

区间数模糊综合评判的UCAV空战威胁评估*

王光辉^a, 徐光达^b, 谢宇鹏^a, 吕超^a

(海军航空大学 a. 岸防兵学院; b. 研究生大队, 山东 烟台 264001)

摘要:针对空战威胁因素信息存在模糊性、不确定性的特点,结合区间数与模糊综合评判这2种方法的各自优势,建立了基于区间数模糊综合评判的无人作战飞机(unmanned combat aerial vehicle, UCAV)空战威胁评估模型。用区间数表示各威胁因素的权重值,并用模糊综合评判方法建立起敌机与威胁因素之间的模糊关系,能够有效克服传统方法确定的恒值向量式的威胁权重值无法体现空战威胁程度模糊性、不确定性的不足、也能够弥补确定权重时专家赋值主观性过强的缺陷。仿真结果验证了该评估模型的有效性。

关键词:威胁评估;UCAV;区间数;模糊综合评判;空战;多属性决策

doi:10.3969/j.issn.1009-086x.2018.06.001

中图分类号:V279;E844 文献标志码:A 文章编号:1009-086X(2018)-06-0001-06

UCAN Air Combat Threat Assessment Based on Interval Number Fuzzy Comprehensive Evaluation

WANG Guang-hui^a, XU Guang-da^b, XIE Yu-peng^a, LÜ Chao^a

(Naval Aeronautical University, a. Institute of Coastal Defense Force;

b. Bridge of Graduate Students, Shandong Yantai 264001, China)

Abstract: Aiming at the characteristics of fuzziness and uncertainty in the information of threat factors of air combat, an unmanned combat aerial vehicle (UCAV) threat assessment model is established based on the interval number and fuzzy comprehensive evaluation. The interval number is used to express the weight value of each threat factor and to establish the fuzzy relationship between the enemy unit and the threat factor by fuzzy comprehensive judging method, which can effectively overcome the defect that the threat weight value of the constant vector type determined by the traditional method cannot reflect the ambiguity of the threat degree for the air combat threat, the insufficient uncertainty, and the error that the expert assignment of the expert in the determination weight can be compensated. Simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed model.

Key words: threat assessment; unmanned combat aerial vehicle (UCAV); interval number; fuzzy comprehensive evaluation; air combat; multi-attribute decision making

* 收稿日期:2018-01-27;修回日期:2018-04-28

基金项目:国家自然科学基金(61501488)

第一作者简介:王光辉(1964-),男,山东泰安人。教授,博士,主要研究方向为武器系统运用。

通信地址:264001 山东省烟台市芝罘区二马路188号海军航空大学研究生三队

E-mail:541554118@qq.com

0 引言

空战对抗的快节奏、高强度,机载武器的信息化、智能化以及战场信息的复杂化、海量化,对无人作战飞机(unmanned combat aerial vehicle, UCAV)的态势感知与战术决策提出了更加严峻的考验。如何基于当前的战场形势判断对手意图并做出合理的威胁评估是 UCAV 提升作战效能、打赢现代空战的关键所在。由此可见,深入分析空战威胁评估问题具有重要的军事价值。

威胁评估是指如何评判、估计敌方目标对我方进行侵袭成功的可能性及侵袭时可能造成的毁伤程度^[1]。目前很多专家对威胁评估问题进行了研究,成果显著。例如,文献[2]采用熵理论与 TOPSIS 相结合的方法进行威胁评估,该方法能够克服传统 TOPSIS 法在计算权重系数上的不足,但对空战信息的完整性与确定性有很高的要求;文献[3]对传统的威胁评估优势函数进行改进,构造的非参量模型更加合理,但难以保证评估结果的可靠性;文献[4]利用回归型支持向量机方法良好的学习、预测能力来构建空战威胁评估模型,但对于大规模空战训练样本的采集训练则难以实施。上述文献所使用的评估模型的可靠性均需提高,否则很难适用于现代空战。由于空战对抗期间存在着大量的不确定的威胁因素,这些因素都具有随机性、模糊性和不完全性的特点,这就需要寻求一种能够处理含有模糊因子问题的方法。同时运用上述文献中各类方法求出的空战威胁目标属性权重值均是确定的数值,难以体现空战威胁程度的模糊性和不确定性。鉴于以上 2 点原因,本文提出了基于区间数模糊综合评判法的空战威胁评估模型,综合 3 种评判函数实现二级综合威胁评估,增强了评估结果的可靠性与说服力。

1 UCAV 空战威胁评估模型

UCAV 遂行空战任务时,受到的蓝方威胁主要与蓝方战机自身的作战能力和当前的空战态势有关。其中,空战能力可用机动性参数、火力参数、探测能力参数等本机的静态属性量化表示;而空战态势可用角度、距离、速度和高度这 4 个实时变化的动态因素进行定量分析^[5]。

1.1 空战能力威胁

UCAV 的空战能力可根据文献[6]中的空战效能指数表示,表达式为

$$C = [\ln B + \ln(\sum A_1 + 1) + \ln(\sum A_2)] \varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3 \varepsilon_4, \quad (1)$$

式中: B 为机动性参数; A_1 为火力参数; A_2 为探测能力参数; ε_1 为操纵效能系数; ε_2 为生存能力系数; ε_3 为航程系数; ε_4 为电子对抗能力系数。

对空战效能指数 C 进行归一化处理,可得空战能力威胁指数为

$$T_j^c = \frac{C}{\max C_j}. \quad (2)$$

1.2 空战态势威胁

利用威胁指数法^[7]计算影响空战的 4 个威胁因素的威胁属性值,假设红方 UCAV 与蓝方战机进行一对一空战,空战几何关系如图 1 所示。

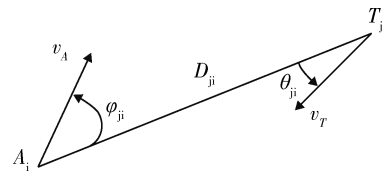


图 1 双机空战对抗态势图

Fig. 1 Situation chart of one to one air combat

图 1 中: D_{ji} 为红方战机 A 与蓝方战机 T 的距离; φ_{ji} 为红方战机 A 的位置角; θ_{ji} 为蓝方战机 T 的进入角;规定角度方向相对于目标线右偏为正。定义角度威胁指数 T_{ji}^a 、距离威胁指数 T_{ji}^r 、速度威胁指数 T_{ji}^v 。得到各威胁指数计算公式如下:

(1) 角度威胁指数为

$$T_{ji}^a = \frac{(|\varphi_{ji}| + |\theta_{ji}|)}{360^\circ}. \quad (3)$$

(2) 距离威胁指数为

$$T_{ji}^r = \begin{cases} 0.5, & r_{ji} \leq r_{mi}, r_{ji} \leq r_{mti}, \\ 0.5 - 0.2 \left(\frac{r_{ji} - r_{mti}}{r_{mi} - r_{mti}} \right), & r_{mti} < r_{ji} < r_{mi}, \\ 1.0, & r_{mi} < r_{ji} < r_{mti} \\ 0.8, & \max(r_{mi}, r_{mti}) < r_{ji} < r_{ri}. \end{cases} \quad (4)$$

式中: r_{ji} 为蓝红双机间的距离; r_{mi} 为红方 UCAV 的最大射程; r_{mti} 为蓝方战机的最大射程; r_{ri} 为红方 UCAV 的雷达最大跟踪距离。

(3) 速度威胁指数为

$$T_{ji}^v = \begin{cases} 0.1, & v_T < 0.6v_A, \\ -0.5 + v_T/v_A, & 0.6v_A \leq v_T \leq 1.5v_A, \\ 1.0, & v_T > 1.5v_A, \end{cases} \quad (5)$$

式中: v_A 为红方UCAV的速度; v_T 为蓝方战机的速度。

2 区间数方法的相关概念

2.1 区间数特征向量法

设 $\tilde{A} = (\tilde{a}_{ij})_{n \times n}$ 为区间数矩阵, 其中 $\tilde{a}_{ij} = [a_{ij}^L, a_{ij}^U]$ 。记 $A^L = (a_{ij}^L)_{n \times n}$, $A^U = (a_{ij}^U)_{n \times n}$, 且 $\tilde{A} = [A^L, A^U]$ 。同理, 对于区间数向量 $\tilde{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$, 即 $\tilde{x}_i = [x_i^L, x_i^U]$, 其中 $x^L = (x_1^L, x_2^L, \dots, x_n^L)^T$, $x^U = (x_1^U, x_2^U, \dots, x_n^U)^T$, 记 $\tilde{x} = [x^L, x^U]$ 。对于给定的区间数判别矩阵 $\tilde{A} = [A^L, A^U]$, 使用区间数特征向量(IEM)法可按以下步骤计算权重^[8]:

(1) 运用特征向量法分别求 A^L, A^U 的最大特征值对应的具有正分量的归一化特征向量 x^L, x^U 。

(2) 由 $A^L = (a_{ij}^L)_{n \times n}, A^U = (a_{ij}^U)_{n \times n}$, 带入式(6)计算出 α, β 。

$$\alpha = \left[\frac{\sum_{j=1}^n \frac{1}{\sum_{i=1}^n a_{ij}^U}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}^U} \right]^{\frac{1}{2}}, \beta = \left[\frac{\sum_{j=1}^n \frac{1}{\sum_{i=1}^n a_{ij}^L}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}^L} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (6)$$

(3) 权重向量 $\tilde{\omega} = [\alpha x^L, \beta x^U]$ 。

2.2 区间数排序方法^[9]

当 \tilde{a}, \tilde{b} 同时为区间数或者其中一个为区间数时, 设 $\tilde{a} = [a^L, a^U], \tilde{b} = [b^L, b^U]$, 且记 $l_a = a^U - a^L, l_b = b^U - b^L$, 则

$$P(\tilde{a} \geq \tilde{b}) = \frac{\min\{l_a + l_b, \max(a^U - b^L, 0)\}}{l_a + l_b} \quad (7)$$

表示 $\tilde{a} \geq \tilde{b}$ 的可能度, 且记 \tilde{a}, \tilde{b} 的次序关系为 $\tilde{a} \geq \tilde{b}$ 。设有 N 个区间数 $\tilde{a}_i = [a_i^L, a_i^U], i \in N$, 则通过式(7)可以求得 $p(\tilde{a}_i \geq \tilde{a}_j), i, j \in N$, 记为 P_{ij} 。则

$$v_i = \frac{1}{n(n-1)} \left(\sum_{j=1}^n P_{ij} + \frac{n}{2} - 1 \right), i \in N \quad (8)$$

的大小就表示区间数 \tilde{a}_i 的大小。

3 基于区间数模糊综合评判方法的评估模型

实际空战中, 红方UCAV所受到的各方面因素

的威胁程度(角度威胁、速度威胁等)均是不易直接量化的指标参数, 通常用“极大”、“极小”等定性的评判等级评语进行描述, 因此, 应用模糊数学理论便可以表示蓝方目标与威胁因素之间的模糊关系, 并对各威胁因素进行合理的量化。模糊综合评判法就是应用模糊关系合成的原理, 从多个方面(因素)对被评价事物隶属等级状况进行综合性评判的一种方法^[10], 该方法具有其他数学模型无法比拟的优势: 模型实用、计算简便、能够有效求解多属性决策问题, 现已普遍应用于诸多领域。

3.1 模糊综合评判原理

设该评估问题的论域 U 是威胁目标的集合, $U = \{\text{目标 } 1, \text{目标 } 2, \dots, \text{目标 } m\} = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$; 各威胁因素的集合为 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ 。权重集 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$, A 表示各威胁因素在评估体系中的重要性(评估中注重那些因素)且满足: $\sum_{i=1}^m a_i = 1$ 。评判结果为 $B = (b_1, b_2, \dots, b_n), b_j (j=1, 2, \dots, n)$ 表示目标机 u_j 对红方战机造成的 t_j 方面因素的威胁属性值。

设单因素评判矩阵为 $R = (r_{ij})_{m \times n}, r_{ij} \in [0, 1]$, 选择适当的模糊算子, 将 A 与 R 按照特定的法则运算得到 B ^[11]:

$$A \circ R = B,$$

式中: “ \circ ”为模糊算子。

3.2 模型的求解

利用上述方法求解此问题模型的步骤如下:

Step 1 确定威胁目标集 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$, 集合中的各目标为红方遭遇每架蓝方战机。

Step 2 确定威胁因素集 T

根据第1节的分析, 这里

$$T = \{t_1, t_2, t_3, t_4\} =$$

{空战能力指数, 角度威胁, 距离威胁, 速度威胁}。

Step 3 确定模糊关系矩阵 R ^[12]

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & \dots & r_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix},$$

式中: R 为评判矩阵, $\forall x_i, i \in N$, 行向量 $(r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{im}) \in [0, 1]^m$ 为 x_i 的模糊属性向量, 表征蓝方战机 x_i 对威胁因素 t_i 的隶属度。

Step 4 确定评判权重向量 \mathbf{A}

\mathbf{A} 可用区间数法求得的权重向量 $\tilde{\omega}$ 来代替。

Step 5 计算区间数评判函数 $F_1(\mathbf{R})$

首先通过式(1)~(5)计算每架蓝方战机的 4 个威胁因子;然后用 IEM 法求出 4 个威胁因子的区间数权重 $\tilde{\omega}_j$;再利用线性加权法计算出每架蓝方战机的区间数威胁值

$$\bar{T}_i = \tilde{\omega}_1 T_{Ci} + \tilde{\omega}_2 T_{ai} + \tilde{\omega}_3 T_{ri} + \tilde{\omega}_4 T_{vi}. \quad (9)$$

根据式(7)计算可能度 $p(\bar{T}_i \geq \bar{T}_j)$, 得到可能度矩阵 $\mathbf{p} = (p_{ij})_{n \times n}$; 根据式(8)算出 v_i , 并对其进行归一化处理最终求出 $F_1(\mathbf{R})$ 。

Step 6 确定模糊综合评判函数 $\varphi: [0, 1]^m \rightarrow \mathbf{R}$ (\mathbf{R} 为全体实数集), 记 $F(\cdot) = \varphi(z_1, z_2, \dots, z_m) \in \mathbf{R}$ 。这里选取的评判函数, 应综合考虑加权隶属度、最大、最小隶属度的综合评判, 需要进行二级评判。3.3 节将对二级评判的具体应用进行分析。

3.3 评判函数的二级评判

本文主要选取下列 2 种评判函数进行二级评判^[13]:

$$F_2 = \bigvee_{j \in M} (b_j \wedge z_j), \quad (10)$$

$$F_3 = \bigwedge_{j \in M} z_{ij}^c. \quad (11)$$

结合 3.2 节中的 $F_1(\mathbf{R})$ 函数, 设论域为 $U_1 = \{F_1, F_2, F_3\}$, 模糊矩阵 $\tilde{\mathbf{R}}_1 = (f_{ij})_{n \times 3}$, f_{ij} 是一次评判用 3 种指标算得的结果, $f_{ij}, j = 1, 2, 3, i \in N$, 由此得到二级评判空间为 $S_2 = (\mathbf{R}, \mathbf{V}_1, \tilde{\mathbf{R}}_1)$, 其中评判因素 \mathbf{V}_1 由 3 种不同的评判指标组成。对 S_2 采用线性加权求和的形式进行判别:

$$\varphi(F_1, F_2, F_3)(\mathbf{R}) = \sum_{k=1}^3 \omega_k F_k(\mathbf{R}). \quad (12)$$

求得的 $f_i(x_i) = \sum_{k=1}^3 \omega_k (f_i)_k, i \in N$, 称为二级评判指标, 其中 x_i 为根据该评判指标计算得到的解向量中的各个数, 那么数值最大的 x_i 便是最优解。上述评判指标的权重系数可用二项系数法^[14]计算。

4 实例分析

本文根据文献[15]中的仿真条件进行实例分析。假设红方出动 1 架 UCAV 具有多目标攻击能力, 作战过程中发现 4 架蓝方战机, 机型为 F-16C, F-5E, F-15E 3 种, 3 种战机的导弹最大射程分别为 50, 45, 55 km, 雷达最大探测距离分别为 100,

200, 130 km, 且均在红方 UCAV 火控雷达的探测范围之内, 红方 UCAV 速度 $v_A = 32$ m/s, 携带的中距空空导弹最大射程 $r_{mi} = 60$ km, 雷达最大跟踪距离 $r_{ri} = 120$ km。根据相关军事专家对各威胁指标权重的评定意见, 构造区间数威胁估计矩阵如表 1 所示。红方 UCAV 获取的蓝方战机信息如表 2 所示。

表 1 区间数威胁估计矩阵

Table 1 Matrix of interval number threat assessment

威胁度	空战能力	角度	距离	速度
空战能力	[1, 1]	[3, 4]	[2, 3]	[3, 5]
角度	[1/4, 1/3]	[1, 1]	[1/2, 1]	[3, 5]
距离	[1/3, 1/2]	[1, 2]	[1, 1]	[2, 3]
速度	[1/5, 1/3]	[1/2, 1]	[1/3, 1/2]	[1, 1]

表 2 空战态势信息表

Table 2 Situation information table for air combat

目标	目标机型	$\varphi_{ji}/(^{\circ})$	$\theta_{ji}/(^{\circ})$	r_{ji}/km	$v_{ji}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
1	F-16C	80	-45	50	300
2	F-16C	45	-45	70	325
3	F-5E	-60	80	60	320
4	F-15E	-45	15	60	330

利用 IEM 法对表 1 中的数据进行计算, 得到:

$$\alpha = 0.927, \beta = 1.071,$$

$$\mathbf{x}^L = (0.517\ 4, 0.148\ 4, 0.226\ 9, 0.107\ 3)^T,$$

$$\mathbf{x}^U = (0.491\ 9, 0.160\ 8, 0.233\ 7, 0.113\ 6)^T.$$

权重向量为

$$\tilde{\omega} = [\alpha \mathbf{x}^L, \beta \mathbf{x}^U] = ([0.479\ 6, 0.526\ 7], [0.137\ 5, 0.172\ 1], [0.210\ 3, 0.250\ 2], [0.099\ 5, 0.121\ 6])^T.$$

根据第 3 节中构建的评估模型得到求解步骤如下:

(1) 该实例中的威胁目标集为

$$U = \{F-16C, F-16C, F-5E, F-15E\}.$$

(2) 确定威胁因素集为

$$T = \{\text{空战能力指数, 角度威胁, 距离威胁, 速度威胁}\}.$$

(3) 由式(1)~(5)计算得到模糊关系矩阵为

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0.848 & 0.848 & 0.414 & 1.000 \\ 0.347 & 0.250 & 0.389 & 0.167 \\ 0.500 & 0.800 & 0.300 & 0.300 \\ 0.096 & 0.043 & 0.098 & 0.055 \end{bmatrix}.$$

(4) 由 2.2 节中的 Step 5 计算得

$$T = \{[0.569\ 1, 0.643\ 1], [0.613\ 6, 0.695\ 1], [0.324\ 9, 0.372\ 0], [0.571\ 1, 0.637\ 2]\}.$$

再根据式(7)得

$$P = \begin{bmatrix} 0.500\ 0 & 0.189\ 7 & 1 & 0.513\ 9 \\ 0.810\ 3 & 0.500\ 0 & 1 & 0.840\ 1 \\ 0 & 0 & 0.500\ 0 & 0 \\ 0.486\ 1 & 0.159\ 9 & 1 & 0.500\ 0 \end{bmatrix}.$$

经式(8)计算后,对结果进行归一化处理,最终算得

$$F_1(\mathbf{R}) = (0.267\ 0, 0.345\ 9, 0.125\ 0, 0.262\ 2).$$

(5) 利用 3.3 节中列出的 2 种评判函数计算 $F_k(\mathbf{R}), k=2,3$, 计算结果为

$$F_2(\mathbf{R}) = \left(\bigvee_{j=1}^4 (r_{ij} \wedge b_j) \right)_{4 \times 1} = (0.503\ 1, 0.503\ 1, 0.414\ 0, 0.503\ 1),$$

$$F_3(\mathbf{R}) = \left(\bigwedge_{j=1}^5 r_{ij}^{c_j} \right)_{4 \times 1} = (0.096\ 0, 0.043\ 0, 0.098\ 0, 0.055\ 0).$$

对上述 2 个结果归一化,结合上一步的计算结果得

$$F(\mathbf{R}) = \begin{bmatrix} 0.267\ 0 & 0.345\ 9 & 0.125\ 0 & 0.262\ 2 \\ 0.261\ 6 & 0.261\ 6 & 0.215\ 3 & 0.261\ 6 \\ 0.329\ 0 & 0.147\ 0 & 0.336\ 0 & 0.188\ 0 \end{bmatrix}.$$

(6) 采用二项系数法算出二级评判指标权重 $\omega_k = (0.710, 0.170, 0.120)$, 对 $F(\mathbf{R})$ 进行二次评判得

$$\varphi(F_1, F_2, F_3)(\mathbf{R}) = \sum_{k=1}^3 \omega_k F_k(\mathbf{R}) = (0.273\ 5, 0.307\ 7, 0.165\ 7, 0.253\ 2).$$

由评判结果可知,最终的威胁排序为 $X = (2, 1, 4, 3)$ 。该威胁排序结论与文献[15]中的评估结果完全相同,从而验证了本文构建的基于区间数模糊综合评判模型的合理性与适用性。

5 结束语

空战威胁评估是UCAV制定作战计划和进行自主空战战术决策的前提,也是实施协同多目标攻击的关键,对UCAV空战效能的发挥有着举足轻重的影响。本文结合了区间数与模糊综合评判方法的优势,基于上述2种方法构建了空战威胁评估模型。用区间数表示各威胁因素的权重值,并用模糊

综合评判方法表征蓝方目标与威胁因素之间的联系,能够有效克服传统方法确定的恒值向量式的威胁权重值无法体现空战威胁程度模糊性、不确定性的不足,也能够弥补确定权重时专家赋值主观性过强的缺陷。最后的实例分析结果与文献[15]中的评估结果相一致,结论在一定程度上能够令人信服。

参考文献:

- [1] 陈洁钰,姚佩阳,税冬东,等.基于结构熵和PSO-RBF的空战动态威胁评估[J].电光与控制,2014,21(11):51-56.
CHEN Jie-yu, YAO Pei-yang, SHUI Dong-dong, et al. Air Combat Dynamic Threat Assessment Based on Structure Entropy and PSO-RBF [J]. Electronics Optics & Control, 2014, 21(11): 51-56.
- [2] 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 Kun, ZHOU De-yun. Topsis Method Based on Entropy in Evaluating the Air Multi-Target Threat [J]. Systems Engineering and Electronics, 2007, 29(9): 1493-1495.
- [3] 肖冰松,方洋旺,胡诗国,等.一种新的超视距空战威胁评估方法[J].系统工程与电子技术,2009,31(9):2163-2166.
XIAO Bing-song, FANG Yang-wang, HU Shi-guo, et al. New Threat Assessment Method in Beyond-the-Horizon Range Air Combat [J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(9): 2163-2166.
- [4] 郭辉,徐浩军,刘凌.基于回归型支持向量机的空战目标威胁评估[J].北京航空航天大学学报,2010,36(1):123-126.
GUO Hui, XU Hao-jun, LIU Ling. Target Threat Assessment of Air Combat Based on Support Vector Machines for Regression [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 36(1): 123-126.
- [5] 张才坤,冯琦,张堃.基于IFE的改进TOPSIS法空战多目标威胁评估[J].飞行力学,2014,32(3):281-284.
ZHANG Cai-kun, FENG Qi, ZHANG Kun. Application of Improved TOPSIS Based on IFE in Evaluating Sequence of Air Multi-Target Threat [J]. Flight Dynamics, 2014, 32(3): 281-284.
- [6] 董彦非,王礼沅,张恒喜.战斗机空战效能评估的综

- 合指数模型[J]. 航空学报, 2006, 27(6): 1084-1087.
DONG Yan-fei, WANG Li-yuan, ZHANG Heng-xi. Synthesized Index Model for Fighter Plane Air Combat Effectiveness Assessment[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 27(6): 1084-1087.
- [7] 肖亮, 黄俊, 徐钟书. 基于空域划分的超视距空战态势威胁评估[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(10): 1309-1313.
XIAO Liang, HUANG Jun, XU Zhong-shu. Modeling Air Combat Situation Assessment Based on Combat Area Division[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(10): 1309-1313.
- [8] 龚胜科, 徐浩军, 苏晨, 等. 基于区间数的第4代战斗机空战效能评估[J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(5): 102-109.
GONG Sheng-ke, XU Hao-jun, SU Chen, et al. Study on Evaluation for Aerial Warfare Efficiency of the Fourth Generation Fighter Based on Interval Number[J]. Fire Control & Command Control, 2012, 37(5): 102-109.
- [9] 王楚燕, 战晓苏. 基于区间数排序的高超声速飞行器目标威胁评估方法[J]. 军事运筹与系统工程, 2017, 31(1): 17-21.
WANG Chu-yan, ZHAN Xiao-su. Target Threat Assessment of Hypersonic Vehicle Based on Interval Number Ranking[J]. Military Operations Research and Systems Engineering, 2017, 31(1): 17-21.
- [10] 郑昌, 董文洪, 牛庆功, 等. 基于AHP和模糊综合评判的无人机效能评估[J]. 舰船电子工程, 2009, 29(6): 71-73.
ZHENG Chang, DONG Wen-hong, NIU Qing-gong, et al. Efficiency Evaluation of UAV System Based on AHP and Fuzzy Integrated[J]. Ship Electronic Engineering, 2009, 29(6): 71-73.
- [11] 梁广东, 卢广山, 张安. 基于组合赋权法机场毁伤效果的模糊综合评判[J]. 火力与指挥控制, 2013, 38(12): 75-78.
LIANG Guang-dong, LU Guang-shan, ZHANG An. Fuzzy Comprehensive Evaluation for Airdrome Damage Effect Based on Combination Weights Method[J]. Fire Control & Command Control, 2013, 38(12): 75-78.
- [12] 张昌龙, 周林, 张文. 基于模糊综合评判的防空作战演习效果评估[J]. 火力与指挥控制, 2011, 36(12): 48-50.
ZHANG Chang-long, ZHOU Lin, ZHANG Wen. Study on Exercise Effect of Air Defense Operation Based on Fuzzy Synthetic Evaluation[J]. Fire Control & Command Control, 2011, 36(12): 48-50.
- [13] 付昭旺, 寇英信, 王琳, 等. 基于模糊综合评判法的空战多目标威胁评估[J]. 电光与控制, 2009, 16(9): 29-32.
FU Zhao-wang, KOU Ying-xin, WANG Lin, et al. Multi-Target Threat Assessment of Air Combat Based on Synthesis Fuzzy Assessment Method[J]. Electronics Optics & Control, 2009, 16(9): 29-32.
- [14] 郭辉, 徐浩军, 谷向东, 等. 基于离差最大化的空战目标威胁评估[J]. 电光与控制, 2010, 17(9): 13-16.
GUO Hui, XU Hao-jun, GU Xiang-dong, et al. Target Threat Assessment for Air Combat Based on Maximizing Deviation[J]. Electronics Optics & Control, 2010, 17(9): 13-16.
- [15] 郭辉, 任博, 吕英军, 等. 基于区间数理论的空战目标威胁评估[J]. 火力与指挥控制, 2013, 38(6): 31-34.
GUO Hui, REN Bo, LÜ Ying-jun, et al. Target Threat Assessment for Air Combat Based on Intervals Theory[J]. Fire Control & Command Control, 2013, 38(6): 31-34.