

海上风电四桩导管架桩基冲刷数值分析

陈斯哲¹，赵西增^{2,3}，崔晨昊^{2,3}

(1. 广东能源集团科学技术研究院有限公司，广州 510000；2. 浙江大学海南研究院，海南三亚 572025；3. 浙江大学海洋学院，浙江舟山 316021)

摘要： [目的]为应对海上风电基础结构面临严重的冲刷挑战，[方法]通过数值模拟研究海流作用下海上风电四桩导管架桩基的冲刷问题。采用 FLOW-3D 软件，利用大涡模拟 (LES) 湍流模型和泥沙运动模型，通过与试验结果的对比如验证冲刷数值模型的有效性，并模拟单独恒定流作用下四桩导管架桩基的冲刷过程，分析桩基周围冲刷坑形态随时间的发展变化，研究不同流速、迎流角度、桩间距对四桩桩基冲刷的影响。[结果]结果表明，群桩效应是四桩导管架基础冲刷规律核心，迎流角度改变桩间遮蔽关系，影响冲刷形态的非对称分布；桩间距调节桩间干涉强度，其增大导致群桩效应逐渐减弱，冲刷模式由整体的、相互连接的冲刷坑过渡为相对独立的局部冲刷坑；极限冲刷深度主要受流速控制，随桩间距变化较小。[结论]研究结果为海上风电四桩导管架桩基冲刷数提供参考。

关键词： 导管架；冲刷；海上风电

中图分类号： P752；TM614 **文献标志码：** A **【DOI】** 10.13788/j.cnki.cbge.2026.03.18

Numerical Analysis on Scouring of Four-Pile Jacket Foundation of Offshore Wind Power

CHEN Sizhe¹, ZHAO Xizeng^{2,3}, CUI Chenhao^{2,3}

(1. Guangdong Energy Group Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510000, China; 2. Hainan Institute of Zhejiang University, Sanya 572025, Hainan, China; 3. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, Zhejiang, China)

Abstract: [Purpose] To address the severe scouring challenges faced by offshore wind power infrastructure, [Method] the scouring problem of the four-pile jacket foundation of offshore wind power under the action of ocean currents through numerical simulation. Using FLOW-3D software is studied, adopting the large eddy simulation (LES) turbulence model and the sediment transport model, the validity of the numerical model was verified through comparisons with experimental results, the scouring process of the four-pile jacket foundation under the action of a single steady flow is simulated. The development and changes in the scour pit morphology around the foundation over time are analyzed, and the effects of different flow velocities, incoming flow angles, and pile spacings on the scouring of the four-pile foundation are studied. [Result] The results show that the group pile effect is central to the scouring characteristics of four-pile jacket foundations. The incident flow angle alters the shielding interactions among piles, leading to an asymmetric distribution of scour morphology. Pile spacing modulates the intensity of interference between adjacent piles; as the spacing increases, the group pile effect gradually weakens, and the scour pattern transitions from a unified, interconnected scour hole to relatively independent local scour holes. The maximum scour depth is primarily governed by flow velocity and exhibits only minor variation with changes in pile spacing. [Conclusion] The research findings provide a reference for the scouring of four-pile jacket foundations in offshore wind farms.

收稿日期：2025-02-19；修回日期：2025-05-25

基金项目：广东省科技计划项目（2022B0101100001，2023B1111050010）

作者简介：陈斯哲（1998—），男，硕士。研究方向：新能源技术。

Key words: jacket; scouring; offshore wind power

0 引言

海上风电作为清洁、可再生的能源,近年来在全球范围内迅速发展,尤其在中国,海上风电装机容量已占据全球近半壁江山^[1]。然而,海上风电基础结构的安全运行面临诸多挑战,其中基础冲刷问题尤为突出。风、浪和流等自然因素的长期作用,海上风电基础结构(如导管架、单桩等)周围海床的局部冲刷现象频繁发生,这不仅会降低基础的承载能力和稳定性,还可能引起结构共振、增加结构的振动幅度,甚至导致基础失效,严重影响海上风电项目的经济效益和运行安全^[2]。导管架平台桩基冲刷危害评估显示,冲刷现象会改变平台周围的水动力条件,对平台安全度和极限承载能力产生显著影响^[3]。单桩基础局部冲刷深度受水深条件、波流作用、桩基尺寸、海床性质等多重因素影响,导致冲刷坑形态各异,严重时可危及结构安全^[4]。在破碎波作用下,近岸地区的单桩基础局部冲刷尤为严重,湍流流场和砂床地形的变化对冲刷过程有显著影响,且冲刷深度可达桩直径的50%^[5]。海上风电基础冲刷是一个复杂的多学科交叉领域问题,涉及流体力学、岩土力学等多个领域,其研究和解决对于保障海上风电产业的可持续发展具有重要意义。

海上风电基础冲刷领域研究包括理论分析、试验研究、数值模拟、现场监测等方面。王栋等^[6]对波流作用下单桩冲刷的水泥土防护技术进行了研究,发现水泥土防护可有效减缓冲刷,但其效果受波流条件、桩径大小和海床土体性质影响,并通过模型试验验证了水泥土防护技术的可行性和有效性。贾家喻等^[7]研究了潮流作用下海上风电群桩基础局部冲刷,揭示了冲刷对风电结构稳定性的影响,强调局部冲刷防护对海上风电的安全运行具有重要意义。姜绍云等^[8]针对导管架平台桩基冲刷现象,通过缩尺模型试验研究了波流作用下的冲刷机制,试验结果表明,冲刷深度受环境条件和桩基特性的影响,且冲刷坑的形态和大小可通过试验得到更真实的模拟。李涛等^[9]在波流作用下对海上风机大直径加翼单桩基础局部冲刷进行了试验研究,发现加翼结构在一定水流强度下具有良好的冲刷防护效果,但在大水流强度或波流叠加情况下防护效果可能消失。付亦鹏等^[10]研究了波流作用下淹没单桩与群桩基础周围海床冲刷现象,通过试验揭示了冲刷对桩基稳定性的影响,强调了冲刷防护的重要性。方孝伍等^[11]利用有限元软件ABAQUS建立了不同冲刷深度的模型,研究了冲刷对海上风电大直径单桩基础的影响,研究表明,随着冲刷深度的增加,桩

身位移增大、桩身压力减小、固有频率降低,土体位移和塑性破坏区域面积也随之增加。周茂强等^[12]通过数值模拟方法研究了海上风电斜桩基础局部冲刷,分析了不同倾斜角度和桩径对冲刷的影响,结果表明,斜桩的最大局部冲刷深度随时间快速增加后趋于稳定,不同直径的斜桩具有不同的最终稳定冲刷深度。祁雷等^[13]通过试验研究了单向流和潮汐流条件下单桩基础的局部冲刷效应及防冲刷护圈的防护效果,发现护圈防护效率随直径增大、随安装高度降低而提高。范少涛等^[14]进行了海上风电场基础结构防冲刷物理模型试验,验证了防冲刷措施的有效性,为海上风电基础设计提供了试验依据。邹新军等^[15]研究了局部冲刷下砂土中桩-盘复合基础的承载特性,揭示了H-T联合荷载作用下冲刷对承载力的影响。贺瑞等^[16]通过模型试验研究了局部冲刷对导管架刚度的影响,发现冲刷的存在显著降低了导管架的刚度,对结构稳定性构成威胁。葛晓春等^[17]基于现场监测,分析了冲刷对海上风电大直径钢管桩的影响,指出冲刷深度与桩基稳定性密切相关。陈立等^[18]提出了基于现场冲刷数据的单桩基础局部冲刷深度预测方法,有助于提高预测精度、指导防护设计。

目前海上风电基础冲刷领域的研究已涵盖多个方面,包括冲刷机理的理论分析、试验验证、数值模拟以及现场监测和防护措施的开发。但是现有研究大多聚焦于海上风电单桩基础,针对海上风电导管架尤其是四桩导管架的冲刷研究相对较少。鉴于四桩导管架在海上风电场建设中应用广泛,本文对单独恒定流作用下四桩导管架基础冲刷进行研究,利用FLOW-3D求解器开展计算流体力学模拟,探究不同水文因素对其冲刷过程、形态等冲刷特性影响。

1 水下结构物冲刷数值方法

1.1 水流运动模型

1.1.1 控制方程

在FLOW-3D中,流体被视为不可压缩黏性牛顿流体,模型在连续方程和动量方程中加入了面积和体积分数,具体的控制方程表达式如下。

连续方程为

$$\frac{\partial}{\partial x}(u_x A_x) + \frac{\partial}{\partial y}(u_y A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(u_z A_z) = 0 \quad (1)$$

式中: u_x 、 u_y 、 u_z 分别为对应方向上的分速度; A_x 、 A_y 、 A_z 分别为对应方向上的面积分数。

动量方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial u_x}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u_x A_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y A_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + u_z A_z \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x \\ \frac{\partial u_y}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u_x A_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y A_y \frac{\partial u_y}{\partial y} + u_z A_z \frac{\partial u_y}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y \\ \frac{\partial u_z}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u_x A_x \frac{\partial u_z}{\partial x} + u_y A_y \frac{\partial u_z}{\partial y} + u_z A_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z \end{cases} \quad (2)$$

式中: t 为运动时间; V_F 为体积分数; ρ 为流体密度; p 为流体压强; G_x 、 G_y 和 G_z 分别为对应方向上的加速度, 其中 $G_z = -9.8 \text{ m/s}^2$; f_x 、 f_y 和 f_z 分别为对应方向上的加速度(黏滯力)。

1.1.2 湍流模型

由于流体间的黏滯性, 流体展现出层流和湍流两种流动状态。层流中各流体微团互不干扰、分层运动; 湍流中流体质点做不规则运动, 各流体微团互相混合。湍流的运行轨迹混乱, 是一种不稳定的复杂流动现象, 基础周围及冲刷坑内的流体运动均属于湍流。FLOW-3D中提供了5种湍流模型, 分别为标准 k - ε 模型、RNG k - ε 模型、一方程模型、零方程模型中的普朗特混合长度模型和大涡模拟(Large Eddy Simulation, LES)模型。其中, 一方程模型和零方程模型中的普朗特混合长度模型过于简单, 不能精确模拟流体发生大变形时的湍流情况。在局部冲刷模型的数值模拟中, RNG k - ε 模型是应用较为广泛的模型, 为标准 k - ε 模型的进一步改进, 基于雷诺平均纳维-斯托克斯方程(Reynolds-Averaged Navier-Stokes, RANS)发展而来, 通过时间平均方法提高计算效率, 但是在实际研究过程中发现, RNG k - ε 模型存在局部冲刷流场模拟结果误差较大

$$\begin{cases} \frac{\partial k_T}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u_x A_x \frac{\partial k_T}{\partial x} + u_y A_y \frac{\partial k_T}{\partial y} + u_z A_z \frac{\partial k_T}{\partial z} \right) = P_T + G_T + D_{\text{Diff}, k_T} - \varepsilon_T \\ D_{\text{Diff}, k_T} = \frac{1}{V_F} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_k A_x \frac{\partial k_T}{\partial x} \right) + R \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_k A_y R \frac{\partial k_T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_k A_z \frac{\partial k_T}{\partial z} \right) + \xi \frac{\nu_k A_x k_T}{x} \right\} \\ \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u_x A_x \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial x} + u_y A_y \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial y} + u_z A_z \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial z} \right) = \frac{C_1 \varepsilon_T}{k_T} (P_T + C_3 G_T) + D_{\text{Diff}, \varepsilon} - C_2 \frac{\varepsilon_T^2}{k_T} \end{cases} \quad (3)$$

式中: k_T 为紊动能; P_T 为速度梯度产生的紊动能 k_T 的附加项; G_T 为浮力产生的紊动能 k_T 的附加项; D_{Diff, k_T} 为扩散项; ε_T 为紊动耗散率; ν_k 为湍流黏度; R 为径向坐标; ξ 为几何修正系数; C_1 、 C_2 和 C_3 为常数; $D_{\text{Diff}, \varepsilon}$ 为扩散项。

在LES模型中, 由于小尺度湍流的复杂性使其难以直接计算, 因此采用涡流黏度概念表征这些微小的湍流结构。涡流黏度与长度尺度和速度波动的乘积成正比例关系。为表示长度尺度 L , Smagorinsky模型采用网格单元尺寸的几何平均作为其表示方法:

$$L = (\delta_x \delta_y \delta_z)^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

式中: δ_x 、 δ_y 和 δ_z 分别为计算网格在3个坐标轴方向上的单元尺寸。

涡黏系数 ν_T 为

$$\nu_T = (cL)^2 \sqrt{e_{ij} e_{ji}} \quad (5)$$

式中: c 为无量纲参数, 称为Smagorinsky参数; e_{ij} 和 e_{ji} 为应变率张量的分量。

1.2 泥沙运动模型

泥沙在海床上的移动是一个复杂的动态过程, 通常可以分为起动、运动和沉积3个阶段。起动阶段,

水流的剪切力超过泥沙与海床间的黏附力,使泥沙颗粒离开海床;运动阶段,泥沙颗粒在水流作用下沿海床滑动或跳跃(推移质),或被水流携带于水体中悬浮(悬移质),具体运动形式取决于水流速度、泥沙粒径及海床特性;沉积阶段发生在水流能力减弱、无法维持泥沙悬浮时,泥沙颗粒逐渐沉降于海床,形成新的沉积层。本文采用FLOW-3D提供的泥沙运动模型,该模型通过控制方程求解悬移质运动,并基于剪切应力求解推移质运动。

1.2.1 泥沙起动

在沉积动力学基础研究中,临界剪切应力是判断沉积物是否起动的关键参数。希尔兹数 θ 为无量纲化的床面剪切应力,因此在冲刷研究中,通常以临界希尔兹数 θ_{cr} 评估泥沙颗粒是否发生起动。当流体作用于泥沙颗粒的希尔兹数 θ 超过该临界值时,表明水流的剪切力已足够克服泥沙的阻力,导致泥沙颗粒脱离海床开始移动。

临界希尔兹数 θ_{cr} 的计算公式为

$$\begin{cases} \theta_{cr} = \frac{0.3}{1+1.2d_*} + 0.055(1-e^{-0.02d_*}) \\ d_* = d_{50} [g(s-1)/\nu^2]^{1/3} \\ s = \rho_s/\rho_w \end{cases} \quad (6)$$

式中: d_* 为泥沙粒径的无量纲参数; d_{50} 为泥沙中值粒径; g 为重力加速度; s 为泥沙相对密度; ν 为水的运动黏度; ρ_s 为泥沙密度; ρ_w 为流体密度。

希尔兹数 θ 的计算公式为

$$\theta = \frac{\tau_{max}}{(s-1)\rho_w g d_{50}} \quad (7)$$

式中: τ_{max} 为波浪和水流共同作用下的床面最大剪切应力; ρ_w 为流体密度。

采用Soulsby表达式^[20]为

$$\begin{cases} \tau_{max} = \left[(\tau_m + \tau_w \cos\phi)^2 + (\tau_w \sin\phi)^2 \right]^{1/2} \\ \tau_m = \tau_c \left[1 + 1.2 \left(\frac{\tau_w}{\tau_c + \tau_w} \right)^{3.2} \right] \\ \tau_c = \rho C_D U_c^2, \tau_w = \frac{1}{2} \rho f_w U_w^2 \\ \tau_w = \frac{1}{2} \rho f_w U_w^2 \\ C_D = \left[\frac{\kappa}{1 + \ln(z_0/h)} \right]^2 \\ f_w = \begin{cases} 2R_w^{-0.5} & \text{层流} \\ 0.0521R_w^{-0.187} & \text{水力光滑流} \\ 1.39(A/z_0)^{-0.52} & \text{完全水力粗糙流} \end{cases} \end{cases} \quad (8)$$

式中: τ_m 为1个波浪周期内近底床面的平均剪切应力;

τ_w 和 τ_c 分别为波浪和水流产生的最大近底剪切应力; ϕ 为水流方向与波浪传播方向夹角; C_D 和 f_w 分别为水流和波浪的水底摩擦阻力系数; U_c 和 U_w 分别为近底1.0倍桩径处的水流速度和波浪水质点最大水平速度; κ 为卡门常数,取0.4; z_0 为床面粗糙高度,取 $z_0=d_{50}/12$; h 为水深; R_w 为波浪雷诺数; A 为水质点振幅。

1.2.2 推移质模型

推移质在流场中不随流体运动,FLOW-3D提供了多种推移质计算的公式,本文建立的冲刷模型采用MEYER-PETER等^[21]提出的推移质经验公式进行计算,对于每个网格中泥沙推移质输送率的无量纲数 Φ ,其计算公式为

$$\Phi = \beta(\theta - \theta_{cr})^{1.5} \quad (9)$$

式中: β 为推移质系数。

每个计算单元中推移质输送率 q_b 为

$$q_b = \Phi [g(s-1)d_{50}^3]^{0.5} \quad (10)$$

推移质中跃移质 δ 计算表达式为

$$\delta = 0.3d_*^{0.7} d_{50} \left(\frac{\theta}{\theta_{cr}} - 1 \right)^{0.5} \quad (11)$$

将推移质输送率 q_b 转换为推移质运动速度 u_b ,即

$$u_b = q_b / (\delta f_b) \quad (12)$$

式中: f_b 为推移质中的泥沙体积分。

计算得到每个计算单元边界泥沙质量流量 Q_b 为

$$Q_b = u_b \delta f_b \rho_s \quad (13)$$

1.2.3 悬移质模型

悬移质在流场中随流体运动,泥沙运输方程为

$$\frac{\partial c_s}{\partial t} + \nabla(\bar{u}c_s) = 0 \quad (14)$$

式中: c_s 为悬移质浓度; \bar{u} 为泥沙与流体的混合速度。

由于泥沙的密度比水大,因此泥沙在水中会发生沉降和漂流,泥沙的漂流速度受浮力(增加漂流速度)和拖曳力(阻止漂流)的影响,混合流的动量方程为

$$\frac{\partial u_s}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla u_s = -\frac{1}{\rho_s} \nabla P + F - \frac{K}{f_s \rho_s} u_r \quad (15)$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla \bar{u} = -\frac{1}{\bar{\rho}} \nabla P + F \quad (16)$$

式(15)和式(16)中: u_s 为泥沙悬移质速度; P 为压力; F 为与体积力和黏滞力有关的函数; K 为拖曳系数; f_s 为泥沙体积分; u_r 为相对速度; $\bar{\rho}$ 为混合密度。

2 数值模型

2.1 冲刷模型验证

导管架基础的局部冲刷问题涉及基础结构、泥

沙和水流之间的复杂相互作用, 为确保冲刷数值模型的有效性, 应将建立的冲刷模型与试验结果进行对比验证。冲刷数值验证模型的设置参照ZHAO等^[22]的淹没桩水槽冲刷试验, 模型中桩露出高度与桩径的比值为0.5, 并将模型仿真结果与水槽试验结果进行比较, 验证冲刷数值模型的可靠性。模型基本参数如下: 水槽长1.4 m、宽0.4 m、高0.85 m, 淹没桩直径为0.1 m、露出高度为0.05 m, 入流边界断面流速为0.441 m/s, 水深为0.5 m, 泥沙中值粒径为0.4 mm, 泥沙厚度为0.15 m。入流边界采用速度边界条件, 出流边界采用压力边界条件, 设置水位与水深相同, 底部采用壁面边界条件, 侧面和顶部采用对称边界。

图1为冲刷数值模型与水槽试验的冲刷深度随时间的变化情况。水槽试验中, 冲刷深度在试验开始时快速增加, 随时间推移增速逐渐变缓, 在1 h后呈现波动平衡。冲刷数值模型结果与水槽试验结果趋势相同, 同样随时间变化增速逐渐变缓, 但冲刷数值模型达到平衡状态的时间相较于试验结果有所延迟。冲刷数值模型前期冲刷发展速度较水槽试验缓慢, 但在1.5 h左右达到平衡状态。在平衡区域, 冲刷数值模型的结果与试验结果接近。冲刷数值模型最大冲刷深度为9.2 cm, 试验最大冲刷深度为8.4 cm, 两者相差9.5%。考虑到本文的主要目的是探究不同因素对导管架基础冲刷的影响, 该误差在可接受范围内, 因此可使用该模型进行后续模拟。

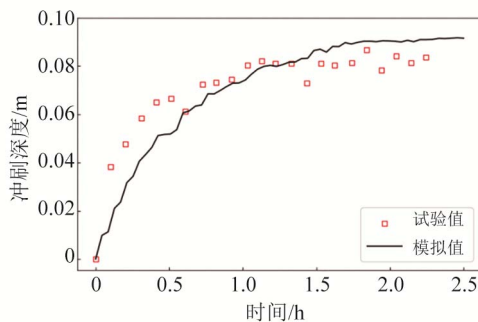


图1 冲刷数值模型与水槽试验的冲刷深度随时间变化对比

Fig. 1 Comparison of Scour Depth Development Over Time Between Numerical Scouring Model and Flume Experiment

2.2 四桩导管架基础冲刷模型设置

海上风电四桩导管架基础安装后, 会受到不同方向、不同速度的水流作用。同时, 桩基的存在会改变周围流场结构, 影响其他桩基的冲刷发展。因此, 为全面理解四桩导管架基础的局部冲刷特征, 通过建立单独恒定流作用下四桩导管架基础的局部冲刷模型, 综合分析不同流速、迎流角对四桩导管

架基础局部冲刷的影响机理; 建立四桩导管架筒形基础间流场扰动模型, 研究四桩导管架基础在单独恒定流作用下的冲刷特性。

采用的四桩导管架桩基间距为15 m, 桩直径为2.59 m。根据LIAN等^[23]的研究结果, 导管架基础结构对冲刷坑深度和形态的影响较小, 可以忽略不计。如果需要考虑导管架结构对基础冲刷的影响, 应加密上部网格对导管架结构进行模拟, 但考虑到计算资源、计算时长以及导管架结构对基础冲刷的影响较小, 仅建立桩基结构模型, 并在仿真中将模型简化为4根间距15 m、直径2.59 m、高度10 m的圆柱。

流场示意图2, 尺寸为长145 m、宽55 m、高20 m, 包括泥沙区域及首尾两个缓冲区域。设定水深为10 m, 泥沙深度为10 m, 泥沙区域长度为55 m, 在泥沙区域前后各设置45 m长的缓冲区, 以防止出入流边界的流体对泥沙区域产生冲击。流场边界设置如下: 入流边界为速度边界, 根据工况流速设置; 出流边界为压力边界, 设定为10 m水深对应的压力; 两侧和顶部为对称边界; 底部为壁面边界。网格划分采用局部网格加密方式, 在确保计算精度的情况下, 节省计算资源。首尾两个缓冲区域在长度、宽度和高度方向分别划分45个、55个和20个网格, 泥沙区域在长度、宽度和高度方向分别划分110个、110个和40个网格。仿真时长设定为7 200 s。

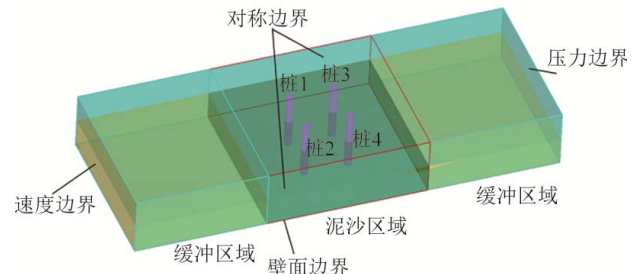


图2 仿真流场示意图

Fig. 2 Schematic Diagram of Simulated Flow Field

本文主要探究单独恒定流作用下四桩导管架桩基的局部冲刷特性, 通过分析不同流向、不同流速条件对局部冲刷的影响, 研究四桩基础在单独恒定流作用下的局部冲刷机理, 并结合四桩基的对称几何结构确定仿真工况, 具体工况见表1。

表1 仿真工况

Tab. 1 Simulation Working Condition

工况	速度/(m/s)	迎流角度/(°)
1	0.5	0
2	1.0	0
3	1.5	0
4	1.0	45.0
5	1.0	22.5

本文采用的泥沙参数参考广东湛江某海域海底沉积物调查结果，模型底床设置为均一砂质底床，泥沙中值粒径为0.000 1 m，泥沙密度为2 650 kg/m³，详细的泥沙及流场参数见表2。

表 2 泥沙及流场参数

Tab. 2 Parameters of Sediment and Flow Field

参数	数值
泥沙中值粒径/m	0.000 1
沉积物颗粒密度/(kg/m ³)	2 650
临界希尔兹数	0.077
休止角/(°)	32
流体密度/(kg/m ³)	1 000
重力加速度/(m/s ²)	-9.8
流体黏度/[(kg·m)/s]	0.01

3 冲刷坑随时间发展过程分析

针对工况3，分析四桩导管架桩基冲刷随时间变化情况。图3为工况3在4个不同时刻下桩基附近床面冲刷深度云图，可以观察到桩基周围床面的动态冲刷演变过程。

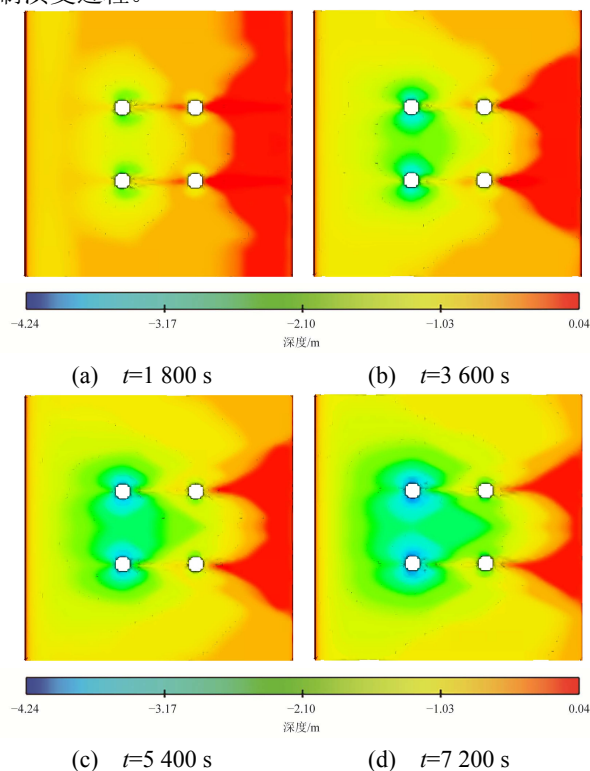


图 3 工况 3 冲刷深度云图

Fig. 3 Cloud Chart of Scour Depth Under Working Condition 3

在冲刷初始阶段 ($t=1\ 800\ s$)，桩基附近已经出现冲刷现象，此时最大冲刷深度为-2.32 m，位于桩1、桩2的内侧。4个桩基附近均呈现两侧冲刷特征，

且形态接近对称。由于桩1和桩2的阻流作用，位于流向后侧的桩3、桩4两侧冲刷坑深度相对较小。

当 $t=3\ 600\ s$ 时，冲刷深度明显增加，且冲刷区域朝下游方向大幅扩展。最大冲刷深度增至-3.19 m，仍位于桩1、桩2的内侧。桩1和桩2之间的冲刷坑开始形成连接趋势，桩3、桩4两侧冲刷深度虽仍较小，但其后侧未受到冲刷的区域大幅缩小。

当 $t=5\ 400\ s$ 时，冲刷坑形态基本稳定，冲刷深度进一步增加，最大冲刷深度为-3.82 m，仍位于桩1和桩2的内侧。桩1和桩2之间的冲刷坑进一步发展并连接，且影响范围向前、向后均有大幅扩展。桩3和桩4两侧开始出现明显的冲刷痕迹。

当 $t=7\ 200\ s$ 时，冲刷深度和影响范围的变化幅度减小，基本达到平衡状态，最大冲刷深度为-4.24 m，仍位于桩1、桩2的内侧。此时，桩1和桩2之间的冲刷坑范围继续扩大，桩3和桩4附近的冲刷坑进一步发展，并与桩1和桩2之间的冲刷坑相连，但桩3、桩4的冲刷程度仍相对较小。

图4为不同时刻下桩1和桩2轴心所在截面的冲刷深度分布。由图4可知，冲刷深度呈对称分布，由两侧向桩体呈阶梯式增大，桩1和桩2内侧冲刷深度深于外侧；随着时间的推移，冲刷深度的增长速率逐渐减慢。

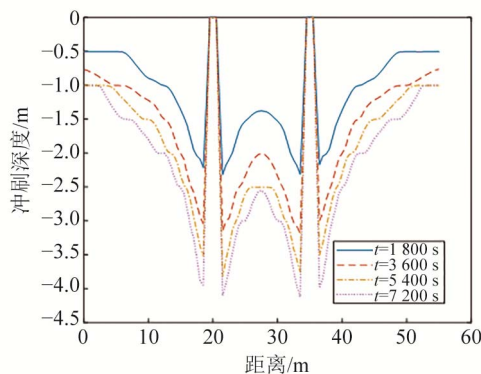


图 4 桩 1 和桩 2 截面冲刷形态分布

Fig. 4 Distribution of Scouring Patterns of Sections of Pile 1 and Pile 2

4 不同工况下冲刷结果分析

4.1 不同流速对冲刷结果影响分析

工况1、工况2和工况3设置0°迎流角度下的不同流速，图5为 $t=7\ 200\ s$ 时不同流速下的桩基冲刷结果。当 $v=0.5\ m/s$ 时，冲刷发展微弱，最大冲刷深度为-0.92 m，桩1和桩2两侧冲刷范围较小，未形成连接；受桩1和桩2的阻流作用影响，桩3和桩4周围几乎未形成冲刷，且4个桩后均有轻微泥沙堆积。当 $v=1.0\ m/s$ 时，冲刷范围进一步扩大，最大冲刷深度为-2.27 m，桩3和桩4后泥沙堆积高度达0.44 m，为3种流速下最高。当 $v=1.5\ m/s$ 时，桩基周围冲刷坑充

分发展, 最大冲刷深度为-4.24 m, 桩1和桩2两侧的冲刷坑充分连接。3种流速下最大冲刷深度均出现在桩1和桩2内侧, 当 $v=0.5$ m/s、 1.0 m/s时, 桩3和桩4两侧冲刷并不明显。图6为不同流速下桩2内侧冲刷深度变化情况。由图6可知, 流速越大, 冲刷深度的增长速率越快, 冲刷达到基本稳定所需的时间越长。

当 $v=0.5$ m/s、 1.0 m/s时, 冲刷深度整体近似呈线性增长, 增长速率分别约为 7.482×10^{-5} m/s、 2.061×10^{-4} m/s; 当 $v=1.5$ m/s时, 冲刷深度的增长呈非线性特征, 冲刷增长速率逐渐减小, 由起始阶段约 2.355×10^{-3} m/s减至末期的约 1.548×10^{-4} m/s。

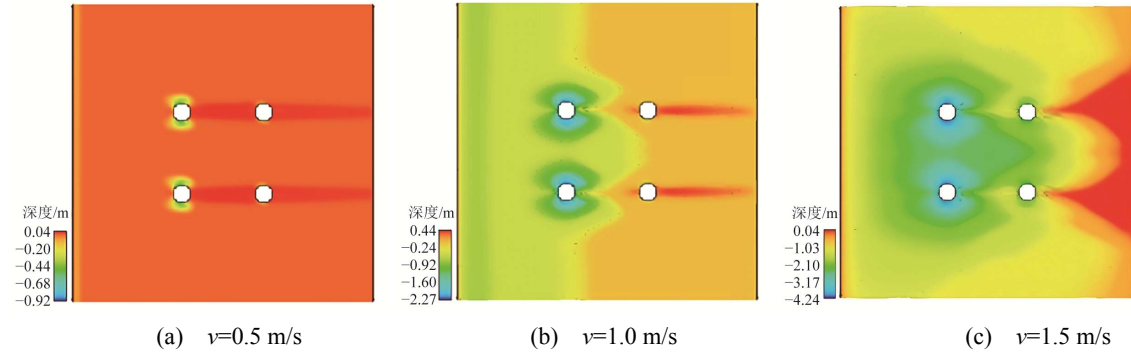


图 5 不同流速下桩基冲刷深度云图

Fig. 5 Cloud Chart of Scour Depth of Pile Foundations Under Different Flow Velocities

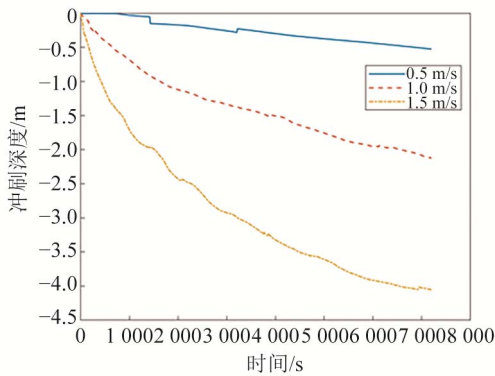


图 6 不同流速下桩 2 内侧冲刷深度变化

Fig. 6 Changes in the Depth of Scouring on the Inner Side of Pile 2 Under Different Flow Velocities

4.2 不同迎流角度对冲刷结果影响分析

工况2、工况4和工况5设置了 1.0 m/s流速下的不

同迎流角度, 图7为 $t=7\ 200$ s时不同迎流角度下的桩基冲刷结果, 图8为不同迎流角度下底床上高度 1.0 m处断面流速分布。由图7可知, 不同迎流角度下的最大冲刷深度差异较小, 均在 -2.2 m左右, 其中 0° 迎流角度时最大冲刷深度最大, 为 -2.27 m。由图8可知, 当迎流角度为 0° 时, 桩3和桩4处于桩1和桩2的尾流作用区内, 其附近流场流速较小, 导致图7中 0° 迎流角度下桩3和桩4周围的冲刷程度较弱。当迎流角度为 22.5° 时, 4个桩基之间的尾流相互影响减弱, 使每个桩基周围均出现明显冲刷, 并且冲刷形态不再呈对称分布, 此时最大冲刷深度为 -2.1 m, 同时桩4后泥沙堆积高度最大, 为 0.51 m。当迎流角度为 45° 时, 桩1、桩2和桩3周围均有明显冲刷, 而桩4仍受到桩1的尾流影响, 因此其周围的冲刷程度相对其余3桩较小。

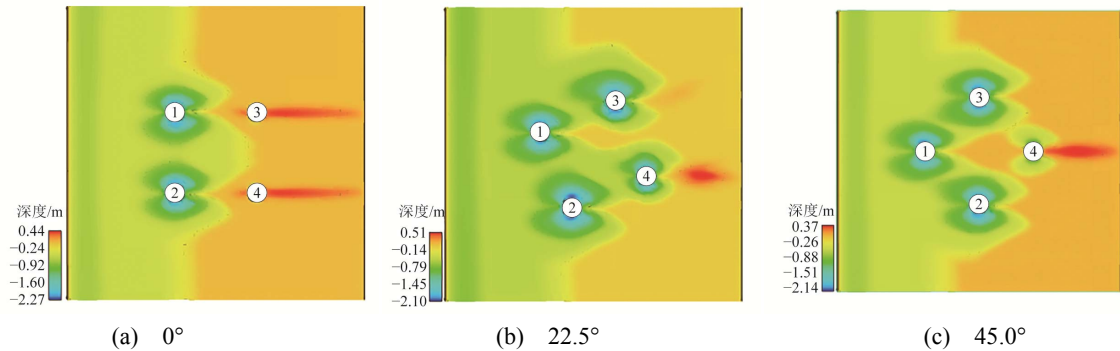


图 7 不同迎流角度下桩基冲刷深度云图

Fig. 7 Cloud Chart of Scour Depth of Pile Foundations Under Different Incoming Flow Angles

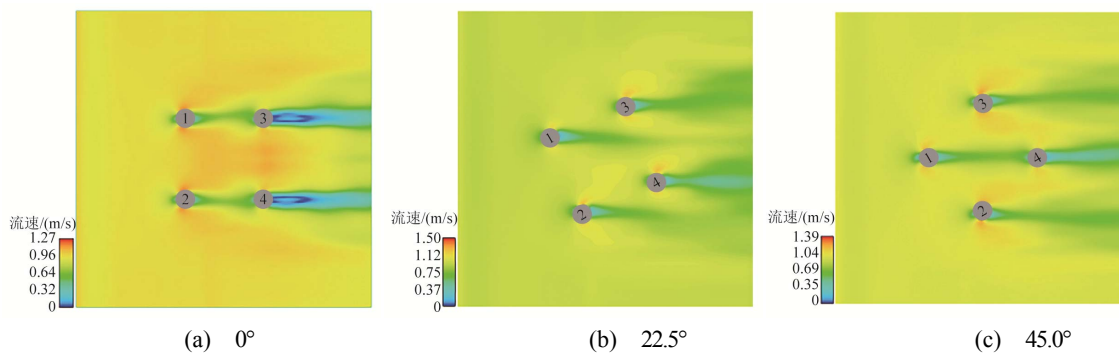


图8 不同迎流角度下底床上高度1 m处断面流速分布

Fig. 8 Distribution of Cross-Sectional Flow Velocity at a Section 1 m Above the Bed Surface Under Different Incoming Flow Angles

4.3 不同桩间距对冲刷结果影响分析

本节探究四桩导管架不同桩间距对冲刷结果的影响，设置了10 m、15 m和20 m 3种桩间距工况，保持桩径不变，迎流角度为0°，流速为1 m/s。图9为不同桩间距下桩基冲刷深度分布云图。由图9可知，

在不同桩间距条件下，上游迎流的2个桩基直接受到水流冲击，其附近冲刷最为严重；下游的2个桩基处于上游2个桩基的尾流作用区内，附近流场流速较小，冲刷程度较弱，且桩后均存在泥沙淤积现象。

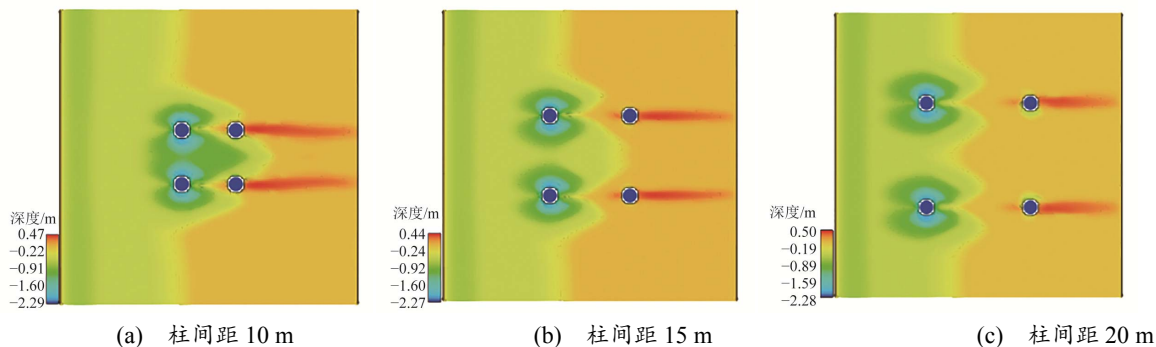


图9 不同桩间距下桩基冲刷深度分布云图

Fig. 9 Cloud Chart of Distribution of Scour Depth of Pile Foundations Under Different Pile Spacings

当桩间距为10 m时，上游2个桩基之间的冲刷坑连接在一起，形成一个整体的冲刷坑，且小桩间距产生的从桩间加速通过的水流使得下游2个桩基之间出现明显冲刷。此时4个桩基更像一个整体结构在抵抗水流，桩间相互影响达到最大，群桩效应显著。当桩间距增加到15 m时，上游2个桩基的冲刷坑形态较为独立，没有明显的连接，上游桩间水流对下游2个桩基附近冲刷的影响明显减小。在20 m的最大桩间距下，每个桩基周围的冲刷坑形态变得更加独立，桩基之间冲刷的相互影响显著减弱，此时桩基附近的冲刷形态与15 m桩间距工况时相似。综上可见，随着桩间距的增大，每个桩基的冲刷模式更接近于单个桩基的冲刷模式。图10给出桩基冲刷深度、堆积高度随桩间距的变化。

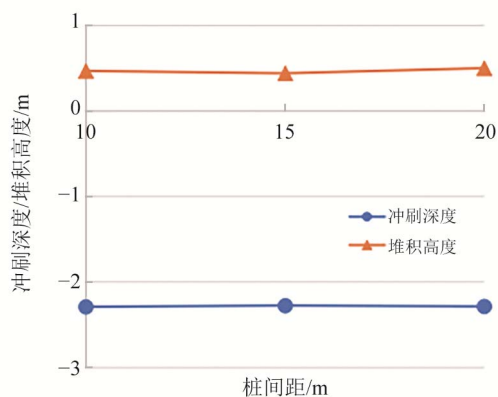


图10 冲刷深度、堆积高度随桩间距变化
Fig. 10 Variation of Scour Depth and Accumulation Height with Pile Spacing

由图10可知, 3种桩间距下的冲刷深度非常接近, 介于 $-2.29\text{ m} \sim -2.27\text{ m}$, 堆积高度亦相差不大, 介于 $0.44\text{ m} \sim 0.50\text{ m}$ 。这表明在本文研究范围内, 桩间距对极限冲刷深度的影响不是决定性的, 其主要影响因素为流速。

4.4 冲刷规律小结

通过前述不同工况的数值模拟结果分析可见, 四桩导管架基础的局部冲刷并非4个独立单桩冲刷的简单叠加, 而是展现出一定的群桩效应, 其冲刷形态和冲刷深度受桩基间相互作用的影响。

流速是驱动泥沙起动和输运的根本能量来源, 直接决定了冲刷的极限深度和发展速率。冲刷深度和冲刷发展的速率均随着流速的增大而显著增加。在低流速下, 冲刷发展缓慢且深度有限; 而在高流速下, 不仅最终的冲刷深度远大于低流速工况, 其初始阶段的冲刷速率也极快, 随后逐渐减缓并趋于平衡。冲刷深度与时间的关系并非简单线性, 尤其在高流速时呈现明显的非线性特征。与单桩基础类似, 流速是控制极限冲刷深度的最主要因素。然而对于四桩导管架, 高流速不仅加剧了单个桩基的冲刷, 还会放大桩间流场的相互作用, 使上游桩基的冲刷坑更易连接成片, 形成更大范围的整体冲刷。

迎流角度是影响桩基间相互作用模式(如遮蔽效应、尾流干扰)的关键因素, 影响整体冲刷坑的形态分布。当迎流角度为 0° 时, 群桩效应中的遮蔽效应最为显著。上游桩1和桩2直接迎流, 产生严重的局部冲刷; 而下游的桩3和桩4处于前者的尾流区内, 附近流速显著降低, 导致其冲刷程度微弱。随着迎流角度的改变, 遮蔽效应被削弱, 所有桩基均会受到水流的直接冲击, 使每个桩基周围均形成冲刷坑。此时, 冲刷坑形态变得不再对称, 冲刷位置和泥沙堆积的位置也随之变化。这揭示了桩基间流场干扰的复杂性, 迎流角度通过改变桩间的尾流遮蔽关系, 影响了冲刷区域的分布和非对称性, 这也是四桩导管架冲刷区别于单桩冲刷的重要特征。

桩间距的大小决定了群桩效应的强度, 即桩基从整体结构到单个独立结构的行为过渡。单桩冲刷主要受自身尺寸影响, 而四桩导管架的冲刷范围和形态还受到桩间距这一几何参数的制约。桩间距越小, 群桩的相互干涉效应越强, 导致各桩基的冲刷坑连接成片, 形成一个范围更大的整体冲刷坑。在小间距工况下, 上游桩基之间水流加速会加剧下游桩基附近的冲刷。随着桩间距的增大, 群桩效应逐渐减弱, 冲刷模式从整体的、相互连接的冲刷坑过渡到相对独立的局部冲刷坑, 每个桩基的冲刷行为更趋近于单桩; 而极限冲刷深度主要受流速控制, 随桩间距变化并不明显。因此, 桩间距主要影响冲刷的形态和范围, 而非极限深度, 桩间距越小, 群

桩干涉越强, 冲刷坑形态整体化趋势越明显。

综上所述, 四桩导管架基础的冲刷规律核心在于群桩效应, 它显著区别于单桩冲刷。迎流角度通过改变桩间遮蔽关系, 主导了冲刷形态的非对称分布; 而桩间距则调节桩间干涉的强度。在进行此类结构的设计与防护时, 不能简单套用单桩的冲刷理论, 必须充分考虑不同方向来流引发的桩间作用, 并根据桩间距评估冲刷坑连片发展的可能性。

5 结论

海上风电作为一种清洁能源, 在快速发展的同时, 其基础结构面临冲刷引起的结构安全性挑战。本文对海上风电四桩导管架桩基在海流作用下的冲刷问题进行了数值研究, 聚焦于单独恒定流作用下四桩导管架桩基冲刷特性, 采用计算流体力学方法进行数值模拟, 并通过与试验结果的对比验证了冲刷数值模型的有效性, 进而分析了不同水文因素对冲刷过程和形态的影响。工况3下冲刷形态呈对称分布, 冲刷深度由两侧向桩基内侧呈阶梯式增大, 桩1、桩2内侧冲刷深度深于外侧; 随着时间的推移, 冲刷深度的增长逐渐减缓, 最大冲刷深度为 -4.24 m 。海上风电四桩导管架桩基的冲刷情况受流速和迎流角度的显著影响。 0° 迎流角度工况下, 当流速为 0.5 m/s 、 1.0 m/s 时, 冲刷深度整体近似呈线性增长, 增长速率分别约为 $7.482 \times 10^{-5}\text{ m/s}$ 、 $2.061 \times 10^{-4}\text{ m/s}$; 当流速为 1.5 m/s 时, 冲刷深度的增长呈非线性特征, 冲刷深度的增长速率逐渐减小, 由起始阶段的约 $2.355 \times 10^{-3}\text{ m/s}$ 减小至末期的约 $1.548 \times 10^{-4}\text{ m/s}$ 。当迎流角度为 0° 时, 处于尾流区的桩基3、桩基4周围冲刷程度较弱; 当迎流角度变为 22.5° 后, 4个桩基周围均形成明显冲刷, 且不再呈对称分布, 最大冲刷深度为 -2.1 m , 桩4后泥沙堆积高度最大, 为 0.51 m 。这表明迎流角度变化带来的桩基间尾流效应变化, 对冲刷形态有显著影响。四桩导管架基础的冲刷规律核心在于群桩效应, 迎流角度通过改变桩间遮蔽关系, 主导了冲刷形态的非对称分布; 而桩间距则调节桩间干涉的强度。随着桩间距的增大, 群桩效应逐渐减弱, 冲刷模式由整体的、相互连接的冲刷坑过渡为相对独立的局部冲刷坑, 每个桩基的冲刷行为更趋近于独立单桩, 而极限冲刷深度主要受流速控制, 随桩间距变化并不明显。

参考文献:

- [1] 李志川, 胡鹏, 马佳星, 等. 中国海上风电发展现状分析及展望[J]. 中国海上油气, 2022, 34(5): 229-236.
LI Z C, HU P, MA J X, et al. Analysis and Prospect of the Development of Offshore Wind Power in China[J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(5): 229-236.

- [2] 杨娟, 朱聪, 蔡丽, 等. 海上风电场不同结构形式桩基局部冲刷数值模拟[J]. 人民长江, 2020, 51(9): 151-157.
YANG J, ZHU C, CAI L, et al. Numerical Simulation of Local Scouring of Pile Foundations with Different Structural Forms in Offshore Wind Farms[J]. Yangtze River, 2020, 51(9): 151-157.
- [3] 亓和平. 浅海导管架平台冲刷灾害评估分析[J]. 中国海洋平台, 2006(3): 45-49.
QI H P. Analysis of Scouring Disaster Assessment for Offshore Jacket Platforms in Shallow Waters[J]. China Offshore Platform, 2006(3): 45-49.
- [4] 杜波, 王栋, 宋木清, 等. 水深条件对单桩基础局部冲刷和流场结构的影响[J]. 水道港口, 2023, 44(5): 754-762.
DU B, WANG D, SONG M Q, et al. Influence of Water Depth Conditions on Local Scouring and Flow Field Structure of Monopile Foundations[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2023, 44(5): 754-762.
- [5] 陶钢, 赵西增, 侯亚东, 等. 破碎波作用下单桩基础局部冲刷试验研究[J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 2024, 39(1): 81-86.
TAO G, ZHAO X Z, HOU Y D, et al. Experimental Study on Local Scouring of Monopile Foundations Under Breaking Waves[J]. Journal of Hydrodynamics, (Series A), 2024, 39(1): 81-86.
- [6] 王栋, 杜波, 戴国亮. 波流作用下单桩冲刷的水泥土防护技术研究及应用[J]. 中国港湾建设, 2024, 44(3): 32-38.
WANG D, DU B, DAI G L. Research and Application of Cement Soil Protection Technology for Monopile Scouring Under Wave and Current Actions[J]. China Port & Waterway, 2024, 44(3): 32-38.
- [7] 贾家喻, 张金凤, 郑斌, 等. 潮流作用下海上风电群桩基础局部冲刷与防护试验研究[J]. 海洋工程, 2023, 41(1): 159-168.
JIA J Y, ZHANG J F, ZHENG B, et al. Experimental Study on Local Scouring and Protection of Group Pile Foundations in Offshore Wind Farms Under Tidal Currents[J]. Ocean Engineering, 2023, 41(1): 159-168.
- [8] 姜绍云, 李志刚, 段梦兰, 等. 波流作用下导管架平台桩基冲刷试验研究[J]. 石油机械, 2012, 40(9): 57-61.
JIANG S Y, LI Z G, DUAN M L, et al. Experimental Study on Scouring of Jacket Platform Pile Foundations Under Wave and Current Actions[J]. Oil & Gas Field Equipment, 2012, 40(9): 57-61.
- [9] 李涛, 王顺意, 李彪, 等. 波流作用下海上风机大直径加翼单桩基础局部冲刷试验研究[J]. 海洋工程, 2024, 42(6): 60-70.
LI T, WANG S Y, LI B, et al. Experimental Study on Local Scouring of Large-Diameter Winged Monopile Foundations for Offshore Wind Turbines Under Wave and Current Actions[J]. Ocean Engineering, 2024, 42(6): 60-70.
- [10] 付亦鹏, 朱成浩, 孙元, 等. 波流作用下淹没单桩与群桩基础周围海床冲刷试验研究[J]. 海洋工程, 2024, 42(6): 71-82.
FU Y P, ZHU C H, SUN Y, et al. Experimental Study on Scouring around Submerged Monopile and Group Pile Foundations Under Wave and Current Actions[J]. Ocean Engineering, 2024, 42(6): 71-82.
- [11] 方孝伍, 吴衍剑, 许洪露. 冲刷对海上风电大直径单桩基础影响研究[J]. 能源与环境, 2023(5): 52-55.
FANG X W, WU Y J, XU H L. Research on the Impact of Scouring on Large-Diameter Monopile Foundations of Offshore Wind Turbines[J]. Energy and Environment, 2023(5): 52-55.
- [12] 周茂强, 陈大江, 葛畅, 等. 海上风电斜桩基础局部冲刷数值模拟研究[J]. 水力发电, 2022, 48(3): 104-107.
ZHOU M Q, CHEN D J, GE C, et al. Numerical Simulation Study on Local Scouring of Inclined Pile Foundations in Offshore Wind Farms[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, 48(3): 104-107.
- [13] 祁雷, 李宁, 朱魁星, 等. 海上风电单桩基础冲刷防护圈防护性能的数值模拟研究[J]. 海岸工程, 2024, 43(2): 129-141.
QI L, LI N, ZHU K X, et al. Numerical Simulation Study on the Protective Performance of Scouring Guard Rings for Monopile Foundations of Offshore Wind Turbines[J]. Coastal Engineering, 2024, 43(2): 129-141.
- [14] 范少涛, 朱嵘华, 陶梓健, 等. 某海上风电场基础结构防冲刷物理模型试验[J]. 中国海洋平台, 2023, 38(6): 34-39.
FAN S T, ZHU R H, TAO Z J, et al. Physical Model Test on Anti-Scouring Structure of a Certain Offshore Wind Farm Foundation[J]. China Offshore Platform, 2023, 38(6): 34-39.
- [15] 邹新军, 陈顺, 涂欣瑶, 等. 局部冲刷下砂土中桩-盘复合基础 H-T 联合承载特性[J]. 防灾减灾工程学报, 2024, 44(3): 495-505.
ZOU X J, CHEN S, TU X Y, et al. H-T Combined Bearing Characteristics of Pile-Plate Composite Foundations in Sand Under Local Scouring[J]. Journal

- of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2024, 44(3): 495-505.
- [16] 贺瑞, 宋俞良, 郑金海. 局部冲坑对导管架刚度影响的模型试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(5): 66-74.
- HE R, SONG Y L, ZHENG J H. Model Test on the Influence of Local Scour Pits on the Stiffness of Jacket Platforms[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences Edition), 2022, 50(5): 66-74.
- [17] 葛晓春, 詹懿德, 祝周杰, 等. 基于现场监测分析冲刷对海上风电大直径钢管桩的影响[J]. 水电与新能源, 2024, 38(1): 59-62.
- GE X C, ZHAN Y D, ZHU Z J, et al. Analysis of the Impact of Scouring on Large-Diameter Steel Pipe Piles of Offshore Wind Turbines Based on On-Site Monitoring[J]. Hydropower and New Energy, 2024, 38(1): 59-62.
- [18] 陈立, 李嘉隆. 基于现场冲刷数据的单桩基础局部冲刷深度预测方法[J]. 中国水运(下半月), 2024, 24(5): 142-144.
- CHEN L, LI J L. Prediction Method of Local Scour Depth of Single Pile Foundation Based on On-Site Scouring Data[J]. China Water Transport (Second Half of the Month), 2024, 24(5): 142-144.
- [19] SMAGORINSKY J. General Circulation Experiments with the Primitive Equations: I. the Basic Experiment[J]. Monthly Weather Review, 1963, 91(3): 99-164.
- [20] SOULSBY R. Dynamics of Marine Sands a Manual for Practical Applications[M]. London: Thomas Telford Publications, 1997.
- [21] MEYER-PETER E, MÜLLER R. Formulas for Bed-Load Transport[C]//Iahsr 2nd Meeting. 1948.
- [22] ZHAO M, CHENG L, ZANG Z P. Experimental and Numerical Investigation of Local Scour Around a Submerged Vertical Circular Cylinder in Steady Currents[J]. Coastal Engineering, 2010, 57(8): 709-721.
- [23] LIAN J J, LI J L, GUO Y H, et al. Numerical Study on Local Scour Characteristics of Multi-Bucket Jacket Foundation Considering Exposed Height[J]. Applied Ocean Research, 2022, 121: 103092.

(上接第 158 页)

- [9] 舒立春, 戚家浩, 胡琴, 等. 风机叶片电加热除冰及电阻丝布置方式试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3816-3822.
- SHU L C, QI J H, HU Q, et al. Experimental Study on De-icing and Layout of Resistance Wire by Electrical Heating for Wind Turbine Blades[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3816-3822.
- [10] 叶璐, 张代军, 李军, 等. 基于碳纳米管膜的树脂基复合材料电加热除冰技术[J]. 复合材料科学与工程, 2024(7): 45-52.
- YE L, ZHANG D J, LI J, et al. Deicing Technology of Resin Matrix Composites by Electric Heating Based on Carbon Nanotube Film[J]. Composites Science and Engineering, 2024(7): 45-52.
- [11] 谷建臻. 低能耗电加热结构设计及防除冰性能研究[D]. 四川绵阳: 西南科技大学, 2024.
- GU J Z. Design of Low Energy Consumption Electric Heating Structure and Research on Anti-Deicing Performance[D]. Mianyang, Sichuan: Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2024.
- [12] 胡琴, 朱茂林, 舒立春, 等. 风力发电机叶片防除冰涂层(二): 温升数值计算及防除冰性能[J]. 电工技术学报, 2024, 39(1): 246-256.
- HU Q, ZHU M L, SHU L C, et al. Anti-Deicing Coatings for Wind Turbine Blades Part 2: Numerical Calculation of Temperature Rise and Anti-Deicing Performance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(1): 246-256.
- [13] WANG Z, SHEN Y Z, LIU S Y, et al. De-Icing Behavior and Efficiency of Electrothermal Film Surfaces with Different Non-Wettability in Low-Temperature Flow Field[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2024, 205: 109301.
- [14] SAMAD A, VILLENEUVE E, VOLAT C, et al. Experimental Assessment of the Ice Protection Effectiveness of Electrothermal Heating for a Hovering Drone Rotor[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2023, 149: 110992.
- [15] 刘红祥, 闯振菊, 刘社文, 等. 风机叶片结冰机理和电热除冰分析[J]. 船舶工程, 2023, 45(12): 171-189.
- LIU H X, CHUANG Z J, LIU S W, et al. Analysis of the Mechanism of Wind Turbine Blade Icing and Electrothermal Deicing[J]. Ship Engineering, 2023, 45(12): 171-189.
- [16] XU Z, ZHANG T, LI X J, et al. Effects of Ambient Temperature and Wind Speed on Icing Characteristics and Anti-Icing Energy Demand of a Blade Airfoil for Wind Turbine[J]. Renewable Energy, 2023, 217: 119135.