

危岩崩塌灾害动力学监测预警系统及工程应用综述¹

陈晨¹⁾, 谢谟文^{1, 2)}✉, 杜岩^{1, 2)}, 李双全¹⁾, 黄正均¹⁾

1) 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083 2) 城市地下空间工程北京市重点实验室, 北京 100083

✉ 通信作者, E-mail: mowenxie@126.com

摘要 危岩崩塌灾害具有分布广、频率高以及突发特性, 是三大地质灾害中最难监测预警的灾害之一。目前基于宏观位移的监测方法难以满足危岩崩塌早期预警的需求问题, 提出基于牛顿第二定律的边坡动力学新理论和微芯智能监测预警新技术, 形成了“技术+管理”的突发岩土灾害态势感知与防灾减灾新模式。从危岩崩塌失稳动力学理论、监测预警技术、关键问题讨论和应用前景与案例四个方面进行分析论述。首先, 突破传统极限平衡理论提出了基于牛顿第二定律的边坡动力学理论, 并基于危岩体概化的单摆质子模型, 构建了可反映危岩非线性破坏特征的脱离程度的动力稳定评价方法。再者, 提出了静力学、动力学、运动学和环境量的“四位一体”监测指标体系, 并在动力学智能传感装备云边融合等技术基础上, 提出了技术监测和工程管理相结合的危岩崩塌灾害防治思想。最后, 对动力学监测预警系统的后续研究方向进行了展望, 并借助库区岩质边坡、矿山边坡岩体开展了应用效果分析, 为突发性脆性灾害的科学防控研究提供参考。

关键词 危岩崩塌; 早期预警; 防灾减灾; 动力学理论; 微芯传感

分类号 P642.21

Review of dynamic monitoring and warning system for unstable rock collapse and its engineering application

CHEN Chen¹⁾, XIE Mo-Wen^{1, 2)}✉, DU Yan^{1, 2)}, LI Shuang-quan¹⁾, HUANG Zhengjun¹⁾

1) School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) Beijing Key Laboratory of Urban Underground Space Engineering, Beijing 100083, China

✉ Corresponding author, E-mail: mowenxie@126.com

ABSTRACT Rock collapse disasters, characterized by their broad spatial distribution, recurrent occurrence, and abrupt unpredictability, are considered one of the most formidable geological hazards to monitor and predict among the three major geological disasters. To address the limitations of current macroscopic displacement-based monitoring methods in meeting early warning requirements for rock collapse, this study proposes a novel slope dynamics theory based on Newton's second law and develops micro-core intelligent monitoring and early warning technology, thereby establishing an innovative "technology-management integration" framework for situational awareness and disaster prevention/mitigation of sudden geotechnical hazards. This study systematically analyzes and discusses theories of rock mass instability dynamics, monitoring and early-warning technologies, critical issues in discussion, and application prospects with case studies from four key perspectives: theoretical framework, technological innovation, methodological challenges, and practical implementation. First, by breaking through the traditional limit equilibrium theory, a slope dynamics theory based on

收稿日期: 2024-09-28

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFC3081400); 国家自然科学基金基金项目 (42471167)

地址: 北京市海淀区学院路 30 号

邮政编码: 100083

电话: 010-62333436

E-mail: xuebaozr@ustb.edu.cn

<http://cje.ustb.edu.cn>

Newton's second law has been proposed. Through a pendulum proton model generalized from dangerous rock masses, a dynamic stability evaluation method has been established to characterize the degree of detachment reflecting nonlinear failure characteristics of dangerous rocks. Second, a "four-in-one" monitoring index system integrating statics, dynamics, kinematics, and environmental parameters has been developed. Building upon cloud-edge integration technologies for intelligent dynamic sensing equipment, a disaster prevention concept combining technical monitoring with engineering management has been formulated for dangerous rock collapse. Finally, future research directions for dynamic monitoring and early warning systems are prospected. Application analyses have been conducted on reservoir rock slopes and mine side slope rock masses, providing references for scientific prevention and control research of sudden brittle disasters. Key innovations include: (1) The development of a slope dynamics theory transcending traditional limit equilibrium analysis. (2) A pendulum proton model generalized from unstable rock masses that enables dynamic stability assessment by quantifying detachment severity through nonlinear failure characteristics. (3) The creation of a four-dimensional monitoring index system integrating static, dynamic, kinematic, and environmental parameters. Leveraging cloud-edge collaborative intelligent sensing, this framework combines technical monitoring with engineering governance for rock collapse prevention. (4) Case validations at the Houziyan open-top rock slope and the surrounding rock mass in Hainan metal mine demonstrate the operational efficacy of the proposed real-time multi-model early-warning system. The dynamics theory resolves stability evaluation challenges across rock collapse evolutionary phases, while the four-dimensional metrics enable data-driven safety alerts. To achieve early warning of brittle rock collapse disasters and overcome the critical limitation that conventional displacement-based warning technologies can only provide last-minute alerts (typically on a minute-to-second timescale), developing advanced early warning mechanisms with intelligent sensing systems represents the imperative direction for future disaster prevention. This study conducts a comprehensive review of emerging destabilization dynamics theories, intelligent sensing technologies, and novel technology-management integration frameworks from multidisciplinary perspectives. Through two representative case studies, the systematic examination of practical implementations of dynamic monitoring and early-warning systems in geological disaster prevention is presented. Future efforts must prioritize theoretical robustness, sensor innovation, and AI integration to enable proactive disaster prevention in infrastructure, mining, and reservoir projects worldwide.

KEY WORDS: unstable rock collapse; early warning; disaster prevention and reduction; dynamic theory; microcore sensing;

危岩崩塌灾害是全球性的山区地质灾害，具有时间上的突发性和空间上的分散性等特点^[1]。根据自然资源部 2023 年统计，我国地质灾害隐患点有近 33 万处，其中崩塌灾害约占地质灾害总数的 40%。近五年我国共发生崩塌灾害 6000 余起，造成巨大的人员伤亡与经济损失。此外，随着水-风-光能源综合开发、基础设施和水电油气管网等加快建设，受高山地形、活动构造、岩土特性以及地震、暴雨及库水涨落、梯级水电开发等影响，危岩崩塌灾害对工程安全的影响日益显著，时刻威胁着我国经济社会发展的全局性、战略性的能源基地建设安全。如何实现危岩崩塌隐患智能感知和精准预警，是有效应对脆性破坏灾害，科学实施防灾减灾的重大科学难题。

现代观测和感知技术的迭代更新，各类监测技术手段的应用，使得危岩崩塌灾害的防治水平得到空前发展^[2-4]。如无人机贴近摄影测量、机载雷达、卫星光学影像、GNSS 监测以及光纤传感监测、微震监测等多种形式的监测预警技术为危岩崩塌灾害的防控做出了积极的贡献。但相较于滑坡、泥石流等具有蠕变特征的灾害，危岩崩塌因其突发性脆性破坏特性，使其成为岩土工程领域最难监测预警的灾害类型之一^[5]。目前普遍采用倾角计、位移计以及视频等设备对宏观位移实施监测，同时对降雨、地震等诱发因素进行监测^[6-8]。但危岩崩塌破坏前往往不会产生明显位移变化，现有的技术方法已无法实现崩塌早期征兆的识别，达到安全预警的目的^[9]。此外，对于危岩崩塌发生的复杂性、多样性以及突发特性而言，传统定时采集的监测设备存在的数据延迟将错失危岩崩塌失稳的瞬态前兆信息，也无法适用于多源数据一体化、自适应性的预警模型发展趋势所需的感知功能^[10,11]。

当前传统危岩监测系统受单一预警阈值和外界环境等影响，系统预警存在预警次数多、空报率高、预警等级不明和应急响应预案联动不足等问题。应急管理部明确提出推进预警与应急响应一体化机制建设，实现筛选掉大量的虚警，避免漏报，提高预警的准确度，降低人工排查成本的要求。因此，为有效解决危岩崩塌灾害监测预警的时效性、准确性和经济性，有必要从危岩失稳理论^[12,13]、监测指标^[14-17]和感知装备^[18,19]等全面开展创新性研究。

危岩体崩塌作为一种突发性地质灾害，其表现形式为边坡岩块体与母体逐渐分离后突发崩落^[20]。评估危岩体内部主控结构面的发育程度是判断其稳定程度的关键；借助可测指标变化反演危岩与母岩分离过程并实时预测危岩崩塌时间是早期预警的理论难题；采用什么装备或传感解决危岩在线监测预警是危岩崩塌预警的技术难题；如何将监测预警结果与工程运营管理相结合是实现高效预警应急响应的关键机制。团队通过危岩动力评价理论模型的构建，并开展室内实验发现：基于固有频率等动力学特征参数可实现危岩主控结构面损伤与其稳定性关系的动态识别和定量判断^[21-24]。大量室内外实验和工程实践表明，团队提出的边坡失稳动力学理论体系为危岩崩塌破坏前兆特征、宏观和微观表象的定性或定量变化规律研究提供了新的方向。团队基于边坡失稳动力学理论体系自主研发了危岩崩塌灾害动力学监测预警系统^[25]。截止目前，危岩崩塌灾害动力学监测预警系统已服务于大渡河、金沙江和雅鲁藏布江等流域二十余座在建或已建水电站，内蒙、山西和海南等数十处矿山以及铁路、引水工程等领域。该系统在线服务的500余个项目中，成功预警险情灾情50余起，带来数亿元的直接经济价值。当前，边坡危岩体的失稳动力学理论、技术和系统日益完善，理论和现场工程应用已取得显著进展。本研究从边坡动力学理论、智能感知装备、“技术+管理”关键问题和工程应用效果进行了综述，并展望了未来危岩崩塌灾害研究方向，为危岩崩塌等岩土灾害监测预警理论研究和工程应用提供参考。

1 危岩崩塌失稳动力学模型

1.1 边坡失稳动力学理论

常用来判断边坡稳定性的极限平衡理论是基于牛顿第一定律建立的惯性体系下的瞬时成立公式，该方法通过边坡抗滑力与下滑力的平衡性判断边坡稳定状态^[12]。边坡危岩的崩塌发生是复杂的长期系统性稳定问题，往往经过稳定、破裂、形变、位移、加速位移直至坍塌的多阶段变化，除静力平衡的变化，动力特征参数、运动特征参数也会随之发生变化。如图1(a)所示，危岩体在变形破坏过程中会经过弹性变形阶段Ⅰ向裂纹逐步扩展阶段Ⅱ转换的过程。在阶段Ⅰ期间，危岩体结构面聚集弹性势能，应力应变为线性相关性，且几乎无宏观位移产生。在阶段Ⅱ期间，危岩体由微破裂稳定发展向累进性破裂变化，并不断释放弹性势能，应力突降现象的发生导致不平衡的产生。从牛顿第二定律指出的加速度可反映物体受力状态的变化看出，可通过表征危岩不平衡力的加速度来建立与危岩稳定状态的关联。如图1(b)所示的危岩动力物理实验模型获得的危岩抗滑力物理学参数变化曲线也表明，危岩崩塌是其物理力学参数动态演化的脆性破坏过程，其不同阶段力学参数变化特征不同^[5]。据此，可将危岩体的稳定性进行三个阶段的划分，分别为：稳定阶段、弱稳定阶段和失稳阶段。稳定阶段的危岩体抗滑力 R_s 可完全由结构面的黏聚力 c_f 提供，危岩体处于惯性体系下的静力平衡状态；弱稳定阶段是指随着结构面黏聚力的下降，其不足以抵抗下滑力 F_g ，危岩产生微小形变，并在结构面产生摩擦力 F_f 用来保持危岩原有的稳定状态。弱稳定阶段抗滑力的突变或者缓慢变化造成的不平衡力作用，可通过瞬时加速度响应特征表征。在失稳阶段，危岩体出现加速变形现象，并在短时间内产生完全坍塌破坏。因此，加速度是评判危岩是否有失稳征兆的主要控制性指标。由于危岩崩塌从稳定到破坏是复杂的全周期性的动态稳定系统性问题，传统的静力学极限平衡分析方法必然会有理论局限性和工程适用性缺陷，导致危岩崩塌监测无法实现失稳前的感知与预警。

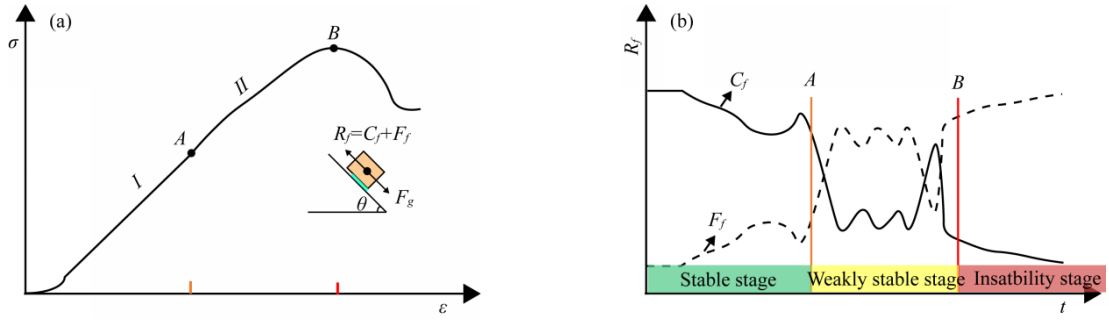


图 1 危岩体动力演化过程。(a) 危岩变形破坏过程;(b)危岩抗滑力学参数变化^[5]

Fig. 1 Dynamic evolution process of unstable rock mass: (a) deformation failure process of unstable rock mass; (b) Anti-slip force change of unstable rock mass

基于此问题，团队从动力学和运动学特征入手，研究边坡危岩动力学稳定评价理论模型、安全预警指标、预警模型及监测方法，形成了基于牛顿第二定律的边坡危岩动态稳定性评价体系，即边坡失稳动力学理论^[25]。如图 2（a）所示，以具有典型边界条件的危岩体为例，其后部存在的一陡倾结构面切割了危岩体与边坡母岩，其下部存在低强度或易风化岩层。该危岩体失稳破坏特征主要为荷载增加或黏聚力减小使其受不平衡力矩导致的沿某一支点发生转动的破坏模式。依据危岩体受力分析，可将该危岩体简化为如图 2（b）所示的单摆质子模型，并得到如式（1）所示的运动方程：

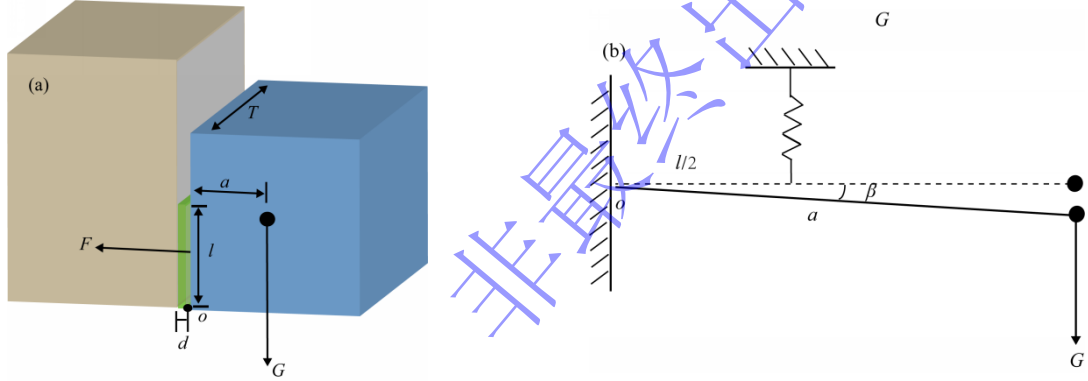


图 2 危岩体动力学概化模型。(a)危岩体受力简图；（b）危岩体单摆质子模型

Fig.2 Schematic model of unstable rock mass dynamics: (a) simplified force diagram of unstable rock mass; (b) single pendulum proton model of unstable rock mass

$$m a \ddot{\beta} + \left(\frac{l^3 E T}{3d} \right) \beta = 0 \quad (1)$$

进一步地，危岩体固有频率 f 可表示为：

$$f = (1/2\pi) \sqrt{(ETl^3)/(3dma^2)} \quad (2)$$

式中， T 为危岩体厚度， l 为危岩体黏结面长度， d 为危岩体黏结面厚度； G 为危岩体重力， $G = mg$ ， $g = 9.8 \text{m/s}^2$ ； a 为危岩体重心与结构面距离； β 为危岩体瞬时转动角度； E 为结构面弹性模量。

危岩体的固有频率由结构面和危岩自身物理属性决定，且与表征结构面黏聚力大小的弹性模量和黏结面积正相关。随着危岩黏结面损伤劣化，其弹性模量或黏结面积降低，导致危岩体的稳定性下降，其固有频率动力特征参数也会随之下落。由此可知，固有频率动力特征参数是可以反映危岩块体与母岩黏聚力变化的可测指标。除固有频率外，通过室内外实验也验证了振动波形、粒子轨迹和振幅等动力学参量可从定性角度识别不稳定岩块体和稳定岩块体，用于危岩体大范围的快速识别^[15-17,22]；固有频率、重心频率等动力学参量则从定量角度反映了危岩体主控结构面黏聚力大小的变化，即可在危岩体未发生明显位移形变前，确定危岩体的稳定状态变化^[19,26]。基于牛顿第二定律提出的边坡失稳动力学理论为危岩崩塌监测预警提供了一种新的理论基础。

1.2 危岩动力学稳定性评价方法

采用极限平衡分析方法评价危岩体稳定性,涉及危岩体几何尺寸、黏聚力以及摩擦角等力学参数。而常规位移监测指标与极限平衡稳定性评价方法不存在直接联系。依赖于统计分析和工程经验的位移监测预警方法由于缺少与崩塌破坏机理的关联性,仅能在单一特定危岩体稳定性评价上发挥一定作用,难以推广到其他危岩体。分析危岩体动力失稳破坏机理,建立一种普遍的、具有理论基础的危岩体稳定性评价方法,是实现危岩体早期预警的前提条件。长期的地质历史时期来看,处于弱稳定阶段的危岩体会逐渐向斜坡方向倾斜或沿结构面滑移,特别是在降雨、融雪等引起结构面强度降低和岩体荷载增加的情况下,会加速不连续面的扩展,使得危岩体不断与边坡脱离。但即使弱稳定阶段的危岩体不连续面不断侵蚀,其仍仅产生难以测量的微小形变。弱稳定阶段的危岩体属于崩塌失稳全过程中的初期阶段,其动力学特征参量可反映主控结构面参量的变化,为危岩体稳定性提供了可测的评价指标。基于边坡动力学理论建立的危岩动力特征参量与其结构面的理论关系,可进一步形成不同失稳类型危岩体的动力学稳定性评价模型,进而实现基于可测指标的危岩体稳定性评价和监测预警等级划分^[23]。在危岩崩塌失稳全过程中,危岩体倾斜角度和裂缝开口不断增加,其底部由缓慢等速滑动转为加速滑动。但危岩体与边坡之间抗拉或抗剪形成的黏聚力不足以维持危岩自重荷载下的平衡状态时,危岩体出现整体坍塌失稳。危岩体在缓慢等速滑动和加速位移的两次蠕变阶段通常经历时间极短,基于位移和倾斜等方法的危岩稳定性评价可实现崩塌临灾预警,难以实现早期预警。临灾预警预留给工程现场的时间不足以采取适当的减灾防灾措施,无法满足工程安全的实际需求。

危岩体在弹性变形的稳定阶段向裂缝逐步扩展的弱稳定阶段转变过程中,动力学特征参数因其不平衡力的产生会发生明显突变。如加速度、固有频率等动力学特征参数的突然变化是危岩体由稳定阶段向弱稳定阶段转变的关键评价参数。以危岩体固有频率为例,其值大小仅与危岩体质量分布和刚度分布有关,反映了危岩自身固有属性。在边坡失稳动力学理论基础上,可构建如式(3)所示的危岩体实时稳定性系数 $K(t)$ 的数学表达。通过危岩体固有频率得到的 $K(t)$ 形成的时程曲线变化速率和变化趋势可评价危岩体稳定性阶段变化和稳定性降低程度。

$$K(t) = \frac{f(t)}{f_0} \quad (3)$$

式中, f_0 为初始时刻测得的危岩体固有频率; $f(t)$ 为 t 时刻危岩体测得的固有频率。

动力学特征参数的变化趋势是判断危岩体在裂纹逐步扩展的弱稳定阶段,其稳定性动态变化的重要表征方式。危岩体作为可能失稳的岩体或块体,在裂纹逐步扩展过程中其脆性破坏具有明显的非线性失效特征。危岩体与边坡脱离程度直接反映了漫长地质历史时期中危岩体当前与边坡黏结程度与初始黏结程度的差异性,能更准确的评价危岩体的非线性失稳特征。由公式(2)危岩体结构面弹性模量和面积与固有频率存在正相关关系。因此,危岩体与边坡的黏结程度与固有频率存在正相关关系,进而危岩体脱离程度 $C(t)$ 可表达为:

$$C(t) = 1 - \left(\frac{f(t)}{f_0}\right)^\alpha \quad (4)$$

式中, f_0 为初始时刻 $t=0$ 时的固有频率, $f(t)$ 为时刻 t 的固有频率, α 为常数,依据危岩失稳类型进行实验或数值模拟确定。在初始时刻 $t=0$ 时,危岩黏结程度未发生变化,即 $C(t)=0$;在危岩黏结程度下降过程中,危岩脱离程度随之增加;危岩到达失稳破坏的某一时刻时,危岩脱离程度到达临界值。

基于固有频率动力特征参数形成的危岩体动力学稳定性评价方法为崩塌脆性灾害提供了一种新的评价方法^[24]。危岩体实时可测的脱离程度 $C(t)$ 的数学表达实现了危岩体动力学稳定性的定量评价新方法,更科学准确的评价危岩失稳全过程的动力特征。与极限平衡安全系数而言,动力学稳定性评价方法是危岩体实时动态更新的安全系数,是将危岩失稳破坏机理与可测参数相关联的评价方法。

2 边坡动力学监测技术研究

2.1 动力学监测指标体系

基于位移、速度监测指标形成的速度倒数模型^[27]、斋藤迪孝模型等预警方式无法适用于危岩崩塌早期预警。降雨、地震等环境诱发因素相关的监测指标虽能一定程度反映危岩崩塌发生的可能性，但作为危岩崩塌发生的充分条件，其预警信息的准确性存在明显不足。应力、应变等静力学监测指标虽只能反映危岩体某一时刻安全状态变化，但作为危岩崩塌必要条件，其预警的时效性和动态变化特性还有待进一步提高^[28,29]。对**反映**危岩失稳机理过程中不平衡力产生的动力特征指标变化实施监测是实现危岩崩塌早期预警的关键。危岩体作为多物理参数组成的动力系统，其从稳定到失稳是动力系统参量变化引起的。国内外最新研究也表明，危岩体结构面黏结程度与其动力学特征参数存在定量或定性相关性，通过加速度、固有频率等动力学监测指标可反映不同稳定阶段危岩崩塌系统动力不稳定特性，从而实现危岩崩塌的早期预警。国内学者借助远程激光测振技术在室内开展危岩失稳过程模拟，采集固有频率来识别岩桥长度的方式，来对原固定不变的监测应力阈值进行动态调整，可实现应力折减系数下危岩体稳定性预警等级的实时更新^[19]。对于不同失稳类型、不同动力学指标的适用性以及常时微动下动力学指标的准确采集也是监测预警中的关键^[13,30]。还有学者从能量角度对不同破坏模式危岩体进行了动力模型理论研究，并提出了动力模型的稳定性计算方法，为动力作用下危岩体防治设计提供参考^[31,32]。国外学者借助地震传感设备对大型危岩开展了动力学监测指标的分析与验证，并不断拓展其使用场景。利用地震监测设备获取的危岩动力学指标不仅可**反映**危岩体脱离程度，还可**反映**结构面空间位置的分布特征，实现表观观测难以实现的地下结构面分布情况描述^[33-35]。危岩体失稳过程中频率降低、极化带宽变窄等动力特征形成的动力学监测指标为危岩失稳监测以及防治效果评价提供了一种新的科学方法^[36-39]。动力学监测指标已逐步拓展应用到海南岸坡^[40]、库区滑坡^[41]、隧道基坑^[42]等监测场景。

表 1 动力学指标在危岩监测中的应用案例

Table 1 Application of dynamic indicators in unstable rock monitoring

Monitoring indicators	Monitoring purpose	Location	Volume/m ³ -Characteristic	Content reference (year)
Sliding force-anchor cable	Validation of sliding force for landslide pre-warming	Open pit iron ore, China	1.1*10 ⁵ - Rock bedding slope	[43] (2004)
Microseismic event	Definition hazard zones	Leventina valley, Switzerland.	3.0*10 ⁵ - Sliding or toppling slope	[44] (2006)
		Mount San Martino, Italy	Unknown- Limestone rock cliff	[45] (2013)
Base compressive stress	Evaluation of landslide displacement trend	Three Gorges Reservoir, China.	Unknown- Sliding or toppling slope	[46] (2012)
		Bourne valley, France	7.6*10 ² - Limestone column	[39] (2016)
Vibration polarization/resonance frequency	Capability of internal damage	Matter valley, Switzerland	3.0 *10 ⁷ - Retrogressive rock	[33] (2019)
		Alpe di Ròscera, Switzerland	1.4 *10 ⁵ - Amphibolitic gneiss slope	[47] (2021)
Site-to-reference spectral ratios/ Wave velocity	Capability testing of monitoring a small rock block	Perledo-Varenna, Italian Prealps	1.5*10 ¹ - Prism shape rock	[48] (2022)
		Zengziyan, China	4.9*10 ⁵ - Tower shape rock	[49] (2023)

如表1所示的诸多案例表明，通过危岩动力响应分析获取的动力学参数为危岩崩塌预测预警提供了一类新的监测指标。危岩体在稳定阶段向弱稳定转变过程中，需监测反映危岩体安全状态变化的指标，实现安全预警目的。危岩体在弱稳定阶段以及向失稳阶段转变过程中，需监测提早发现明显表观、内部变化的指标，实现失稳预警目的。基于危岩稳定三阶段确定动力学、静力学和运动学三类监测指标的突变点与危岩安全状态变化之间关系，**能实现**提取出的指标为不同阶段失稳破坏预警效果最好的监测指标。静力平衡下的应力、应变等静力学监测指标可反映危岩某一时刻的稳定状态，固有频率、阻尼等动力学指标可反映危岩稳定状态的动态变化过程，倾斜角度、速度等运动学指标反映临灾前形变特征。越来越多的研究表明，采用单一的监测变量难以全面描述危岩失稳过程中的崩塌前的预备机制、临灾状态以及触发机制。此外，外界环境温度、湿度等因素也会影响相关

监测指标的变化^[33,35]。例如温度的变化会引起危岩结构面刚度变化，进而引起固有频率等动力特征参数的变化。在利用动力学指标来评价危岩体不可逆稳定性变化之前，还需剔除由于温度影响引起的危岩可逆变化。因此，对于危岩崩塌监测指标体系应由静力学、动力学、运动学与环境量指标组成的“四位一体”指标构成。动力学指标获取危岩长时间稳定性变化的同时，同步监测静力学指标和运动学指标获取危岩诱发因素、瞬态力学参数和运动形态等信息，同时综合考虑温度等环境量信息，可以为危岩崩塌安全预警、失稳预警提供判断依据。如表2所示，为实现危岩体早期预警目标，危岩体不同阶段重点监测指标类型不同。此外，“四位一体”指标体系带来的预警系统数据传输、存储和处理效率等问题是实际工程应用中需关注的技术问题。

表 2 危岩不同阶段监测指标

Current stage	Monitoring indicators	Characteristics of the stage	Warning target
Stable stage	Vibration frequency, mode shape, vibration stiffness, etc	Good adhesion, with a certain degree of safety margin, and no obvious deformation	Security warning
Weakly stable stage	Acceleration, damping ratio, strain, tilt, etc	Adhesion and friction, with dynamically changing safety states and slight deformations.	Security warning
Instability stage	Acceleration, velocity, displacement, etc	The main force-friction, in a near-sliding state, with obvious vibration and acceleration process.	Instability warning

2.2 动力学智能感知技术装备

常规危岩崩塌监测设备主要来源于大地测量、地球物理和岩土工程三大领域。如图 3 所示，激光扫描、摄影测量和 GNSS 等大地测量设备是通过获取岩体表面位置变化信息实现形变监测，无法反映危岩地下结构面信息；电阻成像、微震监测和温度测井等地球物理设备是通过获取岩体物理特征变化反演危岩体结构特征变化来实现稳定性监测，但因其施工工艺和监测数据复杂程度，普遍作为高风险危岩体定期检测方法，无法实现实时监测预警；钻孔探测等传统岩土工程手段可直接获取岩体内部结构、力学特征，但实施成本较高，对危险的危岩体实施起来具有一定的挑战性。虽然现有的感知装备技术很多，但是获取危岩动力特征参数的技术装备很少。目前最为热门的是用于地震感知的微震监测装备，但因其需要具体的地震波信号的触发，难以保障危岩体失稳全过程的预警时效性，还需要进一步开展应用研究。

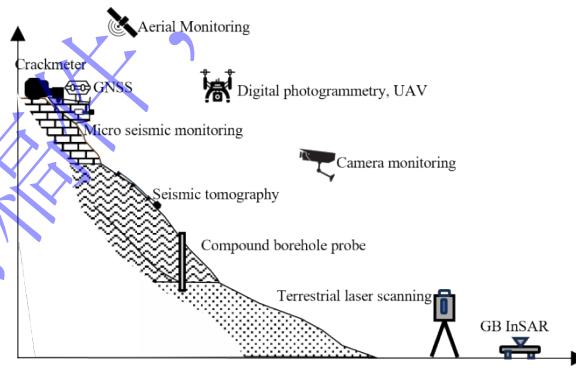


图 3 岩体常规监测设备汇总

Fig.3 Overview of traditional rock mass monitoring equipment

相比于滑坡、泥石流等地质灾害的传统分、秒级别的临灾预警，危岩崩塌这类脆性破坏在工程安全领域需实现天、月级别的安全预警。为实现危岩崩塌的早期预警，满足各类监测指标的采集与处理，静-动力学一体化的智能传感设备是必不可少的。“四位一体”预警指标体系的构建也为危岩崩塌智能感知设备提供了前提条件。解决危岩体监测配套的智能传感技术设备的关键问题在于协同云计算和边缘计算优势的新型物联网架构体系的云边融合的智能感知技术和一体化的智能感知机制。在云边融合的智能感知技术方面：一是通过不同失稳类型的危岩失稳机制分析其失稳全过程静-动力学指标差异性演化特征和关联规律，构建可测指标的危岩体动态评价模型，实现危岩体稳定性实时动态评价，解决危岩体处于哪一稳定阶段和当前脱离程度的感知难题。二是面对于复杂工程

场景，危岩体不同工况下的动力稳定性和风险概率形成的失稳工况预测模型，用于解决危岩崩塌灾害在何种条件下发生的预判难题；三是危岩体崩塌失稳全过程关键静-动力学指标时效演化规律，建立的基于敏感性动力学指标的危岩体崩塌时间预测方法，用于解决崩塌灾害什么时间发生的预测难题。以上三方面形成的静-动力学指标云边融合的智能感知技术，为危岩体早期预警提供更科学全面的决策信息。在一体化的智能传感机制方面：一是基于“稳定-弱稳定-失稳”全过程的多层次静-动力学参量演化规律和敏感性分析，建立的多层次静-动力学监测预警指标体系，解决现有危岩监测指标敏感性差、数据信息单一的问题；二是“四位一体”预警指标体系和危岩体动力稳定评价模型，建立的危岩崩塌安全预警、失稳预警方法，实现危岩不同阶段自动识别和智能早期预警，解决现有监测预警装备时效性差、准确性不足的问题；三是云边融合算法、失稳工况预测和时间预测模型构建的智能监测预警技术，提升危岩灾害早期监测预警预报和精准防控能力；四是实现静-动力学特征的一体化、低成本、自动化、智能化、精准化的现场高频连续实时监测，并融合 MEMS 传感、GNSS 定位模组及边缘技术的融合工作模式，建立危岩体静-动力学指标一体化联动的智能传感机制，突破常规技术仅能实现单一指标定时采集且智能化程度低的限制。通过云边融合的智能感知技术和一体化的智能传感机制的研究，为危岩崩塌监测预警系统提供了满足预警模型需求的智能传感装备，解决危岩崩塌失稳早期预警难题，提升我国危岩崩塌灾害风险防范能力。

为实现危岩体静-动力学指标的不间断采集，借助云边融合感知技术和一体化的智能传感机制研发了具有实时主动感知、自主加密采集、本地-云端多级预警的自供电式无线智能感知装备-微芯桩。如图 4 所示，微芯桩感知原理为装备内部 MEMS 加速度模块在危岩不平衡力作用影响下产生不同方向的电信号变化，然后经过转换模块得到危岩体实时三轴加速度 (a_x, a_y, a_z) 。微芯桩内部采集的原始加速度通过边缘端平滑滤波和温度矫正等处理后，得到危岩体瞬时合加速度和倾斜角度的直采监测指标，并进行原始指标的等级阈值判断。该等级阈值用于区别环境扰动引起的误报和危岩稳定性阶段的变化提醒，装备指示灯显示红、黄、蓝等对应颜色进行区分，并可与外部警示器形成本地秒级的声光预警提醒，便于及时提醒工程现场撤离或采取防控措施。为适应危岩崩塌动态安全状态变化特征，不间断采集危岩体静-动力学指标，微芯桩会依据直采监测指标开启加密采集机制，获取与计算危岩更长时间、多层次动力学特征参数和形变特征参数，其指标主要有时域数据 $a(t)$ 、倾斜角度 θ 、倾斜方向 φ 、固有频率 f 、最大振幅 A 、阻尼比 ζ 等。借助实时采集和触发上传的模式将静-动力学指标上传至云平台，实现设备低功耗长期运行的同时，满足危岩崩塌早期预警需求。设备直采、设备计算和云端分析的预警联动模式对于捕获危岩稳定阶段变化和脱离程度的变化的稍瞬即逝的动力学特征信息提供了功能保障，为危岩体长期安全预警和临灾预警提供适用性装备。

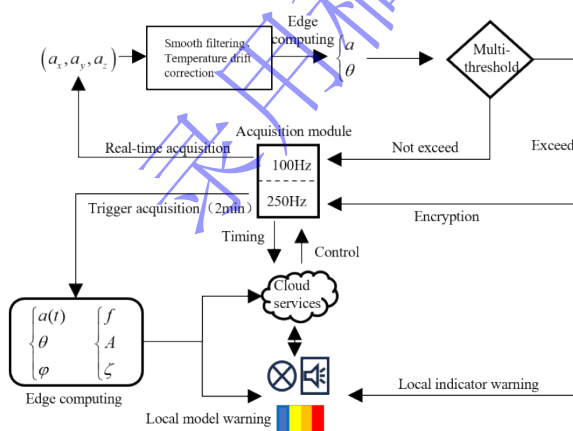


图 4 微芯桩设备工作流程图

Fig. 4 Workflow diagram of the Microchip Pile equipment

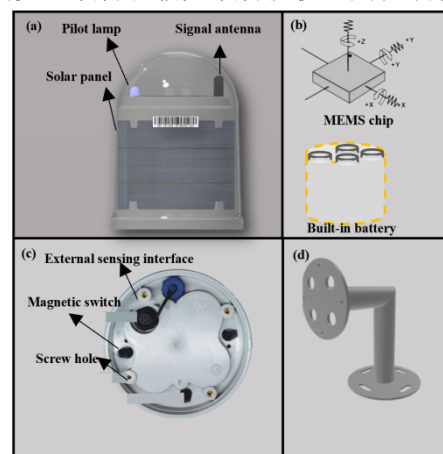


图 5 微芯桩设备组成 (a) 设备外观 (b) 内部关键零件 (c) 设备底部 (d) 固定支架

Fig.5 Composition of Microchip Pile equipment: (a) equipment appearance (b) internal key parts (c) equipment bottom (d) fixed bracket

为实现实际工程的应用，如图 5 所示，微芯桩等越来越多的智能监测装备不仅采用低功耗、高

性能的 MEMS 采集模块，还融合了北斗通讯技术、GPS 定位技术、双供电系统、外接常规传感接口和本地存储模块等。诸多现代软硬件技术的赋能，最新的动力学智能感知技术装备已可实现高频不间断的多层次、多维度和多指标一体化联动，从而实现装备智能化采集、温度误差补偿以及通信自适应切换等多种功能。

3 “技术+管理” 关键问题讨论

危岩动力学理论的逐步完善和微芯智能传感设备的研发，有效提高了工程中危岩崩塌监测的可靠性和预警信息的时效性，为灾害响应决策提供充足的时空环境来安排详尽的应急预案体系。除灾害监测预警技术外，与危岩崩塌灾害日常运维管理相结合的机制建设也是应对复杂岩土灾害的必要措施。监测预警技术和安全管理机制形成的“技术+管理”的危岩崩塌灾害防控新模式是未来应对灾害的趋势。相比传统的单一事前、事中或事后监测为主的防灾减灾手段，建立灾情应对理论框架、技术、组织和物质提供参考原则，实现科学响应、分层分级处理和有力有序应对也是一大难题。目前，多元预警模型联动的早期预警方法和智能化监测预警系统为“技术+管理”的危岩崩塌灾害防控新模式的实现提供了可能。

3.1 多元预警模型实时联动的危岩崩塌早期预警方法

危岩稳定程度的识别、危岩崩塌工况的预测以及危岩崩塌发生时间的预测是危岩崩塌灾害的三个关键点。通过边坡动力学理论形成的动力稳定评价方法、失稳工况预测模型和失稳时间预测模型为上述三个关键点提供了解决方法^[18,30]。为突破常规技术的“分、秒级别”的临灾预警的局限，改变危岩崩塌等脆性破坏灾害监测预警的被动预防态势，实现预警时间达到“天~月级别”的智能化监测，对危岩稳定阶段、弱稳定阶段和失稳三阶段的科学分析与多元模型实时监控联动是必要条件，其基础在于融合物联网云和边缘算法来实时监测静-动力学一体化的监测预警方法^[16,25]。危岩崩塌早期预警包含位移、倾斜、固有频率、振幅、阻尼等多源静-动力学指标边端联动采集，计算、分析、预警嵌入式算法和危岩体稳定性动态评价模型植入边端设备等。此外，在云端实现危岩体失稳工况与失稳时间预测，以云端计算结果来检验边端预警信息并协同调整边端预警阈值，也是实现多元预警模型实时联动的预警方法组成部分。基于边缘计算、云计算、大数据和人工智能技术，将静-动力学监测指标体系、危岩稳定性动态评价模型、危岩失稳工况和失稳时间预测模型进行智能融合，构建大型危岩崩塌三级安全失稳预警方法和基于静-动力学指标云边融合的危岩体崩塌智能化早期监测预警技术，实现边坡动力稳定评价模型、失稳工况预测模型和失稳时间预测模型三种模型实时联动的崩塌灾害智能化早期预警，可提高危岩体崩塌灾害预警的时效性、准确性与自动化智能化水平。

3.2 复杂工况下危岩体崩塌智能化监测预警系统

借助云边融合技术，接入和汇聚多源数据，构建多源静-动力学指标、动力学稳定系数和风险特征值等预警指标、降雨量、地下水等环境量的时序数据库，并结合大数据管理、人工智能训练、可视化展示、数据安全等技术，在云端构建生产、运营、运维等数据统一汇集集成、大规模存储、智能分析等协同体系，实现危岩监测数据的全生命周期管理。除微芯桩智能感知设备外，一体化的管理工具感知网平台和预警信息发布模式也是应对复杂工况下危岩体崩塌智能化监测系统的组成部分。感知网平台是具备“传输、网络、平台、服务”于一体的实时感知数据、定时获取外部数据的工具。微芯传感系列设备的动力学指标、运动学指标和静力学指标相关数据、各类包含空间关键的基础空间数据和各类包含地理实体、分层细化的专题应用数据构成监测装备的多源数据的来源。依托地理信息系统（GIS）平台和应用所需的各类服务接口，解决数据展示、交换、共享的 web 端、手机 APP 和小程序等各类应用系统的相关数据发布问题。由于危岩工况的复杂性以及设备性能等制约，合理的预警信息发布模式是实现危岩崩塌早期预警的关键。危岩崩塌智能化监测预警系统内包含的预警信息发布模式应由设备本地指标预警、云端多因素综合模型预警和结合专业人员的安全预警三部分组成。指标预警指结合危岩固有频率、形变等边缘端的预警来源，采用本地秒级预警响

应的发布模式。模型预警是指除上述的失稳工况预测模型和失稳时间预测模型外，还应结合雨量、气象等历史数据趋势综合分析计算的预警信息发布方式。安全预警是指结合专业人员经验对指标预警、模型预警和现场地质工程条件进行研判后发送预警信息的方式。此外，智能化监测预警系统数据的多源性和发布预警信息的多样性依赖于物联网技术的提升，如分布式数据库集群方式并行处理预警信息、各数据类型切分横向拓展数据库和加权负荷均衡与读写分离方式等。

4 应用前景与案例分析

4.1 动力学监测预警系统的应用前景

对危岩崩塌这类脆性灾害的监测一般以应力或位移等静力学指标为主，有时辅助一些降雨量、水位等环境参量指标，安全监测指标与岩体安全不存在力学模型关系，也极少关注动力学特征参数的监测指标。位移监测和裂缝扩展监测在边坡监测领域由来已久，这些方法仅对变形较大的滑坡体起到一定的预警效果，但对突发性岩体崩塌难以达到理想效果。基于动力学的崩塌监测预警系统为不稳定岩体的预防和早期预警技术瓶颈的突破提供了方向。最新研究与实践表明，岩体可视为刚体、质量和阻尼等物理参数组成的力学系统，其结构面损伤必然引起系统物理特征的变化，进而在动力学特征参数上发生相应的变化。因此，作为岩体直接本质属性，动力特征参数的监测可以识别危岩失稳前兆的异常现象，并在预警的科学性和时效性方面发挥更为积极的作用。前期实验结果表明，基于振动特征指标的边坡失稳前兆识别优于位移等传统指标，且在时效性上优于位移预警^[5]。结合危岩崩塌动力学理论和智能化监测预警技术，借助微动监测的安全稳定性分析与破坏前兆识别可实现危岩崩塌失稳破坏的早期预警。岩体作为一个具有随机性和复杂性的系统，采用局部或某一段时间的静态参数表征全周期下岩体动态参量仍具有一定的局限性和不完善性。但随着危岩体崩塌灾害监测预警理论不断完善、静-动力学一体化监测装备的深入研究以及敏感性监测预警指标的丰富，已能够更全面地获取岩体稳定性信息，实现崩塌灾害早期预警。

MEMS 传感和激光测振等新型感知技术的发展，为危岩动力监测预警系统提供了更多元、更便携的监测手段。云边融合技术和大数据分析技术的优势，为解决危岩崩塌早期预警，实现“技术+管理”的突发性灾害的防灾减灾新模式提供了技术支撑。特别是当前人工智能算法在岩土领域的各类应用尝试，为危岩崩塌灾害的防治提供了新的机遇和挑战。危岩崩塌灾害静力学、动力学、运动学和环境量四位一体的监测指标体系以及地理空间变量等的海量数据处理与分析，如何高效、准确地从中提取关键信息作为防灾减灾依据，是将来面临的一大难题。以深度学习为核心的人工智能算法为危岩体稳定性评价和预测中未知参数和过程提供了新的思路，但有待解决深度学习的可解释性、物理参量一致性和结构不确定性等问题。

4.2 库区猴子岩开顶岩质边坡的应用

西南高山峡谷地区作为我国水电能源建设的重要基地，因其高陡地形和构造发育，库区岩质边坡在水位循环涨落、地震诱发等因素影响下易发生崩塌脆性破坏。在复杂的岩体结构和多重诱发因素的内外耦合作用下，大渡河流域猴子岩水电站库区某开顶岩质边坡发生局部垮塌。如图 6 (a) 所示，该处岩质边坡位于距猴子岩大坝约 14.5km 处，属于丹巴县格宗乡开绕村大渡河右岸，溪河沟上游约 450m 位置。该岩质边坡顺河方向长度约 460m，高程差为 260m，总体积约 400 万立方米。如图 6 (b) 所示，该处边坡浅表部为含大量大孤石、块石和碎石土的崩坡积层，下部为含有千枚岩且岩层内存在层间挤压破碎带的志留系绿片岩。地表裂缝主要分布在岩质边坡的中后部，旁侧地表见多条裂缝延伸至孤石底部。单一孤石尺寸达到 40m×10m×15m，孤石群总方量约 15 万立方米。受岩质边坡影响，通往丹巴的唯一道路 S211 已出现明显开裂迹象，严重威胁了丹巴地区 70 万人交通出行安全。为保障每天近 2 万车辆的通行安全，在配合交通管制措施的基础上，设计单位采用了危岩崩塌灾害动力学监测预警系统，对开顶岩质边坡实施实时监测。

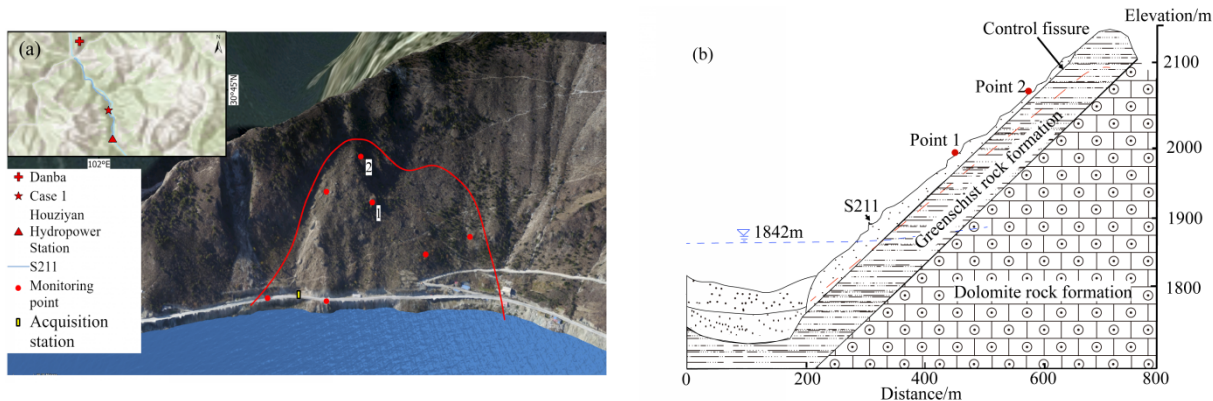


图 6 猴子岩开顶岩质边坡。(a) 地理位置与范围; (b) 地质条件

Fig.6 Houziyan open-top rock slope: (a) geographic location and slope extent; (b) Geological cross section

结合猴子岩开顶边坡高陡地形和垮塌现象, 在已发生局部垮塌的开顶边坡、堆积体和道路等区域部署了七套微芯桩设备。考虑现场通讯网络的不稳定性, 使用一套具备监测数据收集、本地预警和监测数据传输至云平台功能的智能采集测站, 在保障现场秒级预警的同时, 为云端预测提供数据支撑。如图 7 所示, 在监测预警系统服役期间, 发生多次一定规模的局部垮塌, 且均可从监测数据中得以体现。选取如图 6 所示的位于不同高程的两处监测点数据进行应用效果分析。从图 8 所示的 2018 年 1 月 30 日至 2018 年 3 月 13 日历史监测数据可以看出, 两处监测点位在倾斜角度逐渐增加的过程中, 出现多次不同大小的振动加速度值。岩质边坡在裂纹扩展阶段产生的不平衡力下, 会产生振动加速度。监测点位记录的多次连续的振动加速度可用于判断危岩是否进入弱稳定阶段, 进而实现危岩体不同稳定阶段的自动化识别。岩质边坡在由稳定进入弱稳定阶段过程中, 微芯桩同步监测的振动加速度和倾斜角度为动力学灾害表征和临崩前加速蠕变的识别提供了依据, 有助于更好地实现岩体失稳过程的早期预警。



图 7 设备安装场景与现场垮塌现象

Fig.7 Installation scene of Microchip Pile equipment and phenomenon of on-site collapse; (a) equipment installation; (b) on-site collapse

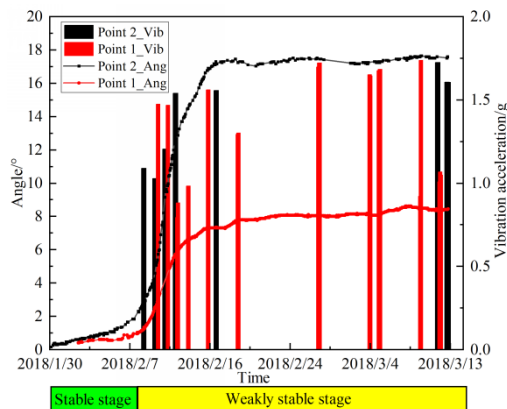


图 8 猴子岩边坡监测数据

Fig.8 Monitoring data of Houziyan rock slope

4.3 海南某金属矿山边帮岩体的应用

矿山开采作为金属矿山资源开发的常见场景，因其频繁人工爆破、开挖扰动等影响，边帮岩体崩塌的风险极高。如图 9 所示，海南省某金属矿山由原来的露天矿山转为地下开采，且目前已形成规模较大的采空区域。地下采空区采用崩落围岩形成的覆盖岩作为充填物，但覆盖岩松散状态难以为上覆岩层提供足够支撑力，导致岩层不断冒落的同时，地表也形成了明显塌陷坑、裂缝等现象。此外，边帮岩体受顺倾结构面控制，在海南热带海洋季风气候的充足雨水影响下，边帮岩体稳定性较差。为了保障矿区公路的安全通行，提早发现边帮岩体稳定状态并进行工程治理，经现场调查和实验，在采矿扰动严重区域和已发生开裂的边帮岩体部署了七套微芯系列设备。此外，如图 10 所示，考虑矿区存在表土层覆盖的持续蠕变滑动的边坡，在该区域同步部署了融合 GNSS 技术的微芯传感设备。

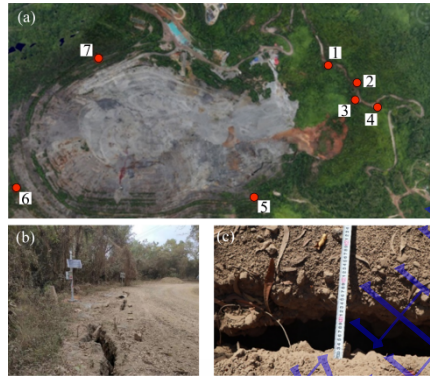


图 9 某金属矿山监测场景。(a) 监测点分布；(b) 道路已出现裂缝；(c) 裂缝宽度

Fig.9 Monitoring scene in a metal mine: (a) distribution of monitoring points; (b) crack appeared on the road; (c) width of the crack

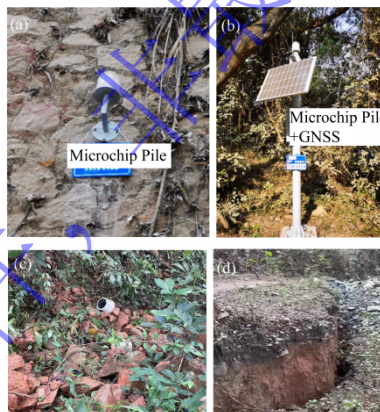


图 10 应用的微芯传感设备与崩塌场景。(a) 微芯桩设备；(b) 融合 GNSS 技术的微芯传感；(c) 监测点崩塌后场景；(d) 道路塌陷迹象

Fig.10 Application of micro-core sensing equipment and collapsed scene: (a) Microchip Pile equipment; (b) micro-core sensing integrated with GNSS technology; (c) scene after collapse at monitoring point; (d) signs of road subsidence

边帮岩体脆性崩塌灾害无法通过常规位移监测实现早期预警，通过静-动力学监测预警指标获取危岩阶段性演化特征和关联规律，可实现突发性岩土灾害失稳全过程的稳定性分析，实现“天~月级别”的提前预警时间，突破“分、秒级别”的临灾预警的局限。在该矿区各监测设备数据中，从位移、倾斜和加速度等指标反映了边帮岩体的稳定程度和形变特征，呈现了如图 10 所示的各种类型的垮塌现象。如图 11 所示，以二号监测点微芯桩数据为例，该点位于 2023 年 10 月 28 日 16 时 20 分出现多次连续的振动冲击加速度，随后在 16 时 41 分监测到倾斜角度产生了约 1° 的变化，最终在 2023 年 10 月 29 日 20 分 42 秒倾斜角度达到 92.184° ，并伴随阶段性突增现象和连续振动加速度信号。现场发生如图 10 (c) 所示的垮塌失稳现象。通过微芯桩设备的振动加速度、倾斜角度和倾斜方向数据，完整呈现了边帮岩体失稳全过程的静-动指标变化特征，验证了动力监测

预警系统在突发性岩土灾害上监测效果，实现了“天级别”的早期预警。

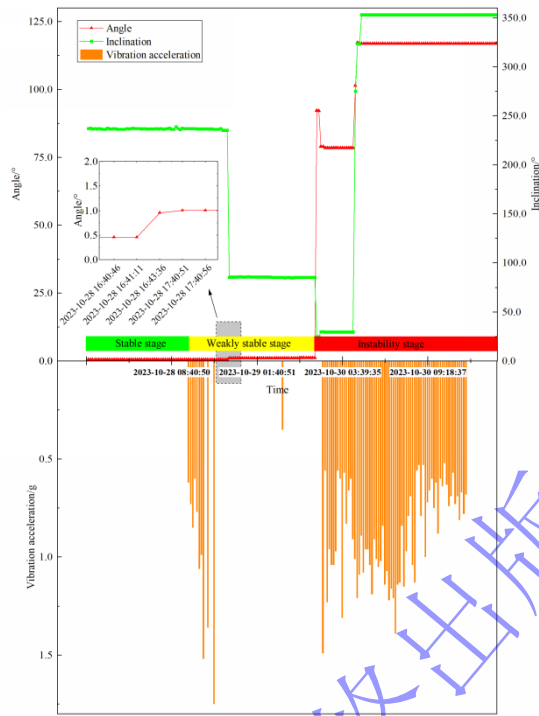


图 11 海南某矿山边坡岩体监测数据

Fig.11 Monitoring data of the surrounding rock mass in a mine located in Hainan

5 结论

危岩崩塌灾害早期预警是我国重大自然灾害监测预警与防控亟待解决的关键课题之一。为实现危岩崩塌脆性灾害的早期预警，突破位移等常规预警技术只能实现“分、秒级别”的临灾预警局限性，开展早期预警机制研究并研发配套智能监测传感技术装备是未来灾害防控的趋势。本文从危岩崩塌失稳动力学新理论、智能感知的监测预警新技术、“技术+管理”防灾新模式以及应用前景与案例分析四个方面对危岩崩塌灾害动力学监测预警系统进行了总结与分析，主要得到以下结论：

(1) 基于牛顿第二定律提出的边坡失稳动力学理论，解决了传统静力学的极限平衡理论难以表征危岩体在稳定阶段、弱稳定阶段和失稳阶段的全过程中的稳定性动态变化问题。瞬时加速度动力参数可反映危岩体在弹性变形向裂纹逐步扩展过程中的不平衡力，是判断危岩体是否有失稳征兆的关键指标。通过将危岩失稳概化为单摆质子模型，推导出的运动方程揭示了固有频率动力学参数与危岩体结构面参量的关系，构建了危岩体动力学稳定性评价的基础，并提出了能够准确描述危岩非线性破坏特性脱离程度的数学表达。

(2) 针对常规位移等预警技术难以应对危岩崩塌脆性灾害及降雨诱发因素预警准确性不足的问题，通过国内外研究案例分析验证了动力学指标可作为危岩崩塌预测预警的一类新监测指标。为实现危岩崩塌全过程的监测预警，提出了静力学、动力学、运动学和环境量的“四位一体”指标体系，为安全预警和失稳预警提供数据支撑。为填补危岩崩塌动力学智能传感装备的空白，基于云边融合智能感知和一体化智能传感机制研发的微芯系列传感装备有效满足了危岩体监测数据采集与早期预警需求。

(3) 为实现安全管理机制与监测预警技术相结合的“技术+管理”的危岩崩塌灾害防控模式，探讨了多元预警模型实时联动的早期预警方法和智能化监测预警系统两大关键问题。动力稳定评价模型、失稳工况预测模型和失稳时间预测模型的多模型联动，可有效提高崩塌灾害预警的智能化水平。借助云边技术、大数据等实现的感知网平台和多级的预警信息发布模式可保障危岩崩塌防控分

级处置和有序应对。

(4) 对库区猴子岩开顶岩质边坡和海南某金属矿山边坡岩体两个应用案例开展了效果分析,验证了基于动力学的崩塌监测预警系统可实现危岩稳定阶段识别与稳定状态变化监测。但监测预警系统仍需在持续完善的动力学理论、静-动力学监测装备、敏感性指标研究和人工智能算法的基础上,不断提升岩体稳定性信息获取与分析能力,真正实现崩塌灾害的早期预警。

参考文献

- [1] Luo G, Cheng Q G, Shen W G, et al. Research status and development trend of high energy rockfall. *Earth Sci*, 2022,47(03):913
(罗刚,程谦恭,沈位刚,等.高位高能岩崩研究现状与发展趋势.地球科学,2022,47(03):913)
- [2] Du Y, Zhang H D, Xie M W, et al. Review on the Monitoring and Early Warning Technology of Large-scale Unstable Rock Collapse. *Adv Eng Sci*, 2024,56(05):10
(杜岩,张洪达,谢谟文,等.大型危岩体崩塌灾害早期监测预警技术研究综述.工程科学与技术,2024,56(05):10)
- [3] Yan Z L, Chai H J, Huang H. Intelligent Safety Monitoring and Hazard Warning System of intelligence Highway Dangerous Rock based on RFID. *Highway*, 2017,62(06):23
(阎宗岭,柴贺军,黄河.基于 RFID 的公路危岩智能安全监测与现场报警系统.公路,2017,62(06):23)
- [4] Li J, Liu Q, Dai X, et al. Monitoring Technology and Application of Dangerous Rock and Rockfall at Tunnel Entrance. *Rail Eng*, 2024,64(06):140
(李健,刘骞,代鑫,等.隧道洞口危岩落石监测技术及应用.铁道建筑,2024,64(06):140)
- [5] Du Y, Xie M W, Jiang Y J, et al. Review on genetic mechanism and early warning of rock collapse disaster. *Metal Mine*, 2021, 01:106
(杜岩,谢谟文,蒋宇静,等.岩体崩塌灾害成因机制与早期预警研究综述.金属矿山,2021,01:106)
- [6] Chu H L, Xing G L, Li K Z, et al. Monitoring of dangerous rock mass in the Three Gorges Reservoir area based on the terrestrial laser scanning method. *Hydro & Eng Geo*, 2021,48(04):124
(褚宏亮,邢顾莲,李昆仲,等.基于地面三维激光扫描的三峡库区危岩体监测.水文地质工程地质,2021,48(04):124)
- [7] Zhang Y T, Wang S F, Sun B Y, et al. Processing and Analysis of Rotorcraft Surrounding Aerial Photography Facing Dangerous Rocks on Slope *Rem Sen Infor*, 2023,38(02):119
(张玉涛,王仕富,孙保燕,等.面向边坡危岩的旋翼机环绕航摄处理与分析.遥感信息,2023,38(02):119)
- [8] Ma X D, Zhou J, Zhang L Q, et al. Feature extraction and instability analysis of dangerous rock mass along highway in meizoseismal areas. *Chinese J Rock Mec & Eng*, 2022,41(S1):2901
(马显东,周剑,张路青,等.强震区公路沿线崩塌危岩体特征提取及失稳分析.岩石力学与工程学报,2022,41(S1):2901)
- [9] Du Y, Xie M W, Jiang Y J, et al. Research progress of collapse early warning based on dynamic monitoring index. *Chinese J of Engin Science*,2019,41(04):427
(杜岩,谢谟文,蒋宇静,等.基于动力学监测指标的崩塌早期预警研究进展.工程科学学报,2019,41(04):427)
- [10] Qi X, Fang M, Cao R L. A method and application of debris flow and mud level warning based on dynamic frequency conversion and real time filtering technology. *Water Resou & Hydro Eng*, 2024,55(07):125
(元星,方敏,曹汝亮.基于动态变频和实时过滤技术的泥石流泥位预警方法及应用.水利水电技术,2024,55(07):125)
- [11] Ma D Z, Wang T B, Hu X G, et al. Data-driven pipeline leak detection method based on cloud-edge Collaboration. *Contr & Deci*, 2023,38(08):2415
(马大中,王天彪,胡旭光,等.基于数据驱动的管道云边协同泄漏检测方法.控制与决策,2023,38(08):2415)
- [12] Li H, Du Y, Xie M W, et al. A mechanical identification method for sliding dangerous rock mass. *J of Engin Science*,2023,45(09):1441
(李恒,杜岩,谢谟文,等.一种滑移型危岩体的力学判识方法.工程科学学报,2023,45(09):1441)
- [13] Wu Z X, Xie M W, Zhang X Y, et al. Damage identification experiment of dangerous rock mass with single structural plane based on constant micromotion. *Chinese J of Eng Sci*, 2024, 46 (04): 589

- (吴志祥,谢谟文,张晓勇,等. 基于常时微动的单结构面危岩体损伤识别实验. 工程科学学报, 2024, 46 (04): 589)
- [14] Zhang X Y, Xie M W, Zhang L, et al. A Calculation model of safety factor of shear fractured falling dangerous rock mass based on natural frequency. *Eng Mecha*, 2024,41(04):1
(张晓勇,谢谟文,张磊,等. 基于固有频率的错断式坠落危岩体稳定系数计算模型. 工程力学, 2024, 41(04): 1-100)
- [15] Huo L C, Du Y, Xie M W, et al. Identification method of dangerous rock mass based on multi-level dynamic indexes. *Chinese J of Rock Mecha & Eng*, 2022, 41(S2): 3124
(霍磊晨,杜岩,谢谟文,等. 基于多层次动力学指标的危岩体识别方法. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(S2): 3124)
- [16] Chen C, Xie M W, Sun G C, et al. Based on time domain index of dangerous rock mass collapse safety evaluation model research. *J of Resea & Devel of Min*, 2022, 42(04): 45
(陈晨,谢谟文,孙广存,等. 基于多时域指标的危岩体崩塌安全评价模型研究. 矿业研究与开发, 2022, 42(04): 45)
- [17] Zhao C, Xie M W, Liu W N, et al. Dangerous rock mass damage recognition based on particle trajectory study. *J of metal mine*, 2022, 4: 66
(赵晨,谢谟文,刘卫南,等. 基于粒子轨迹的危岩体损伤识别研究. 金属矿山, 2022, 04: 66)
- [18] He Z, Xie M W, Wu Z X, et al. On site monitoring of tilt deformation characteristics of tension-splitting rock mass near collapse based on MEMS technology. *Rock & Soil Mecha*, 2024, (11): 1
(贺铮,谢谟文,吴志祥,等. 基于 MEMS 技术的拉裂型边坡危岩体临崩倾斜变形特征现场实测研究. 岩土力学, 2024, (11): 1)
- [19] Du Y, Lu Y D, Xie M W, et al. Based on laser doppler vibration of the dangerous rock body length measurement of rock bridge. *J of coal*, 2019, 44 (S2): 560
(杜岩,陆永都,谢谟文,等. 基于激光多普勒测振的危岩体岩桥长度测量. 煤炭学报, 2019, 44(S2): 560)
- [20] Liu W N. Study on the stability dynamics evaluation model of falling dangerous rock masses on slope[Dissertation]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2022
(刘卫南. 坠落式边坡危岩体稳定性动力学评价模型研究[学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2022)
- [21] Zhao C, Xie M W, Du Y, et al. Spatial Vibration Characteristics and Damage Identification of Toppling Dangerous Rock Mass. *Adv Eng Sci*, 2024, 56(05): 48
(赵晨,谢谟文,杜岩,等. 倾倒型危岩体空间振动特征及损伤识别. 工程科学与技术, 2024, 56(05): 48)
- [22] Lu G, Xie M W, Liu W N, et al. Dangerous rock mass stability analysis method based on amplitude ratio. *J of Research and Development of Mining*, and 2022, 42(01): 82
(路光,谢谟文,刘卫南,等. 基于振幅比的危岩体稳定性分析方法. 矿业研究与开发, 2022, 42(01): 82)
- [23] Huo L C, Du Y, Xie M W, et al. Unstable rock mass identification method based on time and frequency domain dynamic parameters. *Chinese J Rock Mecha & Eng*, 2021, 40(S2): 3156
(霍磊晨,杜岩,谢谟文,等. 基于时频域动力学参量的危岩体识别方法. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(S2): 3156)
- [24] Du Y, Xie M W, Jiang Y J, et al. Experimental study on safety monitoring of dangerous rock based on natural vibration frequency. *Rock & Soil Mecha*, 2016, 37(10): 3035.
(杜岩,谢谟文,蒋宇静,等. 基于固有振动频率的危岩安全监测试验研究. 岩土力学, 2016, 37(10): 3035)
- [25] Xie M W, Guan H L, Du Y, et al. *Introduction to the Dynamics of Slope Instability*. Beijing: Science Press, 2021
(谢谟文, 关鸿亮, 杜岩, 等. 边坡失稳动力学概论. 北京: 科学出版社, 2021)
- [26] Du Y, Xie M W, Jiang Y J, et al. Application of laser doppler vibration is the rock mass of the cumulative damage evaluation test study. *J Eng Sci*, 2017, 39 (01): 141
(杜岩,谢谟文,蒋宇静,等. 应用激光多普勒测振仪的岩块体累计损伤评价试验研究. 工程科学学报, 2017, 39(01): 141)
- [27] Ma C, Miao H B, Yang B, et al. Time-series micro-deformation analysis of large-scale landslide based on SBAS-InSAR technology and its disaster time prediction. *Sci Techn & Eng*, 2023, 23 (22): 9404
(马闯,缪海波,杨犇,等. 基于 SBAS-InSAR 技术的大型滑坡时序微小形变分析及其灾变时间预报. 科学技术与工程, 2023, 23 (22): 9404)
- [28] Racek O, Blahůt J, Hartvich F. Observation of the rock slope thermal regime, coupled with crackmeter stability monitoring: initial results from three different sites in Czechia (central Europe). *Geosci Instru, Met & Data*

Sys.2021,10:203

- [29] Schild L, Scheiber T, Snook P, et al. Multimodal Asynchronous Kalman Filter for monitoring unstable rock slopes. *Geomatics, Nat Haz & Ris*, 2023,14(1).
- [30] Zhang X Y. *Research on stability evaluation model of dangerous rock mass of falling slope based on natural frequency* [Dissertation]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2023.
(张晓勇. 基于固有频率的坠落型边坡危岩体稳定性评价模型研究[学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2023)
- [31] Chen H K, Zhang R G, Tang H G, et al. Pressure shear type dangerous rock damage play rushed to study dynamic parameters. *J Vib & Sho*, 2012, 31 (24): 30
(陈洪凯,张瑞刚,唐红梅,等.压剪型危岩破坏弹冲动力参数研究.振动与冲击,2012,31(24):30)
- [32] Chen H K, Zhou Y T, Tang H M. Based on the analysis of sliding type to remove dangerous rock blasting dynamic stability calculation method. *J Vib & Sho*, 2014, 33(15): 31
(陈洪凯,周云涛,唐红梅.基于时程分析的滑塌式危岩清除爆破动力稳定性计算方法.振动与冲击, 2014,33(15):31)
- [33] Burjáněk J, Gisching V, Moore J R, et al. Ambient vibration characterization and monitoring of a rock slope close to collapse. *Geo J Inter*.2018, 212(1): 297
- [34] Glueer F, Mreyen A S, Cauchie L, et al. Integrating Seismic Methods for Characterizing and Monitoring Landslides: A Case Study of the Heinzenberg Deep-Seated Gravitational Slope Deformation (Switzerland). *Geosc*,2024,14(2):28
- [35] Häusler M, Michel C, Burjáněk J, et al. Fracture Network Imaging on Rock Slope Instabilities Using Resonance Mode Analysis. *Geo Resea Let*,2019,46(12): 6497
- [36] Häusler M, Michel C, Burjáněk J, et al. Monitoring the Preonzo Rock Slope Instability Using Resonance Mode Analysis. *Journal of Geophysical Research: Ear Sur*,2021,126(4)
- [37] Iannucci R, Martino S, Paciello A, et al. Investigation of cliff instability at Ghajn Hadid Tower (Selmun Promontory, Malta) by integrated passive seismic techniques. *J Seism* 2020, 24(4): 897
- [38] Taruselli M, Arosio D, Longoni L, et al. Seismic noise monitoring of a small rock block collapse test. *Geo J Inter*, 2021,224(1): 207
- [39] Bottelin P, Baillet L, Larose E, et al. Monitoring rock reinforcement works with ambient vibrations: La Bourne case study (Vercors, France). *Eng Geo*, 2017,226:136
- [40] Mercerat E D, Payeur J B, Bertrand E, et al. Deciphering the dynamics of a heterogeneous sea cliff using ambient vibrations: case study of the Sutta-Rocca overhang (southern Corsica, France). *Geo J Inter*,2021, 224(2): 813
- [41] Wang Y. *Research on landslide velocity and surge hazard of reservoir bank* [Dissertation]. Beijing: China University of Geosciences, 2005
(汪洋. 水库库岸滑坡速度及其涌浪灾害研究[学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2005)
- [42] Guo D T, Zhou C Y Xie L. Research on static and dynamic behavior of excavation in adjacent Metro tunnel. *J of Rail Sci & Eng*, 2015, 12 (02): 393
(郭典塔,周翠英,谢琳. 近接地铁隧道基坑开挖静动力学行为研究. 铁道科学与工程学报, 2015, 12 (02): 393)
- [43] Tao Z G, Li H P, Sun G L, et al. Research and application of landslide monitoring and warning system based on constant resistance and large deformation anchor cable. *Rock & Soil Mecha*,2015,36(10):3032
(陶志刚,李海鹏,孙光林,等.基于恒阻大变形锚索的滑坡监测预警系统研发及应用.岩土力学,2015,36(10):3032)
- [44] Willenberg H, Loew S Eberhardt E. Slope stability evaluation and run-out simulation for an unstable rock slope above an industrial area in the Leventina valley, Switzerland. *4th Swiss Geoscience Meeting*. Bern 2006:105
- [45] Antonelli M, Della V. *Civil and Environmental Engineering for the Sustainable Development Goals*. Springer Briefs in Applied Sciences and Technology. Springer, Cham, 2022.
- [46] Yin Y P, Wang L Q, Zhao P, et al. Study on mechanism and prevention of collapse and instability of high steep bank slope in Three Gorges Reservoir area. *J Hydra Eng*, 202,53(04):379
(殷跃平,王鲁琦,赵鹏,等.三峡库区高陡岸坡溃屈失稳机理及防治研究.水利学报,2022,53(04):379)
- [47] Hausler M, Michel C, Burjáněk J, et al. Monitoring the Preonzo Rock Slope Instability Using Resonance Mode

Analysis. *J Geo Res*, 2021:126.

[48] Taruselli M, Arosio D, Longoni L, et al. Seismic noise monitoring of a small rock block collapse tests. *Geo J Int*, 2020, 224:207.

[49] Zhou F C. *Fracture destabilization-block collapse mechanism and monitoring and warning of near horizontal stratified limestone tower pillar dangerous rock* [Dissertation]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2023.

(周福川.近水平层状灰岩塔柱状危岩压裂失稳-座溃解体机制与监测预警[学位论文].重庆交通大学,2023.)

录用稿件，
非最终出版稿