

基于 5G+云边 AI 协同的无人机 输电线路巡检应用研究

严尔梅^{1†}, 刘博迪¹, 时磊¹, 顾泽¹, 邓凯锋¹, 吴珊²

(1. 贵州电网有限责任公司, 贵州 贵阳 550002; 2. 中国电建集团贵州电力设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550002)

摘 要:无人机结合数字化技术对输电线路进行巡检是电网安全保障和提质增效的重要应用研究方向,当前的巡检模式存在网络环境不佳、数据传输能力不足、云边 AI 未结合巡检业务进行有效协同等问题,导致无人机巡检模式未能实现规模性应用推广。提出了基于 5G+云边 AI 协同的无人机输电线路巡检方法,从架构设计、关键技术等方面展开研究,并系统性介绍了 5G 网联无人机、云边 AI 协同、5G 融合 AI 等先进技术解决思路。应用成效表明,文章研究成果相对常规 4G+云端 AI 服务器方法,平均下行速率提升了 6.44 倍,平均上行速率提升了 1.77 倍,平均时延减少了 83.3%,平均准确率提升了 9.2%,平均召回率提升了 7.7%,平均处理时间缩短了 79%,总体作业效率提升 25%。数据传输和智能分析能力的提升,促进了输电线路巡检业务提质增效。

关键词:输电线路巡检;5G 切片;5G 网联无人机;云边 AI 协同;边缘 AI

中图分类号:TP39

文献标识码:A

Research on UAV Transmission Line Inspection Based on 5G+Cloudside AI Collaboration

YAN Ermei^{1†}, LIU Bodi¹, SHI Lei¹, GU Ze¹, DENG Kaifeng¹, WU Shan²

(1. Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang, Guizhou 550002, China;

2. POWERCHINA Guizhou Electric Power Engineering Co., Ltd., Guiyang, Guizhou 550002, China)

Abstract: The combination of drones and digital technology for power transmission line inspection is an important research direction for ensuring power grid security and improving quality and efficiency. The current inspection mode has problems such as poor network environment, insufficient data transmission capacity, and ineffective collaboration of cloud edge AI with inspection business, which has led to the failure of drone inspection mode to achieve large-scale application promotion. The article proposes an unmanned aerial vehicle (UAV) transmission line inspection method based on 5G+cloud edge AI collaboration, and conducts research from architecture design, key technologies, and systematically introduces advanced technology solutions such as 5G networked UAVs, cloud edge AI collaboration, and 5G fusion AI. The application results show that the research results of the article have improved the average downlink speed by 6.44 times, the average uplink speed by 1.77 times, the average latency by 83.3%, the average accuracy by 9.2%, the average recall by 7.7%, the average processing time by 79%, and the overall operational efficiency by 25% compared to the conventional 4G+cloud AI server method. The improvement of data transmission and intelligent analysis capabilities has promoted the improvement and efficiency of transmission line inspection services.

Key words: transmission line inspection; 5G slicing; 5G connected drones; cloud edge AI collaboration; edge AI

收稿日期:2024-03-05

基金项目:中国南方电网公司科技项目(067500KK52210004)

作者简介:严尔梅(1978—),女,贵州晴隆人,硕士,高级工程师,研究方向:电网大数据,电力系统数据应用及数据价值挖掘,人工智能及 5G 技术。

†通信联系人,E-mail:1684660581@qq.com

输电线路是电网的重要组成部分,是电力输送、能源保障的重要环节,对输电线路采用无人机、人工智能等先进数字化技术构建起“立体巡检+集中监控”的巡检业务模式,是电网企业高度重视的研究课题和应用方向^[1]。南方电网自 2016 年开展应用至今,经调研统计,输电无人机配置率已达到 2.37 架/百公里,110 kV 及以上线路适航区覆盖率达 90%,累计巡检杆塔 418 万基,发现缺陷 74.3 万处。近三年,输电人均运维公里数增长了 13%,形成了飞手操控、自主巡检、无人机场三种巡检模式。当前处于飞手操控及自主巡检两类模式全面推广、无人机场局部试点阶段阶段。基于无人机挂载作业设备对输电线路进行辅助巡检,并结合 AI 介绍对采集的线路巡检视频及图像进行缺陷识别技术和应用也陆续在开展研究。如文献[2]提出了基于无人机的输电线路巡视方式,并对巡视类型和技术要求进行了介绍;文献[3]提出无人机智能巡检工作模式及技术需求,介绍了巡检数据智能处理、无人机自主导航和无人机续航三个关键技术问题。

然而,现有的无人机+AI 的巡检模式存在以下不足:(1)目前缺陷识别的 AI 模型算法多部署在云端人工智能平台或业务系统中,依赖网络将现场采集图像数据传输,对网络有较高的要求,然而输电线路通常架设在远郊甚至山林地带,网络环境恶劣,导致在线回传时速度慢,影响识别效率,也导致远程调阅实时画面时,存在多路卡顿、时延较长等情况;(2)基于云端识别是当前主流的方式,平台收到现场数据并完成识别后,再将识别结果回传给现场巡检人员进行工作指示,通信链路复杂,存在断链或延时等风险,尤其对实时性要求高且严重等级高的缺陷隐患,难以对一线巡检人员及时提出进一步的措施和指导意见;(3)某些研究提出了采用边缘代理进行输电线路的识别,但缺少与云端人工智能平台如何协同的思考,导致边端识别场景不全,无法满足实际巡检业务需要;(4)当前模型和样本由各省市公司分散管理、分头应用,采集的缺陷样本质量参差不齐,识别模型存在“小、散、乱”等问题,导致模型迭代速度慢,样本共享不充分,缺陷平均识别率为 80%左右,识别误检比为 3~4,无法满足基层作业要求;(5)常规 Wifi 采集和 4G 数据传输方式通道带宽不足,系统架构先进性不足等原因,巡检图像 AI 识别后,仍需人工逐一复核,传输速率低,加载时间为 5~8 s,图像数据传输需消耗大量传输流量,影响工作效率^[4]。

由此,文章提出了基于 5G+云边 AI 协同的输电线路无人机巡检应用研究方法,一是提出了云一

边一端的无人机智能巡检总体架构,将模型算法部署在现场侧的边缘代理装置中,并与云端的人工智能云平台(或业务平台)进行协同,实时性要求高、优先级重要级高的缺陷在边端现场识别,云端进行一般缺陷或补充识别,减少数据传输依赖,提高识别效率和准确率;二是对关键技术进行研究,提出了“采一传一存一用”模式的技术架构,重点介绍了云边 AI 协同、5G 融合 AI 两项关键技术;三是通过开展实地应用,并总结应用成效,对上述问题进行验证。

1 总体架构设计

南方电网公司高度重视数字化技术赋能电网生产业务,通过无人机可实现对输电线路的辅助巡检。随着人工智能技术的发展,提出了更全面的输电线路缺陷识别的巡检业务要求,主要涉及基础植被覆盖、塔身异物、均压环反装、导线损伤等 9 大类 39 小类^[5]。为满足输电线路巡检业务的需求,文章提出了基于 5G+云边 AI 协同的无人机巡检方法,总体架构如图 1 所示。

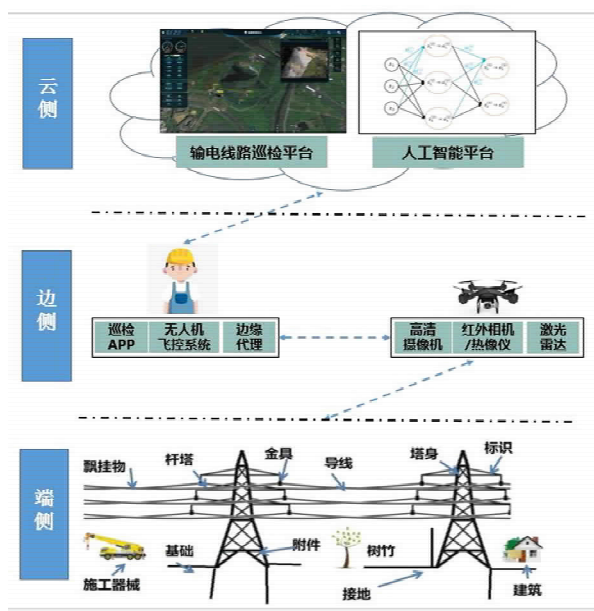


图 1 总体架构设计图

总体架构按云、边、端三侧进行说明如下：

(1)云侧:可分为人工智能云平台和巡检业务平台,人工智能云平台对输电线路巡检所涉及的 9 大类 39 小类缺陷识别模型及样本数据实现全量管理,按需下发到各边端侧,并对实时性要求不高或优先重要等级一般的场景进行推理识别^[6]。巡检业务平台分为移动端、PC 端和大屏端,缺陷识别结果经业务平台确认复核过后,生成缺陷告警,并对一线巡检作业人员 APP 推送处理意见;巡检作业过程中,大

屏端可实时调阅无人机巡检视频或图像;巡检完成后,可自动生成巡检报告提供复核及下载^[7]。

(2)边侧:无人机作业信息采集完成后,将数据接入边缘代理,通过其算力资源和部署的 AI 模型算法进行本地数据计算和处理,对于实时性和优先级、重要等级高的缺陷和业务场景进行本地识别,如:温度过高、螺帽螺栓脱落或缺失、树障和鸟巢缺陷等,对实时性要求不高或一般类缺陷识别或业务,将采集的作业数据通过 4G/5G 网络传输到远端平台进行计算和识别^[8]。

(3)端侧:无人机由飞控系统设定巡检路线,并通过挂载高清摄像机、红外相机/热像仪、激光雷达开展巡检作业。其中高清摄像机采集现场视频图像数据,提供给 AI 模型算法进行缺陷识别;红外相机/热像仪采集线路本体的热能情况,并对热能分布图进行分析是否存在过热异常,进而排查设备

隐患;激光雷达采集输电线路及其通道的点云数据,构建线路三维数据化模型,实现精细化巡检^[9]。

2 关键技术研究

南方电网高度重视数字化技术赋能无人机作业,实现规模化应用,2023 年下发了《关于进一步加快数字化转型的意见》提出了加强长航时、人工智能、电力北斗等新技术融合应用,推动输变配专业协同作业示范建设,提升无人机综合应用效能的工作指示^[10]。为支撑达到规模化应用目标,并针对前述调研的问题现状,文章结合总体架构,采用先进数字化技术和产品,提出技术架构如图 2 所示。

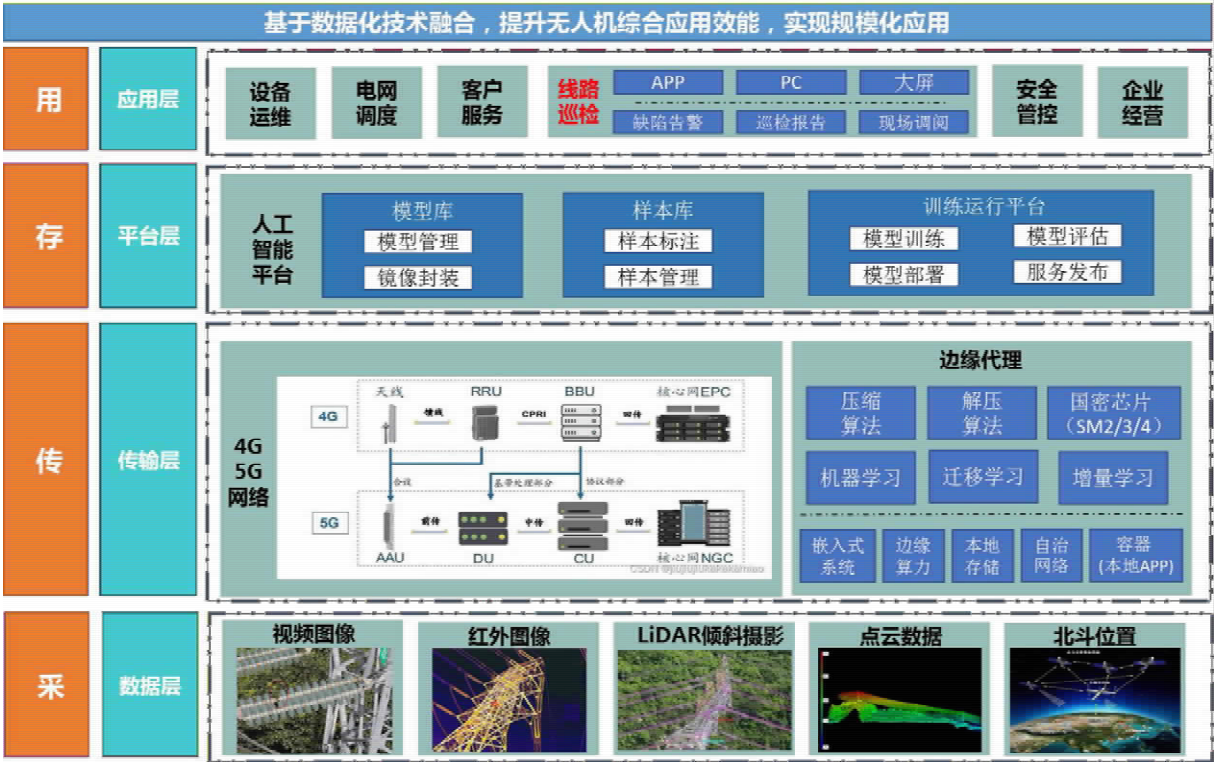


图 2 技术架构设计图

技术架构按“采一传一存一用”模式分为数据层、传输层、平台层、应用层,主要说明如下:

(1)数据层:无人机巡检作业采集输电线路本地及走廊的视频图像、红外图像、LiDAR 倾斜摄影、点云数据,并集成北斗位置信息通过数传模块传输给边缘代理^[11]。

(2)传输层:一是通过边缘代理将采集作业数据进行本地汇集,通过边端的模型算法对实时性、优先级要求高的缺陷进行识别和计算,并通过所配

置的 4G/5G 通信模组将识别结果和采集数据传输到云端平台,边缘代理通过装置配置的模型算法、边缘算力和本地存储提供 AI 和计算支撑,并采用容器化技术提供 APP 应用支撑巡检人员现场作业^[12]。二是采用网络自适应技术,当现场 5G 网络环境好时,通过 5G 切片将数据传输;当 5G 网络覆盖不佳时,自动切换到 4G 网络;当无网环境下时,通过边缘代理实现现场自组网,结合 APP 开展本地巡检业务,将数据缓存到本地,待网络恢复后将

本地缓存数据续传给云端平台。三是数据传输给云端时,可采用边缘代理的压缩算法和加密芯片,减少文件大小和网络流量,提高安全性^[13]。

(3)平台层:人工智能云平台主要包括两库一平台:模型库负责模型管理和镜像封装,模型库对全量模型进行管理,并按配置和业务需求将模型分发到边端侧;样本库负责样本管理和样本标注,样本库由边缘侧采集并上传,并通过标注提供训练使用;训练运行平台负责模型训练、模型评估、模型部署、服务发布和推理计算,训练好的模型发布到模型库进行封装,现场采集的图像基于训练运行平台进行推理计算,并将识别分析结果传送到应用层支撑业务应用^[14]。

(4)应用层:电网业务应用包括设备运维、电网调度、客户服务、线路巡检、安全管控、企业经营等方面,文章提出的线路巡检业务分为 APP、PC 和大屏端,主要包括缺陷告警、巡检报告和现场调阅等功能^[15]。

为支撑无人机规模化运用,涉及多项数字化先进技术,包括:北斗、测绘、飞控、边缘 AI、5G 切片、三维建模、可见光和红外图像识别、模型裁剪、迁移及增量训练、倾斜摄影、加密及解压缩等诸多方面。因篇幅所限,文章对云边 AI 协同、5G 融合 AI 两项关键技术进行介绍。

2.1 云边 AI 协同

数字化新形势下,由于泛在物联网海量终端的接入需求、车辆网、增强现实和视频流分析等高实时性、高数据量传输和高耗能计算等需要,基于云端进行智能 AI 的模式存在数据传输带宽瓶颈彰显、实时性不足、能耗较大、数据安全和隐私性低不足等问题,并随着物联网智能应用场景的涌出,促进了边缘 AI 的产生^[16]。边缘 AI 归属于边缘计算的范畴,简称 AIoT(Artificial Intelligence & Internet of Things,人工智能物联网),又可定义为 AI+IoT,是物联网和人工智能相结合,或人工智能计算处理下移至物联网边端侧的一种新技术形态,将深度学习训练及推理需要的数据通过物联网就地采集、快速处理,其计算、分析及预测的结果直接支撑业务应用。为支撑无人机智能巡检,文章提出了云边 AI 协同架构,如图 3 所示。

云边 AI,即人工智能平台部署在云端侧,边缘 AI 部署在边端侧边缘代理中,协同设计说明如下:

(1)人工智能云平台宜集成数据训练、推理计算、样本管理、模型管理、模型验证、基础模型服务及部分实时性要求不高的业务模型服务模块,对 AI 模型算法和样本进行全量管理,并按需下发到边端。边缘端对下发的模型算法通过迁移或增量

学习,提高识别准确率;并宜具备推理计算能力,对实时性要求高的业务进行本地计算推理^[17]。

(2)人工智能云平台按功能可分为模型库、样本库、训练运行平台,基于云平台提供 CPU/GPU 计算、存储及网络资源进行部署。

(3)边缘 AI 主要有模型部署、推理计算两项功能,模型从云端推送下发过来后,宜参考文献^[18]所述方法,进行迁移学习和增量学习,以满足实际场景需要,提高识别准确度。

(4)通过云边协同套件,可实现模型推送下发及图像样本和识别结果上传。模型下发过程中,考虑到边端硬件资源有限,可参考文献^[19]所述进行相应裁剪,减少模型大小,提升加载效率。

云边 AI 协同涉及模型、样本、业务信息、推理结果等数据流向,数据架构设计如图 4 所示。

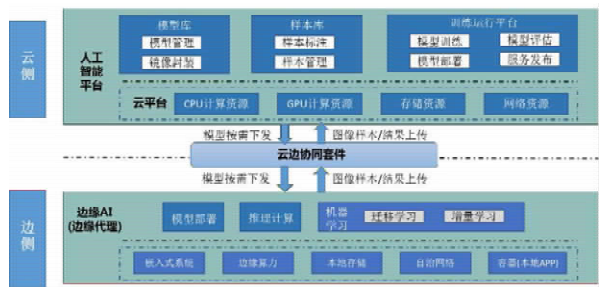


图 3 云边 AI 协同架构

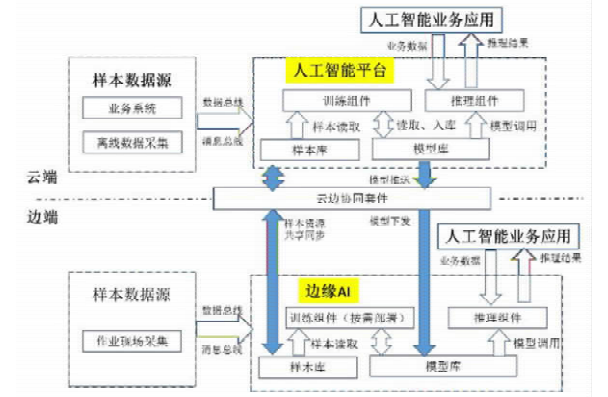


图 4 数据架构设计图

主要设计说明如下:

(1)样本库数据云端来源于业务系统和立项数据采集,边端来源于作业现场采集。将数据按照图像、视频、语音、文本等类型存储,经过数据标注后形成样本库。

(2)训练组件读取样本库的数据和模型库的模型,并将训练好的模型入库存储到模型库;推理组件调用模型库的模型,使用业务应用推送的业务数据,推理计算,将推理结果反馈给业务应用。

(3)人工智能智能平台将模型库的模型推送到云边协同套件,并按各边缘端业务所需进行下发。云边端所需样本通过云边协同套件实现同步共享。

2.2 5G 融合 AI

万物物联时代,5G 基于先进的网络切片即服务技术,构建了三大主流场景:eMBB 增强移动宽带、uRLLC 高可靠低时延连接和 mMTC 海量物联,具备着更高的传输速度、更低的延迟、更大的网络容量、更好的网络覆盖、更稳定的网络连接等明显优势^[20]。5G 与边缘 AI 的结合,带来了以下 5 大核心价值:(1)支持海量的链接数量,并实现本地高速连接;(2)为本地业务处理提供了高实时性保障;(3)基于边缘侧数据实时采集和处理,高效实现异构数据统一聚合和优化;(4)边缘 AI 为设备智能化升级带来革命性优势;(5)敏感数据无需发送到云端处理,安全性大幅提升^[21]。

无人机巡检作业采集并传输的数据主要包括图传和数传两类。对于 AI 识别,主要依赖图传能力将现场的图像进行采集以供 AI 模型算法进行训练和推理。较早的图传方法是无人机及飞控手柄间通过 Wifi 进行点对点通信,最远通信距离小于 500 m,可传输分辨率 1920×1020 的超清图像;某些无人机头部企业如大疆公司,研发了采用 2.4 GHz 频段,类似 WiFi 的图像系统 OcuSync,传输距离可达 7 km^[22]。文献[23]提出了网联无人机的概念,将无人机加装通信模组,采用 4G LTE 蜂窝通信技术,将采集的图像通过地面基站、4G 网络直接传输到远端,当前传输的图像分辨率可达 1280×720 左右。

随着 5G 时代的到来,给无人机图传带来质的飞跃:(1)带宽方面,5G 超带宽基本达到了 1 Gbps 速率,为 4G LTE 的十倍以上,相对传统无人机只能用单镜头相机作业,5G 网联无人机可挂载全景摄像机实现 4 K、8 K 的超高清视频传输,实现动态、高维度的超高清“上帝视角”;(2)时延方面,相比 4G LTE 时延为 50 ms 以上,5G 网联无人机可实现毫秒级的超低时延,低于 20 ms,甚至 1 ms,实现无人机快速精准执行地面飞控命令,视频传输更加清晰流畅;(3)定位方面,相比 4G LET 十米级和 GPS 米级的定位,5G 网络定位精度可达厘米级,在输电线路巡检作业时可实现与线路等高压设备严格保持可靠的安全距离,提高安全作业水平^[24]。

为支撑无人机智能化巡检作业,文章提出 5G+云边 AI 协同的融合设计,如图 5 所示。

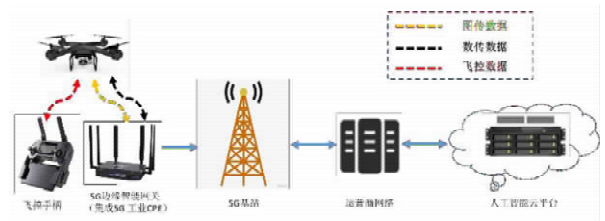


图 5 5G+AI 融合设计图

主要设计说明如下:

(1)无人机将采集的图传及数传数据传输到地面 5G 边缘智能网关,边缘网关配置了 AI 模型和边缘算力进行本地智能分析,并通过配置的 5G 工业 CPE 模块将分析结果和采集数据通过 5G 网络传输到人工智能平台并与后端业务系统进行交互^[25]。

(2)作业人员通过飞控手柄控制无人机执行巡检作业,后续可统一通过 5G 网络传输飞控数据,支持现场控制或远端遥控。

考虑到线路巡检作业现场网络覆盖情况复杂,部分地区网络环境差,为实现无人机 5G 数据传输,如图 6 所示,文章提出以下两种实现方案:

方案一:如图 6(a)所示,通过将无人机内置 5G 工业模组改造,与地面集成了 5G 工业 CPE 的边缘智能网关进行通信,CPE 可有效实现 5G 网络覆盖延伸,解决通信最后一公里问题。

方案二:如图 6(b),无需对无人机进行改造,仍保持原无人机与飞控手柄点对点数据传输方式,仅需通过 HDMI 线将手柄与 5G 边缘智能网关连接,将图传和数传数据通过 5G 边缘网关接入 5G 网络传输到云端。

上述两种方案中,方案一需对无人机进行改造,较方案二成本高,然而传输效果更好;方案二无需对无人机改造,成本低,但现场无人机数据采集传输到地面的方式未变,仅对地面接收后的数据实现了 5G 传输,传输效果不如方案一。



图 6 无人机 5G 数据传输方案设计示意图

文章提出的硬件配置包括:

(1)5G 工业模组,主要为多种电力设备提供集成式 5G 通信能力。表 1 所示为其推荐参数配置。

(2)5G 边缘智能网关,主要功能为:一是边缘 AI 作为物联网边端智能计算节点,基于本地采集或接入物联网数据,运用 AI、大数据等算法模型,进行分析计算、发现故障异常或预测未来。二是具备 5G 工业 CPE 功能,对线路巡检 5G 网络覆盖差或信号不稳定等区域,提供信号二次中继,扩大 5G 网络覆盖范围,打通网络传输最后一公里。表 2、表 3 所示为其推荐参数配置。

表 1 5G 工业模组推荐配置表	
关键指标	推荐配置值
工作温度	−40~+85
技术规格	GSM/UMTS/LTE/5G NR
峰值速率	5G NR;DL 2Gbps/UL 230 Mbps LTE;DL Cat16 1.0Gbps,UL Cat 13 150 Mbps
VoLTE	Support
接口	USB2.0/3.0,I2C,UART,SIM,PC-/I2s,ANT,GPIO

表 2 边缘 AI 推荐配置表	
关键指标	推荐配置值
算力支持	AI 芯片,支持 caffe 框架;4TOPS INT8, 8KP30/4KP120 算力;
工作温度	−40~+75℃
AI 管理	支持云端 MQTT 下发 AI 模型及策略;支持北向管理员, 对接 AI 管理云平台
LOT 接入	支持 RS485/RS232/蓝牙/Wifi/Lora 接口协议; 支持 HDMI 接入;支持有线无线灵活接入

表 3 工业 CPE 推荐配置表	
关键指标	推荐配置值
支持网络	以太网:1 个 LAN 口千兆自适应接口,支持 PoE; Wifi;支持 2.4G 与 5G,满足 IEEE 802.11b/g/n/ac
传输速率	支持 cat19 2.3Gb 下行速率,cat13 上行 250 Mb, 支持国内全频段;
网络接口	支持串口和 USB 接口;通过扩展卡支持 RS485、RS232; 预留 GNSS 位置;
工业防护	防震、防盐雾、EMC、IP65

3 应用案例

基于文章研究成果,南方电网惠州公司开展了输变配一体化无人机巡检应用工作,对其所辖的主要输、变、配线路采用 5G 网联无人机执行巡检任务,作业过程中,基于文章所述云边 AI 协同机制进行本地缺陷分析。惠州境内 35 kV±800 kV 线

路累计长达 2450 km,经过近期一年的应用,实现了全境线路的无人机巡检。通过无人机挂载作业装置,采用测绘、三维建模等技术,实现了所有输电线路最优巡检航线制定,无人机悬停点、巡检角度设置,以及绝缘子、金具等线路运行状态快速、精准检查。结合云边 AI 协同识别,对无人机采集的图像数据进行智能识别,对缺陷或故障隐患自动生成问题清单,辅之以人工核验,有效支撑了运检人员开展线路通道树障清理、线路设备消缺等工作。

如表 4、表 5 所示,结合应用情况分析,文章研究成果与常规方法取得如下提升及成效:

(1)传输能力,文章所述方法与常规方式相比得以大幅提升,平均下行速率提升了 6.44 倍,平均上行速率提升了 1.77 倍,传输带宽方面,经验证具备了 4 K 高清视频的传输能力,平均时延减少了 83.3%,定位精度也从原十米级提升到厘米级,较大提升了无人机输电线路巡检业务处理能力。

(2)缺陷识别方面,平均准确率和召回率是评价 AI 图像识别能力的重要指标,与常规 4G+云端 AI 服务器分析对比,文章所述方法,平均准确率提升了 9.2%,平均召回率提升了 7.7%。此外,由于边端 AI 方式大幅减少了图像上传云端和结果回传的处理时间,平均处理时间缩短了 79%。有效缺陷数增加了 27.5%。由于文章所述方法减少了人工复核时间和系统整理处理时间,平均百公里巡检时间从原 4d 减少至 3d,总体作业效率提升 25%,为线路巡检人员实现了增效减负。

表 4 传输能力提升对比					
巡检方法	下行速率	上行速率	传输带宽	平均时延	定位精度
4G+云端 AI 服务器	46.53 Mbps	29.43 Mbps	1280×720 图像	96 ms	米级
5G+云边 AI 协同	346.51 Mbps	81.42 Mbps	4K 高清视频	16 ms	厘米级

表 5 缺陷识别提升对比					
巡检方法	平均准确率	平均召回率	平均处理时间/ms	有效缺陷数/项	平均百公里巡检时间/d
4G+云端 AI 服务器	82.3%	83.1%	4300	414	4
5G+云边 AI 协同	91.5%	90.8%	900	528	3

传输能力和缺陷识别的提升,为无人机规模化巡检提供了技术条件,有效保障了电网安全,如中秋国庆双节用电保障中,通过无人机对 1000 余基重要杆塔组织精细化巡检,对 4000 余基杆塔开展了红外成像检测,及时发现缺陷,带电作业方式消

缺,确保电网安全稳定运行。应用场景如图 7 所示。应用成效表明,文章所述方案能有效提高数据传输和智能分析能力,提升作业效率、提高缺陷识别率,进一步提高了线路的安全稳定运行水平,保障了经济社会发展和居民生产生活可靠用电。

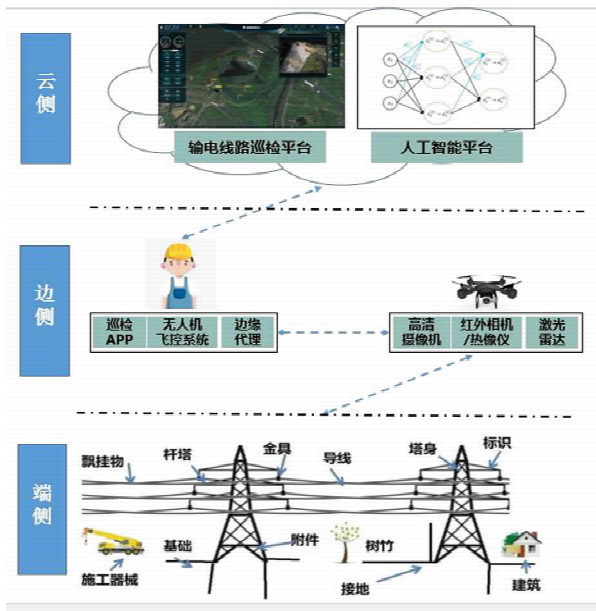


图 7 无人机巡检应用场景图

4 结 论

随着数字化时代的到来,基于 5G、人工智能等先进技术手段,优化无人机输电线路巡检模式,已成为构建新型电力系统的必然选择和重要趋势。南方电网公司明确提出了数据技术支撑输电无人机规模化应用的专项攻坚行动要求。文章基于 5G 和边缘 AI 技术,一方面按云、边、端提出了 5G+云边 AI 协同的无人机巡检总体架构;其次按“采—传—存—用”模式将技术架构分为数据层、传输层、平台层、应用层并进行了设计,并重点介绍了云边 AI 协同和 5G 融合 AI 两项关键技术;最后,文章介绍了所述研究成果于南方电网惠州公司应用及成效情况。应用情况表明,文章所述方法较大地提升了作业效率,实现了基层人员减负增效,提高了缺陷智能识别准确率和数据传输能力,有力加强了电网安全保障能力。

由于增加了边缘计算环节,后续我们计划从安全性方面开展进一步的系统性研究,减少数据传输过程中存在的外泄安全隐患。

参考文献

[1] 郑仟,李宁. 输电线路无人机巡检智能管理系统的应用[J]. 电子设计工程,2019,27(9):74-77+82.

[2] 徐浩,吴炜,陈浩,等. 无人机在输电线路巡检中的多种应用[J]. 电子测试,2020(10):117-118+27.

[3] 缪希仁,刘志颖,鄢齐晨. 无人机输电线路智能巡检技术综述[J]. 福州大学学报(自然科学版),2020,48(2):198-209.

[4] 刘冲,马晓昆,郑宇,等. 基于 5G 技术的无人机在输电线路巡检的应用[J]. 电力信息与通信技术,2021,19(4):44-49.

[5] 马忠梅,韩宝卿,李文娟,等. 智能识别技术在无人机输电线路巡检中的应用[J]. 集成电路应用,2022,39(8):126-127.

[6] 黄郑,王永强,王红星,等. 基于云雾边异构协同的无人机智慧巡检系统[J]. 中国电力,2020,53(4):161-168.

[7] 蒙华伟,刘高,王丛,等. 基于无人机影像的输电线路自动巡检系统[J]. 微型电脑应用,2023,39(8):193-196+200.

[8] 衣晓菲. 机器视觉在无人机电力巡检中的应用研究[D]. 山东:山东大学,2020.

[9] 麦俊佳,曾懿辉,胡壮丽,等. 基于深度学习的输电线路航拍照片目标检测应用[J]. 广东电力,2020,33(9):174-182.

[10] 邵校嘉,屈勇,陈铸成,等. 基于无人机云端控制的智慧输电业务巡检方法[J]. 电网与清洁能源,2022,38(4):54-60.

[11] 韩玲,朱雪田,迟永生. 基于 5G 的低空网联无人机体系研究与应用探讨[J]. 电子技术应用,2021,47(5):1-4+10.

[12] XIAO Z Y, ZHU L P, LIU Y M, et al. A survey on millimeter-wave beamforming enabled UAV communications and networking[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2022, 24(1): 557-610.

[13] FOUDA A, IBRAHIM A S, GUVENC I, et al. UAV-based in-band integrated access and backhaul for 5G communications[C]//2018 IEEE 88th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall). IEEE,2018:1-5.

[14] 吴石松,林志达. 云边协同的电网企业人工智能平台构建设计[J]. 自动化与仪器仪表,2020(11):141-144+148.

[15] 李宁,李波,陈炜,等. 基于多旋翼无人机平台的高性能电力综合巡检系统设计与应用[J]. 电子设计工程,2021,29(24):120-124.

[16] 施巍松,张星洲,王一帆,等. 边缘计算:现状与展望[J]. 计算机研究与发展,2019,56(1):69-89.

[17] 雷波,刘增义,王旭亮,等. 基于云、网、边融合的边缘计算新方案,算力网络[J]. 电信科学,2019,35(9):44-51.

[18] 李亚国,李冠良,张凯,等. 基于人工智能与边缘代理的物联网框架设计[J]. 计算机工程,2023,49(10):313-320.

[19] 黄世青,白瑞林,覃高鄂. 基于灰色关联分析的卷积神经网络模型裁剪方法[J]. 激光与光电子学进展,2020,57(4):127-133.

[20] POLESE M, GIORDANI M, ZUGNO T, et al. Integrated access and backhaul in 5G mm wave networks: potential and challenges[J]. IEEE Communications Magazine, 2020, 58(3): 62-68.

[21] 高骏骞,周磊,曹越,等. 5G 无人机安全研究综述[J]. 移动通信,2023,47(1):59-64.

[22] 麦晓明,王锐,陈海涵,等. 输电线路无人机巡检数据链路通信系统设计[J]. 广东电力,2014(4):76-81.

[23] 于海洋,董石磊,张学智. 基于 5G 网联无人机的智慧巡防应用研究[J]. 电子技术应用,2021,47(5):11-13+18.

[24] 李昶,程锦霞,杨光,等. 5G+无人机的低空数字化发展与应用[J]. 移动通信,2019,43(9):47-52.

[25] 朱晓丹. 5G IAB 集成接入回传组网架构研究[J]. 通信技术,2020, 53(10): 2479-2483.