

基于组合赋权—改进可拓云的装甲车辆 PHM 系统性能评估

秦涛^{1,2}, 鲁冬林¹, 曾拥华¹

(1. 陆军工程大学 研究生院, 南京 210001;

2. 中国人民解放军 32228 部队, 南京 210012)

摘要: 针对装甲车辆 PHM 系统性能评估过程中主观性强、评语等级界限分明等问题, 采用主客观组合赋权和改进可拓云理论相结合的评估方法, 增强了评估结果的客观性和准确性; 首先介绍了装甲车辆 PHM 系统组成及其性能评估指标体系, 然后采用基于“AHP-熵值”的组合赋权法确定指标权重系数, 采用基于最优云熵的改进可拓云理论确定各指标云关联度值, 最后采用模糊综合评判方法计算了 4 套装甲车辆 PHM 系统性能; 结果表明, 改进评估方法在不失准确性的同时, 能够有效克服评估主观性和评语等级界限分明性, 为装甲车辆 PHM 系统性能的优化提供了借鉴和参考。

关键词: 装甲车辆; PHM 系统; 改进可拓云; 组合赋权; 性能评估

Performance Evaluation of Armored Vehicle PHM System Based on Combined Weighting-Improved Extension Cloud

QIN Tao^{1,2}, LU Donglin¹, ZENG Yonghua¹

(1. Graduate School of Army University of Engineering, Nanjing 210001, China;

2. Unit 32228 of PLA, Nanjing 210012, China)

Abstract: Aiming at the problems of strong subjectivity and clear boundary of comment level in the performance evaluation of armored vehicle PHM system, combining subjective and objective combination weighting with improved extension cloud theory, the evaluation method is adopted to enhance the objectivity and accuracy of evaluation results; Firstly, the composition and performance evaluation index system of armored vehicle PHM system are introduced, then the index weight coefficient is determined by the combined weighting method based on the “AHP entropy”, and the cloud correlation value of each index is determined by the improved extension cloud theory based on the optimal cloud entropy. Finally, the performance of four sets of armored vehicle PHM system is calculated by the fuzzy comprehensive evaluation method. The results show that the improved evaluation method can effectively overcome the subjectivity of evaluation and the clear boundary of evaluation level without losing accuracy, the reference for performance optimization of armored vehicle PHM system is provided.

Keywords: armored vehicle; PHM system; improved extension cloud; combined weighting; performance evaluation

0 引言

随着武器装备技术的快速发展, 装甲车辆分系统的技术集成度和复杂度越来越高, 其维修保障问题也摆在了更加突出的位置^[1]。预测与健康管理 (PHM, prognostics and health management) 技术的出现把实现装备在线维修保障变成了可能, 将传统的视情维修从基于故障问题转变为基于性能状态^[2], 有效提高了装甲车辆关键部件的安全性、可靠性、维修性和保障性, 进而提升了使用单位的装备战备完好率和任务成功率。而 PHM 系统目前种类较多, 其性能的好坏将很大影响到在线维修保障的效能, 因此如何有效对 PHM 系统进行评估成为了目前研究的热点。翟梅杰等

学者结合装甲车辆特点, 根据装备组成构建了一套装甲车辆 PHM 系统性能度量指标体系^[3-5]; 吴守军等学者综合 AHP 法与模糊综合评判法实现了装甲车辆 PHM 系统应用范围的确定^[4]; 王冠球等学者在确定指标权重的基础上, 利用模糊综合评价法对 8 套装甲车辆的 PHM 系统进行综合评价^[6]; 评估方法的选择并无好坏之分, 关键需贴合装甲车辆 PHM 系统性能的特点, 能够实现客观准确的评价; 本文在王冠球高级工程师研究的基础上^[6], 对其赋权方法进行了客观修正, 同时在模糊综合评判时, 引入改进可拓云理论构造因素模糊评判矩阵, 有效处理不同评语等级之间界限分明或过于模糊的问题, 在评估结果呈现上实现了定

收稿日期: 2021-09-01; 修回日期: 2021-10-21。

作者简介: 秦涛(1994-), 男, 江苏常州人, 硕士研究生, 助理工程师, 主要从事装备综合保障及其信息化和维修器材保障方向的研究。

通讯作者: 鲁冬林(1969-), 男, 江苏南京人, 教授, 硕士研究生导师, 主要从事装备综合保障方向的研究。

引用格式: 秦涛, 鲁冬林, 曾拥华. 基于组合赋权—改进可拓云的装甲车辆 PHM 系统性能评估[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(4): 237-243.

量和定性综合评价。

1 装甲车辆 PHM 系统简介

1.1 系统构成

装甲车辆装备 PHM 系统是实现装甲装备各分系统故障预测与健康管理的兴起手段，能够通过数据采集、数据传输和数据分析等手段完成装备在线性能监测与评估。图 1 是装甲车辆 PHM 系统构成示意图，主要包含了车载测控设备、通信设备和地面服务器三大模块。具体组成及功能如下：

1) 车载测控设备。该模块装配在装甲车辆需要检测的各个系统（电气、火控、底盘等），主要完成装备技术状态信息和位置信息的采集，实现监测和采集功能；

2) 通信设备。该模块主要实现数据信息传输功能，将采集到的装甲车辆技术状态信息和位置信息传输到地面服务器；

3) 地面服务器。该模块主要由数据库、PHM 系统和相应算法组成，在对历史样本数据分析的基础上，结合相应算法实现对装甲装备进行故障诊断和预测，并辅助业务部门开展维修保障决策。

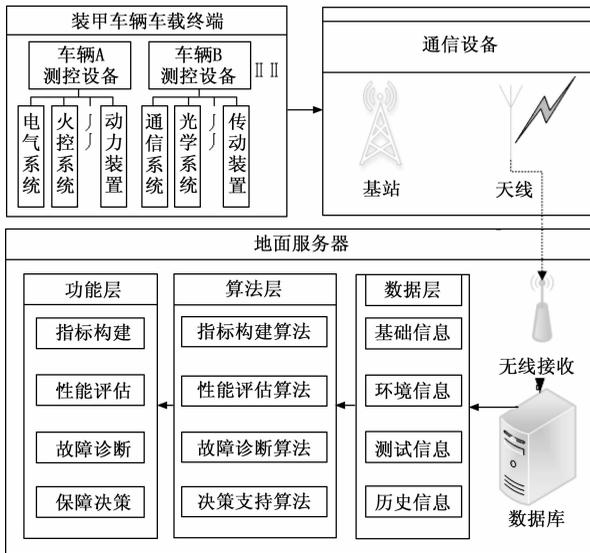


图 1 装甲车辆 PHM 系统构成示意图

1.2 评估指标体系

构建科学合理的装甲车辆 PHM 系统性能评估指标体系，是开展性能度量评估的基础环节，也可为 PHM 系统性能优化、设计改良提供参考。在对不同领域指标体系构建方法的研究基础上，本文参考了翟梅杰在《装甲车辆 PHM 系统性能度量指标体系构建》文中的指标体系，见表 1，并在此基础上开展评估。通过观察，该指标体系提出了总体性能度量指标、车载终端度量指标、通信设备度量指标和地面服务器度量指标共 26 个性能评估指标，包含了 9 个定性指标和 17 个定量指标。

表 1 装甲车辆 PHM 系统性能度量评估指标体系

目标层 A	准则层 B	次准则层 C	指标层 D	指标性质
装甲车辆 PHM 系统性能 A	总体度量 B ₁	可用性度量指标 C ₁	可靠性 D ₁	定性
			维修性 D ₂	定性
			保障性 D ₃	定性
		用户需求度量指标 C ₂	智能化程度 D ₄	定性
			系统失效率 D ₅	定量
			信息管理能力 D ₆	定性
			状态评估 D ₇	定性
			平均故障修复时间 D ₈	定量
	车载终端 B ₂	一般性度量指标 C ₃	重量尺寸 D ₉	定量
			持续运行时间 D ₁₀	定量
		测试性度量指标 C ₄	功耗 D ₁₁	定量
			故障检测率 D ₁₂	定量
	通信设备 B ₃		故障隔离率 D ₁₃	定量
			虚警率 D ₁₄	定量
			通信距离 D ₁₅	定量
			频带利用率 D ₁₆	定量
	地面服务器 B ₄	诊断性能度量指标 C ₅	安全性 D ₁₇	定性
			基站容量 D ₁₈	定量
		预警性能度量指标 C ₆	鲁棒性 D ₁₉	定量
			诊断准确性 D ₂₀	定量
			预警时间 D ₂₁	定量
		数据库度量指标 C ₇	预警准确性 D ₂₂	定量
			故障预测率 D ₂₃	定量
			数据吞吐量 D ₂₄	定量
			数据处理能力 D ₂₅	定量
			自我更新能力 D ₂₆	定性

1.3 改进评估思路

本文在学者王冠球开展装甲车辆 PHM 系统性能评估的基础上，对评估方法和模型进行了改进优化，具体思路如下：在原文利用层次分析法确定权重的基础上，增加客观赋权方法，按照“AHP-熵权”组合赋权方法实现主客观赋权相统一；其次，改进模糊评判矩阵构造方法，引入基于最优云熵的改进可拓云理论实现指标评估值相对评语等级关联度值的确定，保证了评语等级界限适当的模糊性；最后通过模糊综合评判实现装甲车辆 PHM 系统性能的定性和定量评估，具体思路见图 2。

2 评估模型

2.1 组合赋权法评估模型

为了确保装甲车辆 PHM 系统性能评估结果客观准确，本文采用层次分析法与熵权法相结合的组合赋权法进行权重确定。

2.1.1 基于 AHP 的评估指标主观赋权

层次分析法是运筹学理论中比较成熟的方法，主要是在多层次指标框架模型中，通过把隶属于同一上级的同一层次指标进行两两比较判断，形成低层次相对于高层次的相对重要性权重系数，再通过和上层次指标的相对重要性权重系数进行加权

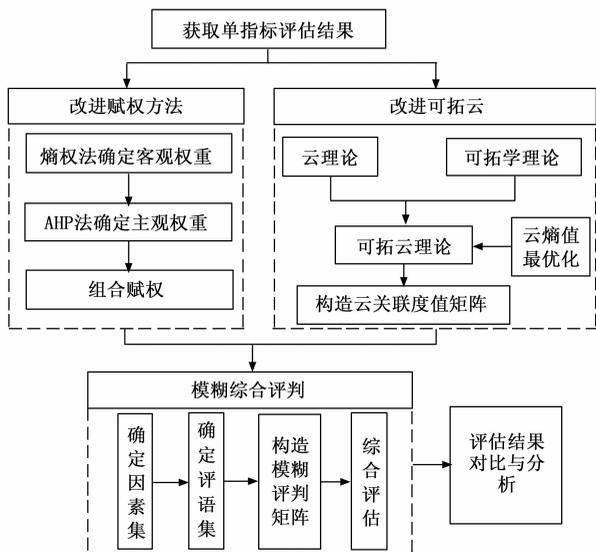


图 2 改进评估思路框架图

综合计算, 得到各层指标相对于总目标层的重要性权重系数。其步骤如下:

1) 构建层次化结构模型: 结合评估指标体系构建指标横向之间的比较关系、纵向之间的逻辑归属关系以及重要级别, 建立自上而下的层次化结构模型。

2) 明确比较判断标度: 采用“1~9”九标度法来描述两者重要性比较结果, 其标度及其标准见表。

表 2 “1~9”九标度属性

标度	两两指标比较判断
1	两者一样重要
3	前比后稍微重要
5	前比后明显重要
7	前比后强烈重要
9	前比后极端重要
2, 4, 6, 8	上述相邻判断中间值
倒数	上述后比前

3) 构造比较判断矩阵: 通过征询专家组意见, 得到不同专家构造出的不同判断矩阵, 并对数据进行综合处理, 得到一个综合判断矩阵。假设专家组人数为 n , 指标体系某层有 m 个因素参与比较, 则第 k 位专家构造出的判断矩阵为:

$$A_k = (a_{ij}^k)_{m \times m}, i, j = 1, 2, 3, \dots, m; k = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

a_{ij}^k 表示第 k 位专家将指标 i 和指标 j 比较所得的标度值。综合 n 位专家的判断矩阵, 得到综合判断矩阵为:

$$A' = (a_{ij}')_{m \times m}, i, j = 1, 2, 3, \dots, m \quad (2)$$

其中: a_{ij}' 与 a_{ij}^k 的关系为:

$$a_{ij}' = \frac{1}{m} \cdot \sum_{k=1}^m a_{ij}^k \quad (3)$$

4) 判断矩阵的一致性检验: 在得到综合判断矩阵 $A' = (a_{ij}')_{m \times m}$ 之后, 求解综合判断矩阵的最大特征值 λ_{\max} 。为了

确保各层次判断矩阵具有一致性, 需对判断矩阵进行一致性检验, 具体检验方式为:

计算一致性指标: $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$, n 为综合判断矩阵阶数;

计算协调率: $CR = \frac{CI}{RI}$, RI 为随机一致性指标, 可通过查表获取数据;

当 $CI < 0.1$ 时, 可认定判断矩阵符合一致性要求, 否则需进行调整。

5) 确定合成权重: 在确定各层次指标相对权重并经过一致性检验后, 则可以根据各级指标的权重求得各层指标相对于总目标的合成权重。假设由 AHP 法得到的主观赋权向量为 $W^1 = (\omega_1^1, \omega_2^1, \dots, \omega_i^1, \dots, \omega_n^1)$, n 为指标数量。

2.1.2 基于熵值法的评估指标客观赋权

熵值法是根据评估指标信息量的大小确定指标权重系数的方法, 借鉴热力学“熵”的概念, 熵值越小则该指标无序度越小, 在评估中起到的作用越大, 用以度量指标信息量的大小。其具体步骤如下:

1) 获取数据, 构建原始数据矩阵 $(Z_{ij})_{m \times n}$, 其中 m 为评估对象数量, n 为指标数量;

2) 计算第 j 个指标下第 i 个评估对象的特征比重 P_{ij} :

$$P_{ij} = Z_{ij} / \sum_{i=1}^m Z_{ij}, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n; \quad (4)$$

3) 计算第 j 个指标熵值 e_j :

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m P_{ij} \times \ln(P_{ij}) \quad (5)$$

4) 计算差异系数 g_j :

$$g_j = 1 - e_j \quad (6)$$

对于给定的 j , z_{ij} 差异越小, e_j 越大, 反映指标对评估对象的作用越小。

5) 确定权重系数 ω_j 。

$$\omega_j = g_j / \sum_{j=1}^n g_j, j = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

假设由熵值法得到的客观赋权向量为 $W^2 = [\omega_1^2, \omega_2^2, \dots, \omega_i^2, \dots, \omega_n^2]$, n 为指标数量。

2.1.3 组合赋权

在确定主客观权重系数向量 W^1 、 W^2 的基础上, 将主客观权重按照一定的系数组合, 得到将集成后的权重向量 W :

$$W = [\alpha_1, \alpha_2] \times \begin{bmatrix} \omega_1^1, \omega_2^1, \dots, \omega_i^1, \dots, \omega_n^1 \\ \omega_1^2, \omega_2^2, \dots, \omega_i^2, \dots, \omega_n^2 \end{bmatrix}, \alpha_1 + \alpha_2 = 1 \quad (8)$$

式 (8) 中的 α_1 取值视情确定, 若 $\alpha_1 \in [0, 0.5]$, 则赋权偏向客观指标数据, 若 $\alpha_1 \in [0.5, 1]$, 则赋权偏向专家经验。常用的 α_1 确定方法有专家咨询法、离差和最小计算法等。本文采取专家咨询法确定 α_1 值。

2.2 基于最优云熵的改进可拓云评估模型

2.2.1 云理论数字特征简介

假定定量论域 U 可以用精确数值来表示范围, C 是该定量论域 U 上的定性概念。如果满足: 1) 定量值 $x \in U$, 且 x 是 C 的一个随机实现; 2) x 对于定性概念 C 的隶属度 $\mu_c(x) \in$

[0, 1] 是具有稳定倾向的随机数, 那么就把 x 在定量论域 U 上的分布称之为云模型, 云滴可表示为 $[x_i, \mu_i(x_i)]$, $i=1, 2, 3, \dots, n$ 。

云的数字特征用期望 Ex 、熵 En 、超熵 He 三个数值来表示, 如图 3 所示。其中, 期望 Ex 表示定性概念 C 的中心值; En 熵是定性概念 C 的不确定性度量, En 越大, 表示亦彼亦此性越明显, 确定性的定量描述就越难; 超熵 He 是熵之熵, 反映了熵 En 的不确定性度量, He 越大, 云滴隶属度的随机性就越大, 云层就越厚。

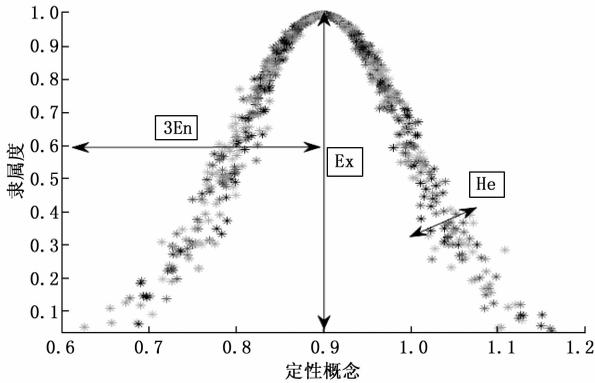


图 3 云模型的数字特征

2.2.2 可拓云理论

本文以正态云为例, 假定某个评语等级的上下界限为 $[V_{\min}, V_{\max}]$, 可求得该评语等级所对应的云模型数字特征如下:

$$\begin{cases} Ex_i = \frac{V_{\max} + V_{\min}}{2} \\ En_i = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{6} \\ He = \lambda \end{cases} \quad (9)$$

其中: λ 体现评语自身的模糊程度, 根据经验设定, 本文取 0.01。

物元 $R = [N, C, v]$ 是可拓学理论的基础模型, 旨在通过建立关联函数描述事物特征, 其中 N 表示物, C 表示物的特征, v 表示特征值。在构建可拓云模型的过程中, 将上述云模型的数字特征替换物元 R 中的特征值, 即得到式 (10) 中的可拓云模型, 可以有效结合可拓学和云理论的优点, 提升处理不确定性的能力。

$$R = \begin{bmatrix} C_1 & v_1 \\ N & C_2 & v_2 \\ & \dots & \dots \\ & C_n & v_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 & [Ex_1, En_1, He_1] \\ N & C_2 & [Ex_2, En_2, He_2] \\ & \dots & \dots \\ & C_n & [Ex_n, En_n, He_n] \end{bmatrix} \quad (10)$$

2.2.3 可拓云理论改进方法

2.2.3.1 一般云熵计算

在传统可拓云模型中, 对于某个评语等级, 在上下界限 $[V_{\min}, V_{\max}]$ 范围内, 云期望 Ex 的计算公式为 $Ex = (V_{\max} + V_{\min}) / 2$, 云超熵 He 一般是常数, 根据经验设定。云熵 En 作为反映属性概念不确定性的关键影响因素, 其取

值大小对于评估结果判定有着重要影响。通过有关文献的查阅, 可将一般的云熵计算方法大致总结为两种, 具体如下:

1) “3En” 规则:

此法忽略了 $(-\infty, En-3En)$ 和 $(Ex+3En, +\infty)$ 区域的云滴, 将 $[Ex-3En, Ex+3En]$ 之内的云模型视为完整模型, 是传统云理论常用的云熵计算方法, 其特征是相邻云之间的边界分明、评语等级划分清晰, 计算公式为:

$$En' = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{6} \quad (11)$$

2) “50% 关联度” 规则:

“50%” 是指将评语等级的临界值和相邻等级的关联度视为相同且均为 50%, 相较于 “3En” 规则, “50% 关联度” 规则下的边界更具模糊性, 计算公式为:

$$En'' = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{2.3548} \quad (12)$$

2.2.3.2 最优云熵计算

以上两种云熵计算方法分别突出了评语等级的分明性和模糊性, 但不同的方法计算出的云熵值很可能导致评估结果出现冲突。为了兼顾两种计算方法优点, 本文采用了一种改进云熵计算方法:

假定某评估指标分数值为 x_i , 对应 k 个评语等级, 可生产 k 个评语等级云模型, 其中等级云的期望值、云熵值和超熵值矩阵分别为:

将云数字特征 (Ex, En, He) 通过正向云发生器生成云滴图, 根据云图内外包络线确定云滴图的内外关联度曲线 l_1, l_2 , 云滴中间位置为期望关联度曲线 L , 以数字特征 (30, 6, 0.4) 为例, 生成云滴图和相应关联度曲线如图 4 所示。

关联度内外曲线的表达式为:

$$\begin{cases} L_1 = e^{-\frac{(x-gx)^2}{2(gx-3He)^2}} \\ L_2 = e^{-\frac{(x-gx)^2}{2(gx+3He)^2}} \end{cases} \quad (13)$$

表 3 评语等级云模型数字特征

云模型数字特征	矩阵	云模型数字特征	矩阵
期望 Ex	$Ex_{1 \times k} = [Ex_1, Ex_2, \dots, Ex_k]$	基于“3En”规则的云熵	$En'_{1 \times k} = [En'_1, En'_2, \dots, En'_k]$
超熵 He	$He_{1 \times k} = [He_1, He_2, \dots, He_k]$	基于“50%关联度”的云熵	$En''_{1 \times k} = [En''_1, En''_2, \dots, En''_k]$

针对有确定分数值的指标, 其与内外关联度曲线形成的 2 个交点表示该指标通过可拓云模型得到的最小和最大关联度, 分别表示为 μ_{\min} 和 μ_{\max} , 并将 $(\mu'_{\min})_d$ 代表指标分数 x_i 在基于 “3En” 规则产生的第 d 个等级云模型中的最小关联度, 将 $(\mu''_{\max})_d$ 代表指标分数 x_i 在基于 “50% 关联度” 规则产生的第 d 个等级云模型中的最大关联度, 将 μ_d 代表指标分数在最优云熵计算方法产生的第 d 个等级云模

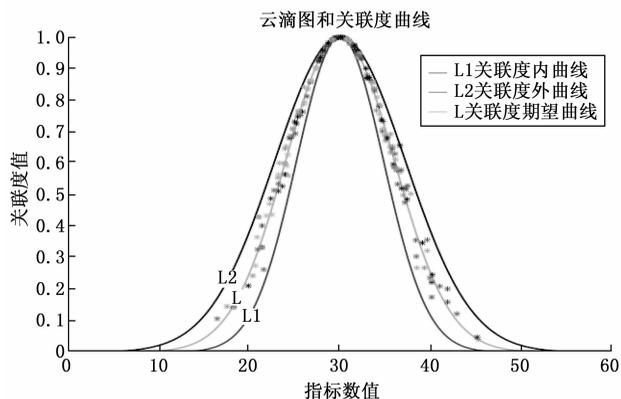


图 4 云滴和关联度曲线图

型中的期望关联度。可以列出关于评语等级 d 的最大关联度偏差 $\Delta\mu_{\max}$ 计算公式:

$$\Delta\mu_{\max} = [(\mu''_{\max})_d - \mu_d]^2 + [\mu_d - (\mu'_{\min})_d]^2, \quad d = 1, 2, \dots, k \quad (14)$$

以实现评估指标值 x_i 相对于 k 个评语等级可拓云模型的最大关联度偏差之和最小化为优化目标, 可构造目标函数如式 (15), 并最终求得基于最优云熵算法的云熵值矩阵 $En_{1 \times k} = [En_1, En_2, \dots, En_k]$:

$$\min \Delta\mu_{\max}(En) = \sum_{d=1}^k \Delta\mu_{\max}, \quad s. t. \quad En'_d \leq En_d \leq En''_d \quad (15)$$

在得到最优云熵值矩阵 $En_{1 \times k} = [En_1, En_2, \dots, En_k]$ 的基础上, 可以由式 (16) 计算评估指标分数值 x_i 与不同评语等级之间的关联度 μ_d :

$$\mu_d = e^{(x - Ex_d)^2 / 2(En_d)^2}, \quad d = 1, 2, \dots, k \quad (16)$$

2.3 模糊综合评判

2.3.1 确定因素集和评语集

根据表 1 中的层次化结构, 可构建两层因素集: 其中第一层总目标因素集为 $U = \{B_1, B_2, B_3, B_4\}$, 第二层子目标因素集有 4 个, 分别为 $U_1 = \{C_1, C_2\}$ 、 $U_2 = \{C_3, C_4\}$ 、 $U_3 = \{B_3\}$ 、 $U_4 = \{C_5, C_6, C_7\}$ 。本文结合装甲车辆 PHM 系统实际情况, 将性能度量评语等级分为: 优 (v_1)、良 (v_2)、中 (v_3)、一般 (v_4)、差 (v_5), 即构建评语集 $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}$

2.3.2 构造综合评判矩阵

1) 确定指标取值范围: 结合装甲车辆 PHM 系统的实

际情况, 在咨询专家的基础上, 为 5 级评语分别设置取值范围, 具体见表 4。

表 4 评语等级取值范围

评语等级	优	良	中	一般	差
取值区间	[100,90)	(90,80]	(80,70]	(70,60]	(60,0]
评语赋分	95	85	75	65	3

2) 确定指标对等级的隶属度: 在确定指标对等级隶属度时, 相邻评语等级之间通常不是界限分明的, 需要考虑模糊处理。本文采用云模型进行确定定量指标的隶属度, 具体做法是按照公式 (17) 计算 5 个评语等级的云模型数字特征, 并分别生成如图 5 所示的云滴图, 然后按照公式 (18) 计算各指标值相对于不同评语等级 d 的关联度值。

$$\begin{cases} Ex_d = \frac{V_{\max} + V_{\min}}{2} \\ En_d = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{2 \cdot 3548} \\ He = \lambda \end{cases} \quad (17)$$

$$\mu_d = e^{\frac{(x - Ex_d)^2}{2(En_d)^2}}, \quad d = 1, 2, \dots, 5 \quad (18)$$

其中: V_{\max} 和 V_{\min} 表示评语等级取值范围区间的上下限, λ 体现评语自身的模糊程度, 根据经验设定; μ_d 表示指标值相对于评语等级 d 的关联度值, 当指标值小于 30 或大于 95 时, 其隶属于差或优的关联度值为 1。

3 实证分析

3.1 数据获取

获取指标数据是开展评估的基础, 根据论文^[6]中获取的指标评价价值, 按照 5 级评语等级划分, 列举 4 套装甲车辆的指标分数, 见表 5。

3.2 组合权重计算

基于 AHP 法的权重计算, 主要参考论文^[6]现有成果, 具体见表 6; 基于熵权法的权重计算, 结合表 5 中 4 个评估对象、7 个评估指标的数据, 按照公式 (4) ~ (7) 通过 Matlab 计算得到, 具体见表 7。

在获取评价指标主客观权重系数后, 按照公式 (8) 计算组合权重。通过邀请多位专家对 μ 值进行打分, 并将结果取平均值, 得到最终 μ 值为 0.60, 表示以专家经验为主, 以指标客观数据为辅。得到的指标组合权重见表 8。

表 5 四套装甲车辆 PHM 系统性能评估指标分数

指标	评语等级					指标分数			
	优	良	中	一般	差	车辆 A	车辆 B	车辆 C	车辆 D
C ₁	[100,90)	(90,80]	(80,70]	(70,60]	(60,0]	85.58	83.46	85.3	86.54
C ₂	[100,90)	(90,80]	(80,70]	(70,60]	(60,0]	92.33	89.4	87.97	85.13
C ₃	[100,90)	(90,80]	(80,70]	(70,60]	(60,0]	92.22	85.6	90.78	89.58
C ₄	[100,90)	(90,80]	(80,70]	(70,60]	(60,0]	89.59	87.22	86.52	80.02
C ₅	[100,90)	(90,80]	(80,70]	(70,60]	(60,0]	79.62	84.97	82.4	71.63
C ₆	[100,90)	(90,80]	(80,70]	(70,60]	(60,0]	79.21	76.95	78.81	74.85
C ₇	[100,90)	(90,80]	(80,70]	(70,60]	(60,0]	81.24	78.34	82.94	79.31

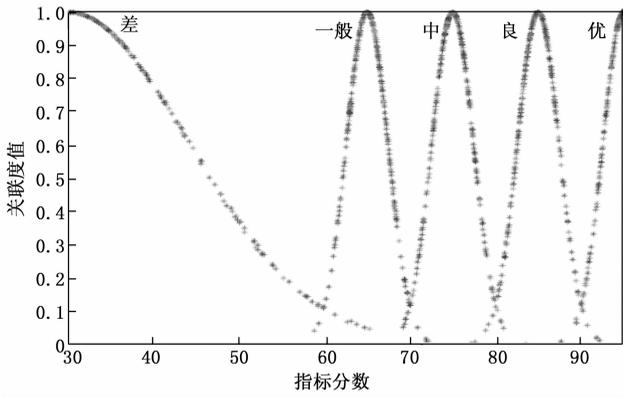


图 5 指标值对评语等级关联关系云滴图

表 6 AHP 法确定主观权重系数一览表

A	主观权重	B ₁	主观权重	B ₂	主观权重	B ₄	主观权重
B ₁	0.179 9	C ₁	0.7	C ₃	0.4	C ₅	0.598 3
B ₂	0.115 0	C ₂	0.3	C ₄	0.6	C ₆	0.245 3
B ₃	0.430 3					C ₇	0.156 4
B ₄	0.274 8						

表 7 熵值法确定主观权重系数一览表

A	客观权重	B ₁	客观权重	B ₂	客观权重	B ₄	客观权重
B ₁	0.257 3	C ₁	0.483 2	C ₃	0.524 1	C ₅	0.336 2
B ₂	0.258 2	C ₂	0.516 8	C ₄	0.475 9	C ₆	0.325 4
B ₃	0.252 4					C ₇	0.338 4
B ₄	0.232 1						

表 8 组合权重系数一览表

A	客观权重	B ₁	客观权重	B ₂	客观权重	B ₄	客观权重
B ₁	0.210 9	C ₁	0.613 3	C ₃	0.449 6	C ₅	0.493 5
B ₂	0.172 3	C ₂	0.386 7	C ₄	0.550 4	C ₆	0.277 3
B ₃	0.359 1					C ₇	0.229 2
B ₄	0.257 7						

3.3 综合评估

在获取指标组合权重系数后，进行综合评估计算。在此之前，需构建指标的模糊评判矩阵，限于篇幅，数据计算过程以装甲车辆 A 为例进行说明。首先按照公式 (16) 计算出车辆 A 的指标相对于不同评语等级的关联度，在进行归一化处理，得到以下 3 个子因素集的模糊评判矩阵 $R_{B_1-C}^A$ 、 $R_{B_2-C}^A$ 、 $R_{B_4-C}^A$ ：

$$R_{B_1-C}^A = \begin{bmatrix} 0.0006 & 0.9994 & 0 & 0 & 0 \\ 0.9810 & 0.0190 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_{B_2-C}^A = \begin{bmatrix} 0.9772 & 0.0228 & 0 & 0 & 0 \\ 0.3331 & 0.6669 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_{B_4-C}^A = \begin{bmatrix} 0 & 0.3444 & 0.6556 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2079 & 0.7921 & 0 & 0 \\ 0 & 0.8909 & 0.1091 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

通过计算得到如下结果：

1) A 车的总体度量性能隶属度向量为 $S_1^A = \omega_{B_1-C} \times R_{B_1-C}^A = [0.379 8, 0.620 2, 0, 0, 0]$ ，按照最大隶属度原则，定性评价为良好；

2) 车载终端性能隶属度向量为 $S_2^A = \omega_{B_2-C} \times R_{B_2-C}^A = [0.622 7, 0.377 3, 0, 0, 0]$ ，定性评价为优秀；

3) 通信设备性能隶属度向量为 $S_3^A = [0.000 4, 0.999 6, 0, 0, 0]$ ，定性评价为良好；

4) 总体度量性能隶属度向量为 $S_4^A = \omega_{B_4-C} \times R_{B_4-C}^A = [0, 0.431 8, 0.568 2, 0, 0]$ ，定性评价为中等；

5) A 车 PHM 系统性能隶属度向量为 $S = \omega_{A-B} \times [S_1^A, S_2^A, S_3^A, S_4^A]^T = [0.187 6, 0.666 1, 0.146 4, 0, 0]$ ，总体性能定性为良好，定量评估结果为 $0.187 6 \times 95 + 0.666 1 \times 85 + 0.146 4 \times 75 = 85.42$ 。同理可计算求出其他装甲车辆 B、C、D 的定性和定量评价结果，见表 9。

表 9 四套车辆 PHM 系统综合评价结果一览表

性能指标	车辆 A	车辆 B	车辆 C	车辆 D
总体度量 B1	良	良	良	良
车载终端 B2	优	良	良	良
通信设备 B3	良	优	中	良
地面服务器 B4	中	良	良	中
改进后系统定性评估	良	良	良	良
改进后系统定量评估	85.42	86.11	81.40	85.15
改进前系统定量评估	84.87	86.65	80.83	83.48
结果偏离度/%	0.64	0.62	0.70	1.96

计算结果表明，运用本文模型计算出的 PHM 系统性能定量评价结果与改进前的结果偏离度整体控制在 2% 以内，如图 6 所示，验证了本文改进评估模型的有效性和实用性；同时，在两者趋于一致的同时，经过熵权法的修正，评估结果兼具主客观性，其中车辆 D 的 PHM 系统定量评价结果相较原文更接近良好水平，增加了评估结果的可信度和准确性。此外，相较论文^[6]，本文同时对具体指标给出了定性和定量 2 种评价结果，数据呈现更加直观明朗。

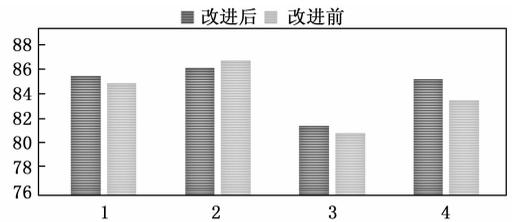


图 6 改进前后定量评估结果比对照

4 结束语

本文在对装甲车辆 PHM 系统介绍的基础上，明确了相较于论文改进评估的思路，首先采用“AHP-熵权”组合赋权法计算指标权重系数；其次在构建因素集模糊评判矩阵过程中，对传统云理论进行改进，按照最优云熵算法计算指标分数相对于评语等级的关联度值，进而构建综合评判矩阵，较好的处理了不同评语等级之间界限分明或过于模糊的问题；最后按照模糊综合评判模型，对 4 套装甲车辆

PHM 系统进行了综合评估, 得到了定量和定性 2 种评估结果。结果表明, 改进后的模型在不失有效性的同时, 能够得到更加客观准确的评估结果。

参考文献:

- [1] 冯辅周, 司爱威, 邢 伟, 等. 故障预测与健康管理技术的应用与发展 [J]. 装甲兵工程学院学报, 2009, 23 (6): 1-6.
- [2] 孙旭升, 周 刚, 于 洋, 等. 机械设备故障预测与健康管理的综述 [J]. 兵工自动化, 2016 (1): 30-33.
- [3] 翟梅杰, 丛 华, 冯辅周, 等. 装甲车辆 PHM 系统性能度量指标体系构建 [J]. 装甲兵工程学院学报, 2017, 31 (2): 53-59.
- [4] 吴守军, 冯辅周, 吴春志, 等. 基于综合评价模型的装甲车辆 PHM 系统应用范围确定 [J]. 测控技术, 2020, 39 (2): 36-43.
- [5] 翟梅杰, 高 鹏. 基于 PCA 的装甲车辆 PHM 系统性能度量指标筛选 [J]. 失效分析与预防, 2017, 12 (5): 299-303, 318.
- [6] 王冠球, 郑国杰, 冯辅周, 等. 基于模糊层次分析的装甲车辆 PHM 系统性能评估 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (6): 239-244.
- [7] 欧阳中辉, 郭遼宇, 刘文彪. 基于改进可拓云的岸舰导弹武器系统训练评估方法 [J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41 (4): 58-64.
- [8] 刘云鹏, 许自强, 付浩川, 等. 采用最优云嫡改进可拓云理论的变压器本体绝缘状态评估方法 [J]. 高压电技术, 2020, 46 (2): 397-405.
- [9] 韩朝帅, 王 坤, 潘恩超, 等. 基于云理论的复杂装备维修性指标评价研究 [J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38 (3): 72-76.
- [10] 徐 林, 葛 伟. 基于模糊综合评判法的舰船装备保障能力评估 [J]. 舰船电子工程, 2016, 36 (2): 106-109.
- [11] 沈进昌, 杜树新, 罗季阳, 等. 基于云模型的模糊综合评价方法及应用 [J]. 模糊系统与数学, 2012, 26 (6): 115-123.
- [12] 徐征捷, 张友鹏, 苏宏升. 基于云模型的模糊综合评判法在风险评估中的应用 [J]. 安全与环境学报, 2014, 14 (2): 69-72.
- [13] 周永林, 王 磊. 基于云模型理论的多层次模糊综合评价法 [J]. 计算机仿真, 2016, 33 (12): 390-395.
- [14] 徐孙庆. 基于信息融合的装备保障能力评估研究 [J]. 装备制造技术, 2019, (8): 89-91.
- [15] 徐 林, 葛 伟. 基于模糊综合评判法的舰船装备保障能力评估 [J]. 舰船电子工程, 2016, 36 (2): 106-109.
- [16] 王治和, 王 丹, 张 强, 等. 基于可拓云理论的 WSN 鲁棒评估 [J]. 软件导刊, 2017, 16 (7): 1-4.
- [17] 李如琦, 苏浩益. 基于可拓云理论的电能质量综合评估模型 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36 (1): 66-70.
- [18] 李海君, 徐廷学. 基于组合赋权-改进灰色关联的导弹状态评估决策 [J]. 现代防御技术, 2021, 49 (4): 91-98.
- [19] 胡 磊, 李海龙, 董思岐. 基于组合赋权和模糊灰色聚类的武器系统网络安全评估 [J]. 火力与指挥控制, 2020, 45 (9): 22-28.
- [20] 范丽娜, 欧中洪, 陈忠杰, 等. 基于组合赋权与模糊灰色聚类的科技服务质量评估模型 [J]. 中国基础科学, 2020, 22 (6): 26-33.
- [1] 冯辅周, 司爱威, 邢 伟, 等. 故障预测与健康管理技术的应用与发展 [J]. 装甲兵工程学院学报, 2009, 23 (6): 1-6.
- [2] AHMAD A, SHAIKH A M, SHAIKH M F, et al. Experimental study of various parameters during speed control of three-phase induction motor using GPIC and LabVIEW [J]. Annals of Emerging Technologies in Computing, 2021, 1: 50-62.
- [3] 方俊雅, 李 倩, 马 鑫. 基于 LabVIEW 的三维可视化温度在线监测系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (4): 26-29.
- [4] 邢翠芳, 邢康林, 李 祁, 等. 基于 LabVIEW 的多通道温度监控系统研究 [J]. 电子设计工程, 2016, 24 (15): 138-141.
- [5] 王建雷, 栾海峰, 刘晓辉, 等. 基于 LabVIEW 的温控仪通讯程序探究 [J]. 工业计量, 2019, 29 (5): 29-31.
- [6] 马 敏, 杨胜伟. 基于 LabVIEW 的气体监测系统串口通讯设计 [J]. 自动化与仪表, 2016, 31 (11): 43-46.
- [7] 刘玉芹, 徐海华. 基于 LabVIEW 的温室大棚远程智能监控系统设计 [J]. 自动化仪表, 2021, 42 (1): 86-89.
- [8] 朱银龙, 华 超, 陈 昕, 等. 基于 LabVIEW 与单片机的温度采集监控系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (12): 93-96.
- [9] 方俊雅, 李 倩, 马 鑫. 基于 LabVIEW 的三维可视化温度在线监测系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (4): 26-28.
- [10] 彭 登, 罗贤虎, 徐 行. 基于 LabVIEW 的多通道温度测量系统设计 [J]. 电子设计工程, 2014, 22 (7): 47-49.
- [11] 朱佳琳, 张心光, 崔 涵. 基于 LabVIEW 的虚拟温度采集系统设计 [J]. 上海工程技术大学学报, 2020, 34 (2): 174-177.
- [12] 万茂科. 基于 LabVIEW 的散热器及室内外温度监测系统 [J]. 工业仪表与自动化装置, 2019 (5): 57-60.
- [13] 周 强, 应竞帆. 基于 LabVIEW 的超导状态实时电压与温度监测软件设计 [J]. 电子设计工程, 2019, 27 (8): 38-43.
- [14] 王 丽. 基于 LabVIEW 的八路智能温度检测系统设计 [J]. 工业控制计算机, 2018, 31 (6): 6-7.
- [15] 庄小利, 司建军, 庄福利. 基于 LabView 的舰船发动机温度检测 [J]. 舰船科学技术, 2018, 40 (10): 91-93.
- [16] 刘 凯, 初光勇, 黄海松. 基于 LabVIEW 的温度控制系统设计研究 [J]. 现代电子技术, 2017, 40 (18): 164-167.
- [17] 赵勇图, 彭东林, 郑 永, 等. 基于小波变换与 LabVIEW 的时栅信号采集分析系统设计 [J]. 仪表技术与传感器, 2019 (8): 106-111.
- [18] 侯少阳, 金施群, 王行芳. 激光监听信号的小波阈值降噪方法在 LabVIEW 中的实现 [J]. 数字技术与应用, 2018, 36 (4): 101-104.
- [19] 晏建洋, 吴建星. 基于 LabVIEW 和 MATLAB 的矿山微震信号小波分析与研究 [J]. 安全与环境工程, 2016, 23 (3): 125-128.
- [20] 张春友, 侯莹莹, 生兆洲. 基于小波变换和 Labview 的内燃机振动信号处理 [J]. 中国农机化学报, 2015, 36 (1): 233-237.
- [21] 陈 娟, 杨奇科, 周晶杰. 基于 LabVIEW 的小波变换在信号滤波中的应用 [J]. 技术与市场, 2013, 20 (5): 51-54.