

漂浮式海上风电施工技术研究

梅卫东

江苏龙源振华海洋工程有限公司

DOI:10.12238/etd.v6i3.14400

[摘要] 随着全球能源转型加速,深远海漂浮式海上风电作为开发深远海风能资源的核心技术,其施工技术的突破对实现规模化应用至关重要。本文从发展必要性、技术分类、行业趋势及施工难点等方面展开研究,结合国内外工程实践,系统分析半潜式漂浮式风电的施工技术体系,并提出未来发展建议。研究表明,通过技术创新与产业协同,漂浮式风电有望在2035年实现平价化,成为全球能源结构的重要组成部分。

[关键词] 漂浮式; 海上风电; 半潜式基础; 施工技术; 风机安装; 系泊系统

中图分类号: TV52 **文献标识码:** A

Research on Floating Offshore Wind Power Construction Technology

Weidong Mei

Jiangsu Longyuan Zhenhua Marine Engineering Co.,Ltd

[Abstract] With the acceleration of global energy transformation, deep-sea floating offshore wind power, as the core technology for developing deep-sea wind energy resources, is crucial for achieving large-scale application through breakthroughs in its construction technology. This article conducts research on the necessity of development, technological classification, industry trends, and construction difficulties, and combines domestic and foreign engineering practices to systematically analyze the construction technology system of semi submersible floating wind power, and propose future development suggestions. Research shows that through technological innovation and industrial synergy, floating wind power is expected to achieve parity by 2035 and become an important component of the global energy structure.

[Key words] floating; Offshore wind power; Semi submersible foundation; Construction technology; Fan installation; MOORING

引言

全球风能资源约70%分布于水深超过60米的深远海区域,而传统固定式风电受限于水深和地质条件,难以经济开发。漂浮式风电技术通过浮体结构与系泊系统实现风机在深海的稳定支撑,成为拓展海上风电开发空间的关键。中国作为全球最大的海上风电市场,已在广东、福建等地建成多个半潜式漂浮式风电示范项目,如“国能共享号”、三峡“引领号”(5.5MW)、海装“扶摇号”(6.2MW)等、“海油观澜号”。然而,漂浮式海上风电施工技术仍面临浮体建造、风机安装、动态海缆铺设等挑战,需系统研究以推动商业化进程。

1 发展漂浮式风电的必要性

1.1 资源禀赋驱动

中国海域风能资源分布显示,水深50-100米区域的风能密度达409W/m²,可开发资源量达2237GW,是近海区域的4.5倍。随着近海资源趋紧,深远海开发成为必然选择。国家发改委《中国

风电发展路线图2050》指出,浅水区(5-50米)技术可开发量为5亿千瓦,而50-100米深水区增至15.3亿千瓦,远海区域更高达9.2亿千瓦。

1.2 环境与经济性优势

漂浮式风电离岸距离超过35公里,可减少沿海工业和居民生活的干扰。以英国HywindScotland项目为例,其离岸距离25公里,年发电量满足20万户家庭需求,且对海洋生态影响极小。在经济性方面,水深超过60米时,漂浮式风电的单位成本较固定式降低30%以上。

1.3 多领域融合潜力

漂浮式风电可与海洋牧场、海上油气平台、岛屿供电及制氢等场景深度融合。例如,国能共享号项目采用“水上发电、水下养鱼”模式,实现“蓝色能源”与“海上粮仓”协同发展。此外,漂浮式风电制氢技术可解决深海风电远距离输电难题。

2 漂浮式风电技术分类

2.1 技术路线对比

漂浮式风电基础主要包括半潜式、立柱式(Spar)、张力腿式(TLP)和驳船式。其中,半潜式因适用水深广(40米以上)、安装便捷,成为国内主流方案。其结构由立柱、浮筒和桁架组成,通过主动压载系统调节姿态,抗风浪性能优异。^[1]而张力腿式虽运动幅度小,但技术成熟度低,造价成本高,尚未大规模应用。

2.2 国内示范项目

目前国内应用最广泛的为半潜式漂浮式风机基础。包括三峡“引领号”、海装“扶摇号”、国家能源集团“国能共享号”、中海油“海油观澜号”等。半潜型浮式基础主要包括立柱、支撑和浮筒。可适用于40m以上区域,它的最大优势是风机的安装可以在船坞或者码头完成,大大降低了安装成本。

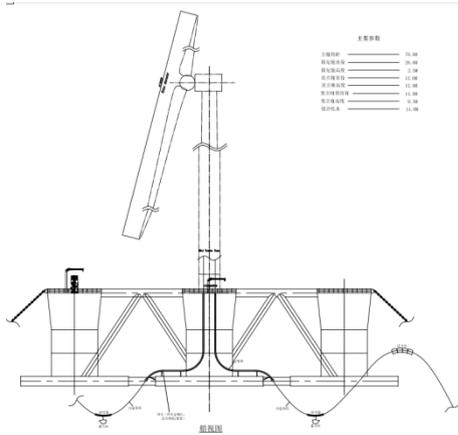


图1 半潜式漂浮式风电基础

3 漂浮式风电行业发展趋势

3.1 装机容量预测

全球风能理事会(GWEC)预测,2030年全球漂浮式风电装机容量将达16.5GW,2026年后进入快速增长期。2020-2025年复合增长率为104.7%,2026-2030年降至59.6%。^[2]中国计划在“十四五”期间开工首个商业化项目,预计2030年装机容量突破5GW。

3.2 成本下降路径

国际可再生能源署(IRENA)指出,2025年漂浮式风电将初步实现商业化,2025-2030年主机和平台成本下降40%-56%,2035年成本接近当前固定式风机(1.75万元/kW)。预测2030年浮式风电资本支出将降至440万-500万美元/MW,2040年进一步降至360万美元/MW。

3.3 技术创新方向

轻量化设计:采用碳纤维复合材料减少浮体重量,如挪威HywindTampen项目浮体用钢量较传统减少20%;

智能化运维:基于物联网的应力松弛监控系统,实时监测系泊缆状态,提升安全性;

多能互补:融合光伏、储能与制氢,如葡萄牙BEHYOND项目探索风电制氢一体化。

4 施工难点与解决方案

4.1 浮体建造

难点:半潜式浮体尺寸庞大(如“国能共享号”型宽98米),需在专业船坞或码头建造,而国内大型船坞资源紧张,高峰期因排队导致工期延误。其复杂钢结构对焊接精度要求极高(误差 ≤ 2 毫米),传统整体建造模式受船坞长度、水深限制显著。

解决方案:采用模块化建造技术,将浮体分解为垂荡板、立柱、浮筒、甲板等核心部件,在不同场地预制后总装。

4.2 风机安装

难点:浮体吃水深(如“国能共享号”空载吃水8.5米),需水深 ≥ 10 米的专用码头,普通码头需加固地基。装载风机时浮体易倾斜(允许 $\leq 0.5^\circ$),传统调载方式难以动态平衡。

解决方案:使用自升式平台或码头布置2000吨履带吊,通过传感器实时监测浮体姿态,压载泵组动态调平(响应时间 ≤ 30 秒),水平度误差 $< 0.1^\circ$ 。



图2 漂浮式风机安装

4.3 吸力锚施工

难点:吸力锚入土深,地质不均易致倾斜或管涌,偏心荷载加剧下沉风险。

解决方案:配置双冗余吸力系统,融合多波束测深与惯性导航监测垂直度,超差时调节压载水纠偏。复杂地质切换桩锚方案:岩石层用灌注桩,软土层用组合锚,锚链预张力控制在设计值80%内,保障施工安全。

4.4 浮体拖航

难点:长距离拖航受气象影响大,易因风浪共振、渔船船舶避让导致偏航或延误。

解决方案:采用五船编队(10000HP主拖+4艘辅拖),集成气象卫星数据规划航线,避开台风(风速 > 25 m/s停航)。通过GPS与姿态传感器动态调整拖轮拉力,横倾 $> 1.5^\circ$ 时侧推矫正,航向偏差 $> 0.5^\circ$ 时艏部辅拖调转速,底部导流鳍片降低波浪阻力15%。

4.5 动态海缆铺设

难点:需承受1500kN张力,弯曲半径 $\geq 20D$,传统方法易致铠装层疲劳损伤。

解决方案:采用浮力块(间距50米)与配重块(间距100米)组合,形成分段悬链线构型,通过CFD模拟优化分布。专用敷设船配备升沉补偿系统(精度 ± 15 厘米),张力传感器控制波动 $< 5\%$,接头处设光纤监测应变,水深 > 80 米增加浮筒支撑,确保弯曲半径 $> 25D$,提升疲劳寿命。

通过技术优化,各施工环节效率与安全性显著提升,为深远海风电规模化开发提供关键支撑。未来需结合智能化监测与绿色工艺,进一步推动降本增效。

5 前景展望与建议

5.1 融合发展模式

海洋牧场:作为全球首台漂浮式风渔融合示范项目,“国能共享号”创新性构建了“水上发电、水下养殖”的立体空间利用体系。该项目在浮式平台下方布置3层立体养殖网箱,采用抗风浪柔性网衣和智能化监测系统,可实时追踪鱼类生长环境,年养殖石斑鱼、大黄鱼等经济鱼类达300吨,产值超2000万元。其“以渔养电”模式通过渔业收益反哺风电运营,使项目内部收益率提升3个百分点,同时减少传统近岸养殖对海岸线的占用,形成生物多样性保护与经济价值创造的协同发展体系。



图3 漂浮式风机与养殖融合

海上制氢:中国电建海南万宁漂浮式风电制氢项目是国内首个“绿电制氢”一体化示范工程,规划配套100MW碱性电解槽,年产能达1.2万吨绿氢。该项目创新采用“海上风电直驱电解槽”技术,通过动态海缆将风机产生的交流电直接输入制氢平台,省去岸上变电站环节,输电效率提升15%。制氢过程耦合海水淡化装置,解决了海上淡水供应难题,副产品浓盐水用于养殖池调盐,形成“风电-制氢-养殖”闭环产业链。据测算,该模式较传统陆基制氢成本降低25%,且避免了长距离输电损耗。随着“双碳”目标推动,海上制氢有望成为深远海风电消纳的核心路径。

5.2 技术攻关方向

抗台型基础研发:针对中国沿海台风,研发适应极端海况的半潜式结构成为当务之急。未来需进一步突破“台风动态响应预测”技术,结合WRF气象模型与浮体运动实时监测,提前72小时启动抗台风预案,实现从被动抗台到主动防灾的技术升级。

国产化装备攻坚:当前动态电缆、系泊连接器等核心部件

严重依赖进口(国产化率<20%),导致供应链周期长达6-8个月,成本占比超30%。动态电缆方面,国内企业已突破1500kN级耐疲劳海缆技术,预计2025年国产化率可达50%,成本降低40%。系泊连接器也打破国外企业的垄断。推动国产化需建立“研发-试验-应用”闭环体系,加速核心部件从样品到产品的转化,预计2030年关键装备国产化率超80%,供应链风险降低70%。

5.3 政策与产业协同

标准体系建设:我国漂浮式风电施工验收标准尚处空白,现有规范多参照固定式风电或海洋油气工程,导致项目建设中存在技术指标不统一、验收流程不规范等问题(如吸力锚入土精度要求在不同项目中差异达±5%)。加快制定相关的标准规范已迫在眉睫,如浮体建造、系泊施工、海缆铺设等核心环节。为项目招投标、施工监管和运维评估提供统一技术依据。

国际合作深化:积极参与欧洲漂浮式项目是我国融入全球漂浮式风电技术体系的重要途径。聚焦浮体优化设计、智能运维和成本控制。未来可建立“技术引进-消化吸收-再创新”机制:一方面引进欧盟成熟的浮体疲劳评估软件;另一方面输出我国在抗台风设计、风渔融合等领域的创新成果,主导制定《热带海域漂浮式风电设计指南》。通过技术共享与标准互认,预计可缩短我国漂浮式风电技术成熟期5-8年,提升在全球产业链中的话语权,助力“一带一路”沿线国家深远海资源开发。

6 结论

深远海漂浮式风电是全球能源转型的战略方向,其施工技术的突破对实现规模化应用至关重要。当前,半潜式基础凭借技术成熟度高、适应性强的优势,成为国内主流方案,但浮体建造、动态海缆铺设等环节仍需技术创新。通过轻量化设计、模块化建造、智能化运维及多能互补模式,漂浮式风电有望在2035年实现平价化,为全球碳中和目标提供关键支撑。

[参考文献]

[1]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.

[2]李丽旻.全球风能理事会:中国连续三年引领全球海上风电增长[N].中国能源报,2021-09-20(005).

作者简介:

梅卫东(1985--),男,汉族,江苏省南通市人,本科,高级工程师,海上风电。