

地面作战目标威胁评估多属性指标处理方法

孔德鹏^{1,2} 常天庆¹ 郝娜¹ 张雷¹ 郭理彬¹

摘要 评估指标的量化处理是目标威胁评估 (Threat assessment, TA) 算法应用的基础。本文针对地面作战目标威胁评估指标类型多样和难以量化的问题, 系统地提出了一种多属性威胁指标的量化方法, 并将指标量化结果转化为统一的直觉模糊集 (Intuitionistic fuzzy set, IFS) 表示形式。研究了地面作战目标威胁评估指标如目标距离、速度、攻击角度、类型、通视条件和作战环境等, 通过模糊评价语言、区间数、实数、三角模糊数等方式进行量化, 最大限度地保留指标不确定信息并降低实际应用的复杂度; 提出了不同表示形式的威胁指标数据与直觉模糊数的转化原则和转化方法, 并给出了理论可行性的数学证明。通过一个地面作战目标威胁评估的多属性指标处理实例, 验证了该方法在多属性指标量化和直觉模糊集表示中的合理性, 说明了该方法能够为目标威胁评估提供科学的评估数据。

关键词 地面作战, 威胁评估, 多属性指标, 直觉模糊集

引用格式 孔德鹏, 常天庆, 郝娜, 张雷, 郭理彬. 地面作战目标威胁评估多属性指标处理方法. 自动化学报, 2021, 47(1): 161–172

DOI 10.16383/j.aas.c180675

Multi-attribute Index Processing Method of Target Threat Assessment in Ground Combat

KONG De-Peng^{1,2} CHANG Tian-Qing¹ HAO Na¹ ZHANG Lei¹ GUO Li-Bin¹

Abstract Quantitative processing of evaluation indexes is the application basis of target threat assessment (TA) algorithm. Aiming at the problems that the TA indexes of ground combat targets are various and difficult to quantify, this paper proposes a quantization method of multi-attribute threat indexes systematically, and transforms the quantization results of indexes into a unified intuitionistic fuzzy set (IFS) representation. TA indexes such as target distance, velocity, attack angle, type, visual condition and combat environment are studied. Fuzzy evaluation language, interval number, real number and triangular fuzzy number are used to quantify the indexes in TA. The uncertain information of the indexes is retained with the maximum extent and the complexity of practical applications is reduced. The transformation principle and method that threat indexes in different forms transform into intuitionistic fuzzy number are put forward, and the mathematical proof of theoretical feasibility is given. An example of multi-attribute indexes processing for TA of ground combat targets is given to verify the rationality of the proposed method in quantifying multi-attribute indexes and transforming them into IFS. It shows that the proposed method can provide scientific evaluation data for target TA.

Key words Ground combat, threat assessment (TA), multi-attribute index, intuitionistic fuzzy sets (IFS)

Citation Kong De-Peng, Chang Tian-Qing, Hao Na, Zhang Lei, Guo Li-Bin. Multi-attribute index processing method of target threat assessment in ground combat. *Acta Automatica Sinica*, 2021, 47(1): 161–172

指标是衡量事物价值的标准或评估系统的参量, 是事物对主体有效性的标度, 其属性值所提供的就是用数字或文字表达的主观意识或客观事实。选取合理的目标威胁评估 (Threat assessment, TA) 指

标并对评估指标进行科学地量化处理, 是战场目标威胁评估的重要基础^[1–3]。目标威胁评估作为战场信息智能感知的一部分, 在以网络为中心的现代作战决策中具有重要作用^[4–5]。然而在地面作战过程中, 目标威胁评估的实际应用却难以满足信息化作战需求, 一方面因为面临的武器目标类型多样, 如武装直升机、坦克、步兵战车、单兵等, 不同类型目标威胁的指标类型、描述方式、威胁影响都不相同, 指标描述通常需要借助多种方式如模糊数、区间数、模糊评价语言等^[6], 所以难以进行有效的多属性评估数据处理^[7]; 另一方面因为地面作战环境复杂, 无论是传感器获得的数据还是作战人员的经验判断, 都具有一定的模糊性和不确定性, 基于 Miller 量

收稿日期 2018-10-07 录用日期 2019-02-13

Manuscript received October 7, 2018; accepted February 13, 2019

国防科技创新特区资助

Supported by National Defense Science and Technology Innovation Zone of China

本文责任编辑 魏庆来

Recommended by Associate Editor WEI Qing-Lai

1. 陆军装甲兵学院兵器与控制系 北京 100072 2. 中国人民解放军 92942 部队 北京 100161

1. Weaponry and Control Department, Army Academy of Armored Forces, Beijing 100072 2. Unit 92942 of PLA, Beijing 100161

化法^[8]、标度法^[9]等指标处理方法容易忽略这些不确定信息, 获得的目标威胁度与实际差别较大; 此外, 在决策者依靠自身经验判断的信息处理中, 没有考虑决策者对自己决策的确定程度, 使得对决策者判断信息的挖掘和利用不够充分, 容易造成评估结果与人为判断不一致的情况。因此, 为了获得较为科学的目标战场威胁度, 需要对目标威胁评估的基础—多属性威胁评估指标进行系统性的综合处理, 既充分保留指标不确定信息又便于实际运用^[10]。如何对多属性的威胁评估指标进行合理量化、有效转化、统一表示, 是地面作战目标威胁评估研究的关键之一。

空战场的目标威胁评估通常选取目标类型、目标速度、目标飞临时、目标航路捷径等指标^[11]; 海战场对空防御目标威胁评估通常选取目标距离、目标速度、目标高度、目标舷角等指标^[12]。相对于空战场和海战场, 地面战场目标类型多样, 为了获得较为科学的目标威胁度, 必须系统性地考虑各个方面因素的影响, 造成目标威胁评估指标相对较多且更加复杂, 例如目标类型、作战能力、指控能力、目标速度、目标距离、攻击角度、环境条件等, 这些指标有些可以通过传感器获得相应参数值, 有些依靠作战人员的主观判断, 有些仅是模糊的等级表示, 而且获得的指标存在一定的误差, 具有较强不确定性。此外, 地面战场突击作战以直瞄武器为主, 目标威胁指标的处理、量化与空战场和海战场的武器也不相同, 例如描述目标距离威胁需要综合考虑评估节点和目标的探测距离和打击距离, 描述目标速度威胁需要考虑目标类型特点, 描述目标类型威胁需要考虑双方的类型关系, 通视条件和环境状况也和目标威胁度相关, 这些都限制了地面作战目标威胁评估的实际应用。直觉模糊集(Intuitionistic fuzzy sets, IFS)是模糊集的推广, 其综合考虑隶属度、非隶属度和犹豫度三方面的信息, 能更加细腻地描述和刻画客观世界的模糊性本质^[13]。目前, 通过对IFS的熵^[14]、距离^[15]、相似度^[16]、知识测度^[17]和集结算子^[18]等的广泛研究, 提高了IFS对不确定信息的综合处理能力, 使得IFS在多属性决策领域显现出巨大优势^[19-21]。而且直觉模糊多属性决策方法应用在空战目标威胁评估等已取得了良好的效果^[22-24]。然而, 由于地面作战目标威胁评估多属性指标信息处理比较困难, 使得基于IFS多属性决策的目标威胁评估方法无法满足地面作战运用的实际需求。因此, 本文的主要目标是利用模糊评价语言、实数、区间数、三角模糊数等方式对不同属性的目标威胁评估指标进行量化, 然后转化为统一的直觉模糊集表示, 为地面作战目标威胁评估提供有效的数据支撑。

本文以地面作战目标威胁评估为研究背景, 首

先, 对基本理论进行介绍; 然后结合地面作战实际给出了不同类型评估指标的量化方法; 其次, 研究不同类型指标的表示方式与直觉模糊集表示的转化方法, 并对合理性进行了数学证明; 最后, 用实例验证了指标处理方法的合理性。

1 基本理论

本节对直觉模糊集相关理论、区间数、三角模糊数和直觉模糊评价语言等基本理论进行介绍。

定义1^[13]. 给定论域 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 则 X 上的一个直觉模糊集 A 具有下列形式:

$$A = \{\langle x_i, \mu_A(x_i), v_A(x_i) \rangle | x_i \in X\} \quad (1)$$

式中, $\mu_A(x_i) : X \rightarrow [0, 1]$ 和 $v_A(x_i) : X \rightarrow [0, 1]$ 分别代表 A 的隶属函数和非隶属函数, 且对于 A 上的所有 $x_i \in X$, $0 \leq \mu_A(x_i) + v_A(x_i) \leq 1$ 成立。称 $\pi_A(x_i) = 1 - \mu_A(x_i) - v_A(x_i)$ 为 A 中的犹豫度, 它是 x_i 对 A 犹豫程度的一种测度。显然, $0 \leq \pi_A(x_i) \leq 1$ 。

为了方便表示, 称 $\alpha = (\mu_\alpha, v_\alpha)$ 为直觉模糊数(Intuitionistic fuzzy number, IFN), 其中 $\mu_\alpha \in [0, 1]$, $v_\alpha \in [0, 1]$, 且 $\mu_\alpha + v_\alpha \leq 1$ 。

定义2^[13]. 直觉模糊数的运算法则为: 设任意直觉模糊数为 $\alpha = (\mu_\alpha, v_\alpha)$, $\beta = (\mu_\beta, v_\beta)$, 则

- 1) $\alpha \oplus \beta = (\mu_\alpha + \mu_\beta - \mu_\alpha \mu_\beta, v_\alpha v_\beta)$;
- 2) $\alpha \otimes \beta = (\mu_\alpha \mu_\beta, v_\alpha + v_\beta - v_\alpha v_\beta)$;
- 3) $\lambda \alpha = \left(1 - (1 - \mu_\alpha)^\lambda, (v_\alpha)^\lambda\right)$, $\lambda > 0$;
- 4) $(\alpha)^\lambda = \left((\mu_\alpha)^\lambda, 1 - (1 - v_\alpha)^\lambda\right)$, $\lambda > 0$.

定义3^[18]. 设 $a_i = \langle \mu_{a_i}, v_{a_i} \rangle$, $i = 1, 2, \dots, n$ 是一个IFN, $\mathbf{W} = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ 为加权向量, 满足 $\sum_{j=1}^n w_j = 1$, $w_j \in [0, 1]$, $j = 1, 2, \dots, n$ 。直觉模糊加权算子IFWA是 $\Theta^n \rightarrow \Theta$ 映射:

$$\begin{aligned} \text{IFWA}(a_1, a_2, \dots, a_n) = \\ w_1 a_1 \oplus w_2 a_2 \oplus \dots \oplus w_n a_n = \\ \left\langle 1 - \prod_{j=1}^n (1 - \mu_{a_j})^{w_j}, \prod_{j=1}^n (v_{a_j})^{w_j} \right\rangle \end{aligned} \quad (2)$$

定义4^[25]. 称 $\tilde{a} = [a^L, a^U] = \{x | a^L \leq x \leq a^U, a^L, a^U \in \mathbf{R}\}$ 为一个区间数, a^L 为区间数下限, a^U 为区间数上限, 特别当 $a^L = a^U$ 时, \tilde{a} 退化为一个实数, 则区间数可看作实数的推广。

设区间数 $\tilde{a} = [a^L, a^U]$ 和 $\tilde{b} = [b^L, b^U]$, 且实数 $\lambda \geq 0$, 区间数运算法则如下:

- 1) 加法: $\tilde{a} + \tilde{b} = [a^L + b^L, a^U + b^U]$;
- 2) 减法: $\tilde{a} - \tilde{b} = [a^L - b^U, a^U - b^L]$;

3) 数乘: $\lambda \tilde{a} = [\lambda a^L, \lambda a^U]$, 特别地当 $\lambda = 0$ 时, $\lambda \tilde{a} = 0$;

4) 乘法: $\tilde{a} \cdot \tilde{b} = [\min\{a^L b^L, a^L b^U, a^U b^L, a^U b^U\}, \max\{a^L b^L, a^L b^U, a^U b^L, a^U b^U\}]$;

5) 除法: $\tilde{a}/\tilde{b} = [a^L, a^U] \cdot [1/b^U, 1/b^L], b^L, b^U \neq 0$.

定义 5^[26]. 若 $a = (a_1, a_2, a_3)$, 其中, $0 \leq a_1 \leq a_2 \leq a_3 \leq 1$, a_1, a_3 分别为 a 所支撑的上界和下界, a_2 为 a 的中值, 则称 a 为一个三角模糊数, 其隶属度函数可以表示为

$$\mu_a(x) = \begin{cases} \frac{x - a_1}{a_2 - a_1}, & a_1 \leq x \leq a_2 \\ \frac{a_3 - x}{a_3 - a_2}, & a_2 < x \leq a_3 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

定义 6^[27]. 设 $\{0, 1, \dots, L-1\}$ 是一组有序整数集合, 设模糊评价语言标度集为 $S = \{s_\alpha | \alpha = 0, 1, \dots, L-1\}$. 其中: s_α 为语言标度, L 为奇数. 一般 L 取 3、5、7、9 等.

定义 7^[28]. 设 $S = \{s_\alpha | \alpha = 0, 1, \dots, L-1\}$ 是模糊评价语言标度集, 设 $\bar{S} = \{s_\alpha | \alpha \in [-q, q]\}$ 是扩展模糊评价语言标度集, q 是一个充分大的正数. 若 $s_\alpha \in S$, 称 s_α 为本原术语, 否则, 称 s_α 为扩展术语, 一般地, 决策者运用本原术语评估决策方案, 而拓展术语只在运算和排序过程中出现.

2 评估指标威胁度量化处理方法

合理的指标量化是获得科学评估结果的基础^[29]. 目标威胁评估是美国国防部数据融合联合指挥实验室提出的 JDL 信息融合模型的第三级, 属于决策级信息融合^[30]. 目标威胁评估作为战场辅助决策的重要部分, 评估结果直接影响作战决策的有效性^[31]. 本节主要介绍不同类型指标的威胁量化方法.

2.1 目标距离指标威胁量化

目标距离是评估目标威胁度的一项重要参数. 目前激光测距仪的运用使得测距误差越来越小, 因此, 为了便于处理, 采用实数对距离指标进行处理. 传统距离指标威胁量化仅考虑目标距离的因素^[3], 然而地面作战还需考虑我方武器平台和目标的作战能力. 最大侦察距离和最大打击距离是目标作战能力的重要体现, 也是影响目标的距离威胁度的重要因素^[25], 通过双方(我方武器平台和目标)最大侦察距离和最大打击距离与双方距离的关系分别计算距离威胁度 T_{rij} . 如图 1 所示, r_{ai} , r_{taj} 分别为我方武器平台 W_i 与目标 T_j 所携带武器的最大打击距离, r_{ri} 和 r_{trj} 分别为我方武器平台 W_i 与目标 T_j 的最

大侦察距离.

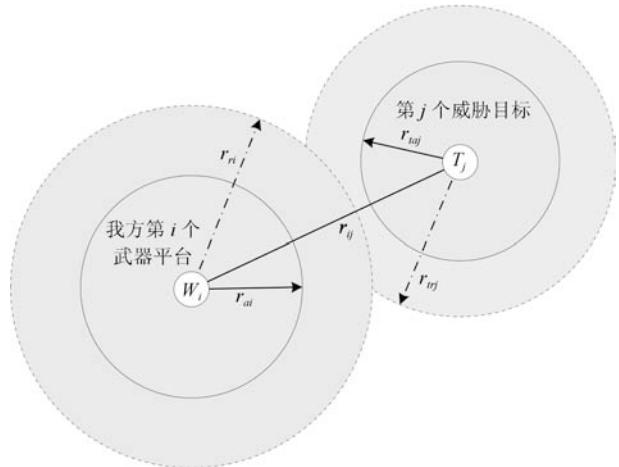


图 1 距离因素威胁度示意图

Fig. 1 Sketch map of distance factor threat degree

直瞄武器必须发现并瞄准目标才能实施打击, 其侦察距离一般大于打击距离, 即 $r_{ri} > r_{ai}$, $r_{trj} > r_{taj}$. 根据我方武器平台 W_i 的最大打击距离 r_{ai} 和最大侦察距离 r_{ri} , 目标 T_j 的最大打击距离 r_{taj} 和最大侦察距离 r_{trj} , 这 4 个距离参数之间的关系确定目标距离威胁度. 当目标与我方武器平台 W_i 距离 r_{ij} 大于目标最大侦察距离 r_{trj} 时, 即目标既无法发现也无法打击我方武器平台 W_i , 因此威胁度为 0; 当目标与我方武器平台 W_i 距离 r_{ij} 减小时, 目标威胁度增加. 根据 4 个距离参数的关系, 可分为以下 6 种情况:

1) 当 $r_{trj} > r_{taj} \geq r_{ri} > r_{ai}$ 时

$$T_{rij} =$$

$$\begin{cases} 0, & r_{ij} \geq r_{trj} \\ p_{11} - p_{11} \cdot \frac{r_{ij} - r_{taj}}{r_{trj} - r_{taj}}, & r_{taj} \leq r_{ij} < r_{trj} \\ p_{12} - (p_{12} - p_{11}) \cdot \frac{r_{ij} - r_{ri}}{r_{taj} - r_{ri}}, & r_{ri} \leq r_{ij} < r_{taj} \\ p_{13} - (p_{13} - p_{12}) \cdot \frac{r_{ij} - r_{ai}}{r_{ri} - r_{ai}}, & r_{ai} \leq r_{ij} < r_{ri} \\ p_{13} + (1 - p_{13}) \cdot \frac{r_{ai} - r_{ij}}{r_{ai}}, & r_{ij} < r_{ai} \end{cases} \quad (4)$$

2) 当 $r_{trj} \geq r_{ri} > r_{taj} \geq r_{ai}$ 时

$$T_{rij} =$$

$$\begin{cases} 0, & r_{ij} \geq r_{trj} \\ p_{21} - p_{21} \cdot \frac{r_{ij} - r_{ri}}{r_{trj} - r_{ri}}, & r_{ri} \leq r_{ij} < r_{trj} \\ p_{22} - (p_{22} - p_{21}) \cdot \frac{r_{ij} - r_{taj}}{r_{ri} - r_{taj}}, & r_{taj} \leq r_{ij} < r_{ri} \\ p_{23} - (p_{23} - p_{22}) \cdot \frac{r_{ij} - r_{ai}}{r_{taj} - r_{ai}}, & r_{ai} \leq r_{ij} < r_{taj} \\ p_{23} + (1 - p_{23}) \cdot \frac{r_{ai} - r_{ij}}{r_{ai}}, & r_{ij} < r_{ai} \end{cases} \quad (5)$$

3) 当 $r_{trj} \geq r_{ri} > r_{ai} > r_{taj}$ 时

$$T_{rij} =$$

$$\begin{cases} 0, & r_{ij} \geq r_{trj} \\ p_{31} - p_{31} \cdot \frac{r_{ij}-r_{ri}}{r_{trj}-r_{ri}}, & r_{ri} \leq r_{ij} < r_{trj} \\ p_{32} - (p_{32} - p_{31}) \cdot \frac{r_{ij}-r_{ai}}{r_{ri}-r_{ai}}, & r_{ai} \leq r_{ij} < r_{ri} \\ p_{33} - (p_{33} - p_{32}) \cdot \frac{r_{ij}-r_{taj}}{r_{ai}-r_{taj}}, & r_{taj} \leq r_{ij} < r_{ai} \\ p_{33} + (1 - p_{33}) \cdot \frac{r_{taj}-r_{ij}}{r_{taj}}, & r_{ij} < r_{taj} \end{cases} \quad (6)$$

4) 当 $r_{ri} \geq r_{trj} > r_{taj} \geq r_{ai}$ 时

$$T_{rij} =$$

$$\begin{cases} 0, & r_{ij} \geq r_{ri} \\ 0, & r_{trj} \leq r_{ij} < r_{ri} \\ p_{41} - p_{41} \cdot \frac{r_{ij}-r_{taj}}{r_{trj}-r_{taj}}, & r_{taj} \leq r_{ij} < r_{trj} \\ p_{42} - (p_{42} - p_{41}) \cdot \frac{r_{ij}-r_{ai}}{r_{taj}-r_{ai}}, & r_{ai} \leq r_{ij} < r_{taj} \\ p_{42} + (1 - p_{42}) \cdot \frac{r_{ai}-r_{ij}}{r_{ai}}, & r_{ij} < r_{ai} \end{cases} \quad (7)$$

5) 当 $r_{ri} > r_{trj} \geq r_{ai} \geq r_{taj}$ 时

$$T_{rij} =$$

$$\begin{cases} 0, & r_{ij} \geq r_{ri} \\ 0, & r_{trj} \leq r_{ij} < r_{ri} \\ p_{51} - p_{51} \cdot \frac{r_{ij}-r_{ai}}{r_{trj}-r_{ai}}, & r_{ai} \leq r_{ij} < r_{trj} \\ p_{52} - (1 - p_{51}) \cdot \frac{r_{ij}-r_{taj}}{r_{ai}-r_{taj}}, & r_{taj} \leq r_{ij} < r_{ai} \\ p_{52} + (1 - p_{52}) \cdot \frac{r_{taj}-r_{ij}}{r_{taj}}, & r_{ij} < r_{taj} \end{cases} \quad (8)$$

6) 当 $r_{ri} > r_{ai} \geq r_{trj} > r_{taj}$ 时

$$T_{rij} =$$

$$\begin{cases} 0, & r_{ij} \geq r_{ri} \\ 0, & r_{mi} \leq r_{ij} < r_{ri} \\ 0, & r_{trj} \leq r_{ij} < r_{ai} \\ p_{61} - p_{61} \cdot \frac{r_{ij}-r_{taj}}{r_{ai}-r_{taj}}, & r_{taj} \leq r_{ij} < r_{trj} \\ p_{61} + (1 - p_{61}) \cdot \frac{r_{taj}-r_{ij}}{r_{taj}}, & r_{ij} < r_{taj} \end{cases} \quad (9)$$

式(4)~(9)中 p_{ij} 为量化的系数, $i = 1, 2, \dots, 6$ 表示第 i 种情况, j 表示每种情况下的第 j 个参数。可由不同的战争任务和武器目标特点进行确定。相比于传统方法仅考虑双方的距离进行威胁量化^[3, 12, 23], 忽略了目标打击和探测距离的因素, 本文的量化方法通过考虑评估双方探测和攻击

距离的 6 种不同条件, 对目标距离威胁度的量化更加符合地面作战的实际, 评估结果更加合理。

2.2 目标速度指标威胁量化

目标速度威胁反应了目标运动状态的威胁程度, 目标运动越快, 其位置和所处环境变化越快, 我方对其打击越困难, 因此威胁度越大^[23]。因此, 目标速度威胁度可按照效益型指标进行处理, 即认为目标速度越大, 其威胁越大。速度的方向信息可作为目标作战意图估计的参考, 这里仅考虑目标速度的标量。由于战场传感器获得的目标速度存在不确定性, 因此利用区间数表示目标速度大小 $v_{ij} = [v_{ij}^L, v_{ij}^U]$ 。传统的指标处理可按式(10)进行计算。

$$T_{vij} = \frac{[v_{ij}^L, v_{ij}^U]}{\max_{j=1,2,\dots,n} (v_{ij}^U)} \quad (10)$$

当目标类型不同时, 式(10)则无法区分不同类型目标的速度威胁度。为解决多类型目标的速度威胁量化问题, 本文采用类型主导、速度匹配威胁指标量化方法。武器类型差别使得目标运动速度差距很大, 如武装直升机可达 300 km/h, 坦克越野机动可达 50 km/h, 而单兵运动速度仅为 10 km/h, 设空中目标最大速度 $V_{air-\max}$, 地面装甲车辆目标最大速度为 $V_{arm-\max}$, 单兵目标的最大速度 $V_{sol-\max}$ 。设目标 T_j 与我方评估节点 W_i 的相对速度大小为 $v_{ij} = [v_{ij}^L, v_{ij}^U]$, 按照目标类型分别进行量化, 速度威胁度 T_{vij} 为

$$T_{vij} = \begin{cases} \beta_1 \frac{[v_{ij}^L, v_{ij}^U]}{V_{air-\max}}, & \text{空中目标} \\ \beta_2 \frac{[v_{ij}^L, v_{ij}^U]}{V_{arm-\max}}, & \text{装甲目标} \\ \beta_3 \frac{[v_{ij}^L, v_{ij}^U]}{V_{sol-\max}}, & \text{单兵目标} \end{cases} \quad (11)$$

式中, $\beta_1, \beta_2, \beta_3 \in [0, 1]$, 分别为空中目标、装甲目标、单兵目标的威胁因子, 表示不同类型目标的速度威胁特征。自行火炮、车载反坦克导弹等的装备在速度威胁量化中, 由于其运动特点基本相同, 也归为装甲目标一类。一般空中目标和装甲目标的速度威胁较大, 而单兵速度威胁相对较小, $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 取值可根据作战目标的特点事先确定, 也可根据作战过程中态势变化对速度影响的程度动态调节, 从而使得目标速度威胁度结果能够有效表征目标速度特征的威胁状态。

2.3 目标攻击角度指标威胁量化

目标攻击角度是指目标火力打击方向与双方武器平台之间连线的夹角, 对于坦克来说, 其火力打击方向即炮口指向, 对于武装直升机来说其火

力打击方向为其飞行航向。目标火力打击方向指向我方武器平台，我方火力打击方向指向目标的反向，此时目标的威胁度最大；目标火力打击方向指向我方武器平台的反向，我方火力打击方向指向目标，此时目标的威胁度最小。一般情况如图 2 所示，目标 T_j 对我方武器平台 W_i 的攻击角度威胁度为 $T_{\theta_{ij}}$, r_{ij} 表示我方武器平台 W_i 与目标 T_j 之间的距离, F_i 和 F_j 表示火力打击方向, θ_{T_j} , θ_{W_i} 表示当前火力打击方向与武器目标连线的夹角, 由于传感器的测量误差, 角度用区间数表示(以逆时针方向为正): $\theta_{W_i} = [\theta_{W_i}^L, \theta_{W_i}^U]$, $\theta_{T_j} = [\theta_{T_j}^L, \theta_{T_j}^U]$, $\theta_{W_i}, \theta_{T_j} \subseteq [-180, 180]$ 。为了跨区间表示方便, 可以将 $\theta_{W_i}, \theta_{T_j}$ 表示为 $[0, 360]$, 在计算处理过程中将 $[180, 360]$ 转化为 $[-180, 0]$ 即可。

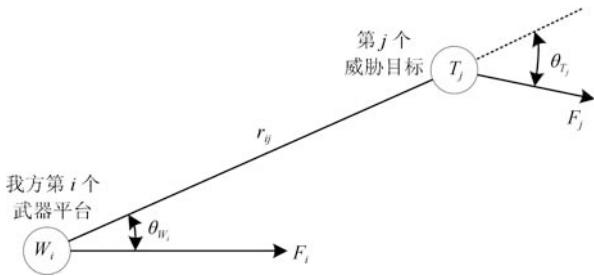


图 2 攻击角度因素威胁度示意图

Fig. 2 Sketch map of target attack angle factor threat degree

目标 T_j 对我方武器平台 W_i 攻击角度的威胁度表示为

$$\begin{aligned} T_{\theta_{ij}} = \frac{1}{360} & \left[\min \{ |\theta_{W_i}^L|, |\theta_{W_i}^U| \} + \right. \\ & \min \{ |\theta_{T_j}^L|, |\theta_{T_j}^U| \}, \\ & \min \{ \max \{ |\theta_{W_i}^L|, |\theta_{W_i}^U| \} + \right. \\ & \left. \max \{ |\theta_{T_j}^L|, |\theta_{T_j}^U| \}, 360 \} \right] \quad (12) \end{aligned}$$

通过上述方法可将目标攻击角度通过区间数的形式进行量化。考虑到目标姿态的测量具有较大误差使得攻击角度误差较大, 所以采用区间数的方式, 最大程度保留攻击角度的不确定信息, 使得评估结果与实际相符。

2.4 地形通视威胁量化

地面作战的突击武器如坦克等都是直瞄武器, 对目标瞄准和跟踪必须要通视目标, 因此目标与我方武器平台是否能够通视是威胁评估的重要因素之一。目标 T_j 和我方武器平台 W_i 的通视简化图如图 3 所示。

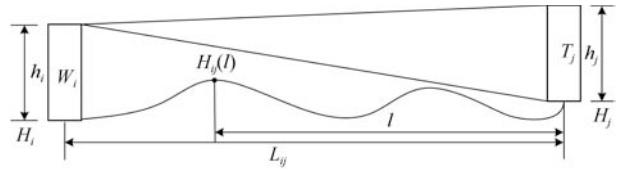


图 3 目标通视情况

Fig. 3 Target visibility condition

通过战场的信息化装备和各种侦察探测设备的信息共享, 可以获取威胁目标的位置信息。基于 3D 战场数字地图和武器目标位置可以评估目标 T_j 和我方武器平台 W_i 的地形通视威胁度 f_{ij} 。

$$f_{ij} = \begin{cases} [t_2, 1], & \max_{l \in [0, L_{ij}]} \left(H_{ij}(l) - \left(H_j + \frac{H_i + h_i - H_j}{L_{ij}} l \right) \right) \leq 0 \\ [0, t_1], & \max_{l \in [0, L_{ij}]} \left(H_{ij}(l) - \left(H_j + h_j + \frac{H_i + h_i - H_j - h_j}{L_{ij}} l \right) \right) \geq 0 \\ [t_1, t_2], & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

式中, $t_1, t_2 \in (0, 1)$ 为量化参数, $t_1 < t_2$; 通视程度利用区间数表示, L_{ij} 表示目标 T_j 和我方武器平台 W_i 的直线距离, l 表示实际点到目标 T_j 的水平距离。 $H_{ij}(l)$ 表示武器目标连线上距离目标 T_j 为 l 的实际地形高程, H_i 和 H_j 表示武器平台 W_i 和目标 T_j 所处位置的实际地形高程(高程信息可由 3D 战场数字地图提供)。 h_i 和 h_j 表示武器平台 W_i 和目标 T_j 的高度。

评估节点与目标完全通视时, 地形通视威胁度为 $[t_2, 1]$; 当两者无法通视, 则威胁度为 $[0, t_1]$; 考虑装备的高度, 当目标只能发现我方评估节点的一部分时, 这种情况比较复杂, 为了简化评估, 这里威胁度统一表示为 $[t_1, t_2]$ 。由于间瞄武器不需要通视即可完成射击, 因此间瞄武器的通视威胁度统一设置为 $[t_2, 1]$ 。这样就可将利用目标的位置结合数字地图获取目标的通视情况, 估计出目标通视因素对我方节点的威胁度。

2.5 环境指标量化

战场环境是影响作战效能发挥的重要因素之一, 环境指标越好越利于装备作战效能的发挥, 环境指标越差越不利于装备作战效能的发挥。由于战场环境比较复杂, 而且局部与全局、当前与未来、我方与敌方都存在一定的变化和差距, 因此无法进行精确的数值描述。但是, 某次作战过程的地点、天气、水

文等相对固定, 可以给出环境指标相对范围, 因此根据环境指标的特点, 把战场环境指标分为优、良、中、差 4 个等级的进行描述。为了方便对环境指标的这种不确定概念进行描述, 采用三角模糊数的形式进行量化表示。

当环境指标为差时, $a = (0, 0.2, 0.4)$, 其隶属度函数表示为

$$\mu_a(x) = \begin{cases} \frac{x}{0.2}, & 0 \leq x \leq 0.2 \\ \frac{0.4-x}{0.2}, & 0.2 < x \leq 0.4 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

同理, 当环境指标为中时, $a = (0.2, 0.4, 0.6)$; 环境指标为良时, $a = (0.4, 0.6, 0.8)$; 当环境指标为优时, $a = (0.6, 0.8, 1)$ 。

按照上述方法可将战场环境指标进行量化, 通过三角模糊数可以有效描述战场环境威胁度的不确定性的特点, 同时简化了处理方式, 便于实际运用。

2.6 其他定性描述类指标量化

目标威胁评估中很多判断需要依靠作战人员提供, 如目标类型威胁度、目标状态威胁度、作战能力威胁度等。作为作战人员的经验数据, 在作战过程中起到至关重要的作用。人为经验信息多以模糊语言形式表达, 这类指标传感器无法获得具体数值。例如, 不太可能、可能、很可能等, 或者差、较差、一般、较好、好等描述语言。同时, 作战人员根据其自身经验对其判断也有确定程度的评价, 如对自己做出的判断非常确定、比较确定、不太确定等。决策者在进行判断时, 一般需要事先设定适当的语言评估标度。本文将威胁评估模糊评价语言标度 α 为 L 个等级 (L 为奇数), 模糊评价语言标度集为 $S = \{s_\alpha | \alpha = 0, 1, \dots, L-1\}$ 。根据决策者对结果的判定的确定程度, 构建结果确定度向量 $C = (c_1, c_2, \dots, c_n)$, 这里分为 5 个等级, 分为十分确定、比较确定、一般、不太确定、不确定。5 种评价确定程度对应相应的区间值, 如表 1 所示。

表 1 确定程度的区间值对应关系

Table 1 Determination degree corresponding to interval values

确定程度	L	U
c_5 (十分确定)	0.9	1
c_4 (比较确定)	0.6	0.9
c_3 (一般)	0.4	0.6
c_2 (不太确定)	0.2	0.4
c_1 (不确定)	0	0.2

本文将传统基于模糊评价语言的评估进行改进, 融合决策者对自己判断的确定程度, 获得带有确定

程度的直觉模糊评价语言, 从而提高基于决策者判断信息的模糊评价语言的合理性。

3 多属性威胁量化指标的转化方法

地面战场目标威胁指标具有多种不同属性和不同的表示方法, 因此, 为了便于进行基于多属性决策的威胁评估, 需要将不同表述类型的信息转化为统一的表示形式。由于直觉模糊集在多属性决策中的优势, 因此本文提出一种模糊评价语言、区间数、实数、三角模糊数转化为直觉模糊数表示的方法, 通过直觉模糊集的形式统一评估指标参数的信息表示。

3.1 不同描述形式的转化原则

设不同形式表示的量化多属性指标集为 X , 量化指标为 $x, x \in X$; 直觉模糊集为 Y , 指标的直觉模糊数表示为 $y, y \in Y$ 。为了使得不同表示形式的指标表示能够有效转化, 且保证转化形式科学合理, 不同表示形式的指标转化应当满足如下原则:

1) 值域约束

对于映射 $x \rightarrow y$, 若 $x \in X$, 则 $y \in Y$ 。

2) 边界特性

若 x 取值为其表示形式的上界, 则 $y = \langle 1, 0 \rangle$ 。若 x 取值为其表示形式的下界, 则 $y = \langle 0, 1 \rangle$ 。

3) 单调映射

若 $x_1 < x_2$, 则 $y_1 < y_2$; 若 $x_1 = x_2$, 则 $y_1 = y_2$; 若 $x_1 > x_2$, 则 $y_1 > y_2$ 。

3.2 模糊评价语言转化为直觉模糊数

设威胁评估模糊评价语言标度 $L = 11$, 分别是极大、很大、大、较大、稍大、中等、稍小、较小、小、很小、极小。如表 2 所示, 可以将模糊评价语言标度转化为直觉模糊数。

表 2 模糊评价语言标度与 IFN 的转化

Table 2 Scale of fuzzy evaluation language and transformation to IFN

模糊评价 语言标度	直觉模糊数		
	μ	v	π
$\alpha = 10$ (极大)	1	0	0
$\alpha = 9$ (很大)	0.9	0.05	0.05
$\alpha = 8$ (大)	0.8	0.1	0.1
$\alpha = 7$ (较大)	0.7	0.15	0.15
$\alpha = 6$ (稍大)	0.55	0.3	0.15
$\alpha = 5$ (中等)	0.4	0.4	0.2
$\alpha = 4$ (稍小)	0.4	0.45	0.15
$\alpha = 3$ (较小)	0.3	0.55	0.15
$\alpha = 2$ (小)	0.2	0.7	0.1
$\alpha = 1$ (很小)	0.1	0.85	0.05
$\alpha = 0$ (极小)	0	1	0

下面给出指标模糊评价语言表示与直觉模糊数表示的转化方法。根据表 2, 可将第 i 个模糊评价语

言 $s_i = (s_{\alpha_i}, c_{\beta_i})$ 表示为:

$$s_i = (\langle \mu_{\alpha_i}, \nu_{\alpha_i} \rangle, [c_{\beta_i}^L, c_{\beta_i}^U]) \quad (15)$$

式中, $\alpha_i \in \{0, 1, \dots, L-1\}$, $\beta_i \in \{1, 2, \dots, 5\}$, $\langle \mu_{\alpha_i}, \nu_{\alpha_i} \rangle$ 为模糊评价语言标度 α_i 对应的直觉模糊数, $[c_{\beta_i}^L, c_{\beta_i}^U]$ 是模糊评价语言确定程度 c_{β_i} 的区间数。

模糊评价语言 s_i 转化为直觉模糊数 $f_i = \langle \tau_i, v_i \rangle$ 如式 (16) 所示。

$$\begin{cases} \tau_i = 1 - (1 - \mu_{\alpha_i})^t (1 - \mu_m)^{1-t} \\ v_i = \nu_{\alpha_i}^t \nu_m^{1-t} \end{cases} \quad (16)$$

式中, $\langle \mu_m, \nu_m \rangle$ 为中间标度 $\alpha_m = (L-1)/2$ 对应的直觉模糊数, $t \in [c_{\beta_i}^L, c_{\beta_i}^U]$ 为决策者对自己做出决策的确定程度值。 $\langle \mu_m, \nu_m \rangle$ 的作用是决策者确定程度越小, 使得决策结果越向中间决策值靠近。例如, 判断一个目标重要度为“非常重要”, 当决策者对自己的判断“不确定”时, 实际评价结果应当向“一般重要”靠近。

证明.

1) 值域约束

模糊评价语言 $s_i = (\langle \mu_{\alpha_i}, \nu_{\alpha_i} \rangle, [c_{\beta_i}^L, c_{\beta_i}^U])$, $\langle \mu_{\alpha_i}, \nu_{\alpha_i} \rangle$ 是一个 IFN, 所以 $\mu_{\alpha_i} \in [0, 1]$, $\nu_{\alpha_i} \in [0, 1]$, $\mu_{\alpha_i} + \nu_{\alpha_i} \in [0, 1]$. $[c_{\beta_i}^L, c_{\beta_i}^U]$ 是 $[0, 1]$ 之间的区间数, 由于 $t \in [c_{\beta_i}^L, c_{\beta_i}^U]$, 则 $t \in [0, 1]$, $1-t \in [0, 1]$.

所以可得 $(1 - \mu_{\alpha_i})^t \in [0, 1]$, $(1 - \mu_m)^{1-t} \in [0, 1]$, $\nu_{\alpha_i}^t \in [0, 1]$, $\nu_m^{1-t} \in [0, 1]$.

根据式 (16), 则 $\tau_i = 1 - (1 - \mu_{\alpha_i})^t (1 - \mu_m)^{1-t} \in [0, 1]$, $v_i = \nu_{\alpha_i}^t \nu_m^{1-t} \in [0, 1]$.

由于 $\tau_i + v_i = 1 - (1 - \mu_{\alpha_i})^t (1 - \mu_m)^{1-t} + \nu_{\alpha_i}^t \nu_m^{1-t}$, 又因为 $1 - \mu_{\alpha_i} \geq \nu_{\alpha_i}$, $1 - \mu_m \geq \nu_m$. 所以有 $0 \leq 1 - (1 - \mu_{\alpha_i})^t (1 - \mu_m)^{1-t} \leq \tau_i + v_i \leq 1 - (\nu_{\alpha_i})^t (\nu_m)^{1-t} + \nu_{\alpha_i}^t \nu_m^{1-t} = 1$.

2) 边界条件

若 $\langle \mu_{\alpha_i}, \nu_{\alpha_i} \rangle$ 取 $\langle 1, 0 \rangle$, 因为 $t \in [c_{\beta_i}^L, c_{\beta_i}^U] \subseteq [0, 1]$, 根据式 (16), 显然 $\tau_i = 1$, $v_i = 0$.

若 $\langle \mu_{\alpha_i}, \nu_{\alpha_i} \rangle$ 取 $\langle 0, 1 \rangle$, 因为 $t \in [c_{\beta_i}^L, c_{\beta_i}^U] \subseteq [0, 1]$, 当取 $t = 1$ 时, 根据式 (16), 显然 $\tau_i = 0$, $v_i = 1$.

3) 单调映射

设模糊评价语言 $s_1 = (\langle \mu_{\alpha_1}, \nu_{\alpha_1} \rangle, [c_{\beta_1}^L, c_{\beta_1}^U])$, $s_2 = (\langle \mu_{\alpha_2}, \nu_{\alpha_2} \rangle, [c_{\beta_2}^L, c_{\beta_2}^U])$. 设 $t_1 \in [c_{\beta_1}^L, c_{\beta_1}^U]$, $t_2 \in [c_{\beta_2}^L, c_{\beta_2}^U]$. 则有:

$$\begin{aligned} \tau_1 - \tau_2 &= \left(1 - (1 - \mu_{\alpha_1})^{t_1} (1 - \mu_m)^{1-t_1}\right) - \\ &\quad \left(1 - (1 - \mu_{\alpha_2})^{t_2} (1 - \mu_m)^{1-t_2}\right) = (1 - \mu_{\alpha_2})^{t_2} \\ &\quad (1 - \mu_m)^{1-t_2} - (1 - \mu_{\alpha_1})^{t_1} (1 - \mu_m)^{1-t_1}, v_1 - v_2 = \end{aligned}$$

$$\nu_{\alpha_1}^{t_1} \nu_m^{1-t_1} - \nu_{\alpha_2}^{t_2} \nu_m^{1-t_2}.$$

当 $t_1 = t_2$, $\alpha_1 = \alpha_2$ 时, 显然 $f_1 = f_2$.

当二者不同时相等时, 分两种情况进行讨论, 一种是决策者确定程度相同、决策判断不同, 另一种是决策者判断相同、决策确定程度不同.

a) $t_1 = t_2$, 若 $\alpha_1 \neq \alpha_2$

若 $\alpha_1 > \alpha_2$, 则 $\mu_{\alpha_1} > \mu_{\alpha_2}$, $\nu_{\alpha_1} < \nu_{\alpha_2}$.

$$\tau_1 - \tau_2 = (1 - \mu_{\alpha_2})^{t_2} (1 - \mu_m)^{1-t_2} -$$

$$(1 - \mu_{\alpha_1})^{t_1} (1 - \mu_m)^{1-t_1} =$$

$$(1 - \mu_m)^{1-t_2} \left((1 - \mu_{\alpha_2})^{t_2} - \right.$$

$$\left. (1 - \mu_{\alpha_1})^{t_1} \right) > 0$$

$$v_1 - v_2 = \nu_{\alpha_1}^{t_1} \nu_m^{1-t_1} - \nu_{\alpha_2}^{t_2} \nu_m^{1-t_2} =$$

$$\nu_m^{1-t_1} (\nu_{\alpha_1}^{t_1} - \nu_{\alpha_2}^{t_2}) < 0$$

所以 $f_1 > f_2$.

若 $\alpha_1 < \alpha_2$, 同理可得 $f_1 < f_2$.

b) 若 $\alpha_1 = \alpha_2$, $t_1 \neq t_2$

i) 当 $\alpha_1 = \alpha_2 > \alpha_m$ 时, 模糊语言评价值为一般以上, $1 - \mu_m > 1 - \mu_{\alpha_2}$, $\nu_{\alpha_1} < \nu_m$. 相同的评价语言, 决策者确定程度越高, 决策值应当越大.

若 $t_1 > t_2$, 则 $1 - t_1 < 1 - t_2$. 因为 $1 - \mu_{\alpha_2} = 1 - \mu_{\alpha_1}$, 所以 $(1 - \mu_{\alpha_2})^{t_2} > (1 - \mu_{\alpha_1})^{t_1}$. 则有

$$\tau_1 - \tau_2 = (1 - \mu_{\alpha_2})^{t_2} (1 - \mu_m)^{1-t_1}$$

$$\left((1 - \mu_m)^{t_1-t_2} - (1 - \mu_{\alpha_2})^{t_1-t_2} \right) > 0$$

$$v_1 - v_2 = \nu_{\alpha_1}^{t_1} \nu_m^{1-t_1} - \nu_{\alpha_2}^{t_2} \nu_m^{1-t_2} =$$

$$\nu_{\alpha_1}^{t_1} \nu_m^{1-t_1} (\nu_{\alpha_1}^{t_1-t_2} - \nu_m^{t_1-t_2}) < 0$$

所以 $f_1 > f_2$.

若 $t_1 < t_2$, 同理可得 $f_1 < f_2$.

ii) 当 $\alpha_1 = \alpha_2 < \alpha_m$ 时, 模糊语言评价值为一般以下, $1 - \mu_m < 1 - \mu_{\alpha_2}$. 相同的评价语言, 决策者确定程度越高, 决策值应当越小.

若 $t_1 > t_2$, 则 $1 - t_1 < 1 - t_2$, $1 - \mu_m < 1 - \mu_{\alpha_2}$, $\nu_{\alpha_1} > \nu_m$.

$$\tau_1 - \tau_2 = (1 - \mu_{\alpha_2})^{t_2} (1 - \mu_m)^{1-t_1}$$

$$\left((1 - \mu_m)^{t_1-t_2} - (1 - \mu_{\alpha_2})^{t_1-t_2} \right) < 0$$

$$v_1 - v_2 = \nu_{\alpha_1}^{t_1} \nu_m^{1-t_1} - \nu_{\alpha_2}^{t_2} \nu_m^{1-t_2} =$$

$$\nu_{\alpha_1}^{t_1} \nu_m^{1-t_1} (\nu_{\alpha_1}^{t_1-t_2} - \nu_m^{t_1-t_2}) > 0$$

所以 $f_1 < f_2$.

若 $t_1 < t_2$, 同理可得 $f_1 > f_2$. \square

3.3 区间数转化为直觉模糊数

实际作战过程中, 获得的数据都存在一定误差,

为了考虑数据误差影响, 本文采用了区间数方法表示方法, 如攻击角度、速度等参数信息, 这种表示方法可以保留参数不确定信息, 提高结果的准确性。鉴于直觉模糊数能够有效表示和处理不确定信息, 这里给出一种区间数与直觉模糊数的转化方法。区间数 $\tilde{a}_i = [a_i^L, a_i^U]$ 表示的指标类型可分为效益型和成本型, 按照式(17)和(18)将其转化成直觉模糊数 $f_i = \langle \mu_i, \nu_i \rangle$ 。

1) 效益型指标

$$\begin{cases} \mu_i = \frac{a_i^L}{\max_{i=1,2,\dots,n} \{a_i^U\}} \\ \nu_i = 1 - \frac{a_i^U}{\max_{i=1,2,\dots,n} \{a_i^U\}} \end{cases} \quad (17)$$

2) 成本型指标

$$\begin{cases} \mu_i = \frac{\min_{i=1,2,\dots,n} \{a_i^L\}}{a_i^U} \\ \nu_i = 1 - \frac{\min_{i=1,2,\dots,n} \{a_i^L\}}{a_i^U} \end{cases} \quad (18)$$

证明。首先对效益型区间数指标转化为直觉模糊集进行证明。

1) 值域约束

如果 $\tilde{a}_i = [a_i^L, a_i^U] \in R$, 则 $\mu_i = \frac{a_i^L}{\max_{i=1,2,\dots,n} \{a_i^U\}} \in [0, 1]$, $\nu_i = 1 - \frac{a_i^U}{\max_{i=1,2,\dots,n} \{a_i^U\}} \in [0, 1]$; 所以 $0 \leq \mu_i + \nu_i = 1 - \frac{a_i^U - a_i^L}{\max_{i=1,2,\dots,n} \{a_i^U\}} \leq 1$.

2) 边界特性

若 \tilde{a}_i 取值上界 $[1, 1]$, 显然 $\mu_i = \frac{a_i^L}{\max_{i=1,2,\dots,n} \{a_i^U\}} = 1$, $\nu_i = 1 - \frac{a_i^U}{\max_{i=1,2,\dots,n} \{a_i^U\}} = 0$.

若 \tilde{a}_i 取值下界 $[0, 0]$, 且 $\max_{i=1,2,\dots,n} \{a_i^U\} \neq 0$. 显然 $\mu_i = \frac{a_i^L}{\max_{i=1,2,\dots,n} \{a_i^U\}} = 0$, $\nu_i = 1 - \frac{a_i^U}{\max_{i=1,2,\dots,n} \{a_i^U\}} = 1$.

3) 单调映射

设区间数 $\tilde{a}_1 = [a_1^L, a_1^U]$, $\tilde{a}_2 = [a_2^L, a_2^U]$. 区间数之间的大小不确定关系常用可能度表示, 为了判断映射的单调性, 需要基于确定的大小关系(可能度为1)进行判断。因此, 本文主要针对大小关系确定的三种情况进行讨论: \tilde{a}_1 完全小于 \tilde{a}_2 ($\tilde{a}_1 < \tilde{a}_2$), \tilde{a}_1 等于 \tilde{a}_2 ($\tilde{a}_1 = \tilde{a}_2$) 和 \tilde{a}_1 完全大于 \tilde{a}_2 ($\tilde{a}_1 > \tilde{a}_2$)。

a) 若 $\tilde{a}_1 < \tilde{a}_2$, 即 $a_1^L \leq a_1^U < a_2^L \leq a_2^U$. 则 $\mu_1 - \mu_2 = \frac{a_1^L}{\max_{i=1,2,\dots,n} \{a_i^U\}} - \frac{a_2^L}{\max_{i=1,2,\dots,n} \{a_i^U\}} < 0$, $\nu_1 - \nu_2 = 1 - \frac{a_1^U}{\max_{i=1,2,\dots,n} \{a_i^U\}} - \left(1 - \frac{a_2^U}{\max_{i=1,2,\dots,n} \{a_i^U\}}\right) = \frac{a_2^U - a_1^U}{\max_{i=1,2,\dots,n} \{a_i^U\}} > 0$ 所以 $f_1 < f_2$.

b) 若 $\tilde{a}_1 = \tilde{a}_2$, 显然 $\mu_1 = \mu_2$, $\nu_1 = \nu_2$, 所以 $f_1 = f_2$.

c) 若 $\tilde{a}_1 > \tilde{a}_2$, 即 $a_2^L \leq a_2^U < a_1^L \leq a_1^U$. 则 $\mu_1 - \mu_2 = \frac{a_1^L}{\max_{i=1,2,\dots,n} \{a_i^U\}} - \frac{a_2^L}{\max_{i=1,2,\dots,n} \{a_i^U\}} > 0$, $\nu_1 - \nu_2 = 1 - \frac{a_1^U}{\max_{i=1,2,\dots,n} \{a_i^U\}} - \left(1 - \frac{a_2^U}{\max_{i=1,2,\dots,n} \{a_i^U\}}\right) = \frac{a_2^U - a_1^U}{\max_{i=1,2,\dots,n} \{a_i^U\}} < 0$ 所以 $f_1 > f_2$.

成本型区间数指标转化为直觉模糊集的证明方法与效益型区间数转化证明方法相同, 不再赘述. \square

3.4 实数转化为直觉模糊数

为了对指标表示形式进行统一, 实数型的指标表示也需要转换为直觉模糊数, 下面给出实数转化为IFN的隶属度和非隶属度的计算公式.

1) 效益型指标

$$\begin{cases} \mu_i = \beta \frac{a_i}{\max_{i=1,2,\dots,n} \{a_i\}} \\ \nu_i = \beta \left(1 - \frac{a_i}{\max_{i=1,2,\dots,n} \{a_i\}}\right) \end{cases} \quad (19)$$

2) 成本型指标

$$\begin{cases} \mu_i = \beta \frac{\min_{i=1,2,\dots,n} \{a_i\}}{a_i} \\ \nu_i = \beta \left(1 - \frac{\min_{i=1,2,\dots,n} \{a_i\}}{a_i}\right) \end{cases} \quad (20)$$

式中, $\beta \in [0, 1]$ 是附加的模糊因子, 其作用是防止实数的确定性特征对其他不确定性指标的影响. 通过式(19)和(20)可将实数集 $\mathbf{R} = \{a_i | i = 1, 2, \dots, n\}$ 转化为直觉模糊集.

证明. 可将实数看成区间数的特例, 因此区间数转化为直觉模糊数的证明方法也可证明实数转化为直觉模糊数. \square

3.5 三角模糊数转化为直觉模糊数

三角模糊数 $a_i = (a_{i1}, a_{i2}, a_{i3})$, $0 \leq a_{i1} \leq a_{i2} \leq a_{i3} \leq 1$, 其隶属度函数可以表示为

$$\mu_{ai}(x) = \begin{cases} \frac{x-a_{i1}}{a_{i2}-a_{i1}}, & a_{i1} \leq x \leq a_{i2} \\ \frac{a_{i3}-x}{a_{i3}-a_{i2}}, & a_{i2} < x \leq a_{i3} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (21)$$

利用式(22)把三角模糊数转化为直觉模糊数 $f_i = \langle \mu_i, \nu_i \rangle$.

$$\begin{cases} \mu_i = \frac{a_{i1}+a_{i2}}{2} \\ \nu_i = \frac{2-(a_{i2}+a_{i3})}{2} \end{cases} \quad (22)$$

证明.

1) 值域约束

三角模糊数 $a_i = (a_{i1}, a_{i2}, a_{i3})$, 则 $\mu_i = \frac{a_{i1}+a_{i2}}{2} \in [0, 1]$, $\nu_i = \frac{2-(a_{i2}+a_{i3})}{2} \in [0, 1]$, $0 \leq \mu_i + \nu_i = 1 - \frac{a_{i3}-a_{i1}}{2} \leq 1$.

2) 边界特性

若 a_i 取值上界 $[1, 1, 1]$, 显然 $\mu_i = 1$, $\nu_i = 0$;

若 a_i 取值下界 $[0, 0, 0]$, 显然 $\mu_i = 0$, $\nu_i = 1$.

3) 单调映射

设三角模糊数 $a_1 = (a_{11}, a_{12}, a_{13})$, $a_2 = (a_{21}, a_{22}, a_{23})$. 与区间数大小判断类似, 三角模糊数之间的大小不确定关系也常用可能度表示. 本文为了判断三角模糊数与 IFN 映射的单调性, 主要针对大小关系确定(可能度为 1)的三种情况进行讨论: \tilde{a}_1 完全小于 \tilde{a}_2 ($\tilde{a}_1 < \tilde{a}_2$), \tilde{a}_1 等于 \tilde{a}_2 ($\tilde{a}_1 = \tilde{a}_2$) 和 \tilde{a}_1 完全大于 \tilde{a}_2 ($\tilde{a}_1 > \tilde{a}_2$).

a) 若 $a_1 < a_2$, 即 $a_{11} < a_{21}$, $a_{12} < a_{22}$, $a_{13} < a_{23}$.

$$\mu_1 - \mu_2 = \frac{a_{11}+a_{12}}{2} - \frac{a_{21}+a_{22}}{2} < 0,$$

$$\nu_1 - \nu_2 = 1 - \frac{a_{13}+a_{11}}{2} - \left(1 - \frac{a_{23}+a_{21}}{2}\right) > 0 \text{ 所以 } f_1 < f_2.$$

b) 若 $a_1 = a_2$, 显然 $f_1 = f_2$.

c) 若 $a_1 > a_2$, 即 $a_{11} > a_{21}$, $a_{12} > a_{22}$, $a_{13} > a_{23}$.

$$\mu_1 - \mu_2 = \frac{a_{11}+a_{12}}{2} - \frac{a_{21}+a_{22}}{2} > 0$$

$$\nu_1 - \nu_2 = 1 - \frac{a_{13}+a_{11}}{2} - \left(1 - \frac{a_{23}+a_{21}}{2}\right) < 0$$

所以 $f_1 > f_2$. \square

4 实例

通过一个实例验证本文威胁评估指标处理方法的合理性和有效性. 在作战过程中, 出现 5 类 6 种目标 $T_1 \sim T_6$, 目标 $T_1 \sim T_6$ 的类型分别为: 坦克、坦克、步战车、车载反坦克导弹、武装直升机、单兵. 评估节点的武器平台类型为坦克, 选取具有代表性的 9 个评估指标 $f_1 \sim f_9$: 目标类型威胁度、目标状态威胁度、火力能力威胁度、指控能力威胁度、目标速度(km/h)、目标攻击角度($^\circ$)、目标距离(m)、通视情况、作战环境, 如表 3 所示, 其中通视情况直接给出其量化值.

表 3 目标威胁评估指标参数

Table 3 Index parameters of target threat assessment

目标	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8	f_9
T_1	大(十分确定)	较大(比较确定)	大(比较确定)	大(比较确定)	[25, 30]	[120, 150]	2 500	[0.7, 1]	良
T_2	较大(比较确定)	大(一般)	大(比较确定)	较大(比较确定)	[30, 35]	[180, 210]	2 000	[0.3, 0.7]	良
T_3	中等(比较确定)	稍小(十分确定)	较大(一般)	较大(一般)	[15, 20]	[150, 180]	2 200	[0.7, 1]	良
T_4	较大(比较确定)	小(不确定)	大(一般)	中等(比较确定)	[15, 20]	[90, 150]	1 800	[0.3, 0.7]	良
T_5	很大(十分确定)	大(比较确定)	很大(一般)	很大(十分确定)	[100, 150]	[135, 180]	4 200	[0.7, 1]	优
T_6	很小(一般)	小(比较确定)	很小(十分确定)	很小(比较确定)	[5, 8]	[150, 210]	800	[0.7, 1]	良

按第 2.1 节距离威胁量化方法将目标距离进行威胁量化, 然后按照第 3.4 节实数与直觉模糊数的转化方法将距离威胁度转化为直觉模糊数. 设我方评估节点打击距离 3 000 米, 有效侦察距离 4 500 米, 量化系数 $p_1 = (0.2, 0.6, 0.8)$, $p_2 = (0.3, 0.5, 0.8)$, $p_3 = (0.2, 0.3, 0.4)$, $p_4 = (0.3, 0.8)$, $p_5 = (0.2, 0.4)$, $p_6 = 0.3$, 则目标距离威胁度计算结果如表 4 所示.

按第 2.3 节目标攻击角度威胁量化方法, 将目标攻击角度威胁度转化为区间数形式, 然后按照第 3.3 节中的方法将区间数转化为直觉模糊数, 如表 5 所示.

设各类目标的最大速度为: 装甲类越野速度 50 km/h, 空中目标 200 km/h, 单兵目标 15 km/h. 按第 2.2 节的目标速度指标威胁量化方法, 计算目标速度的威胁度; 然后按照第 3.3 节的方法将区间数转化为直觉模糊数. 计算结果如表 6 所示.

模糊评价语言按照第 3.2 节的方法进行处理, 其中决策者确定程度值 t 取 $(c_{\beta_i}^L + c_{\beta_i}^U)/2$; 目标通视和环境威胁按照第 2.4 节和第 2.5 节的方法量化, 然后转化为直觉模糊数. 目标通视威胁量化中设置参数 $t_1 = 0.3$, $t_2 = 0.7$. 至此已将所有多属性指标转化为统一的直觉模糊数表示形式, 威胁评估指标直觉模糊集表示如表 7 所示.

获得表 7 所示的威胁评估指标直觉模糊集表示的数据后, 可以应用多种多属性决策方法进行目标威胁评估. 例如利用直觉模糊 TOPSIS 方法^[32], 设各指标的权重 \mathbf{W} 为

$$\mathbf{W} = [0.124, 0.106, 0.125, 0.117, 0.124, 0.112, 0.107, 0.098, 0.088]$$

按下式选择最优解 A^+ 和最劣解 A^- :

$$\begin{cases} A^+ = \{\langle \mu_1^+, \nu_1^+ \rangle, \langle \mu_2^+, \nu_2^+ \rangle, \dots, \langle \mu_n^+, \nu_n^+ \rangle\} \\ A^- = \{\langle \mu_1^-, \nu_1^- \rangle, \langle \mu_2^-, \nu_2^- \rangle, \dots, \langle \mu_n^-, \nu_n^- \rangle\} \end{cases}$$

式中, $\mu_i^+ = \max_{j=1,2,\dots,m} \{\mu_{ij}\}$, $\nu_i^+ = \min_{j=1,2,\dots,m} \{\nu_{ij}\}$, $\mu_i^- = \min_{j=1,2,\dots,m} \{\mu_{ij}\}$, $\nu_i^- = \max_{j=1,2,\dots,m} \{\nu_{ij}\}$.

表 4 目标距离威胁度

Table 4 Threat degree of target distance to IFN

目 标	打击 距离	有效侦察 距离	距离 威胁度	直觉模糊数 表示
T_1	2 500	3 500	0.40	$\langle 0.47, 0.33 \rangle$
T_2	2 500	3 500	0.52	$\langle 0.61, 0.19 \rangle$
T_3	2 400	3 200	0.45	$\langle 0.53, 0.27 \rangle$
T_4	3 000	3 500	0.64	$\langle 0.75, 0.05 \rangle$
T_5	5 000	6 000	0.68	$\langle 0.8, 0 \rangle$
T_6	800	1 000	0.30	$\langle 0.35, 0.45 \rangle$

表 5 目标攻击角度威胁度

Table 5 Threat degree of target attack angle

目 标	目标攻击 角度	我方武器 攻击角度	目标攻击角度 威胁度	直觉模糊数 表示
T_1	[120, 150]	[-15, 15]	[0.29, 0.46]	$\langle 0.41, 0.35 \rangle$
T_2	[180, 210]	[0, 30]	[0.50, 0.67]	$\langle 0.71, 0.06 \rangle$
T_3	[150, 180]	[-30, 0]	[0.33, 0.5]	$\langle 0.47, 0.29 \rangle$
T_4	[90, 150]	[-15, 15]	[0.21, 0.46]	$\langle 0.29, 0.35 \rangle$
T_5	[135, 180]	[-45, 0]	[0.25, 0.5]	$\langle 0.35, 0.29 \rangle$
T_6	[150, 210]	[15, 45]	[0.46, 0.71]	$\langle 0.65, 0 \rangle$

表 6 目标速度威胁度

Table 6 Threat degree of target speed

目标	目标速度	速度威胁度	直觉模糊数表示
T_1	[25, 30]	[0.50, 0.60]	$\langle 0.67, 0.2 \rangle$
T_2	[30, 35]	[0.60, 0.70]	$\langle 0.8, 0.07 \rangle$
T_3	[15, 20]	[0.30, 0.40]	$\langle 0.4, 0.47 \rangle$
T_4	[15, 20]	[0.30, 0.40]	$\langle 0.4, 0.47 \rangle$
T_5	[100, 150]	[0.50, 0.75]	$\langle 0.67, 0 \rangle$
T_6	[5, 10]	[0.33, 0.53]	$\langle 0.44, 0.29 \rangle$

直觉模糊数 $\langle \mu_1, \nu_1 \rangle$ 和 $\langle \mu_2, \nu_2 \rangle$ 的相似度按下

式进行计算:

$$s(\langle \mu_1, \nu_1 \rangle, \langle \mu_2, \nu_2 \rangle) = 1 - \frac{|2(\mu_1 - \mu_2) - (\nu_1 - \nu_2)|}{3} \times \left(1 - \frac{\pi_1 + \pi_2}{2}\right) - \frac{|2(\nu_1 - \nu_2) - (\mu_1 - \mu_2)|}{3} \times \left(\frac{\pi_1 + \pi_2}{2}\right)$$

式中, $\pi_1 = 1 - \mu_1 - \nu_1$, $\pi_2 = 1 - \mu_2 - \nu_2$.

按下式计算各个方案与最优解和最劣解的相似度 S_i^+ 和 S_i^- :

$$\begin{cases} S_i^+ = \sum_{k=1}^n w_k \cdot s(\langle \mu_k^+, \nu_k^+ \rangle, \langle \mu_{ik}, \nu_{ik} \rangle) \\ S_i^- = \sum_{k=1}^n w_k \cdot s(\langle \mu_k^-, \nu_k^- \rangle, \langle \mu_{ik}, \nu_{ik} \rangle) \end{cases}$$

然后计算相对贴近度 $p_i = S_i^+ / (S_i^+ + S_i^-)$, 获得目标威胁评估结果, 如表 8 所示.

从表 3 可以看出不同类型目标的威胁度具有明显差别, 而威胁评估结果为武装直升机的威胁最大、坦克次之、单兵武器最小, 与实际的目标威胁程度相符, 说明评估结果能够有效区分不同类型目标的威胁度. 直觉模糊 TOPSIS 方法^[32] 能获得合理的威胁评估结果是因为经过科学量化、统一表示的决策信息能够有效表征目标各个属性的威胁度, 为基于多属性决策方法的目标威胁评估提供了科学的数据基础.

相对于一些传统威胁评估算法^[3, 12], 在处理距离威胁度式没有考虑双方打击距离和侦察距离的关系, 仅认为距离近的目标威胁度大, 距离远的目标威胁度小, 在表 3 的距离指标量化时会造成距离近的单兵武器威胁度大于距离较远的武装直升机; 一些评估算法^[6, 11, 23] 指标量化时忽略了不确定信息, 如目标速度、攻击角度以及决策者评价信息, 这些参数往往具有一定的测量误差, 这种简化的指标量化方式会使得威胁量化结果与实际差别较大; 还有一些算法^[2, 25] 仅利用区间数进行指标量化, 与本文综合利用区间数、三角模糊数、模糊评价语言相比, 威胁量化结果的精确度较低. 此外, 本文针对地面作战还考虑了通视条件和环境等特殊指标的影响, 这也是传统方法没有考虑的.

表 7 目标威胁评估指标参数

Table 7 Index parameters of target threat assessment

目标	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8	f_9
T_1	$\langle 0.79, 0.11 \rangle$	$\langle 0.64, 0.19 \rangle$	$\langle 0.79, 0.11 \rangle$	$\langle 0.79, 0.11 \rangle$	$\langle 0.67, 0.2 \rangle$	$\langle 0.41, 0.35 \rangle$	$\langle 0.47, 0.33 \rangle$	$\langle 0.7, 0 \rangle$	$\langle 0.5, 0.3 \rangle$
T_2	$\langle 0.64, 0.19 \rangle$	$\langle 0.65, 0.2 \rangle$	$\langle 0.74, 0.14 \rangle$	$\langle 0.64, 0.19 \rangle$	$\langle 0.8, 0.07 \rangle$	$\langle 0.71, 0.06 \rangle$	$\langle 0.61, 0.19 \rangle$	$\langle 0.3, 0.3 \rangle$	$\langle 0.5, 0.3 \rangle$
T_3	$\langle 0.4, 0.4 \rangle$	$\langle 0.4, 0.45 \rangle$	$\langle 0.65, 0.2 \rangle$	$\langle 0.65, 0.2 \rangle$	$\langle 0.4, 0.47 \rangle$	$\langle 0.47, 0.29 \rangle$	$\langle 0.53, 0.27 \rangle$	$\langle 0.7, 0 \rangle$	$\langle 0.5, 0.3 \rangle$
T_4	$\langle 0.64, 0.19 \rangle$	$\langle 0.21, 0.68 \rangle$	$\langle 0.65, 0.2 \rangle$	$\langle 0.4, 0.4 \rangle$	$\langle 0.4, 0.47 \rangle$	$\langle 0.29, 0.35 \rangle$	$\langle 0.75, 0.05 \rangle$	$\langle 0.3, 0.3 \rangle$	$\langle 0.5, 0.3 \rangle$
T_5	$\langle 0.89, 0.06 \rangle$	$\langle 0.74, 0.14 \rangle$	$\langle 0.76, 0.14 \rangle$	$\langle 0.89, 0.06 \rangle$	$\langle 0.67, 0 \rangle$	$\langle 0.35, 0.29 \rangle$	$\langle 0.8, 0 \rangle$	$\langle 0.7, 0 \rangle$	$\langle 0.7, 0.1 \rangle$
T_6	$\langle 0.27, 0.58 \rangle$	$\langle 0.26, 0.61 \rangle$	$\langle 0.12, 0.82 \rangle$	$\langle 0.19, 0.7 \rangle$	$\langle 0.44, 0.29 \rangle$	$\langle 0.65, 0 \rangle$	$\langle 0.35, 0.45 \rangle$	$\langle 0.7, 0 \rangle$	$\langle 0.5, 0.3 \rangle$

表 8 目标威胁评估结果
Table 8 Target threat assessment results

S_i^+	[0.863, 0.858, 0.745, 0.699, 0.950, 0.601]
S_i^-	[0.646, 0.651, 0.764, 0.810, 0.559, 0.908]
p_i	[0.572, 0.569, 0.494, 0.463, 0.629, 0.398]
排序	$T_5 > T_1 > T_2 > T_3 > T_4 > T_6$

综上可以看出,本文的目标威胁评估指标处理方法能够针对地面作战威胁目标的特点,合理地量化威胁指标,并转化为容易处理的直觉模糊集的表示形式,使得目标威胁评估既能够获得科学的指标数据又便于实际处理。

5 结论

本文针对地面作战目标威胁评估指标处理问题,系统地提出了多属性指标的威胁量化方法和直觉模糊集表示方法,并给不同表示形式之间转化的数学证明。针对地面作战目标威胁评估中的目标类型、状态、距离、速度、攻击角度、地形通视、环境等多属性指标,通过模糊评价语言、区间数、实数、三角模糊数等进行量化处理,并转化为统一的直觉模糊集表示的威胁评估决策基础数据,既保留指标不确定信息又便于实际运用。本文的指标处理方法可为地面作战目标威胁评估方法的运用提供研究基础,同时为地面作战智能信息感知和指控决策提供科学的数据支撑。

References

- Kong D P, Chang T Q, Wang Q D, et al. A threat assessment method of group targets based on interval-valued intuitionistic fuzzy multi-attribute group decision-making. *Applied Soft Computing*, 2018, **67**(6): 350–369
- Deng Y. A threat assessment model under uncertain environment. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, (9): 1–12
- Huang J, Li B C, Zhao Y J. Target threat assessment based on intuitionistic fuzzy sets choquet integral. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, **433–435**(9): 736–743
- Roux J N, Van Vuuren J H. Threat evaluation and weapon assignment decision support: A review of the state of the art. *ORiON*, 2007, **23**(2): 151–187
- Lee H, Choi B J, Kim C O, et al. Threat evaluation of enemy air fighters via neural network-based Markov chain modeling. *Knowledge-Based Systems*, 2017, **116**(1): 49–57
- Liu Jing-Shu, Jiang Wen-Zhi, Lei Yu-Yao, et al. Threat evaluation of air-targets for key positions air-defense under dynamic fire access. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2016, **42**(7): 1422–1431
(刘敬蜀, 姜文志, 雷宇曜, 等. 动态火力接入下要地防空作战目标威胁评估. 北京航空航天大学学报, 2016, **42**(7): 1422–1431)
- Looney C G, Liang L R. Cognitive situation and threat assessments of ground battlespaces. *Information Fusion*, 2003, **4**(4): 297–308
- A. M G. The magical number seven plus or minus two: some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, 1956, **63**(2): 81–97
- MacCrimmon K R. Decisionmaking among multiple-attribute alternatives: a survey and consolidated approach. Report RM-4823-ARPA, Santa Monica: RAND Corporation, 1968.
- Naseem A, Shah S T H, Khan S A, et al. Decision support system for optimum decision making process in threat evaluation and weapon assignment: Current status, challenges and future directions. *Annual Reviews in Control*, 2017, **43**: 169–187
- Mao Hong-Bao, Feng Hui, Zhang Liang, et al. Aerial targets threat evaluation method based on combination weighting for MADM. *Journal of Information Engineering University*, 2014, **15**(3): 281–285
(毛红保, 冯卉, 张亮, 等. 基于 MADM 组合赋权的空中目标威胁评估方法. 信息工程大学学报, 2014, **15**(3): 281–285)
- Chen Wei-Yi, Wang Shao-Lei, Zhou Fei. Threat evaluation of air targets to ships in air defense based on weighted KPCA-TOPSIS. *Journal of Naval University of Engineering*, 2014, **26**(1): 87–91
(陈维义, 王少雷, 周菲. 基于加权核主成分 TOPSIS 方法的舰艇防空威胁评估. 海军工程大学学报, 2014, **26**(1): 87–91)
- Atanassov K T. Intuitionistic fuzzy sets. *Fuzzy Sets and Systems*, 1986, **20**(1): 87–96
- Szmidt E, Kacprzyk J. Entropy for intuitionistic fuzzy sets. *Fuzzy Sets and Systems*, 2001, **118**(3): 467–477
- Zhang H, Yu L. New distance measures between intuitionistic fuzzy sets and interval-valued fuzzy sets. *Information Sciences*, 2013, **245**(10): 181–196
- Xu Z S. Some similarity measures of intuitionistic fuzzy sets and their applications to multiple attribute decision making. *Fuzzy Optimization and Decision Makings*, 2007, **6**(2): 109–121
- Guo K. Knowledge measure for Atanassov's intuitionistic fuzzy sets. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2016, **24**(5): 1072–1078
- Xu Z S. Intuitionistic fuzzy aggregation operators. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2007, **15**(6): 1179–1187
- Liu P, Chen S M. Group decision making based on heronian aggregation operators of intuitionistic fuzzy numbers. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2017, **47**(9): 2514–2530
- Xu Z S. Approaches to multiple attribute group decision making based on intuitionistic fuzzy power aggregation operators. *Knowledge-Based Systems*, 2011, **24**(6): 749–760
- Nguyen H. A new knowledge-based measure for intuitionistic fuzzy sets and its application in multiple attribute group decision making. *Expert Systems with Applications*, 2015, **42**(22): 8766–8774
- Wang Yi, Liu San-Yang, Zhang Wen, et al. Threat assessment method with uncertain attribute weight based on intuitionistic fuzzy multi-attribute decision. *Acta Electronica Sinica*, 2014, **42**(12): 2509–2514
(王毅, 刘三阳, 张文, 等. 属性权重不确定的直觉模糊多属性决策的威胁评估方法. 电子学报, 2014, **42**(12): 2509–2514)

- 23 Wu Hua, Su Xiu-Qin. Threat assessment of aerial targets based on group generalized intuitionistic fuzzy soft sets. *Control and Decision*, 2015, **30**(8): 1462–1468
(武华, 苏秀琴. 基于群广义直觉模糊软集的空袭目标威胁评估方法. 控制与决策, 2015, **30**(8): 1462–1468)
- 24 Zhang Kun, Wang Xue, Zhang Cai-Kun, et al. Evaluating and sequencing of air target threat based on IFE and dynamic intuitionistic fuzzy sets. *Systems Engineering and Electronics*, 2014, **36**(4): 697–701
(张堃, 王雪, 张才坤, 等. 基于 IFE 动态直觉模糊法的空战目标威胁评估. 系统工程与电子技术, 2014, **36**(4): 697–701)
- 25 Guo Hui, Xu Hao-Jun, Liu Ling. Threat assessment for air combat target based on interval TOPSIS. *Systems Engineering and Electronics*, 2009, **31**(12): 2914–2917
(郭辉, 徐浩军, 刘凌. 基于区间数 TOPSIS 法的空战目标威胁评估. 系统工程与电子技术, 2009, **31**(12): 2914–2917)
- 26 Xu Zhe-Shui. Study on method for triangular fuzzy number-based multi-attribute decision making with preference information on alternatives. *Systems Engineering and Electronics*, 2002, **24**(8): 9–12
(徐泽水. 对方案有偏好的三角模糊型多属性决策方法研究. 系统工程与电子技术, 2002, **24**(8): 9–12)
- 27 Zhai Y L, Xu Z S, Liao H C. Probabilistic linguistic vector-term set and its application in group decision making with multi-granular linguistic information. *Applied Soft Computing*, 2016, **49**(12): 801–816
- 28 Xu Z S. Deviation measures of linguistic preference relations in group decision making. *Omega*, 2005, **33**(3): 249–254
- 29 Huang Jia-Hui, Feng Dong-Qin, Wang Hong-Jian. A method for quantifying vulnerability of industrial control system based on attack graph. *Acta Automatica Sinica*, 2016, **42**(5): 792–798
(黄家辉, 冯冬芹, 王虹鉴. 基于攻击图的工控系统脆弱性量化方法. 自动化学报, 2016, **42**(5): 792–798)
- 30 Kumar S, Tripathi B K. Modelling of threat evaluation for dynamic targets using Bayesian network approach. *Procedia Technology*, 2016, **24**: 1268–1275
- 31 Naeem H, Masood A. An optimal dynamic threat evaluation and weapon scheduling technique. *Knowledge-Based Systems*, 2010, **23**(4): 337–342
- 32 Chen S M, Cheng S H, Lan T C. Multicriteria decision making based on the TOPSIS method and similarity measures between intuitionistic fuzzy values. *Information Sciences*, 2016, **367–368**(11): 279–295



孔德鹏 陆军装甲兵学院兵器与控制系博士研究生. 2015 年获得装甲兵工程学院硕士学位. 主要研究方向为战场火力运用决策技术.
E-mail: kongdp55@163.com
(KONG De-Peng) Ph. D. candidate in the Weaponry and Control Department, Army Academy of Armored Forces. He received his master degree from Academy of

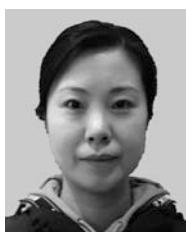
Armored Forces Engineering in 2015. His research interest covers decision-making technology for battlefield firepower utilization.)



常天庆 陆军装甲兵学院兵器与控制系教授. 1999 年获得清华大学博士学位. 主要研究方向为火控系统智能化技术. 本文通信作者.

E-mail: changtianqing@263.net

(CHANG Tian-Qing) Professor in the Weaponry and Control Department, Army Academy of Armored Forces. He received his Ph. D. degree from Tsinghua University in 1999. His research interest covers intelligent technology of fire control system. Corresponding author of this paper.)



郝娜 陆军装甲兵学院兵器与控制系副教授. 2016 年获得装甲兵工程学院博士学位. 主要研究方向为战场信息融合技术. E-mail: lzygdshn@163.com

(HAO Na) Associate professor in the Weaponry and Control Department, Army Academy of Armored Forces. She received her Ph. D. degree from Academy of Armored Forces Engineering in 2016. Her main research interest is battlefield information fusion.)



张雷 陆军装甲兵学院兵器与控制系副教授. 2010 年获得装甲兵工程学院博士学位. 主要研究方向为武器系统与运用工程. E-mail: 13611377719@139.com

(ZHANG Lei) Associate professor in the Weaponry and Control Department, Army Academy of Armored Forces. He received his Ph. D. degree from Academy of Armored Forces Engineering in 2010. His research interest covers weapon system and application engineering.)



郭理彬 陆军装甲兵学院兵器与控制系讲师. 2006 年获得国防科技大学硕士学位. 主要研究方向为导航制导与控制.

E-mail: binexe@126.com

(GUO Li-Bin) Lecturer in the Weaponry and Control Department, Army Academy of Armored Forces. He received his master degree from National University of Defense Technology in 2006. His research interest covers navigation guidance and control.)