基于北斗的铀尾矿库综合监控平台设计

赵 发[1],刘玉生[2],沈立华[2],曹鹏飞[2],宋伶才[2],陈文都[1]

(1.中核二七二铀业有限责任公司,湖南 衡阳 421004;
2.核工业计算机应用研究所,北京 100090)

摘要:针对铀尾矿库退役治理中的安全监测需求,以某铀尾矿库第一拦水坝为试点,通过在铀尾矿库坝体表面、铀尾矿库库区等关键点位部署北斗位移监测终端和各类传感器,实现对尾矿库的实时监测和表面形变趋势、坝体沉降趋势、库区水位变化趋势等的预测预警,提前预测坝体的稳定性,掌握坝体的安全情况。在智能监控和防范体系指导下开发的基于北斗系统(BDS)的综合监测平台,为该铀尾矿库退役治理提供了先进技术手段,变被动"监督"为主动"监控"。研究结果可为其他铀尾矿库的安全监测和智能防范提供参考。

关键词:铀尾矿库;安全监测;传感器;北斗系统

中图分类号:U213 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-8063(2023)02-0076-07

DOI:10.13426/j.cnki.yky.2022.10.11

随着铀矿冶工业的发展,美国、法国、加拿大等主要产铀国,在经历了不同程度的铀矿冶废物扩散、尾矿库安全事故后,从 20 世纪 70 年代开始高度重视铀矿冶废物的处理[1]。铀尾矿库是贮存铀尾矿的专用设施,其安全性已成为制约核工业安全发展的瓶颈,直接关系到周围环境的质量状况和附近居民的安全健康。自 20 世纪 90 年代以来,由于生产计划调整或服务期满等原因,中国决定关停或部分关停的多个铀矿山和水冶厂陆续进入退役治理程序,开展退役环境治理工作[2]。做好尾矿库的监测和预警,特别是坝体变形的监测和预警,对于有效减少直接经济损失和人员伤亡非常重要。

尾矿库一般选择在远离人民生活区或采矿区建设,企业通常通过全站仪(人工定期)或沉降仪等监测设备对尾矿库沉降进行监测。由于铀尾矿库一般远离采矿区,且库区中存储的尾矿具有一定放射性,企业除关注尾矿库沉降外,还需要专业人员定期对坝体浸润线等关键位置进行人工测量。人工测量受天气变化、降雨量、监测点位、周围电磁环境等制约较大,存在监测数据误差大、数据更新不及时、库位内部形变无法测量、人工监测数据的采集及处理结果安全性无法保障等问题。笔者采用 GNSS RTK(Real-time kinematic,实时动态)载波相位差分测量技术[3],结合雨量、内部位移、浸润线等多种传感器设备进行数据自动采集,利用无线加密传输技术,以期实现铀尾矿坝体、库区安全的实时监测。

1 项目概况

某铀尾矿库位于湖南省衡阳市,距江边最短距离约 3 km,距市区直线距离约 10 km。该铀尾矿库为"平地型"尾矿库,由 9 个坝段与 3 个丘陵山头围拦而成,占地面积约为 170 万 m^2[4],库内滩面面积 1.36 km^2,是铀矿冶系统最大的尾矿库,被国家列入环保安全应急管理重点尾矿库。

1994 年,该企业铀水冶线停产,尾矿库随之退役,由于地形条件的变化与初期建设选址距离居民生活区及江边较近,存在较大安全隐患[5]。

1.1 坝体情况

某铀尾矿库全库容量 $1\times10^7\sim1\times10^8$ m^3,坝高 60~100 m,地理位置见图 1。按全库容量和坝高考虑,该尾矿库属于二等库[6];但根据铀尾矿构筑物的等级、重要性及位置,该铀尾矿库应按一等库管理。

收稿日期:2022-10-31

第一作者简介:赵发(1982—),男,云南广南人,学士,高级工程师,主要从事环境工程、核三废退役治理、安全环保等工作。
通信作者简介:陈文都(1995—),男,湖南邵阳人,学士,助理工程师,主要从事建筑工程、核三废退役治理等工作。

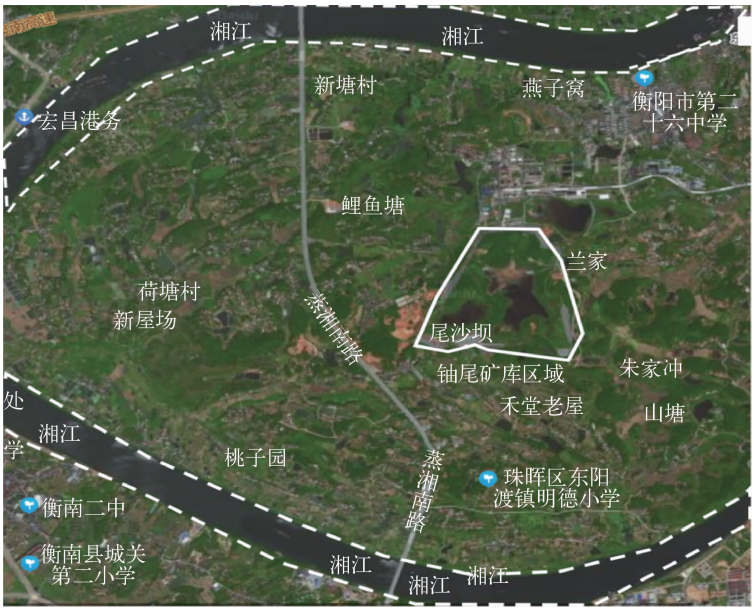


图 1　某铀尾矿库位置示意

Fig. 1　Location of the uranium tailings pond

1.2　监测现状

以人工巡检的方式对尾矿库的坝体表面情况进行检查，每季度组织专业人员利用全站仪及水尺对表面位移沉降及浸润线水位进行监测。目前监测时间跨度大，无法满足对铀尾矿库各项数据的实时监测。

2　监测方案

一等尾矿坝应监测表面位移、内部位移、外坡比、浸润线、干滩长度与坡度、视频；库区应监测库水位、降水量及视频[7]。

2.1　监测设备配置

因铀尾矿库已停产，坝体停止堆积、外坡比和干滩相关参数不必监测；尾矿库渗流依托建成的渗漏回水系统已能满足日常使用，水质采样分析不在本次研究范围内，遵循“适用性、先进性和经济性”的原则进行监测设备选型(表 1)。

2.2　监测设备布设

根据尾矿库第一拦水坝现场实际环境，按照《尾矿库在线安全监测系统工程技术规范》(GB 51108—2015)要求，对监测设备进行布设：1)厂区调度楼楼顶布设 1 个 GNSS 基准站，与尾矿坝直线距离不足 3 km，满足各监测点高精度基线解算的要求；2)第一拦水坝坝顶布设 3 个表面位移监测点、3 个浸润线监测点、2 个内部位移监测点和 1 台摄像机；3)第一拦水坝环坝公路与排水渠间坡面布设 2 个表面位移监测点、2 个浸润线监测点、2 个内部位移监测点；4)第一拦水坝排水沟平面布设 2 个表面位移监测点、2 个浸润线监测点；5)尾矿库库区布设 2 个水位监测点、1 个雨量监测点；6)泵房布设 1 台摄像机。

库区监测设备通过太阳能供电并部署加密网关，坝体监测设备利用市电统一供电，通过光纤将采集到的信息实时汇集于控制箱，按照约定的统一格式将信息回传至核工业计算机应用研究所。

表 1　某铀尾矿库监测设备配置

Table 1　Monitoring device of the uranium tailings pond

序号	应用场景	类型	设备	数量
1	表面位移	GNSS 基准站	GNSS 主机	1 套
		GNSS 监测站	GNSS 主机	7 套
2	坝体监测	浸润线监测点	渗压计	7 处
		内部位移监测点	固定式倾斜仪	4 处
3	库区监测	雨量站	雨量计	1 套
		水位监测点	雷达水位计	2 套
4	视频监测	坝体及泵房视频	摄像机	2 套

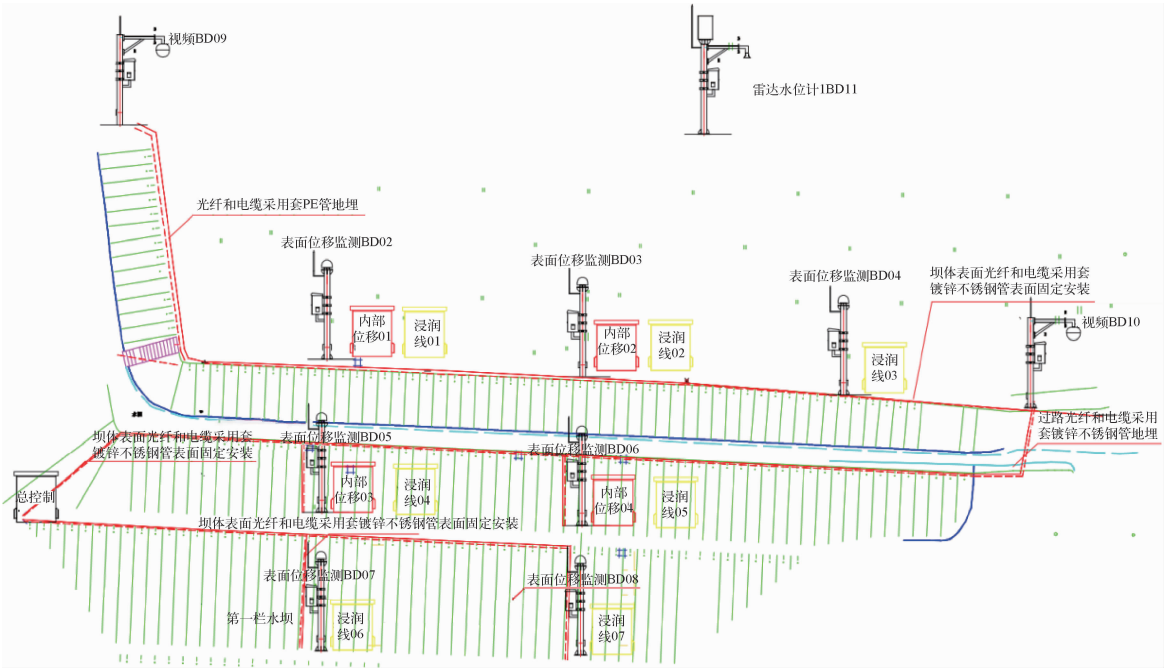


图 2 某铀尾矿库第一拦水坝监控设备布设

Fig. 2 Monitoring device of first retaining dam of the uranium tailings pond

3 综合监测平台设计

综合监测平台依托各监测设备实时获取的尾矿库监测数据，构建监测预警体系，及时发现尾矿坝坝体变化情况，适时发出警示信息，为避险决策和应急处置提供关键性依据。综合监测是尾矿库防灾减灾的重要手段[8]。

3.1 体系架构

以计算、存储、网络、安全等基础设施为支撑，以中核集团北斗服务平台为中枢，接入北斗位移监测站、渗压计、雷达水位计、雨量计等前端设备，获取实时监测数据，向管理部门及业务部门提供全景监测、智能预警和统计分析等应用服务，综合监测平台体系架构见图 3。

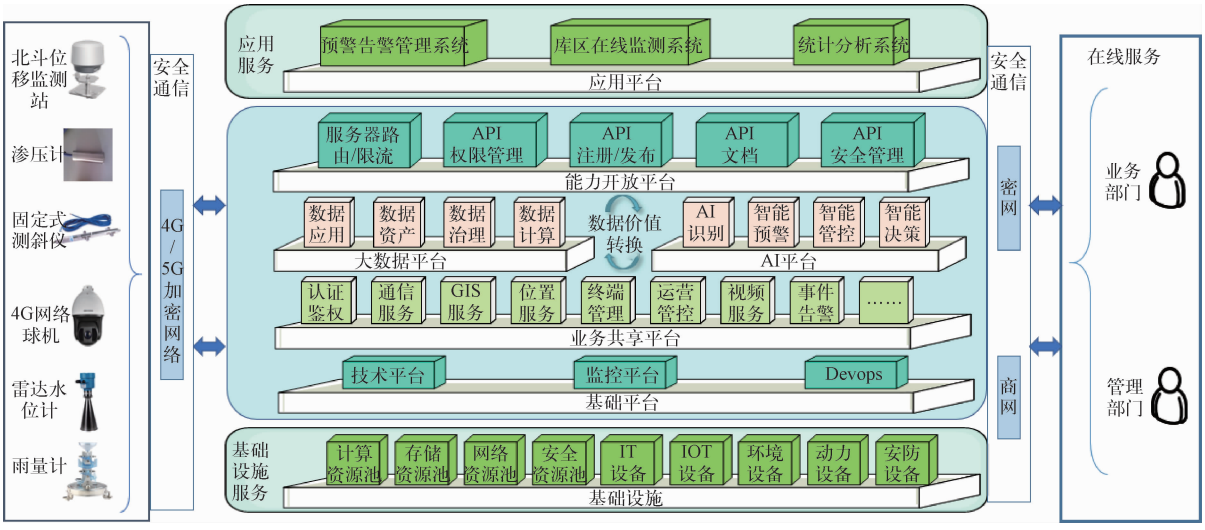


图 3 某铀尾矿库综合监测平台架构

Fig. 3 Framework of comprehensive monitoring platform for the uranium tailings pond

3.2　技术实现

围绕铀尾矿库安全监测的核心需求，结合实际应用场景，遵循软件开发及质量管理相关要求，采用“自上向下”的设计方法和微服务的技术理念，综合监测平台在逻辑上划分为数据层、服务层和展现层。

数据层结合位移监测、雨量监测、库区水位监测、视频监测、浸润线监测、内部位移和系统运行日志等数据的特点，采用关系型数据库进行分类存储，提升大量数据的查询性能和统计分析性能。系统运行日志数据采用文件系统按照时间进行分类文件存储。对于基础数据的访问，Web 端通过封装的统一数据访问引擎实现。

服务层综合采用多种技术手段对外提供支撑服务接口，有效支撑子系统的运行。对外部的数据引接开发消息调度总线。消息推送服务主要实现消息推送、数据管理、位置监控相关功能，将接收到的消息立即转发至客户端。引接的数据及查询、表现的数据接入 Redis 统一的 Web 访问缓存，数据访问服务和 Web 前端可快速访问 Redis 缓存，保障消息引接效率和 Web 访问性能。常规业务采用更稳健、通用的技术架构和 Tomcat 中间件实现。所有服务最终以微服务的形态进行集成，并通过 NGINX 进行发布，供前端应用。

展现层采用最新的 JavaScript、HTML5、WebGL 技术实现在线监测、智能预警的高性能显示，同时采用 ECharts 将监控信息和指标以直观、美观的方式进行表现。综合监控平台总体采用 B/S(Browser/Server)架构。

3.3　安全接入

遵循国家《信息安全等级保护管理办法》[9] 和《信息系统安全等级保护实施指南》[10] 进行分级分域管理，受限域与公共域不直接相连，通过过渡域隔离；业务终端与业务服务器间通过受限域的防火墙进行访问控制，不同等级网络之间通过单向传输设备进行通信，建立安全的访问路径。

综合监测平台依托商网运行，在商网已有的安全策略基础上，根据数据远程安全传输的需要，基于 4G/5G 移动网络、异构通信网络等多种通信方式，结合商用密码技术和安全防护理念，构建保障数据远程传输的移动安全监测系统，通过在数据汇聚端进行加密，在接入区域配备加解密、认证、鉴权等设备，实现终端设备安全接入、网络通信安全可靠、业务信息安全传输的功能，确保整个系统的安全保密(图 4)。

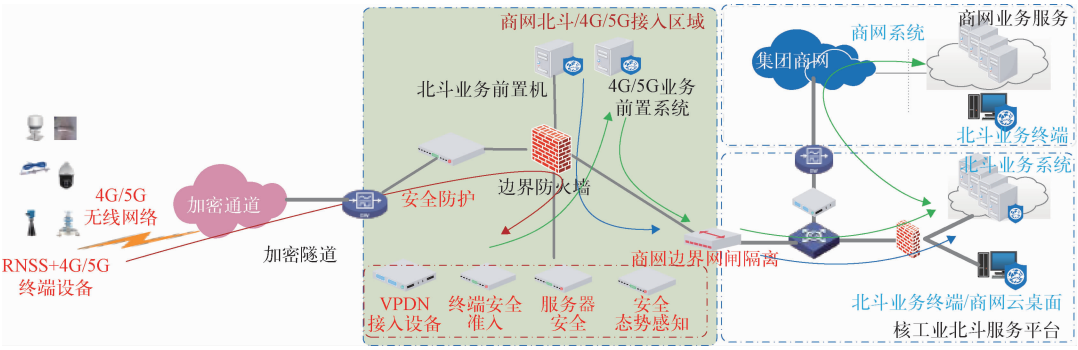


图 4　安全接入

Fig. 4　Secure access

3.4　平台部署

根据总体架构，综合监控平台分为监控终端区、通信网络区、安全接入区、北斗服务平台和系统用户等 5 个逻辑区域。

监控终端区设置用于监控坝体及库区安全使用的前端感知终端设备，所有监控终端通过有线或短距离无线方式进行数据汇聚，汇聚设备加装硬件加密模块及安全加密组件，允许接入北斗服务平台，确保监控终端的保密性、封闭性和可控性。

通信网络区包括北斗短报文和运营商 4G/5G 移动通信网络，为了防止受到非法接入和攻击，移动通信网络采用 APN/VPDN 接入方式，确

保通信网络的安全性。

安全接入区监控终端通过移动通信网络接入，采用多层综合防护技术确保接入安全。第 1 道安全防线基于 VPDN 技术，实现用户认证、设备认证、信道保护、接入控制等；第 2 道安全防线基于 IPSec 技术，实现监控终端与 IPSecVPN 安全网关之间的网络层加密；最后的安全防线是按照等级保护三级要求，部署必要的边界防护设备。另外，通过异构网络接入时，部署接入认证网关和边界防护设备，实现异构网络的安全接入。

北斗服务平台运行在商网，包含综合管理域、应用服务域和互通隔离域。综合管理域部署了移动设备管控服务器、移动应用发布服务器和密钥管理系统，实现入网鉴权认证、设备在线管控和应用安全管理等功能；应用服务域部署尾矿库综合监测服务器和其他通用业务服务器，满足业务应用平滑扩展需求；互通隔离域部署了应用前置、双向隔离网闸和应用后置，实现与商网内部应用的互联互通。

系统用户主要包括企业管理部门、业务部门，经统一认证授权后均可通过商网获取部署在北斗服务平台上的尾矿库综合监测平台，远程获取登录、在线监测、数据下载等权限。综合监控平台总体部署网络拓扑结构见图 5。

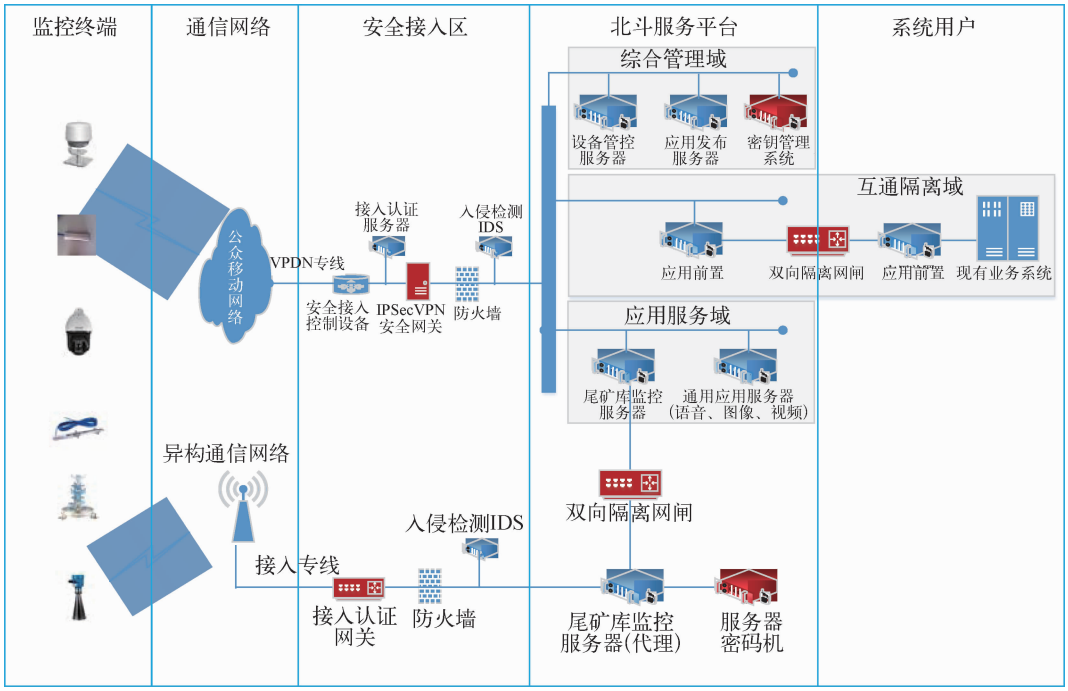


图 5 综合监控平台网络拓扑结构

Fig. 5 Network topology of the comprehensive monitoring platform

4 功能实现

综合监测平台实时处理监测数据，主要实现全景监测、预警管理、统计报表和系统管理功能，并进行界面友好的可视化展示。

4.1 全景监测

显示当前登录用户管理的所有监测点的信息，包括地图位置信息、隐患点和预警统计分类、地图类型切换等功能（图 6）。在设备区域可浏览相关设备图片、实时数据、在线情况等，通过筛选功能可选择需查看的监测设备，并展示所选设备的实时监测数据、当天最新监测数据曲线、数据表格、监测点信息、状态、预警等信息。

4.2 预警管理

针对不同监测点位的地理位置特点和安全监测规范要求，对各设备的预警阈值进行配置。实时反馈各类监测数据对预警阈值的反馈，在监测数据触发预警阈值后对预警信息进行记录。预警管理提供多种查询处理方法，并根据预警信息向用户提供处理建议。



图 6　全景监测功能界面

Fig. 6　Panoramic monitoring function interface

4.3　统计报表

根据所选的设备及时间区间、数据查询类型，将监测数据以统计报表、统计图表、统计月报等形式展示，同时提供各类监测数据报表下载功能，用户可以按月下载，便于对尾矿库稳定性进行深入分析。

4.4　系统管理

系统管理主要实现用户添加、删除、禁用、启用，以及角色配置、隐患点配置等功能，实现对登录平台用户权限的设置；同时提供对新增设备的同步，实现新增监测点位、新增传感器数据接入及配置功能。

5　工程应用

铀尾矿库综合监控平台是中核集团承担的系列北斗三号示范项目之一，是“核＋北斗”融合发展的成果。目前，尾矿库综合监控平台已经正常部署，稳定运行 1 年有余。项目融合处理多种监测传感器的数据，实现了该铀尾矿库的实时综合监测和监测数据在专用无线加密网络通道中的安全传输。

6　结论

某铀尾矿库综合监控平台充分发挥北斗信息服务平台的优势，利用北斗信息服务及各类传感器相结合的自动化监测手段，提升了铀尾矿库的监测效果；利用专用无线加密通道进行数据传输，解决了数据不出行业的安全需求；为更好地运用北斗＋云平台、大数据、物联感知等信息技术，推动北斗技术深度应用积累了宝贵的工程经验。

参考文献：

[1]　潘英杰，徐乐昌，薛建新，等. 国外铀矿冶设施的退役治理[J]. 铀矿冶，2012，31(2)：92-95.

[2]　李向阳，蒋复量，旷梅华，等. “铀尾矿库退役治理技术中心”研究生培养创新基地建设[J]. 湖南科技学院学报，2013，34(12)：149-152.

[3]　国家测绘局. 全球定位系统实时动态(RTK)测量技术规范：CH/T 2009—2010[S]. 北京：测绘出版社，2010.

[4]　谭至宇，赵越，潘凯，等. 某铀尾矿库氡析出率调查研究[J]. 中国辐射卫生，2016，25(6)：654-656.

[5]　核工业二七二研究所. 核工业二七二尾矿库安全整

治项目竣工环境保护验收监测报告表[R]. 衡阳:核工业二七二研究所,1994.

[6] 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. 核工业铀水冶厂尾矿库、尾渣库安全设计规范:GB 50520—2009[S]. 北京:中国计划出版社,2009.

[7] 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.

[8] 郝喆,张亮. 辽宁省尾矿库在线安全监测管理平台设计[J]. 现代矿业,2018(11):151-155+170.

[9] 公安部,国家保密局,国家密码管理局,等. 信息安全等级保护管理办法(公通字〔2007〕43 号)[Z]. 北京:公安部网络安全保卫局,2007.

[10] 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. 信息安全技术信息系统安全等级保护实施指南:GB/T 25058—2010[S]. 北京:中国标准出版社,2010.

Comprehensive Monitoring Platform Design of Uranium Tailings Pond Based on BDS

ZHAO Fa[1], LIU Yusheng[2], SHEN Lihua[2], CAO Pengfei[2], SONG Lingcai[2], CHEN Wendu[1]

(1. No. 272 Uranium Co., Ltd., CNNC, Hengyang 421004, China;
2. Computer Application Institute of Nuclear Industry, Beijing 100090, China)

Abstract: According to the requirements of safety monitoring in the decommissioning of uranium tailings pond, the first dam of a uranium tailings pond is taken as a pilot project. By deploying Beidou displacement monitoring terminals and various sensors at key points such as the surface of uranium tailings dam and the reservoir area, the real-time monitoring of the tailings pond and the prediction and early warning of the trend of surface deformation, the settlement trend of the dam and the variation trend of water level in the reservoir are realized, so as to predict the stability of the dam in advance and master the safety of the dam. Under the guidance of the intelligent monitoring and prevention system, a comprehensive monitoring platform is developed to provide advanced technical means for the decommissioning and management of the uranium tailings pond in the uranium industry, thus transforming passive "supervision" into active "monitoring". The research results can provide reference for safety monitoring and intelligent prevention of other uranium tailings ponds.

Key words: uranium tailings pond; safety monitoring; sensor; Beidou system(BDS)