

基于过程预警模型的矿山边坡监测系统研究与应用

肖自为,马源,李金林,龚弦,邓修林,程曦

(中国建筑材料工业地质勘查中心四川总队,成都 610052)

摘要: 随着矿山开采活动的增加,边坡安全监测成为确保矿山安全与稳定的关键技术。传统的矿山边坡监测系统虽然能够实现一定程度上的监测,但在预警精度和误报率方面仍存在局限。本研究提出了一种基于过程预警模型的矿山边坡监测系统,通过集成变形速率、速率增量和改进切线角等多个监测指标,结合大数据算法模型,实现了对地质灾害变形演化过程的实时监测和全过程预警。该系统不仅降低了预警信息的冗余度和误报率,还提高了预警的准确性和及时性。通过在多个省的应用验证,证明了该系统在提升矿山边坡监测效率和预警精度方面的有效性。本研究对矿山边坡监测技术的发展提供了新的思路,为地质灾害的预防和控制提供了有效的技术支持。

关键词: 矿山边坡监测;过程预警模型;变形速率;大数据算法;地质灾害预警

中图分类号: TD167;TD7;X83 **文献标识码:** A

RESEARCH AND APPLICATION OF MINE SLOPE MONITORING SYSTEM BASED ON PROCESS WARNING MODEL

XIAO Zi-wei, MA Yuan, LI Jin-lin, GONG Xuan, DENG Xiu-lin, CHENG Xi

(Sichuan Branch of China National Geological Exploration Center of Building Materials Industry, Chengdu 610052, China)

Abstract: With the increase in mining activities, slope safety monitoring has become a key technology to ensure mine safety and stability. Although traditional mining slope monitoring systems can achieve a certain degree of monitoring, there are still limitations in terms of warning accuracy and false alarm rate. This study proposes a mining slope monitoring system based on a process warning model. By integrating multiple monitoring indicators such as deformation rate, rate increment, and improved tangent angle, combined with a big data algorithm model, real-time monitoring and full process warning of the deformation evolution process of geological hazards are achieved. This system not only reduces the redundancy and false alarm rate of warning information but also improves the accuracy and timeliness of warnings. The effectiveness of the system in improving the efficiency of mine slope monitoring and early warning accuracy has been demonstrated through application verification in eight provincial emergency systems. This study provides new ideas for the development of mining slope monitoring technology and effective technical support for the prevention and control of geological disasters.

Key words: mine slope monitoring; process warning model; deformation rate; big data algorithms; geological hazard warning

矿山边坡安全监测是矿山工程与地质灾害防治中的一个重要环节。随着矿山开采活动的不断增加,对环境和周边居住区的潜在影响也日益显著,因此确保矿山边坡的稳定性不仅是矿山安全管理的必要条件,也是保护人类生命安全和自然环境的重要任务。矿山边坡安全监测的主要目的是确保矿山的安全和稳定性,通过对边坡稳定性的监控,及时发现潜在的滑坡、崩塌等地质灾害风险,从而采取有效的、针对性的预防和控制措施。边坡一旦出现问题,可能会导致矿山生产中断、生产设备损坏,甚至危及工人的生命安全。

传统监测方法主要包括人工巡查巡视、变形监测、应力监测、振动监测和水文监测等。其中巡查巡视需要依靠大量的人力来完成,而其他几种监测方式虽然在一定程度上能够提供数据支持,但它们主要还是通过人工操作来实现。尽管传统矿山边坡监测技术在过去取得一定成效,但这些技术仍存在不足之处^[1]。主要问题包括监测数据采集的不连续性、监测精度的局限性以及对预警信息处理和解释的依赖度高等问题。此外,传统监测方法在处理大量数据时效率低下,且难以实现对地质灾害变形演化过程的实时监测和全面预警。

近年来随着技术的发展,越来越多的在线监测技术被引入矿山边坡的安全监测中来。这些方法不仅涵盖了地面到空中的多维度监测,还利用了全站仪、经纬仪、水准仪等传统测量工具以及遥感技术、GPS技术等新兴技术。此外,无人机监测技术和激光测距仪监测技术也为矿山边坡监测提供了新的可能。

鉴于传统矿山边坡监测技术存在的局限性,本文提出了一种边坡监测预警系统设计方案。该系统依托于先进的过程预警模型,整合了包括变形速率、速率增量以及改进切线角在内的多项关键监测指标。此外通过引入大数据算法模型,该系统能够实现对矿山边坡地质灾害变形与演化过程的实时监控和全面预警。本研究的目标是通过提升预警信息的准确性和降低误报率,进一步提高矿山边坡监测的效率和预警的准确性。研究成果不仅为矿山边坡监测技术的发展开辟了新途径,同时也为地质灾害的预防与控制提供了强有力的技术支持,展现了其在理论研究和实际应用中的双重价值。

1 研究方法

本研究旨在开发一套高效、实时的矿山边坡监

测系统,该系统设计采用了先进的技术和方法,以实现边坡稳定性的全面监测。研究方法的核心在于构建一个集成多设备、多参数监测的系统架构,并实施高效的数据采集与处理流程,以确保监测数据的实时性和准确性。

1.1 系统架构设计

矿山边坡监测系统的设计目的在于对矿山边坡稳定性的高效、实时监测,以及对潜在地质灾害的及时预警,为矿山安全管理提供强有力的技术支持。

1.1.1 系统总体框架

本系统的设计理念是基于模块化和可扩展性原则,以支持不同监测技术和设备的集成。系统总体框架包括3个主要部分:数据采集模块、数据处理与分析模块,以及预警与决策支持模块。数据采集模块负责从多种监测设备收集数据;数据处理与分析模块应用大数据分析技术处理和分析收集到的数据,识别潜在的地质灾害风险;预警与决策支持模块则根据分析结果提供预警信息,并辅助决策者采取相应措施。

1.1.2 多设备多参数监测机制

考虑到矿山边坡稳定性受多种因素影响,本系统采用多设备多参数监测机制。矿山边坡监测系统采用了多种技术手段,包括但不限于北斗高精度定位、GIS、云计算、物联网、大数据等。使用的设备包括但不限于地面位移监测设备(图1)、卫星遥感设备、气象监测设备等,以及对应的监测参数如位移速度、变形情况、降雨量(图2)、地震活动,还包括地下水位、温度、支护抗滑桩、锚固体受力等方面的监测。

1.1.3 数据采集与处理流程

数据采集与处理流程是实现系统监测目标的关键。首先,通过预先设置的监测计划,系统自动从各监测设备收集数据,并将收集到的原始数据传输至中央处理单元。随后,在数据处理与分析模块,应用先进的数据处理算法(包括数据预处理、特征提取、异常检测等)对原始数据进行处理和分析。处理后的数据将用于更新边坡稳定性模型,并通过机器学习算法优化预警机制,最终生成实时的监测报告和预警信号。

1.2 预警模型构建

在构建高效的矿山边坡监测预警系统中,预警模型的开发是至关重要的一环。本节将详细介绍预警模型构建的方法,特别是变形速率、速率增量及改进切线角指标的定义与计算方法,以及如何将传统阈值与地质灾害变形演化过程相结合,进一步阐述了“过程预警”模型的原理与构建方法。

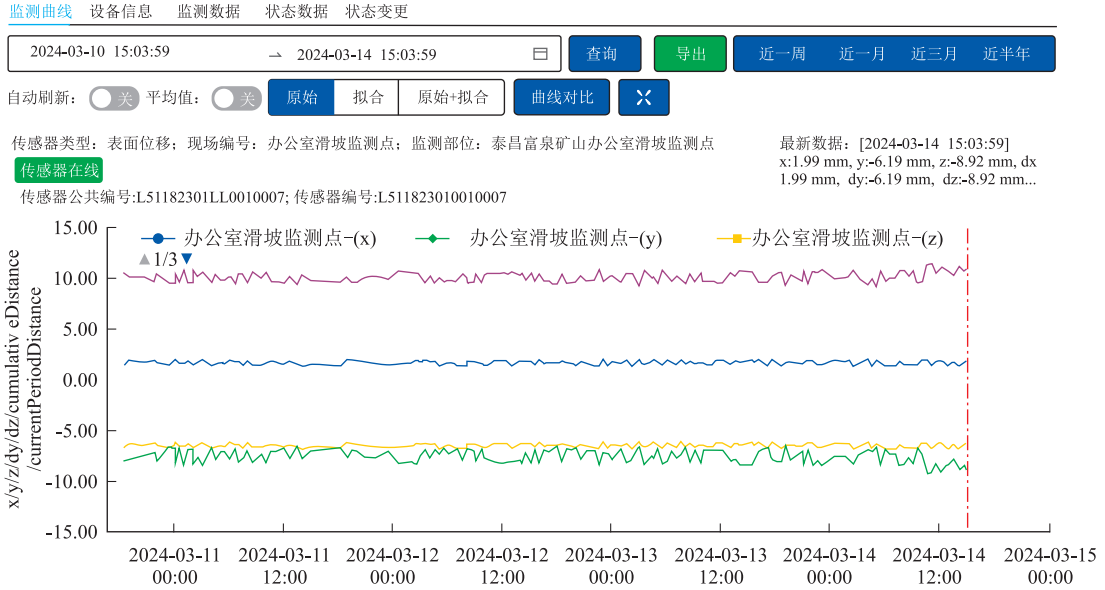


图 1 滑坡监测点数据采集

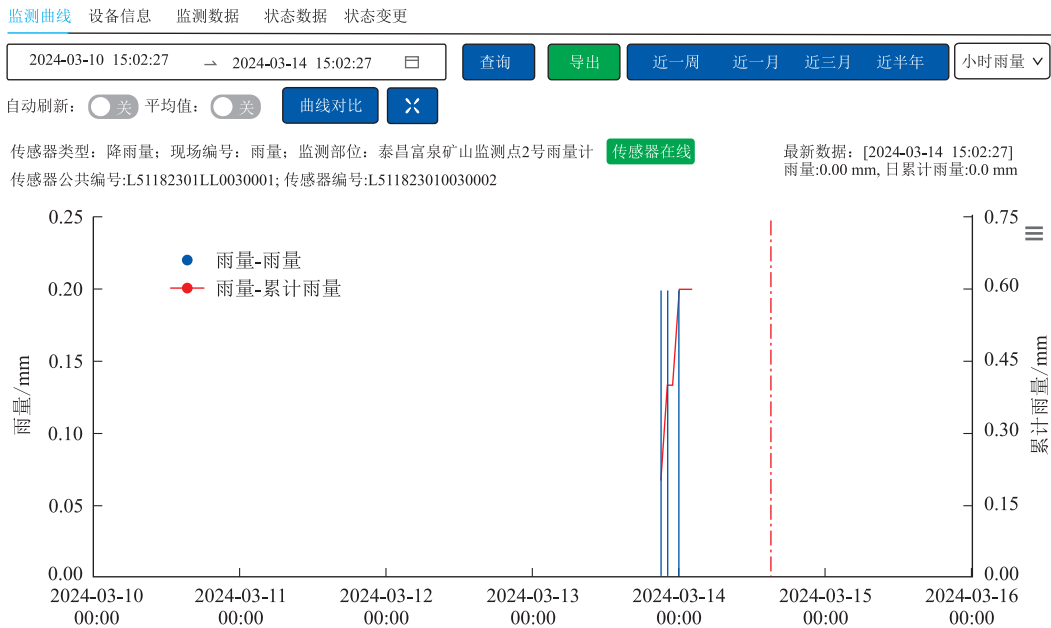


图 2 雨量监测点数据采集

1.2.1 变形速率、速率增量、改进切线角指标的定义与计算方法

预警模型的关键在于准确识别和计算关键监测参数。边坡预警中,变形速率、速率增量和改进切线角是重要的监测指标,它们对于评估边坡的稳定性具有重要意义。

(1) 变形速率:指边坡变形量在单位时间内的变化速度,是判断边坡稳定性变化的直观指标。它是衡量边坡稳定性的一个重要参数,可以通过监测边坡的位移变化来计算得出。在滑坡预警中,变形速率的阈值设置对于判断边坡是否处于危险状态至

关重要^[2,3]。

(2) 速率增量:通常指的是变形速率随时间的变化率,即相邻两个时间段内变形速率的变化量,能够更敏感地指示边坡变形的加速过程。这一指标可以帮助分析边坡变形的加速或减速趋势,从而更准确地预测边坡的未来行为。

(3) 改进切线角:改进切线角是基于边坡变形速率和速率增量,通过分析位移-时间曲线($S-t$ 曲线)的斜率来确定的。传统的切线角可能会因为量纲不一致而导致计算结果不准确,因此引入了改进切线角的概念。改进切线角指标是通过构建切线角

变化模型来描述边坡稳定性的变化特征。当滑坡体的切线角超过 85° 时,表明滑坡呈现出明显的临滑征兆,此时变形速率和切线角随时间呈陡然增加的趋势^[4]。

对这些指标的计算是基于长期的观测数据和先进的数据分析技术,通过数学建模和统计分析来实现。对变形速率、速率增量和改进切线角的定义与计算方法涉及对边坡位移变化的监测和分析。这些指标的监测和分析,可以有效地预警和评估边坡的稳定性,为防灾减灾工作提供科学依据。

1.2.2 传统阈值与地质灾害变形演化过程的结合

在监测预警模型中,虽然传统阈值方法在初始风险识别中发挥着重要作用,但其在处理复杂地质条件下边坡变形演化过程时的局限性日益凸显。鉴于此,本研究提出了一种创新策略,即结合地质灾害变形演化过程的特点,通过深入分析边坡变形的历史数据,构建一个动态调整的阈值模型。该模型不仅能够更精确地预测边坡的潜在风险,而且还能显著提高预警的准确性和实时性。这一策略的成功实施,得益于对实时地质灾害监测数据进行动态阈值分析的方法^[5]、边坡变形预测与位移速率预警阈值方法的研究^[6],以及基于 I-D-R 阈值模型的滑坡气象预警等先进技术和理论的支持^[7]。此外广域滑坡灾害隐患 InSAR 显著性形变区深度学习识别技术的应用^[8]也为本研究提供了重要的理论基础和技术支撑,使得我们能够在更广泛的范围内实现对地质灾害的有效监测和预警。

通过分析边坡变形的历史数据,建立与特定地质条件相适应的动态阈值模型。首先需要边坡安全监测系统能够提供准确的位移数据,具有实时性强、精度高、稳定性好的优点,可以实时获取边坡的位移信息。这为及时发现边坡的异常变化提供了技术支持。系统运行过程中一旦发现边坡的位移超过预设阈值,边坡监测系统将发出警报,及时采取措施以避免灾害事故的发生。这种预警机制是基于动态数据驱动、多源数据可视化及监测数据实时传输等技术建立的^[9],并且支持多级阈值预警,能够根据数据变化超过阈值范围自动预警。

此外边坡监测系统还可以自动采集边坡的各项数据,并进行分析,为决策提供科学依据。这种自动化的数据采集与分析过程,结合了传统的群测群防方法,大大提高了地质灾害监测预警的效率和准确性。例如星载 InSAR 技术的应用展示了在地质灾害监测领域中,新技术和新方法与传统方法的有效结合^[10]。

1.2.3 “过程预警”模型的原理与构建

“过程预警”模型不仅关注最终的预警结果,也重视预警过程中的每一个变化点。该模型基于对边坡变形过程的深入分析,通过监测数据的实时收集与处理,结合变形速率、速率增量以及改进切线角等关键指标的动态变化,实现从边坡变形初期到潜在灾害发生全过程的监控和预警。“过程预警”模型的构建涉及复杂的数据处理和分析技术,包括时间序列分析、模式识别以及机器学习算法等,以确保预警系统能够及时、准确地响应边坡稳定性的任何微小变化。

这一模型的构建还涉及多个关键技术点和技术手段。首先边坡监测系统的建立依赖于现代化的监测手段和技术,如卫星 RTK 差分技术、北斗定位及多源数据采集技术等,这些技术能够实现对边坡位移、倾角、土壤温湿度等关键指标的实时监测和数据采集。通过这些技术手段,可以实现对边坡状态的连续监测,为预警模型提供准确的数据支持。预警模型的构建还需要采用先进的数据分析方法和算法。例如基于故障预测与健康管理(PHM)方法,通过定义基于边坡实际位移量的故障率和安全储备度,结合边坡滑动失稳特征,定量识别边坡的运行状态并预测其失稳风险^[11]。此外机器学习技术也被应用于边坡灾害预警模型的构建中,通过训练样本集构建、样本学习训练与优化建模等步骤,提高预警模型的准确性和效率^[12]。最后预警模型的实施还需要系统性地构建传感器网络,并综合性地分析尾矿库状态。通过将结构健康安全和物联网、云计算等技术相结合,可以实现对超过安全状态部位的预警。

通过上述方法构建的预警模型能够实现对矿山边坡潜在地质灾害的早期识别和预警,为矿山的安全管理提供科学依据和技术支持。

1.3 大数据算法应用

在现代矿山边坡监测预警系统中,大数据技术的融入大大提高了监测的效率和预警的准确性。本节将重点介绍大数据算法在预警系统中的应用,包括数据算法模型的介绍、算法在预警系统中的具体应用,以及与传统边坡监测系统的对比分析。

1.3.1 数据算法模型介绍

大数据算法模型涵盖了从数据收集到解释的全过程,其核心在于对海量数据的有效处理与深入分析。预警系统的有效数据包括那些直接反映边坡状态的监测指标,如监测设备采集到的降雨强度、累计雨量、位移变化速率等,而噪音数据可能源自设备故

表 1 基于多设备多参数的不同预警模型(表中 ** 表示具体的监测数值)

序号	模型编号	模型名称	主要预警指标	预警信息文本	适用监测设备
1	MD01	EI 模型(累计雨量 E/降雨强度 I)	降雨强度/累计雨量	降雨强度 * * mm/h, 累计雨量 * * mm	雨量计
2	MD02	KI 模型(累计雨量 E/降雨强度 I, 考虑有效降雨系数 K)	降雨强度/累计雨量	降雨强度 * * mm/h, 累计雨量 * * mm	雨量计
3	MD11	监测值	当前监测值	当前{设备类型}值为 * * {监测值单位}	监测值为状态量的监测设备, 如泥位值、含水率、崩塌仪、断线仪、土压力计、地下水位监测等
4	MD12	监测值日增量	监测值变化速率/当前监测值	变化(变形)速率 * * {监测值单位}/d, 累计位移(累计量) * * {监测值单位}	裂缝计、位移计等
5	MD13	水平位移	水平位移值	当前 GNSS 累计水平位移 * * mm	GNSS
6	MD14	水平位移日增量	水平位移变形速率/水平位移值	当前 GNSS 水平位移变形速率 * * mm/d, 累计位移 * * mm	GNSS
7	MD15	垂直位移	垂直位移值	当前 GNSS 累计垂直位移 * * mm	GNSS
8	MD16	垂直位移日增量	垂直位移变形速率/垂直位移值	当前 GNSS 垂直位移变形速率 * * mm/d, 累计位移 * * mm	GNSS
9	MD1416	GNSS 水平垂直日增量综合预警	水平位移变形速率/垂直位移变形速率	当前 GNSS 水平位移变形速率 * * mm/d, 垂直位移变形速率 * * mm/d	GNSS
10	MD17	X 方向监测值	X 方向监测值	当前 X 方向监测值为 * * {监测值单位}	类似监测值(MD11), 考虑 3 个方向的分量, 如倾角计、加速度计等
11	MD18	Y 方向监测值	Y 方向监测值	当前 Y 方向监测值为 * * {监测值单位}	
12	MD19	Z 方向监测值	Z 方向监测值	当前 Z 方向监测值为 * * {监测值单位}	
13	MD20	改进切线角模型	切线角	当前切线角为 * * °, 变形阶段为 * *	GNSS、裂缝计等位移类监测设备

障或外部环境干扰,这些数据如果未经处理,可能导致误解。为确保数据质量,我们的矿山预警系统采用了数据滤波技术,并通过设备的定期校准来减少噪音数据的影响。此外我们还利用机器学习算法对历史数据进行了深入训练,以更有效地识别和排除噪音数据,增强数据的准确性和可靠性。在这一过程中,机器学习、深度学习以及时间序列分析等技术手段发挥着至关重要的作用。特别是在矿山边坡监测预警系统中,通过运用这些先进的算法模型,我们不仅能够准确地识别出数据中的关键模式和趋势,还能预测未来可能出现的变形行为,为制定预警策略提供坚实的科学依据^[13]。

1.3.2 算法在预警系统中的应用

在预警系统中,大数据算法的应用主要集中在数据的实时监控、趋势分析、风险评估和预警信号的生成等方面。通过实时收集边坡的监测数据,算法能够快速分析边坡的稳定性状态,及时发现异常变化趋势,预测潜在的地质灾害风险。此外,算法还能根据历史数据和当前监测数据,自动调整预警阈值,提高预警系统的动态适应性和准确性。

1.3.3 与常规边坡监测系统的对比分析

与传统的边坡监测系统相比,采用大数据算法

的预警系统在多个方面表现出了明显的优势。首先是在数据处理能力方面,大数据算法能够处理的数据量远远超过传统方法,能够实现对大规模监测数据的高效分析。其次是在预警准确性方面,大数据算法通过深入学习和分析边坡监测数据,能够更准确地识别潜在风险,减少误报和漏报的可能。然后是在响应速度方面,大数据算法可以实现实时数据分析 and 处理,大幅缩短了预警响应时间,为采取紧急措施提供了更多的时间窗口。

2 系统实现与评估

在矿山边坡监测预警系统的构建与评估过程中,监测数据实时获取和即时处理是一个关键环节。本章节旨在阐述监测数据实时获取和即时处理的具体实施方法,包括地质灾害演化阶段的自动识别以及异常数据的自动处理,旨在提高系统的自动化和智能化水平,确保监测数据的准确性和实时性。

2.1 实时监测数据处理

实时监测数据处理是确保预警系统准确有效运行的基础。该过程包括数据的实时收集、预处理、分析和存储,旨在从实时监测数据中提取有价值的信息,为边坡稳定性评估和预警决策提供支持。

2.1.1 地质灾害演化阶段的自动识别

地质灾害演化阶段的自动识别是通过分析实时监测数据中的模式和趋势来实现的。系统采用机器学习和深度学习算法,根据边坡监测数据的变化特征自动识别地质灾害的演化阶段。这包括初始微小裂缝的形成、裂缝的扩展和发展,以及最终可能导致边坡失稳的临界状态。通过自动识别这些演化阶段,系统能够及时发现边坡稳定性的潜在威胁,为采取预防措施提供时间窗口。

2.1.2 异常数据的自动处理

在边坡监测数据的处理过程中,自动识别和处理异常数据显得尤为重要。这些异常数据可能源于设备故障、外部干扰或数据传输过程中的错误。通过实施数据质量检测算法,系统能够有效地识别出异常值和离群点。一旦这些异常数据被检测到,系统便会自动执行校正或排除操作,确保数据分析的精确性。同时,系统还能依据异常数据的特征及其出现的频率,对监测设备的状态进行评估,从而及时发现并解决潜在的设备故障问题^[14, 15]。

2.2 预警精度提高

在构建矿山边坡监测预警系统的过程中,提高预警精度是提升系统性能的关键。本部分将详细介绍如何通过提高预警信息的准确性与及时性,以及

降低误报率和信息冗余,进一步优化预警系统的性能。

2.2.1 预警信息的准确性与及时性

预警信息的准确性和及时性是确保系统有效性的重要因素。我们通过引入高精度的监测设备和先进的数据分析技术,实现了对边坡稳定性威胁的精确识别和快速响应。系统集成了多种监测技术,如地面雷达、全球定位系统(GPS)和无人机(UAV)摄影测量,以获得高质量的监测数据。同时,采用实时数据分析和机器学习算法,提高了预警信息生成的速度和准确性,确保预警信息能够在地质灾害发展到危险阶段之前及时传达给决策者。

2.2.2 误报率与信息冗余的降低

提高预警系统的效率,关键在于降低误报率和信息冗余。过高的误报率不只造成资源浪费,还可能削弱用户对预警系统的信任。针对这一挑战,我们采取更为精细的数据分析技术和改良算法,旨在精确区分真实的威胁与正常的波动。通过实施动态阈值调整和利用人工智能技术进行深度学习,我们的系统能够更加精准地识别出真正的风险信号,从而大幅减少误报情况的发生。同时,通过对数据处理流程的优化,我们有效减少了信息的冗余,提升了预警信息的相关性和有效性(图3)。

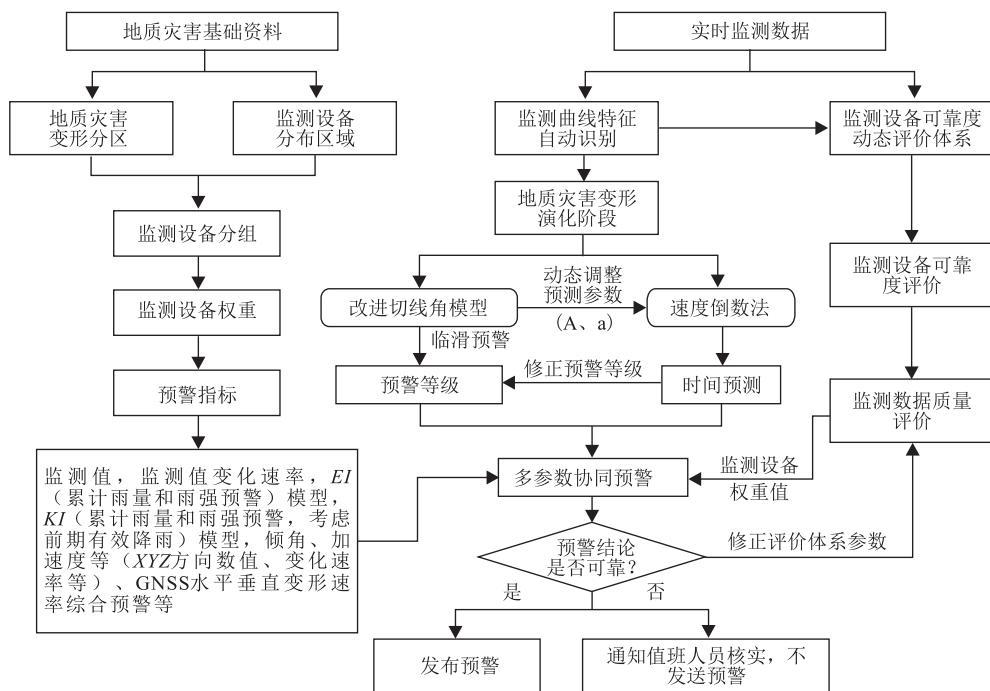


图3 矿山边坡监测系统实现路径

2.3 实际应用案例分析

本部分将基于实际应用案例,深入分析预警系统在多个省份矿山的应用效果,以及预警系统对矿

山安全的实际影响,从而展现本系统在实际操作中的有效性和可靠性。

2.3.1 在多个省的应用效果

我们将预警系统分别部署在中国建筑材料工业地质勘查中心四川总队所属的多个省份矿山管理系统中,涵盖了多种地质环境和矿山类型。在系统运行的1 a内,通过与历史数据比较,我们观察到新系统带来的显著变化。第一个变化是系统的引入大幅提高了应急管理的响应速度,平均提前时间由之前的数小时提升至数分钟,极大地增强了应对突发地质灾害的能力。第二个变化是预警的准确率平均提高了30%,这意味着能够更有效地识别真正的威胁,避免了不必要的紧急响应。第三个变化是应用部门反馈,系统的使用极大提升了决策的科学性和时效性,优化了资源配置。

2.3.2 预警系统对矿山安全的实际影响

针对矿山安全,预警系统的部署实现了两大主要影响。首先是通过精确及时的预警信息,矿山管理者能够在潜在灾害发生前采取预防措施,如撤离作业人员、加固边坡等,显著降低了人员伤亡和财产损失的风险。在过去1 a中,通过系统预警实现的及时干预,成功避免了多起潜在的灾害事件。其次是系统的应用提高了矿山整体的安全管理水平。通过持续地监测和分析,矿山管理者能够更好地理解边坡稳定性的动态变化,优化长期的边坡管理策略,提高了矿山的可持续发展能力。

3 讨论

本章节将探讨在实际应用预警系统时遇到的挑战以及相应的解决方案,同时评估技术的可行性和未来的改进空间。

3.1 系统在实际应用中遇到的挑战与解决方案

在将我们的预警系统部署到各个省的应急管理系统及矿山安全监控领域的过程中,我们碰到了几个关键性的挑战。这些挑战不仅考验了我们的技术创新能力,也促进了我们在实践中深入理解和解决实际问题的能力。

首先是数据的异质性和不一致性对我们系统的数据整合和处理能力构成了巨大挑战。各地区和行业在数据采集、存储格式及质量标准上存在明显差异。为应对此挑战,我们开发了一套高效的数据预处理框架。该框架不仅能够自动识别和转换不同的数据格式,还能进行质量控制和数据清洗,以保证我们的系统能够处理一致性和高质量的数据。

其次不同用户对系统的操作界面和功能存在不同的需求。通过深入的用户调研和持续的反馈循

环,坚持“以用户为中心”的设计理念,我们采用了模块化与定制化的开发策略,构建了一个既灵活又易于操作的用户界面。同时,我们加强对用户培训和支持服务,确保每位用户都能高效地使用我们的系统。

系统的持续维护和升级也是我们面对的重要挑战。随着技术的进步和用户需求的变化,系统需要定期更新以保持其效率和有效性。为此,我们成立了专门的技术团队,专注于追踪最新的技术动态和收集用户的反馈信息。依托这些宝贵的信息资源,我们不仅定期对系统功能进行更新与优化,还积极探索将人工智能、机器学习等前沿技术融入系统之中,旨在提升系统的预测精度和整体用户体验。

通过对这些挑战的克服和解决,我们不仅提高了预警系统的性能和用户满意度,也积累了宝贵的实践经验。我们相信,随着技术的不断进步和用户反馈的积极参与,我们的系统将持续优化,更好地服务于社会 and 用户。

3.2 技术的可行性与改进空间

从目前的应用情况来看,矿山边坡监测预警系统的技术是完全可行的,依托于强大的数据处理能力和先进的算法,能够有效处理大规模、异质性数据,并从中提取有价值的信息。这得益于当前计算能力的提升和机器学习、大数据分析技术的进步。并且该系统已经在多个省的矿山安全管理中得到有效应用。通过系统的运用,提高了应急响应的速度和准确性,增强了矿山安全管理的能力,证明了其在现实环境中的实用性和有效性。

尽管当前系统展现出了良好的性能表现,但仍有进一步提升的空间。例如,尽管我们的数据预处理框架在处理数据异质性方面表现出色,面对数据量的持续增长和来源的多元化,如何进一步优化数据处理的效率与精准度,仍然是我们亟待解决的问题。此外,目前我们的系统主要聚焦于预警信息的生成与分发,而在预警后的应对措施及资源调配方面的支持还不够全面。面向未来,我们正计划开发一个更为智能化的决策支持模块,该模块不仅能提供预警信息,还能根据预警的级别和具体情况,提出具体的应对策略和资源调配方案。随着系统应用场景的不断扩展,我们也需要进一步探索如何保持系统的可扩展性和灵活性,以满足不同用户和环境的需求。

最后考虑到技术发展的快速性和不可预见性,我们将持续关注新兴技术和方法,如区块链技术在数据安全和共享方面的应用。这些新技术的引入将

进一步增强我们系统的功能和应用范围。

4 结论与展望

在本研究中,我们设计并实施了一个高效且准确的矿山边坡监测预警系统,通过利用最新的信息技术和先进算法,旨在提高矿山安全监控的能力。我们开发的预警系统证明了利用当前的计算技术和算法,结合大数据分析和机器学习,可以有效地处理大规模异质性数据,提取出关键的预警信息,为矿山安全提供强有力的技术支持。通过与行业专家合作和实地测试,我们的预警算法显示出高度的准确性和可靠性,在多种情况下都能提供有效的预警信息。系统的开发和实施强调了跨学科合作的重要性,集合了信息技术、数据科学与矿山工程等领域的知识和技能。

矿山边坡监测系统未来的工作将聚焦于以下几个方向:

(1) 技术优化与创新:未来我们可以探索更先进的数据处理和分析技术,如引入深度学习模型,以提高处理复杂数据的能力和预警算法的准确率。同时考虑新兴技术如区块链技术,以增强数据共享的安全性。

(2) 决策支持系统的发展:未来我们可以开发一个更加智能化的决策支持系统,希望该系统不仅能提供准确的预警信息,还能根据不同情况推荐具体的应对措施和资源调配方案。

(3) 系统的普及与应用范围扩展:我们将继续推广我们的预警系统在更多矿山场景中进行测试和应用,同时探索系统在其他领域,如城市灾害预警、交通安全等方面的应用潜力。

作者简介:肖自为(1988—),男,工程师,主要从事矿产资源调查、勘查、区域地质矿产调查、数字矿山等工作。

E-mail:1046716015@qq.com

参考文献

- [1] 周鑫磊,张卫兵,刘臻祥,等. 边坡变形和应力监测技术研究进展及展望[J]. 土木工程,2022,11(3):261-270.
- [2] 许强,彭大雷,何朝阳,等. 突发型黄土滑坡监测预警理论方法研究——以甘肃黑方台为例[J]. 工程地质学报,2020,28(1):111-121.
- [3] 陈全明,黄炜敏,李姣. 基于改进切线角和变形速率的滑坡预警——以湖南省石门县雷家山滑坡为例[J]. 中国地质灾害与防治学报,2024,35(5):133-140.
- [4] 许强,曾裕平,钱江澎,等. 一种改进的切线角及对应的滑坡预警判据[J]. 地质通报,2009,28(4):501-505.
- [5] 薛廉,唐侨,郑杰,等. 基于实时地质灾害监测数据的预警预报动态阈值分析方法[J]. 中国地质灾害与防治学报,2023,34(4):11-21.
- [6] 宋磊. 边坡变形预测与位移速率预警阈值方法研究[D]. 成都:西南交通大学,2015.
- [7] 刘谢攀,殷坤龙,肖常贵,等. 基于I-D-R阈值模型的滑坡气象预警[J]. 地球科学,2024,49(3):1039-1051.
- [8] 吴琼,葛大庆,于峻川,等. 广域滑坡灾害隐患 InSAR 显著性形变区深度学习识别技术[J]. 测绘学报,2022,51(10):2046-2055.
- [9] 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.
- [10] 云焯,吕孝雷,付希凯,等. 星载 InSAR 技术在地质灾害监测领域的应用[J]. 雷达学报,2020,9(1):73-85.
- [11] 黄铭,刘俊. 基于故障预测与健康管理的边坡安全监测预警体系[J]. 工业建筑,2020,50(5):66-70,43.
- [12] 刘艳辉,方然可,苏永超,等. 基于机器学习的区域滑坡灾害预警模型研究[J]. 工程地质学报,2021,29(1):116-124.
- [13] 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.
- [14] 李博. 用于边坡监测设备的故障诊断系统设计与实现[D]. 重庆:重庆大学,2021.
- [15] 刘刚,叶立新,陈麒玉,等. 基于多传感器信息融合的城市边坡监测数据异常事件检测[J]. 地质科技通报,2022,41(2):13-25.