

面向预制桥梁吊装施工的数字孪生管控方法研究

杨光强¹, 王天龙²

¹上海城投公路投资(集团)有限公司, 上海

²上海建工集团股份有限公司, 上海

收稿日期: 2026年4月7日; 录用日期: 2026年7月2日; 发布日期: 2026年7月14日

摘要

针对桥梁建设中面临的安全、技术及管理难题, 本文提出一种基于数字孪生的预制桥梁吊装施工管控方法。该方法融合了“孪生预演-物联智控-数字回溯”三个核心环节, 通过打通三维交互仿真平台与起重机械物联网云平台之间的数据通道, 将吊装仿真预演与机械设备实时监控创新性地结合起来, 并对历史数据进行系统挖掘与分析, 从而实现吊装前施工方案的动态验证、吊装过程的实时监控以及核心数据的回溯闭环。工程实践表明, 该方法能够有效降低复杂施工环境下多次跨高速公路吊装作业的安全风险, 提升预制装配式桥梁施工的质量与效率。

关键词

桥梁吊装, 预制装配, 孪生预演, 物联智控, 数字回溯

Research on Digital Twin Control Methods for Prefabricated Bridge Lifting Construction

Guangqiang Yang¹, Tianlong Wang²

¹Shanghai Urban Investment Highway Investment (Group) Co., Ltd., Shanghai

²Shanghai Construction Group Co., Ltd., Shanghai

Received: April 7, 2026; accepted: July 2, 2026; published: July 14, 2026

Abstract

To address the safety, technical, and management challenges in bridge construction, this paper

proposes a prefabricated bridge hoisting construction control method based on digital twins. This approach integrates three core stages—"digital twin rehearsal, IoT intelligent control, and digital traceability." By establishing a data connection between the 3D interactive simulation platform and the crane IoT cloud platform, it innovatively combines hoisting simulation rehearsals with real-time machinery monitoring. Additionally, it systematically mines and analyzes historical data to achieve dynamic validation of construction plans before hoisting, real-time monitoring of the hoisting process, and closed-loop traceability of key data. Engineering practice demonstrates that this method effectively reduces safety risks in complex construction environments involving multiple highway-crossing hoisting operations, while improving the quality and efficiency of prefabricated bridge construction.

Keywords

Bridge Hoisting, Prefabrication and Assembly, IoT Intelligent Control, Digital Traceability

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着城市化进程脚步的加快以及基础设施建设的高速推进, 市政项目的施工环境日渐复杂、建设规模日益扩大、专业分工也更加细致。建筑施工传统的“粗放式”管理模式已不符合现代化城市建设的要求, 继而出现一系列工程进度滞后、安全事故频发、资源浪费等问题。

建筑信息模型(BIM)和物联网等技术正在建筑行业内深入应用, 并通过预制装配式桥梁的吊装施工数字化管控, 强力推动着市政工程高质量发展[1]-[3]。然而, 目前应用于预制桥梁施工中的数字化管控手段处于初级阶段, 仍然存在着智能化应用程度低、与实际现场施工脱轨、关键要素控制不足等问题。现在的市政工程, 规模越来越大, 施工环境也越来越复杂, 传统的管理方法已经难以满足如今对精细管理和数字管控的高要求。因此, 亟需进一步探索数字化技术在桥梁施工中的深度应用, 构建覆盖预制桥梁吊装的可视化、智能化管控体系, 以数字化、精细化管理推动提升市政项目建设的质量、安全与效率[4][5]。

当前, 在全预制装配式桥梁施工过程中, 信息化的应用已经取得了显著的成果。马辉、徐荫、徐芸[6]等利用 BIM 可视化技术搭建预制构件安全管理平台, 针对 30 m 的跨高速预制箱梁吊装进行仿真模拟, 提高了拆后还建桥梁的施工效率和施工精度。庄国方[7]研究了 BIM 技术指导后续梁段吊装误差纠偏的方法, 通过 BIM 技术对钢箱梁吊装施工的质量进行控制, 提高现场管理效率。刘鑫[8]提出大体积盖梁分片预制与快速拼装技术, 实现了 520t 盖梁的无支架吊装。段婷等[9]在桥梁的设计和施工全过程开展项目建模、信息化应用, 有效提升装配式桥梁工程的施工质量和效率。荆梦瑶[10]利用 BIM 技术建立悬索桥高精度三维模型, 对吊装过程进行了详细施工模拟, 制订高效可行的施工方案。徐明星[11]应用 BIM 技术优化预制场功能区布设、智能控制生产, 大大提高了工程效益。李瑞[12]将数字孪生与 BIM 协同应用于桥梁施工阶段, 构建了施工准备、过程管控、竣工验收全流程数字化管控体系, 实现了施工可视化与精准化管控。马居军[13]基于桥梁全生命周期管理, 通过济南绕城高速黄河特大桥钢梁智能顶推施工案例, 构建了“智能感知-实时决策”的闭环控制系统, 为吊装等施工环节的智能化提供了技术参考。陶龙等[14]依托长沙大桥 826.59t 级整体吊装工程, 构建了双浮吊协同同步控制安全控制体系, 实现了复杂航道环境下超重型钢结构的高精度安装。李泽鹏[15]基于 BIM 技术开发施工监控管理平台, 通过 Midas/Civil

建立全桥仿真模型,实现了对合龙误差、应力、索力及挠度等关键参数的智能化管控。石乔乔[16]构建了覆盖“数据-模型-分析-应用”四层的桥梁钢结构吊装技术框架,通过吊点优化、路径仿真与多机协同调度,显著提升了吊点定位精度与构件就位偏差控制水平。

上述研究已证明在预制装配式桥梁施工管理中,信息化技术的应用已经初见成效,但是目前的信息化工具的应用程度和范围仍有局限性。当前研究内容分别侧重于施工可视化模拟、大型设备监控管理,具有单一性,未能将两者深度融合,并且在三维模拟中仅局限于空间位置关系的展示,没有结合动态力学进行仿真计算,导致仿真预演与现场吊装作业之间缺乏联动与反馈机制,难以形成“模拟-执行-调控”一体化管控。

例如,目前市场上主流的品茗云安全计算软件,虽然能够对吊装工况进行较为详细的仿真模拟与受力验算,但其应用主要停留在方案编制阶段的静态仿真,未能与现场起重机械的实时运行数据进行联动,缺乏对现实吊装过程中负载率、回转角度、双机协同等关键参数的动态监控与预警能力,即“重仿真、轻监控”,难以实现虚拟预演对实际作业的实时指导与闭环调控。

为此,本文依托 G1503 公路和周邓快速路浦东枢纽段工程项目,创新性地整合了“孪生预演-物联智控-数字回溯”的桥梁吊装施工数字孪生管控方法,这一融合使桥梁吊装施工过程变得可控、可视和可溯,从而系统性地推动预制桥梁工程向更智能、更精准、更完整的方向发展。

2. 预制桥梁吊装全过程管控分析

2.1. 预制桥梁吊装全过程管控存在的问题

桥梁吊装,尤其是双机抬吊是一项风险性极高的危大工程,整个过程的数字化管控水平直接影响了工程的质量、安全和进度。然而,在方案制定、过程监控和数据治理三个方面的数字化应用仍然存在欠缺的地方,制约了整体管理效率的提升[15]-[17]。

2.1.1. 吊装前——仿真模拟应用深度和广度不足

(1) 现有仿真模拟主要用于桥梁吊装工况的可视化展示,不能同步模拟起重设备的关键参数(实时负载率、工作半径、对地应力、负荷分配等),对复杂环境下的施工安全评估缺乏关键仿真数据支撑。

(2) 对现场作业人员缺乏动态、可三维交互的实景模拟展示,技术交底内容与现场实际吊装工况往往存在偏差,施工人员无法直观理解吊装路径、吊物空间位置关系,增加了因交底不充分导致的安全隐患风险,严重影响了吊装操作的规范性和一致性[18]。

2.1.2. 吊装中——实时监控缺乏有效技术支撑

(1) 现场管理人员无法远程实时获取吊装设备的关键运行参数(如负载率、实际吊重、主臂角度、倾斜度等),难以及时感知超载、倾斜等风险并做出响应;尤其对于双机抬吊作业,由于缺乏协同可视化监控平台,管理人员与操作人员无法实时了解双机工作状态,导致协同偏差难以量化、效率低下、安全风险增加,无法实现对协同作业风险的主动防控。

(2) 目前针对双机抬吊实时吊装工况监测未能建立健全的分级预警机制,无法根据吊装过程中实际采集的监测数据按照提前预设的风险等级自动识别并报警,吊装作业的现场管控仍然需要依靠管理人员的个人主观经验与临场判断[19]。

2.1.3. 吊装后——方案与执行数据缺乏精准对比分析

施工方案、仿真模拟、实际作业三方面的关键吊装作业参数缺乏精准分析对比,容易形成“数据孤岛”。由于缺少对异常操作的识别与复盘分析,容易导致同类安全风险重复发生,经验无法沉淀为标准

化工艺参数, 制约了施工管理的持续优化与精细化提升[20]。

2.2. 预制桥梁吊装全过程管控目标

在桥梁施工管控中, 以全过程数字孪生管控为核心, 全面应用 BIM、物联网监测、大数据分析等技术, 整合桥梁吊装全过程的关键数据, 最终实现协同化施工与精细化管理。构建“方案预演 - 实时监控 - 数据回溯”的数据闭环, 变被动指挥为基于数据的主动调控, 实现对桥梁施工的全要素协同管理与风险预警, 推动市政工程建设向可视化、协同化、智能化方向转型。

3. 基于“孪生预演 - 物联智控 - 数字回溯”的桥梁吊装全过程管控方法

针对前述问题, 为实现吊装全过程闭环管控目标, 在吊装前采用“孪生预演”方法, 完成方案动态验证与三维可视化交底; 在吊装中采用“物联智控”方法, 完成实时监控与协同预警; 在吊装后采用“数字回溯”方法, 完成数据复盘与经验沉淀。由此形成覆盖方案策划、过程执行与数据归档的闭环管理。

3.1. 孪生预演：仿真验证与三维可视化交底

以建筑信息模型(BIM)、倾斜摄影及地理信息系统(GIS)为技术基础, 整合地形地貌、既有建(构)筑物、内嵌物理参数(外形尺寸、回转半径、负载等)的各类起重机械模型(履带吊、汽车吊、龙门吊、架桥机等)以及待吊装构件与吊装场景模型, 构建高精度、可动态响应的虚拟施工场景。如图 1 所示。

在该场景中, 系统实现了带力学计算的吊装仿真模拟: 不仅支持对吊装路径、途经点、回转区域等进行可视化编辑与全过程动态模拟, 还能通过内置的力学分析算法与碰撞检测算法, 自动计算双机负载率、工作半径、对地应力等核心参数, 提前识别结构碰撞、应力超限、设备倾覆等安全风险点, 从而辅助施工方案的优化编制, 显著提升吊装作业的安全性与可控性。

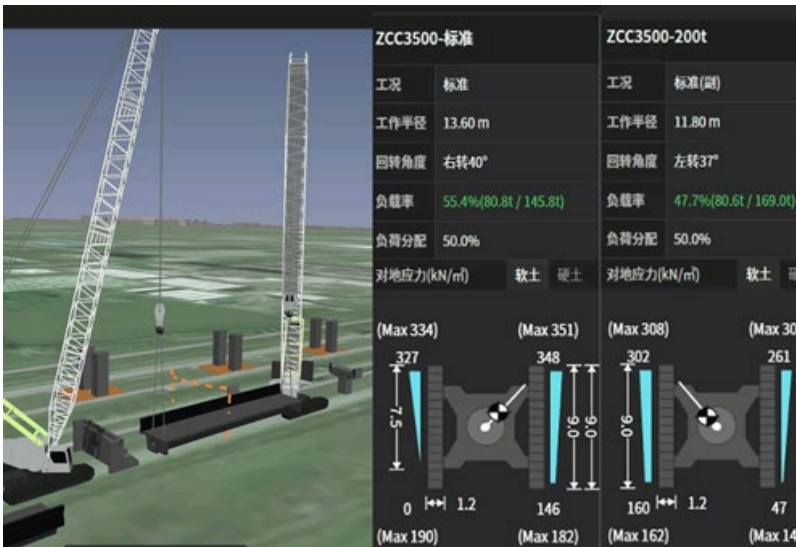


Figure 1. Digital twin rehearsal
图 1. 数字孪生预演

3.2. 物联智控：实时监控与协同预警

通过打通起重机械厂商数据传输接口或安装传感器的方式, 实现实时精确采集吊机作业过程中的起重量、幅度、力矩、回转角度等关键参数并进行分析, 操作人员与指挥人员利用手机端或者电脑端实现

实时监控。在物联智控平台上可以设置分级预警,当吊机监测数据超过安全阈值时,平台立即发出报警,并通过移动终端将预警信息推送给管理人员。如图 2 所示。

双机吊装工况,物联质控平台能够动态计算双机抬吊的荷载分配比例并进行实时可视化数据展示,同步掌握两台吊机的实时负载、协同效率,大幅提升双机协同作业安全。

同时,系统关联了带 AI 算法的高清视频监控,不仅在展示面板旁实时显示吊物姿态、吊钩位置及周边环境的监控画面,还可以自动识别吊装禁区入侵、违规操作等非标准化动作,并实时预警,形成了“数据协同可视化 + 作业现场可视化”的双重保障体系。



Figure 2. IoT intelligent control
图 2. 物联智控

3.3. 数字回溯：数据复盘与经验沉淀

在每次吊装完成后,系统会自动存储并上传所有吊装过程数据至云端。包括“孪生预演”各工况吊装预演方案和“物联智控”+“吊装监控”形成吊装过程视频。平台将对历史数据进行系统性回溯与分析,通过对比吊装预演方案,反推吊装过程,自动识别吊装中的异常操作行为,总结操作经验,进而不断规范和完善吊装作业的标准流程,为后续施工和项目管理积累宝贵的数字资产。

4. 工程案例

4.1. 工程概况

G1503 公路和周邓快速路浦东枢纽段工程项目位于上海浦东新区祝桥镇,其中桥梁段北起金亭公路,南至 G1503/S32 立交区以东,全长约 3.1 km。高架桥上部采用预制装配式工艺,预制装配率达到百分之九十,共涉及 189 根立柱,124 榀盖梁,391 榀小箱梁和 22 跨钢砼组合梁。

4.2. 桥梁吊装重难点分析

本工程桥梁段需在高速公路上方进行盖梁及上部结构吊装作业,共计需 19 次跨越既有交通线路(8 次跨主线、11 次跨匝道),现场交通干扰大、作业窗口受限。构件普遍具有大跨径、大自重的特点,施工中常需采用双机抬吊等非常规高风险工艺,进一步增加了技术难度与安全风险。吊装作业同时面临高空作业风险高、就位精度控制严、交通导改组织复杂等多重叠加挑战,一旦发生事故,不仅可能造成重大人

身财产损失, 更将导致高速公路长时间中断, 产生严重的社会经济影响, 是本项目施工阶段最为关键且复杂的控制难点。

4.3. 吊装案例分析

案例一: Z8P0-Z8P1 东侧小箱梁自重 133.5 吨, 需采用 2 台 350 吨履带吊进行吊装, 且过程中需要带载行走, 吊装风险显著增加。对此, 项目上系统地应用了“孪生预演-物联智控-数字回溯”的全过程数字化管控系统, 提前优化施工方案, 对吊装全过程进行精准管控, 并对历史数据进行分析总结。

吊装前仿真预演: 东侧小箱梁起吊后, 其北端角点与已安装的西侧小箱梁防撞墙发生碰撞。分析显示, 2 号吊机站位距 Z8P1 立柱仅 4 m, 作业半径内无调整空间。经多轮虚拟试吊, 将 2 号吊机整体向北平移 10 m, 重新规划吊装轨迹: 先低空向西旋转避开盖梁, 再提升至安全高度, 由 2 号吊机带载行走移送就位。如图 3(a)所示。

吊装中物联智控: 1 号吊机负载率 65%~72%, 2 号吊机 58%~63%, 荷载分配比例安全; 吊物与障碍物最近距离 1.2 m, 符合预演路径; 带载行走阶段接地压力正常。吊装耗时 2 小时 15 分, 最终就位偏差横向 13 cm、纵向 5 cm。

吊装后数字回溯: 实际吊装轨迹与仿真模拟轨迹高度吻合, 吻合度高达 94%, 其中带载行走的动作时间节点与计划偏差不超过 5 分钟。

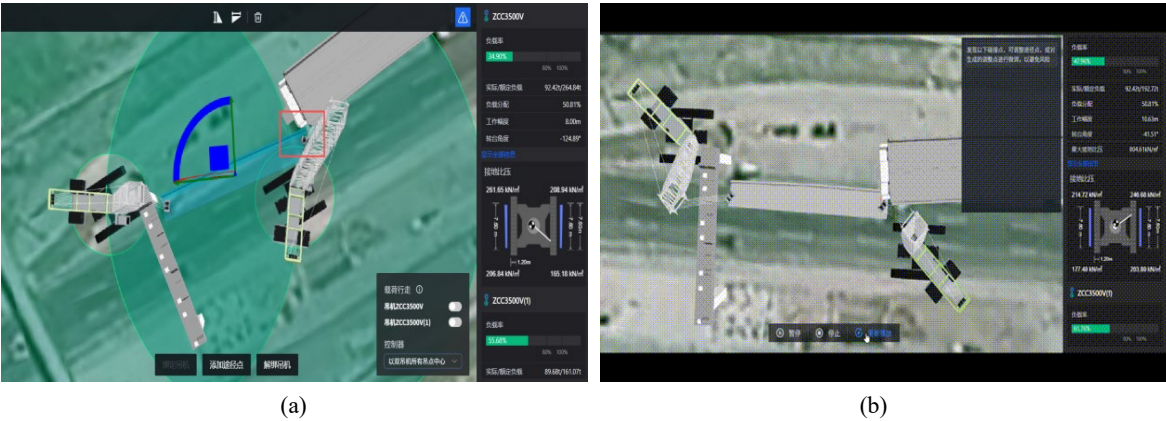


Figure 3. Comparison of Solutions. (a) Original lifting plan; (b) Adjusted lifting plan
图 3. 方案对比图; (a) 原吊装方案; (b) 调整后吊装方案

案例二、为进一步验证本系统对不同构件及复杂工况的适用性, 选取周邓东线 EP73-EP81 区段 U 型盖梁吊装。该区段共 8 榀 U 型盖梁, 单榀最大重量 285t, 采用 2 台 350t 履带吊双机抬吊, 需完成带载行走, 周边环境复杂, 安全风险极高。

吊装前仿真预演: 盖梁旋转时与 EP73 西侧立柱最小净距仅 0.78 m, 且双机负载率分别为 83%和 57%, 差值超安全阈值。经多轮虚拟试吊, 优化方案改为“低空旋转到最佳位置后同步抬吊”, 调整 1 号吊机, 站位南移 2.5 m, 使最小安全距离扩大至 1.65 m 以上, 双机负载率降至 71%和 68%。如图 3(b)所示。

吊装中物联智控: 1 号吊机负载率 70%~73%, 2 号吊机 67%~69%, 荷载分配比例安全; 旋转至风险点实测距离 1.62 m, 与仿真偏差 < 8%; 带载行走阶段接地压力正常。最终就位偏差横向 14 cm、纵向 6 cm, 满足规范要求。

吊装后数字回溯: 平台生成分析报告, 负载率曲线吻合度 91%。该区段 8 榀盖梁全部安全就位, 验证了系统在不同构件及复杂工况中的普适性。

上述两个案例的仿真预演与现场实测关键数据汇总如表 1 所示。

Table 1. Comparison of key data between simulation rehearsal and on-site measurement
表 1. 仿真预演与现场实测关键数据对比

案例	对比项	仿真预演值	现场实测值	偏差/吻合度
案例一	最小安全距离(m)	1.25	1.2	偏差 0.05 m
	1 号吊机负载率(%)	63~70	65~72	吻合度 94%
	2 号吊机负载率(%)	56~62	58~63	吻合度 94%
	就位偏差(cm)	/	横向 13，纵向 5	满足要求
案例二	最小安全距离(m)	1.65	1.62	偏差 0.03 m
	1 号吊机负载率(%)	68~72	70~73	吻合度 91%
	2 号吊机负载率(%)	66~70	67~69	吻合度 91%
	就位偏差(cm)	/	横向 14，纵向 6	满足要求

4.4. 应用效益对比分析

为客观验证本系统在实际工程中的实施效果，选取项目上未采用本系统的另一处类似吊装作业(EP60-EP68 区段盖梁吊装，工况与案例二相近)作为对照。对比结果表明：方案编制时间缩短 64%；单次吊装作业时长缩短 21%；返工次数由对照组的 2 次降为 0。在安全风险方面，本系统在仿真预演阶段提前识别并规避了全部 4 处潜在碰撞风险。上述量化数据验证了本系统在提升效率、保障安全及降低返工率方面的显著优势。

5. 结论与展望

5.1. 结论

本文以 G1503 公路和周邓快速路浦东枢纽段工程为依托，搭建并应用了“孪生预演 - 物联智控 - 数字回溯”的全生命周期数字化管控系统。该系统利用三维交互吊装仿真数字孪生平台实现了对吊装方案的虚拟试错与安全风险的预先识别；借助起重机械物联网安全管理云平台对双机抬吊等高风险作业进行实时数据协同与智能预警；并通过对全吊装过程数据的集成储存与智能分析，形成了可重复使用的宝贵数字资产。工程实践表明，该体系显著提升了复杂环境下多次跨高速吊装作业的安全性、协同性与施工精度，其经验可为同类吊装项目提供参考借鉴。

5.2. 展望

本研究目前仍然存在很多不足之处，后续将对本系统进行优化。未来在三维仿真模拟过程中将通过对接吊索具材料力学数据库，并利用结构疲劳损伤算法对吊索进行寿命安全动态演算；针对带载行走、多机协同等复杂工况，利用车辆动力学与地基承载力分析技术提升平台耦合仿真能力。同时，将利用 AI 算法实现吊装路径的智能规划，智能计算吊机、吊物摆放位置和自动避让碰撞物等功能。该系统将推动吊装作业从智能化监测预警向智能化辅助决策的更高阶段演进。

参考文献

[1] 饶舰. 新一代信息技术与公路工程建设管理融合应用研究[J]. 公路, 2022, 67(12): 245-252.
[2] 赵亮. 智慧桥梁施工管理中“数字化 + 物联网技术”理念应用[J]. 智能建筑与智慧城市, 2022(9): 15-17.

- [3] 刘占省, 史国梁, 孙佳佳. 数字孪生技术及其在智能建造中的应用[J]. 工业建筑, 2021, 51(3): 184-192.
- [4] 刘占省, 孙佳佳, 杜修力, 等. 智慧建造内涵与发展趋势及关键应用研究[J]. 施工技术, 2019, 48(24): 1-7.
- [5] 张立新, 张家瑞, 邵志国, 等. 建筑业高质量发展综合评价与障碍因素分析[J]. 工程管理学报, 2023, 37(4): 13-18.
- [6] 马辉, 徐荫, 徐芸. 基于 BIM 的横跨高速公路桥梁吊装技术研究[J]. 建筑安全, 2019, 34(12): 41-44.
- [7] 庄国方. 基于 BIM 的大型立交互通桥梁吊装施工模拟与优化[J]. 施工技术, 2020, 49(11): 123-126.
- [8] 刘鑫. 城市桥梁全预制装配设计与施工技术研究[J]. 城市道桥与防洪, 2023(12): 141-145+23.
- [9] 段婷, 陈伟, 宋鹏振, 等. 装配式桥梁工程应用 BIM 技术研究——以乌鲁木齐东进场高架道路工程 EPC 总承包项目为例[J]. 四川建材, 2025, 51(2): 184-187.
- [10] 荆梦瑶, 李阳, 吴廷尧. 基于 BIM 技术的悬索桥钢桁梁吊装施工[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(18): 76-82.
- [11] 徐明星. BIM 技术在大型预制装配式桥梁工程施工中的运用[J]. 交通科技与管理, 2024, 5(21): 82-84.
- [12] 李瑞. 数字孪生与 BIM 协同技术在桥梁施工阶段的应用[J]. 智能建筑与智慧城市, 2026(3): 194-196.
- [13] 马居军. 基于桥梁全生命周期的智能建造与运维的数字孪生体系研究[J]. 智能城市, 2026, 12(3): 149-152.
- [14] 陶龙, 赵敏, 雷军伟. 大跨度钢结构桥梁整体吊装施工工艺及吊装安全控制技术[J]. 安装, 2026(1): 48-50.
- [15] 李泽鹏. 波形钢腹板 PC 组合箱梁矮塔斜拉桥智能施工监控分析[J]. 建筑机械化, 2026, 47(4): 106-111.
- [16] 石乔乔. 基于 BIM 的桥梁钢结构吊装施工技术要点分析[J]. 交通科技与管理, 2026, 7(5): 125-127.
- [17] 李晓鹤. 箱梁双机协同吊装技术在市政桥梁工程中的应用[J]. 建筑机械, 2025(7): 118-121.
- [18] 徐赛英. 桥梁预制拼装全过程数字化施工管理研究[J]. 城市道桥与防洪, 2025(1): 174-177.
- [19] 钟志军. 基于 BIM 技术的装配式桥梁施工节点预拼装模拟研究[C]//重庆市大数据和人工智能产业协会. 人工智能与经济工程发展学术研讨会论文集(二). 2025: 1343-1346.
- [20] 赵俊林, 饶舰, 程文诚, 等. 基于 BIM + GIS + IoT 的装配式桥梁全过程数字建造体系研究[J]. 工程管理学报, 2024, 38(3): 82-87.