

基于 G 逻辑的最简规则提取算法

何 群

(南京工业大学 电子与信息工程学院,江苏 南京 210009)

摘 要: 指出求粗集的最简规则是一个二维极简化的粒(G)逻辑问题.将行分辨和列组合具有最大强度的属性值定义为粒极值,对其逐级进行粒运算,得最简粒解集.从理论上统一了求解粗集的算法并用实例以证明.

关键词: 粒极值;粒计算;不可分辨关系;决策规则

中图分类号: TPI81

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2010)10-0091-05

An Algorithm of Minimizing Rules Extraction Based on Granular Logic

HE Qun

(College of Information Science and Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

Abstract: Pointing out that method for solving the rough sets is a minimization problem of two-dimensional for on Granular-logic. The attribute value that the dfiniting on row and compositing on column intensity is maxima was defined as extreme value of granular, logic operation of granular comput with it stage by stage, finally minimization granular sets is got. Unifies the algorithm solving for the rough sets on theory and the experiments show that it is efficienal.

Key words: extreme valued of granular; granular computing; indefinite relation; decision rules

1 引言

当前基于粗糙集理论^[1]对求解决策表所提出的主要算法存在 3 类问题^[2].结合粗糙集和粒计算^[3]两种理论^[4-5],以属性值为基本单位提出粒极值的概念和以此为基础的标准统一算法:以粗集中不可分辨关系^[1]分别算出每个属性值的行向分辨强度值和列向的组合强度值.将具有行分辨强度极大且列组合强度极大的属性值定义为粒极值,应用粒计算^[3],分别用粒极值的分辨、组合强度值对本行中各属性值进行一次分辨强度覆盖、组合强度同取,在该行余集中继续上述新粒极值的确定及覆盖、同取的过程,直至该行余集中所有属性值的行分辨能力值为 0.所获得的全部粒极值即为一个最简规则.

算法的特点是全息定义各属性值强度、择优确定粒极值、动态逐级粒(极值)运算、直接提取规则

(粒极值集)和规则最简.最后用 4 个有代表性的实例给予证明.

2 算法理论和实现

从决策表 $S^{[2]}$ 的总体结构分析可知,要由 An 分辨出 D 的最简式,是一个从行、列方向求二维极值点的问题:对于决策表 S 的一行 $(a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in}) = d_i$,从行方向而言,在可分辨出 d_i 的前提下行属性值 $\{a_{is} | s \subseteq n\} = d_i$ 的个数越少则涉及的属性越少,对该行的规则越简;从列方向而言, $\{a_{is} | s \subseteq n\} = d_i$ 所包括的行数越多则每次约简的行数就越多,对 $D = d_i$ 的规则越简.显然如何求 $\{a_{is}\}$ 是关键.

定义 1(属性值行分辨强度) 设决策表 $S = (U, An \cup D)$, 对 $U = \{\forall i, \forall j\}, d_i \neq d_j$. 根据不可分辨关系的定义^[5],由式(1):

$$\begin{aligned} & \text{for}(\forall i \in U | D = d_i); \\ & \text{for}(\forall j \in U | D = d_j(d_j \neq d_i)); \end{aligned}$$

$$S_{ij} = \sum (a_{ik} \odot a_{jk}) \quad (k = 1, 2, \dots, n);$$

$$RD(\{a_{ik}\}) = \sum (a_{ik} \oplus a_{jk}) \cdot (S_{ij}) \quad (k = 1, 2, \dots, n); \}$$

称 $RD(\{a_{ik}\})$ 为属性值 $a_{ik} (k = 1, 2, \dots, n)$ 的行分辨强度.

其中:

$$a \oplus b = 1 (a \neq b), a \oplus b = 0 (a = b);$$

$$a \odot b = 1 (a = b), a \odot b = 0 (a \neq b).$$

“.”是域界符号,用于区分元素所在级别的域,域内元素为 $\{0, 1\}$ 的无权码;

$\sum$ 是无权码相加符号,按域界对齐且将目标域元素加入对应源域.

$RD(\{a_{ik}\})$ 反映了 i 行中的每个属性值对 d_i 的行分辨强度,根据文献[2]中的定理 1 和推理 1, $RD(a_{ip})$ 值越大则 a_{ip} 对 d_i 的分辨能力越强.对 RD 可进行强度覆盖和域值转换及比较等运算.

设 $RD(a_{ip}) = (01.010.011), RD(a_{iq}) = (01.110.111)$.

强度覆盖(∞): $RD(a_{ip}) \infty RD(a_{iq}) \rightarrow RD(a_{iq}) = 01.010.010$;

域值转换(∞_{10}): $\infty_{10}RD(a_{ip}) = 112, \infty_{10}RD(a_{iq}) = 123$;

比较($< > = \dots$): 如 $RD(a_{iq}) > RD(a_{ip})$.

定义 2(属性值列组合强度) 设决策表 $S = (U, An \cup D)$, 对 $U = \{\forall i, \forall j\}, d_i \neq d_j$. 由式(2):

$$\text{for}(\forall i \in U \mid D = d_i \in U); \}$$

$$\text{for}(\forall j \in U \mid D = d_j (d_j = d_i)); \}$$

$$S_{ij} = \sum (a_{ik} \odot a_{jk}) \quad (k = 1, 2, \dots, n);$$

$$CD(\{a_{ik}\}) = \sum (a_{ik} \odot a_{jk}) \cdot (S_{ij}) \quad (k = 1, 2, \dots, n); \}$$

称 $CD(\{a_{ik}\})$ 为属性值 $a_{ik} (k = 1, 2, \dots, n)$ 的列组合强度.

$CD(\{a_{ik}\})$ 反映了 i 行中的每个属性值对 d_i 的列向组合强度, $CD(a_{ip})$ 值越大则 a_{ip} 对 d_i 的列向组合能力越强.与 $RD(\{a_{ik}\})$ 应用类似, CD 可进行组合同取和域值转换及比较等运算.

设 $CD(a_{ip}) = (01.010.010), CD(a_{iq}) = (01.110.111)$;

组合同取($\cap$): $CD(a_{ip}) \cap CD(a_{iq}) \rightarrow CD(a_{iq}) = (01.010.010)$.

由以上分析可知, RD 是决定规则涉及属性个数,而 CD 则是决定该规则可约简的行数,由两者可

确定出每个属性值 a_{ij} 的重要程度.

定义 3(粒极值) 设由式(1)和式(2)分别求出的 $RD(\{a_{ik}\}), CD(\{a_{ik}\}) \mid (i = 1, 2, \dots, m), (k = 1, 2, \dots, n)$. 以行为单位,由式(3):

$$\text{for}(\forall i \in U); \}$$

$$\{a_{ip}\} = \max C(RD\{a_{ik}\}) \quad (k = 1, 2, \dots, n)$$

$$\{a_{iq}\} = \max C(CD\{a_{ip}\}) \quad (p \subseteq k)$$

$$a_{ij} = \max 1(RD\{a_{iq}\}) \cap \max 1(CD\{a_{iq}\}) \quad (j \subseteq q)$$

$$\text{if}(a_{ij} \neq \Phi) \quad g(A_j, a_{ij});$$

$$a_{ib} = \max(RD\{a_{iq}\}) \cap \max(CD\{a_{iq}\}) \quad (b \subseteq q)$$

$$\text{if}(a_{ib} \neq \Phi) \quad g(A_b, a_{ib}) \}$$

称 a_{ij} 为粒极值,记为 $g(A_j, a_{ij})$,简写 g_{ij} ;称 a_{ib} 为准粒极值,记为 $g(A_b, a_{ib})$,简写 g_{ib} .其中: $\max C()$ 是取含有最高级域值的属性值集; $\max 1()$ 是取只具有唯一最大值的属性值.

只有在 i 行中仅当 a_{ib} 同时具有 $RD(a_{ib})$ 和 $CD(a_{ib})$ 最大时,它是 g_{ib} ;而仅当 a_{ij} 同时具有 $RD(a_{ib})$ 和 $CD(a_{ib})$ 最大且唯一时,它才是 g_{ij} . g_{ij} 将当前粗集进行了准确的确定:具有 g_{ij} 的列 A_j 是必选属性;其行 ($U = i$) 必定产生一条以 a_{ij} 为首选属性值的规则. g_{ib} 是当 A_b 被其他粒极值确定为必选属性后,转为粒极值.

根据基本粒的定义^[3], g_{ij} 和 g_{ib} 是基本粒的子集.基于粒运算原理,算法基本思路是:用 RD 和 CD 确定 g_{ij} ,以 g_{ij} 的 $RD(a_{ij})$ 和 $CD(a_{ij})$ 对 i 行各 $a_{ik} (k = 1, 2, \dots, n)$ 的 RD 和 CD 分别进行一次强度覆盖和组合同取,获得一个粒值 a_{ij} ,重复上述过程直到 i 行的 RD_i 都等于 0,所得的全部粒值即为一个规则.每提取一个规则($r_p = d_p$)后要删除 r_p 所约简的行集且对 $D = d_p$ 的行集重新计算 CD ,以确定新的 $\{g_{ij}\}$.算法如下:

输入:原始样表 $\{U, An, D\}$;

输出:规则表 $\{U, Anr, Dr\}$.

$RD_p(\{U, An, D\}, RD)$; // 式(1)

$\text{for}(\{U, An, D\}); \}$

$CD_p(\{U, An, D\}, CD)$; // 式(2)

$\text{for}(\{i\}); \}$

$RCD_g(RD, CD, \{g_{ij}\})$; // 式(3)

$\{a_{nm}\} = \max C(RD\{g_{ij}\})$; // 得 RD 最大级的 $\{a_{nm}\}$ 集

$a_{pq} = \min(CD\{a_{nm}\})$; // 从 $\{a_{nm}\}$ 中得 CD 最小的 a_{pq}

$r_p \cap = a_{pq}$; // 得规则的一个粒(属性)值

$RD_p = RD(a_{pq})_p \infty RD_p$; // 对 p 行的 RD 覆盖

$CD_p = CD_p \cap CD(a_{pq})$ p ; // 对 p 行的 CD 同取
 if($RD_p = \Phi$) break; // 判结束
 $\{U, Anr, Dr\} += \{p, r_p, d_p\}$; // 获一个规则
 $U -= u \mid \{r_p\}$; // 删除 r_p 所约简的行集

3 实例分析

3.1 无核属性的决策表分析

文献[6]中的表3是一个无核属性的决策表,见表1(左).按式(1)和式(2)求得的各属性值的分辨、组合强度表,见表1(右).按式(3)求得首轮粒极值,在表1(右)中用□和_分别示粒极值和准粒极值.

表1 属性值与首轮粒极值对应表

U	C1	C2	C3	C4	C5	D	C1	C2	C3	C4	C5
1	1	1	4	2	1	1	3.3	3.3	1.0	0.3	2.3
							0	0	0	0	0
2	3	2	4	3	2	2	0.0.B	0.0.D	1.0.6	1.0.F	0.0.F
							0.0	1.0	1.0	0.0	0.0
3	2	2	4	2	3	2	0.1.3	0.3.2	1.0.3	0.2.3	1.3.1
							0.0	1.0	1.0	1.0	0.0
4	2	3	4	1	4	3	0.7	1.F	0.C	1.B	1.F
							0	0	0	0	0
5	3	4	2	1	3	3	0.1	1.3	1.3	0.3	1.2
							0	0	0	0	0
6	2	2	3	2	1	4	0.1.2	0.1.1	1.1.3	0.0.3	1.0.3
							0.0	1.0	1.0	0.0	0.0
7	3	2	3	1	2	4	0.1.2	0.1.1	1.1.3	0.0.3	1.0.3
							0.0	1.0	1.0	0.0	0.0

(1) 根据表1(右)中的强度值,因为 $RD(c_{63}) = 1.1.3$ 最大,所以首选 $U = 6$ 、粒极值 $g(C3, c_{63} = 3)$,在表1(右)中,用 $RD(c_{63})$ 对 RD_6 进行强度覆盖后 $RD_6 = 0$.得结果粒(规则):

$$r_1 = ((C3, 3) \rightarrow (D, 4))_{\{6, 7\}};$$

r_1 约简了 $U = 6, 7$ 两行,在表1(左)中($U = 6$)用□表示.

(2) 由表1(右)中的强度值,再选 $U = 2$ 、粒极值 $g(C3, c_{23} = 4)$,用 $RD(c_{23})$ 对 RD_2 进行强度覆盖后,在 RD_2 中, $RD(c_{22}) = 0.0.9$ 且最大;用 $CD(c_{23})$ 对 CD_2 进行同取后,在 CD_2 中,只有 $CD(c_{22}) = 1.0$,所以 $g(C2, c_{22} = 2)$ 是新的粒极值.再用 $RD(c_{22})$ 对 RD_2 进行强度覆盖后 $RD_2 = 0$.得结果粒(规则):

$$r_2 = ((C3, 4) \wedge (C2, 2) \rightarrow (D, 2))_{\{2, 3\}}.$$

(3) 因为在(2)中确定了 $C2$ 是必选属性,所以准粒极值 $g(C2, c_{12} = 1)$ 转为粒极值.选 $U = 1$ 的

$g(C2, c_{12} = 1)$,在表2中,用 $RD(c_{12})$ 对 RD_1 进行强度覆盖后 $RD_1 = 0$.得结果粒(规则):

$$r_3 = ((C1, 1) \rightarrow (D, 1))_{\{1\}};$$

类似可得

$$r_4 = ((C3, 2) \rightarrow (D, 3))_{\{5\}};$$

$$r_5 = ((C2, 3) \rightarrow (D, 3))_{\{4\}}.$$

全部规则如在表1(左)中□所示,共涉及 $\{C2, C3\}$ 两个属性直接得到表1的5条最简规则(共6个属性值),这个结论比文献[6]所得的最佳约简 $\{C1, C2, C4\}$ 更精准.

3.2 部分核属性的决策表分析

文献[1]中表1的决策表如表2(左).按算法首次求得的各属性值的行、列强度及粒极值(□)、准粒极值(—),见表2(右).

按定义3,全部准粒极值都转为粒极值.经计算得结果粒,见表2(左)中□所示.按表中顺序列出规则如下:

$$r_1 = ((b, 2) \wedge (a, 2) \rightarrow (D, 1))_{\{1, 2, 7\}};$$

$$r_2 = ((c, 3) \wedge (a, 1) \rightarrow (D, 1))_{\{3, 4, 5\}};$$

$$r_3 = ((c, 1) \wedge (b, 3) \rightarrow (D, 1))_{\{6\}}; \dots$$

涉及4个属性(21个属性值)直接得到表的11条最简规则,这个结论相对于文献[1]所得的规则更加精准.

3.3 全核属性决策表分析

逻辑化简是粗糙集约简的一个特例.每个逻辑变量(属性)都核是属性,即不可约简.而逻辑值(属性值)一般是可约简的.下面对一个典型的逻辑函数进行约简.设逻辑函数

$$f(abcd) = \sum m(0, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, A, D, E, F)$$

首次求得的各属性值的行、列综合强度表,见表3(左),RD最高级为3.以粒极值进行覆盖、同取,直到当 m 的RD所有最高级为0后,这时 $m(3, 4, 9, E)$ 有两种选择,而 $m(0, 2, 5, 7, 8, A, D, F)$ 只有一种选择且等价,所以可选 m_0 ,提得结果粒(规则):

$$r_1 = ((b, 0) \wedge (d, 0) \rightarrow (f, 1))_{\{0, 2, 8, A\}};$$

对余下行集重计CD,见表3(右).以粒极值进行最高级覆盖、同取后,全部 m 都只有一个选择,但是 $m(3, 4, 9, E)$ 所欲选属性值的 $CD(= 1.0.0)$ 小于 $m(5, 7, D, F)$ 的 $CD(= 5.2.0)$,所以对 $m(3, 4, 9, E)$ 经4次选取,得规则:

$$r_2 = ((a, 0) \wedge (c, 1) \wedge (d, 1) \rightarrow (f, 1))_{\{3, 7\}};$$

$$r_3 = ((b, 0) \wedge (d, 0) \wedge (d, 0) \rightarrow (f,$$

1))_{|4,5|};

表 2 属性值与首轮粒极值对应表

U	a	b	c	d	e	D	a	b	c	d	e
1	2	2	4	1	3	1	2.2F 3.0.0	3.5F 3.0.2	3.7D 2.0.0	1.77 1.0.1	0.7A 0.0.0
2	2	2	4	2	2	1	1.17 3.0.0	3.2F 3.1.0	2.3F 1.0.0	0.39 0.1.5	3.3D 1.0.2
3	1	2	3	2	4	1	B.3F 1.4.0	7.3F 0.3.1	E.0F 1.6.0	8.3D 1.1.2	5.32 0.0.0
4	1	1	3	2	1	1	0.7.F 3.0.0	1.5.D 2.0.0	1.2.7 3.0.2	0.4.E 1.1.1	0.3.B 0.1.0
5	1	1	3	1	2	1	1.77 1.1.0	1.5B 1.0.0	0.3D 3.1.0	0.6F 2.0.2	1.7E 2.0.1
6	4	3	1	2	1	1	1.38.1D 0.0	0.17.02 0.0	1.2B.1F 0.0	0.2C.1F 1.3	0.17.1F 1.0
7	2	2	3	1	2	1	2.27 6.0.0	3.1F 6.1.0	0.3D 1.1.1	1.3B 5.0.0	3.3E 3.0.0
8	3	3	3	1	3	2	1E.F 1.1.8	1E.E 1.3.5	9.9 0.2.0	11.F 2.0.0	7.7 0.0.2
9	2	3	3	3	1	2	E.33 08.0	5.3F 1F.0	A.1C 01.0	7.2F 10.2	9.3F 06.0
10	3	2	2	3	4	2	2.1.F 1.0.1.2	3.0.8 0.0.0.0	0.1.F 1.0.3.4	0.1.F 1.0.0.1	1.0.7 1.0.2.0
11	3	3	2	3	4	2	0.1.0.7 1.1.2.0	0.1.0.6 0.3.7.0	0.0.0.7 1.3.4.0	0.0.0.7 1.0.1.0	1.0.0.1 1.2.0.0
12	2	3	2	4	4	2	3.66 0.2.2	2.7D 1.E.1	0.7F 1.D.0	3.3F 0.0.0	1.5B 1.1.0
13	2	1	1	2	3	2	1.13.E 0	0.1D.D 0	0.1E.F 0	1.08.3 0	0.07.F 0
14	3	3	2	1	1	2	0.1.1F 3.2.0	0.0.1F 7.5.0	0.1.0F 5.3.0	1.1.14 2.0.0	1.0.1B 4.4.0
15	1	3	2	2	1	2	1.2.1E 0.0.0	2.1.1F 1.7.4	3.1.1B 1.3.2	0.2.05 0.0.1	0.3.1F 1.4.0
16	4	1	1	4	3	3	1.0.1F 1.3	0.1.13 0.0	0.0.1F 0.0	1.1.1E 0.0	0.1.0D 1.0
17	4	4	4	2	4	3	6.7F 3.0.1	7.7F 3.0.0	3.3F 0.0.0	0.5C 2.0.0	5.63 1.0.0
18	4	4	3	2	3	3	1B.3F 1.3.0	1F.3F 1.2.0	5.31 0.0.0	02.2E 1.0.0	1C.1F 0.1.0
19	4	4	2	3	4	3	3.1.17 1.1.0	3.1.1F 1.1.0	0.0.1C 0.2.0	0.1.1B 0.2.0	0.0.0F 1.0.0
20	3	3	2	3	2	3	0.0.7.F 0.0	0.2.0.D 0.0	0.0.C.F 1.0	0.1.B.F 1.0	1.3.F.2 0.0

$$r_4 = ((b,0) \wedge (d,0) \wedge (d,0) \rightarrow (f, 1))_{|9,D|};$$

$$r_5 = ((b,0) \wedge (d,0) \wedge (d,0) \rightarrow (f, 1))_{|E,F|}.$$

表 3 首轮和次轮粒极值表

m	a	b	c	d	a	b	c	d
0	0.1.1 3.C.4	0.3.0 5.B.0	0.2.1 6.3.2	1.0.1 7.1.1				
2	0.1.1 5.C.4	1.0.1 7.2.2	0.2.1 3.5.1	0.3.0 6.B.0				
3	2.0.0 3.11.8	0.1.0 1.0B.4	1.0.0 3.06.1	0.1.0 2.1A.2	2.0.0 1.4.4	0.1.0 0.2.0	1.0.0 1.1.1	0.1.0 1.7.2
4	1.0.0 3.11.1	0.1.0 1.16.2	2.0.0 3.0C.8	0.1.0 2.0B.4	1.0.0 1.4.2	0.1.0 1.7.4	2.0.0 1.2.1	0.1.0 0.1.0
5	0.1.1 5.3.1	1.0.1 7.4.2	0.2.1 6.A.4	0.3.0 3.D.0	0.1.1 3.1.0	1.0.1 7.2.1	0.2.1 6.4.0	0.3.0 5.7.0
7	0.1.1 3.3.1	0.3.0 6.D.0	0.2.1 5.6.2	1.0.1 7.8.4	0.1.1 3.1.0	0.3.0 5.7.0	0.2.1 6.2.0	1.0.1 7.4.1
8	0.1.1 3.C.2	1.0.1 7.2.4	0.2.1 6.9.1	0.3.0 5.7.0				
9	1.0.0 3.18.8	0.1.0 1.16.4	2.0.0 3.05.2	0.1.0 2.0B.1	1.0.0 1.4.2	0.1.0 0.2.0	2.0.0 1.1.1	0.1.0 1.7.4
A	0.1.1 5.9.4	0.3.0 3.7.0	0.2.1 6.A.1	1.0.1 7.4.2				
D	0.2.1 5.9.1	0.3.0 6.E.0	0.1.1 3.5.4	1.0.1 7.2.2	0.2.1 5.4.0	0.3.0 6.7.0	0.1.1 3.2.0	1.0.1 7.1.1
E	2.0.0 3.03.1	0.1.0 2.0D.2	1.0.0 3.14.4	0.1.0 1.1A.8	2.0.0 1.1.1	0.1.0 1.7.2	1.0.0 1.2.4	0.1.0 0.4.0
F	0.1.1 3.3.1	1.0.1 7.8.2	0.2.1 5.5.4	0.3.0 6.E.0	0.1.1 3.1.0	1.0.1 7.2.1	0.2.1 5.4.0	0.3.0 6.7.0

至此, $f(abcd) = 1$ 的最简式全部提出, 这个结论可用卡诺图验证.

3.4 无决策属性的粗糙集约简分析

由于没有决策属性的限定, 所以这种约简只对行分辨强度作判定, 是本算法的子集. 文献[7] 中表 1 的属性表如表 4(左). 按算法首次求得的各属性值的行分辨强度表, 见表 4(右).

表 4 属性值与分辨强度值对应表

N	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e
1	1	0	2	1	0	2.0.1.1	1.0.0.0	0.0.0.1	0.0.1.1	0.0.1.1
2	0	0	1	2	1	0.0.3	0.0.0	1.0.3	0.0.3	1.0.3
3	2	0	2	1	0	1.1.1.1	0.1.0.0	0.0.0.1	0.0.1.1	0.0.1.1
4	0	0	2	2	2	0.3.1	0.0.1	1.0.0	0.3.1	1.3.1
5	1	1	2	1	0	0.1.0.1	1.1.0.1	0.0.0.0	0.0.0.1	0.0.0.1

在表 4(右) 中, 因 $\cap_{10} \text{RCD}(a) = 2\,246$ 值最大, 得首次约简集 $\{a\}$, 由 a 的各属性值的分辨强度分

别对全部属性的各行的属性值覆盖一次;覆盖后因 $\cap_{10}\text{RCD}(b) = 2\ 000$ 值最大,则得二次约简集 $\{a, b\}$;由 b 再次覆盖后 $\cap_{10}\text{RCD}(d) = 0$, 而 $\cap_{10}\text{RCD}(c)$ 和 $\cap_{10}\text{RCD}(e)$ 均为 200, 值最大且相同. 所以最终得两个等价的属性约简集 $\{a, b, c\}$ 和 $\{a, b, e\}$, 与文献[7]的结论相同.

4 结束语

给出一个基于粒极值的最简规则提取的标准算法. 得出以下结论:

(1) 提出粒极值的概念, 首次将粗糙集行的分辨强度和列的组合强度相结合确定粒极值, 粒极值所在列是必选属性而其所在行必定产生一条规则且规则中必需包括该粒极值.

(2) 提出基于粒极值的粒运算, 采用分辨强度覆盖和组合强度同取且逐级递进获取新粒极值, 使所提规则的每个属性值都是粒极值, 即规则最简.

(3) 直接从粗糙集获得最简精确规则, 不涉及规则可信度^[3,5]等概率问题, 统一到一种标准算法, 完整准确地解决了粗糙集最简规则的提取和属性约简问题.

(4) 逻辑真值表是粗糙集的一个特例, 本算法适用于逻辑真值表化简问题, 尤其是多变量真值表求最简表达式的难题.

参考文献:

- [1] 钱锋. 结合模糊集理论的粗糙集属性约简算法[J]. 计算机应用研究, 2007, 24(11): 93-95.
- [2] 何群. 基于逻辑距离判定的最简规则提取算法[J]. 微电子学与计算机, 2009, 27(4): 38-42.
- [3] 卓丽霞. 粒计算规则生成模型[J]. 重庆工学院学报: 自然科学, 2008, 22(9): 149-153.
- [4] 王国胤. 粗糙集理论与应用研究综述[J]. 计算机学报, 2009, 32(7): 1229-1248.
- [5] 陈婷. 基于粒度的粗集-决策树雷达信号识别模型[J]. 微电子学与计算机, 2008, 25(12): 13-16.
- [6] 梁燕. 基于粗糙集理论和三层前馈 BP 网络的分类模型[J]. 计算机工程与科学, 2009, 31(6): 133-135.
- [7] 陈玉明. 基于幂图的属性约简搜索式算法[J]. 计算机学报, 2009, 32(8): 1486-1492.

作者简介:

何群 男, (1955-), 高级工程师, 研究生导师. 研究方向为数据挖掘和粗糙集.

(上接第 90 页)

参考文献:

- [1] Wood J, Edwards T C, Lipa S. Rotary traveling-wave oscillator arrays: a new clock technology[J]. IEEE J. Solid-State Circuits, 2001, 36(11): 1654-1665.
- [2] O'Mahony F. A 10-GHz global clock distribution using coupled standing-wave oscillators[J]. IEEE J. Solid-State Circuits, 2003, 38(11): 1813-1820.
- [3] Sasaki M. A high-frequency clock distribution network using inductively loaded standing-wave oscillators[J]. IEEE J. Solid-State Circuits, 2009, 44(10): 2800-2807.
- [4] Chan S C, Shepard K L, Restle P J. Uniform-phase, uniform-amplitude, resonant-load global clock distributions[J]. IEEE J. Solid-State Circuits, 2005, 40(1): 102-109.
- [5] Hansson M, Mesgarzadeh B, Alvandpour A. A 1.56 GHz

on-chip resonant clocking in 130 nm CMOS[C]// Proc. IEEE Int. Custom Integrated Circuits Conf. USA: San Jose, 2006: 241-244.

- [6] Sathe V S, Kao J C, Papaefthymiou M C. Resonant-clock latch-based design[J]. IEEE J. Solid-State Circuits, 2008, 43(4): 864-873.
- [7] Restle P J. A clock distribution network for microprocessors[J]. IEEE J. Solid-State Circuits, 2001, 36(5): 792-799.

作者简介:

徐毅 男, (1981-), 博士研究生. 研究方向为高速时钟分布技术.

陈书明 男, (1961-), 博士生导师. 研究方向为高性能微处理器设计和超深亚微米 VLSI 设计.