

不完备决策表中基于容差关系的属性约简方法

黄治国, 王 淼

(河南工程学院 计算机学院, 河南 郑州 451191)

摘 要: 针对不完备决策表提出一种基于容差关系的属性约简方法. 以粗糙集容差关系为基础, 定义相容块构造范式求取决策表的全体极大相容块, 将其转化为最全描述得到极大相容块最全描述系统, 为不完备决策表提供了一种有效的信息表达转换方式. 进而以该转换系统为基础定义属性分辨矩阵, 为不完备决策表求取全体属性约简给出了一种解决方案. 理论证明与实例分析说明了该方法的可行性与有效性.

关键词: 不完备决策表; 容差关系; 极大相容块; 属性约简

中图分类号: TP301.6

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2016)06-0147-05

Attribute Reduction Based on Tolerance Relation in Incomplete Decision Table

HUANG Zhi-guo, WANG Miao

(Department of Computer Science, Henan Institute of Engineering, Zhengzhou 451191, China)

Abstract: Attribute reduction based on tolerance relation is proposed for incomplete decision table. Tolerance relation is used to define normal form for constructing consistent block, and the most complete description system of maximal consistent block is obtained by translating all maximal consistent blocks to their most complete description, which provides an efficient way for transforming information description. Furthermore, this description system is used to define discernibility matrix, which gives a solution for searching attribution reduction in incomplete decision table. The theoretical derivation and simulation instance shows that this method is feasible and effective in practice.

Key words: incomplete decision table; tolerance relation; maximal consistent block; attribute reduction

1 引言

粗糙集^[1]是一种处理不精确、不确定和不完备数据的有效分析理论与方法, 现已广泛应用于知识发现与决策支持等众多领域^[2]. 现实应用中由于数据的测量误差、获取限制等原因, 通常会导致信息系统的不完备. 目前对不完备系统信息的处理方法包括删除法、数据补齐法^[3]和模型扩充法^[4]等. 删除法直接删除含缺失信息的所有对象, 形成完备信息系统再加以处理. 数据补齐法运用概率与统计方法补齐缺失数据, 将原不完备系统转换为完备系统再行处理. 扩充模型法考虑对经典模型加以拓展, 使之适

应于不完备系统数据处理. 删除法损失了系统中大量有用信息, 数据补齐法改变了系统原有信息, 均不能很好地适应不完备决策系统数据处理, 因此扩充模型法成为现今处理不完备信息的主流方法.

文献[5]首次建立了不完备决策表中的容差关系扩充模型, 并基于容差关系提出了不完备决策表的极大相容块概念. 极大相容块是不完备决策表的最小知识粒单元, 对于不完备决策系统知识约简与决策分析具有重要研究意义^[6-7]. 文献[8]基于极大相容块概念, 以条件属性对决策属性的支持程度作为启发式信息选择属性, 针对不完备决策表提出了一种决策树生成算法. 文献[9]基于极大相容块概念

收稿日期: 2015-08-26; **修回日期:** 2015-10-11

基金项目: 河南省科技攻关计划项目(142102210562); 河南工程学院博士基金资助项目(D2013003); 郑州市科技攻关计划项目(141PPTGG374); 国家质量监督检验检疫总局科技计划项目(2013QK222)

进一步研究了不完备决策系统的知识约简方法. 然而, 这些工作多是从理论上对不完备系统数据处理模型加以拓展, 鲜有考虑获取基本知识粒的有效算法, 因此如何设计有效的基本知识粒获取方法, 以及在此基础上设计快捷高效的知识约简方法, 仍然是当前不完备决策系统数据分析与处理面临的重要问题.

基于此, 本文以粗糙集容差关系为基础, 定义相容块构造范式求取决策表的全体极大相容块, 进而将其转化为最全描述得到极大相容块最全描述系统, 并以该转换系统为基础定义属性分辨矩阵, 为不完备系统求取全体属性约简给出了一种有效解决方案. 理论分析与仿真实例说明了该方法的可行性与有效性.

2 不完备决策表中的容差关系

给定决策表 $DT = \langle U, A = C \cup D, V, f \rangle$, 其中, $U = \{x_1, \dots, x_n\}$ 为非空有限论域; $A = C \cup D$ 为非空有限属性集, C 和 D 分别为条件属性和决策属性; $V = \bigcup_{a \in A} V_a$, V_a 为属性 a 的值域; $f: U \times A \rightarrow V$ 为映射函数使得 $f(x_i, a) \in V_a (x_i \in U, a \in A)$. 若存在某对象 $x \in U$ 的属性 $a (a \in A)$ 上取值缺失(通常缺失值用“*”表示), 则称该决策表为不完备决策表.

定义 1^[5] 给定不完备决策表 $IDT = \langle U, A = C \cup D, V, f \rangle$, 属性集 $R (R \subseteq A)$ 上的容差关系定义为 $TOR(R) = \{ \langle u, v \rangle \in U \times U : \forall a \in R \rightarrow f(u, a) = f(v, a) \vee f(u, a) = * \vee f(v, a) = * \}$.

容差关系 $TOR(R)$ 是论域 U 上的一个二元关系, 由定义 1 可知容差关系 $TOR(R)$ 满足自反性、对称性, 但不满足传递性.

定义 2^[5] 给定不完备决策表 $IDT = \langle U, A = C \cup D, V, f \rangle$, $\forall x \in U$ 关于属性集 $R (R \subseteq A)$ 的容差类定义为 $T_R(x) = \{y \in U : \langle x, y \rangle \in TOR(R)\}$.

定义 3^[5] 给定对象子集 $X \subseteq U$, X 关于容差关系 $TOR(R)$ 的下、上近似集分别定义为

$$R_T(X) = \{x \in U : T_R(x) \subseteq X\},$$

$$\bar{R}^T(X) = \{x \in U : T_R(x) \cap X \neq \emptyset\}.$$

定义 4^[6] 给定不完备决策表 $IDT = \langle U, A = C \cup D, V, f \rangle$, $R \subseteq A$, $X \subseteq U$, 若对 $\forall x, y \in X$ 均有 $\langle x, y \rangle \in TOR(R)$ 成立, 则称 X 为属性集 R 上的相容块; 若不存在 $X' \subset X$ 是 R 上的相容块, 则

称 X 为 R 上的极大相容块.

令 $\mathcal{D}(R)$ 表示属性集 R 上全体极大相容块构成的集合, $\mathcal{D}_x(R)$ 表示属性集 R 上包含对象 x 的所有极大相容块构成的集合.

性质 1^[6] 给定不完备决策表 $IDT = \langle U, A = C \cup D, V, f \rangle$, $R \subseteq A$, $X \subseteq U$, X 为属性集 R 上的极大相容块当且仅当 $X = \bigcap_{x \in X} T_R(x)$.

性质 1 表明, 极大相容块是块中各元素容差类的交集, 它是块中各元素容差类的公共部分.

性质 2^[6] 给定不完备决策表 $IDT = \langle U, A = C \cup D, V, f \rangle$, $R \subseteq A$, $X \subseteq U$, 若 X 为属性集 R 上的极大相容块, 则必存在对象 $x \in X$ 关于属性集 R 的容差类 $T_R(x)$, 使得 $X \subseteq T_R(x)$.

性质 2 表明, 对任意元素 x 均存在包含它的极大相容块. 因此, 论域关于属性集 R 所有极大相容块必构成论域的一个覆盖, 即 $U = \bigcup \{X : X \in \mathcal{D}(R)\}$.

3 不完备决策表中基于容差关系的属性约简方法

容差关系模型的建立基于这样一个假设, 即不完备决策表中每一对象均具有潜在的完备信息, 未知值“*”是任意可能的取值, “*”被认为与任意可能取值均匹配. 这一假设会导致两个具有不同属性取值的对象属于同一容差类, 因此需要进一步细分容差类形成不完备决策表的基本知识粒单元——极大相容块.

定义 5 给定不完备决策表 $IDT = \langle U, A = C \cup D, V, f \rangle$, $\forall x \in U$ 的相容块构造范式定义为 $CNF(x) = \bigwedge \{(u \vee v) : u, v \in T_C(x) \wedge (u \notin T_C(v) \vee v \notin T_C(u))\}$.

定义 5 中 $(u \vee v)$ 为 u 与 v 的简单析取式, 其内在涵义为“若要使 x 的容差类 $T_C(x)$ 成为相容块, 则必须删除 u 或删除 v , 其中 u 与 v 均属于容差类 $T_C(x)$ 且满足“ $u \notin T_C(v)$ 或 $v \notin T_C(u)$ ”. $CNF(x)$ 为满足条件“ $u, v \in T_R(x) \wedge (u \notin T_R(v) \vee v \notin T_R(u))$ ”的全体 $(u \vee v)$ 构成的合取范式, 其内在涵义为“对 $T_C(x)$ 中满足条件的全体 $(u \vee v)$ 进行同样的删除操作后, 便得到包含于 $T_C(x)$ 中的相容块”.

定理 1 对 $\forall x \in U$ 且 $\{(u \vee v) : u, v \in T_C(x) \wedge (u \notin T_C(v) \vee v \notin T_C(u))\} \neq \emptyset$, 若 $CNF'(x) = (\bigwedge X_1) \vee \dots \vee (\bigwedge X_k)$ 为与 $CNF(x)$ 等价的极小析取范式, 则与对象 x 相关的全体极大相容块 $\mathcal{D}_x(C) = \{T_C(x) - X_1, \dots, T_C(x) - X_k\}$. 其中 $X_i \subseteq T_R(x) \wedge X_i \neq \emptyset (1 \leq i \leq k)$, $\bigwedge X_i$ 是由 X_i 中所

有元素构成的简单合取式。

证明:由定义 5 涵义可知,相容块构造范式 $CNF(x)$ 对应寻找包含于容差类 $T_C(x)$ 中相容块的策略,若 $CNF'(x) = (\wedge X_1) \vee \cdots \vee (\wedge X_k)$ 为与 $CNF(x)$ 等价的极小析取范式,则表明 $X_i (1 \leq i \leq h)$ 是进行删除操作的一个极小对象子集,即仅需删除容差类 $T_C(x)$ 中子集 X_i 便可使 $T_C(x) - X_i$ 成为相容块,因此 $T_C(x) - X_i$ 便为包含于容差类 $T_C(x)$ 中的极大相容块,那么包含于容差类 $T_C(x)$ 中的全体极大相容块便为 $\vartheta_x(C) = \{T_C(x) - X_1, \dots, T_C(x) - X_k\}$ 。

对不完备决策表中对象 $\forall x \in U$,若 $\{(u \vee v): u, v \in T_C(x) \wedge (u \notin T_C(v) \vee v \notin T_C(u))\}$ 为空,即不存在满足条件“ $u, v \in T_R(x) \wedge (u \notin T_R(v) \vee v \notin T_R(u))$ ”的简单析取式“ $(u \vee v)$ ”,则表明 $T_C(x)$ 中任意两对象均互为相容,无需删除 $T_C(x)$ 中任一对象, $T_C(x)$ 即为与对象 x 相关的唯一极大相容块。

定理 1 为求取 $\forall x \in U$ 关于属性集 $R (R \subseteq A)$ 容差类 $T_R(x)$ 的所有极大相容块提供了理论依据,即将其相容块构造范式 $CNF(x)$ 运用命题逻辑吸收律与分配律等值变换后得到其极小析取范式 $CNF'(x) = (\wedge X_1) \vee \cdots \vee (\wedge X_k)$,则与对象 x 相关的极大相容块集 $\vartheta_x(R) = \{T_R(x) - X_1, \dots, T_R(x) - X_k\}$ 。进一步可结合简化决策表粒化思想,针对每一信息粒求取其关于条件属性集的极大相容块,以提高算法生成极大相容块的效率。针对不完备决策表结合粒化思想求取所有极大相容块的过程详见算法 1。

算法 1:不完备决策表中极大相容块生成算法。

输入:不完备决策表 $IDT = \langle U, A = C \cup D, V, f \rangle$

输出:论域 U 关于 C 的全体极大相容块 MCB

步骤 1 $MCB = \emptyset$;

步骤 2 将缺失值“*”看作值域中一取值,针对 IDT 生成其简化表 $\text{sim}(IDT) = \langle U/C, C, V, f \rangle$;

步骤 3 对 $\forall u \in \text{sim}(IDT)$ 计算 $T_C(u)$;

步骤 4 对 $\forall u \in \text{sim}(IDT)$ 生成其相容块构造范式 $CNF(u)$;

FOR $i = 1$ to $|\text{sim}(IDT)|$

$u = \text{sim}(IDT)[i]$;

$CNF(u) = \emptyset$;

FOR $j = 1$ to $|T_C(u)|$

FOR $k = j + 1$ to $|T_C(u)|$

IF $(T_C(u)[j] \notin T_C(T_C(u)[k]) \text{ or } T_C(u)[k] \notin T_C(T_C(u)[j]))$

$CNF(u) = CNF(u) \cup \{(T_C(u)[j]$

$\vee (T_C(u)[k])\}$;

ENDFOR

ENDFOR

ENDFOR

步骤 5 针对 $\forall u \in \text{sim}(IDT)$ 计算与其相关的全体极大相容块。

FOR $i = 1$ to $|\text{sim}(IDT)|$

$u = \text{sim}(IDT)[i]$;

$\vartheta_u(C) = \emptyset$;

IF $(CNF(u) = \emptyset)$

$\vartheta_u(C) = T_C(u)$;

ELSE

转换 $CNF(u)$ 为等价的极小析取范式 $CNF'(x) = (\wedge X_1) \vee \cdots \vee (\wedge X_k)$;

$\vartheta_u(C) = \{T_C(u) - X_1, \dots, T_C(u) - X_k\}$;

ENDIF

$MCB = MCB \cup \vartheta_u(C)$;

NDFOR

算法 1:步骤 1 时间复杂度为 $O(1)$;步骤 2 求取 $U/C (U/C$ 为论域 U 关于属性集 C 导致的划分) 时间复杂度为 $O(|C| |U|^2)$;步骤 3 时间复杂度为 $O(|U/C|^2)$;步骤 4 的时间复杂度最坏情况下不超过 $O(|U/C|^3)$;步骤 5 的时间复杂度为 $O(|U/C|)$ 。通常情况下 $|U| \gg |U/C|$,因此算法 1 的整体时间复杂度为 $O(|C| |U|^2)$ 。

针对不完备决策表 $IDT = \langle U, A = C \cup D, V, f \rangle$ 运行算法 1 后,即可得到系统的全体极大相容块,可进一步生成极大相容块最全描述决策系统获取属性约简。针对不完备决策表求取属性约简的过程详见算法 2。

算法 2:不完备决策表的属性约简算法。

输入:原不完备决策表中论域 U 关于 C 的全体极大相容块 MCB

输出:不完备决策表的全体属性约简集 RED

步骤 1 极大相容块最全描述系统置空,即 $\text{DES}(MCB) = \emptyset$;约简集置空,即 $\text{RED} = \emptyset$;

步骤 2 对每一极大相容块生成其最全描述,即针对每一“*”取值属性判断该块中是否存在其他对象在该属性有取值,若存在则以该取值替代,否则仍取值为“*”;

FOR $i = 1$ to $|MCB|$

$X = MCB[i]$;

$u = X[1]$;

```
FOR  $\forall a \in C$ 
  IF  $(f(u,a)) \neq *$  continue;
  FOR  $k = 2$  to  $|X|$ 
    IF  $(f(X[k],a)) \neq *$  { $f(u,a) = f(X[k],$ 
 $a)$ ;break;}
  ENDFOR
ENDFOR
DES(MCB) = DES(MCB)  $\cup \{u\}$ ;
ENDFOR
步骤 3 对极大相容块最全描述系统生成分辨矩
阵  $\mathbf{M}$ (其矩阵元素为  $M[i][j]$ );
FOR  $i = 1$  to  $|\text{DES(MCB)}|$ 
   $u = \text{sim}(\text{IDT})[i]$ ;
   $\text{CNF}(u) = \emptyset$ ;
  FOR  $j = 2$  to  $|\text{DES(MCB)}|$ 
     $M[i][j] = \emptyset$ ;
    FOR  $\forall a \in C$ 
      IF  $(f(\text{DES(MCB)}[i],a)) \neq$ 
 $f(\text{DES(MCB)}[j],a))M[i][j] = M[i][j] \cup \{a\}$ ;
    ENDFOR
  ENDFOR
ENDFOR
```

步骤 4: 生成分辨范式 $\text{DNF}(\mathbf{M}) = \bigwedge \{ \bigvee (M[i][j]): M[i][j] \neq \emptyset \}$;

步骤 5: 转换 $\text{DNF}(\mathbf{M})$ 为等价的极小析取范式 $\text{DNF}'(\mathbf{M}) = (\bigwedge R_1) \vee \cdots \vee (\bigwedge R_k)$;

步骤 6: 收集约简集 $\text{RED} = \{R_1, \cdots, R_k\}$.

令 $U' = |\text{MCB}|$, 算法 2 步骤 1 的时间复杂度为 $O(1)$; 步骤 2 的时间复杂度在最坏情况下不超过 $O(|C| |U'|^2)$; 步骤 3 的时间复杂度为 $O(|C| |U'|^2)$;

表 2 $\forall u \in \text{sim}(\text{IDT})$ 的 $T_C(u)$ 、 $\text{CNF}(u)$ 、 $\text{CNF}'(u)$ 及与之相关的极大相容块

$\forall u \in \text{sim}(\text{IDT})$	$T_C(u)$	$\text{CNF}(u)$	$\text{CNF}'(u)$	与 u 相关的极大相容块
a_0	a_0, a_4, a_8	$a_4 \vee a_8$	$a_4 \vee a_8$	$\{a_0, a_8\}, \{a_0, a_4\}$
a_1	a_1, a_2, a_3, a_{10}	$(a_2 \vee a_{10}) \wedge (a_3 \vee a_{10})$	$(a_2 \wedge a_3) \vee a_{10}$	$\{a_1, a_{10}\}, \{a_1, a_2, a_3\}$
a_2	a_1, a_2, a_3	$\emptyset$	$\emptyset$	$\{a_1, a_2, a_3\}$
a_3	a_1, a_2, a_3	$\emptyset$	$\emptyset$	$\{a_1, a_2, a_3\}$
a_4	a_0, a_4	$\emptyset$	$\emptyset$	$\{a_0, a_4\}$
a_5	a_5, a_6	$\emptyset$	$\emptyset$	$\{a_5, a_6\}$
a_6	a_5, a_6	$\emptyset$	$\emptyset$	$\{a_5, a_6\}$
a_7	a_7	$\emptyset$	$\emptyset$	$\{a_7\}$
a_8	a_0, a_8, a_9	$(a_0 \vee a_9)$	$(a_0) \vee (a_9)$	$\{a_8, a_9\}, \{a_0, a_8\}$
a_9	a_8, a_9, a_{10}	$(a_8 \vee a_{10})$	$(a_8) \vee (a_{10})$	$\{a_9, a_{10}\}, \{a_8, a_9\}$
a_{10}	a_1, a_9, a_{10}	$(a_1 \vee a_9)$	$(a_1) \vee (a_9)$	$\{a_9, a_{10}\}, \{a_1, a_{10}\}$
a_{11}	a_{11}	$\emptyset$	$\emptyset$	$\{a_{11}\}$

步骤 4 的时间复杂度为 $O(|U'|^2)$; 步骤 5 的时间复杂度为 $O(1)$; 步骤 6 的时间复杂度为 $O(1)$. 因此算法 2 的整体时间复杂度为 $O(|C| |U'|^2)$.

4 算法实例分析

本文以文献[10] 中不完备决策表为例, 分析说明该表在容差关系下的约简求取过程, 并与文献[10] 中方法比较说明本文方法的优越性. 不完备决策表实例见表 1.

表 1 不完备决策表 $\text{IDT} = \langle U, A = C \cup D, V, f \rangle$

U	c_0	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	d
a_0	*	0	0	*	*	0	2	0	1
a_1	*	2	*	*	1	*	0	1	0
a_2	*	2	*	1	*	2	0	1	1
a_3	*	2	*	1	1	2	0	1	1
a_4	1	*	*	*	1	0	*	0	0
a_5	2	3	2	0	*	1	3	1	0
a_6	2	3	2	0	1	*	3	1	1
a_7	2	3	2	1	3	1	*	1	1
a_8	3	*	*	3	1	0	2	*	0
a_9	3	2	1	*	*	0	2	3	0
a_{10}	3	2	1	1	1	0	*	*	0
a_{11}	3	2	1	3	1	1	2	1	1

由于表 1 中每一对象均为一条件等价类, 即 $U/C = U$, 故其简化表与原表相同即 $\text{sim}(\text{IDT}) = \text{IDT}$. 按算法步骤 3、4 求得 $\forall u \in \text{sim}(\text{IDT})$ 的容差类 $T_C(u)$ 、相容块构造范式 $\text{CNF}(u)$ 及与之相关的极大相容块见表 2.

按算法 1 收集论域 U 关于 C 的全体极大相容块见表 3.

表 3 论域 U 关于 C 的全体极大相容块 MCB		
$\forall X_i \in \text{MCB}$	块中对象数目	块内对象
X1	2	$a0,a8$
X2	2	$a0,a4$
X3	3	$a1,a2,a3$
X4	2	$a1,a10$
X5	2	$a5,a6$
X6	1	$a7$
X7	2	$a8,a9$
X8	2	$a9,a10$
X9	1	$a11$

按算法 2 步骤 2 得到极大相容块最全描述系统见表 4.

表 4 极大相容块最全描述系统 DES(MCB)									
DES(MCB)	块内对象	$c0$	$c1$	$c2$	$c3$	$c4$	$c5$	$c6$	$c7$
DES(X1)	$a0,a8$	3	0	0	3	1	0	2	0
DES(X2)	$a0,a4$	1	0	0	*	1	0	2	0
DES(X3)	$a1,a2,a3$	*	2	*	1	1	2	0	1
DES(X4)	$a1,a10$	3	2	1	1	1	0	0	1
DES(X5)	$a5,a6$	2	3	2	0	1	1	3	1
DES(X6)	$a7$	2	3	2	1	3	1	*	1
DES(X7)	$a8,a9$	3	2	1	3	1	0	2	3
DES(X8)	$a9,a10$	3	2	1	1	1	0	2	3
DES(X9)	$a11$	3	2	1	3	1	1	2	1

按算法 2 步骤 3 对极大相容块最全描述系统生成分辨矩阵 M 见表 5. 表 5 单元格中均以数字代替对应的属性名,如“13567”表示实际的分辨属性集为“ $\{c1,c3,c5,c6,c7\}$ ”.

表 5 DES(MCB) 的分辨矩阵									
	DES(X1)	DES(X2)	DES(X3)	DES(X4)	DES(X5)	DES(X6)	DES(X7)	DES(X8)	DES(X9)
DES(X1)									
DES(X2)	0								
DES(X3)	13567	1567							
DES(X4)	12367	01267	5						
DES(X5)	0123567	012567	1356	012356					
DES(X6)	0123457	012457	145	01245	34				
DES(X7)	127	0127	3567	367	0123567	0123457			
DES(X8)	1237	0127	567	67	0123567	012457	3		
DES(X9)	1257	01257	356	356	01236	01234	57	357	

由表 5 运用吸收律可生成分辨范式 $\text{DNF}(M) = (c0) \wedge (c1 \wedge c2 \wedge c7) \wedge (c5) \wedge (c6 \wedge c7) \wedge (c3)$, 将其转换为与之等价的极小析取范式 $\text{DNF}'(M) = (c0 \wedge c3 \wedge c5 \wedge c7) \vee (c0 \wedge c1 \wedge c3 \wedge c5 \wedge c6) \vee (c0 \wedge c2 \wedge c3 \wedge c5 \wedge c6)$, 因此不完备决策表的属性约简集为 $\{\{c0,c3,c5,c7\}, \{c0,c1,c3,c5,c6\}, \{c0,c2,c3,c5,c6\}\}$.

文献[10] 计算得到约简为 $\{c0,c2,c3,c4,c5,c7\}$, 本文方法所得约简 $\{c0,c3,c5,c7\}$ 为其属性真子集. 原因在于文献[10] 是以容差类为不完备决策表基本信息粒单元, 以保持相对正域不变为约简准则获取属性约简, 而本文是以极大相容块为基本信息粒单元, 以不引起极大相容块的合并为约简准则寻找属性约简. 此外, 应用本文方法无需多次计算分类质量, 且可一次得到系统的全体属性约简集合.

5 结束语

本文以粗糙集容差关系为基础, 定义对象容差类关于属性集的极大相容块构造范式, 为不完备系统生成基本信息粒提供了一条有效途径. 进而将相容块转化为最全描述得到极大相容块最全描述系统, 并以该转换系统为基础定义属性分辨矩阵, 为不完备系统求取全体属性约简给出了一种有效解决方案. 理论分析与仿真实例说明该方法可行、有效.

参考文献:

[1] Pawlak Z. Rough sets[J]. International Journal of Information and Computer Science, 1982, 11 (5): 314-356.

跨业务的统一安全身份认证. 提议的方案中远程用户和服务器在认证服务器注册后, 用户即可独立申请服务器提供服务, 服务申请过程中不需要认证服务器参与. 理论分析证明, 提议的认证方案有较高的安全性, 可以抵抗各类攻击, 通信复杂度更低.

参考文献:

- [1] 王崇霞, 高美真, 刘倩, 等. 异构云匿名身份认证方案设计[J]. 微电子学与计算机, 2014, 31(7): 37-40.
- [2] 张晓敏. 基于二次剩余的多服务器环境下的身份认证协议[J]. 计算机安全, 2012(8): 15-20.
- [3] 万涛, 廖维川, 马建峰. 面向多服务器架构的认证协议分析与改进[J]. 西安电子科技大学学报, 2013, 40(6): 174-180.
- [4] C H Huang, J S Chou, Y Chen. Improved multi-server authentication protocol[J]. International journal of Security and Communication Networks, 2012, 5(3): 331 - 341.
- [5] X Li, Y Xiong, J Ma, et al. An efficient and security dynamic identity based authentication protocol for multi-server architecture using smart cards[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2012, 35(2): 763 - 769.
- [6] J S, Chou Y I, Chen, C H Huang, et al. Comments on four multi-server authentication protocols using smart card[EB/OL]. [2016-04-20]. <http://eprint.iacr.org/2012/406.pdf>.

- [7] J H Lee, D H Lee. Efficient and secure remote authenticated key agreement scheme for multi-server using mobile equipment[C]// Proceedings of International Conference on Consumer Electronics, Las Vegas, NV: IEEE, 2008: 1-2.
- [8] Y M Tseng, T Y Wu, J D Wu. A pairing-based user authentication scheme for wireless clients with smart card[J]. Informatics, 2008, 19(2): 285-302.
- [9] K H Yeh, N W Lo. A novel remote user authentication scheme for multi-server environment without using smart cards [J]. International Journal of Innovative Computing Information and Control, 2010, 6(8): 3467-3478.
- [10] 舒剑. 高效的基于口令多服务器认证方案[J]. 计算机应用研究, 2015, 33(8): 2444-2446.
- [11] 张华, 温巧燕, 金正平. 可证明安全算法与协议[M]. 北京: 科学出版社, 2012.

作者简介:

王崇霞(1970-), 女, 副教授. 研究方向为密码学与网络安全. E-mail: cxwang2000@sina.com.

高美真(1970-), 女, 副教授. 研究方向为计算机网络与图像处理.

刘倩(1987-), 博士研究生. 研究方向为智能网络及网络安全.

胡晓曦(1988-), 博士研究生. 研究方向为云计算、空间网络等.

(上接第 151 页)

- [2] Pawlak Z. Rudiments of rough sets[J]. Information Sciences, 2007, 177(1): 3-27.
- [3] 陈志奎, 吕爱玲, 张清辰. 基于属性重要性的不完备数据填充算法[J]. 微电子学与计算机, 2013, 30(7): 167-172.
- [4] 王超, 罗可. 不完备信息系统中基于限制容差关系的属性约简方法[J]. 计算机应用, 2011, 31(12): 3236-3239.
- [5] Kryszkiewicz M. Rough set approach to incomplete information system. Information Sciences[J]. 1998, 112(1-4): 39-49.
- [6] Leung Y, Li D. Maximal consistent block technique for rule acquisition in incomplete information systems [J]. Information Sciences, 2003, 153(1): 85-106.
- [7] Leung Y, Wu W, Zhang W. Knowledge acquisition in

incomplete information systems: A rough set approach [J]. European Journal of Operational Research, 2006, 168(1): 164-180.

- [8] 关晓蔷, 钱宇华. 基于不完备信息系统的决策树生成算法[J]. 计算机科学, 2012, 39(1): 156-158.
- [9] Qian Y, Liang J, Li D, et al. Approximation reduction in inconsistent incomplete decision tables [J]. Knowledge-Based Systems, 2010, 23(5): 427-433.
- [10] 鄂旭, 邵良杉, 周津, 等. 一种新的不完备信息系统属性约简算法[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2010, 22(5): 648-651.

作者简介:

黄治国 男, (1978-), 博士, 讲师. 研究方向为数据挖掘、智能计. E-mail: huangzg2020@139.com.