

寒区高铁隧道口边坡冻融失稳 智能监测预警方法

李 博^{1,2}, 梁 媛¹, 马云东^{1,2}, 于 露^{1,2}

(1. 大连交通大学 交通工程学院, 辽宁 大连 116028; 2. 辽宁省高寒地区高铁技术工程研究中心, 辽宁 大连 116028)

摘 要: 针对寒区高铁隧道口边坡冻融失稳风险及监测数据孤立问题, 本文提出融合北斗定位、毫米波雷达、InSAR 等多源信息的“感知-传输-分析-预警”智能监测系统。该系统通过构建结构变形、环境扰动与异常响应 3 类指标, 采用“点-线-面-体”部署策略, 实现边坡状态的多维感知; 同时, 研发位移触发+图像复核+多源融合的预警模型, 并开发数字化平台, 实现风险分级响应。工程验证结果表明, 该系统在冻融期具有高适应性, 可有效识别滑坡前兆。

关键词: 道路工程; 寒区边坡; 冻融循环; 多源信息融合; 智能监测预警

中图分类号: U25 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2025)09-2985-13

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20250577

Intelligent monitoring and early warning for freeze-thaw instability of high-speed railway tunnel portal slopes in cold regions

LI Bo^{1,2}, LIANG Yuan¹, MA Yun-dong^{1,2}, YU Lu^{1,2}

(1. School of Transportation Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China; 2. Liaoning Province Engineering Research Center of High-Speed Railway Technology in High Cold Region, Dalian 116028, China)

Abstract: Aiming at the freeze-thaw instability risks of high-speed railway tunnel portal slopes in cold regions and the issue of fragmented monitoring data, this paper proposes an intelligent monitoring system integrating multi-source information (including BeiDou positioning, millimeter-wave radar and InSAR) based on a "perception-transmission-analysis-warning" framework. The system constructs three categories of monitoring indicators—structural deformation, environmental disturbance, and abnormal response, and the "point-line-surface-volume" deployment strategy was adopted to achieve multi-dimensional perception of slope conditions. Furthermore, an early warning model incorporating displacement triggering, image verification, and multi-source fusion was developed, alongside a digital platform was developed to achieve risk hierarchical response. The results of engineering validation show that the system has high adaptability during freeze-thaw periods and can effectively identify landslides precursors.

Key words: road engineering; cold region slopes; freeze-thaw cycles; multi-source information fusion; intelligent monitoring and early warning

收稿日期: 2025-06-29.

基金项目: 辽宁省教育厅科学研究项目(LJKZ0507, LJKQZ20222462).

作者简介: 李博(1975-), 女, 教授, 硕士. 研究方向: 交通运输安全. E-mail: libo116028@djtu.edu.cn

0 引言

寒区高铁隧道口边坡受冻融循环作用易失稳变形^[1,2],直接威胁行车安全并增加运维成本^[3]。为此,边坡监测技术正从单点人工观测向多源自动化感知演进^[4,5]:早期主要依赖全球导航卫星系统(Global navigation satellite system, GNSS)和全站仪进行表面位移监测^[6],虽操作简便,但受限于人工频次和空间覆盖范围,对边坡快速变形的捕捉率不足 50%,预警效能有限^[7]。随后,引入倾角仪、应变计及 TDR 等接触式传感器,实现了连续自动观测,但在寒区低温和冻融环境下稳定性不足,误报率高达 10%~15%^[8]。近年来,为突破覆盖范围限制,遥感技术(如 InSAR、激光扫描、无人机摄影)被应用于大范围形变识别^[9-11],毫米波雷达结合视频识别技术则实现了寒区坡面的实时监测^[12,13],国际研究趋势也聚焦于通过多源数据融合降低单一传感器的局限性^[14,15]。

然而,现有技术在实际应用中仍存在显著局限。GNSS 与全站仪获取的数据点位分散、信息孤立^[16];接触式传感器在低温环境下易中断和误报;遥感及无人机监测虽覆盖范围广,但受气象和地形干扰,实时性与可靠性不足^[17]。部分工程仍依赖人工记录和数据处理,不仅效率低下,还易导致信息滞后和判断失误^[18,19]。2022 年贵广高铁 D1862 次列车在暴雨中因泥石流侵入隧道口导致脱轨事故^[20],便暴露了现有依赖单一传感器的监测体系在潜在风险识别与实时预警能力上的不足。

多源数据融合理论上可提升监测精度,通过整合地面与空基传感器信息增强对复杂地形边坡的监测能力^[21]。例如,毫米波雷达结合视频识别可实时捕捉坡面异动,而 InSAR 与无人机影像则能提供大尺度形变信息,实现跨时间尺度的数据互补。但在实际应用中仍面临诸多挑战:数据来源异质,格式与精度差异大,传统融合方法处理困难;寒区低温和复杂气象易导致传感器性能下降,造成监测结果不准确或延迟;实时性与可靠性不足,难以支撑连续预警。因此,亟须构建高精度、智能化、实时化的边坡监测体系。

本文构建了集“感知-传输-分析-预警”于一体的多源融合监测系统,依托北斗高精度定位、毫米波雷达和 InSAR 等技术,开发数字化预警平台,实现边坡风险的智能识别与动态预警,并通过利民隧道口工程验证其可行性。

1 工程地质与隐患特征

如图 1 所示,利民隧道(K68+361.61~K69+210.57)位于黑龙江省哈尔滨市阿城区,洞口边坡陡峭(高差>15 m)。该边坡基岩风化、节理发育,覆盖层松散(粉质黏土-碎石混杂),含局部软弱带。工程区属寒温带季风气候(1991—2020 年年均气温为 3.6℃,历史极低温达-35℃)^[22],年均降雨量 523 mm,显著低于降雨型滑坡高发区域降雨量水平。现场勘测显示,该区域冻融作用显著(最大季节冻深>1.5 m),主要活动于 3~5 月解冻期及 10~11 月冻结期,是诱因滑坡灾害的主要因素。其灾害机制体现为以下 3 类耦合效应:

(1)冻融-水热耦合效应:当土体温度处于-5℃~0℃的相变阈区,且质量含水率>25%时,易诱发浅层滑移或坡脚剪切变形。

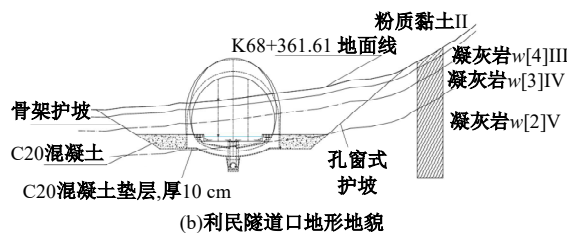
(2)春融期水文激增效应:融雪叠加降雨导致土体饱和,抗剪强度骤降,进而引发既有滑裂带扩展。

(3)列车动荷载扰动效应:加剧冻融期土体结构重组与孔隙水压力波动。

综合来看,滑坡灾害高敏感时段为春融期、强降雨过程后及高频运营时段。



(a)利民隧道高分影像图



(b)利民隧道口地形地貌

图 1 利民隧道工程区位置与地形地貌

Fig. 1 Location and topography of the liming tunnel project area

2 多源监测预警系统构建

2.1 监测指标体系

为精准识别寒区高铁隧道口边坡在冻融、水热及动荷载耦合作用下的复杂失稳演化过程,需构建

具有针对性、可量化、可联动特征的监测指标体系。类、异常响应类。据此构建多源信息指标体系(见表 1),为边坡安全状态的多维度、全过程动态感知与智能研判提供支撑。

表 1 利民隧道口边坡监测指标体系

Table 1 Monitoring index system of the liming tunnel portal slope

监测类型	监测目标	监测项目	感知装置	精度说明
结构变形	坡顶、坡面、坡体监测点及对应区域的沉降位移	水平位移、垂直位移	北斗高精(毫米级)感知单元+北斗 CORS 站	水平±2.5 mm+0.5 ppm 垂直±3 mm+0.5 ppm
	坡体深层土体位移	角倾斜位移	固定测斜仪	±0.05°
环境扰动	感知冻融期水热迁移(温度/含水率)及外部降雨输入,定位冻融相变	土体温度	土体温度传感器	±0.5℃
		土体含水率	土体湿度传感器	±1.5% VWC
	捕捉外部扰动事件	降雨量	雨量计	≤1%
异常响应	边坡坡面特定点状态图像	坡面特定点局部变化、防护栅栏状态	UWB 单元感知模块	
	实时动态影像监测	树木、危岩落石、异物侵限、防护栅栏状态等的实时图像	固定式毫米波雷达+角反射器+高清摄像头	变形监测精度≤±0.1 mm
	边坡局部点状态变化	边坡特定区域、特定时间内的坡面稳定状态图像	合成孔径雷达(InSAR)	精度≤±5 mm/年
	定期图像对比分析边坡状态变化	高分数据影像图像(监测周期大于 InSAR 图像监测周期)	高分数据影像分析单元	图像识别精度≤±1 pixel

2.2 基于有限元风险识别的监测部署

2.2.1 边坡有限元模型构建与失稳区域识别

基于利民隧道口边坡原始 CAD 图,提取特征点坐标,利用 Surfer 软件插值拟合边坡面坐标。结合工程实际情况选取关键点,并依据断面图确定土层厚度,建立边坡三维有限元模型(见图 2,其中 X 为隧道轴向,Y 为垂直轴向,Z 为竖直向)。结合地质资料确定土体类型后,通过 ANSYS 计算分析 XY、YZ、XZ 方向的剪切弹性应变,识别出区域 1 和 2 为潜在滑坡失稳区(见图 3)。

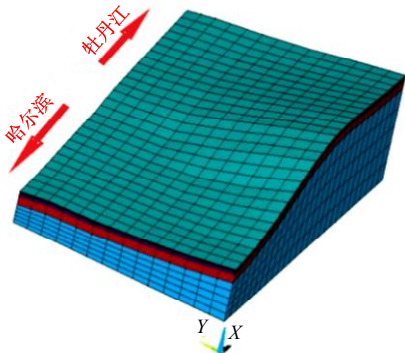


图 2 边坡三维有限元模型
Fig. 2 3D finite element model for slope

2.2.2 “点-线-面-体”融合感知部署策略

基于有限元分析识别的潜在滑坡失稳区(区域 1、区域 2,见图 3),本文提出以下分层监测部署

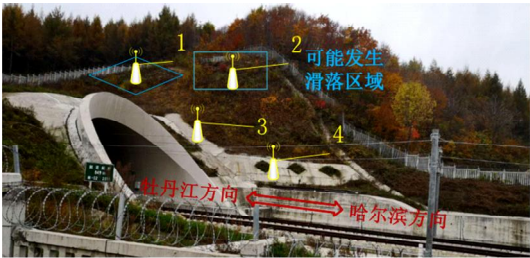


图 3 边坡可能滑坡区域图
Fig. 3 Potential landslide area map of the slope

策略(见图 4):

- (1) 点监测:在区域 1、区域 2 的关键位置(图 3 中菱形/矩形标记点)部署北斗位移监测终端、测斜仪、温湿度传感器及雨量计(分别对应图 4 中设备 1~4),获取关键位点的实时状态信息。
- (2) 线监测:通过分析区域 1、区域 2 内北斗位移监测终端的点位数据,生成位移趋势线,评估潜在滑移面的线性变形特征。
- (3) 面监测:结合区域 1、区域 2 内点监测设备连线所勾勒的范围,并利用区域 1、区域 4 部署的毫米波雷达/视频监控设备(分别对应图 4 中设备 6、7),综合分析坡体表面的形变状态。
- (4) 体监测:综合区域 1、区域 4 内毫米波雷达/视频监控数据及高分遥感影像(分别对应图 4 中数据 6、7),评估包含区域 1、区域 2 在内的边坡整体稳定性状态。

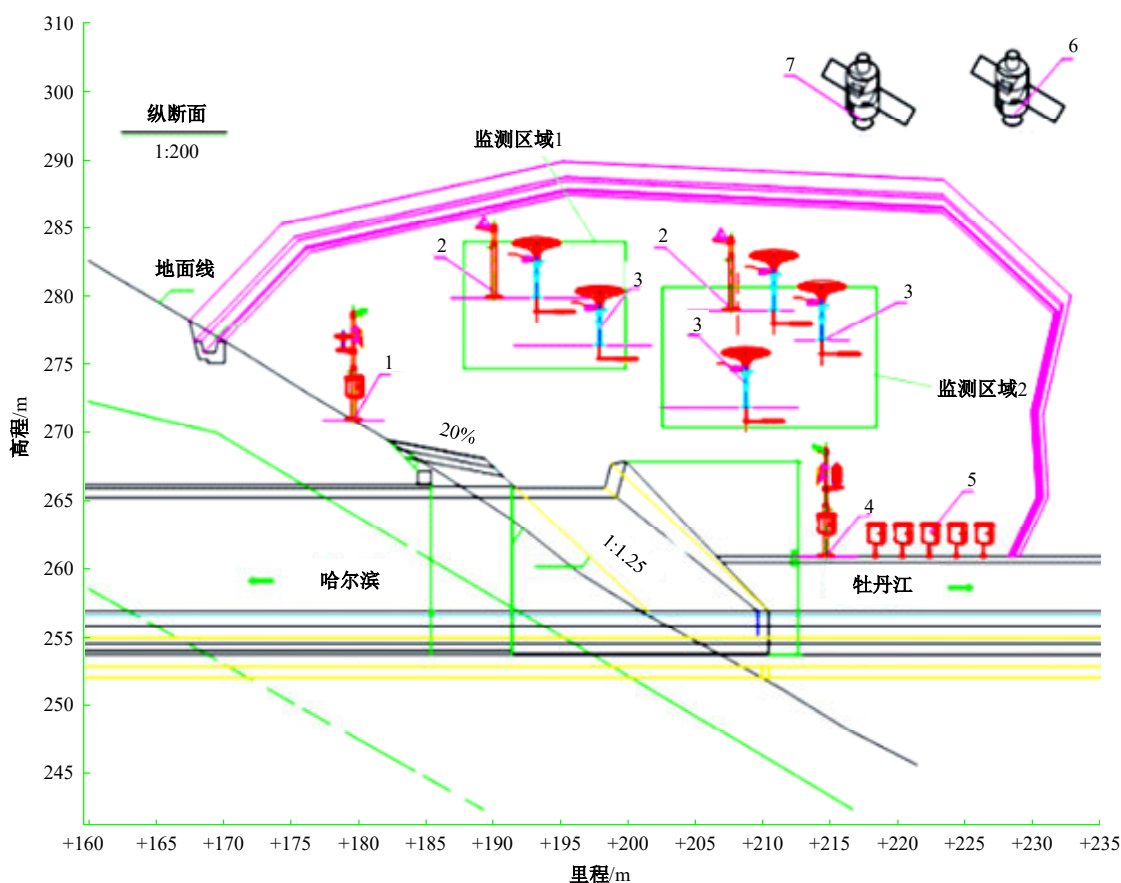


图 4 监测点布局示意图

Fig. 4 Schematic diagram of monitoring point layout

2.2.3 多维度监测设备部署方案

结构变形监测:设备布设于区域1、区域2的坡顶、坡面、坡体。基准站点位需对空条件良好(视场内高度角 $\geq 15^\circ$,且无遮挡)。

环境扰动监测:温湿度传感器布设于区域1、区域2(各布设2台),雨量计布设于隧道口区域(布设1台)。

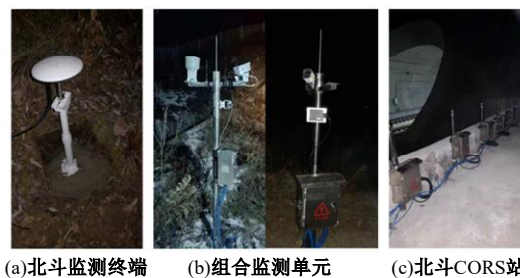
异常响应监测:依托毫米波雷达、InSAR 雷达遥感卫星、高清摄像头与高分数据影像,识别边坡特定点位/区域的树木位移、危岩落石、异物侵限、防护栅栏状态及坡面整体稳定性。该监测模块可与雷达数据联动校验,用于春融期或暴雨期间的应急响应。监测设备部署实景如图5所示。

虽然多源传感设备的部署需投入一定成本,但通过结合边坡潜在失稳特征的精准布点、设备功能的综合利用及针对寒区环境的适应性设计,可在保障监测效果的同时合理控制成本。

2.3 预警模型与预警等级划分

2.3.1 预警模型构建

为克服冻融期突发形变实时监测难题,本文



(a)北斗监测终端 (b)组合监测单元 (c)北斗CORS站

图 5 监测设备安装实景

Fig. 5 Field installation of monitoring devices

构建了基于北斗位移触发、图像复核与多源融合的三级自动化预警模型(见图6),实现滑坡/崩塌的早期识别与快速响应。具体流程如下:

(1)一级触发(位移判定):实时分析北斗位移数据。基于莱因达准则(3σ)分析历史同期同位置数据,确定位移统计阈值。结合位移速率阈值(见表2)综合判定:若位移量及位移速率均未超限,则终止流程;若位移量或位移速率任意一项超限,则触发二级判定。

(2)二级识别(图像复核):调用毫米波雷达图像,结合栅栏状态、侵限记录,检测活动边界、结

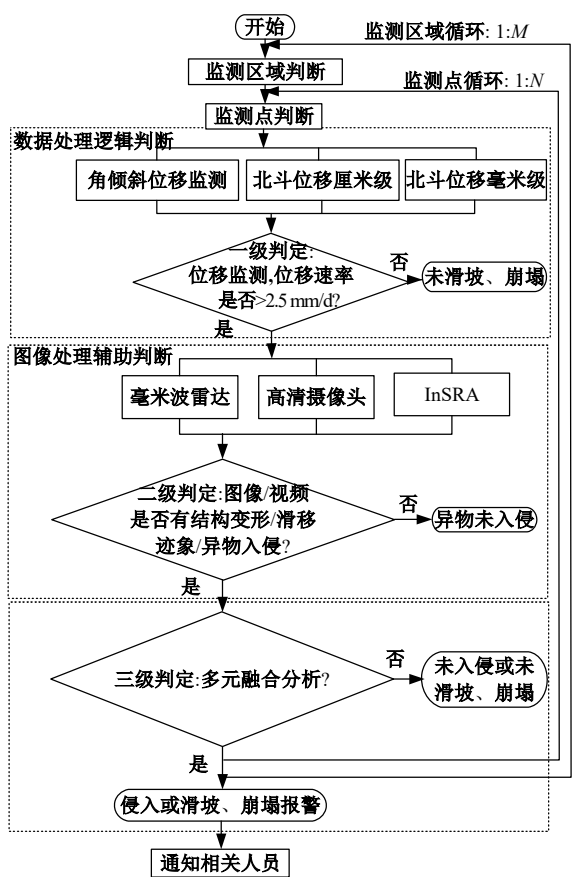


图 6 边坡安全状态监测预警系统流程图

Fig. 6 Flow chart of slope safety condition monitoring and early warning system

构变形或异物侵限。若无异常,则判定误触发并终止流程;若确认异常,则进入三级判定^[23]。

(3)三级预警(多源融合):此阶段融合毫米波雷达形变信息、InSAR图斑、光学影像、视频监控与北斗位移曲线等多源数据进行综合判定。其中,InSAR数据重点关注变形速率>5 mm/年且持续增加的区域;裂缝监测依据扩展速率预警,当扩展速率>1 mm/d时,对应一级预警条件;环境因子评估则结合表2中的寒区特征参数(如地温、含水率、裂缝扩展速率)展开。若多源数据均未超限,则终止流程;若确认存在滑移面扩展、持续变形或动态异常(符合表2高等级预警位移速率,并

伴随对应寒区特征),则触发报警。

(4)风险响应:当触发一级(红色)预警后,系统自动启动应急联动机制,向平台及责任单位发送预警(支持人工确认),同时提升监测频率强化跟踪。具体响应措施按预警等级执行(见表2)。

本模型通过自动化决策克服人工流程的固有延迟,显著提升冻融期瞬时形变监测预警能力。

2.3.2 预警等级划分与阈值确定

本文采用我国现行边坡变形四级预警体系(绿/黄/橙/红对应初始变形至加速临滑阶段)。预警等级划分以位移速率为核心指标(见表2,位移速率阈值范围为<0.5、0.5~1.5、1.5~2.5、>2.5 mm/d),其设定依据如下:

(1)历史数据分析:基于利民隧道口边坡冻融失稳案例库,统计各变形阶段位移速率特征。

(2)规范文献参考:综合边坡工程规范及文献建议值^[24,25]。

(3)强度折减法验证:按理论失稳位移值的70%校核阈值。

需要注意的是,位移速率阈值的应用需紧密结合寒区特殊的冻融环境进行风险评估。针对利民隧道工程,冻融循环(地温波动、水分迁移及冻胀融沉)显著影响变形演化。在相同位移速率下,若出现特定寒区环境(如冻胀期地温<-5℃、融沉期地温>0℃、高含水率、裂缝加速扩展),则边坡失稳风险将显著升高。

表2所列寒区特征参数(地温、含水率、裂缝扩展速率)源于历史数据统计,用于辅助判断位移速率对应的实际风险。例如,当位移速率达到二级预警(1.5~2.5 mm/d)时,若同步出现融沉环境(地温>0℃)或裂缝扩展迹象(裂缝扩展速率<1 mm/d),则采取高于该等级的响应措施,因其实际风险已逼近更高等级。

综上,通过位移速率指标论证及与寒区冻融参数的关联分析,本文构建了适用于本工程的寒

表 2 预警等级划分及响应

Table 2 Classification of early warning levels and response

预警等级	变形阶段	位移速率阈值/(mm·d ⁻¹)	寒区特征参数	响应机制
四级(绿色)	初始变形	<0.5	地温<-5℃,含水率<18%	常规监测数据,每日汇总
三级(黄色)	等速变形	0.5~1.5	地温-5~0℃,含水率20%~25%	平台预警提示,每周现场巡查
二级(橙色)	加速变形	1.5~2.5	地温>0℃,裂缝扩展速率<1 mm/d	加密监测频次,启动应急值班
一级(红色)	加速临滑	>2.5	地温>5℃,裂缝扩展速率>1 mm/d	自动声光报警,联动线路封控,人员撤离

区边坡四级预警模型,详见表2所列预警等级、位移速率阈值、寒区特征参数及响应机制。

3 数字化预警平台

3.1 平台架构设计与核心实现

针对寒区高铁隧道口边坡具有的强动态性与突发性特征,本文开发的数字化预警平台构建了“天-空-地”多源集成监测预警系统,整合 InSAR

(天基)、毫米波雷达(空基)及地面传感器(地基)等设备(部署见2.2节),实现空间、参数与功能互补。

该平台采用“感知层-传输层-分析层-应用层”4层架构(见图7)。

感知层集成北斗、传感器、雷达、摄像头、InSAR/高分影像,覆盖结构变形、环境扰动、异常响应监测。

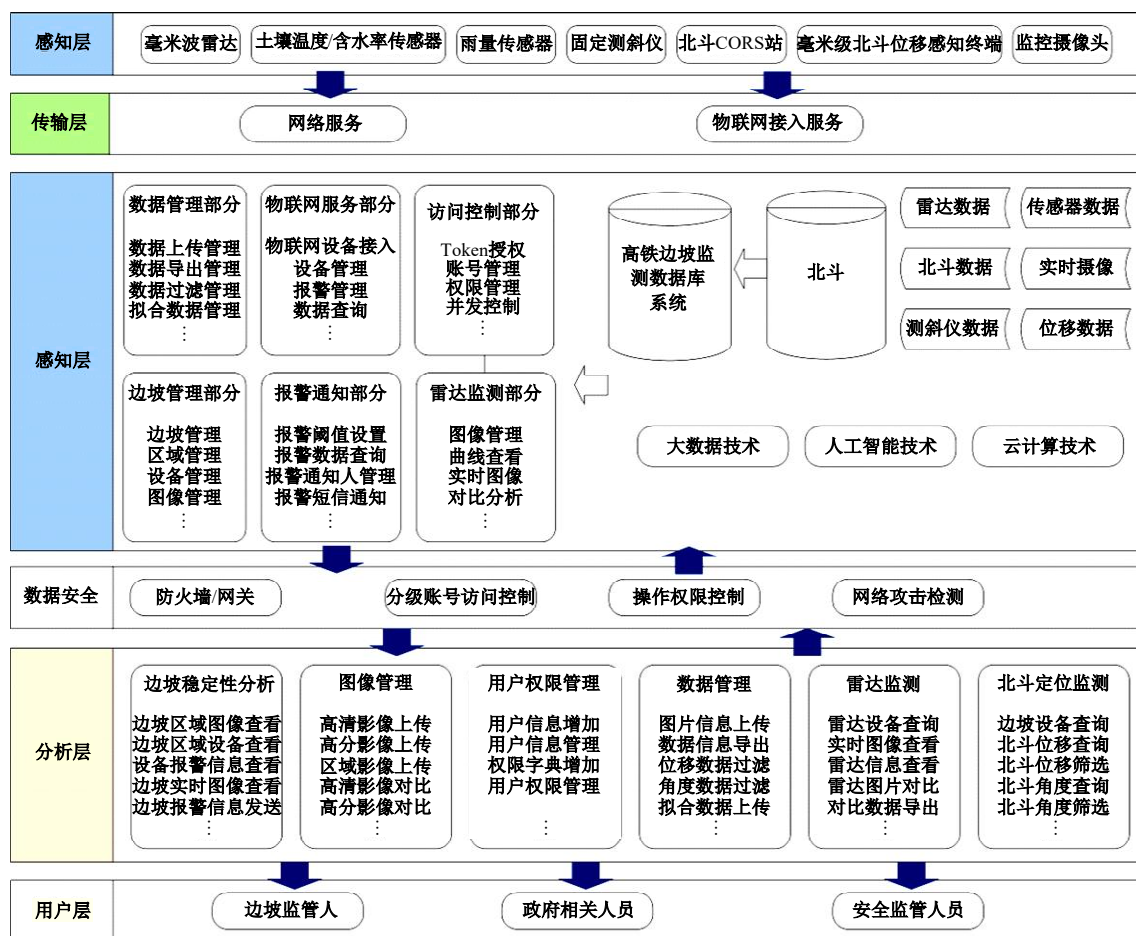


图7 系统整体构架

Fig. 7 Overall system architecture

传输层采用4G/5G/Wi-Fi/微波等多制式冗余通信,结合北斗CORS统一坐标,通过数据加密、断点续传、误码校验保障寒区数据传输的可靠性。

分析层/应用层通过自主开发的上位机软件实现,其核心功能包括实时多源数据可视化(图表/三维模型)、历史趋势回溯、视频异常识别、设备管理及预警规则配置。该系统集成5大模块,即系统管理、感知数据处理、数据管理、影像监控、雷达/北斗/高分数据分析(含稳定性评估算法);支持台式机与移动APP远程访问及权限管理,满

足高铁工务运维需求。

3.2 核心功能模块

3.2.1 监测数据分析

寒区高铁隧道口边坡北斗位移数据的预处理采用多级滤波:首先,剔除原始报文中经纬度高程为0或位置异常的无效解,仅保留差分定位状态为4的有效数据;其次,数据经4G传输后,采用两级均值算法构建基准值(见式(1)),即先对2h数据剔除20%极值后取均值,再对12组均值进行平均运算,最终将得到的稳定基准值 X_{ref} 存储于Flash中。

$$X_{\text{ref}}=\frac{1}{12}\sum_{i=t-6}^{t+5}\tilde{x}_i''$$

(1)

为提升数据的可靠性,采用正弦拟合模型去除温度、含水率等环境数据的周期性噪声。2020—2021 年监测期内,1~4 号设备的位移数据符合高斯分布($R^2>0.93$)。基于莱因达 3σ 准则,计算得出各设备高程位移与水平位移临界值($\mu+3\sigma$),见表 3。其中,2 号设备的高程位移临界值最高(18.33 mm),3 号设备的水平位移临界值最低(3.88 mm)。该阈值量化了寒区高铁隧道口边坡预警标准,有效降低了误报与漏报风险。

表 3 1—4 号设备高程位移、水平位移的临界值

Table 3 Critical values of elevation displacement and horizontal displacement of equipment 1—4

设备名称		均值/ μ	均方差 ($S:\sigma_s$)	均方差 ($P:\sigma_p$)	统计阈值 ($\mu+3\sigma$)
1 号设备	ΔH	0.28	5.31	5.25	16.13
	HD	2.86	2.76	2.73	11.10
2 号设备	ΔH	-1.48	6.63	6.58	18.33
	HD	3.27	3.26	3.23	13.02
3 号设备	ΔH	-0.03	4.49	4.43	13.34
	HD	1.17	0.91	0.90	3.88
4 号设备	ΔH	-1.92	5.96	5.91	15.89

注: ΔH 为高程位移,mm;HD 为水平位移,mm。

在融合层面,智能监测预警系统实现了结构数据与环境扰动的时序对齐与空间投影映射。基于正弦拟合模型,建立温度与位移响应的关联函数,即:

$$d(t)=A\sin(\omega t+\varphi)+B$$

(2)

式中: $d(t)$ 为边坡位移(如高程位移或水平位移); ω 为冻融循环频率; φ 为位移与温度变化的时间滞后量; A 为位移振幅,反映冻融最大响应; B 为基线位移,反映长期累积趋势。其中, A 和 B 通过实测数据的最小二乘回归联合确定。工程上, A 值越大表明边坡对冻融变形更敏感, B 值的变化可揭示边坡整体稳定性的演化趋势。

2020 年 11 月至 2021 年 5 月监测数据显示,大气温度在 $-27\sim 17\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间波动,地表温度滞后大气 7~10 天且呈正弦变化;冻胀前期(11~12 月)与消融期(3~5 月)温度变化较快,稳定冻结期(1~2 月)温度波动平缓。边坡高程位移与温度显著相关;负温区间,高程位移在 $-5\sim 0\text{ mm}$ 范围浮动;温度回升后,高程位移由 -5 mm 增至 5

mm,其趋势与温度拟合曲线($R^2=0.941$)一致。该规律验证了热胀冷缩与冻胀力对边坡变形的驱动作用,并揭示了冻融界面迁移及饱和带变化的影响机制(见图 8)。

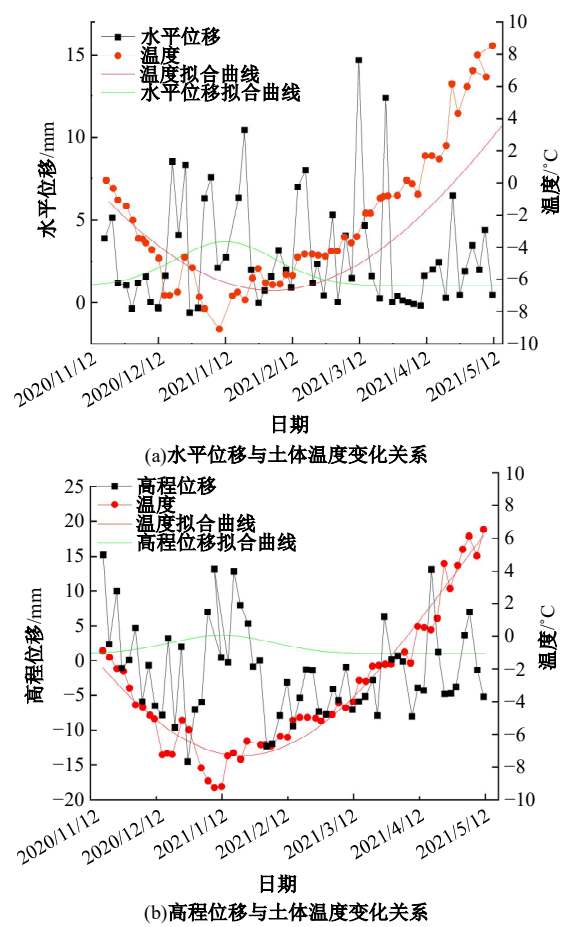


图 8 位移与土体温度变化关系

Fig. 8 Relationship between displacement and soil temperature variation

3.2.2 三维可视化展示

智能监测预警系统集成多源数据空间分析功能(见图 9),具体如下:

- (1)高分/高清影像地貌识别(见图 9(a)、(b))。
- (2)毫米波雷达形变监测(见图 9(c))。
- (3)InSAR 大范围形变场解析(见图 9(d))。
- (4)实时图像动态追踪(见图 9(e))。

这些功能为预警决策提供空间基准,技术人员可手动调用影像数据,辅助风险研判。

数字化平台通过多源数据自动分析与智能预警,替代人工巡检,显著降低运维工时与人力成本;其精准预警推送使现场处置由“全面排查”转向“靶向操作”,为寒区高铁隧道口边坡监测提供可推广方案,赋能同类工程。



(a)高分影像分析入口 (b)高清影像分析入口 (c)毫米波雷达监测接口 (d)InSAR形变分析模块 (e)实时图像监控窗口

图 9 边坡稳定性分析主界面

Fig. 9 Main interface of slope stability analysis

3.2.3 智能预警发布

北斗定位监测作为智能预警系统的核心模块,通过专属界面(见图 10)实时高精度监测边坡地表位移。以 1 号北斗毫米终端为例,当高程位移从 -40.0 mm 变为 50.0 mm 时,系统基于预设阈值(如位移速率 $>0.5\text{ mm/d}$ 触发初级预警)动态分析位移趋势。

当位移曲线界面(见图 10)检测到数据异常时,系统立即激活预警机制,弹出窗口显示异常设备、预警内容及状态判定,并依据表 2 规则确定预警等级。在预警信息界面(见图 10)中,不同预警等级以不同颜色标识(如红色代表一级高风险),同步触发对应级别的报警弹窗(见

图 11)。

当预警触发后(见图 11),技术人员通过以下流程辅助决策:

(1)在预警界面(见图 10)记录异常设备位置信息(如“1 号北斗毫米终端”)。

(2)返回“边坡稳定性分析”界面点选设备的位置,切换至三维可视化系统(见图 9)。

(3)调用该点位的毫米波雷达实时数据(见图 9(c)),复核边坡微变形状状态。

(4)结合北斗位移时序曲线(见图 10)与 InSAR 历史形变(见图 9(d))评估风险趋势。

此流程通过多源数据空间关联提升研判效率(案例验证见 4.2 节)。

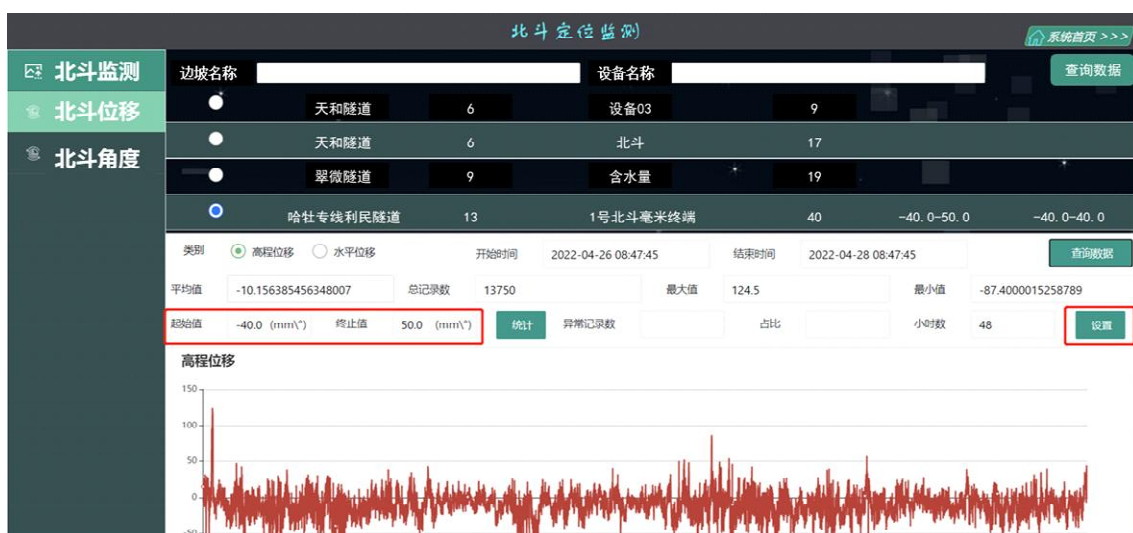


图 10 智能预警查看功能图

Fig. 10 Intelligent early warning view function chart



图 11 预警报警图

Fig. 11 Early warning alarm diagram

4 工程验证与案例分析

4.1 工程验证

为验证寒区高铁隧道口边坡多源融合智能监测预警系统在冻融循环阶段的适用性,选取利民隧道 2021 年 4~6 月 3 组典型监测数据进行分析。该时段覆盖春末冻融启动、夏季冻土消融及雨季高温耦合等特征工况,通过 InSAR 广域形变监测与北斗局部监测的协同验证,完整呈现系统“感知-分析-预警”流程的有效性。图 12(研究区 4~6 月 InSAR 形变分布)中红色五星集中区(高风险区)与边缘黄色区(潜在缓慢变形带)为局部监测点部署及预警等级判定提供宏观依据。

案例 1:4 月春末冻融启动期(见图 13(a))。

位置/时段:InSAR 高风险区(127.172°E 附近,3 号监测区),2021 年 4 月 27 日—5 月 4 日(冻融循环启动阶段)。

监测触发:InSAR 监测形变量达 0.03~0.05 m(超二级预警阈值 0.02 m);北斗水平位移速率达 17~41 mm/d(超二级预警阈值 1.5~2.5 mm/d),触发二级识别。

验证分析:毫米波雷达与高清影像未检出结构滑移或异物侵限,但捕获表层冻胀性微小隆起(幅值<5 mm),排除误触发。融合分析显示,地温为-0.5~0℃(冻融相变临界区),含水率为 0.45%~0.54%,结合春末冻土未完全融化特征,判定冻胀力为主导变形机制(符合冻融-水热耦合效应理论)。

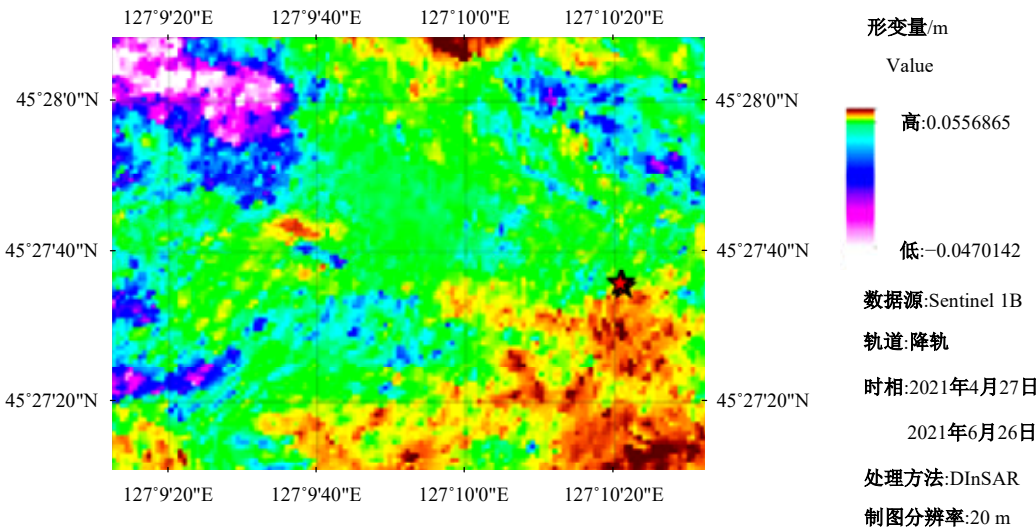


图 12 利民隧道客运专线区域形变图

Fig. 12 Regional deformation map of limin tunnel passengerer dedicated line

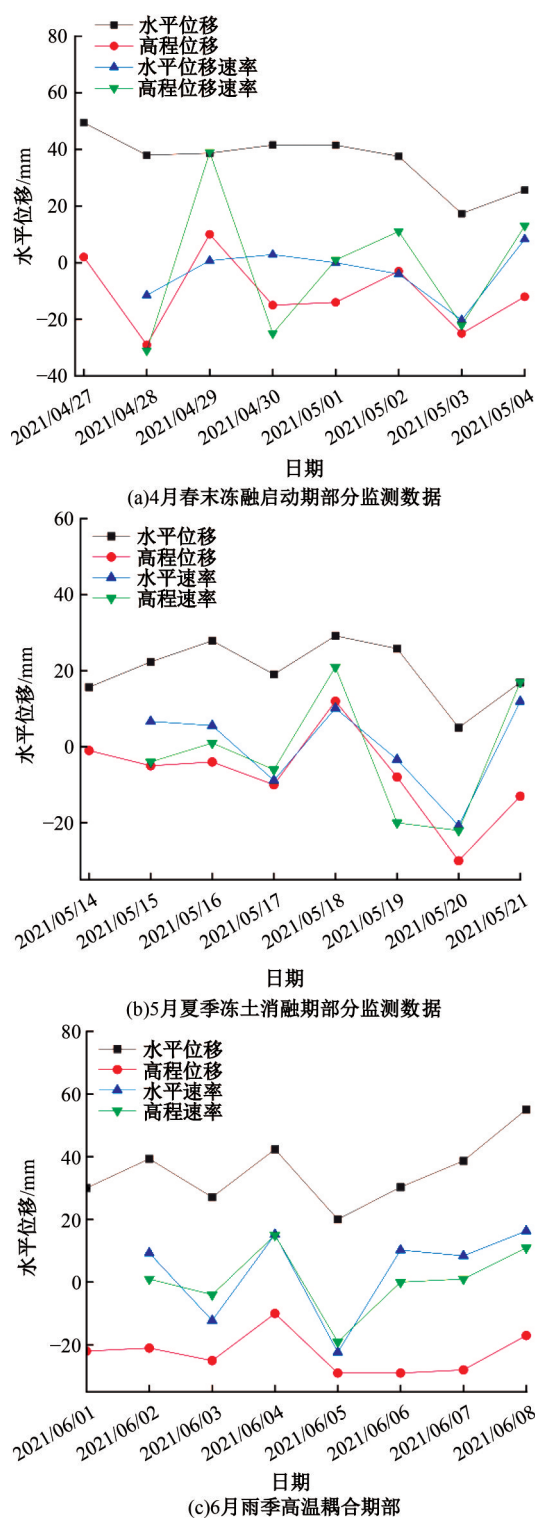


图 13 部分监测数据变化趋势

Fig. 13 Variation trend of partial monitoring data

预警决策:综合判定为加速变形阶段,触发二级(橙色)预警。

案例 2:5月夏季冻土消融后期(见图 13(b))。

位置/时段:InSAR 潜在缓慢变形带(形变量为 0.01~0.03 m, 3 号监测区外围), 2021 年 5 月

14~21 日(冻土消融后期)。

监测触发:InSAR 形变量为 0.01~0.03 m (超三级预警阈值 0.01 m);北斗水平位移速率达 15~28 mm/d (处三级预警阈值 0.5~1.5 mm/d 上限),触发三级识别。

验证分析:毫米波雷达与高清影像显示坡面无裂缝扩展,但检测到冻土消融性沉降(幅值 3~8 mm),与 InSAR 形变趋势一致。融合分析显示,地温为 3.58~4.95 °C (>0 °C,冻胀力消退),含水率为 0.54%(受初雨及冻土残余水影响),虽未达饱和,但受“春融期水文激增效应”滞后作用导致持续变形。

预警决策:判定为等速变形阶段,触发三级(黄色)预警。

案例 3:6月雨季高温耦合期(见图 13(c))。

位置/时段:InSAR 覆盖区外围(2 号监测区), 2021 年 6 月 1~8 日(高温与雨季叠加阶段)。

监测触发:北斗监测显示 2021 年 6 月 5 日高程位移速率短时突增至 -19.01 mm/d (超一级预警阈值 2.5 mm/d),而 6 月 8 日累计水平位移达 55.09 mm(突发性特征);两者分别代表不同日期的局部异常峰值。综合 InSAR 广域形变、地温含水率及雷达影像等多源信息,触发一级识别。

验证分析:环境参数显示地温为 9.42 °C (>5 °C),含水率为 15.4%。经多终端协同验证确认,位移突变呈局部孤立性(非区域性失稳)。融合研判表明,高温环境加剧土体弱化,叠加雨季潜在的饱和风险及“春融期水文激增效应”滞后影响,符合一级预警核心指标。

预警决策:触发一级(红色)预警。

4.2 冻融型滑坡前兆案例验证

2020~2021 年监测期内,数字化预警平台成功捕捉一起冻融型滑坡前兆事件,验证了智能监测预警系统对高风险场景的精准识别能力。2 号设备监测数据(见图 14)显示,2021 年 2 月 18~21 日,水平位移由 14.7 mm 增至 16.8 mm,高程位移由 -25.4 mm 降至 -35.1 mm;同期土体温度从 -5.47 °C 升至 -5.42 °C(冻土相变活跃区),含水率由 0.32% 升至 0.35%。

关键预警特征如下:

- (1)实时水平位移速率连续 3 日 > 2 mm/d。
- (2)高程位移剧变(3 日累计 -9.7 mm)。
- (3)土体温度 > -5 °C,且含水率达预警阈值

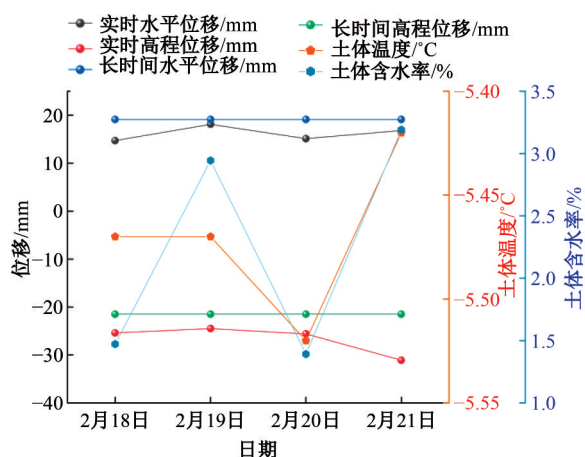


图14 2号设备2月18~21日监测数据

Fig. 14 Equipment #2 monitoring data from February 18~21

(0.35%)。

系统据此于2月21日触发一级滑坡预警,响应流程如下:

(1)定位异常设备(2号北斗毫米终端,见图10)。

(2)加载毫米波雷达数据(见图9(c)),检测到该区域微变形 ≥ 1.2 mm。

(3)关联北斗位移加速趋势(见图10)及InSAR沉降形变速率。

(4)综合判定为一级风险,启动应急响应。

现场验证:雷达监测点对应区域出现径向裂缝及土体松动,系统自动加密监测至1次/h。

系统响应时效(理论最坏值)如下:

(1)感知层:北斗阈值识别延迟 ≤ 1 s(采样率为1 Hz,见表1)。

(2)传输层:4G网络延迟均值为3 s(见3.1节)。

(3)决策层:三级流程耗时 ≤ 4 s(见图6)。

(4)全链路响应时间 ≤ 8 s,远低于24 h人工巡检周期。

5 结 论

(1)融合北斗定位、InSAR遥感、毫米波雷达、温湿传感及图像识别技术,构建覆盖“结构变形-环境扰动-异常响应”的三维指标体系;提出“点-线-面-体”协同部署策略,实现位移场(精度 ± 3 mm)、温度场(± 0.5 °C)、含水率(± 1.5 %)及裂缝演化的动态感知,突破寒区复杂环境时空监测瓶颈。

(2)建立基于位移速率核心指标、环境因子阈值与图像扰动判据的智能预警模型,形成“位移触发→图像复核→多源融合”的分级响应闭环;通

过耦合位移统计阈值(莱因达准则)、温湿临界参数(见表2)及裂缝扩展判据,为灾害孕育至临滑全过程分级预警提供有力支撑。

(3)研发数字化预警平台,集成多源数据处理、三维可视化与应急联动功能,实现监测-分析-响应闭环管理;利民隧道工程验证结果表明,本文提出的智能监测预警系统具备寒区冻融期高适应性(-30 °C冰雪环境下设备可用率达100%)与可靠性(精准捕获2021年2月滑坡前兆,预警逻辑与形变特征吻合度 > 92 %);多源模块协同响应时间 ≤ 8 s,显著优于24 h人工巡检时效。

(4)当前局限:①多源数据权重的动态优化需结合地质力学模型进一步深化;②单工程试点约束统计泛化能力;③极端天气下光学影像识别误差率 > 15 %。未来方向:①开发地质特征驱动的自适应融合算法;②拓展多气候区(极寒/湿热)长周期验证;③构建环境鲁棒性增强的图像识别模型。

参考文献:

- [1] 田四明, 王伟, 刘建友, 等. 寒区铁路隧道防寒抗冻关键技术研究及展望[J]. 隧道建设(中英文), 2024, 44(1): 21-34.
Tian Si-ming, Wang Wei, Liu Jian-you, et al. Research on and prospect of key technologies of frost-proofing and anti-freezing for railway tunnels in cold regions[J]. Tunnel Construction, 2024, 44(1): 21-34.
- [2] 宫亚峰, 吴树正, 毕海鹏, 等. 基于现场监测技术的装配式箱涵温度场及冻胀分析[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2023, 53(8): 2321-2331.
Gong Ya-feng, Wu Shu-zheng, Bi Hai-peng, et al. Temperature field and frost heaving analysis of prefabricated box culvert based on field monitoring[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2023, 53(8): 2321-2331.
- [3] 刘帅, 杨更社, 潘振兴. 冻融环境“三段式”岩质边坡锁固段损伤破坏及灾变机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(11): 2781-2795.
Liu Shuai, Yang Geng-she, Pan Zhen-xing. Study on damage and catastrophic mechanisms of the locked section of a "three-stage" rock slope in a freeze-thaw environment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(11): 2781-2795.
- [4] 周翠英, 陈恒, 朱凤贤. 基于渐进演化的高边坡非线性动力学预警研究[J]. 岩石力学与工程学报,

- 2008(4): 818-824.
- Zhou Cui-ying, Chen Heng, Zhu Feng-xian. Research on nonlinear dynamic warning for high slopes based on progressive evolution process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008(4): 818-824.
- [5] 李长洪, 肖永刚, 王宇, 等. 高海拔寒区岩质边坡变形破坏机制研究现状及趋势[J]. 工程科学学报, 2019, 41(11): 1374-1386.
- Li Chang-hong, Xiao Yong-gang, Wang Yu, et al. Review and prospects for understanding deformation and failure of rock slopes in cold regions with high altitude[J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(11): 1374-1386.
- [6] 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 Jian-hua, et al. Research and application of GNSS/GIS integrated high slope deformation monitoring system for open pit mines[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2015, 40(5): 706-710.
- [7] 高海龙, 徐一博, 刘坤, 等. 基于多源数据融合的高速公路路网短时交通流参数实时预测[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2024, 54(1): 155-161.
- Gao Hai-long, Xu Yi-bo, Liu Kun, et al. High-speed highway road network short-term traffic flow parameters based on multi-source data fusion prediction[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2024, 54(1): 155-161.
- [8] 赵晓康, 胡哲, 张久鹏, 等. 基于光纤传感技术的路面结冰智能监测研究进展[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2023, 53(6): 1566-1579.
- Zhao Xiao-kang, Hu Zhe, Zhang Jiu-peng, et al. Research progress in intelligent monitoring of pavement icing based on optical fiber sensing technology[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2023, 53(6): 1566-1579.
- [9] 马仪, 黄组桂, 贾江栋, 等. 基于无人机-卫星遥感升尺度的土壤水分监测模型研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(6): 307-318.
- Ma Yi, Huang Zu-gui, Jia Jiang-dong, et al. Soil moisture monitoring model based on UAV-satellite remote sensing scale-up[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(6): 307-318.
- [10] Maulana F R, Wattimena R K, Sulistianto B. Integrated D-InSAR and ground-based radar for open pit slope stability monitoring and implications for rock mass young's modulus reduction[J]. Journal of Engineering & Technological Sciences, 2023, 55(3): 247-260.
- [11] 孙书伟, 刘流, 郑明新, 等. 抚顺西露天矿区边坡灾害多源监测预警系统及工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(5): 1124-1138.
- Sun Shu-wei, Liu Liu, Zheng Ming-xin, et al. Slope disaster monitoring and early warning system in Fushun west open pit mine and its engineering application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(5): 1124-1138.
- [12] 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(S2): 3421-3431.
- Ren Kai-yu, Yao Xin, Zhao Xiao-ming, 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(S2): 3421-3431.
- [13] 王瑞. 高速铁路灾害及侵限监测关键技术研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院通信信号研究所, 2022.
- Wang Rui. Research on high-speed railway disaster and intrusion monitoring technology[D]. Beijing: Signal & Communication Research Institute, China Academy of Railway Sciences, 2022.
- [14] 杨秋菊. 基于模糊理论的多源异构传感器数据融合模型[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2024, 54(10): 3058-3063.
- Yang Qiu-ju. Multisource heterogeneous sensor data fusion model based on fuzzy theory[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2024, 54(10): 3058-3063.
- [15] 朱俊清, 赵学儒, 马涛, 等. 基于卫星遥感的路域地质灾害监测方法[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2023, 53(6): 1861-1872.
- Zhu Jun-qing, Zhao Xue-ru, Ma Tao, et al. Monitoring road geological disaster based on satellite remote sensing[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2023, 53(6): 1861-1872.
- [16] Hu M, Ren Y, Xiao L Y, et al. Landslide monitoring based on GNSS and automated inclinometer systems and dynamic modeling using SPH: a case study in Qinghai, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2024, 83: 170.
- [17] Xu Q, Zhao B, Dai K R, et al. Remote sensing for

- landslide investigations: a progress report from China [J]. Engineering Geology, 2023, 321: No. 107156.
- [18] 肖自为, 马源, 李金林, 等. 基于过程预警模型的矿山边坡监测系统研究与应用[J]. 地质灾害与环境保护, 2024, 35(4): 91-98.
- Xiao Zi-wei, Ma Yuan, Li Jin-lin, et al. Research and application of mine slopes monitoring system based on process warning model[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2024, 35(4): 91-98.
- [19] 纪伦, 张红菊, 郭宏斌, 等. 北方寒冷地区温度场作用下公路路表形变规律分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2024, 56(9): 113-123.
- Ji Lun, Zhang Hong-ju, Guo Hong-bin, et al. Road deformation characteristics under the action of temperature field in cold regions of North China[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2024, 25(9): 113-123.
- [20] 陈伟明. 基于位移信息的边坡动态监控系统[D]. 成都: 西南交通大学土木工程学院, 2015.
- Chen Wei-ming. Slope dynamic monitoring system based on displacement information[D]. Chengdu: School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, 2015.
- [21] 马伟斌. 我国寒区铁路隧道冻害机理及防治技术综述与展望[J]. 铁道学报, 2025, 47(6): 196-210.
- Ma Wei-bin. Summary and prospect of frost damage mechanism and control technologies of railway tunnels in cold areas in China[J]. Journal of the China Railway Society, 2025, 47(6): 196-210.
- [22] 张哲, 付伟, 张军辉, 等. 循环荷载下冻融路基黏土长期塑性行为[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2023, 53(6): 1790-1798.
- Zhang Zhe, Fu Wei, Zhang Jun-hui, et al. Long-term characterising plastic behavior of thawed subgrade clay under cyclic loads[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2023, 53(6): 1790-1798.
- [23] 胡昊. 面向高铁运行环境安全的侵限监测关键技术研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院通信信号研究所, 2022.
- Hu Hao. Research on key technologies of intrusion monitoring for high-speed rail running environment safety[D]. Beijing: Signal & Communication Research Institute, China Academy of Railway Sciences, 2022.
- [24] GB50330—2013. 建筑边坡工程设计规范[S].
- [25] GB50497—2009. 建筑基坑工程监测技术规范[S].