

一种基于 FAHP 的多维 QoS 局部最优服务选择模型

李 玲^{1,2)} 刘 敏¹⁾ 成国庆²⁾

¹⁾(同济大学电子与信息工程学院 上海 201804)

²⁾(景德镇陶瓷学院信息工程学院 江西 景德镇 333403)

摘 要 为更全面地考量服务质量(QoS)属性对服务最优选择的影响,进而提高服务组合的效率,该文提出了一种基于模糊层次分析法(FAHP)的多维 QoS 局部最优服务选择模型.模型首先定义了以 QoS 的真实度属性作为分量之一的多维 QoS 向量,并将 QoS 的真实度属性值作为赋权计算的依据,以使权重结果更合理、可信;之后,建立了包含双重质量属性(客观属性和主观评价)的模糊层次结构,以全面考量主客观 QoS 属性对服务最优选择的影响;在此基础上,构造了可根据决策者的偏好与侧重动态调整权重分辨率的 FAHP 赋权模式,该赋权模式与传统的赋权模式不同,该赋权模式下的权向量不是唯一的(但权重的排序唯一),而是一个包含可调参数的函数,通过参数的调整,可保留(或删除)决策者偏好(或放弃)的候选服务,一方面使服务使用者在选择服务时更理智,另一方面也促使服务提供者进一步完善服务质量;最后,利用组合权向量及序数效用函数值得到了局部最优服务.与文献中已有赋权模式的对比实验(包括候选服务效用值的对比、相关 QoS 属性值的对比等)及参数的敏感性分析说明了模型的有效性,其决策结果在一定程度上提高了局部最优服务选择的科学性及合理性.

关键词 服务质量(QoS);局部最优服务选择模型;模糊层次结构;FAHP 赋权模式;序数效用函数;服务计算

中图法分类号 TP393 **DOI 号** 10.11897/SP.J.1016.2015.01997

A Local Optimal Model of Service Selection of Muti-QoS based on FAHP

LI Ling^{1),2)} LIU Min¹⁾ CHENG Guo-Qing²⁾

¹⁾(School of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804)

²⁾(School of Information Engineering, Jingdezhen Ceramic Institute, Jingdezhen, Jiangxi 333403)

Abstract To consider QoS attribute's impact on optimal service selection more comprehensively and then improve the efficiency of service composition, this paper proposed a local optimal model of service selection of Muti-QoS based on Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP). First, it defined the Muti-QoS vector, modelled the fidelity of QoS as one component of the Muti-QoS vector, and used the value of the fidelity of QoS as the basis of weighting to make the weight more reasonable and reliable. Then, it established a fuzzy hierarchy including dual attributes of QoS (objective attribute and subjective evaluation) to fully consider the subjective and objective QoS attribute's impact on optimal service selection. Furthermore, it developed a FAHP-based weighting mode, in which the resolution ratio of weight can be adjusted by the decision-maker's preference. Different from the traditional weighting mode, the proposed weighting mode in this paper makes the weight vector be non-unique (however, the order of the components is unique) and be a function that includes an adjustable parameter. By adjusting the relevant parameter, decision-maker can reserve (or eliminate) the corresponding candidate services according to his preference (or dislike). In this way, it not only helps service user select service more reasonably,

收稿日期:2014-09-17;最终修改稿收到日期:2015-05-22. 本课题得到国家自然科学基金项目(61173015,61573257)资助. 李 玲,女,1981 年生,博士研究生,讲师,主要研究方向为面向服务的计算和 Web 服务组合. E-mail: lilingfanny@163.com. 刘 敏(通信作者),男,1970 年生,研究员,博士生导师,主要研究领域为服务计算和设备智能维护. E-mail: lmin@tongji.edu.cn. 成国庆,男,1982 年生,博士研究生,讲师,主要研究方向为设备智能维护.

but also promotes service provider to further improve the service quality. Finally, the local optimal service was obtained through the values of combination weight vector and ordinary utility function. In addition, the sensitivity analysis of parameters was conducted to study the parameters' impact on optimal service selection. Through the comparison (the value of ordinary utility function, the value of QoS attribute, etc.) with the weighting modes of literature, experiment results indicated that the proposed model is feasible and efficient, and to some extent, the decision results improve the scientificity and rationality of the local optimal service selection.

Keywords Quality of Service (QoS); local optimal model of service selection; fuzzy hierarchy; weighting mode based on FAHP; ordinary utility function; service computing

1 引 言

互联网技术的迅速发展和 Web 服务技术的逐步成熟,使传统的面向组件和系统的架构模式逐渐演变成面向服务的计算模式,为企业(或组织)之间进行的无缝业务集成提供了可能^[1-2],它构成了联结商业服务与信息服务的桥梁,带来了商业模式与计算模式的转型.如何对服务计算的系统进行优化,选择最佳的服务解决方案,以满足服务使用者和服务提供者的需求,是研究者们关注的问题^[3-5].一般来讲,单个的 Web 服务只具有简单的功能,为了满足多变的用户需求,可以将数个 Web 服务组合成带有增值功能的服务组合.例如,当用户计划外出旅行时,需要通过互联网获取相关的 Web 服务,如查询天气、规划旅游线路、预定国内外机票、预定酒店以及汽车租赁等.随着部署在 Internet 上可被公共访问和集成的 Web 服务越来越多,这些 Web 服务构成了一个巨大而丰富的标准组件库.但是,当用户面对这些服务功能相似、非功能特性不同的服务时,他们往往在服务选择上表现得无所适从;另一方面,他们对服务质量的特殊要求也很难被识别^[6].由此看来,一味地降低执行代价或响应时间并不是满足用户偏好需求的最佳途径,因此,根据用户的偏好来为其定制个性化的服务很重要.

由多个 Web 服务按照一定的组合逻辑组合出的新服务称为组合服务,这个组合中包含的 Web 服务称为原子服务^[7-8].与其它软件系统一样,Web 服务的特征也包含功能属性和非功能属性两个方面,前者描述了 Web 服务所提供的功能,后者则描述了 Web 服务在完成相应功能时表现出来的执行特性,例如执行时间、执行代价、可用性、可靠性等,这些执行特性的取值直接影响该服务完成相应功能时的服

务质量(Quality of Service, QoS)^[9-10],QoS 已成为计算机网络和实时计算领域的研究热点^[1,11-19].

基于 QoS 的 Web 服务选择一般包括全局最优和局部最优.对于全局最优选择问题,目前学术界普遍将其转换为组合优化问题来求解,常用的几种方法有约束规划^[20]、线性规划^[20-22]、启发式算法^[1,23-26]、智能算法^[3-4,12-14,27]等,这些方法构造的服务组合大都是满足约束条件的目标最优单解而不是可接受的多解,决策者(服务使用者或提供者)无法根据各自的偏好和侧重来选择组合服务,因此很难充分体现服务个性和激励服务提供者优化其服务质量.

基于 QoS 的局部最优服务选择方法是从每个任务节点的候选原子服务集中,依据 QoS 约束选出最优的一个或较优的几个原子服务.由于局部最优对全局最优会产生积极的影响,因此 Web 服务的局部最优选择已引起越来越多学者的关注^[15-17,21,28-29].局部最优选择为一个多属性决策问题,其核心问题是属性值的获取以及相应属性权重的确定,属性值的获取主要通过 3 种方式:服务提供者对外公布的数据、服务使用者使用服务后进行评价的数据、第三方监测的数据;确定权重的主要方法有:模糊集的模糊矩阵运算及合成、分离重叠源法、修正权重法等.

近年来基于 QoS 的 Web 服务选择的相关研究大部分着眼于全局最优^[1,3-4,12-14,20-27],而局部最优则研究得较少^[15-17,21,28-29].当然,也有学者在全局最优选择的决策过程中先进行局部最优,以提高聚合服务的成功率.正是因为局部最优对于全局最优有这种积极影响,而相对于全局最优服务选择方法的研究热度,局部最优选择方法的研究则较少.

文献^[15]提出了一种基于多维服务质量的局部最优服务选择模型,一方面将用户对服务各质量属性的评价作为原子服务的一个附加属性——真实度,以体现其模型的合理性和公正性;另一方面,用

3 种赋权模式确定各服务质量属性的权重, 最后以序数效用函数值作为候选服务的排序尺度, 其模型表现出了很好的有效性和灵活性, 一方面, 该模型体现了用户需求的偏好及服务质量的客观性, 另一方面, 它有助于快速地生成聚合服务链. 文献[16]通过局部服务质量优化缩小 Web 服务组合的候选服务空间, 以聚合效用值和用户提出的服务质量约束分别作为整数规划问题的最大化目标函数和约束条件, 求解得到一个近似服务质量最优方案, 并通过仿真实验验证了方法的有效性. 其他局部最优选择方法的研究可参见文献[28-29].

正如前面所提到的, 局部最优选择为一个多属性决策问题, 它的核心问题是属性值的获取及权重的确定, 而后者是局部最优选择方法研究的热点. 为了更全面的考量服务质量属性对服务最优选择的影响, 本文提出了一种基于 FAHP 的多维 QoS 局部最优服务选择模型(Local Optimal Model of Service Selection of Muti-QoS based on FAHP). 模型将真实度属性也作为 QoS 向量的一个分量, 以 QoS 的多种属性及其相应的真实度建立模糊层次结构, 并在计算层次权向量和组合权向量时, 全面考量双重属性值数据(包括客观数据和主观数据), 最终得到较为科学、合理的候选服务排序, 并且可以通过调整决策参数来改变各候选服务的权重分辨率. 据我们所知, 目前还没有关于局部最优选择的文献研究过通过调整决策参数来改变权重分辨率的 FAHP 赋权方法, 因此, 我们提出了这种决策模式, 它有几个特点:

(1) 将多维 QoS 向量的一个分量——真实度属性也作为 FAHP 赋权计算的依据, 使权重结果更合理、可信;

(2) 在以 FAHP 为基础的赋权模式中, 权向量不是唯一的(但权重的排序唯一), 而是一个以 β 为参数的函数, 决策者(服务使用者或提供者)可根据自己的偏好和侧重, 调整 β 的取值, 以调整权向量中各分量的权重分辨率(各分量值之间的差距), 从而保留(或删除)决策者偏好(或放弃)的候选服务, 使服务使用者在选择服务时更理智, 促使服务提供者完善服务质量;

(3) 局部最优对全局最优会产生积极的影响, 以 FAHP 为基础的局部最优服务选择可动态调整各属性的权重值大小, 为后续的全局最优服务选择提供更多的决策模式, 可在一定程度上提高全局最

优聚合服务的合理性和成功率.

本文第 2 节在介绍服务质量属性指标定义、度量方法、去模糊化和规范化的基础上, 建立基于 FAHP 的多维 QoS 模型, 并构造包含双重属性的模糊层次结构; 第 3 节通过层次权向量、组合权向量及序数效用函数值的计算求解模型; 第 4 节进行对比分析实验及参数 β 的敏感性分析, 实验结果说明模型的合理性和有效性, 并讨论局部最优对全局最优产生的积极影响; 最后对全文进行总结及对下一步工作的展望.

2 局部最优服务选择模型

2.1 问题描述与分析

如图 1 所示为一般旅游服务集成的业务流程^[1,30], 其中 T_s 和 T_f 分别表示起始状态和最终状态. 服务提供者所提供的旅游服务有旅游路线(S_1)、国内机票预定(S_2)、国际机票预定(S_3)、旅游景点(S_4)、汽车租赁(S_5)及自行车租赁(S_6)等子服务.

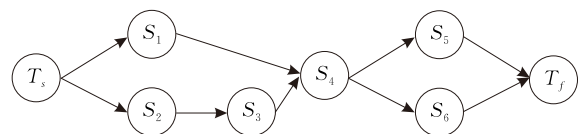


图 1 旅游服务组合工作流示例

在服务组合的过程中, 对于每一个子服务模块都存在一些功能相似, QoS 各异的候选服务可供选择. 在旅游服务实例中, 服务使用者可能对旅游服务中每个子服务的需求不同, 则系统会根据该用户需求来选择相应的候选服务. 基于 QoS 的服务选择目标就是从每个子服务的候选服务集合中选出满足局部 QoS 要求的服务, 如图 2 所示^[18], 并使得全局 QoS 也能满足用户的要求, 并且尽可能地出色.

可以看到, 通过全局最优服务选择模式构造的服务组合大都是满足约束条件的目标最优单解而不是可接受的多解, 决策者(服务使用者或提供者)无法根据各自的偏好和侧重来选择组合服务, 因此很难充分体现服务个性和激励服务提供者优化其服务质量.

如图 3 所示, 局部最优服务选择旨在从这些功能相似, QoS 各异的候选服务中, 根据决策者的偏好或侧重, 制定相应的决策模式, 得到满足决策者需求的一个或多个候选服务, 使服务使用者在选择服务时更理智, 同时促使服务提供者更加完善服务质量.

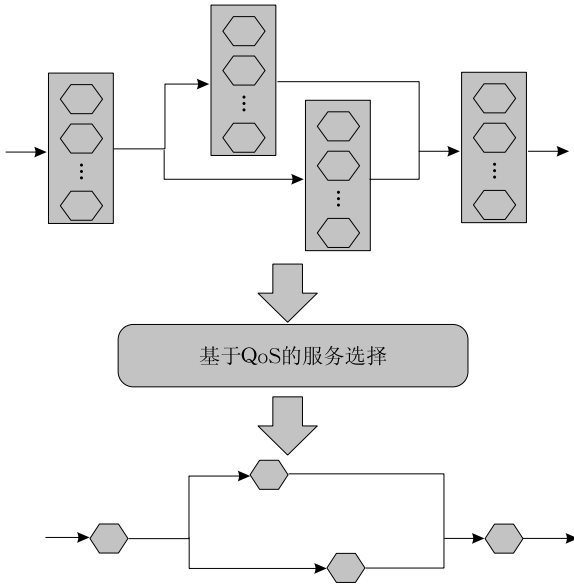
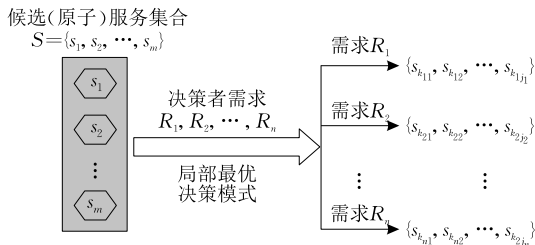


图 2 基于 QoS 的服务选择



其中, $k_{ij} \in \{1, 2, \dots, m\}$, $j_p \in \{1, 2, \dots, m\}$, $i=1, 2, \dots, n$

图 3 基于决策者需求的局部最优服务选择

2.2 服务质量属性指标的定义及其度量方法

QoS 对于 Web 服务在相关领域的成功应用非常关键,一些面向 Internet 的 Web 服务应用,例如信息门户、电子商务应用、实时网格计算等,都越来越关注为服务使用者提供的服务的质量.在许多研究工作中,学者们都提出了有关 Web 服务 QoS 的思想,并且强调 QoS 的重要性,以下是几个典型的有关 QoS 属性指标的研究.

Ran^[19]是较早对 Web 服务 QoS 展开研究的学者之一,他认为 Web 服务的 QoS 可划分成以下五大类:与成本有关的 QoS、与执行时间有关的 QoS、与配置管理有关的 QoS、与事务有关的 QoS 及与安全有关的 QoS.

Aggarwal 等人在文献[31]中提出了一个 QoS 模板的概念,在这个模板中,QoS 属性包括费用、时间等.同时,这个模板能支持用户按需设置各种属性的权值,因此具有良好的个性化和可扩展性.

从用户可感知的公用属性角度出发,Zeng 等人^[21]提出了一种 Web 服务质量模型,该模型主要

包括服务价格、执行时间、信誉度、可用性及可靠性.在之后的相关研究中,该模型得到了学术界的广泛认可并被大量引用.

基于以上的讨论,本文列举几个常用的属性指标,其定义和度量方法如下:

(1) 执行代价 $q_{\text{cost}}(s)$. 定义为用户调用服务需要支付给服务提供者的费用,其值由服务提供者发布.

(2) 执行时间 $q_{\text{time}}(s)$. 定义为从用户发出服务请求到获得服务结果这一过程的时间延迟,包括传输时间 $T_{\text{trans}}(s)$ 和运行时间 $T_{\text{process}}(s)$, 即 $q_{\text{time}}(s) = T_{\text{trans}}(s) + T_{\text{process}}(s)$.

(3) 可靠性 $q_{\text{rel}}(s)$. 定义为在一个相应的期望时间内服务能正确响应用户请求的概率, 即 $q_{\text{rel}}(s) = N_c(s)/n$, 这里 $N_c(s)$ 表示在这一期望时间内服务正确响应的次数, n 表示总的调用次数.

(4) 可用性 $q_{\text{av}}(s)$. 定义为一个服务被正常调用的概率, 即 $q_{\text{av}}(s) = \sum_{i=1}^n \lambda(s)_i / n$, 其中 $\lambda(s)_i = 1$ 表示该服务第 i 次被正常调用, 否则 $\lambda(s)_i = 0$. n 代表该服务总的被调用次数.

(5) 安全性 $q_{\text{sec}}(s)$. 存在于扩展 UDDI 中随服务提供者在服务注册时一起发布, 只需从 UDDI 中读取其值即可, 它具有模糊不确定性.

尽管基于上述常用 QoS 属性的服务选择的相关研究已经取得了较好的成果,这些成果为 Web 组合服务的成功应用起到了重要的推动作用,但是,它们大都没有考虑到 QoS 内在的不确定性,这种不确定性主要体现在以下几个方面^[5,20]:

(1) 出于自身的利益考虑,服务提供者可能会发布与自己实际服务水平差距较大的 QoS 数据,以吸引更多的用户使用;

(2) 在开放的面向服务的体系构架中,由于多种网络的存在(如 Ad-hoc, P2P, WLAN 等)、市场竞争的利益化以及 Web 服务的逻辑流程和资源管理的对外封闭性,不能保证服务提供者发布的服务数据的客观性和真实性.

基于以上的分析,我们在本文的模型中引入 QoS 的真实度属性,通过计算用户使用服务后给出的反馈信息,得到相应服务质量属性的信誉度,即真实度,旨在全面考量原子服务的服务质量,它的定义如下:

QoS 真实度 $q_{\text{fid}}(s)$. 定义为用户对相应 QoS 属性的评价^[15], 即 $q_{\text{fid}}(s) = (fid_1(s), fid_2(s), \dots,$

$fid_n(s)$, 其中 $fid_i(s) = \sum_{j=1}^{m_i} p_{ij}(s) / m_i$ 表示用户对第 i 个 QoS 属性的评价, $r_{ij}(s)$ 表示第 i 个 QoS 属性被 j 次访问给出的评价, m_i 表示第 i 个 QoS 属性被评价的总次数。

2.3 QoS 属性数据的去模糊化及规范化处理

2.3.1 基于模糊集理论的去模糊化处理

由于一些 QoS 属性指标具有模糊性, 如安全性 (Security)、信誉度 (Reputation) 等, 往往采用等级来简单描述, 但在具体的 QoS 模型中, 需要先将这些指标的数据量化——去模糊化。一般采用模糊集理论中的 α -cut 和隶属函数^[32]来处理模糊型的 QoS 指标, 将模糊型 QoS 指标映射到 $[0, 1]$ 区间上。

例如, 安全性取值的 5 个级别 1, 2, 3, 4, 5 分别对应于 0.2-cut、0.4-cut、0.6-cut、0.8-cut 及 1-cut, 即将安全性分别映射到 $[0, 0.2]$ 、 $(0.2, 0.4]$ 、 $(0.4, 0.6]$ 、 $(0.6, 0.8]$ 、 $(0.8, 1]$ 上。这里就 1-cut 举例说明, 假设 $0 < \eta < \alpha < 0.2$, 且安全性相应取值集合 X 上的模糊集 A 的隶属函数为 $f_A(x)$ 。

情形 1. 如果 $1 - \alpha < f_A(x) \leq 1$, 那么安全性取值 x 对应的安全级别为 5;

情形 2. 如果 $0.8 < f_A(x) \leq 0.8 + \eta$, 那么安全性取值 x 对应的安全级别不为 5;

情形 3. 如果 $0.8 + \eta < f_A(x) \leq 1 - \alpha$, 那么安全性取值 x 与安全级别 5 之间存在一种隶属关系, 这种隶属关系可以用隶属度来刻画, 如式(1)所示:

$$g_A(x) = \frac{f_A(x) - (0.8 + \eta)}{(1 - \alpha) - (0.8 + \eta)} \quad (1)$$

2.3.2 基于最小-最大理论的规范化处理

由于 QoS 属性值可以为正向属性, 如可用性、可靠性, 其值越大, 表示质量越高; 也可以为负向属性, 如执行代价、执行时间, 其值越大表示质量越低。因此, 需要进行规范化处理以使属性值在同一范围内操作^[33], 其规范化处理过程如式(2)和(3)表示:

$$q'_{ik} = \begin{cases} \frac{q_{ik} - q_{ik}^{\min}}{q_{ik}^{\max} - q_{ik}^{\min}}, & \text{若 } q_{ik}^{\max} - q_{ik}^{\min} \neq 0 \\ 1, & \text{若 } q_{ik}^{\max} - q_{ik}^{\min} = 0 \end{cases} \quad (\text{正向属性}) \quad (2)$$

$$q'_{ik} = \begin{cases} \frac{q_{ik}^{\max} - q_{ik}}{q_{ik}^{\max} - q_{ik}^{\min}}, & \text{若 } q_{ik}^{\max} - q_{ik}^{\min} \neq 0 \\ 1, & \text{若 } q_{ik}^{\max} - q_{ik}^{\min} = 0 \end{cases} \quad (\text{负向属性}) \quad (3)$$

其中 q_{ik} 表示原子服务 s_i 在第 k 个 QoS 属性上的值,

$q_{ik}^{\min} = \min_{\forall s_i \in T} (q_{ik})$ 表示任务 T 中所有原子服务在第 k 个 QoS 属性上的最小值, $q_{ik}^{\max} = \max_{\forall s_i \in T} (q_{ik})$ 表示任务 T 中所有原子服务在第 k 个 QoS 属性上的最大值。

2.4 基于 FAHP 的多维 QoS 局部最优服务选择模型

2.4.1 基本概念及命题

基于文献[15, 34], 给出以下基本概念及命题。

(1) 原子服务集合. $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$, 其中 s_i ($1 \leq i \leq m$) 表示第 i 个原子服务, $m \in \mathbb{Z}^+$ 表示该集合中原子服务的个数。

(2) 弱序关系“ \cdot ”。设 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$ 是一个原子服务集合, 定义弱序关系 \cdot 为 S 上的一个二元关系, 则对于 S 中的任意两个原子服务 s_i 和 s_j 满足:

① 连通性. $\forall s_i, s_j \in S$, $s_i \cdot s_j$ 或 $s_j \cdot s_i$ 或两者都满足;

② 传递性. $\forall s_i, s_j, s_k \in S$, 若 $s_i \cdot s_j$ 且 $s_j \cdot s_k$, 则 $s_i \cdot s_k$;

③ 无差异性. $s_i \cong s_j$ 当且仅当 $s_i \cdot s_j$ 且 $s_j \cdot s_i$ 。

(3) 设“ \cdot ”是 S 上的弱序关系, 则存在实值的序数效用函数 f , 对 $\forall s_i, s_j \in S$, 有 $f(s_i) \geq f(s_j) \Leftrightarrow s_i \cdot s_j$; 且

① 若 t 是 f 的严格单增函数, 则有 $t(f(s_i)) \geq t(f(s_j)) \Leftrightarrow s_i \cdot s_j$;

② 若 $g = f_1 + f_2$, 其中 f_i ($i=1, 2$) 是序数效用函数, 则有 $g(s_i) \geq g(s_j) \Leftrightarrow s_i \cdot s_j$ 。

2.4.2 多维 QoS 向量及 S 上的序数效用函数

定义 1(多维 QoS 向量). 定义一个 $2n$ 维可扩充的向量: $QoS = (q_1, q_2, \dots, q_n, fid_{q_1}, fid_{q_2}, \dots, fid_{q_n})$ 为多维 QoS 向量, 其中前 n 个分量 q_i ($i=1, 2, \dots, n$) 为 n 个 QoS 客观属性值 (其数据为服务提供者公布或第 3 方监测得到), 后 n 个分量 fid_{q_i} ($i=1, 2, \dots, n$) 为其相应 QoS 属性的主观评价值 (其数据来自服务使用者的评价)。

定义 2(S 上的序数效用函数). 设 $f_1(q_1(s_i)), f_2(q_2(s_i)), \dots, f_n(q_n(s_i))$ 分别是原子服务集 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$ 上满足弱序关系“ \cdot ”的实值序数效用函数, 则单调递增复合函数 $f(s) = (f_1(q_1(s_i)), f_2(q_2(s_i)), \dots, f_n(q_n(s_i)))$ 是 S 上的序数效用函数。

2.4.3 原子服务局部最优的排序原则

定义 3. 设有 $S, QoS, f_k(q_k(s_i)), k=1, 2, \dots, n$, 则 s_1, s_2, \dots, s_m 以 $f(s)$ 的值为排序数值尺度。为简便起见, 可选取严格单调递增的线性函数作为每个 QoS 属性的序数效用函数, 即 $f_k(q_k(s_i)) = \omega_k \cdot q_k(s_i), k =$

1, 2, \dots, n.

定义 4. 设 $H = [h_{ij}]_{m \times n}$ 表示 QoS 属性矩阵, 其中 $h_{ij} = q_i(s_j)$ 是服务 $s_j \in S$ 在 QoS 属性 $q_i \in \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$ 的取值, 设 L 是 H 经过去模糊化及规范化后的标准矩阵, 将 L 进行行分块, 得到 $L = [L_1, L_2, \dots, L_m]^T$, 取 $f(s_i) = \sum_{j=1}^n \omega_j \cdot q_j(s_i) = L_i \cdot \omega$, 则 $s_i \cdot s_j \Leftrightarrow L_i \cdot \omega \geq L_j \cdot \omega, \omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^T, i, j = 1, 2, \dots, m.$

2.4.4 建立多维 QoS 的 FAHP 层次结构

层次分析法(AHP)是美国运筹学家 Satty 创立的一种多目标决策方法^[35], 该方法将定性分析与定量分析相结合, 既能有效地分析目标评价准则相关体系层次之间的非序列关系, 又能有效地综合度量决策者的比较和判断. FAHP^[32] 是对传统 AHP 的一种改进, 它提出了一种更为合理、科学的权向量计算方法, 并且可以根据参数的选择来调整决策者对权重的分辨能力. 下面给出多维 QoS 的 FAHP 层次结构, 如图 4 所示.

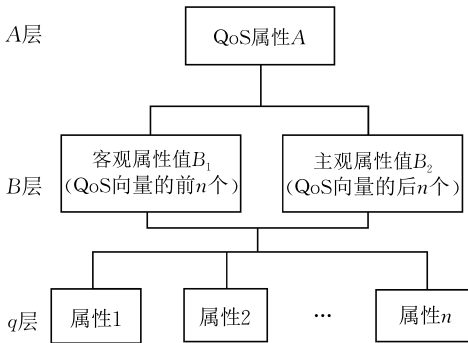


图 4 多维 QoS 的 FAHP 层次结构

3 模型求解

求解步骤如(1)~(5).

(1) 构造各层次的成对比较矩阵. 记 B 层对 A 层的成对比较矩阵为 $P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{21} & p_{22} \end{bmatrix}_{2 \times 2}$, 其中 p_{12} 表示客观属性值相对于主观评价的重要程度, p_{21} 则相反; 在大部分情况下, 可取 $p_{12} = p_{21} = 1$, 即它们在局部最优的服务选择模型中同等重要. q 层对 B 层的成对比较矩阵为

$$Q^1 = \begin{bmatrix} q_{11}^1 & q_{12}^1 & \dots & q_{1n}^1 \\ q_{21}^1 & q_{22}^1 & \dots & q_{2n}^1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{n1}^1 & q_{n2}^1 & \dots & q_{nn}^1 \end{bmatrix}_{n \times n}$$

和

$$Q^2 = \begin{bmatrix} q_{11}^2 & q_{12}^2 & \dots & q_{1n}^2 \\ q_{21}^2 & q_{22}^2 & \dots & q_{2n}^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{n1}^2 & q_{n2}^2 & \dots & q_{nn}^2 \end{bmatrix}_{n \times n}$$

其中 $q_{ij}^1 = \frac{q_i}{q_j}$, q_i 和 q_j 分别是 q_i 和 q_j 标准化后的均值; $q_{ij}^2 = \frac{fid'_{q_i}}{fid'_{q_j}}$, fid'_{q_i} 和 fid'_{q_j} 分别是 fid_{q_i} 和 fid_{q_j} 标准化后的均值.

(2) 判断以上各成对比较矩阵的一致性.

定义 5(一致性矩阵). 如果一个成对比较矩阵 $A = [a_{ij}]_{n \times n}$ 满足

$$a_{ij} \cdot a_{jk} = a_{ik}, i, j, k = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

则 A 称为一致性矩阵, 简称一致阵^[35].

对于二阶成对比较矩阵 P , 因为 $p_{12} = \frac{1}{p_{21}}, p_{21} = \frac{1}{p_{12}}$, 故有 $p_{12} \cdot p_{21} = 1 = p_{11}, p_{21} \cdot p_{12} = 1 = p_{22}$, 满足式(4), 即 P 为一致阵.

对于 Q^1, Q^2 , 因 $q_{ik}^1 = \frac{q_i}{q_k} = \frac{q_i}{q_j} \cdot \frac{q_j}{q_k} = q_{ij}^1 \cdot q_{jk}^1$, $q_{ik}^2 = \frac{fid'_{q_i}}{fid'_{q_k}} = \frac{fid'_{q_i}}{fid'_{q_j}} \cdot \frac{fid'_{q_j}}{fid'_{q_k}} = q_{ij}^2 \cdot q_{jk}^2$, 均满足式(4), 故 Q^1, Q^2 也是一致阵.

(3) 将 P, Q^1, Q^2 转化为模糊一致阵.

定理 1. 若 $A = [a_{ij}]_{n \times n}$ 是一致的成对比较矩阵, 则 $R = [r_{ij}(\alpha)]_{n \times n}, (\alpha \geq 81)$ 是模糊一致判断矩阵. 这里 $r_{ij}(\alpha) = \log_{\alpha} a_{ij} + 0.5, \alpha \geq 81$ ^[36].

定理 1 提供了一种将一致阵转化为模糊一致阵的方法, 这里要求 $\alpha \geq 81$ 是为了保证 $0 \leq r_{ij}(\alpha) \leq 1$; 在本文的计算中, 我们取 $\alpha = 243$.

模糊标度值的大小依赖于决策者对 $\alpha(\alpha \geq 81)$ 取值的选择, 特别地, $\lim_{\alpha \rightarrow \infty} \log_{\alpha} x = 0, 1/9 \leq x \leq 9$; 这样一个一致阵 $A = [a_{ij}]_{n \times n}$ 对应一族模糊一致阵 $R = [r_{ij}(\alpha)]_{n \times n}$, 其中 $r_{ij}(\alpha) = \log_{\alpha} a_{ij} + 0.5, \alpha \geq 81$.

由定理 1, P, Q^1, Q^2 对应的模糊一致阵分别为 $R_P = [\log_{\alpha} p_{ij} + 0.5]_{2 \times 2}, R_{Q_1} = [\log_{\alpha} q_{ij}^1 + 0.5]_{n \times n}, R_{Q_2} = [\log_{\alpha} q_{ij}^2 + 0.5]_{n \times n}$.

(4) 计算各层次模糊权向量及组合模糊权向量.

定义 6(层次模糊权向量的确定).

设 $R = [r_{ij}]_{n \times n}$ 为模糊一致阵, 则其权向量 $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^T$ 可由下面约束规划问题确定^[36]:

$$(P1) \begin{cases} \min z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (\log_{\beta} \omega_i - \log_{\beta} \omega_j + 0.5 - r_{ij})^2 \\ \text{s. t. } \sum_{j=1}^n \omega_j = 1, \omega_j > 0, j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (5)$$

这里 $\beta > 1$.

为求解权向量 $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^T$, 可将约束规划问题(P1)应用 Lagrange 函数转化为下述无约束规划问题(P2):

$$\min L(\omega, \lambda) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (\log_{\beta} \omega_i - \log_{\beta} \omega_j + 0.5 - r_{ij})^2 + 2\lambda \left(\sum_{j=1}^n \omega_j - 1 \right),$$

令 $\frac{\partial L(\omega, \lambda)}{\partial \omega_i} = 0$, 可得

$$4 \sum_{j=1}^n \frac{\log_{\beta} \omega_i - \log_{\beta} \omega_j + 0.5 - r_{ij}}{\omega_i \ln \beta} + 2\lambda = 0,$$

整理得

$$2 \sum_{j=1}^n (\log_{\beta} \omega_i - \log_{\beta} \omega_j + 0.5 - r_{ij}) + \lambda \omega_i \ln \beta = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

于是有

$$\sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^n 2(\log_{\beta} \omega_i - \log_{\beta} \omega_j + 0.5 - r_{ij}) + \lambda \omega_i \ln \beta \right] = 0.$$

由于模糊成对比较矩阵的所有元素之和为 $n^2/2$ ^[36] 及 $\sum_{j=1}^n \omega_j = 1$, 可得 $\lambda \ln \beta = 0$, 而 $\beta > 1$, 从而 $\lambda = 0$.

于是可由下列方程组

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n (\log_{\beta} \omega_i - \log_{\beta} \omega_j + 0.5 - r_{ij})^2 = 0 \\ \sum_{i=1}^n \omega_i = 1, \omega_i > 0 \end{cases}$$

解得

$$\omega_i = \frac{\beta^{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n r_{ij}}}{\sum_{k=1}^n \beta^{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n r_{kj}}}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

$$\text{权重 } \omega_i = \frac{\beta^{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n r_{ij}}}{\sum_{k=1}^n \beta^{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n r_{kj}}}, \quad i = 1, 2, \dots, n \text{ 是底数 } \beta$$

($\beta > 1$) 的函数, 因而对于 $R = [r_{ij}]_{n \times n}$, 有一族权重向量:

$$W = \{(\omega_1(\beta), \omega_2(\beta), \dots, \omega_n(\beta))^T | \omega_i(\beta) = \frac{\beta^{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n r_{ij}}}{\sum_{k=1}^n \beta^{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n r_{kj}}}, \beta > 1, i = 1, 2, \dots, n\} \quad (7)$$

$\frac{\omega_i(\beta)}{\omega_j(\beta)}$ 是关于 β 的严格增函数, 且 $\lim_{\beta \rightarrow \infty} \frac{\omega_i(\beta)}{\omega_j(\beta)} = \infty, \lim_{\beta \rightarrow 1} \frac{\omega_i(\beta)}{\omega_j(\beta)} = 1$, 这也说明可以通过增大 β 的值来

提高各权重大小的分辨率, 当 β 很大时, 某些权重值会趋于零, 这样会不利于计算机处理. 因此 β 的取值可根据决策者的偏好而定.

权重向量的分量排序与 β 的取值无关, 但可以通过调整 β 的取值来调整各权重大小的分辨率. 下面通过一个具体的例子来说明这一点.

$$\text{设 } R = \begin{bmatrix} 0.5000 & 0.5738 & 0.4070 \\ 0.4271 & 0.5000 & 0.3332 \\ 0.5933 & 0.6668 & 0.5000 \end{bmatrix} \text{ 为一个模}$$

糊一致阵, 分别取 $\beta = e, \beta = e^{10}, \beta = e^{20}$, 则可求得对应的权向量分别为

$$\omega(e) = (0.3304, 0.3070, 0.3626),$$

$$\omega(e^{10}) = (0.2490, 0.1194, 0.6316),$$

$$\omega(e^{20}) = (0.1305, 0.030, 0.8395).$$

可以看出: 一方面, 权向量的分量排序(第 3 个分量、第 1 个分量、第 2 个分量)与 β 的取值无关; 另一方面, 随着 β 取值的增大, 各分量值的差距(分辨率)越来越大, 最大的分量值会接近于 1, 而最小的分量值则会接近于 0.

具体来说, 在局部最优服务选择的决策模型中, 由于权向量各分量值代表着各 QoS 属性的权重, 则决策者(服务提供者或服务使用者)可根据自己的偏好和侧重来调整 β 的取值, 以使决策方案更符合自己的需要. 例如, 若在 QoS 属性的权向量中, 其可靠性、可用性权重较大, 而执行代价、执行时间权重较小, 此时, 决策者可根据后续计算或决策(原子服务筛选, 组合服务全局最优等)的需要, 若更注重服务的可靠性及可用性, 则可增大 β 的取值来放大相应属性的权重, 而同时减小其他属性的权重.

定义 7(组合模糊权向量的确定).

设 R_p 的权向量为 $(\omega_1^{R_p}, \omega_2^{R_p})^T$, R_{Q_1} 的权向量为 $(\omega_1^{R_{Q_1}}, \omega_2^{R_{Q_1}}, \dots, \omega_n^{R_{Q_1}})^T$, R_{Q_2} 的权向量为 $(\omega_1^{R_{Q_2}}, \omega_2^{R_{Q_2}}, \dots, \omega_n^{R_{Q_2}})^T$, 则组合模糊权向量为 $\omega^* = (\omega_1^*, \omega_2^*, \dots, \omega_n^*)$, $\omega_i^* = \omega_i^{R_{Q_1}} \cdot \omega_1^{R_p} + \omega_i^{R_{Q_2}} \cdot \omega_2^{R_p}, i = 1, 2, \dots, n$.

表 1 给出了各层次权向量和组合权向量之间的对应关系.

表 1 各层次权向量和组合权向量之间的对应关系

权向量(B对A)		ω_1^{RP}	ω_2^{RP}	组合权向量(q对A)	
B层		q层			
		客观数据(B1)	主观数据(B2)		
权向量 (q对B)	属性 q_1	$\omega_1^R Q_1$	$\omega_1^R Q_2$	$\omega_1^* = \omega_1^R Q_1 \cdot \omega_1^{RP} + \omega_1^R Q_2 \cdot \omega_2^{RP}$	
	属性 q_2	$\omega_2^R Q_1$	$\omega_2^R Q_2$	$\omega_2^* = \omega_2^R Q_1 \cdot \omega_1^{RP} + \omega_2^R Q_2 \cdot \omega_2^{RP}$	
	
	属性 q_n	$\omega_n^R Q_1$	$\omega_n^R Q_2$	$\omega_n^* = \omega_n^R Q_1 \cdot \omega_1^{RP} + \omega_n^R Q_2 \cdot \omega_2^{RP}$	

(5) 计算各候选服务的序数效用函数并排序。

由定义 4, 计算每个候选服务的序数效用函数

$$f(s_i) = \sum_{j=1}^n \omega_j \cdot q_j(s_i) = L_i \cdot \omega, \text{ 按其值大小进行排序,}$$

即可得到局部最优的候选服务。

4 实验分析

旅游业务集成是服务消费的一种典型场景,它通过集成分布在互联网上的服务为出行规划提供支持,因此可构建旅游业务集成的有向无环图 $G(E, V)$, 包括以下几种活动: 旅游路线选择 WS_1 、国内飞机预定 WS_2 、国际飞机预定 WS_3 、旅游胜地选取 WS_4 和汽车租赁 WS_5 ^[37]. 我们将以 WS_4 为例, 生成满足服务功能需求的 10 个候选服务作为原子服务, 采用基于 FAHP 的多维 QoS 模型求出局部最优的候选服务. 实验环境是 CPU 为 Intel Core i5-4200u, 1.6GHz, 内存为 4GB 的 ASUS Y481L, 操作系统为 Windows 7, 并利用了 Mathematic 数学软件.

4.1 基于 FAHP 的多维 QoS 局部最优选择

为了直观地与文献[15]中局部最优服务选择方法进行比较, 我们采用 4 个 QoS 属性 q_{cost} 、 q_{time} 、 q_{rel} 及 q_{av} 组成八维 QoS 向量: $QoS = (q_{cost}, q_{time}, q_{rel}, q_{av}, fid_{q_{cost}}, fid_{q_{time}}, fid_{q_{rel}}, fid_{q_{av}})$, 随机生成的 10 个候选 Web 服务的服务质量信息数据如表 2 所示.

表 2 10 个候选 Web 服务的服务质量信息

	q_{cost}	q_{time}	q_{rel}	q_{av}	q_{fid}			
s_1	0.14	175	0.90	0.92	0.99	0.94	0.90	0.95
s_2	0.20	150	0.95	0.98	0.95	0.89	0.93	0.92
s_3	0.10	158	0.92	0.91	0.95	0.85	0.90	0.91
s_4	0.15	152	0.85	0.95	0.88	0.90	0.90	0.88
s_5	0.18	165	0.92	0.98	0.85	0.90	0.95	0.95
s_6	0.20	175	0.90	0.88	0.99	0.94	0.92	0.90
s_7	0.15	190	0.94	0.92	0.95	0.95	0.92	0.95
s_8	0.16	155	0.88	0.96	0.95	0.88	0.95	0.95
s_9	0.18	150	0.92	0.92	0.92	0.92	0.90	0.95
s_{10}	0.15	145	0.92	0.88	0.92	0.90	0.92	0.90

将服务质量信息数据作规范化处理, 如表 3 所示.

表 3 经过规范化处理后的 10 个候选 Web 服务的服务质量信息

	q_{cost}	q_{time}	q_{rel}	q_{av}	q_{fid}			
s_1	0.60	0.3333	0.5	0.4	1.0000	0.90	0	1.0000
s_2	0	0.8889	1.0	1.0	0.7143	0.40	0.60	0.5714
s_3	1.00	0.7111	0.7	0.3	0.7143	0	0	0.4286
s_4	0.50	0.8444	0	0.7	0.2143	0.50	0	0
s_5	0.20	0.5556	0.7	1.0	0	0.50	1.00	1.0000
s_6	0	0.3333	0.5	0	1.0000	0.9	0.40	0.2587
s_7	0.50	0	0.9	0.4	0.7143	1.0	0.40	1.0000
s_8	0.40	0.7778	0.3	0.8	0.7143	0.30	1.00	0.2587
s_9	0.20	0.8889	0.7	0.4	0.5000	0.70	0	1.0000
s_{10}	0.50	1	0.7	0	0.5000	0.50	0.40	0.2587
Av	0.39	0.6333	0.6	0.5	0.6071	0.57	0.38	0.5857

(1) 建立 FAHP 层次结构 (如图 5 所示).

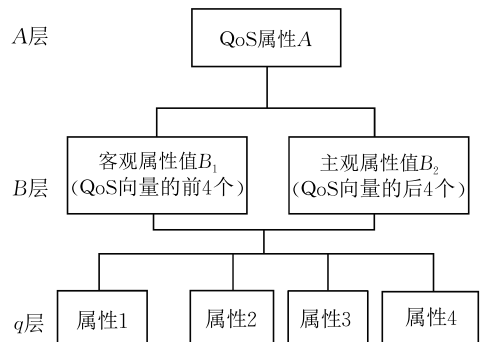


图 5 八维服务质量的 FAHP 层次结构

(2) 构造各层次成对比较矩阵并计算其模糊一致阵.

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix},$$

$$Q_1 = \begin{bmatrix} 1.0000 & 0.6158 & 0.6500 & 0.7800 \\ 1.6238 & 1.0000 & 1.0555 & 1.2666 \\ 1.5385 & 0.9474 & 1.0000 & 1.2000 \\ 1.2821 & 0.7895 & 0.8333 & 1.0000 \end{bmatrix},$$

$$Q_2 = \begin{bmatrix} 1.0000 & 1.0651 & 1.5976 & 1.0365 \\ 0.9389 & 1.0000 & 1.5000 & 0.9732 \\ 0.6259 & 0.6667 & 1.0000 & 0.6488 \\ 0.9648 & 1.0275 & 1.5413 & 1.0000 \end{bmatrix},$$

$$R_P = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 \end{bmatrix},$$

$$R_{Q_1} = \begin{bmatrix} 0.5000 & 0.4117 & 0.4216 & 0.4548 \\ 0.5883 & 0.5000 & 0.5098 & 0.5430 \\ 0.5784 & 0.4902 & 0.5000 & 0.5332 \\ 0.5452 & 0.4570 & 0.4668 & 0.5000 \end{bmatrix},$$

$$R_{Q_2} = \begin{bmatrix} 0.5000 & 0.5115 & 0.5853 & 0.5065 \\ 0.4885 & 0.5000 & 0.5738 & 0.4950 \\ 0.4147 & 0.4262 & 0.5000 & 0.4212 \\ 0.4934 & 0.5049 & 0.5788 & 0.5000 \end{bmatrix}.$$

(3) 利用式(6)计算 R_P, R_{Q_1}, R_{Q_2} 的权向量及组合权向量, 这里取 $\beta = e^{10}$ (β 的值可根据决策者的偏好和侧重调整), 则有

$$\omega_{R_P} = (0.5, 0.5),$$

$$\omega_{R_{Q_1}} = (0.1393, 0.3367, 0.3051, 0.2189),$$

$$\omega_{R_{Q_2}} = (0.3082, 0.2717, 0.1314, 0.2887),$$

$$\omega^* = (0.2238, 0.3042, 0.2183, 0.2538).$$

(4) 根据定义 4 计算各候选服务的序数效用函数值并排序, 得到局部最优原子服务。

由 $f(s_i) = L_i \cdot \omega^*$, 可得各个服务的效用函数值为

$$f(s_1) = 0.4463, f(s_2) = 0.7424, f(s_3) = 0.6690,$$

$$f(s_4) = 0.5464, f(s_5) = 0.6203, f(s_6) = 0.2105,$$

$$f(s_7) = 0.4098, f(s_8) = 0.5946, f(s_9) = 0.5694,$$

$$f(s_{10}) = 0.5688.$$

可得服务排序是 $s_2 \cdot s_3 \cdot s_5 \cdot s_8 \cdot s_9 \cdot s_{10} \cdot s_4 \cdot s_1 \cdot s_7 \cdot s_6$.

4.2 决策结果的对比分析、参数的敏感性分析

4.2.1 不同赋权模式下决策结果的对比分析

由排序结果可以看出, 在 FAHP 赋权模式下, 候选服务 s_2 是最优的选择, 从表 2 也可以看出, s_2 的可靠性和可用性是最高的, 而且执行时间也较少, 进一步可以看到, 这 3 个属性的相应评价也较高, 故其客观数据的真实性也较高; 另一方面, s_6 的序数效用函数值最低, 是最差的候选服务, 原因在于它的执行时间最长, 可用性最低, 而且可靠性也不高. 在文献[15]的 3 种赋权模式下, s_2 和 s_6 也分别是最优和最差的服务, 可见在本文 FAHP 赋权模式下 s_2 的最优性与 s_6 的最差性与文献[15]是一致的, 这说明了本文模型的有效性. 但是, 在文献[15]的赋权模式下, s_5 优于 s_3 , 这与本文的结果有所不同. 虽然从表 2 的前几列数据来看, s_3 的可用性最低, 执行时间及可靠性也不是最优的, 但是, 我们也可以从表 2 的后几列数据看到, 这几个属性相应的真实度也不高, 而且其中有两个是最低的, 由于文献[15]的赋权模式均只

使用了客观数据(表 2 的第 2 列至第 5 列数据)进行排序计算, 未考虑到客观数据的真实性(客观数据如果不是来自于第 3 方监测, 则 QoS 数据的真实性就难以保证), 这样一来, 仅以客观数据为排序依据得到的候选服务排序还有待进一步确定, 而以综合考虑了两种数据的 FAHP 赋权模式计算得到的候选服务排序则具有一定的科学性和合理性.

为了便于直观的比较, 现将由几种不同赋权模式得到的候选 Web 服务效用值用表 4 及图 6 表示出来, 如下(其中前 3 种赋权模式的数据来自于文献[15]).

表 4 几种不同赋权模式下的候选 Web 服务效用值

	效用值			
	主客观赋权模式	客观赋权模式	主观赋权模式	FAHP 赋权模式
s_1	0.3388	0.4105	0.3819	0.4463
s_2	0.7766	0.7400	0.7869	0.7424
s_3	0.4908	0.6012	0.5719	0.6690
s_4	0.4930	0.4490	0.5232	0.5464
s_5	0.5908	0.5872	0.6032	0.6203
s_6	0.2558	0.2523	0.2608	0.2105
s_7	0.3081	0.4001	0.3127	0.4098
s_8	0.5194	0.5217	0.5713	0.5946
s_9	0.5952	0.5813	0.6345	0.5694
s_{10}	0.5565	0.5836	0.6234	0.5688

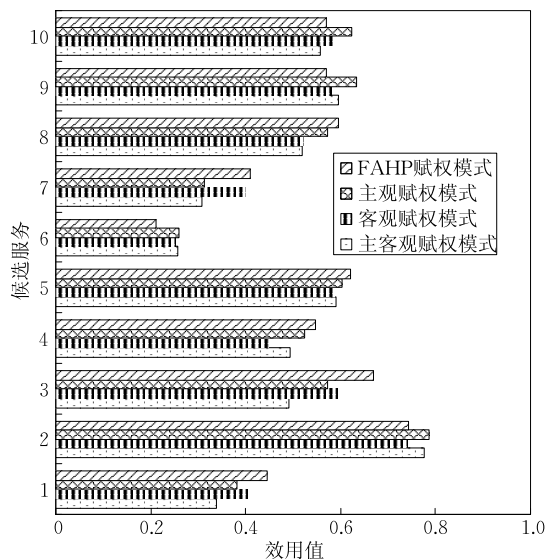


图 6 不同赋权模式下的候选 Web 服务的比较

从图 6 可以看出, 在不同的赋权模式下, s_2 的表现都是最突出的, s_3 和 s_5 也是比较突出的. 在某些情况下, 若并不严苛地要求选择局部最优的一个候选服务, 而是较优的几个候选服务, 则由上图便可直观地从中选择较优的几个, 例如 s_2, s_3 和 s_5 . 另一方面, 在不同的赋权模式下, s_1, s_6 和 s_7 的表现都是比较差的, 由表 2 可以看出这也是较符合实际的, s_6 的执行

代价最大, s_7 的执行时间最长, s_1 的执行时间较长, 可靠性和可用性较低, 而且其各项指标的真实性也较高. 在全局最优服务选择的模型中, 可以先将局部 QoS 最差的几个候选服务剔除, 这样一来, 可以大大减少服务聚合的求解空间, 提高求解效率和服务聚合的成功率.

图 7 给出了各候选服务的服务质量属性及其相应真实度之间的比较, 图表中的第 2 个纵轴坐标为真实度, 可以直观地看出, s_2 的可靠性及可用性最高, 且相应真实度较高; 执行时间中等, 但相应真实度不高. 由此可见, 基于 FAHP 赋权模式得到的 s_2 的局部最优性是比较复合实际的.

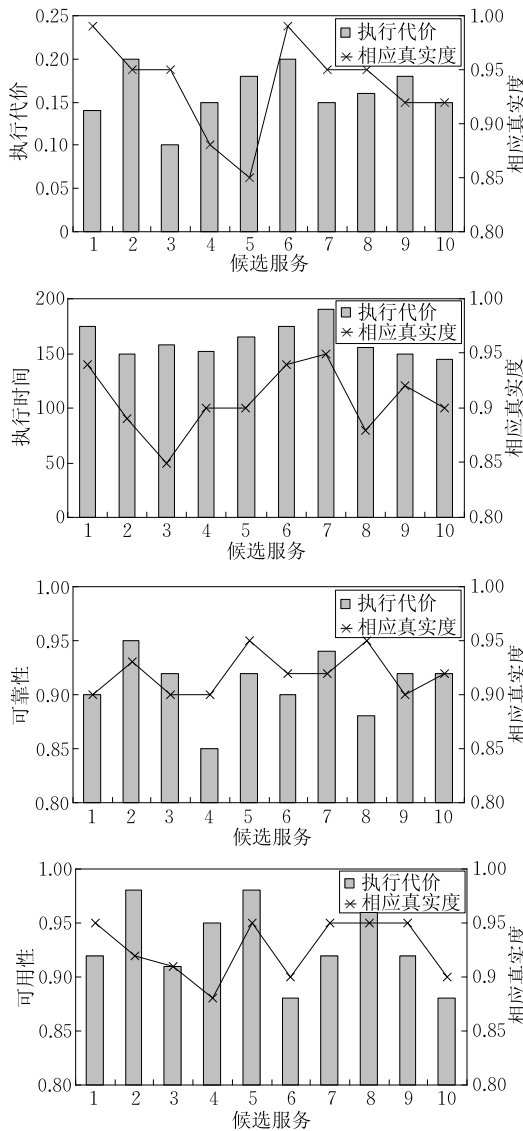


图 7 各服务的 QoS 属性及其相应真实度的比较

选取在 4 种不同赋权模式下排序在前 4 位的候选服务, 分别计算执行代价、执行时间、可靠性和可用性的平均值来比较不同决策模式的优劣, 具体计

算结果如图 8 所示. 可以看出, 与前 3 种赋权模式相比, FAHP 赋权模式在可用性上达到最优, 执行代价较优, 在执行时间及可靠性上与前 3 种赋权模式基本持平, 既体现了服务质量的客观特性, 又反映了用户对其相应服务质量属性的主观评价, 可见, 该模式展示了良好的中间特性, 更具科学性和合理性.

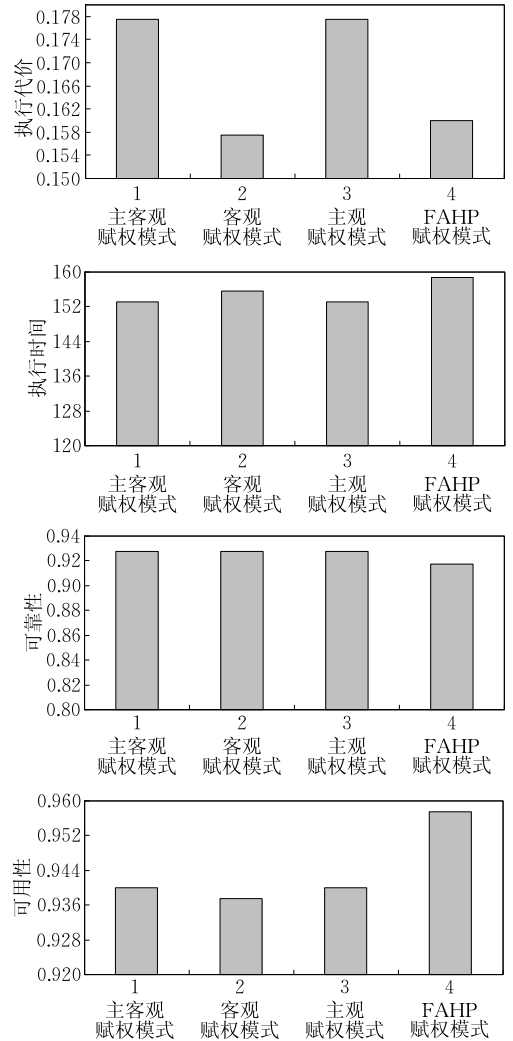


图 8 4 种赋权模式比较

4.2.2 参数 β 对决策结果的敏感性分析

下面分析参数 β 对决策结果的影响, 现分别计算在不同 β 取值下的层次权向量、组合权向量、各候选服务效用函数值及排序, 其结果列于表 5、表 6、表 7 及图 9.

从表 5 及表 6 可以看出, 随着 β 取值的增大, 一方面, 层次权向量及组合权向量各分量间的数值差距越来越大, 通俗地说, 就是数值大的变得更大, 数值小的变得跟小, 即“优劣”更明显化; 另一方面, β 的取值对候选服务排序有一定的影响, 但影响微小, 这种影响主要体现在 s_9 和 s_{10} 的排序上. 从表 2 也可

表 5 层次权向量随 β 取值的变化

β	ω_{RQ_1}	ω_{RQ_2}
e	(0.2370, 0.2588, 0.2563, 0.2479)	(0.2565, 0.2532, 0.2355, 0.2548)
e ²	(0.2243, 0.2676, 0.2624, 0.2456)	(0.2628, 0.2562, 0.2216, 0.2594)
e ³	(0.2122, 0.2765, 0.2684, 0.2430)	(0.2690, 0.2590, 0.2083, 0.2638)
e ⁴	(0.2004, 0.2852, 0.2742, 0.2401)	(0.2750, 0.2615, 0.1955, 0.2679)
e ⁵	(0.1891, 0.2940, 0.2799, 0.2371)	(0.2809, 0.2638, 0.1834, 0.2719)
e ⁶	(0.1782, 0.3026, 0.2853, 0.2338)	(0.2867, 0.2658, 0.1719, 0.2757)
e ⁷	(0.1678, 0.3113, 0.2906, 0.2303)	(0.2923, 0.2676, 0.1609, 0.2792)
e ⁸	(0.1579, 0.3198, 0.2956, 0.2267)	(0.2978, 0.2692, 0.1505, 0.2826)
e ⁹	(0.1484, 0.3283, 0.3005, 0.2229)	(0.3031, 0.2705, 0.1407, 0.2857)
e ¹⁰	(0.1393, 0.3366, 0.3051, 0.2189)	(0.3082, 0.2717, 0.1314, 0.2887)
e ¹¹	(0.1307, 0.3339, 0.3096, 0.2149)	(0.3133, 0.2727, 0.1226, 0.2915)
e ¹²	(0.1225, 0.3531, 0.3138, 0.2107)	(0.3181, 0.2734, 0.1143, 0.2941)
e ¹³	(0.1147, 0.3611, 0.3178, 0.2064)	(0.3229, 0.2740, 0.1065, 0.2965)
e ¹⁴	(0.1073, 0.3690, 0.3216, 0.2021)	(0.3275, 0.2744, 0.0992, 0.2988)
e ¹⁵	(0.1003, 0.3768, 0.3252, 0.1977)	(0.3320, 0.2747, 0.0924, 0.3009)
e ¹⁶	(0.0937, 0.3845, 0.3286, 0.1932)	(0.3364, 0.2748, 0.0859, 0.3029)
e ¹⁷	(0.0875, 0.3921, 0.3318, 0.1887)	(0.3406, 0.2748, 0.0799, 0.3047)
e ¹⁸	(0.0816, 0.3995, 0.3347, 0.1842)	(0.3447, 0.2746, 0.0743, 0.3064)
e ¹⁹	(0.0761, 0.4068, 0.3375, 0.1796)	(0.3487, 0.2744, 0.0690, 0.3079)
e ²⁰	(0.0709, 0.4139, 0.3401, 0.1751)	(0.3526, 0.2740, 0.0640, 0.3093)

表 6 组合权向量及服务排序随 β 取值的变化

β	ω^*	候选服务排序
e	(0.2467, 0.2560, 0.2459, 0.2514)	$s_2 \cdot s_3 \cdot s_5 \cdot s_8 \cdot s_{10} \cdot s_9 \cdot s_4 \cdot s_1 \cdot s_7 \cdot s_6$
e ²	(0.2436, 0.2619, 0.2420, 0.2525)	$s_2 \cdot s_3 \cdot s_5 \cdot s_8 \cdot s_{10} \cdot s_9 \cdot s_4 \cdot s_1 \cdot s_7 \cdot s_6$
e ³	(0.2406, 0.2677, 0.2383, 0.2534)	$s_2 \cdot s_3 \cdot s_5 \cdot s_8 \cdot s_{10} \cdot s_9 \cdot s_4 \cdot s_1 \cdot s_7 \cdot s_6$
e ⁴	(0.2377, 0.2734, 0.2349, 0.2540)	$s_2 \cdot s_3 \cdot s_5 \cdot s_8 \cdot s_{10} \cdot s_9 \cdot s_4 \cdot s_1 \cdot s_7 \cdot s_6$
e ⁵	(0.2350, 0.2789, 0.2316, 0.2545)	$s_2 \cdot s_3 \cdot s_5 \cdot s_8 \cdot s_9 \cdot s_{10} \cdot s_4 \cdot s_1 \cdot s_7 \cdot s_6$
e ⁶	(0.2325, 0.2842, 0.2286, 0.2547)	$s_2 \cdot s_3 \cdot s_5 \cdot s_8 \cdot s_9 \cdot s_{10} \cdot s_4 \cdot s_1 \cdot s_7 \cdot s_6$
e ⁷	(0.2300, 0.2894, 0.2257, 0.2548)	$s_2 \cdot s_3 \cdot s_5 \cdot s_8 \cdot s_9 \cdot s_{10} \cdot s_4 \cdot s_1 \cdot s_7 \cdot s_6$
e ⁸	(0.2278, 0.2945, 0.2231, 0.2546)	$s_2 \cdot s_3 \cdot s_5 \cdot s_8 \cdot s_9 \cdot s_{10} \cdot s_4 \cdot s_1 \cdot s_7 \cdot s_6$
e ⁹	(0.2257, 0.2994, 0.2208, 0.2543)	$s_2 \cdot s_3 \cdot s_5 \cdot s_8 \cdot s_9 \cdot s_{10} \cdot s_4 \cdot s_1 \cdot s_7 \cdot s_6$
e ¹⁰	(0.2238, 0.3042, 0.2183, 0.2538)	$s_2 \cdot s_3 \cdot s_5 \cdot s_8 \cdot s_9 \cdot s_{10} \cdot s_4 \cdot s_1 \cdot s_7 \cdot s_6$
e ¹¹	(0.2220, 0.3088, 0.2161, 0.2532)	$s_2 \cdot s_3 \cdot s_5 \cdot s_8 \cdot s_9 \cdot s_{10} \cdot s_4 \cdot s_1 \cdot s_7 \cdot s_6$
e ¹²	(0.2203, 0.3132, 0.2141, 0.2534)	$s_2 \cdot s_3 \cdot s_5 \cdot s_8 \cdot s_9 \cdot s_{10} \cdot s_4 \cdot s_1 \cdot s_7 \cdot s_6$
e ¹³	(0.2188, 0.3176, 0.2122, 0.2515)	$s_2 \cdot s_3 \cdot s_5 \cdot s_8 \cdot s_{10} \cdot s_9 \cdot s_4 \cdot s_1 \cdot s_7 \cdot s_6$
e ¹⁴	(0.2174, 0.3217, 0.2104, 0.2504)	$s_2 \cdot s_3 \cdot s_5 \cdot s_8 \cdot s_{10} \cdot s_9 \cdot s_4 \cdot s_1 \cdot s_7 \cdot s_6$
e ¹⁵	(0.2161, 0.3258, 0.2088, 0.2493)	$s_2 \cdot s_3 \cdot s_5 \cdot s_8 \cdot s_{10} \cdot s_9 \cdot s_4 \cdot s_1 \cdot s_7 \cdot s_6$
e ¹⁶	(0.2150, 0.3297, 0.2073, 0.2480)	$s_2 \cdot s_3 \cdot s_5 \cdot s_8 \cdot s_{10} \cdot s_9 \cdot s_4 \cdot s_1 \cdot s_7 \cdot s_6$
e ¹⁷	(0.2140, 0.3334, 0.2058, 0.2467)	$s_2 \cdot s_3 \cdot s_5 \cdot s_8 \cdot s_{10} \cdot s_9 \cdot s_4 \cdot s_1 \cdot s_7 \cdot s_6$
e ¹⁸	(0.2132, 0.3371, 0.2045, 0.2453)	$s_2 \cdot s_3 \cdot s_5 \cdot s_8 \cdot s_{10} \cdot s_9 \cdot s_4 \cdot s_1 \cdot s_7 \cdot s_6$
e ¹⁹	(0.2124, 0.3406, 0.2032, 0.2438)	$s_2 \cdot s_3 \cdot s_5 \cdot s_8 \cdot s_{10} \cdot s_9 \cdot s_4 \cdot s_1 \cdot s_7 \cdot s_6$
e ²⁰	(0.2118, 0.3439, 0.2021, 0.2422)	$s_2 \cdot s_3 \cdot s_5 \cdot s_8 \cdot s_{10} \cdot s_9 \cdot s_4 \cdot s_1 \cdot s_7 \cdot s_6$

表 7 候选服务效用函数值随 β 取值的变化

β	候选服务效用函数值									
	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5	s_6	s_7	s_8	s_9	s_{10}
e	0.46	0.72	0.68	0.52	0.62	0.21	0.45	0.57	0.54	0.55
e ²	0.46	0.73	0.67	0.52	0.62	0.21	0.44	0.58	0.54	0.55
e ³	0.45	0.73	0.67	0.52	0.62	0.21	0.44	0.58	0.55	0.56
e ⁴	0.45	0.73	0.67	0.53	0.62	0.21	0.43	0.58	0.55	0.56
e ⁵	0.45	0.73	0.67	0.53	0.62	0.21	0.43	0.58	0.56	0.55
e ⁶	0.45	0.74	0.67	0.53	0.62	0.21	0.42	0.59	0.56	0.55
e ⁷	0.45	0.74	0.67	0.54	0.62	0.21	0.42	0.59	0.56	0.55
e ⁸	0.45	0.74	0.67	0.54	0.62	0.21	0.42	0.59	0.56	0.55
e ⁹	0.45	0.74	0.67	0.54	0.62	0.21	0.41	0.59	0.57	0.56
e ¹⁰	0.45	0.74	0.67	0.55	0.62	0.21	0.41	0.59	0.57	0.56
e ¹¹	0.45	0.74	0.67	0.55	0.62	0.21	0.41	0.60	0.57	0.56
e ¹²	0.44	0.74	0.67	0.55	0.62	0.21	0.40	0.60	0.57	0.56
e ¹³	0.44	0.75	0.67	0.55	0.62	0.21	0.40	0.60	0.57	0.58
e ¹⁴	0.44	0.75	0.67	0.56	0.62	0.21	0.40	0.60	0.57	0.58
e ¹⁵	0.44	0.75	0.67	0.56	0.62	0.21	0.40	0.60	0.57	0.58
e ¹⁶	0.44	0.75	0.67	0.56	0.62	0.21	0.39	0.60	0.58	0.59
e ¹⁷	0.44	0.75	0.67	0.56	0.62	0.21	0.39	0.60	0.58	0.59
e ¹⁸	0.44	0.75	0.67	0.56	0.62	0.21	0.39	0.61	0.58	0.59
e ¹⁹	0.44	0.75	0.67	0.56	0.62	0.22	0.39	0.61	0.58	0.59
e ²⁰	0.44	0.75	0.67	0.57	0.62	0.22	0.38	0.61	0.58	0.59

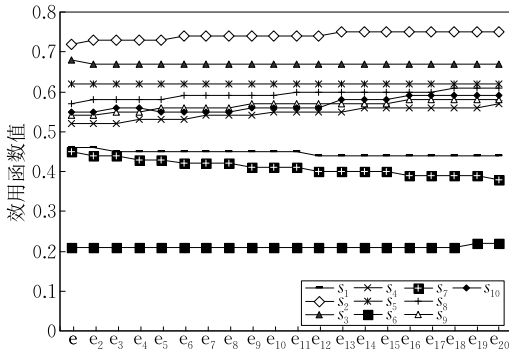


图9 候选服务效用函数值随 β 取值的变化

可以看出, s_9 和 s_{10} 的各项数据十分接近, s_9 的可用性及其相应真实度高于 s_{10} , 但 s_{10} 的执行代价优于 s_9 , 所以当 β 的取值变化导致可用性属性的权重增加时, s_9 就优于 s_{10} ; 类似地, 当 β 的取值变化导致执行代价属性的权重增加时, s_{10} 就优于 s_9 . 由此可见, 参数 β 取值的变化不会影响候选服务中较优及较差服务的排序, 但会影响中间服务的排序, 其效用函数值也会随 β 取值的变化明显波动, 如图 9 所示.

在局部最优服务选择的决策过程中, 若决策者(服务使用者或提供者)需要根据自己的偏好和侧重选取或剔除某些候选服务, 就可通过调整 β 的取值来改变相应属性的权重, 从而改变相应服务的效用函数值及排序, 为后续全局最优服务选择提供动态的决策模式.

4.3 局部最优服务选择对全局最优服务选择的影响

假设 Web 组合服务规划中包含 N 项任务, 而每项任务存在 M 个原子服务可供选择, 那么总共有 M^N 个组合方案, 从中选出最优方案是一个 NP 难问题. 通过局部服务质量优化一方面可以缩小 Web 服务组合的候选服务空间, 提高 Web 服务组合效率, 另一方面可以根据需要保留质量较优的候选 Web 服务参与后续的服务组合评估或提前剔除质量较差的 Web 服务, 以此更好地促进服务组合的整体优化.

LO-IP 是一种基于局部质量优化的 Web 服务组合方法^[16], 先通过局部优化找出每个任务节点的优秀 Web 服务 h 个 ($h < M$) 作为相应任务节点的新候选服务空间, 将服务组合问题转化为一个等价的整数规划问题, 根据整数规划理论^[38], 此时该问题的时间复杂度为 $O(2^{N \times h})$, 远低于没经过局部优化的全局优化问题的时间复杂度 $O(2^{N \times M})$. 与 Global^[19] 方法和 Hybrid^[39] 方法相比, LO-IP 方法在服务聚合成功率和时间代价上都略占优势^[16]. 本文提出的基于 FAHP 的服务质量局部最优选择模型为以局部最优为基础的全局最优选择模型提供了一种新的局部

优化方法, 该方法具有一定的科学性和灵活性, 并且能更好地体现服务提供者和服务使用者双方的偏好和侧重.

5 结束语

本文针对基于 QoS 的 Web 服务局部最优选择问题, 旨在更全面地考量 QoS 属性对服务最优选择的影响, 进而提高服务组合效率, 提出了一种基于 FAHP 的多维 QoS 局部最优服务选择模型, 其主要创新点有: (1) 构造了以 QoS 属性和其相应的真实度属性作为双重属性的模糊层次结构, 较为全面地考量 QoS 的客观属性和主观属性; (2) 建立了以 FAHP 赋权的动态决策模式, 使决策者可根据各自的偏好和侧重调整 QoS 属性的权重; (3) 通过权向量分辨率的调整, 可为后续全局最优服务选择模型提供更多的决策模式, 进而提高聚合服务的成功率.

下一步, 我们将更深入地分析和研究各 QoS 属性的不确定性及其之间的相关性, 以此改进决策模式, 进一步提高模型的科学性和有效性.

参 考 文 献

- [1] Yang Fang-Chun, Su Sen, Li Zhen. Semantic web service composition policy of mixed QoS model. Science in China Series E: Information Sciences, 2008, 38(10): 1697-1716(in Chinese)
(杨放春, 苏森, 李祯. 混合 QoS 模型感知的语义 Web 服务组合策略. 中国科学 E: 信息科学, 2008, 38(10): 1697-1716)
- [2] Alrifai M, Risse T. Combining global optimization with local selection for efficient QoS-aware service composition// Proceedings of the International World Wide Web Conference, Madrid, Spain, 2009: 881-890
- [3] Wang Yong, Dai Gui-Ping, Hou Ya-Rong. Dynamic methods of trust-aware composite service selection. Chinese Journal of Computers, 2009, 32(8): 1668-1675(in Chinese)
(王勇, 代桂平, 侯亚荣. 信任感知的组合服务动态选择方法. 计算机学报, 2009, 32(8): 1668-1675)
- [4] Wen Tao, Sheng Guo-Jun, Guo Quan, Li Ying-Qiu. Web service composition based on modified particle swarm optimization. Chinese Journal of Computers, 2013, 36(5): 1031-1046(in Chinese)
(温涛, 盛国军, 郭权, 李迎秋. 基于改进粒子群算法的 Web 服务组合. 计算机学报, 2013, 36(5): 1031-1046)
- [5] Wang Shang-Guang, Sun Qi-Bo, Yang Fang-Chun. Reputation evaluation approach in Web service selection. Journal of Software, 2012, 23(6): 1350-1367(in Chinese)

- (王尚广, 孙其博, 杨放春. Web 服务选择中信誉度评估方法. 软件学报, 2012, 23(6): 1350-1367)
- [6] Zhu Rui, Wang Huai-Min, Feng Da-Wei. Trustworthy services selection based on preference recommendation. *Journal of Software*, 2011, 22(5): 852-864(in Chinese)
(朱锐, 王怀民, 冯大为. 基于偏好推荐的可信服务选择. 软件学报, 2011, 22(5): 852-864)
- [7] Tomic V, Patel K, Pagurek B. WSOL-Web service offerings language//Proceedings of the Workshop on Web Services, E-Business, and the Semantic Web. Toronto, Canada, 2002: 57-67
- [8] Tomic V. Service Offerings for XML Web Services and Their Management Applications [Ph. D. dissertation]. Department of Systems and Computer Engineering, Carleton University, Ottawa, Canada, 2004
- [9] Menasce D A. QoS issue in Web service. *IEEE Internet Computing*, 2002, 6(6): 72-75
- [10] O'Sullivan J, Edmond D, Hofstede A T. What's in a service. *Distributed and Parallel Database*, 2002, 12(2): 117-133
- [11] Alrifai M, Skoutas D, Risse T. Selecting skyline services for QoS-based web service composition//Proceedings of the International World Wide Web Conference. Raleigh, USA, 2010: 11-20
- [12] Liu Shu-Lei, Liu Yun-Xiang, Zhang Fan, et al. A dynamic Web services selection algorithm with QoS global optimal in Web services composition. *Journal of Software*, 2007, 18(3): 646-656(in Chinese)
(刘书雷, 刘云翔, 张帆等. 一种服务聚合中 QoS 全局最优服务动态选择算法. 软件学报, 2007, 18(3): 646-656)
- [13] Choi C R, Jeong H Y. A broker-based quality evaluation system for service selection according to the QoS preferences of users. *Information Sciences*, 2014, 277: 553-566
- [14] Mardukhi F, NematBakhsh N, Zamanifar K, Barati A. QoS decomposition for service composition using genetic algorithm. *Applied Soft Computing*, 2013, 13: 3409-3421
- [15] Hu Jian-Qiang, Li Juan-Zi, Liao Gui-Ping. A multi-QoS based local optimal model of service selection. *Chinese Journal of Computers*, 2010, 33(3): 526-534(in Chinese)
(胡建强, 李涓子, 廖桂平. 一种基于多维服务质量的局部最优服务选择模型. 计算机学报, 2010, 33(3): 526-534)
- [16] Qi Lian-Yong, Dou Wang-Chun. Web service composition method based on local QoS optimization in cross-organizational cooperation. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2011, 17(8): 1647-1653(in Chinese)
(齐连永, 窦万春. 跨组织协同中基于局部服务质量优化的 Web 服务组合方法. 计算机集成制造系统, 2011, 17(8): 1647-1653)
- [17] Yu T, Lin K J. The design of QoS broker algorithms for QoS-capable web services. *International Journal of Web Service Research*, 2004, 1(4): 33-50
- [18] Wu Jian, Chen Liang, Deng Shui-Guang, et al. QoS-Skyline based dynamic service selection. *Chinese Journal of Computers*, 2010, 33(11): 2136-2146(in Chinese)
- (吴健, 陈亮, 邓水光等. 基于 Skyline 的 QoS 感知的动态服务选择. 计算机学报, 2010, 33(11): 2136-2146)
- [19] Ran S P. A model for Web service discovery with QoS. *ACM SIGecom Exchanges*, 2003, 4(1): 1-10
- [20] Rosenberg F, Celikovic P, Michlmayr A, et al. An end-to-end approach for QoS-aware service composition//Proceedings of the 2009 IEEE International Enterprise Distributed Object Computing Conference. Auckland, New Zealand, 2009: 151-160
- [21] Zeng L Z, Benatallah B, Ngu A H H, et al. QoS-aware middleware for Web services composition. *Transactions on Software Engineering*, 2004, 30(5): 311-327
- [22] Ardagna D, Pernici B. Adaptive service composition in flexible processes. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 2007, 33(6): 369-384
- [23] Parejo J A, Segura S, Fernandez P, Ruiz-Cortés A. QoS-aware web services composition using GRASP with path relinking. *Expert Systems with Applications*, 2014, 41: 4211-4223
- [24] Turajlic N, Dragovic I. A hybrid metaheuristic based on variable neighborhood search and tabu search for the web service selection problem. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 2012, 39: 145-152
- [25] Liu M, Wang M R, Shen W M, et al. A quality of service (QoS)-aware execution plan selection approach for a service composition process. *Future Generation Computer Systems*, 2012, 28: 1080-1089
- [26] Xiao Fang-Xiong, Li Yan, Huang Zhi-Qiu, et al. Modeling and analyzing web services composition using timed probabilistic priced process algebra. *Chinese Journal of Computers*, 2012, 35(5): 918-936(in Chinese)
(肖芳雄, 李燕, 黄志球等. 基于时间概率代价进程代数的 web 服务组合建模和分析. 计算机学报, 2012, 35(5): 918-936)
- [27] Iordache R, Moldoveanu F. A genetic algorithm for automated service binding. *Procedia Engineering*, 2014, 69: 1162-1171
- [28] Gao Yan, Na Jun, Zhang Bin, et al. An environment adaptation approach for composite services based on local Pareto optimal services set//Proceedings of the International Conference on Electronic Information and Electrical Engineering. Changsha, China, 2012: 888-892
- [29] Xie Hai-Jun, Qi Lian-Yong, Dou Wan-Chun. Combining Skyline and local selection for heuristic web service composition. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2011, 41(3): 449-452(in Chinese)
(谢海军, 齐连永, 窦万春. 基于 Skyline 和局部选择的启发式服务组合方法. 东南大学学报(自然科学版), 2011, 41(3): 449-452)
- [30] Li Jun, Zheng Xiao-Lin, Chen De-Ren. A trust-based selection approach for composite service. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2012, 46(5): 886-892(in Chinese)
(李俊, 郑小林, 陈德人. 基于信任的组合服务选择方法. 浙江大学学报(工学版), 2012, 46(5): 886-892)

- [31] Aggarwal R, Verma K, Miller J, Milnor W. Constraint driven Web service composition in METEOR-S//Proceedings of the IEEE International Conference on Service Computing. Shanghai, China, 2004: 23-30
- [32] Xie Ji-Jian, Liu Cheng-Ping. Fuzzy Mathematics Method and Applications. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2006(in Chinese)
(谢季坚, 刘承平. 模糊数学方法及其应用. 武汉: 华中科技大学出版社, 2006)
- [33] Li Jun, Zheng Xiao-Lin, Chen Song-Tao, Chen De-Ren. An efficient algorithm for QoS-aware service composition. Science in China Series E: Information Sciences, 2012, 42(3): 280-289(in Chinese)
(李俊, 郑小林, 陈松涛, 陈德人. 一种高效的服务组合优化算法. 中国科学 E: 信息科学, 2012, 42(3): 280-289)
- [34] Yue Chao-Yuan. Decision Theory and Method. Beijing: Science Press, 2003: 170-188(in Chinese)
(岳超源. 决策理论与方法. 北京: 科学出版社, 2003: 170-188)
- [35] Satty T L. The Analytical Hierarchy Process. New York: McGraw Hill, 1980
- [36] Lan Ji-Bin, Xu Yang, Huo Liang-An, Liu Jia-Zhong. Research on the priorities of fuzzy analytical hierarchy process. Systems Engineering-Theory & Practice, 2006, 19(6): 117-112(in Chinese)
(兰继斌, 徐扬, 霍良安, 刘家忠. 模糊层次分析法权重研究. 系统工程理论与实践, 2006, 19(6): 117-112)
- [37] Sheng Q Z, Benatallah B, Dumas M. SELF-SERV: A platform for rapid composition of Web services in a peer-to-peer environment//Proceedings of the 28th VLDB Conference. Hong Kong, China, 2002: 1051-1054
- [38] Karloff H. Linear Programming. Boston, Mass, USA: Birkhauser, 1991
- [39] Mohammad A, Thomass R. Combining global optimization with local selection for efficient QoS-aware service composition //Proceedings of the 18th International Conference on World Wide Web. New York, USA, 2009: 881-890



LI Ling, born in 1981, Ph.D. candidate, lecturer. Her current research interests include service oriented computing, Web services composition.

LIU Min, born in 1970, professor, Ph. D. supervisor. His research interests include services computing, intelligent maintenance.

CHENG Guo-Qing, born in 1982, Ph. D. candidate, lecturer. His current research interest is intelligent maintenance.

Background

Services computing is a new computing paradigm which is widely used in many fields. Web service is becoming a hotspot on service oriented architecture, due to its providing a promising solution for the seamless integration of enterprise applications to create new value-added services. Industrial practice witnesses a growing interest in the service composition of supply chains, dynamic alliances, e-businesses, extended enterprises, and virtual organizations. In this context, QoS plays an important role in the dynamical selection and composition process of services, and it also affects the evaluation and optimization of composite services.

Service composition based on QoS includes local optimization and global optimization, and local optimization will have a positive impact on global optimization. However, the current research is mostly concentrated on the global optimization, while less of the local optimization. In this paper, a Local Optimal Model of Service Selection of Muti-QoS based

on FAHP is proposed. This model can improve partly scientificity and rationality of the local optimal service selection. Moreover, experiment results and comparative analysis show that the proposed model is feasible and efficient.

This work is partly supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 61173015, 61573257). These projects aim to provide better principles of the design and management of services computing systems. The research group has been working on the related fields for 10 years. Many research papers have been published on respectable journals. The work in this paper contributes that it presents a new decision model in service selection, in which the resolution ratio of weight can be adjusted by the decision-maker's preference. Therefore, this model will open our mind in the optimization of service composition.