

基于多源数据融合的坝体稳定性智能预警系统构建

杨 甦

中国水利水电第十二工程局有限公司, 浙江 杭州 310030

[摘要] 本论文为了解决传统的水库大坝稳定性监测单一、反应迟缓和报警灵敏度低等方面的问题, 提出一种采用多源信息融合的大坝稳定性的智能化预警系统。该系统包括变形监测、渗流监测、环境工况监测以及北斗/GNSS 定位等多种类型的感知信息, 实现了多源信息融合模型以及智能预警算法, 某大型水电工程智能监测预警平台安装了变形监测、渗流监测、环境监测等 864 台智能传感装置组成对大坝、溢洪道、输水隧洞等多种结构体的整体监控网, 每日需处理的数据量高达 2.4T。工程应用发现此系统的预警响应速度比传统的平均值 3.8 小时下降到了 12 分钟, 并且预警正确率达到了 93.7%。大大提高了大坝的安全检测程度。

[关键词] 多源数据融合; 坝体稳定性; 智能预警

DOI: 10.33142/hst.v9i4.19610

中图分类号: TV642.4

文献标识码: A

Construction of an Intelligent Early Warning System for Dam Stability Based on Multi-source Data Fusion

YANG Su

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

Abstract: In order to solve the problems of single monitoring, slow response, and low alarm sensitivity of traditional reservoir dam stability, this paper proposes an intelligent early warning system for dam stability using multi-source information fusion. The system includes various types of perception information such as deformation monitoring, seepage monitoring, environmental condition monitoring, and Beidou/GNSS positioning, realizing a multi-source information fusion model and intelligent warning algorithm. A large hydropower project intelligent monitoring and warning platform installed 864 intelligent sensing devices such as deformation monitoring, seepage monitoring, and environmental monitoring to form an overall monitoring network for various structures such as dams, spillways, and water conveyance tunnels. The daily amount of data to be processed is as high as 2.4T. Engineering applications have found that the warning response speed of this system has decreased from the traditional average of 3.8 hours to 12 minutes, and the warning accuracy has reached 93.7%, which is greatly improved the safety inspection level of the dam.

Keywords: multi-source data fusion; dam stability; intelligent early warning

引言

我国已建大型水工建筑物众多, 其中 80% 以上修建在 20 世纪 80 年代之前, 普遍存在结构性老化问题, 同时全球气候变暖导致极端气候事件愈发严重, 传统的安全管理手段已经不能适应水利新质生产力的发展需要。传统监测预警手段存在的问题是信息孤岛现象突出、预警时效性差、预警水平较低等问题, 迫切需要通过大数据、云计算以及物联网等新技术对监测系统进行智能化改造, 随着北斗导航、物联网感知设备的应用以及机器学习模型的发展给大坝安全稳定监测预警带来了新的解决办法。甘肃电投九甸峡水电站地质灾害监测预警系统建立在北斗导航定

位设备较高的位移测量水平之上, 能够及时发现滑坡区以及边坡等地质体发生的细微形变, 并用物联网的方式迅速传送到云端服务器进行分析比较, 目前该项目已经部署了 22 个基于北斗定位系统的 GNSS 监测点以及 22 个倾角加速度、土壤含水量、深层水平位移计等多种类型的监测点, 可以实现重要临近大坝的库岸坡面全天候、高精度不间断观测。本文基于多元大数据融合技术开发大坝稳定动态监测预警系统, 利用监测数据、环境数据、北斗定位数据进行多层次的数据整合并形成大数据融合模型和智能预报模型, 使坝体的安全由事后被动补救变为事前主动预报。

1 坝体稳定性多源数据体系构建

1.1 多源数据类型与采集方式

大坝稳定性监测包含多种类型、多元化的感知信息，需要形成全网化的大坝感知监测体系，采用云计算+边缘端的方式进行大数据处理中心建设，搭建三级体系结构，在边缘侧布置 24 台计算节点来达到就地快速初步处理的目的，云端设置 256 核计算资源来运行复杂的算法模型，数据处理时延要求小于 50ms，表 1 列举了不同来源的监测数据种类以及不同的采集方法。

1.2 变形、渗流与应力应变监测数据

变形观测是大坝安全监测的主要工作，有坝体表层变形观测、坝体内沉降变形、水平变形等多项指标，而混凝土面板堆石坝这样的特殊类型的大坝，对其进行变形观测就显得更加重要。河口村水库大坝属于混凝土面板堆石坝，是典型的高坝，河床段趾板置于深厚覆盖层中，其坝体材料性质和地基情况复杂，在对大坝安全监测系统数据净化之后应该进一步开展有关监控报警的研究工作。渗流监测包括渗流量监测、渗流压力监测、绕坝渗流等指标，是评价防渗系统的完好程度的重要指标之一。应力应变监测显示了整个大坝的受力状况，如混凝土的应力、钢筋的应力、土压力等等。三种监测数据相辅相成、相互佐证，互为基础来构建大坝结构状态监控的基础。

1.3 环境与工况数据（水位、降雨、温度）

环境及工况信息是影响大坝稳定的重要的外部环境条件。库水位变化直接影响到坝体的渗透压力以及稳定安全系数的变化；降雨入渗导致坝体材料强度下降的同时也会造成坝体内孔隙压力上升；气温的变化会导致混凝土坝体产生温度变形现象。基于大数据技术的大坝水利工程智能化监测预警系统建立了一个将结构安全性、水情信息以及环境因素相结合的整体化评价框架模型来实现对大坝

测指标所形成的数据集。实时采集并结合分析各种环境变量可以作为有效判断大坝是否安全的一个外部参考依据。

1.4 北斗/GNSS 与物联网感知数据集成

北斗/GNSS 技术以其精度高，全天候，无须通视的特点，在大坝变形监测中得到了广泛的应用，北斗定位系统可以达到毫米级到厘米级的误差范围，可以及时地获取大坝区以及边坡重点部分的细微变化情况。借助卫星遥感、北斗定位、无人机巡检、无人船水下测量、大坝安全检测、白蚁智能侦测技术组合成天地水工一体化动态监测体系。利用物联网感知层的倾角加速度计、土壤湿度传感器、深层水平位移传感器等多种 MEMS 设备，完成对大坝及边坡多种物理量不间断地监控。珊溪水库大坝安全在线监控系统安装有 33 个北斗卫星定位仪及超过 200 个埋设在大坝中的自动量测仪器，时刻监测大坝及周边山体滑坡、渗流、应力等信息，进行密集型、精确度高的观测工作。北斗+物联网的数据结合使大坝的安全状况有了更多的观测角度。

2 多源数据融合模型构建

2.1 数据融合理论与层级设计

多源数据分析就是把来源于不同传感器采集的数据，在不同的方向、形式下汇集在一起进行分析，得到比单个传感器更加精确、全面的特征描述信息。数据融合可以分为数据层面、特征层面到决策层面三个层次，数据层面的数据融合是将原始数据简单叠加在一起，保证了信息完整，但工作量巨大；特征层面的数据融合先对各种类型的数据源提取出各自的特征然后再进行融合，工作效率较高；而决策层面的数据融合则是在各个子系统做出自己独立的选择之后再做一次汇总，具有较强的鲁棒性。基于 D-S 证据理论融合多源信息的安全性评估方法，结合现场调查、物理力学实验、数值模拟、实测和监控结果得到一系列定

表 1 大坝稳定性监测多源数据种类及采集方法

数据类别	具体参数	采集方式	采集频率	精度要求
变形监测	表面位移、内部沉降、水平位移	测量机器人、北斗/GNSS、引张线仪	每日 1~24 次	毫米级
渗流监测	渗流量、渗流压力、绕坝渗流	量水堰、渗压计	每小时 1 次	0.1%FS
应力应变	混凝土应力、钢筋应力、土压力	应变计、压力盒	每小时 1 次	0.5%FS
环境工况	库水位、降雨量、温度、地震	水位计、雨量站、温度计、加速度计	每小时 1~24 次	相应规范
北斗/GNSS	三维位移坐标	北斗/GNSS 接收机	每小时 1 次	毫米至厘米级
物联网感知	倾角、加速度、含水率	MEMS 传感器	连续采集	工程需要

结构的状态进行实时监控。通过深层神经网络结构来应对包含大坝变形、渗流压力、库水位在内的四十八项重要监

性和定量指标，构成一个多源证据指标集合。对于坝体稳定性分析存在不确定性的特征而言，采用 D-S 证据理论

可以有效地解决对多种来源的信息进行融合时出现的相互矛盾、不确定等问题。

2.2 基于时空对齐的融合策略

多源监测数据的时间及空间上是不一样的,在时间空间上需要做一个同步化。时间同步主要是为了解决不同传感器之间采集周期不同导致的问题,通过对数据进行插值或者重采样的方式使得其在同一个时间轴上。空间同步主要是解决各个监测点的空间坐标不同导致的问题,通过坐标系转换以及空间插值来实现。小浪底工程大坝安全监测系统包括了外力变形监测、内观监测、巡查观测、泥沙淤积测量、地震监测、环境监测信息等,其监测数据来源具有典型的多元异质性特征。对于这种多元异构的数据就需要构建一个统一的数据模型与接口规范,从而实现各个来源之间的数据互通互联。经过时空同步之后的数据可以更好地为后期特征提取以及融合分析提供支撑作用。

2.3 多尺度特征提取与降维方法

多样化在线检测数据维度高,信息重复,有必要做特征提取以及降维分析。多尺度特征提取手段有:时间上的特征如均值、方差、趋势等等;频率上的特征如频谱、功率谱密度;时频上的特征如小波变换。基于小波变换的改进云计算模型可以对监测采集的数据做净化工作,在云计算环境下从海量监测数据中迅速挑出重点关注部分及测点。降维方法主要有主成分分析(PCA)、t分布随机邻域嵌入(t-SNE)、自编码器等。PCA采用线性映射把高维数据映射到低维平面,保持住主要变化的信息;而自编码器通过神经网络学习非线性的降维方法,在处理复杂非线性的特征方面效果较好。

2.4 基于机器学习/深度学习的融合算法

机器学习与深度学习算法是多源数据分析的良好算力平台,深层神经网络(DNN)能自适应地获取多个来源的数据间的非线性转换关系;长短时记忆网络(LSTM)适合对时序观测到的数据进行分析,可以发掘出大坝的变形存在的时间相关特性;卷积神经网络(CNN)能够很好地找到监测数据中的局部联系的信息,将其和LSTM结合起来的CNN-LSTM联合模型可以在一定程度上掌握时空两方面的关联度;人工智能赋能下的监测数据智能化分析引擎整合了15种深度学习建模方法,通过自动化的特征提取机制探测出监测数据中存在的异常现象,异常模式分类正确率为94.2%。使用注意力机制集成网络可以自主地给不同的监控指标赋予重要程度系数从而让集成网络更关注重要的敏感变量;基于门控循环单元(GRU)的简洁模型在维持较好预测效果的前提下大幅度减少运

算所需的时间,更加适用于边缘计算装置上实时的应用。深度学习集成算法既能解决高维的非线性强相关多模态数据问题又可以端对端地学习和提取特征以及分类,大大提高了大坝稳定性的判别水平。

3 智能预警模型与预警机制设计

3.1 预警模型构建原理

智能预警系统以多种信息集成的结果为基础,对大坝稳定状况作出即时分析及预报。预警模型的主要部分就是建立起监测信息同大坝稳定状况之间的对应联系,在不断地从历史的信息中学习出正常的规律以及异常的现象从而得出未知情况的判断。对于现有的有预警系统的水电站,针对其运行特征及其常见的故障类型,有针对性地选择了几个重要位置的重要检测点,其他的位置也做了相应的标记。预警模型采用了分层的方式,最底层负责数据的收集以及初步处理,第二层负责特征的提取以及混合运算,第三层则是对状态的判断以及预警决策。

3.2 动态预警阈值确定方法

常规预警手段采取恒定门限不能应对各种工况及环境条件的变化情况。而变门限预警依据历史观测信息以及当前运行状况进行动态调节进而大幅度减少误警率以及漏警率的发生概率。主要的技术手段有:统计过程控制技术、滑动时间窗技术和极值理论法。其中统计过程控制技术即通过平均值控制图与移动极差控制图对观测值的统计变异性进行监控,在出现超出控制线的观测值时会发出口令。滑动时间窗技术是以最近的数据为基础动态地确定阈值范围从而可以更好地追踪大坝系统响应的微幅变化过程;极值理论法是在对前一次的历史最大值序列拟合的基础上推算出某一重现期内的最大反应边界。机器学习优化的警戒预警阈值动态调节机制建立在滑动时间窗基础上并考虑季节变化特性以及工程历史运行情况来设定预警阈值,通过对连续60日监测趋势变动实时更新预警指标参数与传统静态阈值相比较误报率降低42.8%,基于孤立森林算法的异常分值门限可以根据所检测的数据点分布密集程度进行自我调节,不需要事先对数据分布做出假设,并且可用于非平稳监测数据流当中,动态式阈值设置能考虑到坝体反应随时间发展变化的特点以及环境的影响使得警报更为准确。

3.3 多级预警分级体系设计

多层次预警分级制度是针对大坝安全稳定状况的不同级别来确定相应的预警级别以及相应的应对措施,在这里预警分为五个级别,分别为正常、关注、警示、警报、紧急五个等级用绿色、蓝色、黄色、橙色、红色进行标注。

不同的预警级别采取不同级别的应对手段:正常情况下保持原监测频率;关注情况下增加监测频率到一天两次;警示情况下组织专家会诊;警报情况下停止水库运行;紧急情况下启动人员撤离方案。监测数值超过预警范围后系统自动发出分类预警信号,通过短信的方式即时通知预警责任人并且联动现场声光报警装置从而进行应急预警,在第一时间告知负责人员以便及时作出应急决策。分级预警机制与应急预案相结合,在不同的警报级别启动对应的处理程序,做到从发现问题到解决处理整个过程的全覆盖式监管。

3.4 异常状态识别与趋势预测

异常检测是通过观测值偏离标准情况来判定大坝是否存在异常现象。常用的方法有基于统计的方法(例如 3σ 准则)、基于聚类的方法(例如 DBSCAN)、基于分类的方法(例如 SVM)。趋势预测是采用历史数据进行时序的预测,从而得到大坝未来的运行状态和发展趋势。基于多模态融合的智能监控预警算法用到了注意力机制来自动提取各个观测指标的重要程度,一个大型水库在进行为期一年的实验之后得出的状态诊断准确率为 93.7%。异常检测以及趋势预测相结合,完成了由当前状态判断到未来风险预测的过程,为提前预警打下了基础。

4 结语

本文提出了以多源信息集成的数据驱动型大坝安全智能监测报警平台框架结构,包括多源数据平台、信息集

成模型以及智能报警模块三个部分。其利用了位移观测、渗流观测、生态环境监控以及北斗/GNSS 导航定位等多种类型的监测信息,在此基础上进行基于机器学习/深度学习的信息集成方法的研究,从而对大坝的安全情况进行动态化监测以及未来发展趋势预报。实验表明此系统的应用可以大幅度提高警报的精度、加快反应速度、减少报警次数,并使大坝的安全防护工作由事后被动处理转变为事先主动防范的新水平。今后的研究可以从以下几个方面着手:复杂环境下复合算法的选择与适配性改进,不同类型工程项目模型的推广加强,跨领域数据集成标准制定,数字孪生、边缘计算等新技术同大坝安全管理相结合等等。

[参考文献]

- [1]马斌,彭志,梁超.基于多源异构数据融合的高坝泄流结构安全智能监测预警方法[J].水利学报,2025,56(9):1132-1142.
- [2]吴继业,马刚,艾志涛,等.时空融合的堆石坝变形预测模型及在安全监测中的应用[J].水利学报,2024,55(5):564-576.
- [3]龚士林,孙辅庭,黄维,等.基于知识图谱的大坝安全智能监控预警方法[J].工程科学与技术,2024,56(3):32-40.

作者简介:杨甦(1998—),男,毕业于四川农业大学水利水电工程专业,工程师,就职于中国水利水电第十二工程局有限公司,项目科技智造部副主任。