

轮式装备性能鉴定试验故障等级评定方法研究

丁豪坚¹, 傅耀宇¹, 王可¹, 郝士祥¹, 陈俊豪²

(1. 中国人民解放军32184部队, 北京100072; 2. 陆军军事交通学院联合投送系, 天津300161)

摘要: **目的** 针对轮式装备性能鉴定试验故障等级评定过程随机性强、结果模糊性和不确定性高的特点, 提出一种基于云模型的轮式装备故障等级评定方法。**方法** 首先, 依据实战化考核要求和性能鉴定试验特点要求, 从“装备”“安全”和“作战”3个角度建立轮式装备故障等级评定指标体系, 其次采用G1法确定指标权重, 引入云模型融合定性定量指标, 采用隶属度确定最终等级, 最后使用建立的故障等级评定云模型对两型装备故障进行等级评定与分析。**结果** 云滴跨度能有效表征打分过程的随机性, 云滴厚度能真实反映评定结果的模糊性和不确定性, 且评定结果与实际一致。**结论** 该方法对于轮式装备性能鉴定试验故障等级评定是可行和适用的, 具有一定的借鉴意义和推广价值。

关键词: 轮式装备; 性能鉴定; 试验; G1法; 云模型; 故障等级

中图分类号: TJ18

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2024)11-0047-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.11.007

Fault Level Evaluation Method for Performance Qualification Test of Wheeled Equipment

DING Haojian¹, FU Yaoyu¹, WANG Ke¹, HAO Shixiang¹, CHEN Junhao²

(1. Unit 32184 of PLA, Beijing 100072, China; 2. Joint Delivery System, Army Military Transportation University, Tianjin 300161, China)

ABSTRACT: Aiming at the characteristics of high randomness, fuzziness and uncertainty in the process of fault level evaluation of wheeled equipment performance qualification tests, the work aims to propose a method for fault level evaluation of wheeled equipment based on a cloud model. First of all, according to the requirements of actual combat assessment and the characteristics of performance appraisal tests, a fault rating index system of wheeled equipment was established from three perspectives of “equipment”, “safety” and “operation”. Secondly, the G1 method was used to determine the index weight, a cloud model was introduced to integrate qualitative and quantitative indexes, and membership degree was used to determine the final grade. At last, a fault classification cloud model was used to evaluate and analyze the two types of equipment faults. The results showed that the cloud droplet span could effectively represent the randomness of the scoring process, and the cloud droplet thickness could truly reflect the fuzziness and uncertainty of the evaluation results, and the evaluation results were consistent with the reality. The method is feasible and applicable for the fault level evaluation of the performance qualification test of wheeled equipment, and has certain reference significance and popularization values.

KEY WORDS: wheeled equipment; performance qualification; test; G1 method; cloud model; fault level

收稿日期: 2024-06-25; 修订日期: 2024-09-05

Received: 2024-06-25; Revised: 2024-09-05

引文格式: 丁豪坚, 傅耀宇, 王可, 等. 轮式装备性能鉴定试验故障等级评定方法研究[J]. 装备环境工程, 2024, 21(11): 47-54.

DING Haojian, FU Yaoyu, WANG Ke, et al. Fault Level Evaluation Method for Performance Qualification Test of Wheeled Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(11): 47-54.

性能鉴定试验作为军用装备试验鉴定的重要一环,是装备订购方检验新装备性能和质量是否满足订购和验收要求的重要手段。试验中暴露的故障问题作为提高装备质量水平的重要依据,其归零后可极大降低装备隐藏的质量风险。故障等级评定是故障归零的前提,GJB/Z 194—2021《装备质量问题归零实施指南要求》中明确了不同等级的故障实施差异化归零流程,而当前在装备试验鉴定领域,就如何判定故障等级还未形成统一标准和做法。对轮式装备而言,其故障问题分级缺乏科学高效的手段,过多的定性评判使得故障分级过程模糊且对结果的可信度支撑不足。如何高效准确评估轮式装备故障等级,以保障后续故障归零质量,是承试单位亟需解决的问题。

故障等级评定^[1]是对故障进行定性及定量的分析以给出相应分级结论的过程,已有学者对此展开研究。左学谦等^[1]将层次分析法(AHP)用于油田柱塞泵的常规故障等级评价。王丰等^[2]在可拓学理论的基础上引入了“故障元”概念形式化描述故障,并据此开展了航空装备故障损伤等级的可拓评定。赵泽平等^[3]从故障影响范围、影响时间和故障概率3个维度出发,对故障等级进行了划分,建立了危害度计算模型,并以动车组高压牵引系统为例,证实了该方法的可行性。Zhou等^[4]在分析29种危害性分析方法对于自动驾驶船舶适用性的基础上,从系统工程角度提出了自动驾驶船舶的故障危害性分析方法。崔铁军等^[5]引入空间故障网络将系统故障过程转化为故障树结构,采用改进AHP法和突变级数法确定了故障树中各事件的权重和分值以判定故障等级。张凯等^[6]针对传统多模态过程故障等级评估方法对模态之间共性特征考虑较少的问题,引入了深度置信网络,提取了多模态的共性特征及单模态的个性特征,并利用多模态的已知故障等级数据集构建了故障等级评估模型。验证表明,该方法较传统方法的准确性提高近10%。俞蒋彬等^[7]提出了一种基于大数据的纯电客车动力电池安全风险多维度评价方法,采用多源数据融合处理得到用于表征电池运行状态的参数,利用随机森林算法预测了动力电池的等级。张保山^[8]利用双标签自适应模糊神经网络对装备故障特征数据进行了模糊推理,得到装备故障等级及其对应隶属度。综上所述,故障等级评定的研究主要分为基于FMECA^[9]和综合评价方法^[10]的故障等级评估,以及基于数据驱动的故障等级预测^[11],前者评定对象为未发生的故障,后者预测对象大多为已暴露的部件级故障,而对于装备整体层面的故障等级判定研究还较少,也未见性能鉴定试验故障等级评定相关研究。

鉴于此,本文分析了轮式装备的能力特点和作战要求,结合性能鉴定工作实际,构建了轮式装备故障等级评定指标体系。针对评定指标定性定量结合、评定结果模糊的特点,采用云模型理论建立轮式装备故

障等级评定模型,实现故障等级量化评定。

1 故障等级评定指标体系

当装备在性能鉴定试验过程中出现故障后,试验组织方需调查核实故障情况,评估故障的影响程度,并提出故障分级建议^[12-13]。对轮式装备而言,其性能鉴定试验中的故障大部分都集中在可靠性行驶试验阶段。在可靠性行驶试验中,通过特定路面高强度、不规则、多循环的冲击振动,达到考核装备结构强度的目的,故障的产生是在振动、冲击、环境多效应叠加下产生的^[14-15]。随着实战化考核向着纵深推进,仅通过分析装备受损程度及其影响已难以全面准确地反映故障的严重程度,而亟需向着多方位、多角度综合评估分析转变。笔者结合轮式装备性能鉴定工作实际,提出轮式装备性能鉴定试验故障等级评定指标体系。

指标体系由目标层、准则层和指标层组成,其中准则层包括装备级、安全级和作战级3个指标,指标层分别由9个一级指标和24个二级指标组成。在准则层中,“装备级”主要关注故障导致的装备受损情况以及故障发生后的排查和维修情况;“安全级”主要评估故障导致的人员、装备和财产损失,以及由此引发的人员伤亡、环境破坏和财产损失风险;“作战级”主要分析故障对装备的物理性能、作战效能和作战适用性3个方面带来的影响。其中,物理性能层面核实装备战术技术指标的下降情况;作战效能层面关注故障对装备完成作战任务时发挥有效作用程度造成的影响^[16-17],具体包括装备战场机动能力、战场生存能力、专用能力和综合情报能力这4类作战能力的降幅;作战适用性层面分析故障对装备在作战中保持可用程度带来的影响^[18-19],主要从作战使用适应性、作战环境适应性和作战保障适应性3个方面来分析,完整的故障等级判定指标体系见表1。

2 基于云模型的轮式装备故障等级评定

基于轮式装备故障等级判定指标体系,首先采用打分法对定性指标赋分。结合实际统计情况,对定量指标定值,并利用G1法确定指标权重。而后引入云模型理论,分别建立不同等级的标准云模型和综合云模型。通过计算综合云模型与标准云模型的隶属度,以确定装备故障等级。

2.1 G1法赋权

G1法是一种以AHP法为基础改进而来的赋权法,相较于AHP一致性检验的复杂性,G1法自然满足一致性,计算较为简便^[20]。本文采用G1法对指标

表 1 故障等级判定指标体系
Tab.1 Fault level classification index system

目标层	准则层	指标层		指标性质
		一级指标	二级指标	
故障等级	装备级 (Q ₁)	装备受损情况 (I ₁)	装备外观受损程度 (I ₁₁)	定性
			主要总成受损情况 (I ₁₂)	定量
			零部件、原材料或软件受损程度 (I ₁₃)	定性
		故障排查情况 (I ₂)	定位难易程度 (I ₂₁)	定性
			故障隐蔽性 (I ₂₂)	定性
			维修工时 (I ₃₁)	定量
		故障维修情况 (I ₃)	维修保障性 (I ₃₂)	定性
			维修复杂度 (I ₃₃)	定性
			人员伤亡情况 (I ₄)	人员伤亡人数 (I ₄₁)
	安全级 (Q ₂)	环境破坏情况 (I ₅)	人员伤亡风险 (I ₄₂)	定性
			环境破坏情况 (I ₅₁)	定性
		财产损失情况 (I ₆)	环境破坏风险 (I ₅₂)	定性
			财产损失金额 (I ₆₁)	定量
		性能影响 (I ₇)	财产损失风险 (I ₆₂)	定性
			关键战术技术指标下降的数量占比 (I ₇₁)	定量
	关键战术技术指标最大降幅 (I ₇₂)		定量	
	作战级 (Q ₃)	作战效能影响 (I ₈)	关键战术技术指标平均降幅 (I ₇₃)	定量
			战场机动能力降幅 (I ₈₁)	定量
战场生存能力降幅 (I ₈₂)			定量	
作战作业能力降幅 (I ₈₃)			定量	
作战适用性影响 (I ₉)		综合情报能力降幅 (I ₈₄)	定量	
		作战使用适应性影响 (I ₉₁)	定性	
		作战环境适应性影响 (I ₉₂)	定性	
		作战保障适应性影响 (I ₉₃)	定性	

层和准则层指标赋值, 过程如下:

1) 序关系确定。以文中的指标体系为例, 一级指标层包含 {I₁, I₂, ..., I₉} 9 个指标, 邀请专家凭借自身经验确定 9 个指标的序关系。具体是以重要性为标准, 在 9 个指标中选出最重要的指标记为 I*1, 而后在剩余的 8 个指标中选出最重要的指标记为 I*2, 按此模式循环直至选出 I*8。将指标按照 I*1>I*2>...>I*3 表示, 即在一级指标层中按 “>” 建立序关系。

2) 重要程度量化。采用 r_k 对相邻指标 I_{k-1} 与 I_k 的重要程度差距进行赋值量化, 即:

$$r_k = \frac{\omega_{k-1}}{\omega_k} \quad (1)$$

式中: k=9, 8, ..., 2; ω_k 表示指标 I_k 的权重; r_k 值表征相邻指标间的重要性差距, r_k 值越大, 意味相邻指标 I_{k-1} 与 I_k 的重要性相差越大。r_k 赋值 [21] 见表 2。

3) 权重计算。基于指标序关系和 r_k, 计算指标 I₉ 的权重 ω₉ 和其他指标的权重, 见式 (2)、(3)。

$$\omega_9 = \left(1 + \sum_{j=2}^9 \prod_{i=j}^9 r_i \right)^{-1} \quad (2)$$

$$\omega_{k-1} = r_k \omega_k \quad (k=9, 8, \dots, 2) \quad (3)$$

表 2 r_k 赋值

Tab.2 r_k assignment

r _k	含义
1.0	指标 I _{k-1} 与指标 I _k 同样重要
1.2	指标 I _{k-1} 与指标 I _k 稍微重要
1.4	指标 I _{k-1} 与指标 I _k 明显重要
1.6	指标 I _{k-1} 与指标 I _k 强烈重要
1.8	指标 I _{k-1} 与指标 I _k 极端重要

2.2 故障等级评定云模型

2.2.1 云模型

云模型是一种实现定性概念与定量数值不确定转换的数学模型^[22], 设 U 表示由定量数值组成的论域, u 为论域中的数值, 满足 u ∈ U, C 为论域上的定性概念, 且 u 是 C 的随机映射。若具有稳定倾向的随机数 β(u) ∈ [0,1], 则称 β(u) 为 u 对 C 的隶属度, u 在 U 上的隶属度分布称为云。云由大量云滴组成, 一粒云滴的坐标为 (u, β(u))。云模型的数字特征由期望 E_x、熵 E_n 和超熵 H_e 组成, 其中 E_x 表示云滴在论域空间的期望, E_n 反映云滴的离散程度, H_e 度量云滴的厚度。

本文采用正态云模型来进行故障等级评定,对于定性概念,正态云模型的隶属度满足:

$$\mu(x) = \exp\left[-\frac{(x - E_x)^2}{2(E_n')^2}\right] \quad (4)$$

云模型借助云发生器进行定性概念与定量数据的双向转化,其中正向云发生器用于定性概念到定量数值的转化。当云模型数字特征(E_x, E_n, H_e)确定后,正向云发生器生成云滴的步骤如下:

- 1) 生成 E_n 为期望, H_e 为标准差的正态随机数 E_n' ;
- 2) 生成 E_x 为期望, E_n' 为标准差的正态随机数 x ;
- 3) 根据隶属度函数计算得到 $\mu(x)$, 令 $y = \mu(x)$;
- 4) 云滴的坐标即为 (x, y) , 重复上述步骤 h 次, 即生成 h 个云滴。

逆向云发生器用于定量数值到定性概念的转化,是样本数据形成概念内涵 (E_x, E_n, H_e) 的过程。本文考虑一阶绝对中心矩的逆向云算法^[23]可能会出现 $H_e^2 < 0$ 的情况,使得超熵 H_e 估计值无意义。故采用许昌林^[24]所提出的多步还原逆向云算法,假设邀请 q 个专家对某一指标进行打分, x_r 为第 r 个专家的打分值,逆向云发生器的工作步骤如下^[24]。

- 1) 计算样本期望 \widehat{E}_x :

$$\widehat{E}_x = \frac{1}{q} \sum_{r=1}^q x_r \quad (5)$$

- 2) 随机抽样分组,设在初始样本中抽取 p 组,每组样本包含 t 个专家分值。记 X_k 为第 k 次抽取样本的集合, $X_k = \{\widehat{X}_{k1}, \widehat{X}_{k2}, \dots, \widehat{X}_{kt}\}$, 其中 $k=1, 2, \dots, p$,

\widehat{X}_{k1} 为 k 次抽取的第 1 个专家分值。计算分组后每组样本方差 DX_k , 令 $Y_k^2 = DX_k$ 。

- 3) 记 $Y^2 = \{Y_1^2, Y_2^2, \dots, Y_p^2\}$, 从样本集合 $\{Y_1^2, Y_2^2, \dots, Y_p^2\}$ 中计算 \widehat{E}_n^2 和 \widehat{H}_e^2 :

$$\widehat{E}_n^2 = \frac{1}{2} \sqrt{4(EY^2)^2 - 2DY^2} \quad (6)$$

$$\widehat{H}_e^2 = EY^2 - \widehat{E}_n^2 \quad (7)$$

$$\text{其中, } EY^2 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^p Y_i^2, \quad DY^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^p (Y_i^2 - EY^2)^2$$

2.2.2 评价等级划分

依据 GJB 5711—2006《装备质量问题处理通用要求》和 GJB/Z 194—2021《装备质量问题归零实施指南要求》,本文将轮式装备性能鉴定故障分为一般故障、严重故障和重大故障。为便于量化打分,设定故障等级的论域为 $[0, 10]$, 分数越高,代表故障问题越轻微。其中,一般故障分值区间为 $(8, 10]$, 严重故障分值区间为 $(5, 8]$, 重大故障分值区间为 $(0, 5]$, 采用指标近似法确定不同故障等级的云模型数字特征:

$$E_x = (C_{\min} + C_{\max}) / 2 \quad (8)$$

$$E_n = (C_{\max} - C_{\min}) / 6 \quad (9)$$

$$H_e = k \quad (10)$$

式中: C_{\max} 表示该等级分值的上限; C_{\min} 表示该等级分值的下限。本文根据故障打分的模糊性和不确定性,令 $k=0.1E_n$ ^[25], 故障分级标准以及云模型数字特征见表 3。

表 3 故障分级标准及云模型数字特征

Tab.3 Fault classification standard and digital characteristics of cloud model

故障等级	分级标准	分值分布	E_x	E_n	H_e
一般故障	对装备的使用性能和作战能力有轻微影响或造成一般损失的故障	(8, 10]	9	0.33	0.033
严重故障	导致或可能导致装备严重降低使用性能和作战能力或造成严重损失的故障	(5, 8]	6.5	0.5	0.05
重大故障	危及人身安全、导致或可能导致装备丧失主要功能和作战能力或造成重大损失的故障	(0, 5]	2.5	0.83	0.083

在 Matlab 环境下,设置云滴数量为 2 000,利用正向云发生器将表 3 中 3 种故障的云模型数字特征转化成云图,并将该云图定义为标准云图,如图 1 所示。

2.2.3 故障等级评定

由于指标体系中的二级指标分为定量指标和定性指标,因此需分别开展不同类型指标的云化。对于定量指标,其通过收集装备实测数据计算得到各指标的降幅,经归一化后转化为相应分值。本指标体系中的定量指标均为正向指标,定量指标云模型数字特征中的期望为其分值,熵值和超熵值为 0^[26-27]。对于定性指标,采用专家打分法进行赋值,而后收集打分结果,利用逆向云发生器生成云模型数字特征,并与定量指标的模型云模型数字特征汇总,结合所属权重向上聚合,得到一级指标的云模型数字特征,随后结合

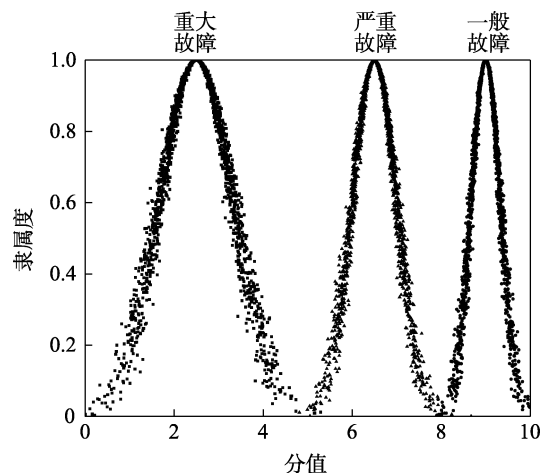


图 1 标准云图

Fig.1 Standard cloud model

其权重向上聚合得到准则层指标的数字特征, 以此类推, 最终得到目标层的综合云模型数字特征(E_x^* , E_n^* , H_e^*)。以综合云模型数字特征为例, 其计算公式见 (11) ~ (13):

$$E_x^* = \frac{\sum_{i=1}^n E_{xi} \omega_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \quad (11)$$

$$E_n^* = \frac{\sum_{i=1}^n E_{ni} \omega_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \quad (12)$$

$$E_e^* = \frac{\sum_{i=1}^n E_{ei} \omega_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \quad (13)$$

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 个准则层指标的期望、熵和超熵。

为保证评价结果的可信度, 计算综合云模型与标准云模型的相似度, 并根据最大隶属度原则确定装备故障等级, 基于云模型的轮式装备故障等级评定流程如图 2 所示。

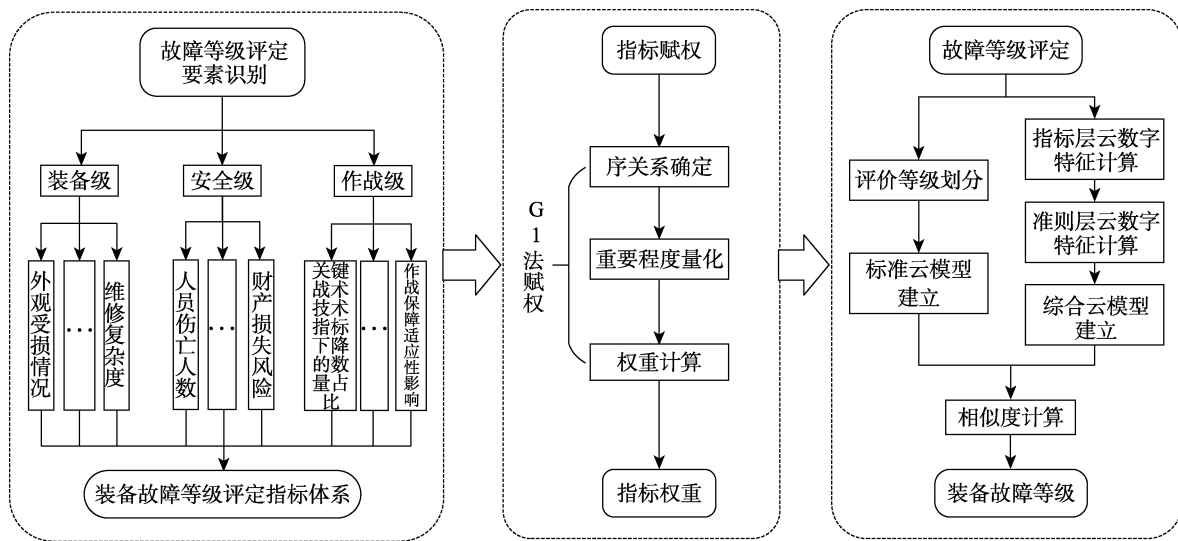


图 2 基于云模型的轮式装备故障等级评定流程

Fig.2 Fault level evaluation process of wheeled equipment based on cloud model

3 实例验证

3.1 指标赋权

为验证所提方法的适用性, 本文选取 2 个不同型号的轮式装备, 针对装备在性能鉴定试验阶段暴露的 2 个故障分别开展等级评定。2 个故障分别为“无法正常挂挡问题”和“底盘差速锁电磁阀进气管漏气”, 文中简称故障 A 和故障 B。首先, 邀请领域专家对故障评定指标体系中的指标进行赋权, 其中 3 个准则层指标为一组, 隶属于同一准则层指标的一级指标为一组, 隶属于同一一级指标的二级指标为一组, 组内指标的权重和为 1。以二级指标 $I_{11} \sim I_{33}$ 确定为例, 采用 G1 法赋权时, 首先确定准则层指标 $Q_1 \sim Q_3$ 的权重, 随后确定一级指标 $I_1 \sim I_3$ 的权重, 最后依次确定二级指标 $I_{11} \sim I_{13}$ 、 $I_{21} \sim I_{22}$ 、 $I_{31} \sim I_{33}$ 的权重, 待获取所有专家确定的权重后, 取权重的平均值作为最终值。指标权重确定后, 邀请装备试验和操作人员对指标体系中的定性指标进行打分, 统计后取平均值作为指标的最终值, 体系中的定量指标以实际统计结果为基础进行标准化得到, 最终指标权重和 2 个故障分值见表 4。

3.2 云模型 数字特征提取

基于表 4 呈现的指标分值和权重, 利用逆向云发生器生成二级指标的云模型数字特征, 设置发生器随机选取样本 100 组, 每组包含 4 个分值, 过程循环 100 次, 取 100 次计算结果的平均值作为二级指标的 E_n 和 H_e 。随后参照公式 (11) ~ (13) 分别计算一级指标和准则层指标云模型数字特征, 结果见表 5。将准则层指标的数字特征继续向上合成, 得到故障 A 和故障 B 的综合云模型数字特征, 分别为 [7.80, 0.50, 0.20] 和 [8.55, 0.4, 0.14]。

3.3 故障等级评定

得到故障的综合云模型数字特征后, 分别将其输入正向云发生器中, 设置云滴数量为 2 000, 生成的云图如图 3 所示。由图 3 可见, 故障 A 云图分布于“一般故障”和“严重故障”之间, 且偏向“严重故障”一侧, 故障 B 云图介于“一般故障”和“严重故障”之间, 但靠近“一般故障”, 这与 2 个故障综合云模型的期望值对应。同时, 故障 B 云滴的分散范围和厚度小于故障 A, 说明了打分人员对故障 B 的等级评定结果一致性好于故障 A。其次, 2 个故障综合云

表4 指标权重及故障分值
Tab.4 Index weight and fault score

准则层指标	G1 法赋权				分值				
	权重	一级指标	权重	二级指标	故障 A	故障 B			
Q ₁	0.30	I ₁	0.41	I ₁₁	0.25	9.60	9.00		
				I ₁₂	0.44	6.50	8.00		
				I ₁₃	0.31	9.20	7.50		
	I ₂	0.295	I ₂₁	0.51	6.40	8.70			
			I ₂₂	0.49	6.40	8.10			
			I ₃₁	0.37	7.70	4.90			
I ₃	0.295	I ₃₂	0.31	7.70	8.70				
		I ₃₃	0.32	8.10	9.10				
		I ₄	0.41	I ₄₁	0.57	10.00	10.00		
I ₄₂	0.43			8.20	8.20				
Q ₂	0.34	I ₅	0.29	I ₅₁	0.57	9.40	9.10		
				I ₅₂	0.43	8.60	8.70		
		I ₆	0.30	I ₆₁	0.58	9.30	9.80		
I ₆₂	0.42			7.80	8.00				
Q ₃	0.36	I ₇	0.34	I ₇₁	0.40	8.00	10.00		
				I ₇₂	0.30	1.90	10.00		
				I ₇₃	0.30	9.50	10.00		
				I ₈	0.37	I ₈₁	0.24	7.70	10.00
						I ₈₂	0.28	8.00	8.00
				I ₉	0.29	I ₈₃	0.25	10.00	10.00
						I ₈₄	0.23	10.00	10.00
I ₉₁	0.39	5.20	7.80						
				I ₉₂	0.30	7.60	7.80		
				I ₉₃	0.31	6.60	8.30		

表5 指标云模型数字特征

Tab.5 Numerical characteristics of index cloud model

指标	故障 A			故障 B		
	E _x	E _n	H _e	E _x	E _n	H _e
I ₁	8.11	0.40	0.16	8.10	0.61	0.17
I ₂	4.19	0.55	0.23	5.50	0.47	0.16
I ₃	7.83	0.38	0.12	7.43	0.30	0.15
I ₄	9.23	0.87	0.39	9.23	0.47	0.12
I ₅	9.05	0.75	0.27	8.93	0.92	0.42
I ₆	8.66	0.69	0.24	9.04	0.37	0.09
I ₇	6.63	0.00	0.00	10.00	0.00	0.00
I ₈	8.88	0.00	0.00	9.44	0.00	0.00
I ₉	6.36	0.95	0.37	7.96	0.62	0.27
Q ₁	6.87	0.44	0.17	7.14	0.48	0.16
Q ₂	9.01	0.78	0.31	9.09	0.57	0.20
Q ₃	7.39	0.27	0.11	9.20	0.18	0.08

的跨度均与标准云不一致,反映出打分过程的随机性较大,体现了故障等级评定影响因素多且相互关联的特点。综合云相较标准云更厚,说明评定结果具有模

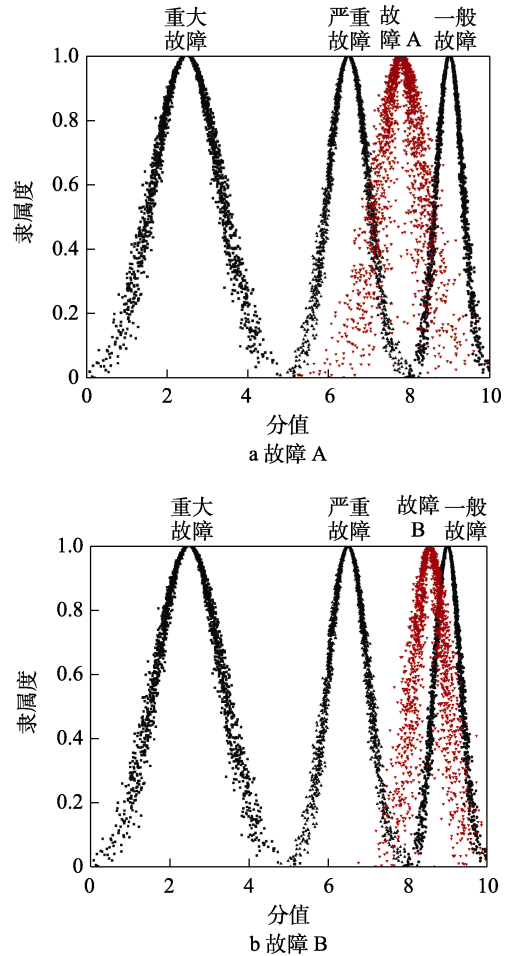


图3 故障等级评定云图

Fig.3 Fault level evaluation cloud: a) fault A; b) fault B

糊性,与装备故障等级评定的不确定性相符。

为确定故障对于不同等级的隶属度,需计算综合云与不同标准云的相似度,考虑计算结果存在稳定性风险,这里采用李海林等^[28]提出的基于期望曲线的正态云模型相似度计算方法,计算原理详见文献[16],计算的结果见表6。从表6中可知,故障A较“一般故障”更相似于“严重故障”,对应隶属度为0.1936;故障B与“一般故障”的相似度较高,对应隶属度为0.5414,隶属度的计算结果符合图3中的云滴分布规律。根据最大隶属度原则,确定故障A为“严重故障”,故障B为“一般故障”,该评定结果与两型装备实际故障归零中判定的故障等级一致。云模型通过云中云滴的分布情况,直观展现了故障等级评定的定性结果,通过实例证明了该方法对于故障分级具有较好的适用性,能够有效提高轮式装备故障分级工作的科学性和规范性。

表6 隶属度计算结果

Tab.6 Membership degree calculation results

标准云	一般故障	严重故障	重大故障	
综合云相似度	故障 A	0.149 8	0.193 6	0
	故障 B	0.541 4	0.026 3	0

4 结语

针对轮式装备性能鉴定试验中缺乏科学有效的故障等级评定手段, 本文提出了基于云模型的轮式装备故障等级评定方法, 主要结论有:

1) 构建了符合性能鉴定特点规律的轮式装备故障等级判定指标体系, 利用 G1 法赋权, 采用云模型定性定量融合指标, 方法思路清晰, 可操作性强, 对于轮式装备故障等级评定是适用和可行的。

2) 实例分析表明, 该方法可真实反映故障评定过程的不确定性, 体现故障等级的模糊性和随机性, 在增强故障分级工作的科学性的同时提高了评定结果的可信度, 可作为轮式装备性能鉴定试验故障等级评定的辅助决策。

3) 通过拓展指标体系此方法, 可用于其他类型装备的性能鉴定试验故障等级评定, 但在实际应用时发现, 指标体系存在以下不足: 一是精确测量故障对装备的性能影响存在一定困难, 装备发生故障后已不支持开展大量测试; 二是指标体系中体系适用性概念较为抽象, 使用时需对指标进行二次分解。后续就上述不足将进行研究和探讨。

参考文献:

- [1] 左学谦, 熊芝, 聂磊, 等. 基于 AHP 的油田柱塞泵常规故障等级评价方法[J]. 流体机械, 2022, 50(8): 67-75.
ZUO X Q, XIONG Z, NIE L, et al. AHP-Based Evaluation Method for Routine Failure Level of Oilfield Plunger Pumps[J]. Fluid Machinery, 2022, 50(8): 67-75.
- [2] 王丰, 顾佼佼, 林瑜. 航空装备故障损伤等级的可拓精准评定研究[J]. 计算机测量与控制, 2018, 26(6): 261-263.
WANG F, GU J J, LIN Y. Research on the Extension Precision Evaluation of the Fault Damage Grade of Aeronautical Equipment[J]. Computer Measurement & Control, 2018, 26(6): 261-263.
- [3] 赵泽平, 姚建伟, 张可新, 等. 基于多维度评价的动车组故障等级划分方法研究[J]. 铁道机车车辆, 2024, 44(1): 69-75.
ZHAO Z P, YAO J W, ZHANG K X, et al. Research of Fault Classification Method of EMU Based on Multi-Dimensional Evaluation[J]. Railway Locomotive & Car, 2024, 44(1): 69-75.
- [4] ZHOU X Y, LIU Z J, WANG F W, et al. Towards Applicability Evaluation of Hazard Analysis Methods for Autonomous Ships[J]. Ocean Engineering, 2020, 214: 107773.
- [5] 崔铁军, 李莎莎. 基于突变级数和改进 AHP 的系统故障状态等级确定方法[J]. 安全与环境工程, 2022, 29(3): 23-28.
CUI T J, LI S S. Method of Determining System Fault State Level Based on Catastrophe Progression and Improved AHP[J]. Safety and Environmental Engineering, 2022, 29(3): 23-28.
- [6] 张凯, 杨朋澄, 彭开香, 等. 基于深度置信网络的多模态过程故障评估方法及应用[J]. 自动化学报, 2024, 50(1): 89-102.
ZHANG K, YANG P C, PENG K X, et al. A Deep Belief Network-Based Fault Evaluation Method for Multimode Processes and Its Applications[J]. Acta Automatica Sinica, 2024, 50(1): 89-102.
- [7] 俞蒋彬, 张欣, 张永涛, 等. 基于大数据的纯电动客车动力电池安全风险多维度评价[J]. 北京交通大学学报, 2023, 47(5): 98-106.
YU J B, ZHANG X, ZHANG Y T, et al. Multi-Dimensional Evaluation of Power Battery Safety Risk of Pure Electric Bus Based on Big Data[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2023, 47(5): 98-106.
- [8] 张保山, 张琳, 张搏, 等. 基于故障风险标尺的复杂装备健康状态分类模型[J]. 系统工程与电子技术, 2020, 42(2): 489-496.
ZHANG B S, ZHANG L, ZHANG B, et al. Equipment Health Classification Model Based on Failure Risk Scale[J]. Systems Engineering and Electronics, 2020, 42(2): 489-496.
- [9] 邵璐璐, 韩继红, 牛侃, 等. 基于加权证据理论的故障模式分析方法研究[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(5): 782-791.
SHAO L L, HAN J H, NIU K, et al. Research on Failure Modes Analysis Based on Weighted Evidence Theory[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(5): 782-791.
- [10] 徐建喜, 崔涛, 赵斌. 铁路货车轮轴类部件故障状态多维度评估建模研究[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(3): 85-91.
XU J X, CUI T, ZHAO B. Research on Multidimensional Evaluation Modeling of Fault States of Railway Freight Car Wheel Axles[J]. Computer Measurement & Control, 2024, 32(3): 85-91.
- [11] 徐筱筱. 基于多模态融合的高铁列控车载设备故障诊断及危害等级评估[D]. 南京: 南京理工大学, 2019.
XU X X. Fault Diagnosis and Hazard Assessment of On-Board Equipment for High-Speed Train Control Based on Multimodal Fusion[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2019.
- [12] 高树新, 马维平. 军用车辆可靠性鉴定试验的故障归零[J]. 军事交通学院学报, 2018(1): 51-55.
GAO S X, MA W P. Fault Return-to-Zero in Reliability Qualification Test of Military Vehicle[J]. Journal of Military Transportation University, 2018(1): 51-55.
- [13] 中国人民解放军总装备部电子信息基础部标准化研究中心. 可靠性鉴定和验收试验: GJB 899A—2009[S]. 北京: 中国人民解放军总装备部, 2009.
Standardization Research Center of the Ministry of Electronic Information of the General Armament Department of the Chinese People's Liberation Army. Reliability Testing for Qualification and Production Acceptance: GJB 899A—2009[S]. Beijing: PLA General Armament De-

- partment, 2009.
- [14] 周金宝, 周军, 翟斌. 车辆装备可靠性试验评价指标研究[J]. 汽车实用技术, 2019, 44(14): 137-140.
ZHOU J B, ZHOU J, ZHAI B. Research on the Reliability Test Evaluation Index for the Vehicle Equipment[J]. Automobile Applied Technology, 2019, 44(14): 137-140.
- [15] 周金宝, 王可, 傅耀宇. 军用车辆装备试验理论[M]. 北京: 科学普及出版社, 2015.
ZHOU J B, WANG K, FU Y Y. Test Theory of Military Vehicle Equipment[M]. Beijing: Popular Science Press, 2015.
- [16] 吴春林, 郭三学. 基于模糊层次分析法的反恐装备体系作战效能评估[J]. 装备环境工程, 2018, 15(11): 129-133.
WU C L, GUO S X. Evaluation of Operational Effectiveness of Anti-Terrorism Equipment System Based on Fuzzy Analytic Hierarchy Process[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(11): 129-133.
- [17] 罗鹏程, 周纶伦, 金光. 武器装备体系作战效能与作战能力评估分析方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 1-7.
LUO P C, ZHOU J L, JIN G. Evaluation and Analysis Method of Combat Effectiveness and Combat Capability of Weapon Equipment System[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014: 1-7.
- [18] 蔡忠义, 金建刚, 周彦卿, 等. 基于统计数据和专家判断的新机作战适用性评估[J]. 火力与指挥控制, 2024, 49(1): 56-62.
CAI Z Y, JIN J G, ZHOU Y Q, et al. Operational Suitability Evaluation of New Aircraft Based on Statistical Data and Expert Judgment[J]. Fire Control & Command Control, 2024, 49(1): 56-62.
- [19] 张宇, 郭齐胜. 装备作战适用性试验内容设计研究[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(6): 101-104.
ZHANG Y, GUO Q S. Research on Content Design of Equipment Operational Suitability Test[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(6): 101-104.
- [20] 李刚. 基于标准差修正群组 G1 的组合赋权方法研究[J]. 系统工程学报, 2012, 27(1): 9-18.
LI G. Research on Method of Determining Combination Weights Based on the Standard Deviation Revised Group-G1[J]. Journal of Systems Engineering, 2012, 27(1): 9-18.
- [21] 赵海龙, 庞松岭, 霍美屹, 等. 基于 G1-独立性权数法的热带海岛环境真空断路器状态评估[J]. 装备环境工程, 2021, 18(11): 58-65.
ZHAO H L, PANG S L, HUO M Y, et al. State Evaluation of Vacuum Circuit Breakers in Tropical Island Environment Based on G1-Independence Weight Method[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(11): 58-65.
- [22] 李德毅, 孟海军, 史雪梅. 隶属云和隶属云发生器[J]. 计算机研究与发展, 1995, 32(6): 15-20.
LI D Y, MENG H J, SHI X M. Subordinate Cloud and Subordinate Cloud Generator[J]. Journal of Computer Research and Development, 1995, 32(6): 15-20.
- [23] 刘常昱, 冯芒, 戴晓军, 等. 基于云 X 信息的逆向云新算法[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(11): 2417-2420.
LIU C Y, FENG M, DAI X J, et al. A New Algorithm of Backward Cloud[J]. Acta Simulata Systematica Sinica, 2004, 16(11): 2417-2420.
- [24] 许昌林, 王国胤. 实现稳定双向认知映射的逆向云变换算法[J]. 模式识别与人工智能, 2013, 26(7): 634-642.
XU C L, WANG G Y. Backward Cloud Transformation Algorithm for Realizing Stability Bidirectional Cognitive Mapping[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2013, 26(7): 634-642.
- [25] 朱贵华, 孙续文. 基于 ANP-云模型的舰艇演训活动安全风险评估[J]. 指挥控制与仿真, 2022, 44(4): 78-83.
ZHU G H, SUN X W. Security Risk Evaluation of Warship Training Activities Based on ANP-Cloud Model[J]. Command Control & Simulation, 2022, 44(4): 78-83.
- [26] 赵楠, 赵荣珍. 面向不平衡数据的云模型旋转机械故障识别方法[J]. 振动与冲击, 2022, 41(22): 70-77.
ZHAO N, ZHAO R Z. Rotating Machinery Fault Identification Method Based on the Cloud Model Confronting Unbalanced Data[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(22): 70-77.
- [27] 沈进昌, 杜树新, 罗祎, 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.
SHEN J C, DU S X, LUO Y, et al. Method and Application Research on Fuzzy Comprehensive Evaluation Based on Cloud Model[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2012, 26(6): 115-123.
- [28] 李海林, 郭崇慧, 邱望仁. 正态云模型相似度计算方法[J]. 电子学报, 2011, 39(11): 2561-2567.
LI H L, GUO C H, QIU W R. Similarity Measurement between Normal Cloud Models[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(11): 2561-2567.