

面向海上风电基础冲刷病害的仿生防护装置研发 及水动力特性分析

黄铀佳

(自然资源部南海发展研究院(自然资源部南海遥感技术应用中心))

DOI: 10.65285/GCJSYGL.V2I4.009

摘要: 海上风电单桩基础长期受潮流、波浪耦合作用, 桩周海床易发生局部冲刷, 引发基础裸露、承载力下降、结构振动加剧等病害, 严重威胁风电机组安全稳定运行。针对传统抛石、硬质护圈等防护技术存在的适配性差、易破损、扰动海洋生态等缺陷, 本文依托海洋生物消能护底机理, 研发一种柔性复合仿生防护装置。通过借鉴海草柔性消能、根系固沙的生物特性, 完成装置整体结构、单元模块与锚固系统的优化设计, 结合 CFD 数值模拟方法, 系统分析不同水流工况下装置周边流场结构、流速分布、涡量演化及床面剪切应力变化规律, 揭示其水动力防护机理。研究表明: 该仿生防护装置可有效削弱桩前下潜流与桩周马蹄涡强度, 降低近底水流流速与床面剪切应力, 最大冲刷抑制率可达 82.3%; 相较于传统刚性防护结构, 柔性仿生结构可自适应水流变形, 水流阻力小、生态扰动低, 适配复杂海洋动力环境。本研究可为海上风电基础冲刷病害的绿色高效防控提供新型技术方案与理论支撑。

关键词: 海上风力; 单桩基础; 冲刷病害; 仿生防护; 水动力特性; 数值模拟

Research on Development and Hydrodynamic Characteristics Analysis of Bionic Protection Device for Scour Diseases of Offshore Wind Power Foundations

Youjia Huang

South China Sea Development Research Institute (South China Sea Remote Sensing Technology Application Center), Ministry of Natural Resources

Abstract: Offshore wind power monopile foundations are continuously affected by the coupled action of tidal currents and waves, which easily causes local seabed scour around the piles. This further leads to foundation exposure, bearing capacity reduction and intensified structural vibration, seriously threatening the safe and stable operation of wind turbines. Aiming at the defects of traditional protection technologies such as rock dumping and rigid guard rings, including poor adaptability, easy damage and marine ecological disturbance, this paper develops a flexible composite bionic protection device based on the energy dissipation and bed protection mechanism of marine organisms. Drawing on the flexible energy dissipation and root sand fixation characteristics of seagrass, the overall structure, unit modules and anchoring system of the device are optimally designed. Combined with CFD numerical simulation, this paper systematically analyzes the flow field structure, flow velocity distribution, vorticity evolution and bed shear stress variation around the device under different hydraulic conditions, and reveals its hydrodynamic protection mechanism. The results show that the proposed bionic protection device can effectively weaken the intensity of pre-pile downflow and horseshoe vortex around the pile, reduce near-bottom flow velocity and bed shear stress, with a maximum scour inhibition rate of 82.3%. Compared with traditional rigid protection structures, the flexible bionic structure can adapt to water flow deformation independently, with low flow resistance and minor ecological disturbance, which is highly adaptable to complex marine dynamic environments. This study can provide a new technical scheme and theoretical support for the green and efficient prevention and control of scour diseases of offshore wind power foundations.

Keywords: offshore wind power; monopile foundation; scour disease; bionic protection; hydrodynamic characteristics; numerical simulation

引言

在“双碳”战略引领下, 我国海上风电产业规模化、高速化发展, 近海及深远海风电场建设规模持续扩大。单桩基础凭借结构简单、施工便捷、造价低廉等优势, 成为

海上风电应用最广泛的基础形式, 占现有风电基础总量的 70% 以上。海洋环境中, 波浪、潮流的持续冲击会改变桩基周边原有水流场平衡状态, 产生桩前壅水、下潜流、桩侧绕流及桩后尾涡等复杂水动力现象, 持续淘刷桩周海床

泥沙,形成局部冲刷坑^[1]。随着冲刷深度不断增加,桩基有效入土深度缩减,基础竖向与水平承载力大幅衰减,同时诱发风机结构共振、塔筒倾斜等安全隐患,是导致海上风电基础失效、运维成本激增的核心病害之一。

一、海上风电基础冲刷病害机理分析

(一) 桩周冲刷水动力成因

海上风电单桩基础为圆柱形阻水结构,水流正向撞击桩基时,水流动能转化为压能,形成桩前壅水区域,近底水流受桩基阻挡产生垂直向下的下潜流。下潜流贴近海床面向桩侧、桩后扩散,与桩基绕流耦合作用,在桩前床面形成高强度马蹄涡,桩后区域产生交替脱落的尾涡。涡旋结构具备极强的泥沙裹挟与输运能力,持续剥离床面表层泥沙,是引发桩周局部冲刷的核心水动力因素^[2]。

(二) 冲刷病害演化过程及危害

海上风电桩基局部冲刷可分为初始冲刷、快速发育、稳定平衡三个阶段。初始阶段,水流剪切力超过床面泥沙起动临界值,表层松散泥沙被裹挟流失,形成浅而广的初始冲刷坑;快速发育阶段,冲刷坑改变局部流场形态,涡旋强度进一步提升,泥沙冲刷速率急剧增大,冲刷坑深度与范围快速扩张;稳定平衡阶段,冲刷坑床面坡度趋于稳定,水流冲刷作用与泥沙淤积作用达到动态平衡,冲刷形态基本固定。

二、仿生防护装置结构研发与设计

(一) 仿生原型与设计原理

本文以近海典型耐冲刷海草种群为仿生原型,提取其核心防护特性:海草柔性茎叶可通过水流扰动变形消耗水流动能,降低近底流速;密集丛生的植株结构可增大水流紊动阻尼,削弱涡旋强度;根系交错穿插固结床面泥沙,提升海床土体稳定性。结合工程应用需求,摒弃天然海草易腐烂、抗浪性差的缺陷,采用人工复合材质,设计模块化、可拆装、高强度的仿生防护装置,实现“消能减速、固沙护底、生态兼容”的多重防护目标^[3]。

(二) 整体结构设计

该仿生防护装置采用“基底锚固层+柔性仿生消能层+表层稳沙层”三层复合结构,以单桩桩基为中心环形对称布置,覆盖范围为桩基外径3倍,完全包裹高冲刷风险区。装置为模块化拼接设计,单块1.0m×1.0m,可灵活组合适配不同规格基础。

基底锚固层为承载基础,采用高强度耐腐蚀橡胶复合板材,内嵌镀锌钢筋骨架提升刚度与抗撕裂性;四角设不锈钢锚固桩,深入海床0.5~0.8m,防止滑移翻转。基底表面预留透水孔,实现水体交换,避免负压空蚀,并为底栖生物提供通道,保障生态连通性。

柔性仿生消能层为核心防护单元,仿海草形态,由超高分子量聚乙烯柔性茎叶构成,单根长30cm、直径0.8cm,耐海水腐蚀与老化。茎叶矩阵式排布,密度120~150根/m²,在水中自由摆动,通过变形耗能削弱冲击,破碎桩周马蹄涡和尾涡。

表层稳沙层为细颗粒透水滤布与轻质生态碎石,铺设于茎叶根部与基底表面,固定茎叶并防止泥沙淘刷;透水不透沙,拦截床面流失,促进泥沙自然淤积,长期形成稳定淤积层,增强护底效果。

三、数值模拟模型建立与工况设置

(一) 数值模型构建

采用CFD数值模拟方法,基于RNG k-ε湍流模型构建海上风电单桩基础-仿生防护装置-海床三维数值水槽模型,精准模拟水流绕流、涡旋演化及床面剪切应力分布规律。数值水槽整体尺寸设置为长20m、宽8m、水深4m,消除水槽边界对核心流场的干扰。风电单桩基础直径设置为0.8m,竖直布置于水槽中心位置,贴合工程常用单桩基础尺寸参数。

模型采用分区网格划分方式,对桩基周边、仿生防护装置区域进行网格加密,最小网格尺寸0.02m,水槽外围区域采用稀疏网格,兼顾计算精度与计算效率。网格质量经检验均高于0.85,满足数值计算收敛要求。边界条件设置:入口为速度入口边界,出口为压力出口边界,水槽底部与桩基表面为无滑移壁面边界,顶部为自由液面边界,采用VOF法追踪气液界面。如图1所示,数值水槽几何模型与桩周加密网格划分满足计算精度要求

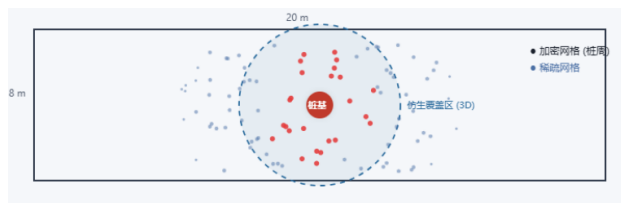


图1 数值水槽几何模型与网格划分示意图（俯视图）

(二) 模拟工况设置

结合近海风电场实际海洋动力环境,设置三组典型单向恒定水流工况,流速分别为0.8m/s、1.2m/s、1.6m/s,覆盖常规海况与极端大风海况水流条件。同时设置无防护空白对照组、传统抛石防护对照组,与本文仿生防护装置进行对比分析,系统探究不同防护结构的水动力防护效果。模拟计算收敛残差阈值设置为10⁻⁶,确保计算结果精准可靠。

四、水动力特性与防护效果分析

(一) 流场流速分布特性

传统抛石防护模式下,硬质抛石结构虽可一定程度阻挡水流冲击,但结构表面粗糙、棱角突出,会加剧水流紊动,桩侧局部流速出现小幅增大,且抛石间隙易形成局部涡流,引发间隙泥沙淘刷,长期防护稳定性不足。而采用仿生防护装置后,桩周近底流速得到显著衰减,柔性仿生茎叶的阻尼消能作用可有效耗散水流动能,不同流速工况下,桩周核心防护区近底流速平均衰减幅度达35%~58%。低速工况下流速衰减效果更为平稳,高速工况下装置通过茎叶大幅摆动强化消能效果,依然可保持良好的减速性能,适配变流速海洋环境。

(二) 涡量演化与紊动特性分析

传统刚性防护结构无法有效破碎涡旋结构,反而会因结构突变加剧水流紊动,桩周涡量衰减幅度有限,仅为12%~18%,防护效果不佳。仿生防护装置的柔性丛生结构可有效切割、破碎大尺度涡旋,将高强度集中涡旋分解为微小弱涡旋,大幅降低涡旋裹挟泥沙的能力。模拟结果显示,布设仿生装置后,桩前马蹄涡基本消散,桩后尾涡规模大幅缩减,各工况下桩周最大涡量值衰减幅度可达65%以上,水流紊动强度显著降低,从根本上抑制了涡旋冲刷作用^[5]。如图2所示,仿生防护装置使桩前近底流速显著衰减,最大涡量值由28.6 s⁻¹降至8.0 s⁻¹,衰减幅度达65%以上。

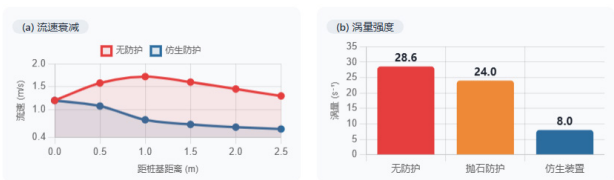


图2 桩周水动力特性对比分析

(三) 床面剪切应力与冲刷抑制效果

床面剪切应力是判断泥沙起动与冲刷强度的核心指标,剪切应力越大,泥沙起动概率越高,冲刷发育速率越快。无防护状态下,桩周近底床面剪切应力峰值集中在桩基迎流面与侧部,高剪切应力区域与实际冲刷病害区域完全吻合。随着水流流速提升,剪切应力呈指数增长,1.6m/s工况下最大剪切应力达到1.82Pa,远超近海泥沙起动临界剪切应力。

布设仿生防护装置后,装置覆盖区域床面剪切应力大幅降低,均匀化效果显著,无局部应力集中现象。三组流速工况下,床面最大剪切应力分别降至0.21Pa、0.29Pa、0.32Pa,均低于泥沙起动临界值,冲刷抑制效果显著。相较于传统抛石防护,本文装置冲刷抑制率提升25%~32%,可彻底阻断桩周泥沙起动条件,实现长效防冲刷。同时,装置透水结构可维持局部水体交换,不会造成海床淤积堵塞,生态适配性远优于传统刚性防护技术。如图3所示,本文仿生防护装置的冲刷抑制率显著优于传统抛石防护,最大抑制率达82.3%,较抛石防护提升约25%~32%。

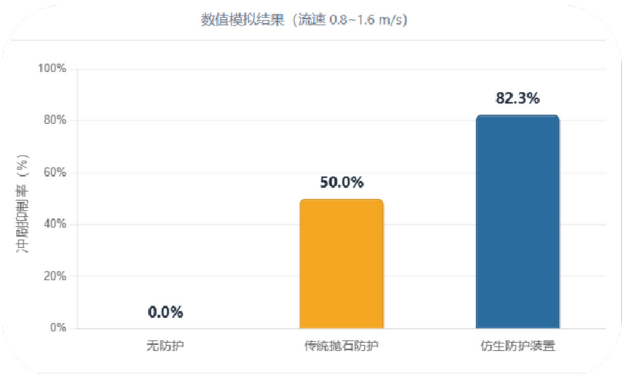


图3 不同防护模式下桩周冲刷抑制率对比

结语:

本文针对海上风电基础冲刷防控难题,基于海洋生物仿生机理研发新型三层复合仿生防护装置,融合柔性消能、刚性锚固与稳沙固土功能,采用模块化结构适配不同规格基础,施工便捷且耐久性强,有效克服了传统技术稳定性差、生态扰动大及易二次冲刷等缺陷。数值模拟表明,该装置可显著调控桩周流场,衰减近底流速、破碎马蹄涡与尾涡,降低紊动强度和床面剪切应力,从动力源头抑制泥沙起动与冲刷发育。装置在不同流速下防护效果稳定,最大冲刷抑制率达82.3%,较传统抛石防护性能大幅提升,同时生态兼容性良好,适用于近海及深远海风电工程。

参考文献:

[1] 梁少鹏. 陆上与海上风电项目工程造价差异及影响因素比较研究 [J]. 价值工程, 2026, 45(26): 76-78.
[2] 江友华, 徐涛, 李柯, 等. 考虑最大电压支撑的海上风电柔直并网故障短路电流与电压不平衡协调控制策略 [J/OL]. 控制与决策, 1-14 [2026-08-25].
[3] 陈西强, 刘丰, 李亚男, 等. 联合多波束扫测的海上风机基础三维冲刷分析与应用 [J]. 科技创新与应用, 2026, 16(22): 193-196.
[4] 刘俊俊, 何炳鑫, 朱鹏飞, 等. 海上风电大直径单桩基础引缆技术对比分析研究 [J]. 科技与创新, 2026, (14): 157-159.
[5] 蒋永强, 孙前, 牛政, 等. 基于 MIKE21 的龙滩水电站扩机工程坝下水动力特性变化研究 [J/OL]. 人民珠江, 1-9 [2026-08-25].

作者简介: 黄钊佳 (1996 年-)、男、汉族、广东龙川人、硕士研究生学历、研究方向: 海洋生态保护与修复、海洋生态动力研究。