

引用格式:徐克虎,张明双,李灵之.基于区间变权灰色关联法的集群目标威胁评估[J].电光与控制,2019,26(12):6-11. XU K H, ZHANG M S, LI L Z. Cluster target threat assessment based on interval variable weight grey correlation method[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(12):6-11.

基于区间变权灰色关联法的集群目标威胁评估

徐克虎, 张明双, 李灵之
(陆军装甲兵学院,北京 100072)

摘要:以地面合成分队联合作战为背景,建立了基于集群目标的威胁评估指标体系;针对传统威胁评估方法中采用常权权重易导致状态失衡的问题,引入区间数理论确定指标区间常权,并结合作战态势利用变权理论确定指标区间变权权重,使权重能够随着战场变化而动态调整;将区间变权与灰色关联法相结合,构建出一种适用于区间数的最小二乘灰色关联威胁评估模型。最后通过实例仿真验证了模型和方法的有效性。

关键词: 集群目标; 区间数; 变权; 最小二乘; 灰色关联法

中图分类号: TJ810 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2019.12.002

Cluster Target Threat Assessment Based on Interval Variable Weight Grey Correlation Method

XU Ke-hu, ZHANG Ming-shuang, LI Ling-zhi
(Academy of Army Armored Force, Beijing 100072, China)

Abstract: In the background of the joint operations of ground synthetic units, a threat assessment indicator system based on cluster targets was established. Aiming at the problem of the imbalance of state in the traditional threat assessment method caused by invariant weight, the interval number theory was introduced to determine the index interval invariant weight, and the variable weight theory was used in combination with the combat situation to determine the index interval variable weight, so that the weight can be dynamically adjusted with the change of the battlefield. By combining interval variable weight with grey correlation method, the least-squares grey-correlation threat assessment model for interval number was constructed. Finally, the effectiveness of the model and the method was verified by the example simulation.

Key words: cluster target; interval number; variable weight; least squares; grey correlation method

0 引言

在地面合成分队联合作战时,为便于组织指挥和作战协同,部队多以集群的方式进行兵力部署和组织战斗,以最大程度地发挥整体作战效能。对地面复杂环境下的集群目标的威胁评估研究,可为指挥员进行兵力部署和火力优化分配提供重要决策依据,具有重大军事应用价值。常用的评估方法有模糊综合评判法^[1]、层次分析法^[2]、Bayes网络^[3]、Topsis法^[4]等,但无论目标属性参数如何变化,这些方法总是以不变的权重应万变的属性值,因此很难得到合理的评估结果^[5]。考虑到不同的专家给出的数值存在差异性,评估本身也具有

一定的模糊性,而且战场态势瞬息万变,集群目标的指标权重应该是一个取值范围,并应随着战场情况变化做出动态的调整。为此,本文依据作战实际,结合区间数和变权理论,提出一种适用于集群目标的区间变权权重求取方法,并在已有文献基础上将最小二乘法引入区间数中,构建出适用于区间数的最小二乘灰色关联评估模型,用来对集群目标进行威胁评估与排序,辅助指挥员进行有效的指挥决策。

1 集群目标指标体系的建立与量化处理

影响集群目标威胁程度的因素有很多,本文在给出预选指标集的基础上,结合地面合成分队联合作战实际和专家筛选结果统计分析,最终确定了集群类型、集群规模、打击能力、相对距离、担负任务、打击难度6个主要评估指标,建立了集群目标威胁评估指标体系,如图1所示。

收稿日期:2018-12-18

修回日期:2019-01-22

基金项目:军内科研基金

作者简介:徐克虎(1963—),男,安徽蚌埠人,博士,教授,研究方向为军用控制工程。

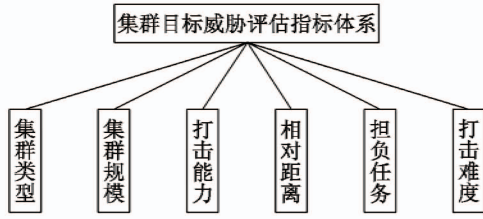


图 1 集群目标威胁评估指标体系

Fig. 1 Cluster target threat assessment indicator system

指标量化的精确与否,对威胁评估结果有较大影响。对于定量的指标,可根据其隶属度函数求出具体数值,而对于定性指标,由于其模糊性,可根据相对重要程度采用直接赋值法来简化运算。

1.1 集群类型

集群类型不同,威胁程度差异较大。以几种常见的集群为例,集群类型指标 I_1 如表 1 所示。

表 1 集群类型指标

Table 1 Cluster type indicator

	集群类型						
	坦克群	步战车群	突击车群	炮兵群	反装甲群	防空兵群	保障群
I_1	0.9	0.8	0.7	0.7	0.6	0.5	0.3

1.2 集群规模

威胁程度随着集群规模的增多而增大,由于集群所含的武器装备和人员数量较多,分析量化较为复杂,可利用其编制的大小进行简化。记一个连的兵力为单位 1,一个排为 1/3,则集群规模 I_2 可简化为

$$I_2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{3} m_{i1} + m_{i2} \right) \quad (1)$$

式中: m_{i1}, m_{i2} 分别是集群中第 i 种目标的排级、连级编制数量(不可重复计算); n 是该集群所含目标总种类数。

1.3 打击能力

打击能力越强,对我方杀伤破坏能力越大,威胁度就越大。打击能力指标 I_3 可用模糊语言分为 5 个等级,并量化如表 2 所示。

表 2 打击能力指标

Table 2 Strike capability indicator

	打击能力					
	很强	较强	强	一般	弱	较弱
I_3	0.9	0.8	0.6	0.5	0.3	0.2

1.4 相对距离

相对距离是指敌集群作战前沿至我方防御前沿的最短直线距离,其值越小,威胁越大。可构造相对距离隶属度函数 I_4 为

$$I_4 = \begin{cases} 0 & r > r_{\max} \\ 0.6 \frac{r_{\max} - r}{r_{\max} - r_{\text{eff}}} & r_{\text{eff}} \leq r \leq r_{\max} \\ 1 - 0.4 \frac{r}{r_{\text{eff}}} & r < r_{\text{eff}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: r_{eff} 是集群中主要装备的有效射程; r_{\max} 是集群中主要装备的最大射程。

1.5 作战任务

在实际作战中,每个集群都担负不同的作战任务,甚至几个集群一起完成上级所赋予的作战任务,敌方担负作战任务的不同会导致其对我方打击的方式和强度不同,威胁程度亦有不同。作战任务指标 I_5 如表 3 所示。

表 3 作战任务指标

Table 3 Operational task indicator

	作战任务						
	主攻	支援	包抄	掩护	保障	防御	撤退
I_5	1	0.8	0.7	0.6	0.6	0.5	0.3

1.6 打击难度

打击难度主要与敌集群目标的分散程度和战场环境有关。目标较为分散时,有利于其隐蔽机动和发起突然袭击,我方侦察难度加大,火力毁伤效果减弱,打击难度增加。目标较为集中时,易于我方侦察目标属性,判定作战企图,火力毁伤效果增强,打击难度减小。分散程度对打击难度的影响可用影响因子 ζ 来表示为

$$\zeta = e^{-(\alpha-0.1)^2} \quad (3)$$

式中, α 为分散程度系数,可量化如表 4 所示。

表 4 分散程度量化关系

Table 4 Quantitative relationship of dispersion degree

	分散程度						
	极疏	疏	较疏	适中	较密	密	极密
α	0.1	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	0.9

战场环境好坏对我方打击难度也有较大影响,一般由专家给出环境复杂因子 ε_0 ,取值在 [1, 2],不复杂取下限 1,很复杂取上限 2。打击难度指标 I_6 可表示为

$$I_6 = \varepsilon_0 e^{-(\alpha-0.1)^2} \quad (4)$$

2 相关理论

2.1 区间数理论

若 $a = [a^L, a^U] = \{x | a^L \leq x \leq a^U\}$,表示在实轴上的一个闭区间,则 a 就是一个区间数。设 $A = (a_{ij})_{m \times m}$ 为区间数矩阵,其中, $a_{ij} = [a_{ij}^L, a_{ij}^U]$, a_{ij}^L, a_{ij}^U 分别指区间的下限和上限。则记 $A^L = (a_{ij}^L)_{m \times m}, A^U = (a_{ij}^U)_{m \times m}$,区间数求权重步骤^[6]如下所述。

1) 分别求出 A^L, A^U 的最大特征值所对应的归一化特征向量 x^L, x^U 。

2) 求出 α, β

$$\begin{cases} \alpha = \left(\sum_{j=1}^m \frac{1}{\sum_{i=1}^m a_{ij}^U} \right)^{1/2} \\ \beta = \left(\sum_{j=1}^m \frac{1}{\sum_{i=1}^m a_{ij}^L} \right)^{1/2} \end{cases} \quad (5)$$

3) 则区间权重为

$$\omega = [\alpha x^L, \beta x^U]。 \quad (6)$$

2.2 变权理论

变权理论最早由汪培庄教授提出^[7],李洪兴、朱勇珍做了进一步完善^[8-10],其定义如下^[11]。

设状态向量为 $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_m)$, 一组变权是 m 个映射 $w_j, j=1, 2, \dots, m: [0, 1]^m \rightarrow [0, 1], (x_1, x_2, \dots, x_m) \mapsto w_j(x_1, x_2, \dots, x_m)$ 满足以下 3 个条件。1) 归一性: $\sum_{j=1}^m w_j(x_1, x_2, \dots, x_m) = 1$ 。2) 连续性: $w_j(x_1, x_2, \dots, x_m)$ 关于每个变元 $x_j (j=1, 2, \dots, m)$ 连续。3) 单调性: $w_j(x_1, x_2, \dots, x_m)$ 关于变元 x_j 单调递增或递减。

则变权向量 $\mathbf{W}(\mathbf{X}) = (w_1, w_2, \dots, w_m)$ 可表示为常权区间向量 ω 与状态变权向量 $\mathbf{S}(\mathbf{X})$ 的归一化 Hadamard 乘积

$$\mathbf{W}_j(\mathbf{X}) = \frac{\omega_j \cdot \mathbf{S}_j(\mathbf{X})}{\sum_{j=1}^m \omega_j \cdot \mathbf{S}_j(\mathbf{X})} \quad (7)$$

式中, 状态变权向量 $\mathbf{S}(\mathbf{X})$ 是均衡函数 $B(x_1, \dots, x_m)$ 的梯度向量, 反映的是各因素状态的一阶变化情况, 可通过合理构造均衡函数来求出, 即

$$\mathbf{S}(\mathbf{X}) = \text{grad } B(x_1, \dots, x_m) = \left(\frac{\partial B}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial B}{\partial x_m} \right)。 \quad (8)$$

3 基于区间变权的集群目标指标权重的确定

区间数理论确定指标权重范围虽然较好地考虑了专家的判断主观性和指标本身的模糊性, 使权重不再是一个精确的数值, 而是可以在一个小范围内浮动的常权区间, 但其浮动范围相对受限, 当战场态势发生较大改变时, 不能及时根据战场态势变化做出相应的动态调整, 往往会造成评估结果的不合理。通过引入变权理论, 构造变权向量, 不同战场态势下的目标集群对应不同的指标权重, 评估结果才能更加符合战场实际。基于区间变权的集群目标指标权重的确定过程如下所述。

3.1 利用区间数理论确定各指标的常权区间

对于 m 个指标, 让多名专家对指标进行两两比较, 给出各自的指标相对重要程度评估值, 专家给出的数值不会落到同一个点上, 但会稳定在一个区间之内, 得出区间数矩阵 $\mathbf{A} = (a_{ij})_{m \times m}$, 根据式(5)、式(6)求得区间权重 $\omega = [\omega^-, \omega^+]$ 。

3.2 构建基于作战态势的状态变权向量

分析地面集群目标实际作战过程可以发现, 作战双方相互接近的过程中, 集群目标会充分发挥其火力性能对我方进行杀伤破坏, 对我方构成直接现实威胁, 火力打击能力的重要性增加。同理, 随着距离的不断

减小, 目标逐渐进入我方武器有效射程之内, 我方对其打击的手段增多且战场环境的影响也相对减弱, 打击难度会降低。所以, 在敌我双方相互接近的过程中, 打击能力指标 I_3 的作用越来越突出, 应做激励型变权, 而打击难度指标 I_6 的作用却在下降, 应做惩罚型变权。其余 4 个指标随着距离变化不会引起较大的变动, 不做变权处理, 但由于要满足归一化条件, 所以也会相应变化。

对于打击能力指标 I_3 , 构建其均衡函数为

$$B_3 = \begin{cases} x & x > r_{\text{eff}} \\ -r_{\text{eff}} e^{1-x/r_{\text{eff}}} & x \leq r_{\text{eff}} \end{cases} \quad (9)$$

式中: x 指相对距离; r_{eff} 指有效射程。

对于打击难度指标 I_6 , 构建其均衡函数为

$$B_6 = \begin{cases} x & x > r_{\text{eff}} \\ x + \frac{r_{\text{eff}}}{k} e^{-kx/r_{\text{eff}}} & x \leq r_{\text{eff}} \end{cases} \quad (10)$$

式中, k 指惩罚系数, 这里取值为 2。

综上所述, 如果距离大于集群有效射程, 各指标均不做变权处理。若距离小于有效射程, 状态变权向量可表示为

$$\mathbf{S}_j(x_1, \dots, x_6) = \frac{\partial B_j}{\partial x_j} = \begin{cases} 1 & j=1, 2, 4, 5 \\ e^{1-x/r_{\text{eff}}} & j=3 \\ 1 - e^{-kx/r_{\text{eff}}} & j=6 \end{cases} \quad (11)$$

随着距离 x 的减小: 当 $j=1, 2, 4, 5$ 时, \mathbf{S}_j 是常数, 表示不进行变权; 当 $j=3$ 时, \mathbf{S}_3 逐渐递增, 进行激励型变权; 当 $j=6$ 时, \mathbf{S}_6 逐渐递减, 进行惩罚型变权, 符合作战实际。

3.3 求解区间变权向量

由于常权是区间常权 $\omega_j = [\omega_j^-, \omega_j^+], j=1, 2, \dots, m$, 变权是在区间常权的基础上结合战场态势进行的, 因此最终权重也为区间值, 记为 $\mathbf{W} = [w^-, w^+]_{m \times m}$ 。其中:

$$\begin{cases} w^- = \frac{\omega^- \cdot \mathbf{S}}{\sum_{j=1}^m \omega_j^+ s_j} \\ w^+ = \frac{\omega^+ \cdot \mathbf{S}}{\sum_{j=1}^m \omega_j^- s_j} \end{cases}。 \quad (12)$$

4 适用于区间数的最小二乘灰色关联威胁评估模型的构建

灰色关联分析法是目前应用最广泛的灰色分析方法之一, 它是依据各因素的样本数据比较目标样本与最优和最劣方案的关联程度, 进而评估各目标的好坏^[12]。通常, 一样本数据与最优方案关联最大, 必定与最劣方

案关联最小。但实际运算过程中,可能产生样本 1 与最优方案关联度比样本 2 大,同时与最劣方案关联度也比样本 2 大的自相矛盾的情况,如图 2 所示。

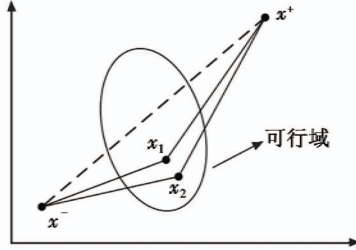


图 2 样本对比示意图

Fig. 2 Sample comparison

因此,文献[13]提出利用最小二乘法对灰色关联分析法做出改进,提高了对空中目标的威胁评估排序能力。但美中不足的是,该方法只适用于精确数值,无法适用于本文提出的区间变权而形成的区间数值,所以,本文在借鉴原有理论的基础上对其进行改进,将最小二乘灰色关联分析法拓展进区间数值中,构建了适用于区间数的基于最小二乘灰色关联分析法的集群目标威胁评估模型。具体步骤如下所述。

1) 确定原始矩阵 Y 。

设待评估的 n 个目标组成的目标集为 $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$, m 个评估指标组成的指标集记为 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$ 。依据目标在各个指标的属性值,构建原始矩阵 $Y = (y_{ij})_{n \times m}$ 。

2) 数据的标准化处理。

因为各个指标的数量级和量纲不同,不能进行直接分析,需要对数据进行标准化处理^[14],以保证不同指标数据的可比性。处理方法如下。

① 对于效益型指标

$$r_{ij} = \frac{y_{ij} - \min_i(y_{ij})}{\max_i(y_{ij}) - \min_i(y_{ij})} \quad (13)$$

② 对于成本型指标

$$r_{ij} = \frac{\max_i(y_{ij}) - y_{ij}}{\max_i(y_{ij}) - \min_i(y_{ij})} \quad (14)$$

数据标准化后,得出评估决策矩阵 $R = (r_{ij})_{n \times m}$ 。

3) 计算灰色关联系数。

第 i 个目标集群在第 j 个指标上与最优、最劣方案的灰色关联系数可表示为

$$\xi_{ij}^* = \frac{\min_i \min_j |r_{ij} - r_j^*| + \varepsilon \max_i \max_j |r_{ij} - r_j^*|}{|r_{ij} - r_j^*| + \varepsilon \max_i \max_j |r_{ij} - r_j^*|} \quad (15)$$

$$\xi_{ij}^- = \frac{\min_i \min_j |r_{ij} - r_j^-| + \varepsilon \max_i \max_j |r_{ij} - r_j^-|}{|r_{ij} - r_j^-| + \varepsilon \max_i \max_j |r_{ij} - r_j^-|} \quad (16)$$

式中: ε 为分辨系数,通常取值为 0.5; r_j^* 和 r_j^- 分别代表指标 j 的最大、最小属性值,可分别表示为 $r_j^* = \max_{1 \leq i \leq n} r_{ij}$,

$$r_j^- = \min_{1 \leq i \leq n} r_{ij}。$$

4) 求关联度。

将区间变权法求得的变权向量 $W = [w_{ij}^-, w_{ij}^+]_{m \times m}$ 与灰色关联法进行结合,则第 i 个目标对象与最优最劣方案的灰色关联度可分别定义为

$$\lambda_i^* = \sum_{j=1}^n w_{ij} \xi_{ij}^* = [\lambda_{iL}^*, \lambda_{iU}^*] \quad (17)$$

$$\lambda_i^- = \sum_{j=1}^n w_{ij} \xi_{ij}^- = [\lambda_{iL}^-, \lambda_{iU}^-] \quad (18)$$

则第 i 个目标对象与最优最劣方案的距离可分别表示为

$$d_i^* = 1 - \lambda_i^* = [1 - \lambda_{iL}^*, 1 - \lambda_{iU}^*] \quad (19)$$

$$d_i^- = 1 - \lambda_i^- = [1 - \lambda_{iL}^-, 1 - \lambda_{iU}^-]。 \quad (20)$$

假设目标以 u_i 隶属于最优方案,以 $1 - u_i$ 隶属于最劣方案,利用最小二乘法构造适用于区间数的目标函数为

$$G(u) = \sum_{i=1}^m \{ (u_i((1 - \lambda_{iU}^*)^2 + (1 - \lambda_{iL}^*)^2))^2 + ((1 - u_i)((1 - \lambda_{iU}^-)^2 + (1 - \lambda_{iL}^-)^2))^2 \} \quad (21)$$

令 $\frac{\partial G(u)}{\partial u_i} = 0$, 则

$$u_i = \frac{1}{1 + \left[\frac{(1 - \lambda_{iU}^*)^2 + (1 - \lambda_{iL}^*)^2}{(1 - \lambda_{iU}^-)^2 + (1 - \lambda_{iL}^-)^2} \right]^2}。 \quad (22)$$

根据 u_i 的定义可知, u_i 的值越大,越接近其隶属的最理想方案,对应的威胁也就越大。所以,可根据 u_i 值的大小对集群目标进行威胁评估与排序。

5 实例仿真

假设在一次作战中,我防御阵地前沿有 6 个敌方集群目标向我方发起进攻,作战态势如图 3 所示。

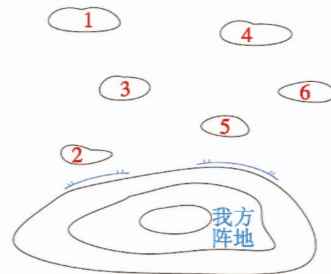


图 3 作战态势示意图

Fig. 3 Operational situation diagram

通过我方侦察获取敌集群目标具体信息如表 5 所示,已知作战地域战场环境良好,环境影响因子为 1,各集群均在有效射程之内,并假定炮兵群有效射程为 5000 m,其余均为 3000 m。

表5 目标集群原始参数表

Table 5 Original parameters of target cluster

序号	集群类型	集群规模	打击能力	相对距离/m	担负任务	打击难度	
						分散程度	环境因子
1	炮兵群	一个连	很强	4500	支援	较密	1
2	坦克群	两个排	较强	500	主攻	适中	1
3	反装甲群	一个排	一般	1800	支援	较密	1
4	保障群	一个连	弱	2800	保障	疏	1
5	步战车群	一个连	强	900	主攻	较疏	1
6	突击车群	一个连	强	1500	包抄	较疏	1

根据指标量化原则可得出目标集群威胁评估决策矩阵 Y , 并根据式(13)、式(14), 将矩阵 Y 标准化得到标

$$R = \begin{pmatrix} 0.667 & 1 & 1 & 0.042 & 0.5 & 0 \\ 1 & 0.5 & 0.833 & 1 & 1 & 0.401 \\ 0.5 & 0 & 0.333 & 0.435 & 0.5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0.833 & 1 & 0.5 & 0.827 & 1 & 0.742 \\ 0.667 & 1 & 0.5 & 0.565 & 0.25 & 0.742 \end{pmatrix}$$

最优方案为 $r^* = (1, 1, 1, 1, 1, 1)$, 最劣方案为 $r^- = (0, 0, 0, 0, 0, 0)$, 由式(15)、式(16)得到正负关联系数矩阵分别为

$$\zeta^+ = \begin{pmatrix} 0.6 & 1 & 1 & 0.343 & 0.5 & 0.333 \\ 1 & 0.5 & 0.750 & 1 & 1 & 0.455 \\ 0.5 & 0.333 & 0.428 & 0.469 & 0.5 & 0.333 \\ 0.333 & 1 & 0.333 & 0.333 & 0.333 & 1 \\ 0.75 & 1 & 0.5 & 0.743 & 1 & 0.660 \\ 0.6 & 1 & 0.5 & 0.535 & 0.4 & 0.660 \end{pmatrix}$$

$$W = \begin{pmatrix} [0.198, 0.355] & [0.178, 0.286] & [0.130, 0.224] & [0.076, 0.120] & [0.141, 0.244] & [0.048, 0.069] \\ [0.172, 0.311] & [0.155, 0.251] & [0.234, 0.408] & [0.066, 0.105] & [0.123, 0.214] & [0.014, 0.020] \\ [0.189, 0.338] & [0.169, 0.273] & [0.166, 0.288] & [0.072, 0.115] & [0.134, 0.232] & [0.038, 0.055] \\ [0.199, 0.356] & [0.179, 0.287] & [0.126, 0.217] & [0.076, 0.121] & [0.142, 0.245] & [0.049, 0.070] \\ [0.178, 0.320] & [0.159, 0.258] & [0.211, 0.367] & [0.068, 0.108] & [0.126, 0.220] & [0.023, 0.033] \\ [0.185, 0.332] & [0.166, 0.268] & [0.180, 0.313] & [0.071, 0.112] & [0.132, 0.228] & [0.034, 0.049] \end{pmatrix}$$

利用式(19)、式(20)、式(22), 计算出区间变权情况下正负关联度和威胁度大小, 如表7所示。表8给出了区间不变权情况下的正负关联度和威胁度大小。

表7 区间变权正负关联度、威胁度大小及排序

Table 7 Positive and negative relevance degree, threat degree and ranking under interval variable weight

集群序号	正关联度	负关联度	u_i	威胁排序
1	[0.539, 0.909]	[0.376, 0.624]	0.852	3
2	[0.620, 1.071]	[0.293, 0.499]	0.962	1
3	[0.335, 0.571]	[0.507, 0.847]	0.153	5
4	[0.409, 0.670]	[0.619, 1.058]	0.095	6
5	[0.590, 1.004]	[0.302, 0.517]	0.948	2
6	[0.480, 0.807]	[0.360, 0.612]	0.768	4

$$\zeta^- = \begin{pmatrix} 0.428 & 0.333 & 0.333 & 0.923 & 0.5 & 1 \\ 0.333 & 0.5 & 0.375 & 0.333 & 0.333 & 0.555 \\ 0.5 & 1 & 0.6 & 0.535 & 0.5 & 1 \\ 1 & 0.333 & 1 & 1 & 1 & 0.333 \\ 0.375 & 0.333 & 0.5 & 0.377 & 0.333 & 0.403 \\ 0.428 & 0.333 & 0.5 & 0.469 & 0.667 & 0.403 \end{pmatrix}$$

综合各个专家的意见, 建立了表6所示的评估指标区间数判断矩阵。

表6 评估指标区间数判断矩阵

Table 6 Interval number judgment matrix of evaluation index

指标	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6
I_1	[1,1]	[1,2]	[1,2]	[2,3]	[1,3]	[3,4]
I_2	[1/2,1]	[1,1]	[1,2]	[2,3]	[1,2]	[3,4]
I_3	[1/2,1]	[1/2,1]	[1,1]	[1,2]	[1/2,1]	[2,3]
I_4	[1/3,1/2]	[1/3,1/2]	[1/2,1]	[1,1]	[1/3,1/2]	[1,2]
I_5	[1/3,1]	[1/2,1]	[1,2]	[2,3]	[1,1]	[2,3]
I_6	[1/4,1/3]	[1/4,1/3]	[1/3,1/2]	[1/2,1]	[1/3,1/2]	[1,1]

依据表6中的数据, 按照上述区间数求权重的计算过程可以求出 $\alpha = 0.870, \beta = 1.127, x^L = (0.2588, 0.2320, 0.1530, 0.0984, 0.1835, 0.0744), x^U = (0.2749, 0.2220, 0.1571, 0.0928, 0.1893, 0.0638)$ 。最后由式(6)求得集群目标威胁评估指标的区间数权重向量为 $\omega = [\alpha x^L, \beta x^U] = ([0.225, 0.310], [0.202, 0.250], [0.133, 0.177], [0.086, 0.105], [0.160, 0.213], [0.065, 0.072])$ 。

由式(11)可求得状态变权向量 S 。将变权向量 S 代入式(12), 求得各指标在不同战场态势下的最终变权权重为

表8 区间不变权情况下威胁度大小及排序

Table 8 Threat degree and ranking under interval invariant weight

集群序号	正关联度	负关联度	u_i	威胁排序
1	[0.601, 0.779]	[0.432, 0.550]	0.716	4
2	[0.701, 0.919]	[0.344, 0.440]	0.984	2
3	[0.387, 0.494]	[0.512, 0.746]	0.187	5
4	[0.468, 0.590]	[0.693, 0.912]	0.049	6
5	[0.704, 0.910]	[0.330, 0.428]	0.985	1
6	[0.556, 0.713]	[0.403, 0.525]	0.813	3

对比表7、表8结果可以发现, 区间变权结果为 $u_2 > u_5 > u_1 > u_6 > u_3 > u_4$, 区间不变权结果为 $u_5 > u_2 > u_6 > u_1 > u_3 > u_4$ 。区间变权与不变权的区别在集群2, 5和集

群 1,6 的排序先后上,分析作战态势并结合专家经验可知,集群 2 是坦克群,虽然规模较小,但其距离较近,火力打击能力较强,直接现实威胁反而应比集群 5 步战车群大。集群 1 为炮兵群,具有强大的火力和较高的机动力,能集中、突然和连续地对目标进行火力打击,而集群 6 为突击车群,虽然机动灵活,但其火力有限、防护能力差、有效载荷小,所以集群 1 炮兵群的威胁度也应比集群 6 突击车群大。因此,基于区间变权的威胁评估方法能够根据战场态势对权重做出相应的动态调整,评估过程更为合理,排序结果更加符合作战实际。

6 结束语

为了弥补常规没有考虑战场态势的影响易导致评估结果不准确的问题,结合联合作战背景下集群目标的战场实际,采用区间变权的方法,使指标权重能够随着战场态势的改变而动态变化,并利用最小二乘法构建了适用于区间数的灰色关联模型来对集群目标进行威胁评估与排序。仿真结果表明,该评估方法合理有效,能为指挥员作战决策提供重要数据支撑。

参考文献

- [1] 丁海燕,陈建华,宋剑. 模糊综合评判舰艇编队防空武器协同共用效能评估[J]. 火力与指挥控制,2010,35(2):95-98.
- [2] 安明伟,方龙,郑少华. 基于层次分析法的坦克电台通信效能评估[J]. 火力与指挥控制,2016,41(1):53-57.
- [3] PAGE S F, OLDFIELD J P, THOMAS P. Towards integrated threat assessment and sensor management: Bayesian multi-target search [C]//IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, 2016:44-51.
- [4] 耿涛,张安,郝兴国. 基于组合赋权 TOPSIS 法的空战多目标威胁评估[J]. 火力与指挥控制,2011,36(3):16-19.
- [5] 郝飞龙,李德清. 属性值为区间数的变权综合决策方法[J]. 数学的实践与认识,2008,38(5):31-35.
- [6] 郭辉,徐浩军,刘凌. 基于区间数 TOPSIS 法的空战目标威胁评估[J]. 系统工程与电子技术,2009,31(12):2914-2917.
- [7] 汪培庄. 模糊集与随机集落影[M]. 北京:北京师范大学出版社,1985.
- [8] 李洪兴. 因素空间理论与知识表示的数学框架(VIII)——变权综合原理[J]. 模糊系统与数学,1995,9(3):1-9.
- [9] 李洪兴. 因素空间理论与知识表示的数学框架(IX)——均衡函数的构造与 Weber-Fechner 特性[J]. 模糊系统与数学,1996,10(3):12-19.
- [10] 朱勇珍,李洪兴. 状态变权的公理化体系和均衡函数的构造[J]. 系统工程理论与实践,1999(7):116-118,131.
- [11] 杜鹏泉,卢盈齐. 惩罚与激励变权的空中目标威胁评估[J]. 现代防御技术,2017,45(5):109-113,119.
- [12] 宋佳庆,张晓玲. 基于灰关联理论的预警探测系统效能评估研究[J]. 现代防御技术,2017,45(1):35-39,74.
- [13] 马琳,宋贵宝,吉礼超,等. 基于最小二乘灰色关联分析法的目标威胁评估[J]. 战术导弹技术,2010(1):28-31.
- [14] 夏春林,周德云,冯琦. 基于变权灰色关联法的目标威胁评估[J]. 火力与指挥控制,2014,39(4):54-57.