

风电机组的日常运维及检修技术研究

张鹏飞

北京国电电力新能源技术有限公司内蒙古分公司 内蒙古 呼和浩特 010000

摘要：随着风电产业规模化发展，风电机组长期暴露于野外复杂环境，高负荷运行易导致零部件磨损、故障频发，直接影响发电效率与设备寿命，日常运维及检修技术成为保障风电项目稳定收益的核心支撑。本文基于风电机组运维基础理论，系统阐述机组结构与工作原理、运维管理核心内涵，详细分析日常巡检、状态监测与信息化管理的关键技术，深入研究常见故障类型、诊断方法及检修策略，展望智能化、绿色化、远程协同化的运维检修发展趋势。本文成果可为风电机组运维检修实践提供实用参考，助力风电产业高质量、可持续发展。

关键词：风电机组；运维管理；故障诊断；状态监测；检修技术

引言：全球能源转型进程加快，风电作为清洁可再生能源的重要组成部分，装机容量持续攀升，在能源结构优化中发挥着关键作用。风电机组多部署于偏远山区、草原、海上等区域，长期承受强风、温差、湿度变化等复杂环境影响，加之长时间高负荷运行，齿轮箱、叶片、发电机等核心部件易出现老化、磨损等问题，引发机组故障停机，造成经济损失。基于此，本文聚焦风电机组日常运维及检修技术，梳理运维基础理论，剖析核心技术要点，展望发展趋势，为解决运维检修痛点、提升机组运行可靠性提供支撑，推动风电产业向高效、稳定、低碳方向发展。

1 风电机组运维基础理论

1.1 风电机组结构与工作原理

风电机组主要由机舱、轮毂、叶片、塔架、基础、传动系统、控制系统、制动系统、偏航系统等核心部件组成，各部件协同工作实现风能向电能的转化。叶片接收风能并带动轮毂旋转，通过传动系统（主轴、齿轮箱、发电机）将机械能传递给发电机，发电机将机械能转化为电能，经变流器、变压器处理后并入电网。控制系统负责实时监测机组运行参数，调控偏航、变桨、制动等系统，确保机组在安全范围内高效运行；偏航系统调整机舱方向，使叶片始终正对风向，最大化捕获风能；制动系统在紧急情况下快速停机，保障机组安全。各部件结构复杂、关联紧密，任一部件出现异常都会影响机组整体运行，为运维检修工作提出了较高要求。

1.2 运维管理基本概念

风电机组运维管理是指围绕机组全生命周期，通过制定科学的运维计划、开展日常巡检、实施状态监测、排查故障隐患、开展检修维护等一系列活动，保障机组安全、稳定、高效运行的管理过程。其核心目标是降低

故障发生率、缩短故障停机时间、延长机组使用寿命、控制运维成本，实现风电项目经济效益最大化。运维管理遵循“预防为主、防治结合、全员参与、持续改进”的原则，涵盖前期运维规划、日常运维实施、故障检修、运维评估与优化等多个环节^[1]。与传统运维模式相比，现代运维管理更注重智能化、信息化、精细化，结合状态监测技术、信息化系统，实现从“被动检修”向“主动预防”的转变，提升运维管理效率与质量。

2 风电机组日常运维技术

2.1 日常巡检内容与方法

风电机组日常巡检是预防性运维的核心环节，通过定期、全面的检查，及时发现设备外观损伤、零部件松动、运行异常等潜在隐患，为后续维护保养提供依据，降低故障发生概率，其核心内容涵盖各系统、各部件的全面排查，且需结合科学的巡检方法，确保巡检质量。巡检内容主要包括：风轮系统，检查叶片表面是否存在裂纹、腐蚀、雷击痕迹、异物附着等损伤，叶尖密封是否完好，轮毂与叶片连接部位的紧固件是否松动；传动系统，检查齿轮箱油温、油位是否正常，有无漏油现象，主轴、联轴器运行有无异常振动、异响；发电系统，检查发电机温度、振动、噪声是否正常，电气接线有无老化、松动，变流器散热系统是否通畅；控制系统，检查主控系统、变桨系统、偏航系统的运行状态，传感器数据是否准确，通信是否正常；辅助系统，检查润滑系统油品质量、油位，液压系统压力是否达标，冷却系统管路有无堵塞、泄漏，塔架表面有无腐蚀、焊缝开裂，基础有无沉降、破损。巡检方法采用人工巡检与智能巡检相结合的方式，人工巡检主要通过目视、耳听、手触等方式，配合常用检测工具，对机组关键部位进行细致检查；智能巡检依托无人机、红外热成像仪等

设备,对叶片、塔架等高空、偏远部位进行全方位排查,提升巡检效率与覆盖面,同时建立巡检台账,详细记录巡检时间、巡检人员、巡检内容、发现问题及处理措施,确保巡检工作可追溯、可管控。

2.2 状态监测与数据分析

风电机组状态监测是实现精准运维的关键技术,通过部署各类监测设备,实时采集机组运行参数与设备状态数据,结合科学的数据分析方法,识别设备运行异常,预判潜在故障,为运维决策提供数据支撑,打破传统“定期检修”的局限,向“状态检修”转型。状态监测的核心对象包括机组运行参数与设备状态参数,运行参数涵盖风速、风向、发电量、机组转速、电网电压、频率等,设备状态参数包括齿轮箱油温、轴承振动、电机温度、液压系统压力、润滑系统油液指标等。监测技术主要采用传感器监测、振动监测、油液分析、红外热成像监测等,传感器实时采集各类参数,通过物联网技术传输至数据处理中心;振动监测用于检测齿轮箱、发电机、主轴等旋转部件的振动信号,识别部件磨损、不平衡等问题;油液分析通过检测润滑油、液压油的理化指标,判断油液劣化程度及零部件磨损情况;红外热成像监测用于检测电气部件、传动部件的温度分布,发现过热隐患^[2]。采用趋势分析、故障特征提取、大数据挖掘等方法,对采集的原始数据进行清洗、整理、分析,构建故障预警模型,通过对比正常运行数据与异常数据的差异,识别故障征兆,预判故障发生时间与部位,同时形成数据分析报告,为维护保养、故障检修提供精准依据,提升运维工作的针对性与高效性。

2.3 运维管理信息化系统

随着风电机组规模化发展,传统人工运维管理模式已难以适配多机组、广范围的运维需求,运维管理信息化系统应运而生,其通过整合监测数据、巡检记录、检修信息、备件管理等各类资源,实现运维工作的信息化、可视化、规范化管理,提升运维管理效率与决策科学性。运维管理信息化系统的核心组成包括数据采集模块、数据存储模块、数据分析模块、运维管理模块、备件管理模块及可视化展示模块。数据采集模块对接各类监测设备与巡检终端,实现运行数据、巡检数据、检修数据的实时采集与同步传输;数据存储模块采用分布式存储架构,安全存储机组全生命周期的各类数据,确保数据完整性与可追溯性;数据分析模块结合AI算法与大数据技术,对采集的数据进行深度分析,实现故障预警、运维策略优化等功能;运维管理模块用于制定巡检计划、维护计划、检修计划,分配运维任务,记录任务

执行情况,实现运维流程的规范化管控;备件管理模块用于管理备件采购、入库、出库、库存盘点等环节,实时掌握备件库存状态,优化备件储备方案,确保故障检修时备件及时供应;可视化展示模块通过图表、曲线等形式,直观展示机组运行状态、监测数据、故障信息、运维任务执行情况等,便于管理人员实时掌握运维动态,快速做出决策。该系统的应用,有效整合了运维资源,规范了运维流程,减少了人工干预,提升了运维管理的精准性与高效性,为大规模风电场运维管理提供了有力支撑。

3 风电机组故障诊断与检修技术

3.1 常见故障类型与原因分析

风电机组常见故障主要集中在传动系统、控制系统、叶片、偏航系统四大类,故障原因与运行环境、部件磨损、维护不当等密切相关。传动系统故障占比最高,约占总故障的40%,主要包括齿轮箱磨损、轴承损坏、发电机故障,多由润滑不足、负载波动、部件老化导致;叶片故障主要有破损、腐蚀、结冰、裂纹,源于户外恶劣环境、雷击、气流冲击等;控制系统故障表现为参数异常、控制失灵,多由传感器故障、线路故障、软件故障引起;偏航系统故障包括偏航不准、卡滞,由齿轮磨损、液压系统泄漏、电机故障导致。明确故障类型与原因,是开展故障诊断与检修的前提^[3]。

3.2 故障诊断方法

风电机组故障诊断方法分为传统诊断方法与智能诊断方法,实际应用中多结合使用。传统诊断方法包括目视诊断、仪器测量诊断、故障树分析,目视诊断通过巡检观察部件外观异常,仪器测量诊断利用测振仪、测温仪等工具检测参数异常,故障树分析通过梳理故障因果关系,排查故障根源。智能诊断方法是当前发展热点,包括振动诊断法、油液分析诊断法、红外测温诊断法、人工智能诊断法,振动诊断法通过分析振动信号识别部件故障,油液分析诊断法通过检测油液成分判断部件磨损程度,红外测温诊断法排查过热故障,人工智能诊断法结合大数据、机器学习,实现故障的自动识别、分类与预警,诊断准确率可达90%以上,大幅提升诊断效率。

3.3 检修策略与实施

风电机组检修策略分为预防性检修、故障检修、状态检修三种,结合机组运行状态与故障情况灵活选用。预防性检修根据运维计划,定期对机组部件进行检查、清洁、润滑、更换,提前排除隐患,适用于易老化、易磨损的常规部件,可有效降低故障发生率;故障检修针对已发生的故障,快速排查故障根源,更换损坏部

件、修复故障，最大限度缩短停机时间，遵循“快速响应、精准检修、安全高效”的原则；状态检修结合状态监测与数据分析结果，针对出现异常的部件开展针对性检修，避免过度检修与检修不足，实现运维成本与检修效果的平衡。检修实施过程中，需严格遵循安全操作规程，做好安全防护措施，确保检修质量与人员安全。

4 风电机组运维与检修技术发展趋势

4.1 智能化运维技术

智能化是风电机组运维检修技术的核心发展趋势，结合人工智能、大数据、物联网、BIM等技术，实现运维检修的自动化、智能化升级。通过在机组部署更多传感器，构建全维度状态监测网络，结合人工智能算法，实现故障的自动识别、预测与诊断，提前预判部件寿命与故障风险；利用机器人技术，替代人工开展高空、海上等危险环境下的巡检与检修作业，降低人工劳动强度，提升作业安全性；结合BIM技术构建机组三维模型，实现运维检修的可视化、数字化管理，优化检修流程，提升检修效率^[4]。

4.2 绿色检修与可持续发展

在“双碳”目标引领下，风电产业作为清洁可再生能源产业，其运维检修技术正朝着绿色化、可持续化方向发展，核心是减少检修过程中的能源消耗、污染物排放，实现资源循环利用，兼顾环境效益与经济效益。绿色检修与可持续发展的主要发展方向包括三个方面：一是绿色检修技术研发，采用环保型检修设备、材料与工艺，减少检修过程中的油污泄漏、废弃物排放，例如使用环保型润滑油、可降解密封材料，采用无拆卸检修技术，减少零部件损耗与废弃物产生；二是资源循环利用，对检修过程中更换的废旧零部件进行分类回收、修复再利用，对于无法修复的零部件，进行无害化处理与资源回收，例如废旧叶片可回收加工为建筑材料、复合材料，废旧齿轮、轴承可修复后重新投入使用，降低资源浪费；三是节能化运维，优化运维流程与检修计划，减少机组停机时间，提升发电效率，同时采用节能型监测设备、检修设备，降低运维过程中的能源消耗，例如采用低功耗传感器、节能型巡检机器人，减少电力消

耗。另外，绿色检修还注重运维人员的环保意识培养，规范环保操作流程，确保检修过程符合环保标准，推动风电产业实现“清洁发电、绿色运维”，助力“双碳”目标实现。

4.3 远程运维与协同管理

远程运维与协同管理可有效解决风电场地理位置分散、运维人员不足、检修成本高的问题，是未来运维管理的重要发展趋势。通过远程运维平台，运维人员可实现对多风电场、多台机组的集中监控、远程诊断与远程指导，减少现场运维人员数量；建立区域协同运维机制，整合运维资源，实现检修人员、检修设备的共享，提高资源利用率；结合5G技术，实现运维数据的高速传输，提升远程诊断与指导的实时性，打破空间限制，实现风电机组运维检修的协同化、集约化管理^[5]。

结束语

风电机组作为风电产业的核心装备，其日常运维及检修技术不仅是保障机组安全稳定运行、提升发电效率与项目投资收益的关键环节，更是推动风电产业向高质量、可持续方向发展的重要基石。未来，随着物联网、大数据、人工智能及数字孪生等新技术的深度融合应用，风电机组运维检修将实现从“被动响应”到“主动预测”的跨越，故障定位更精准、资源调度更高效、环境影响更低碳，为风电产业规模化发展与能源结构深度转型提供坚实技术支撑，加速“双碳”目标落地。

参考文献

- [1]李宇涛.风电机组的日常运维及检修技术研究[J].电力设备管理, 2025(16): 169-171.
- [2]刘海明.风电机组的日常运维及检修技术研究[J].科技资讯, 2025, 23(14): 74-76.
- [3]杜春峰.张之徽.霍东.风电机组的日常运维及检修技术分析[J].中国科技投资,2024(6):145-147.
- [4]于鹏飞.探讨风电机组的日常运维及检修技术[J].电力设备管理, 2024(22): 171-173.
- [5]刁宇.风电机组的日常运维及检修技术分析[J].电力系统装备, 2023(6): 119-121.