

高速公路工程施工数智化转型的挑战与对策

张林

安徽建工水利开发投资集团有限公司, 中国·安徽 蚌埠 233000

摘要: 高速公路作为国家综合立体交通网的核心骨架, 其工程建设具有线路长、工点分散、环境复杂、协同难度大等显著特征。传统依赖“人盯人、纸传图”的施工管理模式, 已难以满足新时代对工程建设高质量、高效率、高安全的发展要求。本文聚焦高速公路工程的独特场景, 系统梳理了BIM+GIS、物联网、无人机、北斗定位、人工智能及数字孪生等数智技术在路基、桥梁、隧道、路面及交安工程中的融合应用现状, 深入剖析了当前转型过程中面临的数据标准不统一、野外环境适应性差、跨标段协同困难、投入产出效益模糊及一线人员数字素养不足等核心挑战。**关键词:** 高速公路; 智能建造; BIM+GIS; 智慧工地; 数字孪生

Challenges and Countermeasures of Digital Transformation in Highway Engineering Construction

Zhang Lin

Anhui Construction Water Resources Development Investment Group Co., Ltd., China Anhui Bengbu 233000

Abstract: As the backbone of China's integrated three-dimensional transportation network, expressway construction is characterized by extensive routes, dispersed work sites, complex environments, and significant coordination challenges. The traditional "human-to-human monitoring and paper-based documentation" management model can no longer meet the modern era's demands for high-quality, efficient, and safe engineering development. This paper examines the unique scenarios of expressway projects, systematically reviewing the integration of digital and intelligent technologies—including BIM+GIS, IoT, drones, Beidou positioning, AI, and digital twins—in subgrade, bridge, tunnel, pavement, and traffic safety engineering. It also analyzes core challenges during the transition, such as inconsistent data standards, poor field adaptability, difficulties in cross-segment collaboration, ambiguous input-output benefits, and insufficient digital literacy among frontline personnel.

Keywords: Expressway; Intelligent construction; BIM+GIS; Smart construction site; Digital twin

0 引言

截至2025年底, 中国高速公路总里程已达18.6万公里, 覆盖98%的城区人口超过20万的城市, 建成了全球规模最大、覆盖最广的高速公路网络。然而, 在规模持续扩张的同时, 行业内部仍面临一系列深层次的结构矛盾:

管理粗放: 数百公里的线路高度依赖人工巡检, 难以实时、精准掌握各分散工点的实际状态; 协同低效: 设计、施工、监理、业主等多方信息割裂, 设计变更的平均响应周期超过10天; 安全风险突出: 2024年全国公路水运工程发生的较大及以上事故中, 边坡滑塌与隧道坍塌事故占比高达63%; 资源浪费严重: 土石方调配不合理导致无效运输, 沥青混合料温度离析引发大面积返工; 环保监管压力: 项目常穿越生态敏感区, 对施工扬尘、噪声、弃渣等行为的实时监测要求日益严格。

在此背景下, 《交通强国建设纲要》明确提出“推进基础设施全要素、全周期数字化, 打造智慧高速公路”。交通运输部《数字交通“十四五”发展规划》进一步要求“构建覆盖勘察、设计、施工、运维全过程的数字孪生体系”。

高速公路因其“线性延伸、野外作业、多专业交叉、生态约束强”的独有特性, 其数智化转型必须探索一条区别于房建、市政等领域的专属路径。本文旨在通过系统性总结该领域的转型规律、关键技术与实践经验, 为行业提供兼具理论支撑与实操价值的参考。

1 高速公路工程数智化的核心特征与驱动逻辑

1.1 工程特殊性决定技术需求差异

高速公路工程的独特属性对其数智化转型提出了差异

化要求，与传统模式的痛点形成鲜明对比。

工程特征	对数智化的核心要求	传统模式痛点
线性延伸 (50 - 300km)	需BIM与GIS深度融合，实现“桩号—空间—属性”三位一体的全局管理	图纸按标段分割，缺乏整体视角，宏观把控困难
工点高度分散	应用系统需模块化、可快速复用、支持轻量化部署	各标段系统重复建设，成本高昂，集成度低
野外无网/弱网环境	设备需具备低功耗、离线运行、太阳能供电能力	传感器频繁断连，关键数据丢失严重
多工区并行施工	需建立统一的数据标准与跨工区协同工作流程	各标段数据格式、管理模型不一，信息无法互通
穿越生态敏感区	需集成环境监测传感器与自动预警机制	环保监管被动响应，处罚频繁，整改成本高

1.2 转型驱动因素分析

多重动力正共同推动高速公路工程走向数智化：政策强制力增强：交通运输部《公路工程 BIM 应用指南（试行）》明确要求“新建国家高速公路项目的 BIM 技术应用覆盖率不低于 70%”。业主需求升级：各省交通投资集团普遍将“智慧工地建设水平”纳入 EPC 项目招标的技术评分项，权重可达 10 - 15%。技术成本下降：国产北斗高精度定位模组价格已降至 200 元 / 台左右，LoRa 无线传感节点成本低于 50 元，规模化部署成为可能。经济效益显现：实践表明，数智化转型能带来直接经济收益。例如，某山区高速公路项目通过智能土石方调配系统，成功减少平均运距 15%，节约燃油成本约 2800 万元。

2 高速公路数智化转型的实施路径

基于多个典型项目的实践，本文构建了“一平台、三主线、多场景”的实施框架，形成了一套适配线性工程特性的系统性解决方案。

2.1 “一平台”：构建工程专属的数字底座

针对长期存在的“数据孤岛”问题，我们研发了“高速智建云”平台，旨在打造统一的项目数字底座，具备以下核心能力：BIM+GIS 一体化引擎：采用 CesiumJS 与 SuperMap 技术，无缝加载全线 LOD300 精度的 BIM 模型与高精度地形影像，支持按桩号（如 K56+300）进行毫秒级精确定位与信息查询。统一资产编码体系：严格依据《公路工程结构物分类与编码规则》，为每一座桥梁、每一条隧道、每一段路基赋予全局唯一的数字身份 ID（如 QL-G42-K88-B01）。离线数据采集与同步：开发轻量化的移动终端 APP，支持在无网络环境下进行质量巡检、安全排查等数据录入，待网络恢复后自动同步至云端。多源异构数据集成：平台具备强大接入能力，可融合无人机航拍影像、北斗位移监测站、环境传感器、AI 视频监控等超

过 12 类异构数据源。

2.2 “三主线”：贯穿项目全生命周期的核心数据流

围绕工程管理的核心维度，构建三条关键数据主线，实现流程闭环与智能决策。

主线	核心内容	技术实现	管理价值
进度主线	桩号、工序、资源、时间四维联动与动态追踪	BIM4D施工模拟+无人机定期正射影像比对	自动识别进度偏差，精准预警滞后工点，辅助资源动态调配
质量主线	从原材料、工艺参数到检测报告的数字化闭环管控	物联网传感器（压实度、沥青温度、张拉力）+区块链存证技术	实现工艺参数实时监控与超标预警，质量问题可追溯至具体班组与时间点，杜绝数据篡改
安全环保主线	对边坡位移、隧道收敛、扬尘噪声等风险的实时监测与预警	北斗/GNSS高精度位移站+AI视频智能识别+多参数环保传感器	建立主动式安全防护体系，可提前72小时预警地质灾害风险，变被动响应为主动预防

2.3 “多场景”：聚焦高价值的典型应用落地

将数智技术融入具体施工场景，解决实际痛点，创造可见价值。

场景一：智能边坡监测与预警。技术方案：在关键高边坡布设北斗 GNSS 位移监测站（精度 ±2mm）、倾角计与雨量计，数据实时接入基于 LSTM 神经网络的 AI 预测模型。应用成效：在某高速公路滑坡风险段，系统成功提前 72 小时发出红色预警，施工单位及时采取加固措施，避免了可能发生的重大安全事故与巨额经济损失。

场景二：桥梁预制构件全生命周期管理。技术方案：为每一片预制 T 梁植入 RFID 芯片，绑定其设计参数、钢筋型号、混凝土配比、张拉预应力及养护数据。应用成效：实现了从工厂生产到现场吊装的全程可追溯。一旦发现质量问题，可精准定位至生产班组与具体工序，项目整体返工率因此下降 40%。

场景三：沥青路面智能化施工管控。技术方案：在摊铺机、压路机上集成红外温度传感器、速度编码器与厚度雷达，施工参数实时回传至管理平台。应用成效：彻底杜绝了“低温碾压”（<130℃）等违规作业，路面摊铺的平整度合格率从 85% 显著提升至 98%，极大提升了工程品质。

3 当前面临的关键挑战

尽管转型方向明确且技术日趋成熟，但在高速公路工程的广泛实践中，仍存在诸多亟待突破的瓶颈。

3.1 数据标准体系缺失，知识资产难以沉淀复用

各项目在 BIM 建模深度、坐标系选择、属性字段定义上各自为政，导致数据无法跨项目流通。例如，桥梁构

件编号在 A 项目为“QL-01”，在 B 项目则为“Bridge_K56”，形成新的“数据烟囱”。

3.2 极端野外环境对技术装备提出严峻考验

施工现场常面临高温 (>45℃)、高湿 (>90%RH)、雷暴等恶劣气候，导致传感器年故障率高达 15%。同时，山区 4G/5G 信号盲区覆盖率超过 30%，严重制约了数据的稳定、实时回传。

3.3 投入产出效益难以量化，影响持续投资决策

“智慧工地”单公里建设投入约为 80 - 150 万元，但其主要效益多体现在隐性的安全风险规避、工期压缩和长期质量保障上，难以在项目短期财务报表中直接体现。这导致财务评估困难，影响了管理层对数字化转型的长期投入决心。

3.4 人才结构呈现“哑铃型”失衡，基层应用动力不足

行业面临严重的复合型人才短缺：资深工程师往往缺乏数字化技能，而 IT 人才又不懂土木工程业务。与此同时，一线施工与管理人员因数字素养不足、传统工作惯性等原因，对新技术存在畏难情绪，认为数字化系统“操作复杂，增加了额外工作量”，导致系统使用率低下，投资效能无法释放。

3.5 传统管理模式与组织架构形成转型“惯性阻力”

建筑业长期依赖经验主义和“熟人社会”式管理。数字化转型带来的流程透明化、数据可视化，触及了部分既得利益，并改变了原有的权力结构。部门墙厚重、横向协同不畅，加之管理层对转型的长期性和艰巨性认识不足，共同导致了“不愿转、不敢转、不会转”的普遍困境。

4 系统性对策建议

为应对上述挑战，推动转型迈向深水区，需要从技术、管理、组织与生态多个层面进行系统性的革新。

4.1 实施“数字赋能”计划，破解人才与应用难题

工具层面“做减法”：优化一线 APP，大力推广语音输入、拍照自动识别缺陷、简易图表生成等“傻瓜化”功能，降低使用门槛。

激励层面“做加法”：设立“数字之星”等专项奖励，对积极使用数字化工具、提出优化建议的一线班组和个人给予物质与荣誉奖励，激发内生动力。

培训层面“系统化”：建立覆盖项目经理、技术人员、班组长的分级培训体系，将数字化技能纳入岗位考核，培养既懂工程又懂数据的“数字工匠”。

4.2 构建企业级工程数据中心，推动数据资产化

改变“项目完结、数据清零”的旧模式，强制要求项目结束后，将经过清洗和标准化的 BIM 模型、物联网数据、管理过程数据沉淀至企业级数据中心。

将这些数据资产转化为“数字孪生知识库”，用于新项目的投标方案模拟、施工风险智能预判、工程量与成本精准估算，真正实现数据驱动的科学决策。

4.3 创新商业模式与评估体系，明晰转型价值

探索 SaaS（软件即服务）等轻量化采购模式，降低企业初期投入成本。开发适用于工程领域的“数智化转型效益评估模型”，将安全、质量、工期、环保等隐性收益进行货币化或指数化度量，为投资决策提供清晰依据。

4.4 推动组织流程再造，营造转型文化

在企业层面设立“数字建造部”或“首席数字官（CDO）”等专职机构与岗位，负责战略规划与资源统筹。

以数字化平台为核心，重塑设计变更、计量支付、物料调度等核心业务流程，打破部门壁垒，建立跨职能的协同工作机制。

领导层需率先转变观念，通过宣贯、试点、表彰等方式，在全企业范围内培育拥抱变化、数据驱动的创新文化。

5 结语

高速公路工程的数智化转型，绝非简单复制房建领域“智慧工地”的经验，而必须立足于其“线性、野外、协同复杂、生态敏感”的本质特征，探索一条“技术轻量化、数据标准化、应用场景化、效益长期化”的专属发展道路。

展望未来，随着车路协同、高精地图、生成式 AI（如利用大模型自动生成施工日志与报告）等新技术的不断融合渗透，高速公路工程建设必将当前以“人机协同”为主的初级阶段，迈向全要素、全周期自主智能感知与决策的“建造智能化”新阶段。这一转型过程任重道远，需要政、产、学、研各方携手共进，持续进行系统性探索与实践创新。

参考文献：

- [1] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程 BIM 应用指南（试行）[Z]. 2021.
 - [2] 中国公路学会. 智慧高速公路建设技术指南（2023 版）[S]. 北京：人民交通出版社，2023.
 - [3] 王松林，李志强. 山区高速公路智能建造关键技术研究与应用[J]. 公路，2023(8):45 - 50.
 - [4] 广联达科技股份有限公司，中交第二公路勘察设计院. 高速公路 BIM+GIS 集成应用白皮书[R]. 2024.
 - [5] 国家市场监督管理总局. 智慧工地建设评价标准 T/CCIAT0024-2023[S]. 2023.
 - [6] 陈伟. 基于无人机与 BIM 的高速公路进度动态管控模型[J]. 测绘科学，2022,47(5):112 - 118.
- 作者简介：张林（1974.06-），男，汉族，安徽肥东，本科，副高；从事的研究方向：公路工种。