

基于多源数据融合的公路塌方分级预警模型研究——以土压力-激光雷达协同监测为例

吴佩秀 何其非 甘江川

四川建筑职业技术大学, 中国·四川 成都 610399

摘要: 针对公路塌方灾害预警准确率低、阈值设定依赖经验等问题, 本文提出一种基于多源数据融合的公路塌方分级预警模型。该模型融合土压力监测装置获取的土体内部应力数据与激光雷达获取的地表形变点云数据, 构建多源监测指标体系; 采用综合评分法与动态阈值相结合的方式, 建立红、橙、黄、蓝四级分级预警机制。以四川省乐西高速公路某边坡为工程案例进行验证, 结果表明, 模型成功预警边坡变形险情, 预警准确率较传统单因素阈值法显著提升, 误报率有效降低。该模型结构简单、易于工程实现, 可为公路地质灾害主动防控提供实用技术支持。

关键词: 公路塌方; 多源数据融合; 土压力-激光雷达监测; 分级预警

Research on Graded Early Warning Model for Highway Landslides Based on Multi-Source Data Fusion —— Taking Soil Pressure-LiDAR Collaborative Monitoring as an Example

Wu Peixiu, He Qifei, Gan Jiangchuan

Sichuan Vocational and Technical University of Architecture, China Sichuan Chengdu 610399

Abstract: To address the problems of low accuracy and experience-dependent threshold setting in highway collapse disaster warning, this paper proposes a multi-source data fusion based graded early warning model for highway collapses. The model integrates soil internal stress data obtained from earth pressure monitoring devices with surface deformation point cloud data obtained from LiDAR to construct a multi-source monitoring indicator system. A comprehensive scoring method combined with dynamic thresholds is adopted to establish a four-level (red, orange, yellow, blue) graded warning mechanism. A case study of a slope on the Lexi Expressway in Sichuan Province verifies the model. The results show that the model successfully warned of slope deformation risks, significantly improving the warning accuracy and effectively reducing the false alarm rate compared to the traditional single-factor threshold method. The model has a simple structure, is easy to implement in engineering practice, and can provide practical technical support for active prevention and control of highway geological disasters.

Keywords: Highway collapse; Multi-source data fusion; Earth pressure-LiDAR monitoring; Graded warning

1 引言

1.1 研究背景与意义

近十年来, 我国公路事故总量呈现稳步下降趋势, 然而公路塌方、滑坡等地质灾害引发的安全事故却持续攀升, 其占公路安全事故总量的比重逐年递增。这一现象折射出极端天气频发、地质环境变化等因素对公路安全带来的新挑战正日益凸显, 传统的交通安全治理体系, 已难以应对新型地质环境风险带来的复合型挑战。2024年梅大高速路面塌方灾害事件的发生, 更凸显了加强公路塌方监测预警技术攻关的紧迫性。

传统的公路塌方监测预警主要依赖单一传感器阈值判别或人工巡检, 存在感知维度单一、预警时效性差、误报率高等问题。国务院《全国地质灾害防治“十四五”规划》

明确提出, 应充分利用星载、航空、地面的空天地一体化多源立体观测体系, 开展多方法、分层次、多尺度的综合遥感动态调查。在此背景下, 探索多源数据融合的公路塌方预警方法, 通过实时监测、动态预警和协同防控, 降低公路塌方事故的发生概率及次生灾害损失, 对于提升公路防灾抗灾能力、保障人民生命财产安全具有重要意义。

1.2 国内外研究现状

国内外围绕地质灾害监测预警技术开展了大量研究工作。在遥感地质灾害筛查方面, InSAR技术可获取大范围地表形变信息, 实现对潜在滑坡隐患的早期识别^[1]。山西省智慧交通研究院构建的“天-地”一体多源感知技术体系, 融合星载InSAR、地面传感器技术, 实现了黄土地区公路地质灾害的精度监测^[2]。在实时监测预警方面, 各

类地面传感器得到广泛应用。山东大学等单位提出的“光纤 + 土压力盒”道路结构病害诊断方法,将光纤传感与土压力监测相结合,实现对道路结构服役状态的实时感知^[3]。北京建工市政路桥市政工程研究院提出的“云边端协同地质灾害智能监测预警体系”,通过云端统筹、边缘响应的精密协同,实现了精准预警、断网无忧的核心能力^[4]。在预警模型构建方面,现有研究多采用单因素阈值法或多因素综合判别法。张蕴灵等提出“时间 + 数据”驱动的主动式监测模式,对于中高风险隐患区域,基于多源异构地面传感器和高精度短临天气预报构建“一坡一策”风险隐患智能预警模型^[1]。杜彦良院士主持的河北省自然科学基金重大项目,拟建立力学 - 数据双驱动的路基 - 边坡服役性能推演预测大模型^[5]。

然而,现有研究仍存在以下不足:一是土体内部应力监测与地表形变监测数据的深度融合应用尚不充分;二是复杂的机器学习模型工程适用性差,基层养护人员难以理解和调整;三是分级预警阈值的设定缺乏动态优化机制。

1.3 本文研究内容

针对上述问题,本文提出一种结构简单、易于工程实现的公路塌方分级预警模型,集成激光雷达监测、土压力传感监测、物联网通信和人工智能算法,构建“空 - 天 - 地”一体化的监测网络,实现对公路边坡土体位移、应力变化的毫米级感知。主要研究内容包括:(1)构建土压力 - 激光雷达多源监测指标体系,实现土体内部应力与地表形变数据的协同分析;(2)设计基于综合评分与动态阈值的四级分级预警方法;(3)探讨模型参数的确定方法与理论依据;(4)通过灵敏度分析与鲁棒性分析评估模型性能。

2 多源数据融合预警模型设计

2.1 总体思路

本文提出的预警模型采用“多源监测 - 综合评分 - 分级预警”的技术路线。模型设计遵循以下原则:①避免复杂的机器学习模型,采用工程人员易于理解和调整的综合评分法。②融合土体内部应力、地表位移等多维度数据,弥补单一传感器的局限性。③根据历史预警效果和地质条件差异动态调整权重和阈值。

当监测数据超过安全阈值时,系统自动触发分级预警,并通过预警信息立杆、导航 App 弹窗、交管平台联动等方式,实时向公路养护部门、驾驶员及周边居民推送风险信息,形成“监测 - 预警 - 响应 - 管控”闭环管理,在为公路安全运维提供创新技术新路径。

2.2 监测指标体系构建

利用激光雷达设备对道路及周边地形进行高密度点云数据采集,生成高精度三维地形模型,实时监测地表形变、沉降等地质变化。利用激光雷达设备对道路及周边地形进行高密度点云数据采集,生成高精度三维地形模型,实时监测地表形变、沉降等地质变化。基于土压力监测装置、激光雷达监测装置,本文选取以下核心监测指标:

2.2.1 土体应力指标

通过土压力监测装置测量土体内部压力变化。土压力传感器布设于边坡潜在滑动面关键位置,实时监测土体内部压力变化趋势。提取特征值有土压力实时值 p (单位: kPa)、土压力变化率 Δp (kPa/h)、土压力累积变化量 P (kPa)。

2.2.2 地表形变指标

通过激光雷达监测装置获取地表点云数据,生成高精度三维地形模型。提取的特征值包括累计沉降量 d (mm)、沉降速率 v (mm/d)、局部坡度变化 θ ($^{\circ}$)。

2.2.3 降雨量指标

研究表明,降雨直接或间接影响了约 90% 以上的滑坡和泥石流灾害的发生,因此本文考虑环境诱发指标作为辅助指标,其特征值包括融合降雨量数据,包括小时降雨量 (mm)、24 小时累积降雨量 (mm)。

基于土压力监测装置、激光雷达监测装置,土压力与土压力数据与激光雷达数据按小时对齐,形成包含时间、位移速率、累计位移、土压力变化率、土压力累积变化量的多维时序数据集。

2.3 分级预警阈值设定方法

参考我国自然资源部门与气象部门联合发布的四级预警体系,依据《公路滑坡防治设计规范》(JTG/T3334-2018)和《地质灾害监测预警规范》(DZ/T0307-2017)中关于滑坡变形阶段划分的建议,结合四川省实践经验,设定分级预警阈值如下:

① IV 级蓝色预警:当位移速率 $>2\text{mm/d}$ 且 $<5\text{mm/d}$,或土压力变化率出现异常,或 24 小时降雨量 $>50\text{mm}$ 时,监测数据出现异常波动,但尚未达到危险阈值。判定响应措施为加强关注,加密监测频次。

② III 级黄色预警:当位移速率 $>5\text{mm/d}$ 且 $<10\text{mm/d}$,或土压力累积变化量超过历史均值 30%,或 24 小时降雨量 $>100\text{mm}$ 时,监测数据持续异常,变形趋势不利。判定响应措施为加强巡查,做好应急准备。

③ II 级橙色预警:当位移速率 $>10\text{mm/d}$ 且 $<20\text{mm/d}$

d, 或土压力持续增大且位移加速, 或72小时累积降雨量 >150mm 时, 监测数据接近危险阈值, 边坡处于临界状态。判定响应措施为自动预警系统研判, 必要时局部交通管制。

④ I级红色预警: 当位移速率 >20mm/d, 或累计位移超过设计预警值, 或土压力急剧变化且位移加速时, 监测数据超过危险阈值, 边坡即将失稳。响应措施为立即组织人员撤离, 实施交通管制。

2.4 综合评分预警方法

为避免单一指标误判, 采用综合评分法进行预警决策。各指标权重采用层次分析法, 邀请5位公路地质灾害防治领域的专家, 对各指标相对重要性进行两两比较, 采用1-9标度法构建判断矩阵, 计算判断矩阵的特征向量, 经专家研讨后, 最终确定位移速率权重取值0.35, 累计位移权重取值0.25, 土压力变化率权重取值0.25, 土压力累积变化量权重取值0.15^[6]。

综合评分S计算公式为:

$$S = 0.35 * f_1(v) + 0.25 * f_2(d) + 0.25 * f_3(\Delta p) + 0.15 * f_4(P)$$

其中, f1、f2、f3、f4 分别为各指标的归一化评分函数, 将原始监测值映射至[0, 1]区间。降雨量作为辅助判别因子, 在强降雨期间对综合评分进行适当修正。

综合评分对应的预警等级判定为: 当 $S \geq 0.8$ 时, 为红色预警; 当 $0.6 \leq S < 0.8$ 时, 为橙色预警; 当 $0.4 \leq S < 0.6$: 黄色预警; 当 $0.2 \leq S < 0.4$ 时, 为蓝色预警; 当 $S < 0.2$ 时, 此时土体状态良好, 一切正常。

3 模型参数确定与性能分析

3.1 位移阈值确定的力学依据

位移速率和累计位移是判断边坡变形阶段的关键指标, 根据边坡蠕变理论, 边坡变形通常经历初始变形阶段(减速蠕变)、匀速变形阶段(稳态蠕变)和加速变形阶段(加速蠕变), 最终导致失稳。基于边坡稳定性分析中的临界位移判据, 累计位移阈值 d_{max} 依据边坡高度、岩土体参数和滑动面形态估算, 考虑到公路边坡监测预警需留足安全裕度, 本文中 d_{max} 取 50mm^[7]。

位移速率阈值参考《公路滑坡防治设计规范》(JTG/T 3334-2018)中关于滑坡变形阶段的划分:

$v < 2\text{mm/d}$: 初始变形阶段或稳定阶段, $2\text{mm/d} \leq v < 10\text{mm/d}$: 匀速变形阶段, $v \geq 10\text{mm/d}$: 加速变形阶段。

因此, 2mm/d 将作为蓝色预警下限, 5mm/d 作为黄色预警下限, 10mm/d 作为橙色预警下限, 20mm/d 作为红色预警下限。

3.2 土压力阈值确定的力学依据

土压力阈值与边坡稳定性安全系数密切相关。根据朗肯土压力理论, 潜在滑动面上的土压力与滑动面倾角、土体重度、内摩擦角和黏聚力有关^[7]。当土压力变化达到临界值时, 边坡安全系数 F_s 趋近于 1。土压力累积变化量的临界值可通过极限平衡法估算:

$$P_{crit} = \gamma H \cdot \Delta F_s$$

其中, γ 为土体重度, H 为边坡高度, ΔF_s 为安全系数下降量。当安全系数从 1.2 降至 1.0 时, 对应的土压力变化量约为 0.3~0.5 倍的初始土压力。对于典型边坡, P_{crit} 约为 3~8kPa, 对此本文取 5 kPa 作为危险阈值。

土压力变化率 Δp 反映应力突变, 其临界值与土体排水条件和加载速率密切相关。研究表明, 快速加载会引起土体内超静孔隙水压力显著累积, 导致有效应力下降, 进而诱发滑坡; 加载速率越大, 孔隙压力峰值越大^[8]。参考类似地质条件下边坡监测的工程经验, 并结合加载速率与孔压增长的正相关关系, 本文将土压力变化率的危险阈值设定为 0.5 kPa/h。

4 评分函数的灵敏度分析

本文通过灵敏度分析考察评分函数对输入指标变化的响应特性, 以此评估模型对不同变形阶段的识别能力。

4.1 位移速率灵敏度分析

当位移速率 v 从 0 到 30mm/d 变化时, 评分函数 $f_1(v)$ 的响应曲线如图 1 所示:

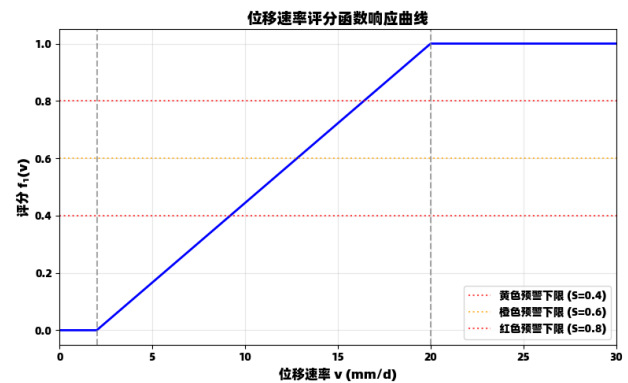


图1 位移速率变化响应曲线图

由图可知当 $v=0\sim 2\text{mm/d}$ 时, $f_1(v)=0$, 此时无响应; 当 $v=2\sim 20\text{mm/d}$ 时, $f_1(v)$ 呈线性增长, 斜率约为 0.0556; 当 $v \geq 20\text{mm/d}$ 时, $f_1(v)=1$, 此时响应曲线达到饱和。对关键点进行分析, 当 $v=5\text{mm/d}$ (蓝色预警下限) 时, 此时 $f_1(v)=0.167$; 当 10mm/d (橙色预警下限) 时, 此时 $f_1(v)=0.444$; 当 $v=20\text{mm/d}$ (红色预警下限) 时, 此时 $f_1(v)=1$ 。

结果表明模型在 $v \geq 10\text{mm/d}$ 的变形加速阶段具有较高的灵敏度，能够快速响应位移速率的增加。

4.2 多指标耦合灵敏度分析

考虑三种典型变形场景，分析综合评分 S 的变化规律：

(1) 匀速变形阶段

设 $v=6\text{mm/d}$, $d=15\text{mm}$, $\Delta p=0.2\text{kPa/h}$, $P=2\text{kPa}$, 计算得：

$$\text{位移速率 } v: x_{\min}=2, x_{\max}=20, f_1(v)=\frac{(6-2)}{(20-2)} \approx 0.222$$

$$\text{累计位移 } d: x_{\min}=5, x_{\max}=50, f_2(d)=\frac{(15-5)}{(50-5)} \approx 0.222$$

土压力变化率 Δp ：

$$x_{\min}=0.1, x_{\max}=0.5, f_3(\Delta p)=\frac{(0.2-0.1)}{(0.5-0.1)}=0.25$$

土压力累积变化量 P ：

$$x_{\min}=1, x_{\max}=5, f_4(P)=\frac{(2-1)}{(5-1)}=0.25$$

综合评分 S ： $S=0.235$ ，由 2.4 节对应区间表明此时土体状态良好，一切正常。

(2) 加速变形初期

设 $v=12\text{mm/d}$, $d=30\text{mm}$, $\Delta p=0.35\text{kPa/h}$, $P=3.5\text{kPa}$, 计算得：

$$\text{计算得：} f_1(v)=0.556, f_2(d)=0.556, f_3(\Delta p)=0.625, f_4(P)=0.625$$

综合评分 $S=0.584$ ，由 2.4 节对应区间表明此时为黄色预警，需要注意。

(3) 临近失稳阶段

设 $v=18\text{mm/d}$, $d=45\text{mm}$, $\Delta p=0.48\text{kPa/h}$, $P=4.8\text{kPa}$, 计算得：

$$\text{计算得：} f_1(v)=0.889, f_2(d)=0.889, f_3(\Delta p)=0.950, f_4(P)=0.950$$

综合评分 $S=0.914$ ，由 2.4 节对应区间表明此时为红色预警，变坡临近失稳。

由上灵敏度分析表明，本文提出的模型能够根据变形阶段的变化，输出连续且合理区分的综合评分，满足分级预警的需求。

4.3 模型适用性条件

基于上述分析，表明本文研究模型的适用边坡类型为均质土坡和类土质边坡、岩质边坡中的破碎岩体、风化岩边坡，不适用于纯岩质稳定边坡和特殊土边坡。对于监测装置的布设要求土压力计应布设在潜在滑动面位置，埋设深度不小于 2m，激光雷达应布设在对面稳定山体，视场角覆盖整个边坡监测区域，监测频率不低于 1 次 / 小时，

预警期间加密至 15 分钟 / 次。

对于新投入使用的边坡，初始阈值按规范值设定，运行 3~6 个月后基于实测数据修正。每次预警事件后，复盘分析阈值合理性，进行动态优化，且不同地质条件的边坡，建议采用“一坡一策”的参数配置。

5 结语

本文针对公路塌方预警模型复杂、工程适用性差的问题，提出一种基于多源数据融合的简易分级预警模型，主要结论如下：

(1) 构建了包含土压力、地表位移两类核心指标的多源监测体系，实现了土体内部应力变化与地表形变数据的协同分析，为塌方预警提供了更全面的数据支撑。

(2) 设计了基于综合评分与动态阈值的四级分级预警方法，模型结构简单、易于工程实现，权重和阈值可根据实际效果动态优化。

(3) 通过灵敏度分析表明，模型能够根据变形阶段的变化输出连续且合理区分的综合评分，对加速变形阶段具有较高的识别灵敏度。

(4) 明确了模型的适用条件，包括适用边坡类型、监测装置布设要求和参数调整策略，为工程应用提供了指导。

本研究为公路塌方预警提供了一种简便实用的技术方案，对提升公路地质灾害主动防控能力具有参考价值。不足之处表现在权重设定依赖工程经验，缺乏严格的理论依据；不同地质类型的预警阈值存在差异，需“一坡一策”调整。未来可引入“空天地”一体化监测技术，实现多尺度协同监测；建立“一坡一策”动态阈值库等方向进行改进。

参考文献：

- [1] 张蕴灵, 牟晓莉, 董元帅. 面向极端天气下公路沿线高边坡相关地质灾害的多源综合监测预警方案[J]. 赛文交通网, 2025.
- [2] 山西省智慧交通研究院有限公司. 一体多源感知黄土地区公路地质灾害[J]. 中国公路, 2024.
- [3] 胡沥中. 起步区市政道路“光纤+”科技项目达到国际领先水平[N]. 大众日报, 2024-03-29.
- [4] 孙景来. 云边端协同地质灾害智能监测预警体系[R]. 北京建工市政路桥市政工程研究院, 2025.
- [5] 杜彦良. 极端环境下高速公路路基-边坡坍塌灾害孕灾机理和预警技术[R]. 石家庄铁道大学, 2024.
- [6] 江西省交通投资集团. 多源数据融合驱动高速公路自然灾害监测预警体系建设[R]. 南昌, 2025.

[7] 宋战平, 王加辉, 郑方. 有限土体土压力的研究现状与展望[J/OL]. 武汉大学学报(工学版), 1-20[2026-04-01].<https://doi.org/10.14188/j.1671-8844.2024.0004>.

[8] 王立安, 余云燕, 孙建忠等. 时变荷载作用下饱和黏土地基的流变固结特性研究[J]. 力学学报, 2024, 56(03):682-690.

基金项目: 课题项目: 2025 年四川省省级大学生创新训练计划项目《公路塌方智能预警防控系统》, S202512764016。

作者简介: 吴佩秀(1995.09-), 女, 贵州黄平, 汉族, 讲师, 工学硕士, 研究方向: 交通运输规划与管理。