

桶型基础气浮拖航特性综述

刘博[✉], 裴爱国

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: [目的] 桶型基础是一种新兴的环境友好型海上风电基础结构, 具有建造简单、施工高效、综合成本低等特点, 逐渐受到了国内外海上风电工程界的关注和认可。桶型基础底部开口, 可通过内部气垫的压缩产生的气压力排开水体, 形成桶内外水压差来提供上浮力, 这种自浮特性是桶型基础能够进行气浮拖航的前提。[方法] 总结了国内外气垫结构的浮运特性, 对比论述了应用于不同领域的气浮结构的相关理论、试验方法和研究结果。[结果] 综述分析了气垫、分舱形式、谐振晃荡等对结构动力响应的影响规律。[结论] 气浮拖航特性分析对桶型基础的推广应用具有重要的现实和理论意义。

关键词: 桶型基础; 气浮拖航; 气垫; 动力响应

中图分类号: TK89; TM614

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2020)02-0081-10

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Review of Air-floating Towing Characteristics of Bucket Foundation

LIU Bo[✉], PEI Aiguo

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: [Introduction] The bucket foundation is a kind of emerging environment-friendly offshore wind turbine foundation, with the characteristic of simple construction, high construction efficiency and low comprehensive cost. It has been gradually received attention and recognition from the offshore wind power engineering community. The bottom is an open structure, which can displace an amount of water by the air pressure generated by the compression of the internal air cushion, and form a buoyancy force by forming a water pressure difference between the inside and the outside of the bucket. This self-floating property is a prerequisite for the bucket foundation to perform air-floating towing. [Method] This paper summarized the floating characteristics of air cushion structures at home and abroad, and discussed the related theories, test methods and research results of air flotation structures applied in different fields. [Result] The influence law of air cushion, subdivision form and resonance sloshing on structural dynamic response is analyzed in depth. [Conclusion] The summary analysis of the air-floating towing characteristics of this paper has important practical and theoretical significance for the promotion and application of the bucket foundation.

Key words: bucket foundation; air-floating towing; air cushion; dynamic response

0 引言

我国是当今世界第二大能源生产国和第二大能源消费国, 能源需求持续增长, 能源资源和环境问题日益突出。风能资源, 尤其是海上风能资源是能源体系的重要组成部分, 具有资源分布广、开发潜力大、环境影响小、可循环使用的特点, 是有利于

人与自然和谐发展的能源资源, 具有广阔的应用开发潜力。我国沿海地区经济发达, 而所需的能源较大, 现有的能源不能匹配经济发展的需要, 而海上风能资源却集中在东南沿海, 开发潜力巨大, 50 m高度、25 m水深以下开发潜力约为200 GW, 70 m高度、50 m水深以下开发潜力约为20 GW, 考虑到我国这样的能源分布和经济发展现状, 将海上风电作为我国后续能源战略的重要组成部分, 具有十分重要的意义。与陆上风电施工建造相比, 海上风电场建造过程中要面临更为复杂的海上环境, 大大增

收稿日期: 2019-11-07 修回日期: 2020-01-21

基金项目: 中国能建广东院科技项目“海上风电吸力桶基础受力机理与变形控制关键技术研究”(EV04631W)

加了海上风电场开发的成本。而其中风电场的基础结构建造及施工所需的费用更是占到了整个风电场开发的30%。近几年桶型基础作为新型的海上风电基础型式,以其建造简单、施工高效、综合成本低等特点,受到了越来越多人的关注。

事实上,桶型基础(Bucket Foundation, Suction Anchor, Suction Caisson)作为一种锚泊和基础型式在海洋及港口工程中具有很大的应用价值,例如:(1)海上结构系泊系统,如单点系泊、船系泊、牵引平台的牵拉、管线的固定与牵引;(2)负压锚;(3)混合单桩基础^[1];(4)防波堤;(5)平台基础,如张力腿平台、导管架平台的基础;(6)海上风电基础。国外学者的研究成果表明吸力式桶型基础在海上风电领域的应用前景广阔,适用于砂性土或软粘土海域。桶型基础样机第一次应用于实际工程中是在2002年,在丹麦的Frederikshavn场地,装机额定功率为3 MW,桶裙高6 m,桶型基础直径12 m;2005年,德国设计了5 MW的海上风机基础,它是重力式与桶裙相结合的基础型式,顶盖分隔舱可以压载,结构底部带有桶裙,可以负压下沉;2009年,桶型基础成功应用于丹麦Homs Rev2风电场的测风塔项目;2010年,首台2.5 MW的复合桶型基础样机在江苏启东完成安装下沉和风电机组的吊装安装,并完成并网发电;2014年,英国Dogger Bank风电场安装了桶型基础测风塔;同年,德国BorkumRiffgrund1海上风电场采用了4 MW风机,底部结构为三桶基础;2016年,英国Dudgeon风电场安装了两台多桶桶型基础,一台单桶直径6 m,桶高6 m,另一台单桶直径4 m,桶高6 m;2018年英国Abderdeen Bay风电场成功安装两台三桶基础,桶径9.5~10.5 m,桶高9~13 m,水深19~32 m;2019年在三峡大丰风电场完成了11台3.3 MW和2台6.45 MW海上风机复合桶型基础的安装作业,采用了一步式运输安装两台桶型基础整机的施工方式,实现了两天完成两台风机的安装效率。

在桶型基础的运输安装过程中,海上浮运和下沉沉放是整个运输安装过程中最重要的两个过程。运输安装过程中的安全可靠性的保证是该项技术成功与否的关键,这两个过程都涉及桶型基础与风、波浪、海流等环境条件的相互作用,其安全性包含了稳定性、耐波性和操纵性三方面。为了桶型

基础及其运输安装技术的应用与推广,对桶型基础的气浮机理及其与各种环境条件的作用的研究有着十分重大的理论与实际意义。

1 国内外研究现状

桶型基础结构可以自浮拖航主要是由于其特殊的结构设计,其底部开口的桶型结构通过内部气垫(Aircushion)的压缩产生的气压力排开水体形成桶内外水压差提供上浮力。桶内气压力(相对值)等于桶壁内外液面压力差,作用于桶内部各个方向:作用于桶壁四周,与外部水压力合力为0;作用于内液面,使内液面低于外液面;作用于桶顶盖,将桶顶起。对于普通实浮体,质量、重心和排水体结构形状,均影响浮稳性。而气浮体是在水体弹簧上又增加了气体介质,影响结构浮运稳性的因素增多。气垫最早的应用与结构下面气垫的存在可以减小摩擦有关,例如基于气垫技术的相对小、快的水上海洋运输工具气垫船ACV(Air Cushion Vessel)和SES(Surface Effect Ships)的开发。在海洋工程结构中,气垫的应用最早源于提升结构以便使其可以在浅水区域拖航。当气垫支撑浮式结构(如图1)拖航发生在长周期涌浪的浅航道或开放海域时,气垫很大程度上影响着结构的动力响应。

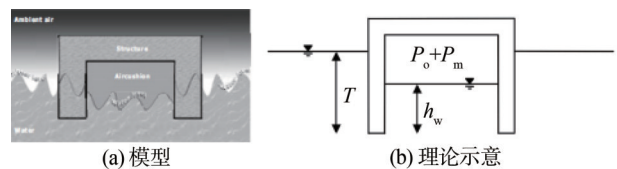


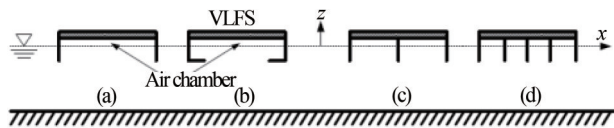
图1 气垫支撑浮式结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of floating structure supported by air cushion

20世纪80年代,人们开始了对气浮结构的研究。Seidl^[2]提出了几种气浮结构的概念设计并且通过模型试验进行了检验,包括通过单一大气垫舱支撑和多个不相连小气垫舱支撑的结构。引入了气囊系数描述平台结构气舱内压缩空气效应,并建立了气囊系数和内部吃水以及几何尺寸的函数关系。近些年,随着超大型浮式结构VLFS(Very Large Floating Structure)和可移动海洋基地MOB(Mobile Offshore Base)成为海洋工程研究的热点,气垫对于结构响应的有利影响成为大型浮式结构设计的参考因素。由于气垫的存在可有效改善结构的水

动力特性, 其他海洋工程浮式结构, 如浮式防波堤结构 (Floating Breakwater)、浮式石油生产平台结构 (Floating Oil Production System), 波浪发电装置 (Wave Energy Absorption Device) 等也引入了气垫舱室 (Aircushion/Pneumatic Chamber), 大大丰富了气垫支撑结构的应用范围和研究领域。

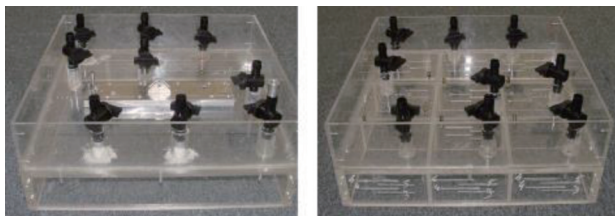
超大型浮式结构 VLFS (如图 2 和图 3) 应用方面, Pinkster^[3-5]、Van Kessel^[6] 和 Ikoma^[7-14] 等研究表明, 对比相同尺寸大小实浮体结构, 气浮结构可以明显减少波浪引起的弯矩和结构荷载。由于气垫的存在, 尤其对于低频入射波, 波浪激振力和弯矩显著减少。然而, 由于结构引入气垫, 气垫/水塞界面运动存在两个谐振源: 水中驻波和气室内声音驻波引起的激荡, 整个结构可能会遭遇谐振晃动 (Sloshing) 等问题。Pinkster 等^[3-5] 采用三维绕射理论计算和模型试验, 对规则波、不规则波中的超大型浮式结构模型进行了逆浪试验。研究发现结构尺寸远大于水波波长时, 激荡可被认为是谱干涉的几个相邻周期波浪作用。对于垂荡, 水静力和空气静力恢复刚度在数量级上是可比较的。而垂荡频率远大于纵摇频率, 水静力恢复刚度占主导。



注: (a)Pinkster 等^[3]; (b)Pinkster & Scholte^[5]; (c)Van Kessel^[6]; (d)Ikoma 等^[7,14]。

图 2 VLFS 气浮支撑结构

Fig. 2 VLFS structure



(a) 方形单仓 (b) 多仓

图 3 VLFS 气浮结构试验模型

Fig. 3 VLFS air flotation structure test model (square single room and multi-room)

Chenu 等^[15] 证实了气垫结构需要采用新的稳性评估方法。Thiagarajan 等^[16] 通过提出一个简化线性波浪理论, 计算并评估了规则波环境下气垫结构的垂荡和纵摇响应和在某种波浪条件下气浮基础

能够安全拖航等问题。Van Kessel^[6] 和 Ikoma 等^[7, 14] 研究发现了分舱气浮结构可以有效减少结构动力响应和结构所受到的弯矩值, 并建议对大型单舱气浮结构进行多舱结构划分来增加静水动力稳定性和减少晃动现象。Ikoma 等^[7, 11] 进一步研究了迎浪条件下不同分舱形式减少大型气浮结构动力响应等问题, 相关的理论及实验结果表明结构响应减少的效果与分舱的大小有着密切关系。

在其他气浮结构的应用方面, Fajinmi 等^[17] 提出了使用气垫舱室来调节浮式石油生产结构吃水的可行性设计 (如图 4), 通过调节气垫柱的高度来补偿结构加载/卸载的吃水高度。研究表明此种结构通过增加谐振阻尼可以有效减少结构响应, 特别是横摇和垂荡响应。此种浮体结构稳性高度 (Metacentric Height) 较低, 通过开关气舱上部的气阀调节气柱即可改变横摇刚度, 进而引起结构在横向稳定性上的显著变化。这种特性不用改变结构本身, 即可最大程度上最小化设计波谱范围内的结构共振横摇运动幅值。

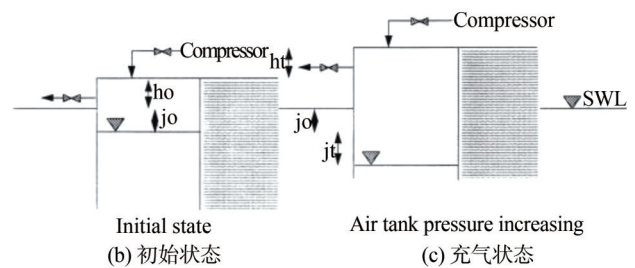
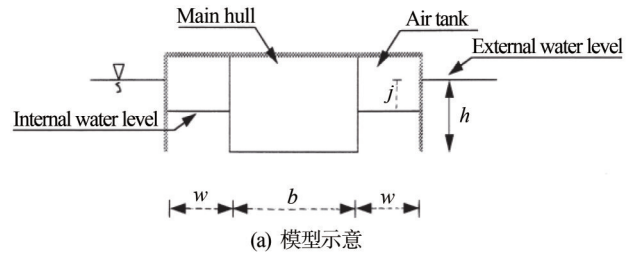
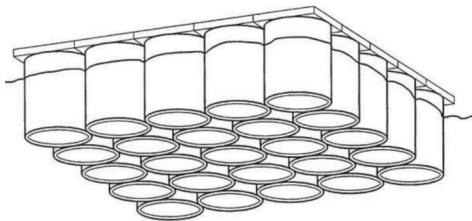


图 4 带气舱浮式石油生产平台结构 (Fajinmi 等^[17])

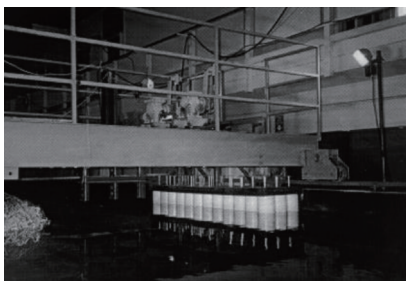
Fig. 4 Floating oil production platform structure with gas tank (Fajinmi et al.^[17])

Cheung 等^[18] 提出了一种多桶气浮平台结构 (如图 5), 桶体壁厚远小于直径, 可应用在波浪发电装置, 防波堤, 浮式机场或军事基地, 桶体之间底部可以开口或封口来提供浮力。由于桶直径小于波长, 桶内的气/水自由面可通过气水弹簧质量系

统描述, 采用分布源法 SDM (Source Distribution Method) 即可计算平台底部的激振力、水柱的震荡和动力响应。桶内气垫采用设置气囊系数 (Air-Pocket Factors) 来计算桶内气垫的压缩性和位移。研究发现, 较小的气囊系数引发较小的垂荡和纵摇激振力, 但相应幅值未必减少, 因为对应减少的附加质量、辐射阻尼和静水恢复刚度抵消了波浪激振力的减少。但这种减少作用对结构受到的水动力响应很有效, 对大型和弹性浮体平台设计很有意义。通过调整气囊系数和水塞高度可调整桶内垫层、甚至整个结构的动力相应。在受迫垂荡和纵摇运动中, 入射波作用下结构响应的数值分析结果和实验数据相当吻合, 而且都发现了水柱振荡的共振区域和激发周期内振荡形式的转换模式。不同于短周期波浪响应, 对于长周期波浪, 气囊系数对结构动力特性的影响比较趋同。这种气垫/水塞的调节响应模式对于大型浮式平台或波浪能吸收装置的动力响应设计具有很大的意义。



(a) 模型示意



(b) 试验照片

图5 多桶浮体平台结构(Cheung^[18])

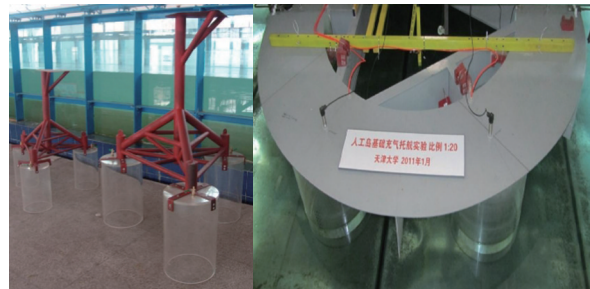
Fig. 5 Multi-bucket floating body platform structure (Cheung et al.^[18])

在桶型基础海洋结构(如图6和图7)应用方面, 别社安等^[19]以JZ93三桶系缆平台为原型, 研究了气浮和实浮在运动过程的差异, 提出了气浮力折减系数这样一个概念。同时从模型试验、现场试验和理论分析三方面对气浮结构的静浮态、小倾角

浮稳性以及运动特性等方面进行了分析和研究。丁红岩、刘建辉、刘宪庆、乐丛欢、张浦阳、黄旭、徐炯和张积乐等^[20-37]对三桶和四桶桶型基础海洋平台和具有多分舱结构的复合桶型基础气浮拖航进行了现场试验和模型试验, 分析了拖航速度、吃水深度、纵倾角、拖缆长度和波浪等因素对于桶型基础平台气浮拖航的影响。值得注意的是, 桶型基础贯入泥面后, 桶型基础内部拖航过程的气垫和水塞被排出变成桶内土塞, 而内部分舱结构除改善拖航稳性外, 还可加强桶内土体刚度^[38]和抗液化特性^[39]。张积乐等^[40]设置了一种由六个大直径无底圆桶通过裙板连接的人工岛基础, 并通过试验和理论分析对该结构在不同波浪条件下的拖航阻力、稳性和运动响应特性进行全面分析。



(a) 三桶现场试验、四桶模型试验



(b) 三桶、单桶模型试验

图6 多桶平台气浮拖航(别社安等^[19];丁红岩等^[27-29, 34-35];张积乐^[40])

Fig. 6 Air-floating towing of the multi-bucket platform (Bie S. A.^[19]; Ding H. Y. et al.^[27-29, 34-35]; Zhang J. L.^[40])

在浮式防波堤应用方面, Koo等^[41]使用数值波浪水槽NWT (Numerical Wave Tank) 研究了时域条件下带气垫浮式防波堤中气垫的阻尼效应对防波堤的运动和波浪传播方式的影响; He^[42]等提出了一种侧面设置有底部开口气垫舱格的箱型浮

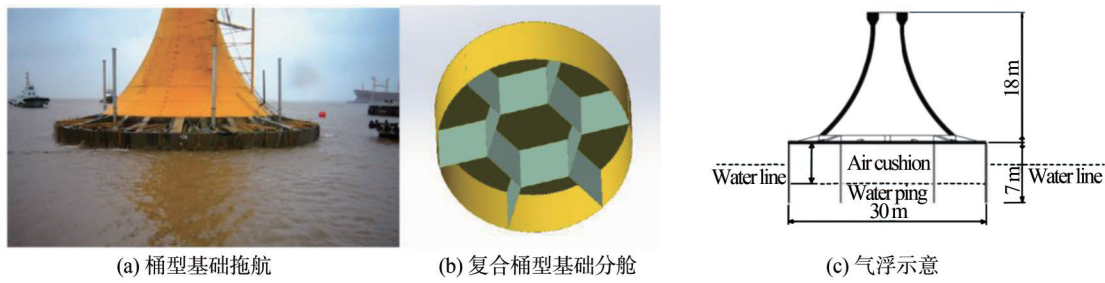


图 7 单桶多舱复合桶型基础气浮拖航(丁红岩等^[27-31])

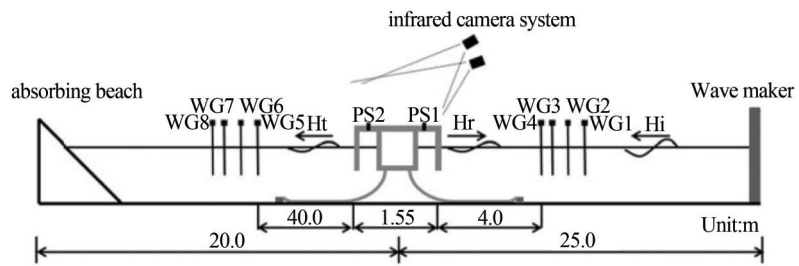
Fig. 7 Air floatation towing of single-bucket and multi-tank composite bucket foundation (Ding H. Y. et al. ^[27-31])

式防波堤 (如图 8), 通过有气垫舱格和不设置气垫舱格两种结构形式的实验比较, 发现带气垫舱格的结构型式的水体部分可以有效减缓规则波作用下的结构响应和增加结构转动惯量。同时, 在波浪传播方面, 可有效减少防波堤背浪区运动产生的辐射波, 部分能量也被气垫舱室消散, 因此较少了波浪能被反射或传播。研究发现, 增加结

构吃水深度可一定程度减少纵荡、垂荡和纵摇运动, 迎浪面的气垫舱格的气体振荡随着吃水增加而减少。对于长周期或很短周期的波浪, 结构在较深的吃水条件下在减少波浪传播方面更为有效。Gomes 等^[43] 和 He 等^[44-45] 进一步研究了这种结构在波浪发电装置结构方面的研究, 拓展了浮式防波堤的使用功能。



(a) 试验照片



(b) 模型示意

图 8 带气舱的浮式防波堤(He 等^[42,44-45])

Fig. 8 Floating breakwater with air cushion tank (He et al. ^[42,44-45])

2 发展动态及相关问题分析

综上所述, 气浮结构由于气垫的存在可以有效减少结构荷载和响应已经达成共识, 但是相关的机理问题还需要大量的理论和实验研究。例如大尺度气浮结构的尺寸与波长/周期等相对尺度问题直接影响数学模型的建立; 另外波浪场中, 气浮结构的吃水深度, 结构内气垫/水塞柱高的比例关系, 入射波参数等边界条件对结构所受荷载作用, 如波浪绕射、辐射, 甚至反射和桶内兴波作用有着直接关系。进一步的水弹性分析层面, 针对细长型气浮结构, 尤其气舱壁厚较小时 (例如采用钢结构壁), 除了考虑气浮结构水动力响应外, 结构体系的内力变化也将成为结构设计的关键问题。总之, 气浮结

构涉及的诸多耦合作用机理问题亟待研究, 尤其涉及稳性的相关问题。由于桶型基础气浮拖航过程涉及桶型基础与风、波浪、海流等环境条件的相互作用, 就必须对桶型基础在浮运过程中的安全可靠进行研究, 桶型基础海上拖航时间较短, 可避开恶劣天气, 结构没有靠泊的要求, 损坏的可能性极小, 因此, 主要考虑拖航中的完整稳性。

气浮结构稳定性核心问题是由于气垫的存在而有可能引起的谐振晃动响应, 这也是相关研究中异常复杂的热点问题。Cheung 等^[18] 在研究 12×6 个直径 15 m, 长 45 m 的桶体组成的气浮结构受迫运动响应相关问题中发现: 结构谐振出现在波周期小于 12 s 附近, 谐振周期附近结构的阻尼值对结构幅值响应算子 RAO (Response Amplitude Operator) 的

影响非常明显。例如纵荡谐振,波浪共振周期下结构的附加质量和辐射阻尼明显增长。对于长周期波浪,水塞柱的振荡是准静力的,气垫的缓冲作用减少了垂荡和纵摇的附加质量和辐射阻尼,不论气囊系数 fa 的取值,纵荡、垂荡和纵摇模式的 RAO 显示趋同的走势(如图9)。不同于 Cheung 等使用气囊系数表示气/水柱不同比例关系来研究结构谐振

响应问题, Thiagarajan 等^[16, 46]在气浮结构研究中直接设定了 3~6 m 四种水塞高度(WPH), 5 m、11 m 和更深三种水深(UKC), 浮式结构原型为 $50 \times 50 \text{ m}^2$, 侧壁高度 10 m。如图10, 类似的, 研究发现短周期波浪可以和结构内部水塞相互作用, 对结构的谐振晃荡贡献很大, 尤其是纵摇响应, 但不同的气/水柱比例对结果的影响有明显区别。

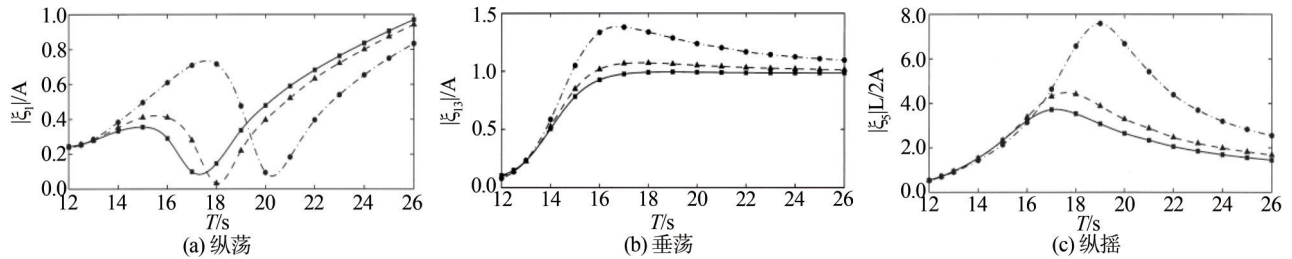


图9 平台动力响应(纵荡、垂荡和纵摇, Cheung 等^[18])

Fig. 9 Platform dynamic response (swinging, heaving and pitching, Cheung et al.^[18])

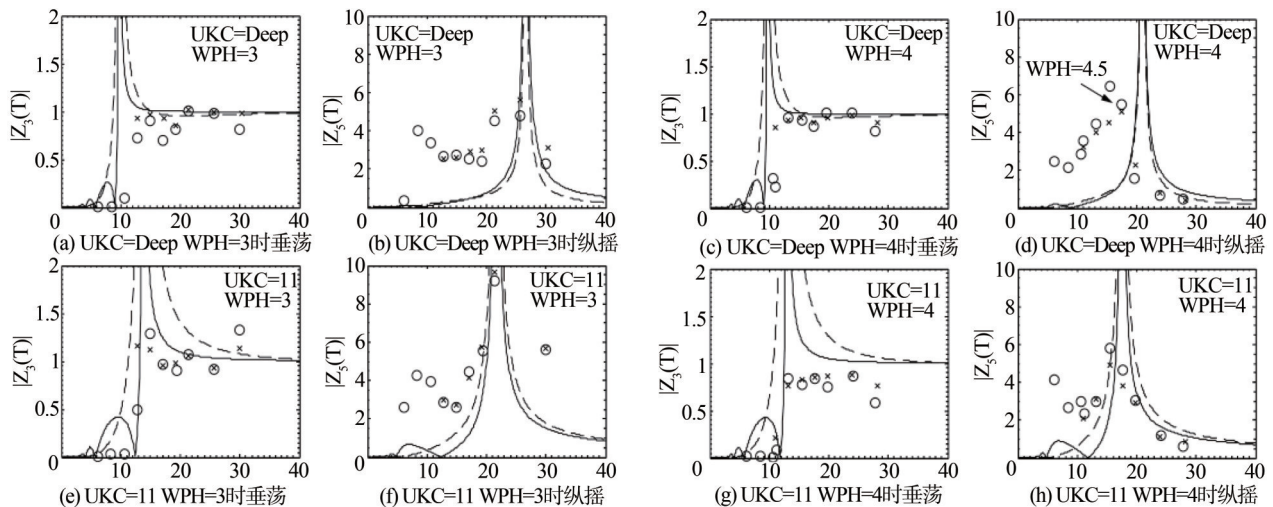


图10 平台动力响应(垂荡和纵摇, Thiagarajan 等^[16, 46])

Fig. 10 Platform dynamic response (swinging, heaving and pitching, Thiagarajan et al.^[16, 46])

关于这个问题的另一有趣的现象出现在 Lee 等^[47]的研究成果中, 该气浮结构原型长为 1 500 m, 吃水 32 m, 气垫浮力等于结构重量的 55%。因为结构尺寸远大于水波波长, 引起谐振晃荡出现的波浪周期可以很容易被预估。然而, 研究结果却显示, 因为结构惯性力和各个模式刚度(恢复)系数的平衡现象, 最重要的垂荡和纵摇谐振响应并没有出现。Pinkster 等^[3-5]也给出了同样的研究结果。事实上, 当气浮结构桶壁相对薄深时, 主要的纵摇弯矩将来源于结构惯性力和静水力恢复系数。对于垂

荡, 静水力恢复系数被气舱的有效刚度提高, 因而结构自振频率也得到提高。如图11, 相对传统结构(虚线)所受的激振力和弯矩, 由于气垫的存在, 气浮结构的低频极值(实线)减少了。长波条件下气/水自由面的晃荡模式在谐振频率上很明显, 在三种较高的频率上, 气/水面的高度变化和驻波响应很相似。这些谐振频率上的水动力阻尼很小, 出现的响应会很大, 不利于安全。

He 等^[42, 44-45]在研究设置气舱式的浮式防波堤的水动力问题时, 同样发现, 带有气舱的结构在垂荡

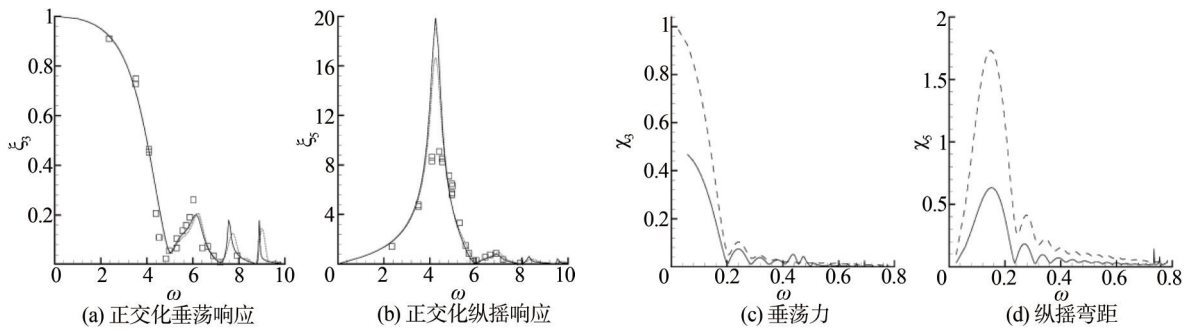


图 11 平台动力响应及激振力和弯矩 (垂荡和纵摇, Lee [47])

Fig. 11 Dynamic response, exciting force and bending moment of the platform (swinging and pitching, Lee et al. [47])

响应上远优于传统实浮体结构, 但是与波浪和结构尺寸的相对关系 B/L 密切相关。同时, 在结构谐振研究方面把结构吃水的影响也作为一个重要因素进行了考虑, 结构吃水深度的增加引起了水塞柱高度的增加, 因此结构自振周期得到了增长。与此同时, 研究中因为在顺浪和逆浪方面均设置了气舱室, 随着不同吃水深度的变化, 波浪经过气舱室时的反射和传播效果也得到了重点关注。如图 12, 波浪反射

系数 $C_r=A_r/A_i$ 和传播系数 $C_t=A_t/A_i$ (其中 A_i 入射波幅值, A_r 反射波幅值, A_t 被传播波幅值), 增加结构吃水将减少波浪从结构底部的传播, 相反的增加波浪的反射作用。但 B/L 决定了最小的反射系数出现的运动模式。对于中等周期的波, 结构吃水较小时, 波浪传播系数相对较低, 对于长周期波和短周期波, 较深的吃水将更有效的减少波浪传播。而对于周期非常短的波浪, 相关变化则很不明显。

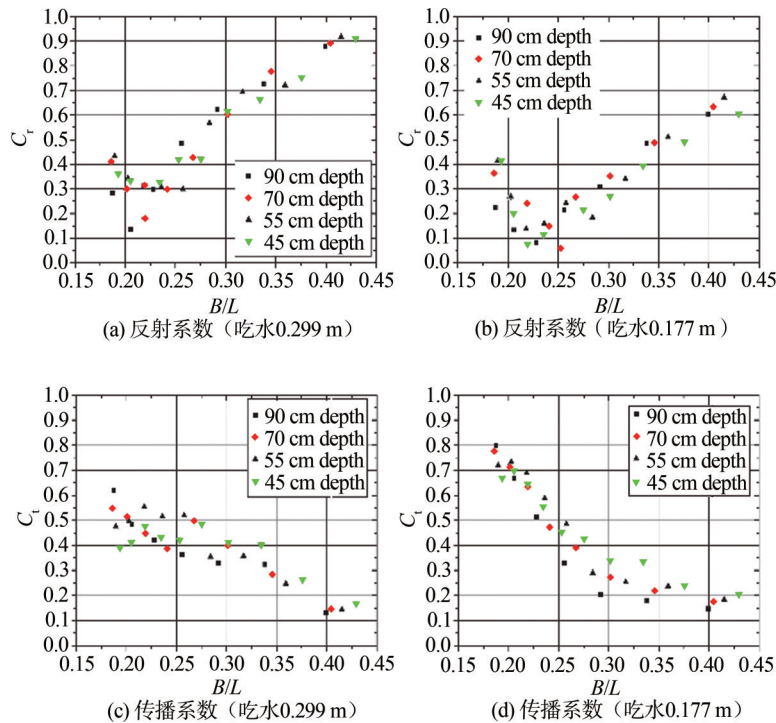


图 12 反射系数 C_r 和传播系数 C_t (He 等 [42, 44-45])

Fig. 12 Reflection coefficient C_r and propagation coefficient C_t (He et al. [42, 44-45])

针对气浮桶型基础, 如图 13, 桶内同样存在分舱结构, 同样涉及不同吃水设置的问题, 不同于 He

等 [42, 44-45] 研究中波浪反射和传播用于研究防波堤的消浪作用, 桶型基础则需要保证气浮性态的安全问

题,又由于结构为薄壁结构,所有在考虑气垫对结构响应的有利作用外,更要考虑桶内不同分舱结构,入射波特性,吃水条件等带来的波浪反射/传播,甚至桶内驻波/兴波作用对结构气浮拖航稳性,甚至包括结构本身材料强度安全的影响。作为气浮结构,波浪频率、附加质量和辐射阻尼等参数引起结构谐振晃荡的耦合问题同样是桶型基础气浮稳性研究的核心问题,也是极其复杂的问题。气浮结构垂荡和纵摇谐振极值点对结构惯性力、静水力恢复系数和气垫变化引起的刚度等非常敏感,而谐振频率上的水动力阻尼很小,出现的响应会很大。Pinkster^[3-5]、Lee^[46]、Van Kessel^[6]和Ikoma^[7-14]提出对舱室进行划分可提高谐振频率,增加纵摇和横摇的稳定性。随着增加分舱带来的结构波浪荷载增加可通过气压补偿不同舱室的压力来缓解。丁红岩等^[47-48]也针对

复合桶型基础桶内的不同分舱结构型式对结构的稳性影响做了相关定性分析,发现舱格的大小、结构型式、吃水深度对结构稳性有着重要影响。例如对图13中的分舱结构,内舱半径从5 m按照2.5 m的幅度增加变化到15 m的过程中,各种分舱的抗倾覆力矩均有所降低,且分舱形式对变化规律的影响差别不大,5 m到10 m变化的降幅明显小于从10 m到15 m时的降幅,随着分舱半径的降低,结构抗倾覆力矩提高的空间有限。复合桶型基础为整体单桶结构,通过内部分舱技术提高基础稳态恢复能力是其核心技术之一,通过对拖航环境因素、基础吃水深度、系缆力、基础拖航中六个自由度的加速度、基础拖航中摇摆升沉位移和桶内分舱气压等变量的优化分析选择可确定浮稳性最佳的桶内分舱优化方案,但确是一个复杂的多项介质耦合水动力学问题。

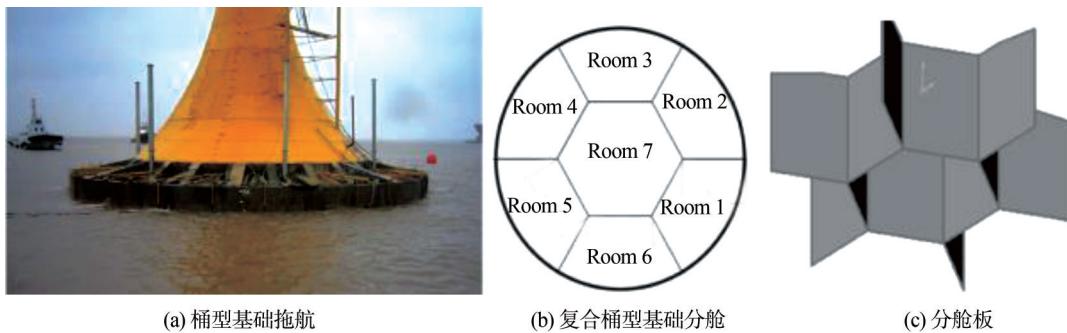


图13 复合桶型基础结构内部多舱式结构(丁红岩等^[48-49])

Fig. 13 Multi-room structure of composite bucket foundation (Ding et al.^[48-49])

在复合桶型基础气浮拖航过程中,结构重心位置、吃水深度大小以及拖航点的设置均对拖航稳性有很大影响。吃水深度的变化会改变结构的重心位置,重心过高在拖航中基础会发生后倾,重心过低将发生前倾,这两种情况均会导致基础在拖航中发生失稳。而通过桶型基础内气水比设置可以改变吃水和重心位置从而影响拖航的稳性。此外,波浪要素、拖航航速及基础拖航倾角等也会影响桶型基础的拖航稳性,其中波高、周期是影响基础拖航的关键条件,桶内气-水的相互作用及其变化对桶型基础的稳性影响也十分复杂。

3 结论

综上所述,桶型基础海上拖航是这种基础最为关键的优势技术之一,针对海上风电桶型基础结构体系气浮拖航耦合运动和施工运输过程中浮运性态

调控理论展开研究,对这种环境友好型基础结构的推广应用具有重要的现实和理论意义。然而,众多学者对应用于不同领域的气浮结构展开的相关理论和实验研究均表明,气浮结构相关的水动力学问题,如谐振晃荡运动模式、气/水自由液面的响应模式以及气舱数量/型式优化方法都是非常复杂的耦合问题,全面、深入的对波浪场中气浮结构的响应机理研究仍是亟需进行的工作。

参考文献:

- [1] WANG X, ZENG X, LI X, et al. Investigation on offshore wind turbine with an innovative hybrid monopile foundation: an experimental based study [J]. *Renewable Energy*, 2019, 132 (1):129-141.
- [2] SEIDL L H. Development of an ASP(Air Stabilized Platform) [M]. United States: NASA STI, 1980.
- [3] PINKSTER J A. The effect of air cushions under floating offshore structures [C]// Anon. *Behavior of Offshore Structures*,

- [S. I.], 1997. [S. I.]:[s. n.], 1997: 143-158.
- [4] PINKSTER J A. The behaviour of large air cushion supported structures in waves [J]. *Proceeding on Hydroelasticity in Marine Technology, Hydroelasticity*, 1998(1):497-506.
- [5] PINKSTER J A, SCHOLTE, MEEVERSEJA. The behaviour of a large air-supported MOB at sea [J]. *Marine Structures*, 2001, 14(1):163-179.
- [6] KESSEL J L, VAN F, PINKSTER J A. The effect of aircushion division on the structural loads of large floating offshore structures [C]// Anon. *Proceedings of OMAE2007*, San Diego, California, USA, June 10-15. USA: ASME, 2007: 687-696.
- [7] IKOMA T, KOBAYASHI M, MASUDA K, et al. A prediction method of hydroelastic motion of aircushion type floating structures considering with draft effect into hydrodynamic forces [C]// Anon. *Proceedings of OMAE2008*, Estoril, Portugal, July 15-20. Portugal: ASME, 2008: 421-429.
- [8] IKOMA T, MASUDA K, MAEDA H, et al. Effects of aircushion division to hydroelastic responses of an aircushion type very large floating structure [C]// Anon. *Proceedings of OMAE2004*, Vancouver, British Columbia, Canada, June 20-25. Canada: ASME, 2004: 755-763.
- [9] IKOMA T, MASUDA K, OMORI H, et al. Improvement of wave power take-off performance due to the projecting walls for OWC type OWC [C]// Anon. *Proceedings of OMAE2013*, Nantes, France, June 9-14. France: ASME, 2013: 115-120.
- [10] IKOMA T, MASUDA K, RHEEM C K, et al. Hydroelastic behavior of air-supported flexible floating structures [C]// Anon. *Proceedings of OMAE2004*, Vancouver, British Columbia, Canada, June 20-25. Canada: ASME, 2004: 745-752.
- [11] IKOMA T, MASUDA K, RHEEM C K, et al. Hydroelastic behaviors of VLFS supported by many aircushions with the three-dimensional linear theory [J]. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2012, 134(1):011104.
- [12] IKOMA T, MASUDA K, RHEEM C K, et al. Response reduction of motion and steady wave drifting forces of floating bodies supported by aircushions in regular waves [C]// Anon. *Proceedings of OMAE2006*, Hamburg, Germany, June 4-9. Germany: ASME, 2006: 371-377.
- [13] IKOMA T, MASUDA K, RHEEM C K, et al. Three-dimensional analysis of hydroelastic behaviours of an aircushion type large floating structure [C]// Anon. *Proceedings of OMAE2005*, Halkidiki, Greece, June 12-17. Greece: ASME, 2005: 349-355.
- [14] IKOMA T, MASUDA K, RHEEM C K, et al. Hydroelastic motion of aircushion type large floating structures with several aircushions using a three-dimensional theory [C]// *Proceedings of OMAE2009*, Honolulu, Hawaii, USA, May 31- June 5. USA: ASME, 2009: 1331-1338.
- [15] CHENU B, MORRIS T M T, THIAGARAJAN K P. Some hydrodynamic characteristics of an air-cushion supported concrete gravity structure [C]// Anon. *The 15th Australasian Fluid Mechanics Conference*, the university of Sydney, Australia, December, 2004. Australia: [s. n.], 2004: 13-17.
- [16] THIAGARAJAN K P, MORRIS T M T. Wave-induced motions of an air cushion structure in shallow water [J]. *Ocean Engineering*, 2006, 33(8-9):1143-1160.
- [17] FAJINMI A A, BROWN D T. Draught control for floating vessels using pneumatics [J]. *Engineering Structures*, 1999, 21(2):112-124.
- [18] CHEUNG K F, PHADKE A C, SMITH D A, et al. Hydrodynamic response of a pneumatic floating platform [J]. *Ocean Engineering*, 2000, 27(12):1407-1440.
- [19] 别社安,任增金,李增志. 结构气浮的力学特性研究 [J]. *应用力学学报*, 2004, 21(1):68-71+177.
- BIE S A, REN Z J, LI Z Z. Study on mechanical characteristics of structural air flow [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2004, 21(1):68-71.
- [20] LE C H, DING H Y, ZHANG P Y. Air-floating towing behaviors of multi-bucket foundation platform [J]. *China Ocean Engineering*, 2013, 27(5):645-658.
- [21] 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*, AIP, 2013, 5(6):063126.
- [22] ZHANG P Y, DING H Y, LE C H. Motion analysis on integrated transportation technique for offshore wind turbines [J]. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, AIP, 2013, 5(5): 053117.
- [23] ZHANG P Y, DING H Y, LE C H, et al. Hydrodynamic motion of composite bucket foundation for offshore wind turbines [C]// Anon. *Proceedings of ISOPE2014*, Busan, Korea, June 15-20. Korea: ISOPE, 2014: 238-243.
- [24] ZHANG P Y, DING H Y, LE C H, et al. Preliminary analysis on integrated transportation technique for offshore wind turbines [C]// Anon. *Proceedings of OMAE2013*, Nantes, France, June 9-14. [S. I.]: ASME, 2013-11149.
- [25] ZHANG P Y, DING H Y, LE C H, et al. Towing characteristics of large-scale composite bucket foundation for offshore wind turbines [J]. *Journal of Southeast University (English Edition)*, 2013, 29(3):300-304.
- [26] 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.
- [27] 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.
- DING H Y, HUANG X, ZHANG P Y, et al. Analysis of fac-

- tors affecting air-floating towing of tubular foundation platform [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(10): 193-198.
- [28] 丁红岩, 乐丛欢, 刘宪庆, 等. 四筒基平台拖航试验分析-水深影响研究 [J]. *天津大学学报*, 2012, 45(2): 160-166.
DING H Y, LE C H, LIU X Q, et al. Analysis of towing test of four-tube foundation platform-water depth impact study [J]. *Journal of Tianjin University*, 2012, 45(2): 160-166.
- [29] 丁红岩, 刘宪庆, 张浦阳, 等. 航速对四筒型基础海洋平台拖航影响的试验分析 [J]. *天津大学学报*, 2012, 45(1): 43-49.
DING H Y, LIU X Q, ZHANG P Y, et al. Experimental analysis of the influence of speed on the towing of a four-cylinder foundation offshore platform [J]. *Journal of Tianjin University*, 2012, 45(1): 43-49.
- [30] 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(自然科学版)*, 2015, 45(12): 113-118.
DING H Y, SHI J C, ZHANG P Y, et al. Study on the hydrodynamic coefficient of the heave structure of the airfoil-type foundation [J]. *Journal of Ocean University of China*, 2015, 45(12): 113-118.
- [31] 丁红岩, 石建超, 张浦阳, 等. 气浮桶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 A 辑*, 2015, 30(5): 516-525.
- [32] 黄旭. 海上风电结构一体化安装技术的浮运分析 [D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [33] 乐丛欢, 丁红岩, 张浦阳. 拖缆长度对桶型基础平台气浮拖航影响的模型试验分析 [J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2012, 33(7): 811-816.
- [34] 乐丛欢, 丁红岩. 新型浮式系泊系统靠泊动力响应分析 [J]. *天津大学学报*, 2013, 46(1): 51-57.
LE C H, DING H Y. Analysis of berthing dynamic response of new floating system mooring system [J]. *Journal of Tianjin University*, 2013, 46(1): 51-57.
- [35] 刘建辉. 筒型基础海洋平台气浮拖航性能研究 [D]. 天津: 天津大学, 2009.
- [36] 刘宪庆. 气浮桶型基础拖航稳定性和动力响应研究 [D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [37] 徐炯. 气浮结构的静稳定性和动力响应的分析计算 [D]. 天津: 天津大学, 2004.
- [38] RANDOLPH M F, GOURVENEC S. *Offshore geotechnical engineering* [M]. Boca Raton CRC Press, 2011.
- [39] 张浦阳, 丁红岩, 李芳. 海上筒型风机基础地震荷载下的抗液化性能研究 [J]. *太阳能学报*, 2013, 34(9): 1587-1593.
ZHANG P Y, DING H Y, LI F. Study on anti-liquefaction performance of offshore tubular fan under seismic loading [J]. *Journal of Solar Energy*, 2013, 34(9): 1587-1593.
- [40] 张积乐. 人工岛基础气浮拖航运动性能试验研究 [D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [41] KOO, WEONCHEOL. Nonlinear time-domain analysis of motion-restrained pneumatic floating breakwater [J]. *Ocean Engineering*, 2009, 36(9-10): 723-731.
- [42] HE F, HUANG Z H, LAW A W. Hydrodynamic performance of a rectangular floating breakwater with and without pneumatic chambers: an experimental study [J]. *Ocean Engineering*, 2012, 51: 16-27.
- [43] GOMES R P F, HENRIQUES J C C, GATO L M C, et al. Hydrodynamic optimization of an axisymmetric floating oscillating water column for wave energy conversion [J]. *Renewable Energy*, 2012, 44: 328-339.
- [44] HE F. Experimental investigation of pile-supported/floating breakwaters integrated with oscillating-water-column converters [D]. Ph. D. dissertation, Nanyang Technological University, 2013.
- [45] HE F, HUANG Z, LAW A W K. An experimental study of a floating breakwater with asymmetric pneumatic chambers for wave energy extraction [J]. *Applied Energy*, 2013, 106(1): 222-231.
- [46] THIAGARAJAN, KRISH, et al. Vertical motions of a concrete gravity structure supported by air cushions in shallow water [C]// Anon. *Proceedings of OMAE2000*, New Orleans, USA, June 8-13. USA: ASME, 2000: 1-7.
- [47] LEE C H, NEWMAN J N. Wave effects on large floating structures with air cushions [J]. *Marine Structures*, 2000, 13(4-5): 315-330.
- [48] 丁红岩, 朱岩. 海上风电大尺度筒型基础分舱优化设计 [J]. *船海工程*, 2016, 45(3): 140-145.
- [49] 乐丛欢, 丁红岩, 张浦阳. 分舱板对海上风机混凝土筒型基础承载模式的影响 [J]. *工程力学*, 2013, 30(4): 429-434.

作者简介:



刘博

刘博 (通信作者)

1989-, 男, 河南三门峡人, 高级工程师, 上海交通大学岩土工程专业博士, 主要从事海上风电支撑结构研究工作、水动力荷载下海床及海床结构物失稳机理研究工作 (e-mail) liubo2@gedi.com.cn。

裴爱国

1969-, 男, 甘肃天水人, 现任中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司总工程师, 中国能源建设集团工程研究院海上风电研究所所长, 教授级高级工程师, 国家一级注册结构工程师, 主要从事火电、核电、海上风电、环保等工程的咨询设计、科技创新、项目管理工作 (e-mail) peiaiguo@gedi.com.cn。

(责任编辑 李辉)