

基于熵权-Topsis 的车体动应力时域外推方法

陈道云, 罗财滢, 祝卫强

(华东交通大学机电与车辆工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 为了对车辆进行结构疲劳分析, 有必要将短时间所测得的动应力时域信号利用外推技术外推成更长时间的历程。以某型机车车体的部分测点为实例, 提出了基于熵权法和 Topsis 方法确定最优阈值的方法。首先将初始时域信号进行去零漂等前处理后, 采用熵权法对超阈值 (POT) 模型阈值评价指标进行权重分配; 其次采用多指标的 Topsis 方法进行综合评价, 对比相对接近度获得最优阈值。对峰谷值超出量进行广义帕累托 (Pareto) 分布参数拟合, 进行极值重构并替换原始样本, 最终得到外推后的样本。从 P-P 图、Q-Q 图可以看到, 峰谷值样本拟合效果较好; 从累积分布图中可以看到, 外推 5 倍和 10 倍后的样本极值变大, 且曲线与实际样本曲线接近。对外推后的时域信号进行损伤计算后发现, 疲劳寿命评估方法更偏向于安全。

关键词: 时域外推; 动应力; 阈值

中图分类号: U260

文献标志码: A

Time-domain extrapolation of dynamic stresses in car body based on entropy weight-Topsis

Abstract: In order to perform structural fatigue analyses of vehicles, it is necessary to extrapolate the time-domain signals of dynamic stresses measured over a short period of time into a longer history using extrapolation techniques. Taking some measurement points of a certain locomotive body as an example, a method to determine the optimal threshold based on the entropy weight method and the Topsis method is proposed. Firstly, after the initial time-domain signal is pre-processed by de-zero drifting and other pre-processing, the entropy weighting method is used to assign weights to the threshold evaluation indexes of the over-threshold (POT) model; secondly, the Topsis method of multiple indexes is used to conduct a comprehensive evaluation, and the optimal threshold is obtained by comparing the relative proximity. The parameters of generalised Pareto distribution were fitted to the excess of peak and valley values, and the extreme value was reconstructed and replaced the original samples to finally obtain the extrapolated samples. From the P-P and Q-Q plots, it can be seen that the peak and valley samples are fitted better; from the cumulative distribution plot, it can be seen that the extreme value of the sample after extrapolation by a factor of 5 and 10 becomes larger, and the curve is close to the actual sample curve. After the damage calculation of the time-domain signal after extrapolation, it is found that the fatigue life assessment method is more biased towards safety.

Keywords: time domain extrapolation; threshold; GPD fitting; damage

在轨道车辆等领域, 结构疲劳失效威胁服役安全与寿命, 准确的疲劳寿命评估依赖全面充分的应力谱^[1-2]。当前, 应力测试受环境、成本等制约多为小样本采集, 传统基于小样本的线性外推评估, 因无法体现应力概率分布特性、难预测长时服役大应力幅值, 使结果偏离真实抗疲劳性能。开展应力谱外推技术研究, 对完善疲劳评估理论、保障装备全寿命周期可靠性意义重大, 是适配工程需求的必然举措。

当前, 可实现应力频次与幅值外推的方法包括雨流外推和时域外推。其中, 雨流外推先对时域信号开展雨流计数, 再借助核密度理论完成外推。而时域外推法相较于雨流矩阵外推法, 优势在于保留原载荷作用次序, 能真实反映实际载荷特征与规律^[3-4]。其中阈值的选取在 POT 模型的构建过程中意义重大。若阈值设定得过高, 会使得一部分有效的极端负载数据被排除在外; 反之, 若阈值设定得过低, 则可能会纳入过多不相关的无效数据。许多学者对此进行了研究, 目前常用的有图像法和数值法, Yang 等人^[5]对拖拉机传动轴的载荷特性展开分析, 借助 POT 模型与 EMD 方法, 实现了外推载荷的精准重构。He 等

收稿日期: 2025-08-15

基金项目: 江西省自然科学基金优青项目 (20252BAC210001); 国家自然科学基金青年项目 (52202468); 江西省 2024 年研究生创新专项基金项目 (YC2024-S422)

[6]提出一种基于 GRA-POT 的时域载荷拓展方法, 通过灰色关联分析完成了数控车床切削力载荷谱的编制。Zheng 等[7]则基于灰色关联分析确定出最优阈值, 构建起时域多轴载荷谱外推法的基础理论。王秋实[8]提出了一种基于形状参数最小均方误差的优化阈值确定方法, 并通过拟合优度检验验证了其准确性。郑国峰[9]提出了一种基于广义 Pareto 分布的极值样本扭转载荷时域外推方法, 该方法在商用车驾驶室稳定性分析中表现出较好的适应性。杨子涵[10]采用灰色关联度分析法选取最优阈值, 并提出了一种基于 POT 模型的大功率拖拉机传动轴载荷时域外推方法。彭良峰[11]提出一种基于 VIKOR 多准则决策最优阈值选取的 POT 时域载荷外推方法。Yongle Yang[12]提出了一种结合荷载分量分解的耐久性荷载谱时域混合外推方法, 并结合 CRITIC-VIKOR 方法确定最优阈值。上述阈值选择方法通过统计计算增强了阈值的选择, 减少了主观性, 确定了多个最佳阈值, 但仍存在指标单一、应用范围不广等问题。

针对以上问题, 提出基于熵权-Topsis 法对 POT 模型最优阈值的确定方法, 首先通过熵权法计算各指标的权重系数, 接着利用 Topsis 方法计算各备选阈值的相对接近度, 最终确定最优阈值, 并利用实例验证了方法的可行性。

1 时域外推

1.1 POT 理论

POT 理论, 即门限峰值法, 是一种用于极值分布统计推断的工具, 其核心原理是对超出设定阈值的样本数据进行建模, 以描述分布尾部特征[13]。具体步骤如下: 首先确定时域样本信号的上限阈值 u_{\max} 和下限阈值 u_{\min} , 然后提取超出这些阈值的峰谷值并计算超出量, 接着通过 GPD 分布对超出量的分布进行拟合, 最终间接推算实际峰值样本的极值载荷分布。如图 1 的 POT 极值载荷模型所示, x_i 为实测载荷数据点, 若 x_i 超过选定阈值 u , 便成为 POT 极值样本, 此时定义超越量 $y_i = x_i - u$ 。

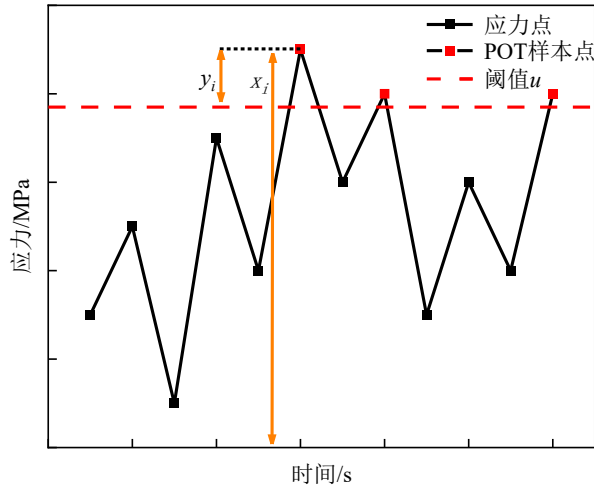


图 1 POT 模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the POT model

1.2 GPD 分布

时域外推方法的关键, 在于运用极值理论对极值样本进行精准描述。依据极值样本所遵循的分布类型, 该方法通常可分为广义极值分布 (GEVD) 和广义帕累托分布 (GPD) 两种形式[14]。相关研究显示, 当阈值足够大时, 超出量的分布更接近 GPD 分布, 所以本文选择基于 GPD 分布来拟合超出量的分布。GPD 的累计分布函数表达式如下。

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

GPD 概率密度函数

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

其中： ξ 是形状参数决定分布尾部的形状； σ 是尺度参数决定尾部的衰减速率； z 是超出量； u 为门限阈值。

1.3 阈值选取

平均超出量 $e(u)$ 与阈值 u 之间存在线性关联，该线性关系的斜率为 $\xi/(1-\xi)$ ，且此斜率仅由形状参数 ξ 决定。据此，若先假定一个数值作为候选阈值，当超过该候选值的样本所对应的平均超出量能呈现出关于超阈值的线性特征——也就是拟合模型中形状参数 ξ 的取值保持稳定时，即可将该假定数值判定为最终的阈值。不过在实际应用场景中，样本的底层分布通常是未知的，同时模型公式中的各项参数也缺乏已知信息，这就导致理论层面的平均超出量函数难以直接获取。但当样本数量达到足够大的规模时，可采用样本经验平均超出量函数（即 EMEF）来替代上述无法获取的理论平均超出量函数。其表达式为

$$e_n(u) = \sum_{i=1}^n (X_i - u) / N_u \quad (3)$$

其中： X_i 为样本观测值； N_u 为超过阈值 u 的样本数量。

为了确定适当的阈值，根据绘制 $e(u)$ 相对于阈值 u 的散点图。以该区域内直线的载荷区间作为初始阈值范围，并在此范围基础上进行进一步分析。由于仅从散点图得出的阈值范围不够精确，本文采用多种测试标准进行评估，K-S 检验、RMSE 检验、 R^2 检验和 SSE 检验是本研究所提出的方法中选择的四个检验标准。

1.4 基于熵权-Topsis 模型的阈值选取

熵权法属于一类以信息熵理论为核心支撑的权重确定方法。其核心思想是通过衡量系统的不确定程度来确定信息量，这样可以客观地反映各个指标的重要性。确定这一点的具体步骤如下：

(1) 选择 n 个备选阈值和 m 个评估指标； X 为原始指标数据矩阵。

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & \cdots & x_{nm} \end{pmatrix} \quad (4)$$

(2) 计算第 n 个备选阈值的权重和第 m 个指标在第 m 个指标中的熵。

$$p_{nm} = \frac{x_{nm}}{\sum_i x_{nm}}, 0 \leq p_{nm} \leq 1 \quad (5)$$

$$e_m = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n p_{nm} \ln p_{nm} \quad (6)$$

(3) 定义第 m 个指标的差异度并计算其权重。

$$d_m = 1 - e_m \quad (7)$$

$$w_m = \frac{d_m}{\sum_{m=1}^n d_m} \quad (8)$$

(4) 标准化得到分析数据矩阵 Z 。

$$Z_{nm} = \frac{x_{nm}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_{nm}^2}} \quad (9)$$

$$Z = \begin{pmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{1m} \\ z_{21} & z_{22} & \cdots & z_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{n1} & z_{n2} & \cdots & z_{nm} \end{pmatrix} \quad (10)$$

Topsis 法的核心思路是，通过测算各方案与正、负理想解之间的距离，来对不同方案的优劣程度进行评价。其基本思想是根据对最终目标的满意程度对各个备选方案进行排序，可以同时处理正反两个指标，对数据分布、样本量等要求没有严格限制，具有更大的灵活性，计算过程也比较直观，因此结合熵权法提供更直观的评价结果，具体步骤如下：

(1) 基于熵权法得到的权重，构造权重矩阵 Z'

$$Z'_{nm} = Z_{nm} \cdot W_m \quad (11)$$

$$Z' = \begin{pmatrix} z'_{11} & z'_{12} & \cdots & z'_{1m} \\ z'_{21} & z'_{22} & \cdots & z'_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z'_{n1} & z'_{n2} & \cdots & z'_{nm} \end{pmatrix} \quad (12)$$

(2) 根据正负指标定义最优值和最差值

$$\begin{aligned} Z^+ &= (Z_1^+, Z_2^+, \cdots, Z_m^+) \\ &= (\max(z'_{11}, z'_{21}, \cdots, z'_{n1}), \\ &\quad \max(z'_{12}, z'_{22}, \cdots, z'_{n2}), \\ &\quad \cdots \cdots \\ &\quad \max(z'_{1m}, z'_{2m}, \cdots, z'_{nm})) \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} Z^- &= (Z_1^-, Z_2^-, \cdots, Z_m^-) \\ &= (\min(z'_{11}, z'_{21}, \cdots, z'_{n1}), \\ &\quad \min(z'_{12}, z'_{22}, \cdots, z'_{n2}), \\ &\quad \cdots \cdots \\ &\quad \min(z'_{1m}, z'_{2m}, \cdots, z'_{nm})) \end{aligned} \quad (14)$$

(3) 计算每个评价对象与最优值和最差值的距离，计算相对接近度。第 n 个评价对象与最大值的距离

$$D_n^+ = \sqrt{\sum_j (z_{nm} - z_m^+)^2} \quad (15)$$

第 n 个评价对象与最小值的距离：

$$D_n^- = \sqrt{\sum_j (z_{nm} - z_m^-)^2} \quad (16)$$

第 n 个评估对象的相对接近度为

$$C_n = \frac{D_n^-}{D_n^+ + D_n^-} \quad (17)$$

其中： $0 \leq C_n \leq 1$ ， C_n 越大，效果越好。

根据超越量的个数，生成服从最优 GPD 拟合的新超越量，用新超越量替换原超越量，得到外推负荷时域信号。

2 实例验证

2.1 数据采集及处理

为研究机车车体底架问题，在实际运营线路上开展了动态应力测试，以捕捉薄弱点的动态应力响应。试验在一段标准的平直干线铁路上进行，测试机车以 80 km/h 的速度匀速运行，试验线路的轨道平顺性状态良好。测试测点布置在车体底架主要承力位置，具体位置如图 1 所示，车辆运行时产生的动应变信

号，借助数据线传输至机箱，最终完成信号采集的操作。动态应力采样频率为 2000Hz，以保证信号有效性，总采样时长为 500 秒。本研究采用了共和（KYOWA）品牌的应变片（型号：KFG-1-120-D17-11N30C2），其灵敏系数为 $2.06 \pm 1.0\%$ ，最大测量范围为 5.0%。

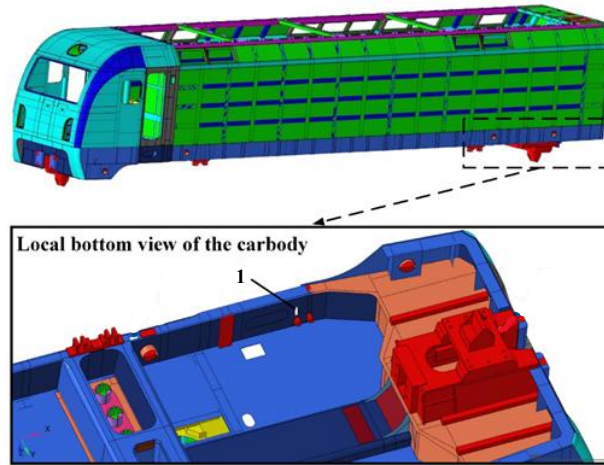


图 1 测点布置位置

Fig1. Location of measurement points arrangement

为了实现时域外推，首先利用胡克定律将原始应变信号转变为应力信号，其次利用移动平均法进行去零漂以保证峰谷值提取的准确性，得到结果如图 2 所示。同时基于快速傅里叶变换技术（FFT）得到测点的频谱图，其能量主要集中在 100Hz 以内，为去除高频干扰，因此设置 100Hz 低通滤波。最后利用阈值剔除方法去除毛刺并进行峰谷值提取，实现数据量的简化，提高分析效率。

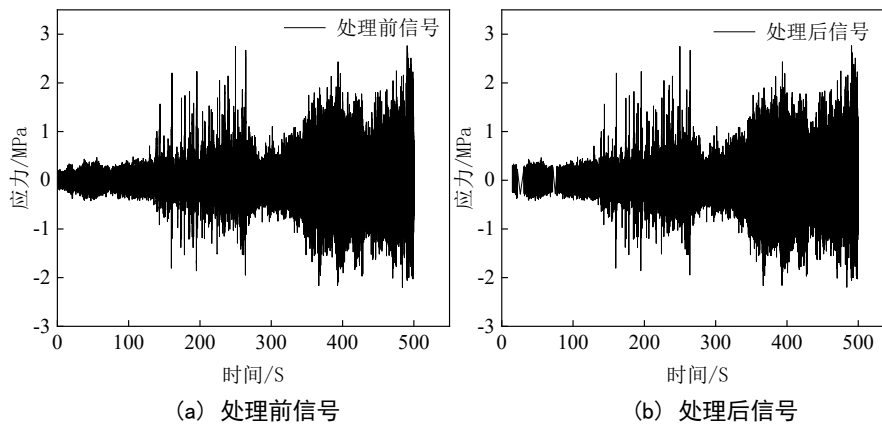


图 2 处理前后信号

Fig. 2 Signal before and after processing

2.2 最优阈值确定

利用经验平均超出量函数以及 Hill 图进行阈值的初定，根据式 3 分别得到峰谷值平均超出量函数图。其中对谷值进行绝对值处理，在获取谷值绝对值的外推结果之后，再把该结果转换为负数。在接下来的表述中，“谷值样本”即代表“谷值样本的绝对值”。如图 3 平均超出函数图所示，尾部均值变化波动较大，因此将阈值初定在波动较小，超阈值均值与阈值呈现线性变化的区域；根据 Hill 图，将阈值选择形状参数波动较为平稳的区域。综合考虑后将峰值最优阈值区间选择为 $[0.8, 1.5]$ ，谷值最优阈值区间为 $[0.7, 1.4]$ 。

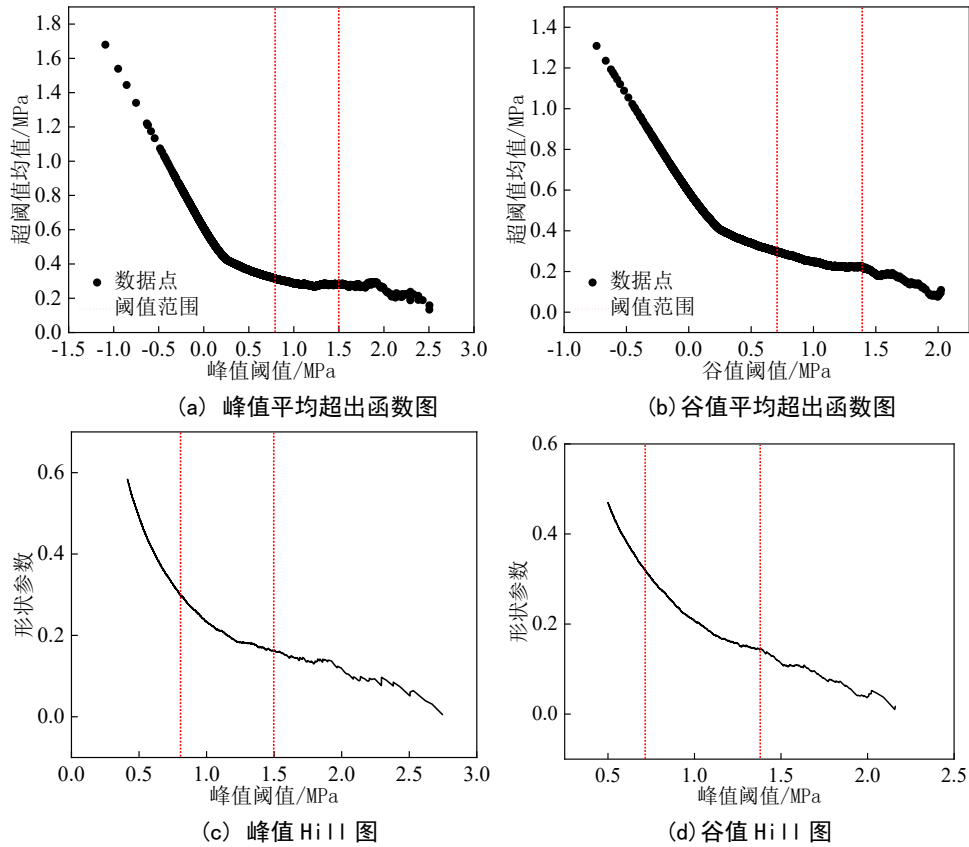
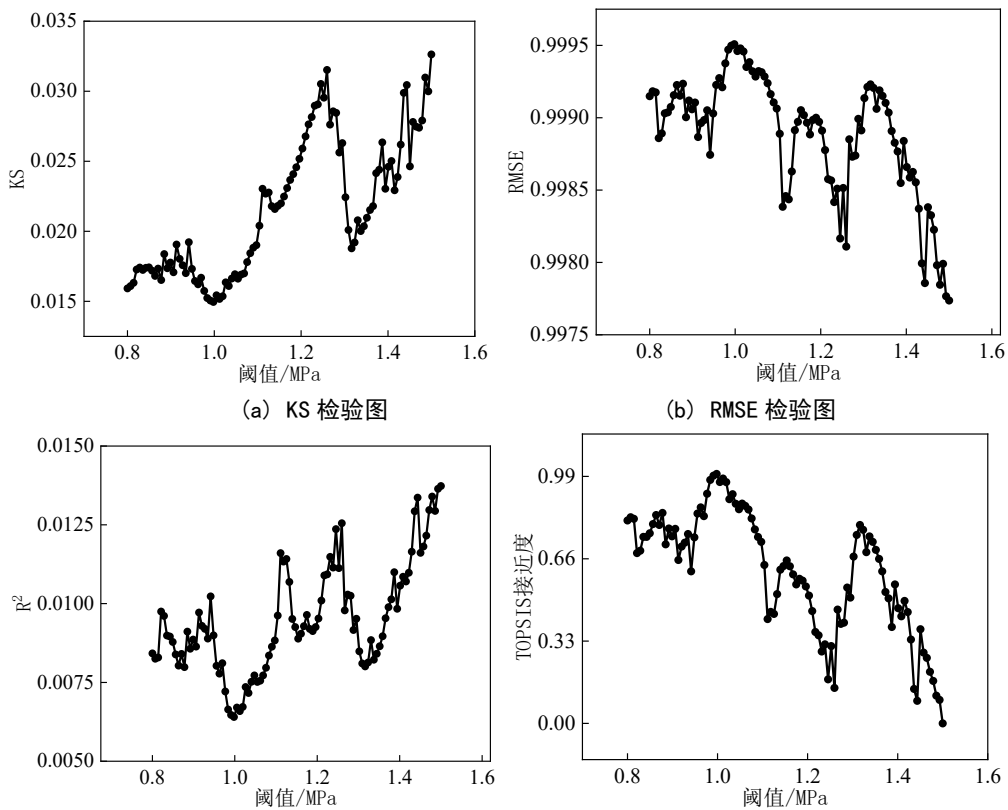


图 3 峰值和谷值阈值选择图

Fig. 3 Peak and valley threshold selection diagram

在选择的阈值范围内，按照等间隔选出 100 个候选阈值。针对这些候选阈值，运用极大似然估计法，对 POT 极值样本所对应的 GPD 形状参数及比例参数进行计算。之后采用 KS 检验、RMSE 检验和 R^2 检验这三种方法，对每个阈值对应的 GPD 模型进行拟合度的检验，从何获取各个候选阈值和相关评价指标之间的关联，结果如图 4-5 所示。



(c) R2 检验图

(d) 接近度图

图 4 峰值备选阈值与各评价指标之间的关系及接近度图

Fig. 4 The relationship and proximity graph between peak candidate threshold and various evaluation indicators

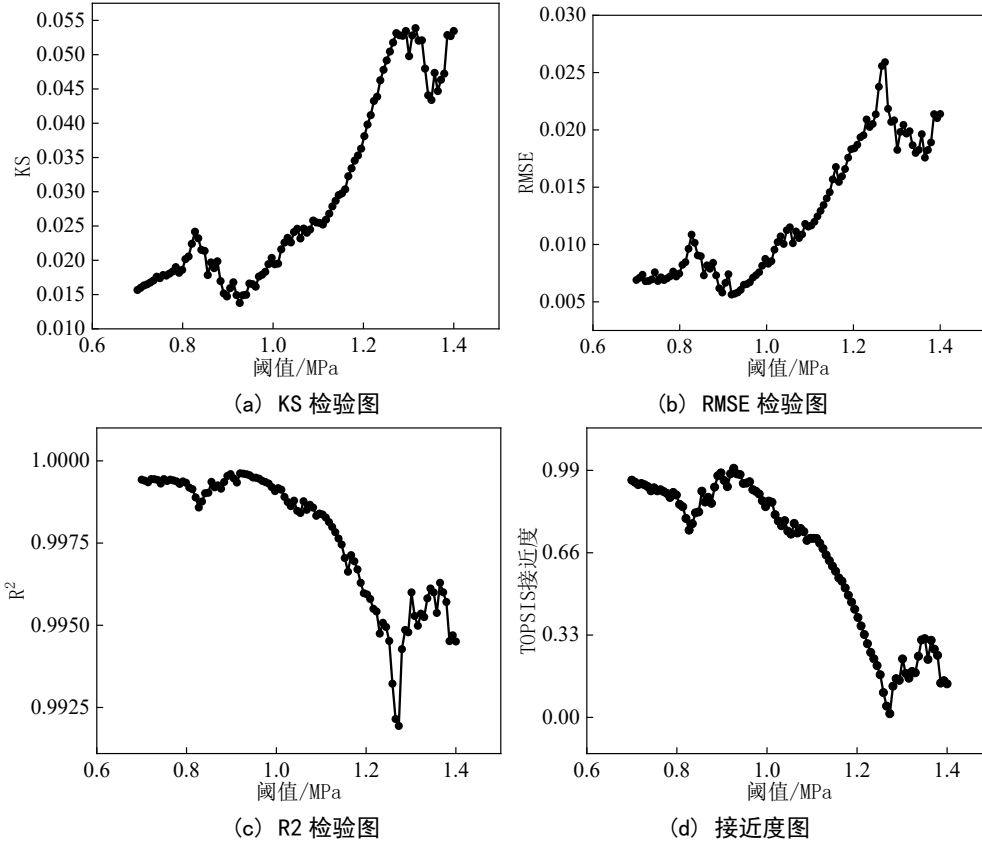


图 5 谷值备选阈值及各评价指标之间的关系

Fig. 5 The relationship between valley value candidate threshold and various evaluation indicators

从图 4-5 中可以看到，各个评价指标与阈值之间的关系并不是完全一致的，一个指标无法精确的选择最佳阈值，因此需通过熵权法来客观求得各评价指标的权重系数。权重的确定以指标数据的变异程度为基础，其中信息熵越小，说明指标数据的变异程度越大，提供的信息越丰富，对应的权重也会更高。最终得到的权重系数如表 1 所示，对于峰值和谷值超出量，KS 检验权重最高， R^2 检验权重最低。

表 1 权重系数

Tab. 1 Weighting factors

权重系数	KS	RMSE	R^2
峰值	0.3768	0.3416	0.2817
谷值	0.5242	0.2888	0.1870

将权重系数代入式中，得到正负理想解并计算相对接近度，峰谷值相对接近度如图 6 (d) 所示。从图中可以看到，峰值相对接近度在波动一段后迅速下降；而谷值的相对接近度平稳一段后再下降。从图中可以得到相对接近度最高的阈值也就是最优阈值，峰值为 0.998MPa，谷值为 0.9263MPa。

3 外推结果分析

依据已确定的最优峰值阈值 0.998MPa 与谷值阈值 0.9263MPa 的选取结果，从时域载荷信号里提取超出阈值的样本点，以此构建 POT 极值样本。并利用 ACF 和 PACF 图进行独立性检验并进行去串相关处理，最终结果如图所示，大多数滞后自相关系数及偏自相关系数落在 95% 置信区间内，说明簇最大值序列整体上可以近似独立。随后，运用极大似然参数估计法，计算该极值样本对应的 GPD 尺度参数和形状参数，结果如表 2。将得到的参数估计值代入式，便可得到 POT 极值载荷样本的 GPD 累计分布函数。

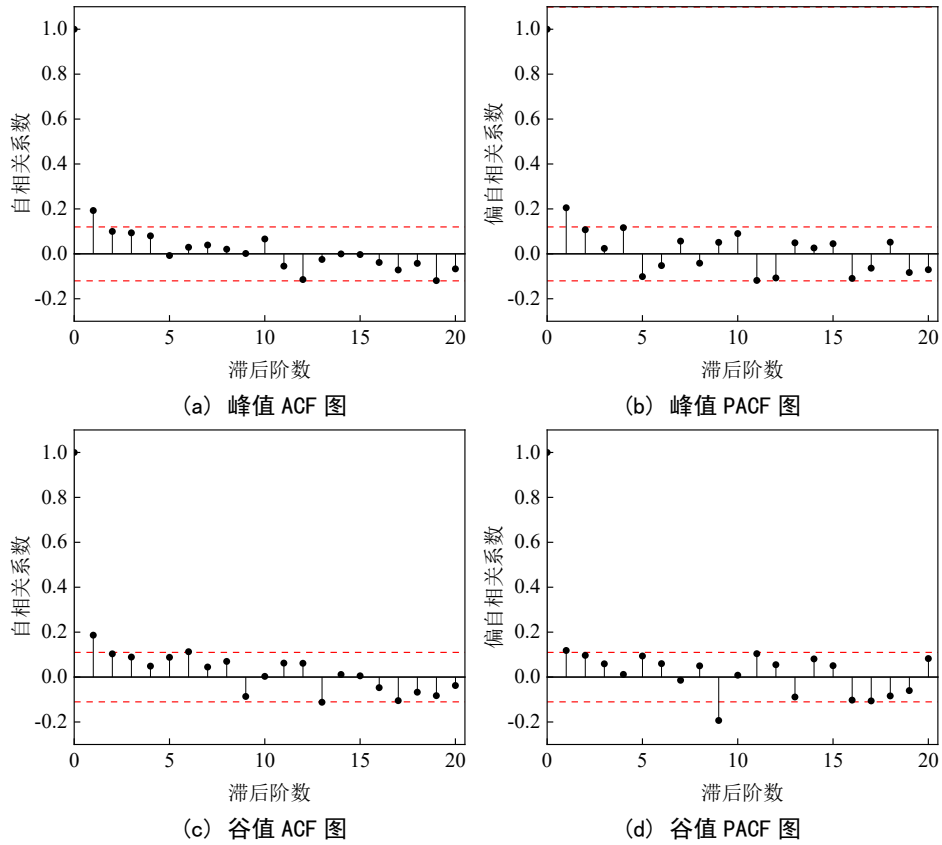


图 5 峰谷值独立性检验

Fig. 5 Peak valley independence test

表 2 GPD 拟合最优模型参数

Tab. 2 Parameters of the optimal model fitted by GPD

样本	阈值/MPa	形状参数	95%置信区间	尺度参数	95%置信区间
峰值	0.998	-0.0377	[-0.0903, 0.0149]	0.2981	[0.2765, 0.3213]
谷值	0.9263	-0.1300	[-0.1781, -0.0820]	0.2883	[0.2690, 0.3089]

根据得到的 GPD 模型参数，绘制出累积分布函数图，并利用 P-P 图及 Q-Q 图进行拟合度的判断。从图 7-9 中可以看到，样本与 GPD 拟合曲线呈现出较高的重叠度，说明整体拟合效果好。从 P-P 图中看到，峰值谷值两者重合度都较高，说明样本整体拟合优度较好。从 Q-Q 图中看出，谷值中部拟合稍微偏离理论分位数，尾部拟合接近，且整体符合分布；而峰值整体拟合的较好。

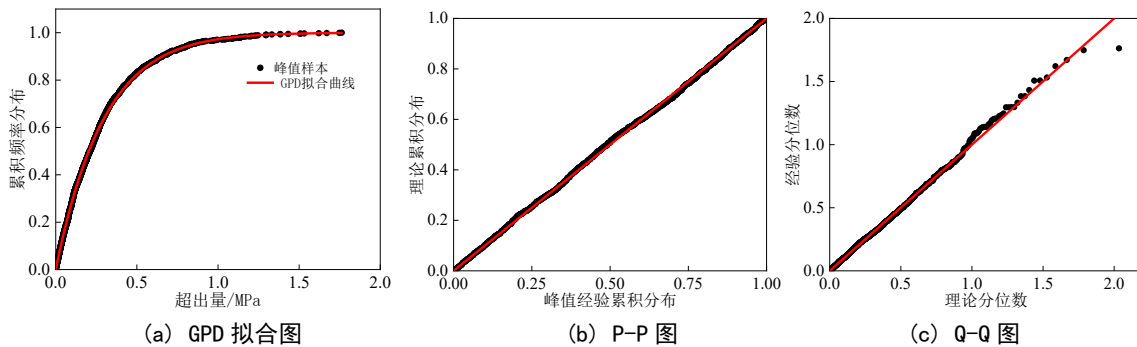


图 7 峰值拟合结果

Fig. 7 Peak fitting results

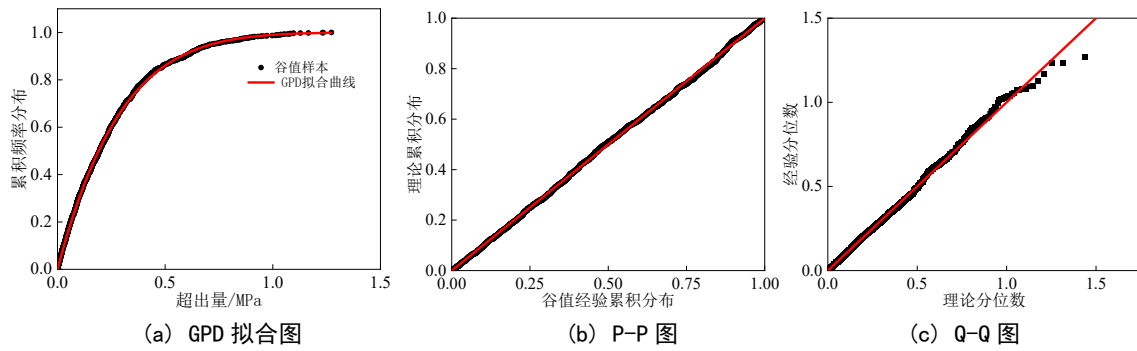


图 7 谷值拟合结果

Fig. 7 Valley fitting results

首先，要依据经 GPD 拟合得到的超出量分布对应的概率密度函数，生成数量与样本数匹配的随机载荷序列。紧接着，将该载荷序列在原始时间点上替换掉原有的超出值，由此获得外推后的时域信号。图 10 为经过时域外推 5 倍和 10 倍得到的结果，可以看到由于时域外推只对超出阈值的样本进行了重构，因此极大的保留了原始载荷在上下阈值之间的变化趋势。

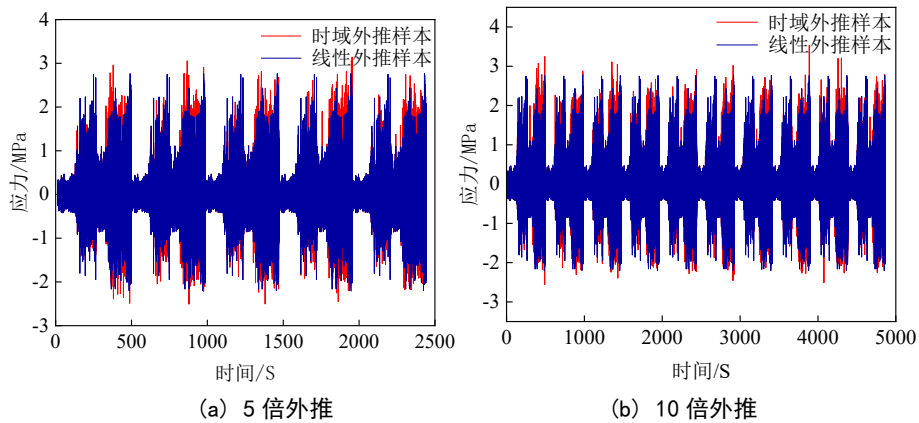


图 10 时域外推多倍的动应力时域信号

Fig. 10 Dynamic stress time-domain signal extrapolated multiple times in time domain

在对经过外推处理的动应力时域信号开展雨流循环计数后，得到线性外推、时域外推及雨流外推三种方式下的幅值 - 频次对比结果，具体如图 11 所示。这之中，线性外推仅能实现频次的拓展，却不能对幅值进行拓展；而时域推方法的结果，不仅与实际样本曲线具备较高的拟合度，还顺利实现了幅值的外推。把此推结果与雨流矩阵外推结果对比后可知，两者具有较高相似性，该现象进而验证了此时域外推方法的正确性。说明其能够充分还原结构在长时间载荷作用下的受力状态。并且时域外推结果与雨流外推相比，时域外推结果精度更高，最大幅值更接近于实际情况。

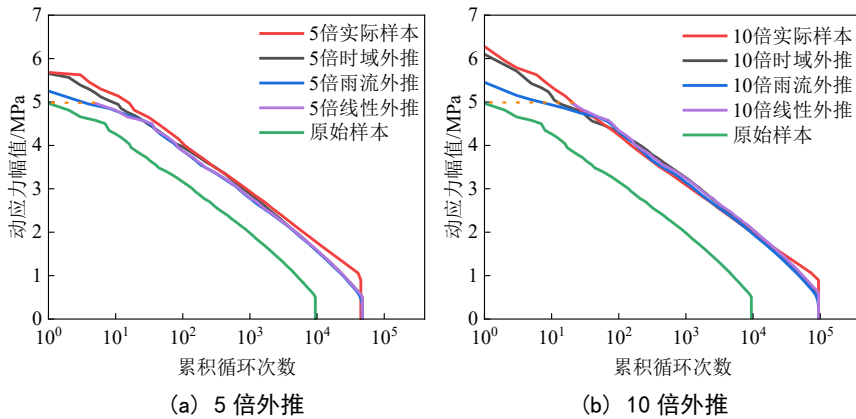


图 11 不同外推方法累积频次对比

Fig. 11 Comparison of cumulative frequency of different extrapolation methods

分别对 5 倍、10 倍外推处理后的动应力时域信号开展疲劳寿命分析，再将得到的结果与实际获取

的动应力时域信号的疲劳寿命分析结果进行比较。根据 BS7608 标准，利用式 22 计算疲劳损伤^[15]。

$$\begin{cases} D_{BS7608} = \frac{n_i}{5 \times 10^7} \left(\frac{\sigma_i}{S_{ov}} \right)^{m_{BS7608}}, & \sigma_i \geq S_{ov} \\ D_{BS7608} = \frac{n_i}{5 \times 10^7} \left(\frac{\sigma_i}{S_{ov}} \right)^{m_{BS7608}+2}, & \sigma_i < S_{ov} \end{cases} \quad (18)$$

在方程中， D_{BS7608} 是基于 BS7608 的疲劳损伤， m_{BS7608} 是 BS7608 中 S-N 曲线的斜率， S_{ov} 是 BS7608 中 S-N 曲线的转折点。

对于车体这类焊接结构，参考 BS7608 标准将其考虑为 F2 级。因此其中 m 为 3， S_{ov} 为 21MPa。对于 5 倍外推，线性外推损伤为 4.07E-9，时域外推损伤为 4.44E-9，雨流外推损伤为 3.87E-9，实际损伤为 5.22E-9。对于 10 倍外推，线性外推损伤为 8.14E-9，时域外推损伤为 8.9E-9，雨流外推损伤为 7.9E-9，实际损伤为 9.6E-9。其中时域外推得到的损伤均大于线性外推与雨流外推，并且更加接近实际损伤。由此可见，通过线性外推得到的疲劳寿命计算结果具有一定风险，而依托时域外推得出的疲劳寿命计算结果则更趋向于安全。

4 结论

(1) 提出基于熵权-Topsis 法对最优阈值的确定方法，更加客观的进行阈值选取，一定程度上降低了传统方法选取的主观性，实现数据的自动阈值选取，更好的适应复杂工程数据，保证选择阈值的稳健性和科学性，以提高载荷谱外推的可靠性和准确性。

(2) 确定最优阈值后进行 GPD 拟合，利用 CDF、P-P 图和 Q-Q 图验证其拟合的功效，结果表明峰谷值 CDF 图高度拟合；P-P 图中理论分布与样本分布一致；Q-Q 图中数据点沿拟合直线沿着分布均匀，尾偏差较小，谷值偏差更小。

(3) 时域外推与雨流外推和线性外推 10 倍相比，从累积循环次数图中可以看到，时域外推不仅与实际样本曲线十分吻合，还有效扩展了极值载荷；并且利用 BS7608 标准计算损伤后得到的损伤相较于线性以及雨流外推更大，更接近于实际损伤，由此可见，依托时域外推法构建的疲劳寿命评估方法更趋向于安全。

参考文献

- [1] GUO F, WU S C, LIU J X, et al. Fatigue life assessment of bogie frames in high-speed railway vehicles considering gear meshing[J]. International Journal of Fatigue, 2020, 132: 105353.
- [2] HU Y, WU S, WITHERS P J, et al. Corrosion fatigue lifetime assessment of high-speed railway axle EA4T steel with artificial scratch[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2021, 245: 107588.
- [3] CHE Y, WANG X, LV X, et al. Study on probability distribution of electrified railway traction loads based on kernel density estimator via diffusion[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 106(2): 383–391.
- [4] YANG X, ZHOU X, WAN B, et al. Load Spectra Extrapolation by Bandwidth - Optimized Kernel Density Estimation Based on DBSCAN Algorithm[J]. Journal of Vibration Engineering & Technologies, 2024, 12(2): 1445 - 1456.
- [5] 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.
- [6] YANG Z H, SONG Z H, LUO Z H, et al. Time - domain Load Extrapolation Method for Key Components of Tractors Based on EMD-POT Model[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(15): 252 - 262.
- [7] HE J L, ZHAO X Y, LI G F, et al. Time domain load extrapolation method for CNC machine tools based on GRA-POT model[J]. The International Journal of Advanced Man-ufacturing Technology, 2019, 103(9): 3799-3812.
- [8] ZHENG G F, LIAO Y L, CHEN B X, et al. Multi -axial load spectrum extrapolation method for fatigue durability of special vehicles based on extreme value theory[J]. International Journal of Fatigue, 2024, 178: 108014.
- [8] 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(04):762-771+834.
- WANG Q S, ZHOU J S, GONG D, et al. Fatigue Life Assessment Method of Bogie F-rame Based on Dynamic Stress Time-

domain Extrapolation[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2021, 41(04): 762-771+834.

- [9] 郑国峰, 陈柏先, 隗寒冰, 等. 极值服从广义 Pareto 分布的扭转载荷外推方法研究[J]. 重庆理工大学学报, 2024, 38(02):198-207.
ZHENG G F, CHEN B X, KUI H B, et al. Research on Torsional Load Extrapolation Method with Extreme Values Obeying Generalized Pareto Distribution[J]. Journal of Chongqing University of Technology, 2024, 38(02): 198 - 207.
- [10] 杨子涵, 宋正河, 尹宜勇, 等. 基于 POT 模型的大功率拖拉机传动轴载荷时域外推方法[J]. 农业工程学报, 2019, 35(15):40-47.
YANG Z H, SONG Z H, YIN Y Y, et al. Time-domain Load Extrapolation Method for Drive Shaft of High - power Tractor Based on POT Model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(15): 40 - 47.
- [11] 彭良峰. 基于多准则决策的汽车耐久性载荷外推与用户—试验场关联[D]. 重庆: 重庆大学, 2023:21-30.
PENG L F. Vehicle Durability Load Extrapolation and User-Test Field Association Based on Multi-Criteria Decision-Making[D]. Chongqing: Chongqing University, 2023: 21-30.
- [12] YANG Y L, PENG L F, LIN W X, et al. Improved time-domain hybrid extrapolation method for vehicle durability load spectrum based on load component decomposition[J]. Measurement, 2025, 245: 116660.
- [13] 陈元坤, 毛丹, 李寿科, 等. 基于 POT 法确定风压系数极值的自动阈值选取与参数估计[J]. 振动与冲击, 2023, 42(16):138-146.
CHEN Y K, MAO D, LI S K, et al. Automatic Threshold Selection and Parameter Estimation of Wind Pressure Coefficient Extreme Values Based on POT Method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(16): 138-146.
- [14] 郭杰, 杨荣山, 谭斌. 基于 GPD 理论和百分位数阈值法的轮轨力极值估计与动力系数研究[J]. 铁道学报, 2024, 46(03):11-20.
GUO J, YANG R S, TAN B. Research on Extreme Value Estimation of Wheel-Rail Force and Dynamic Coefficient Based on GPD Theory and Percentile Threshold Method[J]. Journal of the China Railway Society, 2024, 46(03): 11 - 20.
- [15] CHEN D Y, XIAO Q, MOU M H, 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.



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