

# 基于行波定位技术的配网无人机故障特巡研究

胡哲千\*, 夏红军

(国网浙江省电力有限公司杭州市余杭区供电公司, 浙江 杭州 311100)

**摘要:** 目前, 多旋翼无人机已在配网架空线路巡视作业中得到广泛应用, 辅助线路运维人员提升整体巡视质效。同时, 行波故障定位技术也在供电半径大、运行环境复杂的配网架空线路上得到有效推广, 协助故障抢修人员大幅压降故障定位时间。文章主要研究配网无人机网格化巡视应用条件下, 配合行波故障定位技术, 执行配网架空线路故障快速特巡的方案, 以达到压降故障查找时间、提升故障抢修整备效率的目标, 实现区域供电可靠性再提升。

**关键词:** 配网无人机; 网格化巡检; 行波故障定位; 故障特巡

中图分类号: TM764

DOI: 10.13882/j.cnki.ncdqh.2503A049

CSTR: 32400.14.ncdqh.2503A049

## Research on Fault Inspection of Distribution with Drones Based on Traveling Wave Positioning Technology

HU Zheqian\*, XIA Hongjun

(State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd. Hangzhou Yuhang District Power Supply Company, Zhejiang Hangzhou 311100, China)

**Abstract:** At present, multi-rotor drones have been widely used in the inspection of overhead power lines in distribution networks, assisting line maintenance personnel in improving the overall inspection quality and efficiency. At the same time, traveling wave fault positioning technology has also been effectively promoted in overhead power lines with large power supply radius and complex operating environment, assisting fault repair personnel in significantly reducing fault location time. This article mainly studies the application of unmanned aerial vehicles in grid based inspection of distribution networks, combined with traveling wave fault location technology, to implement a rapid special inspection plan for overhead line faults in distribution networks, in order to achieve the goals of voltage drop fault search time, improve fault repair and maintenance efficiency, and further enhance the reliability of regional power supply.

**Keywords:** distribution-drone; grid based inspection; traveling wave positioning technology; fault inspection

## 0 引言

近年来, 随着多旋翼无人机技术升级和设备迭代, 其在飞控精度、续航时长、信号传输稳定性、复杂工况运行可靠性等综合性能方面均得到极大提升。因其具备空中俯视视角、航线定制编辑、挂载可拓展采集维度、平台易接入智能应用等技术优势, 在配网架空线路巡视、故障特巡、工程验收、安全稽查等各细分业务场景得到广泛应用<sup>[1-2]</sup>。目前, 无人机在配网故障特巡中的应用普遍为抢修人员现场操作无人机辅助查看杆塔上方难以发现的故障点, 其无法脱离现场人员操作, 不能第一时间指导抢修人员定位故障点并拍摄故障设备照片。本文结合行

收稿日期: 2025-03-20

波故障定位技术、无人机网格化巡视技术, 探索配网无人机智能自主故障快速特巡, 实现无人机在配网架空线路故障查找、处置中应用的新突破<sup>[3]</sup>。

## 1 配网行波故障定位技术

配网行波故障定位装置是集工况监测、隐患预警、故障精确定位 3 种功能于一体的配网线路监测终端设备, 主要安装于架空线路首末端及大分支线路首末端, 其以零序电压、暂态电压、电压突变等多参量作为故障录波启动条件, 记录并综合计算后得出精准研判故障点<sup>[4]</sup>。

线路故障发生时, 故障点处会产生瞬时高频扰动, 伴随发生高频行波, 沿线路向两侧传播。行波故障定位装置通过对比线路和监测点工频电流和零

序电流特征,实现故障选线及区间定位;通过采集线路异常放电和故障时刻的高频行波,进行特征提取分析,实现线路隐患预警及故障精确定位<sup>[5]</sup>。

因故障点产生的高频行波传播速度恒定,行波故障定位装置可通过测量行波达到设备时差,精确计算故障点位置。

基于行波双端定位原理,结合线路上各杆塔档距数据,可实现故障点精准定位到杆塔。图1为故障精确定位原理图,当线路某处发生故障时,故障点会向两端产生两个方向相反的故障行波,两个行波故障定位装置会分别在 $T_m$ 和 $T_n$ 时刻监测到隐患点产生的行波。若已知两个行波故障定位装置间的距离为 $L$ ,则可通过行波在导线上的传播速度 $v$ ,分别计算出故障点距离装置M的距离 $l_m$ 和装置N的距离 $l_n$ :

$$l_m = \frac{(L + v(T_m - T_n))}{2}$$

$$l_n = \frac{(L + v(T_n - T_m))}{2}$$

综合行波故障定位装置M、N装设杆塔编号,故障点距离 $l_m$ 、 $l_n$ ,线路上各杆塔间档距数据,校核后即可得到线路故障点精准杆塔编号。

基于行波监测原理的接地故障监测不受线路结构、运行方式、过渡电阻等因素影响,经试验验证,其对单相接地故障的耐过渡电阻能力可达 $5\text{ k}\Omega$ ,且在各种类型的线路中均可实现高阻单相接地监测<sup>[6]</sup>,见图2。

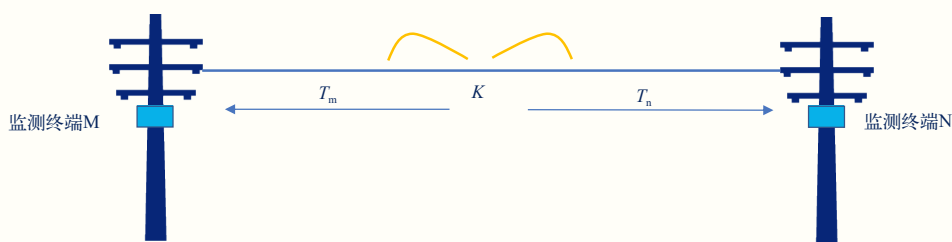


图1 故障精确定位原理图

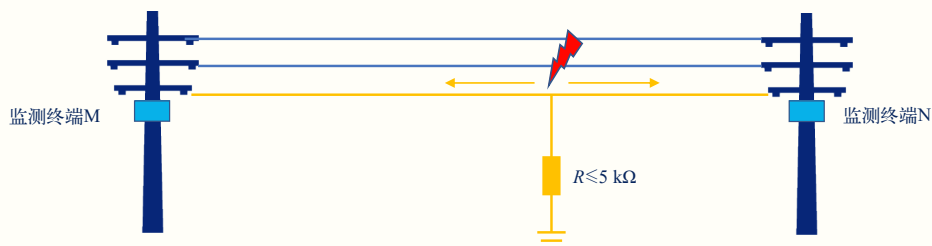


图2 高阻单相接地监测

## 2 配网无人机网格化巡视系统

配网无人机网格化巡视系统指以无人机固定机场为核心,无人机续航支持最大巡视及安全返程距离为覆盖半径的巡视作业系统,其主要由巡视无人机设备、无人机机场、无人机调度管控平台组成,以加载预设航线及巡视模式,实现机场网格覆盖范围内无人机配网架空线路全自主巡视<sup>[7-8]</sup>。

### 2.1 巡视无人机设备选型

配网无人机网格化巡视系统中选用的无人机应具备实时通信、精准定位能力,拥有足够的电池续航以覆盖巡视范围,可挂载合适的云台设备以满足巡视作业过程中各类照片采集要求,同时其机身强度及防护等级应保证在一定条件复杂工况及稍恶劣天气下正常运行<sup>[9]</sup>。

精准定位方面,主要采用支持RTK定位服务的无人机机型,以实现巡视航线准确执行、杆塔顶部巡视 $\text{cm}$ 级定位,其中RTK定位模式主要使用网络RTK模式。实时通信方面,主要采用LTE网络服务,具体可使用无人机机载计算单元内置LTE网络模块或无人机直接挂载LTE网络模块,以实现实时飞控及巡视照片、视频实时回传。电池续航方面,宜满足 $35\text{ min}$ 及以上的有效巡视时长,以实现 $5\text{ km}$ 巡视作业半径覆盖。挂载设备方面,宜采用双光云台组件,以同时满足可见光、红外巡视照片拍摄。机身防护等级方面,宜采用IP45及以上防尘防水等

级。综合以上条件，本方案选用大疆经纬 M300-RTK 无人机。

## 2.2 无人机机场

无人机机场是专为无人机提供停驻、通信、充电、维修及任务执行的一体化设施，核心组件包括自动起降平台、充电/换电系统、环境监测设备和远程控制系统<sup>[10]</sup>，其应建设于配网架空线路密集处，宜为高故障、高时户数架空线路或运行年限较长、运行环境复杂、在运设备老旧的架空线路集中处，以实现机场覆盖范围内巡视效益最大化。

## 2.3 无人机调度管控平台

无人机调度管控平台主要用于对多无人机、配套机场及飞行任务进行统一调度管理并进行实时监控，覆盖飞行任务全周期（规划—执行—监控—分析）管理，实现无人机的自动化、网络化调度<sup>[11]</sup>。其部署于安全的网络大区中，平台主要由设备管理、航线管理、任务管理、作业监控以及采集数据管理等模块组成，同时其可通过接口接收经安全链路传输的实时外部数据，如实时气象信息、故障点位及范围信息等。

配网巡视管理人员可应用无人机调度管控平台对架空线路无人机巡视航线及巡视模式进行管理。主要根据架空线路巡视周期、运行状况、投运年限、近期故障发生情况等因素综合调整巡视策略，进行巡视航线编制，分区段自定义巡视模式，有效提升无人机巡视针对性<sup>[12]</sup>。

## 3 基于行波故障定位技术的配网无人机网格化故障特巡

配网故障处置时长直接影响供电可靠性指标，其主要可分为故障研判、故障特巡、故障隔离、故障抢修、恢复供电 5 个环节。本文研究的基于行波故障定位技术的配网无人机网格化故障特巡方案主要针对故障研判、故障特巡环节进行改善，较传统故障处置模式大幅减少对应时间，显著提升故障整体处置效率。

### 3.1 技术实现

本文研究的方案综合行波故障定位技术、配网无人机网格化巡视系统，在配网架空线路故障发生后迅速得到故障点精准定位，应用无人机调度管控平台可将故障线路的巡视航线进行智能切分，生成仅对故障精准定位点附近杆塔执行故障特巡的作业

任务，经现场环境、气象条件评估确认后，即可快速执行无人机故障特巡。

### 3.2 故障处置模式对比

传统故障处置步骤通常如下：故障范围研判；现场故障特巡；故障情况确认；故障隔离；抢修方案制定及人员、物资准备；现场故障抢修；恢复供电。

应用本文研究方案的故障处置具体步骤如下：故障点精准定位；故障特巡航线生成；无人机巡视安全确认；无人机故障特巡；故障情况确认；故障隔离；抢修方案制定及人员、物资准备；现场故障抢修；恢复供电。

对比传统故障处置步骤，应用本文研究方案的故障处置在故障研判、故障特巡环节中具备显著优势，见表 1。

表1 故障处置步骤对比

故障处置环节	传统故障处置模式	应用本文方案故障处置模式	本文方案较传统模式优势
故障研判	故障范围研判	故障点精准定位	精准定位到杆塔
故障特巡		故障特巡航线生成	
故障特巡		无人机巡检安全确认	
故障特巡	现场故障特巡	无人机故障特巡	应用无人机直飞故障现场；故障特巡范围根据精准定位大幅缩减；空中俯拍视角更清晰
故障特巡	故障情况确认	故障情况确认	
故障隔离	故障隔离	故障隔离	
故障抢修	抢修方案制定及人员、物资准备	抢修方案制定及人员、物资准备	
故障抢修	现场故障抢修	现场故障抢修	
恢复供电	恢复供电	恢复供电	

在故障研判环节中，传统故障处置模式下，故障范围研判主要依赖配网架空线路上安装的故障指示器、智能故障指示器、智能开关等监测设备根据线路上过流信号进行故障范围研判，范围精度为 2 组监测设备之间，或线路（或分支线路）末端监测设备后段，受线路上安装的监测设备密度限制；本文研究方案应用行波故障定位技术，可将故障点精准定位到杆塔，具备显著精度优势。

在故障特巡环节中，传统故障处置模式下，需抢修人员赶赴故障现场根据研判故障范围信息查找故障点，查明故障原因及现场情况后汇报抢修指挥人员，并依据现场情况组织协调抢修工作；本文研究方案应用配网无人机网格化巡视技术，根据行波故障定位装置获取的精准定位信息，直飞故障点附近杆塔，大幅压降了现场排查的时间，同时应用无人机空中俯拍视角可对故障点进行清晰拍摄，抢修指挥人员可直接根据无人机回传现场照片开展抢修工作组织协调，使抢修方案制定及抢修人员、物资筹备工作流程整体提前。

### 3.3 现场应用情况

目前该方案已于杭州市余杭区配网无人机示范区内部署，在无人机机场网格覆盖范围内，实现架空线路故障情况确认平均时长压降至 12.8 min，较传统故障处置模式减少 25.9 min，大幅提升故障整体处置效率，见表 2。

表2 故障点查找平均时间对比 min

故障处置过程	传统故障处置模式	本文方案	平均压降时长
故障研判	1.0	1.0	0
故障特巡航线生成	—	0.5	-0.5
无人机巡检安全确认	—	0.5	-0.5
到达现场	22.3	7.7	14.6
现场故障特巡	15.4	3.1	12.3
故障情况确认平均时长	38.7	12.8	25.9

## 4 结论及展望

本文创新结合行波故障定位技术、无人机网格化巡视技术，实现配网无人机机场巡视覆盖范围内故障研判、现场排查效率突破。在配网生产条件下，受限于设备装设成本，行波故障定位装置覆盖线路有限，本文研究故障特巡方案可推广至网格内所有安装智能故障器、智能开关的线路，在其综合研判得到的故障范围内执行无人机故障特巡，整体提升区域供电可靠性指标。

### 参考文献

- [1] 李宁. 无人机巡检技术研究与应用[J]. 电子技术与软件工程, 2023(7):282-283.
- [2] 徐睿, 刘云. 配电网无人机智能巡视模式建设[J]. 电气时代, 2024(1):110-111.

- [3] 邹林勇. 利用故障行波固有频率的单端行波故障测距法[D]. 西南交通大学, 2009.
- [4] 宋思稼. 基于单端行波信号分析的混联配电网故障定位研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2019.
- [5] 郭书友. 馈电线路行波检测与特征提取[D]. 北京化工大学, 2007.
- [6] 郭俊宏. 配电网单相接地故障定位及其信息处理技术的研究[D]. 华北电力大学(北京), 2006.
- [7] 贾小龙, 张岩, 黄博胜, 等. 无人机电力巡线装置控制系统设计[J]. 电子世界, 2021(6):144-145.
- [8] 李俊鹏, 张继伟, 余艳稳. 基于电网行业巡线无人机智能地面监控系统研究[J]. 信息技术, 2020(6):135.
- [9] 蔡京霖. 电力巡检特殊应用环境下无人机飞行控制系统设计及应用分析[J]. 智慧中国, 2023(10):75-76.
- [10] 李晓辉, 张路, 刘传水, 等. 电力巡检中的无人机群路径规划算法[J]. 计算机系统应用, 2022(3):242.
- [11] 王瑞群, 欧阳权, 段朝伟, 等. 基于强化学习的无人机全自主电力巡检[J]. 机械与电子, 2021(12):43-45.
- [12] 郭建勋, 王立生, 阮利生. 混合型电网巡线无人机的应用分析[J]. 电子世界, 2020(23):13-14.

### 作者简介

胡哲千(1990—)，男，硕士研究生，工程师，主要从事配网运行、生产侧优质服务、配网无人机应用创新、配网设备技术监督等专业管理工作，E-mail: 1002628511@qq.com。

(责任编辑: 张峰亮)

### 资讯

#### 河南商丘公司：升级直流系统监控功能

2025年7月1日，国网河南商丘供电公司变电运维中心依托新一代集控系统完成直流系统告警监视功能升级。

直流系统作为变电站的“心脏”，为继电保护、操作控制等关键功能提供可靠电源，其稳定运行至关重要。仅2025年6月，国网商丘供电公司监控端发现并处置直流系统异常情况8起。

为迎峰度夏期间筑牢直流系统安全防线，国网商丘供电公司在原有D5000系统直流集中监视基础上，创新融入直流遥测数据快捷查看与遥测数据越限告警等功能。升级后，值班人员可及时发现直流异常告警信息，快速查看正对地、负对地电压电阻等关键数据，全面感知直流系统运行工况，确保异常情况早发现、快处置。

国网商丘供电公司将持续优化直流系统集中监控画面，对异常信息重点监视，为迎峰度夏期间电网安全稳定运行提供技术支撑。

信息来源：国网河南省电力公司