

基于 DOFVS 的新型压力输水管道泄漏在线监测方法*

吴慧娟¹, 陈忠权¹, 吕立冬², 孙晓艳², 孙振世¹

(1. 电子科技大学 光纤传感与通信教育部重点实验室 成都 611731; 2. 全球能源互联网研究院 南京 210003)

摘要:压力输水管道因内部压力及外部使用环境腐蚀等因素经常造成爆管泄漏等问题,根据管道泄漏时会引起泄漏点周围管壁振动这一特点,利用基于相位敏感光时域反射仪技术的分布式光纤振动传感技术(DOFVS)提出了一种新型压力输水管道光纤在线泄漏监测方法,此方法利用普通单模通信光纤拾取泄漏点引起的管道振动信号并进行实时检测和定位。在室内测试环境下,该系统能够检测出 DN90 cm × EN2 cm 普通钢制压力输水管道在 0.4 Mpa 压力下,泄漏孔径为 4 mm 的泄漏;在室外测试环境下,该系统能够检测出 DN200 cm × EN2 cm 普通钢制压力输水管道在 0.27 Mpa 压力下,泄漏量大于 11 L/s 泄漏孔的泄漏。此外,采用多尺度小波分解去噪方法,对监测信号中的环境噪声信号进行滤除,并取得了良好的去噪效果。

关键词:压力输水管道;泄漏监测;相位敏感光时域反射仪;小波阈值去噪

中图分类号: TH741.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 410.55

Novel pressurized water pipe leak monitoring method based on the distributed optical fiber vibration sensor

Wu Huijuan¹, Chen Zhongquan¹, Lv Lidong², Sun Xiaoyan², Sun Zhenshi¹

(1. Key Laboratory of Optical Fiber Sensing & Communications (Education Ministry of China), University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China; 2. Global Energy Interconnection Research Institute, Nanjing 210003, China)

Abstract: Due to the internal pressure and other environmental effects, the pressurized water pipe has potential problems such as leakage and burst. Since there is a certain pressure in the pipe, the leakage point will cause the inner pipe walls to vibrate when the pipeline leaks. Thus in this paper, a new method is proposed to monitor the pressurized water pipe with a distributed optical fiber vibration sensor (DOFVS) based on the phase-sensitive optical time-domain reflectometer. The indoor test results indicate that the proposed method can detect the aperture which is equal or larger than 4 mm for a steel pipe with DN91 cm × EN2 cm and 0.4 Mpa inner pressure. The field measurement results show that, the leaking signal could be effectively acquired when the leakage rate is larger than 11 L/s, where the pipe is DN200 cm × EN2 cm steel made pressure pipe and the inside pipe pressure is around 0.27 MPa. Besides, we adopt the wavelet threshold denoising method to effectively suppress the high frequency noises in the monitoring signal, and this method achieve good results.

Keywords: pressurized water pipe; leak detection; phase-sensitive OTDR; wavelet threshold denoising

1 引言

压力输水管道作为一种重要的水资源输送手段,在世界各国都得到了广泛应用。然而压力输水管道由于内部压力的存在使得压力输水管道在受到外部作用力影响

时易造成爆管破损^[1-2],从而导致压力输水管道爆管泄漏,造成经济损失以及水质污染等次生灾害。因此,对压力输水管道进行在线实时泄漏监测需求迫切并具有重要的研究意义。国内外常用的监测方法主要分为两类^[3-6]: 1) 基于软件的方法,流量平衡法无法对泄漏点定位;压力梯度法灵敏度不高,负压波法泄漏信号弱,环境干扰源

多,易产生误报。2)基于硬件的方法,机载红外线法无法实时监测,探测球法和电类传感技术造价高,而光纤传感技术具有灵敏度高、体积小、抗电磁干扰、绝缘等优点。目前,基于布里渊时域反射仪(brillouin optical time domain reflectometer, BOTDR)的方法其散射信号微弱,检测比较困难^[7];基于光频域反射计(optical frequency domain reflectometer, OFDR)的方法虽然空间分辨率高,但是测试距离比较短^[8];基于M-Z光纤干涉仪的分布式光纤传感系统虽能有效地检测到油气管道泄漏,但不能准确定位泄漏点^[9]。

因此,本文基于相位敏感光时域反射仪(Φ optical time-domain reflectometer, Φ -OTDR)的分布式光纤振动传感技术(distributed optical fiber vibration sensor, DOFVS)提出一种新的压力输水管道在线泄漏监测方法,能很好地弥补上述缺陷。该方法利用普通单模光纤拾取压力水管在泄漏孔处因泄漏引起的管壁振动信号,采集受管壁振动调制的光信号,根据光信号在光纤中传播的速度一定,由光时域反射原理即可解调出泄漏点的位置信息。通过现场室内外实验测试,基于相位敏感光时域反射仪分布式光纤振动传感系统能够很好的检测出普通钢制压力输水管道在一定压力和泄漏量条件下的泄漏。

2 泄漏检测原理

当压力输水管道某处发生破损而造成泄漏时,压力水管内的水会因管道内部的压力的作用以很强的冲击力从泄漏点冲出管外,则泄漏点处的管壁在水流的冲击作用下会发生振动^[10-12],则此时管壁的振动会带动贴敷在管道内壁的传感光纤振动。传感光纤在泄漏位置的振动会使得传感光纤在泄漏位置的折射率将会发生改变,从而使进入传感光纤内的光脉冲信号在扰动位置的相位发生变化,这种相位变化最终会致使激光脉冲信号的后向瑞利散射干涉结果的光强度发生变化^[13-15],通过获取传感光纤的异常振动信号进行分析得到泄漏点及其位置信息。

基于相位敏感光时域反射仪分布式光纤振动传感系统的压力水管泄漏监测系统及其泄漏检测原理,如图1所示。相位敏感光时域反射仪分布式光纤振动传感系统^[16-18]通过获取传感光纤内的后向瑞利散射光信号的干涉结果来感知管壁的异常泄漏信息。没有受到扰动的传感光纤的其他各点的后向瑞利散射光的干涉结果的光强通常不发生变化。因此采用差值法提取明显的扰动事件信号,即将两个不同时刻的传感光信号进行归一化差值运算,将光信号的扰动部分即变化部分提取出来,而没有变化的部分差值归零处理。

基于相位敏感光时域反射仪分布式光纤振动传感技

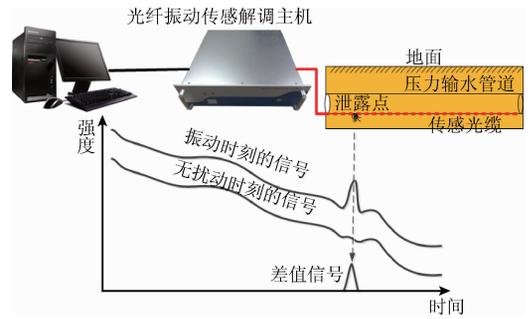


图1 基于相位敏感光时域反射仪(Φ -OTDR)技术的泄漏检测原理

Fig. 1 The detection mechanism of the phase sensitive optical time-domain reflectometer

术的压力输水管道泄漏监测系统的核心设备是光纤振动传感解调主机,其内部结构如图2所示。解调主机内部激光器发出的连续光信号通过声光/电光调制器后将其调制为一种高度相干的光脉冲信号,通过掺铒光纤放大器(erbium doped fiber amplifier, EDFA)对其进行放大后,然后通过环形器将脉冲光信号注入到传感光纤中。脉冲光信号在传感光纤中传输时发生瑞利散射,在光纤各点的后向瑞利散射信号将依次通过环形器送入到光电探测器中。通过光电探测器转换为相应的模拟电信号,而后由采集卡将相应的模拟信号转换为对应的数字电信号,再送到上位机进行处理,即可得到泄漏及其位置信息。

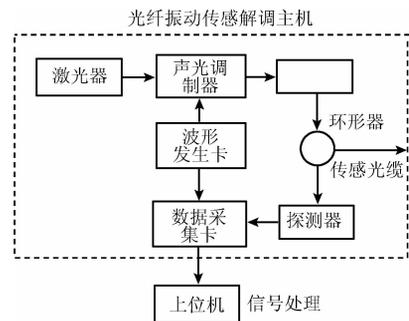


图2 相位敏感光时域反射仪传感信号解调装置及其结构

Fig. 2 Structure diagram of the Φ -OTDR demodulator

上位机通过去噪预处理,并依据差值法确定泄漏的发生,并通过系统探测的泄漏点振动调制的光信号的到达时间来解调出泄漏点的位置信息,即:

$$L = \frac{1}{2} \times \frac{ct}{n} \quad (1)$$

式中: L 为泄漏点到光信号解调主机的距离, c 为光速, t 是泄漏点处的后向瑞利散射光到达光信号解调主机所需要的时间, n 为振动传感光缆的折射率。

3 测试结果及讨论

3.1 室内测试

3.1.1 室内测试过程

为了验证系统对于压力输水管道在不同压力条件下不同泄漏孔径的泄漏检测情况,首先进行室内测试。室内测试系统装置如图3所示,整个测试过程是通过将压力输水管道放置在3 000 t水压试验机上来完成的,此次测试选取的压力输水管道是直径为90 cm,长为12 m,壁厚为2 cm普通钢制管道。将长为20 m左右的普通通信光纤安装在压力输水管道的内壁,而后将光纤的一端通过接长为520 m左右的光纤接到Φ-OTDR解调主机上,光纤的另一端接长为930 m左右的光纤盘。

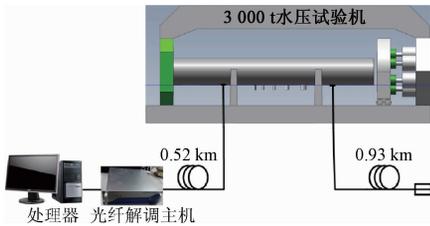


图3 室内测试装置与系统结构

Fig.3 The indoor testing system diagram

光缆安装及测试过程,如图4所示,因为传感光缆是通过感知泄漏孔周围管壁的振动来捕获泄漏信息的,为此对光缆的铺设方案是将其通过环氧树脂粘接到管道内壁来感知泄漏信息,鉴于此次系统测试中光纤的总长度为1 470 m左右,为此对监控软件中设置的监测长度为2 000 m。



图4 室内测试安装过程

Fig.4 The indoor test installation process

3.1.2 室内测试结果

系统泄漏测试响应过程分为3个阶段,分别为停机(3 000 t水压试验机停机状态)不开阀系统响应、不停机(3 000 t水压试验机不停机状态)开阀前系统响应、不停机开阀时的泄漏响应。系统在4 mm-0.2 Mpa下各个测试阶段的响应三维图如图5所示。

图5(a)为系统在停机不开阀系统响应的三维图,图5(b)为系统在不停机开阀前系统响应的三维图。通过对比系统停机不开阀和系统不停机开阀前的系统响应图,可以看出3 000 t水压试验机工作状态因振动给系统带来一些微小幅度的干扰。图5(c)为系统泄漏响应状

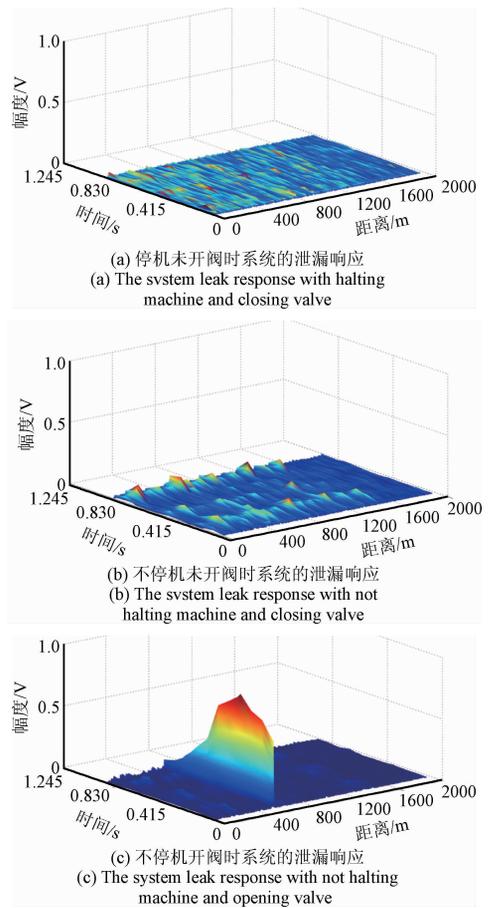


图5 分布式光纤振动传感系统在3个典型测试阶段的响应结果(Φ4 mm-0.2 MPa)

Fig.5 DOFVS responses at three different testing stages (Φ4 mm-0.2 MPa)

态下的三维图,可以看出系统在泄漏点的响应幅度要明显高于非泄漏点处的响应幅度。

压力输水管道在不同压力条件下不同泄漏孔径的泄漏检测结果如表1所示。通过表1结果可以看出,对于室内测试环境,分布式光纤振动传感系统对于压力大于0.2 MPa,泄漏尺寸大于4 mm的情况都能取得良好的测试效果。

表1 压力输水管道在不同压力条件下不同泄漏孔径的泄漏测试结果

Table 1 Hydrostatic leak test results with different aperture sizes and different injecting pressures

泄漏孔径/mm	压力/MPa			
	0.2	0.4	0.6	0.8
40	OK	OK	OK	OK
14	OK	OK	OK	OK
8	OK	OK	OK	OK
4	OK	OK	OK	OK
2	—	—	—	—

3.2 室外测试

3.2.1 室外现场测试过程

此外,该系统在某城市供水管道上做了现场测试,现场测试整体方案及安装过程如图6所示。图6(a)中,测试选取的是靠近市郊区的一段长为440 m,测试光缆长度为800 m,在测试段管道的一端通过接长为360 m的光纤连接到光纤振动传感解调主机上。该段压力输水管道为该市某水库到市内的一条直径为2 m,壁厚为2 cm普通钢制压力输水管道,管道埋地铺设,距离地面大约是2 m。

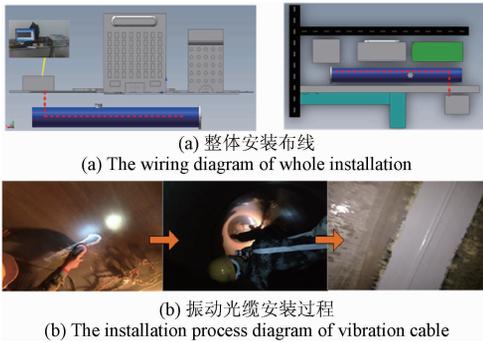


图6 室外整体安装布线

Fig.6 The whole installation wiring diagram

选取普通的单模通信光纤作为此次测试的传感光缆,采用管道内壁上直线铺设方法。现场安装如图6(b)所示,先对铺设光缆的管道内壁处进行机械打磨以去除铺设光缆周围的杂质,再将传感光缆通过环氧树脂粘接管道壁道内壁上。此次室外测试过程是在压力输水管道内保持压力为0.27 MPa条件下,泄漏阀分别开半圈(泄漏量为11 L/s)、一圈(泄漏量为25 L/s)、两圈(泄漏量为101 L/s)、三圈(泄漏量为125 L/s)4种情况下进行的。

3.2.2 室外测试结果

压力输水管道内压力保持在0.27 MPa时,泄漏阀开半圈(泄漏量为11 L/s)过程开阀前后的泄漏响应结果,如图7所示,可以看出440 m泄漏阀位置处泄漏信号的响应,泄漏信号幅度要明显高于其他非泄漏点处的强度。

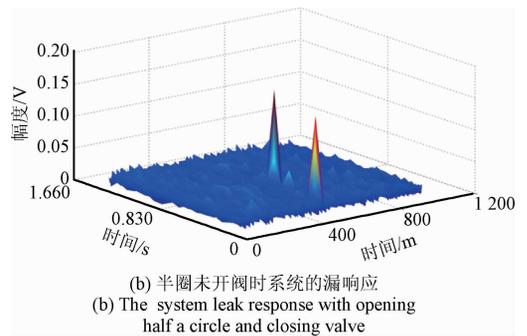


图7 泄漏量为11 L/s系统的漏响应

Fig.7 The response with a leakage rate of 11 L/s

压力输水管道内压力保持在0.27 MPa时,泄漏阀开一圈(泄漏量为25 L/s)前后的泄漏响应结果,如图8所示,可以看出此时泄漏点信号的响应幅度在整个监测光缆的三维图上也非常明显,此时泄漏信号在时域上的响应时间要长于开半圈时的响应时间,信号的响应时间与开阀时间一致。

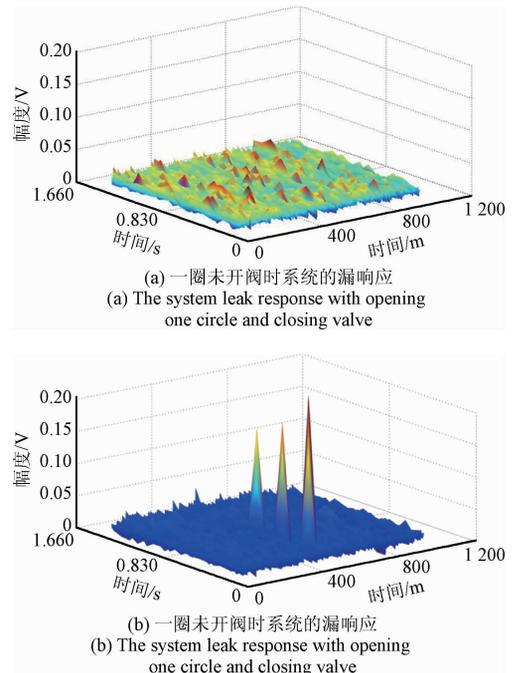
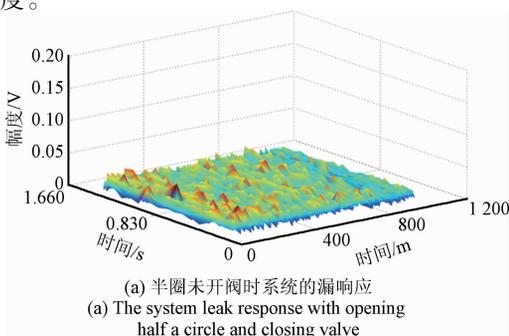


图8 泄漏量为25 L/s系统的漏响应

Fig.8 The response with a leakage rate of 25 L/s

压力输水管道内压力保持在0.27 MPa时,泄漏阀开二圈(泄漏量为101 L/s)和开三圈(泄漏量为175 L/s)时的泄漏响应结果,如图9和10所示。通过图9和10可知,当泄漏量较大,监测系统能够得到较好的泄漏响应信号和检测效果。

分布式光纤振动传感系统在实际城镇复杂背景下能够检测出泄漏量大于11 L/s的泄漏点,当泄漏量大于



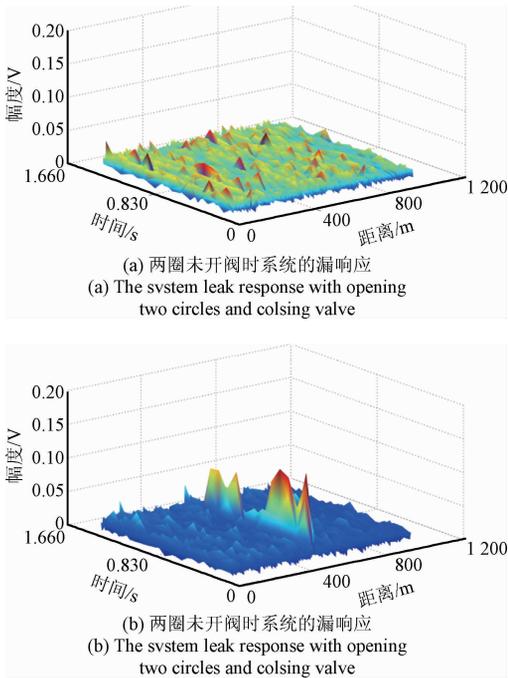


图 9 泄漏量为 101 L/s 系统的泄漏响应
Fig. 9 The response with a leakage rate of 101 L/s

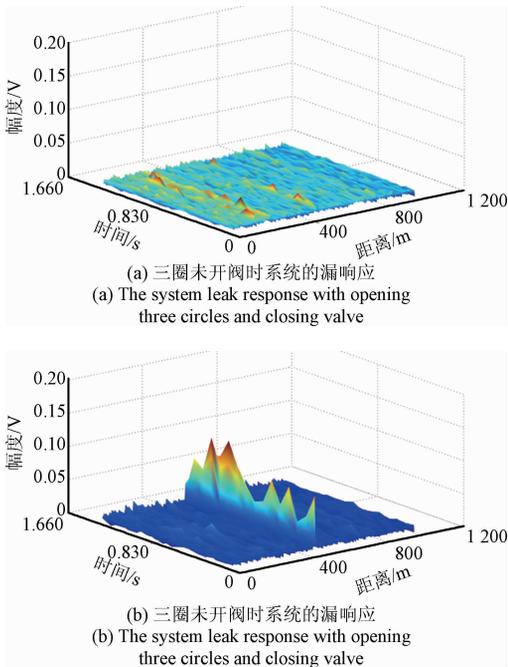


图 10 泄漏量为 175 L/s 的泄漏响应
Fig. 10 The response with a leakage rate of 175 L/s

101 L/s 时系统能够获取长时间稳定的泄漏响应。同时由于城镇复杂背景噪声的影响对比分布式光纤振动传感系统在室内的泄漏监测响应可以看出,室外环境测试条件

下,系统泄漏响应的信噪比小于室内环境下测量的结果。

4 基于多尺度小波分解的信噪比提升方法及结果

分布式光纤振动传感系统获取的传感信号为随机性非平稳信号并且为低频信号,而环境噪声通常为高频信号。根据小波分析的多尺度分析的特性,在小波域,有效信号所产生的小波系数其模值往往较大,而噪声经过小波变换有白化趋势,其小波域对应系数模值很小,为此可以通过选取小波硬阈值去噪方法对监测系统获取到的泄漏信号进行去噪。在去噪过程中小波基函数的选取对去噪结果往往有非常重要的影响,为获得比较平滑的去噪信号,选取 db6 小波进行小波硬阈值去噪^[19-20]。基于多尺度小波分解的去噪结果如图 11、12 所示,图 11 为单点泄漏信号的去噪结果,图 12 为泄漏和第 3 方扰动两点事件同时发生时的去噪结果。

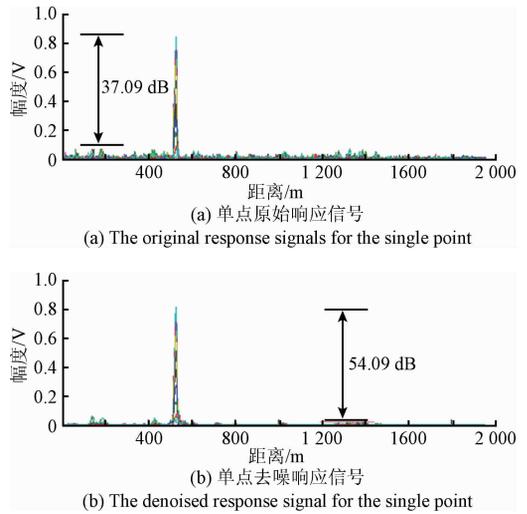


图 11 单点信号去噪对比
Fig. 11 The denoised response signal for the single point leakage event

由图 11 所示的监测系统单点泄漏事件信号去噪前后的对比图可以看出,去噪后的响应信号的噪声基本上完全去除,整个系统响应信号的信噪比明显提高,并且信噪比由原来的 37.09 dB 提高到去噪后的 54.09 dB,提升了 17 dB。

图 12 为在压力输水管道发生泄漏的同时,在传感光缆的 1 500 m 处加入人为扰动的整个系统两点多事件响应的去噪效果对比图。通过图 12(a)和(b)可知,泄漏响应信号的去噪前后的信噪比提升了 2.83 dB,人为扰动的信噪比提升了 3.43 dB。

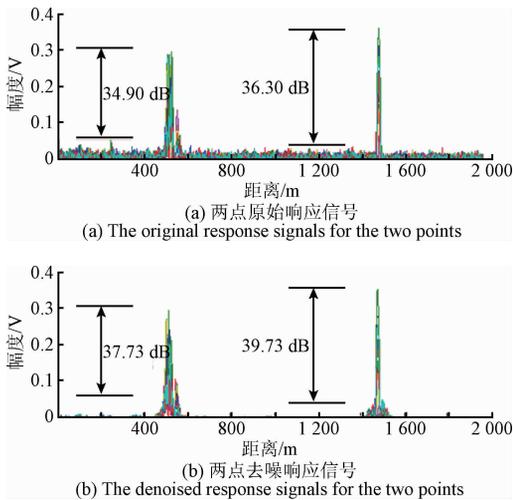


图12 两点信号去噪对比

Fig. 12 The denoised response signals for the two-point event

5 结 论

通过现场测试,基于相位敏感光时域反射仪分布式光纤振动传感系统进行压力输水管道的泄漏监测,取得了良好的效果。该系统能够实现对压力输水管道在线实时泄漏检测和定位,响应时间小于3 s。鉴于相位敏感光时域反射技术的分布式光纤振动传感系统进行压力输水管道在线泄漏监测的有效性、实时性等诸多优点,结合光纤传感本身的长距离全分布式感知、无源、抗电磁干扰等多种突出优点,该监测方法将在压力输水管道泄漏检测定位及防破坏安全监测中发挥重要作用。

参考文献

- [1] RIZZO P. Water and wastewater pipe nondestructive evaluation and health monitoring: A review [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2010(1687-8086):13.
- [2] VALIENTE A. Stress corrosion failure of large diameter pressure pipelines of prestressed concrete [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2001,8(3):245-261.
- [3] 石小琳. 信息融合技术在输水管道泄漏检测与定位中的应用研究[D]. 太原:太原科技大学,2011.
SHI X L. The applied research of information fusion technology in water pipeline leakage detection and location[D]. Taiyuan:Taiyuan University of Science and Technology, 2011.
- [4] 刘哲. 通过多点同步测压法监测大型输水管线爆漏的研究[D]. 广州:华南理工大学,2011.
LIU ZH. The research of monitoring large-scale water pipeline leakage with multipoint synchronous manometric method [D]. Guangzhou: South China University of

Technology, 2011.

- [5] 李健,陈世利,黄新敬. 长输油气管道泄漏监测与准实时检测技术综述[J]. *仪器仪表学报*,2016,37(8):1747-1760.
LI J, CHEN SH L, HUANG X J, et al. Review of leakage monitoring and quasi real-time detection technologies for long gas & oil pipelines [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37 (8): 1747-1760.
- [6] 李帅永,王鹏飞,严冬. 气体管道泄漏模态声发射时频定位方法[J]. *仪器仪表学报*,2016,37(9):2068-2075.
LI SH Y, WANG P F, YAN D, et al. Leak location in gas pipelines with time-frequency analysis of modal acoustic emission using smooth pseudo Wigner-Ville distribution[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016,37(9):2068-2075.
- [7] 倪玉婷,吕辰刚,葛春风. 基于 OTDR 的分布式光纤传感器原理及其应用[J]. *光纤与电缆及其应用技术*, 2006(1):1-4.
NI Y T, LV CH G, GE CH F. Distributed optical fiber sensor principle and its application based on OTDR[J]. *Optical Fiber and Electric Cable and Their Applications*, 2006(1):1-4.
- [8] 丁振扬. 几种改进 OFDR 性能方法的提出及验证[D]. 天津:天津大学,2013.
DIND ZH Y. Methods for improving OFDR performances and their experimental verifications [D]. Tianjin:Tianjin University, 2013.
- [9] 曲志刚,靳世久,周琰. 油气管道安全分布式光纤预警系统研究[J]. *压电与声光*,2006,28(6):640-642.
QU ZH G, JIN SH J, ZHOU Y. Oil and gas pipeline safety warning system by using distributed optical fiber[J]. *Piezoelectrics and Acoustooptics*, 2006, 28(6):640-642.
- [10] LI SH Y, WEN Y M, LI P, et al. Modal analysis of leakage-induced acoustic vibrations in different directions for leak detection and location in fluid-filled pipelines[C]. *IEEE International Ultrasonics Symposium*, 2014:1412-1415.
- [11] LI SH Y, CHENG N W, WANG P, et al. Extraction of single non-dispersive mode in leakage acoustic vibrations for improving leak detection in gas pipelines[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2016, 41(3):77-86.
- [12] MOSTAFAPOUR A, DAVOODI S. A theoretical and experimental study on acoustic signals caused by leakage in buried gas-filled pipe[J]. *Applied Acoustics*, 2015,

- 87(1):1-8.
- [13] XIE K L, RAO Y J, RAN Z L. Distributed optical fiber sensing system based of Rayleigh scattering light ϕ -OTDR using single-mode fiber laser with high power and narrow linewidth [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28 (3): 569-572.
- [14] ZHAN Y G, WANG K, YU Q, et al. Influences of intrusion signal's characteristics on detection performances of the distributed sensor based on phase-sensitive optical time domain reflectometer[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2015, 9(1):094093.
- [15] ZHOU J Y, JIN SH J, FENG H, et al. Study on oil and gas pipeline leakage real-time inspection system based on distributed optical fiber[J]. *Key Engineering Materials*, 2008, 381-382(6): 447-450.
- [16] WU H J, SUN ZH SH, QIAN Y, et al. A hydrostatic leak test for water pipeline by using distributed optical fiber vibration sensing system [C]. *Asia Pacific Optical Sensors Conference*, 2015.
- [17] 王杰. 超长距离相敏光时域反射仪实验与应用研究[D]. 成都:电子科技大学, 2013.
WANG J. Long distance phase-sensitive optical time-domain reflectometer experiment and application research[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013.
- [18] ZHU H, PAN C, SUN X H. Vibration pattern recognition and classification in OTDR based distributed optical-fiber vibration sensing system [C]. *Proceedings of SPIE*, 2014:9062.
- [19] WU H J, XIAO S K, LI X Y, et al. Separation and determination of the disturbing signals in phase-sensitive

optical time domain reflectometry (Φ -OTDR) [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33 (15): 3156-3162.

- [20] WU H J, ZHANG L Q, QIAN Y, et al. Multi-scale wavelet decomposition and its application in distributed optical fiber fences [C]. *Asia Pacific Optical Sensors Conference*, 2015, doi:10.1117/12.2184408.

作者简介



吴慧娟(通讯作者), 分别在 2003 年和 2009 年于重庆大学获得学士学位和博士学位, 现为电子科技大学副教授, 主要研究方向为传感信息获取与处理、模式识别、光纤传感及物联网技术。

E-mail: hjwu@uestc.edu.cn

Wu Huijuan (Corresponding author) received her B. Sc. degree in 2003 from Chongqing University, received her Ph. D. degree in 2009 year from Chongqing University, now she is an associate professor in UESTC. Her main research interests include information acquisition and processing, pattern recognition, optical fiber sensing and internet of things technology.



陈忠权, 2013 年于云南大学获得学士学位, 现为电子科技大学硕士研究生, 主要研究方向为基于分布式光纤振动传感方面的应用。

E-mail: greatczq@163.com

Chen Zhongquan received his B. Sc. degree in 2013 from Yunnan University. Now he is a master degree candidate in UESTC. His main research interests include the application research based on the distributed optical fiber vibration sensing research.