

运营条件下 U 型梁高架地铁线路 环境振动实测分析*

牛晓莉¹ 周宇² 张宏亮³ 康锴³ 段玉振³ 李静敏³

(1. 青岛地铁集团有限公司, 266035, 青岛; 2. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 201804, 上海;
3. 北京城建设计发展集团股份有限公司, 100071, 城市)

摘要 [目的] 对运营条件下的 U 型梁高架地铁线路的环境振动特点进行实测分析。[方法] 以某市运营 6 年的 U 型梁高架地铁线路为研究对象, 分析不同列车速度、不同曲线半径和不同减振措施对 U 型梁高架地铁线路的轨道振动和环境振动的影响。[结果及结论] 当车速在 70 ~ 90 km/h 时, 车速每增加 10 km/h, 地面振动源强处的最大 Z 振级 $V_{LZ, \max}$ 约增加 1.1 ~ 1.4 dB, 符合环评导则的速度修正项建议值; 线路从直线到半径 800 m 曲线, 再到半径 400 m 曲线, 地面源强处振动加速度级会增大 3.7 ~ 4.1 dB, Z 振级增加值略高于环评导则的线路修正项 0.9 ~ 2.4 dB; 减振扣件对 8 ~ 200 Hz 频段的地面振动均有影响, 最大差值处的频率为 50 Hz, 振动加速度级降低约 4.1 dB; 梯形轨枕道床对 4 ~ 200 Hz 频段的地面振动均有影响, 最大差值处的频率为 31.5 Hz, 振动加速度级降低约 8.2 dB。长期运营条件下, 梯形轨枕道床比减振扣件对地面源强处振动的降低效果好, 影响频带宽。

关键词 地铁; 高架线路; U 型梁; 轨道减振; 环境振动
中图分类号 U211.3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.05.034

On-Site Measurement and Analysis of the Environmental Vibration of the Elevated Metro Lines with U-shaped Beams under Operating Conditions

NIU Xiaoli¹, ZHOU Yu², ZHANG Hongliang³, KANG Kai³, DUAN Yuzhen³, LI Jingmin³

(1. Qingdao Metro Group Co., Ltd., 266035, Qingdao, China; 2. The Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, 201804, Shanghai, China; 3. Beijing Urban Construction Design & Development Group Co., Ltd., 100071, Beijing, China)

Abstract [Objective] On-site measurement and analysis of the environmental vibration characteristics are conducted for the elevated metro lines with U-shaped beams under operating con-

ditions. [Method] Taking an elevated metro line with U-shaped beams that has been in operation for 6 years in a certain city as the research object, the impacts of different train speeds, different curve radii and different vibration reduction measures on the track vibration and environmental vibration of the mentioned metro line are analyzed. [Result & Conclusion] When the train speed is between 70 and 90 km/h, for every 10 km/h increase in the train speed, the maximum Z vibration level $V_{LZ, \max}$ at the ground strong vibration source increases by approximately 1.1 to 1.4 dB, which is in line with the recommended value of the speed correction term in the environmental impact assessment guidelines. When the line changes from straight to a 800 m radius curve and then to a 400 m one, the vibration acceleration level at the ground strong vibration source will increase by 3.7 to 4.1 dB, and the increase in the Z vibration level is slightly higher than the line correction term of 0.9 to 2.4 dB in the environmental impact assessment guidelines. The vibration reduction fasteners have an impact on the ground vibration in the frequency band from 8 to 200 Hz, the frequency at the location of the maximum difference is 50 Hz, and the vibration acceleration level is reduced by approximately 4.1 dB. The ladder-sleeper ballast bed has an impact on the ground vibration in the frequency band from 4 to 200 Hz, the frequency at the location of the maximum difference is 31.5 Hz, and the vibration acceleration level is reduced by approximately 8.2 dB. Under long-term operating conditions, the ladder-sleeper ballast bed has a better effect on reducing the vibration at the strong ground vibration source than the vibration reduction fasteners, with a wider affecting frequency band.

Key words metro; elevated line; U-shaped beam; track vibration reduction; environmental vibration

* 山东省重大科技创新工程项目(2019JZZY010427); 青岛地铁集团有限公司项目(M8-ZX-2021-036)

0 引言

城市轨道交通 U 型梁是一种典型的高架线路桥梁。列车反复通过引起的轨道振动沿 U 型梁、桥墩传递至地面,引起高架线路沿线环境振动。因此,高架线路轨道结构采用减振扣件、梯形轨枕道床等减振措施已经较为常见。随着运营时间的累积,对运营中的高架线路的振动特点进行分析就非常必要,这也是评估同类条件下高架线路减振降噪措施性能效果保持情况的重要参考。

已有研究主要针对新建高架线路开展实测分析。文献[1]实测了高速铁路高架段地面振动响应,对比分析了直线段、曲线段的振动特征和衰减规律;文献[2]测试了地铁高架段不同减振措施断面在空车通过时的地面振动,以评估不同减振措施的减振效果;文献[3]测试了温州新建市域铁路简支箱梁桥的地面振动源强,用于为新建市域铁路高架环评作参考;文献[4]针对试运营阶段采取减振措施的高架线路的减振效果进行了实测,以评价减振措施在新线运营期间的减振效果;文献[5]对城际铁路高架车站列车进出站引起的箱梁振动特性进行实测,分析不同列车运行条件引起的振动差异。而在轨道交通长期运营中,轮轨系统、车轨系统都会缓慢发生变化,再加之常规的养护维修,如钢轨打磨和车轮镟修等,会影响车致振动情况。文献[6]对开通运营 3 年左右的山地高架线进行了车致振动测试,分析了振动沿山地地面的衰减规律;文献[7]对山地高架线地面振动特性进行了实测,分析了新线至开通运营 1~3 年内的高架线路的振动特征和振动衰减规律;文献[8]对存在钢轨波磨的高架线简支箱梁段开展了不同车速下的地面振动测试,可以认为是对高架段长期运营下钢轨波磨引起的振动的特征评估。可见,针对运营线路的测试也基本上处于运营初期,以及山地、钢轨波磨等典型条件,尚未有对长期运营条件下高架 U 型梁引起的地面振动进行测试和分析,并比较不同条件下实测振动值与 HJ 453—2018《环境影响评价技术导则 城市轨道交通》^[9](以下简称《环评导则》)修正值的差异。这样的实测分析有助于进一步评估同类条件下减振降噪措施的运营期效果保持和《环评导则》适用性。

本文基于某市运营 6 年以上、岩石地质条件下高架 U 型梁地铁线路的轨道、桥梁和地面振动源强

点进行车致振动现场实测,分析列车速度、曲线半径和减振措施等条件下高架 U 型梁段轨道、桥梁和地面振动,为岩石地质条件下轨道交通高架线的减振措施选型、源强校对和仿真研究、减振措施长期性能评估提供参考。

1 工程概况

1.1 线路条件

该线路于 2018 年 4 月正式开通运营,到测试时已运营了 6 年以上。列车为 4 节编组 B 型车,设计速度为 120 km/h,轴重 ≤ 14.5 t,车轮采用 LM 磨耗型踏面廓形。高架段桥梁主要以 U 型梁为主。高架 U 型梁段轨道采用 60 kg/m 钢轨、DTⅦ2 型扣件(垂直静刚度为 25~35 kN/mm);中等减振采用压缩型减振扣件(垂直静刚度为 15~18 kN/mm),高等减振采用梯形轨枕道床。

分别选取不同列车通过速度、不同曲线半径及不同减振降噪措施地段进行车致振动现场测试。在运营期内,周期性实施了轨道几何形位检测、钢轨探伤,以及扣件、道床状态保养,轨道条件处于正常状态。现场调研的轨道和车辆状态为:车轮圆顺度良好,按规定的镟轮周期和廓形进行修理,车轮存在一定的踏面磨耗但均在限值之内;钢轨表面光带较宽,约 40~50 mm,但不存在轨面波磨、疲劳裂纹和掉块等病害,属于运营和周期性维修条件下的轮轨正常状态。具体测试断面情况如表 1 所示。

1.2 测点布置及计算方法

高架段车致振动测点包括钢轨、道床、桥面以及距桥梁纵向中心线水平距离 7.5 m 的地面处,故每个测试断面共计布置 4 个垂向加速度测点 A1、A2、A3、A4,如图 1 所示。列车通过时引起的上述各位置的垂向振动加速度由压电式加速度传感器测量,型号分别 LC0159TA-500 g(钢轨)、LC0163A-25 g(道床和桥面)和 LC0156-10 g(振动源强),并由 INV3060A 型采集仪记录。

依据《城市区域环境振动测量方法》^[10],选取分频最大振级 V_{Lmax} 和最大 Z 振级 $V_{Lz,max}$ 作为评价指标,计算公式如下:

$$V_{Lmax} = \max_{i=1 \sim m} \left(20 \lg \left(\frac{a_{rms,i}}{a_0} \right) \right) \quad (1)$$

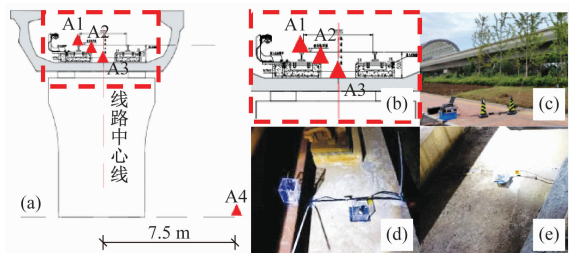
式中:

$a_{rms,i}$ ——中心频率处加速度有效值均值,单位 m/s^2 ;

表 1 测试断面情况

Tab.1 Test section conditions

断面	平面	扣件/道床	车速/(km/h)	测点线路特征
1	直线	普通扣件整体道床	80	基础断面
2	曲线(半径 $R=400\text{ m}$)	普通扣件整体道床	60	半径
3	曲线(半径 $R=800\text{ m}$)	普通扣件整体道床	70	半径
4	直线	普通扣件整体道床	70	速度
5	直线	普通扣件整体道床	90	速度
6	直线	梯形轨枕	80	减振措施
7	直线	减振扣件	80	减振措施



a) 振动测点示意图 b) A1、A2、A3 测点局部图



c) 地面源强测点 d) 钢轨和道床测点 e) 桥面测点

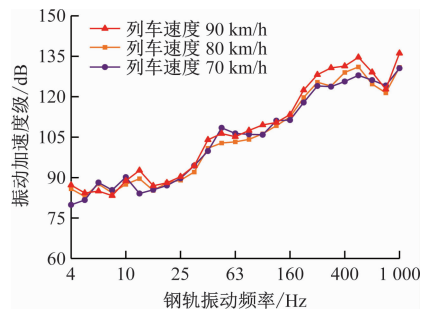
图 1 振动测点布置

Fig.1 Arrangement of vibration measurement points

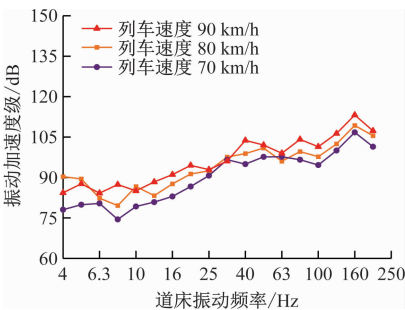
a_0 ——基准加速度,取值为 $1 \times 10^{-6} \text{ m/s}^2$ 。

$$V_{LZ} = 10 \lg \left(\sum_i 10^{(V_{Li} + \alpha_i)/10} \right) \quad (2)$$

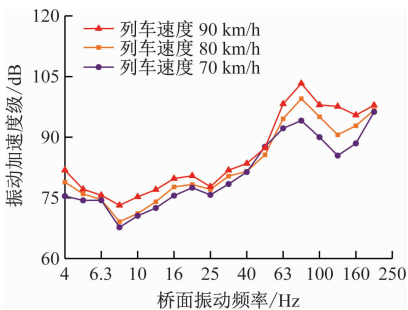
$$V_{LZ, \max} = \max \{ V_{LZ} \} \quad (3)$$



a) 钢轨(A1 测点)



b) 道床(A2 测点)



c) 桥面(A3 测点)

图 2 不同列车速度下的振动加速度 1/3 倍频程

Fig.2 1/3 octave of vibration acceleration under different train speeds

由图 2 可知:不同列车速度(70、80 和 90 km/h)下,钢轨、道床和桥面的振动加速度级均分别呈现趋势相近的分布特征。从图 2 a)可知:钢轨有 400、1 000 Hz 两个振动峰值频率,这与既有研究^[11]

式中:

V_{LZ} ——铅垂向 Z 计权振级(以下简称“Z 振级”),单位 dB;

V_{Li} ——各中心频率对应的振动加速度级,单位 dB;

α_i ——各中心频率的计权因子。

2 桥上振动特征

实测对象均为正常运营的列车,通过断面的车速在规定车速的 $\pm 5 \text{ km/h}$ 范围内,每个断面分别测量 25 趟列车通过时所引起的各点振动数据。

2.1 速度对振动特征的影响

结合表 1 中的断面 1、4 和 5,分析不同列车速度(70、80 和 90 km/h)下所引起的轨道、桥梁和地面振动情况,过车时振动分频振动加速度 1/3 倍频程如图 2 所示。

结果一致,且随着列车速度的增加,钢轨振动频段的振动加速度级均有所增加;在 400 Hz 峰值频率处振动加速度级分别为 127.9、131.1 和 134.6 dB,即在列车速度保持 70 ~ 100 km/h 常速条件下,车速每

增加 10 km/h, 钢轨峰值频率处的垂向振动加速度级约增加 1.7 dB。从图 2 b) 可知: 道床振动峰值频率在 160 Hz, 且随着列车速度的增加对应的振动加速度级峰值略有增加; 在 160 Hz 峰值频率处振动加速度级分别为 106.7、109.3 和 113.2 dB, 即 70 ~ 100 km/h 常速条件下, 车速每增加 10 km/h, 道床峰值频率处的垂向振动加速度级约增加 1.6 dB。同理, 从图 2 c) 可知, 桥面振动的峰值频率在 80 Hz, 随着列车速度的增加, 在 80 Hz 峰值频率处振

动加速度级分别为 94.1、99.5 和 103.3 dB, 即 70 ~ 100 km/h 常速条件下车速每增加 10 km/h, 桥面峰值频率处的垂向振动加速度级约增加 2.3 dB。

2.2 曲线半径对振动特征的影响

结合表 1 中的断面 1、2 和 3, 分析直线以及曲线半径 400、800 m 下列车引起的轨道、桥梁和地面振动情况, 过车时振动加速度 1/3 倍频程如图 3 所示。

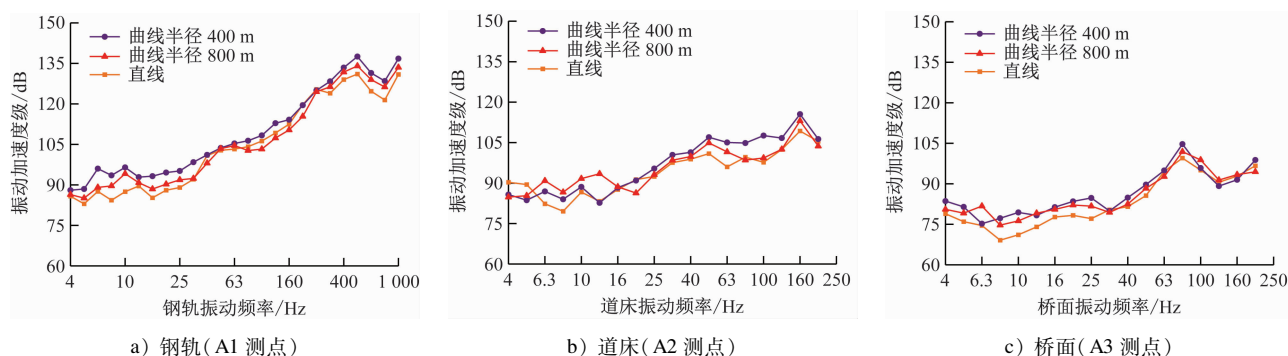


图 3 不同线路条件下的振动加速度 1/3 倍频程

Fig. 3 1/3 octave of vibration acceleration under different line conditions

从图 3 可以看出: 不同直曲线条件下, 钢轨、道床和桥面的振动加速度级均分别呈现趋势相近的分布特征。从图 3 a) 可知: 在 400 Hz 频率上, 半径 400、800 m 曲线的钢轨振动加速度级峰值要比直线的钢轨振动加速度级峰值更大; 直线, 以及曲线半径 800、400 m 的钢轨振动加速度级分别为 131.1、134.1 和 137.5 dB; 尽管通过两条曲线的车速有所降低, 但相比直线段, 半径 800、400 m 的钢轨振动加速度级分别增加了 3.0 和 6.4 dB, 即曲线半径从 800 m 减少到 400 m, 钢轨振动加速度级增大了约 3.4 dB。同理, 从图 3 b)、图 3 c) 可知, 道床和桥面的振动加速度级峰值频率分别为 160 Hz 和 80 Hz, 随着线路从直线变化为曲线以及随着曲线半径的减小, 道床、桥面的振动加速度级分别增大。相比直线段, 半径 800 m、400 m 的道床和桥面振动加速度级分别增加了 3.8、6.2 dB, 以及 2.4、5.2 dB。尽管列车通过曲线的速度相应降低, 但曲线半径从 800 m 减少到 400 m, 道床和桥面的振动加速度级分别增大了约 2.4 和 2.8 dB。

3 地面源强处振动特征

3.1 曲线半径对振动特征的影响

图 4 为不同列车速度 (70、80 和 90 km/h) 下,

地面振动源强处的振动加速度 1/3 倍频程对比图。

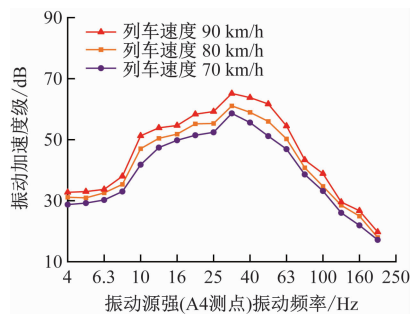


图 4 不同列车速度下振动源强 (A4 测点) 处的振动加速度 1/3 倍频程

Fig. 4 1/3 octave of vibration acceleration at the vibration source strength (A4 measurement point) under different train speeds

从图 4 可知, 不同的列车速度下所引起的地面源强处的振动加速度级趋势分布基本一致, 峰值振动频率均为 31.5 Hz; 随着车速的提高, 源强的振动加速度级均有所增加, 在 31.5 Hz 峰值频率处分别为 58.6、61.1 和 65.1 dB, 即车速每增加 10 km/h, 源强峰值频率处的垂向振动加速度级约增加 1.6 dB。

进一步采用式 (3) 计算地面振动源强处的最大 Z 振级 $V_{LZ, \max}$ 。当车速从 70 km/h 依次提高到 80、90 km/h 时, $V_{LZ, \max}$ 从 63.5 dB 增加到 65.7 dB 和

68.4 dB。即 70 ~ 100 km/h 常速条件下,车速每增加 10 km/h,地面振动源强处最大 Z 振级 $V_{LZ,max}$ 约增加 1.1 ~ 1.4 dB。

《环评导则》振动预测方法中的车速小于等于 100 km/h 下的速度修正项 C_v 计算公式为:

$$C_v = 20 \lg \frac{v}{v_0} \quad (4)$$

式中:

v ——列车通过预测点的运行速度,km/h;

v_0 ——源强处的列车参考速度,km/h。

以 70 km/h 为参考速度,通过式(4)计算可得,速度每增加 10 km/h,最大 Z 振级 $V_{LZ,max}$ 约增加 1.2 dB,与本文实测相符,即经过 6 年以上的运营期,U 型梁高架线路不同列车速度影响下的地面振动源强处的 Z 振级增加值基本符合《环评导则》的速度修正项建议值。

3.2 曲线半径对地面源强振动的影响

图 5 为不同线路条件下地面振动源强处的振动加速度 1/3 倍频程。从图 5 可以看出,曲线区段的地面振动源强处的振动加速度级同样会增大,半径 400 m 和半径 800 m 处振动源强处振动加速度级峰值频率均在 40 Hz,直线段的峰值频率略低为 31.5 Hz。随着线路曲线半径减小,振动加速度级逐渐增加,其峰值频率分别为 61.1、65.8 和 70.0 dB。

采用式(3)计算地面振动源强处的最大 Z 振级 $V_{LZ,max}$ 。当线路从直线变为曲线(曲线半径 800、400 m)时,尽管列车通过曲线的速度响应改变,但地面振动源强处最大 Z 振级 $V_{LZ,max}$ 从 70.7 dB 增加到 74.8 和 78.5 dB。由此可见,曲线情况下,线路从直

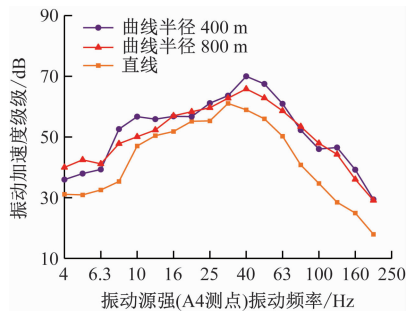


图 5 不同线路条件下振动源强(A4 测点)处的振动加速度 1/3 倍频程

Fig. 5 1/3 octave of vibration acceleration at the vibration source strength (A4 measurement point) under different line conditions

线到半径 800 m 曲线,再到半径 400 m 曲线,地面源强处的振动加速度级会增大 3.7 ~ 4.1 dB。

《环评导则》振动预测方法中曲线条件下的修正项 C_R 计算公式:

$$C_R = 16v/R \quad (5)$$

按式(5)计算 R 为 800 m 和 400 m 时的修正项分别为 1.6 和 2.8 dB。即经过 6 年多的运营期,U 型梁高架线路不同曲线条件下地面振动源强处的 Z 振级增加值略高于《环评导则》的线路修正项 0.9 ~ 2.4 dB。

4 不同减振措施对振动的影响

结合表 1 中的断面 1、6 和 7,分析不同减振措施(普通扣件、减振扣件和梯形轨枕)下轨道、道床、桥面和地面源强的振动情况,过车时振动加速度 1/3 倍频程如图 6 所示。

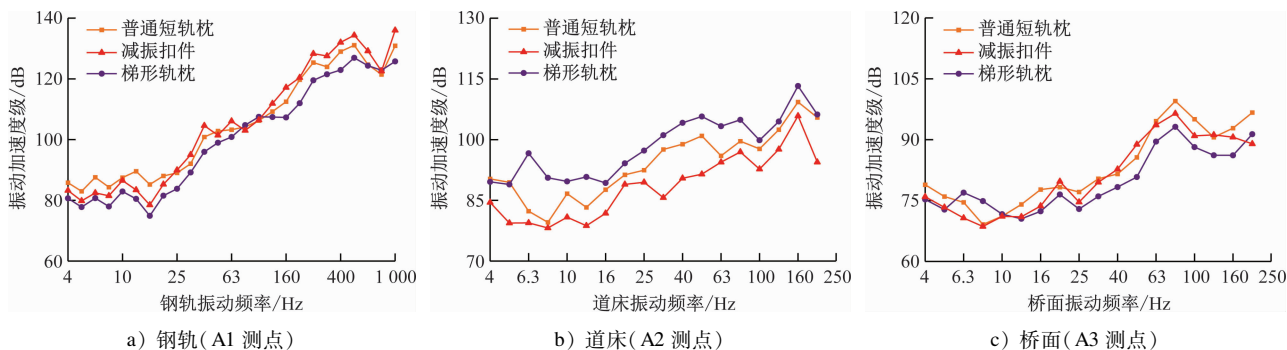


图 6 不同减振措施下的振动加速度 1/3 倍频程

Fig. 6 1/3 octave of vibration acceleration under different vibration reduction measures

从图 6 a) 可知:钢轨振动的频率分布中,由于减振扣件位于钢轨之下,对其振动影响最明显,且减振扣件的钢轨振动大于普通扣件的;在 400 Hz 频

率处,减振扣件和普通扣件处的钢轨振动加速度级分别约为 134.4 和 131.1 dB,说明扣件减振降低了钢轨传递下来的振动,同时减弱了钢轨支承,增大

了钢轨振动加速度级,这与既有研究^[5]结果一致;而梯形轨枕轨道是对道床减振,所以梯形轨枕处的钢轨振动加速度级有所降低,在 400 Hz 处约为 126.9 dB。

从图 6 b)可知:道床振动加速度级峰值频率为 160 Hz,在该频率处,普通扣件、减振扣件和梯形轨枕处的道床振动加速度级分别约为 109.3、105.9 和 113.2 dB。梯形轨枕道床为高等减振措施,通过道床与桥面的软隔离,实现了轨道减振。根据上述原理和能量守恒原则可知,梯形轨道道床的振动加速度级应较普通道床的大。

从图 6 c)可知:桥面振动峰值为 80 Hz,在该频率处,普通扣件、减振扣件和梯形轨枕道床处的桥面振动加速度级分别约为 99.5、96.5 和 93.2 dB,说明减振扣件对桥面振动加速度级有 3 dB 的降低,梯形轨枕道床对桥面振动加速度级有 6.3 dB 的降低。

进一步对比采用不同减振措施断面的地面振动源强处的振动加速度 1/3 倍频程,如图 7 所示。

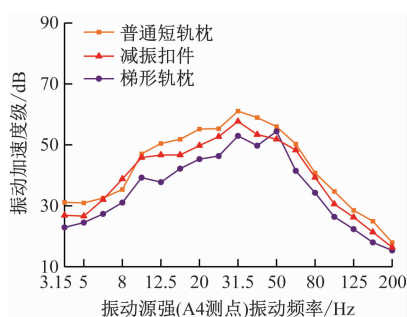


图 7 不同减振措施下振动源强(A4 测点)处的振动加速度 1/3 倍频程

Fig. 7 1/3 octave of vibration acceleration at the vibration source strength (A4 measurement point) under different vibration reduction measures

从图 7 可知:普通扣件和减振扣件处地面振动源强处的振动加速度级峰值频率均为 31.5 Hz,梯形轨枕处地面振动源强处的峰值频率为 31.5 和 50 Hz。从峰值来看,普通扣件、减振扣件和梯形轨枕道床的地面源强点振动加速度级分别约为 61.1 dB (31.5 Hz)、57.7 dB (31.5 Hz) 和 54.4 dB (50 Hz),说明减振扣件和梯形轨枕均能有效降低高架桥线路地面振动源强处的振级。其中,减振扣件对 8 ~ 200 Hz 频段的地面振动均有影响,最大差值频率在 50 Hz 处,振动加速度级相差约 4.1 dB;梯形轨枕道床对 4 ~ 200 Hz 频段的地面振动均有影响,最大差值频率在 31.5 Hz 处,振动加速度级相差约 8.2 dB。

由此可见,长期运营时,梯形轨枕性能仍旧能较好保持,梯形轨枕对地面源强的振动降低效果好、影响频带宽。

5 结论

1) 不同列车速度 (70、80 和 90 km/h) 下,钢轨、道床、桥面和振动源强处的振动加速度级趋势分布基本一致,峰值频率没有变化,幅值随着速度增加而增加。当车速从 70 km/h 提高到 90 km/h,每增加 10 km/h,地面振动源强处最大 Z 振级 $V_{LZ,max}$ 约增加 1.1 ~ 1.4 dB,基本符合《环评导则》的速度修正项建议值。

2) 不同线路条件下,钢轨、道床和桥面处振动加速度级趋势分布基本一致,峰值频率没有变化,幅值随着曲线半径降低而增加。尽管曲线对应的车速不同,但线路从直线到半径 800 m 曲线再到半径 400 m 曲线,地面源强处的振动加速度级会增大 3.7 ~ 4.1 dB。长期运营下,U 型梁高架线路不同曲线条件下地面振动源强处的 Z 振级增加值略高于《环评导则》的线路修正项 0.9 ~ 2.4 dB。

3) 经多年运营,减振扣件和梯形轨枕均能有效降低高架桥地面振动源强处的振级,梯形轨枕比减振扣件对地面源强处振动的降低效果好,影响频带宽。

参考文献

- [1] 何鉴辞,童湘雄,唐剑,等.某高速铁路高架线路直线与曲线段环境振动实测对比分析[J].铁道标准设计,2018,62(6):40.
HE Jianci, TONG Xiangxiong, TANG Jian, et al. Contrastive analysis of environment vibration of elevated straight and curved lines of high-speed railway[J]. Railway Standard Design, 2018, 62(6): 40.
- [2] 冯立力,许永富,尹铁锋,等.宁波轨道交通高架线路现场振动测试与分析[J].都市快轨交通,2018,31(4):92.
FENG Lili, XU Yongfu, YIN Tiefeng, et al. Vibration test and analysis in the Ningbo urban rail transit viaduct[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2018, 31(4): 92.
- [3] 罗伟.温州市域铁路高架线环境振动源强试验研究[J].都市快轨交通,2021,34(3):108.
LUO Wei. Experimental study on the environmental vibration source of Wenzhou suburban railway elevated line[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2021, 34(3): 108.
- [4] 刘锦辉,刘鹏辉,杨宜谦,等.高架线减振轨道减振降噪效果测试与分析[J].振动与冲击,2022,41(15):83.
LIU Jinhui, LIU Penghui, YANG Yiqian, et al. Tests and analy-

- sis for vibration and noise reduction effect of track on metro viaduct[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(15): 83.
- [5] 蔡陈之, 邓苏鹏, 何旭辉, 等. 穗莞深城际铁路高架车站振动实测与分析[J]. *铁道科学与工程学报*, 2022, 19(5): 1395.
- CAI Chenzhi, DENG Supeng, HE Xuhui, et al. Vibration measurement and analysis of an elevated station of Dongguan-Shenzhen intercity railway[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2022, 19(5): 1395.
- [6] 杨金川, 丁选明, 瞿立明, 等. 山区地形条件下高架轨道交通引起地面振动实测研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2021, 41(1): 133.
- YANG Jinchuan, DING Xuanming, QU Liming, et al. Field tests on ground vibration caused by viaduct rail transit under mountainous terrain conditions[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2021, 41(1): 133.
- [7] 干灵锋, 杨芳乙, 李力克, 等. 山地城市轨道交通高架段列车引起环境振动实测研究[J]. *噪声与振动控制*, 2024, 44(1): 255.
- GAN Lingfeng, YANG Fangyi, LI Like, et al. Field test and analysis of environmental vibration caused by viaduct rail transit in mountainous cities[J]. *Noise and Vibration Control*, 2024, 44(1): 255.
- [8] 宋立忠, 冯青松, 孙坤, 等. 城市轨道交通高架钢轨波磨地段振动噪声试验[J]. *交通运输工程学报*, 2021, 21(3): 159.
- SONG Lizhong, FENG Qingsong, SUN Kun, et al. Test on vibration noise of rail corrugation section on urban rail transit viaduct[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2021, 21(3): 159.
- [9] 中华人民共和国. 生态环境部. 环境影响评价技术导则 城市轨道交通: HJ 453—2018[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2019.
- Ministry of Ecology and Environment of the people's Republic of China. Technical guidelines for environmental impact assessment—Urban rail transit: HJ 453—2018[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2019.
- [10] 国家环境保护局. 城市区域环境振动测量方法: GB 10071—1988[S]. 北京: 中国标准出版社, 1989.
- State Bureau of Environmental Protection of the People's Republic of China. Measurement method of environmental vibration of urban area: GB 10071—1988[S]. Beijing: Standards Press of China, 1989.
- [11] 黄瑞堂, 2023. 城市轨道交通不同减振轨道结构振动测试与分析[J]. *噪声与振动控制*, 43(3): 232.
- HUANG Ruitang. Vibration test and analysis of different damping track structures in urban rail transit[J]. *Noise and Vibration Control*, 2023, 43(3): 232.
- [12] 高国飞, 杨运泽, 闫亚娜, 等. 我国城市轨道交通运营线路旅行速度和速度效率分析[J]. *都市轨道交通*, 2024, 37(4): 38.
- GAO Guofei, YANG Yunze, YAN Yana, et al. Travel speed and speed efficiency of existing urban rail transit lines in China[J]. *Urban rapid rail transit*, 2024, 37(4): 38.
- [13] 刘文武, 冯青松, 罗信伟, 等. 地铁隧道振动源强受车辆状态影响因素实测分析[J]. *都市轨道交通*, 2024, 37(4): 24.
- LIU Wenwu, FENG Qingsong, LUO Xinwei, et al. Measured analysis of vibration source strength in metro tunnels influenced by vehicle condition factors[J]. *Urban rapid rail transit*, 2024, 37(4): 24.
- [14] 韦海菊, 王日艺. 基于柔性车体的地铁车辆垂向耦合振动规律研究[J]. *城市轨道交通研究*, 2024, 27(5): 35.
- WEI Haiju, WANG Riyi. Study on vertical coupling vibration law of metro vehicle based on flexible carbody[J]. *Urban Mass Transit*, 2024, 27(5): 35.
- [15] 刘寅虎, 唐永明, 杨震寰, 等. 制动装置推出刚度对轨道交通车辆振动性能的影响[J]. *城市轨道交通研究*, 2024, 27(6): 49.
- LIU Yinhu, TANG Yongming, YANG Zhenhuan, et al. Influence of brake device push-out stiffness on vibration performance of rail transit vehicle[J]. *Urban Mass Transit*, 2024, 27(6): 49.
- [16] 徐航, 荆国强, 马长飞, 等. 大型交通枢纽结构振动传播规律及隔振/震措施[J]. *城市轨道交通研究*, 2024, 27(2): 7.
- XU Hang, JING Guoqiang, MA Changfei, et al. Propagation law of structural vibration in large transportation hub and vibration/seismic isolation measures[J]. *Urban Mass Transit*, 2024, 27(2): 7.
- [17] 杨刚, 何远鹏, 韩健, 等. 嵌入式轨道系统振动传递研究[J]. *城市轨道交通研究*, 2024, 27(7): 197.
- YANG Gang, HE Yuanpeng, HAN Jian, et al. Research on embedded track system vibration transmission[J]. *Urban Mass Transit*, 2024, 27(7): 197.

· 收稿日期:2025-01-08 修回日期:2025-02-12 出版日期:2025-05-10

Received:2025-01-08 Revised:2025-02-12 Published:2025-05-10

· 通信作者:牛晓莉,高级工程师,3571424588@qq.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license