

基于广义随机着色 Petri 网的 Web 服务组合模型

杨年华¹ 虞慧群² 郭新顺¹

(上海对外贸易学院商务信息学院 上海 201620)¹ (华东理工大学计算机科学与工程系 上海 200237)²

摘要 给出了广义随机着色 Petri 网(GSCPN)和基于 GSCPN 的 Web 服务模型,实现了 Web 服务 QoS 和数据的表示,并给出了基于 GSCPN 的服务组合运算方法。用模型的层次化方法来降低模型的复杂性,一定程度上减轻了模型状态爆炸问题。分析了组合运算的性质,探讨了模型的性质和 QoS 分析方法。

关键词 Petri 网, Web 服务, 服务组合, 建模

中图分类号 TP302 **文献标识码** A

Web Service Composition Model Based on Generalized Stochastic Colored Petri Nets

YANG Nian-hua¹ YU Hui-qun² GUO Xin-shun¹

(School of Business Information Management, Shanghai Institute of Foreign Trade, Shanghai 201620, China)¹

(Department of Computer Science and Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)²

Abstract A generalized stochastic colored Petri net(GSCPN) and a Web service model based on GSCPN were proposed. QoS and data representations were realized in this model. Web service composition algorithms based on GSCPNs were proposed. A hierarchical method for GSCPN was proposed for reducing the complexity of a Web service model and mitigating the state explosion problem partly. Properties of composition operations were analyzed. Approaches of analyzing properties and QoS of the model were investigated.

Keywords Petri net, Web service, Service composition, Modeling

Web 服务^[1]是面向服务体系结构(Service Oriented Architecture, SOA)^[2]的一种主要实现技术,能保证不同平台下各种异构应用的互操作,从而实现跨平台的分布式计算。它具有自包含、自描述、平台独立、松散耦合及模块化等特点。随着 Web 服务技术的发展和标准的完善,越来越多的机构和企业将其提供的业务功能封装为 Web 服务进行发布,供合作伙伴或客户使用。因此,研究如何组合这些服务,以实现能快速开发新的业务流程和应用系统的服务组合^[3]技术,已经引起了学术界和产业界的广泛关注。

根据所采用的技术,Web 服务组合方法可以分为 3 类^[3-5]:基于工作流的 Web 服务组合^[6,7]、基于人工智能的 Web 服务组合^[8]和基于形式化方法的 Web 服务组合^[9,10]。形式化方法适合描述系统的精确语义,能够对系统进行验证和分析,是提高系统可靠性的重要建模工具。Petri 网^[11]是一种重要的形式化方法,它适合描述具有异步、并发等特征的分布式系统。研究者已经围绕 Petri 网模型给出了大量分析和验证的方法和工具。因此本文利用 Petri 网对服务组合来进行建模,借助 Petri 网的形式化验证和分析方法,来达到提高服务组合可靠性的目的。

近年来,一些学者已经就基于 Petri 网的服务组合模型展

开了研究,并取得了一定的成果。Hamadi 等人^[12]利用基本 Petri 网对服务组合进行建模,给出了基本组合操作的 Petri 网模型,并分析了模型的代数性质。钱柱中等人^[13]以服务组合中的消息为关注点,在着色 Petri 网的基础上,提出了面向消息的行为 Petri 网模型,并给出了服务自动组合规则。Tan 等人^[14]利用着色 Petri 网定义 BPEL(Business Process Execution Language, BPEL),并对两个服务之间的可组合性进行了分析。基于着色 Petri 网的模型虽然可以对模型中的数据及其操作进行建模,但是这些文献都缺乏对服务组合系统的性能、可靠性等属性的关注。Xia 等人^[15]给出了 Web 服务的广义随机 Petri 网模型,并将此模型转换为连续时间马尔科夫链来进行相关 QoS 的预测分析。Wang 等人^[16]给出了随机 Petri 网的服务组合模型,并进行服务组合生存性的量化分析。然而,目前尚没有相关文献提出同时对服务组合的数据及其操作和服务组合 QoS 进行建模的方法。

给出了一种结合广义随机 Petri 网^[17]和着色 Petri 网^[18]的广义随机着色 Petri 网(Generalized Stochastic Colored Petri Nets, GSCPN)模型。利用此模型既可以对服务组合的功能进行建模,又可以对一些 QoS 属性进行建模和分析。

本文第 1 节给出 GSCPN 的定义和基于 GSCPN 的服务

到稿日期:2011-08-12 返修日期:2011-11-05 本文受国家自然科学基金(60473055, 60773094),上海市曙光计划(07SG32),上海市高校“085 工程”项目,上海市教委科研创新项目(12ZS170)资助。

杨年华(1978—),男,博士,讲师,主要研究方向为可信软件、信息安全、形式化方法、信息系统等, E-mail: cnynh@163.com; 虞慧群(1967—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为软件工程、高可信计算和形式化方法等; 郭新顺(1963—),男,教授,主要研究方向为数据库及其应用技术。

模型;第2节给出服务组合的运算模型;第3节给出模型的层次化方法;第4节给出基于 GSCP 的服务组合模型相关性分析方法。

1 服务模型

定义 1 广义随机着色 Petri 网是一个九元组 $GSCP N = (\Sigma, P, T, F, C, G, E, \lambda, I)$ 。其中 Σ 是库所类型集,也称颜色集; P 是库所集; T 是变迁集, $T = T_i \cup T_o$, $T_i \cap T_o = \emptyset$, T_i 表示时间变迁集合, T_o 表示瞬时变迁的集合; F 是弧集, $F \subseteq P \times T \cup T \times P$; C 是颜色函数集, $C: P \rightarrow \Sigma$; G 是条件函数的集合, $G: T \rightarrow \text{BoolExpression}$, 满足 $\forall t \in T: (\text{Type}(G(t)) = \text{Boolean} \wedge \text{Type}(G(t)) = \text{Boolean} \wedge \text{type}(\text{var}(G(t))) \subseteq \Sigma)$, $\text{var}(G(t))$ 表示 $G(t)$ 中的变量集; E 是弧函数的集合, $E: F \rightarrow \text{Expression}$, 满足 $\forall f \in F: \text{Type}(E(f)) = C(p(f))_{MS} \wedge \text{Type}(\text{Var}(E(f))) \subseteq \Sigma$, $p(f)$ 是 f 关联的库所, $C(p(f))_{MS}$ 表示 $C(p)$ 上的多重集的集合; λ 是时间变迁平均实施速率或瞬时冲突变迁之间优先级集合; I 为初始化函数, $I: P \rightarrow \Sigma$ 为每个库所赋初始颜色, 生产初始标识 M_0 。

定义 2 服务是一个元组 $S = (\Sigma, P, i, o, T, F, C, G, E, \lambda, I)$, 其中 $\Sigma, P, T, F, C, G, E, \lambda, I$ 的含义与定义 1 相同; $i \in P$ 是输入库所, 其前集为空; $o \in P$ 是输出库所, 其后集为空。当 S 表示原子 Web 服务时, $p = \{i, o\}$ 。

图 1 表示了一个原子服务模型。变迁 t 表示服务功能。服务的执行速率在图中没有标识。

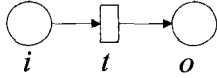


图 1 原子服务模型

2 服务组合运算

原子 Web 服务之间通过顺序、并发、选择和迭代运算构成组合服务, 组合服务又可以作为普通服务参与更复杂服务的构造。Web 服务组合可按如下方法进行形式化定义:

$$S ::= (S \cdot S) \mid (S \parallel S) \mid (S \oplus S) \mid (nS)$$

式中, S 表示服务, $\cdot$ 表示顺序运算, $\parallel$ 表示并发运算, $\oplus$ 表示选择运算, nS 表示迭代运算。

设有两个 Web 服务 $S_1 = (\Sigma_1, P_1, i_1, o_1, T_1, F_1, C_1, G_1, E_1, \lambda_1, I_1)$, $S_2 = (\Sigma_2, P_2, i_2, o_2, T_2, F_2, C_2, G_2, E_2, \lambda_2, I_2)$, 分别经过顺序、并发、选择和迭代运算, 得到组合模型 $S = (\Sigma, P, i, o, T, F, C, G, E, \lambda, I)$ 。

2.1 顺序运算

定理 1 两个服务可以进行顺序组合运算 $S_1 \cdot S_2$ 的必要条件是 $\text{var}(o_1) \supseteq \text{var}(i_2)$ 。

证明: 假设 $\neg(\text{var}(o_1) \supseteq \text{var}(i_2))$, 则 $\exists x \in \text{var}(i_2)$, 使得 $x \notin \text{var}(o_1)$, 那么服务 S_2 的一些输入变量无法从服务 S_1 的输出中获得, 从而 $S_1 \cdot S_2$ 运算不能进行。因此定理 1 成立。证毕。

两个服务的顺序运算 $S_1 \cdot S_2$ 是在两个服务的 Petri 网模型中增加一个瞬时变迁 t_c 。并添加两条弧, 其中一条弧从 o_1 引向 t_c , 另外一个 t_c 引向 i_2 。

$S = S_1 \cdot S_2$, 则 $P = P_1 \cup P_2$, $i = i_1$, $o = o_2$, $T = T_1 \cup T_2 \cup \{t_c\}$, $T_i = T_{i1} \cup T_{i2}$, $T_o = T_{o1} \cup T_{o2} \cup \{t_c\}$, $F = F_1 \cup F_2 \cup \{(o_1, t_c), (t_c, i_2)\}$, $C = C_1 \cup C_2$, $G = G_1 \cup G_2$, $E = E_1 \cup E_2 \cup \{E(o_1, t_c) = E(t_c, i_2) = C(i_2), \lambda = \lambda_1 \cup \lambda_2, I = I_1\}$ 。

$t_c\}$, $(t_c, i_2)\}$, $C = C_1 \cup C_2$, $G = G_1 \cup G_2$, $E = E_1 \cup E_2 \cup \{E(o_1, t_c), E(t_c, i_2)\}$, $E(o_1, t_c) = E(t_c, i_2) = C(i_2)$, $\lambda = \lambda_1 \cup \lambda_2$, $I = I_1$ 。

2.2 并发运算

并发运算的实现思想与郭玉彬等人^[19]给出方法的思想相同, 只是变迁表达的含义有所区别。图 2 中的服务由服务 S_1 和 S_2 经过并发运算组合而成。库所 i 和 o 分别作为组合服务 S 的输入和输出库所。变迁 t_i 的作用是为服务 S_1 和 S_2 生成合适的输入。变迁 t_o 的作用是将 S_1 和 S_2 的输出组合成组合服务的输出。

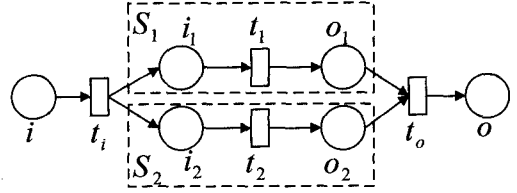


图 2 两个服务的并发运算

$S = S_1 \parallel S_2$, 则 $P = P_1 \cup P_2 \cup \{i, o\}$, $i = i_1, o = o_2$, $T = T_1 \cup T_2 \cup \{t_i, t_o\}$, $T_i = T_{i1} \cup T_{i2} \cup \{t_i, t_o\}$, $T_o = T_{o1} \cup T_{o2}$, $F = F_1 \cup F_2 \cup \{(i, t_i), (t_i, i_1), (t_i, i_2), (o_1, t_o), (o_2, t_o), (t_o, o)\}$, $C = C_1 \cup C_2 \cup \{C(i) = C(i_1) \cup C(i_2), C(o) = C(o_1) \cup C(o_2)\}$, $G = G_1 \cup G_2$, $E = E_1 \cup E_2 \cup \{E(i, t_i), E(t_i, i_1), E(t_i, i_2), E(o_1, t_o), E(o_2, t_o), E(t_o, o)\}$, $E(i, t_i) = C(i)$, $E(t_i, i_1) = C(i_1)$, $E(t_i, i_2) = C(i_2)$, $E(o_1, t_o) = C(o_1)$, $E(o_2, t_o) = C(o_2)$, $E(t_o, o) = C(o)$, $\lambda = \lambda_1 \cup \lambda_2$, $I = I(i)$ 。

定义 3 两个服务可以进行并发组合运算 $S_1 \parallel S_2$ 的必要条件是 $C(o_1) \cap C(o_2) = \emptyset$ 。

如果服务的输出存在相同的变量, 那么在这两个服务的组合模型输出中可能出现冲突, 因此需要定义 3 来保证组合模型输出的一致性。

2.3 选择运算

选择运算的目的是根据一定的条件选择多个服务中的一个作为组合服务的一部分; 或者任意选择一个服务。图 3 表示在服务 S_1 和 S_2 中选择一个服务。库所 i 和 o 分别作为组合服务 S 的输入和输出库所。变迁 $t_{i1}, t_{i2}, t_{o1}, t_{o2}$ 和 t_o 的作用是将输入库所的标记传递给输出库所。如果 S_1 和 S_2 是任意选择的关系, 则 $G(t_{i1}) = G(t_{i2}) = \emptyset$, 否则 $G(t_{i1}) = \neg G(t_{i2}) \neq \emptyset$ 。

$S = S_1 \oplus S_2$, 则 $P = P_1 \cup P_2 \cup \{i, o, p_i, p_o\}$, $i = i_1, o = o_2$, $T = T_1 \cup T_2 \cup \{t_i, t_{i1}, t_{i2}, t_{o1}, t_{o2}, t_o\}$, $T_i = T_{i1} \cup T_{i2} \cup \{t_i, t_{i1}, t_{i2}, t_{o1}, t_{o2}, t_o\}$, $T_o = T_{o1} \cup T_{o2} \cup \{t_i, t_{i1}, t_{i2}, t_{o1}, t_{o2}, t_o\}$, $F = F_1 \cup F_2 \cup \{(i, t_i), (t_i, p_i), (p_i, t_{i1}), (p_i, t_{i2}), (t_{i1}, i_1), (t_{i2}, i_2), (o_1, t_{o1}), (o_2, t_{o2}), (t_{o1}, p_o), (t_{o2}, p_o), (p_o, t_o), (t_o, o)\}$, $C = C_1 \cup C_2 \cup \{C(i), C(o), C(p_i), C(p_o)\}$, $C(i) = C(p_i) = C(i_1) \cup C(i_2)$, $C(o) = C(p_o) = C(o_1) \cup C(o_2)$, $G = G_1 \cup G_2 \cup \{G(t_{i1}), G(t_{i2})\}$, $E = E_1 \cup E_2 \cup \{E(i, t_i), E(t_i, p_i), E(p_i, t_{i1}), E(p_i, t_{i2}), E(t_{i1}, i_1), E(t_{i2}, i_2), E(o_1, t_{o1}), E(o_2, t_{o2}), E(t_{o1}, p_o), E(t_{o2}, p_o), E(p_o, t_o), E(t_o, o)\}$, $E(i, t_i) = E(t_i, p_i) = E(p_i, t_{i1}) = E(p_i, t_{i2}) = C(i)$, $E(t_{i1}, i_1) = C(i_1)$, $E(t_{i2}, i_2) = C(i_2)$, $E(o_1, t_{o1}) = C(o_1)$, $E(o_2, t_{o2}) = C(o_2)$, $E(t_{o1}, p_o) = E(t_{o2}, p_o) = E(p_o, t_o) = E(t_o, o) = C(o)$, $\lambda = \lambda_1 \cup \lambda_2$, $I = I(i)$ 。

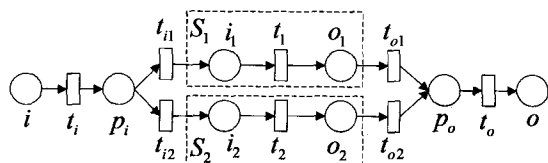


图3 两个服务的选择运算

2.4 迭代运算

某些功能需要通过一个服务的多次反复迭代来实现。图4表示服务 S_1 的迭代模型。库所 i 和 o 分别作为组合服务 S 的输入和输出库所。库所 p_i 存储迭代的中间结果。变迁 t_i 初始化迭代数据。 t_l 将迭代中间结果传递给服务 S_1 作为每次迭代的输入。 t_c 返回迭代的中间结果。 t_e 输出组合服务的操作结果。变迁 t_i, t_l, t_c, t_e 均为瞬时变迁。 $G(t_l) = \neg G(t_e) \neq \phi$ 。

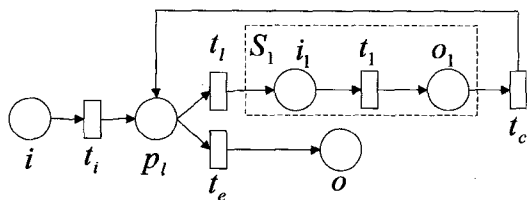


图4 服务的迭代运算

$S = nS_1$, 则 $P = P_1 \cup \{i, o, p_i\}, i = i, o = o, T = T_1 \cup \{t_i, t_l, t_c, t_e\}, T_i = T_{i1} \cup \{t_i, t_l, t_e, t_c\}, T_l = T_{l1}, F = F_1 \cup \{(i, t_i), (t_i, p_i), (p_i, t_l), (p_i, t_e), (t_l, i_1), (o_1, t_c), (t_c, p_i), (t_e, o)\}, C = C_1 \cup \{C(i) = C(i_1), C(p_i) = C(i_1), C(o) = C(o_1)\}, G = G_1 \cup \{G(t_l), G(t_e)\}, E = E_1 \cup \{E(i, t_i), E(t_i, p_i), E(p_i, t_l), E(p_i, t_e), E(t_l, i_1), E(o_1, t_c), E(t_c, p_i), E(t_e, o)\} E(i, t_i) = E(t_i, p_i) = E(p_i, t_l) = E(p_i, t_e) = E(t_l, i_1) = C(i_1), E(o_1, t_c) = E(t_c, p_i) = E(t_e, o) = C(o_1), \lambda = \lambda_1, I = I(i)$ 。

3 模型的层次化

为了降低模型的复杂度,避免 Petri 网带来的状态爆炸问题,层次化方法提供了一种有效的途径。

定义4 一个服务的层次化模型可以表示为元组 $HS = (\Sigma, P, i, o, T, F, C, G, E, \lambda, I, H)$, 其中 $H \subseteq T$ 是一个复合变迁,用来表示一个原子服务或组合服务的功能,其余变量的含义与定义2相同。

按照层次化的思想和定义4的方法,如果图1中的 $t \in H$, 则图1可以表示任何一个复杂的组合服务。经过第2节中的4种组合运算多次组合而成的服务都可以用图1的简单结构表示。第2节中的服务 S_1 和 S_2 也可能是一个用层次化方法表示的组合服务。

4 模型分析

4.1 运算性质分析

定理2 所有服务的组合表示为 S , 服务运算集合 $O = \{\cdot, \parallel, \oplus, n\}$, 则 O 对 S 是封闭的。

证明:根据第2节中运算的定义,服务 S_1 和 S_2 经过运算 O 得到 S , 并且 S 只有一个输入和一个输出库所。根据定义2, S 是一个服务。证毕。

可以证明^[12,19], $(S, \cdot)$ 是一个半群, $(S, \parallel)$ 和 $(S, \oplus)$ 均是可交换半群。

定理3 一个服务模型从输入开始执行,总是能够在输出库所中产生一个标记。

证明:一个原子服务总是可以从输入开始,产生一个输出标记;顺序运算中,前一个服务的输出作为后一个服务的输入,因此第一个服务的输入能够导致最后一个服务的输出标记,也就是组合服务的输出标记;多个经过并发运算的服务,在同步点产生一个组合服务的输出标记;在选择运算中,各个分支之间的条件析取为真,合取为空,其组合服务一定能够在一定的输入条件下产生输出标记;在迭代运算中,当迭代条件为假时就在组合服务的输出库所中产生一个标记。又因为服务组合运算时是封闭的,因此定理3成立。证毕。

4.2 模型有效性分析

可以利用已有的 Petri 网分析工具(如 CPN tools^[20], SPNP^[21]等)分析模型的可达性、有界性、活性等属性。通过工具分析模型的可达性,可以验证一个组合服务在给定的输入下能否产生预期的结果。有界性是指某一库所能达到的最大标记数量。Petri 网的有界性是指任何一个库所能达到的最大标记数量的最大值。利用有界性可以分析服务资源的需求情况。通过分析模型活性,可以知道是否存在死锁、错误流程等信息。

4.3 模型 QoS 分析

随机 Petri 网的可达状态图与一个马尔科夫链同构。将模型的可达图转换为对应的马尔科夫链,可以根据 Petri 网模型中 λ 所表达的含义不同,进行模型生存性^[16]、安全性^[22]、性能的预测^[23]等。这些文献中的 QoS 属性分析方法都适用于本文的模型。利用 SPNP^[21] 工具可以对这些属性进行自动分析。林闯^[24]等人利用随机 Petri 网来分析网络的可信属性,给出了利用随机 Petri 网进行可信属性定量分析的方法。该方法同样适用于分析利用本文中模型建立的组合服务的可信属性。

结束语 为了对 Web 服务组合进行形式化验证和分析,本文给出了广义随机着色 Petri 网模型、基于该模型的服务表示方法及层次化表示方法。为服务组合的需要,给出4种组合运算的模型表示方法,并分析了运算的性质。最后给出了模型有效性和 QoS 的分析方法。下一步将在这个模型的基础上,研究 QoS 属性的表示方法和 Web 服务之间语义的一致性表示方法。

参考文献

- [1] Ferris C, Farrell J. What are Web services? [J]. Communications of the ACM, 2003, 46(6): 31-31
- [2] Papazoglou M P, Heuvel W-J v d. Service oriented architectures: Approaches, technologies and research issues [J]. The VLDB Journal, 2007, 16(3): 389-415
- [3] Dustdar S, Schreiner W. A survey on Web services composition [J]. International Journal of Web and Grid Services, 2005, 1(1): 1-30
- [4] 崔华, 应时, 袁文杰, 等. 语义 Web 服务组合综述 [J]. 计算机科学, 2010, 37(5): 21-25
- [5] Charif Y, Sabouret N. An overview of semantic Web services composition approaches [J]. Electronic Notes in Theoretical Computer Science, 2006, 146(1): 33-41

(下转第158页)

参考文献

- [1] Nambiar U, Kambhampati S. Answering imprecise queries over web databases [C] // Proceedings of the 22nd International Conference on Data Engineering. 2006; 45-54
- [2] Su W, Wang J, Huang Q, et al. Query result ranking over e-commerce web databases [C] // Proceedings of the 15th ACM Conference on Information and Knowledge Management. 2006; 575-584
- [3] Chen Z Y, Li T. Addressing diverse user preferences in SQL-Query-Result navigation [C] // Proceedings of the 2007 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data. 2007; 641-652
- [4] Bosc P, Hadjali A, Pivert O. Empty versus overabundant answers to flexible relational queries [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2008, 159(12): 1450-1467
- [5] Ma Z M, Yan L. Generalization of strategies for fuzzy query translation in classical relational databases [J]. Information and Software Technology, 2007, 49(2): 172-180
- [6] Ma Z M, Meng X F. A knowledge-based approach for answering fuzzy queries over relational databases [C] // Proceedings of the 12th International Conference on Knowledge-based and Intelligent Information and Engineering Systems. 2008, 5178: 623-630
- [7] Zadeh L A. Fuzzy sets. Information and Control [J]. 1965, 8(3): 338-353
- [8] <http://www.amazon.cn>
- (上接第 144 页)
- [6] Curbera F, Duftler M, Khalaf R, et al. Bite: Workflow composition for the Web [A] // Fifth International Conference on Service-oriented Computing-ICSOC 2007 [C]. LNCS, 4749. Vienna, Austria; Springer Berlin / Heidelberg, 2007; 94-106
- [7] Brambilla M, Ceri S, Facca F M, et al. Model-driven design and development of semantic Web service applications [J]. ACM Transactions on Internet Technology, 2007, 8(1): 3. 1-3. 31
- [8] Bertoli P, Pistore M, Traverso P. Automated composition of Web services via planning in asynchronous domains [J]. Artificial Intelligence, 2010, 174(3/4): 316-361
- [9] Xiong P, Fan Y, Zhou M. A Petri net approach to analysis and composition of Web services [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, 2010, 40(2): 376-387
- [10] Ozorhan E K, Kuban E K, Cicekli N K. Automated composition of Web services with the abductive event calculus [J]. Information Sciences, 2010, 180(19): 3589-3613
- [11] Murata T. Petri nets: Properties, analysis and applications [J]. Proceedings of the IEEE, 1989, 77(4): 541-580
- [12] Hamadi R, Benatallah B. A Petri net-based model for Web service composition [A] // Proceedings of the 14th Australasian database conference-Volume 17 [C]. Adelaide, Australia; Australian Computer Society, Inc., 2003; 191-200
- [13] 钱柱中, 陆桑璐, 谢立. 基于 petri 网的 Web 服务自动组合研究 [J]. 计算机学报, 2006, 29(7): 1057-1066
- [14] Tan W, Fan Y, Zhou M. A Petri net-based method for compatibility analysis and composition of Web services in business process execution language [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2009, 6(1): 94-106
- [15] Xia Y, Chen J, Zhou M, et al. A Petri-net-based approach to QoS estimation of Web service choreographies [A] // International Workshops on Advances in Web and Network Technologies, and Information Management [C]. LNCS, 5731. Suzhou, China; Springer Berlin / Heidelberg, 2009; 113-124
- [16] Wang Y, Lin C, Ungsuan P D, et al. Modeling and survivability analysis of service composition using stochastic Petri nets [J]. The Journal of Supercomputing, 2011, 56(1): 79-105
- [17] Chiola G, Marsan M A, Balbo G, et al. Generalized stochastic Petri nets: A definition at the net level and its implications [J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 1993, 19(2): 89-107
- [18] Jensen K. Coloured Petri nets: Basic concepts, analysis methods and practical use [M]. Volume 1, basic concepts. Berlin; Springer-Verlag, 1997; 234
- [19] 郭玉彬, 杜玉越, 奚建清. Web 服务组合的有色网模型及运算性质 [J]. 计算机学报, 2006, 29(7): 1067-1075
- [20] Ratzer A V, Wells L, Lassen H M, et al. CPN tools for editing, simulating, and analysing coloured Petri nets [A] // 24th International Conference on Applications and Theory of Petri Nets (ICATPN 2003) [C]. LNCS, 2679. Eindhoven, The Netherlands; Springer Berlin/Heidelberg, 2003; 450-462
- [21] Hirel C, Tuffin B, Trivedi K S. SPNP: Stochastic Petri nets. Version 6.0 [A] // 11th International Conference on Computer Performance Evaluation Modelling Techniques and Tools [C] // LNCS, 1786. Schaumburg, IL, USA; Springer Berlin/Heidelberg, 2000; 354-357
- [22] Sherief N H, Abdel-Hamid A A, Mahar K M. Threat-driven modeling framework for secure software using aspect-oriented stochastic Petri nets [A] // The 7th International Conference on Informatics and Systems (INFOS 2010) [C]. Cairo, Egypt; IEEE Computer Society, 2010; 1-8
- [23] Perez-Palacin D, Merseguer J. Performance evaluation of self-reconfigurable service-oriented software with stochastic Petri nets [J]. Electronic Notes in Theoretical Computer Science, 2010, 261: 181-201
- [24] 林闯, 王元卓, 杨扬, 等. 基于随机 Petri 网的网络可信赖性分析方法研究 [J]. 电子学报, 2006, 34(2): 322-332