

文章编号: 1005-0523(2024)04-0001-09



三线平行地铁车站振动及传播规律实测研究

周思凡¹, 冯青松¹, 成功¹, 张凌¹, 万宇婷¹, 罗信伟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:【目的】研究三线平行地铁进出站引起的地铁车站的振动特性。【方法】以国内某城市三线平行换乘地铁车站为研究对象, 基于现场实测数据分析该车站振动特性及传播规律。【结果】受线路建成及运营影响, 该车站各站台振动响应差异较大, 进站工况下, 站台1, 站台2和C线站台平均Z振级分别为81.9, 91.4, 61.7 dB; 站台1和站台2振动主要频段为75~125 Hz。出站工况下, 3个站台的平均Z振级分别为82.7, 93.8, 63.7 dB; 站台1和站台2的振动主要频段为50~100 Hz。C线站台振动响应在两种工况下均集中在50~60 Hz内。【结论】在车站内多数测点均可发现出站工况下振动大于进站工况, 最大差值约2.5 dB。车致振动传递至地面一层后会先产生一定衰减, 传递至地面二层时则会产生放大, 振动放大约3.6~5 dB。车致振动在该车站建筑内的传递所产生的衰减较小, 振动衰减主要依靠的是土层, 振动衰减量约为0.53 dB/m。研究成果可为类似结构、平行接入多条线路的地铁车站及车站上盖建筑的振动预测、振动舒适度评价及减振设计提供参考依据。

关键词: 环境振动; 地铁车站; 现场实测; 振动传递规律

中图分类号: TB535; U231

文献标志码: A

本文引用格式: 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.

Experimental Study of Vibration and Propagation Patterns in Three Parallel Subway Stations

Zhou Sifan¹, Feng Qingsong¹, Cheng Gong¹, Zhang Ling¹, Wan Yuting¹, Luo Xinwei²

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

Abstract: 【Objective】To study the vibration characteristics of subway stations caused by the entry and exit of three-line parallel subway stations. 【Method】Taking a third-line parallel transfer subway station in a domestic city as the research object, the vibration characteristics and propagation rules of the station were analyzed based on the field measured data. 【Results】Affected by the completion and operation of the line, the vibration response of each platform in the station varied greatly. Under the inbound condition, the average Z vibration levels of platforms 1, 2 and C were 81.9, 91.4, 61.7 dB, and the main frequency bands of platform 1 and 2 were 75~125 Hz. Under outbound conditions, the average Z vibration levels of the three platforms were 82.7, 93.8, 63.7 dB, the main frequency band of vibration of platforms 1 and 2 is 50~100 Hz, while the vibration response of platform C is concentrated within 50~60 Hz under both conditions. 【Conclusion】In most measuring points in the station, it can be

收稿日期: 2023-08-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(52178423, 52068029); 江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ210644)

found that the vibration under outbound conditions is greater than that under inbound conditions, and the maximum difference is about 2.5 dB. After the vehicle-induced vibration is transmitted to the ground floor, it will first produce a certain attenuation, and when it is transmitted to the ground floor, it will produce amplification, and the vibration is about 3.6~5 dB. The attenuation of vehicle-induced vibration transmitted in the station building is small, and the vibration attenuation mainly depends on the soil layer, and the vibration attenuation is about 0.53 dB/m. The research results can provide a reference for vibration prediction, vibration comfort evaluation and vibration reduction design of similar structures, subway stations and buildings with parallel access to multiple lines.

Key words: environmental vibration; subway station; field measurement; vibration transmission law

Citation format: 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.

【研究意义】近年来,随着我国城市化进程的推进,我国城市轨道交通发展十分迅猛,越来越多的城市开通了地铁线路,国内许多城市开通了多条地铁线路。地铁车站作为地铁系统的重要组成部分,国内许多车站逐渐进行了商业化开发。然而,轨行区直接穿过地铁车站站房,受振动影响较为严重,列车进出站所产生的振动成为地铁运营中亟待解决的挑战之一。有的地铁车站需要接入多条线路,结构也因此变得更为复杂,对解决其产生的环境振动提出了更高的要求。

【研究进展】列车进出站过程引起的振动激励通过道床、隧道或桥梁结构等传递至车站建筑或一些其他上盖建筑,是车站及上部建筑环境振动污染的主要来源,已有国内外许多学者进行了相关研究。史海欧等^[1]利用实测与仿真相结合的手段对交叠式车站的站台、站厅层各测点在复杂工况下振动特性进行了分析,指出要注意车辆-楼板耦合效应,并针对此做出相应减振措施;张谦等^[2-3]基于波函数展开法和镜像原理,建立了隧道壁上的柱面波表达式,分析了列车进出站轴向激励引起的出平面振动和场地柱面纵向振动,结果表明:列车进站时,距离隧道 10 m 左右,竖向振动加速度、速度达到峰值,之后迅速衰减;张楠等^[4]基于刚体动力学方法和振型叠加法建立车辆子系统模型和结构子系统,得到了制动力作用下车辆-车站耦合系统振动特性;冯青松等^[5]基于现场实测的手段,分析了列车进出站对换乘车站振动影响,分析了车站内振动衰减规律。张凌等^[6-7]研究了南昌西站枢纽候车层各类工况下

的实测振动响应,分析候车层振动峰值频段,振动响应传播与结构本身的关系,得到柱脚下的振动响应较小,柱结构对振动有抑制作用。崔聪聪^[8]建立高铁-地铁综合交通枢纽车站模型,从时域和频域的角度分析了地铁列车激励下南昌西站的振动特性。高伟等^[9]利用 ANSYS 软件建立了兰州西站三维有限元模型,研究了地铁交叠的车站结构楼板振动响应,并对比分析了不同工况下地下商场楼板的振动特性。Christoffer 等^[10-11]分别通过传递函数预测了瑞典和莫斯科地铁列车在建筑物内产生的振动响应。谢伟平等^[12]利用实测和仿真的手段,对“桥建合一”的地铁高架车站进行了环境振动与二次噪声的评估,研究结果表明:“桥建合一”型高架车站的振动更剧烈,车站楼板低频振动更容易放大,并在楼板一阶竖弯频率处出现共振。

【创新特色】就上述研究而言,针对地铁列车进出站引起的车站结构振动响应研究多为单线或简单结构的车站,对于多线平行且结构复杂的车站鲜有文献报道。为此,本文考虑到地铁发展所产生的新建线路可能会以不同的方式接入既有车站,此时需考虑地下空间的合理运用和不同接入形式可能导致的振动噪声问题。**【关键问题】**本文依托国内某城市地铁线路开展的大量现场实测,选取某典型三线平行换乘结构的地铁车站,研究三线平行换乘结构地铁车站振动特性及传播规律,为类似结构、平行接入多条线路的地铁车站及车站上盖建筑的振动预测、振动舒适度评价及减振设计提供参考。

1 现场测试

1.1 工程概况

地铁J车站位于我国南方某城市,建筑面积超过23万 m^2 ,共接入地铁A、B、C三条线路,三条线路均呈南北走向,其中A线和B线建成时间较早,且线路经过许多重要商业区,因此两条线路客流量较大,线路发车频次也较高;C线建成时间稍晚,线路主要经过城郊地区,日均客运量不如A线和B线,三条线路列车情况如表1所示。

表1 三条线路列车情况表
Tab.1 Train conditions of the three lines

Line	Top speed/(km/h)
A	80
B	120
C	120

J车站共计4层,地上、地下各两层,地上二层分别为派出所及车站办公区域,办公区域设置在地上二层靠近C线处;地面一层是A、B、C三条线路的换乘站厅层,地下一层为设备层,地下二层为A、B、C三条线路的站台层,该站线路布置与常规车站略有差异,C线位于西部,采用岛式布置;A、B线站台分别位于中部和东部,通过夹层通道或站厅层实现地下跨站台换乘,并与C线在地面一层站厅层换乘。地下二层最左侧站台为C线站台,中间和右侧站台分别为站台1和站台2,站台1、站台2与C线站台间相隔较厚的土层。其中站台1两侧停靠线分别为A线和B线向北线路,站台2两侧停靠线分别为A线和B线向南线路。从垂向看,C线站台距离地面一层垂向距离为14 m,距离地面二层垂向距离为19.8 m;A、B线站台与地面一层垂向距离为11.25 m,距离地面二层垂向距离为17.05 m;从横向看,站台1中轴线距离C线站台中轴线水平距离为26 m,站台2中轴线距离C线站台中轴线42 m。

1.2 测试设备及测点布置

本次测试所使用的采集设备为德国Head公司SQuadriga III数据采集仪,该采集仪是一款便携式的采集仪,设备内部装有电源用于采集数据时的供电。测试时使用的拾振器为941B加速度传感器,所有测试仪器和传感器测试前都进行了校准。为获得数据更好的连续性,本次测试采取不间断采样的方式,所有测点同时开始采样,再根据记录的列

车进出站时刻来截取有效数据。根据以往类似工程经验,楼板主要振动频率在200 Hz以内。当采样频率大于或等于有效信号最高频率的2倍采样频率,采样值包含原始信号的所有信息。振动采集的采样频率设置为500 Hz,采样间隔为0.000 2 s。由于本站客流量较大,22:00至次日0:00仍有较多乘客,因此为尽量避免行人等干扰情况,本次测试不间断采集了22:00至次日0:00列车进出站振动数据,后续的数据处理采用与采集仪配套的ArtemiS软件来分析处理数据,根据波形完整、无干扰无畸形的原则,每个测点截取其中测试效果较好的10组列车进站、出站数据,进行时域、频谱及Z振级分析。

本次测试分别在地下二层、地面一层和地面二层布置了测点,每个测点均配备一台采集仪。地下二层为站台层,共布置三组测点,三个站台各布置一组,每组测点均布置在各线站台中央处;地面一层在地铁站北边靠近办公区域的站厅层内布置了一组测点,地面二层测点布置在地铁站北边办公区域内,地面一层与二层测点均布置在C线站台测点正上方。每组测点均含1个垂向振动传感器、2个水平向振动传感器,水平向传感器方向分别为垂轨向和顺轨向。

2 测试结果分析

2.1 站台层垂向振动响应

由于本站接入线路较多,并且各个站台两侧到发线所截取到的振动响应数据大小相近,故分析站台振动时只考虑各个站台对应线路进出站垂向振动响应。图1为C线站台、站台1和站台2进站工况下振动响应图,图2为C线站台、站台1和站台2出站工况振动响应图。时域响应和频域响应均为所截取数据中具有代表性的一组数据。由图1和图2可知,三个站台处振动响应有显著差异,站台1振动响应和C线站台振动响应均远小于站台2振动响应,其中C线站台振动响应也远小于站台1振动响应。从时域上看,C线站台,站台1,站台2振动加速度峰值进站工况下分别约为0.025,0.38,1.56 m/s^2 ;出站工况下分别约为0.025,0.42,2.48 m/s^2 。进出站工况对比下,C线站台和站台1振动响应差距不大,而站台2处振动加速度峰值则有较大变化,出站时振动存在放大现象。从频域上看,站台1与站台2振动主

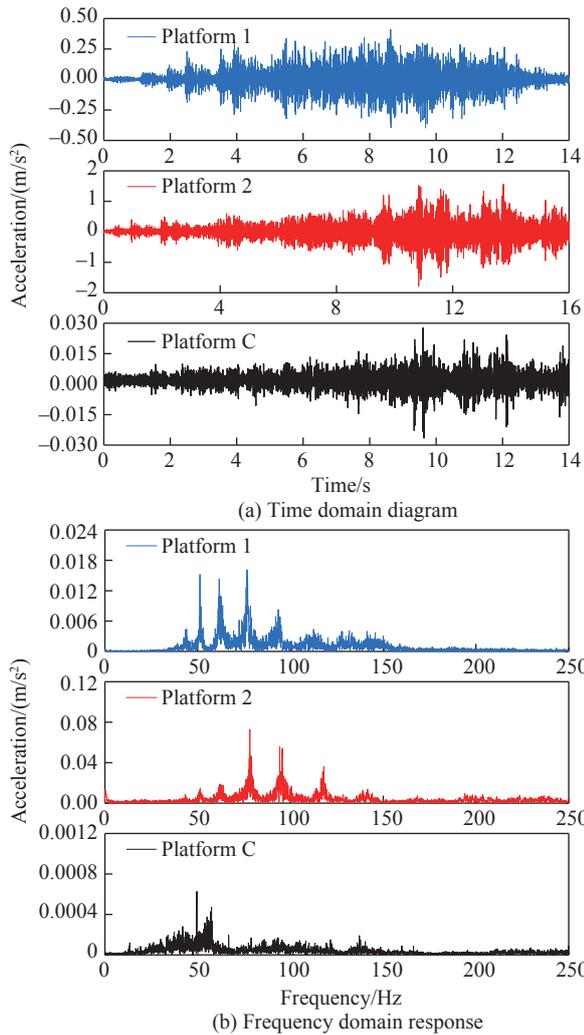


图1 列车进站站台振动响应

Fig. 1 Platform vibration response of incoming train

要频段相近,进站工况下站台1和站台2振动主要集中在75~125 Hz之间;出站工况下,站台1和站台2的振动主要集中在50~100 Hz之间,而C线站台振动响应在两种工况下振动均集中在50~60 Hz内。

各站台受列车运行Z振级如表2所示。由表2可知,三个站台测点Z振级具有较大的差异,站台2处Z振级最大,进站工况和出站工况均超过了90 dB,站台1处小于站台2,但仍处在较高水平,而C线站台处Z振级小于站台1和站台2。这可能跟列车载重及线路运行状况相关,A线与B线建成时间较早,并且线路会经过许多重要商业区,列车载重及发车频次均远高于C线,该运营条件下势必会对钢轨造成更大的磨耗,因此需重点关注A线与B线的运营状态,必要时应考虑相应的减振措施。此外,在所有的站台测点均能发现出站工况下Z振级

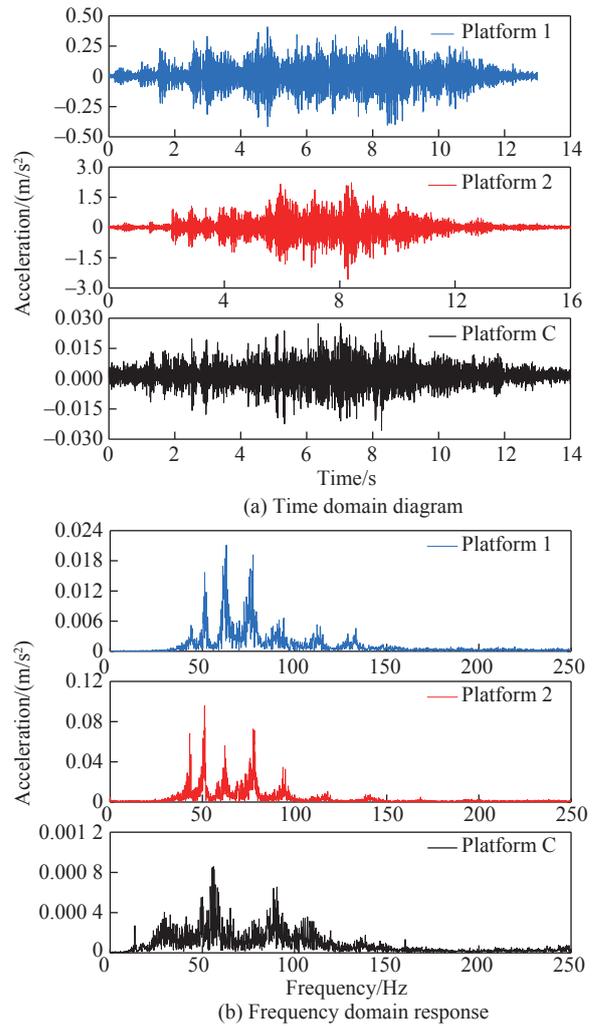


图2 列车出站站台振动响应

Fig. 2 Platform vibration response of departing train

表2 不同站台测点Z振级

Tab.2 Z-vibration level at different platform			dB
Platform	Arrive	Departure	
Platform 1	81.9	82.7	
Platform 2	91.4	93.7	
Platform C	61.7	63.6	

大于进站工况Z振级,这可能是由于列车在出站时是电机牵引加速的过程,更容易达到蠕滑力饱和的状态,这种情况也容易导致钢轨出现更大的磨耗,因此会产生更大的振动。

2.2 地面测点垂向振动响应

地面一层和地面二层测点均布置在C线站台测点正上方,与C线站台垂直距离分别为14, 19.8 m。地面一层车致振动响应如图3所示,地面二层车致振动响应如图4所示。

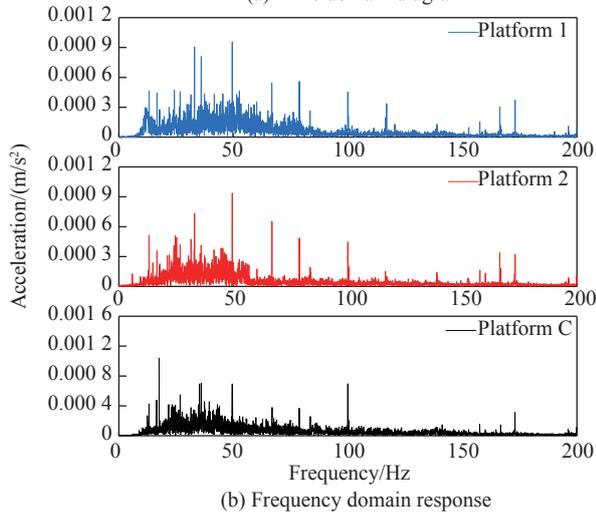
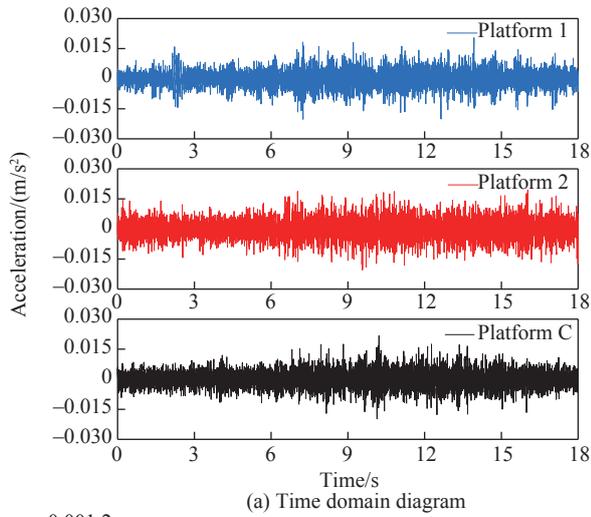


图3 地面一层测点振动响应

Fig. 3 Vibration response of measuring points on the first floor

如图3和图4所示,不同线路所导致的地面一层和二层的振动大小相近,并且幅值较小,与背景振动相差不大。来自站台1和站台2的振动传递至地面一层后均产生了较大的衰减,这可能原因是,来自站台1和站台2的振动在传递时经过了较远的距离,同时也经过了振动阻抗较大的土层。来自C线站台的振动产生的衰减较小,振动加速度峰值约为 0.02 m/s^2 ,这是因为C线列车在进出站的过程中所产生的振动本身就较小,且产生的振动直接通过柱子向上传递,因此C线站台振动传递至地面一层时衰减较小。此外,振动传递至地面二层后出现了放大效应,来自C线,站台1,站台2的振动所产生的振动加速度峰值分别为 $0.027, 0.029, 0.036 \text{ m/s}^2$ 。从频谱上看,地面一层的振动峰值频段主要集中在 $20\sim$

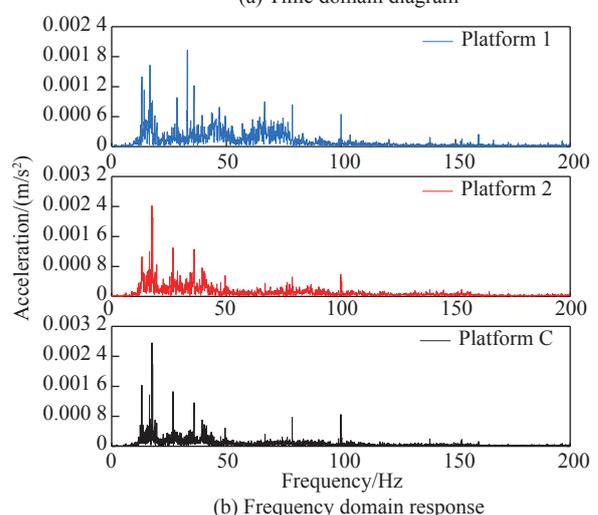
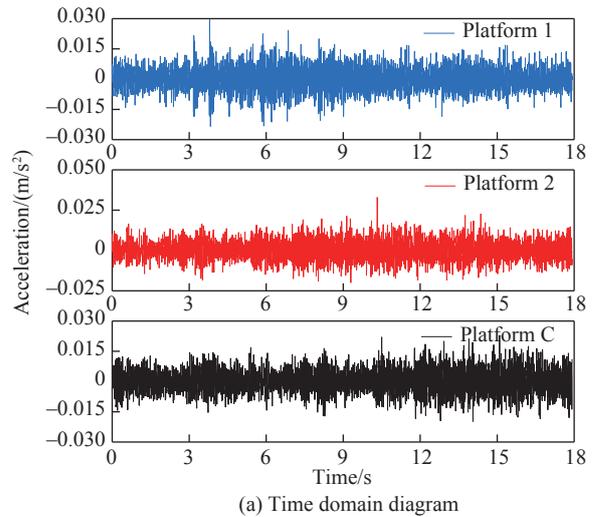


图4 地面二层测点振动响应

Fig. 4 Vibration response of measuring points on the second floor

50 Hz 频段,而地面二层的振动主要集中在 $10\sim 30 \text{ Hz}$ 频段。振动自下而上传递后,振动主频产生了较大偏移,从站台层的中高频振动逐渐转变为低频振动。

地面一层测点和地面二层测点受不同站台列车运行所产生的Z振级如表3所示。由表3可知,来自相同站台所产生的振动幅值几乎不受进出站工

表3 地面一层和地面二层测点Z振级大小

Tab.3 Z-vibration level of the first floor and second floor measurement points dB

Floor	Platform 1		Platform 2		Platform C	
	Arrival	Departure	Arrival	Departure	Arrival	Departure
First floor	64.2	64.7	66.8	66.9	60.2	60.6
Second floor	68.4	68.7	70.4	70.5	64.3	65.1

况影响,并且呈现列车出站工况振动比进站工况大的规律。

根据《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》(JGJ/T 170—2009),地面二层测点位于车站办公区域,属于规范中1类功能区,其夜间振动限值为62 dB,由表3可知,该车站办公区振动已超过限值,需考虑减、隔振措施。根据既有工程经验,可在地面二层楼板处设置吸振器,或者在轨道上设置减振轨道,如钢弹簧浮置板,以达到减少办公区振动的目标。

2.3 多线运行工况下地面测点振动响应

由于J车站同时接入三条线路,因此在分析地面一层及二层测点振动响应时应充分考虑多线运行的工况,但由于不同测试人员对于列车进、出站的判断标准略有差异,因此不同测试人员所记录的列车进、出站时刻会有些许偏差,且各线路间的运营情况相互独立。仅截取到站台1列车与站台2列车混叠、站台1列车与C线列车混叠、站台2列车与C线列车混叠、三线站台列车混叠4种工况下有明显振动信号的进、出站数据各2~3组,求这些数据Z振级的平均值,其结果如表4所示。

表4 不同工况Z振级大小
Tab.4 Z-vibration levels under different working conditions dB

Different platforms	First floor		Second floor	
	Arrival	Departure	Arrival	Departure
Platform 1 and 2 aliasing	67.1	67.6	70.2	70.8
Platform 1 and C aliasing	65.3	65.9	68.9	69.3
Platform 2 and C aliasing	66.0	66.5	69.7	70.1
Three platforms aliasing	67.8	68.2	70.5	70.8

由表3和表4可知,多数工况可以发现振动存在增大的情况,但多线运行与单线运行时Z振级相差不大,振动叠加后并未出现大幅度的增加,以振源较大的线路贡献量为主。其中主要原因是混叠前振源大小及主要频段存在差异。在相同传递条件下,只有在不同振源大小、峰值频段等多种因素相当时才出现混叠振动响应增大较多现象^[13],因此可以推断:不同运行条件下,该车站多线同时运行时不会产生更为严重的环境振动问题。

3 振动传递分析

为研究车致振动在车站内的传递规律,将计算

出所选取不同测点所截取的数据的Z振级后取平均值,作为振动传递分析的主要评价指标。

3.1 振动垂向传递

由于地面一层与二层测点均布置在C线站台测点正上方,故选取这三个测点的数据进行振动垂向传递分析是十分合适的。C线站台、地面一层和地面二层测点之间分频振级衰减量如图5所示,图中数据分别为地面一层分频振级减去C线站台分频振级和地面二层分频振级减去地面一层分频振级。

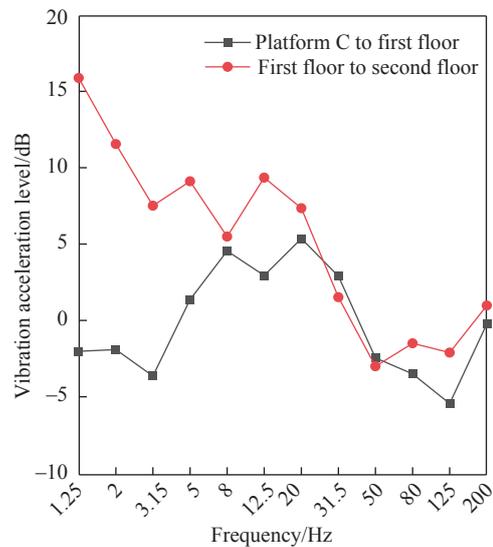


图5 不同测点分频振级衰减图
Fig. 5 Attenuation diagram of vibration level at different measuring points

由图可知,振动自C线站台传递至地面一层后,振动主要在4 Hz以内和50~200 Hz产生了衰减,在中间频段略有增大;振动自地面一层传递至地面二层后,振动在0~40 Hz产生了放大,在40 Hz以上则为衰减。由表2和表3可知,进站工况下,振动自C线站台传递至地面一层测点后衰减了1.5 dB,而出站工况则衰减了约3 dB。从振动传递路径上看,一部分振动从站台上直接沿着立柱向上传递,根据既有工程经验,振动能量在立柱顶端和底端几乎一致,因此这一部分振动衰减较少,另一部分振动则经过振动阻抗较大的土层,产生了一定衰减。振动在继续向上传递后出现了放大现象,此时振动传递不再经过土层,直接由结构向上传递,振动放大了3.6~5.0 dB。原因有两方面,一是由于车站建筑的自振特性,列车进出站运行所产生的振动激起了地面二层楼板的共振^[14]。由图3与图4可知,从时域

上看,地面二层振动的峰值产生了放大,从频谱上看,由于结构本身存在滤波效应,高于30 Hz的振动产生了较大的衰减,但仍可观察到峰值有放大,基于此可推断振动传递激起了楼板的共振,从而放大了振动响应。二是振动波在传递至建筑顶层后无法向外传递,在地面二层楼板跨中处产生聚集效应^[15],放大了振动。

3.2 振动横向传递

为分析车致振动的横向传递,选取C线站台、站台1和站台2的站台响应作为分析对象,在C线站台测点的测试数据中分别截取10组来自站台1和站台2进出站的振动响应,与站台1和站台2本线振动做出对比,分析振动的横向传递特性。C线站台受邻线运行振动响应如图6所示。由图6可知,A线和B线列车运行产生的振动在传递至C线站台后产生了

较大衰减,但仍比C线站台列车通过时的振动更大。从频域上看,来自站台2的振动在主要集中在50~80 Hz范围内,且在该范围内显著大于其他两线振动,在其他频段内,三线振动幅值相差不大。

C线站台受邻线运行影响Z振级如表5所示。由表可知,来自站台1运行列车产生的振动在经过土层传递后作用在C线站台,进站和出站工况下Z振级分别衰减了15.6,16.6 dB,站台2则分别衰减了25.3,26.4 dB,出站工况振动衰减均大于进站工况振动衰减。

表5 C线站台受邻线运行影响Z振级
Tab.5 Platform C is affected by the operation of adjacent lines Z-vibration level dB

Platform	Arrive	Departure
Platform 1	67.9	68.8
Platform 2	69.8	71.4
Platform C	61.7	63.6

分别将来自站台1和站台2作用在C线站台上的振动做散点图并进行拟合,拟合效果如图7所示。由图可知,进站工况下,站台1和站台2的振动衰减斜率分别为0.528和0.514,出站工况下振动衰减斜率则为0.534和0.531。4种情况下其振动衰减率都在0.53左右,可以认定列车运行在该车站内的横向传递时衰减量约为0.53 dB/m。

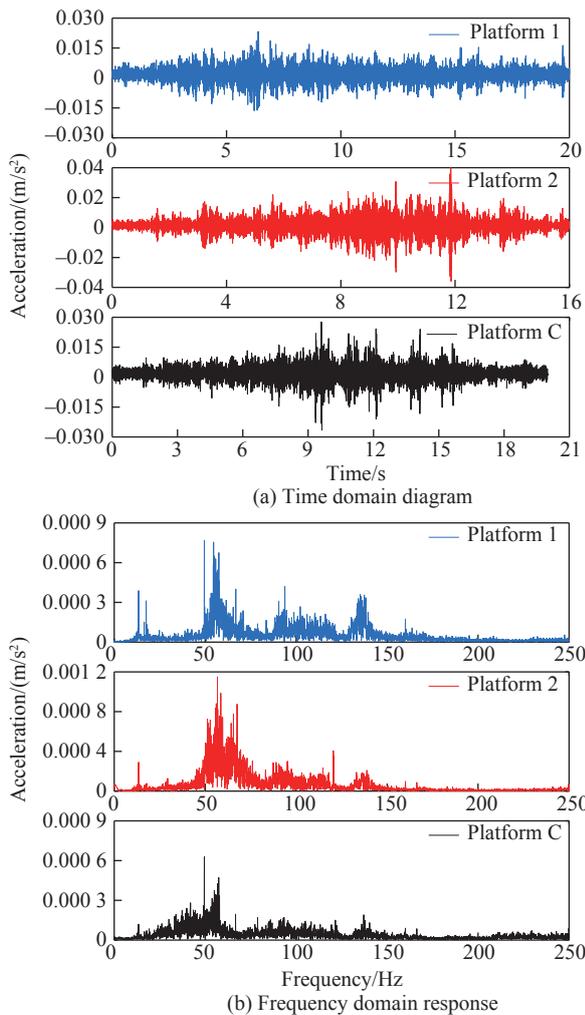


图6 C线站台受不同站台列车振动响应
Fig.6 Platform C responds to the vibration of trains at different platforms

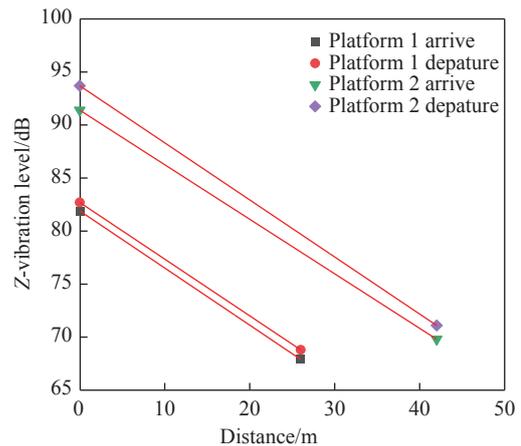


图7 拟合图
Fig.7 Fitting diagram

4 结论

本文对国内某三线平行换乘车站进行了现场实测,经过分析后得出以下结论。

1) J车站三个站台的振动响应具有显著差异,该车站内各站台振动响应差异较大。站台1,站台2,C线站台进站工况下平均Z振级分别为81.9,91.4,61.7 dB;出站工况下平均Z振级分别为82.7,93.8,63.7 dB。站台1和站台2的振动主要频段为50~100 Hz,而C线站台振动响应在两种工况下均集中在50~60 Hz内。振动响应差异较大与线路运行状况有相关性,需对A线与B线线路的运行状态给予更多关注。

2) 在车站内多数测点均可发现出站工况下振动相较于进站工况更大,最大差值约2.5 dB,这可能是由于出站时列车更容易造成蠕滑力饱和,导致列车出站时对钢轨造成更大的磨损,因此出站工况振动大于进站工况振动。

3) 车致振动传递至地面低矮建筑后,会先产生一定衰减,并在向高层的振动传递过程中产生放大效应,振动放大约3.6~5 dB,可为类似结构的地铁车站及上盖建筑提供参考。

4) 多线同时运行时,地面测点混叠后的振动响应存在增大现象,但受混叠前振源特性影响,其振动增大幅度较小,不会产生更为严重的环境振动问题。

5) 车致振动在车站建筑内的传递所产生的衰减较小,振动衰减主要依靠的是土层,振动衰减量约为0.53 dB/m。

6) 地下车站上部建筑的室内振动有严重的超标风险,应予以重视。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 张谦,陈文化.地铁列车出、进站加、减速的轴向激励引起出平面振动[J].振动与冲击,2016,35(24):96-101.
ZHANG Q, CHEN W H. Out-of-plane vibration induced by axial excitation while a metro train arriving at or leaving a station[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(24): 96-101.
- [3] 张谦,陈文化.地铁列车进站引起场地柱面纵向振动[J].振动工程学报,2017,30(3):442-448.
ZHANG Q, CHEN W H. Cylindrical longitudinal vibration while metro train arriving at station[J]. Journal of Vibration Engineering, 2017, 30(3): 442-448.
- [4] 张楠,夏禾,程潜,等.制动力作用下车辆-车站结构耦合系统分析[J].振动与冲击,2011,30(2):138-143.
ZHANG N, XIA H, CHENG Q, et al. Analysis method for a vehicle structure coupled system under braking force [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(2): 138-143.
- [5] 冯青松,廖春明,张凌,等.地铁列车进出站对换乘站振动影响实测分析[J].噪声与振动控制,2021,41(4):19-26.
FENG Q S, LIAO C M, ZHANG L, et al. Measurement and analysis of the impact of metro transfer train arriving at or departing from the station on platform vibration[J]. Noise and Vibration Control, 2021, 41(4): 19-26.
- [6] 张凌,雷晓燕,刘全民,等.地铁环境振动源强测试与评价标准分析[J].振动、测试与诊断,2020,40(1):89-94.
ZHANG L, LEI X Y, LIU Q M, et al. Measurement and evaluation of environmental vibration source strength of the subway[J]. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis, 2020, 40(1): 89-94.
- [7] ZHANG L, LEI X Y, JING J, et al. A study of the suitable measurement location and metrics for assessing the vibration source strength based on the field-testing data of Nanchang underground railway[J]. Sound and Vibration, 2018, 52(5): 22-27.
- [8] 崔聪聪.综合交通枢纽振动响应特性与舒适度分析[D].南昌:华东交通大学,2018.
CUI C C. Based on the analysis of transport hub vibration response characteristics and comfort[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2018.
- [9] 高伟,耿传智,贾坚.地铁交叠式车站楼板振动响应三维动力有限元仿真分析[J].城市轨道交通研究,2014(2):61-66.
GAO W, GENG C Z, JIA J. 3D dynamic finite element simulation of floor vibration response of overlapping metro station[J]. Urban Mass Transit, 2014(2): 61-66.
- [10] CHRISTOFFER W, ANDERS B. Prediction of train-induced vibrations inside buildings using transfer functions [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2007, 27(2): 93-98.
- [11] SMIRNOV V, TSUKERNIKOV I. To the question of vibration levels prediction inside residential buildings caused by underground traffic[J]. Procedia Engineering, 2017, 176: 371-380.

- [12] 谢伟平, 杨友志, 李伟. “桥建合一”型地铁高架车站振动与结构噪声测试研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(7): 1837-1845.

XIE W P, YANG Y Z, LI W. Research on vibration and structural noise measurement of subway elevated station “combination of bridge and construction” [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(7): 1837-1845.

- [13] 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, 2023.

ZHANG L. Study on complex vibration characteristics of integrated transportation hub under motivation of multi-vibration[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2023.

- [14] 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, 2009, 42(5): 33-39.

- [15] 王田友, 丁洁民, 楼梦麟, 等. 地铁运行所致建筑物振动的传播规律分析[J]. 土木工程学报, 2009, 42(5): 33-39.

WANG T Y, DING H M, LOU M L, et al. Subway-induced building vibration and its propagation[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(5): 33-39.



第一作者: 周思凡(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为铁路环境振动与噪声。E-mail: zsfecjtu@ecjtu.edu.cn。



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。E-mail: fqshdjtdx@aliyun.com。

(责任编辑: 姜红贵)