

基于分布式光纤声波传感技术(DAS)的地下管道、 隧道侵入监测方法研究

曹鹏涛¹, 韦义师¹, 李轶², 吴奇¹

(1. 深圳市水务规划设计院股份有限公司, 深圳 518022;

2. 深圳市新通物探工程有限公司, 深圳 518109)

摘要: 地铁隧道沿线入侵事件造成地铁线路变形破坏, 地下管道沿线人为破坏、野蛮施工引发安全事故与财产损失, 有必要在隧道沿线与地下管道沿线进行监测与预警, 及时发现入侵破坏处, 进行阻止或者及时开展补救维修降低事故损失。分布式光纤声波传感(DAS)技术, 具有动态在线监测、大范围密集测量、方便布设免维护等独特优势。通过在地下轨道交通、地下管道沿线布设分布式光纤, 采用 DAS 技术对光纤沿线外界扰动进行监测, 针对传统的时频分析算法不适用分析 DAS 信号, 笔者采用基于优化 S 变换的时频分析方法, 将 DAS 信号变换到时间-频率域, 根据不同振动信号的时频特征差异, 在时间频率域对不同振动信号进行分类识别、精确定位, 并对超过阈值的侵入信号进行预警。通过数值模拟分析以及实际地铁线路区间 DAS 监测实验, 结果表明基于优化 S 变换的 DAS 监测方法技术, 对不同主频振动信号具有较强识别监测能力, 并且具有监测距离长、响应及时等特点, 可以实现长距离、大范围密集测量、动态、实时监测预警, 为城市地下管道、地下轨道交通沿线监测提供了一种快速准确的解决方案。

关键词: 分布式光纤声波传感(DAS); 监测预警; 时频分析

中图分类号: U231

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-1749.2025.01.11

0 引言

随着城市地下空间开发利用强度不断增大, 引发各种城市安全问题, 尤其是城市建设对地下管道、地下轨道交通的侵入破坏, 已经直接影响城市安全和可持续发展^[1]。研究城市地下管道、地下轨道交通侵入监测、预警方法技术, 借助新型分布式光纤声波传感技术(DAS), 对城市地下管道、地下轨道交通沿线的入侵与破坏进行预警, 及时发现入侵破坏处进行阻止或者及时开展补救、维修, 降低事故损失^[1-4]。

常见的管道侵入事件监测方法有人工巡检、无

人机观测、智能视频监控、光纤传感技术、多道地震传感器监测技术等^[5-9], 其中人工巡检技术直观简单, 需要大量人力效率低; 无人机监测受天气与限制飞行影响, 难以实现实时观测; 基于视频监控与图像识别技术存在监控盲区; 多道地震传感器监测技术成本高难以实现长距离大范围监测。传统的监测预警手段较难实现对地下管道、地下轨道交通沿线, 长距离动态在线监测、大范围密集测量, 并且存在布设监测设备难度大、维护成本高等不足^[6-7]。分布式光纤声波传感(DAS)技术, 具有动态在线监测、大范围密集测量、方便布设免维护等独特优势^[8]。通过对地下轨道交通沿线、地下管道沿线布设分布式光纤, 当光纤沿线存在外界侵入扰动时, 会改变光纤长

收稿日期: 2023-11-10

基金项目: 深圳市水务规划设计院股份有限公司科技项目(B202207)

第一作者: 曹鹏涛(1994—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事工程物探、工程检测等工作, E-mail: 13156394063@163.com。

度和折射率,改变光波传输的光程和时延,通过解调光波时延即可重建 DAS 监测信号的扰动波形^[10-12]。

在光纤监测信号处理与算法应用方面近些年包含基于小波变换的人工入侵与机械挖掘事件识别^[13]、时间域信号峰值包络线方法识别与区分不同侵入事件^[14]、利用小波变换代替传统傅里叶变换在频率域通过神经网络算法识别侵入信号^[15]、基于模式识别算法识别振动信号^[16]。上述光纤监测信号处理方法为单一域单变量的时间序列处理方法、频率域处理方法,容易忽略信号中某些重要信息^[16-17]。二维信号处理方法可以充分利用 DAS 监测信号数据中潜在的状态与关系,具有明显优势^[17]。时频分析算法将非平稳信号变换到时间-频率域,凸显出信号中不同频率成分能量随时间变化情况,进而容易识别隐藏在时间域信号中的侵入、强震动等突变信号。将 DAS 监测信号过经验模态分解(EMD)方法,获得若干个本征模态函数(IMF)和一个残余项,然后对所有本征模态函数进行希尔伯特变换(HTT)获得信号时频分布,该算法处理非平稳信号时由于经验模态算法不稳定性存在模态混叠效应,干扰 DAS 信号时频分析^[17]。二维时频分布算法如魏格纳-威尔双线性表示,是信号的一种能量型时频表示,具有较高的时频分辨率,但是双线性时频分析算法因为计算原理的缺陷存在交叉干扰项^[16-17]。小波变换时频分析,将信号不同频率信息分解到不同频带范围,由于小波变换不同尺度因子,因而具有多分辨率特性,但是小波变换时频算法是一种时频表示,不是真正时频分布,并且时频分布精度严重依赖小波基函数的选取^[18]。目前对 DAS 监测信号噪声压制提高信噪比算法研究较为成熟与广泛,但对 DAS 监测信号时间-频率域处理分析算法研究较少^[17-20]。

DAS 监测信号是一种时变非平稳信号,适用于在时间-频率域进行处理分析,传统的时间-频率域分析算法在处理 DAS 信号时存在一系列问题,如短时傅里叶变换算法窗函数固定,分辨率固定,只适用于分析带宽固定不变的非平稳信号、二项式时频分析算法存在交叉干扰项等问题^[21],不适用分析 DAS 监测信号。广义 S 变换是一种新的时频分析算法,在时间-频率域拥有良好的多分辨率特性和时频聚焦性,是一种线性变换方法,不存在交叉干扰项,反变换也不存在不同频率信息丢失^[21-22]。

针对传统地下管道、轨道交通长距离在线监测

方法的不足,笔者采用 DAS 技术进行地下管道沿线进行长距离动态在线监测、大范围密集测量振动信号、侵入信号。针对传统的时间-频率域分析算法不适用于分析 DAS 监测时变信号,笔者采用优化 S 变换(OST)对 DAS 监测信号变换到时间-频率域,根据不同振动信号、侵入信号在时间-频率域的时频特征差异,对 DAS 监测信号中不同种类的振动信号进行分类,对超过预警值的侵入信号在时间-频率域进行监测、预警分析,精确定位处理。在深圳地铁 16 号线大运—大运北区间,地铁线路建设阶段进行实验性监测,监测了地下隧道内安装维修施工时,是否存在暴力施工对隧道已安装隧道管片的破坏,实现了基于分布式光纤声波传感技术(DAS)对地下管道、地下轨道交通沿线的不同入侵事件进行监测、预警,验证了该方法可以实现长距离监测、高精度定位、及时响应等特点。

1 方法原理

1.1 分布式光纤声波传感技术(DAS)原理简介

分布式光纤传感技术是利用光纤探测与信号传输于一体,可实现长距离、高密度的探测与监测,可探测光纤传输路径上的每一监测点的振动、应变、温度等参数的时间变化信息和空间分布,长距离的单根光纤上能够探测成千上万点的参数信息^[1-3]。目前常见的分布式光纤传感技术有两大类:干涉型和散射型分布式光纤传感技术。其中散射型的分布式光纤传感技术基本原理主要有拉曼散射、布里渊散射、瑞利散射^[10]。

DAS 通过解调光纤沿线激光的后向瑞利散射,对光纤沿线环境物理量(温度、振动、应变、声音)进行空间连续、实时动态感知^[11]。当光纤沿线存在外界振动干扰时,会改变光纤长度和折射率,改变光纤内部光波传输的光程和时延,造成接收端光波相位、散射光干涉变化。光波时延近似与外界扰动程线性映射关系,通过解调光波时延即可重建 DAS 监测信号的扰动波形。根据解调方式的不同,DAS 可分为定性解调和定量解调,其中定性解调分布式光纤振动传感技术称为 DVS,该方法是利用后向散射光干涉图样的幅值变化反映光纤沿线外界振动干扰,定性解调方式可以判断光纤沿线是否存在振动入侵事件,但难以实现光纤沿线振动波形的重建。定量方式解调分布式光纤振动传感技术被定义为 DAS,通过解调后向瑞利散射单色光脉冲相位信息,获得光

波时延特征,进而线性重建光纤沿线外界振动信号波形^[12]。

分布式光纤声波传感技术(DAS)中最具代表性的方法是相位敏感光时域反射计(Φ -OTDR)技术, Φ -OTDR 是通过发射单频激光脉冲来获取光纤沿线物理参数变化,通过不同位置参数变化实现事件定位,具有长距离传感(几十至上百千米)、响应频带宽、定位精度高等优势^[10-12]。该方法将强相干性的

激光信号通过环形器注入到传感光纤,当外界振动干扰信号传播到传感光纤某个位置时,该位置区域的光纤内部折射率发生变化,进而引起后向瑞利散射光的相位随之变化,从而导致接收到的后向瑞利散射干涉信号改变。通过输入光脉冲信号与接收信号之间的时差,可以确定分布式光纤上的不同位置的振动信号。基于相位敏感光时域反射计的 DAS 原理如下图 1 所示。

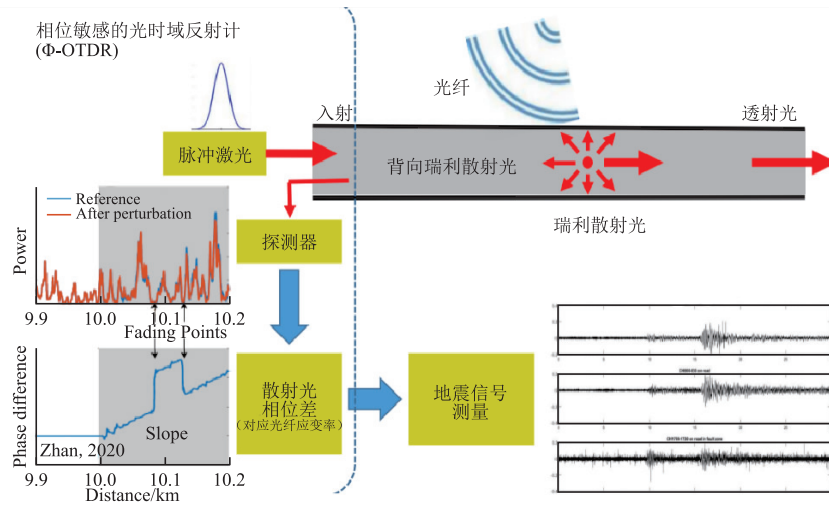


图 1 基于 Φ -OTDR 的分布式光纤声波传感技术示意图

Fig. 1 Schematic diagram of distributed fiber optic acoustic sensing technology for OTDR

1.2 广义 S 变换时频分析

DAS 监测信号作为一种时变信号,对时变信号进行最好分析的方式是在时间-频率域进行处理分析,传统的时间频率域分析算法存在一系列不足,如窗函数固定、分辨率固定的短时傅里叶变换(STFT),只适用于分析固定频带宽度的非平稳信号;小波变换(WT)分析精度可通过不同的小波分析窗口进行调节,但不具有自适应性,并且小波变换不是真正时间-频率谱;二项式时频分析算法如 Wigner-Ville 分布和 Cohe 分布,因计算方法不足,存在严重的交叉干扰项影响^[21]。

S 变换是一种新的时频分析方法,信号的时频分辨率直接与频率相关,并且具有良好的多分辨率特性和时频聚焦性,S 变换的相位因子保留了每个频率的绝对相位特征,是一种线性变换,不存在交叉项干扰,S 反变换也不存在任何频率信息丢失^[22]。S 变换中的窗函数是由简谐波与高斯窗函数的乘积构成^[23]。

原始 S 变换(ST)

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)w(t-\tau)e^{-i2\pi ft} dt \quad (1)$$

窗函数为高斯窗函数如下

$$w(t, f) = \frac{1}{\sigma(f)\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2\sigma(f)^2}} \quad \sigma(f) = \frac{1}{|f|} \quad (2)$$

式(1)、(2)中 $S(\tau, f)$ 为时间信号 S 变换后的数据, $\sigma(f)$ 为频率 f 绝对值导数的函数, τ 为窗函数的中心点,控制窗函数在时间轴上的位置; $w(t, f)$ 为窗函数, t 代表时间, f 为频率。

S 变换窗函数的时窗宽度根据信号的频率变化呈反比例变化,在低频信号较宽的时窗宽度可以获得较高的频率分辨率,高频信号较窄的时窗宽度可以获得较高时间分辨率。S 变换中基本窗函数形态较为固定,在不同的应用中受到限制,为此国内外学者对 S 变换中基本窗函数进行了优化改进,提出一系列不同窗函数的广义 S 变换算法^[21-25]。

广义 S 变换(GST)

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t)gw(\tau-t, f)ge^{-i2\pi ft} dt \quad (3)$$

式中 $gw(\tau-t, f)$ 为广义 S 变换中的窗函数,其中 τ 为窗函数的中心点, t 为时间, f 为频率; $h(t)$

为原始时间信号数据; $S(\tau, f)$ 为时间信号 S 变换后的数据。

Moukadem 等人^[26]对广义 S 变换的基本窗函数 $w(t, f)$ 通过引入不同参数对高斯窗的宽度进行调节,使高斯窗的宽度适应信号的时变特性,这一优化高斯窗函数如下

$$\omega(\tau-t, f, p) = \frac{|f|^r}{(mf^p+k)\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\tau-t)^2 f^{2r}}{2(mf^p+k)^2}} \quad \sigma(f) = \frac{mf^p+k}{f^r} \quad (4)$$

式中参数 m, p, k, r 为广义 S 变换窗函数优化因子,其中参数 m, p, k 用于优化低频分量,参数 r 用于优化高频分量, $\sigma(f)$ 为计算优化频率 f 的函数。引入优化因子目的在于为高斯窗提供更多的灵活性,使窗函数自适应信号时变特性,改进的优化 S 变换(OST)为

$$S^{m,p,k,r}(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \frac{|f|^r}{(mf^p+k)\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\tau-t)^2 f^{2r}}{2(mf^p+k)^2}} e^{-i2\pi ft} dt \quad (5)$$

这一新窗函数保留了原始 S 变换窗函数的归一化条件,保证优化 S 变换的可逆性,式(5)中 m, p, k, r 各参数含义与式(4)相同; τ 为窗函数的中心点, t 为时间 f 为频率, $x(t)$ 为时间信号; $S^{m,p,k,r}(\tau, f)$ 为时间信号经优化 S 变换后的数据。

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|f|^r}{(mf^p+k)\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\tau-t)^2 f^{2r}}{2(mf^p+k)^2}} dt = 1 \quad (6)$$

式中 m, p, k, r 各参数含义与(4)式相同, τ 为窗函数的中心点, t 为时间 f 为频率。

DAS 信号因长距离大范围监测,信号特征复杂,场地环境信号、周围干扰信号、信号衰减干扰,时变特征强,优化 S 变换中的自适应高斯窗函数,可以实现对 DAS 监测信号在时间频率域自适应变化,提高不同频率信号在时频域中的能量聚焦性,从而提高不同频率成分在时间-频率域的时频分辨率^[25-26]。

2 时变信号时频分析测试

2.1 合成时变信号时频分析对比

针对 DAS 监测信号的时变特征,以及 DAS 监测单道时变信号与地震勘探单道时变信号具有一定类似性,采用地震勘探合成信号中常用合成时变信号参数,进行数值模拟合成单道 DAS 监测信号。合

成单道时变信号 1 时长为 500 ms,子波为时长为 120 ms 主频为 35 Hz 的雷克子波,合成时变信号记录如图 2 所示。

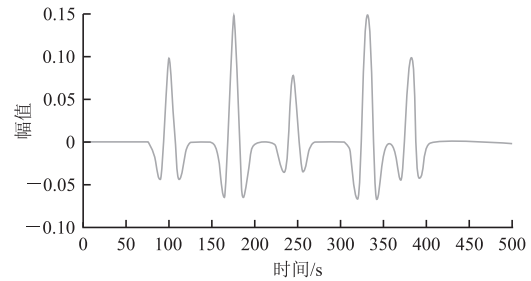


图 2 合成时变信号 1

Fig. 2 Synthetic time-varying signal 1

对合成时变信号 1 使用不同时间-频率分析算法进行时频处理,短时傅里叶变换(STFT)、原始 S 变化(ST)、广义 S 变换(GST)和优化 S 变换(OST)分别求取各方法对应的时频谱如图 3 所示,从时频谱对比分析可以看出,STFT 时频谱中有效信号频带较宽存在严重频率泄露,振动信号对应的高频和低频信号频带混叠,难以有效区分;ST 时频谱各反射信号对应的频率分辨率较高但时间分辨率较低,并且在低频段存在能量泄露现象;GST 时频谱相比 ST 时频谱,各反射信号对应频带的带宽变窄,时间分辨率提高,但是还是存在 ST 时频谱中在低频段的能量泄露问题;OST 的时频谱中各反射信号对应频带窄时间分辨率高,可以清晰分辨出各反射信号在时间轴上的位置,频率分辨率也较高,不存在 ST 与 GST 时频谱中在低频段存在的能量泄露问题^[21]。

2.2 线性交叉调谐信号时频分析对比

单道合成时变信号 2 为线性交叉调谐信号,时长为 1 000 ms,为了测试优化 S 变换对时变信号含有噪音干扰时的时频分析特性,在合成时变信号 2 中添加信噪比为 5 dB 的白噪音。如图 4 所示。

对单道合成时变信号 2 与添加噪音后的时变信号 2 分别进行 S 变换(ST)、广义 S 变换(GST)、优化广义 S 变换(OST),获得对应的时频谱,如图 5 所示。

从单道合成时变信号 2 的时频谱(图 5(a))与添加噪音后的时变信号 2 的时频谱(图 5(b)),对比分析可看出,ST 时频谱不同频率信号边界存在边缘效应,严重干扰高频段信号时频分析,并且 ST 时频谱对信号的低频段信号相对中、高频段信号分辨率相对较低;GST 时频谱不同频率信号边缘效应减弱,高频段信号的分辨率相比于 ST 时频谱中获得

较大程度提高,但低频段信号分辨率较低;OST 时
频谱对于信号中的高频、中频、低频都具有很好的时

间一频率分辨率,也不存在不同频率信号的边缘效
应干扰^[21]。

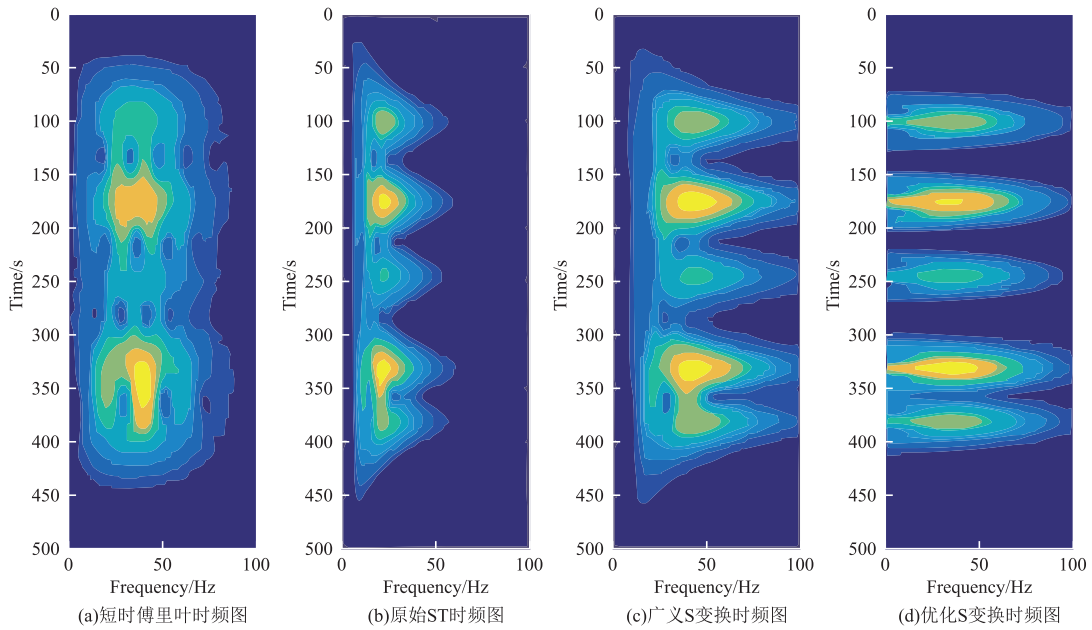


图 3 时频谱对比

Fig. 3 Time frequency spectrum comparison

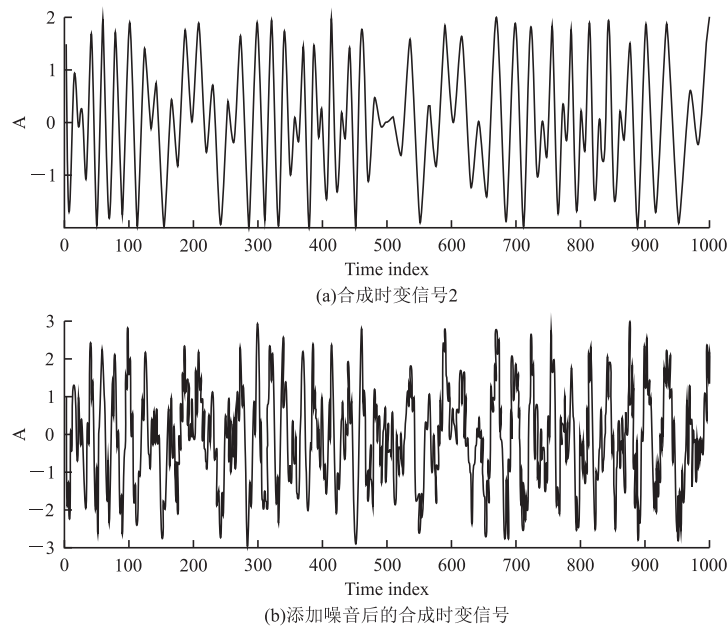


图 4 合成时变信号 2

Fig. 4 Synthetic time-varying signal 2

2.3 实测 DAS 监测信号时频分析对比

实测 DAS 监测信号为实际 DAS 监测光纤单
道信号截取 750 ms 信号数据(图 6(a)),分别通
过原始 S 变换、广义 S 变换、优化 S 变换时频
分析计算,获得对应的时频谱(图 6(b))。ST、

GST、OST 时频谱分析对比可以看出,实测 DAS
监测信号不同频率分量信号在 OST 时频域中能
量聚焦性相对更高,时频分辨率优于 ST、GST 时
频谱。说明了优化 OST 适用于在时间频率域分
析 DAS 监测信号。

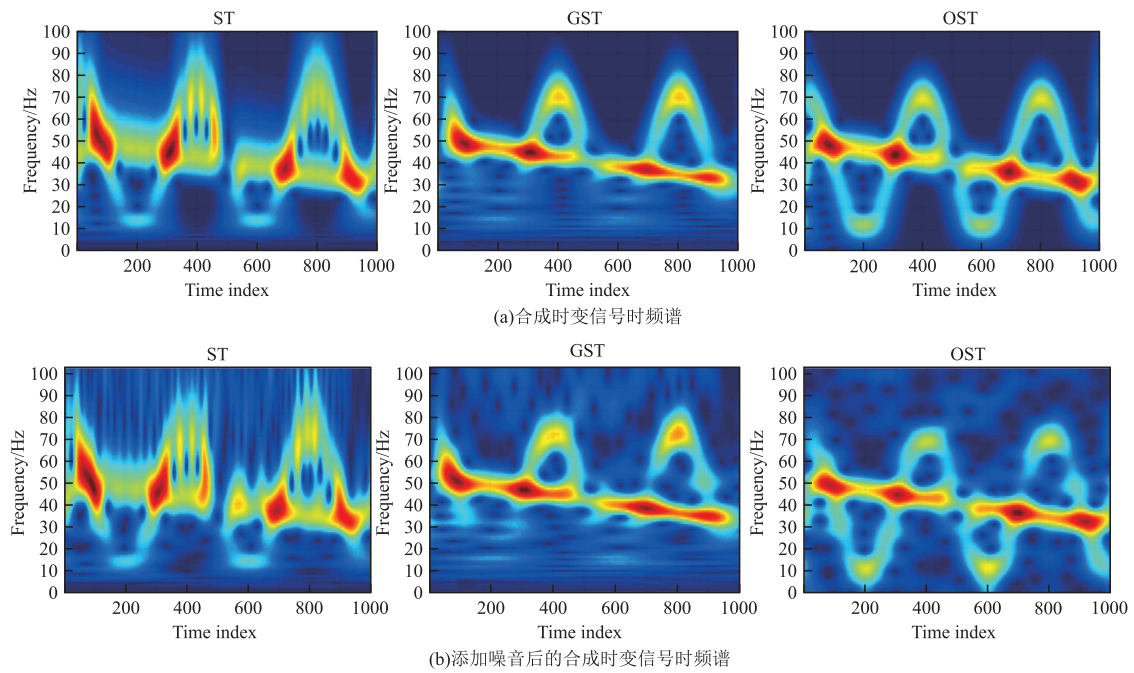


图5 合成信号2时频谱

Fig. 5 Time-frequency spectrum of synthetic signal 2

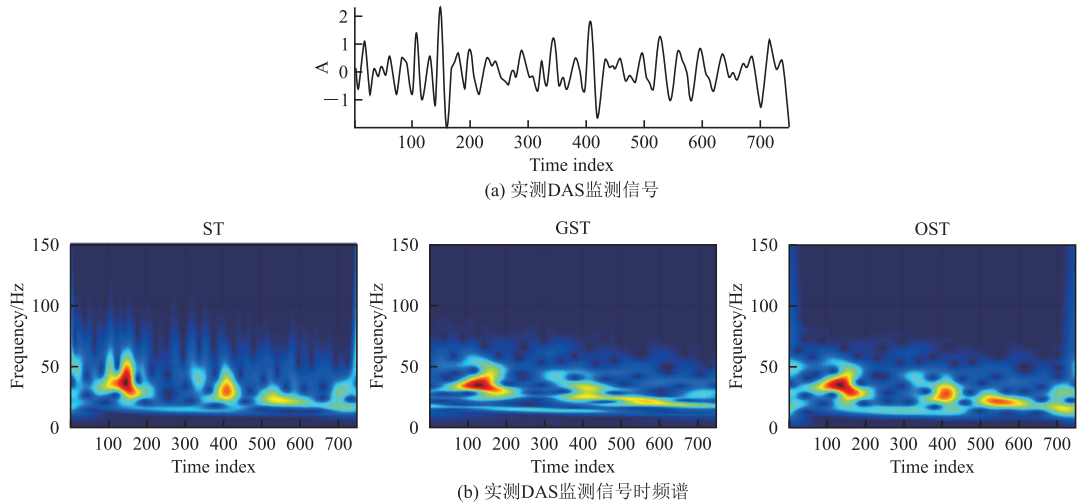


图6 实测 DAS 监测信号时频谱

Fig. 6 Time-frequency spectrum of DAS signal

3 地下管道、隧道侵入监测应用

在深圳地铁 16 号线大运—大运北区间,该区间为盾构区间在地铁线路建设阶段后期,在地铁隧道区间管片不同位置布设分布式光纤线路,进行实验性监测,监测地下隧道内安装传输线缆施工时的不同施工振动信号、以及隧道沿

线顶部地面道路不同振动信号(图 7)。将 DAS 监测到的振动信号,通过 OST 变换到时间—频率域,分析 DAS 监测不同振动信号的时间—频率域信号特征,以及不同施工振动信号对隧洞管片的振动破坏程度,监测是否存在暴力施工对隧道已安装隧道管片的破坏、以及地面强振动信号对地铁隧道管片的影响,并实时进行监测、预警提示(图 8)。

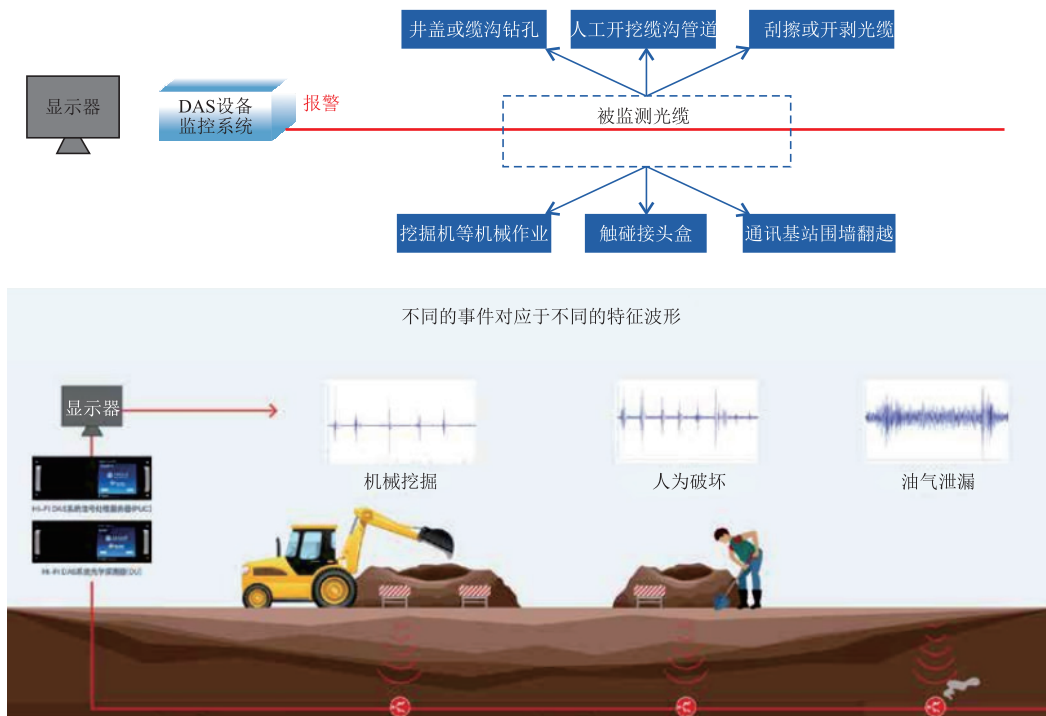


图 7 基于分布式光纤监测示意图

Fig. 7 Schematic diagram based on distributed fiber optic monitoring



图 8 光纤敷设照片

Fig. 8 Fiber optic laying

本次 DAS 监测信号空间采样通道数为 258 个，空间采样间隔为 5 m，每通道数据长度 300 000 个点，每道采样率为 1 000 Hz。下图 9 显示为 DAS 监测 258 道 1 000 s，信号波列图显示。下图 10 显示为 DAS 监测信号 258 道中的 20 道、80 道、120 道、180 道、220 道各道信号波形，时间长度为 1 000 s。

将 DAS 监测到的振动信号通过 OST，变换到时间—频率域分析 DAS 监测地铁隧道区间的不同振动信号时间—频率域信号特征。从图 11 单道 DAS 监测信号的时间—频率谱可以看出，本次监测信号能量主要以高频信号 100 Hz~250 Hz 为主，低频信号以 10 Hz~30 Hz 为主。

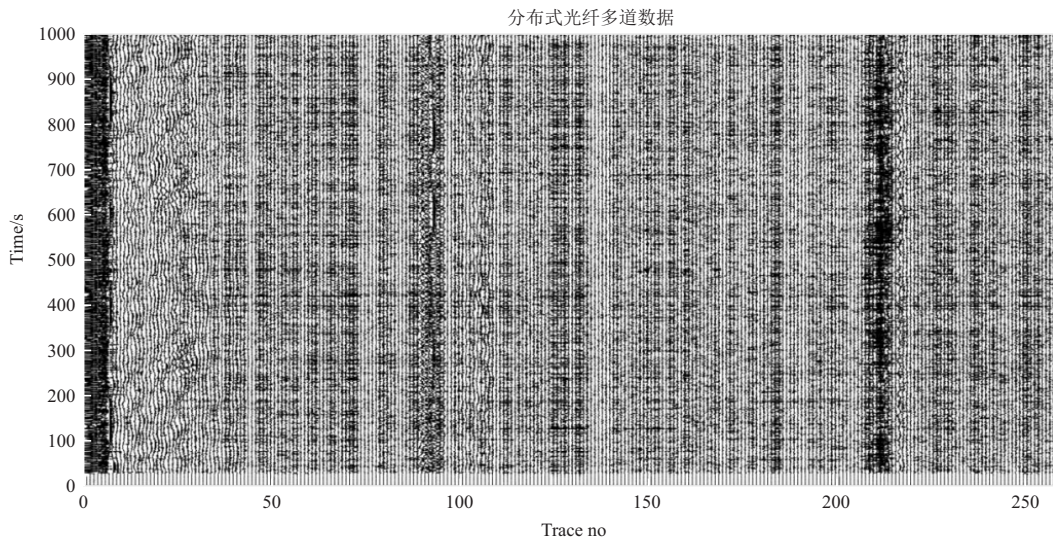


图 9 DAS 监测信号

Fig. 9 DAS monitoring signal

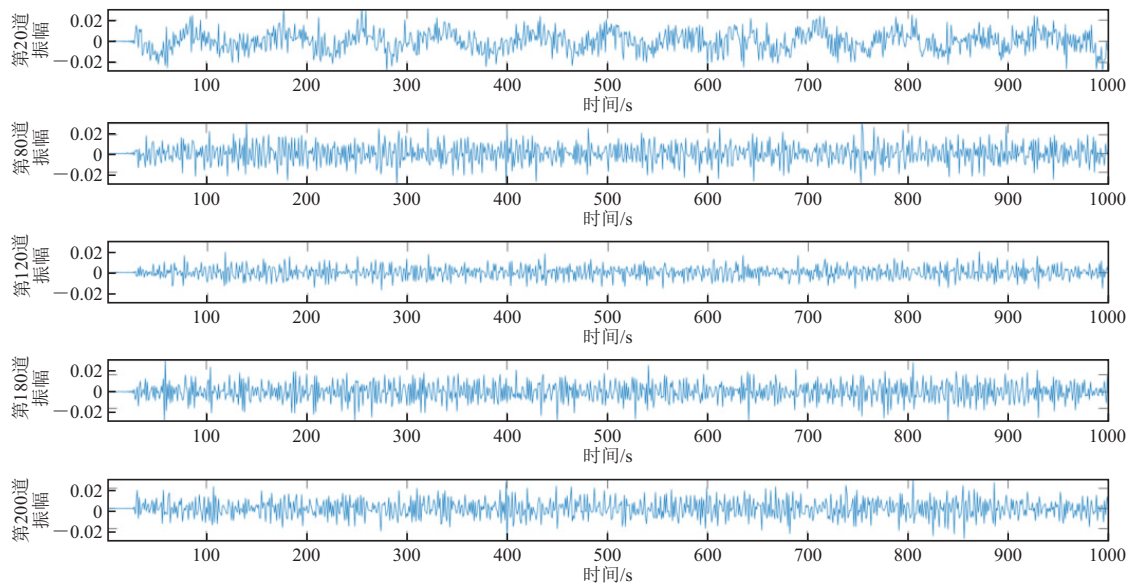


图 10 DAS 监测单道信号

Fig. 10 DAS monitoring single channel signal

在 GST 时频谱中可以看到,光纤沿线监测的不同主频振动信号发生位置与主要持续时间。其中地铁施工信号线缆支架在隧道管壁安装以高频信号为主,高频信号主频为 100 Hz~250 Hz,低频信号主频为 10 Hz~30 Hz 为主。如图 12(a)所示,主频为 100 Hz 振动信号发生在光纤监测沿线 95 道,距离为 470 m 处;如图 12(b)所示,主频为 250 Hz 振动信号发生在光纤监测沿线 205 道,距离为 1 020 m 处,强能量振动信号主要持续时间为 400 s~500 s 时间段。

地铁施工中轨道固定螺丝安装,线缆与管壁碰撞以低频信号为主,信号主频为 15 Hz~20 Hz,其中 15 Hz、20 Hz,从低频信号的 OST 时频谱中可以看出,低频振动信号主要集中在监测光纤沿线 1 道~50 道之间。OST 时频谱中监测到的低频信号,主要集中在隧道区间车站出入口附近,与实际隧道现场线缆铺设主要在隧道区间车站出入口附近摆放移动一致。如图 13 所示,其中 15 Hz 的振动信号强能量主要集中在光纤沿线 15 道~25 道(70 m~120 m)持续时间在 500 s~600 s 之间;如图 14 所示,

其中 20 Hz 的振动信号强能量主要集中在光纤沿线 25 道(70 m)、100 道(495 m)持续时间在 50 s 附近。

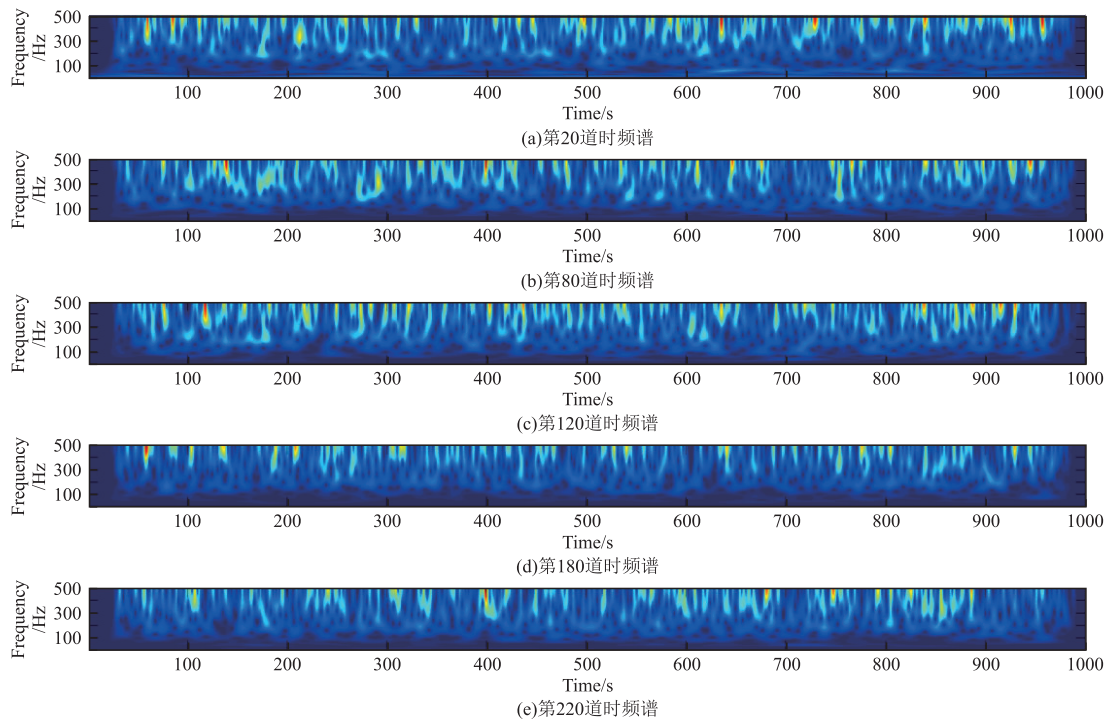


图 11 单道光纤数据时频谱显示图

Fig. 11 Single channel fiber optic data time-frequency spectrum display diagram

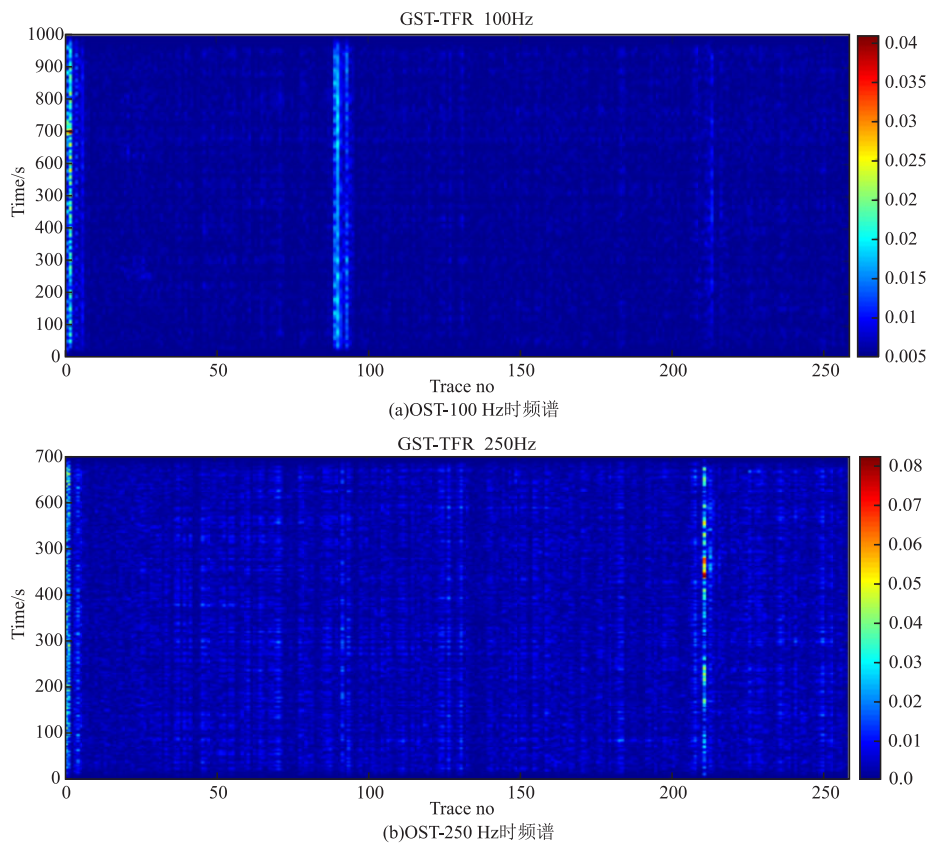


图 12 光纤数据高频信号时频谱显示图

Fig. 12 Optical fiber data high-frequency signal time-frequency spectrum

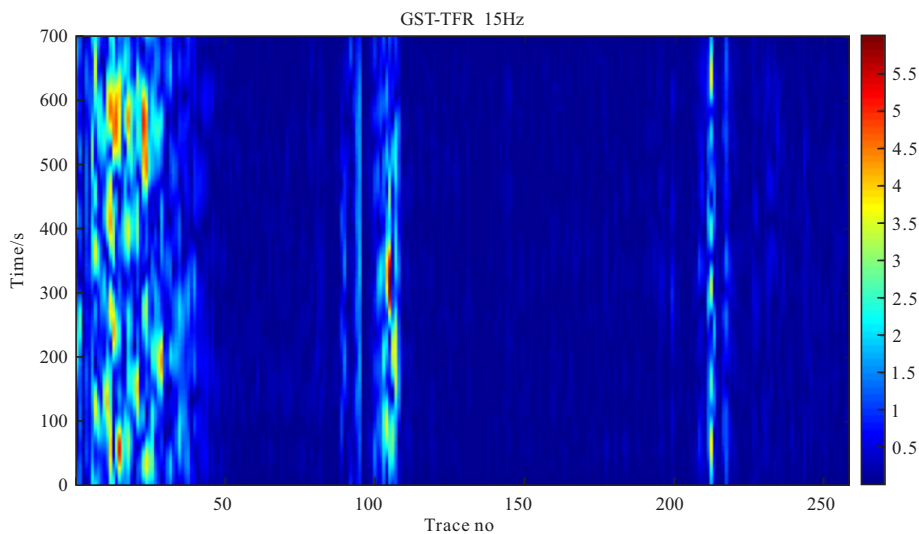


图 13 OST-15 Hz 时频谱

Fig. 13 Time-frequency spectrum of GST-15 Hz

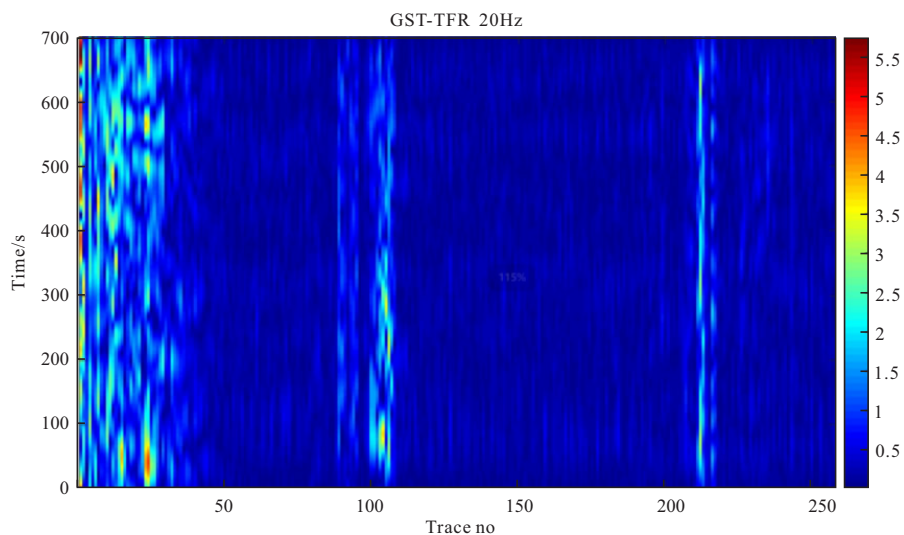


图 14 OST-20 Hz 时频谱

Fig. 14 Time-frequency spectrum of GST-20 Hz

实际地铁隧道区间 DAS 监测振动信号经优化 S 变换到时间频率域,根据不同振动信号主频的时频特征差异,对不同振动信号进行分类,通过时间—频率谱,确定不同振动信号发生的位置与持续时间,并对超过阈值的强能量振动信号进行预警,实现 DAS 沿线振动信号监测、预警。

4 结论

1)针对传统地下管道、轨道交通长距离在线、实时、动态监测方法技术存在的不足,笔者采用分布式

光纤声波传感技术(DAS)对地下轨道沿线进行长距离、动态、在线监测,实现了大范围密集测量振动信号、侵入信号。

2)针对传统的时频分析算法,分析 DAS 监测信号的不足,笔者采用优化 S 变换算法(OST)将 DAS 监测信号变换到时间—频率域,根据不同振动信号、侵入信号在时间频率域的时频特征差异,对监测信号进行分类,并对超过阈值的侵入信号在时间频率域进行精确定位、监测、预警分析处理。

3)通过数值模拟合成信号以及实际地铁隧道区间 DAS 监测试验,证明了基于优化 S 变换的 DAS

监测方法技术,对不同主频振动信号具有较强的识别监测能力,并且具有监测距离长、响应及时等特点,为城市地下管道、轨道交通沿线长距离、大范围密集测量、动态监测预警,提供了一种快速准确的解决方案。

参考文献:

- [1] 刘泽龙,李素贞,张祎. 埋地管道光纤周界振动监测与预警技术[J]. 振动测试与诊断, 2022, 42(3): 593-599.
LIU Z L, LI S Z, ZHANG Y. Perimeter monitoring and early warning technology for buried pipeline based on vibration fiber optic [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2022, 42(3): 593-599. (In Chinese)
- [2] 王蕾,徐云涛,毛哲凯. 基于分布式光纤传感器的地下原水管道(廊)沉降监测研究[J]. 传感技术学报, 2023, 36(5): 833-838.
WANG L, XU Y T, MAO Z K. Research on settlement monitoring method of underground pipe gallery segment based on distributed optical fiber sensor[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2023, 36(5): 833-838. (In Chinese)
- [3] 王辰,刘庆文,陈典,等. 基于分布式光纤声波传感的管道泄漏监测[J]. 光学学报, 2019, 39(10): 119-125.
WANG C, LIU Q W, CHEN D, et al. Monitoring pipeline leakage using fiber-optic distributed acoustic sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(10): 119-125. (In Chinese)
- [4] 杨超. 综合物探方法在城市道路典型障碍物定位研究中的应用[J]. 物探化探计算技术, 2024, 46(2): 215-223.
YANG C. Application of comprehensive geophysical prospecting method in the study of typical obstacle localization of urban roads[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2024, 46(2): 215-223.
- [5] 白力名,简兴祥,张伟. 改进鼠群优化算法在地下岩体破裂事件定位中的应用研究[J]. 物探化探计算技术, 2023, 45(5): 681-688.
BAI L M, JIAN X X, ZHANG W. Research on the application of improved rat swarm optimisation algorithm in the localisation of underground rock mass rupture events [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 45(5): 681-688.
- [6] 朱琳. 分布式光纤管道安全预警信号处理方法的研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.
ZHU L. Research on Distributed Fiber Optic Pipeline Safety Warning Signal Processing Method [D]. Tianjin: Tianjin University, 2009. (In Chinese)
- [7] 李超. 石油运输管道检测技术的研究和应用现状[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2019, 39(20): 36-37.
LI C. Research and application status of oil transportation pipeline detection technology[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2019, 39(20): 36-37. (In Chinese)
- [8] 曹闯明. 油气长输管道巡检中的智能视频监控技术[J]. 油气储运, 2018, 37(10): 1192-1195.
CAO C M. Intelligent video surveillance technology for the patrol of long-distance oil & gas pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2018, 37(10): 1192-1195. (In Chinese)
- [9] 孙洁娣. 基于多地震动传感器的管道安全监测预警关键技术的研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.
SUN J D. Study on the key problems in the pipeline security monitoring and early warning technique based on multi-seismic sensors[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009. (In Chinese)
- [10] 张旭苹,丁哲文,洪瑞,等. 相位敏感光时域反射分布式光纤传感技术[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 100-114.
ZHANG X P, DING Z W, HONG R, et al. Phase sensitive optical time-domain reflective distributed optical fiber sensing technology[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 100-114. (In Chinese)
- [11] 林融冰,曾祥方,包丰,等. 基于分布式光纤声波传感技术的管道侵入识别与定位[J]. 油气储运, 2021, 40(5): 545-553.
LIN R B, ZENG X F, BAO F, et al. Detection and localization of pipeline intrusion with distributed optical fiber acoustic sensing technology[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(5): 545-553. (In Chinese)
- [12] 曹卫平,黄旭日,姚海,等. 分布式光纤声波传感系统记录的交通噪声的干涉处理分析[J]. 地球物理学报, 2021, 64(7): 2530-2539.
CAO W P, HUANG X R, YAO H, et al. Seismic interferometry for traffic noise recorded by a distributed acoustic sensing system[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64(7): 2530-2539. (In Chinese)
- [13] 张景川,曾周末,赖平,等. 基于小波能谱和小波信息熵的管道异常振动事件识别方法[J]. 振动与冲击, 2010, 29(5): 1-4.
ZHANG J C, ZENG Z M, LAI P, et al. A recognition

- method with wavelet energy spectrum and wavelet information entropy for abnormal vibration events of a petroleum pipeline [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2010, 29(5): 1-4. (In Chinese)
- [14] 陈吉平. 基于1-D CNN的油气管道安全事件分布式光纤检测识别方法[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
CHEN J P. 1D-CNN-based distributed optical fiber sensing signal feature learning and classification method[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019. (In Chinese)
- [15] ZHAO Z F, LIU S J, LIU D. Pipeline intrusion detection and location based on phase-sensitive optical time domain reflectometer [C]//2018 14th IEEE International Conference on Signal Processing (ICSP). August 12-16, 2018, Beijing, China. IEEE, 2018: 32-36.
- [16] 赵亮. 分布式光纤传感周界系统的研究与实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
ZHAO L. Research and Implementation of Distributed Fiber Optic Sensing Perimeter System [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016. (In Chinese)
- [17] 王角. 分布式光纤传感振动信号二维去噪方法研究[D]. 北京邮电大学, 2016.
WANG J. Research on two-dimensional denoising method for distributed fiber optic sensing vibration signals [D]. Beijing University of Posts and Telecommunications, 2016. (In Chinese)
- [18] 谢金利. 分布式光纤振动传感系统信号去噪算法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
XIE J L. Research on Signal Denoising Algorithms for Distributed Fiber Optic Vibration Sensing System [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021. (In Chinese)
- [19] 蔡海文, 叶青, 王照勇, 等. 分布式光纤声波传感技术研究进展[J]. *应用科学学报*, 2018, 36(1): 41-58.
CAI H W, YE Q, WANG Z Y, et al. Progress in research of distributed fiber acoustic sensing techniques [J]. *Journal of Applied Sciences*, 2018, 36(1): 41-58. (In Chinese)
- [20] 韩文功, 张军华. 弱反射地震信号特征及识别方法理论研究[J]. *石油地球物理勘探*, 2011, 46(2): 232-236.
HAN W G, ZHANG J H. Theoretical study on characteristic of weak signal and its identification [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2011, 46(2): 232-236. (In Chinese)
- [21] 曹鹏涛. 基于广义S变换的地震数据弱信号提取方法研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2019.
CAO P T. Research of Weak Signal Extraction Method Based on Generalized S Transform in Seismic Data [D]. Qingdao: China University of Petroleum (Hua-dong), 2019. (In Chinese)
- [22] WANG B F, LU W K. An efficient amplitude-preserving generalized S transform and its application in seismic data attenuation compensation [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56(2): 859-866.
- [23] 黄捍东, 冯娜, 王彦超, 等. 广义S变换地震高分辨率处理方法研究[J]. *石油地球物理勘探*, 2014, 49(1): 82-88.
HUANG H D, FENG N, WANG Y C, et al. High-resolution seismic processing based on generalized S transform [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2014, 49(1): 82-88. (In Chinese)
- [24] 邓攻, 梁锋, 李晓婷, 等. S变换谱分解技术在深反射地震弱信号提取中的应用[J]. *地球物理学报*, 2015, 58(12): 4594-4604.
DENG G, LIANG F, LI X T, et al. S-transform spectrum decomposition technique in the application of the extraction of weak seismic signals [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(12): 4594-4604. (In Chinese)
- [25] 曹鹏涛, 张敏, 李振春. 基于广义S变换及高斯平滑的自适应滤波去噪方法[J]. *石油地球物理勘探*, 2018, 53(6): 1128-1136.
CAO P T, ZHANG M, LI Z C. An adaptive filtering denoising method based on generalized S transform and Gaussian smoothing [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2018, 53(6): 1128-1136. (In Chinese)
- [26] MOUKADEM A, BOUGUILA Z, OULD ABDESLAM D, et al. A new optimized Stockwell transform applied on synthetic and real non-stationary signals [J]. *Digital Signal Processing*, 2015, 46: 226-238.

Research on intrusion monitoring methods of underground pipelines and tunnels based on distributed optical fiber acoustic wave sensing (DAS)

CAO Pengtao¹, WEI Yishi¹, LI Yi², WU Qi¹

(1. Shenzhen Water Planning and Design Institute Co., Ltd. Shenzhen 518022, China;

2. Shenzhen Xintong Illustration Engineering Co., Ltd. Shenzhen 518109, China)

Abstract: Intrusion incidents along subway tunnels cause damage and deformation of subway lines, as well as safety accidents and property losses caused by human damage and barbaric construction along underground pipelines. It is necessary to monitor and warn along the tunnel and underground pipelines, detect intrusion and damage in a timely manner, and prevent or carry out remedial maintenance to reduce accident losses. Distributed fiber optic acoustic sensing (DAS) technology has unique advantages, such as dynamic online monitoring, large-scale dense measurement, and convenient deployment without maintenance. By deploying distributed optical fibers along underground rail transit and underground pipelines and using DAS technology to monitor external disturbances along the fiber optic lines, this paper adopts a time-frequency analysis method based on optimized S transformation to transform DAS signals into the time-frequency domain. Based on the differences in time-frequency characteristics of different vibration signals, different vibration signals are classified and identified in the time-frequency domain. Accurate positioning, providing early warning for intrusion signals exceeding the threshold. Through numerical simulation analysis and actual subway line section DAS monitoring experiments, the results show that the DAS monitoring method technology based on optimized generalized S transformation has strong recognition and monitoring ability for different main frequency vibration signals and has the characteristics of long monitoring distance and timely response. It can achieve long-distance and large-scale dense measurement, dynamic and real-time monitoring, and early warning for urban underground pipelines. Monitoring along underground rail transit provides a fast and accurate solution.

Keywords: distributed optical fiber acoustic sensing (DAS); monitoring and early warning; time-frequency analysis