

数字化技术推动公路工程精细化管理的应用研究

庞达英太

内蒙古交通集团有限公司呼和浩特分公司 内蒙古 呼和浩特 010000

摘 要：本文从精细化管理的内涵出发，系统阐释了 BIM、GIS、物联网、大数据、人工智能及无人机等数字化技术在公路工程设计、施工、质量、安全、材料及档案管理等环节中的应用机理与价值逻辑。研究指出，数字化技术推动精细化的本质在于将管理对象从“物理实体”映射为“数字镜像”，将管理决策从“后验补救”转变为“前馈预控”，将管理粒度从“标段级”细化至“构件级”乃至“工序级”。在此基础上，论文剖析了当前推广应用中的标准化缺失、数据链断裂、人才结构错配及投入产出认知偏差等关键障碍，并提出了标准先行、平台统合、流程再造和生态共建的系统性推进策略，为公路建设行业数字化转型提供理论参照。

关键词：公路工程；精细化管理；数字化技术；建筑信息模型；物联网

引言

公路工程建设正从规模扩张期步入品质提升期，粗放式管理带来的效率损耗、质量通病和安全风险已构成行业转型升级的显性障碍。精细化管理作为一种追求最小资源投入与最大价值产出的管理哲学，其核心理念在于以数据为驱动、以流程为纽带、以标准为尺度，将管理动作精确到每一个作业单元和每一道工序节点。然而，公路工程的线性分布、露天作业、多参建方协同以及地质气候不确定性等固有特征，使得传统管理手段在实现精细化目标时常力不从心。恰在此时，数字化技术的迅猛发展提供了破局利器。建筑信息模型（BIM）赋予工程以三维数据载体，地理信息系统（GIS）延展了空间分析维度，物联网（IoT）打通了现场感知神经，大数据与人工智能则提供了预测与优化的计算大脑。这些技术并非孤立工具，而是可以深度耦合为覆盖公路工程全生命周期的数字神经系统。

1 数字化技术与精细化管理的理论契合

1.1 精细化管理的三层内涵

精细化管理并非简单的“更细致地管理”，而是有着严谨的三层结构。第一层是“精”，即精准——管理目标的设定、资源的配置以及问题的诊断都需以确凿数据为依据，摒弃模糊判断。第二层是“细”，即细化——将宏观管理目标逐级分解为可量化、可追踪、可考核的最小管理单元，使每一个构件、每一台设备、每一名工人的状态都处于受控视野之内。第三层是“化”，即系统化——将精准与细化的要求固化为标准流程和制度规范，使之成为组织运行的常态而非特定时期的运

动。三层递进，共同构成精细化管理区别于传统经验管理的本质特征。

1.2 数字化技术的核心能力谱系

服务于公路工程管理的数字化技术可归纳为五大能力群。感知能力群（以物联网传感器、北斗定位、无人机航测为代表）负责采集现场物理世界的实时状态数据；表达能力群（以 BIM、三维 GIS、数字孪生为代表）负责将物理世界映射为可计算、可交互的虚拟模型；分析能力群（以大数据分析、机器学习算法为代表）负责从海量异构数据中提取规律、识别异常和预测趋势；协同能力群（以云平台、移动应用、区块链为代表）负责打破参建各方之间的信息壁垒，实现跨组织高效协作；执行能力群（以智能摊铺机、无人碾压机组、自动放样机器人为代表）负责将优化后的决策指令直接作用于物理作业过程。五大能力群交织成完整的数字化赋能闭环。

1.3 数字化驱动精细化的内在逻辑

数字化技术推动精细化的逻辑链条可概括为“映射—分析—优化—执行”四步循环。首先，通过感知与表达技术，将公路工程的物理实体及其施工过程映射为可计算的数据模型，解决了传统管理中“看不见全貌”的问题。其次，通过分析技术对模型数据执行空间碰撞检测、进度偏差识别、质量指标比对和风险概率推演，将隐性矛盾显性化，解决了“说不清问题”的困境。再次，基于分析结果自动生成优化方案或辅助决策建议，将管理者的注意力从繁琐的数据处理中解放出来，聚焦于价值判断，解决了“来不及决策”的痛点^[1]。最后，

通过执行技术将优化方案精准落地,并以新的感知数据验证效果,开启新一轮循环。这一闭环使得管理精度从标段级深入至构件级、从日报级压缩至实时级、从经验级跃迁至算法级。

2 数字化技术在公路工程精细化管理中的典型应用维度

2.1 设计阶段的精细化与前置预控

传统设计中各专业(路线、路基、桥梁、隧道、交通工程)之间以二维图纸为媒介的协同方式效率低下、冲突频发。BIM技术的引入实现了多专业在同一三维模型上的协同设计,碰撞检查功能可以在施工前自动发现结构物之间的空间干涉,将变更成本最高的施工阶段问题前置到设计阶段解决。结合GIS的地形与地质数据,设计人员可以进行多路线方案的土方平衡优化,精确计算不同方案的填挖方量,选择经济性最优的路线走向。更进一步的参数化设计允许对桥梁跨径、隧道断面等关键尺寸进行敏感性分析,自动生成满足规范要求且造价最低的设计变体,使设计决策真正建立在量化比选之上。

2.2 施工过程的实时监控与动态调度

施工阶段是精细化管理的核心战场。依托物联网感知网络,将拌合站的生产数据、运输车辆的GPS轨迹、摊铺机的速度与温度参数、碾压设备的振动频率与遍数全部实时上传至云平台,管理人员可以远程监控每一车混合料的出厂温度、运输时间和现场摊铺温度,确保施工参数始终处于设计允许范围内。在进度管理方面,通过无人机定期航摄生成工程正射影像和三维点云,与BIM模型中的计划进度进行叠加比对,可以自动识别滞后段落和超前区域,为资源调配提供精确的空间位置信息。这种动态调度能力使传统“周报式”进度控制进化为“实时感知—即时分析—快速调整”的敏捷管理模式。

2.3 质量检验与隐蔽工程的可追溯管控

质量管理的精细化瓶颈在于隐蔽工程和已覆盖工序的可追溯性差。数字化技术通过“影像档案+数据链条”的组合方式突破这一瓶颈。每一道关键工序的验收过程均可通过移动端拍摄定位照片和视频,自动关联时间戳、GPS坐标和操作人员信息,形成不可篡改的电子施工日志。对于路基压实度、路面厚度、平整度等关键质量指标,智能检测设备将检测数据直接上传至质量数据库,与设计值形成自动比对,超出允许偏差时系统即时触发预警^[2]。更重要的是,所有质量数据与BIM模型

中的对应构件永久绑定,形成了“实体工程—检测数据—模型单元”三位一体的数字档案,为运营期的养护决策提供了完整的基础数据资产。

2.4 安全风险的智能辨识与主动预警

安全管理从“被动响应”转向“主动预控”是数字化最富潜力的应用方向。基于计算机视觉的施工现场视频分析技术可以自动识别未佩戴安全帽、临边防护缺失、吊臂下站人等违规行为,并在数秒内推送告警至现场安全员。对于高边坡稳定性、深基坑支护变形、隧道围岩收敛等监测类风险,布设的自动化监测设备以分钟级频率采集数据,通过预设的阈值和趋势分析模型,在变形速率异常加速时提前发出预警,为人员撤离和加固处置赢取宝贵时间窗口^[3]。进一步地,将历史事故数据、当日天气条件、施工工序安排等多元信息输入机器学习模型,可生成未来24小时的高风险工序清单,指导安全管理人员将巡检资源聚焦于最可能发生问题的作业面,使有限的安全投入发挥最大防控效能。

2.5 物料管理与机械调度的精益化

物料成本通常占公路工程造价的50%以上,是精细化管理的重点。通过为每一辆运输车安装智能标签和称重传感器,结合拌合站和施工现场的双向过磅数据,可以精确核算每一批材料的入场量、消耗量和损耗率,从源头杜绝物料浪费。在钢筋加工场,数控设备的BIM数据直读功能使钢筋下料方案自动优化,材料利用率显著提升。机械调度方面,通过机械设备的智能终端实时采集位置、油耗、运转时长和工作状态,调度中心可依据各作业面的施工进度需求,动态安排机械转场,避免设备闲置或重复调配,同时通过油耗监测及时发现非正常消耗,辅助设备维保计划的精准制定。

3 数字化应用推进中的现实障碍

3.1 标准体系不健全与数据互操作性差

当前公路工程领域的数字化标准建设滞后于技术应用速度。不同软件供应商的BIM模型数据格式不统一,GIS平台与BIM模型之间的坐标转换和语义映射缺乏行业规范,物联网设备采集的数据字段定义五花八门。这种“方言式”的数据生态导致参建各方虽各自建立了数字化系统,但系统之间的数据交换需要大量人工转译和格式转换,信息链在接口处频繁断裂,严重削弱了数字化的整体效能。

3.2 组织惯性与人才结构性短缺

数字化技术的落地不仅是技术问题,更是组织变革问题。公路施工企业的管理层级分明、岗位分工固定,

一线作业人员年龄结构偏大，对智能终端和数字化操作界面的接受度和操作熟练度普遍不高。同时，既懂公路工程又精通数字化技术的复合型人才严重匮乏，大多数项目的数字化工作由外部技术公司代为实施，企业内部缺乏消化吸收和持续运维的能力，形成“依赖外援、自我不成长”的被动局面。

3.3 投入产出量化困难导致决策犹豫

数字化建设前期需要投入较大资金用于设备采购、软件部署和人员培训，但其效益往往表现为事故率的下降、返工量的减少、材料损耗的降低等“避害型”收益，而非直接的产值增加。传统的财务核算方法难以将这类隐性效益准确归因于数字化投入，导致部分企业决策者将数字化视为“锦上添花”而非“雪中送炭”，在资金紧张时率先压缩数字化预算，影响了应用的持续性和深度。

4 系统化推进策略与实施路径

4.1 构建统一的行业数据标准与接口规范

打破数据孤岛的根本之策在于建立从国家层面到项目层面的分级数据标准体系。国家及行业标准应规定公路工程全生命周期的数据分类编码、存储格式和交换协议，确保不同软件之间能够实现无损数据流通。项目层面则应制定具体的数据交付标准和模型细度要求，明确各参建方在不同阶段应提交的数据内容和精度等级。建议推行“数据字典”制度，统一命名规则和计量单位，从源头保障数据的可理解性和可比较性。

4.2 打造集成化数字管理平台而非工具堆砌

企业应避免购买多个互不联通的单点工具（一个 BIM 软件、一个监控系统、一个进度管理软件），而应规划建设统一的数字管理平台。该平台以 BIM 模型为数据底座，集成进度、质量、安全、物料、设备、人员等管理模块，实现“一模到底、一数之源”^[4]。平台应采用微服务架构，便于后续功能扩展，并开放 API 接口兼容已有的成熟子系统。通过单点登录和统一门户，不同角色的使用者——项目经理、工程师、安全员、班组长——看到的是与其职责相关的定制化界面，既保证了信息的全面贯通，又避免了无关信息的干扰。

4.3 推动管理流程再造与组织适配

数字化系统上线之前，必须对现有的管理流程进行梳理和再造。简单地将纸质报表电子化、将线下审批搬到线上，并不能释放数字化的真正价值。企业应借助数

字化契机，重新审视各管理环节的必要性和时序关系，削减冗余审批节点，压缩信息传递层级，建立与实时数据驱动相适应的快速决策机制。组织层面应设立专门的数字化转型部门或岗位，赋予其统筹协调各业务板块的权限，负责推进标准执行、系统运维和全员培训，确保数字化能力内化为组织肌肉而非外挂插件。

4.4 建立价值评估体系与渐进式推广路线

为解决投入产出量化难题，建议建立数字化效益的多维评估框架，将效益指标划分为直接节约（材料损耗降低、机械窝工减少）、效率提升（工序衔接加快、决策周期缩短）、风险规避（安全事故避免、质量返工减少）和战略价值（企业品牌、市场竞争力）四个层级，采用层次分析法赋予权重，综合计算数字化投资回报率。在推广策略上，不宜追求“一步到位”的全项目覆盖，而应选择桥隧等结构复杂、管理痛点突出的节点工程作为先行示范区，积累经验、优化系统后再分期分批向路基、路面等段落推广，以可控的试错成本换取稳健的转型节奏。

5 结语

BIM、GIS、物联网、大数据、人工智能等技术的深度融合，正在将公路工程管理从经验驱动推向数据驱动、从分段管控推向全链贯通、从粗放定性推向精准定量。然而，技术的可获性并不等同于能力的自动转化，标准化缺失、人才断层和组织惯性构成了不容忽视的阻滞因素。推进数字化驱动的精细化管理，需要标准先行、平台统合、流程再造和价值评估四维协同，方能使技术潜能转化为现实生产力。展望未来，随着数字孪生、人工智能生成内容和自主作业机器人等前沿技术的成熟，公路工程精细化管理将进一步向“无人化监测”“自优化调度”和“预测性维护”演进。

参考文献

- [1] 陈敏, 张建平, 刘强. 基于物联网的公路施工质量实时监控系統架构研究 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2024, 24(1): 112-121.
- [2] 黄志远, 王海燕, 李军. 大数据在公路工程进度预测与资源优化中的应用 [J]. 工程管理学报, 2023, 37(5): 88-95.
- [3] 吴国平, 林峰, 郑晓东. 数字化转型背景下施工企业管理流程再造研究 [J]. 建筑经济, 2025, 46(4): 67-74.
- [4] 孙志强, 胡敏, 张伟. 公路建设行业数字化标准体系构建的若干关键问题 [J]. 标准科学, 2024, (8): 43-51.