

# 无人机智能巡检在风电光伏故障检测中的应用

李海涛 刘文洋

国网饶阳供电分公司 053900

DOI:10.32629/ems.v8i6.20609

**[摘 要]** 随着我国社会经济形势的发展,社会的能源需求量也不断提升。目前,以清洁能源为主的风力发电、光伏发电取得了社会大众的广泛认可,但风电光伏发电站的人工故障检修工作难度较大、成本较高且效率较低,为进一步提高风电光伏故障检测工作的效率,降低风电光伏的运维成本,可引入无人机智能巡检技术,实现风电光伏的智能化运维。新能源风电光伏产业快速发展,传统人工巡检存在效率低、成本高、安全风险大、故障识别精度不足等弊端。本文阐释无人机智能巡检技术内涵,分析其故障检测应用必要性,指出复杂环境成像、算法泛化、数据传输、飞行管控等现实困境,并从机型选型、航线规划、故障识别等方面探究风电光伏场景实际应用路径。

**[关键词]** 无人机; 智能巡检; 风电光伏; 故障检测

## 引言

近几年来,我国电力行业飞速发展,电网建设在全国各地扎根。伴随着无线通信技术、GPS 导航定位技术以及自动控制技术的发展,无人机的发展速度越来越快。无人机在电力线路规划、建设、运营维护、应急抢险等工作中发挥着提高效率、保障安全的作用<sup>[1]</sup>。无人机,英文缩写为 UAV,是指使用无线电遥控设备和自备程序控制装置操纵的不载人飞机,或者由车载计算机完全或者间歇自主地操作,随着航空科技的发展,无人机在续航、通信、负载能力等各方面都有了提高。

## 一、无人机智能巡检的技术内涵

无人机智能巡检是使用无人驾驶航空器(UAV)搭载可见光相机、红外热成像仪、激光雷达、紫外成像仪等多传感器载荷,配合地面控制站、数据传输网络以及智能分析平台,对风力发电机组和光伏阵列实施自动化、数字化、智能化的巡视检测和故障诊断的技术体系。

目前我国风电光伏故障检修中使用的无人机以六旋翼无人机为主,无人机识别技术、RTK 精准定位系统、数据采集传感器、集成地面站系统等组成了六旋翼无人机智能巡检系统。智能巡检技术依靠 RTK 定位系统,可以完成差分精准定位,将定位误差值控制在两厘米以内。数据采集传感器通过智能巡航技术可以完成巡检、拍照、摄像等工作,依靠地面站和实时通信系统可以及时将作业数据传送到中心,也可以保存起来。另外,在智能巡检技术应用初期,六旋翼无人机可以自主避开飞行障碍并显示三维航线,运行状态比较稳定,

安全系数较高,能持续进行 35 到 40 分钟的巡检工作。

## 二、风电光伏故障检测的必要性

### (一) 突破传统人工巡检的效能瓶颈

传统的电力巡检依靠人工登高爬塔或者步行查看光伏板,工作量大、效率低。对于一个拥有几百台风机的风电场来说,人工进行一次全面巡检要花费数周的时间,而且人工巡检并不能发现隐蔽的故障<sup>[2]</sup>。风机叶片高达几十米,人工巡检视野受限制,且受风速、雨雪等天气影响很大,常常导致检修停工。无人机巡检具有“高效、灵活、全覆盖”等特点,带有智能系统的无人机可以在几十分钟内完成对单台风机的全方位扫描,巡检效率比人工高几十倍。对于广阔的光伏电站来说,无人机可以在短时间内完成大面积扫描,快速找到温度异常的区域,大幅缩短故障排查时间。

### (二) 显著降低运维安全风险

风电光伏设备大多部署在戈壁、高原、海洋等偏远或者复杂的地形上,并且设备自身具有高空、高压的特点。人工巡检存在高空坠落、触电、雷击等高危情况,尤其是风机叶片的检查,工作人员要爬上百米高的地方,安全风险很高。无人机智能巡检把人员从危险环境里解放出来,用“机器换人”实现“无人化”作业,无人机可以适应平原、湖泊、高山等各种地理环境,在雷雨等恶劣气象条件下也可以完成部分巡检工作,大大降低了作业过程中发生安全风险的概率,保障了运维人员的生命安全。

### (三) 提升故障诊断精度与发电效益

人工巡检依靠肉眼观察、经验判断来识别微小裂纹、早

期热斑等隐蔽故障,对这些细微问题很难发现,容易造成漏检或误判<sup>[3]</sup>。无人机上装有的红外热成像、高分辨率可见光设备可以发现人眼看不见的温度异常、微观结构损伤。以光伏系统为例,无人机用热成像技术可以准确找到由于热斑、PID效应等造成的组件过热甚至起火的隐患,在风电系统中也可以清楚地看到叶片前缘的腐蚀、裂纹和雷击损伤。由于具有高精度,运维人员可以尽早地发现并处理故障,防止小病变成大灾,保证电力系统稳定运行,减少发电损失,提高新能源场站经济效益。

### 三、新能源无人机智能巡检面临的现实困境

#### (一) 复杂环境下图像采集质量稳定性不足

风电场和光伏电站的现场环境具有很强的不确定性,光照强度的波动非常剧烈,容易产生强光反射、局部阴影、逆光拍摄等干扰,常年还会有大风、降雨、降雪、浓雾、沙尘等恶劣气象条件,会对成像质量造成很大影响。在风电巡检环境中,风机叶片一直处在高速旋转和动态形变的状态,无人机近距离作业的时候容易受到强气流的干扰,产生图像抖动、运动模糊、拖影等情况,叶片表面的涂层反光特性比较复杂,容易出现大面积的眩光和过曝区,从而掩盖裂纹、破损等重要缺陷的特征。光伏巡检时正午强太阳辐射会造成红外热成像出现大量背景噪声,使得热斑、异常温升等故障特征被淹没,云层、遮挡物、组件灰尘造成的局部阴影则会造成温度场非均匀分布,大大增加异常误识别的概率。上述环境扰动造成原始巡检数据质量高低不一、信噪比低,大大增加了后面图像处理和缺陷识别的难度。

#### (二) 缺陷识别算法泛化能力与鲁棒性受限

目前新能源缺陷检测大多依靠深度学习模型,但是现有的算法体系存在着场景适应性差、鲁棒性不够等状况<sup>[4]</sup>。数据孤岛和样本分布失衡的现象比较明显,不同厂商、不同型号、不同服役年限的风机叶片和光伏组件外观差别很大,真实的故障样本如叶片裂纹、组件热斑、隐裂等数量很少、种类不均,不能使模型学会稳定的通用故障特征。另一方面模型的泛化能力比较差,在训练数据集中可以达到较高的识别准确率,但是当遇到未知设备类型、新型缺陷形态、复杂光照环境的时候,识别准确率会急剧降低,对于细微的划痕、浅表的裂纹、弱的热斑等低对比度的缺陷漏检率较高。另外环境干扰会造成高误报率,树叶阴影、鸟类粪便、污渍、杂草等背景干扰很容易被误判为设备缺陷,使

运维人员花费大量时间做人工复核工作,从而极大地降低了自动化巡检的效率。

#### (三) 海量巡检数据处理与通信传输瓶颈突出

无人机巡检作业会产出大量的可见光、红外、视频等多模态数据,高分辨率红外时序数据量大,传输、存储、计算都要求很高。从通信层面来讲,偏远地区的风电场和光伏电站5G专网覆盖不足,数据传输依靠4G或者卫星通信,带宽小、时延高,不能满足高清视频流和高精度图像实时回传的要求,不能达到真正的在线实时诊断。无人机机载端算力资源非常有限,不能直接部署复杂的深度学习模型来完成实时推理,如果把所有的原始数据都传送到地面平台进行处理,就会造成网络拥塞、存储压力增大、响应延迟等问题。

#### (四) 飞行安全管控与自动机库协同能力不足

大规模新能源场站集群巡检作业时,无人机要完成长航程、高频次、全自主飞行的任务<sup>[5]</sup>。由于风电机组叶片转动所引起的复杂尾流以及紊流场会对无人机飞行稳定产生很大的影响,并且存在着撞机、炸机等安全隐患。目前多无人机协同巡检的动态避障、全局路径规划、时空冲突消解等算法还处于研究阶段,不能达到高效率、高可靠性的集群化作业要求。虽然无人机自动机库(无人机巢)已经在工程上得到应用,但是由于复杂地形、恶劣天气等原因,无人机自主起降、精准对接、自动换电/充电、数据自动上传等关键流程的可靠性、稳定性还有待提高,与全天候、全自主、无人化巡检的目标还存在较大差距。

### 四、无人机智能巡检技术在风电巡检中的应用

#### (一) 进行无人机选择

风电巡检场景中无人机的选择属于建立高效智能巡检体系的第一步。由于风力发电机一般工作在高原、沿海或者山区等复杂的环境下,并且塔筒高度一般都超过百米,所以必须使用具有长续航、高抗风、高载重和高稳定的大疆Matrice 300/350 RTK或者类似的行业级机型。载荷配置需多样化,搭载高分辨率可见光相机来获取叶片表面裂纹、划痕等宏观缺陷,配置红外热成像相机检测叶片内部脱胶、雷击损伤或者结构温度异常,必要时加装激光雷达(LiDAR)做高精度三维建模,辅助评价叶片形变和塔筒结构健康。无人机还要装有RTK高精度定位模块,在强风干扰的情况下依然可准确地悬停在预定的航线上,并且能够按照预先设定好的航线自动飞行,从而保证数据采集的一致性和准确性,给AI图像识别

提供高质量数据源。

## (二) 确定无人机故障识别的路线

### 1. 确定巡检区域

巡检区域的划分要依照风机的空间分布、风资源特性以及历史故障数据。首先用 GIS 地理信息系统对风电场进行数字化建模, 将每个风机的坐标、高度以及周围障碍物(塔架、其他风机)用三维标注出来, 划定安全飞行空域。对叶片故障高发区叶尖、前缘、后缘、根部等部位设置重点监控网格。另外, 由于各个地区风况不一样, 对于常年处在高风速区的“机位”, 巡检频率和精度也要相应提高。

### 2. 巡检流程

巡检流程要实现标准化和自动化闭环。系统按照风机的机型以及故障特征库来生成最优巡检航线, 包含叶片正面、背面和根部死角。其次无人机自动起飞, 按照规划的路线做全景扫描加重点复拍工作, 先做大范围可见光扫描, 用 AI 算法实时对比, 一旦发现疑似故障点如鸟撞、雷击点, 立即放大倍率做多角度高清抓拍和红外热成像。最后将数据实时传送到云端或者边缘计算终端, 经过图像增强和去噪处理之后存入故障数据库中, 形成巡检报告, 完成由数据获取到故障预警的无缝对接。

## (一) 进行叶片故障的检测

叶片是风力发电机的主要部分, 叶片的好坏直接影响到发电效率和安全。无人机智能巡检使用深度学习算法 YOLO、Mask R-CNN 等可以对叶片缺陷进行自动检测。根据系统的运行情况来看, 可以发现叶片表面的裂纹、涂层剥落、前缘侵蚀、雷击烧蚀、结构变化等常见的故障都能被检测出来。利用多光谱融合、高分辨率图像拼接技术可以准确找到并测量出细微裂纹的长度和宽度, 对内部损伤用红外热成像分析温度梯度差异, 可以识别内部损伤的脱胶、分层缺陷。检测数据经过云端 AI 模型训练和迭代之后, 不但可以识别出已经存在的故障模式, 而且可以利用异常检测算法来发现潜在的隐患, 把传统的依靠人工巡检的“事后维修”转变为“预测性维护”, 从而大大降低运维成本以及非计划停机时间。

## (二) 采取光伏的巡检模式

虽然光伏和风电属于不同的能源形式, 但是无人机智能巡检的理念和作业方式具有很强的相通性, 可以借鉴光伏巡检的经验来改进风电巡检体系。无人机在光伏领域主要是用红外热成像快速找到热斑、二极管故障和组件遮挡, 在风电

场景中可以将模式迁移到风机塔筒、机舱和基础结构上进行巡检。利用光伏巡检中已经形成起来的模式来对风电场升压站、箱变和集电线路等设备实施红外检测, 从而找到电气连接处过热、绝缘老化等问题。另外, 参照光伏巡检的“多机协同”方式, 可以创建起无人机编队, 对风电场和光伏电站实施“风光伏一体化”的综合巡检, 既能共享同一个数据管理平台和运维团队, 又能发挥无人机在应对极端天气时快速反应的能力, 从而实现对多能互补能源基地的全面覆盖和智能监管, 促使新能源运维朝着集约化、智能化的方向发展。

## 五、结束语

因此无人机智能巡检凭借高效灵活、精准安全的特点, 很好地解决了风电光伏传统人工巡检的效能瓶颈和安全难题, 能够准确地发现设备的隐蔽故障, 提高运维质量和发电效益。但是该技术还存在环境成像、缺陷算法、数据传输、飞行协同等多方面的问题。未来要不断改进传感成像以及 AI 识别算法, 健全通信传输和多机协同管控体系, 弥补全天候自主巡检技术的不足, 推动无人机智能巡检深入风电、光伏运维的各个环节, 助力新能源行业迈向智能化、集约化高质量发展的轨道。

## [参考文献]

[1]彭善文, 郭雨濛. “低空经济”视野下无人机智能巡检赋能智慧厂房建设的路径研究 [J]. 城市建筑, 2026, 23 (08): 123-126.

[2]陈飞, 魏兴成, 山峰, 等. 光伏场区无人机智能分区巡检下组件缺陷识别研究 [J]. 电器工业, 2026, (04): 51-55.

[3]王浩, 周坚, 苏煜. 无人机智能巡检技术在光伏组件缺陷检测的应用研究 [J]. 机械工程与自动化, 2026, 55 (02): 170-172.

[4]余军刚. 大型山地光伏电站无人机智能巡检路径优化研究 [J]. 电力设备管理, 2026, (04): 138-140.

[5]中国电力企业联合会. 光伏电站无人机智能巡检要求: GB/T 46924-2025[S]. 中国标准出版社, 2025.

第一作者简介: 李海涛, 1988.08.09, 男, 河北省衡水市饶阳县王同岳镇葛同岳村, 汉族, 本科, 中级工程师, 河北省衡水市, 研究方向: 电力工程;

第二作者简介: 刘文洋, 国网饶阳供电分公司, 中级工程师, 研究方向: 工业工程。