

沿海复杂山区输电线路无人机全自主精细化 巡检关键技术与应用

吴嘉文^{1*}, 季 节², 史浩男¹

- (1. 国网浙江省电力有限公司温州供电公司, 浙江 温州 325000;
2. 国网浙江省电力有限公司温州供电公司经济技术研究所, 浙江 温州 325000)

摘要: 针对浙江南部沿海地区“七山一水二分田”的复杂地形及台风、盐雾多发的气象特征, 传统人工运维存在视觉盲区多、作业风险大、应急响应滞后等难题。文章通过构建高精度激光点云三维模型, 实现了基于微地形感知的超视距 (BVLOS) 自主飞行; 应用“分段接力”作业模式, 解决了山区长距离线路的续航与通信瓶颈; 针对台风灾害, 构建了集灾情快速建模、物资精准投放及夜间照明于一体的应急战法。应用结果表明, 截至 2024 年底, 该技术体系使辖区适航区巡检覆盖率由原来的 65% 提升至 100%, 缺陷识别准确率超过 92%, 显著提升了沿海电网在极端环境下的运维韧性。

关键词: 沿海山区; 超视距飞行; 激光点云; 分段接力巡检; 应急保障; 抗台防汛

中图分类号: TM766

DOI: 10.13882/j.cnki.ncdqh.2602F003

CSTR: 32400.14.ncdqh.2602F003

Key Technologies and Application of Fully Autonomous Fine Inspection of Transmission Lines by UAVs in Complex Coastal Mountainous Areas

WU Jiawen^{1*}, JI Jie², SHI Haonan¹

- (1. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd. Wenzhou Power Supply Company, Zhejiang Wenzhou 325000, China;
2. Economic and Technical Research Institute, Wenzhou Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Zhejiang Wenzhou 325000, China)

Abstract: In response to the complex terrain characterized by "70% mountains, 10% water, and 20% farmland" in the coastal areas of southern Zhejiang, as well as the frequent occurrence of typhoons and salt fog, traditional manual operation and maintenance face challenges such as extensive visual blind spots, high operational risks, and delayed emergency response. This article addresses these issues by constructing a high-precision 3D laser point cloud model, enabling beyond visual line-of-sight (BVLOS) autonomous flight based on micro-terrain perception. By implementing a "segmented relay" operation mode, it overcomes the limitations of endurance and communication for long-distance power line inspections in mountainous areas. For typhoon disasters, an integrated emergency response strategy has been developed, encompassing rapid disaster assessment modeling, precise material delivery, and nighttime illumination. Application results show that, as of the end of 2024, this technological system has increased the coverage of inspectable areas in the region from 65% to 100%, achieving a defect identification accuracy rate exceeding 92%. This significantly enhances the operational resilience of coastal power grids under extreme environmental conditions.

Keywords: coastal mountainous areas; beyond visual line-of-sight flight; lidar point cloud; segmented relay inspection; emergency support; typhoon and flood prevention

温州地区电网大都穿越雁荡山脉及沿海滩涂, 设备的近距离观察, 造成视觉盲区; 2) 当地的气候环境极其恶劣, 长期处于高盐度环境中并伴有频繁的台风天气, 线路易发生倒塔断线、滑坡次生灾害等情况, 而采用“望远镜+摄像机”的传统巡视手

面临双重运维挑战: 1) 特殊的地形环境如地势险峻、植被生长茂盛特别是竹林, 制约了传统巡检手段对

收稿日期: 2026-02-02; 修回日期: 2026-05-09

段已无法满足新一代电网高可靠性要求。

近年来,在《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》实施及低空经济发展背景下,无人机电力巡检正从“一机遥控”向“多机自治”的模式过渡,但现有的常规自主巡检技术面对温州市特有的复杂地形和恶劣气候条件下仍存在通信线缆不稳定、微地形障碍物规避困难、隐性缺陷识别率低等问题。

为此,本文结合国网温州供电公司输电运检中心(以下简称“中心”)的工程实践,重点研究高落差山地超视距(BVLOS)飞行、沿海设备多维状态感知及台风工况下快速应急响应等关键技术,按照“问题分析—体系架构—关键技术—场景应用—成效验证”技术路径,旨在构建一套适配沿海复杂环境的全自主巡检体系,为同类地区的电网运维提供技术参考。

1 沿海复杂山区运维难点与技术需求

1.1 微地形环境下的通信与定位挑战

温州属峡谷及丘陵地带多,电力线路跨越距离大,并有部分位于农村周边山区地形复杂,比如深沟、林地等,易导致GPS接收机被山体遮挡或多次反射,引起飞行器定位不准、姿态不稳等问题。另外,城郊、山区公网信号弱,常规无线电容易中断,难以实现远程控制,限制了巡检范围及安全性;传统无人机采用PWM波作为传输载体进行信息交互,为单向开放式的环形链路,无法实现对飞行器状态信息的实时刷新及反馈控制。

1.2 高盐雾腐蚀与隐蔽性缺陷识别难题

长期在高盐度环境下工作的沿海及临海地区运行的电力线路设备中的绝缘子、金具,往往会出现一些不易发现的缺陷,如细微裂纹、螺栓腐蚀、复合绝缘子表面老化脱落等,这些缺陷会给电网安全带来严重隐患,因此须采取多种光学图像技术(如多光谱技术)联合无损检测的方法进行识别。

1.3 极端台风灾害下应急响应迟滞问题

台风往往伴随强降雨,导致进山及农村道路因泥石流、塌方阻断。在灾后72h黄金抢修期内,人员装备无法抵达现场,传统人工勘察手段失效,导致灾情评估滞后,抢修指挥缺乏精准数据支撑,进一步影响农村区域的供电恢复效率。

2 基于“空地协同”的自主巡检体系构建

针对上述难点,中心构建了以“激光雷达建模为基础、多机种协同为手段、AI智能识别为核心”的技术体系,兼顾山区高效巡检与农村区域灵活运维的需求。

2.1 健全省地两级管控

为实现大电网及农村拓扑图更新联动,该系统采用“省统筹+市落地”的模式,在一个维度上由各省进行统一数据清洗以及模型训练;在另一个维度上则需要结合地形特点制定巡检策略,实现管理集成和技术落地的高度统一。

2.2 构建3层技术架构

为适配大范围电网及农村延伸线路的运维协同需求,同步构建3层技术架构,实现管理统筹与技术落地的深度融合。具体技术架构见图1。

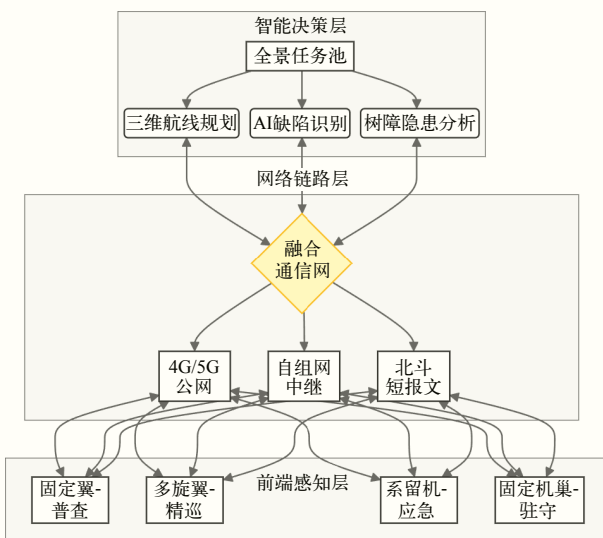


图1 无人机全自主巡检技术体系架构图

1) 前端感知层:配置垂直起降固定翼(普查)、多旋翼(精巡)、系留机(应急)及固定式机巢,形成梯队化装备库,可灵活覆盖山区主干线与农村分支线。

2) 数据链路层:在无公网山区及农村区域,利用自组网中继技术或预置便携式通信基站,保障控制链路稳定性,实现全区域信号覆盖。

3) 智能决策层:融合输、变、配多专业数据,建立统一的“全景任务池”,实现一次飞行、多专业共享,减少对农村区域的重复巡检干扰。

表1 差异化无人机装备配置表

装备类型	核心载荷	技术指标要求	针对性应用场景
垂直起降固定翼	激光雷达	续航>90 min, 点云密度>50 m ⁻²	大范围普查：灾后通道快速建模，树障隐患定量分析 ^[1] ，正射影像获取
高性能多旋翼	变焦/红外/紫外	抗风等级>6级，IP45防护	精细化诊断：沿海绝缘子盐密/放电检测，金具锈蚀检查，红外测温
移动式机群平台	自动换电系统	支持多机并发控制，换电时间<3 min	长线作业：解决山区无电源补给难题，支持“分段接力”作业
重载系留机	高亮度照明/抛投	滞空时间>4 h, 载重>20 kg	应急抢险：夜间持续照明，跨山谷牵引绳/物资投送

2.3 硬件配置与通信链路设计

针对不同地形条件和任务类型，对农村无人机配置进行了差异化设计，在满足功能的前提下尽量降低造价，具体如表1所示。例如在无公网山区，采用“无人机自组网+便携式Mesh地面站”构建弹性通信专网，确保控制指令与遥测数据不间断传输，高清影像可暂存于机载设备，待飞至有网络区域后自动回传。

3 复杂环境下全自主精细化巡检关键技术

3.1 基于高精度LiDAR点云的仿地飞行技术

为解决山区及农村偏远区域GPS信号不稳定、视距遮挡问题，采用激光雷达技术重构线路走廊三维空间，实现“所见即所得”的全自主飞行^[2]，核心流程见图2。

高密度点云采集：利用垂直起降固定翼无人机搭载LiDAR对线路走廊进行条带状扫描，获取点云密度优于<50 m⁻²的原始数据，覆盖主干线及农村分支线通道。

语义分割与建模：通过AI算法可实现对杆塔、导线、植被、地面及农村房屋的语义分割建模，形

成cm级精度的三维矢量化模型，同时可明确区分障碍物边界。

航线自主规划：系统根据三维模型自动计算出安全避障网络线并根据塔形自动规划包含绝缘子串、连接工具等关键部位在内的拍照航点，完成一键起飞后全程自主作业，无须人工遥控。

3.2 “车机协同”的分段接力长续航作业技术

针对温州西部山区及农村道路蜿蜒、单次起降难以覆盖长线路的问题，创新应用“分段接力”作业模式^[3]，突破续航与地域限制，作业流程见图3。

技术原理：以车载移动平台作为中继节点，无人机从山脚起飞点A（或农村集中区域）起飞，完成越岭段巡检任务后，降落在山脊后侧的接力点B（预置移动平台），经极速换电（<5 min）、数据导出后，继续作业至任务终点C，形成闭环作业链。

应用成效：该模式突破电池能量密度物理限制，减少约70%的无效返航路程，将山区及农村区域单日有效巡检里程提升3倍以上，大幅降低人工登山及农村道路往返成本。

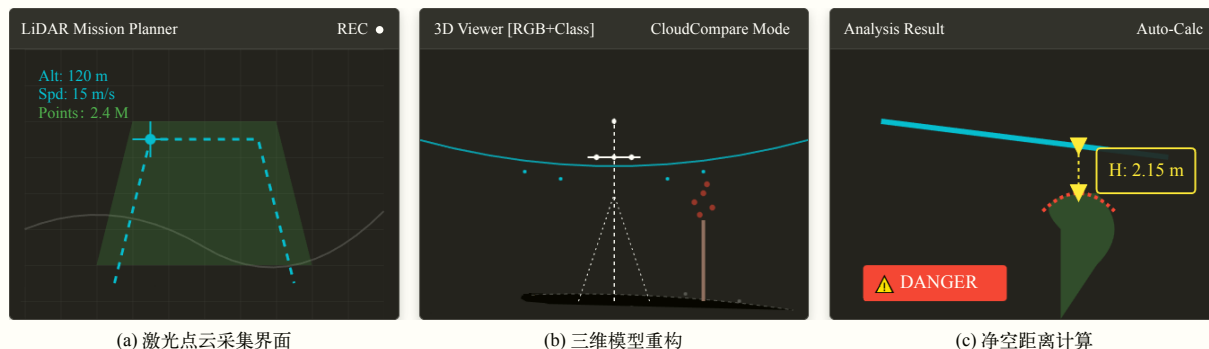


图2 激光点云三维重建与树障分析示意图

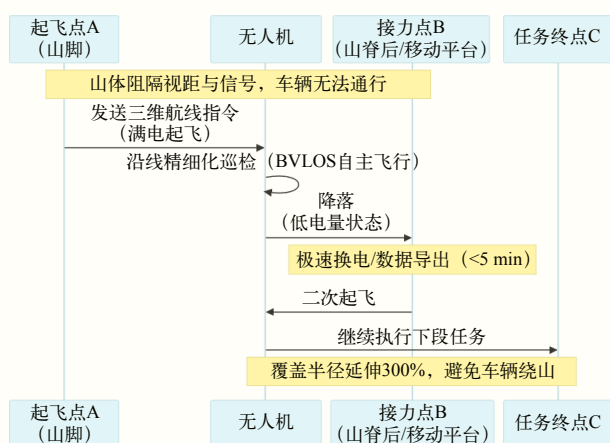


图3 山区“分段接力”巡检作业流程图

3.3 面向沿海设备的多维状态感知技术

针对沿海盐雾腐蚀隐患，单一可见光巡检存在局限性，引入了多光谱融合诊断技术。

紫外成像（UV）检测：在高湿度、高盐雾天气下，精准检测绝缘子表面因盐污积聚产生的微弱电晕放电，提前预警污闪风险，适配沿海农村线路的长期运维。

X射线无损探伤：对运行满15 a以上的老旧岸线，使用无人机搭载轻型X光机高空透视，实现不停电发现内层钢芯压接质量及锈蚀断股情况，并填补了内层缺陷检查的空白，实现不破坏性X射线探伤。

3.4 台风工况下的全天候应急保障技术方案

台风季期间，电网抢修工作是对运维水平的一次考验。该技术方案适合极端气候环境下的应急保障，提升农村地区复电速度。

灾后快速道路模型建立及损毁评估。台风过境后，利用垂起固定翼无人机航飞时间长特点，于1 h内完成受灾区域精细化高清正射影像图获取工作，采用影像比对技术可快速识别歪斜杆塔、断线位置和滑坡点，自动生成损毁状态评估报告。

“孤岛”送物及夜间悬停照明技术。针对路阻“孤岛式”的作业现场（含远离县城的农村电建），采用大载重无人机配送运维材料（金具工具、绝缘工器具、应急药品），利用RTK技术实现cm级的定点精准定位投放。

4 应用成效与数据验证

截至2024年底，该技术体系已在温州电网全面

推广，覆盖山区主干线及周边农村延伸线路，取得显著工程实效，核心指标验证如下：

夜间系留照明：针对夜间抢修照明不足问题，采用系留无人机系统，通过地面发电机经由系留线缆持续供电。无人机在50~100 m高空滞空时，可提供光照均匀度 $\geq 80\%$ 、覆盖3 000 m²的高亮度照明，照度 > 50 lx。相较于传统地面灯塔，其光照范围无死角，有效保障夜间抢修连续性与安全性，加速农村地区供电恢复。

4.1 巡检效率与覆盖率对比分析

与传统人工模式相比，全自主巡检模式在关键指标上实现质的飞跃，具体对比见表2。

表2 传统模式与无人机全自主模式效能对比表

关键指标	传统人工模式	无人机全自主模式	提升幅度/说明
单基巡检耗时/min	40~60 (含登山)	8~12	效率提升约5倍
适航区覆盖率	65% (受地形限制)	100%	消除巡检盲区
树障测距精度	m级 (目测/估算)	cm级 (LiDAR计算)	数据可信度提升
缺陷发现类型	以通道、外观明显缺陷为主	涵盖销钉级缺失、内部损伤	隐患查全率 $> 92\%$

4.2 隐患识别能力与结构优化

通过多维感知技术，发现缺陷结构发生质变^[4]。2024年，中心发现的如闭口销未打开、绝缘子细微裂纹、金具内部锈蚀等本体精细缺陷占比由传统的25%提升至55%，成功避免多起因微小缺陷演变为线路故障，其中包含3起农村台区线路隐患，保障了农村用电的稳定性。

4.3 应急响应效能评估分析

在2024年超强台风防御实战中，无人机先遣队在灾后30 min内即回传首张受灾现场高清图像，相比人工徒步勘察提前4 h以上；农村区域受损线路定位时间缩短至1 h内，为抢修物资精准调配、人员合理部署争取宝贵黄金时间，平均复电时间缩短20%，充分验证了该技术体系在极端工况下的实战效能。

（下转第51页）

- 48(9):3574-3583.
- [2] 程林,姚晨悦,吕顺,等.考虑需求响应的虚拟电厂多能源协同优化调度[J].*农村电气化*,2025(10):79-82.
 - [3] 王守相,郑婉婷,赵倩宇,等.基于碳-绿证互认和电热柔性负荷的含氢多能系统源荷低碳经济调度方法[J].*高电压技术*,2025,51(4):1834-1845.
 - [4] 高瑞阳,王新宝,高烟,等.考虑氢能利用与碳捕集联合灵活运行的综合能源系统源荷低碳优化[J].*电力系统及其自动化学报*,2024,36(5):37-47.
 - [5] 刘哲远,邢海军,程浩忠,等.考虑碳排放流及需求响应的综合能源系统双层优化调度[J].*高电压技术*,2023,49(1):169-178.
 - [6] 李姚旺,张宁,杜尔顺,等.基于碳排放流的电力系统低碳需求响应机制研究及效益分析[J].*中国电机工程学报*,2022,42(8):2830-2842.
 - [7] 王冲,葛玉林,鞠平,等.基于碳排放动态分配调度优先级的配电系统低碳经济运行[J].*电网技术*,2023,47(11):4467-4481.
 - [8] 陈静,杨坤滴,张岩,等.多时间尺度下计及综合需求响应和碳捕集-电转气联合运行的综合能源系统优化调度[J].*电力自动化设备*,2024,44(6):68-76.
 - [9] 周步祥,黄伟,臧天磊.计及共享储能与柔性负荷的微电网鲁棒优化调度[J].*电力科学与技术学报*,2023,38(2):48-57.
 - [10] YANG J,SU C.Robust optimization of microgrid based on renewable distributed power generation and load demand uncertainty[J].*Energy*,2021,223:120043.
 - [11] 陈刚,张娟,王筱,等.分布式新能源接入下微电网需求侧资源优化配置研究[J].*中国能源*,2025,47(9):71-83.
 - [12] 徐文军,吴梦凯,潘夏,等.考虑条件风险价值和热网动态特性的电-热系统储能鲁棒优化配置[J].*浙江电力*,2022,41(9):50-57.
 - [13] 彭乐瑶,马刚,陈永华,等.考虑碳交易体系的微电网多阶段鲁棒优化运行[J].*综合智慧能源*,2024,46(9):9-19.
 - [14] 巨云涛,李红权,于宗民,等.考虑多元不确定性和备用需求的微电网双层鲁棒容量规划[J].*电网技术*,2023,47(8):3343-3361.
 - [15] 陈哲,王槽裕,郭创新,等.计及风电备用容量与需求响应的多备用资源鲁棒优化[J].*电力系统自动化*,2020,44(10):50-58.
 - [16] 资容涛,刘洪兵,侯斌,等.多目标微电网鲁棒优化经济调度[J].*云南电力技术*,2020,48(5):79-84.
 - [17] 陈灵敏,吴杰康,张文杰,等.基于鲁棒优化的微能源网综合需求响应协同调度策略[J].*电力系统自动化*,2021,45(21):159-169.
 - [18] 李圣清,乔靖潇,高泽华,等.基于改进灰狼算法的风光储微电网容量优化配置[J].*智慧电力*,2025,53(8):11-19.
 - [19] 谭理元.基于储能的风电功率波动平抑控制及容量配置研究[D].济南:山东大学,2022.
 - [20] 师阳,李宏伟,陈继开,等.计及激励型需求响应的热电互联虚拟电厂优化调度[J].*太阳能学报*,2023,44(4):349-358.

作者简介

郑和康 (2001—), 男, 硕士在读, 研究方向为电力系统运行与规划, E-mail: 202430349@hbmj.edu.cn.

钟建伟 (1972—), 男, 硕士, 教授, 研究方向为电力系统运行、规划与控制, E-mail: 913838511@qq.com.

陈巍 (1982—), 男, 本科, 高级工程师, 从事电力系统安全监督及管理工作, E-mail: 10421092@qq.com.

向国东 (1979—), 男, 本科, 高级工程师, 从事电力系统安全监督及管理工作, E-mail: 1544768440@qq.com.

沈宇军 (2002—), 男, 硕士在读, 研究方向为电力系统运行与规划, E-mail: 202430342@hbmzu.edu.cn.

(责任编辑: 张峰亮)

(上接第 19 页)

5 结束语

本文针对温州沿海山区及农村延伸线路的特殊地理气象条件, 提出并实践了无人机全自主精细化巡检与应急保障技术体系。该技术路径可行。激光点云建模与“分段接力”模式有效解决了复杂地形下的通信与续航难题, 实现了输电线路(含农村分支线)的数字化、透明化管理, 适配农村电气化发展需求。多光谱诊断与应急照明、物资投送技术, 显著提升了电网应对台风、盐雾等极端环境的能力, 大幅缩短了农村区域故障复电时间, 保障了农村用电可靠性。该模式兼顾高效性与经济性, 可复制性强, 可为福建、广东等同类沿海多山省份的电网运维提供借鉴。

未来, 将进一步深化端侧 AI 边缘计算应用, 实现缺陷实时报警与分级处置; 探索网格化固定机巢与移动作业车的动态协同, 构建“平时智能巡视、

战时快速响应”的立体化坚强电网防线, 助力沿海山区新型电力系统建设高质量发展。

参考文献

- [1] 王先坦,杨忠,王大治,等.面向树障清理无人机的多机跟随控制技术[J].*空间电子技术*,2025,22(6):34-41.
- [2] 谢佳良,陈嘉瑞,马栋.架空输电线路无人机侧方导线仿线飞巡技术研究[J].*农村电气化*,2025(7):32-36.
- [3] 林展鸿.云计算和无人机在电力线路巡视中的应用[J].*集成电路应用*,2025,42(10):200-201.
- [4] 孙政樑,马立博,焦政国,等.无人机在架空输电线路智能巡检中的应用[J].*农村电气化*,2025(1):42-45.

作者简介

吴嘉文 (1994—), 男, 本科, 工程师, 送电线路工, 研究方向: 输电运检, E-mail: wujiawen2026@163.com.

季节 (1993—), 女, 本科, 工程师, 评审专职, 研究方向: 规划评审, E-mail: 627738207@qq.com.

史浩男 (1995—), 男, 本科, 工程师、技师, 送电线路工, 研究方向: 输电运检, E-mail: 2767176560@qq.com.

(责任编辑: 袁航)