

基于数字孪生的建设项目全生命周期成本管理体系研究

刘伏伏¹ 孙亚洲^{2*}

1. 中创建科建设(山东)有限公司 山东 青岛 266555

2. 青岛海发产城投资开发(集团)有限公司 山东 青岛 266500

摘要:传统建设项目成本管理普遍存在全周期数据割裂、管控环节滞后、多方协同不畅等突出痛点,不仅难以满足精细化、动态化管控需求,更严重制约项目投资效益的稳步提升。为系统性破解上述行业难题,本文立足数字孪生技术动态仿真推演和全流程可视化呈现的核心优势,搭建适配建设项目特点的全生命周期成本管控体系,并结合房建、市政工程实际案例开展实证分析,全面检验该体系的落地可行性与实际应用成效。研究表明,该体系可有效打通项目投资估算、设计优化、施工过程管控、竣工结算及运维期成本管控全链条,实现成本动态闭环管控,大幅削减非必要费用支出,切实提升项目整体投资收益,可为建设工程领域成本管理数字化转型升级提供实践参考与理论借鉴。

关键词:数字孪生;全生命周期成本管控;建设工程项目;数字化转型

引言

建设工程行业作为国民经济支柱产业,其项目普遍具有投资体量大、建设周期长、参与主体多元、风险复杂多变等特征。成本管控贯穿项目全生命周期,直接决定投资回报率,是建筑企业核心竞争力的关键体现。近年来,国家出台《“十四五”数字经济发展规划》等政策,大力推动工程建设领域数字化、智能化转型^[1]。然而,现阶段国内多数项目仍沿用传统分段式成本管理模式,短板日益凸显。由于项目缺乏有效的全周期成本管理统筹机制,多方数据标准不统一,各阶段管理割裂、导致后期变更频发、成本损耗加剧等问题。

数字孪生技术作为智能建造的核心支撑,通过构建物理实体与虚拟模型的实时双向映射,整合物联网、BIM、大数据等技术,可实现工程数据全周期采集、分析与应用,为破解传统成本管理困境提供了新路径。该技术与全生命周期成本管理深度融合,可推动成本管控从“事后补救”向“事前预判、事中管控”转变,从“人工粗放”向“智能精细”升级。本文结合实践经验,系统构建基于数字孪生的建设项目全生命周期成本管理体系,并通过实证案例验证其应用价值,为行业数字化转型提供可落地的实施方案。

第一作者简介:刘伏伏,女,中级工程师,从事建设工程成本管理工作多年,持续深耕全生命周期成本管理和信息化应用。

通讯作者简介:孙亚洲,男,中级工程师,长期从事建设工程成本管理工作,致力于项目管理信息化与数字化应用研究。

1 相关理论基础

1.1 建设项目全生命周期成本管理内涵

建设项目全生命周期成本管理(Life Cycle Cost Management, LCCM)是覆盖项目策划决策、勘察设计、招投标、施工建设、竣工交付、运维报废全周期的一体化管控模式,核心宗旨是在严守工程质量、建设进度、安全管控目标的前提下,严格遵循全流程覆盖、动态实时管控、多方协同优化、价值效益导向四大核心原则实现项目全周期总成本最优管控^[2]。

1.2 数字孪生技术核心特征与应用价值

数字孪生(Digital Twin, DT)是以物联网感知、大数据分析、人工智能算法、BIM建模等技术为依托,构建与物理工程实体实时同步、双向映射的虚拟数字化模型,形成“物理实体—虚拟模型—数据链路—智能应用”的完整闭环体系。该技术具备四大核心特征:一是实时映射性,虚拟模型与物理现场数据同步更新,还原工程真实状态;二是全流程可视化,打破空间限制实现工程全维度、全周期可视管控;三是数据闭环性,整合多源数据实现采集、分析、应用、复盘全流程贯通;四是智能决策性,依托仿真推演实现风险预判、方案优化^[3]。上述特征与全生命周期成本管理的动态化、精细化、协同化需求高度契合,为成本管控提质增效提供了坚实技术支持。

2 建设项目全生命周期成本管理现状与痛点剖析

2.1 行业管理现状

当前,建设工程行业成本管理理念逐步升级,从传统事后核算向全过程、全周期管控过渡,部分头部建筑

企业已试点引入BIM、ERP、大数据等数字化工具，推动成本管控提质增效。例如天健建工实现项目数字化成本管控系统全域覆盖，捷瑞数字依托孪生技术将工厂项目成本偏差率控制在5%以内。但从行业整体来看，数字化应用仍处于局部试点阶段，多数企业仍采用分段式管控模式，管控重心集中于施工与竣工结算阶段，数字孪生技术应用多停留在模型可视化展示层面，未能实现数据价值深度挖掘、动态成本管控等核心功能。

2.2 核心痛点问题

2.2.1 全生命周期统筹不足，各阶段成本管理相互脱节

在传统的分阶段管理模式中，建设项目各时期的成本控制往往相互独立，缺乏有效的衔接机制。前期投资估算通常只考虑建设阶段的直接投入，对后期运营维护、报废拆除等环节的成本关注不够；设计阶段则更多关注功能实现，对造价控制和未来运维需求的考量不足，容易导致设计方案冗余、技术路径不合理，进而在施工阶段引发频繁变更，推高实际成本。

2.2.2 管理方式滞后，动态调整能力较弱

现有的成本管控仍较多依赖事后核算与人工复盘，缺乏贯穿施工过程的实时监测与动态预警机制，难以及时应对材料价格波动、现场地质变化、工程变更等不确定性因素。在风险识别方面，多依赖经验判断，预判的准确性和时效性难以保证。部分项目因此受到建材价格大幅上涨或变更控制不力的影响，出现成本超支超过10%的情况，反映出当前管理模式在动态响应方面的不足。

2.2.3 数据协同不畅，信息传递效率制约成本管控实效

当前建设项目普遍面临多方参与、数据来源分散的现实困境。设计阶段的BIM模型、招投标环节的造价数据、施工过程的工程资料、以及财务核算凭证等，尚未形成统一的数据标准和接口规范。由于BIM模型与造价系统、企业资源计划系统之间缺乏有效的数据联通机制，大量信息仍需依赖传统的人工报送和线下审批流程流转。

3 基于数字孪生的建设项目全生命周期成本管理体系构建

结合数字孪生技术优势与建设项目成本管控实际需求，本文构建“目标层-支撑层-核心层-应用层”四位一体的全生命周期成本管理体系，实现成本管控全流程覆盖、全维度协同、全动态优化，彻底破解传统管控痛点。

3.1 体系整体框架设计

该体系以“全生命周期成本最小化、项目投资效益

最大化”为核心目标，强调从源头到末端的系统化管控思路。在基础支撑层面，依托政策标准、技术平台和组织架构三大保障，确保体系运行的规范性与可操作性；在运行机制层面，以数据闭环管理为核心引擎，推动策划决策、设计、施工、竣工、运维等阶段的信息贯通与动态反馈。通过层级联动与多方协同，该体系力求实现对成本的精准预判、实时管控与持续优化，整体架构如图1所示。

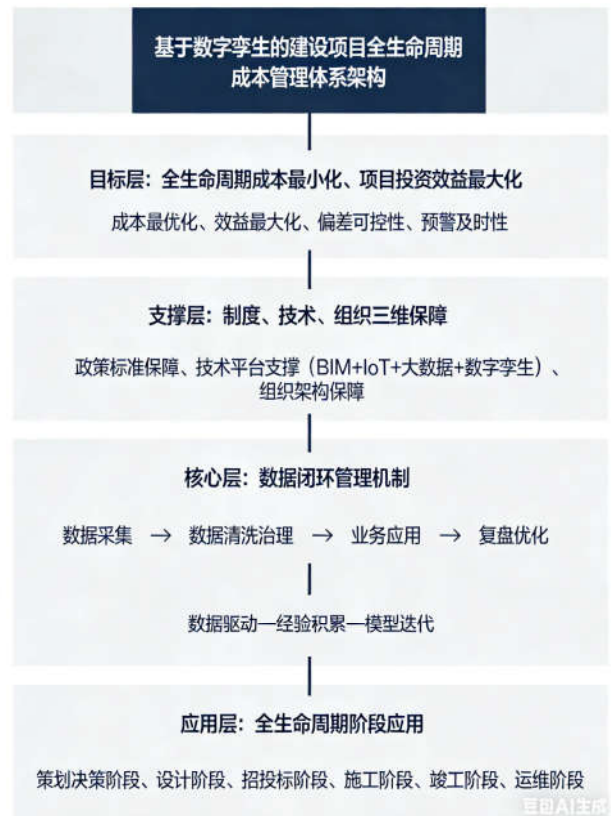


图1 基于数字孪生的建设项目全生命周期成本管理体系架构图

3.2 各层级核心管控内容

3.2.1 目标层：明确成本管控方向与量化考核标准

目标层主要解决“管什么、控到什么程度”的问题。围绕成本管控的核心诉求，确立了成本最优化、效益最大化、偏差可控性以及预警及时性四个基本方向，并结合房屋建筑、市政基础设施等不同项目类型的特点，设置可量化、可考核的具体指标。比如，要求项目成本偏差率控制在±5%以内，非计划性变更所引发的成本增量占比不超过3%，主要材料的现场损耗率压降至1.5%以下。同时，强调工程变更信息的传递效率，要求在24小时内完成数据流转，以确保项目投资回报率稳定在行业平均水平之上，从源头上保障管控目标的落地执行。

3.2.2 支撑层：夯实体系运行的制度与技术基础

支撑层着眼于为成本管控体系的长效运行提供基础保障，主要从政策制度、技术工具和组织架构三个维度展开。在政策标准方面，遵循国家关于数字化转型及工程造价管理的相关政策导向，制定企业内部数字孪生成本管控实施细则，明确各方职责边界、标准化操作流程及绩效考核依据。在技术平台方面，集成BIM、ERP、大数据及物联网技术，构建一体化的管控平台，整合数据采集、造价核算、风险预警、协同审批及仿真分析等功能模块。

3.2.3 核心层：构建全流程数据闭环管理机制

核心层是整个体系运行的“中枢神经”，其关键在于构建“数据采集—清洗治理—业务应用—复盘优化”的闭环管理流程。在数据采集环节，依托物联网传感器、智能终端及BIM模型，搭建覆盖项目全周期的数据采集网络，实现造价、进度、材料、设备及运维等核心数据的自动抓取。在数据处理环节，对采集到的多源数据进行清洗、去重与标准化处理，形成统一的成本数据资产库。在业务应用环节，将数据成果反哺至各阶段的成本管控中，支撑仿真分析、风险预警及造价优化等实际业务。在复盘优化环节，注重从项目中沉淀管控经验，反向修正成本预测模型，形成“数据驱动—经验积累—模型迭代”的良性循环。

3.2.4 应用层：推动全阶段成本管控的落地实施

应用层重点解决数字孪生技术与实际业务“怎么融、怎么用”的问题，强调在各阶段实现精细化成本管控。在策划决策阶段，通过整合历史项目数据和市场价格信息，构建投资估算模型，借助数字孪生技术进行多方案比选与成本推演，提前识别潜在风险、优化投资方向。在设计阶段，依托孪生模型开展跨专业协同设计，实时对接造价信息，推行限额设计与价值工程分析，尽可能在设计源头减少后期变更。在招投标阶段，基于模型自动生成精准工程量清单，结合电子招投标平台推进主材集中采购与透明竞价，有效压降采购成本。在施工阶段，实时采集现场的进度、消耗及变更数据，联动孪生模型进行偏差分析，动态调整人材机配置，及时纠正不合理支出。在竣工阶段，通过自动化对接施工过程数据与造价数据，快速核算结算金额，形成数字化交付成果，缩短结算周期、核减冗余费用。在运维阶段，持续监测设备运行状态与设施损耗情况，利用仿真推演优化日常养护与能耗管理策略，从而降低后期运营成本、延长设施使用寿命。

4 实证案例分析

为验证本文所构建的数字孪生全生命周期成本管理

体系的实际应用效果，选取某市政道路改造工程作为实证案例展开跟踪研究。该项目全长3.2公里，主要建设内容包括路面翻新、管网改造、交通设施升级及绿化提升等，总投资概算为2.8亿元，计划建设周期18个月，属典型的市政公益性项目。

在项目前期筹备阶段，仍沿用传统成本管理模式，逐步暴露出设计方案与现场实际脱节、主材采购成本偏高、变更管控滞后、数据传递不畅等问题，成本超支风险较为突出。针对上述问题，项目团队引入本文提出的成本管控体系，围绕全过程、全方位管控思路，开展系统化应用实践，并对管控效果进行全程跟踪与对比分析。

项目实施后，最终实际总成本控制在2.62亿元，较概算投资累计节约1800万元，成本偏差率为-6.4%，优于预设管控指标。其中，非计划性变更成本占比为2.1%，核心主材浪费率控制在1.1%，均显著低于传统管理模式下的平均水平。项目投资回报率达到了8.2%，高于市政行业6%的平均水平；建设周期较原计划提前1个月完工，工程质量验收合格率为100%，实现了成本、进度与质量的协同管控。

从实证结果来看，基于数字孪生的全生命周期成本管理体系，能够在项目各阶段有效打通数据壁垒、弥补管控短板，推动成本控制由事后核算向动态闭环转变。该体系不仅在市政工程中具备良好的适用性，在房建、交通等各类建设项目中也具有推广价值，有助于提升项目投资效益和企业整体管控水平。

结束语

本文针对传统建设项目成本管理阶段割裂、数据孤岛、管控滞后、协同不足等痛点，构建“目标层-支撑层-核心层-应用层”四位一体的数字孪生全生命周期成本管理体系，通过技术融合、流程优化、协同升级，实现成本管控从粗放式向精细化、从事后向全周期动态化转型。实证案例表明，该体系能够有效降低成本偏差、减少材料浪费、压缩管控周期、提升投资效益，具备较强的可行性与实用性。

参考文献

- [1] 鲍逸. 工程建设行业数字化转型的探索与思考[J]. 建筑科技, 2022, 6(01): 47-50.
- [2] 白建忠. 建筑工程全生命周期成本管理的理论与应用[J]. 中华建设, 2025, (12): 26-28.
- [3] 程勃. 数字孪生技术在政府投资代建制项目全要素集成管理中的应用探究[J]. 中国建设信息化, 2025, (22): 50-53.