

基于数字孪生的建筑工程全周期成本动态管理

祝文斌

富利建设集团有限公司 广东广州 510000

摘要：本文旨在解决传统建筑工程成本管理中存在的阶段性割裂、数据滞后与控制被动等问题，提出了一种基于数字孪生的全周期成本动态管理新模式。首先，在阐释数字孪生技术与全周期成本管理内涵的基础上，明确了二者在数据基础、分析能力和决策支持层面的核心结合点。其次，构建了涵盖设计阶段成本动态控制、施工阶段成本实时监控、运维阶段成本优化管理以及全周期数据集成与反馈的动态管理机制。最后，从平台构建部署、数据采集处理、动态预警决策、流程再造协同四个方面，规划了具体的实施路径。研究表明，该模式能够实现成本管理从静态核算向动态预测、从经验驱动向数据驱动的根本性转变，显著提升成本控制的精准性、前瞻性和协同性，为建筑工程项目降本增效提供了系统性的解决方案。

关键词：数字孪生；建筑工程；全周期成本；动态管理

引言

建筑工程投资规模大、建设周期长，其成本管理是决定项目成败的核心环节。然而，传统的成本管理模式往往局限于各阶段的独立核算，缺乏跨阶段的动态联动与数据追溯，导致成本控制滞后、变更应对被动、超支风险频发。随着数字孪生技术的兴起，其为构建物理实体与虚拟模型实时交互的闭环系统提供了可能。如何利用数字孪生技术打破信息壁垒，整合设计、施工、运维全过程的成本数据，实现对建筑工程成本的实时监控、精准预测与主动干预，已成为行业亟待解决的关键课题。因此，研究基于数字孪生的建筑工程全周期成本动态管理，对于推动建筑业数字化转型、提升项目管理水平具有重要的理论价值与实践意义。

一、数字孪生技术在建筑工程成本管理中的基础理论

（一）数字孪生的概念与特征

数字孪生是指通过构建物理实体的虚拟模型，利用实时数据驱动该模型进行动态仿真与预测的技术体系。其核心特征包括多物理场耦合、多尺度集成、实时同步和全生命周期映射。多物理场耦合指数字孪生模型能够整合结构、热力、流体等多领域物理特性，实现综合仿真分析。多尺度集成体现在模型可同时涵盖建筑整体、子系统、构件等不同层级的信息，支持跨尺度数据交互。实时同步表示虚拟模型与物理实体之间具备双向数据传输能力，能够根据实际运行状态动态更新模型参数。全

生命周期映射则强调数字孪生覆盖从设计、施工到运维的完整过程，形成持续演化的数据闭环。这些特征使数字孪生技术能够为建筑工程提供高保真度的数字化表达，为成本动态管理奠定坚实基础。

（二）建筑工程全周期成本管理的内涵

建筑工程全周期成本管理是指对项目从决策阶段、设计阶段、施工阶段到运营维护阶段所发生的全部成本进行系统化控制的过程。其管理范围不仅包括直接建造成本，还涵盖融资成本、运维成本、拆除成本等间接费用。在决策阶段，成本管理侧重于投资估算与方案比选；设计阶段强调限额设计与价值工程应用；施工阶段注重动态成本控制与变更管理；运维阶段则聚焦于能耗优化与维护成本预测。全周期成本管理的核心目标是实现项目全生命周期内资源的最优配置，通过前期投入与后期运营的平衡，降低总体拥有成本。该管理方式要求建立跨阶段的成本数据库，采用动态成本分析模型，实现各阶段成本数据的可追溯与可对比^[1]。

（三）数字孪生与成本管理的结合点

数字孪生技术与建筑工程全周期成本管理的结合主要体现在三个方面：数据基础、分析能力和决策支持。在数据基础方面，数字孪生通过集成BIM模型、物联网传感器、施工日志等多源数据，构建包含几何信息、物理属性、成本参数的综合数据库，为成本分析提供高精度数据支撑。在分析能力方面，数字孪生利用机器学习算法对历史成本数据进行训练，建立成本预测模型，能够实时模拟不同施工方案、材料选择对成本的影响，实

现成本动态推演。在决策支持方面,数字孪生平台提供可视化成本分析界面,支持管理者进行多方案比选、风险预警和资源优化,例如通过调整施工顺序模拟成本变化,或通过设备运行数据预测未来维护成本。这种结合使成本管理从静态核算转向动态预测,从经验判断转向数据驱动,显著提升成本控制的精准性和前瞻性^[2]。

二、基于数字孪生的建筑工程全周期成本动态管理机制

(一) 设计阶段的成本动态控制

设计阶段的成本动态控制是全周期成本管理的关键起点。数字孪生技术通过构建高精度建筑信息模型(BIM),结合成本数据库,实现设计方案与成本的实时联动。在设计过程中,系统可自动计算不同构件、材料及构造做法的成本影响,支持设计人员在不超预算的前提下优化方案。通过参数化建模功能,设计变更可即时反映在成本模型中,生成差异分析报告,帮助决策者快速评估调整的经济性。数字孪生还支持多方案比选,通过模拟不同设计策略的全周期成本趋势,辅助选择最具经济性的方案。此外,系统可结合历史项目数据与市场行情,对设计成本进行动态预测,避免因信息滞后导致的预算偏差。这种机制将成本控制前置到设计源头,显著降低后期施工与运维阶段的成本风险。

(二) 施工阶段的成本实时监控

施工阶段的成本实时监控依托数字孪生平台对现场数据的动态采集与分析。通过物联网设备、无人机扫描、施工日志等手段,系统实时获取进度、资源消耗、质量检测等数据,并与计划成本进行对比分析。当出现成本偏差时,平台自动预警并定位问题环节,如材料浪费、工期延误或工序冲突。数字孪生还可模拟施工调整方案的成本影响,例如优化机械配置或调整施工顺序,为管理者提供数据支持。此外,系统整合合同管理、变更管理等功能,确保每一笔成本支出都有据可查、可追溯。通过建立施工成本与进度的动态关联模型,数字孪生能够实现成本的精细化管理,减少超支风险,提升资金使用效率^[3]。

(三) 运维阶段的成本优化管理

运维阶段的成本优化管理通过数字孪生技术实现建筑性能与成本的动态平衡。系统整合设备运行数据、能耗记录、维护历史等信息,构建运维成本预测模型。通过对设备状态的实时监测,数字孪生可提前预警故障风险,优化维护计划,避免突发性维修带来的高额成本。在能耗管理方面,系统模拟不同运行策略的能耗与成本差异,如调整空调温度或照明时间,辅助制定节能方案。

此外,数字孪生支持全生命周期成本分析,通过对比不同维护策略的长期经济性,指导设备更新与改造决策。这种机制将运维成本从被动响应转为主动优化,延长建筑使用寿命,降低总体拥有成本。

(四) 全周期数据集成与反馈机制

全周期数据集成与反馈机制是数字孪生成本管理的核心支撑。系统通过统一数据标准,整合设计、施工、运维各阶段的成本数据,形成可追溯的成本数据库。利用区块链技术确保数据的不可篡改性,提升成本信息的可信度。数字孪生平台建立跨阶段的数据反馈闭环,例如将运维阶段的能耗数据反馈至设计阶段,优化未来项目的节能设计;或将施工阶段的成本偏差分析用于改进预算编制方法。通过机器学习算法,系统持续优化成本预测模型,提升管理精度。此外,平台支持多角色协同工作,确保业主、设计方、施工方、运维方基于同一数据源进行决策,减少信息不对称。这种机制实现了成本管理的持续改进,为建筑工程全周期成本动态管理提供系统性保障^[4]。

三、基于数字孪生的建筑工程成本动态管理实施路径

(一) 数字孪生平台的构建与部署

数字孪生平台的构建与部署是实现工程项目全周期成本动态管理的关键技术基础。该平台的建设需要整合多项前沿数字技术,包括建筑信息模型(BIM)技术、地理信息系统(GIS)技术、物联网(IoT)技术等,通过这些技术的深度融合,构建一个能够完整反映建筑实体几何特征、物理属性、业务规则和动态行为的集成化数字模型。平台建设初期,首要任务是建立完善的数据标准体系和统一接口规范,确保设计、施工、运维全过程数据的兼容性与互操作性。技术架构上,平台采用分层设计,自上而下分数据层、模型层、分析层和应用层。数据层存储管理各类结构化与非结构化数据;模型层用参数化建模技术实现建筑实体数字化表达;分析层集成专业算法和仿真引擎,支持动态成本计算与模拟;应用层提供可视化操作界面和智能决策工具。为确保运行效率,要关注高并发处理能力,支持实时数据更新和多用户协同操作。部署实施时,要重点考虑网络安全和数据隐私保护,采用加密传输、权限控制等机制确保系统稳定可靠。平台建成将为工程项目成本动态管理提供技术支撑,实现全流程闭环管理。

(二) 成本数据的采集与处理

成本数据的采集与处理是数字孪生平台发挥其功能

价值的核心前提条件。在数据采集方面，需要全面覆盖工程项目全生命周期的各个环节，包括设计阶段的材料设备清单、施工阶段的人工机械消耗、运维阶段的能源使用记录等关键成本数据。具体的数据采集手段分自动化采集和人工录入两种：自动化采集通过部署物联网传感器、安装智能计量仪表、运用无人机扫描等获取现场数据；人工录入则通过设计标准化表单确保非结构化数据规范一致。数据处理包括清洗、转换、存储和分析四个步骤：清洗是剔除异常和重复数据以保证质量；转换是将不同系统数据转为标准格式；存储采用分布式数据库技术支持海量数据存取检索；分析运用统计学和机器学习算法挖掘成本数据价值规律与趋势，如用时间序列分析预测建材价格波动，用聚类分析识别高成本环节。此外，要建立数据更新机制，确保数字孪生模型与实体建筑同步更新。这一系列数据处理工作为动态成本管理提供高精度、高时效数据支撑，提升管理决策的科学性和可靠性^[5]。

（三）动态成本预警与决策支持

动态成本预警与决策支持是数字孪生平台最具价值的核心功能模块。预警机制基于实时采集的工程数据和预先设定的成本控制阈值，通过智能比对实际成本与计划成本的差异，自动识别成本偏差并触发分级预警响应。预警信息不仅包含偏差数值，还提供可能的原因分析，如供应商价格波动、施工工艺问题等，帮助管理人员快速定位问题根源。在决策支持方面，平台通过集成多维度的仿真模拟和智能优化算法，为管理者提供科学的成本控制方案。例如，运用遗传算法优化施工资源配置方案，或者通过蒙特卡洛模拟评估不同风险应对策略的成本影响。平台还支持灵活的情景分析功能，用户可以调整工期、材料、工艺等关键参数，实时观察成本变化趋势，为制定应对措施提供依据。此外，系统能够自动生成丰富的可视化报表，包括成本趋势曲线、偏差分布热力图等，直观展示成本管理效果。这一智能化的预警与决策机制将传统的被动式成本管理转变为主动干预模式，有效降低了工程项目成本超支风险，提高了整体经济效益。

（四）管理流程再造与组织协同

管理流程再造与组织协同是确保数字孪生成本管理模式有效落地的制度保障。在流程再造方面，需要突破传统的阶段分割管理模式，建立贯穿设计、施工、运维全过程的成本管理新流程。例如，在设计阶段就引入施工单位和运维单位参与方案评审，提前优化成本敏感

点；在施工阶段建立动态预算调整机制，根据实际进度情况灵活调配资金使用。在组织协同方面，建议组建跨部门的成本管理专项小组，由业主单位牵头，设计、施工、运维等各方代表共同参与，明确界定各方职责分工和协作规则。通过数字孪生平台实现工程信息的实时共享，确保所有参与方基于统一的数据源进行决策，大幅降低沟通协调成本。此外，还需要制定配套的绩效考核激励制度，将成本控制效果纳入各参与方的关键绩效指标，建立正向激励机制。例如，对施工单位设置材料节约率奖励条款，对运维单位设定能耗降低考核目标。这种管理创新路径通过业务流程优化和组织机制变革，为数字孪生成本管理提供了坚实的制度保障，实现了先进技术手段与管理目标的有效衔接，最终达成提升工程项目整体效益的目标。

结语

成本动态管理在建筑工程中的应用正随着数字孪生技术的深入发展而展现出前所未有的潜力。通过将数字孪生与全周期成本管理相结合，不仅实现了从设计到运维各阶段成本数据的无缝衔接，还显著提升了成本控制的精准性与前瞻性。这种管理模式以数据为基础，以技术为驱动，以协同为保障，构建了一个闭环的成本管理体系。未来，随着人工智能算法的优化以及物联网设备的普及，数字孪生平台将进一步增强其分析能力与预测精度，为建筑行业提供更加智能化、精细化的成本管理解决方案。同时，这一模式也为其他领域的成本管理提供了有益借鉴，具有广泛的应用前景和推广价值。

参考文献

- [1] 庄晨怡.面向制造企业全生命周期的数字孪生研究综述[J].软件工程与应用, 2021, 10 (3): 7.DOI: 10.12677/SEA.2021.103041.
- [2] 王艺蕾, 陈烨, 王文.基于数字孪生的绿色建筑运营成本管理系统设计与应用[J].建筑节能, 2020 (9): 7.DOI: 10.3969/j.issn.1673-7237.2020.09.013.
- [3] 臧玉华, 刘宏, 熊思佳, 等.基于数字孪生虚拟车间的成本管理研究[J].财会研究, 2022 (9): 34-40.
- [4] 岳增良, 许道勇, 李永福.工程项目成本目标控制平台设计——基于大数据与数字孪生[J].科学技术创新, 2020 (7): 2.DOI: CNKI: SUN: HLKX.0.2020-07-043.
- [5] 李博, 王宁, 叶庆恩.基于数字孪生技术的设备全生命周期管理[J].化工管理, 2022 (000-018).