



海上风电三筒导管架基础的湿拖耦合动力响应研究

张浦阳 梁迪生 齐喜玲

Wet-towing coupled dynamic response of three-bucket jacket foundation of offshore wind power

ZHANG Puyang, LIANG Disheng, QI Xiling

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03588>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

应用于海洋平台的拖链结构与数值分析

Design and numerical analysis of drag chain structure for offshore platform

中国舰船研究. 2018, 13(S1): 111-114, 120 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01125>

核电平台连接机构设计与运动响应分析

Design of connecting mechanism and motion response analysis on nuclear power platform

中国舰船研究. 2020, 15(1): 152-161 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01786>

弹性螺旋桨流固耦合振动特性分析

Analysis on the fluid-structure interaction vibration characteristics of the elastic propeller

中国舰船研究. 2020, 15(3): 102-110 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01540>

基于三参数模型的浅海声场最佳频率研究

Study on optimum frequency of shallow water acoustic field based on three-parameter model

中国舰船研究. 2019, 14(S1): 99-107 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01643>

三维船体建模与稳性计算系统研发

Research and development of 3D hull modeling and stability calculation system

中国舰船研究. 2021, 16(3): 60-66 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01952>

平整冰层中海工结构冰载荷研究方法综述

Review of research on ice loading of offshore structures in level ice fields

中国舰船研究. 2021, 16(5): 39-53 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.02084>



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.1673-3185.03588>

期刊网址: www.ship-research.com

引用格式: 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]. 中国舰船研究, 2024, 19(4): 92-103.

ZHANG P Y, LIANG D S, QI X L. Wet-towing coupled dynamic response of three-bucket jacket foundation of offshore wind power[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2024, 19(4): 92-103 (in Chinese).

海上风电三筒导管架基础的湿拖 耦合动力响应研究



扫码阅读全文

张浦阳*, 梁迪生, 齐喜玲

天津大学 水利工程智能建设与运维全国重点实验室, 天津 300050

摘要: [目的] 为提高海上风电多筒导管架基础的湿拖运输安全性, 需探究其湿拖运输过程的稳性和动态响应问题。[方法] 基于海工分析软件 MOSES 构建水动力模型, 对湿拖运输过程分别进行频域和时域分析, 并定量分析波浪载荷、拖航方式等参数对三筒导管架基础拖航特性的影响。[结果] 计算结果表明, 三筒导管架具有良好的湿拖稳性, 在吃水深度 8~10 m 范围内的正浮态均可满足完整稳性校核; 三筒导管架基础的拖缆力、纵摇角、垂荡加速度、筒气压的幅值与波高呈正比关系, 与吃水深度呈线性变化关系但影响较小; 拖缆力和筒气压的幅值与波浪周期无明显关系, 但波浪周期将影响该基础的纵摇和垂荡响应幅值; 拖缆力与航速的平方近似呈正比关系; 顺浪条件下三筒导管架基础的纵摇运动比逆浪条件更为剧烈。[结论] 研究成果对于提高多筒导管架基础的湿拖运输安全性具有重要的指导意义。

关键词: 海上风电; 三筒导管架基础; 水动力模型; 湿拖稳性; MOSES 软件

中图分类号: TM614; U661.1

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.03588

Wet-towing coupled dynamic response of three-bucket jacket foundation of offshore wind power

ZHANG Puyang*, LIANG Disheng, QI Xiling

State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University, Tianjin 300050, China

Abstract: [Objective] To improve the safety of wet-towing transportation for offshore wind power multi-bucket jacket foundations, it is necessary to explore the stability and dynamic response during the wet-towing transportation. [Methods] A hydrodynamic model was constructed based on the offshore engineering analysis software MOSES, and frequency-domain analysis and time-domain analysis were performed on the wet-towing process. Quantitative analysis was also conducted on the influence of parameters such as wave loads and towing modes on the towing characteristics of the three-bucket jacket foundation. [Results] Computational results show that the three-bucket jacket foundation has good wet-towing stability, and its upright floating state can meet the intact stability checking within a draft of 8-10 m. The amplitudes of towing force, pitching angle, heaving acceleration and air pressure in the bucket of the three-bucket jacket foundation are directly proportional to the wave height, have a linear relationship with draft, and show less influence. The amplitudes of towing force and air pressure in the bucket have no obvious relationship with the wave period, but the wave period will affect the amplitudes of pitching and heaving responses the foundation. The towing force is approximately proportional to the speed squared. The pitching motion of the three-bucket jacket foundation under the conditions of the stern sea is more severe than that under the cross sea. [Conclusion] The research results have important guiding significance for improving the safety of wet-towing transportation of multi-bucket jacket foundations.

Key words: offshore wind power; three-bucket jacket foundation; hydrodynamic model; wet-towing stability; MOSES software

收稿日期: 2023-10-09 修回日期: 2023-12-15 网络首发时间: 2024-03-14 14:47

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52271287)

作者简介: 张浦阳, 男, 1978 年生, 博士, 副教授。研究方向: 土木及海洋工程结构。E-mail: zpy_td@163.com

梁迪生, 男, 1997 年生, 博士生。研究方向: 海上风电基础结构。E-mail: 1203316317@qq.com

齐喜玲, 女, 1995 年生, 博士生。研究方向: 海上风电基础结构。E-mail: qixiling163@163.com

*通信作者: 张浦阳

0 引言

风电是重要的绿色能源,与陆上风电相比,海上风电具有不可替代的优势。目前,单机容量的大型化和由近海走向深远海是海上风电的发展趋势。海上风电基础型式的选择需要因地制宜,考虑地条件条件和适用水深,由此形成了多种型式,例如三脚架基础、筒型基础、单桩基础、浮式基础、重力式基础和导管架基础等,其中筒型基础由于施工成本低、便于安装、可回收利用等优势,近年来的发展速度较快。现有的筒型基础一般适用于0~30 m的浅水水深,为了使筒型基础走向深远海,一种新型基础型式——多筒导管架基础应运而生^[1-3],其结合了筒型基础和导管架基础的优势,是一种很有发展潜力的海上风电基础型式^[4]。

传统的导管架基础通常采用成熟的干拖运输方式,该运输技术已成功应用于多种大型海工结构,例如半潜式钻井平台、Spar平台、TLP平台、大型FPSO平台等,其缺点是需配置大型船舶和起重设备,故施工工序复杂、成本较高。相较于大型海工结构的导管架基础而言,多筒导管架基础的尺度小、自重轻,且为气浮结构,具有一定的自浮稳性^[5-7],如果能采用湿拖运输,则可大幅简化施工工序并降低成本。然而,目前的海上湿拖研究大多集中于重心低、稳性较高的传统海洋平台^[8-9]。

针对近年来发展较快的宽浅式复合筒型基础的海上湿拖技术,天津大学海上风电团队开展了大量研究工作。丁红岩等^[10-15]研究了复合筒型基础的横荡、纵摇^[10]、垂荡的水动力特性^[11],及其在规则波下的运动响应^[12],并设计了一种风机运输船(其通过钢缆与风电整机连接),进而分析了拖航过程中气压^[13]、耐波性^[14]以及风电机组浮态对风电整机湿拖过程的影响^[15],为海上风电整机的一步式运输安装提供了重要的指导意义。张浦阳等^[16]等针对上述结构的风电整机一步式运输安装进行了试验分析,研究结果表明,一步式安装船在湿拖过程中的稳性良好,随着筒型基础内部的气压增加,其结构稳性也随之增加;增加吃水将降低船舶稳性,而压载物对稳性的影响较小。

需注意的是,多筒导管架基础作为新型海上高耸结构,其在拖航过程中将承受较大的倾覆弯矩作用,且多筒导管架基础的湿拖运输对环境因素更为敏感。然而,目前海上风电多筒导管架基础的湿拖运输尚未出现工程实例,故亟需进行数值模拟以验证其湿拖稳性。为此,本文拟针对三筒导管架基础在湿拖运输过程中的水动力特性开展

研究,首先通过采用海工分析软件——MOSES来建立水动力模型,分析湿拖过程中的频域和时域特性,进而对各个参数进行定量分析,用以为多筒导管架基础的湿拖运输安全性提供指导。

1 MOSES建模和稳性分析

1.1 湿拖过程的运动学方程

浮体在波浪下的受迫振动问题可以简化为多筒导管架基础的湿拖过程,其中多筒导管架基础的运动方程为^[17]

$$\sum_{j=1}^6 \left[(\mathbf{a}_{ij} + \mathbf{m}_{ij}(t)) \ddot{\mathbf{x}}_j(t) + \int_0^t \mathbf{K}_{ij}(t-\tau) \dot{\mathbf{x}}_j(\tau) d\tau + \mathbf{C}_{ij} \mathbf{x}_j(t) \right] = \mathbf{F}_i(t) \quad (1)$$

式中: \mathbf{a}_{ij} 为浮体的惯性质量矩阵,其中 $i, j=1, 2, \dots, 6$,表示各个分量编号; $\mathbf{m}_{ij}(t)$ 为浮体的附加质量矩阵,其中 t 为时间变量; $\mathbf{x}_j(t)$ 为浮体位移矩阵; $\mathbf{K}_{ij}(t)$ 为延迟函数矩阵; τ 为卷积时间变量; $\dot{\mathbf{x}}_j(\tau)$ 为单位脉冲响应函数; \mathbf{C}_{ij} 为静水恢复力矩阵; $\mathbf{F}_i(t)$ 为波浪激振力。

其中:

$$\mathbf{K}_{ij}(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \mathbf{B}_{ij}(\omega) \cos(\omega t) d\omega \quad (2)$$

$$\mathbf{F}_i(t) = \sum_{k=1}^N R \{ \mathbf{A}_k \mathbf{F}_i(\omega_k) e^{-i(\omega_k t + \theta_k)} \} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{B}_{ij}(\omega)$ 为浮体的辐射阻尼矩阵,其中 ω 为圆频率; \mathbf{A}_k , ω_k , θ_k 分别为对应波谱中每个规则波成分波的波幅向量、频率和相位,其中波谱成分 $k=1, 2, \dots, N$; R 表示实部; $\mathbf{F}_i(\omega_k)$ 为频率为 ω_k 的单位波幅所对应的波浪激振力; i 为虚数单位。

耦合动力响应分析中涉及空气动力载荷、水动力载荷以及结构动力响应的计算理论详见文献[18-19]。线性系统在某段时间内的响应可以视为是多个线性响应的叠加,MOSES中采用了Newmark- β 法进行迭代计算以求解结构的时域结构动力响应。本文将首先对浮体的位移矩阵、延迟函数矩阵、静水恢复力矩阵、波浪激振力矩阵和附加质量矩阵进行数值计算,进而得到浮体的运动时域响应,这种方法可以更准确地描述浮体的运动时域响应,并提高计算精度。

1.2 建立模型

以某海上风电场的三筒导管架基础作为研究

对象,其总高为 60.14 m,由下部的吸力筒和上部的导管架组成。吸力筒是 3 个 120°分布的钢筒,导管架是钢桁架式结构,整个三筒导管架结构均为刚性连接。吸力筒的高径比为 0.8(筒高 12.8 m,直径 16 m),基础总质量为 1 600 t,相对于吸力筒底部的重心垂直高度为 25 m。本文利用 MOSES 软件的气垫模块,通过编程建立了三筒导管架基础模型(图 1),并在拖轮上建立了动力系统,使其具备自航能力。

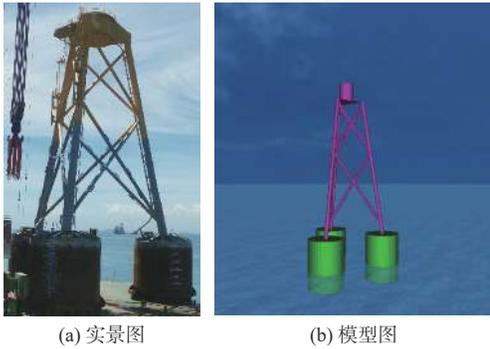


图 1 三筒导管架基础的仿真模型

Fig. 1 Simulation model of three-bucket jacket foundation

基于仿真模型,设置 Y 型拖缆,一端连接拖船,另一端(2 根分叉拖缆)连接三筒导管架基础的其中一个浮体两端,建立如图 2 所示的三筒导管架拖航模型以及基础编号示意图。

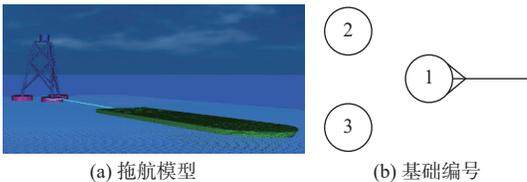


图 2 三筒导管架基础拖航 MOSES 模型

Fig. 2 MOSES model of three-bucket jacket foundation

本文对湿拖初始状态的设置如下:

1) 吃水设定。三筒导管架基础是一种气浮结构,其浮体由水弹簧和气弹簧共同支撑,浮力由内部气压力提供,浮力大小为内外水头差。三筒导管架基础的浮态与自身重量及吸力筒内的气水比相关,将其初始吃水设置为 9 m,经换算,需在 MOSES 中设置气水比为 49.3%。由于拖航过程中需保持三筒导管架基础与拖船的高度相同,因此需将拖船压载至吃水为 5.6 m。

2) Y 型拖缆的类型与长度。通过参考实际拖航作业工况,本文在 MOSES 中选择了气中悬挂链线拖缆(需考虑拖缆自重),其材质为钢缆,直径为 80 mm。为确保拖航稳定性和耐波性^[20],需将缆线长度设置为平台宽度的 3.2 倍,并设置 Y 型拖缆分叉端为 14 m,另一端为 90 m。

3) 拖缆点高度。为减小水流对拖航过程的影响,拖缆点应设置于水面之上。为便于施工,将 Y 型拖缆一端置于吸力筒的顶盖处,局部坐标高度为 12.8 m;另一端则置于拖船的艉部甲板上,局部坐标高度为 7 m。

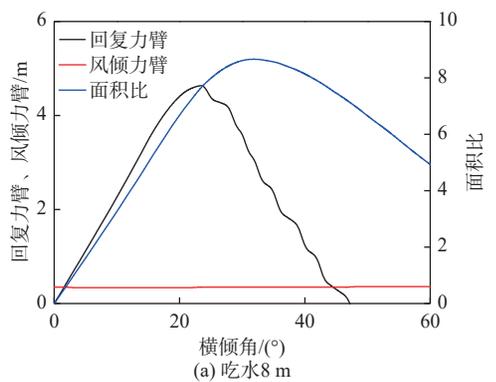
4) 航速。根据 GD 02—2012《海上拖航指南 2011》^[21],自升式钻井平台及其他水上建筑的航速应不小于 4 kn,故本文将拖船航速设置为 6 kn。

2 模型稳性以及频域响应分析

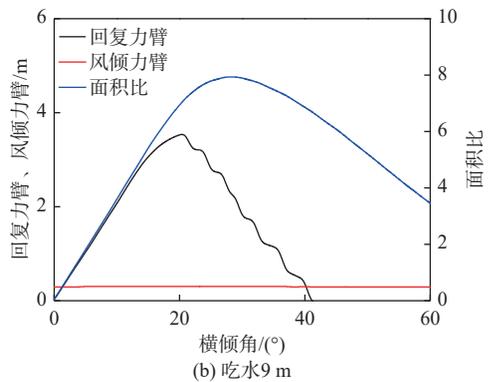
2.1 模型稳性分析

考虑结构自身的稳性参数及风对结构静稳性的影响。首先,在 MOSES 中设置三筒导管架基础的受风面积为水面以上的全部表面,3 个方向的风力系数均为 1;然后,设置环境条件下的风速,简化计算风载荷。通过分析风倾力臂和面积比,可以更全面地评估三筒导管架基础在静水中抵抗自身倾覆和风作用的能力。

为验证该模型的稳性,根据 GD 02—2012《海上拖航指南》^[21]中的完整稳性计算与校核准则,选取三筒导管架基础的常用的拖航工况,即在吃水深度 8, 9, 10 m 这 3 种正浮态工况下计算与校核,结果如图 3,表 1~表 3 所示,其中初稳性高度 GM 即稳心 M 与重心 G 之间的垂向距离。鉴于三筒导管架基础的实际拖航工况及验证计算的保守性,本次计算选取风速为 51.5 m/s (100 kn)。



(a) 吃水 8 m



(b) 吃水 9 m

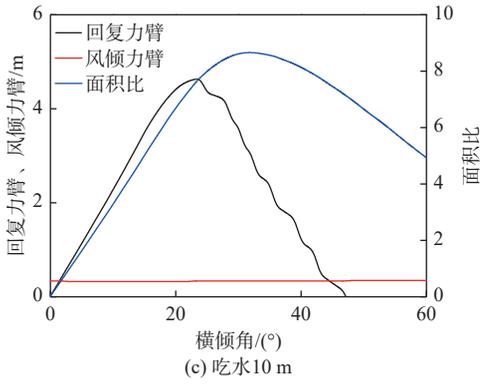


图 3 不同吃水深度下的浮态完整稳性曲线

Fig. 3 Curves of intact stability for the three-bucket jacket foundation under floating condition at different drafts

表 1 吃水 8 m 浮态完整稳性校核表

Table 1 Checklist of intact stability for the three-bucket jacket foundation in the floating state at a draft of 8 m

参数	计算值	标准值	结果
GM/m	12.77	>0.3	通过
消失角/(°)	47.21	>35	通过
面积比	7.53	>1.4	通过

表 2 吃水 9 m 浮态完整稳性校核表

Table 2 Checklist of intact stability for the three-bucket jacket foundation in the floating state at a draft of 9 m

参数	计算值	标准值	结果
GM/m	11.6	>0.3	通过
消失角/(°)	40.92	>35	通过
面积比	6.85	>1.4	通过

表 3 吃水 10 m 浮态完整稳性校核表

Table 3 Checklist of intact stability for the three-bucket jacket foundation in the floating state at a draft of 10 m

参数	计算值	标准值	结果
GM/m	10.73	>0.3	通过
消失角/(°)	36.91	>35	通过
面积比	6.06	>1.4	通过

通过对比不同吃水深度下的计算校核结果可知, 3 种工况下的三筒导管架基础均具备出色的静水稳性, 其中初稳性高度 GM 和面积比这 2 个关键参数均远大于标准值, 这表明该导管架基础在不同工况下均可满足完整稳性的要求。需注意的是, 在吃水为 10 m 的工况下, 其消失角仅略大于标准值(增幅 1.91°), 因此, 从稳性角度而言, 三筒导管架基础的吃水不宜超过 10 m, 且消失角为需重点考虑的设计参数。

2.2 频域 RAO 响应分析

浮体运动的幅值响应算子(response amplitude operator, RAO)即在单位波幅值的规则波作用下,

浮体相应的自由度运动幅值。按照实际海况, 本节选取了 3~25 s 周期的单位波幅规则波以及 8, 9, 10 m 吃水深度这 3 种计算工况, 得到如图 4 所示的结构纵荡、垂荡和纵摇计算结果。

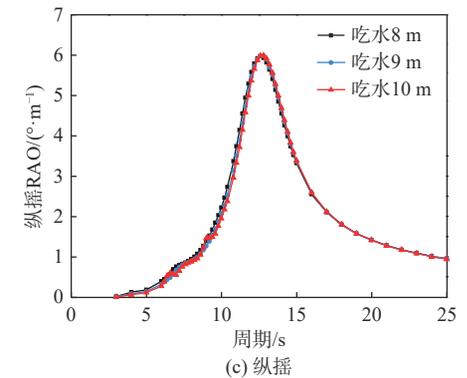
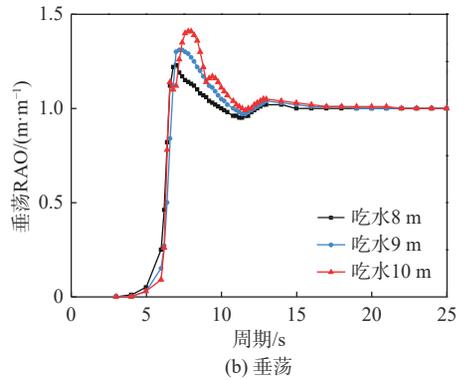
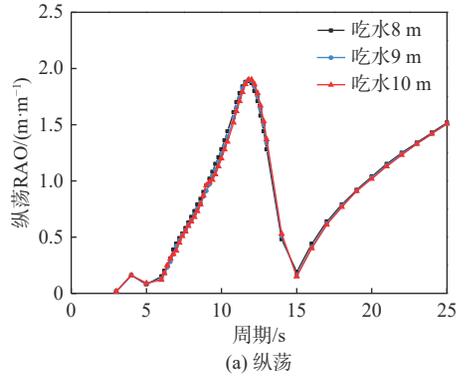


图 4 不同吃水深度下浮体的频域 RAO 响应
Fig. 4 RAOs of floating platform at different drafts

从图 4 可以看出, 对于频域 RAO 响应, 纵荡和纵摇的固有周期随吃水深度的变化较小, 纵荡固有周期为 12 s, 纵摇固有周期为 12.5 s; 垂荡的固有周期则随着吃水深度的增加而逐渐增加, 其中 8, 9, 10 m 吃水所对应的垂荡固有周期分别为 7, 7.3, 7.9 s, 且垂荡 RAO 响应也随着吃水深度的增加而增加。

3 拖航影响因素的时域分析

3.1 不利海况的模拟分析

参考江苏海域风电场^[22]已统计的海洋水文和

气象环境条件,得出如表 4 所示的模拟海况参数。根据拖航经验^[23-24],一般选取逆浪逆风拖航,以避免横向风浪所带来的侧倾,因此本节将风向和浪向均设置为 180°。

表 4 模拟海况参数

Table 4 Parameters of sea states for simulation

海况等级	波高/m	周期/s	风速/(m·s ⁻¹)	安全性
5级	2.5	9.5	10	安全
7级	4.0	10.1	20	不利

本节将在安全性较差的 7 级海况条件下,对三筒导管架基础进行 MOSES 时域拖航模拟分析,并采用接近实际海况的随机波 JONSWAP 谱来模拟海况,谱峰因子为 3.3。为了使三筒导管架基础的拖航达到稳定状态,将模拟时程设置为 600 s,结果如图 5 所示。

对于不利的 7 级海况,需首先确认三筒导管架基础在不利海况下是否能安全拖航。由图 5 可知,在浮运稳定之后(第 60 s 左右),拖航过程中的最大拖缆力为 273.54 t,而本文选用拖缆的最小破断张力为 576 t,即最大拖缆力远小于选用拖缆的破断张力;纵摇角最大值为 5.59°,垂荡加速度的最大幅值为 0.19 m/s²,两者均在可控范围内变化,故三筒导管架基础的运动响应变化较小;1 号筒气压的最大值为 4.36 m,可以保证足够的液封高度(筒气压是直接通过观察筒内“气柱”或者通过“水柱”换算得出,因此单位用 m 表示)。参考 MOSES

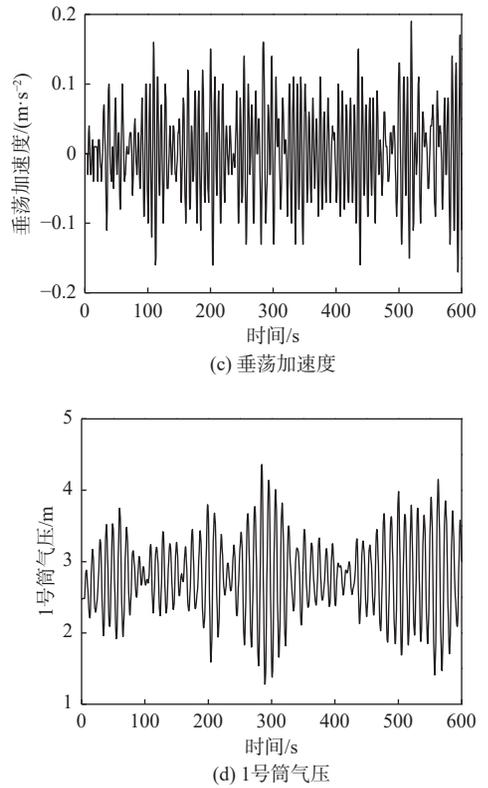


图 5 不利海况下的湿拖模拟分析(7级海况)

Fig. 5 Simulation analysis of wet-towing operation in adverse sea condition (sea state 7)

计算的可视化拖航结果,在不利的 7 级海况条件下,三筒导管架依然具有良好的湿拖稳性。

3.2 三筒导管架基础的拖航特性分析

3.2.1 波浪载荷对拖航特性的影响分析

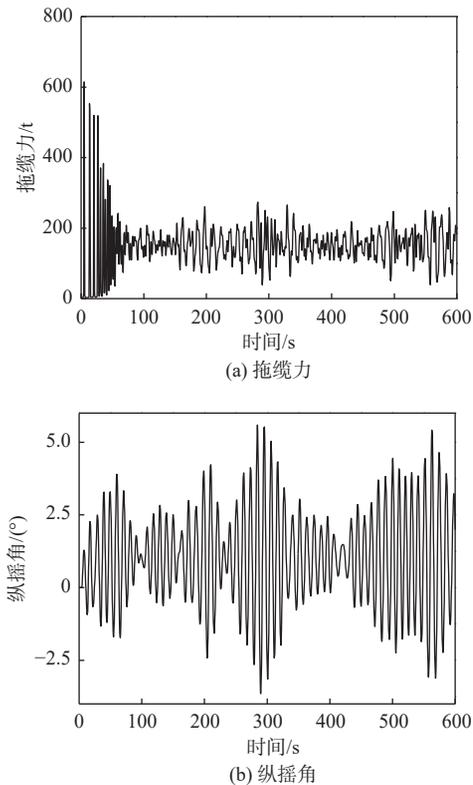
1) 波浪高度对拖航特性的影响。

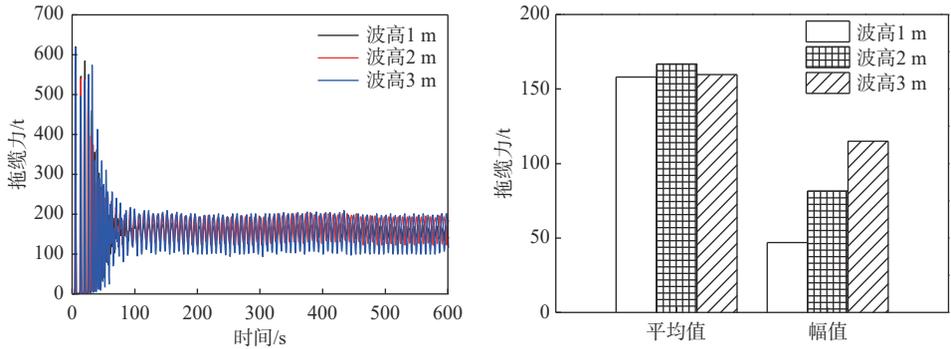
波浪高度是波浪的重要指标之一,参考 5 级海况的环境条件和气浮运输(简称“浮运”)方式,选取波高 1, 2, 3 m 这 3 种工况进行计算,结果如图 6 所示。为便于探究规律,波浪条件选取规则波,波浪周期选取 9 s,波浪方向选取逆浪拖航(180°浪向);拖航方式选择吃水 9 m,航速设为 6 kn。

从图 7 可知,随着波高的增加,三筒导管架基础在稳定拖航过程中的拖缆力、纵摇角、垂荡加速度和气压的平均值几乎不变,但拖缆力幅值、纵摇角幅值、垂荡加速度幅值、1 号筒气压幅值则明显增加,且基本与波高呈正比关系,其中波高 1, 2, 3 m 条件下对应的拖缆力幅值分别为 46, 82, 115 t,纵摇角幅值分别为 0.48°, 0.83°, 1.18°,垂荡加速度幅值分别为 0.07, 0.14, 0.21 m/s²,1 号筒气压振荡幅值分别为 0.2, 0.39, 0.58 m。

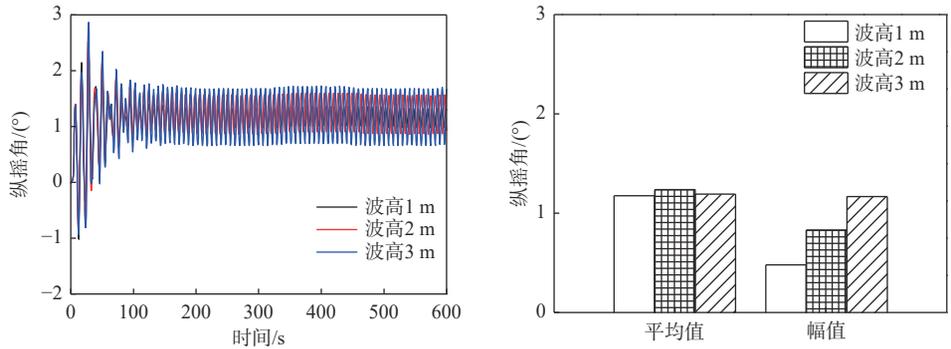
2) 波浪周期对拖航特性的影响。

周期 6, 8, 10 s 这 3 种工况下的计算结果如图 7

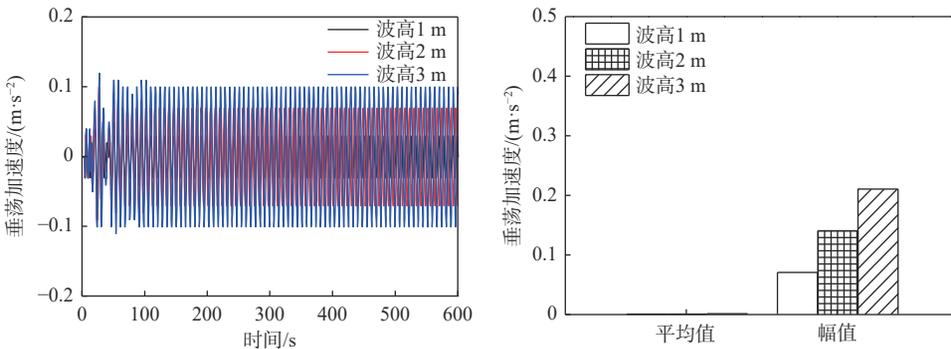




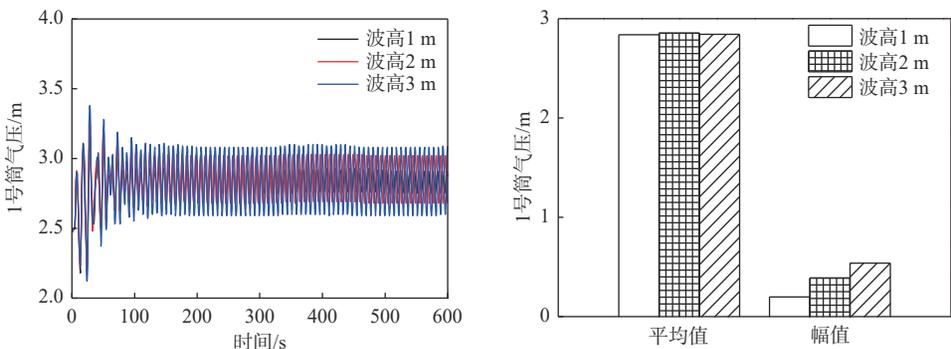
(a) 拖缆力以及统计值



(b) 纵摇角以及统计值



(c) 垂荡加速度以及统计值



(d) 1号筒气压以及统计值

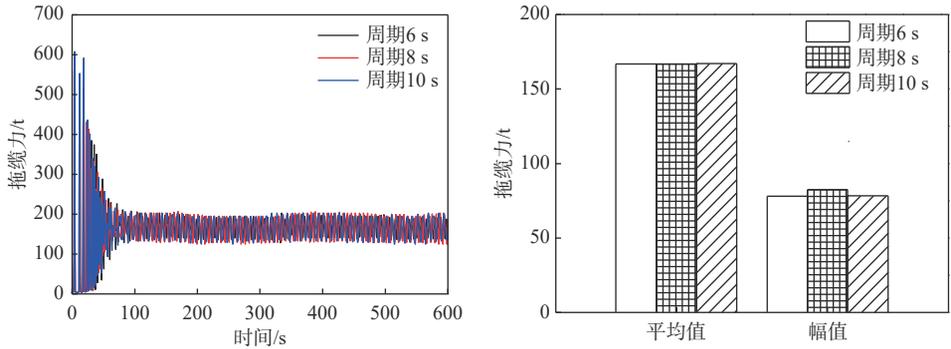
图 6 波高变化下的运动响应

Fig. 6 Dynamic responses under different wave heights

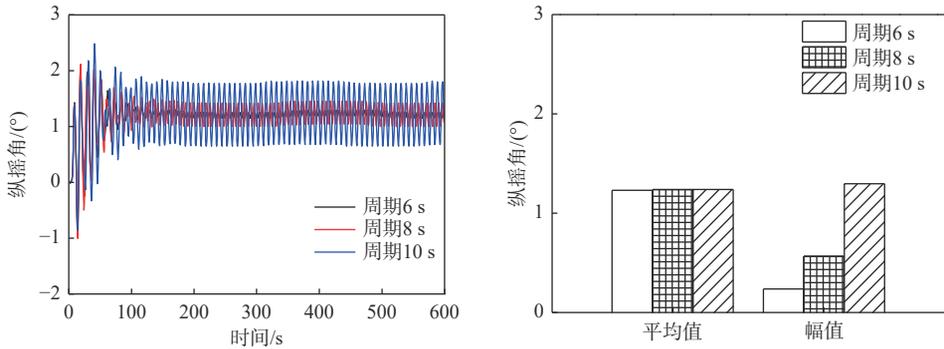
所示。为便于探究规律,波浪条件选取规则波,波浪高度选取 2 m,波浪方向选取 180°浪向的逆浪拖航;拖航方式选择吃水 9 m,航速为 6 kn。

从图 7 可以看出,随着波浪周期的变化,基础稳定拖航时的拖缆力、纵摇角、垂荡加速度和 1 号筒气压的平均值几乎不变。在周期 6, 8, 10 s

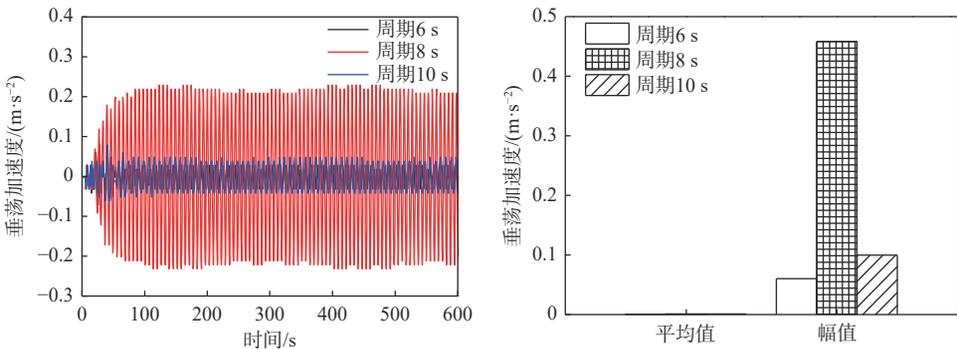
条件下对应的拖缆力幅值分别为 78, 82, 78 t, 纵摇角幅值分别为 0.24°, 0.57°, 1.3°, 垂荡加速度幅值分别为 0.06, 0.46, 0.1 m/s², 幅值分别为 0.07, 0.59, 0.47 m。由此可见,波浪周期几乎不影响拖缆力和 1 号筒气压的幅值,仅影响其变化振荡周期;但波浪周期将影响纵摇角和垂荡加速度的响应幅



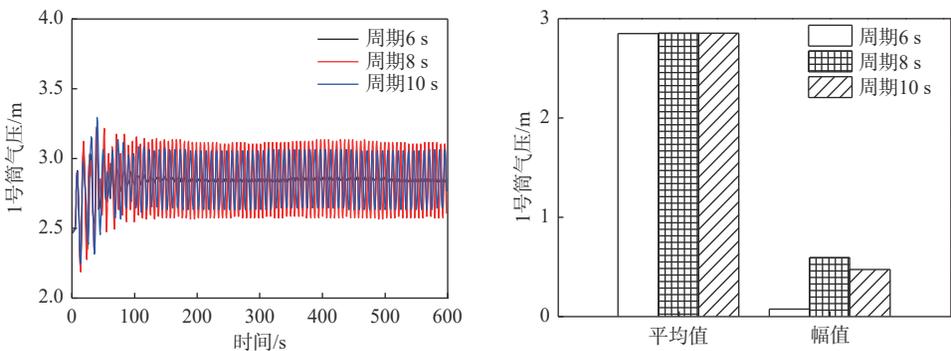
(a) 拖缆力以及统计值



(b) 纵摇角以及统计值



(c) 垂荡加速度以及统计值



(d) 1号筒气压以及统计值

图 7 周期变化下的运动响应

Fig. 7 Dynamic responses under different wave periods

值,这与纵摇和垂荡 RAO 的响应规律(图 4(b)和图 4(c))相吻合。

3) 波浪方向对拖航特性的影响。

波浪方向是波浪条件的重要因素之一,湿拖作业一般选择逆浪或顺浪拖航,以避免横浪导致拖船和三筒导管架基础产生侧倾、偏荡。参考 5 级海况

的环境条件和湿拖方式,选取逆浪和顺浪这 2 种浪向工况进行计算,结果如图 8 所示。为便于探究规律,波浪条件选取规则波,波高选取 2 m,周期选取 9 s;拖航方式选择吃水 9 m,航速为 6 kn。

从图 8 可以看出,逆浪和顺浪拖航几乎不影响基础稳定湿拖时的拖缆力、纵摇角、垂荡加速度

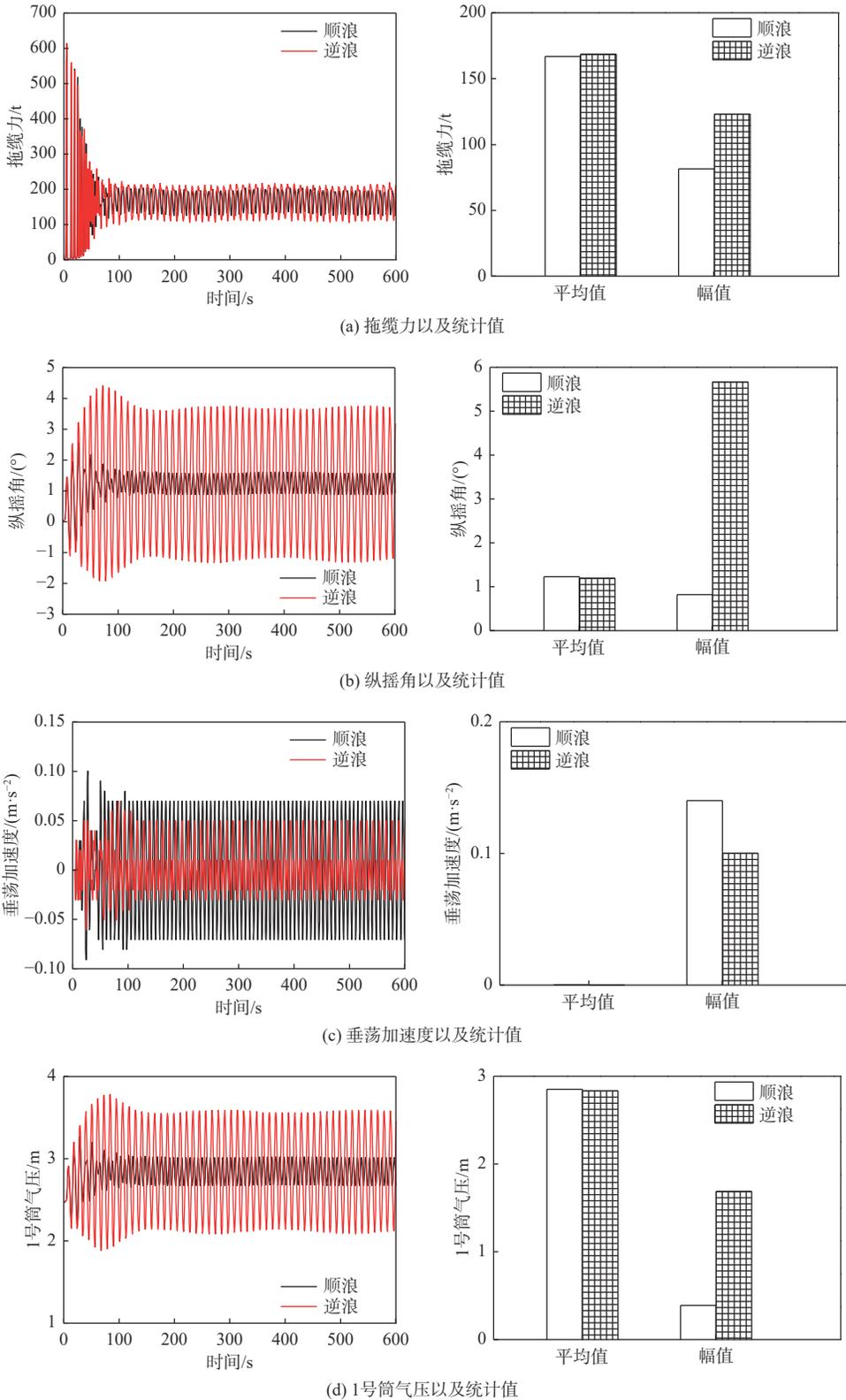


图 8 浪向变化下的运动响应

Fig. 8 Dynamic responses under different wave directions

和 1 号筒气压的平均值。在逆浪、顺浪拖航条件下, 对应的拖缆力幅值分别为 82, 123 t, 增加了 50%; 纵摇角幅值分别为 0.83°, 5.69°, 顺浪相比于逆浪增加了 585%; 垂荡加速度幅值分别为 0.14, 0.1 m/s², 略有减小; 1 号筒气压幅值分别为 0.39, 1.69 m, 增加了 225%。需注意的是, 顺浪条件下三筒导管架

基础的纵摇运动比逆浪条件更为剧烈, 所以不利于拖航过程中筒内气压的稳定。

3.2.2 拖航方式对拖航特性的影响

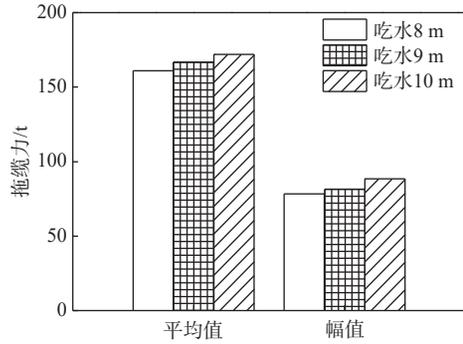
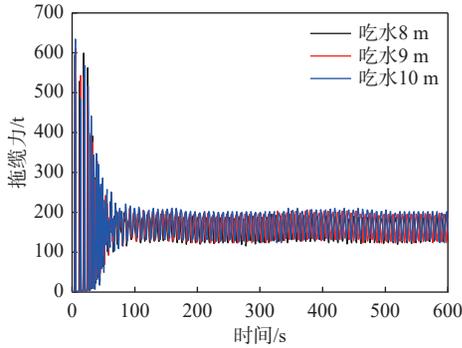
1) 吃水深度对拖航特性的影响。

吃水深度是三筒导管架基础拖航方式的重要参数之一。参考 5 级海况的环境条件和浮运方式,

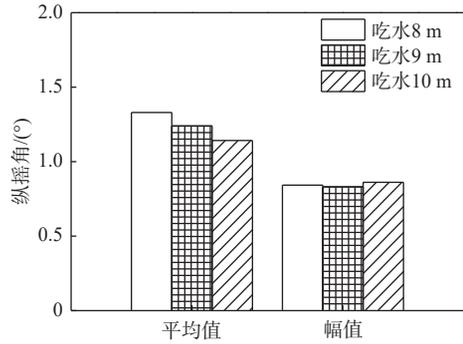
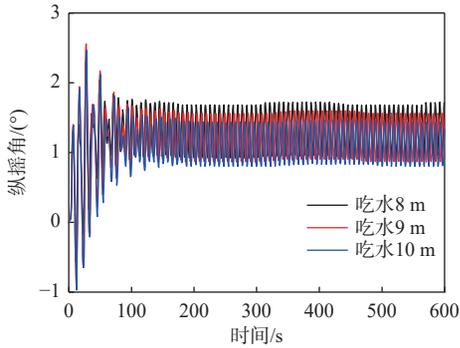
选取吃水 8, 9, 10 m 这三种工况进行计算, 结果如图 9 所示。为便于探究规律, 波浪条件选取规则波, 波浪高度取 2 m, 波浪周期选取 9 s, 波浪方向选取逆浪拖航(180°浪向), 拖航航速设为 6 kn。

从图 9 可以看出, 吃水深度 8, 9, 10 m 条件下, 对应的拖缆力平均值分别为 161, 167, 172 t,

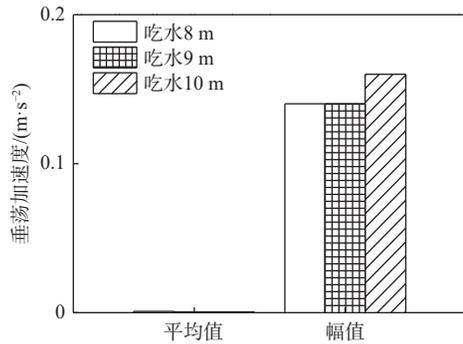
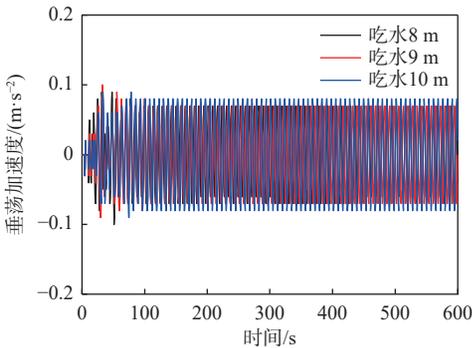
纵摇角平均值分别为 1.32°, 1.23°, 1.13°, 垂荡加速度平均值为 0, 1 号筒气压的平均值分别为 2.90, 2.85, 2.80 m, 即随着吃水深度的增加, 基础稳定拖航>时拖缆力、纵摇角、1 号筒气压的平均值均略有减小且呈线性变化趋势; 吃水深度 8, 9, 10 m 条件下, 对应的拖缆力幅值分别为 81, 83, 85 t, 纵摇



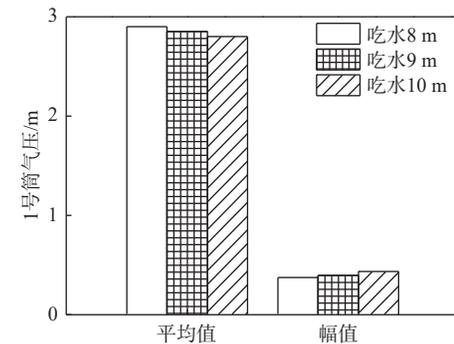
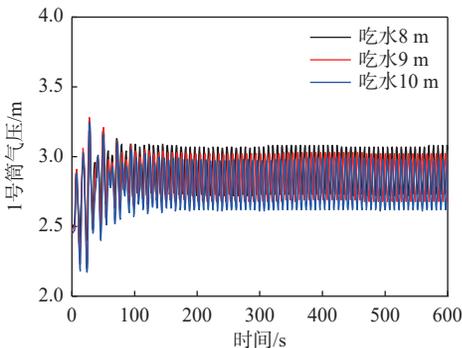
(a) 拖缆力以及统计值



(b) 纵摇角以及统计值



(c) 垂荡加速度以及统计值



(d) 1号筒气压以及统计值

图 9 吃水变化下的运动响应

Fig. 9 Dynamic responses under different drafts

角幅值分别为 $0.84^\circ, 0.83^\circ, 0.86^\circ$, 垂荡加速度幅值分别为 $0.14, 0.14, 0.16 \text{ m/s}^2$, 1 号筒气压幅值分别为 $0.37, 0.40, 0.43 \text{ m}$, 即随着吃水深度的增加, 基础稳定拖航时拖缆力、纵摇角、垂荡加速度和气压的幅值均呈线性变化但影响较小。

2) 拖航速度对拖航特性的影响。

拖航速度的改变将直接影响三筒导管架基础的湿拖运输, 参考 5 级海况的环境条件和浮运方式, 选取拖航速度为 4, 6, 8 kn 这 3 种工况进行计算, 结果如图 10 所示。为了便于探究规律, 波浪条件选取规则波, 波浪高度取 2 m, 波浪周期选取 9 s, 波浪方向选取逆浪拖航 (180° 浪向), 拖航方式则选择

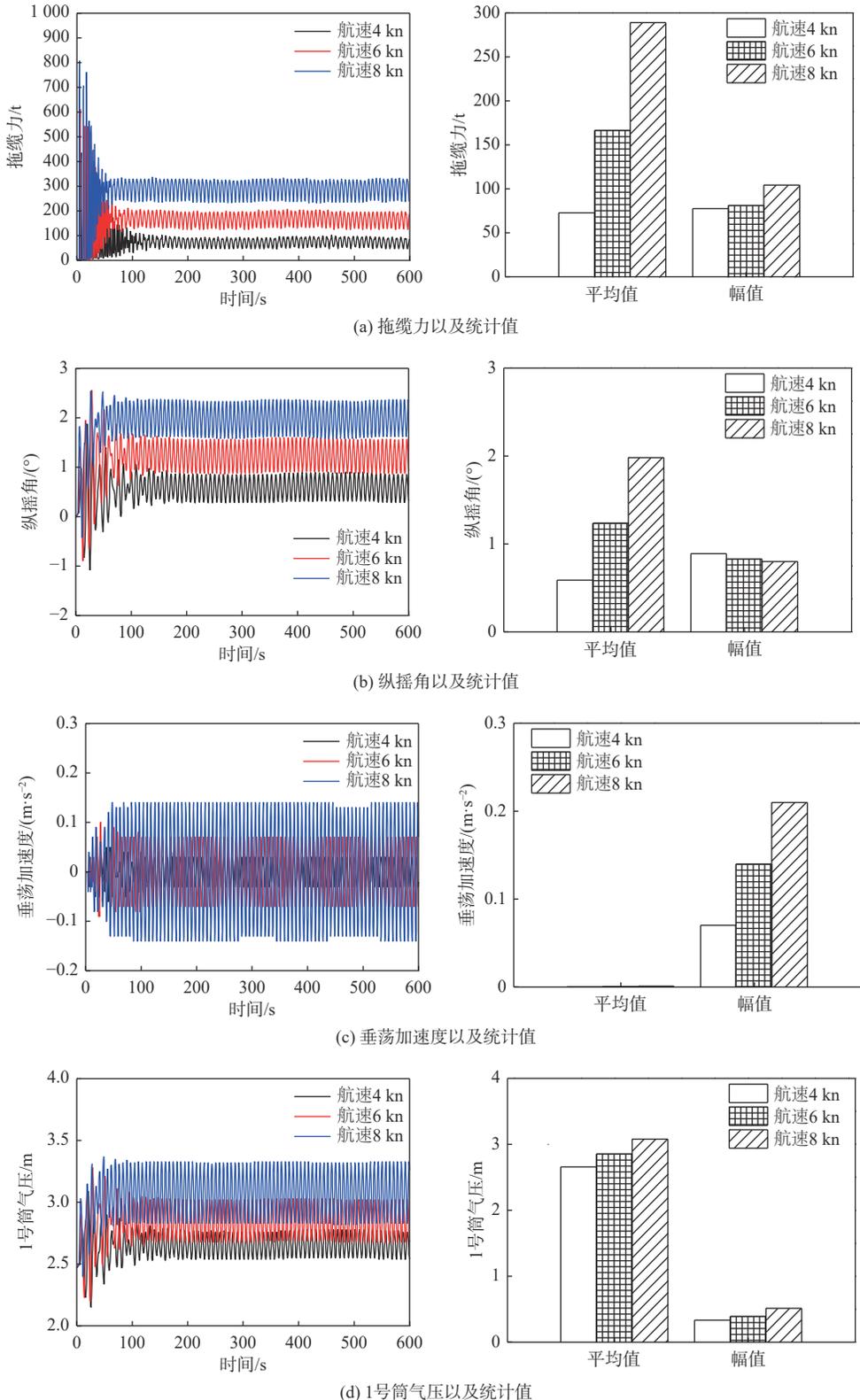


图 10 航速变化下的运动响应

Fig. 10 Dynamic responses under different towing speeds

吃水 9 m。

从图 10 可以看出, 航速 4, 6, 8 kn 条件下对应的拖缆力平均值分别为 73.4, 166.8, 289.0 t, 纵摇角平均值分别为 0.59°, 1.24°, 1.98°, 垂荡加速度平均值为 0, 1 号筒气压平均值分别为 2.65, 2.85, 3.05 m, 随着航速的增加, 基础稳定拖航时拖缆力、纵摇角、垂荡加速度和气压的平均值也明显增加, 其中拖缆力与航速的平方近似呈正比关系。此外, 由于纵摇角平均值的增加, 随着航速的增加, 将大幅加剧三筒导管架基础湿拖的埋艏现象。航速 4, 6, 8 kn 条件下对应的拖缆力幅值分别为 78, 82, 104 t, 纵摇角幅值分别为 0.89°, 0.83°, 0.8°, 垂荡加速度幅值分别为 0.08, 0.14, 0.28 m/s², 1 号筒气压幅值分别为 0.33, 0.39, 0.51 m。因此, 随着航速的增加, 基础稳定拖航时垂荡加速度和 1 号筒气压的幅值也将明显增加。需注意的是, 当增加航速时, 将明显加剧基础湿拖的垂荡运动, 进而对吸力筒内气压的稳定带来非常不利的影

4 结 论

为了研究海上风电场某三筒导管架基础的湿拖耦合动力响应特性, 本文利用海工分析软件 MOSES 建立了水动力模型, 通过对湿拖过程分别进行频域和时域分析, 获得了主要设计参数对湿拖过程的影响规律, 主要结论如下:

1) 通过对三筒导管架基础进行静稳性分析, 可以得出吃水深度 8, 9, 10 m 的正浮态均可满足完整稳性校核, 三筒导管架基础具有良好的静水稳性, 而消失角则是设计中应优先考虑的水力特性参数。

2) 通过对三筒导管架基础进行频域 RAO 响应分析, 得出三筒导管架基础的纵荡、纵摇的固有周期分别为 12 和 12.5 s, 而垂荡则无明显的固有周期; 基础的垂荡 RAO 响应在 6~12 s 周期波浪条件下的变化较大, 当波浪周期大于 13 s 时, 垂荡 RAO 响应将不再受波浪周期的影响。总体而言, 三筒导管架基础的 RAO 响应对吃水深度变化的敏感度较低。

3) 通过对三筒导管架基础进行实际海况的时域湿拖模拟分析, 可知其在安全性较差的 7 级海况条件下仍然可以实现稳定拖航, 说明了三筒导管架具有良好的湿拖稳性。

4) 通过对三筒导管架基础开展湿拖条件下的参数定量分析可知, 波浪高度将成倍数影响拖航过程中的拖缆力、三筒导管架基础的响应以及吸力筒气压的振幅; 波浪周期将影响三筒导管架

基础的响应幅值, 且与对应方向 RAO 的响应规律相吻合; 顺浪拖航条件比逆浪更危险, 故拖航时应采用逆浪拖航; 适当增加吃水将减小拖航中三筒导管架基础的运动响应; 过快的航速将导致明显的埋艏现象以及吸力筒内气压不稳定, 均将对拖航稳定性造成不利影响。

本文证明了三筒导管架具有良好的湿拖稳性, 但仅对三筒导管架基础的水力特性和湿拖运输过程进行了数值模拟研究, 后续将考虑进一步开展缩尺比例试验和现场试验的研究工作。

参考文献:

- [1] TIELTA T I. 关于负压桶形基础替代 Europipe 16/11-E 导管架钻井平台桩基的土工技术 [J]. 海岸工程, 1999, 18(1): 106-112.
TIELTA T I. Regarding the substitution of a negative pressure caisson foundation for the pile foundation of the Europipe 16/11-E drilling platform[J]. ZHANG T J, trans. Coastal Engineering, 1999, 18(1): 106-112 (in Chinese).
- [2] SHONBERG A, HARTE M, AGHAKOUCHAK A, et al. Suction bucket jackets for offshore wind turbines: applications from in situ observations[C]//Proceedings of the TC209 Workshop, TC 209-Foundation Design of Offshore Wind Structures, 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ICSMGE). Seoul: Norwegian Geotechnical Institute (NGI), 2017: 65-77.
- [3] XIAO Z, LIU Y, GE B R, et al. Bearing performance of offshore bucket foundation with internal cruciform skirt under combined loading[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2020, 38(10): 1209-1222.
- [4] OH K Y, NAM W, RYU M S, et al. A review of foundations of offshore wind energy convertors: current status and future perspectives[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 88: 16-36.
- [5] 别社安, 徐艳杰, 王光纶. 气浮结构的静稳性分析 [J]. *清华大学学报 (自然科学版)*, 2002, 42(2): 274-277.
BIE S A, XU Y J, WANG G L. Static stability analysis of air floated structures[J]. *Journal of Tsinghua University (Science & Technology)*, 2002, 42(2): 274-277 (in Chinese).
- [6] 别社安, 时钟民, 王翎羽. 气浮结构的小倾角浮稳性分析 [J]. *中国港湾建设*, 2001(1): 31-36.
BIE S A, SHI Z M, WANG L Y. Stability analysis of air float structures with small roll angle[J]. *China Harbour Engineering*, 2001(1): 31-36 (in Chinese).
- [7] 别社安, 徐艳杰, 王光纶. 气浮结构的浮态和运动特性分析与试验 [J]. *清华大学学报 (自然科学版)*, 2001, 41(11): 123-126.
BIE S A, XU Y J, WANG G L. Study on floating state and kinetic properties of the air floated structures[J]. *Journal of Tsinghua University (Science & Technology)*, 2001, 41(11): 123-126 (in Chinese).
- [8] 杨旭, 陈国龙, 范模, 等. 张力腿平台湿拖稳性及拖航阻

- 力分析[J]. *海洋工程装备与技术*, 2017, 4(5): 300–306.
- YANG X, CHEN G L, FAN M, et al. Stability analysis and wet-towing resistance of a tension leg platform[J]. *Ocean Engineering Equipment and Technology*, 2017, 4(5): 300–306 (in Chinese).
- [9] 胡杰, 潘小军, 廖华, 等. 不同结构形式浮式防波堤湿拖过程中的运动响应研究[J]. *船舶工程*, 2016, 38(12): 72–77.
- HU J, PAN X J, LIAO H, et al. Study on motion response of floating breakwater with different structure in wet towing process[J]. *Ship Engineering*, 2016, 38(12): 72–77 (in Chinese).
- [10] 丁红岩, 石建超, 张浦阳, 等. 气浮筒型基础结构横荡及纵摇水动力系数研究[J]. *水动力学研究与进展*, 2015, 30(5): 516–525.
- DING H Y, SHI J C, ZHANG P Y, et al. Study on swaying and pitching hydrodynamic coefficient of air-floating bucket foundation[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2015, 30(5): 516–525 (in Chinese).
- [11] 丁红岩, 石建超, 张浦阳, 等. 气浮筒型基础结构垂荡水动力系数研究[J]. *中国海洋大学学报*, 2015, 45(12): 113–118.
- DING H Y, SHI J C, ZHANG P Y, et al. Study on heaving hydrodynamic coefficient of air-floating bucket foundation[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2015, 45(12): 113–118 (in Chinese).
- [12] 丁红岩, 霍思逊, 张浦阳, 等. 气浮筒型基础结构规则波中运动响应[J]. *船海工程*, 2015, 44(2): 115–119.
- DING H Y, HUO S X, ZHANG P Y, et al. Motion response of air-floating bucket foundation in regular wave[J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2015, 44(2): 115–119 (in Chinese).
- [13] 丁红岩, 韩彦青, 张浦阳, 等. 气压对海上风电一步式运输安装船稳性的影响[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2017, 50(9): 915–920.
- DING H Y, HAN Y Q, ZHANG P Y, et al. Effects of air pressure on stability of integrated transportation and installation vessel for offshore wind turbine[J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2017, 50(9): 915–920 (in Chinese).
- [14] 丁红岩, 石建超, 张浦阳, 等. 风机运输船浮运过程耐波性分析[J]. *中国海洋大学学报*, 2016, 46(12): 104–110.
- DING H Y, SHI J C, ZHANG P Y, et al. Analysis of wind turbine transport ship seakeeping performance during towing[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2016, 46(12): 104–110 (in Chinese).
- [15] 丁红岩, 石建超, 张浦阳, 等. 风电机组浮态对风机运输船浮运的影响分析[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2016, 49(10): 1034–1040.
- DING H Y, SHI J C, ZHANG P Y, et al. Analysis of effect of floating state of wind turbine group on wind turbine transport ship[J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2016, 49(10): 1034–1040 (in Chinese).
- [16] ZHANG P Y, HAN Y Q, DING H Y, et al. Field experiments on wet tows of an integrated transportation and installation vessel with two bucket foundations for offshore wind turbines[J]. *Ocean Engineering*, 2015, 108: 769–777.
- [17] 刘鑫. 大型导管架平台浮托安装的运动预报与实测比较研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- LIU X. A comparative study on motion monitoring and numerical simulation for the floatover installation of the mega jacket platform[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014 (in Chinese).
- [18] 汪娟娟, 黄衍顺, 李怀亮, 等. 吊重作业起重船波浪中的运动响应[J]. *中国舰船研究*, 2013, 8(3): 50–57.
- WANG J J, HUANG Y S, LI H L, et al. Lifts' motion response in waves in the hoisting operation[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2013, 8(3): 50–57 (in Chinese).
- [19] 刘成义, 唐友刚, 李焱, 等. 浅水单点系泊FPSO软刚臂参数敏感性分析[J]. *中国舰船研究*, 2014, 9(5): 69–76.
- LIU C Y, TANG Y G, LI Y, et al. Sensitivity analysis of the soft yoke parameters of FPSO mooring in shallow water[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2014, 9(5): 69–76 (in Chinese).
- [20] 乐丛欢, 丁红岩, 张浦阳. 拖缆长度对筒基平台气浮拖航影响的试验研究[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2012, 33(7): 811–816, 822.
- LE C H, DING H Y, ZHANG P Y. Testing research on the influence of the towline length on air cushion towing of a bucket foundation platform[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2012, 33(7): 811–816, 822 (in Chinese).
- [21] 中国船级社. 海上拖航指南: GD 02—2012[S]. 北京: 中国船级社, 2012.
- China Classification Society. Guidelines for towage at sea: GD 02—2012[S]. Beijing: China Classification Society, 2012 (in Chinese).
- [22] 乐丛欢, 丁红岩, 董国海, 等. 纵倾角对筒基平台气浮拖航影响模型试验研究[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(6): 86–89.
- LE C H, DING H Y, DONG G H, et al. Model test and analysis of influence of trim angle on towing of platform with air cushion supported by bucket foundation[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2012, 40(6): 86–89 (in Chinese).
- [23] 冯尊涛. 基于海上风电一体化整机运输的多浮体动力耦合性态控制机理研究[D]. 天津: 天津大学, 2021.
- FENG Z T. Study on dynamic coupling behavior control mechanism of multiple floating bodies based on integrated transport of offshore wind turbines[D]. Tianjin: Tianjin University, 2021 (in Chinese).
- [24] 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.
- 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 (in Chinese).