

文章编号: 1002-2082 (2020) 01-0228-07

# 基于分布式光纤的埋地自来水管 多点泄漏定位方法分析

张智望<sup>1</sup>, 王强<sup>2</sup>, 谷小红<sup>1</sup>, 赵亚<sup>2</sup>, 吴琳琳<sup>2</sup>, 朱凯<sup>2</sup>

(1. 中国计量大学机电工程学院, 浙江杭州 310018; 2. 中国计量大学质量与安全工程学院, 浙江杭州 310018)

**摘要:** 基于拉曼散射测温原理, 利用分布式光纤对UPVC(硬脂聚氯乙烯)和铸铁自来水管道进行模拟泄漏点定位实验。首先对采集到的原始Anti-Stokes光信号进行滤波平滑处理, 再利用相关系数法对温度检测信号进行分类分析, 识别自来水管有无泄漏发生, 最后通过选择性阈值法识别出UPVC管以及铸铁管中的泄漏点位置。实验结果表明, 该系统运行稳定且能够准确识别自来水管泄漏情况。选择性平均阈值法的使用, 能够对200 m的埋地自来水管道准确地进行泄漏点的定位, 定位误差为0.25 m~0.65 m。

**关键词:** 分布式光纤测温; 泄漏检测; 相关系数法; 选择性平均阈值

中图分类号: TN247

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202041.0108002

## Analysis on underground water pipes multi-point leakage location method based on distributed optical fiber

ZHANG Zhiwang<sup>1</sup>, WANG Qiang<sup>2</sup>, GU Xiaohong<sup>1</sup>, ZHAO Ya<sup>2</sup>, WU Linlin<sup>2</sup>, ZHU Kai<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;

2. College of Quality and Safety Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** Based on the principle of Raman scattering temperature measurement, a distributed optical fiber system was built to carry out the simulated leakage points location experiment of UPVC (unplasticized polyvinyl chloride) and cast-iron water pipes. Firstly, the original Anti-Stokes optical signal was filtered and smoothed. Then, the temperature measurement signal was classified and analyzed by using correlation coefficient method to identify whether the leakage occurred in water pipes. Finally, the leakage points location in UPVC and cast-iron water pipes was identified by selective threshold method. The experimental results show that the distributed fiber optic system works stably and can accurately identify the leakage points of water pipes. The selective average threshold method can accurately locate the leakage points of 200 m underground water pipes and the location error ranges from 0.25 m to 0.65 m.

**Key words:** distributed optical fiber temperature measurement; leakage detection; correlation coefficient method; selective average threshold

## 引言

近年来, 城市管网的泄漏问题持续影响城市发展。然而, 在实际的监测过程之中, 传统的监测方

式例如水平衡调查法、负压波法和探地雷达探测法<sup>[1]</sup>等不适宜埋地管道的泄漏定位。随着光纤测温技术的研究深入, 分布式光纤测温系统被广泛

收稿日期: 2019-06-19; 修回日期: 2019-09-18

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFC0400603)

作者简介: 张智望 (1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事控制工程研究工作。E-mail: 695624720@qq.com

导师简介: 王强 (1976-), 男, 博士, 教授, 从事结构检测健康检测方面的研究。E-mail: qiangwang@cjlu.edu.cn

通信作者: 王强, E-mail: qiangwang@cjlu.edu.cn

运用在监测城市埋地自来水管道的泄漏。张纪承<sup>[2]</sup>等将拉曼光谱仪用于检测环境温度变化; B. Apperl<sup>[3]</sup>等将分布式光纤测温系统用于污水压力管道的泄漏定位和检测; Nick van de Giesen<sup>[4]</sup>等采用了双端校准的分布式光纤拉曼测温传感器, 使得实际温度测量更为精确; Tsutomu Yamate<sup>[5]</sup>等在石油勘探以及油气田井下检测缺陷中使用分布式拉曼测温传感器, 并且能够较为准确地评估油气井的完整性; 张青<sup>[6]</sup>等提出基于拉曼散射的深孔测温方法对地热资源进行勘测; 何巍巍<sup>[7]</sup>等改进分布式光纤测温系统, 搭建了分布式光纤地面解调样机用于油井监测; 赵亚<sup>[8]</sup>等采用了选择性平均阈值的算法, 针对 PVC(polyvinyl chloride) 自来水管单泄漏点进行定位; Thomas Reinsch<sup>[9]</sup>等采用选取不同涂层的测温光纤对比分析了温度在传输过程中的衰减。

分布式光纤拉曼测温系统在实际使用中, 由于光纤后向散射中产生的拉曼散射光信号特别微弱, 极易与环境外界因素所产生的扰动信号产生虚警或漏警, 影响系统的精确性。在测温的过程中, 为提高温度信号的可靠性, 王焱<sup>[10]</sup>等提出对光信号的位置利用色散补偿算法进行补正, 有效弥补了光信号在传播速度上的不同而产生的测量误差, 提高了分布式光纤拉曼散射测温系统测量的准确性; 韦坚<sup>[11]</sup>等针对环境扰动的问题提出了用卡尔曼滤波的方法, 将测温曲线的数值和曲线之间的方差从 0.251 减少至 0.122。由于不同材质的埋地管道在发生多点泄漏时所产生的温度信号较小, 因此, 为能准确分辨实际泄漏所产生的温差信号和由于环境干扰产生的扰动温差信号, 需对采集的拉曼散射光信号进行处理, 然后再对光信号得到的温度信号进行泄漏点定位。故提出将基于拉曼散射测温原理的分布式光纤测温系统应用于 UPVC(unplasticized polyvinyl chloride) 和铸铁自来水管道的泄漏定位问题。

本文搭建了基于分布式光纤测温原理的自来水管道和多个泄漏点检测实验平台, 进行了 UPVC 管以及铸铁管的泄漏检测和模拟定位实验, 利用分布式光纤对自来水管道进行泄漏检测和定位模拟实验。通过对测量光纤长 200 m 时拉曼散射原始光信号进行平滑去噪处理, 用去噪后的反斯托克斯 (anti-Stokes) 光信号所得温度信号的归一化信号作为相关系数法的特征向量, 对 UPVC 管和铸

铁管有无泄漏进行了分类识别, 然后采用了一种基于分布式光纤拉曼测温的选择性平均阈值算法, 对温度信号进行阈值分析, 最终确定出两个泄漏点的位置。

## 1 分布式光纤测温原理

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 (Stokes) 光子数和 anti-Stokes 光子数分别为<sup>[12]</sup>

$$N_s(T) = K_s S V_s^4 N_e \exp[-(\alpha_0 + \alpha_s)L] R_s(T) \quad (1)$$

$$N_a(T) = K_a S V_a^4 N_e \exp[-(\alpha_0 + \alpha_{as})L] R_{as}(T) \quad (2)$$

式中:  $K_s$ 、 $K_a$  为与光纤散射截面有关的系数;  $V_a$ 、 $V_s$  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;  $\alpha_0$ 、 $\alpha_s$ 、 $\alpha_{as}$  分别为入射光、Stokes 光和 anti-Stokes 光的损耗系数;  $R_s(T)$ 、 $R_{as}(T)$  为低能级粒子数和高能级粒子数分布有关函数。其中  $R_s(T)$ 、 $R_{as}(T)$  可表示为<sup>[13]</sup>

$$R_s(T) = \{1 - \exp[-h\Delta\nu/(kT)]\}^{-1} \quad (3)$$

$$R_{as}(T) = \{\exp[-h\Delta\nu/(kT)]\}^{-1} \quad (4)$$

式中:  $h$  表示普朗克常数;  $\Delta\nu$  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。

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

$$N_s(T_0) = K_s S V_s^4 N_e \exp[-(\alpha_0 + \alpha_s)L] R_s(T_0) \quad (5)$$

$$N_{as}(T_0) = K_a S V_a^4 N_e \exp[-(\alpha_0 + \alpha_s)L] R_{as}(T_0) \quad (6)$$

由 (1) 式和 (2) 式的比值以及 (5) 式和 (6) 式的比值可得温度值  $T$ <sup>[14]</sup>:

$$T = \frac{h\Delta\nu T_0}{h\Delta\nu - kT_0 \ln \frac{N_a(T)/N_s(T)}{N_a(T_0)/N_s(T_0)}} \quad (7)$$

光时域反射 (OTDR) 测距<sup>[15]</sup> 通过在光纤输出端发射激光产生的背向散射光信号, 对比计算得到从激光发射到接收以及背向散射所用时间实现分布式光纤沿线定位的功能。

目前自来水管的泄漏检测方法, 大多仅适用于单一管道泄漏检测以及短距离管道单泄漏点检测, 针对不同材质的自来水管进行长距离多泄漏点实时监测的方法相对较少。而分布式光纤拉曼散射测温系统在管道检测方面有着测量精度高、报警速度快和系统成本低等优点, 因此可将基于拉曼散射和 OTDR 技术相结合的分布式光纤测温

系统应用于UPVC埋地自来水管以及铸铁自来水管道的泄漏检测。

## 2 基于分布式光纤温度泄漏点定位方法

### 2.1 原始 anti-Stokes 光信号预处理

由于光纤分布在地下时受到许多环境因素的干扰,产生的噪声信号会对泄漏点的检测产生虚警和误警的情况,因此需要在对信号进行分析判断之前先进行原始 anti-Stokes 信号预处理。

在埋地管道实验环境中,针对UPVC管以及铸铁自来水管埋地管道进行泄漏检测和定位实验,利用分布式光纤测温系统对温度进行监测和信号采集,对其中963个温度点进行采样,取其中1组典型的泄漏信号,对这组泄漏信号进行中值滤波处理,由图1(a)、图1(b)所示。

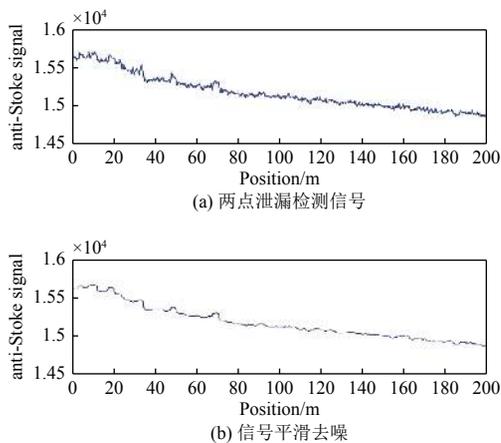


图1 埋地水管泄漏检测光信号

Fig. 1 Leakage detection optical signal of underground water pipes

由图1所知,无法直接对去噪后的 anti-Stokes 信号进行泄漏点的定位,因此需对去噪后光信号所得的温度信号进行处理,再进行泄漏点的判断和定位。

### 2.2 皮尔逊积差相关系数分类

埋地自来水管发生泄漏时,自来水管泄漏的液体会引起周围材料介质的温度发生变化,利用分布式光纤测温系统检测得到的信号与未泄漏时的信号有所不同。

为了能够准确判断埋地管道是否出现了泄漏的情况,需要先对预处理后的信号先进行分类处理。皮尔逊积差相关系数是基于矩阵基本原理的一种典型判断两个矩阵相似性的方法,皮尔逊积差相关系数用公式表示为

$$\rho_{X,Y} = \frac{\text{cov}(X,Y)}{\sigma_X\sigma_Y} = \frac{E((X-\mu_X)-(Y-\mu_Y))}{\sigma_X\sigma_Y} \quad (8)$$

式中:  $E$ 是数学期望;  $\text{cov}$ 是协方差;  $\sigma_X, \sigma_Y$ 分别为  $X$ 和  $Y$ 的样本标准差;  $\mu_X, \mu_Y$ 为  $X, Y$ 的样本平均值。

### 2.3 选择性平均阈值法

提高系统定位精度和降低系统虚警率,是利用分布式光纤测温系统进行自来水管泄漏检测时急需解决的问题,而有效解决办法就是阈值的准确设定。

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<sup>[16]</sup>。具体过程为:首先将检测信号按照采集时间进行划分,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。然后计算中期信号与初级模板的相似系数,判断初级模板是否合格。相似系数用  $\gamma$ 来表示,则:

$$\gamma = 1 - \delta \quad (9)$$

式中  $\delta$ 为差值系数,计算公式为

$$\delta = \frac{\left| \sum_{K=0}^{N-1} T_K T_K - \sum_{K=0}^{N-1} T_K X_K \right|}{\sum_{K=0}^{N-1} T_K T_K} \quad (0 \leq \delta \leq 1) \quad (10)$$

式中:  $T_K$ 为模板信号;  $X_K$ 为待检测信号,通过相关差值法估计模板信号的自相关函数和模板与待检测信号的互相关函数之间的相似度来实现模板匹配。经相关差值法验证后,初级模板合格,进行下一步,否则,舍弃初级信号,重新进行信号的划分和累加平均处理。最后,计算后期信号与初级模板之间的相似系数,识别并剔除差值系数较大的信号数组,将保留下来的信号进行累加平均,得到最终阈值。

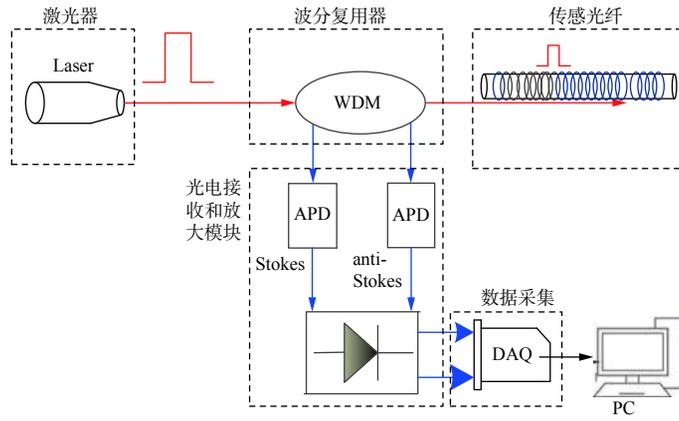
## 3 实验数据分析

### 3.1 实验装置

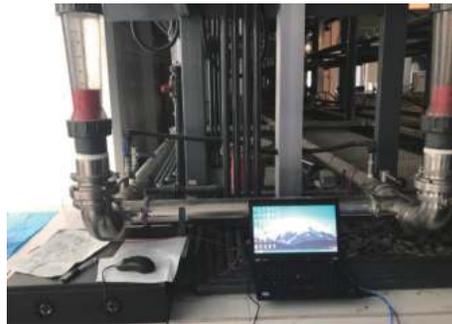
在现场模拟环境下利用基于拉曼散射和光时域反射技术相结合的分布式光纤测温系统进行自来水管泄漏检测和定位实验,选用长200m,纤芯规格为62.5  $\mu\text{m}/125 \mu\text{m}$ ,测温范围-40  $^{\circ}\text{C} \sim 120 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的单芯多模铠装光纤;输出功率为10 000  $\mu\text{W}$ ,中心波长为1 550.12 nm,带宽2 nm的带尾纤MOCVD InGaAsP高功率脉冲半导体激光器;定制长25 m的UPVC埋地管道,UPVC管道通过法兰

连接长 11 m 的铸铁管道, 铸铁管道通过法兰连接长 12 m 的不锈钢管道; 分别在 UPVC 管道的 16 m, 20 m 以及 24 m 处设置 1 号, 2 号和 3 号模拟泄漏窖井; 在铸铁管道的 6 m 以及 4 m 处设置 4 号和 5 号模拟泄漏窖井; 将长 200 m 的单芯多模铠装光纤埋于管道附近, 在管道设置窖井的位置进行光纤缠绕铺设, 利用分布式光纤拉曼测温系统可以

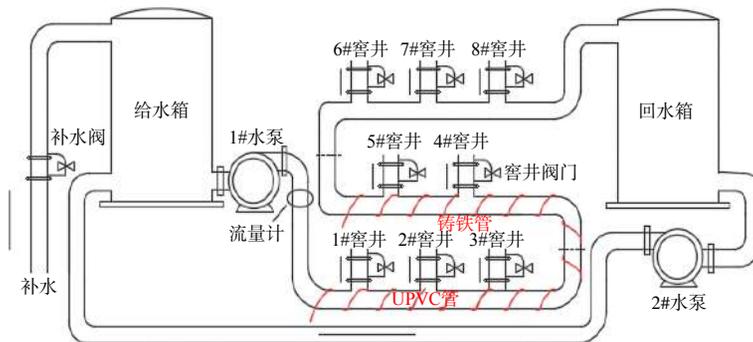
对漏损情况进行探测, 如图 2(c) 所示。在现场实验时打开 2 号窖井和 5 号窖井作为模拟埋地管道泄漏的样本。本文构造了基于分布式光纤拉曼测温的不同材质自来水管多点泄漏模拟检测系统, 现场模拟埋地管道泄漏系统由分布式光纤测温系统、储水箱、UPVC 埋地自来水管、铸铁埋地自来水管以及水循环系统组成, 如图 2 所示。



(a) 系统示意图



(b) 现场实物图



(c) 现场示意图

图 2 模拟两种材质埋地管道检测系统

Fig. 2 Simulation of two kinds of underground pipelines detection system

### 3.2 检测温度信号的皮尔逊积差相关系数分类

在 UPVC 自来水管埋地管道和铸铁管道的泄漏监测实验中, 利用分布式光纤测温系统对 UPVC

自来水管以及铸铁管进行泄漏检测和定位实验。取两组典型检测温度信号如图 3(a)、3(b) 所示。为方便后续信号的处理, 对其进行归一化, 结

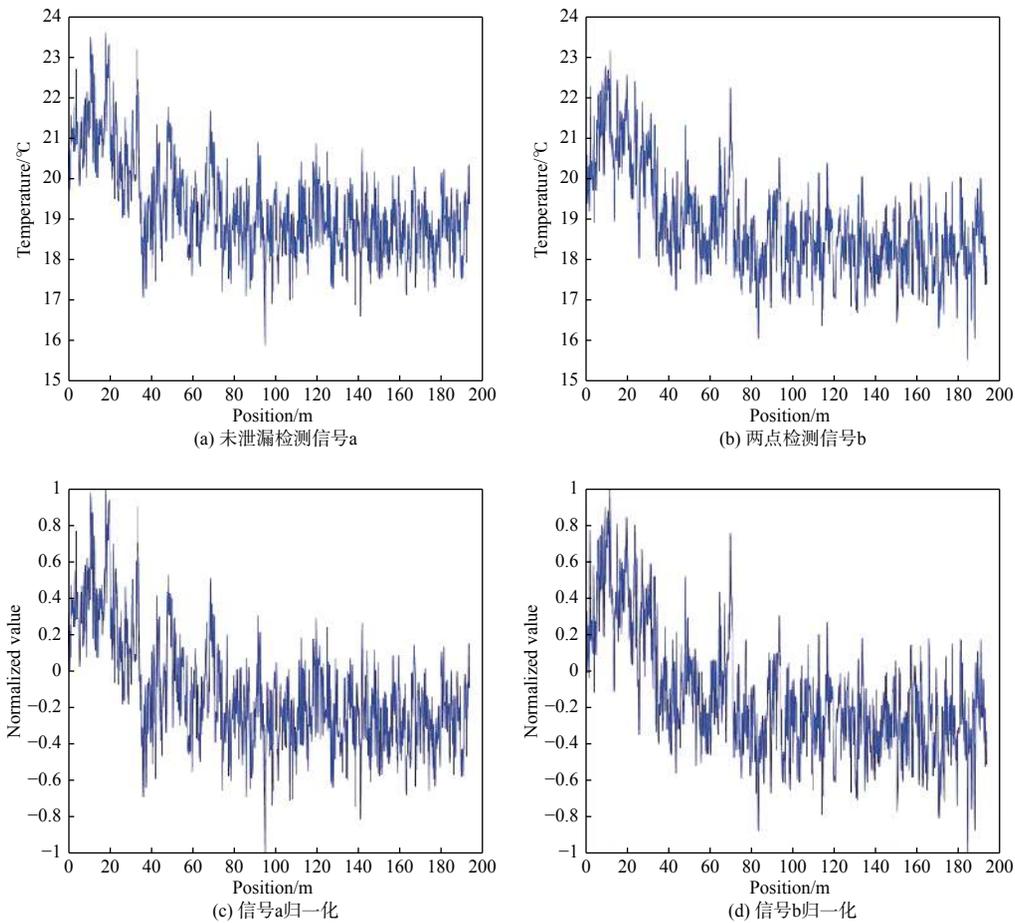


图3 埋地水管泄漏检测信号

Fig. 3 Leakage detection signal of underground water pipes

果分别如图3(c)、3(d)所示。由图3可知,在埋地管道发生泄漏的情况下,由于温差变化较小以及环境土壤等因素的干扰,从去噪后的光信号得到的原始温度图中较难判别埋地水管是否发生了泄漏。因此,需对信号进行处理,利用皮尔逊积差相关系数,对检测信号a、b进行分类。

取自来水管在已知有泄漏和无泄漏情况下所得检测数据20组作为测试样本(其中定义样本1~10为未泄漏温度信号样本,样本11~20为两点泄漏样本),再取一组未泄漏的样本作为参考样本,用测试样本与参考样本分别计算 $\rho_{x,y}$ ,所得结果如表1所示,从表1中可以看出,样本1~10与参考的未泄漏样本之间 $\rho_{x,y}$ 介于0.84到0.9之间,样本11~20与参考的未泄漏样本之间 $\rho_{x,y}$ 介于0.68~0.74之间,从而确定样本1~10与未泄漏的参考样本有强相关性,实现了埋地自来水管道的泄漏情况识别。

### 3.3 阈值设定与泄漏定位

相关系数法定性判别埋地水管泄漏与否之后,

表1 埋地管道样本两点泄漏和未泄漏分类结果

Table 1 Two-point leakage and non-leakage classification results of underground pipelines sample

| 样本编号 | $\rho_{x,y}$ | 样本编号 | $\rho_{x,y}$ |
|------|--------------|------|--------------|
| 1    | 0.860 9      | 11   | 0.711 2      |
| 2    | 0.865 7      | 12   | 0.734 2      |
| 3    | 0.858 2      | 13   | 0.722 2      |
| 4    | 0.871 7      | 14   | 0.720 3      |
| 5    | 0.889 1      | 15   | 0.687 2      |
| 6    | 0.898 1      | 16   | 0.705 6      |
| 7    | 0.886 2      | 17   | 0.716 8      |
| 8    | 0.883 0      | 18   | 0.710 2      |
| 9    | 0.882 0      | 19   | 0.700 1      |
| 10   | 0.849 0      | 20   | 0.690 5      |

需精确地确定泄漏点的具体位置。泄漏定位算法是基于埋地管道在地下发生泄漏时渗出的液体引起周围土壤以及介质变化的原理,根据未泄漏信号确定参考阈值信号,对比阈值信号和两点泄漏信号,寻找

温度突变点,即为埋地管道泄漏点的具体位置。

取 40 组未泄漏信号按照每 10 s 采集一组信号数据依次分为初期信号(10 组)、中期信号(10 组)和后期信号(20 组),首先对前 10 组初级信号进行累加平均算法处理,得到了未泄漏参考信号的初级模板。如图 4 所示,且经过样本差值系数的计算,该初级模板合格,可作为参考初级模板用于最终泄漏点的定位判断之中。

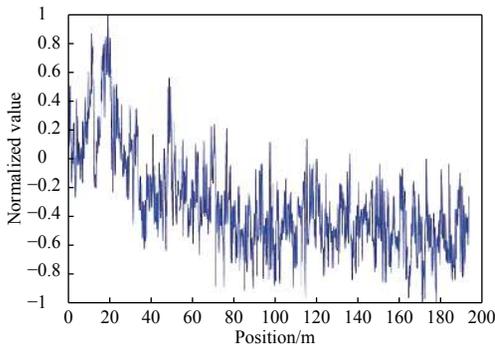


图 4 检测信号阈值初级模板

Fig. 4 Primary template of detection signal threshold

接着,分别计算 20 组后期信号与初级模板信号之间的差值系数 $\delta$ ,由(10)式得到后期信号与初级模板之间的相似系数 $\gamma$ ,为了能够更加准确地确定最终模板,以 $\gamma=0.83$ 为阈值,剔除 20 组后期信号中不满足条件的样本信号,将满足条件的检测样本信号进行累加后取平均值,所得的信号作为选择性阈值算法的最终模板信号,如图 5 所示。与图 4 初级模板信号相比,最终的模板阈值信号更加平稳,这是由于样本相似的差值系数计算后剔除了相差较大的结果。

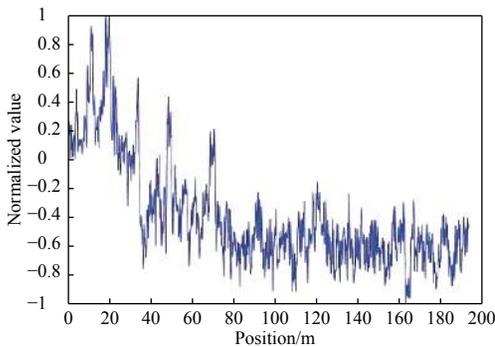


图 5 未泄漏温度检测信号阈值最终模板

Fig. 5 Final template of non-leakage temperature detection signal threshold

最后,确定泄漏位置,取 40 组有泄漏信号分别与最终阈值模板进行对比,得到差值信号后进行

累加平均后归一化,结果如图 6 所示。由图 6 可以看出,差值信号在 19.75 m 以及 34.35 m 处的值明显高于其余位置,说明这两处的土壤介质温度发生了变化,利用拉曼散射以及光时域反射定位原理,可以确定该两点为埋地管道的泄漏点位置,其中 19.75 m 为模拟 UPVC 管道泄漏点,34.35 m 为模拟铸铁管道泄漏点。

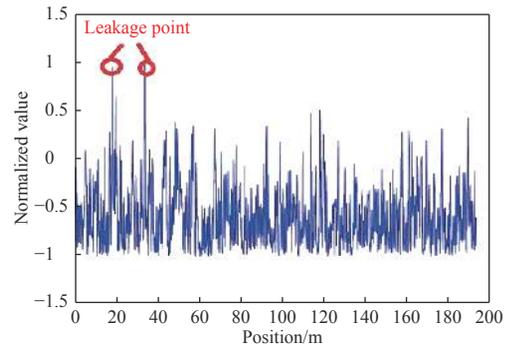


图 6 埋地水管道泄漏点定位

Fig. 6 Leakage points location of underground water pipes

## 4 结论

本文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了模拟自来水管泄漏检测及定位实验,采用传感光纤为 200 m,取 10 组无泄漏信号和 10 组有泄漏信号作为测试样本,利用相关系数法对两组典型泄漏检测信号和未泄漏信号进行了 $\rho_{x,y}$ 分类,识别了 UPVC 埋地管道和铸铁管道的泄漏情况;再对 40 组无泄漏信号进行了选择性平均阈值分析处理,所得信号作为泄漏定位的阈值信号;最后分析了阈值信号与泄漏信号的差值信号,判断出 UPVC 埋地管道接铸铁管道后泄漏点位置为 19.75 m 以及 34.35 m,水管实际泄漏点位置为 20 m 以及 35 m,定位误差分别为 0.25 m 以及 0.65 m。

### 参考文献:

- [1] ZHANG Shufeng, XIE Xiaofeng. Application of ground penetrating radar in water pipeline leak detection[J]. *Guangdong Architecture Civil Engineering*, 2008, 15(6): 58-59.
- 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, 15(6): 58-59.
- [2] ZHANG Jicheng, LUO Haiyan, HU Guangxiao, et al. Thermal/structural/optical integrated analysis on spatial

- heterodyne Raman spectrometer imaging lens[J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(3): 332-338.
- 张纪承, 罗海燕, 胡广骁, 等. 空间外差拉曼光谱仪成像镜头光机热集成分析[J]. *应用光学*, 2018, 39(3): 332-338.
- [ 3 ] 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(2): 82-94.
- [ 4 ] Van de GIESEN N, STEELE-DUNNE S C, JANSEN J, et al. Double-ended calibration of fiber-optic Raman spectra distributed temperature sensing data[J]. *Sensors*, 2012, 12(5): 5471-5485.
- [ 5 ] YAMATE T, FUJISAWA G, IKEGAMI T. Optical sensors for the exploration of oil and gas[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(16): 3538-3545.
- [ 6 ] ZHANG Qing, HAO Wenjie, HAO Shuli, et al. Research of deep-hole temperature measurement technology based on Raman scattering[J]. *Progress in Geophysics*, 2018, 33(4): 1438-1443.
- 张青, 郝文杰, 蒿书利, 等. 基于拉曼散射的深孔测温技术研究[J]. *地球物理学进展*, 2018, 33(4): 1438-1443.
- [ 7 ] HE Weiwei, LIU Yanling, LI Jun, et al. Experiment study and application of distributed fiber optical temperature sensing system[J]. *Drilling & Production Technology*, 2019, 42(3): 72-75.
- 何巍巍, 刘艳玲, 李军, 等. 基于拉曼散射的分布式光纤传感测温系统研究及应用[J]. *钻采工艺*, 2019, 42(3): 72-75.
- [ 8 ] ZHAO Ya, WANG Qiang, LING Zhangwei. Experimental analysis and leakage location detection of tap water pipe based on distributed optical fiber with selective average threshold[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(3): 34-40.
- 赵亚, 王强, 凌张伟. 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[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(3): 34-40.
- [ 9 ] REINSCH T, HENNINGES J. Temperature-dependent characterization of optical fibres for distributed temperature sensing in hot geothermal Wells[J]. *Measurement Science and Technology*, 2010, 21(9): 94022-94029.
- [ 10 ] WANG Yao, JIANG Yi, MA Weiyi. Optimization of demodulation algorithm for the distributed optical fiber Raman temperature measurement system[J]. *Optical Technique*, 2018, 44(6): 646-650.
- 王垚, 江毅, 马维一. 分布式光纤拉曼测温系统中解调算法的优化[J]. *光学技术*, 2018, 44(6): 646-650.
- [ 11 ] WEI Jian, WANG Xiaojun, LIANG Caihai, et al. Distributed optical fiber Raman temperature measurement system based on Kalman filter[J]. *Optical Technique*, 2016, 42(3): 264-267.
- 韦坚, 王小军, 梁财海, 等. 基于卡尔曼滤波的分布式光纤Raman测温系统[J]. *光学技术*, 2016, 42(3): 264-267.
- [ 12 ] TONG Jingkuo, JIN Baoquan, WANG Dong, 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.
- [ 13 ] CHEN Ruilin, WAN Shengpeng, JIA Peng, et al. Distributed fiber Raman temperature measurement system based on cumulative average[J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(4): 590-594.
- 陈瑞麟, 万生鹏, 贾鹏, 等. 基于累加平均的分布式光纤拉曼测温系统[J]. *应用光学*, 2018, 39(4): 590-594.
- [ 14 ] ZHANG Mingjiang, LI Jian, LIU Yi, et al. Temperature demodulation method for distributed fiber Raman temperature measurement[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(3): 213-220.
- 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): 213-220.
- [ 15 ] XING Haojian, QIAO Qiuxiao, JIN Zhongxie. Monitoring technology of nuclear power primary circuit leakage point based on distributed temperature sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(5): 167-173.
- 邢豪健, 乔秋晓, 金钟燮. 基于分布式光纤拉曼测温系统的核电一回路泄漏点监测技术[J]. *光子学报*, 2019, 48(5): 167-173.
- [ 16 ] WANG Peng, LOU Shuqin, LIANG Sheng, et al. Selective average based threshold algorithm for  $\phi$ -OTDR distributed fiber-optic sensing system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(3): 271-276.
- 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): 271-276.