

## 基于区间数理论的空战目标威胁评估<sup>\*</sup>

郭辉,任博,吕英军,罗艳春,崔连柱  
(空军航空大学,长春 130022)

**摘要:**针对空战目标威胁评估问题,提出了一种新的基于区间数理论的评估方法。在分析了现有的目标威胁评估方法中距离威胁模型存在不足的基础上,提出了改进的距离威胁模型。给出了区间数特征向量法求解威胁指标权重的计算步骤,建立了基于区间数理论的空战目标威胁评估的数学模型。最后给出了仿真算例,仿真结果表明该方法是合理和有效的。

**关键词:** 空战 威胁评估 区间数 特征向量法  
**中图分类号:** V271 **文献标识码:** A

## Target Threat Assessment for Air Combat Based on Intervals Theory

GUO Hui, REN Bo, Lü Ying-jun, LUO Yan-chun, CUI Lian-zhu  
(Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China)

**Abstract:** A new assessment method based on intervals theory was proposed with regard to the problem of target threat assessment for air combat. An improved model was proposed based on analyzing the existing target threat assessment methods which had deficiency in distance threat model. The calculation steps for solving weights of threat indexes by interval-number eigenvector method was given, then the mathematical model for evaluating target threat by intervals theory was established. Finally, an application example was given and the results indicated that the method was reasonable and effective.

**Key words:** air combat, threat assessment, intervals, eigenvector method

### 引言

随着航空科技的发展,多目标攻击能力已经成为现代机载武器系统的研究方向和衡量现代战斗机作战能力的一个重要标准。威胁评估是多目标攻击的关键技术之一,它是目标分配和火力分配的前提。常用的威胁评估方法有优势函数法、威胁因子法、威胁指数法等。上述方法主要是采用主观或客观赋权法来确定各威胁指标的权重,但是所得到的目标属性权重仍为确定值。实际上,不同的专家对各威胁指标有不同的偏好,常常使得指标权重具有不确定性,这就使得权重的计算值往往是处于某个区间的不确定值。本文利用区间数特征向量法确定

威胁指标的权重,并将计算所得的区间数权重与区间数的排序相结合进行空战目标的威胁评估,从而克服了传统的威胁评估方法在指标权重确定上的不足。

### 1 空战目标威胁评估指标的确定

在复杂的空战环境中,评估目标威胁程度需要考虑许多因素。它不仅包括空战中敌我飞机的几何位置关系以及距离和速度变化率等空战态势,还包括敌机的类型和机载武器情况,以及我方机载武器情况及其所处状态等。这里选取目标的空战能力和空战态势作为影响目标威胁评估排序的指标。其中空战态势因素包括角度、距离和速度,分别用角度

收稿日期:2012-04-11 修回日期:2012-06-03

<sup>\*</sup> 基金项目:国家自然科学基金资助项目(70671106)

作者简介:郭辉(1981-),男,吉林柳河人,博士,讲师。研究方向:飞行器作战效能评估与智能决策。

威胁因子、距离威胁因子和速度威胁因子来表示。  
双方的空战态势如图 1 所示。

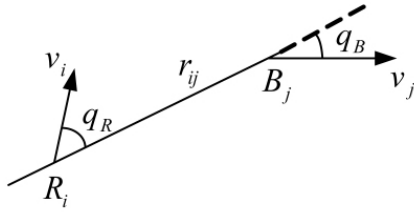


图 1 空战态势示意图

图中  $v_i$  为我机  $i$  的速度矢量  $v_j$  为目标机  $j$  的速度矢量  $q_R$  为目标前置角  $q_B$  为目标航向与目标线夹角(右偏为正)  $r_{ij}$  为我机与目标机之间的距离。定义角度威胁因子  $T_{aj}$  和速度威胁因子  $T_{vij}$  如下<sup>[1]</sup>:

$$T_{aj} = \frac{(|q_b| + |q_r|)}{360^\circ} \quad (1)$$

$$T_{vij} = \begin{cases} 0.1 & v_j < 0.6v_i \\ -0.5 + v_j/v_i & 0.6v_i \leq v_j \leq 1.5v_i \\ 1.0 & v_j > 1.5v_i \end{cases} \quad (2)$$

目前大多数文献都采用文献[2]中的模型计算距离威胁因子,但该方法仅考虑了我方飞机的雷达最大探测距离和导弹的最大射程以及敌方飞机所携带导弹的最大射程,没有考虑敌方飞机的雷达最大探测距离。实际上,双方飞机雷达最大探测距离和导弹最大射程的不同对距离威胁因子的计算有着重要影响。例如,当我方飞机的雷达最大探测距离和导弹最大射程均大于敌方飞机时,在相同的距离上距离威胁因子应当小于我方飞机的雷达最大探测距离和导弹最大射程均小于敌方飞机时的情况。

考虑双方飞机性能对比的各种情况,我们可以分 4 种情况来计算距离威胁因子  $T_{rij}$ 。设  $r_{mi} \sim r_{mj}$  分别为我机  $i$  与目标机  $j$  所携带导弹的最大射程,  $r_{ri} \sim r_{rj}$  分别为我机  $i$  与目标机  $j$  的雷达最大探测距离,则 4 种情况分别为:

$$T_{rij} = \begin{cases} 0 & r_{ij} \geq r_{rj} \\ 0.4 - 0.4 \cdot \frac{r_{ij} - r_{ri}}{r_{rj} - r_{ri}} & r_{ri} \leq r_{ij} < r_{rj} \\ 1 - 0.6 \cdot \frac{r_{ij} - r_{mj}}{r_{ri} - r_{mj}} & r_{mj} \leq r_{ij} < r_{ri} \\ 0.5 + 0.5 \cdot \frac{r_{ij} - r_{mi}}{r_{mj} - r_{mi}} & r_{mi} \leq r_{ij} < r_{mj} \\ 0.5 + 0.3 \cdot \frac{r_{mi} - r_{ij}}{r_{mi}} & r_{ij} < r_{mi} \end{cases} \quad (3)$$

$$T_{rij} = \begin{cases} 0 & r_{ij} \geq r_{ri} \\ 0.3 - 0.3 \cdot \frac{r_{ij} - r_{rj}}{r_{ri} - r_{rj}} & r_{rj} \leq r_{ij} < r_{ri} \\ 1 - 0.7 \cdot \frac{r_{ij} - r_{mj}}{r_{rj} - r_{mj}} & r_{mj} \leq r_{ij} < r_{rj} \\ 0.5 + 0.5 \cdot \frac{r_{ij} - r_{mi}}{r_{mj} - r_{mi}} & r_{mi} \leq r_{ij} < r_{mj} \\ 0.5 + 0.3 \cdot \frac{r_{mi} - r_{ij}}{r_{mi}} & r_{ij} < r_{mi} \end{cases} \quad (4)$$

$$T_{rij} = \begin{cases} 0 & r_{ij} \geq r_{rj} \\ 0.2 - 0.2 \cdot \frac{r_{ij} - r_{ri}}{r_{rj} - r_{ri}} & r_{ri} \leq r_{ij} < r_{rj} \\ 0.2 + 0.2 \cdot \frac{r_{ri} - r_{ij}}{r_{ri} - r_{mi}} & r_{mi} \leq r_{ij} < r_{ri} \\ 0.5 - 0.1 \cdot \frac{r_{ij} - r_{mj}}{r_{mi} - r_{mj}} & r_{mj} \leq r_{ij} < r_{mi} \\ 0.5 + 0.2 \cdot \frac{r_{mj} - r_{ij}}{r_{mj}} & r_{ij} < r_{mj} \end{cases} \quad (5)$$

$$T_{rij} = \begin{cases} 0 & r_{ij} \geq r_{ri} \\ 0.1 - 0.1 \cdot \frac{r_{ij} - r_{rj}}{r_{ri} - r_{rj}} & r_{rj} \leq r_{ij} < r_{ri} \\ 0.1 + 0.1 \cdot \frac{r_{rj} - r_{ij}}{r_{rj} - r_{mi}} & r_{mi} \leq r_{ij} < r_{rj} \\ 0.5 - 0.3 \cdot \frac{r_{ij} - r_{mj}}{r_{mi} - r_{mj}} & r_{mj} \leq r_{ij} < r_{mi} \\ 0.5 + 0.2 \cdot \frac{r_{mj} - r_{ij}}{r_{mj}} & r_{ij} < r_{mj} \end{cases} \quad (6)$$

空战能力威胁因子  $T_{Cj}$  为:

$$T_{Cj} = C_j / \max(C_j) \quad (7)$$

式中  $C$  为空对空作战能力指数,一般用机动性、火力、探测目标能力、操纵效能、生存力、航程和电子对抗能力这 7 个主要因素来衡量飞机的空对空作战能力。空战能力指数  $C$  的计算公式如下<sup>[3]</sup>:

$$C = \left[ \ln B + \ln \left( \sum A_1 + 1 \right) + \ln \left( \sum A_2 \right) \right] \varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3 \varepsilon_4 \quad (8)$$

式中  $B$  为机动性参数  $A_1$  为火力参数  $A_2$  为探测目标能力参数  $\varepsilon_1$  为操纵效能系数  $\varepsilon_2$  为生存力系数  $\varepsilon_3$  为航程系数  $\varepsilon_4$  为电子对抗能力系数。

## 2 基于区间数理论的评估指标权重的确定

权重的确定方法大体可分为主观赋权法、客观赋权法和主客观相结合的赋权法。由于主观赋权法是基于决策者的知识和经验而给出属性权重的,因而在多属性决策问题中得到了广泛的应用。可以利用专家调查法、二项系数法、特征向量法等相互结

合的方法来确定目标属性权重所隶属的区间。本文利用区间数理论中的特征向量法来确定目标属性的权重,首先简单介绍区间数及其运算法则,然后给出区间数特征向量法的计算步骤。

## 2.1 区间数及其运算

令  $\tilde{a}=[a^L, a^U]=\{x|a^L \leq x \leq a^U, a^L, a^U \in R\}$  表示实数轴上的一个闭区间,则  $\tilde{a}$  为一个区间数。如果  $\tilde{a}=\{x|0 \leq a^L \leq x \leq a^U\}$  称  $\tilde{a}$  为正区间数。若  $a^L=a^U$ , 则  $\tilde{a}$  退化为一个实数。令  $\tilde{a}=[a^L, a^U]$ ,  $\tilde{b}=[b^L, b^U]$ ,  $k \geq 0$ , 区间数的运算法则如下<sup>[4]</sup>:

加法  $\tilde{a}+\tilde{b}=[a^L+b^L, a^U+b^U]$ 。

减法  $\tilde{a}-\tilde{b}=[a^L-b^U, a^U-b^L]$ 。

数乘  $k\tilde{a}=[ka^L, ka^U]$ 。

乘法  $\tilde{a} \cdot \tilde{b}=[\min\{a^Lb^L, a^L+b^U, a^U+b^L, a^U+b^U\}, \max\{a^Lb^L, a^L+b^U, a^U+b^L, a^U+b^U\}]$ 。

除法  $\frac{\tilde{a}}{\tilde{b}}=[a^L, a^U] \cdot [\frac{1}{b^U}, \frac{1}{b^L}]$ 。

## 2.2 区间数特征向量法

区间数特征向量法是特征向量法在区间数上的扩展。设  $\tilde{A}=(\tilde{a}_{ij})_{n \times n}$  为区间数矩阵,即  $\tilde{a}_{ij}=[a_{ij}^L, a_{ij}^U]$ 。记  $A^L=(a_{ij}^L)_{n \times n}$ ,  $A^U=(a_{ij}^U)_{n \times n}$ , 并记  $\tilde{A}=[A^L, A^U]$ 。同样对区间数向量  $\tilde{x}=(x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ , 即  $\tilde{x}_i=[x_i^L, x_i^U]$ , 记  $x^L=(x_1^L, x_2^L, \dots, x_n^L)^T$ ,  $x^U=(x_1^U, x_2^U, \dots, x_n^U)^T$ , 并记  $\tilde{x}=[x^L, x^U]$ 。对于给定的区间数判断矩阵  $\tilde{A}=[A^L, A^U]$ , 区间数特征向量法确定权重的计算步骤如下<sup>[4]</sup>:

利用特征向量法分别求  $A^L, A^U$  的最大特征值所对应的具有正分量的归一化特征向量  $x^L, x^U$ 。

由  $A^L=(a_{ij}^L)_{n \times n}$ ,  $A^U=(a_{ij}^U)_{n \times n}$  按式(3)计算  $\alpha$  和  $\beta$ 。

$$\alpha = \left[ \frac{\sum_{j=1}^n \frac{1}{\sum_{i=1}^n a_{ij}^U}} \right]^{1/2}, \beta = \left[ \frac{\sum_{j=1}^n \frac{1}{\sum_{i=1}^n a_{ij}^L}} \right]^{1/2} \quad (9)$$

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

## 3 基于区间数理论的威胁评估模型

首先给出了区间数的排序方法,进一步建立了基于区间数理论的空战目标威胁评估数学模型。

### 3.1 区间数的排序

当  $\tilde{a}$  和  $\tilde{b}$  同时为区间数或者有一个为区间数时, 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<sup>[5]</sup>

$$p(\tilde{a} \geq \tilde{b}) = \frac{\min\{l_a+l_b, \max(a^U-b^L, 0)\}}{l_a+l_b} \quad (10)$$

为  $\tilde{a} \geq \tilde{b}$  的可能度, 且记  $\tilde{a}, \tilde{b}$  的次序关系为  $\tilde{a} \geq_p \tilde{b}$ 。设有  $N$  个区间数  $\tilde{a}_i=[a_i^L, a_i^U]$ ,  $i \in N$ , 则利用式(10)可以求得  $p(\tilde{a}_i \geq \tilde{a}_j)$ ,  $i, j \in N$ , 记为  $p_{ij}$ 。则

$$v_i = \frac{1}{n(n-1)} \left( \sum_{j=1}^n p_{ij} + \frac{n-1}{2} \right), i \in N \quad (11)$$

的大小就表示区间数  $\tilde{a}_i$  的大小。

### 3.2 基于区间数理论的空战目标威胁评估模型

Step 1 利用式(1)~式(7)分别计算每个目标的角度威胁因子  $T_a$ 、距离威胁因子  $T_r$ 、速度威胁因子  $T_v$  和空战能力威胁因子  $T_G$ ;

Step 2 利用区间数特征向量法计算 4 个威胁因子的区间数权重  $\tilde{\omega}_j$ ;

Step 3 按照线性加权法计算每个目标的区间数威胁值:  $\tilde{T}_i = \tilde{\omega}_1 T_{G_i} + \tilde{\omega}_2 T_{a_i} + \tilde{\omega}_3 T_{r_i} + \tilde{\omega}_4 T_{v_i}$ ;

Step 4 利用式(10)计算可能度  $p(\tilde{T}_i \geq \tilde{T}_j)$ , 求出  $p=(p_{ij})_{n \times n}$ ;

Step 5 利用式(11)计算  $v_i$ , 按照  $v_i$  的大小对目标进行威胁排序。

## 4 仿真分析

仿真中,考虑我机为 1 架具有多目标攻击能力的歼击机,在空战中遭遇敌方 8 架 3 种机型(幻影 2000-5, F-15E, F-16C)的敌机,且都在我机火控雷达的跟踪范围内。我机速度  $v_i=318$  m/s, 导弹最大射程  $r_m=60$  km, 雷达最大跟踪距离  $r_{tm}=120$  km。敌方 3 种机型的空战能力指数分别为 17.9、19.8 和 16.8, 导弹最大射程分别为 55 km、70 km 和 50 km, 雷达最大跟踪距离分别为 130 km、200 km 和 100 km。首先通过广泛征求专家意见建立如表 1 所示的 4 个威胁指标的区间数判断矩阵。

表 1 区间数判断矩阵

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]

根据表 1 中的数据,按照区间数特征向量法的计算步骤可得  $\alpha=0.927$ ,  $\beta=1.0707$ ,  $x^L=(0.5174, 0.1484, 0.2269, 0.1073)^T$ ,  $x^U=(0.4919, 0.1608, 0.2337, 0.1136)^T$ , 最后得到权重  $\tilde{\omega}=[\alpha x^L, \beta x^U]=([0.4796, 0.5267], [0.1375, 0.1721], [0.2103, 0.2502], [0.0995, 0.1216])^T$ 。

假设我机与敌机的空战态势即决策矩阵如下页表 2 所示,利用式(1)~式(7)可将决策矩阵转化

为如表 3 所示的各目标威胁因子。

表 2 空战态势表

目标	目标机型	$q_n/(^\circ)$	$q_B/(^\circ)$	$r_{ij}/\text{km}$	$v_j/(\text{m/s})$
1	幻影 2000-5	60	50	68	316
2	幻影 2000-5	65	-45	58	314
3	幻影 2000-5	80	50	52	312
4	F-15E	-50	60	105	285
5	F-15E	-45	60	55	308
6	F-16C	-40	95	45	326
7	F-16C	40	-75	51	330
8	F-16C	70	50	49	324

根据 Step 3 可以得到  $T = \{[0.603 \ 0 \ 0.683],$

表 3 目标威胁因子

目标	$T_c$	$T_a$	$T_r$	$T_v$
1	0.904	0.306	0.373	0.494
2	0.904	0.333	0.440	0.487
3	0.904	0.361	0.511	0.481
4	1.000	0.306	0.580	0.396
5	1.000	0.292	0.525	0.469
6	0.848	0.375	0.520	0.525
7	0.848	0.319	0.470	0.538
8	0.848	0.333	0.504	0.519

$[0.621 \ 0 \ 0.703 \ 0] [0.639 \ 0 \ 0.725 \ 0] [0.684 \ 0 \ 0.774 \ 0],$   
 $[0.677 \ 0 \ 0.766 \ 0] [0.621 \ 0 \ 0.707 \ 0] [0.604 \ 0 \ 0.686 \ 0],$   
 $[0.611 \ 0 \ 0.694 \ 0] \}$ 。利用式(10)可以得到

$$P = \begin{bmatrix} 0.500 \ 0 & 0.382 \ 7 & 0.265 \ 1 & 0.000 \ 0 & 0.035 \ 5 & 0.373 \ 5 & 0.487 \ 7 & 0.441 \ 7 \\ 0.617 \ 3 & 0.500 \ 0 & 0.381 \ 0 & 0.110 \ 5 & 0.152 \ 0 & 0.488 \ 1 & 0.603 \ 7 & 0.557 \ 6 \\ 0.734 \ 9 & 0.619 \ 0 & 0.500 \ 0 & 0.233 \ 0 & 0.274 \ 3 & 0.604 \ 7 & 0.720 \ 2 & 0.674 \ 6 \\ 1.000 \ 0 & 0.889 \ 5 & 0.767 \ 0 & 0.500 \ 0 & 0.541 \ 9 & 0.869 \ 3 & 0.988 \ 4 & 0.942 \ 2 \\ 0.964 \ 5 & 0.848 \ 0 & 0.725 \ 7 & 0.458 \ 1 & 0.500 \ 0 & 0.828 \ 6 & 0.947 \ 4 & 0.901 \ 2 \\ 0.626 \ 5 & 0.511 \ 9 & 0.395 \ 3 & 0.130 \ 7 & 0.171 \ 4 & 0.500 \ 0 & 0.613 \ 1 & 0.568 \ 0 \\ 0.512 \ 3 & 0.396 \ 3 & 0.279 \ 8 & 0.011 \ 6 & 0.052 \ 6 & 0.386 \ 9 & 0.500 \ 0 & 0.454 \ 5 \\ 0.558 \ 3 & 0.442 \ 4 & 0.325 \ 4 & 0.057 \ 8 & 0.098 \ 8 & 0.432 \ 0 & 0.545 \ 5 & 0.500 \ 0 \end{bmatrix}$$

进一步可以得到  $v = \{0.098 \ 0 \ 0.114 \ 5 \ 0.131 \ 4,$   
 $0.169 \ 6 \ 0.163 \ 8 \ 0.116 \ 4 \ 0.099 \ 9 \ 0.106 \ 4\}$ , 由  $v_i$  的大  
 小可以得出各目标的威胁排序(由大到小)结果为:  
 4、5、3、6、2、8、7、1, 这个评估结果与文献[6]中的结  
 论完全一致, 从而说明了本文提出的基于区间数理  
 论的空战目标威胁评估方法是合理和有效的<sup>[7]</sup>。

## 5 结 论

空战目标威胁评估是空战战术决策和武器资源分配的基础, 对空战结局起着举足轻重的作用。传统的空战目标威胁评估方法在确定威胁评估指标权重时往往是以恒值向量的形式给出, 忽略了权重值的不确定性, 难以适应瞬息万变的战场态势。基于此, 本文提出了一种基于区间数理论的空战目标威胁评估方法, 将区间数形式的权重与区间数的排序相结合, 并应用到空战目标威胁评估问题中。该方法简单、实用, 得到的威胁评估结果科学合理, 更加具有说服力。

参考文献:

- [1] 董彦非, 郭基联, 张恒喜. 多机空战目标威胁评估算法[J]. 火力与指挥控制 2002 27(4):73-76.
- [2] 谢希权, 李伟仁. 单机多目标攻击逻辑的对策型决策[J]. 系统工程与电子技术 2000 22(7) 28-31.
- [3] 朱宝鑫, 朱荣昌, 熊笑非. 作战飞机效能评估[M]. 北京: 航空工业出版社 2006.
- [4] 徐玖平, 吴 巍. 多数性决策的理论与方法[M]. 北京: 清华大学出版社 2006.
- [5] 徐泽水. 不确定多属性决策方法及应用[M]. 北京: 清华大学出版社 2004.
- [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] 王 毅, 赵建军, 付龙文, 等. 基于区间数熵的 TOPSIS 防空作战威胁评估方法[J]. 四川兵工学报 2011 42(12): 114-117.
- [8] 涂 帅, 张晓喻, 欧阳中辉. 改进的空战目标威胁评估与目标分配模型[J]. 四川兵工学报 2011 42(9) 47-50.