

输配电线路固定翼无人机隐患前端识别系统研究及应用

唐锐 谢亚婕 崔家瑞 姚平 刘鑫

国网新疆电力有限公司巴州供电公司, 新疆 库尔勒 841000

[摘要]伴随智能电网建设的持续深入, 输配电线路的平稳安全运行面临日趋严峻的挑战, 传统人工巡检模式效能欠佳、风险较大、覆盖范围受限, 无法契合现代电力系统精细化运维的要求。文章聚焦于输配电线路巡检过程中存在的隐患识别困境, 开展探究并设计出一种基于固定翼无人机的前端隐患识别系统。该系统借助整合高清摄像、红外热成像、激光雷达等传感器, 融合边缘计算以及深度学习算法, 做到了对线路设备缺陷、通道环境异常等隐患的实时、精准判别与定位。实际应用验证, 该系统明显增进了巡检效率与隐患发现比例, 减少了运维开支, 为输配电线路的智能巡检给出了有效的技术解决办法。

[关键词]输配电线路; 固定翼无人机; 隐患识别; 前端系统; 智能巡检

DOI: 10.33142/hst.v8i12.18464

中图分类号: TM755

文献标识码: A

Research and Application of Front-end Identification System for Hidden Dangers of Fixed Wing Unmanned Aerial Vehicles in Power Transmission and Distribution Lines

TANG Rui, XIE Yajie, CUI Jiarui, YAO Ping, LIU Xin

Bazhou Power Supply Company of State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Korla, Xinjiang, 841000, China

Abstract: With the continuous deepening of smart grid construction, the smooth and safe operation of transmission and distribution lines is facing increasingly severe challenges. The traditional manual inspection mode is inefficient, risky, and has limited coverage, which cannot meet the requirements of modern power system refined operation and maintenance. The article focuses on the identification dilemma of hidden dangers in the inspection process of transmission and distribution lines, explores and designs a front-end hidden danger identification system based on fixed wing unmanned aerial vehicles. The system integrates high-definition camera, infrared thermal imaging, laser radar and other sensors, and integrates edge computing and deep learning algorithm to achieve real-time and accurate identification and location of hidden dangers such as line equipment defects and channel environment abnormalities. Practical application verification shows that the system significantly improves inspection efficiency and hazard detection ratio, reduces operation and maintenance expenses, and provides an effective technical solution for intelligent inspection of transmission and distribution lines.

Keywords: transmission and distribution lines; fixed wing unmanned aerial vehicle; hazard identification; front end system; intelligent inspection

引言

输配电线路作为电力系统的“主动脉”, 其可靠运行直接影响到社会生产与生活的平稳, 线路布局广泛、所在环境繁杂。经常受到自然灾害、设备年久、外力损害等因素的干扰, 造成隐患屡屡发生。传统依靠人工的巡检模式不仅劳动负荷大、时长多, 而且在山区、沼泽等恶劣地势中执行困难, 难以达成全面、及时的隐患排查。无人机技术特别是固定翼无人机, 凭借其续航时长可观、巡检区域广泛、应对复杂环境能力突出等长处, 在电力巡检领域呈现出极大潜力。因此, 怎样达成隐患的实时、前端智能识别, 仍是当前研究与应用中的关键难题。本文意在探究一种面向输配电线路的固定翼无人机隐患前端识别系统, 借助多源数据整合与智能剖析, 增强隐患识别的自动化与智能化水准, 为电力系统安全运行维护给予技术保障。

1 系统总体架构与关键技术

1.1 系统硬件组成与集成设计

固定翼无人机输配电线路隐患智能巡检系统的硬件架

构, 是一个为契合长距离、高成效、多维度探测需求而高度整合的技术平台, 其关键飞行平台选用拥有长时间续航与大范围作业半径特点的固定翼无人机, 诸如翼展超出 2.5m、续航时间可达到 3h 以上的机型。该平台整合了高精度差分 GPS 与惯性导航系统, 拥有全自动化的弹射/滑跑起飞以及伞降/滑跑降落功能, 还可按照杆塔坐标自动生成最佳巡检航线, 飞行控制精准度达到亚米级。机载任务载荷身为系统的感知中枢, 凭借一个自主研发的轻型三轴增稳云台, 紧密整合了三类专业传感器: 一部拥有 2000 万像素的可见光变焦式相机, 可以实现高清影像拍摄与视频记录; 一台分辨率达到或超过 640×512 像素、热灵敏度高于 50mK 的非制冷红外热成像仪; 以及一部测距精准度高于 3cm、扫描频次达 300kHz 的轻便型激光雷达^[1]。

为保证海量数据与飞行控制的实时对接, 系统选用融合通信办法, 遥控指令、飞行状况以及轻量级预警资讯借助覆盖范围宽广的 4G/5G 公网实施传输; 而具备高带宽的可见光视频流、原始红外热像数据和激光雷达点云, 借

助具备大带宽、低延迟特性的专用数传电台（运行在 1.4GHz 或 2.4GHz 频段，传输速度能够达到 20Mbps 以上）开展实时下传。整个载荷系统借助精细的轻量型架构与集成化供电管控设计，总体重量把控在 3 公斤以内，在保障传感器平稳运行的同时，最大程度地降低了对无人机续航及机动能力的干扰，达成了多源异构数据在空中的同步收集、实时处置与可靠传送，形成了前端智能感知的坚实物理支撑。

1.2 边缘计算与前端智能处理框架

为应对输电线路巡检过程中海量数据实时处理面临的挑战，系统创造性地采用了“云-边-端”协同的边缘计算架构。其关键在于在无人机端整合一台具备高处理性能、低能源消耗的嵌入式 AI 处理器，比如配备 NVIDIA Jetson AGX Orin 或同等规格的计算模组。该处理器具备大于 200TOPS 的 AI 运算能力，还集成了 16GB 以上的高速运存，机载的轻量级 AI 模型历经深度优化与裁剪，体积可缩小至原始模型的五分之一以下，在飞行进程中可以同步接收来自可见光相机、激光雷达的数据流，以接近每秒 15 帧的处理速度开展实时在线推理，切实解决了单纯依赖云端回传造成的分钟级延迟问题。

依托强劲的前端计算能力，系统实现了对关键缺陷的即刻检测。针对可见光图像而言，模型能够实时检测出导线表面的断股与散股（检测准确率>95%）、绝缘子伞裙的损坏与缺损；针对激光雷达所采集的点云数据，可即时算出杆塔的倾斜角度，同时迅速评定树障距离。在实施本地实时剖析后，系统并非回传初始 GB 级数据，而是借助智能压缩与特征提取手段，仅把隐患的类别、置信度、精准的 GPS 坐标、少量关键的特征图像块（像仅包含缺陷的 512×512 像素区域）以及量化后的参数（例如树障距离、倾斜角）等 KB 级的关键信息概要。经由数传链路传送至地面站，这种模式把数据回传带宽的需求减少了 90% 以上，让地面人员在无人机飞过隐患点后的 2~5s 内就能收到告警，达成了从“数据采集”到“隐患告警”的秒级闭环，显著提升了巡检作业的即时性与综合效率^[2]。

1.3 多源数据融合与精准定位技术

系统借助基于激光雷达与 GPS/IMU 的组合式导航手段，达成厘米级精度的线路设备定位。借助对可见光、红外和点云数据实施时空配准与融汇，搭建线路走廊的三维数字化模型。基于此前提，运用目标检测与分割的算法，对隐患目标开展精准提取和标注工作，同时把它和地理坐标建立关联，为后续的维修决策提供确切的位置信息。

2 隐患智能识别算法与模型优化

2.1 基于深度学习的视觉隐患检测

为提高输电线路无人机智能巡检的自动识别水平，研究率先系统地搭建了一个大规模、高品质的典型缺陷图像样本库。该库针对实际巡检中最为常见的隐患种类，用心收集并标记了包含导线缠绕异物（像风筝、塑料膜）、防震锤与线夹等金具的松动或丢失、绝缘子串的闪络损坏

（包含电弧灼烧与破裂），以及杆塔塔材生锈、鸟巢构筑等总计超出 10,000 张高清可见光与红外图像，样本库充分顾及了不同光照状况（白天、黄昏）、天气情形（晴、雾、小雨）和复杂背景（例如山林、农田、城市）的多样性，为模型的稳定性训练搭建了坚实基础。

依托该样本库，研究采用且深度优化了先进的 YOLOv5 目标检测算法框架，主要改进包含：向主干网络当中引入卷积块注意力模块，让模型可以进一步聚焦于图像里的隐患关键区域；对特征金字塔网络（FPN）与路径聚合网络（PAN）结构进行了优化，达成了更具成效的多尺度特征融合，大幅增强了对小尺寸目标（如销钉级金具零件）以及和背景极度相似的缺陷（如灰色绝缘子上的裂纹）的识别能力。500 张单独标注图像的测试集合上开展评估，经优化的模型于 0.5 的 IOU 阈值条件下，其平均精度均值（mAP）达到了 92.7%，其中对“绝缘子闪络”和“导线异物”等关键缺陷的检测精确率（AP）都超过了 95%，这些量化数据显示，该模型具有极高可靠性，已可满足实际线路巡检中高效、精准的自动化缺陷排查要求。

2.2 红外热像分析与异常温度预警

借助红外热成像手段实施的输电线路状态监测，重点在于打造精准的设备温度状态分析与预警机制。凭借装载高分辨率红外热像仪的无人机也或固定监测器具，定时收集线路中导线接续管、耐张线夹、绝缘子串、避雷器等关键部件的温度场分布数据。借助搭建动态的温升计算模型，将所测的设备表面温度跟同一时间的环境基准温度、历史同工作状况下的温度数据进行即时比对，计算出该设备的实际温升与相对温差，由此有效剔除环境跟负荷变化产生的影响，精确反映设备自身的老化或接触不良等故障^[3]。

在识别阶段，算法一开始采用自适应阈值分割手段，根据图像直方图动态设定分割阈值，以消除不同季节、时段中环境背景热辐射差异带来的干扰。借助区域生长算法对初步切分出的潜在高温区域进行精准轮廓提取，甄选出真正的“异常热点”（如某相导线接头温度超出其他两相 15K 以上，或绝缘子单片温度出现异常升高）与日光反射之类的干扰。识别出的异常数据将同该线路段的实时负荷电流、环境风速等参数进行多元融合剖析，系统据此构建三级预警体系：当监测点温度上升超过 30K 却还未达到设备材料的极限状况时，给出一级（注意）预警；若温升超出 50K 或者相对温差超出 95% 的情况出现，发出二级（严重）预警并提议安排检修；当温度逼近安全阈值范围（如导线接头温度升至 80℃）时，发出三级（紧急）警报并斟酌紧急削减负荷。该技术体系的施行，让原本依赖人工手持测温的“点检”模式转变为自动化、智能化的“面检”与预估，明显提高了预防因连接点过热熔断、绝缘子劣化击穿等引发故障的本领。

2.3 激光雷达点云处理与通道环境建模

依托激光雷达开展的输电通道三维建模，该技术流程起

始于对原始海量点云数据开展精细化预处理。运用统计学滤波、半径滤波等算法消除飞行器噪声与大气悬浮物的干扰,且借助基于点云特征(像强度、回波次数、空间分布)的分类算法。借助基于点云特征(像强度、回波次数、空间分布)的分类算法,把点云自动划分成“导线”“杆塔”“植被”“地面”及“建筑物”等独立图层,分类精度可实现 95% 以上。精准抽取出来的导线点云,可用来拟合其三维空间中的悬链线方程,由此重塑线路在微风、不同负荷情形下的精确弧垂形态;杆塔点云可用于剖析其倾斜、形变状况。

在要素提取结束时,系统自主进行精准的空间距离剖析与风险评判。针对树木障碍隐患,算法核算每一处植被点云(尤其是树冠的最高点)与下方导线点云在垂直跟水平方向上的最小间距。当检测到任意距离小于预先设定的安全距离(例如,针对 110kV 线路设定为 3m)时,系统自动把该情况标记为树障隐患点,同时预估其需要修剪的体积。针对通道内的安全威胁而言,系统可识别并进行量化分析,像新建建筑物、临时施工吊臂、其他线路交叉跨越这类侵入物的空间位置、大小以及其与导线的最近间距。借助对动态收集的多期点云数据(像季度或者年度)加以比对,可达成对走廊内植被生长速率、施工活动进度的三维动态监测。此项技术能够让通道巡检效率提高 70% 以上,同时还可生成用于引导精准清障作业的树木砍伐量报告以及高风险侵入物预警地图,为线路的主动安全防护与长远规划提供具有厘米级精度的三维数据支撑^[4]。

3 系统应用实践与效能分析

3.1 典型区域巡检案例实施

在某山区 500 千伏输电线路巡检项目当中,本系统实现常态化安排与施行,固定翼无人机依照预设航线独立飞行,高效率实现约 100 公里线路的全范围巡检。系统借助前端智能识别组件,实时探测并锁定线路异常,累计精确识别出绝缘子自爆、导线上悬挂异物、杆塔基础遭受冲刷等安全隐患达 17 处,全部识别结果都经现场运维人员挨个核查,展现了系统在现实复杂场景下的高精度与可靠性。本次实践切实证明了系统在长距离、大范围输电线路巡检当中的实用性和可靠性,为后续规模化普及应用夯实了坚实基础。

3.2 巡检效率与经济效益评估

和传统人工巡检模式相比,本系统在效率和成效方面实现大幅提升,单次线路巡检所耗费的时间由原先的 5 天急剧缩减至 2h,隐患识别的精准率从约 70% 提高到 95% 以上。系统自动化作业不仅消除了巡检人员高空攀爬、野外行走带来的安全危机,又明显减少了相关安全防护装备与管理开支。按照实际运维数据的统计结果,该线路段自系统投入使用后,每年综合运维成本减少约 30%,经济效益十分突出,系统在增进电网运维智能化水准的同时,也为企业减少人力、压缩停电时段、保障供电安全性提供了有力保障。

3.3 系统局限性与改进方向

目前系统在应对恶劣天气状况时依然存在一定的短

板,像大暴雨、浓雾等情形下图像采集与辨认性能易受影响,并且对部分少见缺陷类型的泛化识别能力仍有欠缺,就这些问题而言,今后会不断完善:一方面采用抗干扰性能更佳的多源传感器,同时拓展包含多样缺陷、复杂天气的训练样本库,以此增强算法模型的稳定性与识别完整性;踊跃探索和无人机集群协同巡检、数字孪生仿真平台等先进技术的融汇。搭建具备动态察觉、智能剖析和自主决断能力的智慧化巡检体系,进一步提高系统在复杂工况下的适应性与整体运维质量^[5]。

4 结语

系统在硬件架构、数据处理及应用实践层面均呈现出优良性能,大幅提高了巡检效率与安全性,减少了运维成本。虽然在环境适应能力等层面依旧有待改进,但它作为电力智能巡检的重要技术途径,已呈现出广泛的应用潜力。未来伴随人工智能与无人机技术的不断进步,该系统有机会在电力系统及其他基础设施巡检领域起到更关键作用。

[参考文献]

- [1]杨爱银,黄伟,张坤,吴海涛,王东华.基于无人机巡检的输配电线路状态评估方法探讨[J].信息记录材料,2025,26(11):110-112.
 - [2]张婉婷.输配电线路无人机自主飞行技术及其在复杂环境中的应用[J].自动化应用,2025,66(6):121-124.
 - [3]黄志都,崔志美.固定翼无人机在输电线路防灾减灾中的应用[J].电工技术,2021(24):184-185.
 - [4]阮峻,陶雄俊,韦新科,李红盛.基于固定翼无人机激光雷达点云数据的输电线路三维建模与树障分析[J].南方能源建设,2019,6(1):114-118.
 - [5]周世祺,雷博.无人机技术在县域配网巡检中的应用[J].中国电力企业管理,2018(17):50-51.
- 作者简介:唐锐(1987.8—),毕业院校:新疆工程学院,所学专业:电气工程及其自动化,当前就单位名称:国网新疆电力有限公司巴州供电公司,就单位职务:国网巴州供电公司输电运检中心航巡班班长,职称级别:工程师;谢亚婕(1998.6—),毕业院校:华北电力大学(北京),所学专业:测控技术与仪器,当前就单位名称:国网新疆电力有限公司巴州供电公司,单位职务:输电线路检修工作负责人,职称级别:高级工/助理工程师;崔家瑞(1998.4—),毕业院校:塔里木大学,所学专业:电力自动化技术,当前就单位名称:国网新疆电力有限公司巴州供电公司,就单位职务:班员;姚平(1995.10—),毕业院校:新疆工程学院,所学专业:机械设计制造及其自动化,当前就单位名称:国网新疆电力有限公司巴州供电公司,就单位职务:专责,职称级别:助理工程师;刘鑫(1995.12—),毕业院校:青海大学昆仑学院,所学专业:电气工程及其自动化,当前就单位名称:国网新疆电力有限公司巴州供电公司,就单位职务:输电运检一班副班长,职称级别:初级。