

DOI: 10.11779/CJGE20231183

基于现场试验的海上筒型基础风电结构动力特性研究

蔡正银, 范开放*, 朱 洵

(南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024)

摘 要: 海上风电结构在正常服役过程中长期承受风、浪等复杂环境荷载, 其结构动力特性是整机安全性评估的重要依据。基于江苏如东复合筒型基础海上风电结构的原位测试数据, 识别了不同环境激励下的结构模态参数, 探讨了海上风电结构动力特性随环境激励、时间等的演化规律。结果表明: 结构模态频率和阻尼比总体服从正态分布, 随时序表现出一定离散性, 径向频率集中在 0.308~0.315 Hz, 径向阻尼比集中在 2.75%~3.5%; 风荷载为风电结构振动特性的关键控制荷载, 模态频率与风速之间呈负相关, 模态径向阻尼比与风速之间呈正相关, 且风速大于 7 m/s 后, 其相关性随着风速增大均略有增加; 随时间推移, 结构频率出现一定程度的退化, 退化主要集中在测试期间的前 150 d, 反映出土体对筒型基础整体约束能力的下降。研究指出筒-土接触作用减弱是造成结构频率退化的主要原因, 并采用筒-土界面刚度弱化作用和海底潮流冲刷作用做出了相应的解释和讨论。

关键词: 筒型基础; 原位测试; 模态参数; 环境激励

中图分类号: TU196

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2025)03-0443-10

作者简介: 蔡正银(1965—), 男, 教授级高级工程师, 主要从事土的基本性质与土工测试、土的本构理论、土工离心模拟技术方面的研究工作。E-mail: zycail@nhri.cn。

Dynamic characteristics of offshore wind power with bucket foundation based on field tests

CAI Zhengyin, FAN Kaifang, ZHU Xun

(Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: The offshore wind power structures bear complex environmental loads induced by winds and waves over the life time. Dynamic characteristic is an important basis for the safety assessment of the offshore wind power structures. Based on the in-situ test data of offshore wind power on composite bucket foundation in Rudong county of Jiangsu Province, the structural modal parameters under different environmental excitations are identified, and the evolution laws of dynamic characteristics of offshore wind power with environmental excitations and time are analyzed. The results show that the modal frequency and damping ratio of the offshore wind power obey the normal distribution, and exhibit a certain degree of dispersion. The modal frequency and damping ratio in the radial direction are concentrated in the ranges of 0.308–0.315 Hz and 2.75%–3.5%, respectively. The wind load is the key control one for vibration characteristics of the wind power structures. There is a negative correlation between the modal frequency and the wind speed, and a positive correlation between the modal radial damping ratio and the wind speed. With the increase of the wind speed, the correlation coefficient increases slightly when the wind speed is greater than 7 m/s. The modal frequency shows a certain degree of degradation, and the degradation is mainly concentrated in the first 150 days of the test period, reflecting the decline in the constraint effects of the soil on the bucket foundation. The weakening of the foundation-soil contact effects is the main reason for the degradation of the modal frequency, and the corresponding explanation and discussion are made by the stiffness weakening effects of foundation-soil contact and the scouring effects.

Key words: bucket foundation; in-situ monitoring; modal parameter; environmental incentives

0 引 言

近年来,为实现“双碳”目标并随着“海洋强国”战略的实施,中国海上风电发展迅速。海上风电结构由于其特殊的服役条件,在风、浪等长期环境动荷载

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB2600700); 国家自然科学基金项目(52378358); 江苏省青年基金项目(BK20230125); 江苏省重点研发计划社会发展项目(BE2023673)

收稿日期: 2023-12-04

***通信作者** (E-mail: kaifangfan@163.com)

的联合下, 结构会产生显著的动力响应。过大的振动不仅对结构造成损伤, 甚至还会影响发电机组的正常运行, 开展海上风电结构动力特性的研究具有重要意义。

自振频率和阻尼比是反映结构动力特性的重要模态参数^[1-4]。国内外有关海上风电结构动力特性的研究集中在通过理论分析及数值建模方面, 由于对环境荷载及地质条件的简化, 研究成果存在一定局限性和失真现象等。随着海上测试手段完善, 以原位测试进行结构振动信号收集, 并通过一定数学算法进行模态参数识别研究的方式越来越受到广大学者们重视。Häckell 等^[1]针对德国 5 MW 海上三脚架支撑风电结构, 提出了通过数据驱动随机子空间方法和向量自回归方法获取结构模态和运行状态参数的分析模型。依据实测数据, Álamo 等^[2]研究了桩-土相互作用对海上单桩基础动态特性的影响, 结果表明表层土体特性对桩-土系统的固有频率和阻尼比变化起到主导作用。Bassett 等^[3]实测了 2.3 MW 风电结构开机与稳定运行状态下的结构加速度数据, 通过小波分解方法获得了结构振动响应特征。Weijtjens 等^[4]通过对比比利时单桩基础海上风电结构进行了 1 年的观测数据研究, 发现结构自振频率和阻尼比受风电结构运行条件的影响很大。

复合筒型基础作为一种新的海上风电基础结构型式, 因陆上建造成本低、海上安装快、抗倾覆能力强、适用多种地质及水深条件等特点, 具有较高的发展潜力, 目前已成功应用于江苏响水、大丰、如东以及广东阳江等地海上风场。蔡正银等^[5]、Zhu 等^[6]、练继建等^[7]和 Ding 等^[8]对中国复合筒型基础的沉贯特性及静力承载特性等开展了一系列的数值分析、室内试验及原位观测研究, 取得了丰富成果, 而关于复合筒型基础海上风电结构在环境激励作用下动力特性的研究还相对有限, 长期的原位观测数据较为匮乏, 结构模态参数与环境激励间的相关性缺乏深入分析。

为此, 本文以江苏如东复合筒型基础海上风电结构为研究对象, 采取原位测试获取结构长期振动数据, 利用集合经验模态分解-模拟退火算法及随机子空间算法分别进行测试数据的降噪与结构模态参数的识别, 重点研究了结构模态参数与环境激励的相关性, 并初步就结构频率的时变性进行了讨论。

1 如东地区海上风电结构原位测试

1.1 气象、水文和地质条件

江苏如东风电场场址处 65 m 高度的年平均风速

为 7.2 m/s, 年平均风功率密度为 356 W/m², 全年有效风时为 7941 h, 主风向为东南风, 东南东方向的风向频率最大, 如东气象站多年风向玫瑰图如图 1 (a) 所示。全年中波浪主要为东方向, 出现频率为 34.21%, 其次为东南东方向, 频率为 19.27%, 如图 1 (b) 所示。全年最大有效波高出现北东向, 为 3.43 m, 最大波高为 6.36 m。次强浪向为北东向和东南东向, 最大有效波高均在 3 m 左右。测试期间测点处的平均海水深 16.5 m, 潮位差约 4.2 m, 平均流速 0.87 m/s。

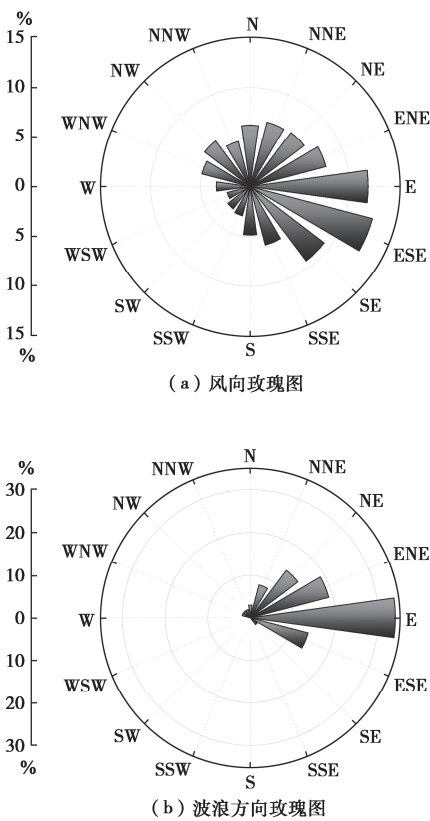


图 1 如东风向、波浪方向玫瑰图

Fig. 1 Rose map of perennial winds and waves in Rudong county

工程地质资料表明, 测试风电结构位置处的浅部土层自上而下依次为松散—稍密的粉砂夹粉土 (厚度约 3.0 m)、淤泥质粉质黏土 (厚度约 6.3 m) 及淤泥质粉质黏土夹粉土 (厚度约 2.4 m)。现场静力触探和室内试验成果等表明基础深度范围内具有“上硬下软”的地层结构特性, 土体基本参数见表 1。

表 1 试验场地土层基本参数

Table 1 Basic mechanical parameters of in-situ tests

土层名称	$\rho /(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	E_s / MPa	c / kPa	$\varphi / (^{\circ})$
粉砂夹粉土	2.01	11.38	3.6	33.7
淤泥质粉质黏土	1.80	3.09	14.4	11.6
淤泥质粉质黏土夹粉土	1.85	3.31	14.5	11.8

注: ρ 为天然密度, E_s 为压缩模量, c 为黏聚力, φ 为内摩擦角。

1.2 海上风电结构形式

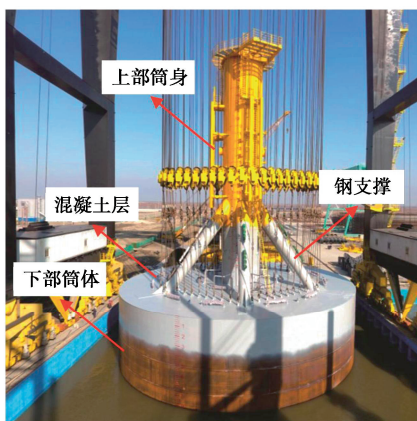
以如东某近海风电场的一台筒型基础风电结构进行振动加速度测试, 该风电结构离岸约 61.0 km, 额定功率为 4.0 MW, 额定转速为 11.2 r/min, 切入和切出风速分别为 3 m/s 和 25 m/s, 额定风速为 10.2 m/s。由图 2 可知, 该海上风电整机结构由上部结构(叶片、轮毂和机舱)、塔筒和基础 3 部分组成。叶片直径为 146.0 m, 轮毂高度为 95.0 m, 上部结构(叶片、轮毂和机舱)质量约为 255 t。塔筒为 3 段式安装, 塔筒之间通过法兰连接, 质量约为 270 t。



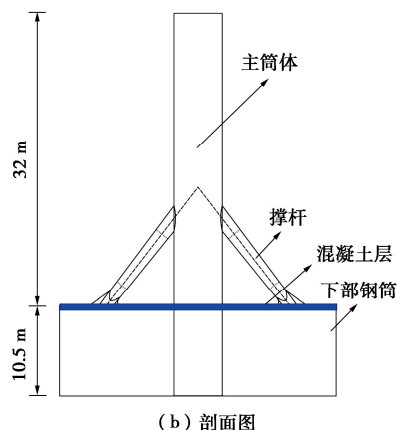
图2 海上风电结构及测点布置示意图

Fig. 2 Offshore wind turbine and layout of measuring points

如图 3 所示, 基础为复合筒型基础, 总高 42.5 m, 泥面下部筒体高度 10.0 m, 底面直径 32.0 m, 筒壁厚度为 0.02 m, 分仓板厚 0.025 m, 筒体顶部浇筑有 0.5 m 厚混凝土层; 泥面以上的结构为主筒体和撑杆, 主筒体直径为 5.5 m, 壁厚为 30~85 mm; 撑杆直径为 1.2~2.0 m, 壁厚为 25~35 mm。主筒体通过 6 根撑杆与筒体相连接, 基础总质量约为 2136t。



(a) 实物图



(b) 剖面图

图3 筒型基础实物及剖面图

Fig. 3 Field picture and section of bucket foundation

1.3 监测方案及参数

如图 2 所示, 在塔筒内壁共设置 5 个加速度测点, 距离筒型基础上部筒身分别为 15, 25, 50, 75, 90 m。原位观测采用 1C302 型电容式三向加速度传感器, 该传感器轴向灵敏度 175 mV/g, 最大量程 5g。采用 DH2002 在线监测分析系统进行动态采集, 数据采集频率为 50 Hz, 数据通过 4G 信号无线传输至远程接收终端。值得注意的是, 如图 2 所示, 考虑到机舱旋转造成的影响, 安装在塔筒上的传感器测得的响应会有变化, 因此, 有必要根据偏航数据进行坐标转换, 具体方法可参考文献[9], 不再赘述。

2 海上风电结构模态参数识别方法

2.1 基于 EEMD-SAA 的数据降噪

集合经验模态分解 (ensemble empirical mode decomposition, EEMD) 是在原始信号上叠加若干次白噪声进行辅助分析, 将多次分解后的固有模态函数平均值作为最终的 (Intrinsic Mode Function) IMF 分量, 以解决经验模态分解 (empirical mode decomposition, EMD) 存在的模态混叠缺陷现象^[10]。算法基本过程为:

步骤 1: 在原始信号基础上加入白噪声信号:

$$x_i(t) = x(t) + g_i(t) \quad (1)$$

式中: $x_i(t)$ 为加入噪声后的信号; $x(t)$ 为原始信号; $g_i(t)$ 为白噪声信号。

步骤 2: 对 $x_i(t)$ 信号进行 EMD 分解, 获取 IMF 分解分量:

$$x_i(t) = \sum_{j=1}^m a_{ij}(t) + r_i(t) \quad (2)$$

式中: $a_{ij}(t)$ 为第 i 次分解中的第 j 个 IMF 分解分量; m 为 IMF 分解分量个数, $r_i(t)$ 为残余项。

步骤 3: 对各次加入噪声分解得到的 IMF 分解分量求均值得到最终的 IMF 分量, 以抵消噪声对分解结

果的影响:

$$a_i(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_{ij}(t) \quad (3)$$

式中: N 为加入噪声的次数。

模拟退火算法 (simulated annealing algorithm, SAA) 是一种全局优化方法, 可以高效避免陷入局部最优解并最终趋于全局最优解, 具有较强的全局收敛性、适应性和鲁棒性。EEMD 算法的关键在于所加入白噪声信号的幅值和次数。过大或过小的白噪声幅值和次数都可能导致出现模式混叠现象^[10], 因此本文引入 SAA 算法实现 EEMD 算法中白噪声信号参数的优化选择, 实施步骤如下:

步骤 1: 构建极值点分布特性评价函数:

$$F(x) = \frac{\sum_{i=1}^{N_1} [P_{\max}(i+1) - P_{\max}(i)]}{N_1 - 1} + \frac{\sum_{j=1}^{N_2} [P_{\min}(j+1) - P_{\min}(j)]}{N_2 - 1} \quad (4)$$

式中: P_{\max} , P_{\min} 为极大值点和极小值点位置系数; i , j 是第 i 个极大值点和第 j 个极小值点; N_1 , N_2 是极大值和极小值数量。

步骤 2: 利用 SAA 算法寻优 EEMD 中白噪声幅值 e 的最优解。

步骤 3: 依据如下公式, 计算白噪声加入次数:

$$\ln e + \frac{\beta}{2} \ln N = 0 \quad (5)$$

式中: e 为白噪声幅值; β 为分解误差; N 为次数。

2.2 基于 SSI 算法的模态参数提取

自该风电结构运行日起, 提取风电结构工作状态下 210 d 内的 550 组测试文件。为更好地反映模态参数的时变性, 每个测试文件均截取相同时长的不间断数据信息并进行 EEMD-SAA 联合降噪处理, 以方便进行对比分析。需要注意的是, 数据的截取时长会对识别结果造成一定影响, 参照前人研究成果^[9], 数据时长选取为 20 min。

采用随机子空间算法 (stochastic subspace identification, SSI) 进行模态参数识别, 其具有识别精度高、抗干扰性强及鲁棒性强等特点^[11], 实施步骤如下:

步骤 1: 采用降噪数据构造 Hankel 矩阵, 即 $\mathbf{Y} = \mathbf{Y}_p / \mathbf{Y}_f$, 其中下标 p 表示“过去”, 下标 f 表示“未来”。

步骤 2: 构造 Toeplitz 矩阵形式的协方差矩阵 $\mathbf{T}_{1/i}$, 即 $\mathbf{T}_{1/i} = \mathbf{Y}_f \mathbf{Y}_p^T$ 。

步骤 3: 对矩阵 $\mathbf{T}_{1/i}$ 进行奇异值分解得到观测矩阵 \mathbf{O}_i 和控制矩阵 \mathbf{M}_i , 计算公式为

$$\mathbf{T}_{1/i} = \mathbf{U}_i \mathbf{S}_i \mathbf{V}_i = \mathbf{O}_i \mathbf{M}_i \quad (6)$$

式中: \mathbf{S}_i 为主奇异值对角阵; \mathbf{U}_i 和 \mathbf{V}_i 分别为左、右奇异矢量矩阵。

步骤 4: 计算系统状态矩阵 \mathbf{A} :

$$\mathbf{A} = \mathbf{O}_i^+ \mathbf{T}_{2/i+1} \mathbf{M}_i^+ = \mathbf{S}_i^{-1/2} \mathbf{U}_i^T \mathbf{T}_{2/i+1} \mathbf{V}_i \mathbf{S}_i^{-1/2} \quad (7)$$

式中: 上标+表示伪逆运算。

步骤 5: 对系统状态矩阵 \mathbf{A} 进行特征值分析以得出模态参数, 设时间间隔为 Δt , 特征值为 z_i , z_i 对应的第 i 个连续时间特征值为 λ_i , 则有 $\lambda_i = \ln z_i / \Delta t$ 。系统的固有频率和阻尼比则为

$$f_i = \frac{|\lambda_i|}{2\pi}, \quad \xi_i = -\frac{\text{Re}(\lambda_i)}{|\lambda_i|} \quad (8)$$

式中: f_i 为固有频率; ξ_i 为阻尼比; “Re” 表示取实部。

3 测试结果分析

3.1 风电结构振动加速度结果

图 4 为低 (3~5 m/s)、中 (9~11 m/s) 及高 (15~17 m/s) 3 种风速范围下的塔筒顶部顺风向的加速度典型测试结果时程图。塔筒顶部加速度振动幅度与风速等级密切相关, 但各时间点振动加速度峰值均未超过风机厂商限定值 $\pm 0.08g$, 风电结构处于安全状态。

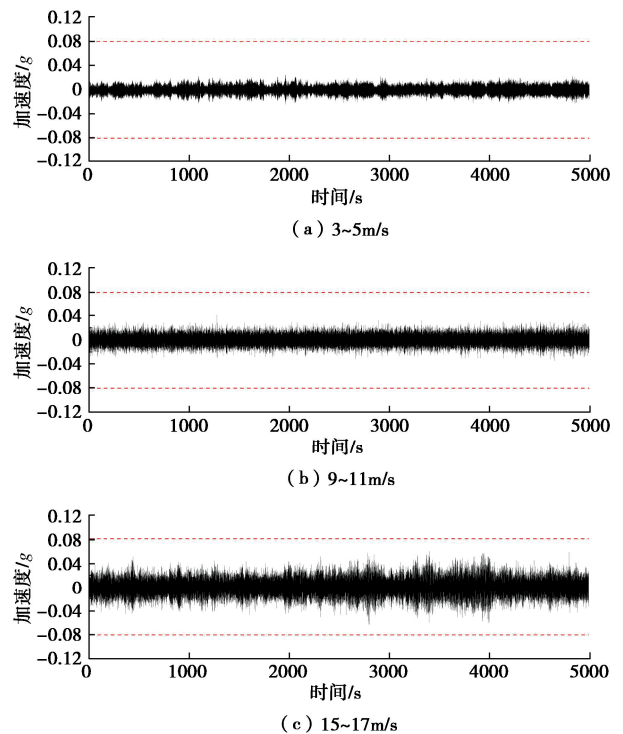


图 4 塔筒顶部#5 测点典型测试结果

Fig. 4 Partial test results of structural acceleration at measuring point No. 5

图 5 为各位置测点顺风向加速度峰值与对应平均风速关系图。加速度峰值均随平均风速的增大近似呈线性增长, 塔筒顶部与下部加速度差异值随着风速增大而明显增长。此外#4 和#5 测点监测结果的差异较小, 加速度峰值交叉出现, 说明存在塔筒中上部加速度大

于塔筒顶部加速度值的现象, 塔筒中上部段受机组发电机运行的显著影响。

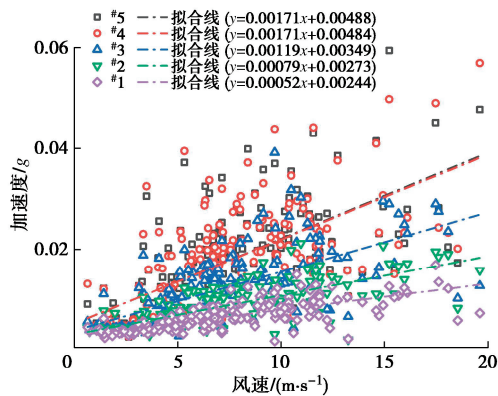


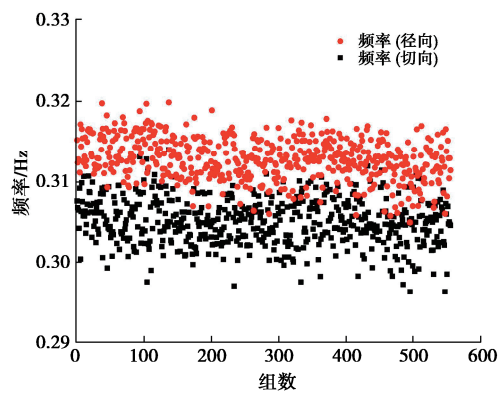
图5 不同测点加速度测试结果

Fig. 5 Results of acceleration at different measuring points

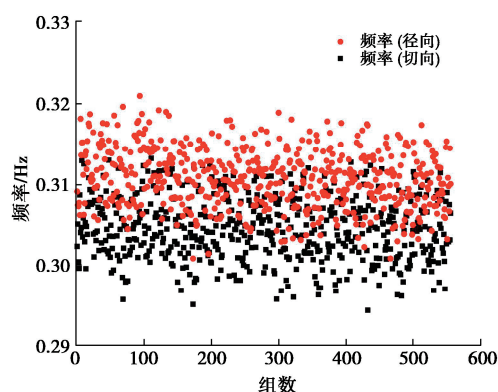
3.2 模态参数时序分布特性

为说明结构整体响应规律及对比分析, 图6给出了利用塔筒下部和顶部两点加速度时序数据, 识别得到的机舱径向及切向两个方向的基本模态频率和阻尼比。由图中的数据时序分布可以看出, 不同测点时序数据识别得到的结果均表现出一定离散性和随机性。

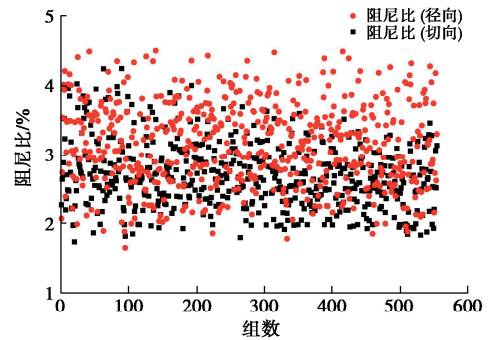
模态频率方面, 在机舱切向方向波动范围为0.294~0.320 Hz, 在机舱径向方向波动范围为0.296~0.321 Hz; 阻尼比方面, 结构在机舱切向方向波动范围为1.65%~4.50%, 在机舱径向方向波动范围为1.65~4.72%。



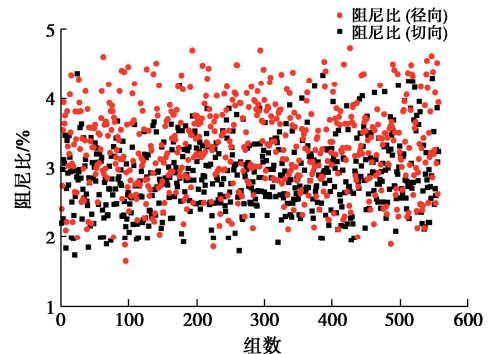
(a) 频率 (#5测点)



(b) 频率 (#1测点)



(c) 阻尼比 (#5测点)



(d) 阻尼比 (#1测点)

图6 结构模态参数识别结果

Fig. 6 Identified results of modal parameters

为避免风电结构在运行过程中发生共振, 需保证整机运行在合理的安全频率范围内, 本风电结构设计采用“软-刚”理念^[9], 即结构频率需限制在1倍频的风轮旋转频率和3倍频的风轮旋转频率之间。根据设计资料, 本风电结构频率允许波动范围为0.27~0.35 Hz, 结合测试结果可知测试期间的风电结构模态频率均处于设计允许范围。

图7为模态频率和阻尼比的分布直方图。由图可知, 不同测点的模态频率及阻尼比分布区间基本一致, 说明结构整体未发生不协调振动变形。模态频率及阻尼比均近似服从正态分布, 且底部测点数据的拟合优度更高。综合两测点结果来看, 径向频率主要集中在0.308~0.315 Hz, 径向阻尼比主要集中在2.75%~3.5%; 切向频率主要集中在0.302~0.306 Hz, 切向阻尼比主要集中在2.25%~3.0%。此外, 由测试数据可知径向方向的模态参数均大于切向方向, 表明机舱径向方向为风电结构的主要振动方向。

3.3 频率与环境激励相关性

前述可知, 采用不同数据序列识别的模态参数离散明显, 从模态参数随环境激励的变化角度进行统计分析更具有准确性和科学性。风和浪荷载是影响海上风电结构振动响应的主要环境激励^[7-9]。考虑到实际风和浪荷载的复杂性, 为便于分析, 在此分别选取平均风速及有效波高来代表风及浪的荷载激励。

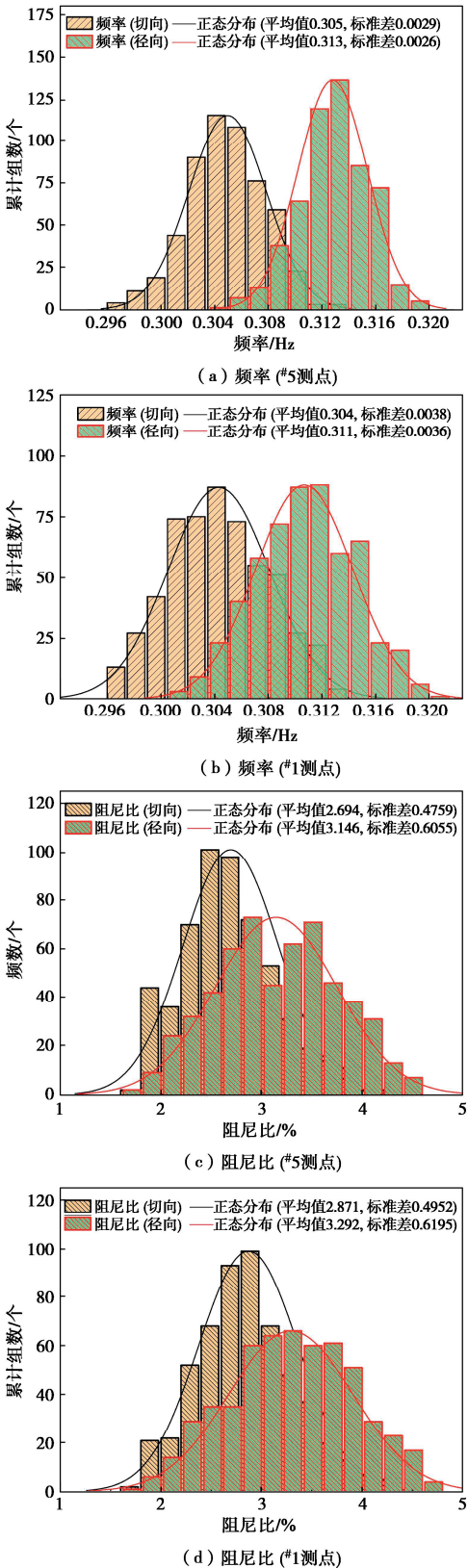


图7 结构模态参数分布直方图

Fig. 7 Distribution histogram of modal parameters

分别统计反演数据样本对应的平均风速及有效波高平均值,并绘制二者与模态频率关系,如图8所示。总体来看,不同测点处的径向和切向频率随风速变化趋势较为一致,且数据具有一定离散性,可能是受风向、温度及浪荷载等因素的耦合作用影响。

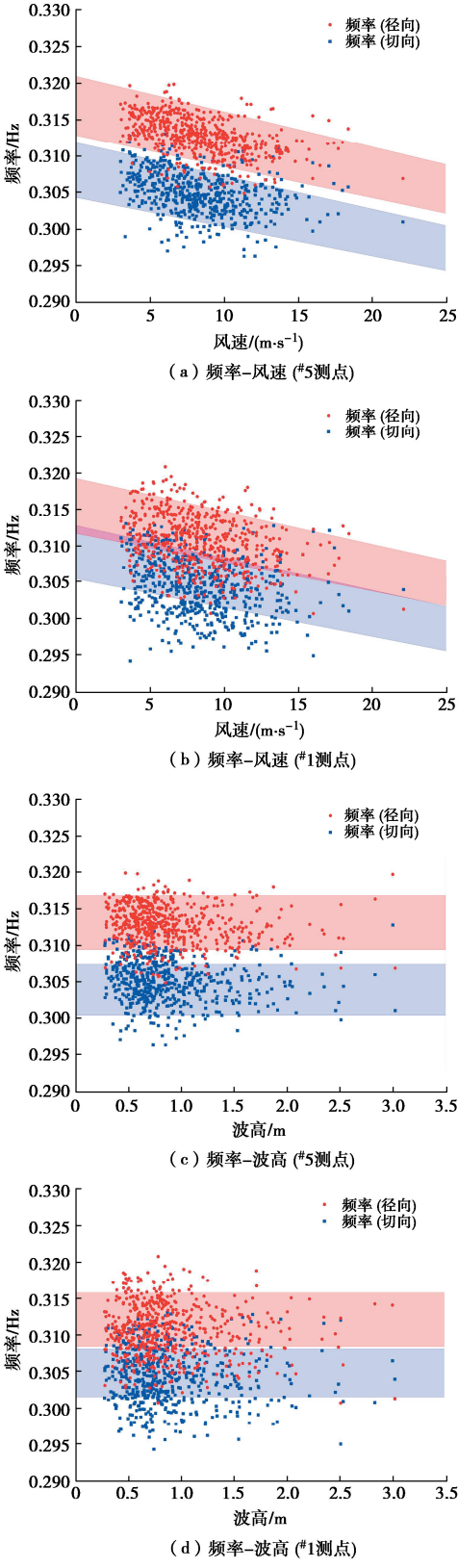


图8 不同风速和波高下的结构模态频率

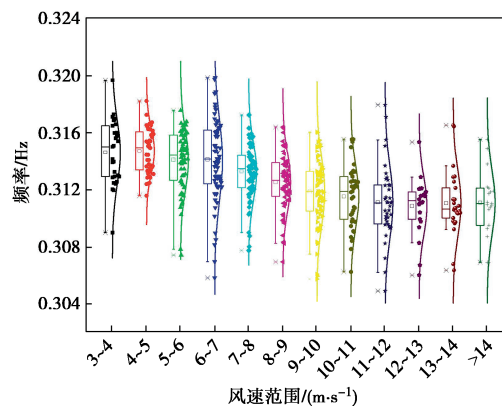
Fig. 8 Modal frequencies at different wind speeds and wave heights

从图8(a),(b)中可以看出,模态频率与风速之间呈负相关,且随着风速升高,模态频率的离散性有降低趋势,说明风荷载为控制风电结构振动特性的关键荷载。从图8(c),(d)中可看出,与风速相关

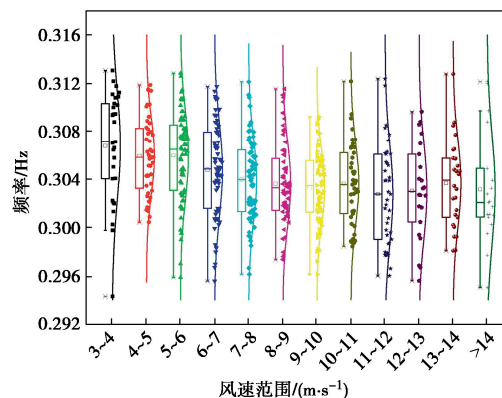
性不同, 模态频率与波高之间没有表现出明显的相关性, 且随着波高的变化, 模态频率的离散性基本没有变化, 说明波浪荷载对结构模态频率的影响较弱。此外, 对比不同高程处结构模态频率的散点图, 可以看出, 相较于位于塔筒顶部的#5测点, 塔筒低处#1测点的切向频率与径向频率的差值有所降低, 二者数据重叠量明显增多。

为了进一步说明模态频率与风速等级的相关性, 按风速范围 1 m/s 的间隔, 将模态频率分组统计。其中, 考虑到风速大于 14 m/s 的数据样本量有限, 将其合并为 1 组, 最终数据被划分为 12 组。

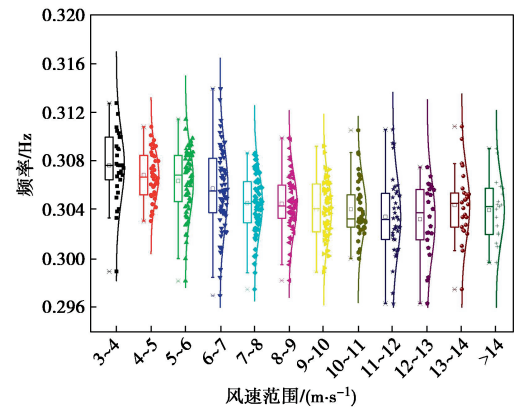
图9给出了12组风速范围下径向频率和切向频率随风速变化的箱型图。总体而言, 在相同风速范围时, 不同测点处机舱径向频率的均值明显大于切向频率, 切向频率的离散性略大于径向频率。从均值上看, 当风速小于 7 m/s 时, 结构径向和切向频率值随着风速增大发生微弱波动; 当风速位于 7~12 m/s 时, 结构径向和切向频率随着风速增大而发生近似线性减小; 当风速大于 12 m/s 时, 结构径向和切向频率值基本稳定, 随着风速增大而发生小幅值波动, 这主要是因为风速大于 12 m/s 的数据样本量较少, 不足以精确反映出高风速情况下的结构模态参数分布特性。从离散性上看, 结构径向和切向频率的离散程度随着风速增大呈现略有下降趋势。从测点位置上看, 底部#1测点结果的离散性略高于顶部#5测点。



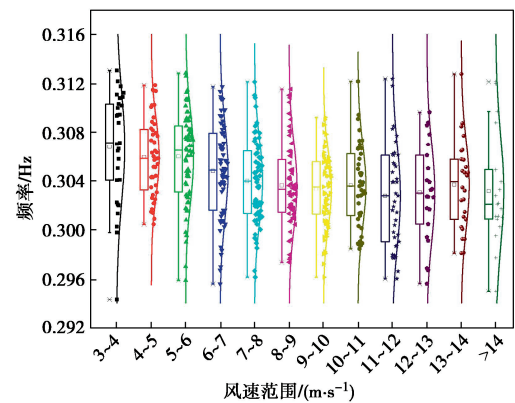
(a) 径向频率 (#5测点)



(b) 径向频率 (#1测点)



(c) 切向频率 (#5测点)



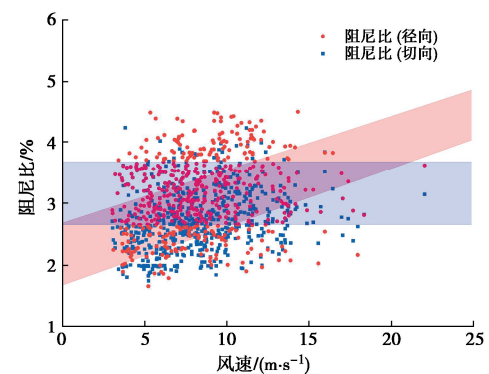
(d) 切向频率 (#1测点)

图9 不同风速下的结构模态频率箱型图

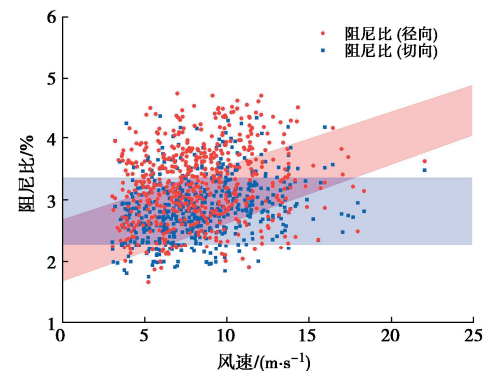
Fig. 9 Box diagram of modal frequency at different wind speeds

3.4 阻尼比与环境激励相关性

分别绘制结构阻尼比与数据样本对应时长范围的平均风速、有效波高的关系, 如图10所示。



(a) 阻尼比-风速 (#5测点)



(b) 阻尼比-风速 (#1测点)

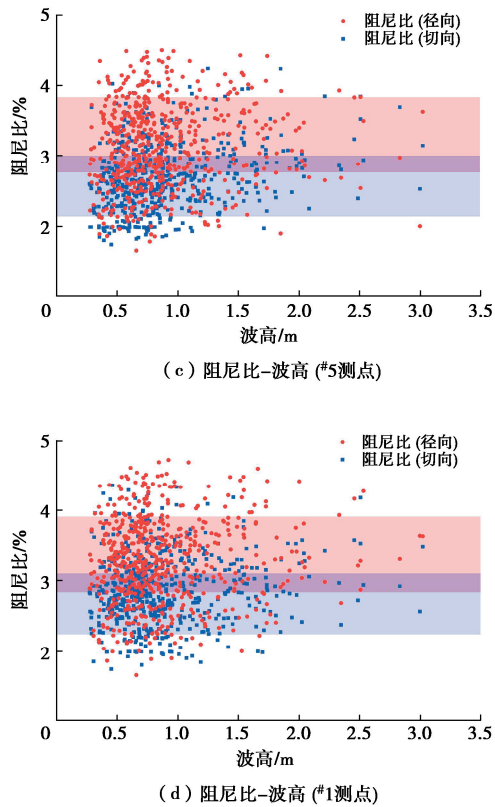


图 10 不同风速和波高下的结构模态阻尼比

Fig. 10 Damping ratios at different wind speeds and wave heights

实际结构模态阻尼比是结构材料阻尼、气动力阻尼、土体阻尼和基础辐射阻尼的共同作用结果^[12]。从图 10 (a), (b) 可以看出, 不同测点的径向阻尼比与风速呈正相关, 且随着风速升高, 其相关性有变强的趋势; 而模态切向阻尼比与风速间的相关性相对较差, 且其离散性受风速波动的影响不大, 这是因为径向方向为主要振动方向, 强烈的筒-土相互作用使得土体辐射阻尼效应得以充分发挥^[12], 最终改变了结构模态径向阻尼比。相反的, 切向方向非主振方向, 土与筒型基础的相对位移较弱, 辐射阻尼效应总体水平较低。

从图 10 (c), (d) 可以看出, 不同测点的径向及切向阻尼比与波高的相关性均较差, 表明波浪荷载非结构模态阻尼的主要因素。为更好地展现径向阻尼比与风速的相关性, 绘制 12 组风速范围下径向阻尼比随风速变化的箱型图。

由图 11 可知, 风速范围位于 3~6 m/s 内的结构径向阻尼比均值呈上下波动趋势; 当风速大于 6 m/s 时, 结构径向阻尼比均值大体上呈波动上升趋势。从离散性上看, 径向阻尼比的离散度随风速增大而发生小幅值波动, 其基本不受风速变化的影响。此外, #1 测点处的径向阻尼比整体大于 #5 测点。这可能是 #1 测点更靠近塔筒底部, 受土体阻尼作用的影响更显著。

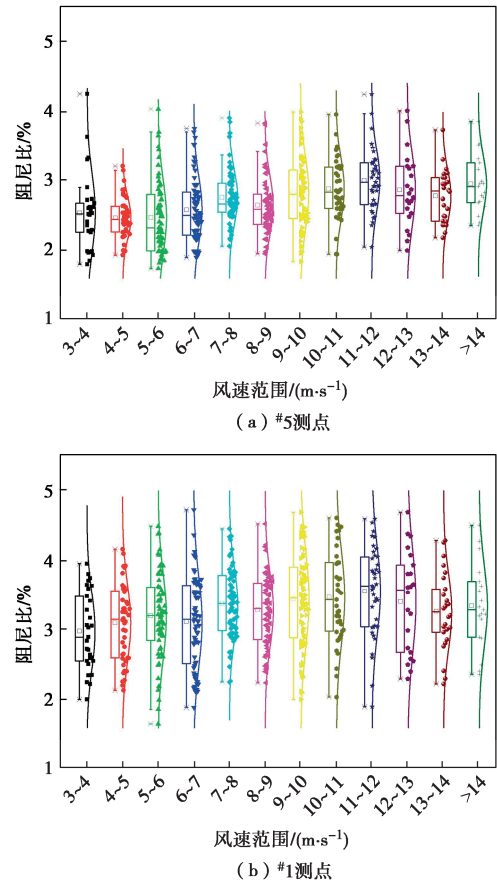


图 11 不同风速下的结构阻尼比箱型图

Fig. 11 Box diagram of modal damping ratio at different wind speeds

4 结构频率时变性的讨论

为研究结构频率的时变性, 分别给出了 8~9 m/s 及 13~14 m/s 平均风速范围下结构径向频率随时间的变化趋势, 如图 12 所示。

随着测试时间推移, 不同测点处的结构频率均出现一定程度退化。自测试开始至约第 150 d (第 375 组数据) 间, 结构频率维持在较高的衰减速度; 而第 150 d 后的结构频率衰减速度放缓, 部分风速范围对应的结构频率在测试后期进入了平稳发展阶段。

实际上, 本文研究的结构基频是结构特性、地基土特性、筒基础与地基土的接触作用特性 3 方面的综合体现。结构疲劳损伤、地基土弱(硬)化亦或筒-土接触作用的变化均会导致结构频率发生一定程度的改变。海洋环境下的结构疲劳损伤为渐变累积过程, 结构损伤程度与时间呈正相关。前人的研究成果表明^[13]: 结构损伤会导致模态参数降低, 且降低速率随损伤程度的增加而增大, 即结构损伤导致的模态参数退化主要发生在后期阶段, 这与本文中结构频率退化集中在初期阶段的规律并不同。因此, 本文中的结构频率退化现象可排除结构损伤的影响, 主要反映土体对筒型基础整体约束能力的下降。结合场地工程地质条件,

从筒-土接触作用角度,分析可能有以下两种情况单独或同时发生:

(1) 筒-土界面刚度弱化作用:如前文所述,场地表层为松散-稍密的粉砂夹粉土,砂-筒界面附近一定范围的土体在长期循环剪切作用下会发生土颗粒重新排列,形成剪切带^[14]。剪切带累积收缩导致筒-土界面刚度的持续弱化:这是因为循环剪切作用下,处于高位势的砂土颗粒降低到较低位势的状态,部分小颗粒进入到大颗粒间的孔隙,进而导致松砂出现剪缩^[15]。室内砂与钢板的循环剪切试验还表明,钢板-土界面弱化主要发生在初始阶段,随着循环次数的增加,钢板-土界面弱化速率不断降低并趋于平缓^[16],这与本文中结构频率退化速率随时间推移而降低的规律一致。

(2) 海底潮流冲刷作用:测试风电结构的基础处于复杂水文环境下,不可避免会出现一定程度的冲刷掏蚀现象。而冲刷作用一方面直接降低了筒-土接触面积,另一方面增加了风电结构裸露于地基土体外的长度,导致结构自振周期增大^[17-18],这与本文中结构频率随时间推移而降低的现象相符。另外,本场地浅部的粉砂夹粉土层工程性能差,抗潮流冲刷能力弱,这与本文中结构频率快速退化阶段相对应;而地基深部为淤泥质粉质黏土层,抗潮流冲刷能力较强,符合本文中结构频率缓慢退化阶段的变化特征。

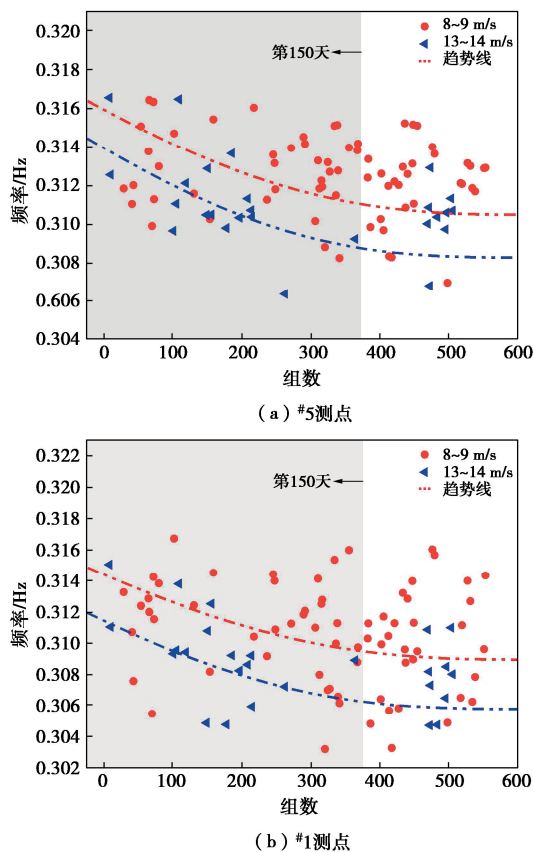


图 12 结构径向频率随时间的变化

Fig. 12 Radial modal frequencies at different time

5 结论与展望

本文以江苏如东复合筒型基础海上风电结构为研究对象,基于 210 d 的加速度监测数据,识别了 550 组不同环境激励下的结构模态参数,主要得到以下 4 点结论。

(1) 结构模态参数总体服从正态分布,径向频率主要集中在 0.308~0.315 Hz,径向阻尼比主要集中在 2.75%~3.5%,切向频率主要集中在 0.302~0.306 Hz,切向阻尼比主要集中在 2.25%~3.0%,测试期间结构加速度和频率均处于设计允许范围。

(2) 结构模态频率与风速之间呈负相关,且风速大于 7 m/s 后,相关性随着风速增大略有增加,离散性出现一定程度降低;结构模态频率与波高之间相关性始终较差,风荷载为风电结构振动特性的关键控制荷载。

(3) 结构切向阻尼比和径向阻尼比随风荷载的变化规律不同,模态径向阻尼比与风速呈正相关,且随着风速升高,相关性有变强的趋势;而模态切向阻尼比与风速间的相关性较差,离散性受风速的影响不大。

(4) 结构频率随时间推移出现了一定程度的退化,退化主要集中在测试期间的前 150 d,反映出筒-土接触作用的减弱,可能表现为筒-土界面刚度弱化或海底潮流冲刷现象,后续可开展现场工作进行验证。

参考文献:

- [1] HÄCKELL M W, ROLFES R. Monitoring a 5MW offshore wind energy converter-condition parameters and triangulation based extraction of modal parameters[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 40(1): 322-343.
- [2] ÁLAMO G M, AZNÁREZ J J, PADRÓN L A, et al. Dynamic soil-structure interaction in offshore wind turbines on monopiles in layered seabed based on real data[J]. Ocean Engineering, 2018, 156: 14-24.
- [3] BASSETT K, CARRIVEAU R, TING D S K. Vibration analysis of 2.3 MW wind turbine operation using the discrete wavelet transform[J]. Wind Engineering, 2010, 34(4): 375-388.
- [4] WEIJTJENS W. Classifying resonant frequencies and damping values of an offshore wind turbine on a monopile foundation for different operational conditions[C]// European Wind Energy Association 2014, Barcelona, 2014.
- [5] 蔡正银, 王清山, 关云飞, 等. 分舱板对海上风电复合筒型基础承载特性的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(4): 751-759. (CAI Zhengyin, WANG Qingshan, GUAN Yunfei,

- et al. Influences of bulkheads on bearing characteristics of composite bucket foundation of offshore wind turbines[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(4): 751-759. (in Chinese))
- [6] ZHU X, CHEN Z, GUAN Y F, et al. Field test on the mechanism of composite bucket foundation penetrating sandy silt overlying clay[J]. Ocean Engineering, 2023, **288**: 116102.
- [7] 练继建, 陈飞, 杨旭, 等. 海上风机复合筒型基础负压沉放调平[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2014, **47**(11): 987-993. (LIAN Jijian, CHEN Fei, YANG Xu, et al. Suction installation and leveling of composite bucket foundation for offshore wind turbines[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2014, **47**(11): 987-993. (in Chinese))
- [8] DING H Y, LIU Y G, ZHANG P Y, et al. Model tests on the bearing capacity of wide-shallow composite bucket foundations for offshore wind turbines in clay[J]. Ocean Engineering, 2015, **103**: 114-122.
- [9] NORÉN-COSGRIFF K, KAYNIA A M. Estimation of natural frequencies and damping using dynamic field data from an offshore wind turbine[J]. Marine Structures, 2021, **76**: 102915.
- [10] 熊春宝, 于丽娜, 常翔宇. 基于 EEMD-小波阈值去噪的桥梁结构模态参数识别[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2020, **53**(4): 378-385. (XIONG Chunbao, YU Lina, CHANG Xiangyu. Modal parameter identification of bridge structures based on EEMD-wavelet threshold denoising[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2020, **53**(4): 378-385. (in Chinese))
- [11] 王茂华, 迟世春, 周雄雄. 基于地震记录和 SSI 方法的高土石坝模态识别[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(7): 1279-1287. (WANG Maohua, CHI Shichun, ZHOU Xiongxiang. Modal identification of high earth-rock dams based on seismic records and SSI method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(7): 1279-1287. (in Chinese))
- [12] 夏栋舟, 何益斌, 刘建华. 土-结构动力相互作用体系阻尼及地震反应分析[J]. 岩土力学, 2009, **30**(10): 2923-2928. (XIA Dongzhou, HE Yibin, LIU Jianhua. Study of damping property and seismic action effect for soil-structure dynamic interaction system[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(10): 2923-2928. (in Chinese))
- [13] 顾永强, 冯锦飞, 张哲玮, 等. 基于模态参数的在役风力发电机叶片损伤识别研究[J]. 太阳能学报, 2022, **43**(3): 350-355. (GU Yongqiang, FENG Jinfei, ZHANG Zhewei, et al. Research on blade damage identification of active wind turbine based on modal parameters[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2022, **43**(3): 350-355. (in Chinese))
- [14] WHITE D J, BOLTON M D. Displacement and strain paths during plane-strain model pile installation in sand[J]. Géotechnique, 2004, **54**(6): 375-397.
- [15] DEJONG J T, WHITE D J, RANDOLPH M F. Microscale observation and modeling of soil-structure interface behavior using particle image velocimetry[J]. Soils and Foundations, 2006, **46**(1): 15-28.
- [16] 刘俊伟, 朱娜, 王立忠, 等. 循环荷载下砂与钢板界面的弱化机制[J]. 浙江大学学报(工学版), 2018, **52**(6): 1123-1130. (LIU Junwei, ZHU Na, WANG Lizhong, et al. Degenerate mechanism of sand-steel interface under cyclic loading[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2018, **52**(6): 1123-1130. (in Chinese))
- [17] PRENDERGAST L J, HESTER D, GAVIN K, et al. An investigation of the changes in the natural frequency of a pile affected by scour[J]. Journal of Sound and Vibration, 2013, **332**(25): 6685-6702.
- [18] 马建军, 韩书娟, 高笑娟, 等. 层状土场中冲刷作用下部分埋置单桩动力响应分析[J]. 岩土力学, 2022, **43**(6): 1705-1716. (MA Jianjun, HAN Shujuan, GAO Xiaojuan, et al. Dynamic response analysis of the partially-embedded single pile affected by scour in layered soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, **43**(6): 1705-1716. (in Chinese))