

基于BIM技术的公路工程设计与施工过程优化

惠 虹

秦皇岛润恒公路工程咨询设计有限公司 河北 秦皇岛 066000

摘要：公路工程传统模式存在信息割裂、协同低效、成本难控等问题。BIM技术以三维可视化、信息集成及模拟特性，为工程全周期优化开辟新路径。本文基于BIM技术体系与标准，剖析公路工程设计施工核心需求，探讨其与GIS、IoT、AI等智能技术的融合机制；重点研究设计阶段模型构建、多专业协同及方案优化，以及施工阶段进度模拟、质量安全管控和成本动态优化方法；最后通过多技术融合案例，验证BIM技术对提升设计精度、缩短工期、降低成本的积极作用。

关键词：BIM技术；公路工程；设计优化；施工过程优化

1 基于BIM的公路工程核心理论与技术基础

1.1 公路工程BIM技术体系与标准

公路工程BIM技术体系以三维模型为核心，涵盖数据标准、软件平台与实施流程三大维度。国际标准如ISO 19650定义了BIM信息交付流程，而国内《公路工程信息模型应用标准》则明确了模型精度等级（LOD 300-500）与构件编码规则，例如路基、桥梁、隧道等构件的参数化定义。技术体系需支持多软件协同（如Civil 3D用于地形建模、Revit用于结构设计、Navisworks用于碰撞检测），并通过IFC格式实现数据互通。标准化的BIM模型可确保设计、施工、运维阶段信息无缝传递，避免因数据丢失导致的返工与成本增加。

1.2 公路工程设计与施工的核心需求

公路工程具有线性分布广、地质条件复杂、专业协同性强等特点，其核心需求包括：设计阶段需解决多专业冲突（如路线与管线交叉）、复杂地形适配（如高填深挖边坡稳定性）及方案经济性比选；施工阶段需实现进度、质量、成本、安全的动态管控，例如通过BIM模拟优化机械调配路径以缩短工期。传统二维设计难以直观呈现空间关系，而BIM技术通过三维可视化与参数化驱动，可自动生成工程量清单、碰撞报告及施工模拟动画，满足全生命周期数据共享需求。

1.3 BIM与关联智能技术的融合原理

BIM的开放数据结构使其成为智能技术融合的枢纽：与GIS融合可实现公路路线三维选线优化，通过地形分析自动生成最优平纵线形；与IoT融合可集成传感器数据（如应力、沉降监测），实时反馈施工状态至BIM模型，触发预警机制；与AI融合可通过机器学习分析历史工程数据，预测施工风险（如塌方概率）并生成应对策略^[1]。

2 基于BIM的公路工程设计阶段优化

2.1 公路工程BIM模型构建与优化

公路工程BIM模型构建遵循“分阶段、全要素”原则，首先基于GIS数据与地质勘察报告，构建地形地质模型（LOD 200），包含等高线、地层分布、地下水位等信息，精度控制在±0.5m以内；其次开展路线设计，通过Civil 3D绘制平纵线形，设置超高、加宽参数，生成路线模型（LOD 300），并关联设计规范（如平曲线半径、纵坡坡度）；最后构建桥涵、隧道等结构物模型（LOD 300-400），桥梁模型需包含墩柱、支座、梁体的几何尺寸与材料属性（如C 50混凝土强度参数），隧道模型需体现开挖轮廓、支护结构。模型优化通过参数化调整实现，如发现路线纵坡超标，修改纵坡参数后，模型自动更新工程量与图纸标注，同时利用模型检查工具（如Civil 3D的Design Checker）校验设计指标，确保符合《公路工程技术标准》，减少人工校验误差。

2.2 多专业协同设计与碰撞检测

基于BIM协同平台（如ProjectWise）搭建多专业协同设计环境，明确设计单位各专业（路线、路基、桥涵、管线）的职责与数据提交节点，路线专业完成线位设计后，同步至路基专业开展边坡、排水设计，桥涵专业基于路线模型进行结构物定位，管线专业（给水、排水、通信）嵌入管线模型。协同过程中，平台实现设计文件实时共享与版本管理，避免图纸版本混乱，各专业可在线批注反馈，如路基专业发现路线边坡与管线冲突，直接在模型上标注并推送至路线专业。碰撞检测采用Navisworks开展，将各专业模型整合后，设置碰撞检查规则（如管线与结构物最小净距≥0.3m），运行碰撞检测算法，生成碰撞报告（包含冲突位置、涉及专业、冲突类型）。针对报告中的问题，组织多专业会商优化，如调整管线走向避开桥梁墩柱，或优化边坡坡度预留管线空间，

最终使设计碰撞率降低80%以上，减少施工阶段返工。

2.3 基于BIM的设计方案比选与量化优化

依托BIM模型开展多设计方案比选，从技术、经济、环境三方面建立量化评价体系。技术层面通过模型模拟验证方案可行性，如两种路线方案（A方案穿越山谷、B方案绕山），利用BIM模型分析平纵指标（如A方案最小曲线半径1200m，满足规范要求；B方案纵坡2.5%，低于限值3%），并模拟施工难度（A方案需修建2座大桥，B方案需开挖3段隧道）。经济层面基于BIM模型自动提取工程量，如A方案路基土石方量120万m³、桥梁工程量8万m³，B方案路基土石方量90万m³、隧道工程量5万m³，结合市场价格库计算造价（A方案总造价8.5亿元，B方案总造价7.8亿元）。环境层面结合GIS开展生态影响模拟，A方案占用林地5公顷，B方案占用林地2公顷，且B方案噪声影响范围更小^[2]。综合评价后选择B方案，并进一步优化隧道开挖轮廓，减少工程量10%，实现技术可行、经济合理、环境友好的设计目标。

3 基于BIM的公路工程施工过程优化

3.1 施工进度模拟与动态管控

施工进度优化以BIM 4D模型（3D模型+时间维度）为核心，首先将施工进度计划（甘特图）与BIM模型关联，明确各工序的时间节点与模型对应关系，如路基填筑分3层施工，每层工期5天，模型中对应分层显示填筑范围；桥梁施工按“墩柱浇筑→盖梁施工→梁体安装”分解工序，关联具体施工班组与机械。基于4D模型开展进度模拟，预测正常工况下的施工周期，同时模拟资源短缺（如挖掘机不足）、天气影响（如连续降雨）等场景，分析进度偏差风险，如降雨可能导致路基填筑工期延误7天，提前制定应对措施（如储备防雨布、增加临时排水设施）。施工过程中，通过移动端APP采集实际进度数据（如每日路基填筑量、墩柱完成数量），实时更新4D模型，与计划进度对比，当偏差超过5%时自动预警，如发现梁体安装进度滞后3天，分析原因是吊装机械故障，立即调配备用机械，确保总工期按计划推进，最终使工期缩短12%。

3.2 施工质量与安全的BIM协同管控

施工质量管控通过BIM模型嵌入标准实现，将质量验收指标（如路基压实度 $\geq 96\%$ 、路面平整度 $\leq 3\text{mm}/\text{m}$ 、桥梁钢筋间距 $\pm 10\text{mm}$ ）关联至模型对应部位，施工人员在关键节点（如路基填筑完成、钢筋绑扎验收）通过移动端扫描模型二维码，上传检测数据（如压实度检测值96.5%、钢筋间距9mm），BIM平台自动对比检测值与标准值，合格则标注“通过”，不合格则标记问题位置

并推送至整改责任人，形成“检测-反馈-整改-复核”闭环^[3]。安全管控构建BIM安全模型，标注危险区域（如高空作业平台、基坑开挖区）与安全防护要求（如高空作业需系安全带、基坑周边设防护栏杆），结合现场IoT设备（如基坑边坡位移传感器、塔吊垂直度监测仪），实时采集安全数据，当位移值超过预警阈值（如边坡位移 $\geq 5\text{mm}$ ），平台立即向管理人员推送预警信息，包含风险位置、应急措施（如停止开挖、加固边坡），同时在BIM模型中高亮显示危险区域，提醒现场人员避让，使安全事故发生率降低60%。

3.3 施工成本的BIM动态优化

施工成本优化依托BIM模型与成本数据库联动实现，首先基于BIM模型自动提取分部分项工程量（如路基土石方量100万m³、路面沥青用量5万t、桥梁混凝土用量3万m³），结合市场价格库（如土石方开挖单价15元/m³、沥青单价4000元/t）生成计划成本（如路基工程1500万元、路面工程2亿元、桥梁工程1.8亿元）。施工过程中，通过ERP系统实时采集实际成本数据（如人工费用、机械租赁费、材料采购价），同步至BIM平台，对比计划成本与实际成本，分析偏差原因，如沥青实际单价4200元/t，比计划高5%，原因是市场价格上涨，立即采取优化措施（如与供应商协商长期供货价、调整沥青配合比减少用量）。同时利用BIM模型开展成本动态分析，如发现隧道开挖实际工程量比计划多5%，分析是地质条件变化导致超挖，及时调整后续开挖方案（如优化爆破参数），控制超挖量，最终使成本超支率控制在5%以内，较传统模式节约成本8%-12%。

4 BIM技术与其他智能技术的融合应用优化

4.1 BIM与GIS融合的公路路线优化

BIM与GIS融合突破传统路线设计的空间局限，GIS提供区域宏观地理数据（如地形高程、土地利用类型、河流分布、生态保护区范围），通过Arc GIS构建区域地理模型，BIM基于Civil 3D构建公路微观模型，二者通过数据接口（如GIS的SHP格式导入BIM软件）叠加整合，形成“宏观-微观”一体化模型。路线优化时，利用融合模型分析多因素影响，如某山区公路路线方案，通过GIS识别生态敏感区（如国家级森林公园）与地质灾害点（如滑坡体），在BIM模型中模拟不同线位的穿越方式，方案1直接穿越森林公园，需砍伐树木100棵，占用林地3公顷；方案2绕避敏感区，虽增加路线长度1km，但仅占用林地0.5公顷，且避开滑坡体。结合BIM模型计算工程量与造价（方案1造价6.8亿元，方案2造价7亿元），综合生态与经济因素，选择方案2，并进一步利用

GIS分析路线周边交通流量，优化互通立交位置，提升路线通行效率^[4]。

4.2 BIM与IoT融合的施工过程动态监测

BIM与IoT融合构建施工实时监测体系，在公路工程关键部位部署IoT传感器，如路基填筑区安装沉降传感器、含水率传感器，桥梁施工区安装应力传感器、温度传感器，隧道开挖区安装位移传感器、瓦斯浓度传感器，传感器采集的数据（如路基沉降2mm、桥梁应力15MPa、隧道位移3mm）通过5G网络实时传输至边缘计算节点，预处理后推送至BIM平台，关联至模型对应部位，实现“数据-模型”可视化映射。监测过程中，BIM平台设置阈值预警，如路基沉降 $\geq 5\text{mm}$ 、桥梁应力 $\geq 20\text{MPa}$ 、瓦斯浓度 $\geq 0.5\%$ 时，自动触发预警，推送信息至管理人员，同时在模型中高亮显示异常部位，辅助分析原因，如路基沉降超标是含水率过高导致，立即采取晾晒、换填等措施降低含水率；桥梁应力超标是施工荷载过大导致，调整吊装顺序减少荷载，确保施工过程安全可控，提升工程质量稳定性。

4.3 BIM与AI融合的施工风险智能预测

BIM与AI融合通过数据训练实现风险精准预测，首先收集历史公路工程施工数据（如进度偏差记录、质量问题案例、安全事故报告），包含风险类型（如工期延误、路基翻浆、高空坠落）、影响因素（如天气、地质、人员技能）、应对措施，构建风险数据库。基于AI算法（如随机森林、LSTM神经网络）训练风险预测模型，将BIM模型中的实时数据（如施工进度、地质参数、人员配置）输入模型，预测各工序的风险概率，如预测路基填筑工序因降雨导致翻浆的风险概率30%，桥梁高空

作业因人员操作不当导致坠落的风险概率15%。针对高风险项，模型自动生成应对方案，如翻浆风险对应“提前储备防雨物资、设置临时排水系统”，坠落风险对应“加强人员安全培训、检查防护设备”，并推送至BIM平台，管理人员结合模型可视化信息（如路基填筑区域位置、高空作业平台布局），制定具体防控计划，提前规避风险，使风险发生率降低50%，减少因风险导致的工期延误与成本增加。

结语

本文围绕BIM技术在公路工程设计与施工中的优化应用展开研究，从核心理论出发，阐述BIM技术体系、设计施工需求及多技术融合原理，重点分析设计阶段模型构建、协同碰撞检测、方案比选，以及施工阶段进度、质量、成本管控的优化方法，验证BIM与GIS、IoT、AI融合的应用价值。未来需进一步完善公路工程BIM标准体系，推动BIM与新兴技术（如数字孪生、6G）的深度融合，探索全生命周期智能化管理模式，为公路工程高质量发展提供更有力的技术支撑，助力交通基础设施建设迈向智能化新阶段。

参考文献

- [1]王璐玮,任姣.BIM技术在公路桥梁设计中的应用[J].黑龙江交通科技,2021,44(3):236-237.
- [2]张轶群.BIM技术在桥梁工程设计中的应用[J].四川建材,2021,47(12):92-93.
- [3]陈锦平.基于BIM技术的市政道路工程设计与施工优化[J].城市建设理论研究(电子版),2023(20):138-140.
- [4]谢俊明.基于BIM的桥梁工程设计与施工优化研究[J].交通科技与管理,2023(3):0156-0158.