

基于扩展 Petri 网的动态服务聚合流程描述模型 及其 BPEL4WS 表示方法

刘书雷,唐桂芬,刘云翔,陈 萃,景 宁
(国防科技大学 电子科学与工程学院,湖南 长沙 410073)

摘 要 针对现有服务聚合流程建模方法的不足,基于扩展 Petri 网提出了一种新的服务聚合流程/资源描述模型 WSCP/R-net,有效解决了动态服务聚合流程模型中不确定路径选择和服务的动态变化性问题。给出了 WSCP/R-net 模型向 BPEL4WS 的转换算法,并以城市应急处理为例说明了转换算法的有效性。

关键词 服务聚合;流程建模;WSCP/R-net;BPEL4WS

中图分类号 TP301 **文献标识码** A

A Model for Dynamic Web Service Composition Process Modeling Based on Extended Petri-net and the Describing Method with BPEL4WS

LIU Shu-lei, TANG Gui-fen, LIU Yun-xiang, CHEN Luo, JING Ning

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: To overcome the shortcoming of current web service composition modeling methods, a new web services composition process/resource model (WSCP/R-net) was proposed on the basis of the extended petri-net. WSCP/R-net resolves the problems on uncertain activity option and dynamic variation of service in process modeling effectively. Furthermore, a description of the methods to translate WSCP/R-net into BPEL4WS was made. Finally, its application was illustrated in city emergency disposal.

Key words service composition; process modeling; WSCP/R-net; BPEL4WS

流程驱动 (process-driven) 的服务聚合方法作为一种有效的聚合策略得到了很多研究者的关注^[1]。流程建模是流程驱动的服务聚合的一个核心问题,其目的是以一种形式化的方法对聚合流程进行直观的描述和形式化的表达,从而为聚合流程的结构和性能分析提供技术基础。

目前,国内外很多研究人员基于基本 Petri 网^[2]和工作流网 (WF-net)^[3]的研究成果对服务聚合流程建模技术进行了研究^[4-6]。与传统工作流应用中活动具有相对稳定性不同,Web 服务是动态变化的,因此,聚合流程建模时不仅要保证任务流的畅通,还要保障每一个流程环节上资源实现 (Web 服务) 的有效性;同时,在服务聚合流程的描述中不仅需要考虑服务、事件、规则等信息,还需要支持流程的不确定路径的选择等问题。由于基本 Petri 网和 WF-net 把每一个 token 看作没有意义的标识,模型设计时并不考虑与实例相关的实例数据和控制数据,所以它们无法解决服务聚合流程模型运行过程中不确定活动的路径选择问题;此外,基本 Petri 网和 WF-net 并不提供对流程的资源信息进行描述的方法,所以它们无法适应 Web 服务的动态变化性问题。因此,现有的基于基本 Petri 网和 WF-net 的聚合流程建模方法并不能完全满足服务聚合流程描述的需求。

针对以上分析,本文从服务聚合的流程和资源两个维度出发对基本 Petri 网进行扩展,把服务结点、服务群、颜色、颜色函数和守护函数引入服务聚合流程建模中,提出了一种新的服务聚合流程/资源描述模型 WSCP/R-net,并研究了 WSCP/R-net 模型向 BPEL4WS 的转化方法。

* 收稿日期:2006-04-10
基金项目:教育部博士点基金资助项目(20059998012)
作者简介:刘书雷(1979—),男,博士生。

1 服务聚合流程/资源网(web service composition process/resource net , WSCP/R-net)

流程驱动的服务动态聚合方法首先要建立适合具体应用需求的通用服务聚合流程模型 ;在调用聚合流程模型执行时 ,服务聚合引擎自动把抽象的聚合模型映射到具体的服务资源上 ,从而形成一个满足用户特定需求的、可以执行的具体服务链。为满足动态服务聚合的建模需求 ,首先给出服务结点和服务群的概念。

定义 1 服务结点(service node , SN)是构成流程模型的基本逻辑单元 ,表示服务聚合应用的一个步骤或任务 ,并不指向具体的 Web Service。

在 Web 环境中 ,满足每一个服务结点功能要求的服务同时存在多个 ,多个提供相同功能的服务组成一个服务群。

定义 2 服务群(service group , SG)是指由不同服务提供者提供的 ,具有相同调用接口 ,能够实现相同功能的一组服务。

针对服务动态聚合流程建模的需求和服务动态变化的应用实际 ,本文把聚合流程功能实现资源类(服务群)显式引入流程建模中 ,从服务聚合的过程(聚合流程的业务逻辑)和资源(聚合流程所包含的服务)出发 ,对基本的 Petri 网进行扩展 ,以变迁代表服务结点 ,以库所代表服务结点的输入/输出 ,通过颜色、颜色函数和守护函数来建立服务结点和资源群的映射 ,从而解决聚合流程不确定性活动的选择和资源的动态变化性问题 ,使之成为一种适合描述服务聚合流程的形式化模型 ,这种模型称为服务聚合流程/资源网(web service composition process/resource net , WSCP/R-net)。

1.1 基本定义

为了介绍 WSCP/R-net ,首先引出下面的概念^[7] :

- S_{ms} 表示非空集合 S 上的多重集。
- $Typ(v)$ 表示变量 v 的类型。
- $Typ(expr)$ 表示表达式 $expr$ 的类型。
- $Var(expr)$ 表示表达式 $expr$ 中的变量的集合。
- 一组变量 $V = \{v_1, \dots, v_n\}$ 的绑定由 $\langle v_1 = b_1, \dots, v_n = b_n \rangle$ 来表示 ,对每一个 $v_i \in V$,有 $b_i \in Typ(v_i) \ (1 \leq i \leq n)$ 。

• $expr \langle b \rangle$ 表示表达式在绑定 b 时的值 , $Var(expr)$ 必须是 b 中变量的子集 ,计算是通过将每个变量 $v \in Var(expr)$ 用值 $b_i \in Typ(v_i) \ (1 \leq i \leq n)$ 来代替而得到的。

定义 3 服务聚合流程/资源网(WSCP/R-net)是一种服务聚合流程/资源描述模型 ,可以定义为一个 10 元组 , $WSCP/R-net = (\Sigma, P, T, A, C, G, W, I, O, M_0)$,它满足如下条件 :

(1) Σ 是颜色集合 ,包含库所颜色集 Σ_P 和服务群的集合 Σ_{SG} , Σ_P 和 Σ_{SG} 均为有限的和非空的 ;

(2) P 是库所的有限集合 ,它与服务结点的输入/输出相对应 ;

(3) T 是变迁的有限集合 ,可以分为辅助变迁、基本变迁和复合变迁 ,辅助变迁代表空服务 ,用黑色填充的矩形框表示 ;基本变迁代表一个基本服务 ,与服务结点相对应 ,用矩形框表示 ;复合变迁代表一个由变迁(基本变迁或复合变迁)库所、弧组成的子流程 ,用双线矩形表示 ;

(4) A 是弧的有限集合 , $A \subseteq P \times T \cup T \times P$, $P \cap T = P \cap A = T \cap A = \emptyset$;

(5) C 是颜色函数 ,包括 :库所颜色函数 C_P 、变迁颜色函数 C_T 、变迁消耗颜色函数 C_{TP} 和变迁产生颜色函数 C_{TE} , C_P 映射库所到类型集合 Σ_P ,即 $C_P : P \rightarrow \Sigma_P$; C_T 映射变迁到服务群集合 Σ_{SG} ,即 $C_T : T \rightarrow \Sigma_{SG}$; C_{TP} 和 C_{TE} 映射变迁到类型集合 Σ_P ,即 $C_{TP} : T \rightarrow \Sigma_P$ 和 $C_{TE} : T \rightarrow \Sigma_P$;

(6) G 为变迁守护函数 ,它将变迁与表达式相关联并使得 $\forall t \in T \ [Type(G(t)) = B \wedge Typ(Var(G(t))) \subseteq \Sigma_P]$, $B = \{true, false\}$;

(7) W 是一个权函数 , $W : A \rightarrow \mathbb{N}^+$, \mathbb{N}^+ 是正整数 ; $\forall a \in A$,当 $W(a) = 1$ 时 ,建模时可以省略 ;

(8) I 是源点(输入点)集合 , $I \subseteq P$, $\forall i \in I \ i_i = \emptyset$ 且 $|I_i| = 1$, $|I|$ 表示集合 I 中元素的数目 ;

(9) O 是汇点(输出点)集合 , $O \subseteq P$, $\forall o \in O \ o_o = \emptyset$ 且 $|O_o| = 1$, $|O|$ 表示集合 O 中元素的数目 ;

(10) M_0 是初始标记,它将库所 P 与一个常量表达式相关联并使得: $\forall p \in P, M_0 = \begin{cases} C_P(i)_{MS}, & p=i; \\ \emptyset, & p \neq i \end{cases}$;

(11) $\forall x \in P \cup T \wedge x \notin I \wedge x \notin O, x$ 位于源点 $i \in I$ 和汇点 $o \in O$ 的路径上。

对各子条件的说明如下:

(1) 颜色集合决定了 WSCP/R-net 中表达式可以使用的数据对象、流程控制变量及流程中涉及的服务群,通过变迁颜色函数把服务群引入 WSCP/R-net 中,有效解决了服务的动态变化性问题;

(2) 守护函数 G 将每个变迁 t 与一个布尔类型的表达式相连,若 G 恒为 true,则建模时可以省去;

(3) 变迁的前置/后继库所颜色值描述了变迁对应服务节点的输入/输出变量,变迁消耗/产生颜色描述了变迁对应服务节点的数据消费/生产关系,WSCP/R-net 通过变迁前置/后继库所颜色、变迁消耗/产生颜色的共享和赋值关系实现了对聚合流程数据依赖关系的表达。因此,在利用 WSCP/R-net 模型建模过程中,库所颜色、变迁消耗/产生颜色的设定必须满足一定的规则,即满足数据依赖有效性,其定义如下:

定义 4(数据依赖有效性) WSCP/R-net 模型满足数据依赖有效性,当且仅当该 WSCP/R-net 模型的颜色设置满足如下规则:

(1) 变迁消耗颜色以及变迁守护函数中的颜色必须依赖于该变迁前置库所的颜色值,形式化描述为: $\forall t \in T, C_{TP}(t) \subseteq \bigcup_{p \in \cdot t} C_P(p), \forall v \in \text{Var}(G(t)), \text{Type}(v) \in \bigcup_{p \in \cdot t} C_P(p)$;

(2) 变迁后继库所颜色必须依赖于该变迁产生颜色以及变迁前置库所的颜色值,形式化描述为: $\forall p \in P, C_P(p) \subseteq \bigcup_{t \in \cdot p} C_{TE}(t) \cup \bigcup_{p \in \cdot(p)} C_P(p)$;

由上述定义可以看出,与 Petri 网和 WF-net 相比较,WSCP/R-net 更适合于聚合流程建模的需要:

(1) 通过库所颜色的引入,使模型含义更加丰富,增强了聚合流程活动和状态转移建模的能力,变迁颜色和颜色函数的引入,把每一个变迁与一个变迁执行资源类(服务群)相关联,从而使得服务聚合流程具有一定的容错能力,更好地满足了网络条件下服务聚合的需要。

(2) 变迁守护函数的引入,为变迁的触发增加了限制条件,能够有效定义服务聚合流程的各种路由结构,从而可以解决不确定性活动的路径选择问题。

(3) 引入了复合变迁和辅助变迁的概念,有了辅助变迁、辅以变迁守护函数,可以表达更加丰富的业务逻辑,通过复合变迁的应用,可以满足复杂服务聚合应用的建模需求。

1.2 动态行为(Behavior)

WSCP/R-net 的动态行为反映了聚合流程运行时的性质,颜色值通过变迁的执行发生变化,同时模型的实施依赖于表示业务规则的守护函数在运行时的解释,通过调整流程控制数据在不同实例中的变化,可以灵活地进行各种路径结构的选择,因此 WSCP/R-net 可以进行复杂聚合流程的建模。

定义 5(变迁使能) 变迁 t 在标记 M 下对绑定 b 是使能的(enabled),当且仅当:

(1) $\forall p \in \cdot t, W(p, t) \leq M(p)$;

(2) $G(t) \langle b \rangle = \text{true}$;

(3) $C_T(t) \neq \emptyset$ 。

条件(1)表示使能变迁 t 的所有前置库所的 token 数必须大于权值函数 $W(p, t)$;条件(2)表示变迁 t 在绑定 b 时应该满足变迁执行的逻辑条件,条件(3)表示存在执行变迁功能的资源。

当一个变迁使能时,它可以被激发,变迁激发涉及的标识的数目由弧权值函数决定,而变迁守护函数的值则通过激发时的绑定来求得。

定义 6(变迁激发) 当一个变迁 t 在标记 M 下对绑定 b 使能时,它可以激发(occur),把标记 M_1 转换到 M_2 ,如下所示:

$$\forall p \in P, M_2(p) = \begin{cases} M_1(p) - W(p, t), & p \in t \cdot - t' \\ M_1(p) + W(t, p), & p \in t' \cdot - t \\ M_1(p) - W(p, t) + W(t, p), & p \in t' \cup t \\ W_i(p), & p \notin t' \cup t \end{cases}$$

标记 M_2 在变迁 t 对于绑定 b 的条件下,从 M_1 直接可达的,记作 $:M_1[t > M_2]$

WSCP/R-net 模型的一次完整执行,意味着一个 token 由源点 i 移到汇点 o ,流程终止的定义如下:定义 τ (流程终止) 一个聚合应用的 WSCP/R-net 模型终止,当且仅当实例数据(case data)到达汇点 o ,即 $\forall o \in O, C_f(o) \neq \emptyset$ 。

1.3 WSCP/R-net 基本模型

在作者前期研究中^[8],基于工作流控制模式的研究成果给出了 8 种聚合流程控制模式,即 Sequence、And Split、And Join、XOR Split、XOR Join、Iteration、N-outof-M 和 Nesting,通过对这些模式的合理的和有意义的组合,本文定义了 6 种 WSCP/R-net 基本模型,通过 6 种基本模型的嵌套应用,可以对各种复杂应用的聚合流程进行表达:

(1) 串联模型(图 1(a))中后一变迁须等前一变迁顺利执行后才可执行,由 Sequence 模式组成。

(2) 并联模型(图 1(b))用来定义聚合流程中没有严格执行次序、可同时进行的分支活动,由 And Split 和 And Join 两种模式组合而成,变迁 t_e 在所有分支都完成后才会被触发。

(3) 选择模型(图 1(c))从 n 个分支中选择 1 个执行,由模式 XOR Split 和 XOR Join 构成;变迁 $t_i (1 \leq i \leq n)$ 是否被执行由守护函数 G_i 的取值来确定。

(4) 循环模型(图 1(d))中 o 处路径的选择由 t_1 和后续变迁守护函数来确定,由 Iteration 模式组成。

(5) 容错模型(图 1(e))中 t_e 在变迁集合 $\{t_1, \dots, t_n\}$ 中的 m 个成功执行后就会被触发,由模式 And Split 和 M-outof-N 构成。

(6) 嵌套模型(图 1(f))能够实现层次化的建模,实现聚合流程的重用;用包含复合变迁的聚合流程来表示,由模式 Nesting 组成。

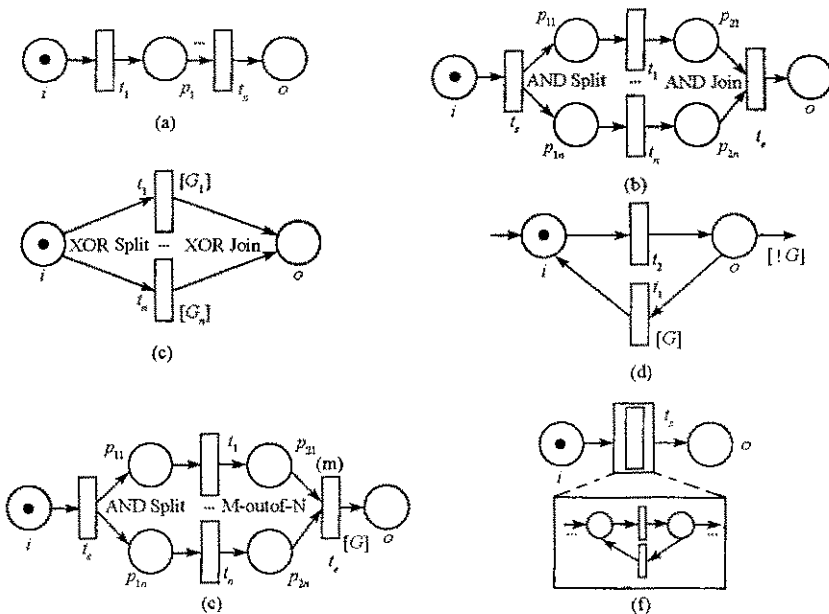


图 1 WSCP/R-net 基本模型

Fig. 1 Basic control models of WSCP/R-net

2 WSCP/R-net 模型向 BPEL4WS 的转换

WSCP/R-net 实现了对聚合流程的形式化描述,在此基础上可以实现对聚合流程的验证和分析(将另文详述)。BPEL4WS 是一种得到广泛支持的服务流程描述语言,通过研究 WSCP/R-net 向 BPEL4WS 的转化方法可以基于 BPWS4J^[9]等引擎对以 BPEL4WS 描述的聚合服务进行部署和发布。

2.1 WSCP/R-net 基本模型的 BPEL4WS 转换方法

仅考虑 WSCP/R-net 控制流向 BPEL4WS 的转换,其中变迁被映射为 BPEL4WS 的活动,点火规则及变迁守护函数用活动之间的控制流关系来描述。由于结构化的流程描述方法更加清晰,因此本文的目标侧重于如何利用结构化的活动(如 Sequence 等)对 WSCP/R-net 模型进行表达。

1.3 节定义了 WSCP/R-net 的 6 种基本模型,对于嵌套模型可以由串联、并联、选择、循环和容错模型组成,因此本节首先给出串联、并联、选择、循环和容错模型向 BPEL4WS 的转化方法,利用这些转化方法可以得到具体服务聚合应用的 BPEL4WS 描述。

List 1	List 2	List 3	List 4	List 5
1<sequence>	1<sequence>	1<switch>	1<sequence>	1<sequence>
2 <invoke name="t1"/>	2 <invoke name="ts"/>	2 <case condition="G1">	2 <invoke name="ts"/>	2 <invoke name="ts"/>
3 <invoke name="t2"/>	3 <flow>	3 <invoke name="t1"/>	3 <invoke name="t2">	3 <flow>
4</sequence>	4 <invoke name="t1"/>	4 </case>	4 <while condition="G">	4 <invoke name="t1"/>
	5 <invoke name="t2"/>	5 ...	5 <invoke name="t1"/>	5 ...
	6 </flow>	6 <case condition="Gn">	6 <invoke name="t2"/>	6 <invoke name="tn"/>
	7 <invoke name="te"/>	7 <invoke name="tn"/>	7 </while>	7 </flow>
	8</sequence>	8 </case>	8 <invoke name="te"/>	8 <invoke name="te">
		9</switch>	9</sequence>	joinCondition="m"/>
				9</sequence>

图 2 WSCP/R-net 基本模型 BPEL4WS 描述

Fig. 2 BPEL4WS description of WSCP/R-net basic control model

- 串联模型转换(图 2 中 List1):在结构化活动<sequence>中顺序调用串联模型中的各个服务。
- 并联模型转换(图 2 中 List2):利用结构化活动<flow>可以实现对并联模型的描述, List2 中第 2~7 行表示并联模型首先执行变迁 t_s , 然后并行执行活动 t_1 和活动 t_2 , 最后流程在活动 t_e 进行同步。
- 选择模型转换(图 2 中 List3):利用结构化活动 Switch 进行描述,通过进行 case 条件的判断,从 n 个分支中选择满足条件的一个来执行。
- 循环模型转换(图 2 中 List4):利用结构化活动 While 进行描述, List4 中第 4~7 行来进行 t_1 、 t_2 循环的控制, While 的 condition 由变迁 t_1 的守护函数确定。
- 容错模型转换(图 2 中 List5):通过为活动 t_e 指定 joinCondition 来实现对 m 个分支的同步; joinCondition 取值为 m , 其表达的意义具有 C_n^m 种可能,如对于 $n=3$, $m=2$ 的情况表示从 3 个分支中选择成功执行的 2 个分支,则此时的 joinCondition 取值为 $(t_1 \wedge t_2)$ 或 $(t_1 \wedge t_3)$ 或 $(t_2 \wedge t_3)$ 。

2.2 WSCP/R-net 模型的 BPEL4WS 转换算法

基于基本模型转换方法,可以得到 WSCP/R-net 模型向 BPEL4WS 的转换算法。算法描述如下:

算法 1 服务聚合应用 WSCP/R-net 模型向 BPEL4WS 的转换

Begin

(1) 确定 WSCP/R-net 中构成串联模型的子流程,将其用复合变迁进行替换,替换时子流程的起点/终止库所进行保留,利用串联 BPEL4WS 转换方法得到各个复合变迁对应的 BPEL4WS 描述;

(2) 确定 WSCP/R-net 中构成并联、选择、循环、容错模型的子流程(可包括复合变迁),将其用复合变迁替换,替换时各个子流程的起点/终止库所进行保留,利用并联、选择、循环、容错模型 BPEL4WS 转换方法得到各个复合变迁对应的 BPEL4WS 描述;

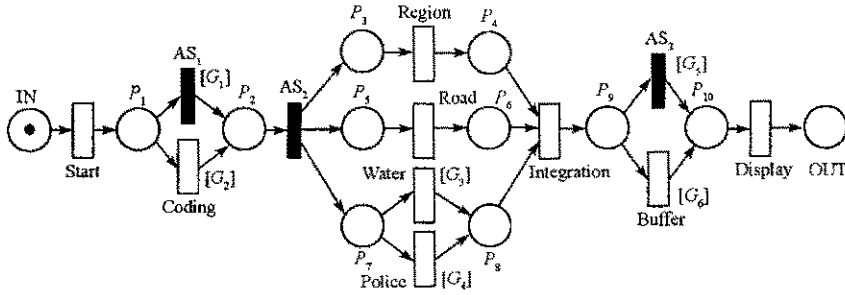
(3) 得到的 WSCP/R-net 模型构成串联模型,则转到步骤(4),否则转到步骤(1);

(4) 利用串联模型 BPEL4WS 转换方法得到流程的 BPEL4WS 描述;

- (5) 将其中的复合变迁(嵌套模型)用其对应的子流程的 BPEL4WS 描述替换;
- (6) 模型 BPEL4WS 描述中不存在复合变迁(嵌套模型),则算法执行完毕,否则转到步骤(5)。

End

城市应急处理是针对城市火/匪警的一种自动化处理流程,通过集成地理上分布的各种空间数据和处理资源,为决策提供支持,具体流程如下:接受报警,启动应急流程,根据报警类型决定是否采用编码服务把报警地名转化为地理坐标,通过坐标获取警情发生地数据,其中火警(匪警)需要知道行政区划、道路、水源(警力)分布数据,对数据进行集成并对火警进行缓冲区分析。对应的 WSCP/S-net 模型如图 3 所示。



Start: 应用请求解析服务; Coding: 地理编码服务; Region: 行政区划数据服务; Road: 道路交通数据服务; Water: 水源分布数据服务; Police: 警力分布数据服务; Integration: 数据整合服务; Buffer: 缓冲区分析服务; Display: 显示输出服务; AS₁~AS₃: 空服务

图 3 城市应急处理 WSCP/R-net 模型

Fig. 3 WSCP/R-net of city emergency disposal

利用算法 1 得到该模型对应的 BPEL4WS 描述。显然变迁 AS₁ 和 Coding、Water 和 Police、AS₃ 和 Buffer 分别构成选择模型,可以用复合变迁 CT1、CT2 和 CT3 分别进行替换,如图 4 所示。

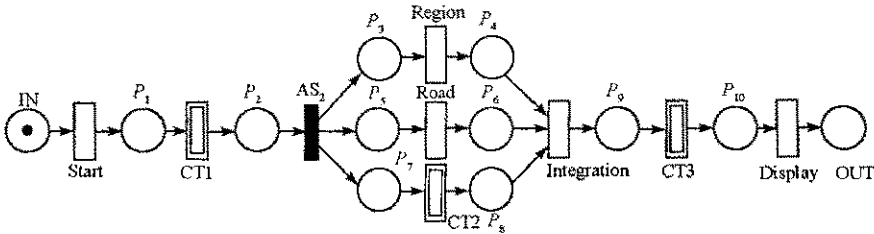


图 4 利用复合变迁 CT1、CT2 和 CT3 替换后的城市应急处理 WSCP/R-net 模型

Fig. 4 WSCP/R-net of city emergency disposal replaced with CT1, CT2, CT3

由选择模型转换方法 CT1~CT3 的 BPEL4WS 描述分别如图 6(a)(b)(c)所示。变迁 AS₂、Region、Road、CT2 和 Integration 构成并联模型,用复合变迁 CT4 替换,如图 5 所示。

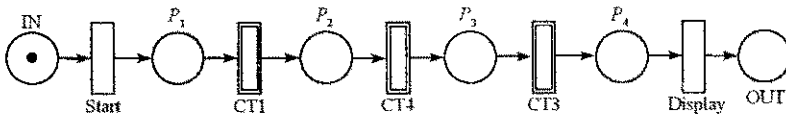


图 5 利用复合变迁 CT4 替换后的城市应急处理 WSCP/R-net 模型

Fig. 5 WSCP/R-net of city emergency disposal replaced with CT4

CT4 的 BPEL4WS 描述如图 6(d)所示,图 5 构成串联模型,其 BPEL4WS 描述如图 6(e)。

按照算法 1,把图 6(e)中各复合变迁分别用对应的 BPEL4WS 描述进行替换,从而得到图 3 城市应急处理 WSCP/R-net 模型的 BPEL4WS 描述。

3 结束语

本文基于服务动态聚合流程建模的需求和服务动态变化的应用实际,基于扩展 Petri 网提出了一种新的服务聚合流程/资源描述模型 WSCP/R-net,有效解决了聚合流程模型中不确定活动选择和服务的动态变化性问题,定义了 6 种 WSCP/R-net 基本模型,丰富了 WSCP/R-net 的表达能力。研究 WSCP/R-net 模型向 BPEL4WS 的转换算法,从而能够基于 BPWS4J 等引擎对用 BPEL4WS 描述的聚合服务进行部署和发布。

CT1 对应 BPEL4WS 描述<<CT1>>	CT2 对应 BPEL4WS 描述<<CT2>>	CT3 对应 BPEL4WS 描述<<CT3>>	CT4 对应 BPEL4WS 描述<<CT4>>	城市应急处理应用 BPEL4WS 描述
1 <switch>	1 <switch>	1 <switch>	1 <sequence>	1 <sequence>
2 <case condition="G1">	2 <case condition="G3">	2 <case condition="G5">	2 <empty name="AS2">	2 <invoke name="Start"/>
3 <empty name="AS1"/>	3 <invoke name="water">	3 <empty name="AS3">	3 <flow>	>
>	>	4 </case>	4 <invoke name="3 <<CT1>>	4 <<CT4>>
4 </case>	4 </case>	5 <case condition="G6">	Region"/>	5 <<CT3>>
5 <case condition="G2">	5 <case condition="G4">	6 <invoke name	5 <invoke name="Road"/>	6 <invoke name="Display">
6 <invoke name	>	= "Buffer">	>	>
= "Coding">	6 <invoke name	7 </case>	6 <<CT2>>	>
7 </case>	= "Police">	8 <switch>	7 </flow>	7 </sequence>
8 </switch>	7 </case>		8 <invoke name	
	8 </switch>		= "Integration"/>	
(a)	(b)	(c)	9 </sequence>	(e)

图 6 复合变迁及城市应急处理 WSCP/R-net 模型对应的 BPEL4WS 描述

Fig.6 BPEL4WS of compound transition and city emergency disposal

参考文献:

- [1] Boualem B, et al. The Self-serv Environment for Web Services Composition[J]. IEEE Internet Computing, 2003, 7(1): 40-48.
- [2] 袁崇义. Petri 网原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 1998.
- [3] Wil van der Aalst Kees, et al. Workflow Management: Models, Methods, and Systems[M]. MIT Press, 2002.
- [4] Hamadi R et al. A Petri Net Based Model for Web Services Composition[C]//Proc. 14th Ralasian Database Conference on Database Technologies, 2003.
- [5] 唐宇,等. 空间信息栅格体系与服务聚合技术[J]. 国防科技大学学报, 2005, 27(2): 46-51.
- [6] 钱柱中,等. 基于 Petri 网的 Web 服务自动组合研究[J]. 计算机学报, 2006, 29(7): 1057-1066.
- [7] Jensen K. Colored Petri Nets Basic Concepts, Analysis Methods and Practical Use (Vol. 1) [M]. New York: Springer-Verlag, 1992.
- [8] 刘书雷,等. 基于 Workflow 的动态服务聚合 QoS 模型及评价体系[J]. 计算机科学, 2005, 32(7B): 463-467.
- [9] IBM. BPWS4J: A Platform for Creating and Executing BPEL4WS Processes [R/OL]. <http://www.alphaworks.ibm.com/tech/bpws4j>.

