

带数据流的面向服务的业务流程模型变化传播 Petri 网方法

何路路 方 欢

(安徽理工大学数学与大数据学院 安徽 淮南 232001)

摘 要 为了灵活适应不断变化的业务需求,需要对流程模型进行调整。在业务逻辑整合过程中,业务逻辑可能发生变化,因此对业务变化及其传播进行分析是十分关键的。已有的研究方法主要基于控制流结构来分析和研究业务的变化域和变化传播问题,忽略了模型所含数据和服务结构的信息。文中对带数据信息的面向服务业务流程模型的变化传播方法和变化域定位进行分析和研究,主要关注服务层和流程层之间的变化传播问题。首先,分析流程层(服务层)的变化操作给模型的服务层(流程层)带来的变化影响范围,并分别提出了服务层变化传播算法(Service Layer Change Propagation Algorithm,SLCPA)和流程层变化传播算法(Process Layer Change Propagation Algorithm,PLCPA)。最后,通过一个具体的实例证明了所提方法的可行性和有效性。

关键词 变化传播,流程层,服务层,面向服务的业务流程模型,Petri 网

中图分类号 TP301 文献标识码 A

Change Propagation Method of Service-oriented Business Process Model with Data Flows Based on Petri Net

HE Lu-lu FANG Huan

(College of Mathematics & Big Data, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China)

Abstract In order to adapt to changing business requirements flexibly, it is necessary to adjust the process models. In the process of business integration, business logic may change, and thus it is critical to analyze the investigations of business changes and its propagation. The existed methods study the business change regions and change propagation methods mainly from the aspect of control flow structures, neglectes the data information and service structures of the mode. In this paper, the change propagation method and the change domain regions were analyzed in the service-oriented business process model with data information. It focused on the propagation problem between the service layers and the process layers. Firstly, by a mutation operation in a service layer (or process layer), the direct influence region of the change was discussed in detail, and two change propagation algorithms were proposed, which are the service layer change propagation algorithm named SLCPA, and the process layer change propagation algorithm named PLCPA respectively. Finally, a case example was given to illustrate the feasibility and effectiveness of the proposed method.

Keywords Change propagation, Process layer, Service layer, Service-oriented business process model, Petri nets

1 引言

随着面向服务架构(Service-Oriented Architecture)的广泛应用,面向服务业务系统的维护和整合面临着日益严重的问题^[1]。由于服务的分布式和动态性,存储库中的业务流程可以是相互依赖的(就设计和执行而言),服务和业务流程可能会不定时地改变。一个服务的改变通常会影响到相关联的业务流程和服务,甚至可能进一步影响到与之关联的各种层次的抽象模型。因此,变化域和变化传播管理是面向服务的业务流程模型的挑战性问题^[2]。为了实现服务的变化域及其传播管理,有必要分析与识别不同类型的变化以及变化影响模式,并采用有效的机制来对其进行处理。

在工作流和信息系统的背景下,变化域及其传播问题在面向服务的业务流程领域已经被广泛研究^[3],已有的研究工

作主要集中在服务或业务流程的变化问题上。已有的关于服务变化管理的研究工作主要包括:服务接口和业务协议适应^[4-5]、BPEL 流程编排(Process Choreography)、编排的变更管理^[6]以及服务演进^[7]。文献[8]提供了关于工作流网运行的标准,并利用实际方法分析提取与动态变化域传播密切相关的元素。文献[9-10]基于行为轮廓理论,提出了边界和内部变迁减少的动态获得目标模型变化域的方法,但该方法未涉及流程模型的数据信息。文献[11]提出了一种用于分类变化类型的算法,根据变化类型来计算可能变化对整个系统的潜在影响。文献[12]提出一种特殊的数据结构用以存储流程模型之间的共享片段的变化传播方法。文献[13]通过建立具有相关联的某些流程模型集合的生态系统,用于在大型流程模型仓库中实现流程模型间关系自动化的方法。文献[14]从业务层面和服务层面的角度出发,对 SOA 架构系统进行了系

本文受国家自然科学基金项目(61472003,61272153,61340003,61402011,61572035),安徽省自然科学基金项目(1608085QF149),安徽省教育厅高等学校自然科学研究重点项目(KJ2014A067, KJ2016A208)资助。

何路路(1990—),男,硕士,主要研究方向为 Petri 网理论与应用,E-mail:809725553@qq.com;方欢(1982—),女,博士,副教授,主要研究方向为 Petri 网理论与应用、智能控制,E-mail:fanghuan0307@163.com。

统地总结和分析了,详尽描述了变化在业务系统中的研究方法和结论。这些研究方法和结论都表明:已有的针对业务流程模型的变化域传播方法的研究大都从模型的结构出发,很少有从模型中所包含的数据流的角度进行分析。鉴于业务流程模型不仅包含结构信息,还包含数据流信息以及服务对象,仅从模型结构层面进行变换域传播分析时的局限性较大。

基于以上背景,本文从模型的结构、数据流以及服务对象3个角度来分析模型的变化域和变化传播问题,提出了基于Petri网的面向服务的业务流程模型的变化传播分析方法,其中包括服务层和流程层的变化传播算法SLCPA和PLCPA。本文的主要思路是:首先,通过建立基于Petri网的带数据的业务流程模型,将所建立的模型分为两个层次,即流程层和服务层,考虑到业务流程模型中不仅含有活动变迁元素,还包括数据信息元素的特性,进一步将流程层分为控制流结构和数据流结构;其次,通过给定两种不同的变化(服务结构的变化和流程结构的变化),分别建立两种变化函数,利用算法来定位服务与流程之间的变化操作所带来的直接影响范围,即直接变化的传播影响范围。

本文第2节介绍了相关概念和基本术语;第3节给出了基于Petri网的面向服务的业务流程模型及变化传播分析的算法;第4节采用具体的实例分析了所提方法的有效性;最后总结全文。

2 相关定义

关于Petri网、变迁发生规则、Petri网系统的定义请参考文献[14],弱序和行为轮廓的定义请参考文献[15]。下面给出一些其他定义。

定义1^[16](工作流Petri网) 一个网 $N=(S, T; F, i, o)$ 称为工作流Petri网,当且仅当满足条件:

- (1)该Petri网有唯一的源库所 $i: i' = \emptyset$;
- (2)该Petri网有唯一的终止库所 $o: o' = \emptyset$;
- (3)该Petri网上的每一个节点都在 i 到 o 的一条路径上,即Petri网是强连通的。

本文研究的变化域和变化传播是关于流程模型的流程层和服务层,而流程层又包含流程的活动元素和数据流信息。因此,下面给出模型的控制流结构、数据流结构以及服务层结构的定义。行为轮廓是关于流程模型活动变迁之间的严格序、交叉序和排他序的一种控制流方面的关系。

定义2(控制流Petri网) 一个网 $\Sigma_F=(S, T; F, M_0, BP)$ 称为控制流Petri网,当且仅当满足条件:

- (1) S 为控制流库所集: $S \neq \emptyset$;
- (2) T 为控制流变迁集: $T \neq \emptyset$;
- (3) M_0 是初始标识, F 是控制流关系, BP 是模型的行为轮廓。

定义3^[17](数据流Petri网) 一个网 $\Sigma_{DC}=(T_D, D; DC)$ 称为数据流Petri网,当且仅当满足条件:

- (1) T_D 为数据流的变迁集: $T_D \neq \emptyset, T_D \subset T$ 且 $\forall t \in T_D,$

t 都存在一个输入参数(记为 $INP(t)$)和一个输出参数(记为 $OUT(t)$),即流程模型中的数据元素;

- (2) D 为数据流的数据集: $D=\{d_1, d_2, \dots, d_m\}$;

(3) DC 为数据流的数据连接集: $DC=\{dc_1, dc_2, \dots, dc_m\}$ 且 $dc=(d, t, INP(t)/OUT(t), write/read)$,其中 $d \in D, t \in T_D, write$ 为输出数据信息的函数,即当变迁 t 发生时的输出数据; $read$ 为输入数据信息的函数,即当变迁 t 发生时的输入数据。

数据流模式定义了流程模型中所包含的数据信息如何在活动之间传输,是理解分析变化影响不可或缺的活动之间的数据依赖关系的关键。

定义4(活动和数据之间的依赖关系) 令一个Petri网系统为 Σ ,则 $\forall t_1, t_2 \in T$,称活动变迁 t_2 关于数据 d 是依赖活动变迁 t_1 的,记为 $t_2 \rightarrow^D t_1$,当且仅当满足:

- (1)活动变迁 t_1 是活动变迁 t_2 的前集;
- (2)存在两个数据连接 $dc_x, dc_y \in \Sigma_{DC}$,使得 $dc_x=(d, t_1, OUT(t_1), write), dc_y=(d, t_2, INP(t_2), read)$ 。

综上所述,一个业务流程Petri网系统定义为: $\Sigma=(\Sigma_F, \Sigma_{DC})$,其中 Σ_F 为控制流网, Σ_{DC} 为数据流网。

定义5^[17](服务层模型) 一个二元组 $SL=(O, F_S)$ 为流程模型的服务层,当且仅当:

- (1) $O=\{o_1, o_2, \dots, o_m\}$ 为操作活动集;
- (2) $F_S \subseteq O \times O$ 为操作与操作之间的控制流关系,对每一个 $f_s=(o_i, o_j) \in F_S (o_i, o_j \in O)$ 定义了从操作 o_i 到操作 o_j 的流关系,称 o_i 为 f_s 的源操作, o_j 为 f_s 的目标操作;
- (3)定义 $c(f_s)$ 为控制关系 f_s 上的约束条件,如果 $c(f_s) \neq \emptyset$,则当 $c(f_s)$ 的值为真时, f_s 发生。

在面向服务的业务流程模型中,一个流程模型可以服务于多个合作伙伴。在流程运行期间,属于流程系统内部的活动变迁则不对合作伙伴公开,而与同一伙伴相关的操作活动变迁则被分组为服务对象。伙伴和伙伴之间共享活动变迁的执行顺序反映了活动变迁之间的控制关系。

下面举例给出流程模型的控制流结构、数据流结构和服务层结构。图1描述了某电子商城购物流程模型(部分图),图中符号的含义如表1所列,其中 d_1, d_2, d_3, d_4 为模型中的数据元素,实线箭头代表模型活动之间的控制流,虚线箭头代表了活动之间的数据连接。1)模型的控制流结构:当变迁 t_1 和 t_2 发生以后,库所 s_2 和 s_3 同时得到一个token,根据定义2可知,变迁 t_3 和 t_4 为交叉序关系;2)模型的数据结构:如变迁 t_2 发生后要将数据 d_1 发送给变迁 t_3 ,根据定义3可知,此时变迁 t_2 的数据连接为 $dc_2=(d_1, t_2, OUT(t_2), write)$ 。而当变迁 t_2 发生后,通过库所 s_2 导致变迁 t_3 发生,此时数据 d_2 被变迁 t_3 连接,因此变迁 t_3 的数据连接为 $dc_3=(d_1, t_3, INP(t_3), read)$;3)模型的服务结构:该流程模型(部分图)涉及到3个对象:买家、第三方支付机构和卖家。由定义5可知,图1的购买流程包括了3个服务对象:买家 sl_1 、卖家 sl_2 和第三方支付机构 sl_3 (见图2)。

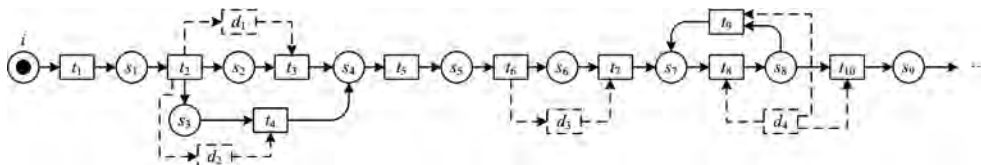


图1 某电子商城的购物流程模型

表 1 图 1 所示模型中的符号表示

| 符号表示 | | | |
|----------|-----------|-------|---------|
| t_1 | 选择商品 | d_1 | 订单信息 |
| t_2 | 提交订单 | d_2 | 交易金额 |
| t_3 | 卖家收到订单 | d_3 | 买家已付金额 |
| t_4 | 向第三方支付付款 | d_4 | 商品、地址信息 |
| t_5 | 第三方支付收到付款 | | |
| t_6 | 第三方支付通知卖家 | | |
| t_7 | 卖家收到到款通知 | | |
| t_8 | 向买家发送确认信息 | | |
| t_9 | 修改订单/收货地址 | | |
| t_{10} | 卖家发货 | | |

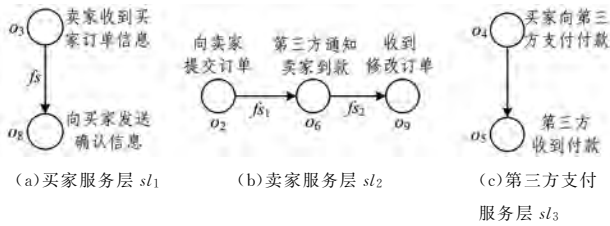


图 2 图 1 中的流程支持的 3 个服务层

定义 6^[18](变化域) 给定一个流程模型 Petri 网 $N = (S, T; F, i, o)$, 则模型的变化部分为 $N_c = (S_c, T_c; F_c, i, o)$, N_c 是一个子网, 即 $S_c \subseteq S, T_c \subseteq T, F_c \subseteq F, N_c \subseteq N$.

定义 7(服务层变化函数) 函数 $FUNSC: \Sigma, SL, serchange \rightarrow PE$ 为服务操作变化带来的流程层直接变化传播范围。其中, Σ 是一个业务流程 Petri 网系统, Σ_F 为其控制流结构, Σ_{DC} 为其数据流结构。SL 为该网系统所支持的服务层; $serchange$ 为给定一个服务层上的类型变化, $O_c = \{o_1, o_2, \dots, o_r\}$ 为 $serchange$ 变化所涉及的操作集合。 $PE = \{pe_1, pe_2, \dots, pe_r\}$ 为一个流程元素的集合, 其中 $pe_i (i=1, \dots, r)$ 包括:

- (1) 活动 $t_i: t_i$ 与变化操作 o_i 相关联;
- (2) 活动 $t_j: t_j$ 与 t_i 有数据依赖关系, 即 $t_j \rightarrow^D t_i$, 将 t_j 集合定义为 T_{depend} ;
- (3) 活动 t_i 和活动 t_j 之间的数据以及数据连接 $d_{ck} (d_{ck} \in DC)$ 。

定义 8(流程层变化函数) 函数 $FUNPC: \Sigma, SL, pchange \rightarrow SF$ 为流程操作变化带来的服务层直接变化传播范围。其中:

- (1) Σ 是一个业务流程 Petri 网系统, Σ_F 为其控制流结构, Σ_{DC} 为其数据流结构;
- (2) SL 为该网系统所支持的服务层;
- (3) $pchange$ 为给定一个流程层上的类型变化, 鉴于面向服务的业务流程的一个流程可以支持多个服务, 因此使用 $O_c^i \subseteq O_c$ 定义属于 sl_i 的操作集;
- (4) $SF = \{sf_1, sf_2, \dots, sf_r\}$ 为服务层变化的集合, 其中 $sf_i (i=1, \dots, r)$ 包括:

- 1) 所有的变化操作 O_c^i ;
- 2) 控制关系 $F_s: F_s$ 将 O_c^i 中的任何操作作为原始操作或者目标操作;
- 3) 操作 $o_x: o_x$ 是关于 sf_i 中控制关系 F_s 的原始操作或目标操作, 但同时 o_x 不属于 O_c^i 。

3 服务层和流程层变化传播计算方法

在面向服务的业务流程模型变化传播分析中, 涉及到流

程模型内服务层和流程层变化操作的类型, 以及该类型的变化操作对目标层产生的直接和间接影响范围。文献[17]详细给出了关于流程层的 9 种类型变化、服务层的 6 种高级别过度变化和 1 种原始操作变化。本文针对文献[17]中的流程层(服务层)一个类型的变化操作(如删除或增加一个活动变迁), 研究算法实现该操作给服务层(流程层)带来的直接影响范围。为此, 给出如下两个算法: 服务层变化传播算法 SLC-PA 和流程层变化传播算法 PLC-PA。

算法 1 用于计算服务层的变化给流程层带来的变化域传播直接影响范围。

算法 1 服务层变化传播算法

输入: 网系统 Σ 及其控制流结构 Σ_F 和数据流结构 Σ_{DC} , 被该网系统所支持的服务层 SL, 给定一个服务层上的类型变化 $serchange$ 以及该变化所涉及的操作集合 $O_c = \{o_1, o_2, \dots, o_r\}$

输出: 流程元素的集合 $PE = \{pe_1, pe_2, \dots, pe_r\}$ 。

Step1

Step1.1 令 $PE \leftarrow \emptyset$

Step1.2 For $\forall t_i \in T$, If t_i 与 o_i 有关联 Then
 $pe \leftarrow \{t_i\}$

Step2

Step2.1 令 $T_{depend} \leftarrow \emptyset$

Step2.2 For $\forall t_j \in T$ 且 $t_j \neq t_i$, If t_i 与 t_j 有数据依赖关系 Then
 $T_{depend} \leftarrow T_{depend} \cup \{t_j\}$

Step3

Step3.1 令 $DC \leftarrow \emptyset$

Step3.2 For $\forall dc \in \Sigma_{DC}$, If dc 和 t_i 有关联且 dc 和 t_j 有关联 Then
 $DC \leftarrow DC \cup \{dc\}$

Step4 令 $pe \leftarrow pe \cup T_{depend} \cup DC$

Step5 算法结束, 令 $PE \leftarrow PE \cup \{pe\}$, 输出 PE。

算法 1 给出了业务系统中服务层的变化对流程层的直接影响范围的计算方法, 给定一个服务层上的变化操作, 求出与此变化操作有关联的活动, 然后计算与此活动有关联的数据连接, 再求解与此活动有数据依赖关系的活动, 进一步计算与数据依赖的活动有关联的数据连接, 最后将上面求出的结果并入集合 PE 中, 即所求的服务层对流程层产生的直接影响范围。

算法 2 用于计算流程层的变化给服务层带来的直接影响范围。

算法 2 流程层变化传播算法

输入: 网系统 Σ 及其控制流结构 Σ_F 和数据流结构 Σ_{DC} , 被该网系统所支持的服务层 SL, 给定一个流程层上的类型变化 $pchange$ 以及一组直接受影响的操作。

输出: 流程元素的集合 $SF = \{sf_1, sf_2, \dots, sf_r\}$

Step1

Step1.1 令 T_c 为一组流程变化 $pchange$ 所涉及的相关变迁集,
 $O^i \leftarrow \emptyset (i=1, 2, \dots, n), SF \leftarrow \emptyset$

Step1.2 For $\forall t \in T_c$, If t 与服务 sl_i 有关联 Then
 $O^i \leftarrow O^i \cup \{o\}$

Step2 令 $sf_i \leftarrow O^i$

Step3 For $\forall o \in O^i$, If 控制关系 F_s 与 o 有关联 Then $sf_i \leftarrow sf_i \cup \{F_s\}$

Step4 For $o_x \in SL$, If o_x 与 F_s 有关联且 $o_x \neq o$ Then
 $sf_i \leftarrow sf_i \cup \{o_x\}$

Step5 算法结束, 令 $SF \leftarrow SF \cup \{sf_i\}$, 输出 SF。

算法 2 给出了业务系统中流程层的变化对服务层的直接影响范围的计算方法,给定一个流程层上的变化操作,首先,求出与服务对象有关的活动变迁,即该服务的操作;然后,求出与该操作有关联的控制关系;最后,求出与此控制关系有关的操作。将所求得的结果并入集合 SF 中,即为所求的流程层的变化对服务层产生的直接影响范围。

4 案例分析

下面利用算法 SLCPA 和算法 PLCPA 来具体分析一个案例。图 3 描述了带数据流的某电子商城的购物流程 Petri 网模型,模型中的符号如表 2 所列。根据定义 7,图 2 的流程模型包含了 4 个服务对象,分别为买家、卖家、第三方支付机构以及快递公司。由于业务服务的改进,该电子商城推出了货到付款的功能,即买家在提交订单后不需要预先向第三方支付机构付款,等买家收到货并确定其完好无损后当面与快递员结算费用,最后由快递公司付款给卖家。由这个过程不难发现,由于新推出的货到付款功能导致流程的服务对象发生了改变,即第三方支付机构的功能消失了(模型的服务结构发生改变),接着分析该流程模型服务结构的改变给流程结构

带来的变化域传播影响范围。

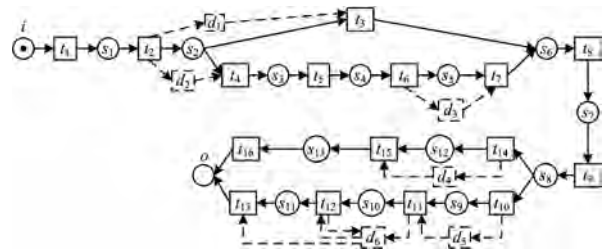


图 3 某电子商城的购物流程 Petri 网模型

表 2 图 3 所示模型的符号表示

| 符号表示 | | | |
|-------|-------------|----------|-------------|
| t_1 | 选择商品 | t_9 | 买家收货 |
| t_2 | 买家提交订单 | t_{10} | 申请退货/退款 |
| t_3 | 卖家收到订单信息 | t_{11} | 卖家通知第三方支付退款 |
| t_4 | 向第三方支付付款 | t_{12} | 第三方支付收到退款通知 |
| t_5 | 第三方支付收到付款 | t_{13} | 第三方支付向买家退款 |
| t_6 | 第三方支付通知卖家到账 | t_{14} | 买家确认收货 |
| t_7 | 卖家收到到账通知 | t_{15} | 第三方支付向卖家付款 |
| t_8 | 卖家发货 | t_{16} | 卖家收到付款 |
| d_1 | 订单信息 | d_2 | 交易金额 |
| d_3 | 买家已付金额 | d_4 | 买家已收货 |
| d_5 | 退款信息 | d_6 | 退款金额 |

根据 SLCPA 算法得出结果,如表 3 所列。

表 3 SLCPA 对图 3 的计算结果

| Step1 | Step2 | Step3 |
|---|--|--|
| 计算出与服务 o_i 有关 的变迁集 $T_i \subseteq T$ | 计算出与 $t_i \in T_i$ 有数 据依赖关系的 T_{depend} | 计算出 t_i 与 $t_j \in T_{depend}$ 之间的数据连接 $dc \in DC$ |
| $T_1 = \{t_4, t_5, t_{11}, t_{12}\}$ | $T_{depend} = \{t_2, t_{10}, t_{13}\}$ | $dc_2 = (d_2, t_2, OUT(t_2), write), dc_4 = (d_2, t_4, INP(t_4), read)$ $dc_{10} = (d_5, t_{10}, OUT(t_{10}), write), dc_{11} = (d_5, t_{11}, INP(t_{11}), read)$ $dc_{11} = (d_6, t_{10}, OUT(t_{11}), write), dc_{12} = (d_6, t_{12}, OUT(t_{12}), read)$ $dc_{12} = (d_6, t_{12}, OUT(t_{12}), write), dc_{13} = (d_6, t_{13}, INP(t_{13}), read)$ |

根据 SLCPA 算法得出流程层的变化域传播范围(见图 4 中的阴影部分)。根据实际意义,当货到付款功能导致第三方支付机构服务消失时,买家向第三方支付传递的数据信息 d_2, d_5 和卖家通知第三方支付退款通知的数据信息 d_6 ,由于第三方支付服务消失导致 d_2, d_5 和 d_6 消失符合实际意义。因此,该算法具有一定的实际可行性。

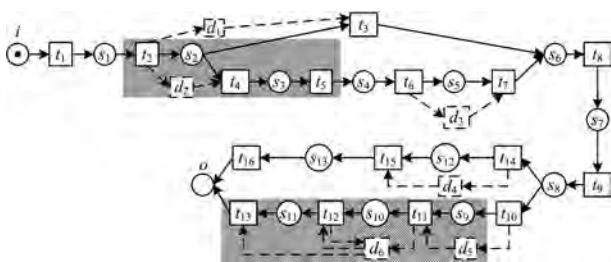


图 4 图 3 的流程模型服务变化域传播范围

结束语 由于服务的分布式和动态性,变化传播方法研究在开发和维护业务流程模型方面具有重要的作用,直接影响着模型系统的正常运行和可信性。本文在已有的研究结论的基础上,基于面向服务的业务流程模型的服务层和流程层之间的依赖关系,探讨了服务层和流程层之间的变化传播问题。本文的贡献主要有:1)基于服务结构、控制流结构,提出了带数据的面向服务的业务流程模型的建模方法;2)针对面向服务的业务流程模型的变化,分别给出了服务层和流程层上的不同变化传播算法 SLCPA 和 PLCPA,并通过算法来确定模型的变化域。

本文主要研究基于单流程、多服务的变化域和变化传播

问题,对更加复杂的业务系统(如多流程组合和交互复杂模型)还未涉及。在未来的研究工作中,将重点针对多个流程模型合并及交互产生的变化域和变化传播问题进行研究。

参考文献

- [1] ALI N, NELLIPAIAPPAN R, CHANDRAN R, et al. Model Driven Support for the Service-Oriented Architecture Modeling Language[C]// International Workshop on Principles of Engineering Service-Oriented Systems. ACM, 2010: 8-14.
- [2] PAPAZOGLU M P. The Challenges of Service Evolution[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2008, 5074: 1-15.
- [3] WEBER B, REICHERT M, RINDERLE-MA S. Change Patterns and Change Support Features — Enhancing Flexibility in Process-Aware Information Systems[J]. Data & Knowledge Engineering, 2008, 66(3): 438-466.
- [4] KONGDENFHA W, BENATALLAH B, CASATI F. An Aspect-Oriented Framework for Service Adaptation [C]// International Conference on Service-oriented Computing. Springer-Verlag, 2006: 15-26.
- [5] DUMAS M, SPORK M, WANG K. Adapt or Perish: Algebra and Visual Notation for Service Interface Adaptation[M]// Business Process Management. Springer Berlin Heidelberg, 2006: 229-234.
- [6] WOMBACHER A. Alignment of Choreography Changes in BPEL Processes[C]// IEEE International Conference on Services Computing. IEEE Computer Society, 2009: 1-8.

- fer torque magnetic memory and logic[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2014, 61(6): 3258-3264.
- [4] HUGHES H, BUSSMANN K, MCMARR P J, et al. Radiation studies of spin-transfer torque materials and devices[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2012, 59(6): 3027-3033.
- [5] BISHNOI R, EBRAHIMI M, OBORIL F, et al. Improving write performance for STT-MRAM[J]. IEEE Transactions on Magnetism, 2016, 52(8): 1-11.
- [6] 赵巍胜, 王昭昊, 彭守仲, 等. STT-MRAM 存储器的研究进展[J]. 中国科学: 物理学力学天文学, 2016, 46(10): 107306.
- [7] 董伟. 基于 NVM 的写操作优化策略研究与设计[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- [8] 李清安. 面向非易失性片上存储的编译技术研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2013.
- [9] CHEN Y R, WANG X B, ZHU W Z, et al. Access scheme of multi-level cell spin-transfer torque random access memory and its optimization[C]// Midwest Symposium on Circuits and Systems. 2010: 1109-1112.
- [10] 何炎祥, 沈凡凡, 张军, 等. 新型非易失性存储器架构的缓存优化方法综述[J]. 计算机研究与发展, 2015, 52(6): 1225-1241.
- [11] CHAITIN, AUSLANDER, CHANDRA, et al. P. W. : Register allocation via graph coloring[J]. Journal of Computer Languages, 1981, 238(16): 265-266.
- [12] COOPER K, DASGUPTA A, et al. Tailoring graph-coloring register allocation for runtime compilation[C]// Code Generation and Optimization. 2006: 39-49.
- [13] 张军超. 相连多寄存器组体系结构上的寄存器分配技术[D]. 中国科学院研究生院(计算技术研究所), 2005.
- [14] 邓宇. 基于图着色的存储层次优化技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.
- [15] 薛丽萍. 基于龙芯 I 的全局寄存器分配研究[D]. 中国科学院研究生院(计算技术研究所), 2004.
- [16] FALK H. WCET-aware register allocation based on graph coloring[C]// Design Automation Conference. 2009: 726-731.
- [17] LOU X H, GAO Z, DIMITORV, et al. Demonstration of multi-level cell spin transfer switching in mgo magnetic tunnel junctions[J]. Applied Physics Letters, 2008, 93(24): 242-502.
- [18] ZHAO M Y, XUE Y, YANG C M, et al. Minimizing MLC PCM write energy for free through profiling-based state remapping[C]// Asia and South Pacific Design Automation Conference. 2015: 502-507.
- [19] ZHAO M Y, XUE Y, HU J T, et al. State asymmetry driven state remapping in phase change memory[J]. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2016, 36(1): 27-40.
- [20] LIU X X, MAO M J, BI X Y, et al. An efficient stt-ram-based register file in gpu architectures[C]// Asia and South Pacific Design Automation Conference. 2015: 490-495.
- [21] LATTNER C, ADVE V. LLVM: A compilation framework for lifelong program analysis & transformation[C]// Code Generation and Optimization. 2004: 75-86.
- [22] LUO H Z, HU J T, SHI L, et al. Two-step state transition minimization for lifetime and performance improvement on MLC STT-RAM[C]// Design Automation Conference. 2016: 1-6.
- (上接第 548 页)
- [7] ANDRIKOPOULOS V, BENBERNOU S, PAPAZOGLOU M P. Managing the Evolution of Service Specifications[C]// International Conference on Advanced Information Systems Engineering. Springer-Verlag, 2008: 359-374.
- [8] RINDERLE S, REICHERT M, DADAM P. Correctness Criteria for Dynamic Changes in Workflow Systems- A Survey[J]. Data & Knowledge Engineering, 2004, 50(1): 9-34.
- [9] WEIDLICH M, WESKE M, MENDLING J. Change Propagation in Process Models Using Behavioural Profiles[C]// IEEE International Conference on Services Computing. IEEE, 2009: 33-40.
- [10] WEIDLICH M, MENDLING J, WESKE M. Propagating Changes between Aligned Process Models [J]. Journal of Systems and Software, 2012, 85(8): 1885-1898.
- [11] GUPTA C, SINGH Y, SINGH C D. A Dynamic Approach to Estimate Change Impact Using Type of Change Prpagation [J]. Journal of Information Processing Systems, 2010, 6(4): 597-608.
- [12] EKANAYAKE C C, ROSA M L, HOFSTED E A H M T, et al. Fragment-Based Version Management for Repositories of Business Process Models[M]// On the Move to Meaningful Internet Systems: OTM 2011. Springer Berlin Heidelberg, 2011: 20-37.
- [13] KURNIAWAN T A, GHOSE A K, DAM H K. Relationship Preserving Change Propagation in Process Ecosystems[C]// International Conference on Service-Oriented Computing. Springer-Verlag, 2012: 63-78.
- [14] ALAM K A, AHMAD R B, AKHUNZADA A, et al. Impact analysis and change propagation in service-oriented enterprises: A systematic review[J]. Information System, 2015(54c): 43-73.
- [15] 吴哲辉. Petri 导论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006, 4: 1-27.
- [16] SERGEY S, MATTHIAS W, JAN M. Business Process Model Abstraction Based on Synthesis From Well-Structured Behavioral Profiles[J]. International Journal of Cooperative Information Systems, 2012, 21(1): 55-83.
- [17] WEIDLICH M, MENDLING J, WESKE M. Efficient Consistency Measurement Based on Behavioral Profiles of Process Models [J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 2010, 37(3): 410-429.
- [18] WANG Y, YANG J, ZHAO W. Change Impact Analysis for Service Based Business Processes[C]// IEEE International Conference on Service-oriented Computing and Applications. IEEE, 2010: 1-8.
- [19] HAO W J, FANG X W. The Approach of Analyzing the Smallest Change Domain in Process Models Based on Petri Nets [J]. Computer Science, 2012, 39(Z11): 76-78.