

运营地铁隧道在线动力监测及时频特征分析*

万灵^{1,2,3}, 黄强⁴, 龚晓南³, 荣耀¹, 周扬⁵, 朱海涛¹

(1. 江西省交通科学研究院有限公司 南昌, 330200) (2. 南昌航空大学土木建筑学院 南昌, 330063)

(3. 浙江大学建筑工程学院 杭州, 310058) (4. 宁波大学岩土工程研究所 宁波, 315211)

(5. 江西省天驰高速科技发展有限公司 南昌, 330038)

摘要 为了研究地铁隧道上部土层施工扰动下隧道结构的模态特征,对上海地铁12号线某盾构隧道进行了现场振动测试,分析了列车振动荷载作用下隧道结构时频域的特征变化规律,并基于自回归滑动模型(auto regressive moving average, 简称ARMA)法提取了受土层扰动前后隧道结构的模态频率变化量。结果表明:盾构隧道结构呈现明显的中低频特性,主频域范围在0~200 Hz之间,列车振源的高频成分消散较快;受土层施工扰动后,隧道侧壁振动整体幅值和数据波动减小;隧道结构模态频率呈现减小的趋势,最大频率变化量为-2.935 Hz。研究结果可为复杂条件下隧道结构的模态识别及在役性能健康监测评估提供依据和支撑。

关键词 地铁隧道;动力监测;时频特征;土层扰动;模态频率

中图分类号 TU93;TH87

引言

地铁具有安全、节能及高效等优点,城市地铁的建设有效缓解了城市交通拥堵^[1]。截至2020年6月,中国内地共有41个城市建成地铁盾构隧道达5 314.11 km^[2],地铁振动问题逐渐得到关注。

通过建立土体-隧道模型及列车-荷载-轨道模型,从机理上分析了列车振动的振幅及波数特性。Forrest等^[3]基于圆柱弹性理论,提出了管中管模型来计算在弹性连续体中点荷载作用下隧道和土体的动力响应。Zhou等^[4]采用解析隧道模型,结合列车-轨道耦合系统计算了饱和土中隧道的动力响应。Clot等^[5]建立了全空间双层圆形隧道模型,分析了隧道土层动力响应预测。Zhu等^[6]针对一种低频振动衰减轨道,通过建立地铁车辆-路基系统的3维耦合动力学模型,研究其在列车动载作用下的减振性能。张小会等^[7]结合车辆-轨道动力学,建立了车辆-浮置板轨道过渡段-隧道-土体系统耦合动力计算方法,研究了浮置板轨道过渡段长度、钢弹簧刚度等参数对隧道振动加速度、土体正应力和孔隙水压力的影响。Gardien等^[8]以日本某一地铁隧道进行建模,提出一个由静挠度模型、轨道模型和传播模型3

个子模型组成的模块化模型,分析从振源到波在土体中的传播规律。当列车运行频率较高时,列车诱导振动和结构噪声对上部结构产生一定的影响^[9]。Xia等^[10]通过监测及数值方法分析列车振动对上部结构的影响。Qiu等^[11]研究了西安古城墙在西安地铁建设和运营过程中的潜在安全隐患,提出了线路优化、隧道施工中的主动控制技术、地基加固以及建筑物加固等缓解措施。

在地铁列车长期振动循环荷载作用下,隧道结构容易产生变形,尤其是隧道结构的纵向变形及局部重点链接部位的变形。黄强等^[12]以上海地铁9号线某区间隧道为例,采用现场实测和动力有限元方法分析了软土隧道的自由场响应特征,并基于经验公式法评估了隧道长期振动沉降。Yang等^[13]通过隧道模型试验,研究了长期列车荷载作用对隧道衬砌和周围土体动力响应的影响。Degrande等^[14]通过测试不同列车速度下的轨道、隧道仰拱和隧道壁以及自由场地的振动,分析了土体的动力特性。万灵等^[15]将短时脉冲激振力应用于某地铁盾构隧道的现场动力测试,结合随机减量、正交多项式及自回归滑动平均模型,有效提取了隧道结构的模态参数。李明航等^[16]分析了地铁列车振动源强离散特征及不

* 国家自然科学基金资助项目(52308402,52008214);江西省交通运输厅科技资助项目(2021H007,2021C0008);宁波市自然科学基金资助项目(2023J083)

收稿日期:2022-01-25;修回日期:2022-07-22

同频段的控制因素,对某地铁线路的同一区间内 2 个断面进行了现场原位测试。

上述研究采用理论数值分析、模型试验及现场测试的方法,对地铁振动下隧道-土体的变形及波动机理进行了分析,但是针对隧道-土体耦合结构模态特征的相关研究较少。地铁列车振动作为比较容易监测和获取的激振振源,蕴含了隧道结构的受力及固有特征。从激振振源中分析结构的应力路径及动力模态参数,从而对隧道整体性能进行预判,具有重要的理论和工程价值。笔者对某地铁隧道进行了长时在线监测,分析上部基坑施工土层扰动下隧道结构时频域的特征变化规律,可为隧道结构振动耦合分析及隧道结构性能评估提供依据和支撑。

1 隧道结构在线动力监测系统

1.1 工程概况

本工程位于上海 12 号线上行线天潼路 (SK22+473.443m) 至国际客运中心 (SK23+924.353 m), 对应上行线动力监测位置在里程 SK22+950.2 m~SK23+58.2 m 之间, 对应环号为 720~810 环。动力监测平面示意图如图 1 所示。



图 1 监测平面示意图

Fig.1 Sketch map of monitored tunnel

地铁盾构隧道外径为 6.2 m, 管片厚度为 0.35 m, 宽度为 1.2 m。隧道埋深范围为 18.1~36.7 m。隧道所在土层厚度如表 1 所示, 表中数据依据《天潼路站-国际客运中心站勘察报告》和上海土层参数经验进行取值。

表 1 土层参数表

Tab.1 Ground conditions parameters

土层	厚度/m	重度 / (kN•m ⁻³)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)
淤泥	3.0	17.2	6	27.5
淤泥质土	2.7	17.7	16	13.0
粉质黏土	2.8	17.9	16	18.0
黏土	4.7	17.9	15	19.0
砂质粉土	7.8	19.5	6	30.0
细砂	7.2	19.4	5	31.0

1.2 动力监测系统

在隧道不同断面设置加速度传感器来测量振动响应。选用 LC01 系列单向压电式加速度传感器, 其具有输出阻抗低、抗干扰及噪声低等优点。传感器参数如表 2 所示。

表 2 传感器参数表

Tab.2 Sensor parameters

参数	型号	
	LC0156A	LC130
灵敏度/(MV•g ⁻¹)	1 500	40 000
量程/g	3	0.12
频响范围/Hz	0.1~2 000	0.5~1 000
谐振频率/kHz	7.5	3
分辨率/g	0.00 002	0.000 000 5
质量/g	126	310

在线动力监测系统中的硬件设备及软件系统如表 3 所示。

表 3 硬件设备及软件系统

Tab.3 Hardware and software devices

仪器	名称	型号	软件系统
传感器	美国朗斯压电加速度传感器	LC130t/LC0156A	—
采集仪	12 通道邑成动态数据采集器	UEI-250kHz	UEI-logger300
终端存储机	笔记本电脑	Thinkpad- X280	—

1.3 动力监测方案

在地铁隧道监测期间, 上部有一基坑正在开挖施工, 现场照片如图 2 所示。

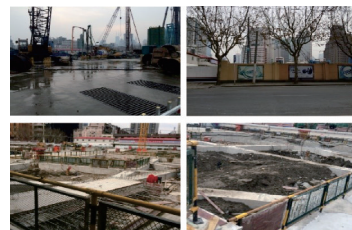


图 2 现场基坑施工图

Fig.2 In-site foundation pit construction

为了捕捉土层扰动下列车-轨道-地铁隧道耦合结构的动力特征变化规律, 监测持续时间为 3 个月, 传感器唤醒监测次数为 540 次, 累积监测时长为 5 400 min, 涵盖了地铁早、晚高峰的振动数据。每

次测试时间节点持续 10 min,每天 6 个测试时间节点,间隔 4 h。为了捕获更多的信号数据,本研究采样频率取 2 kHz。各断面共布置 8 个单向加速度传感器,分别在 4 个不同管环断面,每个断面布设位置在侧壁及道床,隧道动力监测纵、横断面如图 3,4 所示。现场采集终端位于 875 环断面上,动力监测范围为 48 m,在侧壁、道床上分别布置 1 个测点。道床测点是为了捕捉列车振动响应信号,侧壁测点是为了捕捉隧道结构响应信号。



图3 隧道动力监测纵断面图

Fig.3 Longitudinal section of tunnel measured points

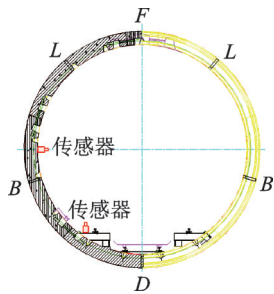


图4 隧道动力监测横断面图

Fig.4 Cross section of tunnel measured points

各断面动力监测测点布置如表 4 所示,其中:PCB 为侧壁监测点;PDC 为道床监测点。地铁隧道动力监测现场照片如图 5 所示。

表 4 断面监测点布置表

Tab.4 Layout of section monitoring points

断面	位置	测点	编号
805 环(CK23+58.08)	侧壁	PCB-1	N_1
	道床	PDC-1	N_2
795 环(CK23+46.08)	侧壁	PCB-2	N_3
	道床	PDC-2	N_4
775 环(CK23+22.08)	侧壁	PCB-3	N_5
	道床	PDC-3	N_6
765 环(CK23+10.08)	侧壁	PCB-4	N_7
	道床	PDC-4	N_8



(a) 监测现场
(a) In-site monitoring



(b) 采集网关
(b) Collection gateway



(c) 道床传感器
(c) Track bed sensor

图5 地铁隧道动力监测照片

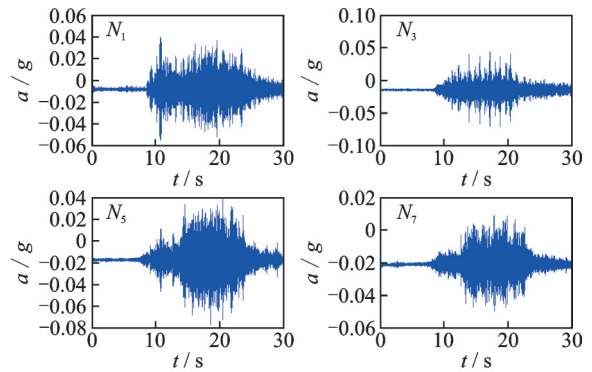
Fig.5 Dynamic monitoring photos of tunnel

2 监测数据分析

2.1 时域数据

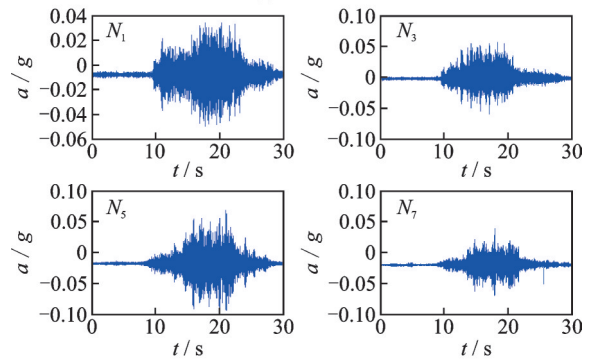
2.1.1 侧壁测点数据

加速度时程数据能够反映列车-轨道-隧道之间的耦合振动响应及其受力特性。经过长时间的动力监测,采集地铁隧道在多个时间段的振动数据进行分析。上海地铁 12 号线有 6 节车辆编组,长为 23.54 m,总长为 141.24 m。1 个编组驶离持续时间为 17.477~22.155 s,时速在 22.9~29.0 km/h 之间。12 号线地铁列车 1 个编组车辆的侧壁测点时程曲线如图 6 所示。



(a) 10月份数据

(a) October data



(b) 12月份数据

(b) December data

图6 侧壁测点时程曲线

Fig.6 Time history curve of side wall measured points

侧壁测点时程数据统计分布如图 7 所示,其中 FIT 为各侧壁测点对应的正态分布拟合曲线。可以看出:加速度均值都为负值分布;受土层施工扰动后,侧壁测点整体的分布均值和方差呈现减小的趋势。

侧壁测点时程数据概率密度分布曲线如图 8 所示,其 10 月份、12 月份数据概率密度分布值分别如表 5,6 所示。从概率分布曲线和范围可以看出:受土体施工扰动后,侧壁测点的概率密度域值呈现减小的趋势,侧壁振动整体幅值变化域和数据波动均减小。

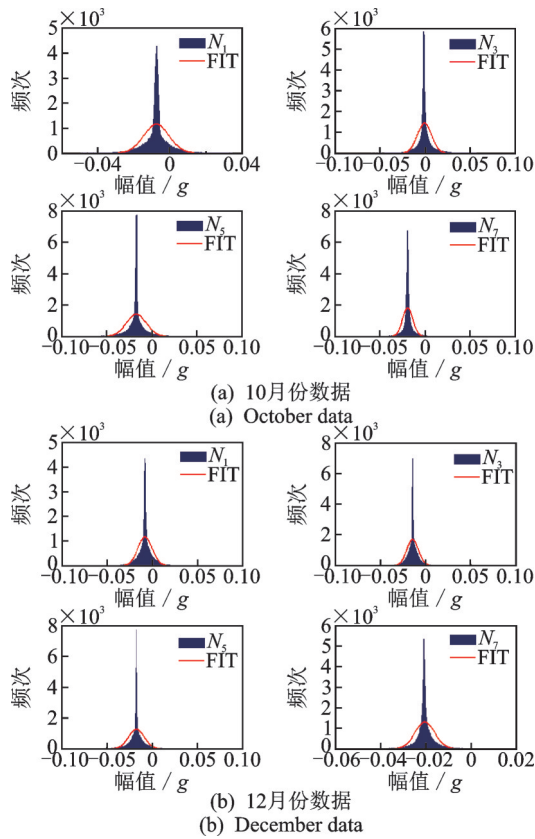


图 7 侧壁测点时程数据统计分布

Fig.7 Statistical distributions of side wall measured points

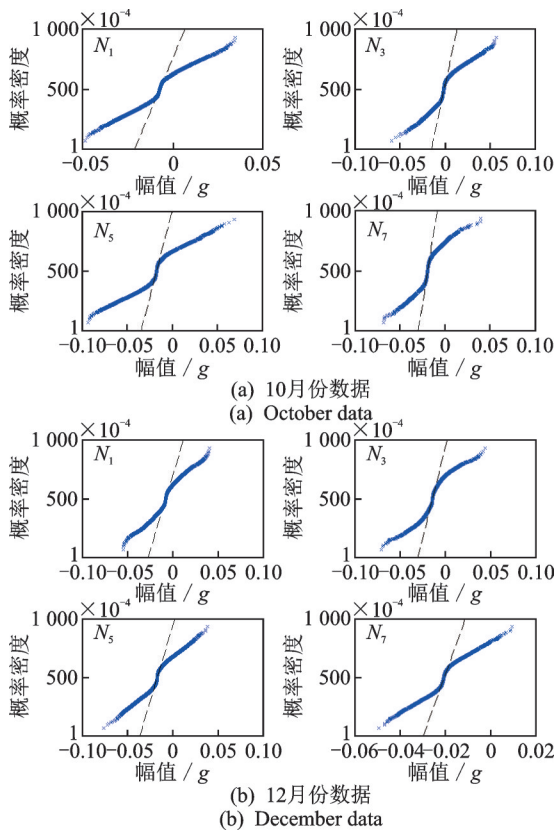


图 8 侧壁测点时程数据概率密度分布曲线

Fig.8 Probability density distribution curves of side wall measured points

表 5 侧壁测点 10 月份数据概率密度分布值
Tab.5 Probability density distribution values of side wall measured points in October

测点	N_1	N_3	N_5	N_7
最小值	-0.495	-0.059	-0.093	-0.068
最大值	0.034	0.056	0.069	0.039

表 6 侧壁测点 12 月份数据概率密度分布值
Tab.6 Probability density distribution values of side wall measured points in December

测点	N_1	N_3	N_5	N_7
最小值	-0.055	-0.071	-0.077	-0.049
最大值	0.040	0.036	0.038	0.009

加速度时程数据能够直接反映隧道结构受力状态,通过土体施工扰动后侧壁测点加速度的时程数据统计分析可知:侧壁处受到列车荷载作用整体方向以负向为主,与传感器监测方向相反,并且土层扰动前后荷载作用整体减小。因此,隧道衬砌管片内部受车辆荷载影响呈现管片内侧压应力减少、外侧拉应力增大的趋势。

2.1.2 隧道道床测点数据

10 月份及 12 月份道床测点时程曲线如图 9 所示。道床测点时程数据统计分布如图 10 所示。从

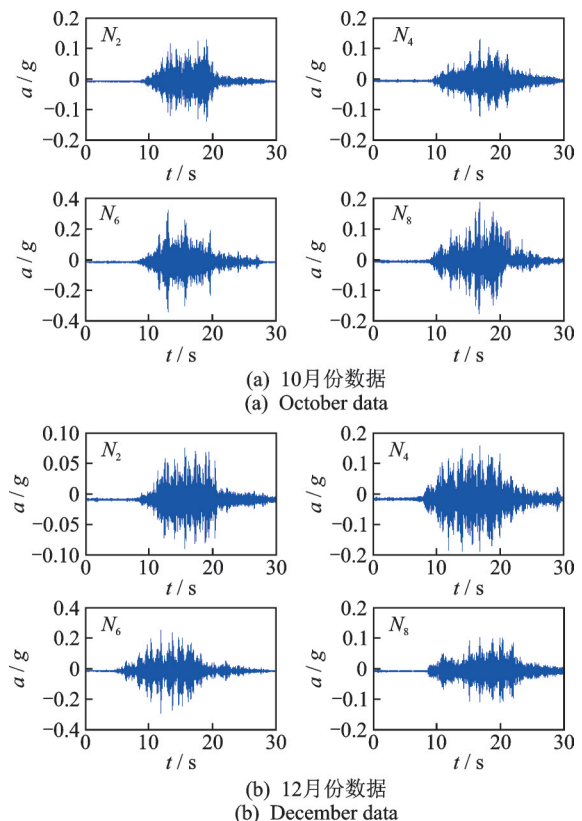


图 9 道床测点时程曲线

Fig.9 Time history curve of track bed measured points

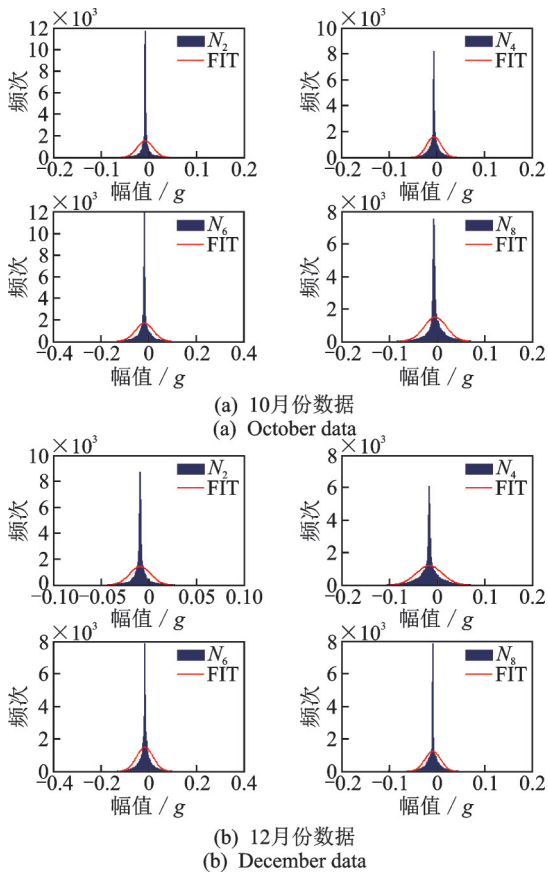


图10 道床测点时程数据统计分布

Fig.10 Statistical distributions of track bed measured points

道床测点时程数据统计直方图可以看出:加速度均值都为正值分布;受土层施工扰动后,侧壁测点整体的分布均值和方差呈现减小的趋势。

道床测点时程数据概率密度分布曲线如图11所示。10月份、12月份数据概率密度分布值如表7、8所示。

表7 道床测点10月数据概率密度分布值

Tab.7 Probability density distribution values of track bed measured points in October

测点	N_2	N_4	N_6	N_8
最小值	-0.138	-0.122	-0.341	-0.178
最大值	0.128	0.130	0.319	0.185

表8 道床测点12月数据概率密度分布值

Tab.8 Probability density distribution values of track bed measured points in December

测点	N_2	N_4	N_6	N_8
最小值	-0.090	-0.186	-0.294	-0.112
最大值	0.075	0.155	0.249	0.101

从概率分布曲线和范围可以看出:受土体施工扰动后,道床测点的概率密度域值呈现减小的趋势,

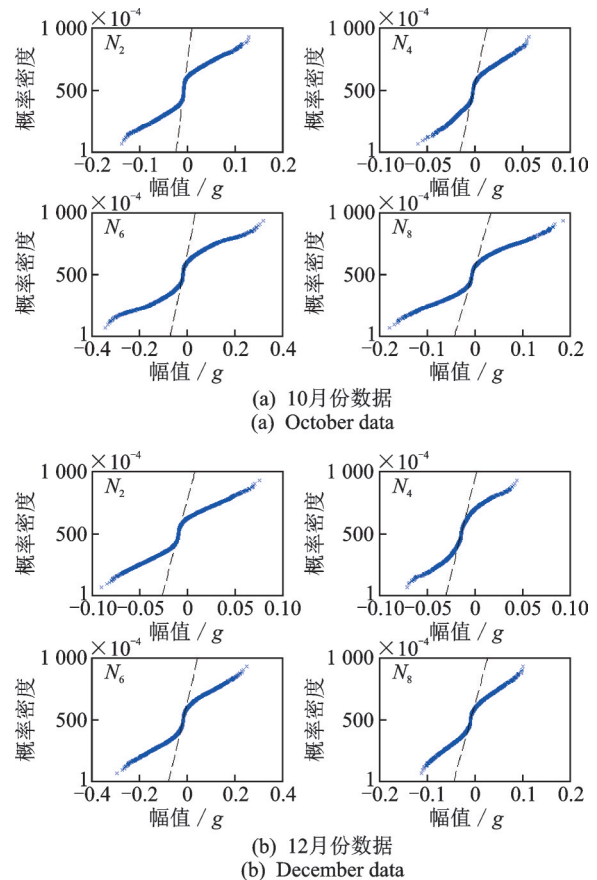


图11 道床测点时程数据概率密度分布曲线

Fig.11 Probability density distribution curves of track bed measured points

侧壁振动整体幅值变化域及数据波动均减小。

加速度时程数据能够直接反映隧道结构受力状态,通过土体施工扰动后道床测点加速度的时程数据统计分析可知:道床处受到列车荷载作用整体方向以正向为主,与传感器监测方向一致,并且土层扰动前后荷载作用大小整体减小。因此,隧道衬砌管片内部受车辆荷载影响呈现管片内侧压应力增大、外侧拉应力减小的趋势。

综合侧壁与道床各个测点的时程数据分析结果,可分析土层扰动前后车辆荷载作用在隧道结构上的应力传递路径,如图12所示。

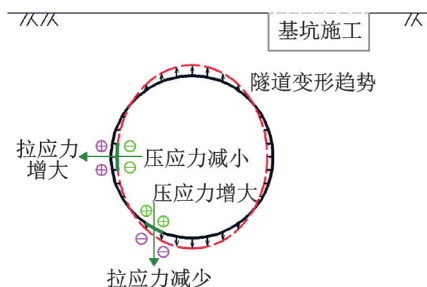


图12 隧道结构应力路径示意图

Fig.12 Diagram of stress path of tunnel structure

2.2 频域数据

上海软土盾构隧道的主要频域范围为 0~200 Hz^[17],引入振动响应的自相关函数,设计切比雪夫滤波器对时域信号进行预处理,以提高频域模态识别精度。滤波器类型为低通滤波(low pass filter,简称 LPF),通带频率为 0~200 Hz,其低通滤波器频响曲线如图 13 所示。

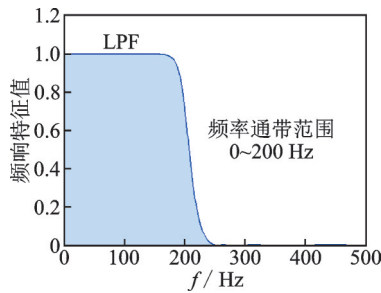


图 13 0~200 Hz 低通滤波器频响曲线

Fig.13 Filter frequency response of 0~200 Hz low pass filter

2.2.1 侧壁测点频域数据

侧壁测点经带通滤波器低通滤波后的时程衰减曲线如图 14 所示。基于 ARMA 方法将上述 4 个测

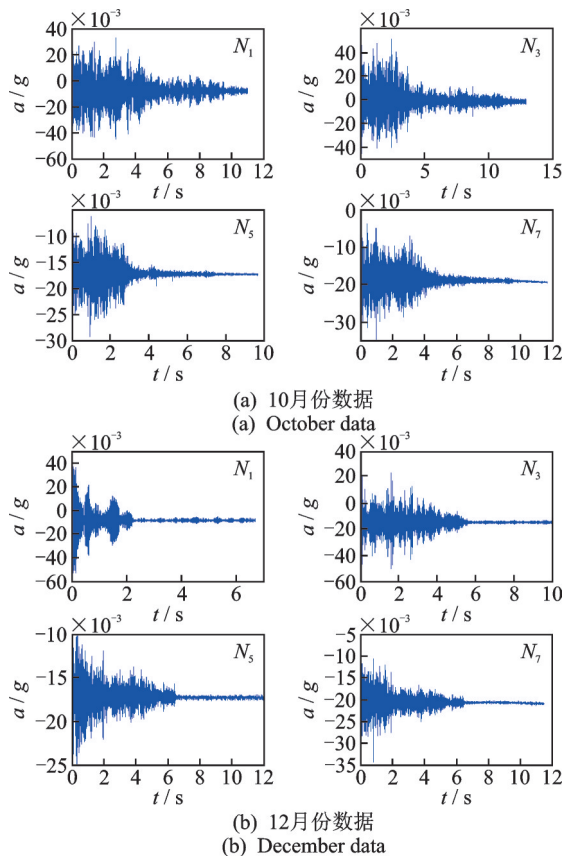


图 14 侧壁测点低通滤波时程衰减曲线

Fig.14 Attenuation curve of side wall measured points filtered by LPF

量点的自相关数据用于模态参数识别。在离散时间域内,结构微分方程为一系列不同时刻的时间序列表示的差分方程,即 ARMA 时序模型方程为

$$\sum_{n=0}^{2N} a_n x_{t-n} = \sum_{n=0}^{2N} b_n f_{t-n}$$

其中: a_k, b_k 分别为待识别的自回归系数和滑动均值系数; f_t 为白噪声。

ARMA 在环境激励下具有较高的时域辨识精度,侧壁测点 ARMA 稳定图如图 15 所示。在稳定性分析中,当 2 个相邻模态阶数之间频率值的允许误差小于 2%,即 $\frac{f^{(p)} - f^{(p+1)}}{f^{(p)}} \leq 2\%$ 时,则认为是稳定的。

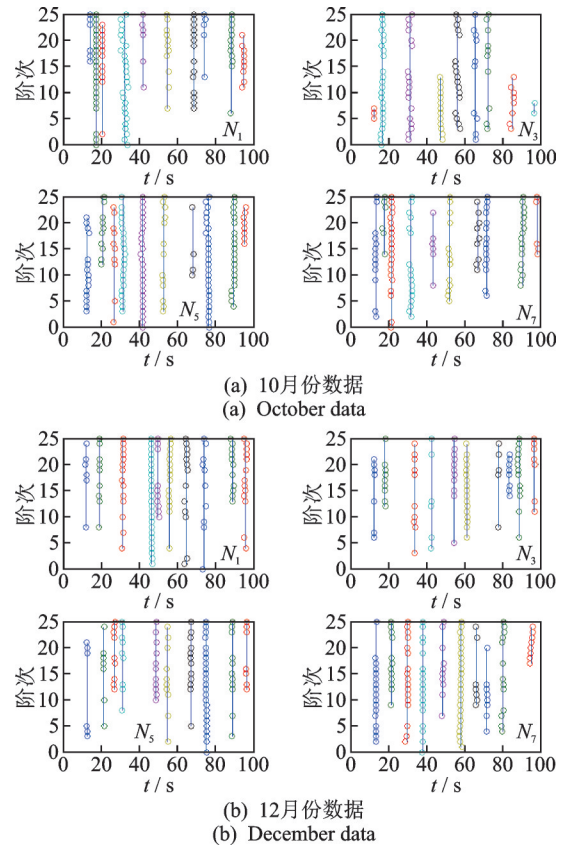


图 15 侧壁测点 ARMA 稳定图

Fig.15 ARMA stability diagram of side wall measured points

由图 15 可知:各侧壁测点识别的模态频率在不同位置 and 不同时间段存在一定差异,理论上隧道结构完好时,其模态参数不发生变化。为了进一步消除虚假模态,提高识别的稳定性和可靠性,通过聚类算法去除 ARMA 数据中差异较大的异常点,得到不同时间段侧壁测点 ARMA 聚类稳定图,如图 16 所示。

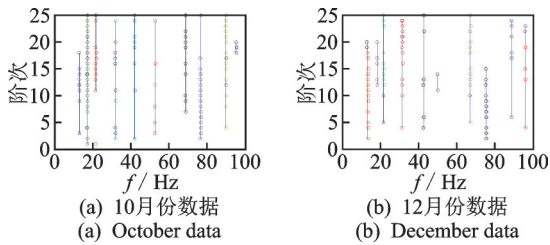


图16 侧壁测点 ARMA 聚类稳定图

Fig.16 Clustering algorithm analysis of ARMA under side wall measured points

2.2.2 道床测点频域数据

道床测点经带通滤波器低通滤波后的时程衰减曲线如图 17 所示。基于 ARMA 方法将上述 4 个测量点的自相关数据用于模态参数识别。ARMA 在环境激励下具有较高的时域辨识精度,道床测点 ARMA 稳定图如图 18 所示。

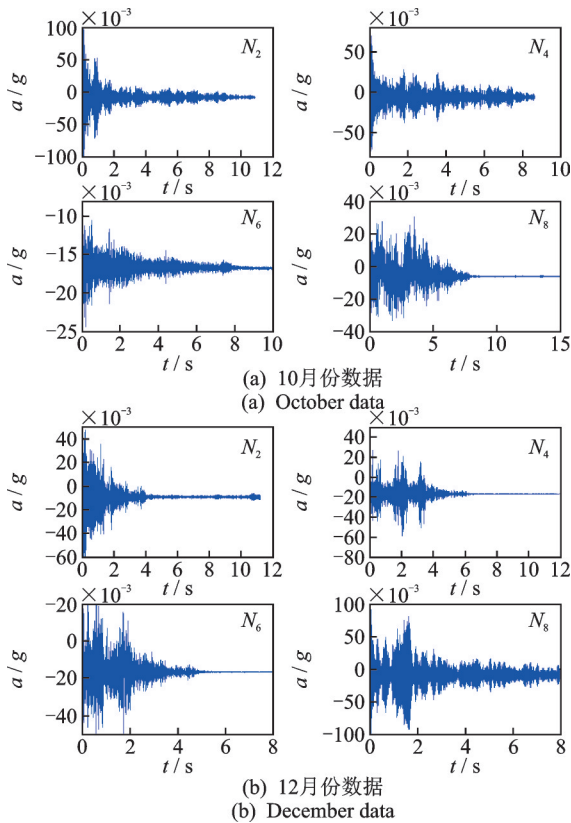


图17 道床测点滤波时程衰减曲线

Fig.17 Attenuation curve of track bed measured points filtered by LPF

由图 18 可知,各道床测点识别的模态频率与侧壁测点识别结果呈现类似的规律,在不同位置和不同时间段存在一定差异。道床测点 ARMA 聚类稳定图如图 19 所示。

2.2.3 不同时间段频域识别对比分析

将地铁隧道上部基坑开挖施工不同时间段聚类算法识别的模态参数进行对比分析,土体施工扰动前后模态参数柱状图如图 20 所示。

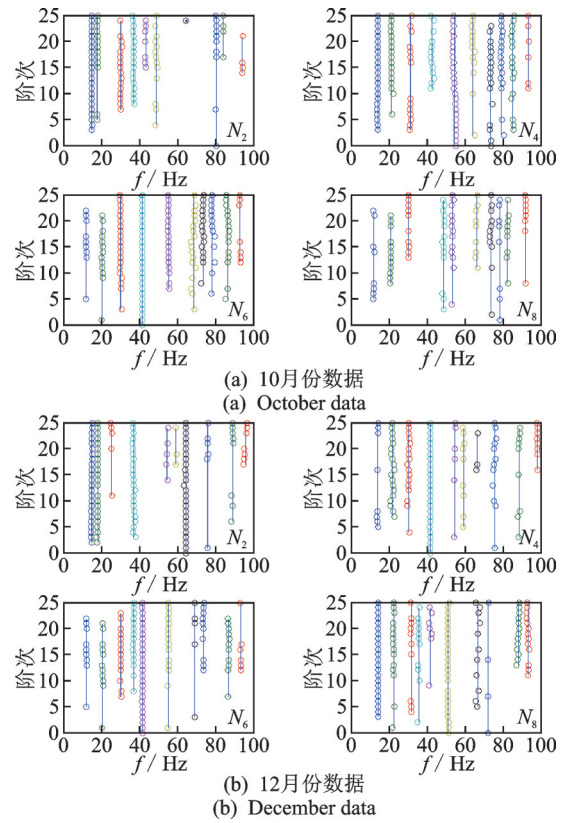


图18 道床测点 ARMA 稳定图

Fig.18 Modal frequency identification stability diagram of track bed measured points

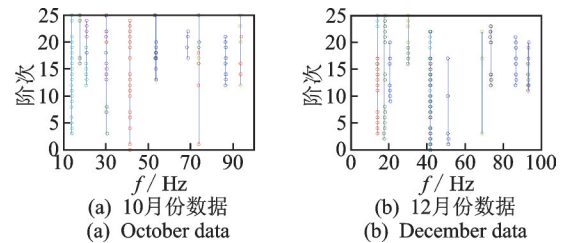


图19 道床测点 ARMA 聚类稳定图

Fig.19 Clustering algorithm analysis of ARMA under track bed measured points

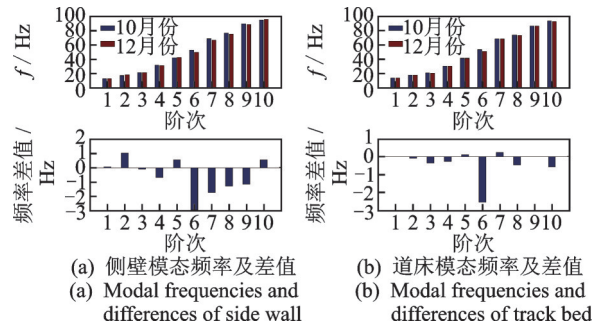


图20 土体施工扰动前后模态参数柱状图

Fig.20 Histogram of modal parameters before and after soil construction disturbance

分析可知,土体扰动前后隧道结构多阶模态频率整体呈现降低的趋势,在第6阶频率中最为明显,最大频率变化量为-2.935 Hz。

3 结 论

1) 侧壁测点整体的分布均值、方差及概率密度域值呈现减小的趋势,土层扰动后,侧壁振动整体幅值及数据波动均减小。

2) 同一断面道床振动幅值要大于侧壁振动幅值,侧壁在纵向振动幅值传递时呈现先增大后减小的规律。

3) 隧道结构在0~200 Hz中低频域结构动力特征较明显,列车振动的高频成分衰减较快。

4) 土层扰动导致结构多阶特征频率及幅值整体呈现减小的趋势,在第6阶频率中最为明显,最大频率变化量为-2.935 Hz。

参 考 文 献

- [1] BROERE W. Urban underground space: solving the problems of today's cities[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, 55: 245-248.
- [2] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通2020年度统计和分析报告[EB/OL]. (2021-04-09) [2022-01-20]. <http://www.ecrrc.com/news/detail-30-32364.html>.
- [3] FORREST J A, HUNT H E M. Ground vibration generated by trains in underground tunnels[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, 294(4/5): 706-736.
- [4] ZHOU S H, HE C, DI H G, et al. An efficient method for predicting train-induced vibrations from a tunnel in a poroelastic half-space[J]. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2017, 85: 43-56.
- [5] CLOT A, ARCOS R, ROMEU J, et al. Dynamic response of a double-deck circular tunnel embedded in a full-space[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, 59: 146-156.
- [6] ZHU S Y, WANG J W, CAI C B, et al. Development of a vibration attenuation track at low frequencies for urban rail transit[J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2017, 32(9): 713-726.
- [7] 张小会, 张泽宇, 狄宏规, 等. 地铁浮置板轨道过渡段参数对隧道和土体振动的影响[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(1): 67-75.
ZHANG Xiaohui, ZHANG Zeyu, DI Honggui, et al. Effect of floating slab track transition section parameters on dynamic responses of subway tunnel-soil system[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2021, 49(1): 67-75.(in Chinese)
- [8] GARDIEN W, STUIT H G. Modelling of soil vibrations from railway tunnels[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, 267(3): 605-619.
- [9] CAO Z L, GUO T, ZHANG Z Q, et al. Measurement and analysis of vibrations in a residential building constructed on an elevated metro depot[J]. *Measurement*, 2018, 125: 394-405.
- [10] XIA H, ZHANG N, CAO Y M. Experimental study of train-induced vibrations of environments and buildings[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, 280(3/5): 1017-1029.
- [11] QIU J L, QIN Y W, FENG Z H, et al. Safety risks and protection measures for city wall during construction and operation of Xi'an metro[J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2020, 34(2): 04020003.
- [12] 黄强, 万灵, 刘干斌, 等. 软土隧道地铁振动效应现场实测与数值分析[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2021, 51(3): 435-441.
HUANG Qiang, WAN Ling, LIU Ganbin, et al. Field measurement and numerical analysis of train-induced vibration effect on metro tunnel in soft ground[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2021, 51(3): 435-441.(in Chinese)
- [13] YANG W B, LI L G, SHANG Y C, et al. An experimental study of the dynamic response of shield tunnels under long-term train loads[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 79: 67-75.
- [14] DEGRANDE G, SCHEVENELS M, CHATTERJEE P, et al. Vibrations due to a test train at variable speeds in a deep bored tunnel embedded in London clay[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, 293(3/5): 626-644.
- [15] 万灵, 谢雄耀. 短时脉冲激励下隧道振动响应与模态参数识别[J]. *振动、测试与诊断*, 2016, 36(5): 990-997.
WAN Ling, XIE Xiongyao. Dynamic response analysis and modal parameters identification of tunnel structure under the short-time impulse force excitation[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2016, 36(5): 990-997.(in Chinese)
- [16] 李明航, 马蒙, 刘维宁, 等. 地铁列车振动源强离散机理测试分析[J]. *振动、测试与诊断*, 2020, 40(4): 738-744.
LI Minghang, MA Meng, LIU Weining, et al. Analysis mechanism of vibration source dispersion induced by metro trains through in-situ test[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2020, 40(4): 738-744.(in Chinese)
- [17] WAN L, XIE X Y, WANG L J, et al. New damage identification method for operational metro tunnel based on perturbation theory and fuzzy logic[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2022, 26(1): 193-206.



第一作者简介:万灵,女,1986年12月生,博士、讲师。主要研究方向为隧道结构动力损伤识别。曾发表《Cavity location method for operational metro tunnels based on perturbation theory》(《KSCE Journal of Civil Engineering》2021, Vol.25, No.6)等论文。
E-mail: wanlingstar@126.com

通信作者简介:黄强,男,1987年9月生,博士、讲师。主要研究方向为城市轨道交通振动效应。
E-mail: huangqiang@nbu.edu.cn