

Establishment of a three-dimensional operation and maintenance system for offshore wind power

Tian Jiang

China Power Construction Guizhou Engineering Co., Ltd., Guiyang, Guizhou, 550003, China

Abstract

This article deeply analyzes the significant characteristics of offshore wind power operation and maintenance, including the continuous erosion of equipment by harsh natural environments, high operation and maintenance costs, and strict requirements for timely operation and maintenance response. By constructing an evaluation system model that covers multiple operation and maintenance methods such as operation and maintenance ships, operation and maintenance mother ships, and helicopters, key indicators such as cost, time, and operation and maintenance capabilities were analyzed in depth. Optimization strategies for building a three-dimensional offshore wind power operation and maintenance system have been proposed from the dimensions of integration and collaboration of operation and maintenance resources, technological innovation applications, and personnel training management. Research has shown that a comprehensive three-dimensional operation and maintenance system can significantly improve operation and maintenance efficiency, effectively reduce operation and maintenance costs, lay a solid foundation for the sustainable development of the offshore wind power industry, and have important practical significance for accelerating the widespread application of clean energy.

Keywords

offshore wind power; Three-dimensional operation and maintenance system; Operation and maintenance characteristics; Evaluation model; Optimization strategy

海上风电立体运维体系的建立

蒋田

中国电建集团贵州工程有限公司, 中国·贵州 贵阳 550003

摘要

本文深度剖析了海上风电运维所呈现的显著特点, 包括恶劣自然环境对设备的持续侵蚀、运维作业成本居高不下以及对运维响应及时性的严苛要求。通过构建一套涵盖运维船、运维母船和直升机等多元运维方式的评估系统模型, 深入分析了成本、时间以及运维能力等关键指标。从运维资源整合协同、技术创新应用以及人员培训管理等维度, 提出了构建海上风电立体运维体系的优化策略。研究表明, 完善的立体运维体系能够显著提升运维效率, 有效降低运维成本, 为海上风电产业的可持续发展奠定坚实基础, 对加速清洁能源的广泛应用具有重要的现实意义。

关键词

海上风电; 立体运维体系; 运维特点; 评估模型; 优化策略

1 引言

随着全球对环境保护和可持续发展的关注度不断提升, 传统化石能源的有限性以及其在使用过程中对环境造成的负面影响日益凸显, 开发和利用清洁能源已成为当务之急。海上风电凭借其丰富的资源储量、不占用陆地空间、风速稳定且发电效率高等独特优势, 吸引了世界各国的广泛关注和大力投入。近年来, 各国纷纷制定相关政策, 加大对海上风电项目的扶持力度, 使得海上风电装机容量呈现出迅猛增长的态势。

2 海上风电运维特点剖析

2.1 复杂恶劣的自然环境影响

海上风电设备常年经受海风、海浪、海流以及盐雾等恶劣自然环境的考验。海风不仅风速高, 而且风向多变, 持续不断地冲击着风电机组的叶片和塔筒, 对这些结构部件产生复杂的载荷作用, 加速了设备的磨损和老化, 增加了结构疲劳的风险。海浪的冲击使得风电机组的基础结构承受巨大的动态载荷, 可能导致基础沉降、倾斜甚至倒塌, 严重威胁到整个风电场的安全稳定运行。海流则在水下对海底电缆等设施产生影响, 可能导致电缆移位、磨损, 影响电力传输的稳定性^[1]。此外, 盐雾具有很强的腐蚀性, 会对设备的金属部件、电气系统等造成严重腐蚀, 缩短设备的使用寿命。

【作者简介】蒋田(1996-), 男, 土家族, 中国贵州铜仁人, 本科, 助理工程师, 从事风力发电等研究。

2.2 高成本运维作业特性

海上风电运维成本高昂，主要源于多个方面。首先，海上风电机组及其配套设备需要具备更高的防护等级和可靠性，以适应恶劣的海洋环境，这使得设备的购置和安装成本远高于陆地风电设备。其次，运维作业需要使用专业的船舶、直升机等设备，这些设备的租赁和使用成本不菲。以一艘中型专业运维船为例，其每日的租赁费用可达数万元，而且在作业过程中还需要消耗大量的燃油。再者，海上作业环境危险，对运维人员的专业技能和身体素质要求较高，人工成本相应增加。

2.3 运维及时性要求

海上风电设备一旦出现故障，若不能及时修复，不仅会造成发电损失，还可能引发更严重的安全事故。例如，风电机组的叶片如果出现裂缝未能及时维修，在持续的风力作用下，裂缝可能迅速扩大，最终导致叶片折断，不仅损坏设备，还可能对周边设备和人员安全造成威胁。而且，海上风电通过海底电缆向陆地输电，电缆故障若长时间得不到解决，将影响整个风电场的电力输出，甚至可能导致电网波动。因此，为了保障海上风电场的稳定运行和电力供应，必须建立快速响应机制，实现对设备故障的及时运维，这对运维体系的快速调度和应急处理能力提出了极高的要求^[1]。

3 海上风电运维评估系统模型构建

3.1 运维船评估指标与模型

运维船在海上风电运维中扮演着重要角色。船型适配性是评估运维船的关键指标之一。不同海域的海况差异较大，需要根据风电场所在海域的风浪特性、水深等因素选择合适的船型。例如，在风浪较大的开阔海域，应选择具有良好耐波性的三体船型，其独特的结构设计能够有效提高船舶在恶劣海况下的稳定性，保障运维人员的作业安全。续航与自持力模型则需要考虑风电场与陆地基地的距离、运维周期等因素。如果风电场距离陆地较远，运维船需要具备较长的续航能力和充足的自持力，以减少往返陆地补给的次数，降低运维成本。作业能力评估包括船舶搭载的各类运维设备，如升降平台的升降高度、承载能力，以及是否配备专业的检修工具等，这些直接影响运维船对不同类型设备故障的维修能力。

3.2 运维母船评估体系

运维母船作为海上风电运维的重要支撑平台，其功能模块的完善程度直接影响运维效果。居住模块要为长期驻留海上的运维人员提供舒适的居住环境，确保他们能够保持良好的工作状态。设备存储模块需具备足够大的存储空间，

以满足各类常用运维设备的存储需求，方便随时取用。维修作业模块配备先进的维修工具与设备，是高效完成维修任务的关键。搭载设备兼容性方面，与运维船设备兼容性良好，能够快速搭载运维船转运来的设备，提高运维效率；与直升机设备兼容性佳，可为直升机提供安全的起降平台和高效的设备转运支持，充分发挥直升机的快速运输优势；自身搭载设备间兼容性好，可确保各设备在运行时互不干扰，协同工作^[1]。运维效率是衡量运维母船性能的重要指标，单次出航能够完成更多的维修任务且平均耗时短，表明运维母船运行高效。通过对这些方面的综合评估，可以全面了解运维母船的性能和适用性，为合理调配运维资源提供依据。

3.3 直升机运维评估要点

直升机在海上风电运维中具有快速抵达故障现场的优势。飞行性能与航程限制决定了直升机的适用范围。在距离陆地较远的深海风电场，需要选用航程长、抗风能力强的直升机机型，以确保能够顺利往返于陆地基地和风电场之间。有效载荷与作业灵活性方面，直升机需要具备足够的有效载荷，以搭载必要的维修人员和设备。其作业灵活性体现在能否在复杂海况下实现精准起降，以及在狭小空间内进行设备吊运等操作。

4 基于模型的运维指标分析

4.1 成本指标分析

从成本指标分析表格可以看出，不同运维方式在初始投资成本和运营期间成本上存在明显差异。运维船的初始投资成本相对较低，在1000万~1500万元之间，但运营期间年均成本也需要300万~500万元。在成本构成中，设备购置与维护占比最高，达到40%，这是因为运维船需要配备专业的海上作业设备，且在恶劣海况下设备损耗较快，需要频繁维护和更换。燃油成本占25%，反映了海上航行对能源的大量消耗。人工成本占30%，体现了海上作业的高风险性和专业性，对人员技能要求高，薪酬相应较高。运维母船的初始投资成本高达3000万~5000万元，运营期间年均成本为800万~1200万元。设备购置与维护成本和燃油成本占比较大，分别为35%和30%，这是由于运维母船功能复杂，设备大型化，且在海上停留时间长，燃油消耗量大^[4]。直升机的初始投资在2000万~3000万元，运营期间年均成本500万~800万元，设备购置与维护成本占比45%，因为直升机设备精密，技术含量高，维护保养要求严格。通过对这些成本数据及构成比例的深入分析，可以为运维公司合理选择运维方式、优化成本结构提供科学依据，在保证运维质量的前提下降低成本。

表 4-1 成本指标分析表

运维方式	初始投资成本 (万元)	运营期间年均成本 (万元)	成本构成比例
运维船	1000-1500	300-500	设备购置与维护 40%，燃油 25%，人工 30%，其他 5%
运维母船	3000-5000	800-1200	设备购置与维护 35%，燃油 30%，人工 25%，其他 10%
直升机	2000-3000	500-800	设备购置与维护 45%，燃油 20%，人工 30%，其他 5%

4.2 时间指标分析

时间指标分析表直观呈现了不同运维方式在时间维度上的表现。就到达故障现场平均时间而言,运维船受航速与海况影响极大。若风电场距陆地基地远且海况不佳,其抵达现场耗时在3~8小时,过程漫长。相比之下,直升机依靠出色的飞行速度,天气允许时仅需1~2小时就能到达,优

势突出。在简单故障维修时长方面,运维船通常为2~6小时,运维母船因功能更完善,维修条件更优,时长为3~5小时,二者差距并不显著。但面对复杂故障,运维船受限于自身设备与作业环境,维修时长可达3~7天,且恶劣海况常使作业中断;运维母船凭借强大的维修能力,将时长缩短至2~5天。

表 4-2 时间指标分析表

运维方式	到达故障现场平均时间(小时)	简单故障维修时长(小时)	复杂故障维修时长(天)
运维船	3-8	2-6	3-7
运维母船	4-6	3-5	2-5
直升机	1-2	/	/

4.3 运维能力指标分析

运维能力指标从多个层面揭示了不同运维方式的特性。在设备维修能力覆盖上,运维船能处理风电机组的一般性故障,如叶片表面清洁、小型电气设备更换等,但受空间与设备限制,对大型设备内部故障往往无能为力。运维母船则具备强大的维修能力,配备专业大型维修设备与车间,可对齿轮箱、发电机等核心大型设备进行拆解维修,堪称海上风电设备的专业“大医院”。直升机主要承担快速运输维修人员与小型关键设备的任务,自身维修能力相对薄弱,却在保障维修及时性上发挥着不可或缺的作用,犹如为运维工作注入“强心针”。在复杂故障应对能力评估中,运维母船凭借丰富资源与专业团队,能够制定周全详细的维修方案并有效执行,优势尽显。

命性变化,是提升运维效率的关键。通过在风电机组关键部位安装传感器,实时采集设备运行数据,如振动、温度、电流等参数。利用大数据分析、人工智能算法对这些海量数据进行深度挖掘与分析,能够提前预测设备故障发生概率,实现预防性维护。例如,基于深度学习的故障诊断模型,能够依据设备历史运行数据与大量故障案例,精准识别潜在故障隐患,并为运维人员提供针对性维修建议,使运维工作从被动应对转变为主动预防。先进运维设备的研发与应用同样重要。研发新型高效的海上作业设备,如具备自动攀爬功能的叶片维修机器人,可显著提高叶片维修效率与安全性,减少人工操作风险[5]。数字化运维平台的搭建,整合了风电场设备信息、运维资源信息、维修记录等各类数据,为运维人员提供便捷操作界面。

5 海上风电立体运维体系优化策略

5.1 运维资源整合与协同

建立统一调度指挥中心是实现运维资源整合与协同的核心。该中心犹如整个运维体系的“大脑”,能够实时收集风电场设备运行状态、运维船、运维母船和直升机的位置及作业状态等关键信息。借助先进的信息处理与分析技术,依据设备故障类型、紧急程度等因素,精准合理地调配运维资源。例如,当接到小型设备故障报警时,调度中心能迅速定位最近的运维船并安排其前往处理,充分发挥运维船灵活便捷的优势;若遇到大型复杂故障,则协调运维母船前往,并安排直升机运送关键维修人员和设备,实现多种运维资源的协同作业。运维船、运维母船与直升机之间的协同机制,需要明确各自职责与详细作业流程。运维船负责近距离、一般性设备巡检与维修,同时将收集到的数据与初步故障判断及时反馈给调度中心。运维母船作为海上维修基地,为复杂维修任务提供全方位支持,并接收运维船转运来的故障设备与人员。直升机专注于快速应急响应与关键物资运输,在最短时间内将所需资源送达现场。在资源共享与互补方面,各运维资源可共享设备、技术与人员信息。

5.2 技术创新应用

智能化监测与故障诊断技术为海上风电运维带来了革

6 结论

本文深入剖析海上风电运维特点,构建涵盖多种运维方式的评估系统模型,并据此分析关键指标,提出优化策略。结果表明,复杂环境、高成本及及时性要求是运维难题。通过模型能精准评估运维方式,成本、时间与能力指标为资源配置提供依据。优化策略从资源协同、技术创新、人员培养入手,可提升运维效率、降低成本。海上风电立体运维体系极具前景,后续研究应聚焦不足,推动产业发展。

参考文献

- [1] 杨亚男,孙毅,李瑞友.海上风电立体运维体系的建立[J].中国新技术新产品,2024,(04):55-57.
- [2] 李斌,顾而行,周晓强,等.海上风电5G+北斗一体化立体空间资源应用[J].江苏通信,2023,39(06):120-123.
- [3] 谭任深,戚永乐,周冰,等.5G定制网技术在海上风电场智慧管理与生态环境监测中的应用实践[J].南方能源建设,2024,11(04):65-75.
- [4] 于海龙,祁雷,朱魁星.海上风电运维母港建设影响因素分析[J].中国设备工程,2025,(06):23-25.
- [5] 李达,孙涛,易丛,等.深远海浮式风电技术发展研究[J/OL].中国工程科学,1-15[2025-04-16].