

基于 BIM 与无人机巡检的输电线路施工质量智能管控研究

李 强

国网信阳供电公司 河南 信阳 464000

【摘要】：输电线路作为电力系统核心骨干，其施工质量直接决定电力输送的安全性、稳定性与经济性。当前输电线路多穿越山地、河湖等复杂地形，传统质量管控依赖人工巡检与二维图纸核对，存在效率低下、覆盖不全、隐患识别滞后、数据追溯困难等问题。随着智能电网建设提速，输电线路施工规模扩大、工艺要求提升，传统管控模式已难以适配精细化、高效化的质量管控需求。同时，BIM 技术的三维建模与信息集成优势、无人机巡检的广覆盖与非接触式作业特点，为突破传统管控瓶颈提供了技术支撑，二者融合应用成为行业发展必然趋势。

【关键词】：BIM；无人机巡检；输电线路；施工质量；智能管控

DOI:10.12417/2811-0536.26.05.070

引言

提升输电线路施工质量管控水平，是保障电力系统安全可靠运行、降低运维成本、推动智能电网高质量发展的关键举措。传统管控模式下的人工误差与效率短板，易导致质量隐患漏判、整改不及时，进而影响线路使用寿命与供电稳定性。推动 BIM 与无人机巡检技术深度融合，可实现施工质量的可视化、智能化、全流程管控，有效弥补传统模式不足。这一融合应用不仅能提升质量检测的精准度与效率，还能实现质量信息的全生命周期追溯与协同管理，对推动输电线路施工领域技术升级、强化质量风险防控、保障能源安全具有重要的现实意义与应用价值。

1 BIM 与无人机巡检融合的技术可行性

1.1 数据交互适配性支撑技术融合落地

BIM 技术具备三维模型参数化建模与全生命周期数据管理能力，可将输电线路施工各环节的设计参数、质量标准、工艺要求等结构化信息集成存储。无人机巡检搭载高清摄像、红外热成像、激光雷达等设备，能快速采集施工场景的实景数据、几何尺寸、缺陷信息等非结构化数据。通过数据接口标准化开发，可实现无人机巡检数据与 BIM 模型的实时对接，完成非结构化数据向结构化数据的转化与关联。同时，二者在时空坐标系上的精准匹配，可实现施工场景的虚实融合可视化，为质量管控提供数据互通基础，技术层面具备明确的适配性与落地条件。

1.2 功能互补性提升管控智能化水平

输电线路施工场景复杂、跨度大，传统管控方式存在盲区多、效率低等问题。BIM 模型可提前预判施工难点、优化施工方案，但其动态更新能力不足；无人机巡检具备高效、全域、全天候的场景覆盖优势，

可实时捕捉施工动态，但缺乏对数据的深度分析与关联应用能力。二者融合后，无人机巡检数据可实时更新 BIM 模型，实现模型的动态迭代，让模型精准反映施工实际状态；BIM 模型可为无人机巡检提供路径规划、重点管控区域标注等支撑，提升巡检针对性。这种功能互补特性，能突破传统管控的技术瓶颈，显著提升输电线路施工质量管控的智能化程度，技术融合具备显著价值。

2 无人机巡检数据采集与施工质量状态感知

2.1 多维度巡检数据采集技术与流程规范

无人机巡检数据采集需构建多维度、全流程的技术体系，保障数据的完整性与准确性。采集前，结合输电线路施工进度与质量管控要点，划分基础工程、杆塔组立、导线架设等核心采集区域，基于 BIM 模型规划最优巡检路径，明确各区域采集频次与精度要求。采集过程中，通过高清可见光相机采集构件外观缺陷、安装位置等视觉数据，红外热成像设备捕捉接头温度、设备发热等热工数据，激光雷达设备获取构件几何尺寸、空间位置等三维数据。同时，同步记录采集时间、经纬度、海拔等辅助信息，建立数据采集台账，严格执行数据校验流程，剔除冗余、错误数据，确保采集数据满足质量状态感知的分析需求。

2.2 数据预处理与特征提取关键技术

无人机巡检采集的原始数据量大、类型杂，需通过预处理与特征提取技术转化为可用于质量状态感知的有效信息。数据预处理阶段，采用图像去噪、拼接、矫正等算法，优化可见光与红外图像质量；通过点云滤波、配准、分割技术，处理激光雷达三维数据，去除环境干扰因素。特征提取环节，针对不同施工质量指标构建特征提取模型，如基于深度学习算法提取构

件裂缝、锈蚀等缺陷特征，通过几何计算提取杆塔垂直度、导线弧垂等尺寸特征，结合热成像数据分析提取设备异常发热特征。通过标准化的特征提取流程，实现对施工质量关键指标的精准量化，为后续状态感知提供核心数据支撑。

2.3 施工质量状态智能感知与预警机制

基于预处理后的巡检数据与提取的特征参数，构建施工质量状态智能感知模型。结合输电线路施工质量验收标准，建立各分项工程的质量阈值体系，将提取的特征参数与阈值进行对比分析，实现对施工质量合格状态、隐患状态、不合格状态的精准判别。针对杆塔倾斜、导线破损、基础沉降等关键质量隐患，搭建实时预警机制，通过阈值突破预警、趋势变化预警两种方式，及时推送隐患信息，明确隐患位置、严重程度、整改要求等内容。同时，将感知结果与 BIM 模型关联，实现隐患位置的可视化定位，辅助管理人员快速制定整改方案，形成“数据采集-特征提取-状态感知-预警推送”的闭环管控流程。

3 基于 BIM 与无人机巡检的质量管控体系构建

3.1 管控体系总体框架设计与目标定位

基于 BIM 与无人机巡检的输电线路施工质量智能管控体系，以“数据驱动、虚实融合、闭环管控”为核心理念，构建“感知层-数据层-应用层-决策层”四层总体框架。感知层以无人机巡检设备为核心，实现施工场景多维度数据的实时采集；数据层负责 BIM 模型数据与无人机巡检数据的整合、存储、处理，搭建标准化数据管理平台；应用层包含质量巡检、状态评估、隐患整改等核心应用模块，实现质量管控全流程智能化；决策层基于应用层数据支撑，进行质量趋势分析与管控决策优化。体系目标定位为突破传统管控模式局限，实现输电线路施工质量的实时化、可视化、智能化管控，降低质量隐患发生率，提升施工质量整体水平与管控效率。

3.2 全流程质量管控模块设计与功能实现

围绕输电线路施工全生命周期，设计涵盖施工准备、施工过程、竣工验收三个阶段的质量管控模块。施工准备阶段，基于 BIM 模型完成施工方案优化、质量标准录入、巡检路径规划等工作，明确各环节质量管控要点；施工过程阶段，通过无人机定期巡检与实时数据上传，实现施工工序质量的动态监测，结合 BIM 模型进行工序交接验收，确保上道工序合格后方可进入下道工序；竣工验收阶段，整合施工全过程巡检数据与 BIM 模型数据，构建数字化验收档案，通过三维

比对、数据溯源等功能，完成工程质量全面验收。各模块通过数据互通实现协同联动，具备质量数据查询、状态可视化展示、隐患整改跟踪等核心功能，保障管控流程闭环运行。

3.3 管控标准与数据规范体系建设

为保障管控体系有序运行，需建立完善的管控标准与数据规范体系。管控标准方面，结合行业现有施工质量验收规范，制定基于 BIM 与无人机巡检的专项管控标准，明确各分项工程的巡检频次、数据精度、质量阈值、缺陷分级等要求，规范巡检流程、验收流程、隐患整改流程。数据规范方面，统一 BIM 模型数据格式与无人机巡检数据格式，制定数据采集规范、数据存储规范、数据交互规范、数据安全规范等，明确数据分类、编码规则、接口标准等内容，确保不同来源、不同类型的数据可实现高效整合与互通。同时，建立标准动态更新机制，结合技术发展与工程实践持续优化标准与规范内容。

3.4 体系运行保障机制与协同管理模式

构建“组织保障、技术保障、制度保障”三位一体的体系运行保障机制。组织保障方面，成立专项管控小组，明确建设单位、施工单位、监理单位的职责分工，建立协同工作机制；技术保障方面，组建专业技术团队，负责 BIM 建模、无人机巡检、数据处理等技术支撑，定期开展技术培训与创新研发；制度保障方面，制定巡检管理制度、质量考核制度、隐患整改制度等，将质量管控成效与绩效考核挂钩，确保各项工作落到实处。同时，建立多方协同管理模式，通过管控平台实现各参与方的数据共享与协同工作，打破信息壁垒，提升质量管控的协同效率，形成全员参与、全程管控的良好格局。

4 核心关键技术研究

4.1 复杂环境下的无人机自主巡检路径规划技术

针对输电线路跨越山川、河流及城市建筑等复杂环境，研究基于数字孪生与强化学习的无人机自主巡检路径规划技术。首先，利用 BIM 与 GIS 融合模型构建包含地形、障碍物及禁飞区的三维数字地图。其次，采用 A 算法或 RRT 算法结合无人机的动力学约束（如最大航程、最小转弯半径），生成初始巡检路径。为了适应施工过程中环境的动态变化，引入深度强化学习（DRL）方法，使无人机能够根据实时感知的障碍物信息与施工进度，在线动态调整飞行轨迹。该技术不仅保证了巡检的全覆盖与无遗漏，还提高了无人机在复杂施工场景下的飞行安全性与自主作业能力。

4.2 大规模点云与 BIM 模型的高精度融合算法

研究针对大规模三维点云与 BIM 模型的高效配准与融合算法,是实现精细化质量管控的技术瓶颈。由于施工场景点云数据量巨大且存在噪声,传统的 ICP(迭代最近点)算法效率低下且易陷入局部最优。因此,需要引入基于特征描述子(如 FPFH、SHOT)的粗配准算法,结合 RANSAC(随机抽样一致性)算法去除外点,快速确定初始变换矩阵。随后,采用改进的 ICP 算法或基于深度学习的配准网络(如 PointNetLK)进行精配准,实现点云与 BIM 模型的毫米级对齐。此外,研究基于八叉树或体素网格的空间索引技术,提高海量数据的检索与比对效率,为实时质量检测提供算力支持。

4.3 基于深度学习的输电线路缺陷语义分割技术

为了从无人机影像中精准提取复杂背景下的细微缺陷,研究基于深度学习的高分辨率语义分割技术。传统的目标检测算法难以精确分割缺陷的边缘轮廓,因此引入 DeepLab、U-Net 等先进的分割网络,结合注意力机制(Attention)与多尺度特征融合技术,提升模型对小目标与复杂纹理的识别能力。通过构建包含多种缺陷类型的大规模输电线路影像数据集,对模型进行迁移学习与微调,使其能够自动区分塔材、绝缘子、导线及背景环境,并精确分割出裂纹、锈蚀、破损等缺陷区域。该技术实现了缺陷识别从“框选定位”到“像素级分割”的跨越,为质量评估提供了更

精细的数据支撑。

4.4 基于数字孪生的施工质量预测与智能诊断技术

研究基于数字孪生的施工质量预测与智能诊断技术,实现对输电线路施工过程的动态模拟与性能评估。利用 BIM 模型构建输电线路的数字孪生体,并将无人机实时采集的结构变形、应力应变及环境监测数据映射至孪生体中。结合有限元分析(FEA)与时间序列预测模型(如 LSTM),对杆塔结构的受力状态与变形趋势进行模拟预测。通过对比预测值与设计允许值,智能诊断出潜在的结构安全隐患与质量风险。该技术不仅能够对已发生的质量问题进行回溯分析,还能对未来的施工质量状态进行预测预警,为施工方案优化与决策制定提供科学依据。

5 结语

输电线路施工质量智能管控是智能电网建设的重要组成部分,其技术创新与模式优化对行业发展具有深远影响。BIM 与无人机巡检的融合应用,为突破传统管控瓶颈、构建精细化质量管控体系提供了有效路径,可显著提升质量检测效率、隐患识别能力与协同管理水平。未来,需进一步完善技术融合方案,优化核心算法与管控流程,推动技术应用的规模化与常态化。通过持续的技术创新与实践探索,不断提升输电线路施工质量管控的智能化水平,为电力系统安全稳定运行筑牢质量根基,为智能电网高质量发展提供坚实保障。

参考文献:

- [1] 朱红兵.无人机巡检技术在输电线路缺陷识别中的优化策略研究[C]//《中国招标》期刊有限公司,2025:463-467.
- [2] 罗维阳.输电线路巡检中无人机与人工巡检的效率对比及协同方案[C]//《中国招标》期刊有限公司.新质生产力驱动第二产业发展与招标采购创新论坛——绿色智造·采购革新专题(第二册).国网扬州供电公司,2025:765-769.
- [3] 严尔梅,刘博迪,时磊,等.基于 5G+云边 AI 协同的无人机输电线路巡检应用研究[J].计算技术与自动化,2025,44(04):166-172.
- [4] 马健.基于无人机巡检的输电线路故障诊断系统研究[J].内蒙古科技与经济,2025,(20):128-131.
- [5] 邢华军.输电线路无人机巡检智能管理系统设计及应用探究[J].电气技术与经济,2024,(02):134-136+139.
- [6] 李欣哲,乐天达,童文华,等.基于 BIM 技术的输电线路电缆工程三维设计研究[J].工程技术研究,2022,7(20):173-175.
- [7] 叶蕾.BIM 与 GIS 融合技术在输电线路设施管理中的应用研究[D].成都理工大学,2021.