第42卷 第8期
2015年8月
计 算 机 科 学
Computer Science
Vol. 42 No. 8
Aug 2015

基于程度不可区分关系的粗糙集模型

秦克云 罗珺方
(西南交通大学数学学院 成都 610031)

摘 要 不可区分关系是粗糙集理论的基础。针对信息系统,提出了程度不可区分关系的概念来刻画信息系统中对象的可区分性程度的差异。提出了基于程度不可区分关系的粗糙集模型,并讨论了模型的基本性质,最后研究了基于程度不可区分关系的粗糙近似算子与Pawlak近似算子的关系。

关键词 粗糙集,程度不可区分关系,粗糙近似算子,模糊关系

中图法分类号 TP18 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.8.049

Rough Set Model Based on Grade Indiscernibility Relation

QIN Ke-yun LUO Jun-fang
(College of Mathematics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract The indiscernibility relation is a key notion of rough set theory. We proposed the grade indiscernibility relation for information system to characterize the difference between the grades of discernibility. The rough set model based on grade indiscernibility relation was presented with its basic properties being discussed. Furthermore, the relationship between grade approximation operators and Pawlak approximation operators was analyzed.

Keywords Rough set, Grade indiscernibility relation, Rough approximation operator, Fuzzy relation

1 引言

粗糙集理论[1,2]是处理不确定性问题的数学工具,自1982年由波兰数学家Pawlak首次提出以来,已经在理论和应用方面取得了长足的发展,特别是在20世纪80年代末90年代初的知识发现等领域的成功应用,使其受到了国际上的广泛关注。目前,粗糙集理论已经在人工智能、知识与数据发现、模式识别与分类、故障检测等方面得到了广泛的应用。

信息系统研究是粗糙集理论的一个重要方向,其中的约简问题是粗糙集理论和应用研究的热点问题[3-5]。人们从相关实际问题的研究背景出发,针对信息系统的多样性与复杂性,提出了多种形式的不可区分关系,用于刻画对象之间的相似性,进而研究相应的约简理论与方法。如,Kryszkiewicz在不完备信息系统中引入了相容关系[6,7],王国胤[8]对相容关系进行了改进,提出了限制容差关系。相应地,人们提出了多种形式的粗糙集推广模型,如覆盖粗糙集模型、广义粗糙集模型、变精度粗糙集模型、概率粗糙集模型、模糊粗糙集模型等[9-13]。

不可区分关系是粗糙集理论的基础,其实质是指出这样一个事实:由于我们对问题认识的深入程度有限,或者可获得的数据样本的不完备,使得我们缺乏足够的知识去区分论域中的某些数据对象[14]。不完备信息系统有多种约简理论,其主要区别在于对象的不可区分关系的描述方式。对于完备信息系统,对象的相似性目前仍然采用Pawlak不可区分关系进行刻画。Ziarko变精度粗糙集模型中的知识也通过Pawlak不可区分关系表示。我们注意到,完备信息系统中对象的可区分性具有程度的差异,但这种差异性在原有模型中无法描述。本文针对信息系统提出程度不可区分关系,研究相应的粗糙集模型的性质,并讨论基于程度不可区分关系的近似算子与Pawlak近似算子的关系。

2 程度不可区分关系

定义1 一个信息系统是一个四元组$S=(U,A,V,f)$,其中,

(1)U是非空有限集合,称为论域,其中元素称为对象;

(2)A是非空有限集合,其中元素称为属性;

(3)$V=\bigcup_{a\in A}V_a$,V_a是由属性a的取值构成的集合,称为a的值域;

(4)$f:U\times A\rightarrow V$称为信息函数,它为每个对象关于每个属性赋予一个信息值,且对于任意$x\in U,a\in A$,有$f(x,a)\in V_a$。

设$S=(U,A,V,f)$是信息系统。对于任意$a\in A$,由a可以确定论域U上的一个等价关系,称为由a确定的不可区分关系,记为R_a,定义如下:

对于任意$x,y\in U$,$(x,y)\in R_a$当且仅当$f(x,a)=f(y,a)$。

到稿日期:2014-09-17 返修日期:2014-11-17 本文受国家自然科学基金(61473239,61175044,61175055),中央高校基础研究基金(2682014ZT28)资助。

秦克云(1962-),男,教授,博士生导师,CCF高级会员,主要研究方向为粗糙集理论、粒计算、多值逻辑等,E-mail:keyunqin@263.net;罗珺方(1990-),女,硕士生,主要研究方向为粗糙集理论与应用。

按照 Pawlak 粗糙集的观点，知识是对对象进行分类的能力，形式化的知识通过等价关系表示。因此，每一个属性决定一个知识。类似地，对于任意 $B\subseteq A$，由 B 确定的不可区分关系 R_B 为：对于任意 $x,y\in U$，$(x,y)\in R_B$ 当且仅当对于任意 $a\in B$，$f(x,a)=f(y,a)$。

由不可区分关系 R_B 可以决定对象集合的一个分类 $\{[x]_{R_B};x\in U\}$，其中 $[x]_{R_B}$ 是 x 关于 R_B 的等价类。显然有 $R_B=\bigcap_{a\in B}R_a$。因此，当 $B\subseteq C\subseteq A$ 时，有 $R_C\subseteq R_B$，即 $[x]_{R_C}\subseteq[x]_{R_B}$。从而当对象 x,y 关于 R_C 不可区分时，x,y 关于 R_B 也是不可区分的，较细的知识确定较细的划分。

定义 2[1] 设 $S=(U,A,V,f)$ 是信息系统，$B\subseteq A$。称 (U,R_B) 为一个 Pawlak 近似空间。对于任意 $X\subseteq U$，X 关于近似空间 (U,R_B) 的下近似 $\underline{R}_B(X)$ 与上近似 $\overline{R}_B(X)$ 分别定义为：

$$\underline{R}_B(X)=\{x\in U;[x]_{R_B}\subseteq X\} \tag{1}$$

$$\overline{R}_B(X)=\{x\in U;[x]_{R_B}\cap X\neq\emptyset\} \tag{2}$$

在粗糙集理论中，称 $bn(X)=\overline{R}_B(X)-\underline{R}_B(X)$ 为概念 X 的边界。如果 $bn(X)=\emptyset$，则称 X 为精确概念，否则称 X 为粗糙概念。概念的不确定性由边界域引起。注意到 $\underline{R}_B(X)\subseteq X\subseteq\overline{R}_B(X)$，可以通过精确概念 $\underline{R}_B(X)$ 与 $\overline{R}_B(X)$ 逼近带有不确定性的概念 X。

在实际应用中，相关数据通常存在噪声。为了增强粗糙集模型的容噪能力，Ziarko 引入多数包含关系，提出了变精度粗糙集模型。

定义 3[13] 设 $S=(U,A,V,f)$ 是信息系统，$B\subseteq A$，$0\leqslant\beta<0.5$。对于任意 $X\subseteq U$，X 关于 (U,R_B) 的 β 下近似 $\underline{R}_B^\beta(X)$ 与 β 上近似 $\overline{R}_B^\beta(X)$ 分别定义为：

$$\underline{R}_B^\beta(X)=\bigcup\{[x]_{R_B};P([x]_{R_B},X)\leqslant\beta\} \tag{3}$$

$$\overline{R}_B^\beta(X)=\bigcup\{[x]_{R_B};P([x]_{R_B},X)<1-\beta\} \tag{4}$$

其中，$P([x]_{R_B},X)=1-\dfrac{|[x]_{R_B}\cap X|}{|[x]_{R_B}|}$ 为 $[x]_{R_B}$ 相对于 X 的错误分类率。

在变精度粗糙集模型中，近似算子借助错误分类率进行刻画，对噪声数据具有一定的容错能力，其中的知识仍然为精确知识，通过等价关系表示。更深刻的研究可以参考 Yao 的概率粗糙集模型[15,16]。为了处理数据噪声问题，本文从知识的角度进行讨论。考虑下面的信息系统。

例 1 设对象集 $U=\{x_1,x_2,x_3,x_4\}$，属性集 $A=\{a,b,c,d\}$，信息函数如表 1 所列。

表 1 信息系统

	a	b	c	d
x_1	3	1	1	1
x_2	1	2	1	1
x_3	1	2	0	0
x_4	1	2	0	0

由此信息系统决定一个不可区分关系 R_A，其中 $A=\{a,b,c,d\}$。R_A 产生的分类为 $U/R_A=\{\{x_1\},\{x_2\},\{x_3,x_4\}\}$。此例中 x_1 与 x_3 以及 x_2 与 x_3 都是可以区分的，即 $x_1\notin[x_3]_{R_A}$，$x_2\notin[x_3]_{R_A}$。注意到，在 4 个属性中，x_1 与 x_3 关于 4 个属性 (a,b,c,d) 可以区分；x_2 与 x_3 关于两个属性 (c,d) 可以区分。因此，x_1 与 x_3 的可区分程度和 x_2 与 x_3 的可区分程度是不同的，这种差异在 Pawlak 粗糙集模型中无法描述。为此，本文提出程度不可区分关系来描述这种差异。

Zadeh 于 1965 年提出了模糊集理论[17]，用于描述客观事物差异的中介过渡性。设 U 是研究对象构成的集合，U 上的一个模糊集 μ 通过其隶属函数表示 $\mu:U\to[0,1]$。对于任意 $x\in U$，$\mu(x)$ 表示 x 隶属于 μ 的程度。以下用 $F(U)$ 表示 U 上所有模糊集构成的集合。信息系统的程度不可区分关系将通过论域集合上的模糊关系进行描述。

定义 4 设 $S=(U,A,V,f)$ 是信息系统。对于任意 $B\subseteq A$，由 B 诱导的程度不可区分关系 GR_B 是 U 上的二元模糊关系，即 $GR_B:U\times U\to[0,1]$，且对于任意 $x,y\in U$，$GR_B(x,y)=\dfrac{1}{|B|}|\{e\in B;f(x,e)=f(y,e)\}|$。

由此定义可知，$GR_B(x,y)$ 表示 B 中不能区分 x 与 y 的属性在 B 中所占的比例。

例 2 考虑例 1 中的信息系统。经计算可得

$$GR_A(x_1,x_2)=\frac{1}{4}|\{e\in A;f(x_1,e)=f(x_2,e)\}|=\frac{1}{4}|\{c,d\}|=\frac{1}{2}$$

类似地，有

$GR_A(x_1,x_1)=1$，$GR_A(x_1,x_3)=0$，$GR_A(x_1,x_4)=0$

$GR_A(x_2,x_2)=1$，$GR_A(x_2,x_3)=0.5$，$GR_A(x_2,x_4)=0.5$

$GR_A(x_3,x_4)=1$

显然，程度不可区分关系具有下列基本性质。

定理 1 设 $S=(U,A,V,f)$ 是信息系统，$B\subseteq A$，

(1) GR_B 是自反模糊关系，即对于任意 $x\in U$，有 $GR_B(x,x)=1$。

(2) GR_B 是对称模糊关系，即对于任意 $x,y\in U$，有 $GR_B(x,y)=GR_B(y,x)$。

(3) 对于任意 $x,y\in U$，$(x,y)\in R_B$ 当且仅当 $GR_B(x,y)=1$。

如果将 R_B 看成模糊关系，由此定理可得 $R_B\subseteq GR_B$。

3 基于程度不可区分关系的近似算子

程度不可区分关系 GR_B 是论域 U 上的模糊关系。借鉴 Dubois 与 Prade 的模糊粗糙集模型[11]，本文提出下面的近似算子：

定义 5 设 $S=(U,A,V,f)$ 是信息系统，$B\subseteq A$。对于 U 上的任意模糊集 $\mu\in F(U)$，μ 关于 GR_B 的下近似 $\underline{GR}_B(\mu)$ 与上近似 $\overline{GR}_B(\mu)$ 为 U 上的模糊集，分别定义为：对于任意 $x\in U$，

$$\underline{GR}_B(\mu)(x)=\bigwedge_{y\in U}((1-GR_B(x,y))\vee\mu(y)) \tag{5}$$

$$\overline{GR}_B(\mu)(x)=\bigvee_{y\in U}(GR_B(x,y)\wedge\mu(y)) \tag{6}$$

注意到 GR_B 是自反、对称模糊关系，因此有：

定理 2 设 $S=(U,A,V,f)$ 是信息系统，$B\subseteq A$。对于 U 上的任意模糊集 $\mu,v\in F(U)$，有

(1) $\underline{GR}_B(\sim\mu)=\sim\overline{GR}_B(\mu)$，$\overline{GR}_B(\sim\mu)=\sim\underline{GR}_B(\mu)$，即 $\underline{GR}_B$ 与 $\overline{GR}_B$ 是对偶的；

(2) $\underline{GR}_B(U)=U$，$\overline{GR}_B(\emptyset)=\emptyset$；

(3) $\underline{GR}_B(\mu\cap v)=\underline{GR}_B(\mu)\cap\underline{GR}_B(v)$，$\overline{GR}_B(\mu\cup v)=$

$\overline{GR}_B(\mu)\cup\overline{GR}_B(v)$；

(4)若 $\mu\subseteq v$,则$\underline{GR}_B(\mu)\subseteq\underline{GR}_B(v)$，$\overline{GR}_B(\mu)\subseteq\overline{GR}_B(v)$；

(5)$\underline{GR}_B(\mu\cup v)\supseteq\underline{R}(A)\cup\underline{R}(B)$，$\overline{GR}_B(\mu\cap v)\subseteq\overline{GR}_B(\mu)\cap\overline{GR}_B(v)$；

(6)$\underline{GR}_B(\mu)\subseteq\mu\subseteq\overline{GR}_B(\mu)$。

这里，$\sim\mu$ 是 μ 的补集，即 $\forall x\in U$，$\sim\mu(x)=1-\mu(x)$。

定理 3 设 $S=(U,A,V,f)$是信息系统，$B\subseteq A$。对于任意 $X\subseteq U$，有：

(1)$\underline{GR}_B(X)(x)=\bigwedge\limits_{y\in U-X}(1-GR_B(x,y))$；

(2)$\overline{GR}_B(X)(x)=\bigvee\limits_{y\in X}GR_B(x,y)$。

证明：假设 $X\subseteq U$。

(1)对于任意 $y\in U$，$y\in X$ 时 $X(y)=1$，$(1-GR_B(x,y))\vee X(y)=1$；$y\notin X$ 时 $X(y)=0$，$(1-GR_B(x,y))\vee X(y)=1-GR_B(x,y)$。于是有：

$\underline{GR}_B(X)(x)=\bigwedge\limits_{y\in U}((1-GR_B(x,y))\vee X(y))=\bigwedge\limits_{y\in U-X}(1-GR_B(x,y))$。

(2)对于任意 $y\in U$，$y\in X$ 时 $X(y)=1$，$GR_B(x,y)\wedge X(y)=GR_B(x,y)$；$y\notin X$ 时 $X(y)=0$，$GR_B(x,y)\wedge X(y)=0$。于是有：$\overline{GR}_B(X)(x)=\bigvee\limits_{y\in U}(GR_B(x,y)\wedge X(y))=\bigvee\limits_{y\in X}GR_B(x,y)$。

下面的定理刻画了 Pawlak 粗糙近似算子与基于程度不可区分关系的粗糙近似算子的关系。

定理 4 设 $S=(U,A,V,f)$是信息系统，$B\subseteq A$。对于任意 $X\subseteq U$，有：

(1)$\underline{GR}_B(X)\subseteq\underline{R}_B(X)$；

(2)$\overline{R}_B(X)\subseteq\overline{GR}_B(X)$；

(3)对于任意 $x\in U$，$\overline{GR}_B(X)(x)=1$ 当且仅当 $x\in\overline{R}_B(X)$；

(4)对于任意 $x\in U$，$\underline{GR}_B(X)(x)=0$ 当且仅当 $x\notin\underline{R}_B(X)$。

证明：(1)$\underline{GR}_B(X)$是 U 上的模糊集，$\underline{R}_B(X)$是 U 的子集。只需证明：对于任意 $x\in U$，当$\underline{GR}_B(X)(x)>0$ 时，$[x]_{R_B}\subseteq X$。假设$\underline{GR}_B(X)(x)>0$，则对于任意 $y\in U-X$，有 $1-GR_B(x,y)>0$，从而 $GR_B(x,y)<1$。故存在 $e\in B$，使得 $f(x,e)\neq f(y,e)$，即 $y\notin[x]_{R_B}$。于是对于任意 $y\in U$，当 $y\in[x]_{R_B}$ 时有 $y\notin U-X$，即 $y\in X$。由 y 的任意性可得$[x]_{R_B}\subseteq X$，即 $x\in\underline{R}_B(X)$。

(2)$\overline{GR}_B(X)$是 U 上的模糊集，$\overline{R}_B(X)$是 U 的子集。只需证明：对于任意 $x\in U$，当 $x\in\overline{R}_B(X)$时，$GR_B(x,y)=1$。假设 $x\in\overline{R}_B(X)$。由定义可得$[x]_{R_B}\cap X\neq\emptyset$，从而存在 $y\in X$ 使得 $y\in[x]_{R_B}$，故对于任意 $e\in B$ 有 $f(x,e)=f(y,e)$。于是 $GR_B(x,y)=1$，从而有$\overline{GR}_B(X)(x)=\bigvee\limits_{y\in X}GR_B(x,y)=1$。

(3)对于任意 $x\in U$，若$\overline{GR}_B(X)(x)=1$，则由$\overline{GR}_B(X)(x)=\bigvee\limits_{y\in X}GR_B(x,y)$可知，存在 $y\in X$ 使得 $GR_B(x,y)=1$，故有 $y\in[x]_{R_B}$，$[x]_{R_B}\cap X\neq\emptyset$，$x\in\overline{R}_B(X)$。

反之，若 $x\in\overline{R}_B(X)$，则$[x]_{R_B}\cap X\neq\emptyset$，从而存在 $y\in X$ 使得 $y\in[x]_{R_B}$，于是有 $GR_B(x,y)=1$，故有$\overline{GR}_B(X)(x)=\bigvee\limits_{y\in X}GR_B(x,y)=1$。

(4)假设 $x\in U$，且$\underline{GR}_B(X)(x)=0$。由$\underline{GR}_B(X)(x)=\bigwedge\limits_{y\in U-X}(1-GR_B(x,y))$可知存在 $y\in U-X$ 使得 $GR_B(x,y)=1$，从而 $y\in[x]_{R_B}$。再由 $y\notin X$ 可得$[x]_{R_B}\not\subset X$，$x\notin\underline{R}_B(X)$。

反之，假设 $x\notin\underline{R}_B(X)$。由定义可得$[x]_{R_B}\not\subset X$。于是存在 $y\in[x]_{R_B}$ 使得 $y\notin X$。故有 $GR_B(x,y)=1$，从而 $\underline{GR}_B(X)(x)=\bigwedge\limits_{y\in U-X}(1-GR_B(x,y))=0$。

设 $S=(U,A,V,f)$是信息系统，$B\subseteq A$。程度不可区分关系 GR_B 是论域 U 上的模糊关系，借助其水平集，可以讨论变精度程度粗糙近似算子。

设 $\mu\in F(U)$是 U 上的模糊集，$\alpha\in[0,1]$，μ 的 α 水平集 μ_α 定义为 $\mu_\alpha=\{x\in U;\mu(x)\geqslant\alpha\}$。

因此，$GR_{B_\alpha}=\{(x,y)\in U\times U;GR_B(x,y)\geqslant\alpha\}$。

例 3 考虑例 1 中的信息系统。取 $\alpha=0.3$，则有：$GR_{A_\alpha}=\{(x_1,x_1),(x_1,x_2),(x_2,x_1),(x_2,x_2),(x_2,x_3),(x_2,x_4),(x_3,x_2),(x_3,x_3),(x_3,x_4),(x_4,x_2),(x_4,x_3),(x_4,x_4)\}$。

注意到$(x_1,x_2)\in GR_{A_\alpha}$，$(x_2,x_3)\in GR_{A_\alpha}$，$(x_1,x_3)\notin GR_{A_\alpha}$，因此 GR_{A_α}不是等价关系。

对于任意 $x\in U$，x 关于 GR_{B_α}的右邻域为：

$GR_{B_\alpha}(x)=\{y\in U;(x,y)\in GR_{B_\alpha}\}$。

基于广义粗糙集模型，定义变精度程度粗糙上、下近似算子：

$\overline{GR}_{B_\alpha}(X)=\{x\in U;GR_{B_\alpha}(x)\cap X\neq\emptyset\}$

$\underline{GR}_{B_\alpha}(X)=\{x\in U;GR_{B_\alpha}(x)\subseteq X\}$

定理 5 设 $S=(U,A,V,f)$是信息系统，$B\subseteq A$，$\alpha,\beta\in[0,1]$，$X\subseteq U$。

(1)$GR_{B1}=R_B$；

(2)若 $\alpha\leqslant\beta$，则 $GR_{B\beta}\subseteq GR_{B_\alpha}$；

(3)若 $\alpha\leqslant\beta$，则

$\underline{GR}_{B_\alpha}(X)\subseteq\underline{GR}_{B\beta}(X)$，$\overline{GR}_{B\beta}(X)\subseteq\overline{GR}_{B_\alpha}(X)$。

证明：(1)与(2)显然成立。

对于(3)，对于任意 $x\in U$，由 $GR_{B\beta}\subseteq GR_{B_\alpha}$ 可得 $GR_{B\beta}(x)\subseteq GR_{B_\alpha}(x)$。故当 $x\in\underline{GR}_{B_\alpha}(X)$时有 $GR_{B_\alpha}(x)\subseteq X$，从而 $GR_{B\beta}(x)\subseteq X$，$x\in\underline{GR}_{B\beta}(X)$。故$\underline{GR}_{B_\alpha}(X)\subseteq\underline{GR}_{B\beta}(X)$。另一式子类似可证。

结束语 本文针对信息系统可能存在的噪声数据，提出了程度不可区分关系的概念，建立了基于程度不可区分关系的粗糙集模型，讨论了这种模型中粗糙近似算子与 Pawlak 粗糙近似算子的关系。基于程度不可区分关系可以进一步研究不完备信息处理以及相关模型中知识约简问题，进一步的工作我们将另文详述。

参考文献

[1] Pawlak Z. Rough set [J]. International Journal of Computer and Information Science, 1982, 11: 341-356

[2] Pawlak Z. Rough set: theoretical aspects of reasoning about data [M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1991

[3] Skowron A, Rauszer C. The discernibility matrices and functions in information systems[C]// Slowinski R, ed. Intelligent Decision Support-Handbook of Applications and Advances of the Rough Sets Theory. London: Kluwer Academic Publishers,

1992:331-362

[4] Marzena K. Comparative study of alternative types of knowledge reduction in inconsistent systems [J]. International Journal of Intelligent Systems, 2001, 16: 105-120

[5] 秦克云,赵华,裴峥. 基于广义不可区分关系的决策表约简[J]. 西华大学学报(自然科学版),2013,32(4):1-4

Qin Ke-yun, Zhao Hua, Pei Zheng. The reduction of decision table based on generalized indiscernibility relation[J]. Journal of Xihua University(Natural Science Edition), 2013, 32(4): 1-4

[6] Kryszkiewicz M. Rough set approach to incomplete information systems [J]. Information Sciences, 1998, 112: 39-49

[7] Kryszkiewicz M. Rules in incomplete information Systems[J]. Information Sciences, 1999, 113: 271-292

[8] 王国胤. Rough 集理论在不完备信息系统中的扩充[J]. 计算机研究与发展,2002,39(10):1238-1243

Wang Guo-yin. Extension of rough set under incomplete information systems[J]. Journal of Computer Research and Development, 2002, 39(10): 1238-1243

[9] Bonikowski Z, Bryniarski E, Wybraniec U. Extensions and intentions in the rough set theory [J]. Information Sciences, 1998, 107: 149-167

[10] Yao Y Y. Constructive and algebraic methods of theory of rough sets [J]. Information Sciences, 1998, 109: 21-47

[11] Dubois D, Prade H. Rough fuzzy set and fuzzy rough sets [J]. International Journal of General Systems, 1990, 17: 191-209

[12] Zhang X H, Zhou B, Li P. A general frame for intuitionistic fuzzy rough sets [J]. Information Sciences, 2012, 216: 34-49

[13] Ziarko W. Variable precision rough set model [J]. Journal of Computer and System Sciences, 1993, 46(1): 39-59

[14] 李德毅,杜鹢. 不确定性人工智能[M]. 国防工业出版社,2005

Li De-yi, Du Yi. Artificial intelligence with uncertainty [M]. National Defence Industry Press, 2005

[15] Yao Y Y, Zhao Y. Attribute reduction in decision theoretic rough set models [J]. Information Sciences, 2008, 178: 3356-3373

[16] Yao Y Y. Three way decisions with probabilistic rough sets[J]. Information Sciences, 2010, 180: 341-353

[17] Zadeh L A. Fuzzy sets[J]. Information and Control, 1965, 8: 338-353

(上接第 224 页)

[5] 刘越. 云计算综述与移动云计算的应用研究[J]. 信息通信技术,2010,4(2):14-20

Liu Yue. Reviews of Cloud Comptuing and Research on the Application of Mobile Cloud Computing[J]. Information and Communication Technology, 2010, 4(2): 14-20

[6] 侯建,帅仁俊,侯文. 基于云计算的海量数据存储模型[J]. 通信技术,2011,44(5):163-165

Hou Jian, Shuai Ren-jun, Hou Wen. Massive Data Storage Model based on Cloud Computing [J]. Communications Technology, 2011, 44(5): 163-165

[7] Zhu X, Wang B. Web Service Management Based on Hadoop [C]// 2011 8th International Conference on Service Systems and Service Management(ICSSSM). Tianjin, 2011: 1-6

[8] 任波. 基于语义的 Web 服务发现研究[D]. 杭州:浙江工业大学,2005

Ren Bo. Based on the Semantic Web Service Discovery Research [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2005

[9] Mukhopadhyay D, Chathly F J, Jadhav N N. QoS Based Framework for Effective Web Services in Cloud Computing[J]. Journal of Software Engineering and Applications, 2012(5): 952-960

[10] 祝希路. 基于 QoS 的可信 Web 服务关键技术研究[D]. 北京:北京邮电大学,2011

Zhu Xi-lu. Research on Key Issues of Trustworthy Web Service Based on QoS[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2011

[11] Srinivasan N, Paolucci M, Sycara K. Semantic Web Service Discovery in the OWL-S IDE[C]//Proceedings of the 39th Hawaii International Conference on System Sciences. 2006

[12] 王尚广,孙其博,张光卫,等. 基于云模型的不确定性 QoS 感知的 Skyline 服务选择[J]. 软件学报,2012,23(6):1397-1412

Wang Shang-guang, Sun Qi-bo, Zhang Guang-wei, et al. Uncertain QoS-Aware Skyline Service Based on Cloud Model[J]. Journal of Software, 2012, 23(6): 1397-1412

[13] 陈洪磊,刘东苏. 基于 QoS 本体的语义 Web 服务发现模型研究[C]//工程和商业管理国际会议. 2012:3167-3171

Chen Hong-lei, Liu Dong-su. The Semantic Web Service Discovery Model based on QoS Ontology Research[C]// International Conference on Engineering and Business Management. 2012: 3167-3171

[14] 方其庆,刘庆华,彭晓明,等. QoS 全局最优的多目标 Web 服务选择算法[J]. 计算机应用研究,2009,26(12):4442-4448

Fang Qi-qing, Liu Qing-hua, Peng Xiao-ming, et al. Global QoS Optimizing and Multi-Objective Web Service Selection Algorithm[J]. Application Research of Computers, 2009, 26(12): 4442-4448

[15] 康国胜,刘建勋,唐明董,等. QoS 全局最优动态 Web 服务选择算法[J]. 小型微型计算机系统,2013,34(1):73-76

Kang Guo-sheng, Liu Jian-xun, Tang Ming-dong, et al. Dynamic Web Services Selection Algorithm with Globally Optimal QoS [J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2013, 34(1): 73-76

[16] 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[J]. 计算机学报,2010,33(3):526-534

Hu Jian-qiang, Li Juan-zi, Liao Gui-ping. A Multi-QoS Based Local Optimal Model of Service Selection[J]. 2010, 33(3): 526-534

[17] Ardagna D, Pernici B. Global and Local QoS Guarantee in Web Service Selection [C] // Proc. Business Process Managment Workshop(BPM'05). 2005: 32-46

[18] Altifai M, Risse T. Combining global optimization with local selection for efficient QoS-aware service composition[C]// Proceeding of 18th International Conference on World Wide Web (WWW 2009). 2009: 881-890

[19] Chen H, Yu Tao, Lin K-J. QCWS: an implementation of QoS-capable multimedia web services[C]// IEEE Fifth International Symposium on Multimedia Software Engineering. 2003: 165-187