文章编号：1006-1355(2021)02-0196-04

地铁沿线建筑物室内振动与噪声特性测试与分析

张天琦，周俊召，熊永亮，罗雁云

（同济大学 铁道与城市轨道交通研究院，上海 201804）

摘 要：随着城市轨道交通的快速发展，地铁运行时产生的振动所引起沿线建筑物室内振动与二次结构噪声问题引起人们的广泛关注。基于某城市轨道交通沿线6层居民楼1楼现场测试，对不同扣件工况下地铁沿线敏感建筑物的室内振动与二次结构噪声问题进行测试与分析。研究表明：地铁沿线建筑物室内各振动、噪声测点峰值频率基本一致，在扣件A工况下峰值频率约为63 Hz，替换为刚度较低的扣件B后，峰值频率在40 Hz～50 Hz左右；采用刚度较小的扣件有利于室内振动与二次结构噪声的降低；虽然所测得的不同测点峰值频率一致，但振级和声压级大小有所不同，基本呈现出振级与声压级随着与地铁线路距离的增加而减小的规律。

关键词：振动与波；地铁沿线；敏感建筑物；室内振动；二次结构噪声；不同扣件

中图分类号：TU311.3；TU112.3；U231 **文献标志码**：A **DOI编码**：10.3969/j.issn.1006-1355.2021.02.033

Measurement and Analysis of Indoor Vibration and Noise Characteristics of Buildings near the Subway

ZHANG Tianqi, *ZHOU Junzhao*, *XIONG Yongliang*, *LUO Yanyun*

(Institute of Railway and Urban Rail Transit, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract : With the rapid development of urban rail transit, people pay more and more attention to the indoor vibration and secondary structure noise of buildings near subways. Based on the field test of the first floor of a six-story residential building near an urban rail transit line, the indoor vibration and secondary structure noise of sensitive buildings near the subway line with different fasteners were tested and analyzed. The research shows that the peak frequencies of the indoor vibration and noise at different measurement points of the buildings along the subway are basically the same. Under the condition of fastener A, the peak frequency is about 63 Hz. After it is replaced by fastener B with lower stiffness, the peak frequency is about 40 Hz - 50 Hz. The fastener with smaller rigidity is favorable to the reduction of indoor vibration and secondary structure noise. Although the peak frequencies at different measurement points are the same, the vibration level and sound pressure level are different. The vibration level and sound pressure level decrease with the increase of distance away from metro line.

Key words : vibration and wave; along the subway; sensitive buildings; indoor vibration; secondary structure noise; different fasteners

目前我国城市轨道交通在快速发展，随之带来的沿线建筑物室内振动与二次结构噪声问题也受到广泛关注。地铁车辆在运行时由于轮轨间的相互作用所产生的振动会通过轨道结构，例如隧道结构和高架墩台、路基等向周围环境传播，振动在经由建筑物基础后诱发建筑物墙体、楼板等振动，辐射出二次结构噪声。这种振动和结构噪声会对居民的生活、工作和休息产生影响[1–3]。国内外很多学者对此进行了研究，并得到了大量有价值的研究成果。曾泽民[4]选取了无上盖物业的广州地铁车辆段受振动影响较大的咽喉区、试车线区域，进行现场试验，获得了车辆段敏感区域的地面及临近建筑物振动传播规律；欧阳昭[5]基于实测数据，分析了导致建筑物二次辐射噪声的主要振动方向及其频谱分布特点；申道明[6]等就地铁列车引起的建筑物内的二次辐射噪声进行了现场试验研究和评价量的探讨分析，总结了运行列车引起的室内二次辐射噪声特性；康波[7]运用有限元软件建立了隧道-土层-建筑物三维有限元模

收稿日期：2020-04-21

基金项目：国家自然科学基金资助项目(51678446，51708422)

作者简介：张天琦(1994–)，女，河南省巩义市人，博士研究生，主要研究方向为轨道结构振动与噪声。
E-mail: 906560886@qq.com

通信作者：罗雁云(1960–)，男，教授，工学博士，主要研究方向为轨道结构。
E-mail: yyluo15@163.com

型以及声学软件建立了建筑物声学边界元模型，分析了地铁列车通过时隧道及建筑结构振动特性。Metrikine[8]通过建立二维模型分析了地铁振动波对周围建筑物的影响及其传播规律。

本文基于距某城市轨道交通地下线路25 m的6层居民楼的室内1楼振动和噪声现场测试，分析了两种不同刚度扣件工况下室内振动和二次结构噪声的频域特性，为降低室内振动和噪声提供依据。

1　测试工况

为了研究不同减振扣件工况下地铁沿线建筑物的室内振动与噪声特性，本文进行了室内振动与二次结构噪声试验。测试的区间为直线段，列车为B型车6节编组。测试区段先采用扣件A，后又替换为刚度较低的扣件B，其中扣件A刚度约为50 kN/mm，扣件B刚度约为35 kN/mm，因在同一测试区间，避免了车速、线型、埋深等的影响。敏感底部距离隧道上边线最小距离为25 m，建筑物为1座6层居民楼。

测试建筑物室内振动时采用B&K8340压电振动加速度计，量程为0.5 g，测试室内二次结构噪声时采用丹麦B&K4189 1/2英寸自由场传声器，其频率范围为6.3 Hz至20 kHz，动态范围为14.5 dB至146 dB。试验过程中紧闭门窗，保持室内安静，关闭冰箱、热水器等噪音干扰源，避免人员走动、说话及其他噪声对测量信号的干扰。为了避免室内1阶驻波对低频二次辐射噪声信号的影响，测点选择在距墙壁0.5 m以外，近1/3～1/2房间几何尺寸以内，避开房间几何中心位置。此外，综合考虑国内外规范，测试室内共布置3个噪声测点，除中心测点2以外，另一个测点1布置在墙角，测点3布置于居民休息和工作位置，即卧室床头附近，上述测点高度均为1.2 m。此外，在室内噪声测点附近各布置一个振动测点V1、V2、V3，测量室内垂向加速度。测点布置示意图详见图1。图中V1、V2、V3为振动测点，S1、S2、S3为噪声测点，V1和S1离线路最近。现场测试图如图2所示。

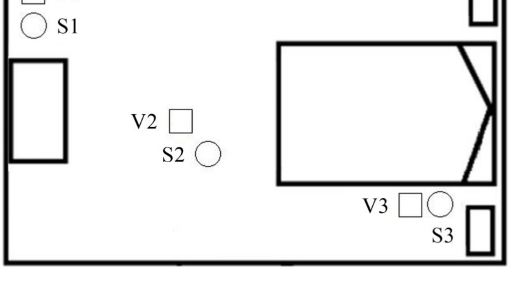

图1 测点布置示意图

（a）室内结构噪声测点

（b）室内振动测点

图2 现场测试图

2　室内振动特性分析

2.1　分频最大振级 VL_{max} 分析

对所测得的高峰时段列车经过时室内各振动测点加速度信号进行频谱分析得到振级，并进行Z计权，进而得到各测点分频最大振级。其中基准加速度为1×10^{-6} m/s^2，Z计权采用《JGJ/T 170－2009》规定的Z振级的计权因子，如表1所示。选取20组离散性较小数据进行平均，振级结果如表2所示，为了更加直观地分析振动特性，同时采用柱状图分析，如图3所示。

表1 JGJ/T 170－2009规定的Z振级的计权因子/dB

中心频率/Hz	4	5	6.3	8	10	16
计权因子/dB	0	0	0	0	0	−2
中心频率/Hz	20	25	31.5	40	50	63
计权因子/dB	−4	−6	−8	−10	−12	−14
中心频率/Hz	80	100	125	160	200	
计权因子/dB	−17	−21	−25	−30	−36	

表2 不同扣件工况下室内各测点分频最大振级 VL_{max}/dB(Z)(4 Hz～200 Hz)

扣件类型	V1	V2	V3
扣件A	65.32	58.93	53.1
扣件B	58.16	52.69	47.65
差值	7.16	6.24	5.45

从表2和图3可以看出，列车经过时，替换前振动测点的分频最大振级均值在60 dB(Z)左右，替换扣件后降为55 dB(Z)左右，且在替换前后均呈现出V1>V2>V3的规律，这是由于距离线路的实际距离为V3>V2>V1，说明测点1、2、3的振动能量随着

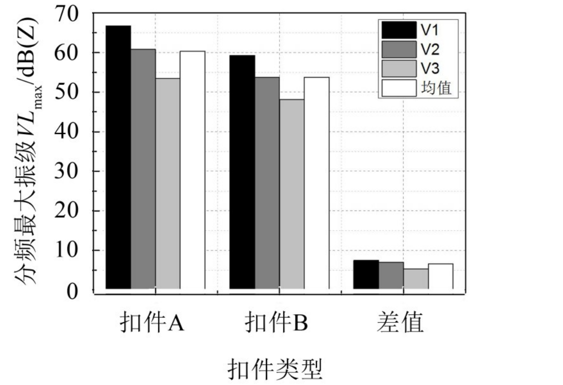

图3 不同扣件工况下室内各测点分频最大振级VL_{max}/dB(Z)（4 Hz～200 Hz）

与线路距离的增大而逐渐减小。此外，从图2可以看出替换后各振动测点的垂向分频最大振级均有不同程度减小，均在5 dB(Z)至8 dB(Z)范围内。这说明替换为刚度较低的扣件B后该区间减振效果增强，所以振动传递至建筑物后室内振动有所降低。

2.2 频域特性分析

图4和图5为两种扣件工况下列车经过时居民楼1楼室内垂向振动测点在Z计权方式下的1/3倍频程对比图。

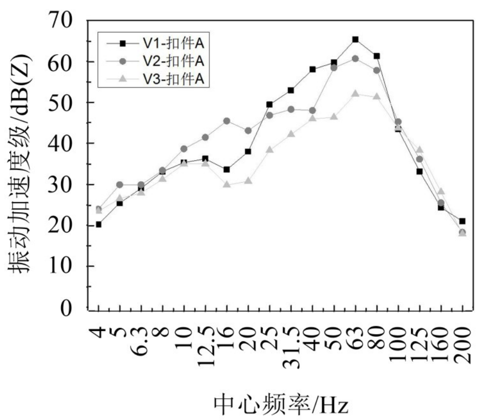

图4 振动测点Z计权垂向振动加速度级倍频程图（扣件A）

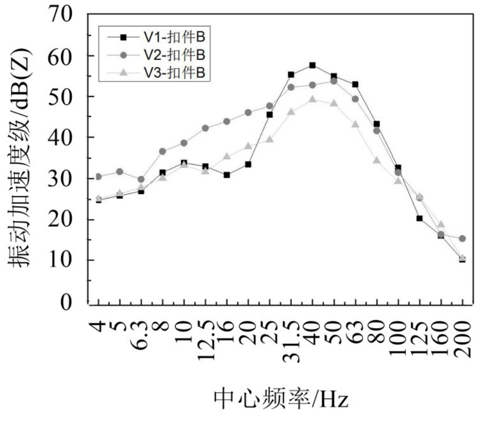

图5 振动测点Z计权垂向振动加速度级倍频程图（扣件B）

从图中可以看出，替换扣件后各测点垂向振动在40 Hz以上的频段内基本均有所降低。在扣件A工况下，各振动测点的峰值频率都在63 Hz左右；更换为扣件B后，各测点峰值频率基本都在40 Hz～50 Hz频段内，更换扣件前后各测点在12.5 Hz附近均存在局部峰值。更换扣件后，峰值频率降低。

3 室内二次结构噪声特性分析

3.1 等效连续A声级

与室内振动数据分析方法相同，对高峰时段列车经过测试截面时采集到的各测点噪声信号进行频谱分析，得到各噪声测点等效A声压级L_{Aeq}分别如表3和图6所示。

表3 不同扣件工况下室内各测点等效连续A声级L_{Aeq}/dB(A)

扣件类型	S1	S2	S3
扣件A	36.21	35.12	34.59
扣件B	30.74	29.34	28.93
差值	5.47	5.78	5.66

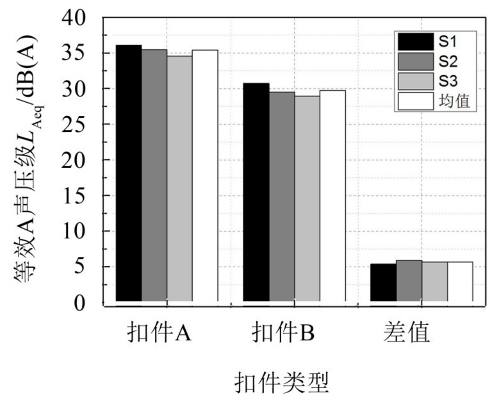

图6 不同扣件工况下室内噪声测点等效A声压级L_{Aeq}/dB(A)（16 Hz～200 Hz）

从中可以看出在16 Hz至200 Hz范围内，在扣件A工况下，各噪声测点等效A声级均在35 dB(A)左右，当替换为扣件B后，各噪声测点等效A声级均在28 dB(A)左右，且与振级相同，呈现出测点1>测点2>测点3的规律。此外，从图6可以看出替换后各噪声测点的等效A声压级均有不同程度减小，均在5 dB(A)至6 dB(A)范围内。这说明该区间在采用刚度较低的扣件B后减振效果增加，由室内振动辐射的二次结构噪也随之降低。

3.2 频域特征分析

图7和图8分别为扣件替换前后列车经过时一楼各噪声测点的A计权1/3倍频程图。可以观察到替换前后各噪声测点呈现相似的频谱特性，替换后峰值频率略有所改变，声压级明显降低。具体来说，替换扣件后，各噪声测点的全局峰值频率由

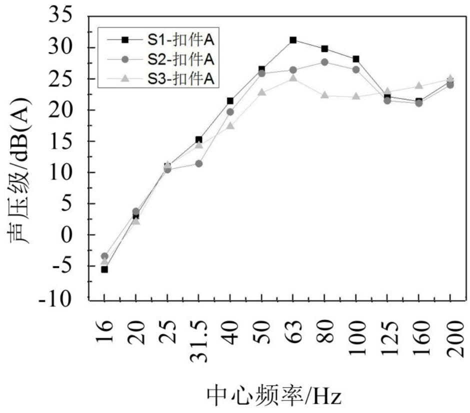

图7 噪声测点A计权声压级1/3倍频程图（扣件A）

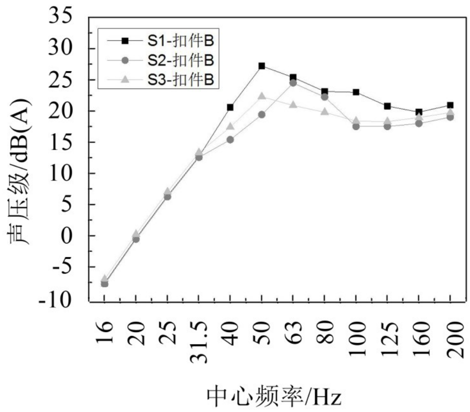

图8 噪声测点A计权声压级1/3倍频程图（扣件B）

63 Hz左右变为50 Hz左右，峰值声压级降低了约3 dB(A)，且与等效连续A声级规律相同，峰值频率处的声压级呈现出测点1>测点2>测点3的规律。综合分析室内振动频域特征可知，在相同工况下，室内振动与其辐射的二次结构噪声峰值频率基本一致。

4 结 语

本文在对不同扣件工况下地铁沿线6层居民楼1楼室内振动与噪声进行现场试验的基础上，从频域角度对此进行对比分析，得到以下结论：

（1）在同种扣件工况下，室内振动与噪声的峰值频率基本一致，替换前均为63 Hz左右，更换为扣件B后，峰值频率变为40 Hz～50 Hz左右。

（2）在其它工况不变的情况下，采用刚度较小的扣件后，室内振动与二次结构噪声均有所降低。

（3）室内不同位置的测点振级和声压级不同，基本呈现出在距离地铁线路越近的测点处所测得的振动加速度级与噪声声压级越大的规律。

参考文献：

[1] 王艺臻. 城市轨道交通地下线诱发邻近建筑物振声特性及控制方法研究[D]. 北京：北京交通大学，2019.

[2] 邢梦婷. 成都地铁商业上盖物业振动与噪声分析研究[D]. 成都：西南交通大学，2017.

[3] 张胜龙. 地铁列车引起的周围建筑物振动及二次噪声预测研究[D]. 北京：北京交通大学，2016.

[4] 曾泽民. 地铁车辆段列车运行引发振动与噪声效应的现场试验研究[D]. 广州：华南理工大学，2015.

[5] 欧阳昭. 地铁运行对周边建筑物振动噪声影响研究[J]. 山西建筑，2015，41(6)：130-132.

[6] 申道明，张来栋，薛松涛. 地铁引起二次噪声特性及评价量实测与探讨[J]. 土木建筑与环境工程，2013，35(4)：133-138.

[7] 康波. 地铁上方建筑物振动及二次噪声辐射分析[D]. 成都：西南交通大学，2011.

[8] METRIKINE A V. Surface ground vibration due to a moving train in a tunnel: two-dimensional model[J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 234(1): 43-46.

（上接第162页）

[5] AHMADI A, KERAMAT A. Investigation of fluid-structure interaction with various types of junction coupling[J]. Journal of Fluids and Structures, 2010, 26(1): 1123-1141.

[6] 仪垂杰，姜兴序. 结构振动模态声辐射及试验研究[J]. 应用声学，1990，35(6)：74-76.

[7] 闫详安，郑炜，张青，等. 往复泵输液管道振动结构有限元分析[J]. 机械工程学报，1999，17(11)：1352-1360.

[8] 尹志勇，钟荣，刘钟族. 管路系统振动噪声控制技术研究现状与展望[J]. 舰船科学技术，2006，2：23-28.

[9] 何涛，孙玉东，吴文伟，等. 水管路系统低噪声配置研究[J]. 船舶力学，2015，9：1149-1158.

[10] 戴青山，朱石坚，张振海. 管路系统低噪声弹性支撑安装研究[J]. 舰船科学技术，2017，39(10)：92-96.

[11] 李伟刚，王春健，李兵尚. 潜艇液压系统管路振动与噪声的分析控制[J]. 机床与液压，2011，7：70-73.

[12] 孙凌寒，殷勇，尹志勇. 船舶管路系统振动噪声控制标准研究[J]. 固体力学学报，2013，33(10)：266-269.

[13] 尹志勇，孙玉东. 一种船舶液压管路系统振动频域响应预报方法[J]. 船舶力学，2013，17(11)：1352-1360.

[14] 张志鑫，柳贡民，李帅军. 管道系统时域响应的传递矩阵计算方法[J]. 噪声与振动控制，2014，34(3)：30-33.

[15] LIU GONG MIN, LI YAN HUA. Vibration analysis of liquid filled pipelines with elastic constraints[J]. Journal of Sound and Vibration, 2011, 330(1): 3166-3181.