

基于数字孪生的桥梁服役性能动态监测方法

曹魏杨¹ 魏鹏² 谭真健²

1. 中国建设基础设施有限公司 重庆 400000; 2. 重庆中建郭家沱大桥建设运营管理有限公司 重庆 400000

DOI: 10.32629/ems.v8i9.22110

[摘要] 桥梁长期服役受车辆荷载、温度变化、材料劣化及局部损伤影响, 定期检测难以连续反映结构状态。本文面向服役性能动态监测, 构建融合物理模型、传感数据和状态识别算法的数字孪生方法, 通过实时映射、参数识别、异常诊断和风险预警实现虚实同步。连续梁桥验证结果显示, 该方法可降低模型响应误差, 提高异常定位和风险判别的连续性, 为桥梁运维提供量化依据。

[关键词] 数字孪生; 桥梁工程; 服役性能; 动态监测; 风险预警

引言

桥梁服役状态具有时变性, 单次静载试验或周期巡检只能获得有限时刻的信息。现有监测系统虽然可以持续获取应变、位移、加速度和温度数据, 但原始数据与有限元模型仍存在参数偏差, 状态判断容易受环境和工况变化干扰。数字孪生能够建立物理桥梁与虚拟模型的持续映射, 利用监测数据修正模型并反演性能变化。本文据此构建动态监测方法, 并从模型精度和异常预警两方面开展验证。

1 桥梁服役性能动态监测需求分析

桥梁动态监测覆盖结构安全、刚度变化、动力特性和环境影响。监测端选取跨中挠度、关键截面应变、支座位移、竖向加速度和温度, 其中应变采样频率 50 Hz, 加速度 200 Hz, 位移和温度 1 Hz。系统以 10 min 为分析窗口, 完成缺失检查、时间同步和异常点剔除; 单窗口缺失率低于 5% 的时候采用邻近插值, 超过 10% 则标记无效。性能评价需要区分温度缓慢漂移和车辆荷载短时响应。数字孪生流程设置了数据层、模型层、诊断层和应用层, 依次承担数据接入、响应计算、参数识别和风险输出, 系统响应周期控制在 60 s 以内。对跨中挠度、关键截面应变和一阶频率分别设置 5%、6% 和 3% 的模型偏差控制值, 超过控制值的时候启动数据复核, 使监测需求能够落实到具体可计算的指标。

2 桥梁数字孪生模型动态构建

数字孪生模型以桥梁有限元模型为基础, 将主梁、桥墩、支座和连接单元按实际边界条件参数化。初始模型采用设计弹性模量、截面惯性矩、支座刚度和材料密度, 并依据基期实测频率、挠度及应变校准。更新参数选取主梁等效弹性模量 E 、支座竖向刚度 K 和阻尼比 ξ , 以实测响应和计算响

应的加权误差最小为目标。模型每 30 min 更新一次, 一阶频率偏差超过 3% 或跨中挠度偏差超过 8% 时触发增量校准。参数采用最近 12 个有效窗口的中位结果, 以抑制车辆随机荷载扰动。孪生体同步保存时间戳、传感器状态、结构响应和模型参数, 使风险判断可追溯至对应时段。基准校准阶段采用频率、挠度和应变三类指标联合约束, 权重分别取 0.30、0.35 和 0.35; 当综合目标函数连续两次变化小于 1% 时停止迭代, 避免参数在噪声作用下反复波动。

3 基于数字孪生的桥梁服役性能动态监测方法

数字孪生动态监测按照实时映射、参数识别、异常判定和风险输出运行。监测数据在边缘节点完成同步和质量检查后映射至虚拟桥梁对应构件, 孪生模型依据更新参数计算理论响应, 再比较实测值与孪生值的残差及变化率。单一测点短时突变先进行相邻测点一致性检查; 多个相关测点连续三个窗口出现同向偏差时进入异常识别。由此保持原始监测量、模型修正量和风险输出之间的连续对应。

3.1 结构响应实时映射

实时映射以构件编号和传感器坐标为索引, 将应变、位移、加速度及温度数据对应到孪生模型节点。数据先完成统一时标转换, 采用 3σ 准则识别孤立异常值, 并以 5 s 滑动窗口计算均值、峰值和均方根。温度影响通过基准期回归关系修正, 如跨中应变温度敏感系数为 $2.8 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$ 时, 先扣除基线漂移再与孪生结果比较。正常状态下跨中挠度残差率控制在 5% 以内, 应变残差率低于 6%。某测点残差率连续三个窗口超过 10% 时, 同步检查相邻测点及同截面计算值, 以排除传感器故障。

3.2 关键性能参数动态识别

关键性能参数从刚度、动力特性和变形恢复能力三个方面提取。刚度识别利用车辆荷载下的实测挠度和孪生基准挠度计算等效刚度折减系数，一阶固有频率采用随机减量和频域峰值联合识别，阻尼比按半功率带宽修正。以基准一阶频率 3.24 Hz 为例，当连续一周识别值降至 3.10 Hz，且跨中等效刚度系数由 1.00 降至 0.94 时，系统记录为性能衰减候选事件。参数采用 24 h 滚动统计，输出中位值及 5%、95%分位值。频率下降超过 4%、刚度折减超过 6%且变形恢复率低于 92%时，进入异常识别模块。

3.3 异常状态智能识别

异常识别将监测残差、频率变化率、刚度折减系数、应变偏差和残余位移作为输入，采用基于时间窗口的多特征判别方式输出正常、关注、预警和高风险四类状态。模型训练阶段以正常工况及不同程度刚度折减样本构建特征边界，运行阶段再由数字孪生模型计算同工况理论响应进行二次校验。某截面实测应变较孪生值高出 12%，且该区域刚度折减达到 8%时，异常得分明显上升；若相邻截面响应保持稳定，则系统缩小疑似损伤范围。对于车辆瞬时冲击造成的单峰异常，只有持续时间超过两个分析窗口才计入风险累计。异常识别结果除给出类别外，还输出 0 至 1 的置信度，当最高置信度低于 0.70 时进入待复核队列，从而减少不确定样本被强制归类造成的误报。

3.4 服役性能风险动态预警

风险预警采用连续风险值和工程阈值联合控制。系统将刚度折减、频率下降、挠度残差、应变异常和异常识别置信度归一化后计算综合风险值 R，并按 R 小于 0.30、0.30 至 0.50、0.50 至 0.70 和不低于 0.70 划分四级状态。为了防止风险值在临界点频繁跳变，输出端对最近 6 个窗口实施指数平滑，平滑系数取 0.35。当 R 超过 0.70 且持续 30 min 以上，或跨中挠度超过设计监控值的 90%并伴随两个以上应变测点同步异常时，系统提升预警等级。风险记录同步保存对应构件、触发指标和历史趋势，运维人员可以据此安排复测、限载或专项检测。动态预警使数字孪生结果从模型计算转化为可执行的养护信息，并保持风险变化过程的连续性。

4 桥梁服役性能动态监测实验分析

为验证所构建的方法，选取一座三跨预应力混凝土连续梁桥作为实验对象，跨径布置为 40 m+60 m+40 m，桥面宽 12.5 m。监测系统布设 12 个应变测点、6 个加速度测点、4 个位移测点和 6 个温度测点，连续采集 30 d 数据，共形成 4320 个 10 min 分析窗口。实验期间日均有效数据率为 97.6%，环境温度范围为 18.4~34.7 ℃。基准模型依据前 7 d 稳定工况完成校准，后 23 d 用于动态监测验证，并设置 2%、5%、8%和 12%四档等效刚度折减工况检验模型识别能力。同时记录车辆荷载等级、环境时间和时间信息，保证不同工况监测结果具有可比性。

4.1 实验对象及监测系统布设

监测布设重点覆盖中跨跨中、边跨四分点、支点附近和主梁腹板应力敏感区域。应变计量程为±1500 $\mu\epsilon$ ，分辨率 1 $\mu\epsilon$ ；加速度计量程±2 g，灵敏度 0.001g；位移传感器量程 100 mm，精度 0.05 mm。数据采集端通过统一网络时钟同步，各测点最大时差控制在 20 ms 以内。实验首先利用两辆总质量约 320 kN 的车辆进行低速校核，跨中实测最大挠度为 8.62 mm，初始模型计算值为 9.18 mm，校准后下降至 8.79 mm；关键截面峰值应变由初始计算的 71.4 $\mu\epsilon$ 修正为 68.1 $\mu\epsilon$ ，与实测 66.9 $\mu\epsilon$ 的差异缩小至 1.8%。该结果说明监测系统与模型参数能够形成稳定对应关系，满足后续动态更新要求。

4.2 数字孪生模型精度验证

模型精度采用 5 组代表性车辆工况进行验证，每组均比较一阶固有频率和跨中挠度。初始模型的频率平均相对误差为 4.12%，跨中挠度平均相对误差为 7.36%；经过在线参数更新后，两项误差分别降至 1.29%和 2.44%。如表 1 所示，5 组工况下孪生模型的一阶频率误差均低于 2%，挠度误差均低于 3.5%，其中工况 3 的频率误差仅 0.62%。随着监测数据持续进入，主梁等效弹性模量由初始 34.5 GPa 修正至 33.7 GPa，支座等效刚度调整幅度为 4.8%，参数变化处于工程可解释的范围。精度改善说明动态更新能够消除初始设计参数和实际服役状态之间的差异，并提高虚拟桥梁对真实结构响应的跟踪能力。

表 1 数字孪生模型精度验证结果

工况	频率实测/Hz	频率孪生/Hz	频率误差/%	挠度实测/mm	挠度孪生/mm	挠度误差/%
1	3.24	3.20	1.23	8.62	8.79	1.97
2	3.21	3.17	1.25	9.34	9.57	2.46

3	3.22	3.20	0.62	10.18	10.44	2.55
4	3.19	3.14	1.57	11.26	11.63	3.29
5	3.18	3.13	1.57	12.05	12.29	1.99

4.3 动态监测结果对比分析

后 23 d 的监测结果显示，传统固定参数模型在温度日变化较大时出现明显残差漂移，跨中挠度平均绝对误差为 0.71 mm，应变平均绝对误差为 4.86 $\mu\epsilon$ ；数字孪生动态更新后分别降至 0.24 mm 和 1.93 $\mu\epsilon$ 。以第 18 d 中午温度由 22.1 $^{\circ}\text{C}$ 升至 31.6 $^{\circ}\text{C}$ 的时段为例，固定模型对跨中应变的最大偏差达到 11.7%，动态孪生模型通过温度修正和参数更新将偏差控制在 4.1%。在 8%等效刚度折减工况中，一阶频率由 3.23 Hz 下降至 3.08 Hz，系统识别的刚度折减系数为 7.6%，与设定值相差 0.4 个百分点；在 2%轻微折减工况中识别值为 2.5%，仍保持可辨识性。结果说明数字孪生方法对环境变化具有较强的适应能力，能够在不改变监测硬件的条件下提高性能参数提取的稳定性。

4.4 异常识别预警效果分析

异常识别采用 40 组正常工况和 40 组刚度折减工况进行检验，折减区域分别设置于中跨跨中和边跨支点附近。如表 2 所示，随着折减程度增加，异常识别概率由 0.74 提高至 0.97，风险值由 0.46 升至 0.89，定位误差由 2.8 m 缩小至 0.9 m。5%折减时系统在两个连续窗口后进入预警状态，平均预警延迟为 38 s；8%和 12%折减工况均能够在 30 s 以内完成高风险判定。全部 80 组样本中共识别异常 38 组，漏报 2 组，正常工况误报 3 组，计算得到异常识别准确率为 93.75%，召回率为 95.0%。误报主要集中在重载车辆连续通过且温度快速变化的时段。加入数字孪生残差校验后，同类工况误报数量由 7 组降至 3 组，说明虚实同步能够为异常识别提供有效约束，提高预警结果的工程可信度。

表 2 异常识别及风险预警结果

工况	刚度折减/%	识别概率	定位误差/m	预警延迟/s	风险值
1	2	0.74	2.8	56	0.46
2	5	0.86	1.9	38	0.63
3	8	0.93	1.3	27	0.78
4	12	0.97	0.9	19	0.89

结语

本文构建了面向桥梁服役性能的数字孪生动态监测方法，通过数据映射、模型更新、参数识别和风险预警形成连续监测链条。实验中，模型更新后固有频率和跨中挠度平均误差明显下降，异常识别准确率达到 93.75%，并能对不同刚度折减工况给出风险等级和空间定位。该方法强化了监测数据与结构力学状态的对应关系，可为日常巡检、专项检测和养护时机确定提供量化支撑。后续可结合长期材料劣化数据，完善跨季节更新机制。

【参考文献】

[1]孙哲,梁斌,李君铂,等. 基于数字孪生的桥梁结构服役安全智能诊断[J]. 中国公路学报, 2026, 39(1): 65-77.

[2]杨磊,陈丽娟. 基于数字孪生的城市高架桥梁工程质量安全预警模型[J]. 公路, 2025, 70(12): 252-258.

[3]倪源城,陈良江. 数字孪生技术在铁路桥梁智能运维中的应用[J]. 铁道建筑技术, 2025, (9): 5-8.

[4]罗晶,周阳,徐梓航. 基于数字孪生技术的桥梁养护管理平台应用研究[J]. 运输经理世界, 2025, (2): 139-141.

[5]宋奥. 基于数字孪生的桥梁健康智能监测技术的应用研究[J]. 交通节能与环保, 2024, 20(6): 239-242.

作者简介：曹魏杨（1989.11—），男，汉族，陕西省渭南市人，硕士研究生，中级工程师，研究方向为建筑与土木工程；

魏鹏（1981.11—），男，汉族，甘肃省陇西人，大学本科，高级工程师，研究方向为道路桥梁运营维护；

谭真健（1994.08—），男，汉族，重庆市丰都县人，本科学历，中级工程师，研究方向为市政设施维护。