

基于多传感器融合的山体边坡智能监测预警系统研究

俞俊,马国强,熊德军,衡博

(国能四川东谷河流域水电开发有限公司,四川 甘孜 626700)

摘要:为实现山体边坡安全的智能化监测与预警,文章设计了一套基于多传感器融合的边坡监测预警系统。该系统采用“1+N”布站模式部署GNSS基准站与监测站,集成深部位移计、雨量计等多源传感设备,通过Kalman滤波算法实现数据融合;采用分层分布式架构建立四级预警体系,实现边坡变形实时监测、数据分析和预警信息推送。工程应用表明,系统的水平位移监测精度达 ± 2.3 mm,垂直位移监测精度达 ± 1.5 mm,预警信息推送时效性控制在3.5 s以内,可为山体边坡安全管理提供可靠的技术支持。

关键词:多传感器;融合;山体;边坡智能监测;预警系统

中图分类号: TP277 **文献标识码:** A

Research on intelligent monitoring and early warning system for mountain slope based on multi sensor fusion

YU Jun, MA Guoqiang, XIONG Dejun, HENG Bo

(Guoneng Sichuan Donggu River Basin Hydropower Development Co., Ltd., Ganzi, Sichuan 626700, China)

Abstract: To achieve intelligent monitoring and early warning of mountain slope safety, this article designs a slope monitoring and early warning system based on multi-sensor fusion. The system adopts a “1+N” deployment mode to deploy GNSS reference stations and monitoring stations, integrating multi-source sensing devices such as deep displacement meters and rain gauges, and achieving data fusion through Kalman filtering algorithm. Adopting a hierarchical distributed architecture to establish a four level early warning system, realizing real-time monitoring, data analysis, and early warning information push of slope deformation. Engineering applications have shown that the horizontal displacement monitoring accuracy of the system reaches ± 2.3 mm, and the vertical displacement monitoring accuracy reaches ± 1.5 mm. The timeliness of warning information push is controlled within 3.5 seconds, which can provide reliable technical support for the safety management of mountain slopes.

Key words: multi sensor, integration, mountains, intelligent monitoring of slopes, early warning system

1 引言

山体边坡失稳是山体周边建筑物安全生产面临的重要威胁之一,其变形破坏具有突发性和潜在性特征。传统的人工巡检方式存在监测频率低、覆盖范围有限等问题,难以满足山体安全管理需求。随着物联网、大数据等技术的发展,基于多传感器融合的智能监测预警系统逐渐成为边坡安全监测的研究热点。本文以某水电站厂房后边坡监测项目为例,设计了一套集成GNSS、深部位移计、裂缝计等多源传感设备的智能监测预警系统,探索了边坡安全监测的新型技术方案。

2 工程概况

四川公司东谷河国如水电站厂房后边坡监测项目

位于重要水电枢纽工程区域,边坡变形监测采用“1+N”布站模式部署GNSS基准站与监测站。监测系统通过北斗卫星定位数据进行静态差分计算,获取监测点XY平面位移与H高程变化数据。系统设定四级预警阈值,包括蓝色(± 20 mm/10 min)、黄色(± 30 mm/10 min)、橙色(± 50 mm/10 min)和红色(± 100 mm/10 min)预警值。监测平台采用三级权限管理架构,配置管理员、操作员和审计员角色,旨在实现设备管理、监测数据分析、告警处理及系统安全审计功能。此外,实时监测数据以图表形式展示,支持数据导出及历史记录查询。

3 边坡监测系统架构设计

3.1 系统总体框架

如图1所示,边坡监测系统采用分层分布式架构,自

下而上划分为数据采集层、数据传输层、数据处理层和应用服务层^[1]。系统采用B/S架构,服务端部署在Linux系统上,使用PostgreSQL数据库存储监测数据,通过Node.js实现后端服务,前端采用Vue框架开发交互界面。

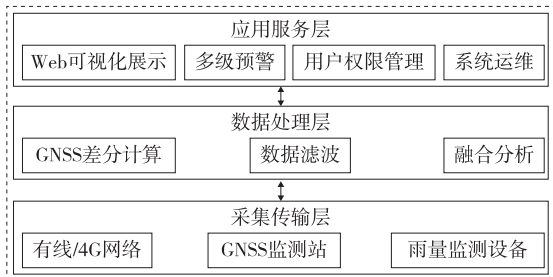


图1 框架设计

3.2 监测网络设计

针对此次山体的边坡监测智能化系统设计,研究采用“1+N”组网方式在水电站厂房稳定地基区域布设GNSS基准站,并在边坡危险区域布设多个GNSS监测站。基准站与监测站间的相对基线解算采用双差观测方程:

$$\nabla\Delta\phi(t) = \frac{\nabla\Delta\rho(t)}{\lambda} + \nabla\Delta N - \nabla\Delta d_p(t) + \nabla\Delta\epsilon(t) \quad (1)$$

式中, ϕ 为载波相位观测值; ρ 为卫星到接收机几何距离; λ 为载波波长; N 为整周模糊度; d_p 为对流层延迟; ϵ 为观测噪声。将基准站坐标作为已知点,通过多基线计算获取监测站的三维坐标变化。

由于该水电站厂房后边坡地质条件复杂,表层松散堆积层与基岩界面滑动风险高,单一监测手段难以全面反映边坡内部位移场分布及其演化规律。为克服GNSS易受遮挡、深部位移计单点监测、裂缝计局部形变等局限性,本文决定采用多传感器协同监测方案,通过数据融合提升监测精度和可靠性^[2]。多源传感数据采用Kalman滤波融合算法建立状态方程:

$$X(k) = AX(k-1) + BU(k) + W(k) \quad (2)$$

$$Z(k) = HX(k) + V(k) \quad (3)$$

式中, $X(k)$ 为状态向量,包含位移、速度和加速度信息; $Z(k)$ 为观测向量,整合GNSS位移、深部位移计、裂缝计等多源数据。

在边坡关键部位布设雨量监测设备,以实时采集降雨量数据,建立降雨量与边坡位移的相关性分析模型。其中,监测网络采用双重供电系统,主电源采用市电供电,备用电源采用太阳能蓄电池组,可确保监测设备24小时不间断运行。此外,所有监测设备均配置有防雷保护装置和防护罩,提高了系统的抗干扰能力和环境适应性。

3.3 数据采集与传输

数据采集系统按照分区域、多层次原则部署,GNSS

监测站采用1 Hz采样频率实时采集载波相位观测值,深部位移计和裂缝计以10 min为采样间隔记录位移数据,雨量计每小时累计一次降雨量数据。现场数据采集单元采用工业级RTU,内置ARM处理器,具备本地数据缓存功能^[3]。数据传输采用双通道冗余机制,主传输通道使用工业以太网,通过千兆光纤实现现场设备到数据中心的高速传输;备用通道采用4G无线网络,在主通道中断时自动切换。系统采用AES-256加密传输,设置数据断点续传机制。RTU端配置看门狗程序,负责监控采集程序运行状态。数据中心采用主备双机热备份方式,旨在确保系统的高可用性。

4 智能预警系统实现

4.1 监测数据管理

监测数据管理系统采用PostgreSQL数据库存储监测数据,建立设备信息表、监测数据表、告警信息表和系统日志表的关系型数据结构,运行流程如图2所示。

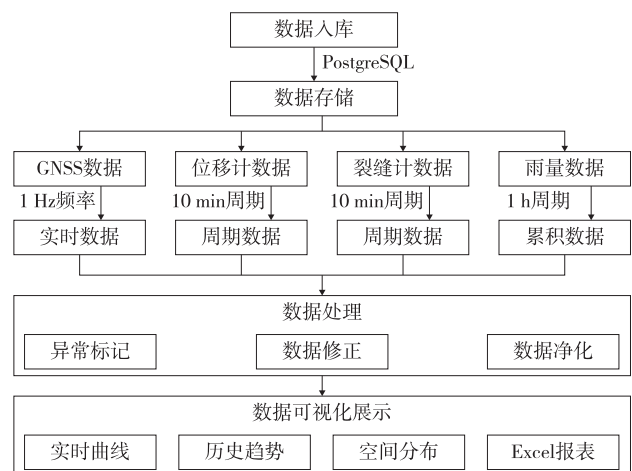


图2 运行流程

系统提供数据可视化功能,支持监测数据的实时曲线、历史趋势和空间分布展示,监测点数据可导出Excel格式报表。数据管理模块具有数据异常标记、数据补偿和数据过滤功能,可对超出量程、突变和断续的数据进行自动标识和处理。系统支持多维度数据查询和分析,可按时间段、监测区域、监测类型进行数据筛选和统计,为边坡稳定性评估提供了数据支撑。

4.2 预警机制设计

边坡预警机制基于GNSS位移监测数据建立四级预警体系。系统根据水平位移速率、垂直位移速率、综合位移速率和不利方向投影位移速率设定阈值,将预警等级划分为蓝色(20 mm/10 min)、黄色(30 mm/10 min)、橙色(50 mm/10 min)和红色(100 mm/10 min)。在预警触发条件同时,考虑了位移速率和累计位移量2个维度。当监测数据超过设定阈值时,系统会自动触发相应级别预警。预警信息可通过短信、邮件等渠道推送至相关人

员,确保预警信息及时传达。针对预警信息的总览如图3所示。

预警级别	监测项目	预警项目	预警时间	预警方式	预警接收人	预警内容
一般	GNSS监测	GNSS预警	2023-04-23 10:30:00	-	-	2023-04-23 11:00:00
一般	GNSS监测	GNSS预警	2023-04-23 11:30:00	-	-	2023-04-23 11:00:00
一般	GNSS监测	GNSS预警	2023-04-23 12:30:00	-	-	2023-04-23 11:00:00
一般	GNSS监测	GNSS预警	2023-04-23 14:30:00	-	-	2023-04-23 11:00:00
一般	GNSS监测	GNSS预警	2023-04-23 15:30:00	-	-	2023-04-23 11:00:00
一般	雨量监测	小雨预警	2023-04-23 16:53:11	邮件通知	张三	24小时内降雨
一般	雨量监测	小雨预警	2023-04-23 16:54:11	邮件通知	张三	24小时内降雨
一般	雨量监测	小雨预警	2023-04-23 16:55:12	邮件通知	张三	24小时内降雨
一般	雨量监测	小雨预警	2023-04-23 16:55:39	邮件通知	张三	24小时内降雨
一般	雨量监测	小雨预警	2023-04-23 16:56:14	邮件通知	张三	24小时内降雨

图3 预警信息总览

4.3 告警信息处理

告警信息处理模块对触发的预警进行了分级管理和状态跟踪。系统会自动记录告警产生时间、告警级别、告警类型和设备信息,支持按告警级别、类别和时间进行检索。在实际应用中,结合此次工程实际情况将告警级别划分为一般告警、重要告警和紧急告警三级^[4]。告警阈值按照监测参数设定三级触发标准,系统会自动识别超限数据并触发相应级别告警。基于此,告警信息会通过告警方式管理模块进行分发,支持配置多个接收人,每个接收人可独立设置需要接收的告警级别。操作人员可通过告警界面可对告警信息进行确认和清除操作,确认后的告警会记录确认时间,清除后的告警信息将自动转入历史告警数据库。此外,系统支持按告警级别、告警类型和时间范围进行告警信息检索,可导出选定条件的告警记录报表,实现告警信息的全流程追踪管理。系统告警方式配置界面包含告警接收人信息设置功能,如图4所示。



图4 添加告警方式

5 系统安全与运维管理

5.1 用户权限管理

边坡监测系统采用三级权限管理架构,实现管理员、操作员和审计员的分级授权。管理员拥有最高系统权限,负责用户账号管理、告警阈值配置和设备管理等核心功能。操作员具备监测数据查看、设备状态监控和

告警处理权限,负责执行日常监测任务^[5]。审计员专门负责系统安全日志和操作日志的审计工作。系统实施严格的密码安全策略,要求密码包含大小写字母、数字和特殊字符,初始密码统一设置为Aa@123456,强制要求用户在首次登录时进行修改。所有用户操作行为(包括登录信息、权限变更和敏感操作)均被详细记录在日志中,能确保系统运行安全可追溯。

5.2 系统运维保障

系统运维保障体系包括硬件维护、软件维护和数据备份层面。在硬件维护方面,应定期检查服务器运行状态、网络通信质量和监测设备工作状况,及时发现异常并进行处理。软件维护包括系统版本更新、安全补丁安装和性能优化,需确保系统稳定运行^[6]。数据备份采用实时备份与定期备份相结合的策略,监测数据实时同步至备用服务器,系统配置信息每日增量备份,同时每周进行一次完整备份。系统设置告警信息推送机制,在设备故障、网络中断或系统异常时立即通知相关维护人员进行处理。

6 工程应用与验证

6.1 现场施工

本工程现场施工分为3个关键环节,分别是监测基础工程、多传感器安装调试及供电系统部署。监测基础工程采用标准化地基施工工艺,依据设计图纸开挖120 cm×90 cm×145 cm规格的地基坑,深度允许偏差为+100 mm,-50 mm。地基采用C20混凝土浇筑,内部预埋 Φ 65 mm PVC管道用于后期电缆敷设。底层铺设150 mm厚度灰土并夯实,灰土配比(体积比)为2:8,粒径控制在15 mm以内。混凝土强度不低于C25,碎石最大粒径控制在50 mm以内,含泥量控制在3%以下。

多传感器安装采用模块化施工方案。GNSS接收设备安装采用专用固定平台,平台设计边长350 mm,预留6个18#固定螺栓。监测立杆采用法兰盘固定方式,通过4个地脚螺栓实现均匀受力^[7]。雨量计安装采用三点支撑结构,底座采用M4×20不锈钢沉头螺钉固定,确保设备水平度。设备箱体采用壁挂式安装,安装高度不超过3.5 m,使用4颗直径为8 mm以上膨胀螺栓固定,箱体倾斜度严格控制在5°以内。

供电系统采用太阳能供电方案,在安装电池组件时需确保接线盒朝下,连接线采用穿管保护。控制器与蓄电池的连接线路实施分层布设,强弱电分离。所有线缆接口距固定点距离保持在625 mm以上,避免压线情况发生。系统各连接节点采用防水密封处理,确保监测设备在山体复杂环境下的可靠运行。

6.2 监测数据精度

本文对山体边坡多传感器监测系统进行了为期6个月的现场测试,旨在全面评估监测数据精度。基于

GNSS接收设备采集的位移数据,选取边坡关键监测点进行定期人工复测,将全站仪测量作为对照基准,同时对雨量计、裂缝计等传感器进行标准化校验,确保数据采集精度符合工程要求。

监测数据精度评估重点关注位移监测精度、降雨量监测精度及裂缝监测精度方面。其中,位移监测采用24小时连续采样模式,采样间隔设定为30 min,通过统计分析来计算水平位移和垂直位移的标准差。降雨量监测采用翻斗式雨量计,分别在3种降雨条件(小雨、中雨、大雨)下进行精度验证。裂缝监测采用高精度位移传感器,测量范围为0~100 mm,分辨率为0.01 mm。各监测设备精度验证结果如表1所列。

表1 监测设备精度验证

监测项目	测量范围	理论精度	实测精度	稳定性评价
水平位移	±100 mm	±2 mm	±2.3 mm	良好
垂直位移	±50 mm	±1 mm	±1.5 mm	良好
降雨量	0~4 mm/min	±0.2 mm	±0.3 mm	良好
裂缝宽度	0~100 mm	±0.01 mm	±0.015 mm	良好

长期数据对比分析表明,多传感器监测系统的实测精度与理论精度基本相符,各项监测数据均满足边坡监测预警的技术要求。水平位移监测精度达±2.3 mm,垂直位移监测精度达±1.5 mm,降雨量监测精度为±0.3 mm,裂缝宽度监测精度为±0.015 mm。监测数据表现出良好的时间一致性和空间相关性,为边坡稳定性评估提供了可靠的数据支撑。

6.3 预警响应时效

本文对边坡智能监测预警系统的响应时效性进行了全面测试,重点评估了数据采集传输时效、预警信息推送时效及应急响应联动时效3个关键环节。采用高频采样模式对系统各环节时延进行统计分析,以验证系统在突发情况下的预警能力。

数据采集传输环节采用分布式网络架构,监测站点数据上传采用4G无线传输,单次数据包平均传输时延控制在0.8 s以内。监测数据经多级缓存和实时计算处理后,数据入库时延不超过1.2 s。系统设置三级预警阈值,当监测数据触发预警条件时,预警信息推送至管理终端的平均时延为1.5 s,短信告警发送时延控制在3 s以内。针对系统响应时效的测试结果如表2所列。

经过连续3个月的系统运行测试,预警系统表现出优异的时效性能。从监测数据采集到预警信息推送的全流程响应时间控制在3.5 s以内,满足边坡安全监测的实时性要求。系统集成的应急响应预案实现了预警信息与应急处置的快速联动,应急响应平均启动时间为4.2 min,为边坡灾害防治提供了有力的技术支撑。

表2 系统响应时效

响应环节	设计指标	测试结果	达标情况
数据传输	≤1.0 s	0.8 s	达标
数据处理	≤1.5 s	1.2 s	达标
预警推送	≤2.0 s	1.5 s	达标
短信告警	≤3.5 s	3.0 s	达标
应急联动	≤5.0 min	4.2 min	达标

7 结束语

本文设计的基于多传感器融合的山体边坡智能监测预警系统实现了对边坡变形的全天候自动化监测。通过多源传感数据融合提升了监测精度和可靠性,建立的四级预警机制为边坡失稳风险防控提供了有效手段。系统在工程实践中表现出良好的稳定性和实时性,但在监测数据深度挖掘、预警模型优化等方面仍有提升空间。未来研究将重点关注智能算法在边坡稳定性评估中的应用,以进一步提升系统的预测预警能力。

参考文献:

- [1] 张秋园. 基于露天矿边坡三维数据融合的边坡雷达监测预警系统[J]. 中国煤炭工业, 2022(8): 63-65.
- [2] 潘奇波. 露天矿边坡稳定性监测技术现状及进展[J]. 中小企业管理与科技, 2022(10): 136-138.
- [3] 姜琳. 基于GNSS的露天矿边坡变形监测方法分析[J]. 电子技术与软件工程, 2022(10): 243-246.
- [4] 王润, 孟兴涛, 曹洋, 等. 爆破荷载下露天矿边坡动力放大效应试验研究[J]. 黄金, 2021, 42(11): 39-43.
- [5] 蔡彬亭, 李树建, 赵雷, 等. 某露天矿采场边坡变形监测系统构建及监测数据分析[J]. 现代矿业, 2021, 37(5): 217-221.
- [6] 张飞, 郝勇浙, 刘跃忠, 等. 露天矿边坡位移监测方法的发展与研究[J]. 采矿技术, 2021, 21(1): 89-93.
- [7] 张宇, 王永伟, 石磊. 露天矿边坡自动化监测关键技术探析[J]. 石化技术, 2020, 27(9): 33-34.

作者简介:

俞俊(1971—), 本科, 工程师, 研究方向: 水电站自动化管理。

马国强(1973—), 本科, 工程师, 研究方向: 水电站自动化管理。

熊德军(1969—), 大专, 工程师, 研究方向: 水电站自动化管理。

衡博(1996—), 本科, 助理工程师, 研究方向: 水利水电工程。