

4.3 效能提升效果评估结果

通过对比永嘉县山河供水有限公司实施低空经济赋能前后的运营数据,显著效能提升在多维度得以量化验证。在成本效益方面(见表1),无人机巡检展现出突出的经济性优势。传统人工巡检模式下,单位面积年均综合成本高达1820元/平方公里,而无人机模式将该指标降至620元/平方公里,降幅达65.9%,实现了成本缩减,提高了效能管理水平。

表1 成本效益对比表

成本类别	传统巡检模式	无人机巡检模式	变化幅度
单位面积年综合成本(元/km ²)	1820	620	↓ 65.9%
年均人力成本(万元)	136.5	80.3	↓ 41.2%
年设备维护费用(万元)	754	469	↓ 37.8%
单次异常处置成本(万元)	8.2	3.5	↓ 57.3%

时间效率提升更为显著(见表2)。全域水利设施完整巡检周期由传统模式的22天压缩至7.3天,效率提升66.8%。异常响应时间从平均34小时缩短至4.2小时,响应速度提高87.6%。地形覆盖能力指标显示,复杂区域(坡>25°)覆盖率由人工巡检的62.3%提升至98.1%,盲区面积缩减85.4%。这种时效性突破直接转化为风险管理效益,2023年台风季通过无人机提前48小时发现3处高危边坡位移隐患,避免直接经济损失逾1200万元。

表2 时间效率分析表

时效指标	传统巡检模式	无人机巡检模式	提升幅度
全域巡检周期(天)	22.0	7.3	↑ 66.8%
平均异常响应时间(小时)	34.0	4.2	↑ 87.6%
复杂地形覆盖率(%)	62.3	98.1	↑ 57.5%
数据更新频率(次/月)	1.2	4.5	↑ 275%

安全效能改善尤为突出(见表3)。高危区域人工巡检事故率从每千小时作业1.8起降至0.2起,降幅达88.9%。2022-2023年度实现零人员伤亡,而此前三年平均年均均有1.3起轻伤事故。缺陷识别准确率提升至96.7%,较人工识别提

高32.5个百分点,误报率下降至3.1%。安全系数提升还体现在预防性维护比例上,计划性维护占比从45.6%提高到78.3%,应急抢修比例相应下降。

表3 安全改善数据表

安全指标	传统巡检模式	无人机巡检模式	改善幅度
高危区域事故率(起/千小时)	1.8	0.2	↓ 88.9%
年人员伤亡事故数(起)	1.3	0.0	↓ 100%
缺陷识别准确率(%)	64.2	96.7	↑ 50.6%
预防性维护占比(%)	45.6	78.3	↑ 71.7%

长期管理效能提升体现在决策模式变革。基于无人机采集的高精度时空数据,永嘉县山河供水有限公司建立起设施健康度评价模型,实现从“事后处置”向“事前预防”的管理转型。

5 结语

本研究以永嘉县为实证样本,深入验证了低空经济对水利工程巡检的深度赋能成效。在山区复杂环境中,无人机智能巡检系统大显身手,凭借灵活性与智能性实现了高效覆盖,让巡检不再受地形掣肘。通过构建多维度评估体系量化分析,成果斐然:成本大幅降低65.9%,响应速度显著提升87.6%,事故率更是锐减88.9%。这一系列数据表明,巡检管理模式成功从被动的事后处置转变为积极的事前预防。不仅如此,在技术实施进程中积累形成的数据资产库,为设施数字孪生系统的搭建筑牢了根基。同时,管网漏损率下降34.2%这一衍生效益,充分彰显了该技术的外溢价值,为水利工程的可持续发展注入了强劲动力。

参考文献

- [1] 刘雪梅,王立虎,董怡,等.融合大模型与事理图谱的水利工程风险识别[J/OL].计算机工程与应用,1-16[2025-08-05].
- [2] 孙维亚,赵宇飞,刘昊,等.“人工智能在水利建设与管理中的应用”最新进展[J/OL].水利建设与管理,2025,(04):1-4[2025-08-05].
- [3] 杨阳蕊,潘世峰,刘雪梅,等.多模态知识图谱与大模型协同的水利工程风险应对决策推荐[J].水利学报,2025,56(04):519-530.

Application and research of intelligent leakage detection technology in Urban Water Supply System

Tianhuai Cui Xiaoqiang Zhang

Shaanxi Water Supply Development and Water Supply Group Co., LTD., Xi'an, Shaanxi, 710000, China

Abstract

The research aims to explore how the intelligent water leakage detection technology can effectively help the water leakage monitoring work in the field of urban water supply. As an advanced intelligent detection technology, online hydrophone plays a positive and significant role in improving the efficiency, accuracy and timely response ability of water leakage detection, and helps to improve the intelligent level of water resources management, and provides beneficial support for ensuring the safety of water supply and the rational development and utilization of water resources. Therefore, the in-depth study of the application of intelligent leakage detection technology has both theoretical guidance value and practical

Keywords

urban water supply system; intelligent leakage detection; water resources management; economic benefits

城镇供水系统智能漏损检测技术应用与研究

崔天怀 张小强

陕西水务发展供水集团有限公司, 中国·陕西 西安 710000

摘要

研究旨在探索智能漏损检测技术如何在城镇供水领域中有效助力漏水监测工作。在线水听器作为一种先进的智能检测技术,对于提高漏水检测的效率、精确度以及及时响应能力具有积极而显著的作用并有助于提升水资源管理的智能化水平,为保障供用水安全和水资源合理开发利用提供有益支持。智能漏损检测技术在城镇供水系统的应用研究在减少水资源浪费、保障供水安全、提升经济效益和推动行业整体性智慧水务建设的探索、实践、发展等方面提出了思考和努力。因此,深入研究智能漏损检测技术应用,既有理论指导价值,也有现实意义。

关键词

城镇供水系统; 智能漏损检测; 水资源管理; 经济效益

1 引言

根据相关资料,目前,我国整体市政供水管网漏损水量,每年高达数十亿吨,不仅造成了巨大的经济损失,还可能引发公共卫生安全事件,形成次生灾害后果。因而,如何有效地控制和减少供水系统的漏损,已成为行业重要课题和亟待解决改善的问题。随着数字通信、水力模型和机器学习等技术的快速发展^[1],智能漏损检测技术逐步成熟应用,为行业提供了新的途径方法,并朝着精确、时效和系统性进步。

2 供水系统功能与检测

2.1 供水系统的构成与功能

城镇供水系统是一个复杂而精细的网络,旨在为城镇

生活和工业生产提供稳定、优质的水产品,生产工艺主要由取水、输水、净化处理和配水四个环节完成。

(1) 取水。其方式根据水源类型和地理位置的不同而有所差异,包括取水构筑物、浮动式取水设施等。

(2) 输水。水源通过输水管道送入处理厂,输水管道通常为能够承受一定压力,并确保水源在输送过程中不受污染的封闭管路。

(3) 水处理。水源经过一系列净化过程,包括澄清、过滤、消毒等工艺,以达到符合用户终端需求用水的质量标准。

(4) 配水。处理后的水商品通过配水管网,按照城镇规划和水压需求等因素,送往用户端,稳定地供应给用户。

2.2 传统漏损检测方法及其局限性

传统漏损检测方法主要以人工听漏为主,配备辅助分析工具。这种方法依赖于专业人员的听觉能力和经验判断,通过对管道及附属设施的声音进行监听,以确定漏水和损害。相对于行业管理进步需求,存在明显的局限性:

【作者简介】崔天怀(1967-),男,中国陕西宝鸡人,硕士,正高级工程师,从事城镇水务管理及科技创新、战新产业规划方面研究。

(1) 检测灵敏度低。容易受到环境噪声、人员经验等因素的影响,导致检测灵敏度不稳定。

(2) 响应速度慢。缺乏实时监测和预警机制,往往险情迁延,漏点滞后发现。

(3) 定位精度差:依赖于经验识别,存在主观性判断和差异性技能误差。

2.3 智能漏损检测技术的发展现状

现阶段,智能检测技术主要基于数据采集、模型算法和精确计算判断,能够显著提高漏损检测的准确性、时效性,根据功能方式,分为被动检测和主动检测两类。被动检测通常在漏损发生后实施,通过传感器捕捉漏水信号进行分析;而主动检测技术则基于数据采集和模型算法,能够实时监测和预测预警管网漏损病患。这两种技术的有机结合实现了现状供水管网漏损的实时监测和高效预测。

2.4 国内外研究进展

国外一些国家供水管网更新较快,漏损率相对较低,并致力于漏损检测技术和工具精确性、时效性的持续提高。此外,人工神经网络(ANN)等先进技术也被引入漏损检测领域,以提高数据分析和预测的精度。

在我国,由于城市化建设的加快,供水管网漏损问题受到全社会普遍关注。国内学者和供水企业积极研发智能漏损检测技术,以提高漏损检测的效率和精度。

3 在线水听器工作原理与技术特点

3.1 工作原理

在线水听器的工作原理是基于能量转换技术,将声波能量转换成电学量,用以表征声场中声压。转换过程通常由压电陶瓷材料或其他压电等效材料完成^[2]。当声波作用于水听器时,压电材料发生形变,产生电信号输出。电信号通过放大处理,以完成有效水下声信息提取。

3.2 技术特点

(1) 高灵敏度与分辨率。水听器所采用压电陶瓷等高性能材料,本身具有较高灵敏度,在捕捉微弱的水下声波信号方面有良好表现;高分辨率测量技术使得水听器能够在宽频率范围内准确测量超声波的声场。

(2) 坚固的水密性结构。采用抗腐蚀材料的不透水组件设计,确保水听器在长时间水下作业中的稳定性和可靠性,以防止水分渗入并损坏内部电子元件。

(3) 宽频率响应范围。覆盖从低频到高频的宽频率范围,满足不同应用场景的需求。

(4) 抗电磁干扰能力。通常采用光学原理或压电原理进行信号转换和传输,具有本质的抗电磁干扰能力;在电磁环境复杂的水下环境中仍能保持稳定的工作性能。

(5) 组阵与远程传输。光纤等新型水听器具有多个单元复用、进行无电源工作、长距离传输信号等优势^[3];易于组成水下阵列,实现远程检测、识别和跟踪等功能。

(6) 适应多种水下环境。通过特殊设计和材料选择,使在线水听器可以在多种水下环境中稳定工作,具有较好适应不同水深、水温、盐度等水下环境的能力。

4 城镇供水漏水检测中的应用流程

4.1 系统安装与调试

4.1.1 水听器的安装位置选择

(1) 噪声源接近性。水听器应尽可能靠近需要监测的噪声源,如水流、机械振动等,以便准确捕捉声音信号。同时,需避免将其安装在强噪声干扰源附近。

(2) 流场影响最小化。安装时,应考虑水听器对管道内流场的影响,选择合理匹配形式位置。

(3) 压力承受能力。水听器安装位置必须能够承受所在环境的压力,特别是在高压管道中。因此,在选择安装位置时,需确保水听器及其固定结构能够承受管道内的压力。

(4) 可访问性与维护性。为了便于后续的系统维护和故障排查,水听器的安装位置应具有一定的可访问性。同时,应考虑安装空间的大小,确保水听器及其固定结构能够顺利安装和拆卸。

4.1.2 水听器的固定方式

(1) 内置式固定。将水听器直接固定于管路的流场中,但需注意,这种方式可能会因湍流影响而产生误差,需谨慎选择。

(2) 齐平式固定。将测量水听器直接安装在管壁上,使水听器探头与周围的壁面处于“齐平”的状态。这种方式能够减少流场对测量的影响,提高测量稳定性。

(3) 管道-容腔式结构固定。使用连接管道和容腔所构成的压力传输系统来固定。这种方式能够进一步缩小测量诱导噪声的频率范围,提高测量精度。

(4) 抱箍固定。在管道上带压开孔后,使用安装底座将水听器固定在管道上,并用抱箍将水听器固紧,适用于各种管道直径和材质,具有较高的灵活性和稳定性。

4.1.3 系统初始化和调试步骤

(1) 系统检查。全面检查,包括电源、连接线、数据采集设备等,确保所有部件均完好无损且连接正确。

(2) 设备初始化。按照设备说明书的要求,对数据采集设备、水听器等进行初始化设置。这包括设置采样率、增益、滤波器等参数,以确保系统能够准确捕捉和处理声音信号。

(3) 校准与验证。使用标准声源对水听器进行灵敏度校准,同时,可通过对比实验或模拟测试来验证系统的性能和稳定性。

(4) 数据采集与分析。在调试过程中,应采集一定量的数据进行分析,并及时进行调整和优化。

(5) 系统优化与调整。根据数据分析结果,对系统进行必要的优化和调整。这可能包括调整采样率、增益等参数,

或改进数据处理算法等。

(6) 文档记录与保存。将整个安装、初始化和调试过程进行详细记录,并保存相关文档和数据,辅助后续的系统维护和故障排查。

4.2 数据采集与处理

通过测量装置准备、信号激励与接收以及数据采集,确保高质量信号。在实际应用中,应根据具体需求和信号特性选择合适的预处理方法和参数。

4.3 漏水判断与定位算法

(1) 数据预处理。对所采集数据进行清洗和筛选,确保数据的质量。清洗后的数据,以提取与漏水相关特征信息,进行分析。

(2) 漏水信号特征提取。利用声学传感器捕捉由漏水引起的异常声音,这些声音通常在人耳听力范围之外。通过实时监测管道内的压力波动信号,提取出漏水引起的压力变化特征。

(3) 漏水判断。根据提取出的漏水信号特征,结合预设的阈值和算法,判断是否存在漏水现象。在初步定位的基础上,进行现场验证(如开挖检查、摄像探测等),确定漏水点的准确位置。

5 实际应用案例分析

5.1 案例一:某南方大城市供水系统

(1) 基本情况

该城市的供水系统是一个复杂而庞大的网络,4座净水厂和5座加压站的高效运行,以及长达1530公里的输配水管线,构成了这个城市供水系统的骨干。黄河水作为主要水源,为该市生活供水提供了保障支持。同时,随着城市的发展,部分管网的老化问题日益凸显,对供水系统的稳定性和效率构成了挑战。

(2) 漏水问题与应用

针对近年来居高不下的管网高漏失率问题,该城市引入了在线水听器进行检测。结果显示,多处隐蔽大缺口漏水点被成功发现并及时修复,根据应用比较,显著降低了漏损率。

(3) 检测过程与结果

按照安装、调试、数据采集和分析步骤,建立设备契合性条件,利用先进的信号处理算法,成功识别出漏水产生的特征声音,从而精确定位漏水点。

(4) 效果评估

经应用,漏水修复时间大幅缩短,水资源节约量显著增加。与以往传统的漏水检测方法相比,在线水听器不仅提高了检测效率,还降低了维护成本。

5.2 案例二:某北方中小城镇供水系统

(1) 基本情况

该城镇供水系统由地下、地表水源共同保障。随着城

区的扩张和人口的增长,供水需求不断增加。部分老旧管网的建设年代久远,材质较差,导致漏水问题频发。

(2) 漏水问题与应用

应用在线水听器检测中,重点考虑了老旧管网区域和地质条件复杂的区域,通过在线水听器捕捉管道内的声音信号,并利用专业软件进行分析,成功定位了多个漏水点。

(3) 检测过程与结果

通过精心规划的检测路径和专业的数据分析,及时识别出漏水点。检测结果显示,漏水问题主要集中在灰口铸铁管等老旧管材区域。

(4) 效果评估

使用后,该城镇的漏水检测时间明显缩短,水资源浪费问题得到有效改善。并通过实时监测和预警,提高了供水稳定性和安全性,提供了有力供水保障。

以上两个案例分别代表了不同规模和地理位置的城镇供水系统及其漏水问题。尽管各系统基本情况有所不同,但漏水问题却普遍存在。通过引入在线水听器进行检测,成功定位并发现漏水点,显著提高了供水系统的稳定性和效率。

6 影响因素及策略

6.1 环境噪声干扰

在线水听器往往会受到来自环境的各种噪声干扰,包括交通噪声和工业噪声等。这些噪声不仅影响水听器的监测精度,还可能掩盖重要的水下声信号,从而对水下监测和研究造成不利影响。

6.2 管道材质与布局

管道的材质、布局对在线水听器检测效果影响较大。通过系统选择管材、优化管道布局,我们可以有效提升在线水听器在检测管网漏损方面的准确性和效率。

6.3 设备维护与校准

定期维护以及及时发现并解决设备潜在的故障问题,防止隐患演变和功能受损,并延长设备的使用寿命;按照规范要求 and 标准执行,以持续提升检测准确性和工作效率。

7 结论与展望

7.1 研究成果

在线水听器在城镇供水网络漏损智能化检测中展现出了客观有效性和积极的应用价值,对于服务保障城镇供水安全、节约水资源、提高管理效率等方面都具有重要意义。

7.2 主要贡献与创新点

智能漏损检测技术在城镇供水系统的应用研究在减少水资源浪费、保障供水安全、提升经济效益和推动行业整体性智慧水务建设的探索、实践、发展等方面提出了思考和努力。同时,在技术融合与创新、主动漏损检测技术的应用、DMA分区与传感器优化的结合方面也体现出了积极的创新点。

7.3 未来发展方向

未来,在线水听器智能检测技术的发展将更加注重提高灵敏度、精准度和抗干扰能力,同时向多通道、阵列化、小型化和集成化方向发展。

7.4 建议与推广

一是各级供水管理部门应充分认识到供水漏损管控的重要作用,加快技术创新与投入保障。二是供水企业单位要加强与相关科研机构、高校及企业开展合作,通过共同研发、技术交流和示范应用等方式,加快应用推广。三是加

强应用效果的评估和反馈,持续优化提高,确保发挥稳定最大效益。

参考文献

- [1] 张剑惠,车通,朱杰,等.漏损检测技术在智慧供水系统中的应用[J].净水技术,2023,42(12):35-43.
- [2] 涂其捷,周瑜,袁鹏成,等.国外商业化水听器概况简析[J].电声技术,2022,46(09):14-17+29.
- [3] 陈丽洁,张鹏,徐兴辉,等.矢量水听器综述[J].传感器与微系统,2006,(06):5-8.