

基于改进 AHP 的短波通信装备性能指标评价

史珂¹ 刘旭²
SHIKe LIU Xu

摘要

为提高短波通信装备保障能力，针对目前装备日常维护指标不全面、装备状态定性呈现、日常维护指标数据利用率高等问题，对 AHP 层次分析法进行优化研究，将日常维护指标数据直接转化为比较矩阵，从而缩短装备性能指标评价时间，并且消除了方案层对准则层数据不一致的问题。以某短波收信机为例进行性能评价，评价结果表明，所提出的方法能够科学、准确、客观地评估装备性能指标，为组网决策提供一定的参考依据。

关键词

AHP；层次分析法；短波通信；通信保障；装备性能

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.08.026

0 引言

短波通信目前已成为军事通信的重要组成部分、战场通信的保底手段^[1]，短波通信装备的保障能力将直接影响战斗力生成。除了提高技术人员的管理、维修能力之外，合理利用装备的各项技术指标^[2]，给出装备适用性评价，在复杂战场环境中为技术人员迅速组建作战指挥网络提供决策依据，也能直接提高短波通信装备的保障能力。

在装备的日常维护中，重要技术指标在合理范围内则认为装备堪用，当需要组网或替换装备时，技术人员凭借工作经验在几十个同类装备中进行择优选择。但实际上，评价一个装备只考虑其重要技术指标是不够的，应当建立起平衡、全面的评价体系^[3]。且各指标权重应有所调整，例如灵敏度指标的重要性要高于信噪比。评价标准应可量化，有助于减少主观因素的干扰，增加评价结果的说服性。基于以上问题，使用改进的 AHP 层次分析法将定性方法与定量方法相结合，在多目标、多准则决策问题中给出最佳的选择。

1 研究方法概述

1.1 AHP 层次分析法

层次分析法，简称 AHP，是美国运筹学家匹茨堡大学教授萨蒂于 20 世纪 70 年代初提出的一种层次权重决策分析方法^[4]。该方法将一个复杂的多目标决策问题分解为目标层、准则层和方案层，每一层有若干指标，通过专家打分的方法将同一层次的指标对上一层准则的相对重要程度进行两两比较，构成成对比较矩阵，最终得到不同的解决方案的权重，

为最佳的选择提供理论依据。层次分析法把定性方法与定量方法有机结合，将多准则难处理的决策问题简化为多层次单目标问题，但也存在所需定量数据少的问题。该方法只把人脑对要素的印象转换为简单的权重进行计算，对于短波通信装备保障来说还不够精准和快速，因此需要对 AHP 层次分析法进行改进。

1.2 改进的 AHP 层次分析法

层次分析法在构造成对比较矩阵时，每一层都采用专家打分的方式，但出于现实考虑，通信装备指标会根据使用情况经常变化，因此在实际作战时，方案层指标对准则层的重要程度通过现场进行专家打分确定是不现实的。

结合短波通信装备特点，每台装备在某指标上都有实际的检测数值，因此可以直接将定量指标转换为两两比较矩阵。改进之后的 AHP 层次分析法计算过程如下。

(1) 假设有 m 个评价指标， n 个评价对象，建立指标评价模型，如图 1 所示。

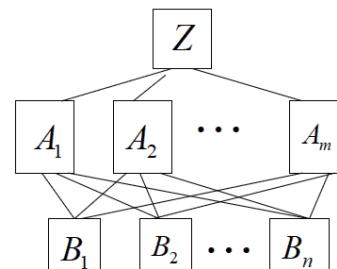


图 1 评价模型

(2) 通过专家打分的方式，把准则层的 m 个指标进行两两比较，确定准则层各指标对目标层的影响权重，构建成对比较矩阵。矩阵中的元素 a_{ij} 表示第 i 个指标相对于

1. 海军潜艇学院 山东青岛 266000
2.91033 部队 山东青岛 266000

第 j 个指标的比较结果，每一种对比结果都可以通过矩阵 $\mathbf{A}=(a_{ij})_{m \times m}$ 展现， \mathbf{A} 就叫作两两比较矩阵，很明显能够看出 $a_{ij}=1/a_{ji}$ ^[5]。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

在构造过程中，为了使结果尽量客观，避免分级过度带来过程中的误差^[6]，通常采用如表 1 所示的九级标度来确定 a_{ij} 的值，尽可能减少性质不同的诸因素相互比较的困难，以提高准确度。

表 1 九级标度表

标度	含义
1	第 i 个指标与第 j 个指标的影响相同
3	第 i 个指标比第 j 个指标的影响稍强
5	第 i 个指标比第 j 个指标的影响强
7	第 i 个指标比第 j 个指标的影响明显强
9	第 i 个指标比第 j 个指标的影响绝对地强
2, 4, 6, 8	表示第 i 个指标因素相对于第 j 个指标的影响介于上述两个相邻等级之间

两两比较矩阵 \mathbf{A} 构造结束后，计算矩阵 \mathbf{A} 的最大特征值 λ_{\max} 和该特征值对应的特征向量，特征向量即为准则层各指标对于目标层影响程度的权重。

(3) 通过将各备选方案日常维护指标直接转换的方式，确定方案层对准则层的两两比较结果，矩阵中的元素 b_{ij} 表示第 i 个备选方案相对于第 j 个备选方案的比较结果。

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

同理，计算矩阵 \mathbf{B} 的最大特征值和该特征值对应的特征向量，特征向量即为方案层各备选方案对于准则层影响程度的权重。

(4) 要确定方案层对于目标层相对重要性的排序权值，即层次总排序，假设 \mathbf{A} 层 5 个因素 A_1, A_2, \dots, A_5 ，对总目标 Z 的排序为 a_1, a_2, \dots, a_5 。 \mathbf{B} 层 3 个因素对上层 \mathbf{A} 中因素为 A_j 的层次单排序为 b_{1j}, b_{2j}, b_{3j} 。现求 \mathbf{B} 层各因素关于总目标的权重，即求 \mathbf{B} 层各因素的层次总排序权重 b_1, b_2, b_3 ，计算按图 2 所示方法进行，即：

$$b_i = \sum_{j=1}^m b_{ij} a_j, \quad i = 1, \dots, n \quad (3)$$

	A_1, A_2, \dots, A_m a_1, a_2, \dots, a_m	\mathbf{B} 层的层次 总排序
B_1	$b_{11} \quad b_{12} \quad \cdots \quad b_{1m}$	$\sum_{j=1}^m a_j b_{1j} = b_1$
B_2	$b_{21} \quad b_{22} \quad \cdots \quad b_{2m}$	$\sum_{j=1}^m a_j b_{2j} = b_2$
\vdots	$\vdots \quad \vdots \quad \ddots$	\vdots
B_n	$b_{n1} \quad b_{n2} \quad \cdots \quad b_{nm}$	$\sum_{j=1}^m a_j b_{nj} = b_n$

图 2 层次总排序计算方法

1.3 一致性检验

准则层对目标层的两两比较矩阵 \mathbf{A} 构造完毕后会发现仍然存在一些问题，例如在两两比较矩阵 \mathbf{A} 中专家打分 A_1 与 A_2 之比为 1:2， A_1 与 A_3 之比为 4:1，那么 A_2 与 A_3 之比应该为 8:1，而不是专家打分的结果 7:1，才能说明成对比较是一致的。但由于客观事物的复杂性，会使专家的判断带有主观性和片面性，完全要求专家在每次比较判断时的思维标准一致是不太可能的^[7]。

因此，在构造比较判断矩阵时，并不要求 $n(n-1)/2$ 次比较全部一致^[8]。虽然不要求矩阵完全具有一致性，但一个混乱的、经不起推敲的矩阵有可能导致决策的失误^[9]，因此，对于每一层次进行指标权重排序时，均需要做一致性的检验，从而确保其指标大体一致。

由于两两比较矩阵 \mathbf{A} 的特征根连续地依赖于 a_{ij} ， λ_{\max} 比 n 大得越多， \mathbf{A} 的非一致性程度也就越严重，因此可以用 $\lambda_{\max}-n$ 数值的大小来衡量 \mathbf{A} 的不一致程度。具体计算方法如下。

(1) 计算两两比较矩阵 \mathbf{A} 的最大特征值 λ_{\max} ，从而得出一致性指标 CI：

$$CI = \frac{\lambda_{\max}-n}{n-1} \quad (4)$$

(2) 在表 2 中查找与 n 对应的平均随机一致性指标 RI。

表 2 RI 值

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

(3) 计算随机一致性比例 CR：

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (5)$$

当一致性比率 $CR < 0.1$ 时，认为两两比较矩阵 \mathbf{A} 的不一致程度在容许范围之内。

2 装备性能指标评价流程

结合评估基本内容和评估方法应用实际，装备性能指标评价流程如图 3 所示。

装备性能指标评价流程按照评价任务分析、评价指标模型构建、指标权重计算、一致性检验和层次总排序的顺序进行。评价任务分析主要包括任务分析、装备使用特点分析和

日常维护指标分析。评价指标模型构建主要结合装备管理规定、装备属性特点建立性能评价指标模型，为后续评价打下基础。指标权重计算主要是基于改进的 AHP 层次分析法形成模型中下一层对上一层的两两比较矩阵，计算其最大特征值和该特征值对应的特征向量。一致性检验是检验专家打分形成的两两比较矩阵是否大体一致，验证数据的有效性。层次总排序是计算模型中最后一层方案层对第一层目标层的排序权值，从而得出推荐结果，为组网提供决策依据和辅助参考。

3 实例分析

结合前文所述装备性能指标评价流程，以某短波收信机为例，详细介绍装备性能指标评价的组织与方法，验证改进 AHP 方法的有效性和可行性。

3.1 建立指标评价模型

根据实地调研情况反馈，收信机除了日常测试的灵敏度、信噪比和音频响应三个指标外，还应对装备的使用年限、故障次数两个重要指标进行考量，综合评定装备性能。因此，根据层次分析法的基本思想，最终确定目标层为最佳目标收信机，准则层包括使用年限、故障次数、灵敏度、信噪比、音频响应五个方面，方案层为三个收信机名称。该装备性能指标评价体系结构如图 3 所示。

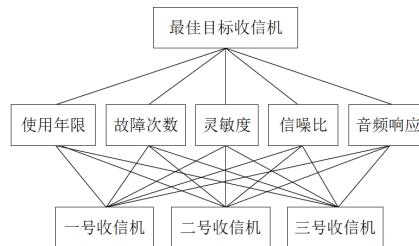


图 3 某装备指标评价模型

- (1) 使用年限。按照装备参数中的启用时间进行计算。
- (2) 故障次数。统计装备故障及维修保养记录中的数据，把影响正常使用的故障进行计数。
- (3) 灵敏度。涉及上边带灵敏度、下边带灵敏度，且上下边带灵敏度要分别在三种工作频率下进行检测，将以上六个数据取均值得出该装备的灵敏度值。
- (4) 信噪比。信噪比的检测数据同样分别在三种工作频率下进行检测，将三个数据取均值得出该装备的信噪比。
- (5) 音频响应。音频响应的检测数据同样分别在三种工作频率下进行检测，将三个数据取均值得出该装备的音



图 3 装备性能指标评价流程

频响应。

3.2 指标权重计算

3.2.1 准则层对目标层权重计算

根据指标评价模型，利用九级标度法，通过专家咨询法，对指标的重要程度进行评分，通过对打分结果进行内部的再次讨论与最终归纳，最终得出五项准则因素对目标层的影响两两比较矩阵 A ，其中 A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 分别表示使用年限、故障次数、灵敏度、信噪比、音频响应。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2} & 4 & 3 & 3 \\ 2 & 1 & 7 & 5 & 5 \\ \frac{1}{4} & \frac{1}{7} & 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & 2 & 1 & 1 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 3 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

求得矩阵 A 最大特征值 $\lambda_{\max}=5.073$ ，该特征值对应的特征向量为：

$$w = \{0.263, 0.475, 0.055, 0.099, 0.110\} \quad (7)$$

3.2.2 方案层对准则层权重计算

采用改进的 AHP 方法，直接使用日常维护数据，将其转化为两两比较矩阵。以使用年限指标为例，得出三个备选方案两两比较矩阵 B_1 ，其中 B_1, B_2, B_3 分别表示一号收信机、二号收信机和三号收信机。

$$B_1 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 5 \\ \frac{1}{2} & 1 & 2 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

具体来看，在两两比较矩阵 B_1 中， $b_{12}=2$ 表示一号收信机与二号收信机之比为 2:1。权重越高表示选用概率越大，因此在使用年限这个指标构建两两矩阵的过程中，可以使用两个装备实际使用年限的反比表示其标度，例如一号收信机使用时间为一年，二号收信机使用为两年，则一号收信机与二号收信机之比 $b_{12} = \text{二号收信机使用年限} / \text{一号收信机使用年限} = 2$ 。对于故障次数同样使用两个设备的反比作为标度，而灵敏度、信噪比、音频响应这三个指标直接使用两个设备测试指标的正比作为标度即可。

根据该方法得出 B_2, B_3, B_4, B_5 矩阵分别表示三个备选方案对于故障次数、灵敏度、信噪比、音频响应几项因素两两比较的结果：

$$\begin{aligned} B_2 &= \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{8} \\ 3 & 1 & \frac{1}{3} \\ 8 & 3 & 1 \end{bmatrix} & B_3 &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 3 \\ 1 & 1 & 3 \\ 3 & 3 & 1 \end{bmatrix} \\ B_4 &= \begin{bmatrix} 1 & 3 & 4 \\ \frac{1}{3} & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} & B_5 &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & \frac{1}{4} \\ 1 & 1 & \frac{1}{4} \\ 4 & 4 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

B_1 矩阵的最大特征值 $\lambda_{\max}=3.005$, 该特征值对应的特征向量 $w=\{0.595, 0.277, 0.129\}$ 。

B_2 矩阵的最大特征值 $\lambda_{\max}=3.002$, 该特征值对应的特征向量 $w=\{0.082, 0.236, 0.682\}$ 。

B_3 矩阵的最大特征值 $\lambda_{\max}=3$, 该特征值对应的特征向量 $w=\{0.429, 0.429, 0.142\}$ 。

B_4 矩阵的最大特征值 $\lambda_{\max}=3.009$, 该特征值对应的特征向量 $w=\{0.633, 0.193, 0.175\}$ 。

B_5 矩阵的最大特征值 $\lambda_{\max}=3$, 该特征值对应的特征向量 $w=\{0.166, 0.166, 0.668\}$ 。

3.3 一致性检验

3.2.1 准则层对目标层一致性检验

根据上一节构造的两两比较矩阵 A , 计算其一致性指标:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1} = \frac{5.073 - 5}{5 - 1} = 0.018 \quad (10)$$

当 n 为 5 时, 根据 RI 值表查询可得, $RI=1.12$, 故随机一致性比例:

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.018}{1.12} = 0.016 \quad (11)$$

计算结果 $CR < 0.1$, 因此两两比较矩阵 A 通过一致性验证。

3.2.2 方案层对准则层一致性检验

两两比较矩阵 B_1, B_2, B_3, B_4, B_5 使用不是专家打分的方式, 而是实际记录数据的比例, 因此不存在不一致的问题, 不需要进行一致性检验。

3.4 层次总排序

矩阵的最大特征根 $\lambda_{\max}=n$ 对应的标准化特征向量作为被比较指标对上层影响程度的权向量, 因此准则层 A 对总目标 Z 的排序为 $\{0.263, 0.475, 0.055, 0.099, 0.110\}$ 。方案层 B 对准则层 A 的五项因素的排序分别为: $\{0.595, 0.277, 0.129\}, \{0.082, 0.236, 0.682\}, \{0.429, 0.429, 0.142\}, \{0.633, 0.193, 0.175\}, \{0.166, 0.166, 0.668\}$ 。

根据 $b_i = \sum_{j=1}^m b_{ij}a_j$ 可得, 方案一 B_1 对总目标的权值为 0.3。同理得 B_2, B_3 对总目标的权值分别为 0.246 和 0.4, 即方案层对总目标的权向量为 $\{0.3, 0.246, 0.456\}$ 。

层次结构的总体排序也需要一致性检验。尽管每层都通过了单级别层次结构的一致性检验, 每对比较判断矩阵的一致性都大体满足要求, 但各层之间仍可能有所差异, 而这种差异将随着层次总排序的逐渐计算而累加起来, 因此需要从模型的总体上来检验这种差异尺度的累积是否显著^[10]。

设 B 层 B_1, B_2, B_3 对上层 A 层中因素 A_j 的层次单排序一致性指标为 CI_j , 随机一致性指标为 RI_j , 则层次总排序的一致性比例为:

$$CR = \frac{a_1CI_1 + a_2CI_2 + \cdots + a_5CI_5}{a_1RI_1 + a_2RI_2 + \cdots + a_5RI_5} = 0.015 \quad (12)$$

当 $CR < 0.1$ 时, 认为层次总排序通过一致性检验, 故

层次总排序通过一致性检验。 $\{0.3, 0.246, 0.456\}$ 可作为最后的决策依据, 即各方案的权重排序为 $B_3 > B_1 > B_2$, 又 B_1, B_2, B_3 分别表示一号收信机、二号收信机、三号收信机, 故最后的决策应该使用三号收信机。

4 结语

使用 AHP 层次分析法对装备性能指标进行建模, 对于定量的指标改进两两比较矩阵的构造方法, 通过单排序、总排序和一致性检测得出算法推荐装备, 为组网决策提供依据, 解决了目前短波通信装备评价指标不完善、量化考核困难、组网决策前缺乏一套科学的评价程序的问题。在实际应用中, 对于不同装备可对准则层再具体划分, 形成四层评价模型, 通过专家打分的方式确定每层指标的权重, 使算法更贴近实际应用。

参考文献:

- [1] 朱卫星, 冯浩. 短波通信: 战场通信的保底手段 [EB/OL]. (2022-07-15)[2023-10-20].http://www.81.cn/bq_208581/10171591.html.
- [2] 韩志超. 基于改进 CRITIC 和区间 MABAC 的装备研制风险评估 [J]. 海军舰艇学报, 2022, 45(6):34-39.
- [3] 王向飞. 装备作战试验设计与评估一体化方法研究 [J]. 海军舰艇学报, 2023, 46(2):24-29.
- [4] 金森. 基于层次分析法的研学旅行综合评价指标体系研究 [D]. 太原: 山西大学. 2020.
- [5] 陈磊. 基于 AHP 的装备试验数据质量评估方法研究 [J]. 舰船电子工程, 2024, 44(1):171-174.
- [6] 杜鹏. 高校研究生导师立德树人多维考核体系的构建研究: 基于层次分析法 [J]. 高等教育评论, 2020, 41(6):46-55.
- [7] 龙万涛. 基于云模型的合成旅装备维修保障能力评估方法研究 [J]. 指挥控制与仿真, 2023, 45(6):146-152.
- [8] 张亚青. 基于熵权和层次分析法的 VOCs 处理技术综合评价 [J]. 中国环境科学, 2021, 8(1):34-55.
- [9] 郭旭. 基于模糊综合评价法和层次分析法的地铁车站施工安全风险评估研究 [D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2020.
- [10] 杨成斌. 基于 AHP-Delphi 的舰船动力系统效能评估方法 [J]. 科技创新与应用, 2022, 12(36):88-92.

【作者简介】

史珂 (1989—), 女, 河南周口人, 硕士, 讲师, 研究方向: 软件工程、计算机教育。

刘旭 (1988—), 男, 山东枣庄人, 本科, 工程师, 研究方向: 通信技术。

(收稿日期: 2024-05-15)