

Comparative Study on Time-Frequency Characteristic of the Vibration Induced by Underground Subway and Road Vehicle

Guangzhen Li, Gang Zong*, Bin Zhang, Xiaosong Ren

State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction in College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai
Email: 15821766746@163.com

Received: Nov. 20th, 2014; revised: Dec. 22nd, 2014; accepted: Jan. 1st, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

A field test is carried out at a site where the vibration signal of both metro and road vehicles can be detected. Analyzing the vibration response in the respect of time-frequency of effective frequency band and effective duration, studying the attenuation law in the reference of RMS and time-frequency energy, this article highlights the differences between the two references in vibration signal analysis. Out of the results, the time-frequency characteristic of the vibration induced by metro and road vehicle differs sharply; in the respect of attenuation law, the amplification of vibration induced by road vehicle during propagating is not so obvious but that of vibration induced by metro is clear, which reaches 6.5 in the reference of time-frequency energy; further more, this also demonstrates time-frequency energy method improves the deficiencies of RMS (root-mean-value) which is an average of the total energy on the whole history.

Keywords

Subway, Road Vehicle, Time-Frequency Characteristic, Field Vibration

地铁与地面车辆引发振动的时频特征比较研究

李广振, 宗刚*, 张斌, 任晓崧

同济大学, 土木工程学院结构工程与防灾研究所, 土木工程防灾国家重点实验室, 上海
*通讯作者。

Email: *15821766746@163.com

收稿日期: 2014年11月20日; 修回日期: 2014年12月22日; 录用日期: 2015年1月1日

摘要

在同一场地同时测得地铁和地面卡车两类振源引发场地振动的加速度响应, 从时频角度统计信号有效频段、有效持时, 其次分别以有效值、时频能量为参考量就振动沿距离衰减规律对两种振动进行比较分析。从分析结果来看, 地铁与地面车辆引发振动在有效频段和有效持时方面差别显著; 在衰减规律方面, 地面交通引发振动在传播过程中放大现象不明显, 而地铁引发振动在传播过程中放大现象则相对明显, 且以时频能量为评价指标时, 最大放大倍数为6.5倍, 从这一方面也说明时频能量改善了有效值计算中对信号能量平均化处理的不足。

关键词

地铁, 地面交通, 时频特征, 场地振动

1. 前言

当今社会, 城市内地铁和地面交通引起的振动[1]-[3]随着人们对生活质量的要求越来越高也变得越来越不可忽视, 因此如何更好地认识和分析振动信号显得尤为重要, 但从目前来看, 对于信号的分析还是局限于单纯的从时域或者频域单独进行。早在上个世纪 80 年代, 茅玉泉[4]通过大量实测实验研究火车和汽车在运行过程中引起的地面振动特性和衰减, 采用数理统计的复合回归方法, 探讨了振动的传播规律, 提出了振动衰减的经验公式。崔高航、陶夏新、陈宪麦[5]对城市轨道交通沿线的地面环境振动进行了实测, 从时域方面进行了分析。Lak 等人[6]对路面不平整引起的车辆动态反应和路面振动响应做了研究, 并建模对其响应做了预测, 从频域角度分析, 指出路面结构只对自由场内的小距离范围内且是高频振动有较大影响。Mohannad 等[7]对交通荷载引起的路面振动做了数值模型的分析, 指出交通荷载引起的路面振动的幅值和频率主要是受车辆速度、路面不平整度和车辆悬挂系统影响。

在时域方面, 传统的振动分析方法包括持时、峰值、有效值等对时域波形进行分析, 而在频域方面, 主要通过傅里叶变换对信号频率进行分析。而傅里叶变换是对信号整体而言的, 并不能体现信号局部的频率特性。相比于传统的分析方法, 时频分析[8]则体现了它在频域局部性上的优势, 通过调节时窗长度的大小可以达到时域和频域的精度协调, 而且时频能量是信号能量的直接体现, 消除了传统方法中有效值在时域上的能量平均化的问题, 使得信号在传播规律上更为准确, 更为贴近实际。本文对同一测试场地同时采集地铁和地面交通主要是卡车引起的振动信号, 从时频分布的角度对信号样本进行分析, 对比分析地铁与路面交通引发场地振动的不同。

2. 场地地表振动实测

为同时获取地铁和地面道路车辆引发的场地振动响应, 实测场地选为毗邻城市二级主干道路的空旷自由场, 道路下方为与之伴行的地铁线路。测线及测点布置见图 1, 行车道投影落于地铁隧道的圆周范围内, 图 1 中的振源点为选定的路面修补点, 如图 2 所示, 车辆行经该点时产生明显振动。测线与地铁行进方向垂直, 沿测线共布置 8 个测点, 考虑到敏感建筑及敏感仪器对振动水平的要求, 测线长度确定为 71 m, 随着与振源距离的递增, 测点排布由密到疏展开。实测道路车辆和地铁运行情况为: 试验车辆

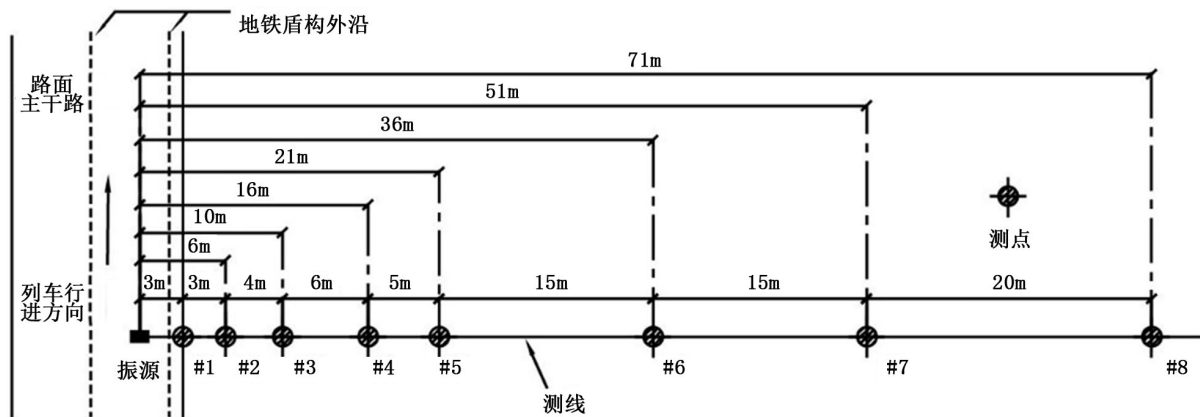


Figure 1. Measuring point's layout

图 1. 测点图



Figure 2. Road vibration source

图 2. 路面振源点

采用总重约 15 吨的东风自卸型载重卡车，卡车行经振源点时的车速约为 30 km/h；地铁在行经测线区段的轨道埋深约 18 m，运行速度约 50 km/h。

振动采集设备为 Kinemetrics® 公司出品的 Rock-Basalt-4X 系列振动信号采集仪，拾振器为 Episor32 型 3 轴力平衡式加速度计，其线性范围为 DC~200 Hz，量程为 ± 2 g (g 为重力加速度)，采集设备如图 3 所示。测试中，加速度计灵敏度设定为 10,000 mV/g，采集仪采样率为 500 sps，总采样时长 72,000 s。现场同时采集水平正交及铅垂向 3 个方向的加速度响应，但考虑到地面车辆引发的场地振动响应主要以铅垂向为主[9]，本文仅对实测的铅垂向响应分量进行分析。

3. 时频分析

本文所采用的时频分布为二次型时频分布，能较好地描述信号的瞬时功率谱密度，是对信号能量的直观描述[10]。具体的时频分布函数有多种，典型的二次型分布类型包括 Cohen 类双线性时频分布函数和 Affine 类双线性时频分布函数，这两类时频分布函数虽时频变换的数学表达式形式不同，但本质上都是对信号时频能量的表达。作为 Rihaczek 分布的实部，Margenau-Hill-Spectrogram 时频分布较其他分布类型对能量等效处理的方式不同，其定义的本身即是对离散信号有限能量的直接表达，同时对交叉项、负能量消除、边缘效应优化问题等方面均具有明显优势[11]，本文对信号时频能量的分析即是基于 Margenau-Hill-Spectrogram 时频分布进行的。



Figure 3. Measuring devices
图 3. 测试仪器

3.1. Margenau-Hill-Spectrogram 时频分布

Margenau-Hill 类型的时频分布主要分为有两种基本形式，即基本型和谱图型，分别为 Margenau-Hill 时频分布和 Margenau-Hill-Spectrogram 时频分布[10] [11]，其中 Margenau-Hill-Spectrogram 时频分布定义[12]如下：

$$\text{MHS}_x(t, \nu) = R \left\{ \frac{1}{K_{gh}} F_x(t, \nu; g) F_x^*(t, \nu; h) \right\} \quad (1)$$

式中， $R\{\}$ 为取实部操作， $j = \sqrt{-1}$ 为虚数单位， ν 为信号频率， t 和 τ 为时间积分变量； g 和 h 分别为对信号多加的时间窗和频率窗， $K_{gh} = \int h(u) g^*(u) du$ 为窗函数的积分，用于调整因信号加窗引入的附加能量项； $F_x(t, \nu, g)$ 是信号加时间窗的 Rihaczek 分布，是信号加频率窗的 Rihaczek 分布。Margenau-Hill-Spectrogram 时频分布用于计算离散信号的 Margenau-Hill-Spectrogram 时频分布谱图，亦可计算两个信号的互 Margenau-Hill-Spectrogram 时频分布谱图。

3.2. 信号的时频特征分析

下文的时频分析均是基于 Margenau-Hill-Spectrogram 时频分布而进行的。信号时频特性的评价指标主要包括瞬时频率估计、群延迟估计、有效持时、有效频段等特征量[9]。其中瞬时频率用来表征信号在局部时间点上的瞬态频率特性，整个持时的瞬时频率反映了信号频率的时变规律；群延迟描述相位变化随着频率变化的快慢程度，直观上就是信号波形包络的时延，单个频率是不存在群延迟，由于群延迟一般适用于强非平稳振动信号的时频特性表征，而本文所关注的地铁引发的场地振动实测响应可被视为弱非平稳信号，故本文对群延迟估计不做讨论；有效持时和有效频段分别用来表征信号主要贡献作用的(比如时频能量等)时段和频段，是分析信号局部化特性的基本量。上述 3 个特征量的表达式如下：

$$\text{瞬时频率: } \text{IF}(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d \arg x(t)}{dt} \quad (2)$$

$$\text{有效持时: } \text{TE} = 2 \sqrt{\frac{\pi}{E_x} \int_{-\infty}^{+\infty} (t - t_m)^2 |x(t)|^2 dt} \quad (3)$$

$$\text{有效频段: } \text{BF} = 2 \sqrt{\frac{\pi}{E_x} \int_{-\infty}^{+\infty} (\nu - f_m)^2 |X(\nu)|^2 d\nu} \quad (4)$$

式中 $x(t)$ 为目标信号, ν 为信号频率, t 为时间变量, $X(\nu)$ 为信号 $x(t)$ 的傅里叶变换, $E(x)$ 为信号总能量, t_m 为中心时间, f_m 为中心频率。

4. 实测数据样本分析

4.1. 信号基本特征分析

测试共得到地铁引起的振动信号样本 10 条, 地面交通(以下称卡车)引起的振动信号共 10 条, 篇幅所限, 部分时程如图 4、图 5。

4.2. 时频分布分析

样本信号频率的时变规律在时频谱中会有进一步的体现, 因此瞬时频率的计算在此不再赘述。而有效持时和有效频段可以更一步的反应信号能量的主要集中时段及主要的频率成分。表 1 和表 2 分别为地铁信号和地面交通信号的有效频段和有效持时计算结果。从计算结果可以看出, 地铁引起的振动信号的有效持时平均为 8 s, 这与截取到的原始信号持时有较大差别, 约为原信号持时的 1/2, 这说明地铁信号并非连续的稳态信号, 事实上, 无论从信号的形态还是实际的地铁构造来看, 地铁引起的振动信号都应该是若干个脉冲信号的接续。从卡车的有效持时来看, 平均约为 1.2 s, 同样约为原信号的一半左右。除了在持时和有效持时方面的不同, 地铁与地面交通引起的振动的最大的区别在于振动信号频率的不同, 从时频图 6、图 7 可以清楚的看出, 卡车的振动信号近似为一种脉冲信号, 而地铁振动信号则较为平稳。总体来说, 卡车和地铁的频率信息, 无论从有效频段还是中心频率来看, 都是完全不同的。地铁振动信号的有效频段为 40~70 Hz, 中心频率为 60 Hz 左右, 而卡车振动信号的有效频段则集中在 10~20 Hz, 中

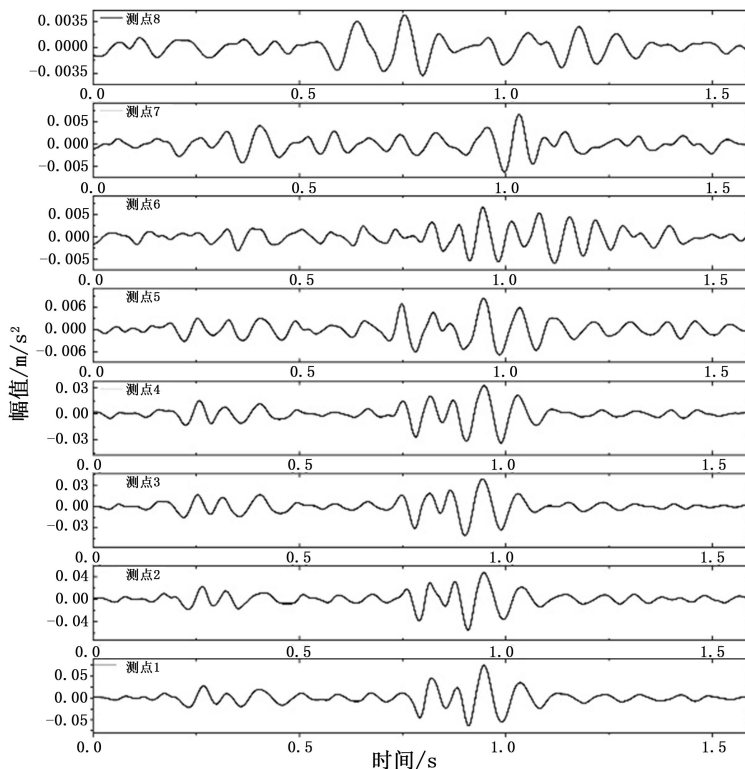


Figure 4. The acceleration time history curve of road vehicle
图 4. 卡车振动加速度时程

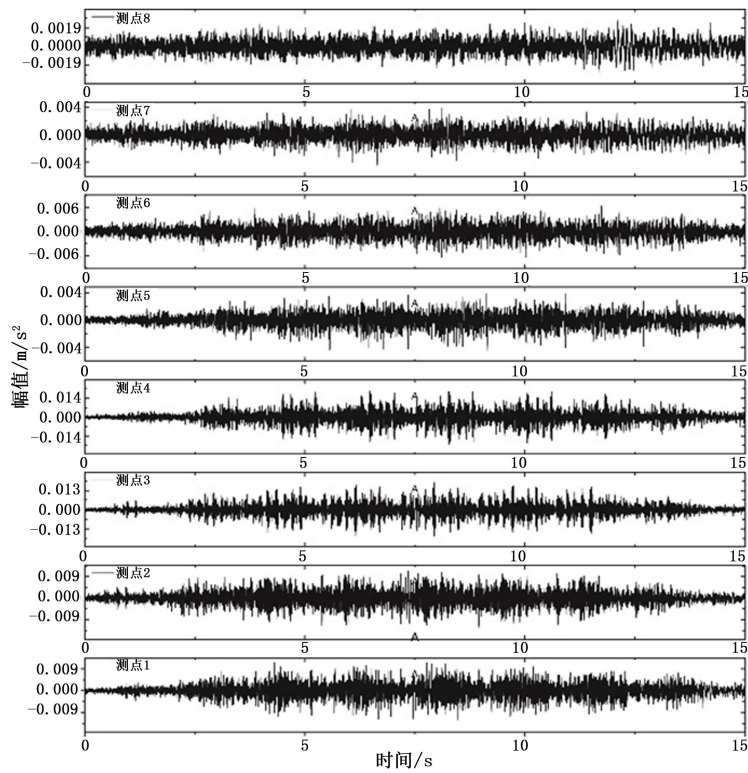


Figure 5. The acceleration time history curve of metro

图 5. 地铁振动加速度时程

Table 1. Effective duration and frequency band of metro vibration signal

表 1. 地铁信号有效持时与有效频段

地铁样本	有效持时/s	有效频段/Hz
样本 1	8.55	66.17
样本 2	8.01	68.30
样本 3	6.87	61.56
样本 4	7.80	56.11
样本 5	7.66	70.01
样本 6	8.59	64.20
样本 7	10.06	42.99
样本 8	8.04	66.04
样本 9	7.34	60.68
样本 10	7.04	65.14
平均值	8.00	62.12

心频率为 12 Hz 左右。其中在地铁样本的振动信号时频图中混入了卡车振动信号，地铁样本 1 中 8000 ms 处和地铁信号样本 2 中 4000 ms 处可以清楚的看到。从这一点也可以确定，要区分卡车和地铁信号，频率是其主要的依据，而且是准确的依据。

Table 2. Effective duration and frequency band of road vehicles
表 2. 卡车信号有效持时与有效频段

卡车样本	有效持时/s	有效频段/Hz
样本 1	1.40	9.86
样本 2	1.34	12.68
样本 3	1.00	11.29
样本 4	1.32	11.83
样本 5	1.89	11.66
样本 6	0.86	12.56
样本 7	1.86	11.73
样本 8	1.36	12.23
样本 9	1.58	13.36
样本 10	1.58	11.23
平均值	1.19	12.47

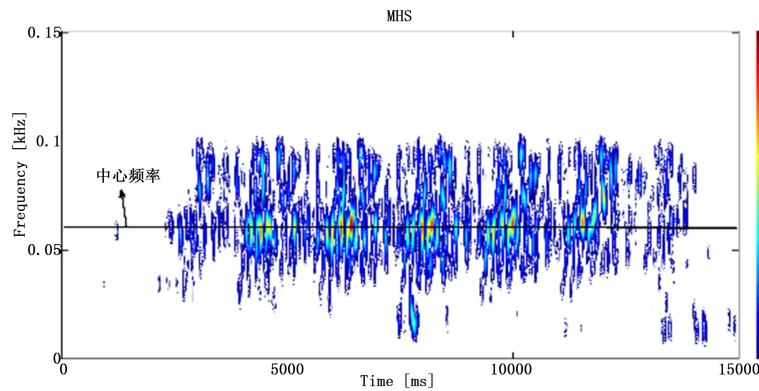


Figure 6. Time-frequency spectrogram of metro vibration signal
图 6. 地铁信号时频图

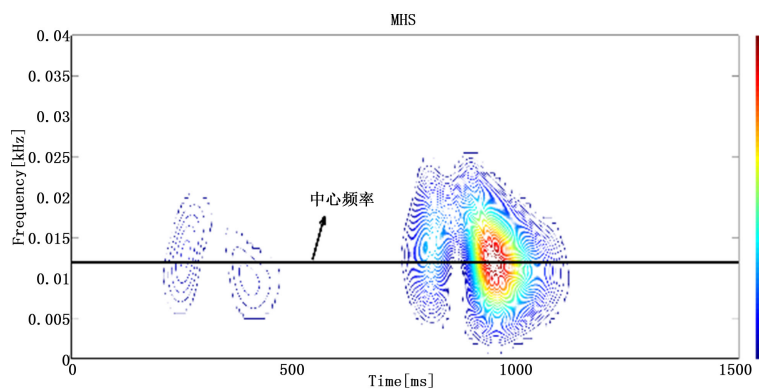


Figure 7. Time-frequency spectrogram of road vehicle vibration signal
图 7. 卡车信号时频图

5. 衰减规律分析

所谓的振动信号的衰减实则能量在介质中的传播。表征一个振动信号的特征的物理量有很多，如果

一个振动信号是以加速度为测量量，则有比如峰值加速度，有效值加速度，持续加速度，静力等效加速度等。而其中能够表征一个振动信号能量的则为有效值加速度，即均方根加速度，对于一个实际的振动信号而言，均方根加速度所表征的能量值从其计算公式可以看出，表示的是在整个持时的平均值，而无论是人的感受还是结构的振动在很大程度上取决于在较短时间内的集中能量的大小，即能量局部性特征，因此从这一方面来讲，用有效值作为能量代表值显得不够准确，而时频分布在描述局部能量方面有着有效值所无法比拟的优势。由公式(3)和公式(4)可知，时频分布中能量的计算仅在有效频段和有效持时内进行，这个特性就消除了有效值在计算时对信号整体能量的平均化，使得计算所得信号能量更为集中，更为贴近实际情况。

振动信号的时频局部化能量 E 可通过对选定的时频窗内时频分布系数的积分定义如下：

$$E = \int_{v_0 - \Delta v}^{v_0 + \Delta v} \int_{t_0 - \Delta t}^{t_0 + \Delta t} P(t, v) dv dt = \int_{t_0 - \Delta t}^{t_0 + \Delta t} |x(t)|^2 dt \quad (5)$$

式(5)中， $x(t)$ 为目标信号， $P(t, v)$ 为时频分布系数， t_0 和 v_0 为分别为信号局部化区域有效持时及有效频段的中心， $2\Delta t$ 和 $2\Delta v$ 则为有效持时和有效频段， t 和 v 为分别为时间和频率。对于离散信号，则有：

$$E = \sum_{t_i} \sum_{v_i} P_i(t_i, v_i) \quad (6)$$

因此为了研究地铁振动信号和卡车振动信号在传播过程中的不同，对所得样本分别取有效值和用时频分布中的局部能量概念作为振动信号能量的代表值，沿距离分别作出衰减曲线，如图 8~11。

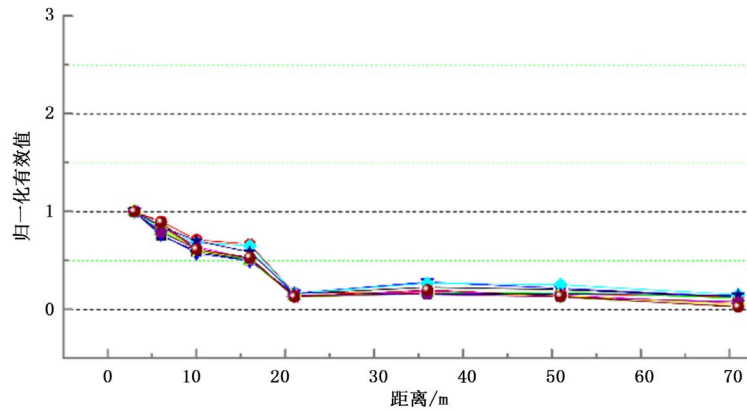


Figure 8. Attenuation of RMS of road vehicle vibration signal

图 8. 卡车有效值衰减图

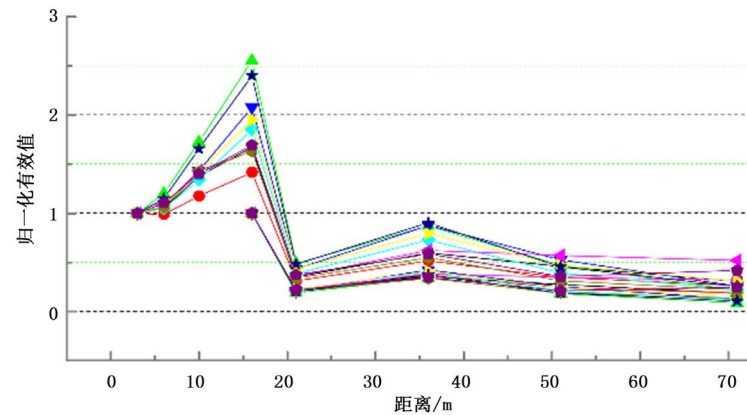


Figure 9. Attenuation of RMS of road vehicle vibration signal

图 9. 地铁有效值衰减图

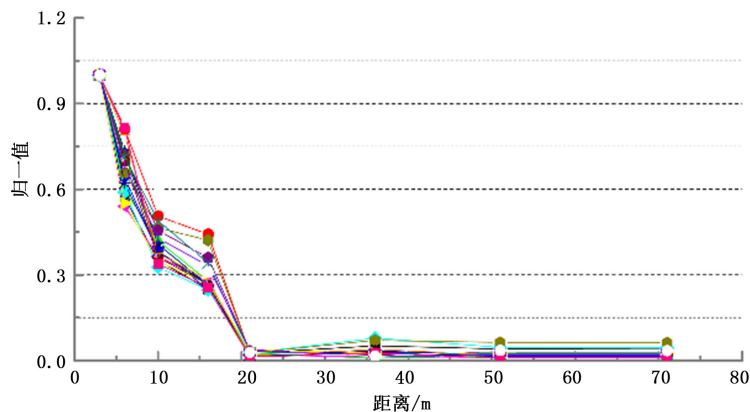


Figure 10. Attenuation of time-frequency energy of road vehicle vibration signal
图 10. 卡车振动信号时频能量衰减图

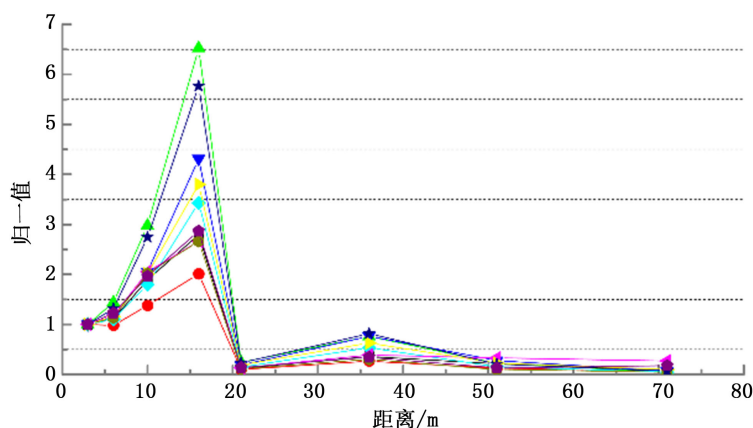


Figure 11. Attenuation of time-frequency energy of metro vibration signal
图 11. 地铁振动信号时频能量衰减图

以有效值作为研究标准时，从振动衰减图来看，无论是卡车还是地铁，其衰减并非传统观念上的衰减，在某些位置并未衰减，甚至出现了比前一个测点的值大的情况，在这里称为放大区。与卡车振动信号相比，地铁的振动信号在传播过程中放大现象更为明显，从地铁振动信号衰减图中可以看出，在第 4 个测点振动水平几乎达到了初始振动水平的 2.5 倍之多。而卡车振动信号放大现象则较不明显，但仍然可以看出在 16 m 和 36 m 处，分别相较于前一个点其振动水平并未减小，事实上这也是一种放大现象，除此之外，另一个不同之处在于地铁振动信号在传播过程中出现了多个放大区，在此次测试中 10~20 m 和 30~40 m，这个现象说明对于有地铁线路穿过的土体，如若在上方有建筑施工或是复杂构筑物时，防振距离要有针对性的扩大。

以时频能量作为考察标准时，其基本趋势与以有效值作为研究标准时的趋势是一致的，但存在细微差别。以时频能量为考察标准时，从卡车振动信号振动衰减图中，其衰减速率更快，且在 36 m 处的放大现象更不明显。而从地铁振动信号衰减图中，以时频能量为考察标准时，放大现象更为明显，在 16 m 处，放大倍数变为 6.5 倍之多，而在 36 m 处的放大现象几无差别。从理论上讲，以时频能量为参考值更能反映出振动信号的实际衰减情况及产生的影响，包括人的感受和对结构的危害。

6. 结论

地铁与路面交通引起场地振动在其时域和频域方面都有显著不同，从时频角度分析，卡车振动信号

的平均有效持时为 1.19 s，而地铁振动信号的有效持时平均为 8 s；频率方面，卡车振动信号的有效频段为 12.47 Hz，而地铁振动信号的有效频段则为 62.12 Hz。从衰减规律对比来看，地铁振动信号在传播过程中出现了明显的放大区现象，其放大倍数在以有效值为标准时达到 2.5 倍，而以时频能量为标准时达到 6.5 倍之多。卡车振动信号则未有明显的放大，但在某些位置出现了衰减变缓的现象，仍可视为一种放大现象。对于时频能量与有效值两种参考量，在此次测试中，在振动信号的传播规律方面，二者基本一致，时频能量放大现象更明显，变异性更小。

对于不同场地条件，不同的轨道类型，不同的列车及运行情况，衰减规律不尽相同，本文仅针对于测试场地而言。对于不同的场地条件，还应针对具体问题制定可行的测试方案，根据测试结果分析，以确定是否需要防振及距离多少。

基金项目

上海市科研计划项目资助，课题编号：13RZ1444800。

参考文献 (References)

- [1] Hao, H., Ang, T.C. and Shen, J. (2001) Building vibration to traffic-induced ground motion. *Building and Environment*, **36**, 321-336.
- [2] 洪俊青, 刘伟庆 (2006) 地铁对周边建筑物影响. *振动与冲击*, **4**, 142-145.
- [3] 梁宁慧, 刘新荣, 曹学山, 钟正君, 廖靖 (2008) 中国城市地铁建设的现状和发展战略. *重庆建筑大学学报*, **6**, 82-85.
- [4] 茅玉泉 (1987) 交通运输车辆引起的地面振动特性和衰减. *建筑结构学报*, **1**, 54-60.
- [5] 崔高航, 陶夏新, 陈宪麦 (2008) 城轨交通沿线地面环境振动衰减实测分析. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, **1**, 39-43.
- [6] Lak, M.A., Degrande, G. and Lombaert, G. (2011) The effect of road unevenness on the dynamic vehicle response and ground-borne vibrations due to road traffic. *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, **31**, 1357-1377.
- [7] Mhanna, M., Sadek, M. and Sharhrou, I. (2012) Numerical modeling of traffic-induced ground vibration. *Computers and Geotechnics*, **39**, 116-123.
- [8] 张斌, 宗刚, 李广振, 任晓崧 (2014) 地铁引发环境振动的时频能量评价方法. *土木工程*, **6**, 176-188.
- [9] 贾宝印, 楼梦麟, 宗刚, 蒋通, 陆秀丽 (2013) 车辆荷载引起地面振动实测研究. *振动与冲击*, **4**, 11-14.
- [10] 葛哲学, 陈仲生 (2006) MATLAB 时频分析技术及其应用. *人民邮电出版社*, **2-5**, 66-82
- [11] Boashash, B. (2003) Time frequency signal analysis and processing. Library of Congress Cataloging in Publication Data.
- [12] Auger, F., Flandrin, P., Goncalves, P. and Lemoine, O. Time-Frequency Toolbox. 1995-1996.

汉斯出版社为全球科研工作者搭建开放的网络学术中文交流平台。自2011年创办以来，汉斯一直保持着稳健快速发展。随着国内外知名高校学者的陆续加入，汉斯电子期刊已被450多所大中华地区高校图书馆的电子资源采用，并被中国知网全文收录，被学术界广为认同。

汉斯出版社是国内开源 (Open Access) 电子期刊模式的先行者，其创办的所有期刊全部开放阅读，即读者可以通过互联网免费获取期刊内容，在非商业性使用的前提下，读者不支付任何费用就可引用、复制、传播期刊的部分或全部内容。

