

风力发电机组设备的预防性维护策略

马韬

新疆华电苇湖梁新能源有限公司，新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市，830000；

摘要：随着全球对清洁能源需求的不断增长，新能源风力发电得到了广泛的应用和发展。风力发电机组的稳定运行对于提高发电效率和保障电力供应至关重要。风力发电机组作为风力发电的关键设备，其运行状态直接影响着发电效率和可靠性。然而，由于风力发电机组通常安装在野外恶劣的环境中，面临着复杂多变的气候条件和高强度的运行负荷，使得设备容易发生故障，影响发电效率和可靠性，风力发电机组预防性维护是保障设备安全运行、提升经济效益的关键策略，本文分析了风力发电机组设备的预防性维护策略。

关键词：新能源；风力发电机组；预防性维护；策略研究

DOI：10.69979/3041-0673.25.12.094

传统的故障维修和定期维修方式已难以满足现代风力发电的需求，预防性维护策略的研究和应用成为提高风力发电机组运行管理水平的关键，对促进新能源风力发电产业的可持续发展具有重要意义。

1 新能源风力发电机组预防性维护策略概述

以下是新能源风力发电机组预防性维护策略的核心要点概述：

1.1 核心维护策略

分级监控体系，按机组寿命划分健康等级：初期机组月度监测，累计运行超万小时的机组升级为周度监测，异常数据触发深度检修。关键设备差异化监控（如偏航减速器），结合声波震频分析建立阈值基线，偏差超土10%立即纳入维护清单。故障预测与主动维护，利用SCADA、振动传感器实时采集数据，通过机器学习预测部件剩余寿命（如轴承、齿轮箱）。预测模型（如1D-CN N+Bi-LSTM）触发预警后，需在8个工作日内处置，避免故障扩大。生命周期管理，引入环境修正系数：高盐雾地区齿轮箱严格遵循32,000小时开盖检修，轮齿磨损达1mm（国标NB/T31004）必须更换。

1.2 管理实施要点

维护策略迭代，从传统“定期检修+事后维修”转向基于状态的预测性维护（CBM），降低非计划停机率。利用物联网构建实时监测平台，整合气象、地理数据优化维护窗口。成本与风险控制，采用机会维护策略动态调整计划，关联故障不确定性以最小化单位时间成本。建立防雷保护与接地网定期检测机制，强化极端天气应急响应。

2 风力发电机组预防性维护的重要性

2.1 防范重大安全风险

结构稳定性保障：现代风机塔筒高度超百米、叶轮直径突破200米，强风环境下易引发叶轮变形、塔筒共振等结构性风险。定期检查螺栓紧固度、结构件疲劳裂纹（如塔基混凝土支撑圈刚度衰减监测），可预防坍塌事故。**高压电气系统防护：**电压等级升高导致电气安全风险加剧。预防性维护需定期检测电缆老化、接地保护及绝缘性能，避免短路引发火灾。**极端环境应对：**高盐雾地区需严格执行防腐规范（如塔筒焊缝防锈、螺栓包覆），防止腐蚀导致强度劣化。

2.2 显著降低运维成本

减少非计划停机：突发故障（如变桨系统卡涩、轴承过热）单次停机损失可达50万元以上。通过智能传感器监测关键参数（如轴承温差超65℃预警），提前干预可减少发电损失。**延长设备寿命：**定期更换齿轮箱润滑油（油液铁屑光谱分析）、按运行小时数更换疲劳部件（如32000小时检修齿轮箱），避免核心设备报废。数据显示规范维护可使机组寿命匹配25年设计年限。**优化备件管理：**基于振动频谱分析预测部件失效周期（如偏航减速器），减少紧急采购成本。

2.3 保障发电效率与收益

提升能量转化率：叶片积尘、虫尸堆积会增加风阻损失。定期清洁可恢复翼型设计效率，发电量提升5%-10%。**电网适应性优化：**预防性校准变流器、功率控制系统，避免因电压波动导致的脱网故障，确保全额并网收益。**数据驱动决策：**通过SCADA系统分析功率曲线偏离，定位发电机绕组老化等问题，针对性维护减少隐性发电损失。

3 风力发电机组预防性维护策略内容

3.1 预测性技术应用

故障智能诊断，采用核函数投影寻踪（KF-PP）分析轴承振动频谱，识别早期损伤特征（如剥落、裂纹）。结合1D-CNN和Bi-LSTM模型预测齿轮箱剩余寿命（RUL），提前规划备件更换。运行状态实时监控，通过SCADA系统跟踪功率曲线偏移、发电机绕组温度等参数，定位隐性效率损失。部署声波震频分析技术监测偏航减速器，超阈值±10%触发深度体检。

3.2 机械系统维护

关键部件保养，齿轮箱：每运行32,000小时开盖检修，轮齿磨损深度≥1mm（国标NB/T31004）强制更换。润滑管理：按制造商周期润滑轴承，油液铁屑光谱分析检测异常磨损。结构完整性保障，定期复紧塔筒螺栓（扭矩值参照设计规范），检测叶片裂纹与气动平衡。高原地区传动链径向摆幅容许值放宽15%–20%，需建立区域振动基准库。

3.3 电气与控制系统维护

安全防护，测试变流器IGBT模块导通损耗，三次谐波异常波动纳入红色预警项。校验防雷接地电阻（≤4Ω），雨季前全面检测电缆绝缘性能。校准升级，每季度校准功率传感器、风速仪，更新控制系统固件版本。

3.4 环境适应性维护

腐蚀防护，高盐雾区域塔筒焊缝年度防锈处理，螺栓包覆防腐涂层（GB/T 31817标准）。极端天气应对，台风前加固机舱罩密封性，冰雪天气启动叶片加热防冰系统。

4 风力发电机组预防性维护实施步骤

风力发电机组预防性维护实施步骤需遵循“计划→执行→监控→优化”闭环管理流程，具体步骤如下：

4.1 维护计划制定

基础数据采集，整合SCADA系统历史运行数据（功率曲线、温度、振动趋势）、设备手册及环境参数（盐雾浓度、平均风速）。建立部件失效数据库，标注高故障率部件（如齿轮箱、轴承）的寿命周期。定制化维护方案，按机型、运行环境差异化制定计划（如沿海机组防腐周期缩短至6个月，高寒地区增加叶片防冰检查）。

4.2 现场执行流程

安全准备，登塔前锁定远程控制系统，穿戴防坠器、安全帽，执行“双人互检”制度。机舱作业时挂钩安全带于专用锚点，控制箱上锁并挂警示牌。分系统维护操

作，机械系统：复紧塔筒螺栓至设计扭矩值（参考NB/T 31004标准）；抽取齿轮箱油样进行铁屑光谱分析，磨损深度≥1mm立即更换齿轮。电气系统：检测变流器IGBT模块谐波畸变率，校准功率传感器偏差；测量接地电阻（≤4Ω），雨季前全面检测电缆绝缘层老化。叶片与塔筒：无人机高压喷涂防冰液（高寒地区），清洁叶片积尘恢复气动效率；超声波探伤检测塔筒焊缝腐蚀，按GB/T 31817标准修补防腐层。

4.3 状态监控与数据分析

实时预警响应，通过振动传感器+声波频谱分析，偏航减速器振幅超阈值±10%自动触发工单。SCADA系统监测发电机绕组温升，65℃以上启动冷却系统并推送告警。健康评估与预测，应用1D-CNN+Bi-LSTM模型分析轴承振动数据，预测剩余寿命（RUL）；生成月度健康报告，标注功率曲线偏移率>5%的机组重点排查。

4.4 动态优化策略

成本效益调整，基于故障关联分析合并检修任务（如齿轮箱润滑与螺栓复紧同步进行），降低登塔频次。备件库存按年均故障量120%动态调整，优先储备高损件（如变桨轴承）。周期迭代更新，每季度评估维护效果：对比非计划停机时长、发电量损失等指标；根据部件实际退化速率，缩短/延长关键项目周期（如老旧机组齿轮箱检修从32,000小时调整为28,000小时）。极端天气应急：台风前72小时启动预案，加固机舱罩密封性并备份控制系统数据。实施效果：闭环管理可使非计划停机率下降40%以上，运维成本节约25%–30%。

5 新能源风力发电机组智能化维护技术

以下是新能源风力发电机组智能化维护技术的核心要点，基于多源数据融合、AI预测与自动化运维技术构建：

5.1 故障预测与健康管理（PHM）技术

多模态数据融合，整合SCADA运行数据、振动频谱、润滑油质谱及红外热成像，构建设备全维度健康画像。采用1D-CNN+Bi-LSTM模型预测关键部件剩余寿命（如主轴承、齿轮箱），预警准确率达92%。智能诊断算法，核函数投影寻踪（KF-PP）识别轴承早期故障，结合声波震频分析建立偏航系统健康基线。变流器故障诊断采用主成分分析（PCA）与EEMD分解，实现IGBT模块损耗实时监测。

5.2 自动化运维装备

无人机集群巡检，搭载激光雷达与红外相机，实现

叶片损伤检测（精度 $\pm 0.1\text{mm}$ ）及光伏组件热斑识别。100MW风场巡检效率提升300%，人工巡检周期从7天缩短至2天。机器人协同作业，柔韧机器人（如万勋科技AP30-P2）支持高空清洗与接触式检测，降低人工高空作业风险。海上升压站部署轨道式巡检机器人，24小时监控关键设备温升与振动。

5.3 数字孪生与智能决策

全生命周期映射，构建风机数字孪生体，实时映射塔基形变（光纤传感精度0.15MPa刚度衰减）及传动链状态。动态优化维护窗口（如钢丝绳更换周期857–923小时），减少过度维护30%。AI辅助决策，生成式大模型（如远景虚拟专家）基于百万级工单训练，秒级解析故障并提供维修方案，检修时间缩短30%。

5.4 海上运维创新

免吊装更换技术，金风科技“自提升智能设备”实现齿轮箱高空拆装，降低海上大部件更换成本50%。混合运维平台，融合数字孪生与海况预测，动态调度运维船舶，非计划停机减少68%。深远海项目应用半湿式铝塑复合海缆，提升能源传输效率并降低施工难度。技术趋势：故障检修从“人工经验”转向“AI秒级响应”，近年预测性维护覆盖率突破90%；海上风电智能运维市场规模年增24.2%，中国占全球需求47.6%。

6 风力发电机组预防性维护效果评估

风力发电机组预防性维护效果评估需建立多维度量化指标体系，以下是基于运行数据与行业实践的核心评估方法：

6.1 运行可靠性评估

设备可用率，等效可用系数（EAF） $\geq 98.45\%$ ，低于此值需优化维护策略。非计划停运频次 ≤ 1.19 次/台年，高频次停机暴露维护漏洞。关键部件故障率，齿轮箱故障间隔时间（MTBF） $\geq 32,000$ 小时，轮齿磨损深度 $<1\text{mm}$ 为合格。发电机轴承温升预警准确率（ 65°C 阈值）需达95%以上。

6.2 经济效益评估

成本节约率，运维成本下降率：对比实施前后，目标节约25%–30%（智能维护体系达标值）。备件库存周转率提升 $\geq 20\%$ ，紧急采购成本降低30%以上。发电收益提升，功率曲线恢复率：叶片清洁、气动优化使发电量

提升5%–10%。故障电量损失率：非计划停机导致的发电损失需控制在年度发电量的0.5%以内。

6.3 技术效能评估

预测准确性，剩余寿命（RUL）预测误差 $\leq 8\%$ （1D-CNN+Bi-LSTM模型标准）。振动预警误报率 $<5\%$ （声波频谱分析技术阈值）。

维护效率，工单响应时效：橙色周检工单24小时内闭环，红色专项工单72小时完成率100%。登塔频次降幅：通过任务合并减少高空作业40%以上。

6.4 安全与合规性评估

风险控制，重大事故发生率：塔筒坍塌、火灾等风险事件归零。接地电阻合格率 $(\leq 4\Omega)$ 达100%，雷击损伤率下降50%。规范符合度，防腐/润滑等作业执行符合GB/T 31817、NB/T 31004标准率 $\geq 98\%$ 。老旧机组电磁激振量控制在临界值60%以内。评估案例：某沿海风场实施预防性维护后，等效可用系数从97.1%提升至98.7%，齿轮箱更换周期延长至35,000小时，年度运维成本下降28%。持续优化机制，季度对标：对比行业标杆调整指标权重，如高盐雾区域防腐周期从6个月缩至4个月。根因分析：SCADA功率曲线偏移 $>5\%$ 的机组启动专项审计。该评估体系通过“数据驱动-动态校准-闭环改进”，确保预防性维护从成本中心转化为效益增长点。

综上，预防性维护通过系统性管理设备状态，将被动维修转化为主动防控，是风电项目实现安全、经济、高效运行的基石。通过“数据预警→分级处置→动态优化”闭环管理，将非计划停机率降低40%以上，运维成本节约25%–30%

参考文献

- [1] 刘国志. 风电变流器预防性维护检测技术应用研究[J]. 科学与信息化, 2024(8): 67–69.
- [2] 于栋. 风电机组齿轮箱油温高原因分析及预防措施探究[J]. 风力发电, 2022(1): 46–51.
- [3] 吴瑛. 双馈风力发电机组主轴轴承失效原因及预防对策[J]. 应用能源技术, 2023(12): 46–50.
- [4] 孙禹. 风电设备运行预防性维护工程项目绩效评价分析[J]. 电气技术与经济, 2024(1): 270–272.
- [5] 蒋勇. 风电机组振动检测预防性检修技术的应用[J]. 电子乐园, 2022(8): 142–144.