

文章编号: 1005-0523(2025)01-0001-07



## 地铁车辆段试车线环境振动影响实测分析

刘庆杰<sup>1</sup>, 陈松<sup>1,2</sup>, 雷晓燕<sup>1</sup>, 徐浩能<sup>1</sup>, 冯青松<sup>1</sup>

(1. 华东交通大学交通运输工程学院, 江西南昌 330013; 2. 江西交通职业技术学院建筑工程学院, 江西南昌 330013)

**摘要:** 为探究地铁车辆行车对环境振动的影响规律, 通过对某地铁车辆段试车线环境振动进行现场实测, 评估不同车速以及不同轨道形式对周围环境振动造成的影响, 并采用1/3倍频的方法研究了源强以及盖板的振动特性。研究表明: 在30~60 km/h区间内, 车速每增加10 km/h, 普通断面的轨枕和邻柱处Z振级分别增加2.2 dB和1.7 dB; 梯形轨枕能大幅减少传递给轨道外结构的振动, 相比于普通断面, 梯形轨枕断面的轨枕和7.5 m处地面测点Z振级分别减小3.4 dB和10.1 dB; 试车线上列车运行速度较快, 引起的振动能量较大, 如不加以控制将远超振动标准允许值, 设置在试车线附近24 m范围内的上盖建筑物的振动值需重点关注。

**关键词:** 试车线; 振动; 实测; 车速; 梯形轨枕

中图分类号: U231

文献标志码: A

本文引用格式: 刘庆杰, 陈松, 雷晓燕, 等. 地铁车辆段试车线环境振动影响实测分析[J]. 华东交通大学, 2025, 42(1): 1-7.

## Measured Analysis of Environmental Vibration Influence on Testing Line of Metro Depot

Liu Qingjie<sup>1</sup>, Chen Song<sup>1,2</sup>, Lei Xiaoyan<sup>1</sup>, Xu Haoneng<sup>1</sup>, Feng Qingsong<sup>1</sup>

(1. School of Transportation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;

2. School of Architecture and Engineering, Jiangxi V&T College of Communications, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** In recent years, the rail transit industry has developed rapidly, but the environmental vibration problems caused by metro operation have attracted more and more attention. In this paper, the environmental vibration of the test line of a metro depot is measured on site, and the influence of different vehicle speeds and different track forms on the surrounding environmental vibration is evaluated. The vibration characteristics of the source strength and the cover plate are studied by using the method of 1/3 frequency doubling. The results show that in the range of 30~60 km/h, for every 10 km/h increase in vehicle speed, the Z vibration level at the sleeper and adjacent column of the ordinary section increases by 2.2 dB and 1.7 dB respectively. The trapezoidal sleeper can greatly reduce the vibration transmitted to the outer structure of the track. Compared with the ordinary section, the Z vibration levels of the sleeper and the ground measuring point at 7.5 m of the trapezoidal sleeper section are reduced by 3.4 dB and 10.1 dB, respectively. The train running speed on the test line is fast, and the vibration energy caused by it is large. If it is not controlled, it will far exceed the allowable value of the vibration standard. The vibration value of the upper building set within 24 m near the testing line needs to be focused on.

**Key words:** testing line; vibration; field measurement; train speed; trapezoidal sleeper

收稿日期: 2024-05-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(51868024)

**Citation format:** LIU Q J, CHENG S, LEI X Y, et al. Measured analysis of environmental vibration influence on testing line of metro depot[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2025, 42(1): 1-7.

截至2023年底,我国内地有59个城市开通城市轨道交通线路,运营总里程约11 232.65 km,其中地铁运营里程为8 547.67 km,占比76.1%<sup>[1]</sup>。地铁车辆段是供地铁车辆停放、检查、整备、运用和修理的区域<sup>[2-3]</sup>,通常地铁车辆段设置在线路的首尾站附近,可以看作是地铁的“停车场”,其占地面积大,通常在25公顷以上。近年来国内各大城市均大力发展TOD模式——即以公共交通为导向的发展模式<sup>[4]</sup>,通俗来讲就是在地铁上面“盖房子”,这种做法极大地提高了车辆段土地利用效率,但缩短了轨道交通振源与建筑之间的距离。车辆段内的车辆通常在凌晨和深夜运行,运行产生的振动问题有可能会影响上盖居民的正常生活<sup>[5-6]</sup>,因此掌握振动传播规律,有效控制振动意义重大。

目前国内外专家已开展了大量的研究工作<sup>[7-11]</sup>,冯青松等<sup>[12-13]</sup>在双层车辆段内进行了现场实测,发现在80 Hz以上频段,土体对高频能量的衰减作用使得二层行车引起的上盖建筑低层振动能量大于一层行车;邹超等<sup>[14]</sup>分析对比了试车线和咽喉区行车对同一栋建筑振动影响的差别,发现不同区域行车引起该建筑的振动主频不同;汪益敏等<sup>[15]</sup>实测了深圳某地铁车辆段一上盖钢结构建筑物,发现该建筑结构固有频率与激励动力特性有关;陈艳明等<sup>[16-17]</sup>对下沉式车辆段列检库区域进行了现场实测,发现列车运行引起上盖平台的振动随着与线路中心距离的增大呈线性衰减规律,其中端部股道行车时线性衰减率比中部股道行车要大;谢伟平等<sup>[18]</sup>对杭州某车辆段试车线上盖建筑进行实测,发现车速改变并不能引起楼板振动主频的变化,列车引起楼板的振动主频始终集中在其自振频率处。

综上所述,既有的研究多集中在车辆段的运用库、检修库等库房上盖区域,而对试车线区域的实测研究较少,且数据随车次变化的随机性较大,故本文采用单列专车来回运行以保证数据的可靠性。本文对该车辆段试车线源强及盖板区域进行现场实测,分析不同因素下试车线列车对周围环境的振动影响程度,并以普通混凝土轨枕为对照,测试梯形轨枕的减振效果,所得结论可为类似工程减振控制及

上盖建筑布局提供一定参考。

## 1 试验概况

本文的实测场地位于珠三角地区某地铁车辆段,该车辆段为架空式单层车辆段,总占地面积约为46.7公顷,其主体构筑物包括停车列检库、周月检库、静调库、联合检修库、洗车机库、工程车库和试车线等,其中试车线的主要作用为测试新车与检修后列车运行时的综合性能,该区域列车最大速度可达80 km/h,为其他区域列车速度的4~8倍。既有研究表明<sup>[19-20]</sup>,列车速度大小与其造成的环境振动强度成正比。因此,本文在试车线上设置两个断面研究试车线列车运行造成的环境振动影响程度,如图1所示,分别为SC-1和SC-2断面,其中SC-1为梯形轨枕断面,轨道断面如图2所示;SC-2为普通轨道断面,该断面为采用普通钢筋混凝土轨枕的有砟轨道。

试车线两断面处钢轨扣件均为弹条I型分叉式扣件。在现场试验时,列车在试车线上运行先后经过上述两断面。两断面测点分布示意如图3所示,由于现场条件有限,普通轨道断面仅在源强处设置A1~A3三个测点,分别为轨枕(A1)、邻柱(A2)和

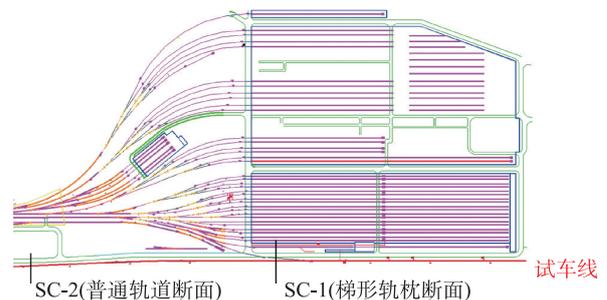


图1 车辆段平面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the metro depot

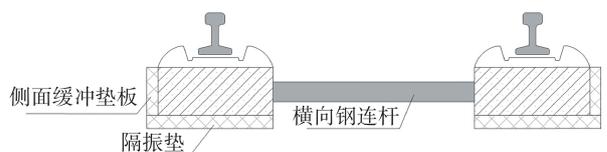


图2 梯形轨枕剖面图

Fig. 2 Trapezoidal sleeper profile

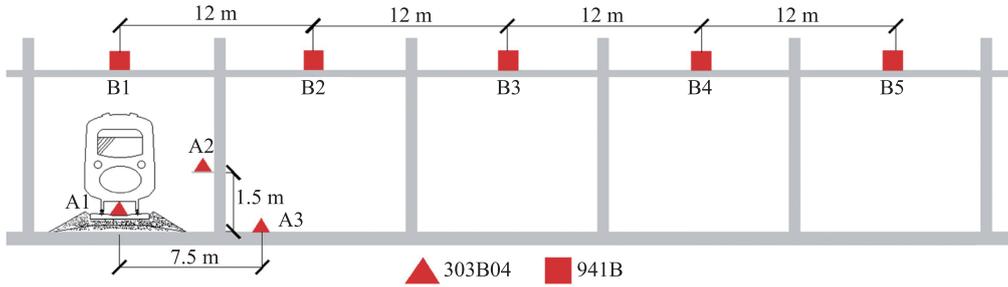


图3 测点布置图

Fig. 3 Measuring point layout

7.5 m处地面(A3);梯形轨枕断面在源强处设置轨枕(A1)和7.5 m处地面(A3)两个测点,在断面上方盖板处设置5个测点,测点均位于盖板正中央,具体见图3中B1~B5,各测点间相距约12 m,其中B1测点位于行车股道正上方。

为消除车辆因素带来的实验误差,本次测试采用单辆服役状态良好的8节编组D型专车在试车线上来回行车。所用数据采集仪为NI CRIO-9031和SQuadriga III测试系统,其中NI CRIO-9031用于试车线源强的垂向振动测试,通过设置加速度峰值自动触发采样进行监测;SQuadriga III则用于车辆段上方盖板的垂向振动测试,为人工按照发车时间手动触发以保证盖上和盖下振动数据同步采集,盖上和盖下采样频率均设置为400 Hz。轨枕和7.5 m地面振动数据通过393B04传感器采集,上方盖板振动数据通过941B传感器采集。试验共采集数据27组,车速分布在30~60 km/h之间,具体工况如下:工况1:车速30 km/h行车,共1组;工况2:车速40 km/h行车,共12组;工况3:车速50 km/h行车,共1组;工况4:车速60 km/h行车,共13组。

## 2 车速对试车线周围结构振动影响分析

本节以普通轨道断面源强振动数据为分析对

象,研究不同车速下源强各测点振动响应变化情况,各车速下典型时程数据如图4所示,由图4可知,随着车速的增加,各测点振动加速度均有所增加。

实测离散振动加速度信号{a}需转换成时域内振动加速度有效值 $a_{rms}$ ,相关公式如下

$$a_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt} \quad (1)$$

式中: $N$ 为离散数据点个数; $m=0,1,2,\dots,N-1$ 。

振动加速度级VAL定义为

$$VAL = 20 \lg \left( \frac{a_{rms}}{a_0} \right) \quad (2)$$

式中: $a_0$ 为基准加速度,取 $1 \times 10^{-6} \text{ m/s}^2$ ;按ISO 2631-1:1997/Amd 1:2010标准中给出的Z计权因子对式(2)进行修正即可得到1/3倍频程中心频率上的Z计权振动加速度级,记为Z振级( $VL_z$ ),作为本文评价车致振动对轨道结构及盖板影响大小的评价量。

由于40 km/h和60 km/h行车工况有多组数据,本文后续对比结果为多组数据平均所得,进一步将源强各测点振动响应随车速变化情况整理如图5所示。

由图5可知,随着车速的增加,轨枕和邻柱的振动加速度有效值与Z振级均呈增大趋势,而由于7.5 m处地面测点距振源较远,其振动水平较为稳

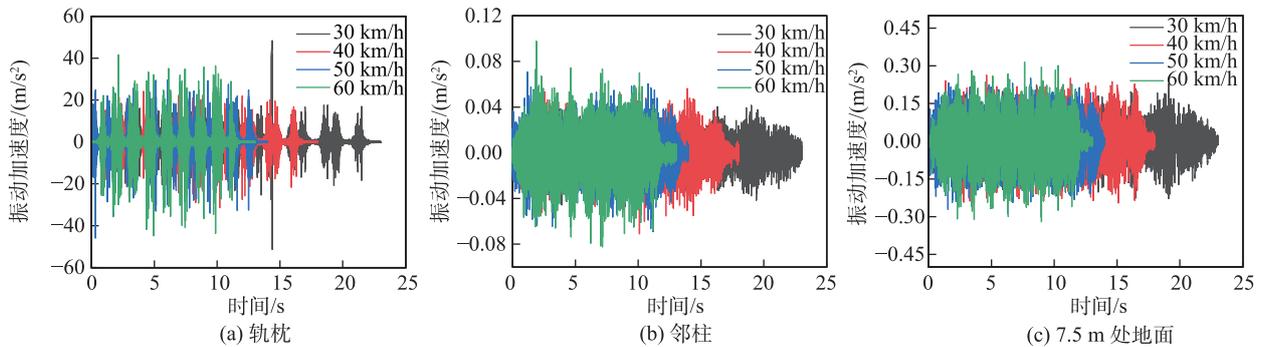


图4 不同车速下时程图

Fig. 4 Time history diagram at different speeds

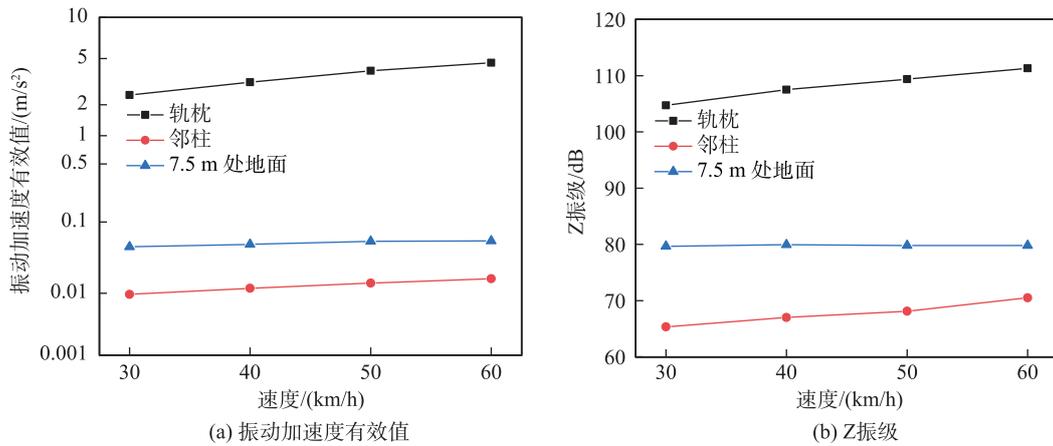


图5 不同车速下源强各测点振动响应

Fig. 5 Vibration response of each measuring point of source intensity at different speeds

定。当车速由 30 km/h 增加至 60 km/h, 轨枕处振动加速度有效值由  $2.456 m/s^2$  增加至  $4.624 m/s^2$ , 增幅达 88%, Z 振级由 104.7 dB 增加至 111.3 dB, 增大 6.6 dB; 邻柱处振动加速度有效值由  $0.010 m/s^2$  增加至  $0.017 m/s^2$ , 增幅达 70%, Z 振级由 65.3 dB 增加至 70.5 dB, 增大 5.2 dB; 7.5 m 处地面振动响应随速度增加的变化趋势较小, 其振动加速度有效值分布在  $0.048 \sim 0.056 m/s^2$ , Z 振级分布在 79.7~79.9 dB。综上, 列车车速平均增加 10 km/h, 轨枕和邻柱处的振动加速度有效值分别增加  $0.723 m/s^2$  和  $0.0023 m/s^2$ , Z 振级分别增加 2.2 dB 和 1.7 dB。

由以上结果可知, 随着与振源距离的增加, 车速变化引起各测点振动响应变化趋势越来越小, 分析其原因可能为: 高频能量在振动路径中的衰减速率比低频快, 振动传至较远地方后, 其中的高频成分大大减少, 因此越靠近振源的结构, 其振动能量中的高频成分就越多, 另外车速的增加使得高频能量强度随之增加, 从而导致高频成分多的结构振动强度变化也大。

### 3 轨道形式对试车线周围结构振动影响分析

选取车速为 60 km/h 工况下两断面源强各测点振动响应为研究对象, 分析不同轨道形式对试车线周围结构振动影响大小, 两断面源强处振动响应汇总如表 1 所示, 在同一车速下, 相比于普通断面, 梯形轨枕断面各测点振动强度明显减小, 其轨枕和 7.5 m 处地面测点振动加速度有效值分别减少了  $0.184 m/s^2$  和  $0.040 m/s^2$ , 减幅分别为 4.0% 和 71.4%,

表 1 两断面源强测点振动响应

Tab.1 Vibration response of source strength measuring points of two sections

测点	指标	普通断面	梯形轨枕断面
轨枕	主频/Hz		
	振动加速度有效值/( $m/s^2$ )	4.624	4.440
	Z 振级/dB	111.3	107.9
7.5 m 处地面	主频/Hz	30~125	30~125
	振动加速度有效值/( $m/s^2$ )	0.056	0.016
	Z 振级/dB	79.8	69.7

另外轨枕和 7.5 m 处地面测点 Z 振级分别减小 3.4 dB 和 10.1 dB。由此可以看出, 梯形轨枕在车辆段试车线应用时表现出来的减振效果较好, 对周围环境的减振效果可达 10 dB 左右, 其减振作用主要归功于其特殊结构: 梯形轨枕结构类似“梯子”, 其左右两边各有一块预制预应力混凝土纵梁及其限位凸台, 两块纵梁靠中间钢横梁连接, 梯形轨枕下面配有减振垫<sup>[21]</sup>, 与钢轨、扣件形成了双弹性叠合梁, 减振垫的弹性作用极大地降低了振动能量的向外扩散。

图 6 给出了轨枕和 7.5 m 处地面测点在 1~200 Hz 内的振动 1/3 倍频, 从图 6(a) 可以看出, 两断面的轨枕测点在 31.5 Hz 以后频段的分频振级均随着频率的增加而增加, 普通断面的轨枕测点在 125 Hz 处达到第一峰值, 而梯形轨枕断面的轨枕测点在 63 Hz 处达到第一峰值。对比 1~40 Hz 内频段, 发现梯形轨枕的存在使得该频段的振动能量大幅降低, 该频段内各分频振级降低约 9~27 dB, 而在 80 Hz 以上频段, 二者数值相当。

从图 6(b) 可以看出, 两断面的 7.5 m 处地面测

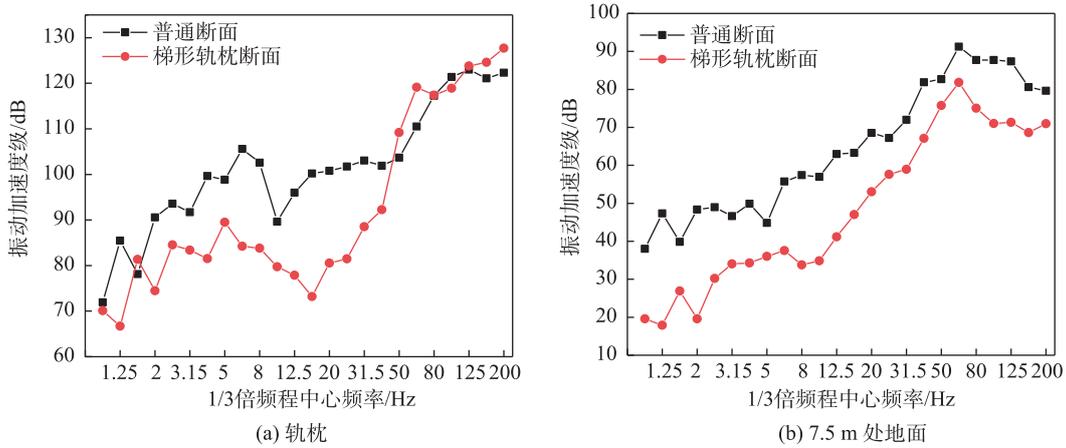


图6 不同轨道形式下各测点振动1/3倍频图

Fig. 6 1/3-octave diagram of vibration at each measurement point for different track forms

点的振动峰值均出现在63 Hz处,并且二者分频振级随频率增加的变化趋势相似,振动主频段均分布在30~125 Hz以内。在全频段内,梯形轨枕断面的7.5 m处地面测点振动强度均小于普通断面,梯形轨枕的减振作用使得各频率下振级降低约7~29 dB。

#### 4 盖板振动传递分析

选取车速为60 km/h工况下梯形轨枕断面上方盖板振动响应为研究对象,分析车致振动沿盖板横向的传递规律,盖板各测点振动响应汇总如表2所示。由表2可知,随着与线路中心距离的增加,盖板各测点振动加速度有效值与Z振级逐渐减小,距离每增加1 m,振动加速度衰减约0.001 1 m/s<sup>2</sup>,Z振级衰减约0.39 dB。

表2 盖板各测点振动响应

Tab.2 Vibration response of each measuring point of the cover plate

指标	B1	B2	B3	B4	B5
主频/Hz	40~120				
振动加速度有效值/(m/s <sup>2</sup> )	0.058	0.030	0.019	0.010	0.007
Z振级/dB	83.5	76.8	74.8	66.4	64.6

图7为盖板各测点垂向振动加速度1/3倍频图,由图7可知,各测点振动主频在40~120 Hz,峰值频率均出现在63 Hz处,这与源强处振动峰值频率相同,表明峰值频率的大小与列车行至该断面时的轮轨动力特性有关。在大部分频段内,分频振动加速度级也随着与线路中心的距离增加而减小,其中衰

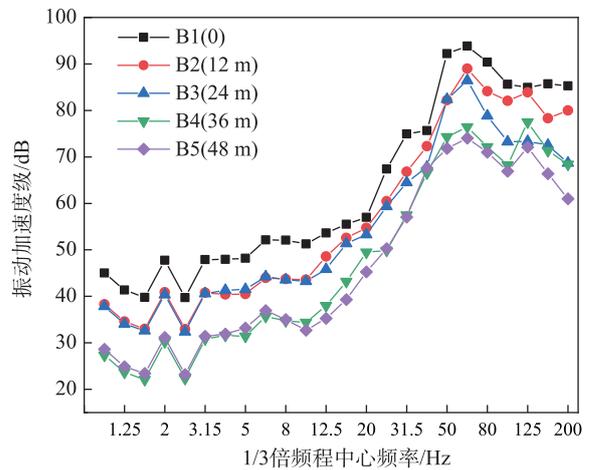


图7 盖板各测点振动1/3倍频图

Fig. 7 1/3-octave diagram of vibration at each measuring point of the cover plate

减最大频段出现在50 Hz以上。另外在1~20 Hz内的低频段,距离线路中心0~12 m、24~36 m区域的振动能量衰减明显,而在12~24 m、36~48 m区域内振动能量几乎保持不变,这一点需结合现场环境作进一步分析。

#### 5 结论

本文采用现场实测的方法研究了珠三角地区某单层车辆段试车线区域车致振动源强及盖上环境振动的影响,对比分析了不同车速及不同轨道形式下振动水平的差异,具体结论如下。

1) 车速在30~60 km/h区间内,每增加10 km/h,普通断面的轨枕和邻柱处振动加速度有效值分别增

加 $0.723\text{ m/s}^2$ 和 $0.0023\text{ m/s}^2$ , Z振级分别增加2.2 dB和1.7 dB, 而7.5 m处地面振动能量随速度增加的变化趋势较小。

2) 梯形轨枕能大幅减少传递给轨道外结构的振动, 相比于普通断面, 梯形轨枕断面的轨枕和7.5 m处地面测点振动加速度有效值减幅分别为4.0%和71.4%, 且Z振级分别减小3.4 dB和10.1 dB。

3) 随着与线路中心距离的增加, 梯形轨枕断面上方盖板各测点振动加速度有效值与Z振级单调递减, 振动加速度衰减速率约为 $0.0011\text{ (m/s}^2\text{)/m}$ , Z振级衰减速率约为0.39 dB/m。

4) 梯形轨枕断面上方盖板各测点Z振级范围为64.6~83.5 dB, 按照城市区域环境振动标准(GB 10070-88)规定, 盖板上距试车线水平距离24 m以内的振动超过标准限值72 dB。

试车线是车辆段内车速较快的线路, 试车时列车车速可以达到60~80 km/h。较高的速度会带来更大的振动, 虽然梯形轨枕可以在一定程度上降低列车引起的上盖建筑振动, 但距离环保标准要求还有一定距离。因此在设计时应考虑将试车线区域的盖板与物业开发区域通过伸缩缝断开, 或采用更高等级的减振轨道。

#### 参考文献:

- [1] 侯秀芳, 冯晨, 燕汉民, 等. 2023年中国内地城市轨道交通运营线路概况[J]. 都市轨道交通, 2024, 37(1): 10-16.  
HOU X F, FENG C, YAN H M, et al. Overview of urban rail transit operational lines in Chinese mainland in 2023 [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2024, 37(1): 10-16.
- [2] 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(3): 33-39.  
HE L G, LIU W W, LUO X W, et al. Measurement and analysis of environmental vibration characteristics of operation zone for double deck depot[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2023, 40(3): 33-39.
- [3] 王孔明, 杨文锐, 徐银光. 地铁车辆段控制中心(DCC)综合信息系统研究[J]. 华东交通大学学报, 2018, 35(3): 56-61.  
WANG K M, YANG W R, XU Y G, et al. Study on comprehensive information system of metro vehicle depot control center[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2018, 35(3): 56-61.
- [4] 李强. 地铁车辆段上盖物业开发设计研究[J]. 现代城市轨道交通, 2017(3): 38-42.  
LI Q. Design of upper cover structure development for metro depot[J]. Modern Urban Transit, 2017(3): 38-42.
- [5] OUAKKA S, VERLINDEN O, KOUROUSSIS G. Railway ground vibration and mitigation measures: benchmarking of best practices[J]. Railway Engineering Science, 2022, 30(1): 1-22.
- [6] DASHEVSKIY M A, MITROSHIN V A, MONDRUS V L, et al. Impact of metro induced ground-borne vibration on urban development[J]. Magazine of Civil Engineering, 2021, 106(6): 10602.
- [7] LIAO Y Y, ZHANG P J, WU Q, et al. A case study on structural serviceability subjected to railway-induced vibrations at TOD developed metro depot[J]. Buildings, 2022, 12(8): 1070.
- [8] ZHANG P J, ZHANG H G, LIU Y Q, et al. Evaluation of indicators of railway-induced annoying vibration based on building measurements developed by tod: a discussion[J]. Physica Scripta, 2024, 99(2): 025008.
- [9] LIANG R H, DING D Y, LIU W F, et al. Experimental study of the source and transmission characteristics of train-induced vibration in the over-track building in a metro depot[J]. Journal of Vibration and Control, 2023, 29(7/8): 1738-1751.
- [10] TAO Z Y, ZOU C, WANG Y M, et al. Vibration transmissions and predictions within low-rise buildings above throat area in the metro depot[J]. Journal of Vibration and Control, 2023, 29(5/6): 1105-1116.
- [11] WANG S Q, CAO Z G, XU Y F, et al. Prediction and mitigation of train-induced vibrations of over-track buildings on a metro depot: field measurement and numerical simulation[J]. Journal of Vibration and Control, 2023, 9: 281-293.
- [12] 冯青松, 余超, 唐柏赞, 等. 双层车辆段上盖建筑振动与结构噪声预测分析[J]. 振动与冲击, 2023, 42(9): 304-311.  
FENG Q S, YU C, TANG B Z, et al. Prediction and analysis of vibration and structural noise of upper cover building of double-deck depot[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(9): 304-311.
- [13] FENG Q S, ZHANG Y L, JIANG J, et al. Field measurement and evaluation of vibration in different areas of a metro depot[J]. Earthquake Engineering and Engineering

- Vibration, 2022, 21(2): 529-542.
- [14] 邹超, 陈颖, 胡子豪, 等. 地铁车辆段不同区域车致上盖建筑振动传播规律研究[J]. 噪声与振动控制, 2022, 42(6): 181-186.  
ZOU C, CHEN Y, HU Z H, et al. Train-induced vibration transmission within over-track buildings in different areas of metro depot[J]. Noise and Vibration Control, 2022, 42(6): 181-186.
- [15] 汪益敏, 陶子渝, 邹超, 等. 地铁车辆段咽喉区上盖建筑振动传播规律[J]. 交通运输工程学报, 2022, 22(1): 112-121.  
WANG Y M, TAO Z Y, ZOU C, et al. Vibration propagation law within over-track buildings above throat area of metro depot[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2022, 22(1): 112-121.
- [16] 陈艳明, 冯青松, 刘庆杰, 等. 下沉式地铁车辆段列检库车致振动实测与分析[J]. 振动、测试与诊断, 2021, 41(3): 532-538.  
CHEN Y M, FENG Q S, LIU Q J, et al. Test and analysis of vibration induced by train operation in sinking metro depot service shop[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2021, 41(3): 532-538.
- [17] CHEN Y M, FENG Q S, LIU Q J, et al. Experimental study on the characteristics of train-induced vibration in a new structure of metro depot[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(30): 41407-41422.
- [18] 谢伟平, 袁葵, 孙亮明. 地铁车辆段上盖建筑车致振动试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2020, 37(3): 99-107.  
XIE W P, YUAN K, SUN L M. Train-induced vibration test of metro depot over-track buildings[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(3): 99-107.
- [19] 孙亮明, 林鸿钦, 田丰, 等. 地铁振动诱发上盖住宅室内结构噪声的实测研究[J]. 武汉理工大学学报, 2023, 45(6): 63-68.  
SUN L M, LIN H Q, TIAN F, et al. Experimental study on indoor structural noise of over-track residence induced by subway vibration[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2023, 45(6): 63-68.
- [20] 侯恩洋, 陶连金, 王志岗, 等. 综合性地铁车辆段车致振动特性实测与分析[J]. 建筑结构, 2023, 53(S2): 927-934.  
HOU E Y, TAO L J, WANG Z G, et al. Measurement and analysis of vehicle-induced vibration characteristics in comprehensive metro depot[J]. Building Structure, 2023, 53(S2): 927-934.
- [21] 陈建党, 吴佩, 林博文. 地铁车辆段上盖物业开发的减振降噪技术研究[J]. 智能城市, 2021, 7(13): 5-6.  
CHEN J D, WU P, LIN B W. Research on vibration isolation and noise reduction technology for the upper cover of metro depot[J]. Intelligent City, 2021, 7(13): 5-6.



通信作者: 刘庆杰(1982—), 男, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为轮轨动力学。E-mail: liuqingjie06@163.com。

(责任编辑:熊玲玲)