

工程实例

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2026. 04. 014

压力管道内窥探测器在大型输水管线探漏的应用

梅海文, 赵云峰, 张欣璐, 孙立瑾

(成都市自来水有限责任公司, 四川 成都 610031)

摘要: 为进一步控制供水管网的漏损问题,成都市自来水有限责任公司尝试将压力管道内窥技术用于大型输水管线探漏。首先,通过对比试验选定适用于作业环境的内窥设备,结合测流评估结果,确定将某条重要输水管线作为探测对象;其次,基于漏点音频的可视化分析与实际管道开挖情况,验证了该技术对于漏点大小评估具有较高的准确性,并统计分析了漏损水量与经济效益。整个探测实践表明,压力管道内窥技术满足大型输水管线的探漏需求,但探测设备还需进一步优化和完善。

关键词: 压力管道; 内窥技术; 输水管线; 漏损; 探测设备; 梅尔谱图; 可视化分析; 经济效益

中图分类号: TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2026)04-0095-05

Application of Pressure Pipeline Internal Probe in Leak Detection of Large-scale Water Transmission Lines

MEI Haiwen, ZHAO Yunfeng, ZHANG Xinlu, SUN Lijin

(Chengdu Municipal Waterworks Co. Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: To further control the leakage problem of water supply pipeline networks, after analyzing the advantages and disadvantages of different detection technologies, Chengdu Municipal Waterworks Co., Ltd. has learned that the internal inspection technology for pressure pipelines has high implementability for leak detection of large-scale water transmission pipelines. Firstly, through comparative experiments, the internal inspection equipment suitable for the working environment was selected. Combined with the flow measurement and evaluation results, a certain important water transmission pipeline was determined as the detection object. Then, based on the visual analysis of the sound signal at leakage points and the excavation situation, the high accuracy of this technology in evaluating the size of leakage points was verified, and the leaked water volume and economic benefits were statistically analyzed. The detection results show that the internal inspection technology for pressure pipelines meets the leak detection requirements of large-scale water transmission pipelines, but the detection equipment still needs to be further optimized and improved.

Keywords: pressure pipeline; internal inspection technology; water transmission line; leakage; detection equipment; Mel spectrum; visual analysis; economic benefit

输水管道作为供水管网中最重要的组成部分,承担着城市供水维稳、居民生活保障、管网拓展支撑等重要任务。然而,腐蚀、施工、地质变动等均会导致管道泄漏,造成水资源的巨大浪费^[1]。因此,发现并准确定位输水管道的泄漏,降低自来水在运输中的损耗,具有十分重要的意义。受埋深、管材、位置、不停水等因素的影响,听音杆(电子听漏仪)、噪声记录仪、系缆式内窥检测系统等漏水检测设备均不适用于大型输水管线。大型输水管线的探漏需在不停水的前提下,通过内部带压探测的方式开展作业。

管道内部带压探测技术主要包括漏磁检测技术、智能球检测技术、压力管道内窥技术等。其中,漏磁检测技术即磁体与管壁接触形成磁路,当管壁不规则时磁路发生扭曲,即可判断结构内部存在缺陷^[2-3],但该技术需要持续与管壁接触,且设备体积庞大,存在卡堵风险;智能球检测技术是将带有传感器的球体设备从管道上游投入至管道中顺水漂流,通过声音判断泄漏是否发生^[4],但由于智能球在大型输水管道中回收困难,易遗失,存在较大的水质安全风险;压力管道内窥技术即在压力管道中放入搭载声学传感器的系缆式管道探测器,该探测器由线缆控制可在管道内移动,实时检测漏水点的声信号,从而判断泄漏位置和大小,该技术具有带压不停水作业、内窥过程可视化、测漏精准等优点。

压力管道内窥检测系统主要由4大机电模块构成,分别是地面控制单元(含终端控制器及送线器)、阀门适配传送装置、管道渗漏探测头与电子定位仪。设备作业情况见图1。

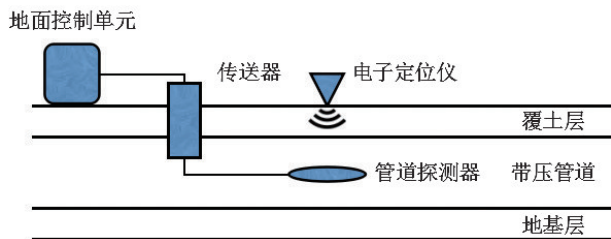


图1 压力管道探测器作业概况

Fig.1 Operation overview of pressure pipeline detector

作业时,探测头经阀门传送装置导入管道,依托水力驱动进行检测;当识别渗漏信号后,首先基于线缆释放长度计量(由终端控制器实时反馈线缆释放量)实现初步定位,再通过电子定位仪的电磁

场强梯度分析完成空间坐标解算,最终实现漏点的三维精确定位。

目前,国内外对于带压管道内窥技术的研究主要集中在工程应用和技术升级两个方面。加拿大的Pure Technologies公司研发了Sahara[®]系缆式管道内部带压检测系统,对漏水点检出效率高、可靠性好^[5-6]。杨成武^[7]使用压力管道内窥设备对市政雨污水管网进行普查,确定了管道内窥技术是一种可靠、可视、可数据化的管养手段。

成都市自来水有限责任公司(简称成都水司)的供水范围为主城区(金牛区、武侯区、青羊区、成华区、锦江区)、高新区、郫都区、天府新区成都直管区、温江区部分区域,管道主要为球墨铸铁管、钢管、普通铸铁管、塑料管、水泥管等材质。据统计,2023年成都水司中心城区的漏损率控制在14%以内,但受制于近几年供水区域的收购与扩张影响,供水范围内的整体漏损率接近20%。为进一步控制漏损问题,需依托压力管道内窥技术优先对大型输水管道进行漏水探测作业。

1 研究方法

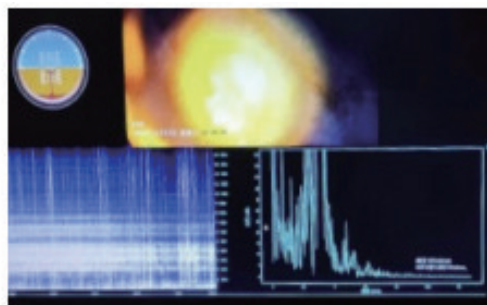
1.1 技术路线

对两种技术指标相差较小的内窥设备进行既定范围内的对比试验,从软件、硬件两个方面综合评估试验结果,从而选定适用于本次探测作业的设备。结合实际流量差值的评估情况,以某大型输水管道作为探漏对象,制定探测计划并开展探测工作。最后基于探测漏点的开挖验证、音频时域图及梅尔(Mel)谱图提取,总结探漏成果并分析压力管道内窥技术的可靠性、经济效益及改进建议。

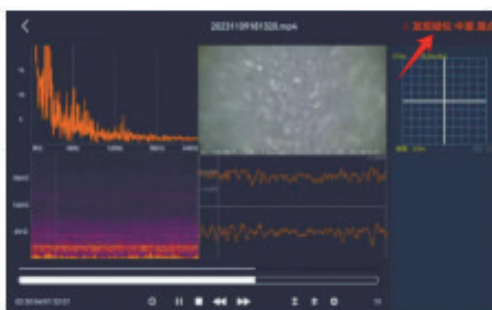
1.2 设备选型

为论证不同品牌探测器的可行性,分别对探测器A与探测器B进行了既定范围内的对比试验,试验场地为存在漏水情况的某条输水管道。硬件方面,两款探测器均搭载高灵敏度水听器、高清摄像单元、精度定位单元及导航姿态传感器、地面控制平台等,可有效检测供水管道的微小泄漏、管瘤、气囊、管内杂质(砂石、杂物)等多种异常情况,但探测器A的地面控制平台体形庞大,且在试验过程中存在牵引伞不匹配、传送装置卡线等情况。软件方面,两款设备具备实时音频波段分析、探测视频输出等功能,但均无法自动生成探测报告。探测器A

的视频输出质量较差,试验过程中视频可见度相对较低。两款设备的终端显示界面及视频成像效果见图2。



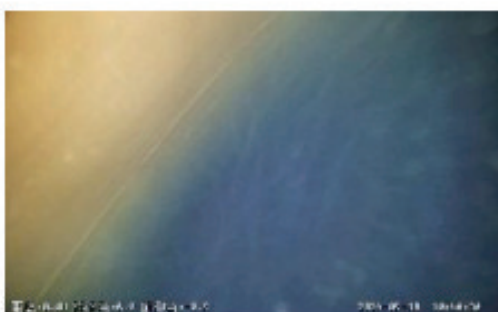
a. 设备A终端显示情况



b. 设备B终端显示情况



c. 设备A成像质量



d. 设备B成像质量

图2 压力管道内窥设备软件对比

Fig.2 Software comparison of pressure pipeline internal inspection equipment

基于对比试验结果,发现探测器B更能适应本

次大型输水管线的作业条件及工程环境。

1.3 探测目标

通过多轮分段测流和评估,确定了某重要输水管线的上、下游流量差值较大且处于一个稳定区间,由此判断该输水管道可能存在漏水情况。该输水管道前期已使用听音杆进行全面漏水普查,并未发现重大漏水问题。该输水管道全长约50 km,采用预应力钢筒混凝土管(PCCP),管径为DN2 600。输水管道漏损可能导致爆管、路面沉降等次生灾害,为保障城市供水安全,提升整体供水效益,需对其进行全线漏水排查与抢修。

依据实际探测器线缆长度和整个输水管道概况确定了探测工程清单,共分为26段,排气阀设施探测段长度依次为1 968、1 940、2 140、1 950、1 970、1 843、2 070、1 980、1 410、2 310、2 040、2 010、1 520、1 780、2 020、1 930、2 170、2 000、2 360、2 028、2 070、2 050、2 030、1 900、2 122、740 m。

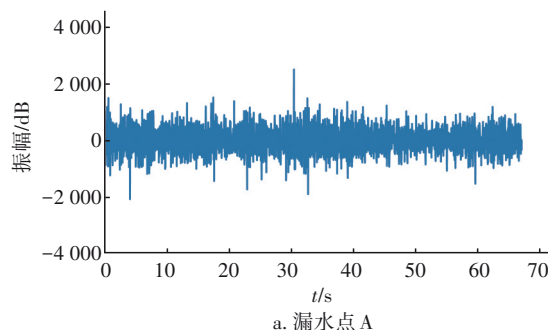
2 探测成果分析

本次作业共计完成38.14 km管线的探测,剩余12.21 km因缺少投放条件暂未实施,后期将通过其他探测技术补充探测。本次探测共发现5处漏水点(A、B、C、D、E),每处漏水点的声信号强度均不相同,需对漏点音频进行振幅分析后才能评估各点位的具体漏水情况。

2.1 振幅谱图与梅尔谱图提取

声信号可通过傅里叶变换获得相应频率振幅谱图,对比幅值大小能够初步获得重要漏水点位。分别选取5处漏水点位约70 s的漏水音频进行可视化处理,获得音频时域振幅谱图(见图3)。

根据各点位的频率幅值从小到大依次为D、A、B、E、C,由此可以判断C点漏水最为严重,需优先进行处置。



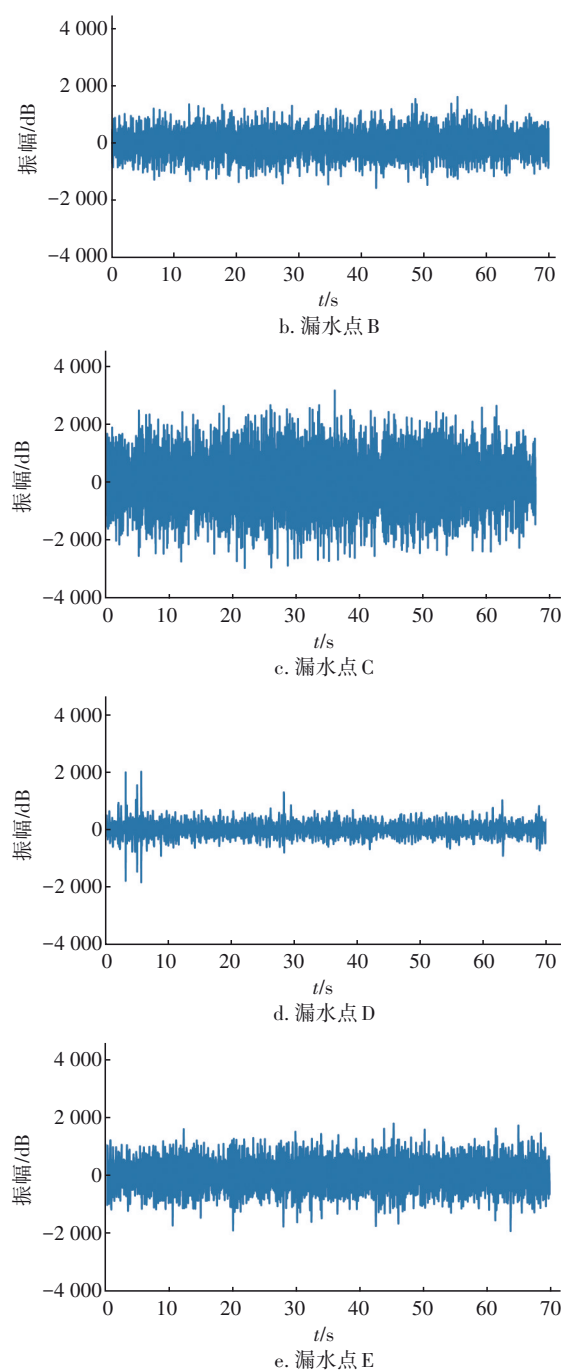


图3 漏水点位音频振幅谱图

Fig.3 Leakage point audio amplitude spectrum

通过梅尔刻度滤波器组对频率幅度谱进行过滤,可以获得该帧数据在对应滤波器的能量值,从而得到梅尔谱图^[8-11]。为验证压力管道探测技术的有效性,选取漏水量较大的C点作为比较对象,构建了漏水与非漏水对比关系梅尔谱图(见图4)。可见,非漏水点位的声信号强度低于漏水点位,证明漏水探测有效性较高,可执行开挖验证及抢修工作。

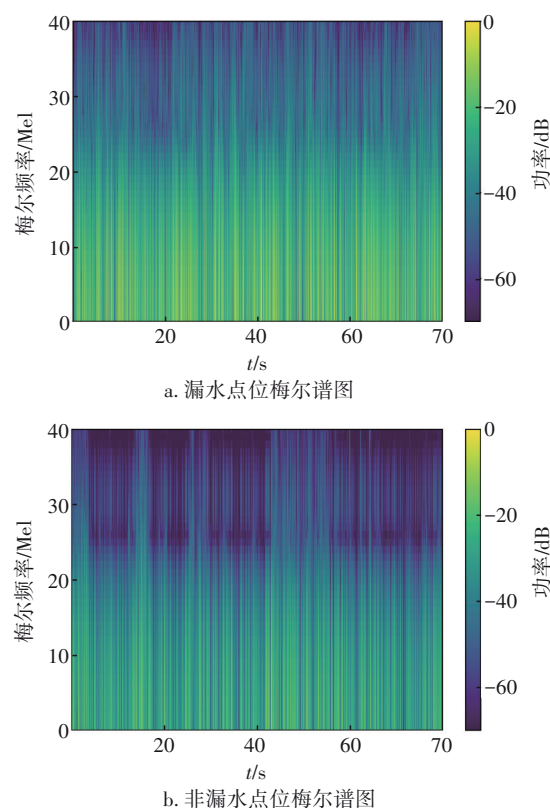


图4 漏水点与非漏水点的梅尔谱图对比

Fig.4 Comparison of Mel spectrum between leakage points and non-leakage points

2.2 开挖验证

经开挖核实验证可知,A~E点均存在漏水情况,C点漏水最为严重。为避免漏水引发的次生灾害,通过不停水抢修,有效控制了重要输水管线的漏损问题。

2.3 成本与经济效益分析

在现行标准与技术规范中,暂未查到利用音频幅值实现漏失水量计量的规定。经实测,5处漏水点的漏水量共计约300 m³/h。通过及时抢修,节约水量262.8万 m³/a,折合水费约796万元/a。本次探漏作业通过对外采购设备的方式,由企业内部员工实训并执行探测作业,比使用听音杆提升了漏点检出率,比委托专业探测公司提供压力管道内窥探测服务减少了外部人力成本支出。综合设备采购费用、年度节省水费等情况,可知节约成本约736万元/a。由此可以确定,供水企业引进压力管道内窥技术有助于降低管网漏损率,并推进探漏业务的降本增效。

3 结论与建议

通过技术分析确认了压力管道内窥技术的有效性,结合选型试验获得相对可靠的设备后,将其运用于重要输水管线探漏作业,并累计探漏5处。根据成本与经济效益分析,证明该技术对大型输水管线的漏水探测可实施性较高,且具有一定的经济效益。在本次漏水探测工作中,探测设备存在投放受限、回收阻力较大、线缆磨损严重、探头进水、终端设备无法生成探测报告等问题。建议后期改进设备收发装置、探头结构及线缆材质,确保能够适应更多的作业环境,并优化终端数据导出功能,实现探测报告自动生成。

参考文献:

- [1] 李哲. 管道机器人泄漏检测与定位关键技术研究[D]. 天津:天津大学,2020:1-2.
LI Z. Research on Key Technologies for Leakage Detection and Localization of Pipeline Robot [D]. Tianjin: Tianjin University, 2020:1-2(in Chinese).
- [2] 杨理践,马凤铭,高松巍. 管道漏磁在线检测系统的研究[J]. 仪器仪表学报,2004,25(增刊1):1052-1054.
YANG L J, MA F M, GAO S W. Research of on-line inspecting pipeline magnetic flux leakage system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25(S1): 1052-1054(in Chinese).
- [3] 郭晓婷,杨亮,宋云鹏,等. 油气管道三轴高清漏磁内检测机器人设计验证[J]. 仪表技术与传感器,2020(12):53-57.
GUO X T, YANG L, SONG Y P, et al. Design and validation of three-axis high definition magnetic flux leakage detection robot for oil and gas pipelines [J]. Instrument Technique and Sensor, 2020(12):53-57(in Chinese).
- [4] 郭颖,杨理践,赵佰顺,等. 长输油管道泄漏检测技术研究现状[J]. 辽宁石油化工大学学报,2022,42(4):25-31.
GUO Y, YANG L J, ZHAO B S, et al. Research status of leakage detection technology for long-distance oil pipelines [J]. Journal of Liaoning Petrochemical University, 2022, 42(4):25-31(in Chinese).
- [5] ISMAIL M I M, DZIYAUDDIN R A, SALLEH N A A, et al. A review of vibration detection methods using accelerometer sensors for water pipeline leakage [J]. IEEE Access, 2019, 7(1):51965-51981.
- [6] HUNAIDI O, CHU W, WANG A, et al. Detecting leaks in plastic pipes [J]. Journal American Water Works Association, 2000, 92(2):82-94.
- [7] 杨成武. 管道潜望镜及管道内窥镜在市政雨水管道管养过程中的应用[J]. 居业,2023(11):46-48.
YANG C W. Application of pipe periscope and pipe endoscope in the process of municipal stormwater pipe maintenance [J]. Create Living, 2023(11):46-48(in Chinese).
- [8] 杨智伦,朱铮涛,陈树雄,等. 改进CNN的供水管道泄漏声音识别[J]. 国外电子测量技术,2023,42(1):153-158.
YANG Z L, ZHU Z T, CHEN S X, et al. Improved CNN for sound recognition of water supply pipeline leaky [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(1):153-158(in Chinese).
- [9] 谢跃,梁瑞宇,包永强,等. 融合改进梅尔谱特征和深信网络的语音测谎算法[J]. 声学学报,2019,44(2):214-220.
XIE Y, LIANG R Y, BAO Y Q, et al. Deception detection with spectral features based on deep belief network [J]. Acta Acustica, 2019, 44(2):214-220(in Chinese).
- [10] 薛珊,李广青,吕琼莹,等. 基于卷积神经网络的反无人机系统声音识别方法[J]. 工程科学学报,2020,42(11):1516-1524.
XUE S, LI G Q, LÜ Q Y, et al. Sound recognition method of an anti-UAV system based on a convolutional neural network [J]. Chinese Journal of Engineering, 2020, 42(11):1516-1524(in Chinese).
- [11] 张科,苏雨,王靖宇,等. 基于融合特征以及卷积神经网络的环境声音分类系统研究[J]. 西北工业大学学报,2020,38(1):162-169.
ZHANG K, SU Y, WANG J Y, et al. Environment sound classification system based on hybrid feature and convolutional neural network [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2020, 38(1):162-169(in Chinese).

作者简介:梅海文(1993—),男,四川峨眉人,硕士,工程师,主要从事供水管网生产运行管理工作。

E-mail:1046745614@qq.com

收稿日期:2024-12-04

修回日期:2025-02-25

(编辑:衣春敏)