

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuua@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2019.0638

基于 RS-CRITIC 的空战目标威胁评估

杨爱武, 李战武*, 徐安, 吕跃, 奚之飞

(空军工程大学 航空工程学院, 西安 710038)

摘 要: 针对不确定信息下的空战目标威胁评估问题, 提出了一种基于粗糙集(RS)理论和指标重要性相关(CRITIC)法的目标威胁评估模型。首先, 通过 CRITIC 法确定准确信息下的目标威胁值, 利用数据挖掘(MD)启发式算法求解最佳分割集合, 将目标威胁值离散化处理后替代粗糙集决策信息系统中的决策属性。其次, 基于构建的完备粗糙集决策信息系统, 通过决策矩阵实现属性约简和目标威胁评估最小决策规则提取。最后, 将规则应用于不确定信息下的目标威胁评估。仿真结果表明: 所提模型能够实现信息缺失下的目标威胁评估, 减少了主观因素和先验知识的影响, 扩展了粗糙集理论应用范围。

关键词: 威胁评估; 粗糙集(RS); 指标重要性相关(CRITIC)法; 决策规则; 不确定信息
中图分类号: TN97

文献标志码: A **文章编号:** 1001-5965(2020)12-2357-09

空战目标威胁评估是在复杂的作战环境下获取敌方动态信息, 将信息进行高效处理, 并量化显示敌方战机威胁程度的大小。随着空战场环境复杂性、对抗性增加, 信息颗粒度、频率、有效性难以满足实际作战的需求。在传感器获取的不确定性、不完备性信息情况下, 准确快速地评估目标威胁程度, 对于飞行员机动决策、目标分配、火力分配、获取战场优势具有深远意义。

空战目标威胁评估是典型的多属性决策问题, 现有的研究成果有: 文献[1]提出了一种基于灰色关联度-逼近理想解排序(GRA-TOPSIS)法目标威胁评估方法, 考虑评估指标之间的关联性, 通过灰色关联极大熵来求解客观权重, 解决指标之间的耦合问题以及客观赋权中不能从逻辑视角体现指标的相对重要性问题。文献[2]提出了一种改进 TOPSIS 的多态融合直觉模糊威胁评估方法, 结合直觉模糊和 TOPSIS 法, 通过考虑多时间信息融合提高决策可靠性。文献[3]提出了一种基于自适应推进极限学习机(ELM-AdaBoost)强预测

器的目标威胁评估方法, 通过改进 ELM 算法, 构造 ELM-AdaBoost 强预测器, 对空战数据进行威胁评估, 精确性和实时性较高。文献[4]提出了一种基于区间集对分析(SPA)及粒子群优化(PSO)算法的超视距空战态势评估方法, 利用 SPA 将区间数转换为联系数, 用 PSO 算法对权重进行寻优, 提高态势评估真实性。文献[5]提出了一种基于不确定信息的空战威胁评估方法, 以证据网络为框架, 通过不确定信息的信度结构转换和优化专家对不确定属性权重的偏好, 实现敌机威胁等级评估。文献[6]提出了一种基于离散模糊动态贝叶斯网络的空战态势评估方法, 将模糊分类和离散动态贝叶斯网络结合进行定性推理, 消除噪声值对态势评估的影响。上述关于多属性决策方法均有效实现了目标威胁评估, 但是存在以下 3 点问题: ①灰色理论、模糊理论、专家系统等存在人为主观因素的影响; ②神经网络、贝叶斯网络等需要大量先验知识, 且推理速度难以满足空战实时性特点; ③难以以客观尺度评判不确定信息

收稿日期: 2019-12-22; 录用日期: 2020-04-10; 网络出版时间: 2020-05-07 08:42

网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20200506.1305.002.html

* 通信作者: E-mail: afeulzw@189.cn

引用格式: 杨爱武, 李战武, 徐安, 等. 基于 RS-CRITIC 的空战目标威胁评估[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(12): 2357-2365. YANG A W, LI Z W, XU A, et al. Threat assessment of air combat target based on RS-CRITIC[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(12): 2357-2365 (in Chinese).

下的目标威胁程度。

针对上述问题,结合粗糙集(RS)理论和指标重要性相关(CRITIC)法定量评估不确定信息下的空战目标威胁。RS理论在不需要任何先验知识情况下,基于数据驱动,消除评估数据冗余,进行目标威胁属性约简,提取评估最小决策规则。由于在空战目标威胁评估中缺乏客观的尺度来评判目标威胁程度,导致决策属性的未知性,经典的RS理论难以适用^[7]。CRITIC法通过指标之间的冲突性和数据之间的对比强度来计算客观权重,加权得到的目标威胁值离散化处理后能够客观地评判目标威胁程度。因此,本文提出一种基于CRITIC法计算RS决策属性,构建完备粗糙集决策信息系统,提取目标威胁评估规则的方法,应用于不确定信息下的空战目标威胁评估,解决不确定信息下目标威胁评估问题。

1 基于CRITIC法计算RS决策属性

CRITIC法^[8-9]是由Diakoulaki等提出的客观赋权方法,通过结合指标间冲突性和数据变异对指标权重影响来确定权重。通过CRITIC法确定目标属性权重来得到威胁值,将威胁值属性集合分割离散化,能够客观评判目标威胁程度,解决RS在提取规则时决策属性未知的问题。

1.1 构建目标威胁评估矩阵

在空战对抗过程中,根据空战场态势,确定有 m 个敌方作战单元构成作战单元集 $X = \{X_1, X_2, \dots, X_m\}$ 和 n 个评估指标构成指标集 $N = \{N_1, N_2, \dots, N_n\}$,第 i 个作战单元的第 j 项指标值 u_{ij} ,则目标威胁评估矩阵 $U = [u_{ij}]_{m \times n}$ 。

1.2 规范化评估矩阵

由于评估指标间属性以及量纲不同,存在效益型、成本型和固定型3类指标,需要对评估指标进行规范化处理,得到具有相同效益属性的评估值。

对于效益型指标,其值越大,目标威胁程度越大,处理为

$$z_{ij} = \frac{u_{ij} - \min_i u_{ij}}{\max_i u_{ij} - \min_i u_{ij}} \quad (1)$$

式中: z_{ij} 和 u_{ij} 分别为规范前后态势指标值。

对于成本型指标,其值越大,目标威胁程度越小,处理为

$$z_{ij} = \frac{\max_i u_{ij} - u_{ij}}{\max_i u_{ij} - \min_i u_{ij}} \quad (2)$$

对于固定型指标,其值保持在一个恰当的数字

值 θ 威胁最大,处理为

$$z_{ij} = 1 - \frac{|u_{ij} - \theta|}{\max_i |u_{ij} - \theta|} \quad (3)$$

式中: θ 为固定型指标最佳取值。

经过规范化处理后得到目标威胁矩阵为 $Z = [z_{ij}]_{m \times n}$ 。

1.3 计算各指标综合信息量

指标之间的冲突性由相关系数 r_{kj} 来表示,数据间对比强度由标准差 s_j 来表示。则各指标的综合信息量可以表示为

$$G_j = s_j \sum_{k=1}^n (1 - r_{kj}) \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

式中:

$$s_j = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (z_{ij} - \bar{z}_j)^2} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

$$r_{kj} = \text{cov}(N_k, N_j) / (s_k s_j) \quad k, j = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

式中: \bar{z}_j 为第 j 个指标的平均值。

1.4 确定目标属性权重

通过各指标的综合信息量可以确定指标间的权重向量为

$$\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n) \quad (7)$$

式中:

$$\omega_j = \frac{G_j}{\sum_{j=1}^n G_j} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

1.5 构建粗糙集决策属性

由目标属性权重可以得到目标威胁值 $TH_{m \times 1} = Z\omega$,离散化后得到目标威胁属性即可作为RS信息系统中的决策属性。对于指标值离散化最重要的是构造最佳分割集合,文献[10]提出了一种基于布尔推理离散化方法,求出基本分割集合,但不能对属性值进行有效区分,搜索最佳分割集合是NP难题,采用数据挖掘(MD)启发式算法^[11]求解最佳分割集合。

定义基本分割集合:设条件属性 a 定义实数值序列 $v_1^a < v_2^a < \dots < v_m^a$,其中实数值序列 $\{v_1^a, v_2^a, \dots, v_m^a\} = \{a(x) : x \in U\}$,在属性 a 上的基本分割集合 B_a 为

$$B_a = \{ (a(v_1^a + v_2^a)/2), (a(v_2^a + v_3^a)/2), \dots, (a(v_{m-1}^a + v_m^a)/2) \} \quad (9)$$

MD启发式算法求解最佳分配集合流程如下:

输入:一个决策表 $S = (U, A, V, f)$ 。

输出:一个分割集合 P 。

步骤1 定义 (a, c) 分割对象为 x 和 y ,将集

合 P 设为 \emptyset 。

步骤 2 令 B_a 为属性 a 上基本分割集合。

步骤 3 建立信息表 $S^* = (U^*, A^*)$, 使 U^* 为由 D 区分条件属性值的集合 (u_i, μ_j) , 并且对于每个 $c \in A^*, A^* = \bigcup_{a \in A} C_a$, 使 $c(x, y) = 1$ 当且仅当 c 可区分 x 和 y , 否则 $c(x, y) = 0$ 。

步骤 4 从 S^* 中选择包含 1 最多的列, 将该列对应分割加入 P , 删除该列连同标记为 1 的行。

步骤 5 如果 A^* 非空, 则返回步骤 4, 否则停止。

其中: $U = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ 为空战对抗目标集; $A = C \cup D = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ 为属性集合, 子集 C 为条件属性, 代表目标威胁评估指标, 子集 D 为决策属性, 用离散化后的目标威胁值确定; $V = \bigcup_{a \in A} V_a$ 为属性值的集合, V_a 为属性 $a \in A$ 的值域; $f: U \times A \rightarrow V$ 为 U 和 A 之间的关系集; S^* 为与 S 相关的信息表。

令 $K_{TH} = \{(TH_1, k_1^{TH}), (TH_2, k_2^{TH}), \dots, (TH_m, k_m^{TH})\}$ 为目标威胁值 TH 的最佳分割集合, 设 $k_1^{TH} < k_2^{TH} < \dots < k_m^{TH}$, 分割集合 K_{TH} 定义了一个新决策属性, 即为 TH 的 K 离散化。

$$TH^k(x) = \begin{cases} 0 & \text{当且仅当 } TH(x) < k_1^{TH} \\ i & \text{当且仅当 } TH(x) \in [k_i^{TH}, k_{i+1}^{TH}) \\ m+1 & \text{当且仅当 } TH(x) > k_m^{TH} \end{cases} \quad (10)$$

2 基于 RS 目标威胁评估规则提取

RS 理论能够有效处理不精确、不一致、不完备目标威胁信息, 从中发现隐含知识, 通过目标威胁属性约简, 提取评估最小决策规则^[12]。

步骤 1 构建 RS 信息表。定义 $S = (U, A, V, f)$ ^[13] 为目标威胁评估一个信息表。

属性子集 a 在 U 上不可分辨关系 I_a 为

$$I_a = \{(x, y) \in U \times U : f(x, a) = f(y, a), \forall a \in A\} \quad (11)$$

不可分辨关系 I_a 构成对论域 U 的划分, 用 U/I_a 表示。

步骤 2 属性离散化。基于 MD 启发式算法^[12] 求解最佳分割集合 $C = \bigcup_{a \in A} C_a$, 定义了一个新的决策信息表 $S^C = (U, A^C)$, 即为信息表 S 的 C 离散化, 其中 $A^C = \{a^C : a \in A\}$, $a^C(x)$ 由式(10)确定。

步骤 3 属性约简。对上述得到的决策表进

行属性约简是提取最小决策规则的基础。通过决策矩阵和决策函数^[14] 来进行属性约简, 决策矩阵保留了目标威胁评估矩阵数据中所有的分类信息, 有利于提取目标威胁评估规则, 决策函数表示从论域特定子集中分辨某个对象或者集合。

$S = (U, A, V, f)$ 决策表中, 属性 $a \in A$, 在 S 中 a 的决策矩阵为

$$M_a^D(S) = (\delta_a^D(x_i, x_j))_{m \times m} \quad (12)$$

式中:

$$\delta_a^D(x_i, x_j) = \{a \in A : a(x_i) \neq a(x_j) \text{ 且 } \partial_A(x_i) \neq \partial_A(x_j)\} \quad (13)$$

通过决策矩阵 M_a^D 建立 $x \in U$ 的决策函数为

$$f_A^D(x) = \bigwedge_{y \in U} \{ \bigvee a^* : a \in \delta_a^D(x, y) \text{ 且 } \delta_a^D(x, y) \neq \emptyset \} \quad (14)$$

对信息系统 S 中所有决策类进行区分:

$$g_A^D(U) = \bigwedge_{x \in U} f_A^D(x) \quad (15)$$

式中: $g_A^D(U)$ 的主蕴涵表示区分决策类所需条件属性最小子集。

决策表中决策属性 D 的约简满足下述关系:

1) $B \in \text{Red}(S, D) \leftrightarrow \bigwedge_{a \in B} a^*$ 为 $g_A^D(U)$ 的一个主蕴涵。

2) $B \in \text{Red}(S, x, D) \leftrightarrow \bigwedge_{a \in B} a^*$ 为 $f_A^D(x)$ 的一个主蕴涵。

其中: $\text{Red}(S, D)$ 为全局约简; $\text{Red}(S, x, D)$ 为对象约简。

步骤 4 规则导出。目标威胁评估规则是条件属性集和决策属性关系的直接反映。由属性约简得到最小模式, 进而以约简为基础获取目标威胁评估最小决策规则。令 $\alpha \rightarrow \beta$ 表示目标威胁评估决策规则 “if α then β ”, α 表示条件属性的合取, 为规则前件 β 表示决策属性 $D = v$, 为规则后件^[12]。由对象约简确定最小决策规则:

$$\text{RUL}(S, x, d) = \{F_B(x) \rightarrow (\partial_B = \partial_B(x))\} :$$

$$B \in \text{Red}(S, x, d) \quad (16)$$

$$\text{RUL}(S, d) = \bigcup_{x \in U} \text{RUL}(S, x, d) \quad (17)$$

式中: $\text{RUL}(S, d)$ 为最小决策规则集。

3 基于 RS-CRITIC 目标威胁评估模型

构建基于 RS-CRITIC 目标威胁评估模型首要是分析影响空战目标威胁程度的因素, 建立全面的目标威胁评估模型, 结合 RS 理论和 CRITIC 法提取目标威胁评估最小决策规则, 用于不确定信息下的目标威胁评估。

3.1 目标威胁因素模型

在空战中,影响目标威胁程度的因素主要有空间态势、作战能力和战术意图。空间态势可以分为角度、速度、距离和高度威胁;作战能力可以分为机动、攻击、探测、操纵、生存、航程和电子对抗

抗能力等;战术意图可以分为攻击、掩护、干扰和规避意图等。空间态势为表示状态信息的动态属性,作战能力为表示特征信息的静态属性,战术意图为表示行为特征属性。目标威胁因素分析如图1所示。

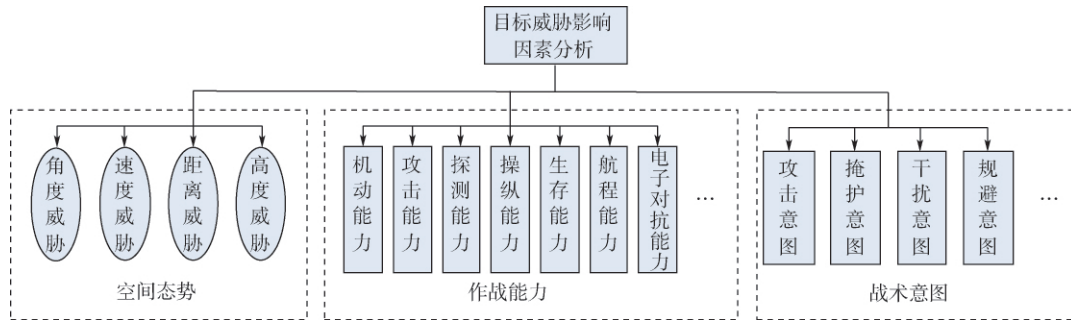


图1 目标威胁因素模型

Fig. 1 Target threat factor model

在复杂对抗环境下,我方作战单元通过对探测信息进行量化处理得到目标威胁程度,其计算公式如下:

1) 角度威胁

$$T_A = (|\varphi| + |q|) / 360^\circ \quad (18)$$

式中: φ 为目标方位角, $0 \leq |\varphi| \leq 180^\circ$; q 为目标进入角, $0 \leq |q| \leq 180^\circ$ 。

2) 速度威胁

$$T_v = \begin{cases} 0.1 & |v_t| < 0.6|v_m| \\ -0.5 + |v_t|/|v_m| & 0.6|v_m| \leq |v_t| \leq 1.5|v_m| \\ 1.0 & |v_t| > 1.5|v_m| \end{cases} \quad (19)$$

式中: v_m 为我方作战单元速度; v_t 为敌机速度。

3) 距离威胁^[14]

$$T_d = \begin{cases} 0 & X \geq X_{Rmax} \\ 0.5e^{-\frac{X-X_{Mmax}}{X_{Rmax}-X_{Mkmax}}} & X_{Mmax} \leq X < X_{Rmax} \\ 2^{-\frac{X-X_{Mkmax}}{X_{Mmax}-X_{Mkmax}}} & X_{Mkmax} \leq X < X_{Mmax} \\ 1 & X_{Mkmin} \leq X < X_{Mkmax} \end{cases} \quad (20)$$

式中: X 为双方作战单元的距离; X_{Rmax} 为雷达最大探测距离; X_{Mmax} 为导弹最大攻击距离; X_{Mkmax} 和 X_{Mkmin} 分别为不可逃逸最大和最小距离。

4) 高度威胁

$$T_h = \begin{cases} 1 & h_d < -5 \text{ km} \\ 0.5 - 0.1h_d & -5 \text{ km} \leq h_d < 5 \text{ km} \\ 0.1 & h_d \geq 5 \text{ km} \end{cases} \quad (21)$$

式中: h_d 为我方高度与敌方高度之差。

5) 作战能力威胁^[15]

$$\vartheta = [\ln \lambda_1 + \ln(\sum \lambda_2 + 1) + \ln(\sum \lambda_3)] \varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3 \varepsilon_4 \quad (22)$$

式中: λ_1 、 λ_2 和 λ_3 分别为战斗机的机动能力参数、攻击能力参数和探测能力参数; ε_1 、 ε_2 、 ε_3 和 ε_4 分别为操纵能力参数、生存能力参数、航程能力参数和电子对抗能力参数。作战能力指标为战斗机空战能力静态值,多为设计指标值,因此将作战能力威胁定义为

$$T_\vartheta = \begin{cases} 1 & \vartheta_{mt}/\vartheta_m > 1.5 \\ 0.75 & 1 < \vartheta_{mt}/\vartheta_m \leq 1.5 \\ 0.5 & \vartheta_{mt}/\vartheta_m = 1 \\ 0.25 & 0.3 \leq \vartheta_{mt}/\vartheta_m < 1 \\ 0 & 0 < \vartheta_{mt}/\vartheta_m < 0.3 \end{cases} \quad (23)$$

式中: ϑ_{mt} 和 ϑ_m 分别为敌方和我方作战单元空战能力。

6) 战术意图威胁

以往的威胁评估模型主要侧重于空间态势和作战能力建模,很少考虑敌方战术意图威胁,将战术意图威胁加入到目标威胁定量计算中能够有效发掘敌方作战单元的潜在威胁,敌方作战单元的战术意图越危险,威胁值越高,战术意图直观体现在敌方作战单元空间威胁值的变化率,即

$$T_l = \frac{\Delta Y(t, T_A, T_v, T_d, T_h)}{\Delta t} \quad (24)$$

式中: Y 为关于时间、空间态势威胁值的函数。

基于对敌方作战单元战术意图的判断,根据文献[16]建立战术意图威胁值表,如表1所示。

表 1 战术意图威胁值				
Table 1 Tactical intention threat value				
战术意图	攻击	干扰	掩护	规避
意图威胁值	0.8	0.5	0.3	0.1

3.2 目标威胁评估流程

将 RS 理论和 CRITIC 法相结合构成了不确定信息下的目标威胁评估模型,具体流程如图 2 所示。

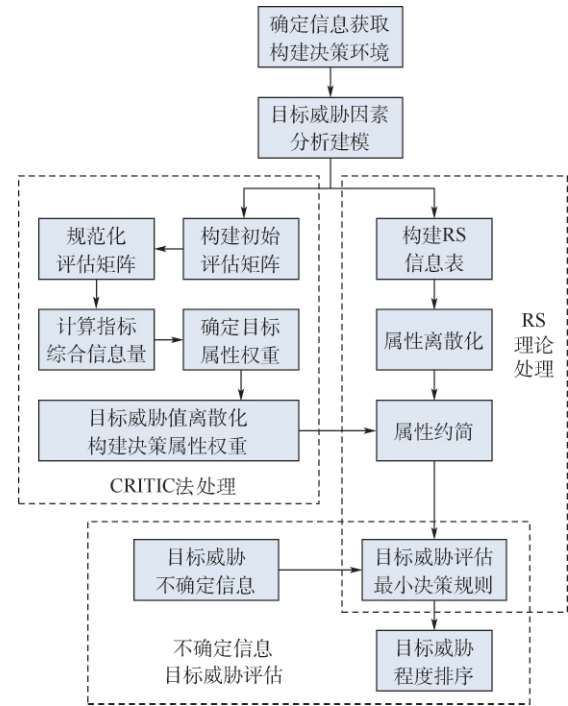


图 2 目标威胁评估流程
Fig. 2 Target threat assessment flowchart

将我方作战单元通过雷达、数据链等手段探测到的空战目标威胁信息构建决策环境、分析空战威胁程度影响因素,通过 CRITIC 法解决 RS 理论在获取目标威胁评估最小决策规则时无决策属性的不足,实现对不确定信息下的空战目标威胁评估。整个评估模型分为 3 个部分:①CRITIC 法处理模块,通过 CRITIC 法求解确定信息下目标属性的权重,得到目标威胁值,离散化处理后替代决策属性;②RS 处理模块,将第一部分得到的决策属性与条件属性构成新的决策信息表,离散化处理后通过属性约简导出最小决策规则;③不确定信息目标威胁评估模块,通过最小决策规则对不确定环境下的目标进行威胁评估,解决了信息情况下缺失无法进行有效评估的问题。

4 仿真分析

在空战复杂对抗环境下,我方作战单元对抗敌方(F-46C、F-45E、F-5E)3 种机型作战飞机,并对其威胁程度进行有效的评估。选取 6 个目标准确信息作为数据样本,基于本文提出的 RS-CRITIC 方法进行不确定信息下的目标威胁评估。我方作战单元的速度为 320 m/s,双方导弹最大攻击距离为 60 km,雷达最大跟踪距离为 80 km,传感器探测到目标方位角 φ 、进入角 q 、空速 v 、相对距离 D 、相对高度差 h_d 等空间态势信息,通过敌方空间威胁值变化率识别敌方战术意图 I 。空战态势信息如表 2 所示。

表 2 空战态势信息							
Table 2 Air combat situation information							
目标	机型	战术意图 I	$\varphi/(^{\circ})$	$q/(^{\circ})$	$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	D/km	h_d/km
1	F-46C	攻击	80	150	330	50	-1.5
2	F-46C	掩护	65	110	310	70	1.2
3	F-45E	掩护	-45	120	315	65	1.4
4	F-45E	干扰	-70	140	330	60	-0.7
5	F-5E	攻击	110	-120	340	50	-1.2
6	F-5E	干扰	85	-130	320	60	-0.5

为了表示方便将战术能力、战术意图、角度威胁、速度威胁、距离威胁、高度威胁 6 个目标威胁属性记为 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 、 a_5 、 a_6 ,其中 a_3 和 a_4 为效益型指标 a_5 和 a_6 为成本型指标 a_1 和 a_2 为固定型指标。式(18)~式(24)计算得到目标属性威胁值如表 3 所示。

根据目标威胁评估指标不同属性,利用式(1)~式(3)对目标威胁评估指标进行规范化处理,得到规范化矩阵:

表 3 目标属性威胁值						
Table 3 Target attribute threat value						
目标	T_{θ}	T_I	T_A	T_v	T_d	T_h
1	0.75	0.8	0.639	0.625	0.707	0.65
2	0.75	0.3	0.486	0.469	0.303	0.38
3	1	0.3	0.458	0.484	0.389	0.36
4	1	0.5	0.583	0.531	0.500	0.57
5	0.5	0.8	0.639	0.594	0.707	0.62
6	0.5	0.5	0.597	0.500	0.500	0.55

$$Z = \begin{bmatrix} 0.750 & 0.800 & 1 & 0.667 & 1 & 1 \\ 0.750 & 0.300 & 0.154 & 0 & 0 & 0.069 \\ 1 & 0.300 & 0 & 0.167 & 0.213 & 0 \\ 1 & 0.500 & 0.692 & 0.667 & 0.487 & 0.724 \\ 0.500 & 0.800 & 1 & 1 & 1 & 0.897 \\ 0.500 & 0.500 & 0.7692 & 0.333 & 0.487 & 0.655 \end{bmatrix}$$

通过式(4)~式(8)确定各属性权值如表4所示。

由目标属性权重可以确定目标威胁值,在MD启发式算法求解最佳分割集合基础上,通过式(9)、式(10)离散化后得到RS决策属性值。如表5所示。

由表5可以看出,目标威胁程度排序:1>5>4>6>3>2,与客观事实相符。

利用文献[1]提出的灰色关联度极大熵模型求解出权重以及目标威胁值如表6所示,对比利用CRITIC法求解目标威胁值如图3所示,文献[1]目标威胁排序与CRITIC法相同,验证了决策属性的有效性。在目标信息明确情况下,CRITIC法相对于文献[1]计算过程简单,在空战中能够快速且客观评判目标威胁程度,替代RS信息系统中的决策属性,保证目标威胁评估规则提取的时效性,以满足不确实信息下的实时评估。

表4 属性权重

Table 4 Attribute weight

属性	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
权重	0.329	0.0807	0.164	0.135	0.142	0.149

表5 目标威胁值及决策属性值

Table 5 Target threat value and decision attribute value

目标	1	2	3	4	5	6
目标威胁值	0.857	0.307	0.406	0.75	0.804	0.543
决策属性值	5	0	1	3	4	2

由MD启发式算法求解目标威胁属性最佳分割集合,根据式(9)、式(10)离散化后得到信息系统中条件属性,结合基于CRITIC法求得决策属性,构建完整的RS决策表,如表7所示,进行目标威胁评估最小决策规则提取。

由于决策矩阵是对称 $m \times m$ 矩阵,只需计算一般元素,由式(11)~式(13)构建决策矩阵,如表8所示。

表6 灰色关联度极大熵模型求解

Table 6 Grey relation maximum entropy model solution

属性	权重	目标	目标威胁值
a_1	0.305	1	0.922
a_2	0.149	2	0.261
a_3	0.152	3	0.354
a_4	0.125	4	0.717
a_5	0.131	5	0.883
a_6	0.138	6	0.525

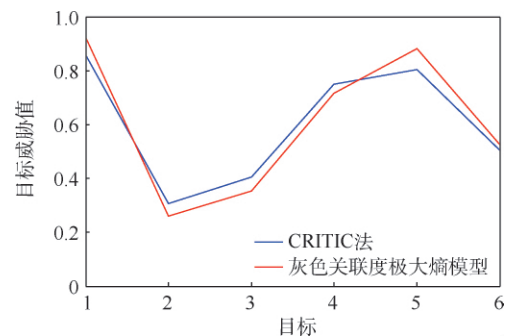


图3 目标威胁值对比

Fig. 3 Target threat comparison

表7 决策信息

Table 7 Decision information

U	条件属性 C						决策属性值
	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	
x_1	2	3	4	2	4	4	5
x_2	2	1	1	1	1	1	0
x_3	4	1	1	1	2	1	1
x_4	4	2	2	2	2	3	3
x_5	1	3	4	4	4	4	4
x_6	1	2	3	2	2	2	2

表8 决策矩阵

Table 8 Decision matrix

U	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
x_1	\emptyset	$a_2 a_3 a_4 a_5 a_6$	$a_1 a_2 a_3 a_4 a_5 a_6$	$a_1 a_2 a_3 a_5 a_6$	$a_1 a_4$	$a_1 a_2 a_3 a_5 a_6$
x_2		\emptyset	$a_1 a_5$	$a_1 a_2 a_3 a_4 a_5 a_6$	$a_1 a_2 a_3 a_4 a_5 a_6$	$a_1 a_2 a_3 a_4 a_5 a_6$
x_3			\emptyset	$a_2 a_3 a_4 a_6$	$a_1 a_2 a_3 a_4 a_5 a_6$	$a_1 a_2 a_3 a_4 a_6$
x_4				\emptyset	$a_1 a_2 a_3 a_4 a_5 a_6$	$a_1 a_3 a_6$
x_5					\emptyset	$a_2 a_3 a_4 a_5 a_6$
x_6						\emptyset

由式(13)构造每个目标的决策函数 $f_C^D(x_i)$, 其中 $i=1, 2, \dots, 6$ 。决策表全局约简为

$$g_A^D(U) = \bigwedge_{x \in U} f_A^D(x) = (a_1 \wedge a_2) \vee (a_1 \wedge a_3) \vee (a_1 \wedge a_4) \vee (a_1 \wedge a_6) \vee (a_3 \wedge a_4 \wedge a_5) \vee (a_4 \wedge a_5 \wedge a_6)$$

全局决策具有下列主蕴涵: $(a_1 \wedge a_2)$ 、 $(a_1 \wedge a_3)$ 、 $(a_1 \wedge a_4)$ 、 $(a_1 \wedge a_6)$ 、 $(a_3 \wedge a_4 \wedge a_5)$ 、 $(a_4 \wedge a_5 \wedge a_6)$ 。

这些主蕴涵可以导出属性约简: $\{a_1, a_2\}$ 、 $\{a_1, a_3\}$ 、 $\{a_1, a_4\}$ 、 $\{a_1, a_6\}$ 、 $\{a_3, a_4, a_5\}$ 、 $\{a_4, a_5, a_6\}$ 。

通过决策表的约简得到区分决策属性所需最小条件属性集合,对应着目标威胁评估最小决策规则,那么可以得到最小决策规则集如表 9 所示。

从获取的规则集可以看出,影响空战目标威胁主要因素在于敌方作战单元的作战能力,结合角度、速度、距离威胁或者结合速度、距离、高度威胁可以利用规则实现对不确定信息目标的威胁评估。

由于空战环境高对抗性、复杂性,不确定信息成为目标威胁评估的主要依据。在此次空战中,机载传感器以及情报信息获取的 4 个目标的空战态势信息如表 10 所示,其中*表示信息不确定。将不确定空战态势信息离散化如表 11 所示。

表 9 目标威胁评估规则集

Table 9 Target threat assessment rule set

规则集	规则(属性类别,属性值)	
	规则前件	规则后件
1	$(a_1, \mu_1(x_i)) \wedge (a_2, \mu_2(x_i))$	$(D, \rho(x_i))$
2	$(a_1, \mu_1(x_i)) \wedge (a_3, \mu_3(x_i))$	$(D, \rho(x_i))$
3	$(a_1, \mu_1(x_i)) \wedge (a_4, \mu_4(x_i))$	$(D, \rho(x_i))$
4	$(a_1, \mu_1(x_i)) \wedge (a_6, \mu_6(x_i))$	$(D, \rho(x_i))$
5	$(a_3, \mu_3(x_i)) \wedge (a_4, \mu_4(x_i)) \wedge (a_5, \mu_5(x_i))$	$(D, \rho(x_i))$
6	$(a_4, \mu_4(x_i)) \wedge (a_5, \mu_5(x_i)) \wedge (a_6, \mu_6(x_i))$	$(D, \rho(x_i))$

表 10 不确定空战态势信息

Table 10 Uncertain air combat situation information

目标	机型	I	$\varphi/^\circ$	$q/^\circ$	$v/(m \cdot s^{-1})$	D/km	h_d/km
1	F-16C	攻击	60	*	*	55	-0.85
2	F-15E	*	-65	145	300	*	-0.77
3	*	干扰	90	-135	345	53	*
4	F-15E	*	-55	140	325	62	-0.3

表 11 离散化不确定空战态势信息

Table 11 Discrete uncertain air combat situation information

目标	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
1	2	3	*	*	3	3
2	4	*	2	1	*	3
3	*	2	4	4	4	*
4	4	*	2	2	2	2

将获取的目标威胁评估规则集应用于不确定信息下的威胁评估。

对于目标 1,利用 RUL 1 确定目标威胁属性值:

RUL 1: if $(a_1, 2) \wedge (a_2, 3)$ then $(D, 5)$

对于目标 2,利用 RUL 6 确定目标威胁属性值:

RUL 4: if $(a_1, 4) \wedge (a_6, 3)$ then $(D, 3)$

对于目标 3,利用 RUL 5 确定目标威胁属性值:

RUL 5: if $(a_3, 4) \wedge (a_4, 4) \wedge (a_5, 5)$ then $(D, 4)$

对于目标 4,利用 RUL 2、RUL 6 确定目标威胁属性值:

RUL 2: if $(a_1, 4) \wedge (a_3, 2)$ then $(D, 3)$

RUL 6: if $(a_4, 2) \wedge (a_5, 2) \wedge (a_6, 2)$ then $(D, 2)$

通过上述规则可以确定目标威胁程度排序为: $1 > 3 > 2 \geq 4$ 。从不确定信息表中可以看出,目标 1 攻击意图明显且平台作战能力强于我方作战单元;目标 3 敌方作战能力不确定,但是角度、速度、距离威胁较高;目标 2 敌方作战能力占优且高度威胁较高;目标 4 敌方作战能力占优,空间态势威胁程度一般。通过对比分析,本文提出的 RS-CRITIC 模型确定目标威胁排序与实际情况趋于一致,验证了模型仿真的有效性,说明结合 CRITIC 法确定准确信息下目标威胁值作为决策属性,基于 RS 提取决策规则集用于不确定信息下的目标威胁评估是有效的,解决了在复杂环境下,不确定信息下的目标威胁评估问题,以及先验知识和人为主观因素对目标威胁客观评估的问题。

在小样本数据情况下,算法计算量小,能够满足空战实时评估,以及不确定信息下的评估要求,规则的精度与适用度需要进一步提高。同时此方法也适用于大样本数据情况,在大样本数据情况下获取的评估规则的精度以及适用度会提高。在空战对抗之前,通过对以往空战多目标时序数据的规则提取,形成评估规则库加载在火控计算机上,在对抗过程中根据传感器探测到目标信息,选取精度高的规则形成目标威胁排序,能够有效提高评估速度以及准确性,便于我方作战单元进行机动决策与目标分配。

5 结 论

1) 基于提出的 CRITIC 法计算目标威胁属性权重,将确定信息下的目标威胁值离散化后代替决策属性,客观的评判了目标威胁程度,解决了 RS 在决策属性未知情况下,决策规则的提取问

题,扩展了RS理论的使用范围。

2) RS理论基于数据驱动,消除评估中的冗余数据,进行属性约简,提取目标威胁评估最小决策规则,适用于不确实信息下的目标威胁评估,减少了先验知识和人为主观因素对目标威胁客观评估的影响,具有一定的容错性。模型求解简单,保证了不确定信息下评估的时效性,对于空战实时评估具有工程实践意义。

3) 不确定信息下的威胁评估是空战机动决策、目标分配、火力分配的前提。提出的方法在小样本情况下,实时性高,为后续空战进程提供支撑,同时在大样本数据情况下,形成评估规则库,规则精度以及适用度会提高,保证评估准确性,为复杂环境空战目标威胁评估提供了一种新的客观评价方法。

由于决策表样本限制,提取决策规则难以适用于所有信息缺失下的目标威胁评估问题,规则的精度和适用度将是下一步研究的重点。

参考文献 (References)

- [1] 奚之飞,徐安,寇英信,等.基于改进GRA-TOPSIS的空战威胁评估[J].北京航空航天大学学报,2020,46(2):388-397.
XI Z F, XU A, KOU Y X, et al. Air combat threat assessment based on improved GRA-TOPSIS[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(2): 388-397(in Chinese).
- [2] 张浩为,谢军伟,葛佳昂,等.改进TOPSIS的多态融合直觉模糊威胁评估[J].系统工程与电子技术,2018,40(10):2263-2269.
ZHANG H W, XIE J W, GE J A, et al. Intuitionistic fuzzy threat assessment based on improved TOPSIS and multiple times fusion[J]. Systems Engineering and Electronics, 2018, 40(10): 2263-2269(in Chinese).
- [3] 徐西蒙,杨任农,符颖,等.基于ELM-AdaBoost强预测器的空战目标威胁评估[J].系统工程与电子技术,2018,40(8):1760-1768.
XU X M, YANG R N, FU Y, et al. Target threat assessment in air combat based on ELM-AdaBoost strong predictor[J]. Systems Engineering and Electronics, 2018, 40(8): 1760-1768(in Chinese).
- [4] 顾佼佼,赵建军,徐海峰,等.基于SPA及PSO的超视距空战态势评估[J].系统工程与电子技术,2014,36(4):691-696.
GU J J, ZHAO J J, XU H F, et al. Situation assessment for beyond-visual-range air combat based on interval SPA and PSO[J]. Systems Engineering and Electronics, 2014, 36(4): 691-696(in Chinese).
- [5] 王昱,章卫国,傅莉,等.基于不确定性信息的空战威胁评估方法[J].西北工业大学学报,2016,34(2):299-305.
WANG Y, ZHANG W G, FU L, et al. A method of threat assessment for aerial combat using uncertain information[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2016, 34(2): 299-305(in Chinese).
- [6] 史建国,高晓光,李相民.基于离散模糊动态贝叶斯网络的空战态势评估及仿真[J].系统仿真学报,2006,18(5):1093-1096.
SHI J G, GAO X G, LI X M. Modeling air combat situation assessment by using fuzzy dynamic Bayesian network[J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(5): 1093-1096(in Chinese).
- [7] 杨远志,周中良,刘宏强,等.基于信息熵和粗糙集的空战目标威胁评估方法[J].北京航空航天大学学报,2018,44(10):2071-2077.
YANG Y Z, ZHOU Z L, LIU H Q, et al. Threat evaluation method of air target based on information entropy and rough set[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44(10): 2071-2077(in Chinese).
- [8] DIAKOULAKI D, MAVROTS G, PAPAYANNAKIS L. Determining objective weights in multiple criteria problems, the critic method[J]. Computers and Operations Research, 1995, 22(7):763-770.
- [9] 宋冬梅,刘春晓,沈晨,等.基于主观赋权法的多目标多属性决策方法[J].山东大学学报(工学版),2015,45(4):1-9.
SONG D M, LIU C X, SHEN C, et al. Multiple objective and attribute decision making based on the subjective and objective weighting[J]. Journal of Shandong University(Engineering Science), 2015, 45(4): 1-9(in Chinese).
- [10] PAWLAK Z, SKOWRON A. Rough sets and boolean reasoning[J]. Information Sciences, 2007, 177(1):41-73.
- [11] 安利平.基于粗糙理论的多属性决策分析[M].北京:科学出版社,2008:35-36.
AN L P. Analysis of multi-attribute decision making based on rough set theory[M]. Beijing: Science Press, 2008: 35-36(in Chinese).
- [12] 张清华,胡君.不确定性概念的粗糙集近似表示[M].北京:清华大学出版社,2017:3-10.
ZHANG Q H, HU J. Rough set approximate representation of uncertainty concept[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2017: 3-10(in Chinese).
- [13] PAWLAK Z. Rough sets[J]. International Journal of Information and Computer Sciences, 1982, 11(5):341-356.
- [14] 黄治国,杨清琳.基于决策向量的分辩矩阵构造方法[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2017,32(2):62-69.
HUANG Z G, YANG Q L. The method based on decision vector for generating discernibility matrix[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology(Natural Science Edition), 2017, 32(2): 62-69(in Chinese).
- [15] 高永,向锦武.超视距多机协同空战目标分配算法[J].北京航空航天大学学报,2007,33(3):286-289.
GAO Y, XIANG J W. Target assessment in BVR air combat[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(3): 286-289(in Chinese).
- [16] 夏鹏程.多机协同任务规划与非完备信息下攻击决策技术[D].南京:南京航空航天大学,2018:57-59.
XIA P C. Research on mission planning & attack decision-making under incomplete information for multi-UAVs[D]. Nanjing:

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics ,2018: 57–

59(in Chinese) .

徐安 男,博士,讲师。主要研究方向: 航空火力指挥控制原理、智能作战。

作者简介:

杨爱武 男,硕士研究生。主要研究方向: 火力指挥控制与评估工程。

吕跃 男,硕士,讲师。主要研究方向: 智能作战、任务规划。

李战武 男,博士,教授。主要研究方向: 航空火力指挥控制原理、智能作战。

奚之飞 男,硕士研究生。主要研究方向: 航空火力指挥控制原理。

Threat assessment of air combat target based on RS-CRITIC

YANG Aiwu , LI Zhanwu* , XU An , LYU Yue , XI Zhifei

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

Abstract: Aiming at the problem of air combat target threat assessment under uncertain information , a threat assessment model based on Rough Set (RS) and Criteria Importance Though Intercriteria Correlation (CRITIC) method is proposed. Firstly , the model determines the target threat value under accurate information by CRITIC and the optimal segmentation set is solved by Mining Data (MD) heuristic algorithm. After the threat value is discretized , it replaces the decision attribute in the rough set information system. Secondly , based on the complete rough set decision information system , attribute reduction and minimum decision rules extraction of target threat assessment are realized by decision matrix. Finally , the export rules are applied to target threat assessment under uncertain information. Simulation results show that proposed method can achieve the target threat assessment in the absence of information , and reduces the influence of subjective factors and prior knowledge , and expands the application of rough set theory.

Keywords: threat assessment; Rough Set (RS) ; Criteria Importance Though Intercriteria Correlation (CRITIC) method; decision rule; uncertain information

Received: 2019-12-22; **Accepted:** 2020-04-10; **Published online:** 2020-05-07 08:42

URL: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20200506.1305.002.html

* **Corresponding author.** E-mail: afeulzw@189.cn