





















含逻辑关系所对应的服务映射规则。

为了方便讨论服务节点使能状态与时变函数触发库所变迁的关系,首先需在组件服务的组合过程进行声明,避免组合过程中冗余服务重复调用导致系统效率降低,引入回溯网络节点定理对组件服务节点作出标记,即定理 1 用于判断是否存在冗余服务操作类型,建立控制流的基本逻辑关系。

**定理 1(回溯网络节点定理).** 对于一个时变 Petri 网服务组合模型 SC-TVPN,若有向弧  $l'=(o_i,i_j,fl)$  满足  $M(p_{in} \cap s_k) \subseteq M(p)$ ,且任意以  $i_s$  为输入功能的终止服务  $s_n$  至少具备 1 条最简有向路径  $L = \{l'_1, \dots, l'_j, \dots, l'_s\}$  使服务组合策略成立,其中,  $l_i, l_j, l_s$  表示被有向路径  $L$  覆盖的有向弧,  $l_i$  表示源组件服务输出功能指向的有向时变函数弧,  $l_s$  表示终止服务所包含时变函数的输入功能有向弧,则其余非最简有向路径  $L'$  上的任一有向弧  $l$  对应的标识集满足:

$$M(o_s) \cap \left( \bigcup_{l_i \in L} M(o_j) \right) = \emptyset,$$

其中,  $L'$  为有向弧  $L$  上以第  $j$  个服务为起始服务的回溯子弧,  $i, j, s, n \in \mathbf{N}^+$ 。

为保证组合服务策略分支流程是正确的,当执行前  $i$  个服务的输出功能组合操作时,需检验此前组件服务功能路径的动作过程,将这一过程称为回溯检验,构建含  $n$  个组件服务的策略则需进行  $n \cdot (n-1)/2$  次回溯检验,且需要对每条有向弧回溯路径对应的 QoS 属性进行一致性验证。

**定理 2(系统状态可达性定理).** 设时变 Petri 网服务组合模型 SC-TVPN 中,若时变函数集  $F_\delta = \{f_{\delta_1}, \dots, f_{\delta_n}\}$  在  $\forall t_i \in T, p_j \in P$  都满足关联矩阵  $A_{ij}$  对应的功能映射关系,且至少存在 1 条从  $p_0$  到  $p_n$  的有向回溯路径,使其满足状态迁移矩阵  $K$ ,且  $\forall M \in R(M), \exists p_k \in P$ ,使  $M_k[t_k, f_{\delta_k}, p_k)M_p$ 。

证明: 令  $M_p$  为 SC-TVPN 中构建的某一服务组合策略  $St$  所包含第  $i$  个组件服务  $S_i$  的起始输出功能状态或前一服务  $S_{i-1}$  的终止输入功能状态。在时变函数作用下,只有  $S_{i-1}$  的输出功能库所和  $S_i$  的输入功能库所具有时间关联,其他服务不受时变函数  $f_{\delta_k}$  的影响,每发生一次状态触发,用一个标识符函数相对应,构建系统关联矩阵表示组件服务功能调用的概率,则只有当状态满足  $M_k[t_k, f_{\delta_k}, p_k)$  驱动节点  $M_p$  状态使能时,系统状态满足可达性。因此,当前  $i-2$  个组件服务组合后,  $S_i$  库所可以迁移至状态  $M_k$ ,并使其能够到达任意组件服务状态。

定理 2 表明 SC-TVPN 实现服务组合过程中,若某一服务节点状态在时变函数下使能,则与其有时间关联特性的库所周期状态将由变迁条件等待触发。

为了进一步说明服务组合的逻辑流控制过程及 QoS 计算方法,假设服务候选集中,由前一组件服务  $S_1$  的输出功能和后一服务  $S_2$  的输入功能构造一次服务节点组合匹配,构造服务  $S_1$  到  $S_9$  的组合服务,可由中间路径的任意服务实现,则选取两个功能相同,组件服务不同的组合服务进行 QoS 计算,相应的 QoS 综合值记为  $\Psi_1$  和  $\Psi_2$ 。则经回溯过程所求得的用户综合 QoS 评价值分别为  $\Psi_1 = \sum V^{(k_1)} \times \omega_{k_1}$  和  $\Psi_2 = \sum V^{(k_2)} \times \omega_{k_2}$ ,  $\omega_k$  为根据用户设定权值,则系统中库所的基本控制流和数据流逻辑关系如图 5 所示。

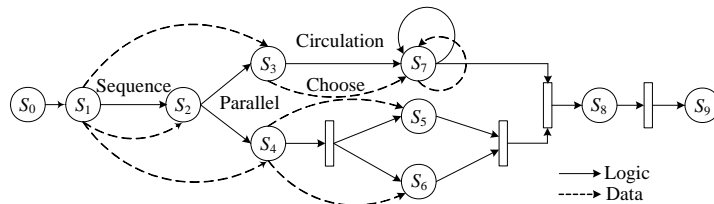


Fig.5 Logical relationship of control flow and data flow in service model

图 5 服务模型中的逻辑关系

组合服务过程中,后一服务  $S_2$  的时变输入功能集  $f_{I\delta}$  与前一服务  $S_1$  的时变输出功能  $f_{O\delta}$  以映射规则集中的服务规则  $fl$  相对应。对服务组合的回溯过程即对已组合部分的输入/输出映射关系检验的过程,这个过程可通过检测对应输入/输出功能集中的参数值获取。

依据 SC-TVPN 中服务控制流逻辑结构,引入组合成功率  $TR^{[16]}$  的概念,用于比较构建组合服务时,表示不同方法下组件服务的可用性及可靠性对组合服务可成功执行的概率大小.本文中,组合成功率  $TR$  由公式(6)计算求得.

$$TR = \sum_{i \in N} l_i \cdot \left( \prod_{t_j \in M(s)} \omega_j A s_j + \prod_{t_k \in M(s)} \omega_k R s_k \right) \quad (6)$$

其中,  $l_i$  表示满足组合服务功能的有向弧路径长度;  $M(s)$  表示标识符函数状态集;  $t$  表示可触发变迁;  $\omega$  为回溯路径涵盖的组件服务中, QoS 属性的用户匹配权值,表示该组件服务在用户需求功能的作用比重.

### 3.2 服务流程验证及组合算法

为使服务候选集中,组件服务均能以特定服务选取概率进行调用,因此需要对候选组件服务实现全局遍历,记录服务信息和节点状态.鉴于此,本文考虑在人工鱼群算法<sup>[17]</sup>的基础上利用人工鱼个体信息对应地记录服务的输入/输出功能、QoS 数据及性能属性.感知周围环境信息的特点为基础,提出一种遍历服务库所及组合操作变迁的服务组合流程验证及策略计算算法.该算法中,人工鱼个体分别用于记录组件服务的输入/输出功能、QoS 数据及性能参数等信息,通过建立的服务映射规则,对不同服务模型下建立的服务组合策略各项指标进行选择 and 计算,进而实现全局服务的筛选和优化配置.

本文算法采用自顶而下的设计思路解决服务组合问题.首先,根据服务数,将一定数量的人工鱼个体置于服务候选集中,其用于记录单一服务的性能参数、时变函数式及状态信息,当系统使能,满足组合操作变迁触发条件时,根据个体记录的服务空间、时变库所及变迁状态,即可实现对遍历至当前位置状态的检验;然后,固定当前服务状态  $x_i$ ,根据设定的调用概率实现下一服务的调用,或对已组合的服务策略进行遍历检验,以得到与当前服务状态匹配的最优组件服务.

由于人工鱼的主要活动受限于巡视视野内的位置状态,通过与当前位置进行比较,选择最优动作作为下一时刻的活动方向.因而,考虑将寻找最优服务策略与人工鱼搜索更高浓度食物生存行为<sup>[16]</sup>建立联系,则每个人工鱼个体都将以向食物浓度更高的位置运动作为目标.

鉴于此,为了提升服务组合模型的组合效率和可靠度,并从含大量组件服务的候选集中取得满足要求的服务组合策略,需要有效提升个体的全局搜索能力,克服原始算法精度低和后期收敛速度慢等问题.因此,本文以基本鱼群算法为基础,在人工鱼个体位置更新过程中引入已知全局最优的服务信息,进而改善了个体遍历的效率,其可以利用公式(7)~公式(9)进行表示.

$$X_i = X + Val \cdot Ra(\cdot) \quad (7)$$

$$\Delta X_i(t+1) = Ra(\cdot) \cdot Sp \cdot [X'(t+1) - X_i(t)] \quad (8)$$

$$X_i(t+1) = X_i(t) + \Delta X_i(t+1) \quad (9)$$

其中,  $Val$  表示个体的视野范围;  $Sp$  表示随机移动的步长;  $Ra(\cdot)$  表示变量函数在区间  $[0,1]$  上服从随机分布,其对应服务组合时,满足回溯条件的服务调用概率;  $X_i(t)$  是人工鱼的当前状态;  $X_i(t+1)$  是个体寻优下一位置的状态;  $\Delta X_i(t+1)$  由当前状态和较优状态  $X'(t+1)$  的差值决定.

为保证组合策略  $St$  能反映真实系统的性能,在寻优过程中,需要结合实际情况对服务参数设置可靠性和可用性等约束条件,删除不满足最低用户需求的服务策略,进而保证服务组合的效率,即满足:

$$\begin{cases} A_s \geq A'_s \\ R_s \geq R'_s \end{cases} \quad (10)$$

其中,  $A'_s$  和  $R'_s$  为用户需求所提的最低可用性和可靠性参数值.

此方法用于检验时变库所的状态和变迁操作正确性,并可以用于计算不同模型下生成服务组合策略的综合 QoS 值,并在此基础上依据用户偏好性能提供一种最优服务组合策略.基于服务组合的语义描述和逻辑结构,我们将算法流程验证和组合计算归纳为如下步骤.

- (1) 利用 PNML 惯例文档描述服务数据和逻辑功能,将服务系统转化为时变 Petri 网结构框架.其中,  $para$

为组件服务性能参数,  $data$  为服务基本信息或数据;  $f_{\delta}(p, n)$  为受  $n$  个时变参数影响的第  $k$  个服务库所,  $e(t)$  表示操作变迁  $t$  在  $f_{\delta}$  下使能,  $M$  为时变标识符的集合.

- (2) 遍历服务系统中的时变参数库所及服务变迁操作, 计算 Petri 网系统的状态可达图.
- (3) 检验服务系统是否满足语法正确性、状态可达性及变迁死锁性<sup>[16]</sup>.
- (4) 检验组合策略的功能特性、执行顺序和 QoS 一致性.
- (5) 计算并输出全部服务组合策略, 生成服务组合策略集合.

具体流程见算法 1.

**算法 1.** 服务性能检验及组合分析算法.

输入: 服务候选集  $WS$ , 服务映射规则, 服务性能参数.

输出: 组合分析检验结果, 服务组合策略  $St$  和对应结果.

```

1: Test(ServiceFlow) //分析服务流程的正确性
1) Input Val and data & parameters of WS;
2)  $M\_temp=M$ ;
3) {For  $i=0$  to  $m$  when
4)   If  $\neg(T(p_i) \in TVPN)$ 
5)     Get  $M_k[t_k, f_{\delta}, p_k]M_p$ ; //验证  $S_i$  是否满足状态可达性
6)     If  $(OutArc \wedge InArc)=False$  break;
7)     Else if  $A^+[j][i] \neq 0$ 
8)       Get  $S_i=S_i+E(t_j, p_i)$ ; //验证节点状态满足是否状态转移性
9)       Output: Places and transitions are true; //测试服务模型的库所及变迁是否正确
10)    If  $(A^-[j][i]=1 \wedge \neg(Type(E(p_i, t_j) \in T(p_i) \wedge Type(Var(E(p_i, t_j)) \in TVPN)))$ 
         $(A^+[j][i]=1) \wedge \neg(Type(E(t_j, p_i) \in T(p_i) \wedge Type(Var(E(t_j, p_i)) \in TVPN)))$ 
11)      Output: Function & flow  $E(p_i, t_j)$  is pass; //分析组合服务策略流程是否正确
12) 2: Check&Calculation(St) //计算服务组合性能参数
13) {For  $j=0$  to  $n$  do
14)   If  $\neg(Type(f_{\delta})=Bealoon \wedge Type(Var G(t_j)) \in TVPN)$  //验证时变函数和 QoS 是否一致
15)   For each  $M \in R(M(0))$ ;
16)   Check  $type(QoS(t_j)) \notin type(Para)$ 
17) 3: Generation(St) //计算及生成服务组合策略集
18) If Datatype of QoS of  $t_j$  is true;
19) {For  $i=1, i \leq l_{max}, i++$  when
20)   For  $t=1, t \leq m \times l_{max}, t++$  when
21)     calculate  $X_i(t+1)=\Psi$  return  $X_i$ ;
22)   Output: Results of calculation and  $St$ .

```

上述过程通过服务组合性能模型和时变 Petri 网的状态可达性对服务对象加以分析. 基于当前状态  $x_i$  及对应集合中其他状态及映射规则, 进行完整地遍历搜索. 因此, 可以实现对描述服务数据、逻辑的元素进行正确性和一致性检验, 进而保证各项性能参数满足 QoS 需求. 假设服务集中的服务数目表示为  $n$ , 服务映射规则数目表示为  $m$ , 人工鱼个体检索的最大循环次数为  $l_{max}$ , 则所提算法对应的最大时间复杂度为  $O(n)$ , 空间复杂度为  $O(m \times l_{max})$ . 同时, 函数  $Test(ServiceFlow)$  可以保证系统性能评价的准确性, 函数  $Check\&Calculation(St)$  则从 QoS 属性方面检验时变 Petri 网服务模型的组合一致性, 函数  $Generation(St)$  可以高效计算系统效率及组合成功率.

### 4 仿真实验及结果分析

本节根据时变 Petri 网特性对服务组合过程进行建模.首先,在服务系统中,对功能相同的 Web 服务通过不同方法进行语义绑定、参数设置、文档发布,使其作为已发布的组件服务可任意调用;然后,对多功能分布式服务进行组合,在不同方法下实现功能相似的组合服务构建过程,并获取相应服务绑定数据;对于用户,则可任意调用系统发布的组合服务,并给出相应的用户反馈评价;在大量数据提取及分析统计后,可表明时间因素对服务组合用户反馈评价的影响;同时,为了进一步证明时变 Petri 网服务模型的有效性,本节通过实验数据分析,定量说明本文方法在服务组合过程中时间表达的突出特性;最后,与包含普通 Petri 网建模的服务组合方法对比,说明时间因素对用户反馈评价的重要性及本文方法的可行性.

#### 4.1 实验条件

基于算法 1 及用户需求分析,为了充分证明本文方法的可行性和有效性,采用研究团队开发的基于开发网络环境下,松散耦合的 B/S 结构服务信息调度应用系统来综合分析模型性能.在此电厂信息调度服务平台中,采用随机法获取 37 640 个组件 Web 服务,用于构建 6 000 组电力信息组合服务,其中,组件服务包含服务数据、控制逻辑及用户评价的 QoS 历史数据等基本信息,用户数据由电厂各部门 289 名工作人员在 6 个月内使用此平台的情况来采集.针对电厂信息调度服务平台中电力信息的 5 个基本服务,通过 BPEL 流程进行调用,其中的服务执行参数由调度费用、时间开销、服务可用性和可靠性组成,且各参数随时间动态变化,将电厂用户每执行一次服务的参数记录下来,以 TVPN 对服务参数进行描述,由 Petri 网结构对各服务节点实现参数最优化的选取和匹配,将服务组合转化为节点路径优化问题.

基于模型流程,设置系统时变函数集  $F_{\delta}=F_{I_{\delta}}\cup F_{O_{\delta}}$  将自然数集  $N=\{1,\dots,1000\}$  视作有限时变库所集,其每个元素对应状态表示个人在一段时间内使用组合服务的次数.时变函数式与组件服务的输入/输出功能相对应,表示服务状态变迁触发或外延.为了便于采集实验数据,设定 1/4 组件服务包含时变输入/输出影响,1/4 只包含时变输入影响,1/4 只包含时变输出影响,其余不受时间变化参数影响.将服务平台基本流程转化为时变 Petri 网模型,其逻辑执行过程如图 6 所示.

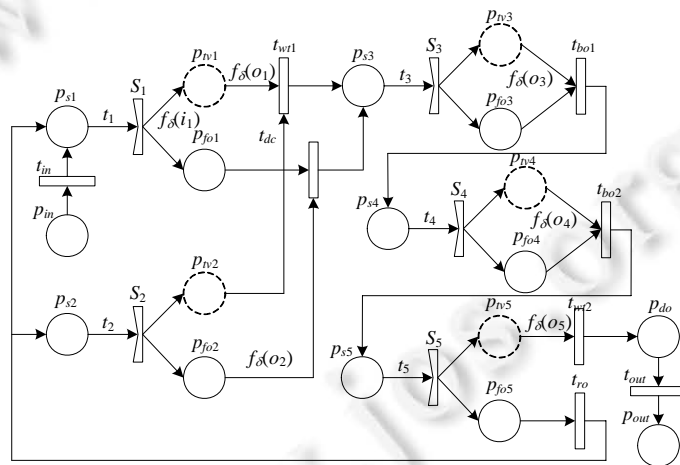


Fig.6 Services workflow of the platform of power plant information based on SC-TVPN

图 6 电厂信息调度服务的 SC-TVPN 网流程

本实验在对应的实际系统中,将时变 Petri 网的时变函数表达式与特定服务条件综合进行讨论,设置部分组件服务的文档为其他建模类型,用于实验对比或测试.实验中用到的信息调度服务平台搭建在 IBM X260 服务器上,实验的 CPU 为 Dual-Core E6500@2.93GHz,内存 4GB RAM,系统软件开发环境为 Visual Studio 2010,数据库采集系统利用 SQL Server 2008 开发搭建,使用到的组件服务主要为涉及电厂工作流程的基本信息调度规程.

## 4.2 服务组合的有效性实验

为了验证本文所提时变 Petri 网服务组合方法的可行性和有效性,根据采集的实验数据,通过设计的服务流程验证及组合算法,由比较调用的组合服务 QoS 指标实现,并综合计算各方法下构建组合服务的组合成功率  $TR_0$ ,可直观得出不同方法对组合服务系统建模的作用及有效性比较。

表 2 为不同服务组合方法下,在服务集  $S_1$  与  $S_2$  中获取服务组合策略的 QoS 可描述性及组合成功率的对比情况.其中,在构建的组合服务策略集  $St$  上,先选取 4 000 个组合服务作为服务测试集  $S_1$ ,将其余 2 000 个组合服务作为服务比较集  $S_2$ .对于  $S_1$  和  $S_2$  中的电力信息调度服务,分别划分组别,并以包含数目为 10 个,20 个,50 个,100 个,500 个映射规则实现综合调度信息服务的组合.组合过程采用服务编码文档绑定及在线发布形式,功能相同的组合服务分别由基本工作流法(BPEL<sup>[18]</sup>)、基于普通 Petri 网(PN<sup>[13]</sup>)的 BPEL、模糊理论组合法(Fuzzy<sup>[19]</sup>)、基于 PN/TVPN 的 Fuzzy、服务功能组合法(AOWSC<sup>[20]</sup>)、基于 PN/TVPN 的 AOWSC 等组合方法实现建模和发布.由服务实际发布的功能可知,上述方法均能表达服务的并发异步特性,可实现不同功能的组合过程.得到的组合策略中,根据功能不同,服务数为 10 个~1 000 个.对于用户而言,各组合/组件服务可循环执行且优先调用 QoS 中可用性较高的执行.然后依据算法 1 计算  $St_1 \sim St_{10}$  这 10 组服务组合策略的时间开销属性  $T_s$ ,并计算各方法下的组合成功率  $TR_0$ .

**Table 2** Comparison of the composition evaluation with different services composition methods

表 2 不同服务组合方法的组合评价比较

方法	服务可描述性	QoS- $T_s$ 可描述性	组合成功率 $TR_0$ (%)
BPEL <sup>[18]</sup>	Yes	No	N/A
BPEL+PN <sup>[13]</sup>	Yes	No	87.75
BPEL+TVPN	Yes	Yes	<b>98.21</b>
Fuzzy <sup>[19]</sup>	Yes	No	N/A
Fuzzy+PN	Yes	No	89.30
Fuzzy+TVPN	Yes	Yes	96.25
AOWSC <sup>[20]</sup> +PN	Yes	No	90.31
AOWSC+TVPN	Yes	Yes	94.69

在使用不同组合方法构建组件服务并进行组合时,不同服务数下时间开销对 QoS 影响比重  $V^{(T_s)}/\psi$  的计算结果.可知,使用 BPEL,Fuzzy 和 AOWSC 这 3 种方法均可进行服务描述,但由于时变 Petri 网在变迁引发操作中考虑了时变参数函数作用,对 QoS 时间开销属性具有更好的描述能力,因此比普通 Petri 网构建的服务组合策略具有更高的组合成功率.随着服务数增多,系统检索服务候选集的时间与服务间功能组合所存在的特定时延都会增加.通过时变 Petri 网的时间参数表达式,将时间因数与本体服务建立关联,构造一个与服务本身特性相关的随机变量,并计算服务组合总时间开销.

基于 SC-TVPN 方法在不同服务组合建模框架下都能较好描述服务数与时间开销的近似线性增长特性,本文采用 BPEL 进行服务组合功能逻辑和数据流描述,并结合时变 Petri 网描述服务异步组合过程,在电厂信息调度服务数据下,得到了比 Fuzzy 和 AOWSC 方法更高的组合成功率.当服务较少时,时间开销占 QoS 的比重为 11.37%;随着服务数增多,该比重趋于稳定到 45%,说明时间开销对服务组合的质量评价具有重要作用.同时,随着服务数增多,用户对服务组合策略的满意度也有较高要求,当用户需求和候选集中可选择执行的服务输入/输出功能一定时,则可选择执行一组组合成功率高且时间开销低的服务组合策略.因此,与已有服务组合模型相比,本文组合方法在评价时间开销对用户反馈服务质量评价的影响上具有有效性.

图 7 表明,构建同一个服务组合方案时,使用不同服务集构建该方案的执行时间也不同.随着方案中服务数的增多,根据回溯算法计算服务组合方案所需的执行时间也将增加.此外,当一个方案服务数较少时,构建组合方案的算法执行时间在两组服务集上无明显差异;反之,方案服务数较多时,包含服务数目较少的服务集  $S_1$  在执行时间上显然效率更高.

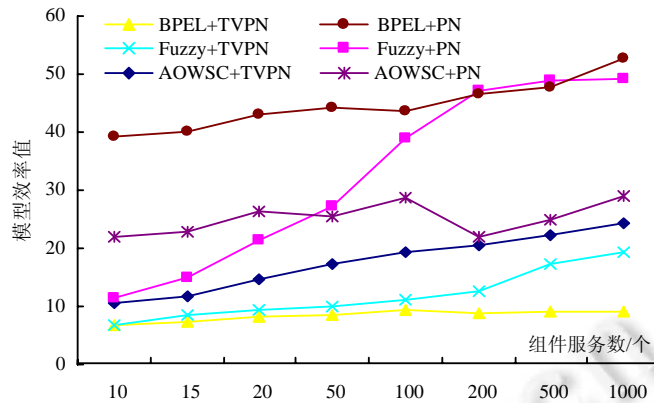


Fig.7 Contrast of service time consumption and efficiency for different methods on the same service set

图 7 不同方法在相同服务候选集下的时间开销及系统效率对比

4.3 同一服务候选集下构建服务组合策略

第 4.2 节的实验是针对同一个服务候选集,采用不同服务建模方法进行实验的,目的是为了通过比较得出本文方法在描述 QoS 的时间开销属性上具有一定优势,同时具有较高的组合成功率.为了进一步说明在不同服务候选集下,本文方法同样具备有效性和可行性,本节在同一服务候选集下进行实验,并比较使用不同的服务映射规则构建不同服务组合策略  $St_1$  和  $St_2$  时得到的用户满意度来证明.表 3 为设定不同服务组合策略中的服务数,通过实验获得的 100 组用户反馈评价情况.

Table 3 Feedback of users for different service compositions on the service set

表 3 同一候选服务集下构建不同服务组合方案的用户评价

组件服务数	组合策略服务数( $St_1/St_2$ )	服务映射规则数	用户反馈通过数( $St_1/St_2$ )	用户反馈相对通过率( $St_1/St_2$ )
10	5/10	10	87/83	1.05
50	15/30	30	75/73	1.03
100	25/50	40	71/63	1.13
200	50/100	50	65/50	1.3
500	100/200	60	62/44	1.41
1 000	250/500	70	55/41	1.34

表 3 反映了在时变 Petri 网构建的服务组合模型中,使用包含不同服务数的同一候选服务集和服务映射集构建不同服务组合策略的用户反馈情况.可以看出,随着服务候选集包含的服务数增多,使用本文所提模型建立的服务策略在用户反馈通过数上呈降低趋势,说明服务搜索空间越大,构建使用户满意的服务策略难度越大.

图 8 为在同一个候选服务集下,用 8 组服务映射规则构建两组不同服务数的服务组合策略,在用户反馈通过数与组合服务时间开销指标的对比情况.

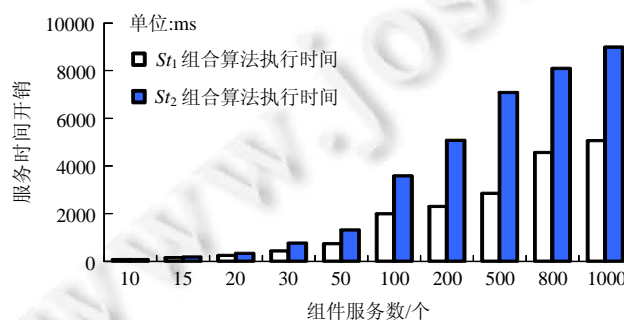


Fig.8 Contrast of service time consumption of different service compositions under the same amount of services

图 8 相同服务候选集下的不同服务组合时间开销

可知,服务策略包含的服务数是影响用户反馈评价的主要因素.另外,在同一服务候选集中,构建服务数不同的服务策略时,用户反馈通过数相差不大,若用相对通过率来表示用户对组合服务满意程度的对比,则该数值可保持在 1.5 以下.根据文献[21]方法可知,本文建模方法是可行的.

使用本文方法进行电厂信息调度服务应用时,应充分考虑使用最少服务数的服务候选集来满足用户的使用需求即可.当组合方案中服务数一定时,时间开销是影响用户满意度的重要参考指标.由调度平台的实际运行过程,使用本文所提建模方法,在宏观上可以有效提高电厂工作人员的信息服务满意度;同时,可以根据用户对信息调度服务的使用偏好,我们可以进一步调整该信息调度平台的服务结构,通过合理的资源配置方式,将软硬件性能与组件服务的执行效率相结合,即可实现平台的最优利用价值.

## 5 总结

用户反馈 QoS 评价方法是反映系统提供组合服务策略是否达到用户期望值的重要衡量指标,而服务的时间开销特性对本文研究的电厂信息调度服务平台具有重要参考价值,电厂系统以省时省力的调度信息服务规程为基准,因此用户更多考虑的是如何节约服务调用的时间开销.本文根据 Web 服务具有异步并发、协同操作等特点,考虑到目前仅有较少研究针对特定服务组合的时间开销特性,提出一种基于时变 Petri 网的系统结构用于描述服务组合建模过程.该模型面向服务组合策略计算,根据组合服务库所回溯理论对服务策略执行正确性检验,降低系统普遍存在的服务重用问题,能有效提高服务组合效率,使系统具有较高的稳定性和组合成功率.

本文提出一种由时间 Petri 网拓展得到的时变 Petri 网服务组合建模方法,并在一组实际电厂信息调度服务平台提供的 Web 服务下进行实验分析,给出不同服务建模方法在组合成功率上的对比情况,说明该方法能够达到较好的效果.此外,使用不同规模的服务候选集进一步通过实验数据,说明时间开销特性对服务组合策略的效率及用户满意度的影响.在日益复杂的网络环境中,使用一种简单、高效的服务组合方法是满足企业级用户需求的前提条件.今后,我们将研究影响服务组合质量的其他因素对系统性能的影响,并考虑通过建立更高效的 Petri 网拓展模型结构来描述系统性能,为服务系统综合分析做进一步探索和研究.

**作者注** 本文是我们于 2016 年 6 月 30 日投到《软件学报》的论文.该文是大连理工大学大学韩敏(本文第一作者)老师指导的 2017 届(2017 年 6 月)毕业的研究生孙国庆(本文第二作者)的硕士学位论文《基于时变 Petri 网的 Web 服务组合研究与应用》工作成果的一部分,特此说明.

## References:

- [1] Kritikos K, Plexousakis D. Requirements for QoS-based Web service description and discovery. *IEEE Trans. on Services Computing*, 2009,2(4):320–337.
- [2] Iordache R, Moldoveanu F. QoS-aware Web service semantic selection based on preferences. *Procedia Engineering*, 2014,69(1): 1152–1161.
- [3] Rodriguez-Mier P, Pedrinaci C, Lama M, *et al.* An integrated semantic Web service discovery and composition framework. *IEEE Trans. on Services Computing*, 2016,9(4):537–550.
- [4] Dhore SR, Gangwar H, Mishra P, Sharma R, Singh R. Systematic approach for composing Web service using XML. *Int'l Conf. on Computing Communication & Networking Technologies*, 2012,90(1):1–5.
- [5] Qian YY, Hui HX. A Web service selection approach based on the authenticity of QoS data and the confidence of users. In: *Proc. of the IEEE Int'l Symp. on Computer Network & Multimedia Technology*. Piscataway, 2009. 1–5.
- [6] Valero V, Macià H, Pardo JJ, *et al.* Transforming Web services choreographies with priorities and time constraints into prioritized-time colored Petri nets. *Science of Computer Programming*, 2012,77(3):290–313.
- [7] Ribas M, Furtado CG, Souza N, Barroso G, Moura A, Lima A, Sousa F. A Petri net-based decision-making framework for assessing cloud services adoption: The use of spot instances for cost reduction. *Journal of Network & Computer Applications*, 2015,57: 102–118.
- [8] Tang X, Jiang C, Zhou M. Automatic Web service composition based on Horn clauses and Petri nets. *Expert Systems with Applications*, 2011,38(10):13024–13031.



- [9] Gabrel V, Manouvrier M, Murat C. Web services composition: Complexity and models. *Discrete Applied Mathematics*, 2015,196: 100–114.
- [10] Hu Q, Du YY, Yu SX. Service net algebra based on logic Petri nets. *Information Sciences*, 2014,268(6):271–289.
- [11] Chen X, Zheng Z, Liu X, Huang Z, Sun H. Personalized QoS-aware Web service recommendation and visualization. *IEEE Trans. on Services Computing*, 2013,6(1):35–47.
- [12] Thirumaran M, Dhavachelvan P, Aishwarya D, Rajakumarid K. Conventional usage of finite state machine over Petri net in Web service change management framework. *IERI Procedia*, 2013,4:99–109.
- [13] Yuan CY. *The Application of Petri Net*. Beijing: The Press of Science, 2013 (in Chinese).
- [14] Shao LS, Zhou L, Zhao JF, Xie B, Mei H. Web service QoS prediction approach. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2009, 20(8):2062–2073 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3375.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2009.03375]
- [15] Hasan MH, Jaafar J, Hassan MF. Experimental study on the effective range of FCM's fuzzifier values for web services' QoS data. In: *Proc. of the Int'l Conf. on Computer & Information Sciences*. IEEE, 2014. 1–6.
- [16] Fan GS, Yu HQ, Chen LQ, Liu DM. Fault diagnosis and handling for service composition based on Petri Nets. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2010, 21(2):231–247 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3790.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2010.03790]
- [17] Zhang C, Zhang FM, Li F, Wu HS. Improved artificial fish swarm algorithm. In: *Proc. of the IEEE 9th Conf. on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*. IEEE, 2014. 748–753.
- [18] Deng SG, Wu J, Li Y, Wu ZH. Automatic Web service composition based on backward tree. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2007,18(8):1896–1910 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/1896.htm>
- [19] Zhao W, Peng L, Tao X, Wu HS. Ability-based fuzzy Web service clustering and searching algorithm. In: *Proc. of the Int'l Conf. on Communication Technology*. IEEE, 2012. 1032–1037.
- [20] Mallayya D, Ramachandran B. Aspect-oriented Web service composition: A Petri net based approach. In: *Proc. of the Int'l Conf. on Cyber-enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery*. Piscataway: IEEE Computer Society, 2011. 88–95.
- [21] Jiang W, Hu S, Liu Z. Top *K* query for QoS-aware automatic service composition. *IEEE Trans. on Services Computing*, 2014,7(4): 50–57.

## 附中文参考文献:

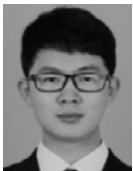
- [13] 袁崇义. *Petri 网应用*. 北京: 科学出版社, 2013.
- [14] 邵凌霜, 周立, 赵俊峰, 谢冰, 梅宏. 一种 Web Service 的服务质量预测方法. *软件学报*, 2009(8):2062–2073. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3375.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2009.03375]
- [16] 范贵生, 虞慧群, 陈丽琼, 刘冬梅. 基于 Petri 网的服务组合故障诊断与处理. *软件学报*, 2010, 21(2):231–247. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3790.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2010.03790]
- [18] 邓水光, 吴健, 李莹, 吴朝晖. 基于回溯树的 Web 服务自动组合. *软件学报*, 2007, 18(8):1896–1910. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/1896.htm> [doi: 10.1360/jos181896]



韩敏(1959—),女,辽宁大连人,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为复杂系统建模与预测,神经网络理论及其应用.



郑丹晨(1983—),男,博士,副教授,主要研究领域为计算机视觉,模式识别.



孙国庆(1991—),男,硕士,主要研究领域为 Web 服务理论,系统集成.



周惠巍(1969—),女,博士,副教授,CCF 专业会员,主要研究领域为自然语言处理,文本挖掘,机器学习.