

深远海浮式风电技术发展研究

李达^{1,2}, 孙涛^{2,3}, 易丛^{1,2}, 高巍^{1,2}, 李书兆^{1,2}, 吕柏呈^{1,2}, 李辉^{1,2}, 张玉明^{1,2},
白卓澜泰³, 王俊荣^{2,3*}, 李华军³

(1. 中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028; 2. 国家能源深水油气工程技术研发中心, 北京 100028;
3. 中国海洋大学工程学院, 山东青岛 266100)

摘要: 发展深远海浮式风电技术是推动海上风电开发降本增效、促进能源结构改革、实现“双碳”愿景的有效途径, 因而突破深远海浮式风电发展的技术瓶颈、加快构建经济高效的海上风电体系成为我国能源电力领域的重大任务。本文在梳理国内外深远海浮式风电发展现状、分析我国深远海风电发展挑战的基础上, 着重剖析了深远海浮式风电技术攻关要素, 涵盖风力机气动荷载演变机理、半潜型基础的运动抑制、张力腿型基础共振、跨物理场测试等科学问题, 风力机气动建模、一体化耦合分析、结构疲劳分析、运动抑制、系泊疲劳分析、动态电缆设计、锚固基础承载力分析、先进材料开发与测试、基础结构大规模定制、集成与海上安装回接、智慧运维等关键技术, 一体化耦合设计分析、实时孪生系统等基础软件能力。进一步阐述了浮式基础型式、浮式风力机总体设计、关键产品自主研发、核心工业软件、高效建造与安装、智能运维等深远海浮式风力机技术发展方向, 提出了构建深远海风电技术创新链、组建深远海风电智能建造与安装产业链、拓展深远海风电产业智能运维体系等发展建议, 以为我国深远海浮式风电技术发展研究及工程应用提供前瞻构思。

关键词: 海上风电; 深远海; 浮式风力机; 一体化耦合分析; 技术创新链; 安装产业链; 智能运维

中图分类号: TK 83 **文献标识码:** A

Development of Deep-Sea Floating Wind Power Technology

Li Da^{1,2}, Sun Tao^{2,3}, Yi Cong^{1,2}, Gao Wei^{1,2}, Li Shuzhao^{1,2}, Lyu Baicheng^{1,2}, Li Hui^{1,2},
Zhang Yuming^{1,2}, Bai Zhuolantai³, Wang Junrong^{2,3*}, Li Huajun³

(1. CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing 100028, China; 2. National Energy Deepwater Oil and Gas Engineering Technology Research and Development Center, Beijing 100028, China; 3. College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, Shandong, China)

Abstract: Advancing the deep-sea floating wind power technology is an effective pathway to reducing costs and enhancing efficiency in offshore wind power development, driving structural reforms in the energy system, and achieving the carbon peaking and carbon neutralization vision. Therefore, achieving breakthroughs in core technologies regarding deep-sea floating wind power and accelerating the construction of cost-effective offshore wind power systems have become major tasks in China's energy and electricity fields. This study reviews the development status of deep-sea floating wind power in China and abroad, analyzes the challenges faced

收稿日期: 2024-08-19; **修回日期:** 2025-01-22

通讯作者: *王俊荣, 中国海洋大学工程学院教授, 研究方向为深水浮式结构系统设计与软件开发; Email: wangjunrong@ouc.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“我国海上超大型漂浮工程发展战略研究”(2023-XBZD-22); 国家能源深水油气工程技术研发中心开放基金课题(CCL2024RCPS0252KQN)

本刊网址: sscae.engineering.org.cn

by China's deep-sea wind power industry, and explores the key elements for technological breakthroughs in deep-sea floating wind power, involving key scientific issues, core technologies, and basic software capabilities (e.g., integrated coupling design and analysis and real-time digital twin systems). Specifically, the key scientific issues include evolution of aerodynamic loads on wind turbines, motion suppression for semi-submersible foundations, resonance of tension-leg-platform-type foundations, and testing across physical fields. The core technologies include aerodynamic modeling of wind turbines, integrated coupling analysis, structural fatigue analysis, mooring and dynamic cable analysis, load capacity analysis for mooring foundations, advanced material development and testing, large-scale customization of foundation structures, integration and offshore installation and reconnection, and intelligent operation and maintenance (O&M). Additionally, the technical development directions of deep-sea floating wind power technology are elaborated, including different types of floating foundations, overall design of floating wind turbines, independent research and development of key products, core industrial software, efficient construction and installation, and intelligent O&M. Furthermore, it is proposed to establish a technological innovation chain, form an intelligent construction and installation chain, and expand the intelligent O&M system for deep-sea wind power, providing forward thinking for the research and engineering application of the deep-sea floating wind power technology in China.

Keywords: offshore wind power; deep-sea; floating offshore wind turbine; integrated coupling analysis; technological innovation chain; installation industry chain; intelligent operation and maintenance

一、前言

海洋风电是构建现代能源结构体系、实现“双碳”愿景、推进海洋强国战略的重要支撑。我国风电装机总容量已居世界首位，在陆上风电场资源开发进一步受限、沿海地区新能源需求持续增长的背景下，海上风电装机成为新的重要增长点。2030年，我国海上风电装机容量约为 1.5×10^8 kW^[1]，将构成推进能源结构转型、应对气候变化的主导力量之一。近年来，近海风资源受航道、海域空间等的限制趋紧，近海风资源开发利用逐步接近饱和状态；而我国拥有丰富的深远海风资源，总量约为 1.3×10^9 kW，是近海风资源的两倍以上^[2]，可支持海洋风电的大型化、规模化发展。为此，海上风电将向深远海挺进，发挥深远海风资源丰富稳定、环境影响小的优势，拓展新的开发潜力。《“十四五”可再生能源发展规划》（2021年）将深远海浮式风电明确为重点支持方向，提出推动深远海风电技术创新、开展海上新型漂浮式基础风电机组示范、推进新型基础的使用和深远海风电的降本增效等重点任务，以促进能源结构改革及产业升级，提升海洋经济竞争力。

我国深远海风资源开发面临客观存在的挑战。国内浮式风电技术发展起步较晚^[3]，直到2021年才实现首个海上风电平台的商业运营，相关技术能力与国际先进水平存在不小的差距^[4]。在地缘性海洋权益竞争加剧的背景下，浮式风电发展需求更显迫切，而部分关键核心技术依然存在瓶颈环节。此外，我国深远海环境具有特殊性，如高波陡极端波

浪较多、台风频发、海床结构复杂^[5]，导致深远海浮式风电开发设计难度高，难以直接沿用欧洲的深远海风电开发模式^[6]。亟需开展适应我国海洋环境条件的深远海风电技术体系研发并培育配套的产业链，才能提高海洋风资源的自主开发能力，加快海洋绿色能源转型。

发展深远海浮式风电，可借鉴固定式支撑结构海上风电、深水浮式油气平台的相关技术，而我国在深水油气开发领域具有良好的技术积累，自主设计和制造了一系列具有国际先进水平的海洋浮式生产平台，如“深海一号”能源站^[7]、“海洋石油122”圆筒型浮式生产储油轮（FPSO）^[8]。深远海风电开发在电力系统、浮体设计、系泊系统、海上安装、动态电缆、运行维护等方面与深水油气开发存在大量的技术重叠，但浮式风电机组相较深水浮式油气平台更高更柔，对强风等动力荷载更为敏感，导致振动问题尤为突出。此外，固定式海上风电机组在浮式技术方面的适用性有待验证，导致浮式风电开发进展迟缓。因此，借鉴深水油气开发技术并计及深远海风电开发的特殊性，开展高性能、经济型浮式平台和系泊系统设计，浮式风力机系统的运动抑制，完善的一体化仿真与设计工具链，智能建造与运维等研究，推动深远海风电直接和间接相关技术的移转、关联产业链的发展壮大，将是我国深远海风资源开发实现快速追赶的可行路径。

突破深远海浮式风电发展的技术瓶颈、构建经济高效的海上风电体系，兼具理论探索和工程应用价值。本文立足国内外深远海风电发展态势，总结我国深远海风电开发面临的技术挑战，探讨解决相

关技术问题的研究思路和方法，辨识我国深远海风电开发技术方向，提出促进深远海风电技术攻关的策略，为深远海风电创新链、产业链高质量发展提供前瞻参考。

二、深远海浮式风电技术发展现状与挑战分析

(一) 国外深远海浮式风电发展现状

欧洲在深远海风电开发方面一直处于领先地位，2023年的新增浮式风电装机容量为37 MW，约占全球新增装机容量的80%；截至2023年年底，欧洲浮式风电累计装机容量>200 MW，约占全球总装机容量的90%^[9]。欧洲浮式海上风电实现从单台样机示范到初步规模化商业应用的跨越式发展，以苏格兰Hywind浮式海上风电场^[10]、挪威Hywind Tampen风电场^[11]、西班牙DemoSATH浮动海上风电项目^[12]等为代表。然而，全球投入运营的浮式风电以示范性项目为主，成熟的商业化案例较少，在海上风电总装机规模中的占比偏小。为了推进深远海海上风电的降本增效，相关机构提出了多种新设计概念，如新型结构材质与支撑形式、经济型系泊系统、新型发电机组等，但多处于设计与验证阶段，技术成熟度尚不足以支撑商业化应用。

在现阶段，欧洲的商业化深远海浮式风电仍以经过验证的单立柱平台（Spar）型、半潜型为主，而张力腿平台（TLP）浮式风力机仅在法国海域开展了工程示范验证；正在积极布局深远海项目，预计2025年的远海风电（离岸距离>70 km）装机容量可达10 GW^[13]。美国、韩国、日本发布了容量较为可观的浮式风电规划，如美国计划2035年完成15 GW浮式风电安装、韩国计划2030年前完成6 GW浮式海上风电投产、日本正在实施120 MW浮式风电示范项目。

(二) 我国海上风电发展现状

我国深远海浮式风电发展起步较晚，但在“十三五”“十四五”行业发展规划以及“双碳”目标推动下发展迅速。截至2024年第三季度，我国海上风电累计建成的并网容量达到40 GW，约占全球总容量的50%。未来10年，我国将进一步扩大海上风电的开发规模。然而，受制于技术、成本等因素，我

国海上风电项目集中在近海浅水区，而深远海风电开发的累计装机容量仅为数十兆瓦（仅占全球总容量的10%），远低于固定式海上风电的规模。为此，“十四五”行业发展规划明确提出，加快深远海风电技术发展，加大对浮式风电示范项目的政策支持力度。整体上，我国海上风电特别是深远海浮式风电具有广阔的开发前景^[14]。

面对复杂的深远海环境，大型化的浮式风力机具有更高的发电效率、更低的度电成本，成为必然的技术发展趋势^[15,16]，由此引发了风电机组、浮式基础的大型化。作为海上风电系统核心的风电机组，单机容量已从前期的5 MW提升至当前的20 MW，以整机规模的跨越式发展驱动风力机基础、电缆、安装、运维等方面成本的有效降低^[17,18]。在这一发展过程中，国内企业和机构掌握了风力机组控制一体化、荷载优化等关键技术，提高了整机和主要部件的制造水平，实现了风电技术从引进、消化吸收到自主创新。例如，中车启航新能源技术有限公司研制的“启航号”20 MW浮式海上风电机组，风轮直径约为260 m、轮毂高度约为151 m，应用了智能化、系统模块化、全链协同化等关键技术，在常规运行和极端工况下具有良好的平稳性与安全性。

在现阶段，我国海上风电项目集中在近海浅水区。为了适应海上风电走向深远海的发展形势，需要借鉴海上油气平台方面的成熟经验，开展深远海浮式风电多类基础形式的应用研究。我国投产的深远海浮式风力机基础形式以半潜型为主（见表1），高性能、经济型的TLP型基础也获得广泛关注。我国浮式风电的开发模式有并网开发、离网供电两类（见表2）。以陆上风力机设计经验、近海固定式风力机建设经验为基础的浮式海上风电开发模式主要适用于近岸项目，而深远海风能开发模式需要持续探索和积累。离网供电、多能协采是现阶段国内漂

表1 我国投产的漂浮式风力机样机项目

典型项目	基础类型	数量	单机容量/MW
“三峡引领号”	半潜型	1	5.5
“海装扶摇号”	半潜型	1	6.2
“海油观澜号”	半潜型	1	7.25
“国能共享号”	半潜型	1	4
“明阳天成号”	半潜型	1	8.3×2

表2 我国漂浮式风电开发模式对比

开发模式	离岸距离/km	水深条件/m	平均风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	典型电价/ ($\text{元}\cdot\text{kW}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)	技术基础
并网开发	<60	<60	7~8	0.4	陆上风力机/海上固定式风力机
离网供电	>100	>100	9~10	0.9	深水油气工程

浮式风电实现盈利开发的有益探索,如中国海洋石油集团有限公司借鉴深水工程经验,建设了水深>100 m、离岸距离>100 km的离网深水浮式风力机示范项目(“海油观澜号”),实现海上风电与海上油气多能协采。此外,突破跨海输电技术以满足深远海的电力远距离输送要求,模块化多级变频器、电能存储系统、非并网应用系统等技术^[19]可为深远海浮式风电场的开发模式提供新思路。

我国海上风电发展迅速、前景广阔,对于深远海风电开发而言则是挑战与机遇并存。我国浮式风电已由科研探索阶段转入生产示范阶段,但整体规模较小、基础平台型式较为单一、运维成本显著高于传统的固定式风电,尚未实现大规模商业化。近年来,浮式风电在技术研发方面取得了一些进展,但整体上发展滞后、体系不够完善;浮式风力机机理性研究有待深入开展并通过系统性的实验验证,浮式风力机一体化耦合与迭代优化、海洋极端环境下浮式基础总体设计与优化等关键技术亟待突破^[20]。

我国海上风电开发整体上处于创新链培育阶段,而高端产业链尚未完全建立;行业可持续、有序发展面临挑战,海上风电价格补贴机制的退出加剧了这一态势。国内海上风电整机市场竞争激烈,投资开发环境严峻,致使关键产品质量的长期可靠性面临风险;热点开发区域存在隐性“门槛”,不利于行业优势企业公平参与市场竞争,影响海上风电产业的健康发展;海上风电产业开发缺乏统筹规划与协同机制,研究课题重复立项、企业重复研发现象突出,未形成技术攻关合力;海上风电产业技术体系尚不成熟,风力机组与浮式基础设计存在界面划分,一体化设计优化难以实现;建造、安装、施工、运维技术及相关设备紧缺,导致海上风电开发项目的实施难度和综合成本增加。

(三) 我国深远海风电发展面临的困难和技术挑战

我国海上风电产业的未来在深远海,但漂浮式风电技术仍处于由样机示范到小批量商业化示

范的初级发展阶段,深远海风电开发存在的困难主要体现在以下方面。①海上风电项目的审批核准流程相对复杂,政策的滞后性与连续性并存,相关影响评估体系不完善,需要优化政策机制,保障深远海风电开发健康有序发展。②深远海风资源分布不均、海况复杂,存在高风险概率的台风、高波陡极端波浪等,对浮式风电机组技术装备要求高,需要突破机组、基础、系泊、建造、运维等一系列技术瓶颈。③浮式风电产业链长、关联度高,浮式风力机的总装受限于近岸码头和航道水深,使设计范围受限,新型系泊产品、快速安装装备等高端配套产品的供应能力尚待完善。④我国综合电价较欧洲、周边国家偏低,对深远海风电开发的经济性要求更高,而浮式风电造价高、距离商业化大规模开发仍有相当的差距,全面的降本增效成为迫切需求。

我国可商业化应用的浮式风电技术体系尚未形成,深远海浮式风电开发的技术挑战主要体现在以下方面。①单机装机容量逐步加大,桨叶、塔体等风力机主要结构更为大型化、柔性化,导致结构体系在风浪流等动力荷载作用下的振动问题愈发突出,伴生了浮体纵摇与桨叶变桨耦合失稳、负阻尼效应下浮式风力机控制系统失稳、长柔桨叶的气动弹性、固定式海上风电机组在浮式结构中的适用性等技术问题。②浮式基础是深远海浮式风力机稳定运行的关键支撑,随着浮式基础的大型化,浮体刚度假定不再适用,流固耦合作用更加复杂,带来了非线性程度增加,旋转桨叶、塔体、基础平台耦合共振等问题,对大型浮式基础在复杂海洋环境荷载下的稳性、可靠性构成了挑战,向风力机桨叶、控制系统、系泊系统等部件的设计可靠性提出了更高要求。③海上风电运维技术水平不匹配海上风电建设规模,风电装备智能化水平不高,大型组件的海上故障维修与更换技术未能突破,大型运维装备等资源存在不足,不适应未来深远海风电大规模开发的需求。

三、深远海浮式风电技术攻关剖析

(一) 科学问题辨析

1. 浮体运动条件下大型风力机气动荷载演变机理

浮式风力机的桨叶趋向轻质化、长柔化发展，在复杂海洋环境下的气动问题更显突出。细长柔性桨叶在旋转离心力、交变气动荷载的作用下可能发生突然偏转以适应气动荷载的变化，但这种偏转可能不稳定，进而导致桨叶失效或损坏^[21]。浮式平台在浪流作用下会产生复杂的动态响应，可能加剧上述不稳定现象；浮式平台的小幅运动会因塔体的高柔特性而引起风力机的大幅运动，使风力机桨叶的动态特性变得更加显著。特别地，浮式平台运动会导致桨叶拍击风轮尾迹场，致使桨叶与高度不稳定的尾迹场耦合，甚至引发气动荷载大幅波动^[22]，影响风力机的运行安全与发电效率。此外，浮式平台的周期性运动会导致气动荷载的周期性变化^[23]，将增大浮式风力机运行的不确定性。

需要探究浮式风力机桨叶与风轮尾迹的耦合机制，发展高效的风力机气动性能分析方法，研究浮式平台运动对大型浮式风力机桨叶绕流场、风轮尾迹、叶片弯矩、风轮推力的作用机制及影响规律，揭示浮式平台运动条件下大型浮式风力机气动荷载的演变机理，建立高效、高置信度的气动荷载预测方法，确保浮式风力机系统的稳定安全运行。

2. 高波陡条件下半潜型基础的运动抑制机理

中国海洋石油集团有限公司对南海环境条件开展了超过20年的监测与分析，发现南海海域特别是深水区域的极端波浪呈现外海长周期涌浪与本地风浪叠加、极端波浪由台风控制且波陡大、能量集中高等特点。在高波陡条件下，浮式平台易产生与波高线性相关的一阶运动、与波高的平方成正比的二阶运动。实践表明，浮式平台的二阶运动总体贡献度>50%，成为威胁浮式平台长期安全服役的重要因素^[24]。对波致振动敏感的半潜浮式风力机，极端条件下的动力运动更加复杂，纵摇运动和机舱加速度应满足补充的设计要求^[25]。

需要针对半潜浮式风力机的服役要求，结合南海海域极端波浪的高波陡特性，研究二阶波浪荷载作用下半潜浮式风力机的运动响应特性，探讨稳性高、纵摇固有周期与一阶纵摇的相互影响机制（见

图1），建立高波陡条件下半潜浮式风力机的纵摇抑制方法和相关设计准则，确保极端波浪作用下半潜浮式风力机仍能维持良好的纵摇运动特性。

3. 张力腿式基础与叶片转动激励共振机理

TLP通过垂向的系泊张力平衡平台浮体产生的超额浮力来保证系统安全稳定运行，广泛应用于深水油气开发，全球在役和在建的TLP共有近30座。TLP具有半顺应性、半刚性的运动性能，在纵荡、横荡、首摇3个水平面内的运动固有周期远小于波浪主能量的周期范围；在张力腿浮筒承受波浪力的较大水平分量作用下，通过张力腿在水平面内的柔性实现平台3个水平面内的运动，表现为顺应性；在纵摇、横摇、垂荡3个垂直面内运动的固有周期远小于波浪主能量的周期范围，较大的张力腿预张力使3个垂直面内（纵摇、横摇、垂荡）的运动较小，表现为半刚性^[26]，从而使TLP呈现出优异的水动力性能（见图2）。

对于张力腿浮式油气平台，共振现象主要体现

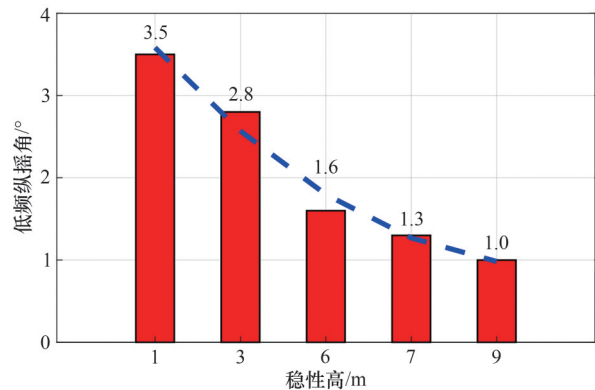


图1 半潜平台低频纵摇与稳性高的非线性关系

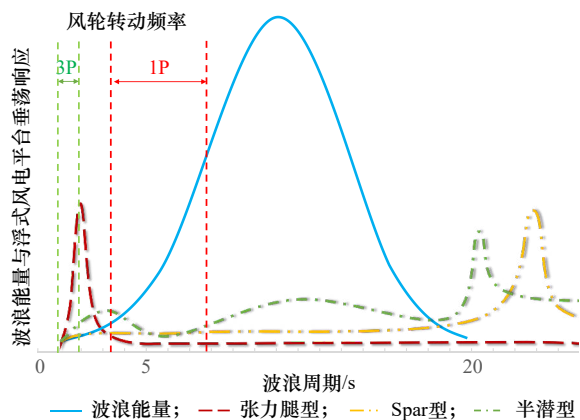


图2 浮式油气平台固有频率与波浪能量关系

注：1P表示叶片转动频率；3P表示3倍叶片通过频率。

在风浪环境载荷与系泊系统的耦合振动上, 相关的振动响应求解方法、工程设计软件、水池试验较成熟。而在浮式风电领域, 张力腿式基础不仅需要应对风浪环境载荷激励, 而且需要考虑固有周期 <5 s 的多种高频共振成分, 如风力机叶轮 3P、塔筒 1 阶固有频率、叶片 1 阶固有频率、基础纵摇 / 横摇固有频率、垂荡固有频率等。为此, 张力腿浮式风电机组仿真分析应采用一体化全耦合技术, 以充分掌握共振响应特性并揭示共振机理。在此基础上, 研究避免或者抑制张力腿浮式风力机高频共振的设计方法, 以更好指导实际工程设计; 采用一体化全耦合方法, 分析张力腿浮式基础系泊的张力响应谱, 以直观展示此类基础与风力机之间的复杂共振特性(见图 3)。

4. 风场与波流场高精度保真测试技术

一体化缩尺模型试验是验证浮式风力机性能和经济可行性的有效方法, 可提供较数值模拟、硬件在环测试更加可靠的结果, 有利于在高成本海试前发现并解决潜在的技术问题。然而, 模型中的风力机、浮体具有不同的相似准则(表征风力机空气动力学特性的雷诺数相似准则、表征浮体水动力特性的弗劳德数相似准则), 难以在同一个物理场中实现气动力、水动力的精确匹配模拟, 引发气动-水动荷载失调的问题。

浮式风力机的物理模型试验系统需要以修正或等效的浮式风力机模型气动载荷为基础, 主要分为全实物模型试验、基于数值浮体的半实物模型试验、基于数值风轮的半实物模型试验^[27]。①以性能相似风轮为基础的全实物模型试验, 可较好地模拟风场旋转采样效应、陀螺效应、气动荷载的动态特性匹配度等, 但严重依赖造风风场的模拟能力、精

细化的风轮模型设计能力。②基于数值风轮的半实物模型试验以验证水动力特性为目的、以水池试验为手段, 采用近似方法进行模拟, 牺牲风洞实验中常用的雷诺数相似准则, 仅保证风力发电机组的载荷相似^[28]。③基于数值浮体的半实物模型试验忽略弗劳德数相似准则, 而侧重验证风力机气动性能特性。

然而, 这 3 类方法忽略了风电机组与浮式基础之间的动力耦合, 难以真实反映浮式风力机的动力响应特性, 无法支撑浮式基础设计优化、风电机组控制策略优化^[29]; 不同物理场条件下数据实时交互与耦合存在瓶颈, 需要采取新技术手段予以突破; 均以风轮气动载荷匹配为约束准则, 面向大型浮式风力机的适应性存在局限。因此, 建立风场与波流场协同的缩尺测试理论以及相应的高精度保真测试技术, 成为未来浮式风力机试验测试技术的攻关方向。

(二) 关键技术问题梳理

1. 大型浮式风力机高效保真气动建模技术

良好的空气动力学特性是确保大型浮式风力机安全可靠并提升发电效率的关键。由于受到浮式平台的影响, 大型浮式风力机的气动性能趋于复杂, 如浮式平台的运动可引起桨叶的非定常效应(呈现高度动态和非线性特征)甚至失速风险, 也会增强桨叶与风轮尾迹的耦合效应, 造成气动荷载发生较大波动, 显著影响风力机的运行安全。需要采用精细的数学模型和高效的计算方法, 以精确捕捉浮式风力机的非定常空气动力学特性, 进而可靠预测不同工况下的气动荷载和输出功率。

非定常空气动力学数值模拟方法主要分为叶素动量理论方法(BEM)、涡流理论方法(FVM)、计算流体力学方法(CFD)^[30]。BEM建模简单、计算效率高, 但依赖工程修正模型, 计算精度相对较低, 特别是对强阵风、浮式平台振荡、复杂尾流状态等非定常因素的模拟精度不足^[31]。FVM的计算精度和适应性优于BEM, 可精确捕捉桨叶与风轮尾迹的耦合效应, 但难以描述复杂运动状态下风力机桨叶表面的分离流动、强三维流动特性^[32]。CFD方法可以较为真实地捕捉平台运动状态下浮式风力机局部翼型绕流、风轮尾迹的动态演化特征, 但建模复杂、计算量大、成本高, 难以支持浮式风力机气

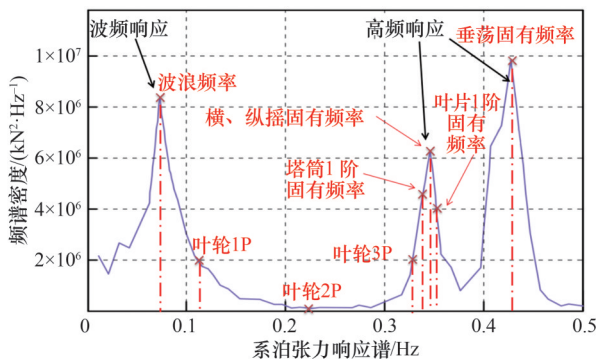


图3 张力腿式风电机组系泊张力响应谱

动性能的优化与控制^[33]。

需要发展现有的数值分析方法，开展浮式风力机非定常气动特性试验技术研究，开发实时监测系统，建立基于物理-数据驱动的高效浮式风力机气动分析模型；深入揭示浮式平台运动条件下风轮非定常气动特性、气动荷载变化规律、动态尾迹演化特性，进而提高浮式风力机的设计水平和运营成效。

2. 大型浮式风力机一体化耦合分析及迭代优化技术

增加风力机的单机容量、风轮直径、塔体高度，以更高的发电利用小时数更好地捕捉深远海高空稳定的风资源，据此提高海上风电开发的经济性并实现降本增效。风力机大型化、深远海化是海上风电资源开发的发展趋势，推动浮式基础朝着大型化方向发展。相较小型浮式基础，大型浮式基础具有良好的稳定性和耐波性，但刚体假设不再适用，即在波浪作用下可能产生复杂的动力响应，因而需要考虑浮式基础的刚度、模态对整机模态及水动力载荷的影响。大型浮式基础在复杂海洋环境荷载作用下需有高的稳定性和可靠性，才能保障浮式风力机的长期安全稳定运行。浮式风电机组作为多物理场、多体非线性耦合动力系统，需采用一体化耦合方法进行模拟（见图4），以捕捉气动力、结构弹性、风力机控制、浮体水动力、系泊系统的非线性

耦合特性，准确模拟浮式风电机组的动力响应。

工程中主要采用分离式设计方法，由提供主机和塔筒的海上风电整机厂家、提供浮式基础（浮体、系泊系统）的设计单位进行交互式迭代。对于固定式海上风电，整机厂家与设计单位采用相对成熟的法兰交界面等效疲劳荷载迭代方法进行优化，但该方法在浮式风电领域的适应性较差。因此，采用一体化耦合方式成为全行业的倾向性发展方向。国内风电行业依然存在“卡点”：整机厂家对外不开放风力机数据，通常独立完成浮式风电一体化耦合仿真分析；相关荷载再传递至设计单位，由设计单位进行浮式基础设计优化。在这一过程中，整机厂家应用的设计软件侧重风力机和塔筒，而对浮式基础的水动力、系泊系统仿真能力不足，难以准确反映浮式基础的动力响应，也就影响一体化耦合设计的准确性和效率。

深远海风资源的经济性开发价值明确，漂浮式风电降本需求凸显。中国海洋石油集团有限公司结合深远海浮式设施方面的工程经验，提出了风电机组设计重构技术，在半潜、TLP风力机研究中基本解决了整机厂家风力机核心数据不对外开放的“卡点”，也认为当前的风电机组设计缺乏对浮式基础运动特性的深入了解而致荷载预报存在误差。

3. 浮式风力机基础结构疲劳时域分析技术

浮式风力机基础结构的疲劳响应直接受到风力

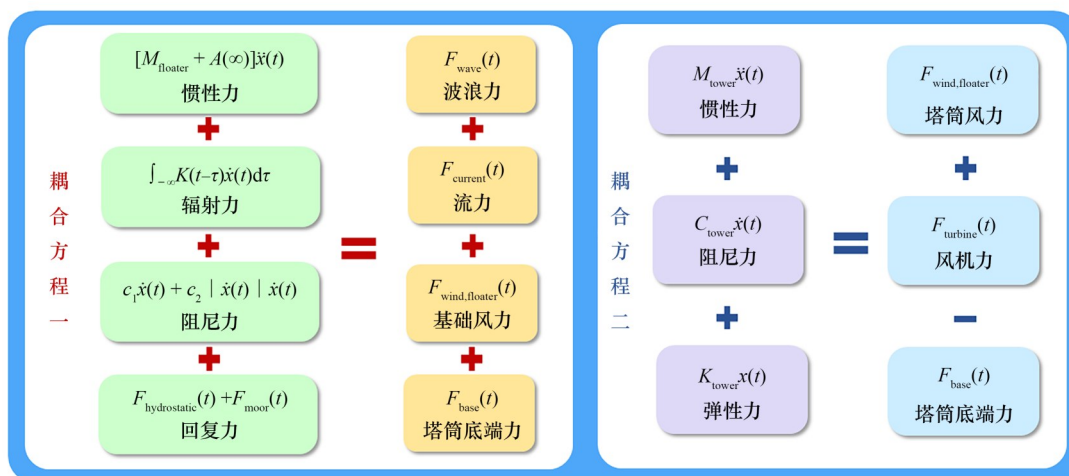


图4 浮式风电一体化耦合方程

注： $[M_{\text{float}} + A(\infty)]\ddot{x}(t)$ 代表平台惯性力； $\int_{-\infty}^t K(t-\tau)\dot{x}(\tau)d\tau$ 代表平台的势流时域辐射力； $c_1\dot{x}(t) + c_2|\dot{x}(t)|\dot{x}(t)$ 代表平台的惯性和黏滞阻尼力； $F_{\text{hydrostatic}}(t) + F_{\text{moor}}(t)$ 代表平台的静水回复力和系泊回复力； $F_{\text{wave}}(t)$ 代表平台波浪荷载； $F_{\text{current}}(t)$ 代表平台流荷载； $F_{\text{wind, float}}(t)$ 代表平台和机组风荷载； $F_{\text{base}}(t)$ 代表塔筒传递至平台荷载； $M_{\text{tower}}\ddot{x}(t)$ 代表塔筒惯性力； $C_{\text{tower}}\dot{x}(t)$ 代表塔筒阻尼力； $K_{\text{tower}}x(t)$ 代表塔筒弹性力； $F_{\text{turbine}}(t)$ 代表风力机，涵盖主机的动力、空气动力、叶片弹性和惯性、控制系统多物理场多体动力的影响； $F_{\text{wind, tower}}(t)$ 代表塔筒风荷载； $F_{\text{base}}(t)$ 代表基础风荷载； x 代表位移； t 代表时间。

机载荷、波浪载荷、基础运动的耦合作用，频域响应涉及多个频率范围（如波浪频率、运动频率、风力机叶轮转动频率、风力机塔筒固有频率），呈现非窄带谱特征，导致传统的频域疲劳分析方法不再适用^[34]。然而，非传统的频域疲劳分析方法（如 Dirlik 方法）在浮式风力机上的应用尚不成熟，难以支持工程实践。

需要采用时域疲劳分析技术作为浮式风力机基础结构疲劳设计的核心方法^[35]，以综合考虑风载荷、波浪载荷、基础运动的耦合作用对结构疲劳损伤的影响。浮式风力机基础的时域结构疲劳分析主要有两种思路：在一体化耦合分析的基础上，考虑时域内风力机、波浪、系泊、惯性载荷之间的传递关系，通过时域结构分析获得时域疲劳应力响应，再推导出疲劳损伤和寿命，整体计算效率偏低；将风力机载荷与其他载荷分开考虑，即采用时域方法计算风力机载荷造成的疲劳损伤、利用传统频域方法计算其余部分的疲劳损伤，再叠加得到总的疲劳损伤，整体计算效率较高。

4. 大型浮式风力机系统的运动抑制技术

浮式风力机的大型化发展驱动风电结构的柔性化，致使结构体系在复杂海洋环境动力荷载作用下的振动问题更为突出。结构控制技术可有效抑制浮式风力机系统的运动，延长风力机的服役寿命并提高运行效率：在浮式风力机系统中增加结构振动控制器，减少浮式风力机系统中不利的振动，实现系统的运动抑制和振动控制。减振装置调谐质量阻尼器（TMD）适用于浮式风力机的桨叶、塔体以及浮式平台的减振控制^[36,37]，但 TMD 附加质量大、运动行程远，在安装空间受限的风力机系统中难以普及应用^[38]。浮式风力机具有宽频和非平稳振动特性，而 TMD 减振频带窄，实际的控制效果有限^[39]。

可引入惯容器，通过较小的物理质量即可实现较大的表观质量。利用惯容器轻质、放大的特性，在基本不改变结构物理质量的前提下进行惯性的灵活调整和频率调节，进而提高惯容器的减振性能^[40]。对于具有宽频振动特征的浮式风力机系统，惯容器的控制适应性有待进一步研究，目前多为理论分析，缺乏试验验证和工程应用。浮式风力机具有大幅平台运动、结构非线性振动耦合的特点，对结构控制设计提出了较高要求，需要设计更加精细

和高效的控制策略。

5. 深水系泊疲劳分析技术

系泊系统事关深远海浮式风电在复杂海洋环境下的安全稳定运行，动力响应受上部风力机结构运动、浮体运动、风轮转动、波流荷载等的显著影响，面临疲劳损伤、技术经济性等方面的挑战^[41]。现有的系泊设计分析主要以准静态模型、有限元模型、细长杆模型为基础^[42]。准静态模型采用悬链线理论，适用于浅水系泊工况，但难以计及深水系泊的动刚度特性。有限元模型将系泊等效为集中质量-刚度单元，可模拟系泊在张紧、高频运动下的响应特征以及局部的应力疲劳损伤，但计算量大，难以支持实时仿真或快速响应的需求。细长杆理论将系泊模拟为具有弹性和任意几何形状的杆件^[43]，可捕捉系泊在不同荷载下的响应特征与张力疲劳情况，但分析精度依赖系泊绳为连续介质的假设，忽略了横向和局部的复杂效应。

值得指出的是，现有的系泊设计分析方法难以模拟系泊单元的平面内/外弯曲疲劳损伤^[44]，浮式风力机上部结构引起的高频振动、二阶和频波浪力可能诱发的系泊共振等显现，导致系泊疲劳寿命预测精度不佳^[45]。需要发展适用性强，兼顾分析精度、计算效率的系泊抗疲劳设计分析技术，开发抗疲劳性能优异的新型系泊材料，以满足深远海浮式风电对系泊安全性和经济性的要求。

6. 高可靠性动态电缆分析技术

动态电缆用于传输电能和信号，承受复杂的海洋环境作用，易出现张拉、弯曲、扭转等复杂变形，是浮式风力机与海底输电系统之间的关键连接部件^[46]。特别是在风浪流长期循环荷载、浮式基础耦合以及腐蚀的作用下，动态电缆易产生弯曲疲劳损伤甚至断裂^[47]。常用的动态电缆分析方法是有限元方法、多体动力学方法^[48]。有限元方法可以计及动态电缆的非线性特征（如材料、几何、接触非线性），准确捕捉应力集中、局部疲劳特性，但难以处理动态电缆的大范围运动（如漂移、悬垂大变形）。多体动力学方法将动态电缆简化为多个刚性或柔性单元，建模简单、计算效率高，支持快速分析动态电缆的整体运动特性，但难以捕捉非线性和局部特性。

有限元、多体动力学方法具有分析能力互补优势，结合后可兼顾动态电缆的整体动力学特性快速

评估、局部关键部位精细化分析,将成为未来动态电缆可靠性分析的重要手段。也需开发新型和智能材料,发展智能化参数优化设计、检测与故障诊断技术,逐步构建高柔性、抗疲劳、耐腐蚀的高可靠性动态电缆技术体系,以切实增强复杂海洋环境下动态海缆的服役可靠性。

7. 浮式风力机锚固基础承载力分析技术

半潜型、TLP型浮式风力机基础通常需要配置多个高成本的系泊锚固基础。为了探索降本增效,共享锚固基础开始应用至半潜型基础、TLP型基础的概念设计方案。对于半潜型风力机基础,系泊锚固基础的水平抗力是决定在位性能的主要控制因素。TLP风力机基础采用垂直系泊系统,竖向抗力成为在位性能的主要控制因素。共享锚受到多向的复杂荷载作用,在位性能、设计方法同单根系泊缆的系泊基础存在明显差异,受力模式更为复杂。

需要形成面向风力机-浮体-系泊-锚固基础的一体化耦合分析方法,研究多向静荷载和循环荷载作用下锚固基础与地基土体的相互作用,分析抗水平、抗拔锚固基础的承载机理与破坏模式,支持锚固基础设计方案优化。进一步提高锚固基础的抗水平、抗拔性能,增强浮式平台在复杂海洋环境下的稳定性,建立智能监测和控制技术,拓展深远海浮式风力机锚固基础技术体系,为锚固基础设计提供依据。

8. 浮式风力机先进材料开发与测试技术

半潜型、TLP型的浮式风力机,其基础多为钢结构。浮式基础尺寸进一步加大,对经济性、耐久性、可靠性的要求越来越高。以混凝土结构作为浮式基础具有较好的经济性和耐腐蚀性,但重心偏高导致俯仰运动更明显,可能因承受较高的塔基荷载、机舱加速度而引发波致疲劳或损坏^[49]。因此,开展轻质高强混凝土、高性能复合材料的研发与测试,是未来浮式风力机基础方面的重要技术方向。

在系泊系统材料方面,国内服役的半潜型浮式风力机均采用传统的锚链或者锚链与钢缆组合,如系泊钢缆首次应用于FPSO、浮式风力机系泊项目。然而,锚链、钢缆的质量相对大,不利于提高浮式平台的性能,材料成本也较高^[23]。纤维系泊缆成本低、密度小、可提供较大的恢复力,开始在海洋油气平台的系泊系统中获得应用,也成为浮式风力机的应用趋势之一^[50]。对于浮式风力机系泊缆绳采用

的纤维材料,需要应用综合性能测试技术,优选高强度、低蠕变、耐磨、抗紫外线的纤维材料;在保障浮式风力机系泊系统在位安全的基础上,减少纤维系泊缆海上安装和张紧流程,降低安装施工的资源需求,提升作业安全性。

9. 浮式基础结构大规模定制技术

深远海漂浮式风电机组的大型化、定制化发展趋势明确^[51],安装费用在相关项目总投资中的占比将逐步降低。结合当前试点项目的良好进展,预计未来5年我国深远海漂浮式风电将进入商业化推广阶段。为此,需要建立浮式基础结构的大规模定制技术,与大兆瓦、定制化风电机组相匹配,利于开展规模化建造、集成、拖航、安装^[52]。

针对各类海域环境,采用一体化耦合分析技术,确定与大兆瓦定制化风电机组相匹配的浮式基础类型,开展兼顾结构轻量化与强度的一体化基础强度设计;解决设计多样性与环境适配性问题,形成适应不同海域、大型基础结构形式的标准化设计分析模块。突破模块化生产瓶颈技术,构建浮式基础模块化、同步化、智能化的制造与装配能力,形成包含前端设计、后端制造与装配在内的全链条定制技术,利于大批次合拢组装、风力机集成以及多座浮式基础成批次地拖航与安装。

10. 高效集成与海上安装回接技术

浮式风力机单机装机容量趋向大兆瓦级,引发海上风电机组及结构朝着大型化、柔性化方向发展,也使浮式风力机的集成难度加大^[15,53],对于离岸较远的深远海项目而言更是如此。工程上通常在码头将上部风力机与下部基础进行集成,再整体拖放至安装地点^[54]。这一过程涉及风电机组与浮式基础安装的静对动、动对动问题^[55],也需开展整体拖航分析。根据数值模拟、荷载响应分析结果,确定海上集成安装的可作业工况,提高安装船性能预报的准确性,再采用船体运动补偿装置、配有主动控制系统的举升装置开展集成。针对安装过程特性,发展数值模拟、荷载响应分析、运动控制等技术,形成海上风电安装短期性能预报技术,抑制风浪流作用下叶片、安装船、风力机基础之间的相对运动,减少高柔风力机结构的疲劳损伤。开发适应大型浮式风力机的新型安装船,保障深远海风电规模化开发需求。复杂海况下的长距离拖航显著影响浮式风力机系统的运动状态,精确捕捉拖航运动中风

力机的非线性振动特性、托缆绳的动态效应等是关键内容；需要建立浮式风力机-拖缆绳-拖船一体化的拖航系统数值模型，进行不同拖航方式下拖航系统的稳性和安全性分析。

浮式风力机海上安装回接流程操作复杂，对安装精度要求高；半潜型基础相对简单且风险较低，而 TLP 风力机需要与拖航进行统筹考虑。可考虑仅具有拖航稳性、采用锚机实现系泊系统的回接张紧及平台吃水调整，也可考虑采用临时浮筒来同步确保安装回接期间的稳性，通过压排载调节风力机吃水实现系泊系统的回接及预张力调整（需要设计安全可靠、易于拆卸的临时浮筒与风力机基础的连接方式）。国内的安装操作经验积累不足，安装技术应用风险较高，需要对安装回接过程开展一体化耦合仿真分析论证^[56]，以明确合适的安装回接海况及方式。

11. 深远海风电海上智慧运维技术

目前国内浮式风电运维存在诸多难点问题；浮式风电处于从单机示范到规模化设计的发展过程，运维应用场景和工程经验不足，运维技术体系不够完善；机位可达性差，可作业船只少，运维装备无法满足深远海浮式风电的运维要求；浮式风电系统的大部件更换通常采用拖航回港口的的方式，成本较高、技术难度偏大。在海上风电场的全生命周期成本构成中，运维费用占比约为 20%。深远海域的浮式风电场离岸距离较远，人员可达性差，恶劣的风浪等环境条件导致人员可驻留时间短；我国东南沿海地区易受台风影响，增加了人员安全的风险。传统的风电运维方式以“人员”为核心，效率和可靠性等存在不足，因而

开展风电运维体系的数字化、智能化转型（见图 6）较为迫切。本研究结合中国海洋石油集团有限公司在深水油气运维、浮式风电开发方面的工程经验，提出了浮式风电智慧运维总体方案构想：以涵盖机组、核心部件的全域感知智能监测系统为基础，监测机舱与平台运动、关键结构应力、螺栓预紧力、润滑油品、传动链震动、腐蚀电位、柔性结构振动等，发展海上浮式风电装备智能控制技术体系，构建故障在线诊断与预测及主动响应系统，建立包含集控中心、智能决策、智能生产管理在内的预防性智慧运维体系，以提升运维效率并降低运维成本。

（三）基础软件能力瓶颈

1. 浮式风力机一体化耦合设计分析软件

浮式风力机系统较为复杂，内部各模块之间存在强耦合作用，不宜直接采用各模块独立进行分析的处理方式。例如，直接采用固定式风电机组载荷作为浮式基础动力响应的输入，将会忽略基础运动对风力载荷的影响，造成结构运动与机组载荷不同步，引起分析结果的偏差；这些偏差受海洋环境条件影响较大，难以直接量化^[57-59]，可能会误导风电系统的设计与优化方向。需将浮式基础、风力机组置于同一系统，开展同步建模，进行一体化分析，才能准确把握浮式风电系统的动力响应特性。

当前，浮式风力机一体化分析多采用浮体模块、风力机组模块之间进行实时数据传输的处理方式，而以油气平台为代表的传统浮式结构、陆上固定式风电机组的动力分析理论及数值工具均

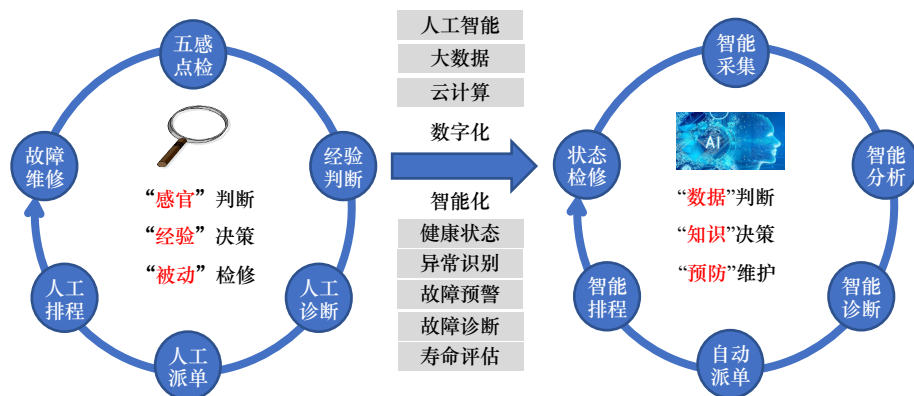


图 6 海上风电运维数字化、智能化转型示意图

较为成熟。在此背景下，浮式风力机一体化分析的关键在于融合水动力、风力机组的计算方法；两方面独立计算并进行数据实时传递，可对双头机、共享系泊等复杂结构进行耦合分析。①最初用于固定式风力机组分析的软件，在引入水动力及系泊模块后实现一体化耦合分析功能，如OpenFAST软件中的HydroDyn、MoorDyn模块^[60]。②最初用于油气平台等传统浮式结构动力响应分析的软件，引入风力机组分析模块而形成风力机气动分析能力，如Orcaflex软件中的气动分析程序AeroDyn。③通过创建界面方式可实现一体化耦合分析功能，如FAST软件整合到AQWA软件的子程序user_force中，在FAST、AQWA独立计算的基础上，经由user_force界面实现数据的双向传递^[61]。

尽管上述做法解决了一体化分析工具的可用性问题，但相关模块开发尚不成熟、整合不够完善，在功能完备性、分析准确性、计算效率上远未达到成熟水平，仍需结合工程实际需求进行持续性的改进和提升。

2. 实时数字孪生系统

深海风电平台远离陆地，长期在恶劣的海洋环境下服役，安全运营更多依赖自身的结构安全性。数字孪生作为海洋开发智能化转型的重要支撑技术，可在保障深远海浮式风电安全和可持续开发方面发挥积极作用^[62]。

实时孪生技术通过构建系统机理模型并结合现场可测数据、海洋气象预报数据，形成矢量化的风电平台荷载模型，继而通过数据反演进行平台在役参数的实时修正，在数字空间中同步重构真实风电平台，建立机理性数字孪生体，实现风电平台预测预警、物性参数评估、船体姿态控制等智能化运维保障功能^[63]。相关技术应用得到的集合分析结果，直接支持设计参数优化，串联起浮式风力机方案设计、现场作业保障等工程环节；也可通过机理性模型开发，解决目前简化模型、机器学习存在的低可解释性、弱泛化能力等问题。需要注意到，受制于海洋环境的非稳态特征、平台弱模态特征等因素，现阶段的深远海浮式风电实时孪生系统存在反演理论不完善、控制系统协调性差等问题，仍需开发并集成新的理论和技术，才能满足深远海风电智能化发展要求。

四、深远海浮式风电技术发展方向探析

(一) 不同型式浮式风力机的发展方向

漂浮式风电基础具有4种基本类型：驳船型、Spar型、半潜型、张力腿型（见表3）。驳船型式建造简单，可进行整体拖航安装，但运动性能较差，不适应深远海恶劣的环境条件。Spar型式建造简便但安装复杂，需要大水深的遮蔽海域来进行扶正作业、风力发电机组与基础的集成作业，不适应我国产业链发展、航道、海域等条件。张力腿浮式风力机的在位性能接近固定式风力机，整体发电量更高，相应的系泊缆覆盖面积小、布置简洁，电缆抗疲劳特性更好，易于布置送出走向。综合来看，半潜型、张力腿型浮式风力机是我国漂浮式风电的主要发展方向。

对比5.5 MW半潜浮式风力机^[64]、16 MW半潜浮式风力机、16 MW张力腿浮式风力机的用钢量组成（见表4）可见：随着单机容量的增加，钢材利用率由5 MW水平的800 t/MW下降至16 MW水平的350 t/MW，综合建设成本由5万元/kW下降至2.3万元/kW；下降后的综合建设成本接近广东地区的固定式风力机平价上网成本（1.5~1.8万元/kW），赋予了小规模商业化开发的条件。如果仅考虑一次性建设投入，现阶段张力腿浮式风力机的建设成本已与半潜浮式风力机基本相当；而张力腿浮式风力机的用钢成本更低，加之规模化开发可共享安装资源，表明降低安装成本的前景良好。

浮式风力机的装机容量不断升高，搭载的塔筒、桨叶等部件规模相应增大，伴生的高频振动、结构失稳等问题进一步显现。为此，一些创新型风

表3 不同类型浮式风力机基础的特点

基础类型	适应环境条件	安装	适用水深	机组适应性	技术成熟度	批量化前景
驳船型	温和	简单	无限制	一般	高	一般
Spar型	恶劣	复杂	深水	良好	高	一般
半潜型	恶劣	简单	无限制	良好	高	一般
张力腿型	恶劣	复杂	无限制	良好	低	高

表4 百米水深16 MW风力机建设用钢量对比

名称	排水量/t	锚基础质量/t	基础平台用钢量/t
半潜型	18 000	240	5800
张力腿型	11 000	2000	4000

力机结构应运而生。例如，在单一浮式基础上搭载多个风力机，可提高整体装机容量；采用桁架、拉索等结构加强传统形式的塔筒，可克服塔筒柔性过大的问题。针对传统浮式基础结构的改进工作也在持续开展，如增加立柱以支持多塔筒结构等。整体来看，发展新型浮式风电结构有望攻克现有的技术瓶颈，但成熟度普遍不足，多处于概念设计及验证阶段。

（二）浮式风力机共性技术发展方向

漂浮式风电的规模化发展，重在降本增效。面向全产业链高质量发展需求，辨识出浮式风力机共性技术发展方向，据此加快突破关键核心技术，实质性提升漂浮式风电开发的技术经济性。提出适合我国海域环境、产业链发展条件的浮式风力机基础方案，攻克制约我国漂浮式风电商业化面临的技术难题，是本领域先进技术发展的目标牵引。

1. 提高浮式风电总体设计能力

掌握大型浮式风力机的非定常空气动力学特性，揭示风力机叶片-风轮尾流耦合机理。开发叶片颤振抑制技术，构建精确气动载荷计算和发电性能预测技术。形成大型浮式风力机叶片设计体系，支持开展大型浮式风力机的基础设计研发，构建高效一体化耦合分析方法，明晰大型机组的极限载荷与运行疲劳载荷。优化浮式基础结构型式，科学降低船体用钢量并提高钢材利用率。结合海洋环境特点、特定海域恶劣海况下浮式平台的运动作用机理，开展浮式风力机总体优化设计，有效降低系泊缆数量与安装成本。发展高保真模型试验技术，支持风电机组与浮式基础的耦合测试，反映接近真实条件下的整体动力响应特性，为总体设计优化、方案验证提供坚实基础。

2. 研制国产关键产品

加快关键部件产品的国产化进程，以耐疲劳高性能钢材和玻璃纤维等新型材料、新型低成本系泊缆的研发与测试、关键系泊部件研制等为布局重点，加快突破快速系泊连接张紧装置、高效安装机具、新型系泊定位锚等关键部件，构建适应中长期发展需求的漂浮式风电产品链。同步推动高端产品国产化进程，攻关深海环境适应性材料与智能监测系统集成技术，通过模块化设计、数字化制造提升供应链韧性，增强产业核心竞争力，实现低成本、

高可靠替代，促进配套产业链升级。

3. 研发核心工业软件

国内工业部门采用的设计软件基本依赖国外产品，如漂浮式风电耦合分析商业软件 DNV Sima、Orcaflex、OpenFAST 等^[65]。国内高校和科研院所开发了系泊系统、浮体运动、风力机载荷计算、耦合分析等方面的软件/模块，但通用性有待加强、适应性需要验证。后续，可建立高校、科研院所、企业研发部门协同的发展机制，联合研制和优化浮式风电通用设计软件。嵌入我国海域环境特征和浮式平台研发经验，支持风电机组载荷、浮式基础水动力、挠性部件动力学、时域一体化耦合、时域结构强度、稳性提升及载荷抑制等关键技术攻关和研究需求，掌握浮式风力机全系统作用机制与设计核心技术。

4. 开展高效建造和海上安装

加快革新漂浮式风电建造模式及技术，采用新型建造工艺，建立模块化、智能化建造技术流程，开发基于数字孪生的预制构件协同设计平台，实现结构组装与质量控制的实时动态优化，提高建造效率、场地周转率，促进漂浮式风电的低成本、规模化开发；同步构建覆盖基础制造、合拢总装、海上运维的全产业链协同机制，培育专业化运维保障力量。研究高效海上安装技术工法，降低对大型安装资源的依赖性；研制配套工/机具，集成智能传感与故障预测系统，建立极端海况下的智能操作模式，降低海上操作故障率，综合性降低海上安装成本。

5. 建立智能化运维技术体系

在高端运维船舶方面加大建造资源投入，开发智能化运维产品，构建基于区块链技术的运维数据共享平台，实现备件供应链与故障诊断的智能联动，增强海上风电设施运维的智能化水平，全面提高运维效率与可达性；同步建设近海运维母港与深远海移动补给基地网络，培育专业化运维服务产业集群。发展浮式风力机在线监测技术并提高应用水平，研发融合数字孪生与边缘计算的寿命预测算法，建立全生命周期性能数据库，为工程设计、运维作业优化提供科学指导。研究大容量风电机组的大部件在位安装、检修、更换技术，解决批量性漂浮式风电机组长期服役面临的关键技术难点。

五、深远海浮式风电技术发展建议

(一) 构建深远海风电技术创新链

建议优选具有深远海风电研发经验的科研院所、高校、企业，组建深远海浮式风电总体设计“国家队”。参研单位共享技术资源、实现优势互补，瞄准行业发展的瓶颈技术和重点关键技术，形成创新合力，实施高质量研发，牵头推动我国深远海风电技术创新与发展。加强浮式风力机的基础理论研究、软件系统研制，提高风力机桨叶设计、空气动力学、风场分布等方面的理论和应用水平，增强风力机技术水平和产业竞争力。探索轻质、高强、耐腐蚀的新型材料及其工程应用，提高浮式风力机的使用寿命并降低维护成本。开展浮式基础与机组一体化设计研究，实现基础运动与上部机组匹配控制，提升浮式风力机的运行可靠性。开发国产的浮式风力机设计软件，建立浮式风力机设计数据库和仿真平台，增强浮式风力机设计能力。

(二) 组建深远海风电智能建造与安装产业链

发展浮式风电智能建造技术、浮式风电机组及基础的大规模定制技术、安装过程精细化分析技术、高精度安装装备，支撑深远海浮式风电的模块化建造、智能化发展。在浮式风电系统智能制造方面，突破模块化生产技术，形成包含前端设计、后端制造及装配在内的链条式定制技术；完善产业链配套设施条件，建设深远海风电装备制造基地，提高我国装备制造能力和水平。在浮式风电安装方面，发展短时波浪预测技术、整体拖航分析方法，开发配备高性能运动补偿装置、高效智能控制技术的安装船以及高效系泊安装回接技术，适应大型、高柔风力机结构的安装需求。

(三) 拓展深远海风电产业智能运维体系

运维技术与设备的先进程度直接决定复杂海况下深远海风电系统长时间自主运行的可靠性。发展深远海风电场风功率预测技术、短时风速预测技术、极端工况（如台风、海啸）预报技术，形成面向功率、荷载、运动等目标的控制技术能力，支持浮式风力机运行状态的智能调整。提升浮式风力机结构的智能检测、故障诊断等技术，开发实时孪生系统，构建实时监测浮式风电系统健康状态的能

力。开发高性能的抗风浪运维船、具有自主规划能力的水下机器人、可多机协同作业的智能巡检无人机等智能设备，支撑深远海浮式风电智能运维体系的建设和应用。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: August 19, 2024; **Revised date:** January 22, 2025

Corresponding author: Wang Junrong is a professor from the College of Engineering, Ocean University of China. His major research fields include hydrodynamics, coupled analysis and simulation software development for offshore floating structures. Email: wangjunrong@ouc.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Research on the Development Strategy of China’s Offshore Ultra Large Floating Engineering” (2023-XBZD-22); Open Fund Project of National Energy Deepwater Oil and Gas Engineering Technology Research and Development Center (CCL2024RCPS0252KQN)

参考文献

- [1] 廖圣璋, 陈可仁. 能源岛: 深远海域海上风电破局关键 [J]. 能源, 2021 (5): 46–49.
Liao S X, Chen K R. Energy island: The key to the failure of offshore wind power in far-reaching waters [J]. Energy, 2021 (5): 46–49.
- [2] Global Wind Energy Council. Global wind report 2024 [R]. Brussels: Global Wind Energy Council, 2024.
- [3] Sahu S K, Kumar V, Chandra Dutta S, et al. Structural safety of offshore wind turbines: Present state of knowledge and future challenges [J]. Ocean Engineering, 2024, 309: 118383.
- [4] 刘霞. 漂浮式海上风电将掀起能源革新浪潮 [N]. 科技日报, 2023-07-07(04).
Liu X. Floating offshore wind power to spark a new wave of energy revolution [N]. Science and Technology Daily, 2023-07-07(04).
- [5] 曹宏宇. 漂浮式海上风电技术发展前景探析 [J]. 产业创新研究, 2023 (12): 148–150.
Cao H Y. Analysis on the development prospect of floating offshore wind power technology [J]. Industrial Innovation, 2023 (12): 148–150.
- [6] Terrero-Gonzalez A, Dai S S, Neilson R D, et al. Dynamic response of a shallow-draft floating wind turbine concept: Experiments and modelling [J]. Renewable Energy, 2024, 226: 120454.
- [7] 朱海山, 李达. 陵水 17-2 气田“深海一号”能源站总体设计及关键技术研究 [J]. 中国海上油气, 2021, 33(3): 160–169.
Zhu H S, Li D. Research on overall design and key technologies of “Deep Sea No.1” energy station in LS17-2 gas field [J]. China Offshore Oil and Gas, 2021, 33(3): 160–169.
- [8] 李达, 白雪平, 张婧文, 等. 圆筒型 FPSO 总体设计方案与关键技术——以“海洋石油 122”为例 [J]. 中国海上油气, 2023, 35(2): 184–194.
Li D, Bai X P, Zhang J W, et al. Overall design scheme and key

- technologies of cylindrical FPSO: Taking "HYSY122" as an example [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2023, 35(2): 184–194.
- [9] Huang W, Tang R J, Ma H H. The review of vortex lattice method for offshore wind turbines [J]. *Renewable Energy*, 2024, 236: 121450.
- [10] Onstad A E, Stokke M, Sætran L. Site assessment of the floating wind turbine hywind demo [J]. *Energy Procedia*, 2016, 94: 409–416.
- [11] Qaiser M T, Ejaz J, Osen O, et al. Digital twin-driven energy modeling of Hywind Tampen floating wind farm [J]. *Energy Reports*, 2023, 9: 284–289.
- [12] Vieira M, Macedo A, Alvarenga A, et al. What future for marine renewable energy in Portugal and Spain up to 2030? Forecasting plausible scenarios using general morphological analysis and clustering techniques [J]. *Energy Policy*, 2024, 184: 113859.
- [13] Wan L, Moan T, Gao Z, et al. A review on the technical development of combined wind and wave energy conversion systems [J]. *Energy*, 2024, 294: 130885.
- [14] 王富强, 郝军刚, 李帅, 等. 漂浮式海上风电关键技术与发展趋势 [J]. *水力发电*, 2022, 48(10): 9–12, 117.
Wang F Q, Hao J G, Li S, et al. Key technologies and development trends of floating offshore wind turbine [J]. *Water Power*, 2022, 48(10): 9–12, 117.
- [15] 严新荣, 张宁宁, 马奎超, 等. 我国海上风电发展现状与趋势综述 [J]. *发电技术*, 2024, 45(1): 1–12.
Yan X R, Zhang N N, Ma K C, et al. Overview of current situation and trend of offshore wind power development in China [J]. *Power Generation Technology*, 2024, 45(1): 1–12.
- [16] 周映鸣, 闫姝, 刘鑫, 等. 中国海上风电支撑结构一体化设计综述 [J]. *发电技术*, 2023, 44(1): 36–43.
Zhou Y M, Yan S, Liu X, et al. Summary of offshore wind support structure integrated design in China [J]. *Power Generation Technology*, 2023, 44(1): 36–43.
- [17] 刘晓辉, 高人杰, 薛宇. 浮式风力发电机组现状及发展趋势综述 [J]. *分布式能源*, 2020, 5(3): 39–46.
Liu X H, Gao R J, Xue Y. Current situation and future development trend of floating offshore wind turbine [J]. *Distributed Energy*, 2020, 5(3): 39–46.
- [18] 王宇航, 周绪红, 杨琳, 等. 风电机组支撑结构技术发展现状及趋势 [J]. *钢结构(中英文)*, 2024, 39(10): 1–13.
Wang Y H, Zhou X H, Yang L, et al. Current status and development trend of supporting structures for wind turbines [J]. *Steel Construction (Chinese & English)*, 2024, 39(10): 1–13.
- [19] Chen Y H, Lin H Y. Overview of the development of offshore wind power generation in China [J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2022, 53: 102766.
- [20] 米立军, 李达, 高巍. 深远海漂浮式风电技术发展现状与思考 [J]. *新型电力系统*, 2023 (3): 211–220.
Mi L J, Li D, Gao W. Current status and thinking on deepsea floating wind power technology [J]. *New Type Power Systems*, 2023 (3): 211–220.
- [21] Leng J, Li G, Duan L. The impact of extreme wind conditions and yaw misalignment on the aeroelastic responses of a parked offshore wind turbine [J]. *Ocean Engineering*, 2024, 313: 119403.
- [22] Li L, Liu Y C, Yuan Z M, et al. Wind field effect on the power generation and aerodynamic performance of offshore floating wind turbines [J]. *Energy*, 2018, 157: 379–390.
- [23] Zhou Y, Xiao Q, Liu Y C, et al. Exploring inflow wind condition on floating offshore wind turbine aerodynamic characterisation and platform motion prediction using blade resolved CFD simulation [J]. *Renewable Energy*, 2022, 182: 1060–1079.
- [24] Tang H J, Ong M C, Hsu T W. Dynamic analysis of a 15 MW semi-taut mooring floating offshore wind turbine at intermediate water depth: Investigating mooring line failure under operating and parked conditions [J]. *Ocean Engineering*, 2024, 312: 119108.
- [25] Li J W, Zuo H L, Zuo J J, et al. Study on the mooring systems attaching clump weights and heavy chains for improving the typhoon resistance of floating offshore wind turbines [J]. *Ocean Engineering*, 2024, 311: 118734.
- [26] 齐磊, 黄冬明, 霍存锋, 等. 张力腿平台系泊运动响应敏感性分析 [J]. *船舶工程*, 2020, 42(1): 122–127.
Qi L, Huang D M, Huo C F, et al. Sensitivity analysis on motion response of moored TLP [J]. *Ship Engineering*, 2020, 42 (1): 122–127.
- [27] 温斌荣, 田新亮, 李占伟, 等. 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): 731–808.
Wen B R, Tian X L, Li Z W, et al. Coupling dynamics of floating wind turbines: History, progress and challenges [J]. *Advances in Mechanics*, 2022, 52(4): 731–808.
- [28] 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.
- [29] Bae Y H, Kim M H. Rotor-floater-tether coupled dynamics including second-order sum-frequency wave loads for a mono-column-TLP-type FOWT (floating offshore wind turbine) [J]. *Ocean Engineering*, 2013, 61: 109–122.
- [30] Koragappa P, Verdin P G. Design and optimisation of a 20 MW offshore wind turbine blade [J]. *Ocean Engineering*, 2024, 305: 117975.
- [31] López-Queija J, Jugo J, Tena A, et al. Floating offshore wind turbine nonlinear model predictive control optimisation method [J]. *Ocean Engineering*, 2024, 314: 119754.
- [32] Saghi H, Ma C, Zi G. Bidirectional tuned liquid dampers for stabilizing floating offshore wind turbine substructures [J]. *Ocean Engineering*, 2024, 309: 118553.
- [33] Zhang W Z, Calderon-Sanchez J, Duque D, et al. Computational fluid dynamics (CFD) applications in floating offshore wind turbine (FOWT) dynamics: A review [J]. *Applied Ocean Research*, 2024, 150: 104075.
- [34] Yeter B, Garbatov Y. Structural integrity assessment of fixed support structures for offshore wind turbines: A review [J]. *Ocean Engineering*, 2022, 244: 110271.
- [35] Yu Q F, Xu J. Fatigue reliability assessment of floating offshore wind turbines under correlated wind-wave-current loads [J]. *Ocean Engineering*, 2024, 313: 119442.
- [36] Zhang Z L. Optimal tuning of the tuned mass damper (TMD) for rotating wind turbine blades [J]. *Engineering Structures*, 2020, 207: 110209.
- [37] Yao J J, Jin X, Yue Y, et al. Investigation on vibration control of

- TetraSpar floating offshore wind turbine [J]. *Ocean Engineering*, 2024, 311: 118934.
- [38] Luo Y F, Sun H X, Hall L, et al. Vibration control for a semi-submersible floating offshore wind turbine with optimal ultra-low frequency electromagnetic tuned inerter-mass dampers [J]. *Structures*, 2024, 63: 106296.
- [39] Kim D, Bae Y H, Park S. Design strategy for resonance avoidance to improve the performance of tension leg platform-type floating offshore wind turbines [J]. *Ocean Engineering*, 2024, 306: 118080.
- [40] López-Queija J, Robles E, Jugo J, et al. Review of control technologies for floating offshore wind turbines [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 167: 112787.
- [41] Stehly T, Beiter P, Duffy P. 2019 Cost of wind energy review [R]. Golden: National Renewable Energy Laboratory, 2020.
- [42] 唐友刚, 张素侠, 张若瑜, 等. 深海系泊系统动力特性研究进展 [J]. *海洋工程*, 2008, 26(1): 120–126.
Tang Y G, Zhang S X, Zhang R Y, et al. Advance of study on dynamic characters of mooring systems in deep water [J]. *The Ocean Engineering*, 2008, 26(1): 120–126.
- [43] Paulling J R, Webster W C. A consistent, large-amplitude analysis of the coupled response of a tlp and tendon system [R]. New York: International Offshore Mechanics and Arctic Engineering Symposium, 1986.
- [44] Wang J R, He C L, Fu D F, et al. An out-of-plane bending fatigue assessment approach for offshore mooring chains considering the real-time updating of interlink bending stiffness [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2024, 12(1): 131.
- [45] He C L, Sun T, Zhang Z L, et al. Numerical investigation on the second-order sum-frequency wave forces induced mooring fatigue of a 15 MW TLP FOWT [J]. *Ocean Engineering*, 2025, 322: 120463.
- [46] Taninoki R, Abe K, Sukegawa T, et al. Dynamic cable system for floating offshore wind power generation [J]. *SEI Technical Review*, 2017, 84: 53–58.
- [47] 姜磊, 高景晖, 钟力生, 等. 远海漂浮式海上风电平台用动态海缆的发展 [J]. *高压电器*, 2022, 58(1): 1–11.
Jiang L, Gao J H, Zhong L S, et al. Development of dynamic submarine cable for offshore floating wind power platforms [J]. *High Voltage Apparatus*, 2022, 58(1): 1–11.
- [48] Rentschler M U T, Adam F, Chainho P. Design optimization of dynamic inter-array cable systems for floating offshore wind turbines [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 111: 622–635.
- [49] Wijaya M R A, Adiputra R, Prabowo A R, et al. Characterization of the applied materials on floating offshore wind turbine members: A review on the current state [J]. *Procedia Structural Integrity*, 2023, 48: 41–49.
- [50] Rui S J, Zhou Z F, Gao Z, et al. A review on mooring lines and anchors of floating marine structures [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024, 199: 114547.
- [51] 董飞飞, 陈海焱, 张天龙, 等. 深远海域海上风电发展分析与建议 [J]. *中国工程咨询*, 2024 (2): 63–66.
Dong F F, Chen H Y, Zhang T L, et al. Analysis and suggestions on the development of offshore wind power in deep sea area [J]. *China Engineering Consultants*, 2024 (2): 63–66.
- [52] 雒德宏. 我国海上风电发展现状及对策建议 [J]. *水电与新能源*, 2022, 36(11): 76–78.
Luo D H. Current situation and suggestions of offshore wind power development in China [J]. *Hydropower and New Energy*, 2022, 36(11): 76–78.
- [53] 蒋运和. 浮式风电施工技术现状及分析 [J]. *船舶物资与市场*, 2024, 32(1): 85–88.
Jiang Y H. Present situation and analysis of floating wind power construction technology [J]. *Marine Equipment/Materials & Marketing*, 2024, 32(1): 85–88.
- [54] Hong S, McMorland J, Zhang H X, et al. Floating offshore wind farm installation, challenges and opportunities: A comprehensive survey [J]. *Ocean Engineering*, 2024, 304: 117793.
- [55] Domingos D F, Atzampou P, Meijers P C, et al. Full-scale measurements and analysis of the floating installation of an offshore wind turbine tower [J]. *Ocean Engineering*, 2024, 310: 118670.
- [56] 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.
- [57] Gao S, Wang D, Lei Y, et al. Comparative study of coupled and uncoupled analysis of semi-submersible floating offshore wind turbines [R]. Shanghai: Comparative Study of Coupled and Uncoupled Analysis of Semi-Submersible Floating Offshore Wind Turbines, 2022.
- [58] Xu X, Srinil N. Dynamic response analysis of spar-type floating wind turbines and mooring lines with uncoupled vs coupled models [R]. St. John's: ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 2015.
- [59] Kim H, Boo S Y. Coupled and uncoupled analysis of Y-wind semi wind turbine foundation [R]. Houston: SNAME 23rd Offshore Symposium, 2018.
- [60] Jonkman B J, Jonkman J M. FAST v8.16.00a-bjj user's guide [R]. Golden: National Renewable Energy Laboratory, 2016.
- [61] Zhang Y M, Liu H X. Coupled dynamic analysis on floating wind farms with shared mooring under complex conditions [J]. *Ocean Engineering*, 2023, 267: 113323.
- [62] Mousavi Z, Varahram S, Etefagh M M, et al. A digital twin-based framework for damage detection of a floating wind turbine structure under various loading conditions based on deep learning approach [J]. *Ocean Engineering*, 2024, 292: 116563.
- [63] 胡阳, 王蔚然, 房方, 等. 风电机组运行动态数字孪生建模及半物理仿真 [J]. *系统仿真学报*, 2024, 36(3): 636–648.
Hu Y, Wang W R, Fang F, et al. Dynamic digital twin modelling and semi-physical simulation of wind turbine operation [J]. *Journal of System Simulation*, 2024, 36(3): 636–648.
- [64] 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.
- [65] Zeng X M, Shao Y L, Feng X Y, et al. Nonlinear hydrodynamics of floating offshore wind turbines: A review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024, 191: 114092.