

# 基于滑动力监测滑坡系统的预警模式分析

张克利 张睿 宋清宇

北京城建勘测设计研究院有限责任公司

DOI:10.12238/fgmsmr.v1i1.9365

**[摘要]** 本文探讨基于滑动力监测的滑坡预警模型构建与实际应用。通过模拟试验深入分析了滑动力、时间与位移之间的动态关系,揭示了滑坡发生的内在机制。并且以某露天铁矿为例进行分析,通过在某露天铁矿部署了高精度监测设备,实时监测地表变形、裂缝错位和地面倾斜等关键参数,并结合钻孔倾斜仪等设备监测滑坡深部位移。实时数据分析为滑坡预警提供了精准依据。应用结果表明,该预警模式能够准确预测滑坡风险,及时传递预警信息,有效减少滑坡灾害的发生,为矿山的安全生产提供了有力保障。预警系统融合多学科知识,考虑了多种影响因素,具有较高的预测能力和实用价值。

**[关键词]** 滑动力; 监测滑坡系统; 预警模式分析

中图分类号: P642.22 文献标识码: A

## Analysis of early warning mode based on sliding force monitoring landslide system

Keli Zhang Rui Zhang Qingning Song

Beijing Urban Construction Exploration & Surveying Design Research Institute Co.,Ltd

**[Abstract]** This article explores the construction and practical application of a landslide warning model based on sliding force monitoring. Through simulation experiments, the dynamic relationship between sliding force, time, and displacement was analyzed in depth, revealing the underlying mechanism of landslide occurrence. Subsequently, high-precision monitoring equipment was deployed in a certain open-pit iron mine to monitor key parameters such as surface deformation, crack dislocations, and ground tilt in real-time, and combined with equipment such as borehole inclinometers to monitor deep displacement of landslides. Real time data analysis provides accurate basis for landslide warning. The application results show that this warning mode can accurately predict landslide risks, timely transmit warning information, effectively reduce the occurrence of landslide disasters, and provide strong guarantees for the safety production of mines. The early warning system integrates multidisciplinary knowledge, considers multiple influencing factors, and has high predictive ability and practical value.

**[Key words]** sliding force; Monitoring landslide systems; Analysis of warning modes

## 引言

滑坡远程实时监测预报系统,基于滑床与滑坡体的力学作用,实现滑坡灾害的高效精准预警。该系统监测潜在滑动面的滑动力变化,包括下滑力与抗滑力的动态关系,以捕捉滑坡前兆。在滑坡发生前,边坡滑动力若连续变化并超过阈值,即预示失稳风险。系统利用北斗卫星和GSM网络实时传输数据,绘制滑动力监测曲线,直观反映边坡变形和位移,为防灾决策提供关键依据。目前,该系统已在全国10个地区的158个监测点广泛应用,其中30%的监测点曲线出现突变,为滑坡预警模式研究提供了宝贵数据。深入分析这些数据,有助于理解滑坡机理,完善预警模式,提升滑坡防治的科学性和精准性,对我国滑坡灾害防治水平具有重要意义。

## 1 滑坡预警模式分析

基于滑坡监测的核心原理,构建滑坡过程模拟试验模型,旨在研究滑动力、时间与表面位移之间的动态关联。研究揭示,滑坡发生前,边坡岩体内的应力会连续且逐渐增大,成为滑坡的内在驱动力。当滑动力——即推动滑坡体下滑的合力,累积至超过岩土体的抗滑力时,滑坡变形和滑动将开始。重要的是,滑动力变化往往先于明显的地表位移。在滑动模型曲线监测期间,滑动力可从常量值逐渐增加到一个峰值,而当滑动力大于峰值时,滑坡体则会开始滑动。如图1所示。

对图1进行分析可发现,曲线从A逐渐上升至B点,到达B点时曲线呈现距离波动,即本次构建的滑动模拟实验模型开始滑动,排除其他因素影响,可认为B点是滑坡模型的滑坡点,在此点分析判断滑坡稳定性<sup>[1]</sup>。

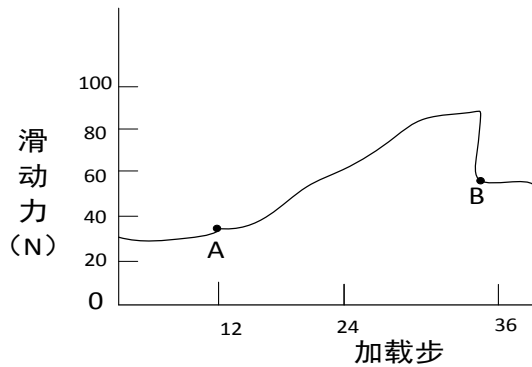


图1 滑坡过程滑动力监测曲线

## 2 基于滑动力监测滑坡系统的预警过程

### 2.1 数据采集

基于滑动力监测的滑坡预警系统通过高精度测量仪器如GPS、激光测距仪、全站仪等进行地表变形、裂缝位错和地面倾斜的实时监测。同时,利用自动水压计等设备监控地下水的动水压力、流量与流速,确保对地下水动态的全面掌握。此外,为深入了解滑坡内部动态,系统还运用钻孔倾斜仪和光纤设备监测滑坡深部的位移情况,特别是滑带的位移。

### 2.2 数据处理

在滑坡监测中心,建立高效的数据处理流程。接收到的数据首先被系统地归类并存储在高性能的数据库中,以便于后续的查询、分析和应用。这些数据包含了从实时监测仪器获取的各种物理量,如地表位移、裂缝扩展情况、滑动力变化等。

为充分发挥这些数据的价值,采用先进的数据分析软件和模型来进行精细处理。通过算法优化和模型校准,能准确捕捉滑坡体动态变化的细微特征,从而全面评估其稳定性。在处理过程中,特别注重数据的精确性,例如地表大地变形监测的点位误差被严格控制在±2.6至5.4mm的范围内,同时水准测量的每公里误差也限制在±1.0至1.5mm之内,以确保分析结果的高可靠性,为滑坡预警和防控提供有力支持。此外,利用机器学习等先进技术对大量历史数据进行分析,以发现滑坡发生的内在规律和模式。这些分析结果为制定针对性的防治措施提供科学依据,进一步提升滑坡预警和防控的效果<sup>[2]</sup>。

### 2.3 预警模型构建

滑坡预测模型是揭示滑坡动态演变过程的非线性系统,它融合了多学科知识,深入剖析滑坡的内在机理。在构建模型时,需全面考虑地形地貌、地质结构、水文状况及人类工程活动等复杂多样的影响因素。这些因素通过改变滑坡体的物理环境和力学性质,对滑坡稳定性产生显著影响。借助卫星遥感、地面测量和地质勘探等技术,获取滑坡体的关键参数,作为模型输入。利用机器学习、深度学习等技术,分析数据间的内在规律和关联性,构建出高预测能力的模型。通过输入已知参数,模型可预测滑坡潜在风险,为防灾减灾提供科学依据,并制定针对性的防治措施,降低滑坡灾害的影响。

系统数学表述为:

在系统中输入  $x = (x_1, x_2, \dots, x_i)$ , 此时系统为初始状态S,

时间为  $t$ 。设系统从初始到结束共有个时间段,则该时间段内系统状态为  $S = (S_1 + S_2 \dots S_i)$ 。输出为:

$$f_i = \sum_{i=1}^i \sum_{j=1}^n a_i(u_{ij} - \hat{u}_{ij}) \quad (1)$$

$$y_{i+1} = y_i + \sum_{t=1}^j u_t S_t \quad (2)$$

其中,时刻  $j$  的变形量为  $y_i$ ,  $y = f(x)$ ;  $S_t$  是  $t$  时刻系统状态;  $u_t$  是  $t$  时刻参数值,在该时间内位移量与以前每时刻都密切相关。

### 2.4 预警信息发布

在滑坡监测体系中,一旦监测到的数据触及或超出预设的预警阈值,系统会立即启动自动预警流程。通过多元化渠道,如短信推送、电子邮件通知和警报器鸣响等,系统将迅速向涉及的部门及人员传递预警信息。这些预警信息不仅精准定位了滑坡体的具体方位,还详细预估了潜在的滑动规模及可能引发的灾害影响范围。同时,为了确保人员安全,预警信息中还包含了针对性的避险措施建议,从而确保相关人员能在第一时间作出反应,有效应对潜在的滑坡风险。

## 3 基于滑动力监测滑坡系统的预警模式应用

### 3.1 工程概况

某露天铁矿正处于三期扩帮四期开采阶段,面临高陡边坡(高差约472m)的挑战。由于复杂的工程地质条件、绿泥岩分布及矿山爆破振动,导致边坡多处出现开裂、滑塌等灾害。特别是2013-2020年间发生的多次滑体,直接影响采场安全。矿区地形为变质岩系构成的单斜构造,地貌以侵蚀中高山地为主,植被稀少。地层岩性包括太古界鞍山群、元古界辽河群和震旦系地层。主要断裂构造F1对矿体无破坏作用。水文地质条件显示,地下水动态与降水量密切相关,有庙儿沟河、黄柏峪河流经。滑坡体特征表现为扇形破坏,滑塌体贯穿平台,长约100m,表面岩石破碎,滚石严重。针对此情况,实施基于滑动力监测的滑坡系统预警模式应用显得尤为重要,以预防和减少类似灾害的发生<sup>[3]</sup>。

### 3.2 滑坡滑动力变化过程模拟

#### 3.2.1 滑坡模型滑动力变化过程分析

通过模型试验法深入研究,该法基于工程地质勘探数据建立滑坡物理及力学模型,模拟滑坡变形破坏。试验分析水平岩层滑坡体的远程监测和预警模式,揭示了滑动力与摄动力间函数关系,模拟出滑动力监测曲线的变化趋势。试验中,保持0.1MPa初始围压,逐级加载至1MPa,观察到滑动力随荷载增加而增大,随后因裂缝产生而突然下降,滑坡体开始错动和位移。这一变化过程与现场滑坡发生时的滑动力监测曲线走势一致,表明滑坡

发生时,滑动力先上升后下降,裂缝扩展至滑坡发生。如图2所示,为滑坡模型曲线图。

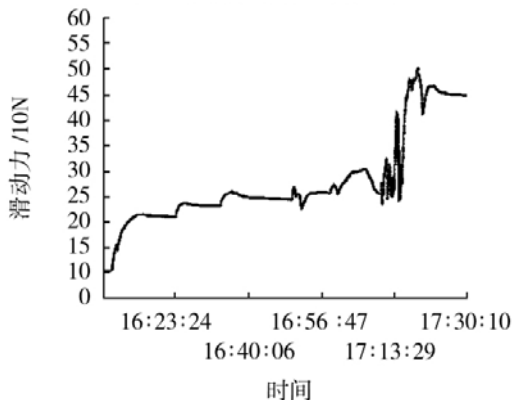


图2 滑坡滑动力模拟试验曲线

经分析,从模拟试验可以发现,当现场发生滑坡时,滑动力曲线会呈现上升趋势,然后现场产生大小不一的裂缝,到达峰值后会呈现剧烈下降趋势,研究表明,滑坡本身对于滑体存在一定的拉力,但随着裂缝的逐渐扩大,拉力逐渐抵消,进而逐渐出现滑坡。同时,当滑体发生滑坡或位移后,会释放能量,则滑动力会逐渐下降。此时,可将这一点作为滑坡预警的临界点。

### 3.2.2 远程监测预警方案的实施

2021年2月,煤矿企业针对滑坡问题制定远程监测预警方案。综合考量滑坡体地形、岩性、地质构造等要素,精心布置了20个滑动力远程监测点,并确立了“体上布线,线上设点”的监测原则。这些监测点覆盖主要滑坡体,并编号管理以简化后续分析。此外,为验证位移监测的时间滞后性,研究团队还在新滑坡体位移监测桩附近增设了下滑力监测点。至2021年11月4日,20套远程监测预警系统完成安装并投入全天候智能监测。近10个月的稳定运行积累了大量数据,为滑坡演变特征分析和预测预报提供重要依据<sup>[4]</sup>。

### 3.3 应用效果讨论

在针对某露天铁矿高陡边坡的滑坡问题实施基于滑动力监测的滑坡系统预警模式后,其应用效果显著,有效预防和减少了滑坡灾害的发生。

在2021年2月至11月的监测周期内,累计滑动力数据呈现出

先显著上升后下降的趋势,这与模型试验中滑动力变化曲线高度吻合。裂缝扩展情况与滑动力数据紧密相关,随着滑动力增大,裂缝明显扩展;滑动力达到峰值并突然下降后,裂缝扩展速度减缓。在此期间,系统成功预警3次,但并未发生实际滑坡事件,表明预警系统具有较高的准确性和可靠性<sup>[5]</sup>。

在实际应用中,基于滑动力监测的滑坡系统预警模式为矿山安全生产提供了有力保障。通过全天候智能监测,系统能够实时捕捉滑坡体的细微变化,及时发出预警,使矿山工作人员有足够的时间采取应急措施。同时,预警系统还提供了丰富的监测数据,为矿山管理部门分析滑坡演变特征、制定防治措施提供了科学依据。

## 4 结论

本文深入探讨了基于滑动力监测的滑坡预警模型,并通过实验模拟和实际应用验证了其有效性。该预警系统不仅揭示了滑坡发生的动态演变过程,还通过实时监测和数据分析为滑坡预警提供了精准的依据。在某露天铁矿的成功应用,证明了该预警模式在减少滑坡灾害、保障矿山安全生产方面的重要作用。

### 【基金项目】

北京市科技新星计划资助项目(20220484141)。

### 【参考文献】

- [1]邹玮昌,屈李鹏,田程.滑坡地质灾害牛顿力远程监测预警系统及工程应用[J].价值工程,2023,42(33):105-108.
- [2]顾华奇,陈皆红,李婷.基于深度学习的滑坡监测与早期预警方法研究[J].江西科学,2019,37(02):209-213+281.
- [3]胡馨尹,王坤伟.基于人工智能和模糊综合评价的库岸滑坡预警系统研究[J].甘肃水利水电技术,2022,58(02):39-42.
- [4]马娟.基于普适型监测的多参数预警研究——以三峡库区卡门子湾滑坡为例[J].西北地质,2021,54(03):259-269.
- [5]陶志刚,王振雨,张海江,等.土地复垦诱发边坡浅层岩体劣化全过程监测试验研究[J].金属矿山,2022,(03):190-196.

### 作者简介:

张克利(1992--),男,汉族,河北省邢台市人,硕士,工程师,研究方向:滑坡监测及预警方法。