

本文网址: <http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03111>

期刊网址: [www.ship-research.com](http://www.ship-research.com)

引用格式: 许仕杰, 程正顺, 杨立军, 等. 风浪流联合作用下半潜式风机与网箱集成系统耦合动力响应特性 [J]. 中国舰船研究, 2023, 18(6): 66-75.

XU S J, CHENG Z S, YANG L J, et al. Coupled dynamic response characteristics of integrated system combining semi-submersible wind turbine and fish farming cage under wind, wave and current actions[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2023, 18(6): 66-75.

# 风浪流联合作用下半潜式风机与网箱集成系统耦合动力响应特性



扫码阅读全文

许仕杰<sup>1,2</sup>, 程正顺<sup>1,2</sup>, 杨立军<sup>\*1</sup>, 曹群<sup>1,2</sup>

1 上海交通大学海洋工程国家重点实验室, 上海 200240

2 上海交通大学三亚崖州湾深海科技研究院, 海南 三亚 572024

**摘要:** [目的] 旨在研究半潜式风机与网箱集成系统在风浪流作用下的耦合动力特性。[方法] 基于自主设计的 SJTU-SPIC 半潜型漂浮式风机, 提出漂浮式风机和网箱集成系统概念并建立数值仿真模型, 采用气动-水动-控制-结构-系泊全耦合分析方法, 开展风浪流联合作用下系统耦合动力响应特性研究。[结果] 数值仿真结果表明: 加装网箱后会引发更大纵荡运动, 但会抑制纵摇运动, 有利于提升风机发电稳定性; 加装网箱后对系泊载荷和发电功率的影响很小。[结论] 半潜型漂浮式风机与网箱集成系统的动力学特性与原半潜型漂浮式风机类似, 该集成系统是可行的。

**关键词:** 半潜式风机; 网箱; 动力响应; 数值模拟

中图分类号: U665.12; U661.1

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.03111

## Coupled dynamic response characteristics of integrated system combining semi-submersible wind turbine and fish farming cage under wind, wave and current actions

XU Shijie<sup>1,2</sup>, CHENG Zhengshun<sup>1,2</sup>, YANG Lijun<sup>\*1</sup>, CAO Qun<sup>1,2</sup>

1 State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

2 SJTU Yazhou Bay Institute of Deepsea Science and Technology, Shanghai Jiao Tong University, Sanya 572024, China

**Abstract:** [Objective] This paper aims to study the coupled dynamic response characteristics of an integrated system of a semi-submersible wind turbine and fish farming cage under wind, wave and current actions. [Method] Based on the self-designed semi-submersible wind turbine SJTU-SPIC, an integrated floating wind turbine and fish farming cage concept is proposed and numerically modeled. The dynamic response characteristics of the integrated concept under wind, wave and current actions are then studied using coupled aero-hydro-servo-elastic-mooring analysis. [Results] The numerical simulations indicate that introducing the fish farming cage can induce slightly a larger surge motion but suppress the pitch, which is beneficial for wind power production. [Conclusion] The dynamic behavior of the integrated system of a semi-submersible wind turbine and fish farming cage proposed herein is similar to that of a floating wind turbine, and the system is shown to be feasible.

**Key words:** semi-submersible wind turbine; fish farming cage; dynamic response; numerical simulation

收稿日期: 2022-09-29 修回日期: 2022-12-16 网络首发时间: 2023-05-18 16:09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (42176210, 52201330); 三亚崖州湾科技城管理局 2020 年度科技计划资助项目 (SKJC-2020-01-005); 上海交通大学“深蓝计划”基金资助项目 (SL2021PT203)

作者简介: 许仕杰, 男, 1995 年生, 硕士生。研究方向: 海上风机与海洋牧场技术。E-mail: xushijie@sjtu.edu.cn

程正顺, 男, 1987 年生, 博士, 副教授。研究方向: 海洋结构物动力耦合与安全评估, 海上风机。

E-mail: zhengshun.cheng@sjtu.edu.cn

杨立军, 男, 1983 年生, 硕士, 工程师。研究方向: 海上浮式平台水动力学。E-mail: rink@sjtu.edu.cn

\*通信作者: 杨立军

## 0 引言

随着风机技术日渐成熟, 海上风场在水深和离岸方面实现了突破, 逐渐向深远海方向发展<sup>[1]</sup>。我国海洋牧场主要以网箱养殖为主, 传统重力式网箱因养殖密度大和近海污染等因素已逐渐无法满足市场需求<sup>[2]</sup>。2017年, 挪威萨尔玛集团委托中船重工建造了全球首个半潜式网箱“Ocean Farm 1”<sup>[3]</sup>, 半潜式网箱由于具有较强抗风浪能力, 可远离近海养殖名贵鱼类, 有着巨大的潜在经济效益, 受到了很多企业的青睐, 但因远海电力供应不足, 限制了半潜式网箱的发展。海上风场和海洋牧场都位于深远海, 若两者能够融合发展, 不仅可以一机两用, 实现降本增效的目的, 风机产生的电能还可直接给网箱供电, 从而解决远海养殖中的供电难问题。这种“海上发电, 海下养殖”的融合必将带动两种产业的快速发展<sup>[4]</sup>。

国内外学者研究了海上风机与网箱的结合问题。在国外, Goseberg等<sup>[5]</sup>在海上固定式风机底部加装养殖网箱并开展了冲刷试验, 验证了加装养殖网箱不会对海上风机的结构安全产生负面影响。2016年, 韩国开展了海上风电与海水养殖结合项目, 研究发现这种结合可提高藻类和鱼虾的养殖产量<sup>[6]</sup>。在国内, 江俊杰等<sup>[7]</sup>对导管架风机基础加装网衣前后水下结构进行了受力分析, 结果表明, 网衣对导管架风机基础水下结构的位移和应力影响很小。Zheng等<sup>[8]</sup>提出在锥形网箱上安装风机塔架的设想, 并开展了风浪环境下的随机响应分析, 验证了这种结合方式的可行性。上述研究大多集中于固定式风机和重力式网箱的结合, 对半潜式风机和网箱集成系统的研究较少。

本文拟以自主设计的SJTU-SPIC 10 MW半潜式风机为基础, 提出半潜式风机与网箱集成系统概念。首先, 基于势流理论和非线性有限元法, 建立半潜式风机数值模型, 通过水池模型试验验证数值模型的准确性, 在模型浮式基础内部加装网箱, 开展风、浪、流联合作用下集成系统耦合动力响应研究。通过对比分析浮式基础运动响应、系泊系统锚链载荷和风机发电功率的变化, 验证半潜式风机与网箱集成系统的可行性。

## 1 半潜式风机与网箱集成系统

半潜式风机与网箱集成的系统由半潜式风机、网箱和系泊系统组成, 如图1所示。半潜式风机为自主设计的SJTU-SPIC 10 MW风机, 网箱由固定在浮式基础内的钢制杆件和柔性网衣组

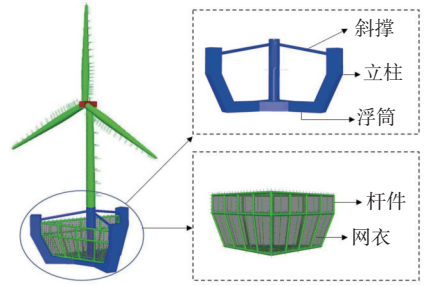


图1 SJTU-SPIC半潜式风机与网箱集成系统

Fig. 1 Integrated system of SJTU-SPIC semi-submersible wind turbine with fish farming cage

成, 系泊系统为原半潜式风机系泊系统。

### 1.1 半潜式风机

自主设计的SJTU-SPIC 10 MW风机采用半潜式技术路线, 搭载DTU 10 MW风机。原DTU 10 MW风机为陆上设计, 为保证半潜式风机与陆上10 MW风机的轮毂高度一致, 将前者的塔架高度缩短为92.6 m, 外径从底部的7.74 m到顶部的5.50 m呈线性变化, 塔底距水线为23.0 m。

浮式基础由3个部分倾斜的侧立柱、1个中央立柱、1个水下浮筒及3个圆柱体斜撑组成, 模型见图1, 主要参数如表1所示。侧立柱由向外倾斜的下部和直立的上部组成, 与传统直立向上的侧立柱相比, 这种向外倾斜的侧柱设计增加了与中央立柱的距离, 从而具有更好的稳定性。水下浮筒由一个六边形的中心浮筒和3个矩形浮筒组成, 浮筒高度为7 m, 可提供足够的浮力和压载空间<sup>[9]</sup>。

表1 SJTU-SPIC浮式基础主要参数<sup>[9]</sup>

Table 1 Main parameters of the SJTU-SPIC floater<sup>[9]</sup>

参数	数值
中央立柱高度/m	46.0
中央立柱直径/m	8.3
上方侧柱高度/m	18.8
下方侧柱高度/m	20.0
侧柱边长/m	9.0
中央立柱与侧柱顶端距离/m	50.0
中央立柱与侧柱底端距离/m	40.0
浮筒高度/m	7.0
斜撑长度/m	42.1
斜撑直径/m	2.0
干舷/m	15.0
吃水/m	30.0
排水量/kg	$1.6 \times 10^7$

## 1.2 网箱

网箱主要由钢制杆件和柔性网衣组成,主体刚性固定在浮式基础内,所需的浮力由半潜式风机提供<sup>[10]</sup>。根据浮式基础的形状,网箱的主体框架分为3部分:上部是与浮式基础侧立柱上部平行的竖向杆件,下部是与侧立柱下部平行的倾斜杆件,底部是与浮筒所在平面平行的横向杆件。网箱模型见图1,主要参数如表2所示。

表2 网箱主要参数

Table 2 Main parameters of the fish farming cage

参数	数值
上部竖向杆件高度/m	11.0
上部横向杆件长度/m	78.8
下部倾斜杆件高度/m	20.0
下部横向杆件长度/m	61.5
底部横向杆件长度/m	26.0
杆件直径/m	1.2
杆件厚度/m	0.02
中央立柱距网箱上部最大距离/m	45.5
中央立柱距网箱下部最大距离/m	35.5
养殖水体体积/m <sup>3</sup>	4.2×10 <sup>4</sup>

柔性网衣附着在半潜式网箱杆件上,每个网面在数值模型中采用含杆单元的细长线表示。网衣主要参数如表3所示。

表3 网衣主要参数

Table 3 Material parameters of the mesh clothing

参数	数值
密实度	0.12
流速衰减因子	0.7
网衣直径/m	0.025
线密度/(kg·m <sup>-1</sup> )	1.5
杨氏模量/MPa	400

## 1.3 系泊系统

图2为系泊系统布置图,主要参数见表4。系泊系统的锚链分为3组,每组锚链之间夹角为120°,由2根相隔5°的锚链组成<sup>[11]</sup>。每根锚链上布置10个重块,第1个重块距平台导缆孔180 m,每个重块间隔15 m。导缆孔位于水面以上15 m,锚点固定在水下60 m、半径为498 m的海底。

## 2 耦合动力响应分析方法

本文利用SIMA软件(SIMO模块和RIFLEX

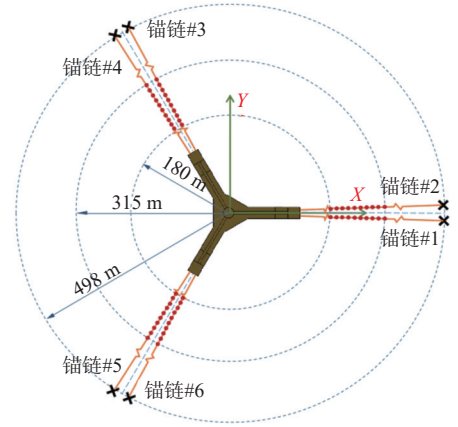


图2 系泊系统布置

Fig. 2 Layout of mooring system

表4 系泊系统主要参数

Table 4 Main parameters of the mooring system

参数	数值
锚链数量	6
每组锚链间角度/(°)	120
相邻锚链间角度/(°)	5
导缆孔高度/m	15
导缆孔到原点水平距离/m	54.5
锚点深度/m	-60
锚点到原点水平距离/m	498
锚链长度/m	465
锚链外径/m	0.095
铁链湿重/(kg·m <sup>-1</sup> )	1.9×10 <sup>3</sup>
抗拉压刚度(EA)/kN	7.788×10 <sup>5</sup>
每根锚链上重块数量/个	10
每个重块重量/kg	3.8×10 <sup>3</sup>
重块位置/m	180-15-315
预张力/N	4.78×10 <sup>5</sup>
破断张力/N	9×10 <sup>6</sup>

模块<sup>[12]</sup>开展风浪流联合作用下半潜式风机与网箱集成系统耦合动力响应分析,该系统为刚柔多体耦合结构,数值模拟与分析主要涉及水动力载荷、结构动力响应和空气动力载荷这3个计算部分。

### 2.1 浮式基础水动力载荷计算方法

半潜式风机浮式基础可视为大尺寸浮式结构物,近似模拟为刚体,其水动力载荷计算主要基于势流理论。首先,在频域分别求解辐射及绕射问题,通过求解辐射问题可计算附加质量和势流阻尼系数,求解绕射问题可计算一阶波浪激励力和平均慢漂力的传递函数。然后,通过Cummins方程<sup>[13]</sup>,将频域水动力系数和运动方程转成时域方程求解。此外,浮式基础和养殖网箱涉及许多

细长杆件,黏性载荷效应较为显著,采用 Morison 公式中的黏性项模拟。根据 DNV-RP-C205<sup>[14]</sup>,浮式基础侧柱阻力系数  $C_D$  为 2.0,中央立柱和斜撑  $C_D$  为 0.7,养殖网箱杆件  $C_D$  为 0.7。

## 2.2 网衣水动力载荷计算方法

网衣水动力载荷采用 Screen 方法,其将网线和结点看作一个整体模拟,即通过等效“面单元”来计算网衣上的水动力,引入密实度参数,去除对雷诺数的依赖,并包含网线间的相互影响<sup>[15]</sup>。该方法将网衣上的水动力  $F_h$  分解为阻力  $F_D$  和升力  $F_L$ ,表达式如下:

$$F_D = \frac{1}{2} C_{DN} \rho A_i |U^r|^2 \quad (1)$$

$$F_L = \frac{1}{2} C_{LN} \rho A_i |U^r|^2 \quad (2)$$

式中:  $C_{DN}$  和  $C_{LN}$  分别为网衣的阻力和升力系数;  $A_i$  为单位网衣的面积;  $U^r$  为网衣与来流的相对速度。  $C_{DN}$  和  $C_{LN}$  分别与密实度有关,并可表示为:

$$C_{DN}(S_n, \theta) = 0.04 + (-0.04 + 0.33S_n + 6.54S_n^2 - 4.88S_n^3) \cos \theta \quad (3)$$

$$C_{LN}(S_n, \theta) = (-0.05S_n + 2.3S_n^2 - 1.76S_n^3) \sin 2\theta \quad (4)$$

式中:  $S_n$  为密实度;  $\theta$  为网衣迎角。

此外,网箱作为一个环形结构,计算网衣水动力载荷时需要考虑上游网衣对下游网衣的影响,即流体在经过上游网衣后,下游网衣的来流速度将受到影响,这种影响用流速衰减因子  $r$  表示:

$$r = 1.0 - 0.46C_{DN} \quad (5)$$

## 2.3 结构动力学模型

半潜式风机与网箱集成系统中包含许多细长柔性结构,如叶片、转轴、塔架和系泊等,这些细

长柔性构件的动力学响应采用非线性有限元法模拟。叶片模拟为具有两个对称平面的非线性梁单元,转轴和塔架模拟为轴对称梁单元,锚链模拟为非线性杆单元。浮式基础与塔底、导缆孔采用刚性连接<sup>[16-17]</sup>。

## 2.4 空气动力学模型

利用叶素动量理论对气动载荷进行求解,该理论分为叶素理论和动量理论。叶素理论将叶片分为若干微段,并将其看作是相互独立的两维翼型,利用局部风荷载求出每个微段的气动载荷,积分后得到整个叶片的气动载荷。动量理论假定叶轮平面的动量损失主要由平面气流做功产生,所以可以根据叶轮的轴向和切向动量损失来计算叶片的诱导速度。由于诱导速度改变了风机平面流场,对由叶素理论得到的叶片气动载荷会产生一定的影响。此外,气动载荷计算还考虑了叶尖损失、动态入流、动态失速等修正。

## 3 结果分析与讨论

### 3.1 环境工况

为研究半潜式风机与网箱集成系统的耦合动力响应特性,本文设置了如表5所示的环境工况。其中,LC1~LC5(LC表示荷载工况)依次为有义波高 3.8 m、谱峰周期为 8.3 s 不规则波下的浪、浪流、风浪、风浪流、风浪流(湍流风)工况,用于分析不同风浪流荷载下,加装网箱后浮式基础运动响应、系泊缆载荷的前后变化;LC5~LC7分别为湍流风速为额定风速、低于额定风速、高于额定风速的荷载工况,用于分析不同风速下加装半潜式网箱后风机发电功率的前后变化。其中,波浪和流的方向为  $0^\circ$ ,波浪谱选用 Jonswap 谱,谱峰因子  $\gamma$  为 2.4;风荷载入射方向为  $0^\circ$ ,湍流风由 TurbSim 软件进行模拟<sup>[18]</sup>,湍流度为 0.1。

表5 环境工况

Table 5 Environmental conditions

工况	有义波高/m	谱峰周期/s	$\gamma$	流速/(m·s <sup>-1</sup> )	风速/(m·s <sup>-1</sup> )	湍流度	备注
LC1	3.8	8.3	2.4				仅波浪
LC2	3.8	8.3	2.4	0.6			浪流联合
LC3	3.8	8.3	2.4		11.4		风浪联合
LC4	3.8	8.3	2.4	0.6	11.4		风浪流联合
LC5	3.8	8.3	2.4	0.6	11.4	0.1	风浪流联合(湍流风)
LC6	3.8	8.3	2.4	0.6	9.0	0.1	风浪流联合(湍流风)
LC7	3.8	8.3	2.4	0.6	14.0	0.1	风浪流联合(湍流风)

### 3.2 数值模型验证

为了验证半潜式风机数值模型的准确性,通过对静水衰减试验和数值仿真的固有周期和无因次阻尼系数进行验证<sup>[19]</sup>。图3所示为半潜式风机在静水衰减试验和数值仿真中纵荡、垂荡和纵摇方向的自由衰减曲线,表6所示为纵荡、垂荡和纵摇方向的固有周期和无因次阻尼系数对比结果。

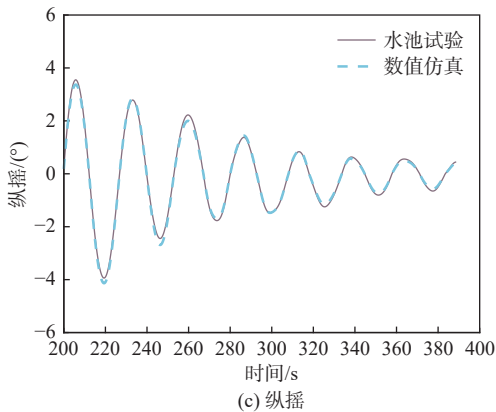
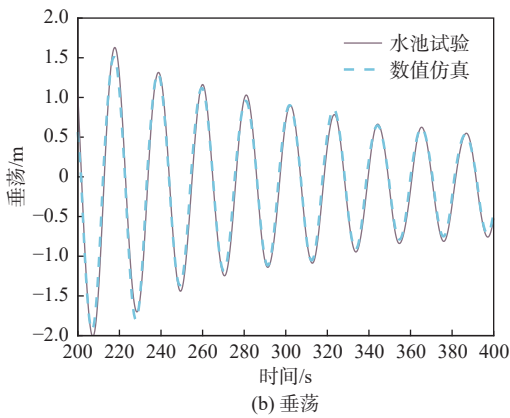
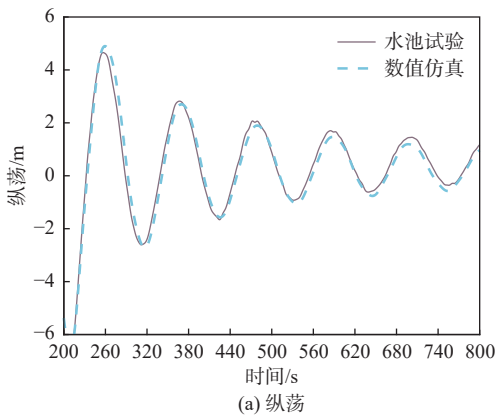


图3 SJTU-SPIC半潜式风机静水衰减试验和数值仿真自由衰减曲线

Fig. 3 Free attenuation curves of the SJTU-SPIC semi-submersible wind turbine in static water attenuation test and numerical simulation

由表6可知,试验和模型在固有周期处的最大误差为纵摇时的3.55%,在无因次阻尼系数处

的最大误差为纵摇时的6.45%,可认为静水衰减试验和数值仿真在固有周期和阻尼系数上近似相同,进而验证了建模仿真的准确性。下文中将在浮式基础内加装网箱,开展半潜式风机与网箱集成系统的耦合动力响应特性研究。

表6 SJTU-SPIC半潜式风机静水衰减试验和数值仿真固有周期及无因次阻尼系数统计值

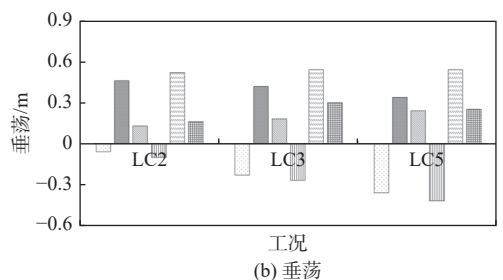
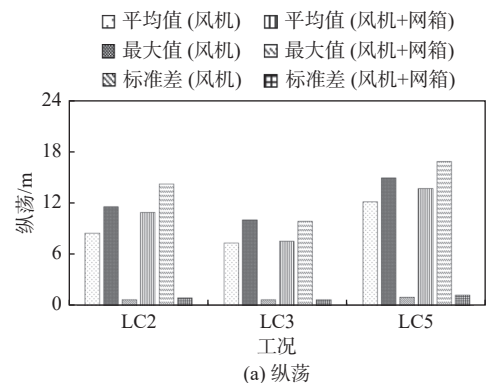
Table 6 Statistics of natural period and dimensionless damping coefficients of the SJTU-SPIC semi-submersible wind turbine obtained in static water attenuation test and numerical simulation

运动方向	静水衰减试验		数值仿真		固有周期误差/%	阻尼系数误差/%
	固有周期/s	阻尼系数	固有周期/s	阻尼系数		
纵荡	113.25	0.108	112.55	0.105	0.62	2.78
垂荡	21.96	0.033	21.50	0.031	2.09	6.06
纵摇	27.89	0.062	26.90	0.058	3.55	6.45

### 3.3 网箱对半潜式风机动力响应特性的影响

#### 3.3.1 浮式基础运动响应

浮式基础的运动主要包括以纵荡和横荡为代表的水平运动、以垂荡为代表的垂直运动以及以纵摇、横摇和艏摇为代表的转动。在仿真工况中,风浪流的方向均为 $0^\circ$ ,浮体沿风浪流方向的运动响应和变化较大,故重点关注纵荡、垂荡和纵摇运动。而且,数值结果表明浮式基础横荡、横摇和艏摇运动响应和变化很小。图4所示为在LC2,LC3和LC5工况下,半潜式风机和半潜式风机与网箱集成系统运动响应柱状图。表7为在LC1~LC5工况下,半潜式风机和半潜式风机与网箱集成系统浮式基础运动响应时域统计值。



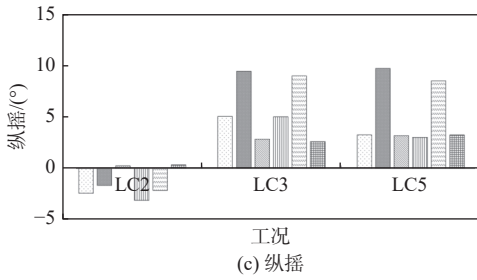


图 4 半潜式风机和半潜式风机与网箱集成系统运动响应柱状图  
Fig. 4 Bar charts of motion response of both the semi-submersible wind turbine and the integrated system of the semi-submersible wind turbine with fish farming cage

由图 4 和表 7 可知:

在纵荡方向, 由于网箱为水下结构, 其受到流的影响较为显著, 在加装网箱后系统纵荡方向会有明显的偏移。在仅波浪的工况下(LC1), 系统纵荡平衡位置仅偏移 0.05 m, 而在浪流联合工况下(LC2), 系统纵荡平衡位置却偏移了 2.39 m。对于风浪联合工况(LC3), 加装网箱后致使系统重心下移, 降低了风载荷对运动的影响, 系统纵荡的最大值和标准差都略有减小, 即分别减少了 0.14 和 0.01 m。对于风浪流联合工况(LC4 和 LC5), 无论是定常风还是湍流风, 由于流的影响, 系统

纵荡平衡位置和最大值都有所增加。由此可见, 当考虑流载荷时, 加装网箱后都会引起更大的纵荡运动。

在垂荡方向, 加装网箱后使得整体质量增加, 垂荡平衡位置有所下降, 最大值和标准差略有增加。在风浪流联合工况下(LC4), 系统垂荡平衡位置下降了 0.06 m, 最大值和标准差分别增加了 0.09 和 0.05 m。但从整体上来看(LC1~LC5), 网箱对系统垂荡的影响很小。

在纵摇方向, 加装网箱后使得系统重心下移, 在考虑风的环境下(LC3 和 LC5), 系统纵摇平衡位置均有所减小, 其中以 LC5 减小最为明显, 减小了 0.25°。可见, 加装网箱后可抑制风机的纵摇运动, 将有利于降低风机发电功率的波动, 提高发电稳定性。

### 3.3.2 系泊系统锚链载荷

由图 2 系泊系统布置图可知, 风浪流方向均为 0°且系泊系统沿风浪流方向对称布置, 故系泊系统锚链载荷也呈对称分布。因为锚链#1 和锚链#2 位于浮式基础右侧, 所以在工况下受到的轴向载荷最小, 而锚链#4 和锚链#5 位于平台最左侧, 所以在工况下受到的轴向载荷最大, 故重点

表 7 半潜式风机和半潜式风机与网箱集成系统运动响应时域统计值

Table 7 Time-domain statistics of motion response of both the semi-submersible wind turbine and the integrated system of the semi-submersible wind turbine with fish farming cage

工况	风机的纵荡/m			风机+网箱集成系统的纵荡/m			备注
	平均值	最大值	标准差	平均值	最大值	标准差	
LC1	1.12	3.58	0.65	1.17	3.59	0.61	仅波浪
LC2	8.46	11.52	0.73	10.85	14.16	0.94	浪流联合
LC3	7.29	9.98	0.74	7.52	9.84	0.73	风浪联合
LC4	12.25	15.49	0.88	13.73	17.67	1.19	风浪流联合
LC5	12.12	14.86	1.00	13.65	16.78	1.27	风浪流联合(湍流风)
工况	风机的垂荡/m			风机+网箱集成系统的垂荡/m			备注
	平均值	最大值	标准差	平均值	最大值	标准差	
LC1	0.00	0.55	0.13	-0.02	0.58	0.14	仅波浪
LC2	-0.06	0.46	0.13	-0.10	0.52	0.16	浪流联合
LC3	-0.23	0.42	0.18	-0.27	0.54	0.30	风浪联合
LC4	-0.35	0.35	0.22	-0.41	0.44	0.27	风浪流联合
LC5	-0.36	0.34	0.24	-0.42	0.54	0.25	风浪流联合(湍流风)
工况	风机的纵摇/(°)			风机+网箱集成系统的纵摇/(°)			备注
	平均值	最大值	标准差	平均值	最大值	标准差	
LC1	-0.50	0.17	0.23	-0.52	0.13	0.23	仅波浪
LC2	-2.40	-1.67	0.26	-3.09	-2.14	0.34	浪流联合
LC3	5.04	9.43	2.83	5.01	8.98	2.58	风浪联合
LC4	3.20	7.07	2.65	2.99	7.10	3.51	风浪流联合
LC5	3.25	9.69	3.16	3.00	8.49	3.26	风浪流联合(湍流风)

关注锚链#1和锚链#4的载荷变化情况<sup>[20]</sup>。图5所示为在LC2, LC3和LC5工况下,半潜式风机和半潜式风机与网箱集成系统锚链张力响应柱状图。表8所示为在LC1~LC5工况下,半潜式风机和半潜式风机与网箱集成系统锚链张力响应时域统计值。

由图5和表8可知,加装网箱后,系统质量有所增大,故在考虑了流载荷和风载荷的环境下(LC2~LC5),系统的平衡位置会沿流和风的方向偏移,从而导致锚链#1载荷均值减小,锚链#4载荷均值增大。LC1为仅波浪工况,所以锚链所受载荷变化不明显。其中,锚链#1载荷均值和最大值分别减少了0.31%和1.66%;锚链#4载荷均值和最大值分别增加了0.17%和1.86%。而考虑了流载荷和风载荷后,则变化明显。LC2为浪流联合工况,锚链#1载荷均值和最大值分别减少了6.68%和5.11%;锚链#4载荷均值和最大值分别增加了17.06%和23.13%;LC5为风浪流(湍流风)联合工况,锚链#1载荷最大值也开始增大,增加了20.8%。可见,加装网箱后增大了系统平衡位置的偏移,使得迎风一侧的锚链载荷均值和最大值都有所增加,并且在风浪流联合作用下系统运动更为剧烈,使得背风一侧的锚链最大值也有所增加,故在多环境工况下对集成系统的锚链提出了更高要求。

然而,从总体上看,锚链载荷最大值为风浪流联合工况(LC4)下的2304.90 kN,始终远小于破断张力9000 kN,可见,加装网箱后依然可以沿用原半潜式风机系泊系统。

表8 半潜式风机和半潜式风机与网箱集成系统锚链张力响应时域统计值

Table 8 Time domain statistics of mooring line tension response of both the semi-submersible wind turbine and the integrated system of the semi-submersible wind turbine with fish farming cage

工况	风机的锚链#1张力响应/kN			风机与网箱集成系统的锚链#1张力响应/kN			备注
	平均值	最大值	标准差	平均值	最大值	标准差	
LC1	440.71	490.69	17.80	439.33	482.53	17.20	仅波浪
LC2	310.06	328.61	9.08	289.35	311.83	10.37	浪流联合
LC3	242.27	310.73	33.16	239.34	310.63	32.01	风浪联合
LC4	209.17	257.95	25.63	205.70	323.89	39.80	风浪流联合
LC5	210.40	339.65	34.08	206.52	410.38	49.42	风浪流联合(湍流风)

工况	风机的锚链#4张力响应/kN			风机与网箱集成系统的锚链#4张力响应/kN			备注
	平均值	最大值	标准差	平均值	最大值	标准差	
LC1	482.53	535.68	12.91	483.36	545.62	13.06	仅波浪
LC2	707.75	858.86	35.17	828.49	1057.50	59.05	浪流联合
LC3	946.81	1317.90	177.65	957.56	1323.60	165.73	风浪联合
LC4	1312.02	1907.50	252.65	1498.41	2304.90	363.50	风浪流联合
LC5	1308.57	2026.50	281.43	1493.76	2297.30	377.30	风浪流联合(湍流风)

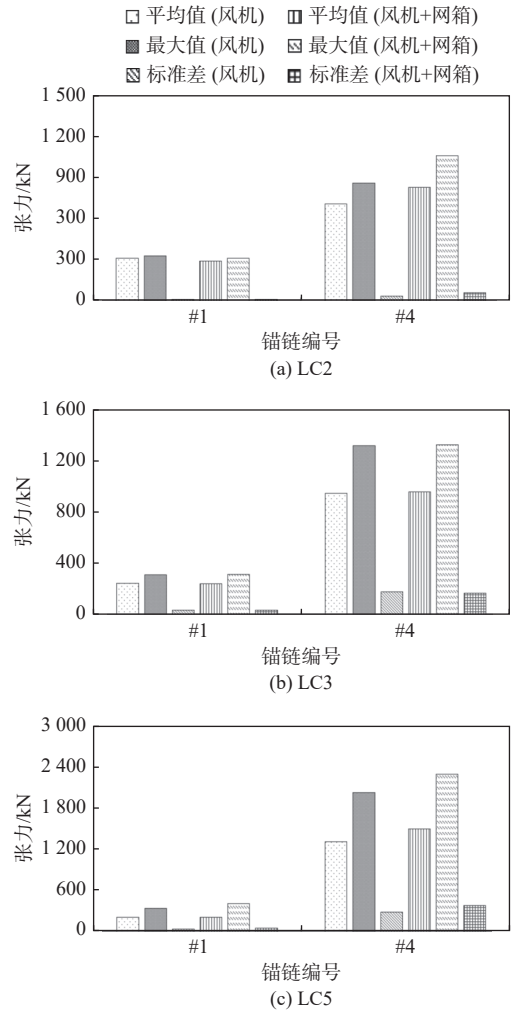


图5 半潜式风机和半潜式风机与网箱集成系统锚链张力响应柱状图

Fig. 5 Bar charts of mooring line tension response of both the semi-submersible wind turbine and the integrated system of the semi-submersible wind turbine with fish farming cage

### 3.3.3 风机发电功率

风机以发电为目的,发电功率是半潜式风机的关键<sup>[2]</sup>。当风速低于额定风速时,主要采用变速控制,使风机捕获风能的效率最优,但发电功率小于 10 MW 额定功率。当风速高于额定风速时,主要采用变桨控制,以保证风机安全性和发电稳定性,使功率维持在 10 MW 额定功率。图 6 所示为 LC5~LC7 工况下半潜式风机和半潜式风机与网箱集成系统的发电功率时域曲线图,表 9 所示为 LC5~LC7 工况下半潜式风机和半潜式风机与网箱集成系统发电功率统计值。

由图 6 和表 9 可知,由于湍流风的影响,各工况下风机发电功率曲线均有明显波动。对比额定风速,当风速低于额定风速时,半潜式风机与网箱集成系统的发电功率均值和最大值分别增大了 0.12 和 0.71 MW;当风速高于额定风速时,半潜式风机与网箱集成系统的标准差减少了 0.05 MW。可见,加装网箱后在低风速下可以提高风机的发电功率,在高风速下可以提高风机的发电稳定性,这对风机的发电策略极为有利。

图 7 所示为半潜式风机和半潜式风机与网箱集成系统发电功率谱密度曲线。由图可知,谱密度曲线最高峰值处的频率为 0.23 rad/s,该频率对应纵摇运动固有频率,可见,纵摇运动是影响风机发电功率稳定性的最重要因素。并且,加装网箱后峰值由 11.32 MW<sup>2</sup>·s/rad 降至 11.24 MW<sup>2</sup>·s/rad,

表 9 半潜式风机和半潜式风机与网箱集成系统发电功率统计值

Table 9 Statistics of the power output from both the semi-submersible wind turbine and the integrated system of semi-submersible wind turbine with fish farming cage

工况	风机的发电功率/MW			风机+网箱集成系统的发电功率/MW			备注
	平均值	最大值	标准差	平均值	最大值	标准差	
LC5	9.02	10.00	1.22	8.83	10.00	1.40	额定风速
LC6	5.41	7.87	1.13	5.53	8.58	1.16	低于额定风速
LC7	9.38	10.00	1.05	9.18	10.00	1.00	高于额定风速

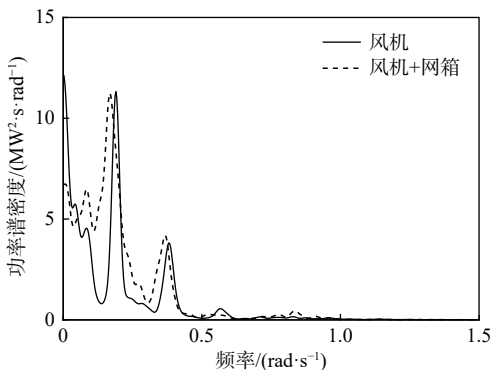


图 7 半潜式风机和半潜式风机与网箱集成系统发电功率谱密度  
Fig. 7 Spectral density of the power output from both the semi-submersible wind turbine and the integrated system of semi-submersible wind turbine with fish farming cage

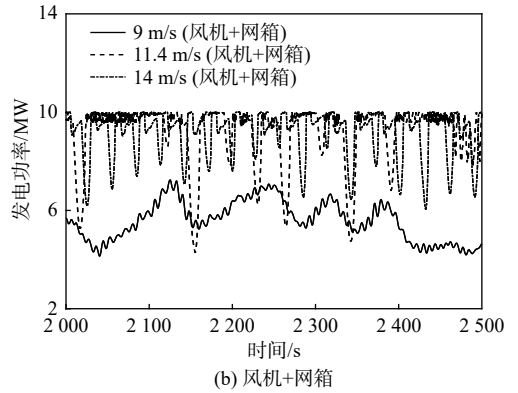
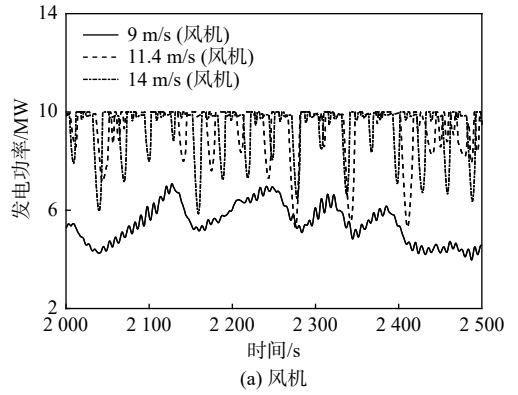


图 6 半潜式风机和半潜式风机与网箱集成系统发电功率时域曲线

Fig. 6 Time-domain curves of the power output from both the semi-submersible wind turbine and the integrated system of the semi-submersible wind turbine with fish farming cage

这进一步证明了加装网箱后对风机的发电稳定性会产生有利影响。

## 4 结论

本文以自主设计的 SJTU-SPIC 10 MW 半潜式风机为基础,提出了半潜式风机与网箱集成系统概念,开展了风浪流联合作用下集成系统耦合动力响应研究。通过对比分析浮式基础运动响应、系泊系统锚链载荷和风机发电功率的变化,得到如下主要结论:

1) 对比原半潜式风机,集成系统在纵荡方向的运动响应有所增加,考虑了流载荷的浪流联合工况增加最为明显;加装网箱后集成系统的重心下移,在纵摇方向的运动响应有所减小,尤其在

风浪流联合工况下,风和流会形成相反的力矩,进一步改善系统的纵摇运动;垂荡方向的运动响应变化很小,可忽略不计。

2) 对比原半潜式风机,加装网箱后整体质量增加,系统向流和风的方向偏移,导致迎风一侧的锚链载荷均值增加,背风一侧锚链载荷均值减少。相比单一环境工况,风浪流联合作用下的运动响应变化更明显。总体上看(LC1~LC5),集成系统锚链载荷的最大值为2304.90 kN,远小于破断张力9000 kN,可见,加装网箱后依然可以沿用原半潜式风机系泊系统。

3) 对比原半潜式风机,加装网箱后集成系统纵摇运动减小,在低风速下可以提高风机的发电功率,在额定风速和高风速下可以提高风机的发电稳定性,这对风机的发电策略极为有利。

总之,半潜式风机加装网箱后对浮式基础的运动响应、系泊系统锚链载荷的影响很小,并能提升风机的发电稳定性,进一步优化风机发电策略。集成系统的动力响应特性与原半潜式风机类似,验证了半潜式风机与网箱集成系统的可行性。

#### 参考文献:

- [1] 李琼慧,王彩霞.从电力发展“十三五”规划看新能源发展[J].中国电力,2017,50(1):30-36.  
LI Q H, WANG C X. New energy development from the 13th Five-Year Plan of electric power development [J]. China Electric Power, 2017, 50(1): 30-36 (in Chinese).
- [2] 郭帅.深水大型养殖网箱抗台设计及水动力性能分析[D].江苏:江苏科技大学,2020.  
GUO S. Anti-typhoon design and hydrodynamic performance analysis of large-scale aquaculture cage in deep water [D]. Jiangsu: Jiangsu University of Science and Technology, 2020 (in Chinese).
- [3] JIN J Z, SU B, DOU R, et al. Numerical modelling of hydrodynamic responses of Ocean Farm 1 in waves and current and validation against model test measurements [J]. *Marine Structures*, 2021, 78: 103017.
- [4] MIKKOLA E, HEINONEN J, KANKANINEN M, et al. Multi-platform concepts for combining offshore wind energy and fish farming in freezing sea areas: case study in the gulf of Bothnia[C]//Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Madrid, Spain: American Society of Mechanical Engineers, 2018, 51258: V006T05A029.
- [5] GOSEBERG N, FRANZ B, SCHLURMANN T. The potential co-use of aquaculture and offshore wind energy structures[C]//Proceedings of the 6th Chinese-German Joint Symposium on Hydraulic and Ocean Engineering (JOINT 2012). Keelung, China: Taiwan Ocean University, 2012: 597-603.
- [6] 莫爵亭,宋国炜,宋焱.广东阳江“海上风电+海洋牧场”生态发展可行性初探[J].南方能源建设,2020,7(2):5.  
MO J T, SONG G W, SONG L. Preliminary study on the feasibility of "offshore wind power + aquaculture" ecological development in Yangjiang, Guangdong Province[J]. *South-ern Energy Construction*, 2020, 7(2): 5 (in Chinese).
- [7] 江俊杰,窦培林.导管架风机基础加装网箱前后的受力分析[J].中国水运,2016,16(11):253-255.  
JIANG J J, DOU P L. Stress analysis of jacket offshore wind turbine foundation with and without a fishing cage [J]. *China Water Transportation*, 2016, 16(11): 253-255 (in Chinese).
- [8] 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.
- [9] CAO Q, XIAO L F, CHENG Z S, et al. Dynamic responses of a 10MW semi-submersible wind turbine at an intermediate water depth: A comprehensive numerical and experimental comparison[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 232: 109138.
- [10] ZHAO Y P, GUAN C T, BIC W, et al. Experimental investigations on hydrodynamic responses of a semi-submersible offshore fish farm in waves[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2019, 7(7): 238.
- [11] CAO Q, XIAO L F, CHENG Z S, et al. Operational and extreme responses of a new concept of 10MW semi-submersible wind turbine in intermediate water depth: an experimental study[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 217: 108003.
- [12] DAI J, ABRAHAMSEN B C, VIUFF T, et al. Effect of wave-current interaction on a long Fjord-crossing floating pontoon bridge[J]. *Engineering Structures*, 2022, 266: 114549.
- [13] ARMESTO J A, GUANCHE R, JESUS F, et al. Comparative analysis of the methods to compute the radiation term in Cummins' equation[J]. *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy*, 2015, 1(4): 377-393.
- [14] DNV. Recommended practice DNV-RP-C205: environmental conditions and environmental loads[S]. Oslo, Norway: DNV, 2010.
- [15] CHENG H, LI L, AARSÆTHER K G, et al. Typical hydrodynamic models for aquaculture nets: a comparative study under pure current conditions[J]. *Aquacultural Engineering*, 2020, 90: 102070.
- [16] CHENG Z S, MADSEN H A, GAO Z, et al. A fully coupled method for numerical modeling and dynamic analysis of floating vertical axis wind turbines[J]. *Renewable Energy*, 2017, 107: 604-619.
- [17] CHENG Z, MADSEN H A, CHAI W, et al. A comparison of extreme structural responses and fatigue damage of semi-submersible type floating horizontal and vertic-

- al axis wind turbines[J]. *Renewable Energy*, 2017, 108: 207–219.
- [18] JONKMAN B J . TurbSim user's guide: version 1.50[S]. Colorado: National Renewable Energy Laboratory, 2009.
- [19] CAO Q, BACHYNSKI-POLIC E E ,GAI ZL, et al. Analysis of a hybrid mooring system concept for a semi-submersible wind turbine in intermediate water depth under operational, extreme, and yaw error conditions[C]//Proceedings of ASME 2022 41st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Hamburg, Germany: ASME, 2022: 5–10.
- [20] CAO Q, XIAO L F, CHENG Z S, et al. An experimental study on dynamic behavior of a new concept of 10MW semi-submersible wind turbine[C]//Proceedings of the 30th International Ocean and Polar Engineering Conference. Shanghai, China: ISOPE, 2020.
- [21] 易乾. 南海海域风浪条件下浮式风机动力响应及构型参数研究 [D]. 北京: 清华大学, 2017.
- YI Q. Research on dynamic response and configuration parameters of floating wind turbine under wind and wave conditions in South China Sea [D]. Beijing : Tsinghua University, 2017 (in Chinese) .

## 相关论文

- [1] 焦甲龙, 张皓, 陈远明, 等. 长峰与短峰不规则波对船舶运动与波浪载荷的影响分析 [J]. 中国舰船研究, 2023, 18(1): 107–115. doi: 10.19693/j.issn.1673-3185.02679
- [2] 付冲, 赵刘群, 孙雷. 采用弦式系泊系统的海洋平台水动力性能数值模拟分析 [J]. 中国舰船研究, 2022, 17(6): 193–208. doi: 10.19693/j.issn.1673-3185.02338
- [3] 张桂勇, 王双强, 孙哲, 等. 船舶与海洋工程流固耦合数值方法研究进展 [J]. 中国舰船研究, 2022, 17(5): 52–73. doi: 10.19693/j.issn.1673-3185.02887
- [4] 张涵韬, 王一雯, 孔祥韶等. 恶劣海况中船舶砰击颤振响应特性数值计算与试验研究 [J]. 中国舰船研究. doi: 10.19693/j.issn.1673-3185.03249