

海上风力发电机组运维成本控制与高效管理策略

关照旗

国电投江苏海上风力发电有限公司 江苏盐城 224544

摘要：海上风力发电机组运维具有高风险、高成本特点，运维人员在实践操作当中需要应对复杂的环境，还要在科学的工作模式下保证运维管理高效性，同时减少运维工作花费的成本。文章简要概述海上风力发电机组运维要点，分析海上风力发电机组运维成本控制措施，探讨高效管理策略，为提高海上风力发电机组运维工作效率和质量提供理论参考。

关键词：海上风力发电机组；运维成本控制；高效管理

成本控制和高效管理在新时期开展各项工作的过程中都受到了较大的重视，落实相关工作的过程中，管理人员要采取可行性措施减少资源浪费、管理失效等问题，才能够达到基本的工作要求。就海上风力发电机组运维管理来说，运维人员要制定可行性维护计划、做好关键部位维护工作、保证作业安全性等，在减少成本的同时达到高效管理要求。因此，需要从海上风力发电机组运维工作要点出发，将各项工作执行到位，达到较高的工作标准和要求。

一、海上风力发电机组运维要点

第一，维护类型与计划。针对海上风力发电机组开展运维工作时，需要以定期检修、日常运维、事故检修几种不同的方式为主。采取定期检修的方式时，要按照厂家的技术要求，基于运行时间开展检测、润滑、紧固等标准化操作，做好计划性维护工作，保持设备最佳状态并延长寿命。开展日常运维工作时，要预判、检测与消除故障问题，技术人员需要具备电气、通信等专业能力，确保故障处理效率满足工作要求。开展事故检修工作时，要针对叶片、发电机等关键部件进行修理，制定详细的方案并组织专家分析原因，以控制成本和停机时间^[1]。

第二，关键维护部位与活动。海上风力发电机组的核心部位包括机舱（容纳齿轮箱和发电机）、轮毂、叶片及塔架，运维人员要关注这些部位的日常运行情况，为了减少故障问题，采取预防性与预测性维护工作，定期清洁、调整和更换部件延缓磨损，还需要利用传感器实时监测振动、温度、油液状态等数据，结合计算机化维护管理系统进行健康诊断和故障预警，实现主动维护。

第三，作业装备与安全。在运维过程中需要准备好

关键装备，尤其是在现代化社会发展期间，应该构建高效运维平台，配备动力定位系统，在恶劣海况下稳定作业。运维人员还可以借助运维交通船的高航速、耐波性和靠泊稳定性特点开展运维工作，确保人员和物资安全高效转运。落实安全措施时，应该严格执行高空作业安全规范，正确使用安全带、防护头盔等个人防护装备，有关部门还应定期培训人员应对海上风险。

二、海上风力发电机组运维成本控制

1. 减少天气延误损失

海上风力发电机组在运行期间会受到天气因素的影响造成损失，尽管可以通过运维工作对其进行控制，但是还是会产生成本消耗。这就要求工作人员在控制成本的过程中从设备设计、气象服务和应急预案等多个方面综合分析，利用专业技术方法减少天气延误造成的损失。

开展海上风力发电机组设计工作时，需要结合极端天气优化风机设计，在台风频发区域采用专门设计的S级风电机组，其抗风能力高于国际标准，以应对强风、湍流和风切变。设计人员可以利用主动防护技术，构建偏航系统调整风机正面正对台风方向，减少侧向受力，同时利用变桨控制改变叶片迎风角度，降低正向风力冲击，促使风机在台风来袭时动态优化姿态，避免硬抗强风造成风机损坏^[2]。

在运行机组期间应该利用海洋气象服务平台结合人工智能、卫星遥感技术等提供风机位置点级的精细化预报，还要构建发呢贡献预警系统，建立针对热带气旋、大风等高影响天气的预警模型，提前识别“可利用型”或“破坏型”气旋，指导风电场采取差异化应对措施。

构建应急预案减少机组运维产生的成本时，应该在

热带气旋接近时，提前调整风机运行模式，制定人员转移、设备加固等方案，还要在故障发生时利用气象窗口预测快速修复故障，缩短停机时间，减少发电损失。

2. 平衡备件库存与供应效率

海上风力发电机组的运行环境比较恶劣，如果在运维期间出现备件短缺的情况就会导致发电量损失，而库存过多则占用资金，因此需要平衡备件库存与供应效率，达到控制成本的目的。首先，需要根据机组运行场景需求优化库存策略，考虑海上风电备件需耐受盐雾腐蚀、高湿度的要求，优先选择经过验证的高性能备件，与供应商明确材质检测和性能测试标准，避免因质量问题导致重复采购。运维人员可以根据备件的历史故障数据、风机可靠性指标等为齿轮箱、发电机部件等关键备件设定动态安全库存，避免过度储备浪费资金。其次，以预测性维护作为主要措施，结合AI技术提高供应效率。运维人员需要利用物联网技术实时监控风机的振动、温度数据等状态，结合机器学习算法预测备件需求趋势，在数据分析优化的基础上优化备件的运输路线和仓储布局。其可以在沿海地区设立区域备件中心，结合实时物流跟踪，确保紧急订单能快速发货，常规订单则通过集中采购和批量配送降低成本。最后，为了提高成本控制实效性，应该采取全生命周期成本管控的方法，通过库存盘点和预警系统实时监控库存水平，避免积压，同时，将备件成本、运输成本、停机损失等纳入综合评估，优化经济订货批量。

3. 运维装备与人员效率最大化

提高运维装备与人员效率可以减少运维工作中的无用功，以高效的工作成效作为基础，减少运维工作中的成本损失。落实海上风力发电机组运维成本控制工作时，可以引入智能化运维技术，利用无人机巡检技术通过搭载红外热像仪等设备的无人机进行定期巡检，将单个风场的检查时间从传统方式的7天大幅压缩至4小时。同时，可以利用数字孪生技术结合实时数据构建虚拟模型，实现故障预演和优化决策，减少无效运维产生的成本浪费。运维人员可以构建预测性维护系统，利用大数据分析技术和AI算法提前预测齿轮箱等关键部件的故障，减少运维船出动次数，在降低运维成本的同时避免非计划停机。运维工作的开展需要通过动态设备的调度达到工作要求，在工作当中可以结合海洋气象数据，利用智能算法动态调整运维船和人员的出海窗口期，避开极端天气，降低交通成本。实现人员效率最大化时，应该针对

海上的复杂环境定期开展仿生鲸鳍设计叶片维护、无人机操作等专项培训，提升人员技能熟练度，还需要定期组织演练完善应急预案，提高突发故障处理时效，有效控制成本。

三、海上风力发电机组运维高效管理策略

1. 实施全生命周期状态监测

第一，构建多维度的立体感知网络。以全生命周期监测作为要点，采集机组状态的全方位、无死角数据，部署一个由“空、天、地”多平台构成的智能感知网络^[1]。监测人员需要做好机舱与塔筒内部检测、升压站与场区环境监测、远程与空基巡检等工作。落实机舱与塔筒内部监测工作时，要在风机机舱、轮毂及塔筒内部署高清视频监控、红外热像仪、声音传感器等多元传感设备，持续采集设备的温度、振动、声音、油液状态等关键参数，及时发现齿轮箱、轴承等核心部件的早期异常信号。开展升压站与场区环境监测时，则需要在升压站部署轨道式巡检机器人和智能摄像头，做好高压设备的自动巡检和红外测温工作。与此同时，应该通过遍布场站的环境传感器，持续监测温度、湿度、风速、盐雾腐蚀等环境数据，评估设备运行环境对寿命的影响。在远程与空基巡检过程中，要利用无人机机巢进行常态化巡航，采集风机叶片、塔筒外壁及集电线路高清影像，精准识别叶片裂纹、螺栓松动、线路覆冰等隐蔽性缺陷。

第二，打造智能分析与预警平台。在全生命周期状态监测中，会获得海量监测数据，在传统的数据管理模式下经常会产生较多阻碍，耗费较长时间，导致管理效率低下。这就需要打造智能分析平台处理海量数据，将数据转化为知识。构建智能分析平台时，集成来自传感器网络、无人机巡检、视频监控等多源异构数据，建立风机、风电场及电网的数字孪生模型，在大数据分析技术与人工智能算法的支持下动态评估设备健康装备。构建预警平台时，应该保证平台具备设备异常自动识别、故障根源分析和剩余寿命预测能力，一旦监测数据偏离正常范围，就需要自动触发多级预警，精准定位潜在故障点，为维修决策工作的开展提供依据^[4]。

第三，优化运维策略与管理模式。全生命周期状态监测与传统的管理模式存在显著的差异，管理人员在工作当中持续优化运维策略，运维人员则应该变被动为主动，基于全状态监测和健康评估结果制定最优的维修策略，最大限度减少非计划停机，降低运维成本的同时提高管理效率。管理人员可以积累运维工作中的全生命周

期数据,为风机选型、运维方案优化、备件库存管理乃至下一代风机设计提供宝贵的数据支撑,实现持续改进。

2. 构建数字化运维平台

第一,明确平台建设目标与需求。海上风力发电机组运维管理的主要目的在于提高运维效率、降低运维成本、保障发电稳定性,构建运维平台的过程中需要利用数字化手段减少故障停机时间,提高平台利用率,体现其在实际建设中的作用和价值。管理人员应该针对海上风电的极端海况、运维难度大等特殊挑战设计平台功能,重点解决数据孤岛、设备管理粗放等问题。

第二,设计平台技术架构。数字化运维平台应该以感知层、网络层、平台层、应用层架构为主,其中,感知层要安装风速、温度、振动等传感器,实时采集设备运行数据,网络层应借助无线通信技术确保数据稳定传输,平台层需要基于云计算提供数据存储、处理和分析能力,支持大数据挖掘和AI算法运行,应用层则需要开发可视化界面、故障诊断、备品备件管理等功能模块,满足运维人员操作需求,平台设计应该强调模块化、可扩展性、高可靠性和安全性,便于未来升级和跨系统集成^[5]。

第三,集成核心功能模块。运维人员和管理人员需要在构建数字化运维平台时协同分析,确定平台设计与建设要点,构建数字孪生系统、做好设备全生命周期管理等工作,还要体现平台的智能故障诊断与预警功能。因此,需要利用三维可视化技术构建风机和风电场的数字模型,实时展示运行状态、发电流程及统计数据,辅助决策。落实平台管理工作时,要以设备台账作为中心,通过关联设计、运维数据等实现从安装到退役的全程跟踪。开展智能故障诊断与预警工作时,要利用AI算法分析历史数据,预测潜在故障并生成维修建议,提升故障修复及时率。

第四,数据管理与分析。数字化运维平台中的数据信息杂且乱,管理人员应该做好数据采集与清洗工作,统一不同厂家设备的数据格式,通过数据清洗和预处理提高质量,解决数据孤岛问题。其可以利用数据挖掘技术分析运行趋势,以图表形式直观展示发电量、故障率等关键指标,为后期优化管理模式提供决策支持。

3. 远程运维与智能化作业工具

第一,远程诊断与无人干预技术。海上风力发电机组在运行期间会受到天气因素的影响,尤其是一些海域

天气难以及时勘测,很难直接进入区域分析实际情况。管理人员就需要通过远程运维的方式诊断故障问题,其可以利用机组边缘计算网关远程诊断主控系统通讯故障、变桨角度偏差等故障问题,解决大部分难以直接人为干预的故障问题。针对简单的传感器误报故障可以直接采取远程复位措施,针对复杂的齿轮箱异响故障则可以利用AR远程指导现场人员排查,提高管理效率的同时减少专家登岛成本^[6]。

第二,机器人代替高危作业。利用爬壁机器人检测叶片表面的裂纹,在机器人上搭载高清摄像头、超声波探伤仪实现故障检测,还可以利用水下机器人检查基础桩的腐蚀情况,使用高科技设备减少工作人员在实践操作中受到的损伤,代替人工登塔、潜水作业等,以此提高作业安全性。

结语

控制海上风力发电机组运维成本的主要目的在于利用最小的资源投入提高机组的发电效率,减少工作中产生的经济损失,同时需要采取高效的管理措施满足更高的标准,规避机组运维期间产生的质量和安全问题。落实具体的工作时,运维管理人员应减少天气延误损失、平衡备件库存与供应效率、实现运维装备与人员效率最大化、实施全生命周期状态监测、构建数字化运维平台、应用远程运维与智能化作业工具等,提高海上风力发电机组运维经济性。

参考文献

- [1]王双林.海上风电场风力发电机状态监测与运行维护策略[J].海峡科学,2024,(08):48-51.
- [2]胡超波.风电场中风力发电机组运行故障及维护[J].仪器仪表用户,2023,30(09):110-112+31.
- [3]李绵基.海上风电场风力发电机运行维护策略研究[J].光源与照明,2022,(12):222-224.
- [4]马金秋.海上风力发电机组运行维护策略[J].设备管理与维修,2020,(12):88-89.
- [5]郑心勤.海上风力发电机组运行维护策略研究[J].经济技术协作信息,2024(1):0256-0258.
- [6]李莉.我国海上风电场运维成本管控途径的探讨[J].财经界,2023(5):12-14.