

智能柔性 workflow 建模方法研究与设计*

申利民¹, 王磊¹, 牛晓云², 李锋¹

(1. 燕山大学 信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 石家庄铁道学院 计算机系, 石家庄 050031)

摘要: 为了提高工作流的智能性和不确定性的变化的响应能力, 提出了一种基于自主计算实体规则的智能柔性 workflow 模型。该模型通过引入自主计算实体以及自主计算实体规则实现流程的智能性, 用柔性活动对不确定活动进行封装, 并用自主计算实体规则来约束柔性活动的具体化以及属性的更改, 并设计了一个高效的流程动态组合更改算法, 实现了柔性活动的动态组合更改。最后, 通过一个具体的实例说明了该模型能够显著提高工作流的主动性和智能性。

关键词: 智能柔性 workflow; 自主计算实体规则; 智能性; 柔性活动

中图分类号: TP391 文献标志码: A 文章编号: 1001-3695(2009)02-0595-03

Research and design of intelligent and flexible workflow modeling method

SHEN Li-min¹, WANG Lei¹, NIU Xiao-yun², LI Feng¹

(1. College of Information Science & Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao Hebei 066004, China; 2. Dept. of Computer, Shijiazhuang Railway Institute, Shijiazhuang 050031, China)

Abstract: To improve the intelligence of flexible workflow and its responsiveness to uncertainties, this paper proposed an intelligent and flexible workflow model based on autonomic computing object rule (ACOR). The model realized the intelligence by using the autonomic computing object (ACO) and ACOR. The model encapsulated uncertainties in a flexible activity and using ACOR restrained the specification of flexible activities as well as the attributes' changing. Then proposed an efficient and dynamic algorithm to implement the flexible activities. Finally, validated the proposed model by a specific case, which shows that the intelligent and flexible workflow model could remarkably improve the initiative and intelligence of workflow.

Key words: intelligent and flexible workflow; autonomic computing object rule; intelligence; flexible activities

工作流 (workflow) 是经营过程的全部或部分自动化, 工作流技术为企业更好地实现过程的组织管理与流程优化提供了先进的手段, 但随着企业环境的持续变化和企业目标的不断调整, 提高工作流的柔性也随之成为工作流研究领域的热点问题之一。当前柔性工作流的研究主要偏重于柔性工作流的实现技术, 更多地体现为对变化的被动灵活反应, 而在动态变化竞争环境中, 缺乏随机应变的能力, 即柔性工作流的智能性有待提高。本文提出了一种基于自主计算实体规则的智能柔性 workflow 模型 (autonomic computing object rule-based flexible and intelligent workflow model, ACOR_FIW)。该模型对不确定因素进行封装, 引入自主计算实体以及自主计算实体规则, 通过自主计算实体之间协作, 在自主计算实体规则约束下达到对不确定活动的智能组合, 并对活动属性动态更改。规则可根据需要进行扩展。

1 ACOR_FIW 模型

在 ACOR_FIW 中, 活动可以划分为两种: 一种是在流程建模阶段能给出完整定义的普通活动; 另一种是柔性活动, 这种活动代表一个活动或子流程, 其特点是无法事先给出完整定义。ACOR_FIW 形式化定义如下:

定义 1 $AO = (Mo, A, P, Ex, K, Tp)$ 自主计算实体是基于

自主计算技术, 嵌入在工作流活动中的智能实体。它是一个六元组。其中 Mo, A, P 和 Ex 分别是监控、分析、规划和执行规则; K 是自主实体共享知识集合, 是实现自主实体智能性的基础; $Tp = (S, Ef, Oc, Ma)$ 是自主实体接触管理器, S 是感知器, 实现对管理资源的状态检测和信息采集, Ef 是使能器, 实现对管理资源的操作, Oc 是协调器, 实现与其他自主元的通信与协调, Ma 是人工管理器。

定义 2 自主计算实体规则是指 workflow 中柔性活动具体化以及活动属性动态更改时必须遵守的规则, 它由嵌入到 workflow 活动中的自主计算实体解析。用 AOC 表示自主计算实体规则。AOC = {SCR, TCR}。其中: SCR 表示动态选取组合自主计算实体规则; TCR 表示活动属性动态变化自主计算实体规则。

定义 3 $ACOR_FIW = \{ver, D, A, E, AO, E\}$ 。其中: Ver 为智能柔性 workflow 的唯一版本号; D 为动态 workflow 的一般信息, 如对流程的基本描述、流程的创建日期等, D 可表示为一个多元组: $D = \{date, description, \dots\}$; A 为流程中的活动集合; AO 是嵌入到每个活动的自主计算实体的集合。

定义 4 工作流活动 $a_i = \{ID, name, type_i, rul_i, Ex_A, ao_i\}$ 。其中: ID 为活动的唯一编号; name 为活动的名称; type 为活动的类型, $type_i \in \{general\ activity, flexible\ activity\}$, 当 $type_i = general\ activity$ 时, rul_i 为空, 当 $type_i = flexible\ activity$ 时, rul_i 表示柔性活动具体化时必须遵守的自主计算实体规

则,它可以表示为一个二元组 $rul_i = \{AP_i, SCR_i\}$ 。其中:

a) AP_i 为在柔性活动具体化过程中可选取的活动组成的集合, $AP_i = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, 称为活动池, 它可以在流程实例运行过程中动态地增减。

b) SCR_i 动态选取组合自主计算实体规则集合, $SCR_i = \{scr_1, scr_2, \dots, scr_n\}$ 。为了形式化描述每一条选取规则, 本文引入如下推论:

推论 1 关系 $a \rightarrow b$ 称为元关系, 当且仅当不存在 $c_1, c_2, \dots, c_n (n \geq N)$, 使得传递关系 $a \rightarrow c_1 \rightarrow c_2 \rightarrow \dots \rightarrow c_n \rightarrow b$ 成立。

推论 2 规则集 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ 是精简规则集, 当且仅当 S 中每条规则都是元关系。

SCR_i 是一个精简规则集。每条规则形如 $a \rightarrow b$ 。其中 a 和 b 表示活动池中的某两个活动, 该规则有两方面意思: (a) 在柔性活动展开时, 若选取了 a 则必须选择 b ; (b) 在安排活动的先后顺序时, a 是 b 的前驱, b 是 a 的后继。

$Ex_A = \{N_A_i, V_A_i | i = 1, 2, \dots, n\}$ 为活动可扩展的属性集合。其中: N_A 为属性的名称; V_A 为属性的值。通过定义活动的可扩展属性, 就可以对活动的属性进行描述, 如生产过程中工人工作时间、温度控制等, 这些属性是动态可扩展的属性值是动态可变化的; ao_i 为嵌入到活动中的自主计算实体, 它可以与其他活动中的实体进行协作, 通过实体与实体之间的协作来实现变化的智能性。

E 是工作流的自主变化规则集合, 它可以表示为一个二元组 $E = \{TAP_i, TCR_i\}$ 。其中: a) TAP_i 为在柔性活动具体化过程中被动态更改属性的活动组成的集合, $TAP_i = \{a_1, a_2, \dots, a_j\}$, 它可以在流程实例运行过程中被动态选择。b) TCR_i 为活动属性动态变化自主计算实体规则集合, $TCR_i = \{tcr_1, tcr_2, \dots, tcr_j\}$ 。

2 AOC 构造

2.1 自主计算实体的知识表达及推理

自主计算实体的自主计算依赖于知识的表达形式。自主实体工作的实质就是根据 workflow 运行情况进行分析和规划, 对柔性元素进行操作, 包括元素的增加、删除、属性更改、组合等, 实现工作流的智能柔性。

推理知识是知识库的核心。考虑到柔性工作流是一个动态变化过程, 自主计算实体的知识往往具有不确定性。本文使用 C-F 模型(基于可信度表示的不确定性推理方法)来对推理知识进行描述, 其一般形式为: $\text{if } E \text{ then } H(\text{CF}(H|E))$ 。在 C-F 模型中, 证据的不确定性也是用可信度因子表示的证据 E 的可信度因子一般在 $[0, 1]$ 上取值。若证据肯定为真时, 则 $\text{CF}(E) = 1$; 若证据肯定为假时, 则 $\text{CF}(E) = 0$, 否则, $0 < \text{CF}(E) < 1$ 。

用 C-F 模型进行知识表达时, 要求条件彼此独立, 而自主实体是对柔性工作流相关多个参数分析并确定柔性操作, E_i 之间相互依赖。为此引入加权因子, 基于加权因子的不确定性推理为: $\text{if } E_1(w_1) \text{ and } E_2(w_2) \text{ and } \dots \text{ and } E_n(w_n) \text{ then } H(\text{CF}(H|E))$ 。其中: w_i 是加权因子; θ 是阈值; 可信度 $\text{CF} = \sum_{i=1}^n w_i \times \text{CF}(E_i)$, $\text{CF}(H) = \text{CF}(H|E) \times \text{CF}(E)$ 。

2.2 动态选取组合自主计算实体规则的构造

对于活动池中的任意两个活动 a 和 b , 它们之间的关系主要有下面几种:

a) a 与 b 无关。表示它们不属于同一个子流程, 因此转换

成自主计算实体规则为空。

b) a 与 b 属于同一个子流程, 且 a 是 b 的前驱, 记为 $a \rightarrow b$ (自主计算实体规则为: $\text{if } E \text{ 选择 } a \text{ then } H \text{ 选择 } b \text{ 为 } a \text{ 的后继}$)。

c) a 与 b 属于同一个子流程, 且 b 是 a 的后继, 记为 $b \rightarrow a$ 。自主计算实体规则为: $\text{if } E \text{ 选择 } b \text{ then } H \text{ 选择 } a \text{ 为 } b \text{ 的后继}$)。

d) a 与 b 属于同一个子流程, a 与 b 只需相邻发生即可满足要求, 记为 $a \rightarrow b$ 。自主计算实体规则为: $\text{if } E \text{ (选择 } a \text{ 或 } b \text{) then } H \text{ (同时选择 } a \text{ 和 } b \text{)}$ 。

对于 a) 不予考虑, 对于 d) 可以将其转换成形如 b) 或 c) 的关系。转换方法如下:

对活动 a 和 b , 且它们具有关系 $a \rightarrow b$ 将两个活动封装成一个活动, 记为 ab , 这个新活动 ab 的前驱是 a 的前驱和 b 的前驱的集合, 它的后继是 a 的后继和 b 的后继的集合。其意义是, 只有当 a 和 b 的前驱都完成时, 才可开始执行活动 ab , 当 ab 执行完后, 就可执行 a 和 b 的后继。

这样就可以得到一个关系集合 $A_RS = \{AS, RS\}$ 。其中 AS 是关系中活动的集合, 它有两种: 形如 a 的元活动和形如 ab 的组合活动。 RS 是一个元关系集合 $RS = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ 。其中每个元素 r_i 都形如 $a \rightarrow b$ 。显然 RS 中的每个关系都是元关系, 因此 A_RS 就是需要的 SCR 规则集合。

2.3 活动属性动态变化自主计算实体规则构造

活动可扩展属性 Ex_A 的属性值是可变化的, 变化是动态的、不确定的, 随着流程运行实例中输入信息项的值的不同而动态变化。本模型通过自主计算实体规则进行匹配动态地实现 Ex_A 的更改。

定义 5 业务信息项是流程发起时必须输入的参数以及特性, 简称信息项, 如定单产品、定单数量等。信息项用 X_i 来表示, 信息项的集合记为 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 。

定义 6 形如: 定单数量 > 100 、物品单价 $= 20$ 等这些不可再分的规则称为元规则, 记为 M_TRC 。

活动属性动态变化自主计算实体规则主要分成以下两种:

a) M_TRC 之间没有联系是相互独立的, 记为 A_M_TRC 。一般表达形式为: $\text{if } E_1 \text{ and } E_2 \text{ and } \dots \text{ and } E_n \text{ then } H \text{ (属性的更改)}$, 或者为 $\text{if } E_1 \text{ or } E_2 \text{ or } \dots \text{ or } E_n \text{ then } H \text{ (属性的更改)}$, 或者为两者混合。其中 E 为独立的 M_TRC 。

b) M_TRC 之间相互有联系, 记为 R_M_TRC 。一般表达形式为: $\text{if } E_1(w_1) \text{ and } E_2(w_2) \text{ and } \dots \text{ and } E_n(w_n) \text{ then } H(\theta)$ (属性的更改), 或者为 $\text{if } E_1(w_1) \text{ or } E_2(w_2) \text{ or } \dots \text{ or } E_n(w_n) \text{ then } H(\theta)$ (属性的更改), 或者为两者混合。其中: w_i 为权值; θ 为阈值。

因此活动属性动态变化自主计算实体规则是 A_M_TRC 、 R_M_TRC 的集合记为: $\text{trc}_i = \{A_M_TRC, R_M_TRC\}$ 。这些规则通过规则设计器进行修改, 并且可以根据需要动态添加。

3 流程柔性活动动态组合更改

动态工作流在定义时流程并不是完整的, 需要在流程运行过程中对柔性活动具体化, 使其成为一个完整的流程, 并且在组合的同时对活动属性进行动态更改。

根据以上过程下面介绍一个高效的动态组合—更改的算法($\text{auto_select_alter_activity}$)。

设活动池表示为 $AP = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, 从中选取的活动。设活动选取组合规则集 SCR 可以表示为 $SCR = \{scr_1, scr_2, \dots,$

$scr_n\}$ 。活动属性动态变化规则可以表示为 $TCR = \{ tcr_1, tcr_2, \dots, tcr_j \}$ 。

算法首先根据 SCR 将活动池中 AP 的活动分成若干个子集的集合。其中每个集合都是一个连通图。假设柔性活动中第一个节点为 a_select , 那么在集合中找到包含 a_select 节点的连通图, 显然这样的连通图只有一个, 它就是所需要的子流程图。然后根据连通图中节点的集合对工作流的自主变化规则集合 E 进行搜索, 找到需要变化的属性进行更改。算法描述如下:

输入 子流程图 $G = (V, E)$, SRC, TRC。其中: $E = null$; $V = \{ \text{开始, 结束} \}$ AP。

输出 按照逻辑顺序组成的子流程图。

a) 对规则集合 SCR 中的每一个规则, 它形如 $a_i \rightarrow a_j$, 作一条从 a_i 到 a_j 的连线。

b) 从图中找出各个连通图, 这样, 活动池中的活动就被进一步分成了一组连通图的节点集的集合。假设这一组连通图表示为: $GS = \{ gs_1, gs_2, \dots, gs_n \}$ 。其中 $gs_i = \{ v_i, e_i \}$, 它们满足如下关系: $v_i \rightarrow v_j = null, 1 \leq i, j \leq n; e_i \rightarrow e_j = null, 1 \leq i, j \leq n$ 。

c) 在 GS 中查找包含 a_select 的连通图 $gs_k = \{ v_k, e_k \}$ 。

d) 根据连通图中的节点集合, 遍历 E 对活动属性进行更改。算法描述如下:

```

设  $v_k$  的个数为  $k$ 
for( int  $i=0$ ;  $i < k$ ;  $i++$ )
{
    if(  $v_i \in TAP \&\& TAP \in E$  )
    {
        Extract  $TCR_i$  where  $TAP_i = v_i$ 
        bool suc =  $ao_i$  analyze  $TCR_i$ 
        if( suc ) then
        {
            Update  $Ex\_A$ ;
        }
    }
}
    
```

e) 对 gs_k 中的活动集合 $v_k = \{ v_1, v_2, \dots, v_n \}$, 对于其中每一个活动 v_i , 若它的入度为 0, 作一条有向线开始, v_i ; 若它的出度为 0, 作一条有向线结束, 这样就得到一个新的连通图, 该连通图就是需要的子流程, 并且这个子流程中的节点的属性根据规则进行了更改。

4 实例建模

本章以一个钢铁公司的船板生产全过程为例进行流程的建模。对于流程只知道其大体的框架以及所涉及的某些活动, 如订单处理、审核、制订生产计划、生产等; 一些重要的活动如: 审核、生产, 事先无法给出完整的定义, 这是因为根据不同的订单有不同的审核、生产方案, 它们受到生产物品、订单数量等的影响。因此给整个流程建模时无法得到子流程审核生产的详细定义, 并且生产中的活动属性是不固定的, 只能随着流程运行具体化这个子流程并对属性进行动态的更改。流程图如图 1 所示。



图 1 某钢铁企业船板生产流程

图 1 为某钢铁公司船板生产流程。设某订单的内容为: 产品为 12#船板, 材料为铁矿石, 订单的数量为 12 000 t, 企业处理订单的能力为 10 000 t/月, 工人工作时间为 8 h/d。在图中有两个柔性活动, 下面以生产为例进行说明。

a) 活动池中可选活动有: a_1 , 生产设计; a_2 , 材料定额; a_3 , 炼钢; a_4 , 理化检验; a_5 , 轧钢 1; a_6 , 轧钢 2; a_7 , 热处理。

b) SCR 中存在如表 1 所示的规则。

表 1 生产的动态组合规则 (SCR)

自主计算实体规则	备注
$a_1 \rightarrow a_2$	$E_1 =$ 选择活动 $a_1, H_1 =$ 同时选择活动 a_2 为 a_1 的后继活动
$a_2 \rightarrow a_3$	$E_2 =$ 选择活动 $a_2, H_1 =$ 同时选择活动 a_3 为 a_2 的后继活动
$a_3 \rightarrow a_4$	$E_3 =$ 选择活动 $a_3, H_3 =$ 同时选择活动 a_4 为 a_3 的后继活动
$a_4 \rightarrow a_5$	$E_4 =$ 选择活动 $a_4, H_4 =$ 同时选择活动 a_5 为 a_4 的后继活动
$a_4 \rightarrow a_6$	$E_5 =$ 选择活动 $a_4, H_5 =$ 同时选择活动 a_6 为 a_4 的后继活动
$a_5 \rightarrow a_7$	$E_6 =$ 选择活动 $a_5, H_6 =$ 同时选择活动 a_7 为 a_5 的后继活动
$a_6 \rightarrow a_7$	$E_7 =$ 选择活动 $a_6, H_7 =$ 同时选择活动 a_7 为 a_6 的后继活动

c) TCR 中存在如表 2 所示的规则。

表 2 活动属性动态变化规则 (TCR)

自主计算实体规则	备注
tcr_1 if(E_8) then $E_9(1)$	$E_8 =$ 订单数量 $> 10\ 000, E_9 =$ 生产能力不足 $CF(E_8) = 0.9$, 经过计算得到 $CF(E_9) = 0.9$
tcr_2 if $E_9(0.7)$ and $E_{10}(0.4)$ then $H_8(0.9, 0.85)$	$E_{10} =$ 设备利用率 $< 90\%, CF(E_{10}) = 0.90,$ $H_8 =$ 轧钢 1 工人加班工作时间为 10 h/d
tcr_3 if $E_9(0.6)$ and $E_{11}(0.4)$ and $E_{12}(0.2)$ then $H_9(0.9, 0.85)$	$E_{11} =$ 设备利用率 $> 90\%, CF(E_{11}) = 0.95,$ $E_{12} =$ 材料充足, $CF(E_{12}) = 0.95, H_8 =$ 轧钢 2 工人加班工作时间为 10 h/d
tcr_4 if E_{13} then H_{10}	$E_{13} =$ 产品为 12#船板, $H_{10} =$ 热处理温度为 200 ~ 300

当下达生产计划后, 经过 auto_select_alter_activity 算法进行推理运算得到子流程, 如图 2 所示。

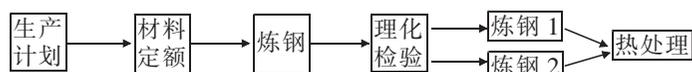


图 2 运算后生产环节的流程图

得到子流程后对活动的可扩展属性进行更改, 订单数量为 12 000 $> 10\ 000$ tcr_1 成立, 自主计算实体向轧钢 1 的自主计算实体发出请求, 得到车间设备的利用率大于 90%、原材料充足等信息, 因此 E_9, E_{11}, E_{12} 均成立。规则匹配如下:

$CF(E) = w_8 CF(E_8) + w_{11} CF(E_{11}) + w_{12} CF(E_{12}) = 0.93$, 阈值 $= 0.8, CF(E) >$, 因此 src_3 成立, 数控一车间工人加班工作时间属性改为 10 h/d, 数控二车间工人加班工作时间改为 10 h/d。结论成立的可信度 $CF(H) = 0.93 \times 0.9 = 0.83$ 。定单产品为 12#船板, 因此 tcr_4 成立, 热处理温度属性改为 200 ~ 300。最后整个生产流程如图 3 所示。

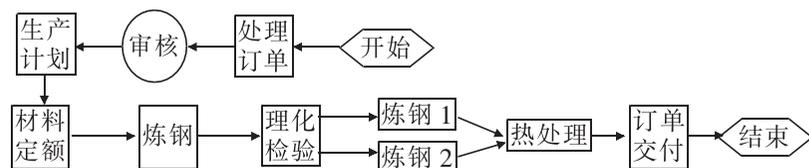


图 3 某钢铁企业船板生产详细流程

5 结束语

本文针对目前工作流动态性以及智能性的不足, 提出了一种基于自主计算实体规则的智能工作流模型, 研究了自主实体协作推理方法, 详细地阐述了自主计算实体规则的构造, 并通过一个动态组合更改算法完成对不确定活动的具体化。今后将进一步研究动态工作流模型, 努力提高它的动态性以及智能性。

参考文献:

- [1] 范玉顺. 工作流管理技术基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [2] 王东勃, 王润孝, 阎秀天, 等. 基于多自主元柔性工作流研究[J]. 计算机系统集成制造系统, 2007, 13(5): 955-960.
- [3] 李洪伟, 周德群, 章玲. 运用 DEMATEL 方法及交叉增援矩阵法对层次分析法的改进[J]. 统计与决策, 2006(8): 10-11.
- [4] 范玉顺, 吴澄. 一种提高系统柔性的工作流建模方法研究[J]. 软件学报, 2002, 13(4): 833-839.
- [5] BRIAN B M, GOMAA H. Agent-oriented compositional approaches to services-based organizational workflow[J]. Decision Support Systems, 2005, 40(1): 31-50.