

doi: 10.7690/bgzdh.2024.03.002

基于模糊-层次分析法的航空兵对地攻击方案评估

宋树成, 刘玉东, 毛德军, 刘太辉, 刘刚
(海军航空大学, 山东 烟台 264000)

摘要: 为科学有效地评估航空兵对地攻击方案, 采用层次分析法 (analytic hierarchy process, AHP) 和模糊综合评价法建立评估模型。根据 AHP 确定方案评估指标体系, 首层分为飞机基本性能、武器系统能力、态势感知能力和综合保障能力 4 个主要影响因素, 第 2 层划分为 12 个影响指标, 并计算得到各影响因素的权重; 使用模糊综合评价法获得航空兵对地攻击方案的最终评估结果。结果表明, 该模型可为对航空兵对地攻击方案评估提供一种科学实用、可操作性强的方法。

关键词: 航空兵对地攻击; 层次分析法; 模糊综合评价法
中图分类号: V271.4 **文献标志码:** A

Evaluation of Air Force Air-to-ground Attack Scheme Based on Fuzzy-AHP

Song Shucheng, Liu Yudong, Mao Dejun, Liu Taihui, Liu Gang
(Naval Aviation University, Yantai 264000, China)

Abstract: In order to evaluate the air force air-to-ground attack scheme scientifically and effectively, the analytic hierarchy process (AHP) and fuzzy comprehensive evaluation method are used to establish the evaluation model. The evaluation index system was established according to the AHP. The first layer was divided into four main influencing factors, including basic aircraft performance, weapon system capability, situational awareness capability and integrated support capability. The second layer was divided into 12 influencing indexes, and the weight of each influencing factor was calculated. The fuzzy comprehensive evaluation method was used to obtain the final evaluation result of air force air-to-ground attack scheme. The results show that the model can provide a scientific, practical and operable method for the evaluation of air-to-ground attack scheme.

Keywords: air force air-to-ground attack; AHP; fuzzy comprehensive evaluation method

0 引言

航空兵是空军的主要作战力量, 同时也是海军五大兵种之一, 可独立或者协助其他兵种完成对空、对海和对地等重要作战任务, 是影响战争成败的重要因素。航空兵对地攻击是航空兵作战任务的一种重要形式, 在制定对地攻击方案过程中, 由于受多种因素的影响, 作战参谋一般会制定多种备选方案。为达到预期作战效果, 在选择最优方案的过程中, 需要对各方案进行综合评估。

效能评估方法^[1]有多种, 如层次分析法 (AHP)、ADC 分析法、SEA 法、模糊综合评价法、指数法等。对作战飞机效能评估或者航空兵对地攻击方案评估方法, 国内外学者做了相关研究。Cook 等^[2]研究了主客观综合赋权法, 潘景余等^[3]基于粗糙集对飞机空地作战效能进行了研究, 张蕾等^[4]采用灰色关联投影模型进行了研究。由于影响航空兵对地攻击作战效果的因素较多, 整个作战过程较复杂, 具有较大的模糊性和不确定性, 难以完全准确地进行评估。笔者采用模糊综合评价方法对航空兵对地攻击方案

进行评估, 并结合 AHP 构建对地攻击方案评估指标体系, 确定影响因素的权重, 有效降低模糊综合评价方法在确定指标权重时的主观性。在方案评估中, 结合 2 种评估方法的优势, 使评估结果最大限度反映客观事实, 为指挥员决策提供科学依据。

1 航空兵对地攻击方案评估模型

1.1 层次分析法

AHP 是美国匹兹堡大学 T.L.Saaty 于 20 世纪 70 年代提出的一种系统分析方法。1982 年, 天津大学许树柏等将该方法引入中国, 其系统、灵活、简洁的优点, 成为一种广泛使用的多准则决策方法。

AHP 主要是根据研究对象性质将要评价的目标分解为多个递阶层次, 通常可以划分为目标层、准则层和指标层。通过逐层对比分析, 获得最底层因素对总目标的影响权重, 进而完成优劣排序。

1.1.1 对目标进行分层

根据实际情况分析目标, 将总目标分为目标层、准则层和指标层。

收稿日期: 2023-11-11; 修回日期: 2023-12-15

第一作者: 宋树成(1988—), 男, 山东人, 硕士。

1.1.2 构造权重判断矩阵

为将各指标之间进行比较，并得到权重判断矩阵，引入 1~9 标度(见表 1)，对同一层次各元素之间进行两两对比，得到权重判断矩阵 A 。

表 1 指标权重标度

标度	意义
1	指标 i 与指标 j 同等重要
3	指标 i 比指标 j 略微重要
5	指标 i 比指标 j 较强重要
7	指标 i 比指标 j 强烈重要
9	指标 i 比指标 j 极端重要

2, 4, 6, 8 是可以使用的其他中间值

同一层次判断矩阵形式如下：

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中 a_{ij} 为指标 i 相对于指标 j 的相对权重，并有如下性质：

$$\left. \begin{aligned} a_{ii} &> 0 \\ a_{ij} &= 1/a_{ji} \\ a_{ii} &= 1 \end{aligned} \right\}$$

1.1.3 指标权重计算

指标权重的计算问题，可以转化为判断矩阵的最大特征值和对应特征向量的计算：

$$AW = \lambda_{\max} W \quad (2)$$

式中： A 为同一层次的判断矩阵； λ_{\max} 为矩阵 A 的最大特征值； W 为 λ_{\max} 对应的特征向量，即指标权重向量。

1.1.4 一致性检验

求出 λ_{\max} 和 W 后，需要对 λ_{\max} 进行一致性检验，具体步骤如下：

1) 计算一致性指标 $C.I.$ 。

$$C.I. = (\lambda_{\max} - n)/(n-1) \quad (3)$$

2) 依据矩阵的阶数 n ，从表 2 中查出平均随机一致性指标 $R.I.$ 。

表 2 平均随机一致性指标

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$R.I.$	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46	1.49

3) 计算一致性指标 $C.R.$ 。

$$C.R. = C.I./R.I. \quad (4)$$

当 $C.R. \leq 0.1$ ，一般认为，判断矩阵的一致性是可以接受的。

可以接受的。

4) 计算各层元素的组合权重。

为得到层次结构中每层的所有元素相对于总目标的权重，需要把前一步计算结果进行适当组合，以计算出总排序的相对权重，计算时自上而下逐层进行，最终得出最低层次元素相对总目标的权重。

1.2 模糊综合评价法

模糊综合评判法^[5-6]作为模糊数学中的一种具体应用方法，能较好地解决对地攻击方案评估中存在的确定性。该评估方法包括定性评估和定量评估，对多因素、多层次的复杂问题评估效果较好。

二级递阶层级结构具体步骤如下：

1) 建立层次结构模型。

2) 确定指标集 U ，指标集中元素为影响总目标的各个指标。

$$U = \{u_i | i = 1, 2, \dots, m\}$$

3) 确定各指标对应的权重系数，第 1 层对应权重系数为 W ，第 2 层对应权重系数分别为 B_1, B_2, \dots, B_m 。

4) 确定评语集 V 。

$$V = \{v_j | j = 1, 2, \dots, n\}$$

式中 v_j 为第 j 种评语。

5) 确定模糊评价矩阵 R 。

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中 r_{ij} 为第 i 个指标对第 j 个评语的属度。

6) 求综合评判结果向量并转化为具体评估值。

由指标权重向量和模糊评价矩阵得到综合评判结果向量：

$$E = W^T \cdot R \quad (6)$$

对 E 进行归一化处理得到：

$$E' = (e'_1, e'_2, \dots, e'_m) = (e_1/T, e_2/T, \dots, e_m/T) \quad (7)$$

式中 $T = \sum_{i=1}^m e_i$ 。

对评语 v_j 赋值 q_i ，将综合评判结果向量转化为评估值：

$$S_{\text{总}} = \sum_{i=1}^m e'_i q_i \quad (8)$$

式中 $S_{\text{总}}$ 为航空兵对地攻击方案的百分制得分。

2 航空兵对地攻击方案评估实例

2.1 AHP 计算各准则层和指标层各因素权重

2.1.1 航空兵对地攻击方案评估递阶层次结构

航空兵对地攻击影响因素较多，包括实施对地攻击的飞机自身因素和保障任务的其他外在因素。笔者将评估指标体系分为 2 个层次，首层包括飞机基本性能、武器系统能力、态势感知能力和综合保障能力^[7-12]，将此 4 个主要影响因素进一步细分为 12 个子因素，具体如图 1 所示。

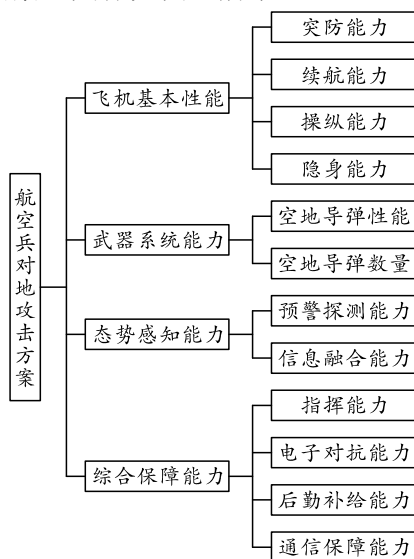


图 1 航空兵对地攻击方案评价指标

2.1.2 构造判断矩阵

采用表 1 中的指标权重标度将首层影响因素进行两两对比，得到准则层权重判断矩阵，判断矩阵 A 为：

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1/5 & 1/2 & 1/3 \\ 5 & 1 & 3 & 2 \\ 2 & 1/3 & 1 & 1/2 \\ 3 & 1/2 & 2 & 1 \end{pmatrix}。$$

2.1.3 计算准则层各影响因素权重

权重计算问题即为判断矩阵的最大特征值和对应特征向量的计算。求最大特征值和对应特征向量方法较多，对于低阶矩阵可以通过手工计算，高阶矩阵可通过计算软件、方根法、和积法等计算。由于笔者对攻击方案的评估是结合模糊评价方法，因此，在兼顾评估方法的简便、可操作以及准确度的前提下，采用方根法近似计算。

计算矩阵 A 的行向量各分量的几何平均值并进行归一化处理：

$$w_i = \left(\prod_{j=1}^n a_{ij} \right)^{1/n}, \quad i=1, 2, \dots, n; \quad (9)$$

$$w'_i = \frac{w_i}{\sum_{j=1}^n w_j}, \quad i=1, 2, \dots, n。 \quad (10)$$

$W = (w'_1, w'_2, \dots, w'_n)^T$ 为最大特征值 λ_{\max} 对应的特征向量，即准则层各因素权重。本算例中权重为：

$$W = (0.0882, 0.4832, 0.1569, 0.2717)^T。 \quad (11)$$

最大特征值 $\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{nw_i}$ ，其中 $(AW)_i$ 为 AW

向量中第 i 个分量，本算例中

$$AW = \begin{pmatrix} 1 & 1/5 & 1/2 & 1/3 \\ 5 & 1 & 3 & 2 \\ 2 & 1/3 & 1 & 1/2 \\ 3 & 1/2 & 2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0.0882 \\ 0.4832 \\ 0.1569 \\ 0.2717 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.3539 \\ 1.9383 \\ 0.6302 \\ 1.0917 \end{pmatrix}。$$

因此， $\lambda_{\max}=4.0145$ 。

2.1.4 一致性检验

分别计算 $C.I.$ 和 $C.R.$ ：

$$C.I. = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = 0.0048。$$

通过表 2 查询，当 $n=4$ 时， $R.I.=0.89$ 。

$$C.R. = C.I./R.I. = 0.0054 < 0.1。$$

说明判断矩阵的一致性较好。

综上，准则层 4 个影响因素为 $W = (0.0882, 0.4832, 0.1569, 0.2717)^T$ 。

同理可得，准则层各元素对应的指标层权重向量分别为：

$$B_1 = (0.3175, 0.1647, 0.2135, 0.3043)^T；$$

$$B_2 = (0.4367, 0.5633)^T；$$

$$B_3 = (0.5832, 0.4168)^T；$$

$$B_4 = (0.2994, 0.2468, 0.1945, 0.2593)^T。$$

2.2 航空兵对地攻击方案模糊综合评价

2.2.1 确定评语集 V

对准则层和指标层的评语分为 4 级，评语集如下：

$$V = \{v_1, v_2, v_3, v_4\} = \{\text{优秀, 良好, 一般, 较差}\}。 \quad (12)$$

2.2.2 确定模糊评价矩阵

根据专家打分法和评语集的 4 级标准，对该方案的 12 个指标进行打分，具体打分情况如表 3 所示。

表 3 航空兵对地攻击方案指标评分

准则层	权重 W	指标层	权重 B	评语集 V			
				优秀 v_1	良好 v_2	一般 v_3	较差 v_4
飞机基本性能	0.088 2	突防能力	0.317 5	0.4	0.3	0.2	0.1
		续航能力	0.164 7	0.5	0.3	0.1	0.1
		操纵能力	0.213 5	0.2	0.3	0.3	0.2
		隐身能力	0.304 3	0.1	0.3	0.4	0.2
武器系统能力	0.483 2	空地导弹性能	0.436 7	0.3	0.4	0.2	0.1
		空地导弹数量	0.563 3	0.5	0.2	0.2	0.1
态势感知能力	0.156 9	预警探测能力	0.583 2	0.3	0.2	0.4	0.1
		信息融合能力	0.416 8	0.2	0.4	0.3	0.1
综合保障能力	0.271 7	指挥能力	0.299 4	0.4	0.2	0.3	0.1
		电子对抗能力	0.246 8	0.4	0.3	0.1	0.2
		后勤补给能力	0.194 5	0.5	0.1	0.3	0.1
		通信保障能力	0.259 3	0.3	0.4	0.1	0.2

则对应指标层的模糊评价矩阵分别为：

$$R_1 = \begin{pmatrix} 0.4 & 0.3 & 0.2 & 0.1 \\ 0.5 & 0.3 & 0.1 & 0.1 \\ 0.2 & 0.3 & 0.3 & 0.2 \\ 0.1 & 0.3 & 0.4 & 0.2 \end{pmatrix};$$

$$R_2 = \begin{pmatrix} 0.3 & 0.4 & 0.2 & 0.1 \\ 0.5 & 0.2 & 0.2 & 0.1 \end{pmatrix};$$

$$R_3 = \begin{pmatrix} 0.3 & 0.2 & 0.4 & 0.1 \\ 0.2 & 0.4 & 0.3 & 0.1 \end{pmatrix};$$

$$R_4 = \begin{pmatrix} 0.4 & 0.2 & 0.3 & 0.1 \\ 0.4 & 0.3 & 0.1 & 0.2 \\ 0.5 & 0.1 & 0.3 & 0.1 \\ 0.3 & 0.4 & 0.1 & 0.2 \end{pmatrix}。$$

2.2.3 求综合评判结果向量并转化为具体评估值

根据准则层各元素对应的指标层各指标权重向量和指标层的模糊评价矩阵计算准则层(第 1 层)的综合评判结果向量，分别为：

$$E_1 = B_1^T \cdot R_1 = (0.3175, 0.1647, 0.2135, 0.3043) \begin{pmatrix} 0.4 & 0.3 & 0.2 & 0.1 \\ 0.5 & 0.3 & 0.1 & 0.1 \\ 0.2 & 0.3 & 0.3 & 0.2 \\ 0.1 & 0.3 & 0.4 & 0.2 \end{pmatrix} = (0.2825, 0.3000, 0.2657, 0.1518);$$

$$E_2 = (0.4127, 0.2873, 0.2000, 0.1000);$$

$$E_3 = (0.2583, 0.2834, 0.3583, 0.1000);$$

$$E_4 = (0.3935, 0.2571, 0.1988, 0.1506)。$$

$$R = \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ E_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.2825 & 0.3000 & 0.2657 & 0.1518 \\ 0.4127 & 0.2873 & 0.2000 & 0.1000 \\ 0.2583 & 0.2834 & 0.3583 & 0.1000 \\ 0.3935 & 0.2571 & 0.1988 & 0.1506 \end{pmatrix}。$$

将 E_1, E_2, E_3, E_4 合成为整个对地攻击方案的模糊评价矩阵：

进而可以计算出整个方案的综合评判结果向量：

$$E = W^T \cdot R = (0.0882, 0.4832, 0.1569, 0.2717) \begin{pmatrix} 0.2825 & 0.3000 & 0.2657 & 0.1518 \\ 0.4127 & 0.2873 & 0.2000 & 0.1000 \\ 0.2583 & 0.2834 & 0.3583 & 0.1000 \\ 0.3935 & 0.2571 & 0.1988 & 0.1506 \end{pmatrix} = (0.3718, 0.2796, 0.2303, 0.1183)。$$

对评语 v_j 赋值 q_i , q_i 为百分制的一个分数，将评判结果向量转化为具体评估值 $S_{总}$ ，在此假定 $q_1 = 100, q_2 = 80, q_3 = 50, q_4 = 30$ 。则

$$S_{总} = \sum_{i=1}^4 e_i q_i = 0.3718 \times 100 + 0.2796 \times 80 + 0.2303 \times 50 + 0.1183 \times 30 = 74.61。$$

式中 $S_{总}$ 为航空兵对地攻击方案的百分制得分。对于其他航空兵对地攻击的方案可使用该方法进行评

估，根据总得分对评出的最优方案进行实施。

3 结束语

作为一种复杂的作战样式，航空兵对地攻击方案受多种因素影响。笔者构建了航空兵对地攻击评价指标体系，根据对地攻击过程的复杂性和模糊性，采用模糊综合评价方法对方案进行评估，并结合层次分析法计算各指标的权重，有效降低了权重确定过程中的主观性和不确定性，使得航空兵对地

攻击方案评估更加客观和科学。从计算过程可知，该方法可操作性强，可作为一种航空兵对地攻击方案的评估方法，对提高对地攻击效能具有较高的实用价值。

参考文献：

- [1] 张杰, 唐宏, 苏凯. 效能评估方法研究[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 16-80.
- [2] COOK W D, KRESS M. A Multiple-criteria Composite Index Model for Quantitative and Quantitative Data[J]. European Journal of Operational Research, 1994, 78(6): 367-79.
- [3] 潘景余, 王礼沅. 基于粗糙集的飞机空地作战效能多指标综合评估模型[J]. 火力与指挥控制, 2009, 34(10): 142-148.
- [4] 张蕾, 查滔, 张喜斌. 攻击机空地作战效能的灰色关联投影评估模型[J]. 电光与控制, 2008, 15(9): 35-42.

(上接第6页)

3.7 抗干扰能力评估与鉴定技术

针对复杂战场环境下导引头抗干扰性能评估与“地域分布、逻辑一体”的导引头抗干扰试验鉴定需求, 需开展强敌干扰技术及其运用、复杂战场环境等效构建、干扰对抗评估方法、抗干扰试验数据治理、抗干扰试验鉴定等技术研究, 形成包含目标/背景/干扰等多类要素的多粒度全数字模型体系, 可在内场以电磁信号形式复现外场复杂的战场环境, 支撑导引头抗干扰内场仿真测试与评估; 建立面向不同体制导引头的抗干扰性能测试与评估的平台和题库, 构建一套跨域联合抗干扰试验平台, 以及数据建设管理工具和数据管理平台, 形成共享可用的数据模型资源库, 支撑导引头抗干扰试验优化与能力摸边探底; 形成抗干扰试验理论方法、标准规范等成果, 为抗干扰试验鉴定提供重要指导。

4 结束语

为科学高效提升反装甲导引头抗干扰能力, 需尽快开展以下工作: 1) 重视应用场景与对手研究, 进行科学的技术趋势预判, 对“与谁打、怎么打”进行准确预判, 能够提出准确的需求, 为装备研发与技术发展指明方向, 避免为了发展而发展, 要有明确的规划与目标。2) 做好顶层规划, 做好装备系列化发展与技术体系化发展, 增强装备与技术普适

- [5] 胡晓惠, 蓝国兴, 申之明. 武器装备效能分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 20-36.
- [6] 梁保松, 曹殿立. 模糊数学及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 151-165.
- [7] 朱宝鏊, 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: 22-56.
- [8] 孙世霞, 来国军, 张宏斌. 武装直升机作战效能仿真与评估方法[M]. 北京: 科学出版社, 2019: 33-42.
- [9] 张海峰, 韩芳林, 潘长鹏. 基于云模型的无人机对海突击作战效能评估[J]. 兵工自动化, 2019, 37(4): 57-61.
- [10] 潘长鹏, 韩玉龙, 庄益夫. 舰载无人机编队协同对海突击作战效能评估指标体系研究[J]. 战术导弹技术, 2009(2): 25-32.
- [11] 张培高. 联合战役指挥教程[M]. 北京: 军事科学出版社, 2012: 23-45.
- [12] 张育军, 刘永辉, 邓洲. 作战空间的信息优势原理[J]. 舰船电子对抗, 2005, 28(6): 22-25.

性。建立适合自身特点的装备与技术体系, 避免碎片化发展产生的装备与技术的空白, 也能更加合理地利用资源, 形成良性发展循环, 这是降低成本的基本策略。3) 脚踏实地做好应用基础研究, 自主可控发展具有自身特点的技术, 注重基础研究工作的考核, 大力发展信号与信息处理技术。4) 通盘考虑, 统筹规划, 切实做好新技术的研发、转化与推广工作。对每一项新技术研究都作出明确的转化应用要求, 有效促进研发积极性与增强研发紧迫感, 同时对国防科技做好统筹, 做到军兵种间互通, 各技术领域间互通, 避免形成新技术转化与推广的壁垒, 提升研发投入的效费比。

参考文献：

- [1] 王学伟, 熊璋, 沈同圣, 等. 光电成像导引头抗干扰性能评估方法[J]. 光电工程, 2003(1): 56-58.
- [2] 徐记伟. 毫米波导引头抗干扰技术研究[J]. 飞航导弹, 2016(6): 80-83.
- [3] 赵永亮, 张天孝. 红外成像导引头抗干扰技术研究[J]. 航天电子对抗, 2009(1): 14-16.
- [4] 刘箴, 张宁, 吴馨远. 多模复合导引头发展现状及趋势[J]. 飞航导弹, 2019(10): 90-96.
- [5] 宁立跃, 胡仕友. 导弹导引头智能感知抗干扰性能评估方法研究[J]. 战术导弹技术, 2020(4): 119-124.
- [6] 马晓平, 赵良玉. 红外导引头关键技术国内外研究现状综述[J]. 航空兵器, 2018(3): 3-7.