

基于模糊层次分析的装甲车辆 PHM 系统性能评估

王冠球¹, 郑国杰¹, 冯辅周², 李 军¹

(1. 中国人民解放军 32228 部队 22 分队, 南京 210012;

2. 陆军装甲兵学院 车辆工程系, 北京 100072)

摘要: 针对装甲车辆 PHM 系统性能水平难以度量的问题, 采用模糊层次分析法对装甲车辆 PHM 系统的性能进行评估, 该方法在专家知识和经验的基础上增加了模糊数学的理论, 评估结果更加科学可靠; 首先通过深入研究装甲车辆 PHM 系统的应用现状和影响因素, 建立装甲车辆 PHM 系统性能度量指标体系, 然后采用多层次交互式层次分析法确定指标权重, 最后采用模糊综合评判分析计算 8 套装甲车辆 PHM 系统性能状态; 综合评价结果表明, 不但有效地区分了不同装甲车辆 PHM 系统性能的优劣, 同时还为装甲车辆 PHM 系统的研究与改进提供了参考方向。

关键词: 装甲车辆; PHM 系统; 性能评估; 模糊层次分析法

Performance Evaluation of Armored Vehicle PHM System Based on Fuzzy Hierarchy Analysis

Wang Guanqiu¹, Zheng Guojie¹, Feng Fuzhou², Li Jun¹

(1. Troop No. 32228 of PLA, Nanjing 210012, China;

2. Academy of Army Armoured Force, Beijing 100072, China)

Abstract: To solve the problem that the performance of armored vehicle PHM system is difficult to measure, the fuzzy analytic hierarchy process is used to evaluate the performance of armored vehicle PHM system. This method adds the theory of fuzzy mathematics on the basis of expert knowledge and experience, and the evaluation results are more scientific and reliable. The performance measurement index system of armored vehicle PHM system is established by deeply studying the application status and influencing factors of armored vehicle PHM system, and then the index weight is determined by multi-level interactive analytic hierarchy process. Finally, the performance status of 8 sets of armored vehicle PHM system is calculated by fuzzy comprehensive evaluation analysis. The comprehensive evaluation results show that it not only effectively distinguishes the performance of different armored vehicle PHM system, but also provides a reference direction for the research and improvement of armored vehicle PHM system.

Keywords: armored vehicle; PHM system; performance evaluation; fuzzy hierarchy analysis

0 引言

为适应现代信息化战争的需求, 我军正在大力推进军事变革, 装甲车辆作为地面常规突击力量, 成为变革的重中之重。在新型装甲车辆的研制过程中, 装甲车辆在线维修保障问题日益突出, 而预测与健康管理 (PHM, prognostics and health management) 技术的出现可以大大提高装甲车辆关键部件的安全性、可靠性、维修性和保障性, 进而提高装甲车辆的战备完好率和任务成功率, 因此, 装甲车辆 PHM 系统的研究与实现将对我国装甲装备的发展起到积极的推进作用。但是随着 PHM 技术研究的不断深入, 大量具备 PHM 功能的系统涌现出来, 如何有效评价这些

PHM 系统性能的优劣, 并从中选择出适合装甲车辆的系统成为面临的首要问题。

评价是在多因素相互作用下对被评价对象作出一个全局性、整体性的综合判断, 用一个总指标来说明被评价对象的一般水平, 进而实现不同对象的排序和择优^[1]。常用的体系评估方法有很多, 大致可分为 4 大类: 专家评价法、运筹学法 (层次分析法、数据包络分析法)、人工智能法 (神经网络评价法、灰色综合评价法) 和混合法 (模糊层次分析法、模糊神经网络评价法) 等^[2]。评估方法本身并无优劣之分, 关键在其适用范围, 通过分析各方法解决问题的思路, 研究其优缺点和适用场合, 针对装甲车辆 PHM 系统本身的特点, 从中挑选出最合适的方法来满足性能评估

收稿日期: 2020-11-15; 修回日期: 2020-12-08。

基金项目: 武器装备预研基金重点项目。

作者简介: 王冠球 (1971-), 男, 黑龙江人, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事装甲装备维修保障方向的研究。

引用格式: 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.

的需求。

装甲车辆 PHM 系统性能度指标体系构建时既要有较高的先进性要求，又要充分考虑国内当前的技术水平，目前我国装甲车辆 PHM 系统的研究尚处于探索阶段，相关技术尚未突破，在一定程度上仍需借鉴专家的经验，因此，PHM 系统性能评估过程是一个定量计算和定性分析相结合的综合决策过程。针对这一特点，本文将层次分析法和模糊综合评判进行融合，提出了一种改进的模糊层次分析法综合评价装甲车辆 PHM 系统性能，有效的实现了对不同 PHM 系统性能优劣的划分。

1 模糊层次分析法基本原理

层次分析法 (AHP, analytic hierarchy process) 是将主观判断客观化的多准则决策分析法，把人的主观判断过程层次化、数学化，为多属性决策问题提供了一种简便的决策方法，但是，在实施过程中忽略了定性评价指标的模糊性和人为评价的倾向性，在一定程度上影响了判断的结果^[3-4]。

模糊层次分析法 (FAHP, fuzzy analysis hierarchy process) 是在层次分析法的基础上融合了模糊理论，充分考虑了评价者的主观判断、决策及偏好本身的模糊性，使得决策结果更加客观合理，其基本步骤如下：1) 构建评价指标体系，确定因素集；2) 划分评价等级，确定评价集；3) 计算评价指标权重；4) 模糊综合评判。

1.1 评价指标体系构建

评价指标体系是综合评价的基础，是由多个相互联系、相互作用的评价指标按照一定层次结构组成的有机整体，只有科学合理的评价指标体系才能得出科学公正的综合评价结论。确立指标体系的方法有很多，主要分为经验确定法和数学分析法两种，虽然数学分析法可以降低指标体系构建的随意性，但是采用的样本不同建立的体系不同，不能保证指标体系的唯一性，所以在研究中多采用经验确定法^[4-5]。

本文采用层次分析法，在明确评估目标的前提下，深入分析评估对象，梳理相关影响指标，按照不同的属性分为若干层次，根据最上层为目标层、中间层为决策层、最底层为方案层的顺序，形成自上而下支配关系的递阶层次模型。其中最顶层为评估者最终的评估目标，中间层由影响评估目标的决策指标集构成，该层次也可以进一步细化为多层子决策层，方案层为要解决的各种方案、措施，对于本文而言就是 8 套待评估的装甲车辆 PHM 系统。

1.2 评价指标权重确定

为体现各个评价指标在体系中的作用地位和重要程度，在体系确定后对各个指标赋予不同的权重。本文采用多层次交互式层次分析法把问题层次化，并把系统的分析归结为最底层指标相对最高层指标的相对重要性权值的确定或者相对优劣次序的排序问题，最终通过评估人员的交互协

商取得评估共识，获得最终的权重向量，具体应用流程如图 1 所示。

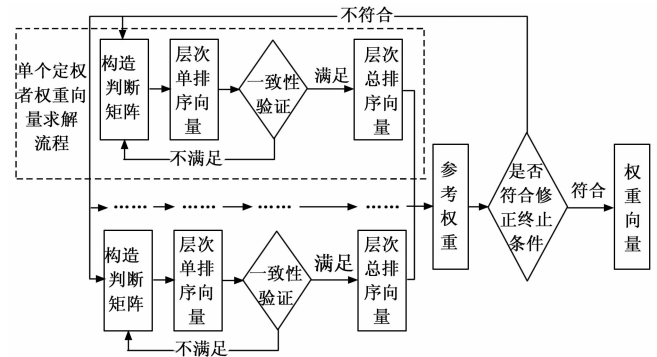


图 1 多个定权者权重向量求解流程

1.2.1 单个定权者权重向量求解

1) 构造判断矩阵。每一层次中的指标对上一层指标的相对重要性是通过两个指标间两两比较得出的，据此构建判断矩阵 P ：

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & \cdots & p_{1j} & \cdots & p_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{i1} & \cdots & p_{ij} & \cdots & p_{im} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{n1} & \cdots & p_{nj} & \cdots & p_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

以准则层 B 对于目标层 A 的判断矩阵为例，式中 p_{ij} 表示 B_i 相对于 B_j 的重要程度， p_{ij} 越大，重要性越强。Saaty 教授提出了 1~9 标度法，如表 1 所示，但是在进行重要性比较时发现，指标间的差异并没有标度展现的那么大。例如 B_i 相对于 B_j 稍微重要的标度是 3，表示 B_i 比 B_j 重要两倍，但实际两个指标之间的重要性相差并没有那么大，稍微重要的意义与标度不符，对于缺乏评估经验的人来说，就丧失了标度的依据。因此对 1~9 标度法进行修正，得到 5/5~9/1 标度法，如表 1 所示。

表 1 p_{ij} 标度含义

含义	1~9 标度	5/5-9/1 标度
B_i 相对于 B_j 同样重要	1	5/5
B_i 相对于 B_j 稍微重要	3	6/4
B_i 相对于 B_j 明显重要	5	7/3
B_i 相对于 B_j 非常重要	7	8/2
B_i 相对于 B_j 极为重要	9	9/1
上述相邻判断的中间值	2,4,6,8	5.5/4.5, 6.5/3.5, 7.5/2.5, 8.5/1.5
B_j 与 B_i 进行比较 $1/p_{ij}$	倒数	倒数

2) 层次单排序向量。层次单排序向量即每一个判断矩阵中各个影响指标相对于上一级指标的权重向量，表示各指标排序的优先顺序，计算步骤如下：

- (a) 计算判断矩阵每一行元素的乘积 $M_i = \prod_{j=1}^n p_{ij}$
- (b) 计算 M_i 的 n 次方根 $\overline{W}_i = \sqrt[n]{M_i}$
- (c) 进行归一化处理 $W_i = \frac{\overline{W}_i}{\sum_{i=1}^n \overline{W}_i} (i = 1, 2, \dots, n)$,

则向量 $W = [W_1, W_2, \dots, W_n]^T$ 为指标的权重向量。

3) 一致性验证。由于影响因素的复杂性和决策者对指标主观判断具有不稳定性, 因此构造的判断矩阵很难达到一致, 判断矩阵的有效性需要通过一致性检验来验证:

$$CR = \frac{\lambda_{\max} - n}{(n - 1)RI} \quad (2)$$

式中, λ_{\max} 为判断矩阵 P 的最大特征值, RI 为随机一致性指标, 由于修正了标度值, 所以随机一致性指标也要进行修改, 新的 RI 值如表 2 所示。

表 2 随机一致性指标

n	1	2	3	4	5
RI	0	0	0.169	0.259 8	0.328 7
n	6	7	8	9	
RI	0.369 4	0.400 7	0.416 7	0.437	

若一致性比率 $CR \leq 0.1$, 则该判断矩阵通过了一致性检验, 其归一化的向量可以作为权重向量使用, 并进一步计算各层指标相对目标层指标的层次总排序权重向量, 否则要重新构造判断矩阵。

1.2.2 多个定权者权重向量求解

由于定权者来自不同的层次, 不同的岗位, 在要求尽可能做到客观、公正、一致的情况下, 也会因为定权者专业领域、相关经验以及个人偏好等认知的不同, 导致对装甲车辆 PHM 系统性能评估的权重分配上会有不同的倾向。针对这一问题提出了一种基于多层次交互式过程的评估指标定权法, 该方法的本质是使评估人员通过反馈式协商取得评估共识, 在比较和权衡中不断修正权重分配状况, 最终获得较为一致的权重向量, 使得结果更客观可靠。

所谓交互式^[6-8]是指在求解出每个定权者的权重向量后, 将所有权重向量进行融合, 得到初始参考权重向量, 定权者以初始参考权重向量为参照调整各自的指标权重, 经过几轮交互, 达到交互终止条件则认为权重结果趋于一致, 最终得到定权人员群体关于评估指标的综合权重^[9-10]。

交互终止的判定条件可以通过判断相邻两轮交互后的参考权重向量之间的距离大小来设定, 当距离小于设定的极小值 ϵ 时, 则终止交互。设 W_t^* 和 W_{t+1}^* 是经过 t 轮和 $t+1$ 轮交互后的参考权重向量, 则两者之间的距离:

$$d(W_t^*, W_{t+1}^*) = \sqrt{\sum_{k=1}^q (W_{t+1}^* - W_t^*)^2} \quad (3)$$

1.3 模糊综合评判

模糊综合评判以模糊数学为理论依据, 用数学工具来

解决边界不清和不易定量等模糊问题, 从多个指标对被评价目标隶属状况进行综合评价, 能够克服打分弹性较大的弊端, 避免了定性判断的主观随意性。评估过程需要确定以下几方面内容:

1) 因素集的确定。因素集是指影响评价对象取值的各因素组成的集合, 即指标集, 用字母 U 来表示:

$$U = (u_1, u_2, \dots, u_n) \quad (4)$$

2) 评价集的确定。评价集是评价人员在刻画每一个指标所处状态的各种评价结果所组成的集合, 即评价等级, 用字母 V 来表示:

$$V = (v_1, v_2, \dots, v_m) \quad (5)$$

3) 模糊判断矩阵的确定。首先对因素集中的单个指标 $u_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 进行单因素评判, 从而得到指标 u_i 对评语集的隶属度, 即单个指标从 U 到 V 的模糊映射关系:

$$R_i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{im}) \quad (6)$$

n 个指标的评价集构成总的评价矩阵, 即模糊综合判断矩阵 R :

$$R = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m) \quad (7)$$

数据获取主要采用问卷调查的方式, 被调查人员评价的准确度取决于对装甲车辆 PHM 系统相关知识的广度和深度, 以及对装甲车辆 PHM 系统应用的实践经验和阅历。由于被调查人员对装甲车辆 PHM 系统了解程度参差不齐, 所以根据人员的熟悉程度划分为 5 个等级, 参考权重如表 3 所示。

表 3 参考权重对照表

熟悉程度	参考权重/%
非常熟悉	100
熟悉	80
较熟悉	60
不太熟悉	40
不熟悉	0

2 装甲车辆 PHM 系统性能评估

装甲车辆的维修保障任务日益突出, PHM 系统的融入可以大大提升装甲车辆的战备完好性, 节省维修保障时间, 实现自主维修保障, 目前装甲车辆 PHM 系统的研究已经逐步得到应用, 涌现出多种类型的装甲车辆 PHM 系统。

装甲车辆 PHM 系统性能评估是结合装甲车辆自身的特点建立影响性能评估的指标体系, 对其各个影响指标的权重进行合理配置, 进一步做出科学合理的评价。下面以 8 套装甲车辆 PHM 系统为例, 通过上述方法定权、评估, 选出性能优良的装甲车辆 PHM 系统。

2.1 体系构建

装甲车辆 PHM 系统按照组成可划分为车载终端、通信设备和地面服务器三个部分，在对装甲车辆 PHM 系统应用和使用状态进行全面了解后，将装甲车辆 PHM 系统的性能评价指标分为 4 类，并构建了 4 层指标体系，装甲车辆 PHM 系统性能评估体系如图 2 所示。

2.2 评价指标权重确定

共有 20 名专家参与权重的设定，经过 7 轮的交互得到最终的权重向量，现给出最终的交互结果。通过指标之间对于其上一层指标的重要性进行两两比较得到判断矩阵，并由前述计算方法求得层次单排序向量、最大特征值以及一致性比例，计算结果如表 4~15 所示。

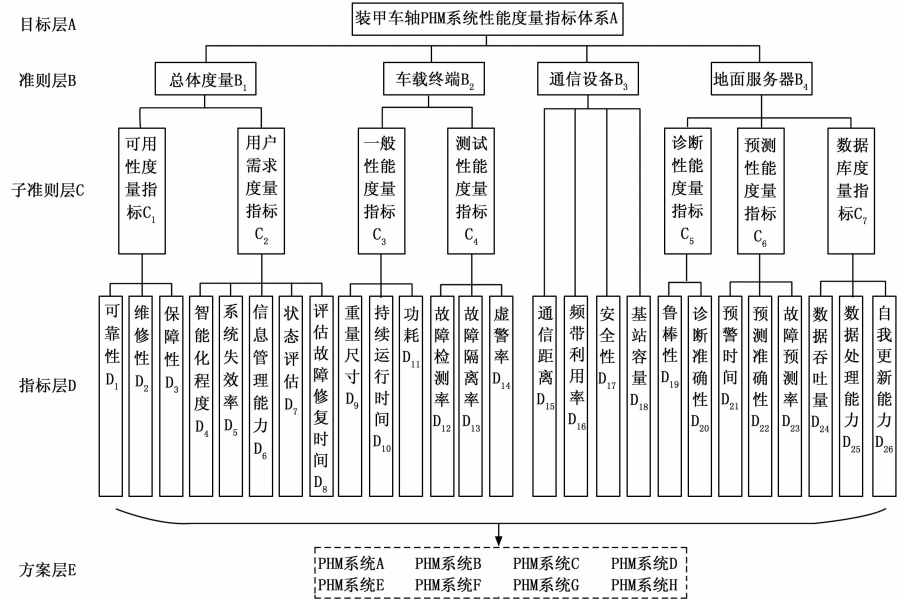


图 2 装甲车辆 PHM 系统性能度量指标体系

表 4 准则层 B 相对于目标层 A 的判断矩阵

A	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	权重
B ₁	1	6/4	3/7	4/6	0.179 9
B ₂	4/6	1	2/8	3/7	0.115
B ₃	7/3	8/2	1	6/4	0.430 3
B ₄	6/4	7/3	4/6	1	0.274 8

$$\lambda_{\max} = 3.002, CI = 9.91 \times 10^{-4}, CR = 0.005 9 < 0.1.$$

表 9 指标层 D 相对于子准则层 C₂ 的判断矩阵

C ₂	D ₄	D ₅	D ₆	D ₇	D ₈	权重
D ₄	1	2/8	4/6	3/7	6/4	0.102 5
D ₅	8/2	1	7/3	6/4	9/1	0.425 2
D ₆	6/4	3/7	1	4/6	7/3	0.160 5
D ₇	7/3	4/6	6/4	1	8/2	0.250 5
D ₈	4/6	1/9	3/7	2/8	1	0.061 3

$$\lambda_{\max} = 4.002 4, CI = 7.98 \times 10^{-4}, CR = 0.003 1 < 0.1.$$

表 5 子指标层 C 相对于指标层 B₁ 的判断矩阵

B ₁	C ₁	C ₂	权重
C ₁	1	7/3	0.7
C ₂	3/7	1	0.3

$$\lambda_{\max} = 5.026 4, CI = 0.006 6, CR = 0.020 1 < 0.1.$$

表 6 子指标层 C 相对于指标层 B₂ 的判断矩阵

B ₂	C ₃	C ₄	权重
C ₃	1	4/6	0.4
C ₄	6/4	1	0.6

表 10 指标层 D 相对于子准则层 C₃ 的判断矩阵

C ₃	D ₉	D ₁₀	D ₁₁	权重
D ₉	1	2/8	4/6	0.156 4
D ₁₀	8/2	1	7/3	0.598 3
D ₁₁	6/4	3/7	1	0.245 3

表 7 子指标层 C 相对于指标层 B₃ 的判断矩阵

B ₃	C ₅	C ₆	C ₇	权重
C ₅	1	7/3	8/2	0.598 3
C ₆	3/7	1	6/4	0.245 3
C ₇	2/8	4/6	1	0.156 4

$$\lambda_{\max} = 3.002, CI = 9.91 \times 10^{-4}, CR = 0.005 9 < 0.1.$$

表 11 指标层 D 相对于子准则层 C₄ 的判断矩阵

C ₄	D ₁₂	D ₁₃	D ₁₄	权重
D ₁₂	1	7/3	3/7	0.279 3
D ₁₃	3/7	1	2/8	0.132 7
D ₁₄	7/3	8/2	1	0.588

$$\lambda_{\max} = 3.002, CI = 9.91 \times 10^{-4}, CR = 0.005 9 < 0.1.$$

表 8 指标层 D 相对于子准则层 C₁ 的判断矩阵

C ₁	D ₁	D ₂	D ₃	权重
D ₁	1	7/3	8/2	0.598 3
D ₂	3/7	1	6/4	0.245 3
D ₃	2/8	4/6	1	0.156 4

$$\lambda_{\max} = 3.010 6, CI = 0.005 3, CR = 0.031 3 < 0.1.$$

表 12 指标层 D 相对于准则层 B₃ 的判断矩阵

B ₃	D ₁₅	D ₁₆	D ₁₇	D ₁₈	权重
D ₁₅	1	6/4	7/3	8/2	0.430 3
D ₁₆	4/6	1	6/4	7/3	0.274 8
D ₁₇	3/7	4/6	1	6/4	0.179 9
D ₁₈	2/8	3/7	4/6	1	0.115

$\lambda_{\max} = 4.002\ 4, CI = 7.983\ 3 \times 10^{-4}, CR = 0.003\ 1 < 0.1$ 。

表 13 指标层 D 相对于子准则层 C₅ 的判断矩阵

C ₅	D ₁₉	D ₂₀	权重
D ₁₉	1	7/3	0.7
D ₂₀	3/7	1	0.3

表 14 指标层 D 相对于子准则层 C₆ 的判断矩阵

C ₆	D ₂₁	D ₂₂	D ₂₃	权重
D ₂₁	1	3/7	6/4	0.263
D ₂₂	7/3	1	7/3	0.536 2
D ₂₃	4/6	3/7	1	0.200 8

$\lambda_{\max} = 3.018\ 3, CI = 0.009\ 1, CR = 0.054\ 1 < 0.1$ 。

表 15 指标层 D 相对于子准则层 C₇ 的判断矩阵

C ₇	D ₂₄	D ₂₅	D ₂₆	权重
D ₂₄	1	6/4	7/3	0.467 8
D ₂₅	4/6	1	7/3	0.357
D ₂₆	3/7	3/7	1	0.175 2

$\lambda_{\max} = 3.018\ 3, CI = 0.009\ 1, CR = 0.054\ 1 < 0.1$ 。

经验证各判断矩阵均满足一致性条件, 所以可由以上数据进一步求出各级指标相对于目标层 A 的总排序向量, 权重系数计算结果如表 16 所示。所得各评价指标的权重结果是装甲车辆 PHM 系统性能评估工作的基础, 反映了影响 PHM 系统性能各要素的相对重要性, 为装甲车辆 PHM 系统的研发和设计提供参考方向。

2.3 模糊综合评判

对 8 套装甲车辆 PHM 系统进行模糊综合评价, 比较不同 PHM 系统之间的性能优劣。进行模糊综合评判应具备以下几个要素: 一是因素集 $U = \{D_1, D_2, \dots, D_{26}\}$; 二是评价集, 评价集一般划分为 3~9 个等级, 本文根据装甲车辆 PHM 系统的实际情况将评价集划分为 5 个等级, 即 $V = \{\text{优, 良, 中, 一般, 差}\}$, 根据大多数评判者的评判习惯, 确定各等级评分区间, 如表 17 所示; 三是模糊判断矩阵。定性的指标经过专家评分, 定量的指标通过计算获得, 根据专家的熟悉程度分析整合 30 个专家的调查问卷, 得到 8 套系统各个指标的评价值, 进一步可以计算各个系统的得分。例如对 PHM 系统 A 的可用度量, 其可靠性、维修性

表 16 装甲车辆 PHM 系统性能度量指标权重计算结果

目标层	准则层 B		子准则层 C			指标层 D			
	准则	权重	子准则	权重	总权重	指标	权重	相对 B 层权重	总权重
A	B ₁	0.179 9	C ₁	0.7	0.126	D ₁	0.598 3	0.189	0.075
						D ₂	0.245 3	0.172	0.031
						D ₃	0.156 4	0.109	0.02
						D ₄	0.192 4	0.058	0.01
			C ₂	0.3	0.054	D ₅	0.798 5	0.24	0.043
						D ₆	0.301 3	0.09	0.016
						D ₇	0.470 4	0.141	0.025
						D ₈	0.115 2	0.035	0.006
	B ₂	0.115	C ₃	0.4	0.046	D ₉	0.156 4	0.062 6	0.007 2
						D ₁₀	0.598 3	0.239 3	0.027 5
						D ₁₁	0.245 3	0.098 1	0.011 3
			C ₄	0.6	0.069	D ₁₂	0.279 3	0.1676	0.019 3
						D ₁₃	0.132 7	0.079 6	0.009 2
						D ₁₄	0.588	0.352 8	0.040 6
	B ₃	0.430 3				D ₁₅		0.430 3	0.185 2
						D ₁₆		0.274 8	0.118 2
						D ₁₇		0.179 9	0.077 4
						D ₁₈		0.115	0.049 5
	B ₄	0.274 8	C ₅	0.598 3	0.164 4	D ₁₉	0.7	0.418 8	0.115 1
						D ₂₀	0.3	0.179 5	0.049 3
			C ₆	0.245 3	0.067 4	D ₂₁	0.263	0.064 5	0.017 7
						D ₂₂	0.536 2	0.1315	0.036 1
						D ₂₃	0.200 8	0.049 3	0.013 5
			C ₇	0.156 4	0.043	D ₂₄	0.467 8	0.073 2	0.020 1
						D ₂₅	0.357	0.055 8	0.015 3
						D ₂₆	0.175 2	0.027 4	0.007 5

和保障性的权重系数分别为 0.598 3、0.245 3、0.156 4，而对该系统这三个方面性能综合评价分值为 83、91、87，则 PHM 系统 A 的可用性度量指标得分为 $83 \times 0.598 3 + 91 \times 0.245 3 + 87 \times 0.156 4 = 85.588$ 。同理可以计算其他指标的分值，进而得到 8 套 PHM 系统的最终评价结果，如表 18 所示。

表 17 评价等级及评分区间

等级	优	良	中	一般	差
评分区间	[100,90]	(90,80]	(80,70]	(70,60]	(60,0]

表 18 PHM 系统评估结果

评价对象	A	B	C	D
系统性能 A	84.869	86.648	80.83	83.481
总体度量 B1	87.612	85.245	86.104	86.121
车载终端 B2	90.646	86.577	88.225	83.848
通信设备 B3	85.429	90.242	76.153	88.574
地面服务器 B4	79.778	81.97	81.607	73.623
可用性 C1	85.588	83.462	85.301	86.544
用户需求 C2	92.335	89.404	87.976	85.135
一般性能 C3	92.222	85.604	90.779	89.582
测试性能 C4	89.596	87.225	86.523	80.026
诊断性能 C5	79.624	84.975	82.404	71.631
预测性能 C6	79.219	76.955	78.812	74.85
数据库 C7	81.243	78.342	82.943	79.319
评价对象	E	F	G	H
系统性能 A	80.558	81.794	79.27	81.313
总体度量 B1	81.776	87.659	84.002	80.538
车载终端 B2	88.633	83.906	88.153	83.15
通信设备 B3	79.104	82.191	77.142	84.543
地面服务器 B4	78.658	76.449	75.786	75.995
可用性 C1	79.434	86.933	83.087	79.221
用户需求 C2	87.242	89.354	86.136	83.612
一般性能 C3	90.636	87.553	92.67	89.486
测试性能 C4	87.297	81.474	85.141	78.926
诊断性能 C5	79.445	77.103	74.933	76.665
预测性能 C6	78.358	73.222	75.115	73.021
数据库 C7	76.116	79.009	80.102	78.094

图 3 给出了 8 套装甲车辆 PHM 系统最终评价值的柱状图，可以看出系统 G 的评价等级为中，其他 7 套系统的评价等级都为良，系统 B 的综合评价结果最好，其通信设备性能和地面服务器性能评价在这 8 套系统中都比较高，系统 A 的总体性能和车载终端性能也比较突出，这两套系统值得借鉴学习。横向比较各个系统的性能评价，地面服务器的分值普遍偏低，诊断性能、预测性能以及数据库的相关技术研究需要进一步加强。总的来看，现有装甲车辆

PHM 系统性能大体水平为良，距离广泛应用推广到装甲车辆上并应用到战场环境中还有很大的提升空间。

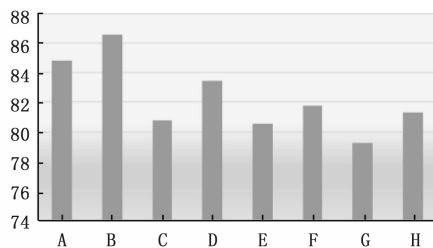


图 3 8 套装甲车辆 PHM 系统评价值

3 结束语

本文采用模糊层次分析法对 8 套装甲车辆 PHM 系统的性能进行了评估，针对层次分析法中度量标度值不合理的情况，引入了“5/5—9/1”标度，针对因定权者经验限制及个人偏好而产生的定权偏向问题，提出了多层次交互式过程的评估指标定权方法，使得权重更加科学合理。经过评估，有效地区分了不同装甲车辆 PHM 系统性能的优劣，为部队进一步选择和研制装甲车辆 PHM 系统提供了参考依据，同时也为现有的装甲车辆 PHM 系统的改进提供了参考方向。

参考文献:

- [1] 穆永铮, 鲁宗相, 乔颖, 等. 基于多算子层次分析模糊评价的电网安全与效益综合评价指标体系 [J]. 电网技术, 2015, 39 (1): 23-28.
- [2] 杜栋, 庞庆华, 吴炎. 现代综合评价方法与案例精选 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2015.
- [3] 陈希祥, 邱静, 刘冠军. 基于层次分析法与模糊综合评判的测试设备选择方法研究 [J]. 兵工学报, 2010, 31 (1): 68-73.
- [4] 程庆文, 汪波. 基于 AHP 和模糊理论的企业经营能力评价体系 [J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37 (1): 123-127.
- [5] 赵华琼, 唐学文. 基于模糊层次分析法的网络业务性能评估模型 [J]. 计算机应用, 2013, 33 (11): 3035-3038.
- [6] 周龙伟. 未来我军数字化师指挥体系典型指标评估研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
- [7] 马庆跃. 武器装备体系作战效能综合评估技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [8] 李慧敏. 基于模糊评判理论对长春市综合公园的景观评价 [D]. 长春: 吉林农业大学, 2012.
- [9] 谭维错, 郭爱煌, 钱业青. 基于模糊层次分析的小小区性能评估 [J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36 (8): 1651-1655.
- [10] 张晶晶, 许修乐, 丁明, 等. 基于模糊层次分析法的变压器状态评估 [J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45 (3): 75-81.