

· 港口 ·



## 高桩码头光纤应变温-力分离研究\*

李森林, 孙克纬, 冯龙海, 吴 焯, 刘雨青

(南京水利科学研究院, 江苏南京 210029)

**摘要:** 针对高桩码头桩身光纤应变信号易受温度与机械扰动耦合干扰、进而导致结构状态识别精度下降的问题, 开展光纤温-力自动分离研究。采用完整集合经验模态分解 (complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise, CEEMDAN) 与  $K$ -means 聚类相结合的方法, 构建融合谱峭度、模态能量与样本熵的多维特征向量, 实现内禀模态函数 (intrinsic mode function, IMF) 分量的自动分类与重构。选取宁波舟山港典型高桩码头桩基实测数据进行验证。结果表明, 分离得到的温度分量与实测温度高度相关 (皮尔逊相关系数  $PCC > 0.89$ ), 机械分量信噪比提升超过 12 dB, 相比 EEMD- $K$ -means 与 VMD- $K$ -means 模型, 均方根误差降低约 12%, 温度趋势提取精度提升 4%。该方法无需参考光纤或有限元模型, 能够在复杂海洋环境下稳定实现温-力分量分离与靠泊事件识别。研究结果揭示了高桩码头桩身温-力耦合的响应特征, 为港口结构健康监测与动态载荷识别提供了高效、可推广的信号处理途径。

**关键词:** 高桩码头; 光纤应变; 温-力分离; 信号解耦; CEEMDAN;  $K$ -means 聚类

中图分类号: U6156.1+13

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)05-0036-11

### Thermo-mechanical separation of optical fiber strain in pile-supported wharves

LI Senlin, SUN Kewei, FENG Longhai, WU Ye, LIU Yuqing

(Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** To address the reduced accuracy of structural condition identification caused by the coupled interference of temperature and mechanical loading in pile-supported wharves, an automatic thermo-mechanical separation approach is developed. The method combines complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise (CEEMDAN) and  $K$ -means clustering, and constructs a multi-feature vector integrating spectral kurtosis, modal energy, and sample entropy to automatically classify and reconstruct intrinsic mode functions (IMFs). Field data from a representative pile foundation at the Ningbo-Zhoushan Port are used for validation. The results indicate that the separated temperature component correlates highly with the measured temperature ( $PCC > 0.89$ ), and the mechanical component achieves a signal-to-noise ratio improvement of over 12 dB. Compared with the EEMD- $K$ -means and VMD- $K$ -means models, the proposed method reduces the root mean square error by approximately 12% and improves the accuracy of temperature-trend extraction by 4%. Without relying on reference fibers or finite element simulations, the method stably separates thermal and mechanical responses and accurately identifies berthing events under complex marine conditions. The findings clarify the thermo-mechanical coupling behavior of pile foundations and provide an efficient and scalable signal-processing technique for health monitoring of port structures.

**Keywords:** pile-supported wharf; optical fiber strain; thermo-mechanical separation; signal decoupling; CEEMDAN;  $K$ -means clustering

收稿日期: 2025-09-12 录用日期: 2025-11-03

\*基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFC3214902, 2024YFC3214903); 江苏省自然科学基金项目(BK20241743); 湖南省水利科技项目(XSKJ2024064-50, XSKJ2022068-07); 中央基本业务费项目(Y424013)

作者简介: 李森林(1972—), 男, 硕士, 正高级工程师, 研究方向为钢及钢筋混凝土结构防腐蚀。

随着港口大型化和岸线深水化进程的加快,高桩码头结构长期受潮汐冲刷、日照温差、靠泊冲击等多源复杂荷载作用,其桩-梁体系安全性高度依赖于精细化、长期稳定的监测技术。光纤布拉格光栅(fiber bragg grating,FBG)因具备抗电磁干扰、耐腐蚀、体积小和可埋入等优势,已成为港口及海洋工程结构健康监测的重要手段。Fujihashi等<sup>[1]</sup>将FBG应用于隧道变形监测;Glišić等<sup>[2]</sup>实现了老旧钢桥微小变形的实时识别;Min等<sup>[3]</sup>验证了FBG在盐雾与波浪等极端工况下的环境适应性;Gowshikan等<sup>[4]</sup>系统综述了分布式与点式光纤传感技术在结构监测中的发展趋势。

然而,FBG传感器基于波长调制原理,对应变和温度均具有天然敏感性,导致实测信号中常混叠机械应变与热胀应变成分,若无法有效分离,将误导对结构受力状态的判断。已有研究主要通过两类途径开展补偿:一是改进传感器硬件结构,如葛子阳等<sup>[5]</sup>针对FBG柔性传感器滑移效应建立应变误差模型,孙世林<sup>[6]</sup>利用布里渊散射双波长系统实现温度-应变解耦;二是采用信号处理方法进行后验分离,如许舵等<sup>[7]</sup>基于集合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition,EEMD)分解混合信号温力成分,武英杰<sup>[8]</sup>利用变分模态分解(variational mode decomposition,VMD)提取风电系统非平稳信号中的关键模态。但传统经验模态分解(empirical mode decomposition,EMD)类方法存在模态混叠与边界不稳定等问题。为此,Torres等<sup>[9]</sup>提出完整集合经验模态分解(complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise,CEEMDAN),显著提升了信号重构的完整性与成分独立性。国内学者郭晓菲等<sup>[10]</sup>、白丽丽等<sup>[11]</sup>已将该算法成功应用于地震信号与机械故障诊断,验证了其良好的分解与降噪能力。

尽管CEEMDAN在信号分解性能上具有优势,但所得内禀模态函数(intrinsic mode function,IMF)

仍需依赖人工经验判断其物理属性,主观性强、复现性差,限制了其在长期工程监测中的推广。尤其在高桩码头这类长期服役于潮汐波浪、日照温差与靠泊冲击等复杂边界环境下的海洋结构中,FBG光纤采集的应变信号具有显著非平稳性,传统人工判别方法难以稳定识别温度主导与力学扰动分量。为此,近年来部分研究引入无监督聚类算法进行IMF自动识别,如吴平雄<sup>[12]</sup>基于CEEMDAN-K-means模型提高了风电功率建模的重构精度,王磊等<sup>[13]</sup>结合VMD与SVMS(support vector machines,支持向量机)实现了轴承故障分量的自动识别,展示了信号模态聚类在复杂系统中的可行性。

针对上述问题,本文面向高桩码头FBG应变监测环境,提出一种基于CEEMDAN分解与K-means聚类的自适应温-力分量自动解耦方法。方法融合谱峭度、模态能量与样本熵3类特征,构建多维模态特征向量,实现IMF分量的自动聚类识别与重构,避免人工判断带来的主观偏差。以宁波舟山港典型高桩码头桩基实测数据为例进行验证,旨在为高桩码头及其他水工结构的光纤监测信号解析与动态响应识别提供参考。

## 1 研究方法

本文研究面向港口高桩码头桩基的光纤应变监测需求,基于改进的CEEMDAN分解算法与K-means聚类技术,构建了一套温-力分离流程。该流程依次包括信号预处理、CEEMDAN模态分解、IMF特征提取、K-means聚类识别、分量重构以及精度评估6个阶段,形成从原始信号到温度分量与机械分量的自动化解耦路径。技术路线见图1。图1同时给出了各阶段之间的依赖关系和数据流向,用于说明该方法在工程监测场景中的实际实现步骤。

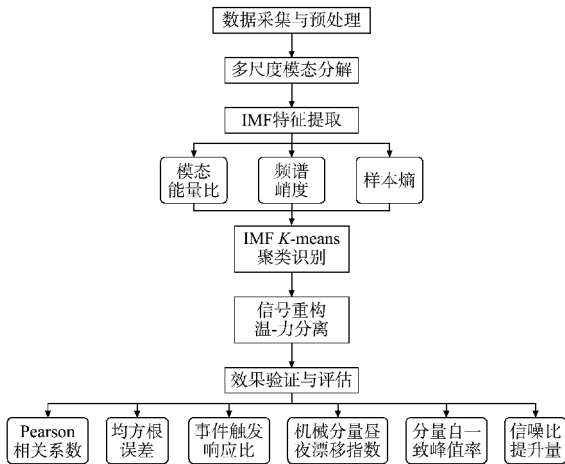


图1 技术路线

Fig.1 Technical roadmap

### 1.1 CEEMDAN 分解原理

CEEMDAN 是 EMD 家族中较为先进的一种变种,通过对信号多次加入高斯白噪声并平均,以减弱模态混叠效应。步骤为:对原始信号  $x(t)$  加入不同实现的高斯白噪声  $n_i(t)$ ,构造集合  $x_i(t) = x(t) + \epsilon n_i(t)$ ;对每个  $x_i(t)$  进行 EMD 分解,获得 IMF 集;对所有第 1 个 IMF 求平均,作为第一分量  $c_1(t)$ ;计算残差  $r_1(t) = x(t) - c_1(t)$ ,重复步骤分解残差,直到残差满足停止准则。

最终将信号表示为:

$$x(t) = \sum_{k=1}^K c_k(t) + r_K(t) \quad (1)$$

式中:  $c_k(t)$  为第  $k$  个 IMF 分量;  $r_K(t)$  为最终残差。

CEEMDAN 的优点包括更清晰的频带分离、更小的边界效应、良好的对非平稳信号的适应能力,适用于光纤实测应变序列中温-力混叠模式的分解。

### 1.2 IMF 特征提取与聚类指标设计

为实现分量的自动聚类识别,需对各 IMF 提取描述其频率、能量和非高斯性的特征指标。本文选取如下 3 类代表性特征。

1) 模态能量比(modal energy ratio, MEB)。反映各 IMF 对整体信号的能量贡献,低频 IMF 通常能量更集中。

$$B_{ME,i} = \frac{\sum_{t=1}^T c_i^2(t)}{\sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T c_k^2(t)} \quad (2)$$

式中:  $B_{ME,i}$  为模态能量比。

2) 频谱峭度(spectral kurtosis, SK)。频谱峭度高的 IMF 具有更突出的突变性,倾向于包含机械扰动或冲击成分。

$$K_{S,i} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (P_j - \bar{P})^4}{\left[ \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (P_j - \bar{P})^2 \right]^2} \quad (3)$$

式中:  $K_{S,i}$  为 SK;  $P_j$  为 IMF 的功率谱密度。

3) 样本熵(sample entropy, SampEn): 衡量 IMF 的序列复杂度,噪声成分往往具有较高的 SampEn 值。

$$E(m, r, N) = -\ln\left(\frac{A}{B}\right) \quad (4)$$

式中:  $E$  为 SampEn 值;  $A$  为在维数  $m+1$  下,距离小于  $r$  的模板对数;  $B$  为在维数  $m$  下,距离小于  $r$  的模板对数。

距离定义为最大距离(Chebyshev):

$$d(X_i, X_j) = \max_{0 \leq k < m} |x_{i+k} - x_{j+k}| \quad (5)$$

常用参数设定为  $m=2$ 、 $r=0.2\sigma$ ,其中  $\sigma$  为序列标准差。

样本熵值越大,表示序列越复杂,越可能包含高频扰动或噪声;反之,较小的  $E$  值通常对应平稳低频信号,适合作为温度成分的候选指标。

每个 IMF 被表示为一个三维特征向量:

$$f_i = [B_{ME,i}, K_{S,i}, E] \quad (6)$$

### 1.3 K-means 聚类及分量归类规则

基于上述特征,对所有 IMF 进行 K-means 聚类。本文经验设定聚类数  $K=3$ ,分别代表:低频平稳分量(主为温度应变);高频扰动分量(主为机械应变);中频过渡分量或背景噪声<sup>[14]</sup>。

为增强稳定性,采用 10 次重复随机初始化取最优聚类结果。最终将聚为一类的 IMF 分量合并重构,对应如下分量:

$$\begin{cases} \varepsilon_T(t) = \sum_{i \in C_{\text{temp}}} c_i(t) \\ \varepsilon_M(t) = \sum_{j \in C_{\text{mech}}} c_j(t) \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $\varepsilon_T$  为热应变;  $\varepsilon_M$  为机械应变; 分量  $C_{\text{temp}}$ 、 $C_{\text{mech}}$  分别为被判定为温度与机械分量的 IMF 子集。

#### 1.4 精度评价指标设计

为全面评估 CEEMDAN-K-means 温-力分离方法的性能, 本文从温度分量匹配性、机械分量响应精度、整体解耦能力 3 个维度设计如下数学指标体系。

##### 1.4.1 温度分量拟合指标

设光纤分离得到的温度分量为  $\varepsilon_T(t)$ , 实际温度参考数据为  $T_{\text{ref}}(t)$ , 则可构造以下指标。

1) Pearson 相关系数  $R_T$ 。

$$R_T = \frac{\sum_{t=1}^N (\varepsilon_T(t) - \bar{\varepsilon}_T)(T_{\text{ref}}(t) - \bar{T}_{\text{ref}})}{\sqrt{\sum_{t=1}^N (\varepsilon_T(t) - \bar{\varepsilon}_T)^2} \cdot \sqrt{\sum_{t=1}^N (T_{\text{ref}}(t) - \bar{T}_{\text{ref}})^2}} \quad (8)$$

2) 均方根误差 RMSE。

$$E_{\text{RMSE},T} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (\varepsilon_T(t) - \alpha T_{\text{ref}}(t))^2} \quad (9)$$

式中:  $E_{\text{RMSE},T}$  为均方根误差;  $\alpha$  为拟合得到的温度敏感系数。

##### 1.4.2 机械分量响应指标

1) 事件触发响应比 (event response ratio, ERR)。对靠泊事件、施工扰动等已知外部施加载荷时段  $t_e \in [t_s, t_e]$ , 计算事件前后机械应变峰值变化比:

$$R_{\text{ERR}} = \frac{\max_{t \in [t_s, t_e]} \varepsilon_M(t) - \min_{t \in [t_s, t_e]} \varepsilon_M(t)}{\sigma_{\varepsilon_M}^{\text{baseline}}} \quad (10)$$

式中:  $R_{\text{ERR}}$  为事件触发响应比;  $\sigma_{\varepsilon_M}^{\text{baseline}}$  为事件发生前 1 h (或某固定周期) 的应变标准差。该指标反映分离出的机械分量是否对真实扰动事件有显著响应。

2) 机械分量昼夜漂移指数 (diurnal drift index, DDI)。温度驱动的应变一般呈现昼夜周期性变化, 而机械扰动多为非周期或突变性质。利用这一特点定义:

$$I_{\text{DDI}} = \frac{\sum_{k=1}^{N_{\text{days}}} |\bar{\varepsilon}_M^{\text{day},k} - \bar{\varepsilon}_M^{\text{night},k}|}{N_{\text{days}} \bar{\sigma}_{\varepsilon_M}} \quad (11)$$

式中:  $I_{\text{DDI}}$  为机械分量昼夜漂移指数;  $\bar{\varepsilon}_M^{\text{night},k}$  为第  $k$  天白天与夜间时段的机械分量日均应变,  $\mu\varepsilon$ ;  $N_{\text{days}}$  为统计天数;  $\bar{\sigma}_{\varepsilon_M}$  为机械分量应变的标准差平均值,  $\mu\varepsilon$ 。该指数反映机械分量的昼夜变化程度, 值越小表示昼夜变化越弱, 表明该分量与温度变化的相关性较低, 更符合“非热源性”假设。

3) 分量自一致峰值率 (peak isolation index, PII)。分离后的机械分量若已成功抑制温度背景干扰, 其极值点应具有明显突变性。定义如下:

$$I_{\text{PII}} = \frac{C_{\text{peaks}}(\varepsilon_M(t), \theta)}{N} \quad (12)$$

式中:  $I_{\text{PII}}$  为分量自一致峰值率;  $C$  为统计超过阈值  $\theta = 2\sigma\varepsilon_M$  的瞬时峰值点数量;  $N$  为总样本点数。指数高表明机械分量呈现高频短时响应特征, 符合理想力扰动行为。

##### 1.4.3 分离解耦能力指标

信噪比提升量为:

$$\begin{cases} R_{\text{SNR},\text{orig}} = 10\lg\left(\frac{\text{Var}(x(t))}{\text{Var}(n)}\right), \\ R_{\text{SNR},\text{mech}} = 10\lg\left(\frac{\text{Var}(\varepsilon_M(t))}{\text{Var}(r)}\right) \end{cases} \quad (13)$$

$$\Delta R_{\text{SNR}} = R_{\text{SNR},\text{mech}} - R_{\text{SNR},\text{orig}} \quad (14)$$

式中:  $R_{\text{SNR}}$  为信噪比提升量,  $x(t)$  为原始光纤应变信号随时间的变化序列;  $\varepsilon_M(t)$  为分离得到的机械分量应变信随时间的变化序列;  $\text{Var}(\cdot)$  为信号方差算子;  $n$  为分解前的噪声成分;  $r$  为分离后残差信号;  $R_{\text{SNR},\text{orig}}$ 、 $R_{\text{SNR},\text{mech}}$  为分离前后信号的信噪比, dB;  $\Delta R_{\text{SNR}}$  为信噪比提升量, 表征去噪及信号增强效果。其中原始信号噪声由高频 IMF 估计, 残差信号为未被机械分量覆盖部分。

定义总信号能量为  $E_{\text{total}} = \sum_t x^2(t)$ , 机械分量能量为  $E_M = \sum_t \varepsilon_M^2(t)$ , 则能量占比指标为:

$$\eta_M = \frac{E_M}{E_{\text{total}}} \quad (15)$$

式中： $E_{total}$  为原始信号总能量； $E_M$  为机械分量能量； $\eta_M$  为机械分量能量占比指标。该指标反映机械分量在整体信号能量中的贡献率，值越高说明分离结果中机械扰动成分占比越大、物理意义更显著。

以上指标将用于不同阶段模型性能验证，并结合工程案例中的关键时段(如典型靠泊事件)进行时序可视化分析，从而验证本方法在复杂干扰环境下的适应性与解耦能力。

## 2 工程案例

### 2.1 工程概况

本文选取宁波舟山港股份有限公司北仑第二集装箱码头 1#、2#泊位段作为工程背景。该码头建于 2001 年，采用典型的高桩梁板式结构，总长度 666.6 m，结构上部由边梁、轨道梁、横梁和预制面板组成，下部桩基由  $\phi 1\ 200\ \text{mm}$  钢管桩与 600 mm×600 mm 方形混凝土桩共同承载。

结构长期处于复杂的海洋环境中，受潮汐涨落、船舶靠泊、波浪冲击、风荷载及日照辐射等边界条件综合作用，桩身易出现温-力耦合的非线性应变演化现象，特别是靠泊冲击下的应力扰动可能被昼夜温差掩盖。监测数据稳定性与分辨率要求较高，传统单点传感器难以满足该类结构多点、长期、高灵敏度的响应识别需求。

为此，工程方在部分典型桩位布设了分布式光纤传感系统，对桩身应变状态进行长期连续监测，以期深入分析桩基温-力耦合机理与靠泊响应特征。

### 2.2 监测布设与采集方式

为掌握典型桩基在多源荷载作用下的应变响应规律，项目在北仑第二集装箱码头 1#、2#泊位段布设了 FBG 传感系统，用于连续监测桩身关键位置的轴向应变变化。FBG 传感器具有精度高、响应快、抗电磁干扰强等特点，适用于海洋复杂环境下的长期结构监测。传感器采用封装型 FBG 芯体，通过胶粘结合不锈钢安装基座的方式与桩体紧密固定，并经预埋保护通道引出至岸边数据

采集箱。光纤布设位置及监测方案：光纤 1 位于靠海侧，光纤 2 位于船舶停靠区，光纤 3 位于受弯区，光纤 4 位于靠陆侧，测量方向为桩身轴向，采样频率为每 3 分钟 1 次，监测时段为 2024 年 10 月 19 日—2024 年 10 月 26 日。

### 2.3 光纤布设与环境稳定性分析

为保证光纤应变监测结果的代表性与稳定性，本研究在北仑第二集装箱码头 1#、2#泊位段典型桩位布设了 FBG 传感器，覆盖靠海侧、船舶停靠区、受弯区与靠陆侧 4 类工况区域。该码头长期处于潮汐、靠泊、波浪、风荷载与日照温差等多源边界条件作用下，桩身应变信号常表现出显著的温-力耦合特性，对监测系统的环境适应能力与数据稳定性提出较高要求。

为评价不同布设位置的环境稳定性，明确各测点光纤应变信号的原始响应特征，选取 2024 年 10 月 19 日—2024 年 10 月 26 日为典型监测时段，对 4 条光纤的均值、标准差、极值及典型扰动幅值进行统计，可反映不同布设位置的环境响应差异。结果汇总见表 1。统计结果表明：靠海侧(光纤 1)以压应为主，波动幅值与标准差均最大；船舶停靠区(光纤 2)受靠泊推靠与温度共同影响，呈拉应主导且突变性较强；受弯区(光纤 3)应变水平最低、波动最小(标准差  $2.15\ \mu\epsilon$ )，可作为温控背景的基线测点；靠陆侧(光纤 4)总体以拉应为主，能感知结构整体变形的远场响应。桩身应变的时序分布特征见图 2，上述空间规律与现场工况相符，验证了布设方案对不同受力区的覆盖合理性与环境适应性。

表 1 FBG 光纤原始应变数据主要统计指标

Tab. 1 Main statistical indicators of raw FBG optical

光纤 编号	安装 位置	fiber strain data				典型扰动 幅值
		均值	标准差	最大 拉应变	最大 压应变	
1	靠海侧	-68.90	34.43	16.60	-133.30	77.36
2	船舶停靠区	9.10	11.44	54.12	-8.72	62.58
3	受弯区	1.26	2.15	16.85	-6.81	19.01
4	靠陆侧	24.04	20.74	63.33	-38.93	72.21

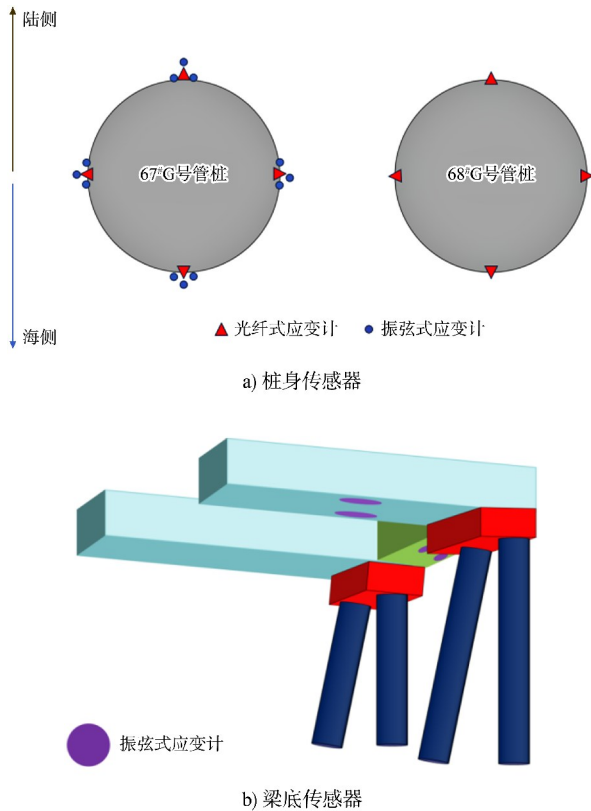


图2 传感器布置  
Fig. 2 Sensor layout

## 2.4 所测桩基典型受力与理论应力对比

从力学机理上解释不同位置的应变方向与幅值差异, 采用简化的桩身线弹性弯曲模型<sup>[15-17]</sup>。假设桩-梁体系在横向荷载  $H$  与上部结构弯矩  $M$  作用下, 桩身截面法向应力可表示为:

$$\sigma(y) = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{I}y \quad (16)$$

式中:  $N$  为轴力;  $A$  为截面面积;  $I$  为截面二次矩;  $y$  为截面上纤维点到中性轴的距离, 正方向取向陆侧; 轴向应变可按  $\varepsilon = \sigma/E$  计算。

上述公式表明, 桩身截面应力沿  $y$  方向呈线性分布: 靠海侧压应最大, 对侧为拉应, 中性轴附近应力接近轴力项(可能接近 0 或略有压/拉)。结合桩身受力特征, 可预期光纤 1 位于压应区, 光纤 2 位于拉应区(靠船侧), 光纤 3 接近中性轴, 光纤 4 位于远场拉应区。

4 条光纤的应变统计特征与桩身理论受力分布相吻合。靠海侧的光纤 1 处于受压主导区, 平均压应为  $-68.90 \mu\varepsilon$ , 波动幅值(标准差  $34.43 \mu\varepsilon$ )

与典型扰动幅值( $77.36 \mu\varepsilon$ )均最大, 说明该测点直接承受横向推力与波浪冲击。船舶停靠区的光纤 2 以拉应为主, 均值  $9.10 \mu\varepsilon$ , 典型扰动幅值  $62.58 \mu\varepsilon$ , 表现出靠泊作业引起的显著应变突变。受弯区的光纤 3 位于中性轴附近, 均值  $1.26 \mu\varepsilon$ , 标准差  $2.15 \mu\varepsilon$ , 为 4 点中最小, 整体以平稳温控响应为主。靠陆侧的光纤 4 处于远场拉应区, 均值  $24.04 \mu\varepsilon$ 、典型扰动幅值  $72.21 \mu\varepsilon$ , 反映结构整体变形的拉伸趋势。其理论应力分布及光纤测点对应关系见图 3。总体来看, 海侧压应显著、陆侧拉应突出, 中性轴附近应变接近 0, 实测结果与桩身  $N/A \pm My/I$  线性弯曲分布特征及压/拉区划趋势一致, 表明监测数据与桩身力学响应具有良好的物理对应性。

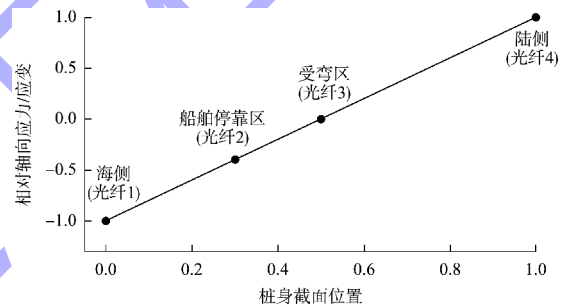
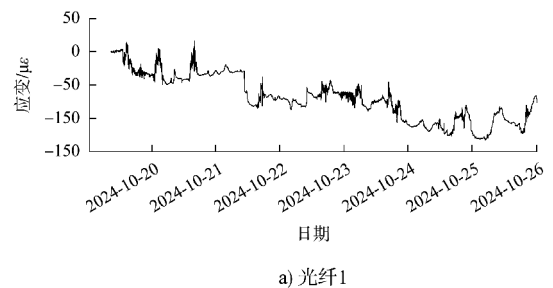


图3 外力作用下典型桩身应力分布与测点位置关系  
Fig. 3 Typical stress distribution of pile section and sensor positions under external loading

## 3 结果与讨论

### 3.1 监测数据基本特征分析

为对比不同测点的动态响应特征, 对光纤 1~4 的时序应变曲线进行整理与分析, 结果见图 4。从整体趋势看, 光纤 1 位于临海一侧, 长期以压应为主, 且波动幅度最大; 光纤 2 与光纤 4 多表现为拉应主导, 易受靠泊推靠与温度共同影响; 光纤 3 处于桩顶侧面, 整体应变水平最低, 响应相对平稳。



a) 光纤1

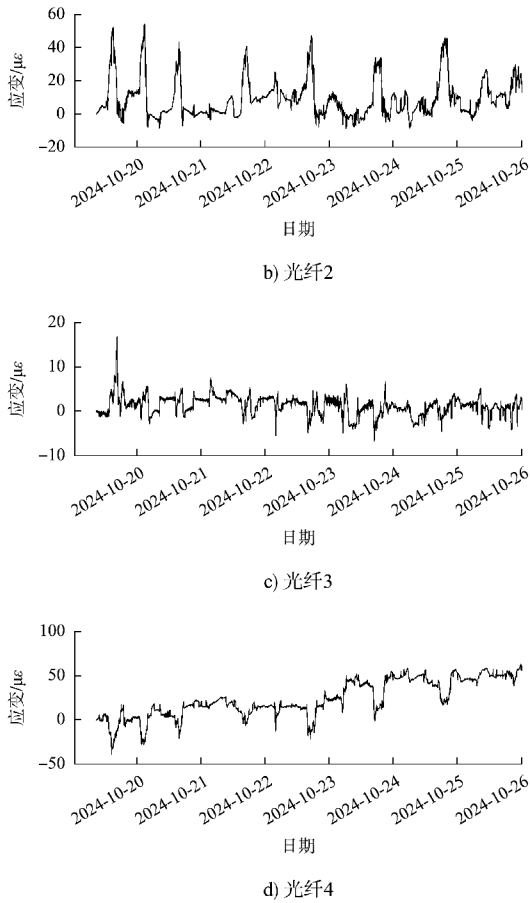


图4 FBG 光纤传感器净应变变化曲线  
Fig. 4 Net strain variation curves of FBG sensors

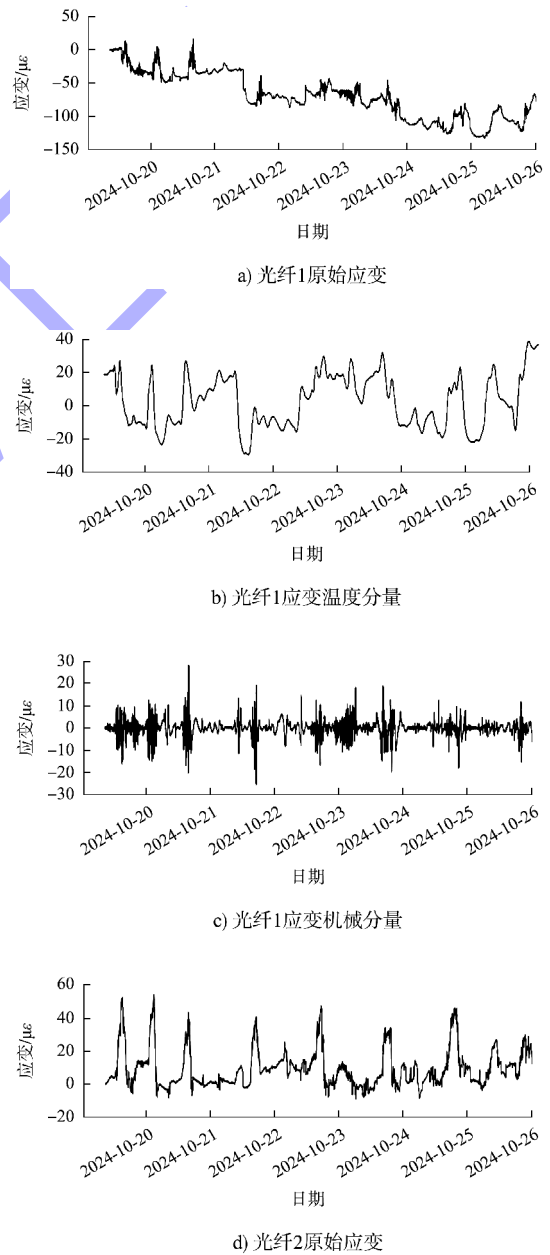
光纤 1、2 分别布设于桩顶靠海侧与靠船侧区域，净应变均值分别为  $-68.90$  和  $9.10 \mu\epsilon$ ，标准差分别达  $34.43$  和  $11.44 \mu\epsilon$ ，均显著高于其余测点。其中，光纤 1 最大压应变达  $-133.30 \mu\epsilon$ ，表明其处于受压主导区，受横向靠泊推力直接作用；光纤 2 最大拉应变为  $54.12 \mu\epsilon$ ，反映其更易受桩顶弯拉或横向回弹影响。

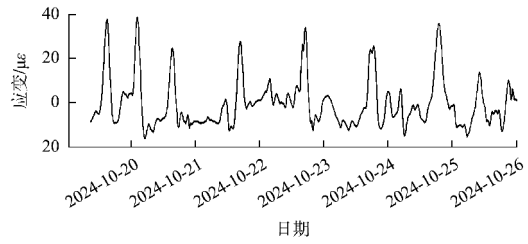
光纤 3 布设于桩顶受弯区，其应变均值接近 0 ( $1.26 \mu\epsilon$ )，标准差仅为  $2.15 \mu\epsilon$ ，扰动幅值亦相对较小 ( $19.01 \mu\epsilon$ )，整体响应以平稳热胀缩为主，具备基线稳定性。光纤 4 安装于靠陆一侧，呈现出相对独立的拉应变趋势 (均值  $24.04 \mu\epsilon$ )，典型事件扰动幅值达  $72.21 \mu\epsilon$ ，说明该区域虽为远场，但仍可能在结构柔性响应中参与整体变形。

总体来看，4 个测点已涵盖桩基典型的压应、拉应、弯拉与温胀响应类型，具备开展温-力分离分析的代表性与适应性。

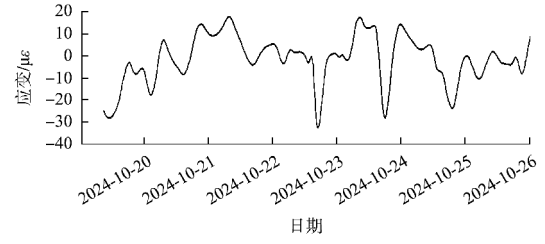
### 3.2 CEEMDAN 分解与分量识别结果分析

为分析典型监测时段内各测点的应变分量特征，选取光纤 1~4 的原始信号作为样本，采用 CEEMDAN 方法进行多尺度分解，并引入 K-means 聚类识别主导温度分量，实现温-力分量的有效解耦。分解结果见图 5，其中包括各测点的原始净应变信号、温度分量及残余力学分量的时间历程。

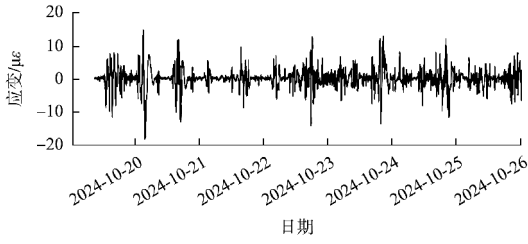




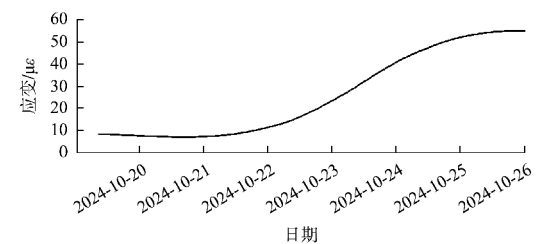
e) 光纤2应变温度分量



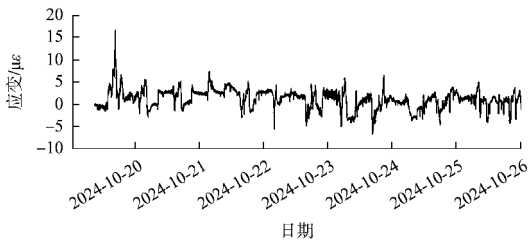
k) 光纤4应变温度分量



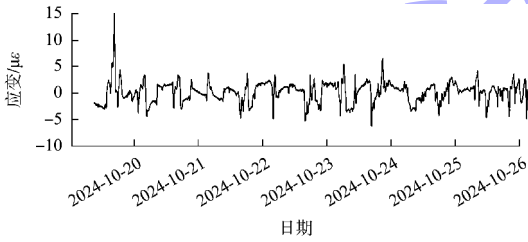
f) 光纤2应变机械分量



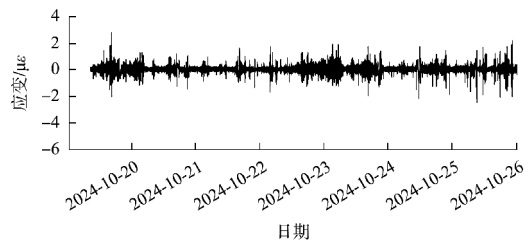
l) 光纤4应变机械分量



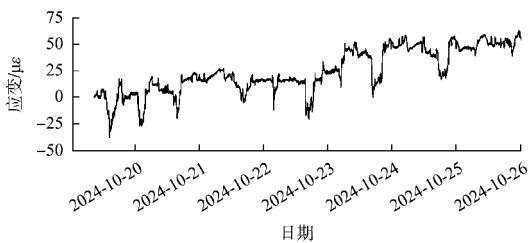
g) 光纤3原始应变



h) 光纤3应变温度分量



i) 光纤3应变机械分量



j) 光纤4原始应变

图 5 光纤信号分解结果

Fig. 5 Decomposition results of optical fiber signal

从整体趋势看, 光纤 1 位于临海一侧, 原始应变整体呈缓慢下降趋势, 期间伴随多处非线性跃变。经 CEEMDAN 分解后, 机械分量在部分时段出现中幅度扰动波动, 与实测靠泊事件对应良好, 说明该点在受温控影响的同时具备明显扰动响应特性。光纤 2 靠近船舶作业带, 原始应变呈“突升-骤降”特征, 具有显著突变性。分离后温度主分量整体平稳, 与同期环境温度变化节律一致; 机械分量则在多个时间段出现短周期脉冲波动, 准确刻画了船舶靠泊扰动, 反映出该算法在高强度扰动场景下的精细识别能力。

光纤 3 布设于桩身受弯区, 对称于光纤 2 位置。原始信号整体呈拉应趋势, 前期受温控主导, 后期叠加多次靠泊扰动导致波动增强。分离结果中, 温度分量变化稳定且周期性明显, 机械分量在中后期出现多次中高频扰动, 反映出受弯结构对靠泊荷载传递敏感, 存在潜在疲劳积累风险。光纤 4 位于靠陆侧, 受船舶冲击影响较小, 原始信号整体平缓但存在拉压交替。分解后温度分量呈明显的周期性缓变, 受日照温差驱动显著; 机

械分量虽幅值较小，仍表现出局部微突变特征，可能与结构缓变或地基渐进沉降相关，体现了 CEEMDAN-K-means 方法在复杂背景噪声下的分离能力。

总体来看，该方法在不同工况下均能有效识别与温度主导相关的平稳趋势分量，并分离出包含高频扰动特征的机械响应。分离结果具有良好的物理一致性和区域适应性，为应变响应机制分析与结构健康评估提供了可靠依据。

### 3.3 多模型对比模量分离识别结果分析

为进一步验证本文所提出的 CEEMDAN-K-means 模型在温-力分离中的优越性，选取当前常用的两种分解算法——EEMD 和 VMD，分别与 K-means 聚类方法进行组合，构建对比模型 EEMD-K-means 与 VMD-K-means。基于相同的实测应变信号对 3 种模型的分离效果进行评估，评估指标包括皮尔逊相关系数(PCC)、均方根误差(RMSE)、信噪比提升量( $\Delta$ SNR)、扰动识别效率( ERR)以及峰值孤立指数(PII)，以全面反映其在温度相关性、扰动识别精度及信号质量提升等方面的性能差异。各模型的分离结果见图 6。从中可见，3 种模型在各光纤测点的分离效果存在明显差异，CEEMDAN-K-means 模型在温度分量提取精度、机械扰动识别能力及信号增强方面均优于其他两种对比模型，尤其在高强度扰动条件下展现出更强的稳定性与适应性。

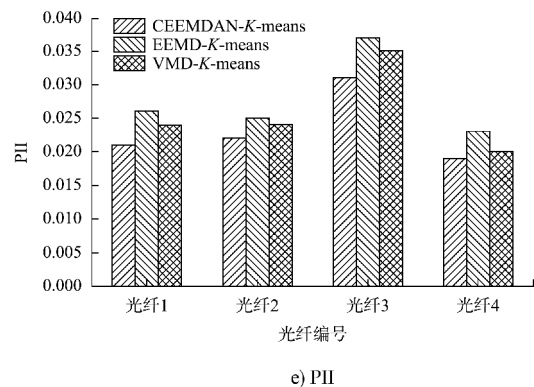
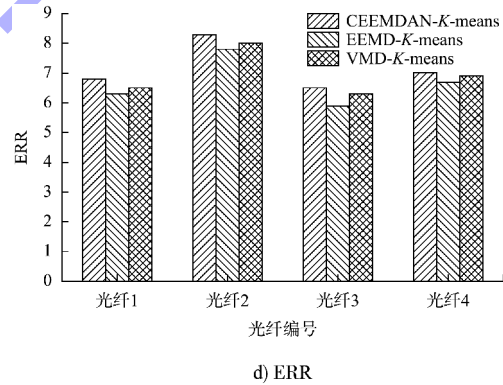
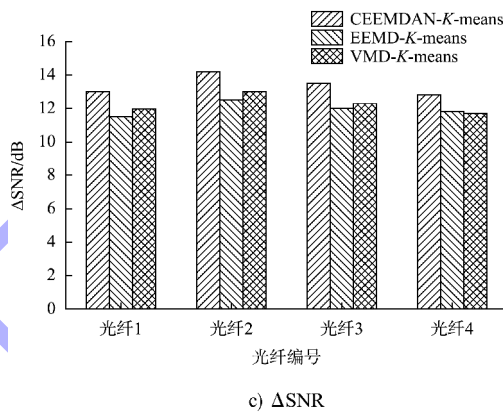
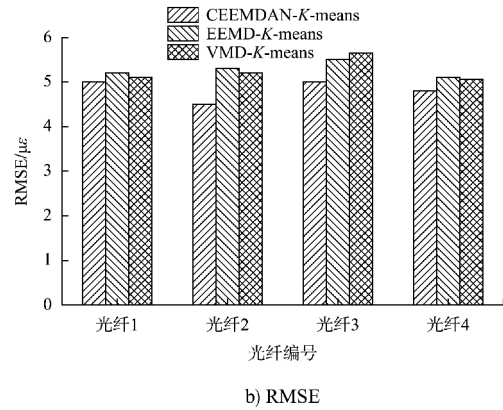
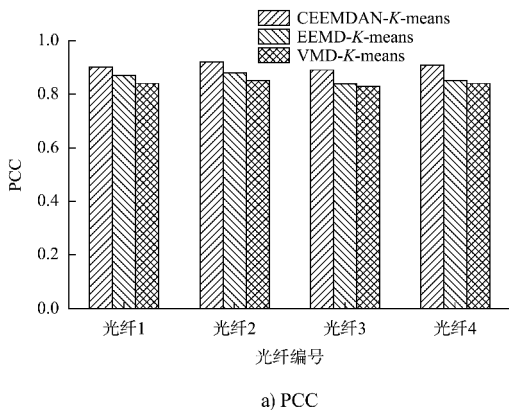


图 6 多模型对比结果

Fig. 6 Comparison results of multiple models

CEEMDAN-*K*-means 模型在 4 条光纤通道上的表现优于其他模型,分离性能稳定且精确。具体而言,该模型在皮尔逊相关系数(PCC)指标上均超过 0.89,最高达到 0.93,明显优于 EEMD-*K*-means 和 VMD-*K*-means,表明其温控趋势提取更为准确;在均方根误差(RMSE)指标上,CEEMDAN-*K*-means 实现了最低误差,平均值低于  $5.1 \mu\epsilon$ ,相比其他模型误差降低超过 12%,表明其在干扰滤除方面具有更高精度;在信噪比提升量( $\Delta$ SNR)、扰动识别效率(ER)与峰值孤立指数(PII)等评估扰动识别能力的指标中,CEEMDAN-*K*-means 也表现最佳,平均信噪比提升达 13.4 dB,扰动识别效率与峰值孤立指数也显著优于其他方法,证明该模型在突发事件检测中具有更强的响应灵敏度和峰值突出能力。

综合比较结果表明,CEEMDAN-*K*-means 联合模型在多项性能指标上均优于 EEMD-*K*-means 和 VMD-*K*-means,具备更高的温-力解耦精度及更强的实际工程应用价值。

总体而言,本文提出的方法在多项典型指标方面均优于 EEMD-*K*-means 和 VMD-*K*-means,展现了其在高桩码头等复杂服役环境下的优异适用性,具有更强的温-力耦合信号分离能力和工程应用潜力。

#### 4 结论

1) CEEMDAN 算法在温-力分离精度及扰动识别能力方面均优于传统 EEMD 与 VMD 系列算法。研究创新点主要包括:①提出三特征融合的 IMF 自动分类机制,实现温度主导与力学扰动分量的自适应识别;②构建无需参考光纤与有限元模型的温-力自动解耦流程,适配港口高桩码头复杂环境;③建立多指标协同评估体系,从温度拟合、扰动提取与信号增强 3 个维度定量评价分离效果。

2) 方法性能方面:CEEMDAN 算法有效抑制模态混叠与边界效应,*K*-means 聚类结合谱峭度、模态能量与样本熵 3 类特征,实现 IMF 分量的自动识别与重构,避免人工判别误差,显著提升信号分离的稳定性与适应性。

3) 温度分量识别方面:4 条光纤分离后的温

度主分量与实测温度的相关系数(PCC)均高于 0.89,最高达 0.93,均方根误差(RMSE)控制在  $5.5 \mu\epsilon$  以内,表明该方法具备较强的温控趋势提取与背景拟合能力。

4) 机械扰动提取方面:分离得到的机械分量能够有效捕捉典型靠泊事件下的突发应力响应,信噪比提升( $\Delta$ SNR)均值超过 12 dB,扰动识别效率(ER)与峰值孤立指数(PII)表现优异,在靠泊阶段能清晰提取扰动峰值,反映出良好的结构事件响应灵敏度。

5) 工程应用价值方面:该方法无需依赖多通道参考光纤或有限元模拟,仅依靠单通道 FBG 信号即可实现高可靠度的温-力分离与扰动识别,适用于港口桩基、水工结构等复杂服役环境的长期健康监测。

6) 模型对比与性能优势:与 EEMD-*K*-means 和 VMD-*K*-means 模型相比,CEEMDAN-*K*-means 模型在温度相关性(PCC)、去噪精度(RMSE)、信噪比提升( $\Delta$ SNR)及扰动识别能力(ER、PII)等指标上均表现最优,验证了其在温-力分离任务中的精度与稳定性。

7) 研究展望与不足:当前研究主要基于典型高桩码头单桩监测数据,后续可结合多桩联合监测与有限元模拟结果,进一步验证算法在群桩受力与复杂边界下的适用性,并探索其在其他水工与海洋结构中的推广应用。

#### 参考文献:

- [1] FUJIHASHI K, KURIHARA K, HIRAYAMA K, et al. Monitoring system based on optical fiber sensing technology for tunnel structures and other infrastructure [C]//Sensing Issues in Civil Structural Health Monitoring. Dordrecht: Springer, 2005: 185-195.
- [2] GLIŠIĆ B, POSENATO D, INAUDI D. Integrity monitoring of old steel bridge using fiber optic distributed sensors based on Brillouin scattering[C]//Nondestructive Characterization for Composite Materials, Aerospace Engineering, Civil Infrastructure, and Homeland Security 2007. San Diego: The International Society for Optical Engineering, 2007: 65311U.
- [3] MIN R, LIU Z Y, PEREIRA L, et al. Optical fiber

- sensing for marine environment and marine structural health monitoring: a review[J]. *Optics & laser technology*, 2021, 140: 107082.
- [4] GOWSHIKAN A, KARIYAWASAM K, XU X, et al. A review on the advances in distributed fibre optic sensing technology for structural health monitoring [C]//12th International Conference on Structural Engineering and Construction Management. Singapore: Springer, 2023: 145-159.
- [5] 葛子阳, 王彦, 秦楠, 等. 正向压力下 FBG 柔性传感器界面滑移的应变误差分析[J]. *光子学报*, 2020, 49(10): 37-45.
- GE Z Y, WANG Y, QIN N, et al. Analysis of strain error of FBG flexible sensor with relative slip under vertical pressure[J]. *Acta photonica sinica*, 2020, 49(10): 37-45.
- [6] 孙世林. 基于布里渊散射的温度应变同时传感技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.
- SUN S L. Study on the simultaneous temperature and strain sensing based on the Brillouin scattering [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012.
- [7] 许舵, 沈国勤, 钱祖平. 基于 EEMD 方法的混合信号分离识别[J]. *军事通信技术*, 2011, 32(2): 27-32.
- XU D, SHEN G Q, QIAN Z P. Research on separation for mixed signals based on ensemble empirical mode decomposition [J]. *Journal of military communications technology*, 2011, 32(2): 27-32.
- [8] 武英杰. 基于变分模态分解的风电机组传动系统故障诊断研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
- WU Y J. Research on fault diagnosis of wind turbine transmission system based on variational mode decomposition [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [9] TORRES M E, COLOMINAS M A, SCHLOTTHAUER G, et al. A complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise [C]//2011 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). New York: IEEE Press, 2011: 4144-4147.
- [10] 郭晓菲, 欧同庚, 马武刚, 等. 基于 CEEMDAN 和小波变换的地震信号随机噪声压制新方法[J]. *大地测量与地球动力学*, 2022, 42(11): 1202-1206, 1210.
- GUO X F, OU T G, MA W G, et al. A new random noise attenuation method of seismic signal based on CEEMDAN and wavelet transform [J]. *Journal of geodesy and geodynamics*, 2022, 42(11): 1202-1206, 1210.
- [11] 白丽丽, 韩振南, 任家骏. CEEMDAN-PE-TFPP 降噪法在齿轮故障诊断中的应用[J]. *机械设计与制造*, 2020(1): 80-83, 88.
- BAI L L, HAN Z N, REN J J. Application of CEEMDAN-PE-TFPP de-noising method in gear fault diagnosis [J]. *Machinery design & manufacture*, 2020(1): 80-83, 88.
- [12] 吴平雄. 基于深度学习的风电功率预测方法研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2023.
- WU P X. Research on wind-power prediction method based on deep learning [D]. Guiyang: Guizhou University, 2023.
- [13] 王磊, 刘国龙, 杨磊, 等. 基于 CEEMDAN-VMD 融合特征和 SO-SVM 的风机轴承故障诊断[J]. *微电机*, 2024, 57(2): 56-62, 72.
- WANG L, LIU G L, YANG L, et al. Fault diagnosis of fan bearing based on CEEMDAN-VMD fusion feature and SO-SVM [J]. *Micromotors*, 2024, 57(2): 56-62, 72.
- [14] BOUZENAD A E, EL MOUNTASSIR M, YAACOUBI S, et al. A semi-supervised based K-means algorithm for optimal guided waves structural health monitoring: a case study [J]. *Inventions*, 2019, 4(1): 17.
- [15] 钟维林, 于洋, 岳霖, 等. 港区桩基沉降应力影响系数的计算方法[J]. *水运工程*, 2025(10): 203-208.
- ZHONG W L, YU Y, YUE L, et al. Calculation method for stress influence coefficient of pile foundation settlement in port areas [J]. *Port & waterway engineering*, 2025(10): 203-208.
- [16] 解立波, 苏雷, 王建峰, 等. 波浪作用下高桩码头-海床系统动力响应特性研究[J]. *水运工程*, 2025(2): 27-35.
- XIE L B, SU L, WANG J F, et al. Dynamic response characteristics of pile-supported wharf-seabed system under wave action [J]. *Port & waterway engineering*, 2025(2): 27-35.
- [17] 程立星, 顾勇, 梁鑫, 等. 固化土在码头桩基冲刷防护应用的试验与数值模拟研究[J]. *水运工程*, 2025(2): 184-190, 210.
- CHENG L X, GU Y, LIANG X, et al. Experimental and numerical simulation research on application of solidified soil in scour protection of dock pile foundation [J]. *Port & waterway engineering*, 2025(2): 184-190, 210.