

正确性保证的私有过程建模方法

莫启^{1,2}, 笪建^{1,3}, 代飞^{2,4}, 朱锐^{1,2}, 林雷蕾¹, 李彤^{1,2}

(1. 云南大学软件学院, 云南昆明 650091; 2. 云南省软件工程重点实验室, 云南昆明 650091;
3. 淮安开放大学信息工程系, 江苏淮安 223001; 4. 西南林业大学大数据与智能工程学院, 云南昆明 650091)

摘要: 私有过程是构建协同业务过程基础, 其正确与否对业务协同实施产生直接影响. 为此, 提出了一种逐步求精构建私有过程的方法. 首先, 定义私有过程, 并将其控制流抽象为四种基本块, 即顺序块、并发块、选择块及迭代块; 然后, 针对四种基本块提出各自的精化规则, 并以此为基础提出了私有过程构建方法; 最后, 从理论上证明了通过该方法建立的私有过程具有工作流网特性且是正确的. 通过对协同制造中供应链建模并与现有的、典型的方法对比分析, 结果表明: 相对已有的工作, 本文方法能够更加有效地对私有过程进行建模.

关键词: 私有过程; 基本块; 精化规则; 接口一致性; 正确性

中图分类号: TP311 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2018)10-2551-10

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.10.033

A Private Process Modeling Approach Guaranteeing Correctness

MO Qi^{1,2}, DA Jian^{1,3}, DAI Fei^{2,4}, ZHU Rui^{1,2}, LIN Lei-lei¹, LI Tong^{1,2}

(1. School of Software, Yunnan University, Kunming, Yunnan 650091, China;
2. Key Laboratory of Software Engineering in Yunnan Province, Yunnan University, Kunming, Yunnan 650091, China;
3. Department of Information Engineering, Huai'an Open University, Huai'an, Jiangsu 223001, China,
4. School of Big Data and Intelligent Engineering, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan 650091, China)

Abstract: Private processes are the basis for building a collaborative business process, and its correctness has a direct impact on the business collaboration implementation. To this end, we propose an approach of step-by-step refinement to build a private process. First, we define a private process and abstract its control flow into four basic blocks, i. e., sequential block, concurrent block, selection block, and iteration block. Then, we propose corresponding refinement rules for the four basic blocks, and a private process construction method is proposed based on these refinement rules. Finally, we theoretically prove that the private process established by the present approach has the characteristics of workflow network and is correct. We model the supply chain in collaborative manufacturing and compare the present approach with the existing methods. The results show that the present method can more effectively model the private process with respect to the existing typical work.

Key words: private process; basic block; refinement rule; interface consistency; correctness

1 引言

随着经济全球化的发展和企业信息化程度不断提高, 企业的经营模式发生了重大的变化. 企业的业务活动已从企业内单目标为导向的独立模式发展成为跨企业多目标合作的协同模式^[1]. 在现代商业环境下^[2,3], 没有一个企业是孤立的. 企业作为参与者参与到业务协作中去, 在协作过程中, 它们彼此进行交互以完成特

定的业务功能. 对于协同业务过程, 如企业信息系统^[4]、电子商务^[5]等, 由于它通常涉及到多个业务过程单元, 跨越了组织的边界, 它的主要任务就是通过各自的信息系统, 不同企业之间可以方便地进行协作以完成共同商业目标^[6]. 为确保业务协同正确实施, 对协同业务过程进行建模与正确性分析是当前业务过程管理领域内的一个研究热点.

针对协同业务过程, 国内外研究者提出了多种建

收稿日期: 2017-03-27; 修回日期: 2018-07-26; 责任编辑: 蓝红杰

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61462095, No. 61862065, No. 61702442, No. 61662085, No. 61379032); 云南省应用基础研究计划项目 (No. 2016FB102, No. 2018FB105); 云南省软件工程重点实验室开放基金面上项目 (No. 2017SE201, No. 2016SE202); 云南省中青年学术和技术带头人后备人才培养经费 (No. C6143002); 云南省教育厅科学研究基金资助性项目 (No. 2017ZZX227)

模和分析方法. 归纳起来, 这些建模方法可分为 2 类: (1) 自底向上建模方法. 该方法要求组织首先定义各自私有过程(组织拥有的完整流程), 之后以此为基础直接构建全局协同业务过程模型(典型如文献[7])或以事先协商好的协作接口为基础通过某种抽象机制从私有过程中抽取公共过程(组织参与协同流程)并将其组合得到协同业务过程(典型如文献[8]); (2) 自顶向下建模方法. 该方法要求首先给出协同全局契约, 然后定义映射规则, 并以此为基础从契约中生成每个组织的私有过程(典型如文献[9, 10]). 由于自底向上建模方法不需要事先定义全局契约且私有过程由参与组织自定义, 较自顶向下建模方法的灵活性和普适性更强. 因此, 本文讨论方法属于自底向上建模方法范畴.

然而, 当前已有典型工作关注重点是如何构建符合个性化特征同业务过程(典型如文献[11]), 并以此为基础对协同业务过程相关性质(如结构弱合理性等)进行分析(典型如文献[12]), 并未涉及私有过程建模方法和正确性分析. 特别地, 私有过程正确性可分为两个层次^[11]: 自身正确性和组合正确性. 自身正确性是指在默认存在足够良好外部环境(即任务在执行时需要接收消息时, 外部环境均能适时提供)情况下, 其结构符合相关特性(如是 workflow 网等)且能够执行完成(如满足合理性等); 而组合正确性则是指构建的私有过程与外部环境组合能够执行完成. 若私有过程不具有自身正确性, 那么必定不满足组合正确性^[11]. 因此, 本文关注私有过程自身正确性.

私有过程建模方法和正确性分析是有效构建正确协同业务过程的一个重要考虑因素. 忽视该因素将导致私有过程构建缺乏指导性方法, 建模效率低下; 另一方面, 私有过程的正确性通常基于其状态迁移模型分析. 若私有过程的结构较为复杂(如其中含有并行分支长度较长或数量较多等情况), 则可能会出现状态空间爆炸问题, 导致协同业务过程正确性分析效率低下.

为此, 本文基于四种基本块(即顺序块、并发块、选择块及迭代块)提出一种正确性保证的私有过程建模方法. 该方法允许参与组织以求精方式逐步构建私有过程, 并可确保最终构建的私有过程是正确的. 由于后续正确性分析可以避免, 因此能够提高协同业务过程正确性分析效率.

2 相关研究

目前, 国内外研究者就协同业务过程建模与正确性分析开展了一系列相关工作.

在协同业务过程建模方面, 文献[8]将私有过程抽象为一组元结构; 然后对于每种元结构提出了各自的约简规则以得到参与组织的公共视图, 继而将公共视

图组合以得到跨组织协同的信息流网结构, 即协同业务过程. 文献[14]引入了过程视图概念. 过程视图由投影规则从私有过程中生成, 它将私有业务过程中无关的信息隐藏而仅暴露相关协作信息, 可视为私有过程的外部映像. 进而将过程视图组合得到协同业务过程. 本课题组也对协同业务过程建模开展研究. 文献[15]将 Petri 网和 Pi 演算交叉应用, 提出了一种协同业务过程的建模方法. 秉承关注点分离的原则, 文献[11]基于 Petri 网提出一种多视角的跨组织业务过程建模方法. 然而, 这些研究工作关注重点是如何构建支持个性化特征(如自治、隐私等)的协同业务过程模型, 对协同业务过程正确性分析没有讨论.

在协同业务过程正确性分析方面, 文献[7]提出了 IOWF (Inter-Organizational Workflow) 用于建模跨组织工作流, 并基于 IOWF 对协同业务过程正确性进行分析. 之后, 国内外研究者以此为基础开展研究. 文献[16]首先采用 Petri 网和 Pi 演算建模协同业务过程的本地控制流和本地控制流间交互协议; 接着定义协同业务过程逻辑结构正确性, 并提出了逻辑结构正确性验证方法. 文献[12]提出一种业务过程协同模型 IOPN (Interaction-Oriented Petri Nets) 用于描述业务协同模型; 接着引入 IOPN 弱合理性概念用来定义 IOPN 的逻辑结构正确性, 并基于不变量的分解方法将一个弱合理的无回路 IOPN 分解为一组顺序图用于验证其逻辑结构正确性. 该方法可避免分析时存在状态空间爆炸问题. 文献[6]针对跨部门业务协同呈现出复杂特性, 对 WF-net^[13]扩展资源和消息等要素以建模参与部门的业务流程, 接着使用库所融合技术将资源库所和消息库所融合以得到跨部门协调业务过程模型. 以传统合理性为基础定义协调业务过程模型正确性标准, 并基于可达图给出协同业务过程正确性分析方法. 一般而言, 协同业务过程正确性包括私有过程正确性和全局正确性两个方面. 然而, 这些方法均是在默认私有过程正确的前提下讨论全局正确性. 事实上, 这些模型中私有过程均基于 WF-net 或扩展 WF-net 构建, 而以 WF-net 建模私有过程正确性通常采用合理性指标衡量. 已有相关文献对 WF-net 合理性进行详细讨论^[13, 17], 这些文献研究结论均表明, 若私有过程结构较复杂(如其中含有并行分支长度较长或数量较多等情况), 则会产生状态空间爆炸问题. 状态空间爆炸问题将导致协同业务过程正确性分析效率低下, 甚至会出现无法判定情况. 如何避免私有过程分析中存在状态空间爆炸问题以提高协同业务过程正确性分析效率上述研究工作均未做进一步讨论.

3 私有过程定义

私有过程描述一个参与组织内部的业务逻辑(以

组织内部任务之间控制流表示)及参与组织与外部环境(即其他参与组织的私有过程)交互^[11,18].本质上,它对应一个参与组织的可执行流程^[18].在实际应用中,通常采用业务过程执行语言 BPEL(Business Process Execution Language)进行描述.

参与组织内部的任务是组织为完成特定业务目标开展的业务活动,形式定义如下.

定义 1(任务) 任务是一个四元组 $Task = (name, org, MsgRec, MsgSend)$,其中: $name$ 是任务名字,用于唯一标识一个任务; org 是任务所属组织; $MsgRec$ 是任务执行前需接收消息集; $MsgSend$ 是任务执行完成后发送消息集.

对于任务 $task$,若 $MsgRec \neq \emptyset$ 或 $MsgSend \neq \emptyset$ 成立,则称 $task$ 为通信任务,否则称为本地任务.通信任务执行使得其所属组织与外部环境发生交互,通过消耗外部环境产生消息或在执行完成后将产生消息发送至外部环境来实现.

将参与组织内部所有任务集和建立其上的控制流组合形成私有过程,它是构建协同业务过程基础.

定义 2(私有过程) 私有过程是一个三元组 $BP = (Tasks, Flow, f)$,其中:

(1) $Tasks = \{task_1, \dots, task_n\}$ 是有限任务集,其中: $\forall i \in [1 \dots n], task_i$ 为符合定义 1 的任务;

(2) $Flow$ 为控制流,它是一个基本 Petri 网 $Flow = (P, T; F, M_0, i, o)$,其中: P 是有限库所集; T 是有限变迁集; $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ 是流关系; M_0 是初始标识,满足 $\forall p \in P, p \neq i: M_0(p) = 0$ 且 $M_0(i) = 1$; i 和 o 是两个特殊库所,分别表示开始库所和终止库所,满足 $\forall i = \emptyset$ 和 $o^* = \emptyset$;若在 $Flow$ 中添加一个库所 t ,满足 $\forall t = o$ 和 $t^* = i$,则 $Flow$ 是强连通的.

(3) $f: T \rightarrow Tasks$ 是变迁映射函数,表示每个变迁关联一个任务.

定义 2 中,规定 $Flow$ 具有工作流网特性^[13]. $Flow$ 定义参与组织中任务之间执行顺序,从而描述一个参与组织内部业务逻辑.同时,对于参与组织中任意一个任务 $task$ 而言,若其是通信任务,则表示当参与组织在执行任务 $task$ 时需与外界环境发生交互.通过明确任务执行前需要接收消息和执行完成后发送消息(参见定义 1),我们能够良好地刻画出组织与外界环境交互.

对于任意私有过程 BP , BP 运行状态可用 $Flow$ 中的托肯分布情况,即标识 $M \subseteq Flow.P$ 来表示.任务在实际执行过程中不仅受到控制流约束,还可能受到外部环境影响.一个任务 $task$ 在标识 M 下使能(记为 $M[task >]$),且仅当其对应的变迁 t 在标识 M 下使能,且 $task$ 需要接收消息存在,继而通过执行 $task$ 到达标识 M' ,记为 $M[task > M']$.

根据定义 2,私有过程的控制流是具有工作流网特性的基本网.因此,借鉴传统合理性^[13],从语义层面来定义私有过程控制流正确性,即完整性.

定义 3(完整性) 某个私有过程 BP 是完整的,当且仅当:

(1) $\forall M: M_0[\sigma_1 > M \rightarrow M[\sigma_2 > [o]]$;

(2) $\forall M': M_0[\sigma > M' \wedge M' \geq o \rightarrow M' = o]$;

(3) $\forall t \in T$, 存在 M, M' 使得 $M_0[\sigma > M[t > M']$.

其中: $\sigma, \sigma_1, \sigma_2$ 为变迁发生序列; $M[\sigma > M']$ 表示在标识 M 下通过执行一个变迁序列 σ 到达标识 M' .

4 私有过程构建

由于私有过程实质上对应一个参与组织的可执行流程^[18],而 BPEL 是当前实现业务过程模型事实上标准,因此当前大多数私有过程通常描述为 BPEL 流程. BPEL 流程表现为结构化流程,即对于一个 BPEL 流程而言,可将其抽象为顺序块、选择块、并行块及迭代块^[22].这是本文将私有过程抽象为四种基本块的原因.另一方面,为了建模灵活性,现有研究中的工作流模型通常是非结构化流程.但是,已有相关研究可将任意一个非结构化流程直接转换为结构化流程或 BPEL 流程^[22,23].因此,不论是私有过程还是一般工作流模型,它们最终都可以抽象为四种基本块.故本文只考虑结构化的私有过程.下面对基本块及基本块精化进行详细阐述.

4.1 基本块定义

私有过程在实际应用中通常采用 BPEL 语言描述.顺序、选择、并发和迭代结构是任务间存在基本结构,私有过程是由这些基本结构组合而成.由于本文在定义私有过程时利用关注点分离原则,实现了结构(控制流)和任务分离.因此,可将私有过程结构(即控制流)抽象为 4 种类型基本块,即顺序块、选择块、并发块和迭代块,以此作为构建私有过程基础.特别地,由于基本块和基本块精化均是基于控制流开展,故为了简洁,下文定义 4~定义 10 及规则 1~规则 4 中均没有结合任务进行讨论.

基本块是私有过程中的一个结构片段,用一个具有单入口和单出口的 Petri 网表示.

定义 4(基本块) 基本块是 7 元组 $B = (P, T; F, A_e, A_x, R_e, R_u)$,其中 P 是有限库所集; T 是有限变迁集; $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ 是流关系; $A_e, A_x \subseteq T$ 分别为基本块的入口和出口; $R_e, R_u \subseteq T$ 分别为基本块中可精化变迁集和不可精化变迁集.

顺序块刻画变迁 t_i, t_j 对应任务的顺序执行,且变迁 t_i, t_j 均可精化.它结构如图 1(a) 所示,形式定义如下:

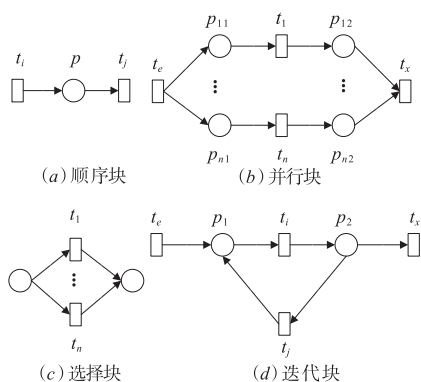


图1 基本块

定义 5 (顺序块) 对于基本块 $B = (P, T; F, A_e, A_x, R_e, R_u)$, 称 B 是一个顺序块当且仅当 $P = \{p\}$; $T = \{t_i, t_j\}$; $F = \{(t_i, p), (p, t_j)\}$; $A_e = \{t_i\}$; $A_x = \{t_j\}$; $R_e = \{t_i, t_j\}$; $R_u = \emptyset$.

并发块刻画变迁 t_1 至 t_n 对应任务的并发执行. 并发块中变迁 t_1 至 t_n 均可精化, 而变迁 t_e, t_x 均不可精化, 变迁 t_e, t_x 仅用于保持结构完整性. 它的结构如图 1(b) 所示, 形式定义如下:

定义 6 (并发块) 对于基本块 $B = (P, T; F, A_e, A_x, R_e, R_u)$, 称 B 是一个并发块当且仅当 $P = \{p_{11}, p_{12}, \dots, p_{n1}, p_{n2}\}$; $T = \{t_1, \dots, t_n, t_e, t_x\}$; $F = \{(t_e, p_{11}), \dots, (t_e, p_{n1}), (p_{11}, t_1), \dots, (p_{n1}, t_n), (t_1, p_{12}), \dots, (t_n, p_{n2}), (p_{12}, t_x), \dots, (p_{n2}, t_x)\}$; $A_e = \{t_e\}$; $A_x = \{t_x\}$; $R_e = \{t_1, \dots, t_n\}$; $R_u = \{t_e, t_x\}$.

迭代块刻画变迁 t_1 至 t_n 对应任务的迭代执行, 且变迁 t_1 至 t_n 均可精化, 其结构如图 1(c) 所示, 形式定义如下:

定义 7 (选择块) 对于基本块 $B = (P, T; F, A_e, A_x, R_e, R_u)$, 称 B 是一个选择块当且仅当 $P = \emptyset$; $T = \{t_1, \dots, t_n\}$; $F = \emptyset$; $A_e = \{t_1, \dots, t_n\}$; $A_x = \{t_1, \dots, t_n\}$; $R_e = \{t_1, \dots, t_n\}$; $R_u = \{t_e, t_x\}$.

迭代块刻画变迁 t_i, t_j 对应任务的迭代执行. 迭代块中变迁 t_i, t_j 均可精化, 而变迁 t_e, t_x 均不可精化, 变迁 t_e, t_x 仅用于保持结构完整性. 它的结构如图 1(d) 所示, 形式定义如下:

定义 8 (迭代块) 对于基本块 $B = (P, T; F, A_e, A_x, R_e, R_u)$, 称 B 是一个迭代块当且仅当 $P = \{p_1, p_2\}$; $T = \{t_i, t_j, t_e, t_x\}$; $F = \{(t_e, p_1), (p_1, t_i), (t_i, p_2), (p_2, t_j), (t_j, p_1), (p_2, t_x)\}$; $A_e = \{t_e\}$; $A_x = \{t_x\}$; $R_e = \{t_i, t_j\}$; $R_u = \{t_e, t_x\}$.

4.2 基本块精化

基于 4 种基本块, 私有过程可通过对基本块中可精化变迁逐步求精生成. 为了阐述这种精化过程如何开展, 需要针对每种基本块给出其对应的求精规则. 在此

之前, 先引入源控制流概念, 作为构建私有过程控制流起点, 其形式定义如下.

定义 9 (源控制流) 源控制流是一个 6 元组 $SP = (P, T; F, R_e, R_u, M_0)$, 其中 $P = \{i, o\}$; $T = \{t\}$; $F \subseteq \{(i, t), (t, o)\}$; $R_e = \{t\}$; $R_u = \emptyset$; M_0 是初始标识, 满足 $M_0(i) = 1$ 且 $M_0(o) = 0$; i 和 o 是两个特殊库所, 分别表示开始库所和终止库所, 满足 $\forall i = \emptyset$ 和 $o^* = \emptyset$.

以源控制流为起点, 对可精化变迁求精可得到精化控制流, 其形式定义如下.

定义 10 (精化控制流) 精化控制流是一个 6 元组 $RP = (P, T; F, R_e, R_u, M_0)$, 其中 P 是库所有效集; T 是变迁有限集; $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ 是流关系; R_e 是可精化变迁集; R_u 是不可精化变迁集; M_0 是初始标识, 满足 $M_0(i) = 1$ 且 $M_0(o) = 0$; i 和 o 是两个特殊库所, 分别表示开始库所和终止库所, 满足 $i = \emptyset$ 和 $o^* = \emptyset$.

本质上, 源控制流可视为初始精化控制流. 基于精化控制流, 下面对 4 种基本块求精规则进行讨论.

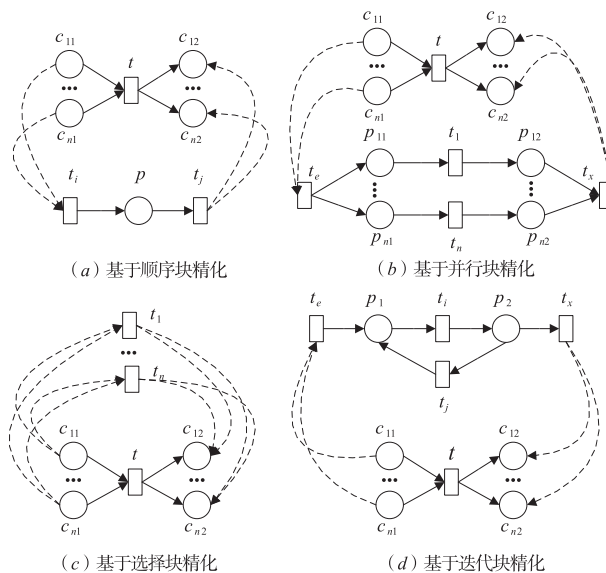


图2 基本块精化规则

基于顺序块求精过程如图 2(a) 所示, 形式定义如下.

规则 1 设 $RP = (P, T; F, R_e, R_u, M_0)$ 精化控制流, 对 RP 中的可精化变迁 $t \in R_e$ 顺序求精后得到的精化控制流为 $RP' = (P', T'; F', R_e', R_u', M_0)$, 其中:

- (1) $P' = P \cup \{p\}$;
- (2) $T' = T \cup \{t_i, t_j\} - \{t\}$;
- (3) $F' = F \cup \{(c_{11}, t_i), \dots, (c_{n1}, t_i), (t_j, c_{12}), \dots, (t_j, c_{n2})\} - \{(c_{11}, t), \dots, (c_{n1}, t), (t, c_{12}), \dots, (t, c_{n2})\}$;
- (4) $R_e' = R_e \cup \{t_i, t_j\} - \{t\}$;
- (5) $R_u' = R_u$.

基于并发块求精过程如图 2(b) 所示, 形式定义

如下.

规则 2 设 $RP = (P, T; F, R_e, R_u, M_0)$ 精化控制流, 对 RP 中的可精化变迁 $t \in R_e$ 并发求精后得到的精化控制流为 $RP' = (P', T'; F', R_e', R_u', M_0)$, 其中:

- (1) $P' = P \cup \{p_{11}, p_{12}, \dots, p_{n1}, p_{n2}\}$;
- (2) $T' = T \cup \{t_1, \dots, t_n, t_e, t_x\} - \{t\}$;
- (3) $F' = F \cup \{(c_{11}, t_e), \dots, (c_{n1}, t_e), (t_x, c_{12}), \dots, (t_x, c_{n2})\} \cup \{(t_e, p_{11}), \dots, (t_e, p_{n1}), (p_{11}, t_1), \dots, (p_{n1}, t_n), (t_1, p_{12}), \dots, (t_n, p_{n2}), (p_{12}, t_x), \dots, (p_{n2}, t_x)\} - \{(c_{11}, t), \dots, (c_{n1}, t), (t, c_{12}), \dots, (t, c_{n2})\}$;
- (4) $R_e' = R_e \cup \{t_i, t_j\} - \{t\}$;
- (5) $R_u' = R_u \cup \{t_e, t_x\}$.

基于选择块求精过程如图 2(c) 所示, 形式定义如下.

规则 3 设 $RP = (P, T; F, R_e, R_u, M_0)$ 精化控制流, 对 RP 中的可精化变迁 $t \in R_e$ 选择求精后得到的精化控制流为 $RP' = (P', T'; F', R_e', R_u', M_0)$, 其中:

- (1) $P' = P$;
- (2) $T' = T \cup \{t_1, \dots, t_n\} - \{t\}$;
- (3) $F' = F \cup \{(c_{11}, t_i), \dots, (c_{n1}, t_i), (c_{11}, t_j), \dots, (c_{n1}, t_j)\} \cup \{(t_i, c_{12}), \dots, (t_i, p_{n2}), (t_j, c_{12}), \dots, (t_j, p_{n2})\} - \{(c_{11}, t), \dots, (c_{n1}, t), (t, c_{12}), \dots, (t, c_{n2})\}$;
- (5) $R_e' = R_e \cup \{t_1, \dots, t_n\} - \{t\}$;
- (6) $R_u' = R_u$.

基于迭代块求精过程如图 2(d) 所示, 形式定义如下.

规则 4 设 $RP = (P, T; F, R_e, R_u, M_0)$ 精化控制流, 对 RP 中的可精化变迁 $t \in R_e$ 迭代求精后得到的精化控制流为 $RP' = (P', T'; F', R_e', R_u', M_0)$, 其中:

- (1) $P' = P \cup \{p_1, p_2\}$;
- (2) $T' = T \cup \{t_i, t_j, t_e, t_x\} - \{t\}$;
- (3) $F' = F \cup \{(c_{11}, t_e), \dots, (c_{n1}, t_e), (t_x, c_{12}), \dots, (t_x, c_{n2})\} \cup \{(t_e, p_1), (p_1, t_i), (t_i, p_2), (p_2, t_j), (t_j, p_1), (p_2, t_x)\} - \{(c_{11}, t), \dots, (c_{n1}, t), (t, c_{12}), \dots, (t, c_{n2})\}$;
- (4) $R_e' = R_e \cup \{t_i, t_j\} - \{t\}$;
- (5) $R_u' = R_u \cup \{t_e, t_x\}$.

结合源控制流和求精规则集, 下面给出私有过程构建方法. 该方法作为业务人员建模指南, 可降低建模复杂性. 它包括如下步骤:

- (1) 定义源控制流 SP 作为构建私有过程起点;
- (2) 分析 SP 中可精化变迁 t , 确定 t 对应的基本块, 根据基本块对应的求精规则进行精化操作后得到 1 次精化控制流 RP_1 ;
- (3) 若 RP_1 粒度合适 (粒度由业务人员根据实际情况确定) 则停止精化, 否则执行(4);

(4) $RP = RP_1$ 并分析 RP 中可精化变迁 $t \in RP$. R_e , 确定 t 对应的基本块, 根据基本块对应的求精规则进行精化操作直至合适粒度为止. 提取 RP 中库所集、变迁集就、流关系、 i 和 o 可构建得到私有过程控制流 $Flow$;

(5) 将 $Flow$ 中的每个变迁关联一个任务得到最终构建的私有过程 BP .

4.3 正确性保持分析

私有过程正确性可从语法和语义两个层面进行分析^[7]. 私有过程语法正确性是指私有过程的结构是工作流网, 即任务之间结构关系具有工作流网特性; 而私有过程语义正确性则是指私有过程可通过执行任务序列到达正确终止状态. 下面首先讨论私有过程语法正确性.

本质上, 分析私有过程语法正确性可转换为对精化控制流 Petri 网结构是否具有工作流网特性分析. 通过对求精过程归纳, 可得到精化控制流是一个工作流网.

定理 1 设 $RP = (P, T; F, R_e, R_u, M_0)$ 是精化源控制流生成最终精化控制流, 则 RP 具有工作流网特性.

证明 基于定义 9 和规则 1 - 规则 4, 可采用数学归纳法证明. 证明过程比较直观, 限于篇幅, 略.

定理 1 表明, 求精得到的精化控制流具有工作流网特性. 据此可推出最终构建私有过程也是语法正确的.

推论 1 设最终构建的私有过程为 BP , 则 BP 具有工作流网特性.

证明 设 $RP = (P, T; F, R_e, R_u, M_0)$ 是精化源控制流生成最终精化控制流, 提取 RP 中库所集、变迁集就、流关系、 i 和 o 构建得到 BP 控制流 $Flow = (P, T; F, M_0, i, o)$. 同时, 根据 3.2 节中提出私有过程构建方法可知, $Flow$ 中每个变迁 $t \in T'$ 关联一个任务, 即存在变迁映射函数 f , 使得对于任意 $t \in T$, 存在任务 $task$, 使得 $f(t) = task$.

根据定理 1 可知: 由于 RP 具有工作流网特性, 因此 $Flow$ 也具有工作流网特性. 故可知私有过程 BP 中任务之间结构关系 (由 $Flow$ 决定) 满足工作流网特性. 证毕.

推论 1 表明, 基于本文方法构建的私有过程符合工作流网特性, 确保其语法正确性.

在保证私有过程语法正确前提下, 本文引入接口一致性概念来讨论私有过程语义正确性, 其定义如下.

定义 11 (接口一致性) 设 t 为可精化变迁, 对 t 使用基本块 $B = (P, T; F, A_e, A_x, R_e, R_u)$ 求精, 称 B 具有接口一致, 当且仅当:

- (1) 若 $M[t > M']$, 则 $\forall M'', \exists \sigma_2: M[\sigma_1 > M'' \rightarrow M''[\sigma_2 > M']$, 其中: $\sigma_1, \sigma_2 \in T^*$;
- (2) $\forall t \in T, \exists M, M' \subseteq P, \sigma \in T^*$, 使得 $M[\sigma > M'']$, $M''[t > M']$.

由定义 11 可知,接口一致性要求每个从标记 M 可达的标识 M' ,存在变迁序列使其到达标识 M' .同时,精化过程未引入死变迁.根据定义 11,可分析得到每种求精规则均满足接口一致性.

定理 2 顺序块 $B = (P, T; F, A_c, A_x, R_c, R_u)$ 求精可保持接口一致性.

定理 3 并发块 $B = (P, T; F, A_c, A_x, R_c, R_u)$ 求精可保持接口一致性.

定理 4 选择块 $B = (P, T; F, A_c, A_x, R_c, R_u)$ 求精可保持接口一致性.

定理 5 迭代块 $B = (P, T; F, A_c, A_x, R_c, R_u)$ 求精可保持接口一致性.

定理 2 - 定理 5 的证明均可基于这四种基本块,并利用 Petri 网的点火规则证明其满足定义 11. 证明过程比较直观,限于篇幅,略.

基于定理 2 - 定理 5,通过对求精过程归纳,可得到私有过程语义正确性定理.

定理 6 设 $RP = (P, T; F, R_c, R_u, M_0)$ 是精化源控制流生成最终精化控制流,则 RP 是完整的.

证明 可根据定理 2 - 定理 5 直接得证. 证毕.

定理 6 表明,求精得到的精化源控制流具有完整性.据此可推出最终构建私有过程也是语义正确的.下面先给出私有过程语义正确性定义.

借鉴传统合理性^[13],从语义层面来定义私有过程正确性.私有过程正确性从任务视角定义私有过程正确执行,即通过执行任务序列可以到达正确终止状态.

定义 12 (正确性) 某个私有过程 BP 是正确的,当且仅当:

- (1) $\forall M; M_0[\sigma_1 > M \rightarrow M[\sigma_2 > [o]]$;
- (2) $\forall M'; M_0[\sigma > M' \wedge M' \geq o \rightarrow M' = o]$;
- (3) 对于任意任务 $task$,存在标识 M, M' 使得 $M_0[\sigma > M[task > M']$.

其中: $\sigma, \sigma_1, \sigma_2$ 为任务序列; $M[\sigma > M']$ 表示在标识 M 下通过执行一个任务序列 σ 到达标识 M' .

结合定义 12 和定理 6,可以推出最终构建的私有过程是正确的.

推论 2 设最终构建的私有过程为 BP ,则 BP 具有正确性.

证明 设 $RP = (P, T; F, R_c, R_u, M_0)$ 是精化源控制流生成最终精化控制流,则提取 RP 中库所集、变迁集就、流关系、 i 和 o 构建得到 BP 控制流 $Flow = (P, T; F, M_0, i, o)$.同时,根据 3.2 节中提出私有过程构建方法可知: $Flow$ 中每个变迁 $t \in T'$ 关联一个任务,即存在变迁映射函数 f ,使得对于任意 $t \in T$,存在任务 $task$,使得 $f(t) = task$.

故可以构建出私有过程 $BP = (Tasks, Flow, f)$,其

中: $Tasks = \{task \mid task = f(t)\}$.

根据定理 6 可知:由于 RP 具有完整性,则可以推出 $Flow$ 也是完整的,即满足:

- (1) $\forall M; M_0[\sigma_1 > M \rightarrow M[\sigma_2 > [o]]$;
- (2) $\forall M'; M_0[\sigma > M' \wedge M' \geq o \rightarrow M' = o]$;
- (3) $\forall task \in T', \exists M, M'$ 使得 $M_0[\sigma > M[task > M']$.

其中: $\sigma, \sigma_1, \sigma_2 \in T' *$.

如引言所述,由于本文方法关注私有过程自身正确性,则可知存在一个足够良好外部环境 R ,使得 BP 中任意任务在需要接收消息时, R 总能适时提供消息.因此,结合 1), 2) 和 3) 可以推出下面三个条件成立:

- a) $\forall M; M_0[f(\sigma_1) > M \rightarrow M[f(\sigma_2) > [o]]$;
- b) $\forall M'; M_0[f(\sigma) > M' \wedge M' \geq o \rightarrow M' = o]$;
- b) $\forall task \in Tasks, \exists M, M'$ 使得 $M_0[f(\sigma) > M[task > M']$.

其中: $f(\sigma)$ 为 σ 对应的任务序列.

根据定义 12,可以推出私有过程 BP 是正确的.证毕.

推论 2 表明,最终构建的私有过程是正确的,从而避免后续语义正确性分析,提高协同业务过程正确性形式分析效率.

5 实例分析

本节以具有实际业务含义的简化供应链为研究对象,通过对该供应链中私有过程建模来阐述本文方法有效性,并与相关正确性分析方法进行实验对比,来阐述本文方法分析效率.

5.1 实例说明

协同制造中简化的供应链包含 1 个零售商、1 个制造商、 n 个外购件供应商、 n 个外购件送货商和 1 个产品送货商,其交互过程如图 3 所示.

首先,零售商与制造商就订购产品价格进行协商(步骤 1),在价格达成一致后零售商向制造商提交订单(步骤 2);其次,制造商在收到该订购请求后对订购产品的物料清单进行分析,确定订购产品由外购件 A_1 至 A_n 组成.接着同时向 A_1 供应商至 A_n 供应商发送外购配件请求(步骤 3.1.1 ~ 3.1.n.1); A_1 供应商至 A_n 供应商在收到外购请求后通知各自的送货商进行配送(步骤 3.1.2 ~ 3.1.n.2)并将其送至制造商(步骤 3.1.3 ~ 3.1.n.3);最后,制造商在收到外购件 A_1 至 A_n 后对这些配件进行组合(步骤 4);并通知产品送货商将订购产品送至零售商(步骤 5 ~ 步骤 6)

5.2 供应链私有过程建模

图3供应链中涉及的参与组织私有过程均可按本

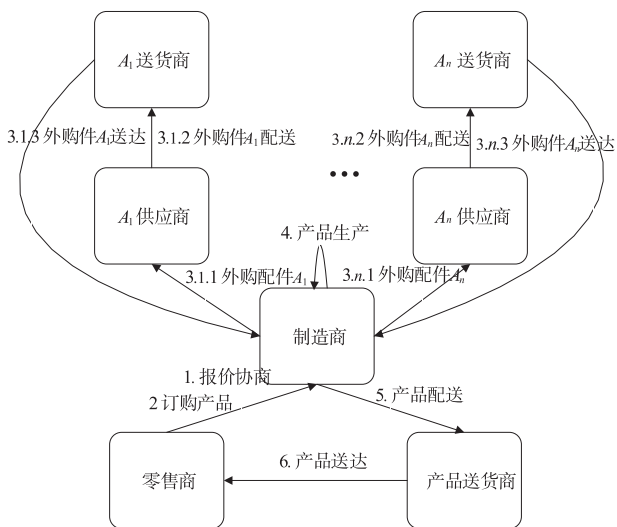


图3 供应链交互过程

文方法构建. 限于篇幅,下面着重展示如何通过精化生成制造商私有过程控制流. 如图 4 所示,以初始块为基点,组合或重复多次使用规则 1 - 规则 4 对可精化变迁求精,如报价协商变迁组合运用规则 1 和规则 4 求精等,最终可生成私有过程控制流,如图 4(e) 所示. 进一步地,通过将私有过程控制流中变迁关联任务实现私有过程建模. 由此可见,本文方法是一种有效的符合业务人员思维习惯的建模方法,可作为业务人员建模指南.

5.3 模型定量分析

以图 4(e) 所示制造商私有过程为对象,从语法正确性分析效率和语义正确性分析效率两个方面对本文方法和代表性文献[6,7]中的方法进行定量评价.

特别需要说明的是,本文关注私有过程表现为结构化流程,故可将其抽象为四种基本块. 基于这一特性,本文提出方法的基本思想是基于这四种基本块提出精

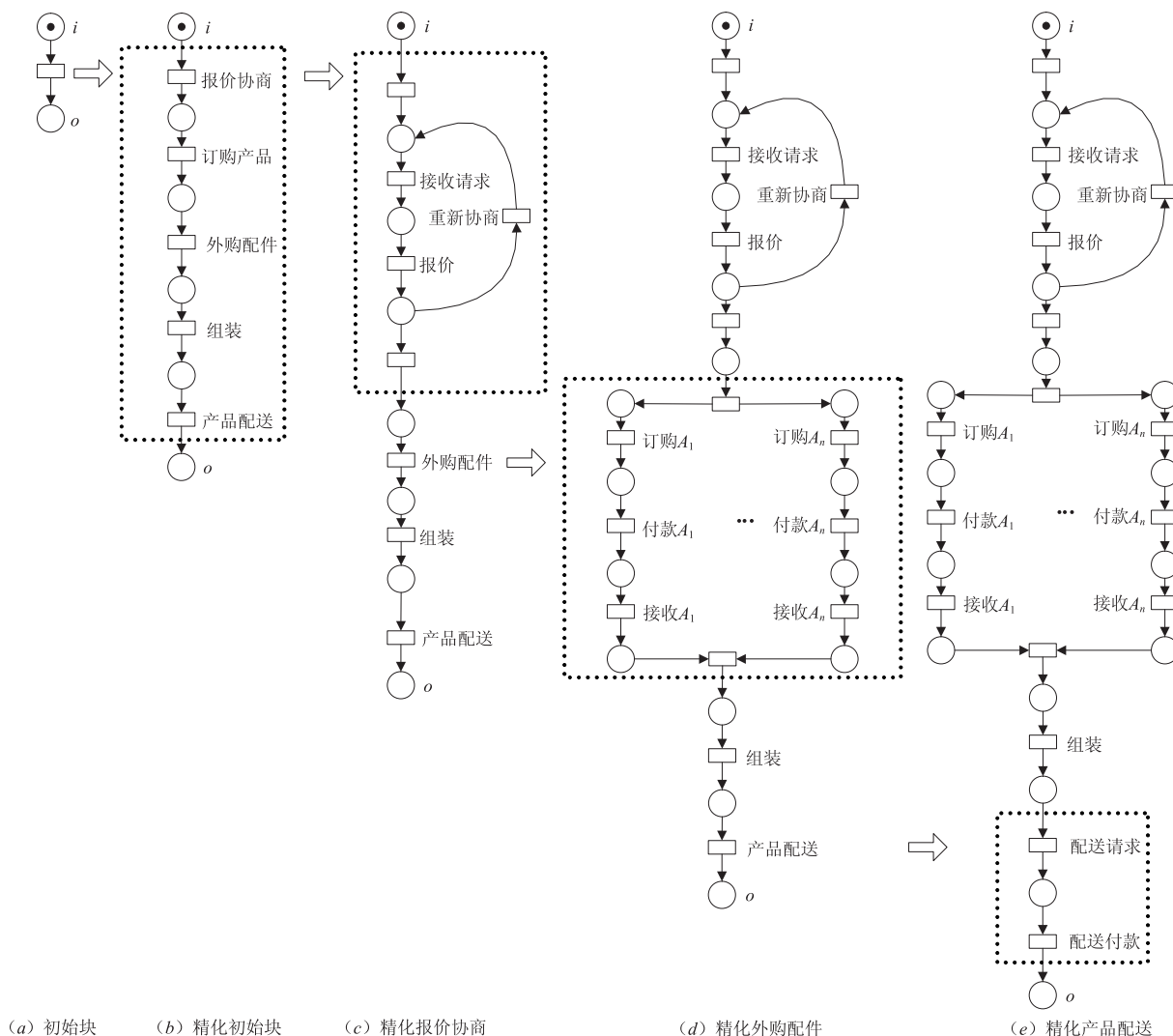


图4 制造商私有过程控制流精化过程

化规则集来构建私有过程,并在构建每一步满足正确性,从而使得最终构建私有过程具有正确性,以避免后续正确性验证.另一方面,文献[6,7]为了建模灵活性,在构建私有过程中没有考虑正确性和结构化特性,从而使得最终构建模型是非结构化的且可能存在错误.为了确保最终建立非结构化流程正确性,文献[6,7]都提出对其进行正确性验证方法.同时,文献[6,7]和本文方法正确性标准均采用合理性.因此,基于上述分析,我们认为对本文方法和文献[6,7]提出方法进行分析效率比较是合理的.

本文采用模型验证技术作为语法及语义正确性形式分析的方法.由于模型验证的效率及时间由待验证系统的状态迁移模型决定,故我们采用文献[19]中的

评估指标:可达状态(reachable state)、有效迁移(fair transition)及系统直径(system diameter)对本文方法和文献[6,7]方法的正确性分析效率进行定量评价.系统直径即搜索深度,表示从初始状态到最远可达状态之间的距离;可达状态和有效迁移的数量则反映了系统状态空间规模的大小,直接影响模型验证的效率^[19].需要指出的是,本文仅考虑可能影响形式验证效率的因素,以此作为私有过程正确性效率评价指标.如何使用模型检测技术验证其正确性已有工作^[20]可供借鉴实现,限于篇幅,在此不再赘述.

图5为本文方法和文献[6,7]在语法正确性分析效率上对比图.

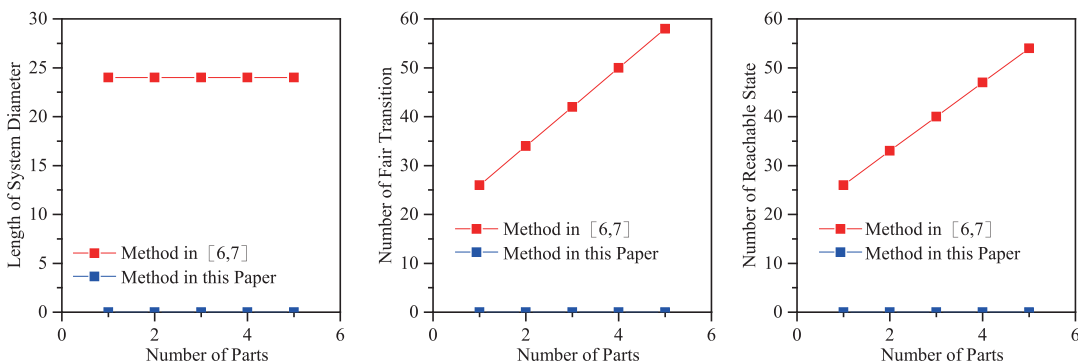


图5 语法正确性分析效率比较

从图5可以看出,随着供应商需要采购零配件数量增加(n 从1增加至5),文献[6,7]对应状态迁移模型的可达状态和有效迁移呈线性增长,系统直径保持不变.而本文方法对应可达状态、有效迁移和系统直径均为0.由此可得出如下结论:由于本文方法可在事先确保语法正确性,无需对私有过程控制流遍历,语法正

确性分析效率显著地优于文献[6,7].需要指出的是,此处的状态迁移模型是指将私有过程中变迁和库所抽象节点,流关系抽象为边生成有向图.

图6为本文方法和文献[6,7]在语义正确性分析效率上对比图.

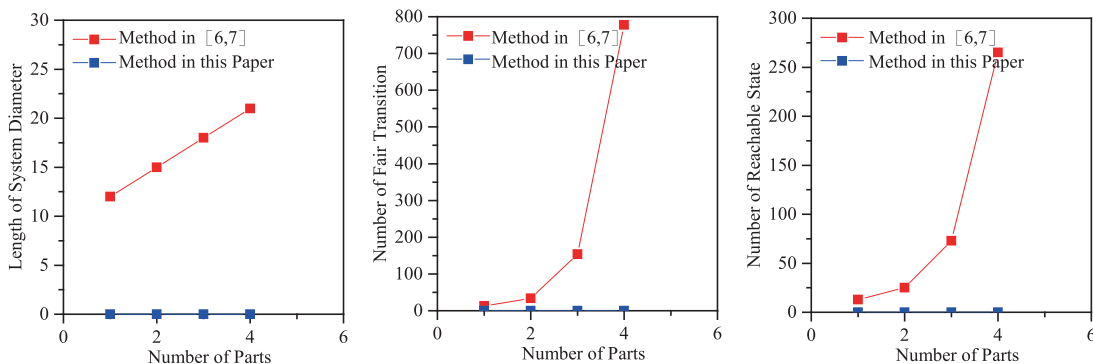


图6 语义正确性分析效率比较

从图6可以看出,随着供应商需要采购零配件数量增加(n 从1增加至5),文献[6,7]对应状态迁移模型的系统直径呈线性增长,但可达状态和有效迁移急

剧增长.特别地,当 $n=5$ 时,其状态迁移模型无法生成,导致其语义正确性无法判定.而本文方法对应可达状态、有效迁移和系统直径均为0.由此可得出如下结

论:由于本文提出方法可在事先确保语义正确性,无需生成私有过程控制流对应可达图并分析其执行序列相关属性,避免文献[6,7]中语义正确性分析效率低下甚至无法判定问题.需要指出的是,此处的状态迁移模型是指由私有过程控制流生成可达图,如何生成 Petri 网可达图已有成熟算法^[21]可供借鉴,限于篇幅,在此不再赘述.

6 总结

私有过程是构建协同业务过程基础,其结构复杂性可能会导致协同业务过程正确性分析效率低下甚至无法判定.为有效地构建合理协同业务过程,本文基于 4 种基本块提出了一种采用精化方式逐步构建协同业务过程方法.该方法可确保最终构建的私有过程具有语法和语义正确性,避免后续正确性分析,提高协同业务过程正确性形式分析效率.由于本文方法关注私有过程自身正确性,因此可忽视私有过程与外部环境交互对其正确性分析产生影响.事实上,若松弛良性外部环境这一条件,考虑跨组织环境下任务执行(即参与组织间存在交互情形),则私有过程正确性涉及组合正确性问题.如何对这一问题进行详细地分析是我们下一步工作.

参考文献

- [1] 卢亚辉,明仲,张力.业务过程协同模式的研究[J].计算机集成制造系统,2011,17(8):1570-1579.
Lu Yahui, Ming Zhong, Zhang Li. Collaboration patterns of business process [J]. Computer Integrated Manufacturer Systems, 2011, 17(8): 1570-1579. (in Chinese)
- [2] Sill A. Cloud, data, and business process standards for manufacturing [J]. IEEE Cloud Computing, 2016, 3(4): 74-80.
- [3] Yousfi A, Freitas AD, Dey A, et al. The use of ubiquitous computing for business process improvement [J]. IEEE Trans on Services Computing, 2016, 9(4): 621-632.
- [4] Li Ying, Luo Zhiling, Yin Jianwei, et al. Enterprise pattern: integrating the business process into a unified enterprise model of modern service company [J]. Enterprise Information Systems, 2017, 11(1): 1-21.
- [5] Yu Wangyang, Yan Chungang, Ding Zhijun, et al. Modeling and verification of online shopping business processes by considering malicious behavior patterns [J]. IEEE Trans on Automation Science and Engineering, 2016, 13(2): 647-662.
- [6] Zeng Qingtian, Lu Faming, Liu Cong, et al. Modeling and verification for cross-department collaborative business processes using extended Petri nets [J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2015, 45(2): 349-362.
- [7] Aalst W. Modeling and analyzing interorganizational workflows [A]. Proc of the 1st Int Conf on Application of Concurrency to System Design [C]. Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society, 1998. 262-272.
- [8] 王晶,胡昊,余萍,等.结合公共视图和对象 Petri 网的跨组织流程建模 [J]. 计算机科学与探索, 2014, 8(1): 18-27.
Wang Jing, Hu Hao, Yu Ping, et al. Public view and object Petri net based modeling of cross organizational process [J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2014, 8(1): 18-27. (in Chinese)
- [9] Aalst W, Lohmann N, Massuthe P, et al. From public views to private view correctness by design for services [A]. Proc of the 4th Int Workshop on Web Service and Formal Methods [C]. Berlin: Springer, 2007. 139-153.
- [10] Aalst W, Weske M. The P2P Approach to Interorganizational Workflows [M]. Berlin: Springer, 2013.
- [11] 莫启,代飞,朱锐,等.从私有过程提取公共过程构建业务协同的方法 [J]. 计算机研究与发展, 2017, 54(9): 1892-1908.
Mo Qi, Dai Fei, Zhu Rui, et al. An approach to extract public process from private process for building business collaboration [J]. Journal of Computer Research and Development, 2017, 54(9): 1892-1908. (in Chinese)
- [12] 葛季栋,胡海洋,周宇,等.一种基于不变量的工作流协同模型分解方法 [J]. 计算机学报, 2012, 35(10): 2169-2181.
Ge Jidong, Hu Haiyang, Zhou Yu, et al. A decomposition approach with invariant analysis for workflow coordination [J]. Chinese Journal of Computers, 2012, 35(10): 2169-2181. (in Chinese)
- [13] Aalst W. The application of Petri nets to workflow management [J]. Journal of Circuits System & Computers, 1998, 8(1): 21-66.
- [14] Eshuis R, Norta A, Kopp O, et al. Service outsourcing with process views [J]. IEEE Transactions on Services Computing, 2015, 8(1): 136-154.
- [15] 代飞,莫启,林雷蕾,等.结合 Petri 网和 Pi 演算的协同业务过程建模 [J]. 计算机科学与探索, 2015, 9(6): 692-706.
Dai Fei, Mo Qi, Lin Leilei, et al. Collaboration business process modeling based on petri nets and Pi calculus [J]. Journal of Frontiers of Computer Science & Technology, 2015, 9(6): 692-706. (in Chinese)
- [16] Zhang L, Lu Y, Xu F. Unified modelling and analysis of collaboration business process based on Petri nets and Pi calculus [J]. IET Software, 2010, 4(5): 303-317.

- [17] Aalst W. Workflow Verification: Finding control-flow errors using petri-net-based techniques[J]. Business Process Management, Models, Techniques, & Empirical Studies, 2000, 1806(2): 161 – 183.
- [18] Fdhila W, Indiono C, Rinderle-Ma S, et al. Dealing with change in process choreographies: design and implementation of propagation algorithms[J]. Information Systems, 2015, 49: 1 – 24.
- [19] 袁敏, 黄志球, 胡军. 跨组织多业务事务建模与验证方法[J]. 软件学报, 2012, 23(3): 517 – 538.
Yuan Min, Huang Zhiqiu, Hu Jun. Modeling and verification of cross-organizational multi-business transactions [J]. Journal of Software, 2012, 23(3): 517 – 538. (in Chinese)
- [20] 张广泉, 戎玫, 王昇. 时间感知 Web 服务交互行为建模与失配检测方法研究[J]. 电子学报, 2011, 39(11): 2568 – 2575.
Zhang Guangquan, Rong Mei, Wang Sheng. Research on Interaction modeling and mismatch checking of time-aware web services [J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(11): 2568 – 2575. (in Chinese)
- [21] 袁崇义. Petri 网原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
Yuan Chongyi. The Principle and Application of Petri Nets [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2005. (in Chinese)
- [22] Lohmann N, Kleine J. Fully-automatic translation of open workflow net models into simple abstract BPEL processes [J]. LNI, 2008, 4(3): 57 – 72.
- [23] Polyvyanyy A, Garcia-Banuelos L, Dumas M. Structuring acyclic process models[J]. Information Systems, 2010, 37(6): 518 – 538.

作者简介



莫 启 男, 1986 年生于湖南岳阳. 云南大学软件学院讲师. 研究方向为业务过程管理.
E-mail: moqiyueyang@163.com



笪 建(通信作者) 男, 1979 年生于江苏淮安. 云南大学硕士, 淮安开放大学信息工程系助教, 研究方向为业务过程管理.
E-mail: 602234341@qq.com