

一种基于不变量的从 workflow 网到 PERT 图的转换方法

葛季栋^{1,2}, 胡 昊¹, 吕 建¹

(1. 计算机软件新技术国家重点实验室(南京大学), 南京大学计算机科学与技术系, 江苏南京 210093;
2. 南京大学软件学院, 江苏南京 210093)

摘 要: workflow 管理系统为现代企业提供了一种协同工作环境, 可以管理企业的业务过程, 并提高企业的商业竞争能力. 为了有效管理业务过程的进度, 需要提供一种基于 workflow 过程模型的进度估算方法. 基于 Petri 网的 workflow 网模型难以直接估算 workflow 过程模型的进度与工期, 而在传统的项目进度计划中, PERT 图是一种成熟的技术, 为此, 本文在 workflow 网的基础上增加了时间的概念, 基于 LMSF 不变量的分解技术, 提出了一种将 LMSF 不变量分解得到的子网转换为 PERT 图的算法, 由此达到估算 workflow 过程模型的进度与工期的目的.

关键词: workflow; Petri 网; 过程建模; 合理性; 不变量; PERT 图

中图分类号: TP311 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2008)05-0893-06

A Transformation Approach from Workflow Net to PERT Diagram Based on Invariants

GE Jidong^{1,2}, HU Hao¹, LÜ Jian¹

(1. State Key Laboratory for Novel Software Technology (Nanjing University), Department of Computer Science and Technology, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China; 2. Software Institute, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China)

Abstract: Workflow management systems provide a cooperative work environment for the modern enterprises, which can availablely manage enterprise business process and enhance its business competence. In order to efficiently manage the schedule of business processes, it is necessary to provide a schedule estimating method for workflow process model. The process modeled by workflow net based on Petri nets is difficult to be estimated for its schedule and total time directly. While in traditional schedule planning, the PERT diagram is an available technology. This paper introduces time concept into the workflow net and presents a transformation algorithm from LMSF invariant's subnet to PERT diagram based on LMSF invariant decomposition. According to the resulting PERT diagram, the schedule and total time of workflow process model can be estimated.

Key words: workflow; Petri net; process modeling; invariants; PERT diagram

1 引言

workflow 技术经常被用于管理企业的业务过程^[1]. 在现代商业环境下, 为了应对激烈的竞争, 企业需要通过加强和改善业务过程管理来缩减其产品和服务的业务成本. 由计算机软件支撑的 workflow 管理系统 (WfMS, Workflow Management Systems) 可以提高企业的业务过程的管理效率. 通过对过程数据和日志的分析与反馈可以为企业的业务过程重组与改进 (Business Process Reengineering and Improvement) 提供依据. 在 Internet 环境下, 基于 Web 的 workflow 管理系统能够为现代企业计算提供一

种协同工作环境, 由此可以提升企业的商务能力和竞争力. 在另一方面, 面对激烈的商业竞争, 对企业的业务过程的进度规划与管理提出了挑战. 如何根据 workflow 过程模型及时准确地估算业务过程的进度与工期是本文关注的重点问题.

workflow 过程建模语言 (PML, Process Modeling Language) 是 workflow 管理系统的核心成分, 作为企业业务流程管理工具的工作流管理系统, 为了有效管理业务流程的进度, 需要提供一种基于 workflow 过程模型的进度估算方法. 在 workflow 过程建模方面, 荷兰学者 Aalst 提出的 workflow 网 (Workflow net)^[2] 模型是 Petri 网应用于 workflow

收稿日期: 2007-04-02; 修回日期: 2007-11-19

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 60721002, No. 60736015, No. 60403014, No. 60603034); 国家 973 重点基础研究发展规划 (No. 2002CB312002); 国家 863 高技术研究发展计划重点项目 (No. 2006AA01Z159, No. 2006AA01Z177, No. 2007AA01Z178, No. 2007AA01Z140); 江苏省自然科学基金 (No. BK2006743)

过程建模的重要模型,然而 workflow 网难以直接估算 workflow 过程的进度与工期,而在传统的项目进度计划中,PERT 图(Programming Evaluation and Review Technique, 见定义 8)是一种成熟的技术^[3-6],以及与 PERT 图相关的关键路径方法 CPM (Critical Path Method)也是很实用的管理技术.因此通过建立从 workflow 网到 PERT 图的转换,可以为 workflow 网的进度估算提供依据.本文基于 LMST-不变量的分解技术,提出了一种将 LMST-不变量分解得到的子网转换为 PERT 图的算法,根据得到的 PERT 图可以估算 workflow 网的每个执行分支的总工期和关键路径等规划问题(programming problem),由此可以解决基于 workflow 网的业务过程管理中的进度规划问题.

2 时间 workflow 网与 PERT 图转换问题

workflow 管理系统依靠计算机软硬件环境,为企业的业务流程管理提供了一种协同工作环境,可以提高企业的工作效率,并通过监控业务流程执行来达到保障与改善企业管理的效果.一般来讲,workflow 管理系统中都包含一个过程建模工具和一个过程引擎,过程建模工具用以描述需要部署的业务过程,经过实例化交给 workflow 管理系统的过程引擎解释执行.过程建模工具一般包含一个过程建模语言 PML(Process Modeling Language),过程引擎的设计以过程建模语言为依据,因此过程建模语言是 workflow 管理系统的核心成分^[1,2,7-9].在 workflow 过程模型的形式化建模方面, Petri 网是一个很好的选择.将 workflow 过程建模理论与 Petri 网相结合, Aalst 提出了 workflow 网模型(Workflow net, 简称 WF-net),以及在该模型基础上提出了合理性(soundness)的形式化定义作为 workflow 过程模型的正确性评价标准^[2].

Petri 网是一个三元组 $PN = (P, T, F)$, 其中 P 是库所(place)集合, T 是变迁(transition)集合, 且 $P \cap T = \emptyset$, $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ 是库所与变迁之间的弧线集合. $\bullet x = \{y \in P \cup T \mid (y, x) \in F\}$ 表示一个库所或者变迁的前集, $x \bullet = \{y \in P \cup T \mid (x, y) \in F\}$ 表示一个库所或者变迁的后集, 图 1 是 Petri 网的图形表示的一个实例.关于 Petri 网的基本概念, 可以参考文献[11, 12].

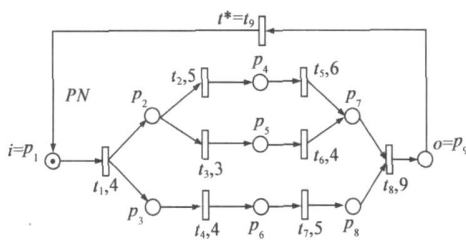


图 1 一个时间 workflow 网模型

为了估算基于 workflow 过程模型的业务过程的进度和工期, 本文在 workflow 网^[2]的基础上增加了时间的概念. workflow 模型的时间扩展模型有多种^[13-17], 为了便于

分析问题的本质和更清晰体现问题的特征, 本文基于一种简单的时间 workflow 网 TWF-net (Timed Workflow net) 模型, 它是 workflow 网的一种时间扩展模型. 一个 Petri 网 $PN = (P, T, D, F)$ 是 TWF-net, 需要满足以下条件:

- (1) PN 有两个特殊的库所: i 与 o . 库所 i 起始库所: $\bullet i = \emptyset$. 库所 o 是结束库所: $o \bullet = \emptyset$. $[i]$ 与 $[o]$ 分别表示 workflow 网的起始状态与结束状态.
- (2) 如果在 PN 中加入一个变迁 t^* , 且满足 $\bullet t^* = \{o\}$ 与 $t^* \bullet = \{i\}$, 那么所得到的扩展后的 Petri 网 $PN^* = (P, T \cup \{t^*\}, F \cup \{(o, t^*), (t^*, i)\})$ 是强联通的 (Strongly Connected).
- (3) $D: T \rightarrow N$, 表示某个变迁所指的活动需要的执行时间.

图 1 所示为一个基于时间 workflow 网建立的过程模型, 变迁编号后面的数值表示某个活动所需的执行时间.

命题 1 一个 workflow 网 PN 如果满足 soundness, 当且仅当 $(PN^*, [i])$ 是活的并且有界的^[2].

定义 1 合理点火序列 (Sound Firing Sequence) ^[18]
 设 $(PN, [i])$ 是一个 workflow 网, 对于一个点火序列: $\sigma: [i] \xrightarrow{\sigma} M$, 如果存在另一个点火序列 σ' 使得 $M \xrightarrow{\sigma'} [o]$, 那么称 σ 序列为合理点火序列.

workflow 网的 soundness 属性判定是 workflow 网分析的一个重要方面, 一般来讲基于 Petri 网的可达图的算法, 可以生成 workflow 网的可达图, 通过遍历可达图的状态空间可以判定 soundness 属性. 但是基于可达图的状态空间方法经常会遇到状态空间爆炸 (state space explosion)^[10, 19, 20] 的问题. 为此本文结合不变量与 workflow 网合理性 (soundness) 的关系, 提出了基于不变量的分析方法. 根据 workflow 网的特点以及 Petri 网的 T-不变量的特殊含义, 本文总结提出了 LMST-不变量的概念 (见定义 3), workflow 网中的一个 LMST-不变量对应着一个从初始状态到结束状态的合理执行序列 (sound firing sequence), 且一个 workflow 网如果是合理的 (sound), 那么该 workflow 网的活动 (变迁) 集合被 T-不变量覆盖, 即该 workflow 网可以分解为多个 T-构件的子网 (见定义 5), 而在 workflow 的执行含义上, 每一个 T-构件的子网可以映射为一个 PERT 图 (算法 1), 为此, 本文提出了从 T-构件的子网到 PERT 图的转换算法. 因此一个合理的 (sound) workflow 网可以分解为多个 PERT 图, 根据得到的 PERT 图可以估算 workflow 网的每一种执行方案的总工期和关键路径等规划问题 (programming problem), 由此可以解决基于 workflow 网的业务过程管理中的进度规划问题.

3 workflow 网的不变量分解方法

Petri 网可以表示成关联矩阵的形式, 依据 Petri 网的执行语义与状态方程, Petri 网存在两种不变量: P-不

变量 (Place invariant) 与 T-不变量 (Transition invariant)^[11, 12]. 这两个不变量与 Petri 网的有界性 (boundedness) 和活性 (liveness) 有着密切的关系, 而 workflow 网是一种特殊结构的 Petri 网, 借助 workflow 的不变量计算可以分析 workflow 网的合理性. 本文的分解技术主要涉及 T-不变量, 因此, 本文将介绍一些 T-不变量以及 workflow 网的 T-不变量的特殊概念.

定义 2 (关联矩阵, T-不变量)

(1) 一个 Petri 网 $PN = (P, T, F)$ 可以表示为一个关联矩阵, $PN: (P \times T) \rightarrow \{-1, 0, 1\}$, 该函数定义为

$$PN(p, t) = \begin{cases} -1, & \text{if } (p, t) \in F \\ 0, & \text{if } (p, t) \notin F \wedge (t, p) \notin F \text{ or } \\ & (p, t) \in F \wedge (t, p) \in F \\ 1, & \text{if } (t, p) \in F \end{cases}$$

(2) 对于一个 Petri 网 $PN = (P, T, F)$, T-不变量是方程组 $PN \cdot Y = 0$ 的整数解, 解的集合表示为 $J = \{J_1, J_2, \dots, J_n\}$. 本质上, T-不变量 J_k 是一个变迁向量 (T vector), 映射关系表示为 $J_k: T \rightarrow Z$. 一个 T-不变量 J_k 是半正的 (semipositive) 当且仅当 $J_k \geq 0 \wedge J_k \neq 0$. 一个 T-不变量 J_k 是正的 (positive) 当且仅当 $\forall t \in T: J_k(t) > 0$. $\|J_k\|$ 表示在 J_k 中值大于 0 的变迁的集合, 即 $\|J_k\| = \{t \in T \mid J_k(t) > 0\}$. 一个 Petri 网被 T-不变量覆盖, 当且仅当存在一个正 T-不变量 $J_k > 0$.

(3) 最小不变量: 对于一个半正 T-不变量 J_k , 如果不存在其它半正 T-不变量 J_x 包含于 J_k (即 $J_x \subset J_k$), 那么称 J_k 是最小的. 任何半正的不变量都是最小不变量的线性组合^[14]. 如果一个 Petri 网存在一个正不变量 (positive invariant), 那么任意不变量都是最小不变量的线性组合.

(4) T-不变量的基本性质: 令 (PN, M_0) 是一个网系统, J_k 是 PN 的一个 T-不变量, σ 是与 J_k 相关的 Parikh 向量^[14], 那么 $M \xrightarrow{\sigma} M$, 即在状态 M , 经过 J_k 中一组变迁的点火之后可以重新回到状态 M . 实际上, T-不变量对应着一个循环执行.

与一般 Petri 网相比, workflow 网具有一些特殊的结构限制, 因此 workflow 网的不变量具有一些特点和特殊含义. 基于 workflow 网的特点, 本文提出了 LMST-不变量.

定义 3 (workflow 网的 T-不变量)

令 $PN = (P, T, F)$ 是一个 workflow 网, t^* 是连接库所 o 与 i 的附加变迁, $PN^* = (P, T \cup \{t^*\}, F \cup \{(o, t^*), (t^*, i)\})$ 是其扩展模型. 对于一个 T-不变量 J_k , 如果 $J_k(t^*) = 1 \wedge J_k \geq 0$, 那么称 J_k 是合法的最小半正 T-不变量 (LMST-不变量, Legal Minimal Semipositive T-invariant). 设 J_k 是 LMST-不变量, 那么对应着一个实际的合理的执行序列 $(\sigma = u_1 u_2 \dots u_n t^*) \wedge (u_i \in T)$, 其中 $[i]$

$\xrightarrow{u_1} M_1 \xrightarrow{u_2} M_2 \longrightarrow \dots \xrightarrow{u_{n-1}} M_{n-1} \xrightarrow{u_n} [o] \xrightarrow{t^*} [i]$. 令 $\pi(\sigma)$ 是一个记录每个变迁在序列 σ 出现次数的向量, 那么有 $\pi[\sigma] = J_k$, $\pi(\sigma, t) = J_k(t)$ 表示变迁 t 在序列 σ 中出现的次数. 图 1 中的 LMST-不变量有 $[1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1]$ 与 $[1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1]$. 容易得出, 一个从 $[i]$ 到 $[o]$ 的合理点火序列对应着一个 LMST-不变量. 本文将侧重于基于 LMST-不变量的分析.

定义 4 子网 (Subnet)

设存在两个 Petri 网, $PN' = (P', T', F')$ 与 $PN = (P, T, F)$, 如果满足条件 $P' \subseteq P, T' \subseteq T$, 且 $F' = F \cap ((P' \times T') \cup (T' \times P'))$, 那么称 PN' 是 PN 的子网 (subnet).

定义 5 T-构件 (T component)

设存在两个 Petri 网, $PN' = (P', T', F')$ 与 $PN = (P, T, F)$, PN' 是 PN 的 T-构件 (T component), 当且仅当满足条件: (1) $PN' = (P', T', F')$ 是 Petri 网 $PN = (P, T, F)$ 的子网 (subnet), 且 $\forall t \in T': \bullet t \cup t \bullet \subseteq P'$. (2) $PN' = (P', T', F')$ 是一个标识图 (marked graph).

定义 6 T-覆盖 (T coverable)

一个 Petri 网 $PN = (P, T, F)$ 被称为 T-覆盖 (T-coverable), 当且仅当对于任意变迁 $t \in T$, 存在一个 T-构件 $PN' = (P', T', F')$ 使得 $t \in T'$.

定理 1 一个 Petri 网是良构 (well formed), 那么该 Petri 网存在一个正 T-不变量^[11].

定理 2 设 $PN = (P, T, F)$ 是一个 workflow 网, 如果 PN 满足 soundness 属性, 那么在其扩展网 $PN^* = (P, T \cup \{t^*\}, F \cup \{(o, t^*), (t^*, i)\})$ 中存在一个正 T-不变量, PN^* 被 T-不变量覆盖.

证明: 根据命题 1, 如果 $PN = (P, T, F)$ 满足 soundness 属性, 那么 $(PN^*, [i])$ 是活的 (live) 且有界的 (bounded). 所以在 $PN^* = (P, T \cup \{t^*\}, F \cup \{(o, t^*), (t^*, i)\})$, 以 $M_0 = [i]$ 为初始状态使得 (PN^*, M_0) 是活的且有界的. 那么根据良构 (well-formed) 的定义, PN^* 是良构的, 根据定理 1 可知, PN^* 中存在一个正 T-不变量. 根据 Petri 网及 workflow 网的 T-不变量的基本概念 (定义 2) 可知, PN^* 被 T-不变量覆盖.

定义 7 基于 LMST-不变量的分解

设 $PN = (P, T, F)$ 是一个 workflow 网, 如果 PN 满足 soundness 属性, PN 的扩展网为 $PN^* = (P, T \cup \{t^*\}, F \cup \{(o, t^*), (t^*, i)\})$, 设 J_k 是 PN^* 的一个 T-不变量, 那么由 J_k 分解得到的子网记为 $PN|_{J_k} = (P_k, T_k, F_k)$, 且满足以下条件: (1) $T_k = \|J_k\| \setminus \{t^*\}$, (2) $P_k = \{p \in \bullet T_k \mid p \in P\} \cup \{p \in T_k \bullet \mid p \in P\}$, (3) $F_k = \{(p, t) \mid p \in P_k \wedge t \in T_k \wedge (p, t) \in F\} \cup \{(t, p) \mid p \in P_k \wedge t \in$

$$T_{j_k} \wedge (t, p) \in F_j.$$

根据上述结论, 一个 workflow 网, 如果满足 soundness 属性, 可以根据 PV^* 的 LMST-不变量进行分解. 图 1 中的 workflow 网通过基于 LMST-不变量的分解, 得到图 2 中的两个子网.

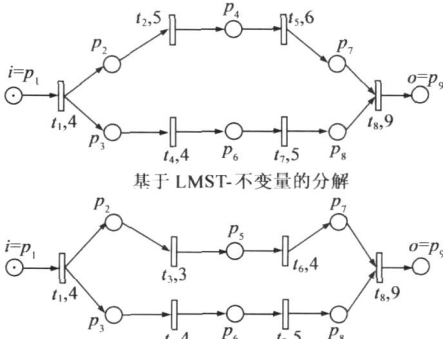


图 2 图 1 中 workflow 网的 LMST-不变量分解的结果

4 基于不变量的从 workflow 网到 PERT 图的转换方法

工作流过程模型是 workflow 管理系统的核心成分, 作为企业业务流程管理工具的工作流管理系统, 为了有效管理业务流程的进度, 需要提供一种基于工作流过程模型的进度估算方法. 而在传统的项目进度计划中, PERT 图是一种成熟的技术^[3-5], 因此通过建立从 workflow 网到 PERT 图的转换, 可以为 workflow 网的进度估算提供依据. 模型分解是 Petri 网及 workflow 网分析中常用的一种思路^[11, 17, 20], 本文基于 workflow 网模型以及 LMST-不变量的特点, 基于 LMST-不变量的分解得到的子网, 提出了一种从 LMST-不变量到 PERT 图的转换方法, 在 PERT 图的基础上可以计算各个执行分支的关键路径 (critical path).

定义 8 PERT 图的形式定义.

PERT 图是由一组活动组成的集合, 其活动集合记为 $PERT, ActSet$, 且活动集合中的每个活动成员 $t_x \in PERT, ActSet$ 的紧前活动的集合记为 t_x, pre , 用以表示 t_x 执行之前必须完成紧邻的前驱活动的集合, 每个活动有一个工时表示该活动的预计执行时间. 其图形表示如图 3 所示, 图中带编号的圆圈表示状态, 联接各状态之间的弧线表示活动.

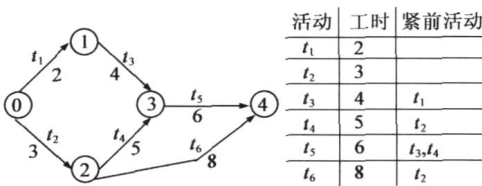


图 3 一个 PERT 图实例

从上述基于 LMST-不变量分解的思想可知, workflow 网中的一个 LMST-不变量对应着 workflow 过程的一个执行分支. 且一个 workflow 网如果是合理的 (sound), 那么该

workflow 网的活动 (变迁) 集合被 T -不变量覆盖, 即该 workflow 网可以分解为多个与 LMST-不变量对应的 T -构件 (定义 5) 的子网 (subnet). 即每一个子网对应着一个 workflow 网的一个执行分支, 在 workflow 网执行时, 如果选择了某个子网作为执行分支, 那么这个子网中的每个变迁 (活动) 都会被执行, 即子网中的变迁同时出现在与该子网对应的执行序列中. 从 PERT 图的含义来讲^[5], PERT 图中的每个活动也必须被执行. 因此 workflow 网的一个与 LMST-不变量对应的 T -构件的子网可以映射到一个 PERT 图. 从 T -构件到 PERT 图的转换关键是确定 T -构件中的变迁之间的执行顺序的依赖关系 (定义 9), 即由此计算出与之对应的 PERT 图中的每个活动的紧前活动集合 (PreActSet). 因此, 在 workflow 网的执行含义上, 每一个与 LMST-不变量对应的子网可以映射为一个 PERT 图, 为此, 本文提出了从 T -构件的子网到 PERT 图的转换算法. 因此一个合理的 (sound) workflow 网可以通过分解转换为多个 PERT 图, 根据得到的 PERT 图可以估算 workflow 网的每一种执行方案的总工期和关键路径等规划问题, 由此可以解决基于 workflow 网的业务过程管理中的进度规划问题.

定义 9 LMST-不变量中变迁之间的依赖关系.

设 t_1 与 t_2 是 $PV = (P, T, F)$ 中的两个变迁, 且存在一个 LMST-不变量 J_k , 使得 $(t_1 \in \parallel J_k \parallel) \wedge (t_2 \in \parallel J_k \parallel)$, 那么 t_1 与 t_2 之间的执行顺序的依赖关系可以由式 (1) 计算得到. $> (t_1, t_2) = 1$ 表示在与该 LMST-不变量对应的执行序列中, t_1 是 t_2 的直接前驱 (direct pre activity), 或者讲 t_2 是 t_1 的直接后继 (direct post activity), 其含义对应到 PERT 图中为 t_1 是 t_2 的紧前活动; $> (t_1, t_2) = 0$ 表示 t_1 与 t_2 没有之间的紧邻依赖关系, 其含义对应到 PERT 图中为 t_1 不是 t_2 的紧前活动.

$$> (t_1, t_2) = \begin{cases} 1, & \exists p \in P: (t_1, p) \in F, (p, t_2) \in F \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

根据上文的论述, 一个 LMST-不变量对应着一个 T -构件的子网, 而 T -构件的子网可以转换为一个 PERT 图. 下面本文给出从 LMST-不变量到 PERT 图的转换算法, 并在下一节给出该算法的一个应用实例. 从算法的循环结构可以看出, 其算法的时间复杂度为 $O(\parallel J_k \parallel)^2$.

算法 1 一个 LMST-不变量对应一个 PERT 图.

输入: J_k // 一个 LMST-不变量
 输出: $PERT_k$ // 一个 PERT 图
 begin

$PERT_k, ActSet := \parallel J_k \parallel \setminus \{t^*\};$ // 根据 LMST-不变量 $\parallel J_k \parallel$ 中的变迁集合得到 $PERT_k$ 的活动集合
 for all $t_x \in \parallel J_k \parallel \setminus \{t^*\}$ do

```

 $t_x.pre := \emptyset;$  //  $t_x.pre$  表示  $t_x$  的紧前活动集合, 初值为空
for all ( $t_y \in \parallel J_k \parallel \setminus \{t^*\} \}) \wedge (t_x \neq t_y)$  do
  if  $(t_y, t_x) = 1$  then // 根据定义 9 的紧前依赖关系计算  $t_x$  的紧前活动集合
     $t_x.pre := t_x.pre \cup \{t_y\};$ 
  end if
end for
end for
end

```

5 实例

图 4 所示为一个 workflow 网模型, 根据本文的上述定义, 其 LMST-不变量为 $J_1 = [1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]$, $J_2 = [1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 1, 1]$, 即 $\parallel J_1 \parallel = \{t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7, t_9, t_{10}, t_{11}, t_{12}, t_{13}, t_{14}, t_{15}\}$, $\parallel J_2 \parallel = \{t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_8, t_{11}, t_{12}, t_{13}, t_{14}, t_{15}\}$. 因此图 4 的 workflow 网模型可以根据 LMST-不变量分解为两个子网, 即分别对应着两个 PERT 图的活动集合: $PERT_1, ActSet = \{t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7, t_9, t_{10}, t_{11}, t_{12}, t_{13}, t_{14}\}$ 与 $PERT_2, ActSet = \{t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_8, t_{11}, t_{12}, t_{13}, t_{14}\}$

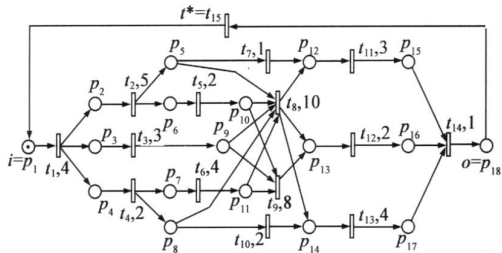


图 4 一个 workflow 网模型

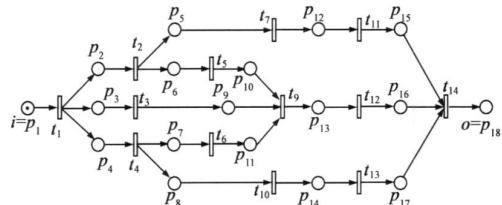


图 5 图 4 中基于 LMST-不变量分解得到的一个子网

t_{14} 与 J_1 相对应的子网如图 5 所示。对于图 5 所表示的子网, 根据定义 9 计算出两个子网中变迁(活动)之间的紧邻依赖关系, 再根据算法 1 可以计算出在与之对应的 PERT 图中的紧前活动依赖表如图 6 所示, 最后得出 PERT 图的图形表示为图 7 所示。按照同样的计算过程可以得出与 J_1 相对应的子网转换得到的另一个 PERT 图, 并可以根据关键路径 (critical path) 算法计算出两个 PERT 图的关键路径分别为 $[t_1, t_2, t_5, t_9, t_{12}, t_{14}]$ 与 $[t_1, t_2, t_5, t_8, t_{13}, t_{14}]$, 总工期分别为 22 与 26。

活动	工时	紧前活动
t_1	4	
t_2	5	t_1
t_3	3	t_1
t_4	2	t_1
t_5	2	t_2
t_6	4	t_4
t_7	1	t_2
t_9	8	t_3, t_5, t_6
t_{10}	2	t_4
t_{11}	3	t_7
t_{12}	6	t_9
t_{13}	4	t_{10}
t_{14}	1	t_{11}, t_{12}, t_{13}

图 6 与图 5 对应的 PERT 中的各活动的紧前活动表

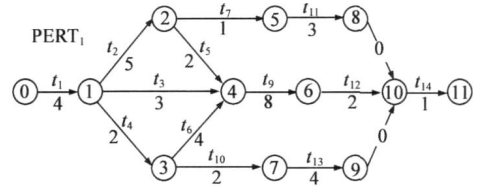


图 7 由图 6 得到的 PERT 图, 与图 5 中的子网对应

6 总结

workflow 技术常用于管理企业的业务过程, 由计算机软件支撑的 workflow 管理系统可以提高企业的业务过程的管理效率. 在 Internet 环境下, 基于 Web 的 workflow 能够为现代企业计算提供一种协同工作环境, 由此可以提升企业的商务能力和竞争力. workflow 过程模型是 workflow 管理系统的核心成分, 作为企业业务流程管理工具的工作 flow 管理系统, 为了有效管理业务流程的进度, 需要提供一种基于 workflow 过程模型的进度估算方法. workflow 网^[2]模型是 Petri 网应用于 workflow 过程建模的重要模型, 然而 workflow 网难以直接估算 workflow 过程的进度与工期, 而在传统的项目进度计划中, PERT 图是一种成熟的技术, 为此, 基于 workflow 网模型, 结合 LMST-不变量的特殊含义, 将一个合理的 (sound) workflow 网分解为多个与 LMST-不变量对应的 T 构件的子网, 并提出了一种将 LMST-不变量分解得到的子网转换为 PERT 图的算法. 一个合理的工作 flow 网可以通过分解转换为多个 PERT 图, 根据得到的 PERT 图可以估算 workflow 网的每一种执行分支的总工期和关键路径等, 由此可以解决基于 workflow 网的业务过程管理中的进度规划问题。

参考文献:

[1] Aalst W M P van der, Hee K van. Workflow Management: Models, Methods, and Systems[M]. Cambridge, Mass, USA: MIT Press, 2002.

[2] Aalst W M P van der. The application of Petri Nets to workflow

- management[J]. Journal of Circuits, Systems, and Computers, 1998, 8(1): 21- 66.
- [3] Pozewaunig H, Eder J, Liebhart W. ePERT: extending PERT for workflow management system [A]. Proceedings of the First East European Symposium on Advances in Databases and Information Systems (ADBIS' 1997) [C]. New York: ACM Press, 1997. 217- 224.
- [4] Eder J, Pichler H, Gruber W, Ninaus M. Personal schedules for workflow systems[A]. Proceedings of Business Process Management 2003[C]. Berlin: Springer Verlag, 2003. 216- 231.
- [5] 胡运权, 郭耀煌. 运筹学教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.
- [6] Sona J H, Kima J S, Kimb M H. Extracting the workflow critical path from the extended well formed workflow schema[J]. Journal of Computer and System Sciences, 2005, 70(1): 86- 106.
- [7] 范玉顺. workflow 管理技术基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [8] Stohr E A, Zhao J L. Workflow automation: overview and research issues[J]. Information Systems Frontiers, 2001, 3(3): 281- 296.
- [9] Salimifard K, Wright M. Petri net based modelling of workflow systems: an overview[J]. European Journal of Operation Research, 2001, 134(3): 664- 676.
- [10] Girault C, Valk R. Petri Nets for System Engineering: A Guide to Modeling, Verification and Application[M]. Springer Verlag, 2003.
- [11] Desel J, Esparza J. Free Choice Petri Nets[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1995.
- [12] 袁崇义. Petri 网原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [13] 李慧芳, 范玉顺. 基于时间 Petri 网的工作流模型分析[J]. 软件学报, 2004, 15(1): 17- 26.
Huifang Li, Yushun Fan. Workflow model analysis based on time constraint petri nets[J]. Journal of Software, 2004, 15(1): 17- 26. (in Chinese)
- [14] Li H C, Yang Y, Chen T Y. Resource constraints analysis of workflow specifications[J]. Journal of Systems and Software, 2004, 73(2): 271- 285.
- [15] Li H C, Yang Y. Dynamic checking of temporal constraints for concurrent workflow s[J]. Electronic Commerce Research and Applications, 2005, 4(2): 124- 142.
- [16] Lin C, Qu Y. Temporal inference of workflow systems based on time Petri nets: Quantitative and qualitative analysis[J]. International Journal of Intelligent Systems, 2004, 19(5): 417- 442.
- [17] Li J Q, Fan Y S, Zhou M C. Timing constraint workflow nets for workflow analysis [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part A, 2003, 33(2): 179- 193.
- [18] Dehnert J, Aalst W M P van der. Bridging the gap between business models and workflow specifications[J]. International Journal of Cooperative Information Systems, 2004, 13(3): 289- 332.
- [19] Valmari A. The state explosion problem[A]. Proceedings Lectures on Petri Nets I: Basic Models, Advances in Petri Nets [C]. Berlin: Springer Verlag, 1998. 429- 528.
- [20] 林闯. 随机 Petri 网和系统性能评价[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.

作者简介:



葛季栋 男, 1978 年生于江苏南通, 博士, 讲师. 研究方向为软件过程建模与分析、软件质量管理、形式化方法. E-mail: gjdju@163.com



胡 昊 男, 1975 年生于江苏南京, 博士生, 讲师. 研究方向为软件过程、软件质量管理、软件 Agent 技术.

吕 建 男, 1960 年生于江苏南京, 教授, 博士生导师. 主要研究领域软件形式化与自动化、软件 Agent 技术及其应用.