 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i4.9960

Research on Application of Digital Twin Based Monitoring Technology for Highway Structures

Zhe Ran

Yunnan Yunling Expressway Engineering Consulting Co., Ltd., Kunming, Yunnan, 650200, China

Abstract

To address challenges in traditional monitoring such as data silos, inadequate visualization, and insufficient decision support, this paper proposes a digital twin-based monitoring framework for highway structures. By analyzing the development stages and technical features of digital twins, and through the application to monitoring projects of extra-long-span suspension bridges and ultra-long tunnels, the framework utilizes 3Dmax[1] to construct high-precision models and Unreal Engine[2] for rendering and interactive development. It integrates multi-source sensor data to establish a comprehensive platform integrating information management, data visualization, scenario simulation, and overload alerts. This architecture consolidates heterogeneous data, enables dynamic structural status tracking, enhances readability and intelligence, and provides a viable approach for intelligent operation and maintenance of structures.

Keywords

structure monitoring; digital twin; 3ds Max; unreal engine; data visualization

基于数字孪生的高速公路构筑物监测技术应用研究

冉哲

云南云岭高速公路工程咨询有限公司，中国·云南 昆明 650200

摘　要

针对传统监测存在的数据孤岛、可视化弱、决策支撑不足等问题，本文提出基于数字孪生的高速公路构筑物监测技术框架。在梳理数字孪生发展阶段与技术特征基础上，结合特大跨径悬索桥与特长隧道监测项目，采用3Dmax[1]构建高精度模型，利用虚幻引擎[2]进行渲染与交互开发，接入多源传感器数据，构建集信息管理、数据可视化、场景模拟与超限预警于一体的综合平台。该架构整合异构数据，实现结构状态动态跟踪，提升可读性与智能化水平，为构筑物智慧运维提供可行路径。

关键词

结构监测；数字孪生；3Dmax；虚幻引擎；数据可视化

1 引言

随着随着交通运输行业信息化推进，高速公路构筑物实时监测至关重要。通过采集分析数据，挖掘规律、评估结构状态，指导养护与异常纠偏，预防重大事故。结合 BIM 技术 [3] 可视化呈现，结合传感器采集数据对构筑物更好地进行可视化展现，可以多角度、多维度地对构筑物状态进行实时展现，更加便于养护管理决策。

2 数字孪生的发展

数字孪生发展通常分为四个阶段：

第一阶段：概念萌芽与单点应用，以静态 3D 模型和仿真为主，用于产品设计与故障预测。

第二阶段：技术驱动与垂直深化，依托物联网和云计算，实现动态单向数据连接。

第三阶段：系统集成与协同优化，借助 5G、边缘计算、AI 等技术，从设备级向系统级扩展。

第四阶段：生态融合与自治决策，通过 AIGC、区块链等构建孪生体网络，形成复杂生态系统。

2.1 数字孪生当前发展现状

当前数字孪生正向第四阶段过渡，呈现三大特点：技术融合（AI、计算视觉、AIGC）；行业深化（制造业从单设备到工厂级优化，如特斯拉超级工厂）；平台化（微软、西门子、华为云等推平台）。最大壁垒是多源数据难打通。数字孪生已从可视化工具演进为智能化决策底座，与 AI、元宇宙结合，迈向复杂系统优化。尽管面临挑战，其作为数字化转型核心引擎地位确立，下一波聚焦跨域协同、生态构建与智能自治。

2.2 数字孪生在高速公路构筑物应用分析

传统高速公路构筑物包括桥梁、隧道等土木结构，智

【作者简介】冉哲（1996–），男，中国云南弥渡人，硕士，工程师，从事工程结构监测研究。

慧交通催生门架基础、通信管道等新型构筑物。当前监测主要针对桥梁、隧道、边坡三大类：桥梁监测温湿度、位移、应变、振动等；隧道监测拱顶变形、粉尘、含水率；边坡监测地表变形、环境、含水率。通过传感器实时采集数据，经预处理、统计分析后，结合有限元模型计算超限阈值，对比实测数据评估健康度。数字孪生应用方面，采用 3Dmax 建模、虚幻引擎渲染，同步数据库驱动模型。架构分四层：用户层通过浏览器交互；服务器层运行引擎，渲染并推送视频流；通信层使用 WebRTC、WebSocket 等 [4] 协议；数据层集成传感器 API，实现模型状态驱动。

3 桥梁监测数字孪生应用分析

3.1 桥梁监测系统建设

以大跨径悬索桥监测系统为例，针对其结构特性 [5] 进行针对性方案设计，为全面实现各项数据类型自动化监测需求，及时掌握桥梁运营状态，通过桥梁所处环境、所受作用以及结构构造特点、力学行为特性、状态评估需求和养护管理要求布设了包含桥址区、主梁内、锚室内、鞍罩内温湿度，车辆荷载、风速风向、索力、振动、位移、应变等监测子项，从数据采集、数据传输、数据处理、数据展示四个层级进行了监测系统集成。



图 2.1 特大跨径桥梁数字孪生监测界面

3.2 桥梁监测数字孪生应用

基于图纸与无人机影像，使用 3Dmax 构建桥梁及地形模型，并按传感器实际位置细化监测子项。所有模型经虚幻引擎渲染，打造高真实场景。数据层接入实时传感器数据，支持点击监测类别切换对应布设区域，点选传感器查看实时测值，直观展示位置与数据。系统可根据温湿度、风速自动切换晴天、雨天、大雾等场景，动态调整场景布局。首页实时汇总监测数据，通过交互界面清晰呈现传感器类型、位置与数值，提升数据查看的实时性与直观性。

3.3 隧道监测系统建设

针对衬砌开裂、渗漏水、排水堵塞、路面裂缝等病害的特长隧道，设计监测方案：外环境（降雨、温湿度、能见度、风速风向），内环境（水压力），衬砌结构（表观病害、拱顶沉降），突发事件（衬砌掉块、突涌水），应急系统（情报板、定向广播、通行灯）。实时掌握结构变形、应力、病害及环境变化，研判安全状态并识别风险。监测数据用于实时预警与启动应急预案，结合定检数据支撑养护决策，提升安全运维水平，保障运营安全。



图 2.2 温湿度传感器数字孪生界面

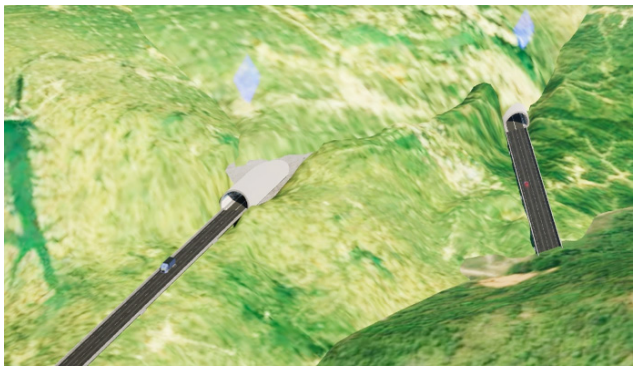


图 2.3 特长隧道数字孪生监测界面

3.4 隧道监测数字孪生应用

基于图纸与无人机影像，采用 3Dmax 建立隧道地形及结构模型，并按传感器实际位置完成监测子项建模。经虚幻引擎渲染，构建高真实场景。系统接入实时数据，支持点击监测类别切换子项布设，点选传感器直观展示安装位置与实时数据，实现可视化表达。

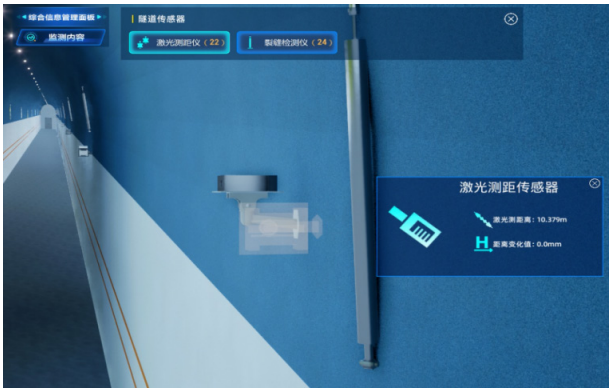


图 2.4 激光测距仪数字孪生界面

系统内置晴天、雨天等场景，依据气象数据自动切换，同步真实环境，实时还原现场并动态更新。首页集中展示监

测数据，用户交互查看子项和传感器，实现数据与场景联动，直观呈现传感器类型、位置与数值，显著提升可视化与智能化水平。

4 智慧化统管平台

针对高速公路关键结构物病害与结构特点，通过传感器实时采集断面监测数据，结合 3Dmax 与 UE 构建数字孪生模型，以数据驱动实现从项目后端处理到前端展示的一体化综合平台。基于孪生平台直观展示的监测信息与数据分析报告，可全面、及时判断结构状态，为智慧化管理、应急响应与安全监管提供支撑。

5 结论

本文梳理了数字孪生从静态建模到智能协同的四个阶段，分析其在高速公路构筑物监测中的应用前景。以大跨径悬索桥为背景，构建基于数字孪生的可视化平台：采用 3Dmax 建模、虚幻引擎渲染，接入多源数据，实现桥梁环境与结构响应监测、超限预警。并将该框架拓展至隧道场景，验证了其在多场景监测中的普适性。研究表明，数字孪生提升了数据直观性与结构状态感知能力，支撑智能化运维与应急响应。未来融合 AI、边缘计算等技术，将推动监测向数据驱动、跨系统协同与自主运维发展。

参考文献

[1] 赵全哲,王飒,任达,等.基于3DMax的城市道路路灯三维自动建模方法[J].测绘与空间地理信息,2024,47(05):93-95+99.

[2] 鲁瀚友,赵文刚,蒋婕妤,等.基于UE5的虎渡河水流数字仿真技术研究及应用[J].长江科学院院报,2024,41(08):157-163.

[3] 蒋龙.BIM技术在道路与桥梁工程设计中的应用[J].智能建筑与智慧城市,2025,(01):105-107.

[4] 吴杰,孙振勇,韩松涛.WebSocket在服务端和客户端之间的应用[J].起重运输机械,2024,(13):100-104.

[5] 郑淦亢,何越磊,万乐山.基于数字孪生的特大跨径铁路桥梁健康监测数据可视化及预警研究[J].土木建筑工程信息技术,2024,16(04):65-69.