

基于数字孪生的地下工程施工全过程可视化监控系统设计

谢伟¹ 罗冉¹ 张博¹ 任荣¹ 刘夕奇²

1. 中国水利水电第七工程局有限公司 四川 成都 610299

2. 珠江水利委员会珠江水利科学研究院 广东 广州 510611

摘要：本文探讨基于数字孪生的地下工程施工全过程可视化监控系统设计。阐述数字孪生理论、地下工程施工监控特性及可视化支撑技术，设计系统总体架构与核心模块，涵盖数字孪生模型构建、多源数据采集融合、全过程可视化监控及交互预警等。还介绍系统在施工准备、实施、收尾阶段的功能设计与实现路径，为地下工程施工监控提供新方案。

关键词：数字孪生；地下工程；可视化监控；多源数据融合；智能预警

引言：地下工程施工环境复杂，传统监控方式难以满足需求。数字孪生技术凭借实时映射、动态更新等优势，为施工监控带来新契机。其四维结构能紧密贴合施工动态性与阶段性，确保虚拟模型与物理实体高度一致。结合地下工程施工监控多维度要素及特殊环境要求，借助三维建模、数据传输处理等支撑技术，设计可视化监控系统，提升施工管理的安全性与效率。

1 系统设计的理论基础与技术支撑

1.1 数字孪生相关理论

数字孪生构建包含物理实体、虚拟模型、数据链路、服务应用的四维结构，其中物理实体是信息采集的源头，虚拟模型是仿真分析的载体，数据链路承担信息传递的功能，服务应用则将分析结果转化为实际效用。其运行遵循实时映射、动态更新、交互反馈的逻辑，物理实体的状态变化通过数据链路同步至虚拟模型，虚拟模型经运算优化后反向作用于物理实体，形成闭环运行机制^[1]。工程领域应用中，数字孪生需贴合施工的动态性与阶段性，施工不同阶段对应虚拟模型的参数调整与状态演进，从前期规划到中期建设再到后期运维，始终确保虚拟模型与物理实体在时间推进和空间分布上保持高度一致。

1.2 地下工程施工监控的技术特性

施工全过程监控需覆盖多维度要素，不仅要关注围岩变形趋势、结构受力状况、施工进度节点、设备运行状态以及人员所处位置，还需实时掌握各要素间的关联影响。地下环境对监控技术提出特殊要求，监控设备需适应低照度的光线条件，通过特殊感光组件保障清晰成像；适应高湿度的空气环境，借助密封防潮设计避免元件损坏；适应强干扰的信号场景，依靠抗干扰技术维持稳定传输。同时需保障数据采集的连续性，避免因中断

导致关键信息缺失，还要确保采集数据的可靠性，为施工决策提供准确依据。

1.3 可视化与监控相关支撑技术

三维建模技术为监控提供基础模型，通过构建工程结构的三维模型清晰呈现工程实体形态，小到构件连接细节，大到整体布局规划都能精准展现。结合地理信息系统融合地下空间的地质环境信息，包括岩层分布、地下水文等情况，全面展现工程所处环境特征。数据传输与处理技术保障信息高效流转，依托物联网实现多源信息的实时采集，从各类传感器获取的环境、设备、人员数据能快速汇聚。借助边缘计算与云计算的协同作用处理施工产生的海量信息，边缘计算负责就近快速处理实时数据，云计算承担大规模数据的深度分析与存储，提升数据处理效率。可视化渲染技术增强信息呈现效果，实现三维场景的实时渲染与动态效果模拟，运用图表、色彩标注、动画演示等方式实现多维度信息的可视化呈现，让监控信息更直观易懂。

2 系统总体架构设计

2.1 架构设计原则

时空一致性原则要求虚拟模型与施工实体在时间和空间维度保持同步更新。施工实体位置变动、形态改变时，虚拟模型需即时调整，确保监控信息能真实反映现场状况。例如在隧道挖掘中，盾构机每推进一段距离，虚拟模型中的隧道长度、形状等信息同步更新，保障管理者依据模型做决策的准确性。模块化与可扩展性原则倡导按功能划分独立模块，各模块各司其职又可灵活衔接。像数据采集模块专门负责感知设备数据收集，数据分析模块专注处理采集来的信息，互不干扰。当有新监测需求，如增加对地下水位监测，仅需添加对应传感器并关联至数据采集模块，接入数据分析模块适配流程，

便能轻松实现功能升级，也能适配不同规模、不同类型的地下工程场景。多源数据融合原则注重整合地质、施工、监测、设备等多类型数据，打破数据壁垒，将分散信息串联成完整的监控信息链，为施工管理提供全面数据支撑。从地质勘探获取的岩层结构数据，与施工进度、设备运行状态数据整合，能让管理者全面了解工程情况，提前预判诸如因地质松软导致施工进度受阻、设备负荷异常等潜在问题。

2.2 分层架构设计

感知层承担施工全过程数据实时采集的功能，通过部署多种感知设备实现信息获取。围岩应力传感器捕捉岩层受力变化，位移监测仪追踪结构位置偏移，设备状态检测器掌握机械运行情况，人员定位终端记录作业人员动向。数据层负责数据的存储、清洗、转换与融合，实时数据库存放动态更新的监测数据，历史数据库留存施工各阶段过程信息，数据中台开展数据治理工作，同时提供数据共享服务。模型层致力于构建与物理工程实时联动的数字孪生模型，基础几何模型呈现工程结构与地质环境的外观形态，物理属性模型包含材料力学特性、围岩稳定性参数等核心信息，行为仿真模型可进行施工进度模拟和风险演化预测^[2]。应用层聚焦施工全过程的可视化监控与业务应用，可视化监控模块直观展示现场情况，进度管控模块助力把控施工节奏，风险预警模块及时识别安全隐患，协同管理模块促进各环节高效配合。支撑层为系统运行提供基础保障，网络通信依托相关技术搭建稳定传输通道，计算资源整合边缘节点与云服务器的处理能力，安全防护通过数据加密、权限管理等手段保障系统安全。

3 系统核心模块设计

3.1 数字孪生模型构建模块

基础模型搭建融合两种技术，构建涵盖工程结构、地质分层、周边环境的三维基础模型。模型中清晰呈现隧道衬砌、支护结构等工程实体，准确标注不同岩层分布、地下管线等地质与周边环境要素，同时定义模型构件的属性信息，包括各类构件采用的材料、具体尺寸以及施工先后时序。模型实时更新机制依托感知层采集的施工数据运作，自动更新模型的几何形态，随着开挖面不断推进、结构浇筑逐步完成，模型对应部位的形态同步改变；同步更新模型的物理属性，围岩受力变化、结构沉降情况等数据均能在模型中实时体现。多尺度模型适配提供三种尺度的模型切换，宏观尺度模型展现整体工程进度，让管理者快速掌握工程整体推进情况；中观尺度模型聚焦分部分项工程状态，清晰呈现某一施工段

或某一结构的建设详情；微观尺度模型细化至关键构件受力，助力精准把控核心部位施工质量，满足不同场景下的监控需求。

3.2 多源数据采集与融合模块

数据采集接口设计开发与各类传感器、施工设备、管理系统的标准化接口，实现各类信息自动接入。针对地下复杂环境，支持有线与无线混合采集方式，在信号稳定区域采用有线传输保障数据高效传递，在布线困难区域通过无线方式确保采集不中断。数据预处理功能对采集到的信息进行处理，去除干扰信号实现降噪，剔除不符合常规范围的异常值，转换不同格式信息使其统一，保证信息质量；按施工阶段与监控要素分类梳理信息，形成条理清晰的结构化信息资产。数据融合算法设计采用时空融合算法，统一不同来源信息的时间标记与空间坐标，让各类信息在时间和空间维度上保持一致；通过关联分析挖掘多维度信息间的内在联系，探寻施工进度快慢与围岩变形程度之间的关联等，为施工决策提供更全面的依据^[3]。

3.3 全过程可视化监控模块

施工进度可视化将施工计划与实际进度映射至数字孪生模型，通过色彩标注展示各工序进展，绿色代表已完成工序，黄色标识进行中工序，红色提示滞后工序；动态模拟施工流程，直观呈现关键线路推进状态，让管理者清晰了解各环节衔接情况。施工状态可视化在虚拟模型中叠加实时监测到的信息，用应力云图直观展示围岩受力分布，用位移曲线清晰标注结构沉降趋势；对施工设备进行三维建模，盾构机、装载机等设备的位置、运行参数与工作状态均能在模型中实时显示。风险隐患可视化对识别的风险点在模型中进行高亮标注，明确指出围岩塌方风险、管片开裂风险等隐患位置；用动态动画模拟风险演化过程，结合预警等级用不同颜色闪烁提醒，蓝色表示提示性预警，橙色代表警告性预警，红色为紧急预警。

3.4 交互与预警模块

人机交互功能支持对模型进行灵活操作，通过旋转、缩放可从不同角度观察模型，剖切操作能深入查看隧道内部等隐蔽部位的施工状态。系统还提供数据查询接口，点击模型中的任意构件，即可调取该部位对应的监控数据与施工记录，实现模型与数据的联动查询。新增快捷操作面板，可一键切换常用监控视角，预设施工关键节点的模型展示方案，提升操作便捷性，适配现场快速管控需求。智能预警功能预先设定各监控指标的安全阈值范围，当监测数据超出阈值时，系统会自动触发

预警机制。通过可视化界面弹窗、现场声光提醒等多种方式推送预警信息，同时关联相应的风险处置建议，为管理人员及时采取应对措施提供支持。预警信息可同步推送至相关人员移动终端，确保不在监控室时也能及时接收预警，助力高效防范施工风险。

4 系统功能设计与实现路径

4.1 施工准备阶段功能

虚拟施工模拟依托数字孪生模型预演施工流程，从开挖、支护到衬砌等各环节均能在虚拟场景中完整呈现，小到每台设备的进场顺序，大到各工序的衔接时长都清晰可见，据此优化施工方案中的工序衔接顺序与资源调配计划，避免机械闲置、人员窝工等问题。针对不同地质条件，如松软岩层、破碎围岩、富水地层等，分别模拟施工效果，观察不同支护方式下的结构稳定性，提前识别各场景下可能出现的工序冲突、设备干涉、空间占用矛盾等潜在问题。监控方案数字化配置在模型中精准规划传感器布设位置，结合工程结构特点确定隧道拱顶、边墙等关键监测点，同时根据监测要素重要程度设定合理监测频率，重要部位加密监测，次要部位适当降低频率，确保数据采集高效且全面；根据施工各阶段重点差异，预设对应监控重点与可视化展示方式，如开挖阶段重点展示围岩变形，衬砌阶段侧重呈现结构受力，为后续施工监控做好准备。

4.2 施工实施阶段功能

实时动态监控将施工进度、结构状态、设备运行、人员位置等信息实时转化为可视化内容呈现在数字孪生模型中，进度用不同色彩区分完成度，结构状态通过动态曲线展示变化趋势。支持电脑、平板、移动端等多终端访问，现场施工人员可通过移动设备随时查看关键数据，及时调整作业节奏；远程管理人员也能借助电脑实时掌握施工全貌，发现异常可快速下达指令，便于实现现场与远程的协同管控。多维度协同管理通过模型共享让建设、施工、监理等多方人员同步获取工程信息，各方可在虚拟场景中开展远程会商，借助模型标注功能圈出问题区域，结合语音交流充分交换意见；对施工中发

现的质量缺陷、安全隐患等问题进行详细标注，明确整改责任部门、整改要求与完成时限，通过模型实时更新整改进展，追踪整改进度直至问题解决，形成从问题发现到解决的闭环管理。

4.3 施工收尾阶段功能

施工过程回溯依托存储的历史信息与存档模型，重现施工全过程各关键节点状态，如隧道贯通、主体结构完工、附属设施安装等重要时刻的工程样貌，甚至能还原当时的施工环境参数与人员配置情况。按时间轴系统梳理各阶段监控信息，将每日施工数据与对应时段的模型状态精准关联，形成完整的施工过程数字化档案，档案包含文字记录、图像资料与模型快照，为后续工程复盘、经验总结提供详实依据。工程验收辅助在数字孪生模型中整合验收所需的结构检测信息、施工记录、材料检测报告等各类资料，通过分层展示、动态标注等可视化方式清晰展示验收要点，让验收人员快速把握结构强度、尺寸精度等关键检查内容；将设计图纸与实际施工模型进行逐段比对，用高亮线条标记尺寸偏差、结构差异等情况，自动生成偏差统计表格，辅助开展验收偏差分析，提升验收工作效率与准确性。

结束语

基于数字孪生的地下工程施工全过程可视化监控系统设计，融合多种先进技术，构建了完整的系统架构与功能模块。从施工准备到收尾阶段，系统均能发挥重要作用，实现实时监控、协同管理、过程回溯与验收辅助等功能。该设计有助于提升地下工程施工的智能化水平，保障施工安全与质量，为同类工程提供有价值的参考与借鉴。

参考文献

- [1]刘晋峰.高层建筑地下工程施工技术关键要素探究[J].现代物业：中旬刊,2021,20(05):170-170.
- [2]程蓉.建筑工程地下工程防水混凝土的施工技术[J].中国科技投资,2022,(22):134-136.
- [3]牛忠华.建筑地下工程防水施工技术分析探讨[J].居舍,2023,(18):50-52.