

关于新能源风力发电设备的预防性维护策略探析

温钗，王彬

天津明智润阳技术有限公司，天津 300308

DOI:10.61369/EPTSM.2025060019

摘要：风力发电作为新能源领域的重要支柱，其设备长期运行于野外复杂环境，受强风、盐雾、温度波动等因素影响，易出现部件老化、性能衰减等问题，非计划停机将直接导致发电量损失与运维成本激增。预防性维护通过提前识别潜在故障、优化维护周期，成为保障风电机场高效运行的关键手段。故此，文章以新能源风力发电设备为切入点，明确风力发电设备预防性维护的核心目标及维护重点，提出新能源风力发电设备的预防性维护策略，希望能够为风电场制定科学运维方案提供实践参考，助力提升风力发电项目的投资回报率与可持续运行能力。

关键词：新能源；风力发电设备；预防性维护；故障风险；全生命周期成本

Analysis of Preventive Maintenance Strategies for New Energy Wind Power Generation Equipment

Wen Chai, Wang Bin

Tianjin Mingzhi Runyang Technology Co., Ltd., Tianjin 300308

Abstract : As a crucial pillar in the field of new energy, wind power generation equipment operates in complex outdoor environments over extended periods, where it is susceptible to issues such as component aging and performance degradation due to factors like strong winds, salt spray, and temperature fluctuations. Unplanned shutdowns directly result in power generation losses and a surge in operational and maintenance costs. Preventive maintenance, by identifying potential faults in advance and optimizing maintenance cycles, has become a key approach to ensuring the efficient operation of wind farms. Therefore, taking new energy wind power generation equipment as the entry point, this article clarifies the core objectives and maintenance priorities of preventive maintenance for wind power generation equipment, and proposes preventive maintenance strategies for new energy wind power generation equipment. It aims to provide practical references for wind farms to formulate scientific operational and maintenance plans, thereby enhancing the return on investment and sustainable operational capabilities of wind power generation projects.

Keywords : new energy; wind power generation equipment; preventive maintenance; fault risk; whole-life cycle cost

在“双碳”目标推动下，截至2024年底，全国风电累计装机容量已突破6亿千瓦，我国风力发电产业实现规模化发展。然而，风电机组多部署于草原、沿海、山地等野外区域，运行环境恶劣且机组结构复杂，任一部件故障都可能引发连锁反应，导致机组停机。随着物联网、大数据技术在风电领域的应用，基于实时数据的预测性维护虽展现出优势，但在数据采集精度、故障诊断模型适配性^①等方面仍需完善。基于此，深入探究新能源风力发电设备的预防性维护策略对于提升风电场运行稳定性、降低全生命周期成本具有重要现实意义。

一、风力发电设备预防性维护的核心目标

(一) 保障机组运行连续性，降低非计划停机风险

风力发电设备的运行效率与发电收益直接挂钩，而野外复杂环境下，设备部件长期承受力学载荷、环境侵蚀等多重作用，易出现隐性故障隐患。非计划停机不仅会直接中断发电过程，导致电能产出量减少，还可能因停机期间设备处于非稳定状态，增加后续启动时部件损坏的概率。预防性维护的首要目标便是通过主

动排查与干预，提前识别设备运行中的异常信号，如部件磨损初期的细微变化、系统参数的微小漂移等，在故障萌芽阶段采取针对性措施，避免故障扩大化引发的停机事件。这种主动防控模式能够有效减少设备运行中的不确定性，确保机组始终处于稳定运行区间，为风电场持续输出电能提供基础保障，进而维护发电业务的连续性与稳定性，避免因突发停机造成的产业链上下游协同受阻。

(二) 延缓设备老化进程，延长部件与整机使用寿命

风力发电设备作为高价值资产，其使用寿命直接决定了项目

的投资回报周期与长期收益能力。设备在长期运行中，部件会因摩擦、腐蚀、疲劳等因素逐渐老化，性能随之衰减，若不加以干预，老化速度会不断加快，最终导致部件提前报废、整机运行效率大幅下降。预防性维护通过对设备各核心部件的定期养护、状态校准与性能优化，能够有效减缓老化进程。例如，对传动系统进行定期润滑，可减少部件间的摩擦损耗，降低机械应力对部件结构的破坏；对电气系统进行绝缘检测与维护，可避免绝缘层老化引发的电气故障，保护电路系统的完整性，这不仅能延长单个部件的使用周期，还能保障整机各系统间的协同运行效率，避免因某一部件过早损坏引发的连锁反应，从而整体延长设备的使用寿命，提升设备全生命周期内的价值产出。

（三）优化维护资源配置，控制全生命周期成本

风力发电项目的成本管控贯穿设备采购、运行、维护至报废的全流程，其中维护成本在全生命周期成本中占比极高，若维护策略不合理，易出现过度维护导致成本浪费，或维护不足引发故障维修成本激增的问题。预防性维护的核心目标之一便是通过科学的维护规划，实现维护资源的精准配置，平衡维护投入与故障损失。一方面，通过提前识别故障风险，可避免故障发生后高额的紧急维修费用，如更换核心部件的成本、紧急调用维修人员与设备的额外开支等；另一方面，通过制定合理的维护周期与维护内容，可避免不必要的维护操作，减少人力、物力资源的浪费，避免对状态良好的部件进行频繁拆解检查，降低维护过程中对部件造成的二次损伤风险。

二、风力发电设备预防性维护的关键对象与维护重点

（一）机械系统：聚焦核心传动与受力部件的状态保障

机械系统作为风力发电设备实现风能向机械能转化与传递的核心功能载体，其运行稳定性直接决定整机发电效率与安全水平，因此预防性维护需聚焦系统内承受载荷强度高、力学损耗风险大的关键部件，构建针对性维护体系。

叶片作为机组直接与风能作用的核心部件，需长期承受野外复杂环境的综合作用：一方面，气流在叶片表面形成动态载荷易引发疲劳损伤，盐雾、沙尘、紫外辐射等环境因素会加速叶片表面材质老化与腐蚀；另一方面，极端天气下的异物撞击可能造成局部结构损伤。基于此，叶片维护需形成“外观 – 内部 – 防护”三维管控：定期开展外观检测时，需结合视觉巡检与表面粗糙度测量，识别涂层剥落、边缘缺损等显性损伤；通过超声波探伤或射线检测技术对叶片腹板、叶根等应力集中区域进行内部结构探伤，排查隐性裂纹；同时需定期评估表面防护涂层的附着力与抗腐蚀性能，及时补涂或更换防护层，防止环境侵蚀进一步渗透至叶片基体，导致结构强度衰减。

传动系统作为衔接叶片与发电机的动力传递中枢，由主轴、齿轮箱、联轴器等部件构成，其运行过程中部件间的啮合传动与旋转运动易产生两类核心损耗：一是齿轮、轴承等运动副的机械摩擦损耗，二是传动过程中因对中性偏差引发的附加载荷损耗。针对此类问题，传动系统维护需以“润滑保障 – 状态监测 – 异常

溯源”为核心：优先保障润滑系统的功能有效性，通过定期采集润滑油样进行理化指标分析与污染度检测，判断内部部件磨损程度与润滑失效风险；同步对主轴轴承、齿轮箱高速轴等关键部位布设振动传感器，结合噪声监测设备实时采集振动频谱与声压级数据，通过对比正常运行工况下的特征参数，识别异常振动源，避免因局部磨损加剧导致传动效率下降，或因部件卡滞引发系统停机，最终保障机械系统各部件间的协同运行精度。

（二）电气系统：强化能量转换与传输部件的安全防护

电气系统承担着将机械能转化为电能并实现高效传输的功能，维护重点需聚焦能量转换核心部件与电路系统的稳定性，防范电气故障引发的安全风险与性能损耗。发电机作为能量转换的核心设备，其定子与转子绕组的绝缘性能直接影响运行安全，需定期开展绝缘电阻检测，避免绝缘层老化导致的漏电或短路问题，同时关注轴承运行状态，通过温度监测与润滑维护，减少机械摩擦对发电效率的影响。变流器作为调节电能输出的关键装置，内部功率模块与电容组件易受电流冲击与温度变化影响，需重点监测模块工作温度与电容性能衰减情况，及时清理散热系统积尘，保障散热效率，防止因过热导致的模块损坏或电能转换效率下降。

（三）控制系统：保障信号采集与指令执行的精准性

控制系统是机组运行的“中枢神经”，负责实时采集环境与设备状态信号、执行运行调节指令，维护重点需围绕传感器与主控模块的可靠性，确保指令传输与执行的精准性。传感器作为数据采集的前端设备，涵盖风速、风向、转速等关键参数采集单元，需定期开展数据校准，避免因环境干扰或部件老化导致的数据漂移，确保采集信息能真实反映机组运行状态与外部环境变化，为主控系统决策提供准确依据。主控系统作为指令处理与下发的核心，需保障程序运行稳定性与通信链路通畅，定期检查控制系统的程序完整性，测试应急停机等关键逻辑的响应速度，避免因程序故障或通信中断导致的机组失控。

三、新能源风力发电设备的预防性维护策略

（一）时间基预防性维护策略：基于周期标准的规范化养护实施

时间基预防性维护策略以设备运行时长或固定周期为核心依据，依托设备制造商提供的设计寿命参数与行业积累的维护经验，构建统一的维护周期体系与操作规范。在策略启动阶段，需先对设备各核心部件的设计使用周期进行系统梳理，区分易损部件与长效部件的维护间隔差异，明确不同周期下的维护内容清单，例如短期周期内的部件紧固性检查、中期周期内的润滑系统养护、长期周期内的核心部件拆解检测等。

在时间基预防性维护策略的实施阶段，需以预设维护周期为基准，严格落实各项养护操作，确保所有维护内容均符合设备技术标准与行业规范要求。例如，针对传动系统螺栓的紧固作业，需依据设备设计文件规定的力矩参数执行，保障螺栓连接的稳定性；针对电气部件的绝缘性能检测，需遵循电力行业相关技术规

程，确保检测方法与判定标准的合规性^⑩。与此同时，需构建完整的维护档案管理体系，对每次维护的具体执行时间、操作流程步骤、消耗的养护材料规格及数量，以及维护时设备的基础运行参数进行详细记录，形成可追溯、可核查的维护记录链条，为后续维护周期调整与设备状态评估提供基础数据支撑。

此外，需定期开展维护周期合理性评估工作，结合设备实际运行环境的特殊性对周期参数进行动态校准。对于处于高盐雾浓度的沿海风电场，金属部件易受腐蚀侵蚀，需适当缩短防腐维护周期，增强部件抗腐蚀能力；对于位于高沙尘含量的内陆风电场，空气过滤系统易发生堵塞，需提高清洁操作频率，保障设备散热与进气质量。通过周期性的维护周期校准，既能避免因维护间隔过短造成的人力、物力资源浪费，又能防止因周期过长导致潜在故障隐患未被及时发现，最终实现规范化养护流程与设备实际运行需求的精准适配。

（二）状态基预防性维护策略：依托实时监测的动态化干预执行

状态基预防性维护策略以设备实时运行状态数据作为核心支撑依据，通过构建全维度、多参数的状态监测体系，实现对设备运行状态的持续动态追踪与异常情况的及时干预。在该策略实施的前期准备阶段，需完成监测系统的整体搭建工作：根据设备不同核心部件的运行特性与故障敏感参数，选取适配的监测传感器类型，具体来说，在传动部件上安装振动传感器，实时捕获部件运行中的振动信号；在电气部件上部署温度传感器，动态监测部件工作温度变化；在控制系统中设置参数采集模块，实时采集系统运行中的关键控制参数，确保能够全面、准确地捕获设备运行过程中的核心状态数据。

在数据采集环节，需重点保障传感器安装位置的精准性，确保传感器安装于部件故障敏感区域，以获取有效监测数据；同时保障数据传输的稳定性，通过专业数据采集终端与传输链路，实时采集振动频率、温度波动幅度、电压电流变化曲线、系统压力数值等参数，并将采集到的原始数据实时传输至中央数据分析平台。中央平台需搭载专业的数据处理与分析算法，对实时采集的数据进行动态解析，将当前监测参数与预设的正常运行阈值进行对比分析，识别数据变化的异常趋势，进而判断对应部件是否处于潜在故障状态，为后续维护干预提供科学决策依据。

当监测数据超出预设预警范围时，需立即启动专项维护响应流程：组织具备专业资质的运维技术人员，对数据异常对应的部件进行针对性拆解检查与状态评估，明确异常产生的根本原因，并据此制定专项修复方案^⑪。同时，需定期对状态监测体系进行优化完善：随着设备运行年限的增加，部件老化程度与故障特性会发生变化，需相应调整监测参数的预警阈值；结合历史监测数据

参考文献

- [1] 乌友坦达来.风力发电设备检修维护中的火灾风险挑战与应对策略研究 [J].消防界(电子版),2024,10(16):76-78.
- [2] 王庆春,王源治.风力发电设备运行维护分析 [J].光源与照明,2021,(09):71-73.
- [3] 张所成,张润宏,陆元英.风力发电设备安全保护技术研究 [J].中国新技术新产品,2021,(04):146-148.
- [4] 王瑞雪,武姿廷.风力发电设备安全管理与运行维护 [J].中国高新科技,2020,(12):13-14.
- [5] 董晓晨.风力发电设备安全管理与运行维护 [J].现代制造技术与装备,2020,(01):163+169.

中的异常案例，不断完善预警机制的判定逻辑，提升状态判断的准确性，最终实现维护干预措施与设备异常状态的动态匹配。

（三）预测性维护策略：基于数据建模的前瞻性维护规划

预测性维护策略以大数据分析技术与故障预测模型作为核心技术支撑，通过整合设备全生命周期内的多维度数据构建预测分析体系，实现对设备潜在故障的提前预判与维护工作的前瞻性规划。在该策略实施初期，需重点完成数据基础建设工作：全面收集设备从投运至当前阶段的全生命周期运行数据，具体包括设备在不同工况下的运行参数、历年开展维护操作的详细记录、历史故障发生的具体时间节点与故障原因分析报告、设备所处运行环境的长期监测数据等。对收集到的原始数据需进行系统化处理，包括数据清洗、数据去重、数据标准化，消除数据干扰因素，确保数据质量能够满足故障预测模型的建模需求。

在数据准备工作完成后，需依托机器学习、深度学习等人工智能算法，结合设备不同部件的故障特性，选择适配的模型构建方法：针对齿轮箱等旋转部件的故障预测，可采用时序数据分析模型，通过分析振动数据的时间序列特征预判故障；针对发电机绝缘老化等渐进式故障^⑫，可采用趋势预测模型，通过分析绝缘电阻等参数的变化趋势预判故障发展阶段。在模型训练过程中，需持续输入设备历史故障数据与对应运行参数，不断优化模型的核心参数，提升模型对故障类型的识别精度、故障位置的定位准确性及故障发生时间的预判准确度。

基于故障预测模型输出的预判结果，需制定个性化维护计划：明确需要开展维护的具体部件、维护操作的详细技术流程及维护工作的实施时间窗口，并提前调配维护所需的人员、工具与备件资源。同时，需建立模型动态优化机制：将设备新产生的运行数据与故障案例持续输入预测模型，对模型的算法逻辑与参数设置进行迭代更新，确保模型能够适应设备运行状态的动态变化，使维护计划始终保持前瞻性，最终实现对设备潜在故障的提前干预，避免故障扩大化。

四、结束语

综上所述，新能源风力发电设备的预防性维护，是平衡设备可靠性与运维经济性的核心环节，其策略选择与实施效果直接关系到风电场的长期稳定运行与收益水平，可通过时间基、状态基以及预测性等维护策略，构成覆盖设备全生命周期的维护框架。在实际应用中，风电场需结合自身设备型号、运行环境、运维资源及管理能力，灵活选择与组合策略，并通过不断校准维护方案，适配设备运行状态的动态变化。