

BPMN 2.0 过程模型的语义和分析

赵莹¹ 赵川¹ 黄蕊² 代飞²

(云南电力调度控制中心 昆明 650011)¹(西南林业大学大数据与智能工程学院 昆明 650224)²

摘要 BPMN 2.0 已成为了建模业务过程事实上的标准。BPMN 2.0 过程模型中建模元素的混用会产生控制流方面的语义错误。首先,建立了 BPMN 2.0 过程模型到工作流网的映射,并使用 Petri 网来形式定义过程模型的语义;其次,借助 Petri 网的分析技术,使用这种定义的语义对 BPMN 2.0 过程模型进行了合理性分析。实验结果表明,这种形式化可以识别 BPMN 2.0 过程模型中的语义错误。

关键词 业务过程,语义定义,语义分析,BPMN 2.0,工作流网

中图法分类号 TP311 **文献标识码** A

Semantics and Analysis of BPMN 2.0 Process Models

ZHAO Ying¹ ZHAO Chuan¹ HUANG Bi² DAI Fei²

(Yunnan Power Dispatching and Control Center, Kunming 650011, China)¹

(School of Big Data and Intelligence Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)²

Abstract The business process modelling notation 2.0 (BPMN 2.0) process is a defactor standard for capturing business processes. The mix of constructs found in BPMN 2.0 process makes it possible to obtain models with a range of semantic errors, including deadlocks and livelocks. Firstly, this paper defined a formal semantics of BPMN 2.0 process models in terms of a mapping to WF-nets. Secondly, this defined semantics were used to analyze the soundness of BPMN 2.0 process models, using analysis techniques of Petri nets. Finally, the experimental results showed that this formalization could identify the semantic errors of BPMN 2.0 process models.

Keywords Business processes, Semantic definition, Semantic analysis, BPMN 2.0, Workflow net

业务流程建模标注 2.0 (Business Process Modeling Notation 2.0, BPMN 2.0)^[1] 是业务流程管理领域建模业务过程事实上的工业标准。BPMN 2.0 存在 3 种基本的端到端的模型:过程 (process) 或编制 (orchestration)、编排 (choreography) 和协作 (collaboration)。建模者可以使用过程来对组织内部的业务过程进行建模,还可以使用编排或协作来对组织间业务过程的交互进行建模。

过程标注继承了许多业务过程建模符号中的元素,如:XML 过程定义语义 (XML Process Definition Language, XPDL)^[2]、统一建模语言中的活动图 (Activity Diagrams of the Unified Modeling Notation)^[3]。BPMN 2.0 过程的理念是业务过程模型由活动节点和控制节点组成,活动节点用于描述事件或任务,控制节点用于描述活动间的控制流。

同其他面向图的过程建模语言一样,使用 BPMN 2.0 过程建模产生的过程模型容易出现一系列的语义错误,如死锁、活锁^[4]。但是,对业务过程模型的语义分析受限于 BPMN 2.0 过程缺乏形式化的语义和分析技术。

针对上述问题,本文关注 BPMN 2.0 过程的语义定义和语义分析,主要贡献如下:

(1) 通过建立 BPMN 2.0 过程到工作流网 (WF-net) 的映

射,使用 Petri 网来准确定义 BPMN 2.0 过程的语义。

(2) 使用 Petri 网的分析技术,对 BPMN 2.0 过程模型进行了语义分析。

本文第 1 节介绍 BPMN 2.0 过程和 Petri 网的基础知识;第 2 节是相关工作;第 3 节讨论 BPMN 2.0 过程到工作流网的映射;第 4 节对 BPMN 2.0 过程模型进行语义分析;第 5 节是实验;最后总结全文。

1 相关基础

本节主要介绍 BPMN 2.0 过程和 Petri 网的相关知识。

1.1 BPMN 2.0 过程

在 BPMN 2.0 中,过程描述了组织中活动的序列。本质上,由过程定义的过程模型是流元素的图,这些流元素是活动 (activities)、事件 (events)、网关 (gateways) 和序列流 (sequence flows)。本文关注 BPMN 2.0 过程的核心子集,如图 1 所示。

活动是业务过程中需被执行的工作。活动可以是原子式的或非原子式的,分为任务 (task) 和子过程 (sub process)。进一步,任务又可以分为 7 种类型:服务 (service)、接收 (receive)、发送 (send)、用户 (user)、脚本 (script)、手工 (manual)

本文受国家自然科学基金项目 (61462095, 61702442), 云南省自然科学基金项目 (2016FB102) 资助。

赵莹 (1983-), 女, 高级工程师, 主要研究方向为电力调度自动化与信息化; 赵川 (1982-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力调度自动化与信息化; 黄蕊 (1982-), 女, 硕士, 讲师, 主要研究方向为业务过程和软件工程, E-mail: 125149146@qq.com (通信作者); 代飞 (1982-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为业务过程和软件工程。

和参照(reference)。子过程是复合活动,被定义为其他活动的序列。子过程可以是折叠视图的形式,以隐藏内部细节;也可以是展开视图的形式,以显示内部细节。图 1 所示的是折叠形式的子过程。

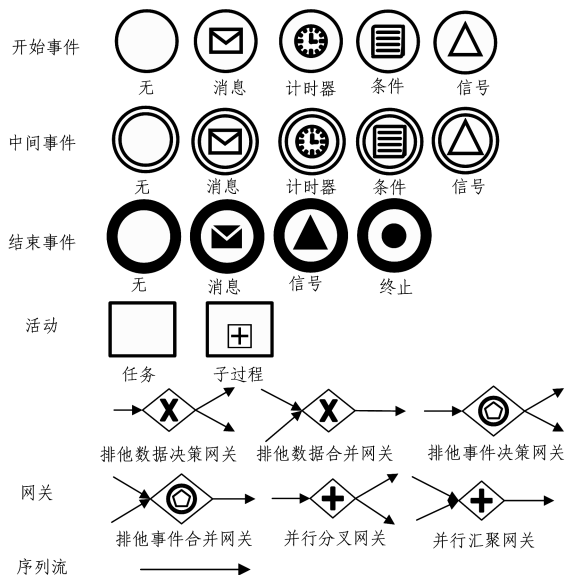


图 1 BPMN 2.0 过程的核心子集

事件(event)是在过程中发生的事情,包含 3 种类型:开始事件(start event)、结束事件(end event)和中间事件(intermediate event),分别用以指示过程的开始、过程的结束和过程在开始至结束间的某个时刻发生了什么。其中,开始事件可分为 5 种类型:无(none)、消息(message)、计时器(timer)、条件(conditional)和信号(signal);结束事件可分为 4 种类型:无(none)、消息(message)、信号(signal)和终止(terminate);中间事件可分为 5 种类型:无(none)、消息(message)、计时器(timer)、条件(conditional)和信号(signal)。

网关用于控制过程中序列流的收敛(converge)和发散(diverge),包含 3 种类型:排他数据网关(data-based exclusive gateway)、排他事件网关(event-based exclusive gateway)和并行网关(parallel gateway)。其中,排他数据(事件)网关又包含排他数据(事件)决策网关(data/event-based XOR decision gateway)和排他数据(事件)合并网关(data/event-based XOR merge gateway)。排他数据(事件)决策网关用于从互斥的流中选择一个流;排他数据(事件)合并网关用于将一组互斥的流合成为一个流。并行网关又包含并行分叉网关(parallel fork gateway)和并行汇聚网关(parallel join gateway)。并行分叉网关用于产生并发流,并行汇聚网关用于同步并发流。

序列流用于连接流对象,表示编排中流对象间的控制流关系。

1.2 Petri 网

因为 Petri 网具有直观的图形化表示、坚实的数学基础和分析技术,在业务过程管理领域,Petri 网常被用来建模、验证和分析业务过程^[5]。

Petri 网是一个二分有向图(directed bipartite graph),有两类节点类型:库所和变迁,这些节点间通过有向弧相连,同类型的库所(变迁)间不允许相连。通常,库所用圆圈表示,变迁用矩形方框表示。

定义 1(Petri 网) Petri 网是一个三元组 $N=(P, T, F)$, 其中:

- (1) P 是有限库所的集合;
- (2) T 是有限变迁的集合 $P \cap T = \emptyset$;
- (3) $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ 是弧的集合(流关系);

定义 2(前集和后集) 令 $N=(P, T, F)$ 是一个 Petri 网,若 $x \in P \cup T$, $\cdot x = \{y \mid (y, x) \in F \wedge y \in P \cup T\}$, 则称 $\cdot x$ 为 x 的前集;若 $x \in P \cup T$, $x \cdot = \{y \mid (x, y) \in F \wedge y \in P \cup T\}$, 则称 $x \cdot$ 为 x 的后集。

定义 3(Petri 网的语义) 令 $N=(P, T, F)$ 是一个 Petri 网,有:

- (1) 库所中包含 0 个或者多个托肯,托肯用小黑点表示。
- (2) $M: P \rightarrow Z$ 是 N 的一个状态,也称为标识(Marking),表示库所中托肯的分布。其中, Z 是非负整数的集合, $M(p)$ 表示库所 p 中的托肯数, Ω 表示 N 上的所有状态。
- (3) 变迁 $t \in T$ 在状态 $M \in \Omega$ 是使能的(enabled), 当且仅当 $\forall p \in \cdot t: M(p) \geq 1$ 。
- (4) 一个使能的变迁 t 可以发生点火。如果发生点火,那么 t 从每个输入库所 $p \in \cdot t$ 中消耗一个托肯,并在每个输出库所 $p \in t \cdot$ 中产生一个托肯。

(5) $M_1 \xrightarrow{t} M_2$: 变迁 t 在状态 M_1 下是使能的且在 M_1 下发生点火得到状态 M_2 。

(6) $M_1 \xrightarrow{\sigma} M_n$: 点火变迁序列在 $\sigma = t_0 t_1 \dots t_{n-1}$ 使得状态 M_1 通过一组中间状态 M_2, \dots, M_{n-1} 到达状态 M_n , 即 $M_1 \xrightarrow{t_1} M_2 \xrightarrow{t_2} \dots \xrightarrow{t_{n-1}} M_n$ 。

(7) 状态 M_n 称作从 M_1 可达, 即 $M_1 \xrightarrow{*} M_n$, 当且仅当存在一个点火序列 σ 使得 $M_1 \xrightarrow{\sigma} M_n$ 。

(8) 网系统 $\Sigma = (N, M_0)$ 是一个二元组。其中, N 是 Petri 网, M_0 为 N 的初始状态。

工作流网是 Petri 网的一类子网,要求只有一个源库所和一个汇聚库所,且每个变迁都在从源库所到汇聚库所的路径上。

定义 4(工作流网) Petri 网 $N=(P, T, F)$ 是一个工作流网(WF-net), 当且仅当:

- (1) 存在一个源库所 $i \in P$, 使得 $\cdot i = \emptyset$;
- (2) 存在一个汇聚库所 $o \in P$, 使得 $o \cdot = \emptyset$;
- (3) 每一个节点 $x \in P \cup T$ 都位于从 i 到 o 的一条路径上。

定义 5(合理性)^[6] 设 $N=(P, T, F)$ 是一个工作流网,该工作流网是合理的当且仅当:

- (1) 对于每一个从状态 i 可达的状态 M , 存在一个实施序列, 从状态 M 通往状态 o , 形式化表示为: $\forall M (i \xrightarrow{*} M) \Rightarrow (M \xrightarrow{*} o)$;
- (2) 状态 o 是从状态 i 可达的唯一最终状态, 且结束时其中会有一个标记, 形式化表示为: $\forall M (i \xrightarrow{*} M \wedge M \geq o) \Rightarrow (M = o)$;
- (3) 无死变迁, $\forall t \in T \exists M, M' i \xrightarrow{*} M \xrightarrow{t} M'$ 。

2 相关工作

文献[4]使用 Petri 网形式定义了 BPMN 1.0 编制过程的

语义,建立了编制过程中的建模元素到 Petri 网片段间的映射关系,并使用 Petri 网的分析技术对编制过程进行了语义分析。

文献[7]使用图重写规则(graph rewriting rule)形式定义了 BPMN 2.0 编制过程的执行语义。

文献[8-9]使用进程代数 CSP 形式定义了 BPMN 1.0 编制过程的语义。其优势在于建模者可以使用形式语义检测不同抽象层次业务过程模型间的一致性。具体而言,一方面,建模者可以对业务过程模型领域相关的时序性质进行检测,例如订单提交后,一个响应必须在 24 小时内发送到客户端;另一方面,建模者可以对业务过程模型的通用性质进行检测,例如无死锁(deadlock-freeness)和正常结束(proper completion)。

文献[10]使用 YAWL 定义了 BPMN 1.0 编制过程语义,建立了 BPMN 元素到 YAWL 元素的映射关系,并使用 YAWL 的分析技术对业务过程模型的合理性和活性进行了检测。

文献[11]使用进程代数 COWS(Calculus of Orchestration of Web Services)形式定义了 BPMN 1.0 编制过程的语义。基于形式语义,建模者不仅可以对业务过程模型进行合理性检测,还可以对业务过程模型(只要业务流程模型具有模拟信息)进行定量模拟。

文献[12]使用线性时序逻辑 LTL(Linear Temporal Logic)形式定义了 BPMN 1.2 编制过程的执行语义。一方面,在 LTL 框架下,建模者可以对业务过程模型的时序性质进行检测;另一方面,还可以为 BPMN 1.2 标准提供形式的语义规约。

上述研究成果对 BPMN 过程的语义定义和语义分析具有重要的指导作用和借鉴意义。本文与上述工作的最大不同在于:1)上述工作大多使用进程代数、YAWL 和线性时序逻辑,来定义 BPMN 过程模型的语义,而本文关注的是使用 Petri 网定义 BPMN 2.0 过程模型的语义;2)与本文工作最为相似的是文献[4]的工作,与之相比,本文在定义过程模型的语义时,明确给出了映射过程。

3 BPMN 2.0 过程到工作流网的映射

本节将讨论 BPMN 2.0 过程到工作流网的映射,以达到使用 Petri 网定义业务过程的语义的目的。

采用的基本块是具有入口和出口的工作流网片段。

3.1 基本块

定义 6(基本块) 令 $WF = (P, T, F)$ 是一个工作流网,顺序块、选择决策块、选择合并块、并发分叉块和并发汇聚块称为基本块,基本块是一个五元组 $b = (P_b, T_b, F_b, A_e, A_x)$,其中:

(1) P_b, T_b, F_b 分别称为库所集、变迁集和弧集,且有 $P_b \subseteq P, T_b \subseteq T, F_b \subseteq F$ 。

(2) $A_e, A_x \subseteq P_b$ 分别为基本块的入口和出口。

(3) 顺序块如图 2(a)所示,其中, $P_b = \{p_1, p_2\}, T_b = \{t_1\}, F_b = \{(p_1, t_1), (t_1, p_2)\}, A_e = \{p_1\}, A_x = \{p_2\}$ 。

(4) 选择决策块如图 2(b)所示,其中, $P_b = \{p_1, p_2, p_3\}, T_b = \{t_1, t_2\}, F_b = \{(p_1, t_1), (p_1, t_2), (t_1, p_2), (t_2, p_3)\}, A_e =$

$\{p_1\}, A_x = \{p_2, p_3\}$ 。

(5) 选择合并块如图 2(c)所示,其中, $P_b = \{p_1, p_2, p_3\}, T_b = \{t_1, t_2\}, F_b = \{(p_1, t_1), (p_2, t_2), (t_1, p_3), (t_2, p_3)\}, A_e = \{p_1, p_2\}, A_x = \{p_3\}$ 。

(6) 并发分叉块如图 2(d)所示,其中, $P_b = \{p_1, p_2, p_3\}, T_b = \{t_1\}, F_b = \{(p_1, t_1), (t_1, p_2), (t_1, p_3)\}, A_e = \{p_1\}, A_x = \{p_2, p_3\}$ 。

(7) 并发汇聚块如图 2(e)所示,其中, $P_b = \{p_1, p_2, p_3\}, T_b = \{t_1\}, F_b = \{(p_1, t_1), (p_2, t_1), (t_1, p_3)\}, A_e = \{p_1, p_2\}, A_x = \{p_3\}$ 。

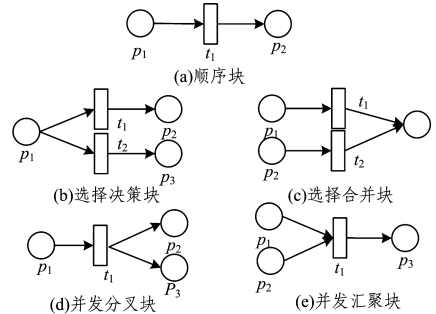


图 2 基本块

3.2 事件

开始事件、结束事件和中间事件的映射规则如图 3 所示。事件都被映射为工作流网中的顺序块。需要注意的是:1)映射过程不区分开始事件的类型、结束事件的类型和中间事件的类型;2)虚线圆圈所示的库所为连接库所,用于连接基本块以组成工作流网;3)开始事件、结束事件和中间事件的映射规则的区别在于连接库所的数量和位置。开始事件映射产生 1 个连接库所,且该库所在变迁的右边;结束事件映射产生 1 个连接库所,且该库所在变迁的左边;中间事件映射产生 2 个连接库所,这 2 个库所位于变迁的左边和右边。

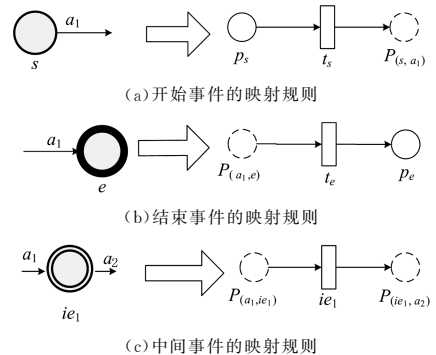


图 3 事件的映射规则

3.3 活动和子过程

活动和子过程的映射规则如图 4 所示。活动被映射为工作流网中的顺序块;子过程被映射为工作流网片段。需要注意的是:1)活动的映射规则和中间事件的映射规则一样。2)图 4(b)描述了将一个具有单一开始事件和单一结束事件的子过程映射为工作流网网片段的映射过程。在该工作流网网片段中,变迁 t_s 用于表示子过程的开始,变迁 t_e 用于表示子过程的结束,变迁 t_1 用于表示子过程中的任务 t_1 ,变迁 t_2 用于表示子过程中的任务 t_2 。3)子过程可以具有多个开始事件和多个结束事件,但必须保持父过程和子过程间的流一致性。

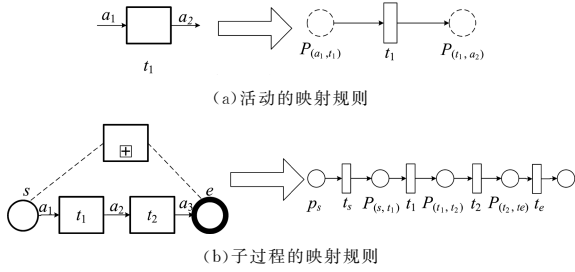


图 4 活动和子过程的映射规则

3.4 网关

网关的映射规则如图 5 所示。其中,图 5(a)所示的映射规则用于将排他数据决策网关转换为 workflows 的选择决策块;图 5(b)所示的映射规则用于将排他数据合并网关转换为 workflows 中的选择合并块;图 5(c)所示的映射规则用于将排他事件决策网关转换为 workflows 的选择决策块;图 5(d)所示的映射规则用于排他事件合并网关转换为 workflows 中的选择合并块;图 5(e)所示的映射规则用于并发分叉网关转换为 workflows 中的并发分叉块;图 5(f)所示的映射规则用于将并发汇聚网关转换为 workflows 中的并发汇聚块。

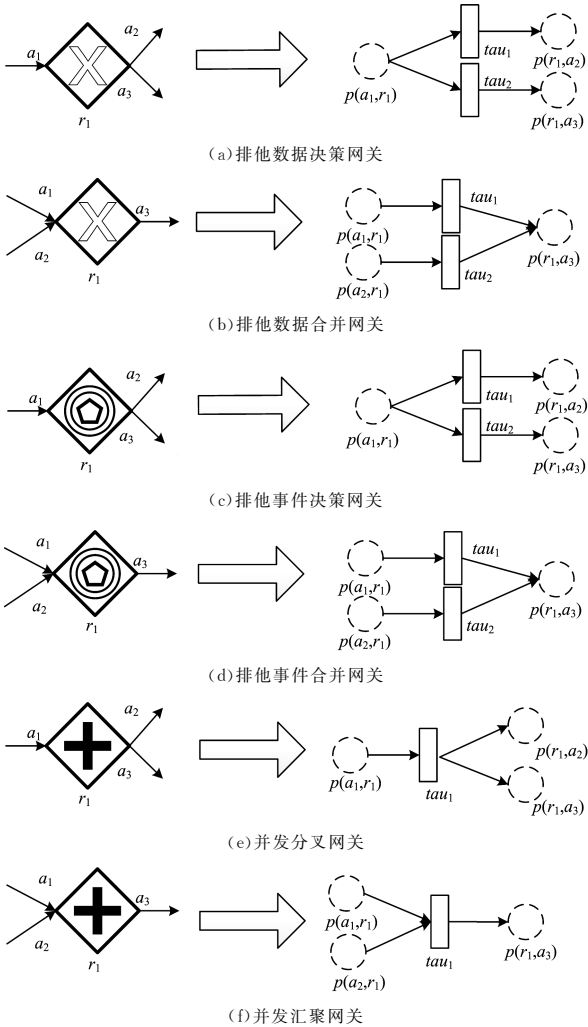


图 5 网关的映射规则

需要说明的是:1)映射过程不区分排他数据网关和排他事件网关。因此,在图 5 中,图 5(a)所示的映射规则和图 5(c)所示的映射规则映射产生的基本块一样;图 5(b)所示的映射规则和图 5(d)所示的映射规则映射产生的基本块也一样。

2)网关映射产生的变迁 τ_{au} , 可视为不可见变迁。

3.5 初始状态

BPMN 2.0 过程模型的初始状态用开始事件表示;工作流的初始状态用库所中的托肯表示。对应地,映射过程可在开始事件映射产生的库所中添加 1 个托肯,用以表示工作流的初始状态。但是,BPMN 2.0 过程模型允许使用子过程,而子过程也具有开始事件。因此,需要映射过程区分父过程的开始事件和子过程的开始事件。

针对上述问题,配置初始状态的基本思想是:在顶层过程中的每个开始事件对应的库所中添加 1 个托肯,而在子过程中每个开始事件对应的库所中不添加托肯,如图 6 所示。

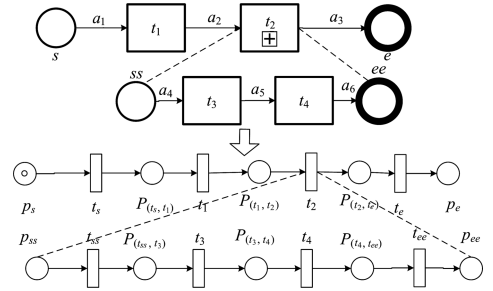


图 6 配置工作流的初始标识

3.6 映射过程

基于 3.2—3.5 节提出的映射规则,将 BPMN 2.0 过程模型映射为 workflow 网的过程包含 3 个步骤:

第 1 步 划分。将 BPMN 2.0 过程模型划分为图 3—图 5 中箭头左边所示的过程模型片段。

第 2 步 映射转换。根据图 3—图 6 所示的映射规则,将这些过程模型片段映射为对应的基本块。

第 3 步 组合。使用库所融合技术,将这些映射产生的基本块组合为 workflow 网。这里指的库所融合技术具体是指,某个基本块中的库所 $p(? , y)$ 与另一个基本块中的库所 $p(y, ?)$ 具有相同的变迁名或库所名,则两个库所可以融合为一个库所 $p(? , ?)$ 。其中,? 表示占位符。我们称库所 $p(? , y)$ 为前融合库所, $p(y, ?)$ 为后融合库所。

以图 7—图 9 为例对划分、映射转换和组成进行说明。

图 7 将一个 BPMN 2.0 过程模型划分为 6 个过程模型片段:1 个开始事件片段、1 个排他数据决策网关片段、2 个活动片段、1 个排他数据合并网关片段和 1 个结束事件片段。

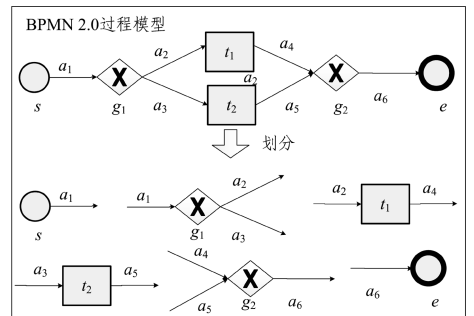


图 7 BPMN 2.0 过程模型的划分

图 8 将图 7 产生的 6 个过程模型片段映射为对应的基本块。其中,开始事件片段映射为顺序块 b_1 ;排他数据决策网关片段映射为选择决策块 b_2 ;2 个活动片段分别映射为顺序块 b_3 和 b_4 ;排他数据合并网关片段映射为选择合并块 b_5 ;结

束事件片段映射为顺序块 b_6 。

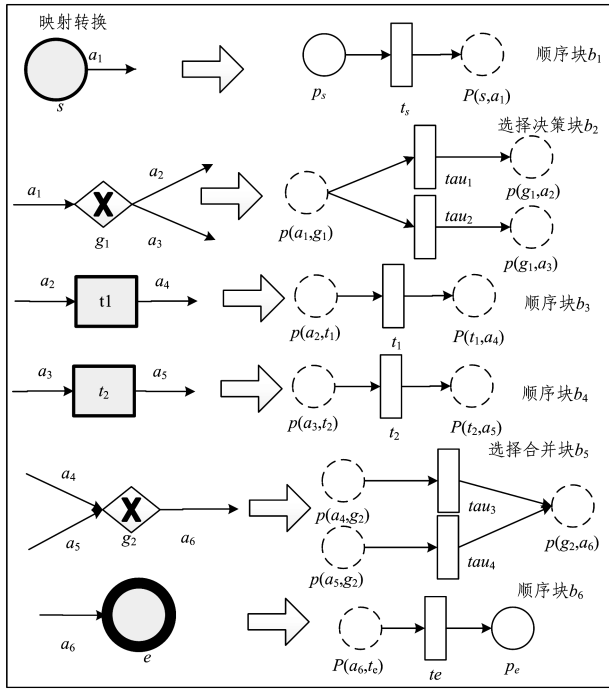


图8 过程模型片段的映射转换

通过库所融合技术将图8所示的基本块 $b_1 - b_6$ 组合成工作流网,如图9所示。例如,在顺序块 b_1 中的库所 $p(t_s, a_1)$ 和选择决策块 b_2 中的库所 $p(a_1, g_1)$ 具有相关的变名 a_1 ,则这两个库所可以融合为工作流网中的一个库所 $p(t_s, g_1)$,即通过库所融合,将顺序块 b_1 和选择决策块 b_2 进行了组合。

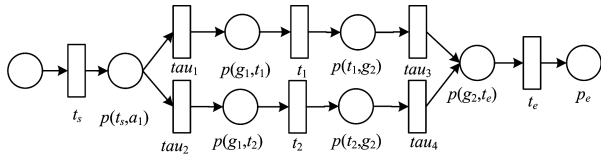


图9 映射产生的工作流网

4 BPMN 2.0 过程模型的分析

合理性是业务过程应满足正确性的最低要求^[5]。本文采用合理性定义,从控制流角度,对 BPMN 2.0 过程模型进行正确性分析的基本思路为:针对映射产生的工作流网,使用 Petri 网的开源分析工具 WoPeD(Workflow Petri Net Designer)^[13]对工作流网进行合理性分析。

在对映射产生的工作流网进行合理性分析的过程中,我们发现 BPMN 2.0 过程模型中主要存在 3 类问题:1)路由活动不匹配,如图 10 所示;2)存在死活动,如图 11 所示;3)存在死锁,如图 12 所示。

(1)路由活动不匹配。在图 10(a)所示的业务过程中并发分叉网关 g_1 和排他数据合并网关 g_2 不匹配,这使得对应生成的工作流网(见图 10(b))违反了合理性定义的条件 2。

(2)存在死活动。在图 11(a)所示的业务过程中活动 t_2 和 t_3 是死活动,这使得对应生成的工作流网(见图 11(b))违反了合理性定义的条件 3。

(3)存在死锁。在图 12(a)所示的业务过程中存在死锁,活动 tau_3 无法执行,这使得对应生成的工作流网(见图 12

(b))违反了合理性定义的条件 1。

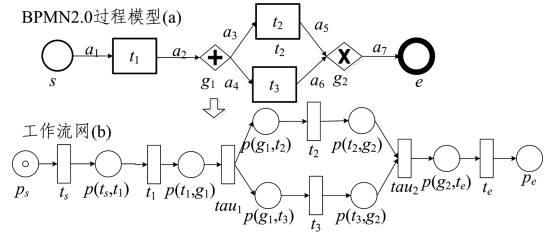


图10 路由活动不匹配的过程模型及其对应的工作流网

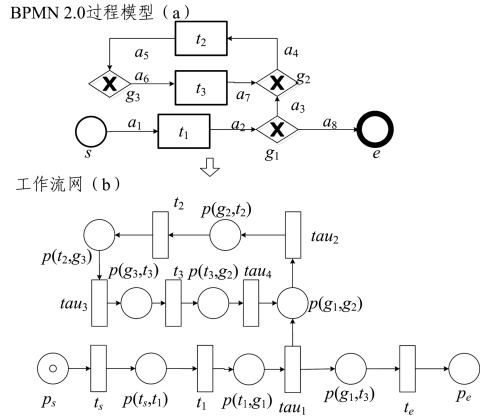


图11 带死活动的过程模型及其对应的工作流网

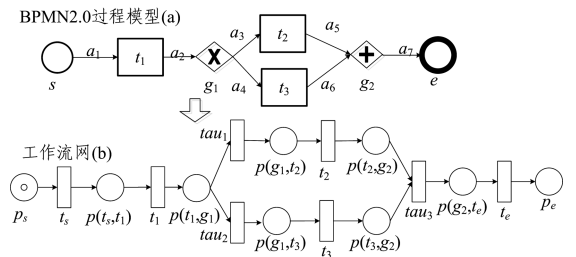


图12 带死锁的过程模型及其对应的工作流网

5 实验

本文使用 Java 语言自行开发了一个工具,即 Process2WFNet,用于将 BPMN 2.0 过程模型转换为工作流网。该工具的体系结构如图 13 所示。其中,partitioning 用于将 BPMN 2.0 过程模型划分为过程模型片段;mapping 用于根据过程模型片段映射为对应的基本块;composing 用于将基本块组合为工作流网。

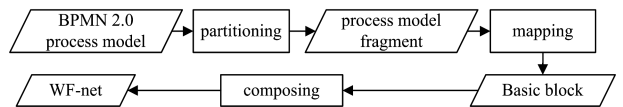


图13 工具的体系结构

本文将使用 BPM AI 过程模型库^[14](<http://bpt.hpi.uni-potsdam.de/BPMAcademicInitiative>)作为实验评估过程模型的数据源。BPM AI 是由工业界和学术界合作创建的用于科学研究的流程建模平台,合作组织的研究人员和学生使用平台提供的在线建模工具创建了大量的真实过程模型。通过将相似和相同的过程模型过滤掉并将无开始事件或结束事件的过程模型过滤掉,最终选取了 100 个过程模型。使用 Process2WFNet 对这些过程模型进行映射转换,再使用 WoPeD 对这些转换生成的工作流网进行合理性分析。合理

性分析的结果如图 14 所示,其中:

- (1)有 3 个过程模型存在死活动;
- (2)有 4 个过程模型存在死锁或活锁;
- (3)有 2 个过程模型存在路由活动不匹配;
- (4)有 91 个过程模型是合理的。

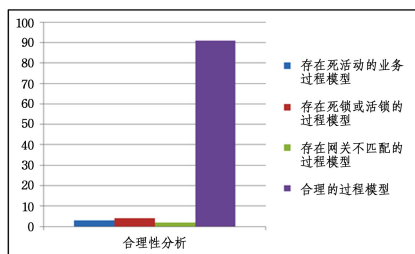


图 14 合理性分析的结果

结束语 BPMN 2.0 过程缺少形式化的语义和分析技术,使得建模者无法确保过程模型的正确性。首先,通过建立 BPMN 2.0 过程到工作流网的映射,使用 Petri 网准确定义过程模型的语义;其次,借助 Petri 网的分析技术,使用这种定义的语义,对 BPMN 2.0 过程模型进行了合理性分析;最后,通过实验表明,这种形式化可以识别 BPMN 2.0 过程模型中存在的语义错误。

本文未定义相容网关、链接事件、补偿事件、错误事件等元素的语义,这是下一步工作的重点。

参 考 文 献

- [1] OMG. Business Process Model and Notation (BPMN) Version 2.0[EB/OL]. <http://www.omg.org/spec/BPMN/2.0>.
- [2] PALMER N. XML Process Definition Language[M]. Springer US,2009.
- [3] WOHEP P, AALST W M P V D, DUMAS M, et al. Pattern-Based Analysis of the Control-Flow Perspective of UML Activity Diagrams[M]// Conceptual Modeling — ER 2005. Springer Berlin Heidelberg,2005:63-78.
- [4] DIJKMAN R M, DUMAS M, OUYANG C. Formal semantics

and analysis of BPMN process models using Petri nets[J]. Information & Software Technology,2007,50(12):1281-1294.

- [5] JIN T, WANG J, YANG Y, et al. Refactor Business Process Models with Maximized Parallelism[J]. IEEE Transactions on Services Computing,2017,9(3):456-468.
- [6] AALST W. The application of Petri nets to workflow management[J]. Journal of Circuits System & Computers,1998,8(1):21-66.
- [7] DIJKMAN R, GORP P V. BPMN 2.0 Execution Semantics Formalized as Graph Rewrite Rules[J]. Lecture Notes in Business Information Processing,2010,67:16-30.
- [8] WONG P Y H, GIBBONS J. A Process Semantics for BPMN[C]// Proceedings of the International Conference on Formal Engineering Methods. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2008:355-374.
- [9] WONG P Y H, GIBBONS J. Formalisations and applications of BPMN[J]. Science of Computer Programming, 2011, 76(8):633-650.
- [10] YE J H, SUN S X, SONG W, et al. Formal Semantics of BPMN Process Models Using YAWL[C]// Proceedings of the International Symposium on Intelligent Information Technology Application. Washington, D. C. .IEEE,2008:70-74.
- [11] PRANDI D, QUAGLIA P, ZANNONE N. Formal Analysis of BPMN Via a Translation into COWS[C]// Proceedings the 10th International Conference on Coordination Models and Languages. Berlin, Germany: Springer-Verlag,2008:249-263.
- [12] LAM V S W. A Precise Execution Semantics for BPMN[J]. Iaeng International Journal of Computer Science,2012,39(1):20-33.
- [13] ECKLEDERA, FREYTAG T. WoPeD2.0 goes BPEL 2.0[C]// German Workshop on Algorithms and TOOLS for Petri Nets, Algorithmen Und Werkzeuge Für Petrinetze(Awpn 2008). Rostock, Germany,2008:75-80.
- [14] DUMAS M. 过程感知的信息系统[M]. 王建民,等译.北京:清华大学出版社,2009.

(上接第 538 页)

- [8] JAIN-ZHI O, PEI-HSIN W, MING-SYAN C. Experimental results on a constraint based sequential pattern mining for telecommunication alarm data [C]// Proceedings of the Second International Conference on Web Information Systems Engineering. IEEE,2001:186-193.
- [9] GARCIA R, LLANA L, MALAGON C, et al. Event Prediction in Network Monitoring Systems: Performing Sequential Pattern Mining in Osmius Monitoring Tool [M]// Advances in Data Mining: Applications and Theoretical Aspects. Berlin: Springer-Verlag Berlin,2010:632-642.
- [10] WANG Z, ZHANG B, LI G. A Topological Constraints Based Sequential Data Mining Approach on Telecom Networks Alarm Data [C]// International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization,2009(CSO 2009). 2009:750-754.
- [11] MEIRA D M, NOVEMBER B H. A Model For Alarm Correlation in Telecommunications Networks [J]. Federal University of Minas Gerais,1998.

- [12] EIRA D M, NOGUEIRA J M S. Modelling a telecommunication network for fault management applications [C]// Network Operations and Management Symposium,1998(NOMS 98). IEEE. IEEE,1998:723-732.
- [13] JAUDET M, HUSSAIN A, SHARIF K. Temporal classification for fault-prediction in a real-world telecommunications network [C]// Proceedings of the IEEE Symposium on Emerging Technologies,2005. IEEE,2005:209-214.
- [14] ZAKI M J, LESH N, OGIHARA M. Predicting failures in event sequences [M]// Data Mining for Scientific and Engineering Applications. Springer,2001:515-539.
- [15] SALFNER F, LENK M, MALEK M. A survey of online failure prediction methods [J]. Acm Computing Surveys,2010,42(3):10.
- [16] ZHONG J, GUO W, WANG Z. Study on network failure prediction based on alarm logs [C]// 2016 3rd MEC International Conference on Big Data and Smart City (ICBDSC). 2016:1-7.