

doi: 10.7690/bgzdh.2026.02.010

基于改进 G1-CRITIC 的导弹装备维修保障效能评估指标赋权方法

崔爽^{1,2}, 李保刚¹, 董德鹏³, 王婷婷⁴, 张荣亮⁵

(1. 海军航空大学岸防兵学院, 山东 烟台 264001; 2. 中国人民解放军 31660 部队勤务保障营, 宁夏 中宁 755100; 3. 中国人民解放军 31660 部队远程多管火箭炮营, 宁夏 中宁 755100; 4. 中国人民解放军 93786 部队通信修理所, 河北 张家口 075000; 5. 中国人民解放军 96224 部队一营, 山东 青岛, 266000)

摘要: 为提高导弹装备维修保障效能评估指标赋权科学合理性, 提出改进 G1-CRITIC 组合赋权法。构建由人力资源、物资保障、信息资源、训练与训练保障等 7 个因素组成的导弹装备维修保障效能评估指标体系, 用 DEMATEL 对传统 G1 法进行修正, 得到主观权重, 引入变异系数概念对 CRITIC 法进行改进获得客观权重, 运用最小鉴别信息法将主、客观权重进行组合。通过实例验证结果表明: 该方法合理有效, 能为导弹装备维修保障效能评估提供参考。

关键词: G1; CRITIC; 组合赋权; 指标权重; 效能评估; 导弹装备

中图分类号: TJ765 **文献标志码:** A

Evaluation Index of Missile Equipment Maintenance Support Effectiveness Based on Improved G1-CRITIC

Cui Shuang^{1,2}, Li Baogang¹, Dong Depeng³, Wang Tingting⁴, Zhang Rongliang⁵

(1. Naval Aviation University, Yantai 264001, China; 2. No. 31660 Unit of PLA, Zhongning 755100, China; 3. No. 31660 Unit of PLA, Zhongning 755100, China; 4. Communication Repair Department, No. 93786 Unit of PLA, Zhangjiakou 075000, China; 5. No. 96224 Unit of PLA, Qingdao 266000, China)

Abstract: An improved G1-CRITIC combination weighting method is proposed to improve the scientific rationality of missile equipment maintenance support effectiveness evaluation index weighting. The maintenance support effectiveness evaluation index system of missile equipment is constructed, which is composed of seven factors, such as human resources, material support, information resources, training and training support. The traditional G1 method is modified by DEMATEL to obtain the subjective weight, and the CRITIC method is improved by introducing the concept of variation coefficient to obtain the objective weight. The subjective and objective weights are combined by using the minimum discriminant information method. The example results show that the method is reasonable and effective, and it can provide reference for the effectiveness evaluation of missile equipment maintenance support.

Keywords: G1; CRITIC; combinatorial weighting; effectiveness evaluation; missile equipment

0 引言

导弹装备维修保障体系是由相关要素组合构成的, 其效能会直接影响导弹战斗力的形成与发挥^[1]。评估导弹装备维修保障效能的时候需要构建科学指标体系, 再根据各指标对整体效能的影响程度赋予其相应权重。选取恰当的方法对指标进行合理赋权一直是评估问题中研究的重点^[2]。

目前已有的研究结果显示: 指标赋权方法能够依照其特性划分为主观赋权法和客观赋权法^[3]。主观赋权法是基于评价者的主观认知情况, 通过对各个指标的重要性进行比对以及开展量化运算, 从而确定这些指标的权重, 目前主要有层次分析法(AHP)、灰色关联法、专家打分法(Delphi)等^[4-6]。客观赋权法主要有熵权法、模糊综合评判法、CRITIC 法等^[7-9]。由于个人偏好不同, 主观赋权法

具有较强主观随意性, 导致确定的指标权重主观不确定性, 而客观赋权法虽避免主观偏差, 并具有较为严谨的数学理论基础, 但仍存在一些不足, 当特定指标数据离散度太大时, 易被赋予过高权重, 使评估结果过度依赖单一指标^[10]。为了避开主客观赋权法的固有局限, 笔者通过改进传统 G1 法来确定主观权重, 优化 CRITIC 法计算客观权重, 基于最小鉴别信息原理将二者融合起来, 从而构建导弹装备维修保障效能评估的组合赋权模型。

1 导弹装备维修保障效能评估指标体系

根据导弹装备维修保障系统构成, 通过对影响效能发挥的因素进行分析, 结合相关专业学者意见后, 构建一套用于导弹装备维修保障效能的评估指标体系, 其结构情况如图 1 所示。

收稿日期: 2024-11-13; 修回日期: 2024-12-12

第一作者: 崔爽(1996—), 女, 河北人, 硕士。

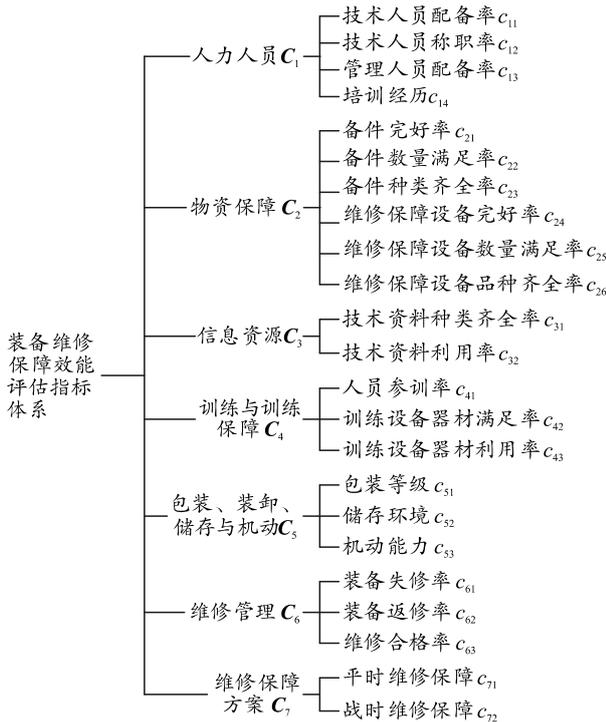


图 1 导弹装备维修保障效能评估指标的体系架构

该体系架构主要由 7 部分因素 23 个指标组成:

1) 根据维修保障活动人员主体引出的评估指标, 主要包括技术、管理人员的配备率、称职率及人员培训经历等;

2) 根据维修保障活动所需的物资资源提出的评估指标, 主要包括备件设备种类和数量的齐全率、满足率及完好率等;

3) 根据所需信息技术资源引出的评估指标, 主要包括技术资料的齐全率和利用率等;

4) 根据日常维修训练活动提出的评估指标, 主要有训练设备器材的满足率、利用率及人员参训率等;

5) 根据装备及物资的包装、储存、机动等需求引出的评估指标, 包括装备备件的包装等级、储存环境及保障机动能力等;

6) 根据装备的维修管理提出的评估指标, 包括装备的失修、返修、合格率等;

7) 根据维修保障活动方案提出的评估指标, 包括平时、战时维修保障方案等。

2 改进 G1-CRITIC 组合赋权法基本原理

2.1 改进 G1 法主观赋权

2.1.1 序关系分析法(G1 法)

G1 法是在层次分析法基础上改进的主观赋权方法。它的分析流程和层次分析法比较相近, 能够

充分融入专家所具备的丰富经验, 同时还显著简化了赋权过程存在的复杂性, 这种方法不仅计算量相对较小, 而且避免了层次分析法里的一致性检验环节^[11], 适用于具有随机性、模糊性且数量较多的指标, 可以较好地体现指标间的序列关系。

基本步骤如下:

1) 按照该领域专业方面的认知以及实际应用的需求, 对评估指标开展重要性的排序工作, 将其依次划分成 n 个指标(x_1, x_2, \dots, x_n)进行排列, 假设排序结果为: $x_1 > x_2 > \dots > x_n$ ($>$ 为前者在某种程度上优于后者的关系)。

2) 按照各指标序列之间的关系进行排序, 专家凭借自身经验评估相邻指标之间的重要程度, 然后依据评估结果确定相应的标度值 R_k :

$$R_k = a_{k-1}/a_k \quad (k = n, n-1, \dots, 2). \quad (1)$$

式中: a_{k-1} 为排序关系中第 $k-1$ 个指标 x_{k-1} 的主观权重; a_k 为排序关系中第 k 个指标 x_k 的主观权重。

标度值定义如表 1 所示。

表 1 指标重要性尺度及其含义说明

标度值	含义说明
1.0	2 个指标在重要性上处于同等水平
1.2	前一指标相较后一指标略占优势
1.4	前一指标相较后一指标具有较明显的重要性
1.6	前一指标相较后一指标表现出较强的重要性
1.8	前一指标相较后一指标具有极为突出的重要性
1.1, 1.3, 1.5, 1.7	用于表示相邻 2 个重要性等级之间的中间状态

3) 依据专家咨询意见构建判断矩阵, 进而求解得出各指标的权重分别为:

$$a_j = \left[1 + \sum_{k=2}^m \left(\prod_{j=k}^m R_j \right) \right]^{-1} \left. \begin{array}{l} \\ a_{k-1} = R_k a_k \quad (k = n, n-1, \dots, 3, 2) \end{array} \right\}. \quad (2)$$

4) 为了降低专家主观因素所带来的干扰, 专门组织多位专家针对同一问题开展独立评判, 然后汇总分析各位专家得出的结果以形成综合结论。

一般情况下, p 中可能有 p_1, p_2, \dots, p_u ($1 \leq p_d \leq p, d = 1, 2, \dots, u, \sum_{d=1}^u p_d = p$) 位专家对 x_1, x_2, \dots, x_n

给出序列关系为 $x_{k1}^{(d)} > x_{k2}^{(d)} > \dots > x_{kn}^{(d)} (k = 1, 2, \dots, p_d; d = 1, 2, \dots, u)$, 给出 $x_{i-1}^{(d)}$ 与 $x_i^{(d)}$ 不同事物之间重要性进行对比 $R_{ki}^{(d)} (k = 1, 2, \dots, p_d; d = 1, 2, \dots, u)$ 。由式(2)计算出 $x_{kj}^{(d)}$ 的权重系数 $a_{kj}^{(d)}$, 对每个 j ($1 \leq j \leq n$), 将 p_d 个 $a_{ki}^{(d)}$ 把各个数值的几何平均数取出来当作集

成的输出：

$$a_j^{(d)} = \frac{1}{p_d} \sum_{k=1}^{p_d} a_{kj}^{(d)}, \quad (j=1, 2, \dots, n; d=1, 2, \dots, u)。 \quad (3)$$

$$a_j = k_1 a_j^{(1)} + k_2 a_j^{(2)} + \dots + k_u a_j^{(u)}, \quad (j=1, 2, \dots, n)。 \quad (4)$$

式中 $k_d = p_d/p (d=1, 2, \dots, u)$ 。

2.1.2 改进 G1 赋权法

虽然 G1 法能够对主观权重进行有效确定，传统的 G1 法没有充分消除指标之间的耦合关联，所以引入 DEMATEL 法对主观权重进行修正，以此精确地确定指标之间的影响联系，从而提升评估的准确性。

步骤如下：

1) 构建直接影响矩阵

根据各个因素的全局权重来开展两两比较工作，根据目前这种情形来构建直接影响矩阵，经过标准化处理后生成规范化矩阵：

$$B = \frac{A}{\max_{1 \leq j \leq n} \sum_{i=1}^n a_{ij}} = (b_{ij})_{n \times n}。 \quad (5)$$

2) 建立综合影响矩阵

按照式(3)对综合影响矩阵 T 开展求解工作：

$$T = B/E - B = (t_{ij})_{n \times n}。 \quad (6)$$

式中： E 为单位矩阵； t_{ij} 为指标 i 对指标 j 的直接影响程度。

3) 着手进行影响力评估矩阵的构建工作。

根据式(4)得出中心影响矩阵 a'' ：

$$a'' = (a_j'')_{1 \times n} = \left(\sum_{j=1}^n t_{ij} + \sum_{j=1}^n t_{ji} \right)_{1 \times n}。 \quad (7)$$

4) 根据式(5)对通过 G1 法所确定的主观权重开展校正处理：

$$a = (a_j)_{1 \times n} = \left(\frac{a_j a_j''}{\sum_{j=1}^n a_j a_j''} \right)_{1 \times n}。 \quad (8)$$

式中： a_j 为修正后的主观权重； a_j'' 为中心影响度。

2.2 开展基于 CRITIC 法的客观权重优化工作

2.2.1 介绍 CRITIC 法的具体原理内容

CRITIC 法和熵权法的原理比较相近，在权重计算时既会考量指标对比强度，又会兼顾指标之间的冲突性，属于更为全面的客观赋权方法。基本步骤如下：

1) 计算各指标标准差。

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}； \quad (9)$$

$$\bar{x}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_{ij}。 \quad (10)$$

式中： σ_j 为第 j 个指标 x_j 的标准差； \bar{x}_j 为 m 个方案中指标 x_j 的平均值。

2) 计算各指标间相关系数 r_{ij} ：

$$r_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x}_i)(x_j - \bar{x}_j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x}_i)^2 \sum_{j=1}^m (x_j - \bar{x}_j)^2}}。 \quad (11)$$

式中： \bar{x}_i 为指标 x_i 在所有方案中的平均指标值；同理 \bar{x}_j 为指标 x_j 在所有方案中的平均指标值。

3) 计算指标包含的信息量：

$$C_j = \sigma_j \cdot \sum_{i=1}^n (1 - r_{ij}), \quad j=1, 2, \dots, n。 \quad (12)$$

对 CRITIC 法来说， C_j 越大表示指标信息的量越大。

4) 计算各指标客观权重：

$$b_j = C_j / \sum_{j=1}^n C_j。 \quad (13)$$

2.2.2 改进 CRITIC 法

在对导弹装备维修保障系统进行评价时，存在指标量纲不一样且数量级差异特别明显的问题，为准确反映出指标的变异程度，笔者采用变异系数来改进 CRITIC 法。

1) m 个评价对象和 n 个指标中第 i 个对象的第 j 个指标取值 x_{ij} 构成原始指标数值矩阵 $X=(x_{ij})_{m \times n}$ 。

2) 对 X 中各指标值进行标准化处理：

$$x_{ij}^* = (x_{ij} - \bar{x}_j) / s_j \quad (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n)。 \quad (14)$$

$$\bar{x}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_{ij}； \quad (15)$$

$$s_j = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}。 \quad (16)$$

式中 \bar{x}_j 和 s_j 分别为第 j 个指标的均值和标准差。

3) 求指标的变异系数：

$$v_j = s_j / \bar{x}_j \quad (j=1, 2, \dots, n)。 \quad (17)$$

4) 通过开展标准化矩阵计算得出指标相关系数，进而获取到相关系数矩阵：

$$R = (r_{hl})_{n \times n} \quad (h=1, 2, \dots, n; l=1, 2, \dots, n)。 \quad (18)$$

式中 r_{hl} 为 h 和 l 指标间的相关系数。

5) 求各指标独立性程度的量化系数:

$$\eta_j = \sum_{h=1}^n (1 - r_{hj}) \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (19)$$

6) 求各评价指标的综合性系数:

$$C_j = v_j \sum_{h=1}^n (1 - r_{hj}) \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (20)$$

7) 确定各指标权重:

$$\omega_j = C_j / \sum_{j=1}^n C_j \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (21)$$

2.3 基于最小相对熵确定组合权重

为了让组合权重能够最大限度地贴近主客观权重,按照最小信息准则,把集成修正 G1 法得到的主观权重和改进 GRITIC 法获取的客观权重整合起来,测算指标的组合权重:

$$\left. \begin{aligned} \min J(\lambda) &= \sum_{i=1}^n \left(\lambda_i \ln \frac{\lambda_i}{a_i} + \lambda_i \ln \frac{\lambda_i}{\omega_i} \right) \\ \text{s.t.} \sum_{i=1}^m \lambda_j &= 1 \quad \lambda_j \geq 0 \quad i=1, 2, \dots, m \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

式中 λ_j 为第 j 各个指标的组合权重值,求解该模型可得组合权重:

$$\lambda_j = \frac{\sqrt{a_j \omega_j}}{\sum_{j=1}^m \sqrt{a_j \omega_j}} \quad (23)$$

3 实例分析

根据图 1 可知:导弹装备维修保障效能评估指标体系,中因素层有 7 个指标,指标层有 23 个指标,维修保障效能评估的前提条件是对各项指标开展权重赋值工作。

3.1 对 G1 法改进并确定主观权重

笔者邀请了 6 名导弹装备维修保障领域的专家来参与评价分析,按照表 1 所示标度值对因素层做排序以及赋值,接着对指标层完成序关系判定与赋值操作。

其中专家 1 确定因素层指标序关系为 $C_2 > C_5 > C_4 > C_1 > C_6 > C_7 > C_3$,相邻指标重要度之比为: $R_1=1.2; R_2=1.6; R_3=1.2; R_4=1.4; R_5=1.2; R_6=1.2$,根据式(1)和(2)求出权重依据原指标顺序为: 0.121, 0.280, 0.060, 0.146, 0.233, 0.087, 0.072。其他 5 位专家依据相同的方法算出权重,根据式(3)和(4)得到平均权重,具体数值如表 2 所示。

表 2 因素层指标权重

专家	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7
1	0.121	0.279	0.060	0.145	0.232	0.086	0.072
2	0.137	0.276	0.070	0.197	0.164	0.098	0.058
3	0.132	0.190	0.079	0.158	0.266	0.110	0.065
4	0.103	0.248	0.086	0.172	0.207	0.123	0.061
5	0.149	0.180	0.079	0.136	0.251	0.113	0.094
6	0.137	0.253	0.082	0.151	0.211	0.098	0.068
均值	0.130	0.238	0.076	0.160	0.222	0.105	0.070

同理以相同方法得到指标层各指标权重向量:

$$C_1 = (0.271, 0.337, 0.165, 0.227) ; C_2 = (0.227, 0.133, 0.131, 0.238, 0.138, 0.134) ; C_3 = (0.615, 0.385) ; C_4 = (0.459, 0.259, 0.281) ; C_5 = (0.232, 0.483, 0.284) ; C_6 = (0.272, 0.308, 0.420) ; C_7 = (0.417, 0.583) 。$$

计算各指标在体系中权重:

$$C = \begin{pmatrix} 0.035, 0.044, 0.021, 0.030 \\ 0.054, 0.032, 0.031, 0.057, 0.033, 0.032 \\ 0.047, 0.030 \\ 0.073, 0.041, 0.045 \\ 0.052, 0.107, 0.063 \\ 0.029, 0.032, 0.044 \\ 0.029, 0.041 \end{pmatrix} \quad (24)$$

根据各个因素全局权重进行两两比较来构建直接影响矩阵,利用式(5)和(6)开展计算从而得到综合影响矩阵 T ,再依据式(7)进行求解以得出中心影响矩阵 a'' :

$$a'' = [-2.087, -2.0337, -2.241, 2.124, 1.990, 2.109, -2.554, -2.875, 1.979, 2.537, -2.623, 2.764, 2.681, 2.548, -2.687, 2.605, 2.796, 2.534, 2.109, 2.559, -2.641, 2.821, -2.050] \quad (25)$$

由式(8)得到修正后主观权重:

$$a = [0.036, 0.041, 0.023, 0.031, 0.053, 0.033, 0.032, 0.055, 0.034, 0.033, 0.048, 0.031, 0.070, 0.041, 0.045, 0.051, 0.099, 0.060, 0.031, 0.033, 0.044, 0.031, 0.041] \quad (26)$$

3.2 改进 CRITIC 法确定客观权重

按照某导弹保障单位维修保障得到的实测数据构建初始指标数值矩阵,在经过标准化处理之后,借助式(17)~(19)计算出各评价指标的综合系数:

$$C = (1.037, 1.215, 0.770, 0.077, 1.511, 1.224, 0.918, 1.244, 0.947, 1.244, 1.155, 0.740, 1.866, 1.598, 1.303, 1.215, 3.407, 1.256, 0.860, 1.066, 1.096, 0.859, 1.214) \quad (27)$$

由式(21)得到客观权重:

$$\omega = [0.035, 0.041, 0.026, 0.027, 0.051, 0.042, 0.031, 0.042, 0.032, 0.042, 0.039, 0.025, 0.063, 0.054, 0.044, 0.041, 0.115, 0.038, 0.029, 0.036, 0.037, 0.029, 0.041] \quad (28)$$

3.3 确定组合权重

将主客观权重代入式(23)求得综合权重，所得结果如表 3 所示。

表 3 各指标权重值

指标	主观权重	客观权重	组合权重
C ₁₁	0.036	0.035	0.036
C ₁₂	0.041	0.041	0.042
C ₁₃	0.023	0.026	0.025
C ₁₄	0.031	0.027	0.030
C ₂₁	0.053	0.051	0.053
C ₂₂	0.033	0.042	0.038
C ₂₃	0.032	0.031	0.032
C ₂₄	0.055	0.042	0.049
C ₂₅	0.034	0.032	0.034
C ₂₆	0.033	0.042	0.038
C ₃₁	0.048	0.039	0.044
C ₃₂	0.031	0.025	0.028
C ₄₁	0.070	0.063	0.068
C ₄₂	0.041	0.054	0.048
C ₄₃	0.045	0.044	0.046
C ₅₁	0.051	0.041	0.047
C ₅₂	0.099	0.115	0.110
C ₅₃	0.060	0.038	0.049
C ₆₁	0.031	0.029	0.031
C ₆₂	0.033	0.036	0.035
C ₆₃	0.044	0.037	0.041
C ₇₁	0.031	0.029	0.031
C ₇₂	0.041	0.041	0.042

以物资保障因素指标主观、客观、组合权重为例，绘制簇状折线如图 2 所示。

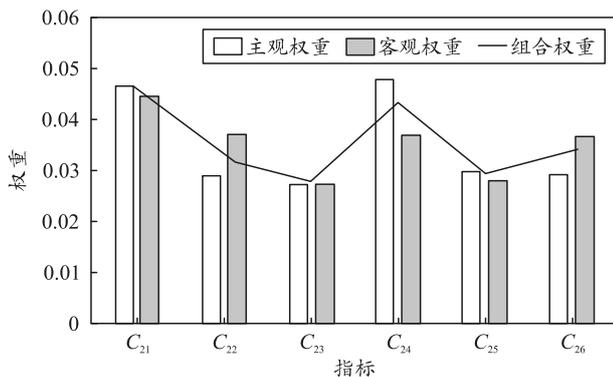


图 2 物资保障因素指标权重计算结果

由图 2 可知：修正 G1 法在考虑专家经验的基础上综合考量指标间相互关联关系，导致主观权重波动大，改进 CRITIC 法确定的客观权重是根据实际数据特点得到的，波动较平缓。最小鉴别信息法确定组合权重平衡了主、客观权重的差异，与两者

的距离尽可能小，既体现了专家经验，又包含了实际数据信息特点，具有较强科学性^[16]。

4 结论

笔者构建了由人力人员、物资保障、信息资源、训练与训练保障等 7 个因素组成的导弹装备维修保障效能评估指标体系，涵盖了导弹维修保障系统的各方面；利用 DEMATEL 对传统 G1 法进行修正获得主观权重；引入变异系数概念对 CRITIC 法进行改进确定客观权重；根据最小鉴别信息法将主、客观权重进行组合，提出了改进的 G1-CRITIC 组合赋权法，并通过实例验证，其能弥补单一赋权法缺陷且合理有效。

参考文献：

- [1] 张柳, 于永利, 聂成龙, 等. 装备维修保障系统建模理论与方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [2] 施端阳, 胡冰, 刘一鸣, 等. 改进 AHM-RS 雷达装备保障性评估指标赋权方法[J]. 火力与指挥控制, 2020, 45(6): 170-176.
- [3] 张发明. 综合评价基础方法及应用[M]. 北京: 科学工业出版社, 2018: 23-24.
- [4] 谢经纬, 时扬, 尹东亮, 等. 基于 AHP-云模型的部队装备维修保障效能评估[J]. 信息与电脑(理论版), 2020, 32(20): 40-43.
- [5] 艾宝利, 武昌. 维修保障系统效能评估的灰色-证据理论模型[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2009, 10(4): 81-84.
- [6] 田军, 张朋柱, 王刊良, 等. 基于德尔菲法的专家意见集成模型研究[J]. 系统工程理论与实践, 2004(1): 57-62, 69.
- [7] TIAN J, ZHANG P Z, WANG K L, et al. The integrating model of expert's opinion based on Delphi method[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2004(1): 57-62, 69.
- [8] 闫永玲, 张庆波, 李国立. 地空导弹装备战时维修保障效能评估研究[J]. 火力与指挥控制, 2020, 45(7): 51-55.
- [9] 王波, 钟峰, 王永安. 基于模糊综合评判的导弹维修保障系统评估研究[J]. 舰船电子工程, 2013, 33(3): 97-99.
- [10] 邱日升, 潘继飞, 赵君, 等. 基于组合赋权的 ELINT 系统效能评估算法[J]. 现代雷达, 2020, 42(8): 13-18.
- [11] 吕瑞强, 胡涛, 杨阳. 基于改进熵值法的装备维修保障能力灰色评估[J]. 火力与指挥控制, 2017, 42(5): 108-111.