

风力发电设备运维中存在的问题与优化措施

崔帅帅

中国水利水电第十一工程局有限公司 河南 郑州 450001

【摘要】：本文立足于风力发电设备的运维概述，围绕风力发电设备运维中存在的问题与优化措施展开探讨。首先，阐述了风力发电设备的基本构成、工作原理及运维核心内容与模式，随后从运维策略管理、技术设备、外部环境成本三个维度剖析当前运维工作存在的问题，在此基础上，针对性提出运维模式智能化转型、管理体系完善、关键技术突破、服务模式创新等优化措施，旨在为提升风电设备运维效率、降低运维成本、保障风电产业可持续发展提供参考。

【关键词】：风力发电设备；运维管理；故障诊断；智能运维；优化措施

DOI:10.12417/2705-0998.25.22.029

引言

在“双碳”目标下，风力发电以其资源可再生、清洁低碳的优势，为全球能源结构调整指明了方向。我国风电产业历经多年发展，装机容量稳居世界前列，陆上风电技术日趋成熟，海上风电也进入规模化开发阶段。然而，风电设备多部署于野外、海上等复杂环境，长期面临极端气候、负荷波动等考验，运维工作的复杂性与难度显著高于传统能源设备。运维质量不仅直接关系到风机的可利用率与发电效率，更影响项目的投资回报周期与安全运营水平。当前，我国风电运维领域仍存在模式滞后、技术应用不充分、管理体系不完善等问题，制约了产业效益的进一步释放。深入分析这些问题的根源，探索科学有效的优化路径，对于推动风电运维从“被动维修”向“主动预防”“智能运维”转型，降低运维成本，提升产业核心竞争力具有重要的现实意义。本文围绕风电设备运维的核心流程与关键环节，系统分析现存问题，并结合先进技术与管理经验，建立全方位的优化体系，以推动风电运维行业的规范化、智能化发展。

1 风力发电设备运维概述

1.1 基本构成与工作原理

风力发电设备是一个复杂的系统，其涵盖了机械、电气、控制等多学科技术，主要由风轮系统、发电系统、传动系统、控制系统、塔筒与基础构成。风轮系统能够将捕获的风能转化为机械能，其组成部件有叶片与轮毂；传动系统包含齿轮箱、联轴器等部件，实现转速提升与动力传递；发电系统以发电机为核心，将机械能转化为电能；控制系统通过传感器采集运行数据，实时调节风轮偏航、变桨角度，确保设备在安全范围内高效运行^[1]；塔筒为设备提供支撑，基础则保障整机的稳定性。各系统协同运作，共同致力于风能向电能的转化与输出。受系统复杂结构及特殊运行环境的影响，要求运维工作的开展必须做到全覆盖、全流程管控。

1.2 运维主要内容与模式

保障设备安全稳定运行、提升发电效率是风力发电设备运

维的主要目标，运维内容涉及日常巡检与定期维护、故障检修与备件管理、状态监测与性能分析。日常巡检与定期维护是指通过目视检查设备外观、加注润滑油脂、紧固连接螺栓、更换滤芯等操作，及时排除潜在隐患，属于预防性工作；故障检修与备件管理主要针对突发故障的快速响应，通过根本原因分析制定修复方案，同时依托备件供应链保障维修所需部件的及时供应；状态监测与性能分析则通过采集设备运行参数，开展数据解读与发电量评估，为运维决策提供数据支撑^[2]。当前主流的运维模式分为三类，分别是纠正性维修、预防性定期维修与基于状态的预测性维护。纠正性维修属于事后维修，在设备故障发生后进行修复，虽投入成本低但易造成长时间停机损失；预防性定期维修按照固定周期开展维护工作，能在一定程度上减少故障发生，但可能存在过度维修或维修不足的问题；基于状态的预测性维护则依托实时监测数据判断设备状态，按需开展维护，是兼顾效率与成本的理想模式。

2 风力发电设备运维中存在的主要问题

2.1 运维策略与管理层面的问题

纵观当前风电设备运维现状，普遍存在运维策略粗放的问题，多数企业运维工作重点仍然围绕定期维修与事后维修进行，计划的制定缺乏针对性，难以匹配不同设备的运行状态，不仅可能因过度维修导致资源浪费，还可能因维修不足致使故障再次出现，影响整体成本效益。运维管理体系不健全进一步加剧了这一问题，标准化与精细化程度不足，作业流程存在漏洞，缺乏统一的操作规范与质量评估标准，同时知识管理缺失，过往的故障处理经验与运维数据未能有效沉淀，难以形成闭环管理^[3]。专业化高水平运维人才短缺成为制约运维质量提升的关键瓶颈，尤其是海上风电与新型大容量机组的运维工作，对复合型技术人才的需求迫切，但行业内相关人才供给不足，加之部分风电场地理位置偏远，人员流动性大，进一步加剧了人才缺口。备件库存管理不合理的问题同样突出，关键备件储备不足易导致故障发生后维修延误，非关键备件积压则占用大量资金，影响企业资金周转效率，而备件需求预测的精准度不足与供应链协同不畅，是造成这一问题的核心原因。

2.2 技术与设备层面的问题

因缺少对故障诊断与预警技术的应用，影响了运维效率。尽管多数风电场备配有 SCADA、CMS 等监测系统，但因对数据的挖掘受限，影响了数据价值的充分发挥，降低了故障预测准确率，很难做到提前预警与主动干预。部件早期失效与共性故障频发严重影响设备运行稳定性，齿轮箱磨损、发电机轴承故障、叶片裂纹与雷击损伤、变桨与偏航系统故障等问题屡见不鲜，这些故障不仅维修难度大，还可能引发连锁反应，扩大故障影响范围。恶劣运行环境给运维工作带来特殊挑战，海上风电面临高盐雾腐蚀、台风、覆冰等问题，陆上风电则受沙尘、极端温度、雷电等因素影响，这些环境因素加速设备老化，增加故障发生概率，同时也给现场运维作业带来安全风险^[4]。老旧机组改造与延寿运维面临诸多难题，随着技术迭代加速，早期投产的机组面临部件停产、技术兼容性不足等问题，改造升级的技术难度与成本较高，而这些机组的运维质量直接影响整体风电项目的效益。

2.3 外部环境与成本层面的问题

风电运维效率在一定程度上受运维可达性的影响，特别是对于海上风电，受海况、天气等因素的影响，有效作业窗口期短，交通与吊装成本大，增加了时间成本及运维难度。运维成本的持续上涨使企业面临严峻挑战，随着机组大型化、海上化趋势加强以及风机机龄增长，人工、船舶、备件及吊装等各项成本不断上升，挤压了项目的利润空间。数据孤岛与信息整合困难进一步加剧了运维挑战，不同设备厂商的系统数据格式不统一，数据分散存储于各个平台，难以实现跨平台、全生命周期的数据分析与共享，导致运维决策缺乏全面的数据支撑，难以形成协同高效的运维体系。

3 风力发电设备运维的优化措施

3.1 推动运维模式智能化与预测性转型

为了能够从整体上提升运维效率，降低成本，需推动运维模式从传统被动定期维修。对此，应加大对基于状态的预测性维护，深度结合 SCADA、CMS、油液分析、振动监测、热成像等多源数据，通过数据分析精准判断设备状态及潜在故障。构建智能运维平台与数字孪生系统，依托大数据、人工智能与机器学习算法，建立故障诊断模型与设备寿命预测模型，实现维修决策的智能化优化，同时通过数字孪生技术模拟设备运行场景，为运维方案制定提供虚拟仿真支撑。积极应用无人机、机器人等智能巡检技术，对叶片、塔筒外部等人工难以触及的区域进行自动化、高精度检测，既提升巡检效率与检测精度，又降低高空作业的安全风险^[5]。传统运维模式与智能预测性运维模式在核心理念、数据基础、决策依据等方面存在显著差异，具体对比如表 1 所示：

表 1 传统运维模式与智能预测性运维模式对比

对比维度	传统（定期/事后）运维模式	智能预测性运维模式
核心理念	基于时间计划或故障发生	基于设备实时状态与趋势预测
数据基础	有限，主要依赖经验与手册	海量多源实时/历史数据
决策依据	固定周期或故障报警	数据分析、模型预测与风险评估
维护动作	计划性更换/故障后修理	精准干预、提前预警、视情维修
成本效益	可能过度维修或维修不足，总体成本较高	优化维修资源，减少非计划停机，降低总体成本
技术支撑	基础监测、人工经验	IoT、大数据、AI、数字孪生等

由表 1 可见，智能预测性运维模式以数据为核心驱动，通过精准感知设备状态实现主动维护，相比传统模式更能适应风电设备复杂的运行特点，在成本控制与效率提升方面具有显著优势，是未来风电运维的主流发展方向。

3.2 加强运维管理体系建设与人才培育

建立精细化、标准化的运维管理体系，从根本上提升运维质量，结合企业实际情况优化作业流程，严格按照质量要求，确保各环节操作规范化，同时，做好全生命周期资产管理，全程跟踪设备从投产到退役环节的运维状态及故障诊断和维修情况，形成管理闭环。强化人才队伍建设与技能培训，构建多层次培训体系，针对不同岗位需求设置专项培训内容，涵盖新型设备操作、智能监测技术、故障诊断方法等核心知识，同时加强与高校、专业培训机构的合作，开展定向人才培养，补充复合型运维人才缺口。完善激励机制，通过合理的薪酬福利、职业发展通道设计，提升人才归属感，减少人员流失。优化备件供应链与库存管理，实施基于风险分析的差异化备件策略，对关键部件、慢速流动件采取分类管理，合理确定储备数量，同时探索区域共享库存、供应链金融等创新模式，加强与供应商的协同合作，缩短备件采购与配送周期，平衡库存成本与维修效率。

3.3 聚焦关键技术突破与专项优化

使用专项治理技术应对共性问题，确保设备安全可靠。比如，对齿轮磨损问题，借助实时状态监测系统与在线滤油技术，优化润滑方案，降低这类问题的发生率；针对发电机故障，为降低过热故障与绝缘老化故障风险，采用增强绝缘材料性能、优化散热系统的措施；对于叶片裂纹与雷击损伤，为提升叶片抗损伤能力，采用新型前缘防护材料与智能修复技术，这样一

来也能够完善防雷系统设计；针对变桨与偏航系统故障，通过优化控制算法与部件质量使系统处于稳定运行状态。此外，设备选择还应重点关注其自身防腐性能及对环境的适应能力，针对陆上沙尘、海上高盐雾等特殊环境，需要用高等级的防护材料和工艺，并制定针对性的检查维护方案，确保设备处于高效的运行状态。另外，对老旧机组进行技术改造与延寿评估，通过更换高效部件、加装先进控制系统以及进行结构强化评估等措施，提升发电机组发电效率，同时建立科学的延寿评估体系，结合设备技术兼容性、运行情况及成本效益等方面因素，制定科学合理的改造或退役方案。

3.4 创新运维服务模式与成本控制

加大对合同能源管理、全生命周期托管等创新商业模式的推广应用力度，将收益与运维风险捆绑，激励运维商积极主动降本增效。基于全生命周期托管模式，服务商负责设备从投产到退役整个过程的运维工作，在创新技术与专业化管理策略的共同作用下，实现效益最大化；合同能源管理模式聚焦节能效益与发电量，将运维服务向价值创造转变。在风电场集群区建立备件中心与运维基地，发展区域化、集约化运维管理模式，

通过资源共享与协同调度，降低边际成本。利用先进技术降低特定环节成本，通过气象预报与海况监测优化海上运维窗口期与船舶调度，减少等待时间与运输成本；借助无人机、机器人等智能设备替代人工开展高空、野外巡检，降低人工成本与安全风险；通过大数据分析优化维修计划与备件采购，减少资源浪费，实现精细化成本控制。

4 结语

风力发电设备运维作为推动风电产业健康可持续发展的重要举措，该项工作的落实应贯穿整个设备运行始终。面对当前运维工作面临的策略管理粗放、技术应用不足、环境成本压力大等多重挑战。运维模式智能化预测化转型、加强管理体系建设与人才培育、突破关键技术瓶颈等具体策略的有效落实，能够从整体上提升运维效率，为设备稳定运行提供可靠的保障。在未来的探究中，随着信息技术的快速发展及在风电运维中的深度应用，将推动风电行业朝着更智能、更高效、更经济的方向发展，为全球能源转型与“双碳”目标实现提供有力支撑。

参考文献：

- [1] 曹占有.风力发电设备运维存在的问题及改进探讨[J].中国设备工程,2025,(01):70-72.
- [2] 阴志鹏,朱卫宁,李赫,刘晗.基于大数据的风力发电智慧运维体系[J].河北建筑工程学院学报,2024,42(03):158-161.
- [3] 庞金鹏,王文杰,张巍,安振东.提高风力发电可靠性的风电机组运维管理研究[J].中国新技术新产品,2024,(09):71-73.
- [4] 朱洪喜.风力发电设备运维中存在的问题与优化措施[J].光源与照明,2024,(02):180-182.
- [5] 李向小.风力发电场运维管理的有效措施研究[J].电气技术与经济,2023,(08):224-226.