

基于BIM与无人机协同的内蒙古农村公路 智能化施工管理研究

陈慧颖 郭秀珍

内蒙古自治区通辽市科左中旗地方道路养护中心 内蒙古 通辽 029300

摘要：内蒙古自治区地域辽阔、地形复杂、气候条件严酷，传统农村公路施工管理模式面临信息孤岛、监管滞后、资源浪费等问题，难以满足高质量发展要求。本文聚焦内蒙古农村公路工程特点，提出一种基于建筑信息模型（BIM）与无人机（UAV）协同的智能化施工管理方法。通过构建BIM+UAV融合技术框架，实现施工全过程的数据采集、模型更新、进度监控、质量检测与安全预警一体化管理。研究结合内蒙古典型农村公路项目案例，验证了该方法在提升施工透明度、优化资源配置、降低管理成本及增强决策科学性方面的显著优势。结果表明，BIM与无人机协同技术可有效破解内蒙古农村公路施工管理中的现实难题，为边疆民族地区交通基础设施智能化建设提供可行路径与理论支撑。

关键词：BIM；无人机；农村公路；智能化施工；协同管理；内蒙古

引言

近年来，国家持续加大农村公路建设投入，《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》明确提出要推进“四好农村路”高质量发展。内蒙古自治区作为我国北方重要生态安全屏障和边疆民族地区，农村公路总里程已超14万公里，覆盖全区所有苏木乡镇和建制村。然而，受限于地域广阔（总面积118万平方公里）、人口密度低、气候恶劣（冬季严寒、春季风沙大）、施工窗口期短等特点，内蒙古农村公路建设长期存在“点多、线长、面广、分散”的管理困境。传统施工管理模式依赖人工巡检、纸质记录和经验判断，存在信息传递滞后、数据碎片化、过程不可追溯等问题，导致施工进度失控、质量隐患频发、安全事故风险高。尤其在偏远牧区，通信不便进一步加剧了管理难度^[1]。因此，亟需引入数字化、智能化技术手段，构建适应内蒙古特殊环境的新型施工管理体系。建筑信息模型（BIM）技术以其三维可视化、信息集成和全生命周期管理能力，在大型基础设施工程中已取得显著成效。无人机（UAV）凭借灵活机动、高效低成本、高精度航测等优势，成为工程现场数据采集的重要工具。将BIM与无人机技术深度融合，形成“空—地—云”一体化的智能感知与决策系统，有望为内蒙古农村公路施工管理带来革命性变革。

1 内蒙古农村公路施工管理痛点分析

1.1 地理与气候制约

内蒙古东西跨度超2400公里，地貌涵盖高原、山地、沙漠、草原等。施工区域常位于无信号覆盖的偏

远地带，传统通信与定位手段失效。冬季最低气温可达-40℃，冻土深度大，路基处理难度高；春季风沙频繁，影响测量精度与施工安全；全年有效施工期仅5–6个月，工期压力巨大。

1.2 管理模式粗放

多数农村公路项目由县级交通部门直接管理，缺乏专业BIM团队。施工方多为本地小型企业，信息化水平低，依赖纸质图纸和口头指令。监理力量薄弱，难以实现全过程、全覆盖监管。材料、机械、人员调度缺乏数据支撑，资源浪费严重。

1.3 质量与安全风险突出

路基压实度、路面平整度等关键指标依赖人工抽检，代表性不足；隐蔽工程（如涵洞、排水沟）验收流于形式；边坡稳定性监测手段缺失，雨季易发生滑塌事故。2022年内蒙古某旗县农村公路因边坡失稳导致施工人员伤亡，暴露出传统监管模式的重大缺陷。

1.4 数据孤岛现象严重

设计、施工、监理、业主各方使用不同软件系统，数据格式不兼容，信息无法共享。施工变更难以及时反馈至设计模型，造成“图实不符”。竣工资料整理耗时耗力，影响后期养护决策。

2 BIM与无人机协同技术框架构建

2.1 总体架构设计

本文提出“三层两环”协同管理架构（图1）：

感知层：以无人机为核心，搭载RGB相机、激光雷达（LiDAR）或多光谱传感器，定期对施工现场进行航

拍，获取高分辨率影像、点云及热红外数据^[2]。

平台层：基于轻量化BIM平台（如Revit+Navisworks或国产广联达/鲁班），集成无人机数据处理模块、进度模拟引擎、质量分析工具及安全预警算法。

应用层：面向业主、施工方、监理方提供移动端/PC端应用，支持进度查看、问题上报、远程验收等功能。

“两环”指：

数据闭环：无人机采集→数据处理→BIM模型更新→问题识别→整改反馈；

管理闭环：计划制定→过程监控→偏差分析→动态调整。

2.2 关键技术实现

2.2.1 无人机数据采集与处理

考虑到内蒙古地区风沙大、温差剧烈的特殊环境，选用具备强抗风能力（≥6级）、长续航时间（≥45分钟）和RTK/PPK高精度定位功能的工业级无人机（如DJIM300RTK）作为数据采集平台。飞行策略采用“网格化低空航拍+重点区域倾斜摄影”相结合的方式，在常规路段以50–100米高度进行正射飞行，确保地面采样距离（GSD）优于2厘米；在涵洞、边坡、交叉口等关键节点，则采用五向倾斜摄影，获取更丰富的立面信息。每次飞行前，系统会根据天气预报自动评估作业窗口，避开沙尘暴或大风天气，确保数据质量与飞行安全。航拍数据通过Pix4D或ContextCapture等专业软件进行处理，自动生成正射影像图（DOM）、数字表面模型（DSM）及高密度三维点云^[3]。为实现与BIM模型的精准对齐，采用迭代最近点（ICP）算法进行空间配准，并辅以地面控制点（GCP）校正，最终达到毫米级的空间一致性。这一过程完全自动化，处理结果可直接推送至BIM平台，大幅减少人工干预。

2.2.2 BIM模型轻量化与动态更新

鉴于农村公路项目规模较小、结构相对简单，BIM建模无需追求过高的细节等级。本文采用参数化建模方法，在Revit或国产平台中快速构建LOD300级别的模型，包含道路中心线、路基断面、路面结构层、涵洞、排水设施等核心构件及其工程量属性。模型通过轻量化引擎压缩后，可在普通笔记本电脑或移动端流畅加载。模型的动态更新是协同管理的关键。系统通过API接口，将无人机生成的DSM与设计BIM模型进行布尔运算，自动计算各桩号段的实际填挖方量，并与计划值对比，生成土方平衡报告。当现场发生设计变更（如路线微调、涵洞位置移动）时，监理人员可通过移动端APP在最新无人机影像上直接圈注问题区域，系统自动生成电子变更

单，并同步更新BIM模型中的相关构件，确保“所见即所得”，彻底解决“图实不符”难题。

2.2.3 智能化施工监控模块

在进度管理方面，系统将施工进度计划（如Project导出的横道图）与BIM模型构件一一关联，构建4D-BIM场景。每周无人机航拍后，内置的AI图像识别模块（基于YOLOv5深度学习模型）会自动分析影像，识别沥青摊铺机轨迹、基层铺设范围等施工痕迹，计算已完成工程量，并与计划进度进行可视化对比，生成偏差热力图，帮助管理者快速定位滞后区域。在质量管理方面，系统融合多源数据实现非接触式检测。例如，利用无人机搭载的热成像相机监测沥青摊铺温度场分布，识别低温离析区域；通过点云数据计算路面纵断高程，反演国际平整度指数（IRI）；对路基压实区域进行纹理特征分析，间接评估压实均匀性。这些方法无需中断施工，即可实现高频次、全覆盖的质量监控。在安全管理方面，系统在BIM模型中预设电子围栏和风险阈值。当无人机识别到工人未佩戴安全帽、违规进入高边坡作业区等行为时，自动向管理人员手机推送预警信息。同时，通过连续多期DSM数据对比，监测边坡表面位移速率，一旦超过预设阈值（如5mm/周），即触发滑坡风险预警，为应急处置争取宝贵时间。

3 实证案例分析：内蒙古锡林郭勒盟某农村公路项目

3.1 项目概况

本研究选取内蒙古锡林郭勒盟正蓝旗一条新建农村公路作为实证对象。该项目全长12.3公里，按三级公路标准建设，设计时速30公里/小时，总投资约2800万元。路线穿越典型温带草原地貌，地势总体平缓但局部起伏较大，最大纵坡达6%，共设置钢筋混凝土圆管涵8座。施工周期严格限定在2024年5月至9月，时间紧、任务重，具有内蒙古农村公路的典型特征。

3.2 协同管理系统部署

项目启动初期，组建了由业主、施工、监理及技术支持方组成的联合工作组。硬件方面，配置DJIM300RTK无人机1台、RTK基站1套及便携式数据处理工作站2台。软件平台基于广联达BIM5D进行二次开发，新增无人机数据接入、AI识别、安全预警等模块。管理流程上，确立“周一航拍、周二处理、周三协调”的固定节奏，确保数据更新与决策调整的及时性。

3.3 应用成效分析

3.3.1 进度管控精准化

传统模式下，进度依赖施工日志，误差率约15%。应用BIM-UAV系统后，通过AI识别摊铺机轨迹与沥青覆

盖范围,进度计算误差降至3%以内。第6周发现K5+200-K6+000段基层施工滞后3天,系统自动预警,项目部及时增派机械,避免整体工期延误。

3.3.2 质量控制可视化

对K8+500处路基段进行压实度抽检,传统方法仅3个测点,合格率92%;无人机点云分析显示局部区域压实纹理异常,经补充检测发现该区域合格率仅85%,及时返工处理。沥青摊铺温度监测发现K10+300处存在低温离析,避免了早期病害。

3.3.3 安全管理主动化

系统在K3+800高边坡处设置位移阈值(5mm/周)。第8周监测到位移速率达6.2mm/周,触发红色预警。经地质雷达复核确认潜在滑动面,立即采取锚固措施,避免事故发生。

3.3.4 管理成本降低

减少现场巡检人员50%,纸质资料减少80%。无人机单次航拍成本约800元,远低于人工测量(约3000元/次)。项目整体管理效率提升40%,工期缩短7天。

4 面临的挑战与对策

4.1 技术挑战

尽管BIM与无人机协同技术展现出巨大潜力,但在内蒙古农村公路场景下仍面临若干技术瓶颈。首先是模型轻量化与精度之间的平衡问题。过于精细的模型会导致加载缓慢,影响移动端使用体验;而过度简化又可能丢失关键工程信息。对此,本文建议采用LOD分级策略,在施工阶段仅加载与进度、质量、安全直接相关的构件属性,其余细节可按需调用。其次是复杂自然环境对无人机作业的干扰。内蒙古春季风力强劲,电磁环境复杂,易导致无人机失控或定位漂移。应通过设置备用航线、采用抗干扰飞控系统、严格遵循气象窗口等方式加以规避。最后是多源数据融合的算法鲁棒性问题^[4]。在植被覆盖密集区域,点云与BIM模型的自动配准精度会显著下降。未来可结合地面控制点布设与基于深度学习的语义分割技术,提升匹配准确率。

4.2 管理挑战

技术落地的最大障碍往往来自管理层面。基层管理人员普遍缺乏BIM和无人机操作经验,对新系统存在畏难情绪。为此,必须坚持“以人为本”的设计理念,开

发界面简洁、操作直观的“傻瓜式”应用,并配套开展定制化培训,必要时派驻技术专员驻场指导,降低使用门槛。此外,当前尚缺乏针对农村公路的BIM-UAV应用标准,各方在数据格式、更新频率、验收流程等方面各行其是,制约了技术推广。建议由内蒙古自治区交通运输厅牵头,联合高校与企业,制定地方性技术指南或标准,为规模化应用提供制度保障。最后,小型项目的预算限制也是不可忽视的现实问题。可探索“政府购买服务”或“区域共享平台”模式,由第三方技术公司提供按需付费的无人机巡检与BIM管理服务,降低单个项目的一次性投入成本。

5 结语

本文针对内蒙古农村公路施工管理中存在的地理制约、模式粗放、风险突出及数据孤岛等核心问题,系统构建了BIM与无人机协同的智能化施工管理框架,并通过锡林郭勒盟实际项目进行了实证检验。研究表明,该协同模式能够有效实现施工全过程的可视化、可量化与可控化,显著提升进度、质量与安全管理水平。尤为重要的是,通过轻量化设计与流程优化,该技术方案能够适应内蒙古农村公路项目投资小、专业弱、周期短的现实约束,具备良好的可推广性。未来研究可从三个方向深化:一是融合北斗三号高精度定位与低轨卫星通信技术,彻底解决无网区数据回传难题;二是将BIM-UAV系统升级为数字孪生平台,贯通设计、施工、养护全生命周期,为农村公路长效管理提供数据底座;三是探索将无人机多光谱数据与碳排放模型结合,量化施工过程的环境影响,助力绿色低碳公路建设。

参考文献

- [1]蒋松梁,李景丰,吴漪璘.公路工程中BIM全过程应用的研究与实践[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(20):173-177.
- [2]白仲兰.基于BIM技术的农村公路路基施工管理方法[J].建材发展导向,2025,23(16):43-45.
- [3]胡维操.无人机技术在公路施工质量安全中的应用[J].智能建筑与智慧城市,2025,(07):32-34.
- [4]高玉彪.公路工程施工安全监管中无人机技术的应用成效研究[J].中国高新科技,2025,(14):106-108.