

基于数字孪生的水利水电工程地下洞室群施工进度精准管控方法

罗晓东

身份证号: 440921198811273539

DOI:10.61369/WCEST.2025020010

摘要 : 介绍水利水电工程地下洞室群施工数字孪生技术,包括五维模型及优势。阐述针对其施工的建模方法、多源异构数据融合方案、双环仿真框架等。还涉及进度偏差识别、综合评价函数、决策支持引擎等内容。并通过实例验证,对比传统方法体现优势,探讨成本模型与推广应用可行性,总结创新成果及后续研究方向。

关键词 : 数字孪生; 地下洞室群; 施工进度管控

A Method for Accurate Control of Construction Progress of Underground Caverns in Water Conservancy and Hydropower Projects Based on Digital Twin

Luo Xiaodong

ID: 440921198811273539

Abstract : This paper introduces the digital twin technology for constructing underground cavern clusters in water conservancy and hydropower projects, including five-dimensional models and their advantages. It discusses modeling methods, multi-source heterogeneous data fusion strategies, and a dual-loop simulation framework for construction. The paper also covers issues such as progress deviation identification, comprehensive evaluation functions, and decision support engines. Through case studies, it highlights the advantages of this technology over traditional methods, explores the feasibility of cost models and their application, and summarizes the innovative outcomes and future research directions.

Keywords : digital twin; underground cavern group; construction schedule control

引言

随着我国水利水电工程建设的不断推进,对施工进度精准管控的要求日益提高。2021年发布的《关于加快推进水利工程建设高质量发展的指导意见》强调了利用先进技术提升工程建设质量和效率的重要性。数字孪生技术作为一种新兴的数字化手段,在水利水电工程地下洞室群施工进度精准管控中具有重要应用价值。其技术体系架构涵盖物理实体、虚拟模型等多维度,能够应对地下洞室群施工的复杂特点。通过BIM+GIS融合建模、多源异构数据融合等方法,可实现对施工过程的精确模拟和有效管控,同时在进度偏差识别、综合评价及决策支持等方面也具有显著优势,为水利水电工程施工进度管理带来新的思路和方法。

一、数字孪生技术理论基础与工程适用性分析

(一) 数字孪生技术体系架构

数字孪生技术体系架构包含物理实体、虚拟模型、服务系统、孪生数据和连接交互五维模型。物理实体是现实中的对象,虚拟模型是其数字化映射。服务系统为虚拟模型和物理实体提供各种功能支持。孪生数据是两者交互产生的数据,连接交互则确保了物理空间与信息空间的动态耦合。这种动态耦合机制使得数字孪生能够实时反映物理实体的状态,并在多维施工要素表征中具有显著优势。它可以精确地模拟施工过程中的各种复杂情况,为施工进度的精准管控提供有力依据,有助于提高水利水电工程

地下洞室群施工的效率和质量^[1]。

(二) 地下洞室群工程特性与孪生应用适配度

地下洞室群工程具有多工作面并行、时空约束交织、资源冲突频发等特点。多工作面并行使得施工过程复杂多样,增加了管理难度。时空约束交织,如不同洞室的开挖顺序、支护时间等存在严格的时空限制,影响施工进度。资源冲突频发,包括人力、设备等资源在不同工作面的分配不均。从隐蔽工程可视化维度,数字孪生可将地下不可见的工程结构和施工过程呈现出来,有助于及时发现问题^[2]。从施工逻辑数字化维度,能将复杂的施工逻辑进行梳理和数字化表达,更好地规划施工顺序。从进度推演迭代化维度,可根据实际情况不断调整和优化施工进度计划。

二、地下洞室群施工数字孪生建模方法

(一) 多尺度几何建模与语义增强

针对水利水电工程地下洞室群施工数字孪生建模的需求，重点研究BIM+GIS融合的多尺度几何建模与语义增强方法。利用BIM的高精度几何建模能力和GIS的空间分析优势，实现地下洞室群的三维精确呈现^[3]。通过建立基于施工WBS的构件级语义标注规则，对洞室群的各个构件赋予准确的语义信息，便于施工过程中的信息管理和查询。同时，为施工机械、人员等动态要素建立参数化表达模型，能够实时反映其在施工过程中的状态变化，为施工进度的精准管控提供有力支持。这种多尺度几何建模与语义增强方法，有效提升了地下洞室群施工数字孪生模型的准确性和实用性。

(二) 多源异构数据融合机制

为实现多源异构数据融合，需设计标准化接入方案。针对物联网监测数据（如地应力、变形量测）、进度报验数据以及环境感知数据，建立统一的接入标准，确保数据的准确性和一致性^[4]。在此基础上，构建基于本体的数据关联模型，通过对不同数据源的语义理解和逻辑关系梳理，实现数据间的有效关联。同时，设计质量校验算法，对融合后的数据进行质量检测，剔除异常数据，保证数据的可靠性，为地下洞室群施工数字孪生建模提供高质量的数据基础。

三、数字孪生驱动的进度管控体系构建

(一) 施工进度动态仿真方法

1. 离散事件 - 系统动力学混合仿真模型

建立考虑资源供应随机性、地质条件不确定性的双环仿真框架，将离散事件与系统动力学相结合。通过对施工过程中各种事件的离散模拟以及对系统动态行为的分析，能够更准确地反映实际施工情况。在这个框架下，研究工序延误传播机理，分析工序之间的相互影响以及延误如何在不同工序间传递。同时，关注关键路径的动态演变规律，随着施工的进行以及各种不确定因素的影响，关键路径可能会发生变化，通过仿真模型揭示这种变化规律，为施工进度的精准管控提供理论支持^[5]。

2. 虚实交互的进度偏差预警

基于孪生数据比对分析进度偏差识别方法，是通过对实际施工数据与数字孪生模型中的预期数据进行对比。利用两者之间的差异来精准定位进度偏差点^[6]。在此基础上，开发基于时间序列相似度的早期预警指标体系。通过分析时间序列上的数据特征相似性，量化进度偏差的程度和趋势，从而及时发出预警信号。同时，制定分级响应策略。针对不同程度的进度偏差，采取相应的措施，确保施工进度能够得到有效的管控和调整，保障水利水电工程地下洞室群施工的顺利进行。

(二) 进度优化决策支持方法

1. 多目标动态调度模型

构建工期 - 成本 - 安全综合评价函数，综合考虑各因素对工

程进度的影响。工期方面，结合施工计划与实际进展，准确评估时间偏差；成本涉及人力、物力及设备等资源投入；安全因素包括施工环境风险及人员操作规范等。同时，设计考虑设备周转效率与劳动力弹性的改进型NSGA-II优化算法。设备周转效率影响施工连续性，通过合理安排设备调度提高利用率。劳动力弹性则根据工程进度需求灵活调整人员配置，提高劳动效率。该算法能有效求解多目标动态调度模型，为进度优化决策提供支持^[7]。

2. 知识增强的决策推理机制

集成施工规范知识图谱与历史案例库，开发基于案例推理(CBR)与规则推理(RBR)的混合决策支持引擎^[8]。通过知识图谱对施工规范知识进行结构化表示，为决策提供准确的知识基础。同时，利用历史案例库中的相似案例，基于CBR方法快速获取可能的解决方案。结合RBR方法，依据施工规范中的规则对这些方案进行进一步筛选和优化。这种混合决策支持引擎能够充分利用知识和经验，为水利水电工程地下洞室群施工进度的优化决策提供有力支持，提高决策的准确性和效率。

四、工程应用与验证分析

(一) 工程背景与实施路径

1. 典型抽水蓄能电站案例概况

选取某典型抽水蓄能电站地下厂房洞室群进行研究。该工程地质条件复杂，岩石特性、地质构造等因素给施工带来诸多挑战^[9]。施工组织设计需综合考虑洞室布局、施工顺序、施工方法及资源配置等。在进度管理方面，由于地下洞室群施工工序繁多且相互关联，如开挖、支护、衬砌等，任何一个环节延误都可能影响整体进度，因此存在诸多重难点。需精准把握各工序的时间节点和逻辑关系，同时应对地质条件变化等不确定因素对进度的干扰，以实现施工进度的有效管控。

2. 数字孪生系统部署方案

在数字孪生系统部署方案中，硬件感知层部署是关键。需合理设置传感器，以获取地下洞室群施工相关数据，如应力、应变等^[10]。数据传输协议确保数据准确、高效传输，采用合适的协议可避免数据丢失和错误。模型轻量化处理能提高系统运行效率，对复杂的地下洞室群模型进行简化，在保证精度的同时降低计算资源需求。通过这些关键技术的实施，数字孪生系统能够更好地模拟地下洞室群施工过程，为施工进度精准管控提供有力支持。

(二) 进度管控效果评估

1. 仿真精度验证

通过历史施工数据回溯仿真来验证仿真精度。采用平均绝对百分比误差(MAPE)指标对进度预测准确性进行定量评价。MAPE指标能够综合考虑预测值与实际值之间的偏差程度，通过计算预测进度与实际进度的差异占实际进度的百分比，得到一个直观反映预测精度的数值。在水利水电工程地下洞室群施工中，将实际施工过程中的各项进度数据与基于数字孪生技术的预测数据进行对比分析，运用MAPE指标衡量两者的偏离程度，从而有效评估该进度管控方法在仿真精度方面的表现，为进一步优化和

改进提供依据。

2. 管理效能提升分析

对比传统甘特图管理方式，基于数字孪生的管控方法在多方面展现出优势。在响应速度上，数字孪生技术能实时获取地下洞室群施工中的各类数据，快速分析并反馈问题，相比之下，甘特图难以及时反映实际进度变化。资源利用率方面，数字孪生可精准模拟施工过程，优化资源配置，避免资源闲置或过度使用，而甘特图在资源管理上较为粗放。计划符合率上，数字孪生通过对施工环境和进度的实时监测与调整，能更好地保证实际进度与计划相符，甘特图则因缺乏动态调整能力，计划符合率相对较低。

(三) 技术推广可行性研究

1. 技术经济性评价

构建全生命周期成本模型，需综合考虑硬件采购、软件研发、人员培训、系统维护等各项成本。同时，分析系统部署边际成本与工期压缩效益的投入产出关系至关重要。随着系统部署的深入，边际成本可能呈现不同的变化趋势。若边际成本增加但带来的工期压缩效益更为显著，从整体经济性角度可能是可行的。通过量化分析这种关系，可确定最佳的系统部署方案，以实现成本效益的最大化。这不仅有助于合理安排资源，提高工程经济效益，还能为技术的推广应用提供有力的经济支撑，增强其在水利水电工程领域的可行性和竞争力。

2. 行业适配度分析

在水利水电工程行业中，数字孪生技术的推广应用具有较高

的可行性和适配度。从标准规范衔接角度，随着行业数字化发展，相关规范逐渐完善，为数字孪生技术应用提供了制度保障。施工企业数字化基础不断增强，大量企业已引入先进的数字化设备和软件，具备了应用数字孪生技术的硬件和软件条件。同时，在技术复合型人才储备方面，高校和企业都在积极培养既懂水利水电专业知识又掌握数字孪生技术的人才，为技术推广提供了人力支持。这些都表明数字孪生技术在水利水电工程地下洞室群施工进度精准管控中，无论是从行业环境还是企业自身条件来看，都具有良好的适配性和推广应用的可行性。

五、总结

基于数字孪生的水利水电工程地下洞室群施工进度精准管控方法在多方面取得创新成果。在模型构建上，实现了对复杂地下洞室群的精准呈现；算法设计方面，为施工进度管控提供了高效的计算方法；系统集成上，提升了整体管控的协同性与准确性。后续研究应聚焦边缘计算赋能实时仿真以及群体智能辅助决策等方向，以进一步提升管控的实时性与智能性。同时，结合新型基础设施建设背景，数字孪生与建筑产业互联网平台的融合发展具有广阔前景。这将为水利水电工程地下洞室群施工进度管控带来新的机遇与挑战，有望实现更加高效、精准的施工进度管理，推动行业的数字化转型与发展。

参考文献

- [1] 宋强. 复杂环境下地下洞室群施工风险评估及防控措施研究 [D]. 重庆交通大学, 2022.
- [2] 王悦悦. 基于数字孪生的地铁施工安全风险预测与智能管控 [D]. 北京工业大学, 2022.
- [3] 陈以超. 大断面地下洞室群围岩破坏判据及应用 [D]. 青岛理工大学, 2023.
- [4] 齐发. 基于 ILHS 的非贯通随机节理影响的地下洞室群动力稳定分析 [D]. 天津大学, 2022.
- [5] 杨爽. 城市地下洞室群施工围岩稳定性研究 [D]. 重庆交通大学, 2022.
- [6] 赵梦琦, 余佳, 任炳昱, 等. 地下洞室群施工进度纠偏的 SD-DES 模型 [J]. 水力发电学报, 2021, 40(8): 112–123.
- [7] 蔡久顺. 国际某大型水电工程地下洞室群通风布置 [J]. 电力勘测设计, 2021(3): 5–10.
- [8] 胡兴, 刘检华, 庄存波, 等. 基于数字孪生的复杂产品装配过程管控方法与应用 [J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(2): 642–653.
- [9] 马靖, 王泽晨, 赵明, 等. 基于数字孪生的生产单元可视化管控 [J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(5): 1256–1268.
- [10] 郝博, 王明阳, 王建新, 等. 基于数字孪生的智能装配车间管控模式 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021(1): 157–163.