

无人机设备智能巡检在风电光伏故障检测中的应用

徐 鹏¹ 赵 强¹ 朱志成¹ 刘文超¹ 侯 峰²

1. 宁夏龙源新能源有限公司 宁夏银川 750001

2. 国网宁夏电力有限公司 宁夏银川 750001

摘 要: 全球能源结构转型驱动风电光伏装机规模持续扩张,处于复杂地理环境里的设备运维工作面临着严峻挑战。传统的人工巡检模式在效率、安全性以及覆盖维度上均存在着显著短板,难以达到新型电力系统对设备状态实时感知提出的需求。以视觉感知和智能算法为依托的无人机巡检技术,给新能源场站的运维带来了三维空间动态监测的解决方案。通过将多模态传感器数据与深度神经网络加以融合的方式,达成了对叶片裂纹、光伏板热斑等潜在故障的早期识别,进而极大地推动了新能源资产全生命周期管理朝着数字化转型的方向发展。

关键词: 无人机设备;智能巡检;风电光伏故障检测;应用研究

引言

风电光伏设备面临的运行环境极为复杂,其装机容量呈现出指数级的迅猛增长态势,二者之间由此形成了尖锐矛盾,使得传统的故障检测手段陷入到技术瓶颈之中。因地理空间障碍而产生的巡检盲区、人工目视检测所不断累积的主观误差,以及周期性巡检存在的时效滞后问题,共同对新能源场站的运维效能起到了制约作用。无人机智能巡检技术本质上是空间信息获取方式以及故障诊断逻辑这两方面的双重革新。文章聚集在无人机智能巡检系统于复杂电磁环境下适应性的优化上,对故障特征提取和设备退化趋势预测二者之间协同机制展开探索,目的在于建立符合新型电力系统特性的主动防御型运维体系。

作者简介:

徐鹏(1985.07—)男,汉族,宁夏中卫人,本科,工程师,主要研究方向:新能源场站运维检修技术研究。

赵强(1978.05—)男,汉族,陕西合阳人,本科,工程师,主要研究方向:新能源场站运维检修技术研究。

朱志成(1984.06—)男,汉族,甘肃武威人,本科,工程师,主要研究方向:新能源场站运维检修技术研究。

刘文超(1987.11—)男,汉族,宁夏中宁人,本科,工程师,主要研究方向:新能源场站运维检修技术研究。

侯峰(1987.12—)男,汉族,宁夏固原人,硕士研究生,高级工程师,主要研究方向:电网一次设备运维检修技术研究。

一、无人机设备智能巡检技术的原理与优势

无人机智能巡检是一种利用无人机技术,通过搭载各种传感器和设备,对特定区域进行自主飞行、数据采集和处理,从而实现对目标对象智能化巡检的技术。目前无人机智能巡检技术可应用于多种场景,如在电力行业中,无人机搭载高清摄像头、红外热像仪等设备,可实现对输电线路、变电站等设备进行巡检,能够及时发现设备缺陷和故障,提高电力设备的运行可靠性。在光伏场站中,系统通过热斑检测算法自动比对组件表面温度差异,精准定位由隐裂或旁路二极管失效引发的异常发热区域;针对风力发电机叶片,毫米波雷达与高清影像的联合分析可有效识别表面裂纹、覆冰或结构形变等潜在缺陷,突破传统目视检查受限于视角与分辨率的瓶颈。相较于人工巡检模式,该技术显著优化了高空高危环境下的作业安全性,巡检人员无需攀爬塔筒或暴露于极端天气即可完成全面诊断,同时依托自主开发的路径规划引擎,无人机能够根据地形起伏与障碍物分布动态调整飞行轨迹,在保证全覆盖扫描的前提下最大限度降低能源消耗。

二、风电光伏故障检测的现状与挑战

(一) 风电光伏系统的特点与故障类型

风电系统依赖旋转机械部件持续运行的特殊性决定了其故障模式具有机械应力累积的渐变特征,齿轮箱轴承磨损与叶片气动弹性形变构成主要失效风险源,湍流风载引发的塔筒振动模态偏移则加剧了结构疲劳损伤。光伏组件作为静态电子系统虽无运动部件,但长期暴露于户外环境使得电池板封装材料面临紫外辐照老化与湿

冻循环侵蚀,微观裂纹在热应力作用下沿晶界扩展可能诱发串联电阻异常,玻璃盖板表面污染物沉积导致的电流失配现象往往呈现区域性分布特征。两类系统均存在电气连接点因温差交变产生蠕变松弛的共性问题,汇流箱内部铜铝异种金属接触在潮湿环境中易发生电化学腐蚀,直流电弧放电隐患随设备老化程度加深呈现非线性增长趋势。设备集群在复杂电磁环境中运行时,功率变换器开关频率谐波与空间电荷分布相互耦合引发的绝缘介质劣化问题具有隐蔽性特征,场致发光效应可能提前预示背板击穿风险。多物理场耦合作用下的材料性能退化路径差异,使得故障诊断既需关注机械振动频谱特征突变,又不能忽视伏安特性曲线细微畸变传递的早期预警信号。

(二) 传统故障检测方法的局限性

传统检测手段在应对大规模新能源场站的运维需求时暴露出多重掣肘,人工巡检团队需携带重型设备穿越复杂地形,光伏板阵列间的狭窄间距与风机塔筒的垂直高度大幅降低作业机动性,地表视角的遮蔽效应常导致组件背板缺陷或叶片迎风面损伤成为监测盲区。依赖热成像仪与电流检测的离线诊断模式存在时效性断层,光伏组串的间歇性故障特征易受光照波动影响而漏检,风机齿轮箱的早期磨损信号往往湮没在机组运行噪声中难以捕捉。经验依赖型判断方式易受个体技能差异干扰,积灰遮挡与真实热斑在红外图谱中的灰度差异缺乏量化标准,叶片漆面老化与结构性损伤的目视判别边界模糊,主观评估偏差可能延误关键部件的更换窗口。定期维护机制与设备实际劣化周期存在错配风险,突发的雷击浪涌或沙尘侵蚀可能引发绝缘失效却无法触发预设的检测程序,而过度拆卸检查反而加速机械连接件的疲劳损耗,这种被动响应模式难以适配新能源电站动态变化的运维场景^[1]。

(三) 新经济环境对故障检测的新要求

风电光伏设备接入电力市场交易机制的深化推动故障检测标准向经济性维度延伸,竞价上网模式下非计划停机导致的电量损失直接关联场站收益,要求检测系统具备发电量预测偏差与设备潜在失效风险关联分析能力。新型电力系统构建过程中分布式电源聚合参与调频调压的市场化运作,使得设备健康状态数据成为辅助服务定价的核心参数,传统阈值告警模式难以满足动态电价体系下设备可用率与运维成本的多目标优化需求。碳中和目标倒逼生态敏感区项目采用低环境侵入式运维方案,自然保护区周边场站的地面巡检作业频次受到严格限制,

迫使检测技术向空基非接触式感知方向转型。新能源参与现货市场带来的功率波动率考核压力,要求故障诊断模块能够区分设备固有性能衰减与电网调度指令引发的异常工况,避免误判导致的无效维护成本支出。退役设备梯次利用市场的形成催生寿命评估精度需求,检测数据需支撑剩余价值测算模型构建,这对历史运行数据与当前状态参数的关联建模深度提出更高要求。电力系统柔性化改造进程中出现的构网型变流器控制逻辑与设备绝缘状态耦合问题,要求检测体系同步兼容电气性能分析与控制策略适配性验证双重功能。

三、无人机设备智能巡检在风电光伏故障检测中的应用

(一) 风电机组叶片巡检

在风电机组叶片日常巡检环节,搭载高清摄像头的无人机贴近叶片表面匀速飞行,巡检人员在地面站接收实时回传影像,逐帧检查是否存在裂纹、砂眼或涂层脱落现象,针对叶片前缘磨损这类肉眼难辨的缺陷,操作员会手动切换至偏振光模式增强表面纹理辨识度。当遇到雷击损伤隐患区域,无人机会自动悬停并开启激光雷达扫描,生成的三维点云模型同步传输至后台分析系统,结合历史数据比对可精准定位内部结构分层或粘接层空隙。相较于传统吊篮作业需要停机配合的局限,双频段通信模块保障了无人机在机组正常运行期间完成巡检任务,作业窗口期从原先的季度巡查缩短为月度循环。遇到叶片覆冰或沙尘天气,巡检员会提前更换抗干扰更强的毫米波雷达吊舱,这种穿透性探测手段能有效识别被遮蔽的应力集中区^[2]。针对叶片根部的螺栓松动问题,多旋翼无人机携带的磁通量传感器沿着法兰盘缝隙匀速移动,磁场畸变数据经算法解析后直接标记潜在松动点位置。每次巡检结束后,运维班组依据系统生成的损伤分布热力图,优先安排存在贯穿性裂纹的机组进行登塔复查,这种靶向性检修策略使叶片维护效率提升三成以上。

(二) 光伏电站故障检测

工作人员每天早晨会根据系统生成的工单分配巡检任务,操作人员操控搭载高清摄像头和热成像仪的无人机沿着预置航线飞行,这些航线经过工程师反复调试既能覆盖所有组件又避开支架阴影和周边障碍物。当无人机悬停在离地十米高度时,旋转云台会以四十五度角对光伏板表面进行多角度拍摄,这种倾斜摄影手法比传统垂直拍摄更能捕捉到边框变形或玻璃面板的细微裂纹。后台算法自动将传回的可见光图像与红外热图叠加分析,电池片热斑在屏幕上呈现为醒目的红色斑块,杂草遮挡

的组件则显示出不规则的温度梯度。如果运维人员发现某组串存在异常发热现象,则会带着绝缘杆和万用表去现场复核,掀开接线盒果然发现内部二极管击穿导致的短路问题。阴雨天气巡检时,工程师会手动切换无人机的偏振光模式,潮湿环境下这种特殊滤镜能穿透水膜清晰识别背板脱层的褶皱痕迹,比起过去踩着泥泞挨个检查组件节省了两小时工作量。针对西北地区常见的沙尘堆积问题,无人机每月底执行的低空扫描任务能精准标出玻璃表面积灰超过三毫米的组件位置,保洁班组根据坐标图优先清理发电效率下降严重的区域。

(三) 海上风电巡检

在海上风电场日常巡检作业中,运维班组操控搭载多光谱成像仪的六旋翼无人机贴着塔筒表面爬升,潮湿海风裹挟的盐雾环境要求设备必须配备防水云台,操作员在母船控制舱内切换热成像模式捕捉法兰连接处的温度异常。面对浪涌导致船体晃动的情况,无人机自主开启动态基准定位系统,利用塔筒顶部安装的射频标签修正飞行轨迹偏差,螺旋桨掀起的咸涩水珠顺着叶片导水槽滑落时,摄像头正逐行扫描避雷针接闪器的烧蚀痕迹。当发现塔架焊缝存在疑似裂纹,操作员会启动激光测振模块进行微米级振幅检测,振动频谱数据经边缘计算设备预处理后直接触发三级报警机制。针对基础桩海生物附着问题,双机编队作业成为常态,前机用超声波探头敲击桩体判断空腔腐蚀程度,后机沿着潮差带拍摄藤壶覆盖密度分布图。台风过境后的特殊巡检中,无人机切换至抗强风模式低空掠过机组,倾斜摄影构建的三维模型与风暴前存档数据叠加比对,能清晰显示塔筒门盖密封条位移量。螺栓预紧力监测依靠机腹悬挂的脉冲涡流检测仪,探头扫过法兰面时自动识别应力松弛区域,生锈的螺栓头与崭新垫片在紫外镜头下呈现差异明显的荧光反应^[3]。叶片前缘侵蚀检查需要配合潮汐规律,退潮时段无人机沿着叶尖至叶根方向逆光飞行,阳光穿透蒙皮时内部玻璃纤维布分层缺陷会投射出细长阴影。每逢夏季藻类繁殖高峰期,配备高压气嘴的定制无人机每周两次清除轮毂表面的黏稠生物膜,防止微生物代谢产物加速齿轮箱呼吸器堵塞。

(四) 风光线站一体化巡检

在风电场和光伏电站的日常巡检中,巡检人员根据设备分布特征与地形条件设定飞行高度与速度参数,螺

旋桨产生的下洗气流掠过光伏板表面时可吹走部分积灰。当遇到风机叶片或支架结构时,无人机自动切换至环绕飞行模式,借助激光雷达对塔筒焊缝进行三维建模,机械舱油污渗漏形成的热斑会被红外传感器实时捕捉。对于分布在陡坡或水域边缘的光伏阵列,地面站操作员可手动调整飞行路径避开障碍物,强风天气下无人机会启动抗风悬停功能保持拍摄稳定性。采集的高清影像通过4G网络回传至运维中心,AI算法将组件表面裂纹与植被遮挡区域标注为黄色预警,逆变器散热异常则触发红色报警信号。运维班组收到工单后携带望远镜与绝缘杆赶赴现场,通过无人机拍摄的定位照片快速找到故障光伏组串,叶片表面的雷击灼伤点经过二次确认后列入大修计划。在多云天气巡检时,无人机云台会根据光照强度自动调节曝光参数,光伏板背板上的鸟巢痕迹与风机基础沉降裂缝都能清晰呈现,定期飞行积累的图像数据为设备寿命预测提供趋势分析素材。

结语

无人机智能巡检技术为风电光伏场站构建了多维立体的设备健康感知网络,核心价值在于对传统检测手段时空局限性的突破。在这一技术当中,将自主导航和智能诊断进行深度耦合,实现了故障特征提取方面从静态阈值判断朝着动态模式识别的跨越。相关行业应强化边缘计算节点和云端诊断平台的协同优化,进而构建起具备自进化能力的检测模型迭代机制。在未来发展进程中,需要重点关注异构无人机群协同作业能力的提升,同时对数字孪生框架之下的虚实交互验证模式展开探索,最终促使适应高比例新能源接入的智能运维技术体系得以形成。

参考文献

- [1]徐进,丁显,宫永立,等.无人机智能巡检在风电光伏故障检测中的应用[J].设备管理与维修,2019,(07):170-172.
- [2]陆成龙,刘忠德,张皖军,等.无人机智能巡检在检测风电光伏故障中的应用研究[J].电子设计工程,2021,29(06):130-134.
- [3]张德旺.无人机智能巡检在风电光伏故障检测中的应用[J].中国战略新兴产业,2022,(09):125-127.