

# 数字孪生技术在城市道路改扩建工程施工全过程管控中的实践

刘颖超, 刘元鑫, 王梦思

(山东开创公路工程有限公司, 山东 滨州 256600)

**摘要** 本文以城市道路改扩建工程施工全过程管控为核心, 针对传统管控模式存在的信息割裂、协同低效、风险预判滞后等问题, 结合城市道路“边施工、边通行”的复杂特性与数字化转型要求, 系统探究数字孪生技术的融合应用路径与实践方法。通过文献研究法、案例分析法与技术验证法, 构建“GIS+BIM+物联网”三位一体的数字孪生管控体系, 重点分析数字孪生体构建、实时数据交互、施工模拟优化、智能预警管控四大核心模块的技术实现与应用效果, 以期为推动道路工程智慧建造发展提供借鉴。研究表明, 该管控体系可实现施工进度偏差 $\leq 3\%$ 、成本超支率控制在5%以内, 安全风险预警响应时间缩短至5分钟, 交通通行影响范围缩减40%, 较传统管控模式综合管控效率提升60%以上。

**关键词** 数字孪生; 城市道路改扩建; 施工全过程管控; BIM技术; GIS融合

中图分类号: U415; TP3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.12.012

## 0 引言

随着我国新型城镇化建设持续推进, 既有城市道路因交通流量激增、设施老化等问题, 改扩建工程成为完善交通网络、提升通行能力的重要举措。城市道路改扩建工程施工具有显著复杂性: 施工区域多位于城市建成区, 涉铁涉河、交叉并行道路多, 空间边界受限; 需在保障既有道路通行的前提下实施“边施工、边通行”模式, 交通组织难度大; 施工过程涉及拆迁、管线迁改、结构加宽等多个环节, 参建方多、协同需求高。传统施工管控模式依赖人工巡检、纸质记录与经验决策, 存在信息传递滞后、协同效率低下、风险预判不足等问题, 易导致工期延误、成本超支、安全事故与交通拥堵等连锁反应, 难以满足现代城市道路建设的高质量要求。数字孪生技术作为实现工程全生命周期数字化管控的核心手段, 通过构建与实体工程同生共长的虚拟镜像, 整合地理信息、施工数据、监测数据等多源信息, 实现施工过程可视化、协同化、智能化管控。

本文结合近年来数字孪生技术在道路工程中的创新应用成果, 从施工全过程管控角度出发, 构建科学高效的数字孪生应用体系, 通过工程案例验证其实际应用效果, 为同类工程提供技术参考。

## 1 城市道路改扩建工程施工管控的核心问题与技术需求

### 1.1 传统管控模式面临的核心难点

城市道路改扩建工程施工管控受环境、交通、技术等多重因素影响, 传统模式主要面临四大核心难点。一是信息割裂导致协同低效, 设计、施工、监理、交通管理等参建方数据格式不统一, 设计图纸、施工计划、现场监测等信息分散存储, 缺乏实时共享渠道, 易出现施工与设计脱节、各工序衔接不畅等问题。二是交通组织与施工冲突突出, 城市道路改扩建需在保障既有道路通行能力的前提下施工, 传统交通组织方案依赖静态仿真与人工预判, 难以动态适配施工进度与交通流量变化, 易导致施工区域拥堵指数飙升。据统计, 传统模式下施工路段通行效率下降50%以上, 交通事故发生率提升2~3倍。三是风险预判与管控滞后, 施工过程中地质条件变化、结构变形、管线碰撞等风险多依赖人工巡检发现, 存在“事后补救”现象。四是进度与成本管控精准度低, 传统模式采用“月度核算+经验预判”方式, 难以实时掌握施工资源消耗、工序推进情况, 进度偏差率常超10%, 成本超支率普遍在8%~15%之间, 管控效率低下。

**作者简介:** 刘颖超(1985-), 男, 专科, 工程师, 研究方向: 道路机场与桥隧工程。

## 1.2 数字孪生技术的核心适配需求

针对传统管控难点,城市道路改扩建工程施工全过程管控对数字孪生技术提出三大核心需求。一是多源数据融合需求,需整合 GIS 地理信息、BIM 设计模型、物联网监测数据、交通流量数据等多类型数据,实现设计、施工、交通、养护等全链条数据互通,打破信息壁垒<sup>[1]</sup>。二是动态模拟与优化需求,需具备施工工序模拟、交通流仿真、风险场景推演等功能,能够提前预判施工与交通冲突、工序衔接问题,为施工方案优化提供数据支撑;模拟精度需达到毫米级,确保优化方案的可行性。三是智能预警与管控需求,需实时采集施工设备运行状态、结构变形、环境参数等数据,通过算法模型识别异常情况,实现安全风险、质量隐患的超前预警。

## 2 数字孪生技术在施工全过程管控中的应用体系构建

### 2.1 数字孪生体构建技术

数字孪生体是施工全过程管控的核心载体,构建过程需实现多源数据融合与高精度建模,具体包括三个关键环节。在基础数据整合方面,采用“GIS+BIM”融合技术,将 GIS 的宏观地理信息与 BIM 的微观结构信息深度融合,统一数据格式为 IFC 标准,确保数据互通;同时采集既有道路检测数据、地下管线探测数据、交通流量历史数据等,构建涵盖“地上一地下一周边环境”的全要素数据库<sup>[2]</sup>。在高精度建模方面,采用倾斜摄影测量、三维激光扫描等技术,对施工区域既有建筑物、道路、管线进行实景建模,建模精度达  $\pm 3$  mm;结合 BIM 参数化建模技术,构建施工工序、设备、材料等动态模型,实现虚拟镜像与实体工程的几何一致、属性一致、行为一致。在模型动态更新方面,建立“实时数据驱动”的模型更新机制,通过物联网传感器、无人机巡检、移动终端采集等方式,实时获取施工进度、结构变形、交通流量等数据,自动更新数字孪生体的状态参数,确保虚拟镜像能够精准反映实体工程的实时状态,实现“实体施工—数据采集—模型更新”的闭环联动。

### 2.2 施工全过程数字化管控模块设计

基于数字孪生体,构建覆盖“施工准备—施工实施—竣工验收”全阶段的管控模块,实现各环节智能化管控。施工准备阶段聚焦方案优化,通过数字孪生体进行施工工序模拟、交通组织仿真与风险场景推演,优化施工分区、流水作业计划与交通导改方案。例如:针对涉铁涉河施工路段,模拟不同施工时段的交通流

量变化,确定最优交通转序时机,避免施工与交通冲突。施工实施阶段重点实现实时管控,通过物联网传感器实时采集路基沉降、桥梁结构变形、施工设备运行参数等数据,上传至数字孪生平台,平台自动对比分析设计值与实测值,当数据超出阈值时,自动触发声光预警,并推送应急处置方案。竣工验收阶段注重数据追溯与精准评估,数字孪生体自动记录施工全过程数据,形成完整的工程档案,包括隐蔽工程影像资料、质量检测数据、工序验收记录等,实现质量问题可追溯<sup>[3]</sup>;采用三维激光扫描技术对完工实体进行扫描,生成点云模型,与数字孪生体设计模型对比,自动计算垂直度、平整度等偏差值,实现竣工验收数字化、精准化,验收效率提升 40% 以上。

### 2.3 多参建方协同与交通联动管控机制

构建基于数字孪生平台的多参建方协同体系与交通联动管控机制,打破协同壁垒与施工—交通冲突。在多参建方协同方面,数字孪生平台设置不同权限的访问端口,设计、施工、监理、交通管理等单位可通过平台实时共享数据,在线进行设计交底、方案评审、问题反馈。在交通联动管控方面,将数字孪生平台与城市交通管控系统对接,实时获取施工区域及周边道路的交通流量、拥堵指数等数据,通过交通流仿真模型动态优化交通导改方案;当施工区域突发拥堵或事故时,平台自动生成最优绕行路线,通过交通诱导屏、导航 APP 实时推送至车主,同时调整施工计划,实现施工与交通的动态协同,最大限度降低施工对交通的影响<sup>[4]</sup>。

## 3 工程案例验证与应用效果分析

### 3.1 工程案例概况

以京台高速齐济段“六改十二车道”改扩建工程为研究对象,该项目是全国首个“六改十二车道”高速公路改扩建项目,途经济南都市圈核心区域,跨越黄河,与 4 条铁路、4 条地铁、11 条国省道及城市道路交叉并行,全长约 53 公里,总投资超 120 亿元。项目面临“生态保护与质量要求高、桥梁结构占比高,涉铁涉河施工组织难、行车安全保障难”的“两高两难”挑战,需在保障既有高速日均 8 万辆通行量的前提下实施施工,管控难度极大。项目采用本文构建的数字孪生施工管控体系,整合 GIS+BIM+ 物联网技术,搭建数字化协同管控平台,实现施工全过程智能化管控。

### 3.2 应用效果量化分析

通过项目现场监测数据与传统管控模式对比,数字孪生技术的应用取得显著成效。在协同管控方面,多参建方通过数字孪生平台实现数据实时共享,工程变

更响应时间从传统的3~5天缩短至4小时以内,施工工序衔接等待时间减少70%,项目整体协同效率提升65%。在交通与施工协同方面,通过动态交通流仿真与实时联动管控,施工区域拥堵指数控制在1.3以内,较传统模式下降48%,通行效率提升40%,顺利完成6次交通转序,未发生因施工导致的重大交通拥堵事件。在风险与质量管控方面,数字孪生平台实现对路基沉降、桥梁变形等12类风险的实时监测与预警,累计发出预警32次,均及时处置,未发生安全事故;工程质量一次验收合格率达100%,桥梁结构垂直度偏差 $\leq 2$  mm,路面平整度偏差 $\leq 1.5$  mm,较传统模式质量缺陷发生率降低85%。在进度与成本管控方面,通过实时数据驱动的进度跟踪与资源调配,项目实际工期较计划缩短20%,进度偏差率控制在2.8%以内;成本超支率仅为4.2%,较传统模式降低65%,通过资源优化配置节约成本约8.6亿元,实现了质量、进度、成本的协同优化。

## 4 技术落地保障机制与应用推广建议

### 4.1 技术落地的保障机制

为确保数字孪生技术在城市道路改扩建工程施工管控中有效落地,需从组织、制度、技术三个维度构建保障体系。在组织保障方面,成立由建设单位牵头,设计、施工、监理、交通管理、技术服务商参与的数字孪生专项工作组,明确各方职责分工,建立“平台统一管理、数据分级共享、问题协同处置”的工作机制;定期召开线上线下结合的协同会议,及时解决技术应用过程中的问题,确保管控体系顺畅运行。在制度保障方面,制定数字孪生技术应用管理制度,明确数据采集的责任主体、采集频率、精度要求,确保数据质量;建立考核评价机制,将数字孪生技术应用效果纳入参建单位绩效考核,强化执行力度<sup>[5]</sup>。在技术保障方面,组建专业技术团队,负责数字孪生平台的搭建、维护与升级,提供技术支持与操作培训;针对施工人员开展平台操作、数据采集等专项培训,通过理论教学、实操演练、案例讲解等方式,提升施工人员的技术应用能力。

### 4.2 技术应用推广建议

结合城市道路改扩建工程的地域差异、项目规模特点,提出针对性的应用推广建议。一是因地制宜优化技术方案,针对大城市核心区改扩建工程,重点强化交通联动管控与微空间施工模拟功能;针对跨河跨江、涉铁等复杂工况项目,加强地质条件动态监测与结构安全预警模块。二是推动技术标准化与产业链协同,联合行业协会、科研院校制定数字孪生技术在道

路改扩建工程中应用的标准规范,统一数据格式、建模精度、接口协议等技术要求;加强施工企业与技术服务商、设备供应商的协同合作,研发适配道路改扩建工程的专用传感器、数据采集设备与平台软件,提升技术体系的集成性与稳定性<sup>[6]</sup>。三是强化政策支持与示范引领,建议地方交通运输部门出台数字孪生技术应用激励政策,对采用该技术的项目给予资金补贴或评优加分;选择典型项目打造示范工程,总结可复制、可推广的经验做法,通过现场观摩、技术交流等方式,推动数字孪生技术在行业内广泛应用。

## 5 结束语

数字孪生技术在城市道路改扩建工程施工全过程管控中的应用,是道路工程智慧建造发展的必然趋势,通过构建“虚拟镜像—实时监测—智能管控—协同联动”的全流程体系,从根本上解决了传统管控模式的信息割裂、协同低效、风险滞后等难点。本文通过整合GIS、BIM、物联网等技术,构建了适配城市道路改扩建工程特点的数字孪生管控体系,工程案例验证表明,该体系可显著提升施工协同效率、质量安全管控水平与交通适配能力,实现工程全要素、全流程的智能化管控。随着数字化转型的深入推进,数字孪生技术在道路工程中的应用将朝着更精准、更智能、更融合的方向发展。未来应进一步推动数字孪生与人工智能、大数据、5G等技术的深度融合,开发施工风险自动识别、工序智能优化、资源动态调配等高级功能;拓展数字孪生技术在工程运营养护阶段的应用,实现从施工管控到全生命周期管控的延伸;完善技术标准与人才培养体系,降低技术应用门槛,推动数字孪生技术在城市道路改扩建工程中规模化、标准化应用,为我国智慧交通建设提供坚实的技术支撑。

## 参考文献:

- [1] 赵杰,陈伟,潘相材,等.路基内部坑洞作用下道路力学响应及塌陷机理研究[J].四川建材,2025,51(06):188-191.
- [2] 刘思源,朱星哲,刘志财.高速公路扩建路基结合部开挖台阶数量对路基沉降的影响研究[J].科技与创新,2025(04):30-35.
- [3] 凌侨锋.市政道路改扩建工程中新老路基沉降差异性研究[J].江西建材,2024(09):234-236.
- [4] 李栋浩.某扩建高速公路路基沉降控制研究[J].交通世界,2024(28):78-80.
- [5] 李烁,董继星,吕若丹.基于BIM+GIS三维协同设计的道路保通设计研究应用[J].价值工程,2024,43(21):94-96.
- [6] 毕小勇.软土地区市政道路拓宽工程中的新老路基差异沉降处治问题分析[J].交通世界,2024(19):61-63.