

基于拟间接依赖的过程模型挖掘方法

化 佩¹ 方贤文¹ 刘祥伟²

(安徽理工大学信息与计算科学系 淮南 232001)¹ (安徽理工大学信息管理系 淮南 232001)²

摘 要 过程挖掘旨在从信息系统所记录的事件日志中挖掘出人们需要的且合理的过程模型,从而有助于改善或重建业务流程。以往的方法大多是根据任务间的直接依赖关系构建过程模型,具有很大的局限性。现存的过程挖掘方法中,虽然有能挖掘间接依赖的方法,其却没有从过程行为的角度进行分析。基于拟间接依赖的过程模型挖掘方法,把行为轮廓融入其中,依据行为轮廓建立初始模型;然后基于增量日志和拟间接依赖关系调整模型;最后根据评价标准选出最优模型。此方法特别适用于挖掘含有间接依赖的过程模型。

关键词 过程挖掘,行为轮廓,事件日志,拟间接依赖关系

中图法分类号 TP391.9 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.11.017

Method of Process Models Mining Based on Quasi Indirect Dependence

HUA Pei¹ FANG Xian-wen¹ LIU Xiang-wei²

(Department of Information and Computing Science, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)¹

(Department of Information Management, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)²

Abstract Process mining aims to achieve the reasonable process model which we need from the event logs recorded by information system, which helps us to improve or rebuild the business process. In the past, the process model based on the direct dependence between the tasks has a lot of limitations. Although there are many methods can discover indirect dependence, they do not do analysis from the perspective of the process behavior. The process mining algorithm based on quasi indirect dependence takes the behavioral profiles into account and the initial model is established according to the behavioral profiles. Then model is adjusted based on incremental logs and quasi indirect dependence. Finally, the optimal model is selected according to the evaluation criteria. This method is especially suitable for mining the process model with indirect dependence.

Keywords Process mining, Behavioral profiles, Event logs, Quasi indirect dependence

1 引言

近年来,信息系统在企业中起着越来越重要的作用,多数信息系统利用业务流程模型来描述任务间的关系。由于信息系统能够产生数以亿计的事件日志,手动建模很浪费时间,另外建模过程又容易受主观因素的影响,因此产生了一种自动建模技术——过程挖掘。过程挖掘作为发现人们实际工作规则的工具,能够从信息系统记录的事件日志中提取有价值的信息构建过程模型,然后把此模型和预先定义的模型进行比较,从而有助于企业改善业务流程。现存 3 种类型的过程挖掘技术,即过程发现、过程一致性检测和过程优化处理^[1]。本文过程挖掘技术皆指过程发现,即关于如何从记录的事件日志中构建过程模型的技术。过程挖掘的基本思想由 J. E. Cook 于 1995 年提出,目的是从记录事件的日志中自动挖掘过程模型。近年来, van der Aalst 在过程挖掘领域做了大量

的研究,取得了辉煌的成绩,如文献[2]提出了从事件日志中挖掘可配置过程模型的方法;文献[3]基于概率行为关系,提出了一种从不完备事件日志中挖掘块结构过程模型的新算法。另外也有很多学者研究过程挖掘技术,如文献[4]提出了一种通用的过程挖掘方法——分解 Petri 网,这种方法把挖掘问题分解成较小的挖掘问题,可以利用现有的不同的过程挖掘方法进行挖掘,最后再把它们组合成初始挖掘问题;文献[5]提出了一种合并流程组织间不同合作伙伴的输入数据作为过程挖掘算法输入的新技术;文献[6]则提出了一种挖掘带有并行结构的整合的挖掘方法,这种方法是遗传算法、改进粒子群算法以及微分进化算法的整合。

间接依赖这个概念是由 van der Aalst 教授最先提出的,但是在对间接依赖的挖掘方面却没有做过多研究,他提出的一些算法(如 α 算法等)不能有效地挖掘出含有间接依赖的过程模型。现存的过程挖掘方法中,比较理想的挖掘含有间接

到稿日期:2015-08-23 返修日期:2016-02-18 本文受国家自然科学基金项目(61572035,61272153,61402011),安徽省自然科学基金(1508085MF111),安徽省高校自然科学基金重点项目(KJ2014A067),安徽省优秀青年人才基金资助。

化 佩(1988—),女,硕士,主要研究方向为 Petri 网和过程挖掘,E-mail:497457097@qq.com;方贤文(1975—),男,博士,教授,主要研究方向为 Petri 网和可信软件,E-mail:280060673@qq.com;刘祥伟(1977—),女,硕士,副教授,主要研究方向为业务过程管理。

依赖的过程模型的方法是文献[7]提出的 α^{++} 算法,该方法虽然能挖掘出含有间接依赖的过程模型,但是没有从过程行为的角度进行分析。

本文以 Petri 网行为轮廓为基础,提出基于拟间接依赖的挖掘含有间接依赖的过程模型的新方法。进行模型挖掘时先根据行为轮廓建立初始模型;然后找出具有拟间接依赖关系的变迁对并对模型进行调整;最后根据计算适合性和行为适当性用增量日志来调整模型,直到得出符合需要的业务流程模型。行为轮廓体现的是活动间潜在的发生顺序,能够从活动间的行为关系出发发现过程模型的结构特征。把行为轮廓的概念引入本文,使得本文提出的过程模型挖掘方法更加简单,挖掘出的过程模型的行为与实际行为的一致性程度更高。

本文第2节为基本概念;第3节为基于拟间接依赖的过程模型挖掘方法,其中3.1节介绍基于事件日志行为轮廓的流程模型基本结构,3.2节介绍任务间拟间接依赖关系的确定,3.3节介绍基于拟间接依赖挖掘含有间接依赖的业务流程模型算法,3.4节进行实例分析,验证算法的可行性;最后总结全文并展望未来。

2 基本概念

本节给出本文所需要的基本概念,首先给出流程 Petri 网模型的形式化定义。

定义 1^[8](流程 Petri 网模型) 一个流程 Petri 网模型是一个六元组 $PM=(S, T, F, C, s, e)$, 满足以下条件:

(1) S 是有限非空库所集合, T 是有限非空活动变迁集合, 且 $S \cap T = \emptyset$;

(2) $F \subseteq (T \times S) \cup (S \times T)$, 为 PM 的流关系;

(3) $C = \{od, or, pl, cy\}$ 是流程网的结构类型, 即顺序、选择、并行、循环 4 种结构, 其中并行和循环都属于交叉结构;

(4) $s \in T$ 是开始活动变迁, $e \in T$ 是终止活动变迁。

本文的业务流程挖掘方法是以日志的行为轮廓为基础的, 行为轮廓是由 Johannes Koskinen 最先提出, Matthias Weidlich 将行为轮廓运用于捕获流程模型基本的行为约束, 它体现的是变迁之间潜在的发生顺序, 是以活动变迁之间的弱序关系为基础的, 若存在一条发生序列使得一个活动变迁发生在另一个之后, 则这两个活动变迁是弱序关系。

定义 2^[9](行为轮廓) 设 $PM=(S, T, F, C, s, e)$ 为一个流程 Petri 网模型, 一个变迁对 $(x, y) \in (T \times T)$ 是下列关系中的一种:

(1) 严格序关系 $\rightarrow_{PM}$: 若 $x >_y$ 且 $y \not>_x$;

(2) 排他序关系 $+_{PM}$: 若 $x \not>_y$ 且 $y \not>_x$;

(3) 交叉序关系 $\parallel_{PM}$: 若 $x >_y$ 且 $y >_x$;

则称 $BP_{PM} = \{\rightarrow_{PM}, +_{PM}, \parallel_{PM}\}$ 为流程 Petri 网模型 PM 的行为轮廓。

定义 3(基于弱序关系扩展的次序关系) 设 $L \subseteq P(T^*)$ 是流程 Petri 网模型 $PM=(S, T, F, C, s, e)$ 中的事件日志, $\sigma = t_1 t_2 \dots t_n$ 为事件日志 L 中的一条日志序列, 则一个活动变迁对 $(x, y) \in (T_L \times T_L)$ 是下列关系中的一种:

(1) 直接弱序 $>_d$: 存在 $\sigma = t_1 t_2 \dots t_n, \sigma \in L, i \in \{1, 2, \dots, n-1\}$, 使得 $t_i = a, t_{i+1} = b$, 则 $a >_d b$;

(2) 间接弱序 $>_{id}$: 存在 $\sigma = t_1 t_2 \dots t_n, \sigma \in L$, 使得 $t_i = a, t_j =$

b , 其中 $i \in \{1, 2, \dots, n-2\}, j \in \{i+2, i+3, \dots, n\}$, 则 $a >_{id} b$;

(3) 弱循环 $\leftrightarrow$: 存在 $\sigma = t_1 t_2 \dots t_n, \sigma \in L, i \in \{1, 2, \dots, n-2\}$, 使得 $t_i = t_{i+2} = a, t_{i+1} = b$, 则 $a \leftrightarrow b$;

(4) 直接严格序关系 $\rightarrow_d$: 若 $a >_d b \wedge b \not>_d a \wedge a^- \leftrightarrow b \wedge b^- \leftrightarrow a$, 则 $a \rightarrow_d b$;

(5) 间接严格序关系 $\rightarrow_{id}$: 若 $a >_{id} b \wedge b \not>_{id} a \wedge a^- \leftrightarrow b \wedge b^- \leftrightarrow a$, 则 $a \rightarrow_{id} b$;

(6) 并行交叉序 $\parallel_p$: 若 $a >_d b \wedge b >_d a \wedge a^- \leftrightarrow b \wedge b^- \leftrightarrow a$, 则 $a \parallel_p b$;

(7) 循环交叉序 $\parallel_c$: 若 $a >_d b \wedge b >_d a \wedge a \leftrightarrow b \wedge b \leftrightarrow a$, 则 $a \parallel_c b$;

(8) 排他序关系 $\otimes$: 若 $a \not>_d b \wedge b \not>_d a \wedge a \not>_{id} b \wedge b \not>_{id} a$, 则称 $ABP_L = \{\rightarrow_d, \rightarrow_{id}, \parallel_p, \parallel_c, \otimes\}$ 为日志 L 改进的行为轮廓。

如果活动变迁对 (x, y) 满足直接严格序关系, 即 $x \rightarrow_d y$, 则活动变迁对 (y, x) 满足直接严格逆序关系, 即 $y \rightarrow_d^{-1} x$; 若满足间接严格序关系 $x \rightarrow_{id} y$, 则活动变迁对 (y, x) 满足间接严格逆序关系, 即 $y \rightarrow_{id}^{-1} x$ 。属于严格序关系或严格逆序关系的变迁对有特定的发生顺序, 属于排他序关系的变迁对不可能在同一条序列中出现, 而属于交叉序关系的变迁对能够以任意的顺序发生。与进程模型的行为轮廓相比, 在单独的一条日志中是不存在排他序关系的。

定义 4 适合性:

$$a_p = 2 \frac{|\{(a, b) | R_M(a, b) = R_L(a, b)\}|}{|T_M \times T_M| |T_L \times T_L|}$$

其中, $R_M(a, b) \in \{\rightarrow_d, \rightarrow_{id}, \parallel_p, \parallel_c, \otimes\}$ 表示过程模型中 a 和 b 的关系, $R_L(a, b) \in \{\rightarrow_d, \rightarrow_{id}, \parallel_p, \parallel_c, \otimes\}$ 表示事件日志中 a 和 b 的关系。

行为适当性^[10]:

$$a_B = \frac{\sum_{i=1}^k n_i (|T_V| - x_i)}{(|T_V| - 1) \sum_{i=1}^k n_i}$$

其中, k 为给定的执行日志的不同事件轨迹数, n_i 表示第 i 类事件轨迹中所包含的过程实例数, T_V 为流程模型中可见任务的集合, x_i 表示当前事件轨迹重放时就绪变迁的平均个数。

3 基于拟间接依赖的过程模型挖掘方法

3.1 基于事件日志行为轮廓的过程模型的基本结构

过程模型由一个或多个工作流构成, 事件日志确定日志的行为轮廓, 然后根据行为轮廓进行模型挖掘, 这是业务流程挖掘的基本方法。要想准确地挖掘出模型, 必须明确基于事件日志行为轮廓的基本结构, 一些常见的基本结构如下:

(1) 若事件日志为 $L = \{\dots AB \dots\}$, 则 $A >_d B$, 在过程模型中就会有如图 1(a) 所示的结构;

(2) 若事件日志为 $L = \{\dots ABD \dots, \dots ACD \dots\}$, 则 $A >_d B >_d D, A >_d C >_d D, B \otimes C$, 在过程模型中会有如图 1(b) 所示的结构;

(3) 若事件日志为 $L = \{\dots ABCD \dots, \dots ACBD \dots\}$, 则 $A >_d B, B >_d D, A >_d C, C >_d D, B >_d C, C >_d B$, 且 $B^- \leftrightarrow C, C^- \leftrightarrow B$, 在过程模型中则会出现如图 1(c) 所示的结构;

(4) 若事件日志为 $L = \{\dots BCBCB \dots\}$, 则 $B >_d C, C >_d B$,

$B \leftrightarrow C, C \leftrightarrow B$, 即 $B \parallel_c C$, 若为 $L = \{\dots BB\dots\}$, 则 $B \parallel_c B$, 在过程模型中将会出现如图 1(d) 或图 1(e) 所示的结构。

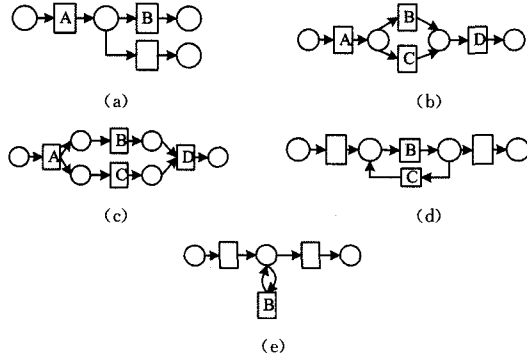


图 1 基于行为轮廓的基本结构

3.2 任务间拟间接依赖关系的确定

实际上,无论在哪个进程模型中,任务间都只存在直接依赖关系和间接依赖关系这两种因果依赖关系。如果只考虑任务间的直接依赖关系,则不能准确无误地从事件日志中挖掘出过程模型,因此还必须考虑任务间的间接依赖关系,为了准确地找出具有间接依赖关系的变迁对,提出拟间接依赖关系的概念。

定义 5(拟间接依赖关系) 设 $L \subseteq P(T^*)$ 是流程 Petri 网模型 $PM = (S, T, F, C, s, e)$ 中的事件日志, $\sigma_i = t_1 t_2 \dots t_n$ 为执行日志 L 中的日志序列,则一个活动变迁对 $(a, b) \in (T_L \times T_L)$ (不考虑在每条日志序列中都共同出现的活动对) 具有拟间接依赖关系,记为 $a \propto b$, 当且仅当:

$$P(a, b) = \frac{\sum_{i=1}^k n_i r(b, \sigma_i)}{\sum_{i=1}^k n_i R(a \rightarrow_{id} b, \sigma_i)} = 1$$

其中, k 为给定的执行日志的不同日志序列数, n_i 表示第 i 类日志序列中所包含的过程实例数, $r(b, \sigma_i)$ 用来判断活动变迁 b 是否在 σ_i 中出现,若 b 在 σ_i 中出现,则 $r(b, \sigma_i) = 1$, 若不出现,则 $r(b, \sigma_i) = 0$; $R(a \rightarrow_{id} b, \sigma_i)$ 用来判断 a 和 b 是否以间接严格序关系出现,若是,则 $R(a \rightarrow_{id} b, \sigma_i) = 1$, 若不是,则 $r(a \rightarrow_{id} b) = 0$ 。

从拟间接关系的定义可知,若 $a \propto b$, 则变迁 b 与变迁 a 有依赖关系,即 b 是否发生取决于 a , 因此 a 和 b 之间必有一个库所直接将它们相连以保证它们之间的这种依赖关系,即 $a \cdot \cap \cdot b \neq \emptyset$, 又因为 $a \rightarrow_{id} b$, 由间接依赖关系的定义可知,若 $a \propto b$, 则 a 和 b 具有间接依赖关系。

3.3 基于拟间接依赖的过程模型挖掘算法

本文提出的基于拟间接依赖的过程模型挖掘算法以日志改进的行为轮廓为基础,首先分析事件日志改进的行为轮廓,根据日志改进的行为轮廓建立初始模型;然后找出具有拟间接依赖关系的变迁对并对模型进行调整;最后根据计算适合性和行为适当性用增量日志来调整模型,直到得出符合需要的业务流程模型。具体的业务流程挖掘算法如算法 1 所示。

算法 1 基于拟间接依赖的过程模型挖掘算法

输入: 处理过的事件日志

输出: Petri 网模型

步骤 1 对提取到的所有日志进行预处理,去除不完备的事件轨迹并合并日志;

步骤 2 遍历每条事件轨迹,根据定义 3,计算日志改进的行为轮廓,建立行为轮廓关系表(仅列出主要的关系即可,如 $\rightarrow_a, \parallel_p, \parallel_c, \otimes$),然后根据日志改进的行为轮廓关系表建立初始模型 M_0 ;

步骤 3 计算模型的适合性 a_p ;

步骤 4 若 $1 - a_p < 0.1$, 则进入步骤 5; 否则新增一个日志来调整模型 M_0 得到模型 M_1 , 令 $M_0 = M_1$, 转入步骤 3;

步骤 5 在适合性接近 1 的情况下,计算行为适当性 a_b , 若 $a_b(M_0, L) < 0.9$, 则新增一个日志转入步骤 2; 否则,进入步骤 6;

步骤 6 根据定义 5,找出使

$$P(a, b) = \frac{\sum_{i=1}^k n_i r(b, \sigma_i)}{\sum_{i=1}^k n_i R(a \rightarrow_{id} b, \sigma_i)} = 1$$

的变迁对 $(a, b) \in (T_L \times T_L)$ (不考虑在每条日志序列中都共同出现的活动对);

步骤 7 若 $a \cdot \cap \cdot b \neq \emptyset$, 则不对模型不做调整, 若 $a \cdot \cap \cdot b = \emptyset$, 则在 a 和 b 之间加上一个库所直接将它们相连,把具有拟间接依赖关系的变迁对考虑完毕,得到模型调整模型 M_2 , 若 $1 - a_p(M_2) < 0.1 \wedge a_b(M_0, L) < 0.9$ 且 $(a_p(M_0) + a_b(M_0, L))/2 < (a_p(M_2) + a_b(M_2, L))/2$, 则 M_2 即为要挖掘的含有间接依赖关系的过程模型, 否则 M_0 为要挖掘的模型。

3.4 实例分析

为了验证上述算法的可行性,本节给出简单的实例,即基于事件日志挖掘出某网站叫外卖的业务流程模型,记录的执行日志中包含以下任务(用大写英文字母表示): (A) 进入网站、(B) 进入店铺、(C) 搜索美食、(E) 添加美食到美食篮、(F) 准备结账、(G) 新用户注册、(H) 老用户登录、(I) 填写用户信息、(J) 老用户无优惠、(K) 新用户立减 10 元、(M) 选择支付方式、(Q) 在线支付立减 2 元、(S) 餐到付款、(U) 计算总价、(V) 确认订单、(X) 退出网站、(Y) 无订餐需要。事件日志如表 1 所列。

表 1 事件日志

事件日志 L ₁	
实例数	事件轨迹
3248	ABCEFGIKMSUVX
2365	ABCEFHJMSUVX
786	ACBEYX
事件日志 L ₂	
实例数	事件轨迹
1249	ACBEFHJMQUVX
725	ABCEFHJMSUVX
1120	ACBEFGIKMQUVX
事件日志 L ₃	
实例数	事件轨迹
1502	ABCEFGIKMSUVX
3110	ACBEFGIKMQUVX
620	ABCEYX
事件日志 L ₄	
实例数	事件轨迹
544	ACBEYX
376	ABCEYX
501	ACBEFHJMQUVX

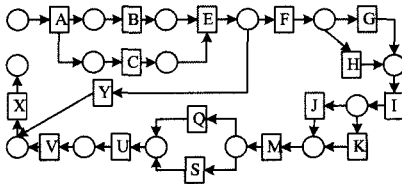
首先将相同的事件轨迹进行合并,按实例数从大到小进行排列,结果如下: {ABCEFGIKMSUVX (4750), ACBEFGIKMQUVX (4230), ABCEFHJMSUVX (3090), ACBEFHJMQUVX (1750), ACBEYX (1330), ABCEYX (996)}, 依次记为 $\sigma_1, \sigma_2, \dots$, 根据定义 2, 计算日志改进的行为轮廓关系, 建立行为轮廓关系表, 如表 2 所列。

表2 行为轮廓关系表

	A	B	C	E	F	G	H	I	J	K	M	Q	S	U	V	X	Y
A		1	1														
B			2	1													
C		2		1													
E					1												1
F						1	1										4
G							4	1									4
H					4			1									4
I									1	1							4
J										4	1						4
K									4		1						4
M												1	1				4
Q													4	1			4
S												4		1			4
U															1		4
V																1	4
X																	
Y					4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	1

注:1表示 $\rightarrow_d$,2表示 $\parallel_p$,3表示 $\parallel_c$,4表示 $\otimes$ 。

根据3.1节建立初始模型 M_0 ,如图2所示。

图2 初始模型 M_0

根据适合性定义计算得到 $a_p(M_0)=1$,所以进入步骤5,根据行为适当性公式计算得 $a_B(M_0, L)=0.9365$,因此不用增加执行日志来调整模型,直接进入步骤6,遍历每个变迁对,得

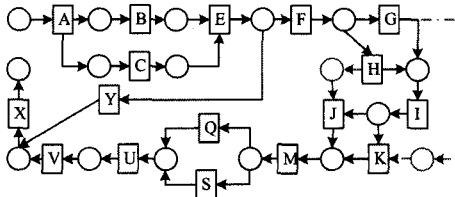
$$P(H, J) =$$

$$\frac{4750 \times 0 + 4230 \times 0 + 3090 \times 1 + 1750 \times 1 + 1330 \times 0 + 996 \times 0}{4750 \times 0 + 4230 \times 0 + 3090 \times 1 + 1750 \times 1 + 1330 \times 0 + 996 \times 0} = 1$$

$$P(G, K) =$$

$$\frac{4750 \times 1 + 4230 \times 1 + 3090 \times 0 + 1750 \times 0 + 1330 \times 0 + 996 \times 0}{4750 \times 1 + 4230 \times 1 + 3090 \times 0 + 1750 \times 0 + 1330 \times 0 + 996 \times 0} = 1$$

通过这一步的计算得出 $P(H, J)=1, P(G, K)=1$,因此变迁对 $(H, J), (G, K)$ 具有拟间接依赖关系,即 $H \propto J, G \propto K$,然后对模型进行调整得到调整模型 M_2 ,如图3所示。计算得 $a_p(M_0)=1, a_B(M_2, L)=0.9760$ 且 $(a_p(M_0) + a_B(M_0, L))/2 = 0.9683 < (a_p(M_2) + a_B(M_2, L))/2 = 0.9880$,因此 M_2 即为所要挖掘的含有间接依赖关系的过程模型。

图3 调整模型 M_2

从大写英文字母表示的意义来看,任务“新用户注册”和任务“新用户立减10”、任务“老用户登录”和任务“老用户无优惠”确实存在着依赖关系,只有做如模型 M_2 那样的调整才能保证它们之间的依赖关系。因为挖掘出了业务流程中变迁

对的间接依赖关系,模型的行为适当性 $a_B(M_2, L)=0.9760$ 明显提高了。

上述实例若用 α 算法进行挖掘,只能得到模型 M_0 ,虽然所记录的事件轨迹都能在模型中重放,但模型 M_0 忽略了 H 和 J 、 G 和 K 之间的关系,它能产生所记录的事件轨迹以外的事件轨迹,如轨迹 $ABCEFGIJKLMQUVX$ 等,这也是 $a_B(M_0, L) < a_B(M_2, L)$ 的原因。可能本文的方法不能挖掘出所有类型的间接依赖结构,但能挖掘出一大类含有间接依赖关系的过程模型。

结束语 随着信息技术的快速发展,业务流程挖掘越来越重要,本文以行为轮廓为基础,提出基于拟间接依赖的挖掘含有间接依赖的过程模型的新方法。最后用一个简单实例说明了所提方法的可行性。

由于流程模型结构的多样性,信息系统记录的事件日志数量大,业务流程挖掘中仍有许多问题亟待解决。下一步计划基于行为轮廓来挖掘含有不可见任务和block任务的过程模型。

参考文献

- [1] van der Aalst W. Service Mining: Using Process Mining to Discover, Check, and Improve Service Behavior[J]. IEEE Transactions on Services Computing, 2013, 6(4): 525-535
- [2] Buijs J C A M, van Dongen B F, van der Aalst W M P. Mining Configurable Process Models from Collections of Event Logs [J]. Business Process Management. Springer Berlin Heidelberg, 2013, 8094: 33-48
- [3] Leemans S J J, Fahland D, van der Aalst W. Discovering Block-Structured process models from incomplete event logs[J]. Application and Theory of Petri Nets and Concurrency Lecture Notes in Computer Science, 2014, 8489: 91-110
- [4] van der Aalst W. Decomposing Petri nets for process mining: A generic approach [J]. Distributed and Parallel Databases, 2013, 31(4): 471-507
- [5] Claes J, Poels G. Merging event logs for process mining: A rule based merging method and rule suggestion algorithm[J]. Expert Systems with Applications, 2014, 41(16): 7291-7306
- [6] Ouyang C, Cheng H J, Juan Y C. An Integrated mining approach to discover business process models with parallel structures: towards fitness improvement[J]. International Journal of Production Research, 2014, 53(13): 1-29
- [7] Wen Li-jie, van der Aalst W M P, Wang Jian-min, et al. Mining Process Models with Non-Free-Choice Constructs[J]. Data Mining and Knowledge Discovery, 2007, 15(2): 145-180
- [8] Fang Xian-weng, Hao Wen-jun. The Approach of Analyzing the Smallest Change Domain in Process Models based on Petri Nets [J]. Applied Mathematics and Information Sciences, 2012, 6(3): 943-949
- [9] Smirnov S, Weidlich M. Business Process Model Abstraction based on Synthesis from Well-structured Behavioral Profiles[J]. International Journal of Cooperative Information Systems, 2012, 21(1): 55-83
- [10] Rozinat A, Van der Aalst W M P. Conformance checking of processes based on monitoring real behavior [J]. Information Systems, 2008, 33(1): 64-95