

文章编号:1673-2049(2016)05-0057-07

基于振源-传播模型的地铁引起地面振动数值预测

许锐^{1,2}, 李寻昌¹, 程辉¹, 薛松涛^{2,3}

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 同济大学 结构工程与防灾研究所, 上海 200092;
3. 日本东北工业大学 建筑学科, 宫城 仙台 982-8577)

摘要:针对上海地铁运行引起地面振动的预测问题,应用振源模型计算不同车速对轨道基础的激振力,应用传播模型计算不同激振力输入下的地面振动加速度,建立了“地铁-隧道-土层”系统动力有限元模型。通过对比数值模拟结果与实测结果,分析了不同因素对地铁引起地面振动的影响规律。结果表明:随着地铁车速增加,振源激振力和地面振动加速度的幅值均明显增大;地面上距地铁中心线30 m范围内各点振动加速度峰值随距地铁中心线距离由近及远呈幂函数形式衰减;地面振动加速度频率主要为低频振动,随着距地铁中心线距离的增大,高频衰减相对于低频更为明显;建议上海地区建筑尽量在地铁中心线20 m范围外进行规划,或采取降低设计车速、减轻车辆荷载、优化隔振措施等方法,减少地铁运行引起地面振动对地面建筑及居民生活的影响。

关键词:地面振动;动力有限元模型;激振力;轨道不平顺功率谱;振源-传播模型

中图分类号:TU91 **文献标志码:**A

Numerical Prediction of Ground Vibration Induced by Subway Based on Vibration Source and Propagation Model

XU Rui^{1,2}, LI Xun-chang¹, CHENG Hui¹, XUE Song-tao^{2,3}

(1. School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;
2. Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Department of Architecture, Tohoku Institute of Technology, Sendai 982-8577, Miyagiken, Japan)

Abstract: On the purpose of studying on ground vibration induced by subway, the vibration source model was applied to calculate the exciting force caused by different train speeds, and the propagation model was applied to calculate the ground vibration caused by different exciting forces, then the dynamic finite element model of “metro-tunnel-soil” system was established. By contrasting the numerical results and measured results, the influence law of ground vibration affected by different factors was analyzed. The results show that the exciting force and the ground vibration acceleration increase obviously with the increase of train speed; the ground vibration acceleration peak value decreases significantly as the distance to tunnel increases, and their relationships with the distance can be represented by power function within 30 m range from center line of subway; the ground vibration acceleration frequency is mainly concentrated in low frequency, and the high-frequency actuation is more obvious than low frequency actuation; it is

收稿日期:2016-04-06

基金项目:国家自然科学基金项目(41172257);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2013G1261062,310826161018)

作者简介:许锐(1981-),男,四川自贡人,长安大学讲师,工学博士,博士后,E-mail:firewoodxu@126.com。

recommended to take construction gauge outside 20 m of center line of subway, or reduce the design speed and the vehicle load, or optimize vibration isolation measure, to reduce environmental impact of local residents in Shanghai area.

Key words: ground vibration; dynamic finite element model; exciting force; track irregularity power spectrum; vibration source and propagation model

0 引言

地铁线路选择是依据城市规划和客流预测进行的,势必会经过居民区或对振动比较敏感的重要单位。从目前中国地铁建成后的运营效果看,地铁运营列车轮轨冲击产生的振动对地面建筑及居民生活可能会产生一定的影响,振动超标问题已成为轨道交通发展中备受公众关注的焦点^[1-3]。对拟建或在建地铁运行引起地面振动进行精确预测,用以优化结构设计或隔振措施,是具有理论和社会意义的。地铁引起环境振动的研究方法主要以现场测量^[4-8]、模型试验^[9]、工程类比、理论分析^[10]和数值模型^[11-16]为主。统计交通振动问题的研究文献,许多早期的研究都是使用解析法和试验法。当使用解析法时,考虑的问题常常在几何形状与材料性质上施加许多限制,对于其他复杂情况,很难得到封闭形式的解。另一方面,尽管通过现场测量和模型试验得到的结果显得更可靠,更接近实际情况,然而一个详尽的试验和测量的花费是非常昂贵的,而且成果只针对特定的工程,其重现性较差。

目前广泛使用的是数值模拟方法,但地铁引起环境振动有很多的不确定性,导致这些模型在预测精度上与实际应用还有不小差距。首先,地铁引起环境振动的研究对象是“地铁-隧道-土层”相互作用的一个开放系统的波动问题,使得地铁列车振动传播预测分析受到各种因素的共同影响,包括地铁车辆条件、轨道线路状况、地基地质条件、空间距离等。其次,现有大部分数值模拟研究主要针对环境更为简化的地面轨道交通振动问题,虽然近年来也有学者关注于地铁运行引起环境振动的研究,但考虑各种参数影响的真正适用于中国车辆状况、道路情况、环境标准的振动预测模型研究还鲜见报道。鉴于此,本文针对上海地铁运行引起地面振动的问题,建立“地铁-隧道-土层”系统动力有限元模型,提出适用于上海地区地面振动系统预测方法,并总结了地面振动随距离衰减的规律,最后通过与实测数据的比较分析,验证了本文所提出方法的有效性。

1 “地铁-隧道-土层”系统动力有限元模型

1.1 振源模型

本文提出的“地铁-隧道-土层”系统动力有限元模型主要由两部分组成,即振源模型和传播模型。振源模型是以车轮与轨道之间的作用力为纽带,分别建立上部车辆模型与下部轨道模型进行计算的,如图 1 所示。上部车辆模型考虑列车自身振动等的影响,将车厢、转向架、轮对、钢轨等作为一个振动系统。下部轨道模型将钢轨、轨枕、道床、路基等作为一个系统,即“钢轨-轨枕-道床-路基”模型^[10]。模型将钢轨、道床等简化为由弹簧和阻尼器支承的连续弹性梁。上、下部模型耦合为整体,采用 MATLAB 软件编写有限元程序进行计算。

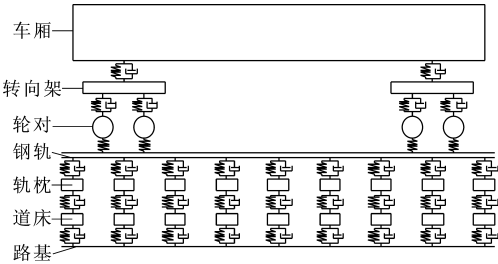


图 1 振源模型
Fig. 1 Vibration Source Model

轨道不平顺是指轨道接触面沿轨道长度方向与理论平顺轨道面之间的偏差,它是引起机车车辆振动的主要激励。由于本文的列车-轨道模型仅在竖直平面内,所以只考虑高低不平顺。中国高速列车总体技术条件中建议采用德国高速线路不平顺谱密度。根据中国高速列车总体技术条件规定,高速线路的轨道高低不平顺功率谱密度函数 $S(\Omega)$ 为

$$S(\Omega) = - \frac{A\Omega_c^2}{(\Omega^2 + \Omega_r^2)(\Omega^2 + \Omega_c^2)} \tag{1}$$

式中: Ω 为轨道不平顺的空间角频率,与波长 λ 的关系为 $\Omega = 2\pi/\lambda$; Ω_c, Ω_r 均为截断频率, $\Omega_c = 0.82 \text{ rad} \cdot \text{m}^{-1}$, $\Omega_r = 0.02 \text{ rad} \cdot \text{m}^{-1}$; A 为粗糙度常数, $A = 4 \times 10^{-4}$ 。

通过数值模拟采用三角级数叠加法原理处理公

式(1)得到轨道不平顺的样本,见图 2。

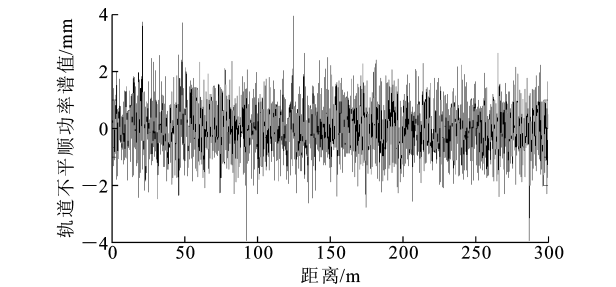


图 2 轨道不平顺功率谱值

Fig. 2 Track Irregularity Power Spectrum Density
数值模拟中选取的所有参数均参考上海地铁的具体情况,如表 1 所示。

表 1 列车与轨道主要参数

Tab. 1 Main Parameters of Vehicle and Track	
参数	数值
整车空车的质量 M_c/t	37
整车转动惯量 $J_c/(kg \cdot m^2)$	2.5×10^8
转向架的质量 M_t/t	5
转向架转动惯量 $J_t/(kg \cdot m^2)$	4.5×10^3
一系悬挂刚度 $K_{s1}/(N \cdot m^{-1})$	5.5×10^6
二系悬挂刚度 $K_{s2}/(N \cdot m^{-1})$	4.7×10^6
一系悬挂阻尼 $C_{s1}/(N \cdot s \cdot m^{-1})$	1.1×10^4
二系悬挂阻尼 $C_{s2}/(N \cdot s \cdot m^{-1})$	1.1×10^4
轮对质量(含其上固定附属结构) M_w/t	1.5
轨下垫层弹性系数 $K_{y1}/(N \cdot m^{-1})$	6×10^7
轨下道床弹性系数 $K_{y2}/(N \cdot m^{-1})$	8×10^7
道床下路基弹性系数 $K_{y3}/(N \cdot m^{-1})$	6.5×10^9
转向架固定轴距/m	2.5
转向架中心距离/m	17.5
转向架到车头或车尾距离/m	3.55
赫兹公式中常数	5.3025×10^{-8}
弹性模量 E_r/Pa	2.06×10^{11}
截面面积 A_r/m^2	7.745×10^{-3}
截面惯性矩 I_r/m^4	3.217×10^{-6}
单位长度质量 $M_r/(kg \cdot m^{-1})$	60.4
相邻轨枕间距/m	0.625
轨下垫层阻尼系数 $C_{y1}/(N \cdot s \cdot m^{-1})$	5×10^4
轨下道床阻尼系数 $C_{y2}/(N \cdot s \cdot m^{-1})$	1×10^5
道床下路基阻尼系数 $C_{y3}/(N \cdot s \cdot m^{-1})$	9×10^4

1.2 传播模型

本文的传播模型是通过 MARC 软件建立的平面应变模型,是按照单元网格由近及远逐渐放大来模拟振动波在土体中的传播的。在盾构附近的区域采用了 $0.05\text{ m} \times 0.05\text{ m}$ 的最小网格,然后向边界逐渐放大。这种单元放大趋势一方面大量减少了计算工作量,另一方面也符合振动波在土体传播过程

中高频波衰减更快的趋势,能够协调计算代价和计算精度之间的矛盾。最终建立的模型单元数量为 58 337 个,图 3 给出了 MARC 软件所建立的半正对称模型的单元划分,并显示了在盾构处最密集单元的划分情况。动力计算采用 Newmark 积分法,选择 0.001 s 的时间积分步长;模型采用瑞利阻尼,通过计算模型的自振频率,取阻尼比为 0.05 ;为模拟土层半无限空间的特点,模型边界设置为粘弹性边界,以满足散射波场假设。

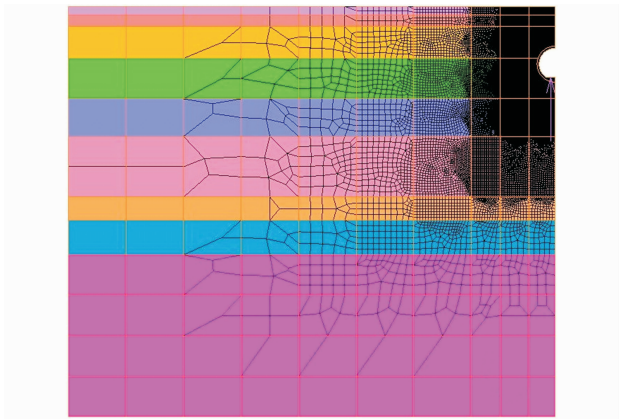


图 3 传播模型

Fig. 3 Propagation Model

选择在上海地铁某地下线附近的地面进行了现场测试,传播模型的设置参数完全根据该区域土层特点以及地铁隧道盾构特点来选择。其中隧道圆心中点埋深 10 m ,盾构内径 $d=5.5\text{ m}$,外径 $D=6.2\text{ m}$,均选用混凝土 C50 材料。土层主要参数见表 2。

2 数值结果分析

2.1 振源模型结果分析

按照图 1 中振源模型,计算得到了地铁不同车速下作用在盾构上的激振力。将振源模型最下部弹簧的弹性力作为图 3 所示传播模型的输入激振力,该激振力的时程曲线如图 4 所示。

由图 4 可知,随着车速 v 增加,激振力幅值增大,车速 $80\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 比 $50\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时激振力增加了 40% 左右,频谱图也反映了同样的影响规律。

2.2 传播模型结果分析

传播模型计算的地铁盾构中心线处地面振动加速度时程曲线如图 5 所示。

由图 5 可知,随着车速增加,由于盾构处输入激振力的增大,地面竖向加速度幅值增大。

3 实测对比分析

本文现场测试及数据处理方法依据《城市区域

表 2 土层主要参数
Tab. 2 Main Parameters of Soil Layers

土层序号	土层名称	层底埋深/m	重度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比	平均剪切波速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	弹性模量/MPa	剪切模量/MPa
1	填土	1.53	19.0	0.29	110	54.4	21.1
2	粉质粘土	3.33	19.5	0.29	150	103.9	40.3
3	淤泥质粉质粘土	8.83	17.4	0.29	190	148.7	57.6
4	淤泥质粘土	15.65	16.9	0.26	140	76.6	30.4
5	粘土	22.45	17.8	0.41	140	90.3	32.0
6	粉质粘土	32.85	18.1	0.29	200	171.4	66.4
7	粉质粘土	36.99	19.0	0.37	280	396.1	144.6
8	粉砂	43.17	19.0	0.37	280	386.3	141.0
9	粉细砂	63.67	19.0	0.37	340	555.0	202.6

环境振动标准》、《住宅建筑室内振动限值及其测量方法标准》、《城市轨道交通(地下线)引起建筑物振动与二次辐射噪声限值及其测量方法标准》以及《城市轨道交通(地下段)列车运行引起的住宅室内振动与结构噪声限值及测量方法》来进行。测试采用美国 NI 公司生产的 PXI1042 多通道数据采集系统,加速度传感器采用朗斯公司生产的内装 IC 压电式加速度传感器。测试点选择上海地铁某地下线上部的居民小区内。为保证测试不受外界噪声的干扰,测试过程中整个居民小区保持清场状态。加速度传感器在地铁隧道上方垂直于地铁线路布置,距离地铁隧道中心线不同距离处设置了测试点。测试位置处地铁运行车速为 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 本文同样选择车速 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的数值分析结果来进行对比,图 6~8 分别给出了距离隧道不同位置地面点的地面振动加速度时程曲线。

实测加速度时程曲线的峰值与数值模拟的结果略有差别。造成这种差别的原因主要是数值模拟计算结果没有考虑背景噪声的干扰,而实测结果受测试环境的影响,不确定性因素更多。数值结果与实测结果的曲线在总体规律上基本一致,而且峰值加速度值也基本吻合,证明了数值模拟结果的可靠性。

4 振动衰减规律分析

由图 6~8 可以看出,计算所得数值结果与实测结果在幅值上比较一致,符合地铁引起地面振动的加速度随着离地铁中心的距离增加而减小的规律。距盾构中心线距离由近及远的地面振动加速度峰值衰减曲线对比见图 9。由图 9 可知,地面振动加速度峰值在 7.5 m 处比 0 m 处减少了约 75%,15 m 处加速度峰值比 7.5 m 处减少了 50%。

如果将数值分析得到的地面上距离隧道由近及远的各点加速度时程曲线峰值进行统计,则得到如

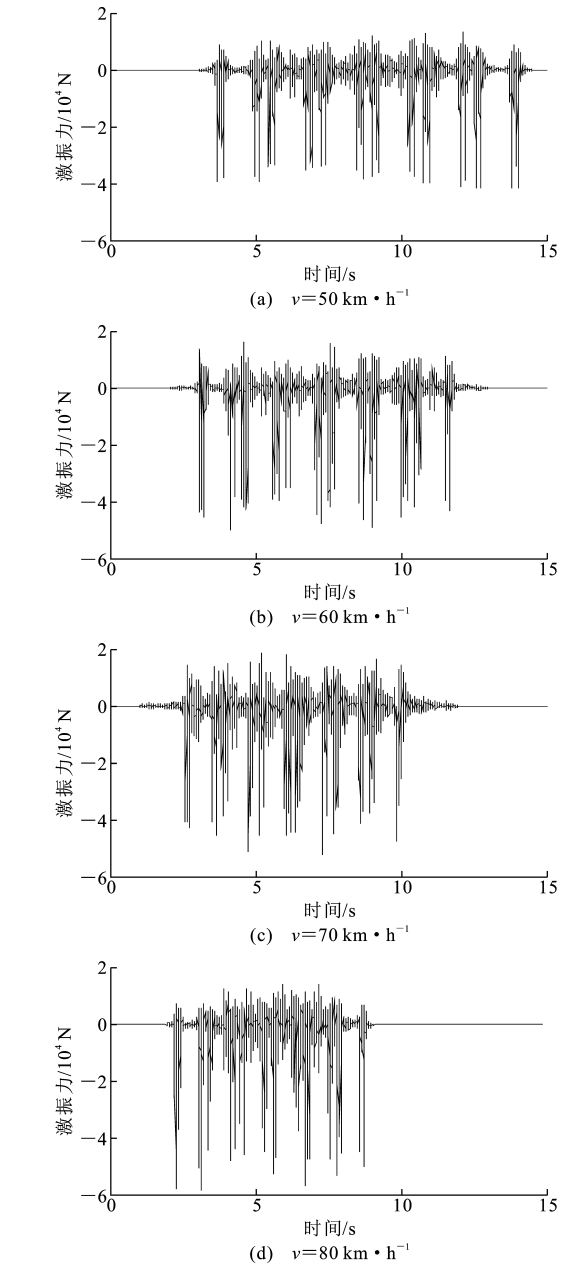


图 4 各车速下的激振力
Fig. 4 Exciting Forces Caused by Different Train Speeds

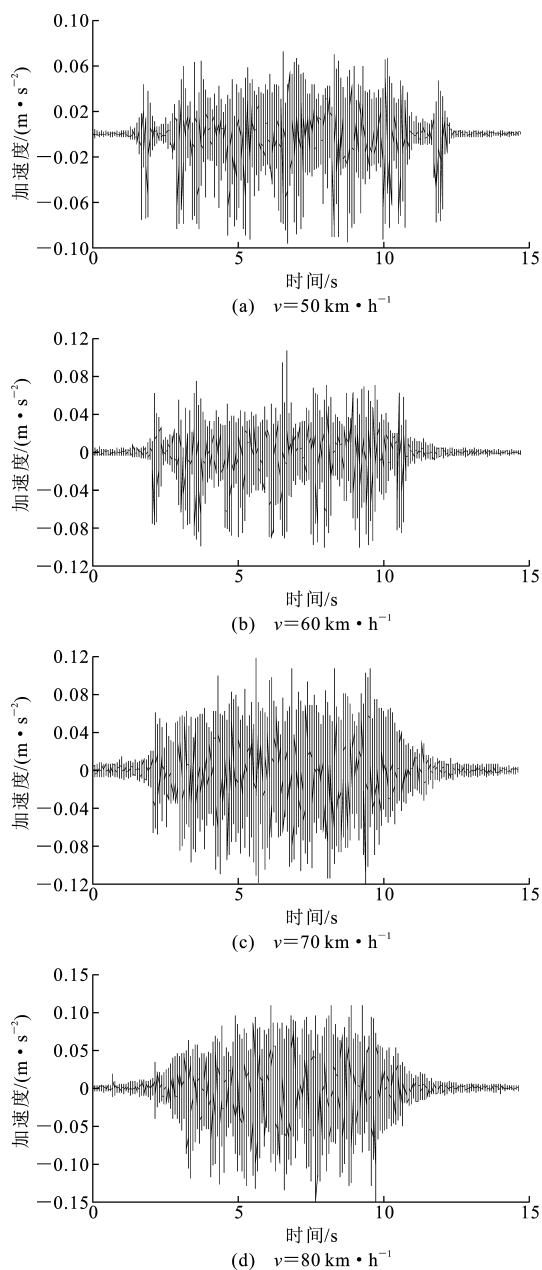
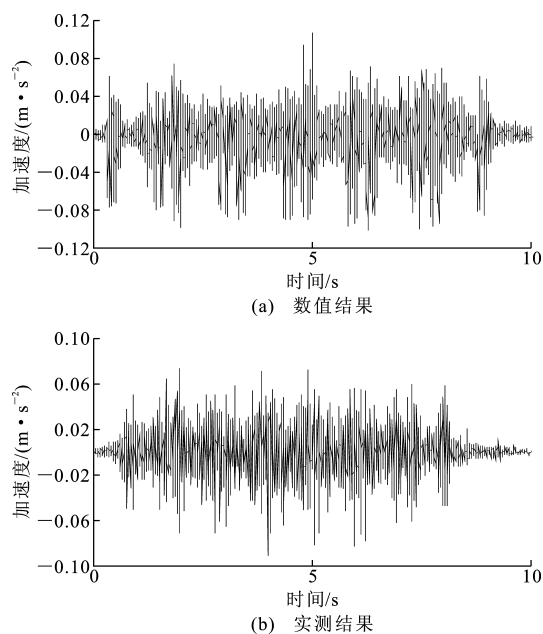
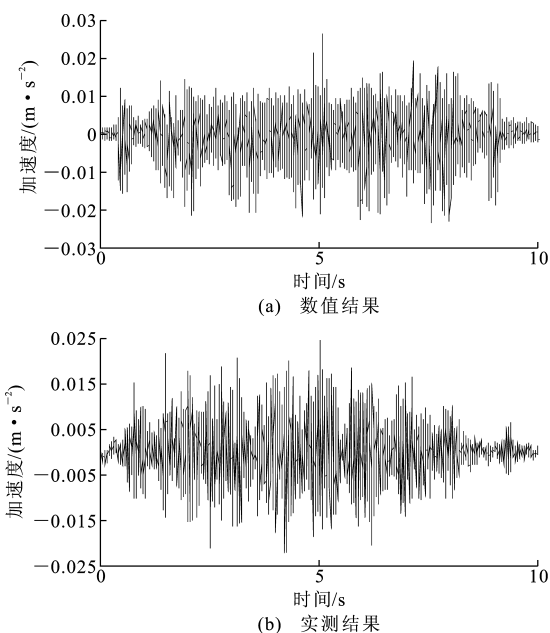


图 5 地铁中心线处地面振动加速度时程曲线

Fig. 5 Time History Curves of Ground Vibration Acceleration at Center Line of Subway

图 10 所示的衰减规律。由图 10 可知,地面上各点加速度时程曲线峰值衰减规律大致为:开始时衰减非常大,随着距离的增大,衰减逐渐趋于平缓,加速度峰值基本呈幂函数 $y=0.095 \cdot 2x^{-1.453}$ (拟合相关系数 $R=0.996$) 的规律衰减。

为分析图 10 中加速度峰值呈幂函数衰减规律的原因,将地面各点实测加速度时程进行频域分析,得到如表 3 所示的距隧道中心线不同距离 h 的 $1/3$ 倍频程曲线。由表 3 可以发现,由于土层对高频波的吸收相对更大,低频波传播相对更远,所以各测试

图 6 距地铁中心线 0 m 处地面振动加速度对比
Fig. 6 Comparison of Ground Vibration Acceleration at 0 m off Center Line of Subway图 7 距地铁中心线 7.5 m 处地面振动加速度对比
Fig. 7 Comparison of Ground Vibration Acceleration at 7.5 m off Center Line of Subway

点的振动在 10 Hz 以下的低频段比较接近,在 10 Hz 以上的高频段则随着距离的增大而明显衰减。随着离隧道中心线距离的增大,高频波急速衰减,低频波则基本稳定,待高频波衰减到一定程度,低频波的稳定性则显现出来,此时整体振动衰减将逐渐趋于平缓,所以图 10 呈现出加速度峰值开始衰减大,后趋于平缓的衰减规律。通过对图 10 中衰减曲线

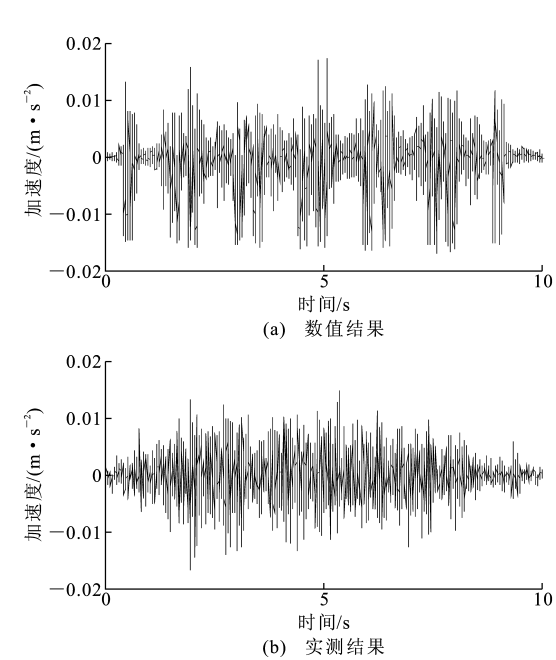


图 8 距地铁中心线 15 m 处地面振动加速度对比

Fig. 8 Comparison of Ground Vibration Acceleration at 15 m off Center Line of Subway

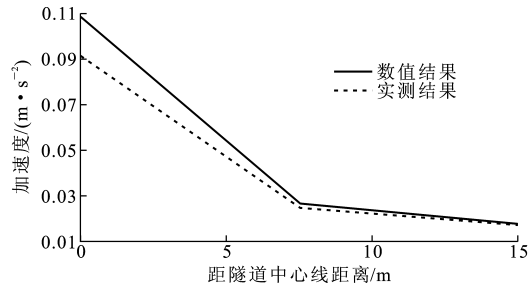


图 9 地面振动加速度峰值对比

Fig. 9 Comparison of Ground Vibration Acceleration Peak Value

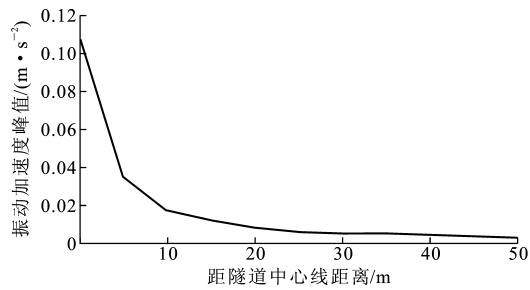


图 10 加速度峰值衰减曲线

Fig. 10 Attenuation Curve of Acceleration Peak Value

表 3 加速度 1/3 倍频程

Tab. 3 Acceleration 1/3 Octave Band

测点距地铁中心线距离/m	不同 1/3 倍频程中心频率(Hz)对应的振动加速度级/dB												
	1	1.6	2.5	4	6.3	10	16	25	40	63	100	160	250
0	36.8	33.7	40.0	39.5	43.0	56.0	57.6	60.1	81.5	68.8	63.0	66.7	55.8
10	36.6	36.1	37.6	35.7	40.9	49.6	46.6	50.9	66.9	62.6	60.0	58.1	56.0
20	41.3	38.8	37.5	39.0	39.1	54.2	47.9	53.6	66.1	63.1	61.1	62.7	69.6
30	41.2	37.7	40.2	40.9	40.0	49.0	45.9	43.8	61.3	52.3	46.6	56.6	47.6

的分析,建议上海地区建筑尽量在地铁中心线 20 m 范围外进行规划,或采取降低设计车速、减轻车辆荷载、优化隔振措施等方法,减少地铁运行引起地面振动对地面建筑及居民生活的影响。

5 结 语

- (1)随着地铁车速增加,振源激振力的幅值随之增大,车速 80 km · h⁻¹ 比 50 km · h⁻¹ 时激振力增加了 40%左右。随着地铁车速增加,地面振动加速度的峰值明显增大,基本与振源激振力增大的趋势吻合。
- (2)地面上距地铁中心线 30 m 范围内的各点振动加速度时程曲线峰值衰减开始较大,随着距离的增大,衰减逐渐趋于平缓,基本呈幂函数形式衰减。
- (3)地面振动加速度主要为低频振动。随着离隧道中心线的距离越来越大,各个位置点上的振动

- 加速度在各频域段上均出现了明显衰减,但高频衰减相对于低频更为明显。
- (4)建议上海地区建筑尽量在地铁中心线 20 m 范围外进行规划,或采取降低设计车速、减轻车辆荷载、优化隔振措施等方法,减少地铁运行引起地面振动对地面建筑及居民生活的影响。

参考文献:

References:

[1] 唐和生,申道明,薛松涛. 地铁引起建筑物振动评价量及限值实测与探讨[J]. 振动与冲击,2012,31(21): 89-93.

TANG He-sheng, SHEN Dao-ming, XUE Song-tao. Measurement & Discussion for Evaluation and Limits of Subway Induced Ground-borne Vibration in Buildings[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31 (21): 89-93.

[2] 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.
- SHEN Dao-ming, ZHANG Lai-dong, XUE Song-tao. Experimental Investigation on Characteristics and Evaluation Indexes of Ground-borne Noise Induced by Subway[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2013, 35(4):133-138.
- [3] 申道明,唐和生,胡长远,等. 地铁运行引起室内二次辐射噪声烦恼度阈值分析[J]. 结构工程师, 2013, 29(1):40-46.
- SHEN Dao-ming, TANG He-sheng, HU Chang-yuan, et al. Analysis on Annoying Threshold of Subway Induced Ground-borne Noise in Buildings[J]. Structural Engineers, 2013, 29(1):40-46.
- [4] 张光明,贺玉龙,杨立中,等. 快速铁路路堤段地面振动特性[J]. 交通运输工程学报, 2014, 14(3):8-14.
- ZHANG Guang-ming, HE Yu-long, YANG Li-zhong, et al. Ground Vibration Characteristic of Embankment Section for Fast Railway[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2014, 14(3):8-14.
- [5] 陈建国,夏禾,陈树礼,等. 运行列车引起的周围地面振动规律研究[J]. 工程力学, 2010, 27(1):98-103.
- CHEN Jian-guo, XIA He, CHEN Shu-li, et al. Investigation on Running-train-induced Ground Vibrations Near Railway[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(1):98-103.
- [6] 贺玉龙,向怡. 郑西高速铁路渭南北高架车站环境振动测试分析[J]. 噪声与振动控制, 2012, 32(3):152-154, 187.
- HE Yu-long, XIANG Yi. Test and Analysis of Environmental Vibration of Weinan North Elevated Station of Zhengzhou-Xi'an High-speed Railway[J]. Noise and Vibration Control, 2012, 32(3):152-154, 187.
- [7] 张杨,陈国兴,毛昆明,等. 轨道交通运行引起的场地振动实测研究现状[J]. 防灾减灾工程学报, 2011, 31(2):225-232.
- ZHANG Yang, CHEN Guo-xing, MAO Kun-ming, et al. Status Quo of Research on Measurement of Ground Vibration Induced by Rail Transit[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2011, 31(2):225-232.
- [8] 王福彤,陶夏新,崔高航,等. 地面城轨交通近轨道区域自由地表振动实测研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(5):131-135.
- WANG Fu-tong, TAO Xia-xin, CUI Gao-hang, et al. Test in Situ for Free Ground Vibration Near Urban Railway Line[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(5):131-135.
- [9] GUPTA S, DEGRANDE G, LOMBAERT G. Experimental Validation of a Numerical Model for Subway Induced Vibrations[J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 321:786-812.
- [10] 楼梦麟,李守继. 地铁引起建筑物振动评价研究[J]. 振动与冲击, 2007, 26(8):68-71, 170.
- LOU Meng-lin, LI Shou-ji. Evaluation of Buildings' Vibration Induced by Underground Trains[J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(8):68-71, 170.
- [11] 夏禾. 交通环境振动工程[M]. 北京:科学出版社, 2010.
- XIA He. Traffic Induced Environmental Vibrations and Controls[M]. Beijing:Science Press, 2010.
- [12] FIALA P, DEGRANDE G, AUGUSZTINOVICZ F. Numerical Modeling of Ground-borne Noise and Vibration in Buildings Due to Surface Rail Traffic[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 301(3/4/5):718-738.
- [13] 冯青松,雷晓燕,伍明辉. 地铁运行列车引起建筑物低频振动的数值分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2007, 4(5):68-72.
- FENG Qing-song, LEI Xiao-yan, WU Ming-hui. Numerical Analysis of Building Under Low-frequency Vibrations Induced by Subway Running Train[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2007, 4(5):68-72.
- [14] 王泽兴,赵伟屹,申道明. 快速列车对长沙高架车站的振动与噪声模拟分析[J]. 佳木斯大学学报:自然科学版, 2012, 30(3):355-359.
- WANG Ze-xing, ZHAO Wei-yi, SHEN Dao-ming. Simulation of Vibration and Structure-borne Noise Due to High-speed Train Through Changsha Station[J]. Journal of Jiamusi University: Natural Science Edition, 2012, 30(3):355-359.
- [15] 张鹏飞,雷晓燕,高亮,等. 铁路环境振动对厂房内精密仪器的影响分析[J]. 振动与冲击, 2013, 32(16):187-192.
- ZHANG Peng-fei, LEI Xiao-yan, GAO Liang, et al. Effect of Railway Environment Vibration on Precision Instruments Inside the Plant[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(16):187-192.
- [16] KOUROUSSIS G, CONTI C, VERLINDEN O. Investigating the Influence of Soil Properties on Railway Traffic Vibration Using a Numerical Model[J]. Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, 2013, 51(3):421-442.