

# 基于WDAG的工作流模型优化分析

文俊浩, 秦佳, 赵瑞锋

(重庆大学计算机学院, 重庆 400044)

**摘要:** 为优化过程执行, 降低实际运行成本, 采用加权有向无环图(WDAG)的形式对工作流进行优化分析。将WDAG中的节点、弧和权重映射为工作流模型中的事件、运行过程和付出代价, 建立基于WDAG的工作流模型, 针对工作流中出现频率最高的顺序运行方式, 提出一种包含合并优化和并行优化2种优化策略的优化算法。模拟实验结果验证了该算法的有效性。

**关键词:** 加权有向无环图; 工作流; 优化

## Optimization Analysis of Workflow Model Based on WDAG

WEN Jun-hao, QIN Jia, ZHAO Rui-feng

(College of Computer Science, Chongqing University, Chongqing 400044)

**【Abstract】** In order to optimize the process execution and reduce the actual cost for operation, optimization of workflow is analyzed in the form of Weighted Direct Acyclic Graph(WDAG). By mapping the nodes, arcs, weights of the WDAG to the events, operations, cost of workflow model correspondingly, this paper constructs a workflow model based on WDAG. It proposes an optimization algorithm that involved two strategies, consolidation optimization and parallel optimization to aim at the sequence process which happens most frequently in workflow. Simulation experimental result proves the validity of the algorithm.

**【Key words】** Weighted Direct Acyclic Graph(WDAG); workflow; optimization

### 1 概述

工作流是一类能够完全或者部分自动执行的经营过程, 根据一系列过程规则, 文档、信息或任务能够在不同的执行者之间传递、执行<sup>[1]</sup>。在诸如企业经营、物流管理、保险理赔、银行投资和工业控制等众多行业中, 工作流技术已经得到广泛的应用。20世纪90年代兴起的流程重组(Process Reengineering), 将工作流技术的简单应用深入到业务流程的性能与效率的研究。

文献[2]将Petri网理论应用于工作流研究, 提出基于Petri网的工作流建模方法, 将Petri网的变迁、库所和标记映射为工作流中的任务、条件和实例。文献[3]进一步指出工作流分析应该按照验证、校验和性能分析的顺序依次进行。文献[4]提出基于有向无环图(Direct Acyclic Graph, DAG)的工作流建模方法, 并使用5种归约法则(终结符归约、顺序归约、邻接归约、闭合归约和重叠归约)验证工作流是否存在结构化冲突(如死锁和未同步)。文献[5]基于类似有向无环图的数学模型, 提出一种在工作流中通过合并部分任务节点来减少整体运行时间的方法。

在将Petri网理论引入工作流形式化建模之后, 多数后续工作流相关研究都沿用Petri网作为建模工具<sup>[2-3]</sup>。而采用其他方式如基于有向无环图的工作流研究, 相关文献极少<sup>[4-5]</sup>, 并且已经查到的此类文献中涉及工作流优化研究的更少<sup>[5]</sup>。因此, 本文基于加权有向无环图(Weighted Directed Acyclic Graph, WDAG)提出一种工作流模型并讨论其优化问题, 该研究为提高实际业务流程的效率提供了新的思路和方法。

### 2 基于WDAG的模型定义

设加权有向无环图  $WDAG=(V, E, W)$ , 其中,  $V$  为节点集

合;  $E$  为弧集合;  $W$  为权重和值。当且仅当  $WDAG$  满足以下条件时, 定义为工作流模型:

(1) 设  $v \in V$ ,  $v$  表示任务运行过程中的一个事件。

(2) 设  $v_s, v_t \in V$ , 节点  $v_s$  到节点  $v_t$  的弧记做  $(v_s, v_t) \in E$ ,  $(v_s, v_t)$  表示任务运行的过程是从事件  $v_s$  运行至事件  $v_t$ 。

(3)  $\forall v_s, v_t \in V, \exists (v_s, v_t) \in E$ ,  $(v_s, v_t)$  上的权重值  $w_{st}$  表示任务从事件  $v_s$  运行至事件  $v_t$  的过程中需要付出的代价, 且有  $W = \sum w_{st}$ 。

(4) 只存在一个输出节点  $v_i$ , 且不存在弧  $(v, v_i) \in E$ , 其中  $v$  为图中任一节点, 称  $v_i$  为起始节点。

(5) 只存在一个输入节点  $v_o$ , 且不存在弧  $(v_o, v) \in E$ , 其中  $v$  为图中任一节点, 称  $v_o$  为结束节点。

(6) 连通性: 任取  $v_s, v_t \in V$ , 总是存在一条路径  $p$  连通节点  $v_s$  与节点  $v_t$ 。

(7) 不存在环状结构, 使用多次顺序路径迭代表示工作流中的环状流程。

根据上述定义, 可以得到工作流模型的基本特征是: 单点输入/单点输出, 连通且无环。

### 3 基于WDAG的模型优化算法

在工作流模型  $WDAG$  中, 工作流模型优化的目标是在不破坏工作流原本运行过程的前提下, 使付出代价之和即权重

**基金项目:** 国家“十一五”科技支撑计划基金资助项目(2007BQA00316); 重庆大学研究生科技创新基金资助项目(200811A1C0030292)

**作者简介:** 文俊浩(1969-), 男, 教授、博士, 主研方向: 服务计算, 面向服务的软件工程; 秦佳、赵瑞锋, 硕士研究生

**收稿日期:** 2009-06-02 **E-mail:** jhwen@cqu.edu.cn

和值  $W$  尽可能小。

顺序运行是工作流中出现频率最高且最简单的运行方式，对它的优化可以显著提高整个工作流的运行效率，因此，本文主要对这种运行方式进行分析讨论。

### 3.1 模型优化

**定理** 在加权图中，一个节点发生改变，与它变动相关的弧随之改变(如修改、删除)，弧上的权重值也随之改变(如变更)。

假设优化前的顺序运行方式依次通过节点  $(v_s, v_i, v_j)$ ，如图 1 所示。

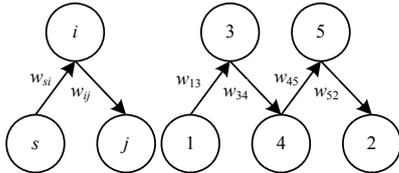


图 1 优化前的顺序运行方式

针对图 1 所示的顺序运行方式，给出以下 2 种优化策略：

(1)合并优化：如图 2 所示，当  $w_{si}+w_{ij} \geq w_{sj}$  时，将节点  $v_i$  删除，合并弧  $(v_s, v_i)$  和  $(v_i, v_j)$  得到新的弧  $(v_s, v_j)$ ，计算得出新的权重值  $w_{sj}$ 。

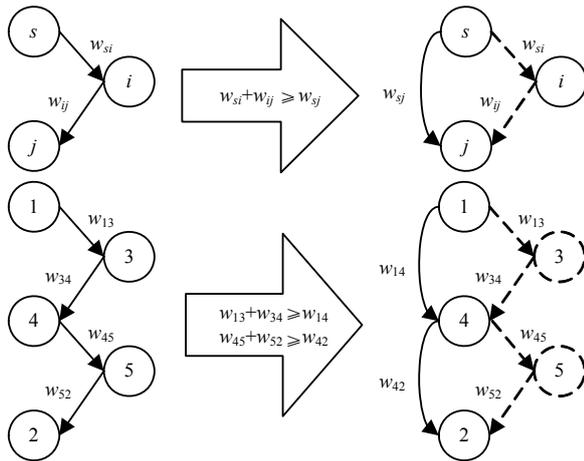


图 2 合并优化策略

**定义(权重相关度)** 权重值  $w_1$  与  $w_2$  的相关度  $\alpha(w_1, w_2)$  表示付出的代价  $w_1$  与  $w_2$  之间的相互关联程度。 $\alpha$  越大，表示相互关联越紧密，反之亦然。

(2)并行优化：如图 3 所示，当  $w_{ij} \geq w_{sj}$  且  $\alpha(w_{si}, w_{ij})=0$  时，将弧  $(v_i, v_j)$  删除，添加新的弧  $(v_s, v_j)$ ，计算得出新的权重值  $w_{sj}$ 。

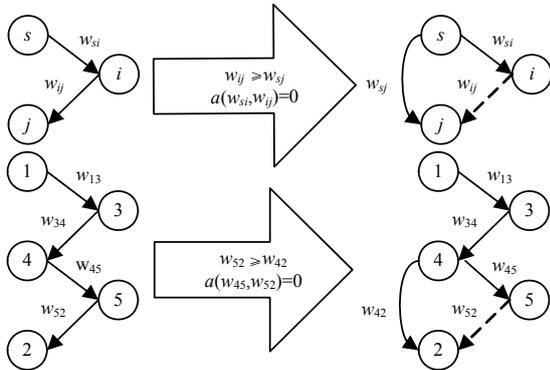


图 3 并行优化策略

### 3.2 优化算法

工作流中顺序运行方式的优化算法如下：

```

BEGIN
    初始化建立基于加权有向无环图 WDAG 的工作流模型 W
    FIND W 中的顺序运行路径集合 P
    WHILE P 含有未标记的顺序运行路径
        任取未标记路径  $p \in P$ ，标记  $p$ ， $p=(v_s, \dots, v_t)$ 
        //合并优化
        FOR  $v_i=v_s$  TO  $v_{t-2}$  DO
            取顺序节点集合  $(v_i, v_{i+1}, v_{i+2})$ 
            IF  $w_{i,i+1}+w_{i+1,i+2} \geq w_{i,i+2}$  THEN
                删除节点  $v_{i+1}$ 
                合并弧  $(v_i, v_{i+1})$  和  $(v_{i+1}, v_{i+2})$  得到新的弧  $(v_i, v_{i+2})$ 
                计算得出新的权重值  $w_{i,i+2}$ 
                更新路径  $p$ 
            END
        END //合并优化结束
        //并行优化
        FOR  $v_i = v_t$  TO  $v_{s+2}$  DO
            取顺序节点集合  $(v_{i-2}, v_{i-1}, v_i)$ 
            IF  $w_{i-1,i} \geq w_{i-2,i}$  AND  $\alpha(w_{i-2,i-1}, w_{i-1,i})=0$  THEN
                删除弧  $(v_{i-1}, v_i)$ 
                添加弧  $(v_{i-2}, v_i)$ 
                计算得出新的权重值  $w_{i-2,i}$ 
                更新路径  $p$ 
            END
        END //并行优化结束
    END
    END

```

### 3.3 算法分析

设  $WDAG$  中共有  $n$  个节点，则算法的时间复杂度为  $O(n)$ ，空间复杂度即为  $O(1)$ 。在合并优化和并行优化操作中，节点的选取是依照节点出现顺序依次选择的，不一定达到权重和值的最优化。由于权重值分布的随机性，因此可以采取一些选择策略，如按照权重值大小顺序依次合并相关弧和节点等。

### 4 实验分析

本文利用 Matlab 软件，随机模拟工作流模型中的顺序路径  $p$  和权重值  $w$ ，然后进行优化分析。在实验中，设权重  $w$  的取值范围为  $(0, 1)$ 。

图 4~图 7 是分别进行 4 次相互独立的随机实验得到的结果(每次实验包含 2 次优化，第 1 次为合并优化，第 2 次为并行优化)。其中，图 4 生成 100 条顺序路径，每条路径所包含的节点数依次为 1~100。

图 5 生成 901 条顺序路径，每条路径所包含的节点数依次为 100~1 000；图 6 生成 100 条顺序路径，每条路径所包含的节点数均为 100；图 7 生成 1 000 条顺序路径，每条路径所包含的节点数均为 1 000。

从图 4、图 5 可以看出，随着节点数的增加，优化前后权重和值的差距变大，2 次优化之间的权重和值差距很小。从图 6、图 7 可以看出，当节点数一定时，2 次优化之间的权重和值变动幅度较小。

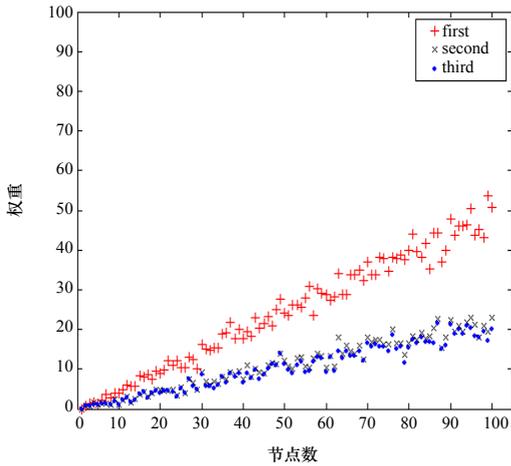


图4 权重和值分布结果 1

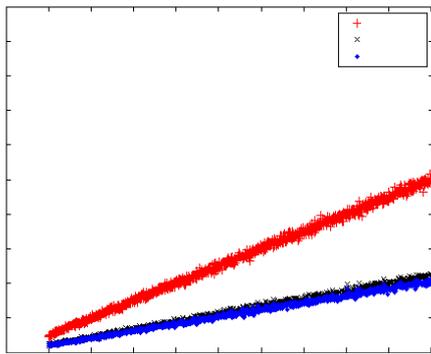


图5 权重和值分布结果 2

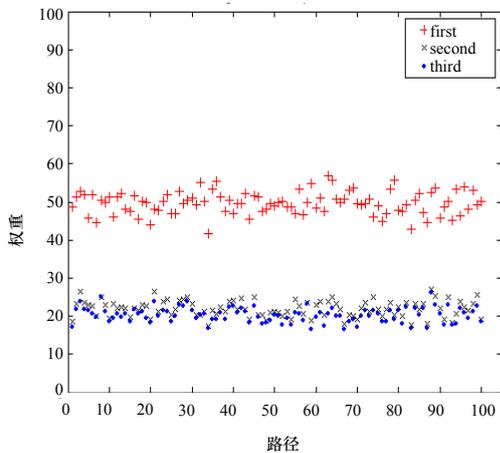


图6 权重和值分布结果 3

设节点数为  $n$ , 优化前的权重和值为  $W_1$ , 使用模型优化算法(合并优化和并行优化)之后得到的权重和值为  $W_2$ , 从图 4~图 7 可以得出如下近似方程:  $W_1 \approx n/2$ ,  $W_2 \approx n/5$ , 进一步得到权重和值增量  $\Delta W$  的近似方程为

$$\Delta W \approx W_2 - W_1 = n/5 - n/2 = -3n/10 < 0$$

由于权重和值增量  $\Delta W$  始终为负, 因此得证本文所提出的优化算法的

有效性。根据上述得出的权重和值增量  $\Delta W$  的近似方程, 结合图 4、图 5 还可以得到,  $\Delta W$  与节点数  $n$  成近似反比关系, 也即随着节点数的增加, 优化前后权重和值的差值呈近似线性关系, 逐渐增大。

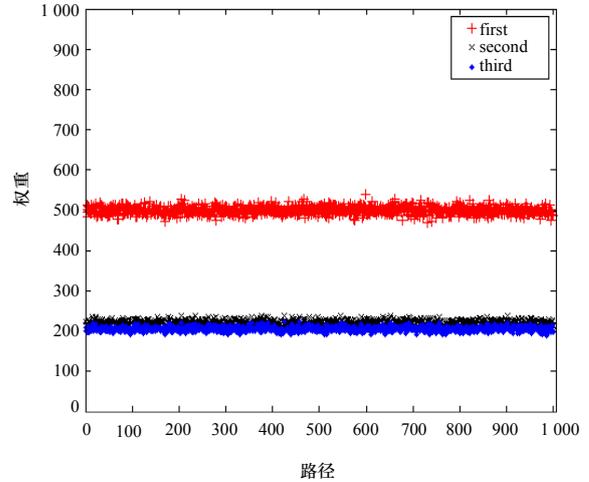


图7 权重和值分布结果 4

## 5 结束语

workflow 模型优化是提高实际业务流程性能和效率的重要手段。本文通过将加权有向无环图的节点、弧和权重映射为 workflow 模型中的事件、运行过程和付出代价, 针对 workflow 中出现频率最高的顺序运行方式, 提出 2 种优化策略, 合并优化和并行优化, 然后给出相应的具体优化算法, 并通过模拟实验加以分析和验证。

在实际的应用中, 本文所提出的 workflow 模型优化算法使用的权重值  $w$  和权重相关度  $\alpha$  需要根据实际业务流程中包含的各种因素综合计算得出。

下一步研究方向是对基于 WDAG 的 workflow 模型中其他运行方式的优化分析, 如分支运行方式, 以及在本文的研究基础上扩展加入循环运行方式的优化分析, 使得基于 WDAG 的 workflow 模型优化分析方法进一步完备和接近实际需求。

## 参考文献

- [1] Workflow Management Coalition. WfMC-Terminology & Glossary. 1996.
- [2] Aalst W M P. The Application of Petri Nets to Workflow Management[J]. Journal of Circuits, Systems and Computers, 1998, 8(1): 21-66.
- [3] 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.
- [4] Sadiq W, Orłowska M E. Analyzing Process Models Using Graph Reduction Techniques[J]. Information Systems, 2000, 25(2): 117-134.
- [5] Dewan R, Seidmann A, Walter Z. Workflow Optimization Through Task Redesign in Business Information Processes[C]//Proc. of the 31st International Conference on System Sciences. Kohala Coast, HI, USA: IEEE Computer Society, 1998: 240-252.

编辑 金胡考