

漂浮式风机—网箱融合系统的运动响应分析

乔承¹, 苏波泳¹, 冯小星², 朱娟², 吴正峰³, 王恒^{1*}

(1. 南通大学 机械工程学院, 江苏南通 226019; 2. 江苏龙源振华海洋工程有限公司, 江苏南通 226014;
3. 南通振华重型装备制造有限公司, 江苏南通 226007)

摘要: [目的]为解决传统养殖网箱与漂浮式风机在深海环境中抗载荷能力较弱、结构稳定性不足的问题, [方法]提出漂浮式风力机融合养殖网箱方案。基于势流理论与 Morison 方程, 采用 AQWA 和 OpenFAST 软件对漂浮式风机及网箱进行建模与仿真分析, 并采用 1 : 40 缩尺模型开展水池试验验证数值模型的准确性。通过频域分析方法, 提取并分析漂浮式风力机系统的整体运动阻尼特性, 评估其在不同频率范围内的响应特征; 对比在不同海况条件下, 网箱对平台运动幅值、共振特性的作用。[结果]结果表明, 网衣的存在使风机整体固有周期增加, 同时降低系统的整体响应幅值, 尤其是共振峰值附近的响应; 在额定海况和五十年一遇海况试验中, 半潜式风机加入网衣后, 融合系统在纵荡方向的最大值分别降低了 12.6% 和 25.1%。[结论]网衣的加入在降低平台运动响应的同时, 提高了系统的稳定性, 验证了该方案在复杂海洋环境中的可行性。

关键词: 漂浮式风机; 网箱; 运动响应; 数值仿真; 水池试验

中图分类号: TM315 **文献标志码:** A **【DOI】** 10.13788/j.cnki.cbgc.2025.11.17

Motion Response Analysis of Floating Wind Turbine-Net Cage Integrated System

QIAO Cheng¹, SU Boyong¹, FENG Xiaoxing², ZHU Juan²,
WU Zhengfeng³, WANG Heng^{1*}

(1. School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, Jiangsu, China; 2 Jiangsu Longyuan Zhenhua Marine Engineering Co., Ltd., Nantong 226014, Jiangsu, China; 3. Nantong Zhenhua Heavy Equipment Manufacturing Co., Ltd., Nantong 226007, Jiangsu, China)

Abstract: [Purpose] To solve the issues of weak load resistance and insufficient structural stability of traditional aquaculture net cages and floating wind turbines in deep-sea environments, [Method] the integration of floating wind turbines into aquaculture cages is proposed. Based on potential flow theory and the Morison equation, AQWA and OpenFAST software are used for modeling and simulating the floating wind turbine and net cage system. Additionally, a 1 : 40 scaled model is used in tank experiments to validate the accuracy of the numerical model. Through frequency-domain analysis, the overall motion damping characteristics of the floating wind turbine system are extracted and analyzed to assess its response characteristics across different frequency ranges. The influence of the net cage on platform motion amplitude and resonance characteristics under varying sea conditions is also compared. [Result] The results indicate that the presence of the netting increases the natural period of the turbine system while reducing the overall response amplitude, particularly near resonance peaks. In the rated sea state and the 50-year extreme sea state tests, the maximum surge response of the semi-submersible wind turbine with the netting

收稿日期: 2025-02-21; 修回日期: 2025-04-07

基金项目: 江苏省研究生科研与实践创新计划项目 (SJCX24_2032); 南通市重大科技成果转化计划项目 (XA2023005);
江苏省自然科学基金项目 (BK20240952)。

作者简介: 乔承(2000—), 男, 硕士研究生。研究方向: 海洋工程装备。

通信作者: 王恒(1981—), 男, 博士、教授。研究方向: 海洋风电装备可靠性。

is reduced by 12.6% and 25.1%, respectively. [Conclusion] The addition of netting reduces platform motion response while enhancing system stability, thus verifying the feasibility of this integrated scheme in complex marine environments.

Key words: floating wind turbine; net cage; motion response; numerical simulation; tank test

0 引言

传统海洋网箱通常布置于近海区域, 这类网箱结构多以浮式或半固定式为主, 通过锚链系统与海底固定。然而, 随着养殖规模的扩大, 近海区域面临养殖空间有限、环境污染加剧等问题^[1]。因此, 向深远海拓展养殖空间已成为当前海洋养殖业的重要发展方向。BI等^[2]研究了周期、波高和网箱形状等多种因素下网箱的波传输系数变化。KIM等^[3]对漂浮式网箱的系泊系统进行了研究。LI等^[4]通过水池试验研究了船形桁架结构单点系泊深海养殖网箱的运动响应。HUANG等^[5]研究了网和系泊线长度对网箱浮圈动态变形的影响, 结果表明网对网箱浮圈变形的影响较大。深海海况复杂、风浪强烈等问题, 对网箱结构的设计和可靠性提出了严峻挑战, 单一功能的网箱结构难以满足资源高效利用的需求。

风电产业作为海洋资源综合利用的重要领域, 正在迅速崛起^[6]。将风机与海洋网箱融合, 发展多功能的海洋平台结构, 成为解决海洋空间高效利用与多元化开发需求的重要研究方向。TIAN等^[7]将海上钢管架平台和网箱结合, 研究表明钢管架的受力随网箱潜水深度的增加而减小。MA等^[8]的研究结果表明养殖网箱和漂浮式风机共享系泊系统会对风机平台整体的运动和系泊锚链的张力产生影响。ZHENG等^[9]提出一种创新结构FOWT-SFFC, 其下部为钢制网箱, 上部安装风力涡轮机。WANG等^[10]通过水动力模型试验验证了风力发电和渔业相结合的可行性。目前, 海洋风电与养殖网箱的融合研究仍处于探索阶段, 主要集中于近海, 并采用固定式风机与海洋网箱相结合的模式。针对深远海漂浮式风电与养殖网箱的融合研究仍较为匮乏, 且现有研究多以养殖网箱作为浮式主体进行分析。

因此, 本文依据挪威船级社(Det Norske Veritas, DNV)规范建立模型, 采用半潜式风机, 在半潜式平台的基础上加装网衣。在静水工况下验证平台结构的衰减特性, 对比分析网箱结构对半潜式风机结构稳定性的影响及其在不同海况下的适应性, 为深海漂浮式风机融合养殖网箱平台的设计提供参考。

1 理论分析

1.1 莫里森方程

莫里森方程(Morison Equation, ME)^[11]是描述波浪对细长结构物作用力的一种经典理论模型, 其适用于结构物尺寸较小的情况(结构物的特征直径

D 与波长 L 的比值 $D/L < 0.2$)。莫里森方程将波浪作用力分为2个部分: 惯性力和拖曳力, 分别由流体加速度和速度引起。总载荷表示为

$$\begin{aligned} F &= F_D + F_I \\ &= \frac{1}{2} C_D \rho D U |U| + C_M \rho V \frac{\partial U}{\partial t} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: F 为结构单位长度上的总波浪载荷; F_D 为拖曳力; F_I 为惯性力; C_D 为阻力系数; C_M 为惯性力系数; ρ 为流体密度; D 为结构物的特征直径; U 为流体的瞬时速度; V 为物体的体积; $\partial U / \partial t$ 为流体的瞬时加速度。

本文Morison方程被用于在AQWA中建立浮式平台的细长桁架结构和网衣, 根据文献[12-13], 桁架结构的 C_D 取0.63, 网衣的 C_D 取1.2, C_M 取2.0。

1.2 辐射-绕射理论

辐射-绕射理论(Radiation-Diffraction Theory, RDT)是用来分析波浪与大尺度海洋结构物相互作用的重要理论(结构物的特征直径 D 与波长 L 的比值 $D/L > 0.2$)。在辐射-绕射理论中, 总波浪势通常分为3个部分, 即

$$\Phi = \Phi_I + \Phi_D + \Phi_R \quad (2)$$

式中: Φ_I 为入射波势; Φ_D 为绕射波势; Φ_R 为辐射波势。

1.3 叶素理论和湍流风场

叶素理论(Blade Element Theory, BET)将风力机叶片视作由多个叶素组成, 假设叶素的受力由局部相对风速、迎角、升力和阻力决定, 从而可以单独计算各叶素的受力, 并通过积分得到整个叶片的总效应。

风机叶片的切向力矩 dM 和风机的输出功率 dP 分别为式(3)和式(4), 将式(5)积分可以得到风机总功率 P , 即

$$dM = dF_T \cdot r \quad (3)$$

$$dP = dF_T \cdot wr \quad (4)$$

$$P = B \int_{r_{hub}}^{r_{tip}} dP \quad (5)$$

式(3)~式(5)中: dF_T 为切向力分量; r 为叶素半径; w 为风机角速度; B 为叶片数量; r_{tip} 为轮毂半径; r_{hub} 为叶片端部半径。

风力机所处的风场并非理想的均匀流场, 该风场受到大气湍流的影响, 表现出复杂的时空变化特性。大气湍流风场的主要特征包括风速随机波动、剪切效应和脉动风影响等。因此, 本文基于TurbSim

软件,采用Kaimal模型建立合理的湍流风场模型,并研究其对风力机性能的影响。

以轮毂中心为参考点,设定参考风速为10.5 m/s,轮毂高度处湍流风速见图1。

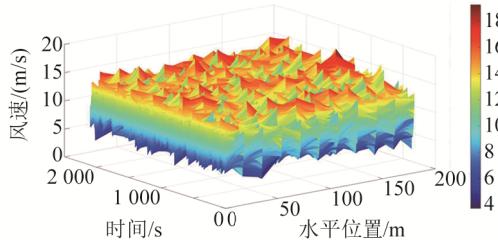


图1 轮毂高度处湍流风速

Fig. 1 Wind Speed Turbulence at Hub Height

2 数值仿真

2.1 半潜式风机建模

半潜式浮式基础主要参数见表1,下部浮式平台采用半潜式浮式基础,见图2。

表1 半潜式浮式基础主要参数

Tab. 1 Main Parameters of Semi-Submersible Floating Foundation

参数	数值	参数	数值
立柱间距/m	70.0	COG-X/m	20.301
下浮筒直径/m	12.0	COG-Y/m	0.034 6
上浮筒直径/m	14.0	COG-Z/m	10.912
垂荡板直径/m	28.0	横摇转动半径/m	34.620
横撑直径/m	2.0	纵摇转动半径/m	34.884
斜撑直径/m	1.6	艏摇转动半径/m	40.729
质量/t	8 861.3	设计吃水/m	14.000

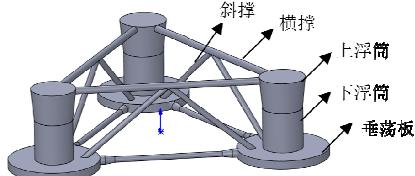


图2 半潜式浮式基础

Fig. 2 Semi-Submersible Floating Foundation

上部风轮系统采用上海电气4 MW风力机,主要参数见表2。

结合ANSYS/AQWA和OpenFAST建立半潜式风机和网箱的“气动-水动-结构-系泊”全耦合模型。上部风力机模型在OpenFAST中构建,下部浮式基础、系泊系统和养殖网箱模型在AQWA中构建,AQWA和OpenFAST之间的计算流程见图3。2个软件通过user_force64.dll实现耦合,该.dll是AQWA用于外力计算的内置动态链接库文件。

表2 4MW风力机主要参数

Tab. 2 Main Parameters of 4MW Wind Turbine

参数	数值
风轮直径/m	130
轮毂中心高度(距静水面)/m	85.213
额定风速/(m/s)	10.5
额定风轮转速/(r/min)	13.36
主轴倾斜角/(°)	6.0
风轮质量/kg	239 201
额定风轮推力/N	712 400

在计算海上漂浮式风力机运动响应时,AQWA通过动态链接库与OpenFAST交互,调用OpenFAST获取当前时间步风力机塔基的载荷数据,并将其作为外部作用力输入自身模型;同时,AQWA将半潜式平台计算出的位移、速度和加速度信息反馈至OpenFAST,以确定湍流风场中风轮的瞬时运动速度和轮毂高度的相对风速,从而实现对整个系统的综合动态响应分析。

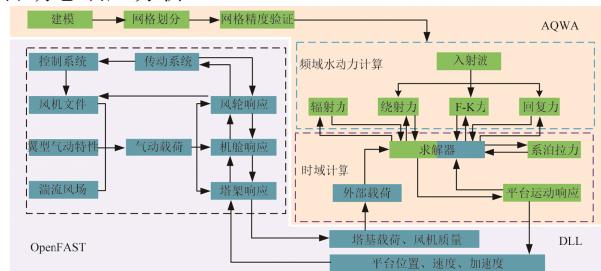


图3 AQWA 和 OpenFAST 之间的计算流程

Fig. 3 Calculation Flowchart Between AQWA and OpenFAST

2.2 网衣建模

莫里森方程能够有效模拟网衣所受的流体作用力,并处理其中的流体-结构相互作用问题,通常被用作网衣的建模。针对养殖网箱网衣网格数量过多问题,本文采用网目群化^[14]的方法进行简化,网目群化法见图4。

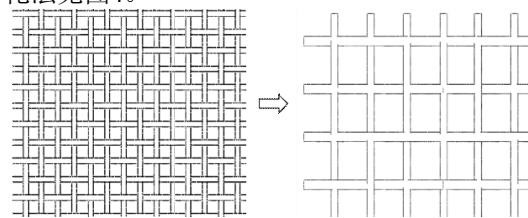


图4 网目群化法

Fig. 4 Mesh Grouping Method

为满足力学特性,网衣模型如下:

$$E_e A_e = EA \quad (6)$$

式中: E_e 为群目化后的等效弹性模量; A_e 为群目化

后的等效截面积; E 为实际网衣材料的弹性模量; A 为实际网衣的截面积。

由此, 网目线径的等效线径为

$$d_e = d \sqrt{\frac{n}{n_e}} \quad (7)$$

式中: d 为原始网衣线径; n 为原网目的数量; n_e 为群目化后的等效网目数量。

根据重力和浮力相似准则, 网衣在群目化时需要满足:

$$\begin{cases} \sum_{n=1}^m F_b = F_{be} \\ \sum_{n=1}^m F_g = F_{ge} \\ \sum_{n=1}^m V = V_e \end{cases} \quad (8)$$

式中: m 为群目化数目; F_b 为原网目所受浮力; F_{be} 为群目化后网目所受浮力; F_g 为原网目所受重力; F_{ge} 为群目化后网目所受重力; V 为原网目体积; V_e 为群目化后网目体积。

本文网衣的网目大小为60 mm, 线径为3 mm, 选用超高分子量聚乙烯材料, 密度为930 kg/m³, 该网箱共有三面侧网和一面底网。鉴于软件的计算能力, 群目化数目 $m=289$, 群目化后的线径 $d_e=51$ mm。

3 水池试验

本文水池试验在上海交通大学海洋工程水池开展。根据海洋工程水池开展模型试验的设施条件, 确定模型缩尺比 $\lambda=40$, 其主要参数见表3。其中: COG-X、COG-Y和COG-Z分别为试验模型的重心在X、Y和Z方向的坐标值。

表3 水池试验模型主要参数

Tab. 3 Main Parameters of Tank Test Model

参数	数值	参数	数值
立柱间距/m	1.750	COG-X/m	0.508
下浮筒 直径/m	0.350	COG-Y/m	0.001
上浮筒 直径/m	0.300	COG-Z/m	0.273
垂荡板 直径/m	0.700	横摇转动半径/m	0.866
横撑直径/m	0.050	纵摇转动半径/m	0.872
斜撑直径/m	0.040	艏摇转动半径/m	1.018
质量/kg	143.890	设计吃水/m	0.350

实型安装位置处水深为35 m, 模型试验水深为0.875 m。水池试验物理模型见图5。

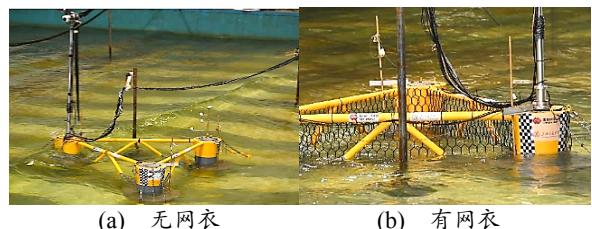


图5 水池试验物理模型

Fig. 5 Tank Test Physical Model

半潜式平台采用3×3共9根锚链进行系泊, 每组锚链中心线之间夹角为120°。每组系泊缆包含3根锚链, 组内锚链间夹角为5°, 见图6。每根锚链都采用“锚链+浮子+配重”形式, 锚链起始端和末端分别位于半潜平台顶部的导缆孔和海底的锚泊点。原型设计水深为35 m, 在1:40缩尺比条件下试验模拟水深可以满足相似关系, 故无须进行水深截断锚泊系统设计。

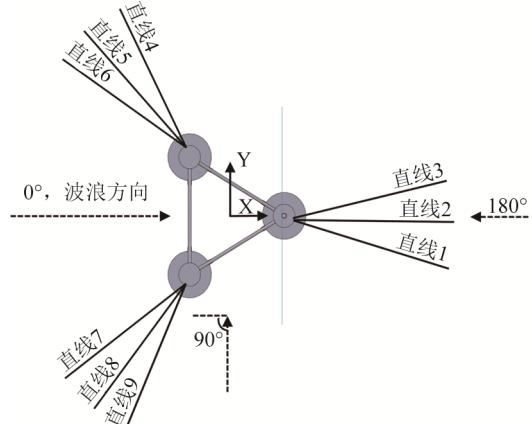


图6 系泊系统布置方式

Fig. 6 Mooring System Layout Configuration

4 结果分析

4.1 自由衰减分析

自由衰减试验是验证半潜式风机-网箱融合系统在静水状态下的运动响应特性的重要方法之一, 加装网衣前后6个自由度的数值模拟结果见图7。

由图7可见, 网衣的存在显著降低了风机平台的运动幅值, 改善了平台的动态稳定性, 其中横荡方向的衰减曲线与横摇, 以及艏摇高度耦合, 无法得到理想中的仅有横荡自由度的孤立的衰减曲线结果, 产生这一现象是因为系泊系统在横荡方向上的不对称性。在纵荡和横荡方向的部分运动幅值存在一定误差, 考虑网衣模型简化等因素, 误差大小在可接受范围之内。

网衣对系统的固有周期产生影响, 使融合系统的固有周期增加, 这表明网衣的存在增强了半潜式风机的附加质量效应, 见表4。在线性阻尼系数方面,

六自由度的结果均表明网衣的存在显著提高了系统的运动阻尼。

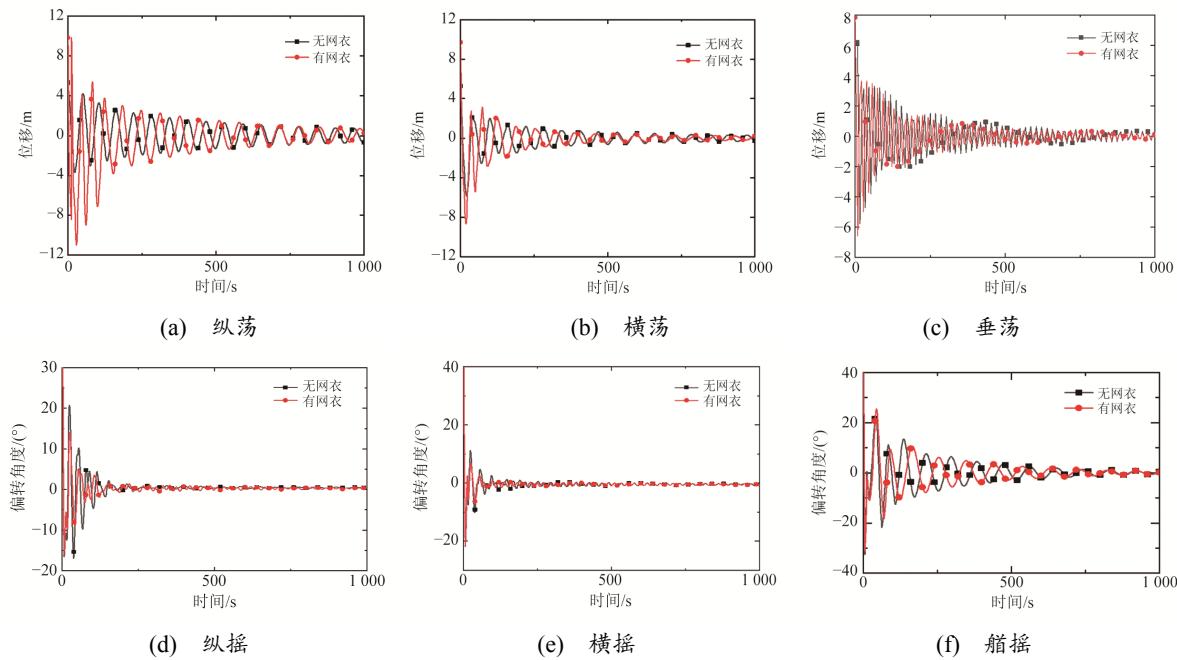


图 7 数值模拟自由衰减曲线

Fig. 7 Numerical Simulation of Free Decay Curve

表 4 静水衰减结果

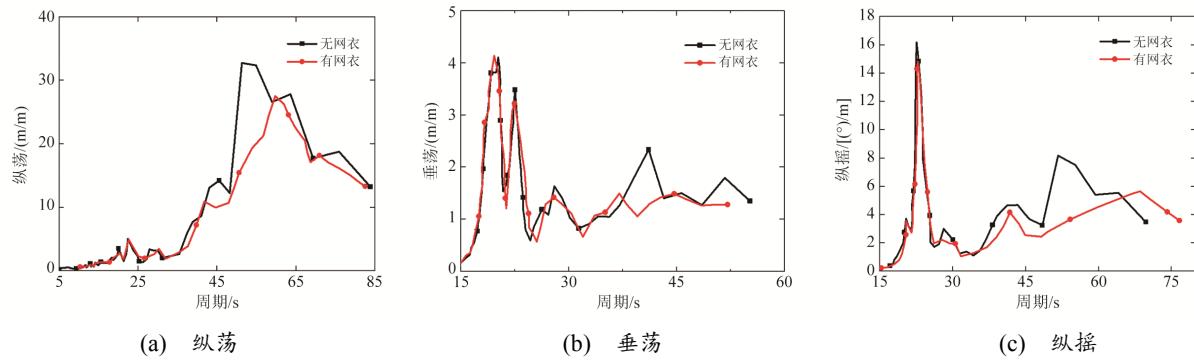
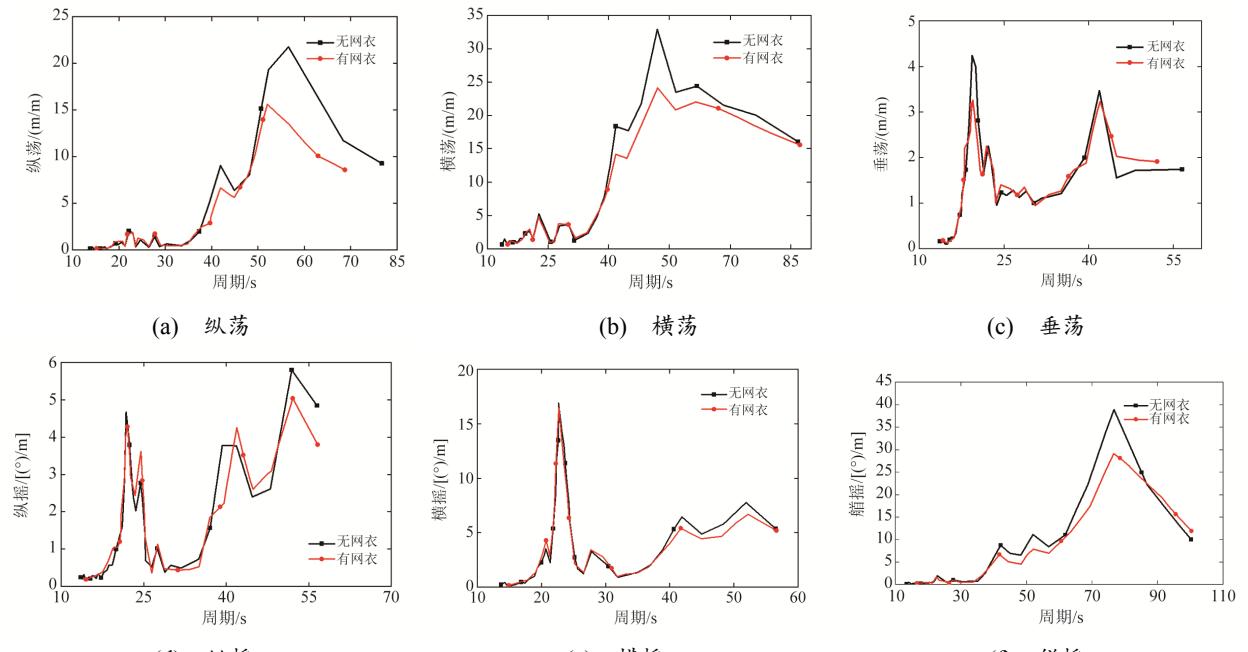
Tab. 4 Static Water Damping Results

类型	方向	固有周期/s		线性阻尼系数
		水池试验	数值仿真	
无网衣	纵荡	53.0	60.9	0.063
	横荡	49.9	52.2	0.038
	垂荡	19.0	18.7	0.029
	纵摇	22.0	23.1	0.074
	横摇	21.8	20.8	0.049
	艏摇	76.6	75.9	0.054
有网衣	纵荡	54.0	61.5	0.124
	横荡	59.6	55.8	0.083
	垂荡	18.9	18.8	0.075
	纵摇	21.8	21.9	0.101
	横摇	22.0	21.3	0.068
	艏摇	83.0	82.6	0.065

4.2 RAO 特性分析

响应幅值算子 (Response Amplitude Operator, RAO) 是海洋工程和船舶运动分析中的一个重要概念，用于描述结构在海洋环境中对特定波浪频率或周期的响应程度。在水池试验中，波浪入射角分为 0° 和 90° ，在浪向角为 0° 时，选取纵荡、垂荡和纵摇等3个主运动方向，见图8。

本文系泊系统在浪向角为 90° 时不具备对称性，因此，在 90° 横浪方向上选取了所有六自由度运动，见图9。水池试验中采用白噪声波浪试验，由于场地限制，所采用的白噪声波浪能量主要集中在 $0.125\text{ s} \sim 0.625\text{ s}$ （实际值为 $5\text{ s} \sim 25\text{ s}$ ），有义波高最大为 0.05 m （实际值为 2.00 m ）。

图8 水池试验 0° 浪向RAO结果对比Fig. 8 Comparison of Tank Test RAO Results at 0° Wave Direction图9 水池试验 90° 浪向RAO结果对比Fig. 9 Comparison of Tank Test RAO Results at 90° Wave Direction

从图8和图9可看出, 在浪向角为 0° 时, 融合系统在纵荡方向的响应幅值最为显著, 无网衣时最大值为 32.72 m/m , 有网衣时最大值为 27.51 m/m , 响应幅值降低了 15.9% ; 在垂荡方向无网衣时最大值为 4.11 m/m , 有网衣时最大值为 4.13 m/m ; 在纵摇方向无网衣时最大值为 $16.16\text{ }(^{\circ})/\text{m}$, 有网衣时最大值为 $14.44\text{ }(^{\circ})/\text{m}$, 响应幅值降低了 10.6% 。

在浪向角为 90° 时, 融合系统在横荡、纵荡和艏摇方向的响应幅值更为显著, 在横荡方向, 无网衣时的最大值为 32.91 m/m , 有网衣时的最大值为 24.11 m/m , 响应幅值降低了 26.7% ; 在纵荡方向分别为 21.78 m/m 和 15.62 m/m , 响应幅值降低了 28.3% ; 在艏摇方向分别为 $38.92\text{ }(^{\circ})/\text{m}$ 和 $28.14\text{ }(^{\circ})/\text{m}$, 响应幅

值降低了 27.7% 。由此可见, 加入网衣后, 融合系统的RAO曲线整体响应幅值降低, 尤其是共振峰值附近的响应, 表明网衣有效增加了阻尼, 削弱了共振响应; 在高频段, 半潜式风机加入网衣前、后的曲线几乎重合, 网衣的阻尼效果不显著。

为进一步验证水池试验结果的准确性和可靠性, 本文采用数值模型计算半潜式风机-网箱融合系统的RAO曲线, 见图10。数值模型基于频域分析方法, 假设流体为无黏性、不可压缩的理想流体, 并考虑网衣对平台运动的附加阻尼作用。数值模拟使用了相同的波浪条件, 分析了浪向角在 0° 和 90° 这2种工况下的动力响应。

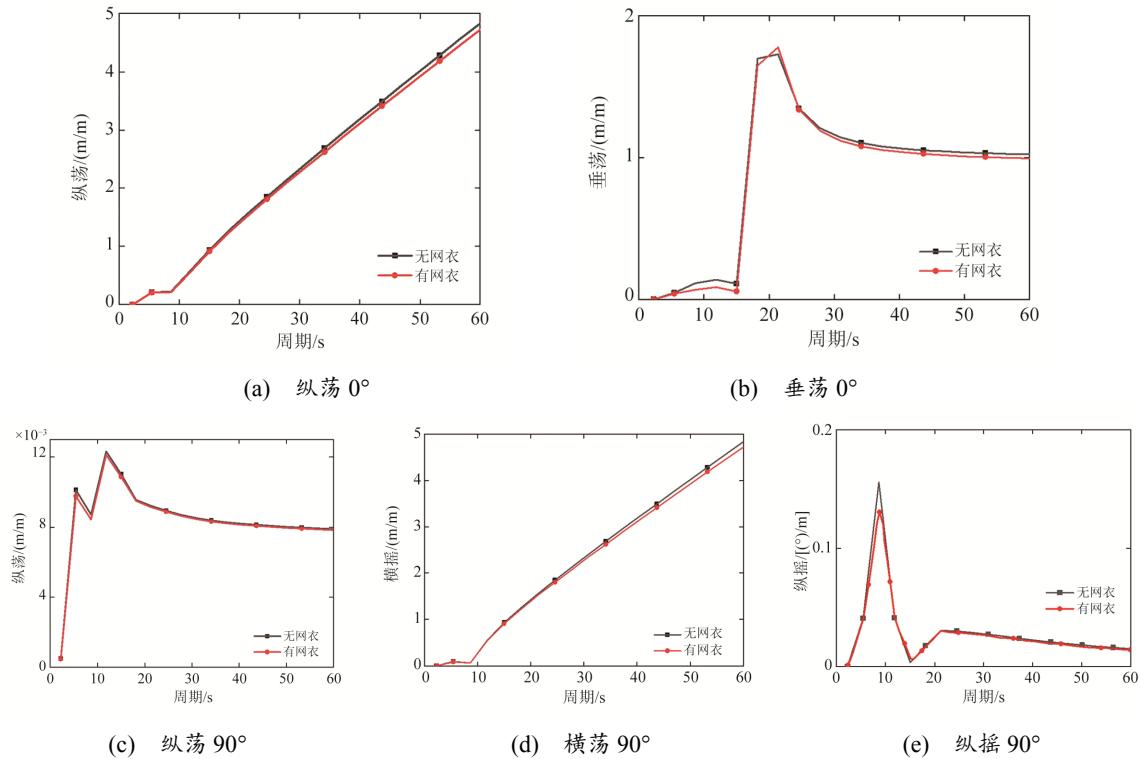


图 10 数值模拟 RAO 结果对比

Fig. 10 Comparison of Numerical Simulation RAO Results

数值模型与水池试验的RAO曲线在整体趋势上具有高度一致性。特别是在中频段（周期 $T>20$ s）和共振区域，数值模拟与试验数据的峰值幅度和频率分布均较为吻合。在高频段（周期 $T<20$ s），网衣对半潜式风机响应的抑制作用在数值模型中略有降低，原因是模型中对非线性效应的简化处理。

4.3 不同海况下运动特性分析

在完成了物理模型和数值模型的频域分析，并

通过静水自由衰减与RAO曲线对比验证网衣对半潜式风机的影响后，为深入研究半潜式风机-网箱融合系统在复杂海况下的动力响应特性，本文进一步开展了风浪流联合作用下的时域分析。

为尽可能涵盖实际海洋环境的变化范围，并确保研究的全面性与可靠性，本文将海洋环境划分为额定海况和五十年一遇海况等2种典型工况进行分析，见表5。

表 5 不规则波模拟环境条件

Tab. 5 Irregular Wave Simulation Environmental Conditions

波浪	有义波高/m	谱峰周期/s	谱形参数
额定海况	0.978 6	5.946 3	1.00
五十年一遇海况	5.020 0	10.920 0	1.16

额定海况中浪向角分别为 0° 和 90° ，风速为10.5 m/s，风向为 0° ，表层流速为1.246 m/s，风机转速为13.36 m/s；五十年一遇海况中浪向角分别为 0° 和 90° ，风速为46.2 m/s，风向为 90° ，表层流速为1.246 m/s，风机转速为0 m/s。

表6和表7总结了水池试验中半潜式风机-网箱融合系统在额定海况和五十年一遇海况下不同浪向角时的运动统计值。其中， A_{\max} 、 A_{\min} 和 $(A^+ - A^-)^{1/3}$ 分别表示运动最大值、最小值和运动有义双幅值。

表 6 额定海况 (0° 浪向)Tab. 6 Rated Sea Conditions (0° Wave Direction)

方向	网衣	A_{\max}	A_{\min}	$(A^+ - A^-)^{1/3}$
纵荡/m	无	5.074	3.681	0.395
	有	4.434	3.505	0.269
垂荡/m	无	-0.146	-0.809	0.216
	有	0.041	-0.469	0.164
纵摇/(°)	无	1.134	0.247	0.251
	有	0.734	0.099	0.158

在额定海况下, 无网衣时的最大水平漂移距离为 $-0.146\text{ m}\sim 5.074\text{ m}$, 纵荡方向的偏离程度最大, 有义双幅值为 0.395 m 。有网衣时的最大水平漂移距离为 $0.041\text{ m}\sim 4.434\text{ m}$, 纵荡方向的偏离程度最大, 有义双幅值为 0.269 m 。

表 7 五十年一遇海况 (0° 浪向)Tab. 7 50-Year Return Period Sea Conditions
(0° Wave Direction)

方向	网衣	A_{\max}	A_{\min}	$(A^+ - A^-)^{1/3}$
纵荡/m	无	8.384	-0.946	3.285
	有	6.281	-4.240	3.284
垂荡/m	无	0.943	-1.886	0.868
	有	1.153	-1.736	0.803
纵摇/(°)	无	2.555	-3.453	2.516
	有	2.924	-3.660	2.611

五十年一遇海况下, 无网衣时的最大水平漂移距离为 $0.943\text{ m}\sim 8.384\text{ m}$, 最大有义双幅值为 3.285 m 。有网衣时的最大水平漂移距离为 $1.153\text{ m}\sim 6.281\text{ m}$, 最大有义双幅值为 3.285 m 。

在额定海况中, 纵荡最大值从 5.074 m 减小至 4.434 m , 降低了 12.6% 。在五十年一遇海况中, 纵荡最大值从 8.384 m 降低至 6.281 m , 减少了 25.1% , 总体来看, 网衣降低了半潜式风机的水平漂移、纵荡幅值及整体的运动响应强度, 在额定和五十年一遇海况中均表现出较好的抑制作用。

数值仿真分析中同样对 0° 浪向的额定海况和五十年一遇海况进行了模拟, 图11为加网衣前、后半潜式风机的运动响应分析, 其中图11(a)~图11(c)为额定海况下的运动响应曲线, 图11(d)~图11(f)为五十年一遇海况下的运动响应曲线。由于垂荡方向的运动幅度较小, 选取了 $1500\text{ s}\sim 1800\text{ s}$ 的曲线。

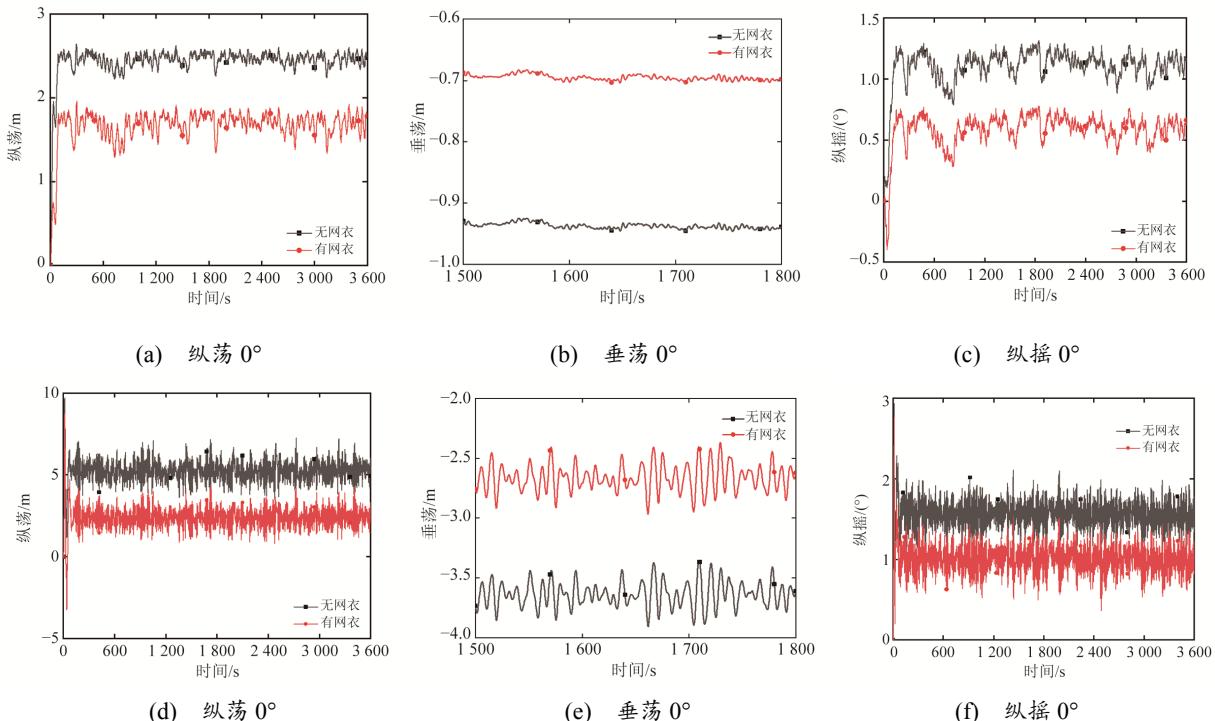


图 11 不同海况下的运动响应

Fig. 11 Motion Response Under Different Sea Conditions

由图11可知, 半潜式风机在加装网衣后, 浮式基础的运动幅值均有所降低。

5 结论

1) 数值仿真和水池试验结果表明, 加装网箱后, 半潜式风机的附加质量效应增加, 尤其是在阻尼系数方面, 六自由度的运动结果均表明网箱的存在显著提高了系统的运动阻尼。

2) 加装网箱后, 融合系统的RAO曲线在共振峰

值附近的整体响应幅值显著降低, 表现出良好的减振效果。在浪向角为 0° 时, 纵荡方向的响应幅值降低了 15.9% , 纵摇方向降低了 10.6% ; 在浪向角为 90° 时, 横荡方向降低了 26.7% , 纵荡方向降低了 28.3% , 舷摇方向降低了 27.7% 。这表明网箱显著提升了半潜式风机的动态稳定性, 有效抑制各方向的运动幅值。

3) 在风浪流联合试验中, 半潜式风机-网箱融合系统在不同海况下的水平漂移表现显著改善。在额定海况下, 其水平漂移距离减少了 12.6% ; 在五十

年一遇海况下，水平漂移距离降低了25.1%。这表明该融合系统不仅在常规海况下表现出优异的稳定性，在极端条件下也具有较强的抗漂移能力。

参考文献：

- [1] SIEVER M, KORØSEN Ø, WARREN - MYERS F, et al. Submerged Cage Aquaculture of Marine Fish: a Review of the Biological Challenges and Opportunities[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2021, 14(1): 106-119.
- [2] BI C W, ZHAO Y P, DONG G H, et al. Experimental and Numerical Investigation on the Damping Effect of Net Cages in Waves[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2015, 55: 122-138.
- [3] KIM S J, JEONG S J, PARK S J. Hydrodynamic Performance and Mooring Safety Assessment of an Offshore Floating Movable Fish Cage[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2024, 12(12): 2351.
- [4] LI G Q, LI X B, XIE Y H, et al. Experimental Study on Hydrodynamic Performance of the Semi-Submersible Vessel-Shaped Fish Cage[J]. *Aquacultural Engineering*, 2024, 107: 102482.
- [5] HUANG X H, GUO G X, TAO Q Y, et al. Dynamic Deformation of the Floating Collar of a Net Cage Under the Combined Effect of Waves and Current[J]. *Aquacultural Engineering*, 2018, 83: 47-56.
- [6] 马勇, 解光慈, 徐稼航, 等. 漂浮式海洋牧场养殖装置系泊系统设计[J]. *船舶工程*, 2022, 44(3): 14-21.
MA Y, XIE G C, XU J H, et al. Design of Mooring System of Semi-Submersible Marine Ranching Plant[J]. *Ship Engineering*, 2022, 44(3): 14-21.
- [7] TIAN Z L, YANG H, WEN H J. Hydrodynamic Performance of a Submersible Net Cage Integrated with an Offshore Platform[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2024, 11: 1436992.
- [8] MA Y, LI L, ONG M C, et al. Design and Dynamic Analysis of a Co-Existence Solution Between a Semi-Submersible Offshore Fish Cage and a Spar-Type Floating Offshore Wind Turbine[J]. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2024, 146(3): 031301.
- [9] ZHENG X Y, LEI Y. Stochastic Response Analysis for a Floating Offshore Wind Turbine Integrated with a Steel Fish Farming Cage[J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(8): 1229.
- [10] WANG H Y, FANG H M, CHIANG Y C. Study on the Coexistence of Offshore Wind Farms and Cage Culture[J]. *Water*, 2021, 13(14): 1960.
- [11] BAL K, BAYRAKTAR BURAL D. Investigation into Forces on Offshore Piles with Constant and Linearly Varying Diameters Using CFD and Extended Morison Equation Under Separate Wave and Current Loadings[J]. *Brodogradnja*, 2024, 75(4): 1-19.
- [12] 张成林. 深远海养殖网箱-浮式风力机集成系统耦合建模及动力响应分析[D]. 上海: 上海海洋大学, 2023.
ZHANG C L. Coupling Modeling and Dynamic Response Analysis of a Integrated System of Deep-Sea Aquaculture Cage-Floating Offshore Wind Turbine[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2023.
- [13] 孙磊. 重力式网箱锚碇系统锚绳张力特性研究[D]. 山东青岛: 中国海洋大学, 2015.
SUN L. Study on Tension Characteristics of Anchor Rope in Gravity Cage Anchorage System[D]. Qingdao, Shandong: Ocean University of China, 2015.
- [14] SHI Q, ZHAO D P, XUE D W, et al. Numerical Modelling of the Interaction Between Flexible Net Panels and Fluids Using SPH Method[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2024, 11: 1365857.

首套全国产化移动式大型旋筒风帆在江苏起航

日前，加装2套大型旋筒风帆的粤电83轮从江阴中船澄西船舶修造有限公司码头缓缓驶离。作为全国产化首套移动式大型旋筒风帆的实船应用“首秀”，标志着我国船舶工业在绿色船舶改装领域再次实现关键突破，为航运业低碳转型注入新动能。

据悉，这套国产化装备单个转子帆质量达110t，高25m、直径5m，最大工作转速可达180r/min，最大推力能稳定控制在300kN以内。经测算，它将为粤电8轮降低5%~8%的油耗，平均每日节省燃油约2t，每年可减少高达1600t的温室气体排放，实现环保效益与经济效益双提升。此次加装的2套移动式旋筒风帆是一种利用旋转的风筒产生马格努斯效应，将风能转化为推动船舶前进动力的装置，且不受风向限制，是降碳减排“利器”。自2023年以来，江阴已累计为国内外6艘船舶加装20套转子帆，同时还建造交付21套转子帆，实现了固定式、移动式、折叠式全类型覆盖。

来源：新华日报