

# 动态 Web 服务组合的选择策略\*

门鹏, 段振华

(西安电子科技大学 计算理论与技术研究, 西安 710071)

**摘 要:** 为了提高光网络资源的利用率, 提出一种基于 Petri 网的 Web 服务组合最优化选择的方法. 根据用户需求使用 Petri 网对服务组合之间的数据依赖关系建模, 利用 Petri 网的 T-不变量得到各种可能组合方案, 并对于每种组合方案使用广义随机 Petri 网分析其性能. 实验结果表明: 该方法充分利用 Petri 网善于描述、分析、评价分布式系统的优点, 得到性能最优的基于光网络资源的服务组合方案.

**关键词:** Web 服务组合; Petri 网; 光网络

**中图分类号:** TP311

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2009)02-325-4

## 0 引言

随着网络技术的发展, 光网络以其接近无穷的宽带和很小的传输延时等特点, 得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>. 面向服务的光网络将所有可用资源封装成 Web 服务, 使下层光网络资源也成为基于 Web 的服务资源, 即光网络 Web 服务资源. 随着企业业务需求的不断增长, 将多个 Web 服务资源进行整合可以提高网络资源的利用率. 如何自动获取一个具有高质量的服务组合方案是一个需要解决的问题.

Petri 网是一种图形化的数学分析工具, 善于描述分析各种类型的系统<sup>[2-3]</sup>. 本文采用 Petri 网对服务组合方案进行建模并采用广义随机 Petri 网 (Generalized Stochastic Petri Nets, GSPN)<sup>[3]</sup> 分析每种组合方案的性能, 从而获得性能最佳的组合方案.

## 1 相关概念

**定义 1.** Web 服务产生式规则: 一个 Web 服务操作  $OP_i(I_i, O_i, Qos_i)$ , 由一个产生式规则集  $R_i$  表示. 针对  $O_i$  中每个输出参量, 存在一条产生式规则, 定义为一个三元组  $R_{ix} = (I_i, o_{ix}, OP_i)$ , 其中,  $I_i$  是操作  $OP_i$  的输入参量集合,  $o_{ix} \in O_i, x = |O_i|, O_i$  是操作  $OP_i$  的输出参量集合.

**定义 2.** 用户组合服务需求: 用表达式  $WS_R(I_R, O_R)$  描述, 其中  $I_R$  是用户能提供的本体概念集合,  $O_R$  是用户期望得到的概念集合.

**定义 3.** 服务操作的数据依赖关系: 对于两个操

作  $OP_i(I_i, O_i, Qos_i)$  和  $OP_j(I_j, O_j, Qos_j)$ , 对应的产生式规则集是  $R_i$  和  $R_j$ . 如果  $\exists R_{ix} = (I_i, o_{ix}, OP_i) \in R_i, \exists R_{jy} = (I_j, o_{jy}, OP_j) \in R_j, \exists in\_j \in I_j$ , 使得  $o_{ix} = in\_j$ , 则称操作  $OP_i$  和  $OP_j$  有数据依赖关系.

## 2 构造 Web 服务组合方案

### 2.1 研究动机举例

假设在某个应用场景中有 7 个 Web 服务, 每个服务操作的输入、输出参量以及平均执行时间如表 1. 将用户需要的服务组合描述为  $WS_R(\{H, K, D, F, B\}, \{X\})$ . 本文的研究目标是根据已有的 Web 服务和用户需求, 构造性能最佳的 Web 服务组合方案.

表 1 Web 服务库示例

服务操作	输入参量	输出参量	平均耗时/ms
$S_1$	$B, N, Q$	$X$	75
$S_2$	$N, Q, U$	$X$	43
$S_3$	$P$	$X$	39
$S_4$	$D, F$	$M$	52
$S_5$	$H, K$	$Q, T$	46
$S_6$	$T$	$U$	45
$S_7$	$I$	$L$	10

### 2.2 建模服务之间数据依赖关系

一个产生式规则  $R_{ix} = (I_i, o_{ix}, OP_i)$  可以用一个 Petri 网结构  $PN\_R_{ix}$  表示. 用变迁  $t$  表示操作  $OP_i$ ; 其输入库所表示  $I_i$  中的输入参量  $I_i$ , 输出库所表示输出参量  $o_{ix}$ .

算法 1: 构造服务依赖关系的 Petri 网模型:

输入: 用户需求  $WS_R(I_R, O_R)$ , Web 服务库

输出: Web 服务依赖关系的 Petri 网.

1) 用库所集合  $P_{IRX}, P_{ORY}$  分别代表用户需求  $I_R, O_R$  中的每个参量. 分别给  $P_{IRX}$  中每个库所添加

\* 国家自然科学基金(60433010, 60873018)、装备预先研究项目(51315050105)和博士点基金(200807010012)资助  
Tel: 029-88204271 Email: menpeng@snnu.edu.cn  
收稿日期: 2008-01-14

一个输入变迁,  $P_{OR_Y}$  中库所添加输出变迁.

2) 选择一组可以满足每个用户需求  $o_r \in O_R$  的产生式规则  $R_{ir} = (I_i, o_{ir}, OP_i)$ , 用变迁  $t$  连接代表  $o_r$  的库所和代表产生式规则  $R_{ir}$  的 Petri 网结构  $PN_{R_{ir}}$ .

3) 对于每个  $PN_{R_{ir}}$  的每个输入参量  $i_{ir} \in I_i$ , 如能由用户  $i_r \in I_R$  提供, 则用变迁  $t$  连接代表匹配参量的库所, 并针对该参量的搜索停止; 否则, 查看是否由某个产生式规则  $R_{jy}$  的输出  $o_{jy}$  匹配这个参量, 并用变迁  $t$  连接代表匹配参量的库所. 如果该参量始终得不到满足, 则停止针对该参量的搜索.

4) 重复步骤 3) 直到所有  $PN_{R_{ir}}$  的  $I_i$  中输入参量都停止搜索, 程序退出.

对于前边的示例, 根据算法 1 得到如图 1 的 Petri 网模型. 其中矩形变迁代表一条产生式规则, 竖线变迁代表操作间的赋值关系.

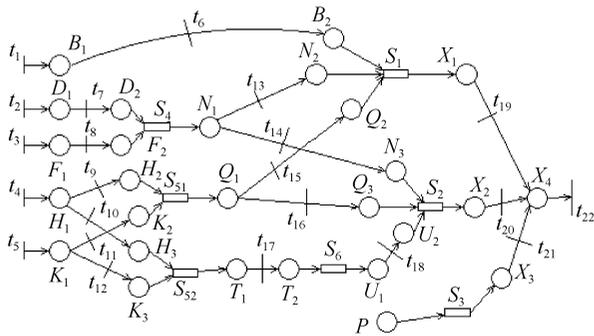


图 1 Web 服务依赖关系的 Petri 网模型  
Fig. 1 Petri net model of Web services dependent relationship

### 2.3 使用 $T$ 不变量获取组合方案

借鉴文献[4]使用  $T$  不变量判定是否存在满足用户请求的合成 Web 服务的思想, 通过 Petri 网的  $T$  不变量得到各种方案.  $T$  不变量是使状态回归的变迁序列, Petri 网的初始状态为零状态, 通过触发  $T$  不变量支撑集中的变迁序列就能使标识回到零状态. 而回到零状态的前提条件是库所  $P_{OR_Y}$  中有标记, 即用户需求得到满足. 因此, 由  $T$  不变量支撑集中的变迁转换而来的服务组合方案可以满足用户需求. 从  $T$  不变量中提取 Web 服务组合方案 Petri 网模型的构造算法为:

算法 2: 获取服务组合方案的 Petri 网模型

输入: 服务依赖关系的网  $PN$ ,  $T$  不变量的支撑集  $I$

输出: 服务组合方案的 Petri 网模型

1) 在  $PN$  中选出所有在集合  $I$  中的变迁, 并选出与这些变迁相连的弧和库所, 组成一个新的网  $PN_T$ .

2) 在  $PN_T$  中, 将代表属于相同操作的产生式

规则的变迁合并为一个变迁, 并将代表相同输入参量的库所合并为一个库所. 合并时保持与变迁或库所相连的弧不变.

3) 将代表相同数据赋值操作的变迁合并为一个变迁.

4) 将所有库所与变迁之间的多弧合并为一条单弧.

根据文献[5]的计算  $T$  不变量的算法, 图 1 存在两个  $T$  不变量  $T_1$  和  $T_2$ , 它们的支撑集分别是:  $I_1 = \{t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7, t_8, t_9, t_{11}, S_4, S_{51}, t_{13}, t_{15}, S_1, t_{19}, t_{22}\}$ ,  $I_2 = \{t_2, t_3, t_4, t_5, t_7, t_8, t_9, t_{10}, t_{11}, t_{12}, S_4, S_{51}, S_{52}, t_{14}, t_{16}, t_{17}, S_6, t_{18}, S_2, t_{20}, t_{22}\}$ . 根据不变量  $I_1, I_2$ , 由算法 2 得到两个代表服务组合方案的 Petri 网模型. 其中  $I_2$  对应的 Petri 网模型如图 2, 它代表一个 Web 服务组合方案, 库所矩形代表一个 Web 服务操作, 竖线代表操作间的赋值关系.

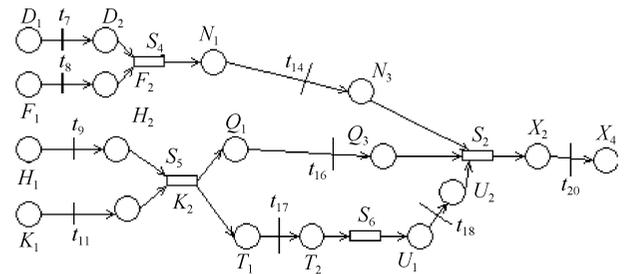


图 2 一种 Web 服务组合方案的 Petri 网模型  
Fig. 2 A Petri net model of Web service composition plan

### 2.4 分析组合方案的性能

当同时获得多个 Web 服务组合方案时, 应优先选择性能最优的方案. 光网络性能参量包括服务响应时间、服务可用性以及生存性等一系列参量. 本文主要考虑组合服务的响应时间这一参量. GSPN 的可达图同构于连续时间的马尔科夫链 (Markov Chain, MC)<sup>[3]</sup>, 由此可以利用马尔科夫随机过程分析 Petri 网运行的各种性能指标. 这里主要使用 GSPN 估算每种组合方案的平均处理时间, 从而选出最佳方案. 在 GSPN 中  $T$  被划分为时间变迁集  $T_t$  和瞬时变迁集  $T_i$ ,  $T = T_t \cup T_i$ ,  $T_t \cap T_i = \emptyset$ ; 每个时间变迁的实施时间服从一个指数分布函数  $\forall t \in T_t$ :  $F_t = 1 - e^{-\lambda_t x}$ , 其中实参  $\lambda_t > 0$  是每个时间变迁平均实施速率, 表示在可实施情况下单位时间内平均实施次数. 这里假设原子 Web 服务操作的发生是服从指数分布函数的, 因为这种假设本身与现实大多数系统相符合的<sup>[3]</sup>. 用瞬时变迁描述操作之间的赋值, 并且假设赋值操作不需要耗费时间.

为了分析服务组合的性能, 首先在组合方案的 Petri 网模型中加入一个额外时间变迁  $client(\lambda_{client} = 1)$ , 用它连接库所  $P_{OR_Y}$  到  $P_{IR_X}$ . 变迁  $client$  的触发

代表客户调用组合 Web 服务的速率.同时,给库所  $\{D, F, H, K\}$  中各加入一个标记形成初始状态,构成新 Petri 网模型  $PN\_X$ .

GSPN 的可达集可以分为两个不相交的子集:仅使时间变迁可实施的状态和可使瞬时变迁可实施的状态,前者称为实存状态,后者称为消失状态.在分析过程中去掉消失状态,可以使得计算复杂度降低.根据网  $PN\_X$  的可达图可知它有 7 个实存状态.

分析 GSPN 模型的一般步骤为:

1) 求约简后的马尔可夫链的转移概率矩阵.根据公式  $U = F + EG^\infty$ , 其中,  $F$  表示  $U$  中实存状态向实存状态的转移概率;  $E$  表示  $U$  中实存状态向消失状态的转移概率;  $G^\infty$  中的元素  $g_{ij} = Pr(r \rightarrow j)$  表示从给定的消失状态  $r$  出发, 经过任意步首先到达实存状态  $j$  的概率.求得实存状态向实存状态的转移矩阵

2) 求与步数相关的实存状态稳定概率分布.行向量  $Y = [y_0, y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6]$  代表稳定状态概率, 根据线性方程组  $Y = Y \cdot U$ , 得  $Y$  的值.

3) 求与步数无关的稳定状态概率.

选择约简后的马尔可夫链的一个状态  $i$  做参考状态, 则连续访问状态  $i$  之间访问状态  $j$  的次数为  $V_{ij} = Y_j / Y_i$ . 每个状态的驻留时间为  $ST_i = \begin{cases} 0 & \forall i \in V \\ [\sum_{f \in H_i} r_f]^{-1} & \forall i \in T \end{cases}$ , 其中  $H_i$  是实存状态  $i$  下可

实施的变迁集合. 返回参考状态  $i$  的平均时间为  $W_i = \sum_{j \in T} V_{ij} ST_j$ . GSPN 的状态稳定状态概率最终表示为  $P[j] = \begin{cases} 0 & j \in V \\ V_{ij} ST_j / W_i & j \in T \end{cases}$ .

选择  $M_0$  为参考状态, 分别求得  $V_{ij}$ ,  $ST_i$  和  $W_0$ , 从而求得稳定状态概率

选择  $M_0$  为参考状态, 分别求得  $V_{ij}$ ,  $ST_i$  和  $W_0$ , 从而求得稳定状态概率

$P[M_0] = 0.1983$ ,  $P[M_1] = 0.0361$ ,  $P[M_2] = 0.1757$ ,  $P[M_3] = 0.1877$ ,  $P[M_4] = 0.0451$ ,  $P[M_5] = 0.3489$ ,  $P[M_6] = 0.00812$ .

4) 性能指标分析. 设  $G_i$  是能使  $t_i$  激发的状态集合, 则该变迁的平均激发速率为  $f_i = t_i \times \sum_{m \in G_i} P[m]$ . 在本例中, 变迁 client 每实施一次就代表整个系统完成一次, 该方案总的实施时间为  $1/f_{client}$ . 从标识  $M_6$  返回  $M_6$  的时间就是组合服务的运行时间. 即总时间减去服务调用时间  $1/\lambda_{client}$ . 因此, 组合 Web 服务的运行时间是  $1/f_{client} - 1/\lambda_{client} = 122.2\text{ms}$ .

同样的方法可以求出支撑集  $I_2$  对应的 Web 服务组合方案的运行时间是  $148.8\text{ms}$ . 因此, 图 2 的 Petri 网模型是最佳组合方案.

### 3 相关工作对比分析

根据理论基础不同, 动态 Web 服务组合可以分为基于 AI<sup>[6-7]</sup> 规划的方法和基于演绎推理式定理证明的方法<sup>[8]</sup>. 为了检验基于 Petri 网的 Web 服务选择算法的有效性, 针对 2.1 节的研究示例, 采用随机 Petri 网的仿真实验来比较不同方法产生的组合服务的吞吐率. 将本文提出的方法与文献[6]中基于图形搜索的算法以及文献[8]中的基于逻辑的算法进行比较.

首先将三种方法产生的服务组合方案都转化为随机 Petri 网模型, 对它们模型的吞吐率进行比较. 系统吞吐率的计算公式是  $\lambda_{client}(P)$ , 其中  $P$  是使变迁 client 触发的概率. 图 3 描述了随服务调用速率  $\lambda_{client}$  的变化, 组合服务吞吐率的变化曲线. 可以看出当调用速率相同的情况下, 基于逻辑的算法产生的服务组合的吞吐率最低. 这是由于该组合方案只有顺序结构, 服务运行时间最长. 基于图形搜索的算法产生的方案吞吐率中等. 因为该算法没有对产生的服务组合方案进行最优化选择. 基于 Petri 网的方法吞吐率最高.

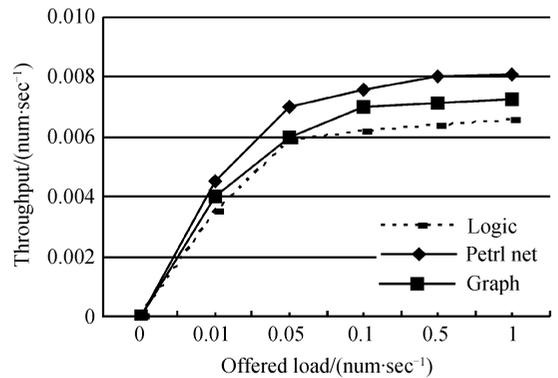


图 3 不同方法产生组合方案的吞吐率比较

Fig. 3 Throughput of comparison of composition plan using different methods

### 4 结论

本文针对光网络 Web 服务的组合问题, 提出一种基于 Petri 网的动态 Web 服务组合的选择策略. 通过使用 Petri 网对基于光网络 Web 服务组合方案进行自动建模, 使用 GSPN 评估服务组合方案的性能. 充分利用 Petri 网的善于描述、分析评价并发系统的特点, 自动完成最优组合 Web 服务方案的生成、选择以及转换.

#### 参考文献

- [1] GUAN Ai-hong, SUN Jun-qiang. A low crosstalk and low attenuation photonic switching network for WDM networks [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(1): 99-103.  
管爱红, 孙军强. 用于 WDM 光网络的一种低串扰无损耗光开

- 关矩阵[J]. 光子学报, 2007, **36**(1): 99-103.
- [2] GAO Hong-wei, YUAN Shu-zhong, Liu Bo, *et al.* Two level demodulated FBG sensing multiplexing technique [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(4): 569-572.  
高宏伟, 袁树忠, 刘波, 等. 两级解调 FBG 传感复用技术[J]. 光子学报, 2006, **35**(4): 569-572.
- [3] LIN Chuang. Stochastic Petri net and system performance evaluation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.  
林闯. 随机 Petri 网和系统性能评价[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [4] TANG Xian-Fei, JIANG Chang-jun, DING Zhi-jun, *et al.* A Petri net-based semantic web service automatic composition method[J]. *Journal of Software*, 2007, **18**(12): 2291-3000.  
汤宪飞, 蒋昌俊, 丁志军, 等. 基于 Petri 网的语义 Web 服务自动组合方法[J]. 软件学报, 2007, **18**(12): 2291-3000.
- [5] LIN C, CHAUDHURY A, WHISTON A B, *et al.* Logical inference of horn clauses in Petri net models[J]. *IEEE Trans on Knowledge and Data Engineering*, 1993, **4**(3): 416-426.
- [6] PRABHU S. Towards distributed dynamic web service composition [C]. *Proceedings of the Eighth International Symposium on Autonomous Decentralized Systems*. Washington DC: IEEE Computer Society, 2007: 25-32.
- [7] SIRIN E, PARSIA B, WU D, *et al.* HTN planning for web service composition using SHOP2 [J]. *Journal of Web Semantics*, 2004, **1**(4): 377-396.
- [8] RAO Jing-hai, KÜ NGAS P, MATSKIN M. Logic-based web services composition: from service description to process model [C]. *Proceedings of the IEEE International Conference on Web Services*. Washington DC: IEEE Computer Society, 2004: 446-453.

## Choice Strategy of Dynamic Web Service Combination

MEN Peng, DUAN Zhen-hua

(Institute of Computing Theory and Technology, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Received date: 2008-01-14

**Abstract:** In order to improve the utilization rate of optical network, an approach of selecting the top quality web services composition based on Petri nets was presented. A Petri net model, which represented the data dependent relationship between the service composition according to consumers' demands and the current available services, was obtained. By calculating the  $T$ -variables relationships of the Petri net, plans of the service composition were obtained. And, the generalized stochastic Petri net (GSPN) was employed to analyze the performance of the plan. Compared with other approaches available, the results show that the presented method takes full advantages of Petri nets, such as easy description, analysis and evaluation of the systems, and can obtain the best plan of Web service compositions.

**Key words:** Web services composition; Petri net; Optical networks



**MEN Peng** was born in 1978. He is pursuing his Ph. D. degree at Institute of Computing Theory and Technology, Xidian University, and his research interests focus on Petri nets and web services.