

风力发电机组检修中的状态检修技术探析

丁 明

中国大唐集团有限公司宁夏分公司 宁夏 银川 751100

摘 要：风力发电机组状态检修技术通过实时监测设备运行状态与多源数据分析，实现了从“计划检修”到“精准检修”的跨越。该技术以振动分析、热红外检测、声波诊断及油液监测为核心手段，可提前识别轴承磨损、电气过热、齿轮箱异响及润滑失效等潜在故障，显著降低非计划停机风险。实践表明，状态检修技术有效提升故障诊断准确率，降低维护成本，延长机组有效运行时间，为风电场高效运维与全生命周期管理提供关键技术支撑。

关键词：风力发电机组；检修；状态检修技术

1 风力发电机组概述

风力发电机组是一种将风能转化为电能的装置，是现代可再生能源技术的重要组成部分。其核心原理基于空气动力学，通过捕获自然风动力，驱动风轮叶片旋转，进而带动发电机产生电力。风力发电机组主要由风轮（含叶片和轮毂）、主轴、齿轮箱、发电机、偏航系统、控制系统、塔架及基础结构等关键部件构成。风轮作为能量捕获的核心部件，其叶片设计需兼顾空气动力学效率与结构强度，通常采用玻璃纤维或碳纤维复合材料以减轻重量并提升抗疲劳性能。齿轮箱负责将风轮的低速旋转转换为发电机所需的高速输出，而双馈式或直驱式发电机则根据技术路线选择直接或经变频器后并入电网。偏航系统通过风向传感器实时调整机舱方向，确保风轮始终正对风向，最大化风能捕获效率。控制系统是风力发电机组的“大脑”，通过监测风速、风向、转速、温度等参数，实现启动、停机、变桨距调节及故障保护等智能化管理。塔架作为支撑结构，其高度设计需平衡风速梯度与制造成本，常见高度范围为80至150米。现代风力发电机组单机容量已从千瓦级跃升至兆瓦级，海上风电机组更突破15兆瓦，配合先进的抗台风、防腐蚀技术，可在复杂环境中稳定运行^[1]。作为绿色能源的代表，风力发电机组具有零碳排放、运行成本低、占地少等优势，其规模化应用对优化能源结构、应对气候变化具有重要意义。随着数字化、人工智能技术的融合，未来风力发电机组将朝着更高效率、更低运维成本、更强环境适应性的方向持续演进。

2 风力发电机组状态检修技术原理与方法

2.1 状态监测技术

风力发电机组状态监测技术，是确保风力发电机组高效、稳定运行的关键手段。其核心原理在于通过实时或定期采集风力发电机组各关键部件的运行数据，利用

先进的传感器技术和数据分析方法，对机组的运行状态进行全面、准确的监测。状态监测技术主要依赖于各种高精度传感器，这些传感器被安装在风力发电机组的各个关键部位，如齿轮箱、发电机、叶片、主轴等。这些传感器能够实时采集机组的振动、温度、转速、电流、电压等多种物理参数。采集到的数据随后被传输至数据处理中心，通过专业的数据分析软件进行处理和分析。振动监测是风力发电机组状态监测中最常用的方法之一。通过安装加速度传感器或位移传感器，可以实时监测机组各部件的振动情况。振动信号的分析可以揭示出机组是否存在不平衡、不对中、松动、磨损等故障隐患。温度是反映机组运行状态的重要指标之一，通过安装温度传感器，可以实时监测机组各部件的温度变化。当温度超过正常范围时，往往意味着机组存在过载、润滑不良或散热不良等问题。对于发电机而言，电流和电压的稳定输出是机组正常运行的关键。通过安装电流传感器和电压传感器，可以实时监测发电机的输出电流和电压，从而判断发电机是否存在故障或性能下降。对于齿轮箱等需要润滑的部件，油液监测是判断其运行状态的重要手段。通过采集油液样本并进行分析，可以了解油液的品质、污染程度以及部件的磨损情况。

2.2 故障诊断技术

故障诊断技术是在状态监测技术的基础上，对采集到的数据进行深入分析，以准确判断风力发电机组是否存在故障以及故障的具体类型和位置。故障诊断技术主要依赖于信号处理、模式识别、人工智能等先进技术。通过对采集到的数据进行预处理、特征提取和模式匹配等步骤，可以实现对机组故障的快速、准确诊断。信号处理是故障诊断的第一步，它主要包括滤波、降噪、时频分析等步骤。通过信号处理，可以去除数据中的噪声和干扰，提取出有用的故障特征信息。特征提取是从处

理后的数据中提取出能够反映机组故障特征的关键信息。这些特征可能包括振动的频率、幅值、相位等,也可能包括温度的变化趋势、电流和电压的波动情况等。模式识别是将提取出的故障特征与已知的故障模式进行匹配,从而判断机组是否存在故障以及故障的具体类型。模式识别方法包括基于规则的推理、神经网络、支持向量机等。随着人工智能技术的不断发展,其在风力发电机组故障诊断中的应用也越来越广泛。通过训练深度学习模型,可以实现对机组故障的自动识别和分类,提高故障诊断的准确性和效率。

2.3 状态评估技术

状态评估技术是在状态监测和故障诊断的基础上,对风力发电机组的整体运行状态进行综合评估,以预测机组的未来运行趋势和剩余寿命。状态评估技术主要依赖于数据融合、可靠性分析、寿命预测等理论和方法。通过对机组各部件的运行状态进行综合分析,可以评估机组的整体健康状况,并预测其未来的运行趋势和剩余寿命。数据融合是将来自不同传感器、不同时间点的数据进行整合和分析,以获取更全面、准确的机组运行状态信息。通过数据融合,可以消除单一传感器或单一时间点的数据误差和不确定性^[2]。可靠性分析是评估机组在规定条件下、规定时间内完成规定功能的能力。通过可靠性分析,可以了解机组的故障率、平均无故障时间等可靠性指标,为机组的维护和管理提供决策支持。寿命预测是基于机组当前的运行状态和历史数据,预测其未来的剩余寿命。寿命预测方法包括基于物理模型的预测方法、基于数据驱动的预测方法等。通过寿命预测,可以合理安排机组的维护计划和更换周期,降低维护成本和提高机组的可用性。

3 状态检修技术在风力发电机组中的优势

3.1 提高设备可靠性

状态检修技术通过安装在风力发电机组关键部位的传感器网络,实时采集振动、温度、电流、电压等运行数据,结合大数据分析和人工智能算法,能够提前识别部件的早期退化迹象。例如,通过监测齿轮箱的振动频谱变化,可发现齿轮磨损或轴承疲劳的微弱信号;通过分析发电机绕组温度趋势,可预判绝缘老化风险。这种基于数据驱动的故障预警机制,使运维人员能够在故障发生前采取针对性维护措施,避免突发停机对设备造成不可逆损伤。传统定期检修往往因检修周期与设备实际状态脱节,导致过度维护或维护不足。状态检修技术通过动态评估设备健康状态,将维护决策从“时间驱动”转变为“状态驱动”。例如,当监测到叶片表面出现微

小裂纹时,系统可自动触发维修工单并推荐最佳维护窗口,避免裂纹扩展引发叶片断裂事故。实际案例表明,采用状态检修的风电场非计划停机时间可减少30%-50%,设备平均无故障运行时间(MTBF)显著提升。状态检修技术通过持续监测关键部件的疲劳累积和性能衰减,能够精准预测部件的剩余寿命。这种预测性维护模式不仅延长了设备使用寿命,还通过避免突发故障导致的连带损伤(如主轴断裂引发塔架倒塌),显著降低了风电场的全生命周期运维风险。

3.2 降低维护成本

传统定期检修需按固定周期拆解设备进行检查,导致大量正常部件被重复拆装,加速了密封件老化、螺纹磨损等问题。状态检修技术通过精准定位故障部件,仅对存在隐患的组件进行针对性维护,避免了“大拆大换”的浪费。状态检修技术通过预测部件失效时间,可提前规划备件采购,避免因突发故障导致的紧急备件高价采购。基于部件寿命预测的采购计划还能减少库存积压,降低资金占用成本。状态检修技术通过减少非计划停机和优化维护窗口,显著降低了运维人工成本。例如,某海上风电场通过状态监测将单次维护时间从72小时缩短至24小时,同时利用低风速时段安排维护,使单台机组年均发电量损失减少15%。远程监测与诊断系统的应用还减少了现场巡检频次,进一步降低了人力成本。

3.3 提升发电效率

状态检修技术通过持续监测机组的功率曲线、风速-转速匹配等关键参数,可实时发现因部件磨损或控制策略偏差导致的效率下降问题。例如,当监测到叶片表面粗糙度增加导致风能捕获效率降低时,系统可自动触发清洗或修复任务;当发现偏航系统对风偏差时,可远程调整控制参数,使机组始终保持最佳运行状态。非计划停机不仅直接损失发电量,还可能因电网调度调整导致限电损失。状态检修技术通过减少故障停机次数和缩短停机时间,显著提升了机组的年利用小时数。状态检修技术与风电场SCADA系统、功率预测系统的深度融合,为智能化运维提供了数据基础。例如,通过分析全场机组的运行状态数据,可优化风电机组布局和功率分配策略;通过集群化监测与诊断,可快速定位区域性问题(如某批次齿轮箱的设计缺陷),实现批量维护,进一步提升整体发电效率。

4 风力发电机组状态检修技术的应用

4.1 振动分析技术在轴承故障诊断中的应用

振动分析技术是风力发电机组状态检修的核心手段之一,尤其在轴承故障诊断中具有不可替代的作用。风

力发电机组的轴承（如主轴轴承、齿轮箱轴承）长期承受交变载荷，易出现磨损、疲劳剥落或润滑不良等问题，导致振动异常。通过在轴承座或附近结构上安装加速度传感器，可实时采集振动信号，并基于频谱分析、包络解调等技术提取故障特征^[3]。应用原理：当轴承出现局部缺陷时，滚动体通过缺陷区域会产生周期性冲击信号，其频率与缺陷位置（如外圈、内圈或滚动体）及转速相关。实际案例：某风电场通过振动监测发现某台机组齿轮箱高速轴轴承存在高频冲击信号，经包络解调后确认外圈剥落故障，及时更换轴承避免了主轴断裂风险。该技术可将轴承故障诊断准确率提升至95%以上，且能提前3-6个月预警潜在失效。

4.2 热红外检测技术在电气连接故障排查中的应用

电气连接部位（如电缆接头、开关柜、发电机绕组）的松动、氧化或过载会导致接触电阻增大，进而引发局部过热。热红外检测技术通过非接触式测量设备表面温度分布，可快速定位异常发热点，为电气故障排查提供直观依据。应用原理：热红外相机通过捕捉物体表面发射的红外辐射，将其转换为温度场图像。对于正常运行的电气部件，其温度分布应均匀且符合设计标准；若存在故障，过热区域会呈现明显的高温亮点。实际案例：某海上风电场利用无人机搭载热红外相机对集电线路进行巡检，发现某塔筒内电缆接头温度高达120℃（正常值为60-80℃），及时停机检查发现接头螺栓松动导致接触不良。该技术尤其适用于高空或封闭空间内的电气部件检测，可大幅缩短故障排查时间，降低运维人员安全风险。

4.3 声波检测技术在齿轮箱异响诊断中的应用

齿轮箱是风力发电机组的核心传动部件，其内部齿轮、轴承的磨损或断裂会产生异常噪声。声波检测技术通过采集并分析齿轮箱运行时的声信号，可识别早期故障并判断故障类型。应用原理：正常齿轮啮合产生的声波具有稳定的频率和幅值特征，而故障会导致声波信号中出现调制或冲击成分。通过时域波形分析、频谱分析或小波变换等方法，可提取故障特征频率并与标准库对比。实际案例：某风电场在齿轮箱定期巡检中，通过声

波传感器捕捉到低频异响信号，经分析确认为行星轮系某齿轮存在裂纹。由于发现及时，避免了齿轮断裂导致的重大事故。该技术对早期轻微故障敏感，尤其适用于低速重载齿轮箱的诊断。

4.4 油分析技术在润滑系统维护中的应用

润滑油不仅起到润滑减磨作用，还携带了设备内部磨损、污染等关键信息。油分析技术通过检测油液中的金属颗粒、水分、酸值等指标，可评估齿轮箱、轴承等部件的磨损状态及润滑系统性能^[4]。应用原理：正常运行的设备油液中金属颗粒浓度极低，而磨损故障会导致颗粒数量激增。油液水分含量超标会加速油品氧化，降低润滑效果。实际案例：某风电场通过定期油液检测发现某台机组齿轮箱油样中铁含量超标5倍，同时水分含量达到0.2%（标准为<0.1%），结合振动分析确认齿轮存在异常磨损。及时更换润滑油并调整维护策略后，齿轮箱寿命延长了2年。该技术可提前6-12个月预警润滑系统失效风险，显著降低非计划停机概率。

结束语

状态检修技术作为风力发电机组智能化运维的核心驱动力，正深刻改变着风电行业的运维模式。通过数据驱动与智能算法的结合，该技术不仅实现了故障的早期预警与精准定位，更推动了运维策略从“被动响应”向“主动预防”的转型。未来，随着物联网、边缘计算与数字孪生技术的深度融合，状态检修将进一步向预测性维护、自主化决策方向发展，为风电产业的高质量发展注入新动能，助力全球能源绿色转型目标加速实现。

参考文献

- [1]胡成栋.风力发电机组的检修技术应用与对策分析[J].中国高新科技,2022(21):35-36.
- [2]周国旭.风力发电机组电气与控制系统快速线索思路研究[J].中国设备工程,2021(14):68-69.
- [3]刘祥雄,胡德聪,吴磊.基于大数据平台的智慧风电集控建设解决方案[J].能源科技,2021,19(06):41-43+75.
- [4]曹青蒋鼎.风力发电机组检修维护工作安全管理要点探讨[J].数码设计(下),2021,010(005):102.