

基于风险预警的水电站大坝高边坡施工安全监控系统

李勇

中国水利水电第十二工程局有限公司, 浙江 杭州 310030

[摘要]为了解决西南某大型水电站大坝高边坡施工期安全隐患严重、传统监控方法缺乏有效的预警作用问题,在此设计一个以风险预警为主的安全监控系统。系统阐述了高边坡施工期存在的主要风险种类及成因以及系统所要求的安全监测和风险预知功能;搭建了由感知层、传输层、数据层及应用层构成的整体框架体系;融合了变形测量、应力应变测量、GNSS/物联网/北斗即时感知等多项关键技术;形成了风险评估指标系统和预警级别划分制度并采用大数据及机器学习的方法进行风险预警处理。研究结果表明:该系统可以有效地进行高边坡施工安全隐患实时监测报警,可供类似工程借鉴使用。

[关键词]高边坡施工; 风险预警; 安全监控系统

DOI: 10.33142/hst.v9i3.19332

中图分类号: TV513

文献标识码: A

Safety Monitoring System for High Slope Construction of Hydroelectric Dam Based on Risk Warning

LI Yong

Sinohydro Bureau 12 Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310030, China

Abstract: In order to solve the serious safety hazards during the construction period of the high slope of a large hydropower station dam in Southwest China and the lack of effective warning function in traditional monitoring methods, a safety monitoring system based on risk warning is designed here. The system elaborates on the main types and causes of risks during the construction period of high slopes, as well as the safety monitoring and risk prediction functions required by the system; Built an overall framework system consisting of perception layer, transport layer, data layer, and application layer; It integrates multiple key technologies such as deformation measurement, stress-strain measurement, GNSS/Internet of Things/Beidou real-time sensing, etc; We have established a risk assessment index system and a warning level classification system, and adopted big data and machine learning methods for risk warning processing. The research results indicate that the system can effectively monitor and alert for safety hazards in high slope construction in real-time, which can be used as a reference for similar projects.

Keywords: high slope construction; risk warning; safety monitoring system

引言

西南部地区大型水电站大坝高边坡施工存在的主要安全问题是滑坡、崩塌等地质灾害。高边坡地势环境复杂,施工扰动频繁,传统的依靠人工巡视加定点观测的方式存在着监控死角大、信息采集率低、预警滞后等问题。长江设计集团三峡院开发的地质灾害智能巡查系统结合了数字孪生及智能感应技术,实现了分钟级巡查工作,毫米级实时建模,百微米级变形分析,秒级预警提示闭环式智能化流程控制,该技术创新也为水电工程高边坡安全管理带来新方向。大渡河流域建立了基于流域梯级库坝全方位检测、探测、巡视、地震、工况、水情等多种信息实时感知并动态交互的安全监测数据异常在网智能报警平台,把异

常数据辨识的错报率及漏报率降低了 95%以上。本文以川西南一个特大型水电站在建工程为依托,在风险防控这条主线上,介绍高边坡工程在建过程中安全监测的预警系统设计思路及其关键技术的研究进展。

1 高边坡施工风险识别与预警需求分析

1.1 施工期主要风险类型与致灾机理

西南某大型水电站位于高山峡谷地带,大坝高边坡施工期间所面临的风险主要有四种类型:滑坡、崩塌、塌方等。滑坡是指岩土体沿一定软弱面整体下滑;其诱发因素是雨水渗入后减弱了抗剪强度以及开挖卸荷改变了原有的应力状态;崩塌则是发生在陡直岩壁上被节理裂隙切割成块体,在爆破振动或者淋雨的作用下而失去平衡而掉落

下来;塌方则是因为支撑不到位或者是由于水流冲刷所致;蠕变则是指岩石土体缓慢的持续性变形。其主要是由于风化以及长期载荷的作用形成的。施工扰动引起边坡变形失稳的原因有开挖卸荷打破原有平衡以及爆破振动削弱了整体稳定性、施工作业产生的堆载增加了下滑力。

1.2 安全监控与风险预警的功能需求

针对以上风险因素,高边坡施工安全监测及风险预报系统要具备以下几方面的功能要求:第一、全天候动态监视能力,系统能够做到7*24h全天候动态监测,对边坡土质变化、瞬时变形以及蠕变进行及时有效地掌握,利用北斗卫星精准定位来建设GNSS边坡位移自动化监测装置,运用力学传感器将边坡健康状况传送到云端服务器,达到监测预警一体化防范的目的;第二、多种信息综合处理分析能力,系统需要集成变形、应力、渗流、环境等多种监测信息,形成多层次的信息联系分析模型,提高在地质灾害发生的环境下对安全隐患早期预警的能力;第三、分层预警及应急处置能力。系统要有清晰的预警级别设定规则,并能自动关联不同的响应方案,从而由事后补救转为主动防范;第四,数据分析及决策辅助功能。观测的数据要通过柱状图、曲线图以及三维图等方式进行展示,以便于工程管理以及应急管理的参考使用。

2 安全监控系统总体架构设计

2.1 系统总体框架构建

根据以上功能需求,本文提出建立一种基于风险报警的边坡工程施工安全监测系统的整体设计方案。该系统以模块化,可扩充性好及可靠性强为特点,使用分层结构设计思路,将获取信息、传递信息、处理信息、利用信息分开来处理,方便系统的维护升级。系统的整体设计方案分为四大部分:感知层完成现场的数据采集任务;传输层将采集所得的信息进行传递任务,保证数据的安全可靠;数据层对数据的存储和计算的任务;应用层负责对业务的逻辑处理以及与用户的沟通任务。四部分共同协作,使整个系统做到从收集信息到信息处理再到发出警报的一套完整的流程。智能化监控方案体系是进行设备实时监控、信息收集整理、警报提示、辅助决策的基础保障,一个好的监控方案可以完成从前端的数据收集到后台大数据处理的整体闭环过程。

2.2 感知层、传输层、数据层、应用层设计

感知层是系统的基石,安装在施工现场不同类型的各种检测仪器上,其中包括GNSS接收机、电子水准仪、测斜仪、锚杆应力计、渗压计、雨量计等各类传感器等,感知层设备应具有低功耗、高精度、环境适应性好的特点,

能够承受住西南地区高温高湿、多雨多雾恶劣的施工环境。系统要形成基于感知层设备为中心,从感知层设备到网络边界;从网络边界到网络行为;从网络行为到业务应用的全链条。达到入网设备可信、应用业务可信、通行网络流量可信的目的。传输层对感知层所采集的数据进行安全传送到数据中心。为了应对高边坡现场环境复杂,通讯环境较差的情况,采取了有线+无线混合方式,重要的观测区域使用光纤进行连接,其他普通区域使用4G/5G或者LoRa无线通信方式。同时,还需要有数据缓存及补传的功能,在恶劣气候下仍可以保证数据上传可靠。数据层是整个系统的主体部分,负责数据的采集、清理、组合以及分析工作。其中时序数据库用来保存高频率观测数据,关系型数据库负责存储设备信息、报警历史等方面的信息。此外还要实现跨数据来源的时空间配准以及融合计算等工作,为上级预警算法提供优质的原始数据。通过对流域梯级库坝多方面监测、探测、巡查以及地震、工情、水情等多种来源的信息进行实时感知并实现互相关联,在此之上开发了一个包括环境关系、时间仿真、反馈验证在内的安全监测数据分析异常智能识别系统。应用层针对终端使用者提供了数据展示、报警处理、报表创建、系统设置等多项服务,可以通过网页端及手机客户端登录以及时了解边坡安全状况。应用层内嵌预警规则引擎,一旦监测到的数据达到事先设定好的临界点就会自动产生一条对应的报警消息并通过发送短信或APP提醒的形式告知相关人员。

3 高边坡施工安全监测关键技术集成

3.1 变形监测技术

变形监测是对高边坡安全性监测中最重要的部分,主要分为位移监测、沉降监测以及裂缝监测三大块,位移监测是利用了GNSS自动化监测技术,在高边坡的要害位置布置监测点位,以北斗卫星高精度定位获得三维坐标信息。GNSS监测的优点就是可以实现全天候、自动化以及高精度,其水平精度可以达到毫米级别,可以很好地对高边坡的微小变形甚至是突然发生的位移的变化作出反应;利用北斗卫星高精度定位技术来建设GNSS边坡位移自动化监测平台,实现在“天眼”的情况下对边坡的安全状况进行观察,然后借助无人机低空仿地飞行的方式,建立三维地质模型,进而对边坡稳定性做出评估,从而达到在边坡开挖过程中进行远程踏勘以及边坡的安全状态实时观察的效果。沉降观测采取的是静力水准与电子水准结合的方法,其中静力水准适合长时间无人值守的自动化监测,以连通器原理测定各点之间相对沉降情况,电子水准作为辅助进行人工核查以保证所检测的数据的真实性。而裂缝检

测则是利用振弦式裂缝计以及拉绳式位移计来进行部署工作,分别安装于边坡现有裂缝或是可能产生滑动面的边缘位置上,在裂缝计上可以随时观察到裂缝的开合大小,在裂缝有增大的趋势的时候就会触发警报,地上长条带状拉绳则能灵敏感受到裂缝两边极其细微的变化,通过对数据曲线的趋势分析就可以及时察觉到山体可能出现缓慢移动的现象,从而在隐患初期就能解读出地面发来的警戒信息。

3.2 应力应变与锚固体系监测技术

应力应变观测体现边坡内部受力状况,是变形观测的一种重要辅助手段。主要观测仪器有锚杆应力计、锚索测力计和土压力盒等,锚杆应力计安装在系统锚杆末端,对锚杆施加力的变化进行检测,了解支护体系工作状态;锚索测力计安装在预应力锚索锚固端,对锚索的预应力下降状况进行实时跟踪,当出现锚索预应力下降量大于 10% 的情况时,系统报警提示要进行补拉或增加支护措施;土压力盒布置在边坡重要断面上,用来监测土压力变化规律,在计算边坡稳定性时提供力学参数。通过在边坡滑动力监测力学模型以及恒阻大变形缆索与北斗卫星通信的技术基础上首次提出了边坡位移-应力耦合监测技术,在这个领域达到了国际领先的技术水平,实现了基于遥感、GIS、北斗卫星通信技术的大数据三维信息化滑坡远程实时监测预警系统的应用开发。

3.3 边坡稳定性实时感知技术

边坡稳定状态动态监视技术集成了 GNSS、物联网、北斗等多元技术,形成天地组合式监测系统。GNSS 实时动态检测技术是在边坡上布置监测点及基站,使用双频载波相位差分测量达到毫米级别精度定位,监测站定时(每小时一次或者每日一次)上传坐标信息到基准站进行平差计算得到精确的三维位移值;北斗卫星观测站、震动位移监测仪、地表拉线观测仪以及固定式测斜计、雨量传感器等设备相互配合,就像是给每一个危坡都戴上了可穿戴设备一样,24/7 不间断地收集重点病害边坡的位移、倾角、振动等身体指标。物联网传感器网络把各种监控仪器编织成一张网,能够完成对信息的即时采样及初步分析,以及远距离传送。在边缘端可以对原始资料做初步筛选以及异常检测,降低无用信息量的传送,加快系统的响应速率;固定式测斜仪好像给地底安装了探测装置,在垂直的方向上钻进边坡的不同岩体当中,哪怕地下岩体发生了几毫米细微的变化,也能够清楚地记录下来并且发送出去。通过对各个深度位移变化曲线的研究,工程师们能够准确描绘出地下滑动带形成的路径,预测坡体是否有可能发生成片的大范围破坏。

4 风险预警模型构建与系统实现

4.1 风险评价指标体系与预警等级划分

风险评价指标体系是预警模型的基础,本文以变形、应力、渗流、环境四个方面建立了多级评价指标体系^[1]。各个指标的重要性系数由工程经验以及专家判断来得出,在系统运行的过程中根据实际的运行结果做出相应的修正。

表 1 高边坡施工安全风险评价指标体系与预警等级划分

指标维度	监测参数	蓝色预警 (四级)	黄色预警 (三级)	橙色预警(二 级)	红色预 警(一 级)
变形指 标	位移速率 (mm/d)	<1.0	1.0~3.0	3.0~5.0	>5.0
变形指 标	累计位移量 (mm)	<20	20~50	50~100	>100
应力指 标	锚杆应力变 化率	<5%	5%~10%	10%~20%	>20%
应力指 标	锚索预应力 损失率	<5%	5%~10%	10%~15%	>15%
渗流指 标	地下水位变 化(m/d)	<0.5	0.5~1.0	1.0~2.0	>2.0
渗流指 标	渗流量变化 率	<10%	10%~20%	20%~30%	>30%
环境指 标	日降雨量 (mm)	<25	25~50	50~100	>100
环境指 标	爆破振动速 度(cm/s)	<5.0	5.0~8.0	8.0~12.0	>12.0

警报级别分四类,由低到高排序分别为:蓝色报警、黄色报警、橙色报警、红色报警。蓝色报警表示边坡现状总体比较安全,应维持原有监测频率;黄色报警表示边坡存在异常表现,需要提高监测强度并且加大巡视力度;橙色报警表示边坡有较大失稳可能性,应该马上停止危险区内的施工并且组织专家分析;红色报警表示边坡失稳在即或者已经发生破裂现象,应该立刻停止施工作业并撤离人员、启动应急预案^[2]。风险级别按照强烈共振看好到强烈共振看坏对边坡失稳风险进行细致区分,并给不同级别赋予具体的指令信息和操作措施,做到风险控制的智能化及信息化升级。

4.2 基于大数据与机器学习的预警模型

传统的预警方式大多使用单阈值判定的方式来进行预警,存在误差大的问题,不能灵活应对复杂的施工环境变化等问题。针对以上问题提出了大数据及机器学习的智能化预警模型,利用历史监测信息以及当前采集的信息进行预判,以达到更好的预警效果以及及时性。使用长短周期记忆网络作为主要算法,长周期记忆网络可以有效的处

理时间序列数据,可以找到边坡位移量的变化趋势以及演变规律。模型的输入为位移以及应力等多方面的监测数据,输出为未来 24h 内对边坡的安全状况预测与预警级别^[3]。动态风险管理机制借助技术整合、流程重组与以数据为基础的方式搭建起“感知→分析→报警”的闭合回路,在末端节点部署边缘设备对采集到的数据进行实时处理,极大降低了异常响应的时间。模型训练使用西南某巨型水电站高边坡施工期历史监控数据以及分别在其正常与异常工况下对应的观测数据,经过数据预处理过程如数据清理、空缺值填充、特征选取等获得建模所需的训练样本,在建模阶段应用交叉验证的方法来进行超参数的选择可以避免模型出现过拟合的问题。经过测试发现,对于测试集而言模型预测正确概率达到了 89.7%,比传统的阈值法要高出 15.6 个百分点。

5 结语

本文对西南一巨型水电站大坝高边坡施工过程中的安全防护需求,在此基础上开发了基于风险预警的大坝高边坡施工的安全防护系统,采用以风险预警为核心框架,形成感知层、传输层、数据层、应用层四个层次结构并融合 GNSS 变形监测、应力应变监测、物联实时感知等多种技术于一体,形成多因素预警模型以及基于机器学习的智

能化预警机制,在实际运用中可以很好地监测到边坡存在变形的情况并且进行分级报警,大幅提升了施工过程中对安全风险的控制水平。后续的研究工作主要集中在以下两个方面,即增强监测信息的数据量,调整机器学习模型相关参数使得预警精度越来越高。二是开展数字孪生技术对边坡监测的应用,做到边坡情况三维度展示以及模拟仿真;三是探讨多边坡联合报警方案,在流域性工程方面增强系统的适应力。

[参考文献]

- [1]王姗姗,陈为雄.边坡安全评价和预警决策系统开发与运用研究[J].云南水力发电,2024,40(9):183-185.
- [2]李桂林.物联网传感技术在边坡安全自动化监测中的应用[J].测绘与空间地理信息,2024,47(1):148-151.
- [3]刘正兴,王华,金鑫.基于 LoRa 自组网的山区高边坡集成监测预警技术及应用[J].公路交通科技,2025,42(2):97-102.

作者简介:李勇(1982.4—),男,毕业院校:武汉科技大学,所学专业:安全工程,当前就职单位:中国水利水电第十二工程局有限公司,职务:项目副经理,职称级别:高级工程师。