

基于 Petri 网化简方法的工作流模型验证

李建强 范玉顺

清华大学自动化系, 北京 100084

摘要: 经营过程的建模、分析与优化是支持企业经营过程重组 (BPR) 的重要基础, 行之有效的模型分析方法是成功进行模型分析的重要的关键技术问题。在深入分析了经营过程工作流模型特点的基础上, 本文提出了一种基于 Petri 网图形化简规则的业务过程模型分析与验证方法, 证明了所提出这套化简规则的完备性和多项式时间的复杂性。并应用一个实例证明了所提出方法的有效性。

关键词: 经营过程重组, 工作流分析, Petri 网, 模型化简

一、引言(Introduction):

BPR 的实质是企业根据市场的需要以企业经营过程为核心重构企业的关键业务流程, 并建立与其匹配的运行机制和组织结构, 实现对经营过程的有效管理和控制。它一般分为五个阶段: 项目规划、企业经营过程建模、模型分析与优化、基于模型的企业经营过程重组实施和项目评价与监控。在这个过程中模型分析与优化是企业实施 BPR 中非常重要的一个环节, 对 BPR 成功与否起着至关重要的作用。近几年来, 作为支持 BPR 的重要技术的工作流技术得到了广泛的重视, 但是由于工作流技术产生于实际应用, 缺乏良好的理论基础, 应用工作流方法建立的企业经营过程模型缺乏必要的行之有效的模型验证和模型分析方法。所以研究如何从理论上验证所建立的过程模型结构的合理性, 研究如何评价所建立的模型的性能和优化模型的方法显得尤其重要。

反映企业经营过程的工作流模型的正确性、有效性和高性能是模型分析和优化的主要内容, 所以我们把模型分析分成三个部分: 模型证实、模型验证、模型性能分析。其中模型证实从一般模型分析的角度来讲仅是证实模型完成其功能的有效性, 而在我们要研究的模型性能分析中则是需要确认模型是否与要描述的真实世界中系统相一致。模型验证也包括两个方面: 一方面它作为单独分析工作流模型的正确性 (不存在结构上或行为上的死锁等) 的静态分析方法而存在, 另一方面它作为模型性能分析的一部分, 即在进行模型性能仿真之前, 验证仿真模型 (企业环境或经营过程描述等) 的正确性。模型性能分析一般指通过仿真获得的仿真数据 (业务平均处理时间、资源平均利用率等) 来评估新建立的经营过程是否满足目标需求。

虽然现在绝大部分的工作流产品都提供模型性能分析的仿真功能, 但由于复杂性等原因很难找到一种有效的算法对模型进行分析与验证。本文在总结模型分析研究成果现状的基础上, 针对目前模型验证方法存在的不足, 总结了 Petri 网模型分析中的一些图形化简规则, 针对企业经营过程模型的特点并利用文 [1] 中提出的模型正确性标准, 提出了一种具有完备性和高效率的工作流模型的模型验证方法。本文第二节对工作流模型及工作流模型验证与分析现状进行了分析; 第三节介绍相关 Petri 网知识, 并给出了一种从工作流联盟的过程定义到工作流网的模型映射方法; 第四节详细讨论了我們提出的工作流模型验证方法, 并以实例进行了说明。

二、工作流模型及验证方法现状(Workflow Model and Its Verification)

目前有很多方法都可以用来进行工作流 (过程) 模型的定义和描述, 如: WFMC 定义语言、EPCM 模型、Petri 网等。尽管各种工作流建模方法形式上不尽相同, 但它们都能

提供对逻辑顺序结构, 资源使用, 路由控制信息等流程定义所必须的要素的描述。从研究中我们认识到 workflow 模型对企业经营业务过程的完整描述一般应包括五个方面 (见图 1): 过程视图、信息视图、资源视图、组织视图, 功能视图。过程视图用来定义实现某种经营目的或经营目标需要那些活动, 及它们执行的顺序或相互约束关系。功能视图从过程或活动的功能的角度对 workflow 模型进行描述, 包括输入、输出、约束、资源 (人或物) 的操作等。资源视图和组织视图是 workflow 模型从资源配置或分配的角度对经营过程进行描述, 它包括组织划分和基于活动的资源分配等, 以此来完成与过程模型的关联。信息视图则主要

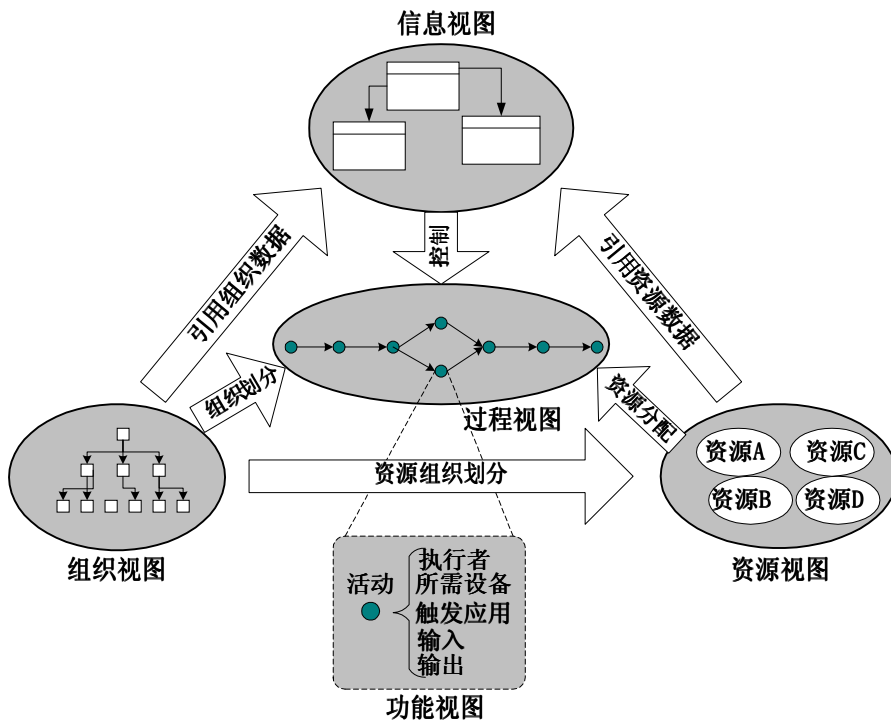


图 1. 工作流过程模型

Figure 1. Workflow Model

从两个方面对工作流模型进行描述: 工作流控制数据、工作流相关数据。工作流控制数据用来辨别每个过程或活动实例的状态并根据工作流相关数据 (确定过程实例状态转换的条件) 来判断选择下一个将执行的活动, 即通过工作流控制数据和工作流相关数据的协同工作共同来完成事务实例在业务过程中的路由。可以看出, 工作流模型侧重于描述业务流程包括什么活动及各个活动以什么样的逻辑关系来完成经营目标, 它不涉及活动如何被执行的具体细节而只关心活动间协调的必要逻辑约束信息。因此, 过程视图是过程模型中是最基本和最重要的方面, 也是集成过程模型其他视图的中心。

由于 workflow 模型的复杂性^[8], 目前还没有有效的算法可以对 workflow 模型的正确性进行分析。文献[7]提出一种基于图形化简的方法进行 workflow 模型验证, 并归纳了几种化简规则, 但这种方法只对 workflow 模型结构中存在的特殊问题 (与连接或同步的输入存在互斥的或分支及或连接的输入中有属于同一个与分支的输出) 进行了分析与验证, 而且这种方法不适用于存在循环结构的 workflow 模型。由于 Petri 网严格的数学基础和图形化的规范语义, 对于 workflow 的建模与分析研究人员来讲有很大的诱惑力, 文献[2]中提出了用 Petri 网进行 workflow 的建模的工作流网, 将 workflow 模型的正确性归纳为工作流网的完整性, 并在文献[1]中提出了一种基于 Petri 网的图形化简方法辅助模型验证, 但是其提出的化简步骤由于不具备完备性并不能完全验证 workflow 模型的正确性。文献[3]中提出了一种基于仿真的模型验证方法, 但它缺乏理论上的严格证明, 而且当发现系统中确实存在冲突或死锁时, 并不能给确

定具体是在什末部分出现的问题 (只是给出了一些辅助的检测数据)。针对这些不足, 本文提出了一种 workflow 模型验证方法, 并用实例进行了方法验证。验证结果表明, 本文提出的方法是有效的。

三、模型映射(Model Mapping)

这里只对我们将要用到的 Petri 网^[5]和 workflow 网^[2]的一些概念或定理作简单介绍:

定义 1: Petri 网 $PN=(P,T,F)$ 称为自由选择 Petri 网, 如果任意变迁 t_1 和 t_2 满足 $\bullet t_1 \cap \bullet t_2 \neq \phi$ 则 $\bullet t_1 = \bullet t_2$ 。

定义 2: 对于 Petri 网 $PN=(P,T,F)$ 的非空库所集合 S , 如果满足 $\bullet S \subseteq S^\bullet$, 则称 S 为虹。

定义 3: 矩阵 C 为 Petri 网 $PN=(P,T,F)$ 的映射矩阵, 如果 $|P|>1$ ($|T|>1$), 且库所 $p(t)$ 所对应的行(列)可以被其他行(列)线性表出即: $r(p) = \Lambda_{m \times 1} \bullet C$ ($c(t) = C \bullet \Lambda_{n \times 1}$), 则称库所 p (变迁 t) 是线性相关的。若 $\Lambda_{m \times 1} \geq 0$ ($\Lambda_{n \times 1} \geq 0$), 则称 p (变迁 t) 是非负线性相关的。

定义 4: 一个 Petri 网 PN 被称为 workflow 网, 当且仅当它满足下面的两个条件:

- (1) PN 有两个特殊的库所: i 和 o 。库所 i 是一个起始库所, 即 $\bullet i = \Phi$; 库所 o 是一个终止库所, 即 $o^\bullet = \Phi$ 。
- (2) 如果在 PN 中加入一个新的变迁 t^\bullet , 使 t^\bullet 连接库所 o 与 i , 即 $\bullet t^\bullet = \{o\}$, $t^\bullet = \{i\}$, 这时所得到的 PN 是强连接的。

定义 5: 在 workflow 网 PN 中加入一个新的变迁 t , 使 t 连接库所 o 与 i , 即 $\bullet t = \{o\}$, $t^\bullet = \{i\}$ 称此 PN 为扩展 workflow 网。

定义 6: workflow 网 PN 具有完整性, 当且仅当 PN 满足下面三个条件:

- (1) 对于每一个由初始状态 M_0 (只有一个托肯在库所 i 中) 可达的状态 M , 存在变迁的发射序列*可以使系统状态由 M 转移到状态 M_e (只有一个托肯在库所 o 中)。
- (2) 状态 M_e 是由状态 M_0 可到达的所有状态中唯一一个在库所 o 中存在托肯的系统状态。
- (3) (PN, M_0) 具有活性。

定理 1: workflow 网 PN 具有完整性的充分必要条件是它的扩展 workflow 网具有有界性和活性^[1]。

现在绝大多数 workflow 建模工具对于 workflow 活动之间的逻辑关系一般是通过事务在过程模型中的路由来体现的, 而每一具体事务的路由选择是由活动对事务处理的结果也就是事务本身的特性 (经过活动处理后的状态) 决定的。在此条件下, 对于有些表面上不具有自由选择特性的模型结构 (如图 2), 在转换为自由选择特性的结构后 (图 3), 并不改变过程模型语义: 选择/汇合节点 D 对输出路径 $R1$ 、 $R2$ 的选择与活动 A 是没有关系的, 因为它的选择是根据节点 D 中的事务特性决定的, 在这种情况下假如活动 A 没有执行, 它就会一直等下去, 直到活动 A 执行结束才开始执行活动 B 。从这个角度说大部分 workflow 过程模型本身具有自由选择的特性。

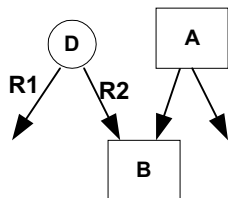


图 2. 形式上的非自由选择结构

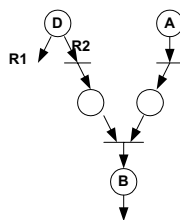


图 3. 非自由选择结构的 Petri 网映射

Figure 2. A Formal Non-free-choice Structure Figure 3. The Mapping Petri net of Figure 2

我们提供一种将 workflow 联盟提供的过程描述语言定义的工作流过程模型^[7]转换为扩展 workflow 网的映射方法: 每个活动 A (选择/汇合节点 D) 映射为一个库所 Ap (Dp), 并且针对每一个输出为非同步结构活动的路径产生一个以 Ap (Dp) 为输入库所的变迁 At (Dt),

同时变迁 At (Dt) 的输出库所为所有活动 A 的输出活动 (当输出为有同步结构的的活动 S 时, 见后)。对于有同步结构的的活动 S , 用一个库所 Sa 和其对应, 但产生两个变迁 Si 和 So : Si 为 Sa 的输入变迁, So 为 Sa 的输出变迁。对于同步 S 的输入: 当为活动时, 我们为每个活动 SA 的输出变迁 SAt 添加输出库所 SAP , SAP 的输出变迁为 Si ; 当为选择/汇合节点 D 时, 我们创建库所 DSP 作为 Dt 的输出库所和 Si 的输入库所。最后, 在起始库所和终止库所之间加入一个新的变迁 t , 使 $\bullet t = \{o\}$, $t^\bullet = \{i\}$, 系统的初始状态只在起始库所中有一个托肯。显然, 通过这种映射获得的经营过程 workflow 模型肯定是自由选择 Petri 网。

四、模型化简方法(Model Reduction Method)

我们将 Petri 网中已经存在的图形化简方法根据 workflow 网的特点进行必要的改进, 提出了具有完备性的自由选择扩展 workflow 网的化简规则:

规则 1: 如果自由选择扩展 workflow 网 \overline{PN} 中输入输出弧都唯一的变迁 t 的输入库所 p_i 与输出库所 p_o 不是同一个库所, t 的输入库所 p_i 的输入变迁不为空且只有唯一的输出变迁 t , 则变迁 t 的输入输出库所可以被融合同一个库所 p (从而 t 被化简掉), p 的输入输出变迁分别是 p_i 与 p_o 输入变迁与输出变迁的并。

规则 2: 如果自由选择扩展 workflow 网 \overline{PN} 中输入输出弧都唯一的库所 p 的输入变迁 t_i 与输出变迁 t_o 不是同一个变迁, p 的输出变迁 t_o 的输出库所不为空且只有唯一的输入库所 p , 则库所 p 的输入输出变迁可以被融合成同一个变迁 t (从而 p 被化简掉), t 的输入输出库所分别是 t_i 与 t_o 的输入库所与输出库所的并。

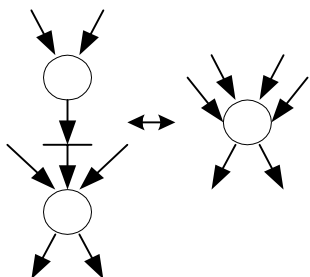


图 4. 规则 1

Figure 4. Rule 1

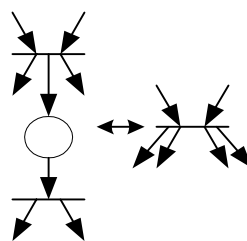


图 5. 规则 2

Figure 5. Rule 2

规则 3: 自由选择扩展 workflow 网 \overline{PN} 包含一个非负线性相关的的库所 p , 如果 $\overline{PN}^{-s} = (P \setminus \{p\}, T, F \setminus p)$ 是连通的且包含一定数量的库所与变迁, 则 p 可以被化简掉。

规则 4: 自由选择扩展 workflow 网 \overline{PN} 包含一个非负线性相关的的变迁 t , 如果是连通的且包含一定数量的库所与变迁, 则 t 可以被化简掉。

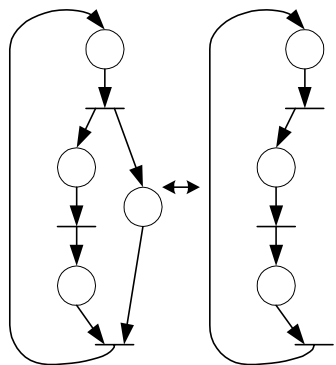


图 6. 规则 3

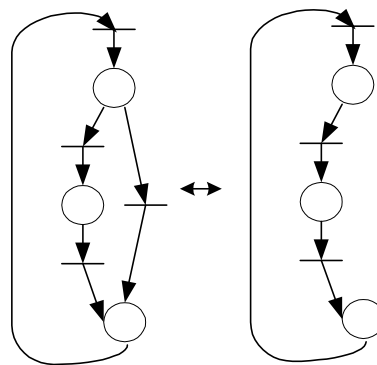


图 7. 规则 8

Figure 6. Rule 3

Figure 7. Rule 4

定理 2: 用规则 1—4 对自由选择扩展 workflow 网进行化简, 不改变 workflow 网的完整性。

证明: workflow 网的完整性即扩展 workflow 网的活性和有界性, 规则 1、2 的活性和有界性的保持是显然的, 详见[5]。而对于规则 3、4 的活性和有界性的保持来源于[4]中化简规则 R3 和 R4, 在这里我们只是将其中化简规则的条件 1、2 给省略掉了。要证明本定理只要证明在自由选择扩展 workflow 网中条件 1、2 自然满足就可以了。条件 1 要求 Petri 网具有自由选择特性它的满足是显然的。条件 2 要求 Petri 网中每一个非空虹中至少有一个库所包含有一个托肯。下面我们证明自由选择扩展 workflow 网自然满足这个条件。由虹的定义可知: 对每一个变迁而言, 如果它有一个输出库所在虹中, 那末它必有一个输入库所属于虹。而对于扩展 workflow 网中的每一个变迁而言都有一条开始于源库所的路径到达该变迁, 这样 workflow 网中的每一个虹都必然包含源库所, 而源库所中总有一个初始的托肯, 所以 workflow 网中每一个虹都包含有一个托肯, 命题得证。

定理 3: 化简规则 1—4 可以将所有具有完整性的自由选择扩展 workflow 网在多项式时间内化简为只包含一个库所和一个变迁的闭环网。

证明: 我们这里只是将[5]的化简规则 R3 和 R4 针对到扩展 workflow 网的特点, 做了某些改进, 在[5]中已经对化简规则 (1, 3, 4) 和 (2, 3, 4) 针对自由选择 Petri 网化简的完备性和复杂性 (多项式时间) 作了证明, 显然在具有自由选择语义的扩展 workflow 网中同样成立, 命题得证。

由于规则 3 和规则 4 的使用需要计算扩展 workflow 网的映射矩阵 C, 这会给化简规则的使用带来一定的不便。因此, 我们将规则 3、4 进行了一些显性归纳, 得出的化简规则 5、6、7、8, 以提高化简效率。

规则 5: 如果自由选择扩展 workflow 网 \overline{PN} 中库所 p_1, p_2 有相同的输入输出变迁, 则可以将 p_1, p_2 融合成一个库所 p 。

规则 6: 如果自由选择扩展 workflow 网 \overline{PN} 中变迁 t_1, t_2 有相同的输入输出库所, 则可以将 t_1, t_2 融合成一个变迁 t 。

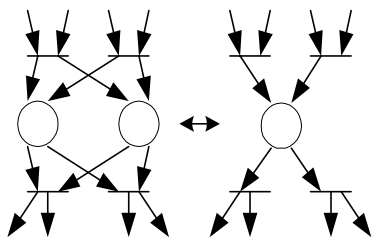


图 8. 规则 5

Figure 8. Rule 5

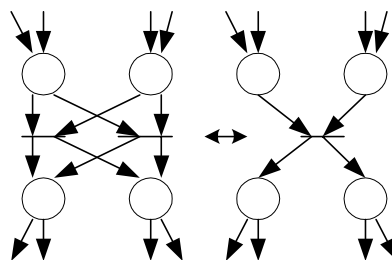


图 9. 规则 6

Figure 9. Rule 6

规则 7: 如果自由选择扩展 workflow 网 \overline{PN} 中库所 p 的输入变迁与输出变迁是同一个变迁, 则库所 p 可以被化简掉。

规则 8: 如果自由选择扩展 workflow 网 \overline{PN} 中变迁 t 的输入库所与输出库所是同一个库所, 则变迁 t 可以被化简掉。

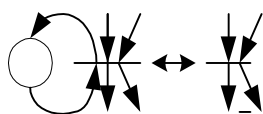


图 10. 规则 7

Figure 10. Rule 7

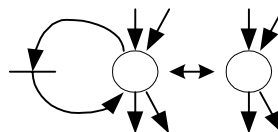


图 11. 规则 8

Figure 11. Rule 8

利用我们上面提出的扩展 workflow 网的化简规则 1—8 可以很方便有效的进行 workflow 过程

模型的验证: 只要可以将描述企业经营过程的扩展工作流网在有限步骤内化简为只有一个变迁和一个库所的自闭环, 则此经营过程的工作流模型就是正确的。另外, 如果在工作流的过程模型中存在死锁或结构上的冲突等模型不合理的问题, 则在工作流模型验证的图形化简过程中很容易检测到产生这种问题的原因, 这也是这种验证方法的优势所在。

下面我们以实例说明我们的工作流模型验证方法的有效性, 图 4 (a) 为需要验证的用工流联盟的过程描述语言定义的工作流模型, 它和文献[6]中图 9 的工作流模型很相似, 唯一的不同在于图 4 (a) 中的工作流模型存在一个循环结构, 但正是这个循环结构的存, 造成了文献[6]提供的基于图形化简的模型验证方法不能完成此工作流模型的正确性验证。图 4 (b) 为利用本文提供的工作流模型映射方法转关得到的扩展工作流网。具体化简过程如下(图 4):

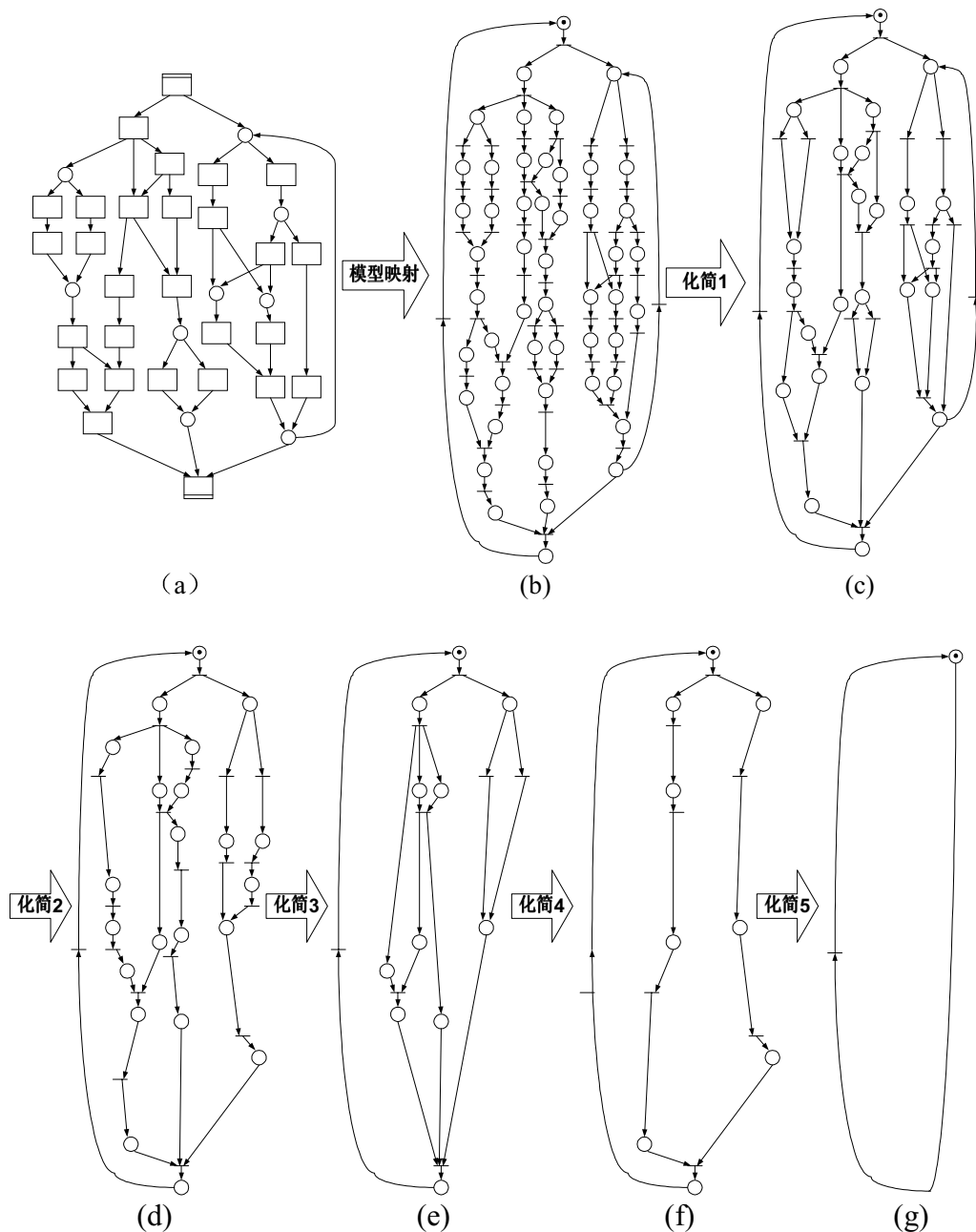


图 12. 化简规则的应用实例

Figure 12. Application Instance of Reduction Rules

化简 1: 多次应用化简规则 1、2 将 (b) 化简为 (c);

化简 2: 对 (c) 应用化简规则 3、4 (实际主要应用化简规则 5、6) 得到 (d);

化简 3: 对 (d) 再次使用化简规则 1、2 得到 (e);

化简 4: 应用化简规则 5、6 各将 (e) 化简为 (f);

化简 5: 对 (f) 分别应用化简规则 1、2、5 得到 (g);

在本例中, 通过交替使用化简规则 1-8 对扩展 workflow 网进行化简, 得到了只有一个变迁和一个库所的自闭环。很容易看出, 它符合 workflow 网模型的正确性标准, 从而验证了此 workflow 模型的正确性。

五、结论(Conclusion)

workflow 模型的分析是 workflow 技术中重要的研究课题之一, 本文在已有的 workflow 过程模型分析方法的基础上提出了一种利用 Petri 网进行图形化简的模型验证方法。首先根据企业业务处理过程的所具有的特性以及大部分过程模型定义工具所建立的 workflow 模型都有自由选择性的特点, 将 workflow 过程模型映射为 自由选择扩展 workflow 网, 然后针对所得到的自由选择扩展 workflow 网的特点对已有的 Petri 网图形化简分析方法进行必要改进, 提出了一套具有完备性的扩展 workflow 网化简规则。它可以在有限时间内将具有界性和活性的自由选择扩展 workflow 网化简为只有一个库所和变迁的自闭环网, 从而可以快速完成 workflow 模型的分析与验证。所提出的 workflow 模型的静态分析方法能够帮助企业在实现经营过程重组实施前进行经营过程模型的正确性分析与验证, 从而有效支持企业实施 BPR。

参考文献

1. W.M.P.van der Aslst. Verification of Workflow nets. In P.Azema and G.Balbo, Editors, *Application and Theory of Petri nets 1997*, volume 1248 of *Lecture Notes in Computer Science* Springer-Verlag,Berlin, pp. 407-426 (1997)
2. W.M.P.van der Aslst. The Application of Petri Nets to Workflow Management.*The Journal of Circuits,Systems and Computers* 8(1):21-66, (1998)
3. W.M.P.van der Aslst. and Arthur H.M. Ter Hofstede. Verification of Workflow Task Structures: A Petri-Net-Based Approach. *Information Systems* Vol.25, No.1, pp. 43-69,2000
4. Javier Esparaza. Reduction and Synthesis of Live and Bounded Free Choice Petri Nets *Information and Computation* 114,50-87(1994)
5. Tadao Murata. Petri Nets:Properties,Analysis and Applications *Proceeding of the IEEE*, Vol.77.No.4,Appril 1989
6. Wasim Sadiq and Maria E.Orlowska.Analyzing Process Models Using Graph Reduction Techniques. *Information systems* Vol.25,No.2,pp.117-134,2000
7. Workflow Management Coalition.*Interface 1:Process Defition Interchange,Process Model*. Document Number WfMC TC-1016-P(1998)
8. A.H.M.ter Hofstede, M.E.Orlowska,and J.Rajapakse. Verification Problems in Conceptual Workflow Specifications. *Data and Knowledge Engineering*,24(3):239-256(1998)

RESEARCH OF PETRI NET BASED WORKFLOW MODEL REDUCTION METHODS

Li Jianqiang Fan Yushun

Dept.of Automation,Tsinghua University,Beijing 100084

Abstract: Bussiness process modeling, analysis and optimization are the important foundations of

BPR, the efficient and effective analytical method plays the key role in model analysis. In this paper, according to the characteristics of workflow model for business process, a Petri net based verification approach that employs a set of graph reduction rules is proposed. The completeness and polynomial time complexity properties of the proposed method are proved. A case study is made to demonstrate our method..

Keyword: Business process reengineering, Workflow analysis, Petri nets, Model reduction

作者简介: 李建强, 男, 74.03.13, 清华大学自动化系博士研究生, 研究方向: 工作流建模与仿真, Petri 网及性能分析, 网络化制造及项目管理。

范玉顺, 男, 62.05.11, 教授, 博士生导师。90 年 7 月博士毕业于清华大学自动化系。现任清华大学系统集成研究所副所长, IFAC 先进制造技术委员会委员, 863/CIMS 主题关键技术专业专家组成员。现研究方向: 企业建模, 企业经营过程重组与 workflow 管理, 系统集成与集成平台技术, 面向对象与柔性软件系统技术。