

水利水电工程中高坝大库安全监测新技术探索研究

邓齐芳

中国安能集团第一工程局有限公司湖南分公司

DOI:10.32629/hwr.v10i6.7044

[摘要] 水利水电工程现在趋于大型化,高坝大库的数目正不断上升,这类设施的安全运用对防洪、用水、发电乃至生态都是福音。按传统方法进行监测所获信息不够实时、所涉区域有限、整体自动化水平较低,不能很好应对特殊地形或极端气候的需要。近年来物联网、人工智能、遥感等新技术发展迅速,开始促成“主动观察—智能判断”式监测的出现。新式传感器允许多点、多类参数同步监测,遥感和无人机有助于处理难于到达区的巡检任务,AI增强了对数据的分析及预警能力。文中将对高坝大库监测技术作较完整归纳,结合实例说明其适用情况,以技术角度提出长期安全方案。

[关键词] 高坝大库; 安全监测; 物联网; 人工智能; 遥感测绘; 智能预警

中图分类号: P237 文献标识码: A

Research on New Technologies for Safety Monitoring of High Dams and Large Reservoirs in Water Conservancy and Hydropower Engineering

Qifang Deng

Hunan Branch, China Anneng Group First Engineering Bureau Co., Ltd.

[Abstract] Water conservancy and hydropower projects are trending toward larger scales, with the number of high dams and large reservoirs continuously increasing. The safe operation of such facilities benefits flood control, water supply, power generation, and even ecology. Traditional monitoring methods provide insufficiently real-time information, cover limited areas, and have relatively low overall automation levels, making them inadequate for addressing the demands of complex terrains or extreme climatic conditions. In recent years, technologies such as the Internet of Things (IoT), artificial intelligence (AI), and remote sensing have developed rapidly, giving rise to an "active observation—intelligent judgment" monitoring paradigm. New-generation sensors enable simultaneous multi-point, multi-parameter monitoring; remote sensing and unmanned aerial vehicles (UAVs) facilitate inspection tasks in hard-to-reach areas; and AI enhances data analysis and early warning capabilities. This paper provides a comprehensive review of monitoring technologies for high dams and large reservoirs, illustrates their applicability through case studies, and proposes long-term safety solutions from a technical perspective.

[Key words] High dam and large reservoir; Safety monitoring; Internet of Things (IoT); Artificial intelligence (AI); Remote sensing and surveying; Intelligent early warning

1 引言

高坝大库是水利水电系统中基本而重要的设施,对所处流域的防洪能力、用水效率及生态环境均有直接影响。现在全球气候条件正趋于极端化,暴雨、地震类事故有上升趋势,同时老工程又面临性能衰退的问题,传统监测方法不能很好应对上述各项要求。此时新兴技术的结合是解决瓶颈的可行思路。文章将就监测技术本身、已有实例和前景发展做归纳分析,提出有关高坝大库安全监测技术如何进步、怎样演化的思考与判断。

2 监测技术革新方向

2.1 新型传感设备与分布式监测

对高坝大库而言,安全监测的重点是准确地追踪坝体有关应力、形变、渗流和温度的各项动态指标。以点式方法布置的常规传感器所占空间有限,不能给出足够细节的分布信息,因此未必能说明全坝真实状况。现在采用的新型传感手段结合光纤光栅(FBG)、MEMS微机电装置及无线自组网(WSN)技术,按分布方式对多参数同时加以监测。光纤光栅所依据的是光波波长同应变、温度成比例的基本关系,能发现毫米级位移现象,本身又不

易受电磁影响、不被腐蚀,适合做长期观察。MEMS传感器因体积小、耗能少而可以埋入坝体之中,对局部应力或渗流作即时记录。无线自组网由节点自动构成通信链路,所建网络无须大量布线即可覆盖整个坝区,有利于加快数据获取进程。^[1]

分布式传感网络的主要价值来自所涉空间范围及对局部异常的响应能力。若只用点式手段作监测,得到的是零散信息,不能清楚地判断非均质变形或隐藏渗漏的位置;而分布式方法把传感器连续地安排于所测区域,有助于确定坝体中应力、渗流和温度各处的状态,给出完整结构状况的说明。就实际应用而言,光纤光栅类装置沿坝轴方向成排布置时,能指出不同高度上变形的差异,帮助找到滑动隐患;MEMS传感器集合对坝基界面有应力监控作用,可预示沉降的不均匀性。又因冗余配置而具有高可靠性,个别节点失效不会破坏网络功能,所获数据是连贯、完整的系列。

2.2 遥感与无人机辅助监测

高坝大库所处的地形较复杂,常规的监测盲区又很多,单纯依靠人工巡检在可达性及效率上不能很好地解决问题。遥感和无人机的运用把非接触式监测带入实际应用,使地理空间的限制得到缓解,监测速度与范围因而都有所提高。卫星遥感方法(以InSAR为例)是基于合成孔径雷达干涉来研究形变的,能用相位差判断各时相雷达图中坝体的微小位移。所涉区域宽、重复观测周期短是它的优点,对陡坡或无路的山区特别适用,适合做大尺度形变场的持续性调查。^[2]

有关无人机的技术利用了灵活布设及高精度载荷,对卫星遥感所不能很好处理的细节予以补充。由高清相机、热成像设备或激光扫描仪构成的无人机系统能较快查明坝体裂缝、渗水及植被状况。所用高清相机以多角度照片为基础作拼接处理,得出三维坝形,给出裂缝的大小和走向;热成像仪器从表面温差着手分析,识别不显眼的渗流路径或混凝土老化区;激光扫描所得的点云可用来恢复坝体形状,对侵蚀、沉积做定量追踪。若将无人机同卫星遥感配合使用,便能建立“宏观-微观”统一的立体监测方案,同时了解大范围形变、查清小处缺陷。

2.3 AI赋能的数据分析与风险预警

有关高坝大库的监测数据是多源、异构、高维的,一般用人工方法处理时不易发现其内在规律。现在借助AI技术以深度学习思路来整合位移、渗流及气象诸类信息,对坝体做整体健康分析,由此把“数据记录”推进为“风险预测”的新阶段。CNN-LSTM这一类深度学习手段利用卷积神经网络(CNN)对空间做归纳、用长短期记忆网络(LSTM)研究时间序列,能自动地、完整地建立坝体行为和相关风险之间的复杂对应关系。

AI模型的基本价值应归于它所具有的自学习及泛化能力。用固定阈值做预警的传统方法不能很好地应对各种工况的变化;而借助历史信息训练的AI模型可以灵活地设定阈值,对各季节或各水位状态下的坝体作出适应性判断。按此思路,模型能从雨季、旱季渗流量的差别出发,找到正常渗流和管涌的分界点;根据温度-变形的联合关系来判定热效应同结构缺陷的不同之

处。^[2]同时,它可对非线性、非平稳类监测结果加以分析,发现微小但有警示意义的异常,使预警较易成立。

3 典型应用场景分析

3.1 混凝土坝稳定性评估

对混凝土坝稳定性的分析应着重于坝体所受应力及形变状态的准确把握,对可能的薄弱点作预先识别。光纤光栅传感器具有高度精确、不易受干扰的优点,适合埋设在坝内用以跟踪应力,将光波波长的微小改变对应到毫米级形变,从而可视化应力场。InSAR所依据的是卫星遥感得到的表面毫米级位移信息,观察面积大、地形适应性强,是高陡边坡长期监控的理想手段。若把两种方法配合使用,即构成“内部-表面”联合监测思路,对总体形变和局部应力都可作出清楚说明。

数字孪生仿真平台是研究混凝土坝稳定性的主要手段。按所涉资料(地质、材料及荷载)的类型加以整合,用三维方式构造坝体的物理模型,再对各种工况(含水位变动或地震)做结构模拟。文中所提方法可以考察温度如何影响混凝土的热应变,分析相应应力的重新分布;又利用流固耦合理论来判断库水作用下坝体的安全程度。将仿真结果同实际测量作比照,有助于改进模型、获得更准确的预测。以数字孪生为基础的实时分析可判明坝踵、坝趾处各时段的应力是否过高,因而能较早提出加固建议或方案依据。

3.2 土石坝渗漏隐患识别

要解决土石坝中渗漏隐患的问题,应以“地下-地表”立体方式来布置监测装置,利用多参数配合查清渗漏通道。按坝体各层深度配置地下水位计、渗压传感器,对浸润线及所涉水压做连续的实时观察。若出现渗漏现象,浸润线将不正常上升,渗压测量能给出压力变化的提示,初判渗漏区域。热红外无人机从空中取得地表温度资料,无须直接接触坝体。所遇渗漏使局部水分状况有变,相应地热传导效果被削弱,低温区即为渗漏入口的标志,由此确定位置。

热成像技术的基本优点是高灵敏度及对变化的快速反应。人工巡检不能很好地区分隐藏式渗漏,但用热红外无人机做短时间扫描即可得到坝体各部分的完整温态信息(即云图)。就温度梯度来说,正常渗流所对应的区域一般温平,异常渗漏总是造成某个局部的低温现象,而且所涉温差与实际渗漏量基本成比例关系。所用方法不依赖于白天或晴朗天气,夜间、阴天都可作监测,因而能加快检查进度。

3.3 山区水库泥沙淤积监测

山区水库中泥沙淤积的监测要围绕库容演变做动态分析,把优化调度同寿命延长结合起来考虑。多波束测深所用的扇形声波束能给出较完整的水下地形资料,对泥沙层厚度及分布有准确的量化意义。所获信息范围大、精度高,适合用于深水或狭小河段的淤积调查。卫星遥感的解译方法按时间序列分析水面形态,配合水深数据来识别库容的减少部分。将两种手段联合运用即构成“点-面”式监测结构,既可研究局部淤积又不遗漏整体库容情况。

AI图像识别是泥沙淤积分析所用的重要工具。按传统思路做遥感影像判读要靠人,处理速度慢又不能完全避免偏见;AI则能自动地把泥沙的色相、纹理及形态都纳入考察范围,借助深度学习方法来定位淤积区域。现在已知卷积神经网络(CNN)可用来训练水体/淤积识别系统,得到有关热力的分布信息;结合既往资料可作趋势性预测。对所涉泥沙的粒度亦可加以分析,考虑其对水库容量、对泄洪的阻碍作用,由此给出清淤工程的理论支撑或建议。

3.4 老旧坝体健康状态评估

对老旧坝体进行健康状态分析要以材料老化及结构损伤为量化对象,用此来指导科学维修改造。振动测试可用人工或自然振动方式诱发坝体模态行为,从而得到固有频率、阻尼比一类的模态数据。结构健康监测所用的(SHM)方法结合加速度计、应变计做长期动态跟踪。模态特征本身是损伤的敏感信号:刚度随老化而降低,相应地固有频率会变小;裂缝使质量分布失衡,模态形态因而有异。将实际测量结果同设计值作比较,即能判断当前坝体的健康状况。

所称的机器学习分类器对损伤识别是重要的工具。以往方法用阈值来处理模态参数改变的情况,不便于分析老坝复杂类别的损伤现象;而现代机器学习手段(包括支持向量机或随机森林)可以训练有关模态—损伤的对应关系,完成自动分类任务。以固有频率、阻尼比这类指标为输入时,模型给出的是损伤概率及

位置的估计信息。若将过去修理史同地质背景加以对照,就可能查清成因,分清材料退化和外力作用各自应占的比例^[3]。

4 结论

有关高坝大库安全的监测技术正在由传统的人工巡检转为智能或数字化模式。现代传感方法配合遥感、AI等手段已能较大幅度地改善监测状况,对工程安全形成各种层面的保护。按当前发展思路应着手做三件事:制定标准、培养复合型人才、促成“人机结合”方式,用这些办法来处理气候或老化所导致的问题,使水利水电系统在较长时间内保持良好状态、避免重大事故的发生。

[参考文献]

[1]郑雪玉.高坝大库深层放空系统布置及运行安全关键技术研究[D].武汉大学,2022.

[2]郑守仁.我国高坝大库建设及运行安全问题探讨[C]//中国大坝协会.水库大坝建设与管理中的技术进展——中国大坝协会2012学术年会论文集.长江水利委员会,2012:25-33.

[3]任金明,葛益恒,王永明.高坝大库水电工程导流阶段划分及度汛安全[J].大坝与安全,2012,(03):1-5.

作者简介:

邓齐芳(1990--),男,汉族,湖南汝城人,大学本科,中共党员;现就职于中国安能集团第一工程局有限公司湖南分公司,助理工程师,研究方向:水利工程。