

基于改进经验小波变换模型的 供能管道移动 GIS 综合智慧巡检策略

高颖[†]

(珠海横琴能源发展有限公司, 广东 珠海 519031)

摘 要:当前供能管道巡检策略由于对管道的缺陷特征提取不够纯净,导致缺陷定位准确度差,因此,提出了基于改进经验小波变换模型的供能管道移动 GIS 综合智慧巡检策略。利用移动 GIS 技术采集管道数据,根据管道数据采用改进经验小波变换模型对管道缺陷特征进行提取,其树状结构的子频带自分解能够准确分辨出缺陷源信号与其他干扰信号,提取到更加纯净的缺陷特征,并对缺陷特征向量特征集进行滤波,从而计算出管道缺陷的具体位置。在实验论证中,对提出的策略的定位准确性进行了验证,结果表明,提出的策略应用于供能管道巡检中,对管道缺陷定位的准确性较高。

关键词:供能管道;智慧巡检;移动 GIS;改进经验小波变换模型

中图分类号:TE832

文献标识码:A

Integrated Intelligent Inspection Strategy for Mobile GIS of Energy Supply Pipeline Based on Improved Empirical Wavelet Transform Model

GAO Ying[†]

(Zhuhai Hengqin Energy Development Co., Ltd., Zhuhai, Guangdong 519031, China)

Abstract: The current inspection strategy of energy supply pipeline is not pure enough to extract the pipeline defect features, resulting in poor defect positioning accuracy. Therefore, a comprehensive intelligent inspection strategy of energy supply pipeline mobile GIS based on improved empirical wavelet transform model is proposed. The mobile GIS technology is used to collect the pipeline data, and the improved empirical wavelet transform model is used to extract the pipeline defect features according to the pipeline data. The subband self decomposition of the tree structure can accurately distinguish the defect source signal and other interference signals, extract more pure defect features, and filter the feature set of the defect feature vector, so as to calculate the specific location of the pipeline defects. In the experimental demonstration, the positioning accuracy of the proposed strategy is verified. The results show that the proposed strategy is applied to the routing inspection of energy supply pipeline, and the positioning accuracy of pipeline defects is high.

Key words: energy supply pipeline; intelligent patrol inspection; mobile GIS; improved empirical wavelet transform model

当前供能管网的数据异常庞大,管理模式也相当复杂,因此,对管道的巡检工作是极其重要的。由于当前现有的管道巡检策略主要依赖模拟制图和属性数据库,对管道数据的采集不够全面,不能

准确捕捉到隐藏的空间位置数据和实体的属性描述数据^[1]。另外,在管道日常管理中,及时发现管道运行异常,快速找出故障原因以及准确定位缺陷位置是管道日常巡检工作中的首要任务^[2]。因此,

收稿日期:2022-11-17

作者简介:高颖(1972—),女,山东淄博人,硕士,工程师,研究方向:清洁能源多联供区域集中供冷供热系统的开发与运行。

[†]通信联系人,E-mail: xiongcheng704878@163.com

针对当前策略对管道数据采集不够全面和缺陷定位不准确的问题,设计并研究了基于改进经验小波变换模型的供能管道移动 GIS 巡检策略,将移动 GIS 技术与改进经验小波变换模型相结合,利用移动 GIS 技术对管道进行关键信息定位,通过可视化地图获取管道相关数据,采用改进经验小波变换模型确定管道缺陷具体位置,便于实现管道巡检业务的高效管理。

1 供能管道巡检策略设计

1.1 基于移动 GIS 技术采集供能管道数据

设计的供能管道智慧巡检策略在移动 GIS 数据基础上,巡检人员通过移动端使用调试工具来访问管道的 GIS 数据,根据采集到的相关数据实现巡检过程。

为了能快速访问管道内部的 GIS 数据,如管网图像等,通常需要调试工具的 URL 进行资源定位,之后通过在布局文件中添加可视化地图组件即可访问 GIS 服务器当中的管道地图^[3]。布局文件具体代码如图 1 所示。

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<com.esri.android.map.MapView
xmlns:android="http://schemas.android.com/apk/res/android"
android:id="@+id/map" android:layout width="fill_parent"
android:layout height="fill_parent"
initExtent=" -1.3296373526814876E7 3930962.41823043 -1.2807176545789773E7
4201243.7502468005" >
<com.esri.android.map.ags.ArcGISTiledMapServiceLayer
url="http://services.arcgisonline.com/ArcGIS/rest/services/World_Streetes Map/MapServer"/>
</com.esri.android.map.MapView>
```

图 1 布局文件代码

在可视化地图中添加 ArcGISTiledMapServiceLayer 图层,其资源属性对应调试工具附带的 REST 上的管网地图,这样就实现了在移动端上查看和采集管道的相关数据,如图 2 所示。

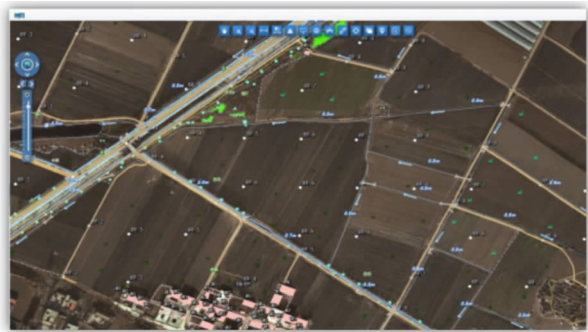


图 2 移动 GIS 管网地图

根据地图中管网分布,通过利用 MapView 组件对地图的缩放、平移、旋转、获取范围和比例尺信息等操作,可实现对单一或多个供能管道的数据采集^[4]。该组件的常用策略如表 1 所示。

表 1 MapView 组件常用策略列表

返回类型	操作策略	说明
void	centerAt (Point p, Boolean b)	将管道居中到指定的点
Point	getCenter()	获取管道中心点
void	setResolution (double d)	设置当前管道分辨率
double	getResolution()	获取当前管道分辨率
void	setScale(double d)	设置当前管道比例尺
double	getScale()	获取当前管道比例尺
void	zoomin()	缩小 1 倍
void	zoomout()	放大 1 倍
void	zoomto(Point p, float f)	将管道放大到指定点
void	setRotationAngle (double d)	将管道按照指定的角度旋转
Point	toMapPoint (floaty, float y)	将屏幕坐标转换成管道上的点

通过利用 MapView 对可视化地图中的管网调用响应策略,获取目标供能管道的图像以及数据信息,为后续巡检工作提供数据基础。

1.2 基于改进经验小波变换模型提取管道缺陷特征

为了提高巡检效率,快速确定管道缺陷位置,需要将缺陷处于其他正常部分的特征分离开来,即提取缺陷特征^[5]。由于实际的缺陷信号是复杂多变的,因此本文在利用移动 GIS 技术采集到的管道数据基础上,采用改进经验小波变换模型(improved empirical wavelet transform , IEWT)进行提取。

改进经验小波变换模型是一种多尺度时频阈技术,其中树状结构的子频带自分解适用于检测图像中局部的信号变化。因为基于小波变换得到的管道信号被分解得到一系列分量,分量中只有少部分包含缺陷信息,因此,只需要筛选出敏感分量,即可得到管道的缺陷特征。利用改进经验小波变换模型提取管道缺陷特征的流程如图 3 所示。

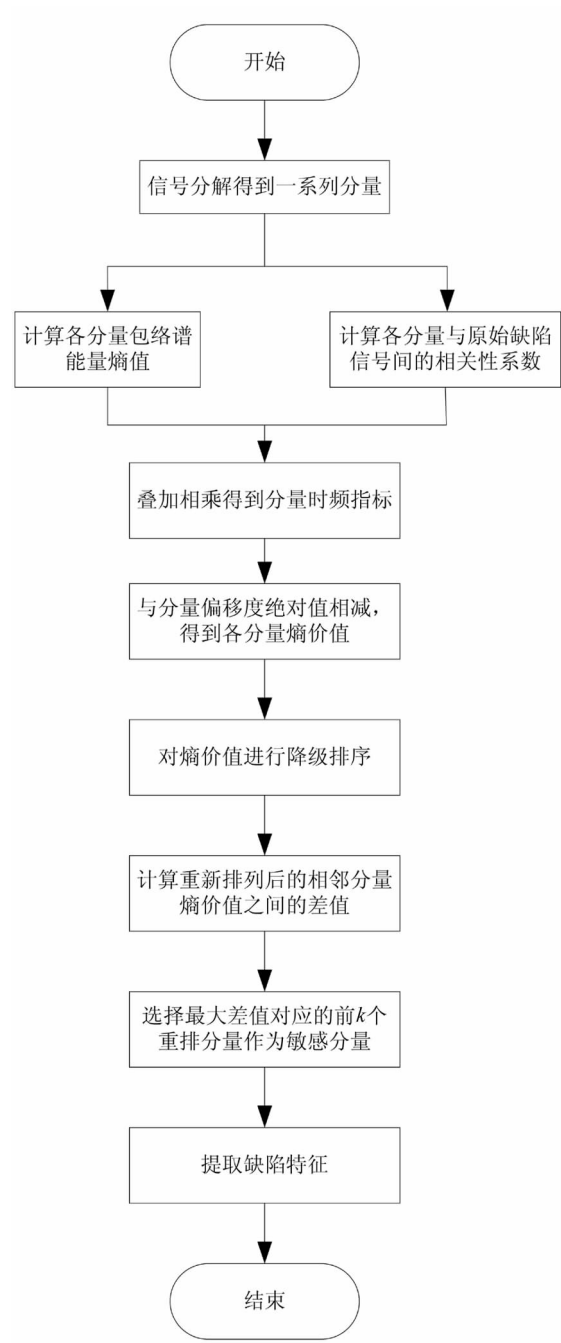


图 3 基于改进经验小波变换模型的缺陷特征提取

当缺陷出现时,管道正常部位与原始缺陷信号之间的包络谱相似度系数可直接表示时域中的缺陷特征程度,即缺陷信号的相似度系数越大,信号中包含的缺陷信息越多,也就是说,缺陷信息越多,频谱越复杂,包络谱的熵值越大^[6]。

假设信号 x 经过自分解得到一系列分量 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 首先计算 IEWT 分量 $x_j(t)$ 的快速小波变换 $h(t) = H[x_j(t)]$ 定义如下:

$$h(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x_j(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (1)$$

其中, τ 表示信号时延。

分量 $x_j(t)$ 和快速小波变换 $h(t)$ 可形成新的复合信号,即:

$$z(t) = x_j(t) + jh(t) \quad (2)$$

则包络谱相似度系数可表示为:

$$E(t) = |z(t)| = \sqrt{x_j^2(t) + h^2(t)} \quad (3)$$

接下来计算包络谱能量熵值。该熵值可以描述信号的混淆程度。当管道出现缺陷时,缺陷信息被反映到频谱中,之后进一步映射为谱能量分布的变化。因此,假设将信号 IEWT 分量 x_j 的包络谱 Z_j 划分为 H 个区域,第 h 个区域中的包络谱相似度系数为 $E(t_h)$, 能量为 E_h , 则总能量为:

$$E = \sum_{h=1}^H E_n \times E(t_h) \quad (4)$$

为消除数据字节长度不一致的影响,将定义信号 IEWT 分量 x_j 的包络谱能量熵值为:

$$EP(x_j) = -\frac{1}{\ln N} \sum_{h=1}^H (E_h/E) \ln (E_h/E) \quad (5)$$

上式中, N 表示 IEWT 分量 x_j 的字节长度。

IEWT 分量 x_j 与缺陷信号 x 间的相关性系数 $R(x_j, x)$ 的计算公式为:

$$R(x_j, x) = \frac{\left| \frac{\sum_{i=1}^n (x_j(i))(x(i) - \bar{x})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_j(i) - \bar{x}_j)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (x(i) - \bar{x})^2}} \right|}{1} \quad (6)$$

上式中, $x(i)$ 表示第 i 个缺陷信号; $x_j(i)$ 表示第 i 个 IEWT 分量 x_j ; $\bar{x}_j$ 表示 x_j 的平均值; $\bar{x}$ 表示 x 的平均值。

包络谱能量熵值是经验小波变换模型分解得到的在时域内的模态函数,在频域中,熵值越大,其频谱中包含突出峰值频率充分的概率越高^[7]。基于此,本文分别从频域利用能量熵值,从时域利用能量分类与原始缺陷信号之间的相关系数来确定敏感分量,得到的分流时频指标 $ER(x_j)$ 为:

$$ER(x_j) = EP(x_j) * R(x_j, x) \quad (7)$$

在分量时频指标中引入形态分布编程因数来平衡函数关系:

$$V(x_j) = ER(x_j) - |\text{skewness}(x_j)| \quad (8)$$

上式中, $\text{skewness}(\cdot)$ 表示偏移度,用来描述模态函数的漂移程度,偏移度越低,说明分量在频谱中的形态分布越均匀。

由以上计算过程求出各分量的熵价值指标 $V(x_j)$, 对计算得到的各个熵价值进行降序排列,将重排后的熵价值和分量分别记为 $V'(x_j)$ 和 x'_j ;

计算重排后分量熵价值 $V'(x_j)$ 与其相邻值之间的差值,即:

$$h_j = V'(x_j) - V'(x_{j-1}) \quad (9)$$

确定与最大值 $\max(h_j)$ 对应的序列号 k , 以此确定 x'_j 中的前 k 各分量是缺陷敏感分量。

将求得的敏感分量作为缺陷特征,构成的缺陷特征向量集为 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_k\}$, 至此完成对管道缺陷特征的提取。

1.3 实现管道智慧巡检

基于前文提取到的缺陷特征向量集,在此同样采用改进经验小波变换模型实现管道缺陷定位^[8]。对管道缺陷定位需要将缺陷特征向量进行有效滤波,并由此计算出缺陷的具体位置,与移动 GIS 技术相结合,实现供能管道综合智慧巡检。计算过程如下:

两源信号 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 的损失函数经过傅里叶变换可得到互谱:

$$S_{x_1 x_2}(f) = \mathbf{X} \cdot S_{ss}(f) e^{2\pi f \tau} = \alpha S_{ss}(f) e^{x_1 x_2(f)} \quad (10)$$

上式中, $S_{ss}(f)$ 表示源信号的自谱; f 表示相关函数; $\mathbf{X}$ 表示缺陷特征向量; τ 表示源信号的时间延迟。

计算源信号之间的相位差为:

$$(f) = S_{x_1 x_2}(f) \cdot 2\pi f \tau \quad (11)$$

由上式可以看出,在原型号的频带内相位差与频率的关系是正相关,且变化斜率为 $2\pi\tau$, 则互谱的计算公式为:

$$G_{x_1 x_2}(f) = X_1(f) X_2^* \cdot (f) \quad (12)$$

上式中, $X_1(f)$ 和 $X_2(f)$ 分别表示傅里叶变换因数; $*$ 代表复共轭。

计算两信号的互相关函数,其表达式为:

$$\rho_{x_1, x_2} = \frac{R_{x_1, x_2} G_{x_1 x_2}(f)}{\sqrt{R_{x_1, x_1}(0) R_{x_2, x_2}(0)}} \quad (13)$$

上式中, R_{x_1, x_2} 表示两个信号的相关性系数; $R(0)$ 表示初始系数。 $|\rho_{x_1, x_2}|$ 的取值范围为 $0 \sim 1$, 若 $\rho_{x_1, x_2} < 0$, 说明两信号呈负相关; 若 $\rho_{x_1, x_2} = 0$, 说明两信号不相关; $0 < \rho_{x_1, x_2} < 0.4$, 说明两个信号之间呈低度相关; 若 $0.4 \leq \rho_{x_1, x_2} < 0.7$, 说明两信号之间呈显著相关; 若 $\rho_{x_1, x_2} \geq 0.7$, 说明两信号之间呈高度相关^[9]。

对输入信号进行滤波处理得到调幅分量 ω , 因此,可以利用如下公式计算出管道的缺陷位置:

$$\omega = \frac{\omega + c\tau}{\rho_{x_1, x_2}} \quad (14)$$

上式中, ω 表示信号调频分段的调幅分量; c

表示振动信号沿着管壁的传播速度; τ 表示信号时延; ρ_{x_1, x_2} 表示信号间的互相关函数。

2 实验验证

本次实验主要对前文设计的管道缺陷巡检策略进行可靠性验证。分布采用不同巡检策略与本文设计策略进行对比实验,根据实验结果分析本文策略的应用性能。

2.1 实验准备

首先利用移动 GIS 技术对西北地区某地供能管道系统进行管道巡检,建立巡检任务,设定巡检的关键点信息,管道智能巡检应用每半分钟回传因此轨迹数据,巡检轨迹数据会通过相应通信服务器传到后台进行入库,并通过相关组件获取巡检轨迹过程中的管道数据^[10]。管道巡检实时轨迹如图 4 所示。

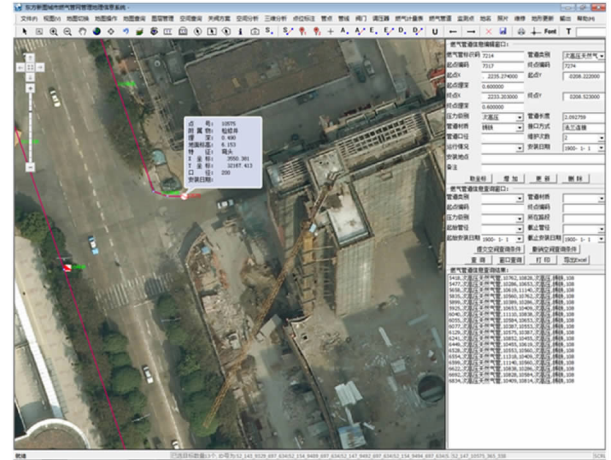


图 4 巡检实时轨迹

通过对采集到的管道数据进行整理与分析,发现该管道系统位于芦苇丛中一处常年无法监测到的管道桩出现了一种缺陷,存在重大管道安全隐患^[11]。当管道出现缺陷时,缺陷部位的能量会有损失,这使得缺陷处所在点的压力下降,密度降低,而管道中的流体具有连续性,其不会立刻改变速率,从而使流体在倾斜处的上游和下游不断填充,这又造成了整个管内的压力和密度下降,因此,将流体持续向缺陷处上游和下游扩散时产生的音波作为改进经验小波变换模型的输入信号,并对缺陷特征进行提取^[12]。

2.2 实验说明

本次实验同时采用文献[2]管道巡检机器人的定位检测策略和文献[5]的管道巡检船的定策略

(记为策略 1 和策略 2)与本文策略作为对比进行分析。实验中对音波信号 $y_1(t)$ 进行模拟,采样频率设为 7421 Hz,采样点数设为 10240,然后对信号所在 300~500 Hz 范围内的频段部分进行低通滤波处理来模拟管道缺陷处的发射源信号。另外,将 $y_2(t)$ 作为另一方向的音波信号,该信号的输出方式为 $y_1(t)$ 延迟 60 个采样点^[13]。同时,为提高实验结果的真实性和准确性,对信号 $y_1(t)$ 和 $y_2(t)$ 均添加信噪比为 30 dB 的白噪声,在 700~1200 Hz 的频段范围添加信噪比为 -5 dB 的白噪声,作为干扰信号^[14]。该仿真信号的时域图与频谱图如图 5 所示。

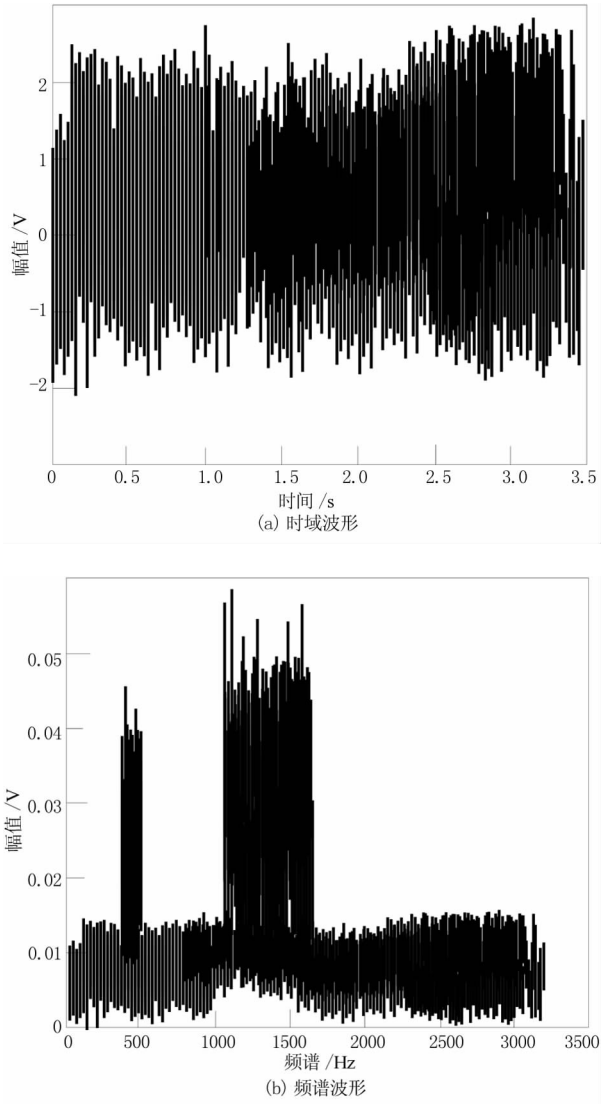


图 5 仿真信号波形及频谱图

2.3 定位准确度实验分析

将最终获取到的信号分别记为 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$,经过实验前运算, $x_1(t)$ 相对于 $x_2(t)$ 的实

际时间延迟为 -7.629ms。分别利用策略 1、策略 2 和本文提出的策略对管道的缺陷频带进行定位。评价指标为 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 的相关性系数所对应的时延值,时延值与预先计算的时延值越接近,表明信号的相关性程度越高,证明该策略对缺陷频带的定位越准确^[15]。对比结果如图 6 所示。

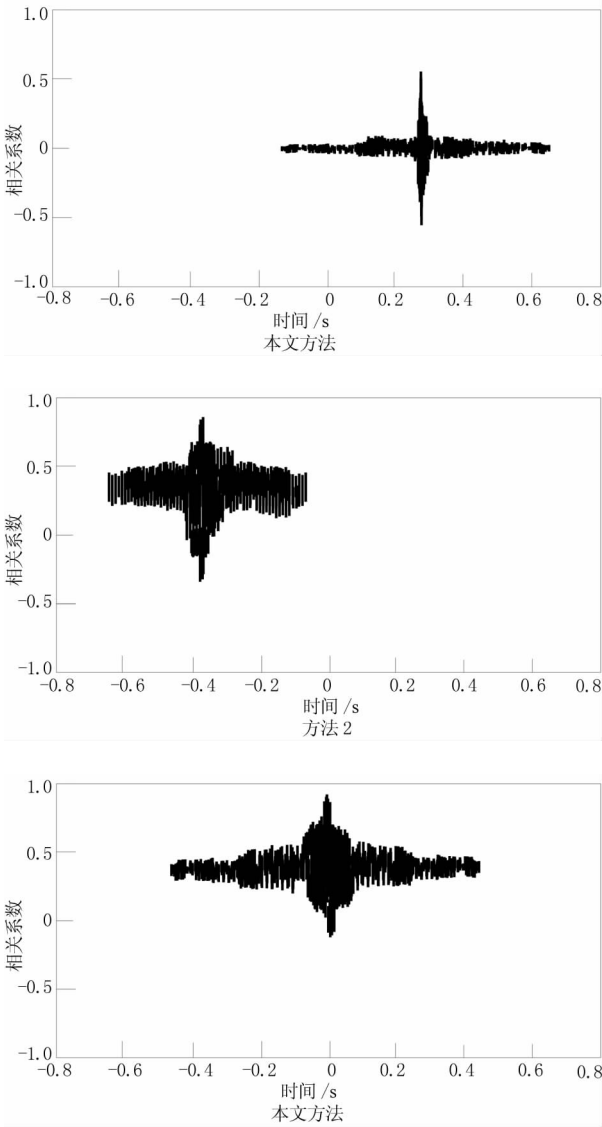


图 6 缺陷频带提取对比结果

由图 6 可知,利用策略 1 对之间的相关性进行分析,其相关系数的峰值为 0.563,对应的横坐标时延为 0.275 ms,相关系数值较小,与实际时延值相差较大;利用策略 2 得到的相关性系数峰值为 0.875,对应的时延为 -0.375 ms,较优于策略 1,但仍与预先计算时延值有一定差距;本文策略的相关性系数峰值为 0.9529,对应的时延值为 -7.629 ms,与实际时延值一致。由此可以证明,本文设计的管道巡检策略能够准确地寻找出缺陷位置,可以

实现缺陷精准定位。

3 结 论

针对当前管道巡检策略存在对管道缺陷定位不准确的不足,提出了基于改进经验小波变换模型的供能管道移动 GIS 巡检策略。利用移动 GIS 技术调试工具的 URL 进行资源定位,通过在布局文件中添加可视化地图组件对管网进行访问,从而得到管道相关数据,作为提取管道缺陷特征的基础数据,利用改进经验小波变换模型提取管道缺陷特征,获取缺陷特征向量集,对管道缺陷定位需要将缺陷特征向量进行有效滤波,并由此计算出缺陷的具体位置,实现管道智慧巡检。利用对比实验,对本文策略的有效性进行验证,结果表明,提出的策略在管道巡检中,对于管道缺陷定位具有较高的准确性。

参考文献

[1] 张羽翀,胡云鹏,孙磊峰,等. 无人机在油气管道巡检中的应用[J]. 中国安防,2021(12):105—108.

[2] 宋雷震,孙晓东. 管道巡检机器人目标识别与定位检测技术[J]. 吉首大学学报(自然科学版),2021,42(5):38—43.

[3] 刘凯,秦锋,徐浩,等. 基于多旋翼无人机的输气管道巡检路径规划研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版),2021,38(6):34—41.

[4] 李松,张守良,卓亮,等. 基于“互联网+”油气管道现场巡检

运行新模式的应用研究[J]. 工业安全与环保,2021,47(7):79—81.

[5] 秦尧,胡楠,李勇跃,等. 海底管道巡检船定位能力分析[J]. 船舶设计通讯,2020(S1):29—34.

[6] 高海康,徐杰,秦龙龙,等. 基于移动 GIS 的油气管道智能巡检系统研究与应用[J]. 信息系统工程,2020(8):76—79.

[7] 陈涛,王艳,纪志成. 基于经验小波变换的光伏功率组合预测模型[J]. 系统仿真学报,2021,33(11):2627—2635.

[8] 边少锋,周威,刘立龙,等. 小波变换与滑动窗口相结合的 GNSS—IR 雪深估测模型[J]. 测绘学报,2020,49(9):1179—1188.

[9] 崔芮华,张振,佟德栓,等. 基于改进经验小波变换多特征融合的航空交流串联电弧故障检测[J]. 电工技术学报,2022,37(12):3148—3161.

[10] 胡璇,李春,叶柯华. 改进经验小波变换在风力机齿轮箱故障诊断中的应用[J]. 机械强度,2022,44(2):294—301.

[11] 吴建章,梅飞,郑建勇,等. 基于改进经验小波变换和 XGBoost 的电能质量复合扰动分类[J]. 电工技术学报,2022,37(1):232—243+253.

[12] 胡璇,李春,叶柯华. 基于连续平均谱负熵改进经验小波变换的风力机齿轮箱故障诊断[J]. 热能动力工程,2021,36(12):164—172.

[13] 王茜,田慕琴,宋建成,等. 基于经验小波变换的振动信号特征量提取[J]. 振动与冲击,2021,40(16):261—266.

[14] 张鹏,齐波,张若愚,等. 基于经验小波变换和梯度提升径向基的变压器油中溶解气体预测方法[J]. 电网技术,2021,45(9):3745—3754.

[15] 陶彩霞,杜雪,高峰阳,等. 基于经验小波变换的混合输电线路单相接地故障测距[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(10):105—112.