

数字孪生技术在水利水电工程进度管控中的应用

侯棋森 210403199002281813

摘要

水利水电工程具有规模大、工序复杂、参与方众多、受自然环境影响大等特点，传统进度管控方式存在信息滞后、可视化程度低、风险预判能力不足等问题，难以满足高精度进度管理需求。数字孪生技术通过构建物理工程的数字化映射模型，可实现工程全生命周期数据的实时集成与动态更新，为进度管控提供可视化、智能化的支撑。本文首先阐述数字孪生技术与水利水电工程进度管控的结合逻辑，分析传统进度管控存在的痛点问题，进而探讨数字孪生技术在进度管控中的具体应用路径，最后总结应用价值与未来发展方向。研究表明，数字孪生技术能够显著提升水利水电工程进度管控的精准性与预见性，为工程按期交付提供技术保障。

关键词：数字孪生；水利水电工程；进度管控；数字化映射

一、引言

水利水电工程是我国基础设施建设的重要组成部分，承担着防洪减灾、水资源调配、清洁能源供应等关键功能，其建设进度直接影响项目投资效益与社会功能发挥。不同于一般建筑工程，水利水电工程多处于江河峡谷区域，地形地质条件复杂，施工工序涉及大坝填筑、厂房建设、机电安装等多个交叉作业环节，参建单位包括业主、设计、施工、监理等多个主体，进度管控过程中容易出现数据分散、信息不对称、偏差调整不及时等问题。传统进度管控主要依靠甘特图、关键路径法等工具，辅以人工现场巡查收集数据，不仅效率低下，而且难以直观呈现各工序之间的空间逻辑关系，对于潜在的进度风险也无法提前预判。

随着数字技术与工程建设领域的深度融合，Building Information Modeling（BIM）、物联网、大数据等技术逐步应用于水利水电工程管理，但此类技术多侧重于静态数据的集成，无法实现物理工程与数字模型的实时同步交互。数字孪生技术的出现为解决这一问题提供了新的思路，其核心是构建与物理实体一一对应的数字化孪生体，通过传感器等设备采集实时数据驱动孪生体动态更新，从而实现对物理实体的实时监控、模拟仿真与优化决策。将数字孪生技术应用于水利水电工程进度管控，能够打破各参与方的信息壁垒，实现进度数据的可视化呈现与动态模拟，有效提升进度管控的智能化水平。

二、水利水电工程传统进度管控的痛点分析

2.1 信息集成度低，信息不对称问题突出

水利水电工程进度相关数据分散在不同参建单位的不同管理系统中，设计变更数据、现场施工数据、物资供应数据、移民征地数据等无法实现实时共享，业主与监理单位获取进度信息需要依靠各参建方层层上报，不仅信息传递链条长，而且容易出现数据遗漏、失真等问题。由于无法掌握全面准确的进度数据，管理者难以对整体进度情况做出精准判断，容易导致决策滞后。

2.2 可视化程度不足，工序交叉冲突难发现

传统进度管控大多采用二维图纸结合甘特图的形式呈现进度计划，甘特图只能体现各工序的时间安排，无法反映工序之间的空间位置关系，对于大坝浇筑、隧洞开挖、机电安装等交叉作业较多的环节，很难提前发现不同工序在空间与时间上的冲突。等到现场施工出现冲突后再进行调整，不仅会延误工期，还会造成不必要的成本浪费。

2.3 风险预判能力弱，进度偏差调整被动

水利水电工程施工受水文、气象、地质等不可抗力因素影响较大，传统进度管控方式多为事后纠偏，即在进度出现明显偏差后才采取调整措施，无法提前识别潜在的进度风险，也无法模拟不同风险场景下进度的变化趋势，导致进度管控始终处于被动状态，对于工程总工期的控制能力较弱。

三、数字孪生技术在水利水电工程进度管控中的应用路径

3.1 构建水利水电工程进度数字孪生模型

构建精准的数字孪生模型是实现进度管控的基础，首先需要整合工程的三维地理信息、设计模型、施工组织设计等基础数据，建立与物理工程空间几何特征完全一致的初始数字孪生体。在此基础上，将进度计划分解到每个分部、分项工程甚至单个施工单元，为每个构件赋予时间属性，形成包含空间、时间双维度信息的进度基准模型。同时，开放多源数据接入接口，对接施工现场的物联网传感器、监控摄像头、人员设备定位系统、物资管理系统等，实现施工人员数量、设备运行状态、物资进场量、现场施工进度影像、水文气象等数据的实时采集与自动更新，保证数字孪生模型与物理工程的状态保持同步。

3.2 实现进度的可视化动态管控

基于构建完成的数字孪生模型，管理者可以通过终端设备实现工程进度的三维可视化呈现，从任意视角查看不同区域、不同工序的施工进度，直观对比实际进度与计划进度的偏差。通过时间轴拖动，可以模拟工程从开工到竣工的整个施工过程，提前展示不同施工阶段的现场布局，直观呈现各交叉工序的空间与时间安排，帮助管理者提前发现工序之间的冲突，及时调整施工顺序，避免现场施工冲突造成的工期延误。同时，各参建方可以通过同一个数字孪生平台获取进度信息，打破信息壁垒，实现进度信息的共享与协同，减少因为信息不对称造成的沟通成本与决策失误。

3.3 开展进度风险模拟与预判

基于数字孪生模型积累的海量进度数据，结合机器学习算法，可以构建进度风险预测模型，对影响进度的各类因素进行敏感性分析，识别出对工程总工期影响较大的关键风险因素。通过模拟不同风险场景，比如遭遇超标准洪水、地质条件比设计预判更差、物资供应延迟等情况，计算不同场景下进度的偏差程度，提前预判可能出现的工期延误，帮助管理者提前制定应对预案。当实际施工过程中出现风险因素时，可以快速调用预设预案，调整进度计划，将风险对工期的影响降到最低，实现从被动纠偏到主动防控的转变。

四、数字孪生技术应用的价值与发展展望

将数字孪生技术应用于水利水电工程进度管控，相比传统管控方式具有显著的应用价值：一是提升了进度管控的精准性，通过实时数据更新保证管理者掌握最新的进度情况，避免了信息失真造成的决策失误；二是提升了管控效率，减少了人工收集数据、传递信息的成本，实现了进度管控的自动化、智能化；三是提升了工期风险防控能力，通过提前模拟预判风险，实现了进度管控从事后纠偏向主动防控转变，保障工程能够按期交付。

当前数字孪生技术在水利水电工程中的应用还处于起步阶段，未来还需要进一步提升数据采集的自动化水平，降低传感器等设备的应用成本，优化多源数据融合的算法，提升数字孪生模型的运行效率。同时，需要进一步完善数字孪生平台与参建方现有管理系统的对接标准，推动数据的无障碍共享，充分发挥数字孪生技术在进度管控中的作用，推动水利水电工程管理向数字化、智能化方向升级。

参考文献

- [1] 张建忠, 李庆斌, 胡昱. 数字孪生大坝研究进展与发展展望[J]. 水力发电学报, 2022, 41(1): 1-14.
- [2] 王福生, 刘东海, 李丙洋. 水利工程施工进度管控数字化技术研究现状与展望[J]. 水利学报, 2021, 52(8): 935-946.
- [3] 陶飞, 刘蔚然, 张萌, 等. 数字孪生五维模型及十大领域应用[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(1): 1-18.