

光纤传感技术在水利安全监测中的应用

王鑫磊 常志飞

北京中水科工程集团有限公司 北京 100038

摘要: 水利安全监测是保障工程稳定与流域安全的核心支撑,传统技术存在监测盲区、抗干扰弱等局限。本文聚焦光纤传感技术在该领域的应用,阐述其以光为载体的核心工作原理及抗干扰、高精度等特性。重点分析技术在大坝结构、堤防工程、水环境监测及施工期管控中的应用,涵盖应变、渗流、水质等多维度监测场景。同时提出“感知-传输-分析-应用”系统架构及数据优化策略。研究表明,光纤传感技术可有效提升水利监测的精准性与实时性,为水利工程安全决策提供可靠技术支撑。

关键词: 光纤传感技术;水利安全监测;核心应用

引言:水利工程作为民生保障关键基础设施,其安全运行直接关系到流域内生命财产安全。当前我国水利工程数量多、跨度广,传统监测技术依赖点式设备,在极端环境下易出现数据滞后、失真等问题,难以适配全生命周期监测需求。光纤传感技术凭借抗电磁干扰、长距传输等优势,成为突破传统瓶颈的重要方向。本文立足水利监测实际需求,系统探讨光纤传感技术的应用价值,明确技术应用场景与系统构建路径,为推动水利安全监测智能化升级提供理论与实践参考。

1 光纤传感技术核心原理与技术特性

1.1 核心工作原理

光纤传感技术以光为信息载体、光纤为传输介质,通过感知外界环境参量对光传播特性的调制实现监测。其核心是利用光纤的光敏特性,当外界物理量作用于传感光纤时,会引起光纤中传输光的强度、相位、偏振态、波长等光学参数发生变化。系统通过光发射模块产生稳定光源,经光纤传输至传感区域,受调制后的光信号沿光纤返回,由光探测模块将光学参数变化转化为电信号,再通过信号处理单元解析得到对应物理量的具体数值,完成从光信号到监测数据的转换过程,实现对目标参量的精准感知与量化。

1.2 核心技术特性

光纤传感技术具备以下适配水利监测场景的多重优势。(1)抗干扰能力强,光纤本身绝缘、抗电磁辐射,不受水利工程中高压设备、雷电环境的影响,在潮湿、多尘环境下仍能稳定工作。(2)监测精度高,可实现对微小物理量变化的捕捉,满足水利工程结构微变形、水文参数细微波动的监测需求。(3)传感距离远,单根光纤传输距离可达数十甚至上百公里,无需频繁布设中继设备,适配大型水利工程的广域监测需求。(4)稳定

性与耐久性突出,光纤材质耐腐蚀、抗老化,使用寿命长,能适应水利工程长期监测的要求,同时可实现分布式或准分布式监测,实现对监测区域的全面覆盖^[1]。

2 水利安全监测的需求与传统技术局限性

2.1 水利安全监测的需求

水利安全监测要围绕工程结构稳定与水文环境可控构建核心需求体系,首要需求为实时性,需同步捕捉结构变形、水位涨落等动态变化,为应急处置提供时间窗口。其次是长效性,水利工程服役周期长达数十年甚至上百年,监测系统需持续稳定运行以支撑全生命周期安全评估。精准性是数据应用的基础,需降低环境干扰导致的误差,保障参数反馈真实可靠。广域覆盖需求同样突出,大型水利工程涉及坝体、堤防、库区等多区域,监测需实现无死角覆盖。极端环境适应性至关重要,需耐受高温、高湿、洪水冲击等复杂工况,确保特殊条件下监测不中断。

2.2 传统技术的局限性

传统水利监测技术难以全面适配上述需求,存在明显短板。在感知层面,多依赖点式监测设备,无法实现大范围连续监测,易形成数据盲区。信号传输上,部分技术受电磁干扰影响大,在雷雨天气或高压设备周边易出现数据失真。耐久性方面,传统传感元件多为金属材质,在潮湿、腐蚀性水环境中易老化锈蚀,需频繁更换维护,增加运维成本。实时性表现不佳,部分技术依赖人工采集数据,存在滞后性,难以满足突发情况的快速响应需求。传统技术数据处理效率低,多为单一参数独立分析,无法实现多源数据融合,难以精准判断工程安全整体态势,且设备布设受地形限制大,在复杂地质区域安装难度高^[2]。

3 光纤传感技术在水利监测中的核心应用

3.1 在大坝结构安全监测中的应用

大坝作为水利工程的核心枢纽,其结构安全直接关系到下游区域的生命财产安全,光纤传感技术通过多维度感知实现对大坝全生命周期的安全监测,具体应用集中在以下方面:(1)结构应变与应力监测。采用光纤光栅传感器与分布式光纤传感技术相结合的方式,将传感光纤预先埋入大坝混凝土浇筑层或粘贴于坝体表面关键受力区域,如坝踵、坝趾及坝体中部等应力集中部位。通过捕捉光信号波长偏移量,精准获取坝体在水位变化、温度波动及地质沉降作用下的应变分布数据,实现从点式到面式的全域应力状态感知,为坝体结构强度评估提供量化依据。(2)坝体变形与位移监测。利用光纤干涉技术与准分布式传感网络,构建大坝三维变形监测体系。在坝体垂直方向与水平方向分别布设传感光纤阵列,通过分析光相位变化捕捉坝体的沉降、水平位移及不均匀变形等微小变化,监测精度可达微米级。针对土石坝等易变形坝型,可通过光纤与坝体材料的协同变形特性,实现变形数据的实时传输与连续记录。(3)渗流与渗漏监测。沿大坝防渗墙、基础帷幕及坝体排水廊道布设分布式光纤传感系统,基于光纤对温度与振动的双重敏感特性,监测渗流过程中水流带来的温度变化及渗漏通道形成时的振动信号。通过信号处理技术区分正常渗流与异常渗漏,精准定位渗漏点位置,定位误差可控制在米级范围内,为渗漏隐患的及时处置提供精准指引。(4)坝体温度监测。在大坝混凝土浇筑阶段及运行期均布设温度传感光纤,浇筑期实时监测水泥水化热引起的温度场分布,避免温差过大导致裂缝产生;运行期监测坝体温度随环境与水位的变化规律,为分析温度应力对坝体结构的影响提供数据支撑。

3.2 在堤防工程安全监测中的实践

堤防工程作为防洪减灾的重要屏障,具有线路长、地质条件复杂、易受水流冲刷等特点,光纤传感技术凭借其广域覆盖与隐蔽式监测优势,成为堤防安全监测的核心技术手段,主要实践应用包括:(1)堤身结构完整性监测。采用分布式光纤传感技术沿堤防轴线布设传感光缆,光缆可直接埋入堤身土壤或固定于堤顶防护结构中,利用瑞利散射效应捕捉堤身内部的振动与应变信号。当堤身出现裂缝、沉陷或管涌等隐患时,会引起局部光纤光学参数变化,通过信号解析可实现隐患的早期识别与定位,有效弥补传统人工巡查难以发现深层隐患的不足。(2)堤基与岸坡稳定性监测。在堤防基础及沿线岸坡布设光纤光栅传感器阵列,重点监测堤基承载力变化及岸坡岩土体的应力状态。针对软土地基区域,通

过传感光纤监测地基沉降与不均匀变形;对崩岸风险较高的岸坡,实时捕捉岩土体滑动产生的应变变化,结合水位与气象数据,构建岸坡稳定性动态评估模型。(3)防汛期应急监测。在汛期来临前,快速在重点险工险段布设临时光纤传感系统,采用便携式传感终端实现数据的快速采集与分析。系统可耐受洪水浸泡、水流冲击等极端工况,实时监测堤防在高水位作用下的结构响应,包括堤身浸润线抬升引起的应力变化及波浪冲击导致的堤坡变形,为防汛指挥提供实时数据支撑。(4)堤防渗漏与管涌监测。结合高密度电法与光纤传感技术,构建堤防渗漏监测立体化体系。沿堤防外侧布设分布式光纤传感网络,捕捉管涌渗流产生的持续振动信号,同时通过光纤温度传感监测渗流带来的温度异常,两种监测数据融合解析,可显著提升渗漏与管涌隐患的识别准确率,监测深度可达30米范围内。

3.3 在水环境与水文参数监测中的应用

水环境与水文参数的精准监测是水资源管理与水生态保护的基础,光纤传感技术凭借其抗干扰性强、测量精度高的特点,在多参数监测中实现广泛应用,具体包括:(1)水质参数监测。基于光纤光谱分析技术与光纤光栅传感原理,开发针对水体pH值、溶解氧、浊度及污染物浓度的专用传感系统。通过在光纤端涂覆特异性敏感材料,当水体中目标参数发生变化时,敏感材料会引起光纤传输光的强度或波长变化,通过光谱分析实现参数的定量测量。系统可避免电磁干扰对测量结果的影响,适用于工业废水排放口、饮用水源地等复杂场景。(2)水位与水量监测。采用光纤光栅水位传感器与分布式光纤水位监测系统,实现不同尺度的水位监测需求。小型传感器可安装于水文站、水库取水口,通过弹性膜片带动光纤光栅形变,将水位变化转化为波长偏移量,测量精度可达 $\pm 0.1\%F \cdot S$;大型分布式系统可沿河道或库区岸线布设,实现长距离连续水位监测,为水量调度与洪水预报提供数据支持。(3)水流流速与流量监测。利用光纤多普勒效应与分布式声波传感技术,构建水流运动参数监测体系。将传感光纤布设于水体中或河道底部,当水流流经光纤时,会产生特定频率的声波信号,通过分析信号频率变化计算水流流速,结合河道断面数据实现流量的间接测量。(4)隐蔽排污监测。基于分布式光纤声波/振动传感(DAS)技术,在河流、湖泊等水域周边布设传感光缆,捕捉水下排污形成的淹没水射流带来的振动信号。通过信号主频能量分析与质心频率特征识别,可准确定位排污口位置、判断排污时段,定位精度达米级,为水环境执法与污染溯源提供技术支撑,

有效减轻人工巡检的工作负荷。

3.4 在水利工程施工期监测中的应用

水利工程施工期面临地质条件复杂、施工工序多、安全风险高等问题，光纤传感技术可实现施工过程的实时监测与动态管控，保障施工安全与工程质量，主要应用包括：（1）基坑与边坡安全监测。在水利工程基坑开挖与高边坡支护过程中，采用光纤智慧锚索与分布式传感网络相结合的方式监测。将传感光纤预先埋入锚索中心丝凹槽内，使光纤与锚索钢绞线协同变形，实时监测锚索全长的应变分布与温度变化，当变形量超过阈值时自动发出预警。针对高边坡可实现每米一个监测点的高密度覆盖，监测应变范围达0-8000微应变。（2）混凝土施工质量监测。在混凝土浇筑过程中，将温度与应变传感光纤同步埋入浇筑体，实时监测水泥水化热引起的温度变化与混凝土收缩产生的应变。通过监测数据调整浇筑速度、优化养护措施，避免因温差过大或收缩不均导致裂缝产生。在大体积混凝土结构中，可实现三维温度场与应变场的同步监测，为施工质量控制提供精准依据。（3）施工期结构应力监测。针对施工过程中的临时结构与永久结构结合部位，如围堰、导流洞、船闸闸室等，布设光纤光栅应力传感器。实时监测结构在施工荷载、水流冲击等作用下的应力变化，确保结构受力处于安全范围内。（4）施工干扰监测。利用分布式光纤传感技术监测施工活动对周边环境的影响，如桩基施工产生的振动对邻近建筑物的影响、开挖作业对地下管线的扰动等。将传感光纤布设于受影响区域，通过分析振动信号的频率与强度，评估施工干扰程度，为优化施工方案、设定安全施工距离提供数据支撑，避免施工引发次生安全事故^[3]。

4 光纤传感水利监测系统的构建与优化策略

光纤传感水利监测系统构建要以全流程可靠性为核

心，先明确水位、渗流、结构应力等核心监测指标，匹配分布式光纤传感、光纤光栅等适配技术，构建“感知-传输-分析-应用”闭环架构。硬件部署需结合水利工程地质条件，优化传感节点布设密度，确保数据采集覆盖关键风险区域，同时采用抗干扰封装技术提升极端水文环境适应性。

系统优化应聚焦数据与功能双维度：数据层面通过边缘计算预处理冗余信息，结合卡尔曼滤波算法降低噪声干扰，提升数据精度；功能层面搭建轻量化云平台，实现监测数据实时可视化与异常预警联动。此外，需建立动态校准机制，定期结合传统监测数据修正传感偏差，通过模块化升级提升系统兼容性，保障长期稳定运行，为水利工程安全决策提供精准支撑^[4]。

结束语：本文系统梳理光纤传感技术在水利安全监测中的应用体系，从技术原理出发，结合大坝、堤防等核心场景，阐明其在多维度监测中的独特优势，同时提出科学的系统构建与优化方案。相较于传统技术，光纤传感技术有效弥补了监测精度与环境适应性的短板，实现了从点式到全域监测的跨越。未来需进一步强化技术与水利场景的深度融合，攻克极端环境下的传感稳定性难题。

参考文献

- [1]李龙.光纤传感技术在水利管道泄漏监测中的应用分析[J].水上安全,2025(3):65-67.
- [2]杨宝森,沈逸星.分布式光纤管道监测技术在长距离输水工程中的运用分析[J].模型世界,2024(29):127-129.
- [3]汪东风.基于分布式光纤测温技术的渠道堤坝渗漏监测研究[D].江苏:南京理工大学,2021(05):33-34.
- [4]张伟.水利工程大坝安全监测中的光纤传感技术集成与应用研究[J].中国高新科技,2025(18):95-97.