

动态服务聚合流程定义元模型及其应用^{*}

李国中¹ 刘书雷² 吴秋云² 景 宁²

(中国电子科技集团公司第十五研究所 北京 100083)¹ (国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)²

摘 要 适应 Web 服务的动态变化性是流程驱动的服务聚合研究的一个重要内容,传统的工作流建模思想必须加以改进以适应这一新的应用需求。本文引入了服务结点和 service 群的概念,从服务聚合的过程维和资源维出发定义了服务聚合流程定义元模型。在此基础上,基于扩展的工作流网提出了一种新的服务聚合流程/资源描述模型 WSCP/R-net,有效解决了现有的基于基本工作流网的服务聚合建模技术所不能解决的不确定路径选择和 service 的动态变化性问题。文章以城市危机应急处理的 Web 服务流程构建为例说明了 WSCP/R-net 应用的有效性和可行性。

关键词 动态服务聚合,流程建模,流程定义元模型,扩展工作流网,WSCP/R-net

A Dynamic Web Service Composition Process Definition Meta-Model and its Application

LI Guo-Zhong¹ LIU Shu-Lei² WU Qing-Yun² JING Ning²

(No. 15 Research institute, Electronics Technology Group Corporation of China, Beijing 100083)¹

(College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073)²

Abstract One of important issues of process-driven dynamic Web Services composition is supporting dynamic variation of Web Services. To satisfy this request the designing model of traditional workflow must be improved. This paper proposes the concept of SN and SG to adapt to the dynamic variation of Web Services, and proposes a meta-model of Web Services composition process definition to satisfy the need of dynamic Web Services composition process modeling. According to the meta-model, a new Web Services Composition Process/Resource model(WSCP/R-net) is proposed based on extended Workflow-net. WSCP/R-net effectively resolves the problems on uncertain activity option and dynamic variation of service in process model. The application of WSCP/R-net in Web service composition process modeling is illustrated in city emergency disposal project.

Keywords Dynamic Web services composition, Process modeling, Process definition meta-model, Extended workflow-net, WSCP/R-net

1 引言

流程驱动(Process-Driven)的动态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],其主要思想是首先由业务人员建立适合具体应用需求的通用服务聚合流程模型;普通用户在调用聚合流程模型时,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。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服务聚合流程进行直观的描述和形式化的表达,从而为服务聚合流程的结构和性能分析提供了技术基础。

由于 Petri 网具有图形化表达的形式化语义、基于状态的流程描述方式以及丰富的模型分析方法,国内外很多研究人员基于基本 Petri 网和工作流的研究成果对服务聚合流程建模技术进行了研究^[2~4]。与传统工作流应用相比,服务聚合作为一种新型的应用模式具有以下不同的应用特点:(1)Web 服务的应用空间更大;(2)Web 服务是动态变化的;(3)在 Web 环境下,具有相同功能的服务可能存在多个;(4)Web 服务是分布的、异构的、自治的。因此,动态服务聚合流程建模机制需要更多的动态性和灵活性支持,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。由于基本 Petri 网和工作流网把每一个托肯看作没有意义的标识,因此基本 Petri 网和工作流网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 网和工作流网并不提供对流程的资源信息进行描述的方法,所以它们无法适应动态服务聚合中的 service 动态变化性问题。

针对以上不足,基于动态服务聚合流程建模的需求和 service 动态变化的应用实际,本文引入了服务结点和 service 群的概念,定义了动态服务聚合流程定义元模型;在此基础上,基于扩展工作流网提出了一种新的服务聚合流程/资源描述模型 WSCP/R-net;并结合承担的 SIG 项目中城市危机处理服务流程的构建说明了 WSCP/R-net 进行动态服务聚合流程建模的有效性和可行性。

2 动态服务聚合流程定义元模型

元模型(meta-model)是用来定义语义模型的构造(construct)和规则(rule)的^[5],聚合流程的流程定义元模型是用于描述服务聚合流程所包含的元素、元素之间关系及元素属性的。

动态服务聚合中,通用服务聚合流程模型由多个服务结点组成;服务结点是一个抽象的概念,并不代表具体的 service,

^{*}基金项目:国家自然科学基金项目(No. 60472031);教育部博士点基金项目(No. 20059998012)。

服务结点的定义如下:

定义 1 服务结点 (Service Node, SN) 是构成流程模型的基本逻辑单元, SN 仅仅包含功能描述和接口信息, 并不指向具体的 Web Service。

在 Web 环境中, 多个提供相同功能的服务组成一个服务群, 服务群定义如下:

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。同一 SG 中的服务具有相同的功能, 不同的是各个服务 QoS 属性。

每一个 SN 对应一个 SG, 动态服务聚合就是在流程模型执行过程中从各个 SN 对应的 SG 中选择具体的服务组成一个可执行的满足特定 QoS 约束的服务链来满足特定的需求。

针对动态服务聚合的建模需求, 本文从服务聚合的过程维 (聚合流程的业务逻辑) 和资源维 (聚合流程所包含的服务群) 出发, 定义了服务聚合流程定义元模型, 如图 1 所示。

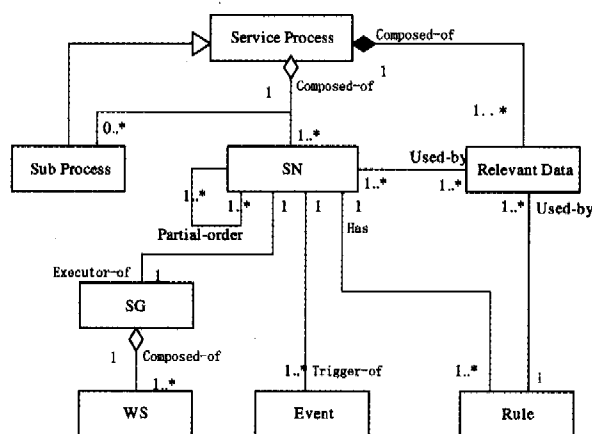


图 1 服务聚合流程定义元模型

服务聚合流程 (Service Process) 描述了服务聚合的业务逻辑, 服务聚合流程可以包含多个 SN、子流程 (Sub-Process) 及相关的资源。

SN 是构成流程模型的基本逻辑单元; SN 的引入, 可以实现服务聚合流程的动态建模。主要的属性包括名称、类型、触发事件等; 每一个 SN 可以包含多个触发事件 (event) 和执行规则 (rule), 同时, 每一个 SN 的执行只能由一个对应的 SG 来实施。SN 之间的偏序关系 (Partial-order) 表达了 SN 之间的串行、并行等流程控制关系。

SG 代表执行某一个 SN 功能的一个资源类, 一个 SG 由多个 Web Service (WS) 组成; SG 的重要属性包括名称、功能描述、输入和输出等。

事件 (Event): 当前 SN 的结束以及下一个 SN 的开始通过一个或者多个事件来触发。

规则 (rule): 规则用来描述 SN 执行的逻辑状态, 即当 SN 收到触发事件时, 通过规则的实施来确定 SN 是否进入执行状态, 规则通常与具体的事例数据相关。

流程相关数据 (Relevant Data): 服务聚合流程模型用来决定一个服务聚合实例状态转移的数据, 重要属性包括数据名称和数据类型等。

在 Web 环境下, 服务是动态变化的, SN 和 SG 的引入, 使得服务聚合流程模型能够解决服务的动态变化问题, 具有一定的容错能力。因此本文所提出的服务聚合元模型能够满足动态服务聚合流程建模的需要, 同时能够对服务聚合中资

源的动态变化性提供支持。

3 服务聚合流程/资源网 (WSCP/R-net)

与服务聚合流程定义元模型相对应, 本文对基本的工作流网进行扩展, 以变迁代表 SN, 以库所代表 SN 的输入和输出, 变迁与库所之间的连线表示 SN 之间的因果关系, 通过颜色、颜色函数和守护函数, 来建立 SN 和 SG 的映射, 从而解决聚合流程不确定性活动的路径选择和资源的动态变化性问题, 使之成为一种适合描述动态服务聚合流程的形式化模型; 本文提出的这种模型称为服务聚合流程/资源网 (Web Service Composition Process/Resource Net, WSCP/R-net)。

3.1 基本定义

为了介绍 WSCP/R-net, 首先引出下面的概念^[6]:

* s_m 表示非空集合 S 上的多重集;

* $Type(v)$ 表示变量 v 的类型;

* $Var(expr)$ 表示表达式 $expr$ 中的变量的集合;

* 一组变量 V 的绑定, 对每一个 $v_i \in V$, 有 $b_i \in Type(v_i)$ ($1 \leq i \leq n$);

* $expr(b)$ 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 $b_i \in Type(v_i)$ ($1 \leq i \leq n$) 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, WSCP/R-net 可以定义为一个 8 元组, $WSCP/R-net = (\Sigma, P, T, A, C, G, W, I)$, 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 SN 的输入/输出相对应; $\exists I \subseteq P, \forall i \in I, i = \phi$ 且 $|I| = 1$; $\exists O \subseteq P, \forall o \in O, o = \phi$ 且 $|O| = 1$; 其中 $| \cdot |$ 表示集合中元素的数目;

③ T 是变迁的有限集合, 每一个变迁表示服务聚合流程中的一个 SN;

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

⑤ C 是颜色函数, C 包含两个部分: 库所颜色函数 C_P 和变迁颜色函数 C_T , 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 $C_T: T \rightarrow \Sigma_{SG}$, 通过变迁颜色函数可以把 SN 与执行 SN 的 SG 关联起来;

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

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

⑧ I 是初始化函数, 它将库所 P 与一个常量表达式相关联并使得: $\forall p \in P, I = \begin{cases} C_P(p)_{MS} & p = i \\ \phi & p \neq i \end{cases}$;

⑨ $\forall x \in P \cup T \wedge x \notin I \wedge x \notin O, x$ 位于源点 $i \in I$ 和汇点 $o \in O$ 的路径上;

⑩ 设 T_k 是变迁 T 的分类函数, 则 $\forall t \in T, Type(T_k(t)) \in TK, TK = \{Auto, User, Event, Time, Assistant\}$ 。

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和流程控制变量以及流程中涉及的 SG; SG 集合决定了执行网中各个变迁功能的资源, SG 由服务聚合框架来实现

和管理;

②与普通的着色 Petri 网仅仅把库所通过库所颜色函数映射到库所颜色集来丰富网的表达能力相比, WSCP/R-net 通过变迁颜色函数把变迁执行资源类(SG)引入网中,从而可以有效解决服务聚合中服务的动态变化性问题;

③守护函数 G 将每个变迁 t 与一个布尔类型的表达式相连,在利用 WSCP/R-net 进行服务聚合流程建模时,若变迁的 G 恒为 true,则建模时该变迁的守护函数可以省去;

④根据服务聚合流程建模的需要,本文把变迁分为 5 类,即自动变迁(Auto)、用户变迁(User)、事件变迁(Event)、时间类型(Time)和辅助变迁(Assistant),每一种变迁都有自己特殊的应用和交互模式;

自动变迁:只要变迁达到使能(enable)状态,不需要其他的操作变迁就可以自动触发;

用户变迁:使能变迁的执行需要用户的交互才能继续进行;

事件变迁:事件变迁达到使能状态时,变迁的执行依靠外部事件的触发,如 e-mail、异常消息以及其他事件管道得到的消息;

时间变迁:由控制时间的定时器来触发使能的变迁;时间变迁可以用来避免由于异常而引起的长时间等待问题;

辅助变迁:辅助变迁本身不具有业务功能,它的引入是为了优化服务聚合流程模型的结构;辅助变迁的触发也是自动进行的。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;辅助变迁用黑色填充的矩形框表示。

一般情况下自动变迁和辅助变迁的守护函数恒为真,建模时可以忽略;事件变迁和用户变迁在达到使能状态时需要根据变迁守护函数来判断变迁是否触发。

由上述定义可以看出, WSCP/R-net 与基本工作流网类似,也是由位置、变迁、令牌和有向弧线组成的有向二分图,与基本工作流网相比较, WSCP/R-net 更适合于服务流程建模的需要:

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;同时,库所颜色可以根据不同的聚合应用适当增加,因此模型的扩展能力也在加强;

2)变迁颜色和变迁颜色函数的引入,使得每一个服务变迁可以拥有多个执行服务,从而使得服务聚合流程具有一定的容错能力,适应了 Web 服务的动态变化性需求,更好地满足网络条件下动态服务聚合的需要;

3)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,增加了过程定义的柔性,使得聚合流程的定义更加灵活、方便。

3.2 动态行为

WSCP/R-net 的动态行为(Behavior)反映了服务聚合流程运行时的性质。一方面,颜色值(实例相关数据和流程控制数据)在流程运行过程中通过变迁的执行而发生变化;另一方面, WSCP/R-net 的实施依赖于表示业务规则的变迁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 可以用来进行各种复杂服务聚合流程的建模。

定义 4 变迁 t 在标记 M 下对绑定 b 是使能的(enabled),当且仅当:

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

$$(2) G(t)(b) = true$$

$$(3) C_T(t) \neq \emptyset$$

表达式 $W(p, t)$ 的计算结果是当变迁 t 激发时从库所 p 流走的 token, 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。

定义 5 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:

$$\forall p \in P$$

$$M_2(p) = \begin{cases} M_1(p) - W(p, t) & p \in \cdot t - \cdot \\ M_1(p) + W(t, p) & p \in t \cdot - \cdot \\ M_1(p) - W(p, t) + W(t, p) & p \in t \cdot \cup \cdot t \\ W_1(p) & p \notin t \cdot \cup \cdot t \end{cases}$$

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: $M_1[t > M_2]$ 。

在 WSCP/R-net 模型中,一个变迁对应于一个 SN, SN 之间的相互依赖关系由控制流表达,也可能由控制流和数据流一起描述,因此 WSCP/R-net 模型的一次完整执行,意味着一个控制托肯由源库所 i 移到终止库所 o ,也即实例数据到达终止库所 o 。

4 WSCP/R-net 应用实例

4.1 城市危机处理流程 WSCP/R-net 模型构建

城市危机应急处理是针对城市火警以及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资源和空间信息处理资源,为指挥部门的决策提供支持,具体的执行过程如下:首先接受市民或者传感器的报警信息,启动应急流程;根据报警信息的信息类型决定是否采用地理编码服务把报警地名转化为地理坐标;根据报警的类型,通过地理坐标从各个部门获取警情发生地的数据,其中火警需要行政区划、道路交通、水源分布数据,匪警需要行政区划、道路交通以及警力分布数据;对获取的数据进行集成并进行缓冲区分析,从而使得决策部门能够直观地了解事故地点的周边环境、水源分布等信息,为报警处理的指挥决策提供支持。对应的 WSCP/S-net 模型如图 2 所示。

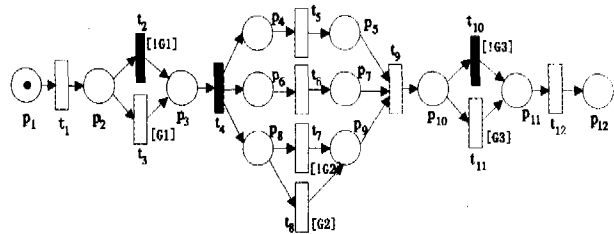


图 2 城市应急处理 WSCP/R-net 模型

其中, t_1 为请求解析服务, t_3 为地理编码服务, t_5 为行政区划数据服务, t_6 为道路交通数据服务, t_7 为水源分布数据服务, t_8 为警力分布数据服务, t_9 为数据整合服务, t_{11} 为缓冲区分析服务, t_{12} 为显示输出服务; t_2, t_4, t_{10} 为空服务(辅助变迁)。定义在库所 $p(p \in P)$ 的颜色集 $C_p(p)$ 代表处在 p 状态的服务聚合应用实例的属性集,结合应急处理的具体应用,库所颜色集可定义为 $\Sigma_c = \{No(\text{报警号}), AlarmType(\text{警种}), PositionType(\text{位置类型}), Position(\text{位置}), Data(\text{数据})\}$, 其中: No 记录聚合流程的运行标志; $Position$ 描述警情发生地的位置

信息, Data 记录数据服务运行结果, 属于实例相关数据 (Case Data); AlarmType 和 PositionType 用于流程路径的选择, 属于控制数据 (Control Data)。AlarmType = {火警, 匪警}, PositionType = {地名, 地理坐标}。

库所的颜色函数定义如下:

$$C_p(p) = \begin{cases} No \times AlarmType \times PositionType \times Position & p \in \{p_1, p_2\} \\ No \times AlarmType \times Position & p \in \{p_3, p_4, p_5, p_6\} \\ No \times AlarmType \times Position \times Data & p \in \{p_7, p_8, p_9, p_{10}\} \\ No \times AlarmType \times Data & p \in \{p_{11}, p_{12}\} \end{cases}$$

变迁颜色集可以定义为 $\Sigma_{SG_i} = \{SG_i \mid 1 \leq i \leq 12 \wedge i \neq 2 \wedge i \neq 4 \wedge i \neq 10\}$

Guard $G_1(\text{pro})$ { If pro.PositionType="地名" Then Return(true) Else Return(false) End If }	Guard $G_2(\text{pro})$ { If pro.AlarmType="匪警" Then Return(true) Else Return(false) End If }	Guard $G_3(\text{pro})$ { If pro.AlarmType="火警" Then Return(true) Else Return(false) End If }
--	---	---

图3 变迁守护函数

4.2 模型执行过程

本文对 4.1 节所示应用实例的 WSCP/R-net 模型运行过程进行描述, 以此说明 WSCP/R-net 进行动态服务聚合流程描述的可行性和有效性。

在本节的描述中, 假定 WSCP/R-net 模型中的资源有效性已得到保障, 即每一个变迁的变迁颜色函数取值 (对应 SG 信息) 均不为空。

假设一个运行实例, “x 宾馆” 发生火灾, 指挥中心接受地名报警, 库所 P_1 产生一个托肯, P_1 的托肯颜色值可以记为 P_1 (No = “060412001”, AlarmType = “火警”, PositionType = “地名”, Position = “x 宾馆”), 流程进行执行阶段:

1) 变迁 t_1 的守护函数为真, 自动触发, 流程模型状态变为 $\{P_2\}$, 颜色 $\text{pro}(\text{No} = \text{“060412001”, AlarmType} = \text{“火警”, PositionType} = \text{“地名”, Position} = \text{“x 宾馆”})$;

2) 在库所 P_2 进行流程路径的选择, 变迁 t_3 的守护函数在绑定 (PositionType = “地名”) 时为 true, 变迁 t_2 的守护函数在绑定 (PositionType = “地名”) 时为 false, 故变迁 t_3 触发, 流程模型的状态变为 $\{P_3\}$, P_3 (No = “060412001”, AlarmType = “火警”, Position = “地理坐标”), 其中 “地理坐标” 为火警发生地 “x 宾馆” 经过编码操作后所得到的地理坐标;

3) 变迁 t_4 为辅助变迁, t_4 自动触发后模型状态变为 $\{P_4, P_5, P_6\}$, 流程处于数据, P_4, P_5, P_6 与 P_3 具有相同的颜色值;

4) 流程在库所 P_6 进行流程路径的选择, 变迁 t_7 的守护函数在绑定 (AlarmType = “火警”) 时为 true, 变迁 t_8 的守护函数在绑定 (AlarmType = “火警”) 时为 false, 变迁 t_7 进行触发; 同时由于变迁 t_5, t_6 的守护函数为 true 所以进行触发, 流程模型的状态变为 $\{P_5, P_7, P_9\}$, 颜色 $\text{pro}(\text{No} = \text{“060412001”, AlarmType} = \text{“火警”, Position} = \text{“地理坐标”, Data} = \text{A})$, 其中 A 分别为通过变迁 t_5, t_6 和 t_7 获取的行政区划、道路交通和水源分布数据;

5) 变迁 t_9 的守护函数为 true, 所以进行触发, 流程模型的状态变为 $\{P_{10}\}$, 颜色 $\text{pro}(\text{No} = \text{“060412001”, AlarmType} = \text{“火警”, Position} = \text{“地理坐标”, Data} = \text{B})$, 其中 B 为各种数据进行集成后的数据;

6) 库所 P_{10} 进行路径选择, 变迁 t_{11} 的守护函数在绑定 (AlarmType = “火警”) 时为 true, 变迁 t_{10} 的守护函数在绑定

$\neq 4 \wedge i \neq 10\} \cup \{\phi\}$, 其中 ϕ 表示空服务; 变迁的颜色函数定位如下:

$$C_T(t) = \begin{cases} SG_i & t \in \{t_i \mid 1 \leq i \leq 12 \wedge i \neq 2 \wedge i \neq 4 \wedge i \neq 10\} \\ \phi & t \in \{t_2, t_4, t_{10}\} \end{cases}$$

辅助变迁的引入是为了优化服务聚合流程模型的结构, 每一个辅助变迁对应一个空服务。图 2 中带有 [.] 标识的变迁表示该变迁具有守护函数 (没有 [.] 标识的表明该变迁的守护函数恒为 true), 守护函数表达了流程的业务规则, 结合城市应急处理的应用逻辑, 图 2 中变迁对应的守护函数定义如下 (设 pro 表示变迁的前置库所的颜色值):

(AlarmType = “火警”) 时为 false, 所以变迁 t_{11} 进行触发, 模型状态变为 $\{P_{11}\}$, 颜色 $\text{pro}(\text{No} = \text{“060412001”, Position} = \text{“地理坐标”, Data} = \text{C})$, 其中 C 为进行缓冲区分析后的数据;

7) 变迁 t_{12} 的守护函数为 true, 所以变迁触发显示数据 C, 流程结束。

由上述城市危机应急处理流程的运行过程可以看出, WSCP/R-net 模型有效解决了现有的基于基本 Petri 网和工作流网的服务聚合流程建模技术所不能解决的不确定活动的路径选择问题; 此外, WSCP/R-net 模型通过变迁颜色 (服务群) 和变迁颜色函数的引入, 能够对 Web 服务的动态变化性提供支持, 更好地满足了 Web 环境下动态服务聚合流程建模的需要。

结论及下一步工作 服务聚合流程建模是流程驱动的动态服务聚合研究中的关键问题。本文首先基于服务聚合动态建模的需求和服务聚合中服务动态变化的应用实际, 引入了服务结点和服群的概念, 从服务聚合的过程维和资源维出发定义了服务聚合流程定义元模型; 与流程定义元模型相对应, 基于扩展工作流网提出了一种新的服务聚合流程/资源描述模型 WSCP/R-net, 有效解决了服务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, 能够更好地满足服务聚合流程动态建模的需求。

本文的研究工作还在继续; 下一步将对 WSCP/R-net 模型的正确性进行研究, 保证服务聚合流程在投入使用之前的正确性和可靠性。

参考文献

- Boualem B, Zheng S Q, Marlon D. The Self-Serv Environment for Web Services Composition. IEEE Internet Computing, 2003, 7(1): 40~48
- Tang Yu, Luo, He Kaitao, Jing Ning. SRN: An Extended Petri-Net-Based Workflow Model for Web Services Composition. IC-WS2004, San Diego, USA, IEEE Press, 2004. 591~599
- 李志伟. 以 Petri 网为基础的网络服务组合前置验证及简化方法. 中原大学, 台湾, 2004
- Hamadi R, Benatallah B. A Petri net based Model for Web Services Composition. In: Proc. 14th talasian database conference on Database technologies, 2003
- Rumbaugh J, Jacobson I, Booch G. The Unified Modeling Language Reference Manual. Addison Wesley Longman, Inc., 1999
- Jensen K. Colored Petri Nets Basic Concepts. Analysis Methods and Practical Use, Volume 1, 2 and 3, second edition, 1996