

数字孪生驱动下边坡灾害预警与应急响应机制分析

杨 鹏 仓小东*

云南云岭高速公路工程咨询有限公司 云南 昆明 650200

【摘要】：数字孪生技术为破解边坡灾害预警滞后、应急响应低效难题提供了有效路径。本文先剖析边坡灾害多维度风险及传统防控短板，再构建涵盖多源数据融合、分层数字孪生模型、动态预警、协同应急响应与技术保障的完整解决方案，最后阐述实践应用路径与动态优化策略。该机制通过虚实映射与智能推演，推动边坡防控从经验驱动转向数据驱动，提升灾害防控的精准性与实效性，为边坡工程安全管理提供技术支撑。

【关键词】：数字孪生；边坡灾害；预警与应急响应

DOI:10.12417/2811-0536.26.07.038

引言

极端气候与复杂地质条件下，边坡灾害的突发性和破坏性对工程安全及生命财产构成严重威胁。传统防控模式存在数据孤立、预警滞后、响应协同不足等问题，难以应对动态演化的灾害风险。数字孪生凭借全域感知、实时交互、虚拟推演的核心优势，成为重构边坡灾害防控体系的关键技术。其深度融合多源数据与专业模型，实现灾害风险的精准识别、预警与高效处置，为边坡安全管控转型提供了全新思路。

1 数字孪生驱动下边坡灾害的风险识别与问题剖析

(1) 边坡灾害的多维度风险识别：边坡灾害的风险孕育与地形地貌、地质结构、气象条件等多因素密切相关，其复杂性体现在风险源的隐蔽性与演化过程的动态性^[1]。数字孪生技术为风险识别提供了全域感知视角，通过整合地质勘察数据、实时监测数据与环境动态数据，构建边坡三维数字模型，精准捕捉岩土体应力变化、地下水渗流规律等关键风险指标。借助虚拟仿真技术还原边坡演化轨迹，能够识别传统手段难以察觉的潜在风险点，包括岩土体裂隙发育、坡体变形累积等隐性风险，同时实现对暴雨、地震等外部触发因素引发的风险放大效应的动态追踪，形成覆盖孕灾、成灾、致灾全链条的风险识别体系，为后续防控工作提供精准靶向。

(2) 传统边坡灾害防控中的核心问题：传统边坡灾害防控模式存在明显短板，集中表现为风险预判的滞后性与防控机制的局限性。在风险监测层面，依赖单一监测手段导致数据覆盖不全面，数据传输与处理存在延迟，难以实时反映边坡动态变化，使得风险预警缺乏及时有效的数据支撑。在防控逻辑层面，缺乏动态联动的风险响应机制，各监测单元与处置环节相互割裂，无法根据风险演化态势灵活调整防控策略。此外，传统防控手段对边坡灾害演化规律的把握缺乏

系统性，难以实现风险的精准量化评估，导致防控措施针对性不足，无法从根源上遏制灾害发生与蔓延，这些问题为数字孪生技术的介入提供了必要前提。

2 边坡灾害预警与应急响应的数字孪生解决方案构建

(1) 多源数据融合与标准化处理体系：数字孪生解决方案的构建以全面、精准的数据支撑为前提，需建立覆盖边坡全生命周期的多源数据融合机制。数据采集范围涵盖地质勘察基础数据、实时动态监测数据及环境关联数据，其中地质勘察数据包括岩土体物理力学参数、地质构造分布、地下水赋存状态等静态信息，为数字模型构建提供初始依据；实时动态监测数据通过空天地一体化监测网络获取，包含边坡位移变形、应力应变、振动信号等动态指标，实现对边坡状态的实时捕捉；环境关联数据则涉及气象降水、气温变化、植被覆盖等外部影响因素，为风险演化分析提供环境背景支撑。数据采集过程中，需兼顾数据时效性与精准度，通过优化监测设备部署密度、调整数据采样频率，确保动态数据能够实时反映边坡细微变化，静态数据能够全面覆盖地质结构关键节点^[2]。

数据采集完成后，需通过标准化处理流程保障数据质量。首先进行数据清洗，剔除异常值、缺失值等干扰数据，采用插值法、滤波法等技术手段补全数据链条，针对不同类型数据的特性选择适配的处理算法，例如对振动信号采用小波变换去噪处理，对位移数据采用滑动平均法平滑处理；随后开展数据归一化处理，统一不同来源、不同维度数据的计量单位与格式标准，消除数据异质性影响，通过建立数据映射关系将非结构化数据转化为结构化数据，便于系统统一处理与分析；最后通过数据融合算法，包括贝叶斯估计、D-S证据理论等，将多源数据整合为结构化、规范化的数据集，建立数据关联映射关系，挖掘不同类型数据间的潜在关联，确保数据在数字孪生系统中能够高效流转与深度挖掘，为后续模型构建与功能实现奠定坚实

基础。

(2) 边坡数字孪生模型的分层构建：边坡数字孪生模型的构建遵循分层设计逻辑，通过物理实体与虚拟镜像的精准映射，实现对边坡系统的全方位复刻。基础层为几何模型构建，基于高精度地形测量数据与地质勘察资料，采用三维建模技术还原边坡地形地貌、地质结构、工程设施等物理特征，通过点云数据拼接、网格划分优化等技术手段提升模型精度，确保模型在空间形态上与实体边坡高度一致，误差控制在合理范围内，同时预留数据接口，支持模型的动态更新与扩展，能够根据新的监测数据与勘察成果实时调整模型参数^[3]。

中间层为机理模型嵌入，结合岩土力学、流体力学等专业理论，构建边坡灾害演化机理模型，涵盖岩土体变形破坏机理、地下水渗流机理、灾害触发传导机理等核心内容。通过将机理模型与几何模型耦合，建立多场耦合仿真系统，模拟岩土体应力-应变关系、地下水与岩土体的相互作用、外部荷载对边坡稳定性的影响等复杂物理过程，能够精准反映边坡在不同工况下的状态变化规律，实现对边坡内部演化过程的可视化呈现与量化分析。

顶层为智能分析模型集成，引入机器学习、深度学习等人工智能算法，构建风险识别、等级评估、趋势预测等智能分析模型。该层模型以多源融合数据为输入，通过对数据的深度挖掘与特征提取，自动识别边坡风险状态，量化风险等级，预测灾害演化趋势。智能分析模型的训练需依托海量历史数据与工程实践数据，通过不断优化算法结构与参数配置，提升模型的预测精度与泛化能力，能够适应不同地质条件、不同环境因素下的边坡灾害预测需求，使数字孪生模型具备自主分析、智能判断的核心能力，为预警与应急响应提供科学决策支持。

(3) 动态预警体系的构建与优化：动态预警体系是数字孪生解决方案的核心功能模块，依托数字孪生模型的实时交互与动态推演能力，实现从风险感知到预警发布的全流程闭环管理。预警指标体系的构建需围绕边坡灾害演化关键节点，筛选位移速率、应力峰值、地下水水位变化率等核心指标，结合历史灾害数据与工程安全标准，建立多级预警阈值体系，明确不同预警等级的判定标准与响应触发条件。指标筛选过程中需采用相关性分析、主成分分析等方法，剔除冗余指标，保留对边坡稳定性影响显著的关键指标，同时考虑指标的可监测性与数据获取的便捷性，确保预警体系的实用性与可操作性。

预警数据处理采用实时流处理技术，对监测数据进行毫秒级解析与分析，通过数字孪生模型实时推演边坡状态变化，建立数据与边坡稳定性之间的动态关联模型，当监测指标达到或超出预警阈值时，系统自动启动预警流程。预警信息发布采用多渠道联动模式，整合短信、平台推送、声光报警、应急广播等多种方式，构建全方位、立体化的信息发布网络，确保预警信息能够快速传递至相关管控单元与责任主体，同时根据预警等级自动匹配对应的预警内容与发布范围，针对高等级预警实施全网推送与重点提醒，提高预警信息的针对性与时效性。为提升预警准确性与可靠性，需建立预警体系动态优化机制，通过持续收集预警响应反馈数据，分析预警偏差原因，调整预警指标权重与阈值标准，优化预警模型算法参数，使预警体系能够适应边坡状态的动态变化与外部环境的不确定性，逐步提升预警精度与响应效率。

(4) 协同联动应急响应机制设计：协同联动应急响应机制以数字孪生模型的虚拟仿真推演为核心，构建“监测-研判-调度-处置”的全链条响应流程^[4]。在灾害预警触发后，数字孪生系统立即启动应急推演功能，基于当前边坡状态数据与灾害演化预测结果，模拟不同应急处置方案的实施效果，包括资源调度效率、处置路径合理性、灾害控制效果等，为应急决策提供量化参考依据。应急资源调度模块通过整合区域内应急物资、救援队伍、交通路线等资源信息，构建应急资源数字台账，实现资源的实时可视化管理。

应急处置协同模块建立跨部门、跨区域的协同联动机制，通过数字孪生平台实现各参与主体的信息共享与实时沟通，明确各主体职责分工与协同流程，确保应急处置过程中的指令传达、信息反馈、行动配合高效顺畅，形成“统一指挥、分级响应、协同作战”的应急处置格局，提升灾害应对的整体性与实效性。

(5) 技术支撑与保障体系构建：数字孪生解决方案的落地实施需依托完善的技术支撑与保障体系，确保系统稳定运行与功能有效发挥。硬件支撑体系方面，需部署高精度监测设备，包括 GNSS 位移监测站、应力应变传感器、地下水监测仪等，构建覆盖边坡全域的监测网络，保障数据采集的连续性与精准性；同时配置高性能计算服务器、云计算平台等硬件设施，为数字模型运算、数据处理分析、虚拟仿真推演提供强大的算力支持。

软件支撑体系方面，开发集数据管理、模型构建、预警发布、应急调度于一体的数字孪生综合管理平台，具备数据集成、模型运算、可视化展示、协同交互等

核心功能,支持多终端访问与操作,满足不同场景下的应用需求。平台需采用先进的软件架构设计,确保系统的稳定性、扩展性与安全性,能够适应数据量增长与功能扩展的需求,同时建立严格的安全防护机制,保障数据安全与系统运行安全。标准规范保障体系方面,制定数字孪生在边坡灾害防控领域的应用标准与技术规范,明确数据采集、模型构建、预警响应、应急处置等各环节的技术要求与操作流程,统一技术标准与管理规范,确保解决方案的标准化实施与推广应用。

3 数字孪生驱动下边坡灾害防控机制的实践应用与优化

(1) 数字孪生防控机制的实践应用路径:数字孪生驱动的边坡灾害防控机制在实践中以全域感知、精准研判、高效处置为核心逻辑展开应用。依托前期构建的多源数据融合体系与分层数字孪生模型,将实时监测数据与虚拟仿真推演深度结合,实现防控流程的智能化运转。在日常防控阶段,通过数字孪生平台对边坡状态进行持续监测与动态评估,实时追踪风险演化态势,为预防性维护提供数据支撑;当预警信号触发后,系统快速调用应急响应模块,基于虚拟推演结果生成最优处置方案,同步调度应急资源与处置力量,确保防控措施精准落地。整个应用过程中,物理边坡与虚拟镜像的实时交互的作用充分发挥,实现防控决

策从经验驱动向数据驱动转型,提升边坡灾害防控的针对性与有效性^[5]。

(2) 防控机制的动态优化策略:数字孪生驱动的边坡灾害防控机制需依托实践反馈进行动态优化,形成“应用-反馈-迭代”的闭环升级模式。针对实践中暴露的数据传输延迟、模型适配性不足等问题,通过优化数据传输协议、升级算力支撑设施,提升数据处理与模型运算的效率;结合边坡状态的动态变化与外部环境的波动,持续调整预警阈值标准与应急响应流程,强化机制对复杂场景的适配能力。同时,通过整合防控实践中的有效经验与技术创新成果,完善数字孪生模型的算法体系与功能模块,优化多源数据融合的精准度,推动防控机制在数据感知、模型推演、决策输出等各环节的持续升级,确保其始终与边坡灾害防控的实际需求高度契合。

4 结语

数字孪生驱动的边坡灾害预警与应急响应机制,通过多维度风险识别、全链条解决方案构建及实践优化,形成了“数据-模型-决策-应用”的完整闭环。该机制突破传统防控局限,以数据驱动替代经验判断,显著提升了灾害预警的及时性与应急响应的科学性。未来需持续强化技术融合与实践迭代,优化模型适配性与机制协同性,推动该技术在更多复杂边坡场景中规模化应用,为边坡工程安全提供更坚实的保障。

参考文献:

- [1] 陈超,阿迪力·如苏力,李晓军,芮易,吕艳云,路林海.基于无人机和数字孪生的边坡施工安全动态评估与反馈方法[J].测绘通报,2025(5):131-137.
- [2] 阿迪力·如苏力,李晓军,芮易,吕艳云,王圣涛,张磊.基于数字孪生的边坡工程及时施工安全控制策略[J].同济大学学报(自然科学版),2025,53(9):1361-13711456.
- [3] 高俊勃,张海超,韦一.基于数据驱动的煤矿灾害预警与应急响应系统研究[J].山东煤炭科技,2025,43(11):76-80
- [4] 李芷媛,沈仲辉,林东,雷弯,陈慧佳.数智驱动下露天矿边坡灾害监测预警:研究进展与发展趋势[J].工矿自动化,2025,51(11):65-75.
- [5] 胡盛明,汪舟,卢永飞,马贵平,毛志斌,王清华.基于 AI 驱动的边坡地质灾害智能识别与巡检养护研究进展[J].南昌工程学院学报,2025,44(1):37-47.