

快速地下线振动源强特性实测分析

欧阳滔¹ 刘庆杰^{1*} 罗信伟² 冯青松¹

(1. 华东交通大学轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室, 江西 南昌 330013;

2. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 广东 广州 510010)

摘要: 【目的】既有振动源强预测公式只适用于普速地铁, 无法适用于最高时速 160 km 快速地下线振动源强特性。【方法】对某沿海城市市域快线进行多个断面的振动特性进行了现场测试, 通过数据分析研究了车速、隧道埋深、曲线等因素对振动源强的影响。【结果】直(曲)线区段车速在 90 km/h 到 160 km/h 振动源强在 71 dB 至 80 dB 之间, 随着车速的增大振动源强也增大, 速度每增加 20 km/h 振动源强增加 3.72 dB; 振动源强随着隧道埋深的增加而减小, 隧道埋深每增加 10 m, 振动源强会减小 4.9 dB; 相同情况下, 曲线区段(曲线半径 1850 m)的振动源强大于直线区段的振动源强, 值为约 7 dB。列车投入运营 1 年后, 由于轮轨状态的恶化, 振动源强出现增大, 且不同列车之间的差异较大, 选取某一断面七个月份的监测数据分析得到, 运营期稳定后振动源强较为稳定。【结论】本文快速地下线的振动源强影响因素的分析对于今后快速地下线振动源强的预测公式完善有一定的指导作用。

关键词: 快速地下线; 现场测试; 振动源强; 影响因素;

Measured characterisation of vibration source strengths for express underground lines

Ouyang Tao¹ Liu Qingjie^{1*} Luo Xinwei² Feng Qingsong¹

(1. State Key Laboratory of Railway Infrastructure Performance Monitoring and Assurance, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, Jiangxi, China; 2.

Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd, Guangzhou 510010, Guangdong)

Abstract: 【Objectives】 The existing prediction formula of vibration source strength is only applicable to normal-speed subways, and cannot be applied to the vibration source strength characteristics of express underground lines with a maximum speed of 160 km/h. 【Method】 The vibration characteristics of multiple sections of a coastal city urban expressway were tested on site. The influence of vehicle speed, tunnel buried depth, curve and other factors on the vibration source strength was studied through data analysis. 【Results】 The vibration source strength was between 71 dB and 80 dB at the speed of 90 km/h to 160 km/h in the straight (curve) line section. The vibration source strength also increased with the increase of vehicle speed, and the vibration source strength increased by 3.72 dB for every 20 km/h increase in speed. The vibration source strength decreases with the increase of the buried depth of the tunnel. For every 10 m increase in the buried depth of the tunnel, the vibration source strength decreases by 4.9 dB. In the same case, the vibration source strength of the curve section (curve radius 1850 m) is stronger than that of the straight section, and the value is about 7 dB. One year after the train was put into operation, due to the deterioration of the wheel-rail state, the vibration source strength increased, and the difference between different trains was large. The monitoring data of seven months of a certain section were selected and analyzed. The vibration source strength was relatively stable after the operation period was stable. 【 Conclusion】 The analysis of the influencing factors of the vibration source strength of the express underground line in this paper has a certain guiding role in improving the prediction formula of the vibration source strength of the express underground line in the future.

Key words: express underground line; field measurements; vibration source strength; influencing factor

【研究意义】轨道交通以其运量大、速度快、污染小和安全可靠等特点, 成为解决城市通勤问题

的重要手段。目前, 城市轨道交通线路多以地下线为主, 由此产生了环境振动问题, 会影响着周边居

收稿日期: 2023-10-09

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51868024)

民生活、干扰精密仪器使用。国际上已经把振动列为七大环境公害之一^{[1][1]}。近年来,为了满足市域通勤的需求,城际铁路得到快速发展。北京、成都、广州的市域铁路都到达了 160 km/h 的时速。市域铁路以较高的速度在市区穿行,其诱发的环境振动问题引起了人民的关注。振动源强是振动环境预测和影响评价的基础,因此对于快速轨道交通线路振动源强的研究非常重要。

【研究进展】国内外的许多专家学者在振动源强开展了大量研究工作。文献^{[1][2]}对我国北京、上海、广州的部分地铁线路做了大量实测,研究了我国地铁振动源强特性及对环境的影响程度,并给出了不同减振措施的效果分析。文献^{[1][3]}通过对宁波地铁隧道内的试车试验,分析了扣件类型和列车运行速度等因素对振动源强特性的影响,并得到宁波地铁的振动源强为 70.41 dB。文献^{[1][4]}通过对南昌地铁 1 号线隧道内约 200 趟列车的振动响应,从统计角度分析了不同车次列车运行对时域和频域的影响,得到南昌地铁的实测振动源强值为 76.66 dB。文献^{[1][5][1][5]}通过对某地铁线路的同一区间内两个断面进行现场实测,得到振动源强呈现与列车编组相关的周期性且早晚高峰时段振动源强没有显著增大。文献^{[1][6]}通过对某地地铁进行了为期一年的 5 次监测测试,隧道振动响应随列车运营里程的增加而增加,钢轨打磨后振动响应的最大值和平均值分别降低了 8 dB 和 5 dB。文献^{[1][7]}规定的源强测点位置为道床上部近轨外侧 0.5~1.0 m 处。文献^{[1][8]}提出振动源强类比监测测点位置由道床上部近轨外侧 0.5~1.0 m 处调整为隧道壁高于轨顶面 1.25±0.25 m 处。文献^{[1][9]}表明,曲线轨道沿线的水平和垂直振动均大于直线轨道上列车运行引起的相应振动。文献^{[1][13]}分析了随路况变化的车辆振动信号变化规律,如曲线、斜率等。分析结果表明,车辆振动不

仅受车辆自身结构和轨道铺设的地质条件的影响,而且与线路条件密切相关。文献^{[1][14]}在已运营地铁线路不同地质条件的区间隧道和地面布置监测点位,得到振动源强和振动影响实测值,进行对比分析的得出振动源强主频集中在 63 Hz 附近,振动影响水平距离衰减区别不大。文献^{[1][15]}现场实测了某地铁车辆段运用了库道床、柱子和盖板的振动加速度,分析了其振源特性及其传递衰减规律。

【创新特色】目前我国的环境振动模型是基于传统普速地铁的实测数据开发的,无法满足快速地下线振动预测评估的需求。此外,快速地下线的车辆类型、轨道结构形式、隧道断面尺寸等均与普速地铁有较大差异,因此对其振动源强特性展开研究是非常必要的。

【关键问题】现场测试是振动源强的主要获取手段。而针对快速地下线的振动测试数据则较少。课题组以某最高时速 160km/h 的市域快线为研究对象,开展了大量的现场测试工作,测试工况涵盖了不同的速度、曲线半径、埋深和地质条件,本文对这些实测数据进行了深入的分析,揭示了快速地下线的振动源强特征和影响因素。对未来高速地下线的减振降噪声级具有一定的参考价值。

1 测点布置与典型数据分析

本次选择国内某城市开通的市域铁路进行现场测试,选取了 9 个非减振断面进行轨道交通振动源强现场测试。通过对实测数据分析,研究地铁运行时轨道振动的时、频域特征分析影响振动源强的几个关键因素,为以后中国的快速地下线轨道的减振措施的发展提供依据和参考。

1.1 测试断面的选取及测点的布置

本次试验测试共计 9 个普通整体道床断面,不同断面的工况等参数对比见表 1:

表 1 各测试断面工况对比

Tab.1 Comparison of working conditions of each test section

Section serial number	Straight, curved segments (Curve radius/m)	Depth of tunnel/m	Velocity/(km/h)	Geological condition	Whether the line is officially opened during the test
1#	curve (1 850)	27.8	100~160	medium-coarse sand	no
2#	straight line	25.9	90~160	medium-coarse sand	no
3#	straight line	42.6	100~140	migmatitic granite	no
4#	straight line	25.5	80~110	migmatitic granite	no
5#	straight line	23.4	90~120	highly weathered argillaceous siltstone	yes
6#	straight line	25.9	100~160	medium-coarse sand	yes
7#	curve (1 850)	28.5	110~160	medium-coarse sand	yes
8#	curve (1 800)	19.3	90~120	Micro / strongly weathered argillaceous siltstone	yes
9#	straight line	41.6	70~100	migmatitic granite	no

注: 2#断面与 6#断面为同一断面。2#断面测试时间为线路正式开通前、6#断面测试时间为线路正式开通后十个月。

隧道内测点布置图如图 1 所示，每个断面设 3 个测点，分别位于钢轨垂向（测点 1），道床垂向（测点 2）和隧道壁垂向（测点 3），测点 3 位于比轨面高 1.25 m 处的隧道壁。

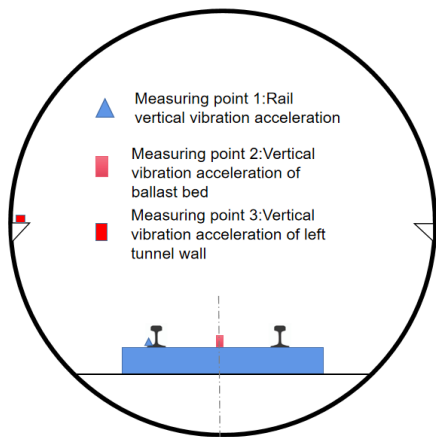
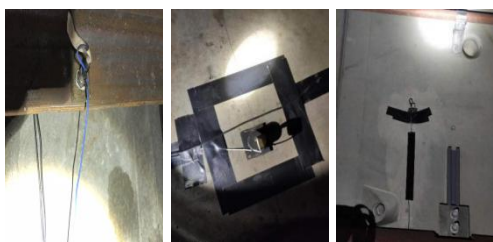


图 1 测点布置示意图

Fig.1 Schematic diagram of measurement point layout



(a) Rail measurement points (b) Track bed measurement points

(c) Tunnel wall measurement points

图 2 现场测试布置图

Fig.2 Field test layout

1.2 测试仪器

测试采用的数据采集仪包括：NI CRIO-9031 数据采集仪，其用于隧道内轨道结构的振动噪声源强测试，并采用触发采样进行监测。

采用的振动传感器包括 PCB-352 加速度传感器、PCB-393 振动加速度传感器。



a) NI-9031 数据采集仪



b)PCB-352C04

c)PCB-393B04

图 3 仪器设备

Fig.3 Instruments and equipment

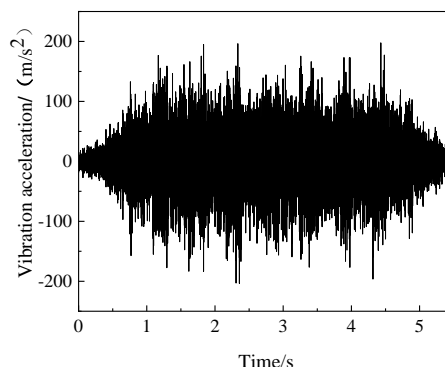
钢轨垂向振动加速度测试，采用 PCB-352C04 加速度传感器；灵敏度系数约为 10 mV/g，频响范围 0.5~10 000 Hz，测试范围±500 g；

道床及隧道壁振动加速度测试采用 PCB-393B04 加速度传感器，灵敏度为 1 000 mV/g，频响范围为 0.06~450 Hz，测试范围±5 g。

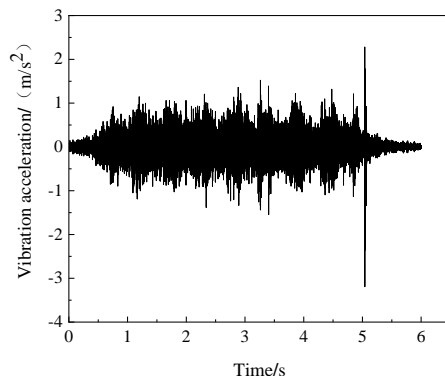
1.3 典型数据分析

选取 2#断面列车经过时速度为 157 km/h 趟次测试数据进行数据分析。

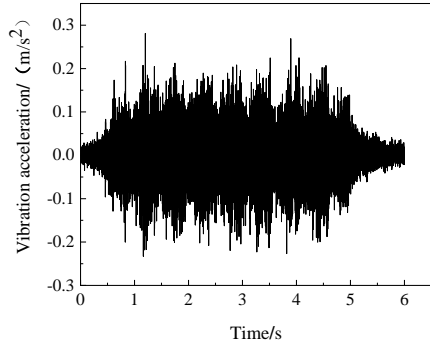
图 4 展示了速度为 157 km/h 的列车经过该断面时钢轨、道床和隧道壁的垂向加速度时程曲线。



(a) The rail is vertical



(b) The track is vertical



(c) The tunnel wall is vertical

图 4 各测点振动加速度时程曲线

Fig.4 Time history curve of vibration acceleration

由图可知钢轨垂向振动加速度峰值为 197.55 m/s²，有效值为 91.17 m/s²；道床垂向振动加速度峰值为 3.16 m/s²，有效值为 0.60 m/s²；隧道壁垂向振动加速度峰值为 0.28 m/s²，有效值为 0.011 m/s²。由数据易知，振动在钢轨-道床-隧道壁这样的传递路径中在不断衰减。

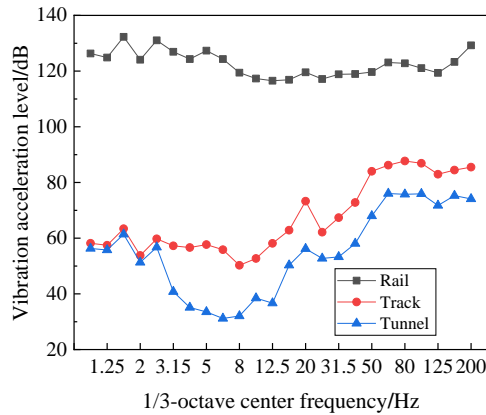


图 5 各测点 1/3 倍频程中心频率图

Fig.5 1/3 octave center frequency diagram of each measurement point

对加速度时程数据进行频谱分析，并转化为以振动加速度级作为纵坐标的 1/3 倍频程谱，如图 5 所示。由图可以看出在 1~200 Hz 范围内钢轨垂向的振动加速度级均在 120 dB 以上；道床垂向和隧道壁垂向振动加速度级在 1~8 Hz 整体呈下降趋势，在 8~63 Hz 呈上升状态，在 63~200 Hz 达到最大之后基本维持稳定。从图上也能明显看出振动加速度级从钢轨垂向到道床垂向到隧道壁垂向是依次减小的。

2 振动源强的影响因素分析

根据《环境影响评价技术导则：城市轨道交通》^{[1].[16]}，地下线源强定义为轨顶面上方 1.25±0.25m 处隧道壁的 Z 振级。

Z 振级是按 ISO2631/1—1997^{[1].[17]}规定的全身振动 Z 计权因子修正后得到的振动加速度级，记为 VL_Z, dB。

$$VL_Z = 10 \lg \left[\sum_{i=1}^{20} 10^{(L_{a,i} - W_i)/10} \right] \quad (1)$$

式中 L_{a,i} 是第 i 个中心频率上所测得的振动加速度级，dB；W_i 是该频率上 Z 方向的计权因子，dB。

2.1 车速对振动源强的影响

为研究速度对于振动源强的影响，排除其他因素的干扰，故选取通过列车速度差异较大的 1#断面，列车速度为 94~155 km/h。其一天中通过列车的速度与振动源强的关系如图 6 所示：

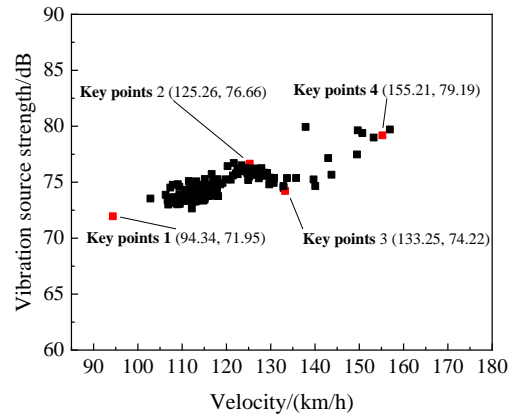


图 6 速度与振动源强关系图

Fig.6 Relationship between velocity and vibration source strength

从图中可以看出随着速度的增加振动源强也随之增加，但在速度超过 125 km/h 后呈现下降趋势，并在 133 km/h 之后继续增大。选取图中四个关键点数据进行分析。

表 2 四个关键点各测点 Z 振级

Tab.2 Z vibration level of each measurement point of the four key points

Key point	Velocity/(km/h)	Z vibration level of each measurement point /dB		
		rail	roadbed	tunnel wall
1	94.34	113.65	78.95	71.95
2	125.26	114.57	84.55	76.66
3	133.25	115.08	83.92	74.22
4	155.21	117.91	84.52	79.19

如表 2 所示，四个关键点速度从 94.34 km/h 提升到 155.21 km/h，钢轨垂向 Z 振级也逐步提升，总体看来就振动源强而言，速度越快，振动源强越大，但在 125~133 km/h 区段，隧道壁 Z 振级基本没有增加。

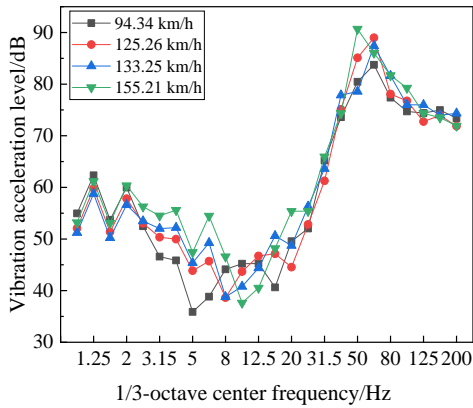


图 7 不同速度的 1/3 倍频图

Fig.7 1/3 octave diagram of different speeds

如图 7 所示为四个不同速度关键点的隧道壁振动加速度级三分之一倍频图。从图中可以看出，隧道壁的振动能量主要集中在 50 Hz 附近，受列车簧下质量与轨道共振频率影响。对于 50 Hz 附近的振动随着车速的增加而逐渐增加，而 1.25 Hz 的振动 125~133 km/h 的幅值要小于其他车速。其可能的原因是，快速线的施工标准高，在某些波长的平顺控制较好引起的。

2.2 地质和埋深的影响

为研究地质对振动源强的影响，选取三个不同地质且均处于直线、埋深在 25 m 左右的断面进行对比分析。图 8 为这三个断面的振动源强对比图。

如图 8 所示，能明显看出在速度相同的情况下，中粗砂断面的振动源强最小，混合花岗岩断面的振动源强居于强风化泥质粉砂岩和中粗砂断面的振动源强之间。

为研究地质与振动源强之间的关系，分别选取以上三个断面速度接近 110 km/h 的数据点进行分析。

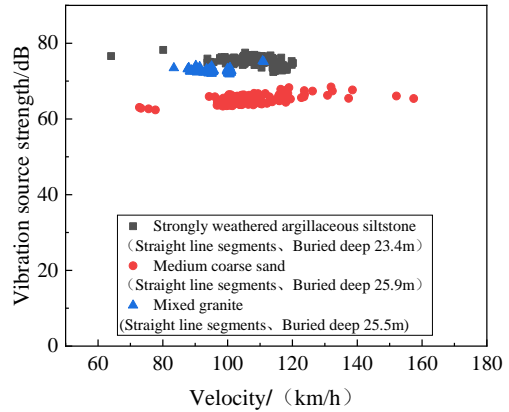


图 8 不同地质振动源强对比图

Fig.8 Comparison of different geological vibration sources

如表 3 所示为三种不同地质相同速度关键点的各测点 Z 振级，可以看出，强风化泥质粉砂岩断面的道床垂向 Z 振级为 75.10 dB,而隧道壁垂向 Z 振级为 75.99 dB,出现了微放大的情况。中粗砂和混合花岗岩地质断面的道床垂向 Z 振级到隧道壁垂向 Z 振级均减小了 10 dB 左右。

表 3 不同地质关键点各测点 Z 振级

Tab.3 Z vibration level of each measurement point at different geological key points

Section serial number	Geological condition	Straight, curved segments	Depth of tunnel (m)	Velocity (km/h)	Z- vibration level of each measurement point (dB)		
					rail	roadbed	tunnel wall
5#	highly weathered argillaceous siltstone	straight line	23.4	109.45	123.12	75.10	75.99
6#	medium-coarse sand	straight line	25.9	109.63	112.95	77.50	65.93
4#	migmatitic granite	straight line	25.5	110.82	116.48	84.71	75.31

图 9 为三种不同地质的隧道壁振级 1/3 倍频程对比图。从图中可以看出在 0~2.5 Hz 以内中粗砂地质和混合花岗岩地质隧道壁振动加速度级低于地质为强风化泥质粉砂岩的隧道壁振动加速度级，在 2.5~25 Hz 之间三种地质的隧道壁振动加速度级的差值均能达到约 15 dB。这是因为在这个频段内中粗砂地质吸收能量能力大于混合花岗岩地质大于强风化泥质粉砂岩。在 31.5~80 Hz 内混合花岗岩地质的隧道壁振级明显高于其他两种地质的隧道壁振级。

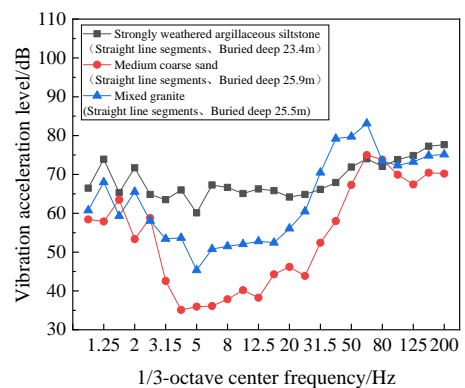


图 9 不同地质隧道壁 1/3 倍频图

Fig.9 1/3 frequency doubling diagram of tunnel wall in different geological conditions

为研究埋深对于振动源强的影响,选取埋深为 25.5 m 和埋深为 42.6 m 且均处于直线段、地质为混合花岗岩的两个断面进行对比分析。图 10 为这两个断面的振动源强对比图。

由图 10 及表 4 可知,4#断面的平均速度比 3#断面的平均速度约小 30 km/h。按照常理速度越大,振动越大,3#断面的振动源强应该大于 4#断面的振动源强。但事实确是 4#断面的振动源强比 3#断面的高约 5 dB,这是因为 3#断面的埋深比 4#断面的埋深大,也说明了在相同情况下埋深越大,振动源强越小。为研究隧道埋深与振动源强之间的联系,分别选取两个断面相同的速度的数据点进行分析。

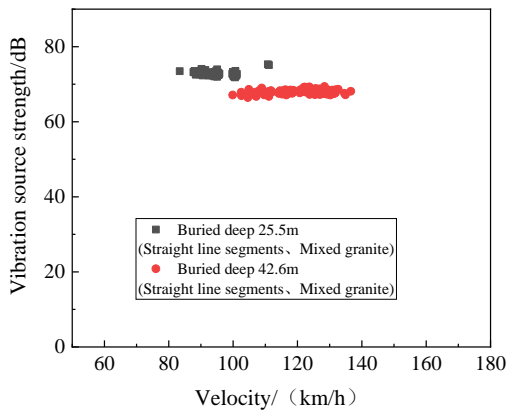


图 10 不同隧道埋深振动源强对比图

Fig.10 Comparison diagram of vibration source intensity of different tunnel buried depth

表 4 不同隧道埋深断面平均速度与振动源强对比
Tab.4 Comparison of average velocity and vibration source intensity of buried depth section of different tunnels

Section serial number	Depth of tunnel (m)	Average speed (km/h)	Vibration source intensity (dB)
4#	25.5	95.18	72.78
3#	42.6	126.67	67.93

如表 5 所示,隧道埋深 25.5 m 和 42.6 m 均选取了速度约 110 km/h 的两个关键点,钢轨垂向 Z 振级相差 2.5 dB 左右,埋深 42.6 m 的钢轨垂向 Z 振级到道床/轨道板垂向 Z 振级衰减比埋深 25.5 m 的多约 10 dB。总体看来,速度相同的情况下埋深 42.6 m 的振动源强小于埋深 25.5 m 的振动源强。

表 5 不同隧道埋深关键点各测点 Z 振级

Tab.5 Z vibration level of each measurement point at the key points of different tunnel burial depths

Section serial number	Depth of tunnel (m)	Velocity (km/h)	Z vibration level of each measurement point (dB)		
			rail	roadbed	tunnel wall
4#	25.5	110.82	116.48	84.71	75.31
3#	42.6	109.69	113.89	72.05	66.95

图 11 为埋深 25.5 m 和 42.6 m 两个断面对隧道壁的 1/3 倍频程对比图。从图中可以看出在 3.15 Hz 以内两个断面隧道壁振动加速度级及没有明显区别。在 3.15~6.3 Hz 埋深 42.6 m 的隧道壁振动加速度级明显大于埋深 25 m 的隧道壁振动加速度级,这说明埋深对振动源强在低频内影响不大,在 6.3~80 Hz 间埋深大的隧道壁振动加速度级均比埋深小的隧道壁振动加速度级小 5~10 dB。埋深 25.5 m 的隧道壁振动主频在 63 Hz,埋深 42.6 m 的隧道壁振动主频在 200 Hz。

综上所述,两种不同埋深的工况在相同速度下,埋深 42.6 m 的振动源强比埋深 25.5 m 振动源强小 8.3 dB 左右。

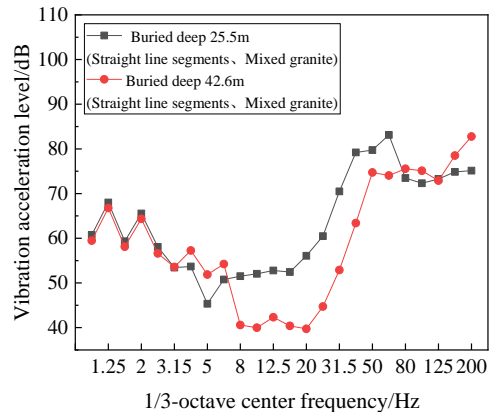
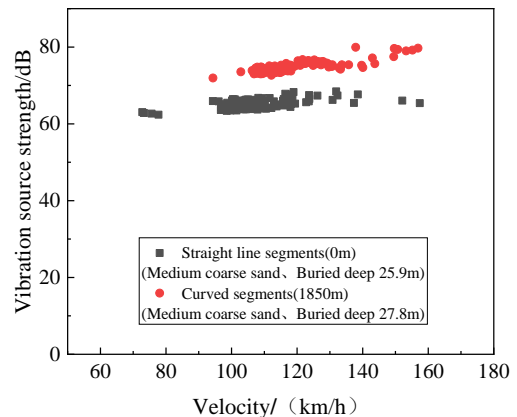


图 11 不同隧道埋深隧道壁 1/3 倍频图

Fig.11 1/3 frequency doubling diagram of tunnel wall with different buried depth of tunnel

2.3 直线与曲线

为研究直线与曲线对于振动源强的影响,选取直线区段和曲线区段(曲线半径为 1850 m)且地质均为中粗砂、埋深在 25 m 左右的两个断面做对比分析。图 12 为这两个断面的振动源强对比图从图中可以看出,相同速度情况下,曲线段的振动源强大于直线段的振动源强。



注: 直线: 2# 断面 曲线: 1# 断面

图 12 直线、曲线区段振动源强对比图

Fig.12 Comparison of linear and curved vibration sources

从表 6 中可以看出，直、曲线两断面选取的两个速度均为 117 km/h 的关键点，钢轨垂向 Z 振级均在 114 dB 左右，直线段的钢轨垂向到道床/轨道板垂向再到隧道壁垂向的 Z 振级衰减均比曲线段的大，

在其他条件相同速度 117 km/h 左右时，曲线段隧道壁 Z 振级比直线段隧道壁高约 7 dB。由此可以得到，在条件相同时曲线段的振动源强高于直线段的振动源强。

表 6 直线、曲线关键点各测点 Z 振级

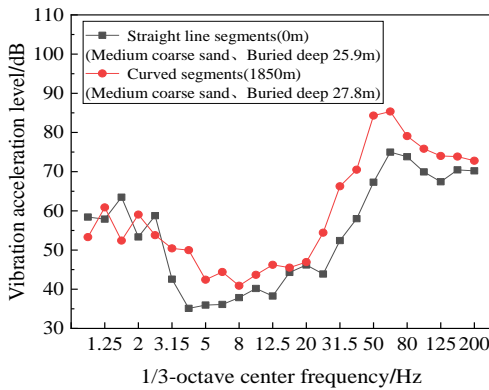
Tab.6 Z vibration level of each measurement point at the key points of straight line and curve

Section serial number	Straight, curved segments (Curve radius (m))	Velocity (km/h)	Z vibration level of each measurement point (dB)		
			rail	roadbed	tunnel wall
2#	straight line (0)	117.59	114.31	78.02	67.21
1#	curve (1850)	117.53	114.63	83.08	74.46

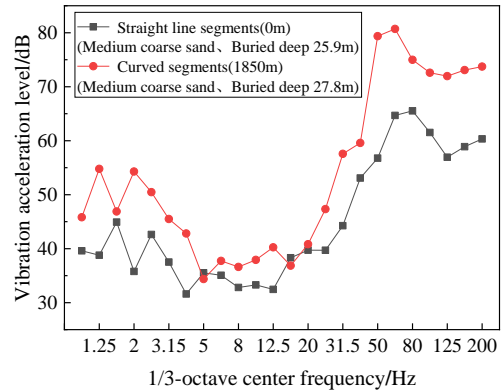
图 13 为直、曲线段隧道壁垂向、横向 1/3 倍频对比图。从图 a 中可以看出垂向 1/3 倍频在 2.5 Hz 以内直、曲线段隧道壁振动加速度级及没有明显区别。在 3.15 Hz 后曲线段的隧道壁振动加速度级明显大于直线段的隧道壁振动加速度级，在 25~160 Hz 间曲线段的隧道壁振动加速度级均比直线段的隧道壁振动加速度级大 5 dB。从图 b 中可以看出隧

道壁横向 1/3 倍频在 4Hz 以内及 63~200Hz 曲线和直线的振动加速度级差值能达到 20dB。由此可以看出在某些频段内，曲线段对于横向振动的影响大于垂向振动的影响。

综上所述，直、曲线速度为 95~140 km/h 时，曲线的振动源强比直线的振动源强高约 7 dB。



(a)垂向



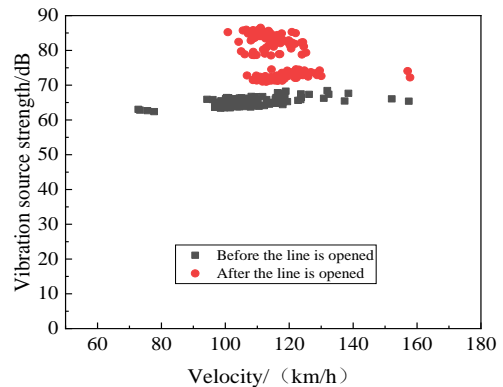
(b)横向

图 13 直、曲线区段隧道壁垂向、横向 1/3 倍频图

Fig.13 1/3 frequency doubling diagram of tunnel wall in straight and curved sections

2.4 运营时间的影响

为研究开通运营对于振动源强的影响选取同一断面线路正式开通运营前后振动源强对比分析，如图 14，从图中可以看出线路开通后的振动源强呈明显分层现象，这可能是由于不同编组的列车导致的，就线路开通后状态最好的一列车编组而言，能看出线路开通后的断面振动源强在同等速度的情况下略大于线路开通前的断面振动源强，这是由于开通运营一段时间后轮轨状态发生变化，不同车辆的振动也产生了较大差异。



注：线路运营开通前：2# 断面；线路运营开通后：6# 断面

图 14 同一断面线路开通前后振动源强对比

Fig.14 Comparison of vibration sources before and after the opening of the same cross-sectional line

图 15 为同一断面在线路开通前后的隧道壁 1/3 倍频程对比图。从图中可以看出在 2.5 Hz 之后在工况为线路开通后的隧道壁振动加速度级明显大于工况为线路开通前的隧道壁振动加速度级，在 3.15~25 Hz 之间线路开通前后的隧道壁振动加速度级差值能达到 25 dB 左右。这也说明了线路正式开通前后由于荷载及钢轨状态原因，振动源强还是有所区别的。

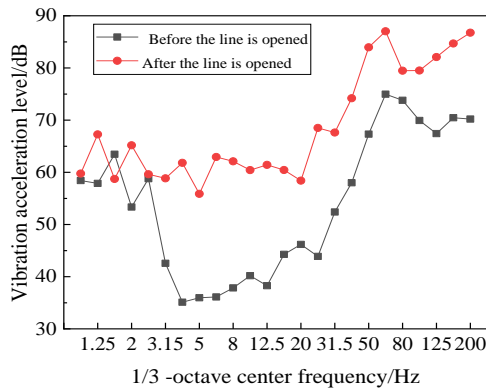


图 15 隧道壁 1/3 倍频图

Fig.15 Tunnel wall 1/3 octave diagram

在线路投入运营 6 个月后将某段面开展实时监测，段面每天通过的列车引起的振动如图 16，从图中能看出振动源强均值随运营时间变化不大，基本维持在 70~73 dB 之间，这也说明了运营期稳定后振动源强与运营时间关联较小。

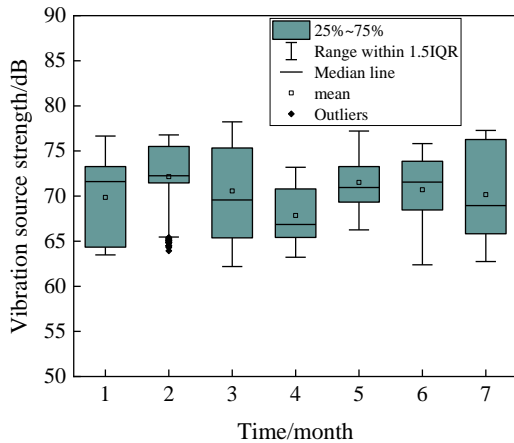


图 16 振动源强与月份关系图

Fig.16 Relationship between vibration source intensity and month

3 结论

本文就快速地下线的振动源强选取九个普通整体道床断面以现场实测的方法对数据进行处理分析得到车速，地质、埋深，直、曲线,运营时间等因素对振动源强的影响。得到以下结论：

1) 振动源强值随着速度的增加而增加，但两

者不是简单的线性关系。

2) 随着埋深的增加振动源强减小，埋深每增加 10 m,振动源强会减小 4.9 dB。

3) 在车速，地质、埋深等相同的条件下曲线段的振动源强比直线段的振动源强平均高 7 dB。

4) 线路正式开通运营一段时间后达到稳定期，振动源强基本维持在定值。

目前，振动源强的预测公式主要针对普速地下线，本文快速地下线的振动源强影响因素的分析对于今后快速地下线振动源强的预测公式完善有一定的指导作用。

参考文献

- [1] 闫维明, 聂晗, 任珉等. 地铁交通引起的环境振动的实测与分析[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(4):187-191. Yan Weiming, Nie Han, Ren Min et al. In situ experiment and analysis of environmental vibration induced by urban subway transit[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2006, 26(4): 187-191.
- [2] 辜小安, 任京芳, 刘扬等. 我国地铁环境振动现状及控制措施[J]. 铁道劳动安全卫生与环保, 2003, 30(5):206-209. Gu Xiaohan, Ren Jingfang, Liu Yang, etc. The Status Quo of Environment Vibration Level and Control Measures of Subway in China[J]. Railway labor safety and health and environmental protection, 2003, 30(5): 206-209.
- [3] 何卫, 谢伟平, 刘立胜. 地铁隧道列车振动特性试验研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2016, (4):85-89. He Wei, Xie Weiping, Liu Lisheng. Experimental investigation of vibrations induced by subway train loading in tunnel[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2016, (4): 85-89.
- [4] 张凌, 雷晓燕, 刘全民等. 地铁环境振动源强测试与评价标准分析[J]. 振动. 测试与诊断, 2020, 40(1):89-94. Zhang Ling, Lei Xiaoyan, Liu Quan, etc. Measurement and Evaluation of Environmental Vibration Source Strength of the Subway[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2020, 40(1): 89-94.
- [5] 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.
- [6] Ma M, Li M, Qu X, et al. Effect of passing metro trains on uncertainty of vibration source intensity: Monitoring tests[J]. Measurement, 2022, 193: 110992.
- [7] 环境保护部 HJ 453-2008 环境影响评价技术导则 城市轨道交通[S]. 北京: 2008.
- [8] 董志勇, 卢力, 刘鹏辉等. 城市轨道交通环评导则修订前后地下线振动预测分析[J]. 环境影响评价, 2019, 41(04):50-54.

- Dong Zhiyong, Lu Li, Liu Penghui, etc. Comparison and Analysis of Underground Line Vibration Prediction before and after Revision of Technical Guidelines for Environmental Impact Assessment [J]. Environmental Impact Assessment, 2019, 41 (04) : 50-54.
- [9] Huang S, Chen Y, Zou C, et al. Train-induced environmental vibrations by considering different building foundations along curved track[J]. Transportation Geotechnics, 2022, 35: 100785.
- [10] 杜林林,刘维宁,刘卫丰等.曲线轨道钢轨横向振动频域响应特性研究[J].铁道学报,2021,43(06):95-103.
Du Linlin, Liu Weining, Liu Weifeng, etc. Study on Lateral Dynamic Response of Curved Track in Frequency Domain[J]. Journal of The China Railway Society, 2021, 43 (06) : 95-103.
- [11] 张琪. 曲线地段地铁振动源强特性及其对邻近建筑物影响分析[D].北京交通大学,2022.
Zhang Qi. Characteristics of Vibration Sources of Metro in Curved Track and its Influence on Adjacent Buildings[D]. Beijing Jiaotong University, 2022.
- [12] 刘维宁,杜林林,刘卫丰.地铁列车曲线运行振动源强特性分析[J].铁道学报,2019,41(07):26-33.
Liu Weining, Du Linlin, Liu Weifeng. Study on Characteristics of Vibration Sources of Metro Trains Running in a Curved Track[J]. Journal of The China Railway Society, 2019, 41 (07) : 26-33.
- [13] Zhang H C, Zhang X D, Cao G Z. Research on Metro Vehicle Vibration with regard to Route Conditions[J]. Advanced Materials Research, 2010, 139: 2295-2298.
- [14] 杨忠平,蒋忙舟,张瑞浩等.不同地质条件下地铁振动源强及影响实测与分析[J].铁道标准设计,2023,67(09):190-194.
Yang Zhongping, Jiang Mangzhou, Zhang Ruihao and so on. Measurement and Analysis of Vibration Source Strength and Influence of the Subway under Different Geological Conditions[J]. Railway Standard Design, 2023, 67 (09) : 190-194.
- [15] 贺利工,刘文武,罗信伟等.双层车辆段运用库环境振动特性实测分析[J].华东交通大学学报,2023,40(03):33-39.
He Ligong, Liu Wenwu, Luo Xinwei, etc. Measurement and Analysis of Environmental Vibration Characteristics of Operation Zone for Double Deck Depot[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2023, 40 (03) : 33-39.
- [16] 生态环境部.环境影响评价技术导则 城市轨道交通: HJ453—2018[S].北京: 中国环境出版社, 2019.
- [17] International Organization for Standardization. ISO2631-1 vibration and shock evaluation of human exposure to whole-body vibration, part1: General requirements[S]. Geneva: [s. n.],1997.



第一作者: 欧阳滔 (1995—), 男, 硕士, 研究方向为铁路环境振动与噪声。

E-mail: 2947735114@qq.com。



通信作者: 刘庆杰 (1982—), 男, 副教授, 博士, 硕士生导师。主要研究方向: 轨道结构动力学、结构健康监测、铁路环境振动与噪声。

E-mail: liuqingjie06@163.com。

