

一种基于时间 Petri 网的工作流模型*

李 炜¹, 曾广周², 王晓琳²

¹(北京理工大学 计算机科学与工程系,北京 100081);

²(山东大学 计算机科学与技术学院,山东 济南 250061)

E-mail: liwei236@sina.com

http://cs.sdu.edu.cn

摘要: 面向任务流和资源流并行的业务过程,讨论了一类如何通过资源流控制任务流的工作流建模问题.在时间 Petri 网的基础上提出了一种称作资源/任务网(R/T-net)的工作流概念模型,并给出了基于 R/T-net 的工作流建模过程.设置在任务模型中的资源依赖和资源期望可以有效地实现资源流对任务流的控制,而其中的资源点火规则和资源路由规则可以灵活地实现资源的协调、同步、分配和传递,因此,比仅用时间属性刻画任务转移的时间 Petri 网模型更符合诸如办公、制造、物流运输等业务过程.

关键词: 工作流;工作流建模;Petri 网;时间 Petri 网;资源/任务网

中图法分类号: TP311 文献标识码: A

workflow management is one of the most rapidly developing computer application technologies, and has been widely applied to office automation, business process reengineering (BPR) and other areas that require planning and management of workflow. According to the definition of the workflow management alliance, workflow is the whole or part of business process automation. In this process, documents, information or tasks flow according to certain process rules, realizing the coordination of work among organization members to achieve the overall business goal^[1].

Designing workflow management systems is key to workflow modeling, that is, giving an abstract representation of business processes at the concept level. Usually, business processes are defined and formalized, and the process is defined by a set of well-defined activities (or tasks) and their connections, as well as related conditions. The main modeling tools currently used are activity networks and Petri nets. Petri nets are a class of models that describe distributed, concurrent and asynchronous systems effectively. Petri nets include 4 basic elements: transition (transition), place (place), directed arc (directed arc) and token (token). Time Petri nets use time attributes to represent the start and duration of transitions^[2].

Research and practice show that workflow is essentially a business process with activity flow and resource flow in parallel. Resource flow management is a key indicator of workflow management. For example, in ERP systems, material flow, capital flow and information flow are important resource manifestations in the enterprise process. Human resources, production equipment, production tools, raw materials and intermediate products are important resource factors. When carrying out enterprise process reengineering or process optimization, the system not only ensures the smooth flow of material, capital and information, but also ensures the reliable realization of effective resources in each process link. Therefore, for activity flow and resource flow in parallel business processes, using time attributes to describe activity start and transfer time Petri net method, its modeling results cannot be令人满意.

This paper discusses the workflow modeling problem of business processes with task flow and resource flow in parallel. Section 1 proposes a resource/task net (Resource/Task net, R/T-net) model based on time Petri nets, and gives the firing rules. Section 2 gives the workflow modeling method and an example of a white wine勾兑调味流程的例子.

* 收稿日期: 2001-04-03; 修改日期: 2001-06-20

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目(Y98G07103)

作者简介: 李炜(1974 -),女,山东济南人,博士生,主要研究领域为数据仓库,数据挖掘技术,工作流管理;曾广周(1947 -),男,山东郓城人,教授,博士生导师,主要研究领域为 CSCW,工作流管理,智能计算;王晓琳(1962 -),女,山东泰安人,副教授,主要研究领域为 CSCW,工作流管理.

1 工作流与 R/T-net 模型

为了便于描述 R/T-net,下面首先给出工作流的定义,然后给出相关项的解释.

定义 1. 工作流::=Workflow_ID As 工作流模型.

工作流模型::=(工作流名称)+{(资源)}+{(任务)}

其中,

资源::= r As 资源模型

资源模型::=Type

```

Resource_name As String      //资源名称
Shared_name As String        //共享名称
Resource_Type As String      //资源类型
Role As String                //资源角色
Operation As String          //允许的操作
Existence As Boolean         //是否实际存在(true/false)
Locked As Boolean            //是否锁定(true/false)
Content As String            //资源内容描述
End Type

```

任务::= t As 任务模型

任务模型 ::= Type

```

Task_name As String          //任务名称
Dependent_Resource_Set=({ $r_{dep}$  As 资源模型},fire_rule) //资源依赖
Expected_Resource_Set=({ $r_{exp}$  As 资源模型},routing_rule) //资源期望
Function As String           //功能描述
Start_Time As Time           //开始时间
Duration As integer          //持续周期
Precedent_Task_Set={ $t_{pre}$  As 任务模型} //前导任务
Successive_Task_Set={ $t_{suc}$  As 任务模型} //后继任务
Priority As Integer           //后继任务之间的启动顺序
End Type

```

资源类型按照属性划分,例如人力、物质、资金、数据、文本以及多媒体文档等,每种类型都可以按照问题域细分成若干子类,用唯一的编码标识,按照面向对象的方法进行类管理.属性 Existence 描述资源的实际存在性.在企业流程中,绝大多数资源对于任务来说都是实际存在的,但也有少数资源可能由于各种原因使得任务开始时不到位,或者随着流程的进行而被消耗掉,因此对资源的存在性必须加以标识.从适用范围来看,资源又可以分成任务共享资源和任务私有资源两种.在工作流程中,任务可以在两个级别上共享资源:一个是对象级同名共享,例如公文流中被传递的某个文档(文件),企业中央数据库中被使用和修改的某个数据段等;另一个是(子)类级同名共享,例如齿轮加工流程中逐级传递的齿轮毛坯、粗锻齿轮、精锻齿轮,又如纺织流程中逐级传递的原纱、粗纱、细纱等,尽管它们随着流程的进行不断地发生名称的变更,但变化的名称仅仅代表了该类资源的一个实例.任务共享资源具有任务之间的可流动(可传递)属性,可流动的资源伴随任务的发生和执行形成资源流.任务私有资源是一类位置不变的资源,例如某一加工工位上的机床、公文流转中用于编辑文档的计算机、反应罐中的循环液等.为了避免工作流程中共享资源对象的使用冲突以及可能发生的意外流转,对于正在被某个任务使用的共享资源对象必须锁定(locked),资源对象一旦被某个任务锁定,则对于另一些任务来说是不能用的,尽管在流程设计中可能对任务指定了这些资源需求.资源角色指出资源在系统中的受操作属性,例如可复制、可重用、可修改、可损耗/消耗、可再生、可创建等,以便于规划资源的考核指标.资源可接受的操作是一个与资源角色及应用领域相关的定义,例如在离散加工流程中,可以是切削、刨磨和装配,而在反应式流程中,可能是配方、催化和裂变等.资源的其他属性均在 Content 中进行描述.

在任务模型中,任务的资源依赖是指为了启动和执行任务所必须的资源集合,包括任务私有资源依赖(预分配资源或作为资源期望的一部分通过自身活动产生的新资源)和传入资源依赖.在资源依赖齐备时,任务是否启动由两个因素共同决定:一个是建立在资源集合 $\{r_{dep}\}$ 上的点火操作(fire-rule),另一个是预先设置的任务开始时间(start-time).资源的点火操作可以自动进行,也可以人工启动,操作类型包括资源的合并、分解及置入顺序的协调(优先、同步、解锁)等,每种成功的操作都产生一个真值(使资源达到可用状态).资源期望用于预计任务对资源的加工结果,即期望通过任务的成功实施,产生哪些资源,消耗哪些资源,变化哪些资源,传出哪些资源等.因此,资源期望是业务流程设计和重组的一个重要经济指标.资源期望也包括两部分,即任务私有资源期望(可能是就地输出的资源,也可能是需要转化为自身资源依赖、重新输入的资源)和需要传给下一级任务的资源(传出资源期望).传出资源期望按照路由规则(routing-rule)分配给相应的后继任务.任务的前驱和后继特征刻画流程图中的任务流.属性 Priority 用于说明后继任务之间的启动顺序,例如优先、并发等,以避免点火冲突.

定义 2. 给定任务集 $T=\{t_1,t_2,\dots,t_n\}$ 和某个资源 r .对于任一任务 $t_i \in T$,若 $t_i.r.existence=true \wedge t_i.r.Locked=true$,则 r 对 t_i 是可用的,并且关于所有的 $j \neq i, r$ 对 $t_j \in T$,是不可用的.

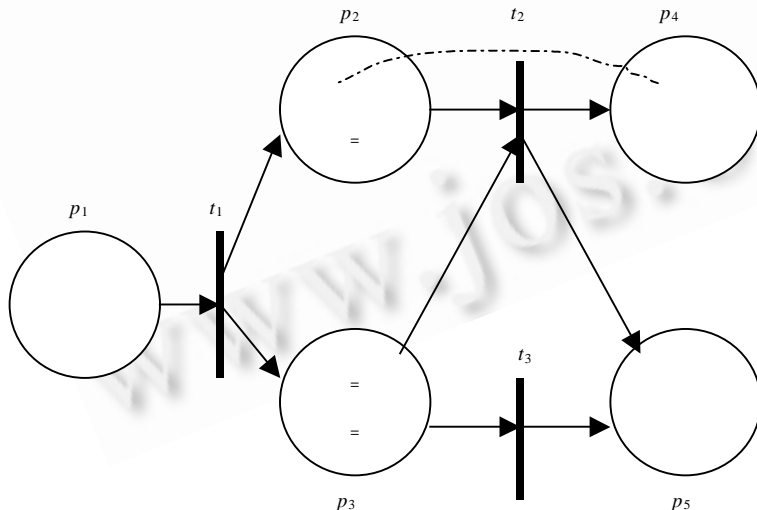
定义 3. 若资源 r 是可用的,则称其状态值为真,否则为假.

用令牌标记资源.由于资源被区分为任务共享资源和任务私有资源,所以令牌又可以区分为共享令牌和私有令牌.记令牌的调度规则为 schedule.令牌调度规则是一个与 fire-rule 相关联的操作,它根据任务对资源的使用要求设定,例如可以是 FIFO(先到先服务)、LIFO(后到先服务)或同步等等.

推论 1. 当且仅当被某个令牌标记的资源可用时,该令牌的值为真,否则为假.

定义 4. 记位置为 p ,转移为 t .对于任一位置 p ,

- (1) 若 (p,t) 成立,则称 p 是 t 的前驱位置, t 是 p 的后继任务.序偶 (p,\wedge) 表示 p 没有后继任务(没有后继任务的位置称作流程终点).
- (2) 若 (t,p) 成立,则称 p 是 t 的后继位置, t 是 p 的前驱任务.序偶 (\wedge,p) 表示 p 没有前驱任务(没有前驱任务的位置称作流程起点).
- (3) 若 $(t_i,p) \wedge (p,t_j)$ 成立,则称 t_i 是 t_j 的前驱任务, t_j 是 t_i 的后继任务.



---Input resource dependence ---Output resource expectance
 ---Private resource dependence ---Private resource expectance
 传入资源依赖, 传出资源期望, 私有资源依赖, 私有资源期望.

Fig.1 Illustration of the R/T-net
 图 1 R/T-net 的符号图示

为了讨论方便,本文约定:对于任一任务 t ,用传入令牌表示传入资源依赖,记为 $r_{token-in}$ (用符号 \rightarrow 表示),并且标记在其前驱位置中;用传出令牌表示传出资源期望,记为 $r_{token-out}$ (用符号 \leftarrow 表示),并且标记在其后继位置中.记 t 的私有资源依赖令牌为 $r_{token-dep}$ \ast (用符号 \ast 表示),并且置于其前驱位置中,记 t 的私有资源期望令牌为 $r_{token-exp}$ \ast (用符号 \ast 表示),并且置于其后继位置中,如图 1 所示.

在上述关于任务模型的说明中已经指出,某个任务 t 新产生的私有资源期望集合中可能包含有转化为自身私有资源依赖的部分.换句话说,在任务的输出中,可能含有既是私有资

源期望又是私有资源依赖的双重身份的私有资源.按照上述约定,这些具有双重身份的私有资源,一方面,将作为任务的输出资源以令牌 $r_{\text{token-exp}}$ 本的形式被标记在 t 的后继位置中;另一方面,它们又必须作为任务的输入资源以令牌 $r_{\text{token-dep}}$ 本的形式出现在 t 的前驱位置中.对于这种情况,本文称 $r_{\text{token-dep}}$ 本为 $r_{\text{token-exp}}$ 本的令牌镜像,并用虚线连接两个相应的令牌,如图 1 所示.

根据定义 4,容易得出下面的结论:

推论 2. 若 $(t_i, p) \wedge (p, t_j)$ 成立, $i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n$, 并且记 t_i 的传出资源的令牌集合为 $\{r_{\text{token-out}}\}_i, t_j$ 的传入资源的令牌集合为 $\{r_{\text{token-in}}\}_j$, 则在位置 p 中, 下述关系成立:

$$\{r_{\text{token-in}}\}_1 \cup \{r_{\text{token-in}}\}_2 \cup \dots \cup \{r_{\text{token-in}}\}_n \equiv \{r_{\text{token-out}}\}_1 \cup \{r_{\text{token-out}}\}_2 \cup \dots \cup \{r_{\text{token-out}}\}_m. \quad (1)$$

推论 2 指出, 如果某个位置 p 既是一些任务的输出位置, 同时又是另一些任务的输入位置, 那么, 位置 p 中的和 尽管在标记前驱任务的传出资源和标记后继任务的传入资源时, 充当了不同的角色, 但实际上可能标记的是同一个资源. 因此, 上述约定的令牌标记方法将会造成同一资源的重复标记(用符号 $=$ 表示, 如图 1 所示). 为了避免重复, 在不致混淆的情况下, 可以采用统一的符号.

推论 3.

(1) 若任务 t 有 n 个输入位置 p_j , 相应的传入令牌集合为 $\{r_{\text{token-in}}\}_{j=1, 2, \dots, n}$, 任务 t 的私有资源依赖令牌集合为 $\{r_{\text{token-dep}}\}$, 则下述关系成立:

$$\text{由} \{r_{\text{token-in}}\}_1 \cup \{r_{\text{token-in}}\}_2 \cup \dots \cup \{r_{\text{token-in}}\}_n \cup \{r_{\text{token-dep}}\} \text{标记的资源集合} \equiv \{r_{\text{dep}}\}. \quad (2)$$

(2) 若任务 t 有 n 个输出位置 p_j , 相应的传出令牌集合为 $\{r_{\text{token-out}}\}_{j=1, 2, \dots, n}$, 任务 t 的私有资源期望令牌集合为 $\{r_{\text{token-exp}}\}$, 则下述关系成立:

$$\text{由} \{r_{\text{token-out}}\}_1 \cup \{r_{\text{token-out}}\}_2 \cup \dots \cup \{r_{\text{token-out}}\}_n \cup \{r_{\text{token-exp}}\} \text{标记的资源集合} \equiv \{r_{\text{exp}}\}_t. \quad (3)$$

根据以上分析和解释, 并采用与上文一致的记法, 下面给出 R/T-net 的正式定义.

定义 5. R/T-net = $\{R, P, T, R_{\text{token}}\}$.

其中, $R = \{r_1, r_2, \dots\}$ 是工作流程中所有资源的集合; $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ 是位置集合; $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ 是转移(任务)集合; $R_{\text{token}} = R_{\text{token-dep}} \cup R_{\text{token-exp}} \cup R_{\text{token-in}} \cup R_{\text{token-out}} = \{r_{\text{token-dep}1}, r_{\text{token-dep}2}, \dots\} \cup \{r_{\text{token-exp}1}, r_{\text{token-exp}2}, \dots\} \cup \{r_{\text{in}1}, r_{\text{in}2}, \dots\} \cup \{r_{\text{token-out}1}, r_{\text{token-out}2}, \dots\}$ 是所有令牌的集合.

为了便于描述转移点火规则, 下面再给出前资源条件和后资源条件的定义.

定义 6. 对于任一任务 t ,

(1) 设有向弧为 (p, t) . 记 $w_{\text{token-in}} = (\{r_{\text{token-in}}\}, \text{OP})$, 其中 $r_{\text{token-in}}$ 是位置 p 中的传入令牌, OP 表示施加于传入令牌集合 $\{r_{\text{token-in}}\}$ 上的逻辑运算操作, 称 $w_{\text{token-in}}$ 是任务 t 来自位置 p 的前资源条件.

(2) 设有向弧为 (t, p) . 记 $w_{\text{token-out}} = (\{r_{\text{token-out}}\}, \text{OP})$, 其中 $r_{\text{token-out}}$ 是位置 p 中的传出令牌, OP 表示施加于传出令牌集合 $\{r_{\text{token-out}}\}$ 上的逻辑运算操作, 称 $w_{\text{token-out}}$ 是任务 t 流向位置 p 的后资源条件.

转移点火规则:

(1) 设某转移 t 的输入位置分别为 $p_{\text{in}1}, p_{\text{in}2}, \dots$, 若前资源条件 $w_{\text{token-in}1}, w_{\text{token-in}2}, \dots$ 均为真, 并且 t 的所有私有资源依赖令牌 $r_{\text{token-dep}1}, r_{\text{token-dep}2}, \dots$ 均为真, 则 t 执行资源点火规则 fire-rule 操作. 若 fire-rule 操作结果为真, 则准备点火.

(2) 对除 t 之外的其他所有转移, 锁定分别使 $w_{\text{token-in}1}, w_{\text{token-in}2}, \dots$ 为真的令牌(标记为假).

(3) 在设定的点火时刻激发 t .

(4) 任务 t 在规定的持续时间内执行.

(5) 若任务 t 结束, 则确定所有私有资源期望令牌 $r_{\text{token-exp}1}, r_{\text{token-exp}2}, \dots$ 是否均为真; 依照 routing-rule, 确认后资源条件 $w_{\text{token-out}1}, w_{\text{token-out}2}, \dots$ 是否均为真; 若 $w_{\text{token-out}1}, w_{\text{token-out}2}, \dots$ 均为真并且 $r_{\text{token-exp}1}, r_{\text{token-exp}2}, \dots$ 均为真, 则

对于 t 消耗或就地输出的资源, 标记其属性 Existence 为 false, 对于 t 新产生的资源(传出资源和自身资源依赖), 标记其属性 Existence 为 true;

对除 t 之外的其他所有转移, 解锁步骤 2 中锁定的那些令牌(标记为真);

若私有资源期望令牌集合 $\{r_{token-exp}\}$ 中含有私有资源依赖的成分,则使镜像 $r_{token-dep}$ 为真; 否则对任务 t 进行故障恢复或人工确定流程是否继续进行.

2 基于 R/T-net 的工作流建模过程

基于 R/T-net 的工作流建模过程包括 3 个要素,即确定流程中的所有资源、所有任务和每个任务的资源依赖/资源期望集合.根据定义 5,基于 R/T-net 的工作流建模过程包括下述几个主要步骤:

步骤 1. 按照定义 1 中的资源模型对业务流程中的所有资源作出需求分析、归类和描述.对每个(类)资源对象分配相应的令牌.

步骤 2. 按照定义 1 中的任务模型对业务过程进行任务分解和描述,做任务(转移)关联图.对图中的每个任务指定私有/传入资源依赖和私有/传出资源期望,并做资源-令牌对照表.

步骤 3. 按照式(1)~(3),对每个任务检查资源和令牌表示之间的一致性和完备性,检查资源点火规则 $fire_rule$ 和资源路由规则 $routing_rule$ 的适用性.

步骤 4. 在任务关联图上对每个任务补充前驱/后继位置,并按照本文约定对每个位置作出任务的私有资源依赖和私有资源期望的令牌标记.

步骤 5. 按照定义 3,指定流程的始点和终点,对流程起点作初始传入令牌标记,形成 R/T-net 的初步设计方案.

步骤 6. 按照转移点火规则对 R/T-net 方案进行业务流程的系统仿真(手工或自动),对设计结果作出分析和评价,进行再设计和优化,直至满意为止.

图 2 是一个白酒勾兑调味工作流程的例子,其中,资源点火规则 $fire-rule$ 是成分酒的正确置入顺序,资源路由规则 $routing-rule$ 按照勾兑调味流程设定.图中略去了私有资源的表示. t_1 表示勾兑任务, t_2 表示调味任务.位置 p_1 对应半成品酒,按照工艺流程,需要依比例选择数种不同的半成品酒按顺序进行勾兑,所有半成品酒的“与”运算构成勾兑任务的前资源条件. p_2 对应基础酒,基础酒是半成品酒的混合液,它既是勾兑任务的传出资源期望,同时又是调味任务的传入资源依赖. p_3 对应不同比例的调味酒,所有调味酒与基础酒共同构成调味任务的前资源条件,调味酒按顺序置入基础酒. p_4 对应合格成品酒, p_5 对应不合格酒.

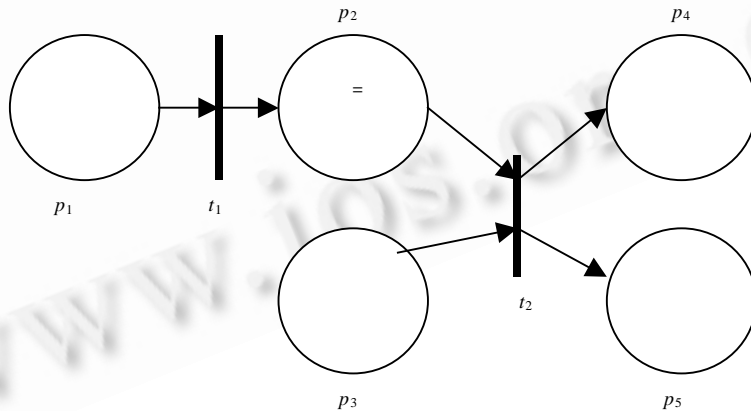


Fig.2 The mixing and flavoring process of liquor
图 2 白酒勾兑调味流程

3 结束语

本文面向任务流和资源流并行的业务过程,在时间 Petri 网模型的基础上,提出了资源/任务网(R/T-net)的概念,并给出了基于 R/T-net 的工作流建模方法.R/T-net 在工作流建模方面具有下述主要特点:(1) 资源流控制工作流的进程.众所周知,在工作流管理系统中,资源流代表了业务流程的一个重要效益指标,因此用资源流控制任

务流,符合业务流程实际,较之时间 Petri 网模型,更能体现 workflow 管理的特点。(2) 在任务模型中设置的资源依赖和资源期望,以及对其中包含的任务共享资源和任务私有资源的划分,不仅可以有效地实现任务转移对资源条件满足性的检查,而且易于按照资源流实现模型的仿真。(3) 在资源依赖中设置的资源点火规则和在资源期望中设置的路由规则,为实现资源之间的协调、同步、分配、传递等控制提供了灵活的挂接机制,尽管因篇幅所限,本文并未给出这些机制的描述和实现方法。(4) 当流程变得复杂时,可以依照资源的类组织结构和资源可接受的操作,分层设计 R/T-net 图,就像设计分层的数据流图那样,实现抽象和信息隐藏,从而增加 R/T-net 图的可读性。实践中我们开发了一个 R/T-net 编辑器,并应用上述模型于制鞋业及酿酒业的工作流程设计之中,均获得了成功。目前我们正在进行的主要工作是基于组件对象模型和 Web 技术构建 R/T-net 仿真系统。

References:

- [1] Fan, Yu-shun, Wu, Cheng. Research on workflow management technology and current and future products. *Computer Integrated Manufacturing System*, 2000,6(1):1~7 (in Chinese).
- [2] Van der Aalst, W.M.P., Van Hee, K.M. Business process redesign: a Petri-net-based approach. *Computers in Industry*, 1996,29(1,2):15~26.

附中文参考文献:

- [1] 范玉顺,吴澄.工作流管理技术研究与产品现状及发展趋势. *计算机集成制造系统*,2000,6(1):1~7.

A Workflow Model Based on Timed Petri Net*

LI Wei¹, ZENG Guang-zhou², WANG Xiao-lin²

¹(Department of Computer Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China);

²(College of Computer Science and Technology, Shandong University, Ji'nan 250061, China)

E-mail: liwei236@sina.com

<http://cs.sdu.edu.cn>

Abstract: How to modeling a business process is discussed in this paper, in which the task stream and the resource stream are concurrently occurred. A Resource/Task net (R/T-net) based on the timed Petri net and the modeling process by using R/T-net for workflow is proposed. The resource dependence and expectancy set in task model can be used to control the task transition, while the fire-rule and the routing-rule can be used to control cooperation, synchronism, assignment and transition of resource, so that it is more powerful than the Petri net in the workflow modeling, such as the office automation, the product manufacturing, the material transaction, and so on.

Key words: workflow; workflow modeling; Petri net; timed Petri net; resource /task net

* Received April 3, 2001; accepted June 20, 2001

Supported by the Natural Science Foundation of Shandong Province of China under Grant No.Y98G07103