

文章编号: 1005-0523(2026)01-0030-09



平行换乘式地铁站车致振动特性研究

冯青松¹, 胡欣伟¹, 张凌¹, 江焯¹, 涂勤明²

(1. 华东交通大学轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室, 江西 南昌 330013;
2. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 广东 广州 510010)

摘要: 为研究平行换乘式地铁站在不同线路列车相互影响下的结构振动特性, 文章结合车辆轨道耦合动力学分析、有限元仿真及地铁车站现场测试, 深入探讨振动在建筑内的传递特性, 并分析列车组合运行对建筑物的影响, 进而提出减振建议。研究表明: 站台垂向振动主要集中在30~80 Hz频段, 且在36, 47, 67 Hz处出现明显峰值; 由于入射波与反射波在顶层叠加, 振动在顶层放大, 平均放大量为4.50 dB, 振动横向传递衰减率约为0.51 dB/m; 当两线路同时运行列车时, 线路上方楼层的中间采样点Z振级高于同层两侧采样点, 建议在线路上方设置生活、办公区域时, 应避免将其布置在线路上方中间位置; 为满足站内振动限值要求, 建议将进站速度限制小于22 km/h; 减振扣件的减振效果可达3.80 dB, 钢弹簧浮置板除自身固有频率11~14 Hz外, 在其他频段减振效果显著, 尤其在80 Hz频段处减振效果可达28.00 dB。

关键词: 地铁; 平行换乘; 环境振动; 有限元仿真; 实测

中图分类号: TB535; U231+4

文献标志码: A

本文引用格式: 冯青松, 胡欣伟, 张凌, 等. 平行换乘式地铁站车致振动特性研究[J]. 华东交通大学学报, 2026, 43(1): 30-38.

Study on Vehicle-Induced Vibration Characteristics of Parallel Transfer Subway Stations

Feng Qingsong¹, Hu Xinwei¹, Zhang Ling¹, Jiang Xuan¹, Tu Qinming²

(1. State Key Laboratory of Performance Monitoring and Protecting of Rail Transit Infrastructure, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510010, China)

Abstract: To investigate the structural vibration characteristics of parallel transfer subway stations under the mutual influence of trains on different lines, this study integrates vehicle-track coupling dynamics analysis, finite element simulation, and field tests at subway stations. It analyzes the transmission characteristics of vibrations within buildings and the impact of combined train operations on structures, offering vibration reduction suggestions. The results indicate that platform vertical vibrations predominantly occur within the 30~80 Hz frequency range, with distinct peaks at 36, 47, 67 Hz. Due to the superposition of incident and reflected waves at the top layer, vibrations are amplified there, with an average amplification of 4.50 dB, and the lateral transmission attenuation rate is approximately 0.51 dB/m. When trains operate simultaneously on both lines, the Z vibration level at central sampling points above the lines is higher. To comply with vibration limits, the entry speed should be restricted to no more than 22 km/h. The vibration reduction fastener achieves an effect of 3.80 dB. Except for its inherent frequency range of 11~14 Hz, the steel spring floating plate exhibits significant vibration reduction in oth-

收稿日期: 2024-10-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(52468063)

er frequency bands, notably reaching 28.00 dB at the 80 Hz band.

Key words: subway; parallel transfer; environmental vibration; finite element simulation; field measurement

Citation format: FENG Q S, HU X W, ZHANG L, et al. Study on vehicle-induced vibration characteristics of parallel transfer subway stations[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2026, 43(1): 30–38.

随着城市轨道交通的高速拓展,城市交通网络的运行效率与便捷程度得以显著提升。然而,在这种快速发展的进程中,一些问题逐渐浮现且不容忽视,其中振动与噪声问题尤为突出^[1-6]。列车在轨道上行驶时,由于车轮与不平顺轨道的接触,特别是在加速、减速和通过曲线时会产生机械振动。这些振动通过地下土体和岩石传播,影响上部建筑和周围设施,成为振动污染的主要形式。目前,研究车致振动的方法主要有实测、数值仿真和解析法。国内外众多学者采用不同方法对车致振动进行了深入研究。在实测方面,周思凡等^[7]以国内某三线换乘车站为研究对象,通过实测分析了该车站的振动特性及振动传递规律,指出多线运行时振动响应存在叠加增大的现象。Degrande等^[8]对英国伦敦地铁列车时速为20~50 km/h时的轨道、隧道、地面及附近建筑物进行了实测,发现地下室水平向振动在10~100 Hz频率范围内显著衰减。崔聪聪等^[9]对南昌西站地铁列车车致振动的频率分布特征和振动传递规律进行了实地测量,指出隧道埋深每增加2 m,上部各层Z振级衰减2~4 dB。在数值仿真方面,史海欧等^[10]利用有限元仿真分析了十字交叠式车站的各层振动特性,指出应更多关注列车-楼板耦合现象,并采取必要的减隔振措施。高广运等^[11]基于上海某地区真实地质构造建立了岩土-隧道-构筑物有限元模型,分析了单线地铁运行对邻近建筑各层振动的影响,指出振动在高层建筑底部3层有明显衰减,而低层建筑则无此现象。在解析法方面,吴德顺等^[12]利用傅里叶变换反演振源,结合传递函数,完成了对邻近建筑内车致振动的预测,最大Z振级误差不大于4%。Hussein等^[13]介绍了一种用于计算地下铁路振动的管中管模型,该模型允许结合多层半空间几何结构,其结果和计算效率相较于有限元-边界元模型具有优势。

未来地铁站的设计与建设需更加重视不同线

路之间的相互影响。本文通过实测和建立有限元模型,分析了多种工况下的振动特性,并提出了相应的减振建议,为提升地铁站的舒适性与环保性提供实用指导。

1 实测分析

1.1 车站概况与测点布局

该地铁站地处广州市区某两条地铁线路的交汇处,为地上两层与地下两层的结构。列车于地下二层(即站台层)运行,乘客借助楼梯在地下一层(换乘层)实现A、B号线之间的换乘。该地铁站的办公区域位于地上二层的西南角。A号线呈南北走向,B号线于其西侧平行接入,从而形成地下双岛式站台平行换乘的布局。A、B号线均运行6节编组的地铁B型车。

为采集地铁A号线上下行线进出站、不停站通过,B号线上下行线进出站,以及两线组合运行时的站台振动数据,鉴于站台有效全长为135 m,测点布置于距来车方向站台边缘约60 m处。具体而言,在A号线站台层横向跨中设置实测点T1,在B号线站台层横向跨中设置实测点T2,并在上方楼层选取S3~S9作为仿真数据的采样点,详见图1。

1.2 列车进出站实测剖析

由于该站多次收到有关振动的投诉,受地铁公司委托,课题组针对站内振动开展了现场测试。为明确振动的幅度,重点对站台层进行测试,分别测取A、B号线列车减速进站和加速出站,以及A号线列车不停站通过工况下的振动加速度数据,并进行时域及频谱分析。

选取测试结果中无邻线干扰的A2股道进出站工况数据进行分析,站台层T1垂向振动时域、频谱图如图2所示。

在频谱层面,列车处于进出站工况时,测点的垂向振动响应主要集中于30~80 Hz频段,且在36, 47, 67 Hz 3个频率附近出现峰值。

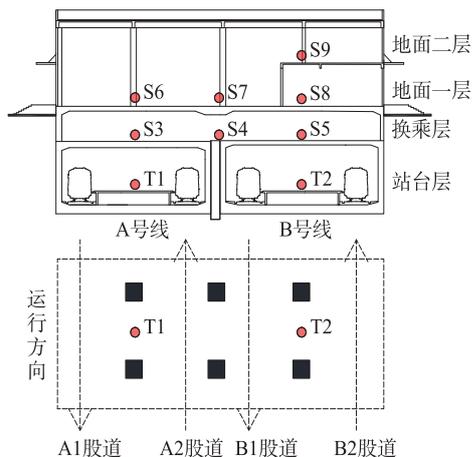


图1 测点布置示意图

Fig. 1 Sample points layout

列车处于减速进站工况时, T1垂向振动加速度峰值为 0.187 m/s^2 , Z振级达到 87.80 dB 。列车刚进站时, 测点的垂向振动加速度达到最大值, 随着车速逐步降低, 振动加速度的幅值逐渐减小, 直至列车接近静止时, 振动加速度出现短暂骤增后再次减小。

列车处于加速出站工况时, T1垂向振动加速度峰值为 0.169 m/s^2 , Z振级为 85.50 dB 。相比之下, 列车减速进站引发的测点振动加速度略大于加速出站所引发的振动加速度。其原因在于测点距离来车方向更近, 且进出站时速度是影响振动的主要因素。出站时速度从零开始增加, 当达到一定速度时, 列车已远离采样点, 故而引起的振动较小。

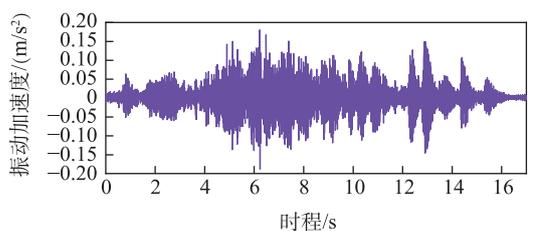
依据《城市区域环境振动标准》(GB 10070—88)和《城市区域环境振动测量方法》(GB 10071—88)进行评价, 最大Z振级限值为 75.00 dB 。本地铁站开通时间较早, 长期运行导致轨道状态欠佳, 列车进、出站时Z振级均超出规范限值, 证实了附近居民对铁路振动的有关投诉。

2 仿真分析

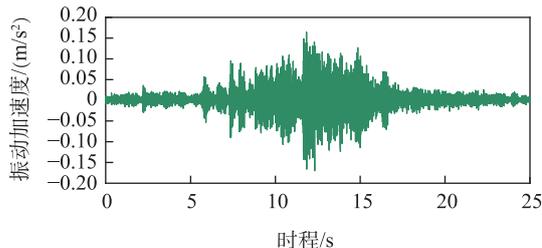
针对车站投诉问题, 本节主要构建了轮轨动力学模型与有限元模型, 对振动的传递规律以及平行线路间的振动叠加现象展开了仿真分析。

2.1 构建车辆动力学模型

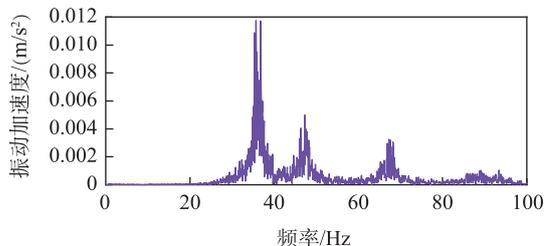
运用Universal Mechanism(UM)多刚体动力学仿真软件, 构建地铁B型车动力学模型, 如图3所



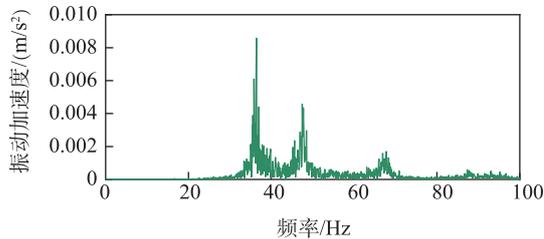
(a) A2股道列车进站时域图



(b) A2股道列车出站时域图



(c) A2股道列车进站频域图



(d) A2股道列车出站频域图

图2 A2股道列车进出站时域、频谱图

Fig. 2 Time domain and frequency domain diagrams of trains entering and leaving the station on track A2

示。将车辆视为由7个刚体构成的模型, 分别为1个车厢、2个转向架和4组轮对。一系悬挂和二系悬挂均考虑横向X、纵向Y、垂向Z三个方向的刚度及阻尼, B型车具体参数见表1。

为验证有限元模型的准确性, 将实测速度数据导入UM, 以模拟列车减速进站过程。进站时程约为 25 s , 轮轨作用力随速度降低呈减小趋势。轨道谱采用德国低干扰谱与随机小波不平顺叠加, 计算所得轮轨作用力如图4所示。

2.2 构建车站有限元模型

借助有限元分析软件ANSYS构建车辆-轨道-

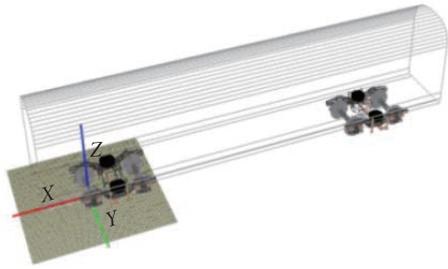


图3 车辆动力学模型
Fig. 3 Vehicle dynamics model

表1 地铁B型车参数
Tab.1 Metro B-type car parameters

车辆参数	取值
一系悬挂阻尼/(kN·s/m)	10
一系悬挂刚度/(kN/m)	450
二系悬挂阻尼/(kN·s/m)	60
二系悬挂刚度/(kN/m)	1 700
车辆轴距/m	12.6
车辆长度/m	19.0
车体质量/kg	39 540
转向架质量/kg	3 520
轮对质量/kg	1 539
车体俯仰惯量/(kg·m ²)	1.33×10 ⁶
转向架俯仰惯量/(kg·m ²)	1 760
固定轴距/m	2.2

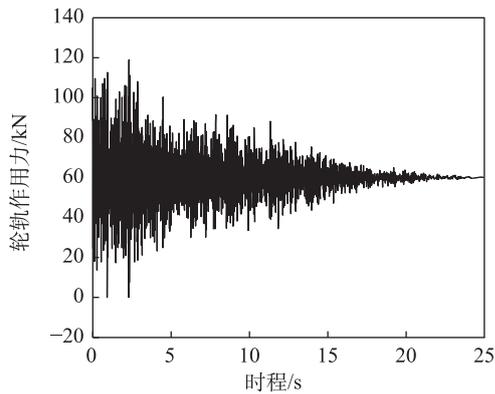


图4 轮轨作用力
Fig. 4 Wheel-rail force

楼板耦合有限元模型。在已搭建完成的模型边界处,沿边界法向延伸一层厚度均匀的实体单元,并将外层边界予以固定,以此模拟黏弹性边界^[4]。该换乘站属于地下双岛式站台结构,两条线路呈平行布局。地上与地下各有两层,自下而上的层高依

次为7.5,4.0,4.8,4.8 m。车站的主要结构由岩土、梁、柱、楼板、墙体、道床以及钢轨构成。钢轨选用中国标准60轨,扣件采用WJ-8B型常阻力钢轨扣件。车站各结构材料参数详见表2,车站整体有限元模型如图5所示。

表2 各结构材料参数
Tab.2 Structural material parameters

结构	密度/(kg/m ³)	弹性模量/Pa	泊松比	单元
梁(C40 砼)	2 400	3.25×10 ¹⁰	0.20	Beam188
柱(C50 砼)	2 420	3.45×10 ¹⁰	0.20	Beam188
楼板(C40 砼)	2 400	3.25×10 ¹⁰	0.20	Shell63
墙(C35 砼)	2 400	3.10×10 ¹⁰	0.20	Shell63
轨道板(C35 砼)	2 400	3.10×10 ¹⁰	0.20	Solid45
钢轨	7 850	2.10×10 ¹¹	0.30	Beam188
人工填土	1 750	1.80×10 ⁸	0.40	Solid45
淤泥质土	1 800	2.80×10 ⁸	0.38	Solid45
可塑状残积土	2 000	7.20×10 ⁸	0.38	Solid45

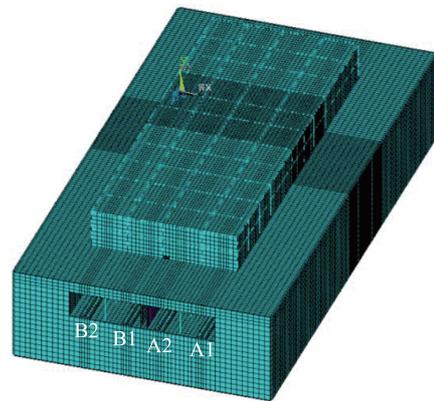


图5 整体有限元模型
Fig. 5 Overall finite element model

将图4中计算所得的轮轨力以移动荷载的形式施加于有限元模型,进行瞬态分析。为验证模型的准确性,选取无邻线干扰的A2股道过车工况作为对比案例,将仿真得到的T1、T2振动加速度与实测数据进行对比。在有限元分析过程中,车辆进站速度设定为37.8 km/h,并逐渐减速至停止状态,积分步长选取0.005 s,分析频率设定为100 Hz。时域和频谱的对比结果如图6所示。

对比结果显示:时域幅值呈现出较好的吻合度,且无论是实测数据还是仿真数据,振动主频均处于20~60 Hz,这表明有限元仿真模型能够较为精准地

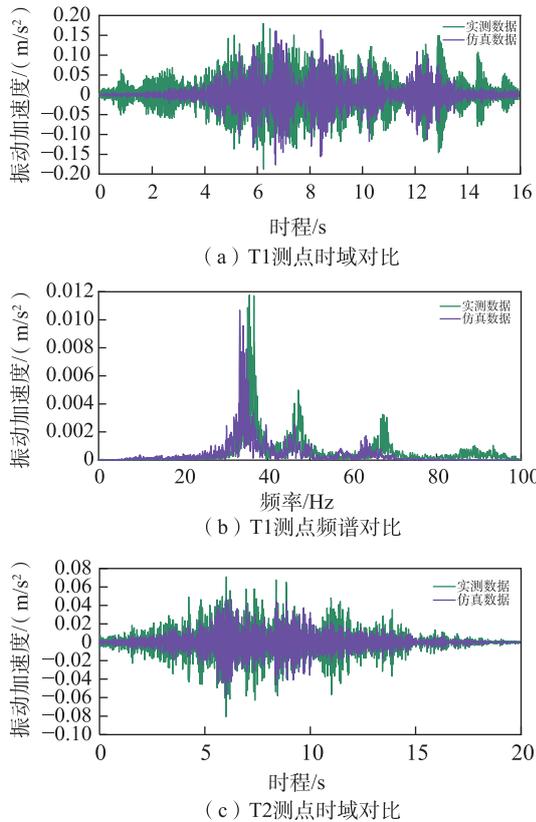


图6 实测、仿真对比图

Fig. 6 Comparison of actual measurement and simulation

模拟20~60 Hz 峰值频段。该有限元模型在分析平行换乘式车站车辆致振特性及其传递规律方面具备良好的可行性与可靠性,可应用于后续工况的研究。

2.3 振动垂向、横向传递分析

为深入剖析振动传递规律,以及探究不同线路单独运行和组合运行对车站产生的影响,计算了6组典型行车工况,并针对站台 T1、T2 以及楼板 S3~S9 的振动特性展开分析。各工况下采样点 Z 振级的计算结果统计于表3。从表中数据可知,上部

楼层的振动存在较为严重的超标现象,需引起足够重视。

S5、S8、S9 处于 B 号线站台 T2 的正上方。工况 1 和工况 2 中无列车在采样点正下方通行,而工况 3~工况 6 在垂向传递方面更具代表性,绘制工况 3~工况 6 的 Z 振级沿楼层传递图,详见图 7。

从 Z 振级沿楼层传递示意图能够得知,振动从站台层 T2 向换乘层 S5 的平均衰减量为 5.70 dB,从换乘层 S5 向地面一层 S8 的平均衰减量为 0.90 dB,从地面一层 S8 向地面二层 S9 的平均增大量为 4.50 dB。站台层 T2 向换乘层 S5 衰减较为显著,其原因在于站台层直接与土体相接触,振动首先经过土体的吸收作用后再沿立柱向上传递。而换乘层 S5 向地面一层 S8 衰减相对较小,依据过往的工程经验,振动能量在立柱顶端和底端近乎一致,所以这一部分的振动衰减较少。在 4 个工况中均出现地面一层 S8 向地面二层 S9 传递时振动反而增大的现象。这是由于地面二层以上不存在可继续传递振动的结构,进而致使入射波与反射波叠加放大,该现象在多篇研究报道中均有提及且得到了证实^[15]。

为剖析振动的横向传递规律,选取站台层 T1 和 T2 的响应作为分析对象。图 8 为站台振动向邻线衰减的示意图。

从图 8 中能够观察到,振动自站台向邻线衰减较为显著。当 A、B 两条线路分别处于单向通车状态(工况 1、工况 3)时,向邻线的 Z 振级衰减率分别为 0.56 dB/m 和 0.66 dB/m;而当两线路分别处于双向通车状态(工况 2、工况 4)时,向邻线的 Z 振级衰减斜率分别为 0.39 dB/m 和 0.44 dB/m。由此可见,单向通车时 Z 振级的横向衰减程度大于双向通车情况。这是由于双向通车股道的振动源更趋近于

表3 不同行车工况下的 Z 振级

Tab.3 Z vibration level under different driving conditions

工况	过车线路		振级/dB								
	A	B	站台层		换乘层			地面一层		地面二层	
			T1	T2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
1	A2	—	86.80	76.40	80.40	81.60	77.40	80.70	79.30	76.70	80.40
2	A1、A2	—	87.80	80.00	81.30	85.90	80.70	80.60	83.60	78.90	86.40
3	—	B2	71.90	85.40	70.90	80.20	80.30	72.50	79.10	79.80	81.60
4	—	B1、B2	79.90	88.80	80.90	86.00	81.40	80.10	83.30	80.30	87.60
5	A1	B1	87.00	88.90	80.60	83.50	82.70	81.40	82.40	82.00	86.40
6	A1、A2	B1、B2	90.60	89.40	83.00	89.00	85.30	84.80	86.90	83.90	88.50

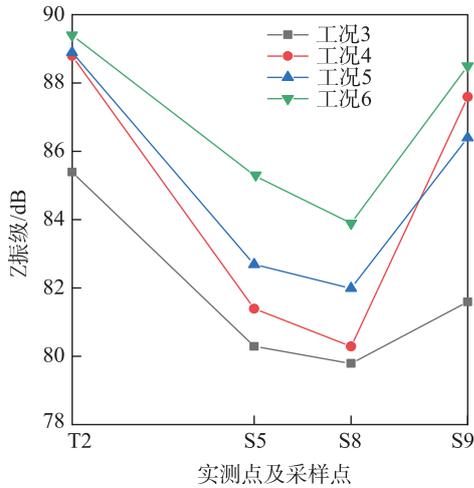


图7 振动沿楼层传递示意图
Fig. 7 Transmission along the floor

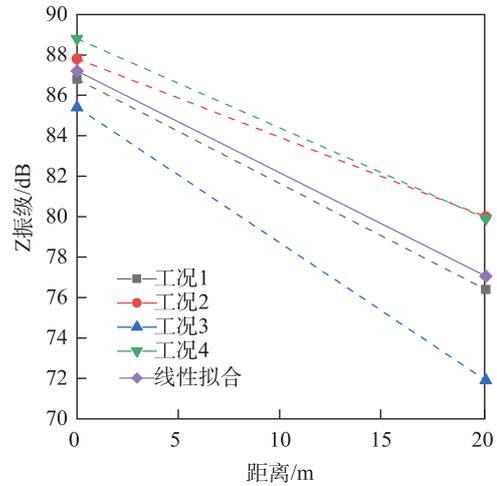


图8 振动横向衰减示意图
Fig. 8 Schematic diagram of lateral vibration attenuation

邻线,致使振动衰减路径相对更短。振动的衰减受诸多复杂因素作用,对4个工况进行线性拟合后,得到斜率为0.51。因此,在本车站范围内,可认定列车运行所产生振动的横向传递衰减率为0.51 dB/m。

2.4 组合运行时的振动叠加分析

为探究列车组合运行对各楼层振动的影响,选取同层采样点S3~S5、S6~S8作为研究样本。换乘层、地面一层各采样点的Z振级情况如图9、图10所示。

从工况2、工况4、工况5、工况6能够看出,当A、B两条线路组合运行列车时,中间采样点的Z振级高于同层两侧的采样点,然而工况1与工况3并未出现这一现象。这表明当存在多条股道同时有列车通过

时,振动会在一定范围内产生叠加^[16],换乘层及地面一层中间采样点的放大量统计详见表4。

在本车站内,叠加区域出现于两线路中间上方约7.5 m(换乘层)、11.5 m(地面一层)附近,平均放大量分别为4.11,2.55 dB。基于该研究结果,建议在平行换乘站设计初始阶段就充分考量振动叠加现象。并且,在线路上方规划工作与生活区域时,应避免将其设置于两线路中间区域。

3 减振措施剖析

3.1 进站速度控制

依据经验,降低车辆行驶速度可有效减轻轨道振动。为确定适宜的进站速度,分别计算以28.8,

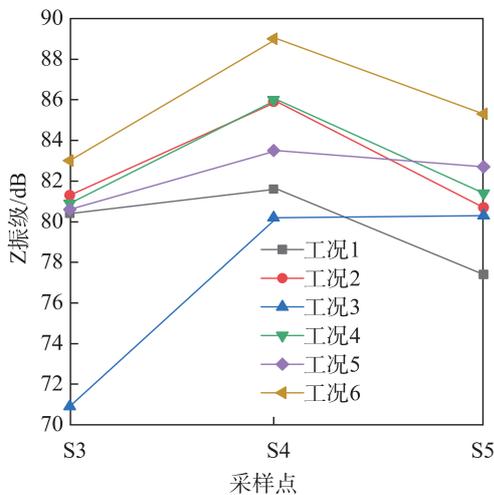


图9 换乘层采样点Z振级
Fig. 9 Z vibration level on transfer platform

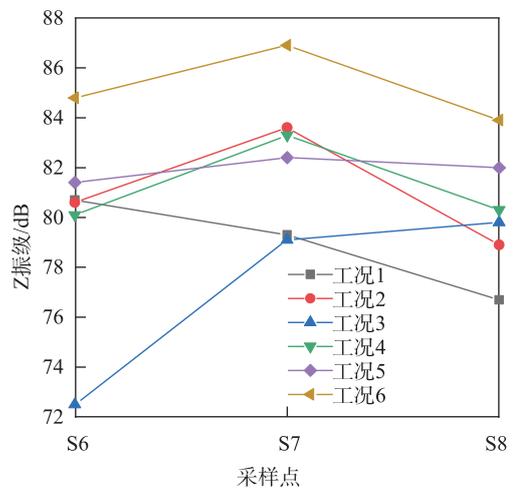


图10 地面一层采样点Z振级
Fig. 10 Z vibration level on the ground floor

表4 Z振级放大量

Tab.4 Z vibration level amplification dB					
采样点	工况2	工况4	工况5	工况6	平均
S4	4.90	4.85	1.85	4.85	4.11
S7	3.85	3.10	0.70	2.55	2.55

37.8, 43.2 km/h 速度进站时的站台振动响应。3种工况下T1 振动加速度时域如图 11 所示。

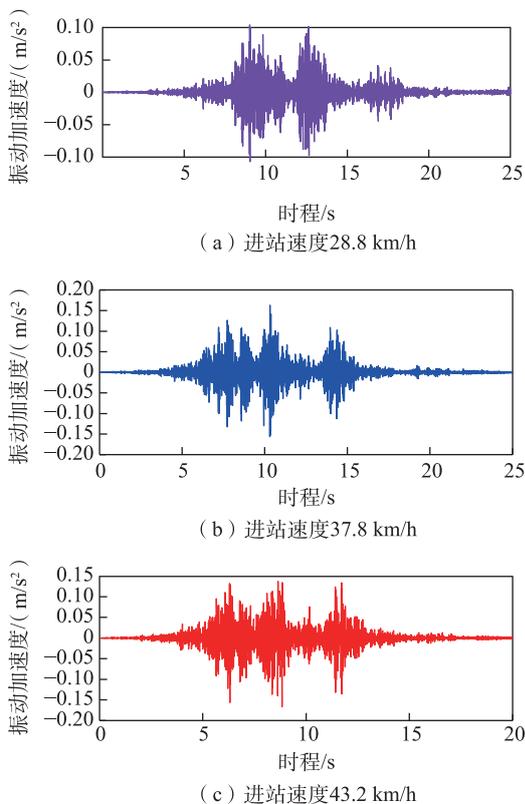


图 11 不同进站速度时域图

Fig. 11 Time domain diagram of different entry speeds

计算结果显示,进站速度为 43.2 km/h 时,振动加速度峰值为 0.167 m/s²,振级为 87.80 dB;进站速度为 37.8 km/h 时,振动加速度峰值为 0.163 m/s²,振级为 87.20 dB;进站速度为 28.8 km/h 时,振动加速度峰值为 0.108 m/s²,振级为 83.90 dB。

在 3 种进站速度条件下,站台振级均超出振动限值。随着进站速度的降低,振动加速度峰值亦呈下降趋势。对 3 个速度对应的 Z 振级进行曲线拟合,具体情况见图 12。图 12 中 y 为站台 Z 振级, x 为列车进站速度。

根据拟合曲线,为满足站内振动限值 75.00 dB,

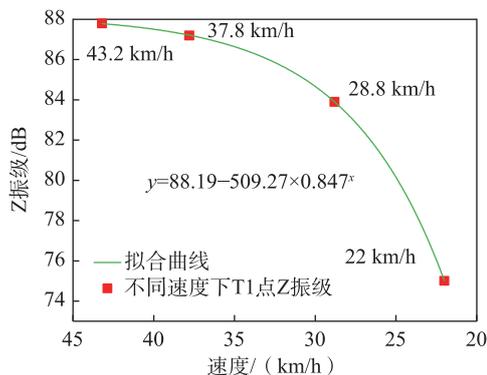


图 12 不同进站速度的拟合曲线

Fig. 12 Fitting curves at different speeds

在未采取减振措施的情况下,可将进站速度限制在 22.0 km/h 以下,实际应用中建议取整为 20.0 km/h。

3.2 使用减振扣件或钢弹簧浮置板

鉴于本文所述地铁站开通较早,轨道状态不良是导致振动过大的主要原因,提出两种减振建议:① 更换减振扣件(适用于既有线路改造);② 在建设初期使用钢弹簧浮置板(适用于新建线路)。

选取工况 1 进行减振效果分析,设定浮置板的弹簧支座刚度为 10 MN/m,阻尼为 7.5×10⁴ N·s/m,减振扣件刚度为 7 MN/m。图 13 展示了减振扣件、钢弹簧浮置板轨道及普通整体道床在车致振动下 T1 的垂向振动 1/3 倍频程图。

由图 13 可见,减振扣件的减振效果达 3.80 dB,在 40 Hz 频段处减振效果最为显著,达到 10.80 dB。值得关注的是,在更为严苛的限值要求下,即便采用减振扣件,该地铁站的振动状况仍可能无法达标,不过其可作为一种经济成本相对较低的减振举

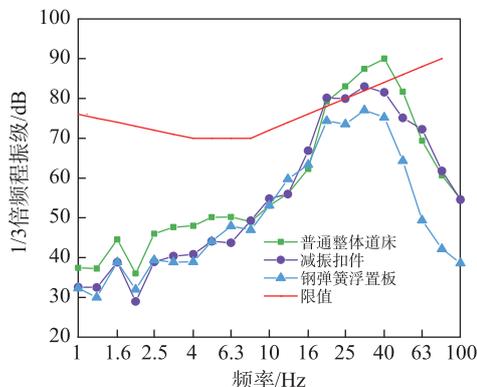


图 13 减振扣件、钢弹簧浮置板的减振效果 1/3 倍频程图

Fig. 13 1/3 octave frequency diagram of effect of vibration reduction fasteners and steel spring floating plates

措。钢弹簧浮置板轨道在11~14 Hz附近致使T1的振级出现放大现象,这是因为该频段接近浮置板的固有频率^[7]。在其他各中心频率窄带频率范围内的振级均低于普通整体道床,且40 Hz以上频段的减振效果随频率升高更为明显,在80 Hz频段处减振效果达到最大值,为28.00 dB。减振后的振级符合规范限值,表明钢弹簧浮置板轨道的减隔振效果显著。

4 结论

本文针对国内某平行换乘车站开展了实测,并结合车辆轨道耦合动力学分析、有限元仿真分析,得出结论。

1) 在列车进出站工况下,站台垂向振动响应主要分布于30~80 Hz频段,且在36,47,67 Hz处出现峰值。

2) 由于入射波与反射波在顶层叠加,振动由地面一层S8向地面二层S9传递时出现增大现象,平均放大量为4.50 dB。振动沿轨道外横向传递的衰减率约为0.51 dB/m。

3) 当两线路同时运行列车时,两线路上方楼层的中间采样点Z振级高于同层两侧的采样点,建议在平行换乘站设计初期就对振动叠加现象予以考量。在线路上方设置工作生活区域时,应避免设置在两线路中间。

4) 随着进站速度降低,Z振级也相应降低。根据Z振级-速度拟合曲线,为满足振动限值,可将进站速度限制在不高于22.0 km/h,在实际应用中建议取整为20.0 km/h。

5) 减振扣件的减振效果达3.80 dB,但在更为严苛的限值要求下可能仍无法达标。钢弹簧浮置板的减振效果显著,除浮置板固有频率11~14 Hz频段外,其他频段振级均低于普通整体道床,且40 Hz以上的高频段减振效果随频率升高更为明显,在80 Hz频段处减振效果达到最大值,为28.00 dB。减振后的振级符合规范限值。

参考文献:

- [1] 黄俊,杨江,范涛,等.地铁列车进出站振动实测与分析[J].爆破,2021,38(2):184-191.
HUANG J, YANG J, FAN T, et al. Measurement and analysis of inbound and outbound vibrations of metro train[J]. Blasting, 2021, 38(2): 184-191.
- [2] 张天琦,周俊召,熊永亮,等.地铁沿线建筑物室内振动与噪声特性测试与分析[J].噪声与振动控制,2021,41(2):196-199.
ZHANG T Q, ZHOU J Z, XIONG Y L, et al. Measurement and analysis of indoor vibration and noise characteristics of buildings near the subway[J]. Noise and Vibration Control, 2021, 41(2): 196-199.
- [3] 王一干,刘鹏辉,李腾,等.车辆段轨道减振措施对上盖建筑减振降噪效果试验研究[J].振动与冲击,2020,39(21):284-291.
WANG Y G, LIU P H, LI T, et al. Tests for effect of track vibration reduction measures in a depot on vibration and noise reduction of a superstructure[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(21): 284-291.
- [4] 岳建勇.地铁交通引起的建筑物振动实测与数值模拟分析[J].岩土力学,2020,41(8):2756-2764.
YUE J Y. In situ measurement and numerical simulation for the environmental vibration induced by urban subway transit[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(8): 2756-2764.
- [5] ZOU C, WANG Y M, WANG P, et al. Measurement of ground and nearby building vibration and noise induced by trains in a metro depot[J]. Science of The Total Environment, 2015, 536: 761-773.
- [6] 冯青松,雷晓燕,伍明辉.地铁运行列车引起建筑物低频振动的数值分析[J].铁道科学与工程学报,2007,4(5):68-72.
FENG Q S, LEI X Y, WU M H. Numerical analysis of building under low-frequency vibrations induced by subway running train[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2007, 4(5): 68-72.
- [7] 周思凡,冯青松,成功,等.三线平行地铁车站振动及传播规律实测研究[J].华东交通大学学报,2024,41(4):1-9.
ZHOU S F, FENG Q S, CHENG G, et al. Experimental study of vibration and propagation patterns in three parallel subway stations[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(4): 1-9.
- [8] DEGRANDE G, SCHEVENELS M, CHATTERJEE P, et al. Vibrations due to a test train at variable speeds in a deep bored tunnel embedded in London clay[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 293(3/4/5): 626-644.
- [9] 崔聪聪,雷晓燕,张凌,等.站房结构在地铁激励下的振动响应研究[J].噪声与振动控制,2018,38(2):120-126.
CUI C C, LEI X Y, ZHANG L, et al. Study on vibration response of station structures under subway excitation[J]. Noise and Vibration Control, 2018, 38(2): 120-126.

- [10] 史海欧, 廖春明, 张凌, 等. 复杂工况下地铁交叠式车站振动特性分析[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(9): 136-141.
SHI H O, LIAO C M, ZHANG L, et al. Influence of positive temperature gradient load on ballastless track on continuous beam bridge[J]. Railway Standard Design, 2022, 66(9): 136-141.
- [11] 高广运, 陈娟, 朱林圆. 上海地铁荷载作用下邻近建筑物振动响应分析[J]. 噪声与振动控制, 2016, 36(6): 136-141.
GAO G Y, CHEN J, ZHU L Y. Numerical analysis of the vibration impact induced by underground moving trains on surrounding buildings in Shanghai[J]. Noise and Vibration Control, 2016, 36(6): 136-141.
- [12] 吴德顺, 顾晓强, 刘鑫, 等. 基于现场实测反演的地铁运行诱发邻近结构振动预测[J]. 结构工程师, 2024, 40(5): 36-44.
WU D S, GU X Q, LIU X, et al. An inversion analysis for predicting structure vibration due to operation of nearby metro train based on field measurements[J]. Structural Engineers, 2024, 40(5): 36-44.
- [13] HUSSEIN M F M, FRANÇOIS S, SCHEVENELS M, et al. The fictitious force method for efficient calculation of vibration from a tunnel embedded in a multi-layered half-space[J]. Journal of Sound and Vibration, 2014, 333(25): 6996-7018.
- [14] 谷音, 刘晶波, 杜义欣. 三维一致黏弹性人工边界及等效黏弹性边界单元[J]. 工程力学, 2007, 24(12): 31-37.
GU Y, LIU J B, DU Y X. 3D consistent viscous-spring artificial boundary and viscous-spring boundary element[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(12): 31-37.
- [15] 冯青松, 江焯, 成功, 等. 库内线不同减振扣件刚度组合对双层车辆段上盖建筑振动噪声影响研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(9): 3320-3330.
FENG Q S, JIANG X, CHENG G, et al. Influence of different stiffness combinations of damping fasteners on vibration and noise of upper building of double-deck depot excited by garage inner track[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(9): 3320-3330.
- [16] 张凌. 多振源激励下综合交通枢纽复杂振动特性研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2022.
ZHANG L. Study on complex vibration characteristics of integrated transportation hub under motivation of multi-vibration[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2022.
- [17] 崔旭浩, 郑强, 吕欣乐, 等. 城市地铁橡胶弹簧浮置板轨道动力特性研究[J]. 交通工程, 2024, 24(2): 44-48.
CUI X H, ZHENG Q, LYU X L, et al. Research on dynamic characteristics of rubber spring floating slab track in subway[J]. Journal of Transportation Engineering, 2024, 24(2): 44-48.



通信作者: 冯青松(1978—), 男, 二级教授, 博士生导师, 研究方向为轨道交通振动与噪声、轨道结构长期服役性能。
E-mail: fqshdjtdx@aliyun.com。

(责任编辑: 姜红贵)