

# 跨组织应急业务过程挖掘

谭文安<sup>1,2</sup>, 吴亚锋<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学计算机科学与技术学院, 南京 211106;

2. 上海第二工业大学计算机与信息工程学院, 上海 201209)

**摘要:** 对跨组织应急业务过程案例进行分析, 给出了跨组织应急业务过程任务的形式化定义及其协作关系的定义, 根据跨组织应急业务过程任务间的协作关系定义不同组织间的协同模式; 然后, 基于扩展消息库所的 Petri 网模型来描述跨组织应急业务过程模型; 给出挖掘组织内业务过程模型和组织间协同过程模型的挖掘算法, 最后通过模型集成算法将不同组织的内部业务过程模型和组织间协同过程模型进行合并, 得到跨组织全局应急业务过程模型, 使用 PIPE 对模型进行正确性验证。

**关键词:** 跨组织; 应急; 协同模式; Petri 网; 业务过程

**中图分类号:** TP 391

**文献标志码:** A

## 0 引言

涉及公共安全和公共卫⊥生的突发事件应急救援需要多个组织部门共同完成, 应急预案是这些组织部门应对突发事件的行动指南。然而, 由于具体情况不同, 应急救援组织部门执行的实际任务和应急预案规定的执行任务可能存在不同。通过挖掘跨组织应急救援执行过程, 可发现应急预案的不足, 对应急救援执行过程进行改进, 从而提高应急救援执行效率, 加强组织间协同合作, 减少突发灾害事件造成的公共财产损失。

各类企业信息系统 (IS) 得到了广泛应用, 大量信息以事件日志的形式保留在企业数据库系统中<sup>[1]</sup>。过程挖掘技术能够从 IS 产生的事件日志中抽取信息, 为各类应用的过程发现、监测和改进提供新的手段<sup>[2]</sup>。传统上, 过程挖掘应用于单一的组织内部。但是, 随着服务技术、供应链技术和云计算技术的普及, 会遇到很多包含多组织的事件日志挖掘场景。过程挖掘宣言<sup>[3]</sup>中指出一般存在 2 种跨组织的过程挖掘情形: ① 不同组织共同工作, 处理业务于过程协作环境; ② 不同组织环境中执行相同的

过程, 同时分享经验、知识或者一个共同的框架。前者, Claes 等<sup>[4]</sup>提出一种根据不同组织之间的合作伙伴关系来合并不同组织的事件日志的方法, 然后对不同组织的集成事件日志进行集中挖掘, 即可得到一个跨组织业务过程模型; Zeng 等<sup>[5]</sup>提出一种分布式的跨组织业务过程挖掘方法, 可以根据多源事件日志挖掘跨组织全局业务过程模型; 刘聪<sup>[6]</sup>提出一种支持隐私保护的跨组织业务流程挖掘方法。后者, Buijs 等<sup>[7-8]</sup>提出了一种挖掘不同组织从事同一类业务的过程模型的方法, 借鉴处理经验, 从而改进自身业务过程。

## 1 跨组织应急业务过程案例分析

结合南京市突发环境污染事件应急方案中规定的事件处置过程给出跨组织任务的形式化定义, 分析跨组织任务的构成要素以及任务间的协作关系。

### 1.1 应急案例分析

南京市突发环境污染事件应急预案规定: 当发生环境污染突发事件后, 各个应急组织的具体应急处理过程如下。

收稿日期: 2017-05-29

通信作者: 谭文安 (1965-), 男, 湖北荆州人, 博士, 教授, 主要研究方向为协同计算与系统进化、协同学习与知识管理。

E-mail: watan@sspu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61672022), 南京航空航天大学研究生创新基地 (实验室) 开放基金项目 (kfj20161608), 上海第二工业大学校重点学科 (XXKZD1604), 上海第二工业大学研究生创新基金 (No.A01GY17F022) 资助

市公安局: 110 接警后, 在第一时间抽调警力赶赴事故现场, 同时向市政府应急办报告突发环境污染事件的发生情况; 组织开展现场治安、疏散人员、警戒及周边道路交通管制, 保障救援运输畅通和城市公共交通; 协调并做好事故现场记录, 视听资料、证人证言收集等取证工作; 参与对突发事件信息报道、善后处置、调查处理等工作。

市政府应急办: 在接到突发环境污染事件爆发信息后, 立即成立应急小组, 同时将接到信息报送上上级部门, 根据应急响应级别向省、市政府报告突发事件情况; 组织有关部门和专家分析判定事故性质和危害程度, 同时制定事件处置方案; 向市卫生局、市环保局等有关部门发送启动应急处置方案的信息; 汇集各部门的处置信息, 组织相关部门召开突发事件通报会。

市消防局: 119 接警后, 立刻组织消防人员赶赴现场, 同时将事件上报, 开展专业消防救援工作, 组织调查突发事件中污染事故原因, 并参与协调综合力量投入救援行动。

市卫生局: 立即调配医务人员、医疗器材、急救药品等赶赴现场; 组织有关医疗专家根据伤员情况制定救治方案; 组织现场抢救及伤员转运、分流等救治工作; 组织突发事件中公共卫生事件的调查、处理工作; 负责统计上报接收到的伤亡人员信息。

市环保局: 组织有关环保专家赶赴现场, 开展突发环境事件现场调查, 分析污染物种类、浓度、污染程度和范围, 提出对现场应急处置和人员保护措施的建议, 组织有关专家分析并评估事件发生的原因、发展趋势以及污染影响程度等。

在跨组织应急业务过程处置过程中, 每个应急组织部门都会有相应的执行任务集合, 表 1 为某城市突发环境污染事件应急处置任务集合。

表 1 中:  $M_1$  表示某地发生突发环境污染事件,  $M_2$  表示所执行的突发环境污染事件应急预案,  $M_3$  表示事件中抢救的中毒人员,  $M_4$  表示根据污染物给出的人员保护建议,  $M_5$  表示中毒人员治疗情况,  $M_6$  表示后期环境污染情况,  $M_7$  表示事故的发生原因。

分析上述城市突发环境污染事件应急处置过程可以发现: ① 参与城市突发环境污染事件应急救援的组织部门一共有 5 个, 分别为市公安局、市政府应急办、市消防局、市卫生局和市环保局; ② 每个组

织部门需要执行各自的任務集合, 每个任务具有一些固定的属性, 例如任务执行的组织部门、任务执行的开始和结束时间、任务执行需要接收的消息集合以及发送的消息集合; ③ 任务间可能存在消息传递关系, 例如公安局执行“上报事件”和应急办所执行“成立应急小组”之间存在消息传递关系; ④ 任务间可能存在消息共享关系, 例如卫生局“赶赴现场”和环保局“赶赴现场”共享由应急办发送的消息“执行突发环境污染事件应急预案”; ⑤ 任务“事件通报会”需要公安局、消防局、应急办、环保局和卫生局等多个组织部门共同参与, 则称“事件通报会”为同步任务。

**定义 1** 在跨组织应急业务过程模型中, 六元组  $\text{Task} = \langle \text{Name}, \text{Organization}, \text{TimeStart}, \text{TimeEnd}, \text{MessReq}, \text{MessSent} \rangle$  被称为跨组织任务。

其中:  $\text{Name}$  表示任务的名称,  $\text{Organization}$  表示任务所属的执行部门,  $\text{TimeStart}$  表示任务的开始执行时间,  $\text{TimeEnd}$  表示任务的执行完成时间,  $\text{MessReq}$  表示任务执行时接收的消息集合,  $\text{MessSent}$  表示任务执行完成后发送的消息集合。

## 1.2 任务关系

分析上述城市突发环境污染事件应急处置过程, 可以发现不同组织部门的跨组织任务间存在有消息传递、消息共享和任务同步等协同模式。

如果某个任务的执行需要接收其他任务发送来的消息, 则称这 2 个任务间存在消息传递关系。

**定义 2** 任意给定 2 个不同的跨组织任务  $\langle t_1, O_1, TS_1, TE_1, \text{MessReq}_1, \text{MessSent}_1 \rangle$  与  $\langle t_2, O_2, TS_2, TE_2, \text{MessReq}_2, \text{MessSent}_2 \rangle$ , 如果有条件  $O_1 \neq O_2, \text{MessSent}_1 \cap \text{MessReq}_2 \neq \emptyset$  或  $\text{MessSent}_2 \cap \text{MessReq}_1 \neq \emptyset$  成立, 则称  $t_1$  和  $t_2$  间存在消息传递关系。

如果某 2 个任务的执行需要接收其他任务发送的相同消息, 则称这 2 个任务间存在消息共享关系。

**定义 3** 任意给定 2 个不同的跨组织任务  $\langle t_1, O_1, TS_1, TE_1, \text{MessReq}_1, \text{MessSent}_1 \rangle$  与  $\langle t_2, O_2, TS_2, TE_2, \text{MessReq}_2, \text{MessSent}_2 \rangle$ , 如果  $O_1 \neq O_2, \text{MessReq}_1 \cap \text{MessReq}_2 \neq \emptyset$  成立, 则称  $t_1$  和  $t_2$  间存在消息共享关系。

如果某个任务由不同组织部门共同合作完成, 由此形成多个分属各个组织部门内部的任务, 它们

表1 应急任务集合  
Tab.1 Emergency task set

任务	名称	组织部门	开始时间	结束时间	接受消息	发送消息
T1	110 接警	公安局	2016-10-09 13:50:00	2016-10-09 13:52:00		
T2	事件上报	公安局	2016-10-09 13:53:00	2016-10-09 13:55:00		{M <sub>1</sub> }
T3	赶赴现场	公安局	2016-10-09 13:55:00	2016-10-09 14:05:00		
T4	人员疏散	公安局	2016-10-09 14:05:00	2016-10-09 14:20:00		
T5	封锁现场	公安局	2016-10-09 14:20:00	2016-10-09 14:30:00		
T6	收集取证	公安局	2016-10-09 14:35:00	2016-10-09 16:15:00		{M <sub>7</sub> }
T7	控制责任人	公安局	2016-10-09 17:15:00	2016-10-09 20:15:00		
T8	事件通报会	公安局	2016-10-10 08:30:00	2016-10-10 09:30:00		
T9	成立应急小组	应急办	2016-10-09 14:00:00	2016-10-09 14:05:00	{M <sub>1</sub> }	
T10	制定处置方案	应急办	2016-10-09 14:05:00	2016-10-09 14:15:00		{M <sub>2</sub> }
T11	启动应急方案	应急办	2016-10-09 14:15:00	2016-10-09 16:15:00		
T12	汇总处置信息	应急办	2016-10-09 16:15:00	2016-10-09 20:30:00	{M <sub>5</sub> , M <sub>6</sub> , M <sub>7</sub> }	
T13	事件通报会	应急办	2016-10-10 08:30:00	2016-10-10 09:30:00		
T14	119 接警	消防局	2016-10-09 13:51:00	2016-10-09 13:52:00		
T15	赶赴现场	消防局	2016-10-09 13:55:00	2016-10-09 14:05:00		
T16	抢救中毒人员	消防局	2016-10-09 14:05:00	2016-10-09 14:55:00		{M <sub>3</sub> }
T17	危险品处置	消防局	2016-10-09 15:05:00	2016-10-09 16:15:00		
T18	事件通报会	消防局	2016-10-10 08:30:00	2016-10-10 09:30:00		
T19	赶赴现场	卫生局	2016-10-09 14:15:00	2016-10-09 14:25:00	{M <sub>2</sub> }	
T20	制定救治方案	卫生局	2016-10-09 15:00:00	2016-10-09 15:20:00	{M <sub>3</sub> }	
T21	人员现场治疗	卫生局	2016-10-09 15:20:00	2016-10-09 16:00:00	{M <sub>4</sub> }	
T22	报告伤亡情况	卫生局	2016-10-09 16:05:00	2016-10-09 16:15:00		{M <sub>5</sub> }
T23	事件通报会	卫生局	2016-10-10 08:30:00	2016-10-10 09:30:00		
T24	赶赴现场	环保局	2016-10-09 14:20:00	2016-10-09 14:30:00	{M <sub>2</sub> }	
T25	分析污染情况	环保局	2016-10-09 14:30:00	2016-10-09 15:00:00		
T26	人员保护建议	环保局	2016-10-09 15:05:00	2016-10-09 15:10:00		{M <sub>4</sub> }
T27	评估后期污染	环保局	2016-10-09 15:30:00	2016-10-09 16:10:00		{M <sub>6</sub> }
T28	事件通报会	环保局	2016-10-10 08:30:00	2016-10-10 09:30:00		

具有相同的任务名称、开始时间、完成时间、接收消息和发送消息等属性, 则称此任务为同步任务。

**定义 4** 任意给定 2 个不同的跨组织任务  $\langle t_1, O_1, TS_1, TE_1, \text{MessReq}_1, \text{MessSent}_1 \rangle$  与  $\langle t_2, O_2, TS_2, TE_2, \text{MessReq}_2, \text{MessSent}_2 \rangle$ , 如果有条件  $t_1 = t_2, O_1 \neq O_2, TS_1 = TS_2, TE_1 = TE_2, \text{MessReq}_1 = \text{MessReq}_2, \text{MessSent}_1 = \text{MessSent}_2$  成立, 则称  $t_1$  (或  $t_2$ ) 为同步任务。

## 2 扩展消息库所的 Petri 网模型

### 2.1 基础知识

介绍扩展消息库所的 Petri 网模型之前, 先简单介绍 Petri 网和工作流网等相关的基本概念。Petri 网是一种用于描述离散的、分布式系统的数学建模工具<sup>[9]</sup>。它既能描述系统的结构, 又能描述系统的运行。从形式上看, 1 个网就是 1 个没有孤立节点的有向二分图。

**定义 5** 满足下列条件的四元组  $(P, T; F, M)$  称为 Petri 网:

- (1)  $P \cup T \neq \emptyset$ ;
- (2)  $P \cap T = \emptyset$ ;
- (3)  $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ ;
- (4)  $\text{dom}(F) \cup \text{cod}(F) = P \cup T$ ;
- (5)  $M : P \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}$ .

其中:  $P$  是库所的有限集合,  $T$  是变迁的有限集合,  $F$  是网的流关系集合,  $M$  是网的标识映射。在建模过程中, 一般使用库所代表条件, 变迁代表事件。一个变迁有一定数量的输入和输出库所, 分别代表可以使用的资源或者数据。

**定义 6** 设四元组  $PN = (P, T; F, M)$  是一个 Petri 网, 对于任意给定的元素  $x \in P \cup T$ , 称  $\cdot x = \{y | y \in P \cup T \wedge (y, x) \in F\}$  是元素  $x$  的前集, 称  $x \cdot = \{y | y \in P \cup T \wedge (x, y) \in F\}$  是  $x$  的后集。

在 Petri 网的基础上, Aalst 提出了工作流网的概念, 工作流网是一种特殊的 Petri 网, 其定义如下:

**定义 7** Petri 网  $PN = (P, T; F, M)$  被称为工作流网, 当且仅当其满足下面的条件:

- (1) 有 2 个特殊的库所  $i$  和  $o$ 。库所  $i$  是起始库所, 即  $\cdot i = \emptyset$ ; 库所  $o$  是终止库所, 即  $o \cdot = \emptyset$ 。
- (2) 如果在  $PN$  中加入 1 个新的变迁  $t^*$ , 使  $t^*$  连接库所  $i$  和  $o$ , 即  $t^* \cdot = \{o\}, t^* \cdot = \{i\}$ , 这时所得到的  $PN$  是强连通的。

## 2.2 扩展消息库所的 Petri 网

**定义 8** 给定 Petri 网  $PN = (P, T; F, M)$ , 当且仅当其满足条件:

- (1)  $P = P_L \cup P_M$ , 其中  $P_L$  为逻辑库所集合,  $P_M$  为消息库所集合, 且  $P_L \cap P_M = \emptyset$ ;
- (2)  $T$  表示任务变迁集合;
- (3)  $F = F_L \cup F_M$ , 称  $F_L = (P_L \times T) \cup (T \times P_L)$  为逻辑库所与任务变迁之间的逻辑关系,  $F_M = (P_M \times T) \cup (T \times P_M)$  为消息库所与任务变迁之间的消息接收与发送关系;

(4)  $\forall p \in P$ , 如果  $p \in P_L \wedge \cdot p = \emptyset$ , 则有  $M_0(p) = 1$ , 否则  $M_0(p) = 0$ 。

则称  $PN$  为扩展消息库所的 Petri 网, 记为  $MWF\_net$ 。MWF\_net 模型是在普通 Petri 网基础上增加了消息库所元素, 有关其变迁引发规则、可达性和有界性等可根据普通 Petri 网的相关知识给出。

## 2.3 组织间协同模式

在 1 个跨组织应急业务过程中, 如果 2 个不同组织的任务之间存在消息传递或消息共享关系, 则说这 2 个组织之间存在消息交互模式。

**定义 9** 设  $MWF\_Net_1 = (P_1, T_1; F_1, M_{01})$  和  $MWF\_Net_2 = (P_2, T_2; F_2, M_{02})$  分别是两个不同组织部门  $O_1$  和  $O_2$  的业务过程模型, 其中  $P_i = P_{Li} \cup P_{Mi} (i = 1, 2)$ , 如果 ①  $P_{M1} \cap P_{M2} \neq \emptyset$ ; ②  $P_{L1} \cap P_{L2} = \emptyset$ ; ③  $T_1 \cap T_2 = \emptyset$  成立, 则称  $O_1$  和  $O_2$  之间存在消息交互模式。

在 1 个跨组织应急业务过程中, 如果 2 个不同组织之间存在同步任务, 则说这 2 个组织之间存在任务同步模式。

**定义 10** 设  $MWF\_Net_1 = (P_1, T_1; F_1, M_{01})$  和  $MWF\_Net_2 = (P_2, T_2; F_2, M_{02})$  分别是 2 个不同组织部门  $O_1$  和  $O_2$  的业务过程模型, 如果 ①  $P_1 \cap P_2 = \emptyset$ ; ②  $T_1 \cap T_2 \neq \emptyset$  成立, 则称  $O_1$  和  $O_2$  之间存在任务同步模式。

## 3 跨组织应急业务过程挖掘

本节首先介绍运行日志、任务集合和直接后继任务集合等相关概念, 然后给出组织内业务过程挖掘算法和组织间协同模式挖掘算法, 最后给出模型集成算法以得到全局跨组织业务过程模型。

**定义 11** 跨组织应急业务过程产生的案例是一系列跨组织任务的集合, 即案例  $\text{Case} = \{\text{Task} \mid \text{其中 Task 是一个跨组织任务}\}$ 。

**定义 12** 跨组织应急业务过程产生的运行日志 (RunningLogs) 是一系列案例的集合, 即运行日志  $\text{RLogs} = \{\text{Case} \mid \text{Case 是一个案例}\}$ 。

**定义 13** 设  $\text{RLogs}$  是一个跨组织应急业务过程产生的运行日志, 对于  $\forall \text{Case}_i \in \text{RLogs}$ , 则称集合  $\text{TaskSet}(\text{Case}_i) = \{T_k \mid \exists \text{Task} \in \text{Case}_i, \text{其中任务 Task} = \langle T_k, O, TS, TE, \text{MessReq}, \text{MessSent} \rangle, 1 \leq k \leq |\text{Case}_i|\}$  为案例任务集合, 则称集合  $\text{TaskSet}(\text{RLogs}) = \bigcup_{\text{Case}_i \in \text{RLogs}} \text{TaskSet}(\text{Case}_i)$  为运行日志任务集合。

**定义 14** 设  $\text{RLogs}$  是一个跨组织应急业务过程产生的运行日志, 对于运行日志  $\text{RLogs}$  中的任意两个任务  $T_i$  与  $T_j$ , 满足条件  $T_i \cdot TE \leq T_j \cdot TS$ , 则称  $T_j$  是  $T_i$  的一个后继任务 (称  $T_i$  是  $T_j$  的一个前驱任

务), 记为  $T_i \ll T_j$ ; 如果  $T_i \ll T_j$ , 且不存在任务  $T_k$ , 使得  $T_i \ll T_k$  与  $T_k \ll T_j$  成立, 则称  $T_j$  是  $T_i$  的一个直接后继任务 (称  $T_i$  是  $T_j$  的一个直接前驱任务), 记为  $T_i \prec T_j$ 。

**定义 15** 集合  $T_i \cdot \text{PostSet} = \{T_j | T_i \prec T_j\}$  称为任务  $T_i$  的直接后继任务集合。

### 3.1 组织内部业务过程挖掘

使用扩展消息库所的 Petri 网模型表示组织内部的业务过程模型, 现有过程挖掘方法<sup>[10-14]</sup>不能直接应用于组织内部的业务过程模型挖掘, 需要根据 MWF\_Net 模型扩展消息库所这一特性, 给出新的挖掘方法来挖掘组织内部的业务过程模型。在挖掘组织内部的 MWF\_Net 模型之前, 本文首先给出计算案例 (Case) 中的任务  $T$  的直接后继任务集合的方法。

**算法 1** 计算案例 (Case) 中的任务  $T$  的直接后继任务集合  $T \cdot \text{PostSet}$ 。

输入:  $\langle T_i, T_i \cdot TS, T_i \cdot TE \rangle (1 \leq i \leq |\text{Case}|)$

输出:  $T_i \cdot \text{PostSet}$

**Step 1** For  $i = 1$  to  $|\text{Case}|$  do

$T_i \cdot \text{PostSet} \leftarrow \emptyset$

For  $j = 1$  to  $|\text{Case}|$  do

If  $T_i \cdot TE \leq T_j \cdot TS$  do

$T_i \cdot \text{PostSet} \leftarrow T_i \cdot \text{PostSet} \cup \{T_j\}$

End if

End for

End for

**Step 2** For each  $T_j \in T_i \cdot \text{PostSet}$  do

For each  $T_k \in T_j \cdot \text{PostSet}$  do

$T_i \cdot \text{PostSet} \leftarrow T_i \cdot \text{PostSet} - \{T_k\}$

End for

End for

**Step 3** Return  $T_i \cdot \text{PostSet}$

其中, 步骤 1 负责计算案例 (Case) 中的每个任务  $T_i$  的后继任务, 首先令  $T_i \cdot \text{PostSet}$  为空, 依次遍历案例 (Case) 中的每个任务  $T_j$ , 如果  $T_i \cdot TE \leq T_j \cdot TS$ , 则将任务  $T_j$  加入到  $T_i \cdot \text{PostSet}$ ; 步骤 2, 对于  $\forall T_j \in T_i \cdot \text{PostSet}$ , 将  $T_j$  的后继任务集合中的所有任务从  $T_i \cdot \text{PostSet}$  中删除, 此时所得集合即为  $T_i$  的直接后继任务集合; 步骤 3, 返回  $T_i \cdot \text{PostSet}$ 。

算法 1 的时间复杂度主要在于步骤 1, 由分析知步骤 1 的复杂度为  $O(|\text{Case}|^2)$ , 因此算法 1 的时

间复杂度为  $O(|\text{Case}|^2)$ 。

以表 1 中公安局的任务集合为例, 使用算法 1 可以得到如表 2 所示的直接后继任务集合。

表 2 公安局任务的直接后继任务集合  
Tab.2 Direct successor task set of public security bureau

Task	MessReq	MessSent	PostSet
$T_1$			$\{T_2\}$
$T_2$		$\{M_1\}$	$\{T_3\}$
$T_3$			$\{T_4\}$
$T_4$			$\{T_5\}$
$T_5$			$\{T_6\}$
$T_6$		$\{M_7\}$	$\{T_7\}$
$T_7$			$\{T_8\}$
$T_8$			$\emptyset$

通过算法 1 得到运行日志中的每个案例任务的直接后继任务集合后, 就可以利用算法 2 挖掘组织内部的 MWF\_Net 模型, 具体挖掘过程如下:

**算法 2** 挖掘组织内部的 MWF\_Net 模型。

输入:  $(T_i, T_i \cdot \text{PostSet}, T_i \cdot \text{MessReq}, T_i \cdot \text{Sent})$

输出:  $\text{MWF\_Net} = (P, T; F, M_0)$

**Step 1**  $P_L \leftarrow \emptyset, P_M \leftarrow \emptyset, T \leftarrow T \cup \{T_i\}, (1 \leq i \leq |\text{Case}|), F \leftarrow \emptyset, M_0 \leftarrow \emptyset;$

**Step 2** For each  $T_i \in T$  do

If  $T_i \cdot \text{MessSent} \neq \emptyset$  do

$P_M \leftarrow P_M \cup T_i \cdot \text{MessSent}$

$F \leftarrow F \cup \{(T_i, P) | P \in T_i \cdot \text{MessSent}\}$

End if

If  $T_i \cdot \text{MessReq} \neq \emptyset$  do

$P_M \leftarrow P_M \cup T_i \cdot \text{MessReq}$

$F \leftarrow F \cup \{(P, T_i) | P \in T_i \cdot \text{MessReq}\}$

End if

End for

**Step 3** For any two tasks  $T_i, T_j \in T$  do

If  $T_j \in T_i \cdot \text{PostSet}$  do

$P_L \leftarrow P_L \cup \{P_{ij}\}$

$F \leftarrow F \cup \{(T_i, P_{ij}), (P_{ij}, T_j)\}$

End if

End for

**Step 4** For each place  $p \in P$  do

If  $p = p_s$  do

$M_0(p) \leftarrow 1$

Else  
 $M_0(p) \leftarrow 0$

End if

End for

**Step 5** Return  $MWF\_Net = (P, T; F, M_0)$

其中, 步骤 1 负责初始化组织内  $MWF\_Net$  模型; 步骤 2, 若  $MessSent \neq \emptyset$  或  $MessReq \neq \emptyset$ , 则将  $P_M$  加入  $T_i$  的消息集合, 并增加  $T_i$  与消息库所间的流关系; 步骤 3, 对于  $\forall T_i, T_j \in T$ , 如果  $T_j \in T_i \cdot PostSet$ , 则将  $P_{ij}$  加入集合  $P_L$ , 并增加流关系  $(T_i, P_{ij}), (P_{ij}, T_j)$ ; 步骤 4, 对于  $\forall p \in P$ , 如果  $p$  是开始库所, 则置  $M_0(p)$  为 1, 否则置  $M_0(p)$  为 0; 步骤 5, 返回单个组织内部的  $MWF\_Net$  模型。

算法 2 的时间复杂度主要在于步骤 3, 经分析知步骤 3 的时间复杂度为  $O(|T|^2)$ , 因此算法 2 的时间复杂度为  $O(|T|^2)$ 。

将表 2 中公安局的任务及其直接后继任务集合作为算法 2 的输入, 即可得到图 1 所示的公安局内的应急业务过程模型, 其中使用同心圆表示消息库所。

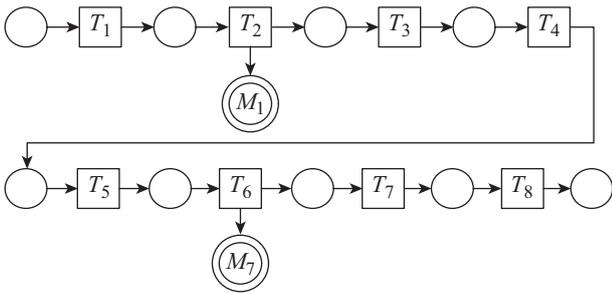


图 1 公安局应急业务过程模型

Fig. 1 Emergency business process model of public security bureau

### 3.2 组织间协同模型挖掘

为了得到组织间的协同模型, 需要过滤处理每个组织的运行日志。设  $RLog_i$  和  $RLog_j$  分别是组织  $O_i$  和  $O_j$  的运行日志, 任意给定 2 个任务  $T_i \in RLog_i$  和  $T_j \in RLog_j$ , 如果满足下列条件之一:

- (1)  $T_i \cdot MessReq \cap T_j \cdot MessSent \neq \emptyset$ ;
- (2)  $T_i \cdot MessSent \cap T_j \cdot MessReq \neq \emptyset$ ;
- (3)  $T_i \cdot MessReq \cap T_j \cdot MessReq \neq \emptyset$ ;
- (4)  $T_i \cdot TS = T_j \cdot TS \wedge T_i \cdot TE = T_j \cdot TE$ 。

则将任务  $T_i$  和  $T_j$  保留在各自的运行日志中, 否则将它们从运行日志中删除。

**算法 3** 组织间协同模型挖掘。

输入: 2 个组织过滤处理后的运行日志  $RLog_1$  和  $RLog_2$

输出: 2 个组织间的协同模型  $MWF\_Net_{12}$

**Step 1**  $P_L \leftarrow \emptyset, P_M \leftarrow \emptyset, T \leftarrow \emptyset, F \leftarrow \emptyset, M_0 \leftarrow \emptyset$

**Step 2** For  $i = 1$  to  $|Case_1|$  do

For  $j = 1$  to  $|Case_2|$  do

If  $T_i \cdot TS = T_j \cdot TS$  and

$T_i \cdot TE = T_j \cdot TE$  do

$T_i \leftarrow T_j$

$T \leftarrow T \cup T_i$

End if

If  $T_i \cdot MessReq \cap T_j \cdot MessSent \neq \emptyset$  do

$P_M \leftarrow P_M \cup (T_i \cdot MessReq \cap$

$T_j \cdot MessSent)T \leftarrow T \cup T_i \cup T_j$

$F \leftarrow F \cup \{(T_j, p), (p, T_i)|$

$p \in T_i \cdot MessReq \cap T_j \cdot MessSent\}$

End if

If  $T_i \cdot MessSent \cap T_j \cdot MessReq \neq \emptyset$  do

$P_M \leftarrow P_M \cup (T_i \cdot MessSent \cap T_j \cdot$

$MessReq)$

$T \leftarrow T \cup T_i \cup T_j$

$F \leftarrow F \cup \{(T_i, p), (p, T_j)|$

$p \in T_i \cdot MessSent \cap T_j \cdot MessReq\}$

End if

If  $T_i \cdot MessReq \cap T_j \cdot MessReq \neq \emptyset$  do

$P_M \leftarrow P_M \cup (T_i \cdot MessReq \cap$

$T_j \cdot MessReq)$

$T \leftarrow T \cup T_i \cup T_j$

$F \leftarrow F \cup \{(p, T_i), (p, T_j)|$

$p \in T_i \cdot MessReq \cap T_j \cdot MessReq\}$

End if

End for

End for

**Step 3** For each place  $p \in P$  do

If  $p = p_s$  do

$M_0(p) \leftarrow 1$

Else

$M_0(p) \leftarrow 0$

End if

End for

**Step 5** Return  $MWF\_Net_{12}$

其中, 步骤 1 负责初始化不同组织间的协同模型; 步骤 2 依次遍历  $RLog_1$  中的任务  $T_i, \forall T_j \in RLog_2$ , 如果  $T_i \cdot TS = T_j \cdot TS$  且  $T_i \cdot TE = T_j \cdot TE$ , 则  $T_i$  和  $T_j$  为同步任务, 合并  $T_i$  和  $T_j$ , 将  $T_i$  加入集合  $T$  中; 如果  $T_i \cdot MessReq \cap T_j \cdot MessSent \neq \emptyset$ , 则将它们的交集加入集合  $P$  中, 并增加流关系  $(T_j, p), (p, T_i)$ ; 如果  $T_i \cdot MessSent \cap T_j \cdot MessReq \neq \emptyset$ , 则将它们的交集加入集合  $P$  中, 并增加流关系  $(T_i, p), (p, T_j)$ ; 如果  $T_i \cdot MessReq \cap T_j \cdot MessReq \neq \emptyset$ , 则将它们的交集加入集合  $P$  中, 并增加流关系  $(p, T_i), (p, T_j)$ ; 步骤 3 对于  $\forall p \in P$ , 如果  $p$  是开始库所, 则置  $M_0(p)$  为 1, 否则置  $M_0(p)$  为 0; 步骤 4 返回组织间协同模型  $MWF\_Net_{12}$ 。

算法 3 的时间复杂度主要在于步骤 2, 经分析知步骤 2 的复杂度为  $O(|Case_1| \cdot |Case_2|)$ , 因此算法 3 的时间复杂度为  $O(|Case_1| \cdot |Case_2|)$ 。

过滤公安局与应急办的运行日志, 作为算法 3 的输入, 可得图 2 所示的协同过程模型。

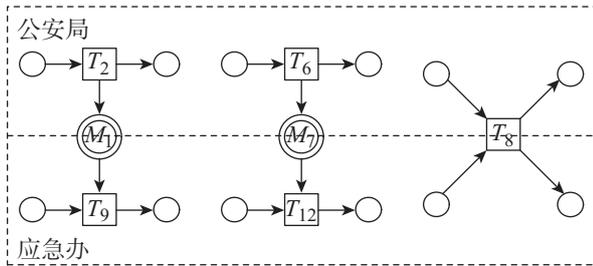


图 2 公安局与应急办的协同模型

Fig. 2 Cooperative model of public security bureau and emergency office

### 3.3 跨组织应急业务过程模型挖掘

组织的内部业务过程模型描述了组织内部任务的执行情况, 组织间的协同过程模型描述了不同组织之间相互协作情况, 但是组织内部业务过程模型和组织间协同过程模型都不能直观的反映跨组织业务过程的全局执行情况, 因此需要将组织内业务过程模型和组织间协同过程模型进行集成, 以得到全局跨组织应急业务过程模型。

**算法 4** 业务过程模型集。

输入:  $n$  个组织内的业务过程模型  $MWF\_Net_i (1 \leq i \leq n)$ , 两两组织间的协同模型

$$MWF\_Net_{ij} (1 \leq i, j \leq n)$$

输出: 跨组织应急业务过程模型  $MWF\_Net$

**Step 1**  $P \leftarrow \emptyset, T \leftarrow \emptyset, F \leftarrow \emptyset, M_0 \leftarrow \emptyset;$

**Step 2** For  $i = 1$  to  $n$  do

For  $j = 1$  to  $n$  do

If  $i \neq j$  do

$$P_i \leftarrow P_i \cup P_j \cup P_{ij}$$

$$T_i \leftarrow T_i \cup T_j \cup T_{ij}$$

$$F_i \leftarrow F_i \cup F_j \cup F_{ij}$$

$$M_{0i} \leftarrow M_{0i} \cup M_{0j} \cup M_{0ij}$$

End if

End for

$$P \leftarrow P \cup P_i$$

$$T \leftarrow T \cup T_i$$

$$F \leftarrow F \cup F_i$$

$$M_0 \leftarrow M_0 \cup M_{0i}$$

End for

**Step 3** For  $i = 1$  to  $n$  do

$$M_{0i}(p_{si}) \leftarrow 1$$

End for

**Step 4** Return  $MWF\_Net$

其中, 步骤 1 负责初始化跨组织应急业务过程模型; 步骤 2 对于  $\forall MWF\_Net_i, MWF\_Net_j$ , 合并  $MWF\_Net_i, MWF\_Net_j$  与  $MWF\_Net_{ij}$ , 即可得到 2 个组织的跨组织应急业务过程模型, 依次对只包含 2 个组织的跨组织应急业务过程模型合并, 即可得到全局跨组织应急业务过程模型; 步骤 3 对于每个组织内的开始库所  $P_{si}$  和结束库所  $P_{ei}$ , 将每个组织内的开始库所标识设置为 1; 步骤 4 返回跨组织全局应急业务过程模型  $MWF\_Net$ 。

算法 4 的时间复杂度主要在于步骤 2, 经分析知步骤 2 的复杂度为  $O(n^2)$ , 因此算法 4 的时间复杂度为  $O(n^2)$ , 其中  $n$  表示组织数。

综合集成执行突发环境污染事件应急救援的 5 个组织内部业务过程模型和他们之间的协同过程模型, 即可得到如图 3 所示的跨组织全局应急业务过程模型。

## 4 模型正确性验证

这里将给出跨组织应急业务过程模型的正确性定义, 并使用 Petri 网编辑器<sup>[15]</sup>验证所挖掘的跨组织应急业务过程模型满足正确性定义。在文献 [16] 中, Aalst 等给出了 workflows 的正确性引理:

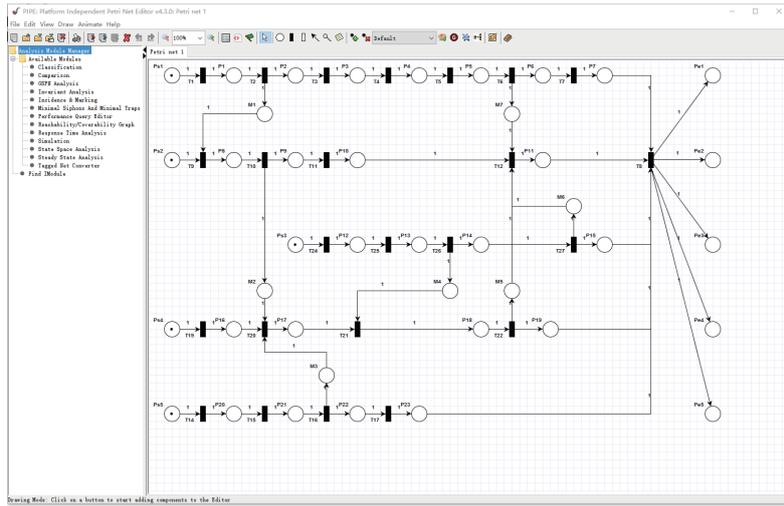


图3 跨组织应急业务过程模型

Fig. 3 Cross-organizational emergency business process model

引理 1 任意给定 workflow 网  $WF = (P, T, F, M_0)$ , 其中库所  $i \in P$  为开始库所,  $o \in P$  为结束库所,  $WF$  是正确的, 当且仅当下列条件成立: ① 对于库所  $i$  中的任意托肯, 在库所  $o$  中都将有对应的托肯, 当  $WF$  运行结束时; ② 如果库所  $o$  中仅有一个托肯, 则其他库所中无托肯; ③ 在  $WF$  中无死变迁。

根据引理 1, 可以给出跨组织应急业务过程模型的正确性定义:

定义 16 设  $MWF\_Net_k = \{MWF\_Net_i = (P_i, T_i, F_i, M_{0i}) \mid MWF\_Net_i$  是第  $i$  个组织的应急过

程模型},  $MWF\_Net = (P, T, F, M_0)$  是集成的跨组织应急业务过程模型, 当条件 ① 当  $MWF\_Net$  运行完成时, 在消息库所中无托肯; ② 对于每一个  $MWF\_Net_i$  运行完成时, 其结束库所中的托肯数等于开始库所中的初始托肯数; ③  $MWF\_Net$  中无死变迁, 成立时, 则  $MWF\_Net$  是正确的。

模拟运行图 3 所示的跨组织应急业务过程模型, 可得到图 4 所示的结果, 其运行完成的状态满足定义 16 中的 3 个条件, 故本文所挖掘的跨组织应急业务过程模型是正确的。

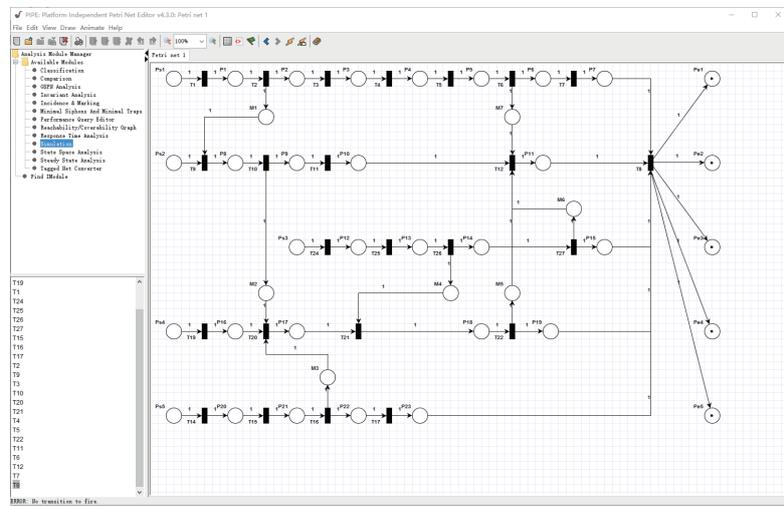


图4 运行完成的跨组织应急业务过程模型

Fig. 4 The finished cross - organizational emergency business process model

### 5 结 语

应急预案设计的合理有利于减少突发事件造成

的公共财产损失, 挖掘分析跨组织应急救援过程, 可发现应急预案存在的不足, 从而改进应急救援过程, 通过组织间协同合作, 提高应急救援执行效率。本

文对跨组织应急业务过程案例进行分析, 提出了一种跨组织应急业务过程挖掘方法。通过定义跨组织任务的协作关系, 确定跨组织间协同运作模式和策略; 扩展消息库所的 Petri 网模型来描述跨组织应急业务过程模型, 在任务同步和消息交换的基础上, 挖掘跨组织协同业务过程模型, 本文的创新贡献是设计组织内业务过程模型挖掘和组织间协同过程模型挖掘算法, 采用模型集成得到全局跨组织应急业务过程模型。

下一步的工作将对跨组织任务间的协作关系进行扩展, 如对挖掘任务的并行、互斥和资源共享等模式进行研究, 以及验证挖掘的模型是否为最优模型。

### 参考文献:

- [1] AALST W M P V D, SCHONENBERG M H, SONG M. Time prediction based on process mining [J]. *Information Systems*, 2011, 36(2): 450-475.
- [2] AALST W M P V D. Process mining: Discovery, conformance and enhancement of business processes [M]. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011.
- [3] AALST W V D, ADRIANSYAH A, MEDEIROS A, et al. Process mining manifesto [C]// *International Conference on Business Process Management*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011: 169-194.
- [4] CLAES J, POELS G. Merging event logs for process mining: A rule based merging method and rule suggestion algorithm [J]. *Expert Systems with Applications*, 2014, 41(16): 7291-7306.
- [5] ZENG Q, SUN S X, DUAN H, et al. Cross-organizational collaborative workflow mining from a multi-source log [J]. *Decision Support Systems*, 2013, 54(3): 1280-1301.
- [6] 刘聪. 跨组织业务流程挖掘及其隐私保护方法研究 [D]. 山东: 山东科技大学, 2015.
- [7] BUIJS J C A M, DONGEN B F V, AALST W M P V D. Towards cross-organizational process mining in collections of process models and their executions [J]. *Business Process Management Workshops-bpm International Workshops*, 2015, 100: 2-13.
- [8] BUIJS J C A M, DONGEN B F V, AALST W M P V D. Mining configurable process models from collections of event logs [M]. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2013.
- [9] 吴哲辉. Petri 网导论 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [10] WEN L J, AALST W M P V D, WANG J M, et al. Mining process models with non-free-choice constructs [J]. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 2007, 15(2): 145-180.
- [11] WEIJTER A J M M, AALST W M P V D. Process mining with the heuristics miner-algorithm [R]. Eindhoven: Eindhoven University of Technology, 2006.
- [12] BRATOSIN C, SIDOROVA N, AALST W V D. Discovering process models with genetic algorithms using sampling [C]//BERLIN S-V. *KES'10 Proceedings of the 14th International Conference on Knowledge-based and Intelligent Information and Engineering Systems*. Cardiff, UK: Cardiff, 2010: 41-50.
- [13] BERGENTHUM R, DESEL J, LORENZ R, et al. Process mining based on regions of languages [C]// ALONSO G, ZURICH E. *BPM'07 Proceedings of the 5th International Conference on Business Process Management*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2007: 375-383.
- [14] SONG M, GUNTHER C W, AALST W M P V D. Trace clustering in process mining [M]. Berlin, Heidelberg: Politecnico di Milano, 2008.
- [15] DINGLE N J, KNOTTENBELT W J, SUTO T. Pipe2: A tool for the performance evaluation of generalised stochastic Petri Nets [J]. *Acm Sigmetrics Performance Evaluation Review*, 2009, 36(4): 34-39.
- [16] AALST W M P V D. The application of Petri nets to workflow management [J]. *Journal of Circuits Systems and Computers*, 1998, 8(1): 21-66.

## Cross-organizational Emergency Business Process Mining

TAN Wenan<sup>1,2</sup>, WU Yafeng<sup>1</sup>

(1. School of Computer Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. School of Computer and Information Engineering, Shanghai Polytechnic University, Shanghai 201209, China)

**Abstract:** The case of cross-organizational emergency business process was firstly analyzed, and the formal definition of cross-organizational task was given. At the same time, the cooperative relationship between cross-organizational tasks was defined. The cooperative model

between different organizations based on the cooperative relationship among inter-organizational tasks was defined. Then, the cross-organizational emergency business process model was described by using the extended Petri net model. The mining algorithms of the intra-business process model and the inter-organizational collaborative process model were given. Finally, the internal business process model and the inter-organizational collaborative process model of different organizations are merged through the model integration algorithm to obtain the global cross-organizational emergency business process model. The platform independent petri net editor (PIPE) was applied to support the soundness of the cross-organizational emergency business process model.

**Keywords:** cross-organization; emergency; collaborative model; petri net; business process

---

简 讯

## 应用艺术设计学院教师获 2016 年度“晨光计划”(艺术学专项)资助

近日,上海市教育委员会、上海市教育发展基金会组织举办了 2016 年度“晨光计划”项目资助仪式,全市 70 项 A 类项目、29 项 B 类项目以及 9 项艺术学专项项目获得立项资助。上海第二工业大学应用艺术设计学院黎春辉老师的“古代玉器造型在当代陶艺创作中的应用研究”成功立项。

“晨光计划”是为推进本市高校教师队伍建设,促进优秀人才的成长,培养造就一批青年骨干教师,由上海市教育发展基金会倡议并出资设立的上海高校青年科研骨干培养计划,由上海市教育委员会与上海市教育发展基金会共同管理实施。