中国舰船研究
CHINESE JOURNAL OF SHIP RESEARCH
CSCD收录期刊 Scopus收录期刊
中文核心期刊 JST收录期刊
中国科技核心期刊 DOAJ收录期刊

海上风机导管架与网箱组合结构水动力特性试验研究

王凯 韩若朗 许条建 邱彪 阮芳伟 刘俊全

Experimental study on the hydrodynamic characteristics of a combined structure of offshore wind turbine jacket and net cage

WANG Kai, HAN Ruolang, XU Tiaojian, QIU Biao, RUAN Fangwei, LIU Junquan

在线阅读 View online: https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03847

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

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

中国舰船研究. 2023, 18(6): 66-75 https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03111

基于改进体积力法的导管螺旋桨水动力性能数值研究

Numerical study on hydrodynamic performance of ducted propeller based on improved body force model

中国舰船研究. 2023, 18(4): 186-196 https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.02920

水下角反射组合体声散射特性

Acoustic scattering properties of underwater corner reflector complexes

中国舰船研究. 2023, 18(5): 83-91 https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03056

FPSO水动力特性的完全非线性数值模拟

Fully nonlinear numerical simulation on hydrodynamic characteristics of FPSO

中国舰船研究. 2020, 15(1): 95-106 https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01726

船底双层板架结构水下近场爆炸试验

Underwater near-field explosion experiment of double-wall bottom grillage

中国舰船研究. 2019, 14(S1): 143-150 https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01571

十字形和X形艉舵航行体的水动力特性对比

Comparison of hydrodynamic characteristics of SUBOFF with cruciform and X-form rudder arrangement

中国舰船研究. 2020, 15(2): 8-16 https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01799

扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

本文网址: http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03847 **期刊网址:** www.ship-research.com

引用格式: 王凯, 韩若朗, 许条建, 等. 海上风机导管架与网箱组合结构水动力特性试验研究 [J]. 中国舰船研究, 2024, 19(4): 202–209.

WANG K, HAN R L, XU T J, et al. Experimental study on the hydrodynamic characteristics of a combined structure of offshore wind turbine jacket and net cage[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2024, 19(4): 202–209 (in Chinese).

海上风机导管架与网箱组合结构水动力特性试验研究

扫码阅读全文

王凯[1], 韩若朗[1], 许条建[*2], 邱彪[3], 阮芳伟[3], 刘俊全[3]

1 中山大学 海洋工程与技术学院, 广东 珠海 519082

2 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024

3 中广核阳江海上风力发电有限公司, 广东 阳江 529931

摘 要: [**目的**] 旨在研究一种将海上风电导管架与养殖网箱结合的新型组合结构的水动力特性。[**方法**] 通过物理模型试验, 分析导管架与网箱组合结构的桩基水平荷载、网衣与导管架的连接张力, 并考虑不同的水深、波高、周期、波向、流速和流向等参数对该结构带来的影响。[**结果**] 试验结果表明, 在 0°规则波条件下, 桩基最大水平荷载为 30.2 N; 在 45°规则波条件下, 桩基最大水平荷载为 27.5 N; 在正向波浪条件下(入射角为 0°), 桩基水平荷载比斜向波浪条件下(入射角为 45°)的大 9.5%。[**结论**] 研究表明, 在规则波条件下周期较小时网箱对导管架桩基水平荷载影响较小, 在纯流条件下网箱显著增加了导管架的桩基水平荷载。

关键词: 网箱; 风机导管架; 组合结构; 水动力特性

中图分类号: U661.1; U665.12 **文献标志码:** A **DOI:** 10.19693/j.issn.1673-3185.03847

Experimental study on the hydrodynamic characteristics of a combined structure of offshore wind turbine jacket and net cage

WANG Kai[1], *HAN Ruolang*[1], *XU Tiaojian*[*2], *QIU Biao*[3], *RUAN Fangwei*[3], *LIU Junquan*[3]

1 School of Ocean Engineering and Technology, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China

2 State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China

3 CGN Yangjiang Offshore Wind Power Co., Ltd., Yangjiang 529931, China

Abstract: [**Objective**] This paper proposes a novel structure that combines an offshore wind turbine jacket and aquaculture net cage, and its hydrodynamic characteristics are investigated. [**Methods**] Experimental tests are carried out to analyze the horizontal loads on the pile foundations of the combined structure, and the tension in the connection between the jacket and net cage, while considering the effects of water depth, wave height, wave period, wave direction, current velocity and direction, and other parameters. [**Results**] For 0-degree regular wave conditions, the maximum horizontal load on the pile foundations is 30.2 N. For 45-degree regular wave conditions, the maximum horizontal load on the pile foundations is 27.5 N. Thus, the maximum horizontal load on the pile foundations under 0-degree regular wave conditions is 9.5% greater than that under 45-degree regular wave conditions. [**Conclusions**] Under regular wave conditions, the net cage has little influence on the horizontal load on the pile foundations when the wave period is small, while under pure current conditions, the net cage will cause a significant increase in the horizontal load on the pile foundations of the combined structure.

Key words: net cage; wind turbine jacket; combined structure; hydrodynamic characteristics

收稿日期: 2024–03–27 **修回日期:** 2024–05–16 **网络首发时间:** 2024–06–20 15:36

基金项目: 广东省促进经济高质量发展专项资金项目(GDNRC[2022]23 号); 广东省海上风电联合基金重点项目(2022B1515250005)

作者简介: 王凯, 男, 1983 年生, 博士, 副教授。研究方向: 海上浮式风机一体化仿真技术。E-mail: wangkai25@mail.sysu.edu.cn

许条建, 男, 1983 年生, 博士, 教授。研究方向: 海洋牧场结构水动力和安全分析。E-mail: tjxu@dlut.edu.cn

邱彪, 男, 1984 年生, 硕士, 工程师。研究方向: 海上浮式风电与养殖网箱耦合。E-mail: 286170067@qq.com

***通信作者:** 许条建

0　引　言

海洋养殖和海上风电产业向深远海发展已是一种趋势[1]。海洋养殖由于离岸远，全自动化养殖是必然选择，充足的电能供给成为深远海养殖的必要条件，但高成本限制了深远海风电的发展。深远海养殖与风电融合开发可以解决各自发展的瓶颈问题，开创海洋空间多用途利用的新理念，有利于这两个产业的发展，形成双赢的新格局。

海上风机的导管架主要由圆柱结构组成，海洋波浪是其主要干扰因素。因此，研究导管架所受荷载需要解决波浪与多个圆柱之间相互作用的问题。目前，分析小尺度圆柱所受波浪力的方法较为成熟，主要包括理论计算与分析、数值模拟和物理模型实验[2-3]。例如: 郁苗等[4]通过 Morison 方程计算了作用在多个圆柱杆件上的波浪力; 范可[5]采用物理模型实验分析了波流联合作用下导管架所受荷载; Wienke 等[6]通过理论分析研究了竖斜细长桩上的波浪冲击荷载; Jose 等[7]通过模型实验研究了具有强非线性的破碎波与导管架之间的相互作用。网衣是网箱的重要组成部分，已经有成熟的方法来研究柔性网衣所受波浪力和水流荷载。例如: 张浦阳等[8]开展了波浪载荷、拖航方式等参数对影响三筒导管架基础拖航特性进行了定量分析; 车淑平等[9]开展了滨海核电站取水明渠拦污网水动力特性的数值研究，结果表明，海生物堵塞会显著影响网衣的张力特征; Xu 等[10]和 Tang 等[11]针对波浪和水流作用下洁净网衣和生物附着网衣的水动力特性进行了系统性分析; Qin 等[12]分析了恶劣海况下重力式网箱的动力响应，研究了波浪谱对浮架升沉的影响。目前，水产养殖与风电技术的结合成为研究热点，相关学者也展开了初步研究。例如: Li 等[13]开展了风、浪、流联合作用下海上风力发电机和养殖网箱一体化结构的水动力特性研究; 许仕杰等[14]构建了漂浮式风机和网箱集成系统的数值模型，分析了风浪流联合作用下集成系统耦合动力响应; Zheng 等[15]采用 WAMIT 软件对浮式风机和刚体网箱集成装置的动力响应进行研究，分析了集成装置的短期极值响应。

综上所述，针对导管架、网衣、浮式风机与网箱组合结构已开展了大量研究，但关于导管架与网箱组合结构的水动力特性研究很少。因此，本文将对导管架与网箱组合结构的水动力特性进行试验研究，考虑水深、波高、周期、波向、流速、流向等参数的影响，系统分析网箱对桩基水平荷载的影响，研究不同工况下网衣与导管架连接处的拉力，为导管架与网箱组合结构的安全设计提供重要依据。

1　试验设置

1.1　模型设计

在波流荷载作用下，针对导管架与网箱组合结构动力响应试验的相似律问题，通常忽略黏性的影响，保持实体与模型的弗劳德数相等，即满足两者的重力相似和惯性相似，即

$$V_{\mathrm{m}}/\sqrt{gL_{\mathrm{m}}}=V_{\mathrm{s}}/\sqrt{gL_{\mathrm{s}}} \tag{1}$$

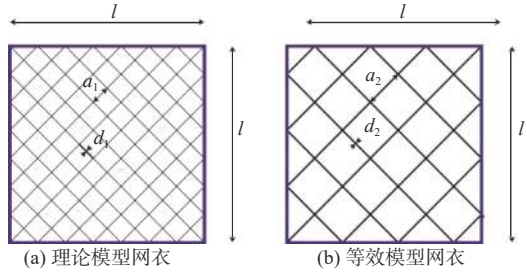
$$(V_{\mathrm{s}}T_{\mathrm{s}})/L_{\mathrm{s}}=(V_{\mathrm{m}}T_{\mathrm{m}})/L_{\mathrm{m}} \tag{2}$$

式中: V 为速度; L 为特征线尺度，下标 m 及 s 分别表示模型和实体; T 为周期; $\boldsymbol{g}$ 为重力加速度。

网衣受到的水流阻力与单位面积网衣在水流垂直方向上的投影面积(迎流面积)大小有关，在保证等效模型网衣与理论模型网衣迎流面积相同的前提下，可以用等效模型网衣代替理论模型网衣进行物理模型试验。如图 1 所示，采用菱形装配形式的网衣(图中网衣宽度为 l)，每一目网衣在水平方向投影的长度为 $2a_1\cdot u_1$，在垂直方向投影的长度为 $2a_1\cdot u_2$; 单个目脚在水流垂直方向上的投影面积 $S_1=a_1\times d_1$，由此，可以计算出单位面积网衣在水流方向上的投影面积为

$$M_1=[1/(2a_1\cdot u_1)]\times[1/(2a_1\cdot u_2)]\times 4S_1=S_1/(a_1^2u_1u_2) \tag{3}$$

式中: u_1 为水平缩结系数; u_2 为垂直缩结系数; a_1 为原型网衣目脚长度; d_1 为原型网衣线径。



(a) 理论模型网衣　　(b) 等效模型网衣

图 1　理论模型网衣与等效模型网衣示意图

Fig. 1　Diagram of the theoretical net and equivalent net

对于等效模型网衣，设网目大小为 a_2，网线直径为 d_2。假设水平缩结系数和垂直缩结系数不变，单个目脚在水流垂直方向上的投影面积表示为 $S_2=a_2\times d_2$，则单位面积网衣在与流向垂直的平面上的投影面积表示为

$$M_2=[1/(2a_2\cdot u_1)]\times[1/(2a_2\cdot u_2)]\times 4S_2=S_2/(a_2^2u_1u_2) \tag{4}$$

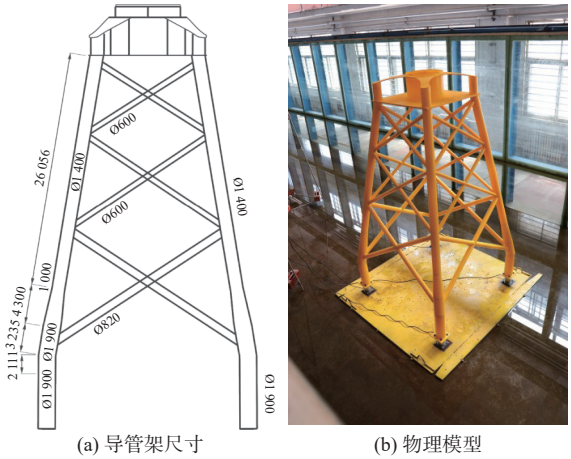
为了使得等效模型网衣与理论模型网衣有相同的迎流面积，令$M_1=M_2$，即

$$S_1/(a_1^2u_1u_2)=S_2/(a_2^2u_1u_2) \tag{5}$$

将$S_1=a_1\times d_1$和$S_2=a_2\times d_2$代入并整理，可得

$$a_1/d_1=a_2/d_2 \tag{6}$$

图 2 所示为导管架的结构以及物理模型试验中导管架模型，该试验模型缩尺比为 1:20，其中单位为 mm。考虑到本文主要分析网箱对导管架桩基水平荷载的影响，因此模型中未考虑设置风机叶片。



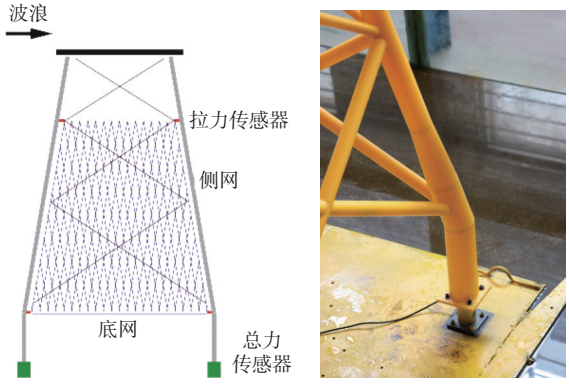
(a) 导管架尺寸 (b) 物理模型

图 2 导管架结构尺寸和物理模型

Fig. 2 Structural dimensions and physical model of jacket

1.2 试验方法

如图 3 所示，本文将本试验制作的导管架与网箱组合结构模型布置于波浪水槽中部位置，并在导管架底部垂直于水槽地面安装 4 个总力传感器（F_1～F_4），用于测量导管架与网箱结构受到的桩基荷载。

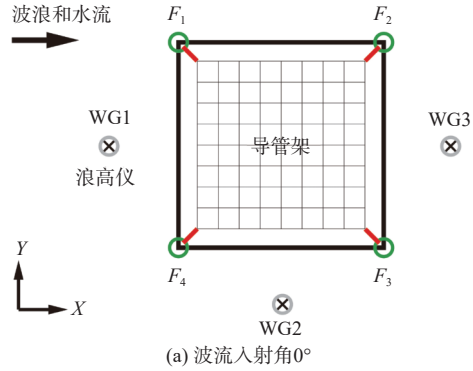


(a) 传感器布置 (b) 模型布置

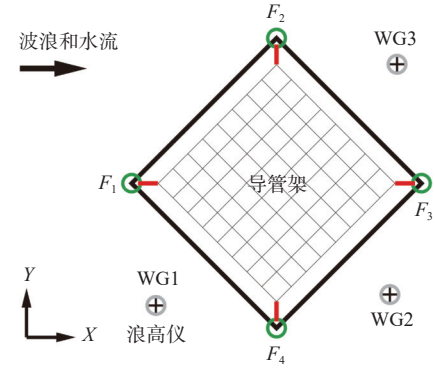
图 3 风机导管架与网箱组合结构模型

Fig. 3 Combined structure of wind turbine jacket and net cage

图 4 所示为导管架与网箱组合结构中网衣的布置方案以及传感器位置示意图。拉力传感器的布置位置见图 5，一共布置了 8 个拉力传感器（T_1～T_8）。



(a) 波流入射角0°



(b) 波流入射角45°

图 4 传感器布置（绿色圆圈表示总力传感器，红色直线表示拉力传感器）

Fig. 4 Arrangement of load sensors (green circle represents total force sensor, red line represents tension sensor)

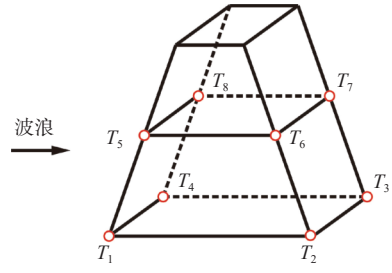


图 5 拉力传感器编号设置

Fig. 5 Serial number of tension sensor

1.3 工况介绍

本文试验包括了规则波工况和纯流工况。其中，规则波设计如表 1 所示，包括 3 种波高、3 种周期以及 2 个波向；纯流工况流速选取 0.09, 0.16 和 0.22 m/s 以及 0°和 45°来流方向（共 6 个工况）进行分析。规则波和纯流试验水深均为 1.184 m。

2 桩基荷载分析

桩基水平荷载是导管架设计的关键参数。本节将分析网箱对导管架桩基水平荷载的影响，针

表 1　导管架与网箱组合结构水动力试验规则波工况

Table 1　Regular wave conditions for the hydrodynamic test of combined structure of jacket and net cage

工况	波高/m	周期/s	波向/(°)	工况	波高/m	周期/s	波向/(°)
1	0.3	1.34	0	10	0.3	1.34	45
2	0.2	1.79	0	11	0.2	1.79	45
3	0.1	2.24	0	12	0.1	2.24	45
4	0.3	1.34	0	13	0.3	1.34	45
5	0.2	1.79	0	14	0.2	1.79	45
6	0.1	2.24	0	15	0.1	2.24	45
7	0.3	1.34	0	16	0.3	1.34	45
8	0.2	1.79	0	17	0.2	1.79	45
9	0.1	2.24	0	18	0.1	2.24	45

对单独导管架结构、导管架与网箱组合结构的桩基水平荷载进行统计分析。

2.1　导管架结构

首先, 分析规则波作用下的单独导管架结构桩基水平荷载。表 2 和表 3 分别给出了试验水深为 1.184 m 两种波向规则波作用下导管架结构桩基荷载。其中, 0°规则波条件下桩基最大水平荷载为 29 N, 45°规则波条件下桩基最大水平荷载为 27 N。结果表明, 正向波浪条件下(入射角为 0°)桩基水平荷载比斜向波浪条件下(入射角为 45°)的大 9.8%。在正向波浪条件下的 2 号和 3 号桩基(背浪侧桩基)水平荷载明显大于 1 号和 4 号桩基(迎浪侧桩基)最大水平荷载; 在斜向波浪条件下, 1 号桩基水平荷载最小, 2 号和 4 号桩基水平荷载最大。

表 2　规则波作用下导管架结构桩基荷载(波向 0°)

Table 2　Loads on the pile foundation of jacket in regular waves when wave direction is 0°

工况	波高/m	周期/s	F_{1X}/N	F_{1Y}/N	F_{2X}/N	F_{2Y}/N	F_{3X}/N	F_{3Y}/N	F_{4X}/N	F_{4Y}/N
1	0.3	2.24	22.492	3.021	26.325	1.580	24.123	1.447	24.546	3.276
2	0.2	2.24	13.597	1.812	15.949	0.967	14.239	0.854	15.117	2.022
3	0.1	2.24	6.024	0.801	6.368	0.392	5.473	0.328	6.537	0.821
4	0.3	1.79	23.449	3.112	29.579	1.715	27.451	1.647	26.939	3.521
5	0.2	1.79	12.576	1.655	18.372	1.112	17.024	1.021	13.880	1.792
6	0.1	1.79	6.541	0.865	10.027	0.622	9.192	0.552	6.881	0.899
7	0.3	1.34	11.444	1.521	19.140	1.138	18.566	1.114	13.821	1.653
8	0.2	1.34	8.642	1.135	14.534	0.862	13.288	0.797	9.701	1.281
9	0.1	1.34	3.385	0.451	6.769	0.423	6.343	0.381	3.870	0.502

表 3　规则波作用下导管架结构桩基荷载(波向 45°)

Table 3　Loads on the pile foundation of jacket in regular waves when wave direction is 45°

工况	波高/m	周期/s	F_{1X}/N	F_{1Y}/N	F_{2X}/N	F_{2Y}/N	F_{3X}/N	F_{3Y}/N	F_{4X}/N	F_{4Y}/N
1	0.3	2.24	16.948	0	26.268	1.562	22.135	0	26.944	1.611
2	0.2	2.24	11.097	0	14.549	0.865	14.532	0	13.895	0.833
3	0.1	2.24	4.894	0	6.453	0.382	6.807	0	6.527	0.396
4	0.3	1.79	21.788	0	23.232	1.953	20.349	0	24.119	1.932
5	0.2	1.79	11.964	0	17.071	1.012	14.065	0	16.756	1.012
6	0.1	1.79	6.958	0	8.825	0.521	6.691	0	8.688	0.531
7	0.3	1.34	11.086	0	22.299	1.325	15.630	0	23.406	1.421
8	0.2	1.34	9.888	0	11.667	0.689	11.002	0	9.826	0.568
9	0.1	1.34	4.164	0	5.608	0.321	5.871	0	4.249	0.256

然后，分析纯流作用下的单独导管架结构的桩基水平荷载。如图 6 所示，对于纯流工况 0°流条件下，桩基最大水平荷载为 0.9 N；45°流条件下，桩基最大水平荷载为 0.81 N。可见，0°流条件下桩基水平荷载比 45°流条件下桩基水平荷载增加了 11%，这主要是受到荷载传递路径的影响。另外，增大流速会显著增加作用在桩基上的荷载。

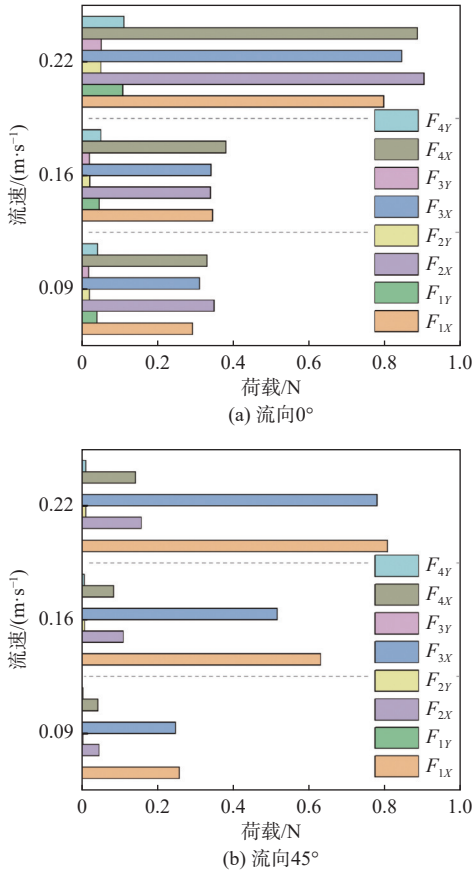


图 6 纯流作用下导管架结构桩基荷载

Fig. 6 Loads on the pile foundation of jacket strucuture in current

2.2 导管架与网箱组合结构

本文研究了试验水深 1.184 m 的导管架与网箱组合结构的桩基水平荷载，通过对比进一步分析了网箱对桩基水平荷载带来的影响。如表 4 和表 5 所示，0°规则波条件下桩基最大水平荷载为 30.2 N，45°规则波条件下桩基最大水平荷载为 27.5 N。结果表明，正向波浪条件下（入射角为 0°），比斜向波浪条件下（入射角为 45°）桩基水平荷载大 9.5%。正向波浪条件下，2 号和 3 号桩基（背浪侧桩基）水平荷载显著大于 1 号和 4 号桩基（迎浪侧桩基）最大水平荷载；斜向波浪条件下，1 号桩基水平荷载最小，2 号和 4 号桩基水平荷载最大。

如图 7 所示，对于纯流工况，0°流条件下，桩基最大水平荷载为 3.05 N；45°流条件下，桩基最大水平荷载为 1.14 N。正向流条件下桩基水平荷载显著大于斜向流条件下桩基水平荷载。与图 6 相比，结果表明：网箱会显著增加作用在组合结构上的荷载。

综上可知，在纯流条件下，网箱将导致导管架桩基水平荷载显著增加；在规则波条件下，网箱对桩基水平荷载影响较小。通常情况下，网衣在水流作用下的荷载较大，而在波浪作用下的荷载较小。

3 网箱与导管架拉力分析

网箱与导管架连接处的拉力也是组合结构设计的重要参数，对网箱与导管架的拉力进行分析。表 6 和表 7 分别给出了规则波工况下试验水深 1.184 m 的网箱与导管架之间拉力。可见，在 0°波浪条件下，迎浪侧最大缆绳拉力为 21.3 N，背浪侧最大缆绳拉力为 10.83 N，迎浪侧缆绳最大拉力显著大于背浪侧缆绳最大拉力，底部缆绳最大拉力大于上部缆绳最大拉力；在 45°波浪条件下，最大缆绳拉力为 17.52 N，底部缆绳最大拉力大于上部缆绳最大拉力。

表 4 规则波作用下导管架与网箱组合结构桩基荷载（波向 0°）

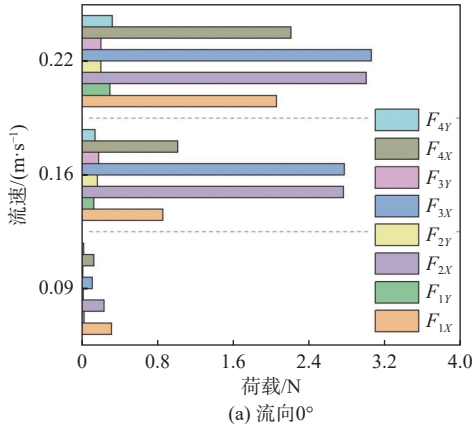
Table 4 Loads on the pile foundation of combined structure of jacket and net cage in regular waves when wave direction is 0°

工况	波高/m	周期/s	F_{1X}/N	F_{1Y}/N	F_{2X}/N	F_{2Y}/N	F_{3X}/N	F_{3Y}/N	F_{4X}/N	F_{4Y}/N
1	0.3	2.24	22.301	2.932	30.171	1.862	28.115	1.746	25.535	3.052
2	0.2	2.24	9.986	1.331	16.581	1.033	16.305	1.021	10.959	1.414
3	0.1	2.24	2.776	0.372	7.869	0.478	9.006	0.536	2.361	0.385
4	0.3	1.79	20.531	2.663	27.333	1.682	24.109	1.481	24.906	3.113
5	0.2	1.79	11.204	1.452	17.133	1.031	15.581	0.992	13.054	1.651
6	0.1	1.79	3.985	0.521	8.402	0.532	7.716	0.499	4.653	0.586
7	0.3	1.34	11.397	1.483	20.168	1.246	17.830	1.185	13.287	1.662
8	0.2	1.34	6.411	0.836	13.130	0.811	12.330	0.792	7.831	0.936
9	0.1	1.34	1.889	0.247	6.686	0.416	6.399	0.396	2.634	0.297

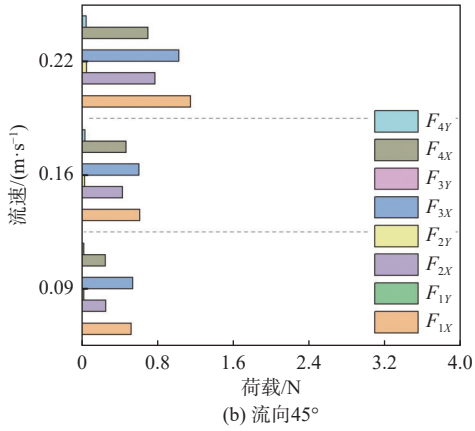
表 5　规则波作用下导管架与网箱组合结构桩基荷载(波向 45°)

Table 5　Loads on the pile foundation of combined structure of jacket and net cage in regular waves when wave direction is 45°

工况	波高/m	周期/s	F_{1X}/N	F_{1Y}/N	F_{2X}/N	F_{2Y}/N	F_{3X}/N	F_{3Y}/N	F_{4X}/N	F_{4Y}/N
1	0.3	2.24	25.042	0	27.542	1.731	24.025	0	25.784	1.679
2	0.2	2.24	12.644	0	13.979	0.922	12.667	0	13.836	0.913
3	0.1	2.24	5.421	0	6.425	0.411	6.055	0	6.042	0.391
4	0.3	1.79	20.766	0	26.184	1.725	24.588	0	24.912	1.622
5	0.2	1.79	12.204	0	14.632	0.901	13.306	0	13.832	0.896
6	0.1	1.79	6.206	0	6.927	0.402	6.034	0	7.049	0.426
7	0.3	1.34	13.398	0	17.439	1.131	18.306	0	17.223	1.125
8	0.2	1.34	9.151	0	11.764	0.766	10.752	0	11.277	0.751
9	0.1	1.34	4.933	0	5.853	0.386	4.919	0	6.145	0.397



(a) 流向0°



(b) 流向45°

图 7　纯流作用下导管架与网箱组合结构桩基荷载

Fig. 7　Loads on the pile foundation of combined structure of jacket and net cage in current

图 8 所示为纯流工况导管架与网箱组合结构连接处拉力荷载。其中, 在 0°流条件下, 迎浪侧最大缆绳拉力为 0.71 N, 背浪侧最大缆绳拉力为 0.31 N, 迎浪侧缆绳最大拉力明显大于背浪侧缆绳最大拉力; 底部缆绳最大拉力和上部缆绳最大拉力差距较小。在 45°流条件下, 最大缆绳拉力为 1.02 N, 底部缆绳拉力大于上部缆绳拉力。45°流条件下缆绳最大拉力显著大于 0°流条件下缆绳最大拉力, 主要是由于网箱的荷载传递路径和分布不同。

4　结　论

本文基于模型试验分析了海上风机导管架与网箱组合结构在纯波和纯流条件下的桩基水平荷载、网箱与导管架连接拉力, 得出主要结论如下:

1) 在正向波浪条件下, 纯导管架结构的 2 号和 3 号桩基水平荷载显著大于 1 号和 4 号桩基荷载; 在斜向波浪条件下, 纯导管架结构的 2 号和 4 号桩基水平荷载最大; 在正向流条件下, 桩基水平荷载大于斜向流条件下桩基水平荷载。

2) 导管架与网箱组合结构在正向波浪条件下比斜向波浪条件下桩基水平荷载大 9.5%; 在正向流条件下桩基水平荷载显著大于斜向流条件下

表 6　规则波作用下导管架与网箱组合结构连接处拉力荷载(波向 0°)

Table 6　Tension force on the connection between jacket and net cage in regular waves when wave direction is 0°

工况	波高/m	周期/s	T_1/N	T_2/N	T_3/N	T_4/N	T_5/N	T_6/N	T_7/N	T_8/N
1	0.3	2.24	15.73	9.44	9.23	18.69	12.27	9.85	8.25	15.36
2	0.2	2.24	6.79	3.53	3.48	7.72	5.28	4.27	3.86	6.35
3	0.1	2.24	1.58	1.22	1.31	2.69	1.37	1.52	0.94	2.29
4	0.3	1.79	12.08	10.83	10.65	21.33	9.78	11.38	8.44	17.79
5	0.2	1.79	5.66	5.46	5.33	11.48	4.65	6.34	3.73	9.39
6	0.1	1.79	1.49	1.36	1.32	3.07	1.41	1.74	1.11	2.59
7	0.3	1.34	10.82	5.22	5.25	11.26	8.21	6.28	6.88	9.31
8	0.2	1.34	6.42	3.92	3.88	8.65	5.43	4.92	4.85	7.00
9	0.1	1.34	1.19	1.05	1.08	2.30	1.22	1.30	1.04	1.96

表 7 规则波作用下导管架与网箱组合结构连接处拉力荷载(波向 45°)

Table 7 Tension force on the connection between jacket and net cage in regular waves when wave direction is 45°

工况	波高/m	周期/s	T_1 /N	T_2 /N	T_3 /N	T_4 /N	T_5 /N	T_6 /N	T_7 /N	T_8 /N
1	0.3	2.24	9.31	12.94	13.22	13.38	6.79	12.75	6.71	12.73
2	0.2	2.24	3.33	5.62	5.10	6.75	2.40	6.34	2.44	6.30
3	0.1	2.24	0.69	1.68	1.08	1.67	0.51	2.32	0.53	1.19
4	0.3	1.79	10.30	13.32	17.52	12.90	7.97	12.64	8.72	12.50
5	0.2	1.79	4.55	7.04	6.87	6.57	3.51	6.82	3.52	6.73
6	0.1	1.79	0.80	1.93	1.31	2.19	0.67	2.14	0.63	2.11
7	0.3	1.34	8.36	9.37	13.72	8.89	7.21	10.30	7.81	10.26
8	0.2	1.34	3.47	4.85	5.30	5.63	3.53	6.74	3.46	6.56
9	0.1	1.34	0.64	1.26	1.12	1.45	0.72	1.81	0.52	1.79

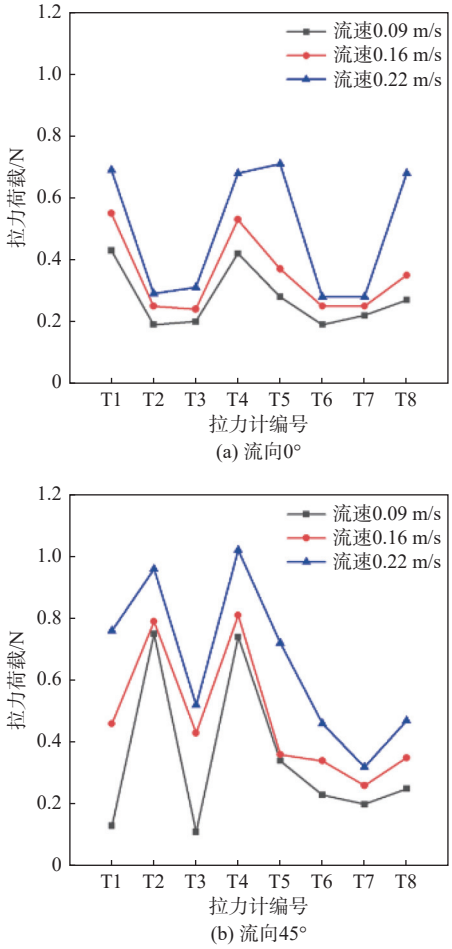


图 8 纯流作用下导管架与网箱组合结构连接处拉力荷载

Fig. 8 Tension force on the connection between jacket and net cage in current

桩基水平荷载。

3) 在规则波条件下, 波浪周期较小时, 网箱对桩基水平荷载影响较小; 在纯流条件下, 网箱将导致导管架桩基水平荷载显著增加。

网箱长期布置在海洋环境中会产生显著的海生物附着现象, 在后续的研究工作中, 建议开展海生物附着网箱对导管架桩基水平荷载的影响研究。

参考文献:

[1] 易建军, 沈雨生, 吴建军, 等. 极端波浪条件下深水导管架基础结构波浪总力试验研究 [J]. 海岸工程, 2023, 42(1): 44–51.
YI J J, SHEN Y S, WU J J, et al. Experimental study of wave total force on deepwater conduit rack foundation structure under extreme wave conditions[J]. Coastal Engineering, 2023, 42(1): 44–51 (in Chinese).

[2] 李玉成, 何明. 小尺度圆柱上不规则波流力的极值分布 [J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 1993, 8(增刊 1): 609–616.
LI Y C, HE M. Extreme value distribution of irregular wave current forces on small-scale cylinders[J]. Journal of Hydrodynamics: Series A, 1993, 8(Supp 1): 609–616 (in Chinese).

[3] 赵海涛, 滕斌, 李广伟, 等. 竖直截断圆柱一阶波浪力的实验研究 [J]. 中国海洋平台, 2003, 18(4): 13–18.
ZHAO H T, TENG B, LI G W, et al. Experimental study of first-order wave forces in vertically truncated cylinders [J]. China Offshore Platform, 2003, 18(4): 13–18 (in Chinese).

[4] 郁苗, 吴家鸣. 考虑流固耦合的桁架式近海结构物波浪载荷及动力分析 [J]. 海洋技术, 2009, 28(4): 117–122.
YU M, WU J M. Wave load and dynamic analysis of truss offshore structures considering fluid-solid coupling [J]. Ocean Technology, 2009, 28(4): 117–122 (in Chinese).

[5] 范可. 深水导管架基础动力响应物理模型试验 [J]. 船舶工程, 2022, 44(增刊 1): 21–27.
FAN K. Physical modelling of the dynamic response of deepwater conduit rack foundations[J]. Ship Engineering, 2022, 44(Supp 1): 21–27 (in Chinese).

[6] WIENKE J, OUMERACI H. Breaking wave impact force on a vertical and inclined slender pile-theoretical and large-scale model investigations[J]. Coastal Engineering, 2004, 52(5): 435–462.

[7] JOSE J, PODRAŻKA O, GUDMESTAD O T, et al. Detailed study on breaking wave interactions with a jacket structure based on experimental investigations[J]. Journal

of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2018, 140 (2): 21301.

[8] 张浦阳, 梁迪生, 齐喜玲. 海上风电三筒导管架基础的湿拖耦合动力响应研究 [J/OL]. 中国舰船研究. (2023-12-27) [2024-03-27]. http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03588

[9] 车淑平, 王辉, 陈思远, 等. 滨海核电站取水明渠拦污网水动力响应数值模拟研究 [J]. 海洋技术学报, 2022, 41(4): 96–105.
CHE S P, WANG H, CHEN S Y, et al. Numerical simulation study on hydrodynamic response of retention network in intake nullah of Binhai Nuclear Power Station[J]. Journal of Ocean Technology, 2022, 41(4): 96–105 (in Chinese).

[10] XU T J, DONG G H, TANG M F, et al. Experimental analysis of hydrodynamic forces on net panel in extreme waves[J]. Applied Ocean Research, 2021, 107: 102495.

[11] TANG M F, DONG G H, XU T J. Experimental analysis of the hydrodynamic coefficients of net panels in current[J]. Applied Ocean Research, 2018, 79: 253–261.

[12] QIN H D, YU S C, LI P. Dynamic response of floating collar and cage under waves and current[J]. Ocean Engineering, 2020, 205: 107330.

[13] LI N, SHI W, HAN X, et al. Dynamic analysis of an integrated offshore structure comprising a jacket-supported offshore wind turbine and aquaculture steel cage[J]. Ocean Engineering, 2023, 274: 114059.

[14] 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 semisubmersible wind turbine and fish farming cage under wind, wave and current actions[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2023, 18(6): 66–75 (in Chinese).

[15] 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.

相关论文

[1] 张建华, 王小宇, 刘志成, 等. 浮式风机平台设计研究综述 [J]. 中国舰船研究.2024, 19(4): 21−31. https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03719

[2] 林琳, 陈明杨, 杨鹏, 等. 15 MW 级 Spar 漂浮式风电平台的设计方案及水动力性能研究 [J]. 中国舰船研究, 2024, 19(4): 71−81. https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03533

[3] 王超, 崔明浩, 周楠, 等. 基于输入−状态联合估计的漂浮式风机塔架结构载荷反演及状态分析 [J]. 中国舰船研究, 2024, 19(4): 167−175. https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03885

[4] 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. https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03111

[5] 孔帅, 季顺迎, 季少鹏, 等. 基于高性能离散元方法的极区浮式平台冰载荷数值分析 [J]. 中国舰船研究, 2021, 16(5): 64−70. https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.02192

[6] 刘垚, 蔡卫军, 王明洲. 基于重叠网格方法的水轮机非定常水动力数值仿真 [J]. 中国舰船研究, 2018, 13(1): 85−92. https://www.ship-research.com/article/doi/10.3969/j.issn.1673-3185.2018.01.013