

中文引用格式:刘金娥,蒋鸣,负柯,等. 基于博弈论—改进云模型的起重机械安全评价[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(11): 81-91.

英文引用格式:LIU Jin'e,JIANG Ming,YUN Ke,et al. Safety evaluation of lifting machinery based on game theory-improved cloud model[J]. China Safety Science Journal,2025,35(11):81-91.

基于博弈论—改进云模型的起重机械安全评价^{*}

刘金娥¹高级工程师, 蒋鸣², 负柯¹高级工程师, 谢旭梦³高级工程师,
李涌泉⁴高级工程师, 汪班桥^{**2}副教授

(1 西安特种设备检验检测院, 陕西 西安 710065; 2 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710064;
3 浙江省特种设备科学研究院, 浙江 杭州 310020; 4 中国特种设备检测研究院, 北京 100029)

中图分类号:X952 文献标志码:A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.11.0420

资助项目:中国特种设备检验协会软科学课题(CASEI-RKT2024-37)。

【摘要】 为解决当前起重机械安全评价中指标体系不健全、权重确定单一化的问题, 基于2019—2023年期间95起起重机械事故调查报告, 结合人、设备、作业环境和管理(4M)理论构建起重机械安全评价指标体系; 采用最优最劣法(BWM)确定主观权重, 并引入指标相关性与冲突性(CRITIC)方法进行客观权重赋权, 基于博弈论思想将主、客观权重进行组合赋权, 形成综合权重, 完成赋权与评价所构建的评价指标体系; 以西安市某建筑施工企业A项目在用3台塔式起重机为实证对象, 运用改进云模型对其安全状况开展评价验证。结果表明: 人员因素是起重机械事故的主要致因, 在对作业人员进行安全检查时, 应重点关注作业人员的安全意识与安全技术水平; 在对起重机械进行安全检查时, 要关注安全保护装置的效能及结构本体关键部位的完整性。模型输出与现场检验记录的关键安全指标高度一致, 证实了该模型在起重机械安全评价中的有效性。

【关键词】 博弈论组合赋权; 云模型; 起重机械; 安全评价; 最优最劣法(BWM); 指标相关性与冲突性(CRITIC)

Safety evaluation of lifting machinery based on game theory-improved cloud model

LIU Jin'e¹, JIANG Ming², YUN Ke¹, XIE Xumeng³, LI Yongquan⁴, WANG Banqiao²

(1 Xi'an Special Equipment Inspection Institute, Xi'an Shaanxi 710065, China;

2 College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an Shaanxi 710064, China;

3 Zhejiang Academy of Special Equipment Science, Hangzhou Zhejiang 310020, China;

4 China Special Equipment Inspection & Research Institute, Beijing 100029, China)

Abstract: To address the issues of an incomplete indicator system and oversimplified weight determination in current lifting machinery safety evaluation, a safety evaluation indicator system for lifting machinery was constructed based on Man, Machine, Milieu, Management(4M) factors theory and 95 lifting machinery accident investigation reports from 2019 to 2023. The BWM was employed to determine

* 文章编号:1003-3033(2025)11-0081-11; 收稿日期:2025-06-10; 修稿日期:2025-09-04

** 通信作者:汪班桥(1977—),女,陕西临潼人,博士,副教授,主要从事复杂工业场景安全风险动态监测与量化安全评价方面的研究。E-mail:dcdgx17@chd.edu.cn。

subjective weights, while an CRITIC method was introduced to determine objective weights. By applying game theory combination weighting, the subjective and objective weights were integrated to form composite weights, thereby enabling the weighting and evaluation of the established indicator system. The results reveal that human factors are the primary cause of lifting machinery accidents. During safety inspections of operators, particular attention should be paid to their safety awareness and technical proficiency. In safety inspections of lifting machinery, the effectiveness of safety protection devices and the structural integrity of key components should be emphasized. The model outputs are highly consistent with key safety indicators in the on-site inspection records, confirming the effectiveness of the proposed model in the safety evaluation of lifting machinery.

Keywords: game theory combination weighting; cloud model; lifting machinery; safety evaluation; best-worst method (BWM); criteria importance though intercriteria correlation (CRITIC)

0 引言

起重机械作为现代工业与基础设施建设中的关键物料搬运设备,其安全运行是保障生产效率、维护公共安全及稳定供应链的关键环节。据《2023 年全国特种设备安全状况通告》,截至 2023 年底,全国(不含港澳台地区)起重机械总量达 292.17 万台,占特种设备总量的 13.72%;全国共发生特种设备事故和相关事故 71 起,其中,起重机械事故 20 起,占比达 28.17%^[1]。然而,目前的常规监管体系虽能提供基础安全保障机制,但起重机械的关键零部件众多,常规监管难以察觉钢丝绳内部损伤,电磁探伤仪虽精准但价高、需逐米扫描^[2]。在应对多应力耦合工况下的渐进式损伤演化问题时,仍存在状态监测盲区与时效性局限,难以实现损伤演化的全过程跟踪与预警^[3-4]。因此,合理评价起重机械的总体安全状况,已成为当前亟待解决的核心问题。

关于起重机械安全评价方法的研究,近年来呈现多元化发展。在模糊语言方法方面,严波等^[5]提出模糊层次分析法,通过模糊化判断矩阵降低主观赋权偏差;熊乾^[6]基于模糊综合评价理论,结合设备运行事故数据库,构建了在役桥式起重机安全评价的动态分析框架,有效提升了评价系统的适应性。针对某一类起重机械,FEI Shuai 等^[7]结合故障树和层次分析法,构建了桥式起重机安全性能评估模型;欧阳韦平等^[8]将构权评价层次分析法应用于内河港机安全评价,开发出设备状态与风险等级的可视化映射模型;FENG Xin 等^[9]采用故障树与贝叶斯网络的门式起重机可靠性评估方法,精确定位了故障根源。在优化改进方面,FARWAH 等^[10]采用多标准决策的吊杆放置器维护策略优化,提升了设备的可靠性与经济性;LI Aihua^[11]基于累积前景理论和改进的博弈论组合加权模型的起重机人为失误风险

排序模型,提升了优先级判断的准确性与合理性。在云模型运用上,杨瑞刚等^[12]采用决策试验和评价试验法——熵权组合赋权法,提出了主客观权重线性融合及云模型集成的起重机械安全评价方法,一定程度上降低了评价中的随机性和模糊性;罗贵宾等^[13]突破传统技术评价范式,从人-机-环-管系统论视角建立了四维评价指标体系,并融合层次分析法与云模型构建了多层级安全评价模型。在新一代信息技术应用方面,彭超雄^[14]构建了起重机械检验检测模型,利用射频识别技术、智能终端等自动采集与分析数据,提升了检验效率与准确性;董青等^[15]引入数字孪生五维模型,搭建虚实交互系统,动态监测运行参数,实现了移动式起重机可视化安全监控。

在上述评价方法中,单一赋权模式难以兼顾主客观平衡,而采用 2 种方法组合赋权时,分配系数的确定往往依据专家意见,从某种程度上仍具有主观随意性,会影响评价结果的合理性和权威性。博弈论作为研究策略性决策的工具,在网络安全评价^[16]、环境安全评价^[17]等领域得到了拓展应用,取得了很好效果。因此,笔者拟通过主客观权重的动态博弈优化组合赋权,构建起重机械安全评价通用框架,并借助改进云模型(熵和超熵动态调整)验证框架的有效性,以期起重机械安全评价提供兼顾科学性与适应性的新思路。

1 起重机械安全状况评价模型构建

数据来源于各省市(区)政府官网、应急管理厅(局)官网、住房和城乡建设厅(局)官网及各地应急管理局等官方渠道,收集 2019—2023 年间 95 起起重机械类事故调查报告数据,并以此为依据结合人的不安全行为、设备的不安状态、环境的不良影响和管理的欠缺(Man, Machine, Miliem, Management, 4M)理论分类汇总事故原因,构建事故原因图谱,如

图 1 所示。

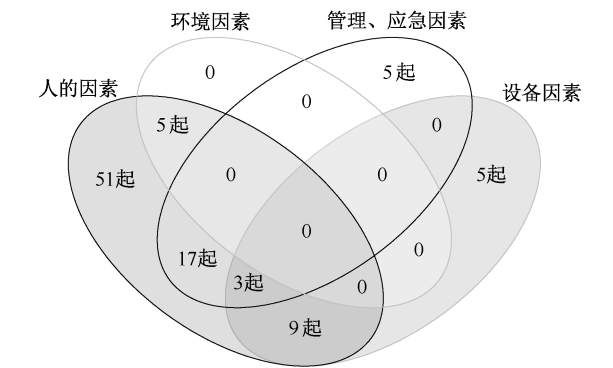


图 1 起重机械事故原因韦恩图

Fig. 1 Venn diagram of lifting machinery accident causes

基于图 1 事故原因分析,并结合国家市场监管总局颁布的《起重机械安全技术规程》^[18],构建系统化的起重机械安全指标体系,包括 4 个一级指标和 13 个二级指标,如图 2 所示。

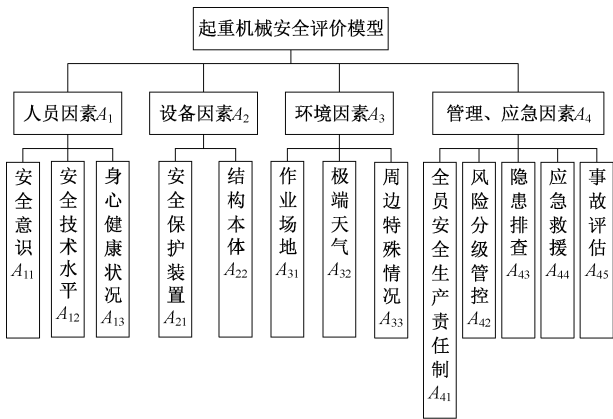


图 2 起重机械安全评价模型

Fig. 2 Safety evaluation model of lifting machinery

关于人为因素,事故的主要诱因包括违章指挥、违章操作、无证上岗、培训缺失、无关人员闯入、违反行车规范以及带病作业等。基于此,将人为因素分为安全意识、安全技术水平和身心健康状况 3 个维度。设备因素方面,安全制动器、起重量限制器等安全装置的故障,以及金属结构锈蚀变形、连接松动、钢丝绳断裂或磨损老化等是导致事故的主要技术原因。据此,将设备因素划分为安全保护装置与结构本体 2 类。环境因素方面,地面湿滑或塌陷会影响起重机械停放与作业稳定性,极端天气会干扰操作人员视野并影响设备性能,而周边高大建筑和高压电线则可能带来气流干扰与触电风险。因此,将环境因素划分为作业场地、极端天气和周边特殊环境 3 个维度。管理、应急因素方面,主要从过程管控与

事后应急管理 2 方面分析,结合事故案例剖析归纳为全员安全生产责任制、风险分级管控、隐患排查、应急救援以及事故评估 5 个关键环节。

2 组合权重确定与集成方法

2.1 最优最劣法

最优最劣法 (Best-Worst Method, BWM) 是一种新的多准则决策分析手段,其核心在于通过指标间的两两对比来精准确定各指标权重^[19]。其基本步骤如下:

1) 确定评价集。依据图 2 筛选出二级指标作为评价因素,构建评价集 $C = \{C_1, C_2, \dots, C_m\}$, 其中, m 为二级指标数量。

2) 确定最优、最劣指标。专家依据自身经验和研究需求,从评价集中确定出影响最大的最优指标 C_B 和影响最小的最劣指标 C_W 。

3) 构建最优、最劣指标判断向量。专家将最优指标 C_B 与其他指标逐一比较,构建最优指标比较集 $A_B = \{a_{B1}, a_{B2}, \dots, a_{Bm}\}$, 将其他指标与最劣指标 C_W 逐一比较,构建最劣指标比较集 $A_W = \{a_{1W}, a_{2W}, \dots, a_{mW}\}$, 其中, a_{Bl} 表示最优指标 C_B 较第 l 个指标的偏好程度, a_{lw} 表示第 l 个指标较 C_W 的偏好程度, $l = 1, 2, \dots, m$ 。

4) 最佳权重求解。对任意准则 l 的权重,考虑到权重的非负性和规范性,构建数学规划问题:

$$\min \max_l \left\{ \left| \frac{\omega_B}{\omega_l} - a_{Bl} \right|, \left| \frac{\omega_l}{\omega_W} - a_{lw} \right| \right\} \tag{1}$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} \sum_l \omega_l = 1 \\ \omega_l \geq 0 \end{cases} \tag{2}$$

式中: ω_B 为最优准则 C_B 的权重; ω_W 为最劣准则 C_W 的权重; ω_l 为准则 C_l 的权重。式 (1) 表示取 $\left| \frac{\omega_B}{\omega_l} - a_{Bl} \right|$ 、 $\left| \frac{\omega_l}{\omega_W} - a_{lw} \right|$ 中的最大值,再从最大值中取最小值。为方便求解,将其转化为如下问题:

$$\text{s. t. } \begin{cases} \left| \frac{\omega_B}{\omega_l} - a_{Bl} \right| \leq \xi \\ \left| \frac{\omega_l}{\omega_W} - a_{lw} \right| \leq \xi \\ \sum_l \omega_l = 1 \\ \omega_l \geq 0 \end{cases} \tag{3}$$

式中 ξ 为最大的绝对值的差。

5) 一致性检验。

$$CR = \frac{\xi}{CI} \quad (4)$$

式中: CI (Consistency Index) 为一致性指标; CR (Consistency Ratio) 为一致性检验值, 其值越接近于 0, 表示一致性越高。

2.2 改进 CRITIC 法

针对传统的指标相关性与冲突性 (Criteria Importance Though Intercriteria Correlation, CRITIC) 方法在鲁棒性与数据分布敏感性方面的理论局限, 提出 3 重改进策略, 采用中位数绝对偏差 (Median Absolute Deviation, MAD) 替代平均值作为指标离散度量; 引入斯皮尔曼等级 (Spearman) 秩相关系数重构指标冲突矩阵^[20]; 建立绝对相关系数转换机制^[21]。基本步骤如下:

1) 构建目标矩阵。n 个专家对 p 项评价指标项打分评价, 形成原始指标数据矩阵:

$$X = \begin{pmatrix} X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1p} \\ X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{2p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ X_{n1} & X_{n2} & \cdots & X_{np} \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中 X_{ij} 为第 i 个样本第 j 项评价指标的数值, $i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots, p$ 。

2) 无量纲化处理。为消除因量纲不同对评价结果的影响, 需要无量纲化处理各指标。

正向化处理:

$$X'_{ij} = \frac{X_{ij} - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (6)$$

逆向化处理:

$$X'_{ij} = \frac{X_{\max} - X_{ij}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (7)$$

式中 X'_{ij} 为经过无量纲化处理后的数据值。

3) 指标变异性。采用 MAD 取代传统的平均值计算方式, 根据 LEYS 等^[22] 在检测异常值中发现用 MAD 来代替平均值效果更好, 基于 Huber 鲁棒统计理论^[23], MAD 可有效降低异常值对离差计算的影响。

$$\begin{cases} MAD = M(|X_j - M(X_j)|) \\ S_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{ij} - MAD)^2}{n-1}} \end{cases} \quad (8)$$

式中: X_j 为第 j 项评估指标的均值; $M(X_j)$ 为矩阵中第 j 列的中位数; S_j 为第 j 项评估指标的标准差。

4) 指标冲突性。用相关系数来表征指标间的

相关性。引入 Spearman 秩相关系数重构指标冲突矩阵, 且建立绝对相关系数转换机制, 通过消除正负相关性方向差异, 确保冲突度量的方向一致性。

其表示为:

$$r_{ij} = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (9)$$

$$R_j = \sum_{i=1}^p (1 - |r_{ij}|) \quad (10)$$

式中: r_{ij} 为第 i 项指标与第 j 项指标的相关系数; d_i 为每对测量值的等级差; R_j 为第 j 项指标与其他指标冲突性量化值。

5) 信息量计算。

$$C_j = S_j \sum_{i=1}^p (1 - |r_{ij}|) = S_j \times R_j \quad (11)$$

式中 C_j 为各个指标的信息量。

6) 客观权重。

$$\omega_j = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^p C_j} \quad (12)$$

式中 ω_j 为各个指标的权重。 C_j 值越大, 第 j 项指标包含的信息量越大, 即指标权重越大。

2.3 博弈论组合赋权

博弈论综合权重计算法是在多个评估指标的权重计算法之间寻找最优解^[24]。具体步骤如下:

1) 主客观权重线性组合。

$$\omega^* = \alpha \omega_1^T + \beta \omega_2^T \quad (13)$$

式中: ω^* 为组合权重; ω_1 为主观权重; ω_2 为客观权重; α 和 β 为权重系数, $\alpha + \beta = 1$ 。

2) 优化组合。基于博弈论思想优化线性组合的权重系数 α 和 β , 使得 ω^* 与主客观权重 ω_1 和 ω_2 离差和最小。

$$\begin{cases} \min | \sum_{k=1}^q \alpha \omega_k^T - \omega_k |_2 \\ \min | \sum_{k=1}^q \beta \omega_k^T - \omega_k |_2 \end{cases} \quad (14)$$

式中: ω_k 为博弈双方的权重; $\sum_{k=1}^q \alpha \omega_k^T$ 和 $\sum_{k=1}^q \beta \omega_k^T$ 为求和综合权重的向量集合; $q=2$ 。

3) 解优化组合系数。根据矩阵微分性质, 进行一阶求导, 满足导数条件如下:

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \omega_1^T & \omega_1 \omega_2^T \\ \omega_2 \omega_1^T & \omega_2 \omega_2^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_1 \omega_1^T \\ \omega_2 \omega_2^T \end{bmatrix} \quad (15)$$

即

$$\begin{cases} \alpha \omega_1 \omega_1^T + \beta \omega_1 \omega_2^T = \omega_1 \omega_1^T \\ \alpha \omega_2 \omega_1^T + \beta \omega_2 \omega_2^T = \omega_2 \omega_2^T \end{cases} \quad (16)$$

4) 归一化处理。

$$\begin{cases} \alpha^* = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} \\ \beta^* = \frac{\beta}{\alpha + \beta} \end{cases} \quad (17)$$

式中 α^* 和 β^* 为最优综合权重系数。

5) 计算最优综合权重。

$$\omega = \alpha^* \omega_1^T + \beta^* \omega_2^T \quad (18)$$

式中 ω 为求得的最终权重。

2.4 改进云模型

云模型理论是李德毅等^[25]在概率论和模糊数学基础上提出的一种反映人类知识体系中概念的模糊性和随机性,研究不确定信息与定量指标间转换的理论。具体步骤如下:

1) 确定评语集。评语集由评价者针对评价对象可能给出的所有结果构成,并为其划定相应的等级区间。

2) 确定评价标准云。第 r 个评语区间 $[x_r^{\min}, x_r^{\max}]$ 对应的标准云数字特征值为 (E_{xr}, E_{nr}, H_e) , 公式为:

$$\begin{cases} E_{xr} = (x_r^{\max} + x_r^{\min})/2 \\ E_{nr} = (x_r^{\max} - x_r^{\min})/6 \\ H_e = k \end{cases} \quad (19)$$

式中: $x_r^{\max}$ 和 $x_r^{\min}$ 分别为各等级得分区间的最大值和最小值; E_{xr} 、 E_{nr} 和 H_e 依次为标准云的期望、熵和超熵; $r=1, 2, \dots, k$ 为常数,需根据项目实际所需的模糊程度调整^[13-26],综合考量模型紧凑性与云滴分布适度性,对云模型超熵在 0~1 区间进行敏感性分析,当 k 取 0.5 时云滴疏密适中,增强验证适配性。

3) 确定指标评价云。收集 c 个专家对 p 项指标评价的问卷,得到评价矩阵:

$$Z = \begin{pmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{1p} \\ z_{21} & z_{22} & \cdots & z_{2p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ z_{c1} & z_{c2} & \cdots & z_{cp} \end{pmatrix} \quad (20)$$

式中 z_{st} 为专家 s 对指标 t 的评价值, $s=1, 2, \dots, c, t=1, 2, \dots, p$ 。

使用逆向云发生器分别计算每个指标下所有专家评分结果的数字特征 $C_t(E_{xt}, E_{nt}, H_{et})$, 由于数据

太离散,采用 MAD 替代平均值^[27-29]。

$$\begin{cases} MAD = M(|X_t - M(X_t)|) \\ E_{xt} = MAD \\ E_{nt} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \times \frac{1}{c} \sum_{s=1}^c |z_{st} - E_{xt}| \\ S_{t^2} = \frac{1}{c-1} \sum_{s=1}^c (z_{st} - E_{xt})^2 \\ H_{et} = \sqrt{|S_{t^2} - E_{nt^2}|} \end{cases} \quad (21)$$

式中: E_{xt} 为指标云的期望值; E_{nt} 为指标云的熵; S_t 为第 t 个指标得分的标准差; H_{et} 为指标云的超熵。

4) 计算综合评价云。将指标权重 ω_t 结合式(21),计算得到综合评价云的数字特征:

$$\begin{cases} E_x = \sum_{t=1}^p (E_{xt} \cdot \omega_t) \\ E_n = \sqrt{\sum_{t=1}^p (E_{nt^2} \cdot \omega_t)} \\ H_e = \sum_{t=1}^p (H_{et} \cdot \omega_t) \end{cases} \quad (22)$$

5) 绘制综合评价云图。确定综合评价云图处于评价集中的评语等级。

6) 对比评价云图。对比分析改进的云模型与传统云模型,充分论证其相较于传统云模型所具备的显著合理性。

3 基于博弈论—改进云模型的起重机械安全评价实例应用

以西安市某建筑施工企业 A 项目所使用的 3 台塔式起重机为评价对象,深入剖析其安全性相关问题,并验证博弈论组合赋权法和改进云模型在安全性评价中的合理性和有效性。

3.1 专家评价数据采集与处理

邀请陕西省西安市 49 位特种设备领域专家进行打分评价,专家分别来自特种设备监管部门(18 人)、设计生产部门(4 人)、使用部门(13 人)以及维护保养部门(14 人)等多个行业。

3.2 BWM 法确定主权重

基于 BWM 法构建专家判断矩阵,采用几何平均法聚合多专家意见,通过式(3)获得主权重及排名,见表 1。

基于 BWM 法构建的起重机械事故致因模型表

表 1 BWM 中各指标权重及排名

Table 1 Weight and ranking of each indicator in BWM

一级指标及权重	二级指标及权重	综合权重及排名
人员因素 $A_1/0.512$	安全意识 $A_{11}/0.583$	0.298 5(1)
	安全技术水平 $A_{12}/0.306$	0.156 7(3)
	身心健康状况 $A_{13}/0.111$	0.056 8(6)
设备因素 $A_2/0.268$	安全保护装置 $A_{21}/0.796$	0.213 3(2)
	结构本体 $A_{22}/0.204$	0.054 7(7)
环境因素 $A_3/0.098$	作业场地 $A_{31}/0.583$	0.057 1(5)
	极端天气 $A_{32}/0.306$	0.030 0(8)
	周边特殊情况 $A_{33}/0.111$	0.010 9(12)
管理、应急因素 $A_4/0.122$	全员安全生产责任制 $A_{41}/0.509$	0.062 1(4)
	风险分级管控 $A_{42}/0.180$	0.022 0(9)
	隐患排查 $A_{43}/0.135$	0.016 5(10)
	应急救援 $A_{44}/0.108$	0.013 2(11)
	事故评估 $A_{45}/0.068$	0.008 3(13)

明:人员因素以 0.512 的权重系数成为事故的首要成因,其中,安全意识指标在评价体系中贡献最为明显,较第 2 位的安全保护装置指标高出 39.94%。这一量化分析结果揭示了人的不安全行为在起重机械事故链中的主导作用,进一步凸显了安全教育培训体系建设的战略价值。在设备因素维度(综合权重 0.268),安全保护装置以 0.796 的权重形成显著技术权重极值,其可靠性水平直接影响设备本质安全度。值得注意的是,虽然环境因素和管理、应急因素的综合权重相对较低,但其中作业场地条件、极端天气和全员安全生产责任制等二级指标仍需引起重视。如作业场地条件通过地基承载力、空间净距等物理参数直接影响设备运行的稳定性,而全员安全生产责任制则从组织行为学层面构建了安全管理责任传导机制,对安全生产管理体系的运行效能具有深远影响。

3.3 改进 CRITIC 法确定客观权重

基于专家打分得到的结果,利用式(6)、式(7)归一化处理数据,并在式(8)中运用改进 CRITIC 法(绝对值处理专家打分)来计算客观权重。因专家更关注指标重要性与冗余性,仅需衡量关联紧密程度,无需考虑正负方向,所以绝对值处理方式契合其需求。同时,绝对值化还能减少主观差异干扰,使权重计算更稳定,与专家打分简化逻辑的特性相符。最终,分别采用原 CRITIC 法与改进 CRITIC 法算得到各指标权重及排名,见表 2。

图 3 为指标权重主客观对比雷达图,可以看出,传统 CRITIC 法计算所获得的结果与运用主观权重

表 2 CRITIC/改进 CRITIC 中各指标权重及排名

Table 2 Weight and ranking of each indicator in CRITIC

and improved CRITIC		
一级指标权重/ 改进权重	二级指标权重/ 改进权重	综合权重及排名 改进权重及排名
人员因素 A_1 0.198 7/ 0.311 0	安全意识 A_{11} 0.373 2/0.497 7	0.074 1(5) 0.154 8(2)
	安全技术水平 A_{12} 0.320 6/0.249 2	0.063 7(7) 0.077 5(6)
	身心健康状况 A_{13} 0.306 2/0.2531	0.060 8(8) 0.078 7(5)
设备因素 A_2 0.332 4/ 0.319 9	安全保护装置 A_{21} 0.520 7/0.527 9	0.173 1(1) 0.168 8(1)
	结构本体 A_{22} 0.479 3/0.472 1	0.159 3(2) 0.151 0(3)
环境因素 A_3 0.288 4/ 0.226 9	作业场地 A_{31} 0.361 4/0.424 2	0.104 2(4) 0.096 2(4)
	极端天气 A_{32} 0.396 2/0.310 7	0.114 3(3) 0.070 5(7)
	周边特殊情况 A_{33} 0.242 4/0.265 1	0.069 9(6) 0.060 1(8)
管理、应急因素 A_4 0.180 5/ 0.142 2	全员安全生产责任制 A_{41} 0.189 0/0.1633	0.034 1(13) 0.023 2(13)
	风险分级管控 A_{42} 0.216 6/0.193 3	0.039 1(9) 0.027 5(11)
	隐患排查 A_{43} 0.202 2/0.231 8	0.036 5(10) 0.033 0(10)
	应急救援 A_{44} 0.194 8/0.170 0	0.035 2(12) 0.024 2(12)
	事故评估 A_{45} 0.197 3/0.2417	0.035 6(11) 0.034 4(9)

BWM 法得出的结果有着显著差异。在采用传统 CRITIC 法的过程中,人员因素所占比例相对而言处于较低水平,分析其原因可能是由于专家在对安全意识与安全技术水平进行打分评价时,存在较大差异性。在实际场景中,不同评价者对于安全意识的衡量标准可能因个人经验、知识背景的不同而有所区别,如一部分评价者更注意日常工作中的作业安全,而另一部分评价者则更注重应对突发情况的反应能力。同时,安全技术水平的评价也会因评价者本身的复杂性和多样性导致打分难以统一。

此外,设备因素所包含的二级指标数量较少,使得设备要素的二级指标综合权重偏高。只考虑安全保护装置和结构本体,相比其他涵盖更多细分项的指标体系,其二级指标在权重计算上则容易占据较大比例。同时,环境因素下的二级指标权重也较大,导致其排名过高。在实际作业环境中,虽然环境因

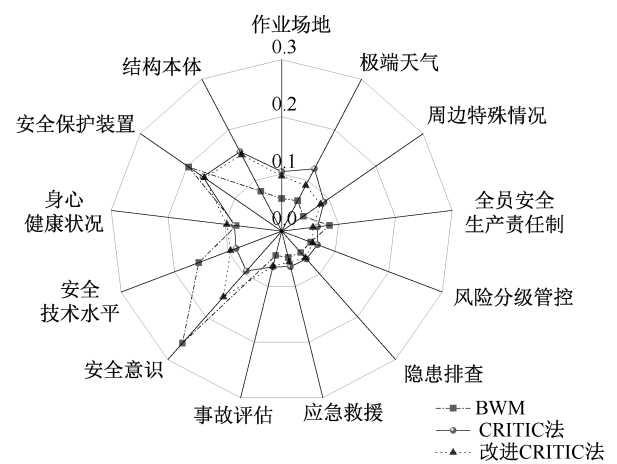


图 3 指标权重主客观对比雷达图

Fig. 3 Radar chart of subjective and objective comparison of indicator weights

素确实对起重机械运行有影响,但传统 CRITIC 法可能过度放大了部分环境指标的作用,使其在综合评价中的排名偏高,而改进 CRITIC 法科学调整权重占比,通过提升人员因素权重占比,相应调整其他 3 类因素的权重占比,其中对环境因素权重进行优化下调,使结果不仅平衡了评价者之间的打分差异,而且更精准地反映了实际情况。

3.4 组合赋权确定最终权重

分别运用 BWM-改进 CRITIC 法与 AHP-熵权法构建主客观权重博弈模型,通过式 (16)、式 (7) 确定最优组合系数 $\alpha_1 = 0.80, \beta_1 = 0.20, \alpha_2 = 0.58, \beta_2 = 0.42$,得到最终权重及排名见表 3。

表 3 博弈论各指标权重及排名

Table 3 Weights and ranking of each indicator in game theory method		
二级指标	BWM-改进 CRITIC 法权重及排名	AHP-熵权法权重及排名
安全意识 A_{11}	0.268 9(1)	0.236 8(1)
安全技术水平 A_{12}	0.140 4(3)	0.105 3(4)
身心健康状况 A_{13}	0.061 3(6)	0.076 8(5)
安全保护装置 A_{21}	0.204 2(2)	0.205 9(2)
结构本体 A_{22}	0.074 5(4)	0.139 3(3)
作业场地 A_{31}	0.065 2(5)	0.054 1(6)
极端天气 A_{32}	0.038 3(8)	0.028 3(8)
周边特殊情况 A_{33}	0.021 0(10)	0.024 6(10)
全员安全生产责任制 A_{41}	0.054 1(7)	0.038 2(7)
风险分级管控 A_{42}	0.023 1(9)	0.026 3(9)
隐患排查 A_{43}	0.019 9(11)	0.022 9(12)
应急救援 A_{44}	0.015 4(12)	0.017 2(13)
事故评估 A_{45}	0.013 7(13)	0.024 1(11)

对比 BWM-改进 CRITIC 法与 AHP-熵权法的

权重与排名结果表明:二者整体一致性较高,未出现显著偏差。但在计算过程中发现,熵权法对数据质量要求较高,易受噪声、离群值干扰,且忽视指标固有重要性,难以有效处理非线性关系及指标相关性问 题。同时,其计算复杂,在大规模数据下效率低,易累积误差,导致结果常与实际不符。鉴于此,在运用博弈论综合考量时,熵权法的系数设定相对较小。

通过博弈论分析框架对比研究改进 CRITIC 法与经典 CRITIC 法,尽管 2 种方法在指标排序结果上具有趋同性,但深入剖析其权重构成特征发现,经典 CRITIC 法中主观权重分配系数 α 呈现显著优势值,而客观权重系数 β 则处于相对弱势状态。表明经典 CRITIC 法在权重分配上更倾向于主观判断,而改进 CRITIC 法则在一定程度上平衡了主观与客观权重的分配,使得权重结果更加科学合理。这种权重配置机制在一定程度上削弱了博弈论组合赋权方法在综合主客观信息方面的理论优势。相比之下,改进 CRITIC 法基于大规模事故案例库的实证研究,通过数据驱动范式重构了权重分配模型。这种基于现实数据集的量化赋权机制,不仅显著提升了改进方法的实证效度,还增强了其理论解释力,使其研究结论更具科学性与实践指导价值。博弈论组合赋权法也在权重分配上作出了关键调整,提高了人员因素的权重占比,同时降低了环境因素的权重占比。这一调整结果与大量事故报告中的结论高度相符,体现了其在权重分配上的客观合理性。

4 云模型验证

基于上述结果,将博弈论组合赋权的权重和专家打分的结果代入云模型,以验证其合理性。通过专家咨询,结合语言表达习惯,采用语言值劣、差、一般、良和优来描述安全等级,对应的评分等级区间设定为 $[0,100]$,分数越高代表指标安全状况越好,设定的安全评语集见表 4。

表 4 评价标准等级划分及对应云模型

Table 4 Evaluation criteria grading and corresponding cloud model		
安全平均等级	等级区间	云模型特征参数
劣	$[0,20]$	$(10.0, 3.333, 0.5)$
差	$(20,40]$	$(30.0, 3.333, 0.5)$
一般	$(40,60]$	$(50.0, 3.333, 0.5)$
良	$(60,80]$	$(70.0, 3.333, 0.5)$
优	$(80,100]$	$(90.0, 3.333, 0.5)$

邀请 5 位经验丰富的安全管理人员作为打分人员,他们深入 A 项目调研,根据现场实际情况,依据指标评分细则对指标赋分。根据得分数据构建评价矩阵,并利用逆向云发生器计算各指标云模型的数字特征生成综合评价云图。利用传统逆向云模型计算得到评价指标 $C_i(E_x, E_n, H_e)$, 评价结果及得到的各指标云模型见表 5。

表 5 各指标云模型

Table 5 Cloud models for each indicator

指标	E_x	E_n	H_e
安全意识 A_{11}	84.182	12.471	4.247
安全技术水平 A_{12}	76.909	15.019	6.191
身心健康状况 A_{13}	69.409	20.675	10.126
安全保护装置 A_{21}	87.818	8.763	0.501
结构本体 A_{22}	88.727	8.245	2.835
作业场地 A_{31}	78.727	11.642	3.965
极端天气 A_{32}	70.545	16.221	8.107
周边特殊情况 A_{33}	69.636	16.883	10.055
全员安全生产责任制 A_{41}	76.000	15.496	1.42
风险分级管控 A_{42}	71.455	18.023	6.032
隐患排查 A_{43}	76.909	15.019	3.347
应急救援 A_{44}	70.545	20.384	5.776
事故评估 A_{45}	61.455	22.622	8.732

将综合权重 ω 和指标云 C_i 代入传统云模型中得到起重机械安全评价综合云 $C(80.75, 13.555, 4.217)$, 并根据云模型特征参数生成综合评价云图, 如图 4 所示。

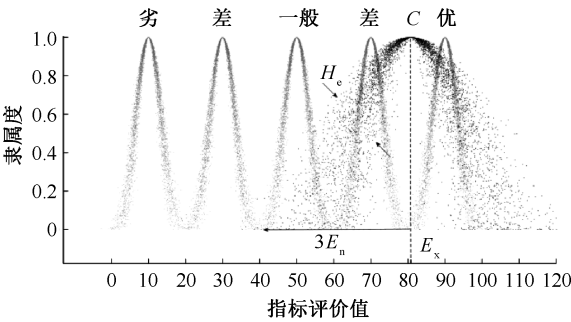


图 4 起重机械安全评价综合评价云图

Fig. 4 Comprehensive evaluation cloud chart of lifting machinery safety evaluation

将建立的综合云 $C(80.75, 13.555, 4.217)$ 和对应的标准云对比, 找到最相似的评价云。比较相似度值后, 得出评价综合云介于安全等级良与优之间, 因此, 该起重机械安全等级的最终判断等级确定为良与优之间, 且评价结果与项目实际安全状况相符,

说明该安全研究模型具有较强的实用性。

但从综合云图(图 4)清晰看到, 所构建的云模型中, E_n 和 H_e 出现取值偏大的情况, 尤其是 H_e 值过大。这一现象显著加剧了云模型的不确定性, 致使模型对于异常值的响应极为敏感。这种敏感性严重干扰了模型输出结果的稳定性, 大幅降低了云模型在实际应用中的可靠性。在起重机械面临的复杂多变环境中, 上述问题极大地限制了云模型的有效应用。基于对云模型特性的深度剖析以及上述改进 CRITIC 法的启示, 采用 MAD 替换云模型中的平均值, 实施对 E_n 和 H_e 的优化减小策略。在数据统计分析领域, MAD 已被验证能有效度量数据离散程度。在云模型语境中, MAD 可精准量化当前由 E_n 和 H_e 表征的云滴实际分布与理想分布间的偏差程度。

通过式(21)、式(22)计算得到优化安全评价综合云 $C^*(83.27, 3.20, 0.52)$ 和各一级指标安全评价云模型 $A_1(84, 3.304, 0.5865)$ 、 $A_2(86.273, 2.4185, 0.6513)$ 、 $A_3(76.727, 3.8635, 0.5004)$ 、 $A_4(78.545, 4.1845, 0.4945)$, 起重机械安全评价优化综合评价云图和一级指标安全评价云模型分别如图 5、图 6 所示。

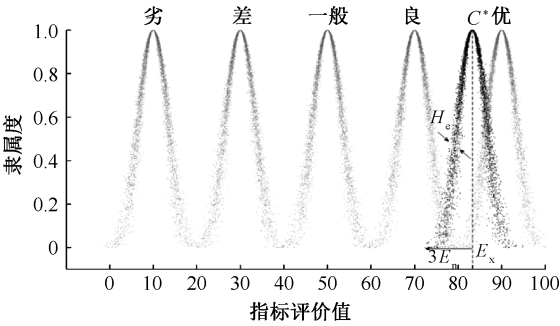


图 5 起重机械安全评价优化综合评价云图

Fig. 5 Optimized comprehensive evaluation cloud chart of lifting machinery safety evaluation

优化后的云图数据分布更集中、精准, 更清晰呈现数据的核心特征与趋势, 为后续分析和决策提供了可靠依据。在稳定性方面, 基于 MAD 优化后的云图显著降低了异常值的干扰, 能够持续稳定地展示数据规律, 增强了分析结果的可信度。在可视化效果上, 优化后的云图清晰简洁, 云滴分布有序, 观察者能够迅速理解数据分布情况, 提升了信息传递和沟通效率。

将优化后的综合云 $C^*(83.27, 3.20, 0.52)$ 与对应的标准云进行分析对比, 确定出与其最为相似的评价云。经由对相似度值的严谨比较分析, 得出优

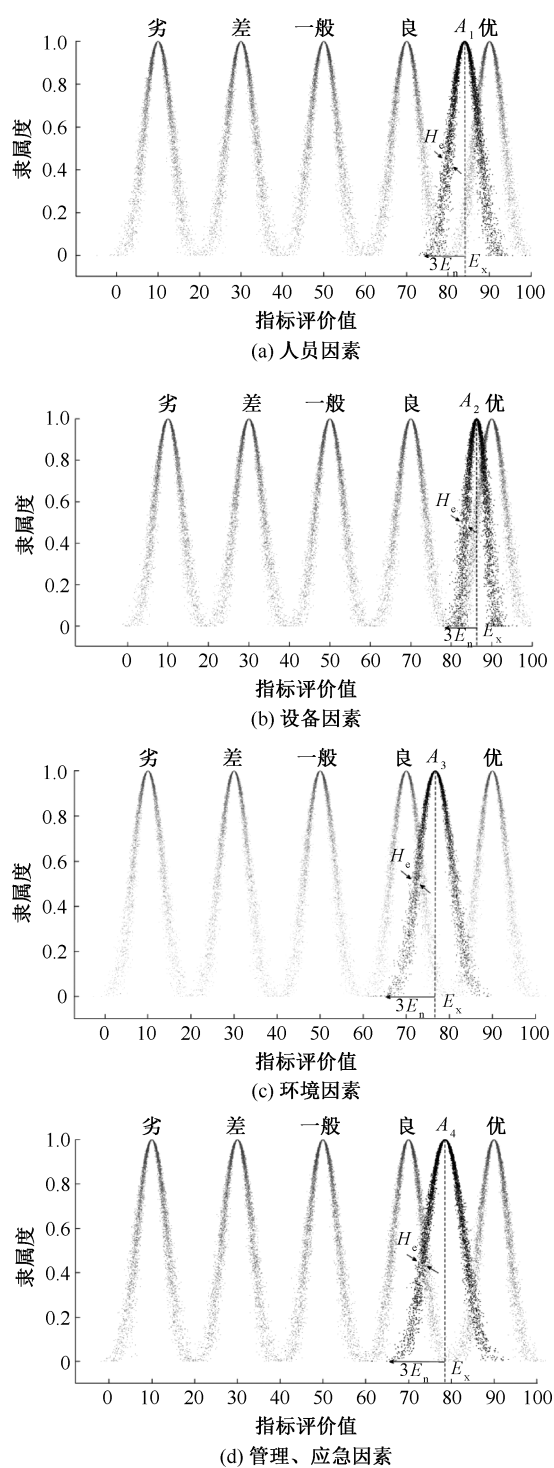


图 6 各一级指标安全评价云模型

Fig. 6 Safety evaluation cloud models of each first-level indicator

化后的综合云处于安全等级良与优之间,这与传统云模型的等级评定结果相契合,既满足了理论数据的相关要求,也说明了优化后的云模型具有科学性和准确性,为后续相关领域研究及实践提供了可靠的理论支持与方法借鉴。图 6 中,优化后的一级指标评价云模型直观呈现,人员因素和设备因素的安全等级靠近优,而环境因素和应急、管理因素靠近良。建议在起重机作业过程中随时关注作业场地,确保作业安全;进一步做好隐患排查、应急救援物资的准备等工作。

5 结 论

1) 通过构建 4 项一级指标与 13 项二级指标,形成覆盖起重机械安全关键要素的评价模型,该模型可克服传统评价指标模糊或遗漏问题,提升评价系统性与准确性。

2) 改进 CRITIC 法以 MAD 替代平均值计算,有效避免了因个人经验差异导致的评分偏差;博弈论组合赋权融合 BWM 法与改进 CRITIC 法波动信息,抑制极端评分差异,解释力与稳健性显著优于单一赋权。

3) 评价指标权重系数计算结果表明:人为因素是起重机械事故主要致因,设备检查过程中应重点关注作业人员的安全意识与安全技术水平;其次是设备的安全保护装置可靠性与结构本体完好性;管理和环境维度综合权重虽低,但须纳入常态化、持续化监控。

4) 文中改进云模型假设各输入指标独立且相互正交,但现实事故致因常伴随高度耦合效应。后续将识别关键耦合关系,构建耦合矩阵并引入耦合修正项,开展灵敏度分析以提升模型的可信度。

5) 文中研究虽在理论与实践均获初效,但改进 CRITIC 法和云模型的理论体系尚需跨区域、跨设备验证。后续将优化理论体系,跨场景验证多类特种设备适用性,拓展应用边界并增强普适性。

参 考 文 献

[1] 国家市场监督管理总局特种设备安全监察局. 市场监管总局关于 2023 年全国特种设备安全状况的通告[EB/OL]. (2024-03-23). https://www.samr.gov.cn/zw/zfxgk/fdzdgknr/tzsbbs/art/2024/art_aea38293416e4af382c0136d2e73f8a2.html.

- [2] 刘荣. 电梯起重机械钢丝绳检测维护[J]. 中国科技信息, 2022(2):48-49.
- [3] 马晨. 形性一体化数字孪生 重塑起重运输机械的新征途[J]. 起重运输机械, 2024(1):4-7.
MA Chen. Integration of shape and feature with digital twin characteristics, reshaping of the lifting and transportation machinery in the new journey[J]. Hoisting and Conveying Machinery, 2024(1):4-7.
- [4] 齐凯, 王新华, 何成忠. 大型起重机械安全预警机制的研究[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(1):136-139.
QI Kai, WANG Xinhua, HE Chengzhong. Research of crane machinery security early warning mechanism[J]. China Safety Science Journal, 2011, 21(1):136-139.
- [5] 李鹏, 徐格宁. 采用改进的模糊层次分析法的桥式起重机安全状态评估[J]. 机械设计与研究, 2021, 37(5):219-223.
LI Peng, XU Gening. Safety condition assessment of bridge crane based on improved fuzzy analytic hierarchy process[J]. Machine Design & Research, 2021, 37(5):219-223.
- [6] 熊乾. 基于模糊综合评价的在用桥式起重机安全评价方法研究[J]. 特种设备安全技术, 2023(2):54-56.
- [7] FEI Shuai, LI Xiangdong, FAN Yali. Safety evaluation for bridge crane based on FTA and AHP[C]. MATEC Web of Conferences, 2018:1-4.
- [8] 欧阳韦平, 许秀东, 邱郡, 等. 基于 AHP 法的内河港口简易臂架型起重机安全评价研究[J]. 中国特种设备安全, 2013, 29(7):9-12.
- [9] FENG Xin, JIANG Juncheng, FENG Yuegui. Reliability evaluation of gantry cranes based on fault tree analysis and bayesian network[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2020, 38(3):3129-3139.
- [10] FARWAH S H, SINGH S, RANJAN N, et al. MCDM methods for boom placer maintenance strategy design: a case study in a construction sector[J]. Safety in Extreme Environments, 2024, 7(1):1-14.
- [11] LI Aihua. Human error risk prioritization in crane operations based on CPT and ICWGT[J]. PLOS One, 2024, 19(2): DOI:10.1371/JOURNAL.PONE.0297120.
- [12] 杨瑞刚, 景玮宸, 张志成, 等. 基于组合赋权云模型的起重机结构安全评价方法研究[J]. 机械设计与制造, 2023(7):69-73,78.
YANG Ruigang, JING Weichen, ZHANG Zhicheng, et al. Research on safety evaluation method of crane structure based on combined weight cloud model[J]. Machinery Design & Manufacture, 2023(7):69-73,78.
- [13] 罗贵宾, 李龙斌, 周诗健, 等. 基于层次分析-云模型的起重机械安全评价[J]. 中国设备工程, 2022(22):172-174.
- [14] 彭超雄. 物联网技术在起重机械检验检测中的应用[J]. 中国设备工程, 2023(7):186-188.
- [15] 董青, 南方磊, 徐格宁. 面向起重机运行状态实时监控的数字孪生系统构建方法[J]. 中国工程机械学报, 2025, 23(2):334-339.
DONG Qing, NAN Fanglei, XU Gening. Construction method of digital twin system for real-time monitoring of crane running state[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2025, 23(2):334-339.
- [16] 吉鸿珠, 顾乃杰. 基于博弈论的网络安全量化评估算法[J]. 计算机应用与软件, 2009, 26(9):4-6,41.
JI Hongzhu, GU Naijie. A quantitative network security evaluation algorithm based on game theory[J]. Computer Applications and Software, 2009, 26(9):4-6,41.
- [17] 刘敦文, 张聪, 颜勇, 等. 基于博弈论的隧道施工环境可拓评价模型研究[J]. 安全与环境学报, 2014, 14(1):92-96.
LIU Dunwen, ZHANG Cong, YAN Yong, et al. Improved extenics model of evaluating tunnel construction environment based on the game theory[J]. Journal of Safety and Environment, 2014, 14(1):92-96.
- [18] TSG 51—2023, 起重机械安全技术规程[S].
TSG 51—2023, Regulation on safety technology for lifting appliances[S].
- [19] 赵娟, 李秉晨, 王喆, 等. 基于 BMW 和 TOPSIS 的新型储能场景适用性评价[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(1):443-455.
ZHAO Juan, LI Bingchen, WANG Zhe, et al. Evaluation of scenario applicability of new energy storage based on BMW and TOPSIS methods [J]. Science and Technology of Energy Storage, 2025, 14 (1):443-455.
- [20] 连强. 综合区间数 Spearman 秩相关系数及其应用[J]. 重庆工商大学学报:自然科学版, 2020, 37(6):71-75.
LIAN Qiang. The synthetic Spearman rank correlation coefficient of interval numbers and its application [J]. Journal of

Chongqing Technology and Business University: Natural Science Edition, 2020, 37(6):71-75.

[21] 陈晨, 闫向阳, 齐桓若, 等. 基于 FAHP-改进 CRITIC 组合赋权的屋顶光伏接入配网评价方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(15):97-108.
CHEN Chen, YAN Xiangyang, QI Huanruo, et al. An evaluation method of a roof photovoltaic access distribution network based on the weight of FAHP-improvement CRITIC combination[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(15):97-108.

[22] LEYS C, LEY C, KLEIN O, et al. Detecting outliers: do not use standard deviation around the mean, use absolute deviation around the median[J]. Journal of Experimental Social Psychology, 2013, 49(4):764-766.

[23] CATANIA L, LUATI A. Robust estimation of a location parameter with the integrated Hogg function[J]. Statistics and Probability Letters, 2020, 164: DOI:10.1016/j.spl.2020.108812.

[24] 段玉兴, 白洪波. 基于博弈论组合赋权的空间新技术卫星在轨运行风险评价[J]. 项目管理技术, 2024, 22(12):149-154.
DUAN Yuxing, BAI Hongbo. Risk assessment of in orbit operation of space new technology satellites based on game theory combinationweighting[J]. Project Management Technology, 2024, 22(12):149-154.

[25] 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 Deyi, MENG Haijun, SHI Xuemei. Membership clouds and membership cloud generators[J]. Computer R & D, 1995, 32(6):15-20.

[26] 李英攀, 刘名强, 王芳, 等. 装配式建筑项目安全绩效云模型评价方法[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(6):115-120.
LI Yingpan, LIU Mingqiang, WANG Fang, et al. Safety performance assessment of fabricated building project based on cloud model[J]. China Safety Science Journal, 2017, 27(6):115-120.

[27] 李小刚, 刘兴, 杜佳, 等. 基于改进云模型的致密砂岩气层分类方法[J]. 特种油气藏, 2022, 29(3):84-91.
LI Xiaogang, LIU Xing, DU Jia, et al. A classification method of tight sandstone gas reservoirs based on improved cloud model[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2022, 29(3):84-91.

[28] 刘振江, 王正, 曹玉洁, 等. 基于改进 CRITIC-云模型法的机场鸟击风险评价[J]. 生态环境学报, 2025, 34(1):135-144.
LIU Zhenjiang, WANG Zheng, CAO Yujie, et al. Risk assessment of bird strike at airport based on improved CRITIC-cloud model[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2025, 34(1):135-144.

[29] 张光卫, 何锐, 刘禹, 等. 基于云模型的进化算法[J]. 计算机学报, 2008, 31(7):1 082-1 091.
ZHANG Guangwei, HE Rui, LIU Yu, et al. An evolutionary algorithm based on cloud model[J]. Chinese Journal of Computers, 2008, 31(7):1 082-1 091.



作者简介: 刘金娥 (1984—),女,陕西西安人,博士,高级工程师,主要从事特种设备检验检测与质量管理体系方面的工作。E-mail:liujine@xseii.com.cn。