

基于相似关系粗糙集中的否定规则及约简

徐维艳¹, 魏 敏², 张 明³

(1 江苏科技大学 数理学院, 江苏 镇江 212003; 2 南京农业大学 理学院, 江苏 南京 210095;

3 江苏科技大学 计算机学院, 江苏 镇江 212003)

摘 要: 为了从不完备决策信息系统中获取否定决策规则, 首次提出了基于相似关系的不相似知识颗粒的概念, 研究了如何通过不相似知识粒获取否定决策规则的方法, 给出了知识约简的启发式算法, 并进行了实例分析, 为从不完备信息系统中获取知识提供了新的理论基础与操作手段。

关键词: 相似关系; 知识获取; 决策规则; 约简

中图分类号: TP18

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2012)11-0053-05

Negative Rules and Reduction in Rough Sets Based on Similarity Relation

XU Wei-yan¹, WEI Min², ZHANG Ming³

(1 School of Mathematics and Physics, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China;

2 College of Science, Nanjing Agriculture University, Nanjing 210095, China;

3 School of Computer Science and Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

Abstract: To derive the negative rules from the incomplete decision information system, the concept of dissimilarity knowledge granule based on similarity relation is firstly proposed. Moreover, the approach to acquire the certain and uncertain negative rules is presented, and heuristic algorithm of the attribute reduction based on the significant attributes is introduced. Finally, an illustrative example is analyzed. These results are meaningful both in the theory and applications for rules' acquisition in incomplete decision systems.

Key words: similarity relation; knowledge acquisition; decision rules

1 引言

Pawlak^[1]提出的经典粗糙集模型只能处理完备无缺的信息, 而由于技术或人为的误差等诸多原因, 要处理的实际信息大多是不完备的、不完全有缺失的, 如何从不完备信息系统数据中获取有价值、有决策能力的知识或规则是粗糙集研究的热点问题^[2-6]. 肯定决策规则的获取和约简, 已有很多研究成果, 然而, 决策分析或专家决策研究通常还需要某种形式的否定决策规则——若待考察对象的条件属性值不满足某些条件, 即可判断其不属于某个确定类别, 或将其从某个决策类中剔除. Tsumoto^[7]最早

研究此类决策规则, 并将其成功应用于医疗诊断专家系统. 在实际应用中, 为了使从小规模的样本数据集中得到的决策规则具有一定的泛化能力, 通常还需对决策规则进行约简, Yao^[8]定义了概率粗糙集模型, 研究了肯定、弃权 and 否定决策规则的获取问题, 遗憾的是没有研究其约简. 而 Yang^[5]提出差异关系粗糙集模型, 文献^[6]提出基于否定支持集粗糙集描述子模型, 在不完备信息系统下, 研究了否定决策规则获取的问题, 给出基于分辨矩阵的属性约简算法, 但该方法不利于计算机的自动实现. 为此, 本文在不完备决策信息系统中首先定义了基于相似关系的不相似知识颗粒, 由此构造下、上近似集合来研

究否定决策规则的获取方法. 为了获得简化的否定决策规则, 进一步给出了基于属性重要度的启发式分布约简的算法. 最后, 实例分析所得结果也表明该方法的可行性和实用性.

2 基本概念

2.1 不完备决策信息系统

定义 1^[6] 决策信息系统 (Decision Information System, DIS) 也称为决策表, 通常可定义为一个四元组: $DIS = \langle U, C \cup D, V, f \rangle$, 其中 U 是一个非空有限对象的集合, 又被称为论域; C 是非空有限条件属性集, D 是非空有限决策属性集, 且 $C \cap D = \emptyset$; V 表示全体属性的值域的集合, 即 $V = V_C \cup V_D$. 对任意 $a \in (C \cup D)$, V_a 表示属性 a 的值域; f 是一个信息函数, 对任意 $x \in U, a \in (C \cup D)$, 定义 $f(x, a)$ 表示对象 x 在属性 a 上的取值, 则有 $f(x, a) \in V_a$.

当决策信息系统 $DIS = \langle U, C \cup D, V, f \rangle$ 中的决策属性集合 $D = \{d\}$ 时, 称 $\langle U, C \cup \{d\}, V, f \rangle$ 为单决策信息系统, 否则称为多属性决策信息系统. 由于任何多属性决策信息系统都可以转化为单决策信息系统, 为简化讨论, 本文的决策信息系统都是单决策信息系统.

不完备决策信息系统 (Incomplete Decision Information System, IDIS) 是指信息系统中出现了未知属性值. 本文假定未知属性值仅出现在条件属性值中, 用“*”表示, 即 $f(x, a) = * (x \in U, a \in (C \cup D))$. 由于在实际问题中数据多是不完备的, 为便于应用, 下文以不完备决策信息系统为研究对象, 讨论其否定决策规则获取的问题.

2.2 决策规则

在粗糙集用于决策规则获取的理论中, 隐藏在不完备决策信息系统 $IDIS = \langle U, C \cup \{d\}, V, f \rangle$ 中的知识将以决策规则的形式被提取出来, 通过考察训练样本或待考察对象 $x (x \in U)$, 可得到如下决策规则:

$$r_x: des([x]_C) \rightarrow des([x]_d) \quad (1)$$

其中, $des([x]_C)$ 称为该决策规则的前件 (条件部分), 表示对象 x 在条件属性集 C 下的描述, 即 $des([x]_C) = \bigwedge_{c \in C} (c, v_c)$, 且 $v_c \neq *$; $des([x]_d)$ 称为该决策规则的后件 (决策部分), 表示对象 x 在决策属性 d 下的描述, 即 $des([x]_d) = \bigvee_{i \in V_d} (d, i)$, 此处的 $i \in V_d$, i 是类别标签. 这为决策者做出肯定判决和分类提供了依据, 故称之为肯定决策规则. 文献

[3-5] 研究此类决策规则并给出确定性度量因子 $Cer(r_x)$ 来衡量规则的可信性程度:

$$Cer(r_x) = \frac{card(\| [x]_C \| \cap \| [x]_d \|)}{card(\| [x]_C \|)} \quad (2)$$

其中, $card(X)$ 表示集合 X 的基数, $\| [x]_C \|$ 表示 x 在条件属性集 C 上描述相同元素构成的集合, 记为 $\| [x]_C \| = \{y \in U: f(y, c) = f(x, c), \forall c \in C\}$, $\| [x]_d \|$ 表示 x 在决策属性 d 上描述相同元素的集合, 记为 $\| [x]_d \| = \{y \in U: f(y, d) = f(x, d)\}$.

令 $Cer(r_x) = \alpha$, 当 $\alpha = 1$ 时, 肯定规则 $r_x: des([x]_C) \rightarrow des([x]_d)$ 的决策能力是确定的, 称为确定性的肯定决策规则; 当 $0 < \alpha < 1$ 时, 肯定规则 $r_x: des([x]_C) \rightarrow des([x]_d)$ 的决策能力是不确定的, 此时称之为不确定性肯定决策规则, 其可信性的程度由 $\alpha \times 100\%$ 来度量.

在决策支持系统中除了上述的肯定决策规则之外, 还常有与之对应的否定决策规则. 否定规则可以帮助决策者做出某种形式的否定判决, 即当待考察的对象条件属性值不满足某些特定的情况, 则其决策属性值就不可能获得某些特定的取值, 或将其从某个决策类中剔除. 亦即:

$$(f(x, c_1) \neq v_{c_1}) \wedge (f(x, c_2) \neq v_{c_2}) \wedge \cdots \wedge (f(x, c_m) \neq v_{c_m}) \rightarrow f(x, d) \neq i \quad (3)$$

相对于上述肯定决策规则的一般形式 (1), 可以给出否定决策规则的一般形式:

$$r_x: des(\neg [x]_C) \rightarrow des(\neg [x]_d) \quad (4)$$

其中, $des(\neg [x]_C)$ 称为否定决策规则的前件, 表示 x 在条件属性集 C 下的描述: $des(\neg [x]_C) = \bigwedge_{c \in C} \neg (c, v_c)$, 且 $v_c \neq *$; $des(\neg [x]_d)$ 称为否定决策规则的后件, 表示 x 在决策属性 d 下的描述: $des(\neg [x]_d) = \bigvee_{i \in V_d} \neg (d, i)$, 此处的 $i \in V_d$, i 是类别标签. 此类规则的可信性程度也可以通过否定决策规则的确定性因子 $NCer(r_x)$ 来度量:

$$NCer(r_x) = \frac{card(\| \neg [x]_C \| \cap \| \neg [x]_d \|)}{card(\| \neg [x]_C \|)} \quad (5)$$

其中, $\| \neg [x]_C \| = \{y \in U: f(y, c) \neq f(x, c), \forall c \in C\}$, 表示 x 在条件属性集 C 上描述不相同 (相似) 元素的集合; $\| \neg [x]_d \| = \{y \in U: f(y, d) \neq f(x, d)\}$ 表示 x 在决策属性 d 上描述不相同元素的集合.

设 $NCer(r_x) = \alpha$, 当 $\alpha = 1$ 时, 规则 $r_x: des(\neg [x]_C) \rightarrow des(\neg [x]_d)$ 是确定的否定决策规则; 当 $0 < \alpha < 1$ 时, 规则 $r_x: des(\neg [x]_C) \rightarrow des(\neg [x]_d)$ 是不

确定的否定决策规则,其可信性的程度由 $\alpha \times 100\%$ 来度量.

3 否定决策规则获取

定义 2^[2] 设 $IDIS = \langle U, C \cup \{d\}, V, f \rangle$, $\forall A \subseteq C$, 由 A 决定的相似关系记为 $SIM(A)$ 且

$$SIM(A) = \{(x, y) \in U^2 : f(x, a) = f(y, a) \vee f(x, a) = *, \forall a \in A\} \quad (6)$$

显然二元关系 $SIM(A)$ 满足自反性和传递性, 但并不一定满足对称性, 是论域 U 上的相似关系. 文献[3]定义了 x 与之相似的集合 $SIM_A(x) = \{y \in U : (x, y) \in SIM(A)\}$, 由 $SIM_A(x)$ 作为基本知识粒(相似知识粒)构造的下、上近似集合能够得到肯定决策规则, 但是不能获取形如式(4)的否定决策规则. 因此, 下文通过定义一个 x 与之不相似的知识颗粒, 来研究否定决策规则获取的问题.

定义 3 设 $IDIS = \langle U, C \cup \{d\}, V, f \rangle$, $\forall A \subseteq C$, 对任意 $x \in U$, 定义 x 与之不相似的集合为 $DIM_A(x)$, 且

$$DIM_A(x) = \{y \in U : (x, y) \notin SIM(\{a\}), \forall a \in A \text{ 且 } f(x, a) \neq *\} \quad (7)$$

$DIM_A(x)$ 表示 x 与之不相似对象的全体构成的集合. 由 $DIM_A(x)$ 为基本知识粒, 即不相似知识粒, 可以构造出新的下、上近似集合.

定义 4 设 $IDIS = \langle U, C \cup \{d\}, V, f \rangle$, $\forall X \subseteq U$, $A \subseteq C$, 以不相似知识粒 $DIM_A(x)$ 作为基本知识粒, 定义 X 关于属性 A 的下、上近似分别记为:

$$\underline{A}_{DIM}(X) = \{x \in U : DIM_A(x) \subseteq X \wedge DIM_A(x) \neq \emptyset\} \quad (8)$$

$$\bar{A}_{DIM}(X) = \{x \in U : DIM_A(x) \cap X \neq \emptyset\} \quad (9)$$

序偶 $(\underline{A}_{DIM}(X), \bar{A}_{DIM}(X))$ 称为 X 关于属性 A 的基于不相似知识粒的粗糙集. 通过下、上近似, 可以得到其正域、边界域分别记为:

$$POS_{DIM}(X) = \underline{A}_{DIM}(X) \quad (10)$$

$$BND_{DIM}(X) = \bar{A}_{DIM}(X) - \underline{A}_{DIM}(X) \quad (11)$$

定理 1 设 $IDIS = \langle U, C \cup \{d\}, V, f \rangle$, 论域 U 上由决策属性 d 导出的覆盖记为 $U/\neg d = \{\neg D_1, \neg D_2, \dots, \neg D_i\}$, 其中 $V_d = \{1, 2, \dots, i\}$, $\neg D_i = \{x \in U : f(x, d) \neq i\}$ 又被称为决策类, i 被称为类别标签. 则对任意 $x \in U$ 对应否定决策规则 $r_{x, des}(\neg[x]_C) \rightarrow des(\neg[x]_d)$, 有下式成立:

(1) 若 $x \in POS_{DIM}(\neg D_i)$, 则 $r_{x, des}(\neg[x]_C) \rightarrow des(\neg[x]_d)$ 是一条确定性否定决策规则;

(2) 若 $x \in BND_{DIM}(\neg D_i)$, 则 $r_{x, des}(\neg[x]_C)$

$\rightarrow des(\neg[x]_d)$ 是一条不确定性否定决策规则.

证明: (1) 由 $x \in POS_{DIM}(\neg D_i)$ 可知, 有 $DIM_A(x) \neq \emptyset$, $DIM_A(x) \subseteq \neg D_i$ 成立. 由 $DIM_A(x)$ 的定义可知, 任何与 x 在条件属性集 C 上描述均不相同的元素, 其决策属性值都不取 i , $i \in V_d$, 所以有 $NC-er(r_x) = 1$ 成立. 因此 r_x 是一条确定性否定决策规则.

(2) 证明与(1)类似.

4 知识约简

知识约简(又称属性约简或特征选择)是粗糙集理论研究的核心问题^[3-6]. 约简即在保持决策信息的决策能力不变的前提下, 通过剔除冗余属性, 从而得到简化的决策规则. 本文给出了一种基于属性重要度的启发式分布约简的算法.

定义 5 设 $IDIS = \langle U, C \cup \{d\}, V, f \rangle$, $V_d = \{1, 2, \dots, i, \dots, r\}$, $A \subseteq C$. 由决策属性 d 导出的覆盖 $U/\neg d = \{\neg D_1, \neg D_2, \dots, \neg D_i, \dots, \neg D_r\}$, 其中 $\neg D_i = \{x \in U : f(x, d) \neq i\}$. 定义

$$L_{DIM}(A) = \{\underline{A}_{DIM}(\neg D_1), \underline{A}_{DIM}(\neg D_2), \dots, \underline{A}_{DIM}(\neg D_r)\} \quad (12)$$

$$L_{DIM}(A) = \{\bar{A}_{DIM}(\neg D_1), \bar{A}_{DIM}(\neg D_2), \dots, \bar{A}_{DIM}(\neg D_r)\} \quad (13)$$

(1) 若 $L_{DIM}(A) = L_{DIM}(C)$, 则称 A 是 C 的一个下近似分布一致协调集; 若 A 是 C 的一个下近似分布一致协调集, 且 $\forall B \subset A$, B 都不是 C 的下近似分布一致协调集, 则称 A 是 C 的下近似分布约简.

(2) 若 $U_{DIM}(A) = U_{DIM}(C)$, 则称 A 是 C 的一个上近似分布一致协调集, 若 A 是 C 的一个上近似分布一致协调集, 且 $\forall B \subset A$, B 都不是 C 的上近似分布一致协调集, 则称 A 是 C 的上近似分布约简.

(3) 若 $L_{DIM}(A) = L_{DIM}(C)$ 且 $U_{DIM}(A) = U_{DIM}(C)$, 则称 A 是 C 的分布一致协调集, 若 A 是 C 的分布一致协调集, 且 $\forall B \subset A$, B 都不是 C 的分布协调集, 则称 A 是 C 的分布约简.

注: (1) 条件属性集合 C 的下近似(上近似)分布约简, 就是满足所有否定决策类 $\neg D_i$ 的下近似(上近似)不变的最小条件属性子集; 条件属性集合 C 的分布约简就是满足所有否定决策类 $\neg D_i$ 的下近似和上近似都不变的最小条件属性子集.

(2) 由定理 1 易知, 若条件属性集合 C 的下近似(上近似)分布约简为 A , 且 $des(\neg[x]_C) \rightarrow des(\neg[x]_d)$ 是一条确定性否定决策规则, 则 $des(\neg[x]_A) \rightarrow des(\neg[x]_d)$ 也是一条确定性否定决策规则; 若条

件属性集合 C 的分布约简为 A , 且 $des(\neg[x]_C) \rightarrow des(\neg[x]_d)$ 是一条不确定性否定决策规则, 则 $des(\neg[x]_A) \rightarrow des(\neg[x]_d)$ 也是一条不确定性否定决策规则。

由定义 5 可知, 求不相似知识的分布约简的关键是求出决策类的所有下、上近似分布约简. 下文给出一种基于属性重要度的启发式分布约简的算法。

设 $DIS = \langle U, C \cup \{d\}, V, f \rangle$, $U/\neg d = \{\neg D_1, \neg D_2, \dots, \neg D_i, \dots, \neg D_r\}$ 是由决策属性 d 导出的覆盖, 则否定决策类 $\neg D_i$ 对条件属性集 C 中的某个条件属性 a 的下近似和上近似依赖度分别定义为:

$$S_a(C, D) =$$

$$\frac{\sum_{i=1}^r (|\underline{C}_{DIM}(\neg D_i) - \underline{(C - \{a\})}_{DIM}(\neg D_i)|)}{|U|}$$

$$S^a(C, D) =$$

$$\frac{\sum_{i=1}^r (|\overline{C}_{DIM}(\neg D_i) - \overline{(C - \{a\})}_{DIM}(\neg D_i)|)}{|U|}$$

由定义可知 $S_a(C, D)$ 、 $S^a(C, D)$ 均大于或等于零。

当 $S_a(C, D) = 0$ (或 $S^a(C, D) = 0$) 时, 表示约去属性 a 后, 否定决策类 $\neg D_i$ 下近似 (或上近似) 分布不发生变化; 当 $S_a(C, D) > 0$ (或 $S^a(C, D) > 0$) 时, 表示约去属性 a 后, 否定决策类 $\neg D_i$ 下近似 (或上近似) 分布将发生变化, 亦说明 a 是不可约简的。

已知 $IDIS = \langle U, C \cup \{d\}, V, f \rangle$, 属性集 $C = \{a_1, a_2, \dots, a_i\}$, $U/\neg d = \{\neg D_1, \neg D_2, \dots, \neg D_i, \dots, \neg D_r\}$ 是由决策属性 d 导出的覆盖, 则条件属性集 C 的下近似分布约简的步骤如下:

Step1: 令 C 的下近似分布约简 $R = \emptyset$;

Step2: 判断 $L_{DIM}(R) = L_{DIM}(C)$ 是否成立. 若成立则转 Setp4, 否则转 Setp3;

Step3: 对任意 $a_i \in (C - R)$, 取 $S_a(C, D)$ 获得最小值时的 a_i , 更新 R , 使 $R = R \cup \{a_i\}$, 转 Setp2;

Step4: 输出 R , R 即为 C 的下近似分布约简。

算法说明: 将 Step2 中的判断条件改为 $U_{DIM}(R) = U_{DIM}(C)$, Step3 的启发信息改为 $S^a(DIM, D)$ 即可求得 C 的上近似分布约简。

算法的时间复杂度分析: Step2 中计算 $L_{DIM}(R)$ 与 $L_{DIM}(C)$ 是否相等的时间复杂度是 $O(|C| \|U\|^2)$, Step3 的时间复杂度是 $O(|C| \log_2 |C|)$, 因此该算法的时间复杂度是 $O(|C| \|U\|^2)$ 。

实例分析: 求如表 1 所示的不完备决策信息系统中的确定性否定决策规则, 其中论域 $U = \{x_1,$

$x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7\}$, 条件属性集 $C = \{a, b, c\}$, d 为单决策属性, $V_a = V_b = V_c = V_d = \{1, 2, 3\}$ 。

表 1 不完备决策信息系统^[8]

U	a	b	c	d
x_1	2	1	1	1
x_2	3	2	*	3
x_3	2	*	2	2
x_4	*	2	2	2
x_5	3	2	1	2
x_6	3	2	3	3
x_7	*	1	1	1

根据定义 3 可知:

$$DIM_C(x_1) = \{x_2, x_4, x_6\};$$

$$DIM_C(x_2) = \{x_1, x_3, x_7\};$$

$$DIM_C(x_3) = \{x_2, x_5, x_6, x_7\};$$

$$DIM_C(x_4) = \{x_1, x_7\};$$

$$DIM_C(x_5) = \{x_3\};$$

$$DIM_C(x_6) = \{x_1, x_3, x_7\};$$

$$DIM_C(x_7) = \{x_2, x_3, x_4, x_6\}.$$

根据单决策属性 d 可得 $U/\neg d = \{\neg D_1, \neg D_2, \neg D_3\} = \{\{x_2, x_3, x_4, x_5, x_6\}, \{x_1, x_2, x_6, x_7\}, \{x_1, x_3, x_4, x_5, x_7\}\}$ 。

由定义 4 可知:

$$POS_{DIM}(\neg D_1) = \{x_1, x_5, x_7\};$$

$$POS_{DIM}(\neg D_2) = \{x_4\};$$

$$POS_{DIM}(\neg D_3) = \{x_2, x_4, x_5, x_6\}.$$

$$BND_{DIM}(\neg D_1) = \{x_2, x_3, x_6\};$$

$$BND_{DIM}(\neg D_2) = \{x_1, x_2, x_3, x_6, x_7\};$$

$$BND_{DIM}(\neg D_3) = \{x_1, x_3, x_7\}.$$

根据下近似分布约简的启发式算法, 通过编程实现可得 $\{b, c\}$ 是条件属性集合 C 的一个约简, 由定理 1 可得以下的确定性否定决策规则:

$$r_{x1/x7}: f(x, b) \neq 1 \wedge f(x, c) \neq 1 \rightarrow f(x, d) \neq 1$$

$$// x_1, x_7 \in POS_{DIM}(\neg D_1);$$

$$r_{x2}: f(x, b) \neq 2 \rightarrow f(x, d) \neq 3 // x_2 \in POS_{DIM}(\neg D_3);$$

$$r_{x4}: f(x, b) \neq 2 \wedge f(x, c) \neq 2 \rightarrow f(x, d) \neq 2 \vee f(x, d) \neq 3$$

$$// x_4 \in POS_{DIM}(\neg D_2), x_4 \in POS_{DIM}(\neg D_3);$$

$$r_{x5}: f(x, b) \neq 2 \wedge f(x, c) \neq 1 \rightarrow f(x, d) \neq 1 \vee f(x, d) \neq 3$$

$$// x_5 \in POS_{DIM}(\neg D_1), x_5 \in POS_{DIM}(\neg D_3);$$

$$r_{x6}: f(x, b) \neq 2 \wedge f(x, c) \neq 3 \rightarrow f(x, d) \neq 3$$

$$// x_6 \in POS_{DIM}(\neg D_3).$$

5 结束语

本文定义了基于相似关系的不相似知识颗粒,导出了基于不相似知识粒的否定决策类的下、上近似集,通过否定决策类的正域可以获得确定性否定决策规则,通过否定决策类的边界域可以获得不确定性否定决策规则,最后研究了基于属性重要度的启发式分布约简的算法,获得简化的否定决策规则,这就为否定决策规则的实用化打下基础.为此,笔者下一步将进行否定决策规则在人工智能的规则搜索、模式分类和决策分析中的实际应用工作研究.

参考文献:

- [1] Pawlak Z. Rough sets[J]. International Journal of Computer and Information Sciences, 1982, 11(5): 341-356.
- [2] Stefanowski, Tsoukias. Incomplete information tables and rough classification[J]. Computational Intelligence, 2001(17): 545-566.
- [3] 陈功平, 秦乐阳. 粗糙运算的产生式关联规则获取方法[J]. 微电子学与计算机, 2011, 28(5): 113-117.
- [4] Qian Y H, Liang J Y. Positive approximation and rule extracting in incomplete information systems[J]. International Journal of Computer Science and Knowl-

edge Engineering, 2008, 2(1): 51-63.

- [5] Yang X B, Yu D J, Yang J Y, et al. Difference relation based rough set and negative rules in incomplete information system[J]. International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems, 2009, 17(5): 649-665.
- [6] 张明, 唐振民, 杨习贝. 不完备信息系统中的否定决策规则和知识约简[J]. 控制与决策, 2011, 26(6): 851-856.
- [7] Tsumoto S. Automated discovery of positive and negative knowledge in clinical databases[J]. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 2000, 19(4): 56-62.
- [8] Yao Y Y. Three-way decisions with probabilistic rough sets[J]. Information Sciences, 2010, 180(3): 341-353.

作者简介:

徐维艳 女, (1978—), 硕士, 讲师. 研究方向为模糊分析、粗糙集及其应用.

魏敏 女, (1980—), 硕士, 讲师. 研究方向为模糊集、粗糙集.

张明 男, (1978—), 博士生, 讲师. 研究方向为粗糙集理论及应用、粒计算.

(上接第 52 页)

参考文献:

- [1] Akyildiz I F, Su W Sankarasubramaniam Y, Cayirci E. A survey on sensor networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(8): 102-114.
- [2] Cheng Z, Perillo M, Heinzelman W B. General network lifetime and cost models for evaluating sensor network deployment strategies[J]. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2008, 7(4): 484-497.
- [3] Xiaobing Wu, Guihai Chen, Sajal K Das. Avoiding energy holes in wireless sensor networks with nonuniform node distribution[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed System, 2008, 19(5): 710-720.
- [4] Geyang Li, Yang Cao, Xun Gao, et al. Energy balancerouting protocol for wireless sensor networks based on fuzzy next-hop selection[J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 2009, 14(2): 101-104.
- [5] Qiu R, Zhao H. Energy balance hierarchical data aggregation mechanism for wireless sensor network[C]

// Proceedings of the 2009 International Conference on Information Engineering; 2009.

- [6] 张曦煌, 夏佳, 沈玉方, 等. 一种蚁群竞争 WSN 能量均衡路由算法[J]. 计算机应用, 2007, 27(8): 1825-1827, 1830.
- [7] 王青正, 闵林, 郭拯危, 等. 基于蚁群优化的无线传感器网络能耗均衡路由算法[J]. 计算机应用研究, 2009, 26(12): 4716-4718.
- [8] Ko Rensong, Lai Chihchung. Density-based routing mechanism for sensor networks[C] // Proceedings of the 10th IEEE Symposium on Computers and Communication. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2005: 341-346.

作者简介:

苏兵 男, (1972—), 博士, 副教授. 研究方向为计算机软件工程、无线传感器网络、计算机网络及网络安全.

黄娟 女, (1987—), 硕士生. 研究方向为无线传感器网络.