

智慧边坡监测预警技术在 TB 主体砂石系统的应用

文 / 郭勇军 中国水利水电第七工程局有限公司第五分局

摘要：我国北斗定位技术已经得到全球各地广泛认可，云贵川地区地形沟壑分部广泛山体陡峭，潜在地质灾害隐患点分布较广，在国务院颁布的《国家综合防灾减灾规划》中也明确指出，要加强灾害监测预警能力建设。TB 电站绿色智慧砂石加工系统左岸加工区布置在“V”形深沟中（TB 沟），占地面积仅 2.2 万 m²，场地狭窄，两侧山坡陡峭，边坡稳定较差，且 TB 沟属于泥石流沟，上游堆积有用料用于生产。因此，对边坡进行及时有效的监测将对现场作业人员及系统安全生产起到至关重要的保护作用。

关键词：边坡监测预警；砂石系统；应用

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.12.038

引言

TB 主体工程绿色智慧砂石加工系统左岸加工区布置在“V”形深沟中（TB 沟），两侧陡峭，上游利用料堆扩容后容量约 378 万 m³，比原设计多堆存约 171.2 万 m³，料堆高度及方量增加较大，边坡稳定性降低。通过在系统及有用料场边坡建设智慧监测预警系统平台对边坡进行及时有效的监测，将对现场作业人员及系统安全生产起到至关重要的保护作用。

一、背景

TB 主体工程绿色智慧砂石加工系统位于云南省迪庆州维西县中路乡境内，主要由左岸 TB 沟砂石系统、右岸筛洗分级及成品料场组成，中间通过跨江贝雷桥及长距离曲线胶带机相衔接。系统毛料设计产能为 1500t/h，成品骨料设计产能为 1250t/h。采用“三段破碎加立轴和棒磨联合制砂”的工艺。系统生产用料堆存于 TB 沟沟内上游的利用料堆存场，堆存场顶部高程 EL. 1830.00，堆存 378 万 m³。

二、边坡监测预警系统总设计方案

针对 TB 沟有用料场边坡构建全方位、全周期实时监测网络，融合大数据分析技术，对监测数据智能分析，实现边坡区域范围内异常事件动态响应和主动预警，确保 TB 主体砂石加工系统及有用料场安全。

边坡智慧监测预警主要包含三部分，分别是：（1）边坡形变位移信息监测网络，在有用料场边坡附近选择合适的观测位置，固定安装传感设备的观测桩，实时收集 3D 点云、视频图像、倾斜振动等信息，为整个监测预警系统提供数据支撑。（2）边坡形变位移智能分析云平台基于前端传感网络监测数据，建立边坡形变位移智能分析云平台。（3）边坡形变位移报警终端在智能分析云平台基础上，集成并设置多级预警，支持弹出软件窗口报警、邮件报警、短信报警及声光报警等功能。

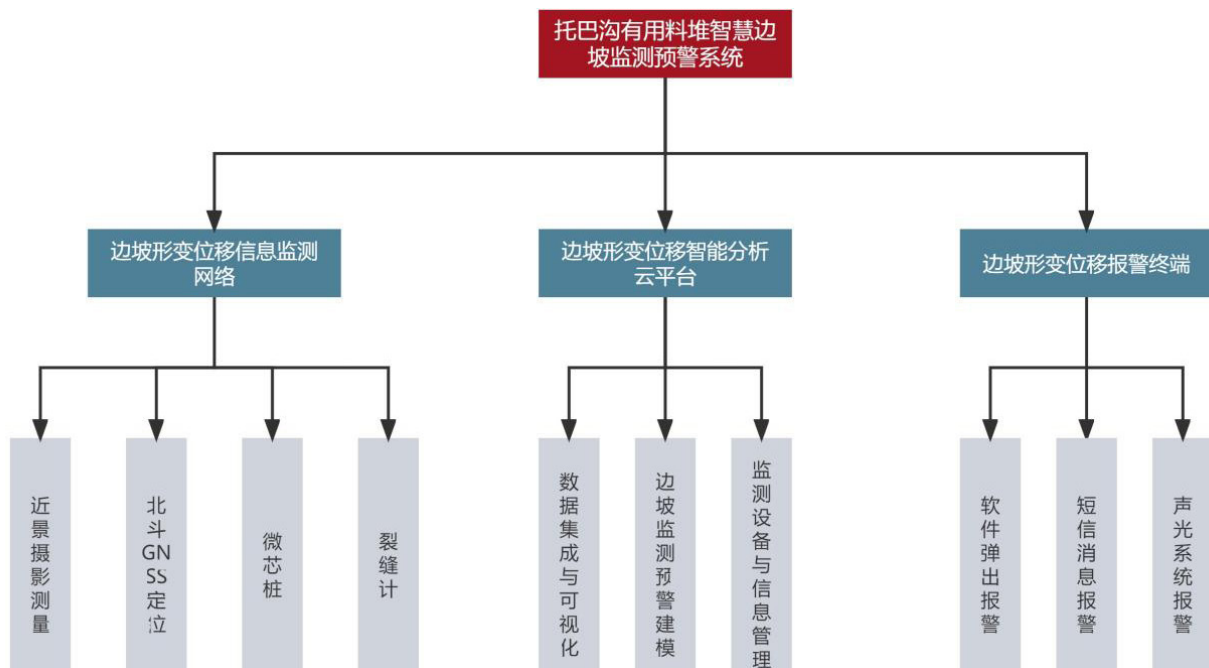


图 1 托巴沟有用料堆智慧监测预警系统设计

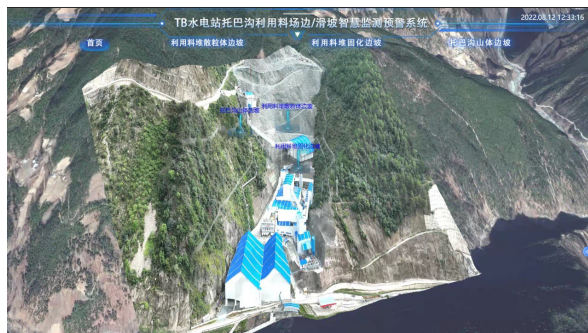


图 2 TB 沟智慧边坡监测预警系统应用界面

三、边坡监测预警系统的构建与应用

(一) 边坡监测预警系统的架构设计

TB 沟有用料场边坡智慧监测预警平台设计分为信息采集、数据传输、功能计算、终端展示 4 个部分，各部分叙述如下：

信息采集：面向边坡区域固定设置多源传感监测站实时获取 3D 点云、视频图像、GPS 坐标等数据，通过信息采集终端将集中传输至云平台，进行存储计算和功能分析。

数据传输：打造完整的 4G/5G/Internet/LoRa 数据通信链路，将监测数据从前端设备实时、有效地传至输云平台，并负责将云平台智能分析结果及时推送至监控中心和各预警终端。

功能计算：建立云计算平台，引入边 / 滑坡稳定性分析、位移形变预测、预警等级自动识别等模型，对监测数据进行综合处理、分析和判定。

终端展示：在监控大屏、声光预警、手机、平板等终端进行数据可视化展示及现场预警。

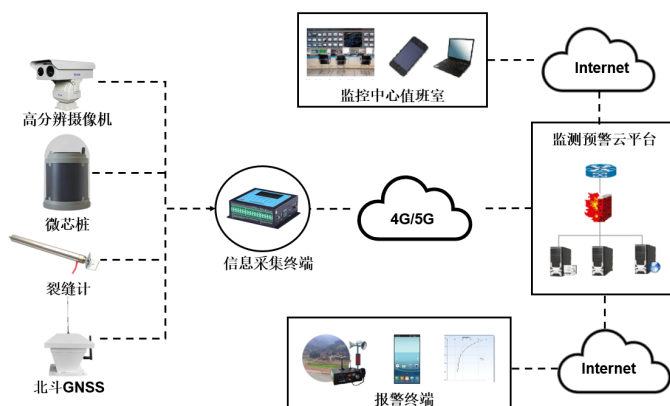


图 3 TB 沟有用料场边坡智慧监测预警架构

(二) 边坡位移形变监测技术应用

1. 北斗 GNSS 位移监测

北斗 GNSS 位移监测是基于北斗定位系统和 GPRS 等无线传输系统完成的动态实时集自动化采集和传输于地表绝对位移监测方法，对 TB 沟有用料场边坡有很好的监测预警作用。

2. 近景摄影测量

近景摄影测量技术通过使用量测或非量测相机，采

取旋转摄影或平行摄影手段对特定区域进行拍摄，进而利用 LensPhoto 等摄影测量软件系统来获取该区域的三维表面点云数据。此技术通过自动识别两期影像之间的控制点，将第二期的相对三维模型转换到第一期的绝对三维模型坐标系中。随后，生成数字高程模型（DEM），并对两个 DEM 进行叠加处理，以此计算出滑坡体的绝对位移以及局部变化区域的位置和面积，进而实现了山体滑坡的自动化监测。

3. 惯性传感技术

微芯桩结合了 MEMS 惯性传感器与 GNSS 高精度定位技术，形成了一种集成化的监测设备。它能收集边坡、滑坡体的静力学、动力学以及运动学信息，用于监测包括绝对位移、倾斜和振动等参数，广泛应用于岩土结构的边坡、土石坝、堤防、基坑等安全性监测以及早期失稳预警。

4. 裂缝监测

裂缝计是一种用于测量结构性裂缝开度或裂缝两侧块体相对移动的仪器。通过对地表裂缝的监测数据分析，可以推断出滑坡的发展趋势及其稳定性状况。

5. 防雷系统

雷电的危害主要分为直击雷和感应雷两种形式。该防雷系统通过在电子设备上安装天馈线保护装置，以及在电力线上安装电涌保护器和空气开关等单项电源避雷器，来提供保护。

四、边坡智能分析与预警

(一) 边坡智能分析与预警

利用大数据分析云计算技术，构建边坡智能分析与预警云平台，集中管理边 / 滑坡位移形变、气象水文监测数据及设备，研发边 / 滑坡稳定性分析、位移形变预报和边 / 滑坡预警等级化功能模块，提供数据可视化交互界面。

1. 稳定性评估

在评估滑坡稳定性时，需要考虑一系列随时间变化的参数，例如降雨量、土壤湿度以及位移形变等。其中，地下水位和位移形变是尤为关键的因素。滑坡的位移形变特征包括滑动面的深度、方向、移动幅度以及移动速率。通过对这些参数的持续监测，可以有效地对滑坡的活动情况进行跟踪。

2. 预测模型

本研究采用了指数平滑法和回归分析模型，基于滑坡临界滑动阶段的累计位移监测数据，进行滑坡位移的拟合和预测，该方法在中短期滑坡预测中表现出了良好的效果。指数平滑法通过数学手段对历史数据进行平滑处理，消除极端值，以得到反映主要趋势的平滑值，作为未来预测的基础。由于滑坡形变通常表现为非线性增长的时间序列，因此三次指数平滑法被应用于具有非线性特征的滑坡预测中。如果在监测过程中发现斜坡变形异常，应增加监测频率，以提升预测的准确性。多元线性回归模型通过构建位移与时间的序列关系，能够在—



图 4 边坡智能分析与预警云平台

定程度上对滑坡进行预测，并且该模型在位移预测上具有较高的精确度。

3. 预警级别

滑坡预警旨在灾害发生前，基于滑坡岩土体的工程地质特征和变形破坏机理，建立预警模型，预测滑坡体稳定性的未来变化趋势及灾害发生的时间。预警级别根据危险程度从低到高分五个等级：绿色、蓝色、黄色、橙色和红色。

绿色预警：滑坡体位移变化微小，整体处于稳定状态，若位移减速，表明滑坡体可能趋于稳定。

蓝色预警：尽管滑坡体仍处于缓慢蠕变阶段，但受极端气候影响，位移变化加剧。此时，不仅要关注位移的临界值，还要考虑如降雨量等外界因素的临界值。

黄色预警：位移总量显著增加，表面位移速率加大但未加速，裂缝集中出现，滑坡体进入匀速蠕变阶段，破坏率超过 25%，需加强抢险措施。

橙色预警：滑坡体进入加速变形阶段，表面位移速率较大且加速，裂缝明显且贯通，破坏率超过 50%，后果严重，需加速抢险并撤离受威胁人员。

红色预警：滑坡体已经进入加速变形，表面变化速率急剧增加，位移曲线显示加速变形趋势，裂缝完全贯通，局部已坍塌，破坏率超过 70%，需紧急抢险和迅速撤离。

(二) 边坡现场应急警报

当监测到的位移、速度、加速度等指标超过预设阈值时，边坡和滑坡的智能监测预警系统能够通过短信、电子邮件、声光信号、网页弹出窗口等多种途径发出警报。警报阈值依据不同监测需求设定。后台软件能自动进行报警，并通过颜色变化和闪烁等方式可视化显示异常数据，迅速引起监控人员的注意。监控人员根据实际情况，可一键式通知现场人员进行疏散。

自动短信预警可在监控中心无人值班时及时通知工

作人员，实现预警目的。该预警系统通过安装在监控中心的 GPRS 模块，利用 GPRS 网络的网络转换协议，实现公网向 GPRS 网络的逆向传输。现场声光一体化警报器能够及时提醒周边人员注意突发情况。

结语

在将智能化边坡监测预警技术应用于 TB 主体砂石系统后，我们得出以下几点结论：

(1) 结合边坡的形态、地质状况以及相关案例数据，并通过地理信息系统 (GIS) 的支持，成功实现了 TB 沟砂石系统边坡的监测预警。这一技术的应用为保障工作人员的生命安全以及系统的稳定生产提供了坚实的支持。

(2) 借助北斗 GNSS 智能监测系统，我们实现了对数据的远程自动采集和对边坡状态的实时监测。这种综合性的分析方法为系统的安全生产提供了坚实的保障。

(3) 该系统的部署使得监测工作不再需要人员频繁进入监测区域进行实地观察，同时实现了连续不断的监测，克服了传统监测手段的许多限制。

(4) 系统能够定时发送告警短信，使得监管人员能够及时了解现场的安全状况，对潜在风险进行预测，并据此采取相应的预防措施。

根据系统收集的监测数据，目前 TB 沟的料堆保持着稳定状态，系统能够满足既定的技术要求。随着互联网技术的快速发展，自动化的边坡监测集成系统日益成熟，预计未来将在工程领域得到更广泛的推广和应用。

参考文献

[1] 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.

作者简介：郭勇军 (1973—03)，男，工程师，主要从事水利水电工程施工工作。