

doi: 10.7690/bgzdh.2018.02.014

## 基于组合评价法的装备保障方案评价

郗玉涛, 王超伟, 赵洪义, 周国敬

(中国船舶重工集团中国舰船研究设计中心, 武汉 430064)

**摘要:** 为评价保障方案从而指导保障系统设计, 提出一种基于改进的组合评价法来评估保障方案。首先, 在分析现有评价指标体系的基础上, 提出保障方案的评价指标参数。其次, 运用主观评价法和客观赋权法分别对装备的保障方案赋权, 得到指标参数的主观、客观权重。然后, 将其带入组合评价模型, 以评价值的最小偏差平方和作为目标函数求出组合权重, 并以此作为中间条件, 运用多属性评价法对保障方案进行评价。最后, 选择 5 个装备保障方案组合评价法的应用实例, 应用层次分析法、熵值法和理想点法对装备的保障方案进行组合评价, 并对比分析应用随机前沿分析法的结果。分析结果表明: 该评价法能够更为准确地反映客观事实, 具有可行性与有效性。

**关键词:** 保障系统; 保障方案; 组合评价

**中图分类号:** TJ06 **文献标志码:** A

## Evaluation of Material Support System Based on Combination Evaluation Method

Qie Yutao, Wang Chaowei, Zhao Hongyi, Zhou Guojin

(China Ship Develop &amp; Design Center CSIC, Wuhan 430064, China)

**Abstract:** For evaluating support scheme and guiding support system design, put forward the evaluation support scheme based on combination evaluation method. Firstly, through analyze current evaluation index system, put forward the evaluation index parameters of support scheme. Secondly, the subjective evaluation method and objective weight method are used to weight the equipment support scheme, and acquire the subjective and objective weight of index parameter. Then bring it into the combination evaluation model, which is using the minimum sum of squared deviations of the evaluation value as the objective function to gain the combination weight. Take the weight as the middle condition, and multi-attribute evaluation method is applied to evaluate the support scheme with it. Finally, select 5 application examples of equipment support scheme combination evaluation method, combine the application of analytic hierarchy process(AHP), entropy method and ideal point method to carry out integrated evaluation for equipment support scheme. Compare and analyze application results of random frontier analysis method. The analysis results show that the evaluation method can correctly reflect the objective fact with feasibility and effectiveness.

**Keywords:** support system; support scheme; combination evaluation

### 0 引言

保障方案的评价与权衡分析是保障性分析最复杂的一项工作, 主要目的是优化保障方案, 同时, 通过参与备选方案的权衡分析来影响装备设计, 以便在费用、进度、作战性能、战备完好性和保障性之间达到最佳平衡; 因此, 能否准确有效地评价装备的保障方案对于对比、优化设计装备保障系统有着重要的意义<sup>[1]</sup>。国内外学者已对装备保障系统与保障方案的评价方法开展了大量研究。评价装备保障方案的方法可归纳总结为 3 种: 一是主观评价法, 采用主观赋权方法对指标体系进行赋权, 然后将数据标准化后加权汇总, 如德尔菲法、层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)等, 此方法虽然

简便并且体现了评价方对于评价目标及评价对象的主观判断, 但不免夹杂个人喜好, 随意性较强; 二是客观评价法, 即评价指标参数的权重客观得来, 并且依据权重进行汇总, 如熵权法、多目标最优化法等, 客观评价法虽然避免了主观评价法对于已知客观信息利用不充分的缺点, 却无法利用评价者关于评价对象的判断信息; 三是无赋权的评价方法, 如人工神经网络、遗传算法和数据包络法等, 此方法基于大数据、大子样的训练, 需借助于相关计算机软件程序完成, 具有较多的限制, 其精确程度也取决于原始样本数据的多少以及准确程度。由于保障方案评价问题具有非线性、难定量和制约因素多的特点, 因此很难用一种方法合理、准确地确定装备保障方案<sup>[2-5]</sup>。

收稿日期: 2017-10-14; 修回日期: 2017-11-21

作者简介: 郗玉涛(1980—), 男, 河北人, 硕士, 从事舰船可靠性、维修性和保障性应用研究。

针对上述问题，笔者提出基于改进的组合评价方法来评估保障方案。同时考虑对于评价指标权重赋值的主观与客观因素，进行综合权衡，并将所求的综合权重作为中间条件，继续运用组合评价法进行装备保障方案评价。

## 1 装备保障方案评价指标体系

### 1.1 评价指标参数体系概述

评价参数指标体系是由若干个相对独立但又具有内在联系、相互统一的指标参数组成，是多系统、多层次的指标集合，可用以反映事物或社会经济现象之间的内在联系及客观总体的全貌。对装备保障方案进行评价的第一步便是建立有效、可操作的评价指标参数体系。评价指标参数体系必须满足完备性、独立性、代表性、可操作性、动态性、简练性 6 项准则。

### 1.2 装备保障方案评价指标体系参数的选择

装备保障方案的评价指标主要是各种装备保障特性定性定量的设计要求，包括相关指标、设计准则、研制参数要求等。制定评价指标时，应选择那些对保障方案的优劣影响最关键、又能够考核评定的指标要求<sup>[7]</sup>。装备保障系统必须在满足一定费效比约束条件下才能够快速高效的提供保障资源、开展保障活动、部署保障力量，从而使得装备充分发挥其总体效能。通过归纳总结，可以运用及时性、有效性、部署性、经济性和可用性等 6 种特性来评价装备保障系统<sup>[2]</sup>。

为简化计算量和便于对比分析，笔者根据上述 6 种特性中的部署性、及时性和有效性，建立装备保障方案的评价指标体系，具体评价参数如表 1。

表 1 保障系统评价参数

评价目标	评价准则	评价参数	计算方法
及时性		平均使用保障资源获取时间 $T_{GRO}$	在规定的期间内，获取使用保障资源的总时间与使用保障活动总数之比
		平均预防性维修保障资源获取时间 $T_{GRPM}$	在规定的期间内，获取预防性维修保障资源的总时间与预防性维修保障活动总数之比
		平均修复性维修保障资源获取时间 $T_{GRCM}$	在规定的期间内，获取修复性维修保障资源的总时间与修复性维修保障活动总数之比
		平均使用保障活动时间 $T_{OS}$	在规定的期间内，使用保障活动的总时间与使用保障活动总数之比
		平均预防性维修保障活动时间 $T_{PMS}$	在规定的期间内，预防性维修保障活动的总时间与预防性维修保障活动总数之比
		平均修复性维修保障活动时间 $T_{CMS}$	在规定的期间内，修复性维修保障活动的总时间与修复性维修保障活动总数之比
保障系统综合评价	有效性	保障设备满足率 $FR_{SE}$	在规定的时间内，提出需求时能提供使用的保障设备数之和与需求的保障设备总数之比
		保障设施满足率 $FR_{SF}$	在规定的期间内，保障设施能满足保障需求的次数与保障设施需求总次数之比
		备件保障概率 $FR_{SP}$	在规定的时间内，需要备件时不缺备件的概率
		保障设备利用率 $UR_{SE}$	在规定的期间内，保障设备的实际工作时间占总拥有时间的比值
		保障设施利用率 $UR_{SF}$	在规定的期间内，保障设施的实际工作时间占总拥有时间的比值
		备件利用率 $UR_{SP}$	在规定的期间内，备件实际使用数量与配置的备件数量之比
部署性		保障规模 $LF$	$\max \left( \left[ \frac{\text{保障物资的总包装质量}}{\text{运输工具的载质量}} + 0.5 \right], \left[ \frac{\text{保障物资的总包装体积}}{\text{运输工具的容积}} + 0.5 \right] \right)$ “ $[ \ ]$ ”表示四舍五入取整

## 2 基于组合评价法的保障方案评价

目前，文献报告的系统评价方法已有数十种之多，纷繁复杂的评价方法各自从不同的角度进行评价，即使评价的输入值如指标体系、参数数值等完全一样，得到的结果也可能大相径庭，导致难以实现评价决策<sup>[6]</sup>；因此，仅用一种方法进行评价的结果可靠性不高，难以令人信服，有必要选用多种方法进行评价。若要得出可供辅助决策者作出判断的评价结果，就必须分析各种评价方法的优劣之处，科学地进行多属性组合评价<sup>[8]</sup>。如今，进行组合评

价一般采用 2 种方法：一是通过主观与客观分析，选择不同权重的评价指标进行组合形成的评价指标体系，即所谓的主观与客观方法；二是采用多属性评价，组合多重评价结果综合得出最终判断。

文中的组合评价模型以最小偏差平方和为目标函数，即合理的属性权重向量  $w=(w_1, w_2, \dots, w_n)$  的获取必须是主观、客观赋权法下的评价与优化组合权重下评价总偏差最小时的解，并用线性规划求解。评价流程如图 1 所示。不妨设多指标评价问题有  $n$  个评价方案， $m$  个评价指标，标准化后的

数据矩阵为  $X=(x_{ij})_{mn}$ , 另有  $r$  种评价方法, 且第  $t$  种评价方法的评价向量:

$$\lambda_t = (\lambda_1^{(t)}, \lambda_2^{(t)}, \dots, \lambda_n^{(t)}), t=1, 2, \dots, r。$$

其中  $\sum_{i=1}^n \lambda_i^{(t)}=1$ 。此种方法的评价向量为:

$\lambda_0 = (\lambda_1^{(0)}, \lambda_2^{(0)}, \dots, \lambda_n^{(0)})$ 。组合评价  $\lambda_0$  与第  $t$  种方法的评价  $\lambda_t$  的偏差为:

$$\sum_{i=1}^n (\lambda_i^{(0)} - \lambda_i^{(t)})^2。 \tag{1}$$

之后, 在偏差平方和最小的意义下, 多目标的决策问题即变为单目标的优化模型, 从而求解相对较为简便:

$$\left. \begin{aligned} \min & \sum_{t=1}^r \sum_{i=1}^n (\lambda_i^{(0)} - \lambda_i^{(t)})^2 \\ \text{s.t} & \sum_{i=1}^n \lambda_i^{(0)}=1 \end{aligned} \right\}。 \tag{2}$$

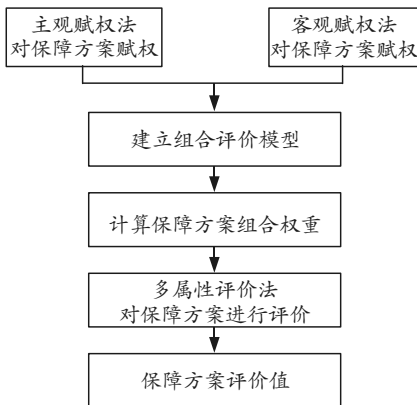


图 1 组合评价法的评价流程

文中采用主观评价方法与客观评价方法相结合, 即  $r=2$ , 前者主观权重为:  $u=(u_1, u_2, \dots, u_m)$ , 后者客观权重的权重为:  $v=(v_1, v_2, \dots, v_m)$ , 优化组合的权重为:  $w=(w_1, w_2, \dots, w_m)$ 。

则第  $i$  个方案的主观、客观二者分别的评价值和组合评价值为:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_i^{(0)} &= w_1 z_{i1} + w_2 z_{i2} + \dots + w_m z_{im} \\ \lambda_i^{(1)} &= u_1 z_{i1} + u_2 z_{i2} + \dots + u_m z_{im} \\ \lambda_i^{(2)} &= v_1 z_{i1} + v_2 z_{i2} + \dots + v_m z_{im} \end{aligned} \right\} i=1, 2, \dots, n。 \tag{3}$$

对所有方案的所有指标而言, 主客观权重下的评价与优化组合权重下评价的偏差应当越小越好, 因此将式(3)代入式(2), 建立如下的组合评价模型:

$$\left. \begin{aligned} \min H(w) &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left\{ \left[ z_{ij} (w_j - u_j)^2 \right] + \left[ z_{ij} (w_j - v_j)^2 \right] \right\} \\ \text{s.t} & \sum_{j=1}^m w_j = 1 \end{aligned} \right\}。 \tag{4}$$

此模型的解:

$$W = A^{-1} \cdot \left[ B + \frac{1 - e^T A^{-1} B}{e^T A^{-1} e} \cdot e \right]。 \tag{5}$$

式中:  $A = \text{diag} \left[ \sum_{i=1}^n z_{i1}^2, \sum_{i=1}^n z_{i2}^2, \dots, \sum_{i=1}^n z_{im}^2 \right]$ ;  $e = [1, 1, \dots, 1]$ ;

$$W = [w_1, w_2, \dots, w_m]; B = \left[ \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (u_1 + v_1) z_{i1}^2, \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (u_2 + v_2) z_{i2}^2, \dots, \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (u_m + v_m) z_{im}^2 \right]。$$

### 3 应用案例

某装备现有 5 个备选保障方案, 每个方案的系统整体设计特性评价参数的原始数据如表 2 所示。

表 2 评价指标参数原始数据

指标	1	2	3	4	5
$T_{GRO}$	10	8	30	16	10
$T_{GRPM}$	12	10	20	20	8
$T_{GRCM}$	12	12	25	25	8
$T_{OS}$	10	8	15	15	20
$T_{PMS}$	12	25	10	12	15
$T_{CMS}$	10	10	10	12	30
$LF$	7	7	5	6	7
$FR_{SE}$	0.85	0.82	0.65	0.78	0.8
$FR_{SF}$	0.78	0.8	0.6	0.8	0.8
$FR_{SP}$	0.88	0.85	0.72	0.8	0.82
$UR_{SE}$	0.5	0.55	0.78	0.5	0.48
$UR_{SF}$	0.48	0.5	0.7	0.48	0.5
$UR_{SP}$	0.54	0.58	0.78	0.5	0.5

在上述评价参数属性中,  $T_{GRO}$ 、 $T_{GRPM}$ 、 $T_{GRCM}$ 、 $T_{OS}$ 、 $T_{PMS}$ 、 $T_{CMS}$ 、 $LF$  为成本型属性;  $FR_{SE}$ 、 $FR_{SF}$ 、 $FR_{SP}$ 、 $UR_{SE}$ 、 $UR_{SF}$ 、 $UR_{SP}$  为效益型属性。

对于保障方案的成本型指标参数, 理想值用  $m_j$  表示。在评价时可运用公式  $m_j = \min(x_{ij})$ 、 $M_j = \max(x_{ij})$  得到该指标参数的理想值。利用式(6)将表 2 中的指标参数进行规范化。

$$x'_{ij} = \begin{cases} \frac{m_j}{x_{ij}} & x_{ij} \in \text{成本型} \\ \frac{x_{ij}}{M_j} & x_{ij} \in \text{效益型} \end{cases}, \tag{6}$$

则规范后的参数矩阵为:

$$X' = \begin{bmatrix} 0.8 & 1 & 0.27 & 0.5 & 0.8 \\ 0.67 & 0.8 & 0.4 & 0.4 & 1 \\ 0.67 & 0.67 & 0.32 & 0.32 & 1 \\ 0.8 & 1 & 0.53 & 0.53 & 0.4 \\ 1 & 0.48 & 1 & 0.83 & 0.67 \\ 1 & 1 & 1 & 0.83 & 0.33 \\ 0.71 & 0.71 & 1 & 0.83 & 0.71 \\ 1 & 0.96 & 0.76 & 0.92 & 0.94 \\ 0.98 & 1 & 0.75 & 1 & 1 \\ 1 & 0.97 & 0.82 & 0.91 & 0.93 \\ 0.64 & 0.71 & 1 & 0.64 & 0.62 \\ 0.69 & 0.71 & 1 & 0.69 & 0.71 \\ 0.69 & 0.74 & 1 & 0.64 & 0.64 \end{bmatrix}_{13 \times 5}。$$

笔者对上述的装备保障方案进行综合评价：首先，用 AHP 和熵值法对保障方案进行赋权，并确定指标的组合权重；再用理想点法 (technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS) 构造备选方案间的优先关系。

### 3.1 层次分析法和熵值法的权向量

层次分析法是将定量评价与定性评价二者综合运用的决策评价方法。文中应用 AHP 法进行指标权重的主观赋权，所以只需确定指标层的权重即可。用层次分析法，首先请专家根据属性之间相对重要性的判断，建立判断矩阵  $B$ ，并求出其归一化最大特征根。此特征根的特征向量  $u=(0.101, 0.07, 0.031, 0.153, 0.055, 0.116, 0.082, 0.015, 0.142, 0.041, 0.104, 0.042, 0.050)$ 。最后做一致性检验， $CR=0.019 < 0.1$ ，可以得出结论，判断矩阵  $B$  通过了一致性检验。

熵值法是一种客观赋权方法，通过计算指标的信息熵，根据指标的相对变化程度对系统整体的影响来决定指标的权重。熵值法的基本思想是依据熵的概念与性质，把各被评方案包含的固有信息和决策者经验判断的主观信息进行量化综合，进而建立基于熵的多目标评价模型，具体步骤如下。

#### 1) 计算接近度与信息熵。

定义  $D_{ij}$  为  $x'_{ij}$  对于理想值的接近度，对于正向指标  $D_{ij} = x'_{ij} / m_j$ ，对于负向指标  $D_{ij} = m_j / x'_{ij}$ 。

由熵的定义，评价指标  $j$  对被评方案的相对重要性的不确定性可由下列的信息熵来度量：

$$E = -\sum_{i=1}^m \frac{d_{ij}}{d_j} \ln \frac{d_{ij}}{d_j}。$$

式中： $d_j = \sum_{i=1}^m d_{ij}$ ； $d_{ij} = D_{ij} / \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n D_{ij}$ 。

由熵的极值性，用最大信息熵  $\ln m$  对上式进行

归一化处理，即得表征评价指标  $j$  的评价决策重要性熵值：

$$e(d_j) = -\frac{1}{\ln m_i} \sum_{i=1}^m \frac{d_{ij}}{d_j} \ln \frac{d_{ij}}{d_j}。$$

#### 2) 计算指标的客观权重 $v_j$ 。

为便于进行评价，需求出客观权重，由  $e(d_j)$  确定  $j$  的客观权重为  $v_j = \theta_j / \sum \theta_j$ 。

式中  $\theta_j = \frac{i}{n - E_e} [1 - e(d_j)]$ ， $E_e = \sum e(d_j)$ 。

根据已经规范化的矩阵  $X'$ ，可以得到上述熵权法的指标权向量为： $v=(0.096, 0.081, 0.036, 0.130, 0.047, 0.098, 0.086, 0.021, 0.187, 0.037, 0.098, 0.038, 0.045)$ 。

### 3.2 组合权重向量与 TOPSIS 求评价

将得到的主观权重  $u$  和客观权重  $v$ ，代入式(4) 求出组合权重  $w=(0.098, 0.075, 0.037, 0.127, 0.045, 0.078, 0.094, 0.028, 0.185, 0.049, 0.087, 0.048, 0.049)$ 。

理想点评价法首先要选取评价指标体系中每一个指标的正理想值和负理想值，并以各方案与上述 2 个参数的欧氏距离作为各个方案的评价度量参数，作为评价方案优劣的标准。

由组合权重向量可得加权标准化矩阵

$$F = (w_j x'_{ij})_{mn} = (f)_{mn}。 \tag{7}$$

所评价的正负理想解可以由上述加权标准化矩阵解得：

$$f_j^* = \begin{cases} \max(f_{ij}), j \in J^* \\ \min(f_{ij}), j \in J' \end{cases}; \quad f_j' = \begin{cases} \min(f_{ij}), j \in J^* \\ \max(f_{ij}), j \in J' \end{cases}。$$

式中： $J'$ 为逆向型指标； $J^*$ 为正向型指标。

各个保障方案欧式距离如下：

$$S_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^m (f_{ij} - f_j^*)^2}, S_i' = \sqrt{\sum_{j=1}^m (f_{ij} - f_j')^2}, j=1, 2, \dots, n，$$

各方案的评价权值是  $C_i^* = S_i' / (S_i^* + S_i')$ 。TOPSIS 法评价权向量： $H'=(h_1', h_2', \dots, h_n')$ 。归一化评价权向量

是： $H=(h_1, h_2, \dots, h_n)$ 。这里  $\sum_{i=1}^n h_i' = 1$ ，根据规范的数据矩阵  $X'$  得到  $H=(0.144, 0.270, 0.257, 0.172, 0.189)$ 。

通过以上分析可以得出，5 种方案优劣程度计算结果为：保障方案 2 最优，保障方案 3 其次，保障方案 5 再次，保障方案 4 较差，保障方案 1 最差。

号合成技术能精确控制每路信号的距离、幅度和相位，同时针对相位调制的信号不会造成信号失真现象，满足空间信号传播原理。该技术具有一定的先进性和参考性，能更加逼真地模拟 ADS-B 空间信号的传播过程，特别是空间信号的交织情况。目前 ADS-B 模拟器已成功应用于多个项目中。多目标合成技术除了能应用于 ADS-B 多目标模拟器，还能应用于 ATC 多目标模拟器、S 模式多目标模拟器等，可为民航设备测试提供技术支持和验证手段。

#### 参考文献：

- [1] 刘旭, 谢来阳. ERA ADS-B 系统在西沙群岛的应用[J]. 大众科技, 2015, 17(9): 7-10.
- [2] 虞粉英. 雷达多目标模拟器[D]. 南京: 南京理工大学, 2011: 1-3.

\*\*\*\*\*  
(上接第 65 页)

#### 4 结束语

笔者考虑了保障系统的整体设计特性，建立保障方案评价指标体系，应用组合评价模型，通过对 AHP、熵值法和 TOPSIS 法的组合，对保障方案的评价问题进行分析。由于基于组合评价法的装备保障方案评价方法充分利用了各种方法的有用信息，避免了主观性，增加了合理性，使评价结果能更为准确地反映客观事实，从而证明了其具有一定的可行性与有效性。

#### 参考文献：

- [1] 徐东, 徐永成. 装备综合保障中的若干关键技术[J]. 兵工自动化, 2006, 25(7): 30-31.
- [2] 曲丽丽, 康锐, 肖波平. 基于 SFA 的研制阶段装备保障

- [3] 胡晨波. 基于 S 模式 ADS-B 多目标模拟器的设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2012: 14-17.
- [4] 郭恒. 多目标模拟 IFF 信号源-基带信号生成单元系统设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2011: 24-27.
- [5] 陈晓华, 文静, 余晓. 磁致伸缩弹性波机理分析与信号处理[J]. 兵工自动化, 2016, 35(9): 78-81.
- [6] 董浩. 室内无线信道测量与信道建模研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014: 7-11.
- [7] 铁奎, 张慷, 凌云志. 通信系统中数字上变频技术的研究与设计[J]. 电子设计工程, 2012, 20(15): 190-192.
- [8] 孙博, 周国安, 焦光龙, 等. 基于中频模拟器的雷达嵌入式仿真训练系统[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(7): 1990-1992.
- [9] 李建军. 空间电磁信号合成情况研究[J]. 电子信息对抗技术, 2006, 21(4): 29-32.
- \*\*\*\*\*
- 方案评价模型[J]. 航空学报, 2010, 31(3): 986-992.
- [3] 迟长啸, 宋太亮, 李广志. 保障方案综合分析方法研究[J]. 装甲兵工程学院学报, 1999, 13(2): 56-61.
- [4] 孙晋法, 李锋, 田伟峰. 基于改进的多属性群决策方法的装备保障方案评估[J]. 四川兵工学报, 2009, 30(8): 96-98.
- [5] 曲丽丽, 康锐. 基于 DEA 的研制阶段装备保障方案评价模型[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(12): 1224-1229.
- [6] 李宏伟, 严骏, 熊云. 装备保障系统评价多属性决策分析[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2008, 9(1): 81-84.
- [7] 李光辉. 舰船总体综合保障技术特点及设计接口分析[J]. 中国舰船研究 2007, 5(2): 96-97.
- [8] 李金颖, 李金超, 牛东晓. 基于熵权法的供电商竞争力组合评价[J]. 继电器, 2008, 36(6): 42-47.