

# 一种综合考虑主客观权重的 Web 服务 QoS 度量算法\*

马友, 王尚广, 孙其博, 杨放春

(网络与交换技术国家重点实验室(北京邮电大学), 北京 100876)

通讯作者: 王尚广, E-mail: sguang@bupt.edu.cn, http://sguangwang.com/

**摘要:** 已有的 Web 服务 QoS(quality of service)度量方法由于无法对用户偏好的模糊性予以准确量化,以及对候选服务 QoS 属性数据分布特征的忽视,导致其度量结果不准确.为此,提出了一种综合考虑主客观权重的 Web 服务 QoS 度量算法.该算法利用自适应用户偏好的主观权重计算方法和服务潜能保障的客观权重计算方法,从主观和客观两个角度进行 QoS 度量,以保障度量结果在符合用户偏好的基础上能够准确地反映服务的整体性能.理论分析和基于 QWS 真实数据集的实验结果表明,所提出的方法能够准确地获得 Web 服务 QoS 的度量结果.

**关键词:** Web 服务; QoS; 主观权重; 客观权重

**中图分类号:** TP311

中文引用格式: 马友,王尚广,孙其博,杨放春.一种综合考虑主客观权重的 Web 服务 QoS 度量算法.软件学报,2014,25(11): 2473-2485. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4508.htm>

英文引用格式: Ma Y, Wang SG, Sun QB, Yang FC. Web service quality metric algorithm employing objective and subjective weight. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2014, 25(11): 2473-2485 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4508.htm>

## Web Service Quality Metric Algorithm Employing Objective and Subjective Weight

MA You, WANG Shang-Guang, SUN Qi-Bo, YANG Fang-Chun

(State Key Laboratory of Networking and Switching Technology (Beijing University of Posts and Telecommunications), Beijing 100876, China)

Corresponding author: WANG Shang-Guang, E-mail: sguang@bupt.edu.cn, <http://sguangwang.com/>

**Abstract:** The existing methods for measuring Web service QoS (quality of service) are not accurate as they cannot precisely quantify the ambiguity of user preference while neglecting the characteristics of QoS data set. This paper presents a QoS measuring algorithm which employs subjective and objective weight. The new approach can automatically adapt to user preference with a subjective weight calculation method, and can evaluate service performance accurately with an objective weight calculation method. The algorithm takes a comprehensive consideration of both subjective and objective aspects to measure Web service QoS, therefore the measure results can conform to user preference and reflect the overall service performance accurately. The theoretical analysis and experimental results based on the QWS real data set show that the proposed algorithm can measure Web service QoS accurately.

**Key words:** Web service; QoS; subjective weight; objective weight

随着 Web 服务的快速发展、服务数量的快速增加,用户在服务选择时需要面对越来越多功能相同、非功能属性不同的候选服务,如何从中选择最合适的服务以满足用户的服务质量需求,对成功地构建面向服务的应用具有至关重要的意义<sup>[1-3]</sup>.服务质量(quality of service,简称 QoS)是一组非功能属性(本文称为 QoS 属性)的集合,其中,每个 QoS 属性表征了 Web 服务某一方面的质量信息,具有一个属性值,例如可用性、响应时间以及吞吐率等<sup>[4]</sup>.由于候选服务的大量存在,用户不可能对其逐一试用以选择最佳服务,这就需要综合考虑候选服务在

\* 基金项目: 国家自然科学基金(61202435); 北京市自然科学基金(4132048); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金 (20110005130001)

收稿时间: 2013-02-01; 修改时间: 2013-09-09; 定稿时间: 2013-10-11

各 QoS 属性上的表现进行 QoS 度量(将服务通过各 QoS 属性所表现出的整体性能进行量化),并依据度量结果进行服务选择,有效的 Web 服务 QoS 度量方法已成为目前服务计算领域的研究热点<sup>[5,6]</sup>.

目前已有的 QoS 度量方法大多侧重于用户偏好的处理,并将其作为 QoS 度量的主要依据.但实际应用中, QoS 度量是用户偏好和待选服务集两者共同作用的过程,如果仅侧重其中一方面而忽略了两者的关系,会导致 QoS 度量结果不准确.以表 1 所示的服务集为例,每个服务在属性  $p_1$  和  $p_3$  上具有相同的取值,若用户偏好考虑的属性为  $p_1, p_2$  及  $p_3$ ,根据已有的方法,会导致 QoS 度量结果只能取决于属性  $p_2$ ,同时忽略了其他属性在 QoS 度量中作用,造成度量结果的片面性,这说明用户偏好要受到服务集本身客观因素的制约.因此在 QoS 度量中,将用户偏好与服务集本身的数据分布特征予以综合考虑是十分必要的.

Table 1 Example 1 for services set

表 1 服务集举例 1

服务	属性				
	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$	$p_5$
WS <sub>1</sub>	2	2	8	7	4
WS <sub>2</sub>	2	1	8	6	6
WS <sub>3</sub>	2	1	8	9	5
WS <sub>4</sub>	2	2	8	10	3

基于上述分析,本文提出了一种综合考虑主客观权重的 Web 服务 QoS 度量算法(Web service quality metric algorithm employing subjective and objective weight,简称 ESOW).该算法首先基于自适应用户偏好的主观权重计算方法(adaptive user preference subjective weight determination method,简称 SWDM)和服务潜能保障的客观权重计算方法(service potentials protection objective weight determination method,简称 OWDM)计算出主观和客观权重,然后通过综合考虑主客观权重的效用函数对 Web 服务进行 QoS 度量,以保障在准确把握用户偏好的同时能准确地反映服务的整体性能.

提出 SWDM 方法的目的是对用户偏好的模糊性进行准确量化,以使 QoS 度量结果能准确把握用户个性化需求.其原理是:首先,基于各 QoS 属性在用户体验中的敏感度不同提出偏好层次的概念,即将用户偏好划分为主要偏好和次要偏好;然后,在此基础上给出分配主观权重的约束条件;利用该约束条件对模糊、定性的用户偏好进行量化建模,以针对用户的个性化偏好计算主观权重.

提出 OWDM 方法的目的是纠正 QoS 度量中用户偏好的片面性,以使 QoS 度量结果能够准确地反映服务的整体性能,从而依据度量结果能挖掘出服务集中潜在的最佳性能.其原理是:首先,以各 QoS 属性对不同服务的区别能力为依据,提出属性参考度的概念;然后,利用粗糙集理论对属性参考度进行计算;最后,根据属性参考度计算出客观权重.

为了验证本文提出的 ESOW 算法,首先对其有效性进行了理论分析,然后基于 QWS 真实数据集对其进行实验验证,并与其他方法进行了对比.结果表明:本文提出的 ESOW 算法不仅有效避免了用户偏好的模糊性,而且还充分考虑了服务集的数据分布特征,准确反映了服务的整体性能,从而使度量结果既能满足用户偏好,又具有较高的准确性.

本文第 1 节提出 ESOW 算法.该算法包含 4 部分内容:主观权重计算方法 SWDM(第 1.1 节)、客观权重计算方法 OWDM(第 1.2 节)、数据归一化方法(第 1.3 节)以及综合考虑主客观权重的 QoS 效用函数(第 1.4 节).第 1.5 节给出 ESOW 算法的详细步骤.第 2 节对 ESOW 算法的性能进行评价,包括理论分析(第 2.1 节)与实验验证(第 2.2 节).第 3 节阐述相关工作并与本文进行比较.第 4 节总结全文并指出下一步的研究方向.

## 1 Web 服务 QoS 度量算法(ESOW)

如图 1 所示,本文提出的 ESOW 算法主要包括 4 个模块:

- 模块 1 使用 SWDM 方法计算主观权重,以自适应不同的用户偏好,将模糊、定性的用户主观要求合理地映射为主观权重.该方法首先依据不同 QoS 属性在用户体验中的不同敏感度将偏好属性划分层次,

基于划分的层次以及敏感度参数 $\beta$ 建立主观权重分配约束条件,通过该约束条件计算出主观权重.

- 模块 2 使用 OWDM 方法计算客观权重,以对用户偏好的片面性造成的误差进行纠正,从而准确地评价各 QoS 属性在 QoS 度量中的不同作用,并将其映射为客观权重.该方法首先以各 QoS 属性对不同服务的区别能力为依据,计算出属性参考度,并依据属性参考度计算出客观权重.
- 模块 3 为数据归一化,其作用是将不同方向、不同单位以及不同取值区间的各 QoS 属性归一化,以便于在 QoS 度量过程中统一处理.
- 模块 4 为 QoS 计算,在计算出主客观权重以及数据归一化处理后,根据用户指定的偏好强度参数 $\alpha$ ,利用效用函数计算 QoS.

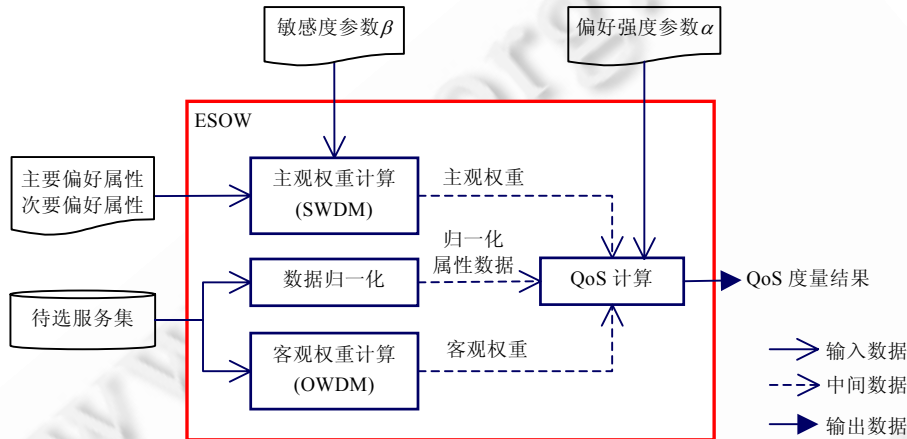


Fig.1 Framework of ESOW

图 1 ESOW 框架

### 1.1 主观权重计算

本节提出自适应用户偏好的主观权重计算方法(SWDM).该方法的主要思想是:深入分析用户偏好产生的原因,基于各 QoS 属性在用户体验中的敏感度不同,将用户偏好划分为主要偏好和次要偏好;在此基础上,建立主观权重分配约束条件,利用该约束条件针对用户偏好分配主观权重,以对用户偏好的模糊性进行准确量化. SWDM 方法从两个角度对不同的用户偏好进行自适应:一方面,从偏好层次划分的角度进行定性描述;另一方面,通过敏感度参数 $\beta$ 进行量化计算.

#### 1.1.1 偏好层次

提出偏好层次的目的是合理确定各 QoS 属性在用户偏好中的作用,为建立主观权重分配约束条件奠定基础,偏好层次的划分依据是 QoS 属性在用户体验中的敏感度.QoS 考虑的是诸如价格、响应时间、可靠性、安全性、吞吐率等 QoS 属性,服务在这些属性上的表现直接决定了用户的使用体验,用户希望所选择的服务在这些属性上都有良好表现.而大多数情况下,由于各因素的相互制约,服务不可能在所有 QoS 属性上都具有高质量,于是,用户希望服务能够在自己最关心的部分属性上有较好的表现,而对其他属性适当降低要求,这就产生了用户偏好,即便对于同一服务,不同用户针对各自的偏好也会得到不同的服务体验,进而做出不同的 QoS 评价.

由于用户最关心的属性对用户体验有较大的影响,即,在用户体验中具有较高的敏感度,因而这些属性在 QoS 度量中具有较大的作用.基于 QoS 属性敏感度的不同,SWDM 方法将用户偏好划分为主要偏好和次要偏好两个层次,将敏感度较高、应首要满足的 QoS 属性称为主要偏好属性,将敏感度较低、可做出适当折中的 QoS 属性称为次要偏好属性.比如,用户关心服务的可靠性、安全性以及价格 3 个 QoS 属性,理想的情况是服务在这 3 个属性上都具有较高的质量.然而实际中,这种服务很可能不存在,这种情况下,用户要对这 3 个属性做出适当

的取舍,比如在首要满足可靠性和安全性的前提下,价格稍高也能接受,此时,可靠性和安全性为主要偏好属性,价格为次要偏好属性.显然,应首要满足主要偏好属性,并尽量满足次要偏好属性.

### 1.1.2 主观权重计算

本节给出了主观权重的计算过程.通过划分偏好层次以及 QoS 属性敏感度量,建立了主观权重分配约束条件,通过该约束条件计算主观权重.

为便于表述,本文将服务集中所有服务组成的集合记为  $WS$ ,将服务所有属性组成的集合记为  $A$ ,将用户偏好涉及的属性集合记为  $P(\subseteq A)$ ,将主要偏好涉及的属性集合记为  $P_f(\subseteq P)$ ,将次要偏好涉及的属性集合记为  $P_s(\subseteq P)$ ,且  $P_f \cap P_s = \emptyset, P_f \cup P_s = P$ ,将在该用户偏好下进行 QoS 度量的  $WS$  记为  $S=(WS, A, P)$ .

用户偏好具有模糊性,即,用户一般难以定量地描述偏好中各属性的重要程度,只能进行定性描述.基于偏好层次,可将其描述为:主要偏好属性的权重应大于次要偏好属性的权重,即,得到约束条件如下:

对于  $\forall p \in P$ ,令  $sw(p)$  表示属性  $p$  的主观权重,则  $sw(p)$  应满足:

$$\begin{cases} \sum_{p \in P} sw(p) = 1 \\ \text{对 } \forall p \in P_f, \forall p' \in P_s, \text{ 有 } sw(p) \geq sw(p') \end{cases} \quad (1)$$

公式(1)中的约束条件不足以确定属性的主观权重,但是注意到,同一层次的偏好属性对于用户的重要程度相近,因此,指定同一层次的偏好属性具有相同的主观权重.这样,公式(1)扩展为

$$\begin{cases} \sum_{p \in P} sw(p) = 1 \\ \text{对 } \forall p \in P_f, \forall p' \in P_f, \text{ 有 } sw(p) = sw(p') \\ \text{对 } \forall p \in P_s, \forall p' \in P_s, \text{ 有 } sw(p) = sw(p') \\ \text{对 } \forall p \in P_f, \forall p' \in P_s, \text{ 有 } sw(p') = \beta \cdot sw(p), 0 \leq \beta \leq 1 \end{cases} \quad (2)$$

由公式(2)可得:若  $p \in P_f$ ,则  $sw(p) = 1/(|P_f| + \beta \cdot |P_s|)$ ;若  $p \in P_s$ ,则  $sw(p) = \beta/(|P_f| + \beta \cdot |P_s|)$ .

这样,通过指定参数  $\beta$  的值即可确定用户偏好中各属性的主观权重. $\beta$  根据具体的用户偏好进行指定,反映了各 QoS 属性在用户体验中的敏感度,因此称为敏感度参数.

## 1.2 客观权重计算

本节提出了服务潜能保障的客观权重计算方法(OWDM).该方法的主要思想是:通过分析 QoS 属性的数据分布特征,合理地评价各 QoS 属性在 QoS 度量中的作用,进而确定具有实际意义的客观权重.即,能够合理地解释一个属性为什么比另外一个重要,从而使 QoS 度量结果能够准确地反映服务的整体性能.首先,基于 QoS 属性区别不同服务的能力提出了属性参考度的概念;然后,通过粗糙集理论给出了属性参考度的计算方法;最后,以属性参考度为依据计算客观权重.

### 1.2.1 客观权重的确定依据

OWDM 方法以属性参考度作为客观权重的确定依据,本节阐述了依据属性参考度计算客观权重的合理性.

QoS 度量的动因是服务之间存在差异,如果服务之间不存在区别,则没有 QoS 度量的必要(因为任意两个服务都是等效的),因此,合理的 QoS 度量需要正确地区分服务间的差异,其差异正是由各 QoS 属性来体现的.因此, QoS 属性对于服务差异的表现能力决定了其对于服务的区别能力,进而决定了该属性在 QoS 度量中的作用.

本文定义属性参考度为 QoS 属性对不同服务的区别能力,进而决定了其在 QoS 度量中的作用.设有表 2 所示的服务集,共有 4 个服务,其中每个服务有 3 个 QoS 属性.各 QoS 属性对服务集的透视图如图 2 所示:图 2(a)表示在属性  $p_1$  的视角下所有服务都是不可分辨的,因此在仅参考  $p_1$  的情况下没有 QoS 度量的必要,因为所有服务都是等效的;图 2(b)表示在属性  $p_2$  的视角有 2 组不可分辨的服务;图 2(c)表示在属性  $p_3$  的视角下所有服务都是可分辨的,此时,所有服务的 QoS 都是不同的.显然,属性  $p_1$  对于 QoS 度量基本无参考价值,其参考度最低;相反,属性  $p_3$  的参考度最大,在 QoS 度量中的作用也最大.

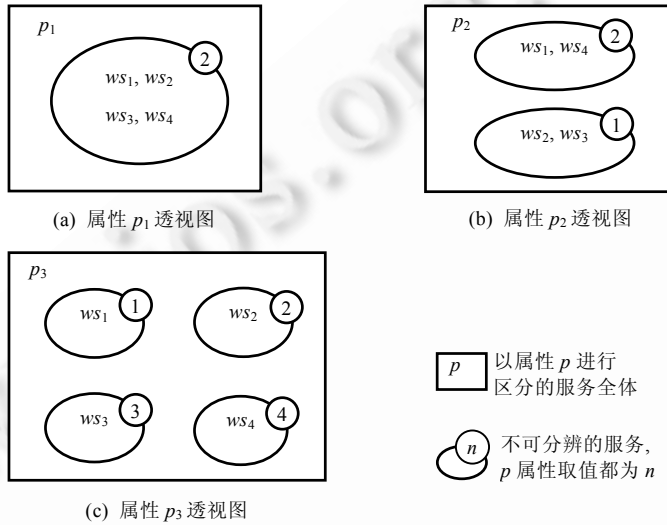
基于上述分析,OWDM 方法以属性参考度作为客观权重的确定依据,参考度越大,客观权重就越大;反之则

越小.

**Table 2** Example 2 for services set

**表 2** 服务集举例 2

服务	属性		
	$p_1$	$p_2$	$p_3$
$ws_1$	2	2	1
$ws_2$	2	1	2
$ws_3$	2	1	3
$ws_4$	2	2	4



**Fig.2** Perspective views of the services set for different attributes

**图 2** 服务集针对不同属性的透视图

1.2.2 客观权重计算

本节给出客观权重的计算过程:首先,通过粗糙集理论计算各 QoS 属性的参考度;然后,通过属性参考度计算客观权重.

定义 1~定义 4 引用自文献[7],介绍了本文用到的粗糙集相关理论.在此基础上,由定义 5 给出了属性参考度的计算方法,定义 6 给出基于属性参考度的客观权重计算方法.

**定义 1.** 称  $I=(U,A,V,f)$  为一个信息系统,其中,  $U$  为论域,是非空有限对象集;  $A$  为非空有限的属性集合;对于  $a \in A, V_a$  是  $a$  的值域,且  $V = \bigcup_{a \in A} V_a; f: U \times A \rightarrow V$  称为信息函数,使得对每一  $a \in A, u \in U$ , 都有  $f(u,a) \in V_a$ .

信息系统也称为信息表,简记为  $I=(U,A)$ ,信息函数  $f(u,a)$  常简记为  $a(u)$ .表 3 是一个信息表的例子.

**Table 3** An example of information table

**表 3** 信息表举例

$U$	$A$			
	$a$	$b$	$c$	$d$
$u_1$	3	2	1	1
$u_2$	2	1	1	2
$u_3$	2	1	1	2
$u_4$	1	1	1	3
$u_5$	2	2	2	2
$u_6$	3	1	2	5

**定义 2.** 对于任一  $X \subseteq A$ , 定义  $X$  上的不可分辨关系  $I_x$  为

$$I_x = \{(x, y) \in U \times U \mid \forall a \in X, f(x, a) = f(y, a)\} \quad (3)$$

若  $(x, y) \in I_x$ , 则称在属性集  $X$  下  $x$  和  $y$  是不可分辨的. 即, 在属性集  $X$  的范围内,  $x$  和  $y$  具有相同的属性值.

由  $X$  决定的一个划分用  $U/I_x$  表示, 或简记为  $U/X$ , 表示由  $I_x$  决定的所有等价类集合. 表 3 中,

$$U/I_{\{a,b,c\}} = \{\{u_1\}, \{u_2, u_3\}, \{u_4\}, \{u_5\}, \{u_6\}\}, \quad U/I_{\{b,c\}} = \{\{u_1\}, \{u_2, u_3, u_4\}, \{u_5\}, \{u_6\}\}.$$

**定义 3.** 设  $I=(U, A)$  为一个信息系统,  $X \subseteq A$ ,  $I_x$  为定义在  $X$  上的不可分辨关系,  $I_x$  也称为知识, 知识  $I_x$  的粒度定义为

$$GD(I_x) = |I_x|/|U|^2 = |I_x|/|U|^2 \quad (4)$$

其中,  $|E|$  表示集合  $E$  中元素的个数, 下同.

$GD(I_x)$  可简记为  $GD(X)$ , 一般情况下,  $1/|U| \leq GD(X) \leq 1$ . 知识粒度可表示知识的分辨能力,  $GD(X)$  越小, 知识  $I_x$  的分辨能力越强. 即, 知识  $I_x$  可将论域  $U$  划分为更多的等价类.

**定义 4.** 设  $I=(U, A)$  为一个信息系统,  $X \subseteq A$ ,  $x \in A$ .  $x$  对于  $X$  的重要度, 即在  $X$  中增加属性  $x$  后知识粒度的减小程度, 记为

$$SIG_X(x) = \frac{GD(X) - GD(X \cup \{x\})}{GD(X)} = 1 - \frac{|I_{X \cup \{x\}}|}{|I_X|} \quad (5)$$

一般有  $0 \leq SIG_X(x) \leq 1 - |I_{\{x\}}|/|U|^2$ ,  $SIG_X(x)$  越大, 则  $x$  对  $X$  越重要. 即, 增加属性  $x$  后, 属性集  $X$  可区分出论域  $U$  中更多对象的不同. 因此, 当  $X = \emptyset$  时,  $SIG_{\emptyset}(x)$  表示属性  $x$  对论域  $U$  中不同对象的区别能力.

**定义 5.** 设有服务集  $S=(WS, A, P)$ , 对  $\forall p \in A$ , 定义属性  $p$  的参考度为其对  $WS$  中不同服务的区别能力, 记为

$$REF(p) = SIG_{\emptyset}(p) = 1 - |I_{\{p\}}|/|WS|^2 \quad (6)$$

**定义 6.** 设有服务集  $S=(WS, A, P)$ , 定义属性  $p(\in A)$  的客观权重为

$$ow(p) = REF(p) / \sum_{p \in A} REF(p) \quad (7)$$

**定义 7.** 设有服务集  $S=(WS, A, P)$ , 若  $OQ(ws^*) = \max\{OQ(ws) \mid ws \in WS\}$ , 则称  $ws^*$  为  $WS$  中整体性能最佳的服务. 其中,  $OQ(ws) = \sum_{p \in A} nv_{ws}(p) \cdot ow(p)$  表示服务  $ws$  的客观 QoS,  $nv_{ws}(p)$  表示服务  $ws$  在属性  $p$  上的归一化取值 (客观 QoS 见第 1.4 节, 归一化见第 1.3 节).

### 1.3 数据归一化

数据归一化是指将不同单位及方向的各项 QoS 属性值化为  $[0, 1]$  区间的取值. 有些 QoS 属性取值越大越好 (比如吞吐量), 称为正向属性, 有些 QoS 属性取值越小越好 (比如价格), 称为负向属性, 且各属性的度量单位不同, 为 QoS 度量带来了不便. 因此, 有必要对各 QoS 属性进行归一化处理. 本文采用的归一化方法为: 对于正向属性采用公式 (8), 对于负向属性采用公式 (9).

$$nv_{ws}(p) = \begin{cases} \frac{v_{ws}(p) - v_p^{\min}}{v_p^{\max} - v_p^{\min}}, & \text{if } v_p^{\max} \neq v_p^{\min} \\ 1, & \text{if } v_p^{\max} = v_p^{\min} \end{cases} \quad (8)$$

$$nv_{ws}(p) = \begin{cases} \frac{v_p^{\max} - v_{ws}(p)}{v_p^{\max} - v_p^{\min}}, & \text{if } v_p^{\max} \neq v_p^{\min} \\ 1, & \text{if } v_p^{\max} = v_p^{\min} \end{cases} \quad (9)$$

其中,  $v_{ws}(p)$  表示服务  $ws$  在属性  $p$  上的原始取值,  $nv_{ws}(p)$  表示归一化后的值,

$$v_p^{\max} = \max\{v_{ws}(p) \mid ws \in WS\}, \quad v_p^{\min} = \min\{v_{ws}(p) \mid ws \in WS\}.$$

### 1.4 QoS 度量

ESOW 算法将 QoS 分成主、客观两个部分, 主观 QoS 表示服务对用户偏好的符合程度, 客观 QoS 表示服务整体性能的高低, 所采用的 QoS 效用函数为

$$Q(ws) = \alpha \cdot SQ(ws) + (1 - \alpha) \cdot OQ(ws) \quad (10)$$

其中,  $Q(ws)$  表示服务  $ws$  的 QoS 度量值,  $OQ(ws)$  表示服务  $ws$  的客观 QoS 度量值,  $SQ(ws)$  表示服务  $ws$  的主观 QoS 度量值,  $\alpha \in [0, 1]$  为偏好强度参数. 偏好强度表示在 QoS 度量中对于用户偏好的依赖程度, 即, QoS 度量结果中主客观两部分的比重, 当完全依赖于用户偏好选择服务时,  $\alpha$  取 1; 当不存在用户偏好时,  $\alpha$  取 0.

$SQ(ws)$  及  $OQ(ws)$  的计算公式为

$$SQ(ws) = \sum_{p \in P} nv_{ws}(p) \cdot sw(p) \quad (11)$$

$$OQ(ws) = \sum_{p \in A} nv_{ws}(p) \cdot ow(p) \quad (12)$$

其中,  $nv_{ws}(p)$  表示服务  $ws$  在属性  $p$  上的归一化取值,  $sw(p)$  表示属性  $p$  的主观权重,  $ow(p)$  表示属性  $p$  的客观权重.

## 1.5 ESOW 算法描述

用户首先指定主要和次要偏好属性, 然后输入偏好强度参数  $\alpha$  和属性敏感度参数  $\beta$ , 基于这些输入, ESOW 算法计算出各服务的 QoS. 需要注意的是, 参数  $\alpha$  和  $\beta$  既可由用户输入, 也可由系统推荐. 根据服务集数据分布特征和用户偏好进行自动化的参数推荐, 将是下一步的研究内容.

算法. ESOW 算法.

输入: (1) 主要偏好  $P_f$ ;

(2) 次要偏好  $P_s$ ;

(3) 偏好强度参数  $\alpha$ ;

(4) 属性敏感度参数  $\beta$ .

输出: 各服务的 QoS 度量值.

步骤 1. 对于每一  $p \in A$ , 计算其客观权重:

步骤 1.1. 构造等价类  $I_{\{p\}}$ ;

步骤 1.2. 计算参考度  $REF(p) = 1 - |I_{\{p\}}| / |WS|^2$ ;

步骤 1.3. 计算客观权重  $ow(p) = REF(p) / \sum_{p \in A} REF(p)$ .

步骤 2. 对于每一  $p \in P$ , 计算其主观权重:

- 若  $p \in P_f$ , 则  $sw(p) = 1 / (|P_f| + \beta \cdot |P_s|)$ ;

- 若  $p \in P_s$ , 则  $sw(p) = \beta / (|P_f| + \beta \cdot |P_s|)$ .

步骤 3. 数据归一化, 对每一  $ws \in WS$  及每一  $p \in A$ , 计算其归一化值  $nv_{ws}(p)$ .

步骤 4. 对每一  $ws \in WS$ , 计算主观 QoS,  $SQ(ws) = \sum_{p \in P} nv_{ws}(p) \cdot sw(p)$ .

步骤 5. 对每一  $ws \in WS$ , 计算客观 QoS,  $OQ(ws) = \sum_{p \in A} nv_{ws}(p) \cdot ow(p)$ .

步骤 6. 对每一  $ws \in WS$ , 计算 QoS,  $Q(ws) = \alpha \cdot SQ(ws) + (1 - \alpha) \cdot OQ(ws)$ .

## 2 性能评价

本节通过理论分析及实验验证对 ESOW 算法的性能进行了评价, 其中, 第 2.1 节通过理论分析证明了 ESOW 算法的有效性, 第 2.2 节通过实验证明了 ESOW 算法 QoS 度量结果的准确性.

### 2.1 有效性分析

**定理 1.** 根据 ESOW 算法的 QoS 度量结果, 可选择出既满足用户偏好又具有较高整体性能的最优服务.

**证明:** 不妨设  $Q(ws_r) = \max \{Q(ws) \mid ws \in WS\}$ ,  $SQ(ws_s) = \max \{SQ(ws) \mid ws \in WS\}$ ,  $OQ(ws_t) = \max \{OQ(ws) \mid ws \in WS\}$ . 其中,  $ws_s$  为仅参考用户偏好所选择的最佳服务, 因而其不能保障服务整体性能较高;  $ws_t$  在服务集中具有最佳的整体性能, 但是忽略了用户偏好;  $ws_r$  为根据 ESOW 算法所得到的 QoS 的最优服务.

定理 1 等价于“ $w_{s_r}$  为既满足用户偏好又保障整体性能较高的最优服务,与  $w_{s_s}$  相比其具有较高的整体性能,与  $w_{s_t}$  相比能更好地满足用户偏好”.因此,证明定理 1 即证:①  $OQ(w_{s_r}) \geq OQ(w_{s_s})$ ;②  $SQ(w_{s_r}) \geq SQ(w_{s_s})$ .

当  $0 < \alpha < 1$  时,

因为  $Q(w_{s_r}) = \max \{Q(w_s) | w_s \in WS\}$

所以  $Q(w_{s_r}) \geq Q(w_{s_s})$

又因为  $Q(w_s) = \alpha \cdot SQ(w_s) + (1-\alpha) \cdot OQ(w_s)$

所以  $\alpha \cdot SQ(w_{s_r}) + (1-\alpha) \cdot OQ(w_{s_r}) \geq \alpha \cdot SQ(w_{s_s}) + (1-\alpha) \cdot OQ(w_{s_s})$

又因为  $SQ(w_{s_s}) = \max \{SQ(w_s) | w_s \in WS\}$

所以  $\alpha \cdot SQ(w_{s_r}) + (1-\alpha) \cdot OQ(w_{s_r}) \geq \alpha \cdot SQ(w_{s_s}) + (1-\alpha) \cdot OQ(w_{s_s}) \geq \alpha \cdot SQ(w_{s_r}) + (1-\alpha) \cdot OQ(w_{s_s})$

所以  $OQ(w_{s_r}) \geq OQ(w_{s_s})$ .①得证.

同理可证②.

当  $\alpha = 0$  时,

$Q(w_s) = SQ(w_s)$ ,即,仅以用户偏好为标准选择服务,此时,所有服务客观 QoS 为 0.情形①得证.

因为此时  $Q(w_s) = SQ(w_s)$  以及  $Q(w_{s_r}) = \max \{Q(w_s) | w_s \in WS\}$

所以  $SQ(w_{s_r}) \geq SQ(w_{s_s})$ .②得证.

当  $\alpha = 1$  时,证明与  $\alpha = 0$  时类似.①,②可得证. □

## 2.2 实验验证

本节进行了两个相关实验:实验 1 在把握用户偏好准确度方面与已有算法进行了对比,实验 2 对 ESOW 算法 QoS 度量结果的准确性进行了分析.

### 2.2.1 实验建立

实验采用真实服务数据集 QWS<sup>[8,9]</sup>.该数据集共有 2 507 个 Web 服务,涵盖了多个不同的功能领域,每个服务有 7 个可度量的 QoS 属性,见表 4.

Table 4 QoS properties in the QWS dataset

表 4 QWS 数据集中的 QoS 属性

编号	属性	描述	单位
1	latency(lat)	服务执行 1 次请求所花费的时间	ms
2	throughput(thr)	每秒内可被调用的最大次数	调用数/s
3	reliability(rel)	正确的回应信息数量/回应信息总数量	%
4	response time(resT)	从用户提出请求到系统接受请求的时间	ms
5	successability(suc)	回应过的请求数量/请求总数量	%
6	availability(ava)	成功调用次数/总调用次数	%
7	best practices(bestP)	服务符合 WS-I Basic Profile 的程度	%

不失一般性,实验只关注搜索(search)功能领域的 Web 服务,去掉一些具有异常值的服务(如响应时间过长),共有 95 个不同的 Web 服务,根据其在数据集中出现的顺序,分别将其命名为 ws01~ws95.

### 2.2.2 实验 1:用户偏好把握准确度对比

实验 1 仅依据用户偏好进行 QoS 度量,目的是验证 ESOW 算法对用户偏好把握的准确性,以文献[10]和文献[11]中的方法为比较对象进行了验证.实验 1 的思想是:1) 以实际中常用的表达习惯设计了一个用户偏好,因此该用户偏好带有模糊性;2) 使用参与比较的 3 种方法,针对用户偏好进行 QoS 度量,并对度量结果进行分析比较;3) 比较的标准不是 3 种方法 QoS 度量值的大小,而是基于 QoS 度量值的服务排列顺序是否合理.这是因为不同方法的数据处理方式不同,导致各自的 QoS 度量值可能处于不同的取值区间,因而比较其大小没有意义.

假设用户偏好为:关心服务在 reliability,availability,best practices 以及 response time 这 4 个属性上的表现,但是最关心前 3 个,在首要保障前 3 个属性的前提下,可适当降低对 response time 的要求.

利用 ESOW 算法中的 SWDM 主观权计算方法,容易得到:主要偏好为 reliability,availability 以及 best



practices,次要偏好为 response time,实验设置 $\beta=0.5$ ,由于本实验只关注用户偏好,因此令 $\alpha=0$ .

将文献[10]作为比较对象,其思想是:1) 将各 QoS 属性值映射到不同的模糊集合,比如将响应时间映射到“长”、“中”、“短”,将可靠性映射到“高”、“中”、“低”,根据相应的隶属度函数求出各属性值对不同模糊集合的隶属度;2) 将用户偏好用逻辑表达式表示,表达式形如 if response time is “short” AND reliability is “high” AND throughput is “high” then QoS is “high”;3) 将各 QoS 属性的隶属度代入表达的条件部分,求出表达式的值,即,求出 QoS 属于“low”,“high”,“middle”的程度;4) 逻辑表达式表示有多条,表示多种情况下的 QoS 度量,分别求出服务 QoS 属于“low”,“high”,“middle”的程度,然后将其乘以各自的系数求和,进而得到最终的 QoS 度量值.其中,“low”的系数为负数,因为它对 QoS 的贡献为负面.

针对所设计的用户偏好,制定了以下 6 条逻辑表达式进行表达:

- 1) if reliability is “high” AND availability is “high” AND best practices is “high” AND response time is “short”, then QoS is “high”;
- 2) if reliability is “high” AND availability is “high” AND best practices is “high” AND response time is “middle”, then QoS is “high”;
- 3) if reliability is “high” AND availability is “high” AND best practices is “high” AND response time is “long”, then QoS is “middle”;
- 4) if reliability is “middle” AND availability is “middle” AND best practices is “middle” AND response time is “middle”, then QoS is “middle”;
- 5) if (reliability is “low” AND availability is “low”) OR (reliability is “low” AND best practices is “low”) OR (availability is “low” AND best practices is “low”), then QoS is “low”;
- 6) if reliability is “low” AND availability is “low” AND best practices is “low” AND response time is “short”, then QoS is “low”.

实际中的用户偏好可能多样,我们可分别设计相应的逻辑表达式进行表示.上面第 5 条和第 6 条表达式说明了 response time 是次要偏好属性,而其他 3 个是主要偏好属性,即,只要最关心的 3 个主要偏好属性表现很差,即使次要的 response time 表现较好(short),最终的 QoS 也不能使用户满意.

针对所设定的用户偏好进行 QoS 度量,表 5 给出了由文献[10]算法得到的排名前 10 的服务,同时给出了这 10 个服务在 ESOW 算法中的度量结果.

**Table 5** Comparing ESOW to the algorithm of Ref.[10] for their QoS metric results  
**表 5** 文献[10]算法和 ESOW 算法 QoS 度量结果对比

服务名	偏好属性				QoS 度量结果及排名						
					文献[10]					ESOW	
	rest	suc	ava	bestP	high	middle	low	QoS	排名	QoS	排名
ws82	131	100	100	84	0.815	0.464	0.000	0.908	1	0.921	4
ws88	127	100	100	84	0.815	0.460	0.000	0.907	2	0.922	3
ws45	125	100	100	84	0.815	0.458	0.000	0.906	3	0.923	2
ws61	113	100	100	84	0.815	0.445	0.000	0.904	4	0.927	1
ws44	120	100	99	84	0.815	0.452	0.003	0.902	5	0.921	5
ws94	141	100	100	84	0.805	0.475	0.000	0.900	6	0.918	6
ws80	146	100	100	84	0.799	0.481	0.000	0.895	7	0.916	7
ws71	133	99	97	84	0.814	0.474	0.018	0.890	8	0.906	11
ws89	134	99	97	84	0.812	0.475	0.018	0.889	9	0.906	12
ws30	135	99	97	84	0.811	0.476	0.018	0.889	10	0.906	13

表 5 中,两种算法的度量结果有较大的差异.容易发现:文献[10]算法的 QoS 度量结果不合理,比如服务 ws82, ws88,ws45 和 ws61,在后 3 个属性相同的情况下,rest(响应时间)长的反而 QoS 度量值更高.这是因为文献[10]的算法中,QoS 度量结果由“high”,“middle”及“low”这 3 部分构成,如果 QoS 对“middle”有较高的隶属度,则可能造成总体 QoS 较高.相之,表 5 中 ESOW 算法的度量结果比较合理,观察前 4 个服务,在后 3 个属性相同的情况下,ResT 越短则 QoS 度量值越高,排名也就越靠前.

然后,将文献[11]作为比较对象,文献[11]通过指定偏好属性的重要等级来确定主观权重.具体步骤是:将偏好属性分为 VL,L,M,H 及 VH 这 5 个重要等级,并分别用模糊数  $\tilde{s}_1 = (0, 0.1, 0.2)$ ,  $\tilde{s}_2 = (0.2, 0.4, 0.6)$ ,  $\tilde{s}_3 = (0.6, 0.7, 0.8)$ ,  $\tilde{s}_4 = (0.8, 0.85, 0.9)$  以及  $\tilde{s}_5 = (0.9, 0.95, 0.1)$  表示.权重计算公式为

$$sw_i = d(\tilde{s}_i, \tilde{0}) / \sum_{j=1}^m d(\tilde{s}_j, \tilde{0}) \tag{13}$$

其中,  $d(\tilde{s}, \tilde{0})$  表示模糊数  $\tilde{s}$  与  $\tilde{0}$  之间的符号距离(signed distance).结合实验指定的用户偏好,将 resT 重要度设为 M,将 suc,ava 以及 bestP 重要度设为 H,表 6 给出了根据文献[11]的算法得到的排名前 10 的服务,同时给出了这 10 个服务在 ESOw 算法中的度量结果.

**Table 6** Comparing ESOw to the algorithm of Ref.[11] for their QoS metric results

**表 6** 文献[11]算法和 ESOw 算法 QoS 度量结果对比

服务名	偏好属性				QoS 度量结果			
					文献[11]		ESOw	
	resT	suc	ava	bestP	QoS	排名	QoS	排名
ws61	113	100	100	84	0.920 5	1	0.926 5	1
ws45	125	100	100	84	0.914 9	2	0.922 8	2
ws44	<u>120</u>	100	<u>99</u>	84	0.914 1	<u>3</u>	0.920 9	<u>5</u>
ws88	<u>127</u>	100	<u>100</u>	84	0.913 9	<u>4</u>	0.922 1	<u>3</u>
ws82	131	100	100	84	0.912 1	5	0.920 9	4
ws94	141	100	100	84	0.907 4	6	0.917 8	6
ws79	115	99	97	84	0.907 0	7	0.912 1	8
ws80	146	100	100	84	0.905 0	8	0.916 2	7
ws24	69	100	100	80	0.902 5	9	0.897 9	16
ws73	118	99	96	84	0.902 4	10	0.907 7	9

表 6 中,两种算法的度量结果稍有差别,以 ws44 和 ws88 为例,根据 ESOw 算法,ws44 的排名要比 ws88 低,与文献[11]中算法的结果相反.ws44 和 ws88 仅在 resT 和 ava(可用性)两个属性上有差别,用户偏好更关心的是 ava,因此在 ESOw 算法中,ava 表现更好的 ws88 具有更高的 QoS,其排名比 ws44 高.这说明 ESOw 算法更准确地把握了用户偏好.

2.2.3 实验 2:ESOw 算法度量结果分析

实验 2 综合考虑主客观权重进行 QoS 度量,即不但尽量满足用户偏好,而且要考虑服务整体性能的表现.令 ESOw 算法中  $\alpha=0.5, \beta=0.5$ ,得到 QoS 度量排名前 10 的服务,见表 7.

**Table 7** QoS metric results employing objective and subjective weight

**表 7** 综合考虑主观、客观权重的 QoS 度量结果

排名	非偏好属性			偏好属性				ESOw ( $\alpha=0.5, \beta=0.5$ )					
	lat	thr	rel	resT	suc	Ava	bestP	QoS	排名	SQ	排名	OQ	排名
ws57	1	40	73	57	95	86	84	0.896 7	1	0.878 6	30	0.914 9	1
ws24	7	21	73	69	100	100	80	0.873 0	2	0.897 9	16	0.848 0	2
ws61	7	11	73	113	100	100	84	0.866 6	3	0.926 5	1	0.806 8	4
ws94	9	10	73	141	100	100	84	0.853 5	4	0.917 8	6	0.789 2	9
ws88	9	7	73	127	100	100	84	0.852 3	5	0.922 1	3	0.782 5	10
ws08	1	16	73	58	98	95	80	0.852 2	6	0.877 2	31	0.827 2	3
ws45	11	7	73	125	100	100	84	0.851 5	7	0.922 8	2	0.780 3	14
ws44	10	7	73	120	100	99	84	0.851 3	8	0.920 9	5	0.781 7	11
ws82	10	7	73	131	100	100	84	0.850 2	9	0.920 9	4	0.779 5	15
ws80	8	7	73	146	100	100	84	0.846 5	10	0.916 2	7	0.776 8	16

表 7 中,QoS 第一的服务 ws57 并不最符合用户偏好(其 SQ 排名较低),但是 ws57 在用户偏好之外的 3 个属性上表现最优,尤其是 lat(服务耗时)和 thr(吞吐率)远好于其他服务,因此其 OQ 最高,进而其 QoS 最高.实际上,lat 和 thr 是服务的重要属性,对用户体验有重要的影响.该实验结果表明:当用户偏好具有片面性时,会导致 QoS 度量出现误差;而 ESOw 算法能够有效地对这种片面性进行纠正,进而做出准确的 QoS 度量.

### 3 相关工作

QoS 准确度量的前提是获取真实可靠的 QoS 属性数据,但在实际应用中经常会出现 QoS 属性数据缺失、可信度不高等情况.北京大学的梅宏团队<sup>[12,13]</sup>针对这些问题进行了研究,在缺失数据预测、数据可靠性分析以及不可信数据修正等方面提出了卓有成效的解决方案,为包括本文在内的各种 QoS 度量方法的研究奠定了良好的基础.

针对 QoS 度量中用户偏好的模糊性,出现了很多了基于模糊数学理论的 QoS 度量方法<sup>[14]</sup>.文献[15]提出了依据用户对各 QoS 属性的满意度进行 QoS 度量的方法.首先,基于模糊理论计算出用户对各 QoS 属性的满意度;然后,设计了妥协(compromise)、合取(conjunction)及析取(disjunction)这 3 种算子,使用 3 种算子对各 QoS 属性满意度的逻辑表达式来表示不同的用户偏好;最后,通过逻辑表达式的计算结果进行 Web 服务的 QoS 度量.该方法的优点在于能够形式化的表达各种不同的用户偏好,然而其表达形式非常复杂,且需要用户自己设计偏好表达式,造成实际应用中很难使用;更重要的是,由于合取和析取算子会忽略或放大某些属性对 QoS 的贡献,造成其度量结果并不准确.文献[10]首先将候选服务各 QoS 属性映射到不同的模糊集合,比如将响应时间映射到“长”、“中”、“短”等模糊集合,将可靠性映射到“高”、“中”、“低”等模糊集合,然后指定多条 QoS 度量的逻辑表达式(比如,若价格“低”、相应时间“短”且可靠性“高”,则 QoS“高”),并将各属性针对不同模糊集合的隶属度代入表达式,最后计算出服务 QoS 属于“高”、“中”、“低”的隶属度,并将其加权求和得到最终的 QoS 度量结果.该方法由于在 QoS 度量过程中对于 QoS 属于“中”的隶属度只做简单相加,造成某些情况下,QoS 属性表现一般的服务反而得到较高的度量结果,因而其度量结果并不准确.

另外,很多研究采用 QoS 效用函数进行 QoS 度量.效用函数最早由 Zeng 等人提出<sup>[16,17]</sup>,是该领域最具影响力的研究成果之一.在本文研究背景下,即,在多个功能相同的服务中选取 QoS 最佳的服务时,效用函数的形式为  $\sum v_{ij} \cdot w_{ij}$ , 其中,  $v_{ij}$  表示第  $i$  个服务的第  $j$  个属性的归一化取值,  $w_j$  表示第  $j$  个属性的权重.效用函数的关键在于合理地确定各 QoS 属性的权重,但 Zeng 等人并未给出属性权重的分配方法,因此,围绕效用函数产生了 QoS 度量领域的研究热点,研究者期望找到高效、合理的权重分配策略,以有效地利用该函数进行 QoS 度量.文献[18]通过询问用户大量启发式问题来确定属性权重.首先,制定一些虚拟的服务,这些服务在各 QoS 属性上有不同的取值;然后,让用户对这些服务的优劣进行排序,进而依据排序得到各 QoS 属性的权重.该方法能够针对用户需求进行比较准确的 QoS 度量,但是必须要和用户进行大量的交互,否则会影响度量结果的准确性,在 Web 服务应用的自动化构建过程中难以使用.文献[19]提出了以各 QoS 属性间的距离相关系数确定权重的方法,将服务集中每一列属性看成一个向量,若某属性和其余属性的距离相关系数较大,则该属性对其他属性的影响较大,其权重也较大.该方法使用的距离相关系数考虑了 QoS 属性的数据分布特征,但是不能将数据分布特征确切地映射到现实意义,即,不能合理地解释为什么一个属性比另外一个重要,权重的合理性有待证明.另外,该方法完全忽略了用户偏好的作用,不能针对个性化用户需求进行 QoS 度量.文献[11]提出了通过用户指定 QoS 属性的重要等级来确定权重的方法,将 QoS 属性由低到高分 5 个等级,等级越高者权重越大.考虑到用户偏好的模糊性带来的误差,通过基于熵理论计算的熵权重对前面所确定的权重进行调整.但是,该方法基于模糊数表示的 Web 服务数据集,而实际应用中大多使用实数值数据集,没有给出将实数值转换为模糊数的方法,进而转换过程中带来的误差也无法估计.

其他相关研究还有:基于本体的 QoS 度量方法<sup>[20]</sup>、基于偏好推荐的 QoS 度量方法<sup>[21]</sup>、基于元模型的 QoS 度量方法<sup>[22]</sup>以及使用一些较新颖的数学理论(如直觉模糊集)进行 QoS 度量<sup>[23]</sup>.

与这些工作相比,本文的特色在于,不但对用户偏好的模糊性进行了准确量化,而且指出了用户偏好具有片面性,QoS 度量是用户偏好和服务集共同作用的结果,应当将用户偏好和服务集 QoS 属性的数据分布特征予以综合考虑.同时,本文提出了属性的权重应具有明确的现实意义,即,要能合理地解释各属性在 QoS 度量中的不同作用,以使度量结果能够准确地反映服务的整体性能.

## 4 结束语

本文主要讨论了如何对 Web 服务 QoS 进行准确度量的问题,提出了从主观和客观两个方面进行 QoS 度量,通过准确区分各 QoS 属性在用户体验中的不同敏感度,以及深入分析待选服务集 QoS 属性数据的分布特征,合理地计算出各 QoS 属性的主客观权重,以避免用户偏好的模糊性和片面性,从而在把握用户偏好的同时又能准确地反映服务的综合性能.实验结果证明了所提出的 ESOW 算法的有效性.在下一步工作中,我们将对 ESOW 算法参数的自动推荐进行研究,以进一步提高 QoS 度量的准确性.

**致谢** 感谢香港中文大学郑子彬副研究员在上海参加 ICSOC 2012 期间对 QoS 度量中与主观权重相关研究工作的指导.

## References:

- [1] Menasce DA. Composing Web services: A QoS view. *IEEE Internet Computing*, 2004,8(6):88–90. [doi: 10.1109/MIC.2004.57]
- [2] Menasce DA. QoS issues in Web services. *IEEE Internet Computing*, 2002,6(6):72–75. [doi: 10.1109/MIC.2002.1067740]
- [3] Tao H, Chen NJ, Wei J, Zhang WB, Zhang Y. OnceAS/Q: A QoS-enabled Web application server. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2004,15(12):1787–1799 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/15/1787.htm>
- [4] Ran S. A model for Web services discovery with QoS. *ACM Sigecom Exchanges*, 2003,4(1):1–10. [doi: 10.1145/844357.844360]
- [5] Wang SG, Sun QB, Zhang GW, Yang FC. Uncertain QoS-aware skyline service selection based on cloud model. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2012,23(6):1397–1412 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4084.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2012.04084]
- [6] Wang SG, Sun QB, Yang FC. Web service dynamic selection by the decomposition of global QoS constraints. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2011,22(7):1426–1439 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3842.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2011.03842]
- [7] Miao D, Fan S. The calculation of knowledge granulation and its application. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2002,22(1):48–56 (in Chinese with English abstract). <http://www.sysengi.com/CN/abstract/abstract108859.shtml>
- [8] Al-Masri E, Mahmoud QH. Discovering the best Web service. In: *Proc. of the 16th Int'l Conf. on World Wide Web (WWW)*. New York: ACM Press, 2007. 1257–1258. [doi: 10.1145/1242572.1242795]
- [9] Al-Masri E, Mahmoud QH. QoS-Based discovery and ranking of Web services. In: *Proc. of the 16th Int'l Conf. on Computer Communications and Networks (ICCCN)*. New York: IEEE, 2007. 529–534. [doi: 10.1109/ICCCN.2007.4317873]
- [10] Wu ZP, Yuan M. User-Preference-Based service selection using fuzzy logic. In: *Proc. of the 6th Int'l Conf. on Network and Service Management (CNSM)*. New York: IEEE, 2010. 342–345. [doi: 10.1109/CNSM.2010.5691228]
- [11] Xiong PC, Fan YS. QoS-Aware Web service selection by a synthetic weight. In: *Proc. of the 4th Int'l Conf. on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD)*. New York: IEEE, 2007. 632–637. [doi: 10.1109/FSKD.2007.462]
- [12] Shao LS, Zhou L, Zhao JF, Xie B, Mei H. Web service QoS prediction approach. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2009, 20(8):2062–2073 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3375.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2009.03375]
- [13] Li Y, Zhou MH, Li RC, Cao DG, Mei H. Service selection approach considering the trustworthiness of QoS data. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2008,19(10):2620–2627 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/2620.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2008.02620]
- [14] Tran VX, Tsuji H. QoS based ranking for Web services: Fuzzy approaches. In: *Proc. of the 4th Int'l Conf. on Next Generation Web Services Practices (NWESP)*. New York: IEEE, 2008. 77–82. [doi: 10.1109/NWESP.2008.41]
- [15] Liu XQ, Fletcher KK, Tang MD. Service selection based on personalized preference and trade-offs among QoS factors and price. In: *Proc. of the 1st IEEE Int'l Conf. on Services Economics (SE)*. New York: IEEE, 2012. 32–39. [doi: 10.1109/SE.2012.5]
- [16] Zeng LZ, Benatallah B, Ngu AHH, Dumas M, Kalagnanam J, Chang H. QoS-Aware middleware for Web services composition. *IEEE Trans. on Software Engineering*, 2004,30(5):311–327. [doi: 10.1109/TSE.2004.11]

- [17] Zeng LZ, Benatallah B, Dumas M, Kalagnanam J, Sheng QZ. Quality-Driven Web services composition. In: Proc. of the 12th Int'l Conf. on World Wide Web (WWW). New York: ACM Press, 2003. 411–421. [doi: 10.1145/775152.775211]
- [18] Srivastava A, Sorenson PG. Service selection based on customer rating of quality of service attributes. In: Proc. of the 8th Int'l Conf. on Web Services (ICWS). New York: IEEE, 2010. 1–8. [doi: 10.1109/ICWS.2010.32]
- [19] Almulla M, Almatari K, Yahyaoui H. A QoS-based fuzzy model for ranking real world Web services. In: Proc. of the 9th Int'l Conf. on Web Services (ICWS). New York: IEEE, 2011. 203–210. [doi: 10.1109/ICWS.2011.43]
- [20] Zhou C, Chia LT, Lee BS. DAML-QoS ontology for Web services. In: Proc. of the 2nd Int'l Conf. on Web Services (ICWS). New York: IEEE, 2004. 472–479. [doi: 10.1109/ICWS.2004.1314772]
- [21] Zhu R, Wang HM, Feng DW. Trustworthy services selection based on preference recommendation. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2011,22(5):852–864 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3804.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2011.03804]
- [22] De Paoli F, Palmonari M, Comerio M, Maurino A. A meta-model for non-functional property descriptions of Web services. In: Proc. of the 6th IEEE Int'l Conf. on Web Services (ICWS). New York: IEEE, 2008. 393–400. [doi: 10.1109/ICWS.2008.97]
- [23] Wang P. QoS-Aware Web services selection with intuitionistic fuzzy set under consumer's vague perception. Expert Systems with Applications, 2009,36(3):4460–4466. [doi: 10.1016/j.eswa.2008.05.007]

#### 附中文参考文献:

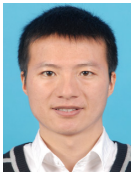
- [3] 黄涛,陈宁江,魏峻,张文博,张勇. OnceAS/Q: 一个面向 QoS 的 Web 应用服务器. 软件学报, 2004, 15(12): 1787–1799. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/15/1787.htm>
- [5] 王尚广,孙其博,张光卫,杨放春. 基于云模型的不确定性 QoS 感知的 Skyline 服务选择. 软件学报, 2012, 23(6): 1397–1412. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4084.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2012.04084]
- [6] 王尚广,孙其博,杨放春. 基于全局 QoS 约束分解的 Web 服务动态选择. 软件学报, 2011, 22(7): 1426–1439. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3842.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2011.03842]
- [7] 苗夺谦,范世栋. 知识的粒度计算及其应用. 系统工程理论与实践, 2002, 22(1): 48–56. <http://www.sysengi.com/CN/abstract/abstract108859.shtml>
- [12] 邵凌霄,周立,赵俊峰,谢冰,梅宏. 一种 Web Service 的服务质量预测方法. 软件学报, 2009, 20(8): 2062–2073. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3375.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2009.03375]
- [13] 李研,周明辉,李瑞超,曹东刚,梅宏. 一种考虑 QoS 数据可信性的服务选择方法. 软件学报, 2008, 19(10): 2620–2627. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/2620.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2008.02620]
- [21] 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. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3804.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2011.03804]



马友(1982—),男,山东宁阳人,博士生,CCF 学生会员,主要研究领域为服务计算.  
E-mail: mayou0531@126.com



孙其博(1975—),男,博士,副教授,CCF 会员,主要研究领域为网络服务与网络智能化,物联网应用技术.  
E-mail: qbsun@bupt.edu.cn



王尚广(1982—),男,博士,讲师,CCF 高级会员,主要研究领域为服务计算,云服务管理调度.  
E-mail: sgwang@bupt.edu.cn



杨放春(1957—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 杰出会员,主要研究领域为服务计算,网络智能化,网络安全,通信软件.  
E-mail: fcyang@bupt.edu.cn