

doi: 10.7690/bgzdh.2025.03.009

基于组合赋权-云模型的轮式装备人-机-环工程评价

丁豪坚, 傅耀宇, 郝士祥, 牛善田, 葛纪桃

(中国人民解放军 63969 部队, 北京 100072)

摘要: 针对轮式装备人-机-环工程评价具有指标复杂、结果模糊的特点, 提出基于组合赋权-云模型的轮式装备人-机-环工程评价方法。根据轮式装备的使命任务和结构特点, 构建轮式装备人-机-环工程评价指标体系; 采用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)和熵权法(entropy weight, EW)组合赋权, 建立轮式装备人-机-环工程评价综合云模型。对某型装备进行实例分析, 结果表明: 该方法能够真实体现评价过程的随机性和评价结果的模糊性, 较传统的评价方法更具科学性, 为轮式装备人-机-环工程评价试验提供了新方法。

关键词: 层次分析法; 熵权法; 云模型; 轮式装备; 人-机-环工程

中图分类号: TP242 **文献标志码:** A

Man-machine-environment Engineering Evaluation of Wheeled Equipment Based on Combined Weighting-cloud Model

Ding Haojian, Fu Yaoyu, Hao Shixiang, Niu Shantian, Ge Jitao

(No. 63969 Unit of PLA, Beijing 100072, China)

Abstract: Aiming at the characteristics of complex indexes and fuzzy results in man-machine-environment (MME) engineering evaluation of wheeled equipment, an evaluation method for MME engineering of wheeled equipment was proposed based on combinatorial weighted cloud model. According to the mission tasks and structural characteristics of wheeled equipment, the evaluation index system of MME engineering of wheeled equipment was established. Analytic hierarchy process (AHP) and entropy weight (EW) were used to assign weights, and a comprehensive cloud model of MME engineering evaluation of wheeled equipment was established. The results show that this method can truly reflect the randomness of the evaluation process and the fuzziness of the evaluation results. It is more scientific than the traditional evaluation method, and provides a new method for the evaluation test of MME engineering of wheeled equipment.

Keywords: AHP; entropy weight; cloud model; wheeled equipment; man-machine-environment engineering

0 引言

人-机-环系统工程学^[1]是将环境作为系统单独环节, 研究人、机械及其工作环境之间相互作用的学科, 装备效能通常受人、机、环境 3 个要素共同作用, 开展装备人-机-环工程评价, 对指导装备生产设计和提升装备操作使用效能乃至作战效能具有重要意义。

人-机-环工程作为一个主观与客观、定性与定量指标并存的系统^[2], 涉及指标要素多, 层次复杂^[3]。赵祥君等^[4]构建了战术车辆人机工程评价指标体系, 采用 G1 法对指标排序, 为战术车辆人机工程攻关重点和发展方向的确定提供参考。苏续军等^[3]针对装备人机工程质量评估难以定量的特点, 提出一种层次分析法(AHP)和灰色关联度分析相结合的装备人机工程质量评估方法, 并实例验证了该方法的有效性。黄官升等^[5]引入人-机-环境系统指

数概念, 建立了特种车辆人-机-环系统指数体系, 基于指数体系开展了特种车辆人-机-环境性能评估。目前, 人-机-环工程评价普遍采取打分法来量化指标, 存在定性指标定量化计算的问题, 且评价人员选择的随机性和打分的主观性也无法很好地解决。云模型是基于模糊数学和统计学演变而来的评价模型, 对于处理定性语言中的模糊性、随机性问题具有较好的普适性^[6]; 同时, 其利用云滴分布能够直观反应打分结果与评价等级之间的隶属情况, 增强了结果的科学性。

笔者提出基于组合赋权-云模型的轮式装备人-机-环工程评价方法, 构建轮式装备人-机-环工程评价指标体系, 采用层次分析法和熵权法(EW)组合赋权, 建立基于组合赋权-云模型的人-机-环工程评价模型。以某型轮式装备为例开展人-机-环工程评价, 验证了该评价方法的适用性和科学性。

收稿日期: 2024-07-08; 修回日期: 2024-08-13

第一作者: 丁豪坚(1979—), 男, 甘肃人, 硕士。

1 轮式装备人-机-环工程评价指标体系

人-机-环工程作为装备保障特性指标之一，与可靠性等其他指标相互联系相互制约，共同满足装备的作战使用需求^[1]。本文中-机-环工程评价指标体系主要从人的因素、机的因素和环境因素^[7] 3 方面出发，结合轮式装备的使命任务和结构特点，开展人-机-环工程评价要素识别，在征求相关领域专家意见后，提出轮式装备人-机-环工程评价指标体系，如图 1 所示。指标体系由 3 层组成，各指标层有层次性且相互关联。决策层为轮式装备人-机-环工程评价。准则层为包括驾乘舒适性在内的 7 项

一级指标：1) 从人的因素角度提出驾乘舒适性、整车安全性和驾乘视野性 3 项指标，该 3 项指标评价装备是否好开、好坐，这关系到驾乘人员经装备机动后能否仍有良好的状态去执行任务；2) 从机的因素出发提出了驾驶和作业轻便性、整车交互性和作业方便性 3 项指标，评价装备是否好用，这是制约装备效能的重要因素；3) 从环境因素出发，提出作业环境指标，评价装备作业状态对环境的适应性和友好性。因素层为包括驾乘空间在内的 27 项二级指标，因素层内的指标相对独立，受上一级准则层指标支配。

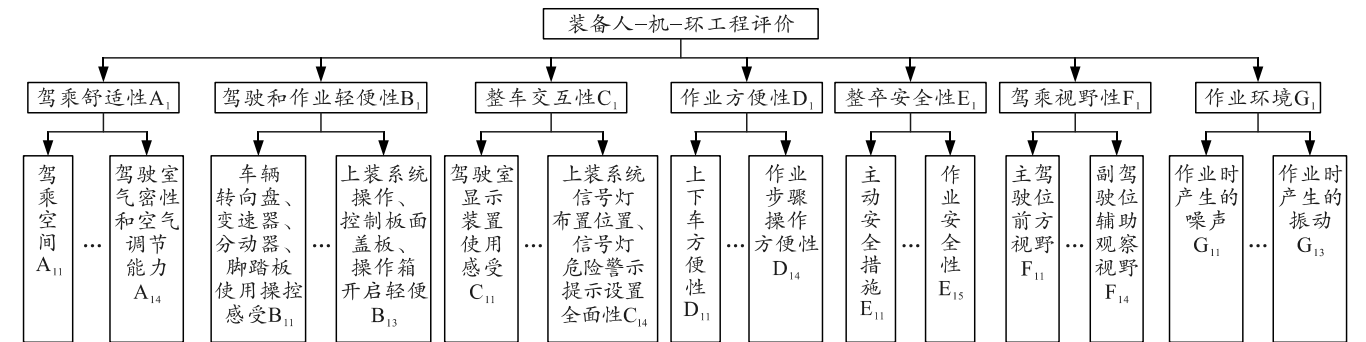


图 1 轮式装备人-机-环工程评价指标体系

2 轮式装备人-机-环工程评价模型

轮式装备人-机-环工程评价体系包含定性和定量指标，人员评价产生的定量分值最终需转化成定性评价等级，以便更真实地展示评价结果。笔者提出基于组合赋权-云模型的装备人-机-环工程评价

方法，流程如图 2 所示，先构建装备的人-机-环工程评价指标体系，基于专家打分结果进行组合赋权，划分评价等级标准建立标准云模型，利用逆向云发生器生成综合云模型，计算综合云与标准云的相似度以确定评价结果。

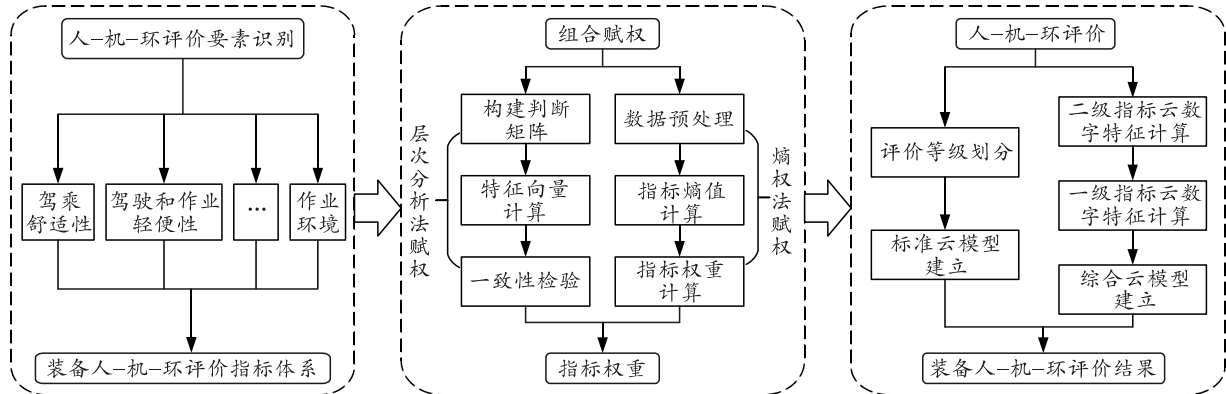


图 2 轮式装备人-机-环工程评价云模型方法流程

2.1 组合赋权

2.1.1 层次分析法

AHP 是一种解决多目标复杂问题的研究方法，该方法将定量分析和定性分析相结合，通过专家经验判断指标之间的相对重要程度，并采用分数进行量化，基于量化值给出指标的优劣次序。该方法步

骤如下：

- 1) 构造判断矩阵，通过相应的 AHP 标度值^[8]，对评价指标体系中的一级指标和二级指标分别打分，得到判断矩阵 A 。
- 2) 计算判断矩阵特征向量 h ，采用和积法计算特征向量，矩阵的特征向量值对应指标的权重值 ω^* 。

3) 进行一致性检验, 为检验判断矩阵是否合理, 需对判断矩阵进行一致性检验, 检验公式如下:

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^u \frac{Ah_i}{nh_i}; \quad (1)$$

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - u}{u - 1}; \quad (2)$$

$$CR = CI/RI. \quad (3)$$

式中: $\lambda_{\max}$ 为判断矩阵的最大特征值; u 为判断矩阵阶数; CI 为一致性指标; RI 为平均随机一致性指标, 笔者使用的 RI 指标值参考文献[9]; CR 为一致性比例, 其值越小, 表明矩阵的一致性越好, 当 $CR \leq 0.1$ 时, 认为判断矩阵通过一致性检验。

2.1.2 熵权法

EW 是一种依据指标不确定性大小来计算权重的方法, 指标的不确定性越大, 其熵值也就越大, 对评价的影响也就越大。假设某型装备人-机-环工程评价采集到 q 个样本, 该评价体系设置 m 项 2 级指标, 那么 x_{rj} 为第 r 个样本对第 j 项指标的打分值, EW 赋权的步骤如下:

1) 数据预处理, 考虑体系中指标均以分数量化, 且量纲相同, 故直接对数据进行归一化处理, 计算第 j 项指标中第 r 个样本值占该指标的比重 P_{rj} :

$$p_{rj} = \frac{L_{rj}}{\sum_{r=1}^m L_{rj}}, \quad r=1, 2, \dots, m, \quad j=1, 2, \dots, q. \quad (4)$$

2) 计算熵值 e_j , 第 j 项指标的信息熵值 e_j :

$$e_j = -k \sum_{r=1}^m p_{rj} \ln(p_{rj}). \quad (5)$$

式中, $k > 0$, 一般取 $k=1/\ln(m)$, $0 \leq e_j \leq 1$ 。

3) 计算权重, 第 j 项指标的信息效用值计算如式(6), 得到效用值后各指标的差异系数 D_j 和权重 ω_j° 的计算如式(7):

$$D_j = 1 - e_j; \quad (6)$$

$$\omega_j^\circ = \frac{D_j}{\sum_{j=1}^q D_j}. \quad (7)$$

2.1.3 组合权重计算

AHP 赋权可以有效反映专家的个人意志, 但存在不够客观的问题, EW 以分值为基础利用信息熵来确定指标权重, 得到的结果较为客观, 故将 AHP 与 EW 结合, 引入修正因子调节主客观权重占比, 综合确定轮式装备人-机-环工程评价指标权重。组合赋权的公式如下:

$$\omega = \varphi \omega^* + (1 - \varphi) \omega^\circ. \quad (8)$$

式中: ω^* 为 AHP 确定的指标权重; ω° 为 EW 确定的指标权重; φ 为修正因子, $0 \leq \varphi \leq 1$ 。

2.2 人-机-环工程评价综合云模型

2.2.1 云模型

云模型是由李德毅等^[10]于 1995 年提出, 用于实现定性概念与定量数值不确定转换的一种数学模型。云模型数字特征包含 E_x 、 E_n 和 H_e , 其中 E_x 表示论域的重心, E_n 表示云滴的离散程度, 反映了模型的模糊性, H_e 表示云滴的厚度, 云滴越厚表明隶属度的离散程度越大^[11]。对于定性概念, 云模型隶属度满足:

$$\mu(x) = \exp[-(x - E_x)^2 / 2(E_n')^2]. \quad (9)$$

云生成器分为正向云发生器和逆向云发生器, 其中正向云发生器用于实现定性概念与定量数值的转化, 逆向云发生器用于实现定量数值与定性概念的转化, 是样本数据形成概念内涵(E_x , E_n , H_e)的过程, 考虑一阶绝对中心矩的逆向云算法^[12]可能会出现 $H_e < 0$ 的情况, 使得超熵 H_e 估计值无意义, 故笔者采用许昌林等^[13]所提出的多步还原逆向云算法。

2.2.2 评价等级划分

参考军事装备人机工程设计相关标准并结合轮式装备的作战使命和使用特点, 将轮式装备人-机-环工程评价按使用感受程度划分为 5 个等级, 设定评价等级的论域为 $[0, 10]$, 其中分数越高表示主观评价越好, 根据各等级的分值范围, 确定相应的云数字特征, 如表 1 所示。 K 根据指标的模糊性和不确定性取 0.02。

表 1 人-机-环工程评价等级云数字特征

评价等级	分值分布	E_x	E_n	H_e
好	(9, 10]	9.5	0.17	0.02
较好	(8, 9]	8.5	0.17	0.02
一般	(7, 8]	7.5	0.17	0.02
较差	(6, 7]	6.5	0.17	0.02
差	[0, 6]	3.0	1.00	0.02

2.2.3 综合云模型建立

假设 q 名专家对因素层 m 项指标进行打分, 基于结果利用逆向云发生器生成 m 项因素层指标的云数字特征 $C_j(E_{xj}, E_{nj}, H_{ej})$, 随后结合因素层指标权重, 计算出准则层指标的云数字特征, 该层指标的云数字特征与其权重合成运算, 得到综合云数字特

征 (E_x^*, E_n^*, H_e^*) ，计算式见式(10)–(12)：

$$E_x^* = \sum_{i=1}^n E_{xi} \omega_i / \sum_{i=1}^n \omega_i ; \tag{10}$$

$$E_n^* = \sum_{i=1}^n E_{ni} \omega_i / \sum_{i=1}^n \omega_i ; \tag{11}$$

$$H_e^* = \sum_{i=1}^n H_{ei} \omega_i / \sum_{i=1}^n \omega_i . \tag{12}$$

式中： n 为准则层指标个数； ω_i 为第 i 个指标的权重； E_{xi} 、 E_{ni} 和 H_{ei} 分别为第 i 个准则层指标云数字特征中的期望、熵和超熵。

为保证评价结果的可靠性，综合云模型与标准云模型进行相似度计算，最终根据最大隶属度原则确定装备人-机-环工程评价等级。

3 实例分析

3.1 指标权重和云数字特征提取

以某型野战抢救抢修轮式车辆为对象开展人-机-环工程评价。依托轮式装备人-机-环工程评价指标体系，邀请多名装备操作人员依据自身使用感受对该装备进行打分，基于打分结果对指标进行组合赋权，其中 AHP 赋权时，先确定准则层指标权重，而后细分因素层指标权重，EW 赋权时，先根据打分结果计算因素层指标权重，再将因素层指标权重汇集至准则层。鉴于人-机-环工程评价皆为主观评价项，为兼顾操作人员评分重要性和数据结果客观性，修正因子取 0.5，得到的准则层指标权重如表 2 所示。

表 2 准则层指标权重与云数字特征

准则层 指标	权重			云数字特征		
	层次权重	熵权重	组合权重	E_x	E_n	H_e
A ₁	0.11	0.23	0.17	8.28	0.65	0.19
B ₁	0.13	0.09	0.11	7.79	0.74	0.22
C ₁	0.10	0.13	0.12	8.02	0.64	0.19
D ₁	0.13	0.17	0.15	7.75	0.83	0.22
E ₁	0.27	0.18	0.22	8.03	1.00	0.27
F ₁	0.14	0.12	0.13	7.81	0.98	0.24
G ₁	0.12	0.08	0.10	7.83	0.59	0.19

指标组合权重确定后，利用多步还原逆向云算法求解云数字特征，设置算法随机选取样本 20 组，每组包含 6 个分值，过程循环 100 次，取 100 次计算结果的平均值作为最终的 E_n 和 H_e ，随后结合指标的权重按式(10)–(12)合成准则层指标的云数字特征，结果如表 2 所示，将准则层指标云数字特征继续向上合成，最终该型装备的人-机-环工程评价综合云数字特征为[7.95, 0.8, 0.22]。

3.2 人-机-环工程评价

将装备人-机-环工程评价综合云数字特征输入

正向云发生器，云滴数量设为 2 000，生成的云图如图 3 所示，由图观察到综合云分布在“一般”和“较好”之间，同时综合云的云滴跨度与标准层不同，这说明打分结果存在模糊性，分值分布较广，与评价指标具有复杂和模糊的特点有关，综合云的云滴厚度与标准层不同，这说明人员打分具有随机性，与打分人员受主观因素影响大有关。相比传统的打分法，该方法较好地处理了人-机-环工程评价中存在模糊性和随机性问题，通过云图中云滴的分布情况，能够更加直观地展示装备的人-机-环工程评价等级，该方法具有较好的适用性和科学性。

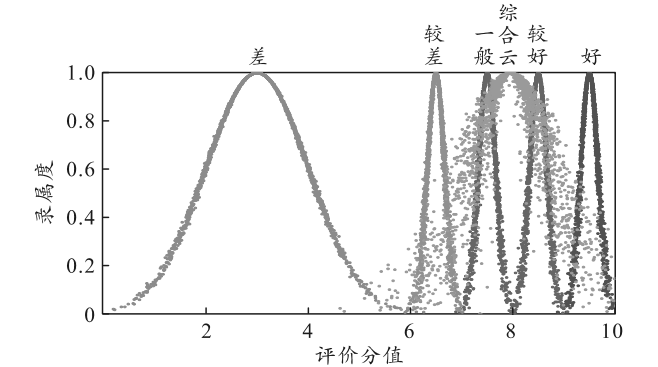


图 3 轮式装备人-机-环工程评价综合云图

进行综合云与标准云的相似度计算，以获取评价结果与评价等级的隶属程度，为保证相似度计算结果的稳定性，笔者采用李海林等^[14]提出的基于期望曲线的正态云模型相似度计算方法，计算过程参见文献[14]，计算结果如表 3 所示。

表 3 相似度计算结果

标准云	好	较好	一般	较差	差
相似度	0.113 5	0.325 7	0.333 6	0.121 2	0.006

由表 3 可知：综合云与标准云“一般”和“较好”的相似度较高，分别为 0.333 6 和 0.325 7，计算结果与图 3 显示的云滴分布情况一致，根据最大隶属度原则确定该装备的人-机-环工程评价结果为“一般”。

4 结束语

针对轮式装备人-机-环工程评价指标复杂、结果模糊的特点，提出了基于组合赋权-云模型的轮式装备人-机-环工程评价方法，构建了轮式装备人-机-环工程评价指标体系，并得出以下结论：

1) 采用 AHP 和 EW 组合赋权，引入修正因子调整权值，在保留专家意志的同时降低了权重确定过程中的主观性；