

智慧梁场数字孪生技术在预制梁质量管控中的应用研究

冯杰¹ 范朋刚¹ 舒恩¹ 韦明远¹ 吴雪刚² 段宇金¹

1 中铁广州工程局集团（南京）第一工程有限公司，江苏南京，211800；

2 中铁第四勘察设计院集团有限公司，湖北武昌，430063；

摘要：针对当前预制梁生产过程中质量管控手段滞后、信息协同不足及决策智能化水平不高等问题，本文围绕“智慧梁场数字孪生技术在预制梁质量管控中的应用”展开系统研究。首先，构建了融合“物理实体—数字模型—多源数据”的智慧梁场数字孪生虚拟建造管控框架；其次，基于 BIM 技术从几何、物理、行为与规则四个维度建立高保真数字孪生模型，支撑封端等关键工序的精细化表达；再次，集成物联网、传感器、AI 与大数据分析等技术，实现对人员、设备、进度、安全及产品质量等要素的全生命周期实时感知与动态追踪；最后，依托数字孪生驱动的智能管控体系，构建涵盖施工工艺评价、设备管理、质量检测与反馈优化的闭环管理机制。研究成果可有效提升预制梁制造过程的质量一致性、过程透明度与智能决策能力，为高铁等重大基础设施工程的工业化、数字化和智能化建造提供关键技术支撑。

关键词：智慧梁场；数字孪生；预制梁；质量管控；BIM；实时感知；智能建造；虚实融合

DOI：10.69979/3029-2727.26.01.030

引言

随着我国交通基础设施建设向高质量、智能化方向加速转型，预制梁作为桥梁工程的核心构件，其制造质量直接关系到整体结构的安全性与耐久性。传统梁场管理模式普遍存在信息割裂、过程不可视、质量追溯困难等问题，难以满足现代智能建造需求。数字孪生技术通过构建物理实体与虚拟模型的实时映射与动态交互，为预制梁全生命周期质量管控提供了全新路径。近年来，国内外学者在数字孪生框架、BIM 集成、物联网感知等方面取得一定进展，但在面向智慧梁场的系统性应用、多源数据融合及闭环质量控制等关键环节仍存在不足。为此，本文聚焦智慧梁场数字孪生虚拟建造管控系统，旨在构建“物理—模型—数据”深度融合的技术框架，研究高保真孪生建模、现场实时感知与智能管控体系等关键技术，推动预制梁生产向可视化、精细化、智能化升级，对提升我国基建工程智能制造水平具有重要理论价值与实践意义。

1 智慧梁场数字孪生技术概述

数字孪生技术是一种通过集成多源数据、物理模型与智能算法，在虚拟空间中对物理实体进行全生命周期动态映射与实时交互的数字化方法。在智慧梁场中，该技术以 BIM 模型为基础，融合物联网、传感器、边缘计算及人工智能等手段，构建涵盖预制梁几何形态、物理属性、行为逻辑与工艺规则的高保真数字孪生体。相比传统质量管控方式，数字孪生能够实现制梁全过程的可视化监控、关键工序的毫秒级数据采集、质量异常的智能预警与追溯，有效推动质量管理由“事后检验”向

“过程预防”转型。其整体技术架构通常包括感知层（现场数据采集）、数据层（多源信息融合与管理）、模型层（多维孪生建模）和应用层（智能分析与决策支持），形成“物理实体—虚拟模型—实时数据—闭环优化”一体化的协同管控体系，为预制梁高质量、高效率、智能化生产提供坚实支撑。

2 智慧梁场数字孪生技术关键环节

2.1 数字化建模

数字化建模是构建智慧梁场数字孪生系统的基础。该过程以 BIM 技术为核心，结合激光扫描、无人机航测等手段，对预制梁结构、生产线设备、场区布局及周边环境进行高精度三维建模。模型不仅包含几何信息，还需集成材料属性、力学性能、施工工艺规则等物理与行为特征，形成涵盖“几何—物理—行为—规则”四维一体的多尺度数字孪生体。通过标准化数据接口与轻量化处理，确保模型在不同终端和业务场景下的高效调用与协同更新。

2.2 实时数据采集与处理

为实现虚实同步，需依托物联网（IoT）技术构建覆盖全场的感知网络。在制梁、养护、存梁、移梁等关键工位部署温度、湿度、应力、位移等传感器，并结合 RFID、视频识别与人员定位系统，实时采集构件状态、设备运行、人员作业及环境参数等多源异构数据。通过边缘计算与 5G 通信技术，对原始数据进行清洗、融合与结构化处理，保障数据的时效性、准确性与完整性，为上层分析与决策提供高质量输入。

2.3 数字孪生模型与实际系统的映射

映射机制是数字孪生实现“虚实互动”的核心。通过建立物理实体与数字模型之间的双向数据通道，将现场实时数据动态驱动至孪生模型，实现模型状态的自动更新与可视化呈现；同时，模型仿真结果也可反馈至物理系统，指导现场调整工艺参数或优化作业流程。该过程依赖于统一的数据标准、高效的通信协议及精准的时空对齐算法，确保虚拟空间与物理世界在时间、空间和逻辑上高度一致。

2.4 智能优化算法应用

在高质量数据与精准模型支撑下，引入机器学习、深度学习及优化算法，对预制梁生产过程进行智能分析与决策。例如，利用时序数据分析预测混凝土强度发展规律，基于图像识别自动检测梁体表面缺陷，或通过强化学习优化蒸养制度与调度方案。这些算法不仅提升质量管控的自动化水平，还能形成“感知—分析—决策—执行”的闭环控制，推动智慧梁场向自适应、自优化方向演进。

3 智慧梁场数字孪生技术在预制梁质量管控中的应用

3.1 预制梁生产过程质量监控

依托数字孪生平台，可实现对预制梁全生产流程的精细化、可视化与实时化质量监控。通过在钢筋绑扎、模板安装、混凝土浇筑、张拉压浆、蒸汽养护等关键工序部署传感器与视觉识别设备，系统自动采集温度、湿度、应力、位移、时间参数等工艺数据，并与 BIM 孪生模型动态关联。一旦实际参数偏离预设阈值（如养护温度不足、张拉力异常），平台即时触发预警并定位问题环节，管理人员可通过三维场景快速核查现场状态，有效防止质量缺陷累积，实现“过程可控、问题可溯”。

3.2 预制梁质量评估与预测

基于历史生产数据与实时感知信息，结合机器学习和深度学习算法，构建预制梁质量智能评估与预测模型。例如，利用时序神经网络对混凝土强度发展曲线进行拟合预测，提前判断是否满足脱模或张拉条件；通过图像识别技术自动检测梁体表面裂缝、气泡、蜂窝等外观缺陷，并量化评级。同时，系统可综合原材料批次、环境条件、操作人员等因素，建立多维质量影响因子库，实现从“经验判断”向“数据驱动”的科学评估转变。

3.3 预制梁质量改进与优化

数字孪生技术不仅用于监控与评估，更支持闭环式质量持续改进。当系统识别出某类质量问题频发（如封端不密实、预应力损失偏大），可自动回溯关联工序数

据，结合工艺知识图谱进行根因分析，并推荐优化方案（如调整配合比、优化蒸养曲线、规范张拉顺序）。优化方案可在虚拟环境中先行仿真验证，确认效果后再推送至现场执行。此外，改进后的工艺参数可反馈至设计与计划模块，实现“制造—反馈—优化—再制造”的良性循环，不断提升预制梁的一致性、可靠性和生产效率，推动梁场向高质量智能制造转型。

4 案例分析

4.1 工程项目概况

本案例选取某高速铁路重点标段的智能化预制梁场作为应用对象，该梁场承担约 800 孔双线简支箱梁的生产任务。传统管理模式下面临工序衔接不畅、质量波动大、人工巡检效率低等问题。为提升预制梁制造质量与管理效能，项目引入数字孪生技术，建设覆盖设计、生产、检测、养护全链条的智慧梁场管控平台。

4.2 智慧梁场数字孪生技术实施步骤

首先，基于 BIM 构建包含梁体结构、台座布局、龙门吊路径及环境设施的高精度三维模型，并嵌入施工工艺规则库；其次，在钢筋加工区、混凝土浇筑工位、养护窑、张拉台座等关键节点部署温湿度传感器、应力计、高清摄像头及 UWB 定位设备，实现人员、设备、物料和构件状态的实时感知；随后，通过工业物联网平台将多源数据接入数字孪生系统，建立物理梁场与虚拟模型的动态映射；最后，集成大数据分析引擎与 AI 算法模块，开发质量预警、强度预测、工艺优化等智能应用功能，并与 MES、ERP 系统对接，形成一体化协同管控流程。

4.3 案例结果与分析

系统上线后，预制梁关键工序合格率由 92.3% 提升至 98.6%，混凝土强度预测误差控制在 $\pm 3\%$ 以内，质量问题平均响应时间缩短 70%。通过数字孪生平台，管理人员可直观查看每片梁的“数字身份证”，包括原材料批次、工艺参数曲线、检测报告及异常记录，实现全流程可追溯。此外，在一次封端密实度异常事件中，系统提前 4 小时预警并定位问题源于注浆压力不足，避免了 3 片梁的返工损失。实践表明，数字孪生技术显著提升了预制梁质量稳定性、过程透明度与管理智能化水平，验证了其在大型基建工程中的可行性和推广价值。

5 智慧梁场数字孪生技术在预制梁质量管控中的效益分析

5.1 经济效益

智慧梁场数字孪生技术通过提升预制梁生产过程的精细化与智能化水平，显著降低质量成本与资源浪费。

一方面,实时监控与智能预警机制有效减少因工艺偏差导致的返工、报废和工期延误,案例显示质量问题发生率下降约 40%,单片梁综合成本降低 5%~8%;另一方面,设备运行状态监测与预测性维护延长了关键装备(如张拉机、蒸养系统)使用寿命,减少非计划停机时间,提高产线利用率。此外,数据驱动的工艺优化可精准控制混凝土配合比与养护能耗,在保障质量前提下实现材料节约,进一步提升项目整体经济效益。

5.2 社会效益

该技术推动了传统基建行业向数字化、智能化转型,提升了工程建设的质量安全水平和管理现代化程度。通过全过程可追溯的质量管理体系,增强了业主、监理与施工单位之间的信息互信,提高了工程验收效率与公众满意度。同时,智慧梁场减少了对高经验依赖的人工巡检和纸质记录,降低了人为误判风险,并为产业工人提供更安全、高效的工作环境。更重要的是,该模式可复制推广至桥梁、轨交、装配式建筑等领域,助力国家“智能建造”战略落地,培养复合型数字工程人才,促进产业链升级。

5.3 环境效益

数字孪生技术通过优化资源配置与能源管理,有效降低预制梁生产的碳排放与环境负荷。例如,基于环境温湿度与混凝土水化热模型的智能养护策略,可动态调节蒸汽用量,减少能源浪费达 15%以上;精准的物料管理避免了水泥、外加剂等原材料的过度使用,减少建筑垃圾产生;同时,虚拟仿真替代部分实体试错,降低了试验梁制作带来的资源消耗。整体上,智慧梁场实现了“绿色制造”与“高质量发展”的有机统一,契合国家“双碳”目标和可持续发展理念。

6 存在问题与对策

当前智慧梁场数字孪生技术在实际应用中仍面临若干挑战,如多源异构数据缺乏统一标准,导致信息集成困难;BIM 模型与物理现场的动态映射精度不足,影响虚实一致性;现场传感器及边缘计算设备成本较高,制约中小梁场推广应用;同时,兼具土木工程、信息技术与智能算法知识的复合型人才匮乏,限制了系统的深度开发与运维。此外,部分平台偏重三维可视化展示,对质量数据的智能分析与决策支持能力较弱。

对此,应加快制定行业数据与建模标准,推动轻量化、低成本感知设备研发,深化工艺知识与 AI 算法融合以提升预测预警准确性,并通过校企合作加强跨学科人才培养,构建“技术—标准—人才”协同支撑体系,

切实提升数字孪生在预制梁质量管控中的实用性与可持续性。

7 总结与展望

本文系统探讨了智慧梁场数字孪生技术在预制梁质量管控中的关键架构、核心环节与应用路径,并通过工程案例验证了其在提升质量稳定性、管理效率和资源利用方面的显著成效。研究表明,数字孪生技术能够实现预制梁全生命周期的可视化、可预测与闭环优化,为智能建造提供有力支撑。

未来,随着 5G、人工智能、边缘计算等技术的深度融合,数字孪生将向更高精度、更强实时性和更广协同性方向发展。同时,需进一步完善标准体系、降低实施成本、拓展应用场景,推动其在更多基础设施工程中规模化落地,助力我国基建行业迈向高质量、绿色化、智能化新阶段。

参考文献

- [1]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.
- [2]刘强.预制梁环形梁场数智化应用研究[J].现代工程科技,2025,4(13):141-144. DOI:10.26929/j.cnki.issn.2097-1672.2025.13.036.
- [3]陈平连.高速铁路智能梁场建设实践与研究[J].交通科技与管理,2025,6(09):85-87.
- [4]巩静.一座“优居房”的智能建造实践样本[N].中国城市报,2025-09-15(011). DOI:10.28056/n.cnki.nccsb.2025.000508.
- [5]温泽坤,孙逊,樊志孺.国产 BIM 设计软件的技术特性与应用实践[J].四川建材,2025,51(09):48-50.

作者简介:冯杰,1981.12,男,汉,安徽六安,项目经理,本科,工程师,土木工程,智慧梁场应用。
范朋刚,1986.01,男,汉,陕西兴平,项目分部经理,本科,高级工程师,铁路桥梁施工。
舒恩,1988.07,男,汉,湖北咸宁,项目质量总监,本科,工程师,梁场智能化建造。
韦明远,1991.12,男,壮,广西上林,技术负责人,本科,助理工程师,智能化箱梁预制与架设。
吴雪刚,1980.04,男,汉,湖北鄂州,硕士,计算机中级工程师,计算机应用技术。
段宇金,2000.09,男,汉,湖北黄冈,项目技术员,本科,助理工程师,铁路桥梁施工。