

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: 为研究三线平行地铁进出站引起的地铁车站的振动特性, 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。分析结果表明:受线路建成及运营影响,该车站内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, 三个站台的平均Z振级为: 82.7、93.8和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。在车站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+.4 文献标识码: A

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, 330013, Nanchang, China; 2. Guangzhou Metro Design and Research Institute, Guangzhou 510010, China)

Abstract: In order to study the vibration characteristics of subway stations caused by subway entry and exit, a three-line parallel transfer subway station in a domestic city was taken as the research object, and the vibration characteristics and propagation rules of the station were analyzed based on the field measurement data. The analysis results show that, affected by the completion and operation of the line, the vibration response of each platform in the station is quite different. Under the inbound condition, the average Z-vibration level of platform 1, platform 2 and platform C is 81.9, 91.4 and 61.7 dB, and the main frequency band of platform 1 and platform 2 is 75~125 Hz. Under outbound conditions, the average Z vibration levels of the three platforms are: 82.7, 93.8 and 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. It can be found in most measuring points in the station that the vibration under outbound conditions is greater than that under inbound conditions, and the maximum difference is about 2.5dB. After the vehicle-induced vibration is transmitted to the ground floor, it will first produce a certain attenuation, and if it continues to be transmitted to the ground floor, it will produce an amplification effect, and the vibration is about 3.6~5dB. 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 subway stations and buildings with similar structures.

Key words: Environmental Vibration; Subway Station; Field Measurement; Vibration Transmission Law

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。随着 TOD 思路的广泛接受,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了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。

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、站厅层各测点再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 10m 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,在时域上进行积分和时间步内的力-运动状态迭代方式求解运动方程,得到了制动力作用下车辆-车站耦合系统振动特性;冯青松^[5]等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^[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。崔聪聪等^[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,并对对比分析了不同工况下地下商场楼板的振动特性。Christoffer With 和 Smirnov Vladimir^[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^[12]等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。

目前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。随着城市轨道交通的进一步发展,部分城市会修建更多的地铁线路,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。基于此,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 m²,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	Type of train	Top speed	Line
A	6A	80 km/h	A
B	6B	120 km/h	B
C	6B	120 km/h	C

车站整体布置如图 1 所示,由图可知,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 14m,距离地面二层垂向距离为 19.8m;A、B 线站台与地面一层垂向距离为

11.25m, 距离地面二层垂向距离为 17.05m; 从横向看, 站台 1 中轴线距离 C 线站台中轴线水平距离为

26m, 站台 2 中轴线距离 C 线站台中轴线 42m。

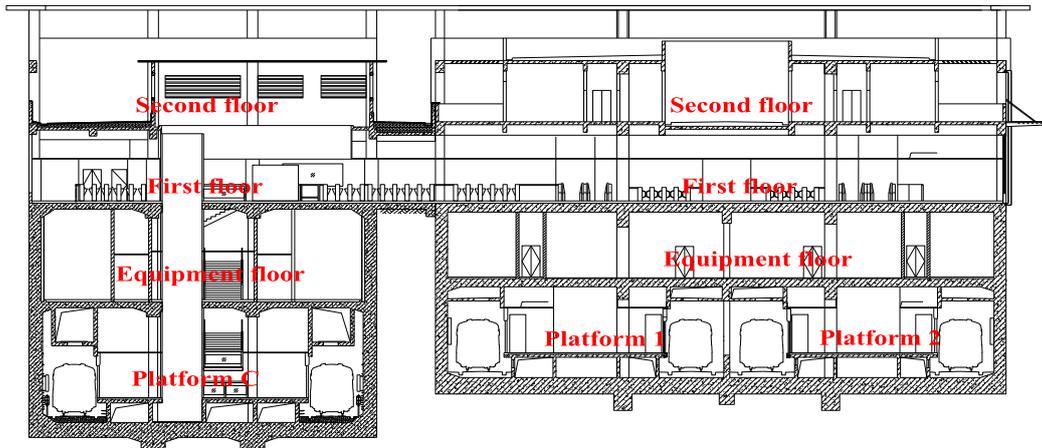


图 1 车站整体布置图

Fig. 1 Overall layout of the station

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 SQuadrigaIII 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, 该款传感器主要参数指标如表 2 所示, 测试设备如图 2 所示。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, 因此, 振动采集的采样频率设置为 500 Hz, 采样间隔为 0.0002 秒。由于本站客流量较大, 晚上 10 点至 12 点间仍有较多乘客, 因此为尽量避免行人等干扰情况, 本次测试不间断采集了晚上 10 点至 12 点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, 其布置示意图如图 3 所示。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, 现场实测照片如图 4 所示。

表 2 941B 型拾振器主要参数指标

Tab.2 Main parameters of type 941B vibration pickup

Main technical index	Value
Sensitivity	0.3
Maximum range/ m/s^2	20
Transmission band/Hz	0.25~80
Output load resistance/ $k\Omega$	1000
Dimension/mm	63×63×80
Weight/kg	1



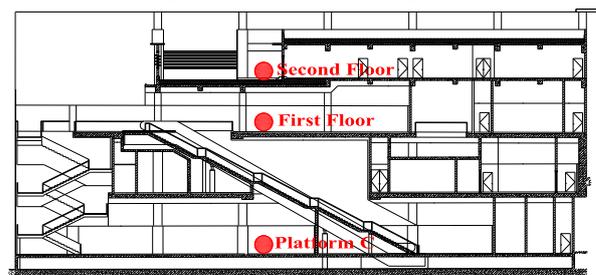
(a) SQuadrigaIII 数据采集仪



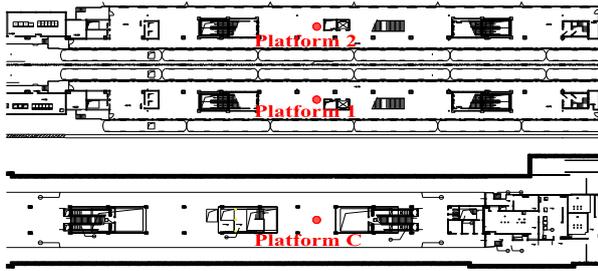
(b) 941B 传感器

图 2 测试设备图

Fig. 2 Test equipment diagram



(a) 测点竖向布置示意图



(b) 测点平面布置示意图

图 3 测点布置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of measuring point layout



图 4 测试现场图

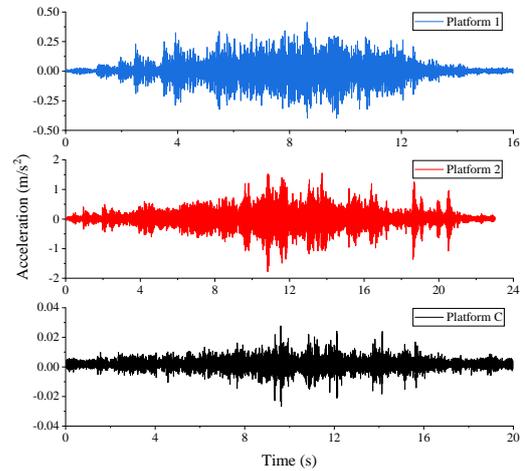
Fig 4 Field measurement diagram

2 测试结果分析

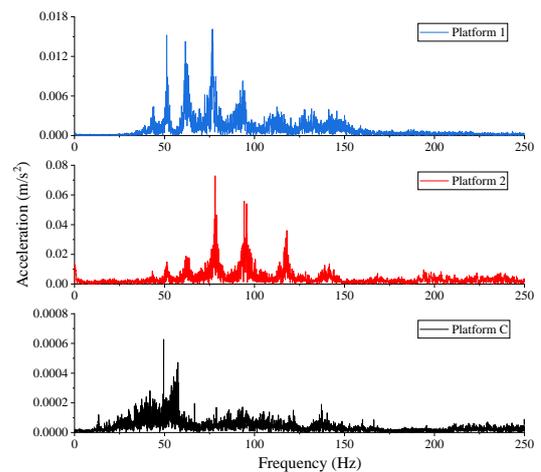
2.1 站台层垂向振动响应

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 5 为 C 线站台、站台 1 和站台 2 进站工况下振动响应图，图 6 为 C 线站台、站台 1 和站台 2 出站工况振动响应图，图中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，进站工况下 C 线站台、站台 1 和站台 2 振动加速度峰值约为 0.025 m/s^2 、 0.38 m/s^2 和 1.56 m/s^2 ；出站工况下 C 线站台、站台 1 和站台 2 振动加速度峰值约为 0.025 m/s^2 、 0.42 m/s^2 和 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 $75\sim 125 \text{ Hz}$ 之间；出站工况下，站台 1 和站台 2 的振动主要集中在 $50\sim 100 \text{ Hz}$ 之间，而 C 线站台振动响应在两种工况下振动均集中在 $50\sim 60 \text{ Hz}$ 内。

各站台受列车运行 Z 振级如表 3 所示。由表可知，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损，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损，因此会产生更大的振动。



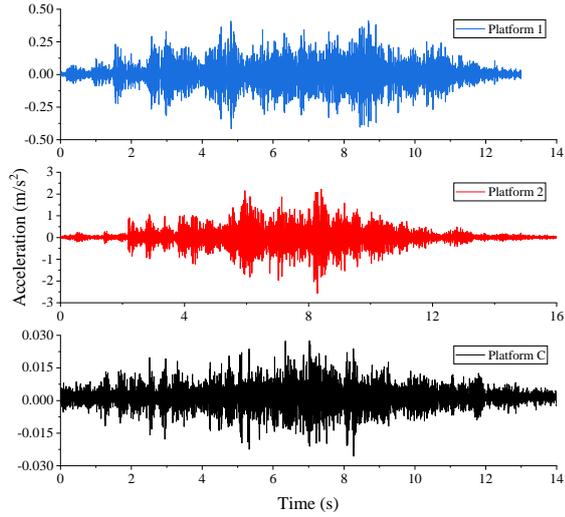
(a) 时域图



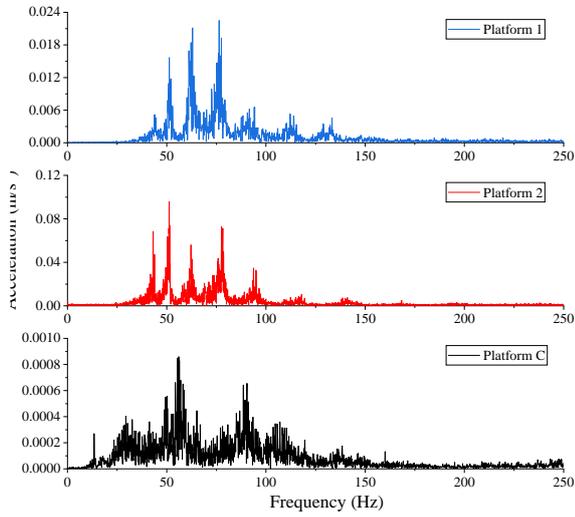
(b) 窄带频谱

图 5 列车进站站台振动响应

Fig 5 Platform vibration response of incoming train



(a) 时域图



(b) 窄带频谱

图 6 列车出站站台振动响应

Fig 6 Platform vibration response of departing train

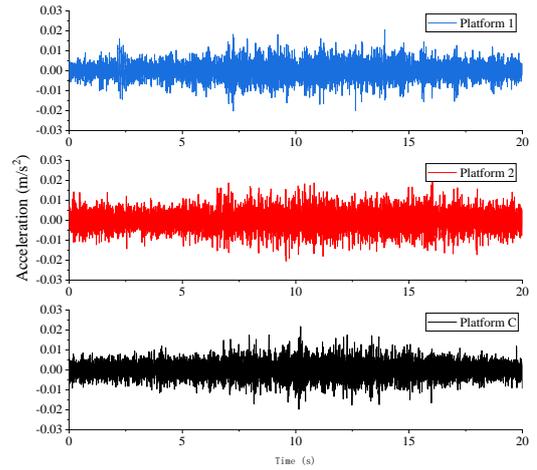
表 3 不同站台测点 Z 振级/dB

Tab 2 Z-vibration level at different platform/dB

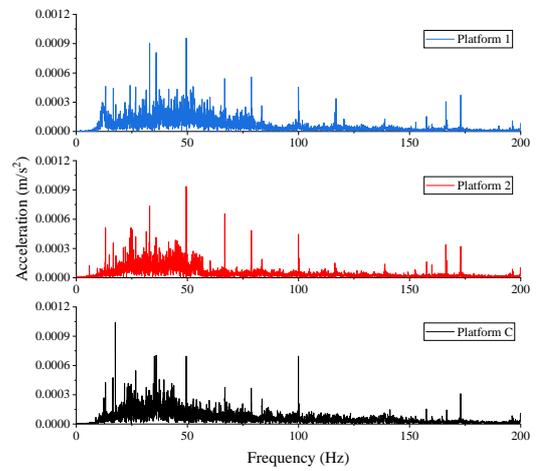
Platform	Z-vibration level	
	Arrive	Departure
Platform 1	81.9	82.7
Platform 2	91.4	93.7
Platform C	61.7	63.6

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 线站台垂直距离为 14 和 19.8m。地面一层车致振动响应如图 7 所示, 地面二层车致振动响应如图 8 所示。



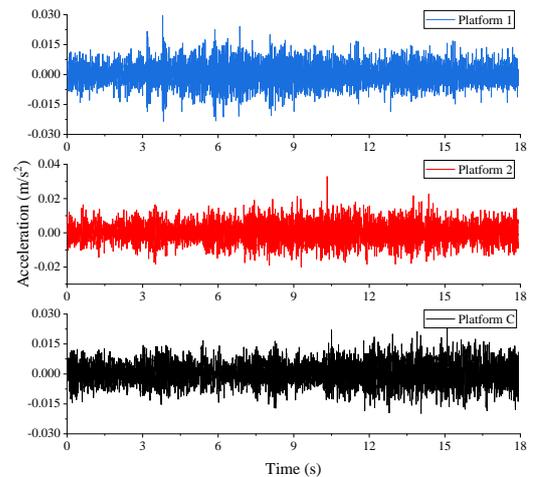
(a) 时域图



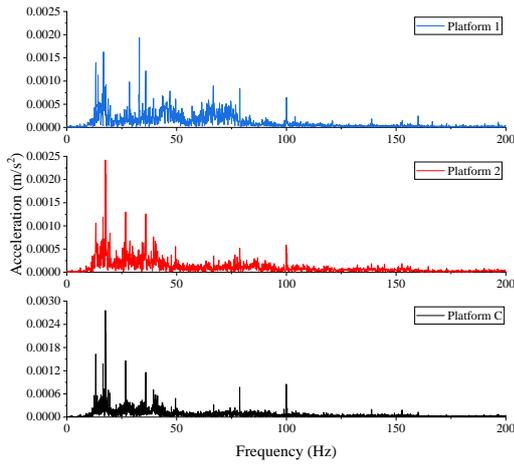
(b) 窄带频谱

图 7 地面一层测点振动响应

Fig. 7 Vibration response of measuring points on the first floor



(a) 时域图



(b) 窄带频谱

图 8 地面二层测点振动响应

Fig. 8 Vibration response of measuring points on the second floor

如图所示，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 0.02m/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 和站台 2 的振动所产生的振动加速度峰值分别为 0.027 m/s^2 、 0.029 m/s^2 和 0.036 m/s^2 ，从频谱上看，地面一层的振动峰值频段主要集中在 $20\sim 50\text{ Hz}$ 频段之间，而地面二层的振动主要集中在 $10\sim 30\text{ Hz}$ 频段之间。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 4 所示。由表可知，来自相同站台所产生的振动幅值几乎不受进出站工况影响，并且呈现列车出站工况振动比进站工况大的规律。

表 4 地面一层和地面二层测点 Z 振级大小/dB

Tab.4 Z-vibration level of the first floor and second floor measurement points/dB

Measurement points	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

根据相关行业规范^[13]，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，因此仅截取到站台 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、三线站台列车混叠四种工况下有明显振动信号的进、出站数据各两到三组，求这些数据 Z 振级的平均值，其结果如表 5 所示。

表 5 不同工况 Z 振级大小/dB

Tab.5 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 4 和表 5 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。这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^[14],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

由图 3 可知,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 9 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。

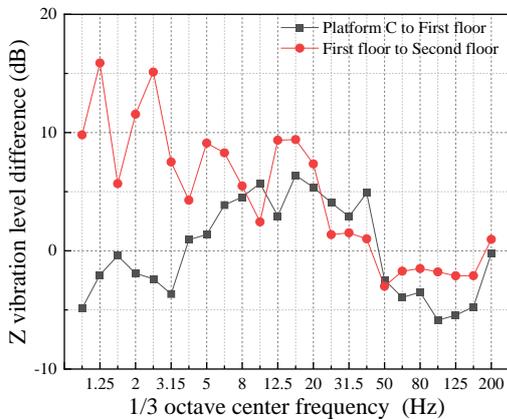


图 9 不同测点分频振级衰减图

Fig. 9 Attenuation diagram of vibration level at different measuring points

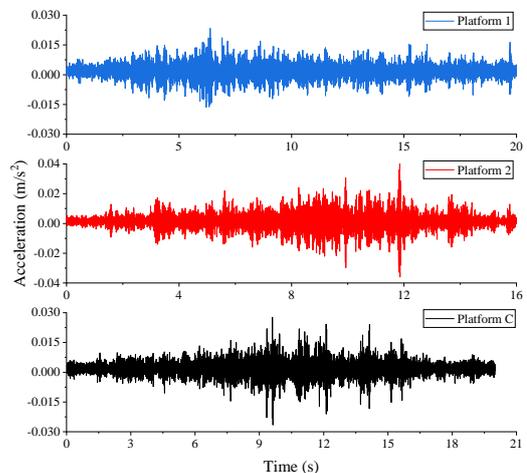
由图可知,振动自 C 线站台传递至地面一层后,振动主要在 4 Hz 内和 50~200 Hz 内产生了衰减,在中间频段略有增大;振动自地面一层传递至地面二层后,振动在 0~40 Hz 内产生了放大,在 40 Hz 以上则为衰减。由表 1 和表 2 可知,进站工况下,振动自 C 线站台传递至地面一层测点后衰减了 1.5 dB,而出站工况则衰减了约 3 dB;从振动传递路径上看,一部分振动从站台上直接沿着立柱向上传递,根据既有工程经验,振动能量在立柱顶端和底端几乎一致,因此这一部分振动衰减较少,另一部分振动则

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 dB。这可能原因有两方面,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^[15]。由图 7 与图 8 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^[16],因此放大了振动。

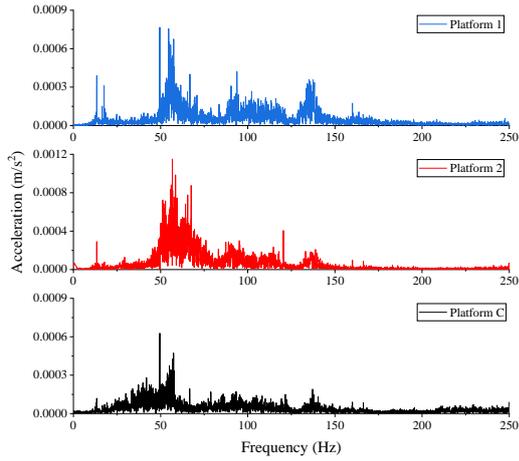
3.2 振动横向传递

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 10 所示。由图可知,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 4 所示。由表 1 和表 4 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 和 16.6 dB,站台 2 则衰减了 25.3 和 26.4 dB,出站工况振动衰减均大于进站工况振动衰减。



(a) 时域图



(b) 窄带频谱

图 10 C 线站台受不同站台列车振动响应

Fig 10 Platform C responds to the vibration of trains at different platforms

表 4 C 线站台受邻线运行影响 Z 振级/dB

Tab 4 Platform C is affected by the operation of adjacent lines

Platform	Z-vibration level/dB	
	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 11 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。

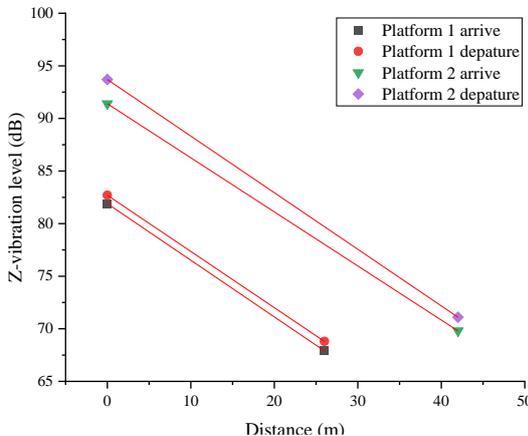


图 11 拟合图

Fig 11 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, 三个站台平均 Z 振级为: 82.7、93.8 和 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, 因此出现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, 需予以重视。

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(09): 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(09): 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+127.
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+127.
- [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(03):442-448.
ZHANG Q, CHEN W H. Cylindrical longitudinal vibration while metro train arriving at station[J]. Journal of Vibration Engineering, 2017,30(03):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(02):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(02):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(04):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(04):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(01):89-94+205.
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(01):89-94+205.
- [7] Ling Zhang, Xiaoyan Lei, Jian Jiang, 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]. Nan Chang, 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 With, Anders Bodare. Prediction of train-induced vibrations inside buildings using transfer functions[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2007,27(2):93-98.
- [11] Smirnov Vladimir, Tsukernikov Ilya. 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(07):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(07):1837-1845.
- [13] 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].
- [14] 张凌.多振源激励下综合交通枢纽复杂振动特性研究[D].华东交通大学, 2023.
ZHANG L. Study on Complex Vibration Characteristics of Integrated Transportation Hub under Motivation of Multi-vibration[D]. Nan Chang, East China Jiaotong University, 2023.
- [15] 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(03):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(05):33-39.
- [16] 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(05):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(05):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。Email: 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、轨道结构长期服役性能研究。Email: fqshdjtdx@aliyun.com。