 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i4.9961

Application of Digital Twin Technology in Highway Slope Health Monitoring

Peng Yang Zhe Ran

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

Abstract

Highway slope stability monitoring is a critical component in ensuring traffic safety and operational efficiency. To address challenges in traditional monitoring methods—including low efficiency, data silos, and delayed alerts—this study systematically explores the application framework of digital twin technology for slope health monitoring. The research establishes a comprehensive digital twin monitoring system through five key dimensions: data acquisition, model construction, real-time perception, analysis and evaluation, and visual decision-making. By integrating technologies such as IoT, BIM/GIS, edge computing, and AI, the system enables dynamic interaction and real-time mapping between physical slopes and virtual models, providing a novel technical pathway for intelligent slope safety management.

Keywords

highway slope; digital twin; health monitoring; Internet of Things (IoT); early warning decision-making

公路边坡健康监测中数字孪生技术的应用

杨鹏 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

公路边坡稳定性监测是保障交通安全运营的关键环节。针对传统监测手段存在的效率低、数据孤岛、预警滞后等问题，本文系统探讨了数字孪生技术在公路边坡健康监测中的应用框架。文章从数据采集、模型构建、实时感知、分析评估与可视化决策五个维度，构建了完整的边坡数字孪生监测体系。该体系通过融合物联网、BIM/GIS、边缘计算及人工智能等技术，实现了物理边坡与虚拟模型的动态交互与实时映射，为边坡安全的智能化管控提供了新的技术路径。

关键词

公路边坡；数字孪生；健康监测；物联网；预警决策

1 引言

长期以来，我国路基边坡的安全监测技术一直是公路修筑维护中的一个薄弱环节，边坡失稳造成滑坡的安全事故时有发生，对人们的生命安全和财产安全都造成巨大的损失。为了减少和防止各种边坡事故的发生，保证人们的生命安全、减少财产损失，有必要对路基边坡进行全生命周期的健康监测，实时掌握边坡的运营状态。近年来，数字孪生技术逐步兴起，为应对这些问题带来了新方向，通过塑造与物理边坡高度相似的虚拟模型，并达成二者之间随时的数据互通，就能够从大量角度全面感知并考量边坡的健康状况。本文旨在构建一套基于数字孪生的公路边坡健康监测技术体系，探讨其关键技术与实现路径，以期为提升边坡工程智能运维水平提供参考。

【作者简介】杨鹏（1989–），男，彝族，中国云南禄丰人，本科，工程师，从事数字孪生技术在公路构筑物健康监测深度探索与应用研究。

2 优化公路边坡监测现状与数字孪生概述

2.1 优化公路边坡传统监测方法的局限性

当下，公路边坡检测大多依靠人工巡查以及少量仪器测量，在地质环境复杂时会暴露出不少不足。人工巡查需凭借经验来判断，很难察觉到深层的变形迹象，而且在恶劣天气下巡查工作十分艰难。像测斜仪，沉降仪这样的传统仪器虽然可以得到一些点位的数据，但是它们设置得比较稀疏，并不能创建起包含整个边坡表面的连续感知网络。各种检测仪器各自独立，其数据格式并不统一，这就成了一个个信息孤岛，无法执行关联分析。检测的时间常常是以天或者周为单位，对于突然出现的变形反应迟缓，不能做到即时发出警报，往往错过最佳处置时机。

2.2 优化数字孪生技术的基本原理与核心特征

数字孪生技术形成物理实体的数字化映射，达成物理世界和信息世界的双向映射及动态交互。其基本原理包含物

理实体，虚拟模型，数据关联和服务系统这四个核心部分。核心特点主要表现在虚实映射，随时同步，闭环优化这三个方面。虚实映射需在虚拟空间精准重现物理实体的几何结构与行为规则，随时同步重视数据采集和模型更新的高频次互动，闭环优化凭借数据分析向物理世界的控制决策提供反馈。这项技术现已由工业制造慢慢扩展到土木工程领域。

2.3 优化数字孪生赋能边坡监测的技术优势

把数字孪生应用到边坡监测当中，会彻底改变传统的监测模式。其一，通过全要素建模把地形地貌，地质状况，支撑结构等全部显现出来，打破信息孤岛。其二，依靠即时数据来促使模型运作，使得边坡变形的过程能够被追查，可以推断，做到预先察觉潜在的滑移面。其三，仿真引擎能够按照即时监测的数据来动态校正力学参数，从而改善稳定性评定的精准度。其四，直观的可视化界面以及多级警报机制，可以帮助管理者立即了解边坡的情况，并作出科学的决策，极大地优化应急反应的速度。

3 优化边坡数字孪生模型构建技术

3.1 优化多源异构数据的采集与融合处理

创建边坡数字孪生模型时，第一步需获取多源数据，其中涉及地质勘查数据，设计图纸，施工记录，遥感图像以及传感器即时检测得来的数据等等。这些数据种类繁杂，格式不同，精度也有差别，所以要执行融合处理。运用数据清洗技术去除异常值与噪声，通过坐标统一转换把全部数据归入同个空间参照体系当中。用插值算法针对零散的地质钻孔数据执行曲面拟合，创建起连续的地层分布状况。依靠时序数据库对随时检测得来的数据实施结构化保存，从而给后续模型激发供应标准化的数据输入来源。

3.2 优化基于 GIS+BIM 的高精度几何建模

几何模型是数字孪生的空间骨架，要兼顾宏观地形和细部结构。GIS 技术善于处理大面积地理空间信息，可以给出边坡区域的地形地貌，水系分布以及植被覆盖状况。而 BIM 技术在细致表现边坡支护结构，排水设施和检测设备上占优。把两者有效地结合，首先在 GIS 环境里创建地形基底，接着把 BIM 模型里的挡墙，锚杆，框架梁等构件纳入进来，做到从宏观到微观的无缝对接。在建模的时候要控制模型面数来保障运行的顺畅，并且保存好关键的几何特征以符合变形分析的需求。

3.3 优化岩土力学信息的模型语义化集成

几何模型自身无法承担力学分析任务，需给模型附加岩土工程方面的语义信息。要为每一层地质图赋予对应的物理力学参数，弹性模量，泊松比，粘聚力，内摩擦角等等。把监测设备当作智能对象植入到模型当中，并对其进行类型，量程，安装位置以及数据接口等方面的界定。给支撑结构构件加上工程属性，其中涵盖材料标号，施工时间，设计承载能力等内容。借助语义化融合手段，使得该模型不但具备视觉效果，而且计算结果更为精准，从而为后续的数值仿真和状态评价形成数据层面的基础保障。

4 优化边坡健康状态实时感知与数据传输

4.1 优化物联网传感网络的布设与数据采集

实时感知依靠科学设置的物联网传感网络，要在边坡表面的关键点位安装位移计，裂缝计，倾斜仪等传感器以监测地表变形状况。在潜在滑移面的深度范围内埋设测斜管和渗压计，从而得到深层位移及孔隙水压力的变动情况。还要布置雨量计，湿度计之类的环境传感器来收集降雨量和含水量的数据。传感器的选择应综合考虑精度，稳定性以及适应野外长时间工作的特性，并采用星型或者网状拓扑结构形成网络。通过 LoRa，NB 优化 - 优化 IoT 等低功耗大范围覆盖的技术把收集到的数据汇总到现场的网关。

4.2 优化边缘计算与监测数据的实时预处理

原始传感器数据若直接上传，会引发网络堵塞，给云端计算带来压力。把边缘计算节点设置在接近传感器之处，于数据源实施即时预处理。边缘节点运行数据滤波算法来去掉随机噪声，找出超出阈值范围的异常值，并启动本地警报。针对连续的时间序列数据执行压缩打包，获取特征值以缩减传送量。凭借轻量级算法在边缘端作出初步的变形趋势判定，做到对异常事件的快速回应。经过预处理的有效数据按照需求上传到中心平台，兼顾及时性和经济性。

4.3 优化基于 5G 的监测数据传输与同步机制

高带宽，低时延的通信网络对数字孪生的即时性十分关键。5G 技术具有大连接，高速率的特点，可以满足海量传感器数据同时接入的需求。在边坡现场安装 5G 优化 CPE 设备，汇集网关数据，并通过运营商网络传送到云端服务器。针对视频观察等大流量数据，5G 网络可保障高清视频流顺利传送。形成精准的时间同步协议，让不同传感器的数据具有统一的时标，从而保证数据在时间轴上一致。数据输送途中运用加密机制，以保障监测信息的安全。

5 优化基于数字孪生的边坡数据分析与评估

5.1 优化监测数据与仿真模型的动态映射

获取到的即时数据需激发仿真模型运行。形成数据接口层，把传感器所测得的值当作边界条件或者初始条件赋予有限元或者离散元仿真模型。比如把实测孔隙水压力的变化及时反馈给模型的渗流场，把位移监测值做为反演分析的按照来动态调节岩土参数。通过数据同化算法持续修正模型的计算结果，使得虚拟模型的反应慢慢靠近物理边坡的实际状况。动态映射机制使得仿真模型不再只是离线分析的工具，而能够随时显示边坡的状态，成为数字镜像。

5.2 优化边坡变形与失稳风险的智能识别

凭借不断更新的检测数据及模型仿真成果，采用人工智能算法来判断变形与失稳风险。通过聚类算法把正常波动和异常变形模式区分开来。依靠像 LSTM 这样的时序预测

模型，对位移发展态势展开短期预测。结合力学分析，找出边坡内部剪切带的生成情况以及塑性区的扩展状况。一旦检测数据与典型失稳模式库里的特征相符，系统就会自动标注高风险区域。智能识别既重视当下状态，又会借助趋势分析获取失稳前兆，从而为预先干预赢得时间。

5.3 优化边坡健康状态的动态评估与趋势预测

把多源信息融合起来，可以得到边坡健康状态的综合评价。用层次分析法或者模糊综合评价模型，全面考量变形速率，累计位移，地下水位，降雨强度这些指标，这样就能量化出边坡的健康指数，并且做到动态更新。依靠时间序列分析和机器学习方法，创建位移预测模型，来估算未来一段时间的变形趋向。再加上天气预报的数据，就可以判断在强降雨情况下边坡稳定性的变化路径。动态评定的结果会表现为健康等级，给后续的警报决策提供科学依据。

6 优化边坡数字孪生监测的可视化与预警决策

6.1 优化基于三维引擎的监测场景可视化呈现

利用 Unity3D，UE4 这样的三维渲染引擎来营造逼真的边坡数字孪生场景。把高精度地形图像和 BIM 构件融合，重现边坡的整体面貌及其细致构造。在图上标注传感器的位置，并且点击就能显示当前读数和历史曲线。变形云图通过色彩过渡直观表现边坡各个部分的位移状况。此场景支持漫游视角，剖面查看之类的交互行为，方便管理者仿佛亲临现场一样把握边坡的运行情况。这种可视化效果减小了专业难度，即便是非专业人士也能立即领悟到监测信息的核心要点。

6.2 优化多级预警机制的构建与阈值设定

创建分级警报机制有益于防范边坡灾害。按照边坡的重要程度及其变形进程，设置蓝，黄，橙，红四种警报阈值。蓝色警报着眼于变形速率出现异常增长情况，黄色警报告知累计位移靠近警戒线，橙色警报与局部失稳先兆相关联，红色警报表明将要产生整体滑塌现象。该阈值需遵照规范要求，并融合历史数据及数值模拟成果予以确定。各级别警报会启动对应的处理流程，从而保证应对举措同风险等级相符，防止出现过度应对或者应对不力的情形。

6.3 优化辅助决策支持与应急响应预案生成

预警一旦触发，数字孪生系统便给予辅助决策支持。自动关联周边环境信息，并显示影响范围之内的道路，桥梁以及居民区分布情况。凭借三维模型迅速计算出潜在滑塌范围和方量，以此来考量灾害的影响程度。按照预先设定好的应急资源数据库，给出最近的应急物资储备点和抢险队伍的位置。自动形成包含现场图片，检测数据，风险分析以及处理建议的应急响应方案，给现场指挥提供技术支撑。数字孪生平台把监测，警报，决策和处理关联起来形成闭关，从而优化应急管理的科学性与时效性。

7 结语

本文就公路边坡健康监测的需求创建起依靠数字孪生技术的完整应用框架。通过多源数据融合以及 GIS 优化 + 优化 BIM 建模形成数字基底，凭借物联网和 5G 技术达成即时感知，利用动态映射和智能算法执行状态评价，最后通过可视化和警报决策系统做到闭环管理。此体系可切实加强边坡监测的智能化水平及其风险防控能力。伴随传感器技术，仿真算法和人工智能不断发展，数字孪生在边坡工程方面的应用将会逐步深入，从而给交通基础设施的安全运行维护提供更为牢靠的技术支撑。

参考文献

[1] 时空智能赋能公路边坡监测[J].中国公路,2025,(17):43-45.

[2] 杨进昆.数字孪生驱动的公路边坡状态预测研究[D].兰州交通大学,2024.

[3] 徐行.高速公路高边坡智慧化管理实践[J].交通工程,2022,22(02):16-20.

[4] 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(06):239-242.

[5] 奚燕,姜雪明,吴珍珍,等.公路交通数字孪生应用开发平台设计与应用[J].中国交通信息化,2024,(10):82-85.