

基于直觉模糊集的空战动态多属性威胁评估

张媛媛, 冯琦, 周德云, 张堃
(西北工业大学电子信息学院, 西安 710072)

摘要: 针对实际空战中目标多属性及动态变化的特点,提出了一种动态多属性威胁评估方法。在建立威胁评估指标体系的基础上,依据目标多个时刻的属性信息,结合直觉模糊集给出了一种构造虚拟最优目标的方法以确定目标属性权重,设计了一种基于正态分布累积分布函数确定时间序列权重的方法,最后借鉴 TOPSIS 的思想实现了空战动态威胁排序。仿真结果说明了该算法的合理性。

关键词: 威胁评估; 空战; 直觉模糊集; 目标属性权重; 时间序列权重

中图分类号: V271.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)02-0017-05

Multi-Attribute Dynamic Threat Assessment in Air Combat Based on Intuitionistic Fuzzy Sets

ZHANG Yuan-yuan, FENG Qi, ZHOU De-yun, ZHANG Kun

(School of Electronic Information, Northwestern Polytechnic University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In view of the multi-attribute and the dynamic characteristic change of the targets in real air combat, a new dynamic, multi-attribute threat assessment method was proposed. Based on the established threat assessment index system, and according to the attribute information of the target at a time series, a method for constructing a virtual optimal objective to determine the target attribute weights was presented with intuitionistic fuzzy sets. A method based on the cumulative distribution function with normal distribution was designed to determine time-series weights. Finally, the dynamic threat sequencing in air combat was realized with TOPSIS method based on multi-attribute of time-series. The simulation results show the reliability of the algorithm.

Key words: threat assessment; air combat; intuitionistic fuzzy set; objective attribute; time series

0 引言

传统的威胁评估方法根据目标在某一时刻收集的数据信息进行评估,亦称静态威胁评估方法。随着战场环境的日益复杂以及现代空战中目标机动性及作战环境的不确定性不断增强,静态威胁评估方法缺乏对威胁信息的动态分析,不能揭示出目标态势信息的动态时序性,因而需要综合多个时刻的目标威胁信息来解决动态威胁评估问题。

目前提出的威胁评估^[1-7]方法基本都采用固定时刻的目标属性信息进行排序。本文考虑了战场态势信息不确定性和时序性,提出了一种在权重完全未知的

情况下进行动态多属性威胁评估的算法。通过引入直觉模糊集^[8]来处理多属性威胁评估中的不确定性,首先选取最新 p 个空战态势时间点,依据各时间点上目标属性到虚拟最优目标的距离来动态地确定目标属性权重,考虑各时刻态势信息在威胁评估中的重要性,利用正态分布累积分布函数确定时间序列权重,最后综合各个时刻的目标属性信息和时序信息,借鉴 TOPSIS 方法^[9]的思想对目标的威胁程度值排序,得到空战动态威胁评估结果。

1 威胁评估指标体系及属性权重

1.1 目标威胁评估指标体系的构建

影响目标威胁程度的因素有很多,主要包括空战能力和空战态势信息。空战能力包括目标机动性能、武器情况、探测能力和杀伤能力等。空战态势包括敌机速度、距离和角度。提取出空战能力因子、角度威胁

收稿日期:2014-03-17

修回日期:2014-05-20

基金项目:国家自然科学基金(61401363);航空科学基金(20145553028)

作者简介:张媛媛(1992—),女,陕西咸阳人,硕士生,研究方向为航空火力控制。

因子、距离威胁因子及速度威胁因子来表述各目标威胁属性。实际作战中,从来自机载雷达或预警机数据链的信息传输获得敌方机型、角度、位置、速度等数据信息,再结合自身敌方信息数据库中相应机型的各个参数,计算出各个威胁因子,将其作为目标属性。为了能够运用直觉模糊集理论进行运算以及处理测量数据的不确定性,首先对这些因子进行处理。

1) 空战能力因子:目标的空战能力越强,则威胁越大;否则,威胁越小,如表1所示。

表1 空战能力与直觉模糊集的对应关系

Table 1 Relationship between air combat capability and intuitionistic fuzzy sets

空战能力因子	高	较高	一般	较低	低
直觉模糊集	$\langle 0.90, 0.05 \rangle$	$\langle 0.75, 0.10 \rangle$	$\langle 0.55, 0.25 \rangle$	$\langle 0.50, 0.25 \rangle$	$\langle 0.50, 0.20 \rangle$

2) 速度威胁因子:目标速度越大,则威胁越大。速度威胁因子的隶属度和非隶属度为

$$\begin{cases} u_{ij} = \phi_i \frac{a_{ij}}{\max\{a_{ij}\}} & 0 \leq p_i \leq 1 \\ v_{ij} = \psi_i \frac{a_{ij}}{\max\{a_{ij}\}} & 0 \leq q_i \leq 1 \end{cases} \quad (1)$$

3) 距离威胁因子:距离越大,威胁越小;反之,威胁越大。

4) 角度威胁因子:角度越大,威胁越小;反之,威胁越大。

角度威胁因子和距离威胁因子的隶属度与非隶属度算式为

$$\begin{cases} u_{ij} = \begin{cases} k_i \frac{\min\{a_{ij}\}}{a_{ij}} & \min\{a_{ij}\} \neq 0 \\ k_i (1 - \frac{\min\{a_{ij}\}}{\max\{a_{ij}\}}) & \min\{a_{ij}\} = 0 \end{cases} & 0 \leq k_i \leq 1 \\ v_{ij} = \begin{cases} l_i \frac{\min\{a_{ij}\}}{a_{ij}} & \min\{a_{ij}\} \neq 0 \\ l_i (1 - \frac{\min\{a_{ij}\}}{\max\{a_{ij}\}}) & \min\{a_{ij}\} = 0 \end{cases} & 0 \leq l_i \leq 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中: a_{ij} 表示第*i*个目标的第*j*个属性值; $0 \leq p_i + q_i \leq 1, 0 \leq k_i + l_i \leq 1, p_i, q_i, k_i, l_i$ 参数根据我方收集相关性数据信息的精准度和空战环境进行综合确定。

1.2 属性权重的确定

在动态多属性决策问题中,假设方案集为 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$, 属性集为 $U = \{U_1, U_2, \dots, U_n\}$, 属性权重未知,记为 $w^k = (w_1^k, w_2^k, \dots, w_n^k), k = 1, 2, \dots, p, w_j^k \in [0,$

$1], j = 1, 2, \dots, n, \sum_{j=1}^n w_j^k = 1$ 。假设时间序列为 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_p\}$, 时间序列权重未知,记为 $\lambda = (\lambda(t_1), \lambda(t_2), \dots, \lambda(t_p))$, 其中 $\sum_{i=1}^p \lambda(t_i) = 1$ 。 $F(t_k) = (f_{ij}^k)_{m \times n}, f_{ij}^k = \langle u_{ij}^k, v_{ij}^k \rangle$, 表示第 t_k 时刻的目标属性决策矩阵, $\langle u_{ij}^k, v_{ij}^k \rangle$ 是直觉模糊集。

定义1 A, B 为两个直觉模糊集, $d(A, B)$ 为 A 和 B 之间的欧氏距离,记为

$$d(A, B) = \sqrt{\frac{1}{2n} \sum_{j=1}^n [(\mu_A(x_j) - \mu_B(x_j))^2 + (v_A(x_j) - v_B(x_j))^2 + (\pi_A(x_j) - \pi_B(x_j))^2]} \quad (3)$$

1.2.1 目标属性权重

记 $m_j^k (j = 1, 2, \dots, n)$ 为 t_k 时刻方案 i 第 j 个属性的虚拟最优直觉模糊集,并且定义

$$m_j^k = \langle \max_{1 \leq i \leq m} u_{ij}^k, \min_{1 \leq i \leq m} v_{ij}^k \rangle \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

则称 $m^k = (m_1^k, m_2^k, \dots, m_n^k)$ 为虚拟最优属性方案。 $\max_{1 \leq i \leq m} u_j^k$ 表示 t_k 时刻能取到最大隶属度, $\min_{1 \leq i \leq m} v_j^k$ 表示 t_k 时刻能取到最小非隶属度。 t_k 时刻,方案 X_i 与虚拟最优属性方案 m^k 之间的距离记为 $d(x_i^k, m^k)$, 距离越小说明威胁值越大。

记

$$q(x_i^k, m^k) = 1 - \frac{d(x_i^k, m^k)}{\sum_{k=1}^p d(x_i^k, m^k)} \quad k = 1, 2, \dots, p, \quad i = 1, 2, \dots, m$$

得到目标属性权重

$$w_i^k = \frac{q(x_i^k, m^k)}{\sum_{k=1}^p q(x_i^k, m^k)} \quad (5)$$

1.2.2 时间序列权重

随着空战过程的进行,收集的态势信息也随着时间不断变化,越是接近当前时刻所收集的数据信息,对整个空战的威胁评估越是重要,因此时间序列权重应该是单调递增的趋势。利用正态分布的累积分布函数的方法确定时间序列权重。

定义2 正态分布的累积分布函数定义为

$$F(t_k; \mu_p, \sigma_p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_p} \int_{-\infty}^t \exp\left(-\frac{(t - \mu_p)^2}{2\sigma_p^2}\right) dt \quad k = 1, 2, \dots, p, \quad t > 0 \quad (6)$$

正态分布的累积分布函数能够由一个误差函数的特殊函数表示为

$$\phi(z) = \frac{1}{2} [1 + \operatorname{erf}(\frac{z - \mu_p}{\sqrt{2}\sigma_p})] \quad (7)$$

式(6)~(7)中: μ_p 为集合 $1, 2, \dots, p$ 的平均值; $\sigma_p (\sigma_p > 0)$ 为标准差,即

$$\mu_p = \frac{1}{p} \frac{p(1+p)}{2} = \frac{1+p}{2} \quad (8)$$

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{1}{p} \sum_{k=1}^p (k - \mu_p)^2} \quad (9)$$

用正态分布的累积分布函数的方法确定时间序列权重为

$$\lambda(t_k) = \frac{F(t_k; \mu_p, \sigma_p)}{\sum_{k=1}^p F(t_k; \mu_p, \sigma_p)} = \frac{\int_0^{t_k} \exp\left(-\frac{(t - \mu_p)^2}{2\sigma_p^2}\right) dt}{\sum_{k=1}^p \int_0^{t_k} \exp\left(-\frac{(t - \mu_p)^2}{2\sigma_p^2}\right) dt} \quad k = 1, 2, \dots, p \quad (10)$$

2 动态空战多属性威胁评估算法

选取最新 p 个空战态势时间点, 基于直觉模糊集的运算法则, 采用动态直觉模糊的评估方法, 确定动态空战中的目标属性权重和时间序列权重, 最后借鉴 TOPSIS 方法^[9]的思想对目标威胁评估排序, 其算法步骤如下所述。

1) 根据已知的决策信息及指标体系, 由式(1)、式(2)确定各时刻的目标决策矩阵 $F(t_k) = (r_{ij}^k)_{m \times n}$ 。

2) 由式(5), 按照虚拟最优属性目标的方法由直觉模糊矩阵计算各时间序列点的目标属性权重 $w^k(w_1^k, w_2^k, \dots, w_n^k), k = 1, 2, \dots, p$ 。

3) 计算出各时间序列点的加权直觉模糊决策矩阵为

$$R(t_k) = (\langle \alpha_{ij}(t_k), \beta_{ij}(t_k) \rangle)_{m \times n} \quad (11)$$

式中, $\langle \alpha_{ij}(t_k), \beta_{ij}(t_k) \rangle = \omega_j(t_k) \cdot \langle u_{ij}(t_k), v_{ij}(t_k) \rangle = \langle 1 - (1 - u_{ij}(t_k))^{\omega_j(t_k)}, (v_{ij}(t_k))^{\omega_j(t_k)} \rangle$ 。

4) 计算 t_k 时刻加权直觉模糊决策矩阵 $R(t_k)$ 的正、负理想解。

正理想解为

$R^+(t_k) = (\langle \alpha_1^+(t_k), \beta_1^+(t_k) \rangle, \dots, \langle \alpha_n^+(t_k), \beta_n^+(t_k) \rangle)$, 其中, $\alpha_j^+(t_k) = \max_{1 \leq i \leq m} \{\alpha_{ij}(t_k)\}, \beta_j^+(t_k) = \min_{1 \leq i \leq m} \{\beta_{ij}(t_k)\}$ 。

负理想解为

$R^-(t_k) = (\langle \alpha_1^-(t_k), \beta_1^-(t_k) \rangle, \dots, \langle \alpha_n^-(t_k), \beta_n^-(t_k) \rangle)$, 其中, $\alpha_j^-(t_k) = \min_{1 \leq i \leq m} \{\alpha_{ij}(t_k)\}, \beta_j^-(t_k) = \max_{1 \leq i \leq m} \{\beta_{ij}(t_k)\}$ 。

5) 计算 t_k 时刻各目标到正、负理想解的欧氏距离 $D_i^+(t_k)$ 和 $D_i^-(t_k)$, 并计算 t_k 时刻各目标 x_i 与正理想解的相对贴进度 $\rho_i(t_k)$ 。

$$\rho_i(t_k) = \frac{D_i^-(t_k)}{D_i^-(t_k) + D_i^+(t_k)} \quad (12)$$

6) 构造动态决策矩阵 H 。

$$H = (\rho_i(t_k))_{m \times p} = \begin{bmatrix} \rho_1(t_1) & \rho_1(t_2) & \dots & \rho_1(t_p) \\ \rho_2(t_1) & \rho_2(t_2) & \dots & \rho_2(t_p) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_m(t_1) & \rho_m(t_2) & \dots & \rho_m(t_p) \end{bmatrix} \quad (13)$$

7) 由式(10), 按照正态分布累积函数的方法计算各时间点的时间序列权重 $\lambda = (\lambda(t_1), \lambda(t_2), \dots, \lambda(t_p))$ 。

8) 构造加权动态决策矩阵 K 。

$$K = \lambda \cdot H = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & \dots & e_{1p} \\ e_{21} & e_{22} & \dots & e_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{m1} & e_{m2} & \dots & e_{mp} \end{bmatrix} \quad (14)$$

9) 确定动态决策矩阵的正、负理想解, 并计算各目标与动态决策矩阵正、负理想解的距离。

到正理想解 e_k^+ 的距离为

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{k=1}^p (e_{ik} - e_k^+)^2} \quad (15)$$

到负理想解 e_k^- 的距离为

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{k=1}^p (e_{ik} - e_k^-)^2} \quad (16)$$

10) 计算各目标的威胁度 C_i , 按照递减的顺序对各目标的威胁评估排序。

$$C_i = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^+} \quad (17)$$

3 仿真及分析

某次空战中, 我机遭遇 4 架敌机, 且敌我双方均在作战范围内。取距离威胁因子参数为 $k = 0.7, l = 0.2$; 角度威胁因子参数为 $k = 0.8, l = 0.2$; 速度威胁因子参数为 $e = 0.7, c = 0.3$ 。我机机载设备所测信息如表 2 所示。

表 2 各时刻目标信息

Table 2 The target information at each moment

时刻	目标	空战能力因子	速度威胁因子	距离威胁因子	角度威胁因子
t_1	1	较高	275	50	120
	2	高	300	60	80
	3	较高	285	66	75
	4	一般	279	70	100
t_2	1	较高	270	65	155
	2	高	270	55	75
	3	较高	270	55	70
	4	一般	275	60	90
t_3	1	较高	274	50	145
	2	高	295	60	60
	3	较高	270	50	60
	4	一般	270	55	65
t_4	1	较高	270	45	80
	2	高	280	50	50
	3	较高	285	55	80
	4	一般	265	60	45

按照步骤1)确定各目标属性的直觉模糊决策矩阵,如表3所示。

表3 直觉模糊决策矩阵

Table 3 Intuitionistic fuzzy decision matrix

Table with 5 columns: 时刻, 目标, 空战能力因子, 速度威胁因子, 距离威胁因子, 角度威胁因子. Rows are grouped by time steps t1, t2, t3, t4.

计算各时间序列的目标属性权重,如表4所示。

表4 目标属性权重

Table 4 The target attribute weights

Table with 5 columns: 时刻, 空战能力因子, 速度威胁因子, 距离威胁因子, 角度威胁因子. Rows are grouped by time steps t1, t2, t3, t4.

计算各时间序列的加权直觉模糊决策矩阵 R(tk), 如表5所示。

表5 加权直觉模糊决策矩阵

Table 5 The weighted intuitionistic fuzzy decision matrix

Table with 5 columns: 时刻, 目标, 空战能力因子, 速度威胁因子, 距离威胁因子, 角度威胁因子. Rows are grouped by time steps t1, t2, t3, t4.

根据步骤4), tk 时刻加权直觉模糊决策矩阵 R(tk)

的正、负理想解如表6所示。

表6 R(tk)的正、负理想解

Table 6 Positive and negative ideal solution of R(tk)

Table with 5 columns: 时刻, 空战能力因子, 速度威胁因子, 距离威胁因子, 角度威胁因子. Rows are grouped by time steps t1, t2, t3, t4 for both positive and negative ideal solutions.

计算 tk 时刻各目标到正、负理想解的欧氏距离,如表7所示。

表7 到正负理想解的欧氏距离

Table 7 The Euclidean distance to positive ideal solution and negative ideal solution

Table with 5 columns: 时刻, 目标1, 目标2, 目标3, 目标4. Rows are grouped by time steps t1, t2, t3, t4 for both positive and negative ideal solutions.

tk 时刻各目标 xi 与正理想解的相对贴近度 rho_i(tk) 如表8所示。

表8 相对贴近度

Table 8 The relative closeness degree

Table with 5 columns: rho_i(tk), t1, t2, t3, t4. Rows are grouped by target indices rho1, rho2, rho3, rho4.

构造动态决策矩阵 H。

H = [0.471 0.386 0.422 0.436; 0.759 0.739 0.681 0.786; 0.554 0.604 0.594 0.410; 0.220 0.286 0.418 0.415]

按照正态分布累积函数的方法计算各时间点的时间序列权重。

F(t1; mu_p, sigma_p) = 0.216; F(t2; mu_p, sigma_p) = 0.882; F(t3; mu_p, sigma_p) = 1.850; F(t4; mu_p, sigma_p) = 2.515

代入式(10)得

$$\lambda = (\lambda(t_1), \lambda(t_2), \lambda(t_3), \lambda(t_4)) = (0.040, 0.161, 0.339, 0.460)。$$

构造加权动态决策矩阵 K 。

$$K = \begin{bmatrix} 0.019 & 0.062 & 0.143 & 0.201 \\ 0.030 & 0.119 & 0.231 & 0.362 \\ 0.022 & 0.097 & 0.201 & 0.189 \\ 0.001 & 0.046 & 0.142 & 0.191 \end{bmatrix}。$$

确定动态决策矩阵 K 的正、负理想解： $K^+ = (0.030, 0.119, 0.231, 0.362)$ ； $K^- = (0.001, 0.046, 0.142, 0.189)$ 。

计算各目标与动态决策矩阵正、负理想解的距离，如表 9 所示。

表 9 到正、负理想解的距离

Table 9 Distances to positive ideal solution and negative ideal solution

	目标 1	目标 2	目标 3	目标 4
与正理想解距离	0.192	0	0.177	0.208
与负理想解距离	0.027	0.210	0.081	0.002

计算各目标的威胁度 C_i ： $C = (0.123, 1.000, 0.314, 0.010)$ 。

最后评估出的各目标威胁排序为：目标 2 > 目标 3 > 目标 1 > 目标 4。

动态评估结果与文献[7]中当前时刻 t_4 评估结果对比如表 10 所示。

表 10 比较结果

Table 10 The comparison of results

	t_4 时刻评估结果	动态评估结果
目标 1	0.413	0.123
目标 2	0.810	1.000
目标 3	0.349	0.314
目标 4	0.492	0.010

单独考虑当前时刻 t_4 的静态评估算法结果为：目标 2 > 目标 4 > 目标 1 > 目标 3。动态评估算法在当前时刻 t_4 综合考虑 t_1, t_2 和 t_3 时刻的属性值及其权重得到：目标 2 > 目标 3 > 目标 1 > 目标 4。静态排序法没有考虑之前时刻目标属性值的变化趋势；而动态评估算法考虑到目标 3 在 t_3 时刻的速度、角度和距离威胁因子的突增，同时考虑到目标 4 的速度、距离、角度因子的持续减小，得到了以上排序结果。

从结果对比可看出，动态评估方法反映出了空战目标威胁属性的时序性及动态变化，从而使空战目标威胁排序更加合理。

4 结束语

针对威胁态势信息的动态时序性，在多个时间点分别计算目标属性权重和时间序列权重，并结合 TOPSIS 方法的思想给出了动态威胁评估的算法。仿真分析针

对不同时刻的目标威胁属性值进行威胁评估，结果反映出了威胁动态变化的特征，为解决动态空战威胁排序问题提供了一种新的参考方法。

参考文献

- [1] VAHDANI B, MOUSAVI S M, TAVAKKOLI-MOGHAD-DAM R. Group decision making based on novel fuzzy modified TOPSIS method[J]. Applied Mathematical Modelling, 2011, 35(9):4257-4269.
- [2] XU Z S. Models for multiple attribute decision-making with intuitionistic fuzzy information[J]. International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge Based Systems, 2007, 15(3):285-297.
- [3] 徐泽水. 不确定多属性决策方法及其应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004. (XU Z S. Decision-making method of the uncertain multi-attribute and application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.)
- [4] 夏勇其, 吴祈宗. 一种混合型多属性决策问题的 TOPSIS 方法[J]. 系统工程学报, 2004, 1(6):630-634. (XIA Y Q, WU Q Z. A technique of order preference by similarity to ideal solution for hybrid multiple attribute decision making problems[J]. Journal of Systems Engineering, 2004, 1(6):630-634.)
- [5] 徐泽水. 部分权重信息下多目标决策方法研究[J]. 系统工程理论与实践, 2002, 22(1):43-47. (XU Z S. On method for multi-objective decision making with partial weight information [J]. System Engineering Theory and Practice, 2002, 22(1):43-47.)
- [6] 曲长文. 应用多属性决策的威胁评估方法[J]. 系统工程与电子技术, 2000, 22(5):26-29. (QU C W. Threat assessment using multiple attribute decision making[J]. System Engineering and Electronics, 2000, 22(5):26-29.)
- [7] 蔡佳, 罗继勋. 基于变权模糊综合评判的目标威胁评估算法[J]. 电光与控制, 2009, 16(12):80-83. (CAI J, LUO J X. Threat assessment algorithm based on weight-variation fuzzy comprehensive judgment [J]. Electronics Optics & Control, 2009, 16(12):80-83.)
- [8] ATANASSOV K. Intuitionistic fuzzy sets[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1986, 20:87-99.
- [9] 张堃, 周德云. 基于熵的 TOPSIS 法空战多目标威胁评估[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(9):1493-1495. (ZHANG K, ZHOU D Y. TOPSIS method based on entropy in evaluating the air multi target threat[J]. System Engineering and Electronics, 2007, 29(9):1493-1495.)