

基于 Petri 网 Behavior Inclusion 的业务流程变化域融合分析

方贤文^{1),2)} 赵 芳²⁾ 方 欢¹⁾ 刘祥伟¹⁾

¹⁾(安徽理工大学信息与计算科学系 安徽 淮南 232001)

²⁾(同济大学计算机科学系 上海 201804)

摘 要 业务流程的变化域是潜在的、易导致系统出现非一致性的区域,从流程模型变化域的角度来分析业务系统可信性,也是解决业务系统可信管理的关键点之一.已有的研究大多数针对业务流程的控制流进行变化域分析,或将控制流与数据流进行交互分析,很少注意到两种流程交互时的行为包含关系及其影响.文中基于业务流程模型存在控制流和数据流,提出了基于 Petri 网 Behavior inclusion 的业务流程变化域融合分析方法,分别研究了业务流程控制流 Petri 网模型的变化域和数据流 Petri 网模型的变化域,并依据 Behavior inclusion 关系,确定了目标模型融合网的最终变化域.另外,对于存在沉默变迁的网提供了紧密度算法,分析业务流程控制流网、数据流网和融合网间的紧密度,以确定控制流模型或数据流模型对融合网变化域的影响程度.最后通过具体的实例分析与仿真实验,验证了该方法的有效性.

关键词 变化域; Behavior inclusion; 融合网; 沉默变迁; 紧密度

中图法分类号 TP393

DOI号 10.11897/SP.J.1016.2018.00695

The Fusion Analysis Method about the Change Region of the Business Process Model Based on Behavior Inclusion in Petri Net

FANG Xian-Wen^{1),2)} ZHAO Fang²⁾ FANG Huan¹⁾ LIU Xiang-Wei¹⁾

¹⁾(Department of Information and Computing Science, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001)

²⁾(Department of Computer Science, Tongji University, Shanghai 201804)

Abstract The change region in business process is potential and easily causing the inconsistency region. Therefore, the trustworthiness analysis of business system from the perspective of change region of business model is also one of the ways to solve the trusted management of business system. Proposed research mainly focus on the change region about the control flow of business process, or the interaction analysis of control flow and data flow, with little attention to the behavior inclusion relationships between the control flow and the data flow, and their influence to each other. In the view of control flow and data flow exist in the business process model, the fusion analysis method about the change region of the business process model is proposed based on behavior inclusion. Firstly, the change region of the control flow and the data flow Petri net models are analyzed respectively. Then, we determine the final change region of the fusion nets in the target model according to the relation of behavior inclusion. Furthermore, aimed to the process model existing silent transitions, we presented the calculation method of closeness in business

收稿日期:2016-02-21;在线出版日期:2016-06-20. 本课题得到国家自然科学基金(61572035,61272153,61402011)、安徽省自然科学基金(1508085MF111,1608085QF149)、安徽省高校自然科学基金重点项目(KJ2016A208)、安徽省学术和技术带头人资助项目(DG119)和安徽省优秀青年人才项目等资助. 方贤文,男,1975年生,博士,教授,主要研究领域为 Petri 网、可信软件和业务流程变化域分析. E-mail: 280060673@qq.com. 赵 芳,女,1989年生,博士研究生,主要研究方向为 Petri 网. 方 欢,女,1982年生,博士,副教授,主要研究方向为 Petri 网、离散事件系统与智能控制. 刘祥伟,女,1977年生,硕士,副教授,主要研究方向为业务流程管理和行为分析.

process models. By analyzing the closeness of the control flow or the data flow with the fusion nets, we could determine the influence degree to the change region of the fusion nets. Finally, we use concrete instance and simulation experiment to verify the effectiveness of the method.

Keywords change region; Behavior inclusion; fusion nets; silent transitions; closeness

1 引言

随着全球化的电子信息技术的不断发展,业务过程模型的建立对于很多大型的组织和公司起着越来越重要的作用,很多机构都倾向建立大型的过程模型仓库用以收集成千上万的模型,目的是促进过程模型的发展以及灵活地适应变化的业务需求.如业务流程建模与标注(BPMN)^[1]以其特定领域的高水平语言提供了大量的模型用以满足建模的需求;而且业务过程模型的抽象(BPMA)^[2]提供了一些技术从详细的过程模型中获取抽象的模型,同时保存了模型的基本性质而忽略掉那些无关紧要的细节;又例如 SAP 参考模型仓库^[3]提供了 604 个过程模型,用以实验性的研究;而业务过程管理(BPM)^[4]有着更广泛的应用场景,从业务流程模型进化过程到流程模型的实施,对 BPM 的方法和技术产生了多方面的需求.

因此,依据这些模型的构造,能提供更加专业的语言用以满足业务流程建模的需求.然而,所建立的模型有时也会出现一定的问题,即变化域.如何寻找出模型的变化域成为关键所在,而且在现实生活中模型不仅会出现控制流方面的问题,数据流方面有时也会出现诸多异常.例如:图书馆还书与借书的过程.读者去图书馆还书时一般都会成功,但是所借的图书若超过图书借阅的期限或者所借图书有所损坏,读者必须刷卡用以补偿图书馆的损失,若卡上余额充足则不影响还书与下一次借书,但若卡上的余额不足就会出现还书失败的场景,对下一次借书的册数也就构成一种约束.因此,我们需要考虑的不仅仅是模型的控制流部分,数据流部分也需要考虑进去,为此将控制流网和数据流网从融合的角度进行考虑,从而找出模型的变化域至关重要.

本文的主要贡献:(1)依据控制流网(Control Flow Nets, CFN)和数据流网(Data Flow Nets, DFN)的行为轮廓及弱序关系分别得出了目标模型控制流网和数据流网的变化域;(2)依据融合网的关键部位、控制流网和数据流网的交叉部位得出融

合网(Fusion Nets, FN)的变化域;(3)基于 CFN、DFN 与 FN 存在 Behavior inclusion 关系确定了目标模型融合网最终的变化域;(4)利用一阶继承关系和紧密度(Closeness)计算出影响融合网变化域的关键因子.

本文第 2 节描述近些年来关于业务流程模型变化域在国内外的研究现状;第 3 节引出业务流程 Petri 网系统的基本概念;第 4 节基于 Petri 网的控制流网、数据流网与融合网之间存在 Behavior inclusion 关系来分析目标模型融合网最终的变化域,并且计算控制流网、数据流网和融合网之间的紧密度;第 5 节采用具体的实例和仿真实验分析本文所给方法的有效性;第 6 节对全文进行总结.

2 相关工作

为了寻找出业务流程模型最终的变化域,国内外涌现出了大量关于该领域的研究工作,主要是从控制流或数据流方面寻找模型的变化域:

(1)从控制流的角度来看,业务流程变化的管理主要分为 3 个步骤:第 1 步,检测业务流程模型的变化;第 2 步,分析变化部分之间的关系并给出相应的计算;第 3 步,寻找变化域分析和解决方案.文献[4]基于迹语义,提出了 8 种变化类型,来检测流程模型中的变化.文献[5]在没有变化日志的情况下,检测并修复流程模型的变化,解决业务流程模型间的差异性.然而,这种方法存在极大的局限性.为了更完善的对业务流程变化进行管理,文献[6]首先以处理变化的能力为标准,给出了 18 种变化模式来检测流程的变化,并与已有的方法进行比较;然后,列出 7 种变化支持的特征,确保流程的变化以正确的方式出现,使得变化部分能够被追踪.但是,这种方法是建立在已经定义好的变化模式的基础上控制流程变化的产生,一旦流程的变化独立地出现在不同的组织单元中,就很难实现.许多业务流程在运行过程中都是高动态的并且不断变化的,文献[7]提供了一种系统的、有序的变化管理技术,以提高系统的灵活性和适应能力,便于变化的分析和管理;Weidlich 等

人^[8-9]给出了匹配过程模型的变化域传播,通过给出源模型的控制流网的变化域,利用变迁对间抽象的行为轮廓的特点,依据边界变迁节点的减少以及内部边界变迁节点的减少的方法来确定目标模型的变化域;文献[10]给出一种新的方法评估控制流网模型变化域,并将变化域进行了分类,且给出了变化域分类的算法;文献[11]提出了一种关于控制流变化域的管理技术,提高了模型的灵活性以及适应性,并用动态的 BPM 方法对模型的变化域进行分析和管理的;文献[12]基于模块以及 Petri 网的 T 不变量分析了业务流程的控制流方面的变化域;Wang 等人^[13]提出了基于网络的方法去识别模型中的重要模块,并且全面探讨了控制流模型变化域分布和传播的相关性,文献[14]描述了为了正确地适应运行中的工作流网,提供了寻找动态控制流变化域的方法;文献[15]提供了从控制流角度查询过程模型的方法,并且允许重放查询模型的行为,并基于迹语义及其抽象化提出了行为包含的概念,并用其分析寻找模型的变化域;文献[16]从控制流角度给出了行为轮廓和行为足迹,对不同类别的网模型予以分层,并提供了网结构和相关语义间的紧密关系;文献[17]将业务过程模型予以抽象化,用一些粗粒度的活动变迁予以描述过程模型相应的控制流关系,并用行为轮廓等理论证明所合成的模型的合理性;文献[18]给出了过程模型控制流方面的复杂事件查询,并用抽象的行为轮廓予以描述分析变化域问题;文献[19]给出了业务过程模型仓库的动作模式,将过程模型用多目标模式和单目标模式予以比较分析业务流程模型的相似性程度,并因此寻找模型的变化域。

(2) 从数据流的角度来看,例如 Sidorova 等人^[20]提出了带数据信息的工作流网,引出了验证其合理性的方法;文献[21]提出在工作流中寻找出数据流错误,引出了时序逻辑反模式的分析方法;Meda 等人^[22]也引出了三种数据流错误,即数据的缺失、数据的丢失以及数据的冗余,并且给出 Graph Traversal algorithm(GTforDF)用以检测工作流网中的数据流错误;文献[23]解释和定义了一些潜在的数据流问题,说明了在数据流网执行过程中若出现不一致的数据则会导致过程的自动终止;文献[24]提出了一种技术将整个过程模型数据流问题分解成小块去解决,能够更有效地解决数据流问题;文献[25]提出了基于 BPEL 描述过程模型的数据依赖关系,并提出基于数据依赖可以构造出更加精确

的模型;文献[26]提出了可配置的过程模型作为参考模型,用于描述特定领域的相似性问题,并提出了活动变迁之间的数据依赖关系用以防止隐藏和阻塞。

以上文献主要是从控制流或数据流方面寻找目标模型的变化域,没有将二者同时考虑进去分析变化域,因而具有一定的局限性. 本文提出了将控制流网模型和数据流网模型进行融合,依据 Behavior inclusion 关系,进而更加准确地去定位整个融合网的变化域。

3 基本概念

关于业务流程 Petri 网系统^[27-29]和业务流程变化域分析^[30-34]的相关概念较多,下面仅介绍与本文密切相关的几个概念,其他可具体参考文献[35-40]。

定义 1. 已知一个控制流模型 Petri 网是一个三元组 $CN = (P^C, T^C, F^C)$, 若 CN 满足如下几个条件:

- (1) P^C 是一个有限非空的控制库所的集合,
 $P^C = \{P_1^C, P_2^C, \dots, P_n^C\}$;
- (2) T^C 是一个有限非空的控制变迁的集合,
 $T^C = \{T_1^C, T_2^C, \dots, T_m^C\}$;
- (3) $P^C \cap T^C = \emptyset$;
- (4) $F^C \subseteq (P^C \times T^C) \cup (T^C \times P^C)$ 为控制库所和控制变迁之间的流关系;
- (5) $\cdot x = \{y \mid (y \in P^C \cup T^C) \cap ((y, x) \in F^C)\}$ 称为 x 的前集, $x \cdot = \{y \mid (y \in P^C \cup T^C) \cap ((x, y) \in F^C)\}$ 称为 x 的后集;
- (6) $\forall x \in P^C$, 若 $\cdot x = \emptyset$, 则称 x 为 P^C 的初始库所, 若 $x \cdot = \emptyset$, 则称 x 为 P^C 的终止库所. 则称 CN 为控制流模型 Petri 网。

下面给出 CN 的实例,图 1 表示的是源模型控制流网,图 2 表示的是目标模型控制流网. 可以看出在图 1 和图 2 中,读者去图书馆还书的过程中要选择楼层,借书过程中要选择图书以及放代书板,具体的行为如图 1 和图 2 所示。

定义 2. 已知一个数据流模型 Petri 网是一个三元组 $DN = (P^D, T^D, F^D)$, 若 DN 满足如下几个条件:

- (1) P^D 是一个有限非空的数据库所的集合,
 $P^D = \{P_1^D, P_2^D, \dots, P_n^D\}$;
- (2) T^D 是一个有限非空的数据变迁的集合,
 $T^D = \{T_1^D, T_2^D, \dots, T_m^D\}$;

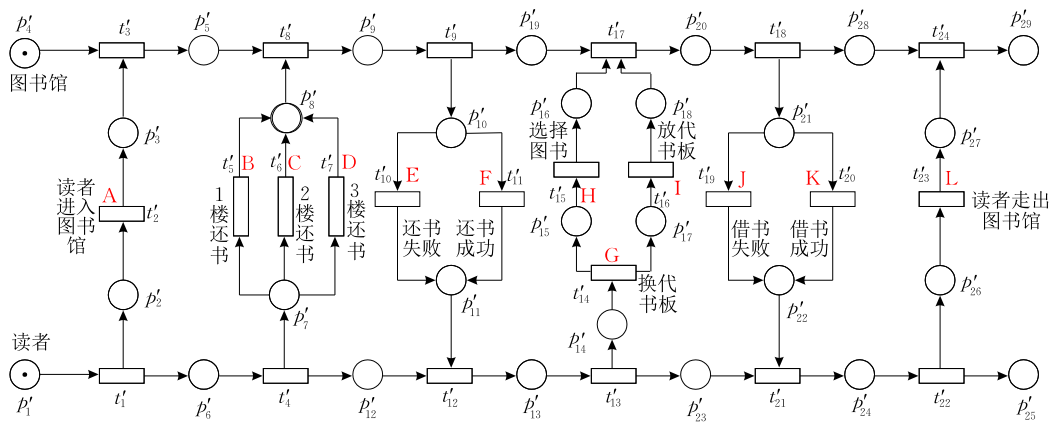


图 1 源模型控制流网

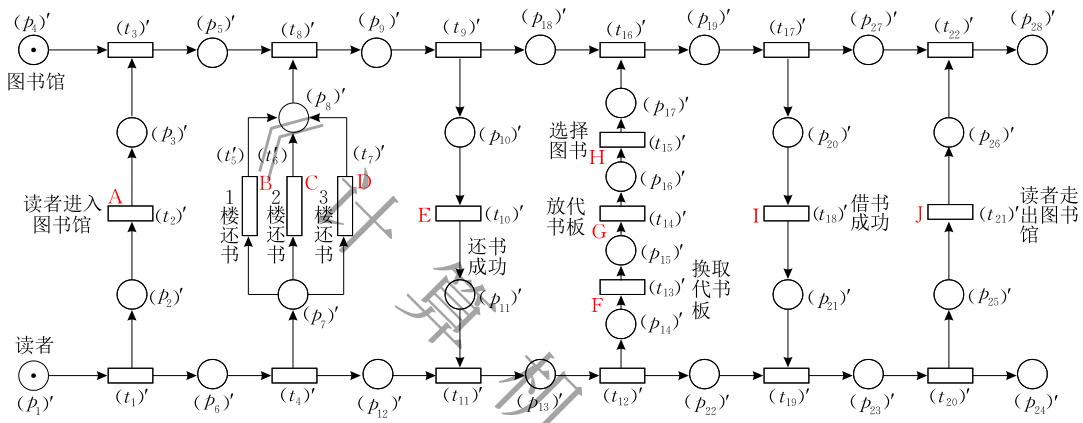


图 2 目标模型控制流网

- (3) $P^D \cap T^D = \emptyset$;
- (4) $F^D \subseteq (P^D \times T^D) \cup (T^D \times P^D)$ 为数据库所和数据变迁之间的流关系;
- (5) $\cdot x = \{y \mid (y \in P^D \cup T^D) \cap ((y, x) \in F^D)\}$ 称为 x 的前集, $x \cdot = \{y \mid (y \in P^D \cup T^D) \cap ((x, y) \in F^D)\}$ 称为 x 的后集;
- (6) $\forall x \in P^D$, 若 $\cdot x = \emptyset$, 则称 x 为 P^D 的初始库所, 若 $x \cdot = \emptyset$, 则称 x 为 P^D 的终止库所. 则称 DN 为数据流模型 Petri 网.

下面给出 DN 的实例, 在图 3 中, 读者去图书馆还书依据所借图书是否超期来确定是否缴费, 若读者缴费余额充足, 那么还书成功, 若缴费不足, 那么还书会失败; 若所借图书小于图书馆限制, 那么借书会成功, 若所借图书大于图书馆限制, 那么借书会失败. 在图 4 中, 读者去图书馆还书依据所借图书是否超期来确定是否缴费, 若读者缴费, 那么还书成功, 若去借 n 本书, 那么也会成功. 具体的行为如图 3 和图 4 所示.

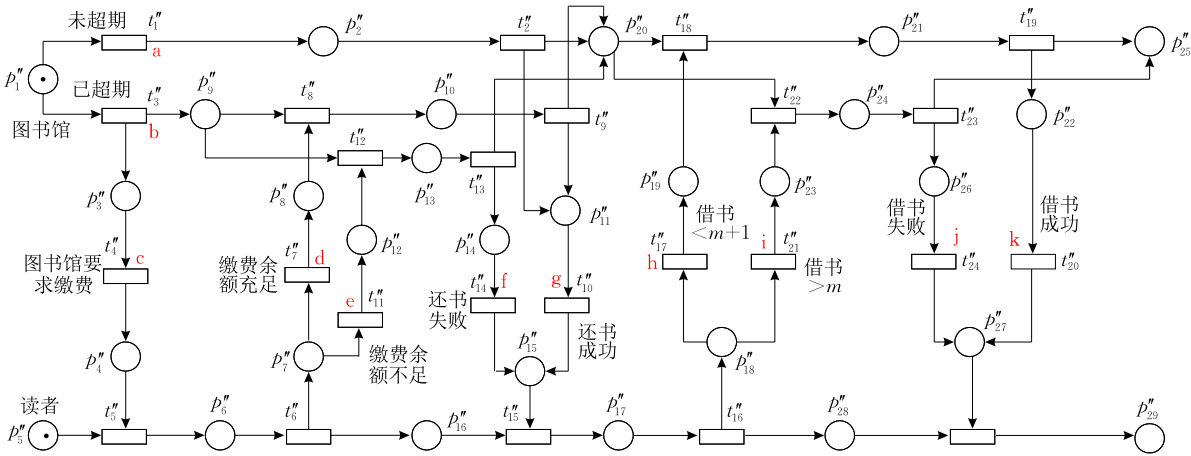


图 3 源模型数据流网

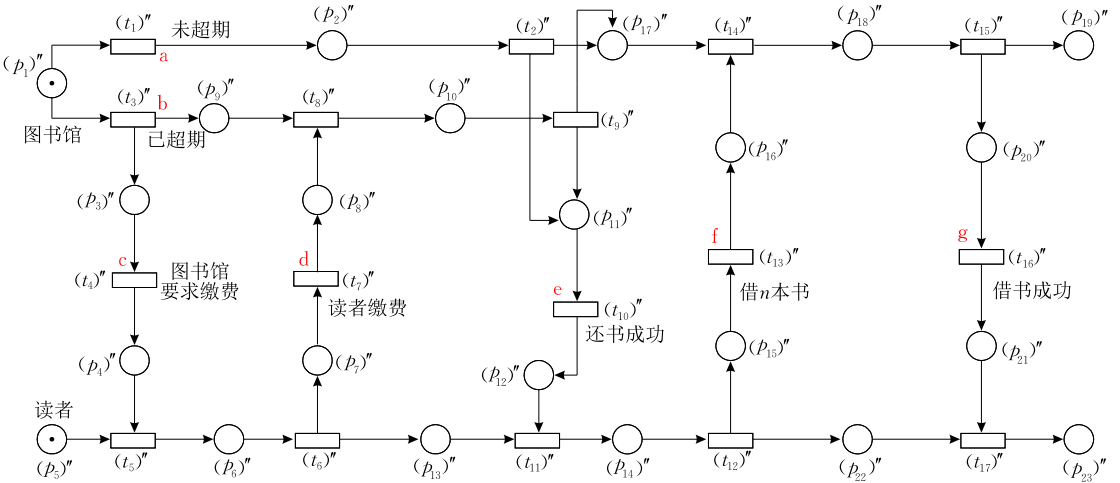


图 4 目标模型数据流网

定义 3. 已知 $CN=(P^C,T^C,F^C)$ 为控制流模型 Petri 网, $DN=(P^D,T^D,F^D)$ 为数据流模型 Petri 网, 则二者融合后形成的 Petri 网为 $CDN=(P,T,F)$, 其中 $P=P^C\cup P^D$, $T=T^C\cup T^D$, $F=F^C\cup F^D$, 称为

融合网。
依据定义 3 给出了图 1 和图 3 的融合网为图 5, 图 2 和图 4 的融合网为图 6。

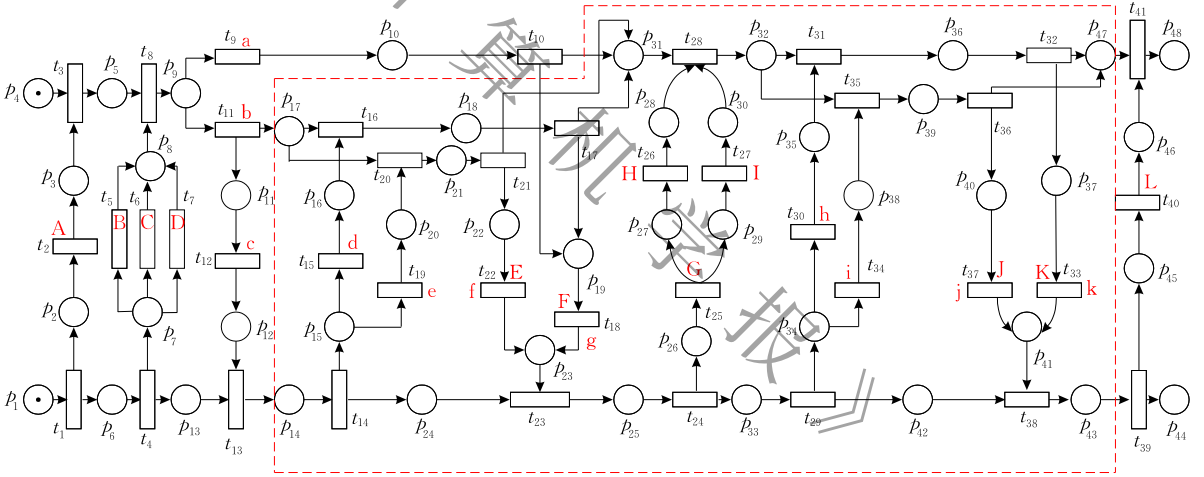


图 5 源模型控制流和数据流的融合网

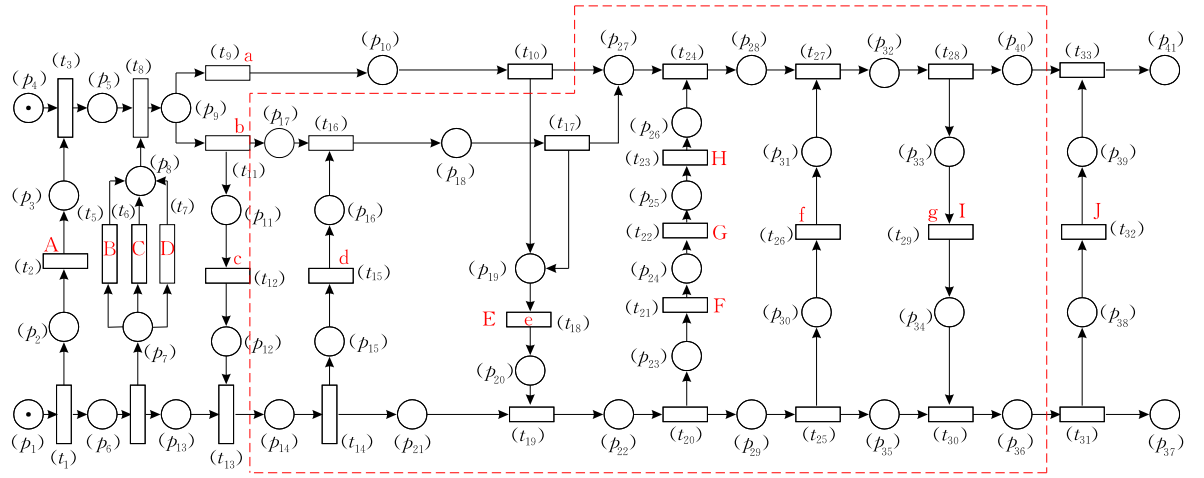


图 6 目标模型控制流和数据流的融合网

图 5 和图 6 重要的符号所代表的意思: p_1 和 (p_1) 表示读者, p_4 和 (p_4) 表示图书馆, t_2 和 (t_2) 表示读者进入图书馆, t_5 和 (t_5) 表示 1 楼还书, t_6 和 (t_6) 表示 2 楼还书, t_7 和 (t_7) 表示 3 楼还书, t_9 和 (t_9) 表示未超期, t_{11} 和 (t_{11}) 表示已超期, t_{12} 和 (t_{12}) 表示图书馆要求读者缴费, (t_{15}) 表示读者缴费, t_{15} 表示读者缴费余额充足, t_{19} 表示读者缴费余额不足, t_{18} 和 (t_{18}) 表示还书成功, t_{22} 表示还书失败, t_{25} 和 (t_{21}) 表示换取代书板, t_{27} 和 (t_{22}) 表示放代书板, t_{26} 和 (t_{23}) 表示选择图书, (t_{26}) 表示借 n 本书, t_{30} 表示借书 $n \leq m$, t_{34} 表示借书 $n > m$, t_{33} 和 (t_{29}) 表示借书成功, t_{37} 表示借书失败, t_{40} 和 (t_{32}) 表示读者走出图书馆。

定义 4. 给定一个控制流模型 Petri 网 CN , 若在 CN 中存在一个发生序列 $\sigma = t_1, \dots, t_n$, 使得当 $i \in \{1, \dots, n\}$ 时, $i < j \leq n$, 有 $t_i = x, t_j = y$, 则称 x 与 y 在控制流模型 Petri 网中存在弱序关系, 即 $x > y$.

DN 的弱序关系可类似的定义。

定义 5. 已知 $CN = (P^C, T^C, F^C)$ 为一个控制流模型 Petri 网, $\forall (t_i, t_j) \in (T^C \times T^C)$ 满足以下几种关系中的一种:

- (1) 严格序关系. $t_i \rightarrow t_j$, 若 $t_i > t_j$ 且 $t_j \not> t_i$.
- (2) 排他序关系. $t_i + t_j$, 若 $t_i \not> t_j$ 且 $t_j \not> t_i$.
- (3) 交叉序关系. $t_i // t_j$, 若 $t_i > t_j$ 且 $t_j > t_i$.

以上几种关系构成了控制流模型 Petri 网的行为轮廓, 根据严格序关系, 相应地可以得到严格逆序关系, 即 $t_i \rightarrow^{-1} t_j$, 若 $t_i \not> t_j$ 且 $t_j > t_i$.

DN 的行为轮廓可类似的定义。

定义 6. 已知 $SCN_1 = (P_1^C, T_1^C, F_1^C)$ 为源模型的控制流模型 Petri 网, $TCN_2 = (P_2^C, T_2^C, F_2^C)$ 为目标模型的控制流模型 Petri 网, $\approx \subseteq T_1^C \times T_2^C$ 为 SCN_1 和 SCN_2 中相应变迁的对应关系:

(1) $\forall T_{11}^C \subseteq T_1^C, T_{21}^C \subseteq T_2^C$ 为两个子变迁集, 并有 $T_{11}^C \times T_{21}^C \subseteq \approx$, 且对 $\forall t_1 \in (T_1^C \setminus T_{11}^C)$, 都有 $(\{t_1\} \times T_{21}^C) \not\subseteq \approx$ 成立, 对 $\forall t_2 \in (T_2^C \setminus T_{21}^C)$, 都有 $(T_{11}^C \times \{t_2\}) \not\subseteq \approx$ 成立, 则称 T_{11}^C 与 T_{21}^C 为 T_1^C 和 T_2^C 的最优对应。

(2) 若 $|T_{11}^C| = |T_{21}^C| = 1$, 则称 T_{11}^C 与 T_{21}^C 为简单对应; 若 $|T_{11}^C| : |T_{21}^C| = n : m$, 则称 T_{11}^C 与 T_{21}^C 为复杂对应。

DN 的匹配关系可类似的定义。

定义 7. 已知源模型的控制流模型 Petri 网为 $SCN_1 = (P_1^C, T_1^C, F_1^C)$, 目标模型的控制流模型 Petri 网为 $TCN_2 = (P_2^C, T_2^C, F_2^C)$, $\forall t_i, t_{i+1} \in T_1^C$ 对应于 $t_j, t_{j+1} \in T_2^C$, 将 TCN_2 中不满足 SCN_1 中变迁间弱序关

系构成的集合 $\{t_j, t_{j+1}, \dots\}$ 称作是目标模型的控制流模型 Petri 网的变化域, 简记为 $(TCN)_C$.

目标模型的数据流模型 Petri 网的变化域可类似的定义。

定义 8. 已知 $SCDN = (P^S, T^S, F^S)$ 为源模型的融合网, $TCDN = (P^T, T^T, F^T)$ 为目标模型的融合网, $\forall t_i \in T^S$, 对应的变迁 $t_j \in T^T$, 其中 $|t_i|$ 和 $|t_j|$ 分别表示 t_i 与 t_j 前集的个数, $|t_i|$ 和 $|t_j|$ 分别表示 t_i 与 t_j 后集的个数, 若 $|t_i| \neq |t_j|$ 或 $|t_i| \neq |t_j|$, 则称 t_j 为目标模型融合网的关键部位。

依据上述定义, 通过源模型查找目标模型融合网的关键部位, 进而得出由关键部位构成的目标模型融合网的变化域, 记为 S_R .

定义 9. 已知一个控制流模型 Petri 网为 $CN = (P^C, T^C, F^C)$, 一个融合网为 $CDN = (P, T, F)$, $\forall t_i \in T^C, \exists t_j \in T$, 使得 t_i 与 t_j 相对应, 则称控制流网和融合网之间存在行为包含 (Behavior inclusion 关系), 记为 $CN \subset CDN$.

数据流网和融合网间的 Behavior inclusion 关系可类似地去定义, 并且将融合网中无任何语义的变迁称作沉默变迁。

定义 10. 已知一个控制流模型 Petri 网为 $CN = (P^C, T^C, F^C)$, 一个数据流模型 Petri 网为 $DN = (P^D, T^D, F^D)$, 若 $\exists t_m \in CN$ 且 $t_m \in DN$, 则称 t_m 为 CN 与 DN 的交叉部位。

定义 11. 已知 I_S 为源模型融合网中数据流网和控制流网的交叉部位, I_T 为目标模型融合网中数据流网和控制流网的交叉部位, 令 $I'_S \subset I_S, I'_T \subset I_T$ 为两个变迁子集, $I'_S \times I'_T \subseteq \approx$, 若 $|I'_S| : |I'_T| = n : m$ ($n \neq m$), 则称 I'_T 为目标模型融合网的交叉部位构成的变化域。

定义 12. 已知目标模型的控制流模型 Petri 网的变化域为 $(TCN)_C$, 其数据流模型 Petri 网的变化域为 $(TDN)_C$, 其融合网的变化域为 $(TCDN)_C$, 将 $(TN)_C = (TCN)_C \cup (TDN)_C \cup (TCDN)_C$ 称为目标模型最终的变化域。

依据 Behavior inclusion 关系即定义 8 得出目标模型融合网最终的变化域。

定义 13. 已知 $N = (P, T, F)$ 为一个网系统, 给定一个变迁对 $t_i \times t_{i+1} \subseteq T \times T$, t_i 与 t_{i+1} 之间的一阶继承关系为 $S(t_i, t_{i+1})$: 若 $t_i + t_{i+1}$ 或 $t_i \rightarrow^{-1} t_{i+1}$, 则 $S(t_i, t_{i+1}) = 0$; 若 $t_i // t_{i+1}$, 则 $S(t_i, t_{i+1}) = 1$; 若 $t_i \rightarrow t_{i+1}$, 则 $S(t_i, t_{i+1}) = S_P$ (其中 S_P 为 t_i 到 t_{i+1} 所走的路中最少库所的个数)。

定义 14. 已知 $N_1 = (P_1, T_1, F_1)$, $N_2 = (P_2, T_2, F_2)$, 且 $N_1 \subset N_2$, 网 N_1 中一阶继承关系的总和记为 S_{N_1} , 网 N_2 中相应元素的一阶继承关系的总和记为 S_{N_2} , 则称网 N_1 与 N_2 的紧密度为 $\delta(N_1, N_2) = \frac{S_{N_1}}{S_{N_2}}$.

4 基于 Behavior Inclusion 关系的融合网变化域分析方法

通过介绍上述基本定义, 本文主要从三个方面来分析目标模型融合网最终的变化域. 首先, 对源模型和目标模型控制流方面进行分析, 依据行为轮廓关系, 找出目标模型控制流网的变化域; 然后, 对源模型和目标模型数据流方面进行分析, 采取同样的方法找出目标模型数据流网的变化域; 最后, 依据定义 8 寻找出图 5 和图 6 的关键部位, 依据定义 10 寻找出图 5 和图 6 的交叉部位, 简化分析融合后的目标模型的变化域, 通过 Behavior inclusion 关系确定目标模型融合网最终的变化域. 为此, 给出如下算法.

算法 1. 基于源模型分析目标模型融合网最终的变化域.

BEGIN(算法开始)

输入: 源模型控制流模型 Petri 网 $SCN = (P_S^C, T_S^C, F_S^C)$,
源模型数据流模型 Petri 网 $SDN = (P_S^D, T_S^D, F_S^D)$,
源模型的融合网为 $SCDN = (P_S^{CD}, T_S^{CD}, F_S^{CD})$
目标模型控制流模型 Petri 网 $TCN = (P_T^C, T_T^C, F_T^C)$,
目标模型数据流模型 Petri 网 $TDN = (P_T^D, T_T^D, F_T^D)$,
目标模型的融合网为 $TCDN = (P_T^{CD}, T_T^{CD}, F_T^{CD})$

输出: 目标模型融合网最终的变化域 $(TN)_C$

1. FOR SCN, TCN DO 对比分析
2. IF $R_T^C = (R_{T_1}^C, \dots, R_{T_k}^C)$ 为 TCN 的可疑区域 THEN
 $R_S^C = (R_{S_1}^C, \dots, R_{S_l}^C)$ 为 SCN 的对应区域
3. END IF
4. IF SCN 中的变迁对 $R_{S_i}^C \rightarrow R_{S_{i+1}}^C$ ($R_{S_i}^C + R_{S_{i+1}}^C, R_{S_i}^C // R_{S_{i+1}}^C$ 或 $R_{S_i}^C \rightarrow^{-1} R_{S_{i+1}}^C$), $1 \leq i < l$ THEN 观察 TCN 中相应的变迁对 $R_{T_j}^C$ 与 $R_{T_{j+1}}^C$ 是否也满足相应的关系:
5. IF 满足 THEN TCN 的变化域为 $R_{T_j}^C - \{R_{T_j}^C\}$
6. ELSE TCN 的变化域为 $R_{T_j}^C, 1 \leq j < k$
7. 得到 TCN 的变化域为 $(TCN)_C$
8. END IF
9. END IF
10. FOR SDN, TDN RETURN 步骤 2
11. 得到 TDN 的变化域为 $(TDN)_C$
12. FOR $SCDN, TCDN$ DO 对比分析

13. 得出 $TCDN$ 的可疑区域
14. FOR $TCDN$ 的关键部位 DO 比较 $SCDN$ 和 $TCDN$
15. 得到 $TCDN$ 的关键部位所构成的变化域 S_R .
16. FOR SCN, SDN DO 在 $SCDN$ 中找出它们的交叉部位 I_S
17. FOR TCN, TDN DO 在 $TCDN$ 中找出它们的交叉部位 I_T
18. IF $I_S' \subset I_S, I_T' \subset I_T$ 为两个变迁子集, $I_S' \times I_T' \subseteq \approx, |I_S'| : |I_T'| = n : m (n \neq m)$ THEN 得到 $TCDN$ 的交叉部位构成的变化域为 I_T' .
19. 得出 $TCDN$ 的变化域 $(TCDN)_C = S_R \cup I_T'$
20. END IF
21. 目标模型最终的变化域为 $(TN)_C = (TCN)_C \cup (TDN)_C \cup (TCDN)_C$
22. 依据 Behavior inclusion 关系, 确定 $TCDN$ 最终的变化域 T_C .

END(算法结束)

通过算法 1 可以得出目标模型融合网最终的变化域, 下面给出算法 2 用来比较控制流网和数据流网对融合网变化域的影响程度.

算法 2. 控制流网、数据流网与融合网的紧密度分析.

BEGIN(算法开始)

输入: 源模型控制流模型 Petri 网 $SCN = (P_S^C, T_S^C, F_S^C)$,
源模型数据流模型 Petri 网 $SDN = (P_S^D, T_S^D, F_S^D)$,
源模型的融合网为 $SCDN = (P_S^{CD}, T_S^{CD}, F_S^{CD})$
目标模型控制流模型 Petri 网 $TCN = (P_T^C, T_T^C, F_T^C)$,
目标模型数据流模型 Petri 网 $TDN = (P_T^D, T_T^D, F_T^D)$,
目标模型的融合网为 $TCDN = (P_T^{CD}, T_T^{CD}, F_T^{CD})$

输出: 控制流网与融合网的紧密度, 数据流网与融合网的紧密度

1. FOR SCN DO 找出有语义的变迁集为 $R_S^C = \{M_1, M_2, M_3, \dots\}$, 在 $SCDN$ 中标出含有相同语义的变迁集 $R_S^{IC} = \{N_1, N_2, N_3, \dots\}$
2. $\forall M_i, M_{i+1} \in R_S^C$ IF $M_i + M_{i+1}$ 或 $M_i \rightarrow^{-1} M_{i+1}$ THEN $S(M_i, M_{i+1}) = 0$
3. END IF
4. IF $M_i // M_{i+1}$ THEN $S(M_i, M_{i+1}) = 1$
5. END IF
6. IF $M_i \rightarrow M_{i+1}$ THEN $S(M_i, M_{i+1}) = S_P$ (S_P 为 M_i 到 M_{i+1} 所走的路中最少库所的个数)
7. END IF
8. 得出 M_i 和 M_{i+1} 之间的一阶继承关系 $S(M_i, M_{i+1})$, 其一阶继承关系的总和记为 S_C .
9. 计算出 R_S^{IC} 中的一阶继承关系, 其总和记为 S_C^I .
10. 计算 SDN 和 $SCDN$ 中 $R_S^D = \{M'_1, M'_2, M'_3, \dots\}$ 和 $R_S^{ID} = \{N'_1, N'_2, N'_3, \dots\}$ 中含有相同语义的变迁集的一阶继

承关系的总和,记为 S_D 和 S_D^I .

11. 得到 SCN 和 $SCDN$ 的紧密度为 $\delta(R_S^C, R_S^{IC}) = \frac{S_C}{S_C^I}$,

SDN 和 $SCDN$ 的紧密度为 $\delta(R_S^D, R_S^{ID}) = \frac{S_D}{S_D^I}$.

12. 得出 TCN 与 $TCDN$ 的紧密度为 $\delta(R_T^C, R_T^{IC}) =$

$\frac{T_C}{T_C^I}$, TDN 和 $TCDN$ 的紧密度为 $\delta(R_T^D, R_T^{ID}) = \frac{T_D}{T_D^I}$.

13. SCN 、 TCN 与 $SCDN$ 、 $TCDN$ 的紧密度为 $\delta(R^C, R^{IC}) = \frac{\delta(R_S^C, R_S^{IC}) + \delta(R_T^C, R_T^{IC})}{1+1} = \frac{S_C/S_C^I + T_C/T_C^I}{2}$, SDN 、 TDN 与 $SCDN$ 、 $TCDN$ 的紧密度

$\delta(R^D, R^{ID}) = \frac{\delta(R_S^D, R_S^{ID}) + \delta(R_T^D, R_T^{ID})}{1+1} = \frac{S_D/S_D^I + T_D/T_D^I}{2}$.

END(算法结束)

5 实例分析和仿真实验

在业务流程建模过程中会出现各方面的问题,比如控制流或数据流,通过采取融合分析的方法寻找出模型的变化域成为业务流程建模领域的一项关键性问题,通过紧密度的计算进而确定影响变化域的关键因子.下面通过对具体实例进行分析来检验本文所给方法的有效性和可靠性.

5.1 关于融合网变化域的实例分析

结合图 1 和图 2,根据算法 1 分析得出,在源模型中读者选择图书与放代书板是交叉序关系,即 t'_{15}/t'_{16} .而在目标模型中读者放代书板与选择图书是严格序关系,即 $(t_{14})' \rightarrow (t_{15})'$,而其他变迁对之间的关系都相同,因而目标模型控制流网的变化域为 $(TCN)_C = \{(t_{14})', (t_{15})'\}$.

结合图 3 和图 4,根据算法 1 得出在源模型中读者缴费余额充足和还书成功是严格序关系,即 $t''_7 \rightarrow t''_{10}$,读者缴费余额不足和还书成功是排他序关系,即 $t''_{11} + t''_{10}$.而在目标模型中对应的读者缴费和还书成功是严格序关系,即 $(t_7)'' \rightarrow (t_{10})''$.

在源模型中,至于读者借书与能否成功,需要进行以下分析(若图书馆的每一层规定读者最多借 m 本):

(1) 若读者已借 0 本,则一次借书的本数 $n \leq m$,则与借书成功是严格序关系,即 $t''_{17} \rightarrow t''_{20}$,若借书的本数 $n > m$,则与借书成功是排他序关系,即 $t''_{21} + t''_{20}$.

(2) 若读者已借 j 本,还 i 本,则分两种情况考虑:

① 若 i 本书中已超期 h 本,若借书卡余额充足,则还书成功,借书的本数 $n \leq m - j + i$,则与借书成功是严格序关系,即 $t''_{17} \rightarrow t''_{20}$,若借书的本数 $n > m - j + i$,则与借书成功是排他序关系,即 $t''_{21} + t''_{20}$.

② 若 i 本书中已超期 h 本,若饭卡余额不足,则还书会失败,因而也影响借书,在这种情况下,若借书的本数 $n \leq m - j + i - h$,则与借书成功是严格序关系,即 $t''_{17} \rightarrow t''_{20}$,若借书的本数 $n > m - j + i - h$,则与借书成功是排他序关系,即 $t''_{21} + t''_{20}$.

在目标模型中,读者借书与借书成功是严格序关系,即 $(t_{13})'' \rightarrow (t_{16})''$.而其他变迁对之间的关系都相同,因而目标模型数据流网的变化域为 $(TDN)_C = \{(t_7)'', (t_{10})'', (t_{13})'', (t_{16})''\}$.

结合图 5 和图 6 以及算法 1 对源模型融合网和目标模型融合网的分析,找出目标模型融合网的可疑区域,在图 5 和图 6 中用虚线标出,通过定义 8 在可疑区域中找出目标模型融合网的关键部位,为 $\{(t_{21}), (t_{24})\}$,所以由关键部位构成的目标模型融合网的变化域 $S_R = \{(t_{21}), (t_{24})\}$.依据定义 10 和定义 11,在源模型融合网中找出数据流网和控制流网的交叉部位 I_S ,在目标模型融合网中找出数据流网和控制流网的交叉部位 I_T , $I'_S \subset I_S$,其中 $I'_S = \{t_{16}, t_{20}, t_{17}, t_{21}, t_{31}, t_{35}, t_{36}, t_{32}\}$,对应的 $I'_T \subset I_T$, $I'_T = \{(t_{16})', (t_{17})', (t_{27})', (t_{28})'\}$,因为 $|I'_S| : |I'_T| = 2 : 1$,所以目标模型融合网的交叉部位构成的变化域为 $I'_T = \{(t_{16})', (t_{17})', (t_{27})', (t_{28})'\}$.所以得出目标模型融合网的变化域为 $(TCDN)_C = S_R \cup I'_T = \{(t_{16}), (t_{17}), (t_{21}), (t_{24}), (t_{27}), (t_{28})\}$.

综上所述,可以得出目标模型最终的变化域为 $(TN)_C = (TCN)_C \cup (TDN)_C \cup (TCDN)_C$,即 $(TN)_C = \{(t_{14})', (t_{15})', (t_7)'', (t_{10})'', (t_{13})'', (t_{16})'', (t_{16}), (t_{17}), (t_{21}), (t_{24}), (t_{27}), (t_{28})\}$.

依据 Behavior inclusion 关系即定义 9,得知 $(t_{14})' \subset (t_{22})$ 、 $(t_{15})' \subset (t_{23})$ 、 $(t_7)'' \subset (t_{15})$ 、 $(t_{10})'' \subset (t_{18})$ 、 $(t_{13})'' \subset (t_{26})$ 、 $(t_{16})'' \subset (t_{29})$,目标模型融合网最终的变化域为 $T_C = \{(t_{15})(t_{16})(t_{17})(t_{18}) \cup (t_{21})(t_{22})(t_{23})(t_{24}) \cup (t_{26})(t_{27})(t_{28})(t_{29})\}$.

经过上述理论分析,将文献[9]中所给的方法与本文所给的方法进行比较,结果如表 1 所示.

表 1 传统分析方法和融合方法分析变化域的对比

	传统分析方法 ^[9]	融合分析方法
控制流网变化域	$\{(t_{14})', (t_{15})'\}$	$\{(t_{14})', (t_{15})'\}$
数据流网变化域	$\{(t_7)'', (t_{10})'', (t_{13})'', (t_{16})''\}$	$\{(t_7)'', (t_{10})'', (t_{13})'', (t_{16})''\}$
融合网变化域	$\{(t_i)(i=15, 18, 21, 23, 26, 29)\}$	$\{(t_i)(i=15, 16, 17, 18, 21, 22, 23, 24, 26, 27, 28, 29)\}$

通过表 1 给出的信息,可以看出文献[9]与本文在计算控制流网的变化域及数据流网的变化域是相同的,但文献[9]给出的基于边界变迁的减少和内部边界变迁的减少的方法寻找变化域的过程较为繁琐,而本文提出的方法是基于 Petri 网行为轮廓理论去寻找业务流程模型的变化域,算法过程较为简单,因而降低了计算的复杂度.

5.2 紧密度计算及分析

根据算法 2、图 1 和图 5 可得出源模型控制流网和源模型融合网的相应元素之间的一阶继承关系,如表 2 所示.

表 2 SCN 与 SCDN 间的一阶继承关系												
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	
	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	
SCN	//	+	+	→	+	→	→	//	→	+	→	
S_P^C	1	0	0	3	0	3	1	1	3	0	3	
SCDN	//	+	+	→	+	→	→	→	→	+	→	
S_P^{IC}	1	0	0	5	0	3	1	1	4	0	3	

同理,由图 3 和图 5 可得出源模型数据流网和源模型融合网的相应元素之间的一阶继承关系,如表 3 所示.

表 3 SDN 和 SCDN 间的一阶继承关系											
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	
	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	
SDN	+	→	→	+	→	+	→	+	→	+	
S_P^D	0	1	3	0	3	0	3	0	3	0	
SCDN	+	→	→	+	→	+	→	+	→	+	
S_P^{ID}	0	1	3	0	3	0	4	0	3	0	

依据定义 14 和算法 2,可知源模型控制流网和源模型融合网间的紧密度:

$$\delta(R_s^C, R_s^{IC}) = \frac{S_C}{S_C^I} = \frac{\sum S_P^C}{\sum S_P^{IC}} = \frac{15}{18} \approx 0.833.$$

源模型数据流网和源模型融合网间的紧密度:

$$\delta(R_s^D, R_s^{ID}) = \frac{S_D}{S_D^I} = \frac{\sum S_P^D}{\sum S_P^{ID}} = \frac{13}{14} \approx 0.929.$$

而按照文献[21]中所给的方法计算得知

$$\delta(R_s^C, R_s^I) = \frac{3 + \frac{1}{\sqrt{5}} + \frac{2}{\sqrt{3}} + \frac{1}{2}}{11} \approx 0.464,$$

$$\delta(R_s^D, R_s^I) = \frac{\sqrt{3} + \frac{3}{2}}{10} \approx 0.526.$$

同理,由图 2 和图 6 可得出目标模型控制流网和目标模型融合网的相应元素之间的一阶继承关

系,如表 4 所示.

表 4 TCN 与 TCDN 间的一阶继承关系									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
	B	C	D	E	F	G	H	I	J
TCN	→	+	+	→	→	→	→	→	→
T_P^C	3	0	0	3	3	1	1	3	3
TCDN	→	+	+	→	→	→	→	→	→
T_P^{IC}	3	0	0	4	3	1	1	4	3

由图 4 和图 6 可得出目标模型数据流网和目标模型融合网的相应元素之间的一阶继承关系,如表 5 所示.

表 5 TDN 与 TCDN 间的一阶继承关系						
	a	b	c	d	e	f
	b	c	d	e	f	g
TDN	+	→	→	→	→	→
T_P^D	0	1	3	3	3	3
TCDN	+	→	→	→	→	→
T_P^{ID}	0	1	3	3	4	3

同理,可计算出目标模型控制流网和目标模型融合网间的紧密度:

$$\delta(R_T^C, R_T^{IC}) = \frac{T_C}{T_C^I} = \frac{\sum T_P^C}{\sum T_P^{IC}} \approx 0.895.$$

目标模型数据流网和目标模型融合网间的紧密度:

$$\delta(R_T^D, R_T^{ID}) = \frac{T_D}{T_D^I} = \frac{\sum T_P^D}{\sum T_P^{ID}} \approx 0.929.$$

而按照文献[21]中所给的方法计算得知

$$\delta(R_T^C, R_T^I) = \frac{\sqrt{3} + \frac{3}{2}}{10} \approx 0.323,$$

$$\delta(R_T^D, R_T^I) = \frac{\sqrt{3} + \frac{3}{2}}{6} \approx 0.539.$$

所以通过本文所给的方法计算得源模型和目标模型的控制流网和融合网间的紧密度:

$$\delta(R^C, R^{IC}) = \frac{\delta(R_s^C, R_s^{IC}) + \delta(R_T^C, R_T^{IC})}{1+1} \approx 0.864,$$

源模型和目标模型数据流网和融合网间的紧密度:

$$\delta(R^D, R^{ID}) = \frac{\delta(R_s^D, R_s^{ID}) + \delta(R_T^D, R_T^{ID})}{1+1} \approx 0.929.$$

而按照文献[21]中所给的方法计算得知

$$\delta(R^C, R^I) = \frac{\delta(R_s^C, R_s^I) + \delta(R_T^C, R_T^I)}{1+1} \approx 0.495,$$

$$\delta(R^D, R^I) = \frac{\delta(R_s^D, R_s^I) + \delta(R_T^D, R_T^I)}{1+1} \approx 0.431.$$

可见,通过采取文献[21]中的方法计算得知控

制流网与融合网紧密,因而控制流网更能影响融合网的变化域.而通过本文所给的方法得知数据流网和融合网紧密,数据流网更能影响融合网的变化域.

在具体实例分析中,当考虑融合网(同时存在控制流和数据流)的变化域的计算方面,文献[9]一方面未能考虑行为包含(Behavior inclusion)关系对控制流和数据流分析时的影响,本文分析了 Behavior inclusion 关系对二者之间行为变化的影响,在分析融合网变化域时,能有效避免通过求解控制流变化域和数据流变化域的交集,而带来的变化域分析不全面或变化域确定不准确的问题;另一方面文献[9]的方法未能考虑融合网中存在沉默变迁的情况,忽视了沉默变迁对融合网变化域的影响,因此也具有一定的局限性.通过本文所提出的方法不仅考虑了具有实际意义的变迁中 Behavior inclusion 关系对融合网的变化域分析的影响,同时也考虑了沉默变迁,因而能够将融合网的变化域予以深度的处理和分析.

5.3 仿真实验

5.1 节和 5.2 节主要是对图书馆这个案例进行了紧密度的计算,下面为了说明本文所提出方法的有效性,依据实验室已有的平台数据包和 Petri 网的理论建立了“家庭水电费在线支付系统”的业务流程模型,其不仅包含控制流网,同时也涵盖数据流网,在 Petri 网的行为轮廓理论的基础上将二者进行融合,予以分析并验证本文所给算法的有效性.且同时考虑了业务流程模型中存在(或不存在)沉默变迁的情况,下面以实验室构建的“家庭水电费在线支付系统”平台数据 BPM Data 1 和 BPM Data 2 来进行仿真实验.

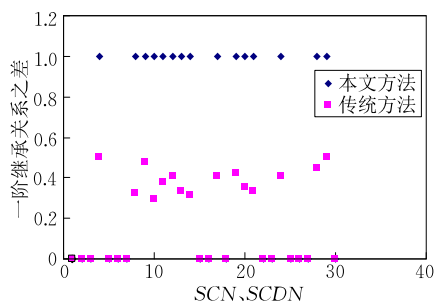
实验数据的基本情况如下:

(1) 在 BPM Data 1 环境中,不存在沉默变迁,且在源模型中存在 31 个控制流变迁,26 个数据流变迁,在目标模型中存在 26 个控制流变迁,21 个数据流变迁.

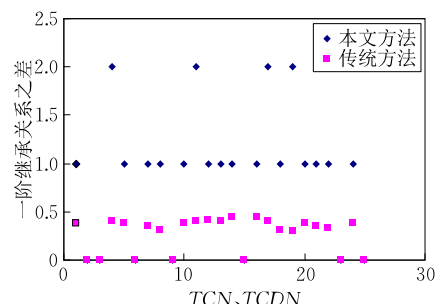
(2) 在 BPM Data 2 环境中,存在沉默变迁,且在源模型中存在 31 个控制流网变迁,26 个数据流网变迁,4 个沉默变迁;在目标模型中存在 26 个控制流网变迁,21 个数据流网变迁,3 个沉默变迁.

针对 BPM Data 1 环境,运用本文所给方法和文献[21]中的方法对相邻变迁之间的一阶继承关系进行做差运算,依据差值越大则影响程度越低的原理,得到实验结果如图 7(注:图 7 和图 8 中的纵坐标表示一阶继承关系之差,横坐标表示变迁数)所

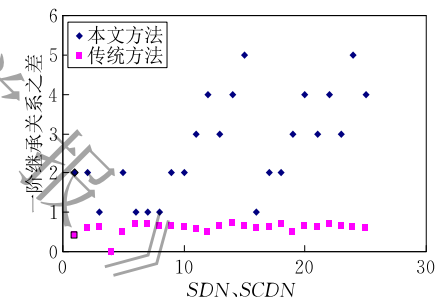
示;结果显示都是控制流网对融合网影响程度更大,因此控制流网和融合网联系更紧密,控制流网更能影响融合网的变化域.因而采取本文所给的方法得出的仿真结论与文献[21]相一致.



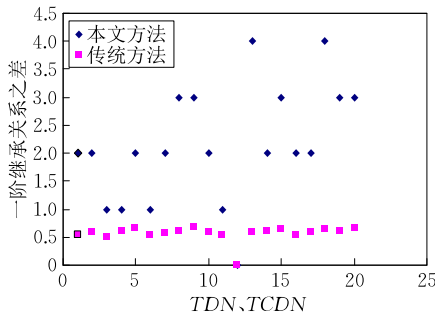
(a) 无沉默变迁情况下的SCN和SCDN的一阶继承关系之差



(b) 无沉默变迁情况下的TCN和TCDN的一阶继承关系之差



(c) 无沉默变迁情况下的SDN和SCDN的一阶继承关系之差



(d) 无沉默变迁情况下的TDN和TCDN的一阶继承关系之差

图 7 在 BPM Data 1 下的实验仿真结果

图 7(a)和图 7(b)是在 BPM Data1 数据平台中无沉默变迁的情况下,通过采用本文所给方法和传统方法^[21]来计算源模型控制流网 SCN 和源模型融合网 SCDN 之间的一阶继承关系以及目标模型控

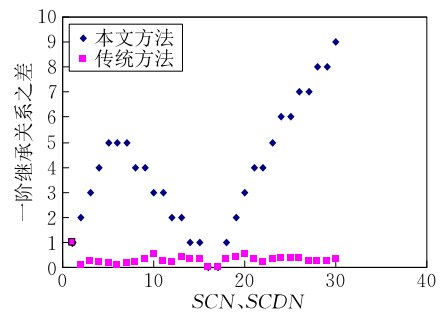
制流网 TCN 和目标模型融合网 $TCDN$ 之间的一阶继承关系. 图 7(c) 和图 7(d) 是在 BPM Data1 数据平台中无沉默变迁的情形下, 分别是通过采用本文所给方法和传统方法^[21]来计算源模型数据流网 SDN 和源模型融合网 $SCDN$ 之间的一阶继承关系以及目标模型数据流网 TDN 和目标模型融合网 $TCDN$ 之间的一阶继承关系.

通过图 7 可以看出在没有沉默变迁存在的情况下, 通过采用传统方法^[21]和本文所给的方法都显示在源模型和目标模型中数据流网与融合网的一阶继承关系之差大于控制流网与融合网, 因此控制流网和融合网联系更紧密, 控制流网对融合网的变化域影响更大. 但本文所提出的方法比文献[21]的方法计算的一阶继承关系之差大, 因此本文所提出的方法有较小的影响性, 主要原因是考虑了行为包含 (Behavior inclusion) 关系对控制流和数据流分析时的影响, 该 Behavior inclusion 关系对于融合网的变化域分析有较好的促进作用, 不会导致计算结果的较大变化.

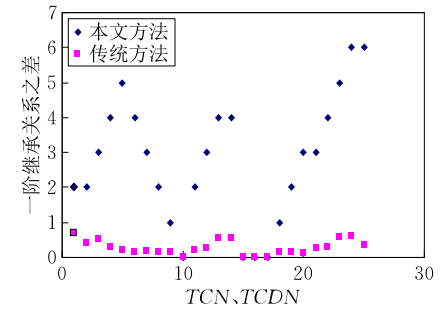
针对 BPM Data 2 环境, 根据具有语文学关系的相邻变迁之间的一阶继承关系, 由于考虑了沉默变迁的存在, 运用本文所给方法和文献[21]中的方法进行做差运算, 则实验结果如图 8 所示: 结果显示与文献[21]的结论相反, 本文的方法表明数据流网对融合网的影响程度更大, 因而得出数据流网更能影响融合网的变化域; 而在文献[21]中依然是控制流网对融合网的影响程度更大.

图 8(a) 和图 8(b) 是在 BPM Data2 数据平台中存在沉默变迁的情况下, 通过采用本文所给方法和传统方法^[21]来计算源模型控制流网 SCN 和源模型融合网 $SCDN$ 之间的一阶继承关系以及目标模型控制流网 TCN 和目标模型融合网 $TCDN$ 之间的一阶继承关系. 图 8(c) 和图 8(d) 是在 BPM Data2 数据平台中存在沉默变迁的情形下, 分别是通过采用本文所给方法和传统方法^[21]来计算源模型数据流网 SDN 和源模型融合网 $SCDN$ 之间的一阶继承关系以及目标模型数据流网 TDN 和目标模型融合网 $TCDN$ 之间的一阶继承关系.

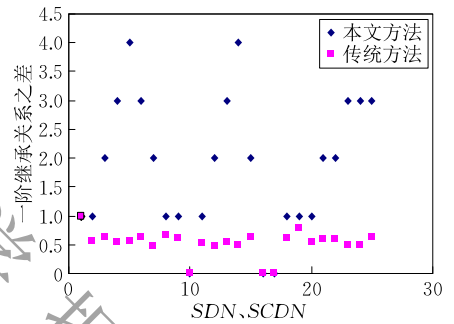
通过图 8 可以看出在有沉默变迁存在的情况下, 通过采用传统方法^[21]得出在源模型和目标模型中数据流网与融合网的一阶继承关系之差大于控制流网与融合网, 因此控制流网和融合网联系更紧密. 而通过采取本文所给的方法则表明在源模型和目标模型中控制流网与融合网的一阶继承关系之差大于



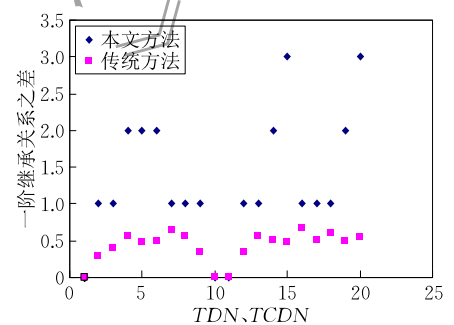
(a) 存在沉默变迁情况下的 SCN 和 $SCDN$ 的一阶继承关系之差



(b) 存在沉默变迁情况下的 TCN 和 $TCDN$ 的一阶继承关系之差



(c) 存在沉默变迁情况下的 SDN 和 $SCDN$ 的一阶继承关系之差



(d) 存在沉默变迁情况下的 TDN 和 $TCDN$ 的一阶继承关系之差

图 8 在 BPM Data 2 下的实验仿真结果

数据流网与融合网的一阶继承关系之差, 因此数据流网和融合网联系更紧密, 数据流网对融合网的变化域影响更大.

因此, 通过仿真实验可以得出, 若不存在沉默变迁, 则控制流网对融合网的影响程度大, 但若考虑有沉默变迁的存在, 则通过我们的实验表明运用本文所给的方法得出数据流网对融合网的影响程度大,

而运用文献[21]所给的方法针对 BPM Data 1 环境和 BPM Data 2 环境所得出的结果都是控制流网与融合网联系更紧密,因此具有一定的局限性.

6 总 结

对于一类包含有控制流和数据流的业务流程系统,由于控制流和数据流的相互影响,容易导致融合网的业务流程出现非预期行为和流程变化,对融合网变化域的分析是目前业务流程管理中的热点和难点之一. 目前已有的工作主要集中于控制流的分析或数据约束下的控制流分析,有少量的研究考虑了将控制流和数据的变化进行各自处理,然后利用变化域的交集来分析融合网的变化域,这种方法虽然有一定的效果,但未考虑控制流和数据流间的行为包含(Behavior inclusion)关系,导致融合网变化域的分析不准确或变化域的丢失. 本文在现有研究的基础上,给出了基于 Petri 网 Behavior inclusion 的业务流程变化域融合分析方法,对源模型和目标模型分别从控制流、数据流的角度去分析变化域,并且依据 Behavior inclusion 关系分析得出了目标模型融合网最终的变化域. 之后,基于一阶继承关系的概念以及紧密度的计算方法,通过仿真实验分析,分别考虑了业务流程中是无沉默变迁和存在沉默变迁的情况下,控制流网和数据流网对融合网的影响程度. 实验结果表明在有沉默变迁的情况下数据流网对融合网变化域的影响程度较大,而文献[21]中的方法是控制流对融合网的影响程度大.

下一步我们将开展业务流程变化域的传播机理研究,并对模型的控制流网、数据流网以及融合网中的出现的变化域进行调整,使得流程模型中尽可能不出现变化域,以达到业务流程优化的目的.

致 谢 本文的完成离不开教研室老师们和同学们的关心和帮助,在此表示深深的谢意. 同时感谢评审专家提出的修改建议,在此表示衷心感谢!

参 考 文 献

- [1] Weidlich M, Mendling J, Weske M. Efficient consistency measurement based on behavioral profiles of process models. *IEEE Transactions on Software Engineer*, 2011, 37(3): 410-429
- [2] Sergey S, Weidlich M, Mending J. Business process model abstraction based on behavioral profiles//*Proceedings of the 8th International Conference*. San Francisco, USA, 2010: 1-16
- [3] Dijkman R, Dumas M, van Dongen B, et al. Similarity of business process models: Metrics and evaluation. *Information Systems*, 2011, 36(2): 498-516
- [4] Remco D. Diagnosing differences between business process models//*Proceedings of the 6th International Conference on Business Process Management*. Milan, Italy, 2008: 261-277
- [5] Küster J, Gerth C, Förster A, et al. Detecting and resolving process model differences in the absence of a change log//*Proceedings of the 6th International Conference on Business Process Management*. Milan, Italy, 2008: 244-260
- [6] Weber B, Reichert M, Rinderle-Ma S. Change patterns and change support features-enhancing flexibility in process-aware information systems. *Data & Knowledge Engineering*, 2008, 66(3): 438-466
- [7] Rajabi B A, Lee S P. Modeling and analysis of change management in dynamic business process. *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, 2010, 2(1): 181-189
- [8] Weidlich M, Weske M, Mendling J. Change propagation in process models using behavioral profiles//*Proceedings of the Services Computing*. Bangalore, India, 2009: 33-40
- [9] Weidlich M, Mendling J, Weske M. Propagating changes between aligned process models. *The Journal of Systems and Software*, 2012, 85(8): 1885-1898
- [10] Gupta C, Singh Y, Chauhan D S. A dynamic approach to estimate change impact using type of change propagation. *Journal of Information Processing Systems*, 2010, 6(4): 597-608
- [11] Rajabi B A, Lee S P. Modeling and analysis of change management in dynamic business process. *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, 2010, 2(6): 181-189
- [12] Fang X, Liu L, Liu X. Analyzing method of change region in BPM based on module of Petri net. *Information Technology Journal*, 2013, 12(8): 1655-1659
- [13] Wang R, Huang R, Qu B. Network-based analysis of software change propagation. *The Scientific World*, 2014, 1155(10): 237-243
- [14] Rinderle S, Reichert M, Dadam P. Correctness criteria for dynamic changes in workflow systems — A survey. *Data & Knowledge Engineering*, 2014, 50(1): 9-34
- [15] Kunze M, Weidlich M, Weske M. Querying process models by behavior inclusion. *Software & Systems Modeling*, 2013, 5(8): 1-19
- [16] Weidlich M, van der Werf J M. On profiles and footprints-relational semantics for Petri nets//Haddad S, Pomello L eds. *Application and Theory of Petri Nets*. Lecture Notes in Computer Science 7347. 2012: 148-167
- [17] Smirnov S, Weidlich M. Business process model abstraction based on synthesis from well-structured behavioral profiles. *International Journal of Cooperative Information Systems*, 2012, 21(1): 55-83
- [18] Weidlich M, Ziekow H, Mendling J. Optimising complex

- event queries over business processes using behavioral profiles. *BPM 2010 International Workshops and Education Track*, 2011, 66(8): 743-754
- [19] Smirnov S, Weidlich M, Mendling J, et al. Action patterns in business process model repositories. *Computers in Industry*, 2012, 63(2): 98-111
- [20] Sidorova N, Stal C, Trcka N. Soundness verification for conceptual workflow nets with data: Early detection of errors with the most precision possible. *Information Systems*, 2011, 36(7): 1026-1043
- [21] Trcka N, van der Aalst W M P. Data-flow anti-patterns: Discovering data-flow errors in workflows//*Proceedings of the Information Systems Engineering*. Eindhoven, Netherlands, 2009: 425-439
- [22] Meda H S, Sen A K, Bagchi A. Detecting data flow errors in workflows: A systematic graph traversal approach. *Workshop on Information Technology & Systems*, 2007, 26(2): 627-632
- [23] Sadiq S, Orlowska M, Sadiq W, et al. Data flow and validation in workflow modeling//*Proceedings of the Conferences in Research and Practice in Information Technology*. Dunedin, New Zealand, 2004: 207-214
- [24] Leoni M, Gama J, Carmona J, et al. Decomposing conformance checking on Petri nets with data. *Lecture Notes in Computer Science*, 2014, 8841(5): 3-20
- [25] Moser S, Martens A, Gorlach K, et al. Advanced verification of distributed WS-BPEL business processes incorporating CSSA-based data flow analysis//*Proceedings of the IEEE International Conference on Services Computing (SCC 2007)*. Salt Lake City, USA, 2007: 213-220
- [26] van der Aalst W M P, Niels L, La Rosa M. Ensuring correctness during process configuration via partner synthesis. *Information Systems*, 2012, 37(6): 574-592
- [27] Jiang Chang-Jun. *PN Machine Theories of Discrete Event Systems*. Beijing: Science Press, 2000(in Chinese)
(蒋昌俊. 离散事件动态系统的 PN 机理论. 北京: 科学出版社, 2000)
- [28] Weidlich M, Mendling J. Perceived consistency between process models. *Information Systems*, 2012, 37(2): 80-98
- [29] Hao Wen-Jun, Fang Xian-Wen. The approach of analyzing the smallest change domain in process models based on Petri nets. *Computer Science*, 2012, OS3: 76-78(in Chinese)
(郝文君, 方贤文. 基于 Petri 网的流程模型中最小变化域的分析方法. 计算机科学, 2012, OS3: 76-78)
- [30] Weidlich M, Polyvyanyy A, Desai N, et al. Process compliance measurement based on behavioural profiles//*Pernici B ed. Advanced Information Systems Engineering*. Berlin, Germany: Springer, 2010: 499-514
- [31] Fahland D, van der Aalst W M P. Model repair-aligning process models to reality. *Information Systems*, 2015, 47(8): 220-243
- [32] Senderovich A, Weidlich M, Gal A, et al. Queue mining-predicting delays in service processes//*Proceedings of the 26th International Conference*. Thessaloniki, Greece, 2014: 16-20
- [33] Martinik I. Modeling of distributed programming systems with using of property- preserving Petri net process algebras and P/T Petri net processes//*Proceedings of the Informatics and Applications*. Lodz, Poland, 2013: 258-263
- [34] Hujsa T, Delosme J, Munier-Kordon A. On the reversibility of well-behaved weighted choice-free system//*Proceedings of the 35th International Conference, Petri nets 2014*. Tunis, Tunisia, 2014: 334-353
- [35] Weidlich M, van der Werf J M. On profiles and footprints-relational semantics for Petri nets//*Proceedings of the 33rd International Conference*. Hamburg, Germany, 2012: 148-167
- [36] Goknil A, Kurtev I, van den Berg K, et al. Change impact analysis for requirements: A meta-modeling approach. *Information and Software Technology*, 2014, 56(8): 950-972
- [37] Ding Zhi-Jun, Jiang Chang-Jun. Verification of concurrent programs by temporal Petri nets. *Chinese Journal of Computers*, 2002, 25(5): 467-475(in Chinese)
(丁志军, 蒋昌俊. 并发程序验证的时序 Petri 网方法. 计算机学报, 2002, 25(5): 467-475)
- [38] Li C, Reichert M, Wombacher A. On measuring process model similarity based on high-level change operations//*Proceedings of the 27th International Conference on Conceptual Modeling*. Barcelona, Spain, 2008: 248-264
- [39] Roy S, Sajeev A S M, Bihary S, et al. An empirical study of error patterns in industrial business process models. *IEEE Transactions on Services Computing*, 2014, 7(2): 140-153
- [40] Weidlich M, Ziekow H, Gal A, et al. Optimizing event pattern matching using business process models. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2014, 26(11): 2759-2773



FANG Xian-Wen, born in 1975, Ph. D., professor. His research interests include Petri nets, trustworthy software and Web services.

ZHAO Fang, born in 1989, Ph.D. candidate. Her research interests include Petri nets and service computation.

FANG Huan, born in 1982, Ph. D., associate professor. Her research interests include Petri nets, discrete event systems and intelligent control.

LIU Xiang-Wei, born in 1977, M. S., associate professor. Her current areas of research are business process management and behavior analysis.

Background

In the business process modeling services, the systems need to build different models to satisfy the demands of the modeling with different targets. But sometimes the models may have some problems, named change region. There have two kinds of it, named the control flow problems and data flow problems. How to find the real change region of a model became the critical problem. Nowadays, many researchers consider the change region from the angle of the control flow or the data flow, very few people consider it from the fusion of them and they never give a measurement method named closeness to the control flow(the data flow)with the fusion of them. In this paper, according to the behavioral profiles of the source and target model, we obtain the change region of the target model from the perspective of the control flow and the data flow through the comprehensive analysis to the source model. Then we analysis the fusion of the control flow and data flow net. So the control flow net or the data flow net has the behavior inclusion relation with the fusion nets. Then we use some methods to determine the final change region of the fusion nets in the target model. Besides, we

provide the calculation method named closeness in business process models. By analyzing the closeness of the control flow or the data flow with the fusion nets, we can determine the influence degree of them.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos. 61572035, 61272153, 61402011, the Anhui Provincial Natural Science Foundation (1508085MF111, 1608085QF149), the Natural Science Foundation of Educational Government of Anhui Province of China (KJ2016A208), the Youth Academic Backbone Foundation of AUST, the Academic and Technology Leader Foundation of Anhui Province (DG119). These projects study the basic theories of the change region. A number of papers have published in some transactions and international conferences. Also, we studied the change region of the control flow and the data flow, the change propagation and the control of the change region and provide the location of the change region and the change propagation under the interaction of the business process models.