

引用格式:王玉红,肖振盛,袁立莎,等. 基于三维数值模拟的防波堤-风机结构体系位移响应及敏感性分析[J]. 大连海事大学学报,2026,52(3):116-126.

基于三维数值模拟的防波堤-风机结构体系位移响应及敏感性分析

王玉红¹,肖振盛^{2a},袁立莎¹,原娟¹,赵经彤^{2a},崔春义^{* 2a, 2b},季则舟¹

(1.中交第一航务工程勘察设计院有限公司,天津 300220;2. 大连海事大学 a.交通运输工程学院;
b.港口与航运安全协同创新中心,辽宁 大连 116026)

摘要:针对防波堤-风机结构体系位移响应的主控因素及参数敏感性机理尚不明确的问题,本文建立一种考虑风-浪联合作用的一体化数值分析模型,并基于灰色关联理论系统揭示各参数对防波堤-风机结构体系位移响应的规律。首先,以某防波堤风电工程为背景,采用 Davenport 风速谱和 JONSWAP 波浪谱,结合谐波叠加法模拟生成风-浪荷载时程;其次,构建防波堤-风机全耦合三维数值模型,并通过与传统单桩式近海风机对比,验证了防波堤对风机位移稳定性的改善效果;最后,选取荷载、结构及地基三类关键影响因素,采用灰色关联分析方法进行多参数敏感性评估,量化了各参数对结构位移响应的敏感程度。研究表明:防波堤的引入产生波浪遮蔽效应并形成附加约束机制,能够显著改善风机系统的位移稳定性;该耦合系统响应主要受风荷载支配,波浪荷载的影响被有效抑制;塔筒参数主导上部变形,桩基参数则主导桩-堤交界处响应。研究成果明确了风-浪联合作用下防波堤-风机结构体系的位移响应变化规律,可为工程抗灾设计与参数优化提供理论依据。

关键词:单桩式近海风机;防波堤;风-浪荷载;灰色关联分析(GRA);敏感性分析

中图分类号:TU447

文献标志码:A

文章编号:1006-7736(2026)03-0116-11

doi:10.16411/j.cnki.issn1006-7736.2026.03.011

Displacement response and sensitivity analysis of breakwater-wind turbine structural system based on three-dimensional numerical simulation

Wang Yuhong¹, Xiao Zhensheng^{2a}, Yuan Lisha¹,

Yuan Juan¹, Zhao Jingtong^{2a}, Cui Chunyi^{* 2a, 2b}, Ji Zezhou¹

(1.CCCC First Harbor Consultants Co., Ltd., Tianjin 300220, China;

2a. College of Transportation Engineering; 2b. Center for Ports and Maritime Safety, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: To address the lack of clarity regarding the dominant factors and parameter sensitivity mechanisms of the displacement response of the breakwater-wind turbine coupled system, this paper established an integrated numerical analysis model considering combined wind-wave action and systematically revealed the influence laws of various parameters based on grey relational analysis (GRA). Firstly, based on a practical breakwater-integrated wind power project, the Davenport wind speed spectrum and JONSWAP wave spectrum were used together with the harmonic superposition method to simulate and generate time histories of wind-wave loads. Secondly, a refined 3D fully coupled numerical model of the breakwater-wind turbine system was constructed. Compared with traditional offshore monopile wind turbines, the model verifies that the breakwater can enhance the displacement stability of the wind turbine. Finally, three types of key influencing factors including load, structure and foundation were selected, and the GRA method was adopted for multi-parameter sensitivity evaluation to quantify the sensitivity of structural displacement response to each parameter. Results show that the introduction of the breakwater produces a wave-shielding effect and forms an additional constraint mechanism, which can significantly improve the displacement stability of the wind turbine system. The system response is predominantly governed by wind loads, while the influence of wave loads is effectively suppressed. Tower parameters dominate the deforma-

收稿日期:2025-12-21;修回日期:2026-06-08

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52178315)

作者简介:王玉红(1973—),女,正高级工程师,E-mail: wangyuhong@ccccltd.cn;崔春义*(1978—),男,博士,教授,博士生导师,E-mail: cuichunyi@dlmu.edu.cn

tion of the upper structure, whereas pile parameters govern the response at the pile-breakwater interface. These findings clarify the displacement response laws of the coupled system under combined wind-wave action, and can provide a theoretical basis for engineering disaster-resistance design and parameter optimization.

Key words: monopile supported offshore wind turbine; breakwater; wind-wave loading; grey relational analysis (GRA); sensitivity analysis

0 引言

近海海域面临空间资源紧缺与软土地基承载力不足的双重限制,防波堤-单桩风机耦合开发模式由此成为极具潜力的解决方案^[1-4]。该结构充分利用防波堤的既有空间与质量,有效改善了传统单桩基础在近岸软土地场的抗倾覆能力。但防波堤的引入同时改变了风机基础的边界条件,风-浪-结构-土之间复杂的相互作用机理亟待探明^[5-7]。

围绕传统单桩式近海风机的桩-土相互作用机理,现有研究已取得较多成果^[8-10]。在基础承载特性研究方面,尚宏景等^[11]基于有限元极限分析下限法,探究了上砂下黏成层海床中风机基础的竖向承载机理。赵子豪等^[12]考虑土体应变软化与应变率效应,通过建立二维平面应变模型,分析软黏土地基中风机基础的水平承载特性。针对循环荷载下的累积变形问题,Zou等^[13]引入砂土刚度循环弱化本构,构建了单桩-摩擦轮复合基础三维模型,提出了考虑弱化效应的V-H承载力包络线预测方法。在工程应用层面,梁超等^[14]建立了适用于大直径单桩的水平承载力统一预测模型。然而,上述研究多聚焦于地基基础本身的极限承载能力,缺乏对风机全系统动力特性的完整刻画,且未充分考虑复杂风浪环境下的动力耦合效应。

事实上,近海风机在服役过程中长期承受复杂的风-浪耦合作用^[15-17],其荷载具有显著的时变性、随机性与循环特性。针对这一问题,在试验研究方面,Lombardi等^[18]通过1g缩尺模型试验,

系统探究了黏性土中单桩式风机的动态桩-土相互作用机理,揭示了考虑地基柔性时,系统自振频率相较于刚性基础假定结果显著降低的规律。在此基础上,Abdullahi等^[19]基于实测数据构建了包含小、中、大三类变幅工况的风-浪加载模式。砂土中大直径单桩模型试验表明,传统恒幅值循环加载法通常低估桩体累积倾斜量与固有频率衰减幅度,并且荷载幅值对结构长期性能的影响权重明显大于循环次数。在数值模拟方面,Velarde等^[20-21]利用 p - y 曲线法构建单桩式近海风机模型,并评估了其疲劳可靠性。在该框架下,许成顺等^[22-23]建立了风机-土体耦合模型,进一步分析了动力荷载下桩基的失效模式。为实现土体力学行为的精细化表征,Ding等^[24-25]引入边界面弹塑性本构模型,同时考虑超孔隙水压力的累积与消散,深入阐明了海上风机在风-浪耦合作用下的动力响应演化规律。

综上所述,尽管传统单桩风机的动力响应研究已取得显著进展,但现有成果多聚焦于孤立基础结构,针对防波堤-风机这一新型耦合体系的动力特性研究仍较为薄弱^[26],现有风机设计理论难以直接涵盖防波堤引入后产生的复杂边界效应。为此,本文基于数值模拟方法,建立风机-防波堤-地基全耦合三维数值模型,对比分析风-浪联合作用下耦合系统与传统单桩式近海风机的位移响应差异,深入探讨了不同场地条件及结构设计参数对单桩式近海风机位移响应的影响机制,以期为该类型化海工结构的抗灾设计与工程应用提供理论依据与技术支持。

1 工程背景与数值建模

本文以某防波堤-风机一体化工程为研究背景。该项目风机轮毂中心高度125.6 m,基础采用大直径单桩形式。该工程场址地质条件复杂,淤泥及淤泥质土广泛分布于浅部地层,呈现显著的高含水率、高压缩性及低剪切强度等软弱土特性。基于上述工程实测参数,采用PLAXIS 3D有限元分析平台,构建防波堤-单桩式近海风机耦合体系的三维数值模型,具体如图1所示。

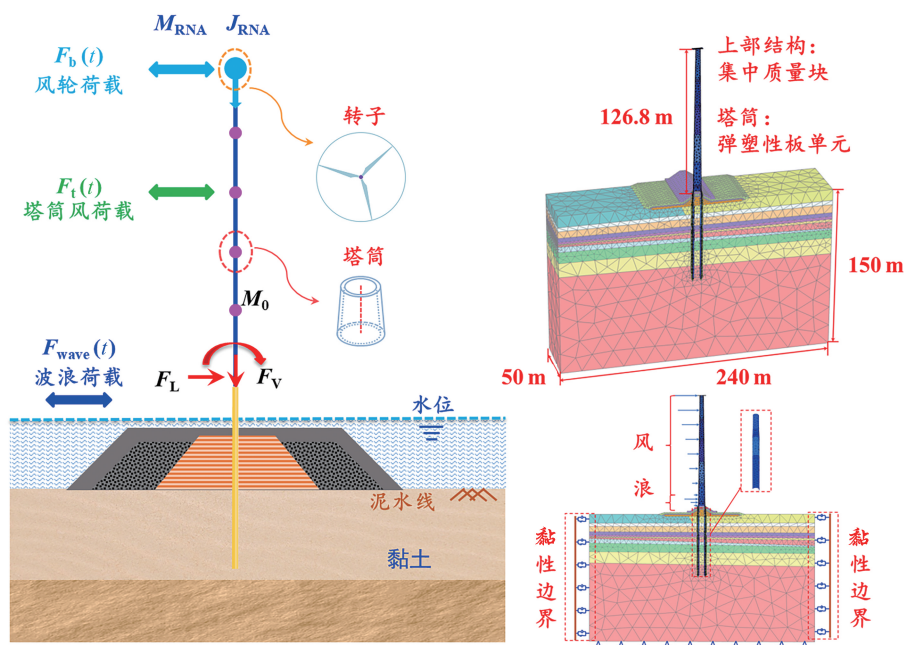


图 1 防波堤-风机耦合体系模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of the breakwater-wind turbine coupled system model

1.1 防波堤结构与材料参数

结合工程勘察数据、相关设计规范及现有文献^[27],确定防波堤各组成部分的物理力学参数。防波堤的典型断面几何构型如图 2 所示,具体材料参数详见表 1。针对防波堤的多层散体构造(包括袋装砂、抛石及扭王字块),本文在建模时采用分层等效简化策略。模型未对单个扭王字块

等离散单元进行精细化构建,而是将其简化为连续介质层,以此反映结构的整体刚度与变形特征。其中,抛石等散体层的等效弹性模量依据 Hunter 等^[28]基于实测数据建立的模量经验公式进行计算;扭王字块护面层的等效力学参数参考 Cihan 等^[29]在 PLAXIS 平台上通过振动台试验与数值模拟对比标定的结果。

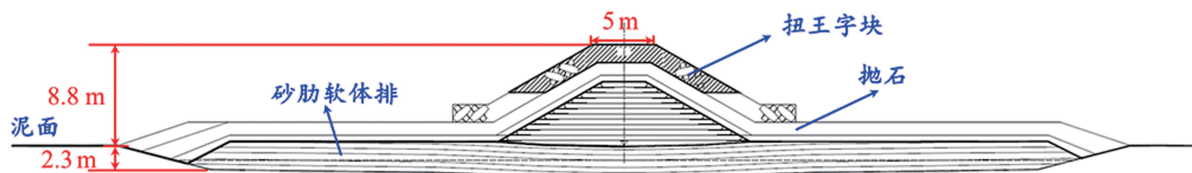


图 2 防波堤断面图

Fig.2 Cross-sectional view of the breakwater

表 1 防波堤材料参数

Tab.1 Material parameters of the breakwater

材料名称	天然重度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/ MPa	泊松比
扭王字块	24	3.4×10^4	0.200
素混凝土	24	2.8×10^4	0.167
抛石	16	3.0×10^4	0.150
袋装砂棱体	19	2.0×10^4	0.200

1.2 地层信息

表 2 为风机机位处典型工程地质剖面信息。该区域具有典型的海相沉积地貌,表层覆盖厚厚的淤泥质土,下卧土层则以粉质黏土、粉土为主。值得注意的是,各土层表现出显著的水平向厚度不均及层位起伏特性。这种地层空间分布的非均质性会导致桩周约束不对称,进而影响基础的稳定性。为此,本文严格按照实际地层分布建模,以精确还原真实的桩-土相互作用环境。

表 2 工程地质剖面信息

Tab.2 Engineering geological profile information

土体名称	饱和重度/ (kN·m ⁻³)	弹性模量/ MPa	黏聚力/ kPa
淤泥质黏土	17.6	37.50	4.0
黏土	18.1	37.50	10.0
粉质黏土	19.6	66.25	14.4
粉土	19.8	50.00	14.6

1.3 风机结构参数

该风机结构由 RNA 系统、塔筒和单桩基础构成。RNA(转子-机舱总成,含叶片、机舱等)总重 228.4 t,数值模型中把该部分等效为塔顶集中质量。塔筒为变截面钢管结构,直径 3.82~7.80 m,壁厚 0.019~0.085 m。基础采用直径 7.80 m 的大直径钢管桩。风机关键部件的具体几何与材料参数见表 3。

表 3 风机参数

Tab.3 Wind turbine parameters

参数名称	参数值
塔筒长度	121.3 m
桩身长度	86 m
塔筒顶端直径	3.82 m
塔筒底部直径	7.8 m
桩身直径	7.8 m
入土深度	80.5 m
桩基壁厚	80 mm
风轮直径	223 m

2 荷载模拟

2.1 风荷载模拟

为构建符合工程实际的风速模型,本文基于 Davenport 谱,采用谐波叠加法生成风速时程。通常情况下,任意高度 z 处的瞬时风速 $u(t)$ 可分解为平均风速 $\bar{u}$ 与脉动风速 $v(t)$ 两部分,即

$$u(t)=\bar{u}+v(t)$$

(1)

式中:平均风速沿高度的分布特性采用指数模型描述,其数学表达式为:

$$\frac{\bar{u}(z)}{V_s}=\left(\frac{z}{10}\right)^{\alpha}$$

(2)

式中: V_s 为 10 m 处的平均风速; α 为风切变指数,本文 $\alpha=0.12$ 。

脉动风速则被视为零均值平稳高斯随机过程,其功率谱密度函数表示为:

$$S_D(f)=\frac{4KV_s^2x}{f(1+x^2)^{4/3}},x=\frac{1200f}{V_s}$$

(3)

式中: $S_D(f)$ 为 Davenport 谱; f 为频率; K 为地表粗糙度系数。

基于激励盘理论分别计算作用于塔筒与叶片表面的风荷载 F_t 与 F_b , 其计算公式为:

$$F_t=0.5\rho\mu_su^2(z,t)A(z)$$

(4)

$$F_b=0.5\rho C_du_b^2(z,t)A_b$$

(5)

式中: $A(z)$ 、 A_b 分别为高度 z 处塔筒计算段的迎风投影面积与风轮面积; C_d 为阻力系数; μ_s 为风阻系数。

根据工程现场实测数据,确定参考高度处平均风速 $V_s=6.71\text{m/s}$, $K=0.003$ 。采用谐波叠加法编制数值计算程序,模拟生成不同高度处脉动风荷载时程,具体如图 3 所示。

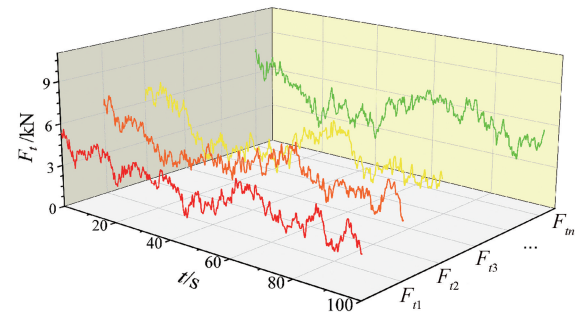


图 3 风荷载时程曲线

Fig.3 Time history curve of wind load

需要指出的是,本文计算工况参考风速为 6.7 m/s,远低于额定风速(11~12 m/s),处于部分负荷运行区间,气动阻尼效应相对较弱。因此,参考 Zuo 等^[30]的建模方法,先对气动荷载进行预模拟并以集中外力形式施加,同时将气动阻尼简化为 Rayleigh 阻尼。

2.2 波浪荷载模拟

本文波浪荷载方向取垂直于防波堤轴线的正向入射方向,与风荷载方向一致(风浪同向),以模拟波浪作用的最不利工况。假定波浪运动为平稳随机过程,采用谐波叠加法将不规则的随机波浪场离散为有限个规则波分量的线性叠加。据此,任意时刻的瞬时波面高程可表示为:

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^n \sqrt{2S_{\eta}(\omega)} \Delta\omega \cos(\omega t + \phi_i) \quad (6)$$

为提高模型在实际海况下的工程适用性,本文选用 JONSWAP 波浪谱表征波浪能量的频率分布特征,其功率谱密度函数表达式为:

$$S_{\eta}(\omega) = \frac{\beta_J}{2\pi} H_s^2 (T_p)^{-4} \left(\frac{\omega}{2\pi} \right)^{-5} \exp \left[-1.25 \left(\frac{\omega}{\omega_p} \right)^{-4} \right] \cdot \gamma^{\exp \left[\frac{(\omega - \omega_p)^2}{2\sigma^2 \omega_p^2} \right]} \quad (7)$$

$$\beta_J = \frac{0.06238}{0.023 + 0.336\gamma - 0.185(1.9 + \gamma)^{-1} [1.094 - 0.01915 \ln \gamma]} \quad (8)$$

$$\sigma = \begin{cases} 0.07, \omega \leq \omega_p \\ 0.09, \omega > \omega_p \end{cases} \quad (9)$$

式中: H_s 为有效波高,本文取 $H_s = 3$ m; ϕ_i 为随机相位角; ω 为波的圆频率; $\Delta\omega$ 为频率增量; γ 为峰值增强因子,本文取 $\gamma = 3.3$; ω_p 为谱峰频率。

在线性波浪理论框架下,任意水深处水质点的水平速度(v_x)与水平加速度(a_x)可分别表示如下:

$$v_x = \sum_{i=1}^n \frac{\omega_i \sqrt{2S_{\eta}(\omega_i)} \Delta\omega}{2} \cdot \frac{\cosh k_i h}{\sinh k_i d_w} \cos(k_i x - \omega_i t + \phi_i) \quad (10)$$

$$a_x = \sum_{i=1}^n \frac{\omega_i^2 \sqrt{2S_{\eta}(\omega_i)} \Delta\omega}{2} \cdot \frac{\cosh k_i h}{\sinh k_i d_w} \sin(k_i x - \omega_i t + \phi_i) \quad (11)$$

式中: k_i 为波数,可由色散方程计算; h 为计算点距水底的距离; d_w 为水深,本文取 $d_w = 10$ m。

在此基础上,采用莫里森方程计算作用于桩上的波浪荷载。该方程将波浪力分解为由水质点速度诱导的拖曳力分量及由加速度诱导的惯性力分量,其表达式如下:

$$F_{\text{wave}} = \frac{\pi D^2}{4} C_m \rho_w a_x + \frac{1}{2} C_d \rho_w D v_x |v_x| \quad (12)$$

式中: C_d 为阻力系数,本文取 $C_d = 1.2$; C_m 为惯性

系数,本文取 $C_m = 2.0$; ρ_w 为水密度; D 为桩基直径。

需要指出的是,莫里森方程的适用性取决于结构特征尺度与波长的比值。本文桩基直径 $D = 7.8$ m,在设定水深 $h = 10$ m、谱峰周期条件下,经色散方程迭代求解可得实际波长 $L = 70.9$ m,由此计算得到 $D/L < 0.2$ 。依据 DNV-RP-C205 规范, $D/L < 0.2$ 时,结构绕射效应尚不显著,莫里森方程仍然适用。

为量化防波堤对波高的削减效应,本文参考 Van Der Meer 等^[31]对 DELOS 实验数据库的分析结果,选用 d'Angremond 公式计算波浪透射系数,并对波高进行修正。具体计算式如下:

$$H_{\text{cor}} = K_t \times H_s \quad (13)$$

$$K_t = -0.4 \frac{R_c}{H_s} + 0.64 \left(\frac{B}{H_s} \right)^{-0.31} (1 - e^{-0.5\xi}) \quad (14)$$

式中: H_{cor} 为修正后波高; R_c 为堤顶超高(淹没时取负值); ξ 为破碎参数。

在波浪破碎效应方面, d'Angremond 透射系数公式通过破碎参数 ξ , 从经验意义上反映了波浪破碎过程对波浪透射的综合影响。本文工况下 $h/H_s = 3.33 (>3)$, 按照 Van Der Meer 等^[32]提出的稳定性准则属于非破波条件,入射波在堤前不会发生深度受限破碎,因此,不存在以“卷破波”形式直接拍击结构的情况;同时,防波堤外侧的扭王字块护面与抛石散体层具有较高的孔隙率与表面粗糙度,波浪在多孔介质内部经强烈紊流摩擦与渗透流动作用,其动能得以显著耗散。在上述双重机制的共同作用下,传递至塔筒底部及桩-堤交界处的残余波浪荷载已大幅衰减,并以长周期低频推力为主导,即使局部存在高频残余冲击分量,其持续时间也较短,对结构整体位移响应的贡献相对有限。因此,本文采用 d'Angremond 透射系数公式与莫里森方程相结合的计算框架,在当前研究范围内是合理的。

3 结构位移响应及参数敏感性分析

3.1 防波堤-风机耦合体系与单桩体系响应差异分析

为直观揭示防波堤-风机耦合体系的动力位

移特性,本文建立无防波堤的传统单桩式风机基准对照模型,通过两类模型在风浪联合荷载激励下的动力响应特征对比,明确防波堤设置对风机基础位移稳定性的具体影响。其中,数值计算总时长取 100 s。该时长参考 Matha 等^[33]海上风机耦合动力分析中的计算时长设置,能够覆盖多个结构主导振动周期并满足稳态响应提取需求。图 4 为有/无防波堤两种工况下塔顶位移时程曲线,图 5 为风机最大位移包络曲线。鉴于加载初期结构处于瞬态响应阶段,振动幅值波动较大,本文选取数值计算的后 50 s(即 50~100 s 区间)作为稳态响应分析时段。该截断点的选取依据如下:瞬态自由振动分量的振幅包络按 $\exp(-2\pi f_1 \xi t)$ 指数衰减,其中, f_1 为系统一阶固有频率, ξ 为总阻尼比。经 PLAXIS 3D 模态分析,本文耦合体系一阶模态频率为 0.32 Hz。本文模型中土体施加 Rayleigh 阻尼,加之桩-土接触界面的能量耗散,

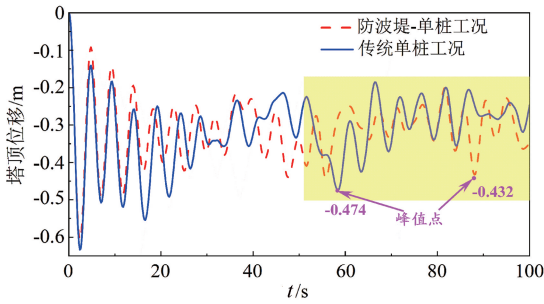


图 4 塔顶位移时程对比

Fig.4 Comparison of tower top displacement time histories

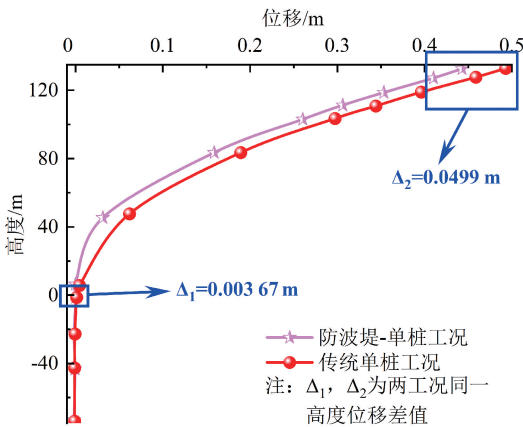


图 5 风机最大位移包络曲线

Fig.5 Maximum displacement envelope curve of the wind turbine

含桩-土相互作用的系统总阻尼比通常为 4%~8%^[34]。令瞬态振幅衰减至初始值的 5%,解得所需时间 $t = \ln 20 / (2\pi f_1 \xi)$ 。取 $f_1 = 0.32$ Hz, $\xi = 4\%$ 时,计算可得 $t \approx 37.3$ s,因此,本文选取的 50 s 截断点具备充分的安全裕度。

本文 1.1 节将防波堤多层散体结构等效为分层连续介质,2.2 节采用 d'Angremond 透射系数对波高进行整体折减。上述处理虽能合理反映防波堤的宏观刚度、整体变形特征及其对波能的衰减作用,但客观上对波浪在堤体内部破碎耗散、波-堤双向流固耦合及瞬态孔压-有效应力耦合等局部非线性效应的精细刻画有所弱化。不过,从堤体自身位移与材料阻尼两个层面来看,上述简化对本文宏观位移响应结果的影响仍是可控的。一方面,He 等^[35]通过物理模型试验发现,即便在海啸波冲击作用下,无论地基处于密实还是松散状态,防波堤均未出现明显位移,表明常规及强浪工况下,堤体自身的动力响应量级十分有限;另一方面,防波堤中的抛石、袋装砂等散体材料具有显著的能量耗散特性,颗粒间的摩擦滑移与非弹性碰撞使其阻尼比远高于混凝土、钢材等连续介质^[35],即便堤体内部产生小幅振动,该振动能量也会在堤体材料阻尼的作用下快速衰减,难以经由堤体向上部风机结构传递。综上,在常规波浪工况下,上述等效与折减处理对风机结构响应宏观工程指标的影响极为有限。

由图 4 可知,进入稳态振荡后,有防波堤工况下的位移振幅显著低于无防波堤工况,表明防波堤结构有效抑制了塔顶的动态摆动幅度。这一规律在图 5 的位移包络线中得到进一步印证:两种工况下,风机位移均随高度增加而非线性增大,呈现典型的悬臂梁弯曲变形特征,但在泥面以上的全塔筒范围内,无防波堤工况的水平最大位移始终大于有防波堤工况,且该差异在塔顶处达到最大。上述现象的物理机制主要归因于两个方面:其一,防波堤的存在使入射波浪能量显著衰减,降低了作用于单桩的波浪荷载幅值;其二,防波堤对单桩提供了额外的侧向约束与附加阻尼,增强了系统耗散振动能量的能力。综上,防波堤-风机耦合体系通过荷载削减与约束增强的双重机制,显著改善了风机整体的位移响应特性,相比传统单桩式近海风机具有更优的位移稳定性。

3.2 基准值误差分析

选取塔筒弹性模量、平均风速、桩基弹性模量、波高、桩基壁厚、土体弹性模量、塔筒壁厚等 7 个物理量作为敏感性分析的影响因子。基于前述数值模型,以实际工况参数为基准值,采用控制变量法设计计算工况,即在保持其他参数处于基准值不变前提下,逐一改变单一参数的数值,从而构建各影响因素的变化梯度。各参数的取值范围及工况设置详见表 4。关于参数变化步长的确定原则,本文采用基于最显著变异特征的统一化步长策略。为确保敏感性分析结果在同一量纲或同一变异水平下具有横向可比性,选取其中变异系数最大参数所对应的变异范围作为基准变化步长,并将其应用于所有参与分析的参数中。

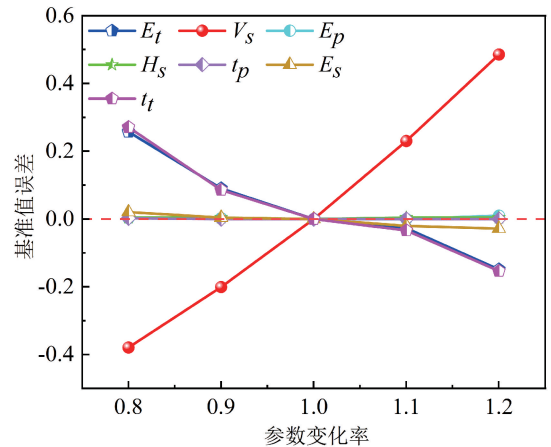
表 4 参数取值范围

Tab.4 Parameter value ranges

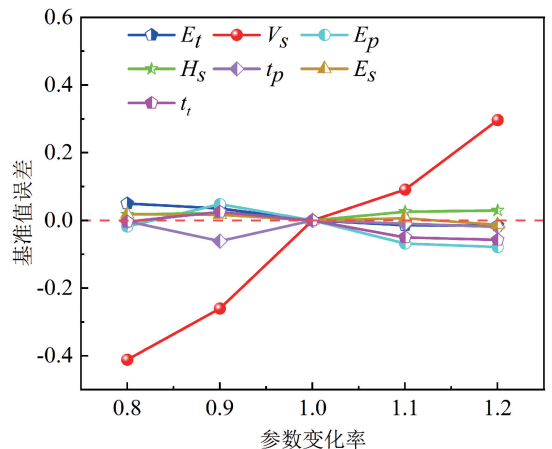
参数	基准值	参数离散取值点
塔筒弹性模量 E_t	210 GPa	0.90、0.95、1.00、1.05、1.10 E_t
平均风速 V_s	6.71 m/s	0.90、0.95、1.00、1.05、1.10 V_s
桩基弹性模量 E_p	210 GPa	0.90、0.95、1.00、1.05、1.10 E_p
波高 H_s	3 m	0.90、0.95、1.00、1.05、1.10 H_s
桩基壁厚 t_p	0.08 m	0.90、0.95、1.00、1.05、1.10 t_p
土体弹性模量 E_s	37.5 MPa	0.90、0.95、1.00、1.05、1.10 E_s
塔筒壁厚 t_t	0.019~0.085 m	0.90、0.95、1.00、1.05、1.10 t_t

为直观对比各参数对防波堤-风机耦合体系位移响应的影响规律,图 6 给出塔筒顶端及桩-堤交界处两个关键位置的基准值误差曲线,用以初步评估各参数对位移响应的敏感性程度。其中,曲线斜率绝对值越大,说明该参数对位移响应的影响越显著;斜率为正、为负分别对应正相关与负相关特性。由图 6(a)可知,平均风速的曲线斜率最大且为正值,表明风速对塔顶位移的敏感性最高,位移随风速增大显著增大;塔筒弹性模量、壁厚则与塔顶位移响应呈显著的负相关关系,即提升上部结构刚度可有效抑制塔顶摆动;相比之下,波高及下部基础参数的曲线趋于平缓,敏感性较低。由图 6(b)可知,各参数的影响规律与塔顶

位置存在一定差异:虽然平均风速仍为最敏感参数,但塔筒弹性模量和壁厚影响程度显著降低,而桩基弹性模量和厚度的敏感性相较于塔顶位置有所增大。这一结果表明,在结构下部区域,桩基自身的刚度特性对位移响应的影响明显增强。综上所述,风荷载对防波堤-风机耦合体系的位移响应最为敏感,塔筒结构刚度参数对塔筒顶部位移影响较大,桩基参数对风机与防波堤交界处的响应影响更为明显,而由于防波堤的遮蔽消能作用,波浪荷载对整体位移响应的影响相对较小。



(a) 塔筒顶端



(b) 桩-堤交界处

图 6 基准值误差曲线

Fig.6 Baseline value error curve

3.3 灰色关联分析

海上风机系统设计参数繁多,且各物理量之间存在显著的量纲差异及复杂的正负相关特性。为此,本文引入灰色系统理论,构建灰色关联分析模型以量化各参数对目标性能的影响权重。为消除数据量纲与数量级带来的偏差,首先,对原始参

数序列与目标特征序列进行预处理,即

$$y_1'(k) = x_1'(k) - x_1'(k-1), k' = 2, 3, \dots, n \quad (15)$$

$$y_2'(k) = x_2'(k) - x_2'(k'-1), k' = 2, 3, \dots, n \quad (16)$$

式中: n 为设计参数数量; x_1' 为设计参数值; x_2' 为对应响应值。

进一步地,对增量序列进行标准化处理,即

$$\xi(k') = \begin{cases} \frac{\text{sgn}(z_1(k') \cdot z_2(k'))}{(1 + 0.5\|z_1(k')\| - \|z_2(k')\| + 0.5) \left| 1 - \frac{\min\{z_1(k') \cdot z_2(k')\}}{\max\{z_1(k') \cdot z_2(k')\}} \right|}, & z_1(k'), z_2(k') \text{不同时为} 0 \\ 1, & z_1(k'), z_2(k') \text{同时为} 0 \end{cases} \quad (20)$$

式中: $0 \leq r < 1$ 时,为正关联,且数值越大,正关联程度越显著;反之, $-1 \leq r < 0$ 时,两者呈负相关, r 越小,负关联程度越高; $r = 0$ 时,参数序列与目标序列无关联。 $\text{sgn}(z_1(k') \cdot z_2(k'))$ 用于表征序列间的正负相关性,

$$\text{sgn}(z_1(k') \cdot z_2(k')) = \begin{cases} 1, & y_1(k') \cdot y_2(k') \geq 0 \\ -1, & y_1(k') \cdot y_2(k') \leq 0 \end{cases}$$

表 5 及图 7 为各参数对塔筒顶端及桩-堤交界处
表 5 灰色关联计算结果

指标	计算结果	
	塔顶	交界处
E_t	0.75	0.30
V_s	0.90	0.78
E_p	0.16	0.39
H_s	0.08	0.20
t_p	0.22	0.30
E_s	0.27	0.28
t_t	0.74	0.29

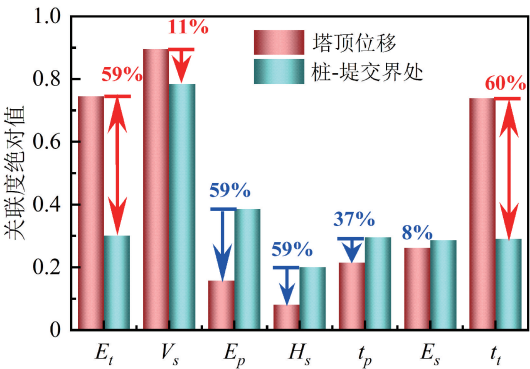


图 7 位移响应灰色关联度

Fig.7 Grey relational degree of displacement response

$$z_i'(k) = \frac{y_i'(k')}{D_i'}, i = 1, 2; k' = 2, 3, \dots, n \quad (17)$$

式中:

$$D_i' = \frac{1}{n-1} \sum_{k'=2}^n |y_i'(k')|, i = 1, 2 \quad (18)$$

则原始关联度 r 可表示为:

$$r = \frac{1}{n-1} \sum_{k=2}^n \xi(k') \quad (19)$$

界处位移响应的灰色关联度绝对值计算结果及柱状图表示。结果显示,在塔顶位置,各参数影响程度排序为: $V_s > E_t > t_t > E_s > t_p > E_p > H_s$ 。风荷载为影响位移响应的首要控制因素,塔筒刚度参数的影响程度次之,而波高因防波堤的遮蔽作用,关联度最低。在桩-堤交界处,各参数影响程度排序为: $V_s > E_p > E_t > t_p > t_t > E_s > H_s$ 。平均风速仍为主要影响因素,而桩基弹性模量的关联度由 0.16 提升至 0.39,表明在该位置处,桩基参数对位移响应的影响有所增加;同时,塔筒壁厚的关联度明显下降,波高的关联度仍处于较低水平。综合分析表明,防波堤-风机耦合体系的位移响应与风荷载的关联性最强,塔筒结构参数对上部塔筒位移贡献显著,桩基参数对交界处位移的影响相对较大,而由于防波堤的遮蔽消能作用,波高对整体结构响应的关联度始终最低。

4 结 语

本文基于 PLAXIS 3D 有限元分析平台建立考虑风-浪联合作用的防波堤-风机耦合数值分析模型,综合考虑了风荷载、波浪荷载及桩-土-防波堤相互作用等多因素耦合效应。在此基础上,对比分析了防波堤-风机耦合体系与传统单桩式近海风机结构的位移响应差异,并结合灰色关联理论系统研究了各关键参数对防波堤-风机耦合体系位移响应的影响规律及敏感程度。主要结论如下:

(1) 相比传统单桩式近海风机,防波堤-风机耦合体系的塔顶位移响应得到显著抑制。该位移

稳定性的提升主要归因于防波堤实体对波浪荷载产生的显著遮蔽效应,以及抛石结构与地基土的相互作用为单桩基础提供了附加约束与阻尼,有效耗散了振动能量。在风浪联合作用工况下,风致倾覆力矩在总倾覆力矩中占据主导地位;附加约束机制通过“桩-堤-土”相互作用提升基础抗倾覆刚度,为稳定性提升的主导因素;遮蔽效应通过削减非主控的波浪荷载,优化耦合体系的受力环境,在整个体系中起到辅助优化的作用。

(2) 基准值误差分析结果表明,防波堤-风机耦合体系的塔顶位移响应对于平均风速最为敏感;由于防波堤的遮蔽作用,波高对结构位移响应的敏感性最低。塔筒结构参数对上部塔筒位移贡献度较高,桩基参数对风机与防波堤交界处的响应影响更为明显。

(3) 灰色关联分析进一步量化验证了上述规律:在塔顶位移方面,平均风速与位移响应的关联度最高,塔筒刚度参数次之,波高关联度最低;在桩-堤交界处,平均风速仍为主要影响因素,但桩基参数的关联度有所增大,而波高的关联度始终处于较低水平,表明防波堤有效削弱了波浪荷载对结构位移响应的影响。

本文所采用的防波堤-风机一体化数值分析模型及基于灰色关联的参数敏感性分析方法,可系统分析复杂海洋环境下新型防波堤-风机结构的位移响应规律,为类似海上风电工程的防灾减灾及设计优化提供理论支撑与参考依据。

参考文献(References):

- [1] 王建超,崔春义,张鹏,等.基于 SACS 的海上风机导管架基础疲劳参数敏感性分析[J].大连海事大学学报, 2023, 49(3): 106-113.
Wang Jianchao, Cui Chunyi, Zhang Peng, et al. Sensitivity analysis of fatigue parameters for offshore wind turbine jacket foundation based on SACS[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2023, 49(3): 106-113. (in Chinese)
- [2] Dong Xiaofeng, Jiang Qi, Lian Jijian, et al. Optimized identification process of equivalent wind load calculations for offshore wind turbines under standstill conditions[J]. Ocean Engineering, 2024, 312: 119043.
- [3] 姜云木,余丁浩,李钢,等.风-浪-涌极限环境条件模型及其相关结构分析[J].海洋学报, 2025, 47(12): 70-

83.

- Jiang Yunmu, Yu Dinghao, Li Gang, et al. A model of extreme environmental conditions for wind-wave-swell and related structural analysis[J]. Haiyang Xuebao, 2025, 47(12): 70-83. (in Chinese)
- [4] 吴志浩,崔春义,张新程,等.直立腿海洋平台冰激振动响应参数敏感性分析[J].大连海事大学学报, 2021, 47(4): 93-99.
Wu Zhihao, Cui Chunyi, Zhang Xincheng, et al. Sensitivity analysis of ice-induced vibration response parameters of the vertical leg offshore platform[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2021, 47(4): 93-99. (in Chinese)
- [5] 吴志浩,崔春义,冷淇程,等.全直桩高桩码头结构的地震易损性分析[J].深圳大学学报(理工版), 2022, 39(4): 432-439.
Wu Zhihao, Cui Chunyi, Leng Qicheng, et al. Seismic vulnerability analysis of vertical pile-supported wharf structure[J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2022, 39(4): 432-439. (in Chinese)
- [6] 姜云木,李钢,余丁浩,等.考虑风浪-涌浪相关性的随机向量过程模拟[J/OL].工程力学, 2024: 1-16. <https://link.cnki.net/urlid/11.2595.03.20240918.1307.009>.
- Jiang Yunmu, Li Gang, Yu Dinghao, et al. The simulation of stochastic vector processes considering the correlation of wind-generated-wave and swell[J/OL]. Engineering Mechanics, 2024: 1-16. <https://link.cnki.net/urlid/11.2595.03.20240918.1307.009>. (in Chinese)
- [7] 张振,崔春义,张鹏,等.基于一维卷积 GRU 网络的导管架平台动力响应实时预测与分析[J].大连海事大学学报, 2023, 49(2): 23-32.
Zhang Zhen, Cui Chunyi, Zhang Peng, et al. Real-time prediction and analysis of jacket platform dynamic response based on one-dimensional convolution and GRU network[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2023, 49(2): 23-32. (in Chinese)
- [8] Yang Yang, Bashir M, Li Chun, et al. Analysis of seismic behaviour of an offshore wind turbine with a flexible foundation[J]. Ocean Engineering, 2019, 178: 215-228.
- [9] Cao Guangwei, Chian S C, Ding Xuanming, et al. Dynamic response of OWTs under wind-wave loads considering 3D water-pile-soil interactions[J]. Ocean Engineering, 2023, 283: 115057.
- [10] Cao Guangwei, Chen Zhixiong, Wang Chenglong, et al. Dynamic responses of offshore wind turbine considering

- soil nonlinearity and wind-wave load combinations[J]. Ocean Engineering, 2020, 217: 108155.
- [11] 尚景宏,杨文灯,杨佳成,等.基于极限分析下限定理的成层地基筒基竖向承载力研究[J].太阳能学报, 2025, 46(10): 628-634.
- Shang Jinghong, Yang Wendeng, Yang Jiacheng, et al. Study on vertical ultimate bearing capacity of bucket foundations based on lower bound thdrem of limit analysis in layered foundation[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2025, 46(10): 628-634. (in Chinese)
- [12] 赵子豪,张正飞,杜威,等.海上风电四桩基础在软黏土中的水平承载特性[J].太阳能学报, 2024, 45(10): 446-452.
- Zhao Zihao, Zhang Zhengfei, Du Wei, et al. Horizontal bearing capacity of offshore wind turbine four-pile foundation in soft clay soil[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2024, 45(10): 446-452. (in Chinese)
- [13] Zou Xinjun, Liang Chuxiong, Chen Shun, et al. Unidirectional horizontal cyclic behaviors of the monopile-wheel composite foundation in sand[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2024, 181: 108665.
- [14] 梁超,孙良伟,刘润,等.基于泥面位移标准的海洋钢管桩基础水平承载力研究[J].太阳能学报, 2026, 47(4): 397-404.
- Liang Chao, Sun Liangwei, Liu Run, et al. Study on horizontal bearing capacity of marine steel pipe pile foundations based on seabed displacement standards[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2026, 47(4): 397-404. (in Chinese)
- [15] Wei Kai, Arwade S R, Myers A T. Incremental wind-wave analysis of the structural capacity of offshore wind turbine support structures under extreme loading[J]. Engineering Structures, 2014, 79: 58-69.
- [16] Jiang Junni, Lian Jijian, Dong Xiaofeng, et al. Research on the along-wind aerodynamic damping and its effect on vibration control of offshore wind turbine[J]. Ocean Engineering, 2023, 274: 113993.
- [17] Xu Mingqiang, Au F T K, Wang Shuqing, et al. Dynamic response analysis of a real-world operating offshore wind turbine under earthquake excitations[J]. Ocean Engineering, 2022, 266: 112791.
- [18] Lombardi D, Bhattacharya S, Wood D M. Dynamic soil-structure interaction of monopile supported wind turbines in cohesive soil[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2013, 49: 165-180.
- [19] Abdullahi A, Bhattacharya S, Li Chao, et al. Long term effect of operating loads on large monopile-supported offshore wind turbines in sand[J]. Ocean Engineering, 2022, 245: 110404.
- [20] Velarde J, Kramhøft C, Sørensen J D, et al. Fatigue reliability of large monopiles for offshore wind turbines[J]. International Journal of Fatigue, 2020, 134: 105487.
- [21] Velarde J, Mankar A, Kramhøft C, et al. Probabilistic calibration of fatigue safety factors for offshore wind turbine concrete structures[J]. Engineering Structures, 2020, 222: 111090.
- [22] 许成顺,李超越,石世刚,等.考虑桩-土相互作用的超大型单桩式海上风机结构地震响应[J].北京工业大学学报, 2024, 50(11): 1301-1311.
- Xu Chengshun, Li Chaoyue, Shi Shigang, et al. Seismic response of super-large monopile offshore wind turbine structure considering pile-soil interaction[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2024, 50(11): 1301-1311. (in Chinese)
- [23] Xu Chengshun, Wang B, El Naggar M H, et al. Soil-pile interaction and evolution of soil pressure in an inclined liquefiable site-pile group-superstructure system[J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2025, 41(4): 401-411.
- [24] Ding Xuanming, Chian S C, Lian Jing, et al. Wind-wave combined effect on dynamic response of soil-monopile-OWT system considering cyclic hydro-mechanical clay behavior[J]. Computers and Geotechnics, 2023, 154: 105124.
- [25] Ding Xuanming, Liu Jianyu, Li Xiao, et al. Lateral bearing characteristics and p - y model of single pile in coral sand considering effect of vertical load[J]. Ocean Engineering, 2025, 342: 122886.
- [26] Chen Jiangnan, Ge Longzai, Xu Yanan, et al. An experimental study on wave force and run-up of wind turbine foundation on breakwater under wave action[J]. Energies, 2025, 18(7): 1676.
- [27] Castelli F, Grasso S, Lentini V, et al. Calibration of the UBC3D-PLM soil model from Dilatometer Marchetti Test (DMT) for the liquefaction behavior and cyclic resistance ratio (CRR) of sandy soils[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2024, 187: 109002.
- [28] Hunter G, Fell R. Rockfill modulus and settlement of concrete face rockfill dams[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 129(10): 909-917.

- [29] Cihan K, Yuksel Y. Deformation of rubble-mound breakwaters under cyclic loads[J]. Coastal Engineering, 2011, 58(6): 528-539.
- [30] Zuo Haoran, Bi Kaiming, Hao Hong, et al. Fragility analyses of offshore wind turbines subjected to aerodynamic and sea wave loadings[J]. Renewable Energy, 2020, 160: 1269-1282.
- [31] Van Der Meer J W, Briganti R, Zanuttigh B, et al. Wave transmission and reflection at low-crested structures: design formulae, oblique wave attack and spectral change[J]. Coastal Engineering, 2005, 52(10/11): 915-929.
- [32] Van Der Meer J W. Rock slopes and gravel beaches under wave attack[D]. Delft: Delft University of Technology, 1988: 1-214.
- [33] Matha D, Sandner F, Molins C, et al. Efficient preliminary floating offshore wind turbine design and testing methodologies and application to a concrete spar design[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences, 2015, 373(2035): 20140350.
- [34] Partovimehr N, Branlard E, Song Mingming, et al. Sensitivity analysis of modal parameters of a jacket offshore wind turbine to operational conditions[J]. Journal of Marine Science & Engineering, 2023, 11(8): 1524.
- [35] He Kunpeng, Ye Jianhong. Physical modeling of the dynamics of a revetment breakwater built on reclaimed coral calcareous sand foundation in the South China Sea—tsunami wave[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(4): 3315-3330.
- [36] Araei A A, Razeghi H R, Tabatabaei S H, et al. Loading frequency effect on stiffness, damping and cyclic strength of modeled rockfill materials[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2012, 33(1): 1-18.