

面向“地灾智治”的数字孪生平台框架设计与应用探索

——以浙江省临海市“地灾智治”试点应用为例

周丹^{1,3}, 徐德军², 魏琦³, 廖娟³, 汪晓慧³

(1. 深圳市中地软件工程有限公司; 2. 临海市自然资源和规划局; 3. 武汉中地数码科技有限公司)

【摘要】我国是多山区国家, 地形复杂、构造活跃, 地质灾害隐患分布广泛, 受强烈地震和极端气象事件频发影响, 近年我国地质灾害处于多发态势。为实现地灾防治数智化管理, 针对高风险防范区, 通过构建地下三维地质、地上三维实景一体化的全要素、全时空数字孪生模型, 以及地质灾害领域知识图谱, 精确还原真实世界中的山体、斜坡、承灾体等丰富信息; 模拟、分析和展示地质灾害变化特征与趋势, 打造地质灾害常态监测、风险预判、精确预警、科学处置的全生命周期管理业务链, 实现地灾防治历史可追溯、现状可感知、未来可推演的管理决策协同化和智能化。

【关键词】数字孪生; 地质灾害; 三维模型; 风险识别; 闭环处置

中图分类号: P694

DOI: 10.13655/j.cnki.ibci.2026.03.055

Design and Application Exploration of Digital Twin Platform Framework for "Intelligent Governance of Geological Disasters"

——Taking the Pilot Application of "Intelligent Governance of Geological Disasters" in Linhai, Zhejiang Province as an Example

ZHOU Dan^{1,3}, XU De-jun², WEI Qi³, LIAO Juan³, WANG Xiao-hui³

(1. Shenzhen Zhongdi Software Engineering Co., Ltd.; 2. Linhai Natural Resources and Planning Bureau; 3. Wuhan Zondy Cyber S&T Co., Ltd.)

【Abstract】China is a mountainous country with complex terrain, active geological structures, and widespread distribution of geological hazards. Due to the frequent occurrence of strong earthquakes and extreme weather events, geological hazards in China have been in a frequent trend in recent years. In order to achieve digital and intelligent management of geological disaster prevention and control, targeted at high-risk prevention areas, a comprehensive and spatiotemporal digital twin model integrating underground 3D geology and above ground 3D reality is constructed, as well as a knowledge graph in the field of geological disasters, accurately reproducing rich information such as mountains, slopes, and disaster bearing bodies in the real world; This paper simulates, analyzes and presents the characteristics and trends of geological hazard changes, create a full lifecycle management business chain for normal monitoring, risk prediction, accurate warning, and scientific disposal of geological hazards, and achieve collaborative and intelligent management decisions for geological hazard prevention and control that are traceable in history, perceptible in current situation, and predictable in the future.

【Keywords】digital twin; geological hazards; 3D model; risk identification; closed loop disposal

1 引言

近年来,随着全球气候变化、人类活动加剧以及城市化进程的快速推进,地质灾害频发,给社会经济发展和生态环境安全构成了严重挑战^[1-2]。传统的“人防”模式,即主要依赖人力巡查、经验判断及事后应急处理的方式,在应对复杂多变且具有高度不确定性的地质灾害时,显现出预警滞后、响应不及时等局限性^[3-4]。

本文以浙江省临海市的实际应用场景为例,通过“智治”的深入推进,以保障人民生命财产安全为目标,以防范化解地质灾害风险为主线,结合数字孪生、人工智能、云计算等前沿技术的深度融合应用^[5-6],打造风险识别、监测预警、闭环处置、灾害模拟、源头管控、安置选址、工程治理七大场景,实现全域风险主动感知、全面工程隐患管控、全链业务协同贯通的地灾防治数智化管理的新模式,有效提升抵御各类地质灾害的能力,确保人民群众的生命财产

安全和社会稳定。

2 建设思路

2.1 设计思路

“地灾智治”数字孪生平台以时空数据为底座、数学模型为核心,对地质灾害体全要素和防治管理活动进行全过程的数字化映射、智能化模拟。设计思路如下:一是建立三维地质模型,基于钻孔、高程、倾斜摄影等数据实现地上地下二三维一体化展示;二是集成物联感知数据,对接气象、水利等部门各类视频、雨量等监测设备,实现对风险区域全空间、全时段的有效监控;三是建立分析模型与预测模型,实现地质灾害风险区全生命周期科学评价与监管;四是科学闭环处置,基于数字孪生灾害预测预警模型,结合全域物联感知数据,及时进行精准预警和人员转移。

2.2 总体架构

以行政管理单位、社会公众作为用户,基于钻孔数据、高程、倾斜摄影构建地上地下一体化三维模型,统一集成“地灾智治”各类业务场景,形成“数字孪生”驱动的地灾智治场景应用服务。纵向上分为基础设施层、数据资源层、平台支撑层、应用层,横向上分为政策制度体系、标准规范体系、组织保障体系

系、网络安全体系,形成“四横四纵”的整体架构(见图1)。

3 关键技术

3.1 轻量化三维模型构建技术

建设三维仿真模型是开展临海市地质灾害风险防控数字孪生建设,进行地质灾害风险模拟仿真的基础。三维模型的准确与否,直接影响模拟仿真结果。三维模型文件的体积大小,直接影响模拟仿真的运行速度。过大的三维模型文件,会直接导致模拟仿真运行速度过缓,从而影响场景应用效果。为了解决这个问题,基于模型轻量化技术,即在不影响模型质量及信息完整度的前提下,对模型进行压缩,大幅减小模型体量,从而提高三维模型浏览与模拟仿真效果。

3.2 海量三维数据快速渲染

针对海量三维地质体在系统中快速渲染,采用高效的缓存和数据组织管理策略,实现三维空间信息显示功能,极大提升全空间海量三维场景显示性能。M3D采用改进版K-D树对数据进行组织重构,使得数据块的数据量相对均衡,并且还会把数据进行聚合操作,进一步减少数据分块。M3D标准提出了一种开放式、可扩展的三维模型数据格式及服务

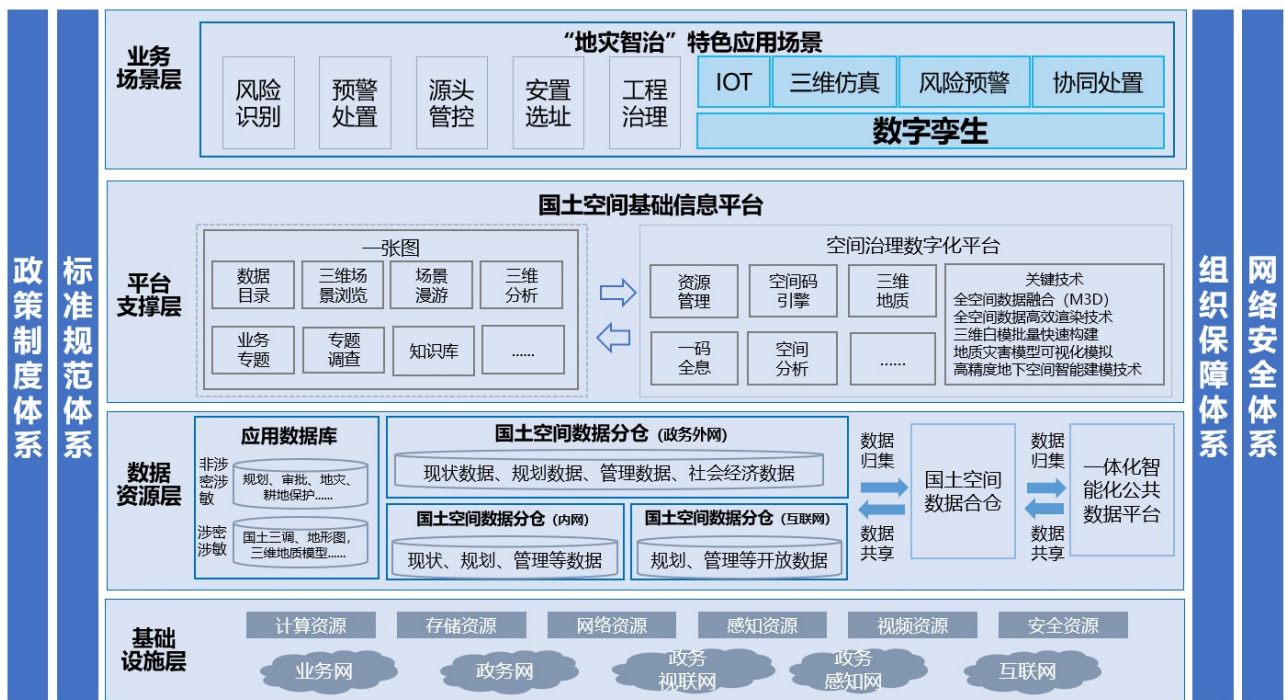


图1 总体架构

接口规范,涵盖空中、地上、地表、地下等范围的多种数据类型,是针对海量三维数据网络应用的数据交换格式,通过对海量三维数据进行网格划分与分层组织,采用流式传输模式,实现多端一体的高效解析和渲染。M3D标准为全空间三维模型数据提供统一的存储和管理规范,能够有效支持全空间数据的一体化组织、可视化、分析与共享服务,同时支持将三维地质模型数据、三维实景模型数据倾斜摄影数据等多种数据格式转换成M3D,极大地提高数据显示效率^[6]。

3.3 地灾模拟和仿真

仿真是数字孪生模型验证的关键方法。仿真和建模是一对伴生体,如果说建模是对物理实体理解的模型化,那仿真就是验证和确认这种理解的正确性和有效性的工具。仿真是将具备确定性规律和完整机理的模型以软件的方式来模拟物理实体的一种技术。在建模正确且感知数据完整的前提下,仿真可以基本正确地反映物理实体一定时段内的状态。

利用GIS数字技术及三维动画技术处理,将滑坡等地质灾害发生时的动态过程仿真模拟通过计算机显示,直观地观察滑坡等地质灾害的活动方式,为地质灾害的发生预测提供可视化的展示。建立地质灾害发生的动态滑动面和瞬间稳定系数的概念,分析滑坡等运动过程中瞬间受力状况,运动方向和速度变化,进行滑坡等运动速度、力、运动方向及时间关系的定量描述。通过动态的模拟将不同阶段的地质灾害进行仿真展示,连续图像展示滑坡的运动过程和堆积方式,在GIS支持下完成滑坡等地质灾害在三维空间中运动过程的数字仿真。

3.4 智能预警算法模型

随着遥感技术、地理信息系统、全球定位系统、计算机技术以及数学方法的发展,形成了大量的灾害相关预测预警模型方法,成为防灾减灾工作的有效工具。临海市“地灾智治”场景应用基于全域1:2000高精度风险调查成果,运用大数据、人工智能等新技术,结合临海市环境特征,综合利用GIS技术与底图代数的相关算法,包括分析诱发地质灾害的地形、地貌、气象、水文等几方面的因素,根据这些因素特点进行量化处理。选取临海市发生地质灾害的典型样本,运用主成分分析法,计算各个因素引发地质灾害的权重指数以及各风险防范区的易发级别,运

用日降雨量和降雨强度以及相关物联感知设备信息计算出地质灾害发生的概率。将地质环境条件和降雨条件、区域性滑坡临界降雨量和降雨强度的阈值、实时的气象动态信息建立基于地质—气象耦合方法的地质灾害预测预警模型。

4 结语

数字孪生技术驱动下的“地灾智治”模式,通过技术变革,沉淀一批实用工具包括数字孪生分析工具、专业制图及可视化工具,实现精准分析预测,全面提升地灾防治智能化、精细化水平。通过完善业务机制、数据共享、流程重塑,依托移动端应用,实现风险识别、监测预警、协同处置、安置选址、复盘评估等全链条闭环管理,打通地质灾害防治“最后一公里”。

基于以上模式临海市成功构建了一个集科学性、高效性和闭环管理于一体的数智化地质灾害防控体系。该体系显著提升了地质灾害风险的识别、预测、预警、预防、治理以及管控能力,极大地强化了政府在地质灾害源头上的管控和治理能力,并有效促进了跨部门之间的协同工作,为全省乃至全国范围内的地质灾害防治工作提供了宝贵的经验和可借鉴的范例。

参考文献

- [1] 钟开斌. 党的十八大以来党领导我国防灾减灾救灾事业开启新篇章[J]. 中国减灾, 2021 (13): 22-29.
- [2] 刘传正, 陈春利. 中国地质灾害防治成效与问题对策[J]. 工程地质学报, 2020, 28 (2): 375-383.
- [3] 赵梦琦, 胡孟娴, 白天, 张瑶伊, 万鹏. 城市洪涝智治中数字孪生技术的应用——以滨江区数智治水系统为例[J]. 水利信息化, 2024 (2): 29-35.
- [4] 张刘锋. 智慧隧道数字孪生应用平台技术探讨与应用[J]. 交通与运输, 2024, 40 (2): 68-73.
- [5] 王莉, 齐发明, 黄波, 等. 复杂构造条件煤岩动力地质灾害多元融合智能预警平台研究[J]. 煤, 2024, 33 (5): 32-35+52.
- [6] 高大菊. 人工智能算法在区域预警系统光电图像识别中的应用研究[J]. 信息与电脑, 2025, 37 (1): 20-22.