中国水产科学 2024 年 10 月, 31(10): 1151–1162
Journal of Fishery Sciences of China

DOI: 10.12264/JFSC2024-0123

半潜式网箱平台拖航水动力特性

刘昌凤[1,2], 张宇[1], 辛宇[1], 尹晶[3], 陈昌平[1,2], 郝健[1,2]

1. 大连海洋大学海洋与土木工程学院, 辽宁 大连 116023;
2. 大连海洋大学设施渔业教育部重点实验室, 辽宁 大连 116023;
3. 国家海洋环境监测中心, 辽宁 大连 116023

摘要: 为提高深远海浮式网箱平台湿拖运输的安全性, 基于三维势流理论和莫里森方程建立半潜式网箱平台拖航过程水动力数值模型, 分析有效波高、浪向角、拖航速度、拖缆长度和系缆点位置对网箱平台运动响应及拖缆张力的影响。结果表明, 有效波高由 1.25 m 增加至 4.00 m 时, 网箱平台垂荡加速度和纵摇角分别提高 293%和 750%, 拖缆张力增加 358%; 顺浪拖航时网箱平台的纵摇响应比顶浪时更为剧烈, 但拖缆张力有所减小; 拖航速度由 2.0 kn 增加至 5.0 kn 时, 垂荡加速度降低 56%, 拖缆张力提高 112%; 拖缆长度增加 3 倍时, 纵摇角减小 43%, 拖缆张力降低 31%; 拖缆点位置对纵摇运动影响较大。根据本研究结果, 建议实际工程中, 网箱平台拖航最高海况限制为 4 级, 拖航速度不超过 5.0 kn, 避免顺浪拖航, 宜采用偏顶浪拖航, 通过适当增大拖缆长度来提高拖航稳定性。

关键词: 半潜式网箱平台; 拖航; 水动力; 运动响应; 拖缆张力
中图分类号: S967 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005−8737−(2024)10−1151−12

随着海水养殖不断向深远海挺进, 大型智能化浮式网箱平台成为深远海养殖主力工程装备之一。浮式网箱平台结构型式的选择需要因地制宜, 考虑环境荷载和作业水深, 可采用半潜式、单立柱式和驳船式等。其中, 半潜式网箱平台由于稳定性高、便于安装, 近年来得以迅速发展, 如海洋渔场 1 号、宁德 1 号和澎湖号等。为降低海上施工难度, 半潜式网箱平台通常在陆地进行安装, 再由拖轮拖曳至作业海域。但是由于网箱平台重心较高, 在长距离拖航过程中平台容易产生倾覆风险。2018 年 5 月底, 深蓝 1 号网箱平台先后发生两次拖航倾斜事故, 造成了较大的经济损失。因此, 大型浮式网箱平台的拖航安全性已成为重要的工程问题。

目前, 国内外学者对拖航问题的水动力研究取得了一定的成果。在数值模拟方面, 基于势流理论, Zhang 等[1]建立了一体化海上测风塔的浮运拖航水动力模型, 计算了测风塔在波浪和风联合作用下的静稳性和动力响应, 在此基础上, 丁红岩等[2]分析了拖缆长度及拖缆点位置对其运动响应的影响; 针对筒形基础, 赵悦等[3]、Zhang 等[4]、朱航等[5]和任建宇等[6]分析了环境参数及吃水深度对结构拖航稳定性的影响, 刘宪庆等[7]研究了不同筒位布置下三筒形基础的水动力系数和幅频响应特性; 翟秋等[8]和李亚杰等[9]分别研究了风浪流对大型预制沉箱及半潜式浮式风机运动响应的影响; 贺维国等[10]对沉管隧道管节拖航过程的运动形态及影响因素进行了研究; 孙涛等[11]研究了桩靴充水对自升式钻井平台拖航作业稳性的影响。在模型实验方面, Wang 等[12]和练继建等[13]研究了环境参数对桶型基础湿拖稳定性的影响; 丁红岩等[14]和王道广等[15]分析了环境参数和拖

收稿日期: 2024-04-26; **修订日期:** 2024-06-26.
基金项目: 辽宁省教育厅高等学校基本科研项目(LJKMZ20221116); 大连市科技创新基金项目(2021JJ12GX029); 辽宁省科技计划联合基金项目(2023BSBA004).
作者简介: 刘昌凤(1981–), 女, 博士, 讲师, 研究方向为深远海养殖工程装备. E-mail: liuchangfeng2@dlou.edu.cn.
通信作者: 陈昌平, 教授, 研究方向为设施渔业工程. E-mail: ccp@dlou.edu.cn

缆点位置对海洋平台拖航过程中运动响应的影响。然而，拖航水动力性能的研究对象主要为浮式风机和海上油气平台等结构，对于浮式网箱平台等大型养殖工程装备尚缺乏系统深入的研究。

本研究基于三维势流理论及半经验的莫里森方程，建立了半潜式网箱平台拖航过程水动力分析模型，研究了波浪条件及拖航方式等关键参数对网箱平台运动响应与拖缆张力的影响，为大型浮式网箱平台拖航运输安全性提供参考依据。

1 基本理论

考虑任意三维浮体以速度 U 在波浪中拖航，建立迁移坐标系 Oxyz, xy 平面与平均静水面重合，z 轴竖直向上并通过浮体几何中心，如图 1 所示。

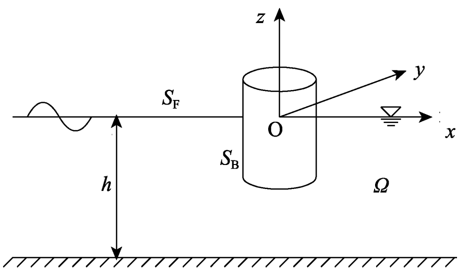

图 1 坐标系示意图
Fig. 1 Sketch of the coordinate system

假定流体无粘、不可压缩，流动无旋。基于线性势流理论[16]，流体速度势 $\Phi(x, y, z, t)$可分解为

$$\Phi = \mathrm{Re}[(\phi_i + \phi_d + \phi_r)e^{-i\omega t}] \tag{1}$$

式中，ϕ_i、ϕ_d 和 ϕ_r 别为入射势、绕射势和辐射势，$\phi_r = \sum_{j=1}^{6} -i\omega\xi_j\phi_j$ (i=1,⋯,6), ω 为波浪的入射频率，ξ_j 为运动响应幅值，ϕ_j 为单位幅值辐射势。

辐射势 ϕ_r 和绕射势 ϕ_d 满足的控制方程和边界条件如下：

$$\begin{cases} \text{拉普拉斯方程：} \nabla^2\phi_j = 0 & \text{in } \Omega \\ \text{自由水面边界条件：} \dfrac{\partial\phi_j}{\partial z} - \dfrac{\omega^2}{g}\phi_j = 0 & z = 0 \\ \text{物面边界条件：} \dfrac{\partial\phi_j}{\partial n} = \vec{n}_j & \text{on } S_B \\ \quad \dfrac{\partial\phi_d}{\partial n} = -\dfrac{\partial\phi_i}{\partial n} & \\ \text{海底边界条件：} \nabla\phi_j = 0 & z = -h \\ \text{远方辐射条件：} \lim\limits_{R\to\infty}\sqrt{R}\left(\dfrac{\partial\phi_j}{\partial R} - \dfrac{i\omega^2}{g}\phi_j\right) = 0 & \end{cases} \tag{2}$$

式中，g 为重力加速度，h 为水深，Ω 为流体域，S_B 为浮体的平均湿表面，$R = \sqrt{x^2 + y^2}$，为场点到坐标原点的距离。

作用在物体上的广义波浪激振力 f_w 可通过物面上压强的积分求得：

$$f_w = i\omega\rho\iint_{S_B}(\phi_i + \phi_d)n\mathrm{d}s \tag{3}$$

式中，n 为物面外法线方向，以指向流体为正。

辐射势贡献的部分称为水动力系数 f_{ij}:

$$f_{ij} = \omega^2\rho\iint_{S_B}\phi_j n_i \mathrm{d}s = \omega^2 a_{ij} + i\omega b_{ij} \qquad i, j = 1, \cdots, 6 \tag{4}$$

式中，a_{ij} 和 b_{ij} 分别为附加质量系数和辐射阻尼系数。

采用 Cummins[17]提出的脉冲响应函数方法求解浮体的时域运动方程：

$$\begin{aligned} &\sum_{j=1}^{6}\{(M_{kj} + m_{kj})\ddot{\xi}_j(t) + \\ &\quad \int_{-\infty}^{t}\dot{\xi}_j(\tau)K_{kj}(t-\tau)\mathrm{d}\tau + B_{kj}\dot{\xi}(t) + C_{kj}\xi(t)\} = \\ &\quad F_{wk}(t) + F_{mk}(t) + R_k(t) + W_k(t) \\ &\quad k, j = 1, \cdots, 6 \end{aligned} \tag{5}$$

式中，M_{kj} 为浮体广义质量，m_{kj} 为附加质量，B_{kj} 为系统阻尼，$K_{kj}(t)$为迟滞函数，C_{kj} 为回复力，$F_{wk}(t)$ 为波浪激振力，$F_{mk}(t)$为拖缆张力，$R_k(t)$为拖航阻力，$W_k(t)$为风阻力。

基于半经验的莫里森方程，拖航阻力由速度力和惯性力两部分组成：

$$\begin{aligned} R_k = &\frac{1}{2}\rho l d C_d |u_f - u_s|(u_f - u_s) + \\ &\rho l A C_m \dot{u}_f - \rho l A(C_m - 1)\dot{u}_s = \\ &\frac{1}{2}\rho l d C_d |u_f - u_s|(u_f - u_s) + \\ &\rho l A(1 + C_a)\dot{u}_f - \rho l A C_a \dot{u}_s \end{aligned} \tag{6}$$

式中，ρ 为流体密度，l 为柱体淹没深度，C_d 为速度力系数，C_m 为惯性力系数，C_a 为附连水质量系数，C_a=C_m−1，d 为柱体直径，A 为柱体横截面积，u_f 和 $\dot{u}_f$ 分别为流体质点的速度和加速度，u_s 和 $\dot{u}_s$ 分别为柱体的速度和加速度。在本研究中，除浮筒外的其他小尺度杆件(立柱、弧管、撑杆、网衣等)均位于水面以上，对于圆柱形管件，速度力系数 C_d 取值范围一般为 0.6~1.2，惯性力系数 C_m=2.0[18]，

由于拖航速度较大，雷诺数 $Re=(1.24\sim4.25)\times10^7$，处于超临界状态($Re>5\times10^5$)，取速度力系数 $C_d=0.7$[16]。

采用集中质量法对拖缆进行动力分析，将其离散为若干个连续单元，拖缆的重力、浮力和阻力等集中作用在各单元节点上，各节点之间通过无质量的弹簧连接，采用有限元法求解动力学问题[19]。在本研究中，拖缆位于水面以上，不考虑流体阻力，节点处只受到重力及拖缆张力。

风阻力计算公式如下[18]:

$$W_k = C_h C_s SP \tag{7}$$

$$P = 0.613\times10^{-3} V_2^2 \tag{8}$$

式中，P 为风压，S 为受风构件的迎风面积，C_h 为受风构件的高度系数，本研究取 $C_h=1.2$，C_s 为受风构件形状系数，本研究取 $C_s=0.5$，V_2 为风速。

由于半潜型养殖平台网衣包含上千万个网目单元，本研究采用网目群化的方法对网衣进行简化[20]，侧面网衣网目群化数为 $N_1=50$，底部网衣网目群化数为 $N_2=106$（图 2）。

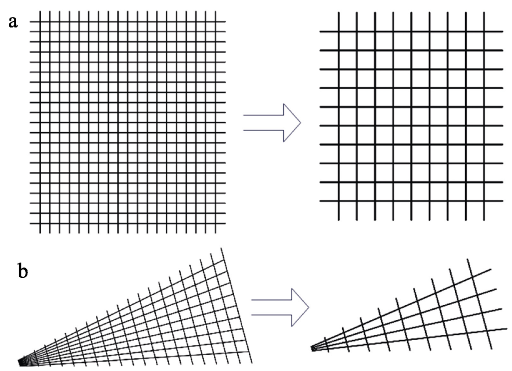

图 2　网目群化示意图

a. 侧面网衣群化 $N_1\times N_1=50\times50$;

b. 底部网衣群化 $N_2\times N_2=106\times106$.

Fig. 2　Diagram of mesh group

a. Mesh group of side net $N_1\times N_1=50\times50$;

b. Mesh group of bottom net $N_2\times N_2=106\times106$.

2　数值模型

以半潜式网箱平台“海洋渔场 1 号”为研究对象，如图 3 所示，平台的结构参数、主尺度参数和拖缆参数分别见表 1、表 2 和表 3。

采用一字形拖缆，拖缆点位于边立柱上，网箱平台拖航布置如图 4 所示。分别研究有效波高、浪向角、拖航速度、拖缆长度和拖缆点位置对网箱平台水动力性能的影响。采用 JONSWAP 谱模

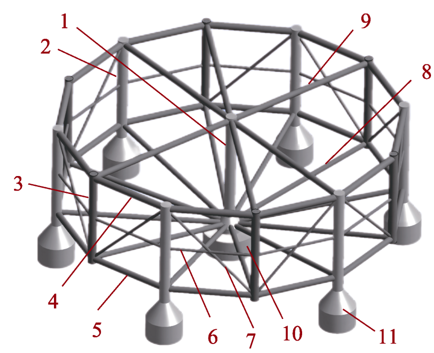

图 3　“海洋渔场 1 号”结构示意图

图中结构编号见表 1.

Fig. 3　Sketch of Ocean Farm 1

Check table 1 for the structure each number refers to.

表 1　网箱平台结构参数

Tab. 1　Structural parameters of the aquaculture platform

编号 no	构件 component	长度/m length	直径/m diameter	壁厚/mm thickness
1	中心浮筒立柱 central column	37	3.56	32
2	边缘浮筒立柱 periphery columns above pontoon	33	3.56	34
3	边立柱 periphery intermediate column	33	2.80	30
4	上弧管 top ring beam	28.5	2.29	18
5	下弧管 bottom ring beam	28.5	2.05	24
6	中弧管 middle ring beam	28.5	1	15
7	斜撑杆 diagonal support	43.6	1	15
8	底径向杆 bottom ring beam	55.4	1.75	23
9	上交叉杆 top cross beam	110	2.05	18
10	中心浮筒 central pontoon cylinder	7	17	137
11	边缘浮筒 periphery pontoons cylinder	13	12	62

表 2 网箱平台主尺度参数

Tab. 2 Main dimensions of the aquaculture platform

参数 parameter	数值 value	参数 parameter	数值 value
重心坐标/m barycentric coordinates	(0, 0, 20)	I_{xx}/(kg·m^2)	32.78×10^9
吃水/m draught	6	I_{yy}/(kg·m^2)	32.55×10^9
排水量/t displacement	5429	I_{zz}/(kg·m^2)	35.04×10^9

表 3 拖缆参数

Tab. 3 Towline parameter

参数 parameter	数值 value	参数 parameter	数值 value
直径/mm diameter	160	破断力/N	1.47×10^7
抗拉刚度/N tensile stiffness	2.35×10^8	线密度/(kg/m)	24.63

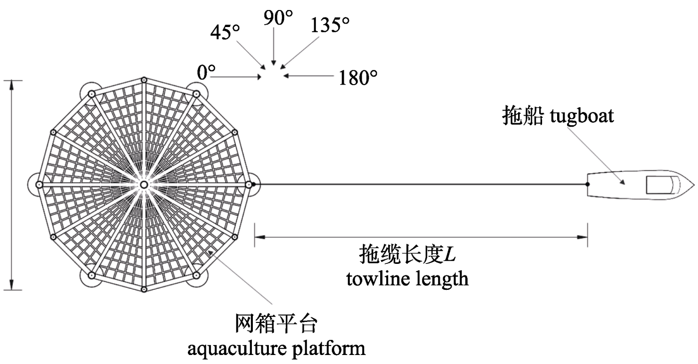

图 4 拖航布置示意图

Fig. 4 Sketch of towing layout

拟不规则波，谱峰因子为 3.3，谱峰周期为 6 s，风速为 15 m/s。为了使网箱平台拖航达到稳定状态，数值模拟时间为 6000 s，时间步长为 0.1 s。

3 数值精度及有效性验证

3.1 网格收敛性验证

对于数值模拟来说，网格离散至关重要，决定了数值计算的准确性及计算效率。基于网箱养殖平台的频域计算结果，验证了平台的网格收敛性，考虑顺浪和横浪两种情况，浪向角分别为 0°和 90°，水深 150 m，网格参数设置见表 4。

图 5~8 给出了网箱平台在顺浪及横浪下的运动幅值响应算子、附加质量和辐射阻尼。可以看

表 4 网格参数

Tab. 4 Mesh parameter

网格 mesh	大小/m size	数目/个 number
mesh①	1.09	6932
mesh②	0.75	13979
mesh③	0.52	29635

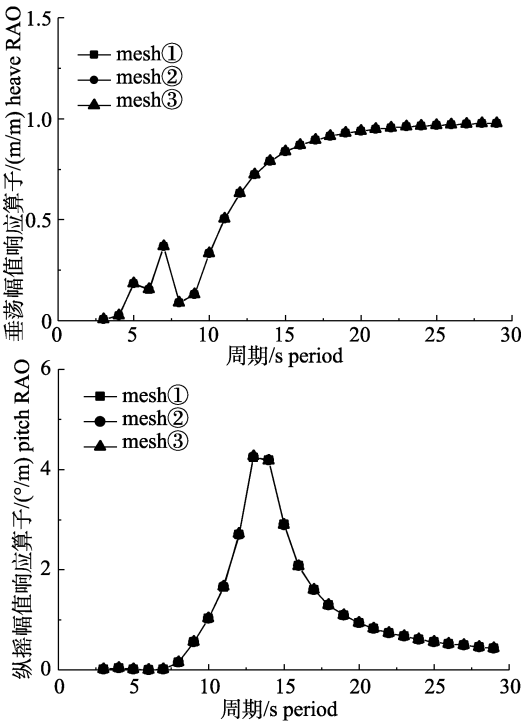

图 5 网箱平台的运动幅值响应算子(0°浪向角)

Fig. 5 Response amplitude operators of an aquaculture platform (0° incident angle)

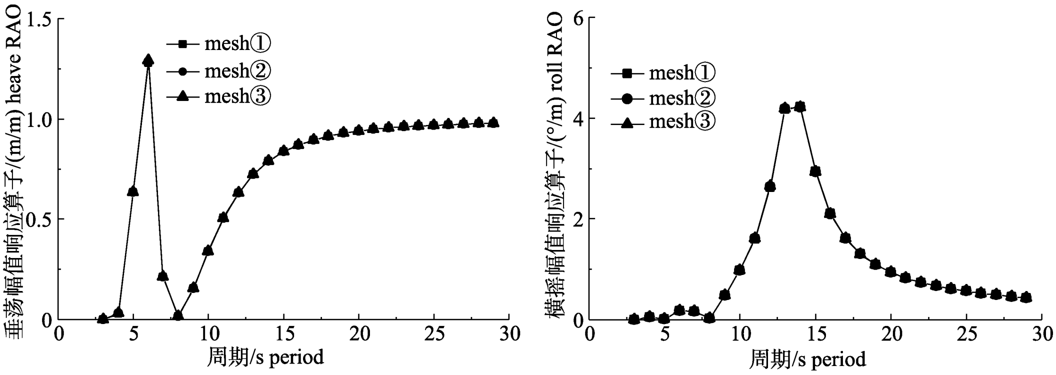

图 6　网箱平台的运动幅值响应算子(90°浪向角)

Fig. 6　Response amplitude operators of an aquaculture platform (90° incident angle)

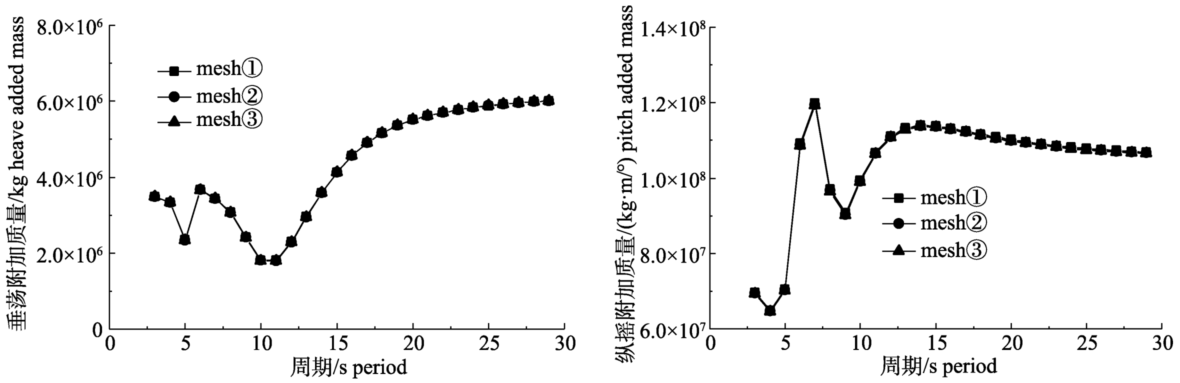

图 7　网箱平台的附加质量

Fig. 7　Added mass of an aquaculture platform

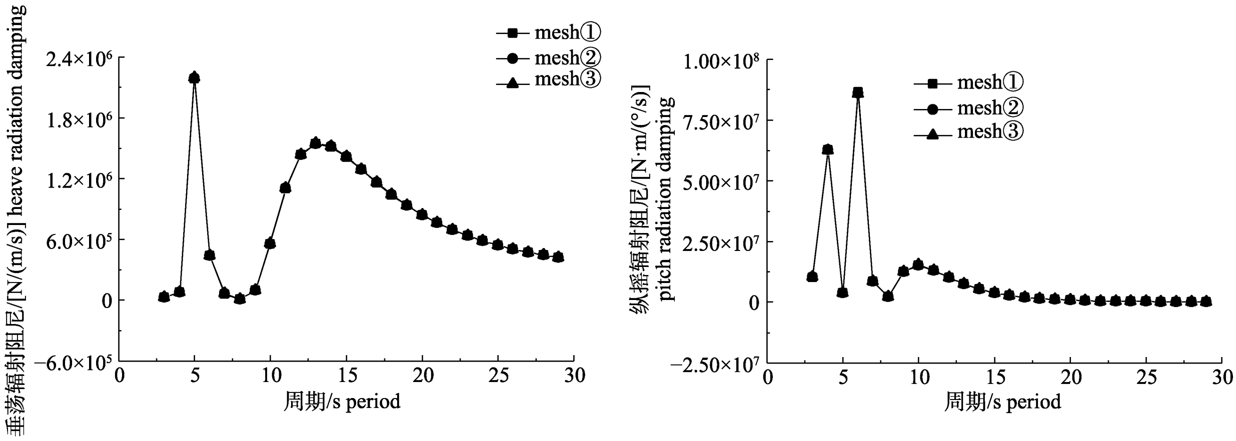

图 8　网箱平台的辐射阻尼

Fig. 8　Radiation damping of an aquaculture platform

出, 3 种网格的计算结果基本一致。为保证数值模拟的准确性, 同时兼顾计算效率, 本研究选用 mesh②进行拖航水动力研究。

3.2　有效性验证

为验证本研究所建模型及数值方法的有效性, 针对“海洋渔场 1 号”网箱平台的作业工况(吃水 43 m), 计算了网箱平台在 0° 浪向角时的运动幅值响应算子, 并与 Dou[21]的频域计算结果进行对比, 如图 9 所示。可以看出, 在垂荡和纵荡方向, 本研究与 Dou[21]的计算结果吻合良好, 而在纵摇

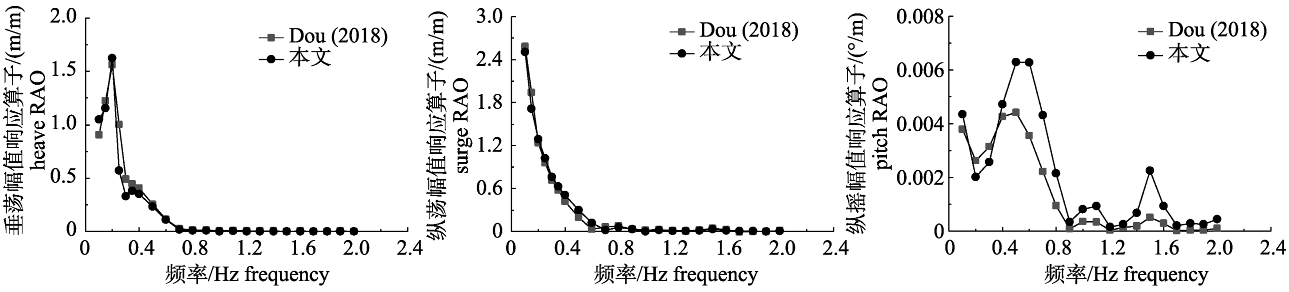

图 9 作业工况下网箱平台运动幅值响应算子(0°浪向角, 吃水 43 m)

Fig. 9 Response amplitude operators of an aquaculture platform under operation condition (0° incident angle, draft 43 m)

方向, 二者的计算结果均趋近于 0, 且最大绝对误差为 0.0027°/m, 整体吻合较好。从而验证了本研究模型的有效性。

4 拖航水动力特性及影响因素分析

4.1 有效波高的影响

有效波高是不规则波的重要指标, 参考 3~5 级海况的波浪条件, 选取 1.25 m、2.50 m 和 4.00 m 3 种有效波高, 考虑顶浪拖航, 浪向角为 180°, 拖航速度 4.0 kn, 拖缆点位于边缘浮筒与边立柱交界处(水面以上 7 m 处), 缆绳长度为 220 m。《海上拖航指南》[22]规范附录 1 中规定, 如果没有进行模型实验, 根据标准建造并且满足良好航海程序时, 可以以垂荡加速度、横摇角及纵摇角作为被拖物拖航稳定性的衡量标准。由此, 本研究对每组工况下 500~6000 s 内网箱平台垂荡加速度、纵摇角和拖缆张力时历结果的最大值、最小值及平均值进行统计, 如图 10 和表 5 所示。

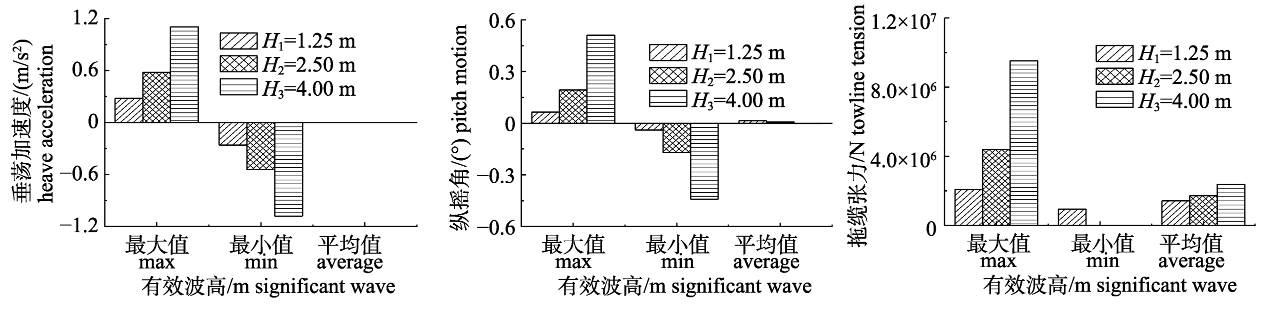

图 10 不同波高下网箱平台的运动响应和拖缆张力

Fig. 10 Motion responses and towline tensions of an aquaculture platform for different significant wave heights

表 5 不同波高下的网箱平台的运动响应和拖缆张力

Tab. 5 Motion responses and towline tensions of an aquaculture platform for different significant wave heights

有效波高/m significant wave	垂荡加速度/(m/s²) heave acceleration			纵摇角/° pitch motion			拖缆张力/(×10⁶ N) towline tension		
	最大值 max	最小值 min	平均值 average	最大值 max	最小值 min	平均值 average	最大值 max	最小值 min	平均值 average
1.25	0.28	−0.26	0	0.06	−0.04	0.01	2.08	0.94	1.42
2.50	0.58	−0.54	0	0.19	−0.17	0.01	4.40	0	1.72
4.00	1.10	−1.08	0	0.51	−0.44	0	9.52	0	2.38

从图 10 和表 5 可以看出, 当波高由 1.25 m 增加到 2.50 m 和 4.00 m 时, 网箱平台垂荡加速度和纵摇角的平均值几乎为零, 正向垂荡加速度大于负向, 其最大值分别增加 107%和 293%; 艏倾角(正值)大于艉倾角(负值), 最大艏倾角分别增长 217%和 750%; 不同波高下拖缆张力的平均值分别增加 21%和 68%, 最大值增加 112%和 358%。为保障养殖平台海上作业的安全性, 根据工程经

验, 设定拖缆张力最小安全系数为 2.0。在 5 级海况下(H=4.00 m), 网箱平台最大垂荡加速度达到 1.10 m/s², 超过《海上拖航指南》规定的垂荡加速度允许值(≤0.98 m/s²)[22], 最大拖缆张力 9.52×10^6 N, 安全系数 1.54, 低于最小安全系数 2.0。因此, 网箱平台拖航作业海况不宜超过 4 级。

4.2　浪向角的影响

浪向角变化对浮体水动力特性也有显著影响, 选取 0°、45°、135°和 180° 4 种浪向角, 有效波高为 2.5 m, 其他计算参数与 **4.1** 相同。

计算得到的网箱平台垂荡加速度、纵摇角和拖缆张力结果的最大值、最小值及平均值如图 11 和表 6 所示。

从图 11 和表 6 可以看出, 不同浪向角下网箱平台垂荡加速度和纵摇角的平均值几乎为零。在顺浪(0°浪向角)和偏顺浪(45°浪向角)条件下, 网箱平台最大垂荡加速度均大于《海上拖航指南》规定的允许值(≤0.98 m/s²)[22], 且艉倾角大于艏倾角, 与顶浪(180°浪向角)情况相比, 网箱平台纵摇角最大辐值分别增加 58%和 68%, 拖缆张力平均值降低 20%和 22%, 拖缆张力最大值降低 49%和 51%。在偏顶浪(135°浪向角)条件下, 网箱平台垂荡加速度最大值比顶浪时降低 26%, 拖缆张力最大值降低 27%。因此, 在拖航过程中应尽量避免顺浪拖航, 宜采用偏顶浪拖航。

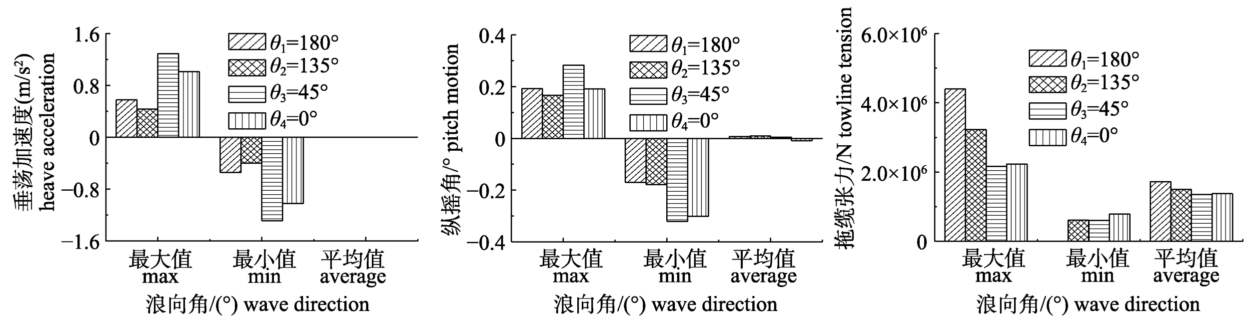

图 11　不同浪向角下网箱平台的运动响应和拖缆张力

Fig. 11　Motion responses and towline tensions of an aquaculture platform for different wave directions

表 6　不同浪向角下网箱平台的运动响应和拖缆张力

Tab. 6　Motion responses and towline tensions of an aquaculture platform for different wave directions

浪向角/(°) wave direction	垂荡加速度/(m/s²) heave acceleration			纵摇角/(°) pitch motion			拖缆张力/($\times10^6$ N) towline tension		
	最大值 max	最小值 min	平均值 average	最大值 max	最小值 min	平均值 average	最大值 max	最小值 min	平均值 average
180	0.58	−0.54	0	0.19	−0.17	0.01	4.40	0	1.72
135	0.43	−0.40	0	0.17	−0.18	0.01	3.23	0.62	1.50
45	1.29	−1.29	0	0.28	−0.32	0	2.16	0.60	1.35
0	1.01	−1.02	0	0.19	−0.30	0.01	2.23	0.79	1.38

4.3　拖航速度的影响

拖航速度影响拖船海上作业时间和燃油消耗量, 选取 2.0 kn、3.0 kn、4.0 kn 和 5.0 kn (U=1.03 m/s、1.54 m/s、2.06 m/s 和 2.57 m/s) 4 种拖航速度, 有效波高为 2.5 m, 其他计算参数与 **4.1** 相同。

计算得到的网箱平台垂荡加速度、纵摇角和拖缆张力结果的最大值、最小值及平均值如图 12 和表 7 所示。

从图 12 和表 7 可以看出, 当拖航速度由 2.0 kn 分别增加到 3.0 kn、4.0 kn 和 5.0 kn 时, 网箱平台垂荡加速度的平均值为零, 正向垂荡加速度大于负向, 其最大值分别降低 31%、36%和 56%, 当拖航速度为 2.0 kn 时, 垂荡加速度已十分接近《海上拖航指南》规定的安全限值 0.98 m/s²[22]; 纵摇角的平均值几乎不变, 最大值分别增加 8%、46%和 62%, 当拖航速≥4.0 kn 时, 艏倾角大于艉倾角; 拖缆张力的平均值分别增加 31%、72%

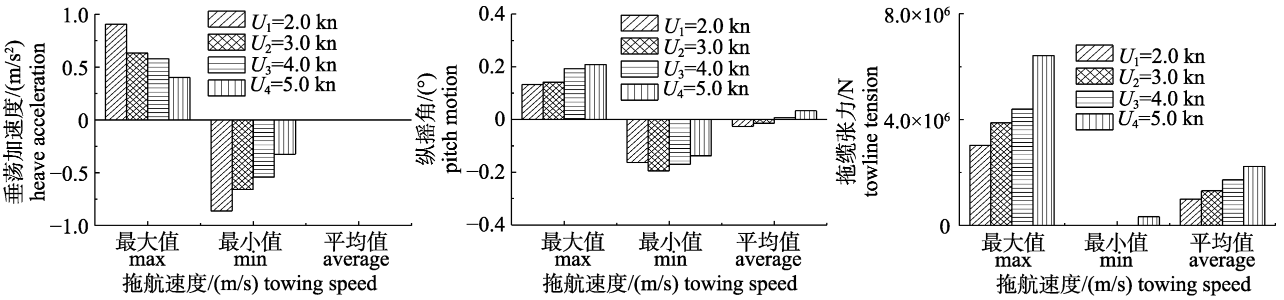

图 12　不同拖航速度下网箱平台的运动响应和拖缆张力

Fig. 12　Motion responses and towline tensions of an aquaculture platform for different towing speeds

表 7　不同拖航速度下的运动响应和拖缆张力

Tab. 7　Motion responses and towline tensions of an aquaculture platform for different towing speeds

拖航速度/(kn) towing speed	垂荡加速度/(m/s^2) heave acceleration			纵摇角/(°) pitch motion			拖缆张力/(×10^6 N) towline tension		
	最大值 max	最小值 min	平均值 average	最大值 max	最小值 min	平均值 average	最大值 max	最小值 min	平均值 average
2.0	0.91	−0.86	0	0.13	−0.16	−0.03	3.03	0	1.00
3.0	0.63	−0.66	0	0.14	−0.20	−0.01	3.88	0	1.31
4.0	0.58	−0.54	0	0.19	−0.17	0.01	4.40	0	1.72
5.0	0.40	−0.33	0	0.21	−0.14	0.03	6.42	0.33	2.23

和 123%,最大值分别增加 28%、45%和 112%, 当拖航速度为 5.0 kn 时, 最大拖缆张力 6.42×10^6 N, 安全系数 2.3, 略高于最小安全系数 2.0。因此, 为了满足运动响应及拖缆张力的要求, 拖航速度不宜小于 2.0 kn 或大于 5.0 kn。

4.4　拖缆长度的影响

拖缆长度对拖航结构的水动力性能有一定影响, 选取 $L=D$、$2D$、$3D$ 和 $4D$ 4 种拖缆长度(D 为网箱平台直径), 有效波高为 2.5 m, 其他计算参数与 **4.1** 相同。

计算得到的网箱平台垂荡加速度、纵摇角和拖缆张力结果的最大值、最小值及平均值如图 13 和表 8 所示。

从图 13 和表 8 可以看出, 当拖缆长度由 D 增加到 $2D$、$3D$ 和 $4D$ 时, 网箱平台垂荡加速度的平均值及最大值、纵摇角和拖缆张力的平均值几乎不变, 最大纵摇角(艏倾)分别降低 17%、35%和 43%, 拖缆张力最大值分别减小 18%、27%和 31%。拖缆长度的增加会缓解因拖船与网箱平台运动不协调而产生的冲击张力, 但拖缆过长也会使拖航操作更加困难。因此, 在保证航向稳定的前提下, 应尽量选取较长的拖缆。

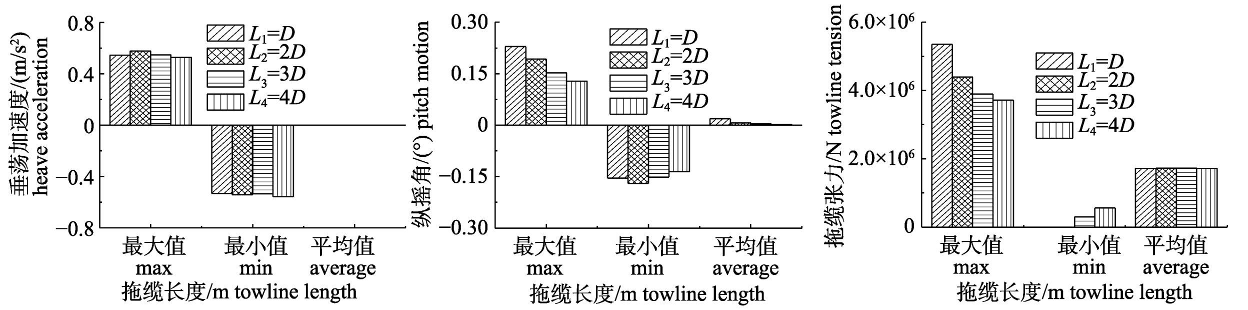

图 13　不同拖缆长度下网箱平台的运动响应和拖缆张力

Fig. 13　Motion responses and towline tensions of an aquaculture platform for different towline lengths

表 8　不同拖缆长度下网箱平台的运动响应和拖缆张力

Tab. 8　Motion responses and towline tensions of an aquaculture platform for different towline lengths

拖缆长度/m towline length	垂荡加速度/(m/s^2) heave acceleration			纵摇角/(°) pitch motion			拖缆张力/(×10^6 N) towline tension		
	最大值 max	最小值 min	平均值 average	最大值 max	最小值 min	平均值 average	最大值 max	最小值 min	平均值 average
D	0.54	−0.53	0	0.23	−0.15	0.02	5.35	0	1.73
$2D$	0.58	−0.54	0	0.19	−0.17	0.01	4.40	0	1.72
$3D$	0.55	−0.53	0	0.15	−0.15	0	3.90	0.30	1.72
$4D$	0.53	−0.56	0	0.13	−0.14	0	3.71	0.56	1.72

4.5　拖缆点位置的影响

拖缆点位置对半潜式网箱平台拖航水动力特性也会产生影响, 选取 Z=−0.06H、0、0.14H、0.22H 和 0.41H (H 为网箱平台高度) 5 种拖缆点高度, 分别对应网箱平台浮心、平均静水面、边缘浮筒与边立柱交界面、形心和重心高度。有效波高为 2.5 m, 其他计算参数与 **4.1** 相同。

计算得到的网箱平台垂荡加速度、纵摇角和拖缆张力结果的最大值、最小值及平均值如图 14 和表 9 所示。

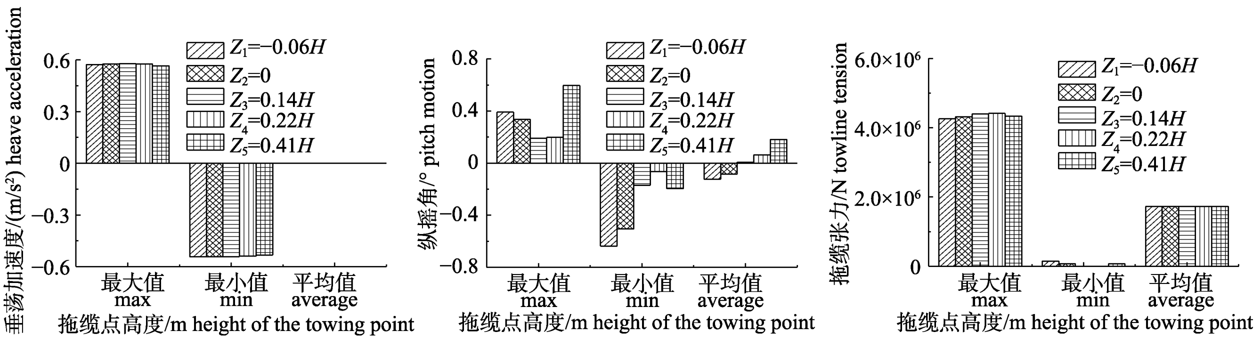

图 14　不同拖缆点位置下网箱平台的运动响应和拖缆张力

Fig. 14　Motion responses and towline tensions of an aquaculture platform for different heights of the towing point

表 9　不同拖缆点位置下网箱平台的运动响应和拖缆张力

Tab. 9　Motion responses and towline tensions of an aquaculture platform for different heights of the towing point

拖缆点高度/m height of the towing point	垂荡加速度/(m/s^2) heave acceleration			纵摇角/(°) pitch motion			拖缆张力/(×10^6 N) towline tension		
	最大值 max	最小值 min	平均值 average	最大值 max	最小值 min	平均值 average	最大值 max	最小值 min	平均值 average
−0.06H	0.57	−0.54	0	0.39	−0.64	−0.12	4.26	0.15	1.72
0	0.58	−0.54	0	0.34	−0.51	−0.08	4.31	0.07	1.72
0.14H	0.58	−0.54	0	0.19	−0.17	0.01	4.40	0	1.72
0.22H	0.58	−0.54	0	0.20	−0.06	0.06	4.41	0	1.72
0.41H	0.57	−0.53	0	0.60	−0.20	0.18	4.34	0.07	1.73

从图 14 和表 9 可以看出, 当拖缆点位置由 Z=−0.06H 提升到 0、0.14H、0.22H 和 0.41H 时, 网箱平台垂荡加速度和拖缆张力的统计值几乎不变, 纵摇角幅值(最大值−最小值)分别降低 17%、65%、75%和 22%。当拖缆点位置高于平均静水面(Z>0)时, 艏倾角大于艉倾角。拖缆点位置决定了拖缆张力力矩的大小, 进而影响网箱平台的航行姿态。

5　讨论

5.1　波浪参数对网箱平台拖航性能的影响

波浪参数是影响网箱平台拖航性能的关键因素之一, 恶劣海况下拖航容易导致平台运动响应

过大或发生断缆事故。从垂荡加速度、纵摇角和拖缆张力的统计分析来看, 有效波高和浪向角对网箱平台拖航性能的影响十分显著。有效波高的增加会导致波浪力增大, 运动响应和拖缆张力也随之增大, 从而降低网箱平台在拖航过程中的稳定性, 这一规律与 Wang 等[12]、Zhang 等[4]和赵悦等[3]针对筒型基础拖航水动力的研究结果一致。根据翟秋等[8]对大型预制沉箱和朱航等[5]对风电三筒导管架基础的研究, 为满足拖缆张力要求, 浮式结构外海拖航海况宜限制在 4 级以内。

湿拖一般采用顶浪或顺浪拖航, 以避免横浪作用下结构产生过大的横摇和横荡响应。根据数值计算结果, 顺浪时网箱平台拖航阻力较小, 因而拖缆张力较顶浪时有所减小, 同时稳定力矩降低, 使得网箱平台纵摇运动比顶浪时更加剧烈, 这一规律在张浦阳等[23]和贺维国等[10]关于筒型基础和沉管隧道管节的研究中也被发现。

5.2 拖航方式对网箱平台拖航性能的影响

拖航速度直接影响网箱平台的湿拖运输。从垂荡加速度、纵摇角和拖缆张力的统计分析来看, 随着拖航速度增加, 网箱平台拖航阻力增大, 导致拖缆张力增加, 系统回复力变大, 因而网箱平台垂荡加速度减小, 这与 Zhang 等[4]针对筒型基础和任建宇等[6]针对浮式风机的研究结果一致。

网箱平台和拖船之间由拖缆连接, 拖缆长度和拖缆点位置也是影响网箱平台拖航性能的关键因素。从统计结果来看, 拖缆长度增加有利于缓解拖缆内产生的冲击张力, 缆绳越长拖缆张力越小, 这与贺维国等[10]关于沉管隧道管节和李亚杰等[9]关于浮式风机的研究结果一致。同时, 增大拖缆长度使得拖缆重量增加, 系统回复力提高, 导致网箱平台纵摇运动响应减小, 这一规律在 Zhang 等[1]关于海上测风塔基础的研究中也被发现。

根据数值计算结果, 当拖缆点位于网箱平台形心所在平面(水面之上)时, 平台的纵摇运动响应最小。王道广等[15]在筒基井口平台静水拖航试验中发现, 拖缆点位于水面或水面以上时其纵摇角明显小于水面以下, 这与本研究结果相符合。丁红岩等[14]针对筒形基础海洋平台在规则波作用下的拖航性能进行了研究, 结果显示, 拖缆点位置靠近浮心所在平面(水面之下)时其纵摇角最小, 与本研究的研究结果存在差异。产生差异的原因是由于网箱平台尺度大、重心高, 在吃水相同的条件下, 网箱平台的水面高度远大于筒型基础平台, 由拖航阻力和波浪增阻引起的倾覆力矩更大, 平台更容易发生艏倾; 此外, 网箱平台的拖航计算中还考虑了风阻力, 对于带有网衣的水面高耸结构, 由风荷载引起的倾覆力矩不能忽略(重心高于迎风面形心), 网箱平台艏倾的趋势进一步增大, 在拖航过程中, 拖缆张力提供稳定力矩, 用于抵抗由阻力引起的倾覆力矩, 稳定力矩的大小随拖缆点高度变化, 当拖缆点位置较高时, 稳定力矩较小, 网箱平台发生艏倾, 当拖缆点位置较低时, 稳定力矩较大, 网箱平台发生艉倾。而吃水、拖航速度、风速和波浪条件, 也会影响网箱平台倾覆力矩的大小。

6 结论

本研究以半潜式网箱养殖平台为研究对象, 建立了拖航水动力模型, 分析了有效波高、浪向角、拖航速度、拖缆长度和拖缆点位置等参数对网箱平台运动响应和拖缆张力的影响, 得到了以下结论:

(1) 有效波高和浪向角对网箱平台运动响应和拖缆张力影响较大, 在自浮远距离拖航时, 建议作业海况不超过 4 级, 避免顺浪拖航, 宜采取偏顶浪拖航, 以保证平台的安全稳定。

(2) 随着拖航速度增加, 网箱平台的垂荡加速度减小, 拖缆张力增大, 为满足平台运动响应及拖缆张力要求, 建议拖航航速控制在 2.0 kn 至 5.0 kn 之间。

(3) 随着拖缆长度增加, 网箱平台最大拖缆张力减小, 平均拖缆张力几乎不变, 实际拖航过程中可在保证航向稳定的前提下适当增加拖缆长度。

(4) 拖缆点高度对拖航姿态影响较大, 要根据网箱平台吃水、外环境荷载及拖航速度合理选取, 确保拖航稳定。

参考文献:

[1] Zhang P Y, Peng Y J, Ding H Y, et al. Numerical analysis of

offshore integrated meteorological mast for wind farms during wet towing transportation[J]. Ocean Engineering, 2019, 188: 106271.

[2] Ding H Y, Hu R Q, Zhang P Y, et al. Towing operation analysis of offshore integrated wind mast[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2020, 41(8): 1156-1162, 1243. [丁红岩, 胡睿奇, 张浦阳, 等. 一体化海上测风塔浮运拖航性态分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(8): 1156-1162, 1243.]

[3] Zhao Y, Zhao S X, Guo Y H, et al. Floating stability of bucket foundation of large offshore electric platform[J]. China Offshore Platform, 2023, 38(2): 7-11, 35. [赵悦, 赵生校, 郭耀华, 等. 海上大型电气平台筒型基础结构浮稳性[J]. 中国海洋平台, 2023, 38(2): 7-11, 35.]

[4] Zhang P Y, Liang D S, Ding H Y, et al. Floating state of a one-step integrated transportation vessel with two composite bucket foundations and offshore wind turbines[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2019, 7(8): 263.

[5] Zhu H, Li M C, Guo Y H, et al. Mechanics and floating analysis of three-bucket jacket foundation for offshore wind power in deep water[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022, 43(11): 269-276. [朱航, 李孟超, 郭耀华, 等. 深水海上风电三筒导管架基础受力及浮运分析[J]. 太阳能学报, 2022, 43(11): 269-276.]

[6] Ren J Y, Le C H, Zhang P Y, et al. Effect of flowing velocity on integrated towing motion of submersible floating offshore wind turbine[J]. Shipbuilding of China, 2022, 63(6): 207-217. [任建宇, 乐丛欢, 张浦阳, 等. 流速对全潜型浮式风机整机拖航影响的研究[J]. 中国造船, 2022, 63(6): 207-217.]

[7] Liu X Q, Luo S, Zhao M J, et al. Motion response characteristics for three bucket foundations based on MOSES [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2022, 41(2): 102-108, 152. [刘宪庆, 罗盛, 赵明阶, 等. 基于 MOSES 的三筒型基础运动响应特性研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2022, 41(2): 102-108, 152.]

[8] Zhai Q, Wang P, Wang H K, et al. Study on stability and seakeeping of large prefabricated caisson towed in open sea[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2023, 38(1): 114-123. [翟秋, 王鹏, 王华坤, 等. 大型预制沉箱外海拖航稳性与耐波性分析[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2023, 38(1): 114-123.]

[9] Li Y J, Min Y, Zhang K P, et al. Dynamic response of semi-submersible floating wind turbine during wet-towing operation[J]. Ship Science and Technology, 2022, 44(18): 116-121. [李亚杰, 闵烨, 张坤鹏, 等. 半潜式浮式风机系统湿拖过程动力响应研究[J]. 舰船科学技术, 2022, 44(18): 116-121.]

[10] He W G, Zhang J F, Lü Y, et al. Investigation into towing behavior and influencing factors of immersed tube tunnels[J]. Hydro-Science and Engineering, 2023, (6): 183-194. [贺维国, 张金凤, 吕洋, 等. 沉管隧道管节拖航过程的运动性态及影响因素研究[J]. 水利水运工程学报, 2023, (6): 183-194.]

[11] Sun T, Zhu Z X. Influence of flooding spud can upon the transit stability of self-elevating drilling units[J]. Ship & Ocean Engineering, 2017, 46(6): 169-172, 177. [孙涛, 朱佐鑫. 桩靴充水对自升式平台拖航稳性的影响[J]. 船海工程, 2017, 46(6): 169-172, 177.]

[12] Wang H J, Liu C, Guo Y H, et al. Experimental and numerical research on the wet-towing of wide-shallow bucket jacket foundation for offshore substation[J]. Ocean Engineering, 2023, 275: 114126.

[13] Lian J J, Liu X, Guo Y H, et al. Research on floating transportation characteristics of offshore wind power three-tube jacket foundation[J]. Port Engineering Technology, 2022, 59(2): 72-75. [练继建, 刘潇, 郭耀华, 等. 海上风电三筒导管架基础浮运特性研究[J]. 港工技术, 2022, 59(2): 72-75.]

[14] Ding H Y, Huang X, Zhang P Y, et al. Analysis on influence factors of towing of air float bucket foundation platform[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(10): 193-198. [丁红岩, 黄旭, 张浦阳, 等. 筒型基础平台气浮拖航的影响因素分析[J]. 工程力学, 2012, 29(10): 193-198.]

[15] Wang D G, Zhao X, Zhang P Y. Towing test of integrated barrel-based wellhead platform foundation[J]. Ship Engineering, 2022, 44(S1): 618-624. [王道广, 赵荥, 张浦阳. 一体化筒基井口平台基础拖航试验[J]. 船舶工程, 2022, 44(S1): 618-624.]

[16] Li Y C, Teng B. Wave Action on Maritime Structures[M]. 3rd ed. Beijing: Ocean Press, 2015. [李玉成, 滕斌. 波浪对海上建筑物的作用[M]. 3 版. 北京: 海洋出版社, 2015.]

[17] Cummins W E. The impulse response function and ship motions[J]. Schiffstechnik, 2010, 47(9): 101-109.

[18] China Classification Society. Rules for Classification of Mobile Offshore units[S]. Beijing: China Communication Press, 2023. [中国船级社. 海上移动平台入级规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2023.

[19] Zhang H M, Xie Z, Fang G S, et al. Investigation on the impact tension characteristics of taut mooring lines[J]. The Ocean Engineering, 2017, 35(5): 23-32. [张火明, 谢卓, 方贵盛, 等. 绷紧式系泊缆冲击张力特性研究[J]. 海洋工程, 2017, 35(5): 23-32.]

[20] Wan R, He X, Wang X X, et al. A method of mesh group for fish cage anti-current characteristics by means of finite

element analysis[J]. Periodical of Ocean University of China, 2007, 37(6): 885-888. [万荣, 何鑫, 王欣欣, 等. 一种适用于网箱耐流特性有限元分析的网目群化方法[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2007, 37(6): 885-888.]

[21] Dou R. Numerical modeling and analysis of a semi-submersible fish-cage[D]. Norway: Norwegian University of Science and Technology, 2018.

[22] China Classification Society. GD02-201 Guidelines for Towage at Sea[S]. Beijing: China Communication Press, 2011. [中国船级社. GD02-2012 海上拖航指南[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.]

[23] Zhang P Y, Liang D S, Qi X L. Research on wet towing coupled dynamic response of three-bucket jacket foundation of offshore wind power[J]. Chinese Journal of Ship Research, 1-13[2024-04-20]. [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, 1-13 [2024-04-20]. https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03588.]

Hydrodynamic performance of a semi-submersible aquaculture platform during wet towing transportation

LIU Changfeng[1, 2], ZHANG Yu[1], XIN Yu[1], YIN Jing[3], CHEN Changping[1, 2], HAO Jian[1, 2]

1. College of Ocean and Civil Engineering, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China;
2. Key Laboratory of Environment Controlled Aquaculture, Ministry of Education, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China;
3. National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China

Abstract: As marine aquaculture expands from coastal regions to the deep seas, large-scale semi-submersible aquaculture platforms have become the primary engineering equipment in recent years because of their high stability and ease of installation. To reduce the difficulty of offshore construction, these platforms are typically installed on land and towed to the operating areas by tugboats. However, owing to the high center of gravity of the platform, there is a risk of capsizing during long-distance towing. In this study, a numerical analysis model was developed to assess the hydrodynamic performance of an aquaculture platform, including its frame and net, during wet-towing transportation. For a large-scale frame, including pontoons and columns, a three-dimensional potential flow theory was applied to solve the diffraction and radiation problems. For the thin net, a semi-empirical Morison equation was used to calculate the wave loads and a mesh group method was implemented to decrease the computational cost and time. The motion equation was solved in the time domain using the impulsive response function method, and analysis of nonlinear catenary towline was performed using the lumped-mass method. This model examines the impact of significant wave height, wave direction, towing speed, towline length, and mooring point position on the motion response and towline tension of a semi-submersible aquaculture platform. The results indicate that as the significant wave height rises from 1.25 m to 4.00 m, the heave acceleration and pitch angle of the aquaculture platform increase by 293% and 750%, respectively, whereas the towline tension increases by 358%. The aquaculture platform experienced more severe pitch motion in the following waves than in the head waves although the towline tension decreased. Furthermore, increasing the towing speed from 2.0 kn to 5.0 kn leads to a 56% reduction in heave acceleration and an 112% increase in towline tension. Tripling the towline length results in a 43% decrease in the pitch angle and 31% decrease in the towline tension. The height of the towing point has a significant impact on the pitch motion. For practical engineering applications, it is recommended to limit the maximum sea condition for towing aquaculture platforms to level 4, keep the towing speed below 5.0 kn, avoid towing in following waves, and instead opt for quarter head waves. Additionally, appropriately increasing the tow line length can improve the towing stability.

Key words: semi-submersible aquaculture platform; wet towing; hydrodynamic; motion response; towline tension

Corresponding author: CHEN Changping. E-mail: ccp@dlou.edu.cn