

# 基于结构分解的因果行为轮廓获取方法

蔡敏<sup>1,2</sup> 汪世义<sup>2</sup>

(同济大学计算机科学与技术系 上海 201804)<sup>1</sup> (巢湖学院计算机与信息工程学院 合肥 238000)<sup>2</sup>

**摘要** 模型因果行为轮廓不仅可用于度量业务模型之间的一致度,还可以监控业务流程的实际执行。针对现有因果行为轮廓获取方法的局限性,提出了基于最小 T-不变量分解技术的因果行为轮廓获取方法。该方法首先将工作流系统模型分解成一组完备子系统,再由各完备子系统内的局部关系推导出系统模型中的全局关系,可用于捕获任意 sound 自由选择工作流系统的因果行为轮廓。

**关键词** T-不变量,工作流系统,因果行为轮廓,完备子系统,变迁对中图法分类号 TP311 文献标识码 A

## Capturing Causal Behavioral Profile Based on Structural Decomposition Technique

CAI Min<sup>1,2</sup> WANG Shi-yi<sup>2</sup>

(Department of Computer Science and Technology, Tongji University, Shanghai 201804, China)<sup>1</sup>

(School of Computer and Information Engineering, Chaohu College, Hefei 238000, China)<sup>2</sup>

**Abstract** The causal behavioral profile can be applied to measure the consistency between two given process models as well as to monitor process execution. To overcome the limitation of existing approach to obtain the causal behavioral profile, a novel approach was presented based on T-invariants decomposition technique. A workflow system is first decomposed into a set of complete subsystems, and then the global relations between transitions are deduced from their local relations in each complete subsystem. The approach can be used for arbitrary sound free choice workflow systems.

**Keywords** T-invariants, Workflow system, Causal behavioral profiles, Complete subsystems, Transition pairs

## 1 引言

为了更加有效地分析和处理各种大型业务流程,人们对现实业务流程进行抽象、建模<sup>[1]</sup>。然而,即使针对同一业务流程,不同的模型设计人员也可能从不同的角度或不同的抽象层次出发,最终建立的模型差异也很大。模型一致性度量可评估两个给定的模型在多大程度上为同一业务流程模型,对于模型的校准、重用、整合等工作非常重要。目前已经有很多种模型一致性度量方法,但能实际应用的却很少。例如基于互模拟的方法<sup>[2]</sup>存在状态空间爆炸问题;基于迹等价<sup>[3]</sup>的方法面临着迹的集合过大甚至无穷问题;而基于观测日志的方法<sup>[4]</sup>虽然回避了上述问题,但其计算结果随日志的不同而不同,容易受到质疑。

基于迹等价的方法对于微小变化过于敏感,文献[5]提出了基于行为轮廓的方法。该方法不仅可以度量模型在多大程度上一致,还可以给出哪里出现了不一致,受到了广泛关注。文献[6]通过网上问卷调查分析得出,基于行为轮廓的方法比基于迹等价的方法更接近过程分析专家所感知的一致度。行为轮廓还有一些其他有价值的应用,如文献[7]利用行为轮廓分析了源模型和目标模型的对应关系,找到过程模型的最小变化域和引起行为变化的变迁活动节点。

因果行为轮廓<sup>[8]</sup>在行为轮廓的基础上增加了共现关系作为附加约束,不仅提高了度量精度,还可以用于实时监控业务过程的执行<sup>[9]</sup>。然而,共现关系的获取是比较困难的。现有的方法计算因果行为轮廓时需要假定无结构网片段是无环的或者可追溯到 S-系统或 T-系统<sup>[8]</sup>,这一假设使得因果行为轮廓的应用范围受到很大限制。为此,本文提出了一种基于最小 T-不变量分解技术的因果行为轮廓获取方法,可适用于任意 sound 自由选择工作流系统。

## 2 基本概念和术语

这里给出本文涉及的一些主要概念和表示符号,详细信息可参考文献[4,5,8-13]。

**定义 1**<sup>[9]</sup> 三元组  $PN=(P, T, F)$  是一个 Petri 网,当且仅当  $P$  和  $T$  分别是库所和变迁的有限集,  $P \cup T \neq \phi$ ,  $P \cap T = \phi$ ,  $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$  是流关系。  $F^+$  是流关系的传递闭包。

结点  $x$  的前集定义为  $\cdot x = \{y | y \in P \cup T, (y, x) \in F\}$ , 后集定义为  $x \cdot = \{y | y \in P \cup T, (x, y) \in F\}$ 。标识  $M: P \rightarrow N$  是一个映射,描述了某一时刻各库所中托肯的分布情况。  $M(p)$  表示标识  $M$  下库所  $p$  中的托肯数。若  $x$  是一个库所,则标识  $[x]$  表示仅库所  $x$  中有一个托肯,其余库所均无托肯。若  $x$  是

到稿日期:2013-03-29 返修日期:2013-06-04 本文受安徽省高等学校省级自然科学基金项目(KJ2013B157, KJ2012Z266)资助。

蔡敏(1975-),男,博士生,讲师,主要研究方向为软件形式化理论、可信软件;汪世义(1974-),男,博士,副教授,主要研究方向为网络安全、人工智能, E-mail: cm\_grass@126.com。

一个变迁,则 $[x]$ 表示 $x$ 的最小使能标识 $M$ ,即对 $\forall p \in \cdot x, M(p)=1$ ,且对 $\forall p \notin \cdot x, M(p)=0$ 。

**定义 2<sup>[10]</sup>** Petri 网  $PN$  是自由选择的,当且仅当 $\forall t_1, t_2 \in T, \cdot t_1 \cap \cdot t_2 \neq \phi$  蕴含 $\cdot t_1 = \cdot t_2$ 。

**定义 3<sup>[10]</sup>** Petri 网  $PN$  是一个工作流网,当且仅当:

- (1)  $PN$  有且仅有一个起始库所  $i$ , 即 $\cdot i = \phi$ ;
- (2)  $PN$  有且仅有一个终止库所  $o$ , 即 $o \cdot = \phi$ ;
- (3) 如果在  $PN$  上增加一个变迁  $t^*$ , 使 $(t^*) \cdot = \{i\}$ ,  $(t^*) \cdot = \{o\}$ , 所得到的扩展网 $\overline{PN}$ 是强连接的。

在工作流网中,一个变迁可表示一个活动,也可能仅表示 AND-split 或 AND-join 结构。库所对应变迁的前件与后件,也可能仅表示 OR-split 或 OR-join 结构。一个工作流系统  $S$  由一个工作流网  $PN$  和它的初始标识 $[i]$ 给出,记作  $S=(PN, [i])$ 。

**定义 4<sup>[11]</sup>** 工作流系统  $S=(PN, [i])$  满足 soundness 属性,当且仅当满足:

- (1)  $S$  是安全的;
- (2) 从任意可达标识  $M$  出发,都可到达标识 $[o]$ ;
- (3) 若存在可达标识  $M \geq [o]$ , 则  $M=[o]$ ;
- (4) 无死变迁。

**定义 5<sup>[12]</sup>** 设  $PN$  是一个网,  $|P|=m, |T|=n, A$  是  $PN$  的关联矩阵,如果非平凡的  $n$  维非负整数向量  $X$  满足  $A^T X=0$ , 则称  $X$  为  $PN$  的一个  $T$ -不变量。 $T$ -不变量  $X$  的支集记作  $\|X\| = \{t_i \in T | X(t_i) > 0\}$ 。对于一个  $T$ -不变量  $X_k$ , 如果不存在其它  $T$ -不变量  $X_j < X_k$ , 则称  $X_k$  是最小  $T$ -不变量。

**定义 6<sup>[13]</sup>** 设  $PN_1$  与  $PN_2$  是两个网, 称  $PN_1$  是  $PN_2$  的一个  $T$ -组件, 当且仅当满足条件:

- (1)  $P_1 = \cdot T_1 \cup T_1 \cdot, F_1 = ((P_1 \times T_1) \cup (T_1 \times P_1)) \cap F_2$ ;
- (2)  $\forall p \in P_1, |\cdot p \cap T_1| \leq 1, |p \cdot \cap T_1| \leq 1$ 。

定义 6 第一个条件要求  $PN_1$  是  $PN_2$  关于  $T_1$  的外延子网, 而第二个条件则要求  $PN_1$  是个标识图。

**定义 7<sup>[5]</sup>** 设  $S=(PN, [i])$  是一个工作流系统。并发关系  $\parallel$  包含所有变迁对  $(x, y)$ , 若  $x \neq y$  且存在可达标识  $M \geq [x] + [y]$ 。

**定义 8<sup>[5]</sup>** 设  $S=(PN, [i])$  是一个工作流系统。弱序关系  $> \subseteq T \times T$  包含所有变迁对  $(x, y)$ , 若系统存在一个变迁发生序列  $\sigma = t_1, t_2, \dots, t_n$ , 使得  $t_j = x, t_k = y, 1 \leq j < k \leq n$ 。

**定义 9<sup>[5]</sup>** 设  $S=(PN, [i])$  是一个工作流系统。变迁对  $(x, y) \in T \times T$  属于下列关系之一:

- (1) 严序关系  $\rightarrow$ : 若  $x > y$  但  $y \not> x$ ;
- (2) 互斥关系  $+$ : 若  $x \not> y$  且  $y \not> x$ ;
- (3) 交错有序关系  $\parallel$ : 若  $x > y$  且  $y > x$ ;
- (4) 逆严序关系  $\rightarrow^{-1}$ : 若  $x \not> y$  但  $y > x$ 。

$B = \{\rightarrow, +, \parallel\}$  被称作是  $T$  上的行为轮廓。

**定义 10<sup>[4]</sup>** 设  $S=(PN, [i])$  是一个工作流系统, 一条从标识 $[i]$ 到标识 $[o]$ 的变迁发生序列称作满迹。

**定义 11<sup>[8]</sup>** 设  $S=(PN, [i])$  是一个工作流系统。

(1) 变迁对  $(x, y) \in T \times T$  属于共现关系  $\gg$ , 若任意一条满迹  $\sigma$  都满足:  $x \in \sigma \Rightarrow y \in \sigma$ 。

(2)  $B = \{\rightarrow, +, \parallel, \gg\}$  被称作是  $T$  上的因果行为轮廓。

### 3 因果行为轮廓的获取

#### 3.1 基于最小 $T$ -不变量的分解算法

对于满足 soundness 属性的工作流网  $PN$ , 其扩展网 $\overline{PN}$ 被它的最小  $T$ -不变量覆盖<sup>[12]</sup>。我们可以先求解 $\overline{PN}$ 的所有最小  $T$ -不变量, 再由最小  $T$ -不变量生成外延子网, 实现分解目的。分解算法如下:

输入: 一个 sound 自由选择工作流网  $PN$ 。

输出: 可选子网集  $O$ 、主干子网集  $B$ 、完备子网集  $C$ 。

int Decomposition(WF  $PN$ , ONet  $O$ , BNet  $B$ , CNet  $C$ ) {

1.  $T = TU\{t^*\}; F = FU\{(t^*, i), (o, t^*)\}$ ;
2.  $B = \phi; O = \phi$ ;
3. SolveEquation( $A, X, ST$ );
4. for each  $T_i \in ST$
5. if  $t^* \in T_i$
6.  $\{OutfaceNet(PN, T_i - \{t^*\}, PN_i); B \leftarrow PN_i\}$
7. else  $\{OutfaceNet(PN, T_i, PN_i); O \leftarrow PN_i\}$
8.  $C = B$ ;
9. for each  $PN_i \in C$  {
10. for each  $PN_j \in O$  tag<sub>j</sub> = 0;
11. do{
12. flag = 0;
13. for each  $PN_j \in O$
14. if  $(P_i \cap P_j \neq \emptyset) \& \& (tag_j = 0)$
15. {
16.  $(P_i = P_i \cup P_j); (T_i = T_i \cup T_j)$
17.  $(F_i = F_i \cup F_j); flag = 1; tag_j = 1$ ;
18. }
19. }while (flag = 0);
20. }
21. } // End Decomposition

算法第 1 行是构建  $PN$  的扩展网 $\overline{PN}$ 。第 3 行求解方程  $A^T X=0$ , 得到所有最小  $T$ -不变量, 记作  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_l\}$ , 它们的支集的集合记作  $ST = \{T_1, T_2, \dots, T_l\}$ , 考虑到  $T$ -不变量的物理意义, 只需求解  $X_i > 0, X_i(t^*) = 0$  或 1 的最小  $T$ -不变量。注意这里  $A$  是 $\overline{PN}$ 的关联矩阵。第 4-7 行由各支集生成外延子网, 这些生成子网被分成两个集合:  $B$  和  $O$ 。其中  $B$  中的每个子网都包含起始库所  $i$  和终止库所  $o$ , 我们称之为主干子网。而  $O$  中每个子网都是环结构, 我们称之为可选子网。第 8-20 行将可选子网与主干子网进行合并, 我们称  $C$  中的每个子网为完备子网。显然一个完备子网由唯一一个主干子网和若干可选子网合并而成。一个完备子系统由一个完备子网与初始标识 $[i]$ 给出, 其任一条满迹  $\sigma$  都必须至少包含其主干子网上的所有变迁, 而可选子网中的变迁则可能不被包含。各完备子系统上的满迹划分了系统的满迹。

#### 3.2 完备子系统的行为轮廓

**引理 1<sup>[10]</sup>** 工作流系统  $S=(PN, [i])$  满足 soundness 属性, 当且仅当  $\overline{S}=(\overline{PN}, [i])$  是活的且有界。

**引理 2<sup>[13]</sup>** 活的有界的自由选择系统  $S=(PN, [i])$ , 其每个最小不变量  $J$  都可生成强连接的  $T$ -组件, 并且  $J$  可执行。

**定理 1** 设  $S=(PN,[i])$  是一个 sound 自由选择 workflow 系统,  $S'=(P',T',F',[i])$  是  $S$  的任一完备子系统, 则  $S'$  也是 sound 自由选择系统。

证明: 首先证明  $S'$  是自由选择的。假设  $S'$  不满足自由选择特性, 则  $S'$  中必存在两个不同的变迁  $t_1$  和  $t_2$ ,  $\cdot t_1 \cap \cdot t_2 \neq \phi$ , 但  $\cdot t_1 \neq \cdot t_2$ 。不妨设存在库所  $p \in \cdot t_1$  但  $p \notin \cdot t_2$ 。但由于  $S$  是自由选择的, 因此在  $S$  中,  $p \in \cdot t_2$ 。因而包含  $t_2$  的最小  $T$ -不变量生成的外延子网必然有  $p \in \cdot t_2$ , 矛盾。

其次证明  $S'$  满足 soundness 属性。因为  $S$  满足 soundness 属性, 所以  $\bar{S}$  是活的且有界(引理 1), 又因为  $\bar{S}$  也是自由选择的, 故  $\bar{S}$  的每个最小  $T$ -不变量都是可执行的(引理 2)。  $S'$  的扩展网  $\bar{S}'$  正是由这些最小  $T$ -不变量生成的外延子网组成, 且包含一个主干子网, 故  $\bar{S}'$  是活的。又  $\bar{S}'$  必定是有界的, 否则存在一条变迁执行序列, 使得某库所中托肯数无限增加。那么在  $\bar{S}$  中执行同样序列也会使该库所中托肯无限增加, 这与  $\bar{S}$  有界矛盾。由引理 2 知,  $S'$  满足 soundness 属性。

综上所述,  $S'$  是 sound 自由选择系统。

对 sound 自由选择系统  $S=(PN,[i])$  中的两个变迁  $x, y \in T$ , 若  $xF^+y$  且  $yF^+x$ , 则称它们是环依赖的; 若  $xF^+y$  且  $yF^+x$ , 则称它们是结构互斥的; 若  $xF^+y$  且  $yF^+x$ , 则称它们是结构有序的。

**引理 3**<sup>[5]</sup> 对于任意的自由选择系统, 并发的两个变迁也是交错有序的。

**引理 4**<sup>[5]</sup> 对于 sound 自由选择系统中的任意两个非并发的变迁, 交错有序等价于环依赖。

**引理 5**<sup>[5]</sup> 对于 sound 自由选择系统中的任意两个非并发的变迁, 互斥关系等价于结构互斥。

文献[5]对于 sound 自由选择系统, 先求出系统中的并发关系, 进而根据流关系的传递闭包可求出系统的行为轮廓。在这里, 考虑到完备子系统的特殊性, 可以直接根据流关系的传递闭包求取上述 3 种关系, 无需先求取并发关系。

**定理 2** sound 自由选择 workflow 系统的任一完备子系统中, 环依赖的两个变迁必属交错有序关系。

证明: 设  $S'$  是 sound 自由选择系统  $S$  的一个完备子系统,  $\forall x, y \in T', xF^+y$  且  $yF^+x$ , 由定理 1 知  $S'$  也是 sound 自由选择系统, 故若  $x \parallel y$ , 由引理 3 可知,  $x \parallel y$ ; 若  $x \ll y$ , 由引理 4 可知,  $x \parallel y$ 。

**定理 3** sound 自由选择 workflow 系统的任一完备子系统中, 结构互斥的两个变迁:

- (1) 若  $x \neq y$ , 则  $x \parallel y$ ;
- (2) 若  $x = y$ , 则  $x + y$ 。

证明: 设  $S'$  是 sound 自由选择系统  $S$  的一个完备子系统,  $\forall x, y \in T', xF^+y$  且  $yF^+x$ 。若  $x \neq y$  但  $x \ll y$ , 由引理 5 知,  $x + y$ 。又因为  $x, y$  在同一个完备子系统中, 故必存在一条满迹同时包含  $x, y$ , 与  $x + y$  矛盾。若  $x = y$ , 由并发关系的定义知  $x \ll y$ , 由引理 5 知,  $x + y$ 。

**定理 4** sound 自由选择 workflow 系统的任一完备子系统中, 结构有序的两个变迁必属严序关系。

证明: 设  $S'$  是 sound 自由选择系统  $S$  的一个完备子系统,  $\forall x, y \in T', xF^+y$  且  $yF^+x$ 。因为  $xF^+y$ , 故  $x \neq y$ 。假设  $x \parallel y$ , 则  $x \parallel y$  或者  $x, y$  是环依赖的。但若  $x \parallel y$ , 与  $xF^+y$  矛盾; 若  $x, y$  是环依赖的, 与  $yF^+x$  矛盾, 故  $x \ll y$ 。

假设  $x \rightarrow^{-1}y$ , 则  $y > x$ , 又从  $xF^+y$  知  $x > y$ , 进而  $x \parallel y$ , 矛盾。因为严序关系、互斥关系、交错有序关系、逆严序关系划分了  $T' \times T'$ , 后 3 种关系已经被排除, 故  $x, y$  只能是严序关系。

由此可以给出求解 sound 自由选择 workflow 系统  $S$  的完备子系统  $S'$  的行为轮廓方法:

```
for each  $(x, y) \in T' \times T'$ 
  if  $xF^+y \& \& yF^+x$   $x \parallel y$ ;
  if  $xF^+y \& \& yF^+x$ 
    if  $(x = y)$   $x + y$ ; else  $x \parallel y$ ;
  if  $xF^+y \& \& yF^+x$ 
     $\{x \rightarrow y; y \rightarrow^{-1}x\}$ 
```

### 3.3 系统的因果行为轮廓

为避免混淆, 我们把完备子系统之间的关系称为局部关系, 整个系统中的关系称为全局关系。特别地, 把局部共现关系记作  $\gg_L$ 。显然, 局部严序关系的并集就是全局严序关系, 局部交错有序关系的并集就是全局交错有序关系。局部互斥关系的并集只是全局交错关系的一部分, 需增加不同变迁对之间的互斥关系。共现关系最为复杂, 因为局部共现关系未必是全局共现关系。

**定理 5** 对于 sound 的自由选择系统  $S$ , 若两个变迁不同时包含于  $S$  的任一完备子系统, 当且仅当它们是互斥的。

证明: 设  $x, y \in T$ , 所有完备子系统不同时包含  $x, y$ , 当且仅当  $S$  中不存在满迹  $\sigma$ , 使得  $x \in \sigma$  且  $y \in \sigma$ , 即  $x + y$ 。

**定理 6** 设  $S=(PN,[i])$  是一个 sound 的自由选择系统, 对于  $\forall x, y \in T, x \gg y$  当且仅当  $S$  的任一完备子系统  $S'$  中, 若  $x \in T'$ , 则  $x \gg_L y$ 。

证明:  $\Rightarrow$  设  $S'$  是  $S$  的一个完备子系统, 若  $x \in T'$ , 但  $x, y$  在  $S'$  上非共现, 则  $S'$  中存在一条满迹  $\sigma$ , 使得  $x \in \sigma$  但  $y \notin \sigma$ , 而  $\sigma$  也是  $S$  的一条满迹, 这与  $x \gg y$  矛盾。

$\Leftarrow$  假设  $x \not\gg y$ , 则  $S$  中存在一条满迹  $\sigma$ , 使得  $x \in \sigma$  但  $y \notin \sigma$ 。而  $\sigma$  也必是某个完备子系统  $S'$  的满迹, 在  $S'$  上  $x \in T'$ , 但  $x \not\gg_L y$ , 矛盾。

根据定理 6, 从局部共现关系可以计算出全局共现关系, 本文给出了一个判断变迁对  $x, y$  是否为全局共现关系的递归算法。算法思想是: 若  $x = y$ , 则  $x, y$  全局共现; 若  $x \neq y$ , 则将系统分解, 再依次判断  $x, y$  在每个完备子系统上是否局部共现。一个完备子系统不包含  $x$ , 则  $x, y$  可视为局部共现; 若包含  $x$  但不包含  $y$ , 则  $x, y$  非局部共现; 若包含  $x$  且  $y$  在主干子网中, 则  $x, y$  局部共现; 若  $x$  在主干子网上但  $y$  不在主干子网上, 则  $x, y$  非局部共现; 若  $x, y$  均不在主干子网上, 则需判断  $x, y$  在可选子网中是否局部共现。

输入: sound 自由选择 workflow 网  $PN$ , 变迁  $x, y$ 。

输出: TRUE 或 FALSE。

```
Boolean Co_occur (WF PN, T x, T y) {
  1. if  $x = y$  return TRUE;
  2. Decomposition (PN, O, B, C);
  3. for each  $PN_j \in C$ 
  4.   if  $x \in PN_j$  {
  5.     if  $y \notin PN_j$  return FALSE;
  6.     if  $y \in B_j$  continue;
  7.     if  $x \in B_j \& \& y \notin B_j$  return FALSE;
  8.      $PN_j = PN_j - B_j$ ; // 删除主干子网
  9.     删除  $PN_j$  中与  $x$  结构互斥的结点及其边;
  10.     $PN_j = PN_j \cup \{p_i, p_o\}$ ;
  11.   for each  $t \in T_j$  {
```

```

12.   if *t = φ PNj = PNj ∪ {(pi, t)};
13.   if t' = φ PNj = PNj ∪ {(t, po)};
14.   } // End for
15.   if (! Co_occur (PNj, x, y) ) return FALSE;
16.   } // End for
17.   return TRUE;
18. } // Co_occur

```

为了判断给定变迁对是否在可选子网中局部共现,算法在第 8 行中删除了完备子系统的主干子网,在第 9 行删除与  $x$  结构互斥的结点及其边,在第 10 行添加了两个库所  $p_i$  和  $p_o$ ,在第 11-14 行将  $p_i$  和  $p_o$  与可选子网起始变迁和终止变迁连接起来,这样构建了一个新的 sound 自由选择工作流网。库所  $p_i$  和  $p_o$  的作用类似于起始库所  $i$  和终止库所  $o$ 。第 15 行判断在可选子网中变迁对是否为共现关系,构成递归。

#### 4 示例及分析

下面通过一个例子来展示该方法的有效性。图 1 是一个 sound 自由选择工作流系统  $S$ ,由该系统可得扩展工作流系统  $\bar{S}$ ,并通过求解方程组  $A^T X = 0$ ,得到  $S$  的所有 3 个最小  $T$ -不变量及其支集:

$X_1 = (1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1)$ ;  $T_1 = (A, B, D, E, G, L, t^*)$ ;

$X_2 = (1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1)$ ;  $T_2 = (A, C, D, F, G, L, t^*)$ ;

$X_3 = (0, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0)$ ;  $T_3 = (D, G, H, I, J, K)$ 。

这 3 个最小  $T$ -不变量支集生成的外延子网如图 2 所示,其中图 2(a), (b) 是删除  $t^*$  后所得的主干子网, (c) 是可选子网。本例中图 2(a), (b) 都需要与 (c) 合并。

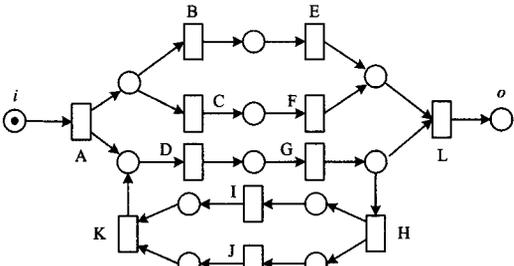


图 1 一个 sound 自由选择工作流系统  $S$

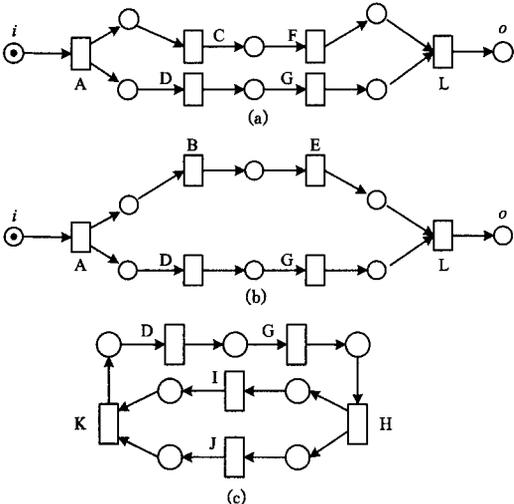


图 2  $S$  的两个主干子网和一个可选子网

经过合并后可得两个完备子系统,如图 3 所示。现在可以根据完备子系统流的流关系闭包,分别求这两个完备子系统的因果行为轮廓。例如在图 3 (a) 中,  $C$  和  $D$  是结构互斥的两个不同变迁,可判断出  $C \parallel D$ ,故  $C \parallel D$ ;  $C$  和  $C$  是结构互斥的两个相同变迁,故  $C + C$ ; 支集  $T_3$  内所有变迁都是环依赖的,故  $T_3$  内任意变迁对都属交错有序关系,如  $I \parallel J$ 。而  $A$  和  $C$  是结构有序的,故  $A \rightarrow C$ 。

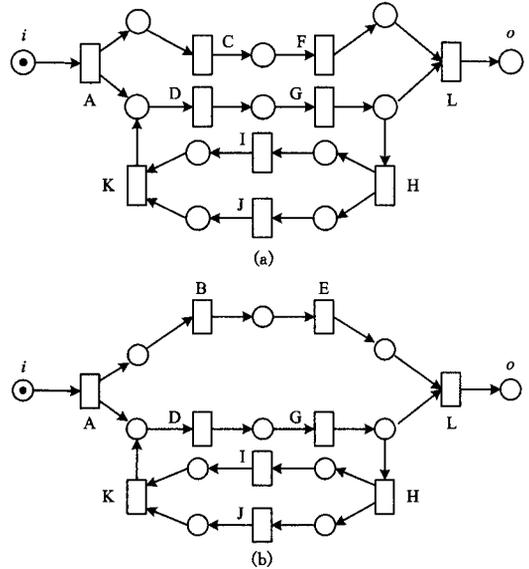


图 3  $S$  的两个完备子系统

支集  $T_1$  构成完备子系统图 3(a) 的主干子网,故  $T_1$  上任意两个变迁相互都是局部共现的,例如  $A \gg_L C, C \gg_L A$ 。可选子网中的任意变迁都与主干子网上的变迁局部共现,但反过来不成立,例如  $I \gg_L D$  但  $D \not\gg_L I$ 。变迁  $B$  不属于图 3(a),  $B$  与其他变迁可视为共现关系,例如  $B \gg_L C, B \gg_L E$ ,但  $C \not\gg_L B$ 。本例中只有一个可选子网,在图 3(a) 中删除主干子网后,得到有  $I, J, H, K$  4 个变迁生成的子网,该子网内 4 个变迁都处于主干结构上,因此这 4 个变迁相互都是局部共现的。同理,可求出完备子系统图 3(b) 的因果行为轮廓。

接下来,计算系统行为轮廓。严序关系和交错关系直接取图 3(a) 和 (b) 的对应关系的并集,而互斥关系除了取并集之外还要加入新的变迁对,例如图 3(a) 和 (b) 都没有同时包含变迁  $B$  和  $C$ ,故  $B + C$ 。最后,求取共现关系。在这两个完备子系统中  $A$  和  $D$  都是局部共现关系,因此  $A \gg D$ 。同理,  $D \gg A, B \gg E, E \gg B$ 。在图 3(b) 中,  $A \gg_L B$ ,但在图 3(a) 中却不是,故  $A \not\gg B$ ,但  $B \gg A$ 。由这些例子可以看出,全局共现关系实际上就是各完备子系统中局部共现关系的交集。

在最坏情况下,也就是当方程组  $A^T X = 0$  有指数个解时,本文的算法是指数复杂度的。算法性能还存在提升空间,例如当同一可选子网与多个主干子网有共同交集时,不必重复计算该可选子网上的共现关系。对于一些实际应用,算法时间性能并非关键。例如模型的一致性度量或业务过程的在线监控,可以预先计算出因果行为轮廓。由此可见,即使对于复杂工作流系统,算法依然有好的实用性。

**结束语** 因果行为轮廓有着重要的应用价值,但因果行为轮廓的获取比较困难。现有方法假定无结构的网片段是无环的或者可以追溯到  $S$ -系统或  $T$ -系统。因为该假设并不总是成立,使得因果行为轮廓的应用范围受到限制。本文提出

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