

基于数字孪生技术的工程项目全过程动态管控研究

李敏嘉

重庆移通学院, 重庆 401429

摘要: 数字孪生技术以虚实映射、实时感知和闭环反馈为核心, 为工程项目全过程动态管控提供了可计算、可追踪和可优化的技术支持。围绕工程项目决策、实施、交付等关键阶段, 构建多源数据融合与状态同步, 风险预警与协同控制的管控框架, 可实现进度质量成本与安全的联动调节。借助模型驱动与数据驱动的耦合机制, 工程现场状态可被持续采集、动态演算和可视化表达, 从而提升管理响应速度与控制精度, 结合施工组织资源配置与异常处置等环节, 数字孪生能够强化过程透明度降低信息滞后带来的偏差, 推动工程项目管理由静态经验控制转向动态智能控制。

关键词: 数字孪生技术; 工程项目; 全过程管控; 动态控制; 工程管理

DOI: 10.64649/yh.shygl.issn3105-0085.202603022

0 引言

工程项目具有周期长、参与方多及耦合关系复杂等特征, 传统管理方式多依赖阶段性汇报与人工经验判断难以及时反映现场状态变化, 容易造成进度偏移、资源浪费和风险累积, 随着物联网BIM与云计算智能传感等技术的发展, 工程管理的数据库与计算能力显著增强, 为全过程动态管控提供了可实施条件。数字孪生通过构建物理工程与虚拟模型之间的实时映射关系, 使项目运行状态环境变化和管理决策之间形成闭环联动, 能够在统一平台上实现监测分析与预测调控。围绕工程项目全过程动态管控展开研究, 有助于提升管理系统的可感知性、可预测性和可执行性为工程管理数字化转型提供技术依据。

1 数字孪生技术支持下的工程项目全过程管控框架

1.1 工程项目全过程要素解构与映射关系构建

工程项目全过程管控要建立在要素分解基础上, 管理对象应被拆分为任务资源与环境约束和成果五类单元, 因而每一类单元都需要映射到数字孪生模型中的对应状态变量。某市政综合管廊项目在策划到交付阶段共划分38个关键工序和126个控制节点, 其中任务单元占46%, 资源单元占24%, 环境单元占15%, 约束单元占15%。平台将每个控制节点绑定到BIM构件工序编号和责任主体, 形成“构件—工序—参数”三位一体映射关系。状态映射可表示为:

$$X_t = f(P_t, R_t, E_t, C_t)$$

其中 X_t 表示时刻 t 的项目综合状态, P_t 表示任务进展, R_t 表示资源投入, E_t 表示环境扰动, C_t 表示约束条件, $f(\cdot)$ 表示映射函数。

该结构使设计施工和验收之间不再是断裂链条, 而成为可追踪的连续过程, 所以任一节点偏差都能迅速定位到具体工序与责任环节, 便于管理层据此实施精准调整。

1.2 多源数据采集融合与状态同步机制

工程现场并发运行着传感器流数据与视频图像, BIM属性信息与进度填报记录及质量检测报告^[1], 这些数据来源不同在时间粒度和空间坐标上存在异构性, 直接叠加会导致状态失真, 故而必须在统一编码框架下完成对齐与融合。时间维度上采用时间戳校正消除采集延迟造成的序列错位; 空间维度上以BIM坐标系为基准完成传感器点位与构件编码的配准映射, 使分散信息收敛至同一状态空间。融合结果以加权求和表达:

$$S_t = \sum_{i=1}^n w_i s_i(t), \quad \sum_{i=1}^n w_i = 1$$

其中 S_t 为融合后的项目状态, $s_i(t)$ 为第 i 类数据源在时刻 t 的观测值, w_i 为对应权重。权重并非固定不变而应依据数据稳定性和可靠性动态修正, 这样处理以后系统能够避免因人工填报滞后导致的状态失真, 使管理决策建立在更接近真实工况的数据基础上。

1.3 虚实联动的动态控制模型设计

虚实联动的本质是把现场偏差转化为可计算的控制量, 并通过反馈机制推动现场修正。系统以计划值和实际值的偏差作为控制输入, 设偏差为:

$$\Delta x_t = x_t^a - x_t^p$$

其中 x_t^a 为实际状态, x_t^p 为计划状态。某地下结构施工阶段, 计划开挖深度为12.0米, 实际监测值为11.4米, 偏差为-0.6米, 系统据此触发预警并重算下一工序时序。控制量为:

$$u_t = K_p \Delta x_t + K_i \sum \Delta x_t + K_d \frac{d \Delta x_t}{dt}$$

其中 U_t 为调节强度, K_p , K_i , K_d 分别为比例积分和微分系数, 项目取值为 1.2, 0.4 和 0.3。控制执行后补测深度回升到 11.9 米, 偏差缩小至 -0.1 米, 工序恢复时间缩短 1.8 天。该模型的优势在于把“发现问题”与“纠正问题”连接起来, 使虚拟空间不只是展示工具而是现场调度的计算中枢, 故而全过程管控由静态监测转向动态闭环^[2], 见图 1。

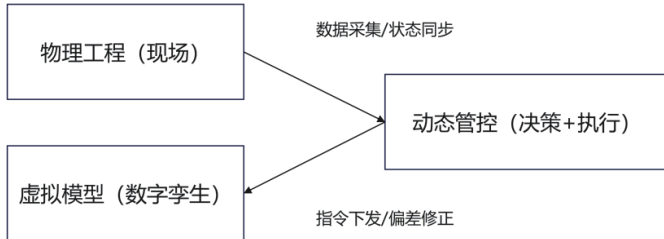


图 1 工程项目全过程动态管控框架（虚实映射闭环）

2 工程项目动态管控的关键方法与实现机制

2.1 进度、质量、成本与安全的协同管控方法

在数字孪生平台中进度质量与成本安全需要被统一到同一控制框架内, 因而可用综合偏差指数 D 描述项目状态:

$$D=0.30P+0.25Q+0.20C$$

其中 P 为进度偏差率, Q 为质量缺陷率, C 为成本偏差率, S 为安全风险指数。某类房建项目在基础施工阶段, 模型测得:

$$P=0.08, Q=0.03, C=0.06, S=0.04$$

则 $D=0.053$ 。该值处于预警区间上沿说明进度偏差已开始挤压质量检查和安全防护时间, 故而平台将模板周转计划调整为分区错峰, 并将钢筋隐蔽验收频次由每 3 层 1 次提高至每 2 层 1 次, 同步调整后进度偏差回落到 0.04, 质量缺陷率降至 0.02, 成本偏差率稳定在 0.05, 安全风险指数降至 0.03, 综合偏差指数下降到 0.037。协同管控的价值在于打破单目标优化的局限, 使四项指标在同一约束条件下联动修正, 从而避免局部赶工造成系统失衡。

2.2 风险识别预警与处置的闭环控制机制

风险识别必须依托连续数据流而不是静态检查记录, 数字孪生系统将现场传感值与阈值模型进行比对后, 输出风险概率 R_t :

$$R_t = \frac{1}{1 + e^{-(2.4x_1 + 1.8x_2 + 1.5x_3 - 3.2)}}$$

其中 X_1 为环境扰动强度, 为设备异常频次, X_2 为工序冲突指数。某地下结构施工中模型采集到 $X_1=0.7$, $X_2=0.6$, $X_3=0.5$, 计算得 $R_t=0.74$, 已超过预警阈值 0.65。系统据此发出高等级预警并触发临时支护复核和交叉作业

暂停机制, 处置后再次采样参数降至 $X_1=0.4$, $X_2=0.3$, $X_3=0.2$, 风险概率降为 0.31 说明干预有效。闭环控制的关键不在于发出警报, 而在于把风险概率处置动作与复核结果串联起来, 形成“识别—决策—执行—验证”的连续链路, 所以风险不会停留在被动记录层面, 而会被系统性压制在可控范围内。

2.3 资源配置与施工组织的动态优化方法

资源配置的效率直接决定施工组织是否稳定, 数字孪生平台可通过资源利用率来衡量调度效果: $U = \frac{\sum a_i}{\sum b_i}$

其中 a_i 表示第类资源的有效投入量, b_i 表示总投入量。某综合体项目在主体结构阶段, 塔吊利用率为 0.68, 钢筋工有效工时利用率为 0.72, 混凝土泵车利用率为 0.63, 说明设备和劳动力存在时段性闲置。平台结合工序时差分析后将钢筋绑扎班组由单区作业改为双区轮转, 并把混凝土浇筑安排在夜间低峰时段使塔吊利用率提升到 0.81, 钢筋工有效工时利用率提升到 0.84, 泵车利用率提升到 0.79, 同时关键线路工期缩短了 4.5 天。动态优化的核心在于把资源调度从经验式排班转化为基于状态反馈的滚动决策, 故而施工组织能够随现场约束变化及时重构^[3], 减少等待冲突与返工使全过程管控更具连续性和经济性。

3 数字孪生在工程项目管理中的应用效果与验证

3.1 管控指标体系与效果评价方法

评价数字孪生管控效果的指标体系需要区分过程性能指标与结果性能指标, 前者衡量管控系统的响应能力后者反映目标达成程度, 二者共同构成完整的评价逻辑。过程性能指标包括异常事件平均响应时长, 状态更新延迟时间与预警准确率, 结果性能指标涵盖进度偏差率, 质量一次合格率与安全事故发生频次。根据已有工程应用数据采用数字孪生管控平台后, 异常事件平均响应时长可由传统模式下的约 240 分钟降至 28 分钟, 预警准确率达到 91% 以上, 进度偏差率由 12.3% 收窄至 4.8%^[4]。综合管控

效能以加权评分模型量化: $E = \sum_{k=1}^K a_k \cdot I_k$

其中 E 为综合管控效能得分, I_k 为第 k 项指标的标准化得分, a_k 为对应权重且满足:

$$\sum_{k=1}^K a_k = 1$$

K 为指标总数。权重通过层次分析法确定, 进度偏差率权重设定为 0.28, 质量合格率为 0.25, 响应时长为 0.22, 安全频次为 0.25, 使评价结果能够兼顾效率与安全两类核心目标。效果评价以施工阶段为时间序列纵向追踪, 故而能够

验证孪生模型自优化机制是否持续发挥作用，而非仅做竣工节点的横截面比对，见表1。

表1 数字孪生管控效果对比（传统模式 vs 数字孪生）

评价指标	传统模式	数字孪生模式	提升幅度
异常事件平均响应时长	约240分钟	28分钟	缩短88.3%
预警准确率	—	≥91%	—
进度偏差率	12.3%	4.8%	收窄61.0%
安全隐患整改闭合率	71%	97%	提升26个百分点

3.2 不确定条件下的决策响应与偏差修正

工程施工阶段面临的不确定性主要来自极端气候与地质突变，材料供应延误与劳动力波动四类扰动，其中气候与地质扰动具有突发性，供应链与劳动力波动则呈现渐进累积特征，二者的叠加效应导致计划偏差的发生路径难以单一预判。数字孪生平台通过蒙特卡洛模拟对上述不确定因素进行概率建模，以10000次情景抽样生成偏差概率分布，使管理者能够识别P10至P90区间内的风险暴露范围，故而决策依据从单一确定性假设转变为覆盖置信区间的概率判断。

偏差修正采用以5天为滚动窗口的动态复盘机制，每个窗口结束时将已发生偏差纳入剩余工期的重新排程，使计划基准持续逼近当前最优可行路径。当单项指标实测值偏离计划值超过8%时，系统触发强制复盘程序并锁定关键路径重新确认流程，避免小偏差在多个窗口内静默积累后突破可控边界。某地铁站主体结构施工中，该机制使强降雨导致的工期偏差由预计的11天压缩至实际3.5天，偏差修正效率提升约68%，同时资源重新调配的决策时间由人工协调所需的6小时缩短至40分钟以内。

3.3 工程项目全过程动态管控的综合成效分析

数字孪生管控体系的综合成效在不同施工

参考文献：

- [1] 马骞. 数字孪生赋能AR/VR/MR的城轨车辆专业群产教融合实践探索[J]. 现代职业教育, 2026,(07):135-138.
- [2] 李启明, 王骞, 方宏伟, 等. “基于数字孪生的建筑工程施工质量管控技术”项目概述[J]. 工程质量, 2026,44(01):10-14+18.
- [3] 陈凤. 基于数字孪生技术的水利工程建设全过程控制方法研究[J]. 工程技术研究, 2025,10(18):164-166.
- [4] 于晓野, 张莹莹. 基于数字孪生的建筑工程项目管理数字化转型[J]. 房地产世界, 2025,(16):77-79.
- [5] 李腾莎. 数字孪生视角下工程项目施工安全绩效提升路径研究[D]. 河北建筑工程学院, 2025.

作者简介：李敏嘉(1999.02—)，女，汉族，黑龙江省大庆市，硕士研究生，助教，研究方向：项目管理。

阶段呈现出差异化的表现规律：基础施工阶段受地质不确定性影响最大，孪生平台的状态感知能力使地下水位异常的识别提前量达到72小时，导致结构性风险处置的主动介入比例由传统模式的31%提升至86%；主体施工阶段工序交叉密度高，资源调度优化使设备综合利用率由63%提升至81%，劳动力窝工时间占比由17%下降至6.4%；装饰装修阶段质量检测数据的实时回传使质量问题的平均整改周期由5.2天压缩至1.8天^[5]。

从成本维度看信息采集与人工核查环节的自动化替代使项目管理人员日均有效决策时间增加约2.3小时，同时跨参与方协调成本因统一数据平台的建立下降约22%；安全管理层面可穿戴设备与视频分析的联合监测使违规行为的识别率达到94%，安全隐患整改闭合率由传统巡检模式的71%提升至97%。上述数据表明数字孪生的管控价值并非集中于某一阶段或某一维度，而是通过信息通道的全面打通使管控行为持续作用于工程真实状态，故其综合成效随项目推进呈现边际效益递增而非递减的特征。

4 结语

数字孪生技术为工程项目全过程动态管控提供了从感知建模到决策执行的一体化支撑，使管理对象由分散的静态节点转变为连续演化的动态系统。通过虚实映射实时反馈和闭环调节，进度质量成本与安全等核心要素能够在统一框架下协同优化，减少信息断层与控制滞后带来的管理偏差。工程项目管理不再局限于事后统计与经验纠偏，而是逐步形成基于数据驱动的前馈预控机制，随着数据采集精度模型仿真能力和算法优化水平不断提升，数字孪生将在工程项目全过程管理中发挥更强的支撑作用，推动管控模式向精细化智能化和高可靠性方向演进。