

基于区间 AHP 法与粗糙集的飞机空战效能评估

龚胜科, 徐浩军, 周莉, 林敏

(空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要:考虑到视距内空战和超视距空战 2 大现代空战模式的特点,构建了飞机空战效能评估指标体系。针对以往效能评估模型中单一权重系数确定方法的不足,应用区间 AHP 法确定主观权重系数,用粗糙集确定客观权重系数,然后将主观和客观权重进行有机集成,得到基于区间数的最优组合权重,充分吸收了主观赋权评估法和客观赋权评估法的优点,同时又克服了 2 类方法各自的缺陷,实现了二者的优势互补,使评估结果更为合理、科学。最后,建立了空战效能的综合评估模型,通过实例计算验证了该模型的可行性和有效性。

关键词:空战效能评估;指标体系;区间 AHP 法;粗糙集;最优组合权重

DOI:10.3969/j.issn.1009-3516.2010.05.004

中图分类号: V271.4;E926 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2010)05-0016-05

飞机的空—空作战效能是评估敌我双方空战实力的主要指标,也是打赢战争的重要因素之一^[1]。从总体上看,效能评估中权重确定方法可分为主观赋权评估法和客观赋权评估法。前者多采取定性的方法,由专家根据经验进行主观判断而得到权数;后者的原始数据来源于实际,根据指标之间的相关关系或各项指标的变异系数来确定权数。它们都有自身无法解决的缺陷,主观赋权法以人的主观判断作为赋权基础,主观随意性较大;客观赋权法所得各指标的权重随样本的变化而变化,权重依赖于样本^[2-3]。面对单一权重确定方法的不足,本文应用区间 AHP 法^[4]与粗糙集^[5-7]相结合的方法确定权重系数,可以在吸收主客观 2 类赋权法优点的同时,克服各自的缺陷,实现二者的优势互补,得到更为合理、科学的评估结果。

1 空战效能评估指标体系

空战效能是对战斗机各项能力和性能的综合描述,表现为多层次、多参数、多因素的特点。战斗机空战效能包括超视距与视距内 2 种空战模式下的作战能力,而战斗机各种性能参数对不同模式下的空战影响各不相同^[8]。文献[1]中建立了对数法的空战指标体系,文献[9]中对空战各指标进行了分析,选取了影响空战的 9 个主要因素来衡量飞机的空—空作战能力,该空战效能指标体系基本能够覆盖空战效能的指标空间,见图 1。指标的具体说明见文献[9]。

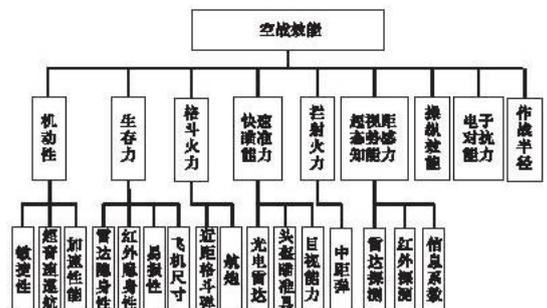


图 1 空战效能指标体系

Fig. 1 Index system of aerial warfare efficiency

* 收稿日期:2010-4-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(70671106)

作者简介:龚胜科(1983-),男,四川邛崃人,硕士生,主要从事飞行安全及作战效能研究;E-mail:gskhss@163.com.
徐浩军(1965-),男,浙江余姚人,教授,博士生导师,主要从事飞行安全及作战效能研究。

2 确定权重系数

2.1 基于区间 AHP 法的主观赋权

2.1.1 区间数基本原理

令 $\tilde{a} = [a^L, a^U] = \{a^L \leq x \leq a^U, a^L, a^U \in \mathbf{R}\}$ 表示实数轴上的一个闭区间,则称 \tilde{a} 为一个区间数。如果 $\tilde{a} = \{x \mid 0 \leq a^L \leq x \leq a^U\}$, 则称 \tilde{a} 为正区间数。如果 $a^L = a^U$, 则 \tilde{a} 退化为一个实数。以区间数为元素的向量或矩阵称为区间数向量或区间数矩阵。

2.1.2 权重确定方法

对建立起的层次分析模型,依据各评价因素的具体指标值以及专家主观评价进行综合分析,经各指标之间两两比较判断,根据表 1 中的比较尺度将这种判断定量化,从而形成区间数判断矩阵 $\mathbf{B} = [\mathbf{B}^L, \mathbf{B}^U]$ 。

表 1 判断矩阵比较尺度表

Tab. 1 A standard dimension of judgment matrix

甲乙指标对比	同等重要	稍微重要	明显重要	强烈重要	极端重要	介于相邻的两者之间	影响之比为上面的互反数
甲指标评价尺度	1	3	5	7	9	2,4,6,8	1,1/2, ..., 1/9

对于给定的区间数判断矩阵 $\mathbf{B} = [\mathbf{B}^L, \mathbf{B}^U]$, 区间 AHP 法确定权重向量采用区间数特征向量法 (Interval-number Eigenvector Method, IEM) 计算,具体计算步骤如下^[4]:

1) 利用层次分析法中的特征向量法,分别求出 $\mathbf{B}^L, \mathbf{B}^U$ 的最大特征值 λ^L, λ^U 所对应的具有正分量的归一化特征向量 $\mathbf{x}^L, \mathbf{x}^U$, 则 $\mathbf{x} = [\alpha \mathbf{x}^L, \beta \mathbf{x}^U]$ 是 \mathbf{B} 对应于 λ 的全体特征向量,其中 $\lambda = [\lambda^L, \lambda^U]$, α, β 为满足 $0 < \alpha \mathbf{x}^L \leq \beta \mathbf{x}^U$ 的全体正实数。

2) 由 $\mathbf{B}^L = (b_{ij}^L)_{n \times n}, \mathbf{B}^U = (b_{ij}^U)_{n \times n}$ 按式(1)计算 α 和 β 。

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

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

2.2 基于粗糙集的客观赋权

2.2.1 粗糙集基本理论

一个信息表达系统可定义为如下四元组: $S = (U, A, V, f)$ 。其中 S 为信息表达系统; U 为对象的非空有限集合, $U = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 称论域; A 为属性的非空有限集合, $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$, A 中的每个 $a_j (j \leq m)$ 称为一个属性; $V = \bigcup_{a \in A} V_a, V_a$ 为属性 a 的值域; $f: U \times A \rightarrow V$ 为一信息函数,表示对每一个 $a \in A, x \in U, f(x, a) \in V_a$ 。属性 $A = C \cup D$, 其中 C 为条件属性集, D 为决策属性集,信息系统也称决策系统。

可辨识矩阵 (discernibility matrix) 由波兰华沙大学数学家 Skowron 首先提出^[7,10], 记为:

$$m_{ij} = \begin{cases} a \in C, a(x_i) \neq a(x_j), d(x_i) \neq d(x_j) \\ \Phi, & d(x_i) = d(x_j) \\ -1, \forall a, \exists a(x_i) = a(x_j), d(x_i) \neq d(x_j) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $a(x)$ 是对象 x 在属性 a 上的值; $d(x)$ 是记录 x 在 D 上的值。

2.2.2 权重确定方法

对于一个可辨识矩阵 $\mathbf{M} = (m_{ij})_{n \times n}$, 认为^[11]: ① 属性在可辨识矩阵中出现的次数越多,其重要性越大; ② 在可辨识矩阵中属性项越短,属性的重要性越大。因此,属性 a 的重要性计算公式为:

$$f(a) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\lambda_{ij}}{|m_{ij}|}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{1}{|m_{ij}|}} \quad (3)$$

式中: $\lambda_{ij} = \begin{cases} 0, & a \notin m_{ij} \\ 1, & a \in m_{ij} \end{cases}$; $|m_{ij}|$ 表示 m_{ij} 包含属性的个数,归一化 $f(a)$ 后即得权重向量 ω'' 。

2.3 主客观组合赋权

基于主、客观这2种方法各有其长处和短处,近年来,研究者提出了将主、客观赋权法所得到的各指标权重通过集成的方法来形成指标最终权重的思想,使之既能客观地反映各指标的重要性,又反映决策者的主观愿望。这里采用一种基于离差平方和的最优组合赋权方法^[2-3],具体计算方法如下:

为了在一定程度上避免主观赋权法和客观赋权法各自带来的权值上的偏差,下面将由主观赋权法得到的权值向量 ω' 和客观赋权法计算得到的权值向量 ω'' 进行组合,以求得最终合适的权值向量 ω 。假设 ω 为最优权值向量,则 ω' 和 ω'' 应与 ω 的偏差达到最小。根据此原理,可建立如下的最优化模型:

$$\min \theta \sum_{j=1}^n (\omega'_j - \omega_j)^2 + (1 - \theta) \sum_{j=1}^n (\omega''_j - \omega_j)^2$$

$$\text{s. t} \begin{cases} \omega_j \geq 0 \\ \sum_{j=1}^n \omega_j = 1 \end{cases} \quad (4)$$

式中: θ 为对主观赋权结果的信任度; $1 - \theta$ 为对客观赋权结果的信任度; ω_j 为第 j 项指标属性的权重。最优化模型(4)存在最优解 $\omega = [\omega^L, \omega^U]$,为一区间数向量,其中 $\omega^L = (\omega_1^L, \omega_2^L, \dots, \omega_n^L)$, $\omega^U = (\omega_1^U, \omega_2^U, \dots, \omega_n^U)$,即为最终组合赋权的区间数权值向量。

3 评估实例

为了验证模型的有效性,这里选3种机型进行评估,各机型均采用常规挂载方案^[1],各分项指标的计算方法参考文献[1]、[9],为消除数值大小对评估结果的影响,计算结果进行了标准化处理,结果见表2。

表2 战斗机空战效能指标数据

Tab.2 Index data of aerial warfare efficiency evaluation for fighter - plane

机型	机动性	生存力	格斗火力	快速瞄准能力	拦射火力	超视距态势感知能力	作战半径	操纵效能	电子对抗能力
F-16C	0.978	0.827	0.852	0.953	0.620	0.714	0.878	0.851	0.846
Mig-29	0.853	0.687	0.912	0.931	0.572	0.832	0.621	0.958	0.987
F-15C	0.775	0.963	0.742	0.887	0.934	0.958	0.912	0.856	0.963

1) 对9项评估指标按照表1的比较尺度进行两两比较判断,得到区间数判断矩阵为式(5),根据区间AHP法权重计算步骤可求得主观权重向量 $\omega' = [\omega'^L, \omega'^U]$,见表4。

$$B = \begin{bmatrix} [1,1] & [7,8] & [8,9] & [4,5] & [2,3] & [1,2] & [5,6] & [3,4] & [6,7] \\ [1/8,1/7] & [1,1] & [1,2] & [1/4,1/3] & [1/6,1/5] & [1/7,1/6] & [1/3,1/2] & [1/5,1/4] & [1/2,1] \\ [1/9,1/8] & [1/2,1] & [1,1] & [1/5,1/4] & [1/7,1/6] & [1/8,1/7] & [1/4,1/3] & [1/6,1/5] & [1/3,1/2] \\ [1/5,1/4] & [3,4] & [4,5] & [1,1] & [1/3,1/2] & [1/4,1/3] & [1,2] & [1/2,1] & [2,3] \\ [1/3,1/2] & [5,6] & [6,7] & [2,3] & [1,1] & [1/2,1] & [3,4] & [1,2] & [4,5] \\ [1/2,1] & [6,7] & [7,8] & [3,4] & [1,2] & [1,1] & [4,5] & [2,3] & [5,6] \\ [1/6,1/5] & [2,3] & [3,4] & [1/2,1] & [1/4,1/3] & [1/5,1/4] & [1,1] & [1/3,1/2] & [1,2] \\ [1/4,1/3] & [4,5] & [5,6] & [1,2] & [1/2,1] & [1/3,1/2] & [2,3] & [1,1] & [3,4] \\ [1/7,1/6] & [1,2] & [2,3] & [1/3,1/2] & [1/5,1/4] & [1/6,1/5] & [1/2,1] & [1/4,1/3] & [1,1] \end{bmatrix} \quad (5)$$

2) 按照粗糙集的方法,将9项评估指标视为属性,每种机型在9项指标上的取值视为对象 u_i 的一条信息, $u_i = \{c_{1i}, c_{2i}, \dots, c_{9i}\}$,对象 u_i 属性值 $c_i(u_i) = c_{ii}$,论域 U 为选取的7型战斗机,各机型均采用常规挂载方案^[1],各分项性能计算方法参考文献[1,9],并对计算结果进行标准化处理,从而形成一个实值二维信息表。采用等距算法^[7]对实值信息表中连续属性值进行离散化,将每个分项性能的取值分为好,中,差3个等级,分别表示为3,2,1,这样就建立了一个离散化二维信息表 $S = (U, A, V, f)$,见表3。

表 3 战斗机空战效能评估信息表

Tab.3 Information table of aerial warfare efficiency evaluation for fighter - plane

U	C								
	c ₉	c ₁	c ₂	c ₃	c ₄	c ₅	c ₆	c ₇	c ₈
u ₁	1	1	2	1	1	1	1	3	1
u ₂	1	1	3	2	2	2	2	1	1
u ₃	2	3	3	2	2	3	1	2	3
u ₄	2	3	3	2	3	3	3	3	3
u ₅	3	1	3	3	2	2	1	3	1
u ₆	3	3	3	3	3	3	3	3	3
u ₇	2	1	1	1	1	1	1	2	2

利用可辨识矩阵权重确定方法,根据式(3)即可求得各指标属性的客观权重向量 ω'' 见表 4。

3) 根据最优化模型(4),这里取 $\theta = 0.5$,可以得到最终的最优组合权值向量 $\omega = [\omega^L, \omega^U]$ 见表 4。

表 4 各指标数据权重系数

Tab.4 Weights of each index

指标权重	机动性	生存力	格斗火力	快速瞄准能力	拦射火力	超视距态势感知能力	作战半径	操纵效能	电子对抗能力	
区间 AHP 法	ω'^L	0.275 2	0.026 3	0.021 1	0.071 0	0.143 4	0.200 7	0.049 8	0.101 2	0.035 5
	ω'^U	0.315 8	0.031 0	0.022 9	0.086 6	0.177 0	0.213 1	0.062 3	0.126 7	0.043 6
粗糙集	ω''	0.138 0	0.082 0	0.079 2	0.133 2	0.121 7	0.112 2	0.111 4	0.115 7	0.106 7
组合赋权	ω^L	0.206 6	0.054 1	0.050 1	0.102 1	0.132 6	0.156 5	0.080 6	0.108 5	0.071 1
	ω^U	0.226 9	0.056 5	0.051 0	0.109 9	0.149 4	0.162 7	0.086 8	0.121 2	0.075 1

采用区间数排序法对表 4 中权重计算结果进行分析,主观赋权结果表明机动性、超视距态势感知能力、拦射火力、操纵效能所占权重较大;客观赋权结果表明机动性、快速瞄准能力、超视距态势感知能力、拦射火力所占权重较大;组合赋权结果为:机动性 > 超视距态势感知能力 > 拦射火力 > 操纵效能 > 快速瞄准能力 > 作战半径 > 电子对抗能力 > 生存力 > 格斗火力,可见,机动性、超视距态势感知能力、拦射火力所占权重较大,结果既客观地反应了各指标的重要性,又反应了决策者的主观愿望,且符合现代空战实际。

最后利用组合赋权结果对表 2 中 F-16C, Mig-29, F-15C 3 型战机效能采用线性加权求和方法求得空战效能评估值依次为 [0.803 9, 0.868 5], [0.784 3, 0.846 2], [0.848 5, 0.916 2], 空战能力排序为: Mig-29 < F-16C < F-15C, 符合现代空战实际情况,也与文献[9]结果一致,说明评估模型是有效可行的。

4 结束语

本文建立了多层次、多参数、多因素战斗机空战效能评估模型,采用区间 AHP 法和粗糙集集成的方法,发挥了区间 AHP 法解决数据不确定性和模糊性问题,及粗糙集理论挖掘数据的优势,有效解决了效能评估中数据不确定性和不完整性问题,以区间 AHP 法确定主观权重,以粗糙集确定客观权重,将主客观权重进行有机集成,得到基于区间数的最优组合权重,最后利用线性加权求和法进行评估,克服了主观和客观两种方法各自的缺陷,实现二者的优势互补,得到了更为合理、科学且符合空战规律的评估结果,为效能评估提供了一种新的手段和途径。

参考文献:

[1] 朱宝莲,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.
ZHU Baoliu, ZHU Rongchang, XIONG Xiaofei. Fighter Plane Effectiveness Assessment [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2006. (in Chinese)

[2] 谭旭,陈英武,高妍方.一种新的基于组合赋权的区间型多属性决策方法[J].系统工程,2006,24(4):111-114.
TAN Xu, CHEN Yingwu, GAO Yanfang. A New Combination Determining Weights Method for Interval Multi-attribute Decision-making [J]. Systems Engineering, 2006,24(4):111-114. (in Chinese)

[3] Ma J, Fan Z P, Huang L H. A Subjective and Objective Integrated Approach to Determine Attribute Weights[J]. European

Journal of Operational Research, 1999, 112: 397 – 404.

- [4] 徐玖平, 吴巍. 多属性决策的理论与方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
XU Jiuping, WU Wei. Multiple Attribute Decision Making Theory and Methods [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006. (in Chinese)
- [5] Pawlak Z. Rough Sets Theoretical Aspects of Reasoning about Data[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [6] Pawlak Z. Rough Set[J]. International Journal of Computer Information Science, 1982(11): 341 – 356.
- [7] 胡寿松. 粗糙决策理论与应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006.
HU Shousong. Rough Decision Theory and Application [M]. Beijing: Beihang University Press, 2006. (in Chinese)
- [8] 傅攀峰, 罗鹏程, 周经伦. 空战武器体系超视距空战能力指标研究[J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(8): 1072 – 1075.
FU Panfeng, LUO Pengcheng, ZHOU Jinglun. Research on the BVR Air Combat Capability Index of Air – to – Air Weapon Systems [J]. Systems Engineering and Electronics, 2004, 26(8): 1072 – 1075. (in Chinese)
- [9] 王礼沅, 张恒喜, 徐浩军. 基于粗糙集的空战效能多指标综合评估模型[J]. 航空学报, 2008, 29(4): 880 – 885.
WANG Liyuan, ZHANG Hengxi, XU Haojun. Multi – index Synthesize Evaluation Model Based on Rough Set Theory for Air Combat Efficiency [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(4): 880 – 885. (in Chinese)
- [10] Skowron A. Extracting Laws from Decision Tables: A Rough Set Approach[J]. Computational Intelligence, 1995(11): 371 – 388.
- [11] 芦晓红, 陈世权, 吴今培. 基于可辨识矩阵的启发式属性约简方法及其应用[J]. 计算机工程, 2003, 29(1): 56 – 59.
LU Xiaohong, CHEN Shiquan, WU Jinpei. Heuristic Attribute Reduction Based on Discernibility Matrix and Its Application [J]. Computer Engineering, 2003, 29(1): 56 – 59. (in Chinese)

(编辑: 徐敏)

Aerial Warfare Efficiency Evaluation for Fighter – plane Based on the Interval AHP and Rough Set

GONG Sheng – ke, XU Hao – jun, ZHOU Li, LIN Min

(Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, 710038, China)

Abstract: A new index system of aerial warfare efficiency evaluation is proposed in this article, based on the characteristic of two great modes of modern aerial warfare within visual range and beyond visual range. In view of the weakness of single method in determination of weights in the traditional model, interval analytic hierarchy process (IAHP) is used to determine subjective weight and rough set method is used to determine objective weight. Then the subjective and objective weights are organically integrated, from which the optimal solution of interval combination weight is obtained. This method totally contains the advantages of the subjective weight evaluation method and the objective weight evaluation method, the use of it overcomes the weaknesses of the above evaluation methods and realizes the complementary advantages, which makes the result of efficiency evaluation more reasonable and scientific. Finally, the comprehensive evaluation model of aerial warfare efficiency is established. The feasibility and validity of the model are verified through the computation of an example.

Key words: aerial warfare efficiency evaluation; index system; interval analytic hierarchy process; rough set; optimal combination weight