

基于服务簇的服务组合替换与分析

杜玉越, 薛 洁, 李彦成

(山东科技大学信息科学与工程学院, 山东青岛 266590)

摘 要: 提出了一种基于服务簇的服务替换方法. 将服务库中服务聚类形成服务簇, 并建立相应的服务簇网元及其矩阵模型. 假设基于服务簇的服务组合已建立, 通过分析服务组合流程, 构建了组合服务网模型. 根据失效服务网元标准矩阵和组合服务网模型, 提出了一种替换服务的快速查找与替换算法. 实验结果例证了本文方法的正确性和有效性, 并表明基于失效服务网元标准矩阵实施服务替换, 可提高服务的替换效率, 保持服务组合模型的健壮性.

关键词: 服务簇; 服务组合; 服务簇网元; 服务替换; Petri 网

中图分类号: TP311 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2014)11-2231-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.11.016

Substitution and Analysis of Service Composition Based on Service Clusters

DU Yu-yue, XUE Jie, LI Yan-cheng

(College of Information Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: A service substitution method is proposed based on service clusters. The services in a service library are clustered and service clusters are formed. The net unit and matrix models of a service cluster are constructed. Assume that the service composition based on service clusters is established, the model of the combination service net is established by analyzing the combination processes. From the standard matrix model of a failure service and the model of the combination service net, a quick finding and substitution algorithm of services is presented. The correctness and validity of the proposed method are illustrated by an example. Also, the experiment results show that the efficiency of service substitution can be enhanced and the robustness of service composition can be kept based on the standard matrix model of the failure service.

Key words: service cluster; service composition; net unit model; service substitution; Petri net

1 引言

当构成组合 Web 服务的原子服务失效时, 若保持已有的服务组合模式, 需选择与其功能相似且参数匹配的服务作为替换服务. 替换成功与否取决于替换后的组合服务是否仍然满足用户需求. 因此, 服务替换是基于服务组合的, 且二者密不可分^[1].

目前, 已有一些服务替换的方法, 且得到了较好的实际应用. 在基于执行上下文感知的服务替代方法中^[2], 对服务进行定性描述, 并发现最优替代服务. 假设服务不暴露交互协议, 通过输入输出消息和 WSDL 接口包含的消息交换模式, 给出了服务替换合约理论^[3]. 针对面向服务的软件系统, 提出了一种有效的服务替换框架^[4]. 在一种基于非功能属性参数选择的服务替换方法中^[5], 实现了通过服务的非功能属性选择最优替代. 然而, 现有的服务替换方法, 存在替换效率和替换后组合

服务正确率低的问题, 且难以保持原有的服务组合模式.

本文假设基于服务簇的服务组合已建立, 提出了一种基于服务簇^[6,8]的服务替换方法, 使得替换后能保持原有服务组合模式, 有效提高了服务替换效率和正确性, 且组合模式能很好的适应网络环境的动态变化. 图 1 给出了一种基于服务簇的服务组合体系结构. 基于服务物理资源层, 建立服务虚拟资源层. 对物理资源层的服务进行服务聚类, 将功能相似的服务聚成服务簇. 基于虚拟资源层, 构建业务模型层. 基于 Petri 网对服务簇进行形式化描述, 形成服务簇网元. 因此, 一个服务簇包含了若干具有相似功能的服务, 并应用服务簇网元对服务簇进行形式化描述. 由于服务簇中服务功能相似, 这种基于服务簇的服务组合模式, 通常不因个别服务失效而改变. 若服务组合中某一服务失效, 影响了原有组合模式, 通常仅需在失效服务所在服务簇中实施服务替换.

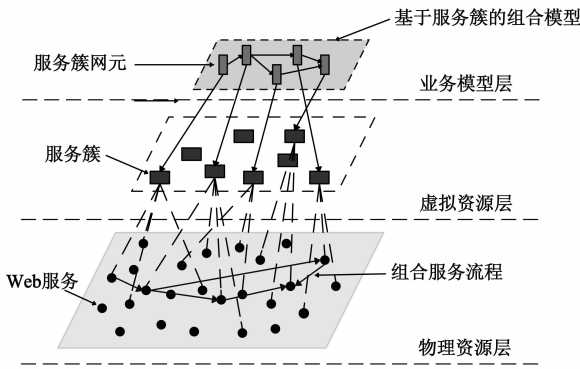


图1 基于服务簇的服务组合体系结构

2 服务簇网元模型

2.1 服务网元

本体可通过一个有向树来表示,称为本体树^[6]。

定义 1(本体向量) $E = [e_1, e_2, \dots, e_n]$ 是一个本体向量,其中 e_i 是向量 E 中用本体概念标注的第 i 个分量, $i \in \{1, \dots, n\}$ 。

基于本体向量,下面给出 Web 服务的定义。

定义 2(Web 服务) 设 E 和 F 是两个本体向量, Web 服务可以描述为一个五元组 $WS = (WN, WD, I, O, QoS)$, 其中:

- ① WN 表示 Web 服务的名称;
- ② WD 表示 Web 服务的功能描述,且用本体概念标注;
- ③ I 表示 Web 服务的输入参数集,且 $\forall wi \in I, wi = (wi.concept, wi.label)$, 其中 $wi.concept$ 表示该参数所关联的本体概念; $wi.label \in \{0, 1, \Delta\}$, $wi.label = 1$ 表示 wi 在本体向量 E 中存在且是服务发生所必需的参数, $wi.label = 0$ 则表示 wi 在本体向量 E 中存在且是服务发生非必需的参数, $wi.label = \Delta$ 表示 wi 在本体向量 E 中不存在;
- ④ O 表示 Web 服务的输出参数集,且 $\forall wo \in O, wo = (wo.concept, wo.label)$, 其中 $wo.concept$ 表示该参数所关联的本体概念; $wo.label \in \{1, \Delta\}$, $wo.label = 1$ 表示 wo 在本体向量 F 中存在, $wo.label = \Delta$ 表示 wo 在本体向量 F 中不存在;
- ⑤ QoS 提供对服务质量的描述。

对于本体向量 E 和 F , 每个服务都可由一输入向量 IV 和一个输出向量 OV 表示, 其中向量中的值是服务输入/输出参数的 $label$ 值。

基于 Petri 网^[7], 给出服务对应的网结构模型, 称为服务网元, 且每一个输入/输出库所用本体概念标记。

定义 3(服务网元) $SN = (P, t, F, M_S, M)$ 为一个服务网元, 其中:

- ① P 为服务网元的库所集, 每个库所用一个本体概念标记;
- ② t 为服务网元的变迁;
- ③ $F \subseteq (P \times t) \cup (t \times P)$, 为服务网元的流关系;
- ④ M_S 为服务网元的标识;
- ⑤ $M: P \rightarrow N$ 一个映射。

在定义 3 所描述的服务网元中, 对 $\forall p \in \cdot t$, 在该网元的服务中存在输入参数 $wi = p \mid WS$ 与之对应, 记 $p = wi.concept, M_S(p) = wi.label$ 。类似地, 对 $\forall p \in t \cdot$, 在该网元的服务中存在输出参数 $wo = p \mid WS$ 与之对应, 记 $p = wo.concept, M_S(p) = wi.label$ 。对有 n 个库所的服务网元, M_S 为一个 n 维向量, 记为 $M_S = [M_S(p_1), M_S(p_2), \dots, M_S(p_n)]$ 。

定义 4 服务网元 $SN = (P, t, F, M_S, M)$ 具有下面的变迁发生规则:

- ① 如果 $\forall p \in \cdot t: M(p) \geq M_S(p)$, 则变迁 t 在标识 M 有发生权, 记为 $M[t >]$;
- ② 若 $M[t >]$, 则 t 在标识 M 下可发生, 得到一个新标识 M' , 记作 $M[t > M']$, 且 $\forall p \in P$;

$$M'(P) = \begin{cases} M(P) - 1, & p \in \cdot t \text{ and } M_S(p) = 1 \\ M(P) + 1, & p \in t \cdot \\ M(P), & \end{cases}$$

下面给出一个例子具体介绍服务和网元的相关概念。

例 1 给定本体向量 $E = [Departure, Destination, Date, Flight type, Flight Company, Up Time, Seat type]$, $F = [Air Company, Up/Down Time, Up/Down Airport, Punctuality Rate, Price, Ticket Amount, Flight No]$ 。机票查询服务 $WS_{TQ} = (WN_{TQ}, WD_{TQ}, I_{TQ}, O_{TQ}, QoS_{TQ})$, 其中 $I_{TQ} = \{(Departure, 1), (Destination, 1), (Date, 1), (Flight Company, 0)\}$, $O_{TQ} = \{(Up/Down Time, 1), (Up/Down Airport, 1), (Price, 1), (Punctuality Rate, 1), (Ticket Amount, 1)\}$ 。

由 WS_{TQ} 知其服务网元为 $SN_{TQ} = (P_{TQ}, t_{TQ}, F_{TQ}, M_S^{TQ}, M_{TQ})$, 其中 $P = \cdot t \cup t \cdot = \{Departure, Destination, Date, Flight Company\} \cup \{Up/Down Time, Up/Down Airport, Price, Punctuality Rate, Ticket Amount\}$, $t_{TQ} = WD_{TQ}, M_S^{TQ} =$

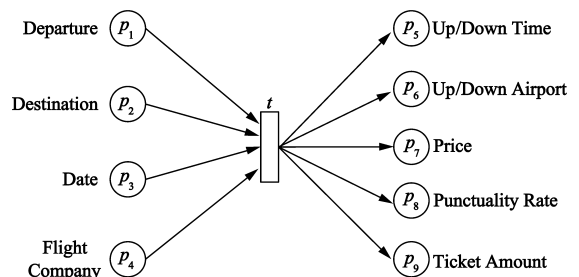


图2 机票查询服务 WS_{TQ} 的服务网元模型

[1,1,1,0,1,1,1,1]. 该服务网元如图 2 所示. 服务的输入/输出向量为: $IV_{TQ} = [1, 1, 1, \Delta, 0, \Delta, \Delta]$, $OV_{TQ} = [\Delta, 1, 1, 1, 1, \Delta]$.

2.2 服务簇网元矩阵

基于服务聚类算法, 将服务注册库中 n 个服务分成 k 个服务簇. 同一个服务簇中的服务具有相似的功能, 服务 WS_j^i 表示第 i 个簇内的第 j 个服务, 其对应的服务网元用 SN_j^i .

在服务簇内各服务的网元模型中, 对其输入/输出参数进行本体概念的标准化处理^[8]. 利用服务簇网元构建算法^[9], 建立服务簇网元模型.

定义 5(服务簇网元) 服务簇网元为一四元组 $GN = (GNI, t_{GN}, GNO; FN)$, 其中:

- ① GNI 为输入参数集, 且 $\forall ni \in GNI, ni = (ni.concept, ni.inf)$, 其中 $ni.concept$ 表示该参数所关联的本体概念; $ni.inf$ 表示该参数所包含的信息;
- ② t_{GN} 表示其变迁;
- ③ GNO 为输出参数集, 且 $\forall no \in GNO, no = (no.concept, no.inf)$, 其中 $no.concept$ 表示该参数所关

联的本体概念; $no.inf$ 表示该参数所包含的信息;

④ $FN = (GNI \times t_{GN}) \cup (t_{GN} \times GNO)$ 是其结构的流关系.

在服务簇 $WSC = \{WS_1, WS_2, \dots, WS_{|WSC|}\}$ 对应的服务簇网元 GN 中, GNI/GNO 为簇内各服务网元输入/输出参数的集合. 在定义 5 中, $ni.inf$ 和 $no.inf$ 分别为两个矩阵, 且矩阵由多个 2 维行向量构成. 以矩阵 $ni.inf$ 为例, 对 $\forall ni \in GNI$, 在服务 WS_j 中若 $\exists wi' \in I_j$ 满足 $ni.concept = wi'.concept (j \in \{1, \dots, |WSC|\})$, 则 $ni.inf$ 中的一个行向量表示为 $[ni.come, ni.label] = [WS_j, wi'.label]$, $ni.come$ 表示包含该参数的服务, 且 $ni.label$ 表示其在 $ni.come$ 对应服务中的标注雅息.

例 2 机票查询服务簇 WSC_{TQ} 包含 6 个服务, 服务网元为 $SN_1, SN_2, SN_3, SN_4, SN_5$ 和 SN_6 . 如图 3 所示.

现对各网元输入/输出参数的本体概念标准化处理^[8]. 参数处理后的结果如表 1 所示. 根据定义 5 和表 1, 机票查询服务簇 WSC_{TQ} 的网元模型如图 4 所示. 下面基于服务簇的输入/输出本体向量, 建立服务簇网元矩阵.

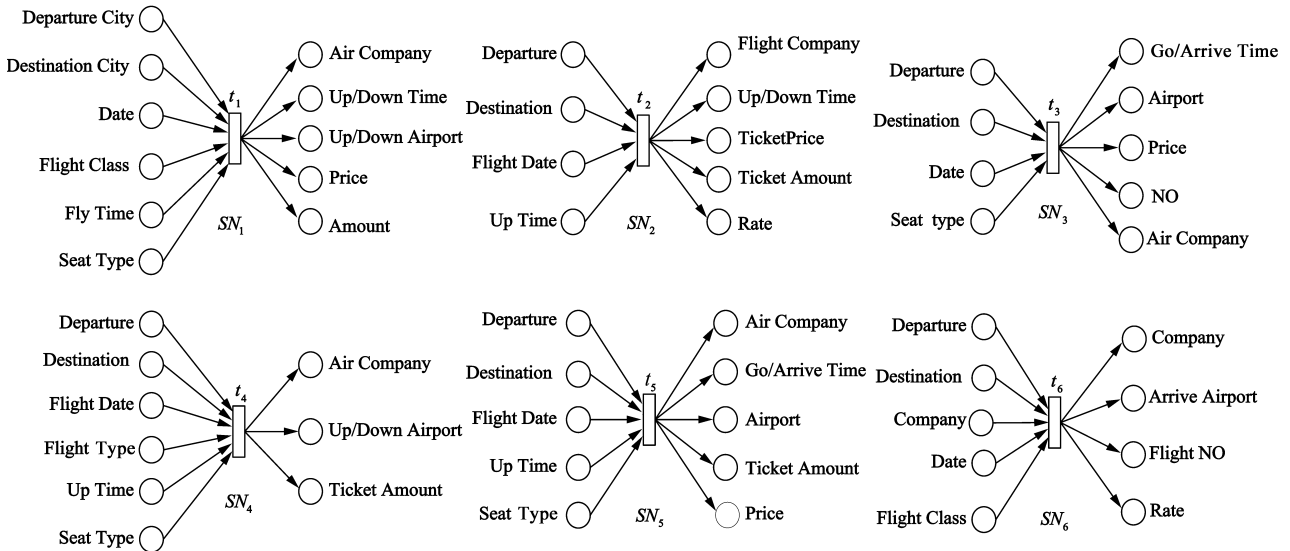


图3 WSC_{TQ} 内各服务的网元模型

表 1 服务簇参数标准化结果

	参数配对关系	统一标注		参数配对关系	统一标注
输入参数	{Departure, DepartureCity}	Departure	输出参数	{Company, AirCompany}	Company
	{Destination, Destination City}	Destination		{Up/DownTime, Go/ArriveTime}	Up/DownTime
	{FlightDate, Date}	Date		{Airport, Up/DownAirport}	Airport
	{FlightClass, FlightType}	Type		{Amount, TicketAmount}	Amount
	{Fly Time, Up Time}	Up Time		{FlightNo, No}	No
	{Company}	Company		{Rate}	Rate
	{Seat Type}	Seat Type		{Price, Ticket Price}	Price

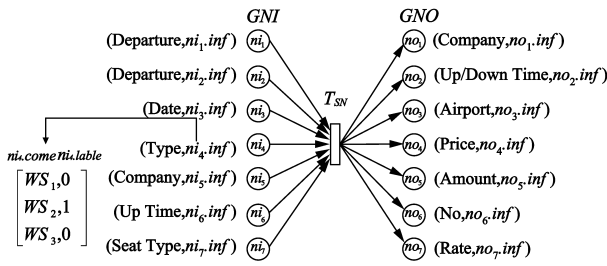


图4 机票查询服务簇 WSC_{TQ} 的网元模型

定义 6(服务簇网元矩阵) 设服务簇 WSC 的网元模型为 GN 且输入/输出本体向量为 GIV/GOV . 对 $\forall WS_j \in WSC$, 其输入和输出向量分别为 IV_j 和 OV_j , ($j \in \{1, \dots, |WSC|\}$). 服务簇网元输入矩阵为 $IM = (IV_1^T, IV_2^T, \dots, IV_{|WSC|}^T)^T$, 其输出矩阵为 $OM = (OV_1^T, OV_2^T, \dots, OV_{|WSC|}^T)^T$.

例 2 中, 服务簇 WSC_{TQ} 的输入本体向量 $GIV_{TQ} = (\text{Departure, Destination, Date, Type, Company, Up Time, Seat Type})$, 输出本体向量 $GOV_{TQ} = (\text{Company, Up/Down Time, Airport, Price, Amount, NO, Rate})$. 由定义 6, 其输入矩阵 IM 和输出矩阵 OM 可表示如下:

$$IM = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & \Delta & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & \Delta & \Delta & 0 & \Delta \\ 1 & 1 & 1 & \Delta & \Delta & \Delta & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & \Delta & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & \Delta & \Delta & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & \Delta & \Delta \end{bmatrix}$$

$$OM = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & \Delta & \Delta \\ 1 & 1 & \Delta & 1 & 1 & \Delta & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & \Delta & 1 & \Delta \\ 1 & 1 & \Delta & \Delta & 1 & \Delta & \Delta \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & \Delta & \Delta \\ 1 & \Delta & 1 & \Delta & \Delta & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

3 组合服务网模型

为实施组合流程的服务替换, 下面给出服务请求的定义.

定义 7(服务请求) 服务请求是一个四元组 $RS = (RF, RI, RO, QoS)$, 其中:

- ① RF 表示其所需要的功能, 用本体概念进行标注;
- ② RI 表示服务请求者提供的输入集合;
- ③ RO 表示服务请求者期望得到的输出集合;
- ④ QoS 表示服务请求者对服务质量的描述以及各属性的约束条件.

组合服务包含多个服务^[9,10], 本文基于服务组合的结构特征, 研究服务失效时的替换问题.

定义 8(组合服务网) $CS = (NU, CN, CP, T_{cs}, F_{cs})$ 为一个组合服务网, 其中:

- ① NU 是组合服务中所有服务的网元集合;
- ② CN 是组合服务名称, 代表了其功能语义描述;
- ③ CP 是组合服务网的库所集合, 且对 $\forall cp \in CP$:

(a) 若 $\cdot cp = \emptyset \wedge cp \cdot \neq \emptyset$, 则 cp 为输入库所, 且 $cp = (cp.come, cp.label, cp.concept)$, $cp.come$ 表示其所在的服务网元; $cp.label \in \{0, 1\}$, $cp.label = 1$ 表示 cp 是服务请求能提供的输入参数, $cp.label = 0$ 表示 cp 是服务请求没有提供的输入参数; $cp.concept$ 表示其所关联的本体概念;

(b) 若 $\cdot cp \neq \emptyset \wedge cp \cdot = \emptyset$, 则 cp 为输出库所, 且 $cp = (cp.come, cp.label, cp.concept)$, 其中 $co.come$ 表示其所在的服务网元; $cp.label \in \{1, \Delta\}$, $cp.label = 1$ 表示 cp 是服务请求期望的输出参数, $cp.label = \Delta$ 表示 cp 不是服务请求期望的输出参数; $cp.concept$ 表示其所关联的本体概念;

(c) 若 $\cdot cp \neq \emptyset \wedge cp \cdot \neq \emptyset$, 则 cp 为交互库所, 且 $cp = (\cdot cp, cp \cdot, cp.concept)$, 其中 $\cdot cp$ 表示其前集变迁; $cp \cdot$ 表示其后集变迁; $cp.concept$ 表示其所关联的本体概念;

④ T_{cs} 是组合服务网中变迁集合;

⑤ $F_{cs} = (CP \times T_{cs} \cup (T_{cs} \times CP))$ 是组合服务网中的流关系.

组合服务网给出了组合服务的结构化描述. 本文假设组合服务网中无自环. 对 NU 中的网元 $SN = (P, t, F, M_s)$, 若 $\exists p \in P$ 有 $p.concept = cp.concept$, 则记 $p = cp | SN$.

例 3 给定服务请求 $RS = (RF, RI, RO, QoS)$, 图 5 为一个满足用户请求 RS 的组合服务网 $CS = (NU, CN, CP, T_{cs}, F_{cs})$, 其中 $NU = \{SN_4^1, SN_4^1, SN_1^2, SN_2^3, SN_6^4, SN_7^5, SN_5^6, SN_8^7, SN_8^8, SN_9^9\}$, $CP = \{cp_i | i \in \{1, \dots, 27\}\}$, $T_{cs} = \{t_4^5, t_4^1, t_1^2, t_2^3, t_6^4, t_7^5, t_5^6, t_3^8, t_5^8, t_7^9\}$. 以 cp_7 为例, $\cdot cp_7 = t_4^1$ 且 $cp_7 \cdot = t_1^2$, 满足 $\cdot cp_7 \neq \emptyset \wedge cp_7 \cdot \neq \emptyset$, 可知 cp_7 为交互库所. 同时, $\{cp_1.concept, cp_2.concept, cp_3.concept, cp_4.concept\} \cap RI \neq \emptyset$, $\{cp_{23}.concept, cp_{24}.concept, cp_{25}.concept, cp_{26}.concept, cp_{27}.concept\} \supseteq RO$, 即服务和

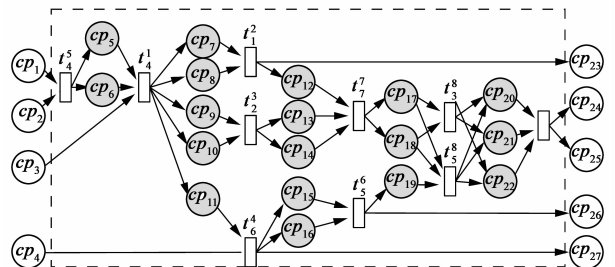


图5 满足服务请求 RS 的组合服务网 CS

请求满足功能匹配条件^[13]. 因此, CS 所对应的组合服务可满足服务请求 RS .

4 组合服务的服务替换

在给定的服务组合中, 当某一服务失效时, 需选取与其功能类似的新服务进行服务替换.

当服务网元处于一种选择结构时, 其对应的 Web 服务失效对组合服务的正常运行可能没有影响. 下面给出服务网元选择结构的定义, 并分析在该结构下服务失效对组合服务的影响.

定义 9 在组合服务网 CS 中, 若服务网元 $SN = (P, t, F, M_S, M)$ 和 $SN' = (P', t', F', M'_S, M')$ 满足 $\cdot t \cap \cdot t' \neq \emptyset$ 且 $t \cap t' \neq \emptyset$, 则称服务网元 SN 和 SN' 构成一选择结构.

定理 1 设在组合服务网 $CS = (NU, CN, CP, T_{cs}, F_{cs})$ 中, 服务 WS 与 WS' 对应的服务网元 $SN = (P, t, F, M_S, M)$ 和 $SN' = (P', t', F', M'_S, M')$ 构成选择结构. 如果 ① $(\cdot t - \cdot t') \cup (\cdot t' - \cdot t) = \emptyset$, 或 $\exists cp \in CP: \cdot cp = \emptyset \wedge cp \neq \emptyset$, 且对 $\forall p \in (\cdot t - \cdot t') \cup (\cdot t' - \cdot t): cp.concept = p.concept \wedge cp.label = 0$; ② $(t - t') \cup (t' - t) = \emptyset$, 或 $\exists cp \in CP: \cdot cp \neq \emptyset \wedge cp = \emptyset$, 且对 $\forall p \in (t - t') \cup (t' - t): cp.concept = p.concept \wedge cp.label = \Delta$; 则当 WS 和 WS' 其中一个不失效时, CS 可正常运行.

证明: 由于服务网元 SN 和 SN' 构成选择结构, 则在组合服务网 CS 中, $\cdot t \cap \cdot t' \neq \emptyset$, 且 $t \cap t' \neq \emptyset$. 因此, $\exists cp \in CP: \cdot cp \neq \emptyset \wedge cp \neq \emptyset$, 且当 $cp = \{t, t'\}$ 时, $\exists cp' \in CP: \cdot cp' \neq \emptyset \wedge cp' \neq \emptyset \wedge cp' = cp$. 同时, 由条件(1), $\cdot t = \cdot t'$, 或对 $\forall p \in (\cdot t - \cdot t') \cup (\cdot t' - \cdot t)$, $\exists cp \in CP(\cdot cp = \emptyset \wedge cp \neq \emptyset)$ 与之对应, 且不是服务请求能提供的输入参数. 由条件(2), $t = t'$, 或对 $\forall p \in (t - t') \cup (t' - t)$, $\exists cp \in CP(\cdot cp \neq \emptyset \wedge cp = \emptyset)$ 与之对应, 且不是服务请求所要求的输出参数. 此时, 如果 WS 和 WS' 其中一个不失效, CS 输出仍能满足服务请求, 即对组合服务无影响. [证毕]

在组合服务网中, 一个服务网元不与任何服务网元满足选择结构, 其对应的服务失效时, 对组合服务流程也没有影响. 下面给出组合服务网中服务网元可达的有关概念.

定义 10(服务网元可达性) 设服务网元 $SN = (P, t, F, M_S, M)$ 和 $SN' = (P', t', F', M'_S, M')$ 同属于一个组合服务网 CS . $\exists \sigma = (t, t_1, t_2, t_3, \dots, t')$, 使得 $M[t > M_1[t_1 > M_2[t_2 > M_3[t_3 > \dots M'[t' > M''$, 且对 $\forall p' \in \cdot t': M''(p') = M'(p') - 1$, 对 $\forall p' \in t': M''(p') = M'(p') + 1$, 则称服务网元 SN 到 SN' 是可达的.

定义 11(可达流程) 若服务网元 SN 到 SN' 可达, 且对应的变迁序列为 σ , 则 σ 中变迁所对应的服务网元构成一个可达流程 FP , 且 SN 称为可达流程的首网元, SN' 称为可达流程的尾网元. 记为 $FP: SN \triangleright SN'$ 下面给出可达流程处于选择结构时的判断方法, 并分析此时服务失效对组合服务的影响.

定义 12 设组合服务网 CS 中存在可达流程 $FP_i: SN_i \triangleright SN'_i$ 和 $FP_j: SN_j \triangleright SN'_j$. 当 $\cdot t_i \cap \cdot t_j \neq \emptyset$ 且 $t'_i \cap t'_j \neq \emptyset$ 时, 称可达流程 FP_i 和 FP_j 构成一个选择结构.

例 4 如图 6 所示, 设在组合服务网 CS 中, 存在两个可达流程 FP_1 和 FP_2 . 其首网元的输入库所满足 $\cdot t_1 \cap \cdot t_2 \neq \emptyset$, 且尾网元输出库所满足 $t'_1 \cap t'_2 \neq \emptyset$. 根据定义 12, FP_1 和 FP_2 处于一个选择结构中.

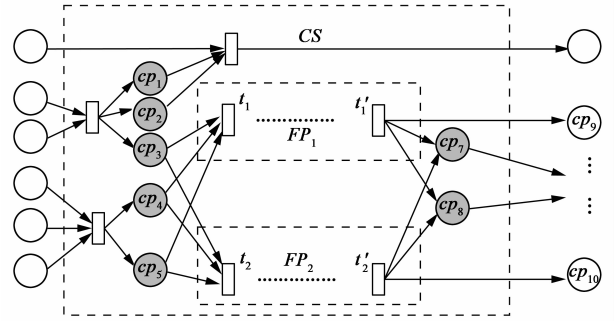


图6 可达流程的选择结构

推论 1 给定组合服务网 CS , 对处于选择结构中的两个可达流程 $FP_i: SN_i \triangleright SN'_i$ 和 $FP_j: SN_j \triangleright SN'_j$, 若其中一个流程的首网元到尾网元可达, 且满足条件:

① $(\cdot t_i - \cdot t_j) \cup (\cdot t_j - \cdot t_i) = \emptyset$, 或 $\exists cp \in CP: \cdot cp = \emptyset \wedge cp \neq \emptyset$, 且对 $\forall p \in (\cdot t_i - \cdot t_j) \cup (\cdot t_j - \cdot t_i): cp.concept = p.concept \wedge cp.label = 0$;

② $(t_i - t_j) \cup (t_j - t_i) = \emptyset$, 或 $\exists cp \in CP: \cdot cp \neq \emptyset \wedge cp = \emptyset$, 且对 $\forall p \in (t_i - t_j) \cup (t_j - t_i): cp.concept = p.concept \wedge cp.label = \Delta$; 则当处于可达流程 FP_k 或 FP_g 中的 Web 服务失效时, CS 可正常运行.

证明: 根据定理 1 及定义 12, 易证结论成立. [证毕]

下面给出服务单一可替换的概念.

定义 13 设服务请求 RS 对应的组合服务网为 $CS = (NU, CN, CP, T_{cs}, F_{cs})$. 对 $\forall SN \in NU$, 在服务簇 WSC 中有服务 WS . 称服务 WS 可由服务 WS' 单一替换, 并记为 $WS \sqsubseteq WS'$, 如果 $\exists WS' \in WSC$, 且相应的服务网元 SN' 满足:

① 对 $\forall cp \in CP: \cdot cp = \emptyset \wedge cp \neq \emptyset, \forall cp' \in CP: \cdot cp' \neq \emptyset \wedge cp' \neq \emptyset$, 当 $cp.concept = SN \wedge cp.label = 1$ 或 $cp' \cdot = t$ 时, WS 的关键输入参数为 $KI = \{cp \mid SN, cp' \mid SN\}$ 且 $\exists p' \in \cdot t': cp.concept = p'.concept$ 或 $cp'.concept =$

p' .concept, 同时对 $\forall wi' \in I' - \{p' \mid WS'\} : wi'.label \neq 1$;

②对 $\forall cp \in CP : \cdot cp \neq \emptyset \wedge cp \cdot = \emptyset, \forall cp' \in CP : \cdot cp' \neq \emptyset \wedge cp' \cdot \neq \emptyset$, 当 $cp.come = SN \wedge cp.label = 1$ 或 $\cdot cp' = t$ 时, WS 的关键输入参数为 $KO = \{cp \mid SN, cp' \mid SN\}$ 且 $\exists p' \in t' : \cdot cp.concept = p'.concept$ 或 $cp'.concept = p'.concept$.

根据失效服务, 对服务簇网元矩阵模型进行标准化处理, 得到失效服务对应的网元标准矩阵.

定义 14 (标准矩阵) 设服务簇 WSC 的网元矩阵为 IM 和 OM , SN 是组合服务网 $CS = (NU, CN, CP, T_{cs}, F_{cs})$ 的服务网元, 对应的服务为 WS . 当 WS 失效时, 将 SN 的关键输入/输出参数在 IV 和 OV 中进行重新标注, 并在 IM 和 OM 中删除替换无关行, 此过程称为服务簇网元矩阵标准化, 得到的矩阵 IM' 和 OM' 称为 WSC 对应于 WS 的标准矩阵.

下面给出一种服务簇网元矩阵标准化的算法.

算法 1 服务簇网元矩阵标准化算法

输入: 失效服务 WS 以及所在服务簇 WSC 的网元矩阵 $IM = (IV_1^T, IV_2^T, \dots, IV_{|WSC|}^T)^T$, $OM = (OV_1^T, OV_2^T, \dots, OV_{|WSC|}^T)^T$;

输出: 服务簇 WSC 对应于失效服务 WS 的标准矩阵 IM' 和 OM' ;

Step 1 初始化关键输入输出参数集 $KI = \emptyset, KO = \emptyset$;

Step 2 扫描 CS 得到关键参数集,

(a) 对 $\forall cp \in CP : \cdot cp = \emptyset \wedge cp \cdot \neq \emptyset$ 以及 $\forall cp' \in CP : \cdot cp' \neq \emptyset \wedge cp' \cdot \neq \emptyset$, 若 $cp.come = SN \wedge cp.label = 1$ 且 $cp \cdot = t$, 记 $KI = KI + \{(cp \mid SN) \mid WS, (cp' \mid SN) \mid WS\}$, 且 $CP = CP - \{cp, cp'\}$;

(b) 对 $\forall cp \in CP (\cdot cp \neq \emptyset \wedge cp \cdot = \emptyset)$ 以及 $\forall cp' \in CP (\cdot cp' \neq \emptyset \wedge cp' \cdot \neq \emptyset)$, 若 $cp.come = SN \wedge cp.label = 1$ 且 $\cdot cp' = t$, 记 $KO = KO + \{(cp \mid SN) \mid WS, (cp' \mid SN) \mid WS\}$, 且 $CP = CP - \{cp, cp'\}$;

Step 3 重复步骤 2 得到关键参数集 KI 和 KO ;

Step 4 根据关键参数集处理矩阵,

(a) 对 $\forall ki \in KI$, 都有 $\exists h \in \{1, \dots, |GIV|\}$ 使得 $GIV(h) = ki.concept$, 逐一标记 $IV(h) = 1$, 得到 IV' , 并用 IV' 覆盖 IM_i 中 IV 的位置;

(b) 对 $\forall ko \in KO$, 都有 $\exists f \in \{1, \dots, |GOV|\}$ 使得 $GOV(f) = ko.concept$, 逐一标记 $OV(f)$ 以外的向量分量为 Δ , 得到 OV' , 并用 OV' 覆盖 OM 中 OV 的位置;

Step 5 删除矩阵 IM 和 OM 的替换无关行, 对 $\forall h \in \{1, \dots, |GIV|\}$, 若 $\exists j \in \{1, \dots, |WSC|\}$, 当 $IV(h) \neq 1$ 且 $IV_j(h) = 1$ 时, 在 IM 和 OM 中分别删除 IV_j 和 OV_j ;

Step 6 输出 IM' 和 OM'

例 5 在例 2 中, 设机票查询服务簇 WSC_{TQ} 的服务 WS_1 在一组合服务中失效, 且对应的关键参数集 $KI = \{wi_{11}, wi_{12}, wi_{13}, wi_{16}, wi_{17}\}$ 和 $KO = \{wo_{11}, wo_{12}, wo_{13}, wo_{15}\}$. WSC_{TQ} 的网元矩阵及在组合流程中所得关键参数集如表 2 所示. 根据算法 1, 失效服务 WS_1 的网元标准矩阵为 $IM'_1 = (IV_1'^T, IV_2'^T, IV_3'^T, IV_5'^T)^T$ 和 $OM'_1 = (OV_1'^T, OV_2'^T, OV_3'^T, OV_5'^T)^T$.

表 2 WS_1 所对应的网元矩阵及关键参数集

IV_1	1 1 0 0 Δ 0 0	OV_1	1 1 1 1 1 Δ Δ	$KI = \{wi_{11}, wi_{12}, wi_{13}, wi_{16}, wi_{17}\}$
IV_2	1 1 1 Δ Δ 0 Δ	OV_2	1 1 Δ 1 1 Δ 1	
IV_3	1 1 1 Δ Δ Δ 0	OV_3	1 1 1 1 Δ 1 Δ	
IV_4	1 1 0 1 Δ 0 0	OV_4	1 1 Δ Δ 1 Δ Δ	$KO = \{wo_{11}, wo_{12}, wo_{13}, wo_{15}\}$
IV_5	1 1 0 Δ Δ 1 1	OV_5	1 1 1 1 1 Δ Δ	
IV_6	0 1 0 1 1 Δ Δ	OV_6	1 Δ 1 Δ Δ 1 1	

基于失效服务所对应的网元标准矩阵对服务的单一可替换性进行分析.

定理 2 设服务 $WS \in WSC$ 在组合服务中失效, 且该组合服务对应的组合服务网为 $CS = (NU, CN, CP, T_{cs}, F_{cs})$. $\exists WS_k \in WSC$, 使得 $WS \supseteq WS_k (k \in \{1, \dots, |WSC|\})$, 当且仅当 $\exists IV_k \in IM' \wedge OV_k \in OM'$, 满足: $\exists h \in \{1, \dots, |GIV|\} : IV'(h) = 1 \rightarrow IV_k(h) \neq \Delta$, 且 $\exists f \in \{1, \dots, |GOV|\} : OV'(f) = 1 \rightarrow OV_k(f) = 1$.

证明 充分性: ① 设 WS 的服务网元为 $SN = (P, t, F, M_s, M)$. 由算法 1, 对 $\forall ki \in KI$, 在 CS 中, $\exists cp \in CP : \cdot cp = \emptyset \wedge cp \cdot \neq \emptyset$, 或 $cp' \in CP : \cdot cp' \neq \emptyset \wedge cp' \cdot \neq \emptyset$, 使得 $cp.come = SN \wedge cp.label = 1 \wedge cp.concept = ki.concept$ 或者 $cp' \cdot = t$, 且 $\exists h \in \{1, \dots, |GIV|\}$, 使得 $GIV(h) = ki.concept$ 且 $IV'(h) = 1$. 在 IM' 中, 若 $\exists h \in \{1, \dots, |GIV|\}$, 使得 $IV'(h) = 1 \rightarrow IV_k(h) \neq \Delta$, 则 $\exists p \in \cdot t$, 使 $cp.concept = p.concept$, 或 $cp'.concept = p.concept$. 由算法 1 的 Step 5, 在 IM' 中不存在 $IV'(h) \neq 1$, 且 $IV_k(h) = 1$ 的情况 ($h \in \{1, \dots, |GIV|\}$). 对 $\forall wi'_k \in I'_k$, $\exists ki \in KI : wi'_k.concept = ki.concept$ 因此, 对 $\forall wi'_k \in I_k - I'_k : wi'_k.label \neq 1$. ② 由算法 1, 对 $\forall ko \in KO$, 在 CS 中 $\exists cp \in CP : \cdot cp' \in cp \neq \emptyset \wedge cp \cdot = \emptyset$, 或 $\exists cp' \in CP : \cdot cp' \neq \emptyset \wedge cp' \cdot \neq \emptyset$, 使得 $cp.come = SN \wedge cp.label = 1 \wedge cp.concept = ko.concept$ 或者 $\cdot cp' = t$. 同时, $\exists f \in \{1, \dots, |GOV|\} : GOV(f) = ko.concept$, 且在 OV' 中除 $OV'(f)$ 的分量都为 Δ . 因此, 在 OM' 中, 若 $\exists f \in \{1, \dots, |GOV|\}$, 当 $OV'(f) = 1 \rightarrow OV_k(f) = 1$ 时, 则 $\exists p \in t \cdot : cp.concept = p.concept$ 或 $cp'.concept = p.concept$. 故 $\exists WS_k \in WSC$, 使得 $WS \supseteq WS_k$.

必要性: ① 设 $\exists WS_k \in WSC : WS \supseteq WS_k$, 由定义 11 的条件(1)和算法 1, 则在 IM' 中, 已经删除了替换无关行, 并根据 KI 进行了重新标注. 因此, 对 $\forall p \in \cdot t$, $\exists h \in \{1, \dots, |GIV|\}$, 使得 $GIV(h) = p.concept$, 且 $IV_k(h) = 0 \vee 1$, 即 $IV_k(h) \neq \Delta$. 由 KI 知, $IV'(h) = 1$. ② 由定义 11 的条件(2)和算法 1, 在 OM' 中已经删除了替换无关行, 并根据 KO 进行了重新标注. 因此, 对 $\forall p \in t \cdot$, $\exists f \in \{1, \dots, |GOV|\}$, 使得 $GOV(f) = p.concept$ 且 $OV_k(f) = 1$. 由 KO 知, $OV'(f) = 1$. [证毕].

当单一服务替换无法进行时,可在簇内进行组合替换.下面给出服务满足组合替换的概念.

定义 15(组合替换) 设服务请求 RS 对应的组合服务网为 $CS = (NU, CN, CP, T_{cs}, F_{cs})$.对 $\forall SN \in NU$,在服务簇 WSC 中有服务 WS 与之对应.称 WS 可由服务 WS_k 和 WS_j 组合替换,记为 $WS_k \parallel WS_j \subseteq WS$,如果 $\exists WS_k, WS_j \in WSC(k, j \in \{1, \dots, |WSC|\})$,使得服务网元 SN_k 和 SN_j 满足:

① 对 $\forall cp \in CP: \cdot cp = \emptyset \wedge cp \neq \emptyset, \forall cp' \in CP: \cdot cp' \neq \emptyset \wedge cp' \neq \emptyset$,当 $cp.come = SN \wedge cp.label = 1$ 或 $cp' \cdot = t$ 时, $\exists p' \in \cdot t_k \cup \cdot t_j: cp.concept = p'.concept$ 或者 $cp'.concept = p'.concept$,且对 $\forall wi' \in I_k \cup I_j - \{p' \mid WS_k\} \cup \{p' \mid WS_j\}: wi'.label \neq 1$;

② 对 $\forall cp \in CP: \cdot cp \neq \emptyset \wedge cp \cdot = \emptyset), \forall cp' \in CP: \cdot cp' \neq \emptyset \wedge cp' \cdot \neq \emptyset$,当 $cp.come = SN \wedge cp.label = 1$ 或 $cp' \cdot = t$ 时, $\exists p' \in \cdot t_k \cup \cdot t_j: cp.concept = p'.concept$ 或者 $cp'.concept = p'.concept$.

类似地,基于失效服务所对应的网元标准矩阵,能够对服务的组合替换进行分析.

定理 3 设 $WS \in WSC$ 是在组合服务中的失效服务,且组合服务对应的组合服务网为 $CS = (NU, CN, CP, T_{cs}, F_{cs})$. $\exists WS_k, WS_j \in WSC (k, j \in \{1, \dots, |WSC|\})$: $WS_k \parallel WS_j \subseteq WS$,当且仅当 $\exists IV_k$ 和 $IV_j \in IM'$,及 $\exists OV_k$ 和 $OV_j \in OM'$ 满足: $\exists h \in \{1, \dots, |GIV|\}: IV'(h) = 1 \rightarrow IV_k(h) \vee IV_j(h) \neq \Delta$,且 $\exists f \in \{1, \dots, |GOV|\}: OV'(f) = 1 \rightarrow OV_k(f) \wedge OV_j(f) = 1$.

证明 与定理 2 证明相似,这里不详细证明. [证毕]

例 6 由例 5 得到对应于失效服务 WS_1 的标准矩阵 $IM'_1 = (IV_1^T, IV_2^T, IV_3^T, IV_5^T)^T$ 和 $OM'_1 = (OV_1^T, OV_2^T, OV_3^T, OV_5^T)^T$,如表 3 所示.根据定理 2 和定理 3, $WS_5 \subseteq WS_1$,且 $WS_2 \parallel WS_3 \subseteq WS_1$.

表 3 服务 WS_1 的标准矩阵表示

IV_1	1 1 1 0 Δ 1 1	OV_1	1 1 1 Δ 1 Δ Δ
IV_2	1 1 1 Δ Δ 0 Δ	OV_2	1 1 Δ 1 1 Δ 1
IV_3	1 1 1 Δ Δ Δ 0	OV_3	1 1 1 1 Δ 1 Δ
IV_5	1 1 0 Δ Δ 1 1	OV_5	1 1 1 1 1 Δ Δ

基于对服务簇网元模型和标准矩阵的分析,失效服务替换问题可通过服务替换算法实施.

算法 2 基于服务簇的服务替换算法

输入:服务簇网元 WSC ,组合服务网 CS ,失效服务 WS 对应的服务网元 SN ;

输出:替换服务集合 S ;

Step1 初始化: $S = \emptyset$;

Step2 求解 WS 对应的服务簇标准矩阵 IM' 和 OM'

Step3 在 CS 中,

(1)判断是否存在服务网元 SN' 与 SN 构成选择结构并满足定理 1,若是,则转 Step5;

(2)判断 SN 是否处在一个满足推论 1 的可达流程中,若是,则转 Step5;

Step4 根据定理 3 进行服务的单一替换,若 $\exists WS' \in WSC: WS \subseteq WS'$,标记 $S = S + WS'$,转 Step7;

Step5 根据定理 4 进行服务的组合替换,若 $\exists WS_k, WS_j \in WSC_i(k, j \in \{1, \dots, |WSC|\})$: $WS_k \parallel WS_j \subseteq WS$,标记 $S = S + WS_k \parallel WS_j$,转 Step7;

Step6 若不存在服务满足单一替换和组合替换,则转 Step8;

Step7 输出 S ;

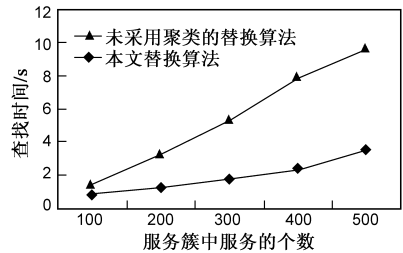
Step8 算法结束.

替换服务一般出现在服务簇 WSC 中,查找范围和次数将大大减少.算法 2 进行替换服务查找时,剔除了与替换无关服务所对应的分量,从而将使替换查找效率进一步提高.在单一替换失败时,采用簇内服务组合替换,提高了服务替换的效率和准确性.

5 实验

实验中对传统的服务替换算法^[11]与本文基于聚类的服务替换算法进行了比较分析.实验采用自上而下的方式产生模拟数据.首先,采用课题组已提出的方法建立领域本体树^[12].然后,定义服务簇,并对服务簇的输入/输出参数进行标注,产生相关服务.实验采用 C# 语言编程,进行模拟仿真分析.

共进行了 5 次实验,服务簇中服务个数分别为 100,200, ..., 500,记录服务簇中服务个数的增加,比较两种替换算法的效率.实验结果如图 7 所示.



从实验结果可看出,在服务簇中服务个数相同的情况下,本文替换算法的平均响应时间为传统替换算法的 0.352 倍,明显低于传统替换算法.随着服务簇中服务数量的增加,两种发现算法的响应时间都为线性增长.但本文替换算法的增幅较小,而传统替换算法的增幅很大.表明本文替换算法的替换效率,受簇内服务个数的影响较小.

6 结论

本文基于服务聚类的思想,将服务库中的服务进行了聚类预处理,提出了一种基于服务簇的服务替换方法,并给出了服务簇的网元模型和矩阵模型.提出了服务单一替换和组合替换所满足的条件.在基于失效服务对服务簇的矩阵模型标准化处理后,给出了不同替换方式下的相应条件.仿真实验结果例证了本文替换算法的有效性和实用性.下一步将对服务替换技术进行更深入的研究.

参考文献

- [1] Brogi A, Canal C, Pimentel E, et al. Formalizing web service choreographies [J]. *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, 2004, 105(1-4 suppl): 73-94.
- [2] Zhang M W, Zhu Z L, Li D C, et al. An execution context aware approach for Web service substitution [A]. *Proceedings of 7th International Conference on Advanced Information Management and Service (ICIPM)* [C]. Jeju: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2011. 13-18.
- [3] Dumas M, Yang Y, Zhang L. Towards a formalization of contracts for service substitution [A]. *Proceedings of 6th World Congress on Services (SERVICES-1)* [C]. Miami: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010. 423-430.
- [4] Liang Q, Lee B S, Hung P C K. A rule-based approach for availability of service by automated service substitution [J]. *Software: Practice and Experience*, 2012, 42(10): 2155. (Published online)
- [5] Santhanam G R, Basu S, Honavar V. Web service substitution based on preferences over non-functional attributes [A]. *Proceedings of IEEE International Conference on Services Computing (SCC'09)* [C]. Bangalore: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2009. 210-217.
- [6] 薛洁, 吴兵, 杜玉越. 一种基于聚类的语义 Web 服务发现方法 [J]. *中国科技论文*, 2012, 7(7): 535-538.
Xue Jie, Wu Bing, Du Yuyue. A discovery method of semantic Web service based on clustering [J]. *China Sciencepaper*, 2012, 7(7): 535-538. (in Chinese)
- [7] Y Y Du, C J Jiang, M C Zhou. A petri net based correctness analysis of internet stock trading systems [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, 2008, 38(1): 93-99.
- [8] 孙萍, 蒋昌俊. 利用服务聚类优化面向过程模型的语义 Web 服务发现 [J]. *计算机学报*, 2008, 31(8): 1340-1353.

- Sun Ping, Jiang Changjun. Usingservice clustering to facilitate process oriented semantic web service discovery [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2008, 31(8): 1340-1353. (in Chinese)
- [9] 殷昱煜, 李莹, 邓水光, 尹建伟. Web 服务行为一致性 with 相容性判定 [J]. *电子学报*, 2009, 37(3): 433-438.
YinYuyu, Li Ying, Deng Shuiguang, Yin Jianwei. Consistency and compatibility of web services behavior decision [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009, 37(3): 433-438. (in Chinese)
 - [10] 毕敬, 朱志良, 范玉顺. Web 服务组合中行为相容性分析与优化控制策略 [J]. *电子学报*, 2011, 39(12): 2842-2849.
BiJing, Zhu Zhiliang, Fan Yushun. Behavioral compatibility analysis and optimal control policy in web services composition [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(12): 2842-2849. (in Chinese)
 - [11] 刘方方, 史玉良, 张亮, 施伯乐. 基于进程代数的 Web 服务组合的替换分析 [J]. *计算机学报*, 2007, 30(11): 2033-2038.
Liu Fangfang, Shi Yuliang, Zhang Liang, Shi Bole. Substitution analysis of web service composition via process algebra [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2007, 30(11): 2033-2038. (in Chinese)
 - [12] Shiyang Deng, Yuyue Du. An approach of Web service discovery and composition based on logic Petri nets [J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 605-607: 2351-2357.

作者简介



杜玉越 男, 1960 年 2 月出生, 山东聊城人. 教授, 博士生导师, 主要研究方向: CSCW、软件工程、形式化技术.

E-mail: yydu001@163.com



薛洁 女, 1989 年 4 月出生, 山东菏泽人. 2011 年本科毕业于山东科技大学计算机系, 现为山东科技大学计算机科学系硕士生, 主要研究方向: Web 服务动态组合、Petri 网理论与应用、CSCW.