

一种基于不变量的 workflow 协同模型分解方法

葛季栋^{1),2)} 胡海洋^{1),4)} 周 宇^{1),5)} 胡 昊^{1),3)} 王栋毅^{1),2)} 过晓波^{1),2)}

¹⁾(计算机软件新技术国家重点实验室(南京大学) 南京 210093)

²⁾(南京大学软件学院 南京 210093)

³⁾(南京大学计算机科学与技术系 南京 210093)

⁴⁾(杭州电子科技大学计算机学院 杭州 310018)

⁵⁾(南京航空航天大学计算机科学与技术学院 南京 210016)

摘 要 现代企业计算的业务过程越来越复杂,有很多分散且相对独立的组织机构,为了协同来自不同组织的业务过程,文中提出一种 IOPN 模型(面向交互的 Petri 网)用于描述跨组织的工作流协同,该模型包含组织内的过程模型和组织间的交互关系. 为了确保 IOPN 模型能够被正确地执行,文中提出 IOPN 模型的弱合理性(relaxed soundness)作为 IOPN 模型的正确性标准之一. IOPN 模型是一种复合模型,其规模一般较大,采用基于状态空间的分析方法,容易产生状态空间爆炸问题,为此文中提出基于不变量的分解方法,能够将一个弱合理的无回路 IOPN 模型分解为一组顺序图,并提出相关定理:一个无回路 IOPN 模型是弱合理的当且仅当其可以被分解为一组合法的顺序图.

关键词 工作流;协同模型;合理性;不变量;分解

中图法分类号 TP311 **DOI 号:** 10.3724/SP.J.1016.2012.02169

A Decomposition Approach with Invariant Analysis for Workflow Coordination

GE Ji-Dong^{1),2)} HU Hai-Yang^{1),4)} ZHOU Yu^{1),5)} HU Hao^{1),3)} WANG Dong-Yi^{1),2)} GUO Xiao-Bo^{1),2)}

¹⁾(State Key Laboratory for Novel Software Technology, Nanjing University, Nanjing 210093)

²⁾(Software Institute, Nanjing University, Nanjing 210093)

³⁾(Department of Computer Science and Technology, Nanjing University, Nanjing 210093)

⁴⁾(School of Computer, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018)

⁵⁾(School of Computer Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

Abstract The business processes of the modern enterprise computing have been becoming more complex. To coordinate workflows from different organizations, which are geographically dispersed and autonomous, this paper proposes a model called IOPN (Interaction-Oriented Petri Nets) to describe the workflow coordination between different organizations. The IOPN model can describe the internal process models and the interaction relations between different organizations. To assure the IOPN model being executed correctly, this paper presents the relaxed soundness of IOPN model as one of correctness properties. The size of the composite IOPN model is usually large, so the analysis based on state space methods will encounter the state space explosion

收稿日期:2012-06-30;最终修改稿收到日期:2012-08-09. 本课题得到国家自然科学基金(61100039,61021062,60973044,61073030,61003019,60903053,61073031,60903024,61272188)、国家“九七三”重点基础研究发展规划项目基金(2009CB320702)、计算机软件新技术国家重点实验室(南京大学)自主课题面上项目(ZZKT2011B10)及开放基金(KFKT2011B07)、中央高校基本科研业务费专项资金、浙江省自然科学基金项目(Z1100822,LY12F02005)资助. 葛季栋,男,1978 年生,博士,讲师,中国计算机学会(CCF)会员,主要研究方向为工作流技术、过程挖掘、软件协同、软件体系结构、软件过程. E-mail: gjd@nju.edu.cn. 胡海洋,男,1977 年生,博士,副教授,主要研究方向为工作流技术、过程挖掘、软件协同、软件体系结构. 周 宇,男,1981 年生,博士,讲师,主要研究方向为软件体系结构、软件演化、分布式计算. 胡 昊,男,1975 年生,博士,副教授,主要研究方向为工作流技术、过程挖掘、软件协同、软件体系结构、软件过程. 王栋毅,男,1987 年生,硕士研究生,主要研究方向为工作流技术、过程挖掘、软件协同. 过晓波,男,1985 年生,硕士研究生,主要研究方向为工作流技术、过程挖掘、软件协同.

problem. This paper presents a decomposition approach with invariant analysis, which can decompose a circuit-free and relaxed sound IOPN into a set of sequence diagrams. Furthermore, this paper presents the corresponding theorem, i. e., a circuit-free IOPN is relaxed sound if and only if it can be decomposed into a set of legal sequence diagrams.

Keywords workflow; coordination model; soundness; invariant; decomposition

1 引言

workflow 技术可以用于管理企业的业务过程^[1], 现代企业计算的 业务过程越来越复杂, 有很多分散且相对独立的组织机构, 因此需要提供一种跨组织过程建模的方法, 用于协同来自不同组织的工作流. 为了更加有效地管理来自不同组织的业务, 每个组织需要分别定义各自的组织内的工作流, 并向其它组织的工作流提供接口, 以便不同组织之间的工作流能够协同工作. 因此, 需要一个松耦合的 (loosely coupled) 建模方法连接来自不同组织的工作流. 该模型提供了一种自底向上的建模方法, 各组织采用工作流网 (WF-net) 分别描述组织内的私有过程模型, 并向外界提供交互接口, 然后在协同模型中定义组织间的交互关系, 由此构造完整的全局模型, 即 IOPN 模型 (Interaction-Oriented Petri Nets (IOPN), 面向交互的 Petri 网).

为了确保 IOPN 模型能够被正确地执行, 需要考虑模型的正确性, 本文结合工作流网的合理性概念 (soundness) 以及 IOPN 模型的特点提出了 IOPN 模型的弱合理性 (relaxed soundness) 作为 IOPN 模型的正确性标准之一. IOPN 模型是一种复合模型, 其规模一般较大, 采用基于状态空间的分析方法, 容易产生状态空间爆炸问题, 为此本文提出基于不变量的分解方法, 能够将满足弱合理性的无回路 IOPN 模型分解为一组顺序图, 并进一步研究 IOPN 模型的弱合理性与其模型的可分解性之间的逻辑关系, 提出相关定理: 一个无回路 IOPN 模型是弱合理的当且仅当其可以被分解为一组合法的顺序图. 该定理可以判定无回路 (circuit-free) IOPN 模型的弱合理性.

本文第 2 节将介绍相关工作以及工作流过程建模的基本理论; 第 3 节提出 IOPN 模型用以描述工作流协同; 第 4 节介绍 IOPN 模型的弱合理性的形式定义, 并以此作为 IOPN 模型的正确性标准之一; 第 5 节介绍本文针对工作流网的特点提出的 LMST-不变量; 第 6 节基于 LMST-不变量分析, 提

出将无回路 IOPN 模型分解为顺序图的方法, 并给出无回路 IOPN 模型的弱合理性与其可分解性之间的逻辑关系; 第 7 节提供一个用 IOPN 描述的应用实例, 并给出其分解为相关顺序图的步骤; 最后, 第 8 节总结全文.

2 相关工作与基本理论

将工作流过程建模理论与 Petri 网相结合, Aalst 提出了工作流网模型 (Workflow net, WF-net), 并在该模型基础上提出了合理性 (soundness) 的形式定义作为工作流过程模型的正确性评价标准^[2]. Aalst 进一步将 WF-net 发展为 IOWF-net 用以支持跨组织工作流过程建模^[3-4], 并将行为继承理论应用于 IOWF-net^[5], 近年来也有许多工作对工作流协同模型的建模方法和协同模型的检验方法开展了深入的研究^[6-7]. Petri 网是本文的理论基础, 本文将简单介绍一些 Petri 网的基本理论.

Petri 网是一个三元组 $PN=(P, T, F)$. Token 在库所集中的分布状况称为 Petri 网的状态 (marking), 表示为 $M: P \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}$ 的标识函数. 设 M 为 PN 的一个状态, p 为一个库所, 那么 $M(p)$ 表示状态 M 在库所 p 中的 Token 的个数. 变迁 t 在状态 M 是使能的 (enabled), 当且仅当 $\forall p \in {}^{\cdot}t: M(p) \geq 1$. 状态 M 所有具备使能条件的变迁集合记为 $enabled(M)$. 关于 Petri 网的基本概念, 可以参考文献^[8-9].

工作流网 (WF-net) 是一种特殊的 Petri 网^[2], 一个 Petri 网 $PN=(P, T, F)$ 是 WF-net, 需要同时满足两个条件: (1) PN 有两个特殊的库所: i 与 o . 库所 i 是起始库所: ${}^{\cdot}i = \emptyset$, 库所 o 是结束库所: $o^{\cdot} = \emptyset$. $[i]$ 与 $[o]$ 分别表示工作流网的起始状态与结束状态. (2) 如果在 PN 中加入一个变迁 t^* , 且满足 ${}^{\cdot}t^* = \{o\}$ 与 $t^{*\cdot} = \{i\}$, 那么扩展后的 Petri 网 $\overline{PN}=(P, T \cup \{t^*\}, F \cup \{(o, t^*), (t^*, i)\})$ 是强联通的.

图 1 所示为一个用工作流网建立的过程模型, 变迁 (transition) 表示工作流过程模型的动作

(action), Token 在庫所集中的分布状况表示工作过程模型的执行状态, 并依据 Petri 网的使能 (enabled) 条件判断在某个状态可以指定的变迁动作. Aalst 基于 workflow 网提出该模型的合理性形式描述^[2] (见定义 1), 结合 Petri 网的活性和有界性提出定理 1.

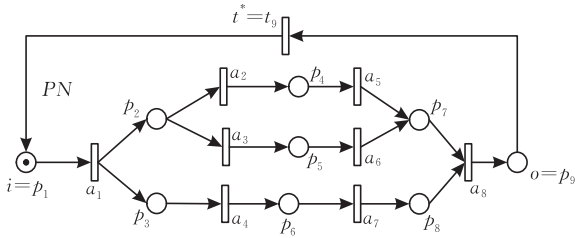


图 1 一个基于 WF-net 描述的工作流过程模型

定义 1. 工作流网的合理性 (soundness) 需满足以下条件:

(1) 对于任何从初始状态 $[i]$ 可达的状态 M , 存在一个点火序列使得能够从状态 M 到达结束状态 $[o]$, 形式描述为 $\forall M([i] \xrightarrow{*} M) \Rightarrow (M \xrightarrow{*} [o])$.

(2) 当工作流的执行从初始状态 $[i]$ 达到一个包含库所 o 的状态时, 那么这个状态在除库所 o 以外的其它库所没有 Token, 形式描述为 $\forall M([i] \xrightarrow{*} M \wedge M \geq [o]) \Rightarrow (M = [o])$.

(3) 在 $(PN, [i])$ 系统中, 不存在死变迁, 形式描述为 $\forall t \in T: \exists M, M', [i] \xrightarrow{*} M \xrightarrow{t} M'$.

定理 1. 一个 workflow 网 PN 如果满足合理性, 当且仅当 $(PN, [i])$ 是活的并且有界的^[2].

3 IOPN 模型: 工作流协同模型

3.1 IOPN 模型

Internet 是开放而动态的计算环境, 需要提供一个松耦合 (loosely coupled) 的组合方法连接来自不同组织的工作流. 本文提出一种称为面向交互的 Petri 网 (Interaction-Oriented Petri Nets, IOPN) 用以描述来自不同组织之间的协同模型. IOPN 模型采用不同工作流的变迁 (工作流的活动) 之间的交互来表示不同工作流过程之间的协同关系. 下面, 本文将给出 IOPN 模型的形式定义 (见定义 2).

定义 2. IOPN (Interaction-Oriented Petri Nets). IOPN 模型可以定义为 $IPN = (ON_S, \rho)$:

(1) $ON_S = \{ON_1, ON_2, \dots, ON_n\}$ 是 n 个 Petri 网组成的集合, 每个 ON_k 描述来自不同组织的子过程.

(2) $ON_k = (P_k, T_k, F_k)$ 表示标号为 k 的对象网. ON_k 是一个 WF-net. 参与交互的 ON_k 之间是对等的.

(3) $\rho \subseteq \bigcup_{k=1}^n \bigcup_{j=1}^n T_k \times T_j (1 \leq k < n, 1 < j < n, k \neq j)$ 是过程交互 (process interaction) 的集合. $(a_1, b_1) \in \rho \wedge (a_1 \in T_k) \wedge (b_1 \in T_j)$ 是交互集的一个元素. $(a_1, b_1) \in \rho$ 表示从 ON_k 到 ON_j 的一个过程交互消息, a_1 是该消息的发送动作, b_1 是其接收动作. 这些参与交互的动作为工作流之间的交互提供了一组接口. 过程交互可以采用消息传递 (message passing) 的机制实现.

(4) 本文对过程交互做一些限制, 每个发送动作只有唯一的接收者, 每个接收动作只有唯一的发送者. 若存在 $(a_1, b_1) \in \rho$, a_1 是这个交互关系的发送动作, 那么 b_1 是这个交互关系的唯一的接收动作, 记为 $b_1 = \rho_{out}(a_1)$; b_1 是这个交互关系的唯一的发送动作, 记为 $b_1 = \rho_{in}(a_1)$.

定义 3. 过程交互中共享库所. 设 $(a_1, b_1) \in \rho \wedge (a_1 \in T_k) \wedge (b_1 \in T_j)$, 对于该过程交互关系, 依据 Petri 网的语法, 存在一个附加的共享库所 $p_{(a_1, b_1)}$ (如图 2 所示), 添加两个弧线 $(a, p_{(a_1, b_1)})$ 和 $(p_{(a_1, b_1)}, b)$, 使得库所 $p_{(a_1, b_1)}$ 能够连接从 a_1 到 b_1 的两个变迁, IOPN 模型中所有共享库所的集合记为 $P_{shared} = \{p_{(a_1, b_1)} \mid (a_1, b_1) \in \rho \wedge (a_1 \in T_k) \wedge (b_1 \in T_j) \wedge (k \neq j)\}$.

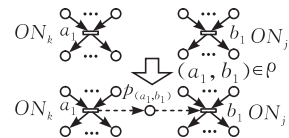


图 2 IOPN 模型: 过程交互之两个变迁之间的共享库所

如图 3 所示, 该 IOPN 模型中包含 3 个对象网 (object nets), 其交互集为 $\rho = \{(a_1, b_1), (b_2, c_1), (c_2, b_3), (b_4, a_2), (a_3, b_5), (a_4, c_3), (b_6, a_5), (c_4, a_6)\}$.

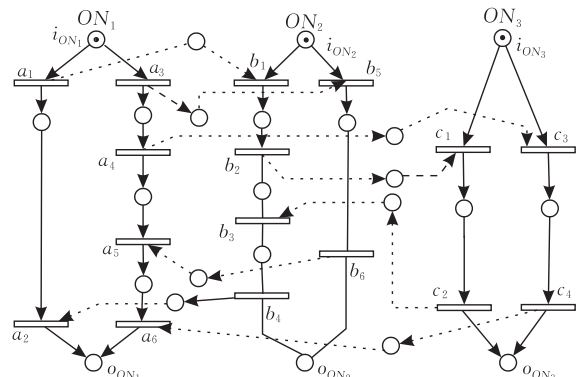


图 3 一个 IOPN 模型 (包含 3 个对象网)

3.2 IOPN 点火规则

定义 4. IOPN 模型的点火规则与状态表示. 设 $IPN = (ON_S, \rho)$, $ON_S = \{ON_1, ON_2, \dots, ON_n\}$, $ON_k = (P_k, T_k, F_k)$, ON_k 是 IPN 中的子过程, $ON_k.M$ 表示 ON_k 的局部状态, 那么 IPN 的全局状态可以表示为 $IPN.M = ON_1.M + \dots + ON_k.M + \dots + ON_n.M + M_\rho$, M_ρ 表示过程交互中共享库所 $P_{\text{shared}} = \{p_{(a_1, b_1)} \mid (a_1, b_1) \in \rho\}$ 的标记 (marking). $ON_k.i$ 与 $ON_k.o$ 分别表示在 ON_k 网中局部的初始状态和结束状态. IPN 的初始状态表示为 $IPN.final = ON_1.i + \dots + ON_k.i + \dots + ON_n.i$, 结束状态表示为 $IPN.final = ON_1.o + \dots + ON_k.o + \dots + ON_n.o$.

对于变迁 $a_1 \in T_k$, 若 $a_1 \in \text{enabled}(ON_k.M + M_\rho)$, 那么 $a_1 \in \text{enabled}(IOPN.M)$. 当 a_1 发生点火时, 存在 3 种可能情况:

(1) 如果不存在 $(a_1, b_1) \in \rho$ 且 $(b_1, a_1) \in \rho$, 即 a_1 与其它变迁没有交互, 那么 $IPN.M \xrightarrow{a_1} IPN.M'$, 即 $ON_k.M \xrightarrow{a_1} ON_k.M'$, $IPN.M' = ON_1.M + \dots + ON_k.M' + \dots + ON_n.M + M_\rho$.

(2) 如果存在一个交互 $(a_1, b_1) \in \rho$, 那么 $IPN.M \xrightarrow{a_1} IPN.M'$, 即 $ON_k.M + M_\rho \xrightarrow{a_1} ON_k.M' + M_\rho + p_{(a_1, b_1)}$ 且 $IPN.M' = ON_1.M + \dots + ON_k.M' + \dots + ON_n.M + M_\rho + p_{(a_1, b_1)}$.

(3) 如果存在一个交互 $(b_1, a_1) \in \rho$, 那么 $IPN.M \xrightarrow{a_1} IPN.M'$, 即 $ON_k.M + M_\rho \xrightarrow{a_1} ON_k.M' + M_\rho - p_{(b_1, a_1)}$, 且 $IPN.M' = ON_1.M + \dots + ON_k.M' + \dots + ON_n.M + M_\rho - p_{(b_1, a_1)}$.

定义 5. 投影子序列 (Projection Sub-Sequence, PSS). 对于 $IPN = (ON_S, \rho)$, $ON_S = \{ON_1, ON_2, \dots, ON_n\}$, $ON_k = (P_k, T_k, F_k)$, 假设 $\sigma = t_1 t_2 \dots t_i \dots t_n$ 是从状态 $IPN.M_1$ 到 $IPN.M_2$ 的一个执行序列, 那么 $IPN.M_1 \xrightarrow{\sigma} IPN.M_2$, $IPN.M_1 = ON_1.M_1 + \dots + ON_k.M_1 + \dots + ON_n.M_1 + M_{1\rho}$, $IPN.M_2 = ON_1.M_2 + \dots + ON_k.M_2 + \dots + ON_n.M_2 + M_{2\rho}$. 则存在从 $\sigma = t_1 t_2 \dots t_i \dots t_n$ 派生出来的一个子序列 (sub-sequence) $\alpha = x_1 x_2 \dots x_i \dots x_n$, 称为基于 ON_k 的投影子序列 (projection sub-sequence), 其遵循如下投影规则:

$$x_i = \begin{cases} x_i = t_i, & t_i \in T_k \\ x_i = \varepsilon, & t_i \notin T_k \end{cases}$$

子序列 α 被称为 σ 在 ON_k 上的投影子序列, 并记为 $\sigma|_{ON_k}$. 很明显, $ON_k.M_1 \xrightarrow{\alpha} ON_k.M_2$. 例如: 如果 $\sigma = a_1 a_2 b_3 b_4 a_5 b_6$, $(a_1, a_2, a_5 \in T_k) \wedge (b_3, b_4, b_6 \notin T_k)$, 那么 $\alpha = \sigma|_{ON_k} = a_1 a_2 a_5$.

4 IOPN 模型的弱合理性

Aalst 提出的合理性^[2] (见定义 1) 是工作流过程模型的正确性标准之一. IOPN 模型能够协同来自不同组织的工作流, 然而如果单个工作流过程模型存在错误或者交互集的定义存在错误, 都有可能引起复合后的工作流协同模型不能被正确而完整地执行. 为了确保工作流能够被正确而完整地执行, 需要考虑 IOPN 模型的合理性和弱合理性 (relaxed soundness). 本文将参照工作流网中关于合理性的概念给出 IOPN 模型弱合理性的形式定义 (见定义 8), 基于该定义, 本文将研究相关的检验算法.

工作流网的合理性判定是工作流网正确性检验的一个重要方面, 一般来讲基于 Petri 网的可达图的算法, 可以生成工作流网的可达图, 通过遍历可达图的状态空间可以判定合理性. 但是基于可达图的状态空间方法经常会遇到状态空间爆炸 (state space explosion)^[11] 的问题. 为此本文结合不变量与工作流网合理性的关系, 提出基于不变量的分析方法. 根据工作流网的特点以及 Petri 网的 T-不变量的特殊含义, 本文总结并提出了 LMST-不变量的概念 (见定义 10), 工作流网中的一个 LMST-不变量对应着一个从初始状态到结束状态的执行分支, 且一个工作流网如果是合理的 (sound), 那么该工作流网的活动 (变迁) 集合被 LMST-不变量覆盖 (见定理 3), 即该工作流网可以分解为多个 T-构件的子网 (见定义 12).

从某种意义上讲, 合理性对于跨组织过程模型略显严格, 因为不同组织的过程在选择了不匹配的分支后容易进入死锁状态, 因此严格合理性妨碍了 IOPN 建模的灵活性. 为了提高 IOPN 模型的灵活性, 本文借用 WF-net 弱合理性^[10] 的概念 (见定义 7), 在这里需要考虑的问题是如何判定 IOPN 的弱合理性. 弱合理性的含义是“工作流网中的每个变迁都有机会被执行”.

定义 6. 合理的点火序列 (Sound Firing Sequence)^[10]. 令 $(PN, [i])$ 是一个 WF-net, 对于一个点火序列 σ 且 $[i] \xrightarrow{\sigma} M$, 如果存在另一点火序列 σ' 使得 $M \xrightarrow{\sigma'} [o]$, 那么称 σ 是合理的点火序列.

定义 7. 弱合理性. 令 $(PN, [i])$ 是一个 WF-net, $(PN, [i])$ 满足弱合理性, 当且仅当任意一个变迁是某个合理的点火序列中的一个元素, 形式化表示为 $\forall t \in T, \exists M, M': [i] \xrightarrow{*} M \xrightarrow{t} M' \xrightarrow{*} [o]$.

从定义 7 可以看出,弱合理性相对于合理性,条件弱化了.弱合理性的条件,意味着在 workflow 网中存在足够多的合理的点火序列,且该合理的点火序列中所包含的变迁的集合能够覆盖该 workflow 网的变迁集,即任意一个变迁都有可能至少出现在某一个合理的点火序列中.严格的合理性不允许有死锁状态(dead state),对比严格的合理性,弱合理性允许有死锁状态.文献[10]给出了一种鲁棒算法(robustness algorithm),可以移除弱合理的工作流网(relaxed sound workflow net)中的死锁状态.

如图 4 所示的工作流网是弱合理的,而非严格合理的.该过程模型包含两个可能的合理的点火序列 $t_1 t_2 t_3 t_4 t_6 t_8$ 和 $t_1 t_2 t_3 t_5 t_7 t_9$,其覆盖了所有变迁,然而它存在两个从初始状态 $[i]$ 可达的死锁状态 $[p_6 + p_9]$ 和 $[p_7 + p_8]$.

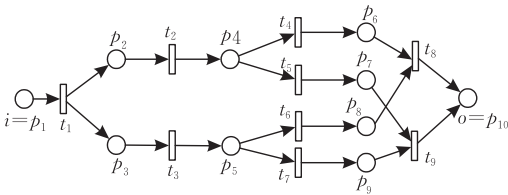


图 4 一个 WF-net 实例(是弱合理的,但不是合理的)

一个 WF-net 是严格合理的,那么它一定也是弱合理的(relaxed sound),但是反之则不一定成立.因为 IOPN 结构与 WF-net 略有不同,因此 IOPN 的合理性与弱合理性(relaxed soundness)的形式定义与基本工作流网的定义略有区别.为此,本文基于工作流网的弱合理性概念,给出 IOPN 模型的弱合理性的形式定义作为协同模型的正确性标准之一.

定义 8. IOPN 模型的弱合理性(Relaxed Soundness of IOPN). 对于 $IPN = (ON_S, \rho)$, $ON_S = \{ON_1, ON_2, \dots, ON_n\}$, $ON_k = (P_k, T_k, F_k)$, IPN 是弱合理的(relaxed sound),当且仅当, $T = \bigcup_{k=1}^n T_k$, 对于任意的 $t \in T$, 存在 $IPN.M, IPN.M'$ 使得 $IPN.init \xrightarrow{*} IPN.M \xrightarrow{t} IPN.M' \xrightarrow{*} IPN.final$.

如图 5 所示是一个不满足弱合理性的 IOPN 模

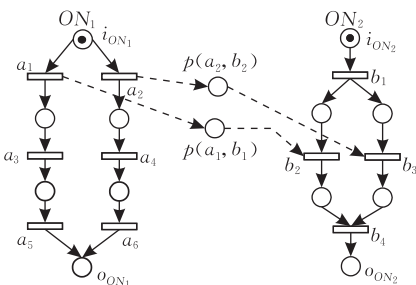


图 5 一个 IOPN 实例:既不满足合理性也不满足弱合理性

型,因为当 ON_1 中 a_1 点火之后,在 ON_2 中 b_3 将没有机会点火;或者当 ON_1 中 a_2 点火之后,在 ON_2 中 b_2 将没有机会点火.

关于 IOPN 模型的弱合理性检验,在一般情况下,基于 Petri 网的可达图的状态空间分析方法是一种可行的分析方法,但是当 IOPN 模型的规模变得越来越大时,IOPN 所描述的协同交互系统的状态空间会越来越大,以至于爆炸到无法处理的程度.另一方面,基于 Petri 网的不变量分析的分解方法可以作为一种互补的有效分析技术,以避免状态空间爆炸问题,这也是不变量分析方法的主要优点.利用 Petri 网的不变量与活性和有界性之间的联系,可以通过计算 Petri 网的不变量来得知 WF-net 的活性和有界性,以至合理性.基于不变量分析,本文提出了一种将无回路(circuit-free) IOPN 分解成顺序图的方法,并给出了无回路 IOPN 的弱合理性与可分解性之间的等价关系.一般来讲,一个 IOPN 模型满足弱合理性,要求 IOPN 模型内的各个 ON_k 满足合理性,但是反过来结论不一定成立,即使 IOPN 模型内的各个 ON_k 满足合理性,但是由于交互集设计不正确,也会造成 IOPN 模型不满足弱合理性.

5 Petri 网的不变量及 LMST-不变量

Petri 网可以表示成关联矩阵的形式,依据 Petri 网的执行语义与状态方程,Petri 网有两种不变量:P-不变量与 T-不变量^[9].这两个不变量与 Petri 网的有界性(boundedness)和活性(liveness)有着密切的关系,而工作流网是一种特殊结构的 Petri 网,借助工作流网的不变量计算可以分析工作流网的合理性.本文的分解技术主要涉及 T-不变量,因此,本文将介绍 T-不变量以及工作流网的 T-不变量的特殊概念.

定义 9. 关联矩阵, T-不变量.

(1) 一个 Petri 网 $PN = (P, T, F)$ 可以表示为一个关联矩阵 A .

(2) T-不变量是方程组 $A \cdot Y = 0$ 的整数解,解的集合表示为 $J = \{J_1, J_2, \dots, J_n\}$.本质上, T-不变量 J_k 是一个变迁向量(T-vector),映射关系表示为 $J_k: T \rightarrow \mathbb{Z}$.一个 T-不变量 J_k 是半正的(semi-positive)当且仅当 $J_k \geq 0 \wedge J_k \neq 0$.一个 T-不变量 J_k 是正的(positive)当且仅当 $\forall t \in T: J_k(t) > 0$. $\|J_k\|$ 表示在 J_k 中取值大于 0 的变迁的集合,即 $\|J_k\| = \{t \in T \mid J_k(t) > 0\}$.一个 Petri 网被 T-不变量覆盖,当且仅当存在一个正 T-不变量 $J_k(t) > 0$.

(3) 最小不变量. 对于一个半正 T-不变量 \mathbf{J}_k , 若不存在其它半正 T-不变量 \mathbf{J}_x 包含于 \mathbf{J}_k (即 $\mathbf{J}_x \subset \mathbf{J}_k$), 则称 \mathbf{J}_k 是最小的. 任何半正不变量都是最小不变量的线性组合^[9]. 若一个 Petri 网存在一个正不变量, 则任意不变量都是最小不变量的线性组合.

(4) T-不变量的基本性质. 令 (PN, M_0) 是一个网系统, \mathbf{J}_k 是 PN 的一个 T-不变量, σ 是与 \mathbf{J}_k 相关的 Parikh 向量^[9], 那么 $M \xrightarrow{\sigma} M$, 即在状态 M , 经过 \mathbf{J}_k 中一组变迁的点火之后可以重新回到状态 M . 即 T-不变量对应着一个循环执行.

与一般 Petri 网相比, workflow 网具有一些特殊的结构限制, 因此 workflow 网的不变量具有一些特点和特殊含义. 基于 workflow 网的结构特点, 本文提出了 LMST-不变量.

定义 10^[12]. workflow 网的 T-不变量. 令 $PN = (P, T, F)$ 是一个 workflow 网, t^* 是连接库所 o 与 i 的附加变迁, $\overline{PN} = (P, T \cup \{t^*\}, F \cup \{(o, t^*), (t^*, i)\})$ 是其扩展模型. 对于一个 T-不变量 \mathbf{J}_k , 如果 $\mathbf{J}_k(t^*) = 1 \wedge \mathbf{J}_k \geq \mathbf{0}$, 那么称 \mathbf{J}_k 是合法的最小半正 T-不变量 (LMST-不变量, Legal Minimal Semi-positive T-invariant). 设 \mathbf{J}_k 是 LMST-不变量, 那么对应着一个合理的执行序列 $\sigma = u_1 u_2 \dots u_n t^* \wedge (u_x \in T)$, 其中 $[i] \xrightarrow{u_1} M_1 \xrightarrow{u_2} M_2 \xrightarrow{u_{n-1}} M_{n-1} \xrightarrow{u_n} [o] \xrightarrow{t^*} [i]$. 令 $\pi(\sigma)$ 是一个记录每个变迁在序列 σ 出现次数的向量, 那么有 $\pi(\sigma) = \mathbf{J}_k$, $\pi(\sigma, t) = \mathbf{J}_k(t)$ 表示变迁 t 在序列 σ 中出现的次数. 图 1 中的 LMST-不变量有 $[1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1]$ 与 $[1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1]$. 容易得出, 一个从 $[i]$ 到 $[o]$ 的合理的点火序列对应着一个 LMST-不变量. 本文将侧重于基于 LMST-不变量的分析.

定义 11. 子网 (subnet). 设存在两个 Petri 网, $PN' = (P', T', F')$ 与 $PN = (P, T, F)$, 如果满足条件 $P' \subseteq P, T' \subseteq T$, 且 $F' = F \cap ((P' \times T') \cup (T' \times P'))$, 那么称 PN' 是 PN 的子网 (subnet).

定义 12. T-构件 (T-component). 设存在两个 Petri 网, $PN' = (P', T', F')$ 与 $PN = (P, T, F)$, PN' 是 PN 的 T-构件 (T-component), 当且仅当满足条件:

- (1) $PN' = (P', T', F')$ 是 Petri 网 $PN = (P, T, F)$ 的子网 (subnet), 且 $\forall t \in T': t \cup t' \subseteq P'$.
- (2) $PN' = (P', T', F')$ 是一个标识图 (marked graph).

定义 13. T-覆盖 (T-coverable). 一个 Petri 网 $PN = (P, T, F)$ 被称为 T-覆盖 (T-coverable), 当且

仅当对于任意变迁 $t \in T$, 存在一个 T-构件 $PN' = (P', T', F')$ 使得 $t \in T'$.

定理 2. 一个 Petri 网系统是活的且有界的, 那么该 Petri 网存在一个正 T-不变量^[9].

定理 3. 设 $PN = (P, T, F)$ 是一个 workflow 网, 如果 PN 满足合理性, 那么在其扩展网 $\overline{PN} = (P, T \cup \{t^*\}, F \cup \{(o, t^*), (t^*, i)\})$ 中存在一个正 T-不变量, \overline{PN} 被 T-不变量覆盖.

证明. 根据命题 1, 如果 $PN = (P, T, F)$ 满足合理性, 那么 $(\overline{PN}, [i])$ 是活的 (live) 且有界的 (bounded). 所以在 $\overline{PN} = (P, T \cup \{t^*\}, F \cup \{(o, t^*), (t^*, i)\})$, 以 $M_0 = [i]$ 为初始状态使得 (\overline{PN}, M_0) 是活的且有界的. 那么根据定理 2 可知, \overline{PN} 中存在一个正 T-不变量. 根据 Petri 网及 workflow 网的 T-不变量的基本概念 (见定义 9) 可知, \overline{PN} 被 T-不变量覆盖. 证毕.

定义 14. 基于 LMST-不变量的分解^[12]. 设 $PN = (P, T, F)$ 是一个 workflow 网, 如果 PN 满足合理性, PN 的扩展网为 $\overline{PN} = (P, T \cup \{t^*\}, F \cup \{(o, t^*), (t^*, i)\})$, 设 \mathbf{J}_k 是 \overline{PN} 的一个 LMST-不变量, 那么由 \mathbf{J}_k 分解得到的子网记为 $PN|_{\mathbf{J}_k} = (P_{\mathbf{J}_k}, T_{\mathbf{J}_k}, F_{\mathbf{J}_k})$, 且满足以下条件:

- (1) $T_{\mathbf{J}_k} = \|\mathbf{J}_k\| \setminus \{t^*\}$.
- (2) $P_{\mathbf{J}_k} = \{p \in \cdot T_{\mathbf{J}_k} \mid p \in P\} \cup \{p \in T_{\mathbf{J}_k} \mid p \in P\}$.
- (3) $F_{\mathbf{J}_k} = \{(p, t) \mid p \in P_{\mathbf{J}_k} \wedge t \in T_{\mathbf{J}_k} \wedge (p, t) \in F\} \cup \{(t, p) \mid p \in P_{\mathbf{J}_k} \wedge t \in T_{\mathbf{J}_k} \wedge (t, p) \in F\}$.

根据上述结论, 一个 workflow 网, 如果满足合理性, 可以根据 \overline{PN} 的 LMST-不变量进行分解. 图 1 中的 workflow 网通过基于 LMST-不变量的分解, 得到图 6 中的两个子网 (T-构件), 从每个 LMST-不变量分解出的一个子网对应一个从 $[i]$ 到 $[o]$ 的执行分支.

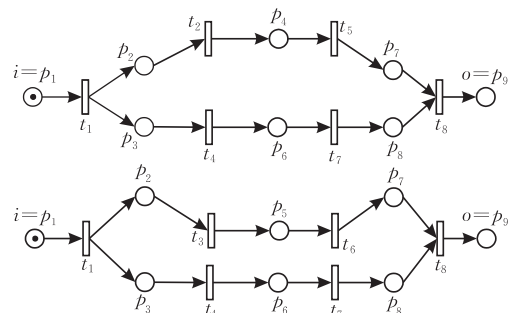


图 6 图 1 中 workflow 网的 LMST-不变量分解的结果

6 不变量分析: IOPN 分解为顺序图

IOPN 模型能够协同来自不同组织的工作流,

为了确保 IOPN 模型能够被正确而完整地执行, 需要考虑合理性和弱合理性作为协同模型的正确性标准之一. 合理性分析可以采用状态空间方法, 然而当参与协同的工作流个数增多时, 其全局模型的状态空间将呈指数增长, 会出现状态空间爆炸问题而使得该方法不能有效应用, 为此本文提出一种避免状态空间爆炸问题的方法, 即不变量分析方法. 基于不变量分析可以将无回路 (circuit-free) IOPN 模型分解为一组顺序图 (见算法 1), 并且本文还给出了相关定理: 一个无回路 IOPN 模型是弱合理的当且仅当其可以被分解为一组合法的顺序图 (见定理 5).

顺序图通常用于描述多个对象之间的交互协议, 本文给出顺序图的形式定义如下.

定义 15. 顺序图 (Sequence Diagram). 一个顺序图可以表示为一个五元组 $D = (O, E, Mes, L, W)$, 其中

(1) O : 一个有限的对象集合.

(2) E : 一个有限的事件集合.

(3) Mes : 一个有限的消息集合. 对于任意消息 $g \in Mes$, $g!$ 和 $g?$ 分别表示发送和接收消息 g , 对于任意事件 $e \in E$, 与之相关的发送或者接收消息为 g , 那么表示为 $\varphi(e) = g!$ 或者 $\varphi(e) = g?$.

(4) $L: E \mapsto O$ 是一个标签函数, 建立任意事件 $e \in E$ 到对象 $L(e) \in O$ 的映射.

(5) $W \subseteq E \times E$ 是事件集合上的一个偏序关系. 每个 $(e, e') \in W$ 均满足 $e \neq e'$, (e, e') 代表了消息序列.

6.1 算法: 将 IOPN 分解为顺序图

对于 LMST-不变量 J_1 , $J_1.out$ 表示在不变量 J_1 中向其它子过程发送消息的变迁集合, $J_1.out|_{ON_k}$ 表示在不变量 J_1 中向子过程 ON_k 发送消息的变迁集合. $J_1.in$ 表示在不变量 J_1 中从其它子过程接收消息的变迁集合, $J_1.in|_{ON_k}$ 表示在不变量 J_1 中从子过程 ON_k 接收消息的变迁集合.

定义 16. 两个 LMST-不变量之间的合法交互 (Legal Interaction between two LMST-invariants). 对于两个 LMST-不变量 J_a 和 J_b , 称它们之间的交互是合法的, 当且仅当 $J_a \in ON_k \cdot J \wedge J_b \in ON_j \cdot J \wedge k \neq j$, $\rho(J_a.out|_{ON_j}) = J_a.in|_{ON_k} \neq \emptyset$ 且 $\rho(J_a.in|_{ON_j}) = J_b.out|_{ON_k} \neq \emptyset$. 如果 J_a 和 J_b 是合法交互, 则记为 $\otimes(J_a, J_b) = 1$, 否则记为 $\otimes(J_a, J_b) = 0$. 函数 $\rho(X)$ 定义为 $\rho(X) = \{y \mid \forall x \in X: (x, y) \in \rho \text{ or } (y, x) \in \rho\}$.

例如在图 3 中, IPN 的 LMST-不变量为 $ON_1 \cdot J = \{J_1, J_2\}$, $ON_2 \cdot J = \{J_3, J_4\}$, $ON_3 \cdot J = \{J_5, J_6\}$, $J_1 = [1, 1, 0, 0, 0, 0] = \{a_1, a_2\}$, $J_2 = [0, 0, 1, 1, 1, 1] =$

$\{a_3, a_4, a_5, a_6\}$, $J_3 = [1, 1, 1, 1, 0, 0] = \{b_1, b_2, b_3, b_4\}$, $J_4 = [0, 0, 0, 0, 1, 1] = \{b_5, b_6\}$, $J_5 = [1, 1, 0, 0] = \{c_1, c_2\}$, $J_6 = [0, 0, 1, 1] = \{c_3, c_4\}$. $\rho(J_1.out|_{ON_2}) = J_3.in|_{ON_1} = \{b_1\}$, $\rho(J_1.in|_{ON_2}) = J_3.out|_{ON_1} = \{b_4\}$, 所以 $\otimes(J_1, J_3) = 1$. 通过计算 LMST-不变量之间的合法交互, 可以得到矩阵 (图 7 表示图 3 的合法交互矩阵) 用以表示 LMST-不变量之间的合法交互关系.

\otimes	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6
J_1	0	0	1	0	1	0
J_2	0	0	0	1	0	1
J_3	1	0	0	0	1	0
J_4	0	1	0	0	0	1
J_5	1	0	1	0	0	0
J_6	0	1	0	1	0	0

图 7 从图 3 得到的 LMST-不变量的合法交互关系矩阵

根据 LMST-不变量之间的合法交互矩阵, 可以设计从 IPN 到顺序图的分解算法. $|ON_k \cdot J|$ 表示 ON_k 中 LMST-不变量的个数, $J_a|_\rho = J_a.in \cup J_a.out$ 表示 LMST-不变量 J_a 在交互集 ρ 投影的变迁集, 在每一个顺序图 $D_i = (O_i, E_i, Mes_i, L_i, W_i)$ 中, O_i 和 E_i 是核心成分, 因此算法 1 主要关注构造每个 D_i 的 O_i 和 E_i .

本文给出从无回路 IOPN 到顺序图的分解算法. 通常, 在一个顺序图中, 参与交互的每个 ON_k 只有一个分支, 单独来看, 每个构件的一组事件动作构成了其局部的分支行为. 而在 IOPN 中, 单独来看, 每个 ON_k 有若干个执行分支, 而每个执行分支对应于 ON_k 的一个 LMST-不变量. 因此在构造分解算法时, 只要抽取 IOPN 中各个 ON_k 的 LMST-不变量并组合在一起, 形成一个闭包 (封闭) 的交互模型, 就可以构造一个顺序图. 这样得到的顺序图会有多个, 对应着的 IOPN 中多个可能的执行分支. 因此构造分解算法的关键就是将 IOPN 中各个 ON_k 的 LMST-不变量, 依据合法交互关系 (见定义 16) 组合在一起.

算法 1. 从 IOPN 到顺序图的分解算法.

设 IPN 是一个无回路 IOPN 模型, $maxnum = \max(\forall k \in \{1, \dots, n\}. |ON_k \cdot J|)$, 选择 LMST-不变量个数最多的一个构件, 即假设 $|ON_p \cdot J| = maxnum$;

输入: $ON_k \cdot J$ 为 ON_k 中 LMST-不变量的集合, ρ 为交互集

输出: 一组顺序图, $DS = \{D_1, \dots, D_i, \dots, D_{maxnum}\}$,

$D_i = (C_i, E_i, Mes_i, L_i, W_i)$

1. FOR $i=1$ TO $maxnum$ DO

2. $J_x := ON_p \cdot J_i$;

3. $C_i := \{ON_p\}$;

```

4.   $E_i := \mathbf{J}_x |_{\rho}$ ; //  $E_i$  的初值设为  $ON_{\rho}, \mathbf{J}_i |_{\rho}$ 
5.   $TIS_i := \{\mathbf{J}_x\}$ ;
6.  FOR  $j=1$  TO  $n$  DO //  $n$  为  $IPN$  中  $ON_s$  的个数
7.    IF  $j \neq \rho$  THEN
8.      FOR  $m=1$  TO  $|PN_j, \mathbf{J}|$  DO
9.         $\mathbf{J}_b := ON_j, \mathbf{J}_m$ ;
10.        $Bool := TRUE$ ;
11.       FOR (EACH  $\mathbf{J}_a$  IN  $TIS_i$ ) DO
12.          $Bool := Bool \wedge \otimes(\mathbf{J}_a, \mathbf{J}_b)$ ;
13.       END FOR
14.       IF  $Bool$  THEN
15.          $C_i := C_i \cup \{ON_k\}$ ;
16.          $E_i := E_i \cup \mathbf{J}_b |_{\rho}$ ;
17.          $TIS_i := TIS_i \cup \{\mathbf{J}_b\}$ ;
18.         BREAK;
19.       END IF
20.     END FOR
21.   END IF
22. END FOR
23. END FOR

```

简要说明: 算法 1 第 6 行中 TIS_i 表示 LMST-不变量集合, 其中任意两个 LMST-不变量之间满足合法交互关系. 第 13 行中布尔量 $Bool$ 表示 \mathbf{J}_a 是否与 TIS_i 中的 LMST-不变量都有合法交互关系 (见定义 16). 该算法的时间复杂度为 $O(|ON_s|^2 \cdot Max^2(|ON_k, \mathbf{J}|))$. 针对算法 1, 本文提出了定理 5.

6.2 IOPN 模型的可分解性与弱合理性的逻辑关系

定理 4. 设存在一个 IOPN 模型 $IPN = (ON_s, \rho)$, $ON_s = \{ON_1, ON_2, \dots, ON_n\}$, $\forall k \in \{1, \dots, n\}$. $ON_k = (P_k, T_k, F_k)$ 是无回路 (circuit-free) Petri 网, 如果该 IPN 是弱合理的 (relaxed sound), 那么其中任意一个 ON_k 在局部也满足弱合理性.

证明. 对于对象网 $ON_k = (P_k, T_k, F_k)$, $\forall t \in T_k$: $\exists IPN.M, IPN.M', IPN.init \xrightarrow{\sigma_1} IPN.M \xrightarrow{t} IPN.M' \xrightarrow{\sigma_2} IPN.final$, $IPN.M = ON_1.M + \dots + ON_k.M + \dots + ON_n.M + M_{\rho}$, $IPN.M' = ON_1.M + \dots + ON_k.M' + \dots + ON_n.M + M'_{\rho}$ 且 $t \in enabled(IPN.M)$. 对应于全局序列 σ_1 , ON_k 存在一个投影子序列 (见定义 5) $\alpha_1 = \sigma_1 |_{ON_k}$ 使得 $ON_k.i \xrightarrow{\alpha_1} ON_k.M$, 且在 ON_k 局部, 满足 $t \in enabled(ON_k.M)$, 即 $ON_k.M \xrightarrow{t} ON_k.M'$. 对应于全局序列 σ_2 , ON_k 存在一个投影子序列 $\alpha_2 = \sigma_2 |_{ON_k}$ 使得 $ON_k.M \xrightarrow{\alpha_2} ON_k.o$. 所以 ON_k 在局部满足弱合理性. 证毕.

定理 5. 设存在一个 IOPN 模型, $IPN = (ON_s, \rho)$, $ON_s = \{ON_1, ON_2, \dots, ON_n\}$, $\forall k \in$

$\{1, \dots, n\}$. $ON_k = (P_k, T_k, F_k)$ 是无回路 (circuit-free) Petri 网. IPN 是弱合理的 (relaxed sound) $\Leftrightarrow IPN$ 能够分解为一组顺序图 $DS = \{D_1, D_2, \dots, D_n\}$ 且每个顺序图满足偏序约束.

证明. 详见附录.

依据定理 5 可以判定无回路 (circuit-free) IOPN 模型的弱合理性.

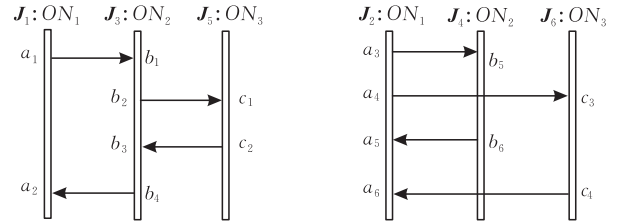


图 8 依据算法 1 将图 3 中的 IOPN 模型分解为两个顺序图

图 8 为依据算法 1 将图 3 所示的 IOPN 模型分解为两个顺序图. 然而图 5 中的 IOPN 不满足弱合理性, 因此不能分级为顺序图. 在图 5 中, 可以计算出 $ON_1.\mathbf{J} = \{\mathbf{J}_1, \mathbf{J}_2\}$, $ON_2.\mathbf{J} = \{\mathbf{J}_3\}$, $\mathbf{J}_1 = [1, 0, 1, 0, 1, 0] = \{a_1, a_3, a_5\}$, $\mathbf{J}_2 = [0, 1, 0, 1, 0, 1] = \{a_2, a_4, a_6\}$, $\mathbf{J}_3 = [1, 1, 1, 1] = \{b_1, b_2, b_3, b_4\}$. $\rho(\mathbf{J}_1.out |_{ON_2}) = \{b_1\}$, $\rho(\mathbf{J}_2.out |_{ON_2}) = \{b_2\}$, $\mathbf{J}_3.in |_{ON_2} = \{b_1, b_2\}$, $\rho(\mathbf{J}_1.out |_{ON_2}) \neq \mathbf{J}_3.in |_{ON_1}$, $\rho(\mathbf{J}_2.out |_{ON_2}) \neq \mathbf{J}_3.in |_{ON_1}$, 所以 $\otimes(\mathbf{J}_1, \mathbf{J}_3) = 0$, $\otimes(\mathbf{J}_2, \mathbf{J}_3) = 0$, 因此不能分解出合法的顺序图.

7 实例分析

本文将介绍 IOPN 模型的实际应用, 图 9 和表 1 使用 IOPN 模型描述了一个 B2B 过程模型, 该过程模型中包含 5 个自治的工作流实体, 其中 EMarket 表示交易平台的中介机构, B_1 表示买方, B_2 表示卖方, Account 表示结算中介, Delivery 表示快递中介. B_1 通过 EMarket 交易平台发现 B_2 商品并发送订单请求, EMarket 将该订单传递信息给 B_2 做确认. 在收到 B_2 的确认之后, EMarket 通知 B_1 为该订单做支付, B_1 收到 EMarket 的支付通知之后, 通过 Account 中介做支付, Account 中介在收到 B_1 的支付之后通知 EMarket, B_1 已经对某订单做了支付, 在 EMarket 收到 B_1 已经做了支付的信息之后, EMarket 通知 B_2 向 B_1 发送货物, 然后 B_2 通过 Delivery 中介向 B_1 发送货物. 当 B_1 收到该订单的货物之后, 分为两种情况: (1) B_1 对收到的货物满意, 然后 B_1 将通知 EMarket 该订单成功, EMarket 转告 Account 中介订单成功, Account 中介将货款转给 B_2 , 至此订单结束; (2) B_1 对收到的货物不满

意,要求退货, B_1 通知 EMarket 订单失败,然后 B_1 通过 Delivery 中介将货物回寄给 B_2 ,当 B_2 收到 B_1 寄回货物之后, B_2 通知 EMarket 已经收到寄回的

货物,然后 EMarket 转告 Account 中介该订单撤回, Account 中介将货款退回给 B_1 ,至此订单结束.图 9 所描述场景的过程交互的消息标签如表 1 所示.

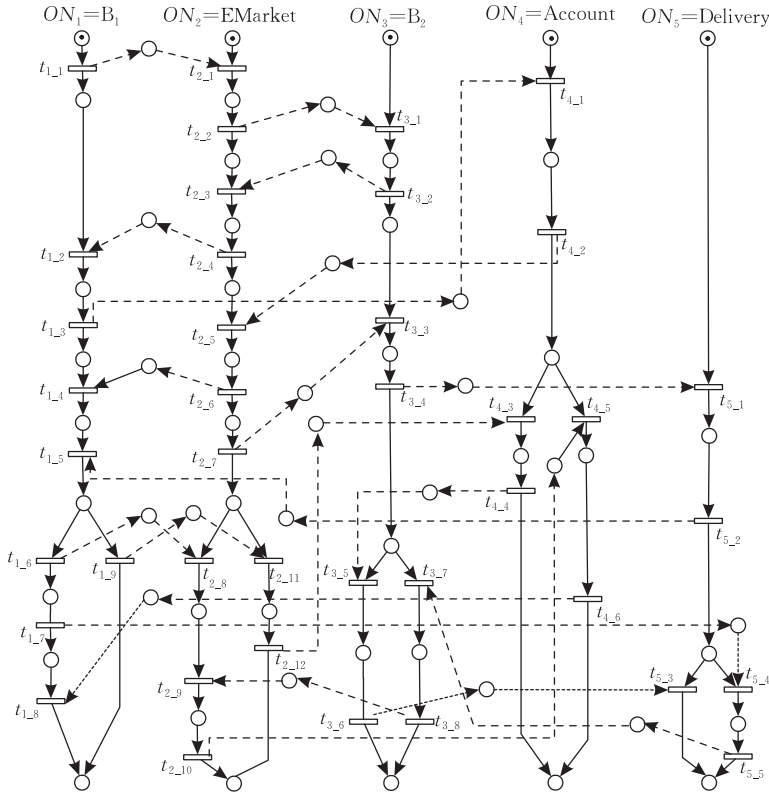


图 9 一个用 IOPN 模型描述的 B2B 的跨组织业务过程

表 1 图 9 中过程交互的消息标签

$t_{1,1}$ =Ordering Mesg._1!	$t_{2,12}$ =Account_3!
$t_{1,2}$ =Infor. to Account?	$t_{3,1}$ =Ordering Mesg._2?
$t_{1,3}$ =Account_1!	$t_{3,2}$ =Ordering_OK!
$t_{1,4}$ =Account_OK?	$t_{3,3}$ =Infor. to Deliver?
$t_{1,5}$ =Delivering_2?	$t_{3,4}$ =Delivering_1!
$t_{1,6}$ =Bad Deal!	$t_{3,5}$ =Account_4?
$t_{1,7}$ =Back_Delivering_1!	$t_{3,6}$ =Good Deal_2!
$t_{1,8}$ =Back_Account_2?	$t_{3,7}$ =Back Delivering_2?
$t_{1,9}$ =Good Deal_1!	$t_{3,8}$ =Infor. Back Account!
$t_{2,1}$ =Ordering Mesg._1?	$t_{4,1}$ =Account_1?
$t_{2,2}$ =Ordering Mesg._2!	$t_{4,2}$ =Account_2!
$t_{2,3}$ =Ordering_OK?	$t_{4,3}$ =Account_3?
$t_{2,4}$ =Infor. To Account!	$t_{4,4}$ =Account_4!
$t_{2,5}$ =Account_2?	$t_{4,5}$ =Back Account_1?
$t_{2,6}$ =Account_OK!	$t_{5,6}$ =Back Account_2!
$t_{2,7}$ =Infor. To Deliver!	$t_{5,1}$ =Delivering_1?
$t_{2,8}$ =Bad Deal?	$t_{5,2}$ =Delivering_2!
$t_{2,9}$ =Infor. Back Account?	$t_{5,3}$ =Good Deal_2?
$t_{2,10}$ =Back Account_1!	$t_{5,4}$ =Back Delivering_1?
$t_{2,11}$ =Good Deal_1?	$t_{5,5}$ =Back Delivering_2!

$(t_{1,1}, t_{2,1}), (t_{2,2}, t_{3,1}), (t_{3,2}, t_{2,3}), (t_{2,4}, t_{1,2}), (t_{1,3}, t_{4,1}), (t_{4,2}, t_{2,5}), (t_{2,6}, t_{1,4}), (t_{2,7}, t_{3,3}), (t_{3,4}, t_{5,1}), (t_{5,2}, t_{1,5}), (t_{1,9}, t_{2,11}), (t_{2,12}, t_{4,3}), (t_{4,4}, t_{3,5}), (t_{3,6}, t_{5,3}), (t_{1,6}, t_{2,8}), (t_{1,7}, t_{5,3}), (t_{5,4}, t_{3,7}), (t_{3,8}, t_{2,9}), (t_{2,10}, t_{4,5}), (t_{4,6}, t_{1,8}).$

图 9 中 IOPN 模型的各个 ON_k 的 LMST-不变量计算为 $ON_1.J = \{J_1, J_2\}$, $ON_2.J = \{J_3, J_4\}$, $ON_3.J = \{J_5, J_6\}$, $ON_4.J = \{J_7, J_8\}$, $ON_5.J = \{J_9, J_{10}\}$.

$$J_1 = [1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 1]$$

$$= \{t_{1,1}, t_{1,2}, t_{1,3}, t_{1,4}, t_{1,5}, t_{1,9}\},$$

$$J_2 = [1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0]$$

$$= \{t_{1,1}, t_{1,2}, t_{1,3}, t_{1,4}, t_{1,5}, t_{1,6}, t_{1,7}, t_{1,8}\},$$

$$J_3 = [1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 1]$$

$$= \{t_{2,1}, t_{2,2}, t_{2,3}, t_{2,4}, t_{2,5}, t_{2,6}, t_{2,7}, t_{2,11}, t_{2,12}\},$$

$$J_4 = [1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0]$$

$$= \{t_{2,1}, t_{2,2}, t_{2,3}, t_{2,4}, t_{2,5}, t_{2,6}, t_{2,7}, t_{2,8}, t_{2,9}, t_{2,10}\},$$

$$J_5 = [1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0]$$

$$= \{t_{3,1}, t_{3,2}, t_{3,3}, t_{3,4}, t_{3,5}, t_{3,6}\},$$

$$J_6 = [1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 1]$$

假设在该 B2B 过程中参与者没有恶意交易行为,在该实例中,可以看出 IOPN 模型能够描述来自不同组织的工作流的协同模型,其交互集为 $\rho =$

$$= \{t_{3,1}, t_{3,2}, t_{3,3}, t_{3,4}, t_{3,7}, t_{3,8}\},$$

$$\mathbf{J}_7 = [1, 1, 1, 1, 0, 0] = \{t_{4,1}, t_{4,2}, t_{4,3}, t_{4,4}\},$$

$$\mathbf{J}_8 = [1, 1, 0, 0, 1, 1] = \{t_{4,1}, t_{4,2}, t_{4,5}, t_{4,6}\},$$

$$\mathbf{J}_9 = [1, 1, 1, 0, 0] = \{t_{5,1}, t_{5,2}, t_{5,3}\},$$

$$\mathbf{J}_{10} = [1, 1, 0, 1, 1] = \{t_{5,1}, t_{5,2}, t_{5,4}, t_{5,5}\}.$$

根据上述计算,可以得到图 9 中的合法交互矩阵为图 10 所示.

\otimes	\mathbf{J}_1	\mathbf{J}_2	\mathbf{J}_3	\mathbf{J}_4	\mathbf{J}_5	\mathbf{J}_6	\mathbf{J}_7	\mathbf{J}_8	\mathbf{J}_9	\mathbf{J}_{10}
\mathbf{J}_1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0
\mathbf{J}_2	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1
\mathbf{J}_3	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0
\mathbf{J}_4	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1
\mathbf{J}_5	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0
\mathbf{J}_6	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1
\mathbf{J}_7	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0
\mathbf{J}_8	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1
\mathbf{J}_9	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0
\mathbf{J}_{10}	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0

图 10 图 9 中 IOPN 模型的 LMST-不变量的合法交互矩阵

依据图 10 的合法交互矩阵得到两个顺序图的拓扑结构(如图 11 所示). 加上图 9 和表 1 中的消息标签,可以构造出两个顺序图 D_1 (如图 12 所示)和 D_2 (如图 13 所示). 由此可见图 9 的 IOPN 模型能够依据算法 1 成功分解为两个正确的顺序图,根据定理 5 可知该 IOPN 模型满足弱合理性. 其构造步骤如下:

$$D_1 = (O_1, \mathbf{E}_1, Mes_1, L_1, W_1),$$

$$O_1 = \{ON_1, ON_2, ON_3, ON_4, ON_5\}$$

$$= \{B_1, EMarket, B_2, Account, Delivery\},$$

$$\mathbf{E}_1 = \mathbf{J}_1 \cup \mathbf{J}_3 \cup \mathbf{J}_5 \cup \mathbf{J}_7 \cup \mathbf{J}_9$$

$$= \{t_{1,1}, t_{1,2}, t_{1,3}, t_{1,4}, t_{1,5}, t_{1,9}, t_{2,1}, t_{2,2}, t_{2,3}, t_{2,4},$$

$$t_{2,5}, t_{2,6}, t_{2,7}, t_{2,11}, t_{2,12}, t_{3,1}, t_{3,2}, t_{3,3}, t_{3,4},$$

$$t_{3,5}, t_{3,6}, t_{4,1}, t_{4,2}, t_{4,3}, t_{4,4}, t_{5,1}, t_{5,2}, t_{5,3}\},$$

$$Mes_1 = \{OrderingMesg._1, OrderingMesg._2,$$

$$Ordering_OK, Infor.toAccount, Account_1,$$

$$Account_2, Account_OK, Infor.toDeliver,$$

$$Delivering_1, Delivering_2, GoodDeal_1,$$

$$Account_3, Account_4, GoodDeal_2\},$$

$$D_2 = (O_2, \mathbf{E}_2, Mes_2, L_2, W_2),$$

$$O_2 = \{ON_1, ON_2, ON_3, ON_4, ON_5\}$$

$$= \{B_1, EMarket, B_2, Account, Delivery\},$$

$$\mathbf{E}_2 = \mathbf{J}_2 \cup \mathbf{J}_4 \cup \mathbf{J}_6 \cup \mathbf{J}_8 \cup \mathbf{J}_{10}$$

$$= \{t_{1,1}, t_{1,2}, t_{1,3}, t_{1,4}, t_{1,5}, t_{1,6}, t_{1,7}, t_{1,8}, t_{2,1}, t_{2,2},$$

$$t_{2,3}, t_{2,4}, t_{2,5}, t_{2,6}, t_{2,7}, t_{2,8}, t_{2,9}, t_{2,10}, t_{3,1}, t_{3,2},$$

$$t_{3,3}, t_{3,4}, t_{3,7}, t_{3,8}, t_{4,1}, t_{4,2}, t_{4,5}, t_{4,6}, t_{5,1}, t_{5,2},$$

$$t_{5,4}, t_{5,5}\},$$

$$Mes_2 = \{OrderingMesg._1, OrderingMesg._2,$$

$$Ordering_OK, Infor.toAccount, Account_1,$$

$$Account_2, Account_OK, Infor.toDeliver,$$

$$Delivering_1, Delivering_2, BadDeal,$$

$$BackDelivering_1, BackDelivering_2,$$

$$Infor.BackAccount, BackAccount_1,$$

$$BackAccount_2\}.$$

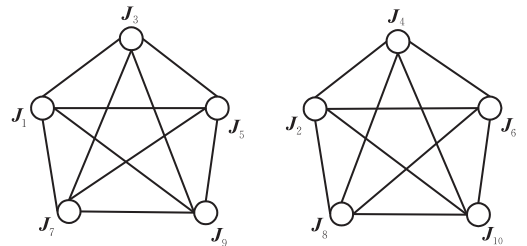


图 11 依据图 10 的矩阵得到两个顺序图的拓扑结构

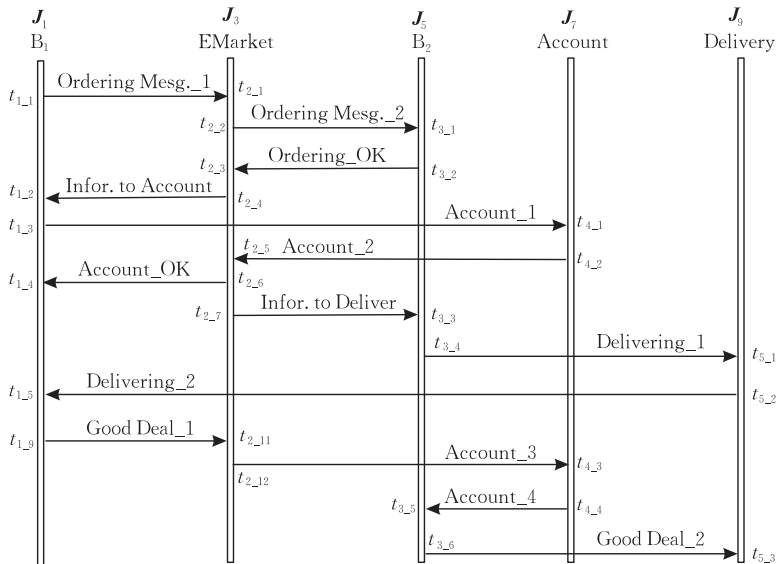
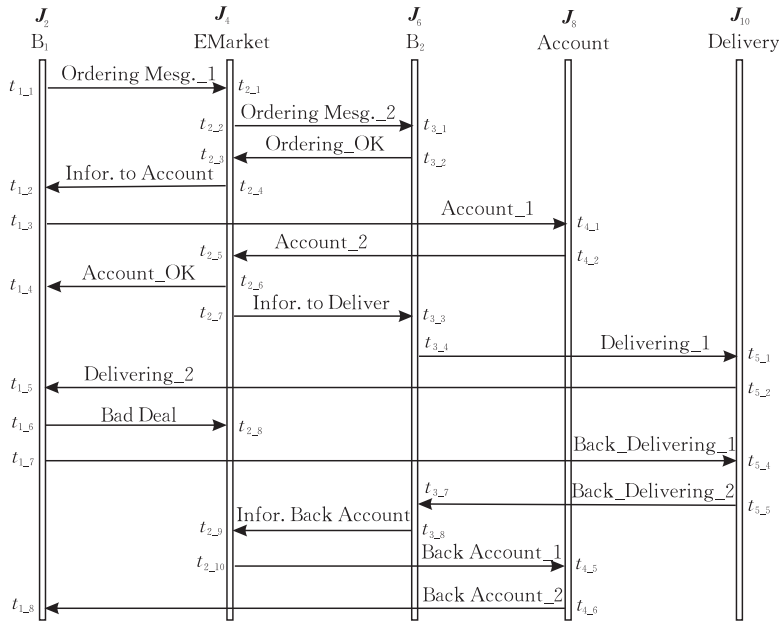


图 12 从图 9 分解得到的一个顺序图 D_1

图 13 从图 9 分解得到的另一个顺序图 D_2

8 总 结

为了协同来自不同组织的业务过程, 本文提出 IOPN 模型用于描述跨组织的工作流协同. 为了确保 IOPN 模型能够被正确地执行, 本文提出了 IOPN 模型的弱合理性作为 IOPN 模型的正确性标准之一. IOPN 模型是一种复合模型, 包含组织内的过程模型和组织间的交互关系, 其规模一般较大, 采用基于状态空间的分析方法, 容易产生状态空间爆炸问题, 为此本文提出基于不变量的分解方法, 能够将一个弱合理的无回路 IOPN 模型分解为一组顺序图, 并提出相关定理: 一个无回路 IOPN 模型是弱合理的当且仅当其可以被分解为一组合法的顺序图. 该定理可以判定无回路 IOPN 模型的弱合理性.

参 考 文 献

- [1] Papazoglou M. Web Services: Principles and Technology. Upper Saddle River, USA: Pearson Prentice Hall, 2007
- [2] van der Aalst W M P. The application of Petri nets to workflow management. The Journal of Circuits, Systems, and Computers, 1998, 8(1): 21-66
- [3] van der Aalst W M P. Interorganizational workflows: An approach based on message sequence charts and Petri nets. Systems Analysis-Modelling-Simulation, 1999, 34(3): 335-367
- [4] van der Aalst W M P. Loosely coupled interorganizational workflows: Modeling and analyzing workflows crossing organizational boundaries. Information and Management, 2000, 37(2): 67-75
- [5] van der Aalst W M P. Inheritance of interorganizational workflows to enable business-to-business E-Commerce. Electronic Commerce Research, 2002, 2(3): 195-231
- [6] van der Aalst W M P, Lohmann N, Massuthe P et al. Multi-party contracts: Agreeing and implementing interorganizational processes. Computer Journal, 2010, 53(1): 90-106
- [7] Gierds C, Mooij A J, Wolf K. Reducing adapter synthesis to controller synthesis. IEEE Transactions on Services Computing, 2012, 5(1): 72-85
- [8] Yuan Chong-Yi. Principals and Application of Petri Net. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005 (in Chinese)
(袁崇义. Petri 网原理与应用. 北京: 电子工业出版社, 2005)
- [9] Reisig W. An Introduction to Petri Nets. Berlin: Springer, 1985
- [10] Dehnert J, van der Aalst W M P. Bridging the gap between business models and workflow specifications. International Journal of Cooperative Information Systems, 2004, 13(3): 289-332
- [11] Girault C, Valk R. Petri Nets for System Engineering: A Guide to Modeling, Verification and Application. Berlin: Springer, 2003
- [12] Ge Ji-Dong, Hu Hao, Lu Jian. A transformation approach from workflow net to pert diagram based on invariants. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(5): 893-898 (in Chinese)
(葛季栋, 胡昊, 吕建. 一种基于不变量的从 workflow 网到 PERT 图的转换方法. 电子学报, 2008, 36(5): 893-898)

附 录.

定理 5. 设存在一个 IOPN 模型, $IPN = (ON_S, \rho)$, $ON_S = \{ON_1, ON_2, \dots, ON_n\}$, $\forall k \in \{1, \dots, n\}$, $ON_k = (P_k, T_k, F_k)$ 是无回路 (circuit-free) Petri 网. IPN 是弱合理的 (relaxed sound) $\Leftrightarrow IPN$ 能够分解为一组顺序图 $DS = \{D_1, D_2, \dots, D_n\}$ 且每个顺序图满足偏序约束.

证明. 该证明分为如下两部分:

(\Leftarrow) 假设存在一个顺序图 $D_x \in DS$, $D_x = (O_x, E_x, Mes_x, L_x, W_x)$. $\mathbf{J}_a |_\rho = \mathbf{J}_a.in \cup \mathbf{J}_a.out$ 表示通过 LMST-不变量 \mathbf{J}_a 在交互集 ρ 上投影得到的一个变迁集合, $E_x |_{ON_k} = \{t \in E_x | t \in T_k\}$ 表示 D_x 的事件集在 ON_k 上投影产生的变迁集. 对于 IPN 中的任意 $t \in T$, 存在以下 (1)、(2) 和 (3) 3 种可能情形:

(1) 如果 $(t, t') \in \rho$ 与 $(t', t) \in \rho$ 均不成立, 那么假设在 ON_k 中 $t \in T_k$, 对于顺序图 $D_x = (O_x, E_x, Mes_x, L_x, W_x)$ 存在一个 LMST-不变量 $\mathbf{J}_a \in ON_k$. \mathbf{J} 使得 $t \in \mathbf{J}_a$ 且 $\mathbf{J}_a |_\rho = E_x |_{ON_k}$.

在 ON_k 中存在 $ON_k.i \xrightarrow{\alpha_1} ON_k.M \xrightarrow{t} ON_k.M' \xrightarrow{\alpha_2} ON_k.o$ 且 $\mathbf{J}_a = \pi(\alpha_1 t \alpha_2 t_k^*)$, 对应于 α_1 和 α_2 , 存在两个全局序列 σ_1 和 σ_2 使得 $IPN.init \xrightarrow{\sigma_1} IPN.M \xrightarrow{t} IPN.M' \xrightarrow{\sigma_2} IPN.final$, $\alpha_1 = \sigma_1 |_{ON_k}$ 且 $\alpha_2 = \sigma_2 |_{ON_k}$, $IPN.M = ON_1.M + \dots + ON_k.M + \dots + ON_n.M + M_\rho$ 且 $IPN.M' = ON_1.M + \dots + ON_k.M' + \dots + ON_n.M + M_\rho$.

(2) 如果存在一个交互对 $(t, t') \in \rho$, 那么假设在 ON_k 中 $t \in T_k$, 对于顺序图 $D_x = (O_x, E_x, Mes_x, L_x, W_x)$ 存在一个 LMST-不变量 $\mathbf{J}_a \in ON_k$. \mathbf{J} 使得 $t \in \mathbf{J}_a$ 且 $\mathbf{J}_a |_\rho = E_x |_{ON_k}$, 在 ON_k 中, 存在 $ON_k.i \xrightarrow{\alpha_1} ON_k.M \xrightarrow{t} ON_k.M' \xrightarrow{\alpha_2} ON_k.o$ 且 $\mathbf{J}_a = \pi(\alpha_1 t \alpha_2 t_k^*)$, ON_j 也是局部弱合理的, 因此存在一个 LMST-不变量 $\mathbf{J}_b \in ON_j$. \mathbf{J} 使得 $t' \in \mathbf{J}_b$ 且 $\mathbf{J}_b |_\rho = E_x |_{ON_j}$, 存在 $ON_j.i \xrightarrow{\beta_1} ON_j.M \xrightarrow{t'} ON_j.M' \xrightarrow{\beta_2} ON_j.o$ 且 $\mathbf{J}_b = \pi(\beta_1 t' \beta_2 t_j^*)$, 对应于存在两个全局序列 σ_1 和 σ_2 使得 $IPN.init \xrightarrow{\sigma_1} IPN.M \xrightarrow{t} IPN.M' \xrightarrow{t'} IPN.M'' \xrightarrow{\sigma_2} IPN.final$, $\alpha_1 = \sigma_1 |_{ON_k}$ 且 $\alpha_2 = \sigma_2 |_{ON_k}$, $\beta_1 = \sigma_1 |_{ON_j}$ 且 $\beta_2 = \sigma_2 |_{ON_j}$, $IPN.M = ON_1.M + \dots + ON_k.M + \dots + ON_j.M + \dots + ON_n.M + M_\rho$ 且 $IPN.M' =$

$ON_1.M + \dots + ON_k.M' + \dots + ON_j.M + \dots + ON_n.M + M_\rho + p_{(t,t')}$, $IPN.M'' = ON_1.M + \dots + ON_k.M' + \dots + ON_j.M' + \dots + ON_n.M + M_\rho$.

(3) 如果存在一个交互对 $(t', t) \in \rho$, 那么假设在 ON_k 中 $t \in T_k$, 对于顺序图 $D_x = (O_x, E_x, Mes_x, L_x, W_x)$ 存在一个 LMST-不变量 $\mathbf{J}_a \in ON_k$. \mathbf{J} 使得 $t \in \mathbf{J}_a$ 且 $\mathbf{J}_a |_\rho = E_x |_{ON_k}$, 在 ON_k 中, 存在 $ON_k.i \xrightarrow{\alpha_1} ON_k.M \xrightarrow{t} ON_k.M' \xrightarrow{\alpha_2} ON_k.o$ 且 $\mathbf{J}_a = \pi(\alpha_1 t \alpha_2 t_k^*)$, ON_j 也是局部弱合理的, 因此存在一个 LMST-不变量 $\mathbf{J}_b \in ON_j$. \mathbf{J} 使得 $t' \in \mathbf{J}_b$ 且 $\mathbf{J}_b |_\rho = E_x |_{ON_j}$, 存在 $ON_j.i \xrightarrow{\beta_1} ON_j.M \xrightarrow{t'} ON_j.M' \xrightarrow{\beta_2} ON_j.o$ 且 $\mathbf{J}_b = \pi(\beta_1 t' \beta_2 t_j^*)$, 对应于存在两个全局序列 σ_1 和 σ_2 使得 $IPN.init \xrightarrow{\sigma_1} IPN.M \xrightarrow{t'} IPN.M' \xrightarrow{t} IPN.M'' \xrightarrow{\sigma_2} IPN.final$, $\alpha_1 = \sigma_1 |_{ON_k}$ 且 $\alpha_2 = \sigma_2 |_{ON_k}$, $\beta_1 = \sigma_1 |_{ON_j}$ 且 $\beta_2 = \sigma_2 |_{ON_j}$, $IPN.M = ON_1.M + \dots + ON_k.M + \dots + ON_j.M + \dots + ON_n.M + M_\rho$ 且 $IPN.M' = ON_1.M + \dots + ON_k.M + \dots + ON_j.M' + \dots + ON_n.M + M_\rho + p_{(t',t)}$, $IPN.M'' = ON_1.M + \dots + ON_k.M' + \dots + ON_j.M' + \dots + ON_n.M + M_\rho$.

因此, 根据上述 3 种情形的证明, 可知 IPN 是弱合理的.

(\Rightarrow) 为了证明必要条件, 我们需要构造一个全局的工作流网 $IPNX = (PX, TX, FX)$, 如下:

$$(1) PX = \left(\bigcup_{k=1}^n P_k \right) \cup P_\rho \cup \{i_X, o_X\}.$$

$$(2) TX = \bigcup_{k=1}^n T_k \cup \{t_{i_X}, t_{o_X}\}.$$

$$(3) FX = \bigcup_{k=1}^n F_k \cup F_\rho \cup \{(i_X, t_{i_X}), (t_{o_X}, o)\} \cup \{(t_{i_X}, i_{ON_k}) | k \in \{1, \dots, n\}\} \cup \{(o_{ON_k}, t_{o_X}) | k \in \{1, \dots, n\}\}.$$

如果 IPN 是弱合理的, $\forall k. \forall IPNX. \mathbf{J}_x: ON_k$ 存在一个 LMST-不变量使得 $ON_k. \mathbf{J}_x = IPNX. \mathbf{J}_x |_{ON_k}$, 对应于 $IPNX. \mathbf{J}_x$, 存在一个顺序图 $D_x = (O_x, E_x, Mes_x, L_x, W_x)$, 且 $E_x = IPNX. \mathbf{J}_x |_\rho$, $E_x |_{ON_k} = ON_k. \mathbf{J}_x |_\rho$ 且 $E_x = \bigcup_{k=1}^n ON_k. \mathbf{J}_x |_\rho$. 所以, IPN 可以依据 $IPNX$ 的 LMST-不变量分解为一组顺序图, 顺序图的数量依据 $IPNX$ 的 LMST-不变量的数量. 证毕.



GE Ji-Dong, born in 1978, Ph. D., lecturer. His research interests include workflow technology, process mining, software coordination, software architecture, and software process.

HU Hai-Yang, born in 1977, Ph. D., associate professor. His research interests include workflow technology, process mining, software coordination, software architecture.

ZHOU Yu, born in 1981, Ph. D., lecturer. His research

interests include software architecture, software evolution, distributed computing.

HU Hao, born in 1975, Ph. D., associate professor. His research interests include workflow technology, process mining, software coordination, software architecture, and software process.

WANG Dong-Yi, born in 1987, M. S. candidate. His research interests include workflow technology, process mining, and software coordination.

GUO Xiao-Bo, born in 1985, M. S. candidate. His research interests include workflow technology, process mining, and software coordination.

Background

In modern enterprise computing, there are many business processes from different organizations, which are geographically dispersed and autonomous. This paper proposes a model called IOPN (Interaction-Oriented Petri Nets) to describe the workflow coordination between different organizations. The IOPN model can describe the internal process models and the interaction relations between different organizations. To assure the IOPN model being executed correctly, this paper presents the relaxed soundness of IOPN model as one of correctness properties. The size of the composite IOPN model is usually large, so the analysis based on state space methods will encounter the state space explosion problem. This paper presents a decomposition approach with invariant analysis, which can decompose a circuit-free and relaxed sound IOPN into a set of sequence diagrams. Furthermore, this paper presents the corresponding theorem, i. e. , a circuit-free IOPN is relaxed sound if and only if it can be decomposed into a set of legal sequence diagrams. This theorem provides an approach to decide the relaxed soundness of the circuit-free IOPN.

This work is under the support of the National Natural

Science Foundation of China (Grant Nos. 61100039, 61021062, 60973044, 61073030, 61003019, 60903053, 61073031, 60903024, 61272188), the National Basic Research Program (973 Program) of China under Grant No. 2009CB320702, the Funds of State Key Laboratory for Novel Software Technology (Grant Nos. ZZKT2011B10, KFKT2011B07), the Fundamental Research Funds for the Central Universities, and Natural Science Foundation of Zhejiang Province (Grant Nos. Z1100822, LY12F02005).

Our group has been working on the workflow technology, process modeling, and process mining for many years, and many high quality papers have been published in international conferences and journals, such as ICSE, APSEC, ICSP (ICSSP), Expert Systems with Applications, Information Systems Frontiers, Science in China Series: Information Sciences, Chinese Journal of Computers, Journal of Software, Acta Electronica Sinica, International Journal of Software and Informatics, Frontiers of Computer Science in China. This paper proposes a decomposition approach with invariant analysis for workflow coordination.