

水利工程大坝安全监测技术分析

陈 婧

中国水电建设集团十五工程局有限公司 陕西 西安 710000

摘 要：本文深入剖析水利工程大坝安全监测技术，全面阐述了各类监测技术的原理、特点及应用情况。通过对不同监测技术的对比分析，揭示其在大坝安全监测中的优势与不足，为水利工程管理者合理选择监测技术提供参考，以提升大坝安全监测的准确性与可靠性，保障水利工程的安全稳定运行。

关键词：水利工程；大坝安全；监测技术

引言

水利工程大坝作为重要的基础设施，其安全运行对于防洪、发电、灌溉等诸多方面具有至关重要的意义。大坝安全监测技术作为保障大坝安全的关键手段，能够实时获取大坝运行状态的相关数据，及时发现潜在的安全隐患，为大坝的维护与管理提供科学依据。随着科技的不断进步，大坝安全监测技术也在持续发展与创新，多种先进技术被广泛应用于大坝安全监测领域。

1 大坝安全监测概述

大坝安全监测对水利工程稳定运行举足轻重。作为关键的水工建筑，大坝承担着拦洪蓄水、调节水流的重任，其安全关乎下游万千民众的生命财产安全，以及生态环境的稳定。一旦大坝出现安全问题，洪水泛滥可能冲毁房屋、农田，破坏生态平衡，后果不堪设想。有效的安全监测犹如给大坝安装了“智慧眼睛”，可实时洞察其运行状态。通过变形监测，能精准捕捉大坝整体或局部的位移、沉降，微小变化也不放过，因为这极有可能是结构异常的预警。渗流监测聚焦于大坝内部及周边水流，监测渗流压力与渗流量，以此判断大坝防渗性能，预防渗漏引发管涌、流土等严重险情。应力应变监测则紧盯大坝关键部位在不同工况下的受力状态，让技术人员及时察觉结构是否因受力不均濒临破坏。这些监测内容相辅相成，为全面、精准评估大坝安全状态提供依据，全力保障水利工程安全稳定运行^[1]。

2 常用大坝安全监测技术

2.1 变形监测技术

(1) 水准测量是经典的变形监测手段，其原理基于水平视线测量两点高差。水准仪通过提供一条水平视线，观测人员读取水准尺上的刻度，利用高差计算公式得出两点间高差变化，以此判断大坝垂直方向的变形情况。在应用场景上，它常用于大坝基础及坝体的沉降监测，特别是地形较为平坦、通视条件良好的区域。水准

测量精度较高，一般能达到毫米级，能有效捕捉大坝细微沉降变化。但操作较为繁琐，需人工逐点测量，耗费大量时间与人力，测量效率低，不适用于大面积、快速监测场景。(2) GPS测量技术借助卫星定位系统确定测点三维坐标。在大坝变形监测中，于坝体关键部位安置GPS接收机，接收多颗卫星信号，运用空间距离交会原理解算出测点坐标。该技术应用广泛，不受通视条件限制，无论是平原还是山区大坝均可实施监测。能实时、动态获取测点坐标，实现全天候作业，测量速度快，精度可达亚毫米级。不过在信号易受遮挡区域，如峡谷或建筑物密集处，定位精度会受影响。(3) 基于全站仪的变形监测技术以全站仪为核心。自动全站仪监测系统利用其自动目标识别与跟踪功能，对大坝观测目标进行角度和距离测量，进而计算目标点三维坐标。在大坝变形监测中，该系统可实现自动化监测，无需人工现场操作，能实时获取数据并传输至监控中心，一旦坝体变形便迅速报警，大大提高监测效率与及时性，测量精度也能满足要求，在复杂地形与不同天气下均可稳定工作。

2.2 渗流监测技术

(1) 测压管是渗流监测常用设备。在大坝内部钻孔，将测压管埋入预定深度，其底部与坝体渗流区域连通。通过测量管内水位高度，推算对应位置渗流压力。测压管常用于监测坝体和坝基渗流压力分布，操作简单、成本低。但它只能测量单点渗流压力，精度有限，面对复杂渗流场监测存在不足。(2) 渗压计基于传感器原理，将渗流压力转化为电信号输出，能精确测量大坝内部及周边不同位置渗流压力，精度高、适应复杂环境。测量渗流量时，常采用在大坝下游设置量水堰的方式，通过测量堰上水头，运用流量公式计算渗流量，也可使用流量计直接测量管道内渗流流量。(3) 渗流监测数据对评估大坝防渗性能意义重大。若坝体或坝基渗流压力超设计允许值，可能意味着防渗结构出现缺陷，如

防渗帷幕失效、坝体裂缝等。渗流量异常增大也是大坝存在渗漏隐患的重要信号,持续渗漏可能引发管涌、流土等破坏现象,威胁大坝安全。通过长期分析渗流监测数据,可及时察觉渗流变化趋势,判断大坝防渗性能是否稳定,为维护加固提供科学依据。

2.3 应力应变监测技术

(1) 电阻应变片工作原理基于金属导体电阻应变效应。粘贴在大坝结构表面后,随结构受力变形,电阻应变片也变形,其电阻值相应改变。测量电阻值变化,经换算得到结构表面应变值,再依据材料力学原理算出应力。电阻应变片体积小、重量轻、粘贴方便,可测大坝表面局部应力应变。但测量范围有限,易受温度等环境因素干扰,需进行温度补偿。(2) 振弦式应变计利用钢弦自振频率随受力变化特性。安装在大坝结构内或表面时,结构受力变形使钢弦拉伸或压缩,改变自振频率。测量钢弦自振频率,可计算结构应变值和应力值。该应变计精度高、稳定性好,受环境因素影响小,适用于长期、高精度应力应变监测。(3) 在大坝关键部位,如坝肩、坝踵、坝趾及内部廊道等易出现应力集中区域,安装电阻应变片和振弦式应变计。通过监测大坝在正常运行、水位变化、地震等不同工况下的应力应变分布,技术人员可清晰掌握大坝结构受力状态。一旦应力应变超出设计范围,表明大坝结构可能面临破坏风险,需及时加固或调整运行方式,保障大坝安全稳定^[2]。

2.4 环境量监测技术

(1) 气温、降水、水位等环境量对大坝安全影响显著,监测这些环境量十分必要。气温变化致使大坝材料热胀冷缩,产生温度应力。长期温度循环作用可能使坝体出现裂缝,影响结构安全。温度计有玻璃液体温度计、热电偶温度计、热敏电阻温度计等。玻璃液体温度计结构简单、读数直观,但精度较低;热电偶和热敏电阻温度计精度高、响应快,可远程测量与自动记录。(2) 降水增加坝体附加荷载,可能使坝体及周边岩土体饱和,降低抗滑稳定性。雨量计常见的有虹吸式、翻斗式等。虹吸式雨量计通过虹吸原理自动记录降水量,精度较高;翻斗式雨量计利用翻斗翻转次数计量降水量,便于自动化测量与数据传输。(3) 水位是关键环境量,大坝上下游水位差产生水压力,影响渗流和结构稳定性。水位计种类多样,如浮子式、压力式、超声波式等。浮子式水位计原理简单,通过浮子升降带动记录装置;压力式水位计依据水压与水位关系测量,精度高;超声波水位计非接触测量,安装维护方便。(4) 这些环境量数据与大坝运行状态紧密相连。气温骤变时,结合

大坝温度应力监测数据,可评估坝体是否因温度变化产生过大应力。降水增加后,关注坝体渗流和位移变化,判断是否因降水导致大坝安全状况恶化。水位变化时,分析大坝渗流压力、渗流量及结构受力状态改变。综合分析环境量与其他监测数据,能更全面、准确评估大坝安全运行状况。

3 新兴大坝安全监测技术

3.1 光纤传感监测技术

(1) 光纤传感技术基于光在光纤中传输时的干涉、散射等特性实现对大坝参数的监测。以干涉型光纤传感器为例,当外界物理量如应变、温度等作用于光纤时,会改变光纤中光的相位。通过将参考光路与测量光路的光进行干涉,依据干涉条纹的变化就能精确测量出这些物理量的改变。散射特性方面,拉曼散射、布里渊散射等被广泛应用。例如在温度监测中,拉曼散射光的强度与温度相关,通过检测拉曼散射光的强度可准确测量光纤沿线的温度分布。(2) 在大坝安全监测中,光纤传感器优势显著。其抗电磁干扰能力强,水利工程环境复杂,电磁干扰源众多,传统传感器易受影响,而光纤传感器不受电磁干扰,能保证监测数据的准确性与稳定性。精度高,可达到亚毫米级应变测量精度和0.1℃的温度测量精度,能捕捉大坝极其细微的变化。且可实现分布式监测,一根光纤可在数千米范围内布置多个监测点,连续测量沿线的参数,全面掌握大坝状态。(3) 在大坝变形监测中,将光纤传感器沿坝体表面或内部关键部位铺设,当坝体发生变形,光纤随之拉伸或压缩,通过测量光信号变化计算变形量。如某混凝土大坝,采用分布式光纤应变监测系统,实时监测坝体不同部位应变,为评估坝体变形提供精确数据。渗流监测方面,利用光纤传感器测量坝体内部孔隙水压力,依据压力变化判断渗流情况。应力应变监测时,将光纤应变片粘贴在大坝结构表面,精准测量结构应力应变分布,为结构安全评估提供依据。

3.2 无人机监测技术

(1) 无人机在大坝安全监测中主要通过搭载不同设备实现多种功能。搭载高清摄像头,可对大坝表面进行高清拍摄,获取大坝整体外观、坝体裂缝、护坡状况等详细信息。利用红外热像仪,能检测大坝表面温度分布,因渗漏部位与正常部位温度存在差异,可据此发现潜在渗漏隐患。(2) 无人机监测技术极大提高了监测效率。传统人工巡检需耗费大量人力、时间,且受地形、天气限制。无人机可快速覆盖大坝区域,短时间内完成大面积巡检,大大节省时间成本。能获取全面的大

坝表面信息,其灵活的飞行能力可到达人工难以抵达的区域,如大坝坝顶、坝坡陡峭处等,从不同角度拍摄图像,为分析大坝状况提供丰富资料。在复杂地形条件下,如山区大坝,地形崎岖、交通不便,无人机可轻松穿梭,不受地形限制,展现出强大的应用潜力。例如在某山区水库大坝巡检中,无人机快速完成巡检,发现坝体一处隐蔽裂缝,及时为大坝维护提供依据。

3.3 智能监测系统

(1) 智能监测系统由传感器网络、数据传输与处理模块、智能分析软件构成。传感器网络包含各类监测大坝变形、渗流、应力应变等参数的传感器,它们实时采集数据。数据传输与处理模块负责将传感器采集的数据快速、准确传输至处理中心,并进行初步处理,如数据滤波、格式转换等。智能分析软件则是核心部分,运用大数据、人工智能技术。通过对长期积累的大量监测数据进行挖掘分析,建立大坝运行状态模型。利用人工智能算法,如神经网络、支持向量机等,对实时监测数据与模型对比,实现异常预警。当监测数据偏离正常范围,系统自动发出警报,提示管理人员。(2) 智能监测系统显著提升了大坝安全监测的智能化水平。传统监测方式依赖人工分析数据,效率低且易遗漏问题。智能监测系统可实时、自动分析海量数据,快速准确判断大坝运行状态,及时发现潜在安全隐患,为大坝安全运行提供有力保障。例如某大型水利枢纽的智能监测系统,通过实时分析数据,提前预警坝基渗流异常,避免了可能发生的重大安全事故^[3]。

3.4 卫星遥感监测技术

(1) 卫星遥感技术通过卫星搭载的传感器获取大坝及周边区域的图像信息。在大坝宏观变形监测方面,利用合成孔径雷达干涉测量技术(InSAR),通过对比不同时间获取的雷达图像,分析相位变化,可精确测量大坝的垂直和水平方向变形,精度可达毫米级。在监测周边地质环境变化时,通过光学遥感图像分析,能发现大坝周边山体滑坡、地表沉降等地质灾害迹象。(2) 卫星遥感监测技术在大面积监测上优势明显,可覆盖大坝及其周边广阔区域,不受地理条件限制,能全面掌握区域整体状况。在长期趋势分析方面,通过多年卫星图像对

比,可清晰观察到大坝及周边环境的变化趋势,为大坝长期安全评估提供数据支持。其应用前景广阔,随着卫星技术发展,分辨率不断提高,监测精度和效率将进一步提升,在大坝安全监测中发挥更大作用。例如对某流域多个大坝进行卫星遥感监测,全面了解大坝群的运行状态及周边环境变化。

3.5 物联网技术在大坝监测中的应用

(1) 物联网技术通过将大坝监测中的各类传感器、设备连接成有机网络,实现数据实时传输与共享。传感器采集的大坝变形、渗流、应力应变等数据,通过无线传输模块上传至物联网平台。在该平台上,不同部门、不同层级人员可根据权限实时获取所需数据,打破信息孤岛。(2) 在提高大坝监测系统可靠性方面,物联网技术采用多节点、分布式架构,当部分节点出现故障,其他节点仍可正常工作,保证数据采集与传输的连续性。可扩展性强,随着大坝监测需求增加,能方便地接入新的传感器和设备,扩充监测系统功能。在远程监控方面,管理人员通过手机、电脑等终端,随时随地查看大坝运行数据,及时掌握大坝状态。设备管理上,物联网平台可对设备进行远程诊断、维护,提高设备管理效率,降低维护成本。例如某大坝物联网监测系统,实现了设备实时管理,提前发现并解决设备故障隐患,保障了监测系统稳定运行。

结语

综上所述,水利工程大坝安全监测技术多样,传统技术成熟可靠,新兴技术借助前沿科技,提升监测精度、效率与智能化程度。实际应用中,需依据大坝特性,融合多种技术,打造完备监测体系。展望未来,伴随科技进步,大坝安全监测技术必将持续革新,为水利工程安全筑牢坚实防线。

参考文献

- [1]马浩然.水利工程大坝的安全监测技术分析[J].水上安全,2024(22):40-42.
- [2]何龙.水利工程大坝的安全监测技术分析[J].百科论坛电子杂志,2020(9):1881-1882.
- [3]彭建梅.基于专利视角的大坝安全监测技术发展分析[J].云南水力发电,2024,40(8):75-79.