露天矿边坡安全监测预警技术研究进展及平台研发*

卜磊[1],章晓余[1],皮芸烽[1],李长洪[2],郑干[1],尹泽旭[1],吕嘉乐[2]

(1.中煤科工集团南京设计研究院有限公司, 江苏 南京 210031;
2.北京科技大学 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要:露天矿边坡地质灾害频发,传统监测手段在实时性、覆盖密度及智能预警方面存在局限。基于边坡安全监测预警领域的研究成果,总结了现阶段存在的不足与亟待解决的关键问题,集成物联网、云计算、大数据与人工智能技术,构建"空-天-地-深"多维多源协同感知网络,研发露天矿边坡智能监测预警平台,并进行边坡稳定性智能诊断与趋势预测。通过分级预警机制与可视化决策系统,实现风险精准识别与应急联动。实践结果表明,露天矿边坡智能监测预警平台显著提升了边坡风险的主动感知与超前预警能力,为露天矿本质安全与智能矿山建设提供了技术支撑。

关键词:露天矿边坡; 智能监测;灾害预警;监测预警平台研发

中图分类号:TD76 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)03-0120-13

Research Progress and Platform Development of Safety Monitoring and Early Warning Technology for Open-Pit Mine Slopes

BU Lei[1], *ZHANG Xiaoyu*[1], *PI Yunfeng*[1], *LI Changhong*[2], *ZHENG Gan*[1], *YIN Zexu*[1], *LYU Jiale*[2]

(1.China Coal Technology & Engineering Group Nanjing Design & Research Institute Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210031, China;
2.Key Laboratory of Ministry of Education for Efficient Mining and Safety of Metal Mines, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Frequent geological disasters occur on open-pit mine slopes, and traditional monitoring methods have limitations in real-time performance, coverage density and intelligent early warning. Based on the research achievements in the field of slope safety monitoring and early warning, the existing deficiencies and key problems to be solved urgently at present were summarized. Internet of Things, cloud computing, big data and artificial intelligence technologies were integrated, the space-air-ground-subsurface multi-dimensional and multi-source collaborative sensing network was constructed, the intelligent monitoring and early warning platform for open-pit mine slopes was developed, and intelligent diagnosis and trend prediction of slope stability were carried out. Through a graded early warning mechanism and a visual decision-making system, accurate risk identification and emergency linkage were realized. Practical results show that the intelligent monitoring and early warning platform for open-pit mine slopes significantly improves the proactive perception and advanced early warning capabilities of slope risks, and provides technical support for the intrinsic safety and intelligent mine construction of open-pit mines.

Key words: Open-pit mine slope, Intelligent monitoring, Disaster early warning, Development of monitoring and early warning platform

0 引言

露天开采是一种重要的矿产资源高效开发方式。随着开采规模不断扩大,开采深度及边坡高度也随之大幅增加,由此而引发的边坡稳定性问题也会变得日益严峻,直接影响矿山安全生产及经济效益。露天矿边坡出现失稳状况,其所引发的滑坡、崩塌等地质灾害不仅具有突发性较强、破坏力极大的特点,而且还往往会造成灾难性后果,例如,造成极为惨重的人员伤亡、巨额财产损失(大型采运设备遭到损毁、生产系统陷入瘫痪状态)、矿产资源损失,以及生态环境遭受严重破坏(河道出现堵塞、植被受到损毁)等,对矿山的可持续运营及区域社会的稳定发展均构成极为严重的威胁。根据权威部门所做的统

* **收稿日期**:2025-10-09
基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC060808402);中煤科工集团南京设计研究院有限公司科技创新项目(ZL23-KY03)
作者简介:卜磊(1989—),男,安徽马鞍山人,博士研究生,工程师,主要从事露天矿边坡安全监测预警方面的研究工作。E-mail: playbkdok@163.com

计来看,在近十年的时间里,全球范围内所发生的重大露天矿边坡灾害事故,已经造成了数百人伤亡,并且产生了数十亿美元的直接经济损失,单次滑坡事故所造成的经济损失就能够达到数百至上千万元。在我国矿山领域中,因为边坡失稳而导致的事故同样占据着相当的比例,其惨痛的教训时刻警示着边坡安全监测预警具有极其重要的意义,例如,2023年2月,内蒙古阿拉善左旗新井煤业露天煤矿发生了大面积的边坡坍塌,造成了严重的人员伤亡和财产损失。因此,高效、精准且先进的边坡监测预警技术已成为露天矿安全管理的核心需求。

伴随着信息技术和岩土工程的融合发展,边坡监测由早期的人工点式测量发展到自动面式扫描,再发展为空天地一体化监测,相应的预警平台也逐渐从人工预警方式转变为现阶段智能云边协同的综合预警平台。现行的露天矿边坡监测方法包括人工巡查、全球导航卫星系统(GNSS)、全站仪、测斜仪、合成孔经雷达干涉测量(InSAR)等。上述方法各有优势,但因露天矿的地质环境复杂、多变且作业条件恶劣,再加上存在大量的数据需要处理,露天矿边坡监测预警仍然存在不足之处,如监测点覆盖面不足、缺乏实时性、自动化程度低、信息孤岛现象严重、预警响应慢等问题,很难满足现代矿山安全管理“早识别、早预警、早处置”、防控关口前移的安全要求。鉴于此,深度融合物联网、云计算、大数据分析及人工智能等新一代信息技术,研发露天矿边坡智能监测预警平台,以解决上述问题具有重要意义。以露天矿边坡智能监测预警平台系统研发及工程应用为主要研究内容,针对露天矿边坡“空-天-地-深”多源异构一体化传感监测实时数据融合的需求,提出基于时空感知的露天矿边坡智能监测预警平台系统框架。通过云端大数据中心,汇集处理大量的监测数据并实现高效管理;针对边坡的稳定性状态,运用预警模型算法,包括区域降雨量预警、单体累计变形量/变形速率预警、改进切线角预警等,实现边坡稳定性状态的智能诊断与演化趋势预测;基于多级预警模型及可视化决策支持系统实现边坡隐患信息的实时推送、精准预警、应急联动。通过研发与应用智能监测预警平台,显著提升露天矿边坡安全风险主动感知能力、智能分析能力及超前预警效能,助力构筑全天候、全时段、全方位、立体化、一体化的“安全屏障”,进而转变为真正的边坡安全全生命周期风险管理,有效防范露天矿边坡地质灾害的发生,切实保障人员生命安全和生产秩序稳定。本研究对于露天矿山行业的安全生产和转型升级具有重要的应用价值和现实意义。

1 露天矿边坡安全监测预警技术研究进展

当前国内诸多学者和专家积极探索并研究各类监测技术方法对露天矿边坡地质灾害的适用性,具体可从以下四方面展开论述。

1.1 点式监测技术

点式监测技术依据离散点位测量原理开展相关工作,在边坡关键部位的变形分析方面有着较为重要的应用价值。传统的大地测量方法,如经纬仪和水准仪,虽说操作方法相对简单,使用成本较低,但其监测效率较低,监测周期较长,且工作强度较大,因此很难契合现代矿山对于高频率及连续性监测的实际需要。为了弥补上述不足,自动全站仪(即测量机器人)开始逐步在边坡监测中得到应用。该设备依靠自身内置的步进马达及CCD传感器阵列,成功实现了对棱镜目标自动搜索、精准识别及精确测量的目的。然而,这种方法依旧要依靠通视条件,当处于雾天、雨天或者存在扬尘等恶劣的气象环境时,其性能会受到明显的影响,并且其有效监测距离通常会被限制在1 km以内。

GNSS在点式监测技术领域发挥了重要作用,其依靠接收空间卫星信号以获取地表监测点的三维坐标,无通视条件限制,可全天候、实时连续监测。齐迹等[1]以鞍钢露天矿GNSS在线监测数据为基础,探究了观测距离与时长对测量精度的影响,并以此构建了三者之间的多元非线性回归模型。目前国际上广泛使用的GNSS主要涉及中国北斗卫星导航系统(BDS)、俄罗斯GLONASS、美国GPS及欧盟Galileo。其中,连续运行参考站系统(CORS)作为GNSS的重要应用形式,由若干永久性基准站、数据处理中心与通信网络组成,大幅提高了露天矿边坡监测的作业效率与定位精度。吴浩等[2]设计了一套集成GNSS/GIS的露天矿高边坡变形监测系统,采用直接计算法快速固定GNSS整周模糊度,结合光纤传输实现变形数据的实时采集与解算,引入模糊综合评判方法,综合黏聚力、内摩擦角、坡高、坡度及位移速率五大参数,对边坡稳定状态进行分级评估,实际应用结果表明,该系统可实现边坡变形的智能监测与多级预警,为矿山安全提供了有效的技术支撑。

GNSS技术在实际应用中存在如下的一些局限性:

(1) 太阳能供电系统在极端气象条件下容易发生中断,影响数据采集的连续性;

(2) 单点监测难以全面反映边坡的整体变形行为,而增加监测点密度又会大幅提高成本;

(3) 在陡峭边坡区域,监测设备容易被落石破坏或滑坡掩埋,可靠性降低。

需要关注的是,虽然 BDS 在单点定位精度方面略低于 GPS,但通过 BDS/GPS 联合监测模式可有效将定位精度提升至毫米级别,极大增强了系统在实际工程中的可靠性与适用性。

1.2 面式监测技术

面式监测技术突破了点式监测在空间覆盖方面的局限性,实现了针对边坡表面变形的全场测量及可视化分析操作。边坡稳定性监测雷达(SSR)属于当下面式监测里较为先进的一种技术手段,它是依靠向边坡表面发出电磁波,而后凭借其对回波相位差变化情况的解析以反演出岩体位移状况。该系统综合运用干涉测量、步进频率连续波(SFCW)及合成孔径雷达(SAR)等多种技术,能够实现亚毫米级别的精度及数公里量程的位移监测。丁辉等[3]基于蠕动变形三阶段理论建立真实孔径雷达预警模型,研究不同时间窗对滑坡时间预测的影响规律及速度倒数法预警模型线性拟合方法。陈涛等[4]剖析了地基合成孔径雷达在露天矿边坡灾害监测预警系统中应用的相关原理、各项关键参数及自身所具备的特点,同时对监测所得出的边坡位移情况及形变速率图像进行了相应分析,得出其所呈现的动态规律。

地面三维激光扫描(TLS),主要是借助实景复制技术以获取边坡表面的三维点云数据,进而依据高速激光扫描获取的数据构建出高精度的数字模型。与摄影测量不同的是,TLS 不用设置任何像控点,对地表纹理的依赖程度较低,环境适应能力较强,这项技术可以有效地识别出边坡的整体位移走向。然而,TLS 依然存在着一些不足:其一,设备使用成本相对较高,且多数依靠进口;其二,它只能获取到表面的变形信息,难以探测深部的位移情况;其三,点云数据的处理流程较为复杂,在进行远距离扫描时,点密度降低会直接对模型精度产生影响。

1.3 立体监测预警网络

随着遥感技术不断发展,露天矿边坡监测已演化为多维协同、多平台集成的技术体系,形成了“空-天-地-深”一体化立体监测预警网络。

在天基监测技术方面,InSAR 属于代表性技术。InSAR 技术解读不同时期 SAR 图像所呈现出的相位信息,以此反演出地表的形变情况。许强等[5]使用星载 InSAR 技术追踪观测边坡表面出现的形变情况,以此实现滑坡变形监测。李如仁等[6]提出了一种将短基线子集干涉测量(SBAS-InSAR)技术与 COMSOL 有限元模拟相融合的方法,该方法能够统一边坡稳定性分析及形变预测这两项内容。为了缓解传统差分干涉测量(D-InSAR)易受到大气延迟及时空失相干的限制,多时相干涉测量(MT-InSAR)方法便广泛被应用于边坡大范围隐患筛查工作。以法国的某个矿山为例,InSAR 所获取的监测精度和传统测量手段较为一致,但其还具有覆盖范围较广(能够达到数百平方公里)、成本相对较低的显著优势。然而,这项技术对于毫米级以下的微小形变的识别能力有限,并且还受到卫星重访周期的制约,现阶段要实现实时预警还存在一定难度。魏恋欢等[7]针对深凹露天矿高陡边坡的形变监测难题,在 SBAS 技术框架下,提出了一种基于地形数据求解坡向形变的计算方法,利用这种方法对大孤山铁矿的三组 Sentinel-1 合成孔径雷达数据进行分析,得到沿雷达视线方向的形变,接着将沿雷达视线方向的形变转化成坡向,通过将坡向形变序列与高精度的测量机器人数据及降水资料进行交叉验证与关联分析,系统评估了矿坑边坡的稳定性,并甄别了其关键影响因素。

空基监测技术主要依靠无人机平台搭载摄影测量及激光雷达技术,凭借自主飞行的方式采集高分辨率的边坡光学影像与点云数据,进而生成高精度的数字高程模型(DEM)。金爱兵等[8]研究表明,镜头俯仰角在 70°~90°范围内可显著提升坡面测量精度。经 PhotoScan、Surfer 与 Rhino 等软件处理,可实现从地形数据到 FLAC3D 三维数值模型的快速构建,为边坡稳定性分析提供精确的几何基础与仿真条件。针对矿山环境中存在强磁场干扰这一问题,目前已研制出配备双天线 GPS 定位系统的无人机平台,借助冗余定位的设计能够有效地保障数据采集的精度。近些年来,随着人工智能图像识别技术的引入,无人机在边坡监测中的应用场景又有了进一步的拓展,比如基于深度学习的非法开采区域识别及地表裂缝自动检测等技术,为边坡灾害风险的早期识别与预警提供了新的技术路径。

从地表监测技术来看,KARUNATHILAKE 等[9]运用地基合成孔径雷达技术开展边坡位移方面的监测工作。DU 等[10]将 GNSS 和实时运动定位技术联合起来运用在滑坡变形监测领域。葛山峰

等[11]以安家岭矿北帮区域的地基干涉雷达历史监测数据为基础,同时结合边坡的实际破坏状况,综合设定实际预警指标。韩流等[12]考虑到露天矿边坡监测对覆盖范围、监测精度及预警及时性的特殊要求,引入刚体运动模型,建立了计算边坡雷达监测单元位移量与变形速率的误差模型,进而整合了边坡雷达监测在大范围覆盖方面的优势与 GNSS 监测在高精度数据获取方面的优势,创新性地提出了针对露天矿场景的"边坡安全评价-边坡雷达覆盖式监测-GNSS 精准预警"一体化边坡监测预警技术体系。

深部监测技术主要针对边坡深部变形的过程开展监测。其中,时域反射技术(TDR)、阵列式位移计(SAA)及微震监测系统均发挥了关键作用。TDR 系统是由电脉冲信号发生器、同轴电缆及信号接收器组合而成,通过对因电缆变形而引发的反射信号特征加以解析,可以实现对边坡内部滑移面的精确定位。国内研究结果显示,TDR 监测结果和测斜仪数据的一致性能够达到 90%以上,同时还具备成本较低、自动化程度较高的优点。SAA 通过获取边坡内部连续的分布式位移场,实现了对潜在滑动面空间位置与演化趋势的精准辨识及实时监测,其优势在于能够以毫米级的精度原位且全断面地监测边坡深部的变形情况,进而提前预警渐进式的破坏并精确定位剪切滑移带。微震监测则是通过捕捉岩体破裂所产生的弹性波信号,反演出边坡内部损伤区的演化规律,以此为潜在滑动预警提供力学方面的依据。

1.4 系统集成及平台研发

单一监测技术具有一定的局限性,无法完全反映露天矿边坡复杂的变形机理。而多源异构数据融合分析能够提升边坡状态精准感知及预警能力,主要包括数据级融合和特征级融合两个方面。其中数据级融合指的是将不同传感器采集到的原始观测数据通过融合的方式合并成组或批量处理,并从中提取一致性高的变形信息。比如可以将 GNSS 获取的坐标数据与 TLS 产生的点云数据进行空间配准形成统一时空基准下的边坡变形场,在 GNSS 中运用恒星日滤波剔除多路径误差的影响。在特征级融合方面,王立文等[13]以边坡雷达、GNSS 为核心监测手段,形成了基于边坡雷达及 GNSS 监测结果的边坡灾害事件预警监测体系,该监测预警体系依托滑坡位移-时间曲线确定边坡岩体变形阶段划分方式及滑坡突发性程度等级判断准则,并结合应急响应手段建立了边坡预警的预警分层分级处置响应机制。该方法从多源监测数据(如 GNSS 位移速率、微震能量释放率、光纤应变突变值等)中提取出与边坡稳定性相关联的特征参数,形成模式识别和状态评估的多维特征向量。平朔安家岭露天煤矿工程实例表明,通过对位移序列和降雨数据的相关性进行分析,该体系已多次准确地完成了暴雨诱发型滑坡预警。马明红等[14]为探明先锋露天煤矿北帮边坡的失稳机制,在其原有的变形条件下建立了 1 条新的监测线,采用地表、深部位移监测及降雨监测等多源监测方法,将获得的数据进行处理后,采用有限元数值模拟软件进行分析,得到变形区总位移、剪应力分布、剪应变增量及弹塑性区变化规律,并通过对比数值模拟结果与现场实测数据检验计算模型的准确性,为边坡稳定性评价及灾后治理提供了理论指导及实践经验。

露天矿边坡监测预警平台经历了从分散独立系统朝着集中化、智能化方向发展的历程。早期的预警系统大多是单机版软件,其功能比较单一,主要是依靠预设阈值的简单报警机制发挥作用,例如在位移速率超出所设定的阈值时会触发警报。然而,鉴于边坡地质条件存在着明显的差异,统一的静态阈值难以适应复杂的实际工况,通常会出现误报或者漏报的情况:部分边坡在位移超出限定范围之后依旧处于稳定的状态,而部分没有达到阈值的边坡已经发生了失稳。新一代预警平台采用云边协同架构,充分借助边缘侧的低延迟响应及云端强大的计算存储能力,以此实现智能分析与决策。郭子林等[15]运用多系统一体化集成模式,结合遗传算法与综合指数法,实现了参数的自优化和智能加权,以此构建了边坡风险综合预警模型,并同步开发出一体化智能预警平台,该平台可集成地表位移与形变、岩体振动、地下水、气象条件及视频监控等多源监测系统,实现监测数据与预警功能的协同整合,有效地解决了以往预警中存在的准确性低、延迟性高、可靠性低、预警指标单一及协同能力不足等问题,为采场边坡的安全防控与治理提供了有力支撑。当下,该平台已经在司家营铁矿顺利应用,实现了对露天矿全天候、立体化的边坡风险精准预警与分级管控,极大地提高了边坡灾变的应对能力及风险防控的智能化水准,对于同类露天矿边坡的预警与灾害防治具有重要参考价值。王树海等[16]从露天矿边坡稳定性及设备人员安全两个维度出发,针对地质灾害监测、设备状态监测、人员定位及安全行为监控等多方面展开了系统性研究,通过引入遥感技术、传感器网络

及数据分析方法等方式,实现了对露天矿山生产全流程的实时监测,构建了一套包含边坡、设备与人员安全状态的综合性安全监测系统。苏白燕等[17]以地质灾害的诱发因素与形成机制为核心依据,针对传统模式下数据管理效率低、实时监测数据处理滞后性强、预警模型构建缺乏针对性等问题,整合了实时数据传输、多源数据可视化与动态数据驱动建模技术,建立了一套新的监测预警方法。该体系使用阈值判断、演化过程跟踪与时空综合预警模型,并依托服务流引擎与数据库,最终研发出一个网络化地质灾害动态监测系统,该系统具备实时数据查询、自动化分析、动态图表生成及灾害自动预警等核心能力。杨天鸿等[18]提出"位移时序阈值-力学机理分析-案例推理"三位一体的智能评价体系,融合微震、GNSS 等多源数据,可实现边坡稳定性的动态诊断与预警。刘善军等[19]强调空-天-地协同观测架构,集成 S-SAR、GNSS、InSAR、无人机与红外热像等多种手段,通过云平台整合多源监测信息,构建具备多终端显示与智能分析功能的综合系统,该集成化平台实现了对边坡变形过程的实时追踪与多级预警,显著提升了矿山安全管理的响应能力与决策水平。

综上所述,露天矿边坡监测预警技术正经历着重大变革,从传统的单点离散模式朝着"空-天-地"一体化的方向转变,并从依靠人工判读逐渐转向智能预警。在当下主流的技术当中,GNSS 因具有不受天气影响及实时性高的优势,仍是用于监测地表位移的主要手段。边坡雷达虽有着非常出色的监测精度,但其昂贵的成本对其推广应用形成了限制。三维激光扫描和无人机摄影测量这两种技术在针对面状监测时能够形成有效的补充。InSAR 被广泛应用于区域筛查工作,再结合 TDR 或者 SAA 实现对深部滑移的定位,进而共同搭建起一个具有多层次且能实现全覆盖的边坡监测网络。监测预警平台的架构也不断发展变化,逐渐演变成了云边协同的模式,通过融合多源数据,结合智能风险评估及动态响应机制,显著提升了预警的时效性及对决策的支持能力。

2 现阶段研究的不足之处及关键问题

2.1 现阶段研究的不足之处

(1) 露天矿边坡监测预警技术虽取得了一定的发展,但对复杂环境的适应性较弱。而在寒区施工时,寒区露天矿一般会选择冬休生产。因此,在冬季开展露天矿边坡监测预警具有重要意义。另外,在此期间,使用常规传感器测得的数据精度很低,尤其是对于环境温度低于-30 ℃条件下的数据采集而言,在冻胀作用下,钻孔测斜仪导管发生形变,进而导致深部位移监测数据可靠性低;同样地,降雨量大、连续性较强会导致雷达监测信噪比降低及 GNSS 多路径效应增强,在边坡雷达观测与 GNSS 监测的过程中会出现跳变现象,增大监测误差与预警的不确定性。

(2) 与传统的阈值预警模型相比,深度学习模型在拟合数据方面具有很好的效果,但在内部的决策机理方面难以解释清楚,一般会被认为是"黑箱",这也是工程人员不易追踪预警的真正原因。系统发出红色预警信号时,因未基于力学机理或具体规则给出合理的解释,可能会降低管理者对预警结果的可信度,因此可能会导致该阶段决策不当或延误。此外,多源监测信息存在差异大的异构性特点,对不同来源的监测信息往往难以进行有效的统一分析和综合评价,特别是难以适应在短时间内对突发事件进行快速响应决策的要求。比如,InSAR 的数据更新频率与 GNSS 的数据更新频率差距较大,容易导致不同源数据间时间尺度不一致的问题。

(3) 当前难以突破成本与普适性的矛盾是露天矿边坡监测预警技术推广的主要问题。例如,边坡雷达这类高端设备,单套的价格动辄高达百万,这样的价格对于绝大多数中小矿山来说都是难以承受的,因此会对推广应用造成一定困难。而国内 GNSS 设备虽然采购价格较为便宜,但是其防水、防潮性能较差,硬件更新迭代速度快需要长期维保,且后期更换成本较大,未能体现出长期价格较为优惠的特点。

(4) 现阶段缺乏大数据平台对海量数据进行管理,进而挖掘应用,露天矿边坡地质灾害相关数据来源多、类型多、存储难,除物联网实时监测数据外,还需卫星数据、航拍数据、三维数据等多类数据,普通监测平台仅对监测数据进行管理,传统监测软件没有专业预警模型,预警方式单一、监测数据展示单调,未能结合 GIS 等相关技术实现数据可视化等。

2.2 露天矿边坡安全监测预警关键问题

露天矿边坡并非静态结构,它处于一个复杂的"应力场-渗流场-损伤场-化学场"等多物理场动态耦合环境中。爆破振动、降雨入渗、地下水位波动、岩体风化等均会显著改变边坡的稳定状态。当前的科学难点在于尚未完全厘清这些场之间如何相互作用、相互激发,并最终导致灾变的非线性演化路径。例如,微小的应力场变化如何加剧岩体内部的

损伤场演化,进而如何改变地下水的渗流场变化,而渗流场的改变又如何反过来软化岩体、降低其强度,形成一个正反馈的循环作用。因此,提出边坡跨尺度多场耦合灾变时空演化前兆识别理论及预警阈值动态设定方法,并构建“空-天-地-深”多源异构数据融合智能感知及大数据动态预警智能诊断技术,是该领域未来亟需解决的关键科学问题。

(1) 边坡跨尺度多场耦合灾变时空演化前兆识别理论及预警阈值动态设定方法。露天矿边坡失稳是一个由量变引起质变的渐变过程,边坡内部微细裂纹逐渐产生、扩展、贯通形成宏观滑移面。因此,需要研究微破裂、裂缝发育、局部变形直至大范围滑移现象之间的跨尺度规律;探明边坡失稳临界点附近存在的普适性可观测物理前兆信号;利用统计物理、损伤力学及分形理论建立能够识别露天矿边坡破坏前兆的新理论。露天矿边坡属于典型的复杂巨系统,其内部存在的节理、断层、软弱夹层等物质形态具有很大的空间变异性,外部载荷也具有随机性和不确定性,这导致边坡系统的灾变演化路径具有显著的不确定性和潜在的混沌特性。传统的基于确定性模型与固定阈值的预警方法在一定程度上难以发挥其作用,不同边坡或是同一边坡不同灾变演化阶段的失稳临界阈值均不同。鉴于此,需要基于概率论、模糊数学和深度学习的动态预警理论,结合实时监测数据自适应判断边坡系统目前距离失稳破坏的距离,并且可以随着预警模型的运行,实现预警阈值的自适应更新,进而实现从“静态阈值报警”到“动态风险预警”的范式转变。

(2) “空-天-地-深”多源异构数据融合智能感知及大数据动态预警智能诊断技术。单一监测手段难以达到理想的效果,需要建立由卫星 InSAR(广域形变)、无人机航拍(精细地形)、地表 GNSS/测量机器人(控制点位移)、测斜仪/地下微震(内部变形)及物联网传感器(应力、水位、降雨量)等多维度相结合的立体化监测网,亟须实现对同/异时/空分辨率、高/低精度、多样化的物理解释度等海量多源异构数据的自动获取、标准化及时钟同步,并通过多源数据融合方法(如卡尔曼滤波、贝叶斯估计、深度学习等),建立多方位精准再现边坡整体安全态势的“数字孪生”体系,破除信息孤岛,达成协同感知,进一步发掘有用信息以便决断分析[19]。传统的力学模型原理直观明了,但不能完全适用于实际现场的复杂问题,需要研究一套综合考虑时间序列数据、空间数据和环境数据的智能诊断技术。利用长短期记忆网络捕捉位移随时间变化的规律;利用图神经网络来建模观测点之间的空间联系;利用卷积神经网络从 InSAR 形变场图中发现异常位置。以此形成基于自适应、自学习的连续动态预警模型,基于历史数据和实时数据不断完善模型参数,对未来可能出现的短期临滑灾害做出准确预测。借助 BIM+GIS 三维可视化技术,将复杂的监测数据、模型分析结果及预警等级转换成直观易懂的决策信息,建立基于风险的预警响应机制,并将预警信息、人员或设备的撤离路线、生产调整方案等内容有机联系起来,实现“监测-分析-预警-决策-处置”的闭环联动智能管控。

3 露天矿边坡地质灾害智能监测理论进展及预警平台研发

3.1 露天矿边坡地质灾害智能监测理论进展

露天矿边坡安全监测预警系统是一个包含数据采集、传输、分析和决策的复杂系统,它深度融合了地质工程、岩土力学、传感器技术与大数据分析等多学科专业,通过“空-天-地-深”一体化的立体监测网络,构建起来的一套感知智能化、分析精准化、预警实时化、管理一体化的综合防控体系,可实现对边坡失稳风险的超前感知、科学预警与精准防控,最终为矿山的安全生产和员工生命财产安全提供技术保障。随着科技的进步,智能监测预警技术在物联网、人工智能、边缘计算等技术的作用下实现了跨越式发展。

(1) 从单点监测到全场感知。物联网架构可整合 GNSS 定位、InSAR 遥感、岩体应力传感器、视频监控等多源设备,实现边坡表层位移、深部裂隙、局部应力等参数的全域覆盖监测,消除传统单点监测的空间盲区,构建起“地表-岩体-周边环境”一体化感知网络。任开瑀等[20]通过时序 InSAR、GPS 和光学遥感影像偏移测量分别对不同地点进行监测,在确保结果准确的条件下,提出将三种监测数据进行优劣互补,InSAR 可以弥补 GPS 监测只能单点监测、不能大范围监测的缺点,而 GPS 监测可以解决 InSAR 在重点地区分辨率低的问题,光学遥感影像偏移测量可以弥补 InSAR 受变形梯度的影响造成的失相干问题。多种监测方法的融合应用,已成为露天矿边坡地质灾害智能监测发展的必然趋势。

(2) 从静态分析到动态演化,通过边缘计算实时处理海量监测数据,结合时序预测模型捕捉边坡变形的细微趋势,将过去定期数据分析升级为秒级动态追踪,精准还原边坡从稳定状态到渐进变形的

演化过程,提前识别潜在失稳征兆。MA 等[21]使用了一种最新的深度学习模型时序图卷积网络(T-GCN),该模型结合了可用于处理空间相关性的图卷积网络(GCN)和可用于处理时间相关性的门控循环单元(GRU),从而在动态的时空关系中预测边坡的整体变形趋势。未来这种动态智能监测体系将深度融合多源信息,形成能实时感知和精准预测的“矿山安全大脑”,实现从被动响应到主动保障的根本性跨越。

(3) 从阈值报警到智能预警。引入深度学习算法融合历史失稳案例、实时环境数据,建立分级预警模型,不仅能突破“固定阈值触发报警”的局限性,还可根据变形速率、应力突变幅度自动判断风险等级,同步生成针对性处理建议,并实现对边坡灾害风险的精准预警。郭延辉等[22]通过改进西原模型优化其切线角公式,以边坡临滑切线角为依据,得到预测区间作为预警判据。袁利伟等[23]提出了一种新的预警分析方法,构建了包括内摩擦角、黏聚力、开采边坡角、结构面倾角差和开采扰动速率在内的滑坡预警指标体系,再通过 PCA-G1-ET 联合模型判定预警等级。报警阈值不应是一个固定的常数,而应随着采矿活动、季节变化、边坡不同位置和不同监测手段而动态调整,通过关联这些多维度因素,使报警阈值具备自适应性,从而更精准地反映边坡实际风险状态,为露天矿安全生产筑牢技术防线。

3.2 预警平台整体技术构架

中煤科工集团南京设计研究院成功开发了一套露天矿边坡地质灾害超前感知与智慧诊断综合平台。该平台运用 Spring Boot 等服务模式实施开发,能够迅速地将服务予以拆分,并且借助 Spring Cloud 等微服务框架达成微服务架构,让系统的各个板块均实现模块化,从而使系统变得更加灵活,能够依据客户的实际业务量实现弹性扩展[24]。该平台的整体技术架构涵盖:硬件设施、软件支撑部分、能力底座平台层、应用层及呈现输出层。平台功能模块主要划分成:大数据支撑平台系统(包含数据对接模块、数据计算存储模块、统一认证模块及可视化管理模块)、灾害数字孪生底座系统(涵盖静态场景构建模块、动态数据融合模块、灾害模拟推演模块、数据分层切片处理模块及数据分发服务模块)、多维风险预警模型系统(涉及设备稳定性评价模块、单体预警模块、区域预警模块及综合预警模块)、多源监测门户系统(囊括成果展示模块、开发服务模块、决策驾驶舱模块及门户导航模块)、监测预警系统(包含监测设备管理模块、隐患点管理模块、监测数据管理模块及视频统一管理模块)及移动端系统(涉及项目管理模块、设备安装调试模块及视频统一管理模块)。系统平台界面如图 1 所示。



图 1 系统平台界面

Fig.1 System platform interface

该平台突破了传统露天矿边坡地质灾害领域监测指标单一、预警时效滞后的问题,融合“空-天-地-深”四位一体的多源协同感知技术,实现露天矿边坡安全态势多源异构数据协同监测感知与地质灾害智能诊断预警。该平台具备多源指标协同监测、临界灾变数据自适应高频采集、灾害数字孪生可视化底座、大数据风险预测分析等功能,创新集成多预警模型对边坡安全态势进行智能诊断,例如,单体累计变量/变化速率预警、改进切线角预警、降雨量预警、组合预警等算法。基本查询业务响应时间≤1 s,实时统计页面响应时间≤3 s,并通过信创环境的适配测试认证。该平台具备技术先进性及知识产权完整性,系统平台技术架构如图 2 所示。

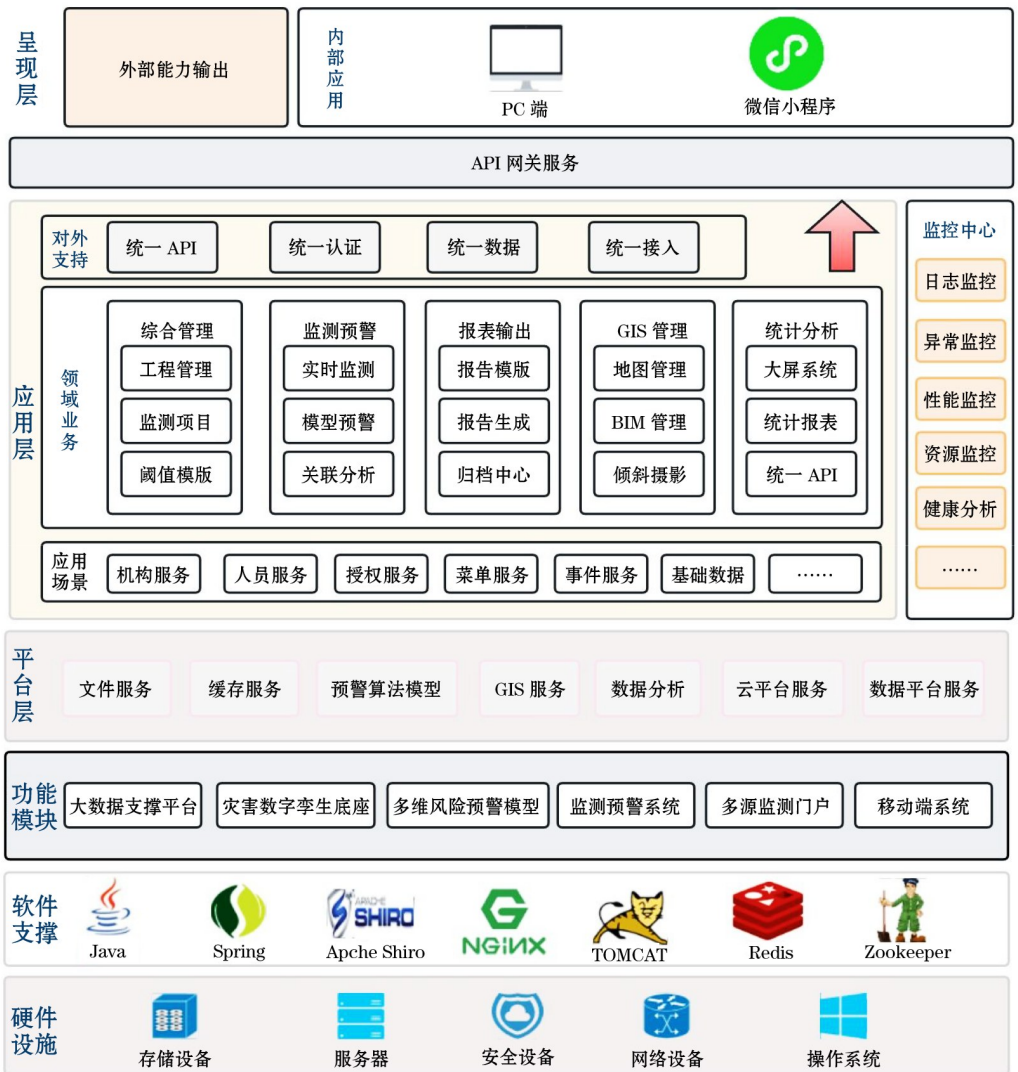


图 2 系统平台技术架构

Fig.2 Technology architecture of the system platform

3.3 平台预警模型设计

平台预警模型的开发与部署采用微服务架构,将 Java、Python 等作为开发测试的语言与工具,对各类预警算法进行实现与封装,进而开发出适用于不同灾害类型的核心预警计算模型。此类模型将以微服务形式开展管理与运行工作。通过对模型进行分类构建并借助微服务实施管理,能使预警模型自身的扩展性、可维护性及兼容性得到提升。同时,利用微服务可实现分布式的运行与管理,这有助于增强核心预警模型的数据接入能力。即便在面临大量监测点数据接入的预警需求时,仍可实现优良的实时处理性能。预警模型开发构建的核心在于预警计算服务。针对露天矿边坡地质灾害,需对降雨量、切线角、累计变形、变形速率等相关的预警核心算法进行封装,开发相应的预警服务。当不同的监测数据接入后,会立即调用对应的预警模型进行实时计算,

根据计算得出的预警系数,对应发布红、橙、黄、蓝四色预警,预警模型分类构建如图 3 所示。

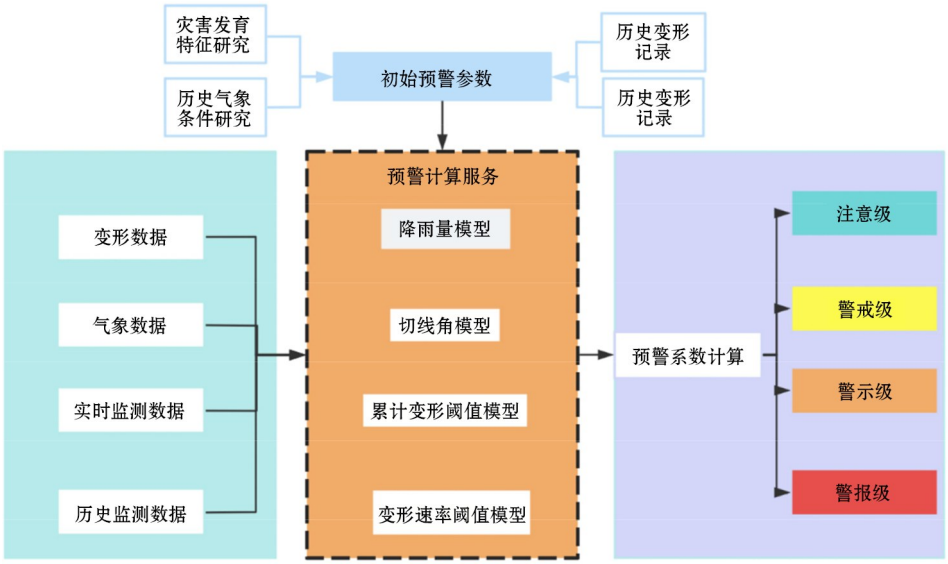


图 3 预警模型分类构建

Fig.3 Classification construction for early warning model

系统输入的数据包括当前的变形数据、气象数据、边坡实时监测数据及历史监测数据,模型根据输入数据调取预警参数后进行动态判定。预警服务所需的初始预警参数记录在数据库中,如监测指标权重与阈值等。预警整体流程如图 4 所示。

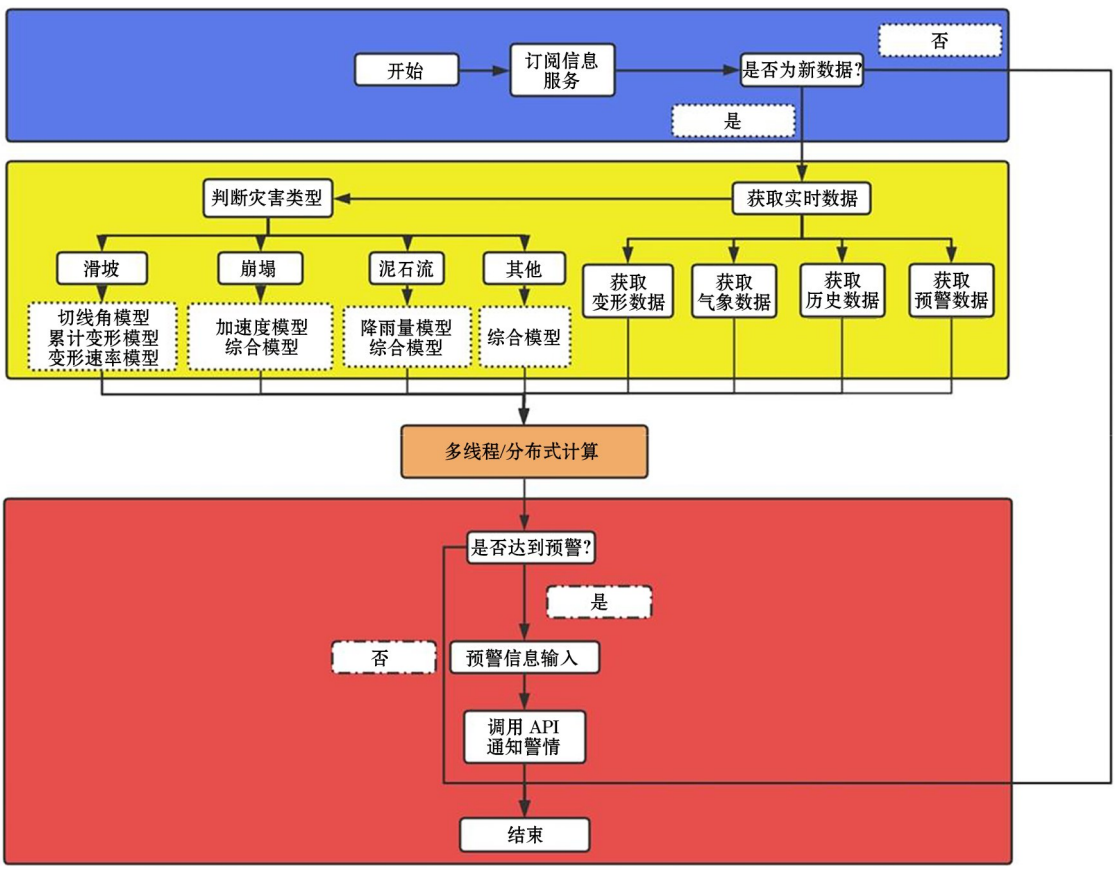


图 4 预警整体流程

Fig.4 Overall early warning process

(1) 消息订阅服务由模型预警服务搭建,监测预警系统接收到实时的设备数据后,通过推送消息的方式将实时监测数据推送至模型预警服务消息中心。模型预警服务通过订阅消息获取新的监测数据。

(2) 变形数据从灾害点信息中获取,预警参数为模型预警服务中针对灾害点配置的相关参数,通过查询缓存或者数据库来获取。

(3) 消息推送的实时数据中,需直接或间接包含隐患点信息(编号、灾害类型等)、监测设备信息(设备编号、传感器编号等)等关键业务信息,从而保证模型预警的正常取值和计算。

基于露天矿边坡安全监测数据的实际情况,并且综合考量研究区域范围及单体边坡失稳滑坡间的自然关联关系,研究制定了三种类型的露天矿边坡安全监测预警模型[25]。

(1) 区域型降雨诱发边坡滑坡预警:主要依托对研究区域内降雨量监测数据的分析来确定预警等级,进而提示管理人员或现场监测负责人等开展必要的检查并予以重点关注。

(2) 单体型边坡失稳滑坡变形监测预警:重点针对单体边坡灾害的变形监测数据进行分析,通过现场调查、室内试验及综合数值模拟等多种技术手段,获取单体滑坡的判据条件。此处所述的判据条件包含累计变形量与变形速率两类指标。基于上述判据,依据变形监测数据确定单体滑坡所对应的预警等级。

(3) 长期监测数据综合预警:其核心研究对象为具备长期监测数据的单体边坡地质灾害,分析工作需借助可靠的滑坡灾害监测预警模型开展,其中改良的切线角模型、加速度模型等均属于适用模型。

基于上述三种代表性的露天矿边坡地质灾害监测预警模型及其对应方法,构建露天矿边坡地质灾害监测预警系统的实施流程,监测预警技术路线如图 5 所示。

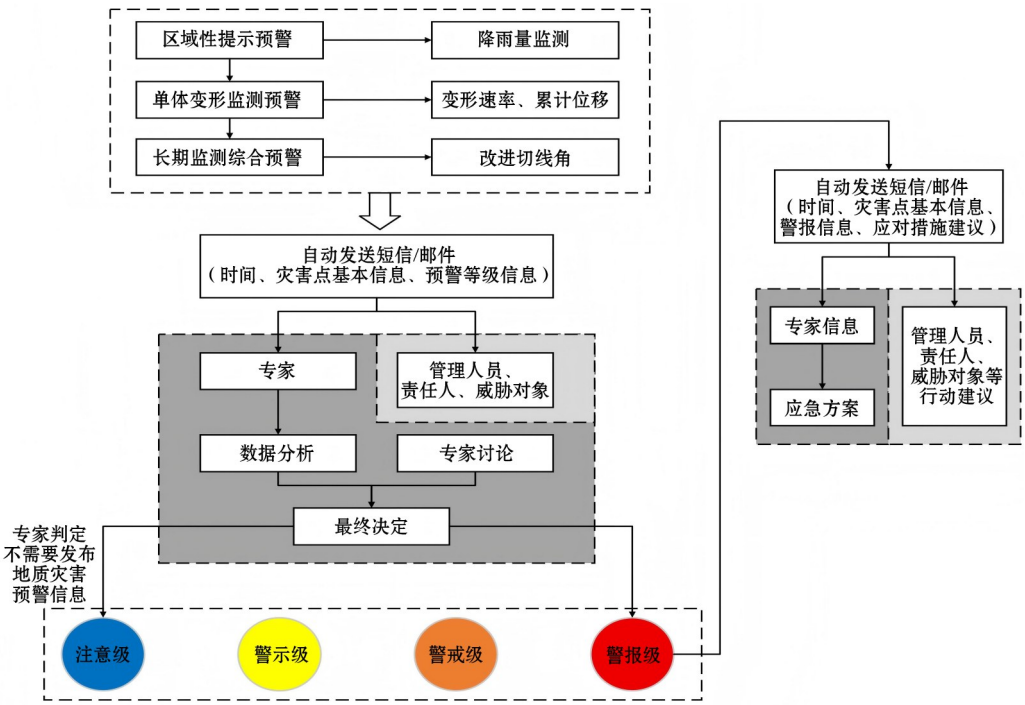
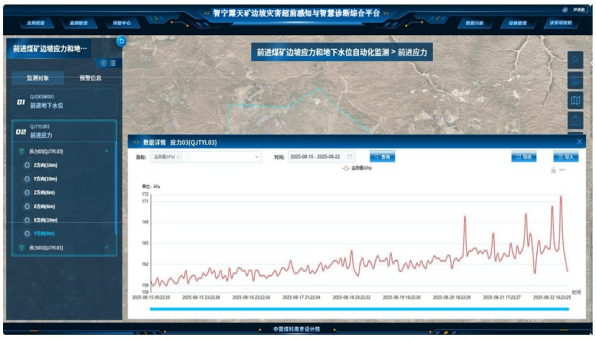


图 5 露天矿边坡地质灾害监测预警技术路线

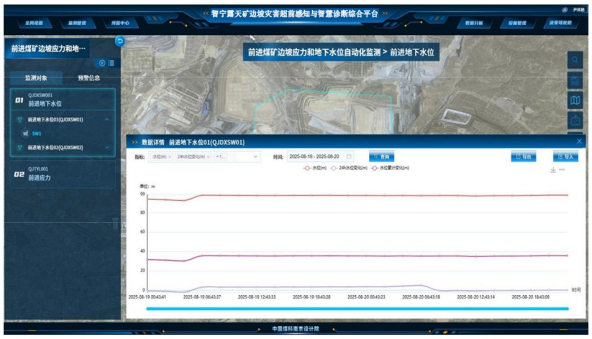
Fig.5 Technical approach for monitoring and early warning of geological disasters of slope in open-pit mine

3.4 平台技术应用示范

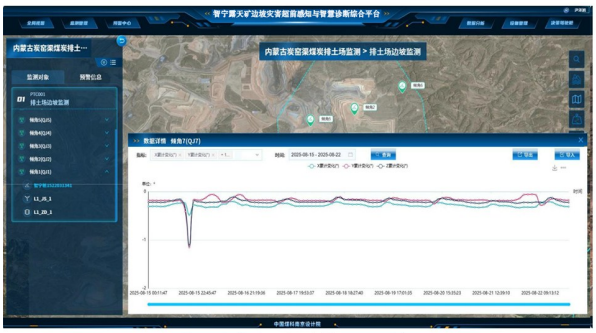
依托上述露天矿边坡智能监测预警平台,作者团队在内蒙、新疆、浙江、江苏等地区开展了一系列典型的露天矿边坡安全智能监测预警系统建设项目,并将相关平台技术推广应用至非煤领域相关岩土工程。依托相关技术成果牵头起草的《露天煤矿边坡安全自动化监测预警技术规范》已由中国煤炭工业协会批准立项,并获得中国煤炭工业协会生产力促进中心评选的煤炭科技成果转移转化项目评价证书。应用实践表明,平台显著提升了边坡风险的主动感知、智能分析与超前预警能力,为露天矿本质安全与智能矿山建设提供了强有力的科技支撑。图 6 为典型露天矿边坡智能监测预警项目应用界面。图 7 为平台用户导航及三维地图可视化。



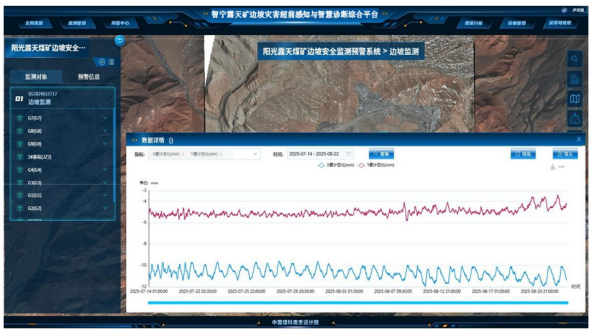
（a）前进煤矿边坡应力自动化监测



（b）前进煤矿边坡地下水位自动化监测



（c）内蒙古炭窑渠煤矿排土场边坡监测



（d）阳光露天煤矿边坡安全监测预警

图 6 典型露天矿边坡智能监测预警项目应用界面

Fig.6 Application interface for intelligent monitoring and early warning of slope in typical open-pit mines



图 7 平台用户导航模式及三维地图可视化

Fig.7 Navigation mode and 3D map visualization of platform user

4 结论

(1) 露天矿边坡监测预警技术近年来在传感器精度、遥感覆盖范围及数据自动化采集方面取得了显著进展,但现阶段在监测技术及预警系统方面仍存在如下不足:数据孤岛问题突出、预警模型智能化不足、应急响应滞后等。亟需解决以下问题:多源异构监测系统(表面位移、深部位移、倾斜、水文地质等)独立运行,缺乏深度融合与协同分析机制;传统阈值法误报率高,且难以量化边坡失稳的时空演化规律;从风险识别到决策传递的链条冗长,缺乏"监测-预警-处置"闭环管理能力。

(2) 中煤科工集团南京设计研究院开发的露天矿边坡智能监测预警平台通过五大核心技术突破实现跨越式升级,具体内容如下:全要素智能感知(构建"空-天-地-深"协同感知网络,实现多源数据毫秒级采集与传输);数字孪生驱动决策(打造边坡灾害数字孪生底座,支持从静态地质建模到动态灾害推演的全生命周期管理);预警模型革命性创新(融合机器学习与多尺度风险评估,实现"设备-单体-区域-综合"精准预警);多端协同管控(打通 PC 端、移动端与云端系统,实现"监测-分析-决策-执行"的闭环联动智能管控);自主可控平台架构(完全国产化开发,兼容主流矿山监测设备与工业协议,通过信创环境的适配测试认证)。

(3) 未来重点研究方向如下:研发可以耐受超低温的传感器,提高设备在特殊恶劣环境下的适应性;融合具有可解释性的 AI 算法,保证模型的可解释度;结合工程实际情况,面向中小矿山研发低成本、范围广的通用型解决方案;侧重研发数字孪生平台,构建雷达-无人机联合探测模式,提升 InSAR 三维形变解算能力。另外,未来边坡监测预警技术研究将更多融入矿山智能化系统中,为露天矿全生命周期安全管控提供强有力的技术支持,进一步向寒区和深凹露天矿领域开拓,实现地质工程学、信息科学、人工智能等多学科交叉融合,推进理论、技术与工程应用的一体化协同发展。

参考文献(References):

[1] 齐迹.GNSS 露天矿监测中观测距离、时间与精度的建模分析[J].测绘与空间地理信息,2024,47(2):112-115.
QI Ji. Modeling analysis of observation distance, time and accuracy in GNSS open-pit mine monitoring[J]. Geomatics & Spatial Information Technology,2024,47(2):112-115.

[2] 吴浩,黄创,张建华,等.GNSS/GIS 集成的露天矿高边坡变形监测系统研究与应用[J].武汉大学学报(信息科学版),2015,40(5):706-710.
WU Hao, HUANG Chuang, ZHANG Jianhua, et al. Deformation monitoring system for high slope in open pit mine with the integration of GNSS and GIS[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University,2015,40(5):706-710.

[3] 丁辉,祁利民,姜杰.不同时间窗下露天矿边坡真实孔径雷达监测预警研究[J].矿业安全与环保,2025,52(5):65-72.
DING Hui, QI Limin, JIANG Jie. Monitoring and early warning study under different time windows using real-aperture radar in open-pit mine slope[J]. Mining Safety & Environmental Protection,2025,52(5):65-72.

[4] 陈涛,郭浩宇,伊孜哈尔,等.地基合成孔径雷达在露天矿边坡监测预警中的应用[J].露天采矿技术,2024,39(5):5-8.
CHEN Tao, GUO Haoyu, Yiziha'er, et al. Application of ground-based synthetic aperture radar in open-pit mine slope monitoring and early warning [J]. Opencast Mining Technology,2024,39(5):5-8.

[5] 许强,董秀军,李为乐.基于天-空-地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警[J].武汉大学学报(信息科学版),2019,44(7):957-966.
XU Qiang, DONG Xiujun, LI Weile. Integrated space-air-ground early detection, monitoring and warning system for potential catastrophic geohazards [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(7): 957-966.

[6] 李如仁,葛永权,李梦晨,等.基于 InSAR-COMSOL 的露天矿边坡稳定性分析及形变预测[J].金属矿山,2024(3):172-182.
LI Ruren, GE Yongquan, LI Mengchen, et al. Stability analysis and deformation prediction of open-pit mine slopes based on InSAR and COMSOL[J]. Metal Mine,2024(3):172-182.

[7] 魏恋欢,封秋月,毛亚纯,等.基于多轨道 SBAS 方法的露天矿高陡边坡形变监测[J].东北大学学报,2020,41(10):1445-1451.
WEI Lianhuan, FENG Qiuyue, MAO Yachun, et al. Deformation monitoring of high steep slope in open-pit mine with multi-orbit SBAS [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science),2020,41(10):1445-1451.

[8] 金爱兵,陈帅军,赵安宇,等.基于无人机摄影测量的露天矿边坡数值模拟[J].岩土力学,2021,42(1):255-264.
JIN Aibin, CHEN Shuaijun, ZHAO Anyu, et al. Numerical simulation of open-pit mine slope based on unmanned aerial vehicle photogrammetry[J]. Rock and Soil Mechanics,2021,42(1):255-264.

[9] KARUNATHILAKE A, ZOU L, KIKUTA K, et al. Implementation and configuration of GB-SAR for landslide monitoring: case study in Minami-Aso, Kumamoto [J]. Exploration Geophysics,2019,50(2):210-220.

[10] DU Y, HUANG G W, ZHANG Q, et al. Asynchronous RTK method for detecting the stability of the reference station in GNSS deformation monitoring[J]. Sensors,2020,20(5):1320-1332.

[11] 葛山峰.地基干涉雷达露天矿边坡监测分级预警模型[J].露天采矿技术,2019,34(4):14-18.
GE Shanfeng. Classified and early warning model of open-pit mine slope monitoring based on ground-based interferometric radar[J]Opencast Mining Technology,2019,34(4):14-18.

[12] 韩流,陈祥宸,王胆,等.露天矿边坡监测预警体系及变形速率阈值确定方法[J].煤炭科学技术,2025,53(2):329-338.
HAN Liu, CHEN Xiangchen, WANG Dan, et al. Monitoring and warning system and deformation rate threshold determining method for open-pit mine slopes[J]. Coal Science and Technology,2025,53(2):329-338.

[13] 王立文,韦忠跟,王敏,等.白音华露天矿边坡监测预警应急响应机制[J].露天采矿技术,2024,39(4):79-83.
WANG Liwen, WEI Zhonggen, WANG Min, et al. The emergency response mechanism for slope monitoring and early warning in Baiyinhua Open-pit Mine[J]. Opencast Mining Technology,2024,39(4):79-83.

[14] 马明红,常华敏,邢克兵,等.先锋露天煤矿北帮边坡监测与变形破坏机理研究[J].露天采矿技术,2025,40(3):22-25.
MA Minghong, CHANG Huamin, XING Kebing, et al. Research on monitoring and deformation failure mechanism of northern slope in Xianfeng Open-pit Coal Mine[J]. Opencast Mining Technology,2025,40(3):22-25.

[15] 郭子林,吴琼,闫宝军,等.大型露天矿采场边坡安全监测综合预警平台搭建与应用[J].有色金属(矿山部分),2025,77(1):133-142.
GUO Zilin, WU Qiong, YAN Baojun, et al. Construction and application of a comprehensive early warning platform for safety monitoring of slope in large open pit mines[J]. Nonferrous Metals (Mining Section),2025,77(1):133-142.

[16] 王树海,梁凌,闫力维,等.露天矿安全监测预警系统研究[J].煤炭工程,2024,56(增刊1):132-137.
WANG Shuhai, LIANG Lin, YAN Liwei, et al. Research on safety monitoring system for open-pit mine[J]. Coal Engineering,2024,56(Suppl.1):132-137.

[17] 苏白燕,许强,黄健,等.基于动态数据驱动的地质灾害监测预警系统设计与实现[J].成都理工大学学报(自然科学版),2018,45(5):615-625.
SU Baiyan, XU Qiang, HUANG Jian, et al. Design and implementation of monitoring and warning system for geological disasters based on dynamic data-driven technology [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition),2018,45(5):615-625.

[18] 杨天鸿,王赫,董鑫,等.露天矿边坡稳定性智能评价研究现状、存在问题及对策[J].煤炭学报,2020,45(6):2277-2295.
YANG Tianhong, WANG He, DONG Xin, et al. Current situation, problems and countermeasures of intelligent evaluation of slope stability in open pit[J]. Journal of China Coal Society,2020,45(6):2277-2295.

[19] 刘善军,吴立新,毛亚纯,等.天-空-地协同的露天矿边坡智能监测技术及典型应用[J].煤炭学报,2020,45(6):2265-2276.
LIU Shanjun, WU Lixin, MAO Yachun, et al. Spaceborne-airborne-ground collaborated intelligent monitoring on open-pit slope and its typical applications[J]. Journal of China Coal Society,2020,45(6):2265-2276.

[20] 任开瑀,姚鑫,赵小铭,等.基于时序 InSAR、GPS、影像偏移测量3种监测数据的滑坡失稳破坏预测研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(增刊2):3421-3431.
REN Kaiyu, YAO Xin, ZHAO Xiaoming, et al. Study of landslide failure prediction based on TS-InSAR, GPS and image offset monitoring[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2020,39(Suppl.2):3421-3431.

[21] MA Z, MEI G, PREZIOSO E, et al. A deep learning approach using graph convolutional networks for slope deformation prediction based on time-series displacement data[J]. Neural Computing and Applications,2021,33(21):14441-14457.

[22] 郭延辉,霍圆,毛肖涓,等.基于改进西原模型的滑坡临滑切线角预警判据研究[J].自然灾害学报,2024,33(5):96-108.
GUO Yanhui, HUO Yuan, MAO Xiaojuan, et al. Research on early warning criterion of landslide critical sliding tangential angle based on improved Nishihara model[J]. Journal of Natural Disasters,2024,33(5):96-108.

[23] 袁利伟,普思伟,钟阳,等.基于 PCA-G1-ET 的露天矿采场滑坡预警[J].工矿自动化,2025,51(7):83-89+104.
YUAN Liwei, PU Siwei, ZHONG Yang, et al. Landslide early warning for open-pit mine based on PCA-G1-ET[J]. Journal of Mine Automation,2025,51(7):83-89+104.

[24] 吴博.深圳市地质灾害监测预警方法研究[D].长春:吉林大学,2024.
WU Bo. Research on geological disasters monitoring and early warning methods in Shenzhen[D]. Changchun: Jilin University,2024.

[25] 吴辉隆.重庆市滑坡灾害监测预警优化研究[D].成都:成都理工大学,2022.
WU Huilong. Research on optimization of landslide disaster monitoring and early warning in Chongqing[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology,2022.