

文章编号: 1000-4750(2013)Suppl-0325-04

# 地铁引发场地振动的实测信号能量分析

吕 鹏, 宗 刚, 李文涛, 单涛涛

(同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

**摘 要:** 选取上海某实际场地, 开展地铁运行引发的场地振动实测。基于实测加速度响应信号, 首先采用传统方法获得了信号在时域和频域内的能量分布特点, 总结出场地振动水平随与振源距离增加而衰减的规律及振动频率的主要分布范围。其次, 采用 Mexican hat 小波对信号进行连续小波变换, 分析了信号时-频能量谱及时-频累积能量的分布特点, 揭示出地铁自身的编组形式是造成振动非平稳性的直接原因, 且地铁行进过程中列车对场地多数测点振动响应的影响范围主要集中于穿越测试断面的本节车厢及前方一节车厢, 但在振动能量放大区, 列车的影响范围基本仅限于穿越测试断面的本节车厢。

**关键词:** 地铁振动; 传播规律; 能量分析; 小波变换; 时-频能量谱

中图分类号: TB533<sup>+</sup>.2 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.04.S096

## ENERGY ANALYSIS OF GROUND VIBRATION INDUCED BY SUBWAY TRAINS

LÜ Peng, ZONG Gang, LI Wen-tao, SHAN Tao-tao

(State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In-situ vibration measuring was carried out for the ground-borne vibration induced by subway trains in Shanghai. Based on the acceleration recordings, firstly, the characteristics of energy distribution in time domain and frequency domain are obtained respectively by the traditional methods. Accordingly, the attenuation curve is analyzed and the dominant frequency range is obtained. Secondly, the time-frequency energy spectrum and accumulated energy curve are presented by continuous wavelet transform based on Mexican hat wavelet. The train formation is the direct reason to the non-stationary ground vibration. To most of the measuring sites, the scope of the impact of the trains on the vibration is limited mainly by the length of two cars. But in the enlarged area of vibrational energy, the scope of the impact of the trains is limited basically by the length of the car passing by.

**Key words:** subway vibration; propagation law; energy analysis; wavelet transform; time-frequency energy spectrum

地铁已成为现代化城市建设中不可或缺的交通设施, 随着地铁列车车速和运量的不断提升, 以及人们对生活环境质量要求的不断提高, 地铁引发的环境问题日益突出<sup>[1-2]</sup>。一方面, 地铁引发的周边环境振动会引起用于精密电子加工、医疗科研操

作等高精仪器的非正常工作; 另一方面, 环境振动虽然不会对人体直接造成伤害, 但它会干扰人们的日常生活, 使人感到不适和心烦, 甚至影响人们的睡眠、休息和学习。此外, 持续的较大的环境振动水平, 对危旧建筑及古建筑亦是一种安全隐患。目

收稿日期: 2012-04-13; 修改日期: 2012-11-08

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2011 年度)。

通讯作者: 宗 刚(1977—), 男, 吉林人, 讲师, 博士, 主要从事工程结构抗震防灾研究(E-mail: zong@tongji.edu.cn)。

作者简介: 吕 鹏(1986—), 男, 江西人, 硕士生, 主要从事工程结构抗震防灾研究(E-mail: lvalb@163.com);

李文涛(1986—), 男, 河北人, 硕士生, 主要从事工程结构抗震防灾研究(E-mail: yuxian.liwentao@163.com);

单涛涛(1984—), 男, 安徽人, 博士生, 主要从事工程结构抗震防灾研究(E-mail: clark\_tao@163.com)。

前, 环境振动已成为世界七大环境公害之一<sup>[3]</sup>。

地铁引发的环境振动水平一般可由振动响应信号能量的大小来表征。传统方法通过获得振动响应信号能量在时域和频域内的分布特点, 以评价相应振动水平, 这类方法的优点在于理论成熟, 方法简便, 但其对非平稳特征明显的信号表达, 往往不够准确。近年来, 基于时-频域的信号能量分析被广泛应用于非平稳信号的处理过程中, 弥补了传统分析方法的不足<sup>[4-5]</sup>。

本文通过在实际场地上实测获得地铁引发的地面振动信号, 分别采用传统方法和小波变换方法对实测加速度响应信号进行能量分析, 获取更多更全面的地铁引发地面振动的信号特征和传播规律。

## 1 振动实测简介

选取位于上海地铁某线 T 车站至 S 车站区间的一块空地作为振动实测场地, 沿垂直于地铁行进方向的横断面地表布置共 5 个测点, 测点布置如图 1 所示。

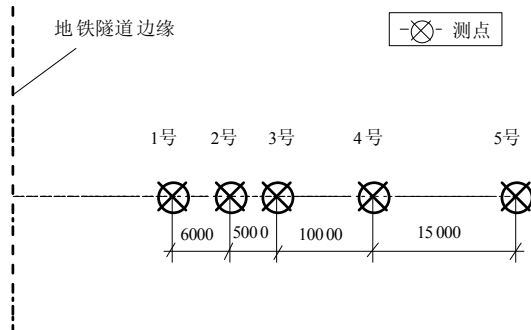


图 1 测点布置图

Fig.1 Layout of measuring points

本次测试信号采集设备采用美国 Kinemetrics 公司出品的 Basalt 4x 型信号采集设备, 传感器型号为 Episensor32 型三向加速度传感器, 传感器下部采用可调螺杆以保证安装的水平度, 且螺杆与地面混凝土面层间采用胶结连接, 确保测试过程中传感器与地面间无相对运动。现场采用并联局域网络和 GPS 校准相结合实现多点响应的同步采集。每一测试样本的采样持时为 180s, 各测点的采样率均为 500sps, 经信号优选截取以后, 共获得 95 条(每个测点各 19 条)有效垂直向地面振动响应加速度记录样本。图 2 为 1 号测点某次典型测试样本时程记录的截取段, 时长 16s。为后续分析地铁信号的需要, 对所有截取样本均已进行相应的滤波和降噪处理。

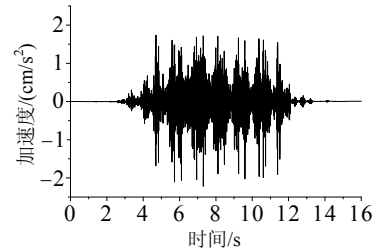


图 2 1 号测点加速度时程记录

Fig.2 Ground acceleration at the 1st measuring point

## 2 信号能量传统表征方法分析

### 2.1 传统表征方法

对于实测的离散振动数字信号, 以加速度响应为例, 传统在时域内一般采用信号  $\{a_m\}$  的均方根值 (RMS) 表征信号能量, 即<sup>[6]</sup>:

$$a_{RMS} = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} a_m^2 \quad (1)$$

式中:  $N$  为离散数据个数;  $m = 0, 1, \dots, N-1$ 。

对于同样的信号, 频域内, 一般采用功率谱表征信号能量, 其计算式如下<sup>[6]</sup>:

$$G(\omega) = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} R_j e^{-i(2\pi k j / N)} \quad (2)$$

式中,  $R_j$  为离散数据的自相关函数:

$$R_j = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} a_m a_{m+j} \quad (3)$$

其余符号同式(1)。

此外, 对于振动水平的评价, 以分倍 (dB) 为单位的 1/3 倍频程振级更加常用, 其本质可以看作是将信号进行傅立叶变换并求其在某些所关心频带内信号均方根值表达的振动能量过程, 即将时域内和频域内的能量表征方法结合使用。

### 2.2 实测数据分析

以信号均方根值表征实测响应样本在时域内的能量水平, 分析地铁运行引发的场地振动能量随与振源(地铁线路)距离增加而衰减的规律, 如图 3 所示, 图中所示值均为各测点 19 条时程记录的统计平均值。可见, 随着与振源距离的增加, 振动能量衰减, 但整体的衰减趋势并非单调变化, 存在着能量回升现象(见图 3 中 21m 处的测点), 即地铁运行引发的场地振动在地表存在局部放大区, 这与文献[7-8]所得结论一致。

图 4 给出了每个测点 19 条加速度时程记录对应的统计平均功率谱图。从图中可以看出各测点振

动信号的能量主要集中在 30Hz~80Hz 频率范围内, 4 号测点(21m 处的测点)在该频带内能量值均出现放大现象, 与时域内的能量回升现象相呼应。

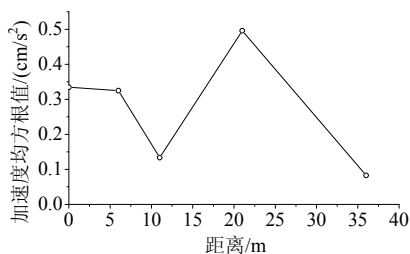


图3 能量衰减曲线

Fig.3 Curve of energy attenuation of ground accelerations at measuring points

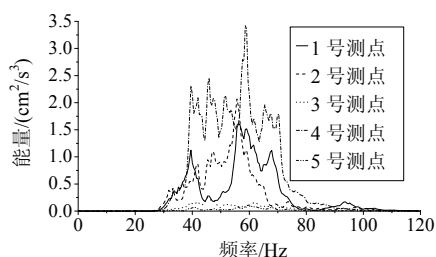


图4 功率谱图

Fig.4 Power spectrum of ground accelerations at measuring points

### 3 信号时-频域能量分析

#### 3.1 连续小波变换

函数  $f(t) \in L^2(R)$  的连续小波变换定义为内积<sup>[9]</sup>:

$$W(k, b) = x(t) \cdot \varphi_{k,b}(t) = \int_R x(t) \varphi_{k,b}^*(t) dt \quad (4)$$

式中:  $W(k, b)$  为小波变换系数,  $\varphi_{k,b}(t)$  为母小波经伸缩因子  $k$  和平移因子  $b$  变换得到的小波序列:

$$\varphi_{k,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{k}} \varphi\left(\frac{t-b}{k}\right), \quad k, b \in R, k \neq 0 \quad (5)$$

伸缩因子  $k$  与频率  $f_a$  的对应关系见下式:

$$f_a = \frac{f_s f_c}{k} \quad (6)$$

式中:  $f_s$  是信号采样率;  $f_c$  是母小波中心频率。

进而可以定义信号小波时-频能量<sup>[10]</sup>:

$$E_{k,b} = |W(k, b)|^2 / \pi \quad (7)$$

#### 3.2 基于小波变换的信号时-频域能量分析

本文采用 Mexican hat 小波作为基函数, 对信号进行连续小波变化, Mexican hat 小波为高斯函数的二阶导数, 其波形对称, 小波函数的时、频域形式分别为<sup>[9]</sup>:

$$\varphi(t) = (1-t^2)e^{-t^2/2} \quad (8)$$

$$\varphi(\omega) = \sqrt{2\pi}\omega^2 e^{-\omega^2/2}, \quad \varphi(\omega=0) = 0 \quad (9)$$

在  $\omega=0$  处,  $\varphi(\omega)$  有二阶零点, 在时、频域具有很好的局部性, 故选择该小波对实测信号进行小波时-频能量谱分析。Mexican hat 母小波的中心频率为 0.25Hz, 根据式(6), 选用伸缩因子  $k$  从 0.5~7, 对应的频率约为 18Hz~250Hz。

图 5 给出了 1 号测点某一次有效样本的小波时-频能量谱图(其余样本亦有类似图谱, 限于篇幅, 未一一列举), 从图中可以发现: 地表实测振动信号表现出明显的非平稳特征, 信号能量不仅具有局部频带集中性, 在时域上, 能量亦存在局部集中特点, 即能量主要集中在不连续的几段局部时-频区域内。进一步, 图 6 给出了对应某有效样本的 5 个测点加速度响应信号小波变换主要能量频带沿时域的累积曲线, 可见, 各条曲线均存在 6 段较明显的“阶梯”跳跃(图中虚线分隔), 对应于时-频能量谱图中的时-频域局部集中特点。时-频域内信号能量分布的这一局部集中现象, 是与列车本身的构造特点相关的, 本文现场实测的地铁列车为 6 节编组列车, 各节车厢采用前后 2 对轮对, 而引起场地振动的最主要振源即为车轮与轨道接触的不平顺引起的振动。在列车经过测点所在横断面时, 因各节车厢轮对间隔引入了时间差, 进而造成了时-频域内能量不连续的特征。

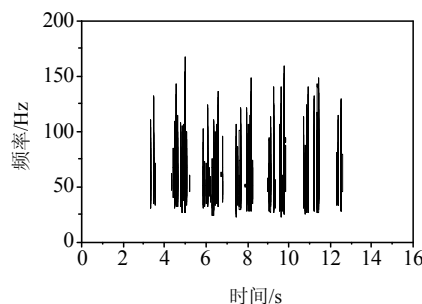


图5 小波时-频能量谱图

Fig.5 Wavelet time-frequency energy spectrum

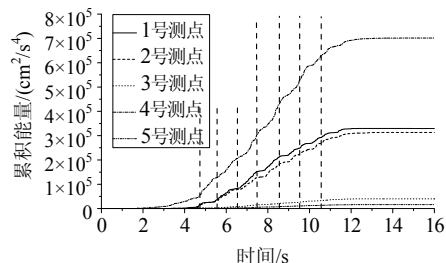


图6 能量累积曲线

Fig.6 Curve of accumulated energy

表 1 给出了对应每一段累积能量“阶梯”跳跃的能量增加量。由表中数据可以看出,除放大区的第 4 测点外,其余测点的各个台阶内能量增加的规律性相近,即:除第一台阶(即第一节车厢)外,其余各台阶内的能量增加量相近,由此可以推断,针对测点断面对应的地表,列车对振动响应的影响范围约为本节车厢及其前方一节车厢;在能量放大区的第 4 测点,各台阶的能量增长量均相近,相应地可以推断,列车对地表振动的影响范围基本只限于本节车厢。

表 1 能量增加量  $/(cm^2/s^4)$   
Table 1 Energy increment

“阶梯”号	第 1 阶	第 2 阶	第 3 阶	第 4 阶	第 5 阶	第 6 阶
1 号测点	$2.18 \times 10^4$	$5.73 \times 10^4$	$7.38 \times 10^4$	$6.15 \times 10^4$	$4.92 \times 10^4$	$4.49 \times 10^4$
2 号测点	$2.33 \times 10^4$	$4.99 \times 10^4$	$5.24 \times 10^4$	$6.11 \times 10^4$	$5.23 \times 10^4$	$4.95 \times 10^4$
3 号测点	$2.18 \times 10^3$	$5.70 \times 10^3$	$8.20 \times 10^3$	$6.77 \times 10^3$	$7.14 \times 10^3$	$6.46 \times 10^3$
4 号测点	$8.70 \times 10^4$	$9.40 \times 10^4$	$1.14 \times 10^5$	$1.33 \times 10^5$	$1.20 \times 10^5$	$7.86 \times 10^4$
5 号测点	$8.25 \times 10^2$	$1.93 \times 10^3$	$3.32 \times 10^3$	$2.85 \times 10^3$	$3.38 \times 10^3$	$2.60 \times 10^3$

## 4 结论

对地铁引发的场地振动现场实测加速度响应信号分别从时域、频域和时-频域进行能量分析,发现:

(1) 时域内,随着与振源距离的增加,地面振动响应衰减,但其衰减趋势非单调变化,存在着能量回升(放大)区域。频域内,地面振动响应能量的频率范围主要集中在 30Hz~80Hz。

(2) 信号的时-频能量分布较之单一的时域或频域能量表达具有更准确的能量局部化描述,信号能量不仅具有局部频带集中性,在时域上,能量亦存在局部集中特点,即能量主要集中在不连续的几段局部时-频区域内,能量的局部集中特点对应了列车的车厢编组方式。

(3) 针对场地的某一测试断面,地铁列车对断面内多数测点振动响应的影响范围主要集中于穿越测试断面的本节车厢及前方一节车厢,但在振动能量放大区,列车的影响范围基本仅限于穿越测试断面的本节车厢。这一结论可为轨道减、隔振设计范围或场地隔振构筑物的设置范围,以及数值模拟中列车车厢数量、场地与轨道边界范围的确定等提供初步参考。

### 参考文献:

[1] 王逢朝,夏禾,张鸿儒. 地铁列车振动对临近建筑物的影响[J]. 北方交通大学学报, 2006, 23(5): 45—48.

- Wang Fengchao, Xia He, Zhang Hongru. Vibration effects of subway trains on surrounding buildings [J]. Journal of Northern Jiaotong University, 2006, 23(5): 45—48. (in Chinese)
- [2] 洪俊青,刘伟庆. 地铁对周边建筑物振动影响分析[J]. 振动与冲击, 2006, 25(4): 142—145.  
Hong Junqing, Liu Weiqing. Analysis of effects induces by subway train on surrounding building vibration [J]. Journal of Vibration and Shock, 2006, 25(4): 142—145. (in Chinese)
- [3] 夏禾,曹艳梅. 轨道交通引起的环境振动问题[J]. 铁道科学与工程学报, 2004, 1(1): 44—51.  
Xia He, Cao Yanmei. Problem of railway traffic induced vibrations of environments [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2004, 1(1): 44—51. (in Chinese)
- [4] 李建平,吴传志,龙兰,翟江涛. 基于小波变换的非平稳随机信号处理[J]. 工程数学学报, 2001, 18(增刊 1): 99—104.  
Li Jianping, Wu Chuanzhi, Long Lan, Zhai Jiangtao. Nonstationary random signal processing based on wavelet transform [J]. Chinese Journal of Engineering Mathematics, 2001, 18(Suppl 1): 99—104. (in Chinese)
- [5] 曹晖,赖明,白绍良. 地震地面运动局部谱密度的小波变换估计[J]. 工程力学, 2004, 21(5): 109—115.  
Cao Hui, Lai Ming, Bai Shaoliang. Estimation of local spectral density of earthquake ground motion based on wavelet transform [J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(5): 109—115. (in Chinese)
- [6] 王济,胡晓. MATLAB 在振动信号处理中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006: 113, 118.  
Wang Ji, Hu Xiao. Application of MATLAB in vibration signal processing [M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Publishing House, 2006: 113, 118. (in Chinese)
- [7] 闫维明,聂晗,任珉,冯军和,张祎,陈建秋. 地铁交通引起地面振动的实测与分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2006, 3(2): 1—5.  
Yan Weiming, Nie Han, Ren Min, Feng Junhe, Zhang Yi, Chen Jianqiu. In situ experiment and analysis of ground surface vibration induced by urban subway transit [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2006, 3(2): 1—5. (in Chinese)
- [8] 楼梦麟,贾旭鹏,俞洁勤. 地铁运行引起的地面振动实测及传播规律分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2009, 29(3): 282—288.  
Lou Menglin, Jia Xupeng, Yu Jieqin. Field measurement and analysis of ground vibration induced by subway trains [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2009, 29(3): 282—288. (in Chinese)
- [9] Daubechies I. Ten lectures on wavelets [M]. Philadelphia, Society of Industrial and Applied Mathematics, 1992: 3.
- [10] Ziqin Z, Hojjat A. Wavelet energy spectrum for time-frequency localization of earthquake energy [J]. International Journal of Imaging Systems and Technology, 2003, 13(2): 133—140.