

南昌地铁4号线列车运行对南昌西站站房结构的振动影响^{*}

崔聪聪¹ 雷晓燕² 张凌²

(1. 江西省交通设计研究院有限责任公司, 330052, 南昌;

2. 华东交通大学铁路环境振动与噪声教育部工程研究中心, 330013, 南昌//第一作者, 助理工程师)

摘 要 对南昌西站综合交通枢纽进行模型仿真,从时域和频域的角度分析南昌地铁4号线对该站的振动影响。研究南昌地铁4号线在不同行驶速度、不同隧道埋深下的振动传播规律及频率分布特点。研究表明,在地铁列车荷载作用下,南昌西站的振动幅值随着振源距离增大而减小,在地面距离轨道中心线24~36 m、60~72 m的区域出现振动放大区。车站不同结构层的振动频率分布特性基本一致,主要集中在0~60 Hz范围内。车站结构横向环境振动水平比竖向环境振动小,竖向振动响应与横向、纵向的振动响应频域分布较为一致。车站结构关键点出现最大振级的频率随着结构高度的增大逐渐向低频移动。

关键词 地铁列车运行;综合交通枢纽站;振动影响;振动水平评价

中图分类号 TB533+.2

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2019.06.028

Operational Vibration Impact of Metro Line 4 on the Structure of Nanchang West Railway Station

CUI Congcong, LEI Xiaoyan, ZHANG Ling

Abstract Through a simulation of the large-scale integrated transportation hub-Nanchang West Railway Station, the vibration impact of metro Line 4 on the integrated hub station is analyzed from the time domain and the frequency domain, and the vibration propagation law and frequency distribution characteristics of Line 4 under different running speeds and tunnel depths are studied. The results show that the vibration amplitude of the integrated hub station decreases with the increase of vibration source distance under the load of metro train, and the vibration amplification area is located in the range between 24~36 m and 60~72 m away from the center line. The vibration frequency distribution characteristics of different structural layers are basically the same, which are mainly concentrated in the range of 0~60 Hz. The horizontal vibration level of the station structure is smaller than the vertical environment

vibration, and the vertical vibration response is more consistent with the lateral and longitudinal vibration responses. The frequency of maximum vibration level at the key points of station structure gradually moves to the lower frequencies as the height of the structure increases.

Key words metro train operation; integrated traffic hub; vibration impact; vibration level evaluation

First-author's address Jiangxi Provincial Transportation Design Research Institute Co., Ltd., 330052, Nanchang, China

大型综合交通枢纽车站大多由高架层、高架夹层、站台层与地下层等组成。我国近年才开始建设这种现代化的大型综合交通枢纽,国外亦少见。枢纽车站的地下层同时穿过多条地铁线,使车站建筑处于非常复杂的振动环境中。目前,地铁列车引起地面建筑环境振动的研究已经取得一定成果,但是地铁列车对综合交通枢纽车站的振动特性研究仍十分匮乏。国内外对地铁列车运行所引起的环境振动研究大多采用数值模拟的方法^[1-3]和现场试验法^[4]。文献^[5-6]通过现场实测的方法分析了地铁列车运行对与地铁合建的建筑结构环境振动特性的影响。文献^[7]对大跨度车站结构精细化模型进行了研究。

南昌西站是南昌市的大型综合交通枢纽,主体由下到上依次为地下层、轨道层、高架层、高架夹层。铁路南昌西站候车厅位于地上二层,地铁2号线、4号线从地下层下方穿越。为研究在地铁4号线列车行驶激励下枢纽车站的振动响应,应用有限元软件Ansys,建立了南昌西站模型。通过分析在不同隧道埋深、不同列车行驶速度下南昌西站站房结构的振动响应,得到地铁列车行驶激励下站房结构的振动响应规律,进而评测地铁列车运行对站房结构的影响。

^{*} 国家自然科学基金项目(51478184)

1 综合枢纽车站——南昌西站的计算模型

铁路南昌西站候车厅层位于整个站房结构地上二层,标高约 8.5 m。南昌西站东西方向的柱网间距为 18.0 m, 18.0 m, 18.0 m, 25.0 m, 18.0 m, 18.0 m, 18.0 m; 南北方向的柱网间距为 22.0 m, 30.0 m, 51.5 m, 53.0 m, 42.0 m, 42.0 m, 53.0 m, 51.5 m, 30.0 m, 22.0 m。地铁 2 号线隧道埋深 14 m, 以南北方向运行通过南昌西站; 地铁 4 号线隧道埋深 19.3 m, 以东西方向通过南昌西站。线路布置图见图 1。

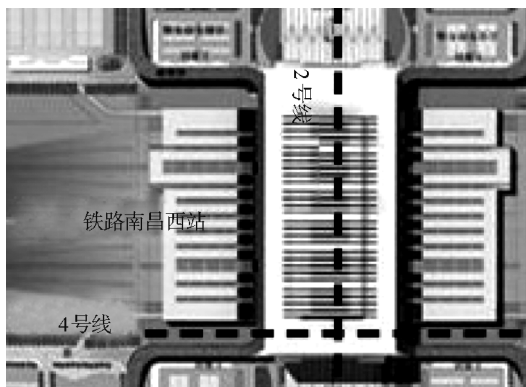


图1 南昌西站线路布置示意图

南昌西站是新型客运枢纽站, 设有铁路南昌西站, 同时通行 2 条地铁线路。利用 ANSYS 软件建立南昌西站土体-地铁隧道-站房结构整体模型。利用无砟轨道双层梁模型^[8]对地铁 4 号线轮轨力进行数值模拟, 对整体模型施加地铁列车行驶激励, 计算分析地铁列车以 120 km/h 的速度通过南昌西站时, 距离地铁轨道中心不同地面点的振动响应。振动响应峰值加速度见表 1。通过距离地铁轨道中心线不同地面点的振动响应可以看出列车通过时振动加速度的变化情况: 隧道壁的振动加速度幅值大于地面; 地面振动加速度值随着与地铁线路中心线距离的增加而减少; 如果以峰值加速度作为考量, 距离地铁轨道中心线 24 ~ 36 m、60 ~ 72 m 的地面区域呈现振动放大。

选取隧道壁、距离隧道轨道中心线 0 m 的地面响应点, 以及距离隧道轨道中心线 24 m 的地面关键点, 对这 3 个点进行频谱曲线分析(见图 2)。

从隧道壁关键点到距离轨道中心线 24 m 处的地面点, 振动加速度主频逐渐向 20 Hz 移动, 说明高频振动会随着距离增加而逐渐衰减, 而低频振动衰减缓慢。数值模拟的振动变化规律与实测情况相符, 可以确认此加载方法的正确性。

表1 120 km/h 速度下不同观测点的振动响应

观测点	与轨道中心线的距离/m	振动响应峰值加速度/(m/s ²)
地面观测点	0	0.027 8
	12	0.025 6
	24	0.015 8
	36	0.017 5
	48	0.013 2
	60	0.008 2
	72	0.010 5
	84	0.007 6
隧道壁关键点		0.045 2

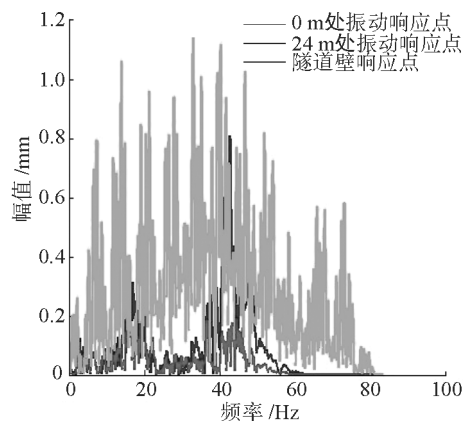


图2 不同响应点的频谱曲线

2 时域与峰值加速度分析

2.1 隧道埋深相同、列车速度不同时站房结构振动响应

南昌地铁 4 号线隧道埋深 19.3 m。分别计算南昌西站站房结构在列车以 60 km/h、80 km/h、100 km/h、120 km/h 不同速度下的振动响应。

2.1.1 关键点的布设

(1) 楼板层关键点: 选取 18 m 长的楼板跨中位置, 距离轨道中心线 0 m、12 m、24 m、36 m、48 m 的关键响应点, 标为 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 、 L_5 (见图 3 b));

(2) 商业夹层关键点: 选取上述楼板关键点正上方对应的点, 作为商业夹层关键点, 标为 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 、 S_5 (见图 3 c))。

2.1.2 关键点的振动响应

地铁 4 号线列车以不同的速度通过南昌西站时, 不同结构层的峰值加速度见表 2。

通过相应的时域响应曲线可知: 不同结点加速度随时间先增大再变小, 并在较低的水平逐渐趋于平稳, 反映了振动的衰减趋势; 在相同的速度下, 不同结构层的时域响应曲线总体趋势较为一致; 同一

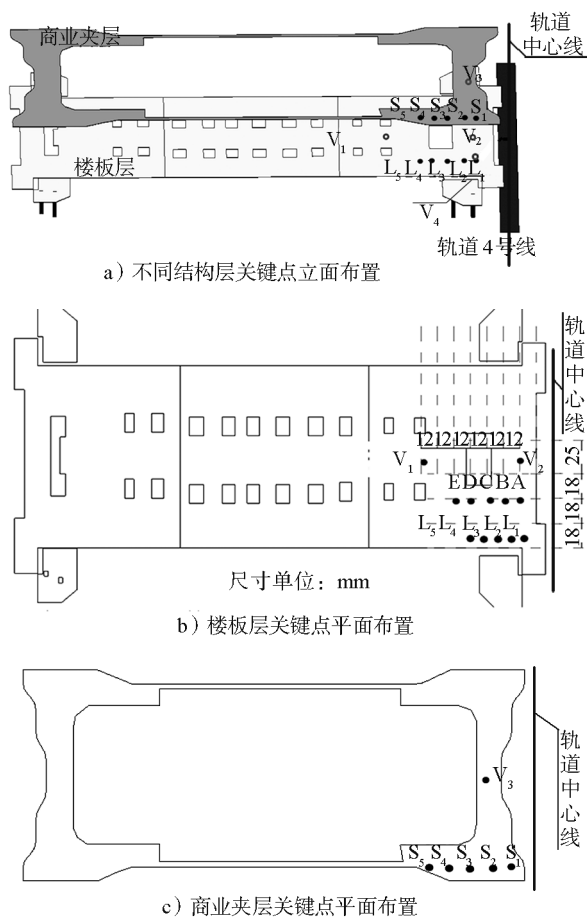


图3 楼板层关键点的布设

表2 同一埋深、不同列车速度下各关键点的振动响应 m/s^2

结构层	关键点	不同速度下的振动响应加速度			
		60 km/h 时	80 km/h 时	100 km/h 时	120 km/h 时
楼板层	L ₁	0.002 5	0.003 3	0.004 3	0.004 7
	L ₂	0.001 2	0.001 6	0.002 0	0.002 3
	L ₃	0.001 5	0.001 7	0.001 8	0.002 0
	L ₄	0.009 9	0.001 2	0.001 5	0.001 8
	L ₅	0.001 0	0.001 3	0.001 6	0.001 9
商业夹层	S ₁	0.007 1	0.009 0	0.001 1	0.001 3
	S ₂	0.004 1	0.006 1	0.008 1	0.001 0
	S ₃	0.003 1	0.004 2	0.006 1	0.007 5
	S ₄	0.002 1	0.002 8	0.003 4	0.003 9
	S ₅	0.002 0	0.002 6	0.003 3	0.003 7

结构层的时域响应曲线在不同速度下的变化趋势较为一致,速度越大,越早出现振动峰值。由于4号线的轨道中心线距离南昌西站站层关键点水平距离有35 m,所以对上部结构的振动响应较小。随着与轨道中心线间距离的增大,楼板关键点的峰值振动加速度迅速减少。

2.2 隧道埋深不同、列车速度相同时站房结构振动

响应

2.2.1 关键点的布设

选取不同结构层的关键点分析振动响应:关键点V₁位于南部楼板25 m跨中处,与轨道4号线垂直距离72 m;关键点V₂位于距离轨道中心线0 m、楼板跨度为25 m的跨中处;关键点V₃位于大跨度商业夹层距离轨道中心线0 m、楼板跨度为25 m的跨中处;关键点V₄位于轨道层,距离轨道中心线0 m。关键点布设见图3,关键点V₂、V₃、V₄仅在高度上有差异。

2.2.2 关键点的振动响应

4号线列车以120 km/h通过时,4号线在14.0 m、16.0 m和实际的19.3 m等3种不同埋深下,不同结构层关键点的振动响应见表3。由表3可知,通过计算南昌西站不同结构层关键点的振动响应峰值加速度,4号线采用不同的埋深,上部结构层的振动响应较小,主要是因为土体差异和距离关键点不同的影响。

表3 120 km/h速度下隧道不同埋深关键点的振动响应 m/s^2

关键点	关键点的振动响应加速度		
	埋深14 m时	埋深16 m时	埋深19.3 m时
V ₁	0.000 56	0.000 50	0.000 41
V ₂	0.004 80	0.003 40	0.001 90
V ₃	0.000 47	0.000 44	0.000 40
V ₄	0.002 40	0.002 00	0.001 71

当4号线隧道埋深19.3 m、以120 km/h速度通过南昌西站时:①分析V₁、V₂、V₃、V₄不同方向的加速度见表4,可以看出竖向峰值加速度与横向、纵向的峰值加速度相差一个量级,说明土体对横向、纵向的加速度影响较大。②对于不同结构层的框架柱关键点A、B、C、D、E(具体位置见图3b),分析其竖向峰值加速度见表5,可以看出:地铁层的振动通过框架柱向上传递至高架层;随着距轨道中心线距离的增大,振动响应迅速减少。

表4 各关键点不同方向的振动响应 m/s^2

关键点	结构层的振动响应加速度		
	x方向	y方向	z方向
V ₁	0.000 077	0.000 65	0.000 064
V ₂	0.000 290	0.001 80	0.000 240
V ₃	0.000 110	0.000 41	0.000 075
V ₄	0.000 570	0.001 70	0.000 290

3 站房结构频域分析

地铁4号线以隧道实际埋深19.3 m通过枢纽站房时,在地铁行驶激励下可对站房结构不同节点

表5 不同结构层框架柱关键点的峰值加速度 m/s^2

结构层	框架柱关键点峰值加速度				
	A	B	C	D	E
轨道层	0.001 3	0.001 00	0.000 79	0.000 64	0.000 41
楼板层	0.001 2	0.000 83	0.000 63	0.000 50	0.000 37

的加速度时程进行快速傅里叶(FFT)变换,得到不同结点的加速度功率谱。

由加速度功率谱可知,地铁引起的结构层振动主频在 $0 \sim 60 \text{ Hz}$ 范围内,同一关键点在不同速度、不同隧道埋深下的频谱特性较为一致。其中: $0 \sim 40 \text{ Hz}$ 附近的振动随距离衰减最慢,合建建筑结构上部结构的振动频率分布特性基本上一致,楼板层的频率分布主要集中在 $0 \sim 60 \text{ Hz}$ 范围内;商业夹层的频率分布主要集中在 $0 \sim 40 \text{ Hz}$ 范围内。这说明随着高度的增大,结构层的高频成分衰减较快。

通过楼板关键点在不同埋深处的频谱曲线可以看出,随着距隧道振源距离的增大,楼板的振动主频向低频移动。通过关键点在不同方向的频谱幅值可以看出,竖向振动响应幅值大于横向、纵向的振动响应幅值,3个方向的振动主频较为一致。

4 振动水平评价

4号线以 120 km/h 的速度通过南昌西站时,各关键点在不同隧道埋深下的竖向最大 Z 振级见表6。由表6可知:随着隧道埋深的增加,最大 Z 振级逐渐减弱;同一车速下,埋深每增加 2 m ,不同结构层 Z 振级衰减 $2 \sim 4 \text{ dB}$ 。

表6 不同隧道埋深下不同关键点的最大 Z 振级 dB

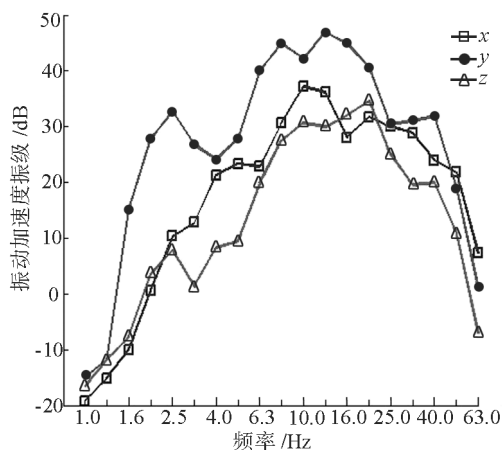
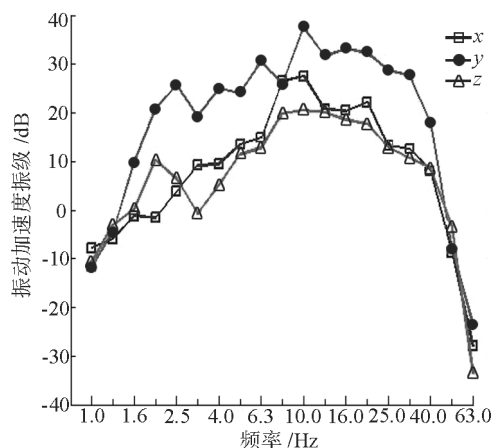
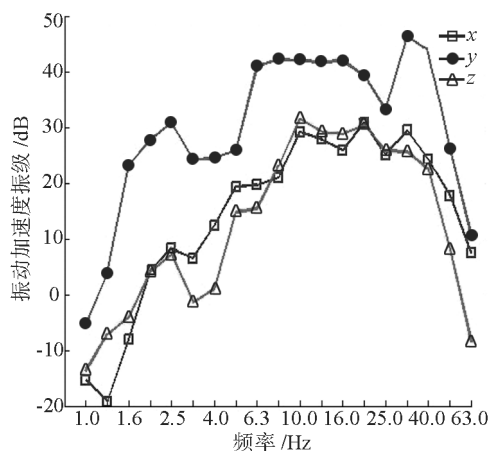
关键点	各关键点最大 Z 振级		
	埋深 14.0 m 时	埋深 16.0 m 时	埋深 19.3 m 时
轨道层 V_4	57.48	55.18	51.06
楼板层 V_2	59.28	57.68	52.00
商业夹层 V_3	48.59	45.01	39.81

当地铁4号线隧道埋深为 19.3 m 时,列车以不同速度通过南昌西站,各关键点的竖向最大 Z 振级如表7所示。由表7可知:车速每增加 20 km/h ,不同结构层 Z 振级增大 $1 \sim 3 \text{ dB}$ 。

表7 关键点的竖向最大 Z 振级 dB

关键点	关键点的竖向最大 Z 振级		
	60 km/h 时	100 km/h 时	120 km/h 时
轨道层 V_4	48.27	50.14	51.06
楼板层 V_2	49.15	51.18	52.00
商业夹层 V_3	35.24	37.12	39.81

地铁4号线在隧道埋深 19.3 m 时,列车以 120 km/h 的速度通过南昌西站时,不同结构层的关键点 V_2 、 V_3 、 V_4 在不同方向的振动响应见图4 a)、4 b)、4 c)。

a) 关键点 V_2 不同方向的振动响应b) 关键点 V_3 不同方向的振动响应c) 关键点 V_4 不同方向的振动响应图4 不同关键点的 $1/3$ 倍频程曲线

通过图4的3个 $1/3$ 倍频程曲线可以看出,南昌西路结构在分析频率范围内的竖向振动响应大于

横向、纵向振动响应,竖向比横向、纵向高 9~12 dB。关键点出现最大加速度振级的频率随着结构高度的增大逐渐向低频移动,楼板层出现最大振级对应的频率接近 12 Hz,轨道层接近 31 Hz,商业夹层接近 9 Hz。

5 结语

(1) 如果以峰值加速度作为考量,则振动放大区域出现在地面 24~36 m 及 60~72 m 处。随着距振动源距离的增大,高频振动会随着距离增加而逐渐衰减,而低频振动衰减缓慢。

(2) 地铁 4 号线通过南昌西站时,土体对横向、纵向的加速度影响较大。楼板层的竖向峰值加速度与横向、纵向的峰值加速度相差一个量级,地铁层的振动通过框架柱向上传递至高架层。

(3) 南昌地铁引起的结构层振动主频为 0~60 Hz,其中 20 Hz 和 40 Hz 附近的振动随距离衰减最慢。随着高度的增大,结构层的高频成分衰减较快。

(4) 在地铁列车行驶激励下站房结构的 Z 振级随着隧道埋深的增加逐渐减弱;同一车速下,埋深每增加 2 m,不同结构层的 Z 振级衰减 2~4 dB;同一埋深下,车速每增加 20 km/h,不同结构层的 Z 振级增大 1~3 dB。

(5) 通过模型仿真研究了南昌西站这一大型综合交通枢纽车站在地铁荷载作用下,不同结构层关

键点的振动响应特性。但由于结构模型较大,节点数量众多,且为了节约计算时间,仅讨论了列车在较高运行速度(120 km/h)的情况。因此,结构模型的精细化仍需完善,振动特性有待进一步深入研究。

参考文献

- [1] SHENG X, JONES C J C, THOMPSON D J. A comparison of a theoretical model for quasi-statically and dynamically induced environmental vibration from trains with measurements [J]. Journal of Sound and Vibration, 2003(267): 621.
- [2] TAKEMIYA H. Simulation of track-ground vibrations due to a high-speed train; the case of X-2000 at Ledsgard [J]. Journal of Sound and Vibration, 2003(261): 503.
- [3] SHENG X, JONES C J C, PETYT M. Ground vibration generated by a load moving along a railway track [J]. Journal of Sound and Vibration, 1999(228): 129.
- [4] 赵红军. 地铁列车振动引起的地面多层建筑物的响应[D]. 北京: 北京交通大学, 2007.
- [5] 聂晗, 闫维明, 高小旺. 地铁交通诱发邻近建筑物振动的实测与分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2008, 5(1): 51.
- [6] 肖桂元, 韦红亮, 王志驹. 地铁列车引起与地铁合建建筑结构环境振动特性现场测试分析[J]. 铁道学报, 2015, (5): 88.
- [7] 何卫, 谢伟平. 基于舒适度评价的大跨度车站结构精细化模型研究[J]. 土木工程学报, 2014, (1): 13.
- [8] 雷晓燕. 高速铁路轨道动力学——模型、算法与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 85.

(收稿日期: 2017-07-17)

(上接第 123 页)



图7 绵阳市“P+R”停车场布局图

伦敦的外围“P+R”停车场模式,东京的构建立体化、人车分离的换乘枢纽模式,莫斯科的构建以公共交通为主体的衔接模式,以及广州的构建分区衔接系统模式等进行了归纳总结,并提出构建绵阳市“5大衔接分区、3大衔接系统”的衔接模式。

重点从与绵阳市大型综合客运枢纽的衔接、与

道路公交系统的衔接及与私家小汽车的衔接等 3 方面构建 3 大衔接系统,形成以轨道交通为骨干,多层次、多方式、相互协调的交通一体化高效衔接系统。

参考文献

- [1] 李岩飞. 城市轨道交通与其他交通的衔接模式研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2012.
- [2] 邓莉. 城市轨道交通一体化衔接设置研究[J]. 科技资讯, 2013(2): 235.
- [3] 易斌. 基于城市轨道交通衔接规划的方法研究[J]. 铁路工程, 2010(5): 84.
- [4] 莫海波. 城市轨道交通与常规公交一体化协调研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2006.
- [5] 中铁二院有限责任公司. 绵阳轨道交通建设规划之交通衔接专题[R]. 成都: 中铁二院有限责任公司, 2015.

(收稿日期: 2017-07-25)