

基于分布式光纤的隧道环境振动监测系统

廖志军 朱俊峰 邓文明

(杭州地铁运营有限公司, 310002, 杭州//第一作者, 高级工程师)

摘要 为防止城市轨道交通控制保护区内的各类施工作业对隧道结构安全造成影响,需要采用隧道环境振动监测系统对安全隐患进行及时预警。介绍了基于分布式光纤的隧道环境振动监测系统的感应原理和振动信号采集、分析方法。通过现场试验,研究分析在人为敲击、列车运行、地面车辆行驶、地面施工作业等工况下,基于分布式光纤的隧道环境振动监测系统采集的振动信号,对所采集振动信号的分析结果表明:基于分布式光纤的隧道环境振动监测系统对微振动事件具有比较高的检测灵敏度,通过对时域、频域及能量图等特征分析能够区分不同类型的振动信号,能够对隧道结构安全状态进行有效监测,达到提前预警的目的。

关键词 城市轨道交通;隧道环境;振动监测;分布式光纤
中图分类号 U458.1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.06.044

Tunnel Environment Vibration Monitoring System Based on Distributed Optical Fiber

LIAO Zhijun, ZHU Junfeng, DENG Wenming

Abstract To prevent the various construction operations in urban rail transit control protection zone from affecting tunnel structure safety, a tunnel environment vibration monitoring system is needed to provide timely early-warning of potential hazards. The sensing principle and vibration signal acquisition and analysis methods of tunnel environment vibration monitoring system based on distributed optical fiber are introduced. Through field experiments, the vibration signals collected by the tunnel environment vibration monitoring system based on distributed optical fiber are studied and analyzed under various working conditions such as manual tapping, train operation, ground vehicle driving, and ground construction operations. The results show that the above monitoring system has relatively high detection sensitivity for micro-vibration events, and can distinguish different types of vibration signals through feature analysis of time-domain, frequency-domain and energy map, thus tunnel structure safety status is effectively monitored, serving the purpose of early warning.

Key words urban rail transit; tunnel environment; vibration monitoring; distributed fiber

Author's address Hangzhou Metro Operation Co., Ltd., 310002, Hangzhou, China

目前,城市轨道交通基础设施和结构健康受到控制保护区(为保障城市轨道交通结构安全和正常使用,在其结构及周边的特定范围内设置的控制和保护区域)内异常或违规施工影响,造成安全隐患,尤其是勘探施工对隧道结构破坏强,严重时甚至会造成隧道钻穿、列车刮伤、列车停运、人员损伤等。隧道上方的施工或内部过车等都会引起地表物理振动,该振动会经过土层介质传播至隧道结构,因此,监测此类振动信号并进行特征分析可对异常情况提前预警,避免风险。

近年来,我国城市地下空间基础设施建设发展迅猛,其中的突发事件会对隧道结构健康状态和运营安全构成潜在威胁,为此,在隧道工程建设期会设置自动化监测系统^[1-4]。例如:广州地铁在运营隧道内布设有全站仪,并配置监测软件,构成运营隧道监测系统,用以解决隧道多目标干扰及地基失稳等问题;厦门地铁在隧道内预埋光纤光栅传感器,对运营隧道二衬变形情况进行自动化监测;在公路隧道中,也尝试用分布式光纤监测隧道环境的温度变化,进行火灾预警;在隧道监测中,还常用单点形式的传感器,用以感知振动、沉降、应变等电信号,对围岩压力、结构力等进行实时监测评估^[5-8]。

综上所述,对城市轨道交通基础设施结构安全进行监测的手段较丰富,但主要是针对隧道结构形变的监测,针对地表微振动信号进行监测的手段较少,针对城市轨道交通控制保护区内施工、地面车辆行驶等引起的振动的监测研究仍处于萌芽时期。

在运营地铁隧道内装设基于分布式光纤的隧道环境振动监测系统(较传统点式监测分布性更好、监测距离更长、硬件成本更低、不易受电磁干扰等),对隧道及控制保护区内不同类型的振动源信号进行采集分析,从而全方面评估该监测系统灵敏

度、多通道一致性、不同类型振动信号特征区分及分布式光纤贴合方式等, 以期为该监测系统在城市轨道交通运营隧道内的应用提供试验数据支撑。

1 隧道工程概况

基于分布式光纤的隧道环境振动监测系统的监测设备布置在杭州地铁4号线黎明站至明石路区间, 该区间控制保护区存在一处民用住宅施工项目。该项目西侧为地铁站点, 基坑边距地铁隧道约为15~30 m, 地铁隧道埋深为10.50~13.85 m, 试验期间该项目基坑开挖深度约为10 m。民用住宅施工地段与地铁隧道平面相对关系如图1所述。其中, 分布式光纤铺设起始端为黎明站D口, 向明石路站方向铺设, 铺设长度对应于地铁隧道盾构管片的环数为145环(总长度约为180 m); 铺设长度达到180 m后垂直过轨, 然后朝反方向铺设145环(总长度约为180 m)。这样, 分布式光纤铺设总体呈现U字形, 有效监测长度约为360 m。图2为分布式光纤铺设位置示意图与施工地段影像截图。图3为地铁隧道环境及现场光纤铺设情况。

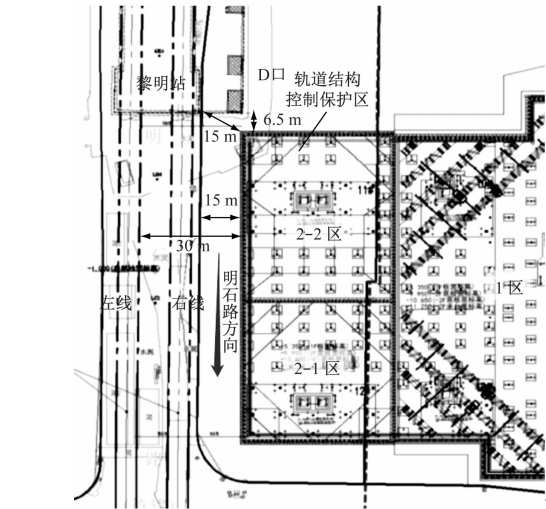
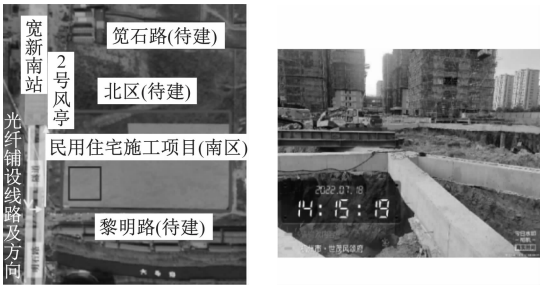


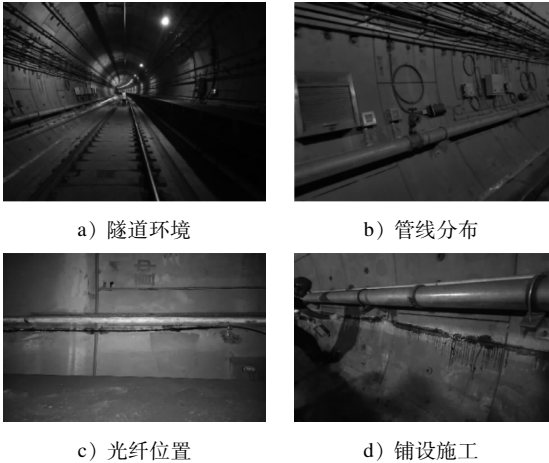
图1 民用住宅施工地段与地铁隧道平面相对关系
Fig.1 Relative planar relation of residential housing construction site and metro tunnel

2 分布式光纤感应原理

试验核心技术器件为DAS(分布式光纤声波传感)技术系统, 该系统基于相干瑞利散射原理, 采用普通单模光纤通信光缆作为前端传感器, 利用的是光纤对声音振动的敏感特性: 当外界声音作用于传感光纤上时, 光纤微小变形将会改变光纤内部散射



a) 示意图
b) 影像截图
图2 分布式光纤铺设位置示意图与施工地段影像截图
Fig.2 Diagram of distributed optical fiber laying position and screenshot of construction site video



a) 隧道环境
b) 管线分布
c) 光纤位置
d) 铺设施工
图3 地铁隧道环境及现场光纤铺设情况
Fig.3 Metro tunnel environment and field optical fiber laying situation

体的间距和折射系数, 进而引起后向散射信号的强度变化。

在光缆一端连接处注入激光脉冲信号, 通过分析后向散射信号的强度就可以探测地表振动所引起的光缆变形, 进而获得振动信号。

DAS系统的核心硬件是DAS解调仪, 接入光缆一端即可监测数十公里长的光缆沿线振动信号, 可用于第三方入侵监测。可根据监测线路长度调节采集系统采样率, 监测线路越长, 对应的采样率越低。

3 现场试验及分析

本试验中, 分布式光纤监测系统监测范围为25 km, 数据采样率按4 kHz设置, 尽可能采集全频段信号。空间分辨率为0.5 m, 即内置传声单元(单个数据采集通道)沿光纤长度方向按0.5 m间隔分布。试验周期为2 d, 累计监测, 保存现场数据约

4.6 TB。分析处理不同特征的振动信号,从振动信号时域波形峰值、频域分量及各通道能量特征等方面开展研究。

3.1 数据预处理

分布式光纤监测系统采集的差分振动信号还原为原始信号后存在较大背景噪声和基线漂移,需要进行滤波才能做进一步特征分析。

对比了 4 阶巴特沃斯数字滤波器、中值滤波器及小波分解滤波器的滤波效果。4 阶巴特沃斯数字滤波器会将滤波转化为高通滤波及带通滤波;中值滤波器通过除去原始信号中低频成分后,得到最终的滤波信号;小波分解滤波器中的 8 层小波分解滤波相比于其他方法,能够在保留原始信号的前提下尽可能滤除高频和低频噪声,使其具有较高的信噪比。因此,选择小波分解滤波器对现场数据进行预处理。

3.2 敲击试验

为建立隧道里程与光纤通道之间的对应关系,需通过敲击光纤不同位置进行标定。在试验期,人为对分布式光纤沿隧道两侧的 7 个不同通道的位置进行轻微敲击,同时分析相应通道信号的能量图(见图 4)和波形(见图 5)。

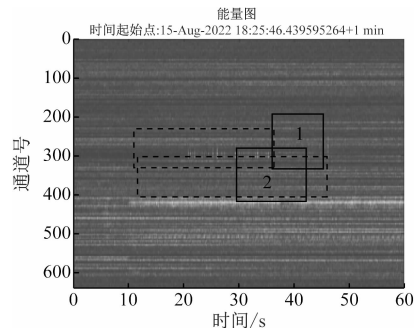
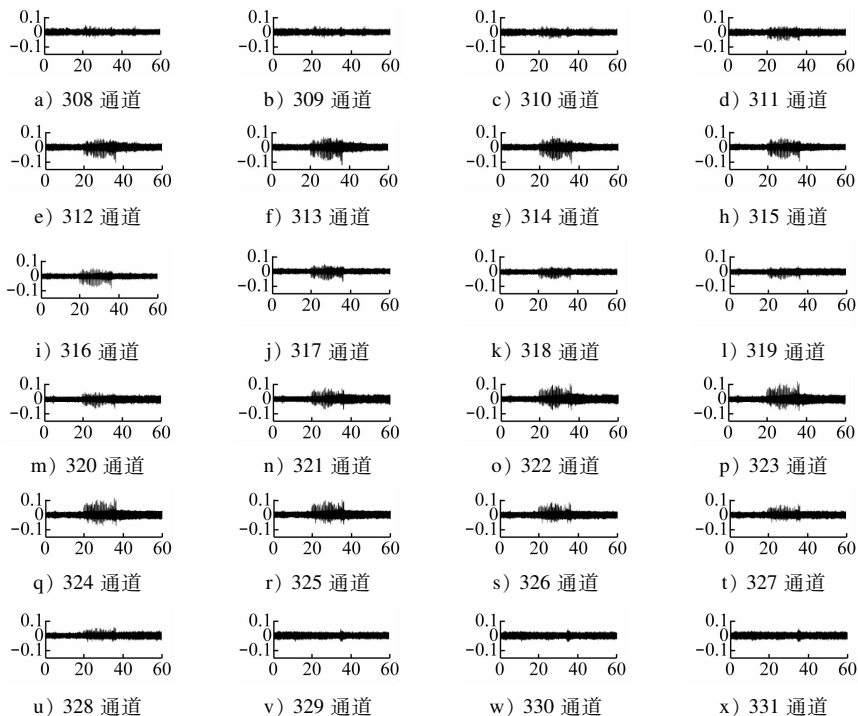


图 4 轻微敲击下分布式光纤不同通道能量截图

Fig. 4 Energy map screenshot of different of distributed optical fiber channels under slight tapping



注:各分图横坐标为时间,单位为 s;纵坐标为量纲一的位移幅值。

图 5 轻微敲击下分布式光纤敲击点(线框)及相邻通道信号波形图

Fig. 5 Distributed optical fiber tapping points (wire frame) and adjacent channel signal waveforms under slight tapping

敲击发生时,除距离敲击点最近的通道外,相邻通道(各通道间隔 0.5 m 且连续)也可以采集到振动信号。振动信号幅值随距离增大而逐渐衰减直至消失,其衰减性保持一致。

总的来说,振动信号的能量仍较为集中,滤波

后频域范围在 0 ~ 100 Hz 以内。

3.3 过车试验

列车在分布式光纤监测区域运行,随时间推移,各分布式光纤通道依次采集到振动信号,持续时间近乎相同。因此,在能量图(见图 6)中能够快

速辨别出过车信号,根据通道的响应次序,能准确辨别列车行驶方向。

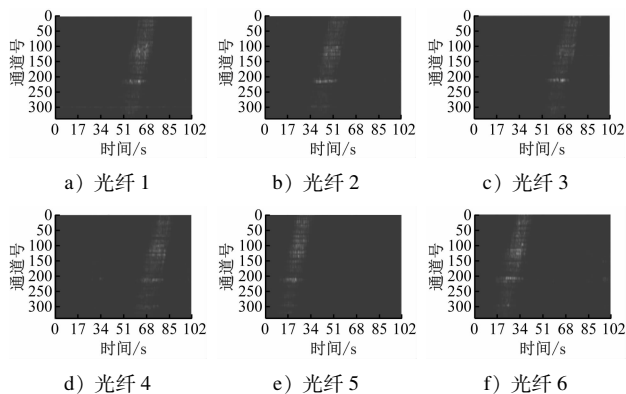


图6 过车时分布式光纤不同通道能量截图

Fig. 6 Energy map screenshot of different of distributed optical fiber channels during train overpassing

由图6可见,每个通道的振动信号持续时间基本一致,约为15 s,不同通道之间接收到的数据波形及能量虽有所差别,但滤波后振动信号的频域分布仍较为均匀。

3.4 地面车辆行驶试验

在整个凌晨时段,监测系统监测到类似列车通过的特征能量,如图7所示。该物体移动速度大于列车经过监测路段的运行速度,在该时间段无列车运行,因此判断该类振动信号为地面列车行驶产生的振动信号。通过滤波转频域分析后,得出该类振动信号特征主频为76 Hz。

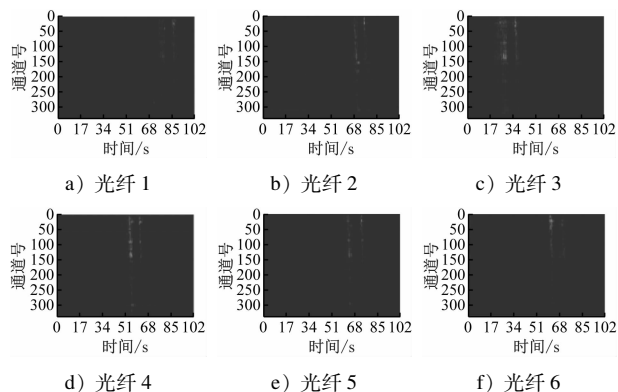


图7 地面列车行驶时分布式光纤不同通道能量截图

Fig. 7 Energy map screenshot of different of distributed optical fiber channels when ground trains are moving

3.5 控制保护区施工作业

对控制保护区内不同施工作业所对应通道的数据进行提取,分析出3类短时、低频的施工振动信号(见图8—图10)。根据时域波形及音频,判断属

于某类地面或墙面施工作业时的振动信号,施工地点靠近监测区域的中部,主频均小于50 Hz。

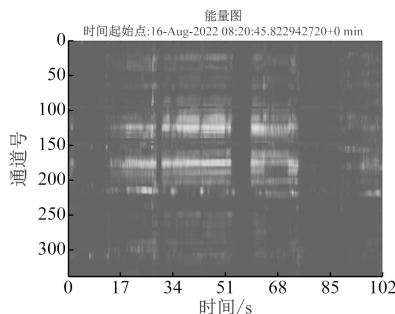


图8 施工信号1(主频约21 Hz)

Fig. 8 Construction signal 1 (main frequency about 21 Hz)

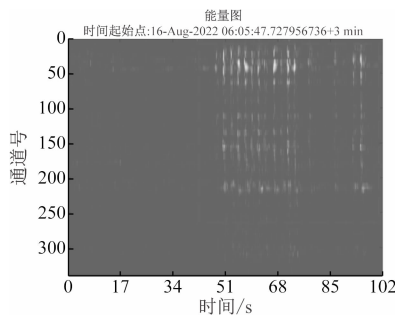


图9 施工信号2(主频约12 Hz)

Fig. 9 Construction signal 2 (main frequency about 12 Hz)

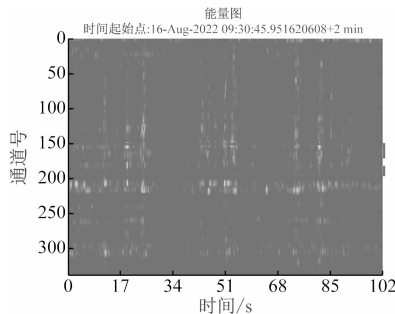


图10 施工信号3(主频约13 Hz)

Fig. 10 Construction signal 3 (main frequency about 13 Hz)

3.6 噪声

光纤传感振动信号较微弱,容易受环境干扰。在光纤传感振动信号中,存在的噪声主要分为4类:环境噪声、衰减噪声、模式噪声及系统噪声。光纤传感振动信号背景噪声能量如图11所示。

环境噪声来源之一是地下自然噪声场,表现为某种特定区域的地球活动。其次是地下人文噪声场,表现为某一特定区域内由人文活动引起的振动。当然还包括地壳板块运动产生的振动噪声、地

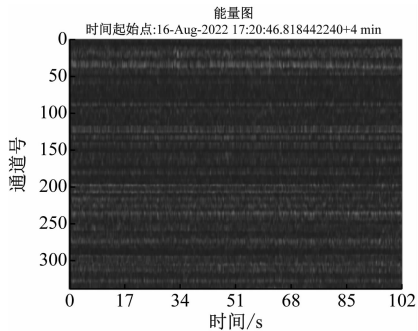


图 11 光纤传感振动信号背景噪声能量截图

Fig. 11 Energy map screenshot of optical fiber sensing vibration signal background noise

下水大规模涌动产生的振动噪声等。环境噪声表现出较强不确定性及偶然性。

衰减噪声场为某一特定区域内使传感信号振幅衰减的因素总和,其广泛存在于周界安防、结构监测等领域。被测物与传感光纤之间存在一定的距离,振动信号经过介质传播到达传感光纤会存在一定衰减,导致采集到的光纤传感振动信号较微弱。造成振动信号在大地介质中衰减的因素很多,其中介质吸收和几何扩散衰减是信号波传播过程中的主要损耗。因此试验开始前会进行光路损耗测量。

模式噪声,一是由于光纤传感系统中的光源具有强相干性,在一定程度上存在模式间色散,因此导致光纤信号间发生干涉;二是当光信号传输至光纤接头处时,因光纤接头不完善而导致只有部分光信号通过接头,信号功率损耗严重。

系统噪声,由于光纤监测系统为光电系统,容易受到外部光路扰动,以及前置放大器和二极管等元器件固有噪声的影响,因此会存在一定的系统噪声。较低的系统噪声水平更加有利于信号的检测。

3.7 信号特征识别

目前,本文分析出多类基础信号,为便于识别,采用如下信号识别方法进行特征提取:将采集到的入侵信号进行滤波、降噪等预处理,提高信号还原度;从信号中提取有效特征,组成可用于描述入侵事件类型的特征向量;选择合适的分类识别算法,实现未知入侵信号分类识别。结合不同需求,选择特征提取方法,可以提高入侵信号检测准确率。

广泛使用的特征提取方法主要有 3 类:时域特征、频域特征和时频域特征。分布式光纤监测系统的监测数据更适用于时域和频域特征结合方法提

取特征。信号识别算法流如图 12 所示。

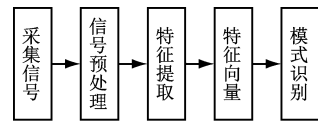


图 12 信号识别算法流

Fig. 12 Signal recognition algorithm flow

具体方法为:对滤波后两组数据中的每类数据按特定时间的窗口长度与滑动步长进行分帧,逐步计算各自时域特征值——峭度。峭度是表征振动信号波形尖峰度的一个统计量,具体含义为波形的平缓程度,用来描述变量的分布特征。振动信号中如果出现周期性的冲击成分,那么计算得到的峭度因子通常大于 3,以此指标来判断振动是否存在。各类型振动信号滤波处理后波形如图 13 所示。各类型振动信号的时域峭度如图 14 所示。

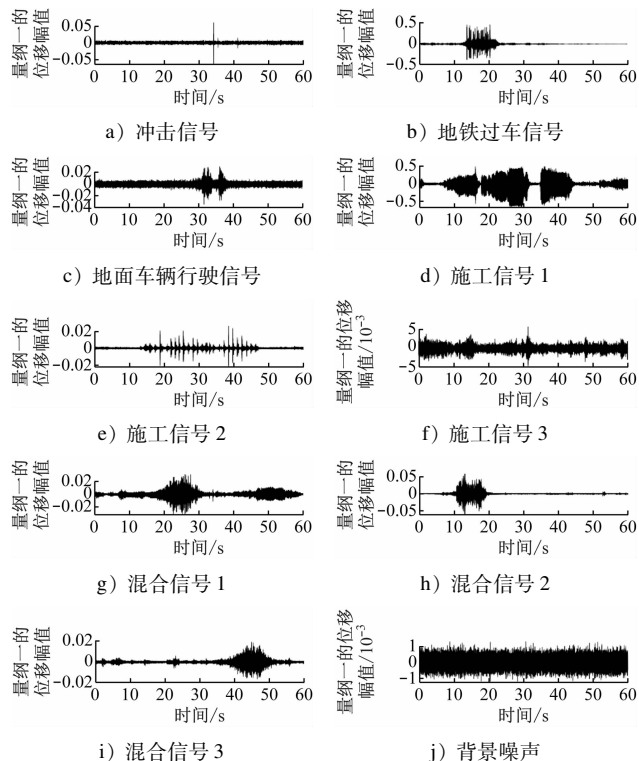


图 13 各类型振动信号滤波处理后波形图

Fig. 13 Waveform after filtering of various types of vibration signal

地铁列车过车信号在高频段的峭度值明显高于低频段;冲击信号在低频段的峭度值显著高于其他信号,与能量成正比;施工振动信号则在低频段的峭度值明显高于背景噪声的峭度值;地面车辆行

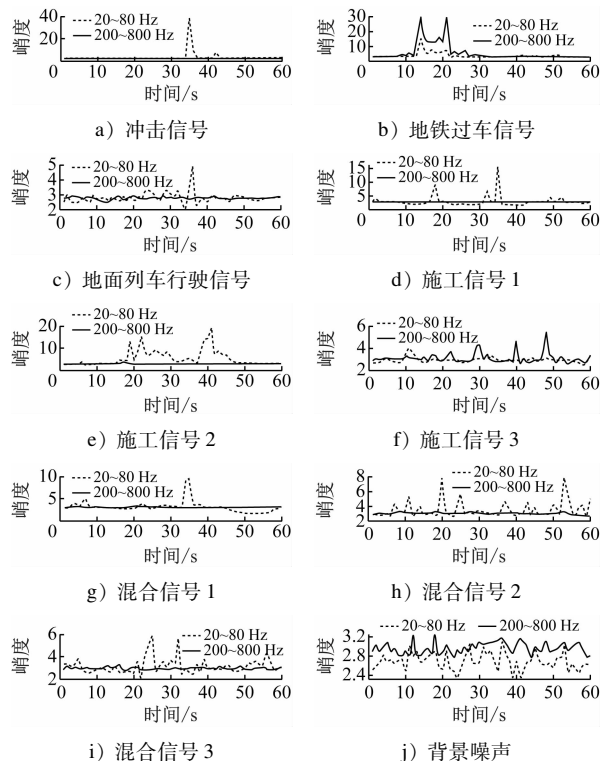


图 14 各类型振动信号的时域峭度

Fig. 14 Time-domain kurtosis of each type of vibration signal

驶信号的峭度值较低,近似于背景噪声。同时,本文还分析了隧道过车和施工信号混合数据,根据能量图显示,隧道过车振源更靠近监测设备,该类混合信号中隧道过车能量占比较大,通过图 14 中时域波形图的短时(10 s 左右)波形震荡即可反映出来。

不同频段的时域特征对不同类型的振动信号表现出不同的区分性。因此,联合多种时域特征作为分类器的输入能够提升分类精度及准确性。

4 结语

基于分布式光纤的隧道环境振动监测系统能够有效采集到包括地铁列车运行、地面车辆行驶、地面施工等情况下产生的各类振动信号。其中,信号的识别与定位可通过提取时域特征来完成。

1) 在数据滤波方面,使用 8 层小波分解滤波(重构 4~8 层)能够有效提取振动信号。

2) 试验表明,各通道数据采集具备一致性,相邻通道由于受设备等因素影响,存在振幅不一致情况,各通道信号幅值总体变化趋势正常,基本满足后期对于异常振动点定位的要求。

3) 监测数据类别与特征表明,振动信号时域特征(峭度)差异较为明显,可将其作为特征识别的重

要标志。

参考文献

- [1] 谢永利,王亚琼. 在役隧道结构安全、健康监测与评估[J]. 中国公路, 2017(13): 56.
XIE Yongli, WANG Yaqiong. Monitoring and evaluation of structural safety and health of in-service tunnel[J]. China Highway, 2017(13): 56.
- [2] 谢永利,王亚琼. 在役隧道结构安全、健康监测与评估[J]. 中国公路, 2017(13): 56.
XIE Yongli, WANG Yaqiong. Safety, health monitoring and assessment of tunnel structure in service[J]. China Highway, 2017(13): 56.
- [3] 关则彬,余振国,宁静,等. 隧道衬砌掉块监测系统研究[C]//中国智能交通协会. 第十五届中国智能交通年会科技论文集. 北京:电子工业出版社,2020.
GUAN Zebin, YU Zhenguo, NING Jing, et al. Research on monitoring system of tunnel lining block drop[C]//China Intelligent Transportation Systems Association. Proceedings of the 15th China Intelligent Transportation Systems Association Annual Conference. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2020.
- [4] 王芳,张磊,邸成. 运营铁路隧道衬砌施工冷缝缺陷综合整治技术[J]. 高速铁路技术, 2021, 12(3): 106.
WANG Fang, ZHANG Lei, DI Cheng. Comprehensive treatment technology of cold joints defect in lining construction of operating railway tunnel[J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(3): 106.
- [5] 李星,王树栋,牟元存. 铁路隧道衬砌致灾病害的综合检测方法探讨[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(6): 74.
LI Xing, WANG Shudong, MU Yuancun. Discussion on comprehensive detection method of disaster-causing diseases of railway tunnel lining[J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(6): 74.
- [6] 魏本现. 自动化变形监测技术发展与在广州地铁中的应用[J]. 工程建设和设计, 2012(10): 145.
WEI Benxian. Automated deformation monitoring technology development and application in the Guangzhou Metro[J]. Construction & Design for Project, 2012(10): 145.
- [7] 陈玖彬,夏才初. 厦门翔安隧道结构长期监测系统预警管理研究[J]. 福建交通科技, 2012(3): 56.
CHEN Jiubin, XIA Caichu. Research on early warning management of long-term monitoring system of Xiang'an Tunnel structure in Xiamen[J]. Fujian Communications Science and Technology, 2012(3): 56.
- [8] 刘源,林茂森. 光纤分布式温度监测系统在赣院隧道中的应用[J]. 江西公路科技, 2010(2): 62.
LIU Yuan, LIN Maosen. Application of optical fiber distributed temperature monitoring system in Ganwan Tunnel[J]. Jiangxi Highway Science and Technology, 2010(2): 62.

(收稿日期:2022-12-07)