

# 一种基于运行时验证的 Web 服务选择方法

张亚红<sup>1</sup> 张琳琳<sup>1</sup> 赵 楷<sup>1</sup> 陈佳丽<sup>1</sup> 冯在文<sup>2</sup>

(新疆大学信息科学与工程学院 乌鲁木齐 830046)<sup>1</sup> (武汉大学软件工程国家重点实验室 武汉 430072)<sup>2</sup>

**摘 要** 为了确保用户选择的 Web 服务的运行时行为与用户需求之间的一致性,提出了一种基于运行时验证的服务选择方法。首先基于自动机原理,对 Web 服务进行运行时验证。其次,定义了 3 种程度的行为匹配关系,基于运行时验证结果,量化 Web 服务运行时行为与用户需求之间的匹配程度,并使用 AHP 理论计算用户偏好。方法综合考虑行为匹配程度和用户偏好对服务选择的影响,提出服务选择策略。最后通过实验分析和比较说明了该方法的合理性。

**关键词** 运行时验证,行为匹配,用户偏好,Web 服务选择

**中图法分类号** TP311 **文献标识码** A

## Web Service Selection Method Based on Runtime Verification

ZHANG Ya-hong<sup>1</sup> ZHANG Lin-lin<sup>1</sup> ZHAO Kai<sup>1</sup> CHEN Jia-li<sup>1</sup> FENG Zai-wen<sup>2</sup>

(College of Information Science and Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)<sup>1</sup>

(State Key Laboratory of Software Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)<sup>2</sup>

**Abstract** To verify the consistency between run-time behavior of Web service and user requirements, a Web service selection method based on runtime verification was proposed. In this paper, based on automata theory, Web service was verified at run time. And then three kinds of behavior matching relationships were presented. Based on the results of runtime verification, the Web services matching degree between run-time behavior of Web service and user requirements was quantified. Besides, the user preferences were considered based on AHP. The method can deal with Web service selection in terms of behavior matching degree and users' preferences, and the experimental results indicate that this method is reasonable.

**Keywords** Runtime verification, Behavior matching, User preference, Web service selection

## 1 引言

Web 服务<sup>[1]</sup>选择,是服务消费者以某种方式在众多 Web 服务中选择满足自身需求的服务,以完成某种功能的过程。在 Web 服务的选择过程中,用户的功能和非功能需求是通常考虑的因素。目前提出的不少 Web 服务选择方法都是假定服务提供者描述的服务信息是真实可信的,因而在对 Web 服务进行选择时,常常直接使用服务提供者发布的 Web 服务信息。然而在实际应用中,这一对 Web 服务描述信息的真实性的假设往往很难保证,服务提供者可能出于利益考虑,发布了较吸引用户的服务描述信息,因此存在选择到的 Web 服务运行行为与用户需求并不相符的隐患,造成服务选择失败。

运行时验证<sup>[2]</sup>是一种新兴的轻量级验证技术,它把形式化验证技术和系统的实际运行结果结合起来,监控系统的运行行为,以保证系统的运行符合用户的需求规约。这一技术的出现,能够验证 Web 服务的运行时行为是否与用户的需求相符。以此为基础,本文提出一种基于运行时验证的 Web 服务选择方法,基于运行时验证的结果,选择出最适合用户的服

务,有效地降低了 Web 服务与用户期望存在较大差异的可能性。

本文工作是前期工作的延续。在前期工作中,基于自动机原理,解决了对服务进行运行时验证问题,那么如何基于前期工作选择出最适合的 Web 服务是本文需要解决的问题。Web 服务的运行时行为和用户需求之间的匹配程度能够说明该服务满足用户需求的程度,本文给出了 3 种不同的行为匹配关系来表示服务对用户需求的满足程度。此外,用户对不同的非功能属性的偏好往往也不同,偏好的不同造成服务选择的结果也有较大的不同,因此本文还考虑了偏好对服务选择的影响。AHP (Analytic Hierarchy Process, 简称 AHP)<sup>[3]</sup>是将与决策有关的元素分解成目标、准则、方案等层次,在此基础上进行定性和定量分析的决策方法,该方法适合于解决多指标决策问题,本文拟采用 AHP 解决用户的偏好问题。

## 2 相关工作

随着对 Web 服务组合和服务发现等技术的不断深入,

到稿日期:2013-03-18 返修日期:2013-06-04 本文受国家自然科学基金项目(61100017,61262089),福建省自然科学基金项目(2012J01250, 2011J05146),新疆大学博士毕业生科研启动基金项目(BS090142)资助。

张亚红(1987—),女,硕士生,CCF 会员,主要研究方向为 Web 服务、形式化验证,E-mail:shinian.zyh@163.com;张琳琳(1974—),女,博士,副教授,主要研究方向为面向方面技术、软件体系结构;赵 楷(1976—),男,博士,讲师,主要研究方向为语义 Web 技术、SOA。

Web 服务选择也成为服务计算领域的研究热点。从目前 Web 服务选择方法来看,不难发现目前方法大多是考虑 QoS 和服务信誉度的服务选择方法。

Zeng 等人较早提出了基于 QoS 的 Web 服务选择方法<sup>[4-6]</sup>,其中文献[5]较为经典。文章考虑了执行价格、执行时间、声望、执行成功率和可用性 5 种常见的 Web 服务 QoS 属性,基于多属性决策技术中的简单加权相加法,Web 服务的各维 QoS 值经过归一化后加权来得到备选 Web 服务的分值,其中 QoS 全权重由用户指定。北京大学的梅宏教授在文献[7]中提出了一种考虑 QoS 数据可信性的服务选择方法。方法从 QoS 数据来源的角度对质量属性进行分类和计算,根据不同的数据来源对 QoS 数据进行修正,使服务选择结果更加可信。Haddad J. El 等人基于 QoS 感知的 Web 服务选择方法在服务组合过程中没有考虑交易性约束的问题,提出了一种新的方法<sup>[8]</sup>,该方法在选择和组合过程中不仅考虑用户的功能需求,还考虑交易属性和 QoS 属性,提出了满足用户偏好的 Web 服务选择算法,其通过权重来表示 QoS 条件,使用风险水平语义定义交易需求。Sun 等人提出一种服务选择中 QoS 的计算方法<sup>[9]</sup>。QoS 受多个因素影响,因此该方法考虑了 3 种因素:服务提供者、消费者上下文和历史信息。该方法综合考虑了多种因素,对基于 QoS 的服务选择提供了有效的支持。

信誉是服务实体基于自身与其他实体之间的交互经验而产生的对其他实能力、诚信和可靠性的一种认知,以及对未来行为的主观期望。文献[10]提出了一个信誉感知的软件服务选择和等级划分的框架。基于市场学期望失验理论,构建了自动划分等级模型。文献[11]建立了 Web 服务贝叶斯信任模型,模型中考虑了多个因素以获取服务的信任度,包括第三方的意见、用户等级。文献[12]提出了一种 Web 服务信誉计算方法,该方法包括两个过程,首先 Cumulative Sum 方法监测恶意反馈等级,其次使用皮尔逊相关系统降低不同用户偏好对反馈信息的影响,提高了信誉度的等级。周庆教授等人,借助对服务可信度的综合评估,通过第三方的服务质量监控数据,从主观和客观两个方面评价 Web 服务选择,提出了基于 QoS 与可信度融合的 Web 服务选择模型<sup>[13]</sup>。

本文在当前 Web 服务选择方法的基础上,以一种新的视角去研究 Web 服务选择,其核心是通过 Web 服务行为进行运行时验证,服务运行时行为满足用户的需求。国内外学者提出了多种形式化方法对 Web 服务建模和验证问题展开研究,如进程代数<sup>[14]</sup>、Petri 网<sup>[15]</sup>、自动机<sup>[16]</sup>、线性时态逻辑<sup>[17]</sup>等。本文在前期工作即基于自动机原理实现了服务的运行时验证的基础上,提出了一种基于运行时验证结果,考虑行为匹配和用户偏好的服务选择方法,保障用户所选及其所需,具有一定的创新性。

### 3 基于自动机的运行时验证

结合前期工作,本节简单介绍基于自动机原理的服务运行时验证。

**定义 1(消息确定有限自动机)** AM 是一个八元组  $AM = (S, M, F, Q, \Sigma, \tau, s_0, T)$ , 其中:  $S$  表示状态的非空有限集合,对于  $\forall s \in S$ ;  $M$  是有穷消息的集合;  $F$  是组合片段执行条件的集合,若无组合片段或是无参数组合片段,执行条件为

空;  $Q$  是消息的 QoS 属性需求规约集合;  $\Sigma$  表示输入字母表  $\Sigma = \{(f, m, qos) | f \in F, m \in M, qos \in Q\}$ ;  $\tau$  表示状态转移函数;  $s_0$  表示 AM 的初始状态,  $s_0 \in S$ ;  $T$  表示 AM 的终止状态集合,  $T \subseteq S$ 。

**定义 2(执行片段和运行)** 使用  $AM = (S, M, F, Q, \Sigma, \tau, s_0, T)$  建模 Web 服务的运行时行为, AM 的一个执行片段可以定义为一个状态与动作交替的有穷序列,记为

$$\eta = s_0 \xrightarrow{a_0} s_1 \xrightarrow{a_1} s_2 \dots s_{n-1} \xrightarrow{a_{n-1}} s_n$$

其中,  $a_i = [frag_i; qos_i] / m_i$ ,  $s_i \xrightarrow{a_i} s_{i+1} \in \tau (0 \leq i \leq n-1)$ 。如果  $s_n \in T$ , 则称  $\eta$  为 AM 的一个运行。

**定义 3(轨迹、字和接受语言)** 设  $\eta = s_0 \xrightarrow{a_0} s_1 \xrightarrow{a_1} s_2 \dots s_{n-1} \xrightarrow{a_{n-1}} s_n$  是 AM 的一个执行片段, 则  $\eta$  上所有动作组成的序列称为  $\eta$  的一个轨迹, 记为  $trace(\eta) = a_0 a_1 \dots a_{n-1}$ 。如果  $\eta$  是 AM 的一个运行, 则称  $trace(\eta) = a_0 a_1 \dots a_{n-1}$  是 AM 的一个字。用  $L(AM)$  表示 AM 字的集合, 称为 AM 的接受语言。

**定义 4** 如果用户的需求模型  $R_u$  的轨迹  $teace(R_u)$  是 Web 服务运行时行为模型的字, 则说明 Web 服务满足用户该需求。

## 4 基于运行时验证的 Web 服务选择机制

运行时验证解决了 Web 服务运行时行为是否满足用户需求的问题,如何基于验证结果选择出最适合的服务是本节研究的重点。图 1 描述了本文提出的基于运行时验证的 Web 服务选择方法对应的流程。首先通过运行时验证得出验证结果,综合考虑行为匹配和用户偏好,对 Web 服务进行排序,计算出服务的 Rank 值,Rank 值最高的服务即为最终选择的服务。

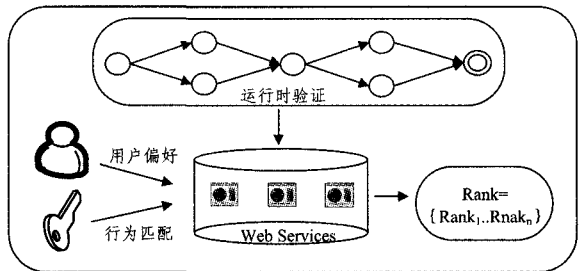


图 1 基于运行时验证的服务选择流程

### 4.1 行为匹配

用户基于运行时验证结果已发布的 Web 服务中选择满足用户需求的服务,行为匹配是比较用户需求与 Web 服务的运行行为之间的匹配程度,用户可以服务行为与自身需求的匹配程度来进行服务选择。本文定义了 3 种不同的行为匹配关系。

**定义 5(完全匹配)** 设  $R_u$  为用户的需求集合,  $AM_{R_i} = (S_{R_i}, M_{R_i}, F_{R_i}, Q_{R_i}, \Sigma_{R_i}, \tau_{R_i}, s_{0R_i}, T_{R_i})$  是用户的第  $i$  个需求的自动机表示,  $AM_W = (S_W, M_W, F_W, Q_W, \Sigma_W, \tau_W, s_{0W}, T_W)$  为 Web 服务运行时行为的自动机表示。如果  $trace(AM_{R_i}) \in L(AM_W)$  ( $1 \leq i \leq n$ ), 则称用户的需求和 Web 服务运行时行为完全匹配, 记为  $AM_{R_i} \xrightarrow{exact} AM_W$ 。

**定义 6(部分匹配)** 设  $R_u$  为用户的需求集合,  $AM_{R_i} = (S_{R_i}, M_{R_i}, F_{R_i}, Q_{R_i}, \Sigma_{R_i}, \tau_{R_i}, s_{0R_i}, T_{R_i})$  是用户的第  $i$  个需求的自动机表示,  $AM_W = (S_W, M_W, F_W, Q_W, \Sigma_W, \tau_W, s_{0W}, T_W)$  为

Web 服务运行时行为的自动机表示。如果  $trace(AM_{R_i}) \in L(AM_w) \cap trace(AM_{R_j}) \in L(AM_w)$ , ( $1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n$ , 并且  $i \neq j$ ), 则称用户的需求和 Web 服务运行时行为部分匹配, 部分匹配记为  $AM_{R_i} \xrightarrow{part} AM_w$ 。

**定义 7(完全不匹配)** 设  $R_n$  为用户的需求集合,  $AM_{R_i} = (S_{R_i}, M_{R_i}, F_{R_i}, Q_{R_i}, \Sigma_{R_i}, \tau_{R_i}, s_{0R_i}, T_{R_i})$  是第  $i$  个用户需求的自动机表示,  $AM_w = (S_w, M_w, F_w, Q_w, \Sigma_w, \tau_w, s_{0w}, T_w)$  为 Web 服务运行时行为的自动机表示。如果  $trace(AM_{R_i}) \notin L(AM_w)$  ( $1 \leq i \leq n$ ), 则称用户的需求和 Web 服务运行时行为完全不匹配, 记为  $AM_{R_i} \xrightarrow{fail} AM_w$ 。

## 4.2 用户偏好

层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, 简称 AHP) 是将与决策有关的元素分解成目标、准则、方案等层次, 在此基础上进行定性和定量分析的决策方法。该方法是 20 世纪 70 年代中期由美国教授 T. L. Saaty 提出的, 不仅适合于求多指标的权重值, 而且也适合于解决多指标决策问题。

采用 AHP 求权重的首要步骤是构建比较矩阵  $M$ ,  $M$  中的元素值表示行元素  $M_i$  对列元素  $M_j$  的相对重要性, 比较矩阵用三标度判断法构建<sup>[18]</sup>, 即用 2, 0, 1 这 3 个数分别描述, 其含义为: 2 表示  $M_i$  比  $M_j$  重要; 0 表示  $M_i$  不如  $M_j$  重要; 1 表示  $M_i$  同等  $M_j$  重要。

计算用户偏好的过程如下:

1. 首先考虑用户偏好中考虑的因素, 假设考虑响应时间、价格、可靠性和可用性 4 个因素, 将这 4 个考虑因素, 两两进行比较, 将响应时间、价格、可靠性和可用性同时作为行和列构造三阶比较矩阵  $M$ 。

2. 比较矩阵  $M$  根据式(1)变换构造三阶判断矩阵  $A$ 。

$$A_{ij} = \begin{cases} \frac{d_i - d_j}{d_{\max} - d_{\min}} \times (m_b - 1) + 1, & d_i \geq d_j \\ a_{ij} = 1, & d_{\max} = d_{\min} \\ \left[ \frac{|d_i - d_j|}{d_{\max} - d_{\min}} \times (m_b - 1) + 1 \right]^{-1}, & d_i < d_j \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $d_{\max} = \max(d_i)$ ,  $d_{\min} = \min(d_j)$ ,  $m_b = \frac{d_{\max}}{d_{\min}}$ 。

3. 将三阶判断矩阵  $A$  通过式(2)转换为最优传递矩阵  $B$ ;

$$b_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \lg \left( \frac{a_{ik}}{a_{jk}} \right), \forall i, j, k = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

4. 将最优传递矩阵  $B$  通过式(3)一致性调整后得到判断矩阵  $C$ ;

$$c_{ij} = 10^{b_{ij}} \quad (3)$$

5. 最后按式(4)计算判断矩阵  $C$  就可求出各指标的权重向量。

$$\omega_j = \frac{1}{\sum c_{ij}} \quad (4)$$

为了方便起见, 本文将上述过程定义为方法  $AHP(D_{ij})$ , 输出结果是用户偏好的各个考虑因素的权重  $\omega_i$ 。

## 4.3 Web 服务选择策略

本文综合考虑行为匹配程度和用户的偏好对服务选择的影响。对于行为匹配的验证, 本文基于运行时交互消息和运行数据的统计, 对行为匹配度加以度量。其中对于非功能属性来说, 我们将其视为未知参数, 将服务运行时的非功能属性值作为对样本的观测值。本文重点考虑响应时间、成功执行率、可用性这些来自服务提供者的非功能属性, 对于来自服务使用者的非功能属性, 本文暂不考虑。用  $q_i$  代表 Web 服务

运行时数据, 基于无偏估计的考虑, 采用样本均值作为估计, 非功能属性的计算如式(5)所示。

$$q_r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i \quad (5)$$

运行时验证次数不同, 对行为匹配程度的精确度影响也是不同的。因此本文为了真实量化 Web 服务运行时行为与用户需求的匹配程度, 需要对服务进行多次验证。综上所述, 基于运行时验证的服务选择策略如下所示:

for(qos<sub>i</sub> in QoS)

$$qos_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i // n \text{ 是运行验证次数}$$

for(i=1, i<n; i++) {

if ( $AM_{R_i} \xrightarrow{exact} AM_w$ ) // 完全匹配

then Match<sub>i</sub> = 1;

else if ( $AM_{R_i} \xrightarrow{part} AM_w$ ) // 部分匹配

$$\text{then Match}_i = \frac{|AM_{R_i} \xrightarrow{part} AM_w|}{n};$$

else if ( $AM_{R_i} \xrightarrow{fail} AM_w$ ) // 完全不匹配

then Match<sub>i</sub> = 0;

$$N_{\text{match}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{Match}_i$$

AHP(D<sub>i</sub>) // 计算权值

$$\text{Rank}_i = N_{\text{match}} + \omega_i \text{qos}_i$$

计算各服务的 Rank<sub>i</sub> 值并对其进行排序  $\text{Rank} = \{\text{Rank}_1, \text{Rank}_2, \dots, \text{Rank}_n\}$ , 对于该方法而言, 最大值 Rank<sub>i</sub> 所对应的 Web 服务就是最终选择的服务。

## 5 实验分析

运行时验证是为了验证服务运行时的行为是否与服务提供者的描述信息一致, 是否满足用户的需求。查准率表示服务选择方法按照用户的需求选择出的服务为理想服务在服务请求中所占的比例。本文就以查准率为例, 对该方法进行实验分析。该实验选择 400 个 Web 服务, 实验环境是在 Windows 环境下使用 Eclipse6.0+SOA Tools Project (STP) 插件, 实验将本文方法、未对服务验证的服务选择和未考虑用户偏好的服务选择方法的查准率进行了比较, 查准率统计结果如图 2 所示。

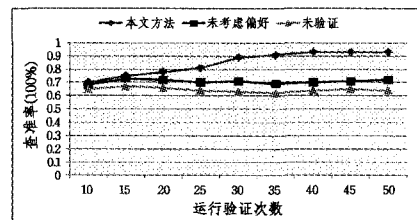


图 2 不同方法下服务查准率

由实验结果可知, 未经运行时验证和未考虑偏好的服务选择方法的查准率较低, 本文方法随着 Web 服务的运行时验证次数的增加, 服务选择的查准率也随之增加, 但运行验证次数达到一定次数后, 运行结果逐渐达到一致和稳定, 所以查准率也趋于稳定。

**结束语** 本文针对用户选择的 Web 服务运行时行为与预期存在差异的问题, 提出一种基于运行时验证的 Web 服务选择方法, 该方法综合考虑服务运行时验证结果与用户需求之间的匹配程度和用户的偏好等因素, 对服务进行量化, 最终选择最满足用户需求的服务。实验结果初步验证了该选择方

法的合理性和有效性。鉴于服务选择的复杂性,有些问题还有待进一步研究和解决,例如对服务进行运行时验证增大了时间开销,如何能在有效的时间内合理使用该方法是后续的研究重点。

## 参 考 文 献

- [1] Christopher F, Joel F. What are Web services? [J]. *Communications of the ACM*, 2003, 46(6): 31
- [2] Leucker M, Schallhart C. A brief account of runtime verification [J]. *The Journal of Logic and Algebraic Programming*, 2009, 78(5): 293-303
- [3] Saaty T L. How to handle dependence with the analytic hierarchy process [J]. *Mathematical Modeling*, 1987, 9(3): 369-376
- [4] Zeng L, Benatallah B, Dumas M, et al. Quality driven Web services composition [C] // *Proceedings of the 12th international conference on World Wide Web*, 2003. New York, USA: ACM Press, 2003: 411-421
- [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] Liu Yu-tu, Ngu A H H, Zeng Liang-zhao. QoS computation and policing in dynamic Web service selection [C] // *WWW (Alternate Track Papers & Posters)*, 2004: 66-73
- [7] 李妍, 周明辉, 梅宏, 等. 一种考虑 QoS 数据可信性的服务选择方法 [J]. *软件学报*, 2008, 19(10): 2620-2627
- [8] Joyce H, Manouvrier M, Rukoz M. Transactional and QoS-Aware Selection Algorithm for Automatic Web Service Composition [J]. *IEEE Transactions on Services Computing*, 2010, 3(1): 73-85
- [9] Wang S, Sun Q, Yang F. Quality of Service measure approach of Web Service for Service Selection [J]. *The Institution of Engineering and Technology*, 2012, 6(2): 148-154
- [10] Limam N, Boutaba R. Assessing Software Service Quality and Trustworthiness at Selection Time [J]. *IEEE Transaction on Software Engineering*, 2010, 36(4): 559-574
- [11] Hien T N, Zhao W L, Yang J. A Trust and Reputation Model Based on Bayesian Network for Web Services [C] // *IEEE International Conference on Web Services*, 2011. New York: IEEE Computer Society, 2011: 251-258
- [12] Wang S G, Zheng Z B, Sun Q B, et al. Evaluating Feedback Rating for Measuring Reputation for Web Services [C] // *IEEE International Conference on Services Computing*, 2011. New York: IEEE Computer Society, 2011: 192-199
- [13] 巫茜, 周庆. 基于 QoS 与可信度融合的 Web 服务选择机制研究 [J]. *计算机科学*, 2012, 39(7): 108-111
- [14] 肖芳雄, 李燕, 黄志球, 等. 基于时间概率代价进程代数的 Web 服务组合建模和分析 [J]. *计算机学报*, 2012, 35(5): 918-935
- [15] 朱俊, 郭长国, 吴泉源. 基于 CPN 的服务交互行为关键属性的运行时确保机制 [J]. *电子学报*, 2011, 39(5): 1064-1071
- [16] Dimitris D, Ervin R, Dimitrios K. Runtime Verification of Behavioral Conformance for Conversational Web Services [C] // *The 7th IEEE European Conference on Web Services*, 2009. New York: IEEE Computer Society, 2009: 139-147
- [17] Jocelyn S, Yuan G, Marsha C, et al. Runtime Monitoring of Web Service Conversation [J]. *IEEE Transaction on Services Computing*, 2009, 2(3): 223-244
- [18] 梁泉, 王元卓. 网络计算环境下 QoS 偏好的处理策略及其应用 [J]. *计算机应用*, 2009, 29(6): 1052-1055

(上接第 245 页)

了一种基于  $T$ -不变量分解技术来计算因果行为轮廓的方法, 克服了现有方法的局限, 将因果行为轮廓的应用范围扩展到任意 sound 自由选择系统。未来的工作是继续探求因果行为轮廓的新应用, 提高因果行为轮廓对模型行为的刻画精度, 以及进一步寻求适应范围更广的因果行为轮廓获取方法。

## 参 考 文 献

- [1] Dumas M, García-Bañuelos L, Dijkman R. Similarity search of business process models [J]. *IEEE Data Engineering Bulletin*, 2009, 32(3): 23-28
- [2] Hidders J, Dumas M, van der Aalst W M P, et al. When Are Two Workflows the Same? [C] // *Atkinson M, Dehne F, eds. Proceedings of the 2005 Australasian symposium on Theory of computing*. Australian: Australian Computer Society, 2005: 3-11
- [3] Gerke K, Cardoso J, Claus A. Measuring the compliance of processes with reference models [C] // *Meersman R, Dillon T, Herrero P, eds. Proceedings of the Confederated International Conferences 2009 on the Move to Meaningful Internet Systems*. Portugal: Springer, 2009: 76-93
- [4] de Medeiros A K A, van der Aalst W M P, Weijters A J M M. Quantifying process equivalence based on observed behavior [J]. *Data and Knowledge Engineering*, 2008, 64(1): 55-74
- [5] Weidlich M, Mendling J, Weske M. Efficient consistency measurement based on behavioural profiles of process models [J]. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 2011, 37(3): 410-429
- [6] Weidlich M, Mendling J. Perceived consistency between process models [J]. *Information Systems*, 2012, 37(2): 80-98
- [7] 郝文君, 方贤文. 基于 Petri 网的流程模型中最小变化域的分析方法 [J]. *计算机科学*, 2012, 39(Z11): 76-78
- [8] Weidlich M, Polyvyanyy A, Mendling J, et al. Causal behavioural profiles-efficient computation, applications, and evaluation [J]. *Fundamenta Informaticae*, 2011, 113(3): 399-435
- [9] Weidlich M, Ziekow H, Mendling J, et al. Event-Based Monitoring of Process Execution Violations [C] // *Rinderle-Ma S, Toumani F, Wolf K, eds. Proceedings of the 9th international conference on Business process management*. France: Springer, 2011: 182-198
- [10] van der Aalst W M P. Workflow verification: Finding control-flow errors using Petri-net based techniques [C] // *van der Aalst W M P, Desel J, Oberweis A, eds. Business Process Management, Models, Techniques, and Empirical Studies*. London: Springer, 2000: 161-183
- [11] van der Aalst W M P, Weijters T, Maruster L. Workflow Mining: Discovering Process Models from Event Logs [J]. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2004, 16(9): 1128-1142
- [12] Pang S, Lin C, Zhou M, et al. A Workflow Decomposition Algorithm Based on Invariants [J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2011, 20(1): 1-5
- [13] Best E, Desel J. Partial order behaviour and structure of Petri nets [J]. *Formal Aspects of Computing*, 1990, 2(1): 123-138