

输电线路无人机巡检缺陷识别与智能分类技术研究

丁卓群¹ 石珊²

1. 国网武汉供电公司输电运检分公司 湖北武汉 430000

2. 国网武汉供电公司变电运维分公司 湖北武汉 430000

摘要: 输电线路是电力系统中能源输送的主要载体,它的安全稳定运行关系到社会经济发展和人民生活用电。传统的手工巡检模式存在效率低、风险大、覆盖面不广等缺点,无人机巡检因为灵活性高、作业范围广、成本低等优点成为行业主流。本文以输电线路无人机巡检缺陷识别和智能分类技术为研究对象,说明技术研究的意义,分析现有技术的发展现状,给出相应的优化建议,为电力输电线路巡检提供智能化支持,把电网运维由“人工为主”变为“智能自主”,提高电网运维的精细化、高效性。

关键词: 输电线路; 无人机巡检; 缺陷识别; 智能分类技术

电力工业是国民经济的基础性产业,输电线路是电力能源传输的动脉,分布范围广、地理环境复杂,长期暴露在自然环境中,易受雷击、覆冰、大风、鸟害等影响产生各种缺陷,若不能及时发现并处理将导致线路故障,造成大面积停电。传统的以人工巡检为主的方式需要工作人员登塔或者徒步巡查,劳动强度大、效率低,并且存在高空坠落、触电等安全隐患。随着无人机技术、人工智能技术的发展,无人机巡检在输电线路运维中得到了广泛应用,但是缺陷识别主要依靠人工判读图像,存在漏判、误判、效率低的问题。因此研究输电线路无人机巡检缺陷识别与智能分类技术,提高巡检质量、降低运维成本、保证电网安全有着非常重要的现实意义。

1. 输电线路无人机巡检缺陷识别与智能分类技术研究的意义

1.1 保障电网安全稳定运行的核心支撑

输电线路缺陷及时发现并且妥善处理是防止线路故障,保证电网安全的重要环节。无人机巡检加智能缺陷识别技术,可以对导地线断股、绝缘子破损、金具松动等各种缺陷进行快速捕捉并准确判定,极大地缩短了缺陷的发现周期,防止缺陷从“小隐患”发展成“大故障”。利用实时识别、分级预警的方式,给运维人员提供缺陷的位置及严重程度信息,帮助运维人员快速开展抢修工作,减少线路停电时间及故障损失,为电网的安全稳定运行筑牢技术防线^[1]。

1.2 提升输电线路巡检效率与质量

传统的手工巡检模式下,一名运维人员一天只能完成

10~15公里的线路巡检,并且受到地形、天气等条件的限制,无法做到对整条线路的无死角巡检。无人机巡检能冲破地理环境限制,用每小时30至50公里的速度完成巡检工作,工作效率得到3到5倍的提高。智能缺陷分类技术可以自动对无人机采集的图像视频进行处理分析,从大量的数据中精准地提取缺陷信息,消除人工判读时由于疲劳、经验不足而造成的漏判、误判问题,大大提高巡检数据处理效率和缺陷识别准确率^[2]。

1.3 降低输电线路运维成本与安全风险

人工巡检要投入大量的人力、物力资源,高山、丘陵、沼泽等复杂的地形区还要架设临时通道,运维成本高。无人机巡检只需要一两个人来完成作业,不用大量人力物力投入,不需要通道搭建,从而大大减少人力物力的成本。无人机可以代替人工完成高空、复杂地形区域的巡检工作,减少运维人员直接接触高压线路和危险环境的机会,从根本上杜绝高空坠落、触电等安全事故的发生,保证运维人员的人身安全^[3]。

1.4 推动智能电网建设的重要举措

智能电网的构建就是要把电力系统信息化、自动化、智能化。输电线路巡检属于电网运维的重要部分,它的智能化程度影响着智能电网的建设进度。无人机巡检缺陷识别与智能分类技术,依托无人机、人工智能、大数据等先进技术,完成巡检数据的自动采集、智能分析、高效应用,打破传统巡检模式的信息孤岛,创建起“巡检-识别-分析-决策-

运维”的全流程智能化体系，给智能电网调度、运维决策赋予数据支撑，推进智能电网建设向纵深发展^[4]。

2. 输电线路无人机巡检缺陷识别与智能分类技术发展现状

2.1 无人机巡检硬件设备技术现状

目前用在输电线路巡检上的无人机主要有多旋翼无人机、固定翼无人机和复合翼无人机。多旋翼无人机操作灵活、可以悬停作业，适合近距离精细化巡检；固定翼无人机续航时间长、作业范围广，适合大范围线路普查；复合翼无人机结合了两者优点，既可以续航又可以灵活作业。硬件上无人机搭载的传感器已经从单个可见光相机发展成红外热像仪、激光雷达、紫外成像仪等多种传感器融合的方案，可以对各种类型的缺陷进行检测。但是仍存在无人机在复杂环境下的续航能力不足、抗风抗干扰能力差、多传感器数据同步融合精度不高等问题。

2.2 缺陷识别算法技术研究现状

缺陷识别算法是智能分类技术的核心，目前主要是基于传统图像处理算法和深度学习算法。传统的图像处理方法，使用边缘检测、阈值分割等方式获取缺陷特征，在简单背景情况下识别效果较好，但是它对复杂背景、光照变化等环境适应能力差，识别精度低。深度学习算法由于具有很强的特征学习能力，已经成为了目前缺陷识别的主要方法^[5]。但是该类算法仍存在缺陷，例如对小尺寸缺陷（导地线微裂纹等）识别精度低，对于不同种类的缺陷泛化能力弱，模型训练需要大量标注数据。

2.3 缺陷智能分类技术应用现状

目前缺陷智能分类主要按照缺陷类型、严重程度等来进行分类，常见的缺陷分类有导地线缺陷、绝缘子缺陷、金具缺陷、杆塔缺陷四大类，每类缺陷又细分为不同的子类型和严重等级（一般缺陷、严重缺陷、危急缺陷）。部分电力运维单位已经搭建起无人机巡检智能分析平台，可以完成巡检数据的自动上传、智能识别和分类统计^[6]。但是应用过程中仍然存在分类标准不统一、不同地区线路缺陷特征不同导致分类精度下降、分类结果与运维需求匹配度不高、不能完全满足实际运维工作精细化的要求等问题^[7]。

2.4 技术发展面临的行业环境现状

随着国家对于智能电网建设的大力支持，电力行业对于无人机巡检智能化技术的需求变得十分迫切，政策层面也

出台了许多文件来推动电力巡检技术创新以及智能化转型。科研机构、高校和电力企业的合作越来越多，开展技术研究与试点应用，取得了较多技术成果。但是行业整体还存在着技术标准不健全、数据共享机制不完善、智能化技术落地成本高、运维人员技术素养低等问题，限制了缺陷识别与智能分类技术的大规模、常态化应用。

3. 输电线路无人机巡检缺陷识别与智能分类技术优化策略

3.1 算法模型优化策略

针对目前缺陷识别算法小尺寸缺陷识别精度低、泛化能力弱、计算成本高等问题，优化算法模型结构和训练方式。一方面用 MobileNet、ShuffleNet 等轻量化网络对 YOLOv8、Faster R-CNN 等主流目标检测算法做剪枝和重构，压缩模型参数量、降低计算复杂度，用特征金字塔网络加强导地线微裂纹、金具小变形等小尺寸缺陷的特征提取能力，保证识别速度与精度的平衡。另一方面，用 CBAM 通道注意力机制和空间注意力机制让模型去关注缺陷的地方，减少复杂的背景（植被、云层等）干扰结果。利用迁移学习技术，用 ImageNet 等通用数据集预训练基础模型，用输电线路缺陷小样本数据微调模型，用半监督学习方法扩充有效训练样本，大大提高了模型对不同电压等级、不同地理环境下输电线路缺陷的泛化能力^[8]。

3.2 数据质量提升策略

高质量数据为缺陷识别和智能分类提供基础条件，在数据采集、标注、预处理的全过程中都要进行精细化管理。数据采集阶段按不同的缺陷种类（绝缘子破损、导地线断股等）优化无人机飞行高度、速度、拍摄角度，在雨雪、大雾等天气条件下调整相机的曝光参数和红外热像仪测温范围，使得图像纹理清晰、缺陷特征明显。同时采集可见光、红外、激光雷达三种类型的数据，给缺陷全方位特征提取提供数据支持。数据标注环节制定包含缺陷类型、位置、严重程度的标准化标注手册，用“机器预标注 + 人工初标 + 多人交叉审核”的方式，建立标注质量评分体系，对标注错误率超过 5% 的批次重新标注，保证标注数据的准确性、一致性。数据预处理方面，使用自适应直方图均衡化、高斯滤波对图像增强和去噪，采用旋转、翻转、随机裁剪、亮度对比度随机调整等方式进行数据扩充，结合红外与可见光图像融合，得到多模态特征数据，增强模型对复杂环境下缺陷的适应性^[9]。

3.3 硬件设备适配策略

根据无人机巡检硬件在复杂环境下性能的瓶颈，做出相应的适配优化和技术升级。续航方面，用高能量密度的锂硫电池取代传统的锂电池，并且加上太阳能薄膜电池辅助供电系统，配合智能电池管理软件随时监控电池状况并调整充放电节奏，把多旋翼无人机的飞行时长由原来的 20 – 30 分钟增加到现在的 45 – 60 分钟；而且利用路径规划算法不断优化，避开重复飞行和无用航线，减少能耗。对无人机通信模块做电磁屏蔽，采用跳频通信、加密传输的方式抵抗高压线路的电磁辐射干扰，在山区、城市密集区等复杂电磁环境下的巡检数据稳定传输。多传感器适配上开发纳秒级的时间同步、毫米级的空间校准模块来解决可见光、红外、激光雷达数据采集不同步、空间错位的问题，使多个传感器能精准对接，进而达到多源数据融合的目的；推进设备模块化设计，使传感器接口标准化并可以实现快速更换、升级操作，降低后期维护费用。另外，改善无人机避障系统，融合激光雷达和视觉避障技术，加强在复杂地形的自主避障水平，保证巡检作业安全^[10]。

3.4 落地应用保障策略

打破技术落地的最后一道障碍，建设全方位、多层次的落地应用保障体系。联合国家电网、南方电网等龙头企业、电力行业协会及科研院校，加快制定无人机巡检数据采集规范、缺陷识别分类分级细则、智能分析平台技术要求等一系列行业标准，规定好数据格式、接口协议、分类阈值等主要指标，使不同地区、不同单位的无人机巡检技术得以标准化且能够互联互通。在人才培育方面，形成了校企合作、岗中培训、技能竞赛的阶梯式人才培养方案；同高校合作创建人工智能、无人机应用等专业，定向培养复合型技术人才；定期开展运维人员智能化技术培训，内容包括无人机操作、智能平台操作、缺陷识别结果分析等实践操作能力，用技能竞赛的形式以赛促学，提高一线员工技术应用水平。平台建设上，“边缘计算 + 云端协同”智能分析云平台，巡检现场设置边缘计算节点，对巡检数据实施实时预处理和初步识别，削减云端传输压力和延迟，云端平台担当大数据储存，模型训练改良，缺陷统计剖析，运维决策支撑等任务，融合 GIS 地理信息系统，做到缺陷位置可视化标注并自动创建运维工单，打通“巡检 – 识别 – 分析 – 决策 – 运维 – 反馈”全链条闭环管理，促使技术成果切实变成电网运维效能。

结束语：

综上所述，输电线路无人机巡检缺陷识别与智能分类技术是电力巡检智能化转型、电网安全稳定运行的支撑。本文通过对技术研究的意义以及发展现状的分析，提出了算法模型优化、数据质量提升、硬件设备适配、落地应用保障等一系列的优化策略。人工智能、无人机以及大数据等技术不断的进步，输电线路巡检会进入自飞行的全程智能化、智能识别的全程智能化、自动分类的全程智能化、精准决策的全程智能化。技术创新成果要转化，行业标准应用要健全，技术可靠实用经济，为智能电网发展提供强劲动力，促进电力行业高质量发展。

参考文献：

- [1] 马晓伟,苑锦霞.输电线路无人机巡检过程实时通信传输方法[J].无线互联科技,2024,21(24):8-10.
 - [2] 刘严,刘吴欢.人工智能下的输电线路无人机巡检技术[J].电工技术,2024,(S2):141-143.
 - [3] 郝睿婧.基于多旋翼无人机的输电线路巡检技术研究[J].电工技术,2024,(S2):556-558.
 - [4] 卢自强.基于无人机影像深度学习算法的输电线路无人机巡检路径规划[J].建设科技,2024,(S1):63-65.
 - [5] 冯伦.无人机巡检技术在输电线路智能监控系统中的集成与应用[J].建设科技,2024,(S1):81-83.
 - [6] 刘维刚,刘新民,赵文瑞,等.基于多时间尺度和VR的输电线路涉鸟故障无人机巡检方法[J].微型电脑应用,2024,40(12):255-258+263.
 - [7] 冯伦.多光谱图像融合技术在输电线路无人机巡检中的应用与效率分析[J].流体测量与控制,2024,5(06):8-11.
 - [8] 王好阳.基于无人机倾斜摄影的架空电力输电线路巡检方法[J].电气时代,2024,(12):88-91.
 - [9] 姜诚,黄和燕,张兴华,等.基于卫星导航的超高压输电线路无人机高效有序巡检研究[J].电网与清洁能源,2024,40(11):39-45.
 - [10] 王涛,严永锋,汪滢,等.架空输电线路无人机巡检图像缺陷识别方法研究[J].科学技术创新,2024,(24):132-135.
- 作者简介：**丁卓群（1994年5月-），男，汉，湖北省武汉市，硕士，工程师，研究方向：输电运维。
- 石珊（出生1997年10月-），女，汉，湖北省武汉市，硕士，研究方向：变电运维。