

5G 智能风电巡检无人机方案

Research and Application of 5G Intelligent
Wind Power Inspection Drone Solution

研究及应用

许灵军,蔡庆宇,王常玲,李 晶,尤雅南,吕 涛,包宸曦(联通数字科技有限公司,北京 100035)

Xu Lingjun, Cai Qingyu, Wang Changling, Li Jing, You Ya'nan, Lü Tao, Bao Chenxi (China Unicom Digital Technology Co., Ltd., Beijing 100035, China)

摘 要:

随着风电行业的快速发展,传统的风电巡检方式已无法满足行业需求,亟需一种高效、智能的巡检方案。提出了一种基于 5G 专网技术的智能风电巡检无人机方案,该方案通过超高速云台相机、AI 识别自动拍摄、雷达测距及智能航线规划等技术,实现了风机不停机、无需专业飞手、及时处置风机缺陷隐患的高效巡检。依托系留无人机 5G 专网系统及不停机无人机巡检方案,结合 5G 全向高增益 CPE,实现了巡检数据的实时智能处理。

关键词:

5G 专网;智能巡检;无人机;智慧风电;边缘计算

doi: 10.12045/j.issn.1007-3043.2025.02.013

文章编号: 1007-3043(2025)02-0071-06

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

With the rapid development of the wind power industry, traditional inspection methods can no longer meet industry demands, creating an urgent need for an efficient and intelligent inspection solution. It proposes an intelligent wind power inspection drone solution based on 5G private network technology. The solution utilizes high-speed gimbal cameras, AI recognition for automatic shooting, radar ranging, and intelligent flight path planning to achieve efficient inspections without stopping the wind turbines, requiring no professional drone operators, and enabling timely handling of turbine defects. The solution leverages a tethered drone 5G private network system and a non-stop drone inspection approach, combined with a 5G omnidirectional high-gain CPE, to enable real-time intelligent processing of inspection data.

Keywords:

5G private network; Intelligent inspection; Drone; Smart wind power; Edge computing

引用格式: 许灵军,蔡庆宇,王常玲,等. 5G 智能风电巡检无人机方案研究及应用[J]. 邮电设计技术, 2025(2): 71-76.

0 引言

风电场内有大量大型风力发电机组,其核心部件(如叶片和塔筒等)在制造、运输和运行中容易潜藏隐患^[1]。由于传统人工巡检方式(如望远镜、吊篮等)效率低且安全风险高,因此这些方式逐渐被无人机巡检所取代^[2]。然而,目前广泛采用的无人机巡检方案存在三大痛点:一是巡检时风机停机,这不仅导致发电量损失、风机寿命缩短,还增加了倒塔的风险^[3]。二是依赖飞手操控无人机,巡检效率低,人工成本高。三

是缺陷处置不及时,风电场大片区域无 5G 网络,巡检数据只能事后处理,一两周后才能定位缺陷,容易使缺陷不断发酵及恶化,甚至拖成重大事故^[4]。比如风机叶片出现小的损坏,如果不及时处置会演变成大的故障,严重时可能导致风机倒塌的重大事故。

为了解决上述三大痛点问题,本文将研究探索“风机不停机、无需专业飞手、缺陷及时处置”的 5G 智能巡检无人机方案,并部署应用于陆地及海上风电场,打造 5G 智慧、高效、安全的风电场。

1 方案思路

本文提出的 5G 智能巡检无人机方案是针对风电

收稿日期: 2025-01-16

场巡检场景定制设计的。具体来说,该方案基于超高速云台相机、AI 识别自动拍摄、雷达测距及智能航线规划等技术制定不停机巡检拍摄方案,实现了风机不停机、正常发电状态下的无人机自动化巡检;基于系留无人机 5G 专网系统及全向高增益 CPE 实现巡检数据的“本地实时 AI 处理+专家远程诊断+现场及时处置”能力,最终打造出“风机不停机、无需专业飞手、缺陷及时处置”的 5G 智能巡检无人机方案。该方案使巡检效率提升 8 倍,显著提升风电场发电量并大幅降低风电场运维成本,从而实现风电场生产运维的降本增效。本文提出的 5G 智能巡检无人机方案支持如下核心功能。

a) 不停机巡检。在风机正常发电的状态下,5G 智能巡检无人机方案能够实现真正的随到随检,无需停机即可实时发现风机缺陷。相较于风机停机的无人机巡检方案,该方案无需停机就可完成巡检,大大减少了风机发电量损失,并避免了风机启停的电能消耗及风机寿命缩短,解决了风机停机期间遇到强风导致的倒塔风险问题。

b) 智能自动化巡检。5G 智能巡检无人机方案支持自动规划巡检航线并自主智能飞行完成巡检工作,无需专业飞手现场规划航线及操控无人机,因此更加智能化和自动化,可将单个风机的巡检时间缩短至 5 min,其效率是风机停机的无人机巡检方案的 8 倍。

c) 实时智能处理巡检数据。5G 智能巡检无人机方案依托系留无人机 5G 专网系统,巡检数据可以通过 5G 专网实时传输至 MEC 平台进行 AI 分析处理,并可

于 10 min 内完成 AI 分析处理并出具检测报告。

d) 及时定位和处置风机缺陷。基于检测报告的风机缺陷识别结论,现场巡检人员可以对风机缺陷现场进行及时处置。如果现场巡检人员对于某些缺陷结论或处置方案存疑,可通过 5G 全向高增益 CPE 接入超远距离的公网 5G 基站,现场远程咨询风机技术专家确定结论,及时定位缺陷并现场处置。

2 方案设计

面向风电场巡检场景的 5G 智能巡检无人机方案如图 1 所示,主要包括 5G 巡检无人机、系留无人机 5G 专网系统、5G 无人机机库及远程 5G 智能巡检管理平台等部分。5G 巡检无人机从无人机机库起飞升空并采用高速云台相机对风机关键部位进行全面清晰的拍摄巡检。巡检数据通过 5G 机载终端实时传输至系留无人机 5G 专网系统。运行于 MEC 平台(内置于 5G 多网元一体机)的本地 5G 智能巡检管理平台对数据进行实时智能处理并自动生成巡检报告。通过 5G 无人机机库的 5G 全向高增益 CPE 与超远距离公网 5G 基站建立的通信链路,巡检报告被实时传输至远程 5G 智能巡检管理平台,供风机技术专家查看和确认。如果现场巡检人员对巡检报告的某些缺陷结论或处置方案存疑,也可通过 5G 全向高增益 CPE 与公网 5G 基站建立的通信链路,实时远程咨询风机技术专家,以便确定结论,从而及时定位缺陷并现场处置。下面将逐一介绍 5G 智能巡检无人机方案的各个组成部分。

2.1 5G 巡检无人机

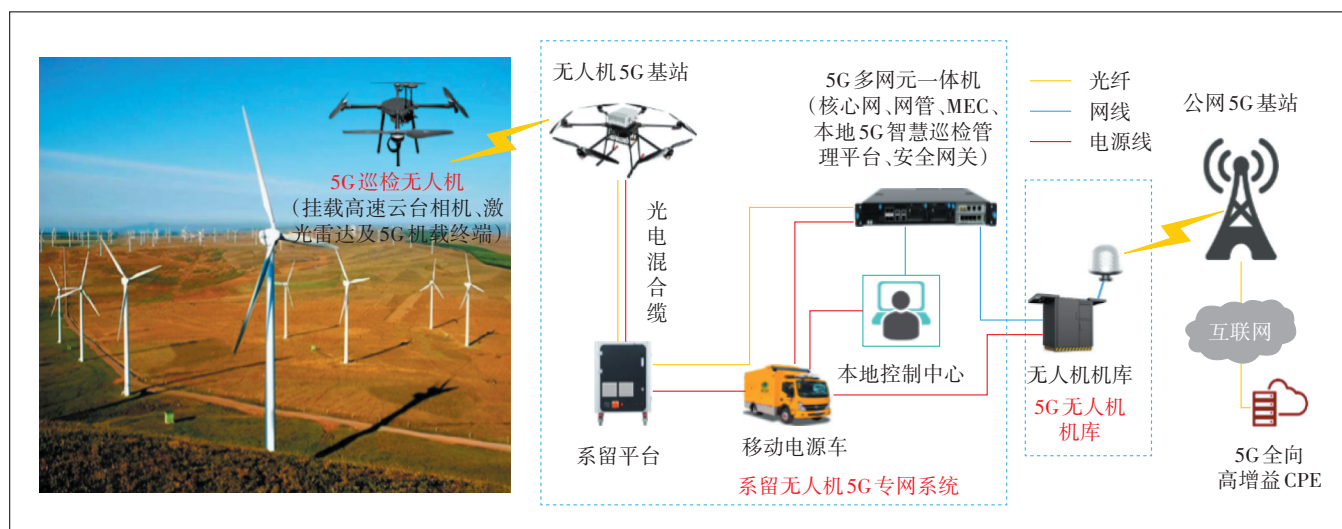


图1 面向风电场巡检场景的5G智能巡检无人机方案

多旋翼无人机挂载超高速云台相机、5G机载终端及激光雷达,能够在距离风机40 m的位置清晰拍摄时速高达400 km的风机叶片,实现了风机不停机检测,在不影响风机正常发电的情况下,做到随到随检。下面将介绍5G巡检无人机的各个组成部分。

a) 多旋翼无人机。作为飞行载具,多旋翼无人机挂载超高速云台相机、5G机载终端及激光雷达。多旋翼无人机实物图片如图2所示,其最长续航时间可达55 min,最高飞行高度为海拔7 000 m,并且具备最大12 m/s的抗风能力。在展开状态下,该无人机支持IP55防护等级,可在-20℃~50℃的环境中正常工作。



图2 多旋翼无人机实物图片

b) 超高速云台相机。超高速云台相机为集成全局快门传感器的无损画质广域相机,其像素高达1.2亿,无需差值算法即可使成像效果更为清晰。该相机的快门速度高达16 000次/s,可在运动中拍摄或拍摄运动的物体。动态范围高达80 dB,低读出噪声与高满阱容量的结合,使得相机能够同时从阴影及高光区域收集图像。

c) 5G机载终端。5G机载终端内置AI算法,支持主流5G频段、4天线MIMO及外接高增益天线,为巡检无人机提供5G网联能力。5G机载终端内置算力高达21TOPS,基于AI深度学习识别算法自动捕捉高速旋转的叶片瞬间并控制相机进行拍摄。此外,它还支持自主航线规划、避障、飞行的各类AI算法,支撑无人机自主航线规划、自动避障、自动飞行及风机图像的自动采集。

d) 激光雷达。激光雷达具备测距功能,确保5G巡检无人机与风机保持合理的安全拍摄距离。激光雷达还可以实时获取周围环境的三维点云数据,包括物体的形状、位置和距离等信息,这使得无人机能够感知并避开障碍物,确保飞行的安全性。

2.2 系留无人机5G专网系统

系留无人机5G专网系统(见图1中大虚线框),主要包括无人机平台、系留平台、5G基站、5G多网元一体机、本地控制中心以及移动电源车等几部分。系留无人机5G专网系统可以快速提供广覆盖的5G专网,满足风电场5G无人机巡检业务需求,具有覆盖范围广、建网速度快、部署灵活机动、建网成本低等特点。下面将绍系留无人机5G专网系统的各个组成部分。

a) 无人机平台。无人机平台作为5G基站及天线的搭载平台,具备在大约5 min内升至200 m高空并长期悬停的能力^[5]。无人机平台与系留平台之间通过光电复合缆连接,其中光电复合缆中的光纤用于连接无人机平台搭载的5G基站与5G多网元一体机,光电复合缆中的电缆用于给无人机平台及其搭载的5G基站供电^[6]。无人机平台搭载的5G基站与天线相连,将基站射频接口输出的射频信号转换为电磁波发射出去。本方案的无人机平台采用定制多旋翼无人机(见图3)。该平台的最大载荷不低于20 kg,搭载了飞行控制系统,集成了工业级MEMS惯性传感器,同时配备了具有冗余备份功能的飞行控制器,从而确保其高可靠性。



图3 多旋翼无人机平台实物图片

b) 系留平台。系留平台主要控制无人机平台的升降及飞行,由移动电源车为其供电。系留平台从移动电源车获取的电力,除满足自身的供电外,还供给无人机5G基站使用^[7]。系留平台采用自动收放线及排线设计,可配合无人机实现一键自动起降功能^[8]。本方案采用的系留平台实物图片如图4所示。

c) 5G基站。机载5G基站采用了基带与射频一体化的架构设计^[9],并专门设计了可挂载于无人机平台的安装件。基带部分基于多核ARM和FPGA的方案,具备完整的5G NR无线接入功能,支持100 MHz载波带宽及4天线MIMO,最大激活用户数为200个。射频部分采用氮化镓(GaN)+Doherty放大器+数字预失真



图4 系留无人机5G专网系统采用的系留平台实物图片

(DPD)的技术组合来设计功率放大器,并采用热管及微通道散热技术提高散热能力,从而实现5G基站的功耗低于150 W,整机重量低于8 kg。机载5G基站实物图片如图5所示。

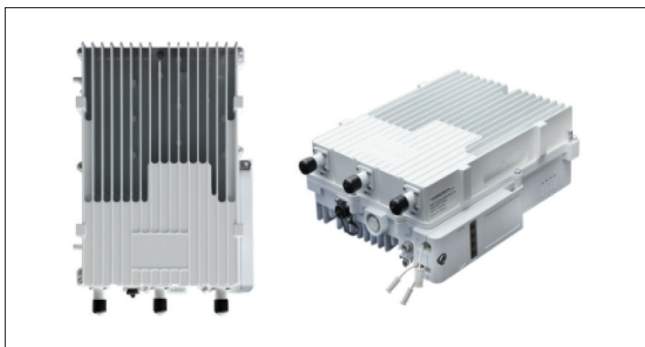


图5 机载5G基站产品实物图片

d) 5G多网元一体机。5G多网元一体机将核心网、网管、MEC及安全网关的功能集成于一体,同时具备5G核心网、网管、MEC以及安全接入网关的全部功能。5G多网元一体机采用轻量级设计方案,并针对行业5G专网的特殊需求进行了定制,具备完整的核心网用户面及控制面功能,内置了IMS系统,可同时提供语音和数据业务。

基于MEC平台的计算资源,可按需部署各类智能应用。为了实现巡检数据的本地实时处理,本地5G智能巡检管理平台被部署于MEC平台上,负责对无人机巡检数据进行实时智能处理并自动生成巡检报告。基于MEC平台的处理能力及AI缺陷识别算法,巡检管理平台可在10 min内完成单台风机巡检数据的AI分析处理并自动出具巡检报告。巡检管理平台能够自动识别6大类、28小类的风机缺陷类型,具体缺陷类型以及对应的缺陷级别、处置建议如表1所示。

表1 5G智能巡检管理平台可以识别的风机缺陷类型

缺陷类别	等级划分			
	LV1(无需处理)	LV2(可随着叶片定维一起维修)	LV3(安排专项维修)	LV4(风机立即停机叶片有可能报废)
表面缺陷	①航标漆脱 ②油渍污渍 ③胶衣脱落(20×20 cm以下)	胶衣脱落(20×20 cm以上)	玻纤损伤	-
雷击损伤	-	接闪器损伤	①前缘后缘开裂 ②玻纤损伤	爆炸性开裂
附件脱落损伤	-	①涡流发生 ②导雷条 ③涡流板 ④排水孔 ⑤接闪器 ⑥锯齿型尾缘	①铝叶尖丢失 ②挡雨环	-
前缘后缘开裂	-	-	开裂长度2 m以下	开裂长度2 m以上
表面裂纹	表面划痕	胶衣裂纹(20 cm以下)	①玻纤裂纹 ②胶衣裂纹(20 cm以上) ③后缘弦向裂纹	-
前缘腐蚀	-	①保护膜损伤 ②胶衣腐蚀	①玻纤腐蚀 ②合模缝裸露	-

在网络安全方面,当系留无人机5G专网系统可以连接公网时,电力内网部署的安全接入网关与5G巡检无人机的5G机载终端之间实现纵向认证功能^[10],从而保障电力网络安全及无人机5G巡检业务安全。当系留无人机5G专网系统无法连接公网时,基于MEC部署的安全接入网关与5G巡检无人机的5G机载终端也可以实现纵向认证功能,以保障5G无人机巡检业务安全。

a) 本地控制中心。本地控制中心运行在1台服务器中,控制MEC运行的各类智能应用并展示界面,并对5G巡检无人机、系留无人机5G专网系统以及5G无人机机库进行控制及管理。

b) 移动电源车。移动电源车作为储能系统,主要包括锂电池电池组及高压电源逆变器2个部分^[11],其中锂电池电池组负责提供直流电,高压电源逆变器负责将直流电转换为380 V的高压交流电并供给系留平台,为系留平台、无人机平台及5G基站供电。同时,锂电池电池组提供的直流电为5G多网元一体机、本地控制中心及5G无人机机库供电。为了提升部署的便利性,移动电源车经过改装,可集成安装5G无人机机库和系留无人机机库^[12]。其中,5G无人机机库用来收纳

及为5G巡检无人机充电,系留无人机机库用来收纳无人机平台及5G基站。在风机巡检作业时,首先开启系留无人机机库,放飞系留无人机,待系留无人机升空至200 m高度,稳定悬停提供5G巡检专网覆盖后,再开启5G无人机机库,放飞5G巡检无人机开展风机巡检作业。

2.3 5G无人机机库

5G无人机机库主要负责完成巡检无人机的收纳、充电及5G数据传输功能^[13],它包括无人机机库和5G全向高增益CPE等2部分。无人机机库是协助5G巡检无人机全流程作业的地面自动化设施,可实现无人机的全自动作业,无需人工操作干预^[14]。5G全向高增益CPE集成自适应切换的3个定向高增益天线,在保持全向通信的前提下,天线增益高达12 dBi,并具备高发射功率,因此可接入距离远达30 km的公网5G基站,为无人机机库提供高速可靠的5G传输通道。本方案采用的机库重180 kg,长和宽分别是1.28 m和1.1 m,实物图片如图6所示。

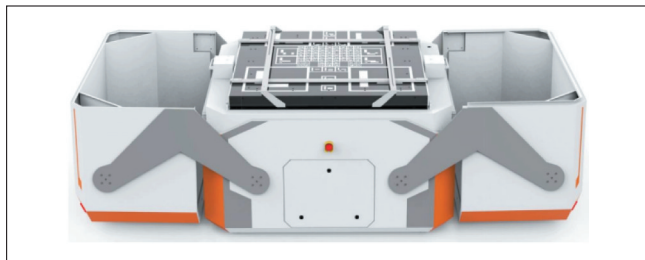


图6 无人机机库实物图片

2.4 5G智能巡检管理平台

基于5G智能巡检管理平台可实现风机叶片无人机巡检的自动化及智能化。具体来说,利用AI智能识别技术和算力精准发现风机叶片故障点,及时上报缺陷隐患,从而协助巡检人员快速完成决策分析。无人机可代替人工进行设备检测,节约整体巡检时间,并扫清视觉盲区^[15]。

本方案部署了2套5G智能巡检管理平台,一套是部署于5G多网元一体机的MEC平台中的本地5G智能巡检管理平台,主要用来完成巡检数据的本地实时处理及自动生成巡检报告。另一个是部署于互联网的远程5G智能巡检管理平台,主要用来管理本地5G智能巡检管理平台上传的巡检报告,方便风机技术专家及时查看巡检报告并远程指导巡检人员确定巡检结论并及时处置缺陷隐患。此外,远程5G智能巡检管

理平台也作为本地5G智能巡检管理平台的备份,一旦本地5G智能巡检管理平台无法及时处理巡检数据,5G巡检无人机的巡检数据将通过“系留无人机5G专网系统→无人机机库→5G全向高增益CPE→公网5G基站→互联网”的路径传输至远程5G智能巡检管理平台,进行实时AI处理并自动生成报告。

3 方案应用效果

以河北省张家口市的某风电场为例,该风电场拥有风机总台数186台,总装机容量为496 MW。该风电场采用了1套5G智能巡检无人机方案,实现了无人机随到随检,AI自动分析叶片缺陷,自动检测及分析识别28类风机叶片缺陷,自动生成巡检报告,对叶片缺陷了如指掌,风机风险隐患得以及时处置。该风电场获得的收益包括增加了发电收益、降低了人工成本、降低了风机反复启停的电网能耗以及风机维护成本。经核算,本方案每年可给该风电场带来343.18万元的直接经济效益。本方案生命周期在5年以上,累计直接经济效益超过1 715.9万元,投入产出比高达5.8倍,还具备促进安全生产、推动行业发展等间接经济效益。

详细核算过程如下。

a) 增加发电收益。采用传统无人机巡检方案时,每次巡检每台机组停机时间按照2 h计算,约损失99.2万kWh电量,按上网电价0.5元/kWh计算,每停机巡检一次该风电场损失达49.6万元。按照每2个月巡检1次风机计算,则该风电场每年停机巡检的损失为297.6万元。该风电场应用5G智能巡检无人机方案,每年不停机巡检给风电场增加的发电收益达297.6万元。

b) 降低人工成本。5G智能巡检无人机方案无需专业飞手操作,因此给风电场节省2个专业飞手的岗位,若专业飞手每年的人力成本按20万元/人计算,则该方案每年可为风电场节约40万元的人工成本。

c) 降低风机反复启停的电网能耗。每台风电机组启动1次平均耗费100 kWh。通过减少风机反复启停,每年可以节约的电网能耗为:186×6×100 kWh×0.5元/kWh=5.58万元。

d) 降低风机维护成本。每台风机每年可以减少6次反复启停,使风电机组寿命更长,故障率更低,且基本消除倒塔风险,从而降低了风机维护成本。

与常规风电无人机巡检方案相比,5G智能风电巡检方案具有巡检效率高、发电量大、风机寿命长、无额

外能耗、作业难度低、缺陷能够得到及时处置等优点,可大幅降低运维成本并提升发电收益,具体对比如表2所示。

4 结论

本文提出了一种创新的5G智能风电巡检方案,旨

表2 5G智能风电无人机巡检方案与常规风电无人机巡检方案对比

对比项目		常规风电无人机巡检方案	5G智能风电无人机巡检方案
智能	专业飞手	需要专业飞手	无需专业飞手
	数据处理	事后处理,通常1~2周出具报告	本地实时处理,10 min内自动出具报告
	缺陷隐患定位	巡检作业1~2周后定位缺陷隐患	巡检作业10 min内定位缺陷隐患
	缺陷隐患处置	巡检作业1~2周后折返现场处置	现场及时处置
高效	风机停机时长	2 h	0 停机
	巡检效率	单风机耗时约40 min	单风机仅耗时5 min,效率提升8倍
	风电场发电量	较低(巡检停机)	较高(巡检不停机)
降本	风机寿命	较低(反复启停风机寿命降低)	较高(无需反复启停风机)
	额外能耗成本	高(启动风机消耗电能)	0(风机一直运转,无额外电能消耗)
	运维成本	高(巡检效率低,需更多人力物力;风机寿命低维修成本高)	低(巡检效率提升8倍,人力物力需求低;风机寿命高,维修成本低)
安全	作业风险	高(无人机距离风机10 m以内飞行)	极低(距风机30~60 m,处于绝对安全距离)
	倒塌风险	高(巡检停机遇强风存在较高倒塌风险)	低(基本消除倒塌风险)

在解决现有无人机巡检的困难,如风机停机导致的发电损失、飞手操控效率低下和缺陷处置不及时等问题。通过搭建系留无人机5G专网系统,该方案实现了在风机不停机的情况下无人机自动巡检,并能实时处理数据和生成报告。该方案的技术创新包括高速云台相机、AI缺陷识别、系留无人机网络和边缘计算,使巡检效率提升了8倍,且安全性更高。应用案例表明,该方案在实际运营中能够快速识别并处置缺陷,带来了显著的经济效益,投入产出比达5.8倍。总体而言,该方案不仅积极响应国家政策导向,也促进了绿色低碳发展,具有广泛的社会效益和行业推广潜力。

参考文献:

[1] 刘宁,苗春雷,王志鹏,等. 5G技术在智慧风电中的应用[J]. 长江信息通信,2024,37(7):212-215.
[2] 许冬,宋文涛,田武成,等. 数字化技术在风机叶片状态监测与可持续性管理中的应用[J]. 智能建筑与智慧城市,2024(8):66-68.
[3] 李哲,李雨欣,董秀芬,等. 基于无人机的风机叶片智能巡检及缺陷检测[J]. 设备管理与维修,2024(1):152-157.
[4] 马敏敏,刘昊,高毓欣,等. 基于无人机与人工智能的风机叶片全自主巡检[J]. 电气时代,2023(S2):44-48.
[5] 郎为民,裴云祥,王振义. 系留无人机应急通信系统研究[J]. 电信快报,2021(9):1-6.
[6] 郎为民,邹力,王振义. 系留无人机通信系统部署问题研究[J]. 电信快报,2021(11):1-7.
[7] 郎为民,马卫国,赵卓萍. 系留无人机系统研究[J]. 电信快报,

2022(11):1-6.
[8] 伍元铭. 系留无人机自动收放线系统设计与研究[D]. 四川:中国民用航空飞行学院,2024.
[9] 付吉祥,许灵军,程广辉. TD-LTE一体化微站产品规划研究[C]//全国青年通信学术年会,全国物联网与信息安全学术年会. 2012.
[10] 吴天宇,孙碧颖,录鹏东. 电力网络中的安全保障与攻防技分析[J]. 集成电路应用,2024,41(6):210-211.
[11] 石雪倩,瞿仕波,廖伟雄. 移动电源车联合供电控制方法研究[J]. 电工技术,2024(9):146-147.
[12] 鹿彬,王刚,李建兴. 车载智能充电无人机机库系统设计[J]. 科技创新与品牌,2018(9):68-71.
[13] 贾展鹏,王永璞,杨博文. 智能化无人机库技术应用可行性研究[J]. 内蒙古石油化工.2024,50(7):77-81.
[14] 张钧,熊隆友. 无人机库自动巡检系统行业应用现状[J]. 中国科技信息,2023(24):135-137.
[15] 吴英才. 基于目标检测算法的风电机组叶片损伤检测研究[D]. 吉林:东北电力大学,2024.

作者简介:

许灵军,毕业于北京邮电大学,高级工程师,博士,主要从事5G行业应用方案研究工作;
蔡庆宇,毕业于北京邮电大学,高级工程师,硕士,主要从事5G行业应用方案研究工作;
王常玲,毕业于北京交通大学,教授级高级工程师,硕士,主要从事5G行业应用方案研究工作;
李晶,工程师,硕士,主要从事AI算法及低代码平台研究工作;尤雅南,工程师,学士,主要从事5G行业应用方案研究工作;吕涛,工程师,学士,主要从事5G行业应用方案研究工作;包宸曦,高级工程师,硕士,主要从事5G行业应用方案研究工作。