

文章编号:1674-8190(2020)01-069-08

# 基于 TOPSIS 的空战效能多指标评估模型

王新<sup>1</sup>, 杨任农<sup>1</sup>, 于洋<sup>2</sup>

(1. 空军工程大学 空管领航学院, 西安 710051)

(2. 空军南苑场站, 北京 100076)

**摘要:** 战斗机空战效能评估在武器装备研制采购、对比敌我双方作战实力等方面发挥着重要作用, 传统评估模型只能在宏观上对空战效能进行评估, 无法通过对比不同战机的优劣指标来进行微观评估。借鉴双基点法改进多指标评估模型, 构建空战效能评估模型; 针对超视距空战和视距内空战, 分别建立不同的指标体系; 根据评估指标赋权时主观法与客观法存在的缺陷, 利用最小信息熵原理综合结构熵和信息熵两种不同类型的赋权技术, 构造组合赋权法。算法验证表明: 组合赋权法不仅可以反映两种视距条件下指标重要程度的不同特点, 而且改进模型能纠正传统模型的评估错误, 可以对空战效能进行有效评估。

**关键词:** 空战效能评估; 双基点法; 多指标评估模型; 最小信息熵原理; 组合赋权法

中图分类号: V271.4; E926

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2020.01.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Multi-index Evaluation Model Based on TOPSIS for Air Combat Efficiency

WANG Xin<sup>1</sup>, YANG Rennong<sup>1</sup>, YU Yang<sup>2</sup>

(1. College of Air Traffic Control and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

(2. Air Force Nanyuan Airport, Beijing 100076, China)

**Abstract:** Combat effectiveness evaluation of fighter plays an important role in the development and purchase of weapons and equipment, and in the comparison of the combat strength of both sides. An improved multi-index evaluation model based on technique for order preference by similarity to ideal solution(TOPSIS) is proposed in this article to build an air combat effectiveness evaluation model. This New model improves the shortcoming that the traditional evaluation method can only make a comprehensive evaluation of air combat effectiveness on a macro level, but cannot make a micro evaluation by comparing different aircraft strengths and weaknesses. Different index systems have been established for the over-the-horizon and dogfight air warfare tasks, and according to the defects of subjective method and objective method when evaluating the weights of indicators, the combined weighting method is constructed by using the minimum entropy principle to synthesize the two different types of weighting technologies: structural entropy weight and entropy weight. The algorithm verification shows that not only can the combined weighting method reflect the different characteristics of the index importance degree under the two line-of-sight conditions, but also the improved model can correct the evaluation errors of the original model, indicating that the method proposed in this paper is feasible and effective.

**Key words:** air combat effectiveness evaluation; TOPSIS; multi-index evaluation model; minimum entropy principle; combined weighting method

收稿日期:2019-01-21; 修回日期:2019-03-10

通信作者:王新, wxshhh@163.com

引用格式:王新, 杨任农, 于洋. 基于 TOPSIS 的空战效能多指标评估模型[J]. 航空工程进展, 2020, 11(1): 69-76.

WANG Xin, YANG Rennong, YU Yang. Multi-index evaluation model based on TOPSIS for air combat efficiency[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(1): 69-76. (in Chinese)

## 0 引言

战斗机作战效能评估是对战斗机完成预定作战任务能力大小的量化计算或结论性评价,其在武器装备研制采购和对比敌我双方作战实力等方面都起着至关重要的作用<sup>[1]</sup>,可为指挥员作出进一步决策提供依据。评估问题一般属于多属性决策问题<sup>[2]</sup>,具有概略性、相对性、时效性和局限性等特点<sup>[1]</sup>。

根据作战飞机的多项技战术参数进行作战效能评估,其计算结果更具科学性,主要方法有以对数法、综合指数法为代表的传统方法和以神经网络技术为代表的人工智能法。人工智能方法虽然可以清晰地描述数据间的相互关系,但模型参数设置较为复杂;而传统方法计算简单、易于理解、容易被推广利用,因此本文仍基于传统方法研究效能评估问题。朱宝鏊等<sup>[1]</sup>较早提出了适用于不同条件下的多种效能评估模型,为之后的研究奠定了理论基础;吴智辉等<sup>[3]</sup>利用层次分析法解决指标间赋权问题,但是该方法较多地反映了专家的意见,难以体现战机空战参数对指标赋权的影响;董彦非等<sup>[4]</sup>提出了综合指数模型,分析了该模型相较于对数模型在计算参数选择和数据规格化等方面的优势,但该模型将分项指标直接相加求得效能值,忽视了战机分项指标对空战效能的不同影响;汪泽辉等<sup>[5]</sup>将效能评估看作不确定性推理问题,基于贝叶斯网络<sup>[6]</sup>对空战效能进行推理分析;任水利等<sup>[7]</sup>在对评估指标数据进行特征提取的基础上,利用相关向量机<sup>[8]</sup>模型评估战斗机的空战效能。

上述研究多从宏观上考量战机的综合空战效能,但从历次空战结果来看,在交战双方整体实力相差不大的情况下,影响胜负结局的通常是战机的某一项关键优势或劣势指标。据此,在微观上根据战机的优劣指标进行细致评估更具实战意义。

本文借鉴“木桶效应”<sup>[9]</sup>原理,利用多指标评估法处理战斗机性能参数,在得到各评估指标值的基础上,并不直接求和得出效能值,而是利用组合赋权法求得相同指标在不同空战条件下的不同权值后,利用双基点法<sup>[10-12]</sup>(Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution,简称 TOPSIS)计算指标矩阵中理想的最优指标和最差指标,通过衡量评估指标与理想指标的接近/差异程度,

给出各型飞机空战效能的排序。

## 1 建立空战效能模型

### 1.1 构造指标体系

进行空战效能评估时,须构造完备的评估指标体系,指标集可表示为: $T = \{T_1, T_2, \dots, T_n\}$ ,同时为了保证评估内容的完整性,还应考虑选取影响空战效能指标的关键构成要素<sup>[13]</sup>。

假设有  $m$  型战斗机参与效能评估,则评价方案集可表示为: $S = \{S_1, S_2, \dots, S_m\}$ 。受篇幅限制,本文直接借鉴文献<sup>[14]</sup>中的多指标评估法对各指标进行分项计算。基于以上分析,设某型作战飞机  $S_i$  的  $T_j$  指标属性值为  $x_{ij}$  ( $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$ ),则评价指标矩阵为

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

### 1.2 数据预处理

当指标量纲不统一时,称数值越大对空战效能影响越好的为效益型指标,数值越小对空战效能影响越好的为成本型指标。为消除指标属性不同对评价结果造成的不利影响,采用功效系数法<sup>[15]</sup>统一指标量纲。利用式(2)处理效益型指标,用式(3)处理成本型指标,便可得到无量纲化矩阵  $\mathbf{Y} = [y_{ij}]_{m \times n}$ 。

$$y_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max \{x_{ij} \mid 1 \leq i \leq m\}} \quad (2)$$

$$y_{ij} = \frac{\min \{x_{ij} \mid 1 \leq i \leq m\}}{x_{ij}} \quad (3)$$

为防止各指标取值范围差异太大对评价结果造成不利影响,将无量纲化矩阵中的各元素进行单位化处理:

$$r_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (4)$$

由此得到评价指标的单位化矩阵  $\mathbf{R} = [r_{ij}]_{m \times n}$ 。

### 1.3 计算指标权重

为体现各评估指标对空战效能影响的不同程度,需给出各指标的相对权重。根据组合赋权法确

定指标的归一化权重向量  $W = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$ , 将其与单位化矩阵线性相加, 求得加权单位化矩阵  $G = [g_{ij}]_{m \times n}$ . 计算指标权重的方法步骤将在第 3 节中进行说明。

### 1.4 计算正负理想点和贴近度

根据功效系数法和组合赋权法的处理过程, 应选取矩阵  $G$  中各指标的最大值作为评价指标的正理想点:  $g_j^+ = \max_j \{g_{ij}\}$ ,  $(i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n)$ , 同理选取各指标的最小值作为评价指标的负理想点:  $g_j^- = \min_j \{g_{ij}\}$ ,  $(i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n)$ . 此后计算各评估方案与正负理想方案之间的欧几里德距离:

$$L_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n (g_{ij} - g_j^+)^2} \quad (5)$$

$$H_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n (g_{ij} - g_j^-)^2} \quad (6)$$

式(5)~式(6)分别为各评价方案与正负理想方案间的贴近度。

### 1.5 综合评估

用评价方案与正理想方案的接近程度来评估战斗机空战效能的优劣。定义评价系数为

$$K_i = \frac{H_i}{L_i + H_i} \quad (7)$$

评价方案距最优方案越近, 即评价系数  $K$  越

大, 认为该方案的空战效能越好<sup>[12]</sup>。因此, 根据各战斗机的评价系数大小, 对其空战效能进行排序。

## 2 模型指标体系

现代空战分为超视距空战和视距内空战<sup>[16]</sup>。进行超视距空战时, 双方飞行员在目视范围外, 根据机载设备探测或上级指挥机构指示, 发现并发射导弹打击敌方<sup>[17]</sup>, 此时考验战机的态势感知及中远程空空导弹的能力; 而进行视距内空战时, 由于双机距离近、速度快, 更加考验战机的近距离格斗能力。因此空战效能评估指标的选取受到空战条件的制约, 在上述两种视距范围内进行作战时, 指标内容及其对应的权值大小均有所不同。但以往大部分研究, 例如文献[4]和文献[16]等都忽略了作战条件的不同, 进行空战效能综合评价, 这样虽能得到整体评价结果, 但是无法在不同的实际作战条件下, 为一线指战员提供不同机型的作战优势对比。

因此本文参考文献[1]、文献[14]和文献[18]选取机动性、生存能力、快速瞄准能力、格斗火力、态势感知能力、操纵能力、电子对抗能力、作战半径等评估指标, 分别从超视距空战和视距内空战两个方面建立不同的评价指标体系, 结果如图 1~图 2 所示。

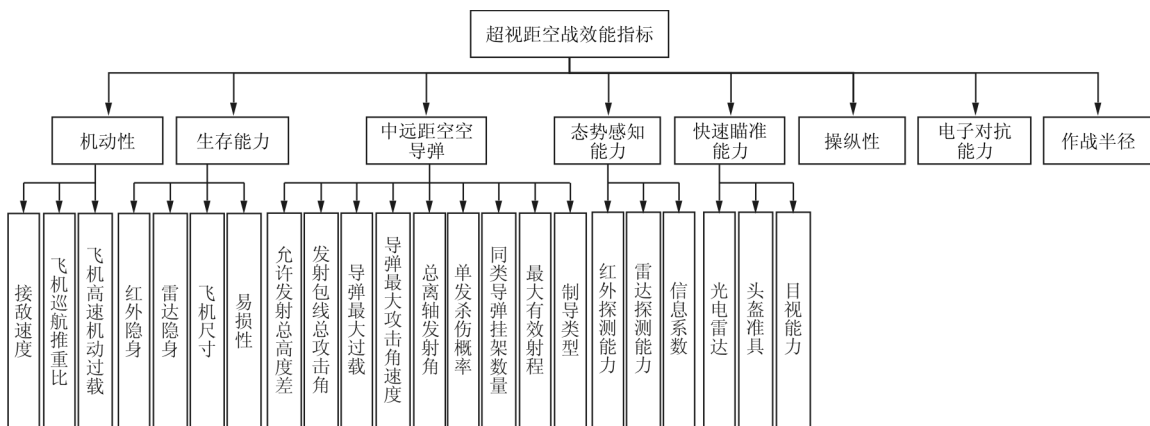


图 1 超视距空战效能评估指标体系

Fig. 1 Evaluation index system of beyond visual range air combat effectiveness

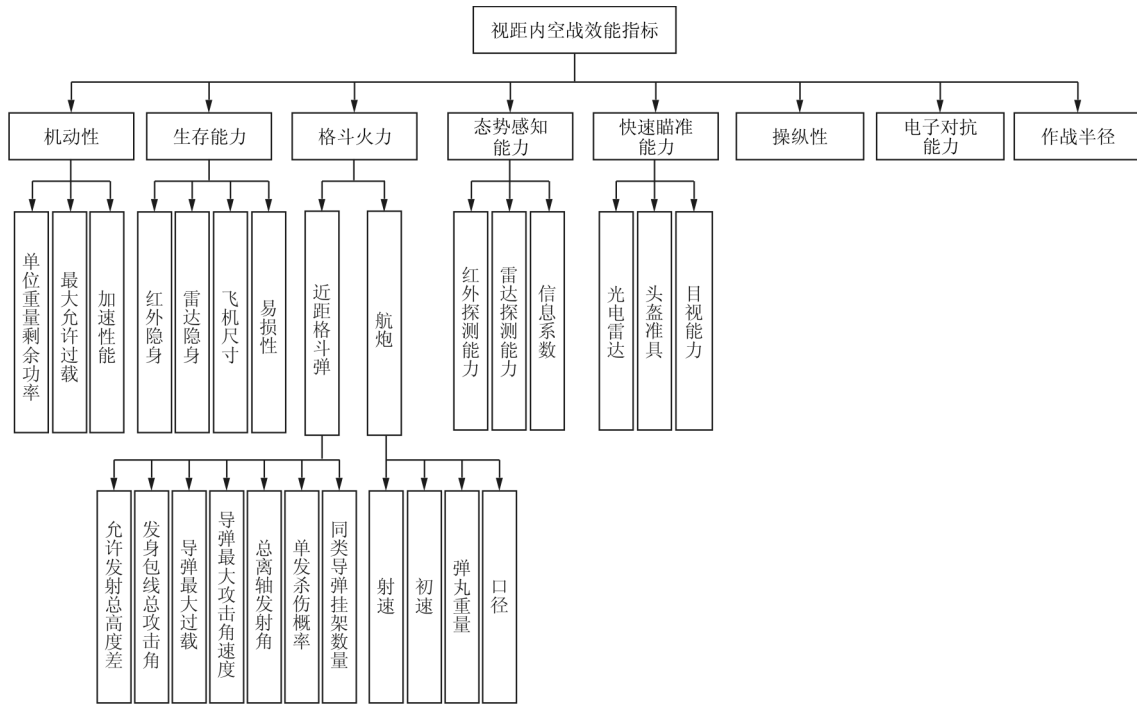


图 2 视距内空战效能评估指标体系

Fig. 2 Evaluation index system of air combat effectiveness in sight distance

### 3 组合赋权

综合各指标进行效能评估时,指标权重的恰当程度对评估质量起着至关重要的作用。利用主观法进行赋权时,所得结果多符合战争规律,但该方法随意性大、决策准确性稍差;而客观法虽无人影响,却忽视了决策者的主观知识<sup>[19]</sup>。因此本文利用最小相对信息熵原理<sup>[20]</sup>,结合结构熵权法<sup>[21]</sup>和熵权法<sup>[22]</sup>这两种不同类型的赋值技术对评价指标进行组合赋值。

#### 3.1 结构熵权法

该方法主要用德尔菲专家调查法构造指标的“典型排序”,并利用熵理论计算其熵值和专家的评审“盲度”,以此为基础求解指标权重<sup>[21]</sup>。方法步骤如下:

**步骤 1** 利用德尔菲法收集专家意见,构造典型排序。

设有  $f$  个专家对  $n$  个指标进行不记名打分或排序,形成专家评估矩阵  $A=[a_{ij}]$ , ( $i=1,2,\dots,f$ ;  $j=1,2,\dots,n$ ),其内容即为专家对指标的“典型排

序”。

**步骤 2** 对评估意见进行盲度分析。

为减小所得数据的“噪声”及不确定性,首先利用公式(8)计算各专家指标的隶属度,然后进行盲度分析。

$$D_{ij} = [d_{ij}] = \frac{\ln(l - a_{ij})}{\ln(l - 1)} \quad (8)$$

式中:  $a_{ij}$  为第  $i$  名专家对第  $j$  个指标的评估排序数;  $l$  为转化参数量,一般取  $l = n + 2$ 。

计算  $f$  个专家对各指标的“一致看法”,即平均认识度  $d_j$ ,令

$$d_j = \frac{\sum_{i=1}^f d_{ij}}{f} \quad (9)$$

定义专家对指标的不确定性为“认识盲度”,记为  $Q_j$ ,令

$$Q_j = \frac{|\{\max(d_{1j}, \dots, d_{mj}) - d_j\} + \{\min(d_{1j}, \dots, d_{mj}) - d_j\}|}{2} \quad (10)$$

记专家对  $n$  个指标的总认识度为  $\mu_j$ ,令

$$\mu_j = d_j(1 - Q_j) \quad (11)$$

**步骤 3** 归一化。

对  $\mu_j$  进行归一化处理后得到指标权重  $\omega_{ij}$ :

$$\omega_{1j} = \frac{\mu_j}{\sum_{j=1}^n \mu_j} \quad (12)$$

通过熵理论计算指标权重:  $\omega_{2j} = \frac{1 - E_j}{n - \sum E_j}$ 。

### 3.2 熵权法

将熵值理论运用到权重的确定过程中:当某一指标的差异较大时,说明该指标提供的信息量较大,此时其权重也应较大,而熵值较小;反之其权重相对较小,熵值较大。算法计算步骤如下:

#### 步骤 1 数据标准化。

在给定 1.1 节中评价指标矩阵  $X$  的基础上,对于指标集  $T = \{T_1, T_2, \dots, T_n\}$ ,有  $T_j = \{x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj}\}$ 。令标准化后的指标值  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ ,则:

$$c_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(T_j)}{\max(T_j) - \min(T_j)} \quad (13)$$

#### 步骤 2 计算指标信息熵。

根据信息论中关于信息熵的定义,一组数据的信息熵  $E_j = -\ln(n)^{-1} \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij}$ 。其中,  $p_{ij} = \frac{c_{ij}}{\sum_{i=1}^m c_{ij}}$ ,若  $p_{ij} = 0$ ,则定义  $\lim_{p_{ij} \rightarrow 0} p_{ij} \ln p_{ij} = 0$ 。

#### 步骤 3 确定指标权重。

### 3.3 最小信息熵原理

本文根据最小信息熵原理,将结构熵权重(主观权重)与信息熵权重(客观权重)进行组合,得到综合指标权重  $\omega_j$ 。用拉格朗日乘子法计算综合权重,公式为

$$\omega_j = \frac{(\omega_{1j} \cdot \omega_{2j})^{0.5}}{\sum_{j=1}^n (\omega_{1j} \cdot \omega_{2j})^{0.5}} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (14)$$

## 4 算法验证

本文在多指标评估模型计算各指标值的基础上,利用双基点法在微观上衡量战斗机的空战效能。指标数据如表 1 所示。

### 4.1 计算组合权值

首先利用德尔菲专家调查法得到 a~e 五名专家关于评估指标的“典型排序”,如表 2 所示,然后利用式(8)~式(14)求取两种视距条件下的指标权重,结果如表 3 所示。

表 1 空战指标数据

Table 1 Air combat index data

| 分项性能    | 超视距空战指标权重 |         |         | 视距内空战指标权重 |         |         |
|---------|-----------|---------|---------|-----------|---------|---------|
|         | F-16C     | Mig-29  | F-15C   | F-16C     | Mig-29  | F-15C   |
| 机动性     | 0.957 0   | 0.884 0 | 0.889 0 | 0.935 0   | 0.874 0 | 0.796 0 |
| 生存能力    | 0.687 0   | 0.827 0 | 0.963 0 | 0.687 0   | 0.827 0 | 0.963 0 |
| 作战半径    | 0.621 0   | 0.878 0 | 0.912 0 | 0.621 0   | 0.878 0 | 0.912 0 |
| 操纵性     | 0.958 0   | 0.851 0 | 0.856 0 | 0.958 0   | 0.851 0 | 0.856 0 |
| 态势感知能力  | 0.832 0   | 0.714 0 | 0.958 0 | 0.832 0   | 0.714 0 | 0.958 0 |
| 快速瞄准能力  | 0.931 0   | 0.953 0 | 0.887 0 | 0.931 0   | 0.953 0 | 0.887 0 |
| 电子对抗能力  | 0.987 0   | 0.846 0 | 0.963 0 | 0.987 0   | 0.846 0 | 0.963 0 |
| 中远程空空导弹 | 0.572 0   | 0.620 0 | 0.934 0 | —         | —       | —       |
| 格斗火力    | —         | —       | —       | 0.912 0   | 0.852 0 | 0.742 0 |

表 2 指标“典型排序”  
Table 2 Index “typical ranking”

| 分项性能    | 超视距空战 |   |   |   |   | 视距内空战 |   |   |   |   |
|---------|-------|---|---|---|---|-------|---|---|---|---|
|         | a     | b | c | d | e | a     | b | c | d | e |
| 机动性     | 3     | 8 | 5 | 4 | 7 | 3     | 2 | 1 | 1 | 1 |
| 生存力     | 5     | 5 | 6 | 8 | 4 | 5     | 1 | 4 | 7 | 7 |
| 作战半径    | 6     | 1 | 7 | 6 | 5 | 6     | 8 | 7 | 8 | 6 |
| 操作效能    | 7     | 6 | 8 | 7 | 6 | 1     | 7 | 5 | 6 | 4 |
| 态势感知能力  | 4     | 4 | 3 | 1 | 1 | 7     | 5 | 8 | 4 | 8 |
| 快速瞄准能力  | 8     | 7 | 1 | 5 | 8 | 4     | 6 | 3 | 3 | 3 |
| 电子对抗能力  | 2     | 3 | 4 | 2 | 3 | 8     | 4 | 6 | 5 | 5 |
| 中远程空空导弹 | 1     | 2 | 2 | 3 | 2 | —     | — | — | — | — |
| 格斗火力    | —     | — | — | — | — | 2     | 3 | 2 | 2 | 2 |

表 3 指标权值  
Table 3 Index weight

| 分项性能    | 超视距空战指标权重 |         |          | 视距内空战指标权重 |         |          |
|---------|-----------|---------|----------|-----------|---------|----------|
|         | 结构熵       | 熵值      | 组合赋权     | 结构熵       | 熵值      | 组合赋权     |
| 机动性     | 0.110 0   | 0.183 7 | 0.145 82 | 0.167 7   | 0.112 5 | 0.139 46 |
| 生存能力    | 0.105 7   | 0.098 2 | 0.104 53 | 0.121 0   | 0.116 1 | 0.120 37 |
| 作战半径    | 0.118 1   | 0.087 0 | 0.103 97 | 0.084 6   | 0.102 9 | 0.094 72 |
| 操纵性     | 0.087 9   | 0.195 6 | 0.134 51 | 0.128 9   | 0.231 3 | 0.175 34 |
| 态势感知能力  | 0.160 1   | 0.099 8 | 0.129 66 | 0.092 4   | 0.118 0 | 0.106 02 |
| 快速瞄准能力  | 0.093 3   | 0.090 9 | 0.094 45 | 0.136 8   | 0.107 5 | 0.123 11 |
| 电子对抗能力  | 0.157 1   | 0.087 5 | 0.120 27 | 0.105 5   | 0.103 5 | 0.106 11 |
| 中远程空空导弹 | 0.167 9   | 0.157 5 | 0.166 79 | —         | —       | —        |
| 格斗火力    | —         | —       | —        | 0.163 0   | 0.108 2 | 0.134 86 |

## 4.2 利用 TOPSIS 进行效能排序

将空战指标数据与组合赋权法得到的权重相乘,求得不同空战条件下的指标矩阵。

$$g^+ = (0.093, 0.072, 0.074, 0.087, 0.089, 0.059, 0.074, 0.133)$$

$$g^- = (0.085, 0.052, 0.050, 0.078, 0.066, 0.055, 0.064, 0.081)$$

由式(5)~式(6)可得 Mig-29, F-16C, F-15C 对正负理想点的贴程度  $L$  和  $H$  分别为

$$L = (0.061\ 3, 0.053\ 6, 0.012\ 2)$$

$$H = (0.019\ 6, 0.024\ 6, 0.064\ 9)$$

最终由式(7)得到 Mig-29, F-16C, F-15C 在超视距作战条件下的效能指标:

$$K_1 = 0.242\ 5, K_2 = 0.314\ 8, K_3 = 0.841\ 5$$

超视距条件下,根据式(1)~式(4)对指标矩阵进行预处理,继而根据 1.4 节内容,可得正负理想点分别为

同理,视距内空战条件下, Mig-29, F-16C 和 F-15C 的空战效能指标:

$$K_1 = 0.462\ 2, K_2 = 0.484\ 8, K_3 = 0.594\ 7$$

上述验证结果表明,在超视距和视距内两种空战条件下, F-15C 的空战效能最优, Mig-29 的空战效能最差, F-16C 的空战效能介于二者之间。验证结果与文献[14]、文献[18]所得对比结果一致,证

明了本文所提方法的有效性。

## 5 结 论

(1) 视距内空战条件下,利用熵权法确定指标权重时,态势感知能力占比较大,忽略了近距离空战条件下格斗火力、机动性及快速瞄准能力的重要性;而利用结构熵权法进行求解时,则忽略了操作效能的重要性。利用本文所提组合赋权法进行求解后,指标权重向操作效能、机动性、格斗火力和快速瞄准能力偏移,所得结果既尊重数据又符合战争的客观规律。在超视距空战条件下,组合赋权法亦表现出类似优势,说明组合赋权法是有效且可行的。

(2) 传统多指标评估模型无法考虑 F-15C 中远程空空导弹及态势感知能力在超视距空战时的巨大作用,也未能考虑 F-15C 的强大生存能力在视距内空战时所展现出的巨大优势,即传统多指标评估模型所得结果存在一定误差。这也从侧面说明了本文所提方法的可行性。

评估指标的选取对效能评估结果的可信度也有一定影响,本文评估指标直接借鉴了相关文献的分析结果,指标在全面性、关联性等方面还存在一定问题,这将是下一步考虑的方向。

## 参考文献

- [1] 朱宝璠,朱荣昌,熊笑非. 作战飞机效能评估[M]. 北京:航空工业出版社,1993.  
ZHU Baoliu, ZHU Rongchang, XIONG Xiaofei. Fighter plane effectiveness assessment[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1993. (in Chinese)
- [2] 徐泽水,达庆利. 多属性决策的组合赋权方法研究[J]. 中国管理科学,2002(2): 84-87.  
XU Zeshui, DA Qingli. Study on method of combination weighting[J]. Chinese Journal of Management Science, 2002(2): 84-87(in Chinese)
- [3] 吴智辉,张多林,谢磊峰. 基于层次分析法的防空信息战效能评估[J]. 系统工程与电子技术,2004,26(2): 209-211.  
WU Zhihui, ZHANG Duolin, XIE Leifeng. Evaluation of the operational effectiveness of the information warfare of air defense[J]. Systems Engineering and Electronics, 2004, 26(2): 209-211. (in Chinese)
- [4] 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 Yanfei, WANG Liyuan, ZHANG Hengxi. Synthesized index model for fighter plane air combat effectiveness assessment[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 27(6): 1084-1087. (in Chinese)
- [5] 汪泽辉,方洋旺. 基于贝叶斯网络的空战效能评估方法研究[J]. 航空工程进展,2018,9(1): 35-42.  
WANG Zehui, FANG Yangwang. Effectiveness evaluation method of air-combat based on Bayesian networks[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2018, 9(1): 35-42. (in Chinese)
- [6] GELMAN A, CARLIN J B. Bayesian data analysis[M]. 3rd ed. Florida: CRC Press, 2014.
- [7] 任水利,甘旭升,丁黎颖,等. 基于核 Fisher 鉴别分析的 RVM 战斗机空战效能评估[J]. 火力与指挥控制,2019,44(10): 143-147,152.  
REN Shuili, GAN Xusheng, DING Liying. et al. RVM effectiveness evaluation of air combat based on kernel Fisher discriminant analysis[J]. Fire Control & Command Control, 2019, 44(10): 143-147,152. (in Chinese)
- [8] TIPPING M E. Sparse Bayesian learning and the relevance vector machine[J]. Journal of Machine Learning Research, 2001, 1(3): 211-214.
- [9] 王敏. “木桶效应”与质量管理[J]. 机械工业标准化与质量,2003(11): 12-13.  
WANG Min. Barrel effect and quality management[J]. Machinery Industry Standardization and Quality, 2003(11): 12-13. (in Chinese)
- [10] 管怀建,唐亮,邓志江. 基于正负理想点法的火炮武器系统作战效能评估[J]. 兵工自动化,2010,29(3): 44-46.  
GUAN Huaijian, TANG Liang, DENG Zhijiang. Operational effectiveness evaluating of gun weapon system based on positive and negative ideal point[J]. Ordnance Industry Automation, 2010, 29(3): 44-46. (in Chinese)
- [11] 李聪,陈健,杨建池,等. 基于正负理想点的评估指标权重选取方法[J]. 兵工自动化,2015,34(9): 22-25.  
LI Cong, CHEN Jian, YANG Jianchi, et al. Weight determination approach for assessment index based on positive and negative ideal points[J]. Ordnance Industry Automation, 2015, 34(9): 22-25. (in Chinese)
- [12] 马亚龙,王精业,徐享忠,等. 基于正负理想点的仿真结果评估方法研究[J]. 计算机工程,2002,28(2): 21-22.  
MA Yalong, WANG Jingye, XU Xiangzhong, et al. Study of evaluation method for simulation result based on positive and negative ideal point[J]. Computer Engineering, 2002, 28(2): 21-22. (in Chinese)
- [13] 李昂,庞宇,李斌. 对单舰防空导弹武器系统综合作战效能的评估[J]. 舰船电子工程,2007,27(3): 55-57.  
LI Ang, PANG Yu, LI Bin. Evaluation of the integrated operational effectiveness of a single-ship anti-aircraft missile weapon system[J]. Ship Electronic Engineering, 2007, 27(3): 55-57. (in Chinese)
- [14] 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 synthesise evaluation model based on rough set theory for air combat efficiency[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(4): 880-885. (in Chinese)
- [15] 陈凤英, 马成文. 功效系数法在企业绩效评价中的应用[J]. 安徽工业大学学报(社会科学版), 2003, 20(4): 50-51.  
CHEN Fengying, MA Chengwen. The application of efficacy coefficient in enterprise achievement evaluation[J]. Journal of Anhui University of Technology (Social Sciences), 2003, 20(4): 50-51. (in Chinese)
- [16] 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)
- [17] 罗继勋, 高晓光, 赵晓睿. 作战飞机效能评估的广义模型[J]. 西北工业大学学报, 2003, 21(1): 38-41.  
LUO Jixun, GAO Xiaoguang, ZHAO Xiaorui. A generalized model of a system of combat airplanes for operation effectiveness evaluation[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2003, 21(1): 38-41. (in Chinese)
- [18] 金韬, 张曙光, 孙金标. 现代战斗机空战能力评估及敏感性分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(1): 82-86.  
JIN Lei, ZHANG Shuguang, SUN Jinbiao. Air combat ability and sensitivity analysis of modern fighter aircraft[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 35(1): 82-86. (in Chinese)
- [19] 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 Youhua. 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)
- [20] WU K Y, JIN J L. Attribute recognition method of regional ecological security evaluation based on combined weight on principle of relative entropy[J]. Scientia Geographica Sinica, 2008, 28(6): 745-758.
- [21] 程启月. 评测指标权重确定的结构熵权法[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(7): 1225-1228.  
CHENG Qiyue. Structure entropy weight method to confirm the weight of evaluating index[J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2010, 30(7): 1225-1228. (in Chinese)
- [22] 刘玘玘, 汪妮, 解建仓, 等. 基于熵权法的城市生态系统健康模糊评价[J]. 武汉大学学报(工学版), 2014, 47(6): 755-759.  
LIU Honghong, WANG Ni, XIE Jiancang, et al. Fuzzy assessment of city ecosystem health based on entropy weight method[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2014, 47(6): 755-759. (in Chinese)

#### 作者简介:

王 新(1995—),男,硕士研究生。主要研究方向:作战任务规划。

杨任农(1969—),男,硕士,教授,博导。主要研究方向:作战任务规划。

于 洋(1992—),男,学士,助理工程师。主要研究方向:战斗机空战效能评估。

(编辑:马文静)