

海上风力发电复合筒型基础拖航稳性研究

倪道俊, 肖瑶瑶

引用本文:

倪道俊, 肖瑶瑶. 海上风力发电复合筒型基础拖航稳性研究[J]. 南方能源建设, 2021, 8(4): 26-31.

NI Daojun, XIAO Yaoyao. Research on Towing Stability of Composite Bucket Foundation for Offshore Wind Power Generation[J]. *Southern Energy Construction*, 2021, 8(4): 26-31.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

桶型基础气浮拖航特性综述

Review of Air-floating Towing Characteristics of Bucket Foundation

南方能源建设. 2020, 7(2): 81-90 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.02.013>

破碎波作用下单桩式海上风机水动力学数值分析

Numerical Analysis of Hydrodynamic Characteristics of Monopile-type OWT Under Breaking Wave

南方能源建设. 2020, 7(3): 70-80 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.03.009>

海上风电场施工安装风险管理研究

Construction and Installation Risk Management of Offshore Wind Farm

南方能源建设. 2016, 3(z1): 190-193 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.S1.043>

海上风电场升压站风险分析与管控研究

Research on the Risk Analysis and Control of the Offshore Substation

南方能源建设. 2018, 5(z1): 228-231 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.S1.041>

适合与风力发电结合的波浪能及海流能共同发电型式探讨

Research on Common Generation Type of Wave Energy and Ocean Current Energy in Conjunction with Wind Power Generation

南方能源建设. 2018, 5(2): 60-64 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.02.007>

海上风力发电复合筒型基础拖航稳性研究

倪道俊[✉], 肖瑶瑶

(三峡新能源阳江发电有限公司, 广东 阳江 529599)

摘要: [目的] 海上风力发电复合筒型基础作为一步式运输安装技术的基础, 已经广泛用于海上风电的发展。文章主要研究内容为保证复合筒型基础在施工过程中的稳定性。[方法] 通过一步式运输安装船运输现场实验, 对江苏响水25#风电整机施工过程中塔筒、叶片吊装以及拖航过程进行实时监测。[结果] 结果显示, 塔筒、叶片吊装过程中复合筒型基础倾角较小; 拖航过程中船筒间相互作用力、横纵摇角以及筒内液封高度均满足要求。[结论] 表明塔筒、叶片吊装过程中, 复合筒型基础具有良好的稳定性; 拖航过程中, 运输船与复合筒型基础紧密贴合, 能保证运输过程中整体结构的稳定; 并且复合筒型基础在拖航过程中能够提供稳定的浮力。

关键词: 海上风力发电; 复合筒型基础; 一步式运输安装; 稳定性

中图分类号: TK89; TU476.1

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2021)04-0026-06

开放科学(资源服务)二维码:



Research on Towing Stability of Composite Bucket Foundation for Offshore Wind Power Generation

NI Daojun[✉], XIAO Yaoyao

(Three Gorges New Energy Yangjiang Power Generation Co., Ltd., Yangjiang 529599, Guangdong, China)

Abstract: [Introduction] As the foundation of one-step transportation and installation technology, composite bucket foundation of offshore wind power generation has been widely used in the development of offshore wind power. The main research content of this paper is to ensure the stability of composite bucket foundation during the construction. [Method] Through the transport field experiment of one-step transport installation ship, the real-time monitoring of tower drum and blade lifting and towing process during the construction of Xiangshui 25# wind turbine in Jiangsu was carried out. [Result] The results show that the dip angle of composite bucket foundation was smaller in the process of tower drum and blade lifting; during towing, the interaction force between drums, the roll angle and the height of liquid seal in tubes all met the requirements. [Conclusion] The results show that the composite bucket foundation had good stability during the tower drum and blade lifting process. In the towing process, the transport ship was closely fitted with the composite bucket foundation, which can ensure the stability of the whole structure in the transportation process. Moreover, the composite bucket foundation can provide stable buoyancy in the process of towing.

Key words: offshore wind power generation; composite bucket foundation; one-step transportation and installation; stability

2095-8676 © 2021 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

海上风电机组制造技术日渐成熟, 制造成本和安装水深成为人们考虑的两个重要因素^[1-2]。风电机组基础建造和安装的费用在总造价中占很大的比重, 并且随着工作水域水深的增加, 海上风电基础结构的制造和安装也面临着很大的困难, 这同样会

增加基础结构的造价^[3-5]。大尺度复合筒型基础可以实现高效益、低成本的建造理念, 包含设计、运输及安装等一系列完整的技术方案。复合筒型基础为宽浅式设计, 顶板上接弧形过渡段^[6-7], 如图1。该基础通过拖船进行拖航浮运, 在安装及拖航过程

收稿日期: 2021-10-18 修回日期: 2021-10-25

项目基金: 三峡新能源公司科技项目“海上风电复合筒形基础与规范研究科研项目”(201215913, 三峡新能源合字[2013]38号)

中, 为保证施工的安全可靠性, 必须对复合筒型基础在安装以及拖航过程中的稳性进行检测研究。



图1 复合筒型基础

Fig. 1 Composite bucket foundation

THIAGARAJAN 通过模型试验与理论分析的方式对气浮结构在浅水中的运动响应做了对比, 得出实验趋势与理论值相吻合, 气垫的存在增加了浮体的纵摇响应, 但是对垂荡响应影响很小的结论^[8]; LEE 研究了带有气垫的大型浮运结构的动力响应, 导出了刚体运动和广义模态的运动方程^[9]; 别社安建立了分析气浮结构静稳性的理论方法, 对气浮结构的小倾角稳性进行了分析^[10]; 刘宪庆通过对气浮结构的不同状态进行受力分析, 提出了单个气浮结构进行分舱会增加浮稳性的作用机理^[1]; 闵巧玲通过对复合筒型基础拖航浮稳性的研究, 得出复合筒型基础的纵摇固有周期、压载会随着基础吃水深度的增加而变大的结论^[6]。

综上所述, 复合筒型基础在安装及拖航过程中的稳性至关重要。因此, 对江苏响水风电场 25#机位复合筒型基础的安装与运输进行了检测。25#机位复合筒型基础与安装船绑扎连接后, 在码头采用 650 t 履带吊依次吊装三节塔筒, 于 2017 年 6 月 8 日上午 9 时启程离岸, 经海上浮运至设计机位, 于 2017 年 6 月 12 日晚间 8 点 30 分开始沉放作业。整个拖航过程持续约 108 h。在这一过程中, 对风机塔筒吊装时复合筒型基础倾角进行检测, 对拖航过程中船筒间相互作用力、安装船倾角、复合筒型基础筒内液面进行监测。

1 实验设备

1.1 一体化运输安装船介绍

复合筒型基础通过一体化运输安装船进行运输。风电机组可在一体化运输安装船上进行吊装以及测试, 该船船头、船尾呈凹型, 便于安装复合筒

型基础, 船体中间则是桁架结构, 保持安装风机塔筒运输过程中的稳定性, 如图 2。整体结构参数见表 1。



图2 一步式运输安装船

Fig. 2 One-step transport installation ship

表1 整体结构参数表

Tab. 1 Overall structural parameters

参数	数值	参数	数值
船体长度/m	103	筒径/m	30
船体宽度/m	51	筒高/m	12
船体深度/m	9	过渡段高度/m	20
设计吃水/m	6	塔筒高度/m	78.5
船体吨位/t	16 900	塔筒重量/t	207.0
上槽直径/m	25	总重量/t	2 700.0
下槽直径/m	37	横摇固有周期/s	8.5
桁架高度/m	62	纵摇固有周期/s	11.0
—	—	垂荡固有周期/s	6.7

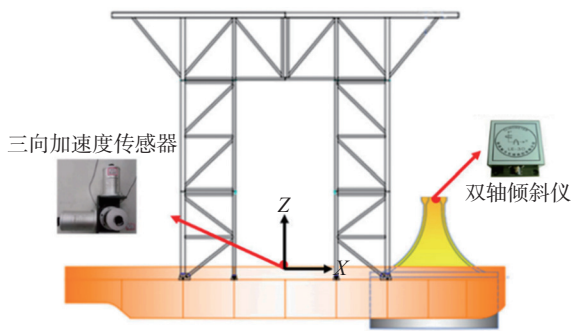
1.2 传感器安装

在塔筒顶端安装一个三向加速度传感器, 以检测叶片吊装时基础的倾角; 在复合筒型基础的上翼缘安装一个双轴倾斜仪, 以监测结构运输过程中的横摇和纵摇角度; 在七个舱室的顶部、船筒之间分别安装压力传感器, 用来检测内部空气压力以及船筒间相互作用力; 在拖航过程中, 运输船中心安装加速度传感器, 筒内安装雷达液位计, 分别用来测拖航过程中船体的运动特性以及筒内液面高度。传感器具体安装布置方式见图 3。

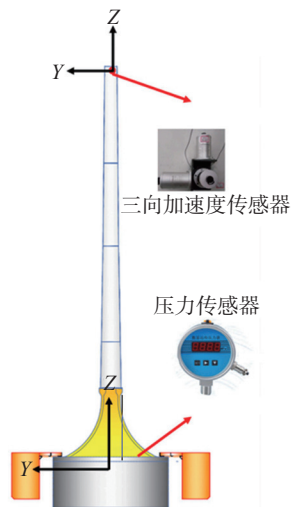
2 结果及分析

2.1 塔筒吊装过程中复合筒型基础的运动特性研究

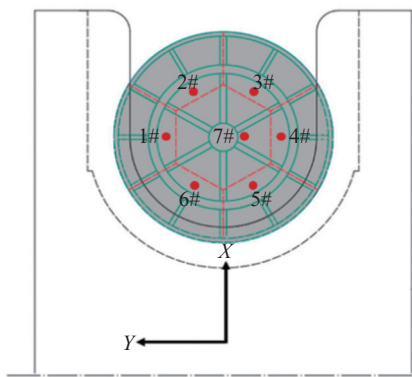
风电整机塔筒的吊装是风电整机施工的重要环节之一, 也是风电整机浮运之前的最后一个环节, 风电整机吊装的稳定程度决定后续拖航过程中整机



(a) 运输船和复合筒型基础侧视图



(b) 运输船和复合筒型基础侧视图正视图



(c) 运输船和复合筒型基础侧视图俯视图

图 3 传感器布置形式

Fig. 3 Sensor layout

的稳定性、拖航是否能顺利进行，所以要对吊装过程中复合筒型基础的稳性进行监测。

塔筒吊装施工在码头进行，采用 650 t 履带吊依此吊装三节塔筒以及叶片，吊装期间，对复合筒型基础的倾角进行检测。监测结果如图 4。

从图中可以看出，风机塔筒及叶片吊装时，复合筒型基础呈现不规则摇摆，其中第二节塔筒吊装时复合筒型基础摇摆幅度最大，最大倾角达到了 0.03° ，而叶片吊装时复合筒型基础摇摆幅度最小，最大值也仅为 0.012° 。可见吊装的部件越大越重，复合筒型基础摇摆幅度也就越大。而三节塔筒与叶片吊装期间，复合筒型基础倾角始终小于 0.04° ，因此可以说明复合筒型基础在吊装过程中具有较好的稳定性。

2.2 拖航过程中船筒间相互作用力研究

拖航过程是风电整机浮运的核心过程，在期间会遇到不同程度的波浪力等外荷载，从而影响运输船、复合筒型基础的稳定性，要保证风电整机的一体化运输，确保拖航过程中运输船，筒型基础紧密贴合不分离，运输船和筒型基础之间必须保持一定的作用力。船筒间相互作用是保证一体化运输的重要指标。

25# 复合筒型基础拖航时，根据拖航经验，采取 500 t 船筒间作用力作为控制标准。监测结果如图 5。

由图 5 可以看出，在拖航过程中，船筒之间的作用力随着波浪的变化而变化。整个的时间历程中，船筒之间仍有 490 t 以上的结合力，说明船筒之间结合得足够紧密，且船筒间作用力波动不超过 30 t，说明两者之间的接触稳定。

综上，复合筒型基础一步式安装法能够满足拖航过程中船筒不脱开的要求，保证了一体化运输的稳定性。

2.3 拖航过程中船体运动特性研究

拖航过程中，风电整机的浮运特性也是研究的重点。不仅要保证复合筒型基础拖航过程中的稳定性，也要确保拖航期间运输船也具有相应的运动特性，上一节的分析可以看出，在拖航过程中，复合筒型基础与安装船之间始终保持 500 t 左右的相互作用力，因此可认为船筒运动同步。

为了避免现场施工工况复杂的现象，通过控制航速，在不同时间测得不同风速，选取了三种不同工况，见表 2。利用倾角仪对安装船倾角进行检测。监测结果见图 6。

从图 6 中可以看出，在拖航过程中，安装船横、纵摇角度随着波浪周期振荡，工况一下横摇角

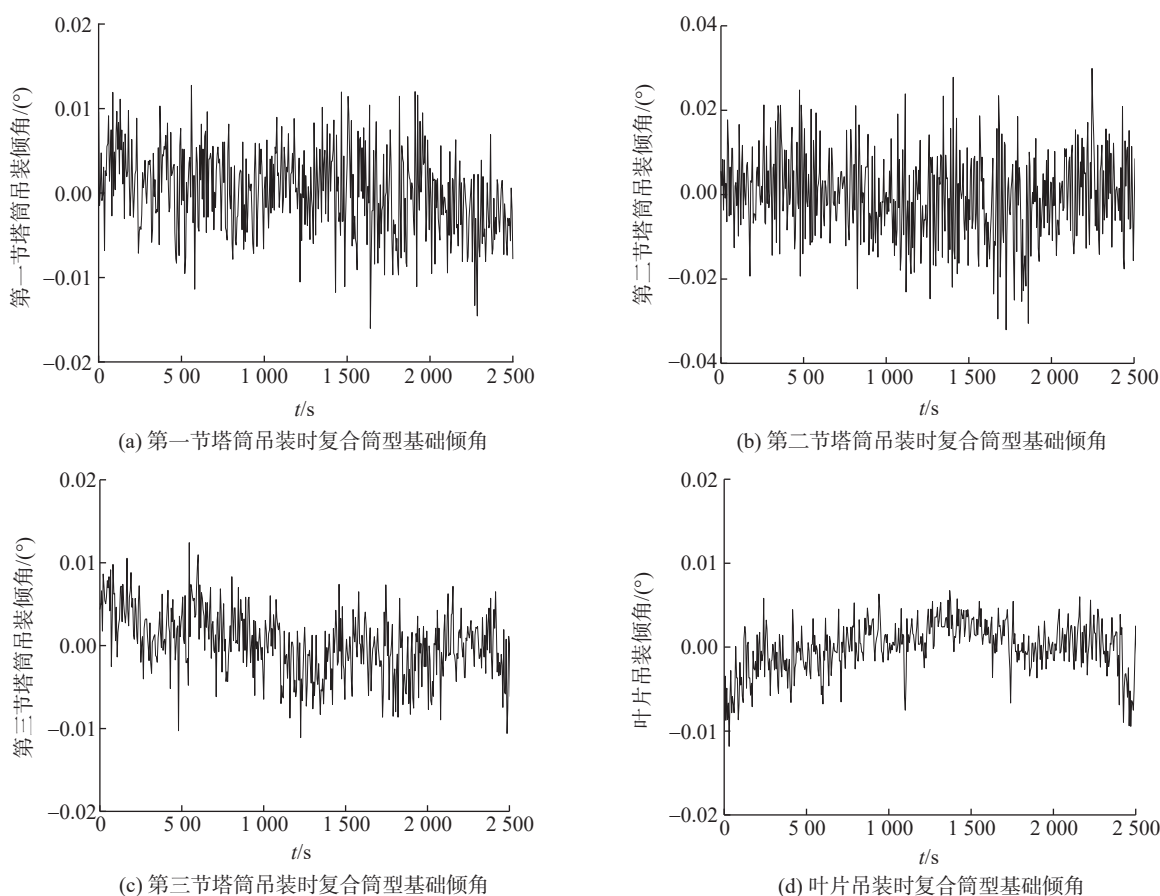


图 4 三节塔筒及叶片吊装时复合筒型基础倾角

Fig. 4 Inclination angle of composite cylinder foundation when lifting three tower cylinders and blades

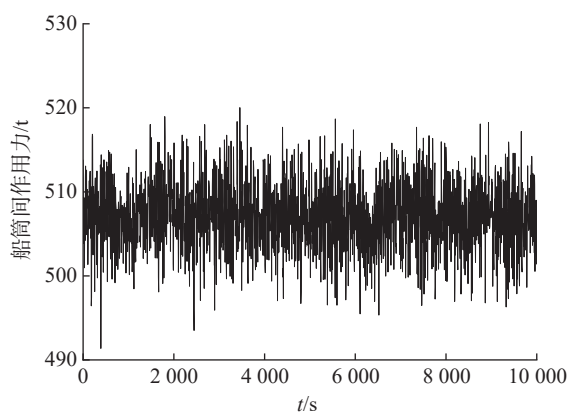


图 5 拖航过程中船筒间作用力

Fig. 5 Interbarrel force during towing

表 2 设计工况表

Tab. 2 Design condition table

工况	风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	航速/节
工况一	6.1	3.4
工况二	9.7	0.7
工况三	1.5	4.5

最大幅值为 0.144° , 纵摇角最大幅值为 0.094° ; 工况二下横摇角最大幅值为 0.161° , 纵摇角最大幅值为 0.248° ; 工况三下横摇角最大幅值为 0.2° , 纵摇角最大幅值为 0.48° 。风速和航速对安装船的横摇角度影响均不明显, 而对纵摇角影响明显, 其中, 工况三相比工况一, 风速减小到工况一的 $1/4$, 航速仅增大了 32.3% , 而安装船的纵摇角最大幅值增大了 410.6% , 可以推断航速的增大对船纵摇角的增大起着明显作用。三种工况相比而言, 工况一的运输过程最为稳定, 即适中的风速和适中的航速条件为理想拖航环境, 风速、航速单一因素的增加均会导致运输过程稳性很大程度降低。安装船在三种工况下的摇摆角度始终不大于 0.5° , 而由于船筒运动同步, 复合筒型基础也与安装船有着相同的倾角, 说明复合筒型基础及安装船在拖航过程中具有较好的稳定性。

2.4 拖航过程中筒型基础内液位研究

复合筒型基础是一种气浮结构, 具有自浮稳性

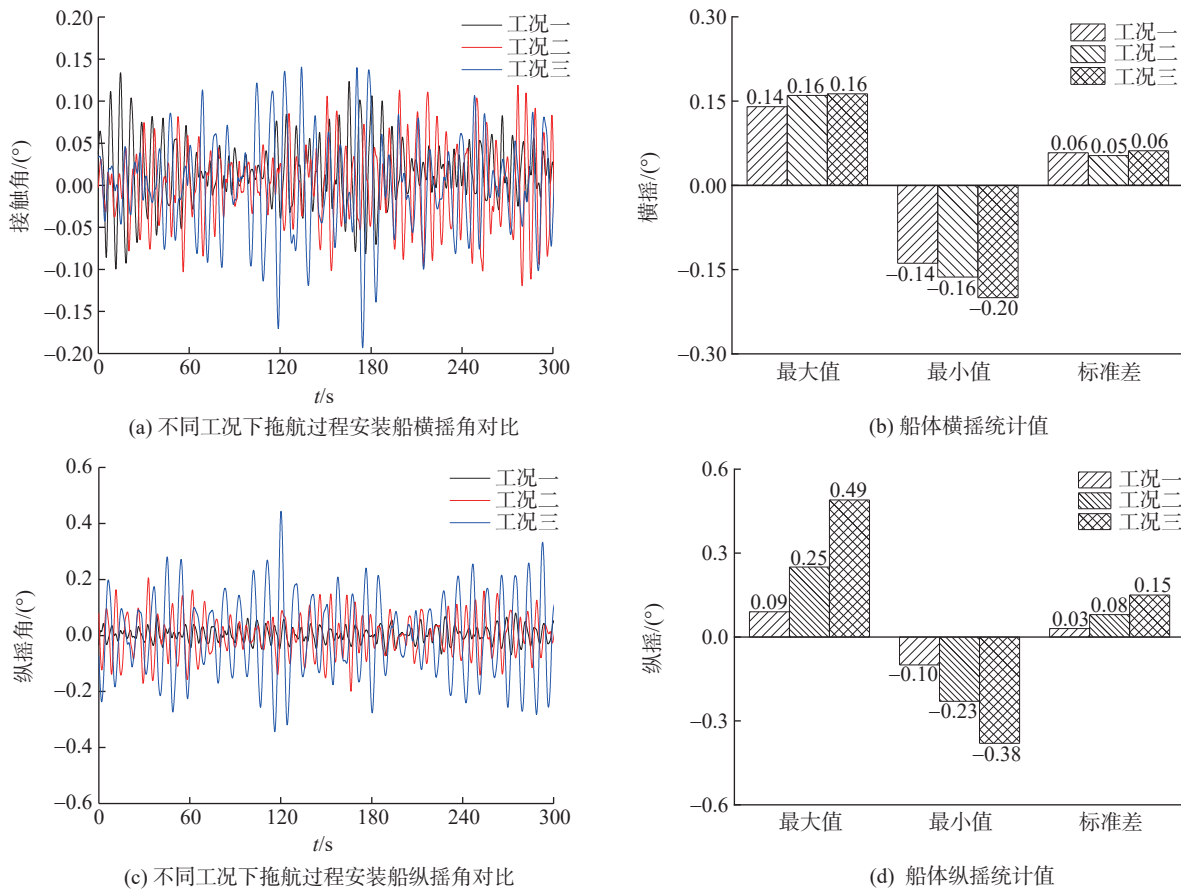


图 6 船体运动特性监测数据

Fig. 6 Monitoring data of ship motion characteristics

的优点,在拖航过程中,筒内的液面是不断变化的。除了保证船筒的一体化运输和船筒的稳定性以外,要保证复合筒型基础提供比较稳定的浮力,这就必须保证复合筒型基础内部具有一定的液封高度。因此,对复合筒型基础的筒内液封高度的监测也至关重要。监测结果如图 7。

由图 7 可以看出,复合筒型基础在拖航过程中,筒内各个舱的液封高度不同,但是均随着波浪在原始液封高度附近呈现周期性变化,筒内液封高度始终大于 250 cm,能够保证筒内气体不逸出。且筒内液面波动始终在 10~20 cm 以内,能够提供比较稳定的浮力,说明复合筒型基础在拖航过程中具有较好的稳定性。

3 结论

通过对塔筒吊装以及拖航过程中结构倾角、动力特性以及筒内液面高度监测结果的分析,得出以下结论:

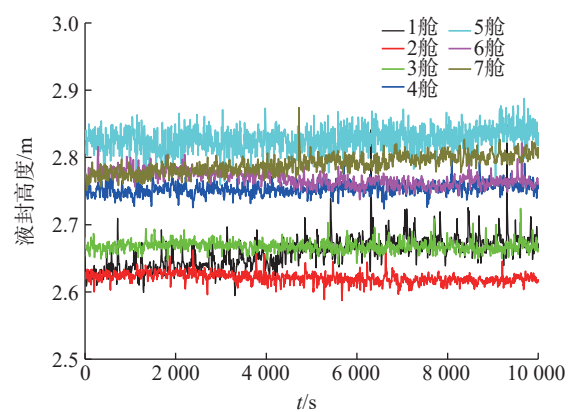


图 7 筒型基础拖航过程筒内液封高度

Fig. 7 Liquid seal height in cylinder during tugging process of cylinder foundation

1) 塔筒、叶片吊装过程中,复合筒型基础最大倾角小于 0.04° ,可以保证吊装过程中的稳定性。

2) 拖航过程中,船筒间作用力在初始作用力 500 t 左右摆动,且波动不大,船筒紧密贴合,而且船体横纵摇角度在三种不同工况下也能保证较好的

稳定性,可以保证拖航过程中船体及复合筒型基础的整体稳定。

3) 拖航过程中,复合筒型基础7个舱室内液面均大于250 cm,且波动不大,可以保证在整个拖航过程中提供稳定的浮力。

综上所述,复合筒型基础在吊装塔筒、叶片以及通过一体化运输安装船拖航工程中始终保持一个稳定的形态,这就为之后复合筒型基础的设计、施工提供了可靠性分析,同时,在同类型浮体的施工安装中也具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 闵巧玲. 复合筒型基础稳性及拖航运动特性分析 [D]. 天津: 天津大学, 2018.
MIN Q L. Analysis of stability and towing motion characteristics of composite cylinder foundation [D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [2] LIU X Q, ZHANG P Y, ZHAO M J, et al. Air-floating characteristics of large-diameter multi-bucket foundation for offshore wind turbines [J]. *Energies*, 2019, 12(21): 4108.
- [3] DING H Y, LIU Y G, ZHANG P Y, et al. Model tests on the bearing capacity of wide-shallow composite bucket foundations for offshore wind turbines in clay [J]. *Ocean Engineering*, 2015, 103(7): 114-122.
- [4] 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(11): 769-777.
- [5] ZHANG P Y, DING H Y, LE C H. Hydrodynamic motion of a large prestressed concrete bucket foundation for offshore wind turbines [J]. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2013, 5(6): 063126.
- [6] 刘宪庆. 气浮筒型基础拖航稳性和动力响应研究 [D]. 天津: 天津大学, 2012.
LIU X Q. Study on stability and dynamic response of air buoy foundation towing [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [7] 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. Journal of Tianjin University (Natural Science and Engineering), 2017, 50 (9) 915-920.
- [8] THIAGARAJAN K P, MORRIS-THOMAS M T, SPARGO A. Heave and pitch response of an offshore platform with air cushion support in shallow water [C]//Anon. *Asme International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, British Columbia, June 20-25, 2004. Canada: [s. n.], 2004: 817-823.
- [9] LEE C H, NEWMAN J N. Wave effects on large floating structures with air cushions [J]. *Marine Structures*, 2000, 13(4): 315-330.
- [10] 别社安, 时钟民, 王翎羽, 气浮结构的静浮态分析 [J]. 中国港湾建设, 2000(6): 18-23.
BIE S A, SHI Z M, WANG L Y. Static floating state analysis of air-floating structure [J]. *China Harbour Construction*, 2000 (6): 18-23.

作者简介:



倪道俊

倪道俊(通信作者)

1984-, 男, 江苏高邮人, 学士, 测控技术与仪器专业, 工程师, 主要从事海上风电项目建设管理工作。先后负责国内首台复合筒海上风机基础科研实施、首台吸力筒导管架风机基础工程实施、首台单柱复合筒风机基础项目实施, 正在负责建设管理的三峡阳江海上风电项目是目前国内装机容量最大的海上风电场 (e-mail) 95699321@qq.com。

肖瑶瑶

1991-, 男, 河南焦作人, 硕士, 水利工程专业, 助理工程师, 主要从事海上风电项目建设管理工作 (e-mail) 308456416@qq.com。

(责任编辑 李辉)

《南方能源建设》荣获“第七届广东省优秀科技期刊”

2021年广东省科学技术期刊编辑学会学术年会于2021年12月2日至4日在广东省恩平市顺利召开, 本次年会的主题为“引领创新·推动一流科技期刊建设”。会上公布了广东省科学技术期刊编辑学会2021年开展的“第七届广东省科技期刊评优”

结果。本次期刊评比设“广东省精品科技期刊”、“广东省优秀科技期刊”和“广东省科技期刊优秀编校质量奖”3项, 《南方能源建设》荣获“第七届广东省优秀科技期刊”荣誉称号。

(《南方能源建设》编辑部)