

基于网进程的模型一致性分析方法

赵培海^{1,2} 王咪咪^{1,2} 方贤文³

(同济大学电子与信息工程学院计算机科学与技术系 上海 201804)¹

(同济大学嵌入式系统与服务计算教育部重点实验室 上海 200092)²

(安徽理工大学信息与计算机科学系 淮南 232001)³

摘要 在业务流程模型相似性分析过程中,有时会出现环结构,从而导致内部行为关系一致但网的进程不一致的情况。已有的方法大多不考虑环结构,忽略了环结构对模型一致性分析的影响。以行为轮廓序关系为基础,研究各个进程间的内部行为关系,并刻画 Petri 网的进程段之间的相互关系,给出了进程视图的概念;通过对 Petri 网的进程段外部的关系进行研究,提出了基于 Petri 网的进程视图的一致性分析方法,以一致的进程视图与整个进程的比值作为两个模型的一致性度。理论和实例分析表明了该方法的有效性。

关键词 Petri 网,环结构,行为轮廓,一致性度,进程视图

中图分类号 TP391.9 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.11.047

Consistency Analysis Method of Models Based on Net Process

ZHAO Pei-hai^{1,2} WANG Mi-mi^{1,2} FANG Xian-wen³

(Department of Computer Science and Technology, College of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)¹

(The Key Laboratory of Embedded System and Service Computing, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)²

(Department of Information and Computing Science, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)³

Abstract In the similarity analysis process of business process models, sometimes there may be loop structure in the business process model, which leads the situation that internal behavior relation is consistent but external process of net is not. The existing methods mostly don't consider the loop structure, and ignore the influence of loop structure on consistency analysis. On the basis of sequence relations of behavior profiles, by analyzing the relations between the internal behaviors of each process and depicting the relations between Petri net process section, a concept of Petri net process view was proposed in the paper. Then through the research on the external relations of Petri net process section, a measure method of behavior consistency based on process view was proposed in this paper, which puts a ratio of the consistent process view and the total processes as the degree of two models. The theoretical analysis and specific example show that the method is very effective.

Keywords Petri net, Loop structure, Behavior profiles, Consistency degree, Process view

1 引言

对流程模型的一致性分析已经得到越来越多的关注,越来越多的国内外学者致力于模型一致性的研究。一致性研究主要分为任务标签、结构、行为 3 个方面^[1]。任务标签和结构的一致性研究已经无法满足复杂多变的业务流程系统。对于内部流程的建模,一个主要的概念是行为一致性,在内部交互的不同阶段大多都涉及到模型的行为一致性问题^[2],因此对于行为的一致性研究成为人们关注的重点。

现有的行为一致性分析技术主要分为两个方面:1)只研究一致性质,即研究一致和非一致,不涉及度量的概念。如文

献[3]提出了协议兼容性、等价和替换,描述了两个服务是否基于交互协议等价的定义,但是等价和兼容性仅仅是从协议角度考虑;文献[4]提出了判定兼容性和一致性的统一框架,分析了兼容性和一致性的关系,并用一致性标准评估了弱互模拟;文献[5]使用迹等价和互模拟来分析模型间的行为一致性,但未涉及一致性度的概念。2)从度量角度研究一致性,如文献[6]从过程语义角度研究网模型间的相似度,定义了两个模型间的相似度;文献[7-10]首次提出了行为轮廓的概念,以两个模型间的对应变迁对间的行为关系来计算模型的一致性度,其结合了网的结构和动态行为关系,但仅仅从模型的大致轮廓出发研究一致性度,对模型的一致性检测不够精确,且对

到稿日期:2015-11-11 返修日期:2016-04-02 本文受国家自然科学基金项目(61572035, 61272153)资助。

赵培海(1989-),男,博士生,主要研究方向为软件行为分析、可信服务, E-mail: Perry_Zhao@foxmail.com;王咪咪(1985-),女,博士生,主要研究方向为 Petri 网、可信软件、模型检测;方贤文(1975-),男,博士,教授,硕士生导师,主要研究方向为 Petri 网、可信软件、服务计算。

于含有环结构的模型并未涉及;文献[11]定义了4C光谱,分析了两个变迁间的行为关系,以矩阵的形式研究一致性度;文献[12]提出一种基于行为轮廓的行为关系检测不一致的方法。然而仅仅通过分析两个网的变迁之间的行为关系,不能从整体角度进行网的一致性分析。

通过 Petri 网来研究被模拟系统的性质,先前已经提出了一些分析方法,其中 Petri 网的进程是描述和分析系统运行的有力工具^[13]。先前有很多进程的算法^[14-18],然而一个进程只反映 Petri 网的一种可能的运行情况,仅仅从网的进程角度来分析 Petri 网已经不能满足我们的需求。只计算进程表达式的方法求得一个网的进程段不能从度量角度来对 Petri 网的相似程度进行直观的说明;并且,先前仅通过分析两个网变迁间的行为关系不能从整体角度进行网的一致性分析。鉴于此,综合两者的特征,研究 Petri 网进程的行为一致性分析方法。

为了研究 Petri 网的进程间的行为一致性,需要对网的进程间的关系进行具体分析,除了要考虑进程内部各个活动间的内部关系,还要考虑各个进程之间的外部关系。首先对进程的內部行为关系进行区分,然后研究各个进程之间的外部特征;在此基础上研究基于 Petri 网的进程视图的一致性测量方法。本文从 Petri 网的进程角度研究行为一致性问题,提出了进程视图的一致性测量方法。在进程内部视图及外部视图的基础上,分析了进程内部的行为关系及进程外部之间的关系,测量了行为一致性度。

本文第 2 节介绍了一个动机例子;第 3 节介绍了一些基本概念;第 4 节详述了基于进程视图的一致性分析方法;最后总结全文。

2 动机例子

首先,我们给出文献[7]中行为轮廓的相关概念。

定义 1(弱序)^[7] 令 (N, M_0) 是一个网系统,其中 $N=(P, T; F)$ 且 $T' \subseteq T$ 是一个变迁集。一对变迁 $(x, y) \in (T' \times T')$ 是 T' 上的弱序关系,当且仅当存在一个发射序列 $\sigma = \langle t_1, t_2, \dots, t_n \rangle$, 其中 $(N, M_0) \perp \sigma$ 并且 $j, k \in N, 1 \leq j < k \leq n$, 使得 $t_j = x, t_k = y$, 记为 $x > y$ 。

定义 2(行为轮廓)^[7] 令 (N, M_0) 是一个网系统,其中 $N=(P, T; F)$ 且 $T' \subseteq T$ 是一个变迁集。一对变迁 $(x, y) \in (T' \times T')$ 可以在下面的行为关系中:

- (1) 严格序关系 $\vec{\rightarrow}$, 当且仅当 $x > y, y \not> x$ 。
- (2) 排他性关系 $+$, 当且仅当 $x \not> y, y \not> x$ 。
- (3) 交叉序关系 \parallel , 当且仅当 $x > y, y > x$ 。

$B = \{\vec{\rightarrow}, +, \parallel\}$ 是在 T' 上的行为轮廓。

由定义 1 和定义 2 可知,图 1 所示的两个网中都有 $a_i \vec{\rightarrow} x_i (i=1, 2; x=(b, c, d, e, f, g, k)), y_i \vec{\rightarrow} z_i (i=1, 2; y=a, b; z=d, e, f, g, k)$, 且 $b_i \parallel c_i (i=1, 2)$ 。事实上,两个网的发生序列是不同的,例如如图 1(a) 中对于变迁 a_1, b_1, c_1 存在一条发生序列 $a_1 b_1 c_1 b_1$, b_1 发生 2 次, c_1 发生一次,且交替依次发生;而图 1(b) 中 b_2 和 c_2 都发生一次且同时发生,是导致两个网进程出现不一致的原因。究其原因是图 1 中环结构导致的。根据文献[7]的方法,可知这两个网是完全一致的,即用两个模型的行为轮廓来计算一致性度已经无法从行为发生角度动

态地对两个网模型进行区分。因此,提出一种对含有环结构的模型的一致性度研究方法便是我们的一个任务。

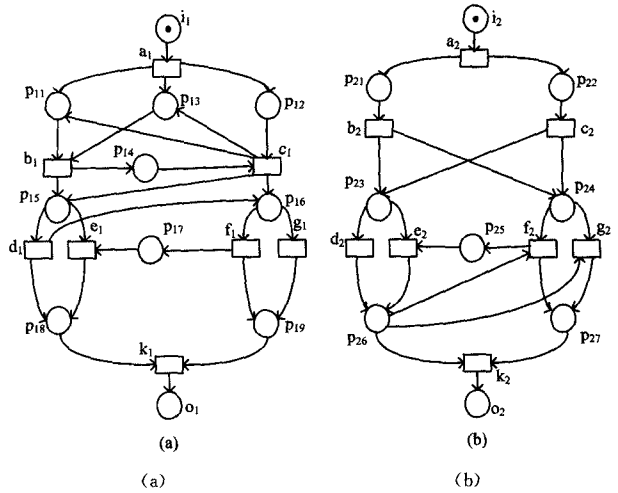


图 1 动机例子图

我们的方法建立在 Petri 网的进程基础上,即基于 Petri 网进程视图的一致性分析方法。

3 基本概念

这一部分主要介绍与本文相关的一些概念和定义。关于 Petri 网及进程方面的定义可参考文献[18, 19], 下面将给出 Petri 网的进程之间的关系。

定义 3(进程的交) 设 φ 为出现网 $N=(B, E; G)$ 到 $\Sigma=(P, T; F, M_0)$ 的一个网映射, $BP(\Sigma)$ 为 Σ 的基本进程段集, P_1, P_2 是其基本进程段, P_3 是它们的交: $P_3 = P_1 \cap P_2$, 当且仅当 $\forall b \in P_3, b \in P_1 \wedge b \in P_2, \forall e \in P_3, e \in P_1 \wedge e \in P_2$ 且 $\forall g \in P_3, g \in P_1 \wedge g \in P_2$ 。

定义 4(进程的并) 设 φ 为出现网 $N=(B, E; G)$ 到 $\Sigma=(P, T; F, M_0)$ 的一个网映射, $BP(\Sigma)$ 为 Σ 的基本进程段集, P_1, P_2 是其基本进程段, P_4 是它们的并: $P_4 = P_1 \cup P_2$ 当且仅当 $\forall b_1 \in P_1 \wedge b_2 \in P_2, b_1, b_2 \in P_3, \forall e \in P_3, e \in P_1 \wedge e \in P_2$ 且 $\forall g \in P_3, g \in P_1 \wedge g \in P_2$ 。

定义 5(进程的包含关系) $X \subseteq Y$ 当且仅当对于 X 中的任意的 b_1, e_1, g_1 , 都有 $b_1 \in Y, e_1 \in Y, g_1 \in Y$ 。

若在 Y 中存在某个 b_2, e_2 或 g_2 使得 $b_2 \notin X, e_2 \notin X$ 或 $g_2 \notin X$, 那么就称 X 真包含于 Y 。

定义 6(进程的等价关系) $X \equiv Y$ 当且仅当 $X \subseteq Y$ 且 $Y \subseteq X$ 。

定义 7(进程的相关关系) $X \bowtie Y$ 当且仅当 $X \cap Y \neq \emptyset$ 。

定义 8(进程的不相关关系) $X \diamond Y$ 当且仅当 $X \cap Y = \emptyset$ 。

4 基于进程视图的一致性分析方法

4.1 进程视图

下面引入进程视图的方法来计算一致性。

定义 9(内部进程视图) 设 φ 为出现网 $N=(B, E; G)$ 到 $\Sigma=(P, T; F, M_0)$ 的一个网映射, $BP = \{BP_1, BP_2, \dots, BP_n\}$ 为 Σ 的基本进程段集, N 的内部进程视图 $B_m = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ (其中 A_i 是 BP_i 的行为轮廓关系) 是 BP 上的内部进程视图。

定义 10(外部进程视图) 设 φ 为出现网 $N=(B, E; G)$ 到 $\Sigma=(P, T; F, M_0)$ 的一个网映射, BP 为 Σ 的基本进程段集, $B_{out}=\{B_1, B_2, \dots, B_m\}$ (B_i 是 BP_i 的进程段的关系) 是 BP 上的外部进程视图。

定义 11(进程视图) 设 φ 为出现网 $N=(B, E; G)$ 到 $\Sigma=(P, T; F, M_0)$ 的一个网映射, $BP(\Sigma)$ 为 Σ 的基本进程段集, $B=B_m \cup B_{out}$ 是进程视图。

由定义 11 可知, 进程视图不仅对模型中的变迁对的关系进行了说明, 同时也对网的进程段外部之间的关系进行了说明(如: 真包含关系、等价关系、相关关系、不相关关系)。

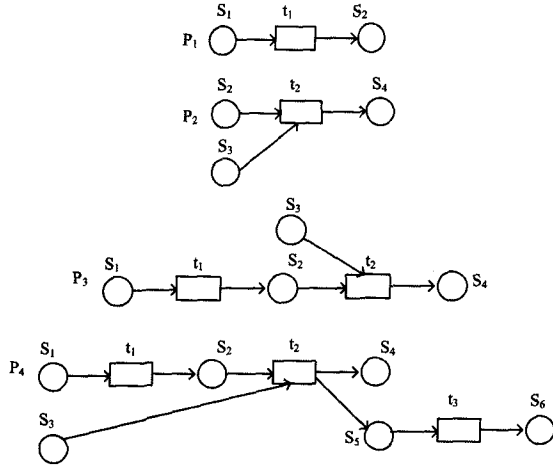


图 2 基本进程段间关系例子图

在图 2 中有: $(P_1 \cup P_2 \cup P_3) \subset P_4, P_1 \cup P_2 = P_3, P_1 \subset P_4, P_3 \subset P_4, P_1 \subset P_3$ 。

4.2 基于进程视图的一致性度

在进程视图的基础上研究进程间的行为一致性度。

定义 12(一致进程视图) 令 $S_1=(N_1, M_1)$ 和 $S_2=(N_2, M_2)$ 是两个网系统, 其中 $N_1=(P_1, T_1, F_1), N_2=(P_2, T_2, F_2)$ 且 $B_1=\{\vec{\tau}_1, +_1, \|_1, \subset_1, \equiv_1, \aleph_1, \diamond_1\}$ 和 $B_2=\{\vec{\tau}_2, +_2, \|_2, \subset_2, \equiv_2, \aleph_2, \diamond_2\}$ 分别是它们的进程视图。一致的进程段集($C\bar{P}$)包含所有的进程对 (x, y) , 如果 (x, y) 属于同一种进程视图关系。

定义 13(进程的一致性度) 令 $S_1=(N_1, M_1)$ 和 $S_2=(N_2, M_2)$ 是两个网系统, 其中 $N_1=(P_1, T_1, F_1), N_2=(P_2, T_2, F_2)$; $\varphi_i (i=1, 2)$ 为出现网 $N_i (i=1, 2)$ 到 $\Sigma_i (i=1, 2)$ 的一个网映射, $BP_i(\Sigma)$ 为 Σ 的基本进程段集, 且 $B_1=\{\vec{\tau}_1, +_1, \|_1, \subset_1, \equiv_1, \aleph_1, \diamond_1\}$ 和 $B_2=\{\vec{\tau}_2, +_2, \|_2, \subset_2, \equiv_2, \aleph_2, \diamond_2\}$ 分别是它们的进程视图, 则基于进程段的行为轮廓的一致性度定义为:

$$BP_d = \frac{|C\bar{P}_1 \times C\bar{P}_1| + |C\bar{P}_2 \times C\bar{P}_2|}{|BP_1 \times BP_1| + |BP_2 \times BP_2|}$$

算法 1 进程的一致性度的求解算法

输入: 两个网系统 $S_1=(N_1, M_1), S_2=(N_2, M_2)$, 基本进程段集合

BP_1, BP_2 ; 它们的进程视图 $B_1=\{\vec{\tau}_1, +_1, \|_1, \subset_1, \equiv_1, \aleph_1, \diamond_1\}$ 和 $B_2=\{\vec{\tau}_2, +_2, \|_2, \subset_2, \equiv_2, \aleph_2, \diamond_2\}$

输出: 进程的一致性度 BP_d

(1) 在 BP_1 中, 从 BP_{11} 开始, 在 BP_2 中查找 BP_{2i} , 如果存在 $BP_{2i} \in BP_2$, 使得 (BP_{11}, BP_{2i}) 属于同一种进程关系, 得到 $C\bar{P}_1=BP_1$, 并

执行步骤(2); 否则在 $C\bar{P}_1$ 中除去 BP_{11} , 得到 $C\bar{P}_1=BP_1 \setminus BP_{11}$, 接着执行步骤(2)。

(2) 同理, 按此一直进行下去直到 BP_1 中的最后一个进程 BP_{1n} , 在 BP_2 中查找 BP_{2i} , 如果存在 $BP_{2i} \in BP_2$, 使得 (BP_{1n}, BP_{2i}) 属于同一种进程关系, 得到 $C\bar{P}_1=BP_1$, 并执行步骤(3); 否则在 $C\bar{P}_1$ 中除去 BP_{1n} , 得到 $C\bar{P}_1=BP_1 \setminus BP_{1n}$, 并执行步骤(3)。

(3) 同理, 可得到 $C\bar{P}_2$, 执行步骤(4)。

(4) 根据定义 13, 计算 $BP_d = \frac{|C\bar{P}_1 \times C\bar{P}_1| + |C\bar{P}_2 \times C\bar{P}_2|}{|BP_1 \times BP_1| + |BP_2 \times BP_2|}$, 输出一致性度 BP_d , 算法终止。

由算法 1 可知, 计算基于进程视图的一致性的关键是找到两个模型相对应一致的进程段。一致的进程段要求不仅要保证对应进程段内部的行为关系一致, 同时要保证进程段间的外部关系一致。算法 1 较行为轮廓方法^[7]更细致地考虑了各进程外部关系。而从进程内部角度研究行为关系已经考虑到了环结构中的运行情况, 同时考虑了相应进程段之间的外部关系, 能够更好地区分环结构中的行为, 因而可以解决含有环结构的情况。

4.3 计算时间

引理 1^[7] 对于一个合理的自由选择 workflow 网, 若变迁个数为 n , 那么计算它的行为关系可以在 $O(n^3)$ 时间内解决。

定理 1 对于一个合理的自由选择 workflow 网, 若进程段的个数为 m , 计算它的进程视图, 那么这个问题可以在 $O(m^2)$ 内解决。

证明: 根据两个基本进程段集合寻找一致的进程段集合的运算可知, 首先需要计算第一个进程段与另一个进程段集合中(假设有 m 个进程)的进程段是否一致, 需要计算 m 次; 然后计算第二个进程与另一个进程段集合中其他的进程是否一致, 需要计算 $m-1$ 次, 依此类推, 直到最后一个进程段, 需要计算 1 次; 故总的计算次数为 $m+(m-1)+(m-2)+\dots+2+1 = \frac{m(m+1)}{2}$ 。

推论 1 对于一个合理的自由选择 workflow 网, 若系统的变迁数为 n , 计算它的进程视图的一致性度, 那么这个问题可以在 $O(n^3)$ 时间内解决。

证明: 由引理 1 和定理 1, 易知此推论成立。

事实上, 由于从 Petri 网的进程角度研究模型的一致性问题的行为发生情况来确定行为间的关系, 而行为轮廓方法只是从存在发生序列去判定行为间的关系, 所提方法更加精确地确定了行为间的关系, 且从根本上确立了模型的行为对之间的关系, 因此所提方法较文献^[7]中方法在精确度上有所提高。

根据以上的算法对第 2 节提出的例子进行分析。

根据算法 1, 求出图 1 中两个网的各自不一致的进程段, 如图 3 所示。图 3 中, $BP_{11}, BP_{12} \in BP_1$ 且 $BP_{21}, BP_{22} \in BP_2$, 可知共有 4 个不一致的进程段, 根据算法 1 可知图 1 的

两个网的一致性度为: $BP_d = \frac{|C\bar{P}_1 \times C\bar{P}_1| + |C\bar{P}_2 \times C\bar{P}_2|}{|BP_1 \times BP_1| + |BP_2 \times BP_2|} = 1 - \frac{2 \times 2 + 2 \times 2}{8 \times 8 + 8 \times 8} = 0.9375$ 。表 1 是所提方法与文献^[7]方法的比较结果。

表1 方法比较

方法	一致性度
文献[7]方法	1
所提方法	0.9375

4.4 实验

实验环境:Java平台 Windows 7 操作系统。实验数据称为模型库,使用6个活动a,b,c,d,e,f,在ProM框架下,限制库所数量不大于7。要求只有一个输入和一个输出库所,活动间限制4种关系:严格序关系、排他序关系、交叉序关系、环结构。

具体实现过程:在ProM框架下,先分别以两个库所作为输入和输出库所,在限制模型为活的前提下,分别按照a,b,c,d,e,f这个顺序,对相邻两个活动之间的关系进行建模,两两活动间有4种行为关系,如a与b,b与c,c与d,d与e,e与f之间都各自有4种可能的行为关系,这样得到 $4^5=1024$ 个模型;然后不限制模型的活性,得到死的模型1024个,共形成2048个工作流网模型的模型库,其中一半是活的网,另一半不是活的网。

事实上,如果相同的行为对之间有着相同的行为关系,那么应该得到 $4^5=1024$ 个模型,但我们却得到了多于1024个模型,这说明两个模型有着完全一致的行为关系树。且不活的网中的行为可能与活的网中行为关系相同,根据行为关系把这些模型分类:

Case 1 16对模型没有环结构但有交叉序关系(活的与不活的比率为32:0);

Case 2 118对模型没有环结构(活的与不活的比率为236:0);

Case 3 118对模型没有交叉序关系(活的与不活的比率为177:59);

Case 4 381对模型有环结构(活的与不活的比率为191:571);

Case 5 381对模型有交叉序关系(活的与不活的比率为578:118);

Case 6 278对模型有环结构且有交叉序关系(活的与不活的比率为226:230)。

分别以行为轮廓一致性度^[7]与所提方法做比较,所提方法在Case 1的一致性度的值都为1,在Case 2—Case 6都小于1。为了对Case 2—Case 6进行区分,分别用这些模型对的一致性度的平均值来表述,结果如表2所列。

表2 实验结果

Case	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6
模型对	16	118	118	381	381	278
Live:Not-Live	32:0	236:0	177:59	191:571	578:118	226:230
文献[7]的方法(平均值)	1	1	1	1	1	1
本文方法(平均值)	1	0.9722	0.9444	0.9167	0.9189	0.9009

表2说明:1)这6种情况的行为轮廓一致性度都为1,但有的有着环结构的模型是活的,有的是不活的;2)对于没有环结构的两个模型的一致性度,所提方法与行为轮廓是等价的;3)对于有着环结构的两个模型的一致性度,所提方法较行为轮廓一致性度更精确;4)行为轮廓一致性度不能区分含有环

结构的模型的活性,但所提方法可以区分。

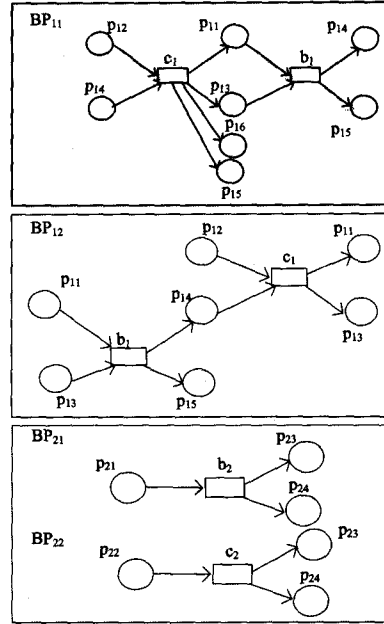


图3 不一致的进程段

结束语 本文对Petri网的进程外部的行为关系进行分析,提出了进程视图的概念,并以此为基础研究了含有环结构的工作流网的进程一致性测量方法。本文主要贡献包括:1)以行为轮廓序关系为基础,对网的进程段间的关系进行研究,提出了基于进程段的进程视图,将该方法和行为轮廓这一内部行为关系相结合,研究进程内、外部的行为关系。2)对网的进程段间的关系进行分析,研究了其一些行为特征及性质,并以此为基础,提出了基于进程视图的行为一致性测度方法。该方法从网的进程角度对Petri网的行为一致性进行分析。

未来还有很多问题需要研究,例如:进程段的求解算法、基于进程段的描述、基于分支进程的行为一致性度等。

参考文献

- [1] Marlon D, Garcia-Bañuelos L, Dijkman R. Similarity Search of Business Process Models [J]. IEEE Data Eng. Bull., 2009, 32(3): 23-28
- [2] Schönberger A, Wirtz G. Taxonomy on consistency requirements in the business process integration context[C]//Proceedings of the Twentieth International Conference on Software Engineering & Knowledge Engineering. San Francisco; SEKE, 2008: 593-598
- [3] Benatallah, Boualem, Casati F, et al. Representing, analysing and managing web service protocols [J]. Data & Knowledge Engineering, 2006, 58(3): 327-357
- [4] Decker G, Weske M. Behavioral consistency for B2B process integration; Advanced Information Systems Engineering—Lecture Notes in Computer Science[M]. Heidelberg; Springer-Verlag Berlin, 2007: 81-95
- [5] van Dongen B, Dijkman R, Mendling J. Measuring Similarity between Business Process Models; Advanced Information Systems Engineering—Lecture Notes in Computer Science[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2008: 450-464

(下转第251页)

- ing on European Software Engineering Conference and Foundations of Software Engineering Symposium. ACM, 2009; 111-120
- [2] Cubranic D, Murphy G C. Automatic bug triage using text categorization[C]//Proceedings of the International Conference on Software Engineering & Knowledge Engineering. Alberta, 2004; 92-97
- [3] Anvik J, Hiew L, Murphy G. Who should fix this bug? [C]//Proceedings of the 28th International Conference on Software Engineering. ACM, 2006; 361- 370
- [4] Xuan J, Jiang H, Ren Z, et al. Automatic bug triage using semi-supervised text classification[C]//Proceedings of International Conference on Software Engineering & Knowledge Engineering. Redwood City, 2010; 209-214
- [5] Podgurski A, Leon D, Francis P. Automated support for classify software failure report [C] // Proceedings 25th International Conference on Software Engineering. IEEE, 2003; 465-475
- [6] Matter D, Kuhn A, Nierstrasz O. Assigning bug reports using a vocabulary-based expertise model of developers[C]//6th IEEE International Working Conference Mining Software Repositories (MSR'09). 2009; 131-140
- [7] Bhattacharya P, Neamtii I. Fine-grained incremental learning and multi-feature tossing graphs to improve bug triaging[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Software Maintenance. Timisoara, 2010; 1-10
- [8] Chen Li-guo, Wang Xiao-bo, Liu Chao. Improving Bug Assignment whit Bug Tossing Graphs and Bug Similarities [J]. Journal of Software, 2011, 6(3): 421-427
- [9] Pang Jian-feng, Bu Dong-bo, Bai Suo. Automatic text classification system based on vector space model of the research and implement. [J]. Computer Application Research, 2001, 4(9): 23-26 (in Chinese)
庞尖峰, 卜东波, 白硕. 基于向量空间模型的文本自动分类系统的研究与实现[J]. 计算机应用研究, 2001, 4(9): 23-26
- [10] Li Yuan-yuan, Ma Yong-qiang. The weight of text's trait word calculate method base on Latent semantic indexing[J]. Computer Application, 2008, 28(6): 1460-1464 (in Chinese)
李媛媛, 马永强. 基于潜在语义索引的文本特征词权重计算方法[J]. 计算机应用, 2008, 28(6): 1460-1464
- [11] Pang Guo-qing. Using word piece as trait calculate text similarity in VSM[J]. Computer and Digital Engineering, 2007, 35(10): 24-36 (in Chinese)
潘国清. VSM 中用语片为特征项计算文本相似度[J]. 计算机与数字工程, 2007, 35(10): 24-36
- [12] Pang Guo-qing. An improved method and application about trait word extract [J]. Journal of Hunan College of Engineering, 2009, 19(2): 38-41 (in Chinese)
潘国清. 一种向量空间模型种对特征项的改进方法及应用[J]. 湖南工程学院学报, 2009, 19(2): 38-41

(上接第 245 页)

- [6] Becker J, Delfmann P, Knackstedt R. Reference Modeling [M]. Berlin; Springer, 2007; 27-58
- [7] Weidlich M, Mending J, Weske M. Efficient consistency measurement based on behavioral profiles of process models [J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 2011, 37(3): 410-429
- [8] Weidlich M, Mending J. Perceived consistency between process models [J]. Information Systems, 2012, 37(2): 80-98
- [9] Weidlich M, Polyvyanyy A, Mendling J, et al. Causal behavioural profiles-efficient computation, applications, and evaluation [J]. Fundamenta Informaticae, 2011, 113(3/4): 399-435
- [10] Weidlich M, Polyvyanyy A, Mendling J, et al. Efficient computation of causal behavioural profiles using structural decomposition[M]//Applications and Theory of Petri Nets-Lecture Notes in Computer Science. Berlin; Springer, 2010; 63-83
- [11] Polyvyanyy A, Weidlich M, Conforti R, et al. The 4C spectrum of fundamental behavioral relations for concurrent systems; Application and Theory of Petri Nets and Concurrency-Lecture Notes in Computer Science[C]//International Conference on Application and Theory of Petri Nets and Concurrency. Switzerland; Springer International Publishing, 2014; 210-232
- [12] van der Aa H, Leopold H, Reijers H A. Detecting Inconsistencies between Process Models and Textual Descriptions; Business Process Management Business Process Management- Lecture Notes in Computer Science[C]//International Conference on Business Process Management. Switzerland; Springer International Publishing, 2015; 90-105
- [13] Goltz U, Reisig W. Processes of place/transition-nets; Automata, Languages and Programming-Lecture Notes in Computer Science[D]. Berlin; Springer-Verlag, 1983; 264-277
- [14] Jiang Chang-jun, Yan Chun-gang. Research on Process Characteristics of Synchronous Composition Nets [J]. Acta Electronica Sinica, 1997, 25(2): 57-60 (In Chinese) (in Chinese)
蒋昌俊, 闫春钢. 同步合成网的进程特性研究[J]. 电子学报, 1997, 25(2): 57-60
- [15] Lin Chuang, Wei Ya-ya. Stochastic Process Algebras and Stochastic Petri Nets [J]. Journal of Software, 2002, 13(2): 203-213 (in Chinese)
林闯, 魏丫丫. 随机进程代数与随机 Petri 网[J]. 软件学报, 2002, 13(2): 203-213
- [16] Wu Zhe-hui, Zhang Ji-jun. Process Grammar and Process Language of Petri Nets [J]. Computer Science, 2002, 29(12): 31-33 (in Chinese)
吴哲辉, 张继军. Petri 网的进程文法和进程语言[J]. 计算机科学, 2002, 29(12): 31-33
- [17] Martinik I. Modelling of Distributed Programming Systems with Using of Property-Preserving Petri Net Process Algebras and P/T Petri Net Processes[C]//2013 Second International Conference on Informatics and Applications(ICIA). Lodz; IEEE, 2013; 258-263
- [18] van Glabbeek R J, Goltz U, Schicke J W. Abstract Processes of Place/Transition Systems [J]. Information Processing Letters, 2011, 111(13): 626-633
- [19] Murata, Tadao. Petri nets; Properties, analysis and applications [J]. Proceedings of the IEEE, 1989, 77(4): 541-580