

大坝安全监测技术的应用与发展

李红辉

新疆巴州新华水电开发有限公司和静哈尔莫墩电厂 新疆 库尔勒 841000

摘要: 大坝作为重要的水利工程设施,其安全运行直接关系到下游人民生命财产安全、社会经济发展以及生态环境稳定。大坝安全监测技术是保障大坝安全的关键手段,通过对大坝各种物理量的实时监测和分析,能够及时发现大坝存在的安全隐患,为采取有效的工程措施提供科学依据。本文深入探讨了大坝安全监测技术的应用现状,包括监测项目、监测方法及常用监测仪器;分析了大坝安全监测技术发展过程中面临的监测数据管理与分析、监测自动化与智能化水平、监测标准与规范不完善等挑战;并从监测技术创新、智能化监测系统建设、多学科融合及人才培养等方面提出了大坝安全监测技术的发展趋势。研究表明,随着科技的不断进步,大坝安全监测技术正朝着高精度、自动化、智能化和综合化的方向发展,未来将在大坝安全管理中发挥更加重要的作用。

关键词: 大坝安全监测技术;应用;发展

DOI: 10.63887/ssrp.2025.1.3.3

引言

大坝是水利工程中的核心建筑物,具有防洪、灌溉、发电、供水等多种功能。然而,大坝在运行过程中会受到多种因素的影响,如水压力、温度变化、地震、材料老化等,这些因素可能导致大坝出现变形、渗流、应力应变等异常现象,严重威胁大坝的安全。历史上,曾发生过多起大坝失事事故,给社会造成了巨大的损失。因此,对大坝进行安全监测,及时掌握大坝的工作状态,对于确保大坝安全运行至关重要。

大坝安全监测技术的应用与发展具有重要的现实意义。一方面,通过实时监测大坝的各项安全指标,能够提前发现潜在的安全隐患,为采取针对性的维护和加固措施提供依据,避免大坝事故的发生,保障下游人民生命财产安全和社会稳定。另一方面,准确的大坝安全监测数据有助于优化大坝的运行管理,提高大坝的运行效率和经济效益。此外,深入研究大坝安全监测技术的发展趋势,能够推动相关技术的创新和进步,为水利工程领域的发展提供技术支持。

1 大坝安全监测技术概述

1.1 大坝安全监测的目的

大坝安全监测的主要目的是及时掌握大坝在各种工况下的工作状态和变化规律,验证大坝设计的合理性和施工质量,为大坝的安全运行和管理提供科学依据。具体包括:监测大坝的变形情况,判断大坝结构是否稳定;监测大坝的渗流状况,防止渗漏破坏;监测大坝的应力应变,评估大坝的承载能力;监测环境因素对大坝的影响,如水位、温度、地震等^[1]。

1.2 大坝安全监测的内容

大坝安全监测内容广泛,主要包括变形监测、渗流监测、应力应变及温度监测、环境量监测等几个方面。

变形监测: 监测大坝在垂直方向和水平方向的位移变化,以及大坝坝体的倾斜、挠度等。变形是反映大坝安全状况的重要指标之一,通过变形监测可以及时发现大坝是否存在不均匀沉降、滑移等异常情况。

渗流监测: 监测大坝的渗流量、渗流压力和水质等。渗流问题可能导致大坝内部土壤颗粒被带走,形成渗透破坏通道,严重影响大坝的安全。渗流监测能够及时发现渗漏隐患,采取相应的防渗措施。

应力应变及温度监测: 监测大坝坝体、坝基和边坡等部位的应力、应变和温度变化。应力应变监测可

以了解大坝在荷载作用下的受力状态，判断大坝结构是否处于安全范围内；温度监测有助于分析温度变化对大坝应力应变和变形的影响。

环境量监测：监测与大坝安全相关的环境因素，如上下游水位、气温、水温、降雨量等。环境量的变化会直接影响大坝的受力状态和工作性能，通过对环境量的监测，可以为大坝安全监测数据的分析提供背景依据^[2]。

2 大坝安全监测技术的应用现状

2.1 监测项目

混凝土坝监测项目

对于混凝土坝，变形监测通常包括表面变形监测和内部变形监测。表面变形监测采用视准线法、引张线法、垂线法等技术，监测坝顶、坝坡等部位的水平和垂直位移；内部变形监测则通过在坝体内埋设应变计、测缝计、沉降计等仪器，监测坝体内部的变形情况。渗流监测方面，设置渗压计监测坝体和坝基的渗流压力，量水堰监测渗流量。应力应变及温度监测通过在坝体内布置应力计、应变计、温度计等，实时获取相关数据。

土石坝的变形监测重点在于水平位移和垂直位移监测，常采用表面位移监测桩、水准点等设施，结合全站仪、GPS 等测量设备进行监测。渗流监测是土石坝安全监测的关键内容，通过埋设测压管监测坝体浸润线，设置量水堰监测渗流量。此外，还会对土石坝的土压力、孔隙水压力等进行监测。

2.2 监测方法

大地测量法是一种传统的变形监测方法，主要包括水准测量、三角测量、导线测量等。水准测量用于测定大坝的垂直位移，具有较高的精度；三角测量和导线测量可用于测定大坝的水平位移。大地测量法技术成熟，精度可靠，但测量工作量大，受外界环境影响较大，难以实现实时监测。

全球导航卫星系统（GNSS）技术

GNSS 技术，如全球定位系统（GPS）、北斗卫星导航系统（BDS）等，在大坝安全监测中得到了广泛应用。GNSS 技术具有全天候、实时、高精度等优点，能

够同时测定大坝监测点的三维坐标，实现大坝变形的自动化监测。通过在大坝上设置 GNSS 监测站，将监测数据实时传输到监测中心，可及时掌握大坝的变形情况^[3]。

分布式光纤传感技术是一种新型的监测方法，它利用光纤作为传感元件，能够同时测量光纤沿线多个位置的温度、应变等物理量。在大坝安全监测中，将光纤埋设在大坝坝体内或表面，可实现对大坝变形、渗流、温度等的分布式监测。该技术具有抗电磁干扰、耐腐蚀、测量距离长等优点，适用于大坝的长期安全监测。

人工巡查法是定期组织专业人员对大坝进行现场检查，观察大坝的外观状况，如是否有裂缝、渗漏、滑坡等迹象，检查监测设施的运行情况等。人工巡查法虽然直观，但受巡查人员的经验和主观因素影响较大，且难以发现一些潜在的、隐蔽的安全隐患^[4]。

2.3 常用监测仪器

引张线仪：用于测量大坝水平方向的线位移，通过测量引张线的水平位移变化来确定大坝的变形情况，具有结构简单、测量精度高的特点。

垂线坐标仪：与正垂线或倒垂线配合使用，测量大坝在垂直方向的位移，可实时监测大坝的沉降情况。

全站仪：是一种集光、机、电为一体的高技术测量仪器，能够同时测定监测点的水平角、垂直角和斜距，从而计算出监测点的三维坐标，广泛应用于大坝表面变形监测。

渗压计：用于测量坝体和坝基的渗流压力，通过将渗压计埋设在预定位置，实时监测渗流压力的变化，判断大坝的渗流稳定性。

量水堰：安装在坝体或坝基的渗流出口处，用于测量渗流量。常见的量水堰有直角三角堰、梯形堰和矩形堰等，根据渗流量的大小选择合适的堰型。

钢筋计：用于测量混凝土坝内钢筋的应力变化，通过将钢筋计与钢筋连接，可实时获取钢筋的应力数据，反映坝体的受力状态。

土压力计：安装在土石坝坝体或坝基中，测量土体对压力计的压力，从而了解土体的应力分布情况。

温度计：用于测量大坝内部和表面的温度，常用的温度计有电阻式温度计、热电偶温度计等，温度监测有助于分析温度变化对大坝性能的影响。

3 大坝安全监测技术发展面临的挑战

3.1 监测数据管理与分析

数据量大且复杂

随着大坝安全监测技术的不断发展，监测项目和监测点不断增加，监测数据的采集频率也越来越高，导致监测数据量呈爆炸式增长。这些数据包括变形、渗流、应力应变、温度等多种类型，数据格式和存储方式各异，给数据的管理和分析带来了巨大挑战。

目前，对于大坝安全监测数据的分析主要采用传统的统计方法和简单的模型分析，难以充分挖掘数据中蕴含的信息。对于复杂的大坝安全问题和多因素耦合作用下的数据变化规律，现有的分析方法往往无法准确判断大坝的安全状况，容易出现误判和漏判。

大坝安全监测涉及多个部门和单位，如水库管理单位、设计单位、科研机构等，各部门之间的数据格式和标准不统一，数据共享机制不完善，导致数据难以有效整合和利用。这限制了对大坝安全状况的全面评估和综合分析，不利于及时发现潜在的安全隐患。

3.2 监测自动化与智能化水平

自动化程度有待提高

虽然部分大坝已经实现了部分监测项目的自动化监测，但整体自动化程度仍然较低。一些监测仪器还需要人工现场读取数据，监测数据的传输和处理也存在一定的延迟，无法实现实时、准确的监测。此外，自动化监测系统的稳定性和可靠性有待提高，容易出现故障和数据丢失等问题。

目前的大坝安全监测系统大多只能实现数据的采集和简单显示，缺乏智能分析和预警功能。无法根据监测数据的变化趋势自动判断大坝的安全状况，及时发出预警信息。智能化水平的不足导致监测人员难以及时发现潜在的安全问题，错过了采取措施的最佳时机。

不同厂家生产的监测仪器和自动化监测系统之间存在兼容性问题，难以实现数据的互联互通和系统的

集成。这增加了大坝安全监测系统的建设和维护成本，也不利于监测技术的统一发展和推广应用^[5]。

3.3 监测标准与规范不完善

标准更新滞后

随着大坝安全监测技术的不断进步和新监测方法、仪器的出现，现有的监测标准和规范存在一定的滞后性。部分标准和规范未能及时涵盖新的监测内容和技术要求，导致在实际监测工作中缺乏明确的指导依据。

在一些大坝安全监测项目中，存在对监测标准和规范执行不严格的情况。监测仪器的安装、调试和校准不符合标准要求，监测数据的采集和处理方法不规范，影响了监测数据的准确性和可靠性。

目前，大坝安全监测领域缺乏统一的、涵盖监测全过程的标准体系，不同地区、不同类型的大坝在监测项目、监测方法、监测频率等方面存在差异，不利于监测数据的对比分析和经验交流。

4 大坝安全监测技术的发展趋势

4.1 监测技术创新

未来将加大对新型传感器的研发力度，提高传感器的精度、灵敏度和可靠性。例如，研发具有自诊断、自补偿功能的智能传感器，能够实时监测自身的工作状态，自动修正测量误差；开发适用于恶劣环境（如高温、高压、强腐蚀等）的特种传感器，满足不同类型大坝的监测需求。

多源数据融合技术将多种监测手段获取的数据进行综合分析，以提高大坝安全监测的准确性和可靠性。通过融合变形、渗流、应力应变、温度等多源数据，结合数值模拟和模型分析方法，更全面地了解大坝的工作状态和变化规律，及时发现潜在的安全隐患。

无人机和机器人技术将在大坝安全监测中得到更广泛的应用。无人机可以搭载高分辨率相机、激光雷达等设备，对大坝的外观进行快速、全面的巡查，及时发现大坝表面的裂缝、滑坡等病害；机器人可以进入大坝内部等危险区域，进行近距离的监测和检测，获取更准确的监测数据。

4.2 智能化监测系统建设

开发基于大数据、云计算、人工智能等技术的智能监测平台，实现对大坝安全监测数据的实时采集、传输、存储、分析和预警。智能监测平台能够自动识别监测数据的异常变化，通过建立安全评估模型，对大坝的安全状况进行实时评估和预测，及时发出预警信息，并为决策提供支持。

利用互联网技术实现大坝安全监测系统的远程监控与诊断。监测人员可以通过网络随时随地访问监测平台，实时查看大坝的监测数据和运行状态。同时，专家可以远程对监测数据进行分析 and 诊断，为大坝的安全管理提供技术支持，提高应急响应能力。

自适应监测技术能够根据大坝的实际运行状况和环境变化，自动调整监测项目的监测频率和监测重点。例如，当监测数据显示大坝某部位出现异常变化时，系统自动增加该部位的监测频率，加密监测点，以便更准确地掌握大坝的安全状况。

4.3 多学科融合

水利工程与信息科学融合

大坝安全监测技术将与信息科学深度融合，利用信息技术手段实现监测数据的数字化、网络化和智能化管理。通过建立水利工程信息模型（LIM），将大坝的几何信息、物理信息、监测数据等进行集成，实现对大坝全生命周期的信息化管理。

材料科学的发展为大坝安全监测提供了新的思路和方法。研究新型的大坝建筑材料，并开发与之配套的监测技术，能够实时监测材料的性能变化和损伤情况。例如，研发具有自感知功能的智能材料，将其应用于大坝建设中，实现对大坝内部应力和损伤的实时监测。

地球科学中的地质、地震等知识对于大坝安全监测至关重要。将地球科学的研究成果应用于大坝安全监测，加强对大坝所在区域地质构造、地震活动等的监测和分析，能够提前预测地质灾害和地震对大坝的影响，采取相应的防范措施。

结语

本文对大坝安全监测技术的应用与发展进行了系统研究。介绍了大坝安全监测的目的和内容，分析了当前大坝安全监测技术在监测项目、监测方法和常用监测仪器等方面的应用现状。同时，指出了大坝安全监测技术发展过程中面临的监测数据管理与分析、监测自动化与智能化水平、监测标准与规范不完善等挑战。在此基础上，提出了大坝安全监测技术在监测技术创新、智能化监测系统建设、多学科融合及人才培养等方面的发展趋势，并通过实际案例验证了相关技术和方法的有效性。

参考文献

- [1] 赣州市赣县区小型水库监测能力提升设计[J]. 戴霖; 杨霞; 简鸿福. 水利技术监督, 2024(01). 22-29
- [2] 小型水库安全监测设计典型问题与思考[J]. 江超; 徐红; 孙银; 曹昕. 大坝与安全, 2023(02). 33-39
- [3] 小型水库管理模式创新与实践[J]. 李连国; 温朗昇. 水利技术监督, 2021(08) 14-20.
- [4] 全国水库大坝安全监测现状调研与对策思考[J]. 王健; 王士军. 中国水利, 2018(20). 46-49.
- [5] 我国小型水库管理中的问题及对策[J]. 范连志; 张小会; 李俊辉. 中国水利, 2011(20) 20-29.