

中文引用格式:李龙飞,高志良,鲁晨阳.大渡河流域库坝安全监测作业多模式应用实践[J].中国安全科学学报,2024,34(增刊1):239-245.

英文引用格式:LI Longfei, GAO Zhiliang, LU Chenyang. Multi-model application practice of reservoir and dam safety monitoring in Dadu River Basin[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(S1):239-245.

大渡河流域库坝安全监测作业多模式应用实践*

李龙飞,高志良,鲁晨阳

(国能大渡河流域水电开发有限公司库坝管理中心,四川成都614900)

中图分类号:X924.2

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.S1.0004

【摘要】为提升大渡河流域库坝安全监测水平,构建库坝智能监测体系,首先,全面分析传统库坝监测作业的问题和难点,然后,系统阐述大渡河流域库坝管理中心的库坝监测作业创新模式。结果表明:大渡河流域库坝管理中心引入三维变形智能监测、北斗卫星高精度变形监测、无人机航测监测、水下无人潜航器监测、智能巡检及深部测斜智能监测等技术,通过技术创新,构建库坝智能安全管控体系。该体系集成多项监测技术,融合分析多源数据,能够实现库坝运行安全风险智能管控及快速应急响应。

【关键词】大渡河流域; 库坝安全; 智能监测; 智能安全管控体系; 监测模式创新

Multi-model application practice of reservoir and dam safety monitoring in Dadu River Basin

LI Longfei, GAO Zhiliang, LU Chenyang

(Reservoir and Dam Management Center of Guoneng Dadu River Basin Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu Sichuan 614900, China)

Abstract: In order to improve the level of reservoir and dam safety monitoring and build an intelligent monitoring system for reservoirs and dams in Dadu River Basin, the problems and difficulties of traditional reservoir and dam monitoring operations were analyzed, and the innovative monitoring mode of reservoir and dam management center in Dadu River Basin was discussed. The results show that the reservoir and dam management center in Dadu River Basin has introduced intelligent three-dimensional (3D) deformation monitoring, Beidou satellite high-precision deformation monitoring, unmanned aerial vehicle (UAV) monitoring, underwater unmanned vehicle monitoring, intelligent patrol, intelligent deep inclination measurement monitoring, and other technologies and has built an intelligent safety management and control system for the reservoir and dam through technology innovation. The system integrates a number of monitoring technologies, integrates and analyzes multi-source data, and can realize intelligent management and control of operational safety risks and rapid emergency response.

Keywords: Dadu River Basin; reservoir and dam safety; intelligent monitoring; intelligent safety management and control system; innovative monitoring mode

0 引言

中国西南地区水能资源十分丰富,是全国水电开发中心,大渡河流域是水电梯级开发最集中的区域之一,在推动地方经济社会发展方面发挥着重大作用^[1]。大渡河流域地处高山峡谷,其流域内的水电站大多处于地质条件复杂的位置,存在地震等自然灾害,具有高坝大库的特点。国家能源集团大渡河流域水电开发公司承担了大渡河流域全长1 062 km范围内的17个梯级水电站的滚动开发。大渡河流域库坝管理中心作为大渡河公司下属部门,主要负责大渡河流域水电站的大坝安全监测与监控^[2]。

大渡河流域电站的库坝监测作业区域多,覆盖面广,对库坝监测作业的安全性带来巨大挑战,存在野外作业安全风险大、流域作业交通风险大、作业区域分散、未知安全隐患多等问题。传统库坝监测作业采用的设备和系统存在系统功能单一、自动化程度低等问题,大量监测作业主要依靠作业人员在野外工作来完成,同时,监测设备和系统采集的数据发掘不充分,基于监测数据的安全风险评估成效不明显,库坝监测作业无法满足大坝安全管理的需求^[3-4]。基于上述问题,大渡河流域库坝管理中心开展了监测作业创新模式的探索实践,通过引入先进智能监测作业技术,避免人工监测作业风险,以提高监测效率和监测数据的挖掘深度。

1 库坝监测作业问题难点

1.1 监测作业点多面广

目前,大渡河流域库坝管理中心接管铜街子、龚嘴、沙坪二级、枕头坝一级、深溪沟、瀑布沟、大岗山、猴子岩、吉牛共9座水电站的监测与监控,介入沙坪一级、枕头坝二级、金川、双江口共4座水电站的工程安全监测系统建设,大坝安全监测多区域、连续作业的特点日益明显,监测作业点多面广,作业人员分散,未知安全风险辨识可能存在盲区,给监测作业的风险管控带来巨大的挑战。

1.2 监测作业复杂繁多

要确保水电站的建设与运行安全,需要时刻关注其工程性态随时间和环境的动态变化。若要充分掌握其安全性态,首先要获取大量的监测数据。通常水电站安全监测项目包括环境量监测、变形监测、渗流监测、应力应变及温度监测、水力学监测、地震反映监测、水文泥沙淤积测验、水下检测和巡视检查

等。大渡河流域梯级库坝群坝型多样(混凝土重力坝、混凝土双曲拱坝、心墙堆石坝、面板堆石坝等),针对不同坝型监测项目的重点、监测仪器的品牌与类型存在一定的差异。面对如此广泛的监测项目作业,现场需要安装大量监测设备以及投入大量现场工作人员开展监测作业。以大岗山水电站为例,目前,该水电站正常在测测点总数为4 279个,其中,外观变形测点合计399个、渗流渗压测点293个、内观测点3 529个、强震21个、气象3个、静力水准监测点33个。大量的监测测点带来监测作业复杂繁多、监测作业需要大量人工参与、监测数据分析缺乏科学快速的智能分析等问题。

1.3 监测作业环境风险大

大渡河地处青藏高原和四川盆地之间的过渡带,有多个地震断裂带纵横交错,且处于四川汶川、芦山地震震中区,区域地震烈度高,气象水文因素多变,洪水峰高量大,地质灾害频发。大渡河流域库坝传统的监测作业多为人工野外作业,使得作业人员面临很多潜在的环境灾害风险。同时,在超过1 000 km的大渡河流域上高山峡谷众多,道路环境复杂,监测作业出车任务量大,交通安全风险压力骤增,作业风险不断加大。如何有效避免监测作业环境风险,确保现场作业人员安全,提高监测作业效率,这就需要监测作业模式创新,利用高新技术,实现科技兴安,完善智能监测,这是目前库坝监测作业创新模式实践的关注重点。

2 安全监测作业创新模式实践

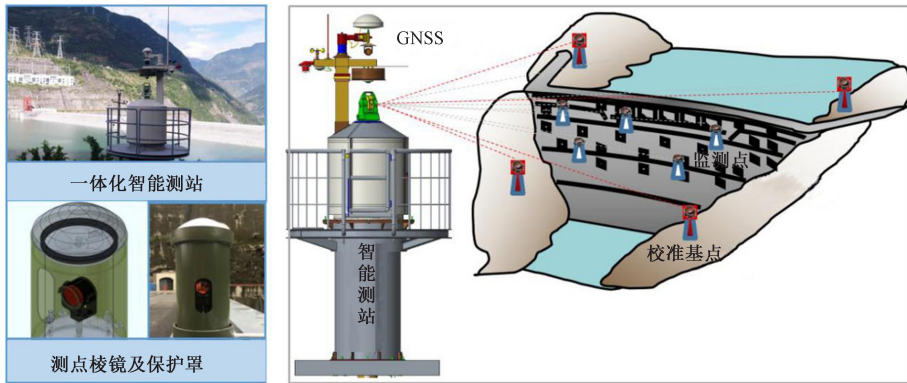
针对流域梯级库坝群监测作业点多面广、复杂繁多、环境风险大等问题,大渡河流域库坝管理中心开展了监测作业创新模式的探索实践,通过引入三维变形智能监测、北斗卫星高精度变形监测、无人机航测监测、水下无人潜航器监测、真空激光准直监测及深部测斜智能监测等技术,并通过技术集成创新,构建了大坝智能安全管控体系,有效解决了库坝监测作业人力成本高、作业风险大及监测数据深度挖掘不充分的问题^[5]。

2.1 三维变形智能监测技术

水电站大坝及边坡表观变形监测具有监测点多、测区范围广等特点,传统测量多依靠人工或半自动手段开展定期测量,存在人力资源投入大、作业风险高、信息反馈慢、工作效率低等问题^[6]。为实现地表三维变形自动化监测,综合考虑技术经济指标,

建设以测量机器人监测为主,卫星定位测量为辅的工程三维变形远程智能监测系统,如图 1 所示。该系统集环境实时感知、设备状态监控、测站智能控

制、设施有效安防于一体,可根据降雨、温度梯度、风速及能见度等环境条件智能选择观测时段,实现大坝及边坡变形监测点的全自动观测。



注:图中 GNSS 为全球卫星导航系统(Global NavigaTion Satellite System,GNSS)。

图 1 三维变形智能监测技术

Fig.1 Intelligent 3D deformation monitoring technology

利用该监测技术能够不间断采集正常及恶劣天气等情况下监测数据。该技术改变了传统采用人工定期测量与人工评判的模式,解决了水电工程大坝及边坡外部变形观测人力资源投入多、劳动强度大、野外作业安全风险高、监测成果质量不理想等问题,提高了三维变形监测的精度指标。

2.2 北斗卫星高精度变形监测技术

对于水电站大坝及边坡的重要监测点而言,需要开展高频次、高精度的监测,且重要监测点多分布于水工建筑物的重要部位或存在垮塌风险的高危边坡,同时,这些高精度的定位信息也存在泄露风险。因此,传统的测量手段无法满足监测需求。为实现

高频次、高精度大坝及边坡变形监测,保证信息安全,响应军民融合国家战略,国能大渡河流域库坝管理中心将北斗卫星定位技术应用于水电站大坝安全监测领域当中。北斗卫星高精度变形监测技术通过融合北斗高精度天线、北斗高精度解算算法、系统数据应用处理等多种技术手段,实现自主可控的大坝及边坡变形监测技术创新^[7]。大渡河流域库坝管理中心采用北斗高精度定位解算算法及软件系统,突破北斗自适应多路径滤波算法、电离层误差修正方法等核心难题,实现大坝及边坡全天候、毫米级高精度智能监测,如图 2 所示。

北斗卫星高精度变形监测技术能够实时感知大

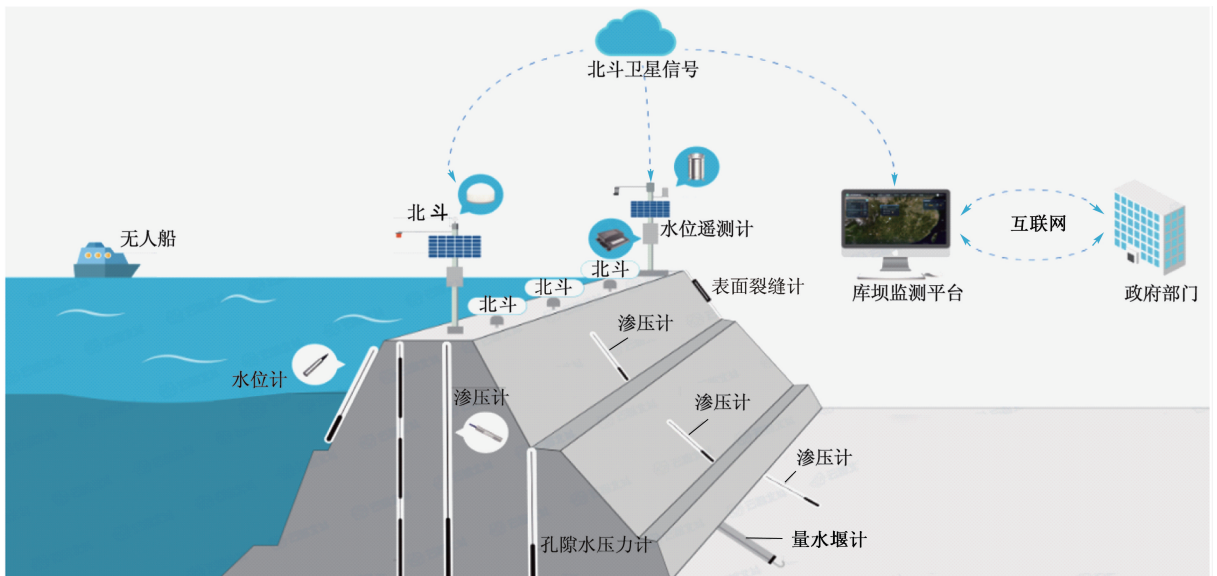


图 2 北斗大坝变形监测技术

Fig.2 Dam deformation monitoring technology using Beidou navigation satellite system

坝及边坡形变信息,计算分析大坝及边坡的稳定性,预测变形发展趋势,并针对危险事件及时报警,为大坝及边坡安全管控提供科学的数据支撑,实现监测数据自动采集、传输、存储、分析及预警等功能。

2.3 无人机航测监测技术

流域边坡传统巡检方式采用人工巡查,无法准确量化缺陷(如裂缝、冲坑、滑坡等),而且巡查安全



风险高、效率低下。采用无人机航测技术代替传统普查方式,可降低监测人力、降低人员作业风险性及经济成本投入,实现重点、危险区域的高效管控。无人机(图3)具有机动性强,图像分辨率高等优点,将高分辨率影像和高精度定位系统结合起来,可快速完成测绘及信息监测,为水电站大坝及边坡提供有效的安全监测信息、直观数据分析和科学的判断决策。



图3 无人机航测技术

Fig.3 UAV monitoring technology

无人机航测技术监测周期短、精度高,将传统接触式监测提升为非接触式监测,极大降低现场工作量,提高现场监测与检查效率,降低人工作业安全风险^[8-9]。在应对大坝及边坡人工监测的普查工作盲区中,无人机航测系统可规避人工勘查风险,大幅度提升普查效率,获得“全面+局部”的可量化影像资料。在应急响应中,可快速获得灾区真实可靠的图片和数据,确定受灾精确位置范围,解决灾后现场状况不明的痛点,有效助力电力企业提高应急救援能力和救援效率。

2.4 水下无人潜航器监测技术

传统水工建(构)筑物表观缺陷水下检测多采用潜水员或机器人水下拍照摄像检查,多是依靠人

工探摸、录像的方式确定异常情况,成本高、周期长、作业深度有限(最大作业水深约为60 m),检测结果可靠度依赖于潜水员的业务素质及摄像清晰度,定位精度差且无法准确定量分析,水下作业安全风险极高^[10]。利用水下无人潜航器搭载高清摄像头、三维扫描声呐、二维图像声呐、姿态传感器、深度传感器等单元部件,能够实现在水下三维空间自由航行,识别水工建筑物缺陷、裂缝、淤积等。

该技术能够解决深水、浑水以及动水等恶劣条件下水工建筑物水下缺陷精准识别的技术难题,突破传统人工下潜、水下摄像等水下检测的技术瓶颈,具有技术手段先进、工作效率高、作业安全风险低、探测范围广、探测精度高等优点。水下无人潜航器检测技术如图4所示。



图4 水下无人潜航器检测技术

Fig.4 Underwater unmanned vehicle monitoring technology

2.5 智能巡检技术

巡视检查能及时发现工程异常现象,是评估大坝安全的重要手段。传统巡视检查仍主要依靠现场

工作人员看、触、听、嗅,再通过与历史信息对比,凭经验判断工程运行状态,极易出现检查过程不规范、结果描述不专业、查询分析不方便等问题,不利于充

分发挥巡视检查反馈大坝运行性态的重要作用。同时,洞室、边坡等部位还存在人工巡检安全风险大,巡检频次低等问题,难以实现全天候及特殊工况下的及时巡检。国能大渡河流域库坝管理中心围绕大坝安全智能化移动巡检需求,构建了利用轨道行走的智能化移动巡检系统(图5),并研究智能巡检项

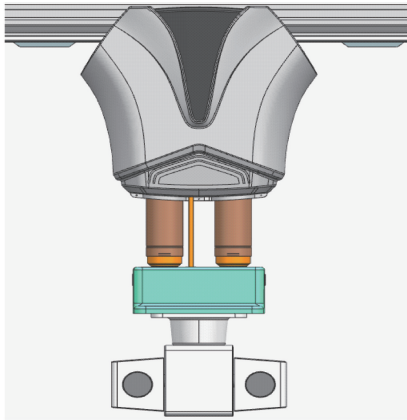


图5 轨道机器人智能巡检技术

Fig.5 Intelligent patrol technology for orbital robots

该技术在保证设备安全的前提下,可通过轨道实现水平、垂直方向移动,结合云台和镜头的旋转、变焦可定点悬停正视抓拍巡视检查部位,实现水工建筑物、多部位、全方位巡查;该技术充分考虑了不同工况下的监控对象特点和巡视检查需求,能实现日常定时自动巡查、预警指标触发巡查以及特殊工况下人工远程巡查;也能实现大坝廊道智能巡检、数字化管理,可智能识别、标记和管理廊道裂缝、渗水析钙缺陷,同时自动识别获取压力表表盘、堰上水头数据。

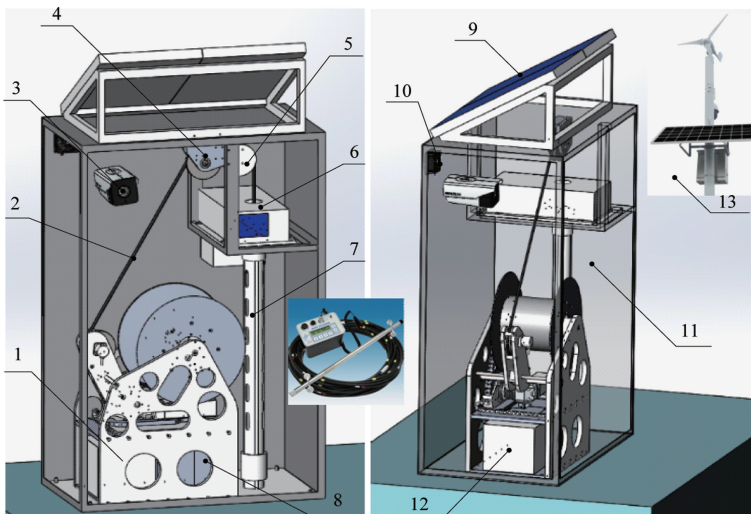
目内容、轨道机器人运动控制策略、路径规划策略、图片抓拍功能策略、巡检影像资料(含视频和图片)存储等项目,最后结合图像识别技术,构建一套“复杂环境下水工缺陷智能识别模型”,实现巡检区域缺陷的识别、标记及发展趋势的参数化、可视化监控。



2.6 深部测斜智能监测技术

深部测斜是反映工程安全特性的重要监测指标,传统测量采用人工监测方式,存在人力资源投入大、高边坡作业安全风险高、监测效率低且信息反馈慢等问题^[11]。国能大渡河流域库坝管理中心研发了深部测斜智能监测技术,智能测斜装置主要由自动绕线组件、水平翻转组件、活动式测斜仪、电源系统、主控系统等部分组成,如图6所示。

深部测斜智能监测技术能代替人工实现对大坝



注:1-自动绕线组件;2-探头线缆;3-摄像头;4-固定滑轮;5-张力传感器;6-水平翻转组件;7-探头储放管;8-电池组;9-光伏面板;10-风扇;11-外壳;12-主控系统;13-风光互补系统。

图6 深部测斜智能监测装备组成

Fig.6 Composition of intelligent monitoring equipment for deep inclination measurement

及边坡深部位移的自动测量和远程遥控等功能,也能实现监测数据的图形化显示、智能分析和综合预警,降低了作业风险,提高了数据采集质量。

2.7 库坝智能安全管控体系

传统的大坝安全管控体系功能单一,在大数据挖掘、分析评价等方面尚欠缺,同时,缺乏风险预判、风险智能预警、风险研究等功能,无法实现实时、动态的专业化安全风险评估^[12]。通过技术集成创新,开发库坝智能安全管控平台,包括感知层、传输层、存储层、计算层、分析层和应用交互层,主要目的是实现大坝及边坡安全管控信息的集成集中,将上述

智能监测技术集成,通过多源数据实时安全智能分析评判,实现大坝及边坡运行安全风险智能管控及快速应急响应,形成大坝及边坡安全风险智能管控新模式。库坝智能安全管控体系总体架构如图7所示。

库坝智能安全管控体系集合了综合管控、数据感知、设备管理、资料整编、决策支持、数字地球、手机APP以及大屏应用等功能。能够为水电站运行管理人员提供各类安全监测信息、各类突发应急信息。若发生突发应急事件时,可为抢险救灾和决策者指挥提供有力的技术支持和科学依据。

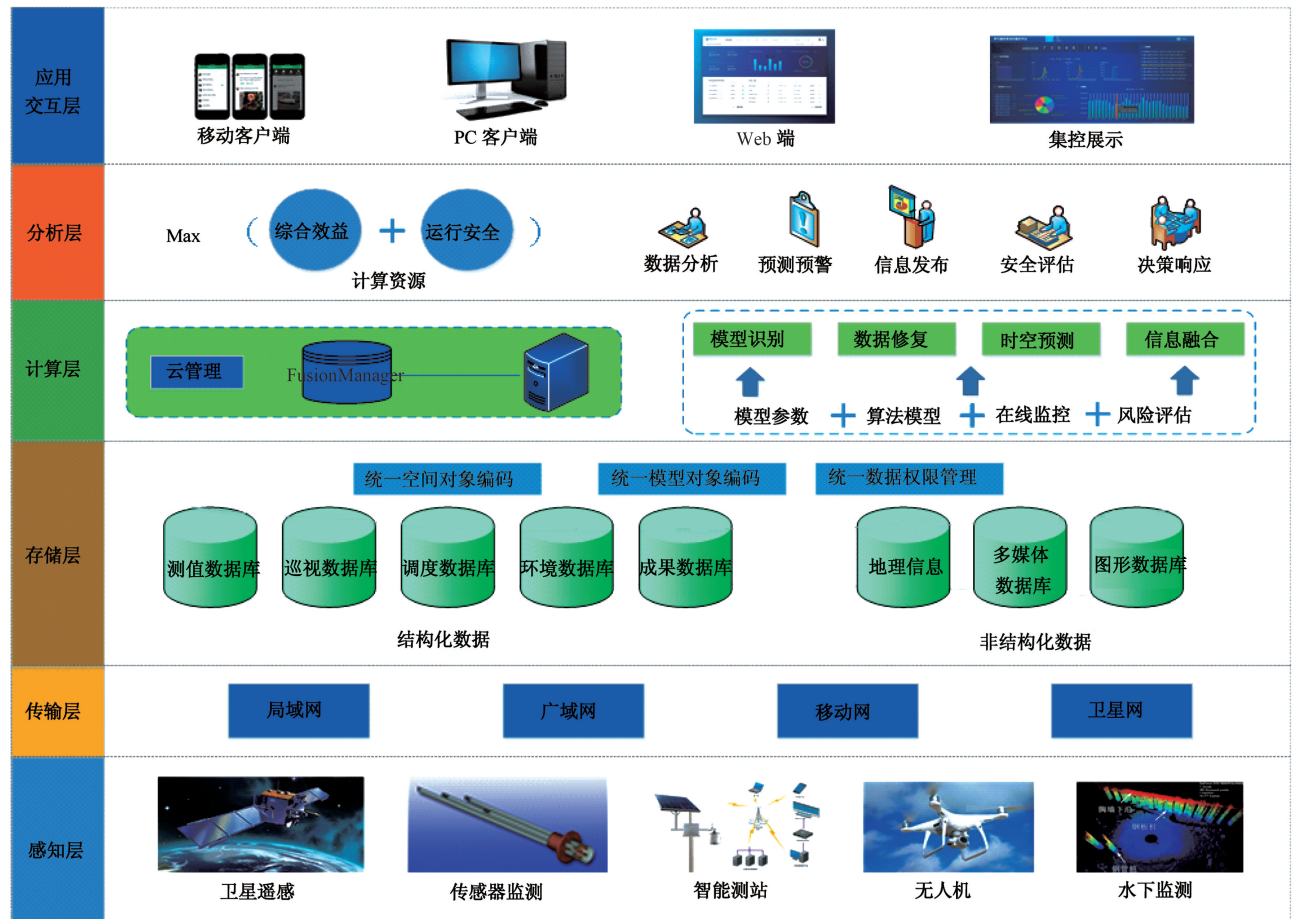


图7 库坝智能安全管控体系架构

Fig.7 Architecture of intelligent safety management and control system for reservoir and dam

3 结论

1) 通过集成整合各项监测技术,构建库坝智能安全管控体系。该体系能够充分发挥各项监测技术的优势,解决传统监测作业模式人力成本高、作业

风险大及监测数据深度挖掘不充分的问题,实现库坝运行安全风险智能管控及快速应急响应。

2) 所构建的库坝智能安全管控体系有助于提升水电站库坝安全管理水平,可为水电站库坝安全管理体系建设提供参考。

参 考 文 献

- [1] 高建,姚福明,雷晓辉,等.水电梯级开发背景下大渡河干流水质评价及水质分布特征研究[J].水利水电技术:中英文,2021,52(10):133-145.
GAO Jian, YAO Fuming, LEI Xiaohui, et al. Study on water quality evaluation and water quality distribution characteristics of main stream of Daduhe River under background of cascade hydropower development [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(10): 133-145.
- [2] 李龙飞,刘聪,黄会宝.大坝安全监测作业风险分析及管控措施[J].电力系统设备,2019(20):173-175.
LI Longfei, LIU Cong, HUANG Huibao. Risk analysis and control measures for dam safety monitoring operations [J]. Power Management, 2019(20): 173-175.
- [3] 梅风波.水库大坝安全监测自动化建设研究[J].中国设备工程,2020,443(7):173-174.
- [4] 王川.探究自动化技术在水库大坝安全管理中的有效运用[J].珠江水运,2020(15):81-82.
- [5] 黄会宝,马芳平,沈定斌,等.大渡河流域大坝智能监测探索与实践[J].水电与抽水蓄能,2022,8(3):16-22,34.
HUANG Huibao, MA Fangping, SHEN Dingbin, et al. Exploration and practice of dam intelligent monitoring in Dadu River basin [J]. Hydropower and Pumped Storage, 2022, 8(3): 16-22, 34.
- [6] 程翔.大型堆石坝内部变形监测关键技术研究[D].武汉:武汉大学,2023.
CHENG Xiang. Research on key technology of internal deformation monitoring in large Rock-fill Dam [D]. Wuhan: Wuhan University, 2023.
- [7] 谢秉辰,胡志刚.基于坐标域的恒星日滤波法及其在北斗变形监测中的应用[J].测绘地理信息,2023,48(5):27-31.
XIE Bingchen, HU Zhigang. A sidereal filtering method based on coordinate domain and its application in BeiDou deformation monitoring [J]. Journal of Geomatics, 2023, 48(5): 27-31.
- [8] 程海涛,刘俊男,武卓琦,等.无人机-人工协同巡视技术体系研究[J].中国安全科学学报,2023,33(增1):169-173.
CHENG Haitao, LIU Junnan, WU Zhuoqi, et al. Research on technical system of UAV and manual cooperative inspection [J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(S1): 169-173.
- [9] 王琳琳,李俊杰,康飞,等.基于无人机图像拼接技术的大坝健康监测方法[J].人民长江,2021,52(12):236-240.
WANG Linlin, LI Junjie, KANG Fei, et al. Dam health monitoring method based on image mosaic technology of Unmanned Aerial Vehicle [J]. Yangtze River, 2021, 52(12): 236-240.
- [10] 楚立鹏,鄢宏华,范强,等.国外水下无人潜航器及其通信技术发展综述[J].中国电子科学研究院学报,2022,17(2):112-118.
CHU Lipeng, YAN Honghua, FAN Qiang, et al. Overview of unmanned underwater vehicles and the communication technologies abroad [J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2022, 17(2): 112-118.
- [11] 王念秦,申辉辉,鲁兴生.边坡变形监测技术发展现状及问题对策[J].科学技术与工程,2021,21(19):7845-7855.
WANG Nianqin, SHEN Huihui, LU Xingsheng. Development status and problem countermeasures of slope deformation monitoring technology [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(19): 7845-7855.
- [12] 王伟,张思远,齐杰庆,等.地震诱发井煤矿次生灾害系统研究[J].中国安全科学学报,2023,33(7):196-202.
WANG Wei, ZHANG Siyuan, QI Qingjie, et al. Study on system of secondary disasters induced by earthquakes in underground coal mine [J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(7): 196-202.



作者简介: 李龙飞 (1988—),男,吉林榆树人,工程硕士,主要从事安全管理方面的工作。
E-mail:277548933@qq.com。