

综述

漂浮式海上风机施工安装现状与发展趋势及技术挑战*

赵树杰, 白浩哲, 徐琨, 杜君峰, 张敏, 袁文永, 李华军**

(中国海洋大学工程学院, 山东 青岛 266100)

摘要: 漂浮式海上风机是开发和利用海上风能资源的关键技术装备,对拓展海上风电的开发空间具有重要战略意义。施工安装是漂浮式海上风机全生命周期的重要环节,也是实现海上风电经济、安全和高效开发的关键。然而随着海上风机的深远海和大型化发展,施工安装难度大幅提升,现有安装工艺及技术装备无法满足其安装作业需求。本文首先回顾了国内、外漂浮式海上风机发展历程,展望了未来漂浮式海上风机在降本增效以及解决施工安装难题中的创新设计理念;然后在此基础上,通过工程案例,总结梳理漂浮式海上风机运输安装工艺,分析漂浮式海上风机运输安装关键问题与技术挑战;最后针对漂浮式海上风机施工安装难题,从新工艺、新装备和新技术等方面提出发展建议,以期对漂浮式海上风电迈向深远海提供参考。

关键词: 漂浮式海上风机; 施工安装; 深远海; 多体系统; 数字化技术

中图分类号: P751

文献标志码: A

文章编号: 1672-5174(2024)10-013-16

DOI: 10.16441/j.cnki.hdxh.20240260

引用格式: 赵树杰, 白浩哲, 徐琨, 等. 漂浮式海上风机施工安装现状与发展趋势及技术挑战[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2024, 54(10): 13-28.

Zhao Shujie, Bai Haozhe, Xu Kun, et al. Current sates, development trends, and technical challenges for floating offshore wind turbine installation[J]. Periodical of Ocean University of China, 2024, 54(10): 13-28.

在全球气候变化的严峻挑战下,世界各国陆续制定了“碳达峰”和“碳中和”发展战略,加速推动能源结构转型^[1-2]。海上风能作为一种重要的清洁能源形式,具有资源丰富、开发利用率高的优势,受到了世界各国的广泛关注^[3-4]。近十年,固定式海上风机在近海区域得到了广泛应用,累计装机规模已突破60 GW,推动了海上风电产业的快速发展。然而,据全球风能理事会(Global Wind Energy Council, GWEC)的统计,全球近80%的海上风能资源富集于水深超过60 m的深远海域。对于固定式海上风机,随着水深增加,其开发成本大幅增加,无法经济、高效地利用深远海域丰富的风能资源。

漂浮式海上风机能够适应更深海域的环境^[1,5-6],布局位置更加灵活,能够搭载更大容量的风机,同时可减少近岸社会环境的干扰,对拓展海上风电开发空间具有重要的战略意义^[7-10]。尽管漂浮式海上风电前景广阔,但在实现商业化发展过程中,从项目的初期规划、设计、建造、运输和安装,到长期运行维护乃至最终的拆解消纳,漂浮式海上风电开发仍面临诸多问题挑

战。在漂浮式海上风电的全生命周期中,施工安装是其中的重要环节,同时也是实现风能资源经济、安全和高效开发的关键^[11-13]。从成本角度分析,漂浮式海上风电的施工安装费用在整个项目开发成本中占有较高比例,如中国已建成的“三峡引领号”和“海装扶摇号”施工安装费用在开发总成本中占比分别达到了21%和26%(见图1)。施工安装安全性同样重要,据统计,在2023年发生的全球海上风电安全事故中,施工安装阶段占比高达62%。

与固定式风机不同,漂浮式海上风机需在近岸完成大部分组装,然后通过驳船将浮体结构和风机整体运输至安装位置。以“海油观澜号”为例,其浮体建造场地位于山东青岛,运行场址位于海南文昌海域,拖航作业总航程近3 000 km,历时近一个月。海洋环境存在不确定性和复杂性,如强风、巨浪和急流等,使得拖航系统的动力响应难以准确预测,海上运输作业面临极大风险挑战。因此,在选择作业环境窗口时,必须非常严格,以确保运输过程中结构的安全和稳定。面对

* 基金项目:山东省重点研究发展计划项目(2021ZLGX04);国家自然科学基金项目(52088102)资助

Supported by the Key Research and Development Program of Shandong Province, China(2021ZLGX04); the National Natural Science Foundation of China(52088102)

收稿日期:2024-07-10; 修订日期:2024-08-01

作者简介:赵树杰(1993—),男,博士。E-mail:zhaoshujie@ouc.edu.cn

** 通信作者:李华军(1962—),男,博士,中国工程院院士,主要从事海洋工程方面研究。E-mail:huajun@ouc.edu.cn

漂浮式海上风机运输安装作业挑战,业界正迫切寻求海上施工安装工艺和作业技术装备的研发与创新,以提高运输安装作业效率、保障作业安全和降低作业成本。

本文将首先梳理国内、外漂浮式海上风机发展历程,并展望未来漂浮式海上风机的创新设计理念。进而根据不同结构型式的漂浮式海上风机的结构特点,

结合工程案例,总结分析漂浮式海上风机运输安装工艺;然后,在此基础上,重点针对漂浮式海上风机运输安装环节,阐述作业存在的关键问题与技术挑战,包括海洋环境预报、航线规划、关键作业装备选型与设计、稳性控制与增稳技术、复杂环境荷载与多体动力耦合仿真;最后,展望未来漂浮式海上风机施工安装中对其工艺、装备和技术的发展需求,并对全文进行总结。

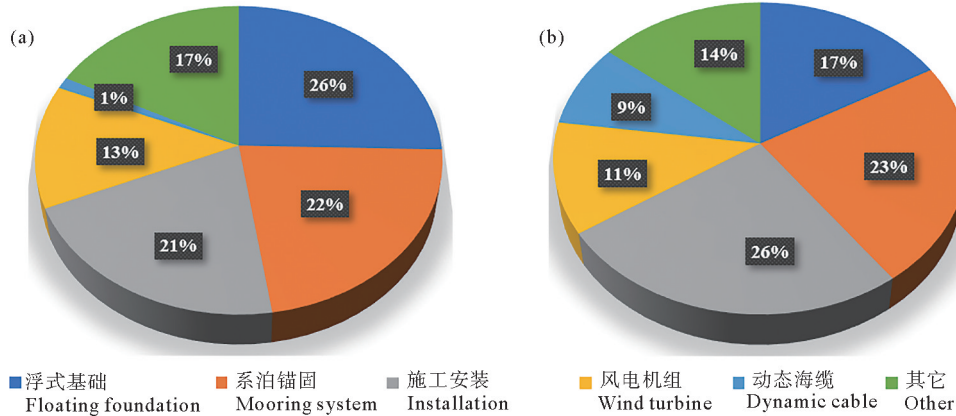


图1 “三峡引领号”(a)和“海装扶摇号”(b)开发成本构成

Fig. 1 Cost composing of “Sanxia Yinling” (a) and “Haizhuang Fuyao” (b)

1 漂浮式海上风机发展历程与未来趋势

漂浮式海上风机的概念最早可以追溯到20世纪70年代^[14],然而,由于当时技术水平的限制,相关发展受到了制约。直到20世纪90年代,欧洲国家率先开展针对漂浮式海上风机的科学研究和技术研发。在过去的十多年,随着全球对清洁能源需求的日益增长,漂浮式海上风机产业发展迅速^[15-24](见图2)。截至2023年底,全球已投入运营的漂浮式海上风电场总装机容量达到了250 MW。

2009年,全球首台单柱式(Spar)漂浮式海上风机样机Hywind Demo于挪威海域建成^[15],标志着漂浮式海上风电产业开始进入样机示范阶段,为漂浮式海上风电产业发展奠定了基础。2011年,全球首台2 MW半潜式海上风机WindFloat 1于葡萄牙海域建成^[16],随后,日本^[25]和法国^[26]也相继投入至漂浮式海上风机的样机测试。经过多年的样机运行,2017年,全球首个漂浮式海上风电场Hywind Scotland在苏格兰北海海域建成^[17],风电场包含5台6 MW Spar海上风机。Hywind Scotland的建成标志着漂浮式海上风电产业发展开始从样机试验阶段向小型风电场示范阶段过渡^[27]。在历经了多年小规模风电场测试运行后,总装机规模达到50 MW的Kincardian漂浮式海上风电场于英国海域建成^[19],标志着漂浮式海上风电产业进一步迈向大规模商业化开发阶段^[28]。目前,世界上最

大的漂浮式海上风电场为挪威Hywind Tampen^[20],总装机容量达88 MW。同时,Hywind Tampen创新性地为场址附近的海洋油气平台供电,开创了漂浮式海上风电电力消纳新模式。

相比国外,中国漂浮式海上风电产业起步较晚,但发展迅速,展现出良好的发展势头。2021年,中国首台5.5 MW半潜式海上风机“三峡引领号”在广东阳江海域建成^[21],标志着中国漂浮式海上风电产业实现零的突破。随后,中国漂浮式海上风电呈现快速发展态势:2022年,6.2 MW半潜式海上风机“海装扶摇号”于广东湛江海域完成并网^[22],作业水深达到65 m;2023年,7.25 MW深远海半潜式海上风机“海油观澜号”于海南文昌海域完成安装并为油气平台供电^[23],作业水深首次突破100 m,开创了中国“海电海用”新模式;同年,全球首个漂浮式风渔融合平台“国能共享号”于福建莆田南日岛海上风电场完成安装^[24],标志着中国在探索漂浮式海上风电发展新模式上迈出了重要一步。展望未来,2025年底,由中国电建集团规划建设的海南万宁漂浮式海上风电场一期工程,预计总装机容量将达到200 MW,预示着中国漂浮式海上风电产业即将迎来规模化发展的新篇章。

目前,国内、外漂浮式海上风电开发主要借鉴海上油气开发的发展经验,浮体结构型式仍以技术成熟度相对较高的半潜式和Spar为主。张力腿平台(Tension Leg Platform, TLP)海上风机发展较晚,目前全球唯一的TLP海上风电场为2023年建成的法国Provence

Grand Large^[29]。与半潜式和 Spar 海上风机相比, TLP 海上风机浮体用钢量少, 在建造成本上具有一定优势, 是未来漂浮式海上风机结构形式的重要发展方向。此外, 为助力漂浮式海上风机降本增效, 国外一些技术企业提出了新型漂浮式海上风机的设计理念^[30] (见图 3)。T-Omega Wind 提出的 T-Omega^[30]、X1 Wind 公司提出的 PivotBuoy^[31] 和 Fred Olsen 1848 提

出的 BURNEL^[32] 概念均采用“无塔筒结构+单点系泊系统”的新组合, 上部风机采用下风式系统, 配合单点系泊系统实现自动对风。此外, 模块化浮体设计概念的逐渐兴起, 也为漂浮式海上风电提供了新的发展路线, 如 Stiesdal Offshore 公司设计的全撑杆 TetraSpar 和 TetraSub^[33] 浮体。

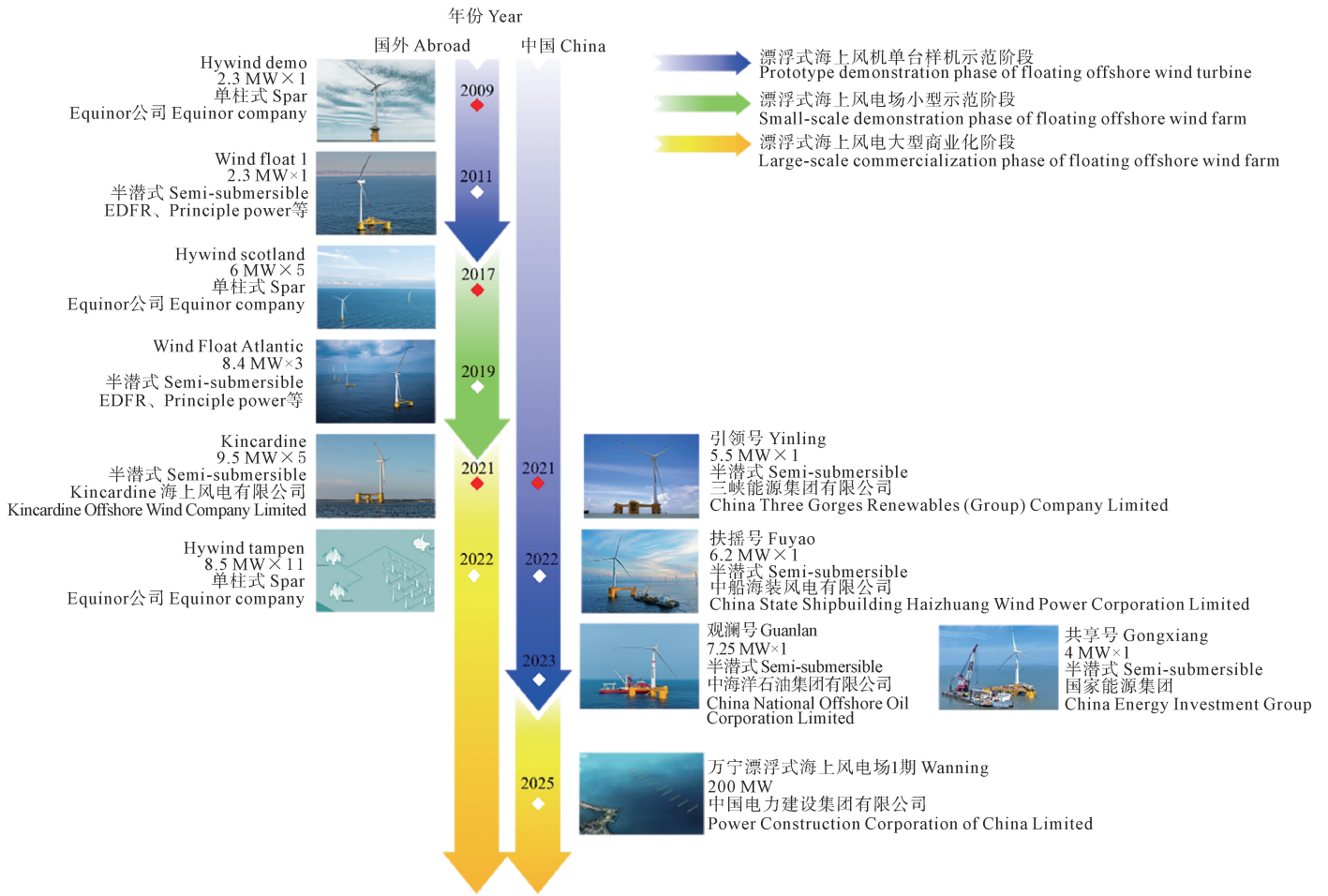
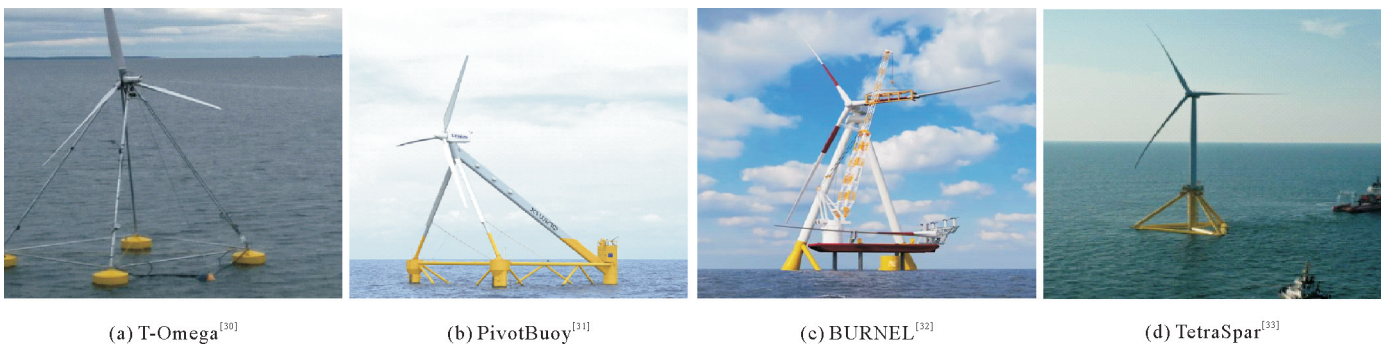


图 2 全球漂浮式海上风机产业发展历程^[15-24]

Fig. 2 Development history of global floating offshore wind turbine industry^[15-24]



(a) T-Omega^[30]

(b) PivotBuoy^[31]

(c) BURNEL^[32]

(d) TetraSpar^[33]

图 3 新型结构型式的漂浮式海上风机概念

Fig. 3 Concept of novel structural types of floating wind turbines

新型漂浮式海上风机的浮体设计跳出了传统油气平台的设计局限,采用轻量化、标准化的杆件装配浮体,更有利于漂浮式海上风机浮体的轻量化设计与快速建造。上部机组设计同样跳出传统“塔筒+机舱+转子+控制系统”的模式,采用“无塔筒+下风向自动对风”的设计理念,简化了整套风机的控制系统,更有利于提高漂浮式海上风机上部机组的可靠性和经济性。新结构型式的漂浮式海上风机系泊系统所采用的单点系泊系统,既满足了上部机组自动对风的需求,又减少了系泊缆数量,降低了系泊成本。然而,“自动对风”的设计概念虽简化了上部机组控制系统的设计,但对单点系泊系统的可靠性提出了更高要求,特别是动态对风过程中漂浮式海上风机大幅运动引起的系泊缆张力瞬态变化,以及极端工况下系泊缆的极限强度。此外,新型漂浮式海上风机的发展还需要深入探讨其水动力及整体耦合动力特性,关注自动对风设计概念中对风速率和上风向支撑结构的遮蔽效应对风电机组发电效率的影响,发展新型漂浮式海上风机的一体化

设计分析理论。

2 漂浮式海上风机施工安装工艺

2.1 Spar 海上风机

Spar 海上风机是产业化程度较高的漂浮式海上风机结构型式。Spar 浮体水线面较小,但由于吃水深、重心低,Spar 海上风机具有较好的自稳性。图 4 为 Hywind Tampen 的施工安装过程^[34-35]。Hywind Tampen 的 Spar 浮体采用了下部混凝土、上部钢材的混合构造,其混凝土子结构首先在 Aker Solution 的船坞中建造,随后通过湿拖作业运输至 Dommersnes 的深水场地;在 Spar 浮体建造完成后,通过多拖船的协同拖航,Spar 浮体被拖运至 Gulen 的深水码头进行上部风机(包括塔筒、机舱、轮毂和叶片)的吊装;随后,整机通过拖船拖运至作业海域,与系泊系统进行对接作业。由于 Spar 浮体吃水深,Hywind Tampen 整体建造、上部风机安装均选择在深水场地,有效规避了建造/组装码头水深及航道水深限制带来的挑战。

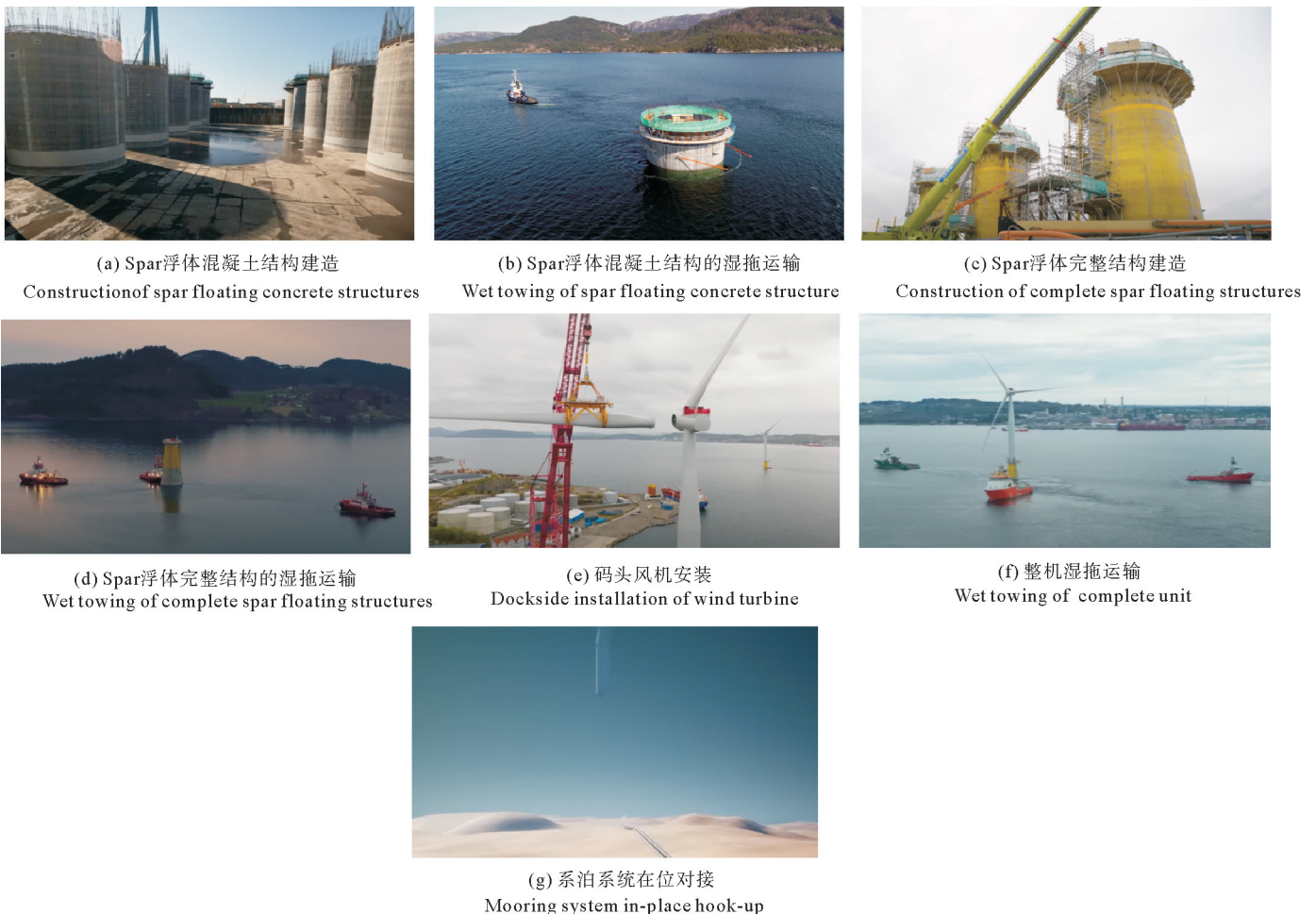


图 4 Hywind Tampen 施工安装作业流程^[34-35]

Fig. 4 Construction and installation process of Hywind Tampen^[34-35]

2.2 半潜式海上风机

半潜式海上风机是目前产业化程度最高、应用范围最广的漂浮式海上风机结构型式。半潜式浮体水线面的面积矩大, 自稳性较好, 且吃水浅, 相较于 Spar 海上风机, 其施工安装作业限制较小。大多数半潜式海上风机施工安装过程依次经历陆上浮体建造、浮体湿拖运输、码头风机安装、整机湿拖运输和系泊在位对接五个阶段^[12]。以 WindFloat 安装作业^[36]为例(见图 5), 其浮体结构首先在船坞中进行立柱主体结构的建

造, 随后进行主体结构、撑杆及其他附属结构的组装。在半潜式基础结构建造完成后, 浮体结构整体通过湿拖运输至组装码头, 利用码头吊机进行上部风机的安装。由于半潜式海上风机吃水远小于 Spar 浮体, 且自稳性优于 TLP 浮体, 因此对码头前沿水深以及风机安装时码头内的泊稳条件要求较低。风机安装完成后, 再将半潜式海上风机整机湿拖至目标海域, 将浮体与已安装的系泊系统进行对接。

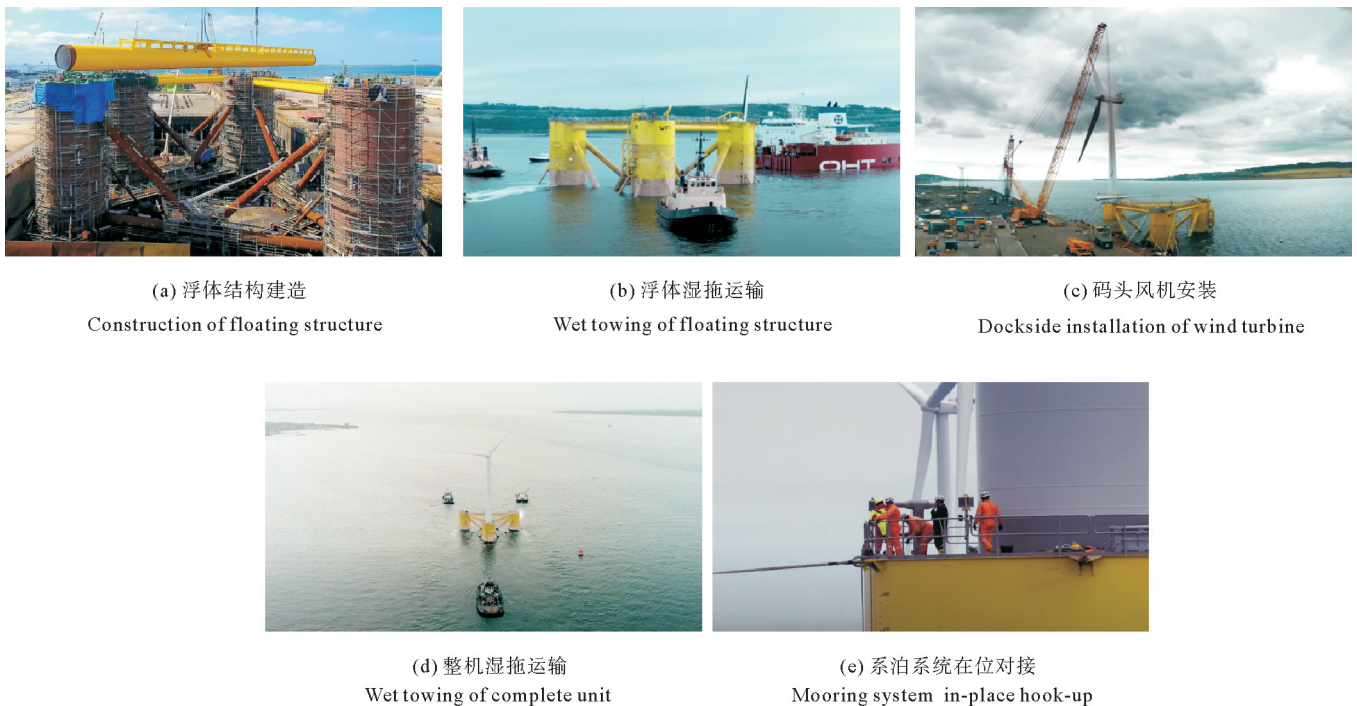


图 5 半潜式海上风机施工安装流程^[36]

Fig. 5 Construction and installation process of semi-submersible offshore wind turbine^[36]

2.3 TLP 海上风机

TLP 海上风机的回复力主要来源于系泊张力筋腱, 其浮体本身水线面较小且吃水较浅, 自回复能力不足, 因此其施工安装作业挑战较大。以 Provence Grand Large 为例, 其施工安装^[29, 37-38]过程如图 6 所示。TLP 浮体建造完成后, 通过滑道滑移至半潜驳船上, 进行浮体结构的干拖运输; 在浮体运至码头后, 进行上部风机的安装, 随后通过主拖船与辅助拖船的协同拖航, 拖运至作业海域, 与已安装好的张力筋腱进行对接。TLP 海上风机运输安装作业受限于浮体的自稳性, 整个作业过程需要不断地调节压载, 有时还需通过增加附载以提高系统稳性。

2.4 新型漂浮式海上风机

以 TetraSpar 为代表的新型撑杆化浮体结构设计

理念, 可在一定程度上解决传统浮体结构形式的施工安装难题。图 7 和 8 分别为其运输施工安装的作业流程以及过程中结构型式的转变情况。TetraSpar 的浮体结构由标准化构件装配而成, 组装过程无需焊接, 从而大幅缩短了建造周期, 降低了建造成本。同时, 这种模块化设计也便于后续的维护与升级, 增强了结构的灵活性与适应性。在建造完成后, TetraSpar 的浮体及龙骨通过驳船下水, 进行上部风机的安装。随后, 在 TetraSpar 湿拖运输过程中将龙骨紧附到浮体结构下方(见图 8), 形成半潜式系统, 可有效避免水深对整机拖航过程的限制。在整机拖运至安装海域后, 将浮体与系泊系统连接并释放龙骨浮体, 从而实现从半潜式结构到 Spar 结构的转变。



图6 Provence Grand Large 运输和安装作业流程^[29, 37-38]
Fig. 6 Construction and installation of Provence Grand Large^[29, 37-38]



图7 TetraSpar 运输和安装作业流程^[33]
Fig. 7 Transportation and installation workflow of TetraSpar^[33]



图8 TetraSpar 运输和安装过程中结构型式转变^[33]
Fig. 8 Transition of TetraSpar during transportation and installation^[33]

3 漂浮式海上风机运输安装关键问题与技术挑战

在现有漂浮式海上风机施工安装工艺流程中,整机运输安装作业周期最长,同时在复杂海洋环境影响下,漂浮式海上风机整机运输面临诸多风险与挑战。深入理解漂浮式海上风机运输安装作业的关键问题与技术挑战对保障作业安全至关重要,同时也可作为作业方案优化提供指导。通过对典型工程案例的分析以及

相关规范标准的调研, 本文总结了以下漂浮式海上风机运输安装过程中面临的几个核心问题与技术挑战, 以为海上运输安装总体施工设计提供参考。

3.1 海洋环境预报与航线规划

海洋环境预报需要为拖航作业提供准确、实时的海洋和气象条件信息, 以便作业团队避开恶劣天气和海况, 选择最佳时间和航线进行拖航。在拖航作业过程中, 环境预报系统还需要实时监测和预警可能出现的突发状况(如风暴和海浪增高), 为拖航作业应急避险提供宝贵的时间和信息支持。长期以来, 海洋环境的预报主要基于物理方程的数值模式, 模式中需要充分考虑各种复杂海洋现象的自然过程及其相互作用。随着大数据和机器学习技术的发展, 海洋卫星遥感技术成为获取历史海洋环境数据的新途径, 进而催生了深度学习预报模型的构建^[39-41]。这一创新为提高海洋环境预报的时空尺度和预报精度提供了新的手段。

在环境预报的基础上, 合理的航线规划是确保拖航效率和拖航安全的关键。漂浮式海上风机拖航航线规划通常为多目标优化问题, 例如: Fabbri 和 Vicen-Bueno^[42]提出了考虑最短拖航时间、波浪增阻以及稳性损失的三目标航线优化体系; Krata 等^[43]和 Szlapczynska 等^[44]采用燃料消耗、结构运动和航程时间等参量, 分别量化经济、安全和效率目标, 开展航线规划多目标优化; Pivert 等^[45]则在漂浮式海上风机拖航优化中, 考虑了作业时间、拖缆张力和碳排放量的最小化目

标。拖航航线的规划还需要对航道条件进行详细调查, 例如中国台湾海峡海域, 该海域浅水段水深仅为 20 m, 风高浪急且有横流, 拖航难度大幅提升, 因此需要通过调整拖航方案以保障拖航作业的安全。拖航系统的航线设计还应制定应急操作方案并设定临时避风锚地, 避风锚地的选取需兼顾作业的经济性与安全性^[46]。

3.2 关键作业装备选型与设计

在漂浮式海上风机拖航作业的装备选型过程中, 关键在于对拖航系统关键物理量的准确量化。对于拖轮的选取, 拖航阻力是其决定性因素。拖航阻力是指被拖结构在行进过程中所遭受的风、浪和流等自然阻力, 拖航速度、被拖结构物吃水和浮体结构特点等均会对拖航阻力产生影响。Wang 等^[47]通过分析结构周围的流场漩涡特点, 探讨了不同浮体结构在不同吃水下的拖航阻力变化规律。Wang 等^[47]和 Amin 等^[48]研究发现(见图 9(a)), 拖航阻力近似与拖航速度的平方成正比。Liu 等^[49-50]采用数值模拟与物理模型试验相结合的方法, 探讨了圆形月池对平台拖航阻力的影响, 以及拖曳过程中月池内流体的流动特性(见图 9(b)), 进而研究发现, 月池中形成的漩涡会造成能量损失, 引起平台拖航阻力增加 7%~10%。Zhang 等^[51]同样通过物理模型试验与 CFD 技术相结合的方法, 探讨了隔舱板对复合筒结构拖航阻力的影响(见图 9(c)和(d)), 进而研究发现隔舱板可以有效减小拖航阻力。

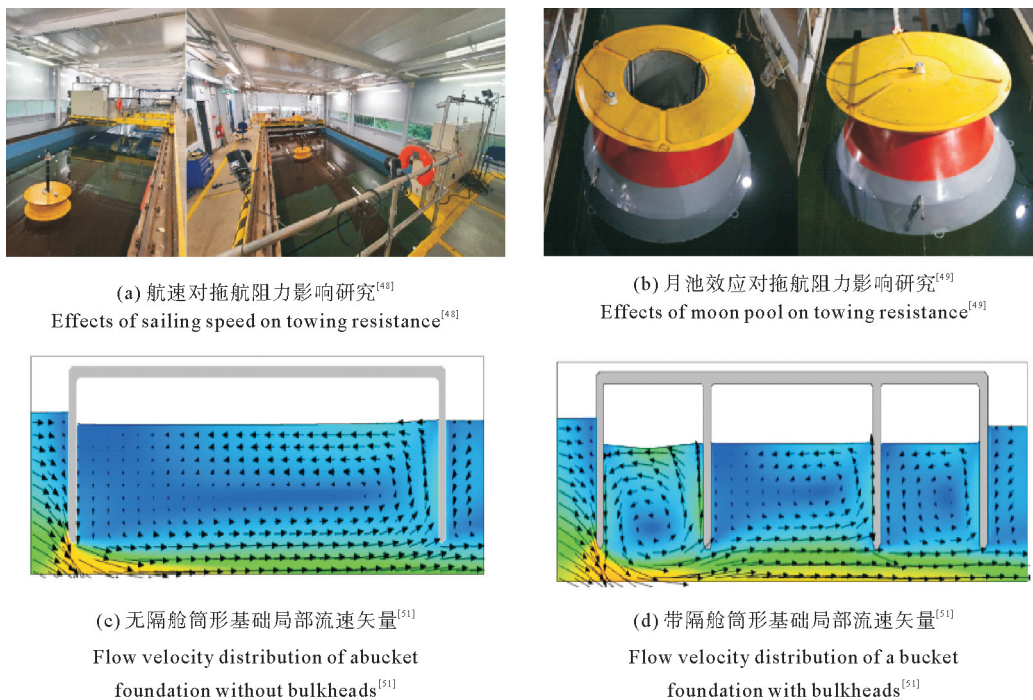


图 9 拖航阻力的相关研究

Fig. 9 Related research on towing resistance

除拖轮外,拖缆、连接件以及其它拖曳索具的选取也非常重要。在已知的拖航作业事故中,多数是由于拖缆达到强度或疲劳极限发生绷断引起的,如 Kolskaya 和 Kulluk 钻井平台事故^[52-53]。因此拖缆的设计需要特别注意拖缆的力学特性,有必要发展本构关系更加精确、力学特性描述更加全面的拖缆数值模型^[54-55]。此外,在拖缆设计时,还应注意瞬态效应(如拖船转向和航速变化)对拖缆的影响,评估拖缆的极限和疲劳强度。Fitriadhy 等^[56]针对拖航系统转向过程中拖缆的松弛现象提出了拖缆松弛公式。Srivastava 等^[57]提出一种能够预测拖船航速变化对拖缆张力特性影响的数值方法,该研究发现,相较于航速增加时,拖缆在航速减小时会产生更大张力。

3.3 稳性控制与增稳技术

漂浮式海上风机由于自身重心偏高,拖航作业过程中存在失稳风险,因此需严格设计关键参数(如漂浮

式海上风机吃水和拖航航速),保障拖航过程中结构稳性满足要求。拖航作业的稳性校核可以分为完整稳性校核和破舱稳性校核。针对完整稳性分析,Zhang 等^[58]、闵巧玲^[59]和翟秋等^[60]探讨了吃水深度对被拖结构拖航稳性的影响,进而研究发现,吃水深度的增加有利于提高拖航作业过程中被拖结构的自稳性。Wang 等^[61]在研究海上风机筒形基础自稳性的过程中考虑了倾斜过程中气舱内气体的影响(见图 10(a)),并据此在稳性校核过程中确定了临界漏气角(见图 10(b))。对于破舱稳性校核,不同于海洋油气平台,漂浮式海上风机湿拖过程及在位运行状态通常无人值守,因此在保障附近海上结构物安全的前提下,可适当降低对破损稳性的要求。在现有漂浮式海上风机结构型式中,TLP 海上风机结构自稳性较差,因此针对其运输安装作业过程中的稳性安全,需要发展压载调节和稳性辅助模块等拖航作业增稳技术。

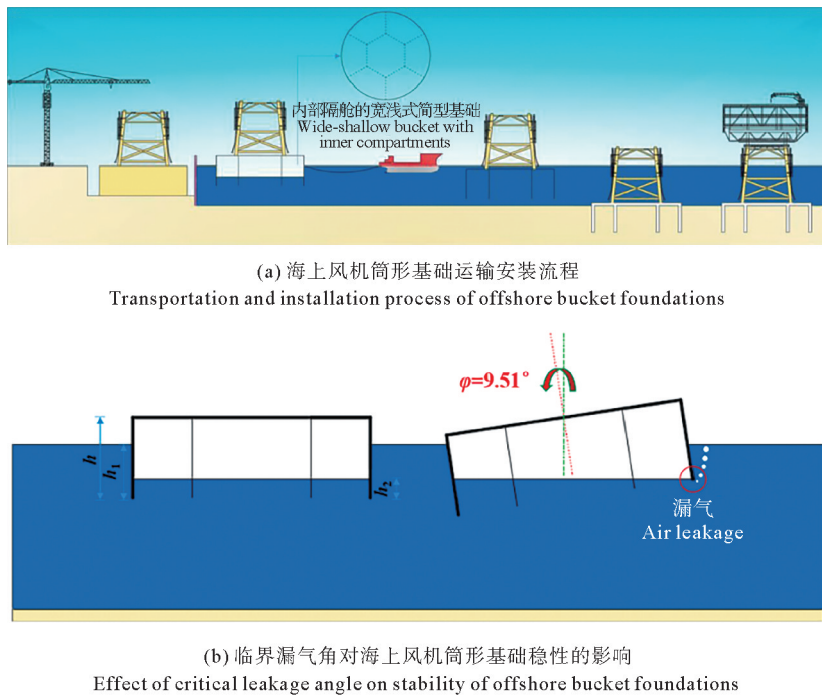


图 10 拖航稳性相关研究^[61]

Fig. 10 Related research on towing stability^[61]

在对漂浮式海上风机自稳性校核的基础上,还应关注漂浮式海上风机在拖航作业动态过程中的稳性问题。当采用单拖作业方案时,漂浮式海上风机拖航系统在水平面内回复能力和阻尼不足,尤其当遭遇恶劣海况以及横向载荷作用时,会产生大幅的横荡-艏摇(即“鱼尾效应”),导致拖航失效。刘建辉^[62]针对筒形基础海洋平台拖航过程的航向稳性分析发现,拖缆长度的增加会降低系统的航向稳性。Park 等^[63]改进了传统

的拖航物理模型试验装置,探讨了拖船横向运动对拖航系统航向稳性的影响。Sinibaldi 等^[64]建立的航向稳性分析简化模型进一步指出,顺风条件下拖航更易发生明显的“鱼尾效应”,从而增加系统拖航阻力。目前,为解决拖航系统的航向稳性问题,通常会采用增加拖轮数量以提升系统的稳性控制能力。为实现对拖航系统的稳性控制,也可通过控制浮体的压载和增稳装置动态调整风机的姿态,实时监测风机的运动状态,保持

拖航作业动态过程的稳定性。

3.4 复杂环境荷载与多体动力耦合仿真

漂浮式海上风机拖航作业系统的动力响应特性是作业环境窗口预报的关键,一旦错过作业窗口期,将会导致作业周期大幅延长,进而增加相关成本。在拖航系统多体动力响应预报中,波浪荷载的求解是漂浮式海上风机拖航系统动力特性评估的重要前提。由于拖航系统航速一般不超过 6 节(例如 Hywind Tampen 设计的拖航航速仅有 2 节),现有研究中较少关注航速对

漂浮式海上风机拖航系统波浪荷载的影响。然而, Pan 等^[65]的研究发现,与无航速状态相比,拖航系统在 1 m/s 的拖航航速下,平均漂移力增大 25%~30%; Chen 等^[66]研究表明,随着航速的提高,拖航结构物运动响应逐渐增大。目前带航速结构波浪荷载的研究主要集中于船舶领域,如何考虑航行兴波和辐射兴波的干扰作用依然是亟待解决的关键问题^[67]。表 1 总结了国内、外针对带航速船舶的水动力问题相关研究的进展。

表 1 边界元法求解带航速船舶的水动力问题

Table 1 Boundary element method (BEM) for hydrodynamic problems of vessels with forward speed

求解域 Solution domain	格林函数 Green function	相关研究 Related research	方法特点 Method features
频域 Frequency domain	自由面格林函数法 Free-surface Green function	Beck 等 ^[68] 和周正全等 ^[69] 在有航速船舶水动力计算中进行了航速修正。Haskind ^[70-71] 、缪国平等 ^[72] 和 Bessho ^[73] 分别推导了不同形式的移动脉动源格林函数。	计算高效,是目前应用最广泛的方法,也是大多数成熟的商业软件所采用的方法。格林函数形式复杂,且仅能考虑弱非线性效应。
	Rankine 面元法 Rankine panel method	Nakos ^[74] 、Nakos 等 ^[75] 、Yasukawa ^[76] 针对频域 Rankine 面元法引入叠模流动假设下的自由面边界条件,部分考虑了移动兴波对船体荷载及运动预报结果的影响;Söding 等 ^[77] 在频域 Rankine 面元法中引入定常兴波流动假设下的自由面边界条件。	Rankine 面元法的格林函数形式简单,便于求解。需要在自由液面边界上布源,远场辐射条件还需截断并添加人工阻尼 ^[78] 。
时域 Time domain	自由面格林函数法 Free-surface Green function	Danmeier ^[79] 采用精确物面假设下的时域移动脉动源格林函数法,结合高阶面元的空间离散形式,计算了有航速船舶在波浪作用下所遭受的波浪荷载; Zhang 等 ^[80] 针对三维时域移动脉动源格林函数法,开发了具有可变维度矩阵的精确积分法,并将其应用于求解 Wigley I 型船的波浪荷载。	频域边界元方法所求解的是稳态下结构的波浪荷载,而时域边界元方法则可以捕捉瞬态的强非线性效应。
	Rankine 面元法 Rankine panel method	Kring ^[81] 、Yasukawa ^[82] 、Kim 等 ^[83-84] 、Song 等 ^[85] 和 Zhang 等 ^[86] 采用基于叠模流动的时域 Rankine 面元法研究了有航速船舶的水动力问题; Li 等 ^[87] 结合了时域 Rankine 面元法、梁单元理论和修正的 Logvinovich 模型,探讨了考虑水弹性作用下船舶不同航速状态的波浪抨击荷载,研究发现较低航速下,航速对抨击荷载的影响较小,当航速较高时,抨击荷载主要集中于船艏侧舷。	
多域 Multi-domain	Rankine 面元法(内域)+自由面格林函数法(外域) Rankine panel method (inner domain) + free-surface Green function method(exterior domain)	Zhang 等 ^[88] 最早采用内域 Rankine 面元法结合外域自由面格林函数法计算船舶运动响应。陈曦 ^[89] 在研究时域多域法时,通过比较发现定常兴波流动假设下的自由面条件能够更准确地预测船体遭受的波浪荷载。周文俊 ^[78] 针对时域多域法的内、外域进行改良,更多地考虑了入射波浪对辐射和绕射的影响,并在外域处理上采用垂向积分方法,减少了外域记忆项的计算量,节省了计算时间。	多域法通过内、外域的分配来弥补方法自身的不足:内域采用 Rankine 面元法可以更好地捕捉自由液面的非线性,外域采用自由面格林函数法避免远场截断。

在环境荷载预报的基础上,还需进一步建立漂浮式海上风机拖航系统多体动力耦合模型,优化拖航航速、拖航吃水、拖缆长度和拖点位置等拖航参数,支撑拖航作业环境窗口预报。Chen 等^[66]探讨了不同航速下漂浮式海上风机的运动响应,明确指出随着拖航速度增大,漂浮式海上风机纵摇增大(见图 11)。Ding 等^[90]探讨了拖点高度对 TLP 海上风机拖航系统的影响,该研究发现,当拖点位置接近海面时,可降低 TLP 海上风机的纵摇幅度与拖缆张力。Zhang 等^[58]探讨了

吃水深度、拖点位置、拖航航速和拖绳长度对海上气象桅杆拖航系统动力响应的影响,进而研究发现,海上气象桅杆运动响应的幅值对拖缆长度变化最敏感。随着漂浮式海上风电产业规模的扩大,作业环境窗口的准确预报变得更为关键,因此需要发展更加高效、准确的漂浮式海上风机带航速状态波浪荷载求解方法并完善漂浮式海上风机拖航系统多体耦合动力学模型,为拖航作业环境窗口预报提供科学数据支撑。

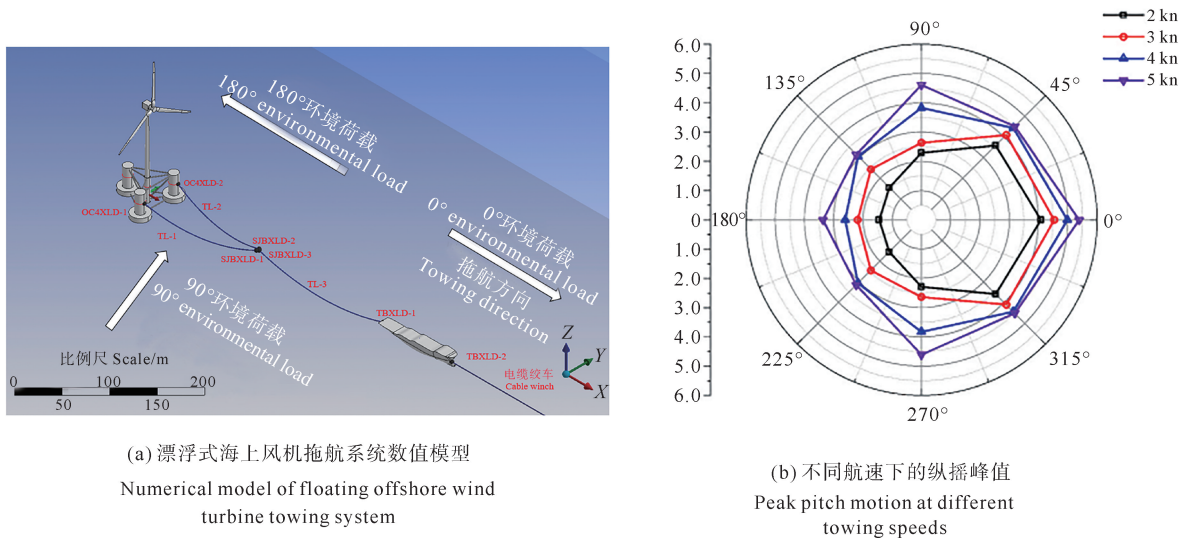


图 11 漂浮式海上风机拖航系统动力响应相关研究^[66]

Fig. 11 Related research on dynamic response of floating offshore wind turbine towing systems^[66]

4 未来技术发展需求与展望

4.1 漂浮式海上风机施工安装新工艺

现阶段,漂浮式海上风机施工安装作业大多采用“码头组装+整机湿拖+系泊对接”的传统技术,这一过程的作业周期长、效率低,无法满足海上风机的深远海和大型化快速发展需求。对于 Spar 海上风机,现有安装工艺对码头和航道水深要求较高,而 TLP 海上风机则受稳性限制,导致两种浮体结构形式未能大规模推广应用。荷兰海工企业 Heerema 提出了一种“浮式对接(Floating to floating)”的漂浮式海上风机施工安装方案^[91],可有效解决 Spar 风机和 TLP 海上风机的施工安装难题(见图 12)。浮式对接技术工艺具体如下:在离岸环境下依次安装浮体和上部风机结构, Spar 浮体采用水平拖运方式降低对航道水深的要求, TLP 浮体则采用干拖作业以避免湿拖过程存在的整机稳性问题。此外,浮式对接还可实现多台风机的安装作业,大幅提升作业效率。

与此同时,浮托安装技术也在逐渐应用于上部风机与浮式基础的对接作业^[92]。首先,风机各组件(如叶

片、塔架和机舱)在码头进行一体化组装;然后风机整体滑移至双体船,并由双体船运输到安装现场;双体船通过动力定位系统保持与浮式基础的对正状态,然后开始现场安装作业;最后,上部结构和浮式基础通过主动作业机构完成对接,同时使用主动补偿技术保障对接精度(见图 13)。由于浮托作业不需要使用大型吊机,并且对风机高度限制较小,浮托技术也将在未来大型化风机的施工安装中发挥重要作用。此外,以 TetraSpar 和 TetraSub 为代表的新型浮体结构,通过调节龙骨位置,实现“半潜式浮体拖航作业”与“Spar 浮体在位运行”的理念结合,解决了 Spar 浮体施工安装难题,为施工安装工艺创新发展提供了新思路^[33]。

随着漂浮式海上风机规模化开发进程的不断推进,未来施工安装工艺需要能够适应更加恶劣和复杂多变的深远海环境条件,满足更大容量风机的安装需求。同时,浮体结构的创新应基于全生命周期设计理念,将结构与施工安装环节统筹考虑,提高系统整体的经济性和可靠性,为漂浮式海上风机发展提供系统化解决方案。



图 12 漂浮式海上风机“浮式对接”施工安装方案^[91]

Fig. 12 "Floating-to-floating" construction and installation plan for floating offshore wind turbines^[91]

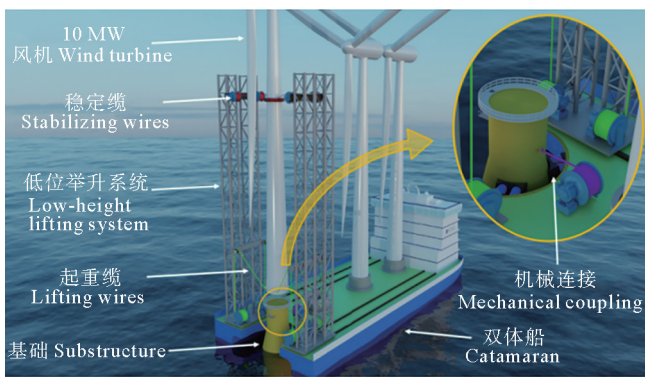


图 13 海上风机双体船浮托安装示意图^[93]

Fig. 13 Schematic of catamaran float-over installation for wind turbine^[93]

4.2 漂浮式海上风机施工安装新装备

发展新型施工作业装备是降低漂浮式海上风机安装成本、提高安装效率和保障作业安全的关键,也是施工安装工艺创新的必要支撑。首先,海上施工作业必然离不开作业驳船的保障。在深远海环境下,浮式安装船拥有较大的甲板空间和承载能力,可以容纳更大型风机及其安装设备,同时采用动力定位系统,确保作业船在海上精确地保持特定位置和姿态,减少了大量锚泊作业时间,从而大幅提高了施工的灵活性和效率。新型船体结构也在不断涌现,Liu 等^[94]针对 Spar 安装作业提出了一种小水线面双体船,可有效减小对接作业过程中的浮体运动;针对 TLP 海上风机安装的稳性

问题,Iberdrola 公司^[95]提出了一种新型 U 形运输安装船(见图 14)。与作业驳船配套的新型结构装备也是提高安装效率和安全性关键,以运动补偿系统为代表的新式作业装备,可以有效减小安装结构受到的波浪荷载影响,提高施工作业的精准度和效率,保障作业人员安全。同时,主动补偿作业可降低结构间的冲击荷载,使得安装作业能够在相对恶劣的海洋环境下开展,扩大作业环境窗口。

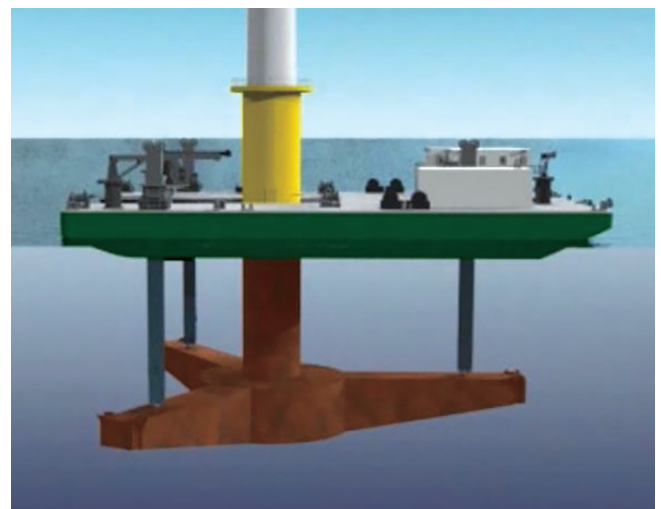


图 14 TLP 海上风机 U 形运输安装船^[95]

Fig. 14 U-shaped transport and installation vessel for TLP offshore wind turbines^[95]

未来,具备高自主性的智能化、无人化作业装备具有巨大发展潜力,其能够自主或远程遥控完成水面作业任务,减少人为因素导致的风险和错误。但智能化、无人化作业装备的发展离不开高新技术的支撑,例如高精度信息感知、通信导航与信息交互、远程监控与智能控制系统等技术的持续创新与融合。在无人施工作业过程中,需要实时监测海上施工现场的各项参数,包括设备运行状态和海洋环境条件等,及时发现并解决问题,同时还能够根据海上环境的变化和作业需求进行自动调节和优化,实现设备的自主运行和自动化操作,保障作业的安全性、可靠性和稳定性。此外,在施工作业完成后,通过对作业数据的记录和分析,能够为决策优化提供支持,提高作业效率和质量。

4.3 漂浮式海上风机施工安装数字化技术

数字化技术为漂浮式海上风机运输安装带来重大技术革新和发展机遇。数字化技术以全息监测、数字孪生和全时空融合为手段,通过构建海上施工作业的虚拟数字模型,能够实现对海上施工作业过程的精准模拟和仿真,准确模拟实际施工环境和作业流程,并为施工作业提供实时智能反馈控制,从而为作业方案的优化和决策提供可靠依据。

基于物理学第一性原理开发高效、准确的数值分析工具是实现漂浮式海上风机运输安装数字化转型的基础。由于安装作业过程涉及多体系统在多个环境场共同作用下的复杂耦合效应,同时也存在着非线性环境荷载、复杂载荷传递和结构冲击碰撞等问题,真实物理过程极其复杂。因此,漂浮式海上风机施工安装的数字化需要针对海上安装作业复杂系统各组成部分的属性、状态、行为和相互作用机制构建认知、抽象和描述方法,发展相应的数学模型,进而形成数字化技术的知识基础。

发展多源多通道数据实时采集感知技术,以及异构数据融合分析和传输共享技术,是实现漂浮式海上风机运输安装数字化转型的关键环节。漂浮式海上风机施工安装涉及到的大型海上作业装备众多,作业流程高度复杂,因而智能传感器的广泛部署成为关键。这些传感器能够实时捕捉装备的运行状态信息,并通过有线和无线的传感器网络发送至船载数据中心进行分析处理,可以有效支撑安装作业过程的智能决策。此外,实际多物理场海洋环境中监测得到的海量数据类型繁杂,需要通过对各种异构数据进行内容分析和融合处理,进一步挖掘隐藏信息和有效数据,提高数字化辅助作业的效率 and 准确性。

最后,以漂浮式海上风机施工安装作业装备体系和工程技术能力为依托,借助机器学习、数字孪生和大数据等数字化赋能方法,能够实现对漂浮式海上风机

施工安装过程关键作业环节中关键结构的动力响应预测和智能反馈控制,促进物理现实与数字空间之间的数据高效交互和传递,进而将传统以关键参数进行控制的作业过程升级为海上作业全过程、全要素控制。综上所述,通过“数据感知-实时分析-智能决策-精准执行”闭环,能够实现漂浮式海上风机运输安装的全流程数字化作业,进而以数据驱动提升工程能力,助力漂浮式海上风机施工安装的产业升级。

5 总结

漂浮式海上风机是海洋风电产业迈向深远海的关键技术装备。目前国内、外漂浮式海上风电开发主要借鉴海上油气产业发展经验,浮体结构型式仍以技术成熟度相对较高的半潜式、Spar 和 TLP 为主,开发成本高昂。在此背景下,以“撑杆化浮体”、“无塔筒+自动对风+单点系泊”为代表的新型结构概念正在不断涌现,助力漂浮式海上风机降本增效。

在漂浮式海上风电开发全生命周期中,施工安装是实现海上风电经济、安全和高效开发的关键。目前,漂浮式海上风机施工安装主要采用“码头组装+整机湿拖+系泊对接”的技术工艺。由于整机运输周期长、距离远,加之海洋环境的不确定性和复杂性,漂浮式海上风机运输安装作业仍面临诸多问题与技术挑战。为了克服这些挑战,应着重从以下几个方面进行技术创新与优化:首先,在现有运输安装作业技术基础上,应进一步提高海洋气象环境条件预报的时效性和准确性,发展航线优化及动态规划方法,为漂浮式海上风机拖航作业的航线设计提供科学指导;其次,针对漂浮式海上风机拖航作业中拖航阻力和拖缆张力等关键物理量,发展快速、准确的预报方法,支撑拖航作业关键装备选型与设计;然后,建立拖航系统多层级稳性评价体系,发展压载调节和稳性辅助模块等拖航作业增稳技术,保障拖航作业过程的系统稳定性;最后,构建复杂环境荷载作用下漂浮式海上风机多体动力耦合模型,为优化拖航作业关键参数和作业环境窗口预报提供科学数据支撑。

在现有施工安装技术基础上,针对漂浮式海上风机的深远海和大型化发展需求,也应积极探索并创新施工安装新工艺与配套作业技术装备。以 TetraSpar 为代表的新型漂浮式海上风机通过特殊的龙骨结构设计可灵活调整结构布置,克服了 Spar 浮体结构运输作业对水深的限制。同时,“浮式对接”作业技术也可有效解决 Spar 和 TLP 浮体运输安装难题,提高安装效率。面对漂浮式海上风机发展机遇与挑战,未来应形成“新工艺+新装备+新技术”的多层级、多角度发展路线,创新安全、经济、高效的漂浮式海上风机运输安

装新工艺,发展漂浮式海上风机运输安装作业新装备,发挥数字化技术优势,为漂浮式海上风机运输安装作业提供系统化解决方案,助力未来漂浮式海上风机向深远海域和大型化方向的蓬勃发展。

参考文献:

- [1] Bai H, Xu K, Zhang M, et al. Theoretical and experimental study of the high-frequency nonlinear dynamic response of a 10 MW semi-submersible floating offshore wind turbine[J]. *Renewable Energy*, 2024: 120952.
- [2] Du J, Zhang D, Zhang Y, et al. Design and comparative analysis of alternative mooring systems for offshore floating photovoltaics arrays in ultra-shallow water with significant tidal range[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 302: 117649.
- [3] 曹群. 中等水深 10 MW 半潜型浮式风机概念方案与耦合动力特性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2022.
Cao Q. Conceptual Design and Coupled Dynamic Analysis for a 10 MW Wind Turbine in Intermediate Water Depth[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2022.
- [4] 温斌荣, 田新亮, 李占伟, 彭志科. 大型漂浮式风电装备耦合动力学研究: 历史, 进展与挑战[J]. *力学进展*, 2022, 52(4): 78.
Wen B R, Tian X L, Li Z W, Peng Z K. Coupling dynamics of floating wind turbines: History, progress and challenges[J]. *Advances in Mechanics*, 2022, 52(4): 731-808.
- [5] Bai H, Zhang M, Li W, et al. Calibration of wave-induced high-frequency dynamic response and its effects on the fatigue damage of floating offshore wind turbine[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 309: 118405.
- [6] Bai H, Zhang M, Yuan W, et al. Conceptual design, parameter optimization and performance investigation of a 10 MW semi-submersible floating wind turbine in shallow water[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 281: 114895.
- [7] Musial W, Heimiller D, Beiter P, et al. 2016 Offshore Wind Energy Resource Assessment for the United States[R]. Golden, Colorado: National Renewable Energy Laboratory, 2016.
- [8] 李志川, 高敏, 齐磊, 等. 漂浮式风电开发技术研究综述[J]. *船舶工程*, 2023, 45(10): 153-160+165.
Li Z C, Gao M, Qi L, et al. Review of floating wind power development technology research[J]. *Ship Engineering*, 2023, 45(10): 153-160+165.
- [9] 刘小燕, 韩旭亮, 秦梦飞. 漂浮式风电技术现状及中国深远海风电开发前景展望[J]. *中国海上油气*, 2024, 36(2): 233-242.
Liu X Y, Han X L, Qin M F. Current status of floating wind power technology and prospects for China's deep sea wind power development[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2024, 36(2): 233-242.
- [10] 陈嘉豪, 裴爱国, 马兆荣, 等. 海上漂浮式风机关键技术研究进展[J]. *南方能源建设*, 2020, 7(1): 8-20.
Chen J H, Pei A G, Ma Z R, et al. A review of the key technologies for floating offshore wind turbines[J]. *Southern Energy Construction*, 2020, 7(1): 8-20.
- [11] 何佳龙, 李祥, 喻葭临, 等. 漂浮式海上风电施工关键技术应用研究进展[J]. *水力发电*, 2023, 49(12): 108-111.
He J L, Li X, Yu J L, et al. Progress on the application of key technologies in floating offshore wind power construction[J]. *Water Power*, 2023, 49(12): 108-111.
- [12] Jiang Z. Installation of offshore wind turbines: A technical review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 139: 110576.
- [13] Ren Z, Verma A S, Li Y, et al. Offshore wind turbine operations and maintenance: A state-of-the-art review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 144: 110886.
- [14] Heronemus W E. Pollution-free energy from offshore winds[C]//Marine Technology Society. Proceedings of the 8th Annual Conference and Exposition, Washington D C; Marine Technology Society, 1972.
- [15] Equinor. Industrialising floating offshore wind[EB/OL]. [2024-07-10]. <https://www.equinor.com/energy/floating-wind>.
- [16] Principlepower. WF1 Trial Rescue Operation Deemed a Success[EB/OL]. (2012-11-15)[2024-07-10]. <https://www.principlepower.com/news/wf1-trial-rescue-operation-deemed-a-success>.
- [17] Equinor. Hywind Scotland[EB/OL]. [2024-07-10]. <https://www.equinor.com/energy/hywind-scotland>.
- [18] Principle Power. Wind Float Atlantic[EB/OL]. [2024-07-10]. <https://www.windfloat-atlantic.com/>.
- [19] Principle Power. KOWL: World's largest floating windfarm full operational[EB/OL]. (2021-10-19)[2024-07-10]. <https://www.principlepower.com/news/kowl-worlds-largest-floating-windfarm-fully-operational>.
- [20] Equinor. Enova supporting pioneer project[EB/OL]. (2019-08-22)[2024-07-10]. <https://www.equinor.com/news/archive/enova-supporting-pioneer-project>.
- [21] 中国三峡集团. “三峡引领号”: 中国漂浮式海上风电, 我是“破壁人”[N/OL]. 澎湃新闻. (2021-08-13)[2024-07-10]. https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_14025120.
- [22] 邝展婷. 国内首台深远海浮式风电装备正式起航! [N/OL]. 中国船舶集团有限公司. (2022-05-27). <http://www.csic.com.cn/n135/n171/n181/c23041/content.html>.
- [23] Penn. 中国第一座深远海浮式风电开装, 抗 17 级台风, 全球加速开发[N/OL]. 澎湃新闻. (2023-04-11). https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_22640236.
- [24] 杨镇潇, 叶国, 赵彤. 光伏发电+渔业养殖: 全球首个漂浮式“风光渔”融合项目主体完工[N/OL]. 澎湃新闻. (2023-10-21). https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_25013362.
- [25] Corporation T. Sakiyama 2 MW Floating Offshore Wind Turbine[R]. Tokyo: Toda Corporation, 2013.
- [26] BW Ideol. First helicopter evacuation exercise on a wind turbine in France[EB/OL]. (2022-06-02)[2024-07-10]. <https://www.bw-ideol.com/en/first-helicopter-exercise-on-a-wind-turbine-in-france>.
- [27] 许移庆, 张友林. 漂浮式海上风电发展概述[J]. *风能*, 2020(5): 56-61.
Xu Y Q, Zhang Y L. Review of floating offshore wind power[J]. *Wind Energy*, 2020(5): 56-61.
- [28] 王征. 英国漂浮式海上风电开发的用海权规划[J]. *风能*, 2022(12): 44-51.
Wang Z. Planning for use right of sea area of British wind energy[J]. *Wind Power*, 2022(12): 44-51.
- [29] Provence Grand Large. Les Trois Éoliennes Flottantes de Provence Grand Large ont Été Installées en Mer Avec Succès[EB/OL]. (2023-10-11)[2024-07-10]. <https://provencegrandlarge.fr/2023/>

- 10/11/les-trois-eliennes-flottantes-de-provence-grand-large-ont-ete-installees-en-mer-avec-succes/.
- [30] Loz Blain. Disruptive offshore wind pyramid moves to real-world prototype testing ENERGY[N/OL]. (2023-12-07). <https://newatlas.com/energy/t-omega-floating-wind-prototype/>.
- [31] X1 Wind. PivotBuoy Project: Part-Scale Prototype in the Canary Islands [EB/OL]. [2024-07-10]. <https://www.x1wind.com/projects/pivotbuoy-project-part-scale-prototype-in-the-canary-islands/>.
- [32] Fred Olsen. The Floating Foundation BRUNEL[EB/OL]. [2024-07-10]. <https://www.fredolsen1848.com/technologies/brunel/>.
- [33] Stiesdal. The world's first fully industrialized offshore foundation [EB/OL]. [2024-07-10]. <https://www.stiesdal.com/offshore/the-tetraspar-full-scale-demonstration-project/>.
- [34] Equinor. Next step for Hywind Tampen[EB/OL]. (2021-04-21) [2024-07-10]. <https://www.equinor.com/news/archive/20210422-next-step-hywind-tampen>.
- [35] Subsea D. Hywind Tampen: Floating Wind Farm Installation[R]. Stavanger: Equinor, 2023.
- [36] Principle Power. The WindFloat[®] Advantage: Installation[EB/OL]. [2024-07-10]. <https://www.principlepower.com/windfloat/advantage/installation>.
- [37] Cranemaster. Installation of the First Floating Wind Turbines in Provence [EB/OL]. [2024-07-10]. <https://cranemaster.com/references/installation-of-the-first-floating-wind-turbines-in-provence/>.
- [38] Renouvelables E. Provence Grand Large Sets Sail[EB/OL]. (2023-09-23)[2024-07-10]. <https://edf-renouvelables.com/en/provence-grand-large-prend-le-large/>.
- [39] Yang S, Deng Z, Li X, et al. A novel hybrid model based on STL decomposition and one-dimensional convolutional neural networks with positional encoding for significant wave height forecast[J]. *Renewable Energy*, 2021, 173: 531-543.
- [40] Barnes A P, Kjeldsen T R, McCullen N. Video-based convolutional neural networks forecasting for rainfall forecasting [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2022, 19: 1-5.
- [41] Wu Z, Wang S, Yuan Q, et al. Application of a deep learning-based discrete weather data continuousization model in ship route optimization[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 285: 115435.
- [42] Fabbri T, Vicen-Bueno R. Weather-routing system based on ME-TOC navigation risk assessment[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2019, 7(5): 127.
- [43] Krata P, Szlapczynska J. Ship weather routing optimization with dynamic constraints based on reliable synchronous roll prediction [J]. *Ocean Engineering*, 2018, 150: 124-137.
- [44] Szlapczynska J, Szlapczynski R. Preference-based evolutionary multi-objective optimization in ship weather routing[J]. *Applied Soft Computing*, 2019, 84: 105742.
- [45] Le Pivert F, López-Santander A, Craven M J, et al. Routing optimisation for towing a floating offshore wind turbine under weather constraints[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 305: 118025.
- [46] 交通运输部救捞与水下工程标准化技术委员会. JT/T 1364—2020海上平台拖航技术要求[S]. 北京: 中华人民共和国交通运输部, 2020.
- Technical Committee for Standardization of Maritime Rescue and Salvage and Underwater Engineering. JT/T 1364—2020 Technical Requirements for Offshore Platforms Towing [S]. Beijing: Ministry of Transport of the People's Republic of China, 2020.
- [47] Wang W H, Yang Y, Zhang K D, et al. Characteristics of flow field and various resistances of sandglass-type FPSO with special shape during towing process[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 292: 116532.
- [48] Amin I, Oterkus S, Ali M E A, et al. Experimental investigation on a towing assessment for a floating desalination plant for Egypt [J]. *Ocean Engineering*, 2021, 238: 109746.
- [49] Liu Y, Li H, Chen J, et al. The influence of a circular moonpool on towing resistance of a conical platform[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 287: 115897.
- [50] Liu Y, Li H, Zhou X, et al. The influence of an annular moonpool on towing resistance of a separated polar ocean nuclear energy platform[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 266: 112913.
- [51] Zhang P, Zhao X, Ding H, et al. The wet-towing resistance of the composite bucket foundation for offshore wind turbines[J]. *Marine Structures*, 2021, 80: 103089.
- [52] Berg T E, Selvik Ø. Emergency towing operations in arctic waters[C]//Offshore Technology Conference. Proceedings of the OTC Arctic Technology Conference. Copenhagen, Denmark: Offshore Technology Conference, 2015.
- [53] Guard U C. Report on Investigation into the Circumstances Surrounding the Multiple Related Marine Casualties and Grounding of the MODU Kulluk on December 31, 2012[R]. Washington, D C: United States Department of Homeland Security, 2014.
- [54] Lacarbonara W, Pacitti A. Nonlinear modeling of cables with flexural stiffness[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2008(3): 1-21.
- [55] Fang Z F, He Q S, Xiang B F, et al. A finite element cable model and its applications based on the cubic spline curve[J]. *China Ocean Engineering*, 2013, 27(5): 683-692.
- [56] Fitriady A, Yasukawa H, Maimun A. Theoretical and experimental analysis of a slack towline motion on tug-towed ship during turning[J]. *Ocean Engineering*, 2015, 99: 95-106.
- [57] Srivastava V K, Sanyasiraju Y, Tamsir M. Dynamic behavior of underwater towed cable in linear profile[J]. *International Journal of Scientific and Engineering Research*, 2011, 2(7): 1-6.
- [58] Zhang P, Peng Y, Ding H, et al. Numerical analysis of offshore integrated meteorological mast for wind farms during wet towing transportation[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 188: 106271.
- [59] 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 Bucket Foundation[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [60] 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*, 2023, 38(1): 114-123.
- Di 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.
- [61] Wang H, Liu C, Guo Y, 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.
- [62] 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.
- Liu J H. The Studying on Towing Behaviour of Bucket Foundation Offshore Platform with Air Cushions[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.
- [63] Park S H, Lee S J, Lee S. Experimental investigation of towing- and course-stability of a FPSO towed by a tug-boat with lateral motion[J]. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2021, 13: 12-23.
- [64] Sinibaldi M, Bulian G. Towing simulation in wind through a non-linear 4-DOF model: Bifurcation analysis and occurrence of fish-tailing[J]. *Ocean Engineering*, 2014, 88: 366-392.
- [65] Pan Z, Vada T, Finne S, et al. Benchmark study of numerical approaches for wave-current interaction problem of offshore floaters[C]//American Society of Mechanical Engineers. Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Busan: American Society of Mechanical Engineers, 2016.
- [66] Chen M, Chen Y, Li T, et al. Analysis of the wet-towing operation of a semi-submersible floating wind turbine using a single tugboat[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 299: 117354.
- [67] 朱仁传, 缪国平. 船舶在波浪上运动理论[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2019.
- Zhu R C, Miao G P. *Ship Motion Theory in Waves*[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2019.
- [68] Beck R F, Loken A E. Three-dimensional effects in ship relative-motion problems[J]. *Journal of Ship Research*, 1989, 33(4): 261-268.
- [69] 周正全, 顾懋祥, 孙伯起, 等. 预报船舶在波浪中航行时相对运动的三维模型[J]. *中国造船*, 1991(4): 41-45.
- Zhou Z Q, Gu M X, Sun B Q, et al. Prediction of relative motions of ships in regular wave[J]. *Shipbuilding of China*, 1991(4): 41-45.
- [70] Haskind M. The hydrodynamic theory of ship oscillations in rolling and pitching[J]. *Prikladnaya Matematikay Mekhanika*, 1946, 10: 33-66.
- [71] Havelock T H. The effect of speed of advance upon the damping of heave and pitch[J]. *Quarterly Transactions of the Royal Institution of Naval Architects*, 1958, 100(2): 131-135.
- [72] 缪国平, 刘应中, 杨勤正, 等. 三维移动脉动源的 Michell 型表达[J]. *中国造船*, 1995(4): 1-11.
- Miao G P, Liu Y Z, Yang Q Z, et al. On the 3-D pulsating source of Michell's type with forward speed[J]. *Shipbuilding of China*, 1995(4): 1-11.
- [73] Bessho M. On the fundamental singularity in the theory of ship motions in a seaway[J]. *Memories of the Defense Academy of Japan*, 1977, 17: 95-105.
- [74] Nakos D E. *Ship Wave Patterns and Motions by a Three Dimensional Rankine Panel Method*[D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 1990.
- [75] Nakos D, Sclavounos P. Ship motions by a three-dimensional Rankine panel method [C]//Ship Hydromechanics and Structures. Proceedings of the 18th Symposium on naval hydrodynamics. Washington D C: Ship Hydromechanics and Structures, 1991: 21-40.
- [76] Yasukawa H. A Rankine panel method to calculate unsteady ship hydrodynamic forces[J]. *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 1990, 1990(168): 131-140.
- [77] Söding H, Von Graefe A, El Moctar O, et al. Rankine source method for seakeeping predictions[C]//Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Rio de Janeiro: Ocean, Offshore and Arctic Engineering Division, 2012.
- [78] 周文俊. 基于多域法的船舶时域非线性水动力分析及大幅运动预报[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
- Zhou W J. *Time-Domain Nonlinear Hydrodynamic Analysis and Large Amplitude Motion Prediction of Ship Based on the Multi-Domain Method*[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020.
- [79] Danmeier D G. *A Higher-Order Method for Large-Amplitude Simulations of Bodies in Waves*[D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 1999.
- [80] Zhang T, Zhou B, Liu H, et al. A study on hydrodynamic analysis of ship with forward-speed based on a time domain boundary element method[J]. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2021, 128: 216-226.
- [81] Kring D C. *Time Domain Ship Motions by a Three-Dimensional Rankine Panel Method*[D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 1994.
- [82] Yasukawa H. Application of 3-D time domain panel method to ship seakeeping problems[C]// National Research Council. Proceedings of the 24th Symposium on Naval Hydrodynamics. Fukuoka: The National Academies Press, 2002.
- [83] Kim K H, Kim Y. Comparative study on ship hydrodynamics based on Neumann-Kelvin and double-body linearizations in time-domain analysis[J]. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 2010, 20(4): 265-274.
- [84] Kim K H, Kim Y. On technical issues in the analysis of nonlinear ship motion and structural loads in waves by a time-domain Rankine panel method[C]//Choi H S, Kim Y. Proceedings of the 23rd International Workshop on Water Waves and Floating Bodies. Jeju: Office of Naval Research, 2008.
- [85] Song M J, Kim K H, Kim Y. Numerical analysis and validation of weakly nonlinear ship motions and structural loads on a modern containership[J]. *Ocean Engineering*, 2011, 38(1): 77-87.
- [86] Zhang X, Bandyk P, Beck R F. Seakeeping computations using double-body basis flows[J]. *Applied Ocean Research*, 2010, 32(4): 471-482.
- [87] Li H, Zou J, Peng Y, et al. Numerical study of slamming and whipping loads in moderate and large regular waves for different forward speeds[J]. *Marine Structures*, 2024, 94: 103563.
- [88] Zhang S, Lin W M, Weems K. A hybrid boundary-element method for non-wall-sided bodies with or without forward speed [C]//Ship Hydromechanics and Structures. Proceedings of the 13th International Workshop on Water Waves and Floating Bodies. Alphen aan den Rijn, Netherlands: International Workshop on Water Waves and Floating Bodies, 1998: 179-182.
- [89] 陈曦. 航行船舶三维时域水动力分析的数值与应用研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- Chen X. *Numerical and Applied Study on Three Dimensional Time Domain Hydrodynamic Analysis of Navigating Ship*[D].

- Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018.
- [90] Ding H, Han Y, Le C, et al. Dynamic analysis of a floating wind turbine in wet tows based on multi-body dynamics[J]. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2017, 9(3): 033301.
- [91] Contractors H M. Floating to floating offshore wind installation method [EB/OL]. (2022-04-21). <https://www.heerema.com/insights/floating-to-floating-installation-method>.
- [92] Zhao S J, Meng X, Li H J, et al. Continuous multi-body dynamic analysis of float-over deck installation with rapid load transfer technique in open waters[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 224: 108729.
- [93] Hong S, Zhang H, Nord T S, et al. Effect of fender system on the dynamic response of onsite installation of floating offshore wind turbines[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 259: 111830.
- [94] Liu T, Halse K H, Leira B J, et al. Comparative study of the mating process for a spar-type floating wind turbine using two alternative installation vessels[J]. *Applied Ocean Research*, 2023, 132: 103452.
- [95] Iberdrola Ingeniería y Construcción. How to install a TLP Substructure for Offshore Wind? TLPWIND® Case Study[R]. Brussels: European Wind Energy Association, 2015.

Current Sates, Development Trends, and Technical Challenges for Floating Offshore Wind Turbine Installation

Zhao Shujie, Bai Haozhe, Xu Kun, Du Junfeng, Zhang Min, Yuan Wenyong, Li Hua jun
(College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Floating offshore wind turbine is a critical technology for the development and utilization of offshore wind energy, playing a significant strategic role in expanding the development space for offshore wind power. The offshore installation stage is essential in the lifecycle of floating offshore wind turbine and is key to developing offshore wind power economically, safely, and efficiently. However, as offshore wind turbines move towards deeper waters and larger scales, the difficulty of installation increases significantly, and existing installation technology and equipment cannot meet the demands of the operation. This paper firstly reviews the development history of floating offshore wind turbines both domestically and internationally. Then, the future prospects of innovative design concepts in reducing costs, increasing efficiency, and addressing installation challenges are presented. Based on engineering case studies, it summarizes the transportation and installation techniques for floating offshore wind turbines, and analyzes the key issues and technical challenges. Finally, in light of the installation challenges for floating offshore wind turbines, this paper proposes the future requirements for technology and equipment in marine operations, to provide references for the advancement of floating offshore wind turbine into deeper waters.

Key words: floating offshore wind turbine; construction and installation; deep and far sea; multi-body system; digital technology

责任编辑 高 蓓