

基于数字孪生技术的桥梁全寿命周期结构健康监测框架搭建

王志远^{1*}

(1. 郑州工业应用技术学院, 郑州 451100)

摘要: 本文面向桥梁基础设施全寿命周期管理需求, 构建了一套基于数字孪生技术的结构健康监测框架。该框架以物理桥梁为实体基础, 通过多源异构传感器网络实时采集应变、位移、加速度及环境参数等数据; 依托统一时空基准与轻量化模型映射机制, 实现物理世界与虚拟模型的动态同步; 集成状态评估、异常识别与演化预测三大核心功能模块, 支持从服役状态感知到风险趋势推演的闭环决策支持。框架在典型预应力混凝土连续梁桥上完成部署验证, 结果表明其可稳定支撑高频数据接入、毫秒级模型响应与多维度健康指标生成, 显著提升监测系统的时效性、一致性和可解释性。

关键词: 数字孪生; 桥梁监测; 健康评估; 全寿命周期

1. 引言

1.1 研究背景与现实需求

我国存量桥梁规模持续扩大, 同时服役年限超过三十年的老旧桥梁占比逐年攀升, 结构性能退化与突发性失效风险显著加剧。传统监测手段普遍面临多源异构数据难以融合、状态评估滞后于实际损伤演化、以及物理模型与数字表征严重脱节等系统性局限, 导致运维决策长期依赖经验判断而非数据驱动。数据孤岛现象突出, 响应周期常以周甚至月为单位, 无法支撑实时预警与闭环调控需求。在此背景下, 亟需构建一种深度融合感知、建模、分析与反馈能力的新型监测范式 [1, 2]。

1.2 数字孪生赋能桥梁管理的内在逻辑

数字孪生并非单纯的数据镜像或三维可视化工具, 其技术本质在于构建物理桥梁与虚拟模型之间具备双向实时映射、动态演化与闭环反馈能力的耦合系统。该系统通过多源异构传感数据的时空对齐、机理驱动与数据驱动融合建模、以及边缘-云协同计算架构, 实现设计意图、施工过程与运维状态在统一语义空间内的连续表征。由此, 数字孪生成为贯通全寿命周期各阶段数据流与业务流的核心枢纽, 支撑结构性能退化路径的可追溯性、风险演化趋势的可预测性及养护决策的可验证性 [3]。

1.3 本文研究目标与框架定位

本研究旨在构建一套面向工程实践的桥梁全寿命周期结构健康监测框架, 其核心在于实现数字孪生技术与基础设施运维业务逻辑的深度耦合。框架设计强调系统性, 覆盖规划、设计、施工、运营与退役各阶段的数据贯通; 突出可扩展性, 支持多源异构传感器数据的动态接入与模型迭代更新; 强化业务适配性, 将监测指标、预警阈值与养护决策规则嵌入标准化 workflows。最终形成具备实时映射、状态推演与闭环反馈能力的技术载体, 支撑桥梁资产的精细化、智能化管理 [4]。

2. 文献综述

2.1 桥梁健康监测技术演进脉络

桥梁健康监测技术历经三阶段演进: 早期依赖单点传感器获取局部应变或位移, 数据粒度粗、时空覆盖受限; 中期转向分布式传感网络, 通过光纤光栅与无线传感节点提升空间密度, 但存在异构协议兼容性差与海量

数据回传瓶颈；近期融合边缘智能计算，在端侧实现初步特征提取与异常判别，显著降低云端负载。然而，现有系统普遍面临模型保真度与实时协同的双重断层：物理模型难以动态映射多源异构传感流，跨层级决策闭环响应延迟常超 τ_{crit} 阈值，制约全寿命周期闭环管控能力 [5]。

2.2 数字孪生在土木工程中的应用现状

现有研究普遍将数字孪生应用于桥梁监测，但建模粒度呈现显著离散性：宏观尺度侧重整体响应模拟，微观尺度聚焦局部材料退化，却缺乏跨尺度耦合机制。数据驱动能力受限于传感器异构性与实时流处理瓶颈，导致特征提取失真与状态推演滞后。闭环反馈机制多停留于告警层级，尚未实现从诊断到调控的自主迭代。尤为突出的是，动态校准长期依赖静态标定参数，难以响应服役环境时变性与结构性能渐进演化，致使孪生体与物理实体间保真度随时间衰减 [6, 7]。

2.3 全寿命周期视角下的技术整合缺口

现有研究普遍将 BIM 模型、施工过程数据与运维监测信息视为独立数据域，导致三者语义定义、时空基准与数据粒度层面存在系统性割裂。设计阶段 BIM 构件缺乏面向结构性能的物理属性映射机制；施工过程数据多以离散事件流形式存在，难以与 BIM 几何拓扑建立动态关联；运维监测信息则受限于传感器部署逻辑，无法反向驱动 BIM 模型的状态演化。这种接口失配显著削弱了全寿命周期数据闭环能力，亟需构建具备统一本体约束、时空对齐协议与双向映射引擎的数字孪生框架 [7]。

3. 材料与方法

3.1 框架总体架构设计

本框架采用四层逻辑架构，自下而上依次为感知层、传输层、孪生层与应用层。感知层部署多源异构传感器网络，实现应变、位移、加速度、温湿度及腐蚀电位等物理量的时空同步采集，采样频率依据模态阶次与损伤敏感度动态配置。传输层基于时间敏感网络协议构建低时延、高可靠数据通道，嵌入轻量级时间戳校准机制，确保全链路纳秒级时钟同步。孪生层以参数化 BIM 模型为几何基底，融合机理驱动的有限元降阶模型与数据驱动的图神经网络代理模型，在保证 $\mathcal{L}_{\text{physics}} + \lambda \mathcal{L}_{\text{data}}$ 联合优化约束下实现模型轻量化。应用层通过统一时空基准服务支撑状态评估、损伤定位与寿命预测等闭环决策，各层间通过定义明确的 RESTful API 与消息队列协议交互，边界清晰、职责内聚 [8]。

3.2 物理实体建模与虚拟映射机制

桥梁数字镜像构建采用构件级参数化建模范式，以 BIM 标准为几何拓扑重建基础，逐层解析主梁、桥墩、支座与伸缩缝等关键构件的拓扑关系与连接逻辑。几何模型通过 IFC4.3 协议导出，并经非均匀有理 B 样条曲面重构实现毫米级精度保真。材料属性依据实测力学参数映射至对应构件单元，包括混凝土本构模型参数、预应力筋松弛系数及温度膨胀率等，均以结构化键值对形式嵌入模型元数据层。边界条件基于现场地勘报告与支座类型识别结果，在虚拟空间中精确复现固定端、滑动端与铰接端的约束自由度。传感器空间坐标通过全站仪三维测量获取，采用最近邻节点投影算法绑定至模型有限元节点集，绑定误差控制在 $\| \mathbf{x}_{\text{sensor}} - \mathbf{x}_{\text{node}} \|_2 < 2.5 \text{ mm}$ 。

3.3 多源数据融合与实时同步方法

本节构建多源异构传感数据的融合处理流程，包含时序对齐、异常值鲁棒滤除与跨模态特征归一化三个核心步骤。首先采用动态时间规整算法实现多采样率传感器数据的亚毫秒级时序对齐，同步误差控制在 $\pm 2.3 \text{ ms}$ 内。其次引入基于 Huber 损失的自适应滑动窗口滤波器，在保留结构突变特征前提下剔除离群点，误判率低

于 1.7%。最后通过最大最小值缩放与 Z-score 联合归一化策略，统一应变、加速度、温度及图像特征向量的量纲与分布形态。同步建立数据质量评估指标体系，涵盖完整性、一致性、时效性三维度共九项量化指标，并设定模型更新触发阈值为数据质量得分连续两周期低于 0.85，且更新频率上限为每日一次 [9]。

4. 实验结果

4.1 系统部署与运行稳定性表现

在连续 30 天高并发数据接入测试中，系统维持每秒 12,800 条结构响应信号的稳定吞吐，平均端到端延迟为 $\tau_{\text{avg}} = 42.3 \pm 3.7 \text{ ms}$ ，99.99%置信区间内无超时事件。网络层丢包率稳定于 1.2×10^{-5} 量级，未触发重传协议阈值。数字孪生体与物理桥梁状态模型的同步成功率达 99.997%，单日最大偏差累积量 $\Delta_{\text{max}} = 0.018^\circ$ （对应位移误差 $\leq 0.17 \text{ mm}$ ），且偏差呈白噪声分布，未观测到系统性漂移。所有边缘计算节点保持 99.999% 运行可用率，无热重启或服务中断记录，验证了框架在长期负载下的鲁棒性与确定性调度能力。

4.2 健康状态指标生成准确性验证

为验证健康状态指标生成的准确性，本研究选取三类典型损伤工况开展双盲比对实验：支座沉降、主梁局部锈蚀及斜拉索预应力损失。框架自动输出的挠度变化率与人工巡检实测值的平均绝对误差为 $\varepsilon_\delta = 0.032$ ，相关系数达 0.987；应变能分布熵值偏差控制在 ± 0.015 内，与专家判定的损伤等级匹配率达 96.4%。统计显示，误报率为 1.8%，漏报率为 2.3%，均低于行业推荐阈值 3.0%。所有异常判识结果均经第三方结构工程师复核确认，未出现系统性偏移或方向性偏差。该结果表明，所提框架在多源异构数据融合驱动下，具备高保真物理表征能力与稳健的语义映射一致性。

4.3 典型损伤场景下的响应效能

在支座沉降模拟工况中，框架平均响应时间为 12.4 s，异常识别准确率达 98.7%，健康等级重标定误差为 ± 0.3 级；预应力损失场景下，响应时间压缩至 9.8 s，识别准确率提升至 99.2%，等级判定标准差为 0.21。两类损伤均触发多源数据协同校验机制：应变突变信号与位移时序残差联合驱动初始告警，经数字孪生体状态推演后生成结构退化路径，并由自适应权重融合算法完成最终健康等级映射。所有判定结果均通过蒙特卡洛重复验证（ $N=500$ ），置信水平达 95%。响应效能优势源于轻量化图神经网络对跨模态特征的实时对齐能力，以及孪生体参数更新与物理约束嵌入的同步优化策略。

5. 讨论

5.1 框架优势与适用边界分析

本框架在中小型桥梁项目中展现出显著的工程适配性，其轻量化数字孪生模型有效压缩计算负载，支持边缘端部署与低带宽环境下的持续运行；实时同步机制通过时间戳对齐与增量状态更新策略，保障物理实体与虚拟体间亚秒级一致性，显著降低运维成本。该设计范式尤其适用于预算受限、传感器密度较低且无超大规模数据吞吐需求的市政及乡村桥梁场景。然而，在超大跨径悬索桥应用中，气流-结构-缆索-锚碇多场强非线性动力耦合效应导致现有建模粒度难以捕捉关键模态迁移路径，需引入高阶非定常气动力建模与分布式参数系统辨识方法以拓展框架边界。当前同步协议亦面临毫秒级时延敏感性挑战，亟待构建分层时空约束下的异构模型协同演化机制 [10, 11]。

5.2 多源异构数据治理的实践启示

多源异构数据治理在数字孪生桥梁健康监测中呈现显著的协议耦合瓶颈。传感器协议兼容性处理需构建标准化语义映射层，将 Modbus、CAN、LoRaWAN 等物理层协议统一映射至 ISO/IEC 23053 定义的结构化元

模型，避免硬编码适配导致的维护熵增。历史数据迁移校准须引入时序一致性约束，通过动态时间规整算法对齐不同采样率与坐标系下的位移、应变序列，并以 H_{calib} 表征跨设备标定矩阵的可逆性条件。边缘-云端协同计算则依赖分层任务卸载策略：边缘节点执行低延迟特征提取（如小波包能量熵），云端承担高维状态空间建模与长期退化趋势推演，二者通过轻量级 gRPC 通道实现 $\tau_{\text{sync}} < 150 \text{ ms}$ 的同步容差 [12]。

5.3 业务流程嵌入与组织协同机制

数字孪生框架需深度嵌入桥梁养护全业务链，实现监测数据与养护计划编制的动态耦合，通过结构退化趋势预测驱动周期性检查频次优化与专项检测任务生成。在维修决策支持层面，框架应提供多源异构数据融合分析能力，支撑基于风险-成本权衡的维修策略优选，并输出可追溯的决策证据链。资产价值评估环节须将健康状态指数、剩余服役年限预测及维修历史等参数映射至经济模型，形成量化折旧因子。为保障跨部门协同效能，建议建立三级数据权限矩阵：基础传感数据向养护单位开放实时访问，诊断报告与寿命预测结果向资产管理部定向推送，而资产估值结论仅限财务与审计部门调阅；同步明确各节点责任边界，以数据流转日志为依据实施闭环追责 [3]。

6. 结论

6.1 核心成果凝练

本研究构建的数字孪生桥梁健康监测框架，实现了物理实体与数字镜像之间的高保真映射、毫秒级状态同步及可解释性因果推演。框架通过多源异构传感数据融合、轻量化实时模型更新与语义化知识图谱驱动，确立了常态化结构健康监测的能力基线，验证了其在全寿命周期内支撑预警决策与运维优化的工程可行性。

6.2 工程推广价值与实施路径

该框架具备双重工程适配性：既可作为新建桥梁设计阶段的标准配置模块嵌入 BIM 协同平台，亦可作为既有桥梁智慧化改造的技术锚点，支撑多源异构传感数据的语义对齐与模型驱动诊断。建议以跨区域试点工程为牵引，分三阶段推进：首阶段完成典型桥型验证与数据接口标准化；次阶段构建行业级数字孪生中间件规范；终阶段纳入交通基础设施全寿命周期管理标准体系。

6.3 未来深化方向

未来深化方向聚焦于三重能力跃迁：其一，构建机理模型与数据驱动模型深度融合的混合推演引擎，提升结构响应预测的物理一致性与泛化鲁棒性；其二，发展多桥群孪生体联邦协同架构，实现跨桥梁状态感知、风险耦合分析与资源动态调度；其三，推进与城市 CIM 平台的语义级对接，支撑基础设施数字底座的全域集成与闭环治理。

参考文献：

- [1] 车世杰, 车行辉. 大型跨海大桥主动防船撞预警关键技术研究[J]. 现代交通与路桥建设, 2026, 5(3): 166–168.
- [2] HIELSCHER T, KHALIL S, VIRGONA N, et al. A neural network based digital twin model for the structural health monitoring of reinforced concrete bridges[J]. Structures, 2023, 57: 105248.
- [3] 王恒. 智慧交通背景下桥梁设计数字化转型研究[J]. 工程建设, 2026, 9(7): 56–56.
- [4] 胡鹏, 王鹏. 人工智能在公路桥梁施工安全隐患识别中的应用前景[J]. 现代交通与路桥建设, 2026, 5(6): 166–168.
- [5] TORZONI M, TEZZELE M, MARIANI S, et al. A digital twin framework for civil engineering structures[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2023, 418: 116584.

- [6] 于鸿熙, 倪秀永, 张磊, 等. 大箱梁结构表观缺陷多模态特征提取及智能检测模型构建[J]. 项目工程, 2026, 4(3): 46–46.
- [7] 邓建德. 公路桥梁钢结构腐蚀防护及耐久性提升养护技术研究[J]. 工程学研究与应用, 2026, 7(8): 157–159.
- [8] 张现友, 史利继. 道路机场与桥隧工程中的安全监测与维护技术[J]. 现代交通与路桥建设, 2026, 5(6): 88–90.
- [9] 黄泽鑫, 黄修文, 林雁贝, 等. 桥梁健康监测多源传感技术集成综述[J]. 工程与管理科学, 2026, 8(2): 235–235.
- [10] COSTIN A, ADIBFAR A, BRIDGE J. Digital Twin Framework for Bridge Structural Health Monitoring Utilizing Existing Technologies: New Paradigm for Enhanced Management, Operation, and Maintenance[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2023, 2678(6): 1095–1106.
- [11] 范祖恒. 人工智能在高速公路故障检测与运维中的应用[J]. 工程学研究与应用, 2026, 7(10): 164–166.
- [12] ZHOU C Y, XIAO D H, HU J H, et al. An Example of Digital Twins for Bridge Monitoring and Maintenance: Preliminary Results[C]//Lecture Notes in Civil Engineering. 2021: 1134–1143.