

钢弹簧浮置板轨道减振性能现场对比测试*

李明航¹, 吴宗臻¹, 马蒙², 王文斌¹, 张胜龙¹

(1. 中国铁道科学研究院集团有限公司城市轨道交通中心 北京, 100081)

(2. 北京交通大学土木建筑工程学院 北京, 100044)

摘要 为研究随机列车荷载作用下钢弹簧浮置板轨道(steel spring floating slab track, 简称 SSFST)上线运营后的减振效果,选取某地铁线路同一区间、同一曲线段内的普通无砟轨道及钢弹簧浮置板轨道典型测试断面,在同一天内开展了现场对比测试。研究结果表明:钢弹簧浮置板轨道减振效果的线上评估结果与列车、轨道的实际运营状态直接相关;在不同列车的随机激励作用下,Z 振级相对插入损失($\Delta VL_{z,max}$)相差超过 10 dB,且部分测试样本无法满足特殊减振的设计需求;为获得保守的评价结果,应选择轮、轨平顺状态良好的运营区段开展对比测试;通过合理的养护维修,使运营列车及轨道保持良好的运行状态,是减振轨道区段满足振动控制需求的关键。

关键词 钢弹簧浮置板轨道;减振效果;列车振动;地铁

中图分类号 TB533⁺.2;X503.5;TU921;TH17

引言

为降低地铁列车振动环境影响,新建线路普遍敷设了大量的减振轨道^[1]。既有研究表明:轨道的减振效果与激励条件、运营环境等因素息息相关,并非轨道的固有特性^[2-4]。因此,轨道减振效果在上线前的实验室评估结果与上线后实际运营测试结果存在较大差异,导致其实际投入运营后未能达到产品标称的减振量或工作频段与振源的显著频段不匹配。目前,针对不同类型轨道减振产品减振性能的线下评估^[5-7]及线上评估^[8-10]的研究较多。为了在实验室内获得线上运营时真实的减振效果,学者们针对有预载与无预载^[11-13]、定点激励与移动列车激励^[14]等因素进行了研究。线上评估的结果一般源于在目标减振轨道断面及其边界条件具有可比性的普通轨道断面开展的对比测试获得的少量样本,且在实际测试评估过程中,不同轨道的测试并不严格具备同步性。因此,输入 2 种轨道系统的真实激励往往存在较大的差异。在减振材料研究方面,韦凯等^[15-17]、李莉等^[18]针对聚氨酯、橡胶等材料的振源减振措施的频变特性开展了大量研究。

由于轨道减振元件的材料频变特性、服役状态、随机列车激励等因素的共同作用,轨道的减振性能

并不确定。然而,在目前的减振轨道设计选型过程中将其减振量作为定值考虑。通过现场测试获取减振轨道上线运营后的真实减振量,对新线的减振轨道设计选型及优化都起着至关重要的作用。

为初步量化分析随机列车荷载作用下轨道减振性能的不确定性,笔者针对同一天内某一区间隧道内的普通轨道及钢弹簧浮置板轨道所在断面的振动响应进行了现场对比测试。

1 试验概况

笔者选择在北京地铁某线路同一区间、同一曲线段的普通无砟轨道及钢弹簧浮置板轨道,在同一天内开展对比测试。测试段均敷设 DTVI₂ 扣件,测试断面位置如图 1 所示。曲线半径为 650 m;测试区间为盾构隧道,外径为 2.95 m、内径为 2.7 m;线路运营列车为 8 节编组 B 型车(6M+2T);车速约为 80 km/h。隧道壁测点设置于轨面以上 1.5 m 的铅垂向;加速度传感器量程为 5 g,灵敏度约为 1 000 mV/g;采样频率为 2 048 Hz。使用高精度波磨小车对测试断面所在区段前后一整段钢轨的表面粗糙度进行测试。

* 中国铁道科学研究院集团有限公司科研开发基金资助项目(2020YJ205);国家自然科学基金资助项目(51978043)

收稿日期:2022-01-05;修回日期:2022-05-12

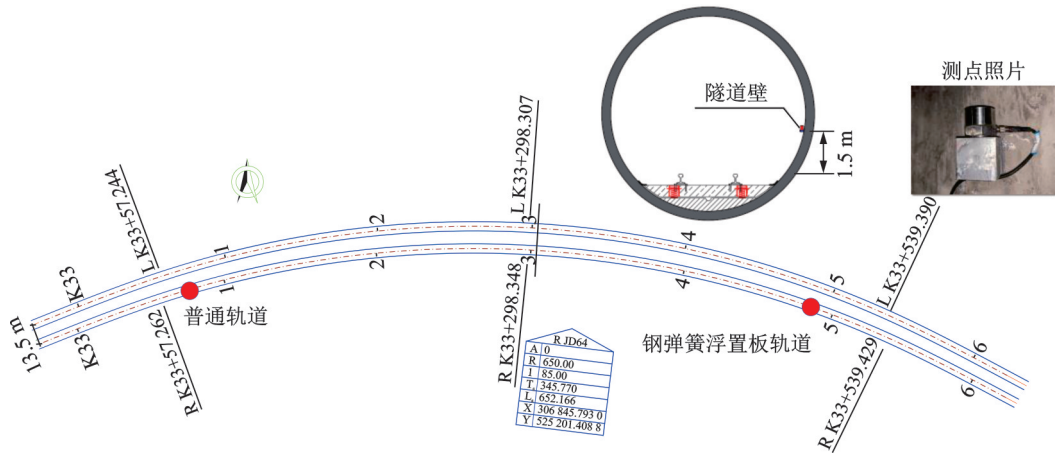


图 1 测试断面位置

Fig.1 Measuring sections

2 钢轨波磨测试

测试断面处钢轨表面粗糙度级测试结果如图 2 所示。显然,2 个测试断面的钢轨均出现了明显的波浪形磨耗,且均具备 63 mm 特征波长;在 100 mm 以上波长段,2 个测试断面的钢轨表面粗糙度级(参考值为 1 μm)分布规律及量级均基本一致,部分中心波长处相差最多不超过 5 dB。因此,在笔者重点关注的轨道交通诱发环境振动影响关心的频段内,2 种轨道的钢轨表面粗糙状态基本一致。

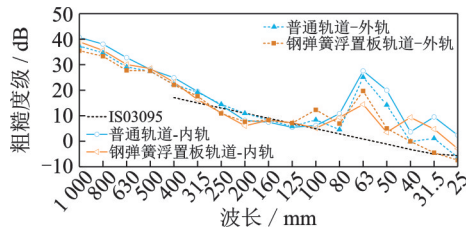


图 2 钢轨表面粗糙度级测试结果

Fig.2 Test results of rail surface roughness level

3 振动响应分析

3.1 最大 Z 振级分析

3.1.1 测试样本

目前,国内一般采用垂向计权加速度级(Z 振级,VL_Z)评价城市区域的环境振动水平。VL_Z可以综合反映 1~80 Hz 频段内振动响应的统计结果。

$$VL_Z = 10 \lg \left(\sum 10^{(VL_i + \alpha_i)/10} \right) \quad (1)$$

其中:VL_i为第 i 个频带的振动加速度级(dB);α_i为计权因子(dB),可参考 ISO 2631/1—1997。

具体计算过程中,VL_Z计算积分常数设为 1 s、重叠系数为 3/4,依次计算不同时间窗内的 VL_Z可

获得列车通过的运行 Z 振级(VL_Z(t))。最大 Z 振级(VL_{Z,max})为列车通过时间内 Z 振级的最大值。

笔者选取的 2 个对比测试断面的隧道结构、埋深、地质条件、曲线半径、车速和钢轨表面粗糙度状态等基本一致。此时,影响轨道减振性能评价结果的随机因素主要有 2 点:①同一运营线路的列车数量较多,不同列车的服役时间、车轮磨耗状态和载重等均存在显著差异;②测试过程中存在偶然误差。

对于正常运营的地铁线路,一天内上线运行的多趟列车是按照线路运行图呈现某种既定的编排顺序,且车轮磨耗状态越差,对应列车通过引起的振动响应越大^[19]。因此,测试结果一般呈现与列车运营编排顺序相关的周期性波动特征。图 3 为一天内所有运营列车通过的 VL_{Z,max}。对比可知,同一天内不

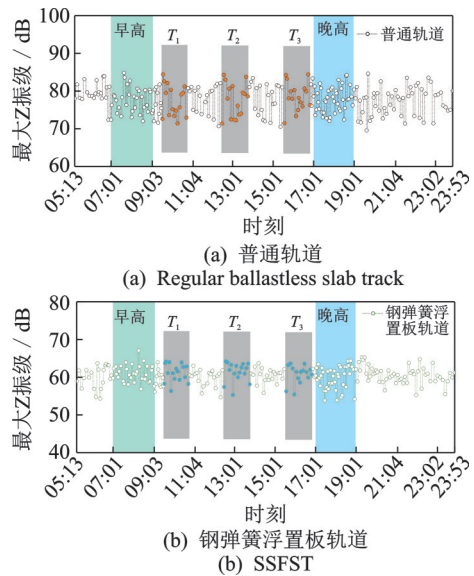


图 3 一天内所有运营列车通过的 VL_{Z,max}

Fig.3 The VL_{Z,max} of different trains passing through the test section in whole day

同列车通过引起的2个测试断面的 $VL_{Z,max}$ 差异均超过10 dB;在一些典型时间段内,不同测试断面的 $VL_{Z,max}$ 呈现明显的周期性变化,即这3个典型时间段内(T_1, T_2, T_3)的振动响应是由编排顺序固定的16列车往复3次通过测试断面引起的。

图4为典型时间段内的 $VL_{Z,max}$ 。 $VL_{Z,max}$ 仅反映列车通过固定测试断面过程中,某1 s时间内1~80 Hz频段内振动响应的统计结果。因此,同一列车多次通过引起的 $VL_{Z,max}$ 也稍有差异,但一般不超过5 dB。由于2个断面的测试是同时开展的,虽然不同轨道测试断面的波动幅值相差明显,但变化规律基本一致。图4中标注的3列典型列车 F_1, F_2, F_3 多次通过时引起的隧道壁 $VL_{Z,max}$ 离散较小,且引起的振动差异基本覆盖了不同列车引起隧道壁 $VL_{Z,max}$ 的离散范围。

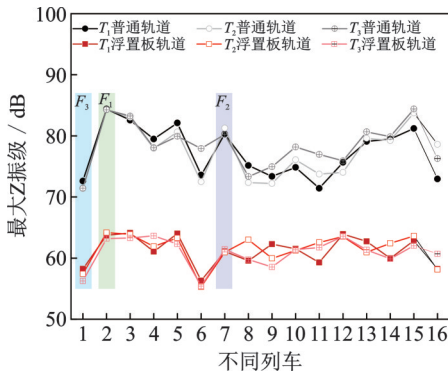


图4 典型时间段内的 $VL_{Z,max}$
Fig.4 The $VL_{Z,max}$ of different trains in typical times

3.1.2 Z振级相对插入损失

减振轨道减振效果的定量评价指标一般为插入损失(insertion loss, 简称IL),其定义为

$$IL = VL_{w0} - VL_{w1} = 20 \lg \frac{a_{w0}}{a_{w1}} \quad (2)$$

其中:VL为振动级; a 为振动加速度;下标 $w0$ 代表未使用减振措施的普通轨道, $w1$ 代表减振轨道。

由式(2)可知,当插入损失为正值时,表示有减振效果,反之无减振效果。

文献[20]给出了减振措施Z振级相对插入损失的定义:在其他条件相同的条件下,使用减振轨道相对于普通轨道形式在隧道壁源测点处 $VL_{Z,max}$ 之间的差值记为 $\Delta VL_{Z,max}$ 。

图5为一天内所有运营列车通过的 $\Delta VL_{Z,max}$ 。随机列车荷载作用下,钢弹簧浮置板轨道展现出了良好的减振效果,但不同列车通过时的 $\Delta VL_{Z,max}$ 差异超过10 dB。此外,在3个典型时间段内 $\Delta VL_{Z,max}$ 也呈现与列车运营编排顺序相关的周期性变化。

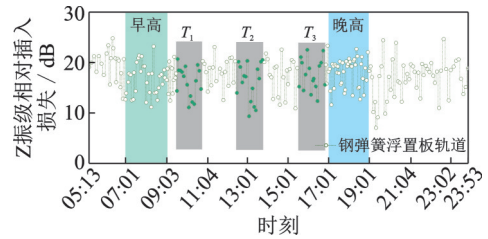


图5 一天内所有运营列车通过的 $\Delta VL_{Z,max}$
Fig.5 The $\Delta VL_{Z,max}$ of different trains passing through the test section in whole day

图6为3个典型时间段内16趟列车通过时钢弹簧浮置板轨道减振效果($\Delta VL_{Z,max}$)。可见,同一列车先后3次通过测试断面的 $\Delta VL_{Z,max}$ 差异接近5 dB。 $\Delta VL_{Z,max}$ 仅反映1列车分别通过2个测试断面时的 $VL_{Z,max}$ 的差值,计算结果与列车不同车轮经过2个测试断面时的轮轨接触状态、车辆载重、测试偶然误差等因素相关,因此具备较强的随机性。

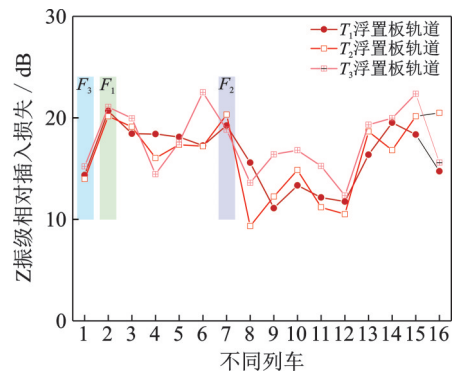


图6 典型时间段内16趟通过列车的钢弹簧浮置板轨道减振效果
Fig.6 The vibration reduction effect of SSFST for 16 trains passing through in typical times

图7为 $\Delta VL_{Z,max}$ 的统计结果。对比测试段面的 $\Delta VL_{Z,max}$ 标准差为3.49 dB,且有32.54%的测试样本无法满足DB11/T 838—2019规定的特殊减振措施的减振效果。

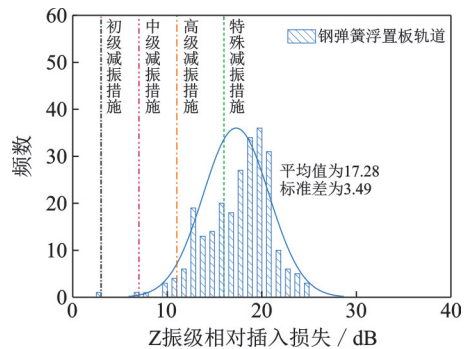


图7 $\Delta VL_{Z,max}$ 统计结果
Fig.7 Statistical distribution characteristics of the $\Delta VL_{Z,max}$ in whole day

3.2 1/3 倍频程振动加速度级对比损失

3.2.1 测试样本及典型数据

振动加速度级(vibration acceleration level, 简称 VAL)反映不同频段振动能量的大小,其公式为

$$VAL(f_i) = 20 \lg \frac{a_{rms}(f_i)}{a_0} \quad (3)$$

其中: f_i 为 1/3 倍频程中心频率;VAL(f_i)为分频振动加速度级(dB); $a_{rms}(f_i)$ 为分频振动加速度有效值(m/s^2); a_0 为振动加速度参考值($10^{-6}m/s^2$)。

2 个测试断面一天内所有测试样本的振动加速度级及统计结果(均值与标准差)如图 8 所示。1~250 Hz 频段内大部分中心频率处不同测试样本分频振动加速度级相差超过 10 dB,其中部分中心频率的离散甚至超过 20 dB;400 Hz 处的振动响应受钢轨波磨的强迫激励控制,不同列车通过引起的振动响应基本一致,相差不超过 5 dB。

参考插入损失的定义,在运营地铁线路上,通过选取普通轨道和减振轨道敷设区段线上评估减振性能时,由于 2 种轨道的赋存环境和轮轨激励并不完全一致,此时获得的轨道减振效果通常被定义为对比损失(comparison loss, 简称 CL)。

图 9 为振动加速度级对比损失样本统计。如图 9 所示,本研究测试案例下,除了在钢弹簧浮置板轨道的自振频率附近(8~10 Hz),其他频段均表现出了良好的减振效果,但在不同列车激励作用下,部分中心频率的对比损失相差超过 10 dB。

图 10 为典型中心频率对比损失统计。分别给出了典型中心频率(10,25,40,63,100 及 160 Hz)对应的振动加速度级对比损失的分布特征。

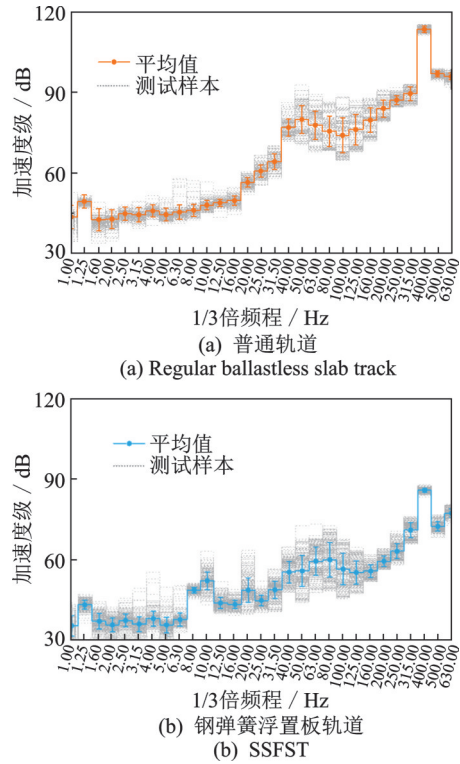


图 8 一天内所有测试样本的振动加速度级及统计结果
Fig.8 Vibration acceleration levels and statistical results of all test samples in whole day

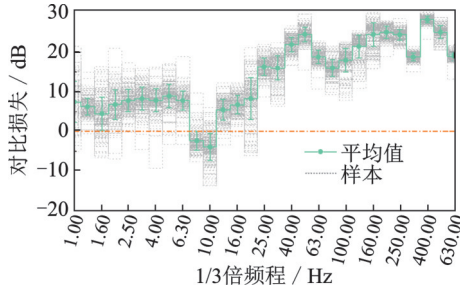


图 9 振动加速度级对比损失样本统计
Fig.9 The CL of different trains passing through the test section in whole day

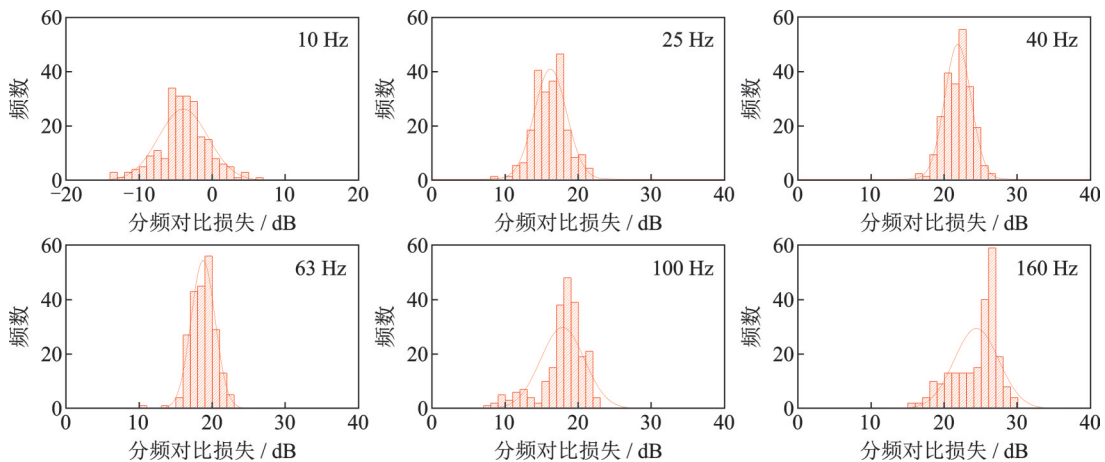


图 10 典型中心频率对比损失统计
Fig.10 The CL of different central frequencies

3.2.2 典型列车振动加速度级对比损失

针对特定的测试断面,短时间内的轨道状态基本一致。此时,不同列车通过引起振动响应的差异主要源于车轮磨损状态的不同。因此,为分析不同水平列车激励作用下的振动响应及其对对比损失的影响,筛选图4中可以反映不同 $VL_{z,max}$ 量级且多次通过数据一致性较好的 F_1, F_2 及 F_3 对应的典型列车

进行对比分析。 T_1 时段内典型列车时程对比如图11所示。

图12为典型列车通过的运行Z振级及振动加速度级。对比可知,同一列车多次通过引起的振动响应基本一致性;对比不同列车,在31.5~250 Hz频段内, $VAL(f_i, F_1) > VAL(f_i, F_2) > VAL(f_i, F_3)$ 。

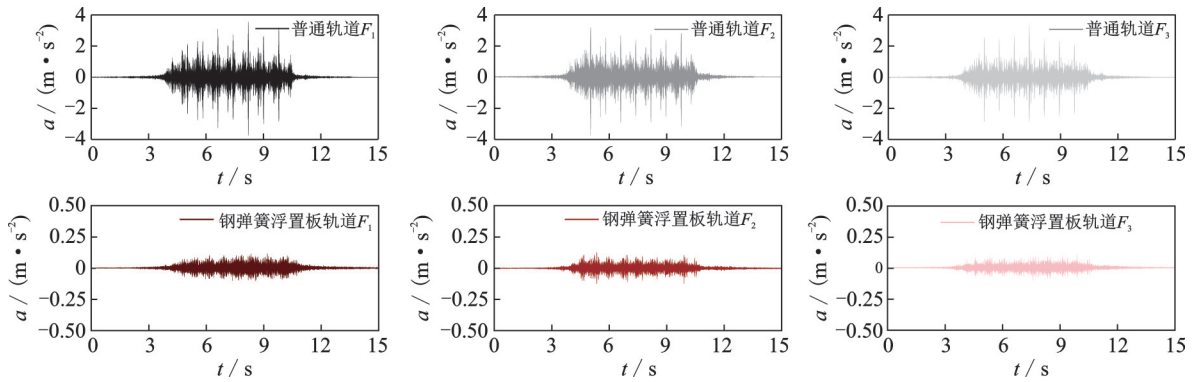


图11 T_1 时段内典型列车时程对比

Fig.11 Acceleration time history of typical trains in T_1

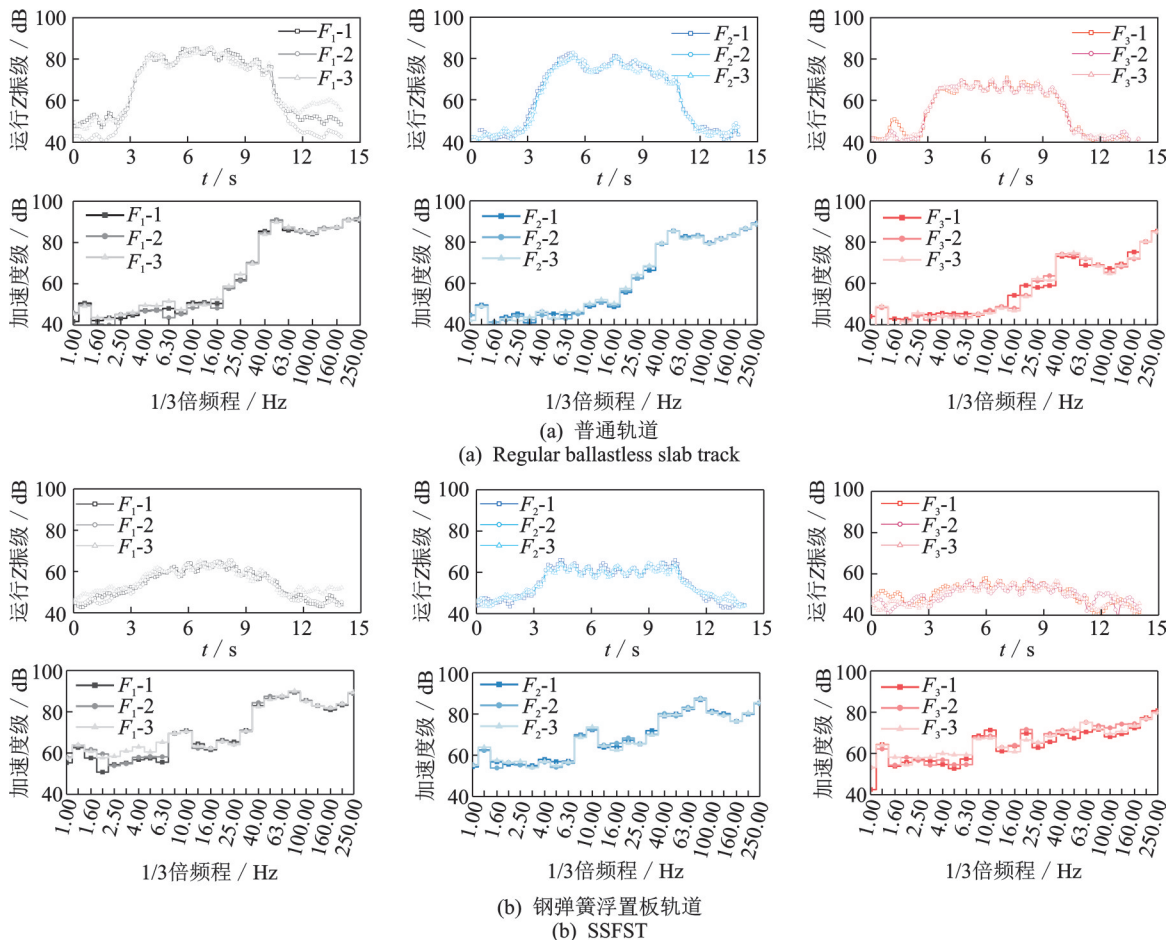


图12 典型列车通过的运行Z振级及振动加速度级

Fig.12 The moving VL_z and VAL of typical trains

图 13 为典型列车通过的振动加速度级对比损失。由于较低频的振动响应由列车准静态激励控制,因此在 12.5 Hz 以下频段,不同列车通过时对比损失计算结果的平均值基本一致;16~80 Hz 涵盖了地铁诱发环境振动响应的特征频段,但在不同中心频率处的对比损失分布特征差异显著;在 100~200 Hz 频段,几乎所有中心频率处基本均为 $CL(f_i, F_1) > CL(f_i, F_2) > CL(f_i, F_3)$ 。

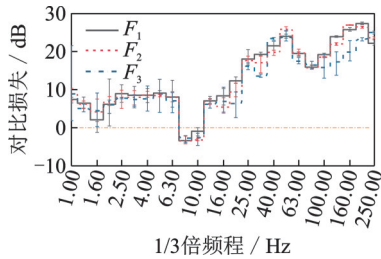


图 13 典型列车通过的振动加速度级对比损失
Fig.13 The CL of VAL corresponding to typical trains

4 振动响应与减振效果的相关性

假设减振轨道振动响应与普通轨道的振动响应线性相关,即

$$VL_{w1}(f_i) = k(f_i)VL_{w0}(f_i) + c_1(f_i) \quad (4)$$

对比损失可表示为

$$CL(f_i) = VL_{w0}(f_i) - VL_{w1}(f_i) = (1 - k(f_i))VL_{w0}(f_i) - c_1(f_i) = (1/k(f_i) - 1)VL_{w1}(f_i) + c_2(f_i) \quad (5)$$

其中: $k(f_i)$ 为线性拟合的拟合斜率; $c_1(f_i)$ 及 $c_2(f_i)$ 均为拟合常数项。

由式(5)可知:当 $k(f_i) < 1$ 时,随着轮轨动态激励的增强,会获得较大的对比损失评价结果;当 $k(f_i) \approx 1$ 时,轮轨动态激励的增强,对对比损失的评价结果几乎无任何影响;当 $k(f_i) > 1$ 时,随着轮轨动态激励的增强,会获得较小的对比损失评价结果。

图 14 为 2 个测试断面隧道壁 $VL_{Z,max}$ 与 $\Delta VL_{Z,max}$ 的关系。虽然 $VL_{Z,max}$ 的计算结果具备较强的随机性,但普通轨道与钢弹簧浮置板轨道断面的隧道壁 $VL_{Z,max}$ 仍具备明显的相关性,参考式(4),线性拟合的斜率 $k(VL_{Z,max}) < 1$ 。因此,随着轮轨动态激励的增强,会获得较大的 $\Delta VL_{Z,max}$ 计算结果,但浮置板轨道断面的振动响应也显著变大。

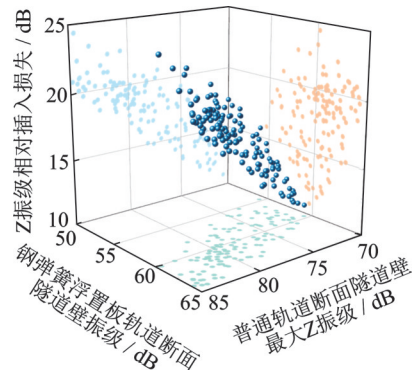


图 14 $VL_{Z,max}$ 与 $\Delta VL_{Z,max}$ 的关系
Fig.14 Relationship between $VL_{Z,max}$ and $\Delta VL_{Z,max}$

图 15 为典型中心频率分频振动响应与分频对比损失的关系。对比可知,在不同中心频率处,2 个测试断面的分频加速度级的映射关系差异显著。对于 20 Hz 以下频段,相比于普通轨道断面,浮置板轨道断面的振动响应离散更大,随着浮置板轨道断面振动响应的增加,获得的分频对比损失减小;25 及 31.5 Hz 处 2 个测试断面的振动响应相关性不强,对比损失评估结果呈现明显的随机性;40,50 及 80 Hz 处线性拟合的斜率 $k(f_i) > 1$;63 及 100 Hz 处线性拟合的斜率 $k(f_i) \approx 1$ 。因此,随着轮轨动态激励的增加,不同频率的对比损失评估结果变化规律差异显著。该现象与钢弹簧隔振器动刚度的非线性直接相关,即动刚度呈现明显的频变特性,且随着激励增加,不同频率的动刚度变化规律不一致。

5 结论

1) 钢弹簧浮置板轨道减振效果的线上评估结果与列车、轨道的实际运营状态直接相关。在随机列车动态激励作用下,Z 振级相对插入损失 ($\Delta VL_{Z,max}$) 离散超过 10 dB,且部分测试样本无法满足特殊减振的设计需求。

2) 为获得保守的浮置板轨道减振效果在线评估结果,应选择轮、轨平顺状态良好的运营区段开展对比测试。

3) 为实现减振轨道的精细化设计,除分析轨道的动刚度频变特性外,其非线性特征同样值得关注。

4) 除了良好的减振性能,通过合理的养护维修,使得运营列车及轨道保持良好的运行状态,从而降低动态激励,是减振轨道区段满足振动控制需求的关键。

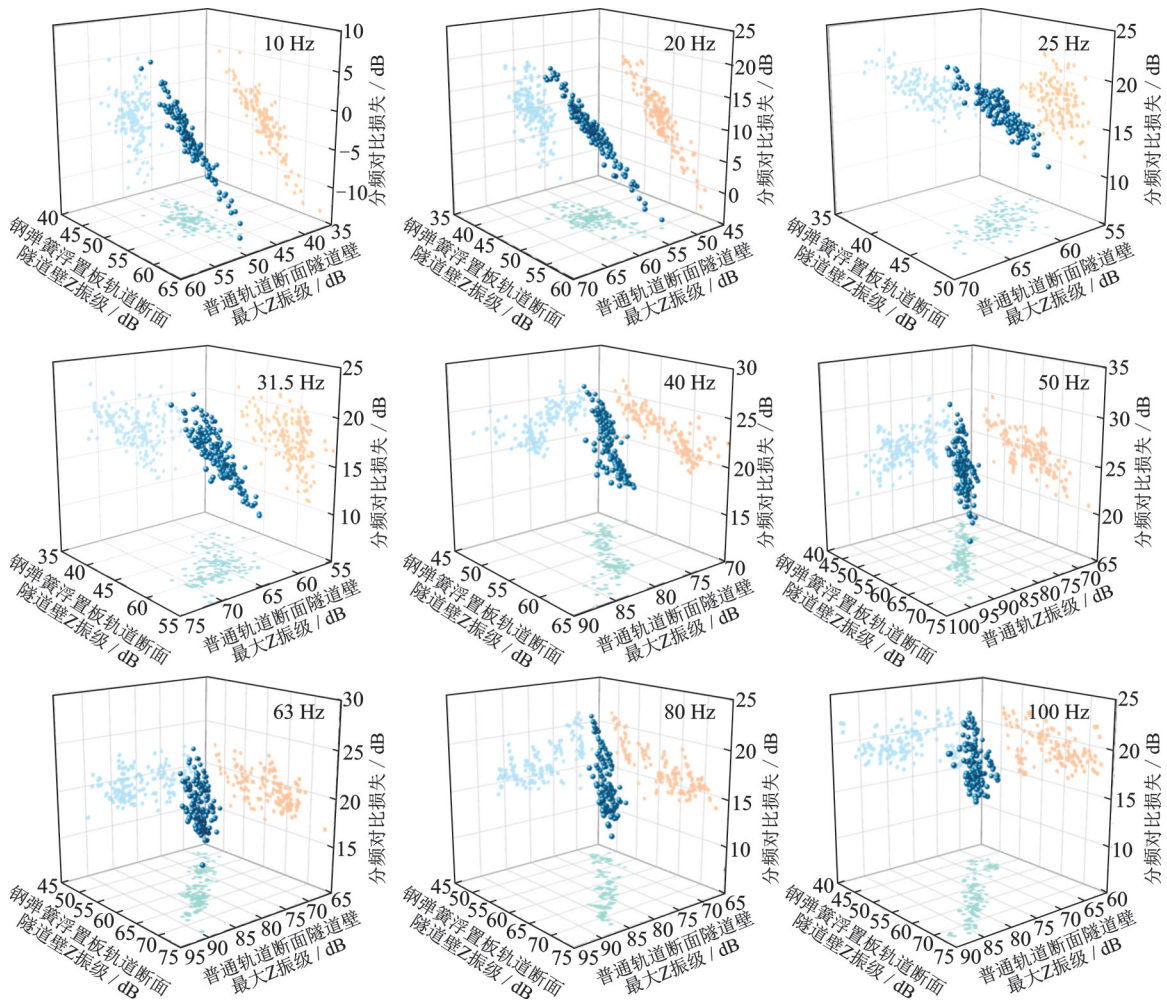


图15 典型中心频率分频振动响应与分频对比损失的关系

Fig.15 Relationship between VAL and CL at different central frequencies

参 考 文 献

- [1] 王文斌, 刘力, 孙宁. 我国城市轨道交通轨道减振现状与发展趋势[J]. 中国铁路, 2013(4):91-94.
WANG Wenbin, LIU Li, SUN Ning. Overview on current research and development trend of rail vibration reduction for urban rail transit in China[J]. China Railway, 2013(4):91-94. (in Chinese)
- [2] MUELLER-BORUTTAU F, BREITSAMTER N. Elastic elements reduce vibration emission-some thoughts on insertion loss [C]//The 6th European Conference on Structural Dynamics (EURODYN 2005). Paris: European Association for Structural Dynamics, 2005: 15.
- [3] VANHONACKER P. CargoVibes project deliverable 2.2-attenuation of ground-borne vibration affecting residents near railway lines[R]. Leuven: Alfa Products and Technologies, 2013.
- [4] GARBURG R, STIEBEL D, CUELLAR V. Rivas project deliverable D1.10-description of test and field tests including validation [R]. Berlin: Deutsche Bahn, 2013.
- [5] 金浩, 刘维宁. 枕下减振垫铺设方式对梯式轨道减振性能影响试验研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(2): 73-78.
JIN Hao, LIU Weining. Experimental study vibration reduction characteristics of ladder track with different arrangement of sleeper pads[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(2):73-78. (in Chinese)
- [6] 刘维宁, 丁德云, 李克飞, 等. 橡胶垫浮置板轨道低频特征试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(8):118-125.
LIU Weining, DING Deyun, LI Kefei, et al. Experimental study on low frequency characteristics of rubber pad floating slab track[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(8):118-125. (in Chinese)
- [7] 刘维宁, 马蒙, 刘卫丰, 等. 我国城市轨道交通环境振动影响的研究现状[J]. 中国科学:技术科学, 2016, 46(6): 547-559.
LIU Weining, MA Meng, LIU Weifeng, et al. Overview on current research of environmental vibration in-

- fluence induced by urban mass transit in China[J]. Scientia Sinica Technologica, 2016, 46(6):547-559. (in Chinese)
- [8] 李克飞,刘维宁,孙晓静,等.北京地铁5号线高架线减振措施现场测试与分析[J].中国铁道科学,2009,30(4):25-29.
LI Kefei, LIU Weining, SUN Xiaojing, et al. In-situ test and analysis on the vibration mitigation measures of the elevated line in Beijing metro line 5[J]. China Railway Science, 2009, 30(4):25-29. (in Chinese)
- [9] 赵才友,王平.桥上无砟轨道橡胶减振垫减振性能试验研究[J].中国铁道科学,2013,34(4):8-13.
ZHAO Caiyou, WANG Ping. Experimental study on the vibration damping performance of rubber absorbers for ballastless tracks on viaduct[J]. China Railway Science, 2013, 34(4):8-13. (in Chinese)
- [10] 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)
- [11] AUERSCH L. The excitation of ground vibration by rail traffic: theory of vehicle-track-soil interaction and measurements on high-speed lines[J]. Journal of Sound & Vibration, 2005, 284(1/2):103-132.
- [12] 李明航,马蒙,刘维宁,等.轨道预载对梯式轨道系统减振效果影响试验研究[J].铁道学报,2020,42(5):113-119.
LI Minghang, MA Meng, LIU Weining, et al. Experimental study of preload effect on vibration reduction of floating ladder track[J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(5):113-119. (in Chinese)
- [13] LI M H, MA M, LIU W N, et al. Influence of static preload on vibration reduction effect of floating slab tracks[J]. Journal of Vibration and Control, 2019,25(6):1148-1163.
- [14] 马蒙,李明航,吴宗臻,等.地铁列车与定点锤击荷载下浮置板轨道减振效果对比试验研究[J].中国铁道科学,2019,40(5):28-34.
MA Meng, LI Minghang, WU Zongzhen, et al. Comparative experimental study on vibration reduction effect of floating slab track under metro train and fix point hammering loads[J]. China Railway Science, 2019, 40(5):28-34. (in Chinese)
- [15] 韦凯,赵泽明,王显,等.浮置板轨道减振垫的刚度测试与评价研究[J].西南交通大学学报,2022,57(4):848-854,925.
WEI Kai, ZHAO Zeming, WANG Xian, et al. Research on the stiffness test and evaluation method of the floating slab track damping pad[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2022, 57(4):848-854, 925. (in Chinese)
- [16] 韦凯,王丰,杨麒陆,等.钢轨扣件弹性垫板的宽频动力性能及其理论表征[J].铁道学报,2019,41(2):130-136.
WEI Kai, WANG Feng, YANG Qilu, et al. Broad frequency-domain dynamic properties of rail pad and its theoretical model[J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(2):130-136. (in Chinese)
- [17] 韦凯,豆银玲,杨麒陆,等.钢弹簧浮置板轨道的随机振动分析及参数优化[J].华中科技大学学报(自然科学版),2017,45(8):115-119.
WEI Kai, DOU Yinling, WANG Xian, et al. Random vibration analysis and parameter optimization of steel-spring floating-slab track[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2017, 45(8):115-119. (in Chinese)
- [18] 李莉,王书卫,吕英康,等.钢轨扣件减振橡胶动态刚度特性分析[J].同济大学学报(自然科学版),2013,41(2):208-212.
LI Li, WANG Shuwei, LÜ Yingkang, et al. Dynamic stiffness analysis of rubber absorber in rail fastenings [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013, 41(2):208-212. (in Chinese)
- [19] 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)
- [20] 北京市市场监督管理局.DB11/T 838—2019 地铁噪声与振动控制规范[S].北京:[s.n.],2019.



第一作者简介:李明航,男,1991年12月生,博士、助理研究员。主要研究方向为地铁列车诱发的环境振动影响预测与评估。曾发表《Influence of static preload on vibration reduction effect of floating slab tracks》(《Journal of Vibration and Control》2019, Vol.25, No.6)等论文。
E-mail: lmh_rails@126.com