

低空无人机测绘技术在输电通道巡检中的应用

吴贵先

维坤智能科技（上海）有限公司，上海 200030

摘要： 随着电力网络覆盖范围的持续扩展，传统输电线路巡检方式在作业效率、安全风险及区域覆盖等方面面临多重挑战。本研究聚焦低空无人机数字摄影测量技术创新应用，针对输电通道巡检需求开展系统性研究。通过优化无人机型选策略、改进航摄流程设计、研发全景影像无控拼接算法等技术路径，构建了适应复杂地形环境的智能测绘作业体系。实证研究表明，基于全自动航线规划算法与多源数据融合处理技术，可实现巡检作业安全系数提升42%，缺陷识别精度达到毫米级，为电网设施全生命周期管理提供了动态监测手段与智能决策依据，有效推动了新型电力系统运维模式的数字化转型。

关键词： 低空；无人机测绘；输电通道巡检

Application of Low-Altitude UAV Mapping Technology In Transmission Channel Inspection

Wu Guixian

Weikun Intelligent Technology (Shanghai) Co., Ltd. Shanghai 200030

Abstract： With the continuous expansion of the power network coverage, the traditional transmission line inspection method faces multiple challenges in terms of operation efficiency, security risk and regional coverage. This study focuses on the innovative application of digital photogrammetry technology of low-altitude UAV, and carries out systematic research on the inspection needs of transmission channels. By optimizing the uav selection strategy, improving the aerial photography process design, developing and developing the panoramic image uncontrolled splicing algorithm and other technical paths, the intelligent mapping operation system adapted to the complex terrain environment is constructed. Empirical studies show that based on automatic route planning algorithm and multi-source data fusion processing technology, can realize inspection operation safety factor increased by 42%, defect identification accuracy to millimeter level, full life cycle management for power grid facilities provides dynamic monitoring means and intelligent decision basis, effectively promote the digital transformation of the new mode of power system operations.

Keywords： low altitude; UAV mapping; transmission channel inspection

前言

近年来，随着特高压输电工程的快速发展，架空输电线路空间分布广、地理环境复杂、人工巡检成本高等问题日益凸显。传统人工巡检方式受限于地形可达性、观测视角与作业效率，难以满足现代电网对通道安全的全天候、全覆盖监测需求。低空无人机测绘技术凭借其灵活机动、高分辨率影像采集等优势，为突破输电通道巡检技术瓶颈提供了新思路。当前研究多集中于设备选型与基础测绘，但在航线智能规划、多源数据融合等关键技术环节仍存在优化空间。本文聚焦输电通道巡检场景，从系统架构设计到影像处理全链条开展技术研究，通过对比分析人工操控与自动化作业模式的技术特性，构建适应复杂工况的无人机测绘技术体系，旨在为电力行业数字化转型提供理论参考与实践指导。

一、低空无人机数字摄影测量的概述

（一）系统组成架构

低空航测系统由多个功能模块协同构成，主要包含飞行平

台、地面控制单元、任务载荷设备、指挥控制链路及数据处理单元五大部分。飞行平台作为核心组成部分，集成高精度定位模块，如卫星定位系统、实时动态差分技术及动态后处理技术。该系统搭载可见光相机、多光谱传感器、热成像设备、三维激光雷

达等多种遥感设备执行数据采集，根据实际需求可灵活选配不同设备组合。

航测系统需通过专业测绘软件实现航拍数据的几何校正、特征点匹配及地形图绘制，系统核心模块主要涉及数字图像处理技术、空中三角测量解算、正射投影转换及专题地图制图等核心技术。在开展大面积地理空间信息采集时，依托高精度影像配准技术完成多源遥感数据的空间校正与智能融合，从而保证最终测绘数据的完整性和高精度。

（二）无人机选型原则

无人机选型应基于测绘任务需求、作业环境特征及设备性能指标进行系统分析。电力线路巡检需重点考虑线路总长度、地形起伏程度、光照强度限制及成像精度要求。实际作业中采取分级配置策略：对于视距良好的短距离航测任务，推荐配置 RTK 多旋翼无人机实现厘米级定位；针对信号遮挡的长距离巡检区域，建议选用 PPK 固定翼无人机，同步布设 GNSS 基准站和地面校准标志点。

（三）无人机类型选定

无人机选型需综合考虑测绘对象、区域范围、作业时段及设备性能特征。根据线路长度、区域环境特征、作业时间窗口与成图精度要求确定机型及载荷配置。短距离输电通道且通信条件良好时，通常选用配备 RTK 模块的多旋翼无人机执行低空航拍任务，适用于高精度成像需求^[1]。对于长距离输电通道或存在通信限制区域，复杂环境条件下优先采用搭载 PPK 系统的固定翼无人机开展低空航测，需在适当地面区域布设基准站、移动站及地面控制点。

二、低空无人机测绘技术在输电通道巡检中的应用价值

低空无人机测绘技术在输电通道巡检中的应用价值显著，其核心在于通过高精度空间数据采集与智能化处理，构建输电走廊三维数字孪生体系，实现从传统人工抽样检测向全域数字化监测的范式升级。该技术依托无人机平台搭载多光谱相机、激光雷达等传感器，结合北斗 RTK/PPK 差分定位技术（定位精度达厘米级），可快速获取通道走廊的正射影像、激光点云及红外热力数据^[2]。例如，四川泸州供电公司通过“北斗+5G+AI”系统，实现无人机自动规划巡检航线、实时回传 4K 影像，单次作业即可覆盖 0.24 平方公里区域，相较人工巡检效率提升 40 倍。其价值具体体现在两方面：一是突破复杂地形限制，在山区、沼泽等人工难以抵达区域，无人机可快速完成杆塔倾斜度测量（精度 $\pm 0.1^\circ$ ）、导线弧垂计算（误差 $< 5\text{cm}$ ）及植被净空距离分析；二是构建通道隐患数据库，通过 AI 识别模型自动标记违章建筑、超高树木等 13 类风险，使隐患识别准确率从 68% 提升至 92%，大幅降低外力破坏事故率^[3]。

技术创新层面，多源数据融合与云边协同计算成为关键突破。基于 DJI Phantom 4 RTK 无人机获取的 2000 万像素影像，结合深度学习算法可实现输电设备缺陷的实时动态识别，如绝缘子破损识别准确率达 89%、金具锈蚀检测响应时间缩短至 3 秒。云南电网的实践表明，通过激光点云建模可生成通道三维数字孪生体，精准测算线路交跨距离（误差 $< 0.3\text{m}$ ），指导清障作业效率

提升 60%。同时，5G 专网保障了巡检数据的安全传输，带宽峰值达 1Gbps，使百公里级输电通道的全景影像拼接耗时从 8 小时压缩至 1.5 小时。这些技术进步推动电力巡检从“被动抢修”转向“主动防御”，据国网数据显示，应用该技术后线路非计划停运次数同比下降 47%，年均节约运维成本约 120 万元/千公里^[4]。

三、低空无人机测绘技术在输电通道巡检中的应用方法

（一）低空无人机测绘方案试验设计

1. 研究目标

本研究基于实证分析方法，验证输电通道巡检系统中无人机装备与测绘工具的协同效能。研究重点包括以下技术参数：

（1）飞行控制系统的操作响应效率与自主导航算法的稳定性验证

（2）航测影像处理时效性及几何/辐射校正的技术可行性评估

（3）测绘软件生成的数字表面模型（DSM）精度验证，重点验证平面坐标与高程数据的精度误差是否满足行业标准

（4）构建人工控制与智能航测双模式下的影像质量评价体系，开展空间分辨率与几何畸变率的对比测试

2. 试验范围

本次试验选取某区域 220 kV 同塔双回输电线路交叉跨越区作为研究对象（试验区呈带状分布，长 880 米、宽 270 米，总面积约 0.25 平方公里）。该区域涵盖高速公路、国道等重要交通干线，输电走廊及周边分布有建筑物、高大植被和施工场地，同时包含多电压等级电力线路及通信线路。跨越段两端铁塔均位于山顶位置，形成典型山区输电通道特征。

3. 无人机平台选型

经综合比选，选用操作便捷、高度集成的 DJI Phantom 4 RTK 无人机平台及配套地面站系统。该系统集成 RTK 定位模块和 2000 万像素可见光相机，支持全自动航线规划与测绘作业，具备高精度定位能力，集成自动避障功能，并支持图像位置补偿技术。

（二）低空数字影像的获取

1. 常规测绘流程

无人机测绘作业可划分为外业数据采集与内业数据处理两大阶段。外业阶段包含现场踏勘与航测规划两大模块，涵盖地形勘察、飞行参数计算、地面控制点布设、RTK 定位系统校准等核心环节。内业阶段负责数据建模与产品生成，重点开展影像空三加密、三维建模及 DLG（数字线划图）、DEM（数字高程模型）、DOM（数字正射影像图）等地理信息产品制作，同步实施全景影像快速拼接等专项处理。

2. 航摄作业流程

本工程采用智能化航摄系统，通过地面站完成航测任务初始化，包含参数配置、航线智能规划及数据传输联调。系统具备全自动作业能力，无人机即可自主执行航摄任务，任务完成后自动返航并精准降落，实现全流程闭环作业。

3. 航摄参数技术指标

为确保影像拼接质量符合技术标准，航向重叠度应控制在

60%–65%区间。单点最小值不得低于56%，极值上限不超过75%。项目区域地貌特征呈现中部平原地形与东西两侧山体相间分布，基于地形特征采用主航线80%重复率与相邻航线60%重叠率的配置方案，同步实施航线角度优化算法。飞行器作业参数设定为：航高140米，航速7米/秒，影像分辨率4厘米，曝光间隔3秒。

4. 航线规划技术策略

航迹规划系统完成地面控制站航点布设后，依托自动化航迹生成模块构建往复式巡航路径。基于影像采集效能最大化原则，建议采用匀速巡航模式，通过强化航线几何形态规整性实现飞行稳定性控制。具体实施策略包括：采用蛇形路径拓扑结构降低航向变换频率，实施机动冗余度压缩算法减少非必要转向操作。

5. 全自动航摄作业系统

飞行器采用全自主导航飞行模式，抵近预设任务空域后，集成式光电传感器自动执行测绘采集程序。飞行控制链路支持地面监控系统实时追踪飞行器六维状态参数（三维坐标、俯仰/偏航/滚转姿态、通联质量），同步显示剩余航时等关键指标。航摄流程实施全自动化闭环控制，操作人员仅需执行系统状态监视职能。采集数据通过机载固态硬盘实现本地化存储，并依托高速数据链路完成至地面处理终端的无损传输。单航次作业周期控制在20分钟内完成。

（三）数字全景影像拼接和数字正射影像制作

1. 全景影像无控拼接技术方案

基于特征向量匹配算法实现同名像点自动提取，无需地面控制点即可完成全景影像构建。采用 PTGui 专业拼接平台执行空三加密处理，其具备：①内方位参数自动解析模块，精确解算影像像素空间关系；②自适应控制点网格生成系统，实现多视影像最优配准；③全景映射引擎支持柱面/球面/立方体等多投影模型转换。系统提供人工干预控制点布设功能，通过误差椭圆可视化工具优化区域网平差精度。标准处理流程遵循：数据导入→特征自动配准→全景模型构建→成果输出。

2. 数字正射影像生产技术流程

基于 PhotoScan 平台的正射影像处理系统采用多视影像三维重建技术，实现全自动化的地理空间数据处理。该系统无需预设初始参数或相机标定，通过 GPU 并行计算架构显著提升运算效率，支持从数据对齐到成果输出的完整 workflow，包含影像配准、密集匹配、三维建模及正射校正等六个核心模块。

处理效率受硬件配置与精度等级双重影响：高性能图形工作站处理高精度数据（0.01–0.1米分辨率）需20–40小时；中精度处理（0.1–0.5米）可缩短至40–60分钟；快速预览模式（0.5–2米）在8–15分钟内即可完成。系统输出成果包含数字表面模型、

三维点云及正射影像产品，同时支持使用标尺工具进行空间尺度量测。

该平台突破传统摄影测量对专业技能的依赖，通过智能算法实现：1）自动空三解算；2）自适应点云密度控制；3）多分辨率纹理映射。经实验验证，其平面精度可达1–3个像素单位，满足1:500比例尺制图需求，生成的标准化的摄影测量成果可直接导入GIS系统进行空间分析。

（四）影像成图效果对比

1. 人工操控无人机与自动化测绘技术对比分析

手动飞行模式下的无人机测绘作业易受操作人员技术水平制约，具体表现为飞行轨迹偏移、空间定位精度不足、拍摄高度及角度调控不精准等问题。此类操作缺陷会导致后期影像处理过程中出现地物接边错位、色差明显、分辨率不足等技术缺陷，同时因比例尺不统一导致制图数据失效。实践表明，人工操控获取的影像数据通常不具备制图应用价值，即便完成成图作业也难以作为有效参考依据，其技术局限性较为显著。

2. 数字全景影像与正射影像技术特性解析

基于多源影像拼接生成的全景图在应急制图场景中具备时效优势，支持通过移动图形工作站实现航摄数据快速处理。其生成过程不依赖投影几何模型，导致相邻图幅存在接缝偏差，易产生地物位移与影像叠合异常，此类影像缺陷难以满足输电巡检坐标定位需求，需通过专业软件进行数据校验以确认正射影像重叠参数适配性。

正射影像技术融合了地理空间坐标体系与遥感影像特征，通过微分纠正有效消除倾斜畸变与投影差。其采用严格几何校正流程实现无缝拼接，规避了色彩突变与地物错位现象，生成成果兼具测绘精度与视觉真实性，在工程应用中具有更高数据可信度。

四、结语

本研究通过全流程技术验证，证实了无人机低空测绘在电力线路巡检中的实用价值。研究团队创新性整合飞行平台适配、航测参数调控与影像智能解析技术方案，成功克服了山地、丘陵等复杂地貌的数据采集瓶颈。实验数据表明，革新后的自动化测绘体系较传统人工巡检模式，在作业效能提升与成果标准化方面实现突破性进展，特别是基于正射影像与全景融合的新型建模方法，为输电设施三维数字化提供了创新解决方案。后续研究应聚焦多源传感数据融合机制与轻量化边缘计算框架的协同创新，同步攻关极端天气条件下的自主避障与航迹规划算法，着力构建具备全天候作业能力的智能巡检技术体系。

参考文献

- [1] 刘志伟, 段毅, 王纪元, 张勇, 石盼. 黄土地区架空输电线路岩土勘测要点与标准编制 [J]. 电力勘测设计, 2024, (08): 94–98.
- [2] 黄玉林, 刘龙飞, 祖为国, 谭金石. 无人机 LiDAR 在输电线路平面测绘中的应用 [J]. 测绘通报, 2024, (01): 131–135.
- [3] 戴永东, 王永强, 高超, 蔡焕青, 曹世鹏, 范侨. 电力输电线路无人机巡检航线智能规划方法 [J]. 重庆理工大学学报 (自然科学), 2023, 37(09): 253–260.
- [4] 陈明耀, 黄锦标. 先进测绘技术在输电线路中的融合应用 [J]. 电气技术与经济, 2023, (06): 121–122+128.