

海上风电导管架等钢结构的建造施工 与海上运输技术分析

黎超锡

中海福陆重工有限公司, 广东 珠海 519040

DOI:10.61369/UAID.2024110026

摘要 : 本文围绕海上风电导管架钢结构建造与运输展开, 对比中欧导管架建造情况, 阐述面临挑战及关键技术, 强调焊接工艺与质量控制重要性。指出运输时船型选择、系固方案及技术管理体系的关键作用。结合项目案例说明技术应用成效, 提出应革新工艺、研发装备, 应对融合数字孪生等挑战, 推动产业发展。

关键词 : 海上风电导管架; 建造施工技术; 海上运输技术

Analysis of Construction and Offshore Transportation Technology for Offshore Wind Power Jacket Structures and Other Steel Structures

Li Chaoxi

CNOOC Fulu Heavy Industry Co., Ltd., Zhuhai, Guangdong 519040

Abstract : This paper focuses on the construction and transportation of offshore wind power jacket steel structures. It compares the construction of jackets between China and Europe, elaborates on the challenges faced and key technologies, and emphasizes the importance of welding processes and quality control. The crucial role of ship type selection, securing plans, and technical management systems during transportation is highlighted. The effectiveness of technical applications is illustrated through project case studies, and it is proposed that processes should be innovated and equipment developed to meet challenges such as integrating digital twins, thereby promoting industrial development.

Keywords : offshore wind power jacket; construction technology; offshore transportation technology

引言

海上风电导管架等钢结构的建造施工与海上运输技术, 是海上风电产业发展的关键支撑。近年来, 随着国家对清洁能源的大力支持, 《关于促进新时代新能源高质量发展的实施方案》于2022年5月颁布, 海上风电产业迎来更广阔发展空间。然而, 当前该行业虽已构建系统核心技术体系, 但仍面临诸多挑战, 如超大型导管架结构几何精度控制、焊接变形、海工基地承载能力瓶颈等。中国海上风电虽发展迅速, 但在导管架设计规范、模块化建造技术、施工标准等方面与欧洲仍有差距。在此背景下, 需不断革新工艺、研发装备, 推动行业迈向新高度。

一、海上风电导管架钢结构建造发展现状

(一) 国内外技术体系对比

欧洲在海上风电导管架钢结构建造方面起步较早, 形成了较为成熟的设计规范体系, 如 DNV GL 等相关标准, 注重结构的安全性与耐久性^[1]。在模块化建造技术上, 凭借先进的工业基础和丰富经验, 能够实现高度集成化与精细化的模块预制。其施工标准严格, 对质量控制、人员资质等要求较高。

中国海上风电发展迅速, 虽起步晚但进步快。导管架设计规范在借鉴国际标准基础上, 结合国内海域特点不断完善。模块化

建造技术也在大力发展, 在一些大型项目中展现出较高水平, 但与欧洲相比, 整体工业配套的成熟度、模块间连接的精准度等方面仍有提升空间。施工标准方面积极与国际接轨, 不过在一些细节执行上因国情和项目特点存在差异。差异形成的技术经济因素包括欧洲长期积累的技术优势、雄厚的资金支持研发先进技术, 而中国大规模发展海上风电面临降本增效需求, 技术发展侧重成本控制与快速推广。

(二) 建造施工主要挑战

海上风电导管架钢结构建造面临诸多挑战。超大型导管架结构对几何精度控制要求极高, 其尺寸庞大、构造复杂, 微小偏差

在后续安装中可能被放大，影响整体稳定性与功能性。多层多道焊接时，因焊缝数量多、分布复杂，热输入量大，易产生焊接变形，如角变形、弯曲变形等，严重影响结构精度与外观质量，增加矫正成本与难度^[2]。此外，海工基地承载能力存在瓶颈，超大型导管架的制造需大型场地、重型设备，现有海工基地在场地规模、设备起吊能力、加工设施配套等方面，可能无法满足日益增长的大型化导管架建造需求，限制建造效率与规模。

二、海工钢结构建造施工关键技术

（一）钢结构建造工艺体系

海工钢结构建造施工关键技术之钢结构建造工艺体系，涵盖从原材料预处理到总组搭载的全流程工艺链。原材料预处理是基础，通过对钢材进行矫正、除锈、涂装等处理，为后续加工提供优质材料。数字化放样借助先进的计算机技术，精确模拟构件形状与尺寸，提高加工精度。分段预制在预制场地将钢结构按设计分成若干段进行制造，提升施工效率。总组搭载则是将预制好的分段运输至指定地点进行总装。其中，SPMT液压平板车移运技术可实现大型构件平稳高效移运^[3]，重型门式起重机联合作业方案，能有效解决大型构件起吊与安装难题，确保各环节紧密衔接，保障海工钢结构建造施工顺利进行。

（二）焊接工艺与质量控制

在海工钢结构建造施工中，焊接工艺与质量控制至关重要。研究高强钢窄间隙自动焊、激光-MAG复合焊等先进工艺是提升焊接质量与效率的关键举措。高强钢窄间隙自动焊可减少焊接填充金属量，提高焊接速度，降低焊接变形^[4]。激光-MAG复合焊结合两种焊接热源优势，能实现深熔焊接，增强接头性能。同时，建立基于数字孪生的焊接变形预测模型与智能化检测系统，通过构建虚拟模型模拟焊接过程，预测变形趋势，提前采取控制措施。智能化检测系统可实时监测焊接质量，及时发现缺陷，确保焊接质量符合高标准要求，从而保障海工钢结构在复杂海洋环境下的安全性与可靠性。

三、海上运输技术管理体系

（一）运输方案决策模型

1. 运输船型优化选择

在海上风电导管架等钢结构的运输中，船型的优化选择至关重要。构建考虑导管架结构尺寸、海况参数和经济性的船型配置多目标决策模型，能有效实现运输船型的优化。导管架结构尺寸决定了所需运输船的承载空间与甲板面积，不同尺寸的导管架需适配相应规格的船只，以确保装载的稳定性与安全性。海况参数影响着运输的可行性和风险，恶劣海况下需选择抗风浪能力强的船型。经济性则是成本控制的关键，综合考虑租船费用、燃油消耗等因素。通过该多目标决策模型，权衡各因素，科学、合理地选择最优运输船型，在保障运输安全的同时，降低运输成本^[5]。

2. 系固方案可靠性分析

在海上运输导管架等钢结构过程中，系固方案的可靠性至关重要。通过运用有限元仿真技术，深入研究不同系固布置下结构的动力响应，能够精准掌握结构在运输过程中的力学特性。不同

的系固布置会导致结构在海浪、风等外力作用下产生不同的振动和应力分布。基于此研究，提出分级系固设计标准，依据钢结构的尺寸、重量、运输路线的海况等因素，将系固方案分为不同等级。这样，在实际运输时，可根据具体情况选择合适等级的系固方案，以确保运输安全，提升系固方案的可靠性^[6]。

（二）风险控制技术体系

1. 实时监测系统构建

海上运输技术管理体系中的风险控制技术体系，实时监测系统构建极为关键。开发集成GPS定位、应力监测与气象预报的智能监控平台是核心举措。通过GPS定位，可实时追踪导管架等钢结构在海上运输过程中的具体位置，精准掌握其航行轨迹^[7]。应力监测则能实时了解钢结构在运输时所承受的应力状况，及时察觉可能出现的结构损伤隐患。气象预报模块融入其中，提前获取气象信息，使运输团队对恶劣天气等潜在风险有充分准备。各部分协同工作，实现运输过程风险预警，为海上运输的安全性与稳定性提供有力保障，最大程度降低运输过程中因位置不明、结构受损、恶劣气象等因素带来的风险。

2. 应急预案决策机制

海上运输技术管理体系中的风险控制技术体系，应急预案决策机制至关重要。通过建立基于贝叶斯网络的突发事件应急响应方案库，能有效整合各类可能出现的海上运输突发状况及其应对策略。贝叶斯网络强大的推理能力，可依据实时获取的事件信息，快速筛选出最适配的应急方案。同时，制定分等级应急操作程序，根据事件危害程度、影响范围等因素，将突发事件划分不同等级。针对不同等级，详细规定操作流程、责任主体、资源调配等内容。这样，在面对海上运输突发状况时，能迅速且精准地启动相应应急预案，高效应对，降低风险损失，保障海上风电导管架等钢结构运输安全^[8]。

四、典型工程案例分析

（一）国内某场地施工的国外海上风电导管架

1. 建造施工技术创新

在国内某场地施工的国外海上风电导管架项目中，建造施工技术创新成效显著。

通过智慧管理以及智能建造实现对“人、机、料、法、环”等数据集成完成全面优化。通过使用不同的三维软件及其二次开发，如结构专业TEKLA，SOLIWORKS，管线专业E3D和PDMS等多专业进行跨专业建模、多专业采办等一系列创新举措，对模型进行一体化管理，完成场内一体化建造要求，一体化率达90%以上，项目质量、安全和效率得到了大幅提升。

全自动焊接工作站的应用大幅提升了焊接效率与质量。该工作站通过精确的编程控制，实现对导管架复杂焊缝的自动化焊接，相比传统人工焊接，焊接速度提高了约40-60%，且焊缝成型良好，缺陷率降低至0.5%以下，有效减少了后期的修补工作^[9]。同时，三维激光扫描精度控制技术为导管架的建造提供了高精度保障。它能够实时获取导管架的三维数据，与设计模型进行比

对,及时发现并纠正偏差,使导管架整体安装精度控制在 $\pm 3\text{mm}$ 以内,确保了导管架与其他海上设施的精准对接,极大地提高了项目的整体质量与安全性。

海上风电导管架的总装口焊接质量是关键。该场地结合场内完工项目的经验,不断展开专家会谈、进行焊接实验,通过比对焊接数据,选择最优焊接工艺。最终成功减少了上部导管架与过渡段、上下部导管架总装口的焊接裂纹,使得总装口返修率大大降低,为后续流水化、批量化建造的海上风电导管架总装积累了宝贵的经验数据。

2.运输技术实践验证

在运输技术方面,多个项目均开展了实践验证与标准借鉴。例如,在某项目中应用半潜式运输船耦合运动抑制技术,有效抑制了导管架在运输过程中因海浪、海风等因素引起的晃动与颠簸。通过实时监测运动参数并依据反馈调整技术措施,运输稳定性得到显著提升。同时,对系固系统进行了全面评估,涵盖系固点布局、索具选型及固定强度等关键环节。实际运输结果表明,经优化的系固系统能够可靠固定导管架,避免移位与损伤,为该类技术在海工运输中的应用提供了重要参考[10]。

模块化建造在另一深水导管架项目中展现出显著优势。通过将导管架拆分为多个功能模块,在陆地预制场地并行开展精细化制造,采用自动化焊接与高精度切割设备,提高了构件加工精度与生产效率。模块间连接节点经过优化设计与预装配试验,确保现场拼接的准确性与高效性。模块建造完成后采用大型驳船运输至现场,不仅降低了海上作业风险与难度,还通过批量化预制管理模式提升了施工效率,为类似钢结构的建造提供了宝贵经验。

在运输作业标准方面,分级管理的应用成效显著。项目依据导管架的尺寸、重量、运输距离及海域环境等因素进行科学分级。对结构复杂、运输难度高的大型导管架,采用高级别运输方案,包括选用专业运输船、配备高精度导航系统及经验丰富的操作团队;而对结构较简单的小型导管架,则在遵循基础安全规范的前提下适当降低标准。该分级管理模式精准匹配了运输风险与管理强度,有效降低了运营风险,为海上风电导管架等钢结构的运输作业提供了可借鉴的范例。

(二)技术经济对比研究

1.全生命周期成本分析

以某海上风电项目为例,对导管架钢结构开展全生命周期成

本分析。建造成本方面,因导管架结构复杂,钢材用量大,加工工艺要求高,制造过程中的材料采购、切割焊接、防腐处理等环节耗费资金多。运输损耗上,海上运输环境恶劣,风浪、腐蚀等易造成结构损伤,如涂层磨损、局部变形等,增加修复成本。维修费用在运行阶段不可忽视,需定期检测维护,更换受损部件。经计算,建造成本占全生命周期成本60%,运输损耗占15%,维修费用占25%。通过此案例的全生命周期成本分析,为海上风电导管架钢结构的技术经济决策提供有力参考。

2.技术发展路径建议

在海上风电导管架等钢结构的建造施工与海上运输技术发展路径上,应着重工艺革新与装备研发。在建造工艺方面,大力推进数字化与自动化,利用先进数控设备提高切割、焊接精度与效率,减少人工干预,降低劳动强度与误差。引入智能监测系统,实时监控建造过程,确保质量稳定。对于运输装备,研发大型、高效且适应深远海复杂海况的智能运输船,具备自动导航、自适应调平、精准定位等功能,提高运输安全性与效率。此外,加强产学研合作,整合各方资源,加速新技术、新装备的研发与应用,形成完备的技术体系,助力海上风电产业向深远海高效、经济、安全地迈进。

五、总结

海上风电导管架等钢结构的建造施工与海上运输技术,是推动海上风电产业发展的关键支撑。当前,行业已构建起较为系统的核心技术体系,但仍面临诸多挑战与机遇。在数字孪生技术整合方面,需加速其与实际建造运输流程的融合,以实现精准模拟与实时监控。绿色建造工艺开发也迫在眉睫,通过采用环保材料与节能技术,减少对海洋生态的影响。此外,加强海陆协同作业标准建设,能有效提升作业效率与安全性。未来,海上风电产业应聚焦这些方向,持续创新,不断优化技术,加强政策引导与支持,推动海上风电导管架等钢结构的建造施工与海上运输技术迈向新高度,为清洁能源的大规模开发利用提供坚实保障。

参考文献

- [1] 马宇轩.海上风电多筒导管架基础下沉安装与回收技术研究 [D].天津大学, 2021.
- [2] 刘潇.海上风电三筒导管架基础及整机浮运研究 [D].天津大学, 2021.
- [3] 周文杰.海上风机导管架基础循环受荷性状与分析方法 [D].浙江大学, 2022.
- [4] 潘宏冠.海上风电吸力筒导管架结构主参数设计与基础稳定性研究 [D].华南理工大学, 2021.
- [5] 梁迪生.海上风电多筒导管架基础结构湿拖过程性态控制研究 [D].天津大学, 2021.
- [6] 李宗豪, 朱军, 陈伟球.海上风电导管架陆地建造过程中的应力分析 [J].工程设计学报, 2021, 28(2):218-226.
- [7] 刘东钊, 焦方利, 丁士星, 等.基于 CAD 软件平台进行海上风电导管架无余量建造方法探讨 [J].广东造船, 2024, 43(3):78-81.
- [8] 孟祥礼.一种海上风电风机基础导管架建造施工方法 [J].天津科技, 2022, 49(8):68-72.
- [9] 陈世伟.海上风电导管架立式建造关键吊装技术 [J].海洋工程装备与技术, 2023, 10(3):83-89.
- [10] 吴蕴丰.海上风电吸力筒导管架基础关键施工技术 [J].中国水运, 2023, 23(10):51-53.