

# 基于微分 Petri 网的业务流程模块适配方法

方贤文<sup>1,2</sup>, 陶小燕<sup>2</sup>, 刘祥伟<sup>1</sup>

(1. 安徽理工大学信息与计算科学系, 安徽淮南 232001; 2. 同济大学计算机系, 上海 201804)

**摘要:** 为适应业务流程多功能及动态变化的需求, 用模块替换的方法对业务流程建模是解决问题的快速有效途径之一. 以开放 Petri 网与微分 Petri 网为基础, 提出了微分控制 Petri 网和微分数据 Petri 网的概念, 分别从语义学角度利用微分 Petri 网的演化表达式对模型的控制流网与数据流网进行活性检测, 利用微分 Petri 网对替换模块及其离散部分与连续部分进行结构稳定性分析, 以达到业务流程模块适配分析. 理论分析结果表明, 所建立的微分表达式能够反映模型活性与稳定性, 模块适配效果较好. 最后基于平台数据进行仿真分析, 实验结果表明本文所提的方法有一定的可行性.

**关键词:** 微分 Petri 网; 控制流; 数据流; 模块适配

**中图分类号:** TP319

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112 (2017)04-0777-05

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.04.002

## Analysis Method of Module Adaptation Based on Differential Petri Net

FANG Xian-wen<sup>1,2</sup>, TAO Xiao-yan<sup>2</sup>, LIU Xiang-wei<sup>1</sup>

(1. Department of Information and Computing Science, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China;

2. Department of Computer Science, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** In order to adapt to the requirements of the business process multi-functional and dynamic change, getting business processes with modular substitution is one of the effective ways to solve these problems. The concept of differential control Petri net and differential data Petri net are proposed based on open Petri net and differential Petri net. Liveness detection in control flow and data flow of models is examined by the evolution expression of differential Petri net through semantics, and stability analysis of substitution module and its discrete and continuous parts are done by differential Petri net, respectively, to achieve business process module adaptation analysis. Theoretical analysis results show that the established model of differential expression can reflect the liveness and stability of models, module adaptation effect is better. Finally, we develop the simulation analysis based on data platform; the experimental results show that the presented method is effective.

**Key words:** differential Petri net; control flow; data flow; module adaptation

## 1 引言

在实际 Web 服务领域中, 彼此协作的服务构成了面向服务体系 (SOA), 由于内部资源的流失及外界干扰等问题的存在, SOA 系统在实际操作时可能达不到预期目标. 此时, 需要对模型中异常的部分进行替换与修正, 从而进一步涉及到模型适配问题. 目前, 这方面已有相当多的研究, 主要关注模型行为方面的适配性.

文献[1]在服务工作流网的基础上通过提取行为特征的方式实现与上下文无关的服务替换组合, 说明替换的行为兼容性等价于行为一致性. 文献[2]提出了

基于行为继承的服务与替代方法对服务行为进行建模, 并用 T 不变量描述了行为继承的充要条件. 文献[3,4]给出了服务行为的适配性, 避免了服务间不兼容的情况, 保证适配行为的安全性. 文献[5]通过在适当的库所上消除和引入并发, 对计算时间和结果的复杂性有实质性的改进, 但是这些方法都只考虑模型的结构约束, 单独在控制流方面分析模型的适配性. 事实上, 数据流和控制流是构成模型的两个重要因素, 如文献[6,7]从数据流和控制流角度考虑模型的过程优化, 数据流也是业务流程建模的约束条件<sup>[8]</sup>.

本文先从语义学角度, 由微分 Petri 网的演化表达

收稿日期: 2015-09-28; 修回日期: 2016-06-27; 责任编辑: 李勇锋

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61572035, No. 61272153, No. 61402011); 安徽省自然科学基金 (No. 1508085MF111, No. 1608085QF149); 安徽省高校自然科学基金重点项目 (No. KJ2016A208); 安徽省学术和技术带头人资助项目 (No. DG119); 安徽省优秀青年人才项目

式,分别从控制流和数据流角度检测模型的活性,选出行行为保持一致的替换模块.然后,从结构学上,通过计算这些替换模块的相关不变量,利用极小支持数来确定最适配模块,使其满足结构上的稳定性.

## 2 动机实例

这部分给出一个具体实例,源模型如图 1 所示,虚线框内为源模型中的待补模块,图 2 中的五个模型片段为部分替换模块候选者.每个图中均包含控制流信息(隐含在流关系中)和数据流信息(由带圆圈的数字表示),将图 2(a)中的模块替补到源模型中,给定库所  $P_1$  一个控制标识,并分别给定  $P_1, P_2, P_3, P_{11}, P_{12}, P_{13}$  一个

数据标识去运行模型,结果是变迁  $t_8$  永远不会发生,若只考虑控制流信息,变迁  $t_8$  是可以发生的.

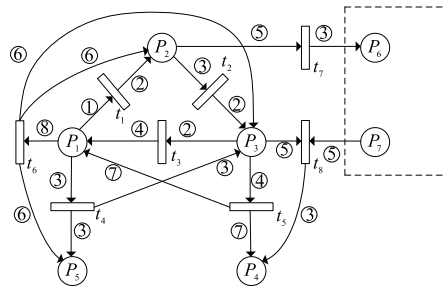


图1 待完善的源模型 $PN_0$

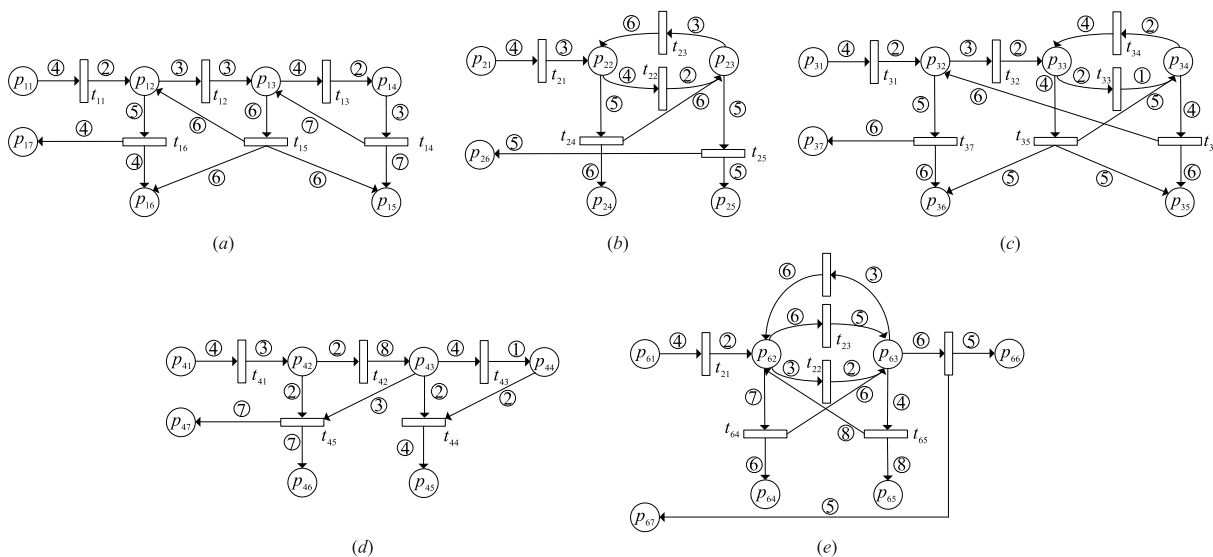


图2 五个替换模块 $PN_i, i=1,2,\dots,5$

## 3 基于微分 Petri 网的模块适配方法分析

Petri 网作为基本理论框架,具有千变万化的应用变型体,以适用各种实际问题.有关 Petri 网、可达性、不变量、极小支集、活网、开放 Petri 网(OPN)、微分 Petri 网(DPN)、对应关系、一致性和合成网等定义参考文献[9~12].

基于 OPN 上网的合成,只将库所接口合二为一,并没有增加新的流关系,保持了网的行为约束,使得目标模型满足行为一致性.将待补模型与替换模块进行接口连接,得到一个目标模型.但是,随着接口的融合,两个模块之间形成了结构约束,而适配替换模块的一个充分条件是目标模型是活的.因此,需对目标模型进行活性检测.

本文借助 DPN 检测模型的活性,先分析 DPN 的演化过程,可表示为以下表达式<sup>[13]</sup>:

$$m(t) = m(t_0) + \mathbf{W}^T \left( \tau(t) + \int_{t_1}^t \mathbf{v}(u) du \right)$$

其中  $t_0$  表示初始时间,  $m(t)$  表示 DPN 在时刻  $t$  的标识,  $\tau(t)$  表示网中变迁在时刻  $t$  已引发的序列,  $\mathbf{v}(u)$  表示微分变迁在时刻  $u$  的引发速度向量,  $t_1$  表示该微分变迁的起始引发时间.

控制流和数据流在模型的活性分析中有同等的重要性.将一个流程模型视为由控制网和数据网两部分构成,不仅可以简化网模型,还可以形象地观察控制流和数据流对网模型的行为约束,将模型的活性分析转化成对网中控制流和数据流的可达性分析.在用 DPN 描述模型时,将控制流和数据流分开表述成两个 DPN 模型.

**定义 1** (微分控制 Petri 网 CDPN) 微分控制 Petri 网为八元组  $DPN_c = (P, T, F, f, W, m_0, J, \lambda)$ , 其中:

- $P$  为控制库所,  $T$  为控制变迁,  $F$  为控制流关系;
- $m_0$  为初始控制标识;
- $\lambda: F \rightarrow \{1, 2, 3, \dots\}$  为控制流权重函数;
- 七元组  $(P, T, F, f, W, m_0, J)$  构成一个微分

Petri 网.

至于微分数据 Petri 网(DDPN)可类似地去定义.

**定义 2** (适配性) 设  $PN_1$  是  $PN$  的一个子网,  $PN_2$  是一个替换模块, 若  $PN_2$  与  $PN$  满足接口一致性, 且  $(PN - PN_1) \cup PN_2$  与  $PN$  满足一致性, 且  $(PN - PN_1) \cup PN_2$  是活的, 则称  $PN_2$  与  $PN$  满足适配性.

在实际情况中, 不论是控制流网还是数据流网, 其库所内部标识数一定是非负数, 也是网正常运行的必要条件. 对 CDPN(或 DDPN)模型, 给定初始标识及初始时间, 代入 CDPN(或 DDPN)的演化表达式进行运行测试. 在此过程中, 若存在某个库所(终止库所除外), 当其内标识为 0 时, 其后集变迁都未成功引发, 即出现死锁, 模型运行终止. 这种方法不仅能检验模块的适配性, 还能检测出模型存在异常的节点, 便于修正.

通过检验目标模型的活性, 进一步缩小了最适配模块的选取范围, 在结构学上, 模型的简单化主要用极小支集来刻画, 构成极小支集的元素个数越少, 该模型在结构上越稳定, 其适用性就越强. 下面给出模型网极小支持数的概念.

**定义 3** (极小支持数) 设网  $N$  的 T(或 S)不变量的极小支集有  $n$  个, 分别记为  $\|X_1\|, \|X_2\|, \dots, \|X_n\|, C_N = \|\|X_1\| \cup \|X_2\| \cup \dots \cup \|X_n\|\|$  为网的 T(或 S)不变量的极小支持数.

在替换模块满足待补模型的行为约束之后, 本文着重考虑从替换模块的稳定性分析角度选取最适配模块. 除了整个模块的极小支集之外, 离散部分和微分部分的极小支集也可用来作为评判标准. 在寻找最适配模块的过程中, 控制流和数据流信息都得到了充分考虑及应用. 在行为语义上, 利用 DPN 的演化表达式, 分别检测目标模型的 CDPN 和 DDPN 活性, 初步选出满足行为一致性的可替换模块. 对这些可替换模块, 再从结构稳定性上利用极小支持数来确定最适配模块, 下面给出算法 1, 选出满足行为保持的可替换模块.

#### 算法 1 选取待补模型的可替换模块集 $W_0$

输入: Petri 网  $PN_0 = (P, T; F)$ , 待补模型  $PN_i = (P_i, T_i, F_i), i = 1, 2, \dots, n (n \in \mathbb{R}^+)$ , 替换模块

输出:  $W_0$ , 可替换模块集

1. For  $PN_0, PN_1, \dots, PN_n$
2. DO 将其转化为  $OPN_0, OPN_1, \dots, OPN_n$
3. IF  $OPN_0$  与  $OPN_1, \dots, OPN_n$  能合成
4. THEN 将成功合成的  $OPN_i (i \in \{1, 2, \dots, n\})$  的 Petri 网模型依次记为  $PN_1, \dots, PN_j (1 \leq j \leq i)$ , 其对应的合成模型依次记为  $C_1, \dots, C_j$
5. END IF
6. FOR  $k = 1$
7. DO 将  $C_k$  转化为 DPN 的形式, 记为  $DPN_k$ , 依据定义 1 得到  $CDPN_k$  和  $DDPN_k$

8. FOR  $CDPN_k$  和  $DDPN_k$ , 分别写出其演化表达式, 将给定的初始标识和起始时间代入表达式, 判断  $CDPN_k$  和  $DDPN_k$  的活性

9. IF  $CDPN_k$  和  $DDPN_k$  都是活的

10. THEN  $PN_k$  为  $PN_0$  的可替换模块, 并将  $W_0 \cup \{PN_k\}$  ( $W_0$  最初为  $\varphi$ ) 记为  $W_0$

11. ELSE 将  $W_0 \cup \varphi$  为记为  $W_0$

12. END IF

13. 输出可替换模块集  $W_0$ .

以上算法给出了行为上满足要求的可替换模块的选取方法. 下面给出算法 2 从结构上选取最适配模块.

#### 算法 2 选取最适配模块 $PN'$

输入:  $W_0$ , 可替换模块集

输出:  $PN'$ , 最适配模块

1. FOR  $CDPN_i$  和  $DDPN_i$ , 其权函数关联矩阵分别记为  $W_{Ci}$  和  $W_{Di}$ , 其中  $W_{DCi}$  和  $W_{DFCi}$  以及  $W_{DDi}$  和  $W_{DFDi}$  分别为它们的离散部分分块与微分部分分块

2. DO 求  $CDPN_i$  和  $DDPN_i$  的 T(或 S)不变量的极小支集, 由它们构成的集合分别记为  $\min T_{W_{Ci}} = \{T_{W_{Ci1}}, \dots, T_{W_{Cij}}\}$   $\min T_{W_{Di}} = \{T_{W_{Di1}}, \dots, T_{W_{Dik}}\}$

3. IF  $\min T_{W_{Ci}}$  和  $\min T_{W_{Di}}$  都不全为空集

4. THEN 计算  $CDPN_i$  和  $DDPN_i$  的 T 不变量的极小支持数, 分别记为  $T_{W_{Ci}}$  和  $T_{W_{Di}}$ , 令  $T_{Wi} = |T_{W_{Ci}}| + |T_{W_{Di}}|$ , 将最小的  $T_{Wi}$  对应的可替换模块记为  $W_i$

5. THEN 依次计算并找出  $CDPN_i$  和  $DDPN_i$  整体、其离散部分及微分部分的 T 和 S 不变量的极小支集和极小支持数

6. END IF

7. 输出最适配模块  $PN'$ .

## 4 仿真实验分析

根据算法 1, 对动机例子图 1 进行分析, 得出  $CDPN_4$  和  $DDPN_1$  不满足活性. 故输出的可替换模块集为  $W_0 = (PN_2, PN_3, PN_5)$ . 将  $W_0$  输入算法 2, 先计算  $W_0$  中每个模块元素的 T 不变量的极小支持数, 由于  $T_{W_{S5}} = 0$ , 所以仅考虑  $DPN_2$  和  $DPN_3$ , 而它们有相同的极小支持数且对应的 S 不变量和离散部分对应的 T 不变量的极小支持数相同, 但离散部分对应的 S 不变量的极小支持数不同, 由此, 确定  $DPN_2$  对应的  $PN_2$  为最适配模块  $PN'$ .

下面利用某电子商务交易与信息服务中心已有的平台数据包进行仿真实验分析. 该平台数据来自于国内某电商平台的在线支付系统, 该支付系统不仅包含控制流网和数据流网, 而且还要考虑资金流的平衡问题. 其业务流程模型的数据包分别为 Benchmark 平台数据 E-payment Data 1 和 E-payment Data 2, 本平台数据符合控制流和数据流共存的要求: (1) 在 E-payment Data 1 环境中, 共存在 132 个控制流变迁, 64 个数据流

变迁,1 个待替换模块,替换部位有接口 3 个;(2)在 E-payment Data 2 环境中,共存在 146 个控制流变迁,58 个数据流变迁,2 个待替换模块 Module1 和 Module2, Module1 替换模块接口 3 个,Module2 替换模块有接口 4 个;(3)E-payment Data 1 和 E-payment Data 2 对应的业务流程模型中都存在离散和连续的结构。

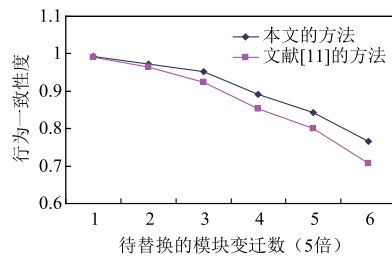


图3 E-payment Data 1数据上的分析

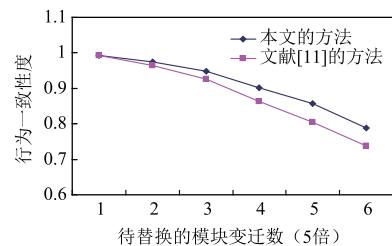


图4 E-payment Data2数据上的分析

针对 E-payment Data 1 环境,运用本文方法和文献[11]中的方法对模型中存在的待替换模块进行适配操作,考察替换操作后模型的活性及行为一致性,得到实验结果如图 3 所示(注:图 3 和图 4 中的纵坐标表示替换后的模型与源模型的行为一致性度,横坐标表示待替换的变迁数的 1/5,如 1 代表 5 个变迁,2 代表 10 个变迁),针对 E-payment Data 2 环境,运用本文方法和文献[11]中的方法对模型中存在的待替换模块进行适配操作,考察替换操作后模型的活性及行为一致性,得到实验结果如图 4 所示。从图 3 和图 4 中可看出,当替换的变迁数较少时,本文的方法与文献[11]中的方法基本一致,随着待替换变迁数的上升,行为一致性度都快速降低,但本文的方法有较好的行为一致性度,文献[11]的方法效果较差。主要原因是在保证替换后模型是活的要求下,本文的方法考虑了控制流和数据流同时匹配的情况,并从稳定性角度进行了分析和调整,而文献[11]的方法仅考虑控制流的匹配,未考虑数据流对控制流的影响,且在分析时未考虑替换后模型的微分稳定性。

## 5 总结

业务流程系统目前已广泛使用,经常会出现一些异常行为的区域,通过业务模块的替换操作来实现业

务流程的适配是比较常用的技术和方法之一,本文的方法能够有效使用于带有控制流和数据流的业务流程系统的适配分析,优化系统性能,提高系统的可生存性。

## 参考文献

- [1] Jun Jin, Hu Jingjing, Cao Yuanda, Wang Jingxia. Behavioral compatibility analysis for context-independent service substitution[A]. China Grid Annual Conference[C]. Beijing, 2012. 121 - 127.
- [2] Feng Guo, Guang Wei. Web services description and substitutions analyzing based on Petri nets[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2013, 19(6): 1423 - 1432.
- [3] Mart J A, Pimentel E. Contracts for security adaptation [J]. The Journal of Logic and Algebraic Programming, 2011, 80(35): 149 - 154.
- [4] Karimpour J, Alyari R, Noroozi A. Formal framework for specifying dynamic reconfiguration of adaptive systems [J]. IET Software, 2013, 7(5): 258 - 270.
- [5] Mooij Arjan J. System integration by developing adapters using a database abstraction [J]. Information and Software Technology, 2013, 55(2): 357 - 364.
- [6] Vallee-Rai R, Gagnon E, Hendren L, Lam P, Pominville P, Sundaresan V. Optimizing java bytecode using the soot framework: Is it feasible? [A]. International Conference on Compiler Construction [C]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2000. 18 - 34.
- [7] Moser S, Martens A, Gorlach K, Amme W, Godlinski A. Advanced verification of distributed ws-bpel business processes incorporating cssa-based data flow analysis[A]. IEEE International Conference on Services Computing (SCC 2007) [C]. Salt Lake City, 2007. 98 - 105.
- [8] Elhog-Benzina D, Haddad S, Hennicker R. Refinement and asynchronous composition of modal Petri nets[A]. Lecture Notes in Computer Science[C]. Berlin Heidelberg: Springer, 2012. 96 - 120.
- [9] 吴哲辉. Petri 网理论[M]. 北京:机械工业出版社, 2006. 6 - 42.  
Wu Zhe-hui. Petri Nets Theory [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2006. 6 - 42. (in Chinese)
- [10] Chen Guopei, Li Junmin, Ying Yang. Stability analysis for differential Petri net [J]. Control and Decision, 2007, 22(11): 1218 - 1227.
- [11] Mooij, Arjan J. System integration by developing adapters using a database abstraction [J]. Information and Software Technology, 2013, 55(2): 357 - 364.
- [12] Weidlich M, Mendling J, Weske M. Efficient consistency measurement based on behavioral profiles of process models[J]. IEEE Transactions on Software Engineer, 2011, 37

(3);410-429.

#### 作者简介



**方贤文** 男,1975 年出生于河南信阳,博士、教授,主要研究领域为 Petri 网、可信软件和服务计算.主持国家自然科学基金 3 项,发表学术论文 90 多篇,其中 SCI/EI 检索 60 余篇.  
E-mail:fangxianwen@hotmail.com

**陶小燕** 女,1987 年出生于安徽马鞍山,现为同济大学在读博士生,主要研究领域为 Petri 网和可信软件等.  
E-mail:slxjx@aust.edu.cn

**刘祥伟** 女,1977 年出生于安徽六安,现为安徽理工大学副教授,主要研究领域为业务流程分析和 Service Computing.  
E-mail:992480828@qq.com