

探究漂浮式海上风电动态电缆敷设施工技术

徐茂禄

中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510700

DOI:10.61369/EPTSM.2025050011

摘 要 : 随着海上风电向深远海发展, 海上风电漂浮式技术因其能够适应水深大、污染少等环境条件, 已成为海上风电发展的未来趋势, 是海上风电开发的新方向。作为连接漂浮式平台与固定式海上升压站或电网的关键“生命线”, 动态海缆(又称动态输出缆) 的敷设施工技术直接关系到整个风电场的安全稳定运行。本文以海上漂浮式风电动态缆的敷设施工技术作为研究对象, 研究海上漂浮式风电动态缆敷设施工的难点、关键技术、关键装备、施工质量控制点, 结合工程实例进行分析论证, 为海上漂浮式风电动态缆敷设施工技术积累经验。

关 键 词 : 浮式海上风电; 移动海缆; 布设施工; 动力布放; ROV; 疲劳控制

Exploring the Construction Technology of Dynamic Cable Laying for Floating Offshore Wind Power

Xu Maolu

China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510700

Abstract : With the development of offshore wind power towards deeper waters, floating technology for offshore wind power has become the future trend of offshore wind power development due to its ability to adapt to environmental conditions such as large water depth and low pollution, and is a new direction for offshore wind power development. As a key "lifeline" connecting floating platforms with fixed offshore substations or power grids, the laying and construction technology of dynamic submarine cables (also known as dynamic output cables) directly affects the safe and stable operation of the entire wind farm. This article takes the laying construction technology of offshore floating wind power cables as the research object, studies the difficulties, key technologies, key equipment, and construction quality control points of offshore floating wind power cable laying construction, and analyzes and proves them with engineering examples to accumulate experience for offshore floating wind power cable laying construction technology.

Keywords : floating offshore wind power; mobile submarine cable; construction layout; power deployment; ROV; fatigue control

引言

全球性的能源革命推动海上风电向更深、更高发展。固定基础从50米以外不再经济, 而浮动基础具有无限发展潜力。浮动海上风电系统由一个系泊系统锚固于海床之上, 其上部的运动平台(承载风机的结构物) 随风、浪、流作6个自由度运动(纵荡、横荡、垂荡、横摇、纵摇、艏摇)。连接上部的运动平台和固定基础(海上升压站、陆地电网) 之间的缆线即动海缆。

动态海缆不同于常规静态海缆的最大区别为: 动态海缆需持续经受平台运动带来的弯曲、拉伸、扭转变形等动态海缆受力, 这使得动态海缆在结构工艺、施工技术等方面提出了更高的要求。同时动态海缆的敷设施工不仅要实现精准的敷设, 还要保证电缆在施工和使用过程中无过高应力和疲劳损伤, 动态海缆敷设施工技术的研究学习是漂浮式海上风电的重要环节。

一、漂浮式海上风电动态电缆概述与技术难点

(一) 动态缆的特殊性

漂浮式海上风电动态缆与传统的静态海缆存在很大的不同, 漂浮式海缆始终在适应着不断变化的恶劣的作业环境, 这也使得漂

式海缆具有着很多不同于传统静态海缆的特性。

特性一: 结构非常复杂, 多层复合结构, 中心导体层外加绝缘层、致密阻水层及关键防护层(一般含径向和纵向两种防护层), 抗拉压动载荷中心机械应力, 同时应充分考虑抗拉应力和弯曲柔性要求的平衡, 外表加设耐磨层以及防腐蚀 / 海生物保护套。

作者简介: 徐茂禄(1982.02-), 男, 广东广州人, 汉族, 本科, 高级工程师, 从事海上风电安全管理研究。

特性二：对动态性能有很高的要求。动缆应有足够高的耐疲劳寿命，能够承受平台6自由度运动带来的可能高达数百万次反复弯绕、反复拉伸和反复扭转寿命要求；有足够的耐弯性能和足够的耐拉性能；有足够的阻水密封、耐海水腐蚀及防止海生物附着性能。

特性三：其连接端点处需要保护。平台端端部连接点处、海床处连接点处，是受力弯曲应力和疲劳载荷最大的部位，成为系统最敏感处，需作特殊设计和加装保护装置达到分散应力、防止过度弯曲和疲劳破坏的目的。

（二）敷设施工的核心技术难点

海上风电动态缆敷设施工在漂浮平台与固定电源之间是漂浮式海上风能利用的核心所在，难度也远远超过海缆固定敷设。总结动态缆敷设施工技术难点如下几个方面。

（1）精确动态定位与协同控制

敷设船在风、浪、流耦合运动中采用 DP 系统保持厘米级位置精度和多自由度运动中的浮板同步即缆线的释放张力和速度要与多自由度的运动中的浮板保持同步，否则会产生瞬间过载或者瞬间最小弯曲半径的设计。

（2）动态响应与疲劳风险管理

悬垂段缆线的敷设过程中的海流和海浪激励会导致悬垂段出现涡激振动 Vortex-Induced Visions, VIV) 和复杂的运动，导致动态缆疲劳寿命损失超过 40%^[1](Johanning et al., 2018)，因此需要实时动态仿真系统，利用 OrcaFlex 等软件设计合理的 S 型 / J 型悬垂线形，控制敷设张力为 80-120kN，避开 1.5 ~ 3.2Hz 的振动频率。

（3）敏感区域防护技术

平台悬挂点、海床触地点为疲劳“双高风险点”；悬挂点处布放聚氨酯弯曲加强器(BendStiffener)，弯曲应变减小60%；悬挂点位置触地点处布放 ROV (遥控无人潜水器) 精确布放防磨垫、岩石压块，着底冲击力≤50kN，悬挂点、触地点误差 ±0.3m。

（4）复杂海床适应性施工

对于岩礁、沙坡等复杂海床，用多波束声呐和 AUV (autonomous Underwater Vehicle) 进行毫米级路由探查。大于 15° 的坡度必须事先挖沟或设置重力式保护座。欧洲的浮体工程（AUV 提供浮体工程）中，总安装成本的 18% 由海床预处理构成^[4]。

（5）恶劣海况作业窗口管理

受施工波高 (≤1.5m)、流速≤1.5 节等海域环境条件约束，施工有效工期每年不足 120d，需实现基于机器学习算法的气象窗口预测模型，满足 72h 的作业窗口决策准确率达 85% 以上。

（6）全要素高精度监控

敷设施工时需要使用光纤传感、MRU 运动参考单元等实时监控技术，其设备需满足能够进行 3D 状态监测。数据延迟必须控制在 200ms 以内，以满足闭环控制需求。

二、动态缆敷设施工关键技术

漂浮式海洋电缆动态敷设系统，是一项集合海洋工程、电力

及智能控制的复杂系统工程，如图 1 所示。其特点为动态适应。

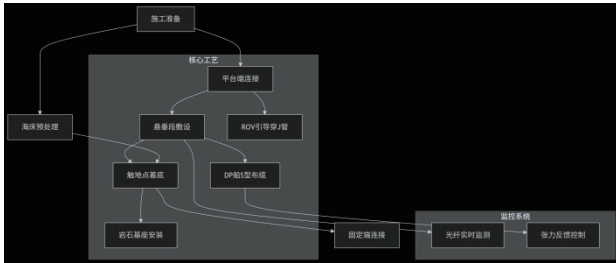


图 1 动态缆敷设技术路线图

DNVGL-ST-0359 中明确，系统使用寿命为 25 年，至少 1x10⁸ 个循环，即敷设阶段，从设计到监测的整个体系需要构建起来。

（一）敷设方法与路径规划

S 形敷设是最常见的缆线敷设方法。S 形敷设方法是指在动态缆敷设施工过程中，通过船上放缆形成单坠段、两头连接平台或锚定点吸收单坠段释放的弹性变形能。施工中通过软件计算确定悬跨长度、悬垂位置、悬垂角度，平衡其缓冲效果与完善施工的安全性。

J 型敷设平台悬于海底较近或水深较小时，其缆线垂直于海底靠近平台，在平台附近形成 J 型曲线，对海底破坏较小，对船位要求也较高，需要有精度较高的动力定位系统来确保施工精度。

S 形敷设与 J 型敷设比较如表 1 所示，（注：表 1 内容依据文献^[2-3]进行对比）：

表 1 敷设方法优劣势对比

方法类型	水深范围	平台运动容忍度	典型悬跨比 (L/h)	海床适应性
S 型敷设	>50m	高 (±3m 垂荡)	1.2-1.5	中等
J 型敷设	30 ~ 80m	低 (±1m 垂荡)	0.8-1.0	优良
混合敷设	全水深	可定制	1.0-1.2	优异
注：悬跨比 L/h= 悬垂段水平投影长度 / 水深				

（二）关键施工工艺

平台端连接、悬挂采用“先平台、后海床”连接，敷设船提前就位锚泊平台，通过工作艇或船用起重机等将预装弯曲加强器 / 护套的缆线端部连接到平台 J 型管、I 型管接口或者固定于吊挂装置上，通过精操作和 ROV 水下操作确保吊挂点的角度满足要求，不要形成初始应力。

悬垂段敷设与形状控制敷设船在动力的驱动下，按照预定的轨迹前进，张紧器根据悬垂曲线及平台运动、环境载荷计算出释放张力、释放速度、及时张紧。

海床触地点是动态疲劳的敏感部位，需选择合适的位置、平整的海床。从地质条件上考虑，可预置岩石垫、安装重力架座保护座，或预埋入地下后开挖出埋沟（考虑到动态疲劳），ROV 引缆着底到预置或预制保护区域。

动态测试和监测贯穿于全部生命周期，敷设完工后通电测试、动态响应测试，通过平台运动或激振验证指标；通过光纤传

感系统长期健康监测预警，确保缆线长期安全运行，其流程如图2所示。



图2 动态对接流程图

（三）疲劳风险控制技术

VIV 抑制装置通过在悬垂段关键位置上设置螺旋列板、整流罩等关键设备，该设备的作用为改变水流，从而破坏漩涡周期性脱落，降低振幅，缓解涡激振动所产生的疲劳损害。

实时疲劳破坏评估是以监测系统，特别是光纤传感系统为前提，实时监测挂点、碰点等处的疲劳累积损伤，当发生临近阈值预警时，采取减小张力，停止作业等一系列减负荷措施以确保施工安全。

三、施工过程风险管理与质量控制

（一）风险管理

动态缆安装风险较高，风险管控需多因素把控。环境窗管理是基础，需确定具体施工海况限值，如波高、周期、风速、流速等，结合精准气象海洋预报，用好开停机控，抓住有效工作窗口期；不能缺失应急方案，要对缆线损伤、设备故障、天气突变、船位失控等突发事件做好应急方案；关键设备应备份冗余，主动力定位系统、主张紧器、主机组等关键设备必须备份，所有设备一定要经得起检验和考验，有效提高设备的可靠性，避免设备发生故障。

（二）质量控制

动态敷设的敷设质量全过程控制从始至终需要全方位的把控，敷设全程监测主要通过持续不断的记录、检查，从敷设张力、敷设速度、船位、姿态、缆线位置、形态、关键点弯曲半径，从而确保敷设施工参数满足规范要求。

关键点检不可少，平台端连接点、触地点着地点、固定端连接点等点通过 ROV 目视点检录像，再结合数据分析复核，保障每一个环节的质量。

四、工程案例分析

“三峡引领号”是我国首台漂浮式海上风电平台。“三峡引领号”机位水深约30m，单机容量5.5MW，使用半潜式平台结构，并于2021年12月正式并网发电。

其最大特征是以浅海适应、浅抗台风为特征，30m 浅水大偏移工况采用“分布式浮力块+配重块”系统，S 型悬垂线形吸收平台运动动能，解决了浅水动态缆线型不稳定问题，外径13.28cm 的缆线抗弯、抗疲劳优化，耐25年1亿次动态弯曲周期，后期经过台风超强台风试验，可靠性得以验证。

创新点在于全过程的全创新，该项目率先在国内实现动态适应性设计进入风电领域，通过国内首创的动态适应性缆疲劳试验机完成服役；施工精度达 DP2级，在距离风力发电机40米船内可靠作业48小时，ROV 的吊点连接偏差小于0.5°，初步形成了“前期勘测+中期S 型敷设+后期动态性测试”的标准流程。

这个案例，要求行业从技术上往深处（>100m）打穿，施工端 DP 定位+ROV 是常态，统一敷设规范。三峡引领号验证可能性，明阳天成号引领规模化，未来数字孪生+AI 优化是动态缆敷设趋势。表2为典型工程案例施工参数对比。

五、结论

漂浮式海上风电动态缆敷设施工是个技术复杂、风险高的系统工程，要求掌握动态缆的技术特点，拥有先进的专用设备、施工技术、严格的疲劳风险控制、过程质量控制。随着漂浮式海上风电的大规模深远海发展，动态缆敷设技术将朝智能化、高效率、高可靠性发展。突破关键装备技术瓶颈，规范标准体系，加强施工组织管理，对于促进中国漂浮式海上风电产业健康、快速发展，高效利用深远海风能资源具有非常重要的意义，技术瓶颈的攻克、施工经验积累是保障连接着漂移风机和电网的“生命线”安全。

参考文献

[1] 李华, 王强, 张宇. 漂浮式海上风电动态缆技术发展与应 [J]. 电力工程学报, 2023, 38(4): 45-53.
[2] 陈晨, 赵亮, 孙明. 基于数值模拟的漂浮式海上风电动态缆敷设安装工艺优化方案 [J]. J.Ocean Eng. 2024 - 42(2): 78 - 86.
[3] 杨波, 马琳, 郑凯. 浮式风电动态缆疲劳分析方法和工程应用 [J]. 中国海上油气, 2024, 36(1): 156-164.
[4] 黄辉, 徐悦, 何飞. 浮水式风电电缆线路浅水区设计及仿真 [J]. 海洋工程设备与技术, 2023, 10(3): 176-183.