

基于 IAHP 和离差最大化 TOPSIS 法目标威胁评估

谷向东¹, 童中翔¹, 柴世杰¹, 袁新威², 芦艳龙¹

(1. 空军工程大学工程学院, 陕西 西安 710038; 2. 空军第五飞行学院, 甘肃 武威 733003)

摘要 针对空战目标威胁评估问题, 综合考虑了主观和客观因素, 将运用区间层次分析法 (Interval-based AHP, IAHP) 求解出的威胁评估指标主观权重与运用离差最大化法求解出的威胁评估指标客观权重相融合得到组合权重。建立了改进的 TOPSIS 法评估空战目标威胁的数学模型, 首先构造加权规范化决策矩阵, 其次确定区间型正理想解和负理想解, 然后计算每个目标分别到正理想解和负理想解的距离, 最后计算每个目标对理想解的贴近度。给出评估实例, 在 3 种不同权重影响因子组合的情况下, 最终求解得到相同的目标威胁评估排序, 评估结果表明: 该方法合理有效, 并针对原方法有了较大改进。

关键词 威胁评估; IAHP; 离差; TOPSIS

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2011.02.006

中图分类号 V271.4 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2011)02-0027-05

空战目标威胁评估是协同多目标攻击空战决策的前提。常用的方法有优势函数法、威胁因子法、威胁指数法和多属性决策等, 都是主要采用主观赋权法或客观赋权法来确定各威胁指标的权重, 然后利用线性加权或 TOPSIS 等方法进行目标的威胁评估。TOPSIS 法是一种求解多属性决策问题非常有效的常用方法, 但传统的 TOPSIS 法通常是人为给定或是采用主观赋权法确定目标属性的权重, 有很大的主观性和盲目性。文献 [1] 分别利用客观赋权法和主客观相结合的赋权法对 TOPSIS 法进行了改进和应用, 但是所得到的威胁指标权重为确定值。区间层次分析法是在层次分析法的基础上形成的, 得到的区间数形式的权重在一定程度上克服了权重确定的盲目性^[2]; 离差最大化方法是多属性决策中常用的客观赋权法。为了兼顾到对威胁指标的偏好, 同时又力争减少主观随意性, 使对威胁指标权重的确定达到主观和客观的统一, 本文拟利用区间层次分析法和离差最大化方法相结合的组合赋权法来确定威胁指标的权重, 并将计算所得的组合权重应用到 TOPSIS 法中。

1 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所处状态等。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, 分别用角度威胁、距离威胁和速度威胁因子来表示。双方的空战态势见图 1。 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_{vj} 如下^[3]:

* 收稿日期: 2010-06-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60772162)

作者简介: 谷向东 (1970-), 男, 河北怀来人, 博士生, 主要从事空战仿真研究. E-mail: lyl.kgy@163.com

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

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

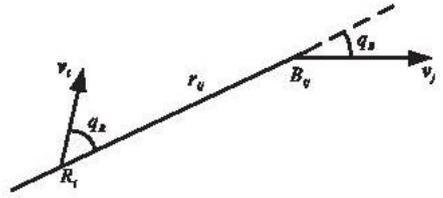


图1 空战态势示意图

Fig. 1 Aerial warfare state sketch map

目前大多数研究都采用文献[4]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双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。针对此问题,考虑双方飞机性能对比,分2种情况来计算距离威胁因子 T_{rij} 。设 r_{mi} 、 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} 、 r_{rj} 分别为我机 i 与目标机 j 的雷达最大探测距离,分别为:

① $r_{rj} > r_{ri}, r_{mj} > r_{mi}$:

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

② $r_{ri} > r_{rj}, r_{mj} > r_{mi}$:

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

③ $r_{rj} > r_{ri}, r_{mi} > r_{mj}$:

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

④ $r_{ri} > r_{rj}, r_{mi} > r_{mj}$:

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

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^[5]:

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

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; ε_1 为操纵效能系数; ε_2 为生存力系数; ε_3 为航程系数; ε_4 为电子对抗能力系数。

2 威胁评估指标权重的确定

下面首先给出IAHP确定指标主观权重的方法,然后给出离差最大化法确定指标客观权重的方法,最后将主客观权重相结合。

2.1 运用IAHP确定评估指标的主观权重

IAHP是AHP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 $A^L = (a_{ij}^L)_{n \times n}$, $A^U = (a_{ij}^U)_{n \times n}$ 。

$= (a_{ij}^U)_{n \times n}$, 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 $\tilde{A} = [A^L, A^U]$, IAHP 确定指标权重的计算步骤如下:

步骤1 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 。

步骤2 由 $A^L = (a_{ij}^L)_{n \times n}, A^U = (a_{ij}^U)_{n \times n}$, 计算 α 和 β 。

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

步骤3 主观权重向量 $\tilde{\omega}_1 = [\alpha x^L, \beta x^U]$ 。

2.2 运用离差最大化法确定评估指标的客观权重

对于空战目标威胁评估问题, 假设各威胁指标的权重信息完全未知, 已知其决策矩阵为 $A = (a_{ij})_{n \times m}$ 。其中 n 为目标(方案)个数, m 为威胁指标(属性)个数, a_{ij} 为第 i 个目标在第 j 个威胁指标下的属性值。用式(1) - (7) 将决策矩阵 A 经过规范化处理后, 得到规范化矩阵 $R = (r_{ij})_{n \times m}$ 。假设各威胁因素的权重向量为 $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m)$, $\omega_j \geq 0, j \in M$, 并满足单位化约束条件, $\sum_{j=1}^m \omega_j^2 = 1$, 则各目标的威胁度 $z_i(\omega)$ 可定义, 见文献[5], 用 $V_{ij}(\omega)$ 表示目标 x_i 与其它所有目标之间的离差定义, 计算方式见文献[6]。于是, 求解权重向量 ω 等价于求解如下最优化模型(10), 解此最优化模型(11), 通过作拉格朗日函数并求解其偏导数, 可以得到威胁评估指标的客观权重向量 $\omega_2 = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m)$ 。

$$\begin{cases} \max V(\omega) = \sum_{j=1}^m V_{ij}(\omega) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n |r_{ij} - r_{kj}| \omega_j \\ \text{s. t.} \quad \omega_j \geq 0, j \in M, \sum_{j=1}^m \omega_j^2 = 1 \end{cases} \quad (10)$$

$$\omega_j = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n |r_{ij} - r_{kj}|}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n |r_{ij} - r_{kj}|}, \quad j \in M \quad (11)$$

2.3 主客观威胁评估指标权重的结合

将运用 IAHP 和离差最大化法求得的威胁评估指标的主客观权重通过公式(12) 进行融合计算, 将得到的组合权重 $\tilde{\omega} = (\tilde{\omega}_1, \tilde{\omega}_2, \dots, \tilde{\omega}_m)$ 作为威胁评估指标的权重。这个组合权重不仅考虑了专家的经验, 同时也考虑了客观因素, 能够比较全面的反映威胁评估指标的相对重要程度。

$$\tilde{\omega} = \eta \tilde{\omega}_1 + \mu \omega_2 \quad (12)$$

式中: η 为客观权重的影响因子; μ 为主观权重的影响因子, 且 $\eta + \mu = 1$ 。根据机载传感器数据信息的完整性和可信度, 对专家的信任程度, 并结合具体空战实例来确定最终主客观权重的影响因子。

3 运用改进的 TOPSIS 法求解目标威胁度

在得到威胁评估指标的组合权重 $\tilde{\omega}$ 的基础上, 依据传统 TOPSIS 方法的基本思想, 直接给出基于区间数的改进的 TOPSIS 法求解空战目标威胁度的计算步骤, 详见文献[7], 此处不再赘述。

4 威胁评估实例

假设我机为 1 架具有多目标攻击能力的歼击机, 遭遇 3 种机型(F-15E, 幻影 2000-5, F-16C)共 6 架敌机, 且都在我机火控雷达的跟踪范围内。我机速度 $v_i = 310$ m/s, 导弹最大射程 $r_m = 65$ km, 雷达最大探测距离 $r_r = 140$ km。敌方 3 种机型的空战能力指数分别为 19.8、17.9、16.8, 导弹最大射程分别为 70、60 和 50 km, 雷达最大跟踪距离分别为 160、130 和 120 km。

首先通过广泛征求专家意见建立见表 1 的 4 个威胁指标的区间数判断矩阵^[7]。根据表 1 中的数据, 按

照区间数特征向量法的计算步骤可以得到 $\alpha = 0.918\ 8$, $\beta = 1.081\ 7$, $\mathbf{x}^L = (0.534\ 9, 0.112\ 0, 0.198\ 8, 0.154\ 3)^T$, $\mathbf{x}^U = (0.479\ 4, 0.132\ 4, 0.230\ 2, 0.158\ 1)^T$, 主观权重向量 $\tilde{\omega}_1 = [\alpha \mathbf{x}^L, \beta \mathbf{x}^U] = ([0.491\ 5, 0.518\ 5], [0.102\ 9, 0.143\ 2], [0.182\ 6, 0.249\ 0], [0.141\ 8, 0.117\ 10])^T$ 。

表1 区间数判断矩阵

Tab. 1 Interzone data judgement matrix

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

假设我机与敌机的空战态势即决策矩阵见表2,利用式(1) - (7)可将决策矩阵转化为表3所示的规范化决策矩阵。求得4个威胁评估指标输出的信息熵分别为: $E_1 = 0.998\ 7$, $E_2 = 0.993\ 7$, $E_3 = 0.985\ 1$, $E_4 = 0.999\ 6$ 。在此基础上,利用式(12)可以求出4个威胁评估指标的客观权重 $\omega_2 = (0.277\ 8, 0.222\ 1, 0.411\ 0, 0.089\ 1)$ 。

表2 空战态势表

Tab. 2 Aerial warfare state

目标	目标机型	$q_R/(^\circ)$	$q_B/(^\circ)$	r_{ij}/km	$v_j/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
1	F-15E	70	50	45	320
2	F-15E	60	35	130	314
3	幻影 2000-5	-50	60	55	324
4	幻影 2000-5	-40	-75	52	316
5	F-16C	65	90	62	330
6	F-16C	80	-45	48	328

表3 规范化决策矩阵 R

Tab. 3 Canonical decision-making matrix R

目标	T_C	T_a	T_r	T_v
1	1.000	0.333	0.592	0.532
2	1.000	0.264	0.486	0.513
3	0.904	0.306	0.517	0.545
4	0.904	0.319	0.527	0.519
5	0.848	0.431	0.260	0.565
6	0.848	0.347	0.501	0.558

根据不同的主客观权重影响因子,分别采用新、旧方法求解的威胁评估排序见表4。可以看出,3种不同权重影响因子组合求解得到的新目标威胁评估排序均为 $X = (1, 2, 4, 3, 6, 5)$, 而采用常规 TOPSIS 评估方法得出的威胁排序受影响因子影响明显,随意性太大。同时应用改进 TOPSIS 法进行威胁评估时应注意:多数情况下常常采用第2种组合的形式进行求解;在客观信息比较容易获得、数据比较准确或自身数据库信息比较完备的情况之下,常采用第3种组合的形式;反之,采用第一种组合的形式。

表4 不同组合权重下的目标威胁评估排序

Tab. 4 Target threat assessment order in different combination weight

影响因子	主观组合权重	正理想解	负理想解	贴近度	新威胁排序	旧威胁排序
$\eta = 0.75$ $\mu = 0.25$	$\tilde{\omega} =$ ([0.44, 0.46], [0.13, 0.16], [0.24, 0.29], [0.13, 0.15]) ^T	$y^+ =$ ([0.44, 0.46], [0.06, 0.07], [0.14, 0.17], [0.07, 0.09])	$y^- =$ ([0.37, 0.39], [0.03, 0.04], [0.06, 0.08], [0.07, 0.08])	$c =$ (0.90, 0.68, 0.55, 0.56, 0.17, 0.44)	$X = (1, 2, 4,$ 3, 6, 5)	$X = (5, 2, 3,$ 1, 6, 4)
$\eta = 0.5$ $\mu = 0.5$	$\tilde{\omega} =$ ([0.38, 0.40], [0.16, 0.18], [0.30, 0.33], [0.12, 0.13]) ^T	$y^+ =$ ([0.38, 0.40], [0.07, 0.08], [0.18, 0.20], [0.06, 0.07])	$y^- =$ ([0.33, 0.34], [0.04, 0.05], [0.08, 0.09], [0.06, 0.07])	$c =$ (0.90, 0.66, 0.57, 0.58, 0.18, 0.48)	$X = (1, 2, 4,$ 3, 6, 5)	$X = (1, 2, 3,$ 5, 6, 4)
$\eta = 0.25$ $\mu = 0.75$	$\tilde{\omega} =$ ([0.33, 0.34], [0.19, 0.20], [0.35, 0.37], [0.10, 0.11]) ^T	$y^+ =$ ([0.33, 0.34], [0.08, 0.09], [0.21, 0.22], [0.05, 0.06])	$y^- =$ ([0.28, 0.29], [0.05, 0.05], [0.09, 0.10], [0.05, 0.06])	$c =$ (0.90, 0.63, 0.59, 0.61, 0.18, 0.52)	$X = (1, 2, 4,$ 3, 6, 5)	$X = (4, 2, 1,$ 3, 6, 5)

5 结束语

本文分别应用 IAHP 和离差最大化法确定指标的主、客观权重并将二者进行组合的指标权重确定方法,进一步将得到的区间数形式的组合权重与 TOPSIS 法相结合,并应用到空战目标威胁评估问题中。该方法简单、实用,得到的空战目标威胁评估结果科学合理,更加具有说服力。下一步将对主客观权重影响因子求解确定问题作深化研究。

参考文献:

- [1] 张堃,周德云. 熵权与群组 AHP 相结合的 TOPSIS 法多目标威胁评估[J]. 系统仿真学报,2008,20(7):1661-1664.
ZHANG Kun, ZHOU Deyun. Application of TOPSIS based on entropy and GD-AHP in evaluating sequence of air target threat [J]. Journal of system simulation, 2008, 20(7):1661-1664. (in Chinese)
- [2] Sajjad Zahir. Incorporating the uncertainties of decision judgments in the analytic hierarchy process[J]. European journal of operational research, 1991,53: 206-216.
- [3] 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.
DONG Yanfei, GUO Jilian, ZHANG Hengxi. Threat assessment for multi-aircraft-air combat[J]. Fire control & command control, 2002,27(4):73-76. (in Chinese)
- [4] 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.
XIE Xiquan, LI Weiren. Game form decision for air combat logic of multi-target attack system[J]. Systems engineering and electronics, 2000,22(7): 28-31. (in Chinese)
- [5] 严盛文,郭基联,张蕾. 基于效能指数的军用飞机经济性建模[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2009,10(1):28-32.
YAN Shengwen, GUO Jilian, ZHANG Lei. Research on affordability modeling of aircrafts based on effectiveness indexes[J]. Journal of air force engineering university:natural science edition,2009,10(1):28-32. (in Chinese)
- [6] 陈华友. 多属性决策中基于离差最大化的组合赋权方法[J]. 系统工程与电子技术,2004,26(2):194-197.
CHEN Huayou. Combination determining weights method for multiple attribute decision making based on maximizing deviations [J]. Systems engineering and electronics,2004,26(2):194-197. (in Chinese)
- [7] 郭辉,徐浩军,周莉. 基于区间数 TOPSIS 法的空袭目标威胁评估[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2010,11(1):40-45.
GUO Hui, XU Haojun, ZHOU Li. Evaluation of air attack threat against target based on interval numbers TOPSIS[J]. Journal of air force engineering university:natural science edition,2011,12(1):40-45. (in Chinese)
- [8] Gordon, Philip H. Global Danger Global Power[J]. Air force magazine, 2002,22(11): 15-20.

(编辑:徐敏)

Target Threat Assessment Based on TOPSIS Combined by IAHP and the Maximal Deviation

GU Xiang-dong¹, TONG Zhong-xiang¹, CHAI Shi-jie¹, YUAN Xin-wei², LU Yan-long¹

(1. Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. The Fifth Flight College of Air Force, Wuwei 733003, Gansu, China)

Abstract: With regard to the problem of target threat assessment for air combat. In the improved TOPSIS the subjective and objective factors are synthetically taken into account, so the combination weight is gained by combining the subjective weight of threat assessment index gained by IAHP with the objective weight of threat assessment index gained by the maximal deviation. The mathematical model of evaluating target threat for air combat by improved TOPSIS is established. Firstly, a Canonical decision-making matrix is established; secondly inter-zone positive and negative ideal solutions are fixed; thirdly the distances are calculated between every target and positive (negative) ideal solutions. Finally, the correlation between each target and the ideal solution is calculated. An application example is given and the results show that target threat assessment indexes are the same under three different combinations of weight factors and the method is reasonable and effective.

Key words: threat assessment; IAHP; deviation; TOPSIS