

Application Research of Transmission Line Ubiquitous Inspection Technology via 5G UAV

Hu Li¹, Lin Ma², Juan Di³, Junfeng Yuan⁴, Hanqing Wang⁵

¹Transmission Inspection Center, State Grid Yinchuan Power Supply Company, Yinchuan Ningxia
²Operation Management Center, Northeast Air Traffic Management Bureau of CAAC, Shenyang Liaoning
³Shanghai Civil Aviation College, Shanghai
⁴Beijing Xiangfei Network Technology Co., Ltd., Beijing
⁵Beijing Youyun Zhixiang Aviation Technology Co., Ltd., Beijing
Email: 38590380@qq.com

Received: Aug. 6th, 2020; accepted: Aug. 21st, 2020; published: Aug. 28th, 2020

Abstract

The transmission line inspection work plays an important role in the safe operation of the power grid. At present, UAVs are accelerating the integration with 5G, Beidou, IoT, AI, big data and other new technologies, building a digital, intelligent transmission line ubiquitous inspection technology system, and deeply integrating with the application scenarios of smart transmission lines, optimizing and reconstructing the UAV power transportation inspection technical system and framework, and promoting the UAV line inspection into the intelligent inspection stage. This paper puts forward the idea of transmission line general inspection technology via 5G UAV, and through the actual research and development application in the construction of the intelligent inspection system of transmission line, it is proved that it is feasible for ultra long distance and low delay control UAV via 5G network or multi machine cooperation to carry out full autonomous unmanned intelligent inspection of transmission line, and carry out real-time fault diagnosis and defect intelligent analysis, which can improve operation safety, inspection efficiency and operation quality. It can provide practical basis for the in-depth study of UAV intelligent inspection operation technology system.

Keywords

5G Technology, Beidou Navigation, Networked UAV, Overhead Transmission Line, Ubiquitous Inspection Technology, Edge Intelligent Computing

“5G+无人机”输电线路泛在巡检技术应用研究

李 虎¹, 马 林², 狄 娟³, 原军锋⁴, 王汉清⁵

¹国网银川供电公司输电运检中心, 宁夏 银川

²民航东北地区空中交通管理局运行管理中心, 辽宁 沈阳

³上海民航职业技术学院, 上海

⁴北京享飞网络科技有限公司, 北京

⁵北京优云智翔航空科技有限公司, 北京

Email: 38590380@qq.com

收稿日期: 2020年8月6日; 录用日期: 2020年8月21日; 发布日期: 2020年8月28日

摘要

输电线路运检工作对电网的安全运行起着至关重要的作用。当前无人机正在加快与5G、北斗、物联网、人工智能、大数据等新技术融合, 构建数字化、智能化的输电线路泛在巡检技术体系, 并与智慧输电线路应用场景深度融合, 优化和重构无人机电力运检技术体系与框架, 推动无人机线路巡检进入智慧巡检阶段。文章提出了“5G+无人机”输电线路泛在巡检技术思路, 并通过在输电线路智能巡检体系建设中的实际研发应用, 证明5G网联无人机超远程低时延控制无人机或多机协同开展输电线路全自主无人智能化巡检, 并实时开展故障研判和缺陷智能分析是完全可行, 对提高作业安全、巡检效率和作业质量效果显著, 为无人机智能巡检作业技术体系的深入研究提供实践依据。

关键词

5G技术, 北斗导航, 网联无人机, 架空输电线路, 泛在巡检技术, 边缘智能计算

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

输电线路运检工作对电网的安全运行起着至关重要的作用。当前我国正在大力建设国家智能电网, 预计2020年我国输电线路总里程将达到159万Km, 这对电网的巡检、维护与保养提出了更高的要求[1][2][3]。传统的输电线路人工巡检方案受环境及天气影响大, 工作效率较低并存在一定的人身安全风险, 而工业无人机具备携带方便、操作简单、载荷丰富、自动飞行等优点, 采用无人机巡检不仅能够发现杆塔异物、绝缘子破损、断股等缺陷, 还能够发现金具锈蚀、开口销与螺栓螺帽缺失等人工巡检难以发现的缺陷, 无人机近年来在电力系统运维方面得到大力推广和应用[4]。

为了应对海量设备连接、移动数据流量爆炸式增长以及不断涌现的各类超低时延新业务和新场景, 5G技术应运而生。5G技术作为下一代移动互联网技术, 将连接、安全和集中计算的能力带给工业, 解决了一直以来阻碍工业企业数字化转型的连接问题。因此, 5G被视为未来数字经济时代的关键使能技术和基础设施, 将强有力支撑无人驾驶、智能机器人、智能无人机和工业互联网等新场景应用。

5G技术在智能电网系统各个环节均有应用前景[1]。基于5G技术的智慧输电线路巡检能够实现输电线路设备状态、通道状况、专业数据及人员信息多源融合与全景监控, 而“5G+无人机”技术通过在输电线路巡检过程中提供远程和实时控制、高清图像/视频传输、有效的无人机识别和监管以及高精度定位等

功能,可以极大扩展无人机控制信息和采集数据实时传输的通信范围,缩短运检故障排查时间,提升巡检效率和巡检质量,并能产生巨大的效益[5]。

“享飞云”是易瓦特科技股份公司研发的一站式无人机电网智能运检云平台,可为电网企业提供全面的无人机电网巡检服务,与电力物联网智能联动,实现设备状态信息集成和数据共享,实现巡检任务智能调度管控,通过无人机搭载多种载荷,实现多机协同巡检作业,视频监控及远程诊断分析、自动巡查,远程操控、数据处理、建模、分析、存储、管理及挖掘。

本文结合无人机输电线路巡检应用现状和 5G 技术,对线路运维应用“5G+无人机”泛在巡检技术作了分析,并结合实际项目和“享飞云”平台对该技术在国家电网某供电公司实际落地应用情况作了详细介绍,展望了未来输电线路泛在巡检技术的应用前景,对行业无人机和电力同行有较好的实际参考意义。

2. “5G+无人机”电力泛在巡检技术分析

2.1. 无人机电力巡检应用现状

目前,无人机输电线路巡检最主要有下述三大业务场景:

(1) 无人机可见光相机精确巡检:无人机可以通过搭载可见光高清拍摄设备,按照巡检要求对杆塔各个巡检部位进行可见光拍摄,通过图片分析缺陷和隐患,从而第一时间进行消缺处置。

(2) 无人机红外热成像精细化巡检:将红外热成像技术与无人机结合,打破光线和空间的限制,可随时随地捕捉清晰、精准的热图像,找出温度异常部位,迅速锁定出现故障的地方以便及时修复。

(3) 无人机输电线路通道巡检:输电线路通道环境对高压线路的安全性影响重大,无人机通道巡检主要包括林木检测、山火监控、外力破坏检测等,可以准确发现和测量出问题和隐患的位置、高度、距离等信息[3][6]。

现阶段无人机电力巡检作业存在主要问题是巡检智能化程度低,巡检质量受运维人员技术水平和外界影响较大,巡检数据分析智能化程度低,准确度和可靠性不满足实用化要求,应用水平难以满足和支撑输电智能运检发展要求。

2.2. “5G+无人机”电力泛在巡检关键技术

国际电信联盟无线电通信局(ITU-R)定义了 5G 的三大典型应用场景为:增强型移动宽带(eMBB)、超可靠低时延通信(uRLLC)和海量大规模连接物联网(mMTC) [7]。其中 uRLLC 和 eMBB 应用场景与无人机电力巡检应用紧密相关,uRLLC 解决了无人机飞行操控时延敏感性、高可靠性和高稳定性问题,而 eMBB 的高带宽特性使无人机巡检过程中利用虚拟现实(VR)、在线 4K 高清画质视频和大流量数据传输等技术成为现实。

北斗卫星导航系统是我国自行研制的全球卫星导航定位系统,在电力行业有着重要的应用价值,可为智能电网、电力物联网、能源互联网的建设提供导航定位、精准授时、短报文通信等服务,是我国能源战略发展的有效支撑手段。比如随着北斗全球卫星导航系统建成,国家电网有限公司将在 2020 年底前建设 1200 座电力北斗基站,组成电力北斗精准时空服务网,为全域电力用户提供厘米级实时定位、毫米级事后定位和纳米级授时服务,在重点区域如输电线路沿线、地质灾害高发地区提供厘米级、毫米级定位服务的能力。

电力 5G 应用和北斗应用都是实现智能电网和经济社会发展的新型数字基础设施和重要驱动力量。在电力巡检领域,无人机正在加快与 5G、北斗、物联网、人工智能、大数据等新技术融合,为构建数字化、智能化的无人机泛在巡检技术体系奠定基础,并与智慧输电线路应用场景深度融合,优化和重构无人机电力运检技术体系与框架,推动无人机电力巡检进入智慧巡检阶段。

“5G+无人机”电力巡检业务主要覆盖输电段、变电端，泛在巡检技术可用在四大应用场景：

(1) 5G 网联无人机自主云巡：5G 网联无人机是将无人机联入 5G 网络，实现无人机互联互通、超视距实时控制、多机协同飞行、数据实时回传等[8]。采用 5G 移动网络的网联无人机将带来两方面的改变[9]：一是 5G 高速率的上下行数据传输能力能够满足无人机控制信号的低时延和高可靠性传输需求，能够有效满足无人机巡检的全程管理需求，避免联网失败等造成的失控风险；二是基于 5G 网络切片技术提供的专网服务能够极大提升无人机在飞行过程中的安全性，避免被劫持等风险。

(2) 5G 远程视频故障诊断分析：5G 网络有更大的网络容量，大幅降低网络时延，能够为电网行业巡检视频业务提供广泛支持[8]。超高清视频被业界认为将是 5G 网络最早实现商用的核心场景之一。超高清视频的典型特征就是大数据、高速率，按照产业主流标准，4K 视频传输速率至少为 12~40 Mbps，4G 网络已无法完全满足其网络流量、存储空间和回传时延等技术指标要求，5G 网络良好的承载力成为解决该场景需求的有效手段。过去，人们很难通过无人机拍摄的视频发现输电线路微小缺陷，现在基于 5G 技术的高清视频，可实现视频监控、远程现场实时展示、远程故障诊断分析等应用。

(3) 5G 边缘智能计算

图像智能分析主要包括图像处理、目标检测、目标跟踪、场景识别等业务应用[10]。随着人工智能技术的发展，深度学习为无人机输电线路作业数据智能计算提供了新的思路。近年来，国内外众多专家学者结合无人机输电线路巡检过程中采集的海量可见光和红外图像数据，利用大规模深层次卷积神经网络 (Convolutional Neural Network, CNN) 模型对杆塔异物、绝缘子破损、销钉缺失、施工车辆等缺陷和隐患的图像识别和数据分析技术已经做了大量深入的研究和实践[11]-[16]。如贵州电网有限责任公司输电运行检修分公司魏韬等人对无人机巡检图像绝缘子串缺陷识别进行了研究，利用 Faster R-CNN 进行缺陷识别定位平均检测时间为 320 ms 和总体 72% 的准确率[12]；国外的 Bushra Jalil 等人基于 Faster R-CNN 进行绝缘子和电力线的缺陷智能识别研究也达到平均 72% 的准确率[16]；广东电网麦俊佳等人并对无人机电力巡检中人工智能图像识别作业数据处理方法进行了实践[11]。

移动边缘计算是指在靠近感知层或数据源头的一侧，采用带有网络、计算、存储、应用核心能力为一体的开放平台，提供近端服务，降低交互的时延和提高运行可靠性。“边缘智能”是指在靠近系统主域的位置，通过对感知层应用的反馈信息进行处理，并根据本地用户上下文信息分析，对用户行为进行预测、预判[10]。基于 AI 的图像智能分析、点云智能识别技术，结合线路实物 ID 信息识别等交互式现场作业技术，在巡检过程中可识别巡检部件引导无人机调距和无人机云台调姿，对缺陷及隐患进行实时识别和问题诊断，提高缺陷识别的时效性。在输电线路无人机智能化巡检时，如果采用 5G 技术，可选择机载端或地面站本地部署移动边缘计算服务器，将巡检图像的边缘智能计算放置于移动边缘计算服务器中，利用边缘云服务为无人机巡检提供图像智能分析服务。通过“端、边、云”部署模式在不降低算力情况下，实现精准化巡检，全面提升巡检数据处理效率和智能化水平，有效分析和掌握输电线路缺陷及外部安全隐患，及时掌握线路设备运行状态，保障隐患消缺及时，节省人力资源，降低巡检成本。

(4) 巡检图像文件实时回传：无人机巡检过程中抓拍的高分辨率照片文件很大，单张高清巡检照片文件大小约 15M，受现有通信网络传输速度低、高延迟的影响，现有的无人机电力巡检数据采集时都储存在无人机 TF 卡，完成巡检后再导出进行人为处理，时效性、互动性都存在不足。而通过 5G 网络可直接将巡检高清照片秒级回传服务器端和数据分析系统，电力运检部门可以及时发现故障并记录、标注和安排处置，地面站与管理中心进行内外场协同作业，及时发现问题并进行图像复采集，极大提升巡检互动性和巡检时效性。

3. “5G+无人机”输电线路泛在巡检技术应用效果

本文研究技术应用于某 110 kV 双回线路智能巡检项目，该项目已具备北斗地基增强基站、5G 基

站、云边协同系统于一体的数据中心环境,应用场景具体包括线路本体 5G 网联无人机自主云巡、5G 网联无人机远程视频故障研判、5G 网联无人机缺陷智能分析三种实际应用。

3.1. 线路本体 5G 网联无人机自主云巡应用情况分析

该场景(图 1)重点是研究在无人机超视距飞行条件下,巡检员直接利用享飞云和 5G 技术实现从云端对无人机的远程控制、无人机在规划航点自动采集数据、无人机飞行数据和视频数据实时回传到享飞云,北斗 RTK 差分数据从北斗地基增强基站实时上传到无人机机载北斗高精度定位系统的实际应用情况,验证 5G 无人机无需人力干预的自主云巡技术可行性。

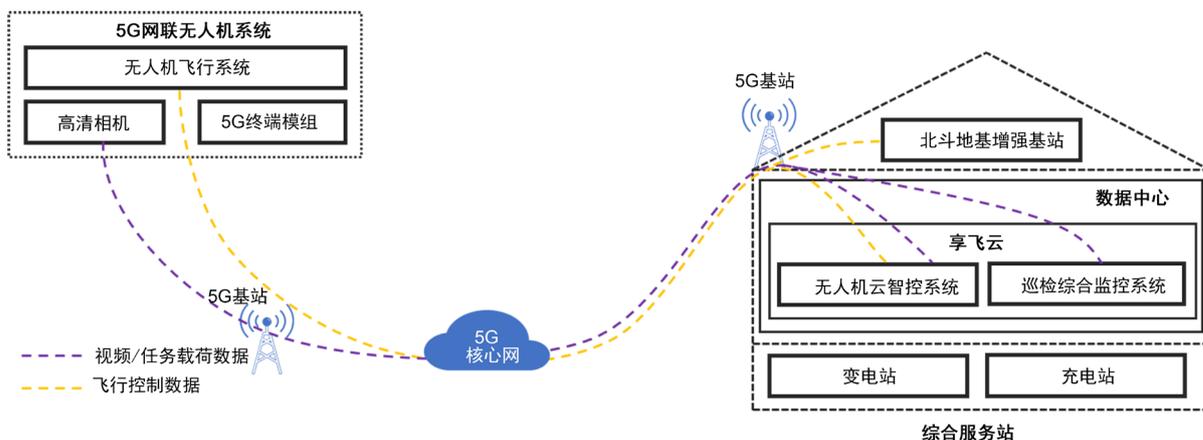


Figure 1. Scene of power line inspection for 5G UAV
图 1. 线路本体 5G 网联无人机自主云巡应用场景

无人机从综合服务站的无人机机场起降,最大飞行高度 80 米;无人机在达到 RTK 定位状态后才可以正常起飞,确保定位精度达到厘米级,且巡检全程必须保证 RTK 定位。

从实际巡检作业采集的监测数据看,5G 网联无人机实际飞行过程中的远程操控、飞行状态监控、厘米级网络差分定位和实时高清视频传输(多路)等监测指标均满足预期数值,通信时延均在毫秒级,具备实时操控、监控和厘米级高精度定位能力。

3.2. 线路本体 5G 网联无人机远程视频研判故障应用情况分析

该场景采用多架携带不同载荷的无人机自动执行线路通道 5G 云巡任务,其中携带热红外相机的无人机先执行杆塔测温巡检(图 2),发现温度异常的杆塔部位,由另一架携带 4K 高清可见光相机的无人机直接飞到可疑故障杆塔巡检(图 3),实时回传高清视频给享飞云无人机云智控系统,由运维工作人员在运维监控室远程根据现场高清视频“把脉”问题,可视频截图和标注进行研判,可知道准确的杆塔编号和故障部位,精准定位缺陷或故障点,再安排检修班组携带设备直接去可疑杆塔维修。主要验证在突发事故情况下 5G 无人机线路本体云巡远程研判和协同工作的应急处理能力。

5G 无人机云巡过程种综合了智能化调度和监控、远程控制、高清视频实时传输、远程可视化故障快速研判等新技术,5G 无人机回传的 4K 高清视频时延保持在 300 ms 以内,可清晰看到 5 cm 分辨率大小的线路本体缺陷以及线路外部隐患,完全可满足故障/隐患实时研判的应用技术要求。

3.3. 5G 网联无人机缺陷智能计算应用分析

智能分析包括智能诊断和智能预警。其中智能诊断是指平台对监拍的图片具备场景识别和异物入侵

诊断能力；智能预警是指平台具备智能预判能力，依托于智能分析诊断功能可以实现对输电线路可能要发生的故障情况提前报警提醒[10]。在云端部署深度学习系统，对卷积神经网络持续调参和训练优化算法模型，再将模型远程部署到边缘系统。这种边云协同智能巡检模式改善了之前需要人工多天处理图像缺陷数据的问题，可极大减少缺陷误报、漏报的情况，缩短输电线路故障和隐患排查的时间。

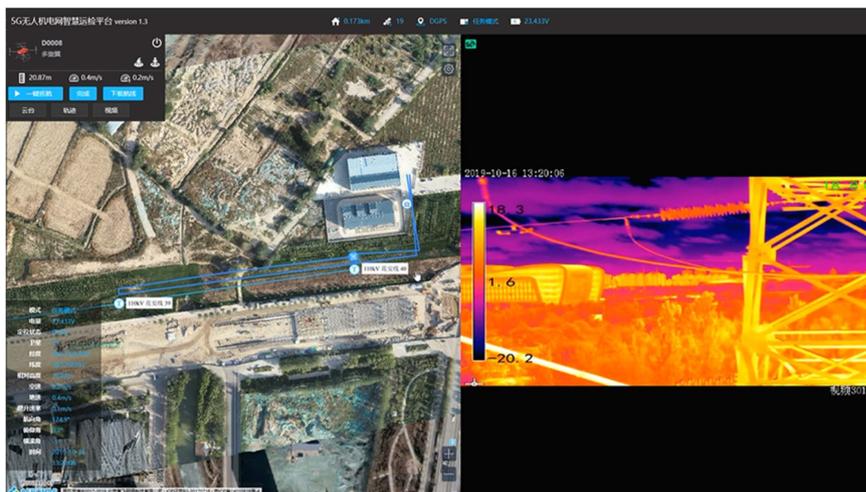


Figure 2. Remote use of thermal infrared video to study and judge faults via 5G UAV
图 2. 利用 5G 无人机远程热红外视频研判缺陷画面

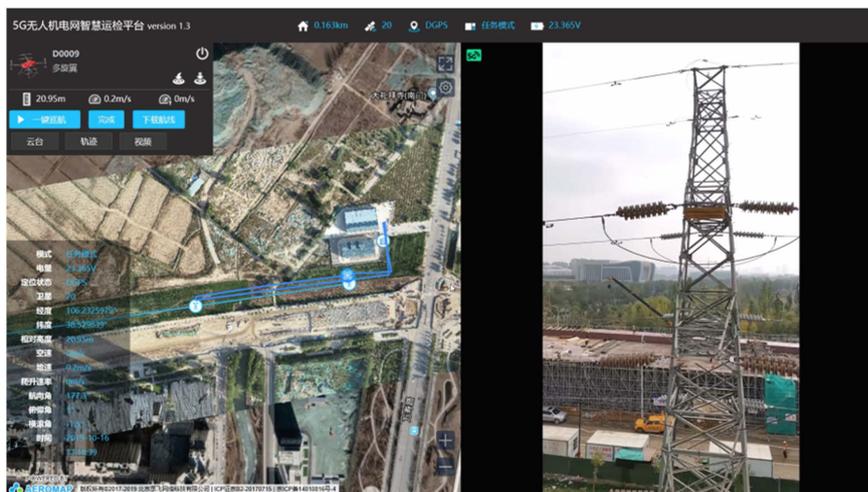


Figure 3. Remote use of visible light HD video to study and judge fault via 5G UAV
图 3. 利用 5G 无人机远程可见光高清视频研判故障画面

该场景(图 4)在边缘侧部署了集成高性能边缘智能计算模块 NVIDIA JETSON TX2 的边缘服务器，在边缘侧部署机巡图像缺陷智能识别系统不仅能在本地运行 AI 推理算法智能分析图像，而且可在现场对识别的问题进行核对和确认，及时上传预警信息。

5G 无人机云巡过程中将采集的高清照片经过 5G 通信链路从机载端传到边缘端，利用享飞云提供的基于深度学习算法的机巡图像缺陷智能识别系统执行图像自动分析。系统自动生成巡检分析报告，并将报告上传到享飞云平台。图 5 为输电杆塔本体金具销钉缺失智能识别样例，这种“智能分析为主，人工校对为辅”的分析模式，将现有完成一基杆塔巡检的周期缩短在 10 分钟内完成。

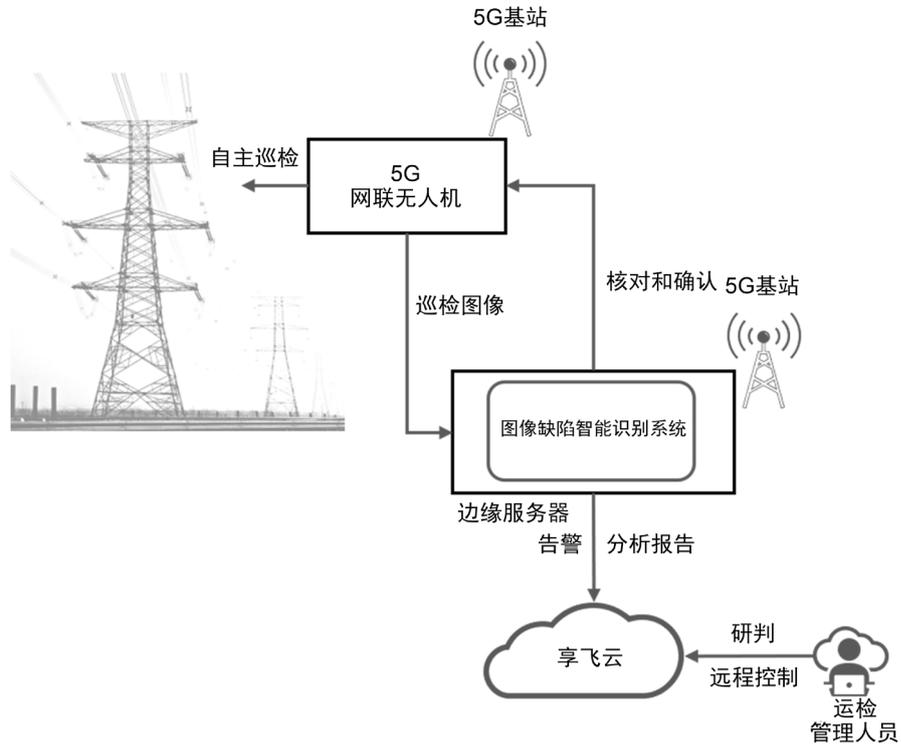


Figure 4. Application deployment architecture of faults intelligent analysis
图 4. 缺陷智能分析应用部署架构



Figure 5. Examples of intelligent identification of transmission line ontology faults
图 5. 智能识别线路本体缺陷样例

4. 结论与展望

本文提出了“5G+无人机”输电线路泛在巡检技术思路并阐述了该技术方案在输电线路智能巡检体系建设中的实际应用情况，证明 5G 网联无人机超远程低时延控制无人机或多机协同开展输电线路全自

主无人智能化巡检,并实时开展故障研判和缺陷智能分析是完全可行,对提高作业安全、巡检效率和作业质量效果显著,为无人机智能巡检作业体系建设提供了新思路和实践依据。

当前,以国家电网有限公司为代表的电力企业都已经在积极推动融合“5G+无人机”和北斗等泛在巡检技术在电网领域的应用,计划未来几年打造智慧输电线路,建设无人机智能巡检作业体系,实现输电线路无人机巡检全覆盖。智能电网是电力行业发展的必然趋势[10],“5G+无人机”输电线路泛在巡检技术未来在电力智能运维领域将具有非常广阔的应用前景。

基金项目

国家重点研发计划项目资金资助(2017YFC1500900)。

参考文献

- [1] 5G 给智能电网注入新动能[EB/OL].
<https://carrier.huawei.com/cn/success-stories/Industries-5G/5G-Injecting-new-kinetic-energy-into-smart-grids>
- [2] 2018 年中国电网行业发展趋势分析:大电网、小电网及大小电网的发展前景分析[EB/OL].
<http://www.chyxx.com/industry/201909/781563.html>
- [3] 刘智勇,赵晓丹,祁宏昌,等.新时代无人机电力巡检技术展望[J].南方能源建设,2019,6(4):1-5.
- [4] 人工智能技术加持即将来临的夏季无人机系统分外忙碌[EB/OL].
http://www.sohu.com/a/308671628_100179202
- [5] Yang, G., Lin, X.Q., Li, Y., *et al.* (2018) A Telecom Perspective on the Internet of Drones: From LTE-Advanced to 5G.
- [6] 季坤,操松元,严波,等.机载激光扫描技术在输电线路运维中的应用[J].电力信息与通信技术,2018,16(2):57-62.
- [7] 国际电信联盟.迎接 5G 的到来:机遇与挑战[R].2018.
- [8] 5G 时代超高清视频应用探索与思考[EB/OL].<http://m.c114.com.cn/w127-1082778.html>
- [9] 中国移动 5G 联合创新中心.中国移动 5G 联合创新中心创新研究报告-网联无人机[R].2018.
- [10] 王艳如,刘海峰,李琳,等.基于边缘智能分析的图像识别技术在输电线路在线监测中的应用[J].电力信息与通信技术,2019,17(7):35-40.
- [11] 麦俊佳,郭圣,徐振磊,等.输电线路多旋翼无人机自动驾驶智能巡检系统[J].计算机系统应用,2019,28(4):105-110.
- [12] 魏韬,杨恒,时磊,等.基于 Fast RCNN 的绝缘子自爆缺陷识别[J].电瓷避雷器,2019(3):183-189.
- [13] 徐振磊,曾懿辉,郭圣,等.基于图像识别技术的输电线路智能监控系统应用[J].计算机系统应用,2020,29(1):67-72.
- [14] 薛冰.基于 Mask R-CNN 的电力设备锈迹检测[J].计算机系统应用,2019,28(5):248-251.
- [15] 何冰,王欣庭,王宗洋,等.基于超像素和深度神经网络的高压输电线路环境检测[J].计算机系统应用,2020,29(1):250-255.
- [16] Jalil, B., Riccardo, G., Martinelli, M., *et al.* (2019) Fault Detection in Power Equipment via an Unmanned Aerial System Using Multi Modal Data. *Sensors*, **19**, 3014. <https://doi.org/10.3390/s19133014>