

# 基于数字孪生的桥梁施工过程实时监控与仿真分析

吴志成

杭州市交通工程集团有限公司 浙江 杭州 310000

**摘要：**随着桥梁建设规模不断扩大、施工环境日益复杂，对施工过程的高效监控与精准仿真需求愈发迫切。本文围绕基于数字孪生的桥梁施工展开研究，先剖析数字孪生技术理论基础，涵盖其概念、在桥梁施工的适用性及优势。接着阐述桥梁施工数字孪生模型构建方法，包括物理、虚拟、数据等层面的设计。随后介绍实时监控与仿真分析体系，通过工程应用案例验证，该技术可显著提升施工效率、降低安全风险，实现精细化管理。

**关键词：**数字孪生；桥梁施工过程；实时监控；仿真

**引言：**在交通基础设施建设蓬勃发展的当下，桥梁作为关键枢纽，其施工质量和安全至关重要。然而，桥梁施工过程复杂多变，受多因素影响，传统监控手段难以及时、全面掌握施工状态，易引发质量和安全问题。数字孪生技术凭借其物理实体与虚拟模型实时交互、数据驱动精准模拟等特性，为桥梁施工监控与仿真带来新契机。本文旨在探讨基于数字孪生的桥梁施工过程实时监控与仿真分析方法，以提升施工管理水平，保障桥梁建设安全高效推进。

## 1 数字孪生技术理论基础

### 1.1 数字孪生概念与核心要素

(1) 定义：数字孪生是融合物理实体、虚拟模型、数据交互与服务应用的闭环系统，通过实时映射物理实体状态，在虚拟空间构建动态等效模型，依托数据交互实现虚拟仿真、分析优化，最终反哺物理实体的全生命周期管理，形成“物理-虚拟-物理”的双向交互闭环，为决策提供精准依据。(2) 关键技术：依赖物联网 (IoT) 采集物理实体实时数据，大数据技术处理海量多源信息，云计算提供高效算力支撑，人工智能实现数据挖掘与智能预测，BIM/GIS融合技术则保障虚拟模型的空间精准性与场景完整性，多技术协同构成数字孪生运行的核心支撑体系。

### 1.2 数字孪生在桥梁施工中的适用性分析

(1) 施工过程动态性对实时监控的需求：桥梁施工涉及多工序交叉、环境复杂多变，结构状态随施工进度动态变化，传统监控难以及时捕捉风险点，数字孪生可实时同步施工数据，动态更新虚拟模型，满足对施工进度、结构安全的实时监控需求。(2) 多源异构数据融合与模型更新的挑战：施工中产生的地质、机械、人员等数据格式各异、来源分散，传统技术难以有效融合，且模型更新滞后，数字孪生通过统一数据接口与智能融合

算法，实现多源数据整合，同时驱动虚拟模型实时更新，应对数据与模型协同难题<sup>[1]</sup>。

### 1.3 与现有技术的对比优势

(1) 相比传统BIM模型的静态性，数字孪生支持动态演化：传统BIM模型多为固定设计状态，无法反映施工中的实时变化，数字孪生可根据实时数据动态调整虚拟模型，模拟不同施工工况下的结构响应，实现全流程动态管控。(2) 相比传感器独立监控，数字孪生实现全局关联分析：传感器监控多局限于局部参数，难以关联整体结构状态，数字孪生整合全桥传感器数据，构建全局模型，可分析局部变化对整体结构的影响，提升风险预警的全面性与准确性。

## 2 桥梁施工数字孪生模型构建

### 2.1 物理实体层建模

(1) 桥梁结构分解：按照桥梁施工逻辑与结构特性，将实体拆解为基础、墩身、梁体、桥面系等核心单元，每个单元细化至构件级（如基础的桩基、承台，梁体的腹板、顶板），并关联材料属性（强度等级、弹性模量）、施工参数（浇筑方量、养护周期），构建结构化实体信息库，为虚拟映射提供精准物理参照。(2) 施工工艺流程建模：针对不同施工工法（如悬臂浇筑、顶推施工），梳理关键工序节点（如挂篮安装、钢筋绑扎、混凝土浇筑、预应力张拉），明确各工序的时间逻辑、资源需求（人员、机械、材料）及衔接条件，采用流程图与时序模型结合的方式，将动态施工过程转化为可量化、可仿真的数字流程，实现施工进度与实体结构的协同建模。

### 2.2 虚拟模型层设计

(1) 多尺度建模方法：整合几何模型（基于BIM技术构建毫米级精度的结构外形与构件装配关系）、力学模型（采用有限元软件建立结构力学模型，模拟施工阶段应力、应变分布）、环境模型（依托GIS技术叠加施工区域地形、

气象、交通等环境要素),通过模型耦合技术实现不同尺度、不同维度模型的协同关联,满足施工监控、力学分析、环境适配等多场景需求<sup>[2]</sup>。(2)模型轻量化与实时渲染技术:采用LOD(细节层次)技术简化非关键区域模型精度,通过三角化压缩、纹理烘焙等方式降低模型数据量;引入GPU加速渲染技术,结合实时光影模拟、材质贴图优化,确保虚拟模型在动态更新过程中保持流畅可视化效果,支持施工人员实时查看模型状态。

### 2.3 数据驱动层实现

(1)传感器网络部署:根据桥梁结构关键部位(墩顶、梁端、支座)与施工风险点,部署多类型传感器,包括应力传感器(监测结构内力)、应变传感器(捕捉局部变形)、位移传感器(跟踪构件沉降与偏移)、环境传感器(采集温度、湿度、风速),形成覆盖结构安全与施工环境的全域感知网络。(2)数据传输与预处理:采用5G+边缘计算技术实现传感器数据的低延迟传输,边缘节点对原始数据进行初步处理(如剔除异常脉冲信号、填补数据缺失值);通过数据清洗算法(如基于统计的异常值检测)过滤噪声数据,再利用特征提取技术(如小波变换、主成分分析)提取关键数据特征,为模型更新提供高质量数据输入。

### 2.4 孪生体动态映射机制

(1)数据-模型同步更新策略:采用卡尔曼滤波算法融合多源传感器实时数据与模型预测值,修正虚拟模型状态偏差;结合机器学习预测模型(如LSTM神经网络),基于历史施工数据与实时监测数据,提前预测结构变形趋势,驱动虚拟模型超前更新,实现“实时同步+预测性更新”双重保障<sup>[3]</sup>。(2)异常数据识别与修正方法:建立数据质量评估指标(如数据波动范围、采集频率稳定性),通过阈值判断与聚类分析识别异常数据(如传感器故障导致的突变值);对异常数据采用插值法(如线性插值、三次样条插值)进行修正,或基于相邻传感器数据与结构力学约束条件反推合理值,确保虚拟模型映射的准确性。

## 3 基于数字孪生的桥梁施工过程实时监控与仿真分析方法

### 3.1 实时监控系统设计

(1)监控指标体系:结构安全指标聚焦桥梁关键部位,涵盖基础沉降量(限值 $\leq 5\text{mm}/\text{天}$ )、墩身倾斜度(控制在1‰以内)、梁体应力应变(不超过设计值80%);施工进度指标细化至工序节点,如悬臂浇筑段施工周期(单节段 $\leq 7\text{天}$ )、预应力张拉完成率;资源调配指标包含施工机械利用率(目标 $\geq 85\%$ )、人员投入与工序匹配度、材料进场及时率,形成多维度、量化的监控指

标体系,为施工管控提供明确依据<sup>[4]</sup>。(2)可视化监控平台开发:依托数字孪生技术搭建3D可视化平台,实时叠加施工进度信息形成4D动态展示,直观呈现桥梁结构成型过程与工序推进状态;平台内置智能报警功能,针对不同指标设定分级阈值,如梁体应力超设计值90%触发黄色预警、超100%触发红色预警,预警信息通过平台弹窗、短信同步推送至管理人员,实现风险快速响应。

### 3.2 施工仿真分析模块

(1)施工过程模拟:针对悬臂浇筑施工,在虚拟模型中模拟挂篮前移、模板安装、混凝土浇筑、预应力张拉全流程,精确计算各工序对梁体线型的影响;对顶推施工,仿真模拟顶推装置受力、梁体位移轨迹及与导梁的协同动作,预判施工中可能出现的卡顿、偏位问题,优化顶推速率(建议2-5m/天)与纠偏方案。(2)风险预测与优化:通过数字孪生模型输入不同施工参数(如混凝土浇筑速度、张拉控制力),仿真分析结构应力变化规律,预测参数异常可能引发的开裂、变形风险;结合历史施工数据与实时监测结果,利用AI算法优化参数,如将悬臂浇筑混凝土坍落度调整至 $180 \pm 20\text{mm}$ ,提升施工质量与结构安全性<sup>[5]</sup>。

### 3.3 多场景仿真案例

(1)正常施工场景下的结构响应分析:在虚拟模型中复现正常施工工况,分析各工序衔接时的结构受力状态,如墩身浇筑完成后承受梁体荷载的应力分布,验证结构承载能力是否满足设计要求,同时模拟施工机械作业对周边结构的影响,优化机械停放位置与作业顺序,避免局部应力集中。(2)极端工况下的仿真预警:针对8级以上大风工况,仿真梁体受风荷载作用的振动幅度与位移变化,若预测位移超15mm,提前预警并建议暂停悬臂浇筑作业;模拟温度骤变(日温差 $\geq 15^\circ\text{C}$ )场景,分析梁体温度应力分布,预警裂缝风险,提出覆盖保温被、调整浇筑时间(建议早6-10点)等应对措施。(3)施工误差累积效应的仿真评估:在虚拟模型中引入各工序常见误差(如模板安装偏差 $\pm 3\text{mm}$ 、钢筋保护层厚度偏差 $\pm 5\text{mm}$ ),模拟误差累积对桥梁线型、结构受力的影响,若预测梁体线型偏差超10mm,追溯误差来源(如模板变形),优化施工工艺(如增加模板刚度检测频次),避免误差叠加影响桥梁整体质量。

## 4 工程应用案例分析

### 4.1 案例背景

选取某跨江大跨度斜拉桥工程,主跨径420m,采用双塔双索面混凝土斜拉桥结构,施工阶段包含主塔浇筑、主梁悬臂浇筑(共32个节段)、斜拉索张拉等关键工序。

工程地处亚热带季风区，汛期水位波动大、夏季台风频发，且施工区域通航繁忙，对施工安全、进度管控及环境适应性要求极高，故引入数字孪生技术实现全流程精细化管理。

#### 4.2 数字孪生系统部署

(1) 硬件架构：在主塔关键截面、主梁各节段及斜拉索锚点部署传感器网络，含120个应力应变传感器、30个位移监测传感器（精度0.1mm）、15个环境传感器（监测风速、温度、水位）；在施工项目部部署2台边缘服务器，实现数据实时预处理与本地存储；云端平台采用阿里云服务器，配置8核16G算力，支撑虚拟模型运算与数据可视化展示，形成“传感器-边缘端-云端”三级硬件架构。(2) 软件系统集成：以Autodesk Revit构建桥梁BIM几何模型，通过ANSYS建立主梁、主塔有限元力学模型，集成ArcGIS环境模型；自主开发自定义分析模块，实现BIM与有限元模型的数据交互、施工进度模拟及风险预警功能，软件系统通过API接口打通数据链路，确保多平台协同运行。

#### 4.3 实时监控与仿真结果

(1) 施工阶段关键参数的实时监测数据：主梁悬臂浇筑至16号节段时，实时监测显示梁端最大竖向位移为8.2mm（设计限值10mm），主塔根部最大压应力为18.5MPa（设计限值20MPa），斜拉索张力波动范围 $\pm 3\%$ ，数据均处于安全区间；汛期水位超警戒值1.2m时，传感器实时捕捉基础沉降0.3mm，无异常变形。(2) 仿真结果与实测数据的对比验证：对主梁10号节段应力进行仿真与实测对比，仿真计算应力值16.8MPa，实测值17.2MPa，相对误差2.3%；梁端位移仿真值7.9mm，实测值8.2mm，相对误差3.7%，误差均小于5%，验证了数字孪生模型的准确性。

#### 4.4 应用效果评价

(1) 施工效率提升：通过数字孪生动态调整施工计划，解决主梁浇筑与斜拉索张拉的工序冲突，工期较计划缩短18天；施工机械利用率从78%提升至91%，混凝土材料损耗率降低3.2%，实现资源高效调配。(2) 安全风险降低：系统累计发出预警12次，其中8级大风预警3次、梁体应力超限预警2次，均及时采取停工或参数调整措施，未发生安全事故；隐患排查效率较传统方式提升60%，如通过模型仿真提前发现模板支撑刚度不足问题，避免结构开裂风险。

#### 结束语

综上所述，基于数字孪生的桥梁施工过程实时监控与仿真分析，为桥梁建设领域带来了创新性的变革。通过数字孪生技术构建的虚拟模型与物理桥梁施工过程的紧密交互，实现了施工状态的实时、精准把控，有效克服了传统监控手段的局限性。该方法不仅提升了施工管理的效率与质量，还增强了安全风险防控能力。展望未来，随着技术的不断进步，数字孪生将在桥梁施工全生命周期中发挥更大价值，助力行业实现智能化升级。

#### 参考文献

- [1]张军圣.基于数字孪生技术的公路桥梁施工全过程模拟与优化[J].智能建筑与智慧城市,2025,(07):93-94.
- [2]吴花锋,李栋.基于数字孪生的大型桥梁施工物料调配路径智能规划方法[J].建筑机械,2024,(12):238-240.
- [3]朱军,朱庆,祝兵,等.数字孪生驱动的桥梁智能建造方法[J].遥感学报,2024,28(05):134-135.
- [4]李庆.基于数字孪生的桥梁施工技术[J].施工技术(中英文),2024,53(09):111-114.
- [5]董帅.数字孪生技术在大型桥梁施工全过程仿真与监控中的应用[J].城镇建设,2025,(04):67-68.