

智慧施工技术助力道路项目成本精细化管理

赵如佳

(广西路桥工程集团有限公司, 广西 南宁 530200)

摘要 针对广韶高速改扩建 JA3 标运营条件复杂、导改频繁的施工挑战, 构建了基于 BIM-5D 的成本动态管控体系, 融合物联网追溯与 AI 调度技术, 实现进度与成本的挣值联动。系统将拌和站、仓点及机械台班数据实时入库, 打通计量支付与产值确认流程。经 6 个月样本期评估, 月均综合成本由 5 147.45 万元降至 4 828.31 万元, 节约率 6.2%, 材料浪费率由 8% 降至 3%, 人工与设备成本分别下降 12.0% 和 5.8%, 投入产出比达 1: 5.37。研究结果表明, 该体系可在多工点交叉条件下实现成本偏差日级纠偏, 为道路改扩建提供可参考的路径。

关键词 智慧施工; BIM-5D; 物联网; 挣值管理; 成本精细化

中图分类号: U415.1

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.16.025

0 引言

随着高速公路改扩建工程常态化, 如何在运营条件下实现成本精准管控成为行业难题。传统成本管理依赖离线台账, 数据滞后、信息割裂, 导致材料浪费、设备利用率低、计量支付与产值确认脱节等问题突出^[1]。本文以广韶高速 JA3 标为依托, 构建 BIM-5D 与物联网、AI 技术融合的成本动态管控体系, 通过统一 WBS 与 CBS 编码、实时数据采集与智能调度, 实现进度与成本统一度量、日级纠偏。该研究旨在破解复杂场景下成本精细化管理瓶颈, 提升工程资源优化配置能力, 为同类工程提供可复制的技术路径与管理范式。

1 广韶高速公路改扩建项目 JA3 标工程概况

1.1 项目基本情况

JA3 标位于广东省韶关市境内, 改扩建里程 12.8 km, 作为广韶高速提质增效的关键单元。项目总投资 15.6 billion CNY, 计划工期 24 months, 建设目标聚焦通行能力提升与结构耐久性增强, 同时兼顾运营干扰控制与施工安全。工程内容涵盖路基改扩建、桥梁加固与新建、涵洞通道整治、排水防护完善、路面结构升级以及交通安全设施更新。鉴于既有高速在运营条件下组织施工, 场地受限、交通导改频繁与材料供应协同叠加, 对进度、质量、成本三类目标的协同提出更高要求^[2]。需重点关注的还有互通节点、跨线桥与河道桥群等关键工点的专业交叉。鉴于上述情境, 项目把 BIM、物联网与大数据等智慧施工手段当作核心抓手,

围绕设计、采购、施工与运维交接建立贯通的数据链, 为后续成本精细化管理提供可落地的场景与技术基础。

1.2 成本管理现状与难点

鉴于 JA3 标在运营条件下改扩建的组织特性, 现行成本管理仍以离线台账和人工汇总开展, 劳务计量与机械台班数据平均滞后 7 d 以上, 使目标成本对现场消耗的偏差难以及时校准。从现场业务流程来看, 物料编码未与工作分解 WBS 和成本分解 CBS 建立一体化映射, 把拌和站与沿线仓点的账物卡关系割裂, 材料浪费率约 8%, 周转料具周期延长。需重点关注的是, 交通导改与雨季把工序推进打散, 关键工点交叉频繁, 设备利用率仅 65%, 机械折旧与待机成本难以在责任单元内精细分摊。由此推导, 进度计划与成本控制缺乏联动, 挣值指标以已完工作对应预算衡量进度绩效却未嵌入生产调度, 计量支付、产值确认与采购兑现周期错位, 钢材与水泥价格波动的风险传导延迟, 进而放大月度两算对比的波动^[3]。

2 智慧施工技术在 JA3 标成本精细化管理中的应用

2.1 基于 BIM 的成本动态管控系统构建

针对 JA3 标运营条件下改扩建工程的组织特点, 本研究构建了基于 BIM 的 5D 成本动态管控系统。通过将工程量清单、预算定额与合同清单在 BIM 环境下统一建模, 形成构件级成本对象, 并对 WBS 与 CBS 进行一体化编码映射, 贯通设计、采购与施工全流程。系统实时接入拌和站生产、仓点出入库及机械台班数据,

作者简介: 赵如佳 (1998-), 女, 本科, 助理工程师, 研究方向: 道路工程。

规则引擎依据定额与合同库计算构件费用，并结合钢材、水泥行情价滚动预测成本，最终形成目标、合同与预测三线对比的闭环视图。在进度—成本联动方面，系统将施工计划分解至构件层级，通过移动终端采集作业量并同步更新 4D 模型，超耗构件在 BIM 中高亮预警。偏差度量采用挣值管理指标，作为预警阈值触发条件，核心公式为：

$$CV=BCWP-ACWP \tag{1}$$

式（1）中， CV 表示成本偏差， $BCWP$ 为已完工作预算费用， $ACWP$ 为已完工作实际费用，单位均为 CNY。服务层部署规则引擎与预警中心，应用层提供成本驾驶舱及分包协同门户，实现工序验收与材料领用、机械台班确认的实时对齐。该系统可在日常调度中输出偏差信号，辅助管理人员优化资源投入，形成进度、成本与质量的协同管控。

2.2 物联网 +AI 的材料与设备成本优化

针对 JA3 标运营条件下施工与导改频繁的特点，本研究将物联网感知与 AI 算法耦合，实现材料与设备成本的日级闭环管理。材料侧，通过雷达料位计、RFID 等终端采集数据，AI 需求预测模块结合配合比、天气等生成滚动需求与安全库存阈值，规则引擎自动预警超耗并联动采购策略，提升库存周转率（表 1 显示优化后月均节约 230 万元）。设备侧，基于 GNSS、油耗计等传感器数据，调度引擎运用约束满足与强化学习优化协同排程，结合能耗与健康状态给出保养建议，成本数据写入 5D 驾驶舱并按构件自动分摊，实现计量支付与产值确认的时间对齐。物联网数据经边缘网关回传至时序数据库，并与 WBS/CBS 主数据绑定，形成可追溯的数据底座。

2.3 大数据驱动的施工进度与成本联动管理

针对 JA3 标多工点交叉作业与运营干扰频繁的特点，本研究构建了基于大数据的进度—成本联动管理机制。通过将 4D 进度、物资消耗、机械台班及价格数据汇聚至项目数据湖，并以工点与构件为粒度建立统一索引，实现了多源数据的时空对齐。为解决导改与雨季造成的计划偏差，系统将挣值法嵌入滚动调度，核心指标计算如下：

$$EV= \text{已完工作量} \times \text{预算单价} \tag{2}$$

式（2）中， EV 表示挣值，已完工作量为按 WBS 校核的合格工程量，预算单价为绑定 CBS 条目的预算单价。

从计划执行偏移的角度来看，系统把计划工作预算费用同上一式联动，进而给出进度偏差：

$$SV=EV- \text{计划工作预算费用} \tag{3}$$

式（3）中， SV 表示进度偏差， EV 同上，计划工作预算费用为考核时点的计划预算费用。服务层通过时序聚类与关键路径重估对偏差进行归因，将导改窗口、设备约束与物料到货作为决策变量，自动生成微区段的资源合并与工序调整方案。应用层采用雷达图对计划完成率、挣值、成本偏差、设备利用率等指标进行耦合态势可视化，辅助管理人员同步校正交通导改、设备待机及采购节拍。由此将进度控制与成本控制纳入同一调度回路，实现对关键工点与工序的分层闭环管控^[4]。

3 智慧施工技术应用效果评估与价值分析

3.1 成本管控效果数据对比分析

针对 JA3 标运营条件下导改频繁、雨季扰动及多工点约束并存的特点，本研究以 WBS/CBS 绑定的月度维度统一核算成本，选取导改方案稳定后连续 6 个月

表 1 JA3 标材料消耗优化前后对比表

材料类别	优化前月均消耗量 /t	优化后月均消耗量 /t	浪费率优化前	浪费率优化后	成本单价 /CNY/t	月度节约成本 /CNY
钢筋	1 200.0	1 140.0	8%	3%	4 200	252 000
水泥	25 000.0	23 750.0	8%	3%	420	525 000
矿粉	8 000.0	7 600.0	8%	3%	260	104 000
沥青	6 000.0	5 700.0	8%	3%	3 500	1 050 000
外加剂	500.0	485.0	8%	3%	1 800	27 000
碎石	30 000.0	28 500.0	8%	3%	90	135 000
砂	25 000.0	23 750.0	8%	3%	80	100 000
乳化沥青	1 000.0	961.786	8%	3%	2 800	107 000
合计	—	—	—	—	—	2 300 000

为应用期，构建可比数据集。对比显示（见表 2）：人工成本下降 12.0%，源于工序验收联动使班组投入与作业面匹配，减少返工等待；材料成本下降 8.5%，由称重闭环与需求预测驱动，拌和站节拍与库存阈值动态校正；设备成本下降 5.8%，归因于调度引擎对通行窗

口与作业优先级的重排，合并异常待机；间接费用增长 4.0%，系临时交通组织与平台运维新增所致。综合节约率达 6.2%，材料端贡献约七成，表明进度—成本联动调度已将主要浪费场景纳入可控区间，成本两算偏差月度波动幅度收敛。

表 2 JA3 标智慧施工技术应用前后成本指标对比表

成本项	基期月均成本 / 万元	应用后月均成本 / 万元	变动率 / %	月度节约 / 万元
人工成本	800.00	704.00	-12.0	96.00
材料成本	2 706.00	2 476.00	-8.5	230.00
设备成本	600	565.20	-5.8	34.80
间接及其他	1 041.45	1 083.11	+4.0	-41.66
合计	5 147.45	4 828.31	-6.2	319.14

3.2 投入产出比评估

针对 JA3 标运营条件下的复杂约束，本研究按投资决策口径进行投入产出评估。前期一次性投入（软硬件、平台定制及培训等）合计 180 万元。以导改稳定后的样本期为窗口，基于 WBS/CBS 统一口径核算，5D 成本驾驶舱、物联网追溯与 AI 调度带来的净节约（已扣除间接费用增量）为 967 万元，投入产出比达 1:5.37，显著促进了现金流与成本效率。结合月均净节约 319 万元测算，静态投资回收期不足 1 个月，有效降低资金沉淀与实施风险。敏感性分析表明，当钢材与水泥行情在 $\pm 5\%$ 区间波动时，滚动预测与合同对冲可使投入产出比稳定在 1:4.9 ~ 1:5.6 的可接受区间。此外，拌和站等设备可迁移、平台规则库可在项目群复用，进一步摊薄边际成本，从全寿命周期视角强化了投入产出表现。

3.3 推广应用建议

针对 JA3 标在多工点交叉推进中的实践经验，提出面向道路改扩建场景的推广建议。首先应以主数据治理为先导，建立覆盖构件、材料与合同的统一编码及版本管理，将行情价与合同价联动嵌入滚动预测。在人员层面，围绕项目经理、造价工程师及现场管理员构建分层培训体系，统一挣值口径与物资追溯范式。在技术架构上，采用“一云多站”数据中台，以模块化组合对接 ERP 与财务系统，按“关键工点试运行—分区段扩容—全线复制”节奏推进。在安全合规方面，实施多租户隔离、权限分层与离线容错，适应山区断续通信条件。在产业层面，联合高校共建可迁移的算法与规则库，在同一项目群内复用账户与设备，持续

摊薄边际成本，并将成本偏差信号纳入地区级调度例会，促成跨项目协同常态化运转^[5]。

4 结束语

本文以广韶高速 JA3 标为依托，构建了 BIM-5D 与物联网、AI 融合的成本动态管控体系，实现了 WBS 与 CBS 贯通、计量支付与产值确认同步、成本偏差日级纠偏。该体系在多工点交叉、导改频繁的复杂施工条件下，有效提升了资源优化配置能力与成本协同管控效能。后续将以主数据治理与数据中台建设为抓手，按关键工点分步复制，强化数据安全与系统可用性，联合产学研持续迭代算法与规则库，推动项目群层面的协同与规模化复用，为道路改扩建工程提供可复制的技术路径与管理范式。

参考文献：

- [1] 何冠局. 基于 BP 神经网络的高速公路运营管理成本预测及控制研究 [D]. 昆明: 云南大学, 2024.
- [2] 张钊. 基于多源数据的高速公路全周期成本核算技术 [J]. 数字经济, 2025(12):117-118.
- [3] 康华江. 高速公路路基工程施工项目成本管理研究 [J]. 运输经理世界, 2021(03):19-20.
- [4] 杨守峰. 高速公路工程施工阶段成本控制优化策略探索 [J]. 青海交通科技, 2025, 37(04):82-86.
- [5] 廖文燕. 高速公路工程项目成本管理策略研究 [J]. 现代工程科技, 2025, 04(22):177-180.