

智慧建造技术在道路、机场与桥隧工程中的实践与展望

刘桐

济南黄河路桥建设集团有限公司, 中国·山东 济南 250111

摘要: 随着建筑信息模型、物联网、人工智能等新一代信息技术的快速发展, 智慧建造已成为交通基础设施建设的重要发展方向。本文系统梳理了智慧建造技术在道路工程、桥隧工程和机场工程三大领域的创新实践, 分析了数字孪生、智能装备、垂域模型等核心技术的应用成效。研究表明, 智慧建造技术实现了工程建设全过程的数字化协同与精益化管理, 在提升工程质量、缩短工期、降低成本方面成效显著, 单项目经济效益可达千万元以上, 工期缩短约两个月。本文最后总结了智慧建造的关键支撑技术, 为行业数字化转型提供参考。

关键词: 智慧建造; BIM 技术; 数字孪生; 智能装备; 交通基础设施

Practice and Prospect of smart construction Technology in Road, Airport and Bridge and Tunnel Engineering

Liu Tong

Jinan Yellow River Road and Bridge Construction Group Co., Ltd., China Shandong Jinan 250111

Abstract: With the rapid development of new generation information technology such as building information model, Internet of Things and artificial intelligence, smart construction has become an important development direction of transportation infrastructure construction. In this paper, the innovative practice of smart construction technology in road engineering, bridge and tunnel engineering and airport engineering is systematically combed, and the application effects of core technologies such as digital twinning, intelligent equipment and vertical model are analyzed. The research shows that smart construction technology has achieved digital collaboration and lean management in the whole process of engineering construction, and achieved remarkable results in improving engineering quality, shortening construction period and reducing costs. The economic benefit of a single project can reach more than 10 million yuan, and the construction period can be shortened by about two months. At last, this paper summarizes the key supporting technologies of smart construction, providing reference for the digital transformation of the industry.

Keywords: Smart construction; BIM technology; Digital twins; Intelligent equipment; Traffic infrastructure

0 引言

“十四五”以来我国建筑业智能建造与绿色建造双核心引擎这一地位已经具备, 工业化、数字化、绿色化方向转型加速推进可以达成, 智慧建造新一代信息技术与建筑业深度融合核心产物这一属性同样存在, 设计、生产、施工到运维全流程革命性变革动能注入得以实现, 交通基础设施建设领域道路、机场、桥隧工程规模大、结构复杂、施工环境多变这些特征普遍具备, 项目精细化管理与协同作业更高标准要求由此提出能够跟上。

当前, 智慧建造技术已在国内众多重大工程项目完成落地应用, 其中涵盖广西陆杨新村大桥“毫米级”精度控制的落地实践、上海浦东机场 37 款机器人协同作业的应用成果、中交集团发布交通基建垂域大模型的创新突破; 这一系列创新实践, 可把我国交通基础设施建设从“中国建

造”向“中国智造”的转型进程稳步推动; 本文明确核心目标为系统梳理智慧建造技术在三大领域的实践应用, 完成共性技术与落地实施经验的总结提炼, 可为行业规模化推广应用提供参考借鉴。

1 道路工程中的智慧建造实践

1.1 智慧梁场与预制生产

道路工程中桥梁占比高, 梁片预制是制约工期的关键环节。政永高速公路德化段建设了泉州市首座智慧化预制梁场, 颠覆传统工艺, 打造集“智能生产、数字管控、绿色建造”于一体的现代化梁场。在全封闭钢结构厂棚内, 全自动液压模板与不锈钢面板精准合模, 智能振捣系统根据预设参数完成混凝土浇筑; 养护区蒸养棚通过物联网技术实时调节温湿度, 让梁片在恒温恒湿环境中快速“成长”; 数字孪生平台上, 每一片梁的钢筋间距、混凝土强度

等数据实时更新,实现从原材料到成品的全周期可追溯管理。这套“智慧组合拳”将单片梁生产周期从传统工艺的 8 天缩短至 3 天,缩短了 62.5%,梁片一次验收合格率达 100%,为泉州市交通建设数字化转型树立了标杆。

1.2 钢箱梁智能顶推技术

跨越既有高速公路的钢箱梁架设环节,政永高速德化段创新应用“工厂预制+分段运输+智能顶推”施工工艺;把总重 588.8 吨的钢箱梁分解为 10 段“钢积木”运抵施工现场,依托 400 吨级智能步履式顶推设备完成全流程架设;10 台液压千斤顶同步作业,结合北斗定位系统实现 0.1 毫米级位移精准控制,横向纠偏精度可达 ± 2 毫米;该技术可全面保障既有高速公路的安全稳定运行,相较传统施工工艺可大幅压缩项目工期。

1.3 路面智能压实与检测

路面工程施工环节,智能压实技术可通过振动压路机搭载的实时测试反馈系统,对压实道次、轧辊参数完成动态记录与实时显示,把路基、基层和沥青层的精细化压实控制落地实现;同时,三维激光断面仪、道路检测机器人等设备的落地应用,可大幅提高路面平整度、纹理深度等核心指标的检测效率与检测精度。

2 桥隧工程中的智慧建造创新

2.1 桥梁数字孪生与体系转换控制

桥梁施工中受力体系转换是技术难度最大的环节之一。广西陆杨新村大桥为国内最大跨径下承式钢管混凝土简支体系拱桥^[1],采用“缆索吊装+斜拉扣挂+平衡索”组合工艺施工。项目团队搭建施工全周期数智建造平台,将 BIM 模型、现场监测数据与有限元分析动态融合,创建大桥数字孪生体,对整个体系转换过程进行全流程动态仿真模拟,“预演”每一次卸载、张拉后结构的内力和变形情况,提前发现潜在问题,从而制定出最优的体系转换工艺流程。项目自主研发的 4GICC 智联计算中枢、拱座支撑体系平衡感知与动态平衡控制子系统,协同测量机器人和各类智能传感器,实现全程数据监测分析和“毫米级”精度控制。刚性系杆吊装过程中,每一节系杆的安装误差控制在 3 毫米以内,两次体系转换均实现“无感”过渡。

2.2 隧道围岩智能判释

隧道施工中围岩分级是确定支护参数和施工工艺的关键依据。西延高铁铜川隧道利用全智能凿岩台车实时获取钻进参数,包括进给速度、冲击压力、推进压力、回转速度等 7 类数据,同时采用数码成像技术自动获取掌子面图片,提取图像的 H(色调)、S(鲜艳程度)、V(明暗程

度)特征值。基于机器学习的六种算法(极限树、K 近邻、袋装法、随机森林、LightGBM、XGBoost),以凿岩台车钻进参数和 HSV 值为特征,围岩岩性、层厚和级别为标签,训练形成围岩智能判释模型,实现手动输入参数、自动输出围岩级别的功能。

2.3 交通基建垂域大模型

2025 年 9 月,中交一公局集团发布了国内首个钻爆法山岭隧道垂域模型“蓝翼·穿岳”、盾构法隧道垂域模型“蓝翼·潜龙”以及拱桥垂域模型“蓝翼·飞虹”。三大垂域模型沿用了中交集团“蓝翼”大模型通用能力,注入 30755 份标准、规范、制度及技术方案,150TB 生产数据,超百亿 Token 高质量训练语料,形成了兼具强合规、高可译、低延迟的垂直领域复合大模型应用体系。其中,“蓝翼·穿岳”功能覆盖超前地质预报、围岩识别、钻爆施工、装备调度等环节管控;“蓝翼·潜龙”构建贯通盾构选型、掘进施工、风险识别和辅助作业的智能建造体系;“蓝翼·飞虹”全面支撑配合比设计优化、拱座施工、钢拱桥拼装、缆索吊控制等核心环节管控。三大模型目前已在全国多个重点项目实现深度应用与规模化部署。

3 机场工程中的智慧建造探索

3.1 超大规模机场的数字孪生实践

重庆江北国际机场五期扩建工程新建 T3B 航站楼建筑面积约 36 万平方米,为全球最大的机场单体卫星厅。项目以弱电信息系统建设运行特点构建数字孪生机场为主线,深度融合 BIM+IoT+AI 技术,构建了民航弱电专业工程设施设备布局、机房能效模拟、施工动画演示、旅客动线仿真、安全防范评估、空间立体分析及虚实孪生机场运维保障等特色功能。在建设阶段,项目采取高精度数字建模、数字预制工厂、机房能效模拟、施工动画演示等措施,有效减少了变更次数和变更工程量,已产生各类显著经济效益 1900 余万元,整体节约工期约两个月。在运营管理阶段,机场管理人员借助可视化的资产管控、全感知的智能运营以及基于 BIM 模型 1:1 还原的机场建设全貌,能够实时采集跑道状态、廊桥位置、运行态势、航班信息等关键运营数据,通过动态交互的数字孪生机场及时掌握生产运行动态。

3.2 建筑机器人集群协同作业

上海浦东机场四期扩建工程中,上海建工投入 37 款建筑机器人组成的“智能方阵”。其中,四轮激光整平机器人、履带抹平机器人、四盘地面抹光机器人组成的“地坪三剑客”在巨大面积地坪区域协同作战;智能高压淋水机

机器人扮演质量检测员角色；抹灰、打磨、喷涂三合一机器人实现“一机多能”；巡检机器狗独立完成工地安全、设备状态、物料管理等任务。为解决多机器人协同作业难题，上海建工自主研发了国内首个以“管理”为核心的机器人集群平台，作为“现场指挥官”统一调度各类机器人，彻底解决了“机器一多就打架”的难题，让机器人从“单打独斗”升级为“集团作战”。

4 智慧建造综合效益分析

①智慧建造可推动工程质量管理从“事后检测”向“过程控制”全面转型；陆杨新村大桥把安装误差精准控制在 3 毫米以内，政永高速梁片一次验收合格率达 100%，济南遥墙机场累计排查解决图纸问题 600 余项；数字孪生与实时监测技术的落地应用，推动工程质量控制从经验判断向数据精准支撑稳步升级。

②智慧建造可实现施工生产效率的大幅提升；政永高速把单片梁生产周期从 8 天压缩至 3 天，重庆江北机场累计节约工期约两个月，济南遥墙机场整体工期提前 58 天；智能装备与数字化管理的全面落地，可有效压缩工序衔接间隔，大幅减少无效等待与返工耗时。

③智慧建造可创造十分显著的经济效益；重庆江北机场累计创造经济效益 1900 余万元，济南遥墙机场累计节约成本约 1545 万元，材料成本降幅达 5% 左右；通过减少设计变更、优化资源配置、降低物料损耗，智慧建造可实现项目全流程精益化成本管控，见表 1。

5 智慧建造的关键支撑技术

5.1 数字孪生技术

数字孪生是智慧建造的核心支撑技术之一，可通过创建物理实体的虚拟映射，把工程建设全过程转化为可视化、可模拟、可控制的闭环管理；桥梁工程领域，把数字孪生体与有限元分析深度结合，可对受力体系转换开展全过

程动态仿真模拟；机场工程领域，数字孪生平台可实现建设期与运维期的数据全链路贯通，为后续智慧运营筑牢基础；当前数字孪生技术正朝着“虚实同步、以虚控实”的方向稳步发展，实时数据采集与模型动态更新的融合深度持续提升。

5.2 智能装备与机器人技术

智能装备智慧建造体系核心执行终端这一地位已经具备，智能凿岩台车、智能拱架台车、智能衬砌台车这些隧道施工装备涵盖在内，四轮激光整平机器人、抹灰打磨喷涂机器人等各类建筑机器人同样包含其中，内置传感器与控制系统借助之后精准定位、自动作业、质量自检全流程闭环实现可以达成，机器人集群平台落地应用多机协同作业调度难题有效破解可以跟上，机器人“单兵作战”向“集团作战”全面升级推动能够完成。

5.3 垂域大模型技术

交通基建垂域大模型 AI 技术与行业专业知识深度融合核心产物这一地位已经具备，“蓝翼”系列垂域模型为代表海量标准规范、技术方案与生产数据注入之后勘察、设计、施工、运维全生命周期智能辅助能力形成可以达成，隧道工程领域围岩识别和钻爆施工全流程管控垂域模型辅助完成能够跟上，桥梁工程领域配合比设计和拱座施工精细化管控精准支撑得以实现，垂域大模型工程技术人员高效智能辅助工具逐步成为可以跟上，见表 2。

6 结语

综上所述，智慧建造技术已构建起完整的技术体系，在交通基础设施领域完成规模化落地应用，数字孪生、智能装备、垂域大模型等核心关键技术均实现突破性发展；道路工程领域，智慧梁场、智能顶推技术可达成预制装配施工效率的显著提升；桥隧工程领域，数字孪生技术可把施工精度稳定控制在“毫米级”垂域大模型可为项目全流

表1 典型项目智慧建造效益统计

项目名称	应用技术	质量效益	进度效益	经济效益
重庆江北机场	BIM+数字孪生	减少变更次数	节约工期2个月	1900余万元
济南遥墙机场	BIM+智慧工地	解决图纸问题600余项	工期提前58天	节约成本1545万元
政永高速德化段	智慧梁场	一次验收合格率100%	单片梁周期缩短62.5%	—
陆杨新村大桥	数字孪生+BIM	安装误差<3mm	—	—

表2 智慧建造关键支撑技术及应用场景

技术类别	主要技术手段	典型应用场景
数字孪生	BIM+有限元分析、虚实同步建模	桥梁体系转换模拟、机场运维管理
智能装备	智能凿岩台车、建筑机器人、智能顶推设备	隧道开挖、墙面作业、钢箱梁架设
垂域大模型	钻爆法隧道模型、盾构法隧道模型、拱桥模型	围岩判释、盾构选型、配合比优化
物联网感知	传感器、三维激光扫描、无人机	钻进参数采集、质量检测、工地巡检

程管控提供核心赋能；机场工程领域，机器人集群协同作业、BIM 全流程协同管理均可收获十分显著的应用成效；智慧建造的综合应用效益，集中体现在质量精准化、进度高效化、成本精益化三大核心维度；单项目可达成千万元以上的经济效益，项目工期可实现两个月左右的压缩；数字孪生、智能装备、垂域大模型、物联网感知四大核心支撑技术，共同把智慧建造体系的底层技术基础搭建完成。

参考文献：

[1] 赵珊珊. “毫米级”精度控制广西陆杨新村大桥全桥受力体系转换完成[N]. 科技日报, 2025-09-09.

[2] 上海市国有资产监督管理委员会. 当“超级工程”遇到“机器人方阵”，上海建工为智能建造贡献样本[EB/

OL].(2025-10-24).<https://www.gzw.sh.gov.cn>.

[3] 中交一公局集团有限公司. 公司发布交通基建领域隧道、盾构、桥梁三大垂域模型[EB/OL]. (2025-09-12). <https://www.fheb.cn>.

[4] 王清勤. 以科技创新为引擎用智能建造与绿色建造推动建筑业高质量发展[N]. 中国建设报, 2025-10-20.

[5] 陈思晓, 余支福, 檀署忠. 政永高速德化段建设迎来双突破[N]. 中国交通报, 2025-09-22.

作者简介：刘桐（1997.11-），男，汉族，山东省济南市，初级职称，吉林建筑大学工学学士学位，研究方向：城市道路与交通工程领域。