

# 用户驱动的组合服务选择算法<sup>①</sup>

张龙昌

(辽宁工程技术大学 营销管理学院, 葫芦岛 125105)

**摘要:** 用户需求准确获取和复杂不确定环境下的最优服务选择是服务组合研究中的难题. 首先提出一个接近用户表达习惯的用户权重表达模型获取用户服务质量(QoS)权重, 然后提出一种基于层次分析法(AHP)和逼近理想解排序法(TOPSIS)的组合服务选择算法(CWSSA)以解决最优服务选择问题. 该算法转换用户的 QoS 属性两两比较矩阵为用户权重, 评估区间数表示的复杂不确定环境下的 QoS 信息. 还介绍了一个 QoS 属性关系表示的用户权重模型和区间数描述的 QoS 模型及聚合算法. 实验验证了该算法的优越性和有效性.

**关键词:** 层次分析法; 逼近理想解排序法; Web 服务; 服务组合; 服务质量

## User Driven Composition Web Service Selection Algorithm

ZHANG Long-Chang

(School of Marketing Management, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

**Abstract:** The composition service selection based on quality of service (QoS) is still challenging because the difficulty of obtaining user's requirements and the complex and uncertain environment make decision making hard. Firstly, a user weight model closer to user's expression habit to obtain the user's weight is presented. And then a novel composition Web service selection algorithm (CWSSA) based analytic hierarchy process (AHP) and technique for order preference by similarity to an ideal solution (TOPSIS) is presented to solve the problem of optimal service selection in the complex and uncertain environment for the first time. It can convert user's pair-wise comparison matrix of QoS attributes to user weight and take QoS information with interval number into consideration. Other contributions of the paper include a user weight model, a QoS model with interval number and strategy for aggregating QoS. Finally, the benefits and effectiveness of our approach are demonstrated.

**Key words:** analytic hierarchy process(AHP); technique for order preference by similarity to an ideal solution (TOPSIS); Web service; service composition; quality of service(QoS)

Web 服务选择方面已经有大量的研究工作, 然而基于用户能够精确给出 QoS 权重的假设已经不能满足用户的需求, 因此本文提出更接近用户习惯的用户权重表达模型; 服务 QoS 的描述有使用实数<sup>[1]</sup>、区间数、模糊数<sup>[2]</sup>、直觉模糊集<sup>[3]</sup>、随机数<sup>[4]</sup>, 然而目前较多使用的 QoS 数据为一段时间内监控的实数值, 不同时间段的监控数据有波动, 因此本文用区间数描述 QoS 属性值. 基于本文的用户权重和 QoS 模型, 借鉴 AHP<sup>[5]</sup>和 TOPSIS<sup>[6]</sup>思想, 给出基于多属性决策理论的组合服务选择算法(CWSSA). CWSSA 根据两两比较矩阵计算

用户权重; 然后计算加权规格化决策矩阵; 最后提出一个优良度函数来综合衡量每个执行计划的质量.

## 1 相关工作

服务 QoS 模型研究中, 文献[1]提出异构数据描述的 QoS 本体, 并给出了用户权重未知情况下的计算方法. 文献[3]用直觉模糊集表示 QoS, 文献[4]用随机数表示 QoS 模型, 文献[7]提出了主观和客观结合的实数 QoS 模型. 然而, 目前 QoS 数据采集方式为一段时间内的平均值(用实数表示), 而不同时间段采集的数据

① 基金项目: 国家基础理论研究计划(973)(2009CB320406, 2009CB320504)

收稿时间: 2011-09-09; 收到修改稿时间: 2012-08-10

总是有波动,因此本文提出的区间数的 QoS 模型更适合目前 QoS 数据获取方式.

在服务选择算法研究中,文献[2,3,7]应用多属性决策理论获得最优组合服务.文献[4]讨论了基于马氏决策过程的动态服务选择.文献[1]讨论了遗传算法在 Web 服务组合中的应用.文献[8]讨论了粒子群算法在服务组合中的应用.然而,上述方法将用户权重定义为精确实数或者不考虑用户权重,这种方法已经不能满足需求.本文的 CWSSA 算法弥补上述算法的不足.

## 2 用户驱动的Web服务QoS模型

### 2.1 用户权重模型

图 1 根据用户的表达习惯定义 5 个关系符号,比较某两个 QoS 属性的关系,其中  $Pr$ 、 $Av$ 、 $RT$ 、 $Ra$ 、 $Rp$  分别代表价格、可用性、响应时间、可靠性、信誉.矩阵第一行表达了价格比可用性稍微重要、比响应时间明显重要、比可靠性非常重要、比信誉极端重要.

$\approx$ , 两属性同等重要	$Pr$	$Av$	$RT$	$Ra$	$Rp$
$>$ , 前属性比后属性稍微重要	$Pr \approx$	$Av >$	$RT \geq$	$Ra \gg$	$Rp \triangleright$
$\geq$ , 前属性比后属性明显重要	$Pr \approx$	$Av \approx$	$RT >$	$Ra \geq$	$Rp \gg$
$\gg$ , 前属性比后属性非常重要	$Pr \approx$	$Av \approx$	$RT \approx$	$Ra >$	$Rp \geq$
$\triangleright$ , 前属性比后属性极端重要	$Pr \approx$	$Av \approx$	$RT \approx$	$Ra \approx$	$Rp >$

图 1 QoS 属性关系符号及实例

### 2.2 Web 服务 QoS 模型

为了方便讨论,本文的 QoS 模型只包含有限的几项指标,下面是组件 Web 服务各指标定义及度量方法.

价格:调用服务  $s$  所需要支付的费用,由服务提供商发布,变化不大,用实数表示,是区间数特例.

可用性:一段时间内成功访问次数与总访问次数比值.固定时间段内,受复杂、不确定性影响,会在一定范围内波动,用  $Av = [\min(a^L, a), \max(a^U, a)]$  表示,其中  $a = Tr/n$ ,  $Tr$  成功访问次数,  $n$  为总次数,  $a^L$ 、 $a^U$  为当前最低概率和最高概率.

响应时间:从客户请求消息发出到最终服务执行结果展现给用户所需的时间开销,单次响应时间模型为  $t = t_{request} + t_{transmission} + t_{display}$ ,  $t_{request}$  为用户提交请求信息转换成标准的服务请求格式所需要时间,  $t_{transmission}$  指请求信息和执行结果在网络中的传输时间,  $t_{display}$  为执行结果在用户转换后显示结果需要的时间.则响应时间  $RT = [\min(t^L, \min(t_1, t_2, \dots, t_n))$ ,

$\max(t^U, \max(t_1, t_2, \dots, t_n))]$ , 其中  $t^L$  和  $t^U$  表示当前响应时间的最低和最高值.

可靠性:服务能够正确执行程度,受不确定因素影响,用区间数  $Ra = [\min(r^L, r), \max(r^U, r)]$  表示,其中  $r^L$  和  $r^U$  为当前可靠性最低和最高值,  $r = r(s)/n$ ,  $r(s)$  为一段时间可靠性的总分值,  $n$  为访问次数.

信誉:服务的可信程度.受 Web 环境开放性、动态性、以及用户偏好的影响,其值实时变化,用区间数  $Rp = [c^L, c^U]$  表示信誉度.

上述属性中,价格和响应时间是成本型,其它是效益型,且区间数的上下限都为大于等于零的实数.

组合服务有多个单一功能的服务根据 workflow 组成,组合服务 QoS 可以根据单个服务 QoS 得到.文献[9]将 workflow 中的选择结构分解为不同的执行路径,循环结构按照分支的执行概率展开,从而化简为只有顺序结构和并行结构.表 1 列出组合服务 QoS 计算公式.

表 1 组合服务 QoS 聚合模型

QoS	顺序结构( $n$ 分支)	循环结构( $m$ 分支)
价格	$Pr = \left[ \sum_{i=1}^n p_i^L, \sum_{i=1}^n p_i^U \right]$	$Pr = \left[ \sum_{i=1}^m p_i^L, \sum_{i=1}^m p_i^U \right]$
可用性	$Av = \left[ \prod_{i=1}^n a_i^L, \prod_{i=1}^n a_i^U \right]$	$Av = \left[ \prod_{i=1}^m a_i^L, \prod_{i=1}^m a_i^U \right]$
响应时间	$RT = \left[ \sum_{i=1}^n t_i^L, \sum_{i=1}^n t_i^U \right]$	$RT = \left[ \max_i(t_i^L), \max_i(t_i^U) \right]$
可靠性	$Ra = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i^L, \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i^U \right]$	$Ra = \left[ \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m r_i^L, \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m r_i^U \right]$
信誉	$Rp = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i^L, \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i^U \right]$	$Rp = \left[ \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m r_i^L, \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m r_i^U \right]$

## 3 组合服务选择算法(CWSSA)

在本文权重模型和 QoS 模型基础上,提出一种基于 AHP<sup>[5]</sup>和 TOPSIS<sup>[6]</sup>的组合服务选择算法-CWSSA,输入为 QoS 属性关系矩阵  $Q$ ,具体步骤如下.

### 3.1 计算用户权重

#### 3.1.1 构造比较判断矩阵

根据关系矩阵  $Q$  构造比较判断矩阵,设  $x_1, x_2, \dots, x_n$  为 QoS 的  $n$  个属性,则定义  $n$  个 QoS 属性两两相互比较矩阵  $A = (a_{ij})_{n \times n}$  为用户的比较判断矩阵,其中  $a_{ij}$  是按照下表将两个服务 QoS 属性的比较转换成实数.

表 2 QoS 属性关系符号转换表

值	算子	解释
1	≈	两属性同等重要
3	∠	前属性比后属性稍微重要
5	≥	前属性比后属性明显重要
7	≫	前属性比后属性非常重要
9	▷	前属性比后属性极端重要
2、4、6、8		两者同样重要
倒数		如 i 相比 j 具有上述标度, 则 j 相比 i 即为该标度的倒数

有下列性质: 1)  $\forall i, j \in N$  有  $a_{ij} > 0, a_{ji} = 1/a_{ij}, a_{ii} = 1$ ; 2) 判断矩阵  $A$  的下三角矩阵可以通过上三角矩阵得到. 根据性质 2 的特性, 本文的权重定义只考虑判断矩阵的上三角或下三角.

定义 1.  $\forall i, j, k \in N$  有  $a_{ij} \times a_{jk} = a_{ik}$  则称判断矩阵  $A$  为完全一致性矩阵.

### 3.1.2 权重向量求解

判断矩阵的阶数可能大于 3, 因此增加了特征根求解(AHP 中用的较多的权重计算方法)的复杂度. 因此利用 Saaty<sup>[5]</sup>给出的求判断矩阵最大特征值近似值方法, 求解用户对服务 QoS 的偏好向量  $\omega$  具体方法如下.

Step1: 设用户 QoS 偏好向量  $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$ , 则  $\forall i \in N$  有

$$\omega_i = \omega_i^* / \sum_{i=1}^n \omega_i^* \quad (1)$$

其中,  $\omega_i^* = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}$ .

Step2: 设  $\lambda_{\max}$  为判断矩阵  $A$  最大特征值, 则

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \omega_i s_i \quad (2)$$

其中,  $\omega_i$  由公式 1 得到,  $s_i = \sum_{j=1}^n a_{ji}$ .

### 3.1.3 一致性检验

用户给出的判断矩阵可能不是完全一致的, 判断矩阵中任何两个属性比较的错误可能导致求出的权重与实际偏差较大, 需要对判断矩阵进行一致性检验, 本文采用 Saaty 的判断矩阵一致性验证方法. 设一致性指标

$$C.R. = C.I./R.I. \quad (3)$$

其中  $C.I. = (\lambda_{\max} - n)/(n - 1)$ ,  $n$  为判断矩阵的阶数,  $R.I.$  为相应  $n$  阶的平均随机一致性指标. Saaty 计算了 1 到 15 阶判断矩阵的一致性指标值(该指标值是多次随机生成判断矩阵得到的  $\lambda_{\max}$  平均值). 本文假设 QoS 属性个数

为 5, 因此取  $\lambda_{\max} \leq 5.45$  和  $R.I. = 1.12$ . 当  $C.R. < 0.1$  时, 即要求用户 QoS 判断的一致性与随机生成判断的一致性之比小于 10% 时, 认为判断矩阵的一致性是可以接受的. 反之, 重新获得用户 QoS 判断矩阵.

### 3.2 加权规格化决策矩阵

服务 QoS 属性类型有效益型和成本型. 效益型是属性值越大越好(如可用性、可靠性、声誉); 成本型是属性值越小越好(如成本、响应时间). 另外, 为消除不同物理量纲对决策结果影响, 需要给出规格化方法. 基于较常用向量规格法, 给出区间数的规格化方法.

定义 2. 设区间数表示的服务决策矩阵为  $\tilde{D} = (\tilde{d}_{ij})_{m \times n}$ ,  $m$  为备选服务数,  $n$  为 QoS 属性个数,  $\tilde{d}_{ij} = [d_{ij}^L, d_{ij}^U]$  且  $d_{ij}^U \geq d_{ij}^L \geq 0$ , 当  $d_{ij}^L = d_{ij}^U$  时  $\tilde{d}_{ij}$  精确实数.

设决策矩阵  $\tilde{D}$  经规格化后的规格化决策矩阵为  $\bar{D} = (\bar{d}_{ij})_{m \times n}$ , 根据区间数四则运算得到规格化方法:

$$\begin{cases} \bar{d}_{ij}^L = \tilde{d}_{ij}^L / \sqrt{\sum_{i=1}^m (\tilde{d}_{ij}^L)^2} & \text{效益型} \\ \bar{d}_{ij}^U = (\tilde{d}_{ij}^U)^{-1} / \sqrt{\sum_{i=1}^m (\tilde{d}_{ij}^L)^{-2}} & \text{成本型} \end{cases} \quad (4)$$

由规格化决策矩阵  $\bar{D}$ 、定义 2 可得区间数加权规格化决策矩阵. 设用户偏好权重向量  $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$ , 有  $\sum_{j=1}^n \omega_j = 1, \omega_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n$ . 则加权规格化决策矩阵为  $\hat{D} = ([\omega_j \times d_{ij}^L, \omega_j \times d_{ij}^U])_{m \times n}$  ( $\omega_j$  是  $\omega$  第  $j$  个元素).

### 3.3 确定理想方案

为比较矩阵  $\hat{D}$  中方案的优劣, 需要定义一个比较的标准. 定义 3 给出矩阵  $\hat{D}$  中方案的正理想方案和负理想方案, 正理想方案为理想的最优方案, 负理想方案为理想最劣方案.

定义 3. 正理想方案 ( $\tilde{s}^+$ ) 和负理想方案 ( $\tilde{s}^-$ )

$$\begin{cases} \tilde{s}^+ = (\tilde{s}_1^+, \tilde{s}_2^+, \dots, \tilde{s}_n^+); \tilde{s}_j^+ = \left[ \max_i (d_{ij}^{+L}), \max_i (d_{ij}^{+U}) \right] \\ \tilde{s}^- = (\tilde{s}_1^-, \tilde{s}_2^-, \dots, \tilde{s}_n^-); \tilde{s}_j^- = \left[ \min_i (d_{ij}^{-L}), \min_i (d_{ij}^{-U}) \right] \end{cases} \quad (5)$$

### 3.4 计算距离测度

下面给出某方案与正理想方案的相近程度计算方法, 用欧几里得范数作为距离的测度.

定义 4. 取定义 2 任意区间数  $x = [x^L, x^U]$  和  $y = [y^L, y^U]$

$$d(x, y) := \sqrt{1/2((y^L - x^L)^2 + (y^U - x^U)^2)} \quad (6)$$

### 3.5 计算到理想解的贴近度

求解加权规格化决策矩阵的最优方案需要比较矩阵中每个方案与正理想方案  $\tilde{s}^+$  的贴近度, 下面定义每个方案到正理想方案  $\tilde{s}^+$  的贴近度函数.

$$f(\hat{d}_i, \tilde{s}^-, \tilde{s}^+) = d(\hat{d}_i, \tilde{s}^-) / (d(\hat{d}_i, \tilde{s}^-) + d(\hat{d}_i, \tilde{s}^+)) \quad (7)$$

函数  $f(d_i, \tilde{s}^-, \tilde{s}^+)$  计算服务组合计划  $d_i$  到正理想的贴近度,  $\max(f(d_i, \tilde{s}^-, \tilde{s}^+))$  为最优计划贴近度.

## 4 算法分析

本节实验包括算法性能分析和算法有效性分析.

### 4.1 算法性能分析

首先分析算法时间复杂度, 设候选计划数  $m$ , QoS 属性个数  $n$ . 构造比较判断矩阵时间复杂度  $O(n \times (n-1)/2)$ , 权重向量求解复杂度  $O(n+n \times n \times n)$ , 一致性检验复杂度为  $O(1)$ , 计算权重总时间复杂度为  $O(5n^2/2 + 3n/2 + 1)$ . 加权规格化决策矩阵包括规格化时间复杂度  $O(m \times n)$ , 加权时间复杂度  $O(m \times n)$ , 总时间复杂度为  $O(2 \times m \times n)$ . 综合评价包括理想方案定义时间复杂度  $O(m \times n)$ , 计算距离测度时间复杂度  $O(2 \times m \times n)$ , 总时间复杂度为  $O(3 \times m \times n)$ . 所以算法的时间复杂度为  $O(5 \times m \times n + 5n^2/2 + 3n/2 + 1)$ ,  $n$  可以看成常数, 算法具有线性复杂度.

### 4.2 实例分析

表 3 用户权重模型

	价格	可用性	响应时间	可靠性	信誉
价格	两属性同等重要	价格比可用性稍微重要	价格比响应时间明显重要	价格比可靠性非常重要	价格比信誉极端重要
可用性		两属性同等重要	可用性比响应时间稍微重要	可用性比可靠性明显重要	可用性比信誉非常重要
响应时间			两属性同等重要	响应时间比可靠性稍微重要	响应时间比信誉明显重要
可靠性				两属性同等重要	可靠性比信誉稍微重要
信誉					两属性同等重要

表 4 服务组合执行计划候选集

	价格	可用性	响应时间	可靠性	信誉
1	120	[0.95, 0.99]	[200, 350]	[9, 10]	[0.89, 0.93]
2	150	[0.95, 0.99]	[180, 320]	[6, 8]	[0.97, 0.99]
3	135	[0.97, 0.99]	[240, 310]	[9, 10]	[0.91, 0.95]
4	95	[0.93, 0.97]	[280, 320]	[4, 6]	[0.84, 0.92]
5	125	[0.82, 0.88]	[190, 360]	[0, 1]	[0.59, 0.65]
6	140	[0.90, 0.96]	[210, 260]	[4, 6]	[0.38, 0.42]
7	120	[0.97, 0.99]	[220, 340]	[9, 10]	[0.97, 0.99]
8	110	[0.98, 1.0]	[230, 300]	[9, 10]	[0.25, 0.31]
9	135	[0.85, 0.89]	[180, 280]	[2, 4]	[0.55, 0.57]
10	100	[0.92, 0.96]	[260, 270]	[4, 6]	[0.95, 0.99]

根据用户权重模型和服务 QoS 模型, 设置用户的 QoS 关系权重矩阵如表 3 所示. 设置区间数表示的组合服务计划候选集如表 4.

Step1: 计算用户权重. 由图 1 和表 2 转换表 3 中的用户权重模型为比较判断矩阵. 由公式 1 计算权重向量  $\omega = (0.51, 0.2638, 0.1296, 0.0636, 0.0329)$ . 由公式 2 得  $A$  的最大特征值  $\lambda_{\max} = 5.243 < 5.45$ . 由公式 3 得  $C.R. = 0.0542 < 0.1$  通过一致性验证,  $\omega$  为用户权重向量.

	Pr	Av	RT	Ra	Rp	Pr	Av	RT	Ra	Rp	
Pr	≈	>	≥	□	>	Pr	1	3	5	7	9
Av		≈	>	≥	□	Av	1/3	1	3	5	7
Rt			≈	>	≥	Rt	1/5	1/3	1	3	5
Ra				≈	>	Ra	1/7	1/5	1/3	1	3
Rp					≈	Rp	1/9	1/7	1/5	1/3	1

Step2: 加权规格化决策矩阵. 由表 4 经过规格化后得下面规格化矩阵  $\bar{D}$ ,  $\bar{D}$  经加权后得  $\bar{D}$ .

	Pr	Av	RT	Ra	Rp
1	[0.1600, 0.1600]	[0.0823, 0.0892]	[0.0266, 0.0648]	[0.0236, 0.0313]	[0.0114, 0.0125]
2	[0.1291, 0.1291]	[0.0823, 0.0892]	[0.0284, 0.0726]	[0.0157, 0.0251]	[0.0124, 0.0133]
3	[0.1426, 0.1426]	[0.084, 0.0892]	[0.0293, 0.0544]	[0.0236, 0.0313]	[0.0117, 0.0128]
4	[0.2024, 0.2024]	[0.0806, 0.0874]	[0.0284, 0.0467]	[0.0105, 0.0188]	[0.0108, 0.0124]
5	[0.1542, 0.1542]	[0.071, 0.0793]	[0.0257, 0.0687]	[0.0000, 0.0031]	[0.0076, 0.0088]
6	[0.1369, 0.1369]	[0.078, 0.0866]	[0.0348, 0.0622]	[0.0105, 0.0188]	[0.0049, 0.0057]
7	[0.1600, 0.1600]	[0.084, 0.0892]	[0.0266, 0.0583]	[0.0236, 0.0313]	[0.0124, 0.0133]
8	[0.1754, 0.1754]	[0.0849, 0.0901]	[0.0302, 0.0557]	[0.0236, 0.0313]	[0.0032, 0.0042]
9	[0.1426, 0.1426]	[0.0737, 0.0802]	[0.033, 0.0726]	[0.0052, 0.0125]	[0.0071, 0.0077]
10	[0.1928, 0.1928]	[0.0797, 0.0866]	[0.0339, 0.0492]	[0.0105, 0.0188]	[0.0122, 0.0133]

Step3: 综合评价. 根据得正、负理想方案.

$$\tilde{s}^+ = ([0.2024, 0.2024], [0.0849, 0.0901], [0.0236, 0.0481], [0.0236, 0.0313], [0.0124, 0.0133])$$

$$\tilde{s}^- = ([0.1291, 0.1291], [0.071, 0.0793], [0.0367, 0.0667], [0.0, 0.0031], [0.0032, 0.0042])$$

根据式 7 得方案贴近度后排序如下, 方案 4 最优方案.

$$f(d_4) > f(d_{10}) > f(d_8) > f(d_1) > f(d_7) > f(d_3) > f(d_2) > f(d_9) > f(d_5) > f(d_6)$$

文献[13]提出了基于区间数的决策算法, 用其计算权重为  $\omega$  和备选服务为规格化矩阵  $\bar{D}$  得最优方案是 4.

$$f(d_4) > f(d_{10}) > f(d_8) > f(d_7) > f(d_1) > f(d_3) > f(d_2) > f(d_5) > f(d_6) > f(d_9)$$

文献[13]算法与 CWSSA 排序结果有些较小差异. 主要两个原因: 1) 文献[13]将区间数规格化后会损失部分精确度; 2) 文献[13]得到最优的服务计划忽略了区间数表示的 QoS 属性具有均匀分布和正太分布等特性. 本文提出的方法能较好评估区间数表示的备选方案.

## 5 结语

以用户为中心的服务选择, 既要考虑用户的 QoS 需求也要考虑服务质量, 而用户很难精确描述权重, 因此需要提出接近用户表达习惯的用户权重模型. 另外, 服务质量不仅受到服务提供者 and 用户能力及其环

境的影响,也受到网络环境各种因素影响,因此很难用一种模型精确描述 QoS 的变化。

针对上述问题,本文提出了一种新颖的用户权重模型,使用户能够很容易表达 QoS 属性重要程度;同时使用区间数描述 QoS,既可以从定性的角度评估 QoS 也可以使 QoS 的监控更加容易。并且提出了支持上述描述的 CWSSA 算法,通过实验证明了算法优势。

CWSSA 算法还应当考虑更多的用户权重表达方式,如区间数、语言短语、直觉模糊集等。也应当考虑更多的 QoS 表达方式,如语言短语、直觉模糊集,以及找出将这些表达方式转换成区间数的方法。

### 参考文献

- 1 Liang WY, Huang CC. The generic genetic algorithm incorporates with rough set theory—An application of the web services composition. *Expert Systems with Applications*, 2009,36(3):5549–5556.
- 2 Yang FC, Su S, Li Z. Hybrid QoS-aware semantic web service composition strategies. *Science in China Series F-Information Sciences*, 2008,51(11):1822–1840.
- 3 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.
- 4 范小芹,蒋昌俊,王俊丽,庞善臣.随机 QoS 感知的可靠 Web 服务组合. *软件学报*,2009,20(3):546–556.
- 5 Saaty TL, Vargas L. *Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with the Analytic Hierarchy Process*, RWS Publications, 2000.
- 6 Hwang CL, Yoon K. *Multiple Attribute Decision Making*, Springer-Verlag, Berlin,1981.
- 7 Sun Y, He SY, Leu JY. Syndicating Web Services: A QoS and user-driven approach. *Decision Support Systems*, 2007,43(1): 243–255.
- 8 Tao F, Zhao DM, Hu YF, Zhou ZD. Correlation-aware resource service composition and optimal-selection in manufacturing grid. *European Journal of Operational Research*, 2010,201(1):129–143.
- 9 Ardagna D, Pernici B. Adaptive service composition in flexible processes. *IEEE Trans. on Software Engineering*, 2007,33(6): 369–384.

(上接第 44 页)

助的 IEEE1588 标准为其提供一个很好的解决方案。

### 参考文献

- 1 关松青,肖昌炎.工业以太网中 IEEE1588 时钟同步技术研究.湖南大学,2010.
- 2 李晓珍,苏建峰.基于 IEEE1588 高精度网络时钟同步的研究. *通信技术*,2011,44(3):105–107,110.
- 3 王康,胡永辉,何在民.基于 DP83640 硬件辅助的 IEEE1588 研究及实现. *时间频率学报*,2011,34(1):1–8.
- 4 IEEE Std 1588TM-2002. IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems.
- 5 关松青,肖昌炎,夏晓荣.IEEE1588 协议在工业以太网中的实现. *计算机工程*,2011,37(6):237–238,241.
- 6 2009-2010 Texas Instruments.Stellaris® LM3S9B96 Development Kit User's Manual.
- 7 2007-2012 Texas Instruments.Stellaris® LM3S9B96 Microcontroller DATA SHEET.
- 8 戴辉,涂岸.基于 ARM9200 体系的 IEEE1588 硬件实现. *微型机与应用*,2010,13:63–65,68.
- 9 Correll K, Barendt N, Branicky M. Design Considerations for Software Only Implementations of the IEEE 1588 Precision Time Protocol. [2005]. USA:http://www.vtinstruments.com/.