高铁综合交通枢纽车站结构振动传播的测试分析

张凌¹, 雷晓燕^{1*}, 冯青松¹, 蒋剑², 崔聪聪³

1. 华东交通大学铁路环境振动与噪声教育部工程研究中心, 南昌 330013;

2. 南安普顿索伦特大学多媒体艺术与技术学院, 南安普顿 SO14 0YN, 英国;

3. 江西省交通设计研究院, 南昌 330052

* Email: xiaoyanlei2013@163.com

收稿日期: 2019-01-04; 接受日期: 2019-05-05; 网络版发表日期: 2019-07-18

国家自然科学基金项目(批准号: 51478184, 51878277, 51668020)和江西省教育厅科学技术研究项目(编号: GJJ160480)资助

摘要 为深入研究高铁型综合交通枢纽车站各类高铁列车低速进出站引起的振动传播特性与枢纽结构特性的关系, 对南昌西站候车层进行大型现场实测. 在候车大厅布设四类测点, 从时域及频域方面研究高铁列车低速进出站引起的振动在候车层垂轨向和顺轨向的传递特性, 同时研究梁柱、伸缩缝等不同结构位置对振动传播特性的影响. 实测研究表明: 振动传播受枢纽车站结构形式影响很大, 梁柱结构的约束作用对高于40 Hz的高频振动传播抑制明显, 大跨结构板跨中点振动响应最大; 伸缩缝边缘出现振动响应显著增大现象, 需要考虑此类三边支撑悬臂板板边位置的减振; 综合交通枢纽车站的建桥分离结构, 可以极大地阻隔40 Hz以上的高频振动, 但低频振动仍可由结构-大地-结构传递, 且衰减量很小; 综合交通枢纽车站综合竖向振动响应均大于水平向, 占主导地位, 但从分频频段来看, 在低于5 Hz的低频段, 水平振动大于竖向振动, 同时水平振动传播衰减, 受结构梁柱约束作用影响不明显.

关键词 综合交通枢纽车站, 实测研究, 振动传播特性, 结构特性

1 引言

随着我国高速铁路的发展, 全国大力推进建设高铁综合交通枢纽, 它将各种城市交通设施与对外交通方式紧密衔接在一起, 具有开放式、立体化、零距离换乘等特点. 在大型高铁综合交通枢纽内, 通常有数十条列车股道, 且多以高架桥梁形式穿行于枢纽结构内, 列车产生的振动通过结构和大地在站内以各种形式传播, 产生复杂的振动特性, 对枢纽结构及旅客身

心产生危害. 作为一种近年来发展起来的便利的交通基础设施, 国内外学者对它展开了一些研究.

文献[1~8]建立数值仿真时频分析模型, 研究了高速列车通行时天津西站、武汉站、重庆沙坪坝综合交通枢纽、南昌西站综合交通枢纽等振动响应特性及振动舒适性. 文献[9]建立数值模型对地铁引起的某大型建筑的振动进行预测和减振分析. 文献[10,11]分别对柏林火车站等建立数值模型进行振动预测. 文献[12,13]采用实测与数值仿真分析的方法, 以成灌快铁

引用格式: 张凌, 雷晓燕, 冯青松, 等. 高铁综合交通枢纽车站结构振动传播的测试分析. 中国科学: 技术科学, 2019, 49: 1107–1116

Zhang L, Lei X Y, Feng Q S, et al. An experimental study on the vibration propagation of high-speed railway integrated transportation hub station structure (in Chinese). Sci Sin Tech, 2019, 49: 1107–1116, doi: 10.1360/SST-2019-0006

安德站为工程背景开展现场试验, 实测了轨道梁、站台、候车大厅和办公室区域的振动加速度, 并对实测信号进行时域和频域分析. 文献[14~16]实测南京西站候车大厅振动响应并分析制动力与车站振动响应间的关系.

目前, 针对高铁综合交通枢纽高架车站振动特性的理论研究已取得一些成果, 主要为考虑车站结构在单一振源的影响下, 正线列车高速通过时的结构振动响应仿真研究, 研究成果多建立在数值仿真模型的基础之上. 由于高铁综合交通枢纽结构庞大复杂, 关于此类结构的测试研究的成果较少. 高铁综合交通枢纽常为交通换乘中心, 列车产生的振动多由不同股道列车启制动进出站引起. 列车股道设在高架桥上并穿行于综合交通枢纽内, 振动向上直接传递到高架高铁候车厅, 向下传递到线下站厅层及地铁结构层, 如图1所示, 不论对车站结构还是对各候车层旅客舒适度都产生很大影响.

对此类大型结构开展深入实测, 研究各种工况下枢纽结构特性对振动传播特性的影响, 可为大型综合交通枢纽设计、减振、数值模拟分析提供一定的数据支持.

本文以南昌西站为研究对象, 测试分析多趟列车从各股道启制动进出站时, 综合枢纽候车层振动响应传递特性. 根据不同工况, 在候车层四类测点, 详细分析不同结构部位对各个方向的振动传递特性的影响. 候车层为大跨度结构, 旅客集中, 振动影响旅客舒适度, 通过对候车层不同结构位置振动响应作详细分析, 可为高铁综合枢纽结构的设计及结构减振提供测试数据依据.

2 综合交通枢纽概况及测点布设

2.1 测试对象概况

南昌西站是向莆铁路和杭南长铁路途经南昌的大型交通枢纽站, 日均客运量达4.3万人次. 如图1所示, 车站结构从上至下分别为高架候车层、高铁站台层、线下站厅层、地铁站台. 高铁站台层高程为0.00 m. 地铁2号线从枢纽结构下部南北方向穿过, 与东西方向运行的高铁线路相互垂直.

图2为枢纽结构中高铁候车层平面轴网图及候车层与站台层三维示意图. 站房主体建筑外墙南北进深385.5 m, 东西宽133 m. 候车层位于整个站房结构的地上二层, 站台层位于地面一层, 南昌西站设26条轨道线路, 其中正线4条, 到发线22条, 共设有22个站台, 站台编号与到发线编号相对应, 具体编号见图2(a), 除站台5、6和17、18之间为两条正线和两条到发线, 其余均为到发线. 除正线轨道形式为无砟轨道外, 到发线股道均为有砟轨道. 正线与枢纽结构之间为建桥分离结构, 并于其正上方候车层相应位置设置两条结构伸缩缝, 将枢纽结构南北方向分为三个区域, 区域一通行的线路有5条到发线, 区域二通行12条到发线, 区域三通行5条到发线, 4条正线暂不通行车辆. 本次测试结果均基于各到发线列车启制动进出站振动测试.

2.2 测试仪器与测点布置

现场环境振动测试采用德国Head公司DATAREC4 DIC24数据采集仪, 中国地震研究所941B型加速度传感器进行加速度采集, 采样频率为800 Hz.

为了反映枢纽各层在车辆进出站时的振动特性,

图1 综合交通枢纽南立面图

图 2 交通枢纽高架候车层平面及测点布置图。(a) 候车层轴网及测点布置图; (b) 候车层及站台层三维示意图

分别在高架候车层、高铁站台层、线下站厅层及地铁站台层布测单向测点及三向测点。

高架候车层位于高铁站台层的正上方, 旅客集中, 高铁列车在此层产生较大振动响应。如图2所示, 高架候车层测点数目较多, 根据不同研究目的将它们分为 A, B, C, D 四类, 具体位置如图2(a)所示, 其中除 D 类测点是三向振动测点外, 其余均为竖向振动单向测点。

A 类测点主要用于分析不同股道车辆产生的振动在候车层横轨方向上的传递特性。B 类测点主要用于分析下方高铁车辆振动由结构柱传递到该层, 通过梁柱顺轨方向的振动传递特性。C 类测点主要用于分析由伸缩缝分开的不同板块之间振动传递特性。D 类测点为三向测点, 主要用于分析振动在水平向顺轨向、

垂轨向振动及竖向振动传递特性。

3 综合交通枢纽高架候车层测试结果与振动特性分析

3.1 A 类测点

A 类测点由南至北分布, A1 至 A7 相邻各点间距均为 10.5 m, A8 为伸缩缝边缘点, 与 A7 间距为 4.5 m。如图 3 所示, A1, A3, A5, A8 分别对应下层列车股道中心点, 横向跨越下层 6~11 股道, 能很好测得 6~11 股道列车进出站引起振动传至候车层的横向传递特性。不间断测试时长为 3 h, 测得不同型号列车进出站振动信号共计 38 趟, 其中进出 7, 8 号股道 15 趟, 9, 10 号股道 13 趟, 6 号

图3 不同股道进出列车, 各测点加速度峰值均值。(a) 不同股道进出车辆A类各测点加速度峰值均值分布图; (b) 测点布置与下方股道位置相对位置示意图; (c) 三种工况A类测点 VL 均值分布图及传递拟合图; (d) 不同股道进出车辆A类各测点 VL_z 均值分布图

股道10趟。满足FTA^[17]每个测点测试超过10辆车的统计要求。图3列出各测点在5号至10号股道进出车辆时, 加速度峰值、加速度振级(VL)以及Z振级(VL_z)的传递统计误差条(error bar)图。加速度振级(VL)为未计权的振动加速度级, 公式为

$$VL = 20 \lg(a / a_0), \quad (1)$$

其中, a 为振动加速度有效值, m/s^2 ; a_0 表示基准加速度, $a_0 = 10^{-6} \text{ m/s}^2$; VL 为加速度振级, dB 。

Z振级(VL_z)为Z计权振级, 是按ISO 2631-2:2003^[18]规定的全身振动垂向计权因子修正后得到的振动加速度级, 单位为 dB 。

由图3(a)和(c)可知, 不论是时域还是频域, 振动响应最大点都出现在进出车辆中心股道处, 并向远处呈近似斜率线性递减。无论哪个股道进出车辆, 各趟振动信号均显示, 振动响应传至伸缩缝边缘A8点时不降

反增。为了进一步得到横轨向振动传递特性, 对各工况下各测点的 VL 值以振动峰值测点为分界作分段线性拟合(图3(c)), 拟合公式列于表1。

由表1的拟合系数来看, 线性拟合度都较好, 各拟合公式斜率近似, 说明竖向振动横轨向传递递减可用线性递减推算。由6条拟合公式得到候车层振动横向传递的平均衰减量为 0.34 dB/m 。

假设A8点不位于伸缩缝板边, 用表中线性拟合公式推算同样距离测点振级, 并与实测A8点振级作比较列于表2。

由表2可知, 各工况由表1推算出的值均小于实测值 $5 \sim 6 \text{ dB}$ 。说明伸缩缝旁测点振动响应增加明显。同时也可发现, 6号股道进出列车时, 振动响应峰值要大于其他股道进出列车时的振动峰值。这是由于伸缩缝处为自由板边, 无支承约束, 振动响应大幅增大。图3(d)中6号股道进车时, 在A8处测得最大Z振级为 77.3 dB ,

表 1 A1~A7测点振动传递分段线性拟合公式

工况	确定性系数 R^2	线性拟合公式
工况1 列车进出7, 8股道	0.952	$Y_{1a}=68.6+0.302x$
	0.783	$Y_{1b}=100.7+0.460x$
工况2 列车进出9, 10股道	0.714	$Y_{2a}=74.7+0.272x$
	0.956	$Y_{2b}=86.4-0.301x$
工况3 列车进出6股道	0.925	$Y_{3a}=73.9+0.230x$
	1.000	$Y_{3b}=108.6-0.471x$

表 2 测点A8表 1拟合公式 $1/Z$ 估算值与实测值差值

工况	表1推算值(dB)	实测值(dB)	差值(dB)
工况1	69.62	75.72	6.12
工况2	66.12	71.43	5.31
工况3	77.43	83.93	6.51

超过规范[GB1007-88]^[19]要求的75 dB, 且此时列车都是低速从6号股道进出站, 如果列车高速通过将会产生更大振动响应. 由图3(a)、(c)和(d)还可看出, 由6号股道进出列车产生的振动响应一般都要大于其他股道情况, 振动峰值 $1/Z$ 均值达到86 dB, 振动加速度均值达到 0.3 m/s^2 , 但由7, 8股道和9, 10股道进出车辆产生的振动响应峰值相近, $1/Z$ 均值为79 dB左右, 振动加速度均值为 0.12 m/s^2 左右. 因此, 这种由于结构特性使振动响应增大的现象不容忽视, 伸缩缝所在的板为三边支承的悬臂板. 在做此类结构设计时, 需在自由板边缘处增加约束, 以达到结构减振的目的.

图3(d)为各测点Z计权加速度振级振动传递规律, 与图3(a)和(c)传递规律差别较大, 各趟振动信号向远处呈Z字形递减; 即在结构轴线上的A1, A3, A5, A7测点出现振动衰减, 而在板块中心点和伸缩缝板边点的A2, A4, A6, A8测点都出现比相邻测点Z振级大的现象. 由ISO 2631-2:2003^[18]标准中的频率计权值 W_m 可知, Z计权振级通过频率计权凸显了对人体影响较大的频率分量的权重. 因此, 在分析建筑结构振动对人体影响评估中, 应将Z振级测点布设于在板跨中心.

选取由8股道出站的D296列车振动信号作时域和频谱分析, 结果如图4(a)和(b). 由图4(a)的时域图可知, 振动响应最大的测点为A5, 以A5测点为中心向两侧呈递减规律传递, 但振动响应在A8测点出现反弹现象. 由图4(b)各测点振动加速度频谱图并结合图3(b)测点

布置图可知, A5位于7和8号股道正上方, 列车振动由M轴线上的梁柱传递到A5点, 70~80 Hz出现峰值, 而后分别向南北两侧传至A1和A8后, 高频振动迅速衰减, 低频振动缓慢减小, 这表明板下部支承梁的约束作用对高频振动的传递抑制明显, 但对低频振动传递影响较小.

由图4(b)还可知, 振动由A5测点横向传至紧邻的A4, A6测点时, 振动能量还较大, 而传至A3, A7测点便迅速下降, 由此车站结构的梁柱轴网结构对振动传递的抑制作用明显, 高频振动能量主要传至与振源相邻板块, 但低于40 Hz的低频振动向远端传递时衰减很慢. 图4时域和频域图中都可以明显看出, A8测点振动能量出现反弹现象.

3.2 B类测点

如图2(a)所示, B类测点由西向东分布在L轴上, B1至B5各测点间距依次为9 m、18 m、30.5 m. B1, B3, B4分别位于柱旁, B2位于东西向18 m板跨跨中, B5位于东西向25 m板跨跨中. L轴位于9, 10股道正上方. 统计9, 10股道11趟车在B1至B5测点产生振动响应作误差条(error bar)图, 见图5.

图5中, 11趟列车的振动均自下方股道通过结构柱直接传递到高架候车层. 轴线上的振级峰值出现在B2和B5测点, 这两个测点为东西向18 m跨和25跨中点, B5测点振动响应大于B2测点, 振动响应的大小与跨度有直接关系, 跨度增加9 m, 振级均值增加2.8 dB, Z振级均值增加6.2 dB. 但各测点振动响应的加速度振级与Z计权加速度振级变化趋势相同, 未出现图3所示差异. 这是由于B1~B5测点位于与下层列车行车方向平行的轴线上, 振动主要由板下部梁柱直接传递上来, 未有垂轨方向上的横向传递.

各测点之间振动水平有差异, 其与测点所在结构位置直接相关. B1~B5测点分布于L轴上的梁上, 柱旁测点振动小, 跨中测点振动大, 说明柱对振动的抑制作用要大于梁. 同时我们注意到, B4测点测得的振动响应最小, 如图2所示, B4测点位于整个车站结构贯通上下多层的大跨度空间结构支撑树状柱旁, 结点约束力强, 更大程度地抑制了该位置的振动响应.

由南北向A类测点及东西向B类测点振动传递规律可知, 综合交通枢纽结构振动响应测试研究及振动水平评价时, 测试点应避开柱旁位置, 而布设在大跨

图 4 D296列车8号股道出站A1~A8测点振动加速度时域图(a)和功率谱图(b)

板的跨中。

3.3 C类测点

C1, C2和C3, C4对称分布于F, G轴之间伸缩缝的南北两边, 如图6所示, 分别测试了列车从19, 20股道进出站和列车从15, 16股道进出站两种工况, 从时域和频域两方面观察伸缩缝结构对候车层振动传递的影响。

由图6可知, 无论哪种工况都出现 $VL_{C1} > VL_{C2}$, $VL_{C4} > VL_{C3}$ 的现象, 这是由于C2, C3测点位于梁柱轴线上, 与A类及B类测点测试结果规律一致。表3分别列出伸缩缝两旁对称测点的振级差, C2, C3测点相距只有12 m, 加速度振级均值差最大达到10 dB, 这与A类测点得到的振动衰减规律不同, 按A类测点得到的平均衰减量为0.34 dB/m, 而计算同样间距的测点振级差只有4 dB。

图7(a)和(b)列出了G1378列车出15股道时, 四个测点垂向振动加速度的时域图及功率谱密度分布图, 从时域和频域角度分析伸缩缝结构对振动传递的影响。为了更清晰显示振动能量集中频段及传递特性, 对功率谱密度图做平滑处理。由图可见, 离振源最近的C4测点在80~120、40、60 Hz及低于20 Hz的低频部分都可见能量峰值, 振动传至C3测点时, 高频部分显著降低, 而跨过伸缩缝后的C2, C1测点仅在30~35 Hz及低于20 Hz的低频部分有能量集中, 高频振动完全衰减。

从数值上看, C4至C1测点的振动, 在低于20 Hz的低频部分没有出现减小的现象, 甚至还出现30至35 Hz处能量增加的现象。分析车站构造可知, 候车层伸缩缝下部为正线, 而正线轨道梁与两边的到发线完全分离, 是建桥分离结构。15股道列车产生振动将由轨道通过

图5 车辆进出9, 10股道, B1~B5测点振级和Z振级图

图6 列车进出伸缩缝两边股道, C1~C4测点VL均值图

柱上传递至候车层C4, C3测点, 而C2, C1测点由于伸缩缝的隔断, 振动是由轨道向下传至大地, 再由基础到结构柱上传至候车层, 此时仅有低频振动存在, 而低频振动对人体振动舒适度影响很大. 由此可见, 建桥分离结构综合交通枢纽可以较大程度上降低候车厅总振级, 阻隔大于40 Hz以上高频振动的传递, 但无法阻断对人体影响较大的低频振动的传递, 因此, 需要考虑

表3 跨伸缩缝测点加速度振级差(单位: dB)

对称测点振级差	19, 20股道进出车辆	15, 16股道进出车辆
$VL_{C2}-VL_{C3}$	7.0	-10.0
$VL_{C1}-VL_{C4}$	9.7	-10.4

图7 G1378出15股道C1~C4测点振动时域比较图(a)和G1378出15股道C1~C4测点振动频谱比较图(b)

降低低频振动的减振措施.

3.4 D类测点

D类测点为X, Y, Z三向测点, 如图8所示, X为顺轨水平向测点, Y为垂轨水平向测点, Z为竖向测点. 如图2(a)所示, D1~D3测点为南北向分布, 位于J, K轴之间, D3~D6测点为东西向分布, 位于J轴上. 测试得到11趟高铁列车从15, 16号股道进出站时的振动加速度信号, 统计得到带误差条(error bar)的VL均值图, 如图9所示.

图 8 三向测点传感器布置图

图 9 D1~D6测点在X, Y, Z三个方向振动统计图

由图9可知,无论是南北向还是东西向,各测点Z向即竖向振动响应都大于水平向,且两个跨中测点D3, D6的振动级竖向显著大于水平向。南北向测点三个方向振动传递出现一致特征,振动级随着距振源距离的增大而逐渐减小。东西向与列车行驶方向平行,竖向振动响应与测点位置约束有关,依然是跨中测点D6和D3竖向振动水平显著增加,但水平向振动从D3至D6

测点变化不大,这说明梁柱的约束作用对水平向振动传递影响不大。

X向振动为顺轨水平向振动,与列车启制力方向相同,Y向为垂轨水平振动。由图9可知,尽管X向与列车启制力方向相同,各点的X向振动响应却未都显示出大于Y向,6个测点中有三个测点 V_{LX} 大于 V_{LY} ,另三个则相反。这是由于列车在进出站时不存在紧急制动启动现象,因此,列车以低加减速进入综合交通枢纽不会显著增大顺轨向振动响应,影响综合交通枢纽振动响应的仍然是竖向振动。

取G1302列车从15号股道进站振动信号作D1~D6号测点X, Y, Z三个方向1/3倍频程图分析。如图10所示,蓝色曲线为Z向振动,红色和黑色曲线为水平向振动。由图10可知,在中心频率5 Hz以下的低频,以水平向振动为主,而大于5 Hz后,振动响应以竖向振动为主。除D1测点在8 Hz以下和D6测点在3.15 Hz以下,Y向水

图 10 G1302列车进站6个测点三向测点倍频程图。(a) D1~D3三分之一倍频程图; (b) D3~D6三分之一倍频程图

平振动略偏低外, 其余各点 X 向和 Y 向的水平振动在各频段内相近, 水平振动的优势频段在低频, 再次说明梁柱的约束作用主要抑制高频振动, 因此, 出现图9(b)所示的水平振动顺轨向传递测点受位置影响不大的规律.

4 结论

通过测试各类工况下高铁列车启制动进出综合交通枢纽时, 站房结构候车层振动响应特性, 详细分析候车层不同结构特性对振动传播的影响, 得出以下结论.

(1) 候车层竖向振动垂轨向传递特性为: 加速度振级(VL)以线路正上方位置为中心向两侧近似线性衰减, 平均衰减量为 0.34 dB/s ; 但由于伸缩缝边缘下部无结构约束, 出现悬臂板边缘的振动放大现象, 放大量达到 $5\sim 6\text{ dB}$. 另外, 当伸缩缝结构下方股道通车时, 引起候车层振动显著大于其他股道通车. 因此, 振动评估和减振设计时, 需特别关注伸缩缝下方股道通车工况和此类三边支承悬臂板结构位置处的减振设计.

(2) 由候车层竖向振动频谱分析可知, 大跨结构候车层振动横纵向传递均受梁柱约束明显, 大部分高频振动仅传递到与振源相邻板块, 但低于 40 Hz 的低频振动传递受约束影响较小. 在建筑结构振动分析评估采用 Z 振级(VL_Z)时, 各结构板块中心振动响应最大, Z 振级测点应布设于在板跨中心, 板的跨径对振动响应有直接影响, 板跨越大, 振动响应越大. 柱对振动的抑制比梁结构更大, 柱结构旁测点不应作为结构振动水平评估测点.

(3) 建桥分离的伸缩缝结构对振动传递阻隔明显, 振动衰减量可达 10 dB , 但主要阻隔的是大于 40 Hz 以上的高频振动, 低频振动仍可通过大地、结构梁柱传递, 减小量不明显, 甚至出现放大现象.

(4) 候车层各测点顺轨水平向、垂轨水平向、竖向三者振动响应中, 竖向振动响应是三向方向中最大的; 顺轨和垂轨两个水平方向振动响应相近, 受下方各股道低速进出站列车启动制动力的影响较小; 在低于 5 Hz 以下低频范围内, 水平振动要大于竖向振动, 水平振动传递受梁柱约束影响不大.

参考文献

- 1 朱志辉, 王力东, 官斌, 等. 车致“站桥合一”大型客站的振动响应. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47: 176–186
- 2 方联民, 朱志辉, 王力东, 等. 车致“站桥合一”高速铁路客站随机振动分析. 铁道学报, 2017, 39: 117–125
- 3 冉汶民, 李青良, 李小珍, 等. 列车荷载激励下站房结构振动响应频域分析方法. 振动与冲击, 2018, 37: 218–224
- 4 Ran W M, Li Q L, Li X Z, et al. Frequency-domain analysis method for vibration responses of a high-speed railway station structure under train load excitation. J Vib Shock, 2018, 37: 218–224
- 5 崔聪聪, 雷晓燕, 张凌. 综合交通枢纽车致振动响应特性研究. 噪声与振动控制, 2017, 37: 144–150
- 6 谢伟平, 徐薇. 武汉站轨道箱型梁车致振动响应研究. 振动与冲击, 2012, 31: 186–190
- 7 王国波, 谢伟平, 于艳丽, 等. 高速列车引起的武汉站楼板振动舒适度研究. 振动与冲击, 2010, 29: 110–113
- 8 丁阳, 米仓. 多振源激励下站房结构振动响应分析方法. 工程力学, 2013, 3: 163–168
- 9 Yang J, Zhu S, Zhai W, et al. Prediction and mitigation of train-induced vibrations of large-scale building constructed on subway tunnel. Sci Total Environ, 2019, 668: 485–499
- 10 Feldmann M, Heinemeyer C. Prediction of the dynamic behavior of bridges and roof of the railway main station Berlin. Zev Rail Glasers Annalen, 2006, 130: 314–326
- 11 Crispino M, D'apuzzo M. Measurement and prediction of traffic-induced vibrations in a heritage building. J Sound Vib, 2001, 246: 319–335
- 12 李小珍, 刘全民, 张迅, 等. 铁路高架车站车致振动实测与理论分析. 西南交通大学学报, 2014, 49: 612–618
- 13 冉汶民, 张迅, 李小珍. 成灌快铁线下桥式车站振动噪声实测与分析. 振动与冲击, 2016, 35: 225–232
- 14 程潜. 考虑列车纵向相互作用的高架车站动力分析. 博士学位论文. 北京: 北京交通大学, 2013. 95–131
- 15 程潜, 张楠, 夏禾, 等. 考虑制动条件的高速列车-轨道-桥梁系统动力响应分析. 中国铁道科学, 2013, 34: 8–14
- 16 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. 振动与冲击, 2011, 30: 138–143
- 17 Transit Noise and Vibration Impact Assessment. U.S. Department of Transportation-Federal Transit Administration FTA, 2006
- 18 ISO 2631-2:2003. Mechanical vibration and shock-Evaluation of human exposure to whole-body vibration. Part 2: Vibration in building (1 Hz to

80 Hz). 2003

19 GB10070-1988. 城市区域环境振动标准. 1988

An experimental study on the vibration propagation of high-speed railway integrated transportation hub station structure

ZHANG Ling¹, LEI XiaoYan¹, FENG QingSong¹, JIANG Jian² & CUI CongCong³

¹ Engineering Research Center of Railway Environment Vibration and Noise, Ministry of Education, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;

² School of Media, Arts & Technology, Southampton Solent University, Southampton SO14 0YN, UK;

³ Communications Design Research Institute of Jiangxi Province, Nanchang 330052, China

In order to better understand the very complicated vibration characteristics of an integrated transportation hub station where vibrations are often excited by the high-speed trains entering and exiting at a much lower speed, a large-scale field measurement was carried out in the waiting hall of the Nanchang West Railway Station. Four kinds of measuring points are set up in the waiting hall to study the propagation characteristics of the vibration caused by high-speed railway in and out of the train at low speed in the time-domain and frequency-domain. At the same time, the propagation characteristics of the vibration caused by the high-speed railway in the vertical and along-rail directions of the waiting hall are studied. The influence of different structural positions such as expansion joints on the propagation characteristics of vibration is also studied. The results show that vibration propagation can be greatly influenced by the used beam-column structure. The restraint provided by such structure can effectively suppress the vibration above 40 Hz, with the largest vibration response found at the center of the large-span plate sitting on top. The vibration response at the edge of expansion joint increases significantly. Therefore, vibration mitigation measures should be considered at those positions. The bridge separation structure of the integrated transportation hub station can effectively block the propagation of high-frequency vibrations above 40 Hz. But for vibrations lower than 40 Hz, the effect is very limited as they can still transmit through the separation via the structure-soil-structure path. In general, the comprehensive vertical vibration response in the integrated transportation hub station is larger than that in the horizontal direction, which dominates, but from the frequency division frequency band, the horizontal vibration is larger than the vertical vibration in the low frequency band lower than 5 Hz. At the same time, the horizontal vibration propagation attenuation is not obviously affected by the constraint of structure beam-column.

integrated transportation hub station, field measurement, vibration propagation characteristics, structural characteristics

doi: [10.1360/SST-2019-0006](https://doi.org/10.1360/SST-2019-0006)