基于行为片段模式的流程模型Petri网交互变化区域的责任分析

杨 艳[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 对Petri网模型交互后的变化区域的责任分析,是模型交互一致性和兼容性研究的一个重要问题。已有的关于变化区域的研究只涉及到寻找变化区域的方法,对于引起变化区域的责任分析并没有做更多研究。给出了责任的定义,结合行为片段模式的概念,从动态的角度,提出一种基于行为片段模式来分析判断变化区域的责任方的方法,并通过实例分析验证了该方法的有效性。

关键词 Petri网,交互,行为片段模式,责任

中图法分类号 TP391.9 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2014.07.015

Method of Obligation Analysis of Change Region in Process Model Based on Petri Net Behavioral Pattern

YANG Yan[1] FANG Xian-wen[1] LIU Xiang-wei[2]

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

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

Abstract The obligation analysis of the change region in the interacted process model Petri nets is an important question of checking and evaluating consistency and compatibility of interacting models. The study of existing change region just deals with the method to find change region, and the obligation analysis is out of the range. Based on the concept of obligation and behavioral fragment pattern, an approach of obligation analysis of change region was proposed. By the application on the citing example, the validation of the approach was verified.

Keywords Petri nets, Interaction, Behavioral fragment pattern, Obligation

1 引言

在业务流程协作的情形下,不同的参与者需要将彼此的模型进行交互以期达到共同的目标。随着模型交互在实际应用中的不断扩展,越来越多的建模者使用模型交互的方法建立模型。文献[1]介绍了使用Petri网建立基于代理的模型交互系统的基本规则,基于代理的模型交互研究是由20世纪80年代逐步衍生而来的,代理是指在模型交互系统中起着一定功能作用的参与者。文献[2]提出一种基于因果行为Petri网对多代理的交互模型进行分布式的结构分析诊断的方法。然而,模型在交互之后不一定就能完整地表现出服务功能,可能某些区域的预想功能与实际模型交互后表现出的有所偏差,即在交互后的模型中存在变化区域。针对变化区域,已有的文献大多是在判断模型一致性时从侧面来进行研究的。模型的一致性检查可以确保模型交互中代理之间的兼容性,也就是模型交互成功的指数,不同的兼容性标准在文献[3]中给出。文献[4]探究了匹配的流程模型之间的变化传播,利用行为轮廓在假定流程模型变化节点已经确定的情况下,研究如何缩小匹配模型的变化范围。

已有关于变化区域的研究都是着眼于寻找变化区域的方法[5],对于引起变化区域的责任方和解决异常现象的方法没有做更进一步的研究。笔者在假设变化区域已确定的前提下,对交互后的模型进行片段[9,10]分解,结合模型分解技术构建模型的行为流程结构树。对结构树进行分析,给出责任的定义,结合行为片段模式来确定变化区域的责任方,从而找到引起变化区域的源头。

本文第2节介绍了一个电子商务中模型交互后确定了变化区域的例子;第3节介绍了模型的行为结构树的构建方法;第4节则着重于变化区域的责任分析,详述了结合行为片段模式确定变化区域的责任方的方法;在随后的第5节介绍所提方法的实例应用分析;最后总结并展望未来工作。

2 引例

图1是软件应用中的一个Petri网[8]模型交互的例子,A和B在交互之前的结构是良好的,自身变迁行为的发生也都正常,但是交互后的模型由于活动变迁的选择执行或者某些合理的外界因素的介入使得模型运行的结果与预期不一致,出现异常,即交互后的模型中存在变化区域。

A和B两个流程模型Petri网是由两个团队分工开发的两个应用软件的部分结构,要想实现模型的功能完整性,必须将模型进行交互。由图1可知,A和B是通过两个库所连接变迁t_{A3}和t_{B3}、t_{A5}和t_{B8}实现模型交互的。模型交互之后,通

到稿日期:2013-04-03 返修日期:2013-05-19 本文受国家自然科学基金项目(61272153,61170059,61340003),安徽省高校省级自然科学基金重点项目(KJ2011A086,KJ2012A073),安徽省自然科学基金项目(1208085MF105),安徽省软科学研究计划项目(12020503031)资助。

杨 艳(1988—),女,硕士生,主要研究方向为Petri网行为、Web服务,E-mail:383509451@qq.com;方贤文 男,博士,教授,硕士生导师,主要研究方向为Petri网、可信软件;刘祥伟 女,硕士,副教授,主要研究方向为服务计算。

过测试和诊断，得出交互模型存在异常。利用寻找变化区域的方法[5]找到了该交互模型的变化区域，在图 1 中用实线框表示。要想排除异常现象，只有确定模型变化区域的责任方，对责任方进行适当调整。因此，对变化区域进行责任分析的方法是解决交互模型异常的重要一步。

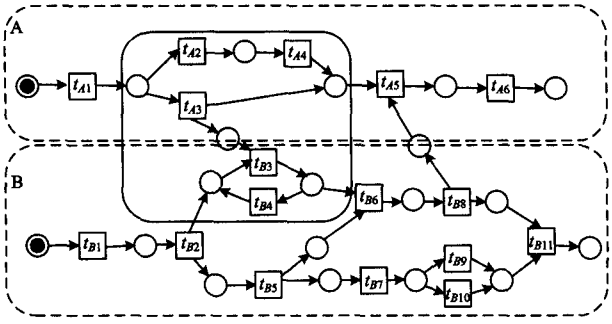

图 1　带变化区域的流程模型交互 Petri 网

3　行为流程结构树的构建

这部分主要介绍模型的行为流程结构树的构建方法，该方法是建立在行为轮廓概念的基础之上，3.1 节给出行为轮廓的概念，而 3.2 节则介绍了流程模型 Petri 网的流程结构树以及行为流程结构树的构建方法。

3.1　行为轮廓

行为轮廓主要表现的是流程模型 Petri 网的序列执行的行为方面，它建立于流程模型 Petri 网的可能发生序列集以及弱序概念的基础之上。

定义 1(弱序)　在一个流程模型 Petri 网 $PM=(P,T,F)$ 中，若对网中所有变迁对 (x,y)，都存在一个发生序列 $\sigma=t_1,\cdots,t_n$，当 $i\in\{1,\cdots,n-1\}$，$i<j\leqslant n$ 时，满足 $t_i=x$ 且 $t_j=y$，则称 x,y 是弱序关系，记作 $x\succ y$。

定义 2(行为轮廓)[9]　设 $PM=(P,T,F)$ 是一个流程模型 Petri 网，变迁对 $(x,y)\in T\times T$ 至少满足以下 3 种关系中的一种：

(1)严格序关系，如果 $x\succ y$，但 $y\not\succ x$，记作 $x\rightarrow y$；

(2)排他序关系：如果 $x\not\succ y$ 且 $y\not\succ x$，记作 $x+y$；

(3)交叉序关系：如果 $x\succ y$ 且 $y\succ x$，记作 $x\parallel y$。

将以上关系的集合称为 PM 的行为轮廓，记为 $BP_{PM}=\{\rightarrow,+,\parallel\}$。

由以上的行为轮廓之间的严格序关系，还可得到严格逆序关系：如果 $y\succ x$，但 $x\not\succ y$，此时记作 $x\rightarrow^{-1}y$。

行为轮廓关系体现了变迁不同等级的执行自由，交叉序关系允许两个变迁以任意序发生，(逆)严格序指代了两个变迁之间有着特定的执行序列，而排他序意味着两变迁不可能出现在一个执行序列中。我们将这 3 种关系按其“严格性”排列构成关系等级图，见图 2。

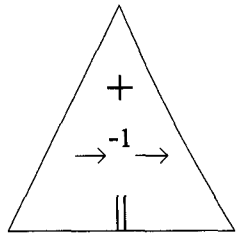

图 2　行为关系等级图

3.2　流程结构树

流程结构树的构建是研究流程模型 Petri 网图结构的技术体现。一个流程模型 Petri 网图可以分为若干个只带有一个进口和一个出口的片段，也就是说流程结构树是由不同等级的流程模型 Petri 网的片段组成的。

定义 3[10](进边，出边，进口，出口，片段)　设 $PM=(P,T,F)$ 是一个流程模型 Petri 网。

· 对于一个流程模型 Petri 网 PM 的一个节点 $x\in X=P\cup T$，$in_{PM}(x)=\{(n,x)\in F\mid n\in\cdot x\}$ 是进边，$out_{PM}(x)=\{(x,n)\in F\mid n\in x\cdot\}$ 是出边。

· 在一个流程模型 Petri 网 PM 的连通子网 PM' 中，若 $\exists e\in in_{PM}(x)\cup out_{PM}(x)[e\notin F']$，则称节点 x 是边界节点。若 $in_{PM}(x)\cap F'=\emptyset$ 或者 $out_{PM}(x)\subseteq F'$，则称 x 是 PM' 的进口。若 $out_{PM}(x)\cap F'=\emptyset$ 或者 $in_{PM}(x)\subseteq F'$，则称 x 是 PM' 的出口。

· 若 PM 中的任一连通子网有两个边界节点，一个是进口，记作 $\omega_{\triangleleft}$，另一个是出口，记作 $\omega_{\triangleright}$，则称这个子网是一个片段，记作 ω。

引例中交互模型的片段分解表现在图 3 中。图 3 中的每个片段都是由包含边集的区域组成的。事实上，每个边也是一个片段，但是在此没有体现。实际划分片段时，还将片段分为 4 种结构不同的类型，T 型片段只包含一个边，P 型片段代表着由片段组成的一段序列，B 型片段则是一类有着公共边界节点的片段，除此之外的其他结构类型的片段统称为 R 型片段。

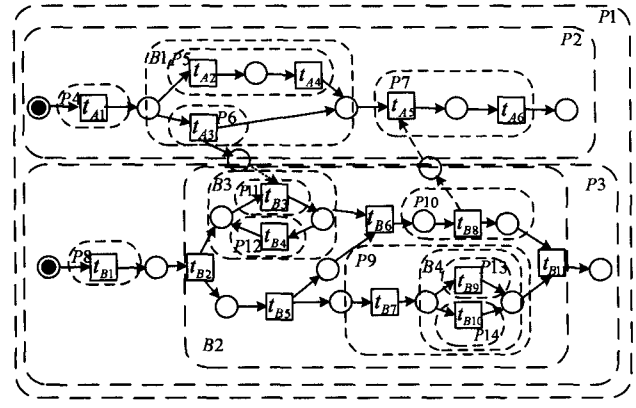

图 3　流程交互模型 Petri 网的片段分解图

根据片段之间的包含关系，可以得到片段的等级，从而构建流程模型 Petri 网的流程结构树。图 4 就是根据图 3 得到的引例中交互模型的流程结构树。

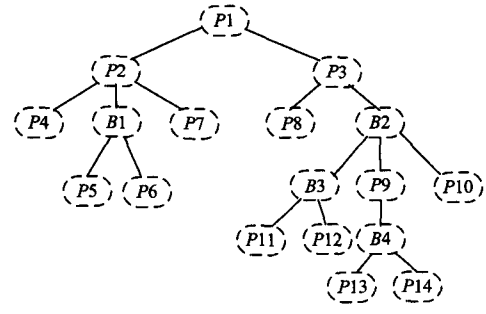

图 4　变化区域的流程结构树

3.3　行为流程结构树

流程结构树主要体现的是流程模型 Petri 网的结构性质，但仅有结构不能完整体现模型的性质来进行模型的责任分

析，还需要与行为相结合。在这一部分中，将行为轮廓的思想融入到流程结构树的构建中，得到本文提出的变化区域责任分析方法的基础——行为流程结构树。

定义 4[10]（行为流程结构树） 设 $PM=(P,T,F)$是一个流程模型 Petri 网，行为流程结构树是一个四元组 $T_{BPM}=(\Omega,\chi,t,b)$，其中：

- Ω 是 PM 中所有片段的集合；
- $\chi:\Omega\to\rho(\Omega)$是将片段对应到其子片段的函数；
- $t:\Omega\to\{T,P,B,R\}$是将片段对应到其片段类型的函数；
- $b:\Omega_B\to\{B_P,B_T,L\}$，$\Omega_B=\{\omega\in\Omega\mid t(\omega)=B\}$是将 B 型片段对应到其分类 B_P，B_T 和 L，其中 B_P 代表着边界节点是库所的 B 型片段，B_T 代表着边界节点是变迁的 B 型片段，L 代表着循环重复的 B 型片段。

由定义可知 B_P 和 B_T 型的片段是非循环的，B_P 代表着子片段间是排他性关系，B_T 代表着子片段间的同步关系。而 L 型则代表着子片段间的循环结构关系。

为了研究需要，还定义了一些带行为的流程结构树的辅助概念。

定义 5[10] （母片段，子片段，根，前辈，后辈，路径）设 $T_{BPM}=(\Omega,\chi,t,b)$是一个流程模型 Petri 网 PM 的带行为的流程结构树。

- 对于两个片段 $\omega,\gamma\in\Omega$，若 $\gamma\in\chi(\omega)$，则称 ω 是 γ 的母片段，γ 是 ω 的子片段。若两个片段有相同的母片段，则称它们为同辈片段。
- 若一个片段没有母片段，则称这个片段是带行为的流程结构树的根，记作 ω_r。
- 对于两个片段 $\omega,\vartheta\in\Omega$，若 $\vartheta\in\chi^+(\omega)$，则称 ω 是 ϑ 的前辈，ϑ 是 ω 的后辈，其中 χ^+ 代表着 χ 的非反射传递闭包。
- 对于任意的片段 $\omega_0\in\Omega$ 和它的后辈 $\omega_n\in\Omega$，从 ω_0 到 ω_n 的一条路径记作 $\sigma_T(\omega_0,\omega_n)$，它是一条片段序列$(\omega_0,\omega_1,\cdots,\omega_n)$。所有路径的并记作 Γ。

通过构建流程模型 Petri 网的行为流程结构树，可以形象地得知片段的结构关系和行为关系，以及从开始片段到结束片段可能发生的路径。图 5 就是引例中交互模型的行为流程结构树。

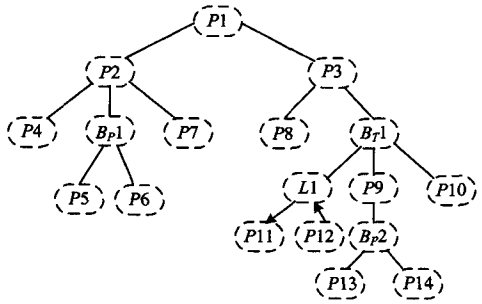

图 5 交互模型的行为流程结构树

4 基于行为片段模式的变化区域的责任分析

这一部分主要是在行为片段模式的基础之上，对变化区域进行责任分析，确定导致变化区域的源头，即其责任方。首先，在 4.1 节中给出了行为片段模式的概念，4.2 节则介绍了责任的相关定义，结合行为片段模式和行为流程结构树对变化区域进行责任分析，并给出两个算法，确定变化区域的责任方。

4.1 行为片段模式

行为片段模式就是把行为轮廓考虑在内的片段模式，片段模式就是考虑片段之间行为依赖关系来对流程模型的片段进行统一的整理，实现优化管理。片段模式用一个关键的参数来描述片段之间行为的依赖关系，即片段间的信心值。

定义 6（信心值） 对于流程模型 Petri 网 $PM=(P,T,F)$的片段集 Ω 的两个子集 X、Y 且 $X\cap Y=\emptyset$，将片段对(x,y)满足的依赖关系数值化，记为 $d(x,y)$，每个 X 在 Y 中的信心值 $con(X,Y)=\dfrac{\sum d(x,y)}{|X|\cdot|Y|}$，其中 $x\in X,y\in Y$。

定义 7（片段模式） 给定一个流程模型 Petri 网 $PM=(P,T,F)$和 PM 的片段集 Ω，$FP=(R,con)$是 PM 的片段模式，其中

(1)R 是 X 到 Y 的一种关联规则，$X,Y\subseteq V$ 且 $X\cap Y=\emptyset$；

(2)con 是片段集 X 到 Y 基于 R 的信心值。

将片段模式中的关联规则用行为轮廓中的 4 种关系表达，即得到行为片段模式。

定义 8（行为片段模式） 给定一个流程模型 Petri 网 $PM=(P,T,F)$和 PM 的片段集 Ω，$BFP=(R,con)$是 PM 的行为片段模式，其中

(1)$R=X\times Y\in\{\to,\to^{-1},+,\|\}$，$X,Y\subseteq V$ 且 $X\cap Y=\emptyset$；

(2)con 是片段集 X 到 Y 基于行为轮廓的信心值，其中 $x\in X,y\in Y$。

4.2 变化区域的责任分析

变化区域的责任分析对流程模型 Petri 网交互后出现异常现象的解决具有重大意义。本节定义了责任的概念，通过计算行为流程结构树中同级片段集之间的信心值，并使用片段序列的不阻塞来分析变化区域的责任。本节涉及到的 Petri 网的一些基本概念在此不再赘述，见文献[15]。

定义 9 设 $PM=(P,T,F)$是一个流程模型 Petri 网，G_f 是 PM 结束标识的集合且 $G_f\in R(M_0)$是有限终止标识集，$\langle PM,G_f\rangle=\{\sigma\in\Gamma\mid(M_0[\sigma>M)\wedge(M\in G_f)\}$记为 PM 的一种片段路径和变迁序列组合的混合路径集。

定义 10 设 $PM=(P,T,F)$是一个流程模型 Petri 网，G_f 是 PM 的终止库所且 $G_f\in R(M_0)$，若 $\forall\sigma\in\langle PM,R(M_0)\rangle$且 $\sigma\notin\langle PM,G_f\rangle$，$\exists\sigma'\in\Gamma$ 使得 $\sigma\circ\sigma'\in\langle PM,G_f\rangle$，则称$\langle PM,G_f\rangle$是不被阻塞的。其中 $\sigma\circ\sigma'$表示 σ 与 σ'的组合路径。

$\langle PM,G_f\rangle$不阻塞的性质表明在 PM 中任意发生的混合路径 σ，在 σ 之后有一个继发路径 σ'，通过组合路径 $\sigma\circ\sigma'$的发生，达到 G_f 中终止库所。这一性质可以用来分析路径中的变迁和模块对路径发生到达终止库所的责任。

定义 11 设 PM_i 是流程模型 Petri 网 PM 的子网，$G_{f_i}\in R(M_0^{(i)})$，$i\in N$，且 $G_f\in R(M_0)$。两个子网 PM_i 和 PM_j 组合而成的网记为 PM'，$i,j\in N$。若对于 $\forall\sigma_i\in\langle PM_i,G_{f_i}\rangle$且$\sigma_i\notin\langle PM',G_f'\rangle$，$\exists\sigma_j\in\langle PM_j,G_{f_j}\rangle$ 使得 $\sigma_i\circ\sigma_j\in\langle PM',G_f'\rangle$，则称 σ_i 中的片段对 PM_j 有责任。

通过上述定义，可以得知变化区域中片段对区域的责任关系，结合行为片段模式确定变化区域的责任方。首先，对给

定的有变化区域的流程模型 Petri 网进行片段划分，构建其行为流程结构树。由行为流程结构树可以得到通过变化区域的所有片段序列，再根据责任的定义，找到与变化区域有责任关系的片段。最后，计算与变化区域有责任关系的片段对变化区域的信心值，确定变化区域的责任方。

算法 1 寻找与变化区域有责任关系的片段

输入：有变化区域的流程模型 Petri 网 PM=(P,T,F)。

输出：与变化区域有责任关系的片段 ω_i，i=1,2,…,n。

(1)将 PM 按照片段的定义进行片段分解，根据片段与片段间的行为关系构建行为流程结构树。

(2)根据行为流程结构树确定通过变化区域的片段路径 σ_i 和变化区域中的片段路径 σ_j，其中 i=1,2,…,n,j=1,2,…,m。

(3)取 PM 的变化区域作为子网 PM_2，与变化区域的变迁有行为关系的所有变迁组成的 Petri 网作为另一个子网 PM_1，PM_1 与 PM_2 组成的网记作 PM′，取 PM_1 中的一条片段路径 $\sigma_i \in \langle PM_1, G_{f_1}\rangle$ 且 $\sigma_i \notin \langle PM', G_f'\rangle$，若在 PM_2 中能找到一条片段路径 $\sigma_j \in \langle PM_2, G_{f_2}\rangle$ 使得 $\sigma_i \circ \sigma_j \in \langle PM', G_f'\rangle$，根据责任的定义，$\sigma_i$ 中片段对变化区域 PM_2 有责任关系。否则判断下一条片段路径，循环直至 i=n 时终止。得到与变化区域有责任关系的片段 ω_k，k=1,2,…,l。

算法 2 确定变化区域的责任方

输入：与变化区域有责任关系的片段 ω_k，k=1,2,…,l。

输出：变化区域的责任方。

(1)计算与变化区域有责任关系的片段 ω_k 在变化区域中的片段 ω_j 组成的片段集合 Ω 中的行为关系权重值，$w(\omega_k \succ \omega_j)=|\{\forall \omega_j \in \Omega: \omega_k \rightarrow \omega_j \vee \omega_k \| \omega_j\}|$，$w(\omega_j \succ \omega_k)=|\{\forall \omega_j \in \Omega: \omega_k \rightarrow^{-1} \omega_j \vee \omega_k \| \omega_j\}|$，$w(\omega_k \prec \omega_j)=|\{\forall \omega_j \in \Omega: \omega_k \rightarrow^{-1} \omega_j \vee \omega_k + \omega_j\}|$，$w(\omega_j \prec \omega_k)=|\{\forall \omega_j \in \Omega: \omega_k \rightarrow \omega_j \vee \omega_k + \omega_j\}|$，$w(\omega_k + \omega_j)=\frac{\min(w(\omega_k \prec \omega_j), w(\omega_j \prec \omega_k))}{|\Omega|}$，$w(\omega_k \rightarrow \omega_j)=\frac{\min(w(\omega_k \succ \omega_j), w(\omega_j \prec \omega_k))}{|\Omega|}$，$w(\omega_k \rightarrow^{-1} \omega_j)=\frac{\min(w(\omega_j \succ \omega_k), w(\omega_k \prec \omega_j))}{|\Omega|}$，$w(\omega_k \| \omega_j)=\frac{\min(w(\omega_k \succ \omega_j), w(\omega_j \succ \omega_k))}{|\Omega|}$，其中 k=1,2,…,l,j=1,2,…,m。

(2)计算 ω_k 在 Ω 中的信心值 $con(\omega_k)$，$con(\omega_k)=\sum_{j=1}^{m}\frac{w(\omega_k+\omega_j)+w(\omega_k\rightarrow\omega_j)+w(\omega_k\rightarrow^{-1}\omega_j)+w(\omega_k\|\omega_j)}{4}$，循环直至 k=l 时终止，信心值最大的片段就是变化区域的责任方。

5 引例分析

将第 2 节中的引例作为实验对象来验证本文方法的有效性。根据文中介绍的模型片段分解方法和行为流程结构树的构建方法，对引例中的交互模型进行片段分解，并构建其行为流程结构树。交互模型的片段分解结果见图 3，行为流程结构树见图 5。由图 3 和图 5 可得知包含在变化区域内的片段有 B_P1、$P5$、$P6$、$L1$、$P11$、$P12$，通过变化区域的所有可能的片段路径组成的集合 $\Gamma_1=\{(P4,B_P1,P7),(P8,L1,P10)\}$，而交互流程模型 Petri 网的所有可能的片段路径组成的集合 $\Gamma_2=\{(P4,B_P1,P7),(P4,P6,L1,P10),(P4,P6,L1,P7),(P8,P9),(P8,B_T1),(P8,L1,P10),(P8,P10)\}$。根据 4.2 节中的算法 1，求得对变化区域有责任关系的片段有 B_P1 和 $L1$，B_P1 有子片段 $P5$ 和 $P6$，$L1$ 有子片段 $P11$ 和 $P12$。记片段 $P5$ 和 $P6$ 组成的集合为 $\Omega_1=\{P5,P6\}$，片段 $P11$ 和 $P12$ 组成的集合为 $\Omega_2=\{P11,P12\}$。根据算法 2 分别计算 $P5$ 和 $P6$ 在 Ω_2 中的信心值，$P11$ 和 $P12$ 在 Ω_1 中的信心值，计算结果如表 1 所列。

表 1 责任片段在责任片段集中的信心值

	con(P5)	con(P6)	con(P11)	con(P12)
Ω_1	—	—	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
Ω_2	0	1	—	—

由表 1 可知，片段 $P6$ 在 Ω_2 中的信心值最大，因此片段 $P6$ 就是所要寻找的变化区域的责任方。片段 $P6$ 只包含了变迁 t_{A3} 和 t_{A3} 的一个进边以及一个出边。由图 1 可知，A 模型中 t_{A3} 和 t_{A4} 共同发生之后才能使得 t_{A5} 有发生权，而交互之后，t_{A5} 的发生权也可能是由 $t_{A3}\rightarrow t_{B3}\rightarrow t_{B4}\rightarrow t_{B6}\rightarrow t_{B8}$ 继承而来的，因此若对模型进行行为控制，使其既能满足 t_{A3} 和 t_{A4} 的共生又能实现序列 $t_{A3}\rightarrow t_{B3}\rightarrow t_{B4}\rightarrow t_{B6}\rightarrow t_{B8}$ 的服务要求，则 t_{A3} 就导致了变化区域的产生。

结束语 在现有的研究基础之上，使用行为轮廓来动态地分析交互模型 Petri 网的结构和行为，提出一种方法确定模型交互后出现变化区域的责任方。该方法的先进性体现在以下 3 个方面：(1)在假设变化区域已经确定的前提下，对交互模型进行片段分解，基于片段进行分析，克服了研究多个具有相同结构和间接行为关系的变迁的重复性；(2)根据片段的等级构建模型的结构树，并结合行为轮廓，构建了能同时体现模型片段结构和行为的行为结构树，从行为结构树可以明确得知模型的片段序列及其行为关系；(3)定义了责任的概念，对通过变化区域的片段序列进行责任分析，得出与变化区域有责任关系的片段，利用行为片段模式中的行为轮廓关系数值化计算与变化区域有责任关系的片段在变化区域片段集中的信心值，得到导致变化区域的责任方。

未来计划通过分析模型交互一致性和兼容性，对导致变化区域的责任方进行适配性分析，使其满足模型交互的较高一致性和兼容性，从而避免导致变化区域。

参 考 文 献

[1] Ezzedine H, Kolski C. Petri Net, Theory and Applications [M]. Croatia: Vedran Kordic, 2008: 131-148

[2] Bennoui H, Chaoui A, Barkaoui K. On Structural Analysis of Interacting Behavioral Petri Nets for Distributed Casual Model-Based Diagnosis [J]. International Journal of Foundations of Computer Science, 2012, 23(7): 1523-1541

[3] Decker G, Weske M. Behavioral consistency for B2B process integration[C]// CAiSE'07 Proceedings of the 19th International Conference on Advanced Information Systems Engineering, 2007. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007: 81-95

[4] Weidlich M, Weske M, Mendling J. Change propagation in process models using behavioural profiles[C]// IEEE Int. Conf. on Services Computing. Bangalore, 2009: 33-40

[5] Fang Xian-wen, Hao Wen-jun, Yin Zhi-xiang, et al. The Analysis Method about Change Domain of Business Process Model Based on the Behavior Profile of Petri Net[J]. Applied Mathematics & Information Sciences, 2012, 6(S3): 943-949

[6] 朱俊. 基于 Petri 网的 Web 服务组合的交互模型及其应用机理的研究[D]. 长沙：国防科学技术大学，2011

(下转第 85 页)

BACA_net 表示的原材料采购订单审核服务系统业务流程的安全模型如图 3 所示。

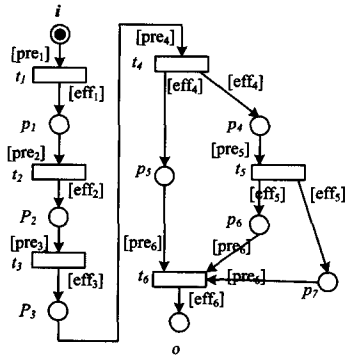

图 3 *BACA_net* 表示的审核服务业务流程

库所及语义描述：i：安全组合服务输入接口；P_1：原材料采购订单；P_2：校对后采购订单；P_3：采购订单金额核算报告；P_4：大额度订单金额复核报告；P_5：小额度订单金额复核报告；P_6：采购主管经理批准报告；P_7：采购主管经理否决报告；o：安全组合服务结束状态（采购通知单）。

变迁及语义描述：t_1，制订原材料采购订单；t_2，校对采购订单；t_3，核算采购订单金额；t_4，复核采购订单金额；t_5，大额度采购订单批准或否决决策；t_6，发送采购通知单。

前提条件及语义描述：前提条件包含两方面内容，前半部分表示授权活动在激发前需要遵循的流程安全策略，确保敏感的活动由不同的用户执行，避免诈骗行为的产生；后半部分要求前趋变迁所关联活动的授权已完成，实现动态授权。设授权活动 a_i 的执行角色用 $R(a_i)$ 表示，a_i 的授权状态用 $AuS(a_i)$ 来表示（$1\leqslant i\leqslant 6$），令 $Ge_{pre_i}=pre_i$，$Ge_{effc_i}=eff_i$，前提条件语义描述为：$[pre_1]::=Role(a_1)\neq Role(a_2)$；$[pre_2]::=Role(a_2)\neq Role(a_1)\wedge AuS(a_1)=completed$；$[pre_3]::=Role(a_3)\neq Role(a_4)\wedge AuS(a_2)=completed$；$[pre_4]::=Role(a_4)\neq Role(a_3)\wedge AuS(a_3)=completed$；$[pre_5]::=Role(a_5)\succ Role(a_2)\wedge AuS(a_4)=completed$；$[pre_6]::=Role(a_1)=Role(a_6)\wedge AuS(a_4)=completed\,|\,AuS(a_5)=completed$，其中，$\succ$ 表示角色的偏序关系，$Role(a_5)\succ Role(a_2)$ 表示 $Role(a_5)$ 支配 $Role(a_2)$。

后继效果及语义描述：定义授权活动执行后对授权状态的影响，确保活动执行完成后所有权限被收回，实现最小权限原则，其语义描述为：$[eff_1]::=AuS(a_1)=completed$；$[eff_2]::=AuS(a_2)=completed$；$[eff_3]::=AuS(a_3)=completed$；$[eff_4]::=AuS(a_4)=completed$；$[eff_5]::=AuS(a_5)=completed$；$[eff_6]::=AuS(a_6)=completed$。

利用前面的结果，基于算法 1 对图 3 的协同授权模型进行一致性检测，容易证明模型的扩展网保持活性和有界性，每个变迁都是活的，并且满足可控死锁的性质。因此，实例中原材料采购订单审核服务业务流程在安全协同进程中是授权一致的。

结束语 本文通过扩展 CPN 表达 BPEL 活动授权执行过程的动态行为语义，实现了活动协同授权约束一致性的形式化分析和检测。实例原形实验表明，*BACA_net* 能够有效地描述 BPEL 活动协同授权的状态和行为，降低协同授权建模的复杂性，保证开放环境下 BPEL 活动授权协同执行的安全性。本文对组合 Web 服务 BPEL 活动协同授权一致性检测机制的研究还需要不断完善。建立一套完整的协同授权模型自动生成、性质分析与验证工具，将是下一步主要研究的内容。

参 考 文 献

[1] 宋巍，唐金辉，张功萱，等. WS-BPEL 服务可替换性分析[J]. 中国科学：信息科学，2012，42(3)：264-279

[2] 唐佳俊，黄志球，王进. 一种 Web 服务组合的可信评估方法[J]. 计算机科学，2013，40(2)：163-168

[3] Manuel M，Nicola D. Implementing workflow reconfiguration in WS-BPEL[J]. Journal of Internet Services and Information Security，2012，2(2)：73-92

[4] Bertino E，Martino D L，et al. Security for Web services and service-oriented architectures[M]. Berlin：Springer，2010：170-175

[5] Ahmed A. A compliance management framework for Business Process models[D]. Potsdam：University of Potsdam，2010

[6] Rafael A. An approach to data-driven detective internal controls for process-aware information Systems[C]// Workshop on Data Usage Management on the Web 2012. 2012：20-25

[7] Mohsen R. Security analysis for web services compositions[J]. Journal of Scientific & Engineering Research，2012，3(5)：1-8

[8] Alberto C，Silvio R，et al. Automated validation of security-sensitive Web Services specified in BPEL and RBAC[C]// Proc of the 12th International Symposium on Symbolic and Numeric Algorithms for Scientific Computing. 2010：456-464

[9] Barry D. Policy Driven Development：SOA Evolvability through Late Binding[D]. San Diego：University of California，2013

[10] Karima M. On Transforming Business Patterns to Labeled Petri Nets Using Graph Grammars[J]. Information Technology and Computer Science，2013，20(2)：15-27

[11] 吴哲辉. Petri 网导论[M]. 北京：机械工业出版社，2006：48-49

[12] Agnarsson G，Greenlaw R. Graph Theory：Modeling，Applications，and Algorithms[M]. New York：Prentice Hall Press，2007：89-97

（上接第 80 页）

[7] 朱俊，郭长国，吴泉源. 基于 Petri 网的 Web 服务交互行为一致性检测方法[J]. 计算机工程与科学，2013，35：28-33

[8] Murata T. Petri nets：Properties，analysis and applications[J]. Proceedings of the IEEE，1989，77(4)：541-580

[9] Smirnov S，Weidlich M，Mendling J. Business Process Model Abstraction Based on Synthesis From Well-Structured Behavioral Profiles[J]. Cooperative Information Systems，2012，21(1)：55-83

[10] Weidlich M，Mendling J，Weske M，et al. Causal Behavioural Profiles－Efficient Computation，Applications，and Evaluation [J]. Fundamenta Informaticae：Applications and Theory of Petri Nets and Other Models of Concurrency，2011，113(3/4)：399-435

[11] Koskinen J，Kettunen M，Systa T. Behavioral profiles—a way to model and validate program behavior[J]. Software：Practice & Experience，2010，40(8)：701-733

[12] Du Yu-yue，Jiang Chang-jun. A Formal Approach for Obligation Analysis of E-Commerce[J]. Chinese Journal of Electronics，2008，17(2)：200-204

[13] 钱柱中，陆桑璐，谢立. 基于 Petri 网的 Web 服务自动组合研究[J]. 计算机学报，2006，29(7)：1057-1066

[14] 汤宪飞，蒋昌俊，丁志军. 基于 Petri 网的语义 Web 服务自动组合方法[J]. 软件学报，2007，18(12)：2991-3000

[15] 吴哲辉. Petri 网理论[M]. 北京：机械工业出版社，2006：6-42