

文章编号: 1005-0523(2026)04-0109-11



基于 CRITIC-VIKOR 模型的车体底架动应力时域外推方法

陈道云, 祝卫强, 罗财滢

(华东交通大学机电与车辆工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要:针对时域外推阈值选取过程中检验指标单一的问题,提出了一种基于 CRITIC-VIKOR 的多准则阈值选取方法。通过经验模态分解法分解得到车体底架动应力数据的主成分信号,利用超出量均值函数图法初步确定最优阈值区间,在区间内基于各检验标准采用 CRITIC-VIKOR 法选取最优阈值,提取超阈值数据进行广义帕累托分布(GPD)拟合,利用拟合参数生成随机载荷以代替原始超阈值数据实现时域外推,计算外推后动应力数据造成的损伤。结果显示,相比于实测数据,线性外推、雨流外推和时域外推计算得到的损伤误差分别为 0.59%、0.20% 和 0.18%,验证了时域外推方法的科学性与准确性。

关键词:时域外推; 阈值; GPD 拟合; 损伤

中图分类号: U260

文献标志码: A

本文引用格式: 陈道云, 祝卫强, 罗财滢. 基于 CRITIC-VIKOR 模型的车体底架动应力时域外推方法[J]. 华东交通大学学报, 2026, 43(4): 109-119.

Time-Domain Extrapolation of Dynamic Stresses in the Underframe of a Car Body Based on the CRITIC-VIKOR Model

Chen Daoyun, Zhu Weiqiang, Luo Caiying

(School of Mechatronics & Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: To address the issue of single evaluation criterion in time-domain extrapolation threshold selection, a multi-criteria threshold selection method based on CRITIC-VIKOR is proposed. The principal component signals of the dynamic stress data of the vehicle undercarriage are obtained through empirical mode decomposition. The optimal threshold range is preliminarily determined using the exceedance mean function plot method. Within this interval, the optimal threshold is selected using the CRITIC-VIKOR method based on each inspection criterion. Data exceeding the threshold are extracted for generalized Pareto distribution (GPD) fitting, and random loads are generated using the fitting parameters to replace the original threshold-exceeding data for time-domain extrapolation. The damage caused by the extrapolated dynamic stress data is then calculated. The results indicate that compared to actual measurement data, the damage errors calculated by linear extrapolation, rain-flow extrapolation, and time-domain extrapolation are 0.59%, 0.20%, and 0.18%, respectively. This demonstrates the scientific validity and accuracy of the time-domain extrapolation method.

Key words: time domain extrapolation; threshold; GPD fitting; damage

收稿日期: 2025-07-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(52202468); 江西省自然科学基金项目(20252BAC210001)

Citation format: Chen Daoyun, Zhu Weiqiang, Luo Caiying. Time-domain extrapolation of dynamic stresses in the underframe of a car body based on the CRITIC-VIKOR model[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2026, 43(4): 109–119.

随着我国铁路行业逐步从大规模建设阶段过渡至长期运维阶段,列车安全运营的保障需求日益凸显。对列车关键部件进行精准的寿命预测,是确保列车安全、稳定运行的核心技术手段之一^[1]。目前,工程领域常用的疲劳寿命预测方法主要分为两类:一类是基于载荷边界条件,通过有限元仿真技术开展寿命预测^[2];另一类是利用实测动应力数据,先编制完整的应力谱,再结合累积损伤模型完成寿命预测^[3]。

在进行动应力数据测试时,考虑到成本、安全等因素,只能测得较短时间内的动应力数据,难以直接反映部件全寿命周期内的应力载荷特征。应力外推可将有限的实测应力数据扩展为覆盖部件全寿命周期的完整应力信息,为后续累积损伤计算与寿命预测提供可靠的载荷输入。目前常用的外推方法有雨流矩阵外推^[4-5]和时域外推,时域外推中阈值的选取是影响时域外推结果的重要因素^[6-8],杨子涵等^[9]选取超出量数目与载荷总循环数目的平方根相等时所对应的阈值作为外推阈值。Beirlant等^[10]用最小均方根误差(mean squared error, MSE)对应的值作为最优阈值。王秋实等^[11]提出了基于自助法的最小MSE确定方法来得到最优阈值。王禹等^[12]利用错误发现率来自动选取最优阈值。尽管学者们已对最优阈值的选取方法展开诸多探讨,但实际应用中仍存在检验指标单一、计算流程繁琐等问题。

CRITIC法是一种经典的客观权重确定方法,其核心在于通过分析评价指标自身的“信息量”与指标间的“冲突性”来计算权重。邓勇亮等^[13]利用CRITIC法对评价指标赋权,并结合VIKOR方法,提出了一种新的地铁车站运营韧性评价模型。VIKOR是一种基于欧氏距离的综合评价方法,它通过计算每个方案与理想解的准则信息之间的欧氏距离来评价方案,进而得到最接近理想解的妥协解。肖强等^[14]运用VIKOR法对各施工方案进行利益比率分析与优势排序,最终得到最优水泥搅拌桩施工方案。

因此,针对上述问题,本研究提出了一种基于

CRITIC-VIKOR和多种检验标准的阈值选取方法,该方法利用CRITIC方法计算各个检验标准的权重占比,通过VIKOR方法将所有检验标准结合,得到每个候选阈值所对应的综合评价量,进而得到最优阈值。在此基础上,以机车车体底架为研究对象,验证阈值选取的准确性及时域外推方法的可行性。

1 数据采集及预处理

车体是电力机车的主要承载结构,本研究选取某型重载机车车体底架采集动应力数据,该机车在重载条件下在既有线路以实际速度进行试验,试验里程为200 km。通过在焊趾附近安装垂直于焊缝方向的单向应变片对焊缝区域的名义应力进行测量,选取易受焊缝结构疲劳强度影响的区域进行动应力测试^[15],图1为应力测点布置方案。

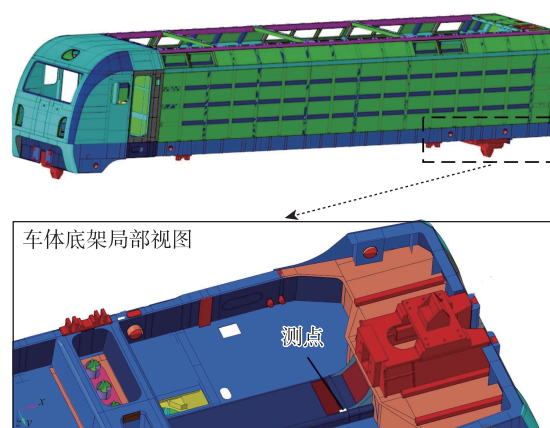


图1 应力测点布置方案

Fig. 1 Layout scheme of stress measuring points

为避免频混导致采样信号的失真,根据信号采集相关理论,将采样频率设为2 000 Hz,将采集到的数据利用Ncode软件的Spike Detection模块进行去毛刺处理,即将某一数据点与其前后相邻的数据点进行比较,若该点与邻近点的差异(在幅值和斜率上)超过设定的阈值,则判定为毛刺并进行处理,之后再行去零漂、滤波、峰谷值提取等处理,信号处理前后的动应力数据如图2所示。

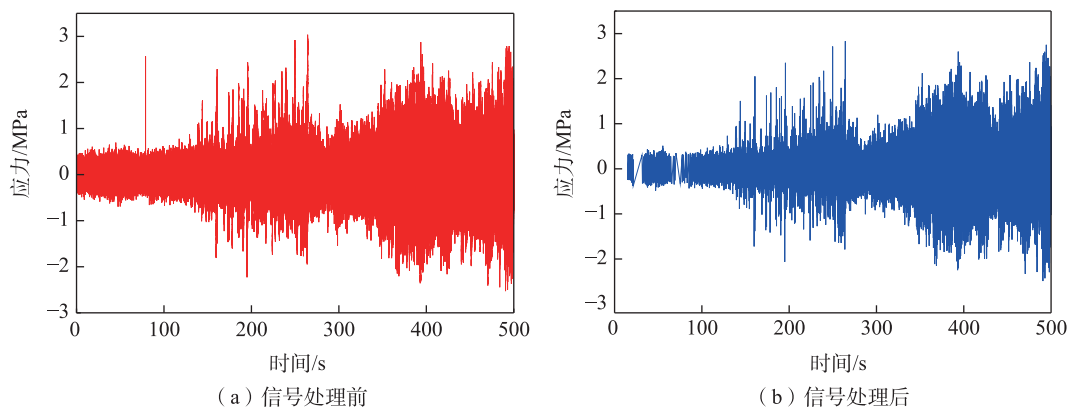


图2 信号处理前后动应力数据图

Fig. 2 Graph of dynamic stress data before and after signal processing

2 时域外推

2.1 经验模态分解(EMD)

经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)能够将1个复杂的非平稳信号分解为有限个本征模态函数(intrinsic mode function, IMF)和1个残余函数之和的形式

$$X(t) = \sum_{j=1}^n c_j(t) + r_n(t) \quad (1)$$

式中: $r_n(t)$ 为残余函数; $c_j(t)$ 为各IMF分量; 每个IMF分量需满足两个条件: ① 在整个数据段, 极值点数目和过零点数目必须相等或相差不超过1; ② 在

任何一点, 由局部极大值点形成的包络线和局部极小值点形成的包络线均值为0。

如图3所示, 动应力信号被分解为13个IMF分量和1个残余函数。

此外, 通过分析每个IMF分量的特征, 如标准差(SD), 可以建立边界, 以有效地分离主成分信号和趋势信号。

由图4可知, 分解得到的IMF分量的标准差先大幅下降, 之后小幅上升, 最后逐渐往0趋近。趋势载荷的波动会导致标准差上升, 因此, 将标准差上升前的最低点即IMF5之前的IMF分量作为主成分信号, 将其余IMF分量和残余函数作为趋势信号,

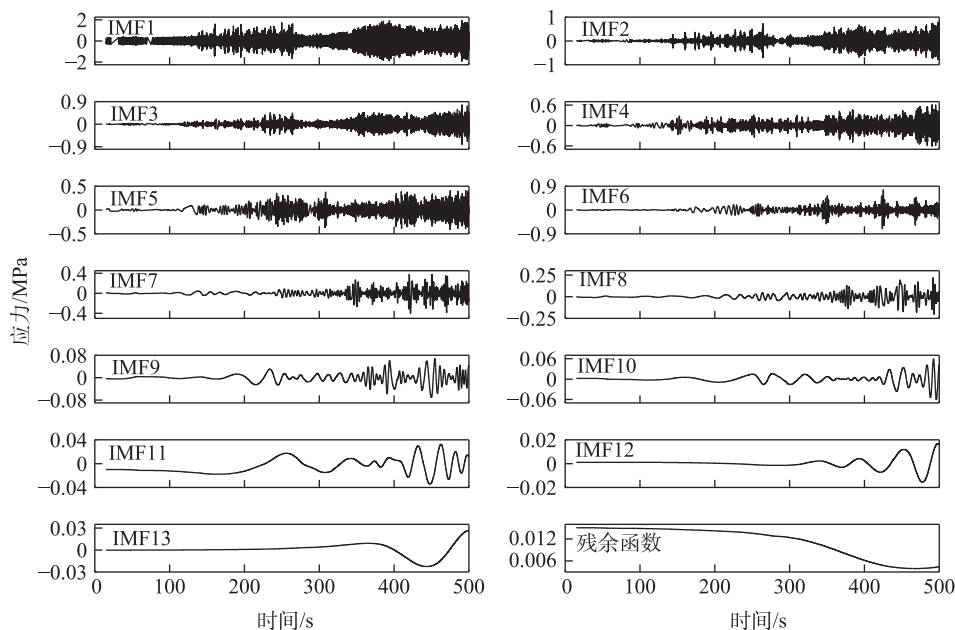


图3 动应力信号 EMD分解结果

Fig. 3 EMD results of dynamic stress signal

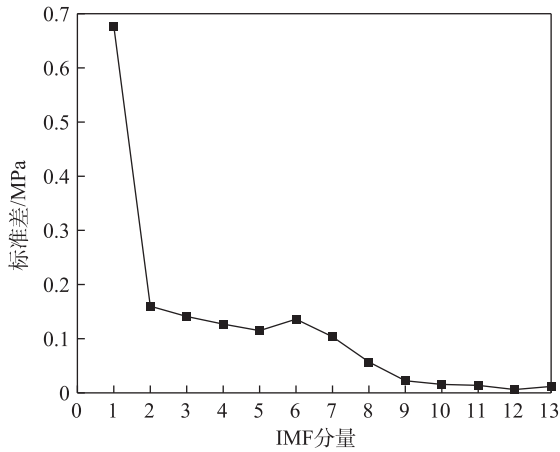


图4 各IMF分量标准差

Fig. 4 Standard deviation of each IMF component

划分结果如图5所示。综上,为使外推结果更加准确,对趋势信号予以保留,仅对主成分信号进行外推。

2.2 POT 极值模型

超阈值(peaks over threshold, POT)理论的核心思想是对超过给定阈值的样本数据进行建模,以描述分布的尾部特征,并利用特征分布生成新的外推信号替换原始信号以实现外推。当阈值设定得充分大时,超出量分布更倾向于服从GPD分布。GPD分布的分布函数(cumulative distribution function, CDF)和概率密度函数如下

$$G(z; \sigma, \xi) = \begin{cases} 1 - \left(1 + \xi \frac{z}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{\xi}}, & \xi \neq 0, z \geq 0 \\ 1 - \exp\left(-\frac{z}{\sigma}\right), & \xi = 0, z \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$g(z; \sigma, \xi) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma} \left(1 + \xi \frac{z}{\sigma}\right)^{-\frac{1+\xi}{\xi}}, & \xi \neq 0, z \geq 0 \\ \frac{1}{\sigma} \exp\left(-\frac{z}{\sigma}\right), & \xi = 0, z \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $z = x - \mu$ 为超出量; x 为应力样本值; μ 为阈值; σ 为尺度参数; ξ 为形状参数。

2.3 最优阈值选取

2.3.1 初始阈值区间选取

超出量均值函数图法是确定阈值初始区间的常用方法,根据GPD分布的性质可得超出量均值函数为

$$e(\mu) = E(x - \mu | X > \mu) = \frac{\sigma + \xi\mu}{1 - \xi} \quad (4)$$

根据式(4)可知,当形状参数 ξ 和尺度参数 σ 被确定时,超出量均值函数 $e(\mu)$ 与阈值 μ 呈线性关

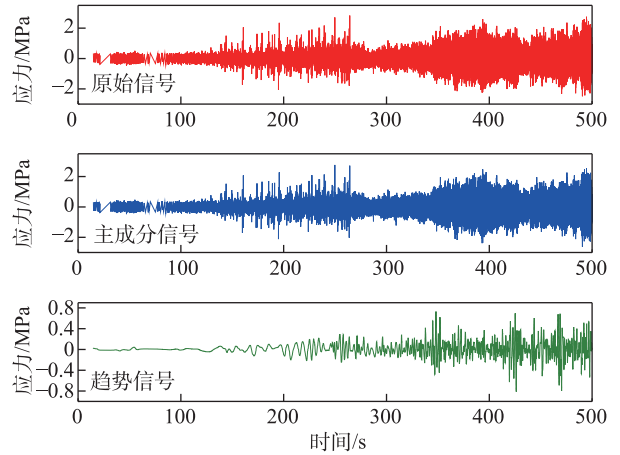


图5 实测载荷分解结果

Fig. 5 Measured load decomposition results

系,且斜率由 ξ 决定。因此,绘制极值样本的超出量均值函数图,选取其中的线性部分,即可初步得到阈值的最优区间。每一阈值 μ 所对应极值样本 $X_1, X_2, \dots, X_n$ 的超出量均值,如式(5)所示

$$e_n(\mu) = \frac{1}{N_\mu} \sum_{i=1}^n (X_i - \mu) \quad (5)$$

式中: N_μ 为样本点中超越阈值 μ 的个数; X_i 为超越阈值 μ 的极值样本。

极大值和极小值样本的超出量均值函数图如图6所示。由图6可知,极大值样本在区间 $[-0.5, 0]$ 以及 $[0.5, 1.5]$ 两端近似为线性分布,在区间 $[1.5, 2.5]$ 波动较为剧烈,极小值样本在区间 $[0, 0.5]$ 以及 $[-1.5, -0.5]$ 两段近似为线性分布,在区间 $[-2.5, -1.5]$ 波动较为剧烈。阈值的设定应保证所得到的极值点数目适当,极大值阈值应足够大且极小值阈值应足够小,因此,极大值的最优阈值区间定为 $[0.5, 1.5]$,同理,极小值的最优阈值区间定为 $[-1.5, -0.5]$ 。

2.3.2 阈值测试准则

最优阈值初始区间确定后,就需在区间范围内确定最优阈值,目前常用的方法在确定阈值的过程中对GPD拟合结果的评价指标利用相对单一,无法综合评价阈值选择的质量。因此,选择基于多评价指标的方法来综合评价拟合结果进而得到最优阈值。

目前,已有相关研究^[16-17]提出了许多对POT极值样本的拟合检验标准,基于前人的研究,此次外推选取了4个测试标准来综合评估阈值的准确性:Kolmogorov-Smirnov (KS)、均方根误差 (RMSE)、平方误差和 (SSE) 测试和卡方检验 (χ^2)。

在极大值和极小值最优阈值区间中以等间隔

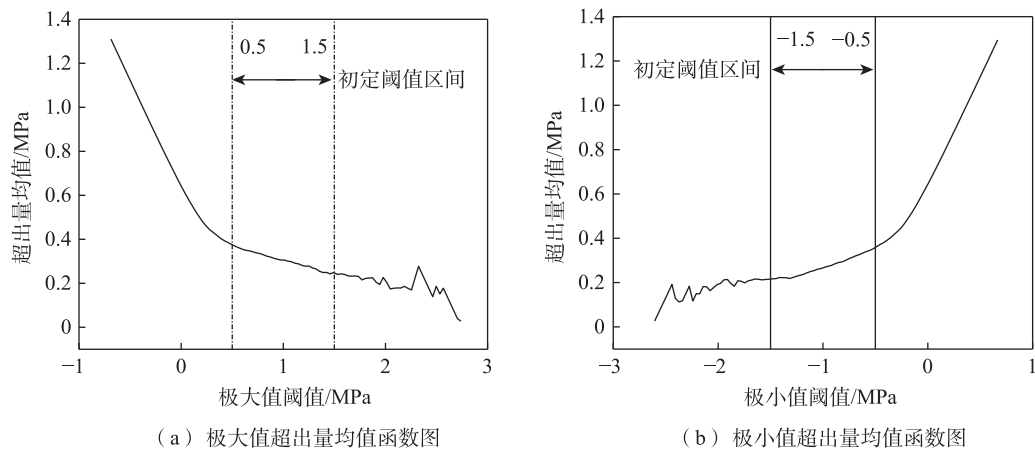


图6 极大值及极小值样本超出量均值函数图

Fig. 6 Plot of extremely large and small samples as a function of exceeding the mean

形式各取100个候选阈值,利用各候选阈值提取极值点并对极值点进行GPD拟合,极大值和极小值四个评价指标的评价结果如图7和图8所示,从图中可以看出,极大值的评价结果中,KS检验和RMSE检验的结果呈现先减小后增大的趋势,卡方检验的

结果则是逐渐增大,SSE检验的结果为先大幅下降,之后在较小范围内波动;极小值的评估结果中,卡方检验和SSE检验的结果呈现逐渐上升的趋势,KS检验则是逐渐下降,RMSE检验的结果呈现为减小-增大-减小的趋势。

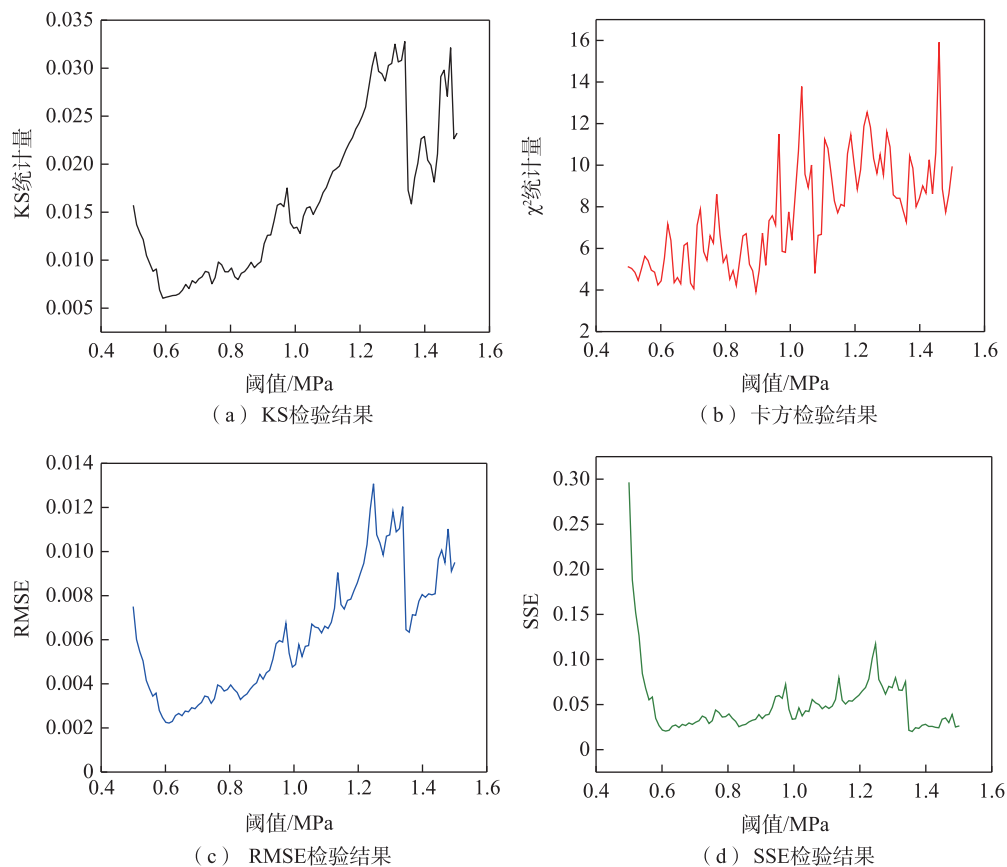


图7 极大值评价结果图

Fig. 7 Graph of maximum value evaluation results

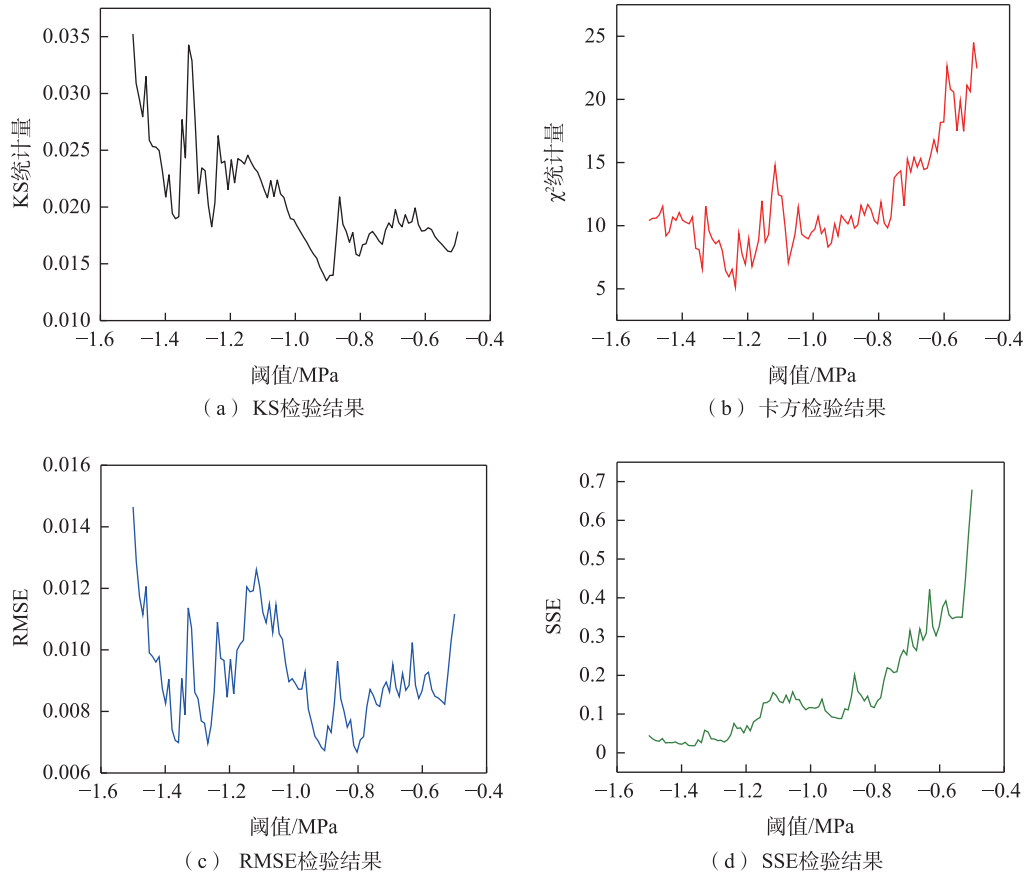


图8 极小值评价结果图

Fig. 8 Graph of results minimal value evaluation results

2.3.3 基于CRITIC-VIKOR方法的POT模型阈值选取

VIKOR是一种基于欧氏距离的综合评价方法,基于VIKOR方法确定POT模型阈值的过程如下。

1) 针对 m 个备选阈值的 n 个评价标准,建立 $m \times n$ 决策矩阵 X ,然后确定每个评价标准的正理想解 f_j^+ 和负理想解 f_j^- ,即

$$\begin{cases} f_j^+ = \min_i x_{ij} \\ f_j^- = \max_i x_{ij} \end{cases} \quad (6)$$

2) 群体效用 S_i 和个体遗憾 R_i 计算如下

$$\begin{cases} S_i = \sum_{j=1}^n w_j (x_{ij} - f_j^+) / (f_j^- - f_j^+) \\ R_i = \max_j w_j (x_{ij} - f_j^+) / (f_j^- - f_j^+) \end{cases} \quad (7)$$

式中: w_j 是权重系数; S_i 和 R_i 分别为第 i 个阈值的评价标准值与正理想解之间的平均以及最大加权距离。

3) 每个候选阈值的综合评价量 Q_i 计算为

$$Q_i = v \frac{S_i - S^*}{S^- - S^*} + (1 - v) \frac{R_i - R^*}{R^- - R^*} \quad (8)$$

式中: $S^* = \min S_i$; $S^- = \max S_i$; $R^* = \min R_i$; $R^- = \max R_i$; v 代表决策机制因子; Q_i 的值越小则代表POT极值样本的GPD拟合效果越好。

在利用VIKOR法计算每个备选阈值的综合评价量时,权重系数 w_j 能显著影响计算结果。CRITIC法是一种在多准则决策问题中,用于客观确定评价指标权重的方法。通过CRITIC计算权重系数的步骤如下。

1) 评价标准规范化,标准化后的值 o_{ij} 为

$$o_{ij} = \frac{\max\{x_j\} - x_{ij}}{\max\{x_j\} - \min\{x_j\}} \quad (9)$$

2) 不同候选阈值对应第 j 个标准的取值标准差 σ_j 可以表示为

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (o_{ij} - \bar{o}_j)^2} \quad (10)$$

3) 第 i 个和第 j 个标准之间的相关系数 ρ_{ij} 为

$$\rho_{ij} = \frac{\sum_{h=1}^m (o_{hi} - \bar{o}_i)(o_{hj} - \bar{o}_j)}{\sqrt{\sum_{h=1}^m (o_{hi} - \bar{o}_i)^2 \sum_{h=1}^m (o_{hj} - \bar{o}_j)^2}}, i \neq j \quad (11)$$

式中: o_{hi} 和 o_{hj} 是第 h 个备选阈值的第 i 个和第 j 个标准的值; $\bar{o}_i$ 和 $\bar{o}_j$ 是全部 n 个对象的第 i 个和第 j 个标准的平均值。

第 j 个准则的冲突度量 l_j 为

$$l_j = \sum_{i=1}^n (\rho_{ij}), i \neq j \quad (12)$$

4) 第 j 个评估标准中包含的信息 C_j 为

$$C_j = \sigma_j \times l_j, i \neq j, j = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

5) 计算权重系数

$$w_j = \frac{C_j}{\sum_{k=1}^n C_k}, j = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

综上,通过 CRITIC 法得到各评价标准的权重系数如表 1 所示,对于极大值,SSE 测试占比的权重最高,为 0.267 6,对于极小值,RMSE 测试占比的权重最高,为 0.307 2。将得到的权重系数代入 VIKOR 综合决策法中,得到各个候选阈值所对应的综合评价量如图 9 所示,最终确定极大值阈值为 0.59 MPa,极小值阈值为-1.25 MPa。

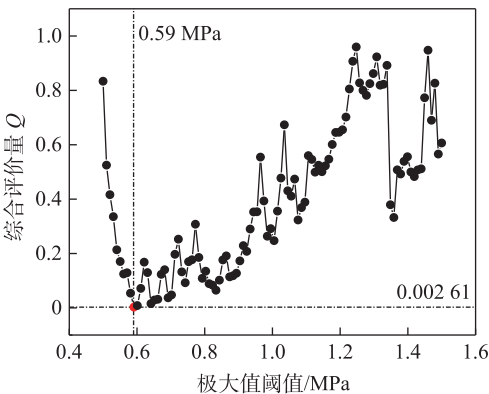
表 1 测试标准的权重系数
Tab.1 Weighting factors for test criteria

权重系数	KS	χ^2	$RMSE$	SSE
极大值	0.257 2	0.264 5	0.210 7	0.267 6
极小值	0.216 7	0.253 0	0.307 2	0.223 1

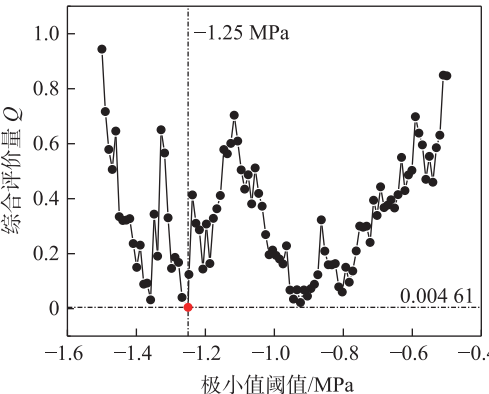
2.4 GPD 拟合与外推信号重构

基于最优阈值提取的极大值与极小值极值点拟合得到的结果如表 2 所示,极大值和极小值拟合结果与超阈值之间的决定系数分别为 0.999 9 和 0.999 3,均大于 0.996 0,满足精度要求。为了进一步直观反映拟合效果,分别绘制 P-P (probability-plot)图和 CDF 图来对模型进行拟合优度检验,如图 10 所示,提取的极值样本与 GPD 拟合曲线重合度较好,拟合效果理想。

根据 GPD 拟合得到的概率密度函数,生成与样本数目一致的随机应力序列,将生成的应力序列在原时间点替换原超出值即可得到外推时域信号。



(a) 极大值综合评价结果



(b) 极小值综合评价结果

图 9 VIKOR 综合评价量图
Fig. 9 VIKOR comprehensive evaluation volume map

表 2 GPD 拟合结果
Tab.2 GPD fitting results

超出量	阈值/MPa	形状参数	尺度参数	R^2
极大值	0.59	-0.137 5	0.405 7	0.999 9
极小值	-1.25	-0.053 1	0.238 5	0.999 3

将原始主成分信号外推 10 倍并叠加趋势载荷得到完整的 10 倍外推结果,如图 11 所示,最终外推结果保留了原始信号的变化趋势,与 10 倍原始信号的重合度较高。

3 外推结果验证

对时域外推 10 倍、线性外推 10 倍(10 倍原始信号)、原始信号和雨流外推 10 倍得到的动应力信号分别进行雨流循环计数,进而绘制幅值累计频次曲线如图 12 所示,与原始信号相比,线性外推得到的动应力信号只增加了频次,幅值并没有变化。时域外推和雨流外推得到的动应力信号在前者基础上还使幅值上升,因此,基于 CRITIC-VIKOR 的时域

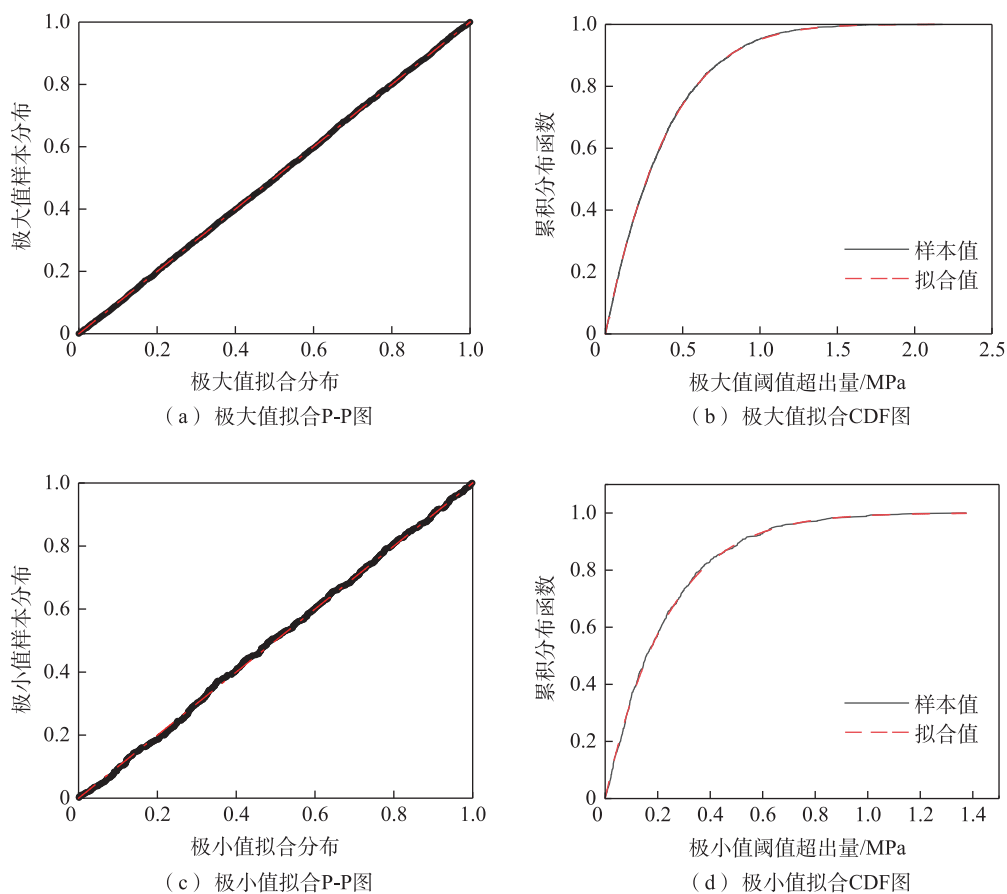


图10 P-P图和CDF图
Fig. 10 P-P and CDF diagrams

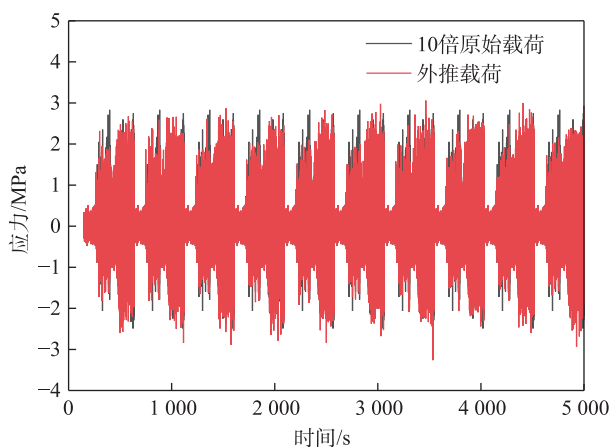


图11 10倍外推结果
Fig. 11 10-fold extrapolation results

外推方法不仅可以增加应力信号的频次,还能基于GPD分布对动应力信号极值进行外推。

利用雨流计数方法得到时域外推10倍与10倍原始信号的雨流矩阵,分别对两种信号的雨流矩阵

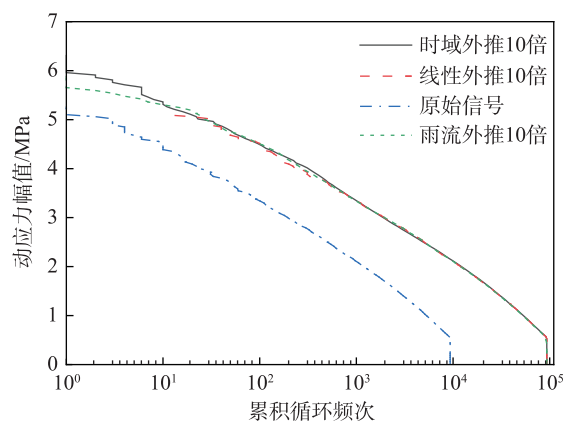


图12 应力循环幅值累计频次曲线
Fig. 12 Cumulative frequency curve of stress cycle amplitude

中应力循环的均值和幅值绘制频次分布直方图,并对其分布进行拟合。如图13所示,时域外推10倍得到的应力循环分布与10倍原始信号循环分布具有相似性,且两种信号的幅值均服从对数正态分布,

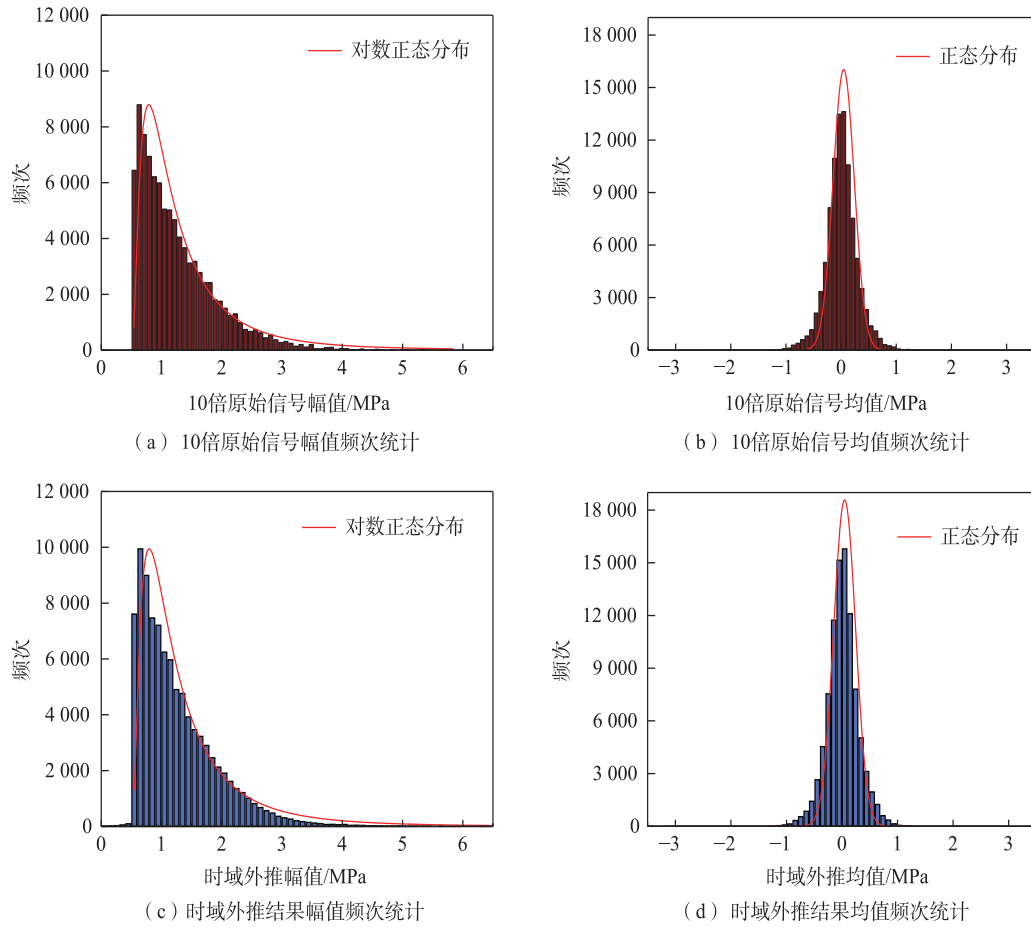


图13 原始数据与时域外推结果的均幅值频次统计

Fig. 13 Frequency statistics of the mean amplitude of the original data and the results of the time-domain extrapolation

均值均服从正态分布,表明该时域外推方法的正确性,能够较好地模拟机车在运行过程中车体底架的动应力真实分布规律。

采用Miner线性累积损伤理论,即式(15)计算外推后的累积损伤,基于时域外推10倍后计算得到的累积损伤为 5.446×10^{-9} ,基于线性外推10倍和基于雨流外推10倍后计算得到的累积损伤分别为 5.404×10^{-9} 和 5.425×10^{-9} ,利用实测5 000 s的应力数据来验证外推结果的准确性,实测数据计算得到的累积损伤为 5.436×10^{-9} ,相比于实测数据,线性外推、雨流外推和时域外推计算得到的损伤误差分别为0.59%、0.20%和0.18%

$$D_i = \frac{n_i}{N_i} = \frac{\sigma_i^m n_i}{c} \quad (15)$$

式中: σ_i 为应力幅值; n_i 为 σ_i 对应的频次; m 、 c 为材料S-N曲线相关参数;根据IIW相关标准, m 取5, c 取 6.80×10^{14} 。

4 结论

针对现有POT外推方法在进行阈值选取时无法综合考虑多种评价标准进而得到最优阈值的问题,提出了一种基于CRITIC-VIKOR模型的时域外推方法,并以机车车体底架的实测动应力信号为例进行了方法解释和分析。

1) 创新性地构建了“EMD主成分分离+CRITIC-VIKOR决策”框架,通过EMD分离主成分与趋势信号,仅对主成分进行外推以排除干扰。整合KS、RMSE、SSE、 χ^2 四准则,用CRITIC客观量化权重,再经VIKOR求得“理想阈值解”,确定最优阈值,解决了单准则难以综合评价GPD拟合质量的问题。

2) 基于优化阈值的超阈值数据与GPD拟合适配性优良,极大值、极小值拟合 R^2 分别达0.999 9、0.999 3,P-P及CDF图验证样本与拟合曲线高度重合。相较传统单准则阈值易导致的拟合偏差,本研

究确定的阈值使GPD精准捕捉应力极值特征,形成“多准则阈值→高精度拟合→可靠外推”闭环。

3) 实现了“频次+幅值”双重扩展,克服了线性外推仅增频次的缺陷,且损伤误差优于雨流外推,外推结果保留原始信号趋势,应力循环分布与实测一致,为列车重要部件疲劳寿命预测提供了更可靠的数据。

参考文献:

- [1] 宋剑锋,黄鑫磊,王思然,等. C80列车长大下坡周期制动踏面疲劳寿命预测[J]. 吉林大学学报(工学版), 2025,55(3):866-876.
- Song Jianfeng, Huang Xinlei, Wang Siran, et al. Fatigue life prediction of brake treads for C80 trains with long downhill cycles[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2025,55(3):866-876.
- [2] Kraft S, Blum H L, Gomes Alves C. Calibration and validation of fatigue design models for railway car bodies considering uncertainty[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2023,46(12):4694-4711.
- [3] Yuan Zheng, Chen Xianjia, Li Cen, et al. The influence of operation variables on stress spectrum of high-speed train bogie frames[J]. Vehicle System Dynamics, 2023, 61(2):499-512.
- [4] 王枫,王玺,邓克军,等. 基于特种车辆摆臂实测载荷的参数估计拟合外推研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2024,38(7):44-49.
- Wang Feng, Wang Xi, Deng Kejun, et al. Parameter estimation fitting extrapolation based on the measured load of special vehicle swing arm[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2024, 38(7):44-49.
- [5] Mei Guiming, Luo Qun, Qiao Wei, et al. Study of load spectrum compilation method for the pantograph upper frame based on multi-body dynamics[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 135:106099.
- [6] Johannesson P. Extrapolation of load histories and spectra[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2006,29(3):209-217.
- [7] 程友杰. 锻压机传动轴载荷信号POT时域外推法处理研究[J]. 工程机械文摘, 2024(4):36-39.
- Cheng Youjie. Research on POT time domain extrapolation method for load signal of forging press transmission shaft[J]. Construction Machinery Digest, 2024(4):36-39.
- [8] 温昌凯,谢斌,宋正河,等. 拖拉机耐久性加速结构试验设计方法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 52(3):703-715.
- Wen Changkai, Xie Bin, Song Zhenghe, et al. Design method of tractor durability accelerated structure test[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022,52(3):703-715.
- [9] 杨子涵,宋正河,罗振豪,等. 基于EMD-POT模型的拖拉机关键零部件载荷时域外推方法[J]. 机械工程学报, 2022,58(15):252-262.
- Yang Zihan, Song Zhenghe, Luo Zhenhao, et al. Time-domain load extrapolation method for tractor key parts based on EMD-POT model[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022,58(15):252-262.
- [10] Beirlant J, Dierckx G, Goegebeur Y, et al. Tail index estimation and an exponential regression model[J]. Extremes, 1999,2(2):177-200.
- [11] 王秋实,周劲松,宫岛,等. 基于动应力时域外推的构架疲劳寿命评估方法[J]. 振动测试与诊断, 2021,41(4):762-771,834.
- Wang Qiushi, Zhou Jinsong, Gong Dao, et al. Fatigue life assessment method of frame based on time-domain extrapolation for dynamic stress[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2021,41(4):762-771,834.
- [12] 王禹,王玲,吕东晓,等. 基于FDR阈值自动选取的拖拉机PTO转矩载荷谱外推[J]. 农业机械学报, 2021, 52(3):364-372.
- Wang Yu, Wang Ling, Lyu Dongxiao, et al. Extrapolation of tractor PTO torque load spectrum based on automated threshold selection with FDR[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(3):364-372.
- [13] 邓勇亮,高雨桐,周琦,等. 基于改进CRITIC-VIKOR法的地铁车站运营韧性评价方法[J]. 交通信息与安全, 2024,42(3):167-174.
- Deng Yongliang, Gao Yutong, Zhou Qi, et al. An operational resilience evaluation of subway station based on improved CRITIC-VIKOR method[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2024,42(3):167-174.
- [14] 肖强,闵瑞,王庆亚,等. 基于多媒体传感器技术与CRITIC-VIKOR方法的水泥搅拌桩施工方案比选[J]. 甘肃科学学报, 2025,37(3):95-100.
- Xiao Qiang, Min Rui, Wang Qingya, et al. Study on the evaluation and selection of cement mixed pile construc-

- tion programs based on multimedia sensor technology and CRITIC-VIKOR approach[J]. Journal of Gansu Sciences, 2025, 37(3): 95-100.
- [15] Chen Daoyun, Xiao Qian, Mou Minghui, et al. Fatigue reliability evaluation of heavy-haul locomotive car body underframe based on measured strain and virtual strain[J]. International Journal of Fatigue, 2023, 172: 107661.
- [16] 陈晋市, 张淼淼, 王普长, 等. 基于主成分分析阈值选取的挖掘机主泵载荷谱外推[J]. 吉林大学学报(工学版), 2023, 53(2): 355-363.
- Chen Jinshi, Zhang Miaomiao, Wang Puchang, et al. Extrapolation of excavator main pump load spectrum based on threshold selection for principal component analysis [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2023, 53(2): 355-363.
- [17] Wang Jixin, Wang Zhenyu, Yang Chao, et al. Optimization of the number of components in the mixed model using multi-criteria decision-making[J]. Applied Mathematical Modelling, 2012, 36(9): 4227-4240.



通信作者: 陈道云(1988—), 男, 副教授, 博士, 硕士生导师, 研究方向为结构强度与可靠性。

E-mail: chendaoyun@ecjtu.edu.cn。

(责任编辑: 李根)