

交通工程数字孪生系统构建及在施工安全管控中的应用

李晨阳

江苏平山交通设施有限公司, 中国·江苏 南京 211500

摘要: 信息技术与交通基础设施建设深度融合发展时, 数字孪生技术给交通工程施工安全管控赋予了新的技术途径。本文主要对交通工程数字孪生系统的建立意义、方法以及施工安全管控的应用策略进行研究。研究表明, 利用多源数据采集、三维建模、实时监测网络搭建和虚实映射技术, 可以建立高保真的数字孪生系统, 实现施工过程的可视化管理以及安全风险动态预警。该系统可以提高施工方案的科学性, 创建实时监控预警机制, 实现施工全过程的安全态势感知与智能决策支持。数字孪生技术的应用不但提高了交通工程施工的安全管理水平, 而且给交通工程智能化建设与管理升级提供重要的支持, 有明显的理论价值和实践意义。

关键词: 交通工程; 数字孪生; 施工安全; 安全管控; 智能建造

Construction of Digital Twin System for Traffic Engineering and Its Application in Construction Safety Management

Li Chenyang

Jiangsu Pingshan Traffic Facilities Co., Ltd., China Jiangsu Nanjing 211500

Abstract: When information technology and the construction of traffic infrastructure are deeply integrated, digital twin technology provides a new technical approach for the safety management of traffic engineering construction. This paper mainly studies the significance, methods of establishing a digital twin system for traffic engineering, and the application strategies in construction safety management. The research shows that by using multi-source data collection, 3D modeling, real-time monitoring network construction, and virtual-real mapping technology, a high-fidelity digital twin system can be established to achieve visual management of the construction process and dynamic early warning of safety risks. This system can improve the scientificity of construction plans, create a real-time monitoring and early warning mechanism, and realize the perception of the safety situation throughout the construction process and intelligent decision support. The application of digital twin technology not only improves the safety management level of traffic engineering construction but also provides important support for the intelligent construction and management upgrade of traffic engineering, with obvious theoretical value and practical significance.

Keywords: Traffic engineering; Digital twin; Construction safety; Safety management; Intelligent construction

0 引言

交通工程建设属于国家基础设施建设的重要部分, 施工安全管控一直是工程管理中的主要问题。传统的施工安全管理是人工巡查、经验判断、静态风险评估为主, 存在着信息滞后、预警不及时、控制手段单一的缺点。近些年来, 数字孪生技术属于新一代信息技术的综合应用, 它借助创建物理实体的数字化镜像, 达成虚实互动并推动动态发展, 给交通工程施工安全管控赋予了革新性的解决办法。本文主要研究交通工程数字孪生系统建立的方法, 以及施工安全管控中的应用策略, 为提高交通工程施工安全管理

水平提供理论指导和实践参考。

1 交通工程数字孪生系统构建的意义

1.1 提升施工过程可视化与透明化水平

数字孪生技术创建出交通工程施工现场的三维数字化模型, 把复杂的施工过程以直观、立体的方式展现出来, 冲破了传统二维图纸和文字描述的局限。系统可以对施工进度、设备运行状况、人员分布情况、材料堆放地点等各方面的内容进行及时的展示, 使管理人员对施工现场有清晰的了解。可视化管理手段大幅度减少了信息传递失真的比例, 从而提高了各个参建方之间协同工作的效率。同时

数字孪生系统具有远程监控的功能,管理人员不用亲临现场就能了解施工的实况,实现了施工管理的透明化、智能化,为科学决策提供可靠的信息支持^[1]。

1.2 实现施工安全风险的动态预警与管控

传统的施工安全管理多用事后处理或者定期检查的方式,不能实现对安全风险的实时监测和提前预警。数字孪生系统利用物联网传感器、视频监控、定位系统等各类数据来形成施工现场的数据流,对施工现场的安全隐患可以实行动态识别及分析。该系统能够对重要的风险源实行连续监测,当监测数据超出安全范围时就会自动触发报警的功能,迅速通知有关工作人员采取相应措施。该种动态预警模式把安全管控关口前移,从被动应对转变为主动防控,有效地降低了安全事故发生的概率,给施工人员的安全和工程质量提供有力保障^[2]。

1.3 推动交通工程智能化建设与管理升级

数字孪生技术的应用是交通工程建设迈入智能化发展阶段的标志。系统以数据驱动的方式实现了施工过程的数字化、网络化、智能化管理,为工程建设全生命周期管理打下了技术基础。数字孪生系统累积的海量施工数据可以用来进行深入的挖掘和分析,给优化施工工艺、改善管理程序、提高资源配置效能提供数据支撑。同时该技术促进了建筑信息模型、人工智能、大数据等先进技术同交通工程领域的融合应用,加快了传统建设模式向智能建造转型的速度,对促进交通工程行业高质量发展具有重要的战略意义^[3]。

2 交通工程数字孪生系统的构建方法

2.1 多源数据采集与三维模型建立

数字孪生系统创建之初就要创建高精度的三维数字化模型。利用激光扫描技术、倾斜摄影测量、无人机航拍等手段,可以快速获取施工现场的地形地貌、既有构筑物等空间数据。根据工程设计图纸以及建筑信息模型,使用三维建模软件创建包含道路、桥梁、隧道等工程实体的数字化模型。模型应该包含工程结构的几何信息、材料属性、施工工艺等各方面参数。同时要部署各种类型的传感器来采集施工过程中的数据,包含视频监控设备、环境监测传感器、设备运行状态传感器、人员定位装置等等,从而形成覆盖整个施工过程的采集网络。采用数据清洗、格式转换、标准化等手段把多源异构数据融合到一个数据平台里,给数字孪生系统赋予完备的、精确的、及时的数据支撑^[4]。

2.2 实时监测网络与数据传输平台搭建

为了使数字孪生系统达到实时性、交互性,需要创建

起稳定高效的数据传输网络以及云端数据处理平台。使用物联网技术将施工现场各种传感器、监测设备接入网络,再用有线或者无线方式实时采集、传递数据。交通工程施工现场环境复杂,范围广,采用边缘计算架构,在现场布置边缘服务器做数据预处理和本地计算,减少网络传输压力、提高响应速度。云端平台主要是对海量数据的存储、管理、分析,使用分布式存储、并行计算技术保证系统的可靠性、处理速度。同时创建数据接口标准以及通信协议,使各个系统、不同的厂商设备之间可以互相兼容、互相联通,形成开放、兼容的数据生态体系^[5]。

2.3 虚实映射与仿真推演系统开发

虚实映射是数字孪生系统的重要功能,通过物理空间和数字空间之间的动态关联,使两者之间实现实时同步以及相互反馈。系统要创建数据驱动的模式更新机制,依靠实时采集的施工数据自动更新数字模型的状态,保证数字孪生体可以正确表现物理实体当前的情况。在此基础上集成仿真推演模块,用数值计算、物理引擎、人工智能算法对施工方案进行虚拟验证和优化分析。系统可以模拟施工工况下结构响应、设备运行效果、安全风险状况,并对可能产生的问题给出改进建议。动态推演施工进度,改变施工参数后观察对工期、成本、安全的影响,为管理决策提供科学依据。仿真结果可以反馈到现场施工环节,指导现场作业的优化工作,形成虚实闭环的持续改进机制。

3 数字孪生系统在施工安全管控中的应用策略

数字孪生系统在施工安全管控中的应用形成了从方案优化到实时监控再到态势感知的完整闭环,其核心应用流程如图一所示。

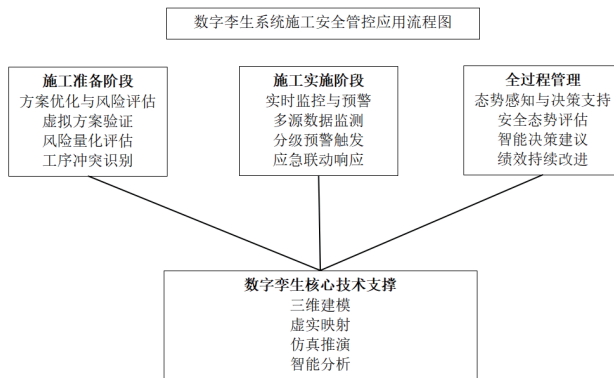


图1 数字孪生系统施工安全管控应用流程图

3.1 基于数字孪生的施工方案优化与风险评估

施工准备阶段使用数字孪生系统对施工方案进行虚拟验证,可以提前发现安全隐患并提出解决办法。在数字孪生环境下模拟施工全过程,可以直观地表现各种施工方案

下作业流程、设备布置、人员分布、相互干扰的情况。系统可以计算施工过程中结构受力状态、临时支护稳定性、大型设备作业安全距离等重要参数，找到高风险作业环节。从调查数据可知，使用数字孪生技术优化施工方案的项目，施工方案的修改率下降了约 40%，方案审批时间缩短了近一半。系统可以模拟出极端天气状况、突发设备故障等异常情况来考察应急预案的有效性、可行性。管理者通过对各种备选方案的安全性、经济性、可行性进行对比，选择出最好的施工方案。数字孪生系统还支持施工风险的量化评估，根据历史数据和工程特征建立风险评价模型，对各种安全风险进行等级划分，为制定针对性的安全管控措施提供依据。经数字孪生系统优化的施工方案，其安全风险等级平均下降约三成，重大安全隐患识别率提高超过 50%，大大提高了施工安全管理的前瞻性、科学性。系统根据施工工序的逻辑关系以及时间、空间约束，可以识别出各个工序之间的安全冲突点，避免由于交叉作业造成的安全风险。系统可以针对不同的方案，在复杂的施工环境中开展安全性对比分析，并用具体数值来表达各种方案存在风险的程度大小，给管理者提供更加直观、易于理解的决策依据。实践证明，使用该系统的项目施工方案论证阶段发现的安全问题数量提高约 45%，有效防止了方案缺陷带来的后续安全隐患。

3.2 实时监控预警与应急响应联动机制

施工实施阶段，数字孪生系统依靠实时的数据采集以及智能分析来创建起全天候，全覆盖的安全监控预警体系。系统整合了视频监控、传感器监测、定位追踪等各方面的数据，对施工现场人员的行为、设备的状态、环境的变化实行连续的监视。对于重要的风险源要设置安全阈值和预警规则，当监测数据出现异常时系统自动触发分级预警，通过声光报警、短信推送、语音广播等方式通知相关人员。经实践观察表明，配备了数字孪生监控系统的施工项目中安全隐患发现时间平均缩短 60% 左右，预警响应速度提高近两倍。系统可以识别人员进入危险区域、设备超负荷运行、支护结构变形超限等风险情况，自动生成处置建议。创建应急响应联动机制，把数字孪生系统同应急指挥平台对接起来，从而达成险情信息的即时共享以及协同处理。当发生安全事故时，系统可以迅速调用事发区域的三维模型以及历史数据，给应急决策提供精确的现场信息支持。同时系统记录所有的预警事件和处理过程，形成安全管理档案，为事故调查分析和改进提供可以追溯的数据依据。根据监测数据可知，采用数字孪生监控预警以

后，施工现场的安全事故发生率下降了 45% 以上，轻微安全事件的处置时效提高了 70% 左右，很好地保证了施工人员的安全和工程的顺利进行。系统还有智能识别功能，通过图像识别技术自动检测人员是否佩戴安全帽、安全带等防护用品，对违规行为实时告警、记录。系统可以对施工区域的温度、湿度、有害气体浓度等环境参数进行连续监测，在环境条件不适宜施工的时候及时发出预警，避免恶劣环境造成的安全事故。调查表明，启用智能监控功能后施工现场的安全违规行为减少约百分之五十五，环境因素引发的安全问题降低近百分之六十，极大地提高了施工现场的本质安全水平。为直观展示数字孪生系统的应用成效，对传统管理模式与数字孪生系统在各项安全管控指标上的表现进行对比分析，结果如图 2 所示

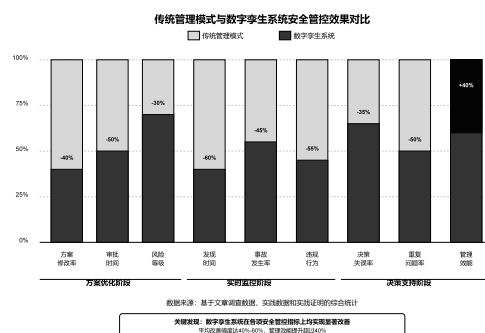


图2 传统管理与数字孪生系统效果对比图

3.3 施工全过程安全态势感知与决策支持

数字孪生系统整合施工全过程多源数据，创建施工安全态势综合感知与分析平台，给管理决策赋予全面的信息支撑和智能化提议。系统用大数据分析、人工智能技术，对历史施工数据、实时监测数据、气象环境数据等进行深度挖掘，找出安全管理的规律性特征和潜在风险趋势。施工安全态势评价模型创建之后，系统可以对当前施工阶段整体安全水平展开动态测算，生成可视化的安全态势图，清楚体现各个区域、各个工序的安全状况分布情况。管理人员根据态势评估的结果，及时对安全管理策略以及资源进行调整，达到精准化、差异化的安全管控目的。经过研究发现，使用数字孪生系统做安全态势分析的项目，安全管理决策的科学性、准确性明显提高，决策失误率降低大约百分之三十五。系统还具备智能决策支持功能，可以根据当前的施工状态和未来工况预测，自动生成优化建议，包含施工工序调整、资源调配方案、安全措施强化等。通过对不同的决策方案进行模拟，使管理者对各个方案的风险收益比有一个了解，从而选择出最优的决策路径。数字孪生系统记录的全过程数据可以用于施工安全管理的持续

改进，通过对比分析不同项目、不同阶段的安全管理绩效来总结出最佳的实践经验，建立安全管理知识库。数据显示，使用数字孪生系统的施工企业安全管理水平呈稳定上升趋势，年度安全管理效能平均提升 40% 以上，为交通工程施工的本质安全打下了良好的基础。系统可以实现多维安全绩效评价，建立包含事故率、隐患整改率、安全投入产出比等各方面的综合评价指标体系，对施工安全管理进行量化考核。管理层依照评价结果找出安全管理的薄弱之处，制订出相应的改进办法。实践数据表明，建立系统化的安全绩效评价机制的项目安全管理持续改进效果更明显，重复性的安全问题发生率降低约 50%，安全管理投入的有效性提高约 45%。系统通过机器学习算法不断优化风险预测模型，数据量的增加使得系统的风险识别准确率也随之提高，为施工安全的智能化、精准化管控提供强有力的技术支撑。

表1 数字孪生系统应用效果对比数据表

应用领域	评估指标	传统管理模式	数字孪生系统	改善幅度	数据来源
施工方案优化	方案修改率	基准值	降低约40%	↓ 40%	调查数据
	方案审批时间	基准值	缩短近50%	↓ 50%	调查数据
	安全风险等级	基准值	平均下降约30%	↓ 30%	实践数据
	重大隐患识别率	基准值	提高超过50%	↑ 50%	实践数据
	方案论证阶段问题发现量	基准值	提高约45%	↑ 45%	实践证明

4 结语

数字孪生技术给交通工程施工安全管控开辟了新的技

术途径，依靠创建虚实融合的数字化管理体系，达成施工过程的可视化呈现，安全风险的动态预警以及管理决策的智能支撑。系统在施工方案优化、实时监控预警、安全态势感知等各方面应用，大大提高了交通工程施工安全管理的科学化、精细化水平。伴随着物联网、人工智能、大数据等科技不断发展，数字孪生系统会越来越完善、成熟，在交通工程建设领域的作用也会越来越大，促使行业朝智能化、安全化方向发展。

参考文献：

[1] 宫培松, 沈欣云, 韩博雯等. 深基坑工程人员区域入侵行为预警数字孪生系统[J]. 中国安全科学学报, 2025,35(8):33-39.

[2] 莫言迟, 刘占省, 刘子昌等. 大型隧道施工过程安全数字孪生建模方法与优化分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2025,33(3):843-855.

[3] 胡斌, 郭慧, 陶雄杰等. 面向冷链智能立体仓库的数字孪生系统构建[J]. 包装工程, 2024,45(1):191-200.

[4] 张惠仙, 晋龙兴, 付威等. 面向变电站二次设备的数字孪生系统研究[J]. 供用电, 2024,41(1):34-41.

[5] 张志国, 刘豪, 姚佳禹等. 基于数字孪生的桥梁转体施工管控平台构建[J]. 铁道建筑, 2025,65(11):157-164.

作者简介: 李晨阳 (1991-), 男, 汉族, 安徽省安庆市, 本科, 工程师, 研究方向: 主要从事交通工程管理与施工技术的研究工作。