

一个组织间松散耦合跨组织工作流的仿真模型^{*}

程绍武¹⁺, 徐晓飞¹, 王刚², 李全龙¹

¹(哈尔滨工业大学 计算机科学与技术学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

²(哈尔滨工业大学 现代生产技术中心,黑龙江 哈尔滨 150001)

A Simulation Model of Loosely Coupled Inter-Organizational Workflows

CHENG Shao-Wu¹⁺, XU Xiao-Fei¹, WANG Gang², LI Quan-Long¹

¹(School of Computer Science and Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

²(Center of Advanced Manufacturing Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-451-88524688, E-mail: csw1968@163.com

Cheng SW, Xu XF, Wang G, Li QL. A simulation model of loosely coupled inter-organizational workflows. *Journal of Software*, 2006,17(12):2461–2470. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/2461.htm>

Abstract: To solve the issue of modeling for loosely coupled inter-organizational workflows (LCIOWF), based on the colored Petri nets, the colored multi-dimension inter-organizational workflow (CMD/IOWF) Nets is proposed through importing color-set, colored function, resource places, waiting places, busy places, begin transitions, end transitions, roles, organizations, time functions, resource functions and transition functions into IOWF. Based on CMD/IOWF, the issue of modeling for multiple workflow instances in LCIOWF (loosely coupled inter-organizational workflow) coupling through resources sharing and activity synchronizing is discussed, as well as the issue of modeling for resources constraint and time relative to simulation. By means of defining inputs/outputs, states, events, time advancing functions and state transferring functions, a simulation model of loosely coupled inter-organizational workflows is presented. Based on the proposed simulation model, the key performance indexes of loosely coupled inter-organizational workflows can be obtained, which are the average execution time, the average execution cost of workflow instances of a respective project, their distributions among organizations and the resource-utilization ratio of a respective project. Finally, to verify validity of the proposed model, a case of loosely coupled inter-organizational workflows simulation is demonstrated.

Key words: simulation model; loosely coupled inter-organizational workflow; Petri net; colored multi-dimension inter-organizational workflow net

摘要: 为了解决松散耦合跨组织工作流的仿真建模问题,以染色 Petri 网为理论基础,将颜色集、染色函数、资源库所、等待库所、忙库所、开始变迁、结束变迁、角色、组织、时间函数、资源函数和变迁函数引入到 IOWF(inter-organizational workflow),提出了染色多维跨组织工作流网 CMD/IOWF(colored multi-dimension/IOWF).基于 CMD/IOWF,讨论了组织间松散耦合跨组织工作流中多个不同项目工作流实例通过资源共享和活

* Supported by the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2003AA413210 (国家高技术研究发展计划(863))

Received 2005-10-31; Accepted 2005-12-31

动同步相互耦合以及与仿真相关的资源约束和时间的建模问题.通过定义输入/输出、状态、事件、时间推进函数和状态转移函数,给出了一个组织间松散耦合的多个跨组织工作流的仿真模型.基于该模型的仿真分析可以求解组织间松散耦合跨组织工作流的关键性能指标,包括:对应项目工作流实例的平均执行时间、平均执行成本及其关于组织的分布,各项目的资源利用率.最后,以一个实例验证了提出模型的有效性.

关键词: 仿真模型;松散耦合跨组织工作流;Petri 网;染色多维组织间工作流网

中图法分类号: TP391 文献标识码: A

近年来,随着经济全球化和网络技术的应用普及,越来越多的业务过程跨越了组织边界.与这些跨组织业务过程相关的业务伙伴工作流过程,构成了组织间松散耦合的多个跨组织工作流过程.它们具有如下特征:每个组织有一个本地工作流过程(即过程定义中的所有任务均由本地资源执行)并对其拥有完全控制,组织不知道彼此的内部工作流过程,只有交互协议是公开的.只要不影响交互协议,组织改变自己的本地工作流过程无须通知其他组织.每个项目对应一个工作流过程定义,一个项目工作流过程中的任务可能属于不同组织的本地工作流过程,多个项目工作流实例因资源共享或活动同步相互耦合.

目前,关于跨组织工作流的研究主要集中在跨组织工作流管理的实现技术和跨组织工作流模型的合理性验证两个方面.跨组织工作流管理实现技术方面的研究主要包括:跨组织工作流的体系结构^[1]、跨组织工作流的柔性控制^[2]、跨组织工作流的合同管理^[3-5]和跨组织工作流的事务管理^[6].跨组织工作流的合理性验证是为了保证跨组织工作流模型定义的正确性——没有死锁和冗余的任务.针对组织间松散耦合工作流的合理性验证问题,van der Aals 提出了组织间工作流网(inter-organizational workflow,简称 IOWF),将由 n 个本地工作流组成的组织间松散耦合工作流的合理性验证问题转化为对 $n+1$ 个工作流网合理性的验证问题^[7],并给出了合理性的一个充要条件.然而,组织间松散耦合工作流过程只满足合理性是不够的,还必须在时间、成本等性能方面满足客户的需求.由于跨组织工作流实例的资源约束分布在多个组织内,每个组织对本地资源拥有完全控制的能力,并且,多个项目的工作流实例由于资源共享或活动同步相互耦合产生的时间等待等因素,使得工作流实例的执行时间和成本具有不确定性.为了有效控制组织间松散耦合工作流实例的执行时间和成本,需要对工作流过程的性能进行评价,并通过调整过程的结构和资源配置,对工作流过程进行优化.基于自由选择 Petri 网分解的工作流性能分析^[8]方法只适用于分析结构具有自由选择特征的组织内工作流的资源负荷和实例的执行周期,不能完全满足组织间松散耦合工作流性能分析的需求,通过仿真模型的执行来分析组织间松散耦合跨组织工作流的性能是一个较好的选择.为此,需要研究组织间松散耦合跨组织工作流的仿真模型.

组织间松散耦合跨组织工作流仿真模型要解决的主要问题是:建模多个项目工作流实例的松散耦合关系,包括资源共享和活动同步;建模工作流实例的项目属性、资源实体的角色和组织属性;建模任务的资源约束和与工作流实例执行相关的时间;建模跨组织松散耦合工作流的动态行为,包括内外部事件的定义及触发次序、状态转移函数、时间推进函数等.为了解决上述问题,需要一个形式化框架来准确地定义松散耦合跨组织工作流的仿真模型.

Petri 网是目前唯一能够对工作流进行定性和定量分析的形式化框架^[9].考察现有的与工作流相关的 Petri 网^[7-13]子类,我们发现:针对一般工作流的研究问题提出的 Petri 网扩展,不能描述多个跨组织工作流过程的松散耦合关系^[8-12],而针对跨组织工作流过程合理性验证问题提出的跨组织工作流网 IOWF^[7,13]只能描述孤立的一个跨组织工作流实例的控制逻辑.本文从组织间松散耦合跨组织工作流仿真建模的实际需要出发,将跨组织工作流网 IOWF 进行扩展,提出了染色多维跨组织工作流网(colored multi-dimension/IOWF,简称 CMD/IOWF),并以此为基础,形式化地给出了一个组织间松散耦合跨组织工作流的仿真模型.最后,以实例验证了所提出模型的有效性.

本文第 1 节介绍 CMD/IOWF 的定义、语义及特点.第 2 节介绍基于 CMD/IOWF 定义的组织间松散耦合跨组织工作流的仿真模型.第 3 节给出一个组织间松散耦合跨组织工作流的仿真实例.第 4 节对本文的研究进行总结和展望.

1 CMD/IOWF 的概念

定义 1. 集合 A 的复集^[14] b 是从 A 到自然数 N 的函数, $b \in A \rightarrow N$. 如果 $a \in A$, 那么 $b(a)$ 是 a 在集合 A 中出现的次数. A_{MS} 是 A 的所有复集的集合, 空的复集记为 θ_A , $b \in A_{MS}$ 记为形式和 $\sum_{a \in A} b(a)a$.

下面是本文使用的有关复集的几个运算: 设 $b_1, b_2 \in A_{MS}, q \in A$. (1) $q \in b_1$, 当且仅当 $b_1(q) \geq 1$; (2) $b_1 + b_2 = \sum_{a \in A} (b_1(a) + b_2(a))a$; (3) $b_1 - b_2 = \sum_{a \in A} (b_1(a) - b_2(a))a$; (4) $b_1 \leq b_2$, 当且仅当 $\forall a \in A, b_1(a) \leq b_2(a)$; (5) $b_1 = b_2$, 当且仅当 $\forall a \in A, b_1(a) = b_2(a)$.

定义 2. 染色多维跨组织工作流网是满足下列条件的八元组 $CMD/IOWF = \langle IOWF, \Sigma, C, F, \omega, R, \varphi, \psi \rangle$,

(1) $IOWF$ 是由 n 个本地工作流网组成的跨组织工作流网;

(2) Σ 是颜色集, $\Sigma = PID \cup RID, RID = ROLEID \times ORGID$, 其中, PID 和 RID 分别为项目标识集和资源标识集; $ROLEID$ 为角色标识的集合; $ORGID$ 为组织标识的集合; RID 是 $ROLEID$ 和 $ORGID$ 的笛卡尔乘积;

(3) C 是颜色函数, $C \in P \rightarrow \Sigma, P = P^* \cup P_{AC}, P^* = \sum_{k=1}^n P_k$, P_k 是标号为 k 的本地工作流网的库所集;

(4) CT 是所有染色托肯的集合, $CT = \{ \langle p, v \rangle | p \in P \wedge v \in C(p) \}$;

(5) F 是变迁函数, $\forall t \in T^*, F(t) \in (CT)_{MS} \rightarrow (CT \times Z)_{MS}$, $(CT \times Z)_{MS}$ 是 $CT \times Z$ 的复集(multi-set), 其中, Z 为非负实数的集合 $Z = \{ x \in real | x \geq 0 \}$; $T^* = \sum_{k=1}^n T_k$; $A \rightarrow B$ 表示所有从 A 到 B 的偏序函数的集合; 变迁函数 $F(t)$ 定义了变迁 t 点火前后, 消耗托肯的复集和产生托肯的复集之间的关系. $dom(F(t))$ 定义了变迁 t 的使能条件, 变迁 t 的使能条件与消耗托肯的时间戳无关.

(6) $\omega: T^* \rightarrow Z, \omega$ 是变迁时延的集合, $\omega = \{ \omega(t) | \omega(t) \in Z \wedge t \in T^* \}$, $\omega(t)$ 代表变迁的时延;

(7) $R: T^* \rightarrow \Omega_{MS}, R$ 是代表变迁使用的资源实体的染色托肯, $R(t) \in \Omega_{MS}, t \in T^*, \Omega = \{ \langle p, v \rangle | p \in P \wedge v \in RID \}$ 是代表资源实体的所有染色托肯的集合;

(8) $\varphi: P \rightarrow A, P = P^* \cup P_{AC}, \varphi$ 是库所属类, $\forall p \in P, \varphi(p) \in A, A$ 是本库所属类的集合, $A = \{ source, wait, busy, resource, sink, AC \}$, 如果库所 p 的属类为 AC , 表示该库所为异步通信库所^[7];

(9) $\psi: T^* \rightarrow B, \psi$ 是变迁的属类, $\psi(t) \in B, B$ 是本地工作流网中变迁的属类的集合, $B = \{ begin, end \}$.

CMD/IOWF 主要从以下 3 个方面对 IOWF 进行了扩展:

1) 染色. 托肯被用来建模工作流实例和资源实体, 通过对托肯染色, 可以区分不同项目的工作流实例及具有不同角色和组织属性的资源实体. 颜色集定义为项目标识集和资源标识集的并集, 资源标识集定义为角色标识集和组织标识集的笛卡尔积. 项目标识用来建模工作流实例的项目属性; 资源标识用来建模资源实体的属性. 其中, 角色标识和组织标识分别用来建模资源实体的角色和组织属性.

2) 引入时间函数 $\omega(t)$ 、资源函数 $R(t)$ 以及属类函数 $\varphi(p)$ 和 $\psi(t)$, 并且为每个托肯关联一个时间戳. $\omega(t)$ 和 $R(t)$ 分别是变迁 t 从使能到点火的时延和变迁 t 点火所需的资源. $\varphi(p)$ 的值是库所 p 的属类, $\psi(t)$ 的值是变迁的属类. 这些函数和时间戳的引入, 扩展了 IOWF 的语义. 使 CMD/IOWF 不仅可以建模任务、任务的资源约束和与工作流实例执行相关的时间, 而且可以建模多个项目工作流实例的松散耦合关系.

- 任务、任务的资源约束和时间建模

在 IOWF 中, 本地工作流网中的库所建模任务的前置条件, 异步通信库所建模处于不同本地工作流过程中任务的异步关系, 本地工作流网的源库所和汇库所分别建模本地工作流过程的开始和结束. 本地工作流网中变迁建模任务, 同步变迁组件集建模处于不同本地工作流过程中具有同步关系的任务集.

CMD/IOWF 在 IOWF 的基础上增加了两类变迁, 分别为开始变迁和结束变迁. 开始变迁用来建模任务的开始事件; 结束变迁用来建模任务的结束事件. 同时, 增加了等待库所、忙库所和资源库所. 等待库所建模工作流实例在某任务节点的等待状态, 忙库所建模工作流实例正在某任务节点执行或者资源实体正在某任务节点处理工作流实例. 资源库所建模资源实体处于就绪状态.

基于CMD/IOWF,任务可以细化为任务网(task-net).任务网是CMD/IOWF的子网,将IOWF中表示任务的变迁连同它的前驱和后继库所用任务网替代,再附加颜色集和染色函数,便构成了CMD/IOWF.

定义 3. 一个任务网是满足下列条件的七元组 $Task-net = \langle p_{in}, p_{out}, p_{busy}, p_{resource}, t_0, t_1, R(t_0) \rangle$,

- (1) $\bullet t_0 = \{p_{in}, p_{resource}\}, \bullet t_0' = \{p_{busy}\}, \bullet t_1 = \{p_{busy}\}, \bullet t_1' = \{p_{out}, p_{resource}\}$;
- (2) $p_{in} \in P, p_{out} \in P, \varphi(p_{in}) \in \{source, wait, AC\}, \varphi(p_{out}) \in \{wait, AC, sink\}$;
- (3) $\varphi(p_{busy}) = busy, \varphi(p_{resource}) = resource, \psi(t_0) = begin, \psi(t_1) = end$.

如图 1 所示.在任务网中,变迁 t_0 建模任务的开始事件, $\omega(t_0)$ 建模任务从可以被执行到开始被执行的人为延时.变迁 t_1 建模任务的结束事件, $\omega(t_1)$ 建模任务从开始执行到结束执行的时间. $R(t_0)$ 表示执行任务所需的资源.如果建模 workflow 实例的托肯 $TOKEN_{pid}$ 进入 p_{in} 的时间戳为 x ,建模 $R(t_0)$ 指定的所有资源实体的 $TOKEN_{rid}$ 进入库所 $p_{resource}$ 的时间戳的最大值为 x' ,那么, $TOKEN_{pid}$ 建模的工作流实例的资源等待时间为 $\max(x, x') - x$.因此, workflow 实例在该任务节点的总等待时间为 $\max(x, x') - x + \omega(t_0)$,也就是资源等待时间加上人为延时.

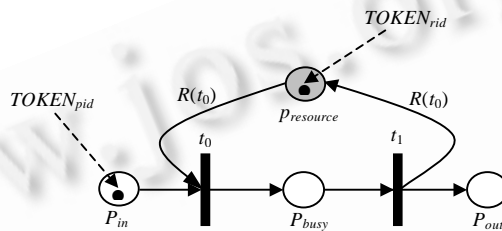


Fig.1 Task-Net

图 1 任务网

• 多项目 workflow 实例的松散耦合

本地 workflow 过程中的任务分为两种类型:一种是到达任务的工作流实例均来自组织外部;另一种是到达任务的工作流实例均来自组织内部,建模前者的任务网中 $\forall p \in p_{in}, \varphi(p) \neq AC$.建模后者的任务网中 $\forall p \in p_{in}, \varphi(p) = AC$. workflow 实例的松散耦合可以发生在任意类型的任务节点处.不同项目 workflow 实例的松散耦合有两种形式,即资源共享和活动同步.对于因资源共享发生的工作流实例耦合,可以表示为一个本地资源库所同时属于两个不同项目 workflow 过程的任务网,并且两个任务网中的开始变迁的资源函数相等.如图 2 所示,实例 i 和实例 i' 使用了组织 j 中相同的资源 $R(t_0) = R(t'_0)$.对于因活动同步引发的工作流实例耦合,可以表示为两个不同项目 workflow 过程的任务网中的开始变迁和结束变迁属于相同的同步变迁组件 $T_{SC}^{[7]}$ (熔接集),如图 2 中的 t'_0 和 t''_0 所示.两种模型的组合可以表示更加复杂的工作流实例耦合.

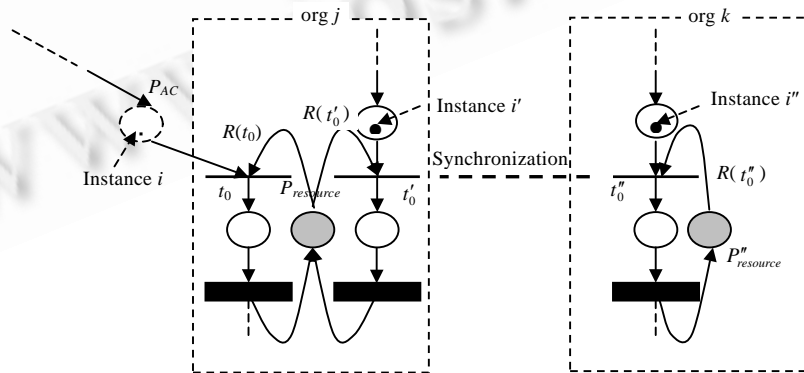


Fig.2 Model of coupling inter-organizational workflow

图 2 workflow 过程的组织间松散耦合模型

3) 引入变迁函数 $F(t)$. $F(t)$ 定义了变迁点火消耗的托肯和产生的托肯.有助于定义组织间松散耦合跨组织

工作流的内部状态转移函数(见第 2 节).

2 仿真模型

组织间松散耦合跨组织工作流的状态仅在活动执行的开始或结束、系统输入和输出等离散的时间点上发生转移,因此,其本质上是一类离散事件系统.下面基于 CMD/IOWF 建立组织间松散耦合跨组织工作流的仿真模型.包括:输入、输出、序列状态、事件、时间推进函数和状态转移函数.

1) 输入/输出

本地工作流网的源库所和汇库所分别用来建模工作流实例的输入位置和输出位置.输入工作流实例的时间间隔表示为某种概率分布的随机事件,如泊松分布、指数分布等. n 个组织参与的组织间松散耦合跨组织工作流的输入表示为 n 个相互独立的随机事件.用 n 个关于时间的输入函数建模工作流实例输入的时间间隔.当工作流实例到达某个汇库所时,表示一个输出产生.

2) 状态

• 资源实体的状态

资源状态= $\{\langle\langle p, v, x \rangle | p \in P^* \wedge (\varphi(p) = resource \vee \varphi(p) = busy) \wedge C(p) = v \wedge v \in RID \wedge x \in Z\}$, 其中, $\langle\langle p, v, x \rangle$ 表示颜色为 v 的资源托肯在时刻 x 进入库所 p . 在时刻 x , 当 $\varphi(p) = resource$ 时, 表示资源实体进入“就绪”状态; 当 $\varphi(p) = busy$ 时, 表示资源实体进入“忙”状态.

• 活动实例的状态

活动状态= $\{\langle\langle\langle p, v, x \rangle, Task-net \rangle | p \in P' \wedge \varphi(p) \neq resource \wedge C(p) = v \wedge v \in PID \wedge x \in Z\}$, P' 为 $Task-net$ 的库所的集合. $\langle\langle p, v, x \rangle$ 表示颜色为 v 的工作流实例托肯在时刻 x 进入到任务网 $Task-net$ 中的库所 p . 在时刻 x , 当 $p = p_{in}$ 时, 表示工作流实例在 $Task-net$ 建模的任务节点处进入“等待被执行”状态. 当 $p = p_{busy}$ 时, 表示工作流实例在 $Task-net$ 建模的任务节点处进入“正在被执行”状态. 当 $p = p_{out}$ 时, 表示工作流实例在 $Task-net$ 建模的任务节点处被“执行完毕”.

• 工作流实例的状态

工作流实例的状态= $\{\langle\langle p, v, x \rangle | p \in P \wedge \varphi(p) \neq resource \wedge C(p) = v \wedge v \in PID \wedge x \in Z\}$, 其中, $P = P^* \cup P_{AC}$. 这里, $\langle\langle p, v, x \rangle$ 表示颜色为 v 的工作流实例托肯在时刻 x 进入库所 p . 在时刻 x , 当 $\varphi(p) = source$ 时, 表示工作流实例进入“被输入并等待执行”状态; 当 $\varphi(p) = wait$ 或者 $\varphi(p) = AC$ 时, 表示工作流实例进入“等待执行”状态; 当 $\varphi(p) = busy$ 时, 表示工作流实例进入“正在被执行”状态; 当 $\varphi(p) = sink$ 时, 表示工作流实例进入“执行结束并输出”状态.

• 工作流的状态

工作流的状态 s 是指时刻 x 所有工作流实例和资源实体的状态分布, 表示为时间戳的染色托肯的一个复集. 所有可能状态的集合 S 表示为带有时间戳的染色托肯的复集的集合 $(CT \times Z)_{MS}$. 在状态 $s \in S$ 下, 工作流的状态标识 $M(s) \in CT_{MS}$ 是不带时间戳的染色托肯的分布,

$$M(s) = \sum_{\langle\langle p, v, x \rangle \in CT \times Z \wedge p \in P^* \cup P_{AC}} s(\langle\langle p, v, x \rangle) \langle p, v \rangle.$$

3) 事件

在跨组织工作流中有 3 类事件: 活动实例执行开始、活动实例执行结束和新的工作流实例输入. 其中, 活动实例的开始和结束执行因与外部输入无关, 称为内部事件; 工作流实例的输入因决定于外部系统, 称为外部事件. 内部事件触发总是将系统内的工作流实例或资源实体从一个状态转移到另一个状态; 外部事件的触发总是在某个工作流过程的开始位置产生一个工作流实例. 无论内部事件还是外部事件的触发, 都会使系统的状态发生转移. 状态转移的规则由状态转移函数给出.

一个内部事件建模为三元组 $e = (t, b_{in}, b_{out})$, 表示当变迁 t 被使能后, 经过 $\omega(t)$ 个时间单位点火, 消耗由复集 b_{in} 指定的托肯, 产生由复集 b_{out} 指定的托肯. 如果 $\langle\langle p, v, x \rangle \in b_{in}$, 那么事件 e 从 p 中消耗一个颜色为 v 、时间戳为 x 的托肯, 如果 $\langle\langle p', v', x' \rangle \in b_{out}$, 那么事件 e 在 p' 中产生一个颜色为 v' 、延时为 x' 的托肯. x' 的值由 $\omega(t)$ 确定. 内部事件集 $E = T^* \times (CT \times Z)_{MS} \times (CT \times Z)_{MS}$.

一个外部事件建模为 $e \in \{ \langle \langle i_k, v \rangle, x \rangle \mid C(i_k) = v \wedge v \in PID \wedge x \in Z \}$, 表示时刻 x , 本地工作流网的源库所 i_k 建模的输入位置, 产生了一个工作流实例, 建模该工作流实例的托肯的颜色为 v .

4) 状态转移

• 内部事件使能

在状态 $s \in S$ 下, 事件 $(t, b_{in}, b_{out}) \in E$ 称为使能的, 当且仅当: (1) $b_{in} \leq s$; (2) $M(b_{in}) \in dom(F(t))$; (3) $b_{out} = F(t)(M(b_{in}))$. 条件(1)要求 t 点火时要消耗的托肯在当前状态 s 中出现. 条件(2)要求在 t 的输入库所中有足够多的 t 点火时要消耗的托肯. 条件(3)要求 t 点火产生的托肯等于 $F(t)(M(b_{in}))$.

活动实例的开始事件和结束事件表示为 $e_0 = (t_0, b_{in}, b_{out})$ 和 $e_1 = (t_1, b_{in}, b_{out})$. 开始事件 $e_0 = (t_0, b_{in}, b_{out})$ 的使能表示活动实例的使能; 结束事件 $e_1 = (t_1, b_{in}, b_{out})$ 的使能表示活动实例正在被执行.

$$dom(F(t_0)) = M \left(\langle \langle p, v \rangle, x \rangle + \sum_{\langle p', v' \rangle \in R(t_0)} R(t_0)(\langle p', v' \rangle)(\langle p', v' \rangle, x') \right),$$

其中, x 是工作流实例到达的时间戳, x' 是资源实体进入就绪状态的时间戳, $\varphi(p) \notin \{ resource, busy, sink \}$, $\varphi(p') = resource$, 并且 $v \in PID$.

$$F(t_0)(dom(F(t_0))) = \langle \langle p, v \rangle, \omega(t_0) \rangle + \sum_{\langle p', v' \rangle \in R(t_0)} R(t_0)(\langle p', v' \rangle)(\langle p', v' \rangle, \omega(t_0)),$$

其中, $\varphi(p) = busy, v \in PID$.

$$F(t_1)(dom(F(t_1))) = \langle \langle p, v \rangle, \omega(t_1) \rangle + \sum_{\langle p', v' \rangle \in R(t_1)} R(t_1)(\langle p', v' \rangle)(\langle p', v' \rangle, \omega(t_1)),$$

其中, $\varphi(p) \notin \{ resource, busy, source \}$, $\varphi(p') = resource$, 并且 $v \in PID$. $dom(F(t_1)) = F(t_0)(dom(F(t_0)))$.

由于在同一时刻, 一个任务节点可能有多个工作流实例在等待处理, 当约束资源得到满足时, 可以有多个活动实例被使能, 哪个活动实例被执行取决于服务台的排队规则和活动实例的优先级.

• 时间推进函数 $t_a(s)$ 与事件触发

时间推进函数 $t_a(s)$ 给出工作流状态转移的时间推进机制, 它可以确定状态 s 的预期保持时间.

一个内部事件 $e = (t, b_{in}, b_{out})$ 的使能时间 $ET(e)$ 是该事件消耗的托肯时间戳的最大值, $ET(e) = \max_{((p,v),x) \in b_{in}} x$.

一个内部事件 $e = (t, b_{in}, b_{out})$ 的触发时间 $TT(e)$ 是该事件的使能时间 $ET(e)$ 与 $\omega(t)$ 之和, $TT(e) = ET(e) + \omega(t)$.

状态 $s \in S$ 的模型时间 $MT(s)$ 是所有被使能的内部事件的触发时间的最小值, $MT(s) = \min \{ TT(e) \mid e \in E, \text{且 } e \text{ 是被 } s \text{ 使能的} \}$.

$t_a(s) = \min(MT(s), x')$, x' 为状态 $s \in S$ 下外部事件的触发时间.

当时间连续发生变化时, 工作流的状态在离散的时间点上发生变化, 这些离散的时间点就是 $t_a(s)$. 仿真时钟每次推进到 $t_a(s)$, 仿真初始时, $t_a(s) = 0$.

• 内部状态转移函数

状态转移函数给出了工作流从转移前的序列状态到转移后的序列状态之间的对应关系. 变迁点火表示内部事件触发. 状态 $s \in S$ 下可能有多个内部事件的触发时间 $TT(e)$ 等于 $MT(s)$, 所有触发时间等于模型时间的内部事件构成了当前状态 s 下的触发内部事件集. 状态 s 下, 所有使能事件的集合记为 $\hat{E}(s)$, 所有触发内部事件的集合记为 $\bar{E}(s) = \{ e \mid e \in \hat{E}(s), ET(e) = MT(s) \}$. 对 $\forall e \in \bar{E}(s), \forall e' \in \bar{E}(s), e = (t, b_{in}, b_{out}), e' = (t', b'_{in}, b'_{out})$, 如果 $b_{in} \cap b'_{in} \neq \emptyset$, 则称 e 和 e' 是冲突的. 在状态 s 下, $\forall e \in \bar{E}(s)$, 与 e 关联的变迁 t 可以点火的充分必要条件是 $e \in \bar{E}(s)$. 当 $\bar{E}(s)$ 中的元素多于一个时, 如果这些事件是不冲突的, 则与这些事件关联的变迁同时点火; 如果其中某几个事件是冲突的, 则按事件的优先级或其他解结规则, 决定哪个事件的变迁先被点火, 同一状态下, 与任意事件关联的变迁只能被点火一次.

内部状态转移函数: $\forall e \in \bar{E}(s)$, 与 e 关联的变迁 t 被点火的结果是把当前状态 s 变成新的状态 s' ,

$$s' = s - b_{in} + \sum_{\langle \langle p, v \rangle, x \rangle \in (CT \times TS)} b_{out}(\langle \langle p, v \rangle, x \rangle)(\langle p, v \rangle, TT(e)).$$

• 外部状态转移函数

如果状态 $s \in S$ 下某一时刻 x 触发的外部事件产生的工作流实例托肯由复集 b_{ext} 指定, 则 $\langle\langle p, v \rangle, x\rangle \in b_{ext}$ 表示外部事件触发在 p 产生颜色为 v 、时间戳为 x 的托肯. x 时刻触发的外部事件将工作流的状态从 s 变成新的状态 s' ,

$$s' = s + \sum_{\langle\langle p, v \rangle, x\rangle \in (CT \times Z)_{MS} \wedge p \in \{i_k | k=1, 2, \dots, n\} \wedge v \in PID} b_{ext}(\langle\langle p, v \rangle, x\rangle) \langle\langle p, v \rangle, x\rangle.$$

- 状态转移函数 $\sigma(s)$

内部状态转移函数和外部状态转移函数统称为状态转移函数. 状态 $s \in S$ 下, 下一时刻发生状态转移的时刻由时间推进函数 $t_a(s)$ 确定, 如果 $t_a(s) = MT(s)$, 那么, 状态转移由内部事件 $e = \langle t, b_{in}, b_{out} \rangle$ 引发, 下一个状态

$$s' = s - b_{in} + \sum_{\langle\langle p, v \rangle, x\rangle \in (CT \times TS)} b_{out}(\langle\langle p, v \rangle, x\rangle) \langle\langle p, v \rangle, x\rangle, TT(e).$$

如果 $t_a(s) = x'$, x' 为外部事件的触发时间, 那么状态转移由外部事件引发, 下一个状态,

$$s' = s + \sum_{\langle\langle p, v \rangle, x\rangle \in (CT \times Z)_{MS} \wedge p \in \{i_k | k=1, 2, \dots, n\} \wedge v \in PID} b_{ext}(\langle\langle p, v \rangle, x\rangle) \langle\langle p, v \rangle, x\rangle.$$

为了验证仿真模型的有效性, 下面给出一个组织间松散耦合的多个跨组织工作流过程的仿真实例.

3 仿真实例

在如图 3 所示的跨组织工作流模型里, 组织 1~组织 3 分别控制一个本地工作流过程的执行. 组织 1~组织 3 的标识分别为 $org1, org2$ 和 $org3$. 变迁 t_0^j 和 t_1^j 分别表示组织 i 的本地工作流过程中任务 j 的开始和结束, 符号 t^{ij} 表示组织 i 的本地工作流过程中任务 j . 系统中有 3 个项目的工作流过程, 项目标识分别为 $pid1, pid2$ 和 $pid3$. 项目标识为 $pid1$ 的工作流实例与项目标识为 $pid2$ 的工作流实例因在任务 t^{12} 和 t^{22} 处同步, 故在组织 1 和组织 2 间发生耦合. 项目标识为 $pid2$ 的工作流实例在执行任务 t^{31} 时与项目标识为 $pid3$ 的工作流实例在执行任务 t^{32} 时, 竞争组织 3 的资源池 p^{31} 中的资源, 使两个项目的工作流实例在组织 2 和组织 3 间发生耦合, 从而对应 3 个项目的工作流过程在组织 1~组织 3 间形成了松散耦合的跨组织工作流过程.

资源库所 $p_{resource}^{ij}$ 表示组织 i 控制的第 j 个资源池 ($i=1, 2, 3; j=1, 2$). 资源被分为 8 种角色, 记为 $role_i$ ($i=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$).

颜色集定义为 $\Sigma = PID \cup RID$, 其中, $PID = \{pid_i | i=1, 2, 3\}$ 为项目标识符集; $RID = \{role_i | i=1, 2, \dots, 8\} \times \{org_i | i=1, 2, 3\}$ 为资源实体的标识符集.

资源池配置:

$p_{resource}^{11}$ 配置为 $3\langle role1, org1 \rangle + 2\langle role3, org1 \rangle + 1\langle role6, org1 \rangle$; $p_{resource}^{21}$ 配置为 $3\langle role1, org2 \rangle + 2\langle role7, org2 \rangle$;

$p_{resource}^{31}$ 配置为 $3\langle role4, org3 \rangle$, $p_{resource}^{32}$ 配置为 $1\langle role5, org3 \rangle$.

资源约束:

$R(t_0^{11}) = 1\langle p_{resource}^{11}, \langle role6, org1 \rangle \rangle$, $R(t_0^{12}) = 1\langle p_{resource}^{11}, \langle role6, org3 \rangle \rangle + 1\langle p_{resource}^{11}, \langle role6, org1 \rangle \rangle$;

$R(t_0^{21}) = 1\langle p_{resource}^{21}, \langle role1, org2 \rangle \rangle + 2\langle p_{resource}^{21}, \langle role4, org2 \rangle \rangle$;

$R(t_0^{22}) = 3\langle p_{resource}^{21}, \langle role1, org2 \rangle \rangle + 6\langle p_{resource}^{21}, \langle role4, org2 \rangle \rangle + 2\langle p_{resource}^{21}, \langle role7, org2 \rangle \rangle$;

$R(t_0^{31}) = R(t_0^{32}) = 3\langle p_{resource}^{31}, \langle role4, org3 \rangle \rangle$, $R(t_0^{33}) = 1\langle p_{resource}^{32}, \langle role5, org3 \rangle \rangle$.

时间参数:

$\omega(t_0^{11}) = \omega(t_0^{12}) = 0$, $\omega(t_1^{11}) = 6$, $\omega(t_1^{12}) = 12$, $\omega(t_0^{21}) = \omega(t_0^{22}) = 0$, $\omega(t_1^{21}) = 3$, $\omega(t_1^{22}) = 10$,

$\omega(t_0^{31}) = \omega(t_0^{32}) = \omega(t_0^{33}) = 0$, $\omega(t_1^{31}) = 3$, $\omega(t_1^{32}) = 7$, $\omega(t_1^{33}) = 10$, $\omega(t_{and-split21})\omega(t_{and-join21}) = 0$.

输入:

项目 $pid1$ 的工作流实例到达组织 1 的本地工作流的起始点 i_1 的时间间隔满足在 1~2 小时之间的正态分布. 项目 $pid2$ 的工作流实例到达组织 2 的本地工作流的起始点 i_2 的时间间隔满足在 1~3 小时之间的正态分布. 项目 $pid3$ 的工作流实例到达组织 3 的本地工作流的起始点 i_3 的时间间隔满足在 1~1.5 小时之间的正态分布.

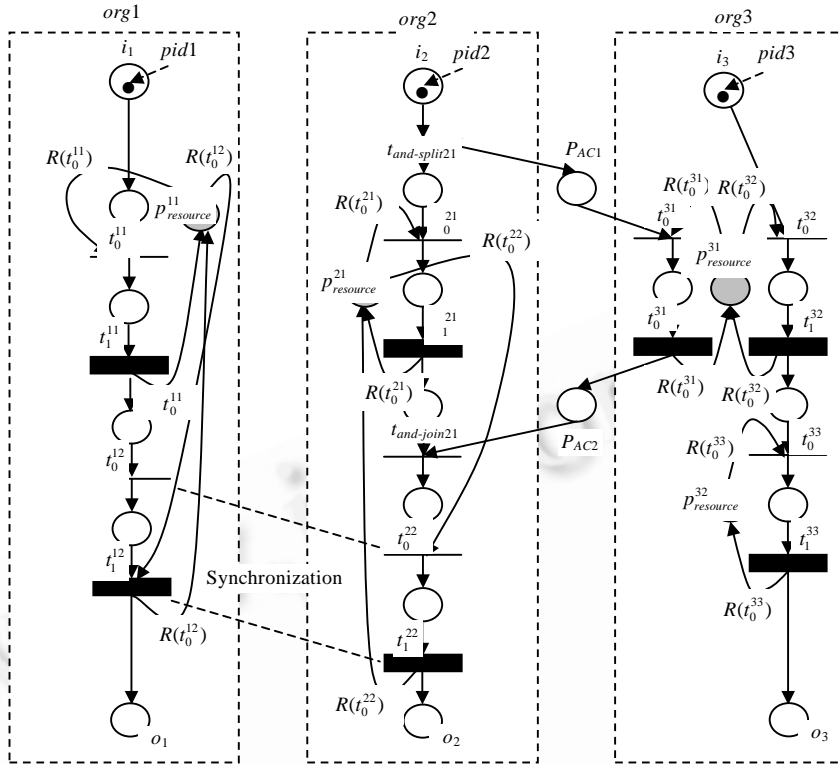


Fig.3 A CMD/IOWF based model of inter-organizational workflow
图3 一个基于 CMD/IOWF 的跨组织 workflow 模型

资源对到达的工作流实例按 FIFO 的排队规则服务.仿真初始时,每个资源池配置的资源均已就绪并且系统中没有工作流实例.仿真时间为 7 天(每天 24 小时),从星期一早上 8:00 开始.所有资源的工作时间是从周一~周五的早上 8:00~12:00 和下午 1:00~5:00,其他时间为加班时间.每种资源的工作时间成本为 $role1=8$ 元/小时; $role2=7$ 元/小时; $role3=5$ 元/小时; $role4=6$ 元/小时; $role5=9$ 元/小时; $role6=6$ 元/小时; $role7=8$ 元/小时; $role8=7$ 元/小时.每种资源的加班成本为工作成本的 2 倍.经仿真获得的系统性能指标见表 1~表 4.

实例表明,基于 CMD/IOWF 建立的仿真模型可以有效地模拟组织间松散耦合的多个跨组织工作流的执行,基于仿真的统计分析可以给出各项目工作流实例平均等待时间及其关于组织的分布,平均执行周期及其关于组织的分布,平均执行成本及其关于组织的分布以及各项目工作流实例对资源的利用率.

Table 1 Average wait-time distribution of workflow instance among organizations (hour)

表 1 工作流实例平均等待时间关于组织的分布(小时)

	org1	org2	org3	Total
pid1	33.50	0	0	33.50
pid2	0	16.90	16.40	33.30
pid3	0	0	11.10	11.10

Table 2 Average execution-time distribution of workflow instance among organizations (hour)

表 2 工作流实例平均执行周期及其关于组织的分布(小时)

	org 1	org 2	org 3	Total
pid1	40.70	0	0	40.70
pid2	0	20.90	19.40	40.30
pid3	0	0	19.10	19.10

Table 3 Average execution-cost distribution of workflow instance among organizations (yuan)**表 3** 工作流实例平均执行成本及其关于组织的分布(元)

	org 1	org 2	org 3	Total
pid1	4.92	0	0	4.92
pid2	0	6.40	5.40	11.80
pid3	0	0	12.60	12.60

Table 4 Resource-Utilization ratio of workflow instance (%)**表 4** 各项目工作流实例对资源的利用率(%)

	pid1			pid2			pid3		
	org1	org2	org3	org1	org2	org3	org1	org2	org3
role1	0	0	0	0	10.50		0	0	0
role2	0	0	0	0	0		0	0	0
role3	7.65	0	0	0	0		0	0	0
role4	0	0	0	0	0	15.75	0	0	55.16
role5	0	0	0	0	0		0	0	36.10
role6	92.64	0	0	0			0	0	0
role7	0	0	0	0	5.25		0	0	0
role8	0	0	0	0	0	0	0	0	0

4 结 论

本研究为基于仿真方法分析优化组织间松散耦合多个跨组织工作流的性能提供支持。主要贡献包括两部分:(1) 从实际需要出发,通过扩展IOWF提出了一个松散耦合跨组织工作流仿真建模的形式化框架——染色多维跨组织工作流网CMD/IOWF;(2) 基于CMD/IOWF给出了一个松散耦合跨组织工作流的仿真模型,并以实例验证了仿真模型的有效性。

与现有的与工作流相关的扩展Petri网^[7-9,15-17]相比,CMD/IOWF具有如下特点: 能够建模不同项目的工作流实例以及不同角色不同组织的资源实体,便于通过仿真对系统的性能参数进行分类统计; 可以准确地表示由于资源共享和活动同步引起的多工作流跨组织松散耦合的关系; 能够建模活动实例的状态、资源实体的状态、工作流实例的状态和工作流系统的状态,便于仿真时获取系统的状态; 能够建模工作流实例在某任务节点的资源等待时间、人为等待时间和实际的执行时间; 能够形式化地定义组织间松散耦合跨组织工作流的仿真模型,包括:输入/输出、系统的状态、事件及事件触发、时间推进函数和状态转移函数。基于给出的仿真模型可以求解松散耦合跨组织工作流中对应每个项目工作流的关键性能指标,包括: 工作流实例的平均等待时间和平均执行周期; 工作流实例的平均等待时间和平均执行周期关于组织的分布; 工作流实例的平均执行成本及其关于组织的分布; 各项目对资源的利用率。

下一步的研究将细化资源的行为模型(包括资源的调度、优先级以及活动获取资源的方式等),并基于层次Petri网建立组织间松散耦合跨组织工作流的仿真模型。

References:

- [1] Hoffner Y, Ludwig H, GülcüC, Grefen P. An architecture for cross-organizational business processes. In: Proc. of the 2nd Int'l Workshop on Advanced Issues of E-Commerce and Web-Based Information Systems. IEEE Computer Society Press, 2000. 2-11.
- [2] Narendra NC. Flexible support and management of adaptive workflow processes. Information Systems Frontiers, 2004,6(3): 247-262.
- [3] Olivier P, Claude G. An approach to implement contracts as trusted intermediaries. In: Proc. of the 1st IEEE Int'l Workshop on Electronic Contracting (WEC 2004). IEEE Computer Society Press, 2004. 71-78.
- [4] Angelov S, Till S, Grefen P. Dynamic and secure B2B E-contract update management. In: Riedel J, Kearns MJ, Reiter MK, eds. Proc. of the 6th ACM Conf. on Electronic Commerce (EC). ACM Press, 2005. 19-28.
- [5] Angelov, Grefen P. The business case for B2B E-contracting. In: Janssen M, Sol HG, Wagenaar RW, eds. Proc. of the 6th Int'l Conf. on Electronic Commerce (ICEC). 2004. 31-40.

- [6] Vonk, Grefen P. Cross-Organizational transaction support for E-services in virtual enterprises. *Journal of Distributed and Parallel Databases*, 2003,14(2):137-172.
- [7] Van der Aalst WMP. Modeling and analyzing inter-organizational workflows. In: Lavagno L, Reisig W, eds. *Proc. of the Int'l Conf. on Application of Concurrency to System Design*. IEEE Computer Society Press, 1998. 262-272.
- [8] Li JQ, Fan YS, Zhou MC. Performance modeling and analysis of workflow. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics: Part A*, 2004,34(2):229-242.
- [9] Salimifard K, Wright M. Petri net-based modeling of workflow systems: An overview. *European Journal of Operational Research*, 2001,134:664-676.
- [10] Van der Aalst WMP. The application of Petri nets to workflow management. *The Journal of Circuits, Systems and Computers*, 1998, 8(1):21-66.
- [11] Van der Aalst WMP, Ter Hofstede AHM. Verification of workflow task structures: A Petri-net-based approach. *Information System*, 2000,25(1):43-69.
- [12] LI HF, Fan YS. Workflow model analysis based on time constraint Petri nets. *Journal of Software*, 2004,15(1):17-26 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/15/17.htm>
- [13] Van der Aalst WMP. Loosely coupled inter-organizational workflows: Modeling and analyzing workflows crossing organizational boundaries. *Information and Management*, 2000,37(2):67-75.
- [14] Van der Aalst WMP. Interval timed colored Petri net and their applications. In: Ajmone MM, ed. *Application and Theory of Petri Nets*. LNCS 691. Berlin: Springer-Verlag, 1993. 453-472.
- [15] Li JQ, Fan YS. A model of workflow performance analysis. *Chinese Journal of Computers*, 2003,26(5):513-523 (in Chinese with English abstract).
- [16] Li W, Zeng GZ, Wang XL. A workflow model based on timed Petri net. *Journal of Software*, 2002,13(8):1666-1671 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/13/1666.pdf>
- [17] Cui LZ, Wang HY, Yu G. Inter-Organizational workflow modeling and analysis. *Journal of System Simulation*, 2005,17(4): 782-785 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献:

- [12] 李慧芳,范玉顺.基于时间约束 Petri 网的工作流模型分析. *软件学报*,2004,15(1):17-26. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/15/17.htm>
- [15] 李建强,范玉顺.一种工作流模型的性能分析方法. *计算机学报*,2003,26(5):513-523.
- [16] 李炜,曾广周,王晓琳.一种基于时间 Petri 网的工作流模型. *软件学报*,2002,13(8):1666-1671. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/13/1666.pdf>
- [17] 崔立真,王海洋,于庚.跨组织工作流的形式化描述及分析. *系统仿真学报*,2005,17(4):782-785.



程绍武(1968 -),男,黑龙江齐齐哈尔人,博士生,主要研究领域为工作流及其仿真技术.



王刚(1963 -),男,教授,主要研究领域为企业建模,企业应用集成.



徐晓飞(1962 -),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为计算机集成制造 CIMS,分布式信息处理,数据库,管理与决策信息系统.



李全龙(1968 -),男,副教授,主要研究领域为项目管理,虚拟企业,感知网.