岩质高边坡自动化监测方案及安全预警体系

齐建广[1]　王凯渤[2]
1. 天津市地球物理勘探中心　天津　300000
2. 天津市地质工程勘测设计院有限公司　天津　300000

摘　要：岩质高边坡自动化监测方案涵盖自动化监测组件、技术架构与运行逻辑，涉及边坡变形、应力应变、环境参数监测及数据传输联动等关键技术。安全预警体系包含预警指令生成传输、边坡状态实时感知预警触发、多监测设备协同预警等运行机制。随着技术发展，监测技术向精度提升与功能完善迭代，预警体系推动多系统融合应用，监测预警持续优化，提升对岩质高边坡安全管控的效能，保障边坡稳定运行。

关键词：岩质高边坡；自动化监测；安全预警；关键技术；运行机制

引言：在岩土工程领域，岩质高边坡的稳定性至关重要，其失稳可能引发严重灾害。传统监测方式存在效率低、精度差等问题，难以满足复杂地质条件下边坡监测需求。自动化监测与安全预警体系凭借实时、精准、全面的优势，成为保障岩质高边坡安全的关键手段。构建科学合理的自动化监测方案及安全预警体系，能及时掌握边坡状态变化，提前发现潜在风险，为采取有效管控措施提供依据，对保障工程安全、减少损失具有重要意义。

1 岩质高边坡自动化监测方案的构成

1.1 自动化监测组件

自动化监测组件是岩质高边坡自动化监测方案的基础支撑。自动化监测组件涵盖数据采集单元、数据传输单元与数据处理单元。数据采集单元选用高精度传感器，可实现边坡位移、应力应变、渗流等多参数的实时采集，采集精度满足岩土工程监测技术规范要求[1]。数据传输单元采用无线通信技术与有线传输相结合的方式，实现采集数据的稳定传输，传输过程中可有效避免数据丢失。数据处理单元通过专业算法对采集到的数据进行筛选、降噪与整合，转化为可直接用于监测工作的有效信息。各组件之间通过标准化接口实现有机衔接，形成完整的采集传输处理链路，为自动化监测工作的有序开展提供硬件与软件层面的双重保障。

1.2 自动化监测的技术架构

自动化监测的技术架构遵循分层设计理念，构建起自上而下的完整技术体系。底层为感知层，由各类监测传感器组成，负责边坡多参数的实时采集，是整个技术架构的基础支撑。中间层为传输层，承担数据从感知层到应用层的传递功能，通过专用传输协议实现数据的高效传递，确保数据传输过程的稳定性与可靠性。顶层为应用层，整合数据处理、参数分析等功能，实现监测数据的有效转化与应用，为边坡监测工作提供技术支撑。各层级之间通过标准化协议实现数据互通，技术架构的设计充分考虑岩质高边坡监测的实际需求，兼顾监测精度与运行效率，形成层次清晰、功能完善的技术体系，符合岩土工程自动化监测领域的技术规范。

1.3 自动化监测的运行逻辑

自动化监测的运行逻辑围绕数据采集传输处理的全流程展开。数据采集阶段通过各类监测传感器捕捉边坡位移、应力应变等关键参数，采集过程严格遵循岩土工程监测技术规范，确保采集数据的准确性与完整性。采集完成的数据通过传输单元传递至处理单元，处理单元采用专业数据处理算法对数据进行降噪去冗，剔除无效数据，保留能够反映边坡状态的关键信息。处理后的有效数据传输至应用层面，用于边坡状态的实时监测与动态管控。运行过程中，各环节紧密衔接，数据采集传输处理的每一步都严格按照技术规范推进，确保监测工作有序开展，为边坡安全管控提供精准的数据支撑。整个运行流程符合岩土工程自动化监测的技术要求，各环节的有序推进保障监测数据的有效利用，为边坡安全管控工作提供可靠依据。

2 岩质高边坡自动化监测的关键技术

2.1 边坡变形自动化监测技术

边坡变形自动化监测技术聚焦岩质高边坡位移变化的实时捕捉，是保障边坡安全管控的重要技术手段[2]。该技术以岩土工程监测技术规范为依据，选用 GPS 定位

技术与 InSAR 干涉测量技术相结合的方式，实现边坡表层与深层位移的精准监测。GPS 定位技术可实现边坡宏观位移的动态捕捉，测量范围覆盖边坡整体区域，满足大范围监测需求；InSAR 干涉测量技术则可实现微小位移的高精度捕捉，分辨率可达毫米级，能够捕捉边坡细微变形特征。通过两种技术的融合应用，可全面覆盖不同尺度的变形监测需求，为边坡变形状态的精准判断提供数据支撑。

2.2 边坡应力应变自动化监测技术

边坡应力应变自动化监测技术针对岩质高边坡内部应力分布及应变变化开展监测，可有效捕捉边坡岩体受力状态的动态变化。该技术采用埋入式应变传感器与表面应力传感器搭配布置的方式，实现边坡岩体内部与表面应力应变参数的同步采集。埋入式传感器深入边坡岩体内部，可捕捉岩体内部应力应变的分布特征及变化规律；表面应力传感器则用于监测边坡表层岩体的应力状态，弥补内部监测的局限。监测过程中通过传感器的实时数据采集，可精准捕捉应力应变的细微变化，结合岩体力学特性分析，判断边坡岩体的受力稳定性，为边坡安全管控提供有力技术支持。

2.3 边坡环境参数自动化监测技术

边坡环境参数自动化监测技术围绕影响岩质高边坡稳定性的环境因素开展监测，涵盖降雨、温度、湿度等关键环境参数。降雨监测采用高精度雨量传感器，可精准捕捉降雨强度、降雨时长等参数，结合岩土工程降水诱发边坡失稳的相关研究，实现降雨对边坡稳定性影响的动态监测。温度与湿度监测则通过环境传感器实现实时采集，可捕捉环境参数的动态波动，分析环境变化对边坡岩体物理力学性质的影响。该技术通过对各类环境参数的持续监测，可及时掌握环境因素对边坡稳定性的作用规律，为边坡安全管控提供全面的环境数据支撑。

2.4 监测数据传输与联动技术

监测数据传输与联动技术是保障自动化监测系统高效运行的核心支撑，衔接监测数据采集与后续处理应用。数据传输采用无线通信与有线传输互补的方式，无线通信技术选用 5G 与 LoRa 技术，可实现复杂地质环境下的数据稳定传输，避免地形遮挡对传输效果的影响；有线传输则用于核心监测数据的备份传输，提升数据传输的可靠性[3]。联动技术通过标准化接口实现各监测单元与数据处理单元的有机衔接，采集的数据可快速传输至处理单元，处理后的信息可直接反馈至监测管控终端，实现监测数据采集、传输、处理的有序衔接，保障监测系统各环节的高效运转，提升监测工作的整体效率。

3 岩质高边坡安全预警体系的运行机制

3.1 预警指令的生成与传输机制

预警指令的生成与传输机制是安全预警体系高效运转的核心支撑。预警指令生成基于监测数据的实时分析，结合岩土工程安全预警技术规范，通过预设的阈值判断规则，对监测数据进行分级研判，形成不同等级的预警指令。预警指令生成过程中，严格依据监测数据与边坡稳定性评价标准，确保指令生成的科学性与精准性。传输机制采用加密传输技术，结合专用通信链路，实现预警指令从生成单元到管控终端的稳定传递，传输过程中可有效降低数据干扰，保障指令传递的及时性与准确性。传输链路设置多重校验机制，可及时发现传输异常并快速调整，确保预警指令能够快速送达相关管控环节，为后续管控措施的落地争取时间。

3.2 边坡状态的实时感知与预警触发机制

边坡状态的实时感知与预警触发机制是预警体系落地的关键环节。实时感知依托前期部署的自动化监测设备，对边坡变形、应力应变、环境参数等进行持续采集，采集数据实时汇入数据处理单元，经过筛选降噪后形成可用于预警判断的有效数据。预警触发依托预设的分级阈值体系，结合边坡岩体力学特性，对实时感知数据进行动态研判。当感知数据达到预设阈值范围时，自动触发对应等级的预警指令，无需人工干预即可完成触发操作。触发过程中，系统可自动识别数据异常波动，区分正常波动与危险异常，避免误触发情况发生。实时感知与预警触发的衔接流程经过优化设计，确保感知数据与触发操作的顺畅衔接，提升预警触发的及时性。

3.3 多监测设备协同预警机制

多监测设备协同预警机制用于解决单一监测设备预警局限性问题，提升预警体系的可靠性。不同类型监测设备按照预设布局方案分布于边坡不同监测点位，各自承担特定参数的监测任务，形成全方位、多维度的监测网络。协同预警通过数据融合算法，对各监测设备采集的不同参数数据进行整合分析，挖掘不同参数之间的内在关联，实现多参数联合研判。当某一监测设备采集的数据出现异常时，系统可调用其他相关监测设备的同期数据进行交叉分析，确认异常性质与影响范围。协同过程中，各监测设备保持独立运行，通过数据互通实现信息互补，避免单一设备数据偏差导致的预警误差。这种协同模式符合岩质高边坡多因素耦合失稳的监测预警需

求，可有效提升预警判断的全面性与精准性，保障边坡安全管控的有效性。

4 岩质高边坡自动化监测及预警技术的发展方向

4.1 监测技术迭代与升级方向

监测技术迭代与升级紧扣岩土工程自动化监测领域技术发展趋势，以精度提升与功能完善为核心目标[4]。迭代升级重点指向传感器性能优化与监测方法创新，新型高精度传感器向小型化、低功耗方向演进，既能提升数据采集精度，又能降低设备部署难度与后期运维成本，适配岩质高边坡复杂地形的部署需求。监测方法逐步融入人工智能技术，借助智能算法实现监测数据的自主分析与异常识别，减少人工干预带来的误差，提升数据处理的效率与准确性。遥感监测技术持续升级，结合无人机航拍技术实现边坡全域无死角监测，突破传统监测方法的空间局限，可全面捕捉边坡不同区域的状态变化，推动监测技术向高效化、精准化转型，适配岩质高边坡多场景监测需求。

4.2 预警体系融合应用方向

预警体系融合应用的核心的是打破监测与预警之间的壁垒，实现多系统、多技术的有机衔接。融合应用重点推进预警体系与自动化监测系统的深度衔接，实现监测数据与预警指令的无缝流转，提升预警响应效率，让监测数据快速转化为预警判断的有效依据。推动预警体系与边坡治理技术的深度融合，将预警信息与治理措施直接关联，实现预警与治理的协同推进，提升边坡安全管控的主动性。预警体系逐步融入地理信息系统技术，通过空间可视化技术清晰呈现边坡状态与预警信息，便于管控人员直观掌握边坡安全状况，推动预警体系从单一预警向综合管控转型，提升边坡安全管控的整体性与系统性，适配岩质高边坡安全管控的实际需求。

4.3 监测预警的优化方向

监测预警的优化方向聚焦精准性与适应性提升，立足岩质高边坡地质条件复杂性与监测预警实际需求，持续完善系统运行效能。优化工作以数据处理效率提升为切入点，通过算法革新减少数据处理延迟，让监测数据快速转化为可用于预警判断的有效信息，缩短数据从采集到应用的流转周期。预警阈值设置需结合边坡岩体力学特性与地质环境差异，动态调整标准，摒弃固定阈值模式，根据边坡实际状态优化阈值区间，减少误判与漏判情况。监测设备布局优化需结合边坡地形地貌特征，调整设备布设点位，提升监测数据的全面性，减少监测盲区。同时优化预警链路设计，简化不必要的中间环节，提升预警指令传递效率，确保预警信息快速送达管控环节[5]。优化过程中兼顾系统稳定性，通过技术调整提升监测预警系统在复杂地质环境与恶劣天气条件下的适应能力，降低环境因素对系统运行的影响，让监测预警系统更贴合岩质高边坡安全管控的实际需求，实现效能持续提升。

结束语

岩质高边坡自动化监测方案及安全预警体系的构建与完善，是保障边坡安全稳定的重要举措。通过不断迭代升级监测技术，融合应用预警体系，优化监测预警流程，提升了系统对边坡状态的感知能力与预警准确性。这不仅有助于及时发现边坡安全隐患，还能为边坡治理提供科学依据，降低安全风险。在实际应用中，需持续关注技术发展，结合边坡实际情况，不断调整优化方案，确保监测预警工作的高效开展，切实保障岩质高边坡的安全运行。

参考文献

[1] 徐念望. 岩质高边坡自动化监测及安全预警技术 [J]. 江苏建材,2024(2):56-58.

[2] 刘飞跃，杨天鸿，朱万成，等. 基于落石视频监测的露天矿岩质边坡临滑预警研究 [J]. 岩土工程学报，2025,47(4):792-800.

[3] 彭松，刘建坤，张云龙，等. 基于北斗三号远程监测系统的公路岩质边坡开挖变形分析 [J]. 科学技术与工程，2022,22(33):14898-14906.

[4] 牛鹏，于庆磊，张鹏海，等. 乌山露天矿岩质边坡监测预警系统的构建与应用 [J]. 矿业研究与开发，2022,42(11):74-81.

[5] 罗纳卿，蒋铧隆. 高速公路高边坡自动化监测系统工程应用 [J]. 土木工程（汉斯期刊）,2024,13(4):358-365.