

基于折中型变权的目标态势威胁评估方法

高 杨, 李东生, 柳 向, 程泽新, 陆 遥
(国防科技大学电子对抗学院, 安徽合肥 230037)

摘 要: 针对传统目标态势威胁评估方法中常权求和带来的评估不合理问题, 可通过变权理论进行改善, 使得权重随态势变化而做出相应调整。但现有的基于变权理论的目标态势威胁评估方法中, 存在对目标态势威胁评估过程分析不充分, 状态变权向量构造不合理等问题, 本文通过分析威胁评估过程, 构造折中型状态变权向量, 提出基于折中型变权的目标态势威胁评估方法。分析表明, 本文方法切合目标威胁评估过程的特点, 评估结果较为科学合理。

关键词: 威胁评估; 变权; 折中型; 状态变权向量

Threat Evaluation Method of Targets Situation Based on Eclectic Variable Weight

GAO Yang, LI Dong-sheng, LIU Xiang, CHEN Ze-xin, LU Yao

(College of Electronic Engineering, National University of Defense Technology, Hefei Anhui 230037)

Abstract: As the conventional threat evaluation method is based on constant weight summation, therefore, leads to unreasonable results, a variable weight mechanism could solve this problem and the index weights are adjusted under different conditions. But there also some problems existing in the general target situation threat evaluation method, such as the insufficient analysis of the process of target threat evaluation, the unreasonable construction of the state variable weight vector, etc. Through the effective analysis of the evaluation process and construction of the state variable weight vector, this paper proposes the threat evaluation method of targets situation based on eclectic variable weight. The analysis shows that the proposed method is scientifically effective and suitable for the characteristics of the threat evaluation process of targets situation.

Key words: Threat Evaluation ; Variable Weight; Eclectic; State Variable Weight Vector

0 引言

态势威胁评估是信息融合中的重要内容, 旨在通过目标任务相关态势, 推理并判断敌方的意图和目的, 量化判断敌方对我方的威胁程度, 通过评估产生定量的威胁能力估计, 并提取出敌方兵力的企图, 属于高层次的信息融合处理^[1]。现代作战模式呈现高度信息化、体系化、集群化、智能化等特点^[2], 目标态势威胁评估是指挥员作战决策与指挥过程中的重要一环, 直接影响后续的作战资源分配^[3]。

目标态势威胁评估的研究主要有理论模型和评估方法两部分, 研究重点在于评估方法。目标态势威胁评估模型主要有经典威胁评估模型、相对威胁评估模型^[4,5]

等, 文献[5]中针对电子干扰中的威胁评估问题, 建立了充分考虑战时、平时多方面因素的威胁评估模型。目标态势威胁评估方法主要包括基于多属性决策理论的态势威胁评估方法^[6-8]、基于模糊集与模糊推理的态势威胁评估方法^[9]、基于云推理的威胁评估方法^[10,11]等, 其中基于多属性决策理论的态势威胁评估方法, 因其能够直观描述各评估指标的组态和相对简单的计算模式, 得到广泛应用。

但传统的目标态势威胁评估方法中, 评估指标的权重以常权的形式给定, 加权求和后表征目标相对威胁度的大小。常权在一定意义上表现了评估指标的相对重要性, 但忽略了指标值对评估结果的影响, 可能产生不合理的结果。变权思想首先由汪培庄教授提出^[12], 强调因素权重应随因素状态值的变化而变化, 以弥补常权决

作者简介: 高杨 (1992—), 男 (汉), 安徽蚌埠人, 博士研究生, 研究方向: 群体态势感知与智能决策、信息融合。gao_yang_mail@163.com。

李东生 (1963—), 男 (汉), 安徽合肥人, 教授, 博士生导师, 博士, 研究方向: 复杂和高速信号处理。

柳向 (1989—), 男 (汉), 河南商丘人, 博士研究生, 研究方向: 组网雷达干扰技术。

策带来的偏差。引入变权原理中的惩罚与激励机制,对影响决策较差的指标实行惩罚,对影响决策较好的指标实行激励,可增强体系的反应灵敏度^[13]。闵绍荣^[14]、徐浩^[15]、巴宏欣^[16]等人分别构造状态变权向量,将变权理论引入目标态势威胁评估中,取得了较好的评估分析结果。但这些研究中没有较好地兼顾态势威胁评估过程特点和状态变权向量的构造,存在一定的不足。为此,本文提出基于折中型变权的目标态势威胁评估方法,并以空中目标威胁评估实例说明方法的合理有效性。

1 评估指标体系

在具体的战术环境下,凡是有攻击意图,并且能造成损伤、击毁后果的空中来袭目标,都为威胁目标。故威胁评估影响因素来自威胁能力与威胁意图两个方面。在实际作战过程中,敌我双方均相互保密,作为防御方,信息来源主要为传感器探测到的信息,一般可以得到目标的类型、速度、航向角、高度、距离、目标的干扰能力等信息。同时,还应该考虑防空火力的性能,尤其是我方防空火力的射界、反应时间、转火时间、命中概率等火力特性对目标威胁度评估的影响。其中,目标类型、速度、高度以及多火力通道下的目标突防概率,直接关系到目标威胁能力;目标航路捷径、机动特性、距离表明了目标的攻击意图,由此空中来袭目标态势威胁评估指标体系如图1所示。

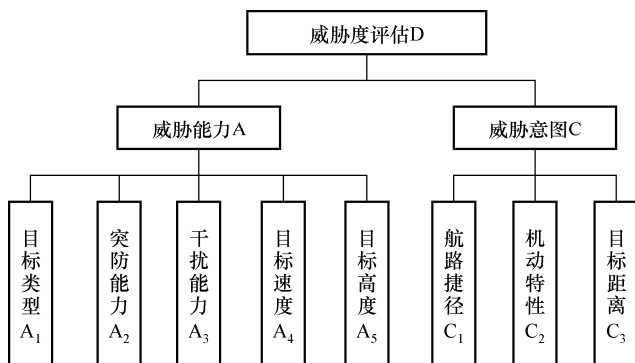


图1 空中目标态势威胁评估指标体系

对于目标态势威胁评估指标的量化,文献^[14-16]中进行了细致描述,此处不再赘述。

2 变权理论

在线性可加性系统中,综合函数 $M(x_1, x_2, \dots, x_m)$ 可表示为

$$M(x_1, x_2, \dots, x_m) = \sum_{i=1}^m w_i(x_1, x_2, \dots, x_m) x_i \quad (1)$$

式中, $w_i \in [0, 1]$, 且 $\sum_{i=1}^m w_i = 1$ 。若 w_i 为常数, 则式(1)

为常权综合, 相应的权重 $W = (w_1, w_2, \dots, w_m)$ 为常权向量; 若 w_i 是变化的, 则式(1)为变权综合, 变权综合通过构造均衡函数来获得状态变权向量^[17]

变权向量 $W(X)$ 可以表示为指标常权 W 和状态变权向量 $S(X)$ 的归一化 Hadamard 乘积:

$$W(X) = \frac{W \cdot S}{\sum_{i=1}^m w_i s_i} \quad (2)$$

状态变权向量 $S(X)$ 是某个 m 维实函数, 即均衡函数 $B(X)$ 的梯度向量, 反映了各因素状态的一阶变化情况:

$$S(X) = \text{grad}B(X) = \left(\frac{\partial B}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial B}{\partial x_m} \right) \quad (3)$$

均衡函数可以根据指标的变化情况进行设计, 同时也可以利用已有的状态变权向量构造出新的状态变权向量^[18], 可构造出指数型、对数型等多种结构。

变权向量满足以下公理。

(1) 归一性: $\sum_{i=1}^m w_i(x_1, x_2, \dots, x_m) = 1$ 。

(2) 连续性: $w_i(x_1, x_2, \dots, x_m)$ 关于每个变元连续。

(3-1) 惩罚性: $w_i(x_1, x_2, \dots, x_m)$ 关于每个变元单调不减。

(3-2) 激励性: $w_i(x_1, x_2, \dots, x_m)$ 关于每个变元单调不减。

(3-3) 折中性: 当 $0 < x_i < p_i$ 时, $w_i(x_1, x_2, \dots, x_m)$ 关于变元 x_i 为减函数, 当 $x_i > p_i$ 时, $w_i(x_1, x_2, \dots, x_m)$ 关于变元 x_i 为增函数。

3 基于折中型变权的评估方法

基于折中型变权的空中目标态势威胁评估方法, 首先是对选取的评估指标进行规范化处理; 然后结合目标态势威胁评估过程的特点, 基于变权理论求取指标权重; 最后进行威胁度求解与排序。由于目标态势威胁评估指标的量化操作获取的指标值为收益型规范指标值, 无须进行规范化处理^[14]。重点介绍目标态势威胁评估过程中的特点分析和折中型变权的求解分析。

3.1 目标态势威胁评估过程分析

分析空中目标对我方的威胁过程可以发现, 当某个指标的属性值很小时, 即使其常权权重很小, 其整体威胁度也会显著降低。如果目标距离我方很远, 则意味着目标不构成威胁; 同样, 如果某一个指标的属性值很大, 哪怕其常权权重非常小, 也会显著提高其威胁度。即权重需对指标的属性值做出相应的调整, 对属

性值低的指标权重进行惩罚,对属性值高的指标权重进行激励。

独立分析某一指标威胁属性值,发现当指标威胁属性值偏低,如目标航路捷径过大,整体的威胁度显著降低,但是,当指标威胁属性值偏高时,却没有显著提高整体威胁度。仍以目标航路捷径为例,假设目标航路捷径过大,其他指标处于常规水平,其整体威胁度没有显著提升,故状态变权向量应满足惩罚幅度大于激励幅度的要求。

常权重反映了各个属性之间的相对重要程度,是威胁评估结果的重要参考,因此,状态变权向量对常权重较大的指标,惩罚或激励的幅度也要与之相适应。

3.2 构造状态变权向量

针对目标态势威胁评估过程分析的3个特点,考虑构造指数型状态变权向量,首先对相关文献进行分析。文献[14]中构造的状态变权向量为

$$S_j(x_j) = \begin{cases} \exp\{-Nmw_j \cdot (x_j - k\bar{x})^2\}, & x_j \in [0, k\bar{x}] \\ 1, & x_j \in [k\bar{x}, \bar{x}/k] \\ \exp\{mw_j \cdot (x_j - \bar{x}/k)^2\}, & x_j \in (\bar{x}/k, 1] \end{cases} \quad (4)$$

式中, m 为指标个数; $\bar{x} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m x_j$ 为平均威胁属性值; $N \in [1, +\infty)$ 为惩罚与激励幅度比,取 $N = 1.8$; $k \in [0, 1]$ 为惩罚阈值系数,取 $k = 0.7$ 。

归一化 Hadamard 乘积,可由公式(2)进一步写为

$$W_j(x_1, x_2, \dots, x_m) = \frac{w_j \cdot S_j(x_1, x_2, \dots, x_m)}{\sum_{k=1}^m w_k S_k(x_1, x_2, \dots, x_m)} \quad (5)$$

结合目标态势威胁评估过程的特点,分析公式(4)构造的状态变权向量,可以得出:

(1) 惩罚与激励幅度比满足惩罚幅度大于激励幅度的要求。

(2) 惩罚阈值系数充分考虑了常权重的存在意义,并不是所有的情况都必须调节权重。

(3) 在状态变权向量的指数项中包括常权部分,满足状态变权向量随着常权的重要性而变化。

但当 $x_j \in [0, k\bar{x}]$ 或 $x_j \in (\bar{x}/k, 1]$ 时, $\frac{\partial S_j(x_j)}{\partial x_j} > 0$,

进而 $w_i(x_1, x_2, \dots, x_m)$ 是变元的增函数,相应的状态变权向量产生的结果为激励型变权。则

$$\forall x_i \in [0, k\bar{x}], \forall x_j \in (\bar{x}/k, 1], S_i(x_i) < S_j(x_j) \quad (6)$$

依据激励型变权的性质,可得

$$\forall \delta > 0, S_i(x_1, \dots, x_i, \dots, x_m) < S_i(x_1, \dots, x_i + \delta, \dots, x_m) \quad (7)$$

$$\forall \delta < 0, S_i(x_1, \dots, x_i, \dots, x_m) > S_i(x_1, \dots, x_i + \delta, \dots, x_m) \quad (8)$$

式(7)满足对属性值高的指标的激励要求,但式(8)并不满足对属性值低的指标的惩罚要求。所以,要增加过高属性值和过低属性值的指标权重,即状态变权向量得到的变权应为折中型变权,在公式(4)的基础上,设计折中型状态变权向量:

$$S_j(x_j) = \begin{cases} \exp\{-Nmw_j \cdot (x_j - k_1\bar{x})\}, & x_j \in [0, k_1\bar{x}] \\ 1, & x_j \in [k_1\bar{x}, \bar{x}/k_2] \\ \exp\{mw_j \cdot (x_j - \bar{x}/k_2)\}, & x_j \in (\bar{x}/k_2, 1] \end{cases} \quad (9)$$

式中, m 为指标个数; \bar{x} 为平均威胁属性值; $N \in [1, +\infty)$ 为惩罚与激励幅度比,取 $N = 1.8$; $k_1, k_2 \in [0, 1]$ 为阈值系数,取 $k_1 = 0.3, k_2 = 0.7$ 。

3.3 威胁度求解与排序

对 n 个空中目标,根据图1中各指标的量化函数,进行归一化处理,得到归一化威胁属性矩阵 $X = (x_{ij})_{n \times 8}$ [14]; 通过层次分析法等确定指标的常权 $W = (w)_{1 \times 8}$; 由折中型状态变权向量公式,计算变权 $W_j(x_1, x_2, \dots, x_m)$; 得到变权重矩阵加权下的决策矩阵 $Z = (z_{ij})_{n \times 8}$, 其中 $z_{ij} = x_{ij} \cdot W(X_{ij})$ 。进一步可用 TOPSIS 法进行威胁度排序:

(1) 确定正理想解 U^+ 和负理想解 U^- :

$$U^+ = \{\max = z_{ij} | i = 1, 2, \dots, n\} = \{z_1^+, z_2^+, \dots, z_8^+\} \quad (10)$$

$$U^- = \{\min = z_{ij} | i = 1, 2, \dots, n\} = \{z_1^-, z_2^-, \dots, z_8^-\} \quad (11)$$

(2) 计算每个目标的威胁属性值到正负理想解的距离:

$$\begin{cases} L_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^8 (z_{ij} - z_j^+)^2} \\ L_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^8 (z_{ij} - z_j^-)^2} \end{cases} \quad (12)$$

(3) 计算每个目标威胁属性值到正理想解的接近度:

$$L_i = \frac{L_i^-}{L_i^- + L_i^+} \quad (13)$$

(4) 按 L_i 的大小排序,即得出目标态势威胁评估结果的大小排序。

4 算例分析

文献[14]研究水面舰艇的空中目标态势威胁评估问题,直接使用文献[14]中5个目标经规范化处理后的态势威胁属性值,如表1所示,即得到 $X = (x_{ij})_{5 \times 8}$ 。

表 1 各目标的指标威胁属性值

目标	类型	突防能力	干扰能力	速度	高度	航路捷径	机动特性	距离
D_1	0.75	0.493 34	0.90	0.967 39	0.200 00	0.938 01	0.30	0.615 08
D_2	0.90	0.156 50	0.10	0.200 00	0.780 92	0.798 52	0.90	0.976 29
D_3	0.90	0.381 56	0.70	0.747 20	0.826 16	0.904 84	0.30	0.031 56
D_4	0.90	0.145 59	0.70	0.747 20	0.826 16	0.904 84	0.30	0.031 56
D_5	0.15	0.145 59	0.30	0.206 37	0.331 58	1.000 00	0.30	0.259 24

综合专家经验,由层次分析法得到常权向量: $W = (0.03, 0.21, 0.09, 0.19, 0.08, 0.14, 0.1, 0.16)$ 。结合表 1 中各

目标的态势威胁评估属性值及折中型变权公式(9),得到变权后的权重矩阵,如表 2 所示。

表 2 各目标的指标变权后的权重值

目标	类型	突防能力	干扰能力	速度	高度	航路捷径	机动特性	距离
D_1	0.0295	0.2067	0.0886	0.2003	0.0787	0.1403	0.0984	0.1575
D_2	0.0287	0.2140	0.0947	0.1801	0.0758	0.1327	0.0979	0.1761
D_3	0.0282	0.1957	0.0839	0.1770	0.0745	0.1378	0.0932	0.2097
D_4	0.0280	0.2073	0.0823	0.1737	0.0738	0.1418	0.0914	0.2017
D_5	0.0270	0.1891	0.0811	0.1711	0.0720	0.2255	0.0901	0.1441

采用常权重加权求和,得到的目标威胁度排序为 $D_1 > D_3 > D_2 > D_4 > D_5$; 而采用折中型变权调整后的权重向量,结合 TOPSIS 法得到的目标威胁排序为 $D_1 > D_2 > D_3 > D_4 > D_5$ 。与文献[14]中的结果一致。分析比较目标 D_2 与 D_3 , 目标 D_2 虽然速度较慢,但其为近距离目标,且机动威胁较大,攻击意图十分明显;而 D_3 虽然速度较快,但距离较远,根据经验其威胁度理应小于 D_2 。由此可见,基于常权重的威胁评估方法无法针对具体的态势变化做出相应的调整,存在一定的局限性。

从表 2 可知,根据指标的威胁属性值适当调整权重,对威胁属性值过低或过高的情况,分别进行惩罚和激励,更易体现目标各指标威胁值的相关性与态势威胁评估结果的紧密联系。

5 结束语

目标态势威胁评估是作战决策中的重要环节,本文针对已有目标态势威胁评估方法在权重求取方面的不足,提出基于折中型变权的态势威胁评估方法。设计的折中型状态变权向量能够实现对指标属性值较小的情况进行惩罚,指标属性值较大的情况进行激励,使得指标权重随着目标态势的变化而变化,得到较为合理的评估结果。

参 考 文 献

- [1] Solano M A, Ekwaro O S, Tanik M M. High Level fusion for intelligence applications using Recombinant Cognition Synthesis[J]. Information Fusion, 2012, 3 (1): 79-98.
- [2] 高杨, 李东生, 程泽新. 无人机分布式集群态势感知模型研究[J]. 电子与信息学报, 2018.
- [3] 李东生, 高杨, 雍爱霞. 基于改进离散布谷鸟算法的干扰资源分配研

究[J]. 电子与信息学报, 2016, 38 (4): 899-905.

- [4] 高杨, 李东生. 基于 ANP 指标权重的相对威胁度评估模型[C]. 第三届中国指挥控制大会论文集. 北京: 国防工业出版社, 2015.
- [5] 高杨, 李东生, 王玉鑫. 多目标威胁评估问题研究[C]. 第四届中国指挥控制大会论文集. 北京: 电子工业出版社, 2016.
- [6] Zhang K, Liu P P, Li K, et al. Multi-target threat assessment in air combat based on entropy and VIKOR[C]. 2017 Ninth International Conference on Advanced Computational Intelligence, 2017, 175-179.
- [7] 高杨, 李东生, 王骁. 基于区间数排序的目标识别系统威胁评估[J]. 探测与控制学报, 2015, 37 (6): 82-86.
- [8] 高杨, 李东生, 雍爱霞. 基于组合权重的目标识别系统威胁评估[J]. 火力与指挥控制, 2016, 41 (5): 39-42.
- [9] 高杨, 王骁, 李东生. 协同式目标识别系统的直觉模糊威胁评估[J]. 弹箭与制导学报, 2016, 36 (1): 154-156, 160.
- [10] Ma S D, Zhang H Z, Yang G Q. Target threat level assessment based on cloud model under fuzzy and uncertain conditions in air combat simulation[J]. Aerospace Science and Technology, 2017 (67): 49-53.
- [11] 高杨, 李东生, 雍爱霞. 结合网络层次分析法的云推理威胁评估模型[J]. 计算机应用研究, 2016, 33 (11): 3430-3434.
- [12] 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.
- [13] 余高峰, 李登峰, 叶银芳, 等. 考虑后悔规避的异质多属性变权决策方法[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23 (1): 154-161.
- [14] 闵绍荣, 陈卫伟, 朱忍胜, 等. 基于变权 TOPSIS 法的舰艇对空防御威胁评估模型[J]. 中国舰船研究, 2015, 10 (4): 100-105.
- [15] 徐浩, 邢清华. 基于区间数变权法的目标威胁评估[J]. 战术导弹技术, 2017, 5: 104-108.
- [16] 巴宏欣, 王俊, 杨颜靖. 基于变权灰色关联法的高超声速目标威胁评估[J]. 火力与指挥控制, 2016, 41 (11): 21-25, 29.
- [17] 李德清, 曾文艺. 变权决策中均衡函数均衡[J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36 (3): 712-718.
- [18] 李德清, 李洪兴. 状态变权向量的性质与构造[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2002, 38 (4): 455-461.