

铜绿山尾矿库在线监测系统设计与应用

熊国雄¹,王 欢¹,毕 成^{2,3},王 勇^{2,3*}

(1. 大冶有色金属有限责任公司铜绿山铜铁矿; 2. 北京科技大学土木与资源工程学院;
3. 北京科技大学金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室)

摘要:铜绿山尾矿库已实施闭库工作,为保证其闭库后的长期安全与稳定,结合铜绿山铜铁矿尾矿库现状,开展了基于GNSS的铜绿山尾矿库在线监测系统设计与应用。介绍了铜绿山尾矿库在线监测系统的总体架构,确定了GNSS监测站的结构、监测点的布设、设备的选型与安装,以及基于SOA架构的尾矿库在线监测信息管理系统。分析了铜绿山尾矿库形变及产生原因,提出了铜绿山尾矿库需要重点监测的风险点位。该系统的应用有效提高了铜绿山尾矿库的管理水平,减少了闭库后长期监测与维护的工作量,为同类矿山提供了借鉴和参考范例。

关键词:尾矿库;在线监测系统;GNSS;铜绿山铜铁矿;信息管理;智能化

中图分类号:TD76

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2025)07-0036-06

doi:10.11792/hj20250705

引 言

矿业是国民经济发展的基础产业,矿产资源为工业发展提供了不可或缺的原料和能源支撑^[1-2]。但是,在矿产资源开发过程中,高价值部分被利用,低价值或当前技术无法处理的尾矿大量堆存于尾矿库^[3-4]。目前,登记在册的尾矿库已有8 000余座^[5]。这些尾矿库占用大量土地,且由于常年堆放,重金属离子易渗入地下造成水污染,同时尾矿库存在溃坝风险,是矿山的重大风险源之一^[6-8]。

自2005年以来,国内尾矿库溃坝重特大事故已发生近20起^[9],给人民群众生命财产安全和生态环境带来了重大的影响。近年来,尾矿库安全管理工作日益加强,《尾矿库安全监督管理规定》^[10]、GB 39496—2020《尾矿库安全规程》^[11]、GB 51108—2015《尾矿库在线安全监测系统工程技术规范》^[12]等对尾矿库安全问题进行了严格规范^[13]。

随着现代电子、信息、通信和计算机技术的应用,全球卫星导航系统(GNSS)监测技术凭借实时、自动、连续监测的优点^[14],成为解决传统尾矿库依赖人工定期检查和手动数据采集,存在时效性差、监测精度低、易受环境干扰等问题的关键技术^[15-18]。基于GNSS的变形监测系统能够及时将尾矿库的运行状态和仪器设备状态展现给监管人员和工作人员,提高尾矿库的可管理性和安全性,实现坝体安全状态的可视化预

警,有效防止尾矿库事故的发生,保障尾矿库安全稳定运行^[19-20]。本文针对大冶有色金属有限责任公司铜绿山铜铁矿尾矿库(下称“铜绿山尾矿库”)在线监测系统的设计及实施应用进行研究,以为同类矿山提供参考。

1 铜绿山尾矿库概况

铜绿山尾矿库位于大冶有色金属有限责任公司铜绿山铜铁矿选矿厂东北0.7 km处的大冶湖边,为四面围坝建成的平地型尾矿库^[21],地理位置如图1所示。库区属亚热带气候,区内降水多集中在春夏两季,占全年降水总量的37%~59.4%,多年平均降水量为1 382.6 mm,最长连续降水天数为20 d,抗震设防烈度为6度,设计基本地震加速度值为0.05g,设计地震分组为第一组^[22]。铜绿山尾矿库形似椭圆,长轴约1.0 km,短轴约0.7 km,库区面积约0.6 km²,初始设计为均质土坝,坝顶标高21.0 m,坝高7.0 m。尾矿库历经四期加高扩容,子坝采用碾压土石筑坝,设计最终堆积标高为42.0 m,总坝高为28.0 m,总库容约1 578.03万m³,属四等库。铜绿山尾矿库于2017年发生溃坝事故^[23-24],当时尾矿库四期子坝第二阶段尾砂膜袋法加高子坝正在施工,事故后加高工程停止。因此,尾矿库的实际使用坝顶标高37.0 m,总坝高23.0 m。目前,该尾矿库不具备正常排放尾矿的条件,已实施闭库管理^[25]。

收稿日期:2025-01-01;修回日期:2025-02-23

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(FRF-BD-25-054);中国有色集团“揭榜挂帅”项目(2022JBGS01)

作者简介:熊国雄(1979—),男,高级工程师,从事采矿技术研究工作;E-mail:670118709@qq.com

*通信作者:王 勇(1985—),男,教授,博士,研究方向为金属矿膏体充填绿色开采;E-mail:wangyong8551@126.com



图 1 铜绿山尾矿库地理位置
Fig. 1 Geographic location of the Tonglushan tailings pond

2 铜绿山尾矿库在线监测系统设计

2.1 在线监测系统原理

基于 GNSS 的在线监测系统采用 GNSS 自动化监测技术对地表形变进行实时自动化监测,其工作原理为:各 GNSS 监测点与参考点接收机实时接收 GNSS 信号,并通过数据通信网络实时发送到控制中心,控制中心服务器 GNSS 数据处理软件实时差分计算各监测点三维坐标,数据分析软件获取各监测点实时三维坐标,并与初始坐标进行对比而获得该监测点变化量。同时,数据分析软件根据设定的预警值而进行报警^[26-27]。

2.2 在线监测系统架构

基于 GNSS 的在线监测系统由数据采集系统、数据传输系统、GNSS 解算系统、数据服务平台组成。铜绿山尾矿库在线监测系统拓扑图如图 2 所示。

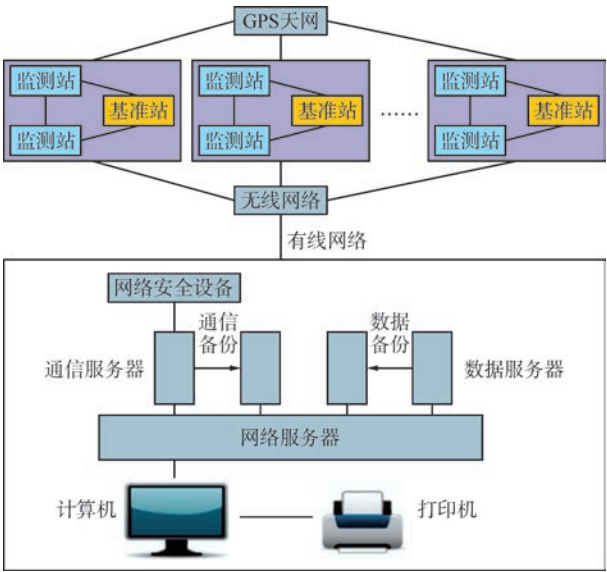


图 2 铜绿山尾矿库在线监测系统拓扑图
Fig. 2 Topology of the online monitoring system for the Tonglushan tailings pond

1)数据采集系统。数据采集系统由 REMOS-GNSS01 测量型接收机、供电系统、安装防护系统组成。其中,REMOS-GNSS01 测量型接收机采用高精度测量型 GNSS 接收模块,融合了自主开发的信噪过滤处理程序,确保获得高质量原始数据。

2)数据传输系统。数据传输系统采用 GPRS 无线传输技术,通过独有的通信协议实现了大数据量实时传出和断线补传功能,确保了数据完整性。

3)GNSS 解算系统。采用自主知识产权的数据解算系统,实现了高精度连续实时解算。

4)数据服务平台。现场设备的远程配置、调试、故障排查、升级等操作全部集成于数据管理系统,实现真正的集成化与智能化。

2.3 在线监测系统布设及安装

2.3.1 系统布设

基准点是变形监测的基准,基准点设在监测区变形影响范围外,通视条件良好并便于保存的稳定位置。观测点位布设在变形特征位置上,安装如图 3 所示。观测点包括水平位移观测点和垂直位移观测点,原则上二者采用同一监测标志。铜绿山尾矿库在线监测系统建设 8 套监测站,其中,5 套为位移监测站。监测站分布于基准站周围(3 km 内),以基准站为核心,通过实时数据对比监测作业区地表形变。同一项目每次观测时,要求固定观测人员,且使用同一监测仪器和设备,采用相同的观测路线和观测方法。

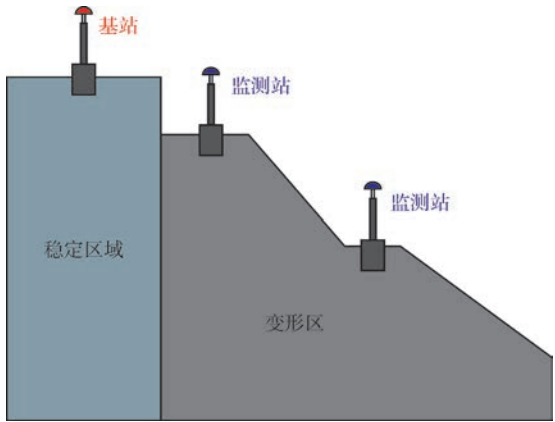


图 3 铜绿山尾矿库在线监测站示意图
Fig. 3 Schematic diagram of the online monitoring station at the Tonglushan tailings pond

2.3.2 设备选型及安装

GNSS 监测终端机选用 REMOS-GNSS01 型,测量精度达到毫米级。一体化站杆由金属支架、金属预埋件组成,可外置 GNSS 天线、GPRS 天线,内置测量型接收机、智能电源控制器、蓄电池等设备。根据施工现场选用太阳能和蓄电池 2 种供电方式,由太阳能控制

器对太阳能电池板和蓄电池进行控制,实现充放电控制和电路保护,可满足设备连续观测和不间断数据采集。具体设备配置如表1所示。

表1 铜绿山尾矿库在线监测系统设备配置

Table 1 Equipment configuration of the online monitoring system for the Tonglushan tailings pond

序号	名称	型号配置
1	GNSS监测终端机	REMOS-GNSS01
2	太阳能电池板	单晶硅SFPVM 100W
3	蓄电池	65Ah
4	金属支架	定制
5	天线保护罩	监测专用玻璃钢(纤维)保护罩
6	GNSS天线	外置
7	GPRS天线	外置
8	智能电源控制器	SML20A
9	一体化支架	高度3 m(可定制),乳白色

GNSS设备箱一体站杆需要安装在基墩上,RTS监测点采用基岩型基墩,基准站采用屋顶型基墩。基墩完成后,进行设备安装,先将太阳能板固定在站杆上,引出电源线并并做好标记;将站杆固定在基墩上,太阳能电池板倾斜面朝正南方,经掩埋的管道连接到GNSS站杆上并连接太阳能控制器,之后将蓄电池放入站杆上并连接到太阳能控制器,连接所使用导线的截面积不小于1.5 mm²。将SIM卡装入设备,连接好GPRS天线、GNSS天线并接通电源。安装完成后,罩

上天线罩,用防盗螺丝固定。监测站实物如图4所示。



图4 铜绿山尾矿库在线监测站

Fig. 4 Online monitoring station at the Tonglushan tailings pond

3 铜绿山尾矿库在线监测信息管理

3.1 信息化平台整体架构

形变监测系统服务平台以各类地质灾害监测数据、基础数据信息为基础,以监测设备管理、数据查询与分析、监测预警为核心,利用数据库技术、WebGIS、Net技术构建了一套完整的管理、分析、预警系统。系统采用SOA架构实现业务集成,而系统实现采用面向对象与组件开发相结合的软件设计方法。依照SOA架构设计原则,确定信息化平台整体框架,如图5所示。

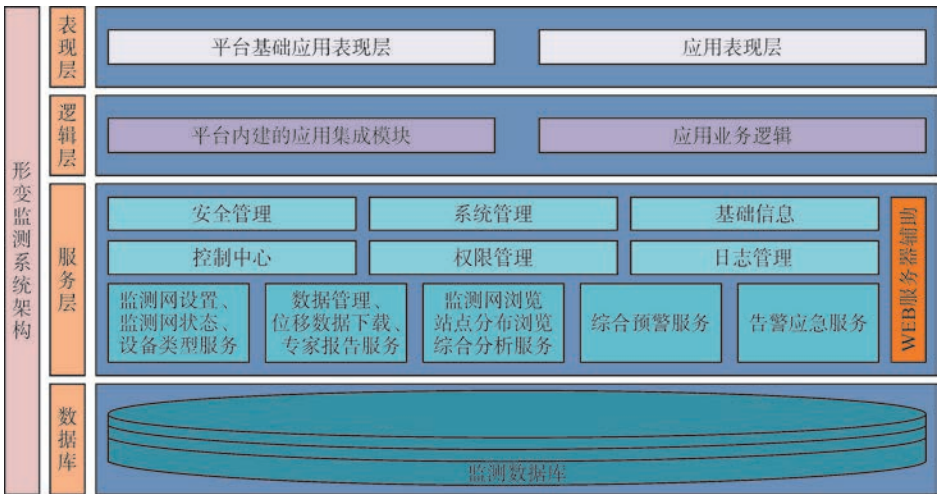


图5 铜绿山尾矿库信息化平台整体框架

Fig. 5 General information platform framework of the Tonglushan tailings pond

3.2 服务平台的组成和功能

系统服务平台包含七大模块,分别为地图服务模块、设备管理模块、数据查询与分析模块、专家报告模

块、预警管理模块、权限管理模块和系统管理模块。平台界面如图6所示。

1)地图服务模块。地图服务模块利用天地图中



图6 铜绿山尾矿库在线监测系统服务平台

Fig. 6 Service platform of the online monitoring system for the Tonglushan tailings pond

提供的地图服务,可以直观、快捷显示各个监测网的分布情况,同时可以利用图标控件直接进行数据查询与分析。

2)设备管理模块。设备管理模块主要是对监测网、监测站点的管理,可以进行监测网及监测站点的创建、删除、修改,实时查看监测站点的工作状态(正常为绿色,异常为红色)、设备状态、设置信息、站点分布及监测站点与数据中心连接记录等。

3)数据查询与分析模块。数据查询与分析模块可以实现对不同类型设备的数据查询、多种因素的综合分析,以及监测原始数据、监测结果数据的下载。

4)专家报告模块。专家报告模块具有提供专家对监测综合数据分析后形成分析报告的上传与下载功能。

5)预警管理模块。预警管理模块分为报警类别子模块、报警设置子模块、报警查看子模块。报警类别子模块可以实现对报警类型进行划分;报警设置子模块可以实现不同因素预警阈值、预警等级的分级设置,不同报警方式设置及报警联系人设置;报警查看子模块可以根据不同搜索条件搜索出对应的报警信

息。

6)权限管理模块。权限管理模块包括菜单管理、角色管理和用户管理。菜单管理是整个权限管理模块中最基础的数据,是权限控制的对象。管理员可以动态管理系统中所有的菜单项目,设置菜单所指向的URL链接。角色管理可以实现不同角色设置不同的菜单访问权限。用户管理可以实现用户创建、角色选择、页面权限、监测网权限的不同设定。

7)系统管理模块。系统管理模块主要具有用户维护管理和用户权限管理及相关配置的功能。该管理模块涉及整个系统运行安全,因此只有系统管理员且深刻了解系统底层运行原理的人可以使用,普通用户只能看到系统日志。

4 铜绿山尾矿库在线监测系统应用

通过对铜绿山尾矿库在线监测系统进行数据查询,获得了铜绿山尾矿库自2024年6月以来的降雨量及各个基站的形变数据。数据由系统自动记录保存并生成趋势图,降雨量及各个基站位移如图7所示。

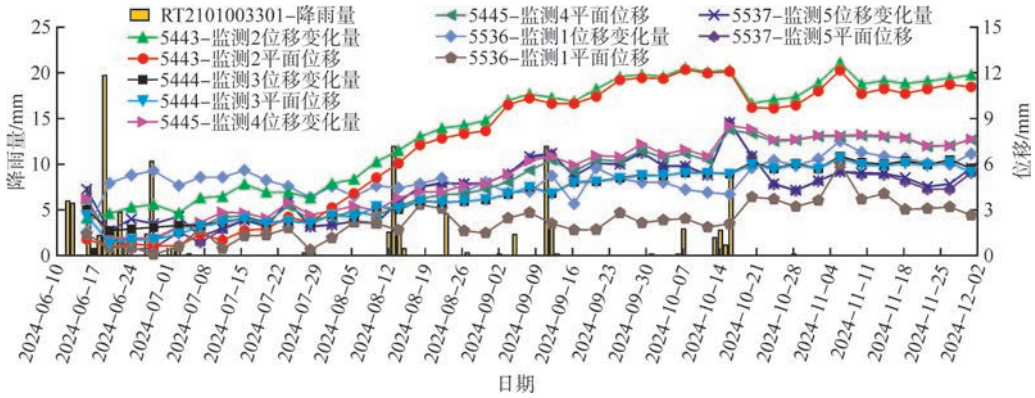


图7 铜绿山尾矿库在线监测历史数据

Fig. 7 Historical data from the online monitoring system for the Tonglushan tailings pond

由图7可知:铜绿山尾矿库降雨集中在6月,且降雨量较大,需要及时对尾矿坝进行巡视监测。铜绿山尾矿库坝体大部分位移较小,安全风险较低。初始阶段大部分基站位移量减小,这可能是由于安装设备后地基逐渐沉降至稳定;各个监测点中,5443-监测2位移变化量最大,达到10 mm,但仍在安全范围内。所有监测点位移均有所增加,但都在安全范围内且趋于稳定,说明铜绿山尾矿库目前较安全。5537-监测5、5445-监测4等2个监测点位移受降雨影响较大;5445-监测4在降雨时位移变化量增大,降雨结束后位移恢复,原因可能是水浸泡造成基站地基土壤膨胀;5537-监测5每次降雨及降雨结束后,位移变化量不断增加,原因可能是降雨导致尾矿坝塑性变形,在雨季需要重点监测;5443-监测2位移变化量最大,需要对其进行日常重点监测;所有监测点10月后已趋于稳定,位移变化量在安全范围内。

5 结 语

结合铜绿山尾矿库实际,介绍了铜绿山尾矿库基于GNSS的尾矿库在线监测系统的整体方案,包括监测站的结构、监测原理、监测点的布设、设备的选型和安装及基于SOA架构的尾矿库在线监测信息管理系统。该系统已投入运行,实现了监测数据的自动采集、传输和分析处理,一旦监控参数超限,能够及时诊断并报警。此外,依据在线监测系统历史数据,分析了各个监测点的形变及原因,对不同风险监测点提出了不同的监测重点。该系统的应用大幅提升了铜绿山尾矿库安全监管水平,降低了尾矿库管理人员的劳动强度,保证铜绿山尾矿库闭库后的长期稳定和安全,为同类矿山尾矿库监管起到了良好的示范作用。未来需进一步优化监测系统,将尾矿库监测系统融入大冶有色金属有限责任公司铜绿山铜铁矿智能控制平台,实现矿山的全面智能管控。

【参 考 文 献】

- [1] 吴爱祥,张晋军,王贻明,等.膏体充填:金属矿绿色开采的变革性技术[J].中国有色金属学报,2024,34(5):1 652-1 666.
- [2] 石教华,毕成,吴爱祥,等.自动化数字矿山膏体充填系统升级改造及应用[J].黄金,2024,45(8):33-39,45.
- [3] 肖柏林,王建栋,阮竹恩,等.金属矿绿色高效膏体充填胶凝材料研究与应用进展[J].有色金属(矿山部分),2024,76(5):1-13.
- [4] 杨宏珺.烂坝山尾矿库的库区变化监测与稳定性分析[D].绵阳:西南科技大学,2024.
- [5] 高学达.尾矿库溃坝风险分析与安全监测技术研究[J].世界有色金属,2024(13):127-129.
- [6] 束永保,李仲学.尾矿库溃坝灾害事故树分析[J].黄金,2010,31(6):54-56.
- [7] HU S T, XIONG X H, LI X, et al. Spatial distribution characteristics, risk assessment and management strategies of tailings ponds in China[J]. The Science of the Total Environment, 2024, 912: 169069.
- [8] SHI B W, LI X X, HU W W, et al. Environmental risk of tailings pond leachate pollution: Traceable strategy for leakage channel and influence range of leachate[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 331: 117341.
- [9] 周杰,曾晟,孙冰.尾矿坝溃坝原因及安全稳定性分析[J].黄金,2018,39(10):73-77,82.
- [10] 尾矿库安全监督管理规定[J].司法业务文选,2011(23):35-42.
- [11] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.尾矿库安全规程:GB 39496—2020[S].北京:中国标准出版社,2020.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.尾矿库在线安全监测系统工程技术规范:GB 51108—2015[S].北京:中国计划出版社,2015.
- [13] 吴双仪,王涛,周斌.关于新形势下加强非煤矿山安全生产工作的实践与思考[J].湖北应急管理,2025(8):44-49.
- [14] 李东良.GNSS-RTK测量技术在尾矿库人工位移监测中的应用[J].现代矿业,2025,41(1):240-242.
- [15] 谢文龙,沈楼燕,李连通,等.一种基于GNSS技术的尾矿库巡检人员定位系统[J].有色冶金设计与研究,2023,44(3):31-33,47.
- [16] 王伟,张伟东,石善福.基于GNSS的尾矿库在线监测系统研究与应用[J].测绘与空间地理信息,2023,46(6):102,105.
- [17] 李翔,陈征,李宏,等.GNSS与多传感器集成的尾矿库监测系统设计[J].电子技术应用,2024,50(7):97-102.
- [18] 刘优平,黎剑华.尾矿坝变形光纤光栅监测技术研究[J].黄金,2015,36(1):60-66.
- [19] 常蓉,马海艺.遥感技术在尾矿库环境监测中的应用探析[J].中国环境监测,2024,40(5):224-233.
- [20] 何皓燃.尾矿库在线监测与安全管理研究与应用[J].世界有色金属,2022(21):28-30.
- [21] 黄建刚,胡光洲.大冶市非煤矿山尾矿库尾砂综合利用研究[J].现代矿业,2023,39(11):1-3,13.
- [22] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.中国地震动参数区划图:GB 18306—2015[S].北京:中国标准出版社,2015.
- [23] 郑昭炆,罗磊,刘宁,等.湖北大冶铜绿山铜铁矿尾矿库溃坝动力特性分析[J].金属矿山,2017(12):136-141.
- [24] 郑昭炆.铜铁尾矿库尾砂流变特性与溃坝动力特性研究[D].上海:上海交通大学,2018.
- [25] 李红利.铜绿山铜铁矿地质环境恢复治理实践[J].现代矿业,2021,37(8):236-238.
- [26] 王立勇,贾然,陈涛.现代传感器原理与应用[M].北京:化学工业出版社,2023.

[27] 张金浩.GNSS 自动化监测应用场景及前景[J].现代传输,2025

(2):61-64.

Design and application of the online monitoring system for the Tonglushan tailings pond

Xiong Guoxiong¹, Wang Huan¹, Bi Cheng^{2,3}, Wang Yong^{2,3}

(1. *Tonglushan Copper-Iron Mine, Daye Nonferrous Metals Co., Ltd.*;

2. *School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing*;

3. *Key Laboratory of Ministry of Education for Efficient Mining and Safety of Metal Mine*)

Abstract: The tailings pond at the Tonglushan Copper-Iron Mine has already been decommissioned. To ensure its long-term safety and stability after closure, an online monitoring system based on GNSS technology was developed, tailored to the current conditions of the facility. This paper presents the overall architecture of the monitoring system, including the design of GNSS monitoring stations, layout of monitoring points, equipment selection and installation, and the development of an online monitoring information management system based on SOA. The system enables deformation analysis of the tailings pond and investigates the causes of deformation. Key risk points requiring focused monitoring are identified. Application of the system has significantly improved the management level of the Tonglushan tailings pond, reduced the long-term post-closure monitoring and maintenance workload, and provided a valuable reference for similar mines.

Keywords: tailings pond; online monitoring system; GNSS; Tonglushan Copper-Iron Mine; information management; intelligentization

(上接第 35 页)

Research on underground personnel unsafe behavior recognition based on YOLOv11

Jiang Dongsheng^{1,2}, Zhu Quanjie^{1,2}, Hao Yingnan^{1,2}, Chen Yuxiang^{1,2}

(1. *School of Emergency Technology and Management, North China Institute of Science and Technology*;

2. *School of Culture and Communication, Institute of Disaster Prevention*)

Abstract: The underground working environment is complex and full of safety hazards, while traditional supervision methods are limited and incapable of providing comprehensive real-time monitoring. Therefore, research on recognizing unsafe behaviors of underground personnel using machine learning has become increasingly urgent. This study proposes a recognition method and model for underground personnel's unsafe behaviors based on YOLOv11. Unsafe behaviors are categorized into 3 types: protective equipment-related, hazardous area-related, and dangerous behavior-related. A dataset was constructed according to these categories. The Albumentations was used for data augmentation, simulating underground environmental variations by adjusting lighting conditions, adding noise, and more, to enhance model generalization and robustness. Finally, a semi-automatic labeling method was adopted for data annotation, and the model was trained. The results show that the model, after data augmentation with Albumentations and using semi-automatic labeling, achieved good performance without requiring extensive manual annotation.

Keywords: YOLOv11; unsafe behavior; behavior recognition; data augmentation; Albumentations; semi-automatic annotation