

性能评价形式化方法的现状和发展

林 闯¹, 李雅娟¹, 王忠民²

(1. 清华大学计算机科学与技术系, 北京 100084; 2. 北京科技大学计算机系, 北京 100083)

摘 要: 性能评价(Performance Evaluation, PE)是计算机网络和计算机系统研究与应用的重要理论基础和支撑技术,也是当今通信和计算机科学领域的重要研究方向. 本文对性能评价的形式化方法(Formal Methods, FM)、该领域的主要研究成果和发展前景进行了综述. 文章着重介绍了 FM 中的三种方法:排队论(Queueing Theory)、随机 Petri 网(Stochastic Petri-Net, SPN)和随机进程代数(Stochastic Process Algebra, SPA). 另外,本文还对不同方法之间的区别和结合做了初步的讨论. 最后对形式化方法做了总结和展望.

关键词: 性能评价; 形式化方法; 排队论; 随机 Petri 网; 随机进程代数

中图分类号: TP391.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 12A-1917-06

Status and Development of Formal Methods for Performance Evaluation

LIN Chuang¹, LI Ya-juan¹, WANG Zhong-min²

(1. Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Department of Computer Science, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Performance evaluation is an important theoretical base and support for researches and applications of computer network and system. And it's also an important research direction in communications and computer science. This is a concise overview paper about formal methods for performance evaluation, main research results and development foreground. In this paper we focus on the three methods of FM: Queueing Theory, Stochastic Petri-Net and Stochastic Process Algebra. And we primarily discuss the combinations of different formal methods. At the end of this paper we summarize formal methods for performance evaluation and open up prospects for this area.

Key words: performance evaluation; formal methods; queueing theory; stochastic petri-net; stochastic process algebra

1 引言

性能评价(Performance Evaluation, PE)^[1~3]是指对系统的动态行为进行研究和优化,包括对实际系统的行为进行测量和模型,按照一定的性能要求对方案进行选择,对现有系统的性能缺陷和瓶颈进行改进,对未来系统的性能进行预测,以及在保证一定服务质量的前提下进行设计.

PE 已有相当长的发展历史. 它最先用于设计、测量通信系统,确保系统的传输和开关特性、保证一定的服务质量. 后来又被用于解决稀有资源的分配问题. 现在 PE 技术已经被广泛用于计算机和通信领域中. 然而传统的方法只考虑了系统的功能特性,而忽视了时间特性;而且当处理以效率为设计目标的实时应用时,时间概念尤为重要. 因此,近年来人们以各种方式把时间信息引入到性能评价的过程中.

2 形式化方法的基本概念和分析技术

2.1 模型方法

这里将介绍几种常用的模型方法:进程综合方法、面向对象、客户机-服务器、模型精化、层次模型方法等.

进程综合方法(composition):进程被描述成子模型,子模型之间通过共享资源及调度策略相互联系. 首先对子模型分别进行研究,然后分析它们之间的联系、进而评价整个系统的性能. 面向对象(object-oriented):共享的资源和任务被描述成不同类型的对象,不同类型的对象之间通过管理和调度策略相互联系. 客户机-服务器(client-server):用服务器表示共享资源,客户机表示任务(进程),服务器与客户机之间通过管理和调度策略相互联系. 模型精化(refinement)^[4]:基本思想是通过删除不必要的消失状态减少状态空间、并利用等价的概念简

收稿日期:2002-06-06;修回日期:2002-09-28

基金项目:国家重点基础研究发展规划(973 计划)项目(No. G1999032707);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, No. 2001NA411040);清华大学信息学院 985 基础创新研究基金

化模型,表现了子模型之间的独立性,为进一步求解和分析模型提供了方便.层次模型(hierarchical modeling)^[5]:处理复杂系统一般采用层次模型.其基本思想是对复杂模型逐步求精.自从七十年代以来,自顶向下逐步分解和自底向上逐步综合的方法已成功地用于计算机和通信系统中.比如层次化的排队网络就是一种非常重要的技术^[6~8].

2.2 系统动态分析

2.2.1 概述

本节讨论如何分析系统的动态行为以及如何确定 QoS 参数.不同的角度关心不同的性能参数,如:

- (1)用户角度:等待时间,响应时间,传输延迟等.
- (2)系统角度:利用率,吞吐量,等待的顾客数,丢失率等.
- (3)用户间影响:公平性等.

对系统进行分析主要有三种方法:解析/代数方法、数值分析方法和模拟.下面将对这三种分析方法分别进行介绍.

2.2.2 解析/代数方法

解析/代数方法首先确定系统性能参数之间的函数关系,然后根据方程是解析可解的还是代数可解的^[9]、确定系统性能评价的标准.表 1 介绍了解析/代数方法的组成^[10~12].

表 1 解析/代数方法的组成

以状态为基础的方法		事件序列方法	
原则			
	使用 Chapman-Kolmogorov 或者稳定状态方程	探求特殊事件序列	
举例			
	标准的方法(MP)	Lindley 积分方程	
	矩阵分析方法	瞬时方法	
	嵌入式再生过程	指数卷积	
	补充变量方法	分段指数函数	
	近似方法...	(最大值,+)—代数	
定界技术		基本定律	
原则			
	在特殊的条件下考虑过程		
举例			
	渐进定界	Little 定律	
	平衡系统定界,...	流平衡定律	
		工作守恒定律	
转换技术		专门的网络算法	
原则			
	将方程的一种形式转化成另一种更易于研究的形式	利用专门的结构和系统参数	
举例			
	拉普拉斯转换	Jackson 状态概率	
	生成函数	Buzen 卷积算法	
	离散傅立叶转换	Lavenberg 和 Reiser 平均值分析	
	复杂对数,...		

2.2.3 数值分析方法

数值分析方法^[13~15]分为以下三步:将系统描述成一个马尔可夫链;确定变迁速率矩阵或变迁概率矩阵;数值求解系统

的性能参数.

2.2.4 模拟

模拟方法^[16,17]通过在计算机上运行系统的模型、分析输出结果,从而评价系统的性能.模拟方法有以下一些不足:模拟复杂系统的程序一般很复杂,不易调试;运行一个可靠的模拟程序,时间代价非常昂贵;分析结果往往不能用数学表达式表示;不能清晰表述系统中各部件之间的关系.但是,模拟方法在形式化方法难于求解或不可求解的情况下很有必要.关于模拟技术在 Cassandras 的书^[18]以及其他一些著作中^[19,20]都有详细的讨论,这里不再赘述.从上面的总结可以看出,模拟技术和形式化方法是相辅相成的.

表 2 数值分析方法

直接方法		迭代方法	
原则			
	运算并修改矩阵	稀疏矩阵守恒	
	直接求矩阵	最终解不一定收敛	
	误差积累	对参数是敏感的,且需要估计初始值	
举例			
	高斯消除法	Power method	
	Grassmann, Taksar, Heyman 变量	Jacobi, Gauss-Seidel, SOR	
适用范围			
	对于只有几百或几千个状态的模型,求解是精确的		
		其他方法	
	递归方法		
	矩阵几何方法		
	归一化方法		

3 排队论 (Queuing Theory)

排队论(Queuing Theory)也称为随机服务理论,即通过对服务对象的到来及服务时间的统计研究,得出一些性能指标(等待时间、队列长度、利用率、吞吐量等)的统计规律,然后根据这些规律来改进服务系统的结构或重新组织被服务对象,使得服务系统既能满足服务对象的需要,又能使系统的费用最经济或某些指标最优.

排队论是用来模型和分析系统性能的传统方法.它是由丹麦数学家爱尔朗(A K Erlang)在 1909 年的时候最先提出来的,后来英国科学家肯达尔(D G Kendall)对排队论进行了系统的研究.目前,排队论的理论基础已经非常成熟,而且被应用到很多领域中.

3.1 排队网络模型

根据系统与外界是否有联系,排队网络分为三种基本类型:开环网络(open networks)、闭环网络(close networks)和混合网络(mixed networks).开环网络可表示一个具有外部到达和离开的事务处理系统.闭环网络可表示多程序级别维持恒定情况下的批量类型的工作负荷.而混合网络对两种系统均可进行模型.

从另一角度考虑,即根据顾客的类型,排队网络又可分为

单一类别的排队网络(single class queuing networks,即所有的顾客具有完全相同的特征)和多类排队网络(multi class queuing networks,即系统中有不同类型的顾客,每个节点中不同的顾客可能有不同的服务请求和不同的路由行为)。

3.2 排队网络模型的性能分析

传统的排队网络模型,一般假定顾客的到达是泊松过程,服务时间呈负指数分布,节点遵循 FCFS 规则。在这种模型中,顾客到达和服务时间均具有无后效性。如果顾客到达和服务时间不具有无后效性,则采用扩大状态空间法,即用补充变量将非马尔可夫过程化成一个多维状态空间的马尔可夫过程进行求解,其中相位法就属于这类方法。对于更一般的排队模型,如 G/G/1 排队模型,不易求得平稳分布。这时可采用积分微分方程法近似求解。近年来,不等式定界法也用于分析一般的排队模型。

排队网络从求解的角度可以分为乘积解排队网络和非乘积解排队网络。下面我们就分别对这两类网络进行分析。对一个乘积解排队网络模型既可进行瞬态分析,也可进行稳态分析。由于我们主要关心系统稳定状态下的行为,所以主要进行稳态分析。首先要判断模型在某个状态下是否稳定,即稳定状态概率是否存在;然后求解稳定状态概率。如果是开环排队网络,可以根据 Jackson 定理进行求解;如果是闭环排队网络,可以先将概率重新正则化、删除不存在的状态,然后使用开环网络的求解方法,Gordon-Newell 定理给出了形式化的算法。对于非乘积解排队网络的分析,可以先修改模型、将非乘积解模型转化为乘积解模型,然后使用上述乘积解模型的分析方法进行求解^[21~23];或者采用分解方法或固定点迭代方法直接进行求解。

4 随机 Petri 网 (SPN)

随着实际系统的日益庞大和复杂化,用传统的排队论方法进行模型和分析已经远远不够。尤其在对并行系统的资源共享模型进行描述和解决非乘积解问题时,SPN 发挥了独特的作用。SPN^[24]是在 1980 年作为描述离散事件动态系统(Discrete Event Dynamic Systems, DEDS)的形式化工具被提出来的,它能有效地模型复杂系统、进行性能和可靠性评价。目前,SPN 已被广泛地用于计算机网络和系统的性能评价等方面。

对 SPN 进行一些有益的扩展,可以得到广义随机 Petri 网(Generalized Stochastic Petri Net, GSPN)^[25],随机活动网(Stochastic Activity Network, SAN)^[26~28]以及扩展随机 Petri 网(Expanded Stochastic Petri Net, EPN)^[29]等。下面我们将分别介绍一般的 SPN 和 GSPN。

4.1 SPN 模型

PN 主要研究系统的性能和可靠性,主要分析方法包括:可达树、关联矩阵和状态方程、不变量和分析化简规则。同时,它也可通过可达性分析研究系统的功能特性,如死锁、安全性等。它的动态行为通过位置中令牌的变化以及变迁的实施规则进行模型。

在 PN 中引入时间的概念,虽然模型的动态行为将受时间参数影响,但时间的引入缩小了状态空间、增强了 PN 的描

述能力,且不会破坏和修改原 PN 结构描述以及同步和并行性的表达,提高了求解效率。SPN 是在 PN 基础上引入时间参数,假定变迁从可实施到实施的延迟时间是一个连续型的随机变量,且服从某一分布。典型的 SPN 假设变迁的实施时间呈指数分布,这样就可通过与其同构的马尔可夫过程进行求解。

4.2 广义随机 Petri 网 (GSPN)

SPN 的状态空间会随着系统模型的增长而指数性地增长,使得与 SPN 同构的 MC 难以求解。GSPN 的提出为缓解状态空间爆炸问题提供了一种途径。GSPN 是对 SPN 进行的一种扩展。传统的 P/T 网中所有的变迁均为瞬时变迁,一般的 SPN 中无瞬时变迁,而 GSPN 介于两者之间;至少包含一个瞬时变迁。瞬时变迁比时间变迁有更高的优先级,时间变迁之间也可通过实施速率来规定其实施的优先级。因此,GSPN 中有两类可达集:实存标识(tangible markings)和消亡标识(vanishing markings)。GSPN 在实存标识中逗留的时间是指数分布的,参数依赖于此标识中可实施的时间变迁;而在消亡标识中逗留的时间为零。

GSPN 在 SPN 的基础上引进了瞬时变迁,时间变迁的实施速率呈指数分布,而瞬时变迁的实施延时无,与随机开关相关联。由于瞬时变迁比时间变迁的优先级高,抑制了时间变迁的实施,使得有些状态不存在,故减小了可达集,简化了状态空间。而且,瞬时变迁的引入使得模型能力增强。但是,GSPN 也有不足之处:(1)对瞬时变迁需要定义随机开关,因此对模型者提出了更高的要求;(2)将 GSPN 压缩成 MC 进行求解时,需要删除瞬时变迁。

4.3 SPN 和排队网络的联系与区别

SPN 和排队网络均是随机模型应用领域中重要的模型工具。从求解的观点来看,SPN 与排队模型等价,它们对应相同的马尔可夫链。但也有区别,下面就其优缺点简单做一比较:

表 3 比较排队网络和 SPN

排队网络		SPN
优点		
	在有乘积解的情况下,无状态空间爆炸问题。	具有更强的模型描述能力,尤其对于分布式系统、并行系统和同步系统等的性能分析更是如此。
缺点		
	离散时间的排队模型无乘积形式的解;	随着位置、变迁和令牌数的增多,仍存在着状态空间爆炸问题;随着系统模型复杂性的增加,状态空间呈指数增长;
	描述能力有限,特别是在如下一些现象的描述上:同步、阻塞(blocking)、顾客的分叉(splitting)。	随机模型的局限性:假定各种服务的速率服从负指数分布。

5 随机进程代数 (SPA)

为了解决分层结构多处理机系统的同步和协作问题,我们从八十年代开始研究进程代数(Process Algebra, PA)和嵌入

式随机进程 (Embed Stochastic Processes, ESP). 典型的进程代数, 如 CCS^[30,31], CSP^[32], 或 LOTOS^[33] 都是描述同步系统的形式化技术.

SPA 为性能评价提供了非常独特的解决方案: 将组件进行的活动抽象为一个进程; 而且能够通过等价定理自动化简状态空间. 它主要用来描述和研究资源共享系统的行为.

由于 SPA 方法的理论基础与传统的形式化方法不同, 因此这种方法有待于进一步完善. 状态空间压缩、高效的性能评价以及随机模型检测^[34] (Stochastic Model Checking, 即用有时态逻辑验证 SPA 系统模型的特性) 是 SPA 当前研究的重点.

5.1 SPA 模型

PA 的基本思想是由小的构造块系统地构造复杂系统, 并形式化地检查系统行为是否等价. 构造块的行为被描述成进程. 存在一些标准的操作使得不同进程之间可以进行组合、同步和通信. 因此 PA 可以看成是带有上述操作的典型自动机.

SPA 在 PA 的基础上考虑了时间信息, 而且时间参数为随机变量. 在进行系统描述前, 不仅要考虑功能信息, 还要考虑随机时间信息 (表示时间间隔或活动的持续时间). SPA 继承了进程代数对模型的代数形式的描述方法, 为模型化系统定义了一套完整的语法和语义. 相对于 SPN 的元素: 位置 (place) 和变迁 (transition), SPA 语法中的基本元素是组件 (components) 和活动 (activity). 系统的语法定义如下:

$$P ::= Nil(\alpha, \gamma) \cdot P \mid P + Q \mid P \parallel {}_L Q \mid P/Q \mid A$$

六种操作符分别为: 空操作 Nil; 带前缀的过程 $(\alpha, \gamma) \cdot P$; 选择操作: $P + Q$; 同步操作: $P \parallel {}_L Q$; 隐藏操作: P/Q ; 常量定义: A . 这几种操作符的具体含义参见文献[35].

5.2 SPA 模型的性能分析

SPA 方法^[36] 主要对资源共享系统作定性和定量的分析. 定性分析是通过系统语义模型的 DG 分析系统的功能特性, 只关心活动的实施类型, 不关心活动的时间参数, 这与 PA 的定性分析方法一致. 定量分析关心系统动态行为的描述、分析和最优化问题; 讨论系统组件之间的数据流和控制流信息; 关心活动的实施类型和实施时间参数. 和定性分析一样, 由语义模型得到 DG, 再采用时间性能分析方法获得性能参数.

模型的 DG 分析过程中, 由 DG 转换得到模型的 CTMC, 进而得到转换速率矩阵 Q , 然后通过分析 Q 获得系统的各种性能参数.

5.3 SPA 和 SPN 的联系与区别

我们从以下几个方面比较 SPA 和 SPN 的差异:

(1) SPA 模型方法是代数文本的描述形式. 而 SPN 是用图的形式来描述系统.

(2) 从系统模型的观点上说, SPN 表现的是系统的状态, 而 SPA 表现的是活动.

(3) 时间抽象在 SPN 模型方法中表现为执行时间为零的瞬时变迁; SPA 中时间抽象表现为引入的瞬时变迁, 目前已经实现了在 TIPP 中引入瞬时变迁. 功能抽象表现为用 hide 操作符将某些活动隐藏为内部活动. SPA 方法利用这一抽象机制来减小状态空间, 但抽象在 SPN 中表现得不突出.

(4) SPN 对模型的表达是扁平 (flat) 的表达方式, 没有体现

模型的层次结构. SPA 的表达式体现组件之间的层次关系, 将结构关系表述得很清楚.

(5) 存在很多工具来支持 SPN 方法的模型分析. 但是目前对支持 SPA 模型方法的工具只有 TIPTool^[37]、PEPA Workbench^[38] 和 Two Towers^[39].

6 不同形式化方法的有机结合

前几节已对三种重要的形式化方法作了概述, 虽然这些方法可以在一些类型的系统中解决状态空间爆炸问题, 但到目前为止还没有一种方法能够分析各种类型的系统. 而且这三种方法在求解实际系统时, 模型分析能力各有利弊. 因此, 我们考虑如何将不同的方法有机地结合起来, 取长补短, 使得模型分析能力增强.

6.1 GSPN 与 QN 的结合

排队网络是一种简洁的性能模型, 它能够用图形简洁地表示服务站、满足一定排队原则的队列和随机路由. 而 GSPN 能够有效地模型系统的可靠性. 高级模型技术 PNiq (Petri Nets including Queuing Networks) 就是将两种方法结合起来、以流等价的方法为基础将组合模型化为纯 GSPN 模型: 根据排队网络获得稳态解, 并用 GSPN 代替与之流等价的排队网络、模型令牌在排队网中经历的延时, 然后用基于状态的技术和工具分析 GSPN 模型. 关于 PNiq 形式化的定义参见文献[40].

PNiq 能有效地进行定量的稳态分析, 并允许使用 Petri 网中的结构化分析方法. 但在用 GSPN 子网代替与之流等价的排队网时, 只有当这个排队网有乘积解时求解结果才是精确的.

6.2 SPN 与 SPA 的结合

有很多工具支持 SPN 的分析, 而支持 SPA 的工具很有限. 而且两种模型方法对系统分析各有优势, 如 SPA 方法的基于等价关系的压缩简化技术和 SPN 方法的结构分析技术. 因此考虑将 SPA 语义转换为 SPN 语义, 以便有效地利用 SPN 的理论和工具.

SPN 采用的结构分析方法, 可以直接从模型网络结构上定性分析系统的性质, 如 P-不变量 (模型的令牌总数一定) 和 T-不变量 (模型的状态是可回归的). 这些分析是由关联矩阵计算出来的. 而 SPA 中没有变迁图的模型, 无法得到关联矩阵. 为了利用 SPN 的结构分析方法, Ribaud 将 SPA 每个操作符映射成 SPN 语义来进行分析. 这是近年来对性能模型评价的一种新方法. 但这种语义转换不能改变系统的时间和功能特性. 另一种将 SPA 语义转化为 SPN 语义的方法是直接将 DG 中的节点对应于 SPN 的位置, 弧对应于 SPN 的弧. 显然这种方法不会改变系统的行为特征, 因此这种转化后, 两种模型在功能特性和时间特性上都是一致的.

7 总结与展望

本文介绍的形式化方法主要基于负指数分布的假设, 如果去掉这个假设, 这个随机过程就是非马尔可夫过程. 这种情况下求解比较困难, 一般只能通过模拟工具进行近似求解. 进一步的研究工作就是寻求一种有效的工具, 能够对非马尔可

夫模型进行有效地模型和分析.国际上已有不少学者从事这方面的研究,近年来也涌现出不少成果^[41,42].非马尔可夫过程中还有一类非常重要的问题,即自相似问题.真实的网络业务具有统计上的自相似性^[43,44],如果用传统的形式化方法进行分析,结果与实际观测的结果差异很大,因此需要研究新的模型和工具.这一问题已经成为目前网络研究的重点.这方面的研究已经取得了一定的进展,具体可见参考文献[45,46].

由此可见,排队论、随机 Petri 网和随机进程代数等形式化方法虽然都是对系统进行性能评价的好方法,理论和分析技术都已得到很大的发展,而且已经被应用于计算机网络和计算机系统的性能评价中.但是其模型分析能力仍有一定的局限性,还有许多问题值得探讨和研究.

参考文献:

- [1] D Ferrari, G Serazzi, A zeigner. Measurement and Tuning of Computer Systems[M]. Prentice Hall, Inc, Englewood Cliffs, 1983. 79 - 103.
- [2] R Jain. The Art of Computer Systems Performance Analysis[M]. New York: J Wiley, 1991. 500 - 580.
- [3] R Klar, P Dauphin, F Hartleb, R Hofmann, B Mohr, A Quick, M Siegle. Messung und Modellierung Paraller und Verteilter Rechensystem[M]. Teubner, 1995.
- [4] 林闯. 随机 Petri 网模型的精化设计[J]. 软件学报, 2000, 11(1): 104 - 109.
- [5] H Kobayashi. Modeling and Analysis-An Introduction to System Performance Evaluation Methodology [M]. London: Addison-Wesley, 1978.
- [6] C M Woodside, J E Neilson, D C Petriu, S Majumdar. The stochastic rendezvous network model for performance of synchronous client-server-like distributed software[J]. IEEE Transactions on Computer, 1995, 44(1): 20 - 34.
- [7] J A Rolia, K C Sercik. The methods of layers[J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 1995, 21(8): 689 - 700.
- [8] U Herzog, J Rolia. Performance validation tools for software/hardware systems[A]. Performance Evaluation[C]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2001.
- [9] H Kobayashi. Modeling and Analysis-An Introduction to System Performance Evaluation Methodology[M]. London: Addison-Wesley, 1978.
- [10] P Tran-Gia. Analytische Leistungsbewertung Verteilter Systeme[M]. German: Springer, 1996.
- [11] Kishor S Trivedi. Probability and Statistics with Reliability, Queuing, and Computer Science Applications[M]. New Jersey: Prentice-Hall, 1982.
- [12] D Gross, C M harris. Fundamentals of Queuing Theory[M]. New York: John Wiley & Sons, 1985.
- [13] W J Stewart. Numerical analysis methods[A]. G Haring, Ch Lindemann, M Reiser. Performance Evaluation [C]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2000. 355 - 376.
- [14] G Bolch, S Grener, H de Meer, K S Trivedi. Queuing Networks and Markov Chains[M]. New York: John Wiley & Sons, 1998.
- [15] G Ciardo. Distributed and structured analysis approaches to study large and complex systems[A]. E Brinksma, H Hermanns, J P Katoen. Lectures on Formal Methods and Performance Analysis[C]. New York, Berlin, Heidelberg: Springer, 2000. 344 - 374.
- [16] Law A M, W D Kelton. Simulation Modeling and Analysis(Third Edition)[M]. Boston: McGraw-Hill, 2002. 400 - 410.
- [17] Fishwick P A. Simulation Model Design and Execution: Building Digital Worlds[M]. New Jersey: Prentice Hall, 1995. 350 - 370.
- [18] C Cassandras. Discrete Event Systems: Modeling and Performance Analysis[M]. Irwin Inc and Aksen Associates, Inc, 1993.
- [19] Raj Jain. The Art of Computer Systems Performance Analysis[M]. New York: J Wiley, 1991.
- [20] M K Molloy. Fundamentals of Performance Modeling[M]. Macmillan-Collierv Macmillan, 1989.
- [21] 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[J]. 计算机学报, 2001, 24(6): 588 - 595.
- [22] 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. 47 - 127.
- [23] 刘道斌, 林闯, 陆维明. 随机 Petri 网非乘积解系统的判定与界限求解[J]. 电子学报, 2001, 29(2): 199 - 203.
- [24] F Bause, P Krizinger. Stochastic Petri Nets [M]. Vieweg, Braunschweig, 1996.
- [25] M Ajmone Marsan, G Balbo, G Conte. A class of generalized stochastic Petri nets for the performances analysis of multiprocessor systems[J]. ACM Transactions on Computer Systems, 1984, 2(2): 93 - 122.
- [26] J F Meyer, A Movaghar, W H Sanders. Stochastic activity networks: structure, behavior, and application [A]. Proc Intern Workshop on Timed Petri Nets[C]. Italy: Torino, 1985. 106 - 115.
- [27] W H Sanders, J F Meyer. Reduced-base model construction for stochastic activity networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1991, 9(1): 25 - 36.
- [28] William H Sanders, John F Meyer. Stochastic activity networks: formal definitions and concepts[A]. E Brinksma, H Hermanns, J P Katoen. Lectures on Formal Methods and Performance Analysis[C]. New York, Berlin, Heidelberg: Springer, 2000. 315 - 343.
- [29] J B Dugan, K S Trivedi, R M Geist, V F Nicola. Extended stochastic Petri nets: Applications and analysis[A]. Proc Performance' 84[C]. Amsterdam: Elsevier, 1984. 507 - 519.
- [30] F Moller, C Tofts. A temporal calculus of communicating systems[A]. J C M Baeten, J-W Klop. Concur' 90: Theories of Concurrency-Unification and Extension[C]. 1990, LNCS 458. 401 - 415.
- [31] Y Wang. Real-time behaviour of asynchronous agents[A]. J C M Baeten, J-W Klop. Concur' 90: Theories of Concurrency-Unification and Extension[C]. 1990, LNCS 458. 502 - 520.
- [32] S Schneider. An operational semantics for timed CSP[J]. Inf & Comp, 1995, 116: 193 - 213.
- [33] L Leonard, G Leduc. An introduction to ET-LOTOS for the description of time sensitive systems[J]. Comp. Netw. & ISDN Sys, 1997, 29(3): 271 - 292.
- [34] H Hermanns, J-P Katoen, J Meyer-Kayser, M Siegle. Towards model checking stochastic process algebra[A]. W Grieskamp, T Santen, B Stoddart. 2nd Int Conference on Integrated Formal Methods [C]. Dagstuhl: Springer, 2000, LNCS 1945. 420 - 439.
- [35] H Hermanns, U Herzog, J Hillston. Stochastic process algebras—a formal approach to performance modeling[A]. Performance Tools' 95/MMB'95[C]. Heidelberg, Germany, 1995.
- [36] 林闯, 魏丫丫. 随机进程代数与随机 Petri 网[J]. 软件学报,

- 2002, 13(2): 203 - 213.
- [37] H Hermanns, U Klehmet, V Mertsotakis, M Siegle. Compositional performance modeling with the TIPPTOOL[A]. R Puigjaner, N N Savio, B Serra. Computer Performance Evaluation[C]. Spain: Springer, 1998. 51 - 62.
- [38] G Clark, S Gilmore, J Hillston, N Thomas. Experiences with the PEPA performance modeling tools[J]. Software, IEE Proceedings, 1999, 146(1): 11 - 19.
- [39] H Hermanns, M Lohrey. Priority and maximal progress are completely axiomatisable[A]. D Sangiorgi, R de Simone. CONCUR'98 Concurrency Theory, Lecture Notes in Computer Science, vol. 1446[C]. Berlin: Springer, 1998. 237 - 252.
- [40] Matthias Becker, Helena Szczerbicka. PNiQ—A concept for performance evaluation[A]. Erol Gelenbe. System Performance Evaluation: Methodologies and Applications[C]. 263 - 274.
- [41] R German. Performance Analysis of Communication Systems: Modeling with Non-Markovian Stochastic Petri Nets[M]. John Wiley and Sons, 2000.
- [42] A Bobbio, A Puliafito, M Telek, K S Trivedi. Recent developments in non-Markovian stochastic Petri nets[J]. Journal of Systems Circuits and Computers, 1998, 8(1): 119 - 158.
- [43] W E Leland, M S Taqqu, W Willinger, D V Wilson. On the self-similar nature of Ethernet traffic[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1994, 2(1): 1 - 15.
- [44] Walter Willinger, Ramesh Govindan, Sugih Jamin, Vern Paxson, Scott Shenker. Scaling phenomena in the Internet: Critically examining criticality[J]. 2002, PNAS 2002 99 Suppl. 1: 2573 - 2580.
- [45] 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. 130 - 147.
- [46] W Willinger, M S Taqqu, R Sherman, D V Wilson. Self-similarity th-

rough high variability: statistical analysis of Ethernet LAN traffic at the source level[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1997, 5(1): 71 - 86.

作者简介:



林 闯 男, 1948 年 7 月出生于辽宁省, 博士, 清华大学计算机系教授, 博士生导师, 计算机网络研究所所长, 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.



李雅娟 女, 1979 年 5 月出生于宁夏. 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, 系统性能评价和随机 Petri 网.

王忠民 男, 1966 年 10 月出生于河北省新乐县, 博士, 北京科技大学信息工程学院计算机系副教授. 主要研究领域为智能管理、软件工程、数据库及电子商务.