

语言真值直觉模糊逻辑的知识推理

邹 丽 谭雪微 张云霞

(辽宁师范大学计算机与信息技术学院 大连 116081)

摘 要 针对格蕴涵代数、直觉模糊集及知识表示、基于语言真值直觉模糊代数的相关性质及运算方法,提出了六元语言真值直觉模糊代数的相关逻辑性质,并在六元语言真值直觉模糊知识表示的基础上,将模糊推理的 CRI 方法进行扩展,研究得出了六元语言真值直觉模糊推理的方法即 6LTV-CRI 算法。而后将直觉模糊推理与六元语言真值直觉模糊推理方法进行对比分析,验证了 6LTV-CRI 推理算法的合理性,并分析了其优缺点。

关键词 直觉模糊知识推理,语言真值直觉模糊代数,语言真值直觉模糊逻辑

中图法分类号 TP181 文献标识码 A

Knowledge Reasoning Based on Linguistic Truth-valued Intuitionistic Fuzzy Logic

ZOU Li TAN Xue-wei ZHANG Yun-xia

(School of Computer and Information Technology, Liaoning Normal University, Dalian 116081, China)

Abstract In view of the lattice implication algebra, intuitionistic fuzzy sets and knowledge representation, based on the related properties and operations of linguistic truth-valued intuitionistic fuzzy algebra, we proposed six-element linguistic truth-valued intuitionistic fuzzy algebra related logical properties. And on the basis of six-element linguistic truth-valued intuitionistic fuzzy knowledge representation, we extended CRI method of fuzzy reasoning, discussed the six-element linguistic truth-valued intuitionistic fuzzy reasoning method, i. e., 6LTV-CRI algorithm. Then comparing with the intuitionistic fuzzy reasoning, six-element linguistic truth-valued intuitionistic fuzzy reasoning method was validated. We obtained the rationality of the 6LTV-CRI algorithm and analysed its advantages and disadvantages.

Keywords Intuitionistic fuzzy knowledge reasoning, Linguistic truth-valued intuitionistic fuzzy algebra, Linguistic truth-valued intuitionistic fuzzy logic

现如今对语言真值格蕴涵代数的研究越来越深入,已经有学者做出了六元、十元及十八元语言真值格在不同方面的研究。

在六元格方面,孙芳、张凤梅^[13]等人提出了基于六元格值命题逻辑的语言真值归结方法。在十元格方面,徐本强、郑宏亮等人^[9]提出了一种基于十元格蕴涵代数的知识表示方法。在十八元格方面,张云霞、崔晓松等人^[14]提出了一种基于十八元语言值模糊相似矩阵的聚类方法。

目前关于知识表示方法的研究还没有涉及到语言真值直觉模糊格。本文基于十八元语言真值直觉模糊代数及 $2n$ 元语言真值直觉模糊代数,通过研究模糊推理 CRI 方法,提出了一种基于六元格上的直觉模糊知识推理方法,即六元语言真值直觉模糊知识推理方法,并将其用于实例推理。

1 直觉模糊集

在直觉模糊集中,Atanassov 采用隶属度和非隶属度表示对象隶属于某一集合的程度。形式地,直觉模糊集定义为:

定义 1^[4] 设 X 是一个给定论域,则 X 上的一个直觉模

糊集 A 为 $A = \{ \langle x, u(x), v(x) \rangle \mid x \in X \}$, 其中 $u(x): X \rightarrow [0, 1]$ 和 $v(x): X \rightarrow [0, 1]$ 分别代表 A 的隶属函数 $u(x)$ 和非隶属函数 $v(x)$, 且对于 A 上的所有 $x \in X, 0 \leq u(x) + v(x) \leq 1$ 成立。

在直觉模糊集 A 中, $\pi_A(x) = 1 - u_A(x) - v_A(x) (\forall x \in U)$ 称为 x 隶属于 A 的怀疑度。在 Zadeh 的模糊集中,若 $u_A(x)$ 是 x 隶属于 A 的隶属度,则 $1 - u_A(x)$ 是非隶属度,即 $u_A(x) + 1 - u_A(x) = 1$ 。从这个角度来看,直觉模糊集是模糊集的推广。

定义 2^[4] 设 A 和 B 是给定论域 X 上的直觉模糊子集即 $A = \{ \langle x, u_A(x), v_A(x) \rangle \mid x \in U \}$ 和 $B = \{ \langle x, u_B(x), v_B(x) \rangle \mid x \in U \}$, 则有

- 1) $A \cap B = \{ \langle x, u_A(x) \wedge u_B(x), v_A(x) \vee v_B(x) \rangle \mid \forall x \in X \}$
- 2) $A \cup B = \{ \langle x, u_A(x) \vee u_B(x), v_A(x) \wedge v_B(x) \rangle \mid \forall x \in X \}$
- 3) $A' = \{ \langle x, u_A(x), v_A(x) \rangle \mid \forall x \in U \}$

论域 U 上的所有直觉模糊集的全体记为 $IFS(U)$, 且直觉模糊集之间有如下序关系: $\forall A, B \in IFS(U), A \leq B$ 当且仅当 $\forall x \in U, u_A(x) \leq u_B(x)$ 且 $v_A(x) \geq v_B(x)$, 自然地, $A = B$

到稿日期:2013-05-11 返修日期:2013-06-21 本文受国家自然科学基金(61105059,61175055,61173100),国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(61210306079),中国博士后基金(2012M510815),辽宁省杰出青年学者计划(LJQ2011116)资助。

邹 丽 女,博士,副教授,主要研究领域为多值逻辑与不确定性推理、智能信息处理,E-mail: zoulicn@163.com;谭雪微(1989-),女,硕士生,主要研究领域为多值逻辑与不确定性推理、智能信息处理;张云霞(1987-),女,硕士生,主要研究领域为多值逻辑与不确定性推理、智能信息处理。

当且仅当 $A \leq B$ 且 $B \geq A$ 。

定义 3^[7] 将由麦姆德尼提出的模糊关系 R_c 进行直觉化扩展后,有直觉模糊关系

$$Rz = \int_{U \times V} (u_F(u) \wedge u_G(u), v_F(u) \vee v_G(u)) / (u, v)$$

2 六元语言真值直觉模糊代数

本部分是基于十八元语言真值直觉模糊代数,在六元语言真值格蕴涵代数的基础上进行推理,得出六元语言真值直觉模糊代数的一些性质及相关运算。

语言真值直觉模糊格 $LI_{18} = (VI_{18}, \cup, \cap)$ 是一个有界分配格(见图 1)^[4],其中 $((h_9, t), (h_9, f)) = (I, R)$ 和 $((h_1, t), (h_1, f)) = (H, O)$ 分别为 LI_{18} 的最大元和最小元。

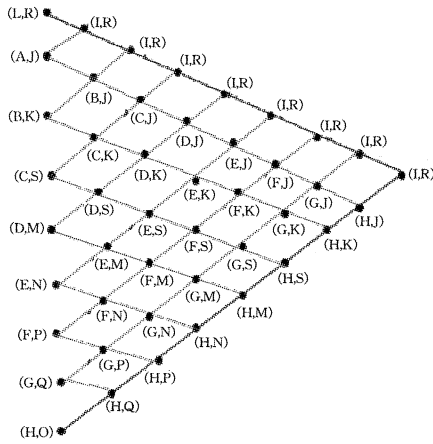


图 1 语言真值直觉模糊格 LI_{18} 结构图

定义 4^[4] 对任意 $((h_i, t), (h_j, f)) \in L_{V(n \times 2)}, ((h_k, t), (h_l, f))$ 是一个语言值直觉模糊对,当且仅当 $i \leq j$ 。

定义 5^[4] 对任意 $((h_i, t), (h_j, f)), ((h_k, t), (h_l, f)) \in LI_{2n}, ((h_i, t), (h_j, f)) \leq ((h_k, t), (h_l, f))$ 当且仅当 $(h_i, t) \leq (h_k, t)$ 且 $(h_j, f) \geq (h_l, f)$ 当且仅当 $i \leq k$ 且 $j \leq l$ 。

定义 6^[4] 对任意 $((h_i, t), (h_j, f)), ((h_k, t), (h_l, f)) \in LI_{2n}, ((h_i, t), (h_j, f)) \leq ((h_k, t), (h_l, f))$ 当且仅当 $i \leq k$ 且 $j \leq l$,有

$$1) ((h_i, t), (h_j, f)) \rightarrow ((h_k, t), (h_l, f)) = ((h_{\min(n, n-i+k, n-j+l)}, t), (h_{\min(n, n-i+l)}, f))$$

$$2) ((h_i, t), (h_j, f)) \cup ((h_k, t), (h_l, f)) = ((h_{\max(i, k)}, t), (h_{\max(j, l)}, f))$$

$$3) ((h_i, t), (h_j, f)) \cap ((h_k, t), (h_l, f)) = ((h_{\min(i, k)}, t), (h_{\min(j, l)}, f))$$

$$4) ((h_i, t), (h_j, f))' = ((h_{n-j+1}, t), (h_{n-i+1}, f))$$

基于十八元语言真值直觉模糊代数,我们在六元语言真值格蕴涵代数的基础上(见图 2),将其具体化为六元语言真值直觉模糊代数。

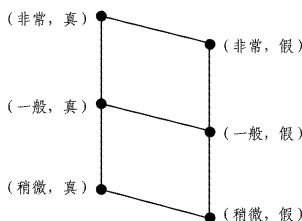


图 2 六元语言真值格蕴涵代数结构图

令六元语言真值格蕴涵代数中 $A = (\text{非常, 真}), B = (\text{一般, 真}), C = (\text{稍微, 真}), J = (\text{非常, 假}), K = (\text{一般, 假}), S = (\text{稍微, 假})$ 。

定义 7 在六元语言真值格蕴涵代数 $L_{V(3 \times 2)} = \{A, B, C, J, K, S\}$ 中,对任意 $((h_i, t), (h_j, f)) \in L_{V(3 \times 2)}, ((h_i, t), (h_j, f))$ 称为一个六元语言真值直觉模糊对,若 $((h_i, t), (h_j, f))$ 满足 $(h_i, t)' \geq (h_j, f)$,其中,运算“ $'$ ”为 $L_{V(3 \times 2)}$ 中的逆序对合,其结构图见图 3。

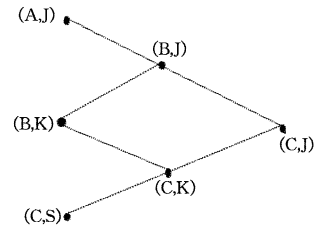


图 3 语言真值直觉模糊格 LI_6 的结构图

综上所述,我们可推得:

推论 1 语言真值直觉模糊格 $LI_6 = (VI_6, \cup, \cap)$ 是一个有界分配格(见图 3),其中, $((h_3, t), (h_3, f)) = (A, J)$ 和 $((h_1, t), (h_1, f)) = (C, S)$ 分别为 LI_6 的最大元和最小元。

根据 LTV_IFL 的性质可以得出 6LTV_IFL 运算如下,体现在表 1—表 3 中。

表 1 六元语言真值直觉模糊格蕴涵运算

\rightarrow	(A,J)	(B,K)	(C,S)	(B,J)	(C,K)	(C,J)
(A,J)	(A,J)	(B,K)	(C,S)	(B,J)	(C,K)	(C,J)
(B,K)	(A,J)	(A,J)	(B,K)	(A,J)	(B,J)	(B,J)
(C,S)	(A,J)	(A,J)	(A,J)	(A,J)	(A,J)	(A,J)
(B,J)	(A,J)	(B,J)	(B,K)	(A,J)	(B,J)	(B,J)
(C,K)	(A,J)	(A,J)	(B,J)	(A,J)	(A,J)	(A,J)
(C,J)	(A,J)	(B,J)	(C,J)	(A,J)	(A,J)	(A,J)

表 2 六元语言真值直觉模糊格析取运算

\vee	(A,J)	(B,K)	(C,S)	(B,J)	(C,K)	(C,J)
(A,J)	(A,J)	(A,J)	(A,J)	(A,J)	(A,J)	(A,J)
(B,K)	(A,J)	(B,K)	(B,K)	(B,J)	(B,K)	(B,J)
(C,S)	(A,J)	(B,K)	(C,S)	(B,J)	(C,K)	(C,J)
(B,J)	(A,J)	(B,J)	(B,J)	(B,J)	(B,J)	(B,J)
(C,K)	(A,J)	(B,K)	(C,K)	(B,J)	(C,K)	(C,J)
(C,J)	(A,J)	(B,J)	(C,J)	(B,J)	(C,J)	(C,J)

表 3 六元语言真值直觉模糊格合取运算

\wedge	(A,J)	(B,K)	(C,S)	(B,J)	(C,K)	(C,J)
(A,J)	(A,J)	(B,K)	(C,S)	(B,J)	(C,K)	(C,J)
(B,K)	(B,K)	(B,K)	(C,S)	(B,K)	(C,K)	(C,K)
(C,S)	(C,S)	(C,S)	(C,S)	(C,S)	(C,S)	(C,S)
(B,J)	(B,J)	(B,K)	(C,S)	(B,J)	(C,K)	(C,J)
(C,K)	(C,K)	(C,K)	(C,S)	(C,K)	(C,K)	(C,K)
(C,J)	(C,J)	(C,K)	(C,S)	(C,J)	(C,K)	(C,J)

3 语言真值直觉模糊知识表示及推理

定义 8 A, B 为语言真值直觉模糊矩阵,“ \circ_i ”是语言真值直觉模糊合成关系。即“ $A \circ_i B$ ”的运算定义为:第一个矩阵的第一行元素分别与第二个矩阵的第一列的对应元素做 \wedge 运算,然后将所得的元素做 \vee 运算,再将所得的结果放在结果矩阵的第一行第一列上,依次类推,求出两矩阵关于“ \circ_i ”的运算结果。

例:

$$A \circ_i B = \begin{bmatrix} (a,b) & (c,d) \\ (e,f) & (g,h) \end{bmatrix} \circ_i \begin{bmatrix} (i,j) & (k,l) \\ (m,n) & (o,p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ((a,b) \cap (i,j)) \cup ((c,d) \cap (m,n)) & ((a,b) \cap (k,l)) \cup ((c,d) \cap (o,p)) \\ ((e,f) \cap (i,j)) \cup ((g,h) \cap (m,n)) & ((e,f) \cap (k,l)) \cup ((g,h) \cap (o,p)) \end{bmatrix}$$

3.1 语言真值直觉模糊知识表示及推理的算法分析

3.1.1 单规则语言真值直觉模糊推理方法

基于模糊假言推理模型,我们将讨论六元语言真值直觉模糊知识推理问题的求解方法。描述形式简化如下:

已知	$A \rightarrow B$	(大前提)
且给定	A^*	(小前提)
求	B^*	

基于模糊推理的CRI方法,其六元语言真值直觉模糊知识推理方法即6LTV-CRI方法的求解步骤如下:

1. 分别选取论域 X 和 Y 上的直觉模糊集 $A(x), A^*(x)$ 与 $B(y), B^*(y)$ 表示命题 A, A^* 与 B, B^* 。

2. 选取一个蕴涵算子 \rightarrow , 把大前提 $A \rightarrow B$ 转化为一个 $X \times Y$ 上的六元语言真值直觉模糊关系 $R_6: A(x) \rightarrow B(y)$ 。六元语言真值直觉模糊的蕴涵算子是: $((h_i, t), (h_j, f)) \rightarrow ((h_k, t), (h_l, f)) = ((h_{\min(3, 3-i+k, 3-j+l)}, t), (h_{\min(3, 3-i+l)}, f))$ 。

3. 将 $A^*(x)$ 与上述语言真值直觉模糊关系进行合成即得 $B^* = A^* \circ_i (A \rightarrow B)$ 。

3.1.2 多规则语言真值直觉模糊推理方法

鉴于单规则语言真值直觉模糊推理,多条直觉模糊规则推理问题转化为如下形式:

已知	$A_1 \rightarrow B_1,$	
	$A_2 \rightarrow B_2,$	
	\vdots	
	$A_n \rightarrow B_n$	(大前提)
且给定	A^*	(小前提)
求	B^*	(结论)

对于上述推理问题,通常有以下两种求解方法:先推理后聚合(first infer then aggregate, FITA);先聚合后推理(first aggregate then infer, FATD)。

1. 先推理后聚合(FITA)

先分别求解以下几个简单的推理问题($i=1, 2, \dots, n$):

已知	$A_i \rightarrow B_i$	(大前提)
且给定	A^*	(小前提)
求	B^*	(结论)

用单规则语言真值直觉模糊推理方法,得出 n 个中间结果 $B_1^*, B_2^*, \dots, B_n^*$ 。然后将这 n 个中间结果以六元语言真值直觉模糊格析取(\vee)运算(见表2),或以六元语言真值直觉模糊格合取(\wedge)运算(见表3)方法聚合而得出结论 B^* 。

2. 先聚合后推理(FATD)

先把 n 条规则按某种方法聚合为一条超规则 $A \rightarrow B$, 然后求解以下问题:

已知	$A \rightarrow B$	(大前提)
且给定	A_i^*	(小前提)
求	B_i^*	(结论)

对规则的聚合,这里我们将每条规则中的已知做六元语

言真值直觉模糊格析取(\vee)运算(见表2),每条规则中的结论也做六元语言真值直觉模糊格析取(\vee)运算(见表2),然后将所得到的已知与结论连接得到一条超规则,最后再按照单规则语言真值直觉模糊推理方法求 B^* 。

3.2 直觉模糊推理与六元语言真值直觉模糊对比推理

通过以上推理,得出了直觉模糊推理模型和六元语言真值直觉模糊推理模型,现将两种方法进行对比。

表4 求解法对比

基于直觉模糊推理的方法	基于六元语言真值直觉模糊推理的方法
1) 将 F, G, F' 用向量表示, 则 $F = [(1, 0) (0.6, 0.3) (0.1, 0.8)]$ $G = [(0.1, 0.8) (0.6, 0.3) (1, 0)]$ $F' = [(1, 0) (0.7, 0.1) (0.2, 0.7)]$	1) 将 F, G, F' 进行简化, 然后用向量表示。 $F = [(A, J) (B, K) (C, J)]$ $G = [(C, J) (B, K) (A, J)]$ $F' = [(A, J) (B, K) (C, J)]$
2) 求直觉模糊关系 R_z 。 $R_z = \int_{U \times V} ((u_F(u) \wedge u_G(u)), v_F(u)) \vee v_G(u) / (u, v)$ $= F^T \wedge G$ $= \begin{bmatrix} (1, 0) \\ (0.6, 0.3) \\ (0.1, 0.8) \end{bmatrix} \wedge [(0.1, 0.8) (0.6, 0.3) (1, 0)]$ $= \begin{bmatrix} (0.1, 0.8) (0.6, 0.3) (1, 0) \\ (0.1, 0.8) (0.6, 0.3) (0.6, 0.3) \\ (0.1, 0.8) (0.1, 0.8) (0.1, 0.8) \end{bmatrix}$	2) 求六元语言真值直觉模糊直觉关系 R_6 。 $R_6 = F \rightarrow G$ $= [(A, J) (B, K) (C, J)] \rightarrow [(C, J) (B, K) (A, J)]$ $= [(C, J) (A, J) (A, J)]$
3) 求 G' 。 $G' = F' \circ_1 R_z$ $= [(1, 0) (0.7, 0.1) (0.2, 0.7)] \circ_1 \begin{bmatrix} (0.1, 0.8) (0.6, 0.3) (1, 0) \\ (0.1, 0.8) (0.6, 0.3) (0.6, 0.3) \\ (0.1, 0.8) (0.1, 0.8) (0.1, 0.8) \end{bmatrix}$ $= [(0.1, 0.8) (0.6, 0.3) (1, 0)]$	3) 求 G' 。 $G' = F' \circ_1 R_6$ $= [(A, J) (B, K) (C, J)] \circ_1 [(C, J) (A, J) (A, J)]$ $= [(C, J) (A, J) (A, J)]$
4) $G' = (0.1, 0.8) / 1 + (0.6, 0.3) / 2 + (1, 0) / 3$	4) $G' = (C, J) / 1 + (A, J) / 2 + (A, J) / 3$ 即 $G' = (\text{稍微真, 非常假}) / 1 + (\text{非常真, 非常假}) / 2 + (\text{非常真, 非常假}) / 3$

(1) 基于直觉模糊推理的实例

设 $U=V=\{1, 2, 3\}$, F 和 G 分别是 U 和 V 上的两个直觉模糊集, 并设

$$\text{很小} = F = (1, 0) / 1 + (0.6, 0.3) / 2 + (0.1, 0.8) / 3$$

$$\text{很大} = G = (0.1, 0.8) / 1 + (0.6, 0.3) / 2 + (1, 0) / 3$$

如果 x 是 F , 则 y 是 G , 现在 x 是较小, 并设“较小”的直觉模糊集为

$$\text{较小} = F' = (1, 0) / 1 + (0.7, 0.1) / 2 + (0.2, 0.7) / 3$$

求在此已知事实下的直觉模糊结论 G' 。

(2) 基于六元语言真值直觉模糊推理的实例

设 $U=V=\{1, 2, 3\}$, F 和 G 分别是 U 和 V 上的两个直觉模糊集, 并设

$$\text{很小} = F = (\text{非常真, 非常假}) / 1 + (\text{一般真, 一般假}) / 2 + (\text{稍微真, 非常假}) / 3$$

$$\text{很大} = G = (\text{稍微真, 非常假}) / 1 + (\text{一般真, 一般假}) / 2 + (\text{非常真, 非常假}) / 3$$

如果 x 是 F , 则 y 是 G , 现在 x 是较小, 并设“较小”的直觉模糊集为

$$\text{较小} = F' = (\text{非常真, 非常假}) / 1 + (\text{一般真, 一般假}) / 2 +$$

(稍微真,非常假)/3

求在此已知事实下的直觉模糊结论 G' 。

求解法对比如表 4 所列。

从上述推理过程和结果可以看出:通过已知条件可知,如果 x 是很小,则 y 是很大;那么,如果 x 是较小,我们可以推理 y 是较大。而通过基于直觉模糊推理的方法与基于六元语言真值直觉模糊推理的方法的求解可以看出,这两种方法所求得的结果都是合理的,因此可以说六元语言真值直觉模糊知识推理方法即 6LTV-CRI 是一种合理的推理方法。

结束语 通过以上对比推理分析出 6LTV-CRI 方法比 CRI 方法运算起来更加简便,因为 6LTV-CRI 方法的一些运算可以通过查表得出,并且 6LTV-CRI 方法看起来更加直观,它的表述更加符合人说话和思维的方式,但 6LTV-CRI 方法也存在一些缺点,如当推理数据要求非常精确时,6LTV-CRI 方法就不能满足要求,只能进行粗略的计算,而此时就需采用 CRI 方法。

语言真值直觉模糊知识的逻辑推理使现实生活中一些不确定或犹豫的知识在计算机中能表示、运行,并推理出相应的结果,更加方便地解决了许多生活中出现的问题,比如在警方办案时,这种知识表示推理方法就能在证据不确定的情况下推理出多种可能的结果,更加有利于办案。

语言真值直觉模糊逻辑的知识推理的应用前景非常广泛,但是本论文中只是总结出了一种模糊逻辑的知识推理方法,还有很多方法有待于我们进一步去研究探索。

参 考 文 献

- [1] 王万森. 人工智能原理及其应用(第 2 版)[M]. 北京:电子工业出版社,2008
- [2] 廉师友. 人工智能技术导论(第 2 版)[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2002
- [3] 年志刚,梁式,麻芳兰,等. 知识表示方法研究与应用[J]. 计算机

应用研究所,2007,24(5)

- [4] 邹丽. 基于语言真值格蕴涵代数的格值命题逻辑及其归结自动推理研究[D]. 成都:西南交通大学,2010
- [5] 梁柱,曾绍玮. 知识表示技术研究[J]. 科学咨询(决策管理),2010(1)
- [6] 夏佩伦. 不确定性推理方法研究[J]. 火力与指挥控制,2010,35(11)
- [7] 雷英杰,王宝树,路艳丽. 基于直觉模糊逻辑的近似推理方法[J]. 控制与决策,2006,21(3)
- [8] 裴崧. 格蕴涵代数中的直觉模糊滤子[J]. 西华大学学报,2007,26(2)
- [9] 郑宏亮,徐本强,邹丽. 一种基于十元格蕴涵代数的知识表示方法[J]. 计算机应用与软件,2013,30(1)
- [10] 张洪美,徐泽水,陈琦. 直觉模糊集的聚类方法研究[J]. 控制与决策,2007,22(8)
- [11] 刘锋,袁学海. 模糊数直觉模糊集[J]. 模糊系统与数学,2007,21(1)
- [12] 杨洋,郭嗣琮,胡金辉. 模糊数直觉模糊集运算的模糊结构元表示[J]. 模糊系统与数学,2009,23(6)
- [13] 孙芳,张凤梅,邹丽,等. 基于六元格值命题逻辑的语言真值归结方法[J]. 广西师范大学学报,2010,28(3)
- [14] 张云霞,崔晓松,邹丽. 一种基于十八元语言值模糊相似矩阵的聚类方法[J]. 山东大学学报:工学版,2013,43(1)
- [15] 方晓,马健,谭成兵,等. 一种新的知识表示和知识推理研究[J]. 河北北方学院学报,2011,27(5)
- [16] Zadeh L A. Fuzzy sets[J]. Information and Control,1965,8(3):338-356
- [17] Atanassov K. Intuitionistic fuzzy sets [J]. Fuzzy Sets and Systems,1986,20(1):87-96
- [18] Xu Y, Chen S, Ma J. Linguistic truth-valued lattice implication algebra and its properties[C]//Proc. CESA'06. 2006:1123-1129
- [19] Xu Y, Ruan D, Qin K Y, et al. Lattice-valued Logic[M]. Springer,2003

(上接第 133 页)

- [4] Clark R, Singh S, Haist C. Ultrasonic characterisation of defects in rails[J]. Insight,2002,44(6):341-347
- [5] Bentoumi M, Akinin P, Bloch G. On-line rail defect diagnosis with differential eddy current probes and specific detection processing[J]. The European Physical Journal Applied Physics,2003,23(3):227-233
- [6] Conci A, Proença C B. A computer vision approach for textile inspection[J]. Textile Research Journal,2000,70(4):347-350
- [7] Kumar A, Pang G K H. Defect detection in textured materials using Gabor filters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2002,38(2):425-440
- [8] Campbell J G, Fraley C, Murtagh F, et al. Linear flaw detection in woven textiles using model-based clustering[J]. Pattern Recognition Letters,1997,18(14):1539-1548
- [9] 刘蕴辉,刘铁,等. 基于图像处理的铁轨表面缺陷检测算法[J].

计算机工程,2007,33(11):236-238

- [10] 胡二根. 钢轨擦伤原因及其防治[J]. 铁道建筑,2000,1:014
- [11] Gonzalez R, Woods R. Digital image processing (3rd Edition) [M]. Prentice Hall,2007
- [12] 任盛伟,李清勇,许贵阳,等. 鲁棒实时钢轨表面擦伤检测算法研究[J]. 中国铁道科学,2011,32(001):25-29
- [13] Li Q, Ren S. A Visual Detection System for Rail Surface Defects [J]. IEEE transactions on systems, man and cybernetics. Part C, Applications and reviews,2012,42(6):1531-1542
- [14] Kapur J N, Sahoo P K, Wong A K C. A new method for gray-level picture thresholding using the entropy of the histogram [J]. Computer vision, graphics, and image processing,1985,29(3):273-285
- [15] Li Q, Ren S. A real-time visual inspection system for discrete surface defects of rail heads[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,2012,61(8):2189-2199