

# 基于选择性平均阈值的分布式光纤自来水管 泄漏检测定位及实验分析

赵亚<sup>1</sup>, 王强<sup>1\*</sup>, 凌张伟<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>中国计量大学质量与安全工程学院, 浙江 杭州 310018;

<sup>2</sup>浙江省特种设备检验研究院, 浙江 杭州 310018;

<sup>3</sup>浙江省特种设备安全检测技术研究重点实验室, 浙江 杭州 310018

**摘要** 基于拉曼散射和光时域反射技术的结合, 利用分布式光纤对自来水管进行泄漏检测和定位模拟实验, 分别在自来水管无泄漏和有微小泄漏的情况下, 通过分布式光纤传感器获取温度检测信号。实验时, 利用绝对距离法对温度检测信号进行聚类分析, 识别聚乙烯(PE)自来水管有无泄漏发生, 再对无泄漏信号利用选择性平均阈值法确定阈值信号, 并通过检测信号和阈值信号的差值信号识别 PE 自来水管泄漏点位置。结果表明, 该系统运行稳定, 且能够准确识别自来水管泄漏情况, 使用选择性平均阈值法能够准确定位泄漏点。

**关键词** 光纤光学; 分布式光纤测温; 聚乙烯自来水管; 泄漏检测; 绝对距离法; 选择性平均阈值

中图分类号 TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.030602

## Experimental Analysis and Leakage Location Detection of Tap Water Pipe Based on Distributed Optical Fiber with Selective Average Threshold

Zhao Ya<sup>1</sup>, Wang Qiang<sup>1\*</sup>, Ling Zhangwei<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> College of Quality and Safety Engineering, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China;

<sup>2</sup> Zhejiang Provincial Special Equipment Inspection and Research Institute, Hangzhou, Zhejiang 310018, China;

<sup>3</sup> Key Laboratory of Special Equipment Safety Testing Technology of Zhejiang Province, Hangzhou, Zhejiang 310018, China

**Abstract** Based on the combination of Raman scattering and optical time domain reflection techniques, the distributed optical fiber is used for the simulation experiment of leakage detection and location of tap water pipes. The temperature detection signal is obtained under no leakage or slight leakage of a tap water pipe by a distributed optical fiber sensor. In the experiment, the absolute distance method is firstly used for clustering the temperature detection signals to identify whether there is leakage in the tap water pipe or not. Then, as for the no-leakage signals, a selective average threshold method is used for the determination of a threshold signal. Finally, the difference signal between the detection signal and the threshold signal is used for the identification of leakage location of a tap water pipe. The results show that the whole system is stable and can be used to accurately identify the leakage of tap water pipes. Moreover, the use of the selective average threshold method can accurately locate the leakage point.

**Key words** fiber optics; temperature measurement by distributed optical fiber; polyethylene water pipe; leakage detection; absolute distance method; selective average threshold

**OCIS codes** 060.2310; 060.2370; 120.5820; 120.6780

## 1 引言

近年来,随着光纤传感技术的发展,分布式光纤

测温系统已广泛应用于管道的泄漏检测与定位。Niklès 等<sup>[1]</sup>将基于布里渊散射原理的分布式光纤监测系统应用于长输管道工程中,通过测温来监测管

收稿日期: 2018-06-22; 修回日期: 2018-07-25; 录用日期: 2018-08-23

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0400603)

\* E-mail: qiangwang@cjlu.edu.cn

道泄漏情况; Mirzaei 等<sup>[2]</sup>采用基于拉曼散射原理和布里渊散射原理的分布式光纤测温系统进行输油管道的泄漏检测和定位; Lombera 等<sup>[3]</sup>提出利用基于布里渊散射原理的分布式光纤测温系统检测大口径水管泄漏的检测方案,并通过实验论证了该方案的适用性; Apperl 等<sup>[4]</sup>将分布式光纤温度传感技术应用于污水压力管道的泄漏检测和定位。随着城市化水平的不断提高,自来水管应用更加普遍,常用的自来水管有普通铸铁管、钢管、玻璃钢管和塑料管[如聚氯乙烯(PVC)管、聚乙烯(PE)管和聚丙烯(PP-R)管]等,传统自来水管泄漏检测方法有水平衡调查法、负压波法和探地雷达探测法<sup>[5]</sup>等,但是,在实际检测中这些方法仅适用于短距离管道的区域性泄漏检测,无法对长距离水管进行实时监测,且传统的声学设备不适用于非金属管道和大口径管道的静态泄漏检测。考虑到分布式光纤测温系统在管道泄漏检测方面的优越性,提出将基于拉曼散射和光时域反射技术相结合的分布式光纤测温系统应用于长距离 PE 自来水管道的在线检测和泄漏定位。

分布式光纤拉曼温度传感系统可采用光纤拉曼散射效应测量温度,但由于光纤中产生的自发拉曼散射信号特别微弱,常被淹没在噪声中,影响了系统的测温精度。刘磊等<sup>[6]</sup>针对存在的噪声问题,提出了将小波变换用于系统的信号处理,使系统的平均温度测量误差由 3.1 °C 降低到 1.1 °C; 向进等<sup>[7]</sup>采用一种改进的小波阈值函数和阈值选取方法对拉曼散射温度信号进行了处理,提高了分布式光纤测温系统的精度。自来水管道在发生泄漏时,由泄漏导致的温差较小; 因此,为准确判别自来水管泄漏与否并进行泄漏定位,须对检测信号进行处理。

本文搭建了基于分布式光纤测温的 PE 自来水管道泄漏检测实验平台,进行了自来水管泄漏检测和定位模拟实验。以测量光纤长为 500 m 时温度检测信号的归一化信号作为聚类分析的特征向量,采用绝对距离法对 PE 自来水管泄漏情况进行了分类识别,提出了一种基于选择性平均的分布式光纤测温传感阈值算法,对无泄漏信号进行了阈值设定,并通过分析阈值信号与泄漏信号的差值信号,确定了泄漏点的位置。

## 2 分布式光纤测温原理

### 2.1 工作原理

激光器发出的光进入光纤后,发生弹性和非弹性碰撞,产生 3 种后向散射光,包括拉曼散射光、布里渊散射光和瑞利散射光。其中,拉曼散射光包含

斯托克斯散射光和反斯托克斯散射光,是光纤分子热振动和光子相互作用发生能量交换的产物。反斯托克斯散射光对温度变化敏感,而斯托克斯散射光基本与温度无关<sup>[8-9]</sup>。

光纤中注入一定能量的激光脉冲,将在距离注入点长度  $L$  处发生拉曼散射,斯托克斯光子数和反斯托克斯光子数<sup>[10]</sup>分别为

$$N_s = K_s S v_s^4 N_e \exp[-(\alpha_0 + \alpha_s)L] \times \{1 - \exp[-h\Delta\nu/(kT)]\}^{-1}, \quad (1)$$

$$N_a = K_a S v_a^4 N_e \exp[-(\alpha_0 + \alpha_a)L] \times \{\exp[h\Delta\nu/(kT)] - 1\}^{-1}, \quad (2)$$

式中:  $K_s$ 、 $K_a$  为与光纤散射截面有关的系数;  $v_s$ 、 $v_a$  为对应的光子频率;  $S$  为光纤的背向散射因子;  $N_e$  为光纤入射端的激光光子数;  $\alpha_0$ 、 $\alpha_s$ 、 $\alpha_a$  分别为入射光、斯托克斯光和反斯托克斯光的损耗系数;  $h$  为普朗克常数;  $\Delta\nu$  为光纤中分子振动频率;  $k$  为玻尔兹曼常量;  $T$  为距离  $L$  处的热力学温度。

根据拉曼散射的温度调制机理,可将(1)式和(2)式表示为<sup>[11]</sup>

$$\frac{N_a}{N_s} = \frac{K_a}{K_s} \left(\frac{v_a}{v_s}\right)^4 \exp[-h\Delta\nu/(kT)] \times \exp[-(\alpha_a + \alpha_s)L]. \quad (3)$$

当  $T = T_0$  时( $T_0$  为已知起始温度), (3)式可表示为

$$\frac{N_a(T_0)}{N_s(T_0)} = \frac{K_a}{K_s} \left(\frac{v_a}{v_s}\right)^4 \exp[-h\Delta\nu/(kT_0)] \times \exp[-(\alpha_a + \alpha_s)L]. \quad (4)$$

由(3)和(4)式可得:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} - \frac{k}{h\Delta\nu} \left[ \ln \frac{N_a(T)N_s(T_0)}{N_a(T_0)N_s(T)} \right]. \quad (5)$$

光时域反射(OTDR)测距就是通过光在光纤中的传播速度和信号从发射到接收返回信号所用的时间,确定光纤上发生后向拉曼散射光的点距离入射端的距离<sup>[12]</sup>表示为

$$L = \frac{1}{2}c \cdot t/n, \quad (6)$$

式中:  $t$  为信号发射到接收到返回信号的时间;  $n$  为被测光纤折射率;  $c$  为光在真空中的传播速度;  $L$  为发生后向拉曼散射光的点到入射端的距离。

### 2.2 自来水管泄漏检测系统

目前自来水管的泄漏检测方法大多仅适用于金属管道泄漏检测以及短距离管道区域性检测,针对塑料材质的自来水管进行长距离实时监测的方法相对较少。而分布式光纤测温系统在管道检测方面有

着测量精度高、检测距离长和成本较低等优点,因此可将基于拉曼散射和光时域反射法技术相结合的分分布式光纤测温系统应用于自来水管的泄漏检测。基于分布式光纤测温的自来水管泄漏检测系统主要包括激光器、波分复用器、微弱信号探测器、传感光纤、数据采集模块、上位机和由储水箱、PE管道、水泵构成的水循环系统,如图1所示。

根据光的散射原理,激光器发出的光沿着光纤

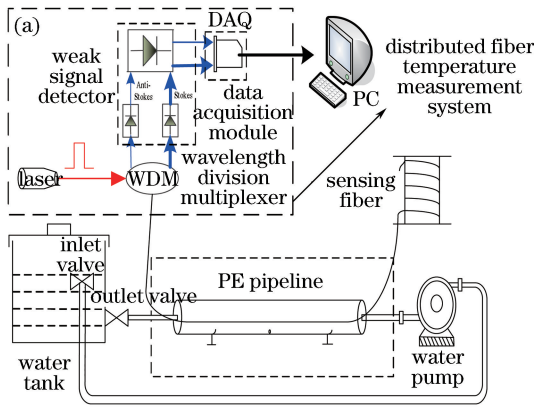


图1 自来水管泄漏检测系统。(a)示意图;(b)实物图

Fig. 1 Tap water pipe leakage detection system. (a) Schematic; (b) physical map

## 3 选择性平均阈值

### 3.1 绝对距离法分类

自来水管发生泄漏时,泄漏液体会引起周围介质温度发生变化,由于温差变化较小且存在大量噪声干扰,导致泄漏信号与未泄漏信号识别较为困难,无法进行阈值设定和泄漏点定位。因此,需要通过绝对距离法对检测信号进行聚类分析,以识别自来水管有无泄漏发生,再对无泄漏信号利用选择性平均阈值法进行阈值设定以及对有泄漏信号进行泄漏点定位。

绝对距离法是聚类分析的一种,其原理是基于数学公式,计算各向量间的绝对距离,按样本间亲疏程度划分类别。绝对距离用公式表示为<sup>[14]</sup>

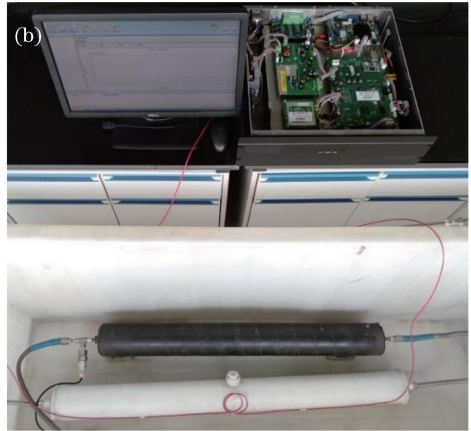
$$d_{i,j} = \sum_{a=1}^p |x_{ia} - x_{ja}|, \quad (7)$$

式中  $d_{i,j}$  为样本  $x_i$  与  $x_j$  的距离,如果样本  $x_1$  和样本  $x_2$  间绝对距离  $d_{i,j}$  值越小,则表示两者差异性越小,相似性越大。

### 3.2 选择性平均阈值法

阈值的准确设定是有效提高自来水管泄漏检测系统定位精度的关键。目前,针对分布式光纤测温系统在阈值设定方面的研究相对较少。在实际检测中,长距离测量光纤返回的后向拉曼散射光信号相

经过 PE 管向前传输时,同时不断产生后向拉曼散射光,这些拉曼散射光的强度随着所在光纤散射点温度的变化而变化<sup>[13]</sup>。散射回来的拉曼散射光经过波分复用器和微弱信号探测器进行光学滤波、光电转换、放大和模数转换等操作,将结果送入数据采集模块,通过上位机进行信号的分析处理,便可将温度信息实时计算出来,同时分布式光纤测温系统利用 OTDR 原理进行温度信息点的定位。



对较弱,加之检测系统的高灵敏度,使得无泄漏信号较弱且夹杂着噪声信号,无法直接作为阈值信号进行泄漏定位。针对  $\phi$ -OTDR 分布式光纤扰动传感系统中阈值信号的设定,王鹏等<sup>[15]</sup>提出了一种基于选择性平均的  $\phi$ -OTDR 分布式光纤扰动传感系统阈值算法,能够更有效地设定阈值,提高系统扰动区域的定位精度。因此,可将选择性平均阈值算法应用于该基于分布式光纤测温的自来水管泄漏检测系统。

选择性平均阈值法,是一种通过模板匹配的方式剔除部分受外界因素影响的温度曲线进行平均的算法。具体过程为:

1) 将检测信号按照采集时间依次分为初期信号、中期信号和后期信号,并对初期检测信号进行累加平均处理,将所得平均信号作为初级模板。

2) 判断所得初级模板是否合格,计算初级模板与中期信号的相似系数( $\gamma$ ),可来表示为

$$\gamma = 1 - \delta, \quad (8)$$

式中  $\delta$  为差值系数,可表示为<sup>[15]</sup>

$$\delta = \frac{\left| \sum_{k=0}^{N-1} T_k T_k - \sum_{k=0}^{N-1} T_k X_k \right|}{\sum_{k=0}^{N-1} T_k T_k}, 0 \leq \delta \leq 1, \quad (9)$$

式中  $X_k$  为待检测信号,  $T_k$  为模板信号。经相关差

值法验证,若相似系数都满足  $0.5 \leq \delta \leq 1$ ,则认为初级模板合格,可进行下一步处理;否则,舍弃所得初级模板信号,重新进行信号的划分和累加平均处理。

3) 利用初级模板信号和后期信号确定最终阈值信号,分别计算后期信号与初级模板信号之间的相似系数和差值系数,对比并剔除后期信号中差值系数较大的信号数组,对剩余的后期信号进行累加平均处理,得到最终阈值信号。

## 4 实验数据分析

### 4.1 实验装置

在实验室环境下利用基于拉曼散射和光时域反射技术相结合的分布式光纤测温系统进行自来水管泄漏检测和定位实验,选用型号 SCJKBV-1A1b(H)-3.0-R,长为 200m、500 m,纤芯规格为  $62.5 \mu\text{m}/125 \mu\text{m}$ ,测温范围  $-40 \sim 120 \text{ }^\circ\text{C}$  的单芯多模铠装光纤;杭州山旭光电有限公司提供的带尾纤

MOCVD InGaAsP 高功率脉冲半导体激光器,出纤功率  $>500 \text{ mW}$ ;定制长为 1200 mm、外径为 110 mm、壁厚为 10 mm 的 PE 管道,管道中部开设有一直径为 4 mm 的小孔,用于模拟自来水管微泄漏。系统采样间隔为 0.2 m,脉冲宽度为 2,雪崩光电二极管 (APD) 带宽为 2 G,实验装置如图 1(b) 所示。

### 4.2 检测信号的聚类分析

由于自来水管泄漏温差变化较小且存在大量噪声干扰,导致 PE 水管在发生极微小渗漏时,从原始温度信号图中较难判别自来水管是否发生泄漏。因此,需对检测信号利用绝对距离法进行聚类分析,判断有无泄漏发生。

在实验室环境中,利用分布式光纤测温系统对 PE 自来水管进行泄漏检测和定位实验,取两组典型温度检测信号如图 2(a)、(b) 所示。为方便信号进行聚类分析,对其归一化,结果如图 2(c)、(d) 所示。

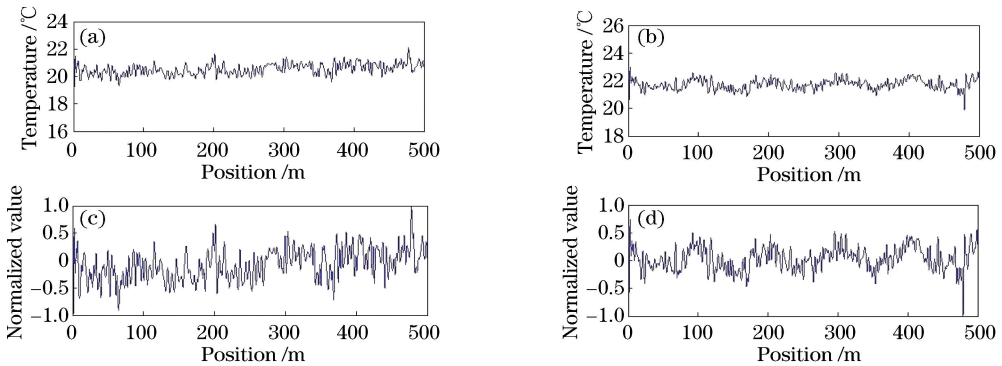


图 2 自来水管泄漏检测信号。(a)检测信号 a;(b)检测信号 b;(c)信号 a 归一化;(d)信号 b 归一化  
Fig. 2 Leakage detection signals of tap water pipe. (a) Detection signal a; (b) detection signal b; (c) normalized signal a; (d) normalized signal b

取自来水管在有泄漏和无泄漏情况下所得的检测数据 25 组(其中无泄漏 10 组,有泄漏 15 组),作为测试样本(定义样本 1 至样本 10 为无泄漏样本,

样本 11 至样本 25 为有泄漏样本)进行聚类分析。由图 3(a) 可知,绝对距离法可准确将有泄漏和无泄漏信号进行分类,因此,可利用该测试样本对检

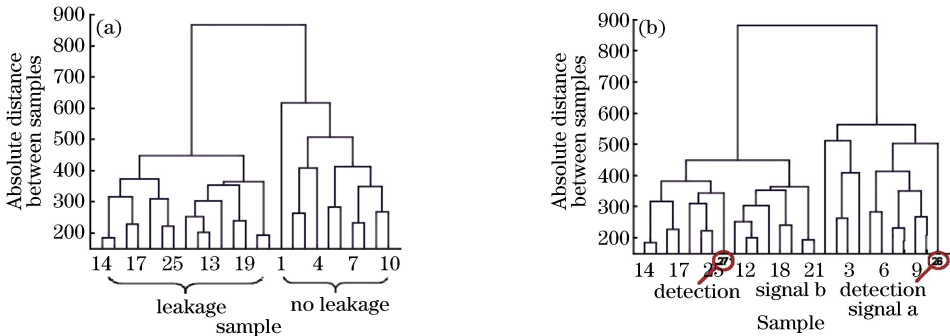


图 3 自来水管有无泄漏和泄漏聚类结果。(a)测试样本分类;(b)检测信号 a、b 聚类结果

Fig. 3 Clustering results under no-leakage and leakage of tap water pipe. (a) Classification of test samples; (b) clustering results of detection signals a and b

测信号 a、b 进行泄漏与否的识别。将检测信号 a、b 分别定义为样本 26 和样本 27, 再次进行聚类分析。由图 3(b) 可得, 样本 26 对应的检测信号 a 为无泄漏信号, 样本 27 对应的检测信号 b 为有泄漏信号。

### 4.3 阈值设定与泄漏定位

用绝对距离法定性判别自来水管道的泄漏与否之后, 须精确定位泄漏点位置。泄漏定位算法基于自来水管泄漏时液体会引起周围介质温度变化的原理, 根据无泄漏信号确定阈值信号, 对比阈值信号与

泄漏信号, 寻找温度突变点, 即为自来水管道的泄漏点位置。

在测量光纤长为 200 m 和 500 m 的情况下, 各取 40 组无泄漏信号, 按照采集时间依次划分为初期信号(10 组)、中期信号(10 组)和后期信号(20 组)。首先对 10 组初期信号进行累加平均处理, 所得平均信号作为初级模板, 如图 4 所示。且经相关差值法验证可知, 初级模板合格, 可用于最终模板信号的确定。

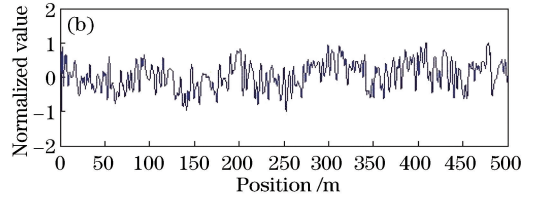
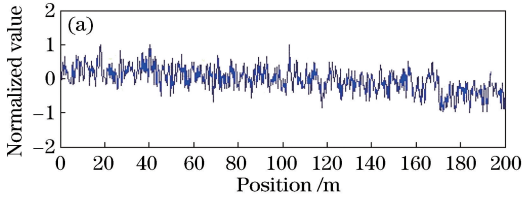


图 4 检测信号阈值初级模板。(a)测量光纤长为 200 m; (b)测量光纤长为 500 m

Fig. 4 Primary template for detection of signal threshold. (a) 200 m measurement fiber; (b) 500 m measurement fiber

分别计算 20 组后期信号与初级模板信号之间的差值系数  $\delta$ , 为获得更加优化的阈值匹配的最终模板, 以  $\delta=0.26$  为上限, 剔除 20 组后期检测信号中不符合要求的检测信号, 将剩余检测信号进行累

加平均, 以所得结果信号作为阈值匹配的最终模板信号, 如图 5 所示。与图 4 初级模板信号相比, 最终模板信号更加平稳, 这是由于相关差值运算剔除了差值系数较大的数组。

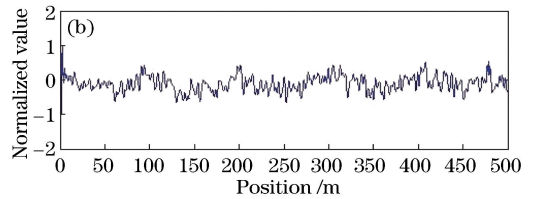
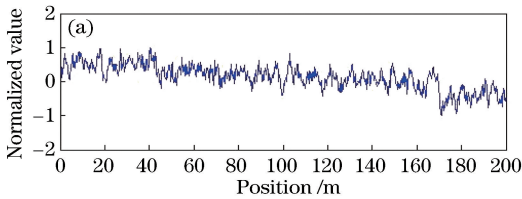


图 5 检测信号阈值最终模板。(a)测量光纤长为 200 m; (b)测量光纤长为 500 m

Fig. 5 Final template for detection of signal threshold. (a) 200 m measurement fiber; (b) 500 m measurement fiber

确定泄漏位置。取 40 组有泄漏信号分别与最终阈值信号进行对比, 作出差值信号, 各选其中一组如图 6 所示。由图 6(a) 可知, 测量光纤长为 200 m 时, 差值信号在 169.37 m 处的值明显高于其余位置, 说明此处介质温度发生了变化, 利用自来水管泄

漏时液体会引起周围介质温度变化的原理, 可确定此处即为自来水管的泄漏点位置。同理, 由图 6(b) 可知, 测量光纤长 500 m 时, 实验所得泄漏位置为 479.75 m。测量光纤长为 200、500 m 情况下自来水管实际泄漏位置分别为 170 m 和 480 m。

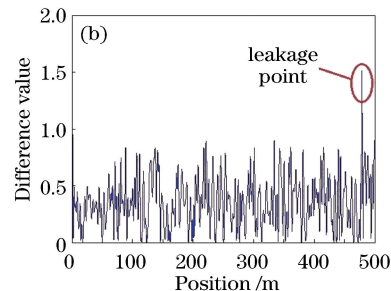
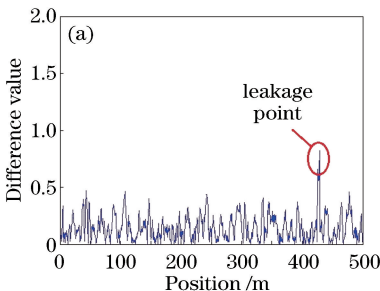


图 6 自来水管道泄漏点定位。(a)测量光纤长为 200 m; (b)测量光纤长为 500 m

Fig. 6 Location of tap water pipe leakage point. (a) 200 m measurement fiber; (b) 500 m measurement fiber

实验过程中,由于自来水管泄漏温差变化较小且存在大量噪声干扰,以及数据处理过程中存在的误差,导致水管在发生极微小渗漏时检测结果可能会出现误报现象,如图7(a)所示,250 m处存在泄漏误报。小波变换具有时域和频域上局部性、分辨

率分析、低熵性等特性,非常适用于管道泄漏信号的分析 and 处理。为避免误报现象的出现,在泄漏信号与阈值信号对比做差值信号之前,对检测泄漏信号采用 sym5 小波进行消噪处理。处理后所得结果如图7(b)所示。

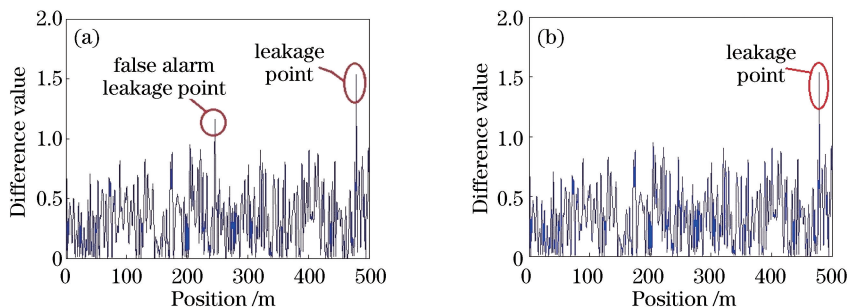


图7 自来水管泄漏误报。(a) 250 m处存在误报;(b)消除泄漏误报

Fig. 7 Misinformation of water pipe leakage. (a) False alarm at 250 m; (b) elimination of false alarm

## 5 结 论

基于拉曼散射和光时域反射技术相结合的分布式光纤测温系统,模拟自来水管泄漏检测及定位实验,采用长500 m的传感光纤,取10组无泄漏信号和15组有泄漏信号作为测试样本,利用绝对距离法对检测信号a、b进行了聚类分析,识别了PE自来水管的泄漏情况。在传感光纤长200 m和500 m情况下,分别对40组无泄漏信号进行了选择性平均处理,以所得信号作为泄漏定位的阈值信号。通过分析阈值信号与泄漏信号的差值信号,得到PE自来水管泄漏点位置分别为169.37 m和479.75 m。

## 参 考 文 献

- [1] Niklès M, Vogel B H, Briffod F, *et al.* Leakage detection using fiber optics distributed temperature monitoring [C] // Smart Structures and Materials 2004: Smart Sensor Technology and Measurement Systems. International Society for Optics and Photonics, 2004, 5384: 18-26.
- [2] Mirzaei A, Bahrampour A R, Taraz M, *et al.* Transient response of buried oil pipelines fiber optic leak detector based on the distributed temperature measurement[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 65: 110-122.
- [3] Lombera R R, Serrano J M, Martinez O, *et al.* Experimental demonstration of a leakage monitoring system for large diameter water pipes using a fiber optic distributed sensor system [C] // IEEE International Conference on Sensors, 2014: 1885-

1888.

- [4] Apperl B, Pressl A, Schulz K. Feasibility of locating leakages in sewage pressure pipes using the distributed temperature sensing technology [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2017, 228: 82.
- [5] Zhang S F, Xie X F. Application of ground penetrating radar in leak detection of water pipelines [J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2008 (6): 58-59,57.  
张树风, 谢晓锋. 探地雷达在自来水管泄漏探测中的应用[J]. 广东土木与建筑, 2008(6): 58-59,57.
- [6] Liu L, Yu M, Yang R J, *et al.* Wavelet denoising applied in optical fiber Raman temperature sensor system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(6): 0605005.  
刘磊, 于森, 杨瑞娟, 等. 小波去噪用于光纤拉曼温度传感系统[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0605005.
- [7] Xiang J, Liu B F, Li Y. Research of noise signal processing in fiber optic distributed temperature measurement system based on wavelet[J]. Modern Instruments, 2011, 17(1): 47-49,44.  
向进, 刘波峰, 李亚. 基于小波的分布式光纤测温系统中噪声信号处理研究[J]. 现代仪器, 2011, 17(1): 47-49,44.
- [8] Yang Y H, Yang W, Jiang T, *et al.* Investigation on characteristics of stimulated Raman threshold in a single mode fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34 (1): 0129001.  
杨远洪, 杨巍, 蒋婷, 等. 单模光纤中受激拉曼散射的阈值特性研究[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0129001.

- [9] Huang X, Gan X Q, Li Q, *et al.* Application of distributed optical fiber temperature measuring system based on Raman scattering [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2013, 30(2): 92-96.  
黄祥, 甘孝清, 李强, 等. 基于拉曼散射的分布式光纤测温系统应用研究[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(2): 92-96.
- [10] Shan Y F, Ma Y J, Fu H, *et al.* Application of distributed optical fiber temperature measurement system in coal mine fire monitoring system [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2014, 27(5): 704-708.  
单亚锋, 马艳娟, 付华, 等. 分布式光纤测温系统在煤矿火灾监测中的应用[J]. 传感技术学报, 2014, 27(5): 704-708.
- [11] Zhang M J, Li J, Liu Y, *et al.* Temperature demodulation method for distributed optical fiber Raman temperature measurement [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(3): 0306002.  
张明江, 李健, 刘毅, 等. 面向分布式光纤拉曼测温的新型温度解调方法[J]. 中国激光, 2017, 44(3): 0306002.
- [12] Zhou Z C, Wang X L, Su R T, *et al.* The application of distributed fiber sensing in fiber lasers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(8): 080006.  
周子超, 王小林, 粟荣涛, 等. 分布式光纤传感在光纤激光中的应用研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(8): 080006.
- [13] Tong J K, Jin B Q, Wang D, *et al.* Distributed optical fiber temperature measurement system for pipeline safety monitoring based on R-OTDR [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2018, 31(1): 158-162.  
佟敬阔, 靳宝全, 王东, 等. 面向管道安全监测的 R-OTDR 分布式光纤测温系统[J]. 传感技术学报, 2018, 31(1): 158-162.
- [14] Han L J, Wang Q, Fan X W, *et al.* Underwater gas pipeline leakage diagnostic method by distributed optical fiber sensor based on SPE [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(5): 052801.  
韩玲娟, 王强, 范昕炜, 等. 分布式光纤传感水下天然气管道泄漏的 SPE 诊断法[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(5): 052801.
- [15] Wang P, Lou S Q, Liang S, *et al.* Selective average based threshold algorithm for  $\phi$ -OTDR distributed fiber-optic sensing system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(3): 322003.  
王鹏, 娄淑琴, 梁生, 等. 选择性平均的  $\phi$ -OTDR 分布式光纤扰动传感系统阈值算法[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(3): 322003.