

数字孪生驱动的智慧梁场虚拟建造管控平台技术研究

花山宏 张林 张云彪 李瑞丰 黄鑫

中铁广州工程局集团（南京）第一工程有限公司，江苏南京，211800；

摘要：随着智能建造与数字孪生技术的快速发展，传统预制梁场在生产管理、质量控制及资源调度等方面面临效率低、协同性差等挑战。本文围绕“数字孪生驱动的智慧梁场虚拟建造管控平台”开展技术研究，构建融合BIM、物联网（IoT）、大数据与人工智能的数字孪生体系架构，实现梁场全要素、全过程、全周期的虚实映射与动态交互。通过建立高保真虚拟模型，集成实时传感数据与生产进度信息，平台支持施工模拟、工艺优化、异常预警与智能决策等功能，显著提升预制梁生产的自动化、可视化与智能化水平。案例应用表明，该平台可有效提高梁场管理效率、降低运营成本，并为桥梁工程智能建造提供可复制的技术范式。

关键词：数字孪生；智慧梁场；虚拟建造；管控平台；BIM；物联网；智能建造

DOI：10.64216/3080-1508.26.01.007

引言

预制梁作为桥梁工程的核心构件，其生产效率与质量直接影响整体建设进度与安全。传统梁场管理模式存在信息孤岛、过程不可视、响应滞后等问题，难以满足现代智能建造的发展需求。近年来，数字孪生技术通过构建物理实体与虚拟模型的实时映射，为基础设施全生命周期管理提供了新路径。在此背景下，本文聚焦“数字孪生驱动的智慧梁场虚拟建造管控平台”关键技术，融合BIM、物联网、大数据等新一代信息技术，旨在实现梁场生产全过程的数字化、可视化与智能化管控。通过搭建高保真虚拟模型与实时数据驱动机制，平台可支持施工模拟、资源调度优化与风险预警，从而提升预制梁场的精益化管理水平，推动桥梁建造向高质量、高效率转型。

1 数字孪生技术体系

1.1 数字孪生概念与内涵

1.1.1 数字孪生定义

数字孪生（Digital Twin）是指通过数字化手段，在虚拟空间中构建物理实体的高保真动态映射模型，实现对物理对象状态、行为及环境的实时感知、仿真预测与智能决策。其本质是物理世界与信息空间深度融合的桥梁，贯穿产品或系统的全生命周期。

1.1.2 数字孪生核心特征

数字孪生具备三大核心特征：一是虚实映射，即物理实体与数字模型之间建立一一对应关系；二是实时交互，通过传感器与通信网络实现数据双向流动与动态同步；三是智能演进，依托数据分析与算法模型，支持状

态预测、故障诊断与自主优化。

1.2 数字孪生关键技术

1.2.1 建模与仿真技术

基于BIM、CAD及多物理场仿真工具，构建涵盖几何、物理、行为和规则等多维度的高精度虚拟模型，支撑梁场设备、工艺流程与环境的精细化表达。

1.2.2 数据采集与传输技术

利用RFID、激光扫描、高清摄像头及各类工业传感器，实现对梁场生产要素（如温度、湿度、应力、位置等）的全面感知，并通过5G、工业以太网等高速通信网络完成低延时数据传输。

1.2.3 物联网与边缘计算技术

物联网实现设备互联与数据汇聚，边缘计算则在靠近数据源端进行实时处理与初步分析，降低云端负载，提升响应速度，满足梁场对毫秒级控制的需求。

1.2.4 人工智能与机器学习技术

通过深度学习、强化学习等算法，对历史与实时数据进行挖掘，实现工艺参数优化、质量缺陷识别、能耗预测等智能应用，驱动梁场自主决策能力提升。

1.3 数字孪生应用架构

1.3.1 数据层

集成多源异构数据，包括结构化生产数据、非结构化视频图像及半结构化日志信息，构建统一数据湖，为上层提供高质量数据支撑。

1.3.2 模型层

融合几何模型、机理模型与数据驱动模型，形成可

动态更新的数字孪生体,支持多尺度、多粒度仿真与推演。

1.3.3 应用层

面向梁场管理需求,提供虚拟建造、进度监控、质量追溯、安全预警及智能调度等业务功能模块,实现“感知—分析—决策—执行”闭环管控。

2 数字孪生在智慧梁场的应用

2.1 智慧梁场的设计阶段

在智慧梁场的设计阶段,数字孪生技术通过构建高精度三维模型,实现虚拟建造模拟与三维协同设计。虚拟建造模拟可对梁体预制全过程进行数字化预演,包括模板安装、钢筋绑扎、混凝土浇筑及养护等关键工序,提前识别工艺冲突与资源瓶颈,优化施工方案;三维协同设计则依托BIM平台,实现结构、机电、工艺设备等多专业一体化集成设计,提升设计效率与准确性,并为后续施工提供统一的数据基础。

2.2 智慧梁场的施工阶段

进入施工阶段,数字孪生驱动的智慧梁场聚焦于智慧化综合管控与动态施工模拟。通过部署物联网传感器实时采集温湿度、应力、位移等数据,并与虚拟模型联动,实现对梁体质量、设备状态和人员作业的全景监控;同时,结合进度计划与实际施工数据,平台可动态更新施工模拟场景,支持偏差预警与调度优化,确保预制过程高效、可控。此外,数字孪生系统还能自动生成电子履历,实现构件全生命周期可追溯。

2.3 数字孪生在智慧梁场的其他应用

除设计与施工外,数字孪生在智慧梁场还拓展至运维管理、能耗优化与安全预警等领域。例如,基于历史数据训练的AI模型可预测设备故障,实现预防性维护;通过对能源使用数据的分析,优化蒸汽养护等高耗能环节的运行策略;在安全管理方面,结合视频识别与定位技术,可对危险区域入侵、违规操作等行为进行实时告警。这些应用共同推动梁场向“感知全面、决策智能、执行精准”的智慧工厂转型。

3 智慧梁场虚拟建造管控平台技术研究

3.1 平台架构设计

智慧梁场虚拟建造管控平台采用“云-边-端”协同的三层架构,实现数据驱动与模型驱动深度融合。底

层为感知层(端),集成各类传感器、RFID标签、视频监控及PLC控制系统,实时采集梁场内构件状态、设备运行、环境参数等多源异构数据;中间为边缘计算层(边),部署边缘网关与轻量化分析模块,实现本地数据预处理、异常检测与快速响应,降低云端负载并提升系统实时性;顶层为云平台层(云),依托云计算与大数据中心,构建统一数字孪生引擎,集成BIM模型、生产计划、质量标准等信息,支撑可视化展示、智能分析与协同管理。整体架构以数字主线(Digital Thread)贯通设计、生产、运维全链条,确保数据一致性与业务闭环。

3.2 关键技术研究

3.2.1 三维建模技术

平台基于BIM+GIS融合建模方法,构建涵盖梁场布局、生产线设备、预制梁体及工艺流程的高保真三维数字模型。采用参数化建模与LOD(Level of Detail)分级策略,在保证模型精度的同时优化渲染效率;通过引入物理引擎,模拟混凝土浇筑流动、蒸汽养护温控等关键工艺过程,增强虚拟模型的行为仿真能力,为施工预演与方案优化提供支撑。

3.2.2 数据采集与传输技术

针对梁场复杂工业环境,平台部署多模态传感网络,包括温湿度传感器、应变计、振动监测仪及UWB定位基站,实现对构件养护状态、设备健康度及人员位置的全面感知。数据通过5G/工业Wi-Fi/Wi-SUN等混合通信方式上传至边缘节点,采用MQTT、OPC UA等协议保障低延时、高可靠传输,并通过数据清洗、时间对齐与语义标注,形成结构化孪生数据池。

3.2.3 人工智能与机器学习技术

平台引入深度学习与知识图谱技术,构建面向梁场场景的智能分析模型。例如,利用卷积神经网络(CNN)分析养护图像识别裂缝或蜂窝麻面;通过LSTM网络预测混凝土强度发展曲线,动态调整脱模时间;结合强化学习优化资源调度策略。同时,构建预制梁质量知识图谱,关联原材料、工艺参数与缺陷类型,支持根因分析与经验复用。

3.2.4 云计算与大数据技术

平台依托微服务架构与容器化部署,实现弹性扩展与高可用性。采用Hadoop/Spark生态处理海量时序与非结构化数据,结合Flink实现实时流计算,支撑秒级

预警响应。数据湖架构统一存储原始数据、模型数据与业务数据，通过 API 网关对外提供标准化服务接口，支持与 ERP、MES 等企业系统无缝集成。

3.3 平台功能实现

3.3.1 施工进度管理

平台将 BIM 模型与施工进度计划（如 4D/5D 模拟）绑定，通过对接实际生产数据（如张拉完成时间、蒸养结束时刻），自动更新虚拟场景中的构件状态，实现进度可视化跟踪。当实际进度偏离计划时，系统自动触发预警，并推荐调整方案，如重新分配台座或调整班组排班。

3.3.2 质量安全管理

质量方面，平台集成智能检测设备数据（如回弹仪、超声波探伤）与人工巡检记录，建立构件质量电子档案，支持全过程追溯；安全方面，通过 AI 视频分析识别未戴安全帽、违规穿越等行为，结合电子围栏与人员定位，实现高风险作业区域动态管控，有效降低安全事故率。

3.3.3 物资与人员管理

平台对钢筋、模板、混凝土等物资实行“一物一码”管理，结合库存阈值自动触发补货提醒；人员管理则通过人脸识别与定位手环，实现考勤、资质核验与在岗状态监控，并根据任务需求智能匹配技能人员，提升人力资源利用效率。

3.3.4 智能决策支持

基于历史数据与实时状态，平台构建多目标优化模型，为管理层提供产能预测、瓶颈分析、能耗评估等决策看板。例如，在多订单并行场景下，系统可综合考虑交期、设备负载与能耗成本，自动生成最优排产方案，辅助管理者实现精益化运营。

综上，该平台通过数字孪生技术深度融合建造业务与信息技术，构建了覆盖“感知—建模—分析—决策—执行”的闭环管控体系，为智慧梁场高质量、高效率、高安全性运行提供了坚实技术支撑。

4 实验与分析

4.1 实验环境与数据

实验在某大型铁路桥梁预制梁场开展，该梁场配备 20 个制梁台座、全自动钢筋加工线及智能蒸养系统。平台部署包括 200 余个 IoT 传感器（温湿度、应力、位移等）、30 路高清视频监控、UWB 人员定位基站及边缘计

算网关，并接入 BIM 模型、MES 生产计划与质量检测数据库。实验周期为 3 个月，累计采集结构化数据超 120 万条，涵盖 120 片预制梁的全生命周期信息。

4.2 实验设计与实施

实验采用对照组与实验组并行方式：对照组沿用传统管理模式，实验组全面应用所研发的数字孪生虚拟建造管控平台。重点验证四大功能模块：施工进度动态跟踪、质量缺陷智能识别、物资人员协同调度及异常工况预警响应。实验过程中，平台每日自动生成进度偏差报告、质量风险清单及资源优化建议，并由现场管理人员执行反馈闭环。

4.3 实验结果分析

结果表明，实验组在多项关键指标上显著优于对照组：施工进度计划达成率提升 18.6%，平均制梁周期缩短 1.2 天；通过 AI 图像识别与数据分析，早期质量缺陷检出率达 92.3%，较人工巡检提高 27 个百分点；物资库存周转率提升 15%，人员调度响应时间缩短 40%；在 3 次模拟设备故障场景中，平台均提前 2 小时以上发出预警，避免了潜在停工损失。此外，管理人员对平台可视化界面与决策支持功能满意度达 89%。综上，实验验证了该平台在提升梁场智能化管理水平、保障生产效率与质量方面的有效性与实用性。

5 结论与展望

5.1 研究结论

本文围绕数字孪生驱动的智慧梁场虚拟建造管控平台开展系统性研究，构建了融合 BIM、物联网、人工智能与云计算的数字孪生技术体系，设计并实现了涵盖设计、生产、管理全链条的平台架构。通过在实际梁场开展实验验证，结果表明该平台能够有效实现施工进度可视化、质量风险早预警、资源调度智能化和决策支持科学化，显著提升预制梁生产的效率、质量与安全水平，为桥梁工程智能建造提供了可行的技术路径与应用范式。

5.2 研究不足与展望

当前研究仍存在若干局限：一是模型精度与实时性在复杂多工序耦合场景下仍有优化空间；二是部分 AI 算法依赖高质量标注数据，泛化能力有待加强；三是平台与上下游供应链系统的深度集成尚未完全实现。未来

工作将聚焦于轻量化边缘孪生模型构建、跨项目知识迁移学习机制探索,以及与智慧工地、数字交付等更大尺度建造生态的融合,推动数字孪生技术从“单点智能”向“系统协同”演进,助力基础设施建造全面迈向数字化、智能化新阶段。

参考文献

- [1]王志伟,王欢.数字孪生视域下唐代团花纹样结构解译与特征研究[J].染整技术,2025,47(10):113-115.
- [2]郭晓岩,尹越,谭笑,等.基于数字孪生的智慧城区运维系统架构分析[J].智能建筑与智慧城市,2025,(10):127-129. DOI:10.13655/j.cnki.ibci.2025.10.038.
- [3]黎炳廷.高速公路智慧建造关键技术应用研究[J].交通科技与管理,2025,6(13):162-164.
- [4]周明利,孙发源,王其昂,等.基于BIM与RFID技术

的预制梁场智能建造研究[J].吉林建筑大学学报,2025,42(03):25-30. DOI:10.20203/j.cnki.2095-8919.2025.03.004.

- [5]汪国华.BIM技术在路桥施工全过程中的应用研究[J].新城建科技,2025,34(05):19-21.

作者简介:花山宏(1979.09—),男,汉,贵州惠水,项目总工,本科,高级工程师,智慧梁场。

张林(1987.05—),男,汉,湖北武汉,项目常务副经理,本科,工程师,智能化机械设备应用。

张云彪(1990.08—),男,汉,安徽阜阳,项目副总工,本科,工程师,铁路桥梁施工。

李瑞丰(1994.09—),男,汉,四川广元,项目工程部长,本科,工程师,工程管理。

黄鑫(1998.04—),男,汉,江西赣州,项目技术员,本科,助理工程师,道路桥梁与渡河工程施工。