

基于有向超图的工作流资源分配均衡优化方法

孙雪冬, 徐晓飞, 王 刚

(哈尔滨工业大学计算机学院, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘 要: 为了拓展工作流资源分配均衡优化的深度和广度, 提出了一种考虑过程支持资源变化与过程结构变化相互影响的优化方法. 通过对过程进行扩展超图建模, 利用超图的性质以及活动能力需求集与支持资源能力集之间的耦合, 给出了过程结构随支持资源变化而变化的形式化处理规则; 给出了由不同结构过程构成的、用于工作流资源分配均衡优化超图模型(DHM-WRAB)的建模规则, 使工作流资源分配均衡优化转化为具有权因子的超图最短路径求解问题, 并给出求解过程; 最后, 通过举例证明该方法可行、有效.

关键词: 工作流; 资源配置; 过程重组; 有向超图

中图分类号: TP311 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2005)08-1370-05

Resource Allocation Balancing of Workflow Based on Directed Hypergraph

SUN Xue-dong, XU Xiao-fei, WANG Gang

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

Abstract: To broaden and deepen the optimization of resource allocating balance for workflow, method based on directed hypergraph was presented. This method considered the interaction of the changes between the supporting resource and the process structure. The process was modelled by directed hypergraph. The properties of hypergraph and coupled relationship of activity's capability requirement with the capability of resource were used to regulate how process structure changed with the change of resource redistribution. The workflow resource allocating question was transformed into finding the shortest path in a weighted hypergraph: DHM-WRAB (DHM-WRAB, Directed Hypergraph Model used for Workflow Resource Allocation Balancing) constructed by different structures of processes. The problem solving process was given too. At last, an example was given to prove the feasibility and validity of this method.

Key words: workflow; resource allocation; process reengineering; directed hypergraph

1 引言

工作流技术在实现企业过程重组、事务流水化处理以及信息流、文档流的管理等面向过程的应用以及在满足系统集成化应用需求方面显示了强大的功能和极大的应用前景. 基于工作流的应用正成为现代企业软件系统的核心组成部分^[1,2]. 工作流是业务过程部分或全部地计算机化或自动化^[3]. 既然是一种流, 就存在着顺畅性的问题. 工作流是否顺畅合理关系到企业能否正常运行, 在工作流的活动间合理地分配支持资源是保证工作流顺畅合理的必要条件. 合理地分配支持资源不但能提高工作流的工作效率, 而且能提高相关支持资源的利用率.

关于过程的资源分配优化, 一些文献给出了一些优化模型^[4,5]和算法^[6,7], 但是它们主要是在假定过程结构一定情况下, 通过改变资源在各个活动上的分配量来实现. 实际上, 资源对活动的支持具有多态性, 并且在支持资源类型发生改变时, 为了使过程保持优良的运行状态, 通常需要改变过程结

构. 在一个支持资源与过程结构互动的环境下进行工作流资源分配优化更具有实际意义.

有向超图是研究有限集中多元子集多元关系的, 它除了一般图论中的通路、闭包、冗余边和冗余节点等概念, 而且还可以解决一些一般图论无法解决的问题, 如超边的合并与分解等^[8-10]; 由于过程优化时, 过程结构变化的前提条件是过程的基本输入和必要输出应该保持不变, 而过程的输入、输出又是多元子集问题, 因此, 超图理论被一些文献用于过程结构的优化, 如^[8,9]给出了基于超图的过程简化规则.

针对上述问题, 本文提出了基于有向超图的、考虑支持资源变化与过程结构变化互相影响的工作流支持资源分配优化方法, 并通过举例证明该方法可行、有效.

2 工作流的资源分配均衡优化

2.1 工作流的资源分配均衡问题

当一个或几个过程的多个实例同时运行时, 对于一个活动, 当后一个实例的工作到来之前, 前一个实例的工作刚好执

行完时, 此时不存在阻塞现象, 即当活动的平均执行时间趋于相同时, 认为此时过程资源分配均衡。由于方差是用来衡量平均偏离程度的, 因此定义过程的资源分配均衡性为构成该过程的活动平均执行时间的方差。如果设资源分配均衡性为 WRB , 活动的平均执行的时间为 X_i , 所有活动的时间 X_i 构成过程时间向量 X , 即 $X(X_1, X_2, \dots, X_n)$, 经由活动 a_i 的概率为 P_i , 活动执行时间为 T_i , 则:

$$\text{活动 } i \text{ 平均执行时间为: } X_i = P_i * T_i \quad (1)$$

$$\text{工作流资源分配均衡性为: } WRB = E(X - EX)^2 \quad (2)$$

$$\text{活动 } i \text{ 平均执行时间偏离量为: } DepT_i = (X_i - EX)^2 \quad (3)$$

WRB 越小, 工作流资源分配越均衡, 当 $WRB = 0$ 时, 资源分配为最均衡。

通常, 在进行过程的资源分配均衡优化时假定过程结构不变, 通过调整资源在各个活动的分配量来实现。实际上, 资源对活动的支持具有多态性——一个活动可有几种支持资源; 并且, 当支持资源类型改变时, 通常伴随过程结构变化; 本文根据过程运行的实际情况, 对资源分配均衡优化的定义进行了扩展, 定义工作流资源分配均衡优化为: 在保持过程功能不变的情况下, 在调整支持资源分配的同时调整过程结构, 使每个活动处理时间满足一定比例, 从而减轻或消除局部阻塞现象, 即求得这样一个资源支持状态及相应的过程结构使得 $E(X - EX)^2$ 为最小。如果设没优化之前的过程活动集为 AB , 优化之后的活动集为 AO , 优化之前的相关资源集为 CRB , 优化之后的相关资源集为 CRO , f 为对过程结构进行变换, g 为对过程进行资源重新分配, h 为过程的时间与过程结构和支持资源的关系, 则优化可描述为:

求 $f, g, st. AO = f(AB), CRO = g(CRB), \exists X' = h(AS, RP) st. E(X' - EX')^2 = \min E(X - EX)^2$, 其中 AS 为优化后过程的结构, RP 为优化后过程的支持资源, 并且 $AS \subset AO, RP \subset CRO$ 。

2.2 工作流的有向超图模型

本文主要通过对工作流进行扩展超图建模, 利用超图的性质, 在保持过程功能不变的情况下, 在调整支持资源分配的同时调整过程结构, 使每个活动处理时间满足一定比例, 从而减轻或消除局部阻塞现象。其中, 工作流的有向超图模型是分析的基础。

2.2.1 过程及资源环境描述 在工作流的超图模型中定义每个输入元素和输出元素作为超图的节点, 连接输入信息集与输出信息集的活动为超图的边。为了支持动态地为活动分配资源, 在活动中加入了活动参与者能力集属性来表示活动对资源的能力需求。为了进行资源分配均衡优化, 在活动中加入了时间及时偏离量属性。因此, 过程的扩展超图模型可描述为:

$PM = (DSet, ASet)$, 其中, PM 为过程的超图模型; $DSet$ 是超图的顶点集合, 也是过程中所有输入、输出数据的集合; $ASet$ 是超图中所有边的集合, 是过程中所有活动的集合; 其中 $DSet$ 又可描述为: $DSet = \{D_1, D_2, \dots, D_n\}$, n 为输入、输出数据数, D_i 为过程的输入、输出数据; $ASet$ 又可描述为: $ASet = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$, m 为活动数, A_i 为过程中的活动, 其又可

描述为: $A_i = (A_ID, CSet, ATime, DepTime, InDSet, OutDSet)$, 其中, A_ID 为活动的标识; $CSet$ 为活动参与者的能力集; $ATime$ 为活动的执行时间, 为支持该活动的资源的函数; $DepTime$ 为活动平均执行时间偏离量; $InDSet$ 为输入数据集; $OutDSet$ 为输出数据集; 其中: $CSet = \{Cap_1, Cap_2, \dots, Cap_k\}$, 其中, k 为该活动的的能力数, Cap_i 为该活动参与者的应该具有的能力。

在过程超图 PM 中, 如果存在一超边 A_λ 包含两节点 D_i, D_j ($i, j = 1, 2, \dots, n$) 则称 D_i 与 D_j 相邻, 称 A_λ 与 D_i (或 D_j) 相关联, 记作与 $D_i \in A_\lambda$, 若 $A_i \cap A_j \neq \Phi$, 则称超边 A_i 与 A_j 相邻。 $|A_\lambda|$ 表示超边 A_λ 所关联的顶点数。

资源是本文的主要研究对象之一, 它是进行过程优化的物质基础, 支持与约束着过程的运行与优化。本文根据需要对资源进行了分类建模, 在资源描述中加入了资源能力集描述, 表示资源具有的能力。因此, 资源环境模型 $ResCon$ 可描述为:

$ResCon = \{Res_i\}$, 其中, Res_i 为相关资源, Res_i 又可描述为: $Res_i = (Res_ID, Res_CSet, ResNum, \dots)$, Res_ID 为资源标识, Res_CSet 为资源的能力集, $ResNum$ 为资源的数量。其中, 资源的能力集与活动对资源的能力需求集的耦合动态生成过程的可支持资源。

2.2.2 逻辑处理 过程的活动之间存在着逻辑关系, 它控制工作流的路由、决定工作流经由每个过程分支的概率, 由于活动在过程运行中的平均执行时间与经由该活动的概率有关, 因此, 在本文的过程超图模型中定义活动间的逻辑关系为概率约束关系。

对于输入逻辑为“与”的活动, 如果设输入活动分别为 $A_1, A_2, \dots$, 输出活动为 A , 因为只有当输入各分支 $A_1, A_2, \dots$, 都满足条件时, 才触发活动 A , 因此, 其概率约束为: $P = P_1 = P_2 = \dots = P_i = \dots$; 同理, 当输入逻辑为“或”时的概率约束为: $P \geq P_1, P \geq P_2, P \geq P_3, \dots$, 并且 $\sum P_i \geq P$; 对于输出逻辑为“与”时的概率约束为: $P = P_1 = P_2 = \dots = P_i = \dots$; 对于输出逻辑为“或”时的概率约束为: $P \geq P_1, P \geq P_2, P \geq P_3, \dots$, 并且 $\sum P_i \geq P$; 其中, $P_1, P_2, \dots$, 为分支活动的概率, P 为产生分支的活动的概率。

2.3 基于有向超图表示的工作流资源分配均衡问题

对于一个过程, 支持资源改变可能导致过程结构变化, 如果把一个过程的不同结构形式以下列规则进行建模: 公用相同的输入、输出及活动, 如图 1 所示, 并定义该模型为工作流资源分配均衡优化超图模型 (DHMWRAB, Directed Hypergraph Model used for Workflow Resource Allocation Balancing), 则资源分配均衡优化可以转化为求以 $(X_i - EX)^2$ 为权因子的资源分配均衡优化超图模型的最短路径求解问题, 对于权因子为正值的超图的最短路径求解问题, 很多文献进行了探讨, 如 [11, 12], 在这里不详细介绍。

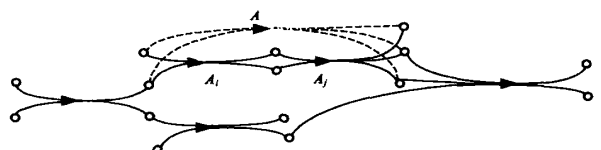


图 1 用于资源分配均衡优化的超图模型

3 DHM WRAB 的建立

3.1 活动/资源的映射

在基于有向超图的工作流资源分配均衡优化中,关键是建立 DHM WRAB,而过程与资源关系的合理处理又是建立 DHM WRAB 的基础.在这里通过活动对资源的能力需求以及资源具有的能力的耦合来生成过程的可支持资源.如果一个资源能对某个活动进行支持,说明该资源具有该活动参与者描述的能力,因此,对活动与资源关系进行了如下定义:

性质 1(资源对活动的可支持性) 对于过程 PM 中的一个活动 A_i ,如果在给定的资源环境内,存在一个资源对象 Res ,它的能力集包含这个活动参与者的能力需求集,则 Res 可对该活动 A_i 进行支持.可形式化描述为:

对于 $\forall A_i \in PM.ASet$, 如果 $\exists Res \in ResCon$, 使得 $A_i.CSet \subseteq Res.Res.CSet$, 则 Res 可对 A_i 进行支持.

性质 2(可公用资源性) 对于过程 PM 中的两个活动 A_i 和 A_j ,如果在给定的资源环境内,存在一个资源对象,它的能力集包含这两个活动参与者的能力集,则这两个活动为可合并的.可形式化描述为:

对于 $\forall A_i \in PM.ASet, A_j \in PM.ASet$, 如果 $\exists Res \in ResCon$, 使得 $A_i.CSet \subseteq Res.Res.CSet$ 且 $A_j.CSet \subseteq Res.Res.CSet$ 则 A_i 和 A_j 可公用资源,否则为 A_i 和 A_j 不可公用资源.

3.2 基于有向超图的过程结构变化的性质和处理规则

对于两个相邻的、由不同资源支持的、可公用资源的活动,当公用资源时,由于支持资源专业程度的降低以及任务传递的时间的减少等因素的影响,此时的活动时间不是简单的原来的两个活动时间相加,而是应该把原来的两个活动变成一个活动处理.同理,当原来的由一个资源支持的活动由不同的资源进行支持时,此时的活动时间并不是原来的时间的简单划分.因此,通过合并与分解活动,用不同的结构来表示过程更具有实际意义.

对于两个相邻活动,只有满足一定条件时,才是可合并的;同理,对于一个活动只有它为可分解的,才可以进行分解.本文根据过程的实际运行情况,在假定根据企业运行的业务规则,过程的活动是可合并的、可分解的情况下,从资源约束角度对活动的可合并性及可分解性进行了定义.

性质 3(可合并性) 对于过程 PM 中的两个相邻的活动 A_i 和 A_j ,如果在给定的资源环境内,存在一个资源对象,它的能力属性集包含这两个活动参与者的能力属性集,则这两个活动为可合并的.可形式化描述为:

对于 $\forall A_i \in PM.ASet, \forall A_j \in PM.ASet$, 如果 A_i 和 A_j 相邻,并且 $Res \in ResCon$, 使得 $A_i.CSet \subseteq Res.Res.CSet$ 且 $A_j.CSet \subseteq Res.Res.CSet$ 则 A_i 和 A_j 可合并,否则为不可合并.

性质 4(可分解性) 对于一个活动,当它为参与者分别取不同的能力属性集时动作的串联,则可以把此活动分成多个活动,可形式化描述为:

对于 $\forall A_i$, 如果 $\exists A_j, A_k, A_l, CSet \subset A_i.CSet, A_k.CSet \subset A_i.CSet, A_j.CSet \neq A_k.CSet, A_j \angle A_k$, 且 A_j, A_k 实现的功能与 A_i 的功能相同,则 A_i 可分解.

为了保证活动分解与合并后,整个过程的功能不能变,以及分解与合并的正确性与合理性,因此,定义了如下处理规则:

规则 1(合并处理规则) 对任何两个可合并的活动进行合并时,都是入口信息集代替中间信息集,合并后的活动参与者能力集为邻接活动的参与者能力集的并集;合并后的活动的时间由其支持的资源决定,可形式化描述为:

对于 $\forall A_i$ 和 $\forall A_j$, 如果 A_i 和 A_j 可合并,合并后的活动为 A_u , 则: $A_u.InDSet = A_i.InDSet \cup A_j.InDSet \cap A_j.InDSet; A_u.OutDSet = A_i.OutDSet \cup A_j.OutDSet \cap A_j.OutDSet; A_u.CSet = A_i.CSet \cup A_j.CSet; A_u.ATime = f^*(Res_u), f^*$ 为活动时间与支持资源的函数, Res_u 为活动 A_u 的支持资源, $Res_u \subset ResCon$;

规则 2(分解处理规则) 对于可分解的活动,分解后各个活动输入数据源的并集等于原活动的输入数据源,各个活动输出数据源的并集等于原活动的输出数据源,各个活动的参与者能力属性集的并集等于原活动的参与者能力属性集,分解后每个活动的时间由每个活动的可用资源决定.可形式化描述为:

如果 A_x 可以分解为 $A_1, A_2, \dots, A_n$ 串联, 则: $\cup A_i.InDSet = A_x.InDSet; \cup A_i.OutDSet = A_x.OutDSet;$

$\cup A_i.CSet = A_x.CSet; i = 1, 2, \dots, n; A_i.ATime = f(Res_i), Res_i$ 为活动 A_i 的支持资源, $Res_i \subset ResCon, f^*$ 为活动时间与支持资源的函数, $i = 1, 2, \dots, n$.

3.3 DHM WRAB 的建立过程

在进行工作流资源分配均衡优化时,首先是根据过程所处的资源环境利用性质 3 与性质 4 进行相邻活动的可合并性、可分解性判断,对于可合并的相邻活动利用规则 1 进行活动合并处理,对于可分解的活动,利用规则 2 进行分解处理;接下来对不同结构的过程,利用 DHM WRAB 的建模规则建立 DHM WRAB.

4 基于有向超图的工作流资源分配均衡优化过程

在进行工作流资源分配均衡优化时,首先,根据当前的资源环境,进行结构变换,建立 DHM WRAB;接下来,根据活动的支持资源状况,计算不同过程结构中,活动时间的偏离量,确定用于资源分配均衡优化的超图模型的权因子;第三步,利用超图的最短路径求解算法求解超图的最短路径,所求得的最短路径为所求过程,此过程为该资源环境下的所有可能的结构中资源分配最均衡的过程.

5 实例分析

5.1 问题描述

下面通过对一个典型的企业过程(进料作业过程)进行资源分配均衡优化分析,说明具体的优化过程及进行优化的必要性.它的活动构成如图 2 所示,其中各个活动分别为:抽验(1, (品质管理), ...), 记录并签章(2, (品质管理), ...), 审核(3, (品质管理负责), ...), 计量(4, (计量), ...), 填写产成品入库单、相关表单并签字(5, (计量), ...), 审核产成品入库单

(6, (计量负责), ...), 入库、填帐卡、贴标签(7, (仓库管理), ...), 填写成品出入库日报表(8, (仓库管理), ...), 微机入账(9, (仓库管理), ...);

可用资源集为: (质检员 1, 质检员 2, 质检主任 1, 计量员 1, 计量员 2, 计量主任 1, 仓库管理员 1, 仓库管理员 2, 仓库管理员 3,), 其中各个资源又可描述为: 质检员 1 (1, (品质管理), ...), 质检员 2(2, (品质管理), ...), 质检主任 1(3, (品质管理负责), ...), 计量员 1(4, (计量) ...), 计量员 2(5, (计量), ...), 计量主任 1 (6, (计量负责), ...), 仓库管理员 1(7, (仓库管理), ...), 仓库管理员 2(8, (仓库管理), ...), 仓库管理员 3(9, (仓库管理), ...)

在进行资源分配均衡优化时需要遵循的业务规则为: 一项任务的实施与审核工作由不同的人来完成. 活动与支持资源的关系以及活动的时间如表 1 左半部分所示.

5.2 优化过程、结果及其性能分析

在进行资源分配均衡优化时, 对于平均执行时间较短的相邻活动, 首先根据业务规则进行可合并性判断, 判断结果为 A_3 与 A_1 、 A_2 不能合并; A_6 与 A_4 、 A_5 不能合并. 对于根据业务规则判断为可合并的活动, 再根据所给资源环境利用性质 3 进行可合并性判断, 判断结果为 A_1 、 A_2 可合并; A_4 、 A_5 可合并; A_8 、 A_9 可合并. 对于可合并的活动利用规则 1 进行合并处理. 对于平均执行时间较长的活动利用性质 4 进行可分解性判断, 判断结果为 A_7 可分解, 依据规则 2 对 A_7 进行分解, 分解为 A_7^j 、 A_7^f 和 $A_7^{j''}$ 其中 $A_7^{j''}$ 又可与 A_8 、 A_9 合并, 合并后的活动为 A_8^j .

对不同结构的过程, 利用 DHM-WRAB 建模规则建模, 所得模型及其中最短路径如图 3 所示; 优化后的活动与支持资源的关系以及活动的时间如表 1 右半部分所示, 优化前后活动的时间分布如图 4 所示.

由图 4 可以看出, 优化后活动的时间分布较集中, 并且各活动的时间趋于相等. 由表 1 利用式子 (2) 可以求得优化之前的资源分配均衡度 WRB 为: 9.4; 优化之后的资源分配均衡度为: 3.8. 当有多个实例同时运行时, 优化之前单位时间完成的过程数为: 0.083; 优化之后为: 0.11.

由上面算得的结果可以看出, 优化可以明显提高工作效率. 由表 1 中相关资源集的变化可以看出, 相关支持资源利用率增加.

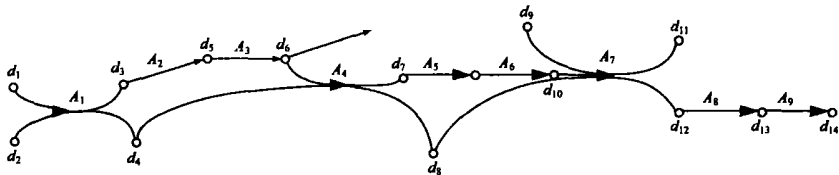


图 2 进料作业过程的超图模型

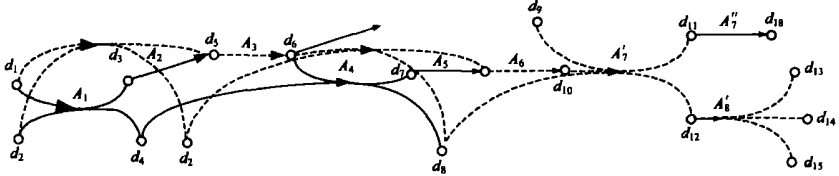


图 3 进料作业过程的资源分配均衡优化超图模型

表 1 优化前后活动支持资源与时间变化

优化前活动	优化前的支持资源	优化前的活动时间	优化前活动	优化后的支持资源	优化后的活动时间
A_1	Res_1	5	A_1^j	Res_1	6
A_2	Res_2	1			
A_3	Res_3	3	A_3	Res_3	3
A_4	Res_4	5	A_4^j	Res_4	7
A_5	Res_5	2			
A_6	Res_6	3	A_6	Res_6	3
A_7	Res_7	12	A_7^j	Res_7	9
			A_7^f	Res_8	2
			A_8^j	Res_9	6
A_8	Res_8	2			
A_9	Res_9	3			

6 结论

本文最大特点是在对过程进行资源分配时, 考虑了一个活动可能由多种支持资源来支持以及过程结构随支持资源的变化而变化, 克服了原有过程优化中结构优化与资源分配优化相脱离所造成的片面性, 更具有实际意义; 在进行过程描述时, 采用了有向超图的方法, 因此, 在优化时可遵循超图的某些原理, 并且把资源分配均衡优化转化为具有权因子的有向超图的最短路径求解问题, 因此可利用现存的一些求解方法进行求解.

随着信息技术的发展, workflow 技术被广泛地应用于生产经营各个领域, 本文的方法减少了因资源分布不合理而导致的过程局部阻塞, 既提高了工作流的运行效率, 又提高资源的利用率, 增加了企业的竞争能力.

参考文献:

[1] 胡锦敏, 张申生, 等. 基于 ECA 规则和活动分解的工作流模型[J]. 软件学报, 2002, 13(4): 761- 767.
[2] Leymann F, Roller D. Workflow based application[J]. IBM System Journal, 1997, 36(1): 102- 123.
[3] TC00 10003, The workflow reference model[S].
[4] Valls Vicente, Perez M, et al. Pre processing techniques for resource allocation in the heterogeneous case[J]. European Journal of Operational

Research, 1998, 107(2): 470–491.

- [5] Tabirca S, Tabirca T, et al. Static workload balance scheduling; continuous case[A]. Proceedings of the 17th IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium 2003[C]. Nice, France, 2003. 251–255.
- [6] Wada, Yutaka, et al. Distributed algorithms for allocating resources to process groups and their complexity[J]. Systems and Computers in Japan, 1999, 30(6): 23–35.
- [7] 魏蛟龙, 张驰. Internet 拥塞控制和资源分配中的对策论分析框架[J]. 电子学报, 2003, 31(10): 1452–1455.
- [8] 黄丽华, 钱宁, 等. 企业过程优化的规则和方法[J]. 高技术通讯, 1997, 11: 26–32.
- [9] 姚磊, 林镒, 等. 一种基于超图的流程再设计方法[J]. 武汉理工大学学报, 2001, 23(10): 91–94.
- [10] 许小满, 孙雨耕, 等. 超图理论及其应用[J]. 电子学报, 1994, 8: 65–71.
- [11] G Gallo, G Longo, et al. Directed hypergraphs and applications[J]. Discrete Applied Mathematics, 1993, 42: 177–201.
- [12] Daniele Pretolani. A directed hypergraph model for random time dependent shortest paths[J]. European Journal of Operational Research, 2000, 123: 315–324.

作者简介:



孙雪冬 女, 1972 年生, 哈尔滨工业大学计算机科学与工程系博士研究生, 现主要从事企业建模、工作流建模与优化等方面研究. E-mail: sun_xuedong@hotmail.com; xuedong_sun@163.com.



徐晓飞 男, 博士, 教授, 博士生导师, 哈工大计算机科学与技术学院院长, 国家 863 计划 CIMS 主题专家, 国家“十五”攻关计划制造业信息化工程重大专项专家组成员, 中国计算机学会常务理事, 美国制造工程师学会高级会员, 德国运筹学学会会员, 黑龙江省计算机学会理事长, 黑龙江制造业信息化专家组组长, 《计算机集成制造系统 CIMS》及《哈尔滨工业大学学报(英文刊)》编委.

王 刚 男, 1964 年生, 哈尔滨工业大学 CIMIT 中心教授, 现主要从事计算机集成制造、企业建模等方面研究.