

基于模态 Petri 网的行为有效区间寻找最优路径的方法

方贤文¹ 陶小燕¹ 刘祥伟²

(安徽理工大学信息与计算科学系 淮南 232001)¹ (安徽理工大学信息管理系 淮南 232001)²

摘 要 为满足客户需求,在行为约束下的业务流程中寻找行为执行的最优路径具有一定的实际意义。已有的研究是在静态分析基础上,通过优化算法或是行为分析来寻找最优执行路径,忽略了行为约束条件对执行行为有效性的影响,所得结果具有一定的局限性。文中在已有方法的基础上,利用 Petri 网行为轮廓序关系描述约束条件并确定行为有效区间,提出了基于模态 Petri 网分支有效区间的业务流程最优路径选择方法。该方法以行为有效区间替代已有的固定值方法,以便更好地描述业务流程的行为约束以及约束下的有效行为。通过一个具体的业务流程分析实例分析了该方法的有效性。

关键词 行为轮廓,分支有效区间,行为约束,最优路径

中图分类号 TP391.9 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2014.07.018

Method of Optimal Path Selection Based on Modal Petri Net Branching Effective Range

FANG Xian-wen¹ TAO Xiao-yan¹ LIU Xiang-wei²

(Department of Information and Computing Science, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)¹

(Department of Information Management, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)²

Abstract For adapting business needs, looking for optimal path of behavior execution in business process under behavior constraints has a certain practical significance. The existing proposed methods are to search the optimal path by optimization algorithms or behavior analysis on the basis of static analysis, ignoring the impact of behavioral constraints on the effectiveness of the execution behavior, thus have some limitations. On the basis of the existing methods, using the ordering relation of Petri nets behavior profile to describe constraints and determine behavioral effective ranges, this paper proposed a method of optimal path selection in business process based on modal Petri net branching effective ranges. This method uses behavioral effective ranges to substitute for the existing fixed value, so as to better describe behavior constraints of business processes and effective behavior under constraints. Finally, a specific case analysis was given out, which shows the proposed method is effective.

Keywords Behavioral profile, Branching effective range, Behavior constraints, Optimal path

1 引言

目前的流程模型应用主要集中于具体问题的建模上,根据不同的行为服务目的可以构建不同的流程模型。随着计算机技术软件平台的不断成熟,以及流程模型应用领域的逐步扩展,势必会出现由多个子流程组合而成的大粒度的业务流程模型来解决单个服务对象不能满足所需功能的问题。这些子流程之间蕴含了执行逻辑,不同的子流程可实现相同的行为服务,但执行结果往往存在一定的差异。针对这种情况,以满足用户所需功能为前提,在一定的行为约束条件下研究流程模型中行为执行的结果属性显得尤为重要,而寻找流程模型中行为执行的最优路径则成为关键所在。

目前已有许多学者在研究业务流程中最优执行路径的问题。文献[1]针对行为约束下的行为执行路径问题,通过优化

算法,得到最优解,确定最优执行路径。在文献[2]中,对执行中不同路径的选择问题,利用优化算法得到次序优先级,自动选择最优路径。这些研究都是从静态角度考虑的,以固定值选择最优路径,没有涉及到行为在执行过程中的动态特征。

文献[3]利用行为轮廓约束关系,在业务流程中优化复杂事件查询。文献[4]通过分析行为,寻找约束条件下的最优路径。文献[5,6]对行为轮廓的3种关系,给出了行为关系的有效区域,在区域内研究行为的有效性。这为流程模型中最优执行路径的研究提供了新的思路。

基于以上背景,本文基于模态流程 Petri 网,根据其结构类型给出行为轮廓的定义,通过行为轮廓对活动变迁的约束关系,确定模型中每个分支区域在其内都有效的分支有效区间;之后结合 Petri 网的动态行为特征及标签函数的意义,在行为约束条件下,确定每个分支子流程中所有可选分支路径

到稿日期:2013-04-11 返修日期:2013-05-12 本文受国家自然科学基金项目(61272153,61170059,61340003),安徽省高校省级自然科学基金重点项目(KJ2011A086,KJ2012A073),安徽省自然科学基金项目(1208085MF105),安徽省软科学研究计划项目(12020503031)资助。

方贤文(1975—),男,博士,教授,硕士生导师,主要研究方向为 Petri 网、可信软件,E-mail:fangxianwen@hotmail.com;陶小燕 女,硕士生,主要研究方向为 Petri 网行为、服务计算;刘祥伟 女,硕士,副教授,主要研究方向为服务计算。

的最优执行路径,进而逐步动态演化确定整个流程模型的最优执行路径。此方法同样适用于寻找无行为约束下的业务流程的最优路径。本文所提出的方法充分考虑了模型中的所有信息,有效克服了通过固定值静态寻找最优路径带来的局限性。

本文第2节给出实例,引出本文所研究的问题;第3节介绍本文所用到的一些基本概念;第4节结合模态流程 Petri 网的动态行为特征与行为轮廓的相关定义,给出两个关键的算法在行为有效区间内寻找最优路径;第5节给出实例分析;最

后总结和展望未来工作。

2 动机例子

这部分给出一个电子购物的实例,通过阐述实例说明用固定值确定最优路径的局限性。

客户需购买一件商品 A 和两件商品 B,经搜索比较后,选定在商家 S_1 、 S_2 和 S_3 购买。图 1 是客户整个购买过程的流程图,其中 i 表示输入, o 表示输出,且图中循环结构默认只执行一次。

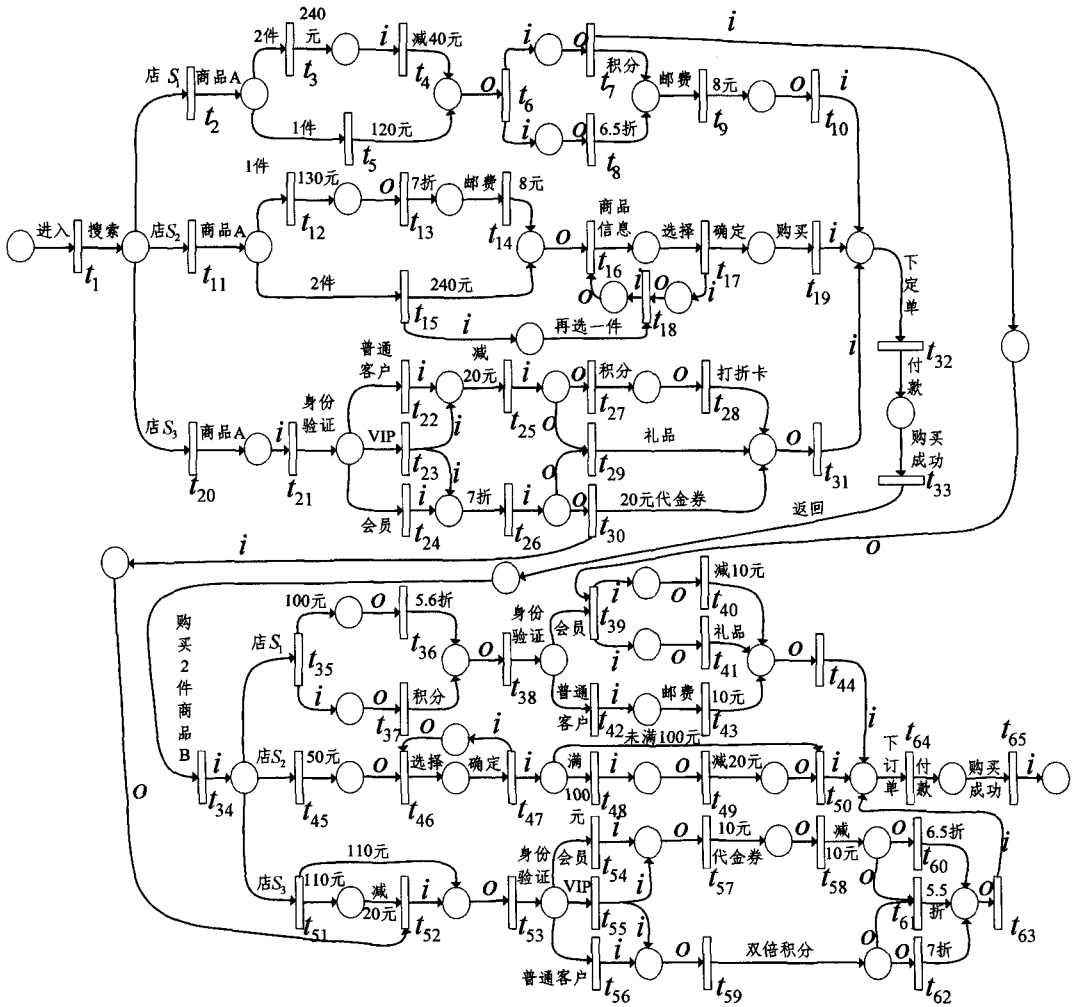


图 1 购买流程图

从图 1 可以看出,买家要成功购买商品 A 和商品 B,需要购买两次,且每次购买可任意选择卖家。为了使购买总金额 M 最小,可以通过寻找最优路径来实现。以前最优路径都是采用固定值的方法直接确定的,即先考虑以最低价格购买商品 A,在此基础上再以最低价格购买商品 B;或者以同样方法先考虑购买商品 B,再购买商品 A。通过这种方法得到本例中的最优路径为:首先在店 S_3 购买商品 A,之后在店 S_2 购买商品 B,在此路径下的 M 值为 134 元。在图 1 中我们找到一条购买路径:商品 A 和商品 B 都在店 S_1 购买,此路径下的 M 值为 132 元,产生的费用比上述方法少。

由此例可以看出,用固定值的方法找到的路径不一定是最优的。此方法的缺陷在于:局部化了路径的选择区域,忽略了其他数据信息对结果的影响。因此,需要寻找其它方法来

对此问题进行分析。

3 基础知识

这部分主要介绍本文用到的一些基本概念,其他相关概念见文献[7-9]。首先给出标签流程 Petri 网的定义;其次定义可行迹;最后给出行为轮廓的概念,以捕捉流程的动态行为特征。

定义 1^[10,11] (模态流程 Petri 网) 一个五元组 $LP_P = (P, T, F, \lambda, C)$ 为一个模态流程 Petri 网,满足以下条件:

- ① P 是条件节点的一个非空有限集, T 是活动变迁节点的一个非空有限集,且 $P \cap T = \emptyset$;
- ② $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$, 为 LP_P 的流关系;
- ③ $\lambda: F \rightarrow \Sigma$, 是一个流关系标签函数;

④ $C=\{od, or, pl, wio, cy\}$, 为流程网的结构类型, 即顺序、选择、并行、弱交叉和循环 5 种结构, 其中并行、弱交叉和循环统称交叉结构。

行为轮廓能有效捕捉网系统在行为执行过程中的顺序约束条件。本文定义的流程网中包含 5 种结构, 对应行为轮廓的 5 种关系, 这些关系都是建立在可行迹基础之上的。若 LP_P 中的两个节点或流关系中, 一个节点跟随在另一个节点之后发生, 那么这两个节点在同一条可行迹上。下面给出可行迹的定义。

定义 2^[10] (可行迹) 已知 $LP_P=(P, T, F, \lambda, C)$ 是一个模态流程 Petri 网。对 $(x, y) \subseteq (N \cup F) \times (F \cup N)$, 若存在一个发生序列 $\tau=n_1 n_2 \dots n_k$, 使得 $n_j=x, n_k=y$, 其中 $1 \leq j \leq k-1, j < k < k$, 则 τ 为一条可行迹, 记 $x < y$ 。

在可行迹基础之上, 一个 LP_P 中的两个活动变迁节点可以有 5 种不同的位置关系, 为了确定这 5 种关系的特征, 下面给出行为轮廓的定义。

定义 3^[12,13] (行为轮廓) 已知 $LP_P=(P, T, F, \lambda, C)$ 是一个模态流程 Petri 网。一个活动变迁对 $(t_x, t_y) \in (T \times T)$ 至少满足以下 5 种关系的一种:

- ①严格序关系 $\rightarrow$: 满足 $t_x < t_y$ 但 $t_y \not< t_x$;
 - ②互斥关系 $+$: 满足 $t_x \not< t_y$ 且 $t_y \not< t_x$;
 - ③交叉关系: 满足 $t_x < t_y$ 且 $t_y < t_x$, 可具体分为以下 3 种:
 - a) 并行关系 $\parallel$: 若存在 t_z , 使得 $t_z > t_x, t_z > t_y$ 同时成立;
 - b) 弱交叉关系 $\times$: 满足 $t_x < t_y$ 且 $t_y < t_x$, 或满足 $t_x \not< t_y$ 且 $t_y \not< t_x$;
 - c) 循环关系 $\leftrightarrow$: 满足 $t_x > t_y > t_x$ 和 $t_y > t_x > t_y$ 。
- 则称 $B_L=\{\rightarrow, +, \parallel, \times, \leftrightarrow\}$ 为 LP_P 的行为轮廓。

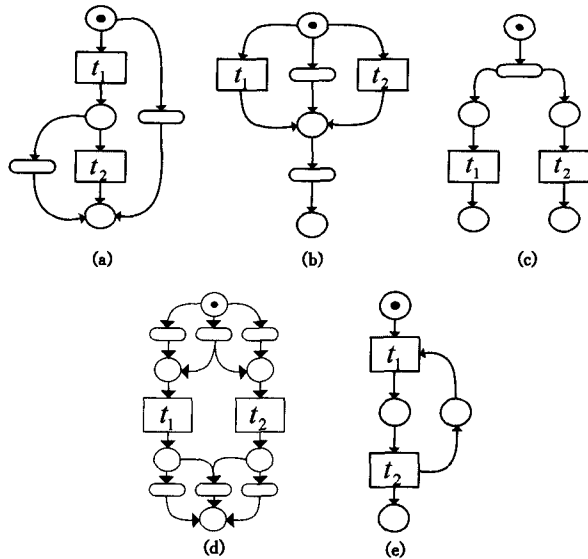


图 2 变迁的序关系

对于一个模态流程 Petri 网 $LP_P=(P, T, F, \lambda, C)$, 若给定初始标识 M_0 , 便可确定网中变迁之间的关系。图 2 给出 5 个示例, 分别说明行为轮廓的几种关系。 t_1 和 t_2 分别为每个图中特定标明的两个变迁。顺序关系如图 2(a) 所示, 说明两个变迁必须都发生, 从初始标识开始的所有发生序列中 t_1 的发生必然引起 t_2 的发生, 记为 $t_1 \rightarrow t_2$ 。互斥关系如图 2(b) 所

示, 说明在所有的发生序列中 t_1 和 t_2 都不会同时存在, 也可能存在一个发生序列都不包含 t_1 和 t_2 , 像这样的一对变迁记为 $t_1 + t_2$ 。并行关系如图 2(c) 所示, 说明两个活动变迁在同一初始标识下, 沿同一发生序列中的两条分支路线并行运行, 互不干扰, 记为 $t_1 \parallel t_2$ 。弱交叉关系的示例如图 2(d) 所示, 说明在一个发生序列中, 若 t_1 和 t_2 都发生, 则 t_1 和 t_2 可并行运行, 记为 $t_1 \times t_2$ 。循环关系如图 2(e) 所示, 说明两个活动变迁在同一初始标识下, 可以以任何顺序存在, 通常图 2(e) 中 t_1 和 t_2 的关系记为 $t_1 \leftrightarrow t_2$ 。

本文所研究的行为轮廓是建立在满足依赖关系的基础之上的, 即只考虑发生序列中直接活动变迁对所满足的行为轮廓关系。

4 基于分支有效区间寻找最优路径的分析

对行为约束下的流程模型而言, 行为执行过程中可能会存在一些行为约束。一个分支路径的执行影响并制约着其后的行为分支路径的选择。在这种情况下, 用固定值的方法, 以局部最优路径寻找整个行为执行的最优路径, 只会使寻找区域直接局部化, 忽略了其他路径所反映的信息, 很难保证结果的最优性。因此, 将所有路径列入考虑范围内, 考虑行为之间的约束关系, 有效、快速地寻找到最优路径, 是解决该问题的关键所在。

相对于固定值而言, 区间包含许多信息。包含 LP_P 中所有可执行路径信息的区间, 对最优路径的寻找起着至关重要的作用。在行为执行过程中, 将同一入口和同一出口之间的可选路径集中在一个区间内, 根据模型确定此类区间存在的个数, 按照行为执行顺序, 在每个区间内考虑所有可选路径的执行结果以及对其后路径执行的影响情况, 直到运行结束。在区间内寻找最优路径, 不但可以使得讨论问题全面化, 而且还可把对行为的分析转化为数学中的最优解问题。

对大粒度的流程模型而言, 即使确定了可选路径所在的区间, 在该区间内选择最优路径仍然是个值得探究的问题。Petri 网作为一种适合的工具可以指定网系统的行为。若区间内的值表示包含数条路径的分支结构, 结合 Petri 网的动态行为特征以及弧标签函数的意义, 在行为执行过程中动态演化确定分支结构中结果最优的路径, 可有效解决此类问题。这种动态的方法, 扩大化了问题讨论的区域, 将问题变得简单化。

LP_P 中出现分支结构的区域, 是寻找最优路径的关键所在。将这部分区域的分支结构对应到发生序列中所得到的不同的变迁序, 是运行结果存在差异的原因, 影响最优路径的判定。因此我们的工作只需对这部分区域进行分析即可。以下给出 LP_P 中分支区域的定义。

定义 4 (分支区域) 已知一个模态流程 Petri 网 $LP_P=(P, T, F, \lambda, C)$, 发生序列都可表示为 $t_1 t_2 \dots t_{k_1} T_1 t_{k_1+1} t_{k_1+2} \dots t_{k_2} T_2 t_{k_2+1} \dots t_{k_n} T_n t_{k_n+1} \dots t_{k_{n+1}}$ 的形式, 其中 $n \in \mathbb{N}^+, k_1 < k_2 < \dots < k_{n+1}$, 且 $T_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为不完全相同的变迁序列。对每个 i , 将 T_i 中所有变迁构成的最小子网称为 LP_P 的一个分支区域, 记为 B_i 。

我们将所有分支区域构成的集合称为分支区域集。分支

区域集包含了 LP_P 中影响行为执行结果的所有部分。因此,我们只在分支区域集中考虑最优路径的寻找问题。对每个分支区域,其变迁序列并不完全相同,故其内部必然存在分支路径。在此前提下,可将问题进一步转化为对分支区域中分支路径的分析。由此给出分支子流程的定义。

定义 5(分支子流程) 已知一个模态流程 Petri 网 $LP_P = (P, T, F, \lambda, C)$ 包含 n 个分支区域,对每个分支区域 B_i 对应的序列集 T_i ,有 $T_i = \{\delta_{ij} \mid \delta_{ij} = t_{j0} T_j^* t_{j1}, j \in N^+\}$,其中 T_j^* 为不完全相同的变迁序列,对每个 j ,将包含序列 $t_{j0} T_j^* t_{j1}$ 中所有变迁构成的最小子网称为 B_i 的一个分支子流程,记为 b_{ij} 。

在一个 LP_P 中,将迹语义抽象成行为轮廓。结合图 2,由关系约束条件的严格程度可知,在 LP_P 的执行语义中,一个发生序列内最有可能出现的是严格序和交叉序,满足互斥关系的两个活动变迁不可能同时存在于一个发生序列中。因此,我们认为 LP_P 中处于严格序和交叉序关系的活动变迁,是唯一可执行的;而且交叉序的执行可视为没有任何顺序约束条件。因此,在问题讨论过程中,我们将交叉序关系作为主导,严格序关系次之。根据行为轮廓的定义,两个活动变迁若处于交叉序关系,则必将处于并行、弱交叉或循环关系中的一种。为区分交叉序的 3 种关系,下面对 LP_P 的行为关系权值给出如下定义。

定义 6(行为关系权值) 已知 $B_L = \{\rightarrow, +, \parallel, \times, \leftrightarrow\}$ 为 $LP_P = (P, T, F, \lambda, C)$ 的一个行为轮廓。 $W_{\rightarrow} = |\forall (x, y) \in (T \times T): x \rightarrow y|$, $W_{\parallel} = |\forall (x, y) \in (T \times T): x \parallel y|$, $W_{\times} = |\forall (x, y) \in (T \times T): x \times y|$, $W_{\leftrightarrow} = |\forall (x, y) \in (T \times T): x \leftrightarrow y|$ 分别为严格序、并行序、弱交叉序和循环序的关系权值。

分支子流程作为 LP_P 的子网,同样可用此方法计算行为关系权值,再由此值得到一个有效值,称为分支有效值。为突出行为轮廓关系所占权重,我们对分支有效值给出如下定义。

定义 7(分支有效值) 已知 b_{ij} 为模态流程 Petri 网 $LP_P = (P, T, F, \lambda, C)$ 的一个分支子流程。 b_{ij} 中所含变迁的个数为 $|T_{ij}|$,则 b_{ij} 的分支有效值 v_{ij} 的计算方法为以下方法中的一种:

i) 若 b_{ij} 中含有交叉结构,则可分为以下 3 种情况:

ii) 仅含有交叉结构 3 种关系中的 1 种,则 b_{ij} 的分支有效值为 $v_{ij} = \frac{W}{|T_{ij}|}$;

iii) 含有交叉结构 3 种关系中的 2 种,则 b_{ij} 的分支有效值为 $v_{ij} = \frac{W_1 + W_2}{2|T_{ij}|}$;

iiii) 包含交叉结构中的 3 种关系,则 b_{ij} 的分支有效值为 $v_{ij} = \frac{W_1 + W_2 + W_3}{3|T_{ij}|}$;

2) 若 b_{ij} 中不含交叉结构,则 b_{ij} 的分支有效值为 $v_{ij} = \frac{W_{\rightarrow}}{|T_{ij}|}$ 。

每种序关系在其关系权值定义区间 $[0, W_r]$ 内都是有效的。基于以上分析, b_{ij} 在区间 $[0, v_{ij}]$ 内都是有效的,其变迁序列在此区间内皆可被执行。称该区间为 b_{ij} 的分支子区间,以下给出其定义。

定义 8(分支子区间) 已知 b_{ij} 为模态流程 Petri 网 $LP_P = (P, T, F, \lambda, C)$ 的一个分支子流程。 v_{ij} 为 b_{ij} 的分支有效值,

称区间 $[0, v_{ij}]$ 为 b_{ij} 的分支子区间。

分支子区间对应 b_{ij} 中的所有变迁序列。而一个 B_i 中可能存在几个分支子流程,每个分支子流程都可确定一个分支子区间,将这些分支子区间优化成一个总区间,该区间对应了 B_i 中所有的变迁序列。由此,给出分支有效区间的定义。

定义 9(分支有效区间) 已知 B_i 为模态流程 Petri 网 $LP_P = (P, T, F, \lambda, C)$ 的一个分支区域,且含有 m 个分支子流程,对每个分支子流程都有唯一确定的分支有效值 $v_{ij}, j = 1, 2, \dots, m$,取 $v_i = \max\{v_{ij}, j = 1, 2, \dots, m\}$,使得区间 $[0, v_i] = \bigcup_{1 \leq j \leq m} [0, v_{ij}]$,记 $[0, v_i]$ 为 B_i 的分支有效区间。

一个 LP_P 中可能存在数个分支区域,这些分支区域包含了对执行结果产生影响的所有信息,对最优路径的寻找起着至关重要的作用。它们的分支有效区间对应着 LP_P 中所有分支路径,解决了最优路径寻找的关键问题,扩大了路径搜索区域。为了确定 LP_P 的所有分支有效区间,我们给出如下算法。

算法 1 确定 LP_P 的所有分支有效区间

输入: $LP_P = (P, T, F, \lambda, C)$, 模态流程 Petri 网

输出: $[0, v_i], i = 1, 2, \dots$, 所有的分支有效区间

- (1) 由定义 4,按照行为执行顺序找出 LP_P 中的所有分支区域,分别记为 $B_1, B_2, \dots, B_n$,执行步骤(2);
- (2) 由定义 5,找出 B_i 中所有的分支子流程,分别记为 $b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{ij}$,并执行步骤(3);
- (3) 由定义 3,对每个分支子流程,若含有交叉结构,计算出其所满足交叉序关系的变迁对,否则计算其满足严格序关系的变迁对;并由定义 6 计算每种序关系权值,并执行步骤(4);
- (4) 由定义 7,计算出每个分支子流程对应的分支有效值,分别记为 $v_{ij}, j = 1, 2, \dots$,并执行步骤(5);
- (5) 将 $v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{ij}$ 的数值按由小到大的顺序排列,依次赋值给 v_{ij} ,使得 v_{ij} 满足关系式 $v_{ik} \leq v_{i, k+1}, k = 1, 2, \dots, j-1$,则 $v_i = \max\{v_{ij}, j = 1, 2, \dots\}$,执行步骤(6);
- (6) 使 $[0, v_i] = \bigcup_{1 \leq k \leq j} [0, v_{ik}]$,由定义 9,得 B_i 的分支有效区间为 $[0, v_i]$,输出 $[0, v_i]$,并执行步骤(7);
- (7) 若 $2 \leq i \leq n$,重复上述执行步骤,否则,算法终止,输出 $[0, v_i], i = 1, 2, \dots, n$,即为所要确定的所有分支有效区间。

在分支子流程中,处于互斥关系的变迁对虽然不可能都出现在同一条路径中,但它却成为区分分支路径的关键。对不存在行为约束的分支子流程,在序列中考虑这些分支路径的执行结构,会增加许多不必要的重复计算。因此,对这样的分支子流程,在一定的约束条件下,我们借助弧标签函数的意义,在分支路径的执行过程中,逐步动态演化确定分支子流程的最优分支路径。这种方法以分支子流程为最小单位,计算局部最优路径,使得讨论问题简单化,避免了大量重复计算,能快速有效地寻找最优路径。

按照行为执行顺序,我们将算法 1 得到的所有分支有效区间按序称为第 i 区间。对于行为约束下的 LP_P ,在行为运行过程中,前面区间内选择的分支路径可能会对其后区间内的分支路径选择有所限制。按照行为执行顺序,以某个分支区域为目标区域。在该区域内以最优分支路径为所求路径,考虑 LP_P 的行为约束关系,在其他分支区域内选择相对较优的分支路径。以这种固定值的方法选择局部最优分支路径,不能保证最终寻找到的最优路径是最优的。

在分支有效区间内寻找约束条件下的最优路径,考虑了 LP_P 中所有有效信息对寻找最优路径的影响,可以减少行为约束条件的丢失。在行为执行过程中,第一条分支路径一旦选定,根据行为约束条件,整个行为的执行路径在某种程度上可能得到确定。因此,第一区间对整个行为的执行路径选择起着很重要的作用。

以第一区间为分析基区间,考虑其内每个分支子流程的执行情况。对分支子流程内分支路径的选择,是否含有分支结构是处理问题的关键。在确定分支子流程的局部最优执行路径之后,由行为约束关系判定其后分支区域内有执行力的分支子流程,对这些分支子流程,先考虑其是否与前面路径对应的分支子流程存在行为约束关系,若存在,考虑存在约束关系的活动变迁是否存在于分支结构中,按情况不同分类处理。下面给出 LP_P 在分支有效区间内寻找最优路径的具体算法。

算法2 寻找约束条件下的最优路径

输入:算法1确定的 LP_P 的所有分支有效区间, $[0, v_i], i=1, 2, \dots, n$
输出: σ , 约束条件 T 下的最优路径

- (1)找出第一区间 $[0, v_1]$ 对应的分支区域内所有的分支子流程,分别记为 $b_{11}, b_{12}, \dots, b_{1j}$, 并执行步骤(2);
- (2)对 b_{11} , 结合弧标签函数, 按序执行, 若分支子流程中出现分支结构, 执行步骤(3), 否则, 执行步骤(4);
- (3)分别计算每个分支路径在约束条件 T 下的值, 取其优, 进而得到该分支子流程在约束条件 T 下的最优值 u_1 , 记录 u_1 对应的执行路径, 记为 σ_1 , 并执行步骤(5);
- (4)计算出该分支子流程在约束条件 T 下的值 u_1 , 记录 u_1 对应的执行路径, 记为 σ_1 , 并执行步骤(5);
- (5)考虑 b_{11} 与下一个分支区域的行为约束关系, 选出所有可执行的分支路径构成相应的分支子流程, 分别记为 $b_{21}, b_{22}, \dots, b_{2k}$, 执行步骤(6);
- (6)若 b_{21} 与 b_{11} 中的活动变迁存在行为约束关系, 且该活动变迁位于 b_{11} 的选择结构中, 执行步骤(7), 否则执行步骤(8);
- (7)按行为执行次序, 对 b_{11} 和 b_{21} 中所有可选分支路径, 分别计算其在约束条件 T 下的值, 取最优值 u_{11} , 记录 u_{11} 对应的执行路径, 记为 σ_{11} , 并执行步骤(9);
- (8)对 b_{21} , 重复步骤(2)~(4), 记录 b_{11} 和 b_{21} 在约束条件 T 下的最优值 u_{11} 对应的执行路径, 记为 σ_{11} , 并执行步骤(9);
- (9)当 $2 \leq i \leq k$ 时, 对 b_{2i} 重复步骤(5)~(8), 依次得到 $\sigma_{12}, \sigma_{13}, \dots, \sigma_{1k}$, 然后执行步骤(10);
- (10)对 $b_{21}, 1 \leq i \leq k$, 重复步骤(2)~(9), 直到在第 n 区间依次得到最优值 $u_{11}, \dots, u_{1j}, \dots, u_{1n}$ 对应的 $\sigma_{11}, \dots, \sigma_{1j}, \dots, \sigma_{1n}$, 在 $u_{11}, \dots, u_{1j}, \dots, u_{1n}$ 中取最优值, 记为 $\bar{u}_1$, 其对应的执行路径记为 $\bar{\sigma}_1$, 执行步骤(11);
- (11)对 $b_{11}, 2 \leq i \leq j$, 重复步骤(2)~(10), 依次得到最优值 $\bar{u}_2, \bar{u}_3, \dots, \bar{u}_j$ 对应的 $\bar{\sigma}_2, \bar{\sigma}_3, \dots, \bar{\sigma}_j$, 在 $\bar{u}_1, \bar{u}_2, \bar{u}_3, \dots, \bar{u}_j$ 中取最优值 u , 记 u 对应的执行路径为 σ , σ 即为所要寻找的最优路径, 输出 σ 。

在约束条件下寻找 LP_P 中的最优执行路径, 首先确定 LP_P 的所有分支有效区间, 考虑行为约束条件, 按照行为执行次序, 在分支有效区间对应的分支区域内选出所有可选分支路径, 构成相应的分支子流程, 以分支子流程为最小单位, 通过动态演化逐步确定最优路径。在区间内考虑所有可执行路径, 并结合 Petri 网的动态行为特征与弧标签函数的意义, 相比执行序列而言, 以分支子流程为最小研究单位, 从中选择局部最优路径, 有效降低了讨论问题的复杂度。

5 实例分析

回顾本文第2节提出的电子购物的例子, 以所需费用最少为约束条件, 下面用分支有效区间的方法来寻找最优路径。

在图1中, 由定义4找出模型中所有的分支区域 B_i 和 B_2 , 再由定义5确定每个分支区域的分支子流程。比如, 图3为第一分支区域的一个分支子流程 b_{11} 。由算法1, 在分支区域 $B_i (i=1, 2)$ 中, 由活动变迁间的约束关系计算 $b_{ij} (i=1, 2; j=1, 2, 3)$ 的交叉序关系权值、分支有效值和分支有效区间, 结果如表1所列。由此得到 LP_P 的两个分支有效区间分别为 $[0, 0.22]$ 和 $[0, 0.2]$ 。再由算法2, 在第一区间 $[0, 0.22]$ 内, 以每个分支子流程为最小计算单位, 充分考虑行为约束条件, 在第二区间内计算所有可执行分支子流程的局部最优路径, 比较所有结果, 取最优值对应的路径为最优路径。表2中列出了以第一分支区域中的每个分支子流程为执行路径所确定的最优值和最优路径。用图1中变迁序列代表执行路径, 在所有分支区域内寻找到的路径 $t_1 t_2 t_5 t_6 t_7 t_8 t_9 t_{10} t_{32} t_{33} t_{34} t_{35} t_{36} t_{37} t_{38} t_{39} t_{40} t_{41} t_{44} t_{64} t_{65}$ 为约束条件下的最优路径, 即买家在店 S_1 购买商品 A 和商品 B , 所用总金额最少。

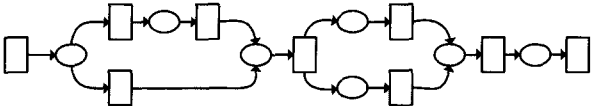


图3 分支子流程 b_{11}

表1 $B_i (i=1, 2)$ 的分支有效区间

B_i	b_{ij}	W	v_{ij}	$[0, v_i]$
B_1	b_{11}	1	0.11	$[0, 0.22]$
	b_{12}	2	0.22	
	b_{13}	1	0.08	
B_2	b_{21}	2	0.2	$[0, 0.2]$
	b_{22}	1	0.17	
	b_{23}	2	0.15	

表2 $b_{1i} (i=1, 2, 3)$ 确定的最优值和最优路径

b_{1i}	最优值	最优路径
b_{11}	132	$t_1 t_2 t_5 t_6 t_7 t_8 t_9 t_{10} t_{32} t_{33} t_{34} t_{35} t_{36} t_{37} t_{38} t_{39} t_{40} t_{41} t_{44} t_{64} t_{65}$
b_{12}	149	$t_1 t_{11} t_{12} t_{13} t_{14} t_{16} t_{17} t_{19} t_{32} t_{33} t_{34} t_{45} t_{46} t_{47} t_{48} t_{49} t_{50} t_{64} t_{65}$
b_{13}	134	$t_1 t_{20} t_{21} t_{23} t_{25} t_{26} t_{29} t_{31} t_{32} t_{33} t_{34} t_{45} t_{46} t_{47} t_{48} t_{49} t_{50} t_{64} t_{65}$

对行为约束下的 LP_P , 用固定值的方法寻找到的最优路径为 $t_1 t_{20} t_{21} t_{23} t_{25} t_{26} t_{29} t_{31} t_{32} t_{33} t_{34} t_{45} t_{46} t_{47} t_{48} t_{49} t_{50} t_{64} t_{65}$ 。虽然在店 S_3 购买商品 A 所用费用最少, 但也限制了之后购买商品 B 的费用额度。这种以局部最优路径确定的整个流程最优执行路径不一定就是最优的。而在分支有效区间内寻找最优路径就不会出现这样的问题, 它将流程中所有信息都包含在内, 将整个寻找区域扩展到最大, 避免信息的丢失, 将所有结果在区间内比较以确认最优解与最优路径, 因此这种方法是有效的, 克服了用固定值方法的片面性。

结束语 为满足客户需求, 在行为约束下的业务流程中寻找行为执行的最优路径具有一定的实际意义。固定值方法仅以局部最优值考虑行为的执行情况, 忽略了行为约束条件对执行路径的影响, 所得结果缺少验证, 具有一定的片面性。本文在已有方法的基础上, 利用行为轮廓序关系的约束条件, 用一个算法得到了所有的分支有效区间, 在这些分支有效区间内寻找最优路径, 并给出了寻找算法。

本文贡献如下:(1)针对先前固定值方法的缺陷,引入了分支有效区间的概念;(2)分析了用分支有效区间寻找最优路径的方法,并给出了寻找最优路径的方法;(3)用实例验证了在分支有效区间内寻找流程最优路径的有效性,即保全了流程模型的所有信息,将寻找区域最大化,通过逐个比较得到的最优解更有说服力。

本文下一步将优化该方法,并进一步针对有效区间来分析业务流程变化域等。

参 考 文 献

- [1] Yannibelli V, Amandi A. Hybridizing a multi-objective simulated annealing algorithm with a multi-objective evolutionary algorithm to solve a multi-objective project scheduling problem [J]. *Expert Systems with Applications*, 2013, 40: 2421-2434
- [2] Ranjan S P, Km B, Raghurama G. An approach of optimal path generation using ant colony optimization[C]// 2009 IEEE Region 10 Conference (TENCON 2009). Singapore: IEEE, 2009: 1632-1637
- [3] Weidlich M, Ziekow H, Mendling J. Optimising complex event queries over business processes using behavioural profiles[C]// *Business Process Management Workshops*, 2011. Hoboken, NJ: Stevens Inst Technol, 2011: 743-754
- [4] Fazlollahtabar H, Mahdavi-Amiri N. Producer's behavior analysis in an uncertain bicriteria AGV-based flexible jobshop manufacturing system with expert system [J]. *Int J Adv Manuf Technol*, 2013, 65: 1605-1618
- [5] Smirnov S, Weidlich M, Mendling J. Business process model ab-

straction based on behavioral profiles [C] // *Service-Oriented Computing(ICSOC 2010)*. San Francisco, CA, 2010: 1-16

- [6] Smirnov S, Weidlich M, Mendling J. Business process model abstraction based on synthesis from well-structured behavioral profiles [J]. *Information Systems*, 2012, 21(1): 55-83
- [7] Weidlich M, Mendling J, Weske M. Efficient consistency measurement based on behavioural profiles of process models[J]. *Software Engineering*, 2011, 37(3): 410-429
- [8] Weidlich M, Weske M, Mendling J. Change propagation in process models using behavioural profiles[C]// *IEEE Int. Conf. on Services Computing*. Potsdam, 2009. 2009: 33-40
- [9] 蒋昌俊. Petri 网的行为理论及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 6-42
- [10] Fang Xian-weng, Hao Wen-jun. The Approach of Analyzing the Smallest Change Domain in Process Models based on Petri Nets [J]. *Applied Mathematics and Information Sciences*, 2012, 6(3): 943-949
- [11] Elhog-Benzina D, Haddad S, Hennicker R. Refinement and Asynchronous Composition of Modal Petri Nets[C]// *Trans. on Petri Nets and Other Models of Concurrency V(LNCS 6900)*. Berlin Heidelberg: Springer, 2012: 96-120
- [12] Weidlich M, Polyvyanyy A, Desai N, et al. Process compliance analysis based on behavioural profiles [J]. *Information Systems*, 2011, 36(7): 1009-1025
- [13] Weidlich M. Behavioural profiles—a relational approach to behaviour consistency [D]. Potsdam: Hasso Plattner Institute, University of Potsdam, 2011

(上接第 76 页)

线支线的信号灯,可以自适应调节支线交叉口各方向绿灯的时间分配,使得从主路口驶向从路口的车流量可以顺利通过从路口,避免了因支线道路排队车辆过多而导致干线交叉口的堵塞,可以在保证绿波带畅通的同时,使支线车辆尽可能多地通过,提高了交叉口的通行效率。

参 考 文 献

- [1] 卢凯,徐建闽,陈思溢,等. 通用干道双向绿波协调控制模型及其优化求解[J]. *控制理论与应用*, 2011, 28(4): 551-555
- [2] Hu Pei-feng, Tian Zong-zhong, Yuan Zhen-zhou, et al. Variable-Bandwidth Progression Optimization in Traffic Operation[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2011, 11(1): 61-72
- [3] Qu Da-yi, Huang Rong-gui, Chen Xiu-feng, et al. Algebraic Optimization Method for Arterial Road Signal Coordination Control [C]// *ASCE*. 2011: 923-932
- [4] Huang Y S, Su P J. Modeling and Analysis of Traffic Light Control Systems[J]. *IET Control Theory Appl*, 2009, 3(3): 340-350
- [5] 吴哲辉. Petri 网导论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006
- [6] 李晓峰, 黄国兴, 李东. 基于多尺度融合的城市交通路网仿真系统研究[J]. *计算机科学*, 2013, 40(2): 108-111
- [7] Farhi N, Goursat M, Quadrat J P. The Traffic Phases of Road Networks[C]// *Transportation Research Part C*. 2011, 19: 85-102

- [8] 徐杨, 张玉林, 孙婷婷, 等. 基于多智能体交通绿波效应分布式协同控制算法[J]. *软件学报*, 2012, 23(11): 2937-2945
- [9] Lu Kai, Zeng Xiao-si, Li Lin, et al. Two-Way Bandwidth Maximization Model with Proration Impact Factor for Unbalanced Bandwidth Demands[J]. *American Society of Civil Engineers*, 2012, 138: 527-534
- [10] Song Xian-min, Tao Peng-fei, Chen Li-gang, et al. Offset Optimization Based on Queue Length Constraint for Saturated Arterial Intersections[J]. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2012, 2012: 907639
- [11] Michel dos Santos Soares. Responsive Traffic Signals Designed with Petri Nets[C]// *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Suntec Singapore, October 2008: 1942-1947
- [12] Wu Xian-yu, Tian Zong, Hu Pei-feng, et al. Bandwidth Optimization of Coordinated Arterials Based on Group Partition Method [J]. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2012, 43: 232-244
- [13] Vazquez C R, Sutarto H Y, Boel R. Hybrid Petri net model of a traffic intersection in an urban network. *IEEE International Conference on Control Applications*[C]// *Part of 2010 IEEE Multi-Conference on Systems and Control*. Yokohama, 2010: 658-664
- [14] Dezani H, Gomes L, Damiani F. Controlling Traffic Jams on Urban Roads Modeled in Coloured Petri Net using Genetic Algorithm[C]// *38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*. Montreal, Canada, October 2012: 3043-3048