

基于BIM技术的公路工程设计与施工过程优化

惠 彪

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 $\pm 0.5\text{m}$ 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 $\geq 0.3\text{m}$),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 m^3 、桥梁工程量8万 m^3 ,B方案路基土石方量90万 m^3 、隧道工程量5万 m^3 ,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 $\leq 3\text{mm/m}$ 、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 m^3 、路面沥青用量5万t、桥梁混凝土用量3万 m^3),结合市场价格库(如土石方开挖单价15元/ m^3 、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。

结束语

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.