



海上风机与养殖网箱融合系统中网箱系泊绳张力与 导管架基础结构的安全性

林旻¹, 邬骞力², 田会元¹, 黄六一^{2*}, 黄桂芳³,
刘波³, 王欣欣², 王刚²

(1. 上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200000;

2. 中国海洋大学水产学院, 山东 青岛 266000;

3. 福建省水产研究所, 福建 厦门 361013)

摘要: 海洋牧场与海上风电融合发展是现代渔业和清洁能源产业融合发展的典型代表, 有利于构建“海上粮仓+清洁能源”的新产业模式。本研究基于福建漳浦六鳌海上风电场风机导管架构建养殖网箱与海上风机融合系统, 运用 Aqua-FE™有限元工具探究极端波流条件下不同网箱布设深度、波流入射角、生物附着程度对网箱系泊绳张力的影响; 采用海洋工程专用设计软件 SACS, 计算分析风机导管架结构在波流及网箱系泊绳张力作用下的应力分布, 评估养殖网箱系泊绳张力对风机导管架基础结构安全性的影响。结果显示, 网箱布设深度的增加能够减少网箱系泊绳最大张力, 显著改善网箱风机整体结构受力状态; 波流入射角的改变对于网箱风机整体结构安全性影响不大; 网衣生物附着程度的增加会显著增加网箱系泊绳最大张力, 从而造成风机导管架基础杆件大量失效。研究表明, 养殖网箱可布设于适当水深以减少受力, 同时应及时清理附着生物, 适当增加网箱系泊点附近的导管架杆件和导管架底部桩土点杆件的壁厚, 以确保养殖网箱与海上风机融合系统结构安全。该结果可为深入研究网箱与风机融合系统的受力, 评估该系统的安全性, 优化设计养殖网箱与风机融合系统提供数据支撑。

关键词: 海上风电; 养殖网箱; 风机导管架; 系泊绳张力; 结构安全性; 数值模拟

中图分类号: P 75; S 954

文献标志码: A

我国海域面积广阔, 海岸线漫长, 海洋资源丰富, 开发潜力巨大, 孕育着多元化的海洋产业。海洋渔业是一个重要的传统海洋产业, 能够为人类提供水产品 and 蛋白质, 保障粮食安全。据统计, 2019 年我国海水养殖产量约 2065.3 万 t, 海洋捕捞产量约 1000.1 万 t^[1]。近年来由于渔业资源的衰退, 发展和建设现代化海洋牧场已成为修复近海生态环境、养护生物资源的重要措施之一, 是当前实现海洋渔业资源高效开发利用的新方向。随

着社会对能源需求不断增加以及环保意识日益增强, 海上风电已成为当前热门的开发领域。海上风电作为一个新兴产业, 可为我国构建清洁低碳、安全高效的能源体系提供重要保障。我国海上风电发展迅猛, 已成为全球重要的海上风电市场之一, 截至 2020 年底, 我国海上风电累计装机量达 9.99 GW^[2]。海上风电随着装机规模的增大, 所需海域面积逐步扩大, 由此带来当地渔业和风电发展的用海竞争, 另一方面海上风电装置制造、

收稿日期: 2022-02-22 修回日期: 2022-04-10

资助项目: 国家重点研发项目 (2019YFD0901003); 中国长江三峡集团公司科研项目 (CTGFB/0004-2020)

第一作者: 林旻(照片), 从事海上风电结构设计研究, E-mail: linm@sidri.com;

邬骞力, 从事海水养殖设施水动力研究, E-mail: wuql@stu.ouc.edu.cn

通信作者: 黄六一, 从事海上风电结构设计研究, E-mail: huangly@ouc.edu.cn



安装、维护成本普遍较高, 资金回报周期较长, 海上风电开发建设面临经济性的考验。基于此, 利用风电装置和海域开展海洋牧场建设, 已受到政府主管部门及风电企业的高度重视。海洋牧场与海上风电的融合发展主要利用海上风电装置的水下桩基作为系泊构件、养殖平台等基础, 并提供养殖生产管理所需的绿色能源, 在风机周围搭建养殖网箱以及人工鱼礁等形成“复合式的海洋牧场”, 能够综合利用海洋空间, 最大化海洋牧场和海上风电行业效益, 优化海洋牧场和海上风电产业格局, 构建“海上粮仓+蓝色能源”新模式, 实现清洁能源和安全水产品的同步高效产出^[3]。

养殖网箱风电融合系统作为海洋牧场与海上风电融合发展模式之一, 是利用风机桩基构建一套海水网箱养殖装备。国内外学者针对养殖网箱以及海上风机桩基独立系统的水动力学特性开展了较为系统的研究。黄六一等^[4]通过水槽模型试验对水流作用下自升降式张力腿网箱水动力学特性进行研究。隋留洋等^[5]通过有限元法研究了单点系泊和多点系泊对深水养殖网箱浮架变形及系泊力的影响。赵云鹏^[6]采用集中质量方法探究了纯流、纯波、波流联合作用下重力式网箱水动力学特性。Dong 等^[7]通过水槽试验探究了底重对网箱在不同来流速度下的阻力、网箱变形以及网箱内部和周围流场的影响。Abhinav 等^[8]探究了 70 m 水深下支撑 5-MW 海底固定式海上风机组的导管架在水动力和空气动力载荷作用下的响应。周文杰等^[9]通过数值模拟的方法研究了台风极端循环载荷下海上风机导管架基础整体结构的动力响应。钟豪^[10]利用 ANSYS Workbench 通过频域和时域分

析方法探究了其设计的风电渔场综合平台在风浪流作用下的运动响应和动力响应。Lei 等^[11]通过模型试验的方法研究了在恶劣海况中浮式海上风电装置与钢制网箱融合系统的动力响应, 证明了该融合结构具有良好的耐波性和动态性能。目前对于养殖网箱风电融合系统研究很少。Su^[12]等采用有限单元法对浮式海上风电装置与六边形半潜式网箱组合结构在规则波作用下的运动响应进行了分析。由于风电海域一般处于开阔海域, 经常出现浪高流急的恶劣海况, 风机桩基和网箱需要承受较大浪流载荷作用, 且二者存在相互作用, 探究海上风机基础结构、网箱结构及海上网箱风电融合结构的水动力特性, 评估桩基的结构安全性, 是构建养殖网箱风电融合系统的前提。

福建海域受季风影响, 风能资源稳定且丰富, 近年来海上风电项目发展迅速。本研究基于福建漳浦六鳌海上风电场(图 1)拟开展的“渔风互补”养殖模式, 利用风机桩基(导管架结构)构建养殖网箱, 考虑了生物附着程度、波流入射角及网箱布设深度等因素, 运用数值模拟方法(Aqua-FE 有限元工具), 分析养殖网箱系泊系统在极端波流状况下的水动力特性, 采用海洋工程专用设计软件 SACS 计算导管架结构应力, 分析导管架结构安全性, 为养殖网箱与海上风机融合系统设计提供数据支撑。

1 材料与方 法

1.1 基本理论方 法

Aqua-FE 数值模型 网箱水动力特性数值模拟利用 Aqua-FE™有限元计算工具完成, 其准

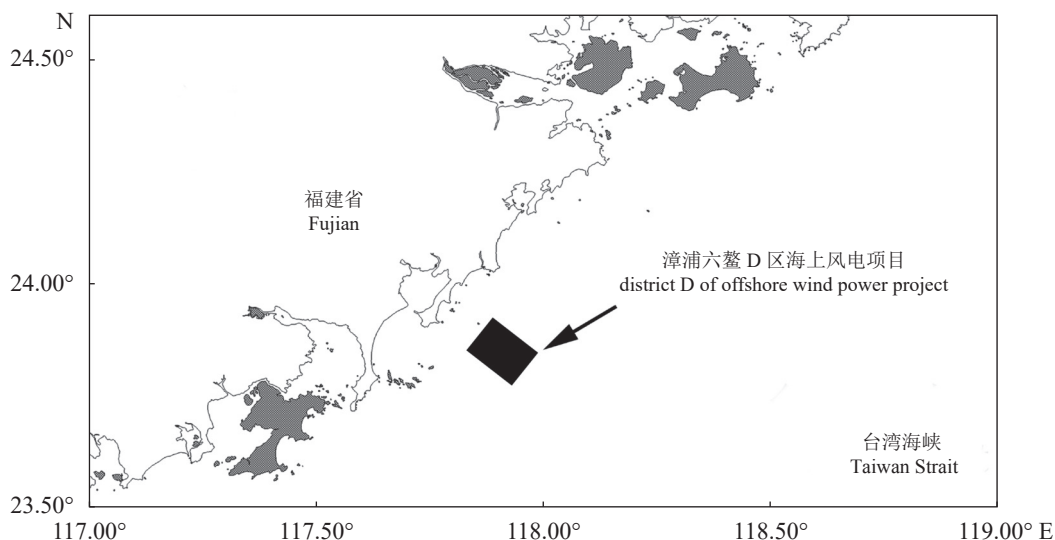


图 1 项目地理位置

Fig. 1 Location of the project

确性已在水槽模型试验和实地测量中得到验证^[13], 该有限元计算工具采用桁架单元和刚度单元模拟网箱系统, 建立如下所示运动方程:

$$M\ddot{q}(t) + Kq(t) = Q(t) \quad (1)$$

式中, $q(t)$ 为节点位移向量, $\ddot{q}(t)$ 分别为节点加速度向量。 M 为系统的质量矩阵, K 为系统整体刚度矩阵, Q 为系统等效节点荷载向量。通过 Newmark- β 方法求解对上述方程在时间上进行积分, 采用 Newton-Raphson 迭代法求解每个时间步下的结点位移, 关于该有限元计算工具详细描述可参考 Tsukrov 等^[13]。

作用在网箱系统构件单元上的水动力由修正

$$C_n = \begin{cases} \frac{8\pi}{\text{Re}_n \cdot s} (1 - 0.87s^{-2}), & 0 < \text{Re}_n \leq 1 \\ 1.45 + 8.55\text{Re}_n^{-0.90}, & 1 < \text{Re}_n \leq 30 \\ 1.1 + 4\text{Re}_n^{-0.50}, & 30 < \text{Re}_n \leq 2.33 \times 10^5 \\ -3.14 \times 10^{-6} (\text{Re}_n - 5.78 \times 10^5), & 2.33 \times 10^5 < \text{Re}_n \leq 4.92 \times 10^5 \\ 0.401 \left(1 - e^{\frac{-\text{Re}_n}{5.99 \times 10^5}} \right), & 4.92 \times 10^5 < \text{Re}_n \leq 10^7 \end{cases} \quad (3)$$

$$C_t = \pi\mu \left(0.55\text{Re}_n^{\frac{1}{2}} + 0.084\text{Re}_n^{\frac{2}{3}} \right) \quad (4)$$

式中, $\text{Re}_n = \frac{\rho_w DV_{Rn}}{\mu}$, $s = -0.077215665 + \ln \frac{8}{\text{Re}_n}$, μ 为流体黏性系数。

导管架基础杆件应力计算及安全评估 在导管架基础结构应力分布及安全性研究过程中, 采用海洋工程专用设计软件 SACS 进行计算分析, 将上述 Aqua-FE 数值模型中计算得到的养殖网箱系泊绳张力最大值以等效静力载荷的形式在每个时间步施加到导管架相应的系泊点上, 系泊荷载的方向始终沿着系泊绳延伸方向指向网箱中心, 以分析波流作用下装配有养殖网箱的导管架的应力分布。

导管架基础结构应力按照《海上固定平台规划、设计和建造的推荐作法 荷载和抗力系数设计法 (增补 1): SY/T 10009—2002》^[15] 标准执行。即在确定桩间距及各杆件的直径、壁厚等参数后, 导管架杆件承受应力与杆件容许应力的比值 (UC 值) 不得大于 1。兼顾结构经济性与安全性, 本研究将 UC 值小于 0.8 的导管架基础杆件定义为结构受力状态良好的杆件, 将 UC 值大于等于 0.8 的导管架基础杆件定义为结构不安全的杆件, 将 UC 值大于等于 1.0 的导管架基础杆件定义为结构

后的 Morison 公式来计算^[13], 可以表示为:

$$f = C_1 V_{Rn} + C_2 V_{Rt} + C_3 \dot{V}_n + C_4 \dot{V}_{Rn} \quad (2)$$

式中, V_{Rn} 和 V_{Rt} 分别为作用在构件单元上相对流速的法向和切向分量。 \dot{V}_n 为法向加速度, \dot{V}_{Rn} 为相对运动速度的法向加速度。系数 $C_1 = \frac{1}{2}\rho_w DC_n V_{Rn}$, $C_2 = C_t$, $C_3 = \rho_w$, $C_4 = \rho_w AC_m$ 。 D 为单元直径, A 为单元横截面积, ρ_w 为水的密度, C_n 和 C_t 分别为法向和切向阻力系数, C_m 为质量系数, 本研究中取 1。

由于构件单元在流体中受到水流的作用力, C_n 和 C_t 随着雷诺数的变化而改变, 参考 Choo 等^[14] 提出的计算公式:

失效杆件。结构不安全的杆件和结构失效杆件在杆件应力云图中用红色显示标记予以标出。

1.2 试验方案

海上风机与养殖网箱融合系统数值模型构建 本研究中的养殖网箱与海上风机融合系统围绕海上风机导管架基础在其内部设置一个立方体养殖网箱 (图 2)。导管架纵向采用 4 根主腿, 直径 1.28~1.62 m, 壁厚 40~65 mm; 顶部相邻两根主腿中心距为 10 m, 底部为 24 m, 主导管的斜率为 11 : 50, 主导管之间采用“X”型斜撑杆连接, 撑杆直径 0.54~0.67 m, 壁厚 20~40 mm (图 2)。结合海上风机导管架基础结构尺寸, 设计 10 m×10 m×10 m 的立方体网箱, 通过 8 个系泊点与风机基础连接, 上下各 4 点 (图 2-a 中的红点)。

为方便计算, 本研究仅考虑水下导管架和网箱部分, 同时将导管架简化为 4 根主导管, 建立计算模型 (图 2-b)。具体参数见表 1。

根据 Huang 等^[16] 研究, 在波流条件下, 采用体积相等的网目群化方法计算的缆绳张力比投影面积相等的群化方法误差少 40%。因此, 本研究采用等体积网目群化方法减少计算工作量。网目

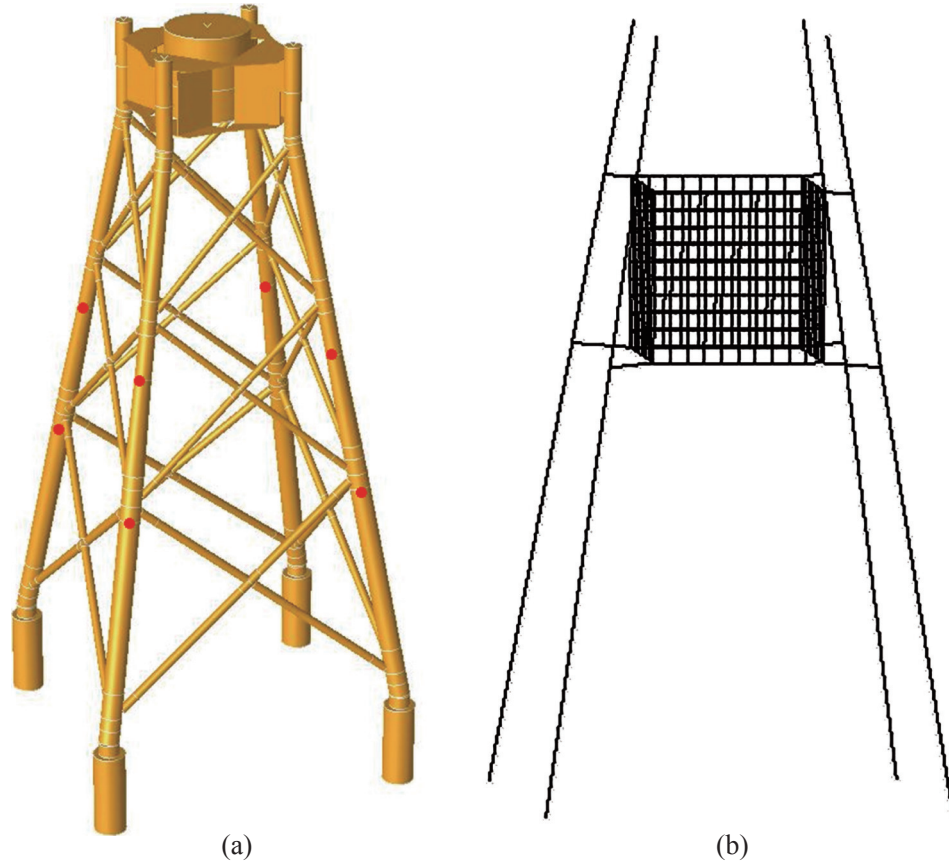


图 2 漳浦六鳌海上风电场风机导管架 (a) 及其计算模型 (b)

Fig. 2 Fan jacket (a) and its calculation model (b) of offshore wind farm in Liua, Zhangpu

群化比为 33 : 1, 群化前后网衣参数见表 2。

计算工况 参照漳浦六鳌海上风电场工程场区全年逐时观测水文资料设置试验工况条件, 为探究养殖设备对海上风机基础结构安全性的影响, 本研究计算养殖网箱在极端工况条件下的波浪荷载。取高水位水深 36 m, 最大水流约 2.12

m/s, 最大波高($H_{1\%}=15.34$ m), 波浪周期按照谱峰周期换算得 $T=12.02$ s。

设置波流同向作用, 波流入射角分别为 0° 和 45° 两个方向 (图 3)。由于导管架和网箱基础结构的对称性, 在波流入射角为 0° 时, 取 N1 (网箱迎流面上端点)、N2 (网箱背流面上端点)、N3 (网箱迎流面下端点)、N4 (网箱背流面下端点) 为系泊力测量点。在波流入射角为 45° 时, 取 N11 (网箱迎流面上端点)、N12 (网箱背流面上端点)、N13 (网箱侧面上端点)、N21 (网箱迎流面下端点)、N22 (网箱背流面下端点)、N23 (网箱侧面下端点) 为系泊力测量点。

表 1 网箱参数

Tab. 1 Parameters of fish cage

网箱组件 structural unit	参数 parameters	材料规格 material and size
网衣 net	材料 material	超高分子量聚乙烯 UHMWPE
	网线直径/mm mesh bar diameter	3
	方形网目大小/mm mesh size	60
	弹性模量/Pa elastic modulus	2.016E+11
	密度/(kg/m ³) density	964
系泊绳 mooring rope	材料 material	PA
	直径/mm rope diameter	37
	弹性模量/Pa elastic modulus	2.83E+09
	密度/(kg/m ³) density	1025

污损生物附着 网箱长期处于水下环境中, 容易附着污损生物, 改变网箱的水动力特性, 对网箱养殖造成危害^[17]。本计算通过改变网线直径从而增加网衣线面积系数的方法来模拟网衣不同生物附着状态, 设置了 5 种不同网衣附着程度, 其对应网线直径和线面积系数见表 3。

$$S_n = \frac{2d}{l} - \left(\frac{d}{l}\right)^2$$

式中, S_n 为线面积系数, d 为网线直径, l 为目脚

表 2 网集群化前后参数变化
Tab. 2 Changes of net parameters before and after mesh grouping

网衣参数 net parameters	网目群化前 before mesh grouping	网目群化后 after mesh grouping
横向网目数 N_T	333	10
纵向网目数 N_N	333	10
弹性模量/Pa elastic modulus	2.016E+11	1.089E+11
网线直径/mm diameter	3	17
网目大小/mm mesh size	60	2000

长度。

由于流速衰减效应的影响, 水流流经上游网片后流速衰减, 导致下游网片所受阻力减少, 需要考虑合适的流速衰减系数来提高数值模拟精度。Bi 等^[18]研究发现, 由于生物污损导致线面积系数高达 0.79 的网片后方流速衰减了约 21.4%。一些学者在试验过程中设定网片后方速度为来流速度的

0.8 倍^[19-20], 因此, 本研究流速衰减系数选取为 0.8。

网箱布设深度 以网箱顶部为参照面, 设置 5 种网箱布设深度 (水平面、水下 5 m、水下 10 m、水下 15 m、水下 20 m)。

2 结果

2.1 网箱系泊绳张力

图 4 为波流入射角 0° 时, 网箱系泊绳迎 (背) 流面上端点 N1(N2) 张力随时间变化趋势, 网箱系泊绳张力随时间呈周期性变化, 与作用的波浪周期基本一致。

波流入射角和水深对系泊绳张力的影响

图 5、图 6 分别为波流入射角为 0° 、 45° 时, 无生物附着状态下网箱系泊绳最大张力大小与网箱布设深度的关系。从图中可知, 网箱迎流面的系泊点受力远大于背流面系泊点受力, 网箱位于水平面时迎流面 N1 点的受力为 143 kN, 为背流面

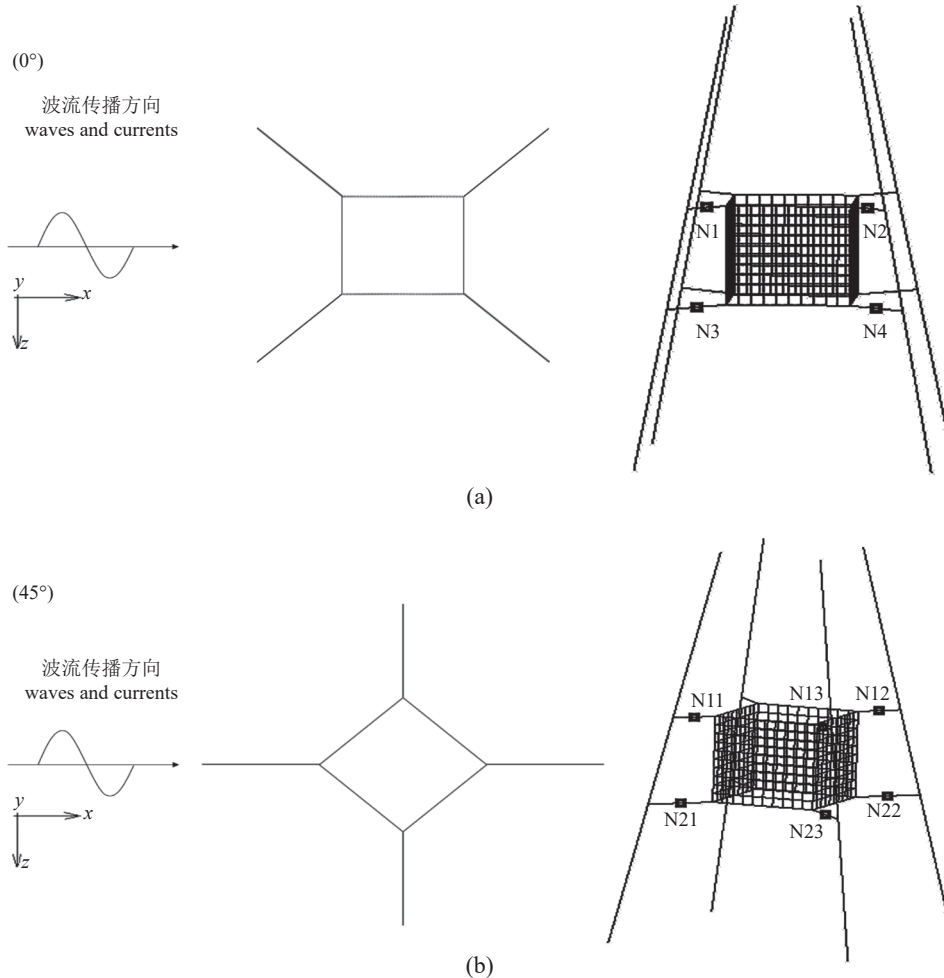


图 3 波流入射角及系泊力测量点设置示意图

Fig. 3 Setting of wave and current incidence angle and mooring force measuring points

表 3 不同生物附着程度网衣对应的网线直径和线面积系数

Tab. 3 Twine diameter and solidity ratio corresponding to net with different percentage of biofouling

生物附着程度/% percentage of bio-fouling	网线直径/mm twine diameter	线面积系数 solidity ratio
0	17	0.034
25	134	0.250
50	293	0.500
75	508	0.750
100	1000	1.000

N3 (80.2 kN)的 1.78 倍。在水平面时, 网箱上端系泊点受力大于网箱下端系泊点受力, 但随着网箱布设深度的增加, 二者受力趋于接近。随着网箱布设深度的增加, 连接网箱与风机导管架的系泊绳张力减少显著, 网箱布设在水下 20 m 处时迎流面 N1 点系泊绳受力比网箱布设在水面时的受力减少约 48.6%。随着网箱布设深度的继续增加, 系泊绳张力减少趋势逐渐平缓, 通过非线性回归分析, 拟合得到 N1 点系泊绳和 N11 系泊绳的张力 (T) 与深度 (h) 变化函数关系。

0°波流入射角时:

$$T = 138.85e^{-0.033h} \quad R^2 = 0.989 \quad (5)$$

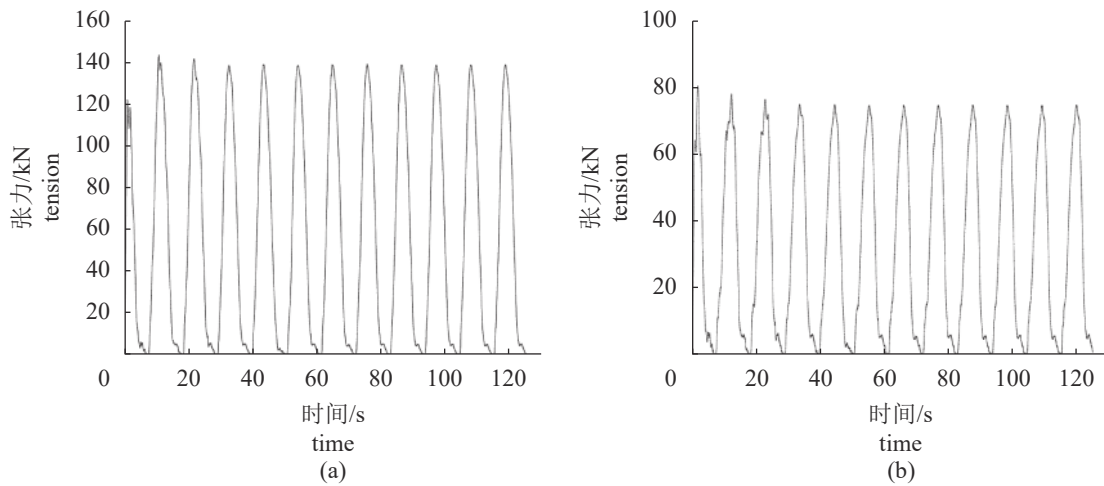


图 4 网箱系泊绳张力随时间变化

Fig. 4 Time series of mooring rope tension

(a) N1, (b) N2.

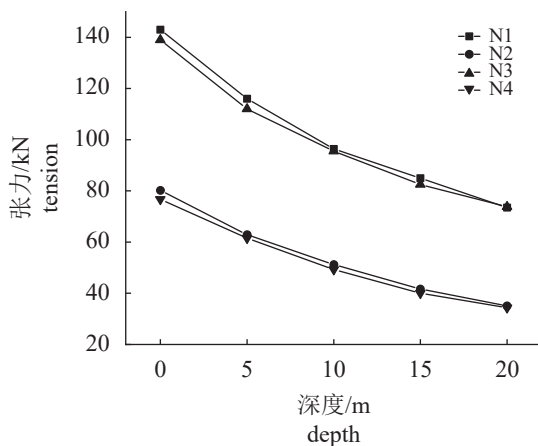


图 5 波流入射角 0°时不同网箱布设深度系泊绳最大张力变化

Fig. 5 Variation of maximum tension of mooring rope with deployment depths when the wave-current incident angle was 0°

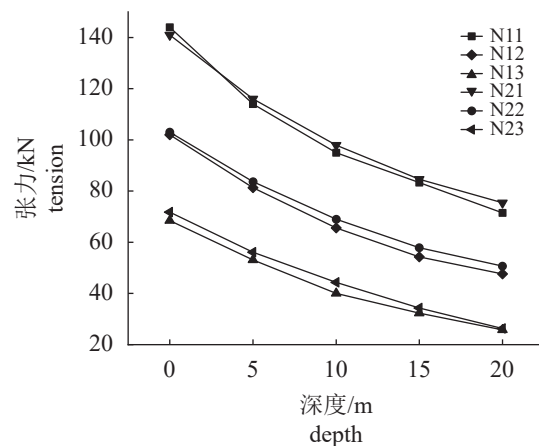


图 6 波流入射角 45°时不同网箱布设深度系泊绳最大张力变化

Fig. 6 Variation of maximum tension of mooring rope with deployment depths when the wave-current incident angle was 45°

45°波流入射角时:

$$T = 138.82e^{-0.034h} \quad R^2 = 0.986 \quad (6)$$

式中, T 表示系泊绳张力, h 为深度。

图7、图8分别为波流入射角0°和45°时, 无生物附着状态下网箱迎(背)流面系泊绳最大张力随深度变化图。由图可知, 两个波流入射角条件下, 网箱迎流面上、下端系泊绳张力随深度变化的趋势一致。45°波流入射角条件下网箱迎流面上、下端系泊绳张力在网箱处于水平面时略大于0°波流入射角, 随着网箱布设深度增加, 两个波流入

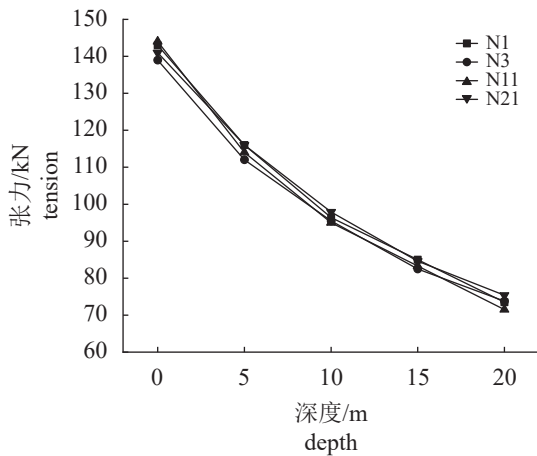


图7 不同入射角下网箱迎流面系泊绳最大张力随深度变化

Fig. 7 Variation of maximum tension of mooring rope on the upstream surface with depth under different incident angles

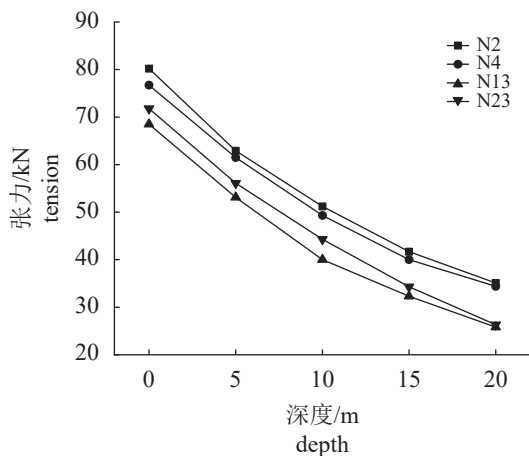


图8 不同入射角下网箱背流面系泊绳最大张力随深度变化

Fig. 8 Variation of the maximum tension at the mooring rope on the downstream surface with depth under different incident angles

射角条件下网箱迎流面下端系泊绳张力趋于接近。45°入射角时迎流面系泊点受力大于0°入射角, 而45°入射角时背流面系泊点受力小于0°入射角, 入射角改变对于背流面系泊点受力的影响较迎流面大。

附着程度对系泊绳张力的影响 图9、图10分别为波流入射角0°和45°, 网箱布设在水面时, 不同附着程度与网箱系泊绳最大张力变化关系图。网箱系泊绳最大张力随着附着程度的增加呈现快速增长的趋势。附着程度越大, 网箱迎流面下端与背流面下端系泊绳最大张力差值越大, 表明网

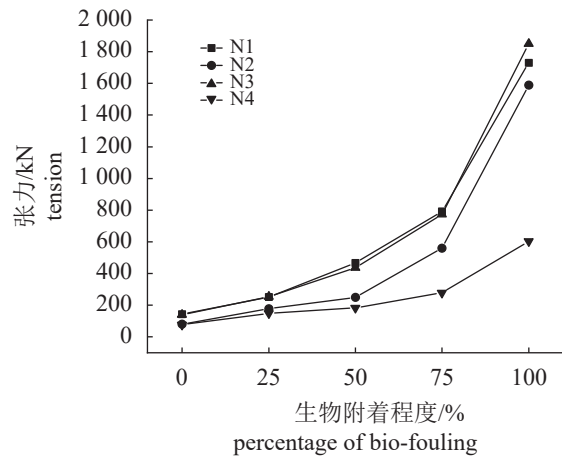


图9 波流入射角0°, 网箱布设在水面时不同附着程度下系泊绳最大张力变化

Fig. 9 Variation of maximum tension of mooring rope under different attachment degrees when the wave-current incident angle was 0° and the fish cage was set on water surface

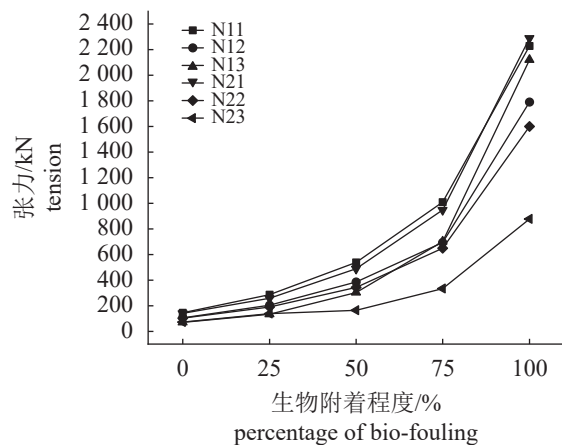


图10 波流入射角45°, 网箱布设在水面时不同附着程度下系泊绳最大张力变化

Fig. 10 Variation of maximum tension of mooring rope under different attachment degrees when the wave-current incident angle was 45° and the fish cage was set on water surface

箱的各系泊绳受力不均匀程度大幅增加。网箱生物附着程度的改变对于背流上端点影响最大, 网衣附着程度 100% 时, 0°入射角下网箱迎流上端点网箱系泊绳最大张力约为网衣无附着时的 12 倍(45°入射角下约 15 倍), 而 0°入射角下网箱背流上端点系泊绳最大张力约为网衣无附着时的 20 倍(45°入射角下约 30 倍)。

综上所述, 网箱系泊绳张力最大值出现在波流入射角为 45°时的 N11 系泊绳处, 因此下文以 N11 位置系泊绳开展不同生物附着程度对网箱系泊绳张力影响的研究。生物附着程度的增加会大幅增加网箱系泊绳的受力, 而将网箱布设在更深水域能够有效减少 N11 位置系泊绳的受力, 在 100% 附着条件下, 布设深度 20 m 的网箱 N11 点系泊力比水平面位置减少约 57%(图 11, 图 12, 图 13)。

2.2 风机导管架基础杆件应力分布

结合网箱系泊绳张力数据, 采用附着程度 50% 和 100%, 开展不同条件下的养殖网箱对导管架基础杆件应力分布计算。

当网箱生物附着程度为 50% 时, 导管架基础杆件受力状态整体较好, 仅导管架底部靠近桩土点位置处的杆件失效, 底层弦杆应力最大值为 0.923, 处于临界危险状态。当网箱生物附着程度增大到 100% 时, 大量导管架基础杆件 UC 值超过 1, 处于失效状态, 结构整体受力状态差(图 14)。

图 15 为网箱生物附着程度为 100% 下, 不同

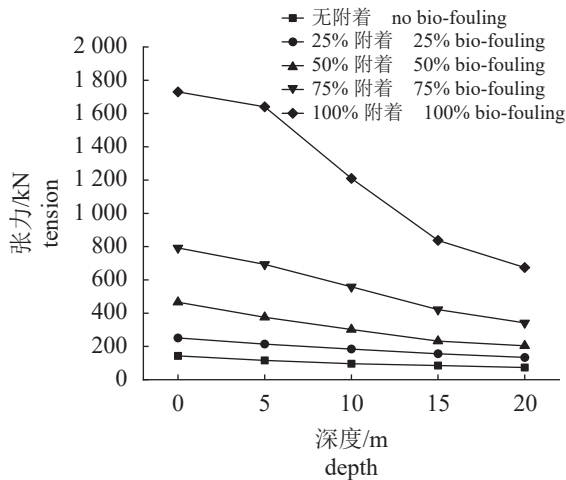


图 11 波流入射角 45°时, 不同生物附着程度对网箱布设深度与 N11 点系泊绳最大张力关系的影响

Fig. 11 Effects of different percentage of biofouling on the relationship between the deployment depth and the maximum tension of the mooring rope at N11 when the wave-current incident angle was 45°

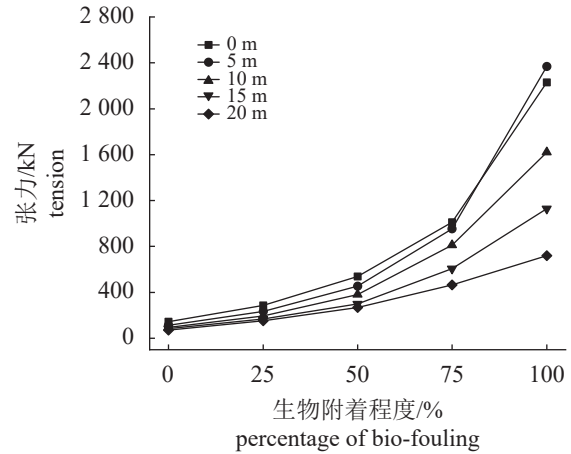


图 12 波流入射角 45°时, 不同网箱布设深度对网箱附着程度与 N11 点系泊绳最大张力关系的影响

Fig. 12 Effects of different deployment depths on the relationship between percentage of biofouling and maximum tension of mooring rope at N11 point when the wave-current incident angle was 45°

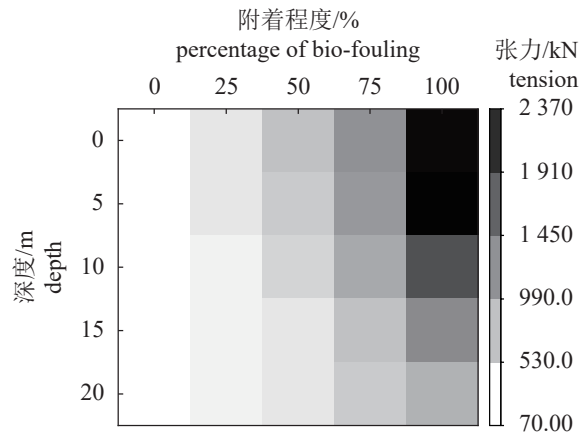


图 13 波流入射角 45°时不同深度、生物附着程度对网箱 N1 点系泊绳最大张力的影响

Fig. 13 Influence of different depths and percentage of biofouling on the maximum tension of the mooring rope when the wave-current incident angle was 45°

养殖网箱布设深度对应的导管架基础杆件 UC 值。由图可知, 网箱布设在水面时, 大量导管架基础杆件 UC 值超过 1, 出现失效状态; 网箱布设在水下 10 m 时, 导管架底部桩土点附近杆件受力最大, UC 值达到 0.979, 弦杆最大值次之, 达到 0.872, 均处于临界危险状态。网箱布设深度达到水下 20 m 时, 导管架底部靠近桩土点附近的杆件 UC 值为 0.804, 弦杆最大 UC 值仅为 0.761, 结构整体受力状态良好。

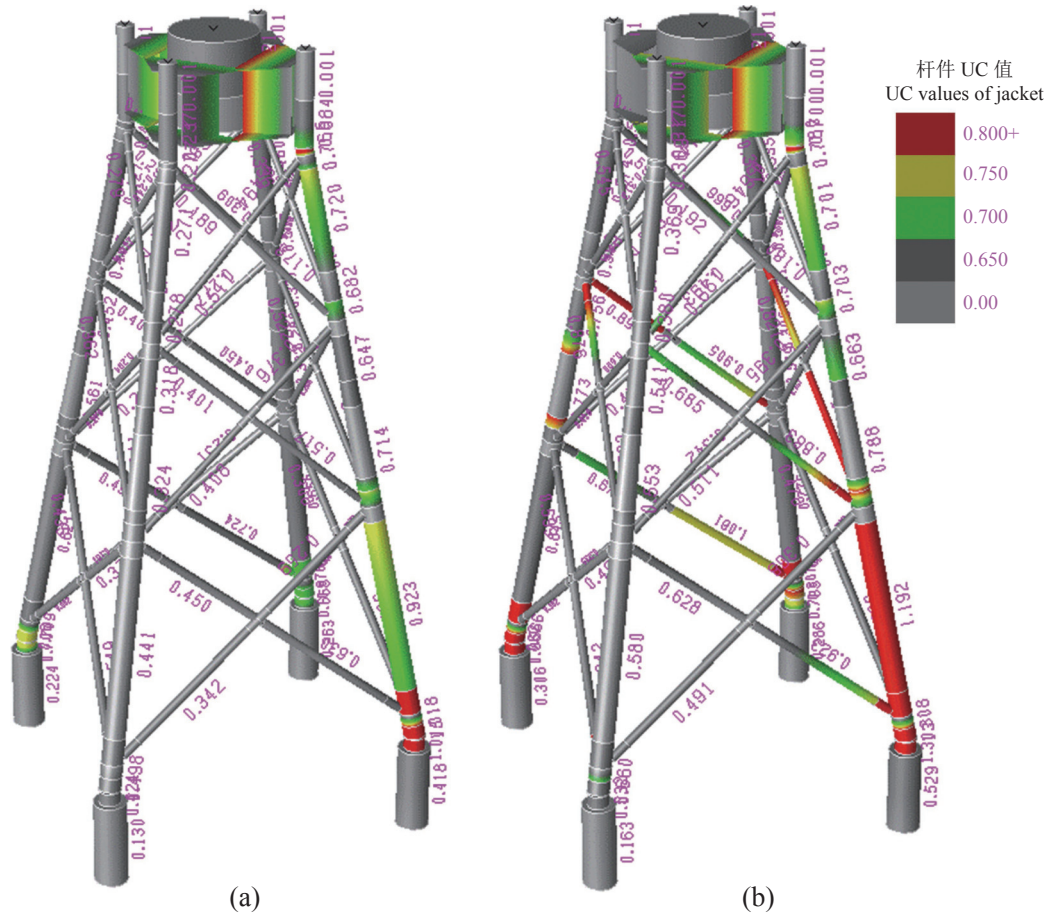


图 14 养殖网箱布设于水面时不同生物附着程度下对应的导管架基础杆件 UC 值

(a) 50% 附着度, (b) 100% 附着度。

Fig. 14 UC values of jacket under different percentages of biofouling

(a) 50% biofouling, (b) 100% biofouling.

3 讨论

3.1 不同参数对网箱系泊绳张力的影响

网箱系泊绳张力是影响网箱风机融合结构安全性的重要因素。结果表明,网箱不同位置处系泊绳所受张力有所不同,迎流面系泊绳的最大张力显著大于背流面,网箱上下两端系泊绳张力值较为接近。刘圣聪等^[21]通过模型试验的方法探究了沉降在水下的HDPE圆形升降式网箱在波流作用下的缆绳张力,结果表明迎流面缆绳张力显著大于背流面。从图7、图8中可以发现,45°波流入射角作用下网箱的上游系泊绳张力较0°波流入射角时差异不大,但45°波流入射角作用下网箱的下游系泊绳张力较0°入射角时减小,这是由于45°波流入射角,上下游中间的系泊绳承担了一定的网箱水动力。通过非线性回归拟合得到的系泊绳张力随网箱布设深度变化的公式表明,网箱布

设深度对系泊绳受力影响显著,随着网箱布置深度增加,网箱系泊绳张力呈指数下降,这与波浪作用的影响由水面向海底依次减弱有关,线性波能量和波浪作用的运动速度随着水深的增加而逐渐衰减^[22]。郑琦^[23]通过模型试验和数值模拟的方法探究了可沉浮式网箱的动力响应,验证了网箱潜入水中能够有效减少网箱系泊绳张力。公式(5)、(6)适用于预测处于不同深度的本模型在极端工况下养殖网箱的系泊绳张力大小,以此选择合适的深度保证养殖网箱和风机导管架的安全。网箱实际布设深度选择过程中还应考虑网箱安装、日常维护需要和养殖对象生活习性等因素。网箱等养殖设施布设在自然海域中,会遭受藤壶、水媳、麦秆虫等污损生物附着,对结构造成不良影响。本研究中生物附着对于网箱的系泊绳张力有较大影响,随着网衣生物附着百分比的增加,系泊绳张力显著增加。这是由于生物附着会造成网箱网孔堵塞,阻碍网箱内部水流交换,同时会增加网

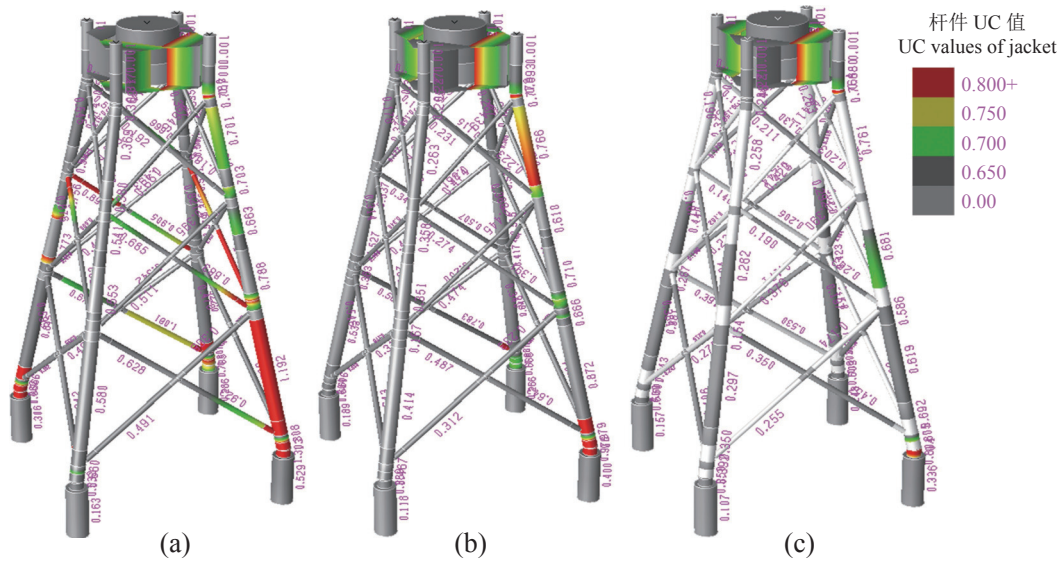


图 15 生物附着程度为 100% 时不同养殖网箱下潜深度对应的导管架基础杆件 UC 值

(a) 网箱位于水平面, (b) 网箱下潜 10 m, (c) 网箱下潜 20 m。

Fig. 15 UC values of jacket corresponding to different diving depths of fish cage with biofouling at 100%

(a) water surface, (b) 10 m underwater, (c) 20 m underwater.

线的直径, 增加网衣线面积系数, 改变网衣的水动力特性, 危害网箱整体安全性^[24]。Bi 等^[25]通过水槽试验探究了生物附着网衣在波浪作用下的水动力特性, 发现作用在污损网片上的波浪力是无附着网片的 3.88 倍。张俊波等^[26]探究发现, 附着生物会造成网箱变形, 体积缩小, 从而对养殖网箱等造成危害。

3.2 不同参数对导管架杆件安全性的影响

导管架杆件安全性是评估海上风机与养殖网箱融合系统可行性的重要指标。结果表明, 网箱布设深度对导管架基础杆件受力影响显著, 随着网箱布置深度增加, 网箱系泊绳张力显著减小, 导管架基础各杆件 UC 值大幅降低, 整体结构受力状态明显改善。本实验中, 网箱附着程度 100%, 布设深度在水下 20 m 时, 网箱的布置对于导管架基础杆件的受力影响不大。网箱布设水深增加, 相同条件下网箱系泊绳张力越小, 网箱系泊绳张力对海底泥面的倾覆弯矩越小, 对结构整体受力越有利, 从而能够有效改善网箱与风机导管架融合结构安全性。另外, 适当增加网箱系泊点附近的导管架杆件和导管架底部桩土点杆件的壁厚可以改善结构关键杆件的应力状态。网箱实际布设深度选择过程中还应考虑网箱安装、日常维护和养殖对象生活习性等因素。本研究中, 生物附着程度的增加会显著增加网箱系泊绳张力, 导致网

箱系泊点附近的导管架杆件和节点应力显著增加, 甚至会引发导管架杆件大量失效, 影响导管架结构安全。网箱生物附着程度为 100% 时, 大量导管架基础杆件呈现失效状态, 而当网箱生物附着程度为 50% 时, 导管架整体受力状态可明显改善。因此, 需要定期清洁网箱及导管架上的附着生物, 以优化导管架杆件的整体受力状态, 保证融合结构的安全性。

4 总结与展望

网箱的存在会影响风机导管架的受力特性, 本研究采用数值模拟方法探究极端波流条件下海上网箱风电融合模式中网箱系泊系统水动力特性影响及海洋牧场+海上风电融合结构中风机导管架基础结构应力分布, 结果表明, 波流入射角对于迎流面系泊绳的影响小于背流面, 对网箱风机整体结构安全性影响不大; 海上结构物的污损生物附着需要得到特别关注, 生物附着程度的增加会显著增加网箱系泊绳的最大张力, 从而造成风机导管架基础杆件大量失效; 将网箱布设在更深的水层能够有效减少网箱系泊绳的最大张力, 显著改善网箱风机整体结构受力状态。海洋牧场+海上风电融合发展模式较为复杂, 缺少融合结构安全性的系统研究, 缺乏有效可靠的试验数据, 同时对于导管架、网箱与波流之间的流固耦合作用、

导管架与养殖网箱的相互影响等问题, 未来仍需要进一步研究, 为深入探究网箱对海上风机导管架的影响, 评估海上网箱风电融合系统安全性, 构建海上网箱风电融合模式提供科学依据。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

- [1] 农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 中国渔业统计年鉴-2020年 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2020.
- Bureau of Fishery Administration of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. China fisheries statistical yearbook 2020[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2020 (in Chinese).
- [2] WFO. Global Offshore Wind Report 2020[R]. Geneva: WFO, 2021: 1-102.
- [3] 杨红生, 茹小尚, 张立斌, 等. 海洋牧场与海上风电融合发展: 理念与展望 [J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(6): 700-707.
- Yang H S, Ru X S, Zhang L B, *et al.* Industrial convergence of marine ranching and offshore wind power: concept and prospect[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(6): 700-707 (in Chinese).
- [4] 黄六一, 杨正, 李玉岩, 等. 水流作用下自升降式张力腿网箱水动力学特性试验研究 [J]. 渔业现代化, 2021, 48(2): 9-15.
- Huang L Y, Yang Z, Li Y Y, *et al.* Experimental study on the hydrodynamic characteristics of self-lift tension leg cage in current[J]. Fishery Modernization, 2021, 48(2): 9-15 (in Chinese).
- [5] 隋留洋, 黄小华, 刘海阳, 等. 系泊方式对深水养殖网箱动力特性影响研究 [J]. 南方水产科学, 2021, 17(4): 98-108.
- Sui L Y, Huang X H, Liu H Y, *et al.* Effects of mooring pattern on dynamic characteristics of a deep-water aquaculture cage[J]. South China Fisheries Science, 2021, 17(4): 98-108 (in Chinese).
- [6] 赵云鹏. 深水重力式网箱水动力学特性数值模拟研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
- Zhao Y P. Numerical investigation on hydrodynamic behavior of deep-water gravity cage[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007 (in Chinese).
- [7] Dong S C, You X X, Hu F X. Experimental investigation on the fluid-structure interaction of a flexible net cage used to farm Pacific bluefin tuna (*Thunnus orientalis*)[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 226: 108872.
- [8] Abhinav K A, Saha N. Nonlinear dynamical behaviour of jacket supported offshore wind turbines in loose sand[J]. *Marine Structures*, 2018, 57: 133-151.
- [9] 周文杰, 王立忠, 汤旅军, 等. 导管架基础海上风机动力响应数值分析 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2019, 53(8): 1431-1437,1447.
- Zhou W J, Wang L Z, Tang L J, *et al.* Numerical analysis of dynamic responses of jacket supported offshore wind turbines[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2019, 53(8): 1431-1437,1447 (in Chinese).
- [10] 钟豪. 浮式风电渔场综合平台水动力特性数值模拟初步研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- Zhong H. Preliminary study on numerical simulation of hydrodynamic characteristics of power and aquaculture integrated platform[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021 (in Chinese).
- [11] Lei Y, Zheng X Y, Li W, *et al.* Experimental study of the state-of-the-art offshore system integrating a floating offshore wind turbine with a steel fish farming cage[J]. *Marine Structures*, 2021, 80: 103076.
- [12] Su H, Bi C W, Zhao Y P. Numerical analysis of the dynamic response of an integrated structure of the floating wind turbine and the fish cage to regular wave[C]//The 9th Conference on Computational Methods in Marine Engineering (MARINE 2021). 2022.
- [13] Tsukrov I, Eroshkin O, Fredriksson D, *et al.* Finite element modeling of net panels using a consistent net element[J]. *Ocean Engineering*, 2003, 30(2): 251-270.
- [14] Choc Y I, Casarell M J. Hydrodynamic resistance of towed cables[J]. *Journal of Hydronautics*, 1971, 5(4): 126-131.
- [15] 国家经济贸易委员会. 海上固定平台规划、设计和建造的推荐作法 荷载和抗力系数设计法 (增补 1): SY/T 10009—2002 [S]. 北京: 石油工业出版社, 2002.
- The State Economy & Trade Commission. Supplement 1 to recommended practice for planning designing and constructing fixed offshore platform-load and resistance factor design: SY/T10009-2002 [S]. Beijing: Petroleum

- Industry Press, 2002 (in Chinese).
- [16] Huang L Y, Li Y Y, Ni Y, *et al.* Study on the influence of mesh grouping on numerical simulation results of fish cages[C]//Proceedings of the ASME 38th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Glasgow: ASME, 2019.
- [17] 石建高, 余雯雯, 赵奎, 等. 海水网箱网衣防污技术的研究进展 [J]. 水产学报, 2021, 45(3): 472-485.
- Shi J G, Yu W W, Zhao K, *et al.* Progress in research of antifouling technology of offshore cage netting[J]. Journal of Fisheries of China, 2021, 45(3): 472-485 (in Chinese).
- [18] Bi C W, Zhao Y P, Dong G H, *et al.* Drag on and flow through the hydroid-fouled nets in currents[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 161: 195-204.
- [19] Gansel L C, Oppedal F, Birkevold J, *et al.* Drag forces and deformation of aquaculture cages-full-scale towing tests in the field[J]. *Aquacultural Engineering*, 2018, 81: 46-56.
- [20] Zhao Y P, Li Y C, Dong G H, *et al.* Numerical simulation of the effects of structure size ratio and mesh type on three-dimensional deformation of the fishing-net gravity cage in current[J]. *Aquacultural Engineering*, 2007, 36(3): 285-301.
- [21] 刘圣聪, 黄六一, 倪益, 等. 水下圆形重力式网箱缆绳张力对波、流的响应特性 [J]. 水产学报, 2019, 43(6): 1518-1526.
- Liu S C, Huang L Y, Ni Y, *et al.* Characters of lines tension of submerged circle gravity cage under effects of waves and currents[J]. Journal of Fisheries of China, 2019, 43(6): 1518-1526 (in Chinese).
- [22] 王树青, 梁丙臣. 海洋工程波浪力学 [M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2013: 10-35.
- Wang S Q, Liang B C. Wave mechanics for ocean engineering[M]. Qingdao: Ocean University of China Press, 2013: 10-35 (in Chinese).
- [23] 郑琦. 不同下潜深度下网箱水动力特性试验研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- Zheng Q. Experimental study on hydrodynamic characteristics of net cage under different submergence depth[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017 (in Chinese).
- [24] 许文军, 徐君卓, 陈连源. 几个养殖海区网箱附着生物主要种类及季节变化 [J]. 浙江海洋学院学报 (自然科学版), 2003, 22(2): 167-170.
- Xu W J, Xu J Z, Chen L Y. Main fouling organisms attaching to net cage & their seasonal change in Zhejiang sea areas[J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science Edition), 2003, 22(2): 167-170 (in Chinese).
- [25] Bi C W, Zhao Y P, Dong G H, *et al.* Numerical study on wave attenuation inside and around a square array of biofouled net cages[J]. *Aquacultural Engineering*, 2017, 78: 180-189.
- [26] 张俊波, 孙名山, 万荣. 海洋渔业装备生物附着控制技术的研究进展 [J]. 中国水产科学, 2021, 28(11): 1489-1503.
- Zhang J B, Sun M S, Wan R. Research progress of biofouling prevention techniques for marine fishery equipment[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2021, 28(11): 1489-1503 (in Chinese).

Mooring rope tension and jacket infrastructure safety in integrated system of offshore wind turbine and fish cage

LIN Min¹, WU Qianli², TIAN Huiyuan¹, HUANG Liuyi^{2*}, HUANG Guifang³,
LIU Bo³, WANG Xinxin², WANG Gang²

(1. Shanghai Surveying, Design and Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200000, China;

2. College of Fisheries, Ocean University of China, Qingdao 266000, China;

3. Fisheries Research Institute of Fujian, Xiamen 361013, China)

Abstract: The combination of offshore wind power and aquaculture industry has developed rapidly, which can comprehensively utilize marine space, maximize the benefits of aquaculture and offshore wind power industry, and realize the simultaneous and efficient output of clean energy and high-quality aquatic products. As one of integrated development modes of offshore wind power and cage culture, the integrated system of fish cage and wind turbine using the pile foundation of wind turbines to form the fish cage is exposed to the extreme sea states with severe waves and currents. The hydrodynamic of the fish cage and wind turbine integrated system, as well as the evaluation of the structural safety of the pile foundation, are the basis for the construction of the integrated system. It is of great necessity to conduct a more systematic study on the hydrodynamic characteristics of fish cage and offshore wind turbine pile foundations. In this paper, an integrated system of offshore wind turbine and fish cage was constructed based on the wind turbine jacket of offshore wind power in Liua, Zhangpu, Fujian Province. The finite element toolbox, Aqua-FE™, was used to investigate the impacts of different deployment depth, wave-current incident angle and percentages of biofouling on mooring rope tension of fish cage in extreme waves and currents. The relationship between the mooring rope tension at the upper end of the upstream side and the deployment depth of fish cage was fitted by nonlinear regression. The effects of waves and currents parameters, as well as mooring line tension of the fish cage, on the stress variations of the wind turbine jacket structure were analyzed by the specialized design software SACS for ocean engineering, and the safety of the wind turbine jacket foundation structure was evaluated. The results show that the increase in the deployment depth of the fish cage could reduce the maximum tension of the mooring rope, significantly improving the stress state of the integrated system. The variation of wave-current incident angles had little effect on the safety of integrated system of offshore wind turbine and fish cage; the rise of the percentage of biofouling significantly increased the maximum tension of mooring ropes, resulting in structural failures of many foundation rods of the wind turbine jacket. In summary, the fish cage can be arranged in an appropriate water depth to reduce stress. At the same time, the fouling organisms shall be cleaned in time, and the thickness of the jacket rod near the mooring point of the fish cage and the pile-soil point rod at the bottom of the jacket shall be appropriately increased to ensure the structural safety of the integrated system. The results can provide data support for further study of the forces in integrated system of offshore wind turbine and fish cage, safety evaluation of the system, and design optimization of the system.

Key words: offshore wind power; fish cage; jacket structure; mooring rope tensions; structural safety; numerical simulation

Corresponding author: HUANG Liuyi. E-mail: huangly@ouc.edu.cn

Funding projects: National Key Research and Development Program of China (2019YFD0901003); Research Project of China Three Gorges Corporation (CTGFB/0004-2020)