

考虑协作方的服务组合分析

辛 乐, 范玉顺

(清华大学 自动化系, 北京 100084)

摘 要: 在业务服务网络中, 服务组合的交付往往由多方协作完成。为了在服务组合的分析和选择中考虑不同协作方的影响, 该文构建了兼容协作方的服务组合模型, 以服务流程逻辑为核心, 拓展定义支持性服务个体的影响因子; 随后通过定义服务组合的结构关联关系指标, 提出基于关联的服务组合优选方法。该方法支持用户结合个人偏好等信息进行分析, 并将支持性服务的效用纳入了考虑范围, 更全面地评估了服务的交付效果。通过算例说明了该模型的有效性。

关键词: 服务组合; 支持性服务; 结构关联关系

中图分类号: TH166

文献标志码: A

文章编号: 1000-0054(2015)05-0538-05

DOI:10.16511/j.cnki.qhdxxb.2015.05.010

Service composition analysis with collaboration

XIN Le, FAN Yushun

(Department of Automation, Tsinghua University,
Beijing 100084, China)

Abstract: In business service networks, service composition often involves cooperation. A service composition model was developed that includes the effects of collaboration to facilitate selection of the service composition method with collaboration. This model describes the service flow as the main logic and expands the definition of the support impact factor for various types of supporting services. Service composition structure correlation indexes are used to optimize the selection approach based on the users' preferences and to predict the supporting services' utility, which gives a more comprehensive assessment of the service delivery effect. A numerical example shows the effectiveness of this model.

Key words: service composition; support service; structure correlation

随着面向服务思想的日益普及和深化应用, 大量企业将核心业务资源以服务的形式进行发布和交付, 在这些业务服务构成的网络中, 服务组合的模式变得更加灵活和多样化。为了支持用户在海量服务中根据需求选择合适的服务或服务组合, 现有的

服务平台提供了服务或服务组合的详细信息如服务个体的组织方式、功能和非功能属性等, 基于服务或服务组合模型的分析是服务选择的一个关键问题。

为了描述服务组合模型特别是业务逻辑^[1], 现有的研究主要基于以下几类模型: 传统流程模型(如 Petri 网^[2]和 EPC 模型等)、面向对象的模型(如 UML 模型等)、动态流程建模语言(如 WPD L、WS-BPEL 和 BPMN 等)、过程集成模型(如 WS-CDL 等)。这些模型定义了完整的业务执行逻辑, 可有效支持企业内或跨企业的流程运转。但在不断发展成熟的业务服务网络中, 涌现出了多种新型的服务组合与协作方式。例如, Dojchinovski 等^[3]在网络应用程序接口(Web application programming interface, Web API)领域将服务协作者分为 API 开发者和应用聚合者等角色, Barros 等^[4]在企业业务信息系统领域定义了服务集成方、服务托管方和服务网关等新型业务服务类型。这些协作性服务与核心服务的组合方式无法用单一的流程模型恰当描述, 却将对服务交付产生重要影响。目前的服务分析与推荐引擎中往往只考虑服务自身的特征, 忽略了协作方的影响, 难以满足用户表达对服务协作方的偏好性需求, 具有一定的局限性。

针对这一问题, 本文建立考虑协作方的服务组合分析方法, 合理反映各协作方对交付质量的影响, 并通过服务组合结构关联关系的分析, 给出服务优选的策略, 支持消费者根据对服务个体性能

收稿日期: 2014-12-04

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61174169);

国家“八六三”高技术项目(2012AA02A613);

高校博士学科点专项科研基金(20120002110034)

作者简介: 辛乐(1987—), 女(汉), 河北, 博士研究生。

通信作者: 范玉顺, 教授, E-mail: fanyus@tsinghua.edu.cn

和协作方的偏好, 结合自身经验或其余消费者评价信息, 进行服务组合的优选。

1 考虑协作方的服务组合模型

将业务服务组合中的服务分为核心服务和支持性服务。核心服务常以流程形式进行组织, 向服务消费者提供服务组合的主要功能; 支持性服务由服务协作方提供, 承担服务交付的辅助性支持。将本文提出的模型称为考虑协作方的服务组合(service composition model with collaboration considered, SCMC)模型。

核心服务流程可能表现为顺序、选择、循环和并行模等逻辑, 在对流程模型进行结构或质量分析时, 常采用化简和合并等方式如关键路径法^[5]和可行路径拆分法^[6]等来进行预处理。本文的研究对象为业务服务领域, 最常见逻辑即为顺序流程, 因此参照 Yu^[6]的处理方法进行简化表述, 即以顺序流程为主要流程模型, 将其他逻辑关系简化和转换为顺序模型。

服务组合基本要素定义如下:

定义 1 核心服务流程(core service flow)表示在服务组合之中提供主要功能的服务个体所组成的过程, 定义为 $csf = (sp, sn, sSqc)$, 即包含关键属性为提供者 sp 、服务个体标识 sn 和顺序标识 $sSqc$ 的一组元素。对于 $s_i, s_j \in csf$, 若 $s_i \cdot sSqc + 1 = s_j \cdot sSqc$, 记为 $s_i a s_j$ 。核心服务流程模型为 $s_1 a s_2 a \dots a s_m$, 或 $\bigotimes_{s_i \in csf} a s_i$ 。

定义 2 支持性服务(support service)表示服务协作方提供的一系列起到辅助功能的服务个体, 往往无法表示为流程逻辑, 记作 $sptS = (sp, sn, sT)$, 即包含 sp 、 sn 和服务支持性类别 sT 的一组元素

定义 3 服务组合(service composition)由核心服务流程与支持性服务构成, 记作 $sc = (csf, \{sptS\})$, 对于 $s_k \in \{sptS\}$, $s_k \cdot sT$ 为 s_k 的支持类型, 将其与核心服务流程的组合记作 $csf \otimes_{s_k \in \{sptS\}} s_k \cdot sT s_k$, 即将服务组合的模型记作 $(\bigotimes_{s_i \in csf} a s_i)$ 。

该服务组合模型在正确处理业务逻辑的前提下, 在结构上加入了服务协作方的功能指标。对于核心服务的流程结构模型与质量特征, 无论是在 Web 服务^[7]还是业务服务领域^[8-9] 均已有多研

究, 因此下一节主要介绍支持性服务的相关特点。

2 支持性服务类别及指标

本节首先给出衡量支持性服务性能的指标定义, 随后通过对服务协作方的介绍, 分别阐述其服务质量特征的常见形式。

2.1 支持性服务影响因子

将支持性服务的作用归纳为其对服务个体或服务组合的服务质量(quality of services, QoS)指标的影响因子, 其中业务服务的 QoS 指标可根据领域属性进行定义和求取^[10]。

定义 4 支持性影响因子(support impact factor, SIF)描述支持性服务对服务组合或个体的影响程度, 记作 $SIF(sptS) = \{sc/s, \{cond\}, \{domain\}, \{attribute\}, factor\}$, 即表示该支持性服务对于服务组合 sc 或组合中的个体 s , 在一系列状态 $cond$ 之下, 对于指定领域 $domain$ 及指标维度 $attribute$ 的倍数影响 $factor$ 。缺省情况时简记 $SIF(sptS) = factor$, 此时 $\{cond\}$ 取值为所有状态 \bigcup_{cond} , $\{domain\}$ 取值为所有领域 \bigcup_{Dm} , $\{attribute\}$ 取值为所有正向维度指标 \bigcup_{Ath}^+ 。

影响因子 SIF 的取值类似 QoS 指标取值的处理, 既可由服务协作方提供, 也可由实际服务交付中的反馈结果进行统计。本文给出 SIF 的动态更新方法为

$$SIF(sptS_t), factor_t = \begin{cases} f_0, & t = 0; \\ (1 - \lambda_f) factor_{t-1} + \lambda_f f'_t, & t \geq 1. \end{cases} \quad (1)$$

其中: f_0 为支持性服务交付时协作方的宣称取值, 参数 $\lambda_f \in [0, 1]$ 控制统计结果的更新速度, $(t-1, t]$ 时间范围内的统计结果为

$$f'_t = \frac{\overline{Q_{Dm, Ath}(sc_t) | sc_t, state \in \{cond\} \wedge sptS_t \in sc_t}}{\overline{Q_{Dm, Ath}(sc_t) | sc_t, csf = sc_t, csf \wedge sptS_t \notin sc_t}} \quad (2)$$

f'_t 为包含 $sptS_t$ 作为支持性服务的服务组合指定领域和维度上在 $(t-1, t]$ 内的 QoS 均值与不含 $sptS_t$ 的服务组合的该项 QoS 的均值之比。

2.2 业务服务的协作方类别及其影响因子分析

经典的服务模型在参与者方面只考虑核心服务的提供者, 本文结合 Web API 和业务信息系统等领域对服务交付框架的研究成果^[3-4], 扩充服务协作方的类型, 并给出对其影响因子的分析。

2.1.1 服务中介平台

服务中介平台(service broker platform, SBP)具有对服务进行注册、查找、匹配、交付和评价等管理功能,作为中介方提供消息传递与交换,最典型的应用为电商服务平台通过发布商品及服务的信息,支持消费者与提供者进行交易。

SBP的信誉反映了其作为运营管理平台的服务个体或组合实现宣称质量的概率^[11],因此SBP的影响因子为 $SIF(SBP_i) = Rpt(SBP_i)$,其中中介平台的信誉指标 $Rpt(SBP_i) \in [0, 1]$ 。

2.2.2 服务编制者

与SBP相比,服务编制者(service aggregator, SA)更深层次地参与了服务的客户化定制,通过将多个核心服务个体进行流程化的编制与组合,为用户提供相对完整的解决方案,实现服务聚合与增值。这一类角色最典型的主体为各类旅行服务公司。

SA对服务交付的影响主要包括信誉度 $Rpt(SA_i)$ 、反映其服务编制或组织能力的评级指数 $Str(SA_i)$ 和时间变动系数 $Ont(SA_i)$ 等,则其影响因子为

$$SIF(SA_i) = \{(sc, \bigcup_{cond}, \bigcup_{Dm}, \bigcup_{Ath}^+, Rpt(SA_i)), (sc, \bigcup_{cond}, \bigcup_{Dm}, \bigcup_{Ath}^+, Str(SA_i)), (sc, \bigcup_{cond}, \bigcup_{Dm}, \bigcup_{time}, 1 + Ont(SA_i))\}.$$

其中: $Rpt(SA_i) \in [0, 1]$, $Str(SA_i) \in [0, 1]$,

$Ont(SA_i) = \frac{t_{exe} - t_{clm}}{t_{clm}} \in (-1, +\infty)$ 表示实际执行时间 t_{exe} 与宣称时间 t_{clm} 的差别系数。

2.2.3 服务托管方

服务托管方(service hoster, SH)通常面向服务提供商进行直接支持,通过对产品或服务的维护管理,支持服务消费。最常见的SH类服务为在线类游戏、商业软件和数据中心等的云计算托管。

SH类服务最重要的影响指标为其可靠性 $Rl(SH_i)$ 和安全性 $Sf(SH_i)$,反映在影响因子上即为 $SIF(SH_i) = \{(sc, \bigcup_{cond}, \bigcup_{Dm}, reliability, Rl(SH_i)), (sc, \bigcup_{cond}, \bigcup_{Dm}, security, Sf(SH_i))\}$,其中: $Rl(SH_i) \in [0, 1]$, $Sf(SH_i) \in [0, 1]$, reliability和security分别指可靠性和安全性QoS指标。

2.2.4 服务渠道运营方

服务渠道即服务提供商与服务消费者的可达性通道,其畅通性和可用性对服务消费的评价产生影

响,如企业售后服务的渠道包括热线客服等,银行类服务的服务渠道包括网上银行和手机银行等。

服务渠道运营方(service channel maker, SCM)提供服务的畅通程度用平均等待时长 $Tw(SCM_i)$ 衡量,则其影响因子可表示为 $SIF(SCM_i) = (sc, \bigcup_{cond}, webAPI, responsetime, \beta^{-Tw(SCM_i)})$,其中 $\beta > 1$, $Tw(SCM_i) \in [0, +\infty)$ 。webAPI为服务领域, responsetime指反馈时间QoS属性。

2.2.5 服务入口运营商

服务入口运营商(service entrance operator, SEO)主要面向服务消费者,提供可能的服务介绍并吸引服务消费,主要包括各类在线推荐系统和广告运营商等。SEO只注重流量吸引的效果,对于随后的服务选择和交付等功能不介入。

SEO的真实性 $Tr(SEO_i)$ 为其重要指标,真实性指标记录了通过入口访问到可信服务与非可信服务的次数之差,则其影响因子为

$$SIF(SEO_i) = (sc, \bigcup_{cond}, \bigcup_{Dm}, reputation, 1/(1 + \alpha^{Tr(SEO_i)}).$$

其中: $\alpha > 1$, $Tr(SEO_i) \in (-\infty, +\infty)$, reputation为信誉指标。

2.2.6 其余支持方

其余支持方(other support operator, OSO)包括未列出的提供其他服务支持方式的协作者,可根据业务服务的实际情况进行角色定义和影响因子分析。

3 服务组合的关联关系分析与优选

基于SCMC可进行一系列结构性关联指标运算,并根据一定的策略来分析和对比服务组合方案,此处的策略可以是普遍性的评价标准,也可以是消费者预设的优选标准。根据服务结构的优选方法可在缺失部分服务个体QoS属性的情况下实施,并可结合用户的历史经验和偏好排序等信息进行综合决策。

3.1 服务组合结构性关联关系指标

定义5 对于 sc_i 和 sc_j ,记 $\Delta(sc_i, sc_j) = \{s_i | (s_i \in sc_i) \wedge (s_i \notin sc_j)\}$ 为 sc_i 对 sc_j 的差异集。

定义6 对于 sc_i 和 sc_j ,若 $\Delta(sc_i, sc_j) = \Delta(sc_j, sc_i) = \emptyset$,则称 sc_i 与 sc_j 同构,记为 $sc_i \triangle sc_j$ 。

定义7 对于 sc_i 和 sc_j ,若 $\Delta(sc_i, sc_j) \neq \emptyset$,

$\Delta(sc_j, sc_i) = \emptyset$, 则称 sc_i 包含 sc_j , 记为 $sc_i \supseteq sc_j$ 。

定义 8 对于 sc_i 和 sc_j , 若 $sc_i.csf = sc_j.csf$, 则称 sc_i 与 sc_j 等核心, sc_i 的等核心服务组合记为 $C(sc_i) = \{sc_j \mid sc_j.csf = sc_i.csf\}$ 。

定义 9 对于 sc_i 和 sc_j , 记 $\delta(sc_i, sc_j) = |\Delta(sc_i, sc_j) + \Delta(sc_j, sc_i)| / (|sc_i| + |sc_j|)$ 为 sc_i 与 sc_j 的差异度, $\delta(sc_i, sc_j) = \delta(sc_j, sc_i)$ 。

定义 10 对于 sc_i 和 sc_j , 记 $\sigma(sc_i, sc_j) = 1 - \delta(sc_i, sc_j)$ 为 sc_i 与 sc_j 的贴近度, $\sigma(sc_i, sc_j) = \sigma(sc_j, sc_i)$ 。

3.2 基于结构关联的服务组合优选策略

根据 SCMC 的算子性质和关联指标, 给出不同情境之下, 基于用户需求的服务组合基本评价原则和优选方案。

3.2.1 情境 1

用户选定服务组合, 检索替代方案。对于用户选定的服务组合 sc_i , 其替代方案可包括与 sc_i 同构的服务组合、包含 sc_i 的服务组合、与 sc_i 等核心的服务组合和与 sc_i 贴近度最高的服务组合, 其替代优先级 prt 排序为

$$\{sc_j \mid sc_j \triangle sc_i\}.prt > \{sc_j \mid sc_j \supseteq sc_i\}.prt > C(sc_i).prt > \{sc_j \mid \max \sigma(sc_i, sc_j)\}.prt.$$

3.2.2 情境 2

用户比较服务组合, 通过差异化分析给出初步的推荐备选方案。用户给定的备选服务组合集合记为 $\{sc\}_{\text{if}}$, 在符合各方面需求约束的情况下, 通过以下策略进行服务组合的对比和筛选:

1) 若 $\exists sc_i, sc_j \in \{sc\}_{\text{if}}, sc_i \triangle sc_j \wedge sc_i.cst \leq sc_j.cst$, 则 $sc_i < sc_j$, 其中 cst 为选择该组合的代价如消费价格和执行时间等, 根据具体情境进行求取, $<$ 表示偏序意义上的“优于”关系;

2) 若 $\exists sc_i, sc_j \in \{sc\}_{\text{if}}, sc_i \supseteq sc_j \wedge sc_i.cst \leq sc_j.cst$, 则 $sc_i < sc_j$;

3) 若 $\exists sc_i, sc_j \in \{sc\}_{\text{if}}, sc_j \in C(sc_i) \wedge sc_i.\{sptS\} < sc_j.\{sptS\} \wedge sc_i.cst \leq sc_j.cst$, 则 $sc_i < sc_j$;

4) 若 $\exists sc_i, sc_j \in \{sc\}_{\text{if}}, \Delta(sc_i, sc_j) < \Delta(sc_j, sc_i) \wedge sc_i.cst \leq sc_j.cst$, 则 $sc_i < sc_j$;

5) 若 $\exists sc_i, sc_j \in \{sc\}_{\text{if}}, \text{Utl}(\Delta(sc_i, sc_j)) - \text{Utl}(\Delta(sc_j, sc_i)) \geq \text{Utl}(sc_i.cst - sc_j.cst)$, 则 $sc_i < sc_j$, 其中 Utl 指服务或费用对用户的效用, 可由用户根

据偏好指定或由历史记录分析得来。

如上所示, 优选策略可依用户要求进行自定义描述。根据服务组合的相关关系指标对备选集进行对比和筛选, 可减少服务备选集的规模, 将服务组合的优选问题通过结构上的分析化简为关键性服务个体之间的对比, 由于服务个体的对比相对简单易行, 评价信息如用户偏好和可获取到的其他对比评价等来源广泛, 从而可有效降低服务组合优选模型的复杂度, 更便于支持服务组合的选择; 并将支持性服务的效用纳入了考虑范围, 可以更全面地评估服务的交付效果。

4 基于结构与关联关系的分析算例

考虑来源于旅行服务平台的案例: 在经过初步旅行地点、时间和费用等条件筛选后, 用户获得可选的旅行方案集合为 $sc_k (k=1, 2, \dots, 6)$, 包括了从当地赴某风景区的各项服务, 如旅行社服务 $TA_i (i=1, 2, 3)$ 、往返航班服务 $al_j (j=1, 2)$ 、住宿服务 $ht_l (l=1, 2, 3)$ 、观光项目 $ss_m (m=1, 2, 3, 4)$ 。用模型表示可选的旅行方案及其价格如下:

$$sc_1 = (al_1 ass_1 aht_1 ass_2 aht_2 ass_3 aht_3 aal_1) \otimes^{SA} TA_1, \text{price}(sc_1) = 6\ 300;$$

$$sc_2 = (al_1 ass_1 aht_1 ass_3 aht_3 ass_2 aht_2 aal_1) \otimes^{SA} TA_1, \text{price}(sc_2) = 6\ 400;$$

$$sc_3 = (al_2 ass_1 aht_3 ass_3 aht_3 aal_2) \otimes^{SA} TA_1, \text{price}(sc_3) = 6\ 600;$$

$$sc_4 = (al_1 ass_1 aht_1 ass_2 aht_2 ass_3 a (ss_4 \otimes^{SA} TA_2) aht_3 aal_1) \otimes^{SA} TA_1, \text{price}(sc_4) = 6\ 500;$$

$$sc_5 = (al_1 ass_1 aht_1 ass_2 aht_2 ass_3 aht_3 aal_1) \otimes^{SA} TA_2, \text{price}(sc_5) = 6\ 600;$$

$$sc_6 = (al_2 ass_1 aht_2 ass_2 aht_1 ass_4 aht_3 aal_2) \otimes^{SA} TA_3, \text{price}(sc_6) = 6\ 300.$$

用户 A 在浏览 sc_1 时进行相似方案的检索, 不考虑价格因素, 则分析各服务组合方案之间的关系可知: $sc_2 \triangle sc_1, sc_4 \supseteq sc_1, sc_5 \in C(sc_1), \sigma(sc_6, sc_1) > \sigma(sc_3, sc_1)$ 。根据优先级原则, 可作为 sc_1 替代方案的服务组合按优先级从高到低排序为 sc_2 、 sc_4 、 sc_5 、 sc_6 和 sc_3 。

用户 B 希望在上述服务组合方案中进一步优选, 推荐出最佳性价比的组合, 除了前文所述服务组合的结构信息之外, 已知的信息还包括:

1) 支持性服务的影响因子。

$$\text{SIF}(TA_1) = \{Rpt_1, (sc, \{cancel\}, \bigcup_{\text{domain}} \text{price}, rt_1)\},$$

$SIF(TA_2) = \{Rpt_2, (sc, \{candle\}, \bigcup_{domain}, price, rt_2)\}$, 其中 Rpt 指其信誉度的取值, rt 指预订后若取消时仍需支付的价格与原价格的比率;

2) 综合其他消费者评价得到的项目服务个体的比较关系 RS 。

3) 用户对于服务的偏好性效用记录 $RU = Utl(\otimes^{SA} TA_2 - \otimes^{SA} TA_1) - Utl(ss_4 \otimes^{SA} TA_2 \otimes^{SA} TA_1) - Utl(cst = 100)$ 。其中 Utl 指服务或费用对用户的效用, cst 为选择该组合的费用。

按照已知条件的不同情况进行分析, 结果如表 1 所示。

表 1 服务组合优选方案

条件设置	$Rpt_1 = 0.8, rt_1 = 0.2$ $Rpt_2 = 0.9, rt_2 = 0.1$	$Rpt_1 = 0.9, rt_1 = 0.1$ $Rpt_2 = 0.8, rt_2 = 0.2$
$RS =$ $ss_3 < ss_4 \wedge$ $al_1 < al_2,$ $RU \geq 0$	sc_5	sc_1
$RS =$ $ss_3 > ss_4 \wedge$ $al_1 > al_2,$ $RU \geq 0$	sc_5, sc_6	sc_6
$RS =$ $ss_3 < ss_4 \wedge$ $al_1 < al_2,$ $RU \leq 0$	sc_4	sc_1, sc_4
$RS =$ $ss_3 > ss_4 \wedge$ $al_1 > al_2,$ $RU \leq 0$	sc_4, sc_6	sc_4, sc_6

可见, 即使不了解服务组合方案包括的所有服务个体的详细质量指标, 通过对服务组合结构及协作方的分析, 仍然可以将服务组合的比较转化为服务个体的比较, 在综合考虑服务协作方性能的前提下, 结合其他平台对服务个体的评价和用户本人对服务个体的偏好性选择倾向等信息, 进行服务组合的优选和推荐。

相比之下, 经典服务组合分析方法^[6]仅考虑核心服务流程, 不考虑服务协作方, 且需已知所有服务个体的 QoS 指标才可进行服务组合的质量指标求取。在本例中, 除了服务协作方 TA_1 和 TA_2 的影响因子之外, 其余的服务个体的质量数据均为未知, 则采用经典的服务组合分析方法无法对服务组合 $sc_k (k = 1, 2, \dots, 6)$ 进行优选。可见, 在服务组

合之间具有较大的结构相关性的情况下, 采用基于结构性关联的服务组合优选方法具有一定的优势。

5 结 论

本文针对服务网络中多种类型服务个体集成为服务组合的情况, 构建了考虑协作方的 SCMC, 既包括核心服务流程逻辑, 也包括支持性服务个体的作用; 随后通过定义服务组合的关联关系指标, 提出基于结构性关联的服务组合优选方法, 该方法不要求已知所有服务个体的质量信息, 支持部分信息缺失情况下的决策; 最后通过实际场景的算例进行验证, 说明所提出模型和方法既可以有效支持对协作方的分析, 也可从结构上有效降低服务组合优选的复杂性, 支持在关键服务个体上结合用户个人偏好等比对关系进行分析。上述模型和方法仍具有一定的局限性, 如基于结构性关联的服务组合优选方法更适合用于分析结构组成较类似、相关性大的服务组合, 不适合分析完全不相关的服务组合; 考虑服务组合时, 对于协作方的分析一方面拓展了对象系统空间, 有助于全面衡量服务的特性, 另一方面也将带来新的代价和风险如需要获取协作方潜在的性能数据和公正评价协作方对服务组合的影响等。下一步将深入研究此类问题。

参考文献 (References)

- [1] Mili H, Tremblay G, Jaoude G B, et al. Business process modeling languages: sorting through the alphabet soup [J]. *ACM Computing Surveys*, 2011, 43(1): 4.
- [2] 倪悦, 范玉顺. 基于着色 Petri 网的语义 Web 服务组合形式化验证 [J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2010(5): 714-717. NI Yue, FAN Yushun. Formal verification for semantic Web services composition based on coloured Petri nets [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2010(5): 714-717. (in Chinese)
- [3] Dojchinovski M, Kuchar J, Vitvar T, et al. Personalised graph-based selection of web APIs [C]// *Semantic Web-ISWC 2012*. Boston, MA, USA: Springer, 2012: 34-48.
- [4] Barros A, U K. Service delivery framework: An architectural strategy for next-generation service delivery in business network [C]// *2011 Annual SRII Global Conference*. Washington, DC, USA: IEEE, 2011: 47-58.
- [5] Zeng L, Benatallah B, Ngu A H H, et al. QoS-aware middleware for Web services composition [J]. *IEEE transactions on Software Engineering*, 2004, 30(5): 311-327.
- [6] Yu T, Lin K J. Service selection algorithms for composing complex services with multiple QoS constraints [C]// *Lecture Notes in Computer Science*. Berlin, Germany: Springer-Verlag Berlin, 2005: 130-143.

(下转第 549 页)

- [7] Amirat Y, Benbouzid M E H, Al-Ahmar E, et al. A brief status on condition monitoring and fault diagnosis in wind energy conversion systems [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009(13): 1619-1636.
- [8] Hameed Z, Hong Y S, Cho Y M, et al. Condition monitoring and fault detection of wind turbines and related algorithms: A review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, **13**(1): 1 -39.
- [9] 张登峰. 风力发电设备状态评价系统 [D]. 郑州: 郑州大学, 2011.
ZHANG Dengfeng. Design Status Evaluation System of Wind Power Generation Equipments [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2011. (in Chinese)
- [10] 郑小霞, 张志宏, 符杨. 基于变权模糊综合评判的海上风电机组运行状态评估 [J]. *计算机测量与控制*, 2013, **21**(7): 1861-1867.
ZHENG Xiaoxia, ZHANG Zhihong, FU Yang. Operating conditions assessment for offshore wind turbine based on fuzzycomprehensive evaluation with variable weights [J]. *Computer Measurement & Control*, 2013, **21**(7): 1861-1867. (in Chinese)
- [11] 王志国, 马一太, 杨昭, 等. 风力发电机组性能分析的模糊综合评判方法 [J]. *太阳能学报*, 2004, **25**(2): 177-181.
WANG Zhiguo, MA Yitai, YANG Zhao, et al. Fuzzy comprehensive evaluation method of wind power generation unit [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2004, **25**(2): 177-181. (in Chinese)
- [12] 李辉, 胡姚刚, 唐显虎, 等. 并网风电机组在线运行状态评估方法 [J]. *中国电机工程学报*, 2010, **30**(33): 103-109.
LI Hui, HU Yaogang, TANG Xianhu, et al. Method for on-line operating conditions assessment for a grid-connected wind turbine generator system [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2010, **30**(33): 103-109.
- [13] Li H, Hu Y G, Yang C, et al. An improved fuzzy synthetic condition assessment of a wind turbine generator system [J]. *Electrical Power and Energy Systems*, 2013(45): 468-476.
- [14] 肖运启, 王昆朋, 贺贵举, 等. 基于趋势预测的大型风电机组运行状态模糊综合评价 [J]. *中国电机工程学报*, 2013, **34**(13): 1-9.
XIAO Yunqi, WANG Kunpeng, HE Guanju, et al. Fuzzy comprehensive evaluation for operating condition of large-scale wind turbines based on trend predication [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, **34**(13): 1-9.
- [15] XIAO Yunqi, WANG Kunpeng, HE Guanju, et al. An operating condition fuzzy assessment strategy for large scale doubly-fed wind power generation system [J]. *Journal of renewable and sustainable energy*, 2014, **6**(3): 1-14.
- [16] 张登峰, 郝伟, 郝旺身, 等. 模糊理论在风力发电设备状态评价中的应用 [J]. *机械设计与制造*, 2011(11): 75-77.
ZHANG Dengfeng, HAO Wei, HAO Wangshen, et al. Application of fuzzy theory in status evaluation of wind power generation equipment [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2011(11): 75-77. (in Chinese)

(上接第 542 页)

- [7] Fan X Q, Fang X W, Jiang C J. Research on Web service selection based on cooperative evolution [J]. *Expert Systems with Applications*, 2011, **38**(8): 9736-9743.
- [8] Janssen M, Feenstra R. Service portfolios for supply chain composition; Creating business network interoperability and agility [J]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2010, **23**(8-9): 747-757.
- [9] Li S, Fan Y, Li X. A trust-based approach to selection of business services [J]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2011, **24**(8): 769-784.
- [10] 黄必清, 王婷, 薛霄. 基于扩展 QoS 模型的物流服务选择方法 [J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2011, **51**(1): 19-24.
HUANG Biqing, WANG Ting, XUE Xiao. Extended QoS model-driven logistics services selection approach [J]. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*, 2011, **51**(1): 19-24. (in Chinese)
- [11] Josang A. A logic for uncertain probabilities [J]. *International Journal of Uncertainty Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 2001, **9**(3): 279-311.