

文章编号:1004-2954(2026)10-0024-09

# 基于云模型的动力锂电池铁路运输风险评估

石古乐<sup>1,2</sup>, 张玉召<sup>1,2</sup>, 常全盛<sup>1,2</sup>, 张 慧<sup>3</sup>

(1. 兰州交通大学交通运输学院, 兰州 730070; 2. 高原铁路运输智慧管控铁路行业重点实验室, 兰州 730070;  
3. 中国铁路兰州局集团有限公司货运部, 兰州 730015)

**摘要:**【目的】为有效评价动力锂电池铁路运输安全风险,降低运输过程中事故发生概率,保障危险货物的顺利送达,提出一种基于组合预测和云模型的风险评价方法。【方法】针对现有研究中风险评价方法的不足,从理论和实践结合的角度,选择一种系统性、科学性和可操作性较强的风险评估方法,为动力锂电池铁路运输的风险管控提供重要支持。首先,为科学评价动力锂电池铁路运输风险水平,从“人—机—物—管—环”5个方面构建动力锂电池铁路运输安全评估指标体系,全面刻画铁路运输过程中可能存在的风险来源,为后续风险评价提供基础;然后,采用熵权法和组合数有序加权(C-OWA)算子确定指标的组合同权重;其次,将组合同权重代入云模型中,完成评价标准云、指标云和综合云的运算,并利用 MATLAB 软件生成风险指标和整体风险评价的云图;最后,以西北地区某危险货物货运站为例,进行动力锂电池铁路运输过程中的风险评估。【结果】评估结果表明,该运输过程的综合风险等级处于较低风险区间,说明铁路运输在安全管理与技术保障方面具有一定优势。【结论】通过案例验证,证明了本文所采用方法的科学性和有效性,为动力锂电池铁路运输安全风险评估提供了重要的方法支撑。

**关键词:**铁路运输; 风险评估; 云模型; 动力锂电池; 熵权法; C-OWA 算子

**中图分类号:**U294.8 **文献标识码:**A **DOI:**10.13238/j.issn.1004-2954.202501090003

## Risk Assessment of Railway Transportation of Power Lithium Batteries Based on Cloud Model

SHI Guyue<sup>1,2</sup>, ZHANG Yuzhao<sup>1,2</sup>, CHANG Quansheng<sup>1,2</sup>, ZHANG Hui<sup>3</sup>

(1. School of Traffic and Transportation, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Key Laboratory of Railway Industry on Plateau Railway Transportation Intelligent Management and Control, Lanzhou 730070, China;  
3. Freight Department, China Railway Lanzhou Group Co., Ltd., Lanzhou 730015, China)

**Abstract:** [Objective] To effectively assess the safety risks of railway transportation of power lithium batteries, reduce the probability of accidents during transportation, and ensure the successful delivery of dangerous goods, this study proposes a risk assessment method based on combined prediction and a cloud model. [Methods] To address the limitations of existing risk assessment methods, a systematic, scientific, and highly operable risk assessment method was selected from the perspective of integrating theory and practice, providing important support for risk management and control in railway transportation of power lithium batteries. First, to scientifically assess the risk level of railway transportation of power lithium batteries, an indicator system for safety assessment was constructed from five aspects: “personnel-equipment-goods-management-environment.” The system comprehensively characterized potential risk sources during railway transportation and provided a basis for subsequent risk assessment.

Then, the entropy weight method and the combined ordered weighted averaging (C-OWA) operator were used to determine the combined weights of the indicators. Subsequently, the combined weights were input into the cloud model to calculate the standard evaluation cloud, indicator cloud, and comprehensive cloud, and

收稿日期:2025-01-09; 修回日期:2025-03-05; 网络首发日期:2025-06-27

基金项目:甘肃省联合科研基金项目(24JRRA851); 中国铁路兰州局集团有限公司科研发展项目(2024013-1)

作者简介:石古乐(2000—),女,硕士研究生,主要从事危险货物铁路运输风险评估工作,E-mail:guyueshi1024@126.com。

通信作者:张玉召(1981—),男,教授,工学博士,硕士生导师,主要从事铁路客货运技术与管理领域研究工作,E-mail:yuzhaozhang@126.com。

MATLAB software was then used to generate cloud diagrams of the risk indicators and overall risk assessment. Finally, a dangerous goods freight station in Northwest China was selected as a case study to assess the risks during the railway transportation of power lithium batteries. [Results] The assessment results showed that the comprehensive risk level of this transportation process was within the low-risk range, indicating that railway transportation had certain advantages in safety management and technical support. [Conclusion] The case study verifies the scientific validity and effectiveness of the proposed method, providing important methodological support for safety risk assessment in railway transportation of power lithium batteries.

**Key words:** railway transportation; risk assessment; cloud model; power lithium battery; entropy weight method; C-OWA operator

## 引言

2023 年,我国电动汽车、锂电池、光伏产品“新三样”出口增长近 30%,在国际市场形成强大的竞争力<sup>[1]</sup>。国家将新能源汽车产业列为重点扶持的战略新兴产业,并出台了一系列推动新能源汽车发展的政策,当前新能源汽车产销量占全球比重超过 60%。动力锂电池以高能量、高密度、长寿命、快速充电、环保等优势作为新能源汽车的主要能源,市场需求也随着新能源汽车销量的爆发式增长而持续攀升,2023 年全国动力电池产量约为 778.1 GW·h,同比增长 42.5%<sup>[2]</sup>。然而,在动力锂电池市场规模扩大的同时,因其自身理化性质和外部环境的影响而导致火灾、爆炸事故时有发生。目前,我国铁路相关部门已发布动力锂电池铁路运输的相关文件,且在 2024 年 11 月 19 日首次运输动力锂电池。鉴于此,对动力锂电池铁路运输开展风险评估,有效提升铁路运输动力锂电池的安全水平具有极为重要的意义。

相关研究表明,导致锂电池火灾或爆炸问题的主要原因是锂电池热失控,即电池内部出现放热连锁反应引起电池温升速率急剧变化的过热现象<sup>[3]</sup>。在使用或运输过程中,电池由于受机械滥用、热滥用或电滥用的影响而发生短路引发电池热失控导致其起火爆炸,极易导致严重的安全事故<sup>[4-6]</sup>。程东浩等<sup>[7]</sup>结合锂电池运输规则,分析动力锂电池特点,提出当前运输存在的种种问题。

根据联合国《关于危险货物运输的建议书规章范本》的规定,动力锂电池属于第九类危险货物<sup>[8]</sup>。国内外学者对于铁路危险货物运输安全方面的研究主要集中在安全评价方面,常见的风险评价方法包括集对模型<sup>[9-10]</sup>、可拓物元法<sup>[11]</sup>、事故树<sup>[12]</sup>、模糊综合评价法<sup>[13]</sup>、层次分析法<sup>[14]</sup>、TOPSIS 法<sup>[15-16]</sup>等。由于铁路动力锂电池运输风险评估涉及指标较多,且部分指标模糊性和不确定性较强,难以进行精确的定量分析。

相比于其他风险评估办法,云模型可以实现定性概念和定量指标的转换,有处理模糊性和随机性的优势。贺佳伟等<sup>[17]</sup>采用多指标熵权云模型的评估方法研究多影响因素下车载动力锂电池火灾风险特性,得到风险指标隶属度并提出风险预防措施。谢斌等<sup>[18]</sup>提出一种基于改进博弈论和二维云模型的高海拔铁路隧道施工风险预警方法,并以色季拉山隧道为例验证了该模型的有效性,为高海拔铁路隧道施工的风险预警评估提供新的思路和方法。周雪等<sup>[19]</sup>采用层次分析法和熵值法主客观结合的方法确定组合权重,采用云模型评价旅客运输安全。李长明等<sup>[20]</sup>利用云模型对煤矿智能化项目进行风险评价,评价结果有效化解现场的风险隐患,并提升了风险管控能力。

鉴于此,充分考虑动力锂电池铁路运输过程的各种因素,从人员、设备、物品、管理、环境建立动力锂电池铁路运输风险评估指标体系。利用熵权法和组合数有序加权算子赋权法(Combined Ordered Weighted Averaging, C-OWA)的组合赋权法,通过云模型建立风险评价模型,产出云图分析动力锂电池铁路运输风险等级并提供风险预防措施,为今后铁路运输动力锂电池提供理论基础。

## 1 指标体系构建

### 1.1 动力锂电池铁路运输风险分析

锂电池根据用途可以分为消费型锂电池、动力型锂电池和储能型锂电池。依据《铁路安全管理条例》《铁路危险货物运输安全监督管理规定》、GB 12268《危险物品名表》等法律法规和有关标准,对含动力型锂电池的混合动力车辆或纯电动车辆,如符合相关要求,在铁路运输时不属于危险货物,其余动力型锂电池都要按照危险货物进行运输<sup>[21]</sup>。

根据作用机制的不同,动力锂电池发生热失控的因素可以归结为四类:机械滥用(如碰撞、挤压、穿刺等)、电滥用(如过充电、过放电、外部短路)、热滥用

(如局部过热、电池连接件的松动或者锈蚀)和内短路<sup>[22]</sup>。当动力锂电池在铁路场站或运输途中,在始发作业、途中作业和终到作业 3 个环节中都可能发生热失控反应,图 1 为动力锂电池在铁路运输过程中引起电池发生火灾、爆炸的机理。

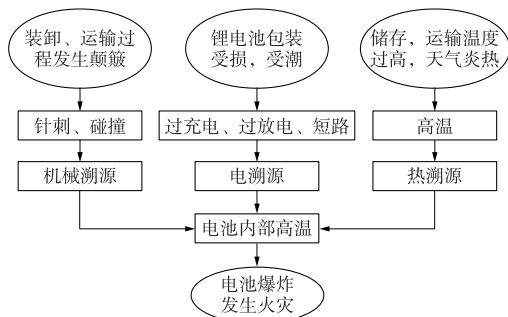


图 1 动力锂电池铁路运输热失控机理

Fig. 1 Thermal runaway mechanism of power lithium batteries during railway transportation

## 1.2 风险评估指标体系建立

在动力锂电池铁路运输过程中,存在很多影响运输安全的风险因素,任何细小的变化都可能引起风险因素,干扰整个运输系统。为了构建更加全面的动力锂电池铁路运输风险指标,应结合锂电池自身危险性、铁路危险货物运输的规章制度和实际情况,依据安全系统工程原理,从“人—机—物—管—环”五大类风险因素出发,构建由 5 个一级指标,20 个二级指标的指标体系。动力锂电池铁路运输风险评价指标体系如图 2 所示。

(1)人员因素。铁路工作人员的安全责任意识、应急处置能力和持证上岗率直接影响运输安全。若操作人员对电池特性、操作规程掌握不足,容易引发操作失误或应急反应不当,增加风险。此外,装卸作业的规范性关系到锂电池在运输中的安全,操作不当可能导致热失控等事故。

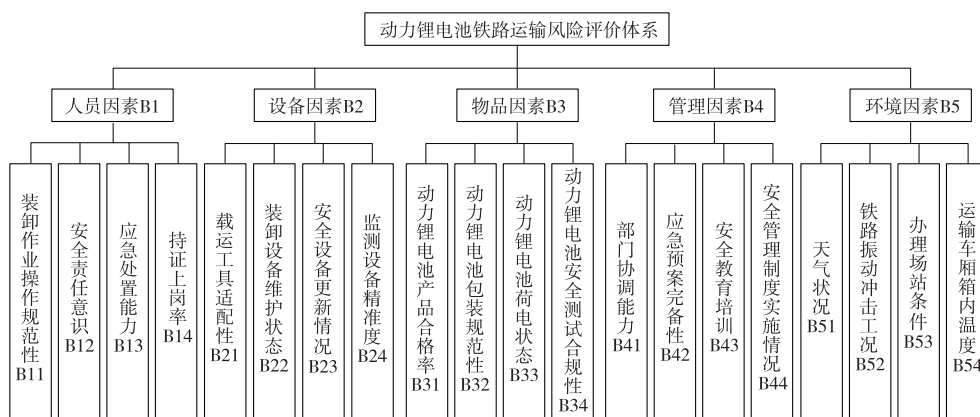


图 2 动力锂电池铁路运输风险评价指标体系

Fig. 2 Risk assessment indicator system for railway transportation of power lithium batteries

(2)设备设施因素。载运工具的选择直接影响锂电池运输的稳定性和安全性,不适配的载运工具可能因振动、冲击或承载不足导致锂电池损坏或热失控。设备的更新状态和维护情况都对运输过程非常重要。由于动力锂电池需要时刻监测参数,所以监测设备不正常可能导致风险的漏检和未及时预警,增加安全隐患。

(3)物品因素。在产品质量方面,合格率至关重要,低合格率意味着电池易出现内部短路等故障隐患,直接影响电池自身质量;包装设计需依据电池质量、容量等选定合理方案,因为包装的规范性与运输中的防护效果紧密相连,不规范的包装易造成电池碰撞损坏与泄漏。动力锂电池荷电状态与电池内部的化学稳定性密切相关,过高或过低的荷电状态都会导致电池活性增强,从而提高热失控的可能性。动力锂电池安全

测试合规性则是保障电池出厂安全的重要前提,未通过严格测试的电池可能在极端环境下表现出不稳定性。

(4)管理因素。管理贯穿在整个动力锂电池铁路运输过程中,合理高效的管理制度有利于降低运输风险,顺利将锂电池运送到站。缺乏协调的工作流程、应急预案的不完善和安全教育培训的不足都可能导致事故应对不力。

(5)环境因素。在动力锂电池铁路运输环境风险方面,天气状况不容忽视,高温加速电池反应致热失控风险上升,低温降低电池性能与活性,潮湿易引发短路腐蚀。线铁路振动冲击工况决定了运输过程中的机械稳定性,过大的振动或冲击可能导致电池内部结构受损、隔膜破裂,从而引发热失控或电解液泄漏。办理场站条件涉及运输节点的操作环境,如装卸设备的适用

性、作业流程的规范性和安全措施完备性,若条件不达标,可能在装卸环节引发电池跌落或碰撞风险。运输车辆厢内温度则直接影响锂电池的运行环境,温度过高可能引起电池过热,而温度过低可能导致电池性能下降甚至产生内部短路。

## 2 模型构建

在构建动力锂电池铁路运输风险评价指标体系时,选取的指标覆盖内容全面、结构清晰,属于多指标体系。由于在分析指标对运输风险的影响时可能存在较为明显的差异,所以不能只选用一种指标赋权方法。采用熵权法得到的准则权重有较高的精确度和准确度,适用于多指标综合评价。而 C-OWA 算子赋权的加入,可以减少准则赋权所带来的误差。所以,“准则权重+次序权重”不仅结合两种赋权方法的优点,也弥补了其中的缺陷,使得评价结果能够更加准确、科学。

### 2.1 基于熵权法和 C-OWA 算子的组合赋权

#### 2.1.1 熵权法

熵权法是一种客观计算评价指标权重的方法,基本原理是在综合考虑各因素提供信息量的基础上,根据各评价指标传递给决策者的信息量变化来确定权重<sup>[23]</sup>,步骤如下。

(1) 建立原始矩阵。假设有个  $n$  评价对象,  $m$  个评价指标,建立原始矩阵

$$G = (g_{ij})_{m \times n}, \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

式中,  $g_{ij}$  为第  $i$  个评价对象对第  $j$  个评价指标的赋值。

(2) 初始矩阵标准化,构建新的判断矩阵  $H = (h_{ij})_{n \times m}$ , 标准化准则如下

$$h_{ij} = \frac{g_{ij} - \min_j(g_{ij})}{\max_j(g_{ij}) - \min_j(g_{ij})} \quad (2)$$

式中,  $h_{ij}$  为第  $j$  项风险指标相对于第  $i$  项的标准化值。

(3) 将判断矩阵归一化处理,处理后的矩阵为  $P = (P_{ij})_{n \times m}$ , 其中

$$P_{ij} = \frac{h_{ij}}{\sum_{i=1}^n h_{ij}} \quad (3)$$

(4) 定义动力锂电池运输风险指标的信息熵,准则如下: 当  $0 \leq e_i \leq 1, (i, j = 1, 2, 3, \dots, n)$  时

$$e_i = (- \sum_{j=1}^n P_{ij} \ln P_{ij}) / \ln n \quad (4)$$

式中,  $\ln n$  为熵系数,  $n$  为评价对象数量。需要注意的是, 当  $P_{ij} = 0, i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$  时,  $\ln P_{ij}$  无法求值, 此时需要对其进行调整, 调整方式如下

$$P'_{ij} = \frac{1 + P_{ij}}{\sum_{i=1}^n (1 + P_{ij})} \quad (5)$$

(5) 确定第  $i$  个动力锂电池运输风险指标的准则权重  $\omega_{ai}$ , 公式如下

$$\omega_{ai} = \frac{1 - e_i}{\sum_{i=1}^m (1 - e_i)} \quad (6)$$

式中,  $\omega_{ai}$  为准则权重。

#### 2.1.2 C-OWA 算子赋权

C-OWA 算子赋权法允许在排序中引入不同程度的偏好, 同时可以灵活处理不确定性和模糊性信息, 目前广泛应用于风险评估、供应链管理、金融决策等领域<sup>[24]</sup>。具体步骤如下。

(1) 邀请  $q$  位专家对建立的动力锂电池铁路运输风险指标进行打分, 分值范围为  $1 \sim 10$  分。专家对每一个打分构成的数据决策集为原始数据集, 原始数据集用  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_j, \dots, a_q\}$  表示, 对原始数据集从大到小排序并从 0 开始排号, 得到新数据集  $B = \{b_0, b_1, b_2, \dots, b_{q-1}\}$ , 其中  $(b_0 \geq b_1 \geq b_2 \dots \geq b_{q-1})$ 。

(2) 运用组合数计算打分数据的权重, 即组合数  $c_{q-1}^i$  决定数据  $b_i$  的权重  $\theta_{j+1}$ , 其中  $\sum_{j=0}^{n-1} \theta_{j+1} = 1$ , 即

$$\theta_{j+1} = \frac{c_{q-1}^j}{\sum_{k=0}^{q-1} c_{q-1}^k} = \frac{c_{q-1}^j}{2^{q-1}}, \quad j = 0, 1, \dots, q-1 \quad (7)$$

(3) 通过权重  $\theta_{j+1}$  依次对决策数据加权, 得到指标因素的绝对权重  $\bar{\omega}_i$ , 可表示为

$$\bar{\omega}_i = \sum_{j=0}^{q-1} \theta_{j+1} b_j, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

(4) 计算指标因素的次序权重  $\omega_{bi}$ , 即

$$\omega_{bi} = \frac{\bar{\omega}_i}{\sum_{i=1}^m \bar{\omega}_i}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (9)$$

其中,  $\omega_{bi}$  为次序权重。

#### 2.1.3 确定组合权重

为了满足决策者对指标划分的需求和充分考虑准则间的相互影响, 在准则赋权和次序赋权方法之间融合一致, 综合考虑这两种赋权方法的优点和缺点, 通过线性加权, 得到组合权重值。计算公式为

$$\omega = (1 - \alpha) \omega_{ai} + \alpha \omega_{bi}, \quad \alpha \in [0, 1] \quad (10)$$

式中,  $\omega_{ai}$  为评价指标  $i$  的准则权重;  $\omega_{bi}$  为评价指标  $i$  的次序权重;  $\alpha$  为待定常数。

## 2.2 云模型

### 2.2.1 基础理论

云模型是一种基于统计数学和模糊数学建立的

模型,刻画了不确定语言值和精确数值之间的随机性和模糊性。云模型具有期望  $E_x$ 、熵  $E_n$ 、超熵  $H_e$  三个数字特征。云滴的期望  $E_x$  是能够代表定性概念的点值,在论域的中心位置。熵  $E_n$  是综合度量定性概念的模糊度和概率,反映云滴的离散程度,  $E_n$  越大,定性云滴的取值范围就越大,定性概念就越模糊。超熵  $H_e$  是对熵的不确定性的度量,即云滴在云图中的凝聚程度<sup>[25]</sup>。

云模型可有效处理动力电池运输风险的不确定性,包括风险源和风险后果方面;可综合多因素耦合作用和确定权重,实现多因素风险的全面评估;还可直观地判断出动力锂电池铁路运输的风险水平及潜在风险隐患,以可视化云图和定性定量结合方式助力风险把控。

## 2.2.2 云模型构建

### (1) 确定标准云

根据构建的风险评价指标体系,建立评价指标集  $U$ ,划分为  $V$  个评语区间,给出等级的双边约束  $[V_{\min}, V_{\max}]$ ,  $V_{\min}$ 、 $V_{\max}$  分别为评价范围的上下限。确定评分值的范围并将其转换为云数字特征值  $E_x$ 、熵  $E_n$  和超熵  $H_e$ ,绘制出评价等级云图。具体转换公式如下

$$\begin{cases} E_x = \frac{(V_{\max} + V_{\min})}{2} \\ E_n = \frac{(V_{\max} - V_{\min})}{6} \\ H_e = k \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $V_{\min}$ 、 $V_{\max}$  为评价范围的上下限;  $k$  为常数,根据风险指标的不确定性进行选取,一般取值在 0.001~0.1 之间。

(2)  $n$  位专家依据划分的风险评价等级,对  $m$  个风险指标进行打分,获得风险评估的专家打分表,计算二级指标的云数字特征  $E_{x,i}$ 、 $E_{n,i}$ 、 $H_{e,i}$ ,公式如下

$$\begin{cases} E_{x,i} = \bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \\ E_{n,i} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \times \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{X}| \\ H_{e,i} = \sqrt{\left| \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2 - E_{n,i}^2 \right|} \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $E_{x,i}$ 、 $E_{n,i}$ 、 $H_{e,i}$  分别为第  $i$  个指标的期望、熵和超熵;  $\bar{X}$  为样本均值;  $x_i$ ,  $i=1, 2, \dots, n$  为各专家评分。

(3) 结合指标的权重和数字特征,计算一级评价指标和综合评价云数字特征参数

$$\begin{cases} E_x = \frac{\sum_{i=1}^m E_{x,i} \omega_i}{\sum_{i=1}^m \omega_i} \\ E_n = \frac{\sum_{i=1}^m E_{n,i} \omega_i^2}{\sum_{i=1}^m \omega_i^2} \\ H_e = \frac{\sum_{i=1}^m H_{e,i} \omega_i^2}{\sum_{i=1}^m \omega_i^2} \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} E_x = \frac{\sum_{i=1}^m E_{x,i} E_{n,i} \omega_i}{\sum_{i=1}^m E_{n,i} \omega_i} \\ E_n = \frac{\sum_{i=1}^m E_{n,i} \omega_i}{\sum_{i=1}^m E_{n,i} \omega_i} \\ H_e = \frac{\sum_{i=1}^m H_{e,i} E_{n,i} \omega_i}{\sum_{i=1}^m E_{n,i} \omega_i} \end{cases} \quad (14)$$

(4) 得到评价结果。在求得上层指标乃至整体的云数字特征值之后,通过 MATLAB 绘制出对应的评价云图,并通过计算相似度进一步保证评估结果的准确性。相似度计算时首先用 MATLAB 生成正态随机数  $y_i \sim N(E_n, H_e^2)$ ,  $x_i \sim N(E_x, y_i^2)$ , 然后计算  $x_i$  在标准云的相似度

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - E_x)^2}{2y_i^2} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (15)$$

## 3 实例分析

### 3.1 实例概况

选取西北地区某一危险货物办理站,邀请 10 位具有专业性、安全管理经验丰富的专家结合专业知识以及实际情况比较影响动力锂电池铁路运输安全的因素,并对其影响程度进行打分。对数据进行处理后,运用组合赋权法得到各级指标的综合权重,最后使用云模型计算得到动力锂电池铁路运输风险评价指标的云模型参数。

### 3.2 风险评价指标权重确定

在获取评价指标数据的基础上,利用式(1)~式(6)得到指标准则权重,通过式(7)~式(9)得到指标次序权重,并利用式(10)线性加权计算指标的组权重。计算结果见表 1。

表 1 动力锂电池铁路运输风险评价指标权重

Tab. 1 Weights of risk assessment indicators for railway transportation of power lithium batteries

| 一级指标 | 权重      | 二级指标 | 准则权重    | 次序权重    | 组合权重    |
|------|---------|------|---------|---------|---------|
| B1   | 0.219 6 | B11  | 0.036 8 | 0.041 5 | 0.039 2 |
|      |         | B12  | 0.062 3 | 0.057 2 | 0.059 7 |
|      |         | B13  | 0.080 7 | 0.056 3 | 0.068 5 |
|      |         | B14  | 0.052 0 | 0.044 7 | 0.052 0 |
|      |         | B21  | 0.028 8 | 0.049 9 | 0.039 3 |
| B2   | 0.177 0 | B22  | 0.036 8 | 0.041 5 | 0.039 2 |
|      |         | B23  | 0.033 5 | 0.039 4 | 0.036 5 |
|      |         | B24  | 0.063 5 | 0.060 4 | 0.061 9 |
|      |         | B31  | 0.059 0 | 0.054 1 | 0.056 5 |
|      |         | B32  | 0.042 7 | 0.057 4 | 0.050 1 |
| B3   | 0.219 3 | B33  | 0.059 0 | 0.054 1 | 0.056 6 |
|      |         | B34  | 0.070 1 | 0.041 5 | 0.056 1 |
|      |         | B41  | 0.028 8 | 0.049 9 | 0.039 4 |
|      |         | B42  | 0.036 9 | 0.044 7 | 0.040 8 |
|      |         | B43  | 0.059 1 | 0.054 0 | 0.056 5 |
| B4   | 0.184 3 | B44  | 0.045 1 | 0.049 9 | 0.047 5 |
|      |         | B51  | 0.080 7 | 0.056 3 | 0.068 5 |
|      |         | B52  | 0.022 1 | 0.054 3 | 0.038 2 |
|      |         | B53  | 0.034 1 | 0.047 8 | 0.041 0 |
|      |         | B54  | 0.059 4 | 0.047 8 | 0.052 1 |

3.3 综合评价云模型

3.3.1 确定标准评价云

将动力锂电池铁路运输风险指标的评价等级分为 5 个风险等级,具体等级划分如表 2 所示,其中分值越高代表该评价指标的风险越大。利用正向云发生器得到标准评价概念云图<sup>[26]</sup>,如图 3 所示。

表 2 评价标准等级划分及其云模型参数

Tab. 2 Classification of evaluation levels and corresponding cloud model parameters

| 评级   | 评分范围   | 云数字特征值参数        | 评价值含义                    |
|------|--------|-----------------|--------------------------|
| 低风险  | [0,2)  | (1,0.333 3,0.1) | 无损坏或异常,运行正常,对运输无隐患       |
| 较低风险 | [2,4)  | (3,0.333 3,0.1) | 存在轻微异常,但安全范围内,无明显危害      |
| 中等风险 | [4,6)  | (5,0.333 3,0.1) | 电池早期故障迹象,可能引发小规模异常       |
| 较高风险 | [6,8)  | (7,0.333 3,0.1) | 明显失效风险,可能导致局部起火或危害环境安全   |
| 高风险  | [8,10) | (9,0.333 3,0.1) | 热失控或严重事故,对人员、设备和环境构成重大威胁 |

3.3.2 综合评价云

邀请 10 位铁路危险货物运输工作人员和研究动力热失控专家对该动力锂电池铁路运输的各级风险指标进行打分,根据式(12)计算二级风险评价指标云模型特征参数,式(13)计算一级风险评价指标云模型参数。风险评价指标云模型特征参数如表 3 所示,评价云图如图 4 所示。

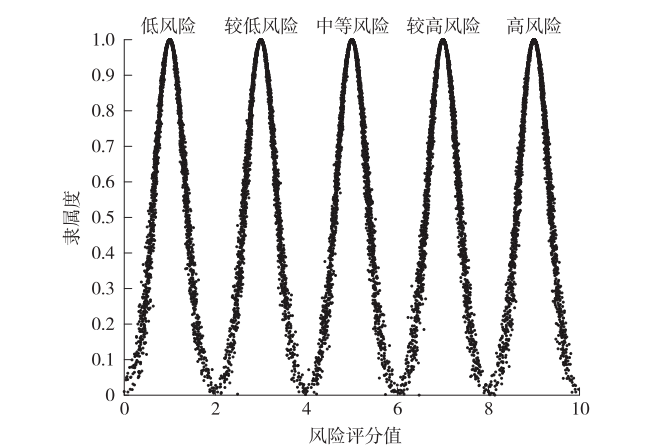


图 3 标准评价概念云图

Fig. 3 Cloud diagram of standard evaluation concepts

表 3 动力锂电池铁路运输风险评价指标云模型特征参数

Tab. 3 Characteristic parameters of cloud model for risk assessment indicators in railway transportation of power lithium batteries

| 一级指标 | 一级指标云模型特征参数         | 二级指标 | 二级指标云模型特征参数       |
|------|---------------------|------|-------------------|
| B1   | (2.896,0.746,0.199) | B11  | (2.3,0.702,0.192) |
|      |                     | B12  | (3.4,0.852,0.123) |
|      |                     | B13  | (3.1,0.677,0.227) |
|      |                     | B14  | (2.5,0.752,0.256) |
|      |                     | B21  | (2.8,0.802,0.144) |
| B2   | (2.647,0.862,0.196) | B22  | (2.5,0.752,0.256) |
|      |                     | B23  | (1.7,0.514,0.175) |
|      |                     | B24  | (3.2,1.052,0.200) |
|      |                     | B31  | (3.7,0.877,0.302) |
|      |                     | B32  | (3.2,0.852,0.123) |
| B3   | (3.612,0.858,0.228) | B33  | (4.1,0.702,0.193) |
|      |                     | B34  | (3.4,1.002,0.273) |
|      |                     | B41  | (1.6,0.752,0.256) |
|      |                     | B42  | (1.7,0.877,0.302) |
|      |                     | B43  | (2.4,0.852,0.123) |
| B4   | (1.816,0.813,0.216) | B44  | (1.4,0.752,0.256) |
|      |                     | B51  | (2.8,0.802,0.145) |
|      |                     | B52  | (1.8,0.602,0.195) |
|      |                     | B53  | (2.1,0.702,0.193) |
|      |                     | B54  | (1.7,0.514,0.175) |

综合 5 个一级评价指标云模型特征参数,结合组合权重采用式(14)计算得出动力锂电池铁路运输风险综合云模型特征参数  $R = (2.690, 0.791, 0.203)$ ,利用 MATLAB 可以得到综合风险云图,如图 5 所示。

为了保证结果的准确性,用式(15)计算综合云与标准云的相似度。根据表 4 可以看出,最大相似度为 0.649,处于较低风险水平,与综合云云图的结果判断一致。

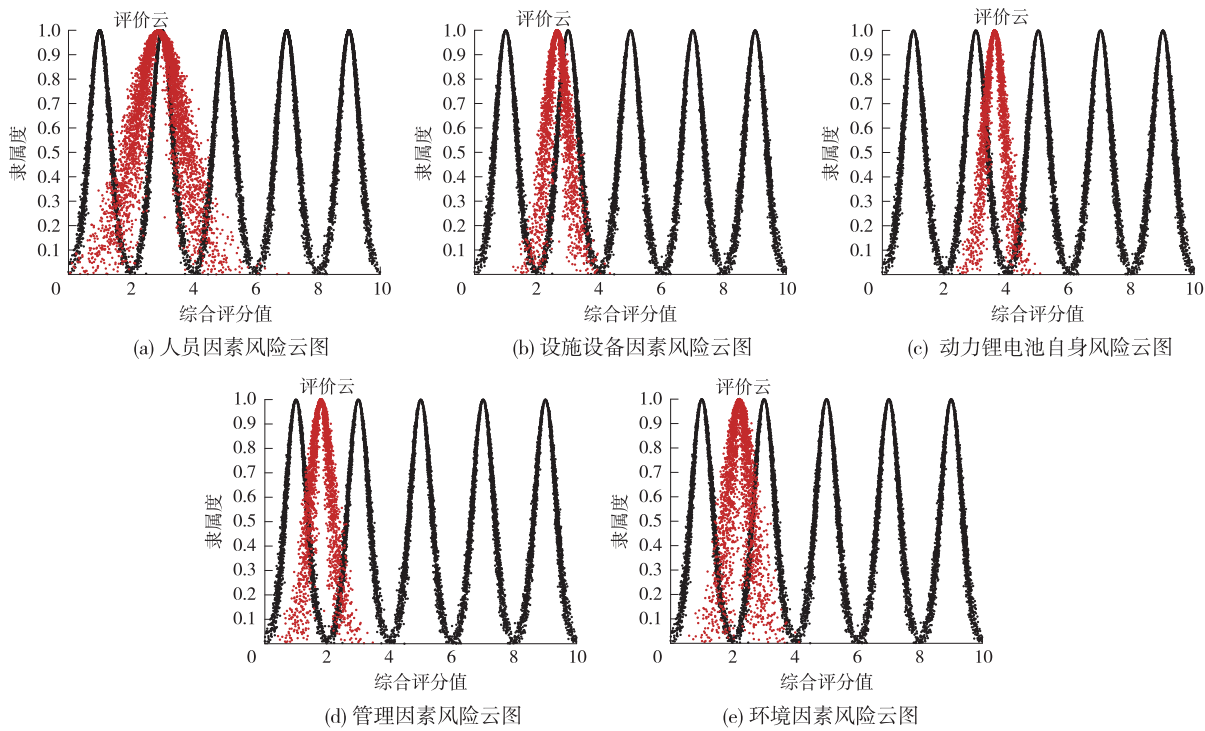


图 4 一级指标风险云图

Fig. 4 Risk cloud diagrams of first-level indicators

表 4 综合云与标准云相似度

Tab. 4 Similarity between comprehensive cloud and standard cloud

| 风险等级 | 低风险                   | 较低风险  | 中风险                    | 较高风险                   | 高风险                    |
|------|-----------------------|-------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 相似度  | $2.67 \times 10^{-6}$ | 0.649 | $3.73 \times 10^{-11}$ | $1.07 \times 10^{-36}$ | $1.23 \times 10^{-78}$ |

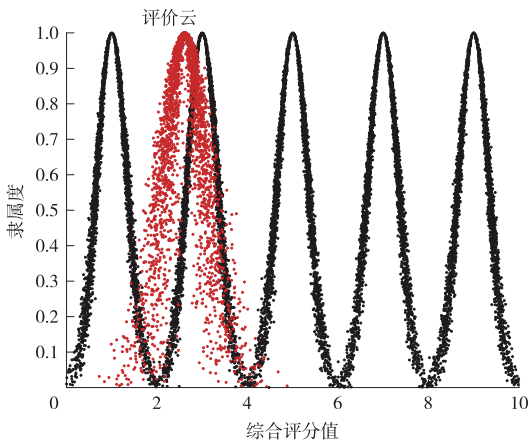


图 5 综合风险云图

Fig. 5 Comprehensive risk cloud diagram

3.3.3 评价结果分析

通过图 5 可以看出,综合风险评价接近“较低风险”,更靠近低风险,表明动力锂电池铁路运输风险水平处于“较低风险”,未来可以通过铁路大批量运输动力锂电池,但存在部分安全隐患。

从图 4 和表 3 可以看出,动力锂电池自身风险最

高,处于“较低风险”,更靠近中风险,说明动力锂电池作为货物本身的安全性是影响铁路运输的核心因素。其中,动力锂电池的荷电状态风险处于“中风险”,是影响其铁路运输安全的重要因素之一。人员因素、设备因素处于“较低风险”,通过查阅事故案例和询问现场人员可知,在运输其他危险货物时工作人员的安全责任意识和应急处置能力较为薄弱,并且设备故障或适配性不足仍可能导致突发性风险。管理因素更靠近“低风险”,说明在管理流程的规范性和执行力上已经取得一定成效,包括安全管理制度的落实、操作规范的完整性及安全教育的有效性,都为风险的降低提供了保障。环境风险云处于较低风险,也更靠近“低风险”,反映出铁路运输在外部环境因素的影响下总体可控。但外部环境的不可预测性仍可能成为潜在威胁。

3.4 运输安全改进措施

随着新能源汽车发展,动力锂电池产量剧增,铁路运输作为安全经济的运输方式必然会成为锂电池运输的重要选择。为了使动力锂电池未来在铁路运输更加安全,从运输风险评估结果出发,提出一些动力锂电池铁路运输的安全措施。

(1) 选用专门适配锂电池运输的载运工具,确保车辆结构稳固、适应运输过程中可能产生的振动与冲击。定期对运输工具进行检查与维护,避免因设备故障引发安全隐患。

(2)动力锂电池不同于一般危险货物,在发生热失控时,温度高达800℃,可能导致非常严重的后果。加强铁路工作人员的专业培训,确保其掌握锂电池的化学特性、电气性能和相关安全操作规程。同时,确保相关人员持证上岗,定期进行安全演练,提高应急处置能力,确保在突发事件中能迅速有效地采取措施。

(3)运输车厢内应配备温控系统,保持适宜的温度范围,避免因高温或低温引起电池过热或性能下降。此外,应对线路的振动和冲击情况进行监控,确保运输环境的稳定性。

(4)加强运输过程中各方的信息共享与协作,确保各部门之间的沟通畅通。例如,铁路部门、物流公司及锂电池生产商应建立信息共享机制,及时传递有关运输、储存、处理等方面的重要信息,以减少信息滞后引发的安全问题。

#### 4 结论

(1)构建动力锂电池铁路运输风险评价体系,运用熵值法和C-OWA算子确定各指标组合权重,使用云模型生成风险指标和运输过程整体风险评价的风险云图,最后得到运输风险等级为较低风险,未来可以通过铁路进行动力锂电池的大批量运输。

(2)在选取指标时,结合动力锂电池运输特点,从“人一机一物—管—环”五大类风险因素出发,构建由5个一级指标、20个二级指标的指标体系,同时结合运行过程中的监测模拟数据,使得评价结果更具科学性。

(3)动力锂电池铁路运输安全评价工作是开展动力锂电池铁路运输业务的首要前提。本文提出的模型可以为后续动力锂电池运输提供很好的参考,并且提供的安全改进措施可以使未来运输动力锂电池更加安全、可靠。

#### 利益冲突声明/Conflict of Interests:

所有作者声明不存在利益冲突。

#### 作者贡献/Authors' Contributions:

石古乐参与了研究设计,石古乐、张玉召、常全盛、张慧参与了论文的写作和修改。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。

#### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国中央人民政府. 第十四届全国人民代表大会第二次会议政府工作报告[EB/OL]. (2024-03-05)[2024-09-14]. <http://lianghui.people.com.cn/2024/n1/2024/0312/c458561-40194559.html>
- [2] 赵丽维,王粤,王海波,等. 2023年中国电池市场分析[J]. 电池, 2024,54(1):9-13.  
ZHAO Liwei, WANG Yue, WANG Haibo, et al. Analysis of China's Battery Market in 2023[J]. Battery Bimonthly, 2024,54(1):9-13.
- [3] 朱晓庆,王震坡,WANG Hsin,等. 锂离子动力电池热失控与安全研究综述[J]. 机械工程学报,2020,56(14):91-118.  
ZHU Xiaoping, WANG Zhenpo, HSIN W, et al. Review of Thermal Runaway and Safety Management for Lithium-ion Traction Batteries in Electric Vehicles[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(14):91-118.
- [4] 尹啸笛,张涛,张新春,等. 机械滥用下锂离子电池的力学响应及安全性预测研究进展[J]. 材料导报,2024,38(2):10-18.  
YIN Xiaodi, ZHANG Tao, ZHANG Xinchun, et al. Research Progress on Mechanical Responses and Safety Prediction of Lithium-ion Batteries under Mechanical Abuse[J]. Materials Reports, 2024, 38(2):10-18.
- [5] 田相军,郭亚洲,凌泽,等. 锂离子动力电池滥用条件下热失控特性研究[J]. 电源技术, 2020,44(5):679-681,692.  
TIAN Xiangjun, GUO Yazhou, LING Ze, et al. Thermal Runaway Characteristics Study of Lithium Ion Power Battery under Various Abuse Conditions[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2020, 44(5):679-681,692.
- [6] ABADA S, MARLAIR G, LECOCQ A, et al. Safety Focused Modeling of Lithium-ion Batteries: a Review[J]. Journal of Power Sources, 2016,306:178-192.
- [7] 程东浩,刘振东,荀立强. 动力锂离子电池运输安全性探讨[J]. 电池,2020,50(2):172-176.  
CHENG Donghao, LIU Zhendong, XUN Liqiang. Discuss on Safety of Power Li-ion Battery Transport[J]. Battery Bimonthly, 2020, 50(2):172-176.
- [8] 孙建丹,汪红辉,储德韧,等. 不同荷电状态三元锂离子电池热失控动力学研究[J]. 电源技术,2023,47(8):1040-1045.  
SUN Jiandan, WANG Honghui, CHU Deren, et al. Kinetic Study of Thermal Runaway Behaviors of Lithium-ion Batteries with Different SOC's[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2023, 47(8): 1040-1045.
- [9] 周荣义,林金玉,刘勇. 危险货物道路运输风险评估的集对模型及应用[J]. 中国安全科学学报,2019,29(1):173-179.  
ZHOU Rongyi, LIN Jinyu, LIU Yong. A Risk Assessment Model for Hazmat Road Transportation Based on Set Pair Analysis and Its Application[J]. China Safety Science Journal, 2019,29(1):173-179.
- [10] 梁经纬,苏谦,钱海啸,等. 基于博弈论及集对分析的边坡支护工程安全风险[J]. 铁道标准设计,2022,66(7):53-59,64.  
LIANG Jingwei, SU Qian, QIAN Haixiao, et al. Safety Risk Assessment of Slope Retaining Structure Based on Game Theory and Set Pair Analysis[J]. Railway Standard Design, 2022,66(7):53-59,64.
- [11] 鞠伟轶,吴洁,谢逢豪,等. 基于组合赋权-可拓云理论的铁路客站火灾风险评估[J]. 铁道标准设计,2023,67(9):149-155.  
JU Weiye, WU Jie, XIE Fenghao, et al. Fire Risk Assessment of Railway Passenger Station Based on Combination Weighting-extension Cloud Theory[J]. Railway Standard Design, 2023, 67(9):149-155.
- [12] 韩梅,吴珊,常青,等. 基于事故树和模糊贝叶斯网络的铁路超限货物运输风险评估[J]. 铁道学报,2021,43(5):9-17.  
HAN Mei, WU Shan, CHANG Qing, et al. Risk Assessment of Railway Out-of-gauge Goods Transportation Based on Fault Tree and Fuzzy Bayesian Network[J]. Journal of the China Railway Society, 2021,

- 43(5):9-17.
- [13] 周海怡, 鲍全贵, 叶茂, 等. 基于组合赋权法的城市桥梁可靠性模糊综合评价[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(增刊1):156-161.  
ZHOU Haiyi, BAO Quanguai, YE Mao, et al. Fuzzy Comprehensive Evaluation of Urban Bridge Reliability Based on Combination Weighting Method[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(S1):156-161.
- [14] SANGIORGIO V, MANGINI A M, PRECCHIAZZI I. A New Index to Evaluate the Safety Performance Level of Railway Transportation Systems[J]. Safety Science, 2020, 131:104921.
- [15] 马潇玥, 韩梅, 陈超, 等. 基于组合权重 TOPSIS 的超限货物运输方案评价[J]. 铁道运输与经济, 2024, 46(2):142-150.  
MA Xiaoyue, HAN Mei, CHEN Chao, et al. Evaluation on Transportation Plan for Railway Out-of-gauge Freight Based on Combined Weight and TOPSIS[J]. Railway Transport and Economy, 2024, 46(2):142-150.
- [16] 石振武, 张成琳, 王金茹. 基于变权 TOPSIS 的城市轨道交通运营水平评价研究[J]. 铁道标准设计, 2025, 69(11):56-63, 123.  
SHI Zhenwu, ZHANG Chenglin, WANG Jinru. Research on Evaluation of Urban Rail Transit Operation Level Based on Variable Weight TOPSIS[J]. Railway Standard Design, 2025, 69(11):56-63, 123.
- [17] 贺佳伟, 邵垒, 杨文举, 等. 基于多指标评估云模型的车载动力电池火灾风险研究[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(20):8901-8906.  
HE Jiawei, SHAO Lei, YANG Wenju, et al. Fire Safety of Vehicle Power Lithium Battery Based on Multi-index Assessment Cloud Model[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(20):8901-8906.
- [18] 谢斌, 刘岩, 崔利兵. 基于改进博弈论一二维云模型的高海拔铁路隧道施工风险预警[J]. 铁道标准设计, 2025, 69(2):144-152.  
XIE Bin, LIU Yan, CUI Libing. High Altitude Railway Construction Risk Warning Based on Improved Game Theory-2d Cloud Model[J]. Railway Standard Design, 2025, 69(2):144-152.
- [19] 周雪, 左忠义, 程伟. 基于组合赋权云模型的铁路旅客运输安全评价[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(增刊1):158-164.  
ZHOU Xue, ZUO Zhongyi, CHENG Wei. Safety Evaluation of Railway Passenger Transportation Based on Combined Weighting Cloud Model[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(S1):158-164.
- [20] 李长明, 赵开功, 张晓蕾, 等. 煤矿智能化项目风险评价云模型及其应用[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(5):168-174.  
LI Changming, ZHAO Kaigong, ZHANG Xiaolei, et al. Cloud Model for Risk Evaluation of Coal Mine Intelligent Projects and Its Application[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(5):168-174.
- [21] 国家铁路局, 工业和信息化部, 中国国家铁路集团有限公司. 关于支持新能源商品汽车铁路运输服务新能源汽车产业发展的意见[EB/OL]. [2023-01-31]. [https://www.miit.gov.cn/xwdtgxdtjtd-tart/2023/art\\_4eee7b1b378a48b79b1146cddcfbd55d.html](https://www.miit.gov.cn/xwdtgxdtjtd-tart/2023/art_4eee7b1b378a48b79b1146cddcfbd55d.html).
- [22] WANG Q S, MAO B B, STOLIAROV S I, et al. A Review of Lithium Ion Battery Failure Mechanisms and Fire Prevention Strategies[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2019, 73:95-131.
- [23] 杨艺, 许以凯, 赵才友, 等. 基于组合赋权法和灰色聚类的轨道质量状态评价[J]. 铁道标准设计, 2023, 67(12):68-73.  
YANG Yi, XU Yikai, ZHAO Caiyou, et al. Evaluation for the Track Quality State Based on Combination Assigning Method and Grey Clustering[J]. Railway Standard Design, 2023, 67(12):68-73.
- [24] 李志荣, 朱金善, 宋健, 等. 基于 C-OWA 算子和证据理论的船舶夜航光环境安全评价[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(12):182-187.  
LI Zhirong, ZHU Jinshan, SONG Jian, et al. Safety Evaluation on Light Environment of Ship Navigation at Night Based on C-OWA Operator and Evidence Theory[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15(12):182-187.
- [25] 罗振华, 郭俊涛, 韩建强. 基于云模型的装配式地铁车站施工安全风险评价[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(6):88-95.  
LUO Zhenhua, GUO Juntao, HAN Jianqiang. Construction Safety Risk Assessment of Prefabricated Subway Station Based on Cloud Model[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(6):88-95.
- [26] 于景飞, 刘俊俊. 组合赋权-云模型的变电站检修风险评价[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(9):3315-3324.  
YU Jingfei, LIU Junjun. Risk Assessment of Substation Maintenance Based on Combined Weighting-cloud Model[J]. Journal of Safety and Environment, 2024, 24(9):3315-3324.

(编辑:王婷)

(上接第9页)

- [32] WANG H B, WANG F M, FAN C C, et al. Experimental Investigation on the Load-bearing Capacity and Deformation Behaviour of the Composite Lining with Polyurethane Compressible Layer[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2024, 147:105722.
- [33] WANG H B, WANG F M, GUO C C, et al. The Role of Polyurethane Foam Compressible Layer in the Mechanical Behaviour of Multi-layer Yielding Supports for Deep Soft Rock Tunnels[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2024, 16(11):4554-4569.
- [34] 张发, 彭轲, 蔡直言, 等. 基于模型试验的隧道刚柔复合衬砌承载特征[J]. 隧道建设(中英文), 2026, 46(2):301-309.  
ZHANG Fa, PENG Ke, CAI Zhiyan, et al. Load-bearing Characteristics of Rigid-flexible Composite Tunnel Lining Based on Model Tests[J]. Tunnel Construction, 2026, 46(2):301-309.

(编辑:夏梦然)