

## 面向服务簇的服务流程构建

胡 强\*

(青岛科技大学 信息科学技术学院, 山东 青岛 266061)

(\*通信作者电子邮箱 huqiang200280@163.com)

**摘 要:** 为了减少服务流程的构建时间, 优化流程的服务质量, 增强流程响应自适应性, 提出一种面向服务簇的流程构建方法。采用服务簇作为组成服务流程的基本单位, 将服务流程的构建划分为面向簇的流程服务推荐和最优服务流程质量计算两个阶段, 并给出具体实现方案。仿真实验以 10 000 个 Web 服务和不同的流程模式作为测试源, 与面向原子服务组建的服务流程相比, 面向簇构建服务流程及服务失效时的流程重构时间均至少降低 50%, 而构建的服务流程质量至少提高 10%。仿真结果表明该方法可以有效缩减流程组建时间, 提高构建流程的服务质量, 增强流程响应自适应性。

**关键词:** 服务簇; 服务流程; 服务推荐; 服务质量; 服务网

**中图分类号:** TP302.1 **文献标志码:** A

### Construction of service processes oriented to service clusters

HU Qiang\*

(School of Information Science and Technology, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao Shandong 266061 China)

**Abstract:** To reduce the building time, optimize the service qualities and improve the adaptive response of service processes, a method to construct service processes based on service clusters was proposed. Service clusters were adopted as the component units in the service processes. The process to build service processes were divided into two phases: recommending the component services oriented to service clusters and computing the optimal service qualities of service processes. The corresponding solutions were also given. The simulation experiment was conducted on 10 000 Web services with different process patterns. Compared with the service processes constructed on atomic Web services, the building and rebuilding times were decreased more than 50% and the service qualities were improved more than 10%. The simulation results confirm the proposed method can greatly reduce the building time and optimize the service qualities and adaptive response in the process of building service processes.

**Key words:** service cluster; service process; service recommend; service quality; service net

## 0 引言

通过调用和集成 Web 服务可以有效地降低新系统的开发难度, 提高开发效率。Web 服务通常被设计得功能粒度较小, 一些复杂的业务功能需要借助于组合的方式构建服务流程来实现。目前服务组合方法的研究已经取得较多成果, 例如, 基于动态规划的组合方法<sup>[1]</sup>、数据驱动的服务流程构建方法<sup>[2]</sup>、面向随机服务质量的服务组合方法<sup>[3]</sup>, 以及改进粒子群算法的服务组合方法<sup>[4]</sup>等。上述方法均以原子 Web 服务作为流程构建的组成单位, 构建服务流程时服务查找空间过大, 因此构建服务流程的时间代价较大, 难以保证流程的服务质量, 且服务流程缺乏柔性, 流程响应的自适应性(流程自动适应外部环境变化的能力)较差。

服务流程在使用过程中面临以下三方面的问题: 1) 流程处于动态多变的分布式应用环境中, 在流程应用过程中, 某些组成服务可能失效; 2) 随着业务流程的推进, 用户的需求可能发生细微改变; 3) 不同用户对实现同一服务功能的流程服务质量的要求不同, 流程难以复用。针对这些问题, 以往研究

中的服务流程构建方法只能花费巨大代价进行流程的二次构建, 难以快速应对流程变化的需求, 因此需要寻找一种新的流程构建方法来应对上述问题。

为了提高服务流程响应的自适应性, 优化流程质量且有效降低流程构建时间, 可以从两个角度对服务流程进行改进: 一是构建柔性的服务流程结构; 二是增强流程的组成服务的自适应性能力。有关柔性流程结构的构建研究在工作流<sup>[5-7]</sup>等领域已经进行了深入研究并取得了一系列的研究成果, 上述成果可以直接用于组合服务流程的结构构建中。本文从第二个角度进行探讨, 提出一种面向服务簇的流程构建方法, 通过服务簇替代组成流程的原子服务, 从而有效克服现有流程构建方法的不足。

## 1 面向服务簇的服务响应体系结构

在以往的研究中, 分组处理的思想已经被应用到 Web 服务的管理中, 研究者提出服务组<sup>[8]</sup>、服务池<sup>[9]</sup>、服务社区<sup>[10]</sup>、服务容器<sup>[11]</sup>等概念, 但上述概念中要求分组的 Web 服务具备相同的接口参数以及功能, 服务响应的自适应性与普通

收稿日期: 2013-12-06; 修回日期: 2014-01-13。

基金项目: 国家 973 计划项目(2010CB328101); 国家自然科学基金资助项目(61170078, 61273180); 山东省教育厅计划项目(J12LN11)。

作者简介: 胡强(1980-), 男, 山东邹城人, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向: 服务计算、软件形式化建模与验证。

Web 服务相比并未见显著改进。

本文提出的服务簇是将一组功能和接口相同或相似的服务聚集在一起,具有较强的功能和响应自适应性,有关面向服务簇的体系结构和实现机制可以参见文献[12]。

图1给出了面向服务簇的服务响应体系结构,与传统的面向服务体系结构(Service Oriented Architecture, SOA)相比,该体系结构增加了虚拟资源层,并在该层次中将网络(物理资源层)中的 Web 服务聚类为服务簇,而服务簇作为基本单位替代传统 SOA 中的原子服务响应来自于业务模型层的服务请求。

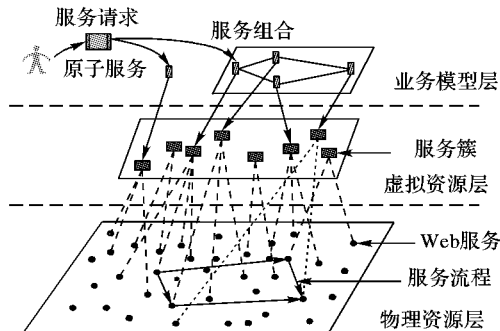


图1 面向服务簇的服务响应体系结构

利用6元组  $ws = (W_{id}, W_{des}, I, O, Q, L)$  表示 Web 服务。其中:  $W_{id}$  是服务标识,  $W_{des}$  为服务的功能描述,  $I$  和  $O$  是服务的输入和输出参数集合,  $Q$  是质量参数集,  $L$  为服务的 URI 地址。服务功能描述以  $W_{des} = (Ob, Ac)$  给出,其中:  $Ob$  是服务处理对象,  $Ac$  是执行的操作。质量参数集  $Q = \{N, C, V, U\}$ , 其中:  $N$  为服务质量参数名称,  $C$  是比较运算符,  $V$  是参数的值,  $U$  是参数的单位。

例如,机票预定 Web 服务的  $W_{des}$  设置为 (flight, book)。若  $q = (Co, =, 0, \$)$ , 则表示该服务是免费使用的。为提高服务簇中原子服务的发现速度,从而缩减服务流程的构建时间,在文献[12]的基础上给出改进后的服务簇定义。

**定义1** 服务簇。

服务簇定义为一个6元组,  $Sc = (C_{id}, C_{des}, P, S_w, Q_c, F)$ , 其中:

- 1)  $C_{id}$  是服务簇的标识;
- 2)  $C_{des}$  是服务簇的功能描述;
- 3)  $P$  为服务簇中所有服务的输入和输出参数列表, 该列表是一个有序列表;

表是一个有序列表;

4)  $S_w = \{ws_1, ws_2, \dots, ws_n\}$  是构成服务簇的 Web 服务集合;

5)  $Q_c = \{q_i\}$ ,  $q_i = \{N, C, [V_{min}, V_{max}], U\}$  为服务簇质量参数集合;

6)  $F$  是服务簇可接受和提供的接口参量序列表。

网络中的 Web 服务由不同的提供者发布,在进行功能和参数描述时采用的术语不同,本文假定同一个领域内服务采用相同的描述术语,对同一类概念的不同术语描述,则借助于语义以及领域本体概念进行标准化和统一化。表1中给出了4个可以进行机票查询的 Web 服务描述,表2则是利用表1中的4个服务构建的一个机票查询服务簇。

在构建服务簇  $S_1$  时,首先将其服务集合  $S_w$  中每个服务的参数对比  $P$  中参数列表顺序进行向量化,对给定的服务  $ws$  按照  $P$  中参数列表顺序,如果其存在相应的参数,用数字1替换;若不存在,则用数字0替换。在本例中  $P = \langle date, dep, des, pasttype, class, airline, price, deptime, arritime, remainder, planemode, company \rangle$ , 基于  $P$  中的参数顺序,  $ws_1$  至  $ws_4$  对应的参数可以映射为4个参数向量,分别为  $[111001111100]$ 、 $[111011111110]$ 、 $[111101111110]$  以及  $[111101111101]$ 。若服务  $ws$  的参数向量  $\delta = [a_n a_{n-1} \dots a_2 a_1]$ ,

构建函数  $f(\delta) = \sum_{i=1}^n a_i \times 2^{i-1}$ ,  $ws$  对应的接口参量序列为  $f(\delta)$ 。  $F$  则是一个服务簇所有组成服务的接口参量序列的集合构成的列表,本例中  $F = 3708-3838-3966-3965$ 。

在服务簇中,簇的质量参数集合应能反映该簇中所有组成服务的共同质量属性,因此引入区间法表示服务簇的质量参数。例如,响应时间参数  $(Rt, <, [1, 7], ms)$  表示该簇的组成服务中最小响应时间小于1ms,最大响应时间小于7ms。

## 2 面向簇的服务流程

本文不再研究如何根据用户的需求动态构建服务流程,而是假设流程结构已经构建完毕,以服务簇作为流程组成的基本单位,建立面向服务簇的服务流程。为了缩减簇流程构建时间,提高构建流程的服务质量和响应自适应性,本章从流程组成服务推荐以及质量组合优化角度对面向簇的服务流程进行探讨。

表1 机票查询 Web 服务

$W_{id}$	$W_{des}$	$I$	$O$	$Q$
$ws_1$	flight, query	date, dep, des	airline, deptime, arritime, price, remainder	$(Rt, <, 5, ms), (Co, =, 0.0, \$)$ $(Rr, >, 96, \%)$
$ws_2$	flight, query	date, dep, des, class	airline, deptime, arritime, price, remainder, planemode	$(Rt, <, 2, ms), (Co, =, 0.01, \$)$ $(Rr, >, 98, \%)$
$ws_3$	flight, query	date, dep, des, pasttype	airline, deptime, arritime, price, remainder, planemode	$(Rt, <, 7, ms), (Co, =, 0.0, \$)$ $(Rr, >, 92, \%)$
$ws_4$	flight, inquire	date, dep, des, pasttype	airline, deptime, arritime, price, remainder, company	$(Rt, <, 1, ms), (Co, =, 0.02, \$)$ $(Rr, >, 99, \%)$

表2 机票查询服务簇

$C_{id}$	$C_{des}$	$P$	$S_w$	$Q_c$	$F$
$S_1$	flight; query	date; dep; des; pasttype; class; airline; price; deptime; arritime; remainder; planemode; company	$ws_1, ws_2, ws_3, ws_4$	$(Rt, <, [1, 7], ms), (Co, =, [0.02, 0.01], \$), (Rr, >, [92, 99], \%)$	3708-3838-3966-3965

## 2.1 流程的组成服务推荐

以服务簇作为响应单位,为服务流程推荐组成服务,其本质是面向簇的服务查找。令  $NR = (R, I, O, Q)$  为对流程中某一个组成节点的服务请求,其中: $R$  为服务请求的功能描述, $I$  为可以提供的输入参数, $O$  为期望获取的输出参数, $Q$  为对服务节点的质量约束。下面介绍几个在服务推荐时用到的定义<sup>[12]</sup>。

**定义2** 语义相似度。

$CCP$  是领域本体树中本体概念  $O_1$  和  $O_2$  最近的父节点,  $Level(CCP)$ 、 $level(O_1)$  和  $level(O_2)$  表示  $CCP$ 、 $O_1$  和  $O_2$  在本体树中的深度,且根节点  $O_{top}$  的  $level(O_{top}) = 1$ ,则  $O_1$  和  $O_2$  的语义距离为:

$$dist(O_1, O_2) = \begin{cases} (2^{-level(CCP)} - 2^{-level(O_1)}) + (2^{-level(CCP)} - 2^{-level(O_2)}), & O_1 \neq O_2 \\ 0, & O_1 = O_2 \end{cases}$$

语义相似度定义  $SeSim(O_1, O_2) = 1 - dist(O_1, O_2)$ 。

**定义3** 值覆盖参数。

$Pa$  和  $Pb$  是两组参数, $Pa$  称为  $Pb$  的值覆盖参数,记为  $Pa > Pb$ , 当且仅当:

- 1)  $Num(Pa) \leq Num(Pb)$ ,  $Num(p)$  表示参数  $p$  的个数;
  - 2)  $\forall m_i \in Pa, \exists n_j \in Pb, Type(m_i) \supseteq Type(n_j)$ ,  $Type(p)$  表示参数  $p$  的类型;
  - 3)  $\forall m_i \in Pb, \exists n_j \in Pa$ , 满足  $Value(m_i) \subseteq Value(n_j)$ ,  $Value(p)$  表示  $p$  的取值范围。
- 例如, $r$  为一个服务请求,  $r.Q = \{(Rr, >, [95, \%]), (Rp, =, 0, \$), (Rt, <, 1, ms)\}$ ,  $s$  是一个服务簇,  $s.Qc = \{(Rr, >, [93, 98], \%), (Co, =, [0, 0.02], \$), (Rt, <, [1, 4], ms)\}$ , 则  $s.Qc > r.Q$ 。

在进行服务推荐时,首先进行功能和接口的匹配,然后求解满足服务质量约束的推荐服务子集。令  $SC$  表示构建服务流程的可选服务簇集合, $sc$  表示其中的一个服务簇, $NR$  为服务请求,  $Res-sc(NR)$  为响应服务簇集合,  $Rec-us(NR)$  表示为  $NR$  推荐的服务集合。为了计算功能的相似度,通常给定一个阈值  $\varepsilon$ ,若  $SeSim(O_1, O_2) > \varepsilon$ ,则认为  $O_1$  和  $O_2$  是语义等价的, $\varepsilon$  需要根据领域本体树的具体构建方式设置,通常设置值不低于 0.9。

基于上述定义可知响应服务簇集合为  $Res-sc(NR) = \{sc \in SC \mid SeSim(NR.R, sc.C_{de}) > \varepsilon \wedge f(NR.I, NR.O) \in sc.F \wedge sc.Qc > NR.Q\}$ , 服务推荐集合  $Rec(NR) = \{us \mid \forall us \in Res-sc(NR) \wedge f(NR.I, NR.O) = f(us.I, us.O) \wedge us.Q > NR.Q\}$ 。由于单个服务质量最优组成的服务流程的质量并不一定是最优化的,此处得到的  $Rec(NR)$  为能够满足服务请求接口和质量要求的服务集合,并未推荐质量最优化的服务,2.2节将从服务流程角度推荐一组最优化的服务来组建服务流程。

## 2.2 流程的质量优化

### 2.2.1 流程的形式化表示

逻辑 Petri 网是将逻辑表达式附加到部分变迁而得到的一种高级 Petri 网,在以往的研究中被成功的用于实时协作系

统<sup>[13]</sup>、E-Commerce 工作流<sup>[14]</sup>以及网上股票交易系统<sup>[15]</sup>的建模与分析,本文采用逻辑 Petri 网描述面向簇的服务流程,利用变迁表示流程中的服务簇,将得到的网系统称为服务网,下面给出服务网的简要定义。

**定义4** 服务网。

设  $LN = (P, T, F, I, O)$ , 则  $SN = (LN, M)$  称为服务网,其中:

- 1)  $P$  是一个有限的库所集合。
- 2)  $T = T_D \cup T_I \cup T_O$  为一个有限的变迁集合,且  $T \cup P \neq \emptyset, \forall t \in T_I \cup T_O: t \cap t' = \emptyset$ , 其中:
  - a)  $T_D$  表示组成服务流程的服务簇集合;
  - b)  $T_I$  表示逻辑输入变迁的集合,对  $\forall t \in T_I$ , 变迁  $t$  的触发受到  $t$  的输入库所集上的逻辑表达式  $f_i(t)$  的控制;
  - c)  $T_O$  表示逻辑输出变迁的集合,对  $\forall t \in T_O$ , 变迁  $t$  触发后的结果受  $t$  的输出库所集上的逻辑表达式  $f_o(t)$  的限制。
- 3)  $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$  是一个有限的弧的集合。
- 4)  $I$  为一个从逻辑输入变迁到逻辑输入表达式的映射,即  $\forall t \in T_I, I(t) = f_i(t)$ 。
- 5)  $O$  为一个从逻辑输出变迁到逻辑输出表达式的映射,即  $\forall t \in T_O, O(t) = f_o(t)$ 。
- 6)  $M: P \rightarrow \{0, 1\}$  是一个标识函数。

目前用于服务组合流程描述的语言较多,如 WS-BPEL、WS-GDL、WSC 以及 XLANG,但 WS-BPEL 是当前应用最为广泛的业界标准,已有不少文献给出了 WS-BPEL 与 Petri 网模型之间的映射准则。为了能够计算和评价面向服务簇的服务流程的质量,给出了 WS-BPEL 基本控制结构与服务网之间的转换规则,如图2所示。

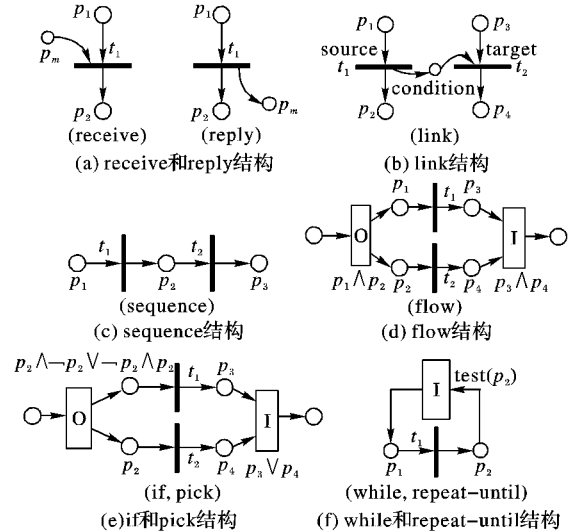


图2 WS-BPEL 逻辑控制结构与服务网的转化规则

### 2.2.2 质量最优化的服务流程

面向服务簇的服务流程中,组成流程的服务响应单位是服务簇,而一个服务簇中可能存在多个服务均可满足构建服务流程的要求,因此在2.1节服务推荐产生的是一个从功能和接口上均可以满足指定需求的服务集合,该推荐集合中的服务具备不同的服务质量,本节则从流程角度给出一种质量最优化的服务流程构建方法。

服务的质量参数可以划分为两大类,一类是数值越大服



务质量越高,如可靠性、响应率以及负载量等,这类参数称为正向参数;一类则是数值越小服务质量越高,如服务费用及响应时间等,这类参数称为负向参数。为了对服务质量进行量化,必须将这些参数标准化评分。

**定义5** 服务质量评分。

$S = \{ws_1, ws_2, \dots, ws_m\}$  为一组 Web 服务,假设  $S$  中的每个服务具有  $n$  个质量参数,  $[q_{11}, q_{12}, \dots, q_{1n}]$  是服务  $s_i$  的质量参数组成的向量,  $s_i$  的服务质量评分为:

$$score(s_i) = \sum_{j=1}^n q_{ij} * w_j; \sum_{j=1}^n w_j = 1 \quad (1)$$

$$q_{ij} = \begin{cases} \frac{q_j^{\max} - q_{ij}}{q_j^{\max} - q_j^{\min}}, & q_j^{\max} - q_j^{\min} \neq 0 \\ 1, & q_j^{\max} - q_j^{\min} = 0; \end{cases} \quad (2)$$

$$q_{ij} = \begin{cases} \frac{q_{ij} - q_j^{\min}}{q_j^{\max} - q_j^{\min}}, & q_j^{\max} - q_j^{\min} \neq 0 \\ 1, & q_j^{\max} - q_j^{\min} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式(1)用于计算  $s_i$  的服务质量评分,其中的参数  $w_j$  用于设置各个质量参数的权重;式(2)和(3)分别用于负向质量参数与正向质量参数的标准化。

表3 流程服务质量计算方法

QoS 属性	顺序	选择	并发	循环
$T(q)$	$\sum_{i=1}^n T(t_i)$	$\text{Max}\{T(t_i)\}$	$\text{Max}\{T(t_i)\}$	$K * T(t_i)$
$C(q)$	$\sum_{i=1}^n C(t_i)$	$\text{Max}\{C(t_i)\}$	$\sum_{i=1}^n C(t_i)$	$K * C(t_i)$
$R(q)$	$\prod_{i=1}^n R(t_i)$	$\text{Min}\{R(t_i)\}$	$\prod_{i=1}^n R(t_i)$	$K * R(t_i)$

注:  $i = 1, 2, \dots, n$ 。

图2所示的转化规则中,只有 sequence(顺序)、flow(并发)、if/pick(选择)以及 while/repeat-until(循环)四种结构对流程全局质量产生影响。在对服务质量标准化后,对给定的服务流程结构,选取组成节点服务簇中的不同服务,流程的整体服务质量是不同的。假设在选择结构中各个组成成分支可以得到执行,循环结构中的循环执行次数为  $K$  次。由于服务流程中涉及到的服务质量参数较多,在此仅以时间、费用代价以及响应率三个质量参数为例,令组成流程的服务  $t_i$  所对应的时间、费用代价以及响应率分别表示为  $T(t_i)$ 、 $C(t_i)$  以及  $R(t_i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ 。表3给出了图2中所示的四种流程基本控制结构的服务质量计算方法,其他服务质量参数处理方法类似,在此不再叙述。

在将 WS-BPEL 流程转化为服务网的过程中,需要分层次记录流程中涉及到的四种基本结构的流程片段,然后利用 2.2.2 节提供的流程质量求解方法,求解出流程质量的计算公式。进一步根据流程中的节点服务请求,为每个节点绑定一个服务簇,利用 2.1 节的方法求解每个响应簇的推荐服务集,从而将服务网中  $T_b$  集合进行有效缩减,再将服务推荐集合中的服务质量参数分别导入流程质量的计算公式,从而求解最优的服务流程路径。

为了简化流程质量求解,通常将循环结构中的循环次数  $K$  设置为 1。对于一些嵌套层次较多的复杂流程,需要根据表3

中的计算公式进行递归推导。

### 3 仿真实验

本文仿真实验采用与文献[12]相同的软硬件环境:CPU 为 i3 2120, 3.3 GHz, 内存 2 GB, 操作系统 Windows 7, 仿真程序采用 Java 进行开发。领域本体树的宽度为 6, 深度为 8, 叶子节点表示本体概念, 实验中所用的服务及服务簇涉及到的语法描述均基于所构建本体树中的概念。Web 服务的数目设置为 10000, 实验进行 5 个轮次, 每个轮次对应的服务簇数目  $N$  分别 30, 50, 80, 100 以及 200, 每次实验过程中每个簇中的服务数量和接口随机生成, 为确保簇的质量, 每个服务簇中服务的数量  $n$  满足  $0.2N \leq n \leq 2N$ 。

在实验过程中, 对每个轮次的实验, 服务流程的节点分别选取 3, 7 以及 10, 流程模式随机指定, 每种节点数目的流程分别进行实验 10 次, 取其平均值作为实验结果; 对于实验过程中无法从随机生成的服务簇和服务中构成服务流程的实验进行删除, 不作时间统计。

从图3可看出, 面向原子服务和面向簇构建相同的服务流程的时间以及流程重构花费差距均在 50% 以上。服务构建时间的降低显示了面向服务簇的方法构建流程时间得到了大幅度缩减, 而流程重构时间的降低则显示了构建流程具有良好的响应适应性。图4中的服务流程质量对比曲线显示, 面向服务簇构建的服务流程的服务质量至少高于面向原子服务构建的服务流程质量 10%, 因此, 该方法进一步提高了流程的服务质量。

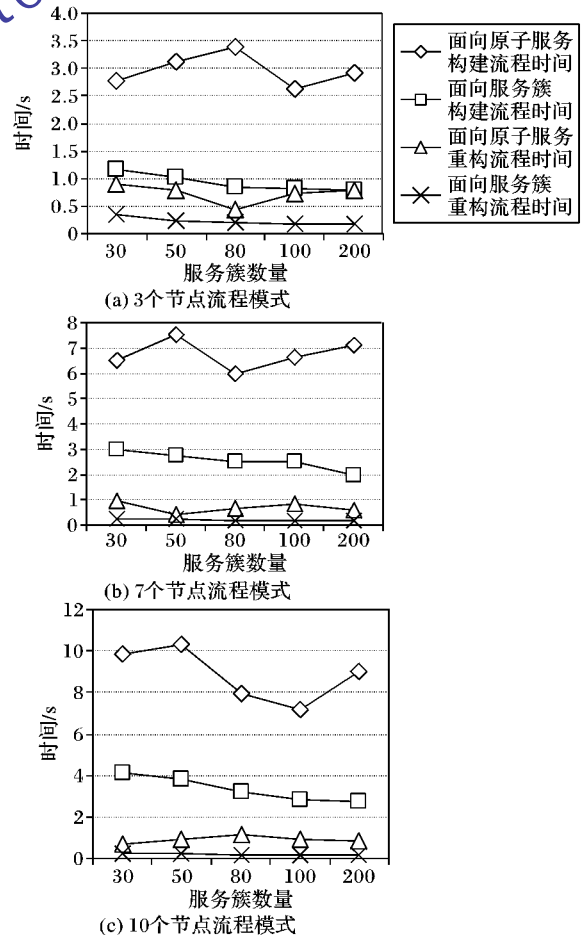


图3 流程构建与重构时间

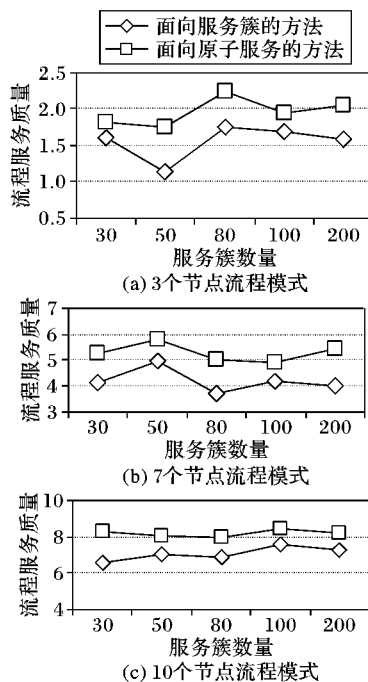


图4 流程的服务质量评分

#### 4 结语

面向服务簇构建服务流程的方法增大了流程中服务响应的粒度,从而缩减了组成服务的查找空间,有效减少了服务流程构建时间。利用逻辑 Petri 网建模服务流程,给出了流程服务质量的计算方法,在流程推荐服务集的基础上求解质量最佳的服务流程,提高了流程服务质量;在服务推荐集的基础上可以快速进行流程重构,提高了流程响应自适应性。开发了相应的仿真平台,仿真实验证明了该方法的有效性。

#### 参考文献:

- [1] KUZU M, CICEKLI N K. Dynamic planning approach to automated Web service composition [J]. *Applied Intelligence*, 2012, 36(1): 1-28.
- [2] TAN W, FAN Y, ZHOU M C, *et al.* Data-driven service composition in enterprise SOA solutions: a Petri net approach [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2010, 7(3): 686-694.
- [3] FAN X, JIANG C, WANG J, *et al.* Random-QoS-aware reliable Web service composition [J]. *Chinese Journal of Software*, 2009, 20(3): 546-556. (范小芹, 蒋昌俊, 王俊丽, 等. 随机QoS感知的可靠 Web 服务组合 [J]. *软件学报*, 2009, 20(3): 546-556.)
- [4] WEN T, SHENG G J, GUO Q, *et al.* Web service composition based on modified particle swarm optimization [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2013, 36(5): 1031-1046. (温涛, 盛国军, 郭权, 等. 基于改进粒子群算法的 Web 服务组合 [J]. *计算机学报*, 2013, 36(5): 1031-1046.)
- [5] da SILVA L M, BRAGA R, CAMPOS F. Composer-Science: a semantic service based framework for workflow composition in e-Science projects [J]. *Information Sciences*, 2012, 186(1): 186-208.
- [6] WEI L, LI Y, ZHAO Q, *et al.* Dynamic changing model of workflow process based on adaptive component [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2010, 16(12): 2603-2610. (魏乐, 李亚玲, 赵秋云, 等. 基于自适应构件的工作流流程动态变更模型 [J]. *计算机集成制造系统*, 2010, 16(12): 2603-2610.)
- [7] DORN C, TAYLOR R N, DUSTDAR S. Flexible social workflows: collaborations as human architecture [J]. *IEEE Internet Computing*, 2012, 16(2): 72-77.
- [8] MAGUIRE T, SNELLING D. Web services service group 1.2 [M]. 2nd ed. London: OASIS, 2006: 1-42.
- [9] LIU X, HUANG G, MEI H. Discovering homogeneous Web service community in the user-centric Web environment [J]. *IEEE Transactions on Service Computing*, 2009, 2(2): 167-181.
- [10] SHENG Q Z, BEN TALIAH B, MAAMAR Z, *et al.* Configurable composition and adaptive provisioning of Web services [J]. *IEEE Transactions on Services Computing*, 2009, 2(1): 34-49.
- [11] BEN TALIAH B, SHENG Q Z, DUMAS M. The Self-Serv environment for Web services composition [J]. *IEEE Internet Computing*, 2003, 7(1): 40-48.
- [12] HU Q, DU Y. Service architecture and service discovery oriented to service clusters [J]. *Journal of Computer Applications*, 2013, 33(8): 2163-2166. (胡强, 杜玉越. 面向服务簇的服务体系结构及服务发现 [J]. *计算机应用*, 2013, 33(8): 2163-2166.)
- [13] DU Y, JIANG C, ZHOU M. Modeling and analysis of real-time cooperative systems using Petri nets [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A*, 2007, 37(5): 643-654.
- [14] DU Y, JIANG C, ZHOU M, *et al.* Modeling and monitoring of e-commerce workflows [J]. *Information Sciences*, 2009, 179(7): 995-1006.
- [15] DU Y, JIANG C, ZHOU M. A Petri-net-based correctness analysis of Internet stock trading systems [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C*, 2008, 38(1): 93-99.
- [8] LIU L, WU J. Test case generation for Web applications based on UML activity diagram [J]. *Journal of Jiangnan University: Natural Science*, 2011, 10(3): 283-288. (刘龙霞, 吴军华. 基于 UML 活动图的 Web 应用测试用例生成 [J]. *江南大学学报: 自然科学版*, 2011, 10(3): 283-288.)
- [9] DU J, LU Y. Model for vulnerability testing of Web-based application [J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2009, 30(12): 2398-2403. (杜经农, 卢发生. 一种 Web 应用软件安全脆弱性测试模型 [J]. *小型微型计算机系统*, 2009, 30(12): 2398-2403.)
- [10] HE K, LI X, FENG Z. Approach to activity diagram model driven testing for Web applications [J]. *Journal of Computer Applications*, 2010, 30(9): 2365-2369. (何可, 李晓红, 冯志勇. 活动图模型驱动的 Web 应用程序测试方法 [J]. *计算机应用*, 2010, 30(9): 2365-2369.)
- [11] QIAN Z, MIAO H. Efficient Web software testing method [J]. *Computer Science*, 2011, 38(2): 152-159. (钱忠胜, 缪淮扣. Web 软件的一种有效测试方法 [J]. *计算机科学*, 2011, 38(2): 152-159.)
- [12] QIAN Z. An approach to generating tests for Web applications based on relation graph [J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2013, 34(3): 486-491. (钱忠胜. 一种基于关系图的 Web 应用测试生成方法 [J]. *小型微型计算机系统*, 2013, 34(3): 486-491.)

(上接第 1782 页)