

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.22.014

# 盾构隧洞内输水管道渗漏监测系统开发及应用

陈一靓<sup>1</sup>, 何伟<sup>1</sup>, 何杰逊<sup>2</sup>, 张路蔚<sup>2</sup>

(1. 浙江省水利水电勘测设计院有限责任公司, 浙江 杭州 310002; 2. 中国船舶集团有限公司第七一五研究所, 浙江 杭州 310023)

**摘要:** 地下管道在长距离输水工程中应用广泛, 输水管道的渗漏安全监控及预警已成为行业研究的重点。针对这一重大行业需求, 以嘉兴市域外配水工程为依托, 引入分布式光纤传感技术和准分布式水声侦听技术, 搭建了实时在线渗漏监测系统。应用结果表明, 采用这两种监测技术可以精准定位30 s内渗漏水量>20 L的渗漏点, 定位误差在10 m之内。

**关键词:** 长距离输水管道; 渗漏监测; 分布式光纤传感技术; 准分布式水声侦听技术; 盾构隧洞

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2024)22-0084-06

## Development and Practical Application of a Leakage Monitoring System for Water Pipeline in Shield Tunnel

CHEN Yi-jing<sup>1</sup>, HE Wei<sup>1</sup>, HE Jie-xun<sup>2</sup>, ZHANG Lu-wei<sup>2</sup>

(1. Zhejiang Design Institute of Water Conservancy and Hydro-electric Power Co. Ltd., Hangzhou 310002, China; 2. The 715 Research Institute of CSSC, Hangzhou 310023, China)

**Abstract:** Underground pipeline has been extensively utilized for long-distance water transmission, and the safety monitoring and early warning of water transmission pipeline leakage has been concerned. Based on the extraterritorial water distribution project in Jiaying, a real-time online leakage monitoring system is built by introducing distributed optical fiber sensing and quasi-distributed underwater acoustic detection methods. The application results demonstrate that these two monitoring techniques can accurately located leakage points with a volume exceeding 20 L within 30 seconds, and the positioning error is no more than 10 m.

**Key words:** long-distance water pipeline; leakage monitoring; distributed optical fiber sensing technology; quasi-distributed underwater acoustic detection technology; shield tunnel

### 1 研究背景

我国为解决水资源地理分布不均的问题,“十三五”期间大规模修建了长距离输配水工程<sup>[1]</sup>。地下管道压力输水具有安全可靠、输水量大、不占用地表空间、能耗低等优势,得到了广泛应用<sup>[2-5]</sup>。但地下

压力输水管道的建设随之带来渗漏及爆管问题,目前针对长距离压力输水管线工程渗漏及预警方面的单点渗漏识别开展了一些研究工作<sup>[6-13]</sup>,但仍无法解决实际工况的多渗漏点干扰和环境背景噪声影响的问题,降低了识别技术的精准度。

基金项目: 浙江省水利厅科技项目(RC1905、RC2231)

通信作者: 何伟 E-mail: hewei08@yeah.net

以嘉兴市域外配水工程为案例,探讨引入分布式光纤传感技术和准分布式水声侦听技术,构建一套实时在线渗漏监测系统。通过监测水流对管壁的冲刷引起的振动和声波来检测渗漏情况,并对可能的爆管风险进行预警。同时将该系统应用于监控隧洞或管道外部第三方开挖引起的风险,有效降低输水结构被外部施工破坏的可能性。

## 2 输水管道渗漏实时在线监测技术及原理

### 2.1 管道渗漏监测技术

常用的管道渗漏监测技术有人工巡检、负压波技术、次声波技术、分布式光纤传感技术、光纤声侦听技术。其中,光纤声侦听是利用水声侦听传感器接收声波对水下目标进行探测、分类、定位和识别的技术;而分布式光纤传感则是基于光时域反射技术,实现长距离高精度振动信号及多点振动同时检测和定位。这两种技术比较适用于本工程这种新建的长距离输水管道。

### 2.2 技术原理

光纤声侦听技术,是利用声学 and 振动原理来准确查找、识别深埋于地下的目标的技术。单元光纤水听器及其信号检测技术是光纤水听器阵列复用的基础。干涉型光纤水听器原理基于光纤干涉仪,其中 Michelson 干涉仪型应用最为广泛。Michelson 干涉仪型光纤水听器光路结构见图 1。

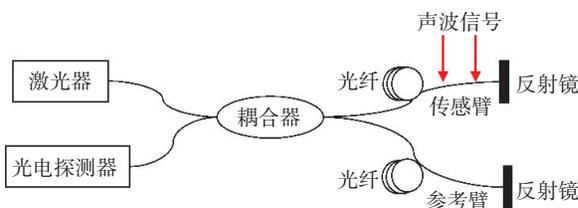


图 1 Michelson 干涉型光纤水听器示意

Fig.1 Schematic diagram of Michelson interferometric optical fiber hydrophone

在各种光纤水听器多路复用技术方案中,时分复用技术和波分复用技术应用较多。时分复用技术可以实现较大数量的水听器复用,易与其他复用技术相结合,而波分复用技术则可以弥补单纯时分复用系统的不足,是光纤水听器阵列的关键技术之一。

分布式光纤传感技术利用光纤作为长距离连续线性传感器和传输信息的载体,实现对传感光缆沿途的振动或者压力信号的分布式采集和分析处

理。该系统部署在现场的传感光缆无需供电,无源、本安、不受电磁干扰。技术原理见图 2。

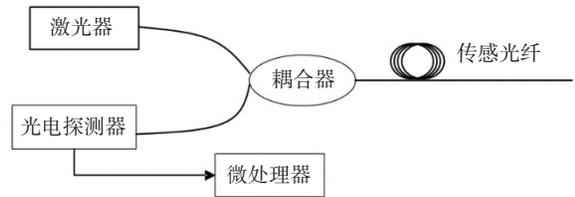


图 2 基于瑞利散射原理的光纤振动传感技术结构

Fig.2 Structure diagram of optical fiber vibration sensing technology based on Rayleigh scattering principle

AI 自学习和模式识别技术,是通过建立复杂的数学模型和分析模型,采用神经网络方法对管道建模,学习区分施工或其他环境因素引起的误报声音和泄漏信号。通过长期在线运行建立音频库,使用数据集对泄漏检测模型进行训练,以实现隧道或管道的第三方开挖和渗漏预警。

泄漏水声信号种类可分为 3 种:①振动摩擦声,即泄漏的喷射水与管壁摩擦产生的振动信号,其频率通常为 0~4 500 Hz;②水地撞击声,即泄漏口流出的水与环境中的介质撞击产生的信号,频率通常为 100~800 Hz;③介质碰撞声,指喷出管道的水带动周围介质相撞产生的声音,频率较低,通常为 20~300 Hz。本系统通过采集振动摩擦声监测管道是否渗漏。

## 3 试验测试

在某屋顶上模仿嘉兴域外配水工程输水管线,敷设渗漏在线监测系统,试验管道长 180 m,直径 8 cm,压力 0.2 MPa。设计方案见图 3。

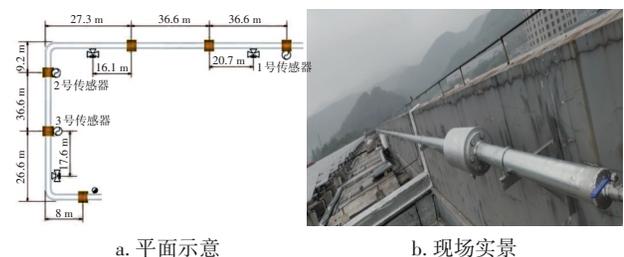


图 3 试验现场

Fig.3 Testing site

打开中间阀门进行泄漏模拟,其中一个声波传感器对传回振动信号的时域波形见图 4(a),当泄漏发生时时域波形发生明显起伏,时频分析见图 4(b),在一定带宽内有明显能量分布。

在管道中间位置对管道进行敲击扰动试验,该

声波传感器接收的敲击信号时域波形见图4(c),时域波形在敲击时刻有明显扰动,幅度出现峰值状急剧变化,且峰值出现时刻与敲击时间相符,敲击信号时频分析见图4(d),显示敲击信号的频谱具有全频带能量分布。

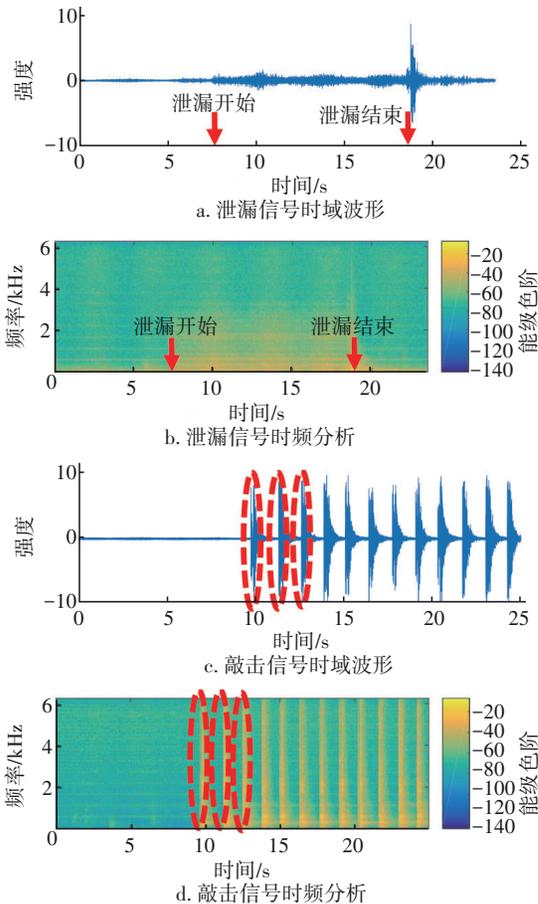


图4 管道泄漏和敲击状态信号分析

Fig.4 Signal analysis of pipeline leakage and tapping status

根据当前管道泄漏监测系统报警机制,当3个传感器同时上传波形时,可以判断出泄漏或者敲击的位置。同时分布式传感光缆也发出报警信号,定位精度达到厘米级。试验过程中多次开关阀门和敲击管道,两个系统的报警准确率达100%。

试验证明:分布式光纤传感系统具有精准定位事件的优势,光纤水听器在甄别不同声音(特征图谱)方面表现突出。两者联合可扬长避短,提高泄漏监测系统的可靠性。

## 4 工程应用

### 4.1 工程概况

嘉兴市域外配水工程从杭州境内引千岛湖水

至嘉兴市,设计引水量为 $2.3 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。全线采用密闭管道压力输水,线路全长172 km,杭州市主城区内输水总管选择地下盾构隧洞内敷设输水管道的方案,DN300输水钢管壁厚28 mm,采用Q345钢材质。钢管连续敷设,隧洞内不设置伸缩节。钢管底部 $135^\circ$ 范围与盾构管片之间设置混凝土基座。

### 4.2 渗漏监测系统设计

渗漏监测系统由信号采集子系统、传输系统、信号处理和分析子系统组成。根据工程特点,管道渗漏监测方案见图5。

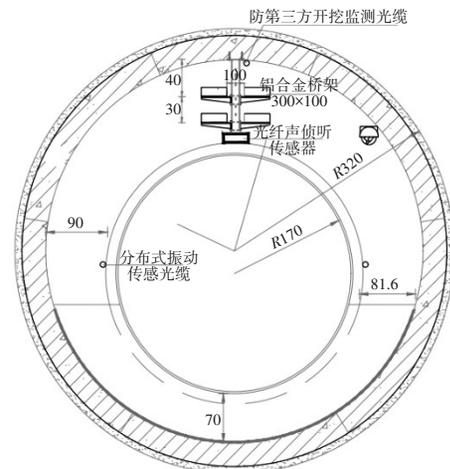


图5 信号采集子系统布置

Fig.5 Layout of signal acquisition subsystem

信号采集子系统包括分布式光纤测振系统和光纤声侦听系统。输水管道总长23 km,结合水听器的侦听范围,设计输水管道上每隔1 km左右配置一个光纤声侦听传感器,贴于管道外壁,声侦听传感器阵列固定于电缆桥架上。为了加强信号采集的准确性,将定制的微振动传感光缆沿管道上方呈 $30^\circ \sim 60^\circ$ 粘贴在管道外壁的两侧。将振动传感光缆连接到机房的振动传感主机。同时,采用分布式光纤测振技术,在隧洞内壁顶部沿直线安装一个分布式光纤振动传感器,以监测隧洞第三方开挖的情况。

信号传输子系统主要由传输光缆组成。在分布式光纤传感测振系统中,采用单模D. 652光纤沿管道两侧和盾构隧洞内壁顶部敷设,集成传感和传输功能,将信号传输到位于D8井内的信号处理子系统。在光纤水声侦听系统中,通过敷设在电缆桥架内的光纤,将各个水声侦听传感器串联,将光信号汇总并传输至D8井。工程调度控制中心设在嘉兴

南湖泵站,与D8井相距数十公里。D8井与工程进度控制中心之间采用租用运营商的数字电路方式进行通信。

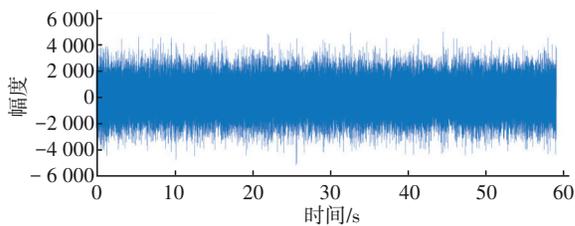
信号处理和分析子系统通过具备自学习和模式识别能力的人工智能技术,对比分析沿线管道泄漏引发的微振动信号、水流以及环境背景噪声,经过综合智能分析,在杜绝漏报误报的前提下,及时发出管道泄漏的报警信号,并对可能导致管道爆裂和危及管道安全的第三方施工破坏发出预警和报警。同时,在管道地理信息系统中精确显示异常点的位置,方便运维部门采取应急预案,减少或避免重大事故的发生。

考虑到上传所有传感器接收到的信号将占用大量宽带资源,根据工程实际情况,决定只将处理好的报警信号上传到南湖泵站控制中心。信号处理和智能分析系统的服务器安装在D8井配电房的机柜中,采用UPS电源供电,以避免市电波动或意外停电对系统的影响。分析结果通过设置在D8井的管理区交换机上传到南湖泵站调度中心,进行统一的数据资源管理。

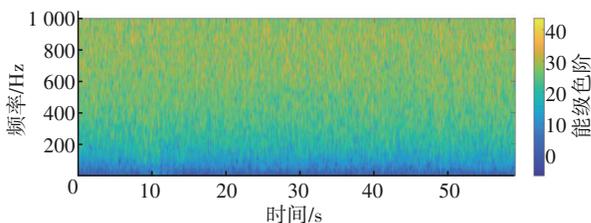
### 4.3 实测数据

嘉兴域外配水工程于2018年2月开工,2021年7月通水,2022年底智慧运行管理系统(包含这套渗漏在线监测系统)基本完工。在监测系统刚开始投运时,为验证系统有效性,采用高压喷水(40 L/min)对通水的管道进行敏感性验证。试验信号分析结果如图6所示。

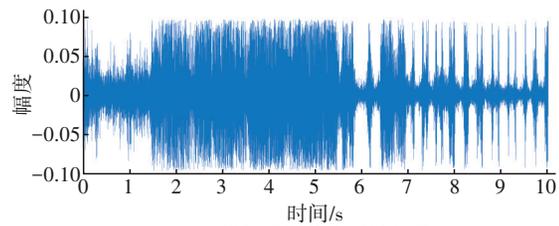
管道无扰动状态下的时域波形与频谱分析分别见图6(a)、(b),无明显特征。



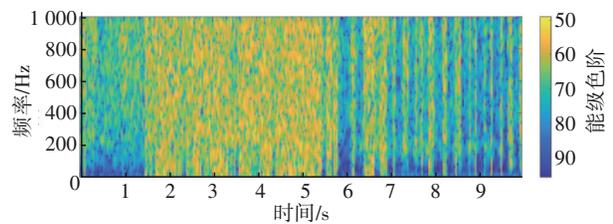
a. 无扰动状态时域信号



b. 无扰动状态时频谱



c. 模拟泄漏状态时域信号



d. 模拟渗漏状态时频谱

图6 管道试验信号分析

Fig.6 Pipeline test signal analysis

采用高压水枪对管壁进行冲击模拟管道泄漏试验,模拟泄漏状态下的时域波形与频谱分析分别见图6(c)、(d),时域波形出现显著扰动,对应时频分析体现全频带能量分布。

在系统刚开始投运时,由于AI系统需要自学习时间,误报较多,给后台工程管理人员带来了一定的困扰。研究表明,卷积神经网络(CNN)作为深度学习方法在地下水管泄漏检测中表现出色,可以对泄漏和非泄漏的水声数据进行分类。工程尝试使用10×10×1数据维度的输入,卷积尺寸2×2,对2000组敲击信号进行训练,学习过程见图7(a),收敛曲线见图7(b)。训练集和验证集两条曲线下降且收敛,证明该组数据训练效果良好。经过几个月的甄别学习,系统可以不断降低误报率。

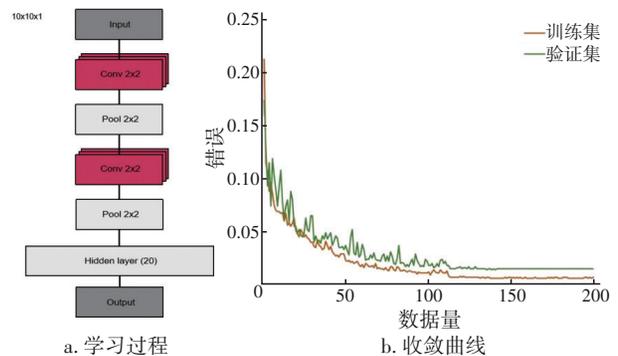


图7 CNN训练结果

Fig.7 CNN training result

该系统在运行期间状态良好,并准确监测到几起防第三方开挖工程事件和泄漏事件,验证了监测系统的可靠性。

事件①:墙体拆除事件,发生时间段监测数据分析分别见图8(a)、(b),现场使用打桩机进行墙体破碎,在时域与时频谱图上清晰看到打桩机工作的噪声特征,特征全频带分布,低频更为明显,并随着打桩的节奏展现出明暗交替的瀑布图。

事件②:厂房破除事件,发生时间段监测数据分析分别见图8(c)、(d),现场使用工程挖掘机进行墙体推倒,在时域与时频谱图上清晰看到挖掘机的工作噪声。由于挖掘机在工作过程中由工人操作决定挖掘节奏,所以不会出现明显的节奏特征;由于挖掘机在工作时产生的噪声更为复杂,所以特征在全频带的分布更为均匀,每次动作的时间也较长。

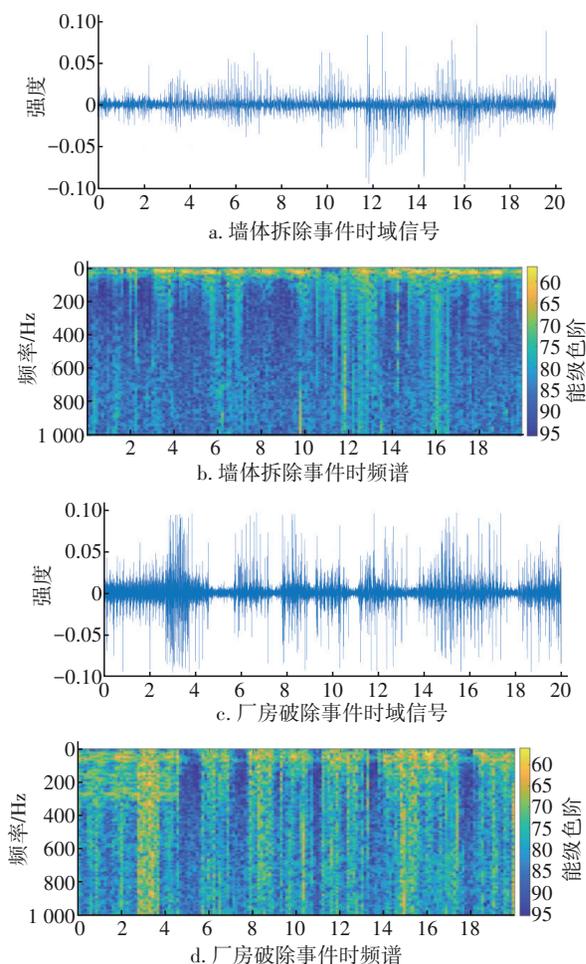


图8 墙体拆除和厂房破除事件的信号分析

Fig.8 Signal analysis of wall demolition and plant breaking event

事件③:某日光纤测振系统报警并给出详细的定位(见图9),通过传回的画面发现地下盾构隧洞内壁发生渗水。该事件表明,只要振动光纤探测到信号,无论是管道渗漏还是隧洞内发生泄漏,系统

都能准确报警并给出报警位置,为地下隧洞的安全提供了更进一步的保证。

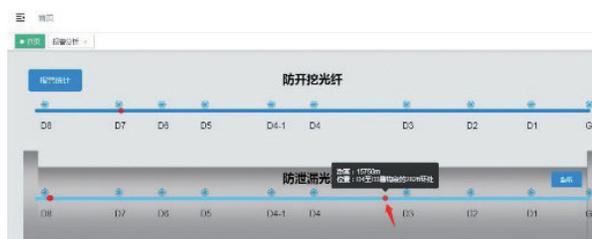


图9 光纤测振系统报警

Fig.9 Optical fiber vibration measurement system alarm

#### 4.4 系统运维

该系统设备采购以及后期运维总投资为300万元。试运行期间,每周人工现场采集数据,设备运行稳定后,改为1个月采集一次现场数据。利用这些现场数据训练模型,更新音频库和模型,减少误报和漏报率。同时在全线范围模拟挖机振动试验和小流量管道泄漏试验,保证系统对微振和泄漏探测的可靠性。该系统投运后,多次进行了随机盲测试验,并根据运行人员要求对系统界面进行升级改造。

#### 5 结论

① 系统论述了基于光纤测振和水声侦听检测技术进行工程安全监测的基本原理,并通过室外试验进行了初步验证。

② 依托嘉兴域外配水工程,首次在长距离调水工程中搭建了输水管道渗漏和防第三方开挖的实时在线监测系统,并可标注具体位置信息,为工程运行安全风险的预防和预警奠定了坚实的基础。这种监测技术在长距离输调水工程中具有广阔的应用前景。

#### 参考文献:

[1] TAO T, XIN K L. A sustainable plan for China's drinking water[J]. Nature, 2014(7511):527-528.  
 [2] 张军. 新疆LLK供水工程长距离输水管道管径、管材的选择[J]. 广西水利水电, 2018(6):54-56.  
 ZHANG Jun. Diameter and material selection of long distance water pipeline for Xinjiang LLK water supply project [J]. Guangxi Water Resources & Hydropower Engineering, 2018(6):54-56 (in Chinese).  
 [3] 郭新蕾, 马慧敏, 李甲振, 等. 管道系统漏损控制技术进展[J]. 水利水电技术, 2018, 49(6):65-71.

- GUO Xinlei, MA Huimin, LI Jiazhen, *et al.* Review on advance of technique for leakage control of pipeline system [J]. *Water Resource and Hydropower Engineering*, 2018, 49(6):65-71 (in Chinese).
- [4] 白若男. 供排水管网检测技术发展现状[J]. *企业科技与发展*, 2022(2):43-45.
- BAI Ruonan. Development status of detection technology for water supply and drainage pipe networks [J]. *Sci-Tech & Development of Enterprise*, 2022(2):43-45 (in Chinese).
- [5] 史昆明. 基于光纤水听器的输水管道渗漏识别方法研究[D]. 郑州:郑州大学, 2020.
- SHI Kunming. Research on Leakage Identification Method of Water Pipeline Based on Optical Hydrophone [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2020 (in Chinese).
- [6] 许扬. 面向管道渗漏检测的分布式光纤传感系统设计与研究[D]. 太原:太原理工大学, 2021.
- XU Yang. Design of Distributed Optical Fiber Sensing System for Pipeline Leakage Detection [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2021 (in Chinese).
- [7] 吴海颖, 朱鸿鹄, 朱宝, 等. 基于分布式光纤传感的地下管线监测研究综述[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2019, 53(6):1057-1070.
- WU Haiying, ZHU Honghu, ZHU Bao, *et al.* Review of underground pipeline monitoring research based on distributed fiber optic sensing [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2019, 53(6):1057-1070 (in Chinese).
- [8] 张禄. 基于水中听音给水管道泄漏检测技术的研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2009.
- ZHANG Lu. Research on Detecting Supply Water Pipeline Leaked of Hydrophones Based on Listening Sound into Water [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2009 (in Chinese).
- [9] 凌骐, 周林虎, 刘广林, 等. 大口径长距离输水管道渗漏原位监测研究[J]. *给水排水*, 2014, 40(2):112-116.
- LING Qi, ZHOU Linhu, LIU Guanglin, *et al.* Study on the in situ leakage detection of the long-distance water transmission pipe with large diameter [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2014, 40(2):112-116 (in Chinese).
- [10] 刘永莉, 付勤友, 陈智, 等. 基于分布式光纤测温系统的管廊管道渗漏监测模型试验[J]. *中国科技论文*, 2022, 17(8):893-899.
- LIU Yongli, FU Qinyou, CHEN Zhi, *et al.* Experimental research on leakage monitoring model of pipe gallery based on distributed optical fiber temperature measurement system [J]. *China Sciencepaper*, 2022, 17(8):893-899 (in Chinese).
- [11] 马慧敏. 供水管网泄漏瞬变流检测技术及实验系统研发[D]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2019.
- MA Huimin. Research and Development of Leakage Transient Flow Detection Technology and Experimental System for Water Supply Network [D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2019 (in Chinese).
- [12] 褚选选. 基于噪声的长距离输水管道渗漏监测研究[D]. 郑州:郑州大学, 2017.
- CHU Xuanxuan. Seepage Monitoring Research on Long Distance Water Transmission Pipeline Based on Noise Signal [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2017 (in Chinese).
- [13] 何存富, 杭利军, 吴斌. 管道泄漏检测分布式光纤振动传感器研制[J]. *仪器仪表学报*, 2006, 27(6):1595-1597.
- HE Cunfu, HANG Lijun, WU Bin. Development of distributed fiber optic vibration sensor for pipeline leakage detection [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, 27(6):1595-1597 (in Chinese).

**作者简介:**陈一靓(1977- ),女,浙江杭州人,硕士,高级工程师,主要从事水利水电工程设计工作。

**E-mail:**494606679@qq.com

**收稿日期:**2023-10-08

**修回日期:**2023-12-12

(编辑:衣春敏)