

doi: 10.7690/bgzdh.2020.03.012

基于 Entropy-TOPSIS 方法的目标威胁动态评估与仿真

杨罗章, 胡生亮, 冯士民

(海军工程大学兵器工程学院, 武汉 430033)

摘要: 为解决在目标威胁评估方法中, 确定各属性的权重时受主观因素和高机动目标影响大的问题, 提出一种改进的多属性决策目标威胁评估方法。综合模糊理论和多属性决策理论, 通过构造隶属度函数规范化属性值, 基于熵值法求解属性权重, 应用 TOPSIS 理论进行目标威胁评估, 构建不同的态势实例, 采用静态数值计算和动态模拟仿真的方法对算法进行验证。仿真实验结果验证了该方法的合理性和有效性。

关键词: 威胁评估; 隶属度函数; 熵; TOPSIS 理论; 动态评估

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A

Dynamic Evaluation and Simulation of Targets Threat Based on Entropy and TOPSIS Method

Yang Luozhang, Hu Shengliang, Feng Shimin

(School of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: For solving the problem of attribute weights are greatly affected by subjective factors and high maneuvering targets in the target threat evaluation, an improve multi-attribute decision target threat evaluation method was proposed. By combing the fuzzy theory with multi attribute decision rules, membership functions were constructed to normalize the attribute values and weights of attribute were calculated by entropy method. Then target threat evaluation was carried out by using TOPSIS rules and different situation instance examples were established. Use static numerical calculation and dynamic simulation method to verify method. The simulation experiment results proved the proposed method is reasonable and effective.

Keywords: threat evaluation; membership functions; entropy; TOPSIS rules; dynamic evaluation

0 引言

目标威胁评估根据给定战场态势预测和评估敌方作战力量对我方的威胁程度, 是高层次的数据融合^[1-3], 是防空反导作战指挥自动化决策中的重要组成部分。其主要任务就是实时判断目标对我舰的威胁程度, 辅助指挥员进行战场态势的推理、判断, 为火力分配和舰艇机动指挥决策提供依据。

已有较多理论和方法用于目标威胁评估中, 主要包括模糊理论法、多属性决策法、贝叶斯网络法、神经网络法、云模型法等^[4-10]。其中, 多属性决策方法能够综合考虑各类威胁要素信息, 且模型简洁、处理数据较容易, 能够满足对目标进行威胁判断的实时性、准确性的要求, 但存在 2 方面的问题: 1) 确定各属性的权重时受主观因素影响大; 2) 目标威胁排序受导弹等高机动目标影响较大, 不能从整体上反映威胁态势。笔者综合模糊理论和多属性决策理论, 在合理考虑模糊性和随机性基础上, 基于熵值法和 TOPSIS (technique for order preference by

similarity to ideal solution) 理论实现多属性决策目标威胁评估。仿真实验结果表明: 该方法计算简单快速, 结果可信, 且易于软件实现。

1 目标威胁评估指标

目标威胁评估指标体系包括指标的选取和规范化。对于选取目标威胁评估的指标, 目标特征量要满足共同性、准确性、全面性和重要性等要求。同时, 结合舰艇防空反导作战应用特点, 遵循能反映目标威胁的关键因素、充分利用已分析获取的信息、反映目标意图信息的原则, 选取相对速度、高度、距离、航路捷径 4 个属性来描述空中来袭目标的威胁度。

威胁指标各属性值的取值范围不同, 物理量纲也不同; 因此, 需要对威胁指标进行规范化处理。若采用一般效益型指标、成本型指标的规范化方法, 则大机动目标属性值的快速变化是影响目标威胁排序的重要原因。笔者根据模糊数学的隶属度理论,

收稿日期: 2019-12-23; 修回日期: 2020-01-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61365007)

作者简介: 杨罗章 (1981—), 男, 安徽人, 硕士, 工程师, 从事信息作战指挥研究。E-mail: yangluozhang_81@126.com。

采用构造隶属度函数的方式将数据规范化至 [0,1] 区间^[5-6]。

按照目标各属性值的典型区间划分方法, 构造目标速度 v , 目标速度威胁隶属度函数为:

$$V = \begin{cases} (v+400)/3200 & -400 < v \leq 0 \\ (v-30)/240+0.25 & 0 < v \leq 60 \\ (v-105)/360+0.5 & 60 < v \leq 150 \\ (v-210)/480+0.75 & 150 < v \leq 270 \\ (v-400)/1040+1 & 270 < v \leq 400 \end{cases} \quad (1)$$

目标高度 h 的威胁隶属度函数为:

$$H = \begin{cases} 1-h/0.6 & 0 < h \leq 0.1 \\ (0.55-h)/2.7+2/3 & 0.1 < h \leq 1 \\ (2-h)/6+1/3 & 1 < h \leq 3 \\ (7-h)/24 & 3 < h \leq 7 \end{cases} \quad (2)$$

目标距离 r 的威胁隶属度函数为:

$$R = \begin{cases} 1-r/24 & 0 < r \leq 4 \\ (12-r)/48+2/3 & 4 < r \leq 20 \\ (30-r)/60+1/3 & 20 < r \leq 40 \\ (100-r)/360 & 40 < r \leq 100 \end{cases} \quad (3)$$

目标航路捷径 d 的威胁隶属度函数为:

$$D = \begin{cases} 1-\frac{d}{6} & 0 < d \leq 1 \\ (1.5-d)/3+2/3 & 1 < d \leq 2 \\ (3-d)/6+1/3 & 2 < d \leq 4 \\ \frac{4}{d} \times \frac{1}{6} & d \geq 4 \end{cases} \quad (4)$$

2 基于熵值法的威胁指标权重求解

权重反映了各评价指标之间的相对重要度。在进行威胁估计时, 关键的问题是确定目标各个威胁指标的权重。计算权重的方法采用客观赋权法—熵值法^[11], 通过计算威胁指标值的信息熵, 根据指标的相对变化程度对方案整体评价的影响, 来决定威胁指标的权重。使用熵值法计算威胁判断指标权重的步骤:

1) 设 m 个空中来袭目标构成的被评估的目标集为 $U=(U_1, U_2, \dots, U_m)$, 影响目标威胁度的 n 个评估指标集为 $C=(C_1, C_2, \dots, C_n)$, 根据原始数据, 计算各个指标的隶属度函数, 对数据进行规范化处理, 得到目标威胁度的判决矩阵为: $X=(x_{ij})_{m \times n}$, 其中

x_{ij} 为被评估目标 U_i 关于 C_j 的指标属性值。对初始数据进行列归一化:

$$y_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}}, (1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n) \quad (5)$$

2) 计算第 j 项指标的信息熵值:

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m y_{ij} \ln y_{ij}, (1 \leq j \leq n) \quad (6)$$

3) 计算第 j 项属性指标的权重:

$$w_j = \frac{(1-e_j)}{\sum_{j=1}^n (1-e_j)}, (1 \leq j \leq n) \quad (7)$$

3 应用 TOPSIS 理论的目标威胁排序

TOPSIS 是逼近于理想解的排序方法, 根据有限多个评价对象与理想化目标的接近程度进行排序, 是对现有对象进行相对优劣比较的评价方法。算法具体步骤如下:

1) 将规范化属性值转化为加权规范化判决矩阵:

$$v_{ij} = w_j x_{ij} (1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n) \quad (8)$$

2) 确定理想解和负理想解。理想解为每个目标属性都取该属性下所有目标中最具威胁的解; 负理想解为威胁最小的解。理想解和负理想解分别记为 $V^+ = (v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+)$ 和 $V^- = (v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-)$:

$$\left. \begin{aligned} v_j^+ &= \max \{v_{ij}, i=1, \dots, m\} \\ v_j^- &= \min \{v_{ij}, i=1, \dots, m\} \end{aligned} \right\}, (1 \leq j \leq n) \quad (9)$$

3) 计算各待威胁排序目标与理想解和负理想解的欧式距离:

$$\left. \begin{aligned} S_i^+ &= \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} \\ S_i^- &= \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \end{aligned} \right\}, (1 \leq i \leq m) \quad (10)$$

4) 计算相对贴近度。定义预选方案 i 与理想解 V^+ 的相对贴近度为 A_i , 则与负理想解 V^- 的相对贴近度为 $1-A_i$ 。因此, 通过计算与正负理想解的贴近程度对方案优劣进行排序:

$$A_i = \frac{S_i^-}{(S_i^- + S_i^+)}, (1 \leq i \leq m) \quad (11)$$

显然 $A_i \in [0,1]$, A_i 越大, 所对应的目标就越靠近正理想解, 即对舰艇的威胁越大。

4 仿真验证分析

利用静态数值计算和动态仿真的方法，在战术软件平台上，对文中的算法进行验证。

1) 静态数值计算分析。

假设某时刻 T ，战场态势中包含有 5 个空中威胁目标，各个目标运动要素参数值如表 1 所示。

表 1 空中目标属性值

| 目标批号 | 飞行速度/ (m/s) | 飞行高度/ km | 距离/ km | 航路捷径/ km | 敌弦角/ (°) |
|------|----------------|-------------|-----------|-------------|-------------|
| 1 | 100 | 0.5 | 30 | 2.0 | 3.82 |
| 2 | 300 | 5.0 | 50 | 0.5 | 359.43 |
| 3 | 50 | 1.0 | 70 | 10.0 | 8.21 |
| 4 | 350 | 0.1 | 90 | 0.1 | 0.06 |
| 5 | 80 | 2.0 | 80 | 1.0 | 359.28 |

利用文中的算法，对表中 5 批目标进行威胁判断，计算得到各目标与正理想解的相对贴近度

$$A_i = (A_1, A_2, A_3, A_4, A_5) = (0.39, 0.76, 0.06, 0.96, 0.33) \quad (12)$$

显然 $A_4 > A_2 > A_1 > A_5 > A_3$ ，即目标威胁从大到小排序为：4 > 2 > 1 > 5 > 3。上述排序结果符合定性分析和一般认知，表明模型算法正确合理。

2) 多类型空中目标条件下的威胁评估仿真分析。

构建多种类型空中目标存在的动态演变态势，利用文中算法，实时计算各目标的威胁系数，并对各目标威胁度进行排序，验证目标威胁判断算法的稳定性和连续性。笔者构建战场场景包括反舰导弹、歼击机、武装直升机、无人机 4 类总共 5 个空中目标，起始时刻 T_0 ，各个空中目标构建态势和运动参数如表 2 所示。

表 2 各空中目标的初始态势和运动参数(不同类型目标)

| 目标类型 | 目标批号 | 距离/ km | 方位/ (°) | 速度/ kn | 航向/ (°) | 高度/ m |
|-------|------|-----------|------------|-----------|------------|----------|
| 导弹 | 579 | 70 | 350 | 560 | 165 | 20 |
| 歼击机 | 580 | 35 | 270 | 240 | 93 | 100 |
| 武装直升机 | 581 | 25 | 160 | 100 | 320 | 70 |
| 无人机 1 | 582 | 28 | 45 | 80 | 190 | 500 |
| 无人机 2 | 583 | 30 | 90 | 30 | 260 | 120 |

不同时刻各空中目标的威胁度曲线如图 1 所示。初始时刻 T_0 ，导弹、歼击机、武装直升机、无人机 1 和无人机 2 分别从不同方位接近舰艇。如图 2(a)所示，战术软件平台根据各目标属性进行威胁排序：歼击机 > 武装直升机 > 导弹 > 无人机 1 > 无人机 2，根据威胁排序可以得出，虽然导弹速度最大、高度最小，但由于距离较远，此时刻歼击机威胁度最大。如图 2(b)所示， T_1 时刻，随着导弹的临

近，导弹的威胁度逐渐增大，导弹威胁度超过武装直升机，此时的威胁度排序为：歼击机 > 导弹 > 武装直升机 > 无人机 1 > 无人机 2。如图 2(c)所示， T_2 时刻，导弹的威胁度变为最高，此时的威胁度排序为：导弹 > 歼击机 > 武装直升机 > 无人机 1 > 无人机 2。如图 2(d)所示， T_3 时刻，随着导弹临近，其威胁系数与其他目标相比，增加趋势进一步明显，无人机 1 和无人机 2 在运动中由于态势变化，威胁度也发生变化，此时的威胁度排序为：导弹 > 歼击机 > 武装直升机 > 无人机 2 > 无人机 1。

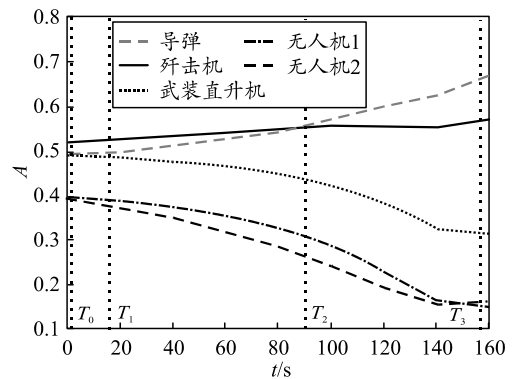
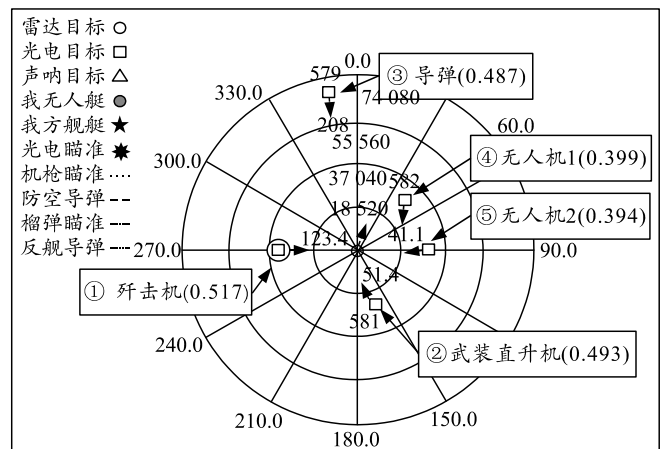
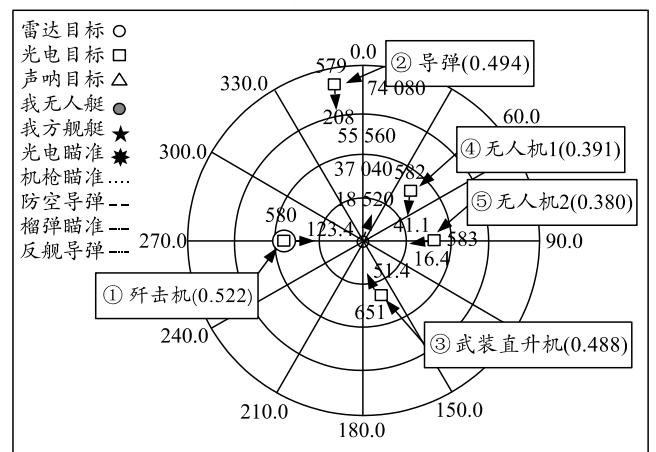


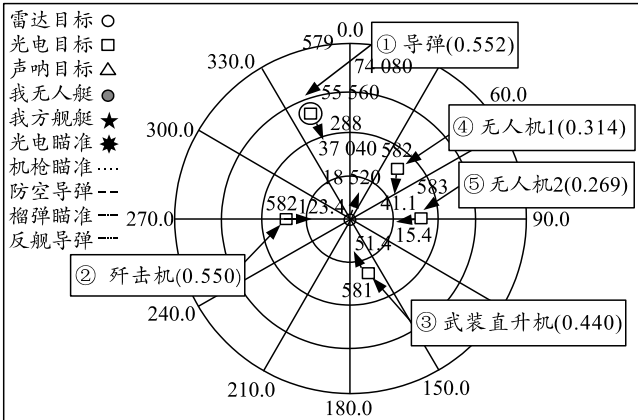
图 1 不同时刻空中目标威胁度曲线(不同类型目标)



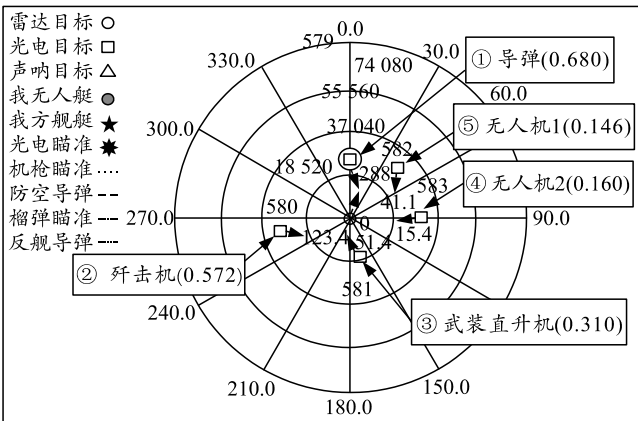
(a) T_0 时刻



(b) T_1 时刻



(c) T_2 时刻



(d) T_3 时刻

图 2 不同时刻空中目标威胁态势(不同类型目标)

3) 多导弹同类目标条件下的威胁判断仿真分析。

对多个方向来袭的多枚反舰导弹威胁判断情况进行仿真分析, 仿真中构建同类型的 4 个空中导弹目标, 起始时刻 T_0 , 各导弹目标的构建态势和运动参数如表 3 所示。

表 3 各导弹目标的初始态势和运动参数(同类型目标)

| 导弹 | 目标批号 | 距离/km | 方位/(°) | 速度/kn | 航向/(°) | 高度/m |
|----|------|-------|--------|-------|--------|------|
| 1 | 588 | 20 | 31 | 500 | 208 | 20 |
| 2 | 589 | 30 | 143 | 510 | 319 | 22 |
| 3 | 590 | 40 | 220 | 480 | 46 | 27 |
| 4 | 591 | 45 | 276 | 490 | 103 | 25 |

不同时刻各空中目标的威胁度曲线如图 3 所示。初始时刻 T_0 , 4 枚空中导弹目标分别从不同方位接近舰艇。如图 4(a)所示, 舰艇战术指挥平台根据各目标属性进行威胁排序: 导弹 1 > 导弹 2 > 导弹 3 > 导弹 4, 根据威胁排序可以得出, 由于各目标属性值差异较小, 此时距离舰艇最近的导弹 1 目标威胁度最大。如图 4(b)所示, T_1 时刻, 导弹 1 目标开始远离舰艇, 这时其威胁度迅速减小, 距离舰艇相对较近且不断接近舰艇的导弹 2 目标的威胁度变为

最大, 此时的威胁度排序为: 导弹 2 > 导弹 1 > 导弹 3 > 导弹 4。随着不同导弹目标远离舰艇, 其威胁度也随之迅速减小, 导弹 3 目标和导弹 4 目标的威胁度在 T_2 时刻和 T_3 时刻依次变为最大, 如图 4(c)和图 4(d)所示, 2 个时刻的威胁度排序分别为: 导弹 3 > 导弹 2 > 导弹 4 > 导弹 1, 导弹 4 > 导弹 3 > 导弹 2 > 导弹 1。当所有目标都处于远离舰艇态势时, 各目标的威胁系数都变为很小, 但仍然会根据目标各属性值, 给出相对威胁程度排序, 威胁度排序保持为: 导弹 4 > 导弹 3 > 导弹 2 > 导弹 1。

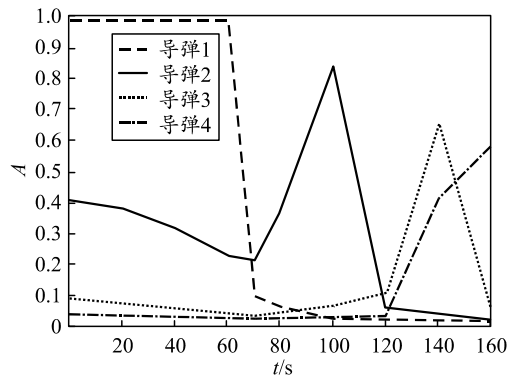
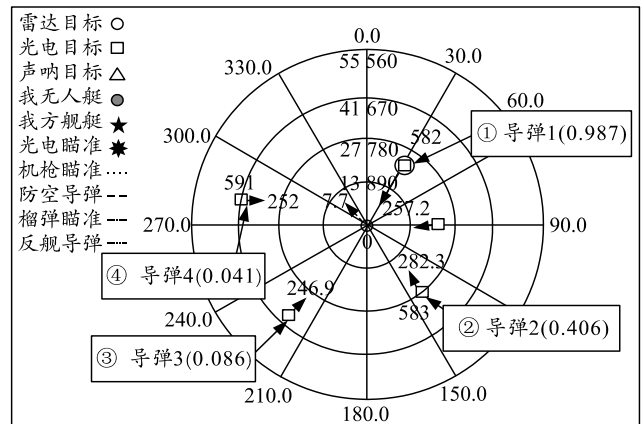
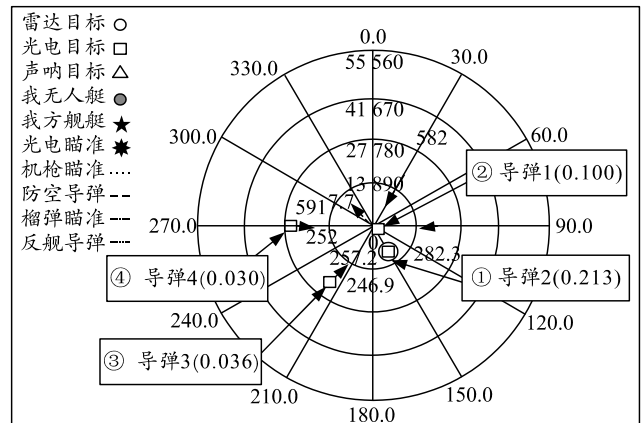


图 3 不同时刻空中目标威胁度曲线(同类型目标)



(a) T_0 时刻



(b) T_1 时刻

[8] 周弘波, 张金成. 基于组合权重的灰色目标威胁评估[J]. 火力与指挥控制, 2018, 43(10): 1819-1823.

[9] 倪小刚, 曹菲. 最优权系数组合赋权在导弹质量评估中的应用[J]. 长春理工大学学报, 2011, 34(4): 140-144.

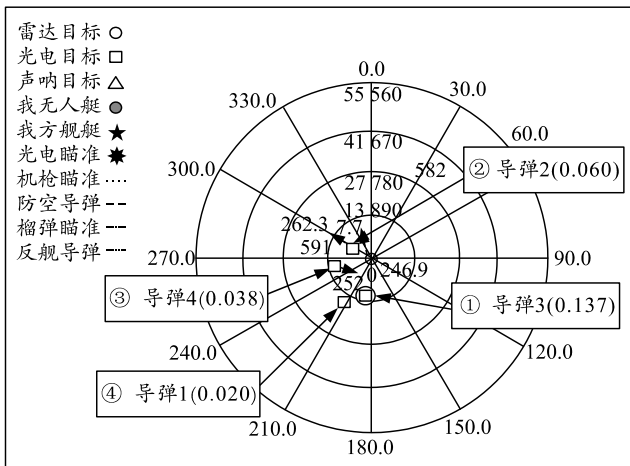
[10] 李志坚, 刘晓利, 王文文. 基于新灰色评估法的空地导弹系统效能分析[J]. 指挥控制与仿真, 2015, 37(2):

74-78.

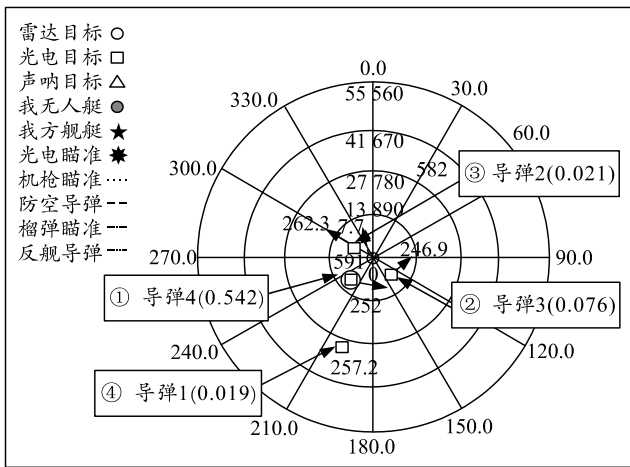
[11] 耿涛, 张安, 郝兴国. 基于组合赋权 TOPSIS 法的空战多目标威胁评估[J]. 火力与指挥控制, 2011, 36(3): 16-19.

[12] 姜启源. 数学模型[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 43-98.

(上接第 56 页)



(c) T_2 时刻



(d) T_3 时刻

图 4 不同时刻空中目标威胁态势(同类型目标)

5 结束语

针对应用多属性决策的目标威胁评估方法, 笔者通过计算威胁指标值的信息熵, 确定各指标的属

性权重, 一定程度上避免了主观随意性, 采用模糊数学的方法, 通过构造隶属度函数, 避免了大机动目标属性值的快速变化影响目标威胁排序的问题。通过静态数值计算和动态模拟仿真, 较好地验证了算法的有效性和合理性, 为目标威胁判断的实际运用提供了参考。

参考文献:

[1] 汤志荔, 张安. 战场威胁估计理论与方法研究[J]. 火力与指挥控制, 2011, 36(9): 1-4.

[2] 黄海明. 舰艇防空目标威胁评估研究概述[J]. 舰船电子工程, 2014, 34(11): 5-8, 23.

[3] 吴志泉, 史红权, 王勃. 对空威胁判断方法研究综述[J]. 舰船电子工程, 2016, 36(11): 1-4, 73.

[4] 张肃. 空中目标威胁评估技术[J]. 情报指挥控制系统与仿真技术, 2005, 27(1): 41-45.

[5] 谭吉玉, 朱传喜, 张小芝, 等. 基于 TOPSIS 的区间直觉模糊数排序法[J]. 控制与决策, 2015, 30(11): 2014-2018.

[6] 雷英杰, 王宝树, 王毅. 基于直觉模糊推理的威胁评估方法[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(9): 2077-2081.

[7] 樊治平, 赵莹. 多属性决策中权重确定的主客观赋权法[J]. 决策与决策支持系统, 1997, 7(4): 87-91.

[8] 卞泓斐, 杨根源. 基于动态贝叶斯网络的舰艇防空作战威胁评估研究[J]. 兵工自动化, 2015, 34(6): 14-19.

[9] 季傲, 姜礼平, 吴强. 基于改良云模型的舰艇防空威胁评估[J]. 火力与指挥控制, 2016, 41(5): 35-38.

[10] 张银燕. 基于云模型理论的空中目标威胁评估方法[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2013.

[11] 朱方霞, 陈华友. 确定区间数决策矩阵属性权重的方法—熵值法[J]. 安徽大学学报(自然科学版), 2006, 30(5): 4-6.