

基于 Petri 网的工作流合法性验证综述*

黄瑜岳, 李克清

(常熟理工学院, 江苏 常熟 215500)

摘要: 对传统的工作流合理性验证方法进行了阐述, 并分析了这些方法的优缺点, 着重针对国内外学者用 Petri 网对工作流合理性验证方法进行综述, 分析其特点, 并指出了工作流的合理性验证的发展方向。

关键词: 工作流; 工作流管理系统; Petri 网; 合法性验证

中图分类号: TP301.6 文献标志码: A 文章编号: 1001-3695(2013)01-0026-04

doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2013.01.005

Survey: legitimacy verification of workflow based on Petri net

HUANG Yu-yue, LI Ke-qing

(Changshu Industry of Technology, Changshu Jiangsu 215500, China)

Abstract: This paper analysed the traditional legitimacy verification of workflow method, and presented its advantages and disadvantages. And then focused on the workflows reasonable verification method based on Petri net researched by domestic and foreign scholars and analyzed the characteristics. At the end, this paper concluded the development direction of rationality validation workflow.

Key words: workflow; workflow management system; Petri net; legitimacy verification

随着办公自动化、计算机集成制造、文件管理及数据库技术等相关领域的发展, 越来越多的人开始关注日常工作中具有固定程序的活动, 这些活动有序地结合在一起来完成一项工作, 在此基础上很多学者提出了通过计算机的有效管理进行自动化工作的概念, 即工作流^[1]。工作流的目的是通过将工作分解成定义良好的任务或角色, 按照一定的规则和过程来执行这些任务并对其进行监控, 达到提高工作效率、更好地控制过程、增强对客户的服务、有效管理业务流程等目的。

工作流概念的提出引起了很多厂商和科研工作者的关注, 并开发出了很多相关的产品, 如美国 IBM 公司 Almaden 研究所提出的能够完成分布执行的基于持久消息的 Extica/FMQM、瑞士苏黎世大学提出的基于事件的工作流执行平台中间件体系结构 EVE、美国佐治亚大学的 LSDIS 实验室开发的基于 Web 和 CORBA 的 Meteor 及美国 Dartmouth 大学开发的基于可移动代理的 Darflow 等。针对复杂的现实世界进行定义和模拟容易产生错误, 这些错误将导致实现上出错, 给系统运行带来巨大的损失。因此, 验证合理性成为工作流执行过程中的一个重要环节, 这一点也得到了很多科研人员和工业界人员的认可。为了降低这种损失, 将在工作流执行之前对其进行合理性验证, 保证其在运行逻辑上的合法性。

1 工作流传统验证方法

1.1 工作流管理系统的简述

工作流管理系统与工作流是两个不同的概念, 工作流是用来描述企业业务系统执行的先后顺序; 工作流管理系统不是企业的业务系统, 而是为企业的业务系统的运行提供一个软件的

支撑环境。工作流管理联盟(workflows management coalition, WFMC)^[2]在 WFM96 文件中对工作流管理系统进行了定义, 即工作流管理系统是一个软件系统, 它完成工作流的定义和管理, 并按照在计算机中预先定义好的工作流逻辑推进工作流实例的执行。

工作流是基于实例(case)开发的, 每个任务的执行其实就是指实例的运行, 并且每个任务可以包含多个实例。由于工作流管理系统的目的是能够更有效地处理实例, 因此工作流所处理的实例基本上都是相似的, 这些实例通过工作流管理系统的定义按照一个指定的顺序执行。工作流的处理(process)是工作流管理系统的核心, 它规定哪些任务执行和以什么样的顺序执行, 这种处理过程的定义形式多种, 如程序、流程图和路由等。由于流程的执行是有顺序的, 在连续发生的任务中间引入了前条件的概念, 前条件满足与否决定了任务是否可以执行, 前条件满足则任务执行同时在任务执行完后后条件为真。工作项(work item)是指那些可以完成一个独立任务的实例。工作项的顺利执行往往需要资源(resource)的配合, 这些资源可以使设备(如打印机、传真机等)也可以是人(如管理员、操作员等), 这些资源的引入在一定程度上会影响整个工作流的效率, 因此为了能够更加有效地管理工作流, 可以将资源分类, 如按角色来分或按组织单元来分等。工作流中的活动是指工作项在资源的合理配合下进行有序的执行。

图 1 展示了工作流的三维视图^[3,4]。a) 实例轴, 它表示实例之间是相互独立、没有直接影响的, 它们之间的相互作用是通过共享资源和数据库来表现的; b) 过程描述轴, 它指出任务的执行是有先后顺序的; c) 资源轴, 它表示了工作流执行过程

收稿日期: 2012-05-09; 修回日期: 2012-06-22 基金项目: 江苏省科技计划资助项目(BE2011376); 苏州市科技计划资助项目(SYND201002)

作者简介: 黄瑜岳(1978-), 男, 讲师, 硕士, 主要研究方向为智能生产、算法设计(prohyy@sina.com); 李克清(1966-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为无线传感器网络、网格计算、优化设计、信息安全等。

中必不可少的部分。图 1 充分说明了 workflow 管理系统是对实例、过程和资源的综合描述。

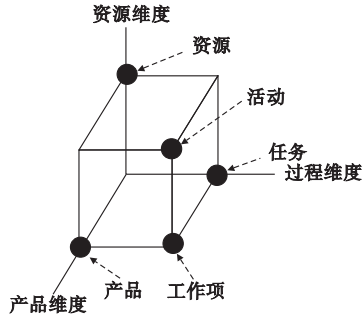


图1 工作流的三维视图

1.2 工作流验证方法的需求

根据对工作流及 workflow 管理系统的分析, Karamanolis 等人^[5,6]对工作流过程验证方法提出了七条基本要求, 总结如下: a) 需要有坚实的数学基础和严格的形式化分析手段, 保证系统的安全性和活性; b) 需要能在设计时对 workflow 模型进行详尽的分析和交互仿真; c) 需要有自动工具支持; d) 需要有一种综合方法在设计系统时进行渐增式分析, 并在多种环境下支持重用; e) 需要产生有意义的、执行路径形式的诊断信息, 指出设计中潜在的错误; f) 对人使用易于理解的图形化表示, 为工具提供一套等价的、定义良好的和有效利用空间的形式化符号; g) 要求没有模拟和形式化方法经验的人也能够理解。

1.3 传统工作流合理性验证方法

工作流合法性验证已经引起了很多厂商关注, 但在国际上对过程的研究则主要是以静态的过程描述和部分的过程仿真为主, 还处于初级阶段, 主要有流程图^[7,8]、状态图、活动网络图^[9]、IDEF 系列、ECAA (事件—条件—动作规则)、并发事务逻辑、事件驱动的过程链模型^[10]及扩展事务模型的建模方法。这些方法在一定程度上解决了流程的描述问题, 但是随着网络技术的进一步发展, 企业中和企业间的业务过程变得越来越复杂, 并且将向灵活性^[11]、自适应性^[12]、可扩展性^[13]以及互操作性等方向发展, 那么仍然利用传统的工作流验证方法将存在一定的缺陷^[6,14]:

- 能对工作流所涉及的角色、资源、组织、成本和时间进行描述, 但对于过程或工作流的优化与重组分析却无能为力。
- 能够对单个工作流进行描述, 但对存在于企业组织单元之间可能有的多个并行过程及其实施很难进行处理, 尤其是对多个业务流程之间的交互, 难以描述与分析。
- 大多数单一建模理论对工作流环境变化的考虑不够, 当环境发生改变时, 工作流过程模型不易作出相应的变动。

因此针对当前大规模、实时变化的业务系统来说, 这些方法是不能满足其需要的, Petri 网^[15,16]的提出避免了这些缺陷, 能够更好地对流程的过程进行建模。

2 Petri 网验证方法

Petri 网是对离散并行系统的数学表示。1960 年由卡尔·A·佩特里发明, 适合于描述异步的、并发的计算机系统模型。Petri 网既有严格的数学表述方式, 也有直观的图形表达方式, 既有丰富的系统描述手段和系统行为分析技术, 又为计算机科学提供坚实的概念基础。

随着 Petri 网技术的快速发展, Petri 网呈现出了一系列的特点: 模拟性、客观性、描述性、流特性、分析性、基础性和同步并发性。其中, 模拟性是指从组织结构的角度, 可以模拟系统

的控制盒管理, 而不涉及系统实现所依赖的物理和化学原理; 客观性是指 Petri 网可以精确描述事件 (变迁) 间的依赖 (顺序) 关系和不依赖 (并发) 关系; 描述性是指可以用统一的语言描述系统结构和系统行为; 流特性是指 Petri 网更适合描述已有规则的流行为特征的系统, 包括能量流、物理流和信息流等; 分析性是指 Petri 网系统具有与应用环境无关的动态行为, 可以作为独立的研究对象; 基础性是指 Petri 网系统可以在不同应用领域得到不同的解释, 从而可以起到沟通不同领域间桥梁的作用; 同步并发性是指 Petri 网系统可以用来描述同步并发的系统。

2.1 工作流网的合理性

工作流网是在 Petri 网的基础上由荷兰学者 Van der Aalst 提出来的^[3,17], 用来对工作流的合法性、有效性进行验证。

工作流模型的合理性、有效性是模型分析中的主要内容, 需要从模型分析的角度来证实模型功能的有效性, 即从工作流模型出发, 保证模型不存在结构上和行为上的死锁状态。目前国内国外很多学者都采用文献 [18] 中对工作流合理性的定义, 工作流网是合理的, 充分必要条件是: 只有它的每一个变迁都属于一条从开始状态 M_0 到终止状态 M_1 的执行序列上; 当终止库所拥有, 其他库所没有令牌时; 模型中不存在执行不到的节点, 即死锁^[19]。

2.2 基于 Petri 网的工作流验证方法

随着社会需求和科学技术的不断发展, Petri 网对位置、变迁和令牌的内涵进行了一定程度的丰富, 使得现在的 Petri 网可以在时间、资源上能够得到更好的表示。本文将 Petri 网扩展技术与工作流的特点相结合, 将工作流的验证方法分为基于典型 Petri 网的工作流验证方法^[20-22]、基于着色 Petri 网的工作流验证方法^[23-25]、基于时间 Petri 网的工作流验证方法^[26-28]、基于层次 Petri 网的工作流验证方法^[29-32]、基于广义随机 Petri 网的工作流验证方法^[33]和基于混合 Petri 网的工作流验证方法。其中, 后四种都是在高级 Petri 网的基础上发展而来的工作流验证方法, 这些方法都用到了 Petri 网的基本思想, 可以对并行系统进行验证, 同时也具有其固有的特点。

2.2.1 基于典型 Petri 网的工作流验证方法

该方法就是对两类节点 (变迁和库所) 的二分图的研究, 可以针对简单的系统进行状态、事件、前条件、同步、并行、选择和迭代的建模, 最后通过相关算法对其进行可达性和安全性分析。

很多学者在这方面做出了很多贡献, 其主要成果为: 周福明等人^[18]根据工作流网运行的实际情况, 从初始状态 $(1, 0, \dots, 0)$ 出发, 通过变迁的使能和激发推动状态的迁移, 直到工作流网的状态变为 $(0, 0, \dots, 1)$, 即为终止状态, 且所有的变迁都被触发过, 所有的库所也都经历过, 既满足工作流模型验证所要求的不存在死锁和死条件, 则称该工作流网是合理的。

郝玫等人^[34]在周福明等人研究的基础上, 提出了变迁矩阵的概念, 即矩阵的行列均表示工作流网中变迁, 矩阵中的元素为 1 或 0 分别表示从行所表示的变迁到列所表示的变迁之间是否存在直接的可达关系。在一定程度上该算法提高了工作流验证的效率, 使得工作流的验证与矩阵相结合, 提高了工作流网建模的表现形式。

高捷等人^[35]提出了用矩阵运算来计算下一状态的方法。基本原理为: 用矩阵来表示输入变迁和输出变迁, 其中横坐标表示变迁, 纵坐标表示库所, 对于输入变迁集矩阵 T 来说, 如果 $T[i][j] = 1$, 表示库所 P_j 是变迁 T_i 的输入库所; 对于输出

变迁集 T 来说, 如果 $T[i][j] = 1$, 则表示库所 P_j 是变迁 T_i 的输出库所。在这种矩阵表示的基础上, 运用矩阵的加减运算来计算工作流的下一状态, 计算方法为

$$M_{i+1} = M_i + T \cdot \dots \cdot T$$

其中: M_i 为当前状态, M_{i+1} 为下一状态。该算法是对上述两种算法的进一步改进, 运用了数学运算, 简化了计算过程, 提高了工作流的验证效率。

邵昱晖等人^[36]针对柔性工作流逻辑网提出了工作流的一种柔性建模方法, 该方法用到了面向对象编程的思想, 以模型中任务依赖关系为主要研究对象, 对工作流的合理性进行分析。基本原理为构造两个动态栈 $stack_1$ 和 $stack_2$, 用有向图的深度优先遍历方法对工作流网进行遍历, 在遍历过程中如遇到 split(AND 或 OR) 结构的节点 t_1 时, 将 t_1 的 rightNum 个副本压入 $stack_1$ 。以函数的递归方法由 t_1 的第一个后向节点继续向后遍历, 当遍历遇到与 t_1 相对应类型的 join(AND 或 OR) 节点 t_2 时, 将 rightNum - 1 个 t_2 的副本压入 $stack_2$ 。之后对 $stack_1$ 做出栈操作, 继续由 t_1 的第二个后向节点开始遍历, 反复进行如上操作。工作流的执行结束后, 满足 a) 若 PN 中令牌初始状态为 $(1 \ 0 \ \dots \ 0)$, 则最终状态必为 $(0 \ 0 \ \dots \ 1)$; b) 若 $Pk_m \neq 0$, 则 $Pk_j = 0 (0 < j < m, 0 < k \leq n)$, 则称为该工作流网是合理的。该方法可以更好地对日趋复杂的工作流进行动态描述, 并使之具有可重构性、可重用性以及可扩展性等特点; 同时, 与单纯工作流网建模相比, 可以避免模型中任务间逻辑关系与语义定义混淆所造成的结构混乱。

与传统的建模方式相比, 该方法在表现形式上更加直观, 并且可以对并发系统进行建模。但是该系统在对复杂系统和大系统进行建模时, 会使整个系统的效率降低, 影响整个系统的正常运行; 同时, 基于典型 Petri 网的验证方法不能够实现对数据和时间的建模。因此, 在市场需求和科学进步的前提下, 提出了高级 Petri 网。

2.2.2 基于着色 Petri 网的工作流验证方法

基于着色 Petri 网的工作流验证方法对令牌的内涵进行了扩展, 令牌不仅起到令牌的作用, 还表明了建模系统中的资源使用情况。因为该方法对令牌的描述在满足典型 Petri 网的同时, 还将其根据色彩和类型进行分类, 每个不同颜色的令牌代表了不同类型的资源。在着色 Petri 网中, 变迁使能的条件变为所有输入库所所拥有的令牌数和颜色值, 能够满足该变迁的需求; 与此同时该变迁执行完以后将会使输出库所获得相应令牌。

Lu、徐俊等人^[24, 37]引入了一个守卫函数的概念, 由弧表达式函数和守卫函数共同控制着色令牌在工作流网中的路由, 即如果守卫函数求出的值为 false, 则即使相应变迁的所有输入库所中都有令牌, 该变迁仍然不能被使能。该方法保证了整个模型可以安全、正确地运行。因此, 该方法可以用于大企业中对权限的划分。

张鹏程等人^[38]针对工作流过程定义中存在的模糊信息提出了模糊着色 Petri 网的验证方法, 该方法用推理的方法对工作流进行建模, 具有一定的局限性, 因此它的使用也是受限的。与典型 Petri 网相比, 该方法同时将资源一起进行建模, 降低了系统运行时出错的可能性。

2.2.3 基于时间 Petri 网工作流验证方法

随着实时系统的发展, 系统对时间的限制越来越严格, 如何在系统执行之前能够模拟该时间限制的正确性成为了模型验证的一个重要的问题。在高级 Petri 网中提出了时间 Petri 网的概念, 在一定程度上解决了该问题。时间 Petri 网中所涉及的

时间既可以附加到迁移上也可以附加到位置上, 前者被称为时间迁移 Petri 网, 后者称为时间位置 Petri 网。在此基础上, 时间 Petri 网的工作流使能条件变为使能的迁移在延迟相应的时间因子后引发。

刘婷等人^[39]对基本工作流模型进行充分的时序分析, 并为顺序、选择、并行和循环等基本模型给出了现行推理规则, 对模型进行时间压缩等效变换, 最终根据工作流网合理性条件及其对时间的限制来判断该工作流网是否合理。

2.2.4 基于广义随机 Petri 网的工作流验证方法

在工作流的验证方面, 很少有人涉足到工作流性能的验证方面, 陈翔^[33]在这方面提出了自己的想法, 将 Petri 网与马尔可夫链结合。基本思想为: 首先将工作流模型转换为广义随机工作流网络模型; 利用 Petri 网的数学模型仿真能力和图形化建模特点, 不仅可以建立直观易懂的工作流模型, 还能将广义随机工作流网络同构为一个马尔可夫链; 根据马尔可夫链这一成熟的数学模型求解工作流的系统特性, 得到工作流模型的时间、资源等动态信息, 为企业业务流程建模、确定业务流程重组时的业务瓶颈起到指导作用。但这个方法未能解决工作流网所涉及的资源分配、数据共享等问题, 因此还需要进一步解决。

2.2.5 基于层次 Petri 网的工作流验证方法

虽然着色 Petri 网和时间 Petri 网的工作流验证方法都对典型 Petri 网进行了扩展, 但是针对当今越来越复杂、越来越庞大的业务系统来说, 将会严重影响其运行效率, 因此出现了层次 Petri 网的验证方法。面向当今庞大的业务系统, 越来越多的学者开始研究层次化的 Petri 网工作流, 研究成果如下:

陈翔等人^[40]提出了三种分层原则, 即流程中可以完成一定功能, 具有逻辑独立性的流程段可以划分成子层; Petri 网建模中, 有些流程虽然不能完成一个独立的功能, 但该任务执行序列具有重复性的流程段也可划分为子层; 按照子类与父类的关系, 将若干工作流组成一个层次结构的系统, 其中关于子类与父类的概念在文献[40]中有详细的说明。这三种分层方法都能使复杂的工作流网简单化, 并且能够满足简化后的工作流网没有发生逻辑上的变化。

Notomi 等人^[32]提出了一种用树型结构来记录 Petri 网分层结构, 树根为最高层, 也显示了整个工作流的整体框架, 叶子节点为子网。通过该方法可以清楚地了解各分层网之间的关系, 有利于各子网之间相互通信的分析和验证。

2.2.6 基于混合 Petri 网的工作流方法

上述方法都可以解决工作流的验证, 但是针对具有特殊要求的复杂系统来说, 用单一的一种方法是不能完全解决问题的, 因此根据需要可以将上述方法很好地结合。

2.3 用 Petri 网研究工作流合理性存在的问题

在国内外学者和企业工作人员的共同努力下, Petri 网虽然解决了工作流中所存在的并发、异步、分布等问题, 但是对工作流的验证仍处于初级阶段。用 Petri 网来验证工作流的合理性还存在一定的问题, 对于描述复杂环境下的工作流, 使得描述过程也会相对复杂, 这就会影响整个系统的运行效率。因此, 寻找一个更加合适的方法来解决工作流的合理性验证是急需解决的问题。

3 结束语

本文围绕工作流系统的基本理论知识, 并结合传统工作流验证方法中存在的问题讨论了 Petri 网的验证方法。随着业务系统的发展, 工作流的验证方法应该能够解决并发、可扩展等

问题, 总体上说, 工作流的验证方法在一定程度上已经解决了这些问题, 并且正向着成熟的方向发展。

参考文献:

- [1] 史美林, 向勇, 杨光信, 等. 计算机支持的协同工作——理论与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2000.
- [2] HOLLINGSWORTH D. The workflow reference model, TCOO-4003[R]. [S. l.]: Workflow Management Coalition, 1995.
- [3] Van der AALST W M P. The application of Petri nets to workflow management[J]. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 1998, 8(1): 21-66.
- [4] VERBEEK H M W, BASER T, Van der AALST W M P. Diagnosing workflow processes using Woflan[R]. Eindhoven: Eindhoven University of Technology, 2000.
- [5] KARAMANOLIS C, GIANNAKOPOULOU D, MAGEE J *et al.* Formal verification of workflow schemas[EB/OL]. [2000]. <http://research.cs.ncl.ac.uk/cabernet/www.laas.research.ec.org/c3ds/trs/papers/26.pdf>.
- [6] 周建涛, 史美林, 叶新铭. 工作流过程建模的形式化验证技术[J]. *计算机研究与发展*, 2005, 42(1): 1-9.
- [7] SADIQ W, ORLOWSKA M. Modeling and verification of workflow graphs[R]. Brisbane: University of Queensland, 1996.
- [8] Van der AALST W M P, HRNSCHALL A, VERBEEK H M W. An alternative way to analyze workflow graphs[C]//Proc of the 14th International Conference on Advanced Information Systems Engineering. Berlin: Springer-Verlag, 2002: 535-552.
- [9] 刘军, 汤晓安, 干哲, 等. 基于活动网络图的工作流模型研究[J]. *微计算机信息*, 2009(9): 9-11.
- [10] Van der AALST W M P. Formalization and verification of event driven process chains[J]. *Information and Software Technology*, 1999, 41(10): 639-650.
- [11] SADIQ S W, SADIQ W, ORLOWSKA M E. Pockets of flexibility in workflow specification[C]//Proc of the 20th International Conference on Conceptual Modeling: Conceptual Modeling. London: Springer-Verlag, 2001: 513-526.
- [12] Van der AALST W M P, BASTEN T, VERBEEK H M W *et al.* Adaptive workflow: on the interplay between flexibility and support[C]//Proc of International Conference on Enterprise Information Systems. Norwell: Kluwer Academic Publishers, 2000: 61-68.
- [13] Van der AALST W M P, JABLONSKI S. Dealing with workflow change: identification of issues and solutions[J]. *International Journal of Computer Systems Science & Engineering*, 2000, 15(5): 267-276.
- [14] 赵天奇, 陈禹六. 基于活动的工作流建模及其动态调度研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2002, 22(3): 40-45.
- [15] 袁崇义. Petri 网原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [16] Van GLABBEEK R, VAANDRAGER F. Petri net models for algebraic theories of concurrency[C]//Proc of Parallel Languages on Parallel Architectures and Languages Europe. London: Springer-Verlag, 1987: 224-242.
- [17] Van der AALST W M P, Van HEE K. Workflow management—models, methods and systems[M]. Cambridge: MIT Press, 2002.
- [18] 周福明, 吴斌, 顾庆, 等. 基于 Petri 网的工作流建模与正确性分析[J]. *计算机科学*, 2005, 32(2): 121-124.
- [19] 范玉顺. 工作流管理技术基础——实现企业业务过程重组、过程管理与过程自动化的核心技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [20] SUN Ping, JIANG Chang-jun. Analysis of workflow dynamic changes based on Petri net[J]. *Information and Software Technology*, 2009, 51(2): 284-292.
- [21] ESPARZA J, LEUCKER M, SCHLUND M. Learning workflow Petri nets[C]//Proc of the 31st International Conference on Applications and Theory of Petri Nets. Berlin: Springer-Verlag, 2010: 206-225.
- [22] SALIMIFARD K, WRIGHT M. Petri net-based modelling of workflow systems: an overview[J]. *European Journal of Operational Research*, 2001, 134(3): 664-676.
- [23] RUSSELL N C, Van der AALST W M P, HOFSTEDE A H M. Designing a workflow system using coloured Petri nets[M]//Transactions on Petri Nets and Other Models of Concurrency III. Berlin: Springer-Verlag, 2009: 1-24.
- [24] LU Ya-hui, ZHANG Li, SUN Jia-guang. Using colored Petri nets to model and analyze workflow with separation of duty constraints[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, 40(1-2): 179-192.
- [25] ZHU Lian-zhang, SHAN Xiu-hui. Colored Petri net based workflow model mapping[C]//Proc of the 3rd International Conference on Bio-medical Engineering and Informatics(BMEI). 2010: 2743-2747.
- [26] XIAO Jun, DENG Hai-hong, GAO Yun-feng *et al.* Workflow modeling and time performance analysis based on Petri net[J]. *Journal of Jilin University: Information of Science Edition*, 2009, 27(1): 104-112.
- [27] HA S, SUH H W. A timed colored Petri nets modeling for dynamic workflow in product development process[J]. *Computers in Industry*, 2008, 59(2-3): 193-209.
- [28] 李慧芳, 范玉顺. 工作流系统的时间管理[J]. *软件学报*, 2002, 13(8): 1552-1558.
- [29] JIANG Hong, DING Xiang-qian, HOU Rui-chun *et al.* Modeling of hierarchical Petri net-based workflow[C]//Proc of the 2nd International Conference on Computing, Control and Industrial Engineering. 2011: 113-116.
- [30] THOMAS J P, NISSANKE N, BAKER K D. A hierarchical Petri net framework for the representation and analysis of assembly[J]. *IEEE Trans on Robotics and Automation*, 1996, 12(2): 268-279.
- [31] BUCHHOLZ P. Hierarchical high level Petri nets for complex system analysis[C]//Proc of the 15th International Conference on Application and Theory of Petri Nets. London: Springer-Verlag, 1994: 119-138.
- [32] NOTOMI M, MURATA T. Hierarchical reachability graph of bounded Petri net for concurrent-software analysis[J]. *IEEE Trans on Software Engineering*, 1994, 20(5): 325-336.
- [33] 陈翔. 基于广义随机 Petri 网的工作流性能分析[J]. *计算机集成制造系统*, 2003, 9(5): 399-342.
- [34] 郝玫, 王道平. 基于 Petri 网的工作流建模合理性验证算法[J]. *计算机工程与应用*, 2008, 44(13): 228-231.
- [35] 高捷, 吴华瑞. 基于矩阵模型的工作流合理性验证算法研究[J]. *计算机工程与设计*, 2010, 31(11): 2621-2624, 2628.
- [36] 部昱晖, 唐慧佳. 柔性工作流逻辑建模及其合理性研究[J]. *计算机应用*, 2009, 29(4): 1155-1158.
- [37] 徐俊, 神康辰, 黄柏林. 着色 Petri 网在工作流建模中的应用[J]. *计算机应用与软件*, 2004, 21(7): 47-48, 97.
- [38] 张鹏程, 李人厚. 模糊着色 Petri 网及其在工作流建模中的应用[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2002, 14(8): 713-716.
- [39] 刘婷, 林闯, 刘卫东. 基于时间 Petri 网的工作流系统模型的现行推理[J]. *电子学报*, 2002, 30(2): 245-248.
- [40] 陈翔, 夏国平. 基于 Petri 网的工作流层次模型及结构分析[J]. *计算机工程*, 2003, 29(1): 11-13.
- [41] 赵卓, 马映红. 安全共享的密文数据库研究与设计[J]. *计算机工程与设计*, 2009, 30(12): 2895-2898.