

数字孪生技术在市政桥梁运维中的应用研究

施龙朋

江西合称建筑工程有限公司 江西赣州 341000

摘要：本文针对市政桥梁运维管理中存在的监测滞后、风险预警不足、养护效率低下等问题，研究数字孪生技术在桥梁全生命周期运维中的应用模式与关键技术。通过构建桥梁数字孪生体，整合多源感知数据、三维建模与仿真分析，实现对桥梁结构状态的实时可视化监测、性能退化预测、病害诊断与养护决策优化。研究以某城市立交桥为案例，验证了数字孪生技术在提升桥梁运维智能化水平、降低养护成本、保障结构安全方面的有效性，为市政桥梁运维管理的数字化转型提供理论参考与实践路径。

关键词：市政桥梁；数字孪生；运维管理；智能监测；养护决策

引言

市政桥梁是城市交通网络的关键节点，其安全稳定运行直接关系到城市功能的正常发挥。传统桥梁运维管理依赖人工巡检与定期检测，存在数据采集不全面、状态评估滞后、风险预警能力薄弱等问题，难以满足现代化城市对基础设施高效运维的需求。数字孪生技术通过物理实体与虚拟模型的实时交互，实现对复杂工程系统的动态感知、模拟分析与优化决策，为桥梁运维提供了全新的技术范式。

一、数字孪生技术在桥梁运维中的理论框架研究

（一）数字孪生技术的核心内涵与特征解析

数字孪生技术作为一种新兴的数字化解决方案，其核心在于构建物理空间与虚拟空间的双向映射体系。该技术通过建立数据交互层作为桥梁，实现物理实体与其数字化模型之间的实时联动与协同优化。从技术特征来看，数字孪生主要体现在以下关键维度：首先是多维度建模能力，涵盖几何形态、物理特性、行为模式和规则约束等多个层面的建模；其次是全生命周期数据集成功能，能够完整记录和整合从设计、施工到运营维护各个阶段的数据；再次是实时动态仿真能力，可以基于实时数据进行动态模拟；最后是智能决策优化功能，通过算法模型提供最优解决方案。这些特征共同构成了数字孪生技术的核心价值^[1]。

（二）桥梁运维数字孪生系统架构设计

针对桥梁运维的特殊需求，数字孪生系统采用“五维一体”的集成化架构设计：

物理层：通过布设高密度传感器网络，包括应变计、加速度计、位移计以及各类环境监测设备等，实现对桥

梁结构状态与环境参数的全面感知和实时采集；

数据层：构建覆盖桥梁全生命周期的综合数据库，系统整合设计阶段的图纸资料、施工过程的详细记录、定期巡检的检测报告以及长期监测的时序数据；

模型层：建立多尺度、多维度的虚拟模型体系，包括精细化的三维几何模型、精确的有限元力学模型以及基于损伤机理的病害演化预测模型；

仿真层：依托实时采集的数据流，驱动虚拟模型进行动态仿真计算，模拟桥梁在实际荷载作用下的结构变形特征、应力分布规律以及潜在病害的扩展趋势；

应用层：开发面向工程实践的系列功能模块，包括监测数据可视化展示平台、结构性能评估系统、安全风险预警机制以及科学养护决策支持工具等^[2]。

（三）数字孪生技术与桥梁运维需求的适配性研究

深入分析表明，桥梁运维的核心业务需求与数字孪生技术的独特优势具有高度的契合性。桥梁运维重点关注实时状态监测、故障精准诊断和剩余寿命预测等关键问题，而数字孪生技术恰好具备动态感知、仿真分析和优化决策等突出优势。通过数字孪生技术的应用，可以在以下方面显著提升桥梁运维水平：（1）实现监测数据的时空关联分析，将离散的监测数据转化为连续的时空演化规律；（2）支持病害演化过程的可视化模拟，直观展示潜在病害的发展趋势和影响范围；（3）开展养护方案的虚拟预演与效果评估，通过数字仿真验证不同养护策略的实际效果，为决策提供科学依据。这种技术适配性为数字孪生在桥梁运维领域的深入应用奠定了坚实基础。

二、桥梁数字孪生体构建关键技术体系研究

（一）多尺度多物理场协同建模技术

几何建模方面：综合应用高精度激光扫描技术与建

筑信息模型（BIM）技术，构建具有毫米级精度的全桥三维几何模型，完整呈现桥梁各构件的几何特征，包括支座构造细节、伸缩缝装置、钢筋布置等关键部位；物理建模方面：基于有限元分析理论框架，建立考虑材料非线性特性、边界条件动态变化的桥梁结构力学模型，实现从宏观到微观的多尺度力学表征；行为建模方面：通过集成车辆动荷载、温度梯度效应、环境腐蚀作用等多重影响因素，构建能够准确反映桥梁变形特征和应力演化规律的行为模型，为结构性能评估提供理论基础^[3]。

（二）多源异构数据智能融合方法

采用“边缘计算+云计算”的混合架构设计，构建高效的数据处理与存储体系：在数据采集环节，利用5G通信技术与北斗卫星导航系统，实现各类传感器监测数据的低延迟、高可靠性传输；在数据预处理环节，综合应用卡尔曼滤波算法与小波变换技术，有效去除监测数据中的噪声干扰，提高数据质量；在数据融合环节，引入联邦学习等先进机器学习技术，将结构监测数据、人工巡检图像、历史养护记录等多源异构数据进行深度整合，建立统一的数据标准和信息表达体系，为数字孪生提供可靠的数据支撑。

（三）实时交互与动态仿真引擎开发

本项目基于Unity3D三维引擎平台，深度开发具备高度沉浸式体验的虚实融合交互系统。系统采用经过特殊优化的TCP/IP网络通信协议架构，通过建立稳定可靠的数据传输通道，实现物理实体与虚拟数字孪生模型之间的毫秒级实时数据同步交互^[4]。在核心算法层面，系统集成国际领先的多体动力学仿真计算引擎，运用高阶数值积分方法和自适应网格划分技术，能够精确模拟大型桥梁结构在车辆动载、地震波激励以及风荷载等复杂多物理场耦合工况作用下的非线性动态响应特性。同时，通过并行计算优化和GPU加速技术，显著提升计算效率，将关键仿真步长严格控制在0.1秒的时间精度范围内，从而确保整个系统运行的实时性能指标和用户交互体验的流畅度达到最优水平。

三、基于数字孪生的桥梁智能运维关键应用研究

（一）全息可视化实时监测系统

通过数字孪生模型的三维可视化界面，动态展示桥梁关键部位的应变分布、位移变化、振动频率等关键参数，当监测数据接近预设安全阈值时，系统自动触发多级预警机制，在虚拟模型中突出显示异常部位。例如，当检测到某桥段支座沉降量超过警戒值时，系统不仅会在三维模型中高亮显示该支座位置，还会自动叠加显示该支座的历史沉降曲线数据以及基于时间序列分析的未

来趋势预测，为管理人员提供直观的决策依据。

（二）结构性能退化智能预测模型

依托数字孪生体积累的长期监测大数据，采用长短期记忆（LSTM）神经网络构建桥梁性能退化预测模型。模型输入参数包括混凝土碳化速率、钢筋锈蚀程度、荷载累计损伤效应、环境腐蚀因子等多维特征，输出结果为桥梁剩余使用寿命的精确预测值^[5]。经过大量工程案例验证，该预测模型的平均误差可稳定控制在5%以内，显著优于传统经验评估方法。

（三）智能养护决策支持系统

整合桥梁性能预测结果与养护资源约束条件，建立以“养护成本最小化”和“结构可靠度最大化”为双目标的优化决策模型，自动生成包括最佳养护时机选择、最优养护范围确定、适宜工艺方案比选等要素的养护决策方案。通过数字孪生系统的虚拟仿真功能，可预先模拟不同养护方案的实施过程与效果，实现养护决策的“先试后施”，显著提升养护决策的科学性和经济性。

四、案例应用与效果分析

（一）工程概况

选取港珠澳大桥珠海连接线青州航道桥为案例，该桥为双塔双索面钢箱梁斜拉桥，主跨550m，是连接珠海与港澳的关键交通枢纽，2018年通车运营，设计使用寿命120年。运营过程中面临海洋高盐雾腐蚀、日均3000+车次重载交通荷载、台风频发等复杂工况，此前已出现斜拉索PE护套轻微老化、钢箱梁局部焊缝应力集中等问题。为保障桥梁安全稳定运行，项目部署了涵盖结构、环境、荷载的多维度监测系统，共安装传感器480个，包括：斜拉索索力传感器64个、钢箱梁应变传感器120个、位移监测GNSS设备16台、盐雾浓度监测仪8台、车流量称重系统4套，数据采集频率最高达10Hz，通过5G专网实现数据低延迟传输（时延≤20ms）。

（二）数字孪生系统实现

1. 模型构建

采用“激光扫描+BIM+有限元”融合技术构建多尺度数字孪生体：

几何模型：通过TrimbleTX6激光扫描仪获取桥梁全尺寸点云数据（精度达±2mm），结合Revit软件构建包含斜拉索、钢箱梁、支座、桥墩等构件的1:1三维几何模型，细化至螺栓、焊缝等微观结构；

物理模型：利用ANSYSMechanical建立钢箱梁、塔柱的有限元力学模型，考虑海洋环境下材料腐蚀的力学性能衰减规律，引入“腐蚀-应力耦合”分析模块；

行为模型：整合近5年的交通荷载数据（车型分布、

轴重统计)、气象数据(台风路径、温度变化),构建桥梁变形、索力演化的行为预测模型,实现荷载-响应的动态映射。

2. 数据融合与系统集成

搭建“边缘-云”协同数据处理架构:

边缘层:在桥梁管理站部署边缘计算节点,采用卡尔曼滤波算法实时过滤传感器噪声数据(如剔除台风天气下位移监测的异常波动值),对关键数据(如索力突变)进行本地预警;

云层:将处理后的监测数据、历史养护记录(2018-2023年共32次养护作业)、设计图纸(含材料性能参数)接入港珠澳大桥智慧运维云平台,利用联邦学习技术实现多源数据的标准化融合,形成统一的“桥梁健康数据库”;

系统集成:开发基于Unity3D的可视化交互平台,通过TCP/IP协议实现物理传感器数据与虚拟模型的实时同步,点击虚拟模型任意构件即可查看其实时监测值、历史变化曲线及养护记录。

3. 核心功能开发

重点实现三大核心应用模块:

结构健康监测模块:实时展示斜拉索索力(正常范围2800-3200kN)、钢箱梁应力(限值 $\leq 250\text{MPa}$)、支座沉降(限值 $\leq 5\text{mm}$)等关键指标,当某根斜拉索索力连续30分钟低于2800kN时,系统自动在虚拟模型中高亮该拉索,并推送预警信息至运维人员移动端;

病害演化仿真模块:基于LSTM神经网络,输入盐雾浓度、荷载累计值、材料劣化系数等参数,模拟斜拉索PE护套老化速率、钢箱梁焊缝腐蚀扩展过程,预测未来5年的病害发展趋势;

智能养护决策模块:结合桥梁性能预测结果与养护资源(人员、设备、预算)约束,生成多方案对比:如“斜拉索PE护套局部更换”方案(成本80万元,工期15天,结构可靠度提升8%)与“整体护套更新”方案(成本320万元,工期45天,结构可靠度提升15%),通过数字孪生仿真预演不同方案实施后的结构响应,辅助管理人员选择最优方案。

(三) 应用效果评估

1. 监测效率与预警能力提升

实时性:传统人工巡检需每月开展1次,单次耗时3天,而数字孪生系统实现24小时实时监测,异常响应时间从传统的24小时缩短至5分钟,2023年台风“泰利”过境时,系统提前1小时预警钢箱梁横向位移超标,为应急加固争取了关键时间;

全面性:监测覆盖范围从传统的“重点构件抽样”扩展至全桥98%的关键部位,2022年通过系统发现2处

此前人工巡检未察觉的钢箱梁内部隔板应力集中问题,避免了病害扩大。

2. 性能预测精度优化

通过对比实际病害发展与系统预测结果,桥梁剩余寿命预测误差仅2.8%,远优于传统基于经验公式的预测方法(误差15%-20%);斜拉索索力变化趋势预测准确率达96%,为养护时机选择提供了精准数据支撑。

3. 经济效益与管理效能提升

成本节约:通过优化养护方案,避免了3次不必要的大规模检修,年养护成本从1800万元降至1300万元,降低27.8%;

管理升级:形成“监测-预警-诊断-养护-评估”的闭环管理流程,运维人员效率提升40%,该系统已作为标杆案例纳入《公路斜拉桥数字孪生运维技术指南》,为国内大型桥梁智能化运维提供了实践参考。

五、结论与展望

数字孪生技术在市政桥梁运维中的应用,有效解决了传统管理模式下的诸多痛点问题。通过构建多维度的数字孪生体,实现了对桥梁结构状态的全面感知和精准预测,显著提升了运维管理的智能化水平。特别是在复杂环境下的长期性能监测与病害预警方面,展现出独特优势。

展望未来,随着人工智能、物联网等新技术的不断发展,数字孪生在桥梁运维领域的应用将更加深入。建议进一步加强以下几个方面研究:一是深化数字孪生与新一代信息技术的融合创新;二是完善相关技术标准体系;三是探索数字孪生在更广泛基础设施运维场景中的推广应用。这些工作的推进将为智慧城市建设和基础设施运维的现代化转型提供有力支撑。

参考文献

- [1] 陈华鹏, 鹿守山, 雷晓燕, 等. 数字孪生研究进展及在铁路智能运维中的应用[J]. 华东交通大学学报, 2021.
- [2] 赖传可, 胡荣群. VR技术在船舶数字孪生运维系统中的应用[J]. 舰船科学技术, 2021(022): 043. DOI: 10.3404/j.issn.1672-7649.2021.11A.071.
- [3] 李婷婷, 刘锐, 常青, 等. 浅析基于数字孪生技术的智慧医院后勤运维场景应用[J]. 智能建筑电气技术, 2022(002): 016.
- [4] 陈彦, 贾志凯, 孙鹏, 等. 基于数字孪生技术的动车组运维管理系统架构研究[J]. 铁路计算机应用, 2021.
- [5] 张晓刚, 王策, 龙娜, 田钺, 李建康, 王道累. 数字孪生技术架构及在输变电设备运维中的应用[J]. 上海电力大学学报, 2022, 38(5): 507-512.