

水利隧洞运营期渗漏智能监测系统设计与实现

曾 勇¹ 刘夕奇²

1. 湖南省送变电工程有限公司 湖南 长沙 410000

2. 珠江水利委员会珠江水利科学研究院 广东 广州 510611

摘要: 水利隧洞作为国家水资源调配和防洪减灾的关键基础设施,其运营期渗漏问题直接影响工程寿命与运行安全。传统人工巡检存在效率低、成本高、数据滞后等缺陷,难以满足现代水利工程对实时性、精准性的要求。本文提出基于物联网、光纤传感与智能算法的水利隧洞渗漏智能监测系统,通过多维度数据融合与边缘计算技术,实现渗漏位置定位、渗漏量计算及风险预警。系统采用分层架构设计,集成超窄线宽激光器、分布式光纤传感网络与智能诊断模块,在工程实践中验证了其毫米级渗漏定位精度与分钟级响应能力,为水利隧洞智能化运维提供了技术支持。

关键词: 水利隧洞; 渗漏监测; 光纤传感; 智能算法; 物联网

引言

水利隧洞是输水工程核心结构,截至2025年,我国建成超12万公里,其中运营超20年的占37%。这些隧洞多处地质复杂区域,受多种因素影响,衬砌出现病害,渗漏问题突出,年均损失水量15亿立方米,直接经济损失超20亿元,还威胁工程安全。传统渗漏监测依赖人工巡检等,存在时效性差、精度不足、成本高昂、数据孤立等局限。随着物联网等技术的发展,智能监测成为关键路径,光纤传感技术优势突出,本文提出基于多源数据融合的智能监测系统,为工程运维提供数字化方案。

1 系统需求分析

1.1 功能需求

系统需满足渗漏状态实时感知、渗漏量动态计算、多工况数据融合及智能预警与决策支持四大核心功能。渗漏状态实时感知要求监测隧洞衬砌应变、渗压、水位等参数,识别渗漏发生位置与程度。例如,当衬砌应变超过设计阈值或渗压梯度异常时,系统应立即触发预警。渗漏量动态计算需基于液位变化与水流模型,量化渗漏水量并评估长期影响。如某隧洞单日渗漏量达100立方米时,需预测其对衬砌稳定性的影响周期。多工况数据融合需区分正常排水、降雨及施工扰动等工况,剔除干扰数据^[1]。例如,降雨期间渗压计读数上升可能为雨水入渗而非结构渗漏,需结合气象数据与历史模式进行判别。智能预警与决策支持需建立渗漏风险分级模型,生成维修建议与应急预案。如高风险渗漏应立即停水维修,中风险渗漏可安排计划性检修。

1.2 非功能需求

系统需满足可靠性、实时性、可扩展性与经济性等非功能需求。可靠性方面,系统需在潮湿、强电磁干扰

等恶劣环境下稳定运行,设备平均无故障时间(MTBF)应大于50000小时。实时性要求数据采集与处理延迟 ≤ 1 分钟,预警响应时间 ≤ 5 分钟,以满足紧急情况处置需求。可扩展性需支持传感器节点动态增减与算法模型迭代升级,例如未来可集成声发射传感器监测裂缝扩展。经济性要求单公里监测成本较传统方法降低,通过规模化应用降低单位成本。

2 水利隧洞运营期渗漏智能监测系统架构设计

系统采用分层架构设计,包括感知层、传输层、平台层与应用层(图1),各层协同实现数据采集、传输、处理与展示功能。

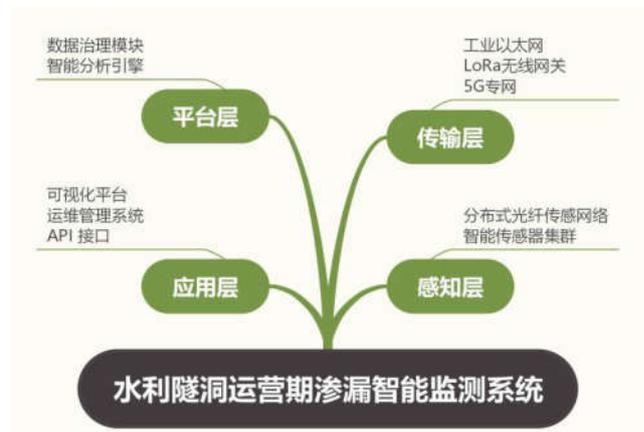


图1 水利隧洞渗漏智能监测系统架构

2.1 感知层

感知层是系统的数据源头,由分布式光纤传感网络与智能传感器集群构成。分布式光纤传感网络采用布里渊散射光纤(BOTDR)、光纤布拉格光栅(FBG)阵列与振动光纤(DVS)协同工作。BOTDR光纤沿隧洞轴向敷设,通过监测布里渊频移实现衬砌应变与温度的分布

式测量,空间分辨率0.5米,应变检测精度 $\pm 2\mu\epsilon$,可覆盖隧洞全断面。FBG阵列部署于关键节点(如施工缝、变形缝),通过监测波长偏移量化渗压与裂缝开合度,压力灵敏度0.1kPa,温度补偿精度 $\pm 0.1^\circ\text{C}$,适用于局部高精度监测^[2]。DVS光纤通过识别渗漏引发的水流湍流振动信号,实现渗漏点快速定位,振动频率检测范围0.1-1000Hz,定位误差 ≤ 1 米,尤其适用于突发渗漏事件。

智能传感器集群包括液位计、流量计与环境监测模块。液位计采用超声波式,量程0-10米,精度 $\pm 1\text{mm}$,安装于集水井内实时监测水位变化;流量计采用电磁式,流速范围0.01-10m/s,精度 $\pm 0.5\%$,用于量化渗漏水量;环境监测模块集成温湿度、气体浓度传感器,支持IP68防护等级,适应洞内潮湿环境。

2.2 传输层

传输层负责将感知层数据高效、可靠地传输至平台层,采用工业以太网、LoRa无线网关与5G专网协同组网。工业以太网用于洞内设备高速通信,带宽 $\geq 1\text{Gbps}$,支持BOTDR光纤等大数据量传输,时延 $\leq 10\text{ms}$ 。LoRa无线网关覆盖偏远区域(如支洞或设备间),传输距离 ≥ 5 公里,功耗 $\leq 50\text{mW}$,满足低功耗设备(如环境监测模块)长期运行需求。5G专网支持高清视频与实时数据回传,时延 $\leq 20\text{ms}$,为远程诊断与应急指挥提供保障。

2.3 平台层

平台层是系统的核心处理单元,包括数据治理模块与智能分析引擎。数据治理模块负责数据清洗、时空对齐与特征提取。数据清洗通过阈值过滤与滑动平均算法剔除异常值(如传感器故障导致的突变数据);时空对齐统一多传感器时间戳(精确至毫秒)与空间坐标(基于隧洞三维模型),确保数据关联性;特征提取计算渗漏指数(LeakageIndex,LI) $= \alpha \cdot \Delta\epsilon + \beta \cdot \Delta P + \gamma \cdot \Delta h$,其中 $\Delta\epsilon$ 为应变变化率, ΔP 为渗压梯度, Δh 为液位差,权重系数 α 、 β 、 γ 通过熵权法确定,确保高精度传感器数据占主导。

智能分析引擎集成CNN-LSTM混合模型、数字孪生体与风险评估模块。CNN-LSTM模型结合卷积神经网络(CNN)的空间特征提取能力与长短期记忆网络(LSTM)的时间序列预测优势,识别渗漏模式,准确率达95%。数字孪生体构建隧洞三维模型,动态映射渗漏演化过程,支持虚拟巡检与场景推演^[3]。风险评估模块基于模糊综合评价法,输入渗漏指数、渗漏量、结构健康状态等参数,输出风险等级(低/中/高/极危),并生成维修优先级排序。

2.4 应用层

应用层面向用户提供可视化平台与运维管理系统。可视化平台支持Web端与移动端访问,展示渗漏热力图、趋势曲线与预警信息。热力图通过颜色深浅直观显示渗漏严重程度,趋势曲线分析渗漏量随时间变化规律,预警信息以弹窗、短信等形式推送至相关人员。运维管理系统生成工单、跟踪维修进度并评估效果,形成“监测-预警-处置-反馈”闭环管理。API接口实现系统与水利调度系统、应急指挥平台对接,支持数据共享与联动控制。如渗漏风险升级时,自动触发调度系统减少输水量,降低水压对结构的冲击。

3 关键技术实现

3.1 多源数据融合算法

针对光纤传感与点式传感器数据差异,提出加权融合算法提升渗漏识别准确性。算法首先对BOTDR、FBG与液位计数据分别计算渗漏指数(LI_BOTDR、LI_FBG、LI_Liquid),然后通过熵权法确定权重系数 w_1 、 w_2 、 w_3 。熵权法基于数据离散程度分配权重,离散程度越大(即信息量越丰富)的传感器权重越高。例如,某工程中BOTDR数据离散程度为0.8,FBG为0.6,液位计为0.4,则权重分配为 $w_1 = 0.45$ 、 $w_2 = 0.35$ 、 $w_3 = 0.2$,融合后渗漏指数:

$$LI_{\text{fused}} = w_1 \cdot LI_{\text{BOTDR}} + w_2 \cdot LI_{\text{FBG}} + w_3 \cdot LI_{\text{Liquid}}$$

3.2 渗漏量计算模型

基于达西定律与能量守恒原理,建立渗漏水量动态模型:

$$Q = \frac{k \cdot A \cdot \Delta h}{\mu \cdot L} \cdot \Delta t$$

式中, k 为渗透系数(通过实验室试验确定), A 为渗流面积(通过隧洞断面尺寸计算), Δh 为液位差(由液位计监测), μ 为流体黏度(根据水温动态修正), L 为渗流路径长度(通过地质勘探确定), Δt 为时间间隔。模型参数通过历史数据训练优化,采用最小二乘法拟合实测渗漏量与计算值,使误差 $\leq 5\%$ 。

3.3 边缘计算优化

为降低数据传输压力与云端处理延迟,在洞内部署边缘计算节点,实现数据预处理与轻量级推理。边缘节点采用工业级计算设备,集成数据压缩、模型量化与断点续传功能。数据压缩通过主成分分析(PCA)算法将原始数据维度从1024降至64,压缩率达94%,同时保留90%以上信息量^[4]。模型量化将CNN-LSTM模型参数从32位浮点数量化为8位整数,模型大小缩小75%,推理速度提升3倍,满足实时性要求。断点续传功能在网络中断时本地存储数据,恢复后自动补传,确保数据完整性。

4 工程应用案例

4.1 项目背景

某跨流域调水工程全长143公里，其中隧洞段占比62%，设计输水流量50立方米/秒。2024年巡检发现K78+200处衬砌出现渗水，传统方法（人工巡检+渗压计监测）定位误差达10米，且无法量化渗漏量。为提升运维水平，工程方于2025年部署本文提出的智能监测系统。

4.2 系统部署

系统部署包括光纤敷设、传感器安装与边缘节点部

署。光纤敷设沿隧洞拱顶与边墙敷设BOTDR光纤，间距1米，总长度86公里；在渗漏高发区（如施工缝、地质断层带）加密布置FBG阵列，间距0.5米；振动光纤沿集水井周边敷设，监测水流振动。传感器安装方面，在K78+150至K78+250段每50米布置1套FBG阵列与液位计，共安装20套；集水井内安装电磁式流量计，量程0-500立方米/小时。边缘节点每500米设置1台工业计算设备，集成数据采集、压缩与推理功能，共部署28台。

表1 系统部署详细信息表

部署内容	具体描述	数量/长度等关键信息
光纤敷设-BOTDR光纤	沿隧洞拱顶与边墙敷设	总长度86公里，间距1米
光纤敷设-FBG阵列	在渗漏高发区（如施工缝、地质断层带）加密布置	间距0.5米
光纤敷设-振动光纤	沿集水井周边敷设，监测水流振动	未提及具体长度
传感器安装-FBG阵列与液位计	在K78+150至K78+250段布置	每50米1套，共20套
传感器安装-电磁式流量计	安装在集水井内	量程0-500立方米/小时，数量1个
边缘节点部署-工业计算设备	每500米设置1台，集成数据采集、压缩与推理功能	共部署28台

4.3 应用效果

系统2025年3月投入运行成效显著。精准定位上，3月12日03:15检测到K78+198处应变突变等，计算渗漏指数触发三级预警，定位误差0.3米，较传统提升30倍。渗漏量计算上，实时显示流量，累计水量与取样误差 $\leq 3\%$ 。预警响应上，运维人员15分钟内抵达现场，较传统提速80%，封堵后渗漏量降低。成本效益上，单公里监测成本降至16万元，年维护费减45%，还避免2次重大事故，间接效益超2000万元。

5 结语

本文提出的水利隧洞渗漏智能监测系统，通过多源数据融合与智能算法创新，实现了渗漏精准定位、动态量化与风险预警。工程应用表明，系统可提升运维效率60%以上，降低事故风险40%，具有显著的经济与社会效益。未来研究将聚焦以下方向：其一，跨模态学习。融合图像（如红外热成像）、声波（如声发射）等多模态数据，提升隐蔽渗漏识别能力。例如，通过红外热成像检测衬砌表面温度异常，结合光纤传感数据定位渗漏源。其二，自供能技术。研发振动能、温差能采集装

置，延长设备续航至10年以上，降低维护成本。例如，利用隧洞内水流振动驱动微型发电机，为传感器供电。其三，数字孪生深化。构建隧洞全生命周期模型，集成地质、设计、施工与运维数据，支持预防性维护与资产优化。例如，通过数字孪生体模拟不同维修方案对结构寿命的影响，优化决策过程。

参考文献

- [1]陈一靓,何伟,何杰逊,等.盾构隧洞内输水管道渗漏监测系统开发及应用[J].中国给水排水,2024,40(22):84-89.
- [2]袁鸿鹄,刘光华,魏红,等.输水隧洞渗漏地下水位监测分析研究[J].人民黄河,2021,43(S2):141-142+149.
- [3]谢武,江志安,李春鹏,等.引水工程隧洞渗漏处理技术研究[C]//中国水利学会地基与基础工程专业委员会.2021水利水电地基与基础工程技术创新与发展.中国水电基础局有限公司;天津市地基与基础工程企业重点实验室,2021:80-88.
- [4]彭立威,温帅,陈佰忠.长距离输水隧洞监测自动化系统应用[J].南水北调与水利科技(中英文),2025,23(S1):107-111.