

地铁轨道改造前后振动及减振效果试验*

何 况^{1,2}, 李铁斌^{3,4}, 周志军¹, 肖新标¹, 池茂儒¹, 陶功权¹

(1. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室 成都, 610031)

(2. 郑州地铁集团有限公司 郑州, 450000)

(3. 中铁一局集团有限公司 西安, 712000)

(4. 中铁一局集团新运工程有限公司 咸阳, 712099)

摘要 针对国内某地铁线路某些区段沿线的建筑物振动与二次辐射噪声严重现象,将轨道原来铺设的普通扣件改造为浮轨扣件,并在跨中钢轨轨腰位置加装阻尼器以降低振动噪声的影响。通过测量列车运营时间内的振动和噪声数据,分析列车通过改造前后线路时的轨道振动、车辆振动和噪声、建筑物振动与二次辐射噪声特性。结果表明:与改造前普通扣件轨道相比,改造后浮轨扣件轨道的钢轨、道床和隧道壁垂向振动加速度有效值分别降低 8%, 70.6% 和 71.4%,隧道壁振动降低最显著,由隧道壁垂向振动加速度评估的轨道减振效果为 8.28 dB;转向架区域和车内最大声压级降低 3.6% 和 3.4%;昼间建筑物振动和二次辐射噪声降低 18.4% 和 22.0%。车辆、轨道、建筑物的振动与二次辐射噪声的主频均与轮轨系统 P2 共振频率接近,是引起车辆、轨道和建筑物振动的主要原因之一。

关键词 浮轨扣件;轨道振动特性;车辆振动和噪声;建筑物振动;二次辐射噪声

中图分类号 U213.2;TH113.1

引 言

在城市轨道交通系统中,车辆、轨道、地面和建筑物 4 个子系统是引起环境振动和噪声的主要因素^[1]。地铁车辆运行时轮轨相互作用产生的动态载荷,通过车辆、钢轨、扣件、轨枕、道床和隧道等基础结构,经由岩土介质向周边地层表面和建筑物基础传播,引发周边环境和建筑物的振动,以及由振动引起的结构二次辐射噪声,影响地铁周边居民的正常生活^[2]。因此,减振降噪问题受轨道结构、车辆结构、运行速度、轮轨相互作用、行车密度与运量、线路条件、隧道和桥梁结构、地质条件、建筑物结构特性等因素综合影响,是一个跨学科的系统性问题。

为了有效衰减地铁沿线尤其是振动敏感区域的振动和噪声,通常对轨道关键部件(例如:高弹性扣件^[3-4]、弹性轨枕^[5-8]和浮置板道床^[9-11])采取减振措施。其中,浮轨扣件(又称先锋扣件)是一种高等减振扣件,通过橡胶楔块支撑钢轨轨腰和轨颞,使钢轨处于悬浮,提供了极低的垂向刚度(5~10 MN/m),在钢轨和道床/轨枕间具有显著的隔离效果。浮轨

扣件在我国地铁线路中被广被采用,取得了较好的减振效果,但可能会诱发短波长波磨^[12]。目前,对于预测和分析列车通过浮轨扣件轨道时引起的轨道振动、车辆振动和噪声,以及建筑物振动与二次辐射噪声等问题,通常采用理论分析和数值建模方法,但存在局限性。例如:理论分析法不能处理具有随机特征的列车载荷和非线性等复杂问题;数值建模需要多参数,计算耗时^[2]。现场测试可以通过设备采集获取列车全天载客运行时轨道、车辆和建筑物产生的振动或噪声信号,分析其振动传递和衰减的规律,实用性和针对性比较强。

针对国内某地铁线路某些区段沿线的建筑物振动与二次辐射噪声反映严重现象,将轨道原来铺设的普通扣件(垂向刚度为 40 MN/m)改造为浮轨扣件(垂向刚度为 10 MN/m),并在跨中钢轨轨腰位置加装阻尼器。笔者基于现场试验测试,研究地铁轨道普通扣件改造为浮轨扣件后,列车通过时的轨道振动、车辆振动和噪声、建筑物振动与二次辐射噪声特性,分析普通扣件和浮轨扣件轨道在振动传递特性上的差异,为地铁轨道减振降噪设计及改造提供借鉴。

* 四川省自然科学基金资助项目(2022NSFSC1914);四川省科技计划资助项目(2023YFQ0091);中国合格评定国家认可委员会科技项目(2022CNAS15)

收稿日期:2022-11-18;修回日期:2023-01-30

1 轨道振动特性和减振效果

改造前后轨道结构现场照片如图1所示。表1为改造前后轨道结构参数。

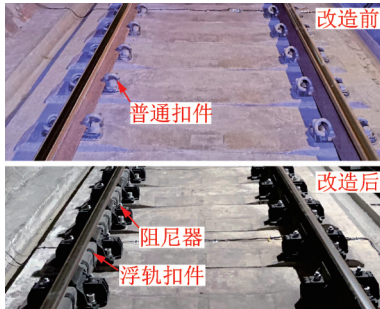


图1 改造前后轨道结构现场照片

Fig.1 Photos of track structure before and after reconstruction

表1 改造前后轨道结构参数

Tab.1 Parameter of the track structure before and after the reconstruction

改造情况	道床	扣件		阻尼器
		类型	垂向刚度/(MN·m ⁻¹)	
改造前	普通	普通	40	无
改造后	普通	浮轨	10	有

测试线路为内环(下行线),铺设60 kg/m钢轨,轨距为1 435 mm,轨底坡为1/40,轨枕间距为600 mm。选取的普通扣件和浮轨扣件轨道测试点处的钢轨均无裂纹、无焊接接头、无道岔和无渗水区等缺陷。列车为A型车6辆编组,动车自重为38 t,拖车自重不高于34 t,最高运行速度为80 km/h。测试区段改造前后的普通扣件和浮轨扣件轨道均为直线,列车全天通过这2种轨道断面时平均速度相近,约为65 km/h。由于列车在直线段运行时,轨道和车辆振动主要在垂向上占优^[13],因此后续结果仅关注垂向特性。

1.1 静态下轨道固有特性

因为浮轨扣件和普通扣件垂向刚度的差异,导致轨道固有特性不同。采用锤击试验法获取静态下2种轨道结构的垂向频响特性,轨道垂向固有特性现场测试如图2所示。现场测试时,振动加速度传感器分别安装在跨中钢轨和轨枕上方钢轨,采用单点激励单点响应法,通过垂向敲击跨中和轨枕上方钢轨轨头获得轨道垂向频响特性。普通扣件和浮轨扣件轨道垂向固有特性如图3所示。为减小测试误差,每个点取3次敲击结果的平均值。50~1 600 Hz频带内激励信号和响应信号的相干系数(无量纲)均

大于0.8,如图3(a)所示。由图3(b)可知,钢轨通常会出现2个比较显著的频率峰值,即钢轨一阶弯曲和Pinned-Pinned共振(钢轨在跨中位置的位移最大,在轨枕上方位置的位移最小,振动半波长为1个轨枕间距)。其中,改造前普通扣件轨道的钢轨一阶弯曲共振频率为277 Hz,而改造为刚度较低的浮轨扣件轨道的钢轨一阶弯曲和Pinned-Pinned共振分别为181 Hz和1 039 Hz。值得注意的是,浮轨扣件轨道的钢轨一阶弯曲振动幅值明显小于普通扣件轨道,表明浮轨扣件轨道对低频(4~200 Hz)敏感程度较小,而在Pinned-Pinned共振频率处振幅较大。

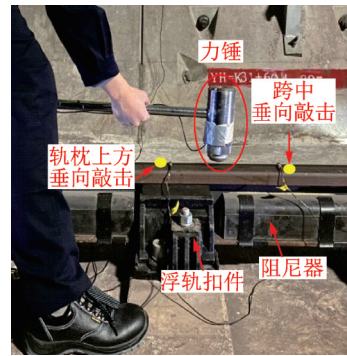
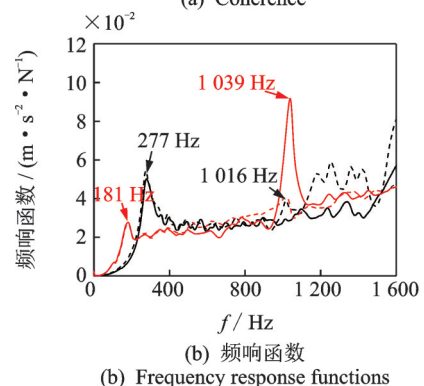
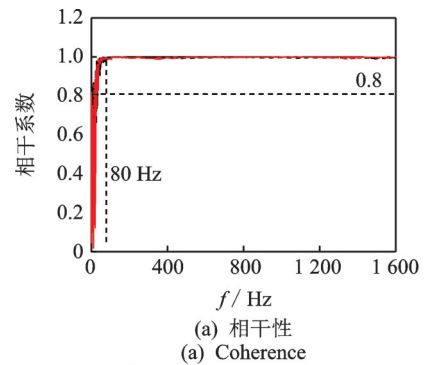


图2 轨道垂向固有特性现场测试

Fig.2 Field testing of track vertical natural characteristics



普通扣件: — 跨中钢轨; --- 轨枕上方钢轨
浮轨扣件: — 跨中钢轨; --- 轨枕上方钢轨

图3 普通扣件和浮轨扣件轨道垂向固有特性

Fig.3 Track vertical natural characteristics of conventional fasteners and floating rail fasteners

1.2 列车运行时轨道振动特性

当列车通过轨道断面时,动态载荷会引起隧道内部轨道关键部件在短时间内持续振动。参照文献[14],在普通扣件和浮轨扣件轨道各布置3个振动测点,即钢轨、道床和隧道壁。列车运行时隧道内轨道振动测点布置如图4所示。



图4 隧道内轨道振动测点布置

Fig.4 Arrangement of measurement points for track vibration in the tunnel

图5为全天正常载客运营时间内某趟列车通过普通扣件和浮轨扣件时轨道的钢轨、道床和隧道壁垂向振动加速度的时域和频域结果。

普通扣件和浮轨扣件时轨道振动加速度均方根值 (root mean square,简称RMS)及其平均值。

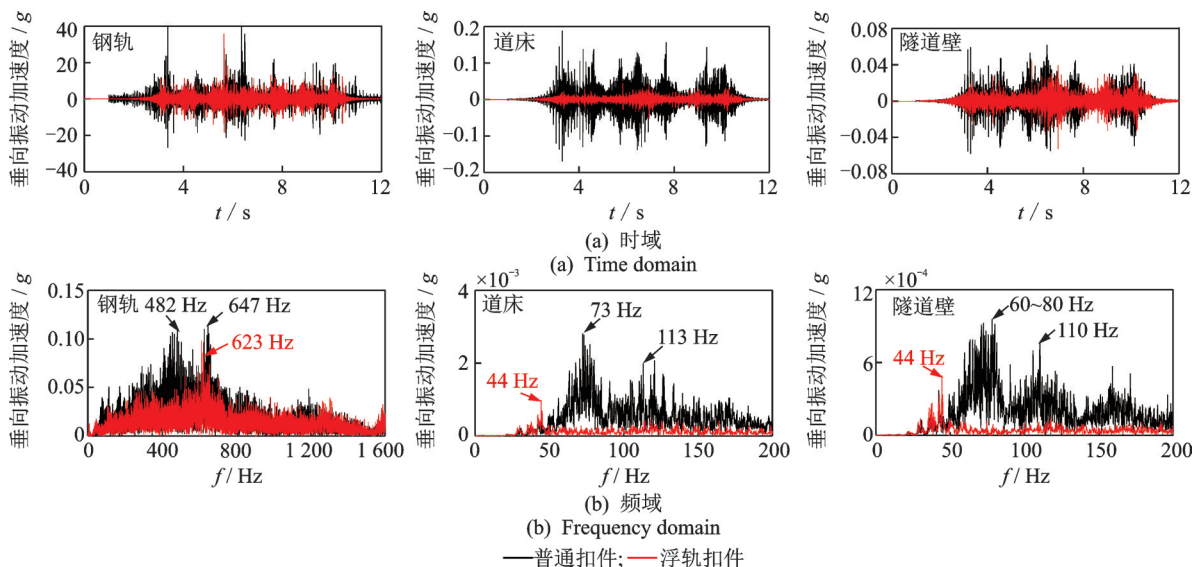


图5 轨道的钢轨、道床和隧道壁垂向振动加速度的时域和频域结果

Fig.5 Time domain and frequency domain results of the vertical vibration accelerations of the rail, track bed and tunnel wall

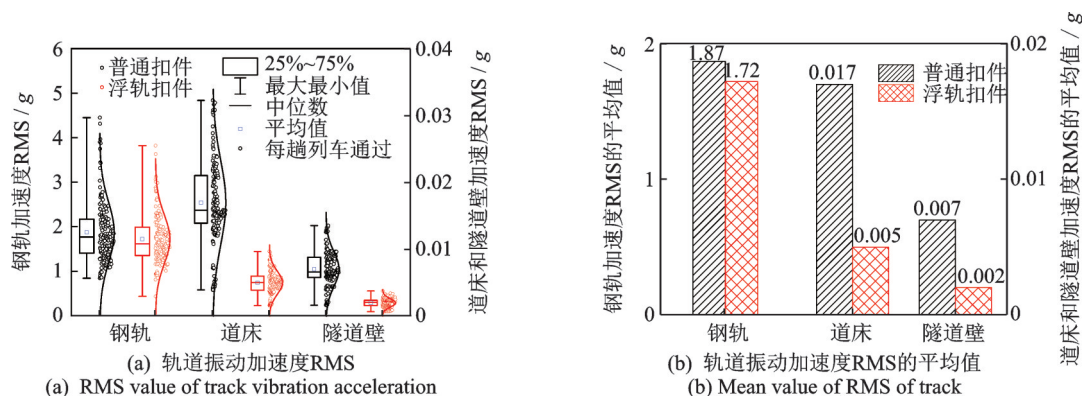


图6 轨道振动加速度均方根值及其平均值

Fig.6 Statistical values of RMS values of track vibration acceleration

由图5和图6可知:

1) 时域频域内,改造后的浮轨扣件轨道的钢轨、道床和隧道壁垂向振动加速度幅值比改造前的普通扣件轨道的振动加速度幅值小。

频率为482 Hz和647 Hz,浮轨扣件轨道的钢轨垂向加速度主要峰值频率表现为623 Hz。全天每趟列车通过普通扣件和浮轨扣件轨道时的钢轨加速度RMS值分别相对集中在1.78 g和1.63 g,RMS值的平均值分别为1.87 g和1.72 g。相比普通扣件,浮轨

2) 普通扣件轨道的钢轨垂向加速度主要峰值

扣件轨道的钢轨垂向加速度降低了8%。这是由于浮轨扣件刚度更低,隔振效果更好,导致存留在钢轨中的振动能量更多。列车通过浮轨扣件轨道时引起的钢轨振动加速度会比普通扣件地段的钢轨加速度大。改造后在钢轨上附加了阻尼器,导致振动能量被衰减,降低了浮轨扣件轨道的钢轨振动加速度。

3) 普通扣件轨道的道床垂向加速度主要峰值频率为73 Hz和113 Hz,浮轨扣件轨道的道床垂向加速度峰值频率降低为44 Hz,高频不再凸显。全天每趟列车通过普通扣件轨道时的道床加速度相对分散,通过浮轨扣件轨道时道床加速度RMS值相对集中,RMS值的平均值分别为0.017 g和0.005 g。相比普通扣件,浮轨扣件轨道的道床垂向加速度降低了70.6%,降低量显著。

4) 普通扣件轨道的隧道壁垂向振动能量主要集中在60~80 Hz和110 Hz,浮轨扣件轨道的隧道壁垂向加速度峰值频率降低为44 Hz,高频不再凸显,与道床振动特性类似。全天每趟列车通过普通扣件和浮轨扣件轨道时的隧道壁加速度RMS值相对集中,RMS值的平均值分别为0.007 g和0.002 g。相比普通扣件,浮轨扣件轨道的道床垂向加速度降低了71.4%,隧道壁振动降低量与道床振动降低量相当。

1.3 轨道减振效果

文献[15]指出,一般检验地下线路轨道减振效果的测点应设在隧道壁,振动加速度传感器安装高度为 1.25 ± 0.25 m范围内,如图4所示。文献[16]规定,评价城市区域的环境振动水平的测量为铅垂向Z振级,采用的时间计权常数为1 s;评价量为最大Z振级 $VL_{z,max}$ [17]。Z振级计算时,首先,根据式(1)将测量得到的隧道壁垂向振动加速度转换为振动加速度级 VL [18],即

$$VL = 20 \lg \frac{a}{a_0} \quad (1)$$

其中: a 为隧道壁垂向振动加速度有效值(m/s^2); a_0 为基准加速度, $a_0 = 10^{-6} m/s^2$ 。

然后,按照文献[19]规定的全身振动Z计权因子修正,得到振动加速度级即为Z振级

$$VL_z = 10 \lg \left(\sum 10^{(VL_i + \alpha_i)/10} \right) \quad (2)$$

其中: VL_i 为1/3倍频中心频率处的振动加速度级(dB); α_i 为1/3倍频中心频率处的全身振动Z计权因子; VL_z 中的最大值即为最大Z振级,记为 $VL_{z,max}$ 。

上述标准评价的频率范围为1~80 Hz,为进一

步考虑更高频率振动的影响,文献[18]采用分频最大振级 VL_{max} 作为轨道交通环境振动评价量,分析频率范围为4~200 Hz。在该频率范围的隧道壁垂向振动加速度进行1/3倍频程分析,按照该标准规定的计权因子修正后得到1/3频带的最大振动加速度级,即为分频最大振级 VL_{max} 。笔者采用上述2种评价量评估轨道减振效果。另外,由于列车运行速度不同会导致减振效果有所差异,为了减小误差,通常记录至少3~5次列车通过测量断面的振动值[15,17]。笔者选取全天运营状态的所有列车通过时的隧道壁振动加速度,计算最大Z振级 $VL_{z,max}$ 和最大振级 VL_{max} ,然后取平均值以评估轨道减振效果。

图7为列车通过普通扣件和浮轨扣件轨道时隧道壁垂向减振效果。图7(a)为全天每趟列车通过时的隧道壁最大Z振级分布;图7(b)为Z计权分频振级分布。由图7可知:

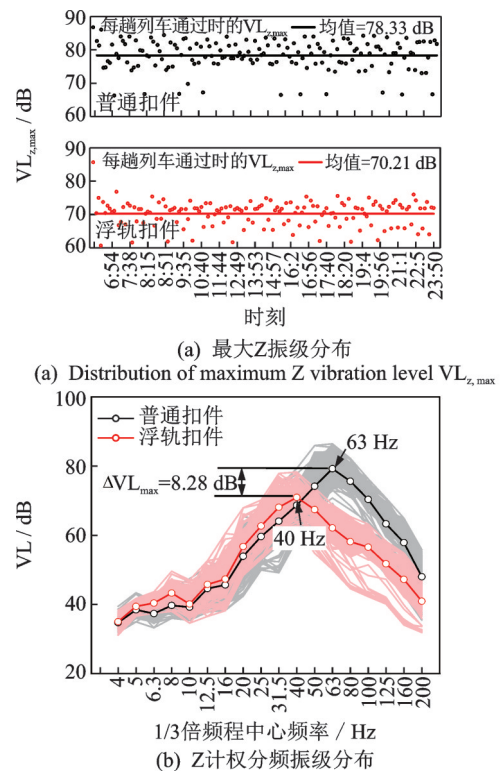


图7 普通扣件和浮轨扣件轨道的隧道壁垂向减振效果

Fig.7 Vibration reduction effect of tunnel wall of conventional fasteners and floating rail fastener track

1) 列车通过普通扣件和浮轨扣件轨道时,隧道壁平均最大Z振级分别为78.33 dB和70.21 dB,相比于普通扣件轨道,浮轨扣件轨道的最大Z振级差异 $\Delta VL_{z,max}$ 为8.12 dB。

2) 普通扣件轨道的分频最大振级峰值中心频

率为 63 Hz,改造后的浮轨扣件并加装钢轨阻尼器,其分频最大振级 VL_{max} 峰值中心频率降低至 40 Hz。另外,在频率低于 40 Hz 时,普通扣件和浮轨扣件轨道的隧道壁分频振级分布基本一致,而高于 40 Hz 时,普通扣件轨道的隧道壁分频最大振级 VL_{max} 明显高于浮轨扣件轨道。这表明,改造后的浮轨扣件在加装钢轨阻尼后,改变了原轨道结构的振动特性,对高于 40 Hz 的轨道振动传递具有明显抑制效果,分频最大振级降幅 ΔVL_{max} 为 8.28 dB。不难发现,采用最大 Z 振级 $VL_{z,max}$ 和分频最大振级 VL_{max} 评估轨道的减振效果时相差 0.16 dB,差异较小。

2 车辆振动与噪声

为分析轮轨相互作用向上传递到车辆的振动和噪声问题,在选择的测试列车的 6 车 4 轴(拖车)轴箱处布置加速度传感器,测量轴箱垂向振动加速度;在 6 车 2 位转向架中心区域布置声级计,测量转向架区域噪声;在 6 车 2 位转向架正上方的车内(客室)内布置声级计,测量车内噪声,该测点距车体地板面垂向距离 1.2 m 处^[20]。轴箱振动、转向架区域噪声和车内噪声测点布置如图 8 所示。试验列车车轮为新镲修状态,以排除车轮失圆对车辆振动和噪声的影响。

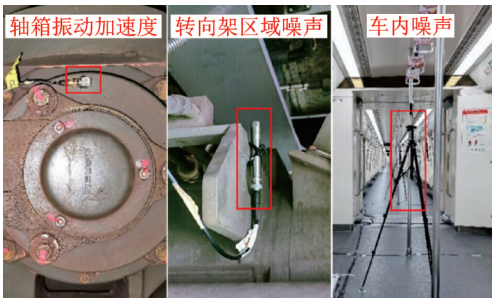


图 8 轴箱振动、转向架区域噪声和车内噪声测点布置
Fig.8 Arrangement of measurement points for vibration of axle box, and noise of bogie area and in interior

图 9 为列车通过改造区段时 6 车 4 轴的左侧轴箱垂向振动加速度分布。其中:红色框对应的为浮轨扣件轨道,黑色框对应的为普通扣件轨道。采用文献[21]中的短时傅里叶变换进行时频分析,窗函数为矩形窗,时间间隔为 1 s,重叠系数为 2/3。由图 9 可看出,浮轨扣件轨道的轴箱振动加速度水平低于普通扣件区段。统计发现,列车经过浮轨扣件轨道时的轴箱垂向加速度 RMS 值比经过普通扣件轨道时降低 47%。图中较为清楚地显示出列车通

过钢轨焊接接头时的轴箱振动加速度高于非焊接接头区域。

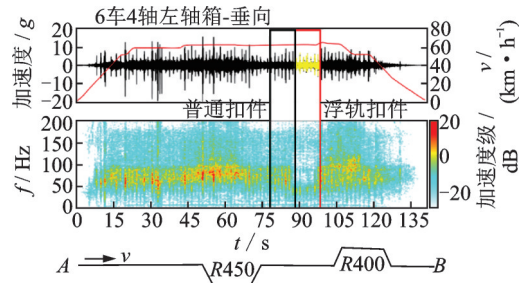


图 9 左侧轴箱垂向振动加速度
Fig.9 Vertical vibration acceleration of the left axle box

列车通过普通扣件和浮轨扣件轨道时的轴箱振动加速度频域特性如图 10 所示。可见:具有新镲车轮状态的列车通过普通扣件轨道时,轴箱垂向振动加速度主频为 66 Hz;通过浮轨扣件轨道时,振动加速度主频降低为 43 Hz。这 2 个频率分别为普通扣件和浮轨扣件轮轨系统的 P2 共振频率。

根据测试得到的转向架区域和车内噪声时域数据,在一定的时间内,连续稳态声的 A 计权声压具有与时变的噪声相同的均方 A 计权声压,这一连续稳态声的声压级就是此时变噪声的等效连续 A 计权声压级 $L_{Aeq,T}$ ^[20],即

$$L_{Aeq,T} = 10 \lg \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right] \quad (3)$$

其中: $t_2 - t_1$ 为规定的时间段(s); $p_A(t)$ 为噪声瞬时 A 计权声压(Pa); p_0 为基准声压, $p_0 = 20 \mu Pa$ 。

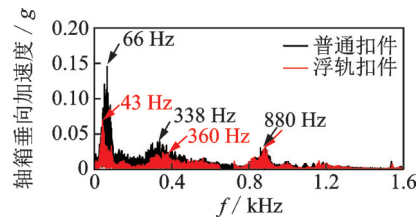


图 10 列车通过普通扣件和浮轨扣件轨道时的轴箱振动加速度频域特性

Fig.10 Frequency domain of vertical vibration acceleration of axle box when the train passes through the conventional fasteners and floating rail fastener track

图 11 为列车通过普通扣件和浮轨扣件轨道时的转向架区域和车内噪声,其中噪声采样频率为 25.6 kHz。由图 11 可知,列车通过同一种扣件轨道时诱发的转向架区域和车内噪声特性曲线类似,在显著频率处转向架的声压级大于车内声压级。1/3 倍频程频谱和窄带频谱均显示出列车通过普通扣件

和浮轨扣件轨道时转向架和车内的显著频率均在630 Hz附近。

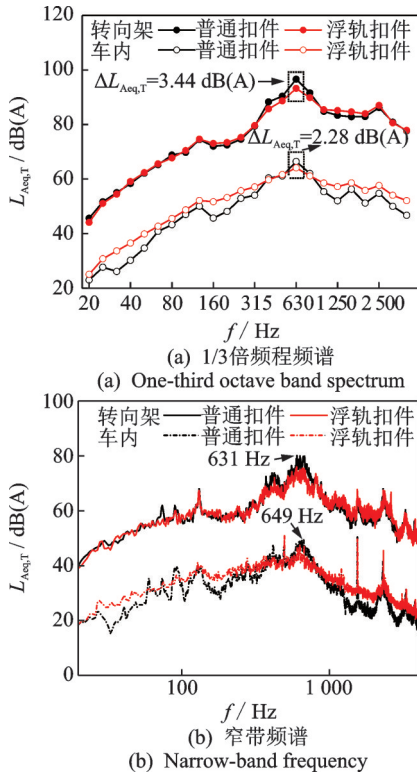


图11 列车通过普通扣件和浮轨扣件轨道时的转向架区域和车内噪声

Fig.11 Noise in the bogie area and in interior when the train passes through the conventional fasteners and floating rail fastener track

从声压级幅值可知,通过普通扣件和浮轨扣件轨道时的转向架区域最大声压级幅值分别为96.67 dB(A)和93.23 dB(A),而车内的最大声压级分别为66.42 dB(A)和64.14 dB(A)。相比普通扣件而言,通过浮轨扣件轨道时转向架区域和车内的最大声压级降低量 $\Delta L_{Aeq,T}$ 分别为3.44 dB(A)和2.28 dB(A)。

3 建筑物振动与二次辐射噪声

列车运行引起沿线固体介质的往复运动而导致地面、建筑物基础或结构的振动,这种由轨道路基扩散的振动在岩土体中以压缩波、剪切波或地表面瑞利波的形式激励建筑物基础。被激励产生振动的建筑构件,其固体表面振动向周围空气介质辐射的声压波称为固体噪声^[18]。为了测量列车通过时引起的建筑物振动和二次辐射噪声,按照文献[18]要求,建筑物振动选择在室内敏感点的卧室地面布置4个测点,以图12所示的建筑物振动与二次辐射噪声现场

测点布置中的 $V_1 \sim V_4$ 表示。二次辐射噪声选择在卧室布置2个测点,距离地面高度为1.2 m,如图12中 S_5 和 S_6 所示。根据现场测量,建筑物与主干道横向距离为20 m,划分为交通干线两侧建筑物,振动噪声影响区为4类^[18]。



图12 建筑物振动与二次辐射噪声现场测点布置

Fig.12 Arrangement of measurement points for buildings vibration and secondary radiation noise

文献[18]规定,建筑物振动的频率范围为4~200 Hz,评价量为1/3倍频程中心频率上Z计权的分频最大振级 VL_{max} (见式(1));二次辐射噪声的频率范围为16~200 Hz,评价量为等效连续A计权声压级(见式(3))。由于列车运行主要集中在昼间(06:00~22:00),夜间(22:00~06:00)列车运行次数极少,因此这里仅给出昼间列车运行引起的建筑物振动和二次辐射噪声测试结果。

图13为建筑物振动与二次辐射噪声特性。图13(a)给出了4~200 Hz范围内建筑物的中心频率振级,图13(b)给出了16~200 Hz范围内二次辐射噪声的声压级。由图13可看出,列车通过普通扣件和浮轨扣件轨道时的建筑物振动显著中心频率峰值分别为63 Hz和50 Hz,中心频率最大振级分别为72.8 dB和59.6 dB,降幅为13.2 dB。另外,列车通过普通扣件轨道时的二次辐射噪声显著中心频率为63 Hz,而浮轨扣件轨道为80 Hz,在显著频率处的声压级降幅为6.6 dB。

按照文献[18]中建筑物振动和二次辐射噪声限值规定,表2为建筑物振动与二次辐射噪声测量值与标准限值对比。可以看出:改造前列车通过普通扣件轨道时,建筑物振动分频最大振级和二次辐射噪声声压级分别为71.9 dB和39.6 dB(A);改造后的建筑物振动和二次辐射噪声分别为58.7 dB和30.7 dB(A)。虽然改造前后的轨道结构均符合规定要求,但改造后的浮轨扣件轨道的减振和降噪效果更佳,振级降低13.2 dB,二次辐射噪声降低8.9 dB(A)。通常来说,人们感觉比较安静的环境或理想的睡眠环境噪声为30~40 dB(A),列车通过普通扣件轨道时引起的二次辐射噪声较大,而改造

为浮轨扣件后会比较安静。

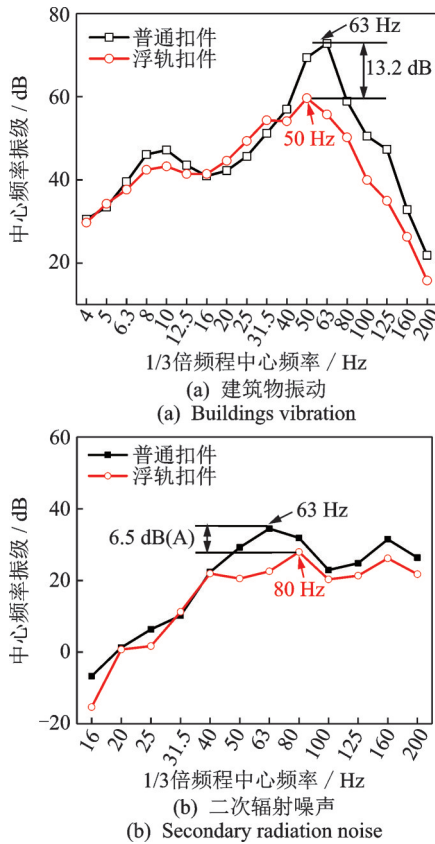


图13 建筑物振动与二次辐射噪声特性

Fig.13 Buildings vibration and secondary radiation noise characteristics

表2 建筑物振动与二次辐射噪声测量值与标准限值对比
Tab.2 Comparison of measured values and standard limits of buildings vibration and secondary radiation noise

项目	振级/dB	是否超限	声压级/dB(A)	是否超限
标准限值(昼间)	75.0	—	45.0	—
普通扣件	71.9	否	39.6	否
浮轨扣件	58.7	否	30.7	否

地铁列车运行时,轮轨相互作用是激振源,诱发的振动向上可传递至车辆(轴箱),向下可传递至轨道基础(钢轨、道床和隧道壁),并沿岩土介质向地面的建筑物传递。图14为轴箱、钢轨、道床、隧道壁和建筑物的振动传递特性。可以看出,无论是普通扣件还是浮轨扣件轨道,钢轨和轴箱振级最大,经过扣件和轨枕隔振后的道床和隧道壁振级次之,再经过岩土和地面后传递至建筑物的振级最小。对于普通扣件轨道,5个关键部件的显著振级中心频率为63 Hz,而浮轨扣件轨道的显著振级中心频率降低为40 Hz。显著频率63 Hz和40 Hz为轮轨系统P2共振引起,是簧下质量在轨道基础上的振动^[22]。P2共

振频率与轨道质量、刚度和簧下质量密切相关,而笔者调查的2种轨道结构的根本差异为扣件刚度,其决定了显著中心频率和减振效果。由于P2共振作用时间较长,向上和向下传递时对车辆和轨道系统造成显著影响。实际上,线路上不可避免地存在轨道不平顺以及车轮周向不圆顺,均可能引起轮轨系统的P2共振,对轮轨接触界面的非均匀磨耗有直接影响。

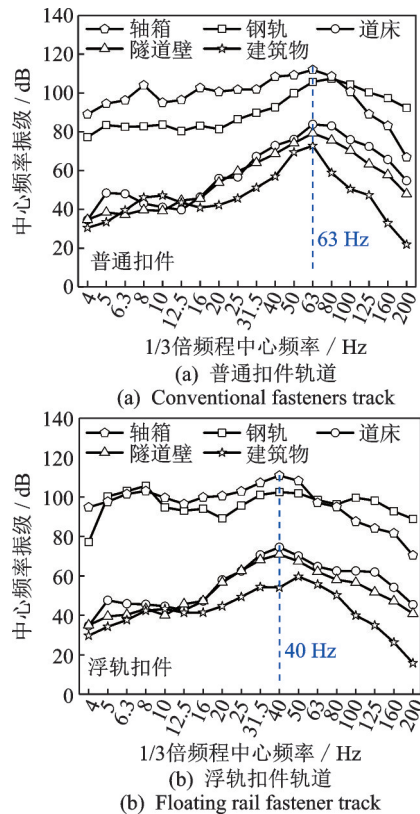


图14 轴箱、钢轨、道床、隧道壁和建筑物的振动传递特性
Fig.14 Vibration transmissibility of axle box, rail, track bed, tunnel wall and building

4 结 论

1) 轮轨相互作用引起的振动向下传递时,相比于普通扣件,浮轨扣件轨道的钢轨、道床和隧道壁垂直振动加速度依次降低了8%,70.6%和71.4%,采用分频最大振级 VL_{max} 评估的轨道减振效果为8.28 dB。

2) 轮轨振动向上传递时引起的转向架区域和车内最大声压级降低量分别为3.44 dB(A)和2.28 dB(A)。

3) 昼间测试区段改造前普通扣件轨道对应的建筑物振动与二次辐射噪声为71.9 dB和39.6 dB(A),改造后浮轨扣件轨道对应的建筑物振动与二次辐射噪声为58.7 dB和30.7 dB(A),建筑物振动与二次辐射噪声分别降低13.2 dB和8.9 dB(A)。

4) 轴箱、钢轨、道床、隧道壁和建筑物的振动与二次辐射噪声的主频均与轮轨系统P2共振频率接近,是引起车辆、轨道和建筑物振动的主要原因。

参 考 文 献

- [1] 雷晓燕,王全金,圣小珍.城市轨道交通环境振动与振动噪声研究[J].铁道学报,2003,25(5):109-113. LEI Xiaoyan, WANG Quanjin, SHENG Xiaozhen. Study on environmental vibration and vibration noise induced by the urban rail transit system[J]. Journal of the China Railway Society, 2003, 25(5): 109-113. (in Chinese)
- [2] 洪俊青,刘庆伟.地铁对周边建筑物振动影响分析[J].振动与冲击,2006,25(4):142-145. HONG Junqing, LIU Qingwei. Analysis of effects induced by subway train on surrounding building vibration [J]. Journal of Vibration and Shock, 2006, 25(4): 142-145. (in Chinese)
- [3] 韩义涛.城市轨道交通减振降噪分析及工程措施[J].铁道工程学报,2010,27(2):85-88. HAN Yitao. Analysis of reducing vibration and noise of urban mass transit and engineering measures for them [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2010, 27(2): 85-88. (in Chinese)
- [4] 耿传智,孙晓明.地铁轨道结构减振效果的实测分析[J].环境污染与防治,2011,33(11):54-57. DI Chuazhi, SUN Xiaoming. In situ experiment and analysis of vibration induced by urban subway transit with different track structures[J]. Environmental Pollution & Control, 2011, 33(11): 54-57. (in Chinese)
- [5] OKUDA H, ASANUMA K, MATSUMOTO N, et al. Dynamic load, resistance and environmental performance of floating ladder track [J]. Quarterly Report of RTRI, 2004, 45(3): 149-155.
- [6] XIA H, DENG Y S, ZOU Y W, et al. Dynamic analysis of rail transit elevated bridge with ladder track [J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2009, 3(1): 2-8.
- [7] 杨新文,何振兴.梯形轨枕轨道振动特性研究[J].振动工程学报,2012,25(4):388-393. YANG Xinwen, HE Zhenxing. Vibration characteristics of ladder sleeper track[J]. Journal of Vibration Engineering, 2012, 25(4): 388-393. (in Chinese)
- [8] 战家旺,夏禾,善田康雄,等.城市轨道交通高架桥梯形轨枕轨道降噪性能试验分析[J].中国铁道科学,2011,32(1):36-40. ZHAN Jianwang, XIA He, ZENDA Yasuo, et al. Experimental study on the noise reduction performance of the ladder sleeper track on the elevated bridges of urban rail transit[J]. China Railway Science, 2011, 32(1): 36-40. (in Chinese)
- [9] DERE Y. Effectiveness of the floating slab track system constructed at Konya Light Rail [J]. Measurement, 2016, 89: 48-54.
- [10] ESZTER L. Mitigation of railway noise and vibration concentrating on the “reducing at source” methods[J]. Intersections/Intersectii, 2004,1(2): 3-11.
- [11] 孙成龙,高亮.北京地铁5号线钢弹簧浮置板轨道减振效果测试与分析[J].铁道建筑,2011(4):110-113. SUN Chenglong, GAO Liang. Experiment and analysis of vibration reduction effect of steel spring floating track of Beijing metro line 5[J]. Railway Engineering, 2011(4): 110-113. (in Chinese)
- [12] LI W, ZHOU Z, ZHAO X, et al. Formation mechanism of short-pitch rail corrugation on metro tangent tracks with resilient fasteners [J]. Vehicle System Dynamics, 2022, DOI: 10.1080/00423114.2022.2086143.
- [13] 金学松,李霞,李伟,等.铁路钢轨波浪形磨损研究进展[J].西南交通大学学报,2016,51(2):264-273. JIN Xuesong, LI Xia, LI Wei, et al. Review of rail corrugation progress [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(2): 264-273. (in Chinese)
- [14] GB/T 19846—2005 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.
- [15] CJJ/T 191—2012 浮置板轨道技术规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [16] GB 10071—1988 城市区域环境振动测量方法[S].北京:中国标准出版社,1988.
- [17] HJ 453—2018 环境影响评价技术导则 城市轨道交通[S].北京:中国环境科学出版社,2019.
- [18] 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:中国建筑工业出版社,2009.
- [19] GB/T 13441.1—2007 机械振动与冲击 人体暴露于全身振动的评价 第1部分:一般要求[S].北京:中国标准出版社,2007.
- [20] GB 14892—2006 城市轨道交通列车噪声限值和测量方法[S].北京:中国标准出版社,2006.
- [21] GB/T 29716.3—2021 机械振动与冲击 信号处理 第3部分:时频分析方法[S].北京:中国标准出版社,2021.
- [22] 关庆华,周业明,李伟,等.车辆轨道系统的P2共振频率研究[J].机械工程学报,2019,55(8):118-127. GUAN Qinghua, ZHOU Yeming, LI Wei, et al. Study on the P2 resonance frequency of vehicle track system [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(8): 118-127. (in Chinese)



第一作者简介:何况,男,1979年6月生,博士生。主要研究方向为轨道交通减振降噪。

E-mail: hekuang1981@163.com

通信作者简介:陶功权,男,1989年3月生,博士、副研究员。主要研究方向为轮轨关系。

E-mail: taogongquan@swjtu.edu.cn