

工程建设数智化管理协同优化研究

张永鑫¹ 裴锡源²

1. 华商国际工程有限公司 北京 100069

2. 中粮科工(北京)工程管理有限公司 北京 100069

摘要: 伴随建筑信息模型(BIM)、物联网(IoT)、大数据分析及人工智能等技术的迭代升级,工程数智化管控已成为破解传统工程管理困境、推动项目全生命周期监管效能升级的关键支撑。本文以工程项目进度、成本、质量三大核心目标的协同优化为研究核心,系统解构工程数智化管理的技术体系与核心效能,深入探析其在破除信息壁垒、实现精细化管控、强化多方协同联动等维度,对进度-成本-质量协同优化的内在作用机理进行研究。工程数智化管理以数据为核心驱动重构管理模式,可实现进度、成本、质量的动态联动与精准调控,为建筑业高质量发展提供坚实保障。

关键词: 工程数智化管控; 进度动态管理; 造价优化控制; 工程质量监管; 多维协同管控

一、引言

(一) 研究背景

在建筑业向现代化转型的进程中,传统工程项目管理模式暴露出诸多短板:各参与主体间信息割裂形成“数据孤岛”,造成沟通效率低下、设计变更传递滞后等问题;进度、成本、质量管控环节相互脱节,常出现“赶进度轻质量”“控成本弃安全”的矛盾现象;过度依赖人工记录与经验决策,数据精准度不足、风险预警不及时,难以适配复杂工程项目的管控需求。随着“智慧建造”“数字中国”战略的深入推进,融合BIM、物联网、大数据分析等技术的数智化管理手段逐步普及,为解决上述痛点、实现三大目标协同优化提供了全新解决方案。

(二) 研究意义

本文系统梳理工程数智化管理与进度-成本-质量协同优化的内在关联逻辑,构建数智化技术赋能项目协同管理的理论框架,丰富工程管理领域数字化转型的研究成果,为后续相关课题研究提供可借鉴的思路与范式,推动建筑业向精细化、智能化、可持续化转型。

(三) 国内外研究现状

国外方面,欧美等发达国家较早涉足工程数智化领域的研究与应用,BIM技术已实现从设计阶段到运营维护全生命周期的深度渗透。美国欧特克公司研发的BIM 360平台、天宝公司的Trimble Connect等工具,已构建起成熟的数智化管理生态。当前国外相关研究重点聚焦于人工智能与数字孪生技术的融合应用,致力于实现项目风险的精准预判与资源配置的最优解。

国内相关研究近年来呈快速增长趋势,学者们多围绕BIM技术应用、智慧工地搭建等方向展开,探讨数智化手段在造价管控、质量追溯等单一维度的应用价值。但现有研究多孤立分析进度、成本、质量的管控效果,对三者协同优化的作用机制探讨不够深入,且针对不同规模项目的差异化实施路径研究较为薄弱,本文以此为突破口弥补现有研究的不足。

二、工程数智化管理的核心技术与体系架构

(一) 核心技术支撑

BIM技术: 作为数智化管理的核心载体,BIM技术通过构建三维可视化模型,整合时间维度(4D)、成本维度(5D)、环境维度(6D)等多源信息,实现项目全生命周期的信息联动与可视化监管,能够提前排查设计冲突、模拟施工流程、精准核算工程量,为后续管控奠定基础。

物联网(IoT)技术: 通过在施工现场部署智能传感器、智能安全帽、射频识别(RFID)标签等设备,实时采集人员定位信息、设备运行状态、材料库存数据、现场环境参数等内容,实现对施工过程中“人、机、料、法、环”五大要素的全天候感知与动态监管。

大数据与人工智能技术: 对采集的海量工程数据进行清洗、建模与深度分析,借助机器学习算法预判工期延误风险、识别成本异常支出、自动检测质量隐患,为管理决策提供科学的数据支撑,推动项目管理从“经验驱动”向“数据驱动”转型。

云计算与移动互联技术: 依托云端平台实现项目数

据的集中存储、高效共享与异地访问，搭配移动端应用打破时空限制，使现场管理人员可实时上报数据、办理流程审批、查阅施工图纸，大幅提升多方协同效率。

（二）体系架构

工程数智化管理体系以“数据中台+业务模块”为核心架构，构建起三层管控体系：一是数据采集层，通过物联网设备、移动终端、系统接口等多渠道实现多源数据的实时汇聚；二是数据处理层，利用大数据技术对采集的数据进行清洗、整合与分析，生成标准化数据资产；三是应用层，涵盖进度管理、成本控制、质量管理、协同办公四大核心模块，实现业务流程的数字化与智能化升级。各模块数据实时互通、深度联动，为进度-成本-质量协同优化提供坚实技术保障。

三、工程数智化管理对工程建设协同优化的影响机制

（一）打破信息壁垒，提升协同效率

传统管理模式下，业主、设计单位、施工企业、监理机构等参与方各自采用独立管理系统，信息传递依赖纸质文件或线下沟通，易出现信息延迟、偏差等问题，进而引发进度延误、成本增加、质量隐患等连锁反应。数智化管理通过云端共享平台，实现所有参与方在同一系统内协同作业，设计变更、签证审批、进度报表等关键信息实时同步，自动推送至关联责任人并记录流转轨迹。以设计变更为例，系统可快速关联进度计划与成本预算，精准评估变更对工期及造价的影响，同步推送至施工、监理单位，确保各方协同调整施工方案，避免返工浪费，实现进度、成本、质量的同步管控与动态平衡。

（二）动态管控进度，精准匹配资源

数智化管理通过4D-BIM技术将施工进度与三维模型深度绑定，实现进度计划的可视化模拟与动态跟踪。系统自动比对实际施工进度与计划进度的偏差，当某一工序出现滞后时，立即发出预警并分析滞后原因，结合人工智能算法推荐最优资源调配方案，如调整人员排班、优化设备调度等，确保进度偏差控制在合理区间。同时，进度数据与成本、质量数据实时联动，若为保障进度需增加资源投入，系统可实时核算成本增量，并同步强化该工序的质量管控措施，杜绝因赶工导致质量下降。某冷链项目通过数智化进度管理，将进度偏差控制在 $\pm 3\%$ 以内，同时减少窝工成本30%，成效显著。

（三）精细化成本管控，降低浪费损耗

数智化管理推动成本管控模式从“事后核算”向“事前预测、事中控制”转型。依托5D-BIM模型，系统

可自动核算工程量与材料用量，结合市场价格波动动态更新成本预算，有效规避人工计算误差。通过物联网设备实时追踪材料出入库及消耗情况，设置库存预警机制，减少材料积压或短缺问题；对人工、机械费用进行实时归集，结合挣值法（EVM）评估项目绩效，提前识别成本超支风险并及时干预。某市政项目采用数智化成本管理后，沥青损耗率从8%降至3%，单项目成本节约8.6万元，成本核算精度提升至95%以上。此外，系统可自动关联质量问题与成本损失，倒逼施工单位强化质量管控，减少因质量返工产生的额外成本。

（四）全流程质量追溯，强化风险防控

数智化管理构建起“事前预防、事中控制、事后追溯”的全流程质量管控体系。系统内置工程建设标准规范库，在施工前明确各工序质量标准与验收要求；施工过程中，质量管理人员通过移动端上传带定位、水印的巡检照片，关联构件编号与责任人，发现质量问题立即生成整改单并分派任务，整改完成后需上传复核照片方可闭环，确保质量问题整改到位、不留隐患。同时，物联网设备可实时监测混凝土养护温度、构件安装精度等关键指标，避免因施工参数不达标引发质量隐患。某桥梁项目采用数智化质量管理后，质量问题整改闭环率从68%提升至98%，竣工一次性通过率达100%，无返工成本产生。质量数据与进度、成本数据深度联动，若出现质量问题，系统可快速评估对工期和成本的影响，辅助管理人员制定最优整改方案。

四、工程数智化管理应用中的现存问题

（一）认知偏差与战略缺失

部分企业对工程数智化管理存在认知偏差，将其简单等同于“采购数智化软件”，忽视了背后的流程再造与组织变革，仅停留在传统管理流程的电子化层面，未能充分发挥数据驱动的核心价值。同时，多数企业缺乏清晰的数字化转型战略，目标模糊、投入分散，导致数智化工具与实际业务需求脱节，难以发挥应有效能。

（二）数据标准不统一，信息互通受阻

不同厂商研发的数智化系统接口互不兼容，各参与方的数据编码、格式标准不一致，形成新的“信息孤岛”。目前行业缺乏统一的数据标准与规范，导致跨系统、跨项目的数据共享存在诸多障碍，严重影响进度-成本-质量协同管控的整体效率。

（三）复合型人才短缺

工程数智化管理需要既精通工程技术又熟悉信息技术的复合型人才，当前行业内此类人才供给严重不足。

一线管理人员对数字化工具操作不熟练，信息技术人员缺乏工程管理实践经验，导致数智化系统落地效果不佳，难以充分发挥其在协同优化中的核心作用。

（四）投入回报周期长，中小企业动力不足

数智化系统初期投入成本较高，涵盖软件采购、硬件部署、人员培训等多项费用，且其效益显现需要一定周期。中小企业资金实力有限，对短期投资回报预期较高，导致数字化转型动力不足，进而造成行业数字化水平参差不齐，影响整体转型进程。

五、优化路径与对策建议

（一）树立数据驱动理念，制定差异化战略

企业需转变传统管理理念，深刻认识到数智化管理是管理模式的系统性变革，而非单纯的技术升级。结合自身业务特点与项目规模，制定清晰的数字化转型战略，大型企业可搭建一体化数智化平台，实现全流程管控；中小企业可优先部署进度、成本等核心模块，试点先行、逐步推广，确保投入与效益精准匹配。

（二）建立统一数据标准，打破信息壁垒

政府与行业协会应牵头制定统一的工程数智化数据标准与编码规范，明确数据格式、接口协议与共享机制，推动不同系统、不同参与方的数据互通互认。鼓励企业采用开放API接口的数智化平台，实现与企业资源计划（ERP）、财务系统、设计系统的无缝集成，构建全产业链数据共享生态。

（三）加强人才培养，构建专业团队

通过校企合作、在职培训、人才引进等多种方式培养复合型人才，高校可增设工程数字化相关课程，优化人才培养体系；企业可组织线上线下专项培训，提升管理人员与技术人员的数字化技能。同时，设立专项激励机制，鼓励员工主动学习并应用数智化工具，营造全员参与的数字化转型氛围。

（四）完善政策支持，降低企业转型成本

政府可出台税收减免、专项补贴等政策，支持中小企业数字化转型；推广软件即服务模式为数智化服务，降低企业初期投入成本。鼓励行业龙头企业开放数智化平台资源，发挥示范引领作用，带动中小企业协同转型，提升全行业数字化水平。

（五）持续迭代优化，推动技术深度融合

企业应建立数智化系统动态优化机制，定期收集用户反馈，结合人工智能、数字孪生、区块链等新技术，持续升级系统功能。例如，引入区块链技术保障合同、

验收等关键数据的不可篡改性，增强多方信任；利用数字孪生技术构建与实体项目实时同步的虚拟模型，实现项目全流程沉浸式管控，进一步提升协同优化能力。

六、结论与展望

（一）研究结论

工程数智化管理通过BIM、物联网、大数据等技术的融合应用，重构了工程项目管理的核心逻辑，从信息协同、进度管控、成本优化、质量追溯四个维度，为进度-成本-质量协同优化提供有力支撑。其核心价值在于破除信息壁垒，实现三大目标的动态联动与精准调控，有效缩短建设周期、降低工程造价、提升工程质量，为建筑业高质量发展注入核心动力。同时，行业在数智化应用过程中仍面临认知、标准、人才、资金等多重挑战，需通过理念革新、标准建设、人才培养、政策支持等综合措施逐步破解。

（二）未来展望

未来，随着人工智能、数字孪生、元宇宙等技术的深度融合，工程数智化管理将向更智能、更协同、更绿色的方向迈进。人工智能技术将实现施工方案的自动生成与风险的精准预判；数字孪生技术将构建与实体项目实时联动的虚拟模型，实现全生命周期可视化管控；在绿色低碳发展导向下，数智化系统将集成碳排放监测、绿色建材管理等功能，助力“双碳”目标实现。后续研究可聚焦于新技术在不同类型工程项目中的应用场景创新，进一步量化数智化管理对协同优化的影响程度，为行业数字化转型提供更精准的理论与实践支撑。

参考文献

- [1] 李启明, 王要武. 数智化技术赋能工程项目协同管理的机理与路径[J]. 工程管理学报, 2025, 39(6): 1-6.
- [2] 刘贵应, 张静. 智慧建造背景下工程管理信息化的实践价值与优化策略[J]. 建筑经济, 2026, 47(1): 32-37.
- [3] 中国建筑科学研究院. 工程数智化管理发展报告(2025)[R]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2025.
- [4] 陈勇强, 李丽红. 基于BIM与数字孪生的项目协同管控模式创新[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2024, 56(8): 102-109.
- [5] 王雪青, 周鲜华. 工程项目成本-进度-质量协同优化的数智化实现路径[J]. 土木工程学报, 2024, 57(7): 120-128.