

分布式 workflow 执行站点多目标随机决策^①

孙红俊^② 范玉顺^③

(清华大学自动化系 北京 100084)

摘 要 针对面向服务的企业(SOE)环境下 workflow 在分布式执行性能方面存在的不足,提出了一种基于随机决策的动态(运行时)执行站点优化方法。该方法以扩展服务 workflow 网,增加软约束和硬约束作为站点优化的基础,对环境的动态性和服务随机性进行分析,针对分片的四种结构,以组合服务质量最优为目标,建立多目标动态执行站点随机线性规划模型,并进行求解。应用实例验证了该方法的可用性。与现有工作相比,所提出的算法使 workflow 执行性能得到了明显提高,并消除了活动并行执行中存在的资源瓶颈。

关键词 分布式 workflow, 模型分割, 执行站点, 随机决策, 线性规划

0 引 言

工作流动态模型分割是一个实现面向服务的企业^[1](service oriented enterprise, SOE)环境下 workflow 分布式执行的有效方法。通过这种方法,全局 workflow 模型在执行过程中被分割成小的分片并分配到不同企业执行^[2]。近年来,研究者在模型分割方面取得了显著成就^[2-7]。在业务流程执行语言(business process execution language, BPEL)分布式执行领域,IBM 印度研究中心在模型分割、分割方法正确性验证以及基于编排的数据流领域开展了一系列研究^[3-5]。文献[6]基于服务组合方法,给出了局部流程构建以及部署到各个站点的算法。基于 Petri 网,文献[2]和[7]给出了静态和动态模型分割方法,对分片的结构正确性进行了验证,并对分割策略和效率进行了分析。然而,现有的研究工作主要侧重于模型分割系统的设计、模型分割算法的实现以及正确性验证等,缺乏对具体应用环境的分析,忽略了执行站点性能、Web 服务的非功能属性、Web 服务的随机性和环境的动态性等要素,从而使 workflow 在分布式执行性能方面存在不足。

本文通过扩展服务 workflow 网,增加影响 workflow 执行性能的要素来定义约束服务 workflow 网。这些约束可分为两类,即软约束和硬约束。硬约束是分片模型强制遵循的约束,主要包括组织壁垒、资源能力、数据安全等。软约束是非强制性的约束,例如用户

偏好、并行执行约束、数据传输等。此外基于角色建立变迁、资源服务以及联邦组织服务之间的关系。考虑到环境的动态性,将服务的状态变化建模成连续时间 Markov 链(continuous-time Markov chain, CTMC)。根据分片的四种执行结构和服务质量(QoS),将 workflow 动态执行站点选择问题建模成多目标随机线性规划的形式,然后将随机线性规划模型转换成等价的确定性整数线性规划模型,并应用分支定界算法和修正启发式算法的混合策略在运行时进行求解。所提出方法的优点主要包括:通过考虑影响 workflow 执行的因素而增强了性能;通过在运行时分配执行站点提高了灵活性;通过并行执行约束避免了并行执行瓶颈等。

1 约束服务 workflow 网

为了便于形式化分析和逻辑正确性验证,采用以着色 Petri 网为基础的服务 workflow 网^[2]建立业务过程模型。此外,在面向服务的企业(SOE)中,考虑到软约束和硬约束对 workflow 分布式执行性能有着重要的影响,定义约束服务 workflow 网,描述服务 workflow 网与这些要素之间的关系。考虑到柔性的需要,将活动执行分配给具体角色负责,并由承担相应角色职责的多个资源服务之一来完成。

定义 1 约束服务 workflow 网(constrained service workflow net, CSWF-net)是一个四元组 $CSWF-net =$

① 863 计划(2007AA04Z150)和国家自然科学基金(60674080)资助项目。

② 女,1977 年生,博士,工程师;研究方向:企业建模, workflow 技术,企业信息化规划;E-mail: sunhj05@mails.tsinghua.edu.cn

③ 通讯作者, E-mail: fanyus@tsinghua.edu.cn

(收稿日期:2009-03-06)

(W, RI, C, R) , 其中:

(1) $W = \{W_1, W_2, \dots, W_\mu\}$ 是服务 workflow 网集合。

(2) $RI = \{RI_1, RI_2, \dots, RI_m\}$ 是角色集, RI_i 表示 SOE 环境下定义的一个角色。

(3) $C = \{Rc, O, S\}$ 表示约束集, 其中:

(a) $Rc = \{Rc_1, Rc_2, \dots, Rc_n\}$ 表示资源服务池集, Rc_i 对应第 i 个资源服务池。

(b) $O = \{O_1, O_2, \dots, O_m\}$ 表示联邦组织服务集, O_i 对应第 i 个联邦组织服务。

(c) $S = \{Su, Sd, Sc, \dots\}$ 表示软约束集, 其中 Su 表示用户偏好约束, Sd 表示数据传输约束, Sc 表示并行执行约束, 该模型可扩展其它软约束。

(4) $R = \{Rr, Rs, Ro, Rp\}$ 表示关系集, 其中:

(a) $Rr: T_{W_i} \rightarrow RI$ 表示 W 和 RI 之间的映射关系, T_{W_i} 是服务 workflow 网 W_i 所包含的变迁集。对应 $\forall T_i \in T$, 角色集 $subRI \subseteq RI$ 用来承担 T_i 的执行, 角色 $RI_i \in subRI$ 作为主管角色负责 T_i 的执行。

(b) $Rs \subseteq RI \times Rc$ 表示 RI 和 Rc 之间的二元关系。对应 $\forall T_i \in T$, 主管角色 RI_i 负责从资源服务池中选择资源服务来支持 workflow 执行。假如资源服务池 Rc_i 包含 Y_i 个资源服务, RI_i 的职责是要从指派的资源服务中选择一个服务来触发变迁 T_i 。

(c) $Ro \subseteq RI \times O$ 表示 RI 和 O 之间的多对多关系。 $RI_i \in RI$, RI_i 对应多个联邦组织服务, $Rc_i \in Rc$, Rc_i 和多个角色相关。

(d) $Rs: T_{W_i} \rightarrow S$ 表示变迁 T_{W_i} 和软约束 S 之间的对应关系。

图 1 给出了约束服务 workflow 网的图形化表达。第一层描述了服务 workflow 网, 软约束集 $\{Su_k, Sd_k, Sc_k\}$ 对应变迁 T_k , 其中, Su_k 表示 T_k 的用户偏好约

束, Sd_k 表示数据传输约束, Sc_k 表示并行执行约束。中间层是角色维, 该层中任意变迁 T_k 的触发都由特定角色 r_j 负责。第三层定义了负责执行第二层中各种角色职责(或功能)的资源服务池, 描述了资源服务池所属的联邦组织服务, 提供了活动执行站点, 其中, so_i 表示联邦组织服务, sr_j 表示资源服务池。而图中不同层次之间的虚线描述了三个视图之间的映射关系。

约束服务 workflow 网是 workflow 网的扩展, 它具有 workflow 网的基本属性。约束服务 workflow 网是完备的当且仅当 (P, T, F) 是完备的 workflow 网, 这里只考虑完备的约束服务 workflow 网。根据模型分割算法^[2], 在运行时, 约束服务 workflow 网动态分割成若干分片。

定理 1 给定一个约束服务 workflow 网 W , 它的分片记作 $F_W = \{F_{W1}, F_{W2}, \dots, F_{Wm}\}$, 如果 W 是完备的, 则 $F_{Wi} (F_{Wi} \in F_W)$ 是完备的, 且 W 和 F_W 行为一致。

证明: 由于约束服务 workflow 网是服务 workflow 网的约束扩展, 它们具有同样的结构特点, 已从全局模型的完备性、各分片的完备性以及分片前后行为的一致性三个方面进行了证明^[2], 这里不再赘述。

根据 workflow 的基本控制结构^[8], 分片的结构可分为 4 类: 顺序执行分片、并行执行分片、选择执行分片和循环执行分片。

2 执行站点多目标随机决策模型

由于 Web 服务具有动态性, 执行站点选择问题变得具有随机性, 从而导致其物理特性不确定。为了能够在运行时准确地获得执行站点, 将分布式 workflow 执行站点选择问题建模成多目标随机决策的形式。在随机决策模型中, 需要考虑软约束、硬约束、Web 服务非功能属性以及分片的执行结构等要素。

2.1 服务候选集获取

获取服务候选集是构建随机决策模型的一个必要步骤。给定一个约束服务 workflow 网 W , 其中, $T = \{T_1, T_2, \dots, T_m\}$ 表示变迁集, $RI = \{RI_1, RI_2, \dots, RI_n\}$ 表示角色集, $O = \{O_1, O_2, \dots, O_n\}$ 对应联邦组织服务集, $Rp = \{Rp_1, Rp_2, \dots, Rp_n\}$ 是资源服务池集合。根据 W 中所定义的关系, 可得到下面的定义和结论。

定义 2 根据约束服务 workflow 网 W 中所描述的映射关系 $F: T \rightarrow R$, 变迁-角色矩阵 $M = \{m_{ij}\}_{m \times n}$ 可定义为一个 $m \times n$ 维矩阵, 其中, $m_{ij} = 0$ 或 $m_{ij} = 1$ 。

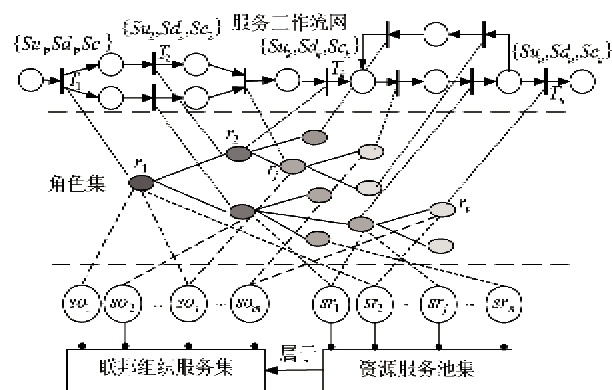


图 1 约束服务 workflow 网图形化表达

$m_{ij} = 1$ 表示变迁 T_i 的触发需要角色 RL_j 的支持,反之, $m_{ij} = 0$ 。由于每个变迁触发都需要一个特定角色来执行,矩阵 M_k 的每一列只有一项值为 1。

定义 3 约束服务 workflow 网 W 中所描述的多对多关系 $Ro \subseteq RL \times O$ 表明,角色-联邦组织服务矩阵 $N = \{n_{ij}\}_{n \times v}$ 可定义为一个 $n \times v$ 维矩阵,其中 $n_{ij} = 0$ 或 $n_{ij} = 1$ 。

当 $n_{ij} = 1$ 时,在联邦组织服务 O_j 中包含角色 RL_i ,反之 $n_{ij} = 0$ 。当 $n_{ij} = 1$ 时,有一个或多个资源服务池候选集支持角色 RL_i 在企业 O_j 中执行。

定义 4 根据约束服务 workflow 网 W 中所描述的二元关系 $Rs \subseteq RL \times Rc$,角色-可用资源服务池矩阵 $A = \{a_{ij}\}_{n \times v}$ 可定义为一个 $n \times v$ 维矩阵,其中, $a_{ij} = 0$ 或 $a_{ij} = 1$ 。

定义 5 $\forall RL_i, Rp_j$, 设 Rp_j 包含于 O_k 中,如果 $a_{ij} = 1$ 且 $n_{ik} = 0$, 则 $a'_{ij} = 0$ 。令 $a'_{ij} = a_{ij}$, 角色-资源服务池矩阵 $A' = \{a'_{ij}\}_{n \times v}$ 是一个 $n \times v$ 维矩阵,其中, $a'_{ij} = 0$ 或 $a'_{ij} = 1$ 。

$a'_{ij} = 1$ 表示资源服务池 Rp_j 支持角色 RL_i 的执行,反之 $a'_{ij} = 0$ 。

根据定义 2 和定义 3,变迁-联邦组织服务矩阵 $B = \{b_{ij}\}_{m \times v} = M^T \times N$ 可表示为一个 $m \times v$ 维矩阵,其中 $b_{ij} = 0$ 或 $b_{ij} = 1$ 。 $b_{ij} = 1$ 表示 O_j 是 T_i 的候选服务,反之 $b_{ij} = 0$ 。基于定义 2 和定义 5,变迁-资源服务池矩阵 $A'' = M^T \times A' = \{a''_{ij}\}_{m \times v}$ 定义为一个 $m \times v$ 维矩阵,其中 $a''_{ij} = 0$ 或 $a''_{ij} = 1$ 。相应地,对于 W 中的每个变迁,都可根据上述过程构建联邦组织服务和资源服务候选集。

2.2 服务动态性分析

由于有许多提供同样或相似功能却有着不同服务质量的资源服务,因而需要考虑用户的非功能需求。QoS 是决定用户满意程度的服务性能的综合效果,资源服务的性能可通过 QoS 属性和参数来评估。根据需求选择执行时间 T 、执行费用 C 、可靠性 R 和可用性 A 这 4 个指标。

在 SOE 中,动态性分析的核心是 Web 服务的随机性分析。Web 服务随机性起源于服务的状态变化,而状态变化也会引起 QoS 属性的变化。重点关注联邦组织服务和资源服务的动态性分析,它们对分布式 workflow 执行性能有着很重要的影响。为了分析这两种服务的动态性,采用连续时间 Markov 链 (CTMC) 建模服务的状态变化。假设服务执行时间 T 和成本 C 符合指数分布,可用性 A 和可靠性 R 可

基于 CTMC 的数学属性进行计算。

对于有限时间 CTMC,设 $P(s_i, s_j)$ 是转换概率函数, $P_i = \sum_{s_j \in S} P(s_i, s_j)$, $\Pr\{\cdot\}$ 表示概率算子。在时间 t 内由非吸收态 s_i 转移到其它状态的 s_j 概率可表示成如下形式:

$$\begin{aligned} R(s_i, s_j, t) &= \Pr\{E_{n+1} \leq t, X(\tau_{n+1}) = s_j \mid X(\tau_n) = s_i\} \\ &= \frac{P(i, j)}{P_i} \times (1 - \exp(-P_i \times t)) \end{aligned} \quad (1)$$

给定联邦组织服务集 $O = \{O, O_2, \dots, O_n\}$, n 表示联邦组织服务的数量, $O_i (1 < i < n)$ 表示第 i 个联邦组织服务。 O_i 有两个状态 $S_{O_i} = \{0, 1\}$, 0 表示从过程协同退出的状态,1 对应加入过程协同的状态。每个联邦组织服务的状态变化可看作是一个有限状态 CTMC,记为 $X = \{X(t), t \geq 0\}$, $X(t)$ 表示联邦组织服务在时刻 t 的状态。在这两个状态之间,以一定的转换概率进行状态转换,每个组织服务 O_i 具有退出率 μ_{O_i} 以及加入率 λ_{O_i} 。

对于联邦组织服务 O_i , 在时刻 t 的可用性 $A_{O_i}(t)$ 可由式

$$A_{O_i}(t) = \frac{e^{-\mu_{O_i} \times t}}{e^{-\mu_{O_i} \times t} + e^{-\lambda_{O_i} \times t}} \quad (2)$$

表示,可靠性函数 $R_{O_i}(t)$ 可由式

$$\begin{aligned} R_{O_i}(t) &= 1 - \Pr\{E_{n+1} \leq t, X(\tau_{n+1}) \\ &= 0 \mid X(\tau_n) = 1\} \end{aligned} \quad (3)$$

表示。

对于资源服务集 $R = \{R_1, R_2, \dots, R_m\}$, $R_i (1 < i < m)$ 表示第 i 个资源服务。 R_i 对应两个状态 $S_{R_i} = \{0, 1\}$, 0 表示修复状态,1 对应失效状态。每个资源服务状态变化也可看成有限状态 CTMC,记为 $Y = \{Y(t), t \geq 0\}$, $Y(t)$ 表示资源服务在时刻 t 的状态。对于 R_i , 失效率 μ_{R_i} 对应平均失效时间的倒数,修复率 λ_{R_i} 对应平均修复时间的倒数。另外一个影响资源服务的动态性的要素是资源服务伴随所属联邦组织服务加入或退出协同而加入或退出。

对于资源服务 R_i , 假设它属于联邦组织服务 O_i , 在时刻 t 的可用性 $A_{R_i}(t)$ 可表示为

$$A_{R_i} = \frac{e^{-\mu_{O_i} \times t}}{e^{-\mu_{O_i} \times t} + e^{-\lambda_{O_i} \times t}} \times \frac{e^{-\mu_{R_i} \times t}}{e^{-\mu_{R_i} \times t} + e^{-\lambda_{R_i} \times t}} \quad (4)$$

可靠性 $R_{R_i}(t)$ 可表示为

$$\begin{aligned} R_{R_i}(t) &= (1 - \Pr\{E_{n+1} \leq t, X(\tau_{n+1}) = 0 \mid X(\tau_n) = 1\}) \\ &\times (1 - \Pr\{E_{n+1} \leq t, Y(\tau_{n+1}) = 0 \mid Y(\tau_n) = 1\}) \end{aligned} \quad (5)$$

2.3 多目标随机决策模型

假如 Web 服务用户有多 QoS 目标,执行站点选择问题可以看作是属性决策问题。此外,在执行站点选择中需要考虑服务的随机性。

不同的 QoS 属性或许位于不同质量维,为了平衡不同的 QoS 量度,指标值需要归一化在 $[0, 1]$ 范围内。给定变迁 T , 对应的资源服务候选集记为 $R = \{R_1, R_2, \dots, R_i, \dots, R_k\}$, $\hat{\xi}_{ij} (j = 1, 2, 3, 4)$ 表示对应于服务 R_i 的第 j 个 QoS 指标, $\hat{\Psi}_{ij}$ 表示 $\hat{\xi}_{ij}$ 的归一化结果。

应用权重 ω_j 对第 j 个 QoS 指标加权来表达它们的相对重要性,假设 Q_t 表示时间门限, Q_c 表示成本门限, Q_a 表示可用性门限, Q_r 表示可靠性门限。根据分片的 4 种执行结构,基于多 QoS 目标的动态执行站点选择问题可形式化为下面的随机线性规划模型。

2.3.1 顺序执行分片

给定一个顺序执行分片 F_s , 该分片只包含一个等待执行的活动。设 $X = \{X_1, X_2, \dots, X_l\}$ 表示 F_s 的资源服务候选集; $\hat{\xi}_i = \{\hat{\xi}_{i1}, \hat{\xi}_{i2}, \hat{\xi}_{i3}, \hat{\xi}_{i4}\}$ 表示 X_i 的 QoS 指标值,它是一个四维随机向量; $Y = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_l\}$ 表示 X 所属的联邦组织服务集, $X_j \in Y_j$; $\hat{\gamma}_i = \{\hat{\gamma}_{i1}, \hat{\gamma}_{i2}, \hat{\gamma}_{i3}, \hat{\gamma}_{i4}\}$ 表示 Y_i 的 QoS 指标值,它也是一个四维随机向量。 $\hat{\xi}_{i1}$ 表示对应于候选服务 X_j 的执行时间随机变量; $\hat{\xi}_{i2}$ 表示它的执行成本随机变量; $\hat{\xi}_{i3}$ 对应于可用性随机变量,该随机变量是由于资源服务 X_j 的状态变化而引起的; $\hat{\xi}_{i4}$ 表示可靠性随机变量。 $\hat{\gamma}_{ik}$ 表示 Y_i 的 QoS 指标值,它分别对应时间、成本、可用性和可靠性随机变量。 $\hat{\Psi}_{ij}$ 表示 $\hat{\xi}_{ij}$ 的归一化值, ω_j 对应第 j 个指标的权重。可通过求解 P1 来解决执行站点动态选择问题。

P1.

$$\max F(X_j, \hat{\xi}_j, \hat{T}_{ij}, \hat{\gamma}_j, \hat{T}_{oj}, T_{os}, T_c) = \sum_{k=1}^4 \omega_k \times \hat{\Psi}_{jk} \quad (6a)$$

$$s. t. \begin{cases} \sum_{k=1}^4 \omega_k = 1 & \omega_j \in [0, 1] & (6b) \\ \hat{\xi}_{j1} \leq \min(\hat{T}_{ij}, \hat{T}_{oj} - T_c - T_{os}, Q_t) & (6c) \\ \hat{\xi}_{j2} \leq Q_c & (6d) \\ \hat{\xi}_{j3} \times \hat{\gamma}_{j3} \geq Q_a & (6e) \\ \hat{\xi}_{j4} \times \hat{\gamma}_{j4} \geq Q_r & (6f) \end{cases}$$

P1 具有随机变量、线性目标函数以及线性约束条件,因而它是一个随机线性规划问题。上式中,

$\hat{T}_{oj} - T_c - T_{os}$ 表示 X_j 所属的联邦组织服务 Y_j 能够停留在过程协同中的时间。 $\hat{T}_{oj}$ 表示 Y_j 的平均驻留时间, T_{os} 表示 Y_j 进入过程协同的起始时间, T_c 表示当前时间, $\hat{T}_{ij}$ 对应资源服务 X_j 的平均失效时间。

2.3.2 并行执行分片

对于并行执行分片,当有两个或多个分支需要同样的角色来负责执行时,它们需要在同一资源服务候选集中选择服务。为了避免并行执行中的资源调用冲突,不同的分支必须选择不同的服务。因此并行执行约束也需要考虑。给定并行执行分片 F_c , 有 l_c 个并行执行分支,这里假设有 l'_c 个分支需要从资源服务集中选择同样功能的资源服务。令 $Z = \{Z_1, Z_2, \dots, Z_{l'_c}\}$ 表示对应于这 l'_c 个并行执行分支的资源服务候选集; $X = \{X_1, X_2, \dots, X_{l'_c}\} (X \subseteq Z)$ 表示为这 l'_c 个并行执行分支所选择的资源服务集; $Y = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_{l'_c}\}$ 表示 X 所属的联邦组织服务集; $\xi = \{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{l'_c}\}$ 表示 X 的 QoS 指标值,它是一个 $l'_c \times 4$ 维的随机矩阵; $\hat{\gamma} = \{\hat{\gamma}_1, \hat{\gamma}_2, \dots, \hat{\gamma}_{l'_c}\}$ 对应于 Y 的 QoS 指标值,它也是一个 $l'_c \times 4$ 维随机矩阵。对于分片 F_c , 假设有 l_m 个并行执行分支需要从同一个资源服务集中选择服务,执行站点选择问题建模成 P2 的形式。

P2.

$$\max F(X, \hat{\xi}, \hat{\gamma}, \hat{T}_{ij}, \hat{T}_{oj}, T_{os}, T_c) = \sum_{i=1}^4 \omega_i \times \hat{\Psi}_i \quad (7a)$$

$$s. t. \begin{cases} \sum_{i=1}^4 \omega_i = 1 & \omega_i \in [0, 1] & (7b) \\ \max_{j=1,2,\dots,l_m} (\hat{\xi}_{j1}) \leq \min(\min_{j=1,2,\dots,l_m} (\hat{T}_{ij}), \min_{j=1,2,\dots,l_m} (\hat{T}_{oj} - T_c - T_{os}), Q_t) & (7c) \\ \sum_{j=1}^{l_m} \hat{\xi}_{j2} \leq Q_c & (7d) \\ \prod_{j=1}^{l_m} (\hat{\xi}_{j3} \times \hat{\gamma}_{j3}) \leq Q_a & (7e) \\ \prod_{j=1}^{l_m} (\hat{\xi}_{j4} \times \hat{\gamma}_{j4}) \leq Q_r & (7f) \\ X_i \neq X_j (X_i \in X, X_j \in X, (X_i \rightarrow T_i) \& (X_j \rightarrow T_j)) & (7g) \end{cases}$$

$$\text{当 } i = 1 \text{ 时, } \hat{\Psi}_i = \max_{j=1,2,\dots,l_m} \hat{\Psi}_{ij}; \text{ 当 } i = 2 \text{ 时, } \hat{\Psi}_i = \sum_{j=1}^{l_m} \hat{\Psi}_{ij}; \text{ 当 } i = 3 \text{ 或 } 4 \text{ 时, } \hat{\Psi}_i = \prod_{j=1}^{l_m} \hat{\Psi}_{ij}。$$

$\min_{j=1,2,\dots,l_m} (\hat{T}_{qj} - T_c - T_{os})$ 表示资源服务集 X 所属的联邦组织服务集 Y 的服务所对应的最小驻留时间。

$\min_{j=1,2,\dots,l_m} (\hat{T}_{qj})$ 表示资源服务集 X 中的服务所对应的最小失效时间。 $(X_i \rightarrow T_i)$ 和 $(X_j \rightarrow T_j)$ 表示对应于资源服务 X_i 和 X_j 的并行执行活动, $X_i \in X, X_j \in X, X_i \neq X_j$, 并且 T_i 和 T_j 对应同一个资源服务候选集。

在 P2 中,可采用拉格朗日函数对目标函数和约束条件中的可靠性和可用性约束进行线性化,从而建模成随机线性规划问题的形式。

2.3.3 其它执行分片

在选择执行分片中,根据前面活动的执行结果选择符合执行条件的活动来执行,顺序执行分片中的方法和表达式可以应用于选择执行分片中。对于循环执行分片,由于服务的动态性和随机性,每循环一次,资源服务需要选择一次,循环执行分片可看成是一系列顺序执行的活动,每次循环的模型采用 P1。

3 问题求解

为了求解上述随机规划问题,多目标随机决策模型可转化为期望值模型的形式,其中,目标函数对应最大期望回报,约束条件对应期望约束:

$$\max E[f(X, \hat{\delta})]$$

s. t.

$$E[g_j(X, \hat{\delta})] \geq \beta_j \quad j = 1, 2, \dots, p \quad (8)$$

式中, X 是一个决策向量, $\hat{\delta}$ 是一个具有概率密度函数 $\phi(\hat{\delta})$ 的随机向量, f 对应于目标函数, g_j 是约束函数, $E[\cdot]$ 是数学期望值算子,该问题称为随机规划的期望值模型。为了得到期望值模型的可行解,目标函数和约束条件的数学期望需要转换为确定的形式。采用连续时间马尔可夫链模型分析给定 Web 服务的可用性和可靠性,此外,假设服务时间和服务成本服从参数为 λ_{Tj} 和 λ_{Cj} 的指数分布。

定理 2 设 $\hat{\delta}_1, \hat{\delta}_2, \dots, \hat{\delta}_n$ 是独立的随机变量, $\hat{\delta}_i (i = 1, \dots, n)$ 服从参数为 λ_i 的指数分布,记为 $\hat{\delta}_i \sim E_{\delta}(\lambda_i)$, 则对应于 $\min_{1 \leq i \leq n} \hat{\delta}_i$ 和 $\max_{1 \leq i \leq n} \hat{\delta}_i$ 的数学期望可表达为

$$E(\min_{1 \leq i \leq n} \hat{\delta}_i) = (\sum_{i=1}^n \lambda_i)^{-1} \quad (9a)$$

$$E(\max_{1 \leq i \leq n} \hat{\delta}_i) = \sum_{i=1}^n (i \times \lambda_i)^{-1} \quad (9b)$$

证明: 因为

$$\begin{aligned} P(\min_{1 \leq i \leq n} \hat{\delta}_i > T) &= P(\hat{\delta}_1 > T, \dots, \hat{\delta}_i > T, \dots, \hat{\delta}_n > T) \\ &= P(\hat{\delta}_1 > T) \times \dots \times P(\hat{\delta}_i > T) \times \dots \times P(\hat{\delta}_n > T) \\ &= \exp(-\sum_{i=1}^n \lambda_i \times T) \end{aligned}$$

所以, $\min_{1 \leq i \leq n} \hat{\delta}_i$ 是指数分布的, 记为 $\min_{1 \leq i \leq n} \hat{\delta}_i \sim$

$$E_{\delta}(\sum_{i=1}^n \lambda_i), \text{ 则 } E(\min_{1 \leq i \leq n} \hat{\delta}_i) = (\sum_{i=1}^n \lambda_i)^{-1}.$$

对于 $E(\max_{1 \leq i \leq n} \hat{\delta}_i) = \sum_{i=1}^n (i \times \lambda_i)^{-1}$, 参考文献[10]中已有证明。

假设, $\hat{\xi}_j$ 和 $\hat{\gamma}_j$ 以及 $\hat{\xi}_j$ 和 $\hat{\gamma}_j$ 是独立的随机变量, 对应于每个状态的驻留时间都服从指数分布, 根据随机变量的概率分布和马尔可夫性以及定理 2 的结论, 不确定随机线性规划问题转换为确定的整数线性规划形式。

分支定界算法可用来获得整数线性规划问题的最优解, 然而, 这种算法不适合规模比较大的问题。并行执行分片的站点选择问题是组合优化问题, 可转换为多约束多维背包问题(multiple choice multiple dimension knapsack problem, MMKP)。文献[9]所提出的启发式算法可以用来求解 MMKP, 该方法能在多项式时间找到次优解。为了避免服务调用冲突, 在启发式算法中需要考虑并行执行分支不能选择同一个服务这个约束。

为了在运行时有效获得最佳执行站点, 采用分支定界算法和修正启发式算法的混合策略。下面给出动态执行站点选择算法。

算法 1: 分布式工作流动态执行站点选择算法

输入: 约束服务工作流网 W 和它的分片集 $F_W = \{F_{W_1}, F_{W_2}, \dots, F_{W_m}\}$ 。

输出: 每个分片所对应的最佳执行站点 $O' = \{O'_1, O'_2, \dots, O'_m\}$ 。

步骤 1: 根据分片 F_{W_i} 的执行结构, 定义分片 F_{W_i} 的随机线性规划模型 $P_{W_i}, P_{W_i} \in \{P_1, P_2\}$ 。

步骤 2: 将 P_{W_i} 转换为期望值模型 EP_{W_i} 。

步骤 3: 将期望值模型 EP_{W_i} 转换为其确定等价形式的整数线性规划问题 CP_{W_i} 。

步骤 4: 如果 $P_{W_i} = P_1$, 模型只有一个整数变量, 且服务数量是有限的, 采用分支定界方法在运行时得到 CP_{W_i} 的最优解。

步骤 5: 当 $P_{W_i} = P_2$ 时, 如果 QoS 指标信息是精

确的,问题规模比较小,采用分支定界算法获得 CP_{W_i} 的最优解;如果系统规模较大,具有较多的潜在选择,采用修正启发式算法获得 CP_{W_i} 的次优解。

步骤 6:对于 CP_{W_i} ,当有两个或多个优化结果 $\{X_1^*, X_2^*, \dots\}$ 时,考虑采用用户偏好和数据传输的关联策略,得到 CP_{W_i} 的最佳解 X^* , X^* 所属的联邦组织服务 Y^* 即为分片 F_{W_i} 的最佳执行站点。

步骤 7:同上,可获得其它分片的最佳执行站点。各分片的最佳执行站点集 $O' = \{O'_1, O'_2, \dots, O'_m\}$ 。

用户偏好策略 Su 由用户的主观意愿 Su_s 以及联邦组织服务的声誉 Su_o 决定。数据传输策略 Sd 用来提高活动之间的通信的速度。有时这些策略是不一致的,例如,根据用户偏好策略,两个活动应该安排到不同站点,然而,根据数据通讯策略,两个活动应该安排到同一个或更相近的站点。因此,提出用户偏好和数据传输的关联策略,具体描述如下:

(1) 当数据传输量达到或超过给定门限值时,采用数据传输策略 Sd , 所对应站点为最佳执行站点。

(2) 反之,考虑用户偏好策略。当根据 Su_s 和 Su_o , 所选择站点一致时,该站点为最佳执行站点;当 Su_s 小于给定的门限,则 Su_s 对应站点为最佳执行站点,否则, Su_o 对应的站点为最佳执行站点。

4 实例

以 SOE 环境下,从事个性化定制业务的制造企业为例来验证所提出的方法。该实例是从一个为客户提供“个性化”汽车定制业务的公司(称为 PAutocar)抽取的简化业务流程(如图 2 所示)。PAutocar 公司处理客户订单并协调汽车设计、制造、总装等企事业单位协同完成。客户访问 PAutocar 的网站并提交订单(输入客户信息、个性化定制需求等),从而初始化一个汽车个性化定制流程。这是一个跨企业联邦的协同业务过程,该企业处理客户需求订单,协调联邦企业协同的完成产品的设计制造装配等。客户提交需求订单后,整个业务过程涉及到订单提交服务、客户检查服务、设计服务、制造服务、装配服务等。

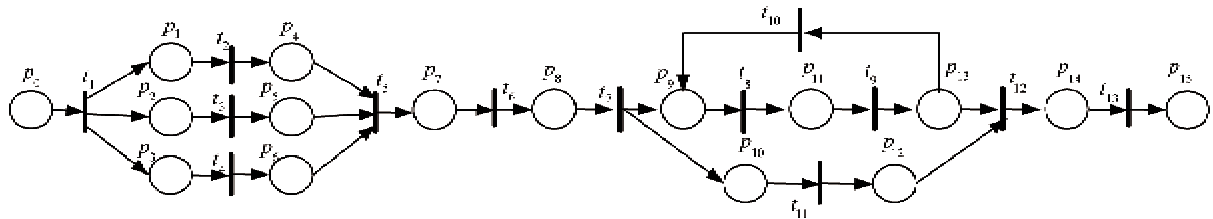


图 2 个性化产品定制简化流程

基于定义 1,描述个性化产品定制的约束服务工作流网。在该约束服务工作流网中,有 8 个角色 $RL = \{RL_1, RL_2, RL_3, RL_4, RL_5, RL_6, RL_7, RL_8\}$, 5 个联邦组织服务 $O = \{O_1, O_2, O_3, O_4, O_5\}$, 在当前时间 T_c 参与过程协同。每个联邦组织服务加入 SOE 环境的起始时间是 $T_o^s = \{T_{o1}^s, T_{o2}^s, T_{o3}^s, T_{o4}^s, T_{o5}^s\}$, 有 16 个可用的资源服务池 $Rp = \{Rp_1, Rp_2, \dots, Rp_{16}\}$ 。对于 $Rp_i (Rp_i \in Rp)$, 它的资源服务集可记为 $\{S_{i-1}, S_{i-2}, \dots, S_{i-k_i}\}$, 其中, k_i 是资源服务池 Rp_i 中资源服务的数量。

采用模型分割算法^[2],图 2 的工作流模型分割成 13 个分片 $F_W = \{F_{W_1}, F_{W_2}, F_{W_3}, F_{W_4}, \dots, F_{W_{13}}\}$ 。以并行执行分片 F_{W_2}, F_{W_3} 以及 F_{W_4} (如图 3 所示)为例来验证本文所提出的分布式 workflow 动态执行站点

随机决策方法。

基于定义 3,角色-变迁矩阵 M 构建如下:

$$M = \begin{bmatrix} 1, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0 \\ 0, & 1, & 1, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0 \\ 0, & 0, & 0, & 1, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0 \\ 0, & 0, & 0, & 0, & 1, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0 \\ 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 1, & 1, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0 \\ 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 1, & 1, & 1, & 0, & 0, & 0, & 0 \\ 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 1, & 0, & 0, & 0 \\ 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 1, & 0, & 0 \\ 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & 1, & 1 \end{bmatrix}^T$$

显然,角色 RL_2 负责 F_{W_2} 和 F_{W_3} 的执行, RL_3 负责 F_{W_4} 的执行。根据定义 2 到定义 5,得到分片 F_{W_2} 、 F_{W_3} 和 F_{W_4} 的变迁-联邦组织服务矩阵 $B(F_{W_2}, F_{W_3}, F_{W_4})$ 以及变迁-资源服务池矩阵 $A''(F_{W_2}, F_{W_3}, F_{W_4})$,

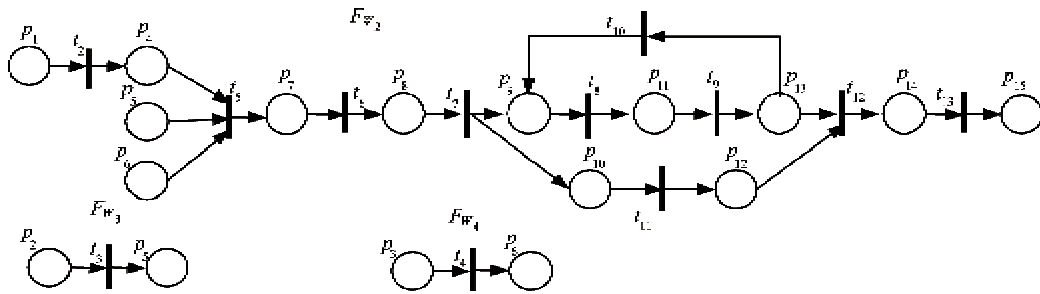


图 3 产品定制流程中的一个并行执行分片

且有

$$B(F_{W2}, F_{W3}, F_{W4}) = B(T_2, T_3, T_4) \\ = \begin{bmatrix} 1, 1, 1, 0, 1 \\ 1, 1, 1, 0, 1 \\ 0, 1, 1, 1, 0 \end{bmatrix}^T$$

$$A''(F_{W2}, F_{W3}, F_{W4}) = A''(T_2, T_3, T_4) = \\ \begin{bmatrix} 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1 \\ 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1 \\ 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0 \end{bmatrix}^T$$

对于分片 F_{W2} 和 F_{W3} , 候选服务集可表示为

$$\{S_{1-1}, \dots, S_{1-k_1}, S_{4-1}, \dots, S_{4-k_4}, S_{5-1}, \dots, S_{5-k_5}, \\ S_{9-1}, \dots, S_{9-k_9}, S_{16-1}, \dots, S_{16-k_{16}}\}$$

分片 F_{W4} 的候选服务集记为

$$\{S_{7-1}, \dots, S_{7-k_7}, S_{8-1}, \dots, S_{8-k_8}, S_{13-1}, \dots, S_{13-k_{13}}\}$$

在表 1 和表 2 中, $E[T]$ 表示执行时间期望值, $E[C]$ 表示成本期望值, $E[R]$ 表示可靠性期望值, $E[A]$ 代表可用性期望值, μ_R 表示资源服务的失效概率, λ_R 表示资源服务的修复概率。此外, μ_O 是联邦组织服务的退出概率, λ_O 表示联邦组织服务加入协同的概率, Ru 表示联邦组织服务的声誉。给定 $\mu_R, \lambda_R, \mu_O, \lambda_O, Ru$ 的值以及 T 和 C 的分布函数, R 和 A 的分布函数可通过公式(4)和(5)得到。

表 1 联邦组织服务的加入率、退出率及声誉值

联邦组织服务	Ru	μ_O	λ_O
O_1	1.0	0.01	0.93
O_2	0.99	0.03	0.97
O_3	0.99	0.04	0.98
O_4	0.98	0.02	0.95
O_5	0.91	0.02	0.96

表 2 资源服务失效率、修复率以及 QoS 指标值

资源服务	$E[T]$	$E[C]$	$E[R]$	$E[A]$	μ_R	λ_R
S_{1-1}	1.5	60	0.91	0.91	0.08	0.97
S_{1-2}	2.1	45	0.93	0.96	0.03	0.94
S_{1-3}	1.8	55	0.91	0.89	0.1	0.92
S_{1-4}	3.5	35	0.91	0.93	0.06	0.98
S_{4-1}	1.7	50	0.89	0.91	0.08	0.95
S_{4-2}	1.0	70	0.97	0.94	0.05	0.93
S_{4-3}	4.0	30	0.85	0.91	0.09	0.99
S_{5-1}	1.6	58	0.89	0.86	0.13	0.98
S_{5-2}	1.9	50	0.92	0.94	0.03	0.96
S_{5-3}	2.5	43	0.86	0.93	0.04	0.91
S_{7-1}	2.0	45	0.9	0.9	0.07	0.94
S_{7-2}	1.8	50	0.83	0.84	0.16	0.99
S_{7-3}	2.2	46	0.91	0.92	0.05	0.98
S_{8-1}	2.8	39	0.89	0.92	0.04	0.95
S_{8-2}	2.5	40	0.91	0.87	0.1	0.97
S_{8-3}	1.9	45	0.8	0.88	0.08	0.93
S_{8-4}	2.4	36	0.9	0.89	0.07	0.92
S_{9-1}	3.6	38	0.92	0.91	0.06	0.99
S_{9-2}	2.2	48	0.85	0.89	0.07	0.93
S_{9-3}	2.6	40	0.88	0.86	0.12	0.98
S_{9-4}	3.2	35	0.91	0.92	0.04	0.92
S_{13-1}	1.5	48	0.96	0.95	0.03	0.91
S_{13-2}	1.8	40	0.95	0.95	0.03	0.97
S_{13-3}	2.1	36	0.9	0.88	0.11	0.98
S_{13-4}	2.9	32	0.91	0.92	0.06	0.94
S_{16-1}	1.2	50	0.93	0.94	0.04	0.99
S_{16-2}	1.9	42	0.94	0.9	0.08	0.95
S_{16-3}	2.1	39	0.92	0.91	0.07	0.98

QoS 指标的权重是 $W = \{0.25, 0.20, 0.35, 0.20\}$, QoS 指标门限值是 $Q_t = 2.8, Q_c = 65, Q_a = 0.91$ 以及 $Q_r = 0.93$ 。 $T_o^c(X_j)$ 表示联邦组织服务加入 SOE 环境的时间, $T_o^c(X_j)$ 表示当前时间。

由于分片 F_{W2}, F_{W3} 和 F_{W4} 是并行执行分片, 因而可以建模成 P2 的形式, 应用算法 1 进行求解。当 $X = \{S_{16-1}, S_{1-2}, S_{13-2}\}$ 时, $F(X)$ 获得最大值 0.897, 这三个分片 $\{F_{W2}, F_{W3}, F_{W4}\}$ 的最佳执行站点是 $\{O_5, O_1, O_4\}$ 。同样可求得其它分片的执行站点。

由于考虑了影响 workflow 分布式执行的重要因素

以及服务动态性,整个过程协同在 SOE 环境下有很好的稳定性,符合应用实际的需要。所提出的方法可以帮助个性化定制企业同其它联邦企业有效地协同工作,提高过程协同的性能,增加灵活性,减少数据传输量和成本,很好地满足用户需求,使企业能够以更快的速度为市场带来更多的新产品。

5 结 论

模型分割已成为实现 workflow 分布式执行的重要技术。本文针对现有模型分割方法在 workflow 执行性能方面存在的不足,提出了分布式 workflow 动态执行站点随机决策方法。在服务 workflow 网上扩展软约束和硬约束,并考虑服务动态性,构建执行站点随机决策模型,采用动态执行站点选择算法进行优化求解,得到动态模型分割所产生各分片的最佳执行站点。本文提出的方法基于角色建立活动和资源服务之间的动态绑定关系,使 workflow 在执行过程中具有更好的柔性;通过执行站点随机决策算法使模型分片动态地分配到执行性能最好的站点执行,提高了 workflow 分布式执行的综合性能;在站点决策过程中,考虑了服务的随机性和环境的动态性,能够更好地适应面向服务的动态环境。此外,在优化过程中,通过约束有效避免了活动在并行执行中存在的资源服务并发访问问题。

未来的工作主要集中在两个方面:一是探讨影响 workflow 分布式执行性能的其它重要因素,例如出错处理、安全问题等;另一方面是根据本文提出的方法设计并构建一套完整的分布式 workflow 动态模型分

割及执行站点随机决策工具,并在实际应用中验证和改进。

参考文献

- [1] George W B, Robert C. Successful application of service-oriented architecture across the enterprise and beyond. *Intel Technology Journal*, 2004, 8(4): 345-359
- [2] Tan W, Fan Y S. Dynamic workflow model fragmentation for distributed execution. *Computers in Industry*, 2007, 58(5): 381-391
- [3] Nanda M G, Kamik N. Synchronization analysis for decentralizing composite Web services. In: *Proceedings of ACM Symposium on Applied Computing*, Melbourne, Florida, USA, 2003. 407-414
- [4] Nanda M G, Chandra S, Sarkar V. Decentralizing execution of composite Web services. In: *Proceedings of the 19th annual ACM SIGPLAN Conference on Object-oriented Programming, Systems, Languages, and Applications*, Vancouver, BC, Canada, 2004. 170-187
- [5] Chaffle G B. Orchestrating composite Web services under data flow constraints. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Web Services (ICWS 2005)*, Orlando, Florida, USA, 2005, 1, 211-218
- [6] 刘必欣, 王玉峰, 贾焰等. 一种基于角色的分布式动态服务组合方法. *软件学报*, 2005, 16(11): 1859-1867
- [7] Tan W, Fan Y S. Model fragmentation for distributed workflow execution: A Petri net approach. In: *Proceedings of the 5th International School and Symposium on Advanced Distributed Systems*. Heidelberg, Germany: Springer Berlin, 2005. 3563. 207-214
- [8] van der Aalst W M P, ter Hofstede Arthur H M. Verification of workflow task structures: a petri-net-based approach. *Information Systems*, 2000, 25(1): 43-69
- [9] 叶世阳, 魏峻, 李磊等. 支持服务关联的组合服务选择方法研究, *计算机学报*, 2008, 31(8): 1383-1397
- [10] 李开丁. 一类最值问题的期望和方差. *高等数学研究*, 2006, 9(4): 105-106

A multi-objective stochastic decision approach for execution sites of decentralized workflows

Sun Hongjun, Fan Yushun

(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract

Aiming at the deficiencies of execution performance for decentralized workflows in service oriented enterprises (SOE), the paper proposes a novel dynamic (run-time) execution site optimization algorithm based on stochastic decision. The proposed method extends the service workflow net with soft constraints and hard constraints, and takes it as the foundation of site optimization. Then, the stochastic characteristics of Web services and the dynamic characteristics of environment are analyzed. For the purpose of obtaining optimum of combinational quality of service (QoS), the dynamic execution site optimization is formularized as stochastic programming models under multi-objective in accordance with the four control structures of fragments. Accordingly, the optimization algorithm is used to solve the above problem. Finally, an example is illustrated to verify the feasibility of the approach. Compared with existing researches, the proposed method improves the execution performance of distributed workflow observably, and avoids the resource bottleneck from concurrent execution actions effectively.

Key words: decentralized workflow, model fragmentation, execution site, stochastic decision, linear programming