

基于家态的多事务 workflow 完整性分析

庞善臣^{1,2}, 闫春钢¹, 蒋昌俊^{1,2}

(1. 同济大学计算机科学与工程系, 上海 200092; 2. 山东科技大学信息科学与工程学院, 山东青岛 266510)

摘要: workflow 技术是计算机应用领域的一个研究热点, 而行之有效的建模方法和分析工具是 workflow 系统的关键, 也是研究人员的研究重点. 基于 workflow 的 Petri 网结构化建模方法, 研究了同一品质多事务 workflow 的 Petri 网模型, 分析了模型处理多种事务的能力, 对以往研究中的不足和错误进行了补充和更正, 给出了基于家态的模型结构完整性验证的一个充要条件. 所得结果为 workflow 模型分析和验证提供了理论基础和依据, 对于分析 workflow 系统处理事务的能力, 提高事务处理效率有重要意义.

关键词: Petri 网; 家态; workflow; 多事务 workflow 网; 完整性

中图分类号: TP302 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2006)06-1163-06

Soundness Analysis of the Multi-cases Workflow Model Based on Home State

PANG Shaichen^{1,2}, YAN Chungang¹, JIANG Changjun^{1,2}

(1. Department of Computer Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. School of Information Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266510, China)

Abstract: Workflow technology is a hotspot in the area of computer application, and the efficient modeling methods and application tools are important for workflow system, and are the emphases of research for researchers. Based on the Petri Nets modeling techniques, the workflow model of multi-cases having same characters be studied in this paper. Some properties of the multi-cases workflow net (MCWF-net) are analyzed and verified. Some shortages and errors in before some studied results be covered or rectified. Based on home state, a necessary and sufficient condition for the soundness of the multi-cases workflow net is presented. The results give a new method for workflow system analysis and verification, and it is important to analyze the ability to deal with the business process of workflow system, and improve the efficiency for workflow system to deal with the business process.

Key words: Petri net; home state; workflow; multi-cases workflow model; soundness

1 引言

workflow 技术作为计算机应用领域的一个研究热点^[1], 已广泛应用在电子商务、通信、医疗、金融、办公自动化、项目管理、物流、制造等诸多领域, 用来实施事务的监控、自动协调和处理. 一个 workflow 是对一个给定事务处理过程的抽象表达, 并详细描述时间活动(任务)的偏序关系, 以确保每个任务由相应的主体完成. 组成事务的各项活动之间的协调逻辑关系、资源分配策略等相关信息都体现在对事务处理的工作流模型描述中. workflow 管理系统具有事实性、同步和异步操作等特点, 其建模方法是成功实施 workflow 管理的关键, 而 workflow 模型应该完整地支持 workflow 定义的概念, 正确、高效地反映企业的经营组织过程, 为确保 workflow 的正确运行, 必须对 workflow 模型的完整性、无死锁性以及是否与实际事务保持一致性进行形式验证和模拟. 因

此 workflow 的模型分析和优化成为 workflow 技术的一个研究重点^[2]. 目前有很多方法都可以用来进行 workflow 模型的定义和描述, 比如基于流程图、状态图、活动网络图的过程建模方法, 许多 workflow 产品采用了此种模型, 但缺点是形式简单, 不能处理复杂的过程逻辑, 缺乏柔性.

总的来说, workflow 的描述应当基于具有丰富语义表达功能的建模方法. 这个方法应当具有清晰性、一致性、易表达性和可扩充性; 这个方法应当能足以表达步骤、循环、分支、条件、路径选择、任务分配、时间、调度和约束条件; 其语义应当能够定义控制流、数据流、资源流, 并能够定义策略来处理这些流的中断, 有关 workflow 的详述可看见文献[17].

由于 Petri 网具有图形化表达的形式语义、基于状态的流程描述方式及丰富的模型分析方法, 又具有严格的数学基础, 能自然的描述并发、同步、资源冲突等系统特性, 自含执行控制, 是目前 workflow 建模的主要方法之一. 文献

收稿日期: 2005-03-30; 修回日期: 2006-01-03

基金项目: 国家 973 重点基础研究发展规划(No. 2003C13316902, No. 2004CB31800F3); 国家自然科学基金(No. 90412013, No. 60503002, No. 60534060); 上海市基础研究重点项目(05JC14063, 03JC14071)

[3]应用 Petri 网对 workflow 系统进行建模和验证,提出了完整性(soundness)的概念,并分析了工作流的依赖性、有效性和完整性,目前,基于 Petri 网的工作流建模中,采用的主要有时间 Petri 网(Timed Petri Net, TPN)^[4-6,19-21],用来解决实际业务过程对工作流系统时间管理功能及调度的需求,给出了时间约束的建模、时序一致性验证与时间违反的处理方法;有色 Petri 网(Colored Petri Net, CPN)^[7,8,22-24],该模型具有较好的表达特性和容易计算机化的特点,较好解决了工作流系统资源建模的方法;随机 petri 网(Stochastic Petri Net, SPN)^[9],该模型在分析 workflow 服务周期、资源利用率等方面具有明显优势;以及逻辑 Petri 网(Logical Petri Net, LPN)^[10,11]等,该模型在一定程度上缓解了工作流网分析上可能带来的空间爆炸问题,提高了工作流模型的合理性和可靠性.文献[25,26]在工作流网的基础上,建立了语义工作流网,模型解决了并发控制流结构可能存在的由于变迁存在并发性控制流语义与控制流中的数据语义不相一致的问题,以及实际应用中由于数据语义存在某些约束而对并发调度产生的影响.由于工作流不仅需要明确地表达经营过程中活动之间的偏序关系,而且还需要对活动信息日志、执行实体、所需资源、服务周期、参与者等进行明确定义,同时还要建立异常处理、访问控制、资源调度等策略.在这些不同的应用背景下,人们基于 Petri 网,并通过增加各种参数提高模型的表达分析和处理能力,建立了上述不同的工作流模型,较好地解决了工作流系统对模型的多种需求,也有不少的研究人员利用混合 Petri 网来解决工作流系统更为复杂的模型^[18],而现在的研究主要集中在使用 Petri 网的相关技术来研究工作流的时间、资源、逻辑依赖,以及工作流的性能验证等方面^[27].

为确保企业在不改变经营过程,增加已有工作流管理系统复用性,减少经营成本,研究工作流处理同一品质多种事务的能力以及工作流的结构特性显得十分必要. Karmel Barkami 等人将文献[3]的中结果进行推广,将事务数量作为参数引入工作流系统,提出了多事务工作流的概念^[15],给出了多事务工作流网保持完整性的一个充要条件,进一步提出多事务工作流网结构完整性的概念,并在不考虑循环结构的情况下,给出了这一子类多事务工作流网保持结构完整性的一个验证定理,但上述研究结果存在着关于家态约束函数的定义和家态的判定定理不完整(具体见文献[15]定义5和引理2),子类事务工作流网结构完整性的定理证明不正确等问题,本文对上述不足之处重新给出了定义和证明,并将子类结构完整性推广到多事务工作流系统上,给出了多事务工作流网保持结构完整性的一个充要条件,使得基于 Petri 网的工作流模型的结构分析与验证更加符合系统实际,使这一结果真正具有实际应用价值.1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2 工作流网和 Petri 网基本理论

有关工作流网和 Petri 网的基本概念,请读者参阅文献[3,13,14],仅就本文中用到的主要概念、性质介绍如下.

定义1 三元组 $N = (P, T; F)$ 是一个网,当且仅当 P, T 分别是库所和变迁的有限集, $P \cup T = \emptyset, F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ 是流关系. $PN = (N, M)$ 是 Petri 网,当且仅当 $N = (P, T; F)$ 是一个网,且 $M: P \rightarrow \{0, 1, 2, 3, \dots\}$ 是 PN 的标识函数.

- (1) $t \in T$ 在 M 下是使能的,当且仅当 $\forall p \in \cdot t, M_p > 0$, 记 $M[t]$;
- (2) 对 $\forall M_1$ 和 $M_2, M_1 \leq M_2$, 当且仅当对所有的 $p \in P: M_1(p) \leq M_2(p)$;
- (3) (PN, M_0) 是活的,当且仅当 $\forall t \in T, \forall M \in R(M_0), \exists M' \in R(M), M'[t]$;
- (4) (PN, M_0) 是有界的,当且仅当对 $\forall M \in R(M_0), \exists k \in \mathbb{N}, M(p) \leq k$;
- (5) PN 是结构有界的,当且仅当对 $\forall M_0 \in R(PN, M_0)$ 是有界的;
- (6) 一个标志 M_h 称为家态,当且仅当对 $\forall M \in R(M_0), M_h \in R(M)$; (PN, M_0) 是可逆的,当且仅当 M_0 是家态.

定义2 $P' \subseteq P$ 是 PN 的一个非空死锁,当且仅当 $P' \neq \emptyset \wedge \cdot P' \subseteq P'$; P' 是 PN 的极小死锁,当且仅当 P' 真子集都不是 PN 的死锁.

现在,我们引入可控死锁的概念和性质.

定义3 (PN, M_0) 是一个 Petri 网, P' 是 PN 的一个死锁.

- (1) P' 是可控的,当且仅当 $\forall M \in R(M_0), \exists p \in P': M(p) \geq \max_{t \in P'} W(p, t)$;
- (2) (PN, M_0) 满足可控死锁的性质,当且仅当 PN 的每一个极小死锁都是可控死锁.

性质1^[15] (PN, M_0) 是一个 Petri 网,则:

- (1) (PN, M_0) 是活的 $\Rightarrow (PN, M_0)$ 满足可控死锁的性质;
- (2) (PN, M_0) 满足可控死锁的性质 $\Rightarrow (PN, M_0)$ 不含真死锁.

在 Petri 网的基础上, Aalst 提出了工作流网(Workflow net)的概念,其定义如下:

定义4 一个 Petri 网模型 $PN = (P, T, F, i)$ 称为工作流网(Workflow net, 简称 WF-net) 当且仅当它满足下面的两个条件:(1) PN 中存在两个特殊的库所 i 和 o , 库所 i 是一个起始库所,即 $\cdot i = \emptyset$, 库所 o 是一个终止库所,即 $o \cdot = \emptyset$;(2) 如果在 PN 中加入一个新的变迁 t , 使 t 连接库所 o 和 i , 即 $t = \{o\}, t \cdot = \{i\}$ 这时所得到的扩展网 \overline{PN} 是强连通的.

在 workflow 网中, 库所对应着过程中的条件, 变迁对应着过程中的可执行活动, 库所中的托肯代表着一个过程实例的状态. 上述定义表明: (1) workflow 网必须具有唯一起始点和唯一终止点, 进入起始库所的托肯代表一个过程实例的开始, 而进入终止库所的托肯则意味着一个过程实例的结束; (2) workflow 网中不存在处于孤立状态的活动与条件 (所谓孤立状态, 是指不存在由 i 到 o 的通路经过该变迁或库所), 即所有的活动与条件都位于由起始点到终止点的通路上.

要说明的是, 上述 workflow 网的定义是最基本的, 即使满足上述的两个条件, 仍然会定义出具有死锁可能性的 workflow 过程, 这就需要通过 Petri 网的分析加以解决.

定义 5 一个 WF-net PN 是完整的(soundness), 当且仅当:

(1) 对每一个由状态 i 可达的状态 M , 存在一个从状态 M 到状态 o 发生序列, 即: $\forall M: i [\triangleright M \Rightarrow M [t \triangleright o$, 其中 q, t 为变迁序列;

(2) 在任何情况下, 终止状态最终可以到达, 当状态由 M 变化到状态 o 时, 只有 o 中含有一个托肯, 其它位置均为空, 即 $\exists M: i [\triangleright M \wedge M(o) = 1 \wedge (\forall p \neq o, M(p) = 0)$;

(3) 在 WF-net 中不存在死的变迁, 即: $\forall t \in T, \exists M, M': i [\triangleright M, M [t \triangleright M'$.

这里符号 i 有两含义, 即库所 i 和库所 i 中存在唯一一个托肯时的标识. 可以看出, 完整性特征反映的是有关 WF-net 动态行为特征. 定义中的 (1) 描述的是从初始标识 i 开始, 总能达到终止标识 o , 定义中的 (2) 是说当库所 o 中存在一个托肯时, 其他库所应为空. 最后一条要求描述的是初始标识下网中不存在死变迁.

复杂的工作流模型主要由四种基本模型组成, 即串联模型、并联模型、选择模型和循环模型^[3].

Aalst 给出的工作流的完整性(soundness)的概念主要描述了工作流的功能完整性, 除此之外, 一个完整的工作流还应在结构上满足完整性, 这是模型分析的基础.

3 多事务 workflow 网的结构完整性

引理 1^[16] 可逆网 $PN = (P, T, F, i)$ 是活的, 当且仅当它的每一个变迁都是一级活的.

定义 6 一个函数 $\chi: R(M_0) \rightarrow \{0, 1, 2, 3, \dots\}$ 是一个状态 $M_h \in R(M_0)$ 的一个约束, 当且仅当:

- (1) $\chi(M) = 0 \Leftrightarrow M = M_h$;
- (2) $\forall M \in R(M_0) \setminus \{M_h\}: \{\chi(M) > 0 \Leftrightarrow \exists t \in T: M [t \triangleright M' \wedge \chi(M') < \chi(M)\}$

引理 2 (PN, M_0) 是一个 Petri 网, $M_h \in R(M_0)$, M_h 是一个家态当且仅当存在一个函数 χ 是 M_h 的一个约束且 M_h 不是死标识.

证明 (必要性) M_h 是家态, $\exists k \in \{0, 1, 2, 3, \dots\}$, 使得 $|R(M_0)| \leq k + 1$, 不妨设 $R(M_0) = \{M_0, M_1, \dots, M_k,$

$\dots, M_{k-1}\}$, 令函数

$$\chi(M_i) = \begin{cases} 0, & M_i = M_h; \\ j, & M_i \neq M_h, j \in \{1, \dots, k-1\} \end{cases}$$

则函数 χ 满足定义 6(1); 对函数 χ 进一步增加限制条件: $\forall M \in R(M_0) \setminus \{M_h\}$, 则 $\exists t \in T, M [t \triangleright M'$, 则 $\chi(M) > \chi(M')$, 则函数 χ 满足定义 6(2), 即函数 χ 是 M_h 一个约束得证, 是家态, 显然 M_h 不是死标识.

充分性 函数 χ 是 M_h 一个约束且不是死标识, 则假设 $M_h \in R(M_0)$, $\exists M' \in R(M_h)$, 使得 $M_h \notin R(M')$, 由定义 6 知, $\chi(M_h) = 0, \chi(M') > 0$, 即 $\exists t \in T: M' [t \triangleright M'' \wedge \chi(M'') < \chi(M')$, 若 $\chi(M'') = 0$, 则 $M'' = M_h$, 与假设矛盾, 否则, $\chi(M'') > 0$, 同理得到一个 $\chi(M''') < \chi(M'')$, 由于函数 χ 的下界为 0, 依次类推, 总能找到一个 $M^*: \chi(M^*) = 0$ 成立, 即 $M^* = M_h$, 这与假设矛盾, 所以 M_h 是家态得证.

定义 7 一个 WF-net PN 称为多事务 workflow 网 (Multicases workflow net 简称 MCWF-net) (PN, n, i) , 当且仅当 $M_0(i) \geq n$, 扩展网 \overline{PN} 中 $W(o, t^*) = W(t^*, i) = n$, 用 n, i 来表示 $M_0(n)$ 是 workflow 事务实例的数量.

定义 8 一个 MCWF-net (PN, n, i) 是完整的, 当且仅当:

- (1) $\forall M \in R(n, i), n, o \in R(M)$;
- (2) $\forall M \in R(n, i), M(o) \geq n \Rightarrow M = n, o$;
- (3) $\forall t \in T, \exists M \in R(n, i): M [t \triangleright$.

引理 3^[15] 一个 MCWF-net (PN, n, i) 具有完整性当且仅当它的扩展网 (\overline{PN}, n, i) 具有活性和有界性.

定义 9 一个 MCWF-net 是结构完整的, 当且仅当 $\exists n$ 使得 (PN, n, i) 是完整的.

文献^[15]在假设 PN 是不含循环结构的一类 MCWF-net (Cycle-free workflow net 记作 CFWF-net), 通过构造家态的约束函数来证明这类工作流的结构完整性, 因为在构造一个家态的约束函数时, 无循环结构的函数构造要比有循环结构容易的多, 但是其在构造 $num(p)$ 函数时并没有给出函数的确切定义, 导致逆向拓扑排序函数无法得到 (具体内容见文献[15]定理 1), 在此我们重新给出定理的证明 (定理 1).

定理 1 一个 CFWF PN 是结构完整的当且仅当存在一个 n , 使得 (\overline{PN}, n, i) 是有界的, 一次性活的并且满足可控死锁的性质.

证明: (必要性) 假设 PN 是结构完整的. 由定义 7, $\exists n$ 使得 (PN, n, i) 是完整的, 由引理 3 得 (PN, n, i) 是有界的和活的, 由活性可得 (PN, n, i) 满足可控死锁的性质.

充分性 假设存在一个 n 使得 (\overline{PN}, n, i) 是有界的, 一次性活的并且满足可控死锁的性质, 并且没有循环结构. 首先构造状态 n, o 的一个约束 χ : 对 (\overline{PN}, n, i) 中的位置进行逆向拓扑编号, 位置 p 的后继位置 p' 的编号比 p 的编号小, 位置 o 的编号为 0, 位置 i 的编号数最大, 我们用 $num(p)$ 来表示位置 p 的编号

$$\text{num}(p) = \begin{cases} 0, p = o; \\ |p'| \text{ num}(p') = K, K \in \{0, 1, 2, 3, \dots\}; \end{cases}$$

现在定义函数 x 如下: $\forall M: x(M) = \sum_{p \in P} M(p) \text{ num}(p)$.

现在证明函数 x 是状态 $n.o$ 的一个约束. 由函数 x 构造情况知 $x(M) = 0 \Leftrightarrow M = x.o$. 如果 $x < n$, 则 $\exists t \in T: M[t >$, 由 $(\overline{PN}, n.i)$ 满足可控死锁的性质, 可以推出 $(\overline{PN}, n.i)$ 不含死锁, 即对 $\forall M \in R(n.i), \exists t \in T, M[t >$, 这与 $x < n$ 矛盾, 如果 $x > n$, 则 $x.o[t^* > M' > n.i$, 这与 $(\overline{PN}, n.i)$ 的有界性矛盾, 即 $x(M) = 0 \Leftrightarrow M = n.o$ 成立;

对任意一个 $M \in R(n.i)$, 假设 $x(M) > 0$. 因为 $(\overline{PN}, n.i)$ 没有死锁, 即 $\exists t: M[t > M'$. 如果 $t \neq t^*$, 由函数 x 构造情况, $x(M') < x(M)$, 否则: $t = t^*$, 因为 $x(M) > 0$ 并且由上面的证明结果 $x(M) = 0 \Leftrightarrow M = n.o$, 则 M 可以表示成: $M = n.o + M'', M'' \neq 0$. 因为 $n.o[t^* > n.i$, 所以 $M[t^* > n.i + M'', M'' \neq 0$, 这与 $(\overline{PN}, n.i)$ 的有界性矛盾, 所以对 $\forall M \in R(n.i) \setminus \{n.o\}: \{x(M) > 0 \Leftrightarrow \exists t \in T: M[t > M' \wedge x(M') < x(M)\}$ 结论成立.

综上所述, 由定义 4 得函数 x 是状态 $n.o$ 的一个约束.

由引理 2 得 $n.o$ 是一个家态, 又因 $n.o[t^* > n.i$, 所以 $n.i$ 也是家态, 又因为 $(\overline{PN}, n.i)$ 是一次性活的, 由引理 1 得 $(\overline{PN}, n.i)$ 是活的, 由引理 3 得 $(\overline{PN}, n.i)$ 是完整的. 由定义 7 进一步得到 PN 是结构完整的.

证毕.

实际上多数 workflow 管理系统具有循环结构, 定理 1 的应用价值较小, 在此基础上, 我们将上述结果扩展到一般的多事务 workflow 网上, 得到定理 2 以使多事务 workflow 网结构完整性形式验证更加符合系统实际.

定理 2 一个 MCWF-net PN 是结构完整的当且仅当存在一个 n , 使得 $(\overline{PN}, n.i)$ 是有界的, 一次性活的并且满足可控死锁的性质.

证明: 必要性是显然的.

充分性 由 $(\overline{PN}, n.i)$ 是一次活的, 所以对 $t^*, \exists x.o = n.o$, 否则 $x.o > n.o$, 即 $x.o = n.o + M'$, 这与 $(\overline{PN}, n.i)$ 有界矛盾, 所以 $n.o \in R(n.i) \wedge n.i \in R(n.o)$. 对 $\exists M \in R(n.o)$, 只要证 $M[\acute{o} > n.o$ 成立即可, 否则 $\forall M' \in R(n.o), \exists \acute{o}$ 使得 $M'[\acute{o} > n.o$, 这是因为 $M_0(p) = 0(p \neq i)$, 所以 $\exists M \in R(n.i): M[\alpha_1 > M' \vee M[\alpha_2 > n.o$, 另外 \overline{PN} 满足可控死锁的性质, 这与 $(\overline{PN}, n.i)$ 有界矛盾, 所以对 $\forall M \in R(n.i), M$ 可达 $n.o$, 即可达 $n.i$, 即对 $\forall M \in R(n.i): n.i \in R(M)$, 所以 $n.i$ 是家态, 故 $(\overline{PN}, n.i)$ 是活的, 有界的, 所以 MCWF-net PN 是结构完整的.

证毕.

4 模型实例分析

根据模型映射关系、WF-net 的定义, 结合实际建立一个工作流的 WF-net 模型.

©以我们开发的基于工作流的供应链系统的计划管理

过程为例^[28], 该过程经过可以简化为 4 个步骤, 分别是统计库存情况, 制定需求计划, 审批、确定计划, 分配计划生成采购报告, 在管理系统中, 将这 4 步骤封装成一个计划管理组件, 计划管理用户只需要调用库存控制组件, 就可以得到库存情况, 用户根据库存报告就可以制定计划, 最后获得相应的采购报告, 则计划管理组件将采购报告转交给采购管理组件, 以供采购管理用户使用, 据此可以建立表示计划管理组件的工作流网模型(如图 1 所示).

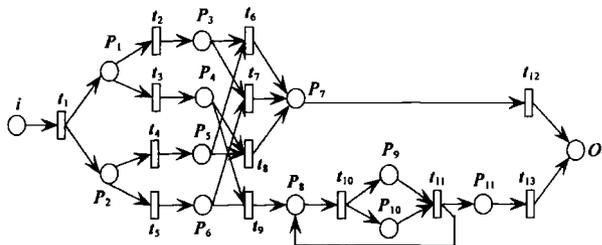


图 1 某企业的计划管理组件的 WF-net 模型

库所及语义描述: i : 计划输入接口; P_1 : 超市物资; P_2 : 自备物资; P_3 : 超市物资库存足量报告; P_4 : 超市物资库存不足报告; P_5 : 自备物资库存足量报告; P_6 : 自备物资库存不足报告; P_7 : 零计划报告确定单; P_8 : 计划报告单; P_9 : 资金报告; P_{10} : 生产需求报告; P_{11} : 确定计划报告单; O : 计划输出接口(采购报告单).

变迁及语义描述: t_1 : 计划开始; t_2, t_3, t_4, t_5 : 库存统计; t_6, t_7, t_8, t_9 : 制定需求计划; t_{10} : 统计资金和生产需求; t_{11} : 审批、确定计划; t_{12}, t_{13} : 分配计划.

利用前面的结果, 现对图 1 的工作流模型进行如下简单分析: 假设在 $n = 3$ 时, 容易证明模型的扩展网保持有界性, 每个变迁都是一次性活的, 并且满足可控死锁的性质, 所以我们建立的模型是一个结构完整工作流模型, 在合适的调度策略下, 系统具有同时处理同一品质多种事务的能力, 这在我们开发的供应链管理系统中得到证实和应用.

5 结论

工作流网的结构完整性对于工作流系统处理多种事务的能力起着关键作用, 论文对以往研究结果进行了补充和更正, 基于多事务工作流的 Petri 网建模和分析方法, 给出了多事务工作流网保持结构完整性的一个验证算法. 在工作流系统同时处理同一品质多种事务的情况下, 其结构完整性是一个基本要求, 但如何保持工作流管理系统的这种能力, 如何分配资源、处理冲突, 需要一个实时的调度算法加以解决, 这将是今后的一个主要研究内容.

参考文献:

[1] 罗海滨, 范玉顺, 吴澄. 工作流技术综述[J]. 软件学报, 2000, 11(7): 899-907.

- flow technology [J]. *Journal of Software*, 2000, 11(7): 899–907. (in Chinese)
- [2] 李建强, 范玉顺. 一种 workflow 模型的性能分析方法[J]. *计算机学报*, 2003, 26(5): 513–523.
LI Jianqiang Fan Yushun. A Method of workflow Model performance analysis[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2003, 26(5): 513–523. (in Chinese)
- [3] W M P van der Aalst. The application of petri nets to workflow management[J]. *The Journal of Circuit System and Computers* 1998, 8(1): 21–66.
- [4] 李炜, 曾广周, 王晓琳. 一种基于时间 Petri 网的工作流模型[J]. *软件学报*, 2002, 13(8): 1666–1671.
Zeng Guangzhou, Wang Xiaolin. A workflow model based on timed Petri net[J]. *Journal of Software*, 2002, 13(8): 1666–1671. (in Chinese)
- [5] 刘婷, 林闯, 刘卫东. 基于时间 Petri 网的工作流系统模型的线性推理[J]. *电子学报*, 2002, 30(2): 245–248.
Liu Ting, Lin Chuang, Liu Weidong. Linear temporal inference of workflow management system based on timed Petri net models[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2002, 30(2): 245–248. (in Chinese)
- [6] JianQiang Li, YuShun Fan, MengChu Zhou. Timing constrain workflow nets for workflow analysis [J]. *IEEE Transaction on System, Man, and Cybernetics Part A: System and Humans*, 2003, 33(2): 179–193.
- [7] Papazoglou M, Delis A, Bouguettaya A, et al. Class library support for workflow environments and application[J]. *IEEE Transactions on Computers*, 1997, 46(6): 673–686.
- [8] 陈翔, 夏国平. 基于着色 Petri 网的工作流建模和合理性分析[J]. *计算机集成制造技术—CIMS*, 2004, 10(4): 381–387.
Chen Xiang, Xia Guoping. Workflow modeling based on colored Petri nets and its soundness analysis[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2004, 10(4): 381–387. (in Chinese)
- [9] 林闯, 田立勤, 魏丫丫. 工作流系统模型的性能等价分析[J]. *软件学报*, 2002, 13(8): 1472–1480.
Lin Chuang, Tian Liqin, Wei Yaya. Performance equivalent analysis of workflow systems[J]. *Journal of Software*, 2002, 13(8): 1472–1480. (in Chinese)
- [10] 唐达, 徐超, 杨晓丽. 工作流建模中时态逻辑的研究与应用[J]. *计算机集成制造技术—CIMS*, 2004, 10(4): 388–393.
Tang Da, Xu Chao, Yang Xiaoli. Temporal logic applied in workflow modeling[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2004, 10(4): 388–393. (in Chinese)
- [11] 杜玉越, 蒋昌俊. 基于工作流网的实时协同系统模拟技术. *计算机学报*, 2004, 27(4): 471–481
Du Yuyue, Jiang Changjun. Modeling real-time cooperative systems with workflow nets[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2004, 27(4): 471–481. (in Chinese).
- [12] 李建强, 范玉顺. 工作流模型时间有界性验证与分析研究[J]. *计算机集成制造系统*, 2002, 8(10): 770–775.
Li Jianqiang, Fan Yushun. Timing Boundedness verification and analysis of workflow model[J]. *Computer integrated manufacturing systems*, 2002, 8(10): 770–775. (in Chinese)
- [13] Mrata T. Petri nets: Properties, analysis and applications [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1989, 77(4): 541–580.
- [14] 庞善臣, 蒋昌俊, 孙萍, 周长红. 共享合成 Petri 网的性质分析[J]. *自动化学报*, 2004, 30(6): 944–948.
Pang Shanchen, Jiang Changjun, Sun Ping, Zhou Changhong. Property Analysis of Shared Composition Petri Nets [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2004, 30(6): 944–948. (in Chinese)
- [15] Kamel Barkaoui, Laure Petrucci. Structural analysis of workflow nets with shared resources [J]. *Computing Science Reports*, 1998, 7: 82–95.
- [16] 袁崇义. Petri 网原理 [M]. 北京: 电子工业出版社, 1998. 4.
Yuan Chongyi. The Principle of Petri Net [M]. Beijing: Publishing Home Press, 2005. (in Chinese)
- [17] 范玉顺. 工作流管理技术基础 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
Fan Yushun. The Fundamental Technology of Workflow Management [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001. (in Chinese)
- [18] Narges Bahr Jaber, Dominique Pontier. Modeling transmission of directly transmitted infectious diseases using colored stochastic Petri nets [J]. *Mathematical Biosciences* 2003, 185: 1–13.
- [19] Li Hui-Fang, Fan Yu-Shun. Workflow Model Analysis Based on Time Constraint Petri Nets [J]. *Journal of Software*, 2004, 15(1): 17–26.
- [20] Jin Hyun Son, Myoung Ho Kim. Improving the performance of time-constrained workflow processing [J]. *The Journal of Systems and software*, 2001, 58: 211–219.
- [21] Ling S, Schmidt H. Time Petri nets for workflow modeling and analysis [A]. *Proceedings of the IEEE international Conference on Advanced Information System, Man and Cybernetics [C]*. 2000, 4: 3039–3044.
- [22] Dongsheng Liu, Jianmin wang, Stephen C F Chan. Modeling workflow processes with colored Petri nets [J]. *Computer in Industry*, 2002, 49: 267–281.
- [23] Injun Choi, Chlsoon Park Changwoo Lee. Task net: Transactional workflow model based on colored Petri net [J]. *European Journal of Operational Research*, 2002, 136: 383–402.

- [24] Lichih Wang, Shaoying Wu. modeling with colored timed object-oriented petri nets for automated manufacturing systems[J]. Computers Ind. Eng 1998, 34(2): 463- 480.
- [25] Andreas Geppert, Dimitrios Tombros, Klaus R. Dittrich. Defining the semantics of reactive components in event-driven workflow execution with event histories [J]. Information System, 1998, 23(4) : 235- 252.
- [26] 胡乃静, 顾宁, 施伯乐. 基于语义约束资源 workflow 并发正确性保证[J]. 计算机研究与发展, 2003, 40(5) : 712- 719.
Hu Naijing, Gu Ning, Shi Baile. Correctness of concurrency based on semantic constraint resource workflow [J]. Journal of Computer Research and Development, 2003, 40(5): 712- 719. (in Chinese)
- [27] 庞善臣, 蒋昌俊. Petri 网在工作流系统建模和分析中的应用[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(增刊) : 100- 104.
Panag Shanchen, Jiang Chang- jun. Petri net and its application in workflow system modeling and analysis[J]. Acta Simulata Systematica Sinica. 2005, 17(Suppl.) : 100 - 104. (in Chinese)
- [28] 庞善臣, 蒋昌俊, 宫丽华. 基于过程组件的物流管理系统模型设计及分析[J]. 山东科技大学学报, 23(1) : 38- 41.
PANG Shan- chen, Jiang Changjun, Gong Lihua. Design and analysis for process components based on logistic management system[J]. Journal of Shandong Inst. of Min. & Tech,

23(1) : 38- 41. (in Chinese)

作者简介:



庞善臣 男, 1974 年 10 月生于山东省嘉祥县. 博士研究生, 讲师. 主要研究方向为 SCW、模型形式化验证、Petri 网理论和图论等, 已在 Discrete Mathematics, Graphs and Combinatorics, 自动化学报等杂志发表论文 20 余篇.
E-mail: shanchenpan@sohu.com

闫春钢 女, 1963 年 2 月生于黑龙江省双鸭山市. 同济大学计算机系副教授, 在职博士研究生, 主要研究方向为 workflow 建模与分析、医疗信息系统、模型形式化验证、Petri 网理论和图论等, 已在 World Science, 电子学报, 系统科学与数学等刊物发表论文 20 余篇.

蒋昌俊 男, 1962 年 5 月生于安徽安庆市. 博士, 教授, 博士生导师, 教育部科技委委员、信息产业部信息应用领域专家、上海市技术预见专家、上海市计算机领域专家、中国自动化学会理事、中国人工智能学会理事、中国便携计算机协会理事、中国计算机学会 Petri 网专业委员会副主任、中国自动化学会管理系统专业委员会副主任. 主要研究领域为并发理论与并行处理、Petri 网理论、模型验证、模糊推理、网格技术, 已在中国科学, IEEE Transactions on Robotics & Automation, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Int. J. of Comp. Syst. Sci. & Eng., Int. J. of Studies in Informatics Control 和 Int. J. of Adv. in Syst. Sci. & Appl. 等国内外重要学术刊物上发表论文 118 篇, 出版学术专著 4 部.