

地铁环境振动源强测试与评价标准分析*

张 凌, 雷晓燕, 刘全民, 冯青松

(华东交通大学铁路环境振动与噪声教育部工程研究中心 南昌, 330013)

摘要 实测南昌地铁 1 号线隧道内约 200 趟列车通过邻近非减振与减振断面的振动响应。基于不同振动评价标准,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、测点位于隧道壁不同高度对振动源强值及钢弹簧浮置板减振量评价的影响。分析结果表明:钢弹簧浮置板隧道壁上的减振效果明显,但浮置板本身的振动响应大幅增加。不同车次对各测点低频段及隧道壁高测点影响较大,但对 Z 振级影响较小。振动在隧道壁上低频段有所放大。由隧道壁低测点测得的最大 Z 振级最适合评价地铁源强值,南昌地铁实测源强值为 76.66 dB。不同高度测点及不同评价标准对浮置板减振量评价有较大影响,建议采用低测点最大 Z 振级评价浮置板减振量。

关键词 地铁隧道; 振动; 源强; 浮置板; 统计分析

中图分类号 TH113; U211

引 言

随着我国城市化进程的推进,轨道交通作为城市交通系统的重点近年来发展迅猛。目前,城市轨道交通线路多以地下铺设为主,由此产生了环境振动问题,因而地铁列车振源特性作为预测振动影响和研究振动传播规律的基础备受关注。目前,获得振源特性的重要手段之一即为现场测试,这方面已取得了大量的研究成果^[1-5]。文献[1]对我国北京、上海和广州的既有地铁线路做了大量测试,研究了我国地铁振动振源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[2]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源振动特性的影响,并得到宁波地铁的振动源强为 70.41 dB。文献[3]通过对北京地铁一天 200 多趟列车的振级进行频次统计分析,得到在地铁环境振动预测中选择隧道壁作为源强有助于提高环境振动预测精度。文献[4]对北京某号线地铁隧道进行测试,分析了各种减振措施在不同频率范围内的减振效果差异。以上文献在分析地铁振动特性时采用不同的振动标准,也较少注明振源测试点在隧道壁的具体位置。文献[6]规定测点位于隧道边墙上,紧靠列车将要通过的轨道,距轨面 1.2m 处。文献[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[8]规定了针对北京地区源强的测点在近侧隧道壁上且垂直于地面的切点处,若隧道无切点,位置选择在距离道床上方 1.9m 处,这是一个地方标准。文献[9]规定测点位置设置在本线侧隧道边墙距离根部 1.0m 高处。可见,各标准对源强测点位置要求不统一,甚至没有明确规定。

笔者对南昌地铁 1 号线某测点隧道内整体道床和浮置板道床断面进行现场测试,通过对实际运行的约 200 趟车经过这两个测试断面时,轨道板中心、隧道壁低测点及高测点共 6 个测点数据进行统计,分析了地铁列车荷载在隧道内的振动传播规律,研究了测点位于隧道壁不同高度、不同评价标准对振源测试结果的影响,得到南昌地铁实测源强值。同时,分析了测点高度及评价标准对钢弹簧浮置板减振效果评价的影响。

1 测点选择及测试仪器

测点选择南昌地铁 1 号线典型路段的两个断面进行,即钢弹簧浮置板断面和混凝土整体道床断面两断面相距 20 m。每个测试断面布置 3 个测点,分别为道床中心点、隧道壁高出轨面 0.5 m 点和 1.25 m 点。隧道类型为单洞圆形,测点布置如图 1 所示。加速度传感器量程为 $\pm 490 \text{ m/s}^2$,频响范围为 0.5~

* 国家自然科学基金资助项目(51478184,51368020);江西省教育厅科学技术资助项目(GJJ160480)
收稿日期:2018-07-06;修回日期:2018-08-18

3 000 Hz,采样频率为 2 500 Hz。每个断面连续测试约 200 趟车,采用自动触发采样,每次测试时长为 2min,总测试时长为 1 d。南昌地铁测试车辆为 B 型车,6 节编组,单向每小时最大载客量为 3.0~5.5 万人次,设计最高时速为 80 km/h。测试列车通过两断面的车速均在 70 km/h 左右。

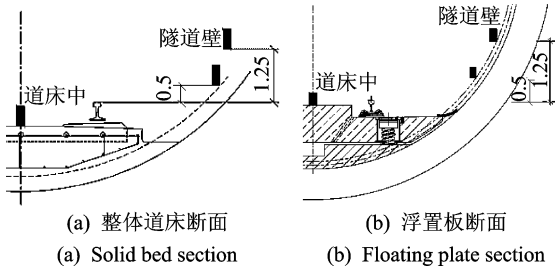


图 1 两测试断面测点布置示意图(单位:m)

Fig. 1 Two layout of measuring points of test section (unit: m)

2 测试结果与分析

2.1 源强数据时域分析

图 2 为某一趟车经过两个测试断面时各点实测加速度时程曲线。从时程图可清晰看出各轮对经过时的冲击效应,峰值成对出现,整体道床隧道壁高测点轮对冲击效应不明显。同一个断面的加速度最大峰值从低测点到高测点依次降低;浮置板断面在隧道壁上看到了浮置板明显的减振效应,且在低测点

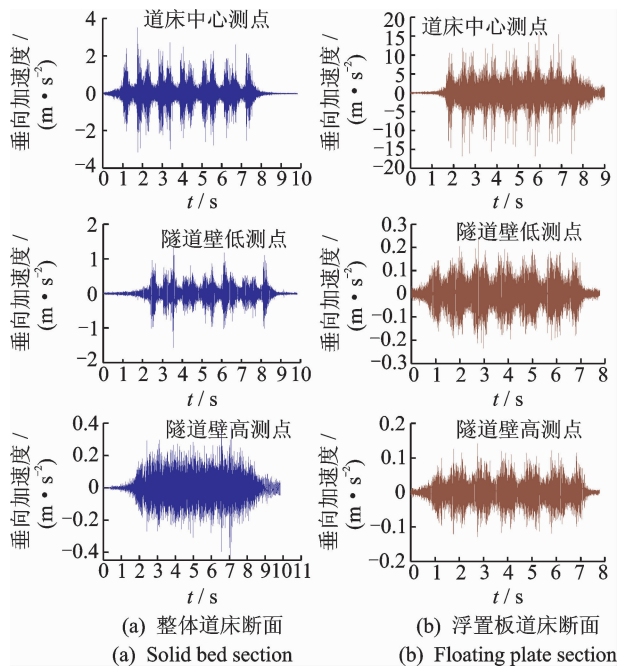


图 2 两个测试断面振动加速度时程曲线

Fig. 2 Vibration acceleration time history curve of two test sections

上观察到的减振效果更明显。对 200 趟列车经过时各测点的加速度峰值进行统计分析,各测点的加速度峰值样本均值和标准差如表 1 所示。

表 1 200 趟车振动加速度峰值统计

Tab. 1 Vibration acceleration statistics of 200 trains

		(m/s ²)	
位置	项目	整体道床	浮置板道床
道床中	均值	3.647	17.874
心测点	标准差	0.563	2.263
隧道壁	均值	1.252	0.249
低测点	标准差	0.194	0.065
隧道壁	均值	0.377	0.147
高测点	标准差	0.056	0.014

从时域统计可知,尽管测试数据有 200 趟,测试加速度峰值标准差都较小,这说明测试数据较稳定。由表 1 可见,对比隧道壁上高低两个测点,在隧道壁低测点处浮置板的减振效果更明显,平均加速度峰值差为 1.003 m/s²,峰值减小量达到 80.1%;高测点的平均峰值差为 0.230 m/s²,峰值减小量为 61.0%;但浮置板道床平均加速度峰值比整体道床增大很多,峰值差为 -14.227 m/s²,振动加速度峰值反而增大 390.1%。同一断面隧道壁高低两个测点只相差 0.75 m,加速度峰值均值有明显差别,其中整体道床断面相差更明显,差值达 0.875 m/s²。

对 6 个测点、200 趟车数据做频数分析,加速度峰值频数图用高斯概率密度曲线进行拟合,如图 3 所示。高斯概率密度函数表达式为

$$y = y_0 + Ae^{-\frac{(x-x_c)^2}{2\omega^2}} \quad (1)$$

其中: $A = 1/\omega\sqrt{2\pi}$; x_c 为均值; ω 为标准差。

从图 3 可以看出,浮置板断面隧道壁低测点围绕均值 0.249 m/s² 的数据最为集中,离散数据较少。相比浮置板,整体道床数据离散性略大。由表 1 和图 3 可知,尽管 200 趟车的车速不同,一天客运量也不同,加速度均值受干扰因素较多,但数值都集中在均值附近,与拟合的高斯分布曲线较吻合,证明通过 200 趟车测得的加速度已能够得到测点的统计特性。

2.2 源强数据频域分析

图 4 为 200 趟车经过两个断面时,6 个测点振动加速度 1/3 倍频程频谱图。图 5 为此 6 个测点振动加速 1/3 倍频程频谱均值图。由图 4,5 可以看到:

1) 200 趟车的各测点分频加速度级有不同程度的上下波动,但各分频加速度级的峰值频率与趋势大体是一致的。6 个测点均在 80 Hz 附近出现明显峰值,这证明隧道内在 80 Hz 左右振动能量较大,

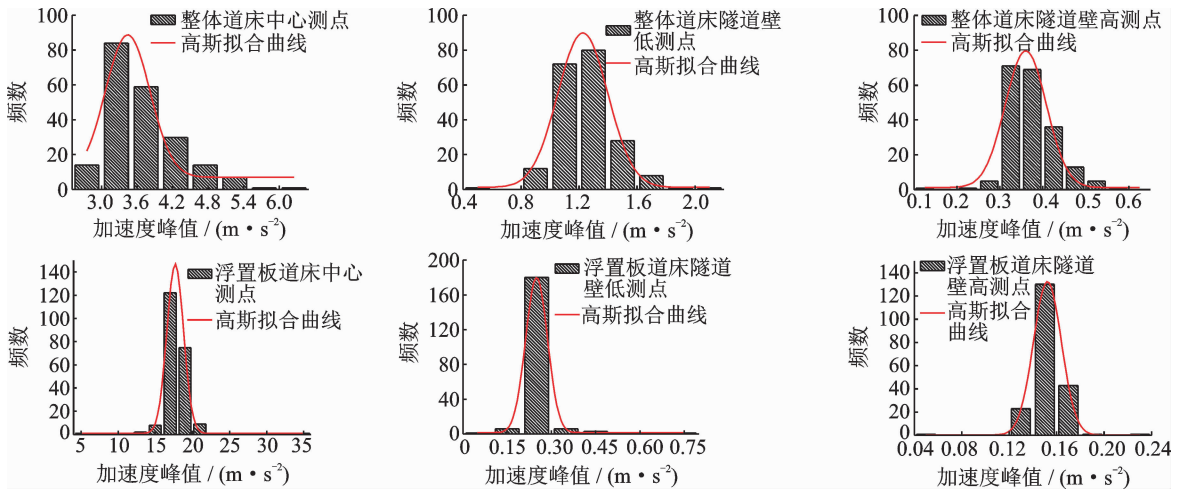


图 3 两个断面振动加速度峰值频数统计图

Fig. 3 The peak vibration acceleration frequency counts of two sections

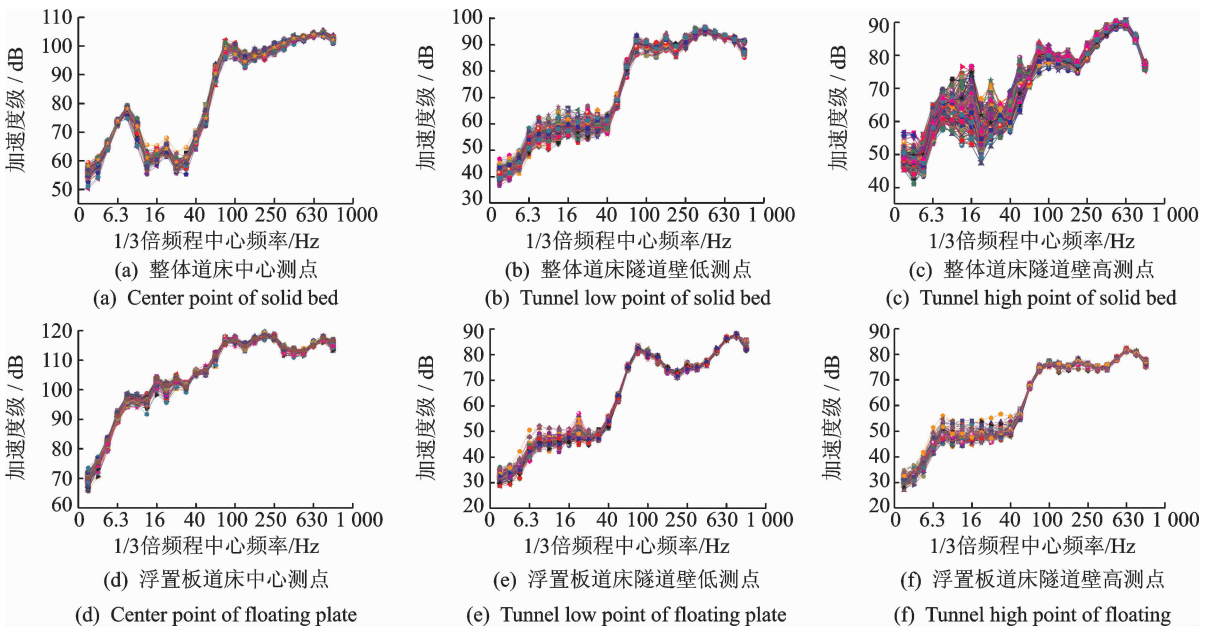


图 4 200 趟车经过两个断面振动加速度 1/3 倍频程频谱图

Fig. 4 The Frequency spectrum of vibration acceleration 1/3 octave of 200 trains passing through two sections

这主要是由轮轨随机不平顺等引起的轮轨相互耦合作用所致。每趟车的车速和载重量不同,但都出现相同规律,即不论是普通整体道床还是浮置板道床,振动传至道床中心时,各中心频率加速度级离散性较小;但振动传至隧道壁测点后,低频部分离散性逐渐增大。隧道壁测点越高,低频部分离散性越大,但高频部分离散性较小。

2) 图 5(b)为浮置板断面 200 趟车的频谱均值图,浮置板轨道使得隧道壁上测得的振动大幅减小,但比较图 5(a), (b)证实浮置板中心测点全频段振动都明显大于整体道床中心测点。以 80 Hz 中心频率对应的振动加速度级(vibration acceleration level,简称 VAL)为例,隧道壁低测点 VAL 浮置板插入损失为 8.2 dB,高测点 VAL 浮置板插入损失为

5.7 dB,但浮置板中心加速度级相较于整体道床中心增大 17.6 dB。由此在考虑减振装置减小环境振动的同时要均衡考虑对车体振动增加的影响。

文中讨论的插入损失值即为有隔振措施与无隔振措施对比之下的在隧道壁上所测振级之差。本次测试两个断面相距只有 20 m,可近似认为除减振措施外,其他条件都相同,故以插入损失来讨论减振措施的减振量。为了定量讨论 200 趟不同车次对 6 个测点频谱的影响、分析各频段测试结果的离散性,做出样本各中心频率的均值及标准差,由式(2)得到两个断面、6 个测点各中心频率振级的变异系数(coefficient of variation,简称 CV)。图 6 为各测点频谱变异系数图。变异系数越大,数据的离散性越大。

$$CV = (S/\bar{X}) \times 100\% \quad (2)$$

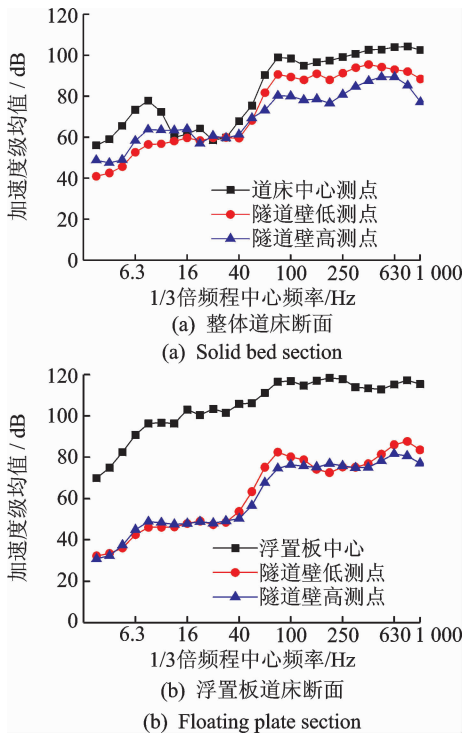


图5 6个测点振动加速度1/3倍频程频谱均值图

Fig. 5 The Frequency spectrum mean value of vibration acceleration 1/3 octave of 6 test points

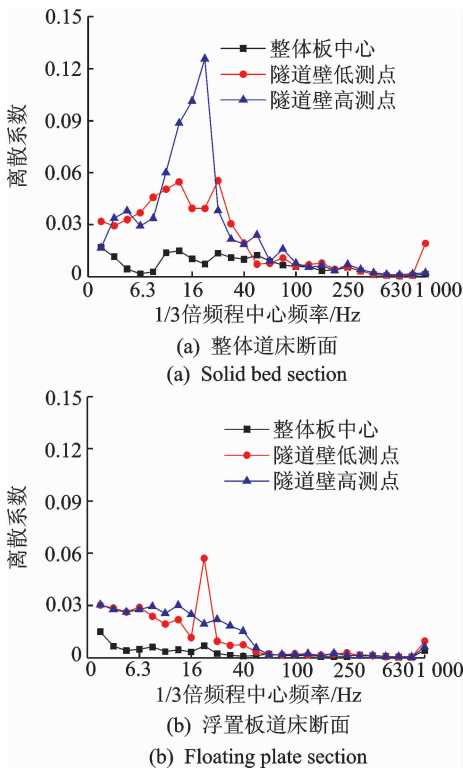


图6 200趟车经过各测点频谱变异系数图

Fig. 6 Spectrum coefficient of variation diagram of 200 train passing through each measuring point

其中： S 为样本标准差； \bar{X} 为样本均值。

由图6可见,1/3倍频程频谱分析时,不同车次对频谱的影响为:

1) 在两个断面振动各中心频率加速度级都是在小于63Hz的低频段离散性较大,在高频阶段变异系数趋近于0,说明对不同车次小于63Hz的低频段测试数据影响很大,对高频段几乎无影响。

2) 从数值上看,整体道床断面隧道壁上的变异系数要远大于浮置板,这说明不同车次对整体道床隧道壁振动测试数据影响比浮置板大。振动从振源由下向上传递时,样本的低频段测试结果离散性增大。这说明不同车次对高测点的影响比低测点大。整体道床隧道壁测试是分析振源及各类减振装置的减振效果的基础,振源测点位置应选择离散性较小的低测点。

2.3 源强及浮置板减振效果评价标准分析

人体在不同振动方向对不同频率敏感程度不同,国内外振动标准^[7-13]大都采用垂向计权振动加速度级(Z 振级)作为评价量,即采用 W_k 计权因子^[13]进行 Z 计权。振源测试的4部标准中^[6-9],有3部标准均要求对隧道壁源强振级进行 Z 计权,但评价的 Z 振级有所不同,主要有3类:最大 Z 振级(VL_{zmax})、分频最大 Z 振级(分频 VL_{zmax})和平均 Z 振级(VL_z)。文献^[7-8]作为环境振动影响预测计算模型的源强,取的是列车通过普通整体道床的最大 Z 振级。文献^[9]对浮置板进行减振评价时,采用的是分频最大 Z 振级。笔者通过对两个断面隧道壁上4个测点200趟车数据进行统计,分析不同高度测点对源强值及浮置板减振效果评价的影响。图7为200趟车4个隧道壁测点1/3倍频程频谱 Z 振级均值图。由图7可以看到:

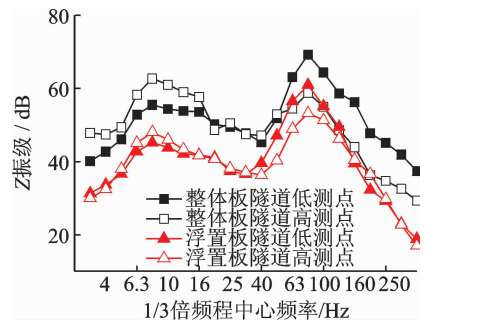


图7 4个隧道壁测点1/3倍频程分频Z振级均值图

Fig. 7 Mean value of 1/3 octave band Z vibration level of four tunnel wall test points

1) 对于相距0.75m的高低两个测点,整体道床断面测点各频段 Z 振级差别比浮置板断面差别大,以80Hz峰值中心频率对应的 Z 振级为例,整体道床隧道壁低测点比高测点大9.88dB,浮置板隧道壁低测点比高测点大6.82dB。

2) 从减振效果来看,不论是隧道壁高测点还是

低测点,浮置板在频率范围内都有较好的减振效果。

3) 两个断面的高低测点都出现了相近规律,即以 25~31.5 Hz 为界,在高频段低测点各频段分频 Z 振级都向高测点出现衰减;但在低于这个界限的低频段,两个断面高低测点的分频 Z 振级都出现了交替,大多数频段都是低测点 Z 振级低于高测点。这说明仅在隧道内部,振动传递过程中高频部分就出现了较快的衰减,但低频部分的振动大部分频段有增大现象。低频振动在隧道壁上振动放大的现象在文献[14]中也观察到。

为了比较不同标准 Z 振级及不同测试高度对源强测试结果及浮置板减振效果评价的影响,将 4 个测点 200 趟车统计出来的最大 Z 振级、分频最大 Z 振级和平均 Z 振级的均值及标准差如表 2 所示。对 200 趟车的数据做频数分析,拟合出高斯概率密度曲线并做三维瀑布图分析隧道壁上各测点 3 种 Z 振级离散性,如图 8 所示。由表 2 和图 8 可知:

表 2 两个断面隧道壁测点 Z 振级统计

Tab. 2 Z vibration level statistics of tunnel wall at two sections

位置	项目	分频最大 Z 振级	平均 Z 振级	最大 Z 振级
整体道床隧	均值	69.33	72.33	76.66
道壁低测点	标准差	1.05	0.72	0.79
整体道床隧	均值	62.88	68.89	70.38
道壁高测点	标准差	3.09	2.58	1.98
浮置板道床	均值	60.98	63.64	66.48
隧道壁低测点	标准差	0.44	0.30	0.35
浮置板道床	均值	53.24	58.46	60.81
隧道壁高测点	标准差	0.57	0.46	0.46

1) 尽管 200 趟车车速有所不同,一天之内不同时段乘客数量不同,除去整体道床隧道壁高测点,其余各测点的标准差都较小,这说明不同车次对振源的 Z 振级影响不大。由图 7 得到高测点的低频部分振动有所放大的现象,对图 8 源强 Z 振级影响不大,两个断面都是低测点 Z 振级大于高测点,符合振动传递规律。

2) 从离散性的角度来看,整体道床隧道壁上高测点的 3 种 Z 振级离散性都是最大的。测试源强 Z 振级是由普通整体道床隧道壁上测得。地铁开通后对地铁源强进行现场测试,无法确保地铁列车以同一速度和同一载重量运行,在测试车次有限的基础上,建议选离散性小的隧道壁低测点的进行源强测试。由图 8 可知,隧道 4 个测点都出现了一致规律,即最大 Z 振级 > 平均 Z 振级 > 分频最大 Z 振级,可见,以最大 Z 振级评价地铁隧道内振源的振动量是最严格的。从各点 3 种 Z 振级的离散性来

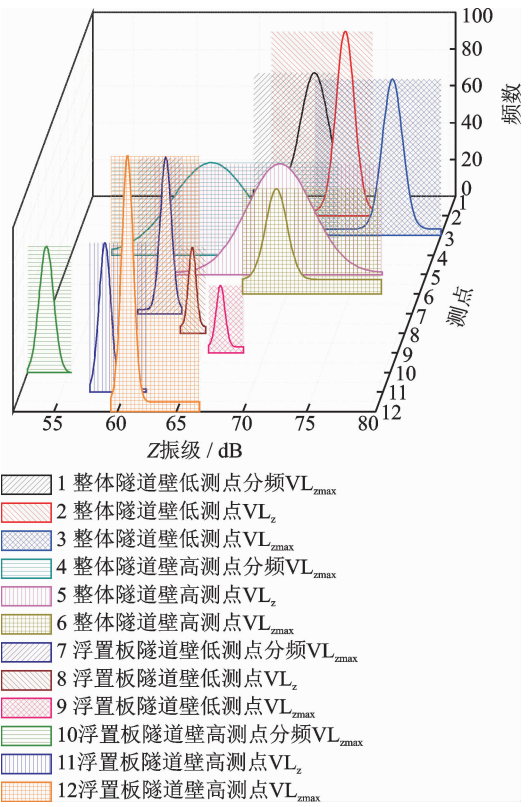


图 8 200 趟车经过 4 个测点的 3 种 Z 振级分布
Fig. 8 Three types of Z vibration level distribution diagram of 200 trains passing through four test points

看,分频最大 Z 振级的离散性最大,平均 Z 振级和最大 Z 振级离散性接近,所以建议以最大 Z 振级来评价源强值。两个断面不同高度测点传递损失很大,整体道床断面高低测点虽然只相差 0.7 m,但最大 Z 振级传递损失达 6.28 dB,所以在评价地铁列车振动源强值时一定要标明测点位置。以普通整体道床单洞圆形隧道壁距轨道垂直距离 0.5 m 低测点计得南昌地铁 1 号线源强为 76.7 dB。

3) 本次测试断面为浮置板过渡段的两侧,相距较近,可以近似讨论浮置板的插入损失。将高、低测点 3 种 Z 振级的均值做近似插入损失,如表 3 所示。可见,评价浮置板减振效果时,不同高度测点对插入损失影响较大,最大 Z 振级高低测点插入损失差别最小,从离散性及高低测点的插入损失差别来看,以低测点最大 Z 振级来评价浮置板的减振效果较合理。南昌地铁钢弹簧浮置板插入损失为 10.18 dB。文献[7]中 Z 振级 VL_z 基本预测计算式中钢弹簧浮

表 3 高低测点浮置板近似插入损失

Tab. 3 Approximate insertion loss of floating plate at high and low test points

位置	分频最大 Z 振级	平均 Z 振级	最大 Z 振级
隧道壁低测点	8.35	8.7	10.18
隧道壁高测点	9.64	10.43	9.57

置板式道床轨道结构修正项为 $-20\sim-30$ dB,对于本测试工况来说偏大,用文献[7]中的环境振动影响预测计算公式预测地面振动会偏低。

3 结 论

1) 钢弹簧浮置板对隧道壁有明显的减振效果,但不论从时域还是频域角度,浮置板本身的振动量都大幅增加。这对列车的运行将会造成不利影响,在考虑减振装置减小环境振动的同时,要均衡考虑对车体振动的影响。

2) 200 趟不同车次的 $1/3$ 倍频程频谱中,在低于 63Hz 的低频段加速度级离散性较大。整体道床测试数据的离散性要大于浮置板,测点越高,离散性越大。振源测试建议取整体道床低测点。

3) 不同频段振动在隧道壁中的传递损失不同,在高于 31.5Hz 的高频段,振动有明显地降低,在低于 31.5Hz 的低频段,振动有所放大。可见,低频振动在传递过程中放大的现象在隧道壁上也有所体现。

4) 从统计角度分析,隧道壁低测点最大 Z 振级在 3 种 Z 振级中最严格,且离散性较小,在讨论地铁隧道源强时,选择普通整体道床隧道壁低测点最大 Z 振级比较合适,南昌地铁源强值为 76.66dB 。

5) 评价浮置板减振效果时以近似插入损失来讨论,最大 Z 振级评价减振量受测点位置的影响较小,南昌地铁隧道内钢弹簧浮置板的减振效果以低测点最大 Z 振级来评价,减振量为 10.18dB 。文献[7]中环境振动影响预测计算公式中钢弹簧浮置板修正系数偏大。

参 考 文 献

[1] 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):206-210.
GU Xiaolan, REN Jingfang, LIU Yang, et al. The status quo of environment vibration level and control measures of subway in China [J]. Railway Occupational Safety Health & Environmental Protection, 2003, 30(5):206-210. (in Chinese)

[2] 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),2016,44(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, 44(4):85-89. (in Chinese)

[3] 李宪同,张斌,户文成,等.北京地铁环境振动预测中源强选取的研究[J].城市轨道交通,2012(8):80-83.
LI Xiantong, ZHANG Bin, HU Wencheng, et al. Selection of vibration source position in environment vibration forecast of Beijing metro [J]. Urban Mass Transit, 2012(8):80-83. (in Chinese)

[4] 刘鹏辉,杨宜谦,尹京.地铁隧道内不同轨道结构振动测试与分析[J].振动与冲击,2014,33(2):31-36.
LIU Penghui, YANG Yiqian, YIN Jing. Test and analysis on vibration of different track structures in tunnel [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(2):31-36. (in Chinese)

[5] 吴永芳.轨道减振效果系统评价方法研究[J].中国铁道科学,2013,34(3):1-6.
WU Yongfang. Study on systematic evaluation method of track vibration reduction effect [J]. China Railway Science, 2013, 34(3):1-6. (in Chinese)

[6] GB/T 19846—2005/ISO 10815:1996 机械振动列车通过时引起铁路隧道内部振动的测量[S].北京:中国标准出版社,2005.

[7] HJ 453—2008 环境影响评价技术导则 城市轨道交通[S].北京:环境保护部,2008.

[8] DB11/T 838—2011 地铁噪声与振动控制规范[S].北京:北京市质量技术监督局,2011.

[9] QGD—001—2009 城市轨道交通弹簧浮置板轨道技术标[S].北京:北京市轨道交通建设管理有限公司,2009.

[10] GB 10070—1988 城市区域环境振动标准[S].北京:中国标准出版社,1988.

[11] JGJ/T 170-2009 城市轨道交通引起建筑物振动与二次辐射噪声限值及其测量方法标准[S].北京:中华人民共和国住房和城乡建设部,2009.

[12] ISO 2631—2:2003 Mechanical vibration and shock- evaluation of human exposure to whole-body vibrations-part 2: vibration in buildings [S]. Switzerland: International Organization for Standardization, 2003.

[13] ISO 2631—1:1997 Mechanical vibration and shock- evaluation of human exposure to whole-body vibrations-part 1: general requirements [S]. Switzerland: International Organization for Standardization, 1997.



第一作者简介:张凌,女,1978年4月生,博士。主要研究方向为铁路环境振动与噪声控制。曾发表《高铁综合交通枢纽车站结构振动传播的测试分析》(《中国科学(技术科学)》2019年第49卷第9期)等论文。

E-mail: 19114729@qq.com

通信作者简介:雷晓燕,男,1957年8月生,博士,教授。主要研究方向为轨道交通环境振动与噪声。

E-mail: xiaoyanlei2013@163.com