Petri nets. In: Proc. of the 10<sup>th</sup>PNPM, 2003. 103~113
- 22 刘道斌, 林闯, 陆维明. 非乘积解随机 Petri 网的乘积形式近似求解. 计算机学报, 2001, 24(6): 588~595
- 23 Chiola G, Anglano C, Campos J, et al. Operational analysis of timed Petri nets and application to the computation of performance bounds. In: Proc. of the 5<sup>th</sup>PNPM, 1993. 128~137
- 24 Allmaier S C, Kowarschik M, Horton G. State space construction and steady state solution of GSPNs on a shared-memory multiprocessor. In: Proc. of the 7<sup>th</sup>PNPM, 1997. 112~121
- 25 Ciardo G. Distributed and structured analysis approaches to study large and complex systems. Formal Methods and Performance Analysis, LNCS 2090, 2001. 344~374
- 26 林闯, 曲扬, 郑波, 等. 一种随机 Petri 网性能等价化简与分析方法. 电子学报, 2002, 30(11): 1620~1623
- 27 Haverkort B R, Ost A. Steady-state analysis of infinite Stochastic Petri nets: comparing the spectral expansion and the matrix-geometric method. In: Proc. of the 7<sup>th</sup>PNPM, 1997. 36~45
- 28 Ciardo G. Discrete-time Markovian Stochastic Petri nets. In: Proc. of the 2<sup>nd</sup> Int'l Workshop on Numerical Solution of Markov Chains, 1995. 339~358
- 29 Jones R, Ciardo G. On Phased Delay Stochastic Petri nets: definition and an application. In: Proc. of the 9<sup>th</sup>PNPM, 2001. 165~174
- 30 Ajmone Marsan M, Chiola G. On Petri nets with deterministic and exponentially distributed firing times. Advances in Petri Nets, LNCS 266, 1987. 132~145
- 31 Choi H, Kulkarni V G, Trivedi K S. Markov regenerative stochastic Petri nets. Performance Evaluation, 1994, 20: 337~357
- 32 Telek M, Pfening A. Performance analysis of Markov regenerative reward models. Performance Evaluation, 1996, 27: 1~18
- 33 Bobbio A, Puliafito A, Telek M. A modeling framework to implement preemption policies in non-Markovian SPNs. IEEE Trans on Software Engineering, 2000, 26(1): 36~54
- 34 German R, Lindemann C. Analysis of stochastic Petri nets by the method of supplementary variables. Performance Evaluation, 1994, 20: 317~335
- 35 German R, Logothetis D, Trivedi K S. Transient analysis of Markov Regenerative Stochastic Petri nets: a comparison of approaches. In: Proc. of the 6<sup>th</sup>PNPM, 1995. 103~112
- 36 German R, Telek M. Formal relation of Markov renew theory and supplementary variables in the analysis of Stochastic Petri nets. In: Proc. of the 8<sup>th</sup>PNPM, 1999. 64~73
- 37 Trivedi K S, Kulkarni V G. FSPNs: Fluid Stochastic Petri Nets. In: Proc. of the Petri Nets'93, 1993. 24~31
- 38 Horton G, Kulkarni V G, Nicol D M, et al. Fluid stochastic Petri nets: theory, applications and solution. European Journal of Operation Research, 1998, 105(1): 184~201
- 39 Gribaudo M, Sereno M, Bobbio A. Fluid Stochastic Petri Nets: An extended formalism to include non-Markovian models. In: Proc. of the 8<sup>th</sup>PNPM, 1999. 74~82
- 40 Wolter K. Second Order Fluid Stochastic Petri Nets: an extension of GSPNs for approximate and continuous modeling. In: Proc. of the WCSS'97, 1997. 328~332
- 41 Wolter K. Jump transitions in second-order FSPNs. In: Proc. of the IEEE MASCOTS'99, 1999. 156~163
- 42 Alla H, David R. Continuous Petri nets. In: Proc. of the Petri Nets'87, 1987. 275~294
- 43 David R. Modeling of hybrid Systems using Continuous and Hybrid Petri Nets. In: Proc. of the 7<sup>th</sup>PNPM, 1997. 47~57
- 44 David R, Alla H. On Hybrid Petri nets. Discrete Event Dynamic Systems, 2001, 11(1): 9~40
- 45 Horton G. Computation of the distribution of accumulated reward with Fluid Stochastic Petri nets. In: Proc. of the 2<sup>nd</sup> IEEE IPDS, 1996. 90~95
- 46 Wolter K, Zisowsky A. On Markov reward modeling with FSPNs. Performance Evaluation, 2001, 44: 165~186
- 47 Tuffin B, CHEN D S, Trivedi K S. Comparison of hybrid systems and Fluid Stochastic Petri nets. Discrete Event Dynamic Systems, 2001, 11(1): 77~95
- 48 German R, Gribaudo M, Horva'th A, et al. Stationary analysis of FSPNs with mutually dependent discrete and continuous parts. In: Proc. of the 10<sup>th</sup>PNPM, 2003. 30~39
- 49 Gribaudo M, Horva'th A. Fluid Stochastic Petri nets augmented with flush-out arcs: a transient analysis technique. IEEE Trans on Software Engineering, 2002, 28(10): 944~955
- 50 Horva'th A, Gribaudo M. Matrix geometric solution of Fluid Stochastic Petri nets. In: Proc. of the 4<sup>th</sup> Int'l Conf. on Matrix-Analytic Methods in Stochastic models, 2002. 37~49
- 51 Tuffin B, Trivedi K S. Importance sampling for the simulation of Stochastic Petri nets and Fluid Stochastic Petri nets. In: Proc. of High Performance Computing, 2001. 228~235
- 52 Ciardo G, Nicol D M, Trivedi K S. Discrete-event simulation of Fluid Stochastic Petri nets. IEEE Trans on Software Engineering, 1999, 25(2): 207~217

(上接第20页)

- 7 Arango G, Prieto-Diaz R. Domain Analysis Concepts and Research Directions. In: Domain Analysis and Software System Modeling, R. Prieto-Diaz and G. Arango, eds. IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, California, 1991
- 8 Matskin M, Rao Jinghai. Value-Added Web Services Composition Using Automatic Program Synthesis. In: CAiSE 2002 Intl. Workshop, WES 2002, Toronto, Canada, May 2002
- 9 李克勤. 面向对象的领域工程方法研究. [博士论文]. 北京大学, 2000
- 10 Tracz W, Coglianese L. Domain-Specific Software Architecture Engineering Process Guidelines (Version 2. 1). ADAGE-IBM-92-02B, April 1994
- 11 Zeng L, Dumas M. Quality Driven Web Services Composition. ACM1-58113-680-3/03/0005
- 12 Benatallah B, Sheng Q Z. The Self-Serv Environment for Web Services Composition. Published by the IEEE Computer Society, 2003
- 13 Narayanan S, et al. Verification and Automated Composition of Web Services, ACM1-58113-449-5/02/0005
- 14 张文娟, 赵俊峰, 谢冰, 杨美清. 一种支持变化性的构件模型 JB-COM/E. 电子学报, 2003(6): 899~902
- 15 Allen R J. A Formal Approach to Software Architecture. [PhD Thesis]. Carnegie Mellon Univ., CMU Technical Report CMU-CS-97-144, May 1997
- 16 张文娟. 支持变化性的软件构件模型其相关技术研究. [博士论文] 北京大学, 2002