

无人战斗机态势评估变精度粗糙集决策方法

黄长强, 胡 杰, 蔡 佳

(空军工程大学工程学院, 陕西 西安 710038)

摘 要: 为了解决在态势评估中一般粗糙集决策方法仅对规则进行提取而不完成规则匹配的问题, 提出了基于加权相似性度量的无人战斗机(unmanned combat aerial vehicle, UCAV)态势评估的变精度粗糙集决策方法。建立了 UCAV 态势评估决策信息系统模型, 基于正确分类率 β 的确定原则, 给出了 β 值的确定方法, 在该 β 值下从决策模型中提取出了决策规则。提出了基于互信息度的属性相对重要度计算方法, 并依据相对重要度给出了属性的客观权重, 结合专家经验形成了属性的综合权重。提出了基于属性综合权重的加权相似性度量方法, 通过比较当前对象与决策信息系统中所有对象的相似程度给出决策结果, 完成对该对象作战意图的预测。结果表明, 该方法有利于 UCAV 对对象作战意图的预测和判断。

关键词: 态势评估; 变精度粗糙集; 无人战斗机; 相似性度量; 加权

中图分类号: V 279

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2011.05.17

Variable precision rough set decision-making method for situation assessment of UCAV

HUANG Chang-qiang, HU Jie, CAI Jia

(Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: A variable precision rough set decision-making method for situation assessment of unmanned combat aerial vehicle (UCAV) based on weighted similarity measurement, which can accomplish decision-making rules matching, is put forward. A model of situation assessment decision-making information system for UCAV is established. Based on the selecting principle of β , the method of choosing value of β is presented. The decision-making rule is then obtained from the decision-making system. The method of calculating attributes' relative importance based on mutual information degree is put forward. Objective weights of attributes are presented according to the relative importance. Combined with expert experience, synthesized weights of attributes are then calculated. Finally, a weighted similarity measurement method based on the synthesized weights is developed, which could predict combat intent of one object by comparing similarity degrees between the object and other objects from the decision-making system. Simulation results show that the method is propitious to UCAV's situation assessment.

Keywords: situation assessment; variable precision rough set; unmanned combat aerial vehicle (UCAV); similarity measurement; weighted

0 引 言

根据美国国防部实验室理事联席会(joint directors of laboratories, JDL)的定义, 作战过程中的态势评估是建立关于作战活动、事件、位置和兵力等元素组织形式的战场综合态势图, 结合战场环境得出目标未来作战意图, 并形成双方的优劣态势关系^[1]。态势评估对于无人战斗机(unmanned combat aerial vehicle, UCAV)来说尤为重要, 自主作战的特性决定了 UCAV 本身必须有能力和作战态势进行觉察和预测。

为了解决 UCAV 态势评估问题, 学者们提出了多种方

法, 如贝叶斯网络^[2]、本体论^[3]等, 但这些方法大多存在推理过程复杂、计算量大和运算时间长等不足。与有人机相比, UCAV 有效载荷小, 机载设备少, 且解算能力差, 上述方法并不适合 UCAV 的态势评估过程。

粗糙集理论是由波兰科学家 Z. Pawlak 于 1982 年提出的一种不确定性决策方法, 文献[4-5]提出将粗糙集运用到态势评估中, 但仅实现了决策规则的提取, 并没有涉及态势预测, 态势评估过程并不完整。另外, 由于战场环境的复杂性, 由传感器获取的用于态势评估的目标参数可能存在噪声或某种程度的不完整, 从而造成分类模式的交迭, 在这种情况下运用传统粗糙集不能形成确定的决策规则。为

收稿日期: 2010-04-15; 修回日期: 2010-12-07。

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)(2009AAXX15, 2009AXX205); 空军工程大学优秀博士学位论文创新基金(BC08002)资助课题

作者简介: 黄长强(1961-), 男, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为有人机与无人机机载制导武器系统技术。E-mail: jackyhoooo@163.com

了解决以上问题,本文提出了UCAV态势评估变精度粗决策方法,根据一定原则确定 β 值,在该 β 值下进行决策规则的提取,并在决策规则的基础上,通过相似性度量的方法完成态势预测,给出决策结果。

1 UCAV 态势评估决策信息系统

1.1 UCAV 态势评估过程

通过态势评估能够发掘出来的关系以及辨识出的事件和行为很多,但过多的信息会造成作战行为难以决策,以致作战任务的失败。所以,选择哪些关系、事件和行为作为作战决策的依据十分重要^[6]。对于作战实体来说,关注和感知的态势只是战场局部范围的,范围大小取决于实体担负的作战任务和配备的装备。不同类型和级别的作战实体,因为作战区域和获取信息的能力不同,它们关注态势和感知态势的范围也不同。一般说,高级别的作战实体,关注态势和感知态势的范围大,反之,低级别的关注态势和感知态势的范围较小。作为较低级别的作战实体,UCAV的态势评估主要是对作战对象的作战意图的预测和判断。

设我方UCAV与目标进行对抗,由本机机载传感器获取目标属性后(也可由它机、地面雷达或预警机等经数据链传给本机),通过态势评估环节完成对目标作战意图的预测和判断。根据Endsley的模型,态势评估应分为态势觉察、态势理解和态势预测三个部分^[7-8]。本文采用变精度粗糙集方法解决UCAV态势评估问题,将态势觉察纳入态势预测过程中,则UCAV态势评估过程如下:首先完成态势理解,即从决策信息系统中提取出决策规则,找出目标状态与目标作战意图的映射关系;然后通过态势觉察过程获取目标当前状态,比较当前条件属性与所有决策规则中条件属性的相似程度,依据最大相似度原则得出目标的作战意图,最终完成态势预测。

1.2 模型建立

态势评估的传统定义是用距离、方向、角度等一些参变量来描述战场态势,但这种定义方式已经不能满足现代作战任务的要求。本文在考虑以上参变量的同时,引入某些战术层信息,形成UCAV态势评估决策信息系统模型。以我方UCAV处于目标前半球范围为例,建立UCAV态势评估决策信息系统模型,如图1所示。

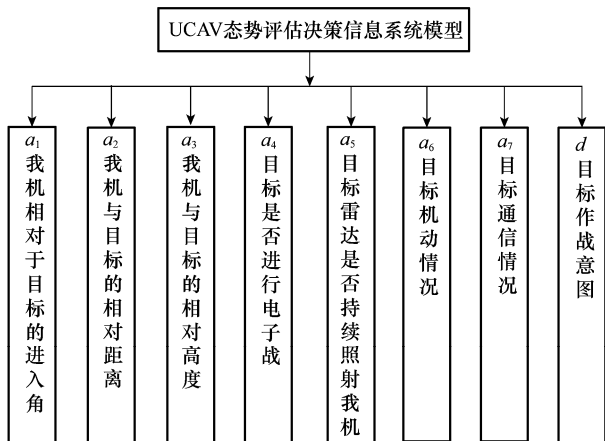


图 1 UCAV 态势评估决策信息系统模型

各属性具体取值如下:

(1) a_1 单位为($^\circ$)。以绝对坐标系为基准,我机相对于目标的进入角是一种空间锥体角,进入角为 $(0, 90^\circ]$ 时量化为0, $(90^\circ, 180^\circ]$ 时量化为1, $(180^\circ, 270^\circ]$ 时量化为2, $(270^\circ, 360^\circ]$ 时量化为3;

(2) a_2 单位为 km。相对距离为 $(0, 5 \text{ km}]$ 时量化为0, $(5 \text{ km}, 10 \text{ km}]$ 时量化为1, $(10 \text{ km}, 15 \text{ km}]$ 时量化为2, $(15 \text{ km}, 20 \text{ km}]$ 时量化为3, $(20 \text{ km}, +\infty]$ 时量化为4;

(3) a_3 单位为 km。目标在我机上方大于2 km处,即相对高度为 $(2 \text{ km}, +\infty]$ 时量化为0, $(0, 2 \text{ km}]$ 时量化为1,目标在我机下方小于2 km处,即相对高度为 $(-2 \text{ km}, 0]$ 时量化为2, $(-\infty, -2 \text{ km}]$ 时量化为3;

(4) a_4 分为目标实施和未实施电子战两种情况,未实施设为0,实施设为1;

(5) a_5 分为目标机载雷达持续和未持续照射我机两种情况,未照射设为0,持续照射设为1;

(6) a_6 分为目标做大机动和未做大机动两种情况,未做大机动设为0,目标做大机动设为1;

(7) a_7 分为目标处于通信状态和处于无线电静默两种情况,无线电静默设为0,通信设为1;

(8) d 分为进攻、防御和逃避三种情况,逃避时设为0,防御时设为1,进攻时设为2。

需要说明的是,模型中属性具体取值范围及量化方法可以根据具体情况确定,但必须涵盖整个值域。

2 基于加权相似性度量的变精度粗决策方法

2.1 基于正确分类率的变精度粗糙集

设 $S=(U, A, V, f)$ 为一个信息系统,也称为知识表示系统。其中, $U=\{U_1, U_2, \dots, U_{|U|}\}$ 为有限非空集合,称为论域对象空间; $A=\{A_1, A_2, \dots, A_{|A|}\}$ 为属性的有限非空集合。 $V=UV_a$,其中 $a \in A, V_a$ 为属性 a 的值域; $f: U \times A \rightarrow V$ 为信息函数,对于 $\forall a \in A, \forall x \in U, f(x, a) \in V_a$,它指定了 U 中每一个对象的属性值。具有条件属性集 C 和决策属性集 $D(A=C \cup D, C \cap D = \emptyset)$ 的信息系统称为决策信息系统。根据不可分辨关系由条件属性集 C 和决策属性集 D 产生的划分分别表示为 $U/C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$ 和 $U/D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$,式中 $m = |U/C|, n = |U/D|, |\cdot|$ 表示集合的基数。在此基础上,给出以下定义^[9]。

决策类的粗糙隶属函数为

$$\mu_{d_j}(x) = |I(x) \cap d_j| / |I(x)| \quad (1)$$

式中, $j=1, 2, \dots, n$;等价类 $I(x)=U/Q, Q \subseteq A$ 。该函数可以表示为概率 $\text{Pr}(d_j | I(x))$,即 x 属于 d_j 的置信度。

对于 $P \subseteq C, x \subseteq U$,给定阈值 $0.5 < \beta \leq 1, d_j$ 的 β 下近似和上近似分别为

$$\begin{aligned} \underline{\text{apr}}_\beta^P(d_j) &= \bigcup \{x \in U \mid \mu_{d_j}(x) \geq \beta\} \\ \overline{\text{apr}}_\beta^P(d_j) &= \bigcup \{x \in U \mid \mu_{d_j}(x) > 1 - \beta\} \end{aligned} \quad (2)$$

P 对于 D 的分类质量为

$$\gamma^\beta(P, D) = \frac{\sum_{j=1}^n |\overline{apr}_P^\beta(d_j)|}{|U|} \quad (3)$$

分类质量度量了论域中给定某一 β 值,由属性集 P 可能正确的分类知识在现有知识中的百分比。若 $\gamma^\beta(P, D) = 0$,则属性集 P 对于 D 是不重要的。

变精度粗糙集中的近似约简 $red^\beta(C, D)$ 为给定 β 值不含多余属性并保证正确分类的最小条件属性集,其满足以下两个性质: ① $\gamma^\beta(C, D) = \gamma^\beta(red^\beta(C, D), D)$; ② $red^\beta(C, D)$ 的子集不具有同样的分类质量。

2.2 β 值的确定

β 值的确定有以下原则: ① 在被选定 β 值下的分类质量尽可能大,即 β 值应具有最大上界; ② 根据被选定的 β 值给出的约简属性集中的属性个数应尽可能少。

由文献 [10] 可知,如果决策类 d_j 满足 $\overline{apr}_P^\beta(d_j) = apr_P^\beta(d_j)$,则称决策类 d_j 为 β 可辨别,否则为 β 不可辨别。决策类边界的可辨别概念是相对的,如果在变精度粗糙集中允许一个较小的正确分类率,则决策类可能有较大的可辨别性。

对于决策类的可辨别性有以下定理 [11]:

定理 1 若 d_j 在 $0.5 < \beta \leq 1$ 上是可辨别的,则 d_j 在任何 $0.5 < \beta_1 < \beta$ 上也是可辨别的。

定理 2 若 d_j 在 $0.5 < \beta \leq 1$ 上是不可辨别的,则 d_j 在任何 $\beta < \beta_2 < 1$ 上也是不可辨别的。

上述定理说明,与每一个可分辨决策类相关的是 β 值的上界,等于或小于 β 值上界时可分辨,大于 β 值上界时不可分辨。

对每一个相对粗糙集 d_j 都存在一个阈值 β ,使得 d_j 在这个阈值水平上是可辨别的 [11]。令

$$ndis(I, d_j) = \{0.5 < \beta \leq 1 \mid \overline{apr}_P^\beta(d_j) \neq apr_P^\beta(d_j)\} \quad (4)$$

式中, $ndis(I, d_j)$ 为满足 d_j 不可分辨的 β 值的全体。满足 d_j 为可分辨的 β 的最大值称为可辨别的阈值。根据定理 1 和定理 2 可知,该阈值等于 $ndis(I, d_j)$ 的最小上界,即

$$\xi(I, D) = \inf ndis(I, d_j) \\ \beta = \xi(I, D) = \min(m_1, m_2)$$

$$m_1 = 1 - \max \{Pr(d_j \mid c_k) \mid Pr(d_j \mid c_k) < 0.5\} \\ m_2 = \min \{Pr(d_j \mid c_k) \mid Pr(d_j \mid c_k) > 0.5\} \quad (5)$$

2.3 基于互信息度的属性相对重要度计算方法

计算属性的重要度的互信息度方法 [12] 体现了粗糙集所需处理信息的不确定度,但一般基于互信息度的计算方法仅给出某一条件属性对于决策属性的绝对重要度,并没有考虑条件属性之间的重要度关系。为此,本文给出了属性相对重要度的互信息度计算方法。

对于决策信息系统 S ,属性集 $P \subseteq C, U/P = \{c_1^p, c_2^p, \dots, c_l^p\}$, $l = |U/P|$, P 的概率分布估计为 $p_i = |c_i^p|/|U| (i=1, \dots, l)$ 。于

是, P 的信息熵 [13] 为

$$H(P) = - \sum_{i=1}^l |c_i^p| / |U| \log_2(|U| / |c_i^p|) \quad (6)$$

条件属性集 P 已知时决策属性集 D 的条件熵 [12] 为

$$H(D \mid P) = - \sum_{i=1}^l p_i \sum_{j=1}^n Pr(d_j \mid c_i^p) \log_2 Pr(d_j \mid c_i^p) = \\ - \sum_{i=1}^l \frac{|c_i^p|}{|U|} \sum_{j=1}^n \frac{|d_j \cap c_i^p|}{|c_i^p|} \log_2 \frac{|d_j \cap c_i^p|}{|c_i^p|} \quad (7)$$

条件属性集 P 与决策属性集 D 的互信息度 [14] 为

$$I(D; P) = H(D) - H(D \mid P) \\ I(P; D) = H(P) - H(P \mid D) \quad (8)$$

两个信息源的互信息度反映了一个信息源从另一个信息源获取的信息量,于是有 $I(D; P) = I(P; D)$ 。

当属性集中删除了一个属性 a 后,互信息度的变化量为

$$\Delta I = \text{abs}(I(P; D) - I(P - \{a\}; D)) = \\ \text{abs}(H(D \mid P - \{a\}) - H(D \mid P)) \quad (9)$$

式中, $\text{abs}(\cdot)$ 为取绝对值。

属性 a 对于决策属性集 D 的重要度为

$$SIG(a, P, D) = \Delta I \quad (10)$$

$SIG(a, P, D)$ 的值越大,说明在已知属性 P 的条件下,删除属性 a 使得互信息度的变化量越大,即属性 a 对决策属性集 D 的越重要。

对于 $\forall a_p, a_q \in A, a_p$ 与 a_q 的相对重要度为

$$SIG_{pq} = SIG(a_p, P, D) / SIG(a_q, P, D) \quad (11)$$

2.4 基于属性综合权重的改进加权相似性度量方法

比较各个对象之间的相似程度,主要是比较对象在所有属性上的相似程度。鉴于各个属性的重要度不同,对相似程度的影响也不同,所以需要属性进行加权处理。现有加权相似性度量方法是在属性重要度的基础上,为每个属性赋予合适的权值,但这一类权值仅由客观计算所得,没有考虑专家经验。基于属性相对重要度的概念,综合主观和客观属性权重,本文给出了一种改进加权相似性度量方法。需要说明的是,加权相似性度量方法中所处理的对象属性集应该是约简后的属性集,这不仅可以降低计算量,更可以避免属性重要度为零时造成的计算结果的不合理性。所以在计算属性权值之前,首先要根据选定的 β 值对属性进行约简。

设条件属性约简集 $B = \{b_1, b_2, \dots, b_{|B|}\}$, 对于 $\forall b_p, b_q \in B(p, q=1, 2, \dots, |B|)$, 由几何均值法有

$$\omega_{b_p} = \left(\prod_{q=1}^{|B|} SIG_{pq} \right)^{1/|B|} \quad \omega_B = \sum_{p=1}^{|B|} \omega_{b_p} \quad (12)$$

进行归一化处理,得属性 b_p 的权重为

$$\omega_{b_p}^0 = \omega_{b_p} / \omega_B \quad (13)$$

该权重为根据数据计算所得的客观权重,基于此,属性 b_p 的综合权重为

$$\omega_p = \alpha_1 \omega_{b_p}^0 + \alpha_2 \omega'_p \quad (14)$$

式中, $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$; ω'_p 为主观权重。当 $\alpha_1 > \alpha_2$ 时,说明决策

者重视客观权重;当 $\alpha_2 > \alpha_1$ 时,说明决策者重视专家的经验知识。在确定综合权重时,若决策者完全信任由决策信息系统所获取的客观权重,则可设 $\alpha_1 = 1, \alpha_2 = 0$;若决策者完全依赖于专家经验,则可设 $\alpha_1 = 0, \alpha_2 = 1$ 。

设对象 $u_{m'}, u_{n'} \in U$, 两者在属性 b_p 上的相似度^[15]为

$$SIM_p(u_{m'}, u_{n'}) = 1 - \frac{\text{abs}(v_{m'} - v_{n'})}{\text{abs}(b_{p\max} - b_{p\min})} \quad (15)$$

在约简后的所有属性上两者之间的相似度为

$$SIM(u_{m'}, u_{n'}) = \frac{1}{|B|} \sum_{p=1}^{|B|} \omega_p SIM_p(u_{m'}, u_{n'}) \quad (16)$$

式中, $v_{m'}, v_{n'}$ 为对象 $u_{m'}, u_{n'}$ 在属性 b_p 上的取值; $b_{p\max}, b_{p\min}$ 为属性 b_p 在值域上的最大值和最小值。

3 算例分析

针对某一 UCAV 态势评估决策信息系统,如表 1 所示,运用基于改进加权相似性度量的变精度粗决策方法加以解决。该系统包括 10 个对象,每个对象具有 7 个条件属性和 1 个决策属性。

表 1 UCAV 态势评估决策信息系统

	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	d
u_1	0	1	1	1	1	0	0	2
u_2	0	2	0	0	0	1	0	1
u_3	0	2	0	0	0	1	0	1
u_4	1	0	2	0	1	0	1	2
u_5	2	1	0	0	0	1	0	0
u_6	1	3	2	1	0	0	1	0
u_7	0	2	0	0	0	1	0	1
u_8	0	2	2	1	0	1	0	0
u_9	0	1	1	1	0	0	1	1
u_{10}	1	0	0	1	1	1	0	2

步骤 1 确定正确分类率 β 值

基于表 1 中的条件属性集和决策属性,有

$$U/A = \{c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8\} = \{u_1, \{u_2, u_3, u_7\}, u_4, u_5, u_6, u_8, u_9, u_{10}\}$$

$$U/d = \{d_1, d_2, d_3\} = \{\{u_1, u_4, u_{10}\}, \{u_2, u_3, u_7, u_9\}, \{u_5, u_6, u_8\}\}$$

$$\begin{aligned} \Pr(d_1 | c_1) &= 1 \Pr(d_1 | c_2) = 0 \Pr(d_1 | c_3) = 1 \\ \Pr(d_1 | c_4) &= 0 \Pr(d_1 | c_5) = 0 \Pr(d_1 | c_6) = 0 \\ \Pr(d_1 | c_7) &= 0 \Pr(d_1 | c_8) = 1 \Pr(d_2 | c_1) = 0 \\ \Pr(d_2 | c_2) &= 1 \Pr(d_2 | c_3) = 0 \Pr(d_2 | c_4) = 0 \\ \Pr(d_2 | c_5) &= 0 \Pr(d_2 | c_6) = 0 \Pr(d_2 | c_7) = 1 \\ \Pr(d_2 | c_8) &= 0 \Pr(d_3 | c_1) = 0 \Pr(d_3 | c_2) = 0 \\ \Pr(d_3 | c_3) &= 0 \Pr(d_3 | c_4) = 1 \Pr(d_3 | c_5) = 1 \\ \Pr(d_3 | c_6) &= 1 \Pr(d_3 | c_7) = 0 \Pr(d_3 | c_8) = 0 \end{aligned}$$

根据式(5)得

$$\begin{aligned} m_{1d_1} &= 1 - \max \{\Pr(d_1 | c_k) | \Pr(d_1 | c_k) < 0.5\} = 1 \\ m_{2d_1} &= \min \{\Pr(d_1 | c_k) | \Pr(d_1 | c_k) > 0.5\} = 1 \end{aligned}$$

于是

$$\beta_{d_1} = \xi(I, d_1) = \min(m_{1d_1}, m_{2d_1}) = 1$$

同理有

$$\beta_{d_2} = \xi(I, d_2) = \min(m_{1d_2}, m_{2d_2}) = 0.67$$

$$\beta_{d_3} = \xi(I, d_3) = \min(m_{1d_3}, m_{2d_3}) = 1$$

则 β 的可辨别阈值上界为 0.67,该阈值上界将 β 取值范围划分为两个区间(0.5, 0.67]和(0.67, 1]。根据式(3)计算两个区间的分类质量得

$$\gamma^{\beta \in (0.5, 0.67]}(C, d) = 1, \gamma^{\beta \in (0.67, 1]}(C, d) = 0.625$$

根据 β 值的确定原则得到 $\beta = 0.67$ 。

图 2 为 β 的取值范围和分类质量。由结果可以看出, β 值与分类质量逆相关。一方面,在特定的 β 取值区间内,分类质量保持不变;另一方面,随着 β 取值增加,分类质量呈下降趋势。

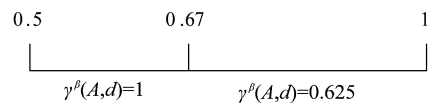


图 2 β 的取值范围和分类质量

步骤 2 求取近似约简集 B 并提取决策规则

根据分类质量的两个性质,求取近似约简集 B ,使得 $\gamma^{0.67}(A, d) = \gamma^{0.67}(B, d)$ 。由于步骤较多,在此省略具体过程,求得约简集有两个, $B = \{a_1, a_2, a_3, a_5, a_6\}$ 和 $B = \{a_1, a_2, a_4, a_5, a_6, a_7\}$,核为 $\{a_1, a_2, a_5, a_6\}$ 。根据表 1 可以提取出以下决策规则,如表 2~表 3 所示。

表 2 以 $B = \{a_1, a_2, a_3, a_5, a_6\}$ 为约简集的 UCAV 态势评估决策规则

	决策规则	支持数
1	$a_1 = 0 \wedge a_2 = 1 \wedge a_3 = 1 \wedge a_5 = 1 \wedge a_6 = 0 \rightarrow d = 2$	1
2	$a_1 = 0 \wedge a_2 = 2 \wedge a_3 = 0 \wedge a_5 = 0 \wedge a_6 = 1 \rightarrow d = 1$	3
3	$a_1 = 1 \wedge a_2 = 0 \wedge a_3 = 2 \wedge a_5 = 1 \wedge a_6 = 0 \rightarrow d = 2$	1
4	$a_1 = 2 \wedge a_2 = 1 \wedge a_3 = 0 \wedge a_5 = 0 \wedge a_6 = 1 \rightarrow d = 0$	1
5	$a_1 = 1 \wedge a_2 = 3 \wedge a_3 = 2 \wedge a_5 = 0 \wedge a_6 = 0 \rightarrow d = 0$	1
6	$a_1 = 0 \wedge a_2 = 2 \wedge a_3 = 2 \wedge a_5 = 0 \wedge a_6 = 1 \rightarrow d = 0$	1
7	$a_1 = 0 \wedge a_2 = 1 \wedge a_3 = 1 \wedge a_5 = 0 \wedge a_6 = 0 \rightarrow d = 1$	1
8	$a_1 = 1 \wedge a_2 = 0 \wedge a_3 = 0 \wedge a_5 = 1 \wedge a_6 = 1 \rightarrow d = 2$	1

表 3 以 $B = \{a_1, a_2, a_4, a_5, a_6, a_7\}$ 为约简集的 UCAV 态势评估决策规则

	决策规则	支持数
1	$a_1 = 0 \wedge a_2 = 1 \wedge a_4 = 1 \wedge a_5 = 1 \wedge a_6 = 0 \wedge a_7 = 0 \rightarrow d = 2$	1
2	$a_1 = 0 \wedge a_2 = 2 \wedge a_4 = 0 \wedge a_5 = 0 \wedge a_6 = 1 \wedge a_7 = 0 \rightarrow d = 1$	3
3	$a_1 = 1 \wedge a_2 = 0 \wedge a_4 = 0 \wedge a_5 = 1 \wedge a_6 = 0 \wedge a_7 = 1 \rightarrow d = 2$	1
4	$a_1 = 2 \wedge a_2 = 1 \wedge a_4 = 0 \wedge a_5 = 0 \wedge a_6 = 1 \wedge a_7 = 0 \rightarrow d = 0$	1
5	$a_1 = 1 \wedge a_2 = 3 \wedge a_4 = 1 \wedge a_5 = 0 \wedge a_6 = 0 \wedge a_7 = 1 \rightarrow d = 0$	1
6	$a_1 = 0 \wedge a_2 = 2 \wedge a_4 = 1 \wedge a_5 = 0 \wedge a_6 = 1 \wedge a_7 = 0 \rightarrow d = 0$	1
7	$a_1 = 0 \wedge a_2 = 1 \wedge a_4 = 1 \wedge a_5 = 0 \wedge a_6 = 0 \wedge a_7 = 1 \rightarrow d = 1$	1
8	$a_1 = 1 \wedge a_2 = 0 \wedge a_4 = 1 \wedge a_5 = 1 \wedge a_6 = 1 \wedge a_7 = 0 \rightarrow d = 2$	1

为了减少 UCAV 态势评估决策规则匹配过程的计算量,选取属性数目较少的表 2 作为后续计算的基础。

步骤 3 计算近似约简集中各属性的相对重要度按照不同属性集对对象空间进行划分可得

$$U/B = \{c_1^B, c_2^B, c_3^B, c_4^B, c_5^B, c_6^B, c_7^B, c_8^B\} = \{u_1, \{u_2, u_3, u_7\}, u_4, u_5, u_6, u_8, u_9, u_{10}\}$$

$$\begin{aligned}
& U/(B - \{a_1\}) = \\
& \{c_1^{B-\{a_1\}}, c_2^{B-\{a_1\}}, c_3^{B-\{a_1\}}, c_4^{B-\{a_1\}}, c_5^{B-\{a_1\}}, c_6^{B-\{a_1\}}\} = \\
& \{u_1, \{u_2, u_3, u_5, u_7\}, u_4, \{u_6, u_9\}, u_8, u_{10}\} \\
& U/(B - \{a_2\}) = \\
& \{c_1^{B-\{a_2\}}, c_2^{B-\{a_2\}}, c_3^{B-\{a_2\}}, c_4^{B-\{a_2\}}, c_5^{B-\{a_2\}}, c_6^{B-\{a_2\}}, c_7^{B-\{a_2\}}, c_8^{B-\{a_2\}}\} = \\
& \{u_1, \{u_2, u_3, u_7\}, u_4, u_5, u_6, u_8, u_9, u_{10}\} \\
& U/(B - \{a_3\}) = \\
& \{c_1^{B-\{a_3\}}, c_2^{B-\{a_3\}}, c_3^{B-\{a_3\}}, c_4^{B-\{a_3\}}, c_5^{B-\{a_3\}}, c_6^{B-\{a_3\}}, c_7^{B-\{a_3\}}\} = \\
& \{u_1, \{u_2, u_3, u_7, u_8\}, u_4, u_5, u_6, u_9, u_{10}\} \\
& U/(B - \{a_5\}) = \\
& \{c_1^{B-\{a_5\}}, c_2^{B-\{a_5\}}, c_3^{B-\{a_5\}}, c_4^{B-\{a_5\}}, c_5^{B-\{a_5\}}, c_6^{B-\{a_5\}}, c_7^{B-\{a_5\}}\} = \\
& \{\{u_1, u_9\}, \{u_2, u_3, u_7\}, u_4, u_5, u_6, u_8, u_{10}\} \\
& U/(B - \{a_6\}) = \\
& \{c_1^{B-\{a_6\}}, c_2^{B-\{a_6\}}, c_3^{B-\{a_6\}}, c_4^{B-\{a_6\}}, c_5^{B-\{a_6\}}, c_6^{B-\{a_6\}}, c_7^{B-\{a_6\}}\} = \\
& \{u_1, \{u_2, u_3, u_7\}, u_4, u_5, u_6, \{u_8, u_9\}, u_{10}\} \\
& U/d =
\end{aligned}$$

$$\{d_1, d_2, d_3\} = \{\{u_1, u_4, u_{10}\}, \{u_2, u_3, u_7, u_9\}, \{u_5, u_6, u_8\}\}$$

于是根据式(7)有

$$\begin{aligned}
& H(d | B) = \\
& - \sum_{i=1}^7 \frac{|c_i^B|}{|U|} \sum_{j=1}^3 \frac{|d_j \cap c_i^B|}{|c_i^B|} \log_2 \frac{|d_j \cap c_i^B|}{|c_i^B|} = 0.28 \\
& H(d | B - \{a_1\}) = - \sum_{i=1}^6 \frac{|c_i^{B-\{a_1\}}|}{|U|} \cdot \\
& \sum_{j=1}^3 \frac{|d_j \cap c_i^{B-\{a_1\}}|}{|c_i^{B-\{a_1\}}|} \log_2 \frac{|d_j \cap c_i^{B-\{a_1\}}|}{|c_i^{B-\{a_1\}}|} = 0.8 \\
& H(d | B - \{a_2\}) = - \sum_{i=1}^8 \frac{|c_i^{B-\{a_2\}}|}{|U|} \cdot \\
& \sum_{j=1}^3 \frac{|d_j \cap c_i^{B-\{a_2\}}|}{|c_i^{B-\{a_2\}}|} \log_2 \frac{|d_j \cap c_i^{B-\{a_2\}}|}{|c_i^{B-\{a_2\}}|} = 0.8 \\
& H(d | B - \{a_3\}) = - \sum_{i=1}^7 \frac{|c_i^{B-\{a_3\}}|}{|U|} \cdot \\
& \sum_{j=1}^3 \frac{|d_j \cap c_i^{B-\{a_3\}}|}{|c_i^{B-\{a_3\}}|} \log_2 \frac{|d_j \cap c_i^{B-\{a_3\}}|}{|c_i^{B-\{a_3\}}|} = 0.44 \\
& H(d | B - \{a_5\}) = - \sum_{i=1}^7 \frac{|c_i^{B-\{a_5\}}|}{|U|} \cdot \\
& \sum_{j=1}^3 \frac{|d_j \cap c_i^{B-\{a_5\}}|}{|c_i^{B-\{a_5\}}|} \log_2 \frac{|d_j \cap c_i^{B-\{a_5\}}|}{|c_i^{B-\{a_5\}}|} = 0.42 \\
& H(d | B - \{a_6\}) = - \sum_{i=1}^7 \frac{|c_i^{B-\{a_6\}}|}{|U|} \cdot \\
& \sum_{j=1}^3 \frac{|d_j \cap c_i^{B-\{a_6\}}|}{|c_i^{B-\{a_6\}}|} \log_2 \frac{|d_j \cap c_i^{B-\{a_6\}}|}{|c_i^{B-\{a_6\}}|} = 0.48
\end{aligned}$$

根据式(9)~式(10)可知

$$\begin{aligned}
& SIG(a_1, B, d) = \\
& \text{abs}(H(d | B - \{a_1\}) - H(d | B)) = 0.52 \\
& SIG(a_2, B, d) = \\
& \text{abs}(H(d | B - \{a_2\}) - H(d | B)) = 0.52 \\
& SIG(a_3, B, d) = \\
& \text{abs}(H(d | B - \{a_3\}) - H(d | B)) = 0.16 \\
& SIG(a_5, B, d) =
\end{aligned}$$

$$\text{abs}(H(d | B - \{a_5\}) - H(d | B)) = 0.14$$

$$SIG(a_6, B, d) =$$

$$\text{abs}(H(d | B - \{a_6\}) - H(d | B)) = 0.20$$

由式(11)得到属性相对重要度矩阵为

$$\begin{aligned}
V_{SIG} &= \begin{bmatrix} SIG_{11} & SIG_{12} & SIG_{13} & SIG_{15} & SIG_{16} \\ SIG_{21} & SIG_{22} & SIG_{23} & SIG_{25} & SIG_{26} \\ SIG_{31} & SIG_{32} & SIG_{33} & SIG_{35} & SIG_{36} \\ SIG_{51} & SIG_{52} & SIG_{53} & SIG_{55} & SIG_{56} \\ SIG_{61} & SIG_{62} & SIG_{63} & SIG_{65} & SIG_{66} \end{bmatrix} = \\
& \begin{bmatrix} 1 & 1 & 3.25 & 3.71 & 2.6 \\ 1 & 1 & 3.25 & 3.71 & 2.6 \\ 0.31 & 0.31 & 1 & 1.14 & 0.8 \\ 0.27 & 0.27 & 0.875 & 1 & 0.7 \\ 0.38 & 0.38 & 1.25 & 1.43 & 1 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

步骤4 计算属性综合权重

由式(12)可得

$$\begin{aligned}
w_{a_1} &= (SIG_{11} \times SIG_{12} \times SIG_{13} \times SIG_{15} \times SIG_{16})^{1/5} = 1.99 \\
w_{a_2} &= (SIG_{21} \times SIG_{22} \times SIG_{23} \times SIG_{25} \times SIG_{26})^{1/5} = 1.99 \\
w_{a_3} &= (SIG_{31} \times SIG_{32} \times SIG_{33} \times SIG_{35} \times SIG_{36})^{1/5} = 0.61 \\
w_{a_5} &= (SIG_{51} \times SIG_{52} \times SIG_{53} \times SIG_{55} \times SIG_{56})^{1/5} = 0.54 \\
w_{a_6} &= (SIG_{61} \times SIG_{62} \times SIG_{63} \times SIG_{65} \times SIG_{66})^{1/5} = 0.76
\end{aligned}$$

$$w_B = w_{a_1} + w_{a_2} + w_{a_3} + w_{a_5} + w_{a_6} = 5.89$$

进行归一化处理,得各属性的客观权重为

$$\begin{aligned}
w_B^{a_1} &= 0.34, w_B^{a_2} = 0.34, w_B^{a_3} = 0.10 \\
w_B^{a_5} &= 0.09, w_B^{a_6} = 0.13
\end{aligned}$$

依据专家经验,给出主观权重为

$$\begin{aligned}
w'_1 &= 0.20, w'_2 = 0.20, w'_3 = 0.15 \\
w'_5 &= 0.30, w'_6 = 0.15
\end{aligned}$$

设 $\alpha_1 = 0.4, \alpha_2 = 0.6$, 意味着在本例中较为看重专家经验,于是有综合权重为

$$\begin{aligned}
w_1 &= \alpha_1 w_B^{a_1} + \alpha_2 w'_1 = 0.256 \\
w_2 &= \alpha_1 w_B^{a_2} + \alpha_2 w'_2 = 0.256 \\
w_3 &= \alpha_1 w_B^{a_3} + \alpha_2 w'_3 = 0.13 \\
w_5 &= \alpha_1 w_B^{a_5} + \alpha_2 w'_5 = 0.216 \\
w_6 &= \alpha_1 w_B^{a_6} + \alpha_2 w'_6 = 0.142
\end{aligned}$$

步骤5 基于加权相似性度量方法进行态势评估决策

设现有一待估计对象 u_{11} , 在某一时刻对象属性为{我机相对于目标进入角为 65° , 与我机的相对距离为 7 km, 位于我机下方相对高度为 2 500 km 处, 实施电子战, 机载雷达持续照射我机, 未做大机动, 无线电静默}, 则根据属性约简集计算该对象与表 1 中所有对象的相似度。

属性 a_1, a_2, a_3, a_5 和 a_6 取值为“0”时设为 0, 取值“1”时设为 100, 取值“2”时设为 200, 取值“3”时设为 300。

根据式(15)~式(16)得

$$\begin{aligned}
SIM(u_1, u_{11}) &= 0.422, SIM(u_2, u_{11}) = 0.217 \\
SIM(u_3, u_{11}) &= 0.217, SIM(u_4, u_{11}) = 0.153
\end{aligned}$$

$SIM(u_5, u_{11}) = 0.208, SIM(u_6, u_{11}) = 0.108$
 $SIM(u_7, u_{11}) = 0.217, SIM(u_8, u_{11}) = 0.161$
 $SIM(u_9, u_{11}) = 0.117, SIM(u_{10}, u_{11}) = 0.110$

由于 $SIM(u_1, u_{11})$ 最大, 所以 u_{11} 和 u_1 最相似, 于是给出 u_{11} 的决策为“进攻”, 即 {我机相对于目标进入角为 65° } \cup {与我机的相对距离为 7 km} \cup {位于我机下方相对高度为 2 500 km 处} \cup {实施电子战} \cup {机载雷达持续照射我机} \cup {未做大机动} \cup {无线电静默} \rightarrow {进攻}。

在本例中, 若不考虑主观权重, 仅根据客观权重计算进行相似性度量, 则有

$SIM(u_1, u_{11}) = 0.167, SIM(u_2, u_{11}) = 0.223$
 $SIM(u_3, u_{11}) = 0.223, SIM(u_4, u_{11}) = 0.338$
 $SIM(u_5, u_{11}) = 0.170, SIM(u_6, u_{11}) = 0.116$
 $SIM(u_7, u_{11}) = 0.223, SIM(u_8, u_{11}) = 0.375$
 $SIM(u_9, u_{11}) = 0.125, SIM(u_{10}, u_{11}) = 0.164$

u_{11} 和 u_8 最相似, 于是给出 u_{11} 的决策为“逃避”。

一般而言, 在实际作战过程中, 对方机载雷达对我机是否进行持续照射对于决定对方作战意图来说较为重要, 而由文中的结果可知, 该属性的客观权重较小。这是因为本文中所给出的态势评估决策信息系统数据有限, 所以有时仅由客观权重给出的相似性度量结果可信度不高。而通过综合考虑主观权重之后, 专家经验和知识能够对仅由客观权重得出的结果进行主观修正, 从而使决策结果在客观数据的基础上更符合实际作战情况。

4 结束语

本文提出了基于加权相似性度量的 UCAV 态势评估变精度粗决策方法, 旨在通过决策规则的提取和匹配预测出对象的作战意图, 通过分析可知:

(1) 在实际应用中, UCAV 在空中仅需进行规则匹配, 其他步骤可在地面任务装订时完成, 方法简单, 适合 UCAV 作战要求;

(2) 决策信息系统中数据越多, 能够提取的决策规则越多, 能够找到与待决策对象具有高匹配性规则的可能性也就越大, 则利用加权相似性度量方法进行决策的正确率也就可能越高;

(3) 文献[5]中的方法仅讨论了 UCAV 态势评估决策规则的提取和融合, 相比较而言, 本文所给出的方法考虑了态势觉察、态势理解和态势预测 3 个方面, 使态势评估的粗集决策方法具有规则匹配的功能, 决策过程更加完整。

参考文献:

[1] White F E. Joint directors of laboratories-technical panel for C³I, data fusion sub-panel[R]. San Diego: Naval Ocean Systems Center, 1987.

[2] 杨有龙, 高晓光. 无人战斗机的态势感知模型框架[J]. 飞行力学, 2003, 21(3): 6-9. (Yang Y L, Gao X G. A model framework of situation awareness for uninhabited combat air vehicle[J]. *Flight Dynamics*, 2003, 21(3): 6-9.)

[3] Kokar M M, Matheus C J, Baclawski K. Ontology-based situation awareness[J]. *Information Fusion*, 2009, 10(1): 83-98.

[4] 李涛, 白剑林, 栾前进. 基于粗糙集与证据理论的防空作战态势评估方法[J]. 航空计算技术, 2008, 38(3): 46-48. (Li T, Bai J L, Luan Q J. Research on situation assessment of air-defense warfare based on rough set theory and evidence theory[J]. *Aeronautical Computing Technique*, 2008, 38(3): 46-48.)

[5] 胡杰, 黄长强, 赵辉, 等. 基于变精度粗糙集理论的 UCAV 态势评估方法研究[J]. 电光与控制, 2010, 17(3): 23-26. (Hu J, Huang C Q, Zhao H, et al. On UCAV's situation assessment method based on variable precision rough set theory[J]. *Electronics Optics and Control*, 2010, 17(3): 23-26.)

[6] Kokar M M, Gee W N. High-level information fusion and situation awareness[J]. *Information Fusion*, 2009, 10(1): 2-5.

[7] Endsley M R. Measurement of situation awareness in dynamic systems[J]. *Human Factors*, 1995, 37(1): 65-84.

[8] 王晓帆, 王宝树. 基于贝叶斯网络和直觉模糊推理的态势估计方法[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(11): 2742-2746. (Wang X F, Wang B S. Situation assessment method based on Bayesian network and intuitionistic fuzzy reasoning[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2009, 31(11): 2742-2746.)

[9] An A, Shan N, Chan C, et al. Discovering rules for water demand prediction: an enhanced rough-set approach[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 1996, 9(6): 645-653.

[10] Ziarko W. Variable precision rough sets model[J]. *Journal of Computer and Systems Sciences*, 1993, 46(1): 39-59.

[11] Beynon M. Reducts within the variable precision rough sets model: a further investigation[J]. *European Journal of Operational Research*, 2001, 134(3): 592-605.

[12] Liu J F, Hu Q H, Yu D. A weighted rough set based method developed for class imbalance learning[J]. *Information Sciences*, 2008, 178(4): 1235-1256.

[13] Duntsch I, Gediga G. Uncertainty measures of rough set prediction[J]. *Artificial Intelligence*, 1998, 106(1): 109-137.

[14] 张文修, 吴伟志, 梁吉业, 等. 粗糙集理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 133-135. (Zhang W X, Wu W Z, Liang J Y, et al. *Rough sets theory and method* [M]. Beijing: Science Press, 2001: 133-135.)

[15] 盛步云, 林志军, 丁毓峰, 等. 基于粗糙集的协同设计冲突消解事例推理技术[J]. 计算机集成制造系统, 2006, 12(12): 1952-1956. (Sheng B Y, Lin Z J, Ding Y F, et al. Rough set-based conflict resolution case reasoning in collaborative design[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2006, 12(12): 1952-1956.)