

数字孪生技术在建筑工程造价管理中的应用

成 露

(浙江西建工程管理有限公司, 浙江 杭州 310012)

摘 要 针对传统建筑工程造价管理存在信息孤岛、动态控制滞后等问题, 本文提出数字孪生技术的应用路径。通过构建物理感知层与虚拟模型层双向映射的技术架构, 剖析数据采集、模型构建及多源信息融合过程, 并从设计优化、施工管控、结算核验及运维管理等环节阐述具体应用场景。结果表明, 数字孪生技术可实现成本数据与工程实体的实时关联, 推动造价管理由静态核算向动态预控转变, 有效提升工程量核算准确性与成本响应速度, 为建筑行业造价精细化管理提供新的技术思路与解决路径。

关键词 数字孪生; 造价管理; 全生命周期; 动态控制

中图分类号: TU723.3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.16.026

0 引言

建筑工程造价管理是建筑工程造价管理贯穿于项目决策、设计、施工到运营全过程的管理活动, 其管理水平直接影响到项目的投资效益和盈利空间。但是, 传统的造价管理方式一直存在着信息传递断层、动态控制滞后等问题, 各阶段的成本数据分散在不同参与方手中, 造成信息孤岛, 无法为全过程成本追溯提供连续的数据支持。施工过程中变更签证频繁出现, 造价核算仍然采用月度统计和事后结算的方式, 造成成本超支风险不能被及时发现和干预。近年来, 伴随着建筑信息模型技术的普及以及物联网传感设备的迅猛发展, 以数字孪生为代表的数字化映射技术逐步渗透到工程管理当中。该技术通过创建出与物理实体同步的虚拟空间里的数字化镜像, 从而为成本要素的即时感知、动态模拟和闭环控制提供了技术可能。因此, 在此情况下, 将数字孪生技术与造价管理深度融合, 对建筑成本控制具有重大的理论意义和实际价值。

1 数字孪生技术在工程造价管理中的应用机理

1.1 数字孪生技术核心概念

数字孪生技术是将多物理场、多尺度、概率性仿真和动态数据融合结合的一种数字化映射方法, 主要目的是创建物理实体在虚拟空间里的高保真数字化镜像。该技术依靠物联网泛在感知网络实时收集物理对象的几何尺寸、状态参数以及环境信息, 再经由建筑信息模型和大数据分析平台达成物理实体同虚拟模型之间实时的数据交互及动态双向映射。数字孪生体不

但可以表现物理实体的几何结构和功能特性, 而且借助机器学习算法以及仿真推演的方法, 对物理实体在全部生命周期内的行为规律进行模拟、推演并加以检验, 从而形成由数据感知、模型创建、决策改良到物理实体的闭环技术体系^[1]。

1.2 数字孪生赋能造价管理的机理

数字孪生对造价管理的机理主要是从数据融合、模型联动和决策闭环这三个方面来体现的。数字孪生技术依靠物联网传感器、射频识别、三维扫描设备等对施工现场人、材、机消耗数据以及环境参数展开持续采集, 并且与BIM模型里的几何信息、定额单价以及合同条款实施异构数据融合, 从而产生包含时间戳和空间属性的成本数据集。数字孪生体把物理建筑实体和虚拟模型用双向映射的方式动态关联起来, 使得造价管理由依靠静态图纸的工程量核算转变为依靠实时进度数据的成本动态核算, 从而达到进度节点和成本支出精准对应的目的。在决策闭环方面, 数字孪生平台将仿真推演算法融入进去, 对不同的施工方案、设计变更或者资源调配策略展开成本影响的模拟预估, 将预警信息发送到管理终端, 形成从状态感知、成本分析到控制指令回馈的闭环流程, 进而实现造价管理由事后核算转向事前预控的转变。

2 基于数字孪生的造价信息采集与动态模型构建

2.1 物理建筑的信息化感知

物理建筑的信息化感知是建立数字孪生造价管理数据基础的重要手段, 它将施工现场的物理状况转变

作者简介: 成露(1993-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 工程造价。

为可以计算的数据流,依靠泛在传感网络。在施工作业面上,在混凝土结构内部布置温度传感器、应变计可以实时检测养护条件,这些数据直接影响冬季施工措施费的计取和混凝土强度达龄期的成本确认。物料管理环节,塔吊吊钩和材料堆场的射频识别读写器以及称重传感器,可以自动采集钢筋、砌块等大宗材料的进场批次、验收数量、消耗部位等信息,并与模型构件建立关联,形成物资消耗台账。

另外,依靠三维激光扫描仪或者无人机倾斜摄影系统定时采集的施工现场点云数据,可以真实再现土方开挖、主体结构施工的实际进度,再同设计模型展开对比分析,便可自动生成完成工程的实物工程量清单。该感知体系形成以后,原先依靠人工填写的进度报表和材料单据就变成了物理世界直接产生的数字信号,大大缩减了造价数据采集的滞后情况并削减了由于人为因素所造成的误差。

2.2 虚拟孪生模型的构建

虚拟孪生模型是基于物理感知来创建承载全部成本信息的数字模型,该过程先利用建筑信息模型技术建立建筑的几何结构和构件层次关系,得到模型的几何骨架。在此基础上,造价信息的挂载是实现孪生模型经济属性的重要环节,需要将工程量清单计价规范与模型构件进行语义关联,使墙体、梁、柱等构件均能关联并继承对应的综合单价、人工工日消耗量、材料市场价格等造价信息,实现模型构件与造价数据的一体化绑定。

为了使模型与不同参与者之间进行有效交互,需要对包含几何、成本等信息的原始模型进行减面处理和数据压缩,在移动端和网页端都可以及时查看构件的属性。虚拟孪生模型是在工程建设过程中不断细化形成的,在设计阶段表现为概算指标的方案模型,在施工阶段表现为挂载合同单价、分包成本的实际成本核算模型,在竣工阶段表现为承载全生命周期成本数据的资产交付模型^[2]。

2.3 多源异构数据的融合与存储

多源异构数据融合与存储属于物理感知层和虚拟模型层之间数据的枢纽,主要解决不同来源、不同结构的数据语义冲突和时间对齐问题。从数据来源来说,造价管理所需数据包括:物联网设备的实时流式数据、BIM 软件的几何模型数据、计价软件的定额数据库、项目管理系统的人工填报记录等。数据格式、精度、更新频率等存在很大差别,需要建立统一的数据融合体系。具体来说,用标准的数据接口协议把传感器监测

设备运行时长和模型中的机械台班定额项联系起来,将物料过磅数据和模型中对应的构件材料消耗量自动匹配,形成统一的项目分解结构,使各个时间点数据可以按施工段和实际进度对齐。融合后的数据存放在支持时空数据管理的建筑大数据平台上,该平台不但具有海量数据存储的能力,还需建立数据之间的关联索引,使造价管理人员在查询构件成本时,可以同时调取其设计参数、施工记录、实际消耗量以及实时监测数据,从而为成本分析和模拟推演提供完整的数据。

3 数字孪生技术在造价管理全过程中的具体应用

3.1 设计阶段的成本动态优化

设计阶段用数字孪生技术创建包含成本属性的虚拟建筑模型,从而达到设计方案经济性动态优化和实时校核的目的。当设计师对建筑形体、围护结构或者设备选型进行调整时,数字孪生平台会依据挂载在构件上的工程量计算规则以及市场价格数据库,立刻做出反应并重新计算出土建工程量增减、材料成本变动和设备采购费用的变化,将成本核算周期由数日缩短到实时。支持多方案并行比较,用同一个孪生环境同时显示不同的设计路线所对应的几何效果和概算值,使设计师和造价工程师可以共同推算成本目标,找出影响造价的主要设计参数^[3]。

3.2 施工阶段的精细化成本控制

3.2.1 进度—成本联动控制

进度—成本联动控制是在传统建筑信息模型的基础上进一步发展,其主要目的是创建时间维度和成本维度之间的动态耦合关系。在数字孪生环境中,施工进度计划把构件当作基本单元,与模型挂钩后产生出计划成本曲线。在实际操作中,物联网系统实时收集的施工进度数据促使孪生模型随之发生演进,系统会立刻找出当期已经完成的构件,并按照这些构件所挂载的合同单价以及资源消耗定额来进行即时计算,从而得出已完工程的预算成本和实际成本。该机制使挣值管理自动执行,通过对计划成本、实际成本和挣值这三组数据进行实时比较,可以对进度滞后或者成本超支的影响范围进行量化分析。当偏差超过设定的阈值时,数字孪生平台可以对不同的赶工方案或者资源调配策略做成本影响模拟,为管理者选择最佳的纠偏路径提供数据支持。

3.2.2 物资精细化管理

物资精细化管理用数字孪生技术来对工程材料、设备资源进行全过程的跟踪和动态调配。物资进场时,

在施工现场入口处设置射频识别读写器和车牌识别系统,自动记录运载车辆信息以及所载物资的规格、数量,并且与采购订单数据进行自动核验,核验无误后更新虚拟仓库库存模型。仓储管理上利用堆场区域视频监控和重量传感器来实时监测材料存量的变化,当库存降到安全阈值以下时系统会自动生成补货预警并推送给采购部门,防止由于材料短缺造成停工待料的情况发生^[4]。根据孪生模型中施工进度和构件关联的材料定额,系统可以自动计算出理论消耗量,再和搅拌站或者加工车间反馈的实际出库数据进行比较,及时发现异常损耗并找到具体的施工部位。该机制把物资流、信息流和资金流三者统一起来进行控制,从而降低库存资金占用、提高材料周转速度。

3.2.3 变更与索赔数字化管理

变更和索赔数字化管理依靠数字孪生模型的可追溯性和仿真能力,来提高工程变更响应速度和索赔依据的严谨性。当施工现场出现设计变更或者施工条件发生变化时,管理人员可以在孪生环境中调整几何参数与施工工艺,系统会立即找出变更所影响的构件范围,然后按照内置的计价规则与合同条款来重新计算工程量的增减量以及费用的变化,此过程还生成变更前成本对比分析报告,为变更方案的经济性评价及批准决策提供量化的参照。数字孪生平台对施工日志、环境监测数据、设备运行状态、指令下达时间等过程信息进行了完整的记录,当出现不利地质条件、设计图纸延误、指令增加工作内容等情形时,系统可以依据时间轴回溯事件的原因、影响范围以及造成资源闲置或者返工损失的情况,生成带有模型截图和数据凭证的索赔支持文档,从而提高索赔谈判过程中证据的可信度。

3.3 竣工结算与运维阶段的资产管理

3.3.1 竣工结算的快速核对

竣工结算快速核对依靠数字孪生模型和实测数据的自动对比,大大提高工程量核算的速度和准确度。工程实体完工后,采用三维激光扫描仪或无人机倾斜摄影系统得到建筑竣工状态的点云数据,再经过处理得到反映真实施工结果的实景模型,并与BIM模型进行自动配准和差异分析,系统可以准确找到实际完成的界面和设计图纸之间的几何偏差,根据模型构件挂载的工程量计算规则,自动提取出已经完成工程的数量。对有设计变更或者现场签证的部位,数字孪生平台保存了变更实施时间、审批过程以及对应的模型版本,每一个工程量的改变都有据可依。该机制把传统

依靠人工现场丈量、图纸核对的结算方式转变成以三维数据为基础的自动化核算流程,缩减了发承包双方对于工程量争议的核对时间,并且创建出带有模型截图和数据来源的结算报告,明显加强了结算依据的可信程度^[5]。

3.3.2 运维阶段的资产价值管理

运维阶段的资产价值管理依靠创建承载全生命周期成本数据的数字孪生档案,从而达成建筑资产价值的动态评价并持续改进。工程竣工交付时,把设备采购成本、安装费用、初始调试记录和供应商信息等全部纳入到资产数据与建筑信息模型中,从而创建起包含暖通空调、给排水、电气照明等各种系统在内的全部数字化资产台账。重要设备上的传感器会一直记录运行时长、耗电量和故障报警等信息,系统根据内部事先设置的折旧公式、维护成本记录等不断更新各资产的当前价值和剩余使用年限。设备出现故障或者进行预防性保养时,数字孪生平台可以结合维修记录、备件更换费用和同类设备平均故障时长等信息,让运维管理人员针对性开展维修和更换工作。

4 结束语

数字孪生技术通过物理实体与虚拟模型的实时双向映射,有效打通了建筑工程各阶段、各参与方之间的信息壁垒,实现了造价数据与工程实体的深度绑定与动态同步。依托多源数据融合与全过程模拟推演,传统造价管理得以从静态、事后核算向动态、事前预控转型,显著提升工程量核算精度与成本响应效率,为建筑工程全生命周期造价精细化、智能化管控提供技术支撑。随着物联网、人工智能和大数据技术的不断融合,数字孪生技术在建筑全生命周期成本决策与造价管理方面将发挥越来越重要的作用。

参考文献:

- [1] 崔媛慧子,徐琳,肖青山.基于数字孪生技术的建筑工程造价管理研究[J].建筑与预算,2025(10):28-30.
- [2] 李小莲,黄文杰,黄冰,等.信息化技术在工程造价管理过程中的研究与应用[J].装备制造技术,2025(10):142-145.
- [3] 廖伟新.“智链”工程造价新业态:BIM与AI的协同创变[J].城市建设,2025(05):25-27.
- [4] 李修强.数字孪生技术在建筑工程造价管理中的应用研究[J].中国建筑装饰装修,2024(07):127-129.
- [5] 李雁.数字孪生技术为造价管理提供强大动力[J].中国商界,2023(03):117-118.