

协调优势粗糙集方法及其在 UCAV 目标威胁估计中的应用

蔡佳¹, 胡杰², 黄长强¹

(1. 空军工程大学 工程学院, 西安 710038; 2. 94857 部队 77 分队, 芜湖 241007)

摘要 针对一般粗糙集方法不能由有限数据给出完整决策规则的问题, 定义了正协调、负协调和混合协调决策信息系统, 研究了正协调系统的优势关系决策规则获取方法, 在此基础上提出了负协调和混合协调系统的优势关系决策规则获取方法, 形成了协调决策信息系统的优势粗糙集方法, 即协调优势粗糙集方法. 将该方法应用到无人战斗机目标威胁估计中, 建立了无人战斗机目标威胁估计决策信息系统, 分析了目标属性的偏好性, 给出了决策算法, 对算法的复杂度进行了分析, 并与 Greco 优势粗糙集方法进行了比较. 结果表明: 该方法简单可行, 得到的确定性决策规则可以涵盖目标条件属性的所有取值, 有效地解决了决策规则的不完备性.

关键词 协调; 优势; 粗糙集; 无人战斗机; 威胁估计

A consistent dominance rough sets method and its application in threat assessment of UCAV's targets

CAI Jia¹, HU Jie², HUANG Chang-qiang¹

(1. Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;
2. The 77th Unit of 94857 PLA Troops, Wuhu 241007, China)

Abstract Aiming at the problem that the general rough sets can not present complete decision-making rules from limited data, the positive, negative and mixed consistent decision-making information system were defined. Method of obtaining rules for positive consistent system based on dominance relation was researched. Based on this, methods of obtaining rules for negative and mixed consistent systems based on dominance relation were put forward. A dominance rough sets method for consistent decision-making information system was then presented. The method was applied in the threat assessment of UCAV's targets. Decision-making information system for threat assessment of UCAV's targets was established. Preference of targets' attributes was analyzed. Decision-making algorithm was given, complexity of which was analyzed, and compared with dominance rough sets of Greco. Results show that the method is simple and rules can cover all values of the attributes.

Keywords consistent; dominance; rough sets; UCAV; threat assessment

1 引言

为了解决传统粗糙集不能处理偏好属性的问题, Greco 用优势关系代替不可分辨关系, 并将其引入到粗糙集中, 形成了一种解决多准则决策问题的优势粗糙集决策方法^[1]. 国内外学者对该方法进行了大量的研究. Zhai 等将分类分数 (category score) 这一概念引入到优势粗糙集方法当中, 基于分类分数可以对各个分类按照偏好程度进行排序, 从而能够解决由不可分辨关系造成的不相容性问题^[2], Blaszczyński 等提出变相容性优势粗糙集方法, 该方法通过设定相容水平这一参数, 允许下近似中的某些不相容性^[3].

根据优势关系提取出何种形式的决策规则也是研究热点之一. Greco 优势粗糙集方法给出了确定 D_{\geq} 、可能 D_{\geq} 、确定 D_{\leq} 、可能 D_{\leq} 、近似 D_{\leq} 五种决策规则形式^[4-5], 文献 [6] 提出了“↑”和“↓”描述符, 并给出了“↑”和“↓”两种可信规则形式, 文献 [7] 通过语义计算方法给出了三种规则形式. 从这些文献可以看出,

收稿日期: 2010-04-15

作者简介: 蔡佳 (1984-), 男, 河南南阳人, 博士, 研究方向: 无人飞行器武器系统总体技术; 胡杰 (1982-), 男, 安徽芜湖人, 博士, 研究方向: 有人机与无人机机载制导武器系统技术, 无人机作战决策; 黄长强 (1961-), 男, 江苏如东人, 教授, 博士生导师, 研究方向: 机载精确制导武器与弹药, 无人机武器系统总体技术.

多数规则形式都是从 Greco 形式中演变而来, 用于解决不同应用方面的问题, 但这些规则形式仅能从有限数据中提取有限决策规则, 这就给决策过程带来了困难.

优势粗糙集所处理的属性都含有偏好性, 而含有偏好属性的决策信息系统可以转化为协调决策信息系统形式; 另外, 不协调决策信息系统也可以转化为协调决策信息系统^[8]. 所以如何在协调决策信息系统中由有限数据提取出覆盖条件属性所有取值的完整决策规则集成为了一项亟待解决的问题. 为此, 本文在正协调决策信息系统的基础上对协调优势粗糙集的规则获取方法进行了扩展, 提出了负协调和混合协调决策信息系统的规则获取方法, 并将其应用在了无人战斗机 (unmanned combat aerial vehicle, UCAV) 目标威胁估计问题中.

2 协调决策信息系统的优势粗糙集方法

2.1 基本概念

定义 1^[1] 设 (U, A, F) 是信息系统, 其中 $U = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 为对象集, $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ 为条件属性集, $F = \{f_l : U \rightarrow V_l (l \leq m)\}$ 为对象与条件属性之间的关系集, V_l 为条件属性 a_l 的有限值域.

对于任意条件属性集 $B \subseteq A$, 记

$$R_B^< = \{(x_i, x_j) \in U^2 \mid f_l(x_i) \leq f_l(x_j), (a_l \in B)\} \quad (1)$$

$$R_B^> = \{(x_i, x_j) \in U^2 \mid f_l(x_i) \geq f_l(x_j), (a_l \in B)\} \quad (2)$$

称 $R_B^<$ 为信息系统 (U, A, F) 上的优势关系, $(x_i, x_j) \in R_B^<$ 表示对象 x_j 在条件属性集 B 上优于对象 x_i ; 称 $R_B^>$ 为信息系统 (U, A, F) 上的劣势关系, $(x_i, x_j) \in R_B^>$ 表示对象 x_j 在条件属性集 B 上劣于对象 x_i .

定义 2^[1] 记 $[x_i]_B^< = \{x_j \mid (x_i, x_j) \in R_B^<\}$, $[x_i]_B^> = \{x_j \mid (x_i, x_j) \in R_B^>\}$. $[x_i]_B^<$ 表示在条件属性集 B 下, 优于对象 x_i 的所有对象集合, 称为 x_i 的优势类. $[x_i]_B^>$ 表示在条件属性集 B 下, 劣于对象 x_i 的所有对象集合, 称为 x_i 的劣势类.

定义 3^[5] 设 (U, A, F) 是信息系统, 对于任意 $X \subseteq U$, X 关于优势关系 $R_B^<$ 和劣势关系 $R_B^>$ 的上近似和下近似分别为

$$\overline{R}_B^<(X) = \{x_i \mid [x_i]_B^< \cap X \neq \emptyset\} \quad (3)$$

$$\underline{R}_B^<(X) = \{x_i \mid [x_i]_B^< \subseteq X\} \quad (4)$$

$$\overline{R}_B^>(X) = \{x_i \mid [x_i]_B^> \cap X \neq \emptyset\} \quad (5)$$

$$\underline{R}_B^>(X) = \{x_i \mid [x_i]_B^> \subseteq X\} \quad (6)$$

定义 4^[5] 设 (U, A, F) 是信息系统, 给出优势关系 $R_B^<$ 和劣势关系 $R_B^>$, 若 $R_B^< = R_A^<$ 或 $R_B^> = R_A^>$, 称 B 为优势协调集或劣势协调集. 若 B 是优势协调集或劣势协调集, 且 B 的任何真子集都不是优势协调集或劣势协调集, 称 B 为优势关系或劣势关系下的属性约简集, 简称为优势或劣势约简集.

记

$$D^<(x_i, x_j) = \{a_l \mid f_l(x_i) < f_l(x_j)\} \quad (7)$$

$$D^>(x_i, x_j) = \{a_l \mid f_l(x_i) > f_l(x_j)\} \quad (8)$$

则 $D^<(x_i, x_j) = D^>(x_i, x_j)$, 即无论从优势关系还是劣势关系角度出发, 用于区分对象的辨识矩阵 Q 是一致的, 即对于

$$Q^< = \{D^<(x_i, x_j) \neq \emptyset \mid x_i, x_j \in U\} \quad (9)$$

$$Q^> = \{D^>(x_i, x_j) \neq \emptyset \mid x_i, x_j \in U\} \quad (10)$$

有 $Q^< = Q^> = Q$.

定理 1 设 (U, A, F) 是信息系统, 在优势关系或劣势关系下以下命题等价

- 1) $R_B^< = R_A^<$;
- 2) $R_B^> = R_A^>$;
- 3) 对于任意 $D \in Q$, $B \cap D \neq \emptyset$.

定理 1 给出了求解优势关系或劣势关系下属性约简集的方法. 首先建立辨识矩阵 Q , 找出使条件 3) 成立的最小集合 B , B 就是约简的属性集. 证明过程见文献 [1].

2.2 协调决策信息系统

设 (U, A, F, d) 为决策信息系统, 其中 $d: U \rightarrow V_d$ 为决策属性, 设 $V_l = V_d = V_m$, 条件属性集的取值域与决策属性的取值域相同, 并设 $V^m = \{(u_1, u_2, \dots, u_m) | u_l \in V(l \leq m)\}$.

定义 5^[9] 对于给定的决策信息系统 (U, A, F, d) , 记 $F(x_i) = (f_1(x_i), f_2(x_i), \dots, f_m(x_i))(x_i \in U)$,

- 1) 若 $F(x_i) \geq F(x_j)$ 时有 $d(x_i) \geq d(x_j)(x_i, x_j \in U)$, 称决策信息系统是正协调的;
- 2) 若 $F(x_i) \geq F(x_j)$ 时有 $d(x_i) \leq d(x_j)(x_i, x_j \in U)$, 称决策信息系统是负协调的;
- 3) 若条件属性集 A 分为两部分:

$$A_1 = \{1, 2, \dots, k\}, \quad A_2 = \{k+1, k+2, \dots, m\}.$$

记

$$F^{(1)}(x_i) = (f_1(x_i), f_2(x_i), \dots, f_k(x_i)) \quad (11)$$

$$F^{(2)}(x_i) = (f_{k+1}(x_i), f_{k+2}(x_i), \dots, f_m(x_i)) \quad (12)$$

当 $F^{(1)}(x_i) \geq F^{(1)}(x_j)$ 且 $F^{(2)}(x_i) \leq F^{(2)}(x_j)$ 时, 必有 $d(x_i) \geq d(x_j)(x_i, x_j \in U)$, 称决策信息系统是混合协调的;

- 4) 若 $F(x_i) = F(x_j)$ 时有 $d(x_i) = d(x_j)(x_i, x_j \in U)$, 称决策信息系统是协调的.

定理 2 正协调、负协调、混合协调的决策信息系统是协调的.

证明 对于正协调的决策信息系统, 当 $F(x_i) = F(x_j)$ 时, 有 $F(x_i) \geq F(x_j)$ 且 $F(x_i) \leq F(x_j)$, 从而有 $d(x_i) \geq d(x_j)$, $d(x_i) \leq d(x_j)$, 于是 $d(x_i) = d(x_j)$, 从而决策信息系统是协调的. 同理可证, 负协调、混合协调的决策信息系统是协调的.

2.3 协调决策信息系统的优势关系决策规则获取方法

根据已有决策信息系统中的数据确定条件属性值节点, 在节点之间, 对于正协调决策系统, 将大的决策属性值赋给条件属性值大的对象, 将小的决策属性值赋给条件属性值小的对象; 对于负协调决策系统, 将小的决策属性值赋给条件属性值大的对象, 将大的决策属性值赋给条件属性值小的对象. 根据这一原则, 给出以下决策规则获取方法.

对于 $(u_1, u_2, \dots, u_m) \in V^m, (v_1, v_2, \dots, v_m) \in V^m$, 记 $(u_1, u_2, \dots, u_m) \wedge (v_1, v_2, \dots, v_m) = (u_1 \wedge v_1, u_2 \wedge v_2, \dots, u_m \wedge v_m)$, 其中 $u_l \wedge v_l$ 表示取 u_l 与 v_l 中的最小值. 假定决策信息系统 (U, A, F, d) 是有限值域, $V_l = V' = V = \{1, 2, \dots, r\}(l \leq m)$, 设 $D_t = \{x_i | d(x_i) = t\}(t \leq r)$ 表示决策属性值为 t 的对象集合, $F_t = \{F(x_i) | x_i \in D_t\}(t \leq r)$ 表示决策属性值为 t 的对象的属性值集合.

- 1) 正协调优势关系决策规则获取方法

$E_t = \wedge F_t(t \leq r)$ 表示决策属性值为 t 的条件属性值中取小值, $G_t = \bigwedge_{k=t}^r E_k(t \leq r)$ 表示决策属性值为 t 时的极小条件属性值向量, 显然有 $G_1 \leq G_2 \leq \dots \leq G_r$. 由于该系统是正协调的, 则决策值越大, 对象的条件属性值向量越大, 属性值是效益型的. 给出以下规则^[9]:

- r1: 若 $F(x) \geq G_r$, 则 $d(x) = r$;
- r2: 若 $F(x) \geq G_t$ 且 $F(x) < G_{t+1}$, 则 $d(x) = t(t \leq r-1)$;
- r3: 若 $F(x) < G_1$, 则 $d(x) = 0$;
- r4: 其他情况 $d(x) = 0$.

规则 r1 表示当对象的条件属性值不小于 G_r 时, 该对象的决策值为 r ; 规则 r2 表示当对象的条件属性值介于 G_t 和 G_{t+1} 之间时, 该对象的决策值为 t ; 规则 r3 表示当对象的条件属性值小于 G_1 时, 该对象的决策值为 0; 规则 r4 表示其他情况时, 该对象的决策值为 0.

- 2) 负协调优势关系决策规则获取方法

$E_t = \wedge F_t(t \leq r)$ 表示决策属性值为 t 的条件属性值中取大值, $G_t = \bigwedge_{k=t}^r E_k(t \leq r)$ 表示决策属性值为 t 时的极大条件属性值向量, 显然有 $G_1 \geq G_2 \geq \dots \geq G_r$. 由于该系统是负协调的, 则决策值越小, 对象的条件属性值向量越大. 给出以下规则:

- r1: 若 $F(x) > G_1$, 则 $d(x) = 0$;

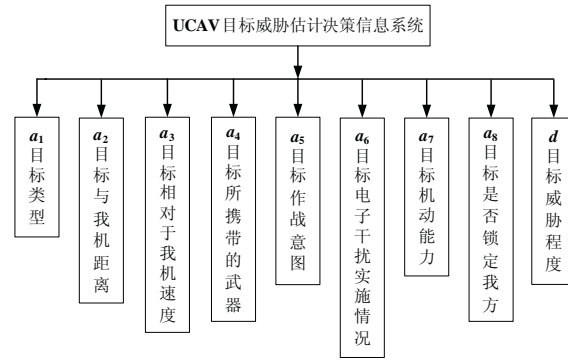


图 1 UCAV 目标威胁估计决策信息系统

r2: 若 $F(x) > G_{t+1}$ 且 $F(x) \leq G_t$, 则 $d(x) = t(t \leq r - 1)$;

r3: 若 $F(x) \leq G_r$, 则 $d(x) = r$;

r4: 其他情况 $d(x) = 0$.

规则 r1 表示当对象的条件属性值大于 G_1 时, 该对象的决策值为 0; 规则 r2 表示当对象的条件属性值介于 G_{t+1} 和 G_t 之间时, 该对象的决策值为 t ; 规则 r3 表示当对象的条件属性值不大于 G_r 时, 该对象的决策值为 r ; 规则 r4 表示其他情况时, 该对象的决策值为 0.

3) 混合协调优势关系决策规则获取方法

与定义 5 中相对应, 设 F_t 分为 F_{t1} 和 F_{t2} 两部分, $E_t = \wedge F_t(t \leq r)$ 分为 E_{t1} 和 E_{t2} 两部分, E_{t1} 表示决策属性值为 t 的条件属性值中 A_1 取小值, E_{t2} 表示决策属性值为 t 的条件属性值中 A_2 取大值, $G_t = \bigwedge_{k=t}^r E_k(t \leq r)$ 分为 G_{t1} 和 G_{t2} 两部分, G_{t1} 表示决策属性值为 t 时的 A_1 取小条件属性值向量, G_{t2} 表示决策属性值为 t 时的 A_2 取大条件属性值向量, 显然有 $G_{11} \leq G_{21} \leq \dots \leq G_{r1}$, $G_{12} \geq G_{22} \geq \dots \geq G_{r2}$. 由于该系统是混合协调的, 则根据定义 5, 包含 A_1 的系统为正协调, 即决策属性值越大, 对象的条件属性值向量越大, 包含 A_2 的系统为为负协调, 即决策属性值越大, 对象的条件属性值向量越小. 给出以下规则:

r1: 若 $F_1(x) \geq G_{r1}$ 且 $F_2(x) \leq G_{r2}$, 则 $d(x) = r$;

r2: 若 $F_1(x) \geq G_{t1}$, $F_1(x) < G_{(t+1),1}$ 且 $F_2(x) \leq G_{t2}$, $F_2(x) > G_{(t+1),2}$, 则 $d(x) = t(t \leq r - 1)$;

r3: 若 $F_1(x) < G_{11}$ 且 $F_2(x) > G_{12}$, 则 $d(x) = 0$;

r4: 其他情况 $d(x) = 0$.

规则 r1 表示当对象的条件属性值 $F_1(x)$ 不小于 G_{r1} 且 $F_2(x)$ 不大于 G_{r2} 时, 该对象的决策值为 r ; 规则 r2 表示当对象的条件属性值 $F_1(x)$ 介于 G_{t1} 和 $G_{(t+1),1}$ 之间且 $F_2(x)$ 介于 G_{t2} 和 $G_{(t+1),2}$ 之间时, 该对象的决策值为 t ; 规则 r3 表示当对象的条件属性值 $F_1(x)$ 小于 G_{11} 且 $F_2(x)$ 大于 G_{12} 时, 该对象的决策值为 0; 规则 r4 表示其他情况时, 该对象的决策值为 0.

对于以上三种方法, 若 $G_t = G_{t+1}$, $G_{t1} = G_{(t+1),1}$ 或 $G_{t2} = G_{(t+1),2}$, 则 $d(x) = t(t \leq r - 1)$.

3 UCAV 目标威胁估计的协调优势粗糙集方法

3.1 UCAV 目标威胁估计决策信息系统及属性偏好性分析

本文在粗糙集的框架下讨论 UCAV 目标威胁估计问题, 即从已知的 UCAV 目标威胁估计决策信息系统中提取出完整的决策规则集进行决策. 一般目标威胁估计是建立在角度优势、速度优势和距离优势等因素的基础上, 这已不能对现代作战中的威胁估计进行全面地描述. 本文引入战术层面上的一些因素, 建立 UCAV 目标威胁估计决策信息系统, 包括条件属性集 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_8\}$ 和决策属性 d , 如图 1 所示.

各属性的含义及取值情况如下所示:

a_1 表示目标类型, 取值为 1 时代表无人电子干扰机, 取值为 2 时代表无人作战飞机, 取值为 3 时代表歼击机. 歼击机的作战能力比无人作战飞机强, 而无人电子干扰机可视为辅助进攻手段, 所以歼击机的威胁程度最高, 无人作战飞机其次, 而无人电子干扰机威胁程度最小.

a_2 表示目标与我机的距离, 取值为 1 时代表离我机距离远, 取值为 2 时代表离我机距离适中, 取值为 3

时代表离我机距离近. 目标与我机距离越近, 我方作战反应时间越短, 则目标威胁程度越大. 所以相对距离近时威胁程度最大, 相对距离适中时其次, 相对距离远时威胁程度最小.

a_3 表示目标相对于我机的速度, 取值为 1 时代表速度慢, 取值为 2 时代表速度适中, 取值为 3 时代表速度快. 目标速度越快, 我方越不易摆脱对方目标, 则目标威胁程度越大, 所以速度快时威胁程度最大, 速度适中时其次, 速度慢时威胁程度最小.

a_4 表示目标所携带武器, 取值为 1 时代表电子干扰设备, 取值为 2 时代表导弹, 取值为 3 时代表导弹和电子干扰设备. 导弹和电子干扰设备威胁程度最大, 导弹其次, 电子干扰设备威胁程度最小.

a_5 表示目标作战意图, 取值为 1 时代表防御, 取值为 2 时代表进攻. 进攻时威胁程度最大, 防御时威胁程度最小.

a_6 表示目标电子干扰实施情况, 取值为 1 时代表未对我方实施电子干扰, 取值为 2 时对我方实施电子干扰. 实施电子干扰时威胁程度最大, 未实施时威胁程度最小.

a_7 表示目标机动能力, 取值为 1 时代表目标机动能力弱, 取值为 2 时代表目标机动能力适中, 取值为 3 时代表目标机动能力强. 目标机动能力强时威胁程度最大, 适中时其次, 目标机动能力弱时威胁程度最小.

a_8 表示目标是否锁定我方, 取值为 1 时代表未锁定, 取值为 2 时代表已锁定. 已锁定时威胁程度最大, 未锁定时威胁程度最小.

d 表示目标威胁程度, 取值为 1 时代表威胁程度弱, 取值为 2 时代表威胁程度中, 取值为 3 时代表威胁程度较高, 取值为 4 时代表威胁程度高.

表 1 为 UCAV 目标威胁估计决策信息系统. 由目标属性偏好性分析可知, 该决策信息系统满足定义 5 中的有限值域正协调定义, 所以该决策信息系统为正协调决策信息系统.

表 1 UCAV 目标威胁估计决策信息系统

	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	d
x_1	2	1	2	2	1	1	2	1	2
x_2	2	2	1	2	2	1	1	2	2
x_3	2	3	3	2	2	1	2	1	2
x_4	1	1	1	1	1	1	1	1	1
x_5	1	2	2	1	2	2	2	1	3
x_6	1	3	3	1	1	1	2	1	2
x_7	3	1	3	3	1	1	3	1	2
x_8	3	2	1	3	2	2	2	1	3
x_9	3	3	3	3	2	2	3	2	4
x_{10}	3	3	2	3	1	1	3	1	2

3.2 具体步骤

步骤 1 给出基于优势关系的辨识矩阵.

根据定义 4, 给出用于区分对象的辨识矩阵 Q , 如表 2 所示.

步骤 2 计算条件属性 A 的优势约简集.

得到辨识矩阵后, 依据定理 1, 可以求取该决策信息系统属性集 A 的优势约简集 $B = \{a_1, a_2, a_3, a_6, a_8\}$, 具体步骤略.

步骤 3 判断系统协调性质, 选取相应协调优势关系决策规则获取方法进行规则提取.

表 2 优势关系下的辨识矩阵 Q

U	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}
x_1	\emptyset	a_3a_7	\emptyset	$a_1a_3a_4a_7$	a_1a_4	a_1a_4	\emptyset	a_3	\emptyset	\emptyset
x_2	$a_2a_5a_8$	\emptyset	a_8	$a_1a_2a_4a_5a_8$	$a_1a_4a_8$	$a_1a_4a_5a_8$	$a_2a_5a_8$	a_8	\emptyset	a_5a_8
x_3	$a_2a_3a_5$	$a_2a_3a_7$	\emptyset	$a_1a_2a_3a_4a_5a_7$	$a_1a_2a_3a_4$	$a_1a_4a_5$	a_2a_3	a_2a_3	\emptyset	a_3a_5
x_4	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset	\emptyset
x_5	$a_2a_5a_6$	$a_3a_6a_7$	a_6	$a_2a_3a_5a_6a_7$	\emptyset	a_5a_6	$a_2a_5a_6$	a_3	\emptyset	a_5a_6
x_6	a_2a_3	$a_2a_3a_7$	\emptyset	$a_2a_3a_7$	a_2a_3	\emptyset	a_2a_3	a_2a_3	\emptyset	a_3
x_7	$a_1a_3a_4a_7$	$a_1a_3a_4a_7$	$a_1a_4a_7$	$a_1a_3a_4a_7$	$a_1a_3a_4a_7$	$a_1a_4a_7$	\emptyset	a_3a_7	\emptyset	a_3
x_8	$a_1a_2a_4a_5a_6$	$a_1a_4a_6a_7$	$a_1a_4a_5$	$a_1a_2a_4a_5a_6a_7$	a_1a_4	$a_1a_4a_5a_6$	$a_2a_5a_6$	\emptyset	\emptyset	a_5a_6
x_9	$a_1 \dots a_8$	$a_1a_2a_3a_4a_6a_7$	$a_1a_4a_6a_7a_8$	$a_1 \dots a_8$	$a_1a_2a_3a_4a_7a_8$	$a_1a_4a_5a_6a_7a_8$	$a_2a_5a_6a_8$	$a_2a_3a_7a_8$	\emptyset	$a_3a_5a_6a_8$
x_{10}	$a_1a_2a_4a_7$	$a_1a_2a_3a_4a_7$	$a_1a_4a_7$	$a_1a_2a_3a_4a_7$	$a_1a_2a_4a_7$	$a_1a_4a_7$	a_2a_3	$a_2a_3a_7$	\emptyset	\emptyset

由于该决策信息系统为正协调决策信息系统, 根据正协调优势关系决策规则获取方法可以得到:

$$D_1 = \{x_4\}, D_2 = \{x_1, x_2, x_3, x_6, x_7, x_{10}\}, D_3 = \{x_5, x_8\}, D_4 = \{x_9\},$$

$$F_1 = \{(1, 1, 1, 1, 1)\}, F_2 = \{(2, 2, 1, 1, 2), (2, 3, 3, 1, 1), (3, 1, 3, 1, 1), (3, 3, 2, 1, 1), (2, 1, 2, 1, 1), (1, 3, 3, 1, 1)\},$$

$$F_3 = \{(1, 2, 2, 2, 1), (3, 2, 1, 2, 1)\}, F_4 = \{(3, 3, 3, 2, 2)\},$$

$$E_1 = \{(1, 1, 1, 1, 1)\}, E_2 = \{(1, 1, 1, 1, 1)\}, E_3 = \{(1, 2, 1, 2, 1)\}, E_4 = \{(3, 3, 3, 2, 2)\},$$

则

$$G_1 = \bigwedge_{k=1}^4 E_k = \{(1, 1, 1, 1, 1)\}, \quad G_2 = \bigwedge_{k=2}^4 E_k = \{(1, 1, 1, 1, 1)\}$$

$$G_3 = \bigwedge_{k=3}^4 E_k = \{(1, 2, 1, 2, 1)\}, \quad G_4 = \bigwedge_{k=4}^4 E_k = \{(3, 3, 3, 2, 2)\}$$

于是有规则:

- r1: 若 $F(x) \geq G_4$, 则 $d(x) = 4$ (威胁程度高);
- r2: 若 $F(x) \geq G_3$ 且 $F(x) < G_4$, 则 $d(x) = 3$ (威胁程度较高);
- r3: 若 $F(x) \geq G_2$ 且 $F(x) < G_3$, 则 $d(x) = 2$ (威胁程度中);
- r4: 若 $F(x) \geq G_1$ 且 $F(x) < G_2$, 则 $d(x) = 1$ (威胁程度弱).

根据以上规则可以得到约简属性集中属性取所有值的决策规则, 如表 3 所示.

3.3 算法复杂度

在求取辨识矩阵的过程中, 由于需要将论域中所有对象两两对比, 而且要比对对象的所有属性, 所以, 该步骤的最坏时间复杂度为 $o(|U|^2|A|)$; 按照定理 1, 求取与辨识矩阵中所有元素都有交集的集合即优势约简集, 该步骤的时间复杂度为 $o(2^{|X|}|U|^2/2)$, 其中 X 为属性核; 分析规则提取的复杂度, 需要计算决策目标为 t 的属性值中取小值和极小值, 所以时间复杂度为 $o((|t|!)|B|)$, 其中, t 为决策目标值, B 为优势约简集. 算法总的时间复杂度为 $o(|U|^2|A|) + o(2^{|X|}|U|^2/2) + o((|t|!)|B|)$.

给出辨识矩阵的空间复杂度为 $o(|U|^2)$; 求取优势约简集的空间复杂度为 $o(|A||U|^2)$; 规则提取时需要计算 E_t, F_t 和 G_t , 该步骤的空间复杂度为 $o(3|t|)$. 算法总的空间复杂度为 $o(|U|^2) + o(|A||U|^2) + o(3|t|)$.

4 与 Greco 优势粗糙集的对比

4.1 由 Greco 优势粗糙集获取的决策规则

仍以表 1 中的数据为研究对象. 根据 Greco 优势粗糙集算法 (以下简称 Greco 算法), 本文选择确定 D_{\geq} -决策规则 (“至少”决策规则) 和确定 D_{\leq} -决策规则 (“至多”决策规则) 两种形式. 按照给出基于优势关系的辨识矩阵、求取优势约简集、给出优势决策类、计算决策类 CL_t^{\geq} 和 CL_t^{\leq} 的下近似等步骤, 可得到以下 18 条决策规则:

表 3 决策规则

规则	规则	规则	规则	规则
1 (3,3,3,2,2)→d=4	23 (1,2,1,2,1)→d=3	45 (1,2,1,2,2)→d=3	67 (1,2,2,2,1)→d=3	89 (1,2,2,2,2)→d=3
2 (1,2,3,2,1)→d=3	24 (1,2,3,2,2)→d=3	46 (1,3,1,2,1)→d=3	68 (1,3,1,2,2)→d=3	90 (1,3,2,2,1)→d=3
3 (1,3,2,2,2)→d=3	25 (1,3,3,2,1)→d=3	47 (1,3,3,2,2)→d=3	69 (2,2,1,2,1)→d=3	91 (2,2,1,2,2)→d=3
4 (2,2,2,2,1)→d=3	26 (2,2,2,2,2)→d=3	48 (2,2,3,2,1)→d=3	70 (2,2,3,2,2)→d=3	92 (2,3,1,2,1)→d=3
5 (2,3,1,2,2)→d=3	27 (2,3,2,2,1)→d=3	49 (2,3,2,2,2)→d=3	71 (2,3,3,2,1)→d=3	93 (2,3,3,2,2)→d=3
6 (3,2,1,2,1)→d=3	28 (3,2,1,2,2)→d=3	50 (3,2,2,2,1)→d=3	72 (3,2,2,2,2)→d=3	94 (3,2,3,2,1)→d=3
7 (3,2,3,2,2)→d=3	29 (3,3,1,2,1)→d=3	51 (3,3,1,2,2)→d=3	73 (3,3,2,2,1)→d=3	95 (3,3,2,2,2)→d=3
8 (3,3,3,2,1)→d=3	30 (1,1,1,1,2)→d=2	52 (1,1,1,2,1)→d=2	74 (1,1,1,2,2)→d=2	96 (1,1,2,1,1)→d=2
9 (1,1,2,1,2)→d=2	31 (1,1,2,2,1)→d=2	53 (1,1,2,2,2)→d=2	75 (1,1,3,1,1)→d=2	97 (1,1,3,1,2)→d=2
10 (1,1,3,2,1)→d=2	32 (1,1,3,2,2)→d=2	54 (2,1,1,1,1)→d=2	76 (1,2,1,1,1)→d=2	98 (1,2,1,1,2)→d=2
11 (1,2,2,1,1)→d=2	33 (1,2,2,1,2)→d=2	55 (1,2,3,1,1)→d=2	77 (1,2,3,1,2)→d=2	99 (1,3,1,1,1)→d=2
12 (1,3,1,1,2)→d=2	34 (1,3,2,1,1)→d=2	56 (1,3,2,1,2)→d=2	78 (1,3,3,1,1)→d=2	100 (1,3,3,1,2)→d=2
13 (2,2,2,1,1)→d=2	35 (2,2,1,1,2)→d=2	57 (2,2,2,1,1)→d=2	79 (2,2,2,1,2)→d=2	101 (2,2,3,1,1)→d=2
14 (2,2,3,1,2)→d=2	36 (2,3,1,1,1)→d=2	58 (2,3,1,1,2)→d=2	80 (2,3,2,1,1)→d=2	102 (2,3,2,1,2)→d=2
15 (2,3,3,1,1)→d=2	37 (2,3,3,1,2)→d=2	59 (3,2,1,1,1)→d=2	81 (3,2,1,1,2)→d=2	103 (3,2,2,1,1)→d=2
16 (3,2,2,1,2)→d=2	38 (3,2,3,1,1)→d=2	60 (3,2,3,1,2)→d=2	82 (3,3,1,1,1)→d=2	104 (3,3,1,1,2)→d=2
17 (3,3,2,1,1)→d=2	39 (3,3,2,1,2)→d=2	61 (2,1,1,1,2)→d=2	83 (2,1,1,2,1)→d=2	105 (2,1,1,2,2)→d=2
18 (2,1,2,1,1)→d=2	40 (2,1,2,1,2)→d=2	62 (2,1,2,2,1)→d=2	84 (3,3,3,1,1)→d=2	106 (3,3,3,1,2)→d=2
19 (2,1,2,2,2)→d=2	41 (2,1,3,1,1)→d=2	63 (2,1,3,1,2)→d=2	85 (2,1,3,2,1)→d=2	107 (2,1,3,2,2)→d=2
20 (3,1,1,1,1)→d=2	42 (3,1,1,1,2)→d=2	64 (3,1,1,2,1)→d=2	86 (3,1,1,2,2)→d=2	108 (3,1,2,1,1)→d=2
21 (3,1,2,1,2)→d=2	43 (3,1,2,2,1)→d=2	65 (3,1,2,2,2)→d=2	87 (3,1,3,1,1)→d=2	
22 (3,1,3,2,1)→d=2	44 (3,1,3,2,2)→d=2	66 (3,1,3,1,2)→d=2	88 (1,1,1,1,1)→d=1	

若 $F(x) \leq F(x_4)$, 则 $x \in CL_1^{\leq}$, 威胁程度“至多”为弱; 若 $F(x) \geq F(x_1)$, 则 $x \in CL_2^{\geq}$, 威胁程度“至少”为中; 若 $F(x) \geq F(x_2)$, 则 $x \in CL_2^{\geq}$, 威胁程度“至少”为中; 若 $F(x) \geq F(x_3)$, 则 $x \in CL_2^{\geq}$, 威胁程度“至少”为中; 若 $F(x) \geq F(x_6)$, 则 $x \in CL_2^{\geq}$, 威胁程度“至少”为中; 若 $F(x) \geq F(x_7)$, 则 $x \in CL_2^{\geq}$, 威胁程度“至少”为中; 若 $F(x) \geq F(x_{10})$, 则 $x \in CL_2^{\geq}$, 威胁程度“至少”为中; 若 $F(x) \leq F(x_1)$, 则 $x \in CL_2^{\leq}$, 威胁程度“至多”为中; 若 $F(x) \leq F(x_2)$, 则 $x \in CL_2^{\leq}$, 威胁程度“至多”为中; 若 $F(x) \leq F(x_3)$, 则 $x \in CL_2^{\leq}$, 威胁程度“至多”为中; 若 $F(x) \leq F(x_6)$, 则 $x \in CL_2^{\leq}$, 威胁程度“至多”为中; 若 $F(x) \leq F(x_7)$, 则 $x \in CL_2^{\leq}$, 威胁程度“至多”为中; 若 $F(x) \leq F(x_{10})$, 则 $x \in CL_2^{\leq}$, 威胁程度“至多”为中; 若 $F(x) \geq F(x_5)$ 则 $x \in CL_3^{\geq}$, 威胁程度“至少”为较高; 若 $F(x) \geq F(x_8)$, 则 $x \in CL_3^{\geq}$, 威胁程度“至少”为较高; 若 $F(x) \leq F(x_5)$, 则 $x \in CL_3^{\leq}$, 威胁程度“至多”为较高; 若 $F(x) \leq F(x_8)$, 则 $x \in CL_3^{\leq}$, 威胁程度“至多”为较高; 若 $F(x) \geq F(x_9)$, 则 $x \in CL_4^{\geq}$, 威胁程度“至少”为高。

4.2 Greco 优势粗糙集算法复杂度

前两个步骤的时间复杂度为 $o(|U|^2|A|)$ 和 $o(2^{|X|}|U|^2/2)$; 求优势类的最坏时间复杂度为 $o(|U|^2|A|)$; 优势类的个数在最坏的情况下为 $|U|$, 给定某一优势类, 求取下近似的时间复杂度为 $o(|A|\lg|U|)$, 时间复杂度最坏为 $o(|U||A|\lg|U|)$. 算法总的时间复杂度为 $o(|U|^2|A|) + o(2^{|X|}|U|^2/2) + o(|U|^2|A|) + o(|U||A|\lg|U|)$.

给出辨识矩阵的空间复杂度为 $o(|U|^2)$; 求取优势约简集的空间复杂度为 $o(|A||U|^2)$; 求取优势决策类主要是完成决策类的向上和向下合并, 故该步骤的空间复杂度为 $o(2|t|-2)$; 计算优势决策类下近似所需的内存亦为 $o(2|t|-2)$. 算法总的空间复杂度 $o(|U|^2) + o(|A||U|^2) + o(4|t|-4)$.

4.3 对比分析

1) 将表 3 与 Greco 算法得到的决策规则对比, 根据 Greco 算法给出的决策规则也覆盖了由威胁程度“弱”、“中”、“较高”和“高”这四个确定节点划分的威胁程度小于等于“弱”(“至多”为弱)、“弱”-“中”(“至多”为中)、“中”-“较高”(“至少”为中和“至多”为较高)、“较高”-“高”(“至少”为较高)和大于等于“高”(“至少”为高)这五个区间, 但部分规则有“重叠”, 如第 2-7 条、第 8-13 条、第 14-15 条、第 16-17 条, 并不能由以上“至少”和“至多”规则中得到全部的确定决策规则. 而由表 3 可知, 利用协调决策信息系统的优势关系决策算法(以下简称协调算法)得到的决策规则可以涵盖属性的所有取值, 解决了有限决策数据库只能

得到有限决策规则的问题. 这样, 无论 UCAV 在作战过程中获取的目标属性是什么值, 都可以根据表 3 中的决策规则给出决策目标值, 有利于作战过程中对目标威胁程度的决策判断.

2) 根据本文所给出的实例, $|U| = 10$, $|A| = 8$, $|X| = 1$, $|t| = 4$, $|B| = 5$, $|B_Z| = 2$, $|e| = 10$, 两种算法的复杂度比较如表 4 所示.

表 4 两种算法复杂度比较

算法	时间复杂度	空间复杂度
Greco 算法	$o(1700+80\lg 10)$	$o(912)$
协调算法	$o(1020)$	$o(912)$

由表 4 可知, 从时间复杂度来看, 协调算法优于 Greco 算法, 这是因为协调算法求解步骤较少, 而从空间复杂度来看, 两者所需的内存相同.

5 结论

本文针对在具有偏好属性的决策信息系统中有限数据仅能得出有限规则这一问题, 在正协调决策信息系统的基础上对协调优势粗糙集的规则获取方法进行了扩展, 提出了负协调和混合协调决策信息系统的规则获取方法, 完善了协调决策信息系统的优势粗糙集方法. 由 UCAV 目标威胁估计实例分析可知, 由该方法得到的决策规则不仅与其他优势粗糙集方法给出的决策规则相一致, 而且能够给出完整的确定决策规则集, 适用于任何包含有偏好属性的决策信息系统.

参考文献

- [1] Greco S, Matarazzo B, Slowinski R. Rough approximation of a preference relation by dominance relations[J]. European Journal of Operational Research, 1999, 117(2): 63–83.
- [2] Zhai L Y, Khoo L P, Zhong Z W. A dominance-based rough set approach to Kansei engineering in product development[J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(1): 393–402.
- [3] Blaszczynski J, Greco S, Slowinski R. Multi-criteria classification — A new scheme for application of dominance-based decision rules[J]. European Journal of Operational Research, 2007, 181(3): 1030–1044.
- [4] Greco S, Matarazzo B, Slowinski R. Rough approximation by dominance relations[J]. International Journal of Intelligent Systems, 2002, 17(2): 153–171.
- [5] Greco S, Matarazzo B, Slowinski R. Rough sets theory for multi-criteria decision analysis[J]. European Journal of Operational Research, 2001, 129(1): 1–47.
- [6] Yang X B, Xie J, Song X N, et al. Credible rules in incomplete decision system based on descriptors[J]. Knowledge-based Systems, 2009, 22(1): 8–17.
- [7] Liou J J H. A novel decision rules approach for customer relationship management of the airline market[J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(3): 4374–4381.
- [8] Slowinski R, Stefanowski J, Greco S, et al. Rough set based processing of inconsistent information in decision analysis[J]. Control Cybernetics, 2000, 29(1): 379–404.
- [9] 张文修, 仇国芳. 基于粗糙集的不确定决策 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 121–123.
Zhang W X, Qiu G F. Uncertain Decision-Making Based on Rough Sets[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 121–123.