

# 一种基于资源约束的工作流建模及分析方法

庞善臣<sup>1,2</sup>

(1. 山东科技大学信息科学与工程学院, 山东青岛 266590; 2. 清华大学计算机科学系, 北京 100084)

**摘要:** 资源约束是工作流正确实施的一个瓶颈问题,因此工作流系统的资源建模及模型正确性验证方法显得非常重要.为此,基于 Petri 网和工作流建模方法,提出了一种资源约束的工作流系统的形式化建模和分析技术,定义了资源空间(RS)、资源子网、资源工作流网和资源工作流网完整性(soundness)的概念,建立了资源调用视图以及 Petri 网影射模型,得到了资源工作流网保持完整性判定的一个充要条件.该方法将系统资源建模和过程建模合成到一个模型中,解决了工作流系统资源和过程分别建模给系统的正确性验证带来的困难,为工作流系统资源状态的可视化和进行有效的系统验证提供了模型依据.给出的实例验证了模型的有效性.

**关键词:** 资源约束; 工作流网; 资源子网; 资源工作流网; 完整性

**中图分类号:** TP311      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2012) 08-1497-06

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>      **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.08.1001

## Modeling and Verification of Workflow Based on Resource Constraint

PANG Shan-chen<sup>1,2</sup>

(1. College of Information Science & Engineering, Shandong University of Science & Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

2. Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Resource constraint is a choke point of workflow system, and the efficient resource modeling and Verification methods are more important for workflow management system(WFMS). A new formal method used to model and analyze workflow system with resource constraint, resource workflow net, is presented based on Petri net and workflow techniques in this paper. Based on the definition of resource space(RS), resource subnet, resource workflow net(RWF-net), and soundness of the RWF-net, the resource scheduling views model formulated in WFMS are described and translated into Petri net, and a necessary and sufficient condition for the soundness of RWF-net is presented. The method integrate process model and resource model that can solve system analysis and verification problem for the process and resource modeled respectively and assure the consistency between process model and resource model. The usability of the research results in this paper is illustrated by an example.

**Key words:** resource constraint; workflow net; resource subnet; resource workflow net; soundness

## 1 引言

随着现代企业业务过程分布性、协同性和依赖性的快速发展,工作流技术在实际中的应用不断深入,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,工作流模型作为工作流管理系统(Workflow Management System,简称 WFMS)的核心部分<sup>[1]</sup>,对企业业务过程逻辑及其业务活动依赖关系进行抽象表示,并用来实施过程的监控、自动协调和处理,以确保每个任务由相应的主体完成.因此工作流业务流程的建模和模型的分析技术是工作流系统研究和应用

的重要内容,目前研究人员提出了多种不同的工作流建模和分析方法,如:EPCM模型、PERT图、活动树及 Petri 网,仅基于 Petri 网的建模方法就有多种<sup>[2-9]</sup>,主要原因是 Petri 网具有严格的数学基础和规范语义<sup>[10-14]</sup>.随着网格计算、服务计算等新的研究领域的出现,基于网格或服务的工作流系统研究也得到了较好发展<sup>[15,16]</sup>.许多软件开发商也推出了他们支持服务的工作流产品开发平台,如:Business Process Execution Language for Web Services (BPEL4WS)<sup>[17]</sup>, Business Process Modeling Language (BPML), Web Service Choreography Interface(WSCI).

上述工作流的模型及设计平台虽然具有丰富语义

表达功能、易表达性和可扩充性,并且能表达步骤、循环、分支、条件、路径选择、任务分配、时间、调度和约束条件,能够定义策略来处理控制流和数据流的异常中断,但是在对资源视图的管理和描述没有提供任何程度的直接支持<sup>[18]</sup>,总的来说,资源的描述和利用在工作流系统中是一个重要部分,受资源的配置和分布等情况的约束,工作流系统很难达到理想状态下的性能指标,资源约束成为工作流正确实施是一个瓶颈问题.在工作流的活动间合理地配置资源是保证工作流正确实施的必要条件.合理地配置资源不但能提高工作流的工作效率,而且能提高相关资源的利用率.因而具有资源约束描述功能的工作流模型已成为当前工作流建模深入研究的重点内容之一.在工作流系统的资源模型的研究上已取得了许多成果:文献[18]通过建立多种独立于工作流技术和建模语言的形式化模式,来获得资源在工作流系统中不同表现和利用途径,为资源视图的全面处理提供基础;文献[19]给出了基于并发约束处理逻辑(Concurrent Constraint Transaction Logic, CCTR)的资源分配约束的工作流资源调度模型,较好地解决了资源静态的分配问题;文献[7]将工作流定义为四维结构,将资源作为其中一维,并建立了工作流的资源分配模型:Resource Assignment Petri Net for Workflow Management(WF-RAPN),该模型是一个13元组;其他研究人员对工作流的资源建模也提供了许多方法<sup>[20-22,25,26]</sup>.

在以往的资源模型中,一般是将过程和资源分别建模,独立分析和验证,为整个系统的分析和验证带来困难,甚至会导致过程和资源调度的不一致,因此资源约束的工作流系统正确性的形式验证技术研究就变的非常重要和必要.本文基于Petri网的工作流建模方法,提出了一种资源约束的工作流系统的形式化建模和分析技术,定义了资源空间(RS)、资源子网、资源工作流网和资源工作流网完整性(soundness)的概念,建立了资源调用视图以及Petri网影射模型,得到了资源工作流网保持完整性判定的一个充要条件.通过子网合成的方法,将系统资源建模和过程建模合成到一个模型中,解决了工作流系统资源和过程分别建模给系统的正确性验证带来的困难,给出的实例验证了模型的有效性.

## 2 基本概念

有关工作流网和Petri网的基本概念,请读者参阅文献[2,13,23],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,  $P \cap T = \phi$ ;  $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$  是有向弧集.  $PN = (N, M)$  是Petri网当且仅当  $N = (P, T; F)$  是一个网,且  $M: P \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}$  是

$PN$  的标识函数.  $\forall t \in T, p \in P$ , 用  $\cdot t (t \cdot)$  表示变迁  $t$  的所有输入(出)库所集,而  $\cdot p (p \cdot)$  表示库所  $p$  的所有输入(出)变迁集.设  $M_0$  是  $PN$  的一个初始标识,则  $R(M_0)$  表示由  $M_0$  可达到的所有标识的集合.

(1)  $t \in T$  在  $M(P)$  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)  $(PN, M_0)$  是安全的,当且仅当对  $\forall M \in R(M_0), M(p) \leq 1$ ;

(5) 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;

(6) 若对  $\forall t \in T: |\cdot t| = |t \cdot| \leq 1$ , 则称  $PN$  为一个标识状态图.

**定义2** 设  $PN$  是一个Petri网,一个从节点  $n_1$  到  $n_k$  的路径  $C$  是一个节点的序列  $\langle n_1, n_2, \dots, n_k \rangle$ , 其中  $\langle n_i, n_{i+1} \rangle \in F, 1 \leq i \leq k-1$ ; 一个Petri网是强连通的,当且仅当对于每一对节点  $x, y \in P \cup T$ , 都存在一个从  $x$  到  $y$  的路径.

**定义3** Petri网  $PN' = (P', T', F')$  是  $PN = (P, T, F)$  的子网,当且仅当  $P' \subseteq P, T' \subseteq T, F' = F \cap ((P' \times T') \cup (T' \times P'))$ , 记作  $PN' \subseteq PN$ ; Petri网  $PN' = (P', T', F')$  是  $PN$  的自治子网,当且仅当(1)  $PN' \subseteq PN$ ; (2)  $\forall p \in P': (\cdot p \cap (T \setminus T')) = \phi \wedge p \cdot \cap (T \setminus T') = \phi$ .

自治子网中  $P'$  只与  $T'$  有关系,与  $T \setminus T'$  的其它变迁没有关系,这样通过  $T'$  中的变迁进入  $P'$  的托肯,只能通过  $T'$  的变迁离开  $P'$ , 这个性质对得到系统的活性和有界性是非常必要的.

**定义4**<sup>[25]</sup> 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  $\cdot i = \phi$ ; 库所  $o$  是一个终止库所,即  $o \cdot = \phi$ ;

(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  $\cdot t = \{o\}, t \cdot = \{i\}$ , 这时所得到的扩展网  $\overline{PN}$  是强连通的.

在工作流网中,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) 工作流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.

### 3 资源工作流网及其性质分析

为了描述 workflow系统资源模型,我们建立资源空间的概念.

**定义 5 资源空间** 资源空间是资源分布的集合,即  $RS = \bigcup_{i \in N} R_i(t)$ ,其中  $i$  为资源  $R$  的 ID,  $t$  为时刻,  $R_i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{im})$  为资源的度量向量.

资源在 workflow系统中被活动或任务的调用形式可以归纳成四种,如图 1 所示.

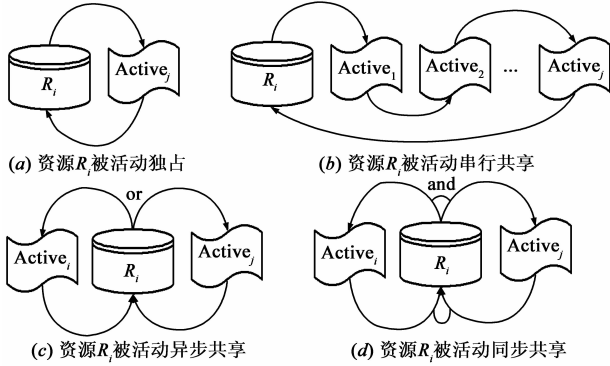


图1 工作流系统的资源调用视图

其中资源被活动异步共享经过调度策略可以转化为资源被活动串行共享的情况,而资源能够被多个活动同步共享时,可以认为被共享的资源粒度较大,按照粒度划分方法,可以将该资源分割成若干个原子粒度的资源,进而将该调度的情况转化为若干资源被活动或任务独占的情况.

利用 Petri 网,可以实现图 1 资源调用视图到 Petri 网模型的映射,其中库所中的托肯和变迁分别表示资源和任务,如图 2 所示.

根据模型映射,我们假设所有的资源具有原子粒度,进一步给出资源子网的概念.

**定义 6 资源子网** Petri 网  $PN^r = (P_r, T_r, F_r, M_{r0})$  是资源  $r$  的一个资源子网,满足如下条件:

(1)  $r \in RS$ ; (2) 存在唯一的  $p_{r0} \in P_r$  为资源库所,且  $M_{r0}(p_{r0}) = 1$ ; (3)  $\forall p \in (P_r \setminus \{p_{r0}\})$ ,  $M_{r0}(p) = 0$ ; (4)  $PN^r$  为强连通的标识状态图; (5)  $PN^r$  的圈都通过  $p_{r0}$ .

**定义 7 资源子网空间**  $PN^R = (P_R, T_R, F_R, M_{R0})$  为资源子网空间:  $PN^R = \bigcup_{r \in SR} PN^r$

**定义 8 资源工作流网(简称 RWF-net)**  $PN = (P, T, F, M_0)$  是一个资源工作流网,当且仅当满足下列条件:

- (1)  $PN = PN_R \cup PN_w$ , 其中  $PN_R \subseteq PN^R$  为资源子网的集合,  $PN_w$  为工作流网;
- (2)  $P = P_R \cup P_w$ ;  $T_R \subseteq T_w$ ;  $F = F_R \cup F_w$ ;  $p \in P_w$ :  $M_0(p) = M_{w0}(p)$ ;  $p \in P_R$ :  $M_0(p) = M_{R0}(p)$ ;
- (3) 对于任意的资源库所  $p_{r0}$ :  $i(p_{r0}) = 1$ ;
- (4)  $o \in P_w$ :  $o \cap \{p_{r0}\} = \emptyset$ ; 即库所  $o$  没有任何资源流入;

为区别其它的状态标识,我们在使用中  $i, o$  将既表示库所,也可以用来表示初始状态和终止状态标识(用  $i$  来表示  $M_0$ ).

根据 workflow网的定义很容易得到资源工作流网  $PN$  的扩展网  $\overline{PN}$ .

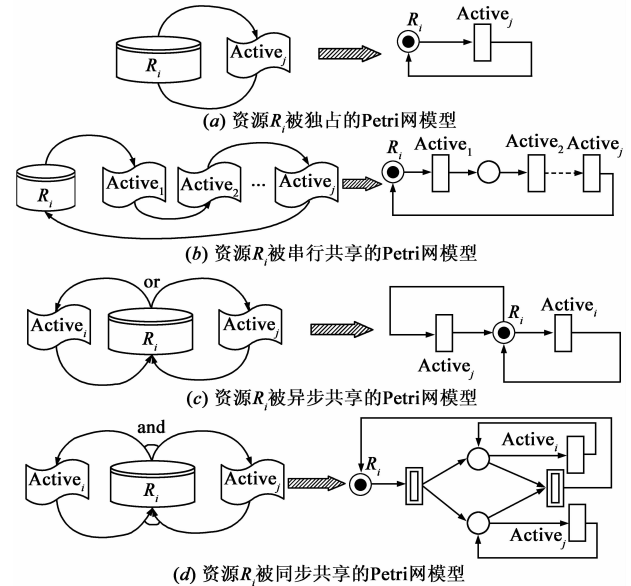


图2 资源调用视图及分配策略的Petri网模型

**定义 9**  $\overline{PN} = (\overline{P}, T, F)$  为资源工作流网  $PN = (P, T, F)$  的扩展网,当且仅当:  $\overline{P} = P, \overline{T} = T \cup \{t^*\}$ ,  $\overline{F} = F \cup \{\langle o, t^* \rangle, \langle t^*, i \rangle\}$  是  $PN$  的扩展网.

**定义 10 资源工作流网的完整性** 一个 RWF-net 是完整的,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:  $\forall M: i[\sigma > M \Rightarrow M[\tau > o$ , 其中  $\sigma, \tau$  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, 库所  $o$  中含有一个托肯外, 对任意的资源库所  $p_{r0}$ :  $o(p_{r0}) = i(p_{r0})$ , 其它位置托肯均为空, 即  $\exists M: i[\sigma > M \wedge M(o) = 1 \wedge (\forall p_{r0} \in P_R: M(p_{r0}) = i(p_{r0}) \wedge \forall p \in P \setminus \{p_{r0}, o\}: M(p) = 0) \Rightarrow M = o$ .
- (3) 在 RWF-net 中不存在死的变迁, 即:  $\forall t \in T, \exists M, M': i[\sigma > M, M[t > M'$ .

**引理<sup>[24]</sup>** 可逆网  $PN = (P, T, F)$  是活的, 当且仅当它的每一个变迁都是一级活的.

**定理** 一个 RWF-net PN 具有完整性的充分必要条件是 PN 的扩展网  $\overline{PN}$  具有活性和安全性。

**证明** (充分性) 扩展网  $(\overline{PN}, i)$  具有活性, 则定义 10 中(3)显然成立, 同时  $\forall M \in R(i): \exists M' \in R(M), M' [t^* > .$  所以  $\forall M \in R(i): \exists M' \in R(M), M'(o) = 1,$  由资源工作流网的定义(2)  $T_R \subseteq T_w$  知,  $T_R$  是  $\overline{PN}$  自治子网的变迁集, 由自治子网的定义和资源子网定义的(4)、(5)可得  $\exists M_k \in R(M): \forall M'_k \in R(M_k \xrightarrow{\sigma} M'): M'_k(p_{r_0}) = i(p_{r_0}) = 1$  (其中  $R(M_k \xrightarrow{\sigma} M')$  为  $M'_k$  到  $M'$  的可达状态标识集), 即对  $p_{r_0}: M'(p_{r_0}) = i(p_{r_0}),$  由(4)  $o \in P_w: \bullet \bullet o \cap \{p_{r_0}\} = \phi$  以及工作流网的定义可得  $t^* = \{o\},$  令  $M' = o + M'', M''(P \setminus \{o, p_{r_0}\}) \neq 0,$  则  $M'[t^* > i + M'',$  这与扩展网是安全的相矛盾, 即  $\forall p \in P \setminus \{o, p_{r_0}\}: M''(p) = 0,$  此时  $M' = o,$  所以(1)和(2)成立, 由定义 10 知  $(PN, i)$  是完整的。

(必要性)  $(PN, i)$  具有完整性, 先证  $(\overline{PN}, i)$  是安全的, 假设  $(\overline{PN}, i)$  不是安全的, 则  $\exists M_1 \in R(i), p \in P \setminus \{p_{r_0}\}: M_1(p) > 1.$  则  $\exists t \in p^*, t$  在  $M_1$  可至少引发两次, 即  $M_1[t > M_2 \wedge M_2(p') > 1,$  依次类推, 由定义 10 中的(1)得  $\exists \sigma \in T^*: M_1[\sigma > o.$  则  $o(o) > 1.$  这与定义 10 中的(2)矛盾, 即  $(\overline{PN}, i)$  是安全的得证;

再证  $(\overline{PN}, i)$  是活的, 由定义 10 中的(1)  $\forall M \in R(i), o \in R(M);$  由定义 10 中的(2)及  $(\overline{PN}, i)$  的安全性可得  $o[t^* > i,$  即:  $\forall M \in R(i): i \in R(M),$  即  $i$  是一个家态, 即  $(\overline{PN}, i)$  是可逆的, 根据定义 10 中的(3)得任意的变迁  $t \in T$  都是一次活的, 由引理 1 得  $(\overline{PN}, i)$  是活的。

在建立工作流系统资源的资源子网模型的基础上, 利用自治子网将工作流网和资源子网合成为资源工作流网, 模型不仅可以反映过程的定义情况, 同时实现了资源的动态调度模型与过程的有机结合, 所得模型为资源的分析和调度提供了一种形式化的方法, 更有利于进行系统的性能、时间以及约束语义等方面的分析。

### 4 资源工作流网合成算法

合成算法:

- Step1: 根据资源子网定义分别建立所用资源的控制过程模型;
- Step2: 根据工作流网定义建立工作流的控制过程模型;
- Step3: 根据资源工作流的合成限制条件将所建立的资源子网与工作流网合成为资源工作流网;
- Step4: 利用系统安全性分析算法检查合成的资源工作流网的安全性; 如果满足安全性, 则继续系统

活检查, 否则, 返回安全性检查错误报告;

Step5: 利用系统活性分析算法检查合成网络的活性, 如果满足活性条件, 则返回系统完整性的报告, 否则, 返回活性检查错误报告。

当网络的错误结构返回时, 建模人员就可以改变模型结构来消除错误。

### 5 实例分析

图 3 给出了一个企业生产经营过程的简化流程, 流程具有 7 个工序步骤, 使用包括 3 种雇员和 2 类机器在内的 5 种资源, 相应的 WF-net 如图 4 所示, 其中  $t_A, t_B$  是增加的两个辅助性活动, 分别表示活动 3 和活动 4 的会聚、流程的结束. 活动资源调度关系如表 1 所示, 由表 1 和过程建模方法, 可以建立 5 种资源的资源子网模型如图 5 所示。

表 1 活动资源调度关系

活动	活动 1	活动 2	活动 3	活动 4	活动 5	活动 6	活动 7
调用资源	资源 1	资源 2	资源 3	资源 1	资源 2 资源 3	资源 4 资源 3	资源 5 资源 3

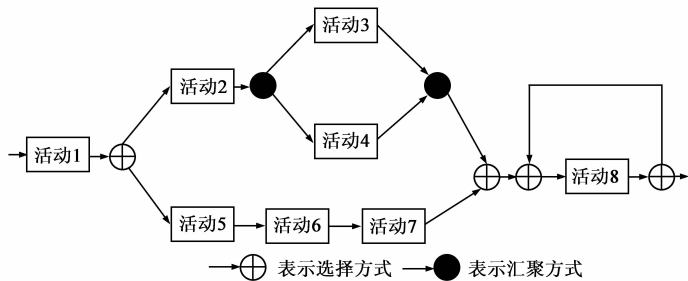


图 3 一个企业生产经营活动的简化流程

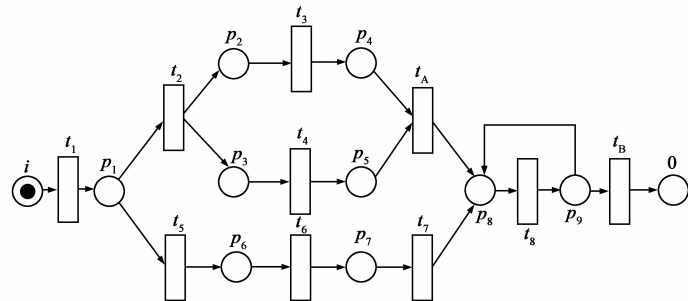


图 4 与图 3 对应的工作流网

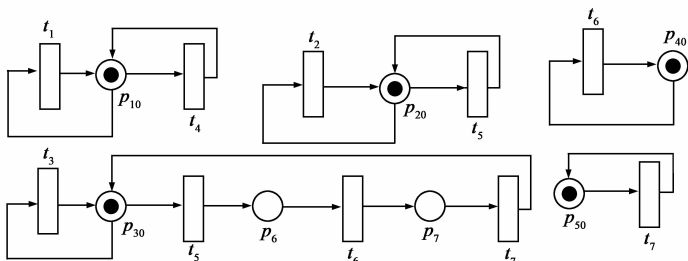


图 5 五种资源的资源子网

根据资源工作流的定义,在图 4 和图 5 的基础上,将资源子网和工作流网合成为资源工作流网如图 6 所示。

容易证明图 4 的工作流网是完整的,图 5 的资源子网都是强连通的标识状态图,图 7 给出了图 6 的 RWF-net 扩展网的可达图,其中各标识由表 2 给出。

根据可达图分析方法,可以判定 RWF-net 的扩展网是活的、安全的,因此 RWF-net 是完整的。

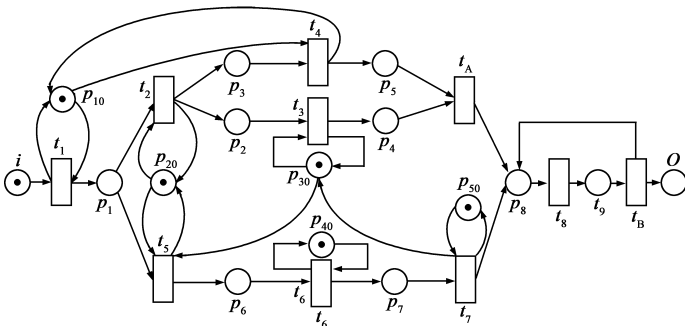


图6 企业经营工程的资源工作流网

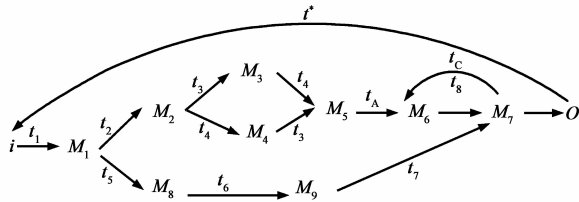


图7 图6RWF-net的可达图

表 2 各标识情况分布表

	<i>i</i>	$P_{10}$	$P_{20}$	$P_{30}$	$P_{40}$	$P_{50}$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$P_6$	$P_7$	$P_8$	$P_9$	<i>o</i>
<i>i</i>	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$M_1$	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$M_2$	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
$M_3$	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
$M_4$	0	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
$M_5$	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
$M_6$	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
$M_7$	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
$M_8$	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
$M_9$	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
<i>o</i>	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

## 6 结论及进一步的研究工作

在建立工作流系统资源的资源子网模型的基础上,利用子网合成将工作流网和资源子网合成为资源工作流网,实现了资源和过程的统一建模,既保证了经营过程的结构,同时还为资源的调度提供图形的视图模型。模型不仅可以反映过程的定义情况,同时实现了资源的动态调度模型与过程的有机结合,所得模型为资源的分析和资源约束下的工作流正确性验证提供了一种形式化的方法,更有利于进行系统的性能、时间以

及约束语义等方面的分析。建立资源工作流网的活性保障策略,建立基于资源工作流的系统协同模型以及性能分析方法是今后需要进一步研究的内容。

## 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.  
LUO Hai-Bin, FAN Yu-Shun, WU Cheng. Overview of workflow technology[J]. Journal of Software, 2000, 11(7): 899 - 907. (in Chinese)
- [2] 李建强,范玉顺. 一种工作流模型的性能分析方法[J]. 计算机学报, 2003, 26(5): 513 - 523.  
LI Jian-Qiang FAN Yu-Shun. 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.  
LI Wei, ZENG Guang-Zhou, WANG Xiao-Lin. 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 Wei-Dong. 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 Guo-Ping. 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 Li-Qin, WEI Ya-Ya. 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. workflow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 Xiao-Li. 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[J]. 计算机学报, 2004, 27(4): 471 – 481.  
DU Yu-Yue, JIANG Chang-Jun. 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—CIMS, 2002, 8(10): 770 – 775.  
LI Jian-Qiang, FAN Yu-Shun. 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 Shan-Chen, JIANG Chang-Jun, SUN Ping, ZHOU Chang-Hong. 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[A]. Computing Science Reports, Proc WFM' 98[C]. Lisbon, Portugal; Eindhoven University of Technology, 1998. 82 – 95.
- [16] 袁崇义. Petri 网原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005. 225 – 258.
- [17] Alireza Khoshkbarforousha, Pooyan Jamshidi, Ali Nikravesh, Fereidoon Shams. Metrics for BPEL process context-independency analysis[J]. Service Oriented Computing and Applications, 2011, 5(3): 139 – 157.
- [18] Narges Bahi-Jaber, Dominique Pontier. Modeling transmission of directly transmitted infectious diseases using colored stochastic Petri nets[J]. Mathematical Biosciences 2003, 185 (1): 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(3): 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]. Nashville, TN, USA: IEEE Press, 2000. 3039 – 3044.
- [22] Dongsheng Liu, Jianmin wang, Stephen C F Chan. Modeling workflow processes with colored Petri nets[J]. Computer in Industry, 2002, 49(3): 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(2): 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. 基于语义约束资源工作流并发正确性保证[J]. 计算机研究与发展, 2003, 40(5): 712 – 719.  
HU Nai-Jing, GU Ning, and SHI Bai-Le. Correctness of concurrency based on semantic constraint resource workflow[J]. Journal of Computer Research and Development, 2003, 40 (5): 712 – 719. (in Chinese)

#### 作者简介



**庞善臣** 男, 1974 年出生于山东嘉祥. 中国计算机学会 Petri 网专业委员会副主任, 中国计算机学会服务计算专业委员会委员, 2008 年同济大学计算机软件与理论专业博士毕业, 研究方向包括 Petri 网理论与应用、服务计算、可信计算、分布式并发系统分析与验证等.

E-mail: shanchenpang2008@gmail.com