

Research on the Collaborative Early Warning Mechanism of Dynamic Cost and Schedule in the Whole Process of Engineering Projects Based on Digital Twins

Qiang Fu Tongshuai Zheng

Zhongneng Jian Road and Bridge Engineering Co., Ltd., Tianjin, 300000, China

Abstract

With the increasing complexity of engineering projects, traditional project cost monitoring and schedule collaborative management cannot achieve dynamic control throughout the entire process, and can no longer meet the current engineering related needs. The problems of cost overruns and schedule delays are becoming increasingly serious. Based on this, this article takes digital twin technology as the core support, combined with the full life cycle characteristics of engineering projects, to construct a dynamic cost monitoring system based on digital twin, achieve precise cost control from design to operation and maintenance stages, and propose a three in one cost and schedule collaborative early warning mechanism of "data collaboration model driven early warning response", providing theoretical support and practical path for refined management of engineering projects.

Keywords

digital twin; Engineering project management; Dynamic cost monitoring; Progress coordination; early warning mechanism

基于数字孪生的工程项目全过程动态成本与进度协同预警机制研究

傅强 郑同帅

中能建路桥工程有限公司, 中国·天津 300000

摘要

随着工程项目复杂程度的提升,传统项目成本监控与进度协同管理无法实现全过程的动态管控,已经无法满足当前工程相关的需求,成本超支与进度滞后问题日益严重。基于此,本文以数字孪生技术为核心支撑,结合工程项目全生命周期特性,构建基于数字孪生的动态成本监控体系,实现从设计到运维阶段成本的精准管控,并提出“数据协同-模型驱动-预警响应”三位一体的成本与进度协同预警机制,为工程项目精细化管理提供理论支撑与实践路径。

关键词

数字孪生; 工程项目管理; 动态成本监控; 进度协同; 预警机制

1 引言

数字孪生(Digital Twins, DTs)是当下一种革新性技术,将实时数据应用于物理实体,并对其进行同步更新的同时,为跨领域资产的全生命周期管理提供了创新解决方案,同时也是给工程建设项目的全流程管控提供一种新途径。当前,数字孪生已经成功应用到制造业、航空航天等范畴中去,但在工程项目管理中,其应用多集中于施工阶段的质量安全监控,工程项目建设的全生命周期成本和进度等方面的协同预警还处于尝试阶段,尚未形成系统性的理论框架与实践方案。因此,基于数字孪生的工程项目全过程动态成本与进度

协同预警机制研究,对推动工程项目管理的数字化转型及高质量发展具有重要的意义。

2 数字孪生基本概述

2.1 数字孪生理论与概念

数字孪生的概念最早由美国密歇根大学教授 Michael Grieves 于 2003 年提出,最初应用于产品全生命周期管理,核心内涵是充分利用物理模型、传感器、运行历史等数据,集成多学科、多物理量、多尺度、多概率的仿真过程,在虚拟空间中完成映射,从而反映相对应的实体装备的全生命周期过程^[1]。

数字孪生系统具备三大核心特征:

一是双向映射性:物理实体的状态变化通过实时数据传输同步至虚拟模型,虚拟模型的模拟分析结果可反向指导

【作者简介】傅强(1992-),男,中国湖北襄阳人,硕士,工程师,从事经营技术管理研究。

物理实体的运营决策；二是全周期动态性：覆盖物理实体的全生命周期，而非局限于某一阶段，且模型与数据随实体状态动态更新，避免静态模型的滞后性；三是多维度协同性：整合几何维度、物理维度、行为维度、数据维度的信息，实现多维度数据的协同分析。

2.2 数字孪生的应用领域

数字孪生技术凭借“动态映射、智能分析”的优势，已在多个领域实现落地应用，具体应用场景如下：

制造业和工业过程：数字孪生在制造业中用于优化生产流程、减少工厂调试时间、提高生产效率，并通过预测性维护和数据驱动的根本分析来增强生产力。

医疗保健：数字孪生在医疗保健领域用于改进电子健康记录、疾病预防和治疗，以及管理 COVID-19 疫情。

工程项目领域：以前在工程项目管理中，数字孪生应用仅应用于“施工阶段”，现在将数字孪生运用到“全生命周期”^[2]。

智慧城市：数字孪生可以用于城市的规划、管理和运行的服务当中，可以实现“城市级”的动态管控。比如，上海“城市数字孪生体”，对城市的交通、能源、安防等多方面大数据进行分析，以虚拟模型对早高峰或晚高峰路段的车流情况做到精准的模拟分析，并以此来调配相应回路的信号灯绿灯时长，使主要干线的道路通行能力提升到了 18%。

农业和食品供应链：数字孪生将被运用于农业及食品供应链中实现农业资源的最优化、农业生产力、可持续性的提升，利用系统模型与数字孪生增强农业生产的生产率与透明度。

与其它领域相比，工程项目领域中数字孪生的应用更加注重“多参与方协同”和“动态成本-进度联动”。业主、设计单位、施工单位、监理单位等多方主体可以借助数字孪生平台进行资源共享和信息互通，避免出现“信息孤岛”；并且基于成本和进度数据的协同分析，在项目开展前就可以对“成本超支导致进度滞后”和“进度压缩增加成本”这两种风险情况进行提前预警，使得工程项目的整体收益最大化。

3 基于数字孪生的工程项目全过程动态成本监控的实践应用

3.1 工程项目施工阶段实时成本监控

施工阶段是工程项目成本消耗的核心阶段，占总投资的 60% - 70%，此阶段的成本监控需聚焦“人、材、机”三大核心资源的消耗动态。基于数字孪生的施工阶段成本监控，通过感知层设备采集资源消耗数据，同步更新至虚拟模型，实现成本消耗的实时可视化与偏差预警^[3]。

3.1.1 人工成本实时监控

利用 RFID 人员定位卡和工时统计系统获取施工人员的实时数据信息，RFID 卡片可以读取人员进入或离开现场的

时间以及所在的工作区域，将人员对应的任务工时统计到工时统计系统中，经由工时统计系统记录具体的工时并上传至数字孪生平台，然后数字孪生平台将收集来的人员时间信息与虚拟模型中的“人工成本预算”对应的人员单价（工种）、计划工时等要素进行对比，并实现自动计算“实际人工成本-计划人工成本”的偏差值^[4]。

例如，在某住宅项目的钢筋工班组计划钢筋绑扎 50 吨每天的人工成本为 2000 元/天。通过数字孪生系统监测结果显示：以 2022 年 6 月 30 日为例，某日该班组实际工时为 10 小时（计划 8 小时），完成钢筋绑扎 40 吨（计划 50 吨），实际人工成本为 2200 元（计划 2000 元）。此场景下，系统会在虚拟模型上标出该班组的“成本超支（10%）”和“效率不足（20%）”的情况，并实时通知项目经理，由其进行问题原因分析并协调解决。比如上面情况就是“钢筋原材料供应不及时”原因造成的效率低，在之后的工作当中，加强与材料供应商之间的沟通联系，避免出现这样的偏差问题再次发生。

3.1.2 材料成本实时监控

材料成本占施工阶段总成本的 50% - 60%，是成本监控的重点。通过“RFID 材料标签+称重传感器+库存管理系统”实现材料全流程追踪：材料进场时，RFID 标签记录材料名称、规格、数量、单价、供应商信息；材料出库时，称重传感器记录实际领用数量，库存管理系统同步更新库存数据；这些数据实时关联至数字孪生虚拟模型，与“材料成本预算”（含计划消耗量、损耗率）进行对比，识别“超量领用”“损耗超标”等问题。

以某桥梁项目为例，计划 C30 混凝土的单位损耗率为 2%，某施工段计划浇筑 1000m³ 混凝土，计划消耗量为 1020m³。通过数字孪生系统监控发现，实际领用混凝土 1050m³，损耗率达 5%，远超计划值。系统通过虚拟模型回溯材料领用记录，发现是“模板拼接缝隙过大导致混凝土漏浆”，随即通知施工班组整改模板，后续该施工段的混凝土损耗率降至 1.8%，单段材料成本节约 3 万元。

3.1.3 机械成本实时监控

机械成本主要包括机械租赁费、燃油费、维修费，约占施工阶段总成本的 15%-20%，因此要对其进行管控的核心就是“设备利用率”“能耗效率”，实现这部分成本的精确控制。可以将“设备传感器+燃油计量表”的方式用来采集设备的实时数据，其中传感器记录的是设备运行状态、工作时长及工作强度、燃油计表记录的是实际燃油的消耗量，所有数据会上传到数字孪生平台并和“机械成本预算”进行对比分析，判定是否出现“设备闲置”或者“能耗超标”等情况。

例如，某隧道项目租用了一台盾构机，月租金 15 万，原计划按每天工作 16 小时来进行计算的。单价能耗 50L/小时。发现某一周日均工作 12 小时、闲置率高达 25%，能耗

达到 60L/小时。此时可以通过数字孪生系统进行分析，发现问题是“盾构机刀具磨损未及时更换导致频繁停机”。随即提醒设备管理团队提前采购刀具，优化维修计划，随后盾构机的日均工作时长由原来的 12 小时提高到了 15 小时，同时消耗也从原来的 60L 降低到了现在的 52L，每个月可以节省 2.5 万元。

3.2 工程项目变更的追溯与评估

工程项目变更包含设计变更、施工方案变更、材料替换等，是导致成本超支的主要原因之一，传统变更管理中，变更申请、审批、成本影响评估依赖人工流转，存在“审批周期长、成本影响测算不准、变更痕迹难追溯”的问题。基于数字孪生的变更追溯与评估，通过“虚拟模型变更模拟 + 成本数据联动”，实现变更的快速审批、精准成本测算与全流程追溯。

3.2.1 变更申请与模拟

当施工单位提出变更申请时，可在数字孪生虚拟模型中直接修改相关构件的参数，系统自动关联该构件的“材料成本、人工成本、机械成本”数据库，实时测算变更后的成本变化；同时，系统模拟变更对施工进度的影响，为变更审批提供数据支撑。

3.2.2 变更审批与追溯

数字孪生平台构建“变更审批流程模块”，业主、设计单位、监理单位可通过平台查看变更申请、虚拟模型变更对比、成本与进度影响评估报告，实现线上审批，审批周期从传统的 7 - 10 天缩短至 2 - 3 天。同时，平台自动记录变更的全流程信息，形成“变更追溯台账”，后续若出现成本争议，可通过虚拟模型回溯变更过程，明确责任方。

3.2.3 变更后成本动态调整

经变更审批后，数字孪生系统自动将虚拟模型的成本预算值同步到成本监控内，以后的各项领料、用工消耗都将以调整更新后的预算为基准进行管控。比如某商业综合体项目出现“玻璃幕墙改为光伏幕墙”的设计变更，经系统测算其变更费用为 500 万元，施工期滞后 15 天，在审批通过之后，数字孪生系统自动将幕墙工程的调整变更预算、进度计划等同步至各版块，并且系统能够根据情况及时监测光伏幕墙所用材料的进场进度及安装成本等，保证项目变更之后的成本及进度处于可监控范围之内。

4 基于数字孪生的工程项目全过程动态成本与进度协同预警机制

成本与进度是工程项目管理的“一体两面”，成本超支可能导致进度滞后，进度压缩也可能增加成本。传统预警机制多单独针对成本或进度设置阈值，忽略二者的协同关系，易导致“预警不精准、响应不及时”。基于数字孪生的协同预警机制，通过构建“数据采集 - 模型映射 - 协同分析 - 预警响应”的闭环，实现成本与进度数据的实时联动、偏差预测与主动预警。

4.1 协同预警机制核心环节技术拆解

闭环各环节需依托数字孪生技术实现精准落地，技术支撑、操作要点与目标明确，确保数据从采集到响应的全流程可控，具体如下表 3-1 所示：

4.2 成本 - 进度协同预警指标体系构建

传统预警仅关注单一指标，协同预警需建立“双维度联动指标”，覆盖整体项目与分项工程，同时预留动态调整空间，确保预警阈值科学合理，具体如下表 3-2 所示：

表 3-1 协同预警机制核心环节技术表

核心环节	技术支撑	关键操作	目标达成
数据采集	物联网 (IoT) 传感器、BIM+GIS 融合技术、RFID 芯片、无人机巡检	1. 实时采集人工考勤、材料进场量、设备台班等成本数据； 2. 同步获取分项工程完成度、关键线路工期等进度数据； 3. 自动校验数据关联性。	实现成本、进度数据“分钟级同步”，杜绝数据脱节或滞后
模型映射	数字孪生平台、实时渲染引擎、参数化建模技术	1. 将采集数据映射至虚拟模型，生成动态成本 - 进度关联视图； 2. 按施工阶段更新模型参数； 3. 标记成本与进度耦合节点。	让抽象数据转化为“可视化模型”，直观呈现二者协同关系
协同分析	机器学习算法、蒙特卡洛模拟、成本进度偏差矩阵	1. 预测未来 30 天成本超支概率与进度滞后风险； 2. 计算“成本超支 X%”与“进度滞后 Y 天”的联动影响系数； 3. 对比计划值与实际值，定位偏差根源	从“被动统计”转向“主动预测”，精准锁定协同偏差点
预警响应	智能推送系统、移动端 APP、项目管理中台	1. 按风险等级推送预警； 2. 附带偏差分析报告与优化建议； 3. 记录响应动作与效果，更新至孪生模型形成闭环	确保预警“精准到人、快速落地”，避免响应延迟

表 3-2 成本 - 进度协同预警指标体系表

指标类型	具体指标	预警阈值 (参考)
整体项目指标	1. 成本进度协同系数 2. 关键线路成本偏差率 3. 项目整体工期 - 成本匹配度	1. < 0.8 (系数 < 1 表示协同失衡) 2. > 8% 或 < -5% 3. < 90%
分项工程指标	1. 钢筋工程 “用量 - 工期” 偏差率 2. 混凝土浇筑 “成本 - 完成度” 同步率 3. 机电安装 “设备租赁期 - 施工进度” 匹配率	1. 偏差 > 10% 2. 同步率 < 85% 3. 匹配率 < 90%
动态调整指标	1. 材料价格波动对工期的影响度 2. 人工短缺导致的成本追加率	1. > 5% (价格涨 5% 致工期滞后) 2. > 6%

4.3 典型场景预警响应实践

根据以上机制, “材料涨价导致成本超支与进度滞后” “施工效率低引发进度滞后与成本追加” 是常见的两类高频场景, 采用数字孪生模型通过模拟可以精准给出相应的方案, 如某桥梁项目钢材价格周涨幅达 15%, 钢筋工程进度滞后计划进度 5 天, 通过虚拟模型模拟出 “批量锁价 + 调整施工顺序” 的方案, 计算得出, 采取该方案能够节省约 30 万的成本超支, 可将工期延误缩减到 2 天, 并且实现项目顺利按期进行, 验证了协同预警机制的实践价值。

5 结语

随着工程项目日趋庞大和复杂的趋势, 以往针对传统 “分阶段、单维度” 的成本与进度管理模式已经无法满足各利益主体之间以及自身建设过程中对多角度、多维度的协调管控要求, 数字孪生技术应用于工程项目全过程成本进度的

动态预警及其 “数据协同 - 模型驱动 - 预警响应” 闭环的模式有效改变了这一现状, 为成本与进度数据的融合、风险的提前预判以及纠偏措施的适时落地提供了可能, 并有利于工程项目的成本进度管控做到及时、准确。未来可进一步优化数字孪生模型的仿真精度, 加强多参与方协同权限的精细化管理, 推动该机制在大型复杂工程项目中更广泛的应用, 为工程项目数字化、精细化管理提供更坚实的理论支撑与实践路径。

参考文献

- [1] 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):74-75
- [2] 郑文, 林文, 韩晓东, 郑晟. 工程项目全过程可视化数字监管技术研究[J]. 闽江学院学报, 2023, 44(2):41-52
- [3] 苟红丽. 基于数字孪生技术的工程造价动态监控创新实践[J]. 张江科技评论, 2025(6):78-80