

文章编号: 1008-1402(2011)02-0164-04

基于薄层法—有限元法的地铁引起地面振动分析^①

石家武¹, 唐和生¹, 刘加华², 刘扬²

(1. 同济大学结构工程与防灾研究所, 上海 200092 2 上海申通轨道交通研究咨询有限公司, 上海 201103)

摘要: 运用薄层单元法与有限单元法结合的方法, 对地铁列车运行时的地面振动进行了分析研究, 计算了离地铁隧道不同距离的地面加速度, 并与实测结果进行比较, 结果吻合较好, 可为地铁运营时对周围环境的振动影响提供预测与参考。

关键词: 地铁; 振动; 加速度; 薄层法; 有限单元法

中图分类号: TU311 **文献标识码:** A

0 引言

地铁交通因为其不占用地面空间、运量大、速度快、准时方便的优点, 已成为缓解城市拥挤交通的重要手段。但是, 地铁运行会引起的环境噪声与振动, 振动还可以引发二次噪声, 从而影响地铁周围居民的工作与生活。因此, 地铁对环境的影响越来越受国内外学者的关注和重视。本文利用薄层法与有限单元法结合研究地铁对地面产生的振动影响, 并与地面的实测加速度进行比较验证。

1 薄层法 (格林函数)

层状地基在无限长线荷载激振下模型见图 1:

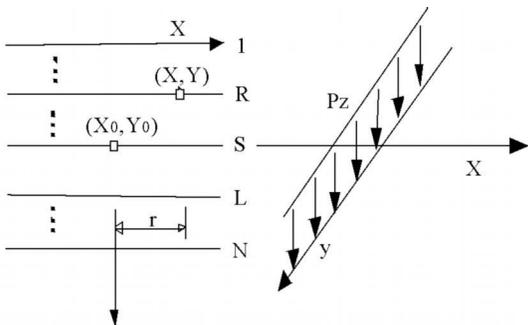


图 1 层状地基在无限长线荷载作用下计算模型

在 S 节面上 m 点 (x_0, y_0) 处作用简谐线荷载 $(R_x \ R_y \ P_z)^T$ 时, 在 R 节面上 n 点 (x, y) 处产生的位移 $(u_x \ u_y \ u_z)^T$ 为^[1]:

$$(u_x \ u_y \ u_z)^T = A_m (R_x \ R_y \ P_z)^T \quad (1)$$

式中 A_m 为柔度矩阵, 即表示在 m 点施加单位简谐线荷载, 在 n 点的位移, 计算过程可参见文献 [1]。

该计算方法是在频域内进行, 所以激振力采用频域力。同时, 从上式可以看出, 沿荷载方向与其他方向不耦合, 所以本文选取垂直地铁运行方向平面, 建立二维平面应变模型, 来分析地铁运行时地面的振动。

2 薄层法与有限单元法耦合计算

计算模型如下:

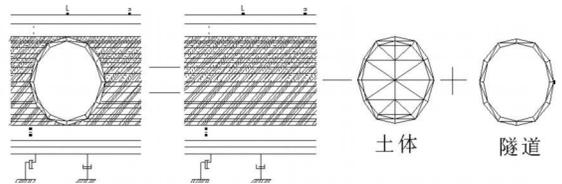


图 2 薄层法与有限单元法耦合计算模型

其数学表达式为:

$$K = K_0 - K_s + K_t - \omega^2 (M_s - M_t) \quad (2)$$

其中, K_0 为完整半空间的刚度矩阵, K_s 为挖去土体的刚度矩阵, K_t 为隧道的刚度矩阵, M_s 为土体的质量矩阵, M_t 为隧道的质量矩阵。

在计算中, 隧道选取 n 个节点, 进行单元划分, 地面根据计算所需选取 m 个节点。每个节点有两个自由度, 则 K_0 为 $2(m+n) \times 2(m+n)$ 维矩阵, 其中任意元素采用薄层法 (1) 式计算, 土体采用粘性阻尼边界条件; 挖去土体与隧道的刚度、质量矩阵为 $2n \times 2n$ 维矩阵, 采用有限单元法进行计算, 计算结果乘以转换矩阵则可得与 K_0 同维的矩阵。对求得的刚度矩阵 K 取逆, 得到该模型的柔度矩阵, 即可求解在任意节点施加荷载, 其他点的位移响应。

① 收稿日期: 2011-01-17

作者简介: 石家武 (1985-) 男, 福建建阳人, 硕士, 研究方向: 地铁振动。

3 算 例

进行计算. 根据某地铁实际情况, 模型隧道中心埋深 15m; 盾构内径: $d=5.5\text{m}$; 外径 $D=6.2\text{m}$; 材料为混凝土 C45.

3.1 计算模型与参数

激振力计算采用轮轨耦合模型^[3], 见图 3

土体选取某地典型场地数据^[2], 深度取 100m

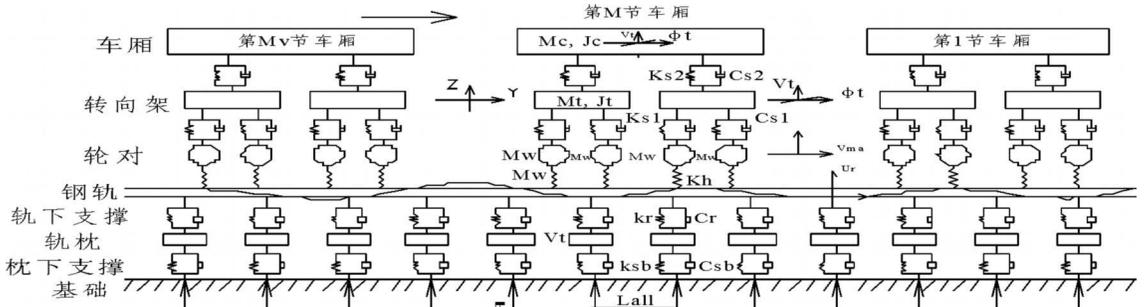


图 3 车辆计算模型

根据该模型计算得, 当地铁列车以 60 km/h 运行时, 单侧地铁单个轨枕的激振力见图 4 转换成线荷载经傅里叶变换到频域的激振力见图 5.

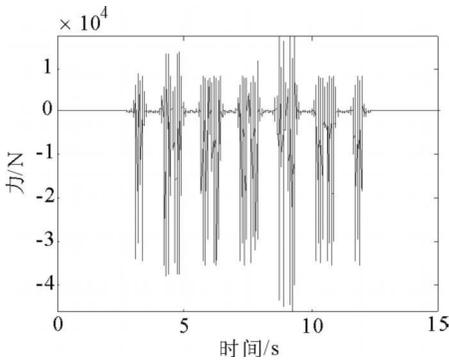


图 4 地铁竖向振动荷载时程曲线

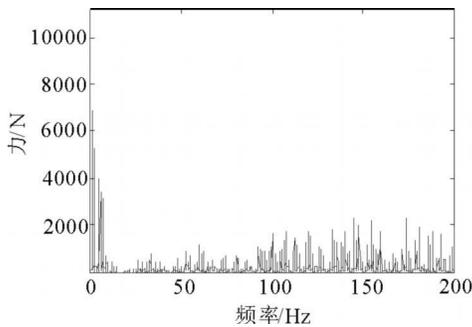


图 5 地铁竖向振动荷载频谱曲线

3.2 计算结果与实测结果比较分析

实测结果与理论计算表明, 水平向的振动远小于竖直方向, 所以本文只对地面竖直方向的振动加速度进行了比较.

(1) 加速度计算结果傅里叶逆变换到时域与实测结果比较:

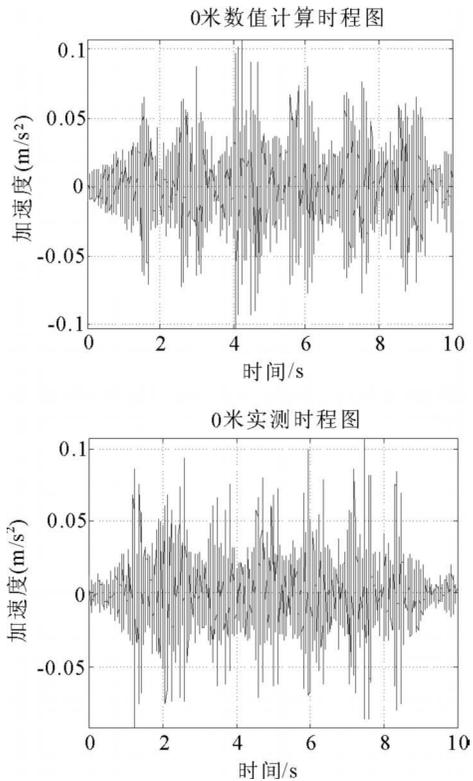


图 6 距隧道中心 0m 处时程曲线

由图 6~图 8 可以看出: 计算所得数值结果与实测数据在幅值上比较一致, 且都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

(2) 计算结果频域图比较:

由图 9~图 11 可以看出: 计算结果与实测结果在加速度频域上也具有一致性, 也是随着离地铁隧道中心的距离的增加而减小; 此外, 计算与实测加速度在频域的幅值分布也基本一致, 表明地铁对地面

的振动影响主要为 100Hz以下,集中在 60~80Hz.

(3)三分之一倍频程计算结果与实测结果比较:

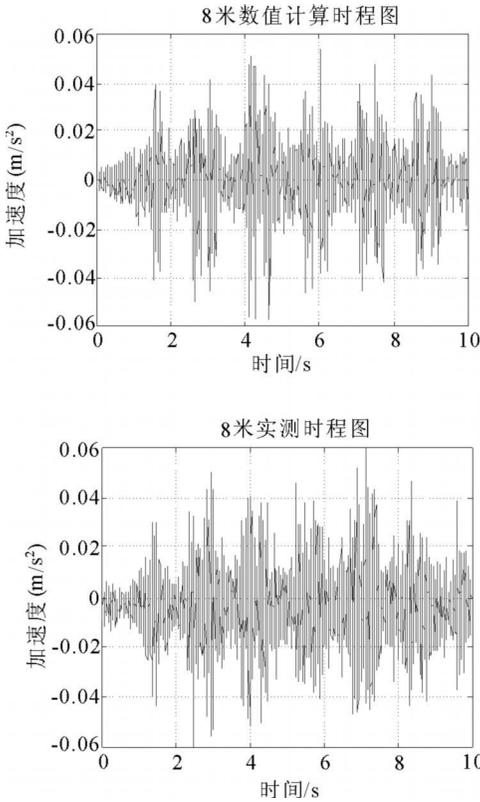


图 7 距隧道中心 8^m处时程曲线

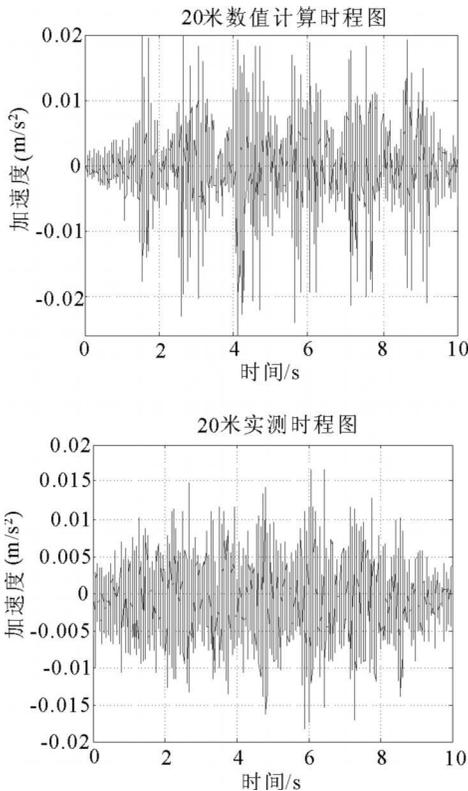


图 8 距隧道中心 20^m处时程曲线

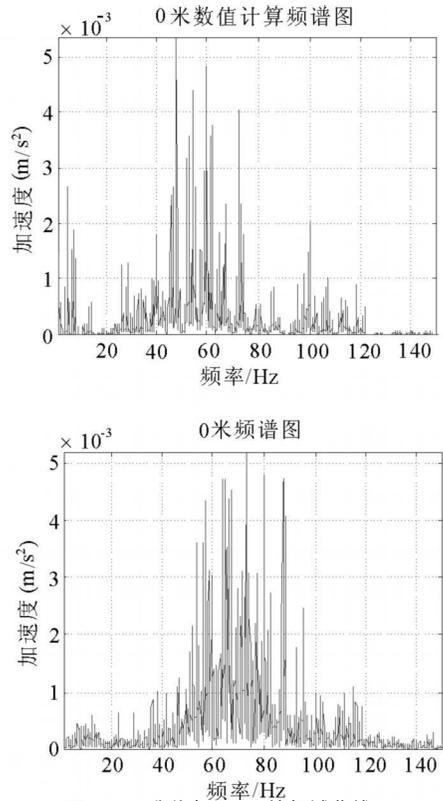


图 9 距隧道中心 0^m处频域曲线

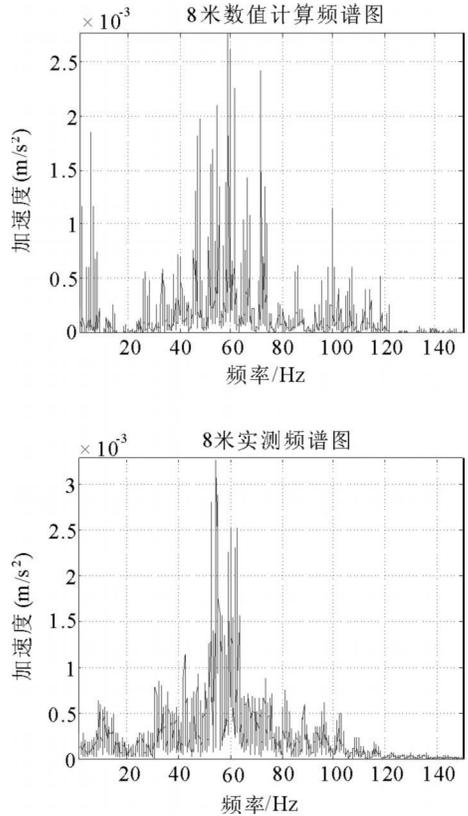


图 10 距隧道中心 8^m处频域曲线

由图 12~图 14可见,各点的计算所得的加速度的三分之一倍频曲线,与实测的加速度三分之一倍频曲线在 20Hz以上比较接近,但是在 20Hz以

下, 计算值波动比较大, 这与地铁所得的激振力在频域的分布本身有很大的联系, 此外, 也说明了该计算方法与计算理论有一定的改进前景.

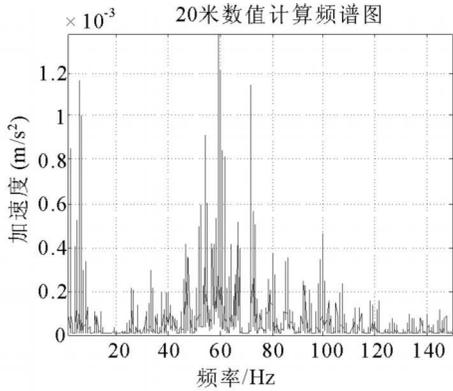


图 11 距隧道中心 20m 处频域曲线

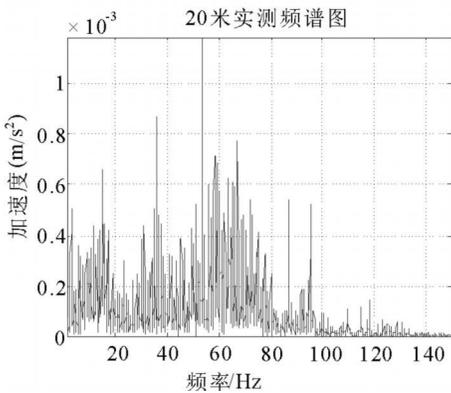


图 12 0m 处三分之一倍频程曲线

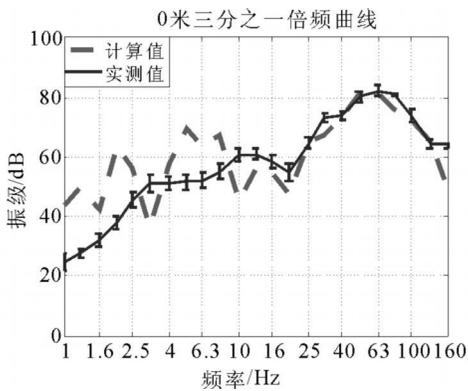


图 12 0m 处三分之一倍频程曲线

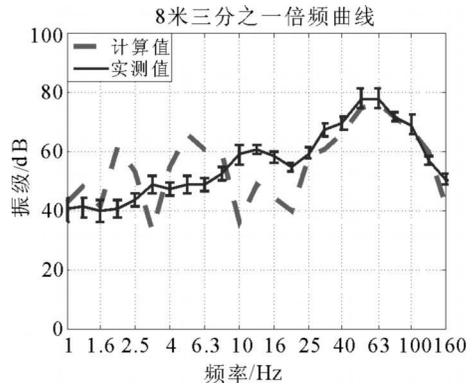


图 13 8m 处三分之一倍频程曲线

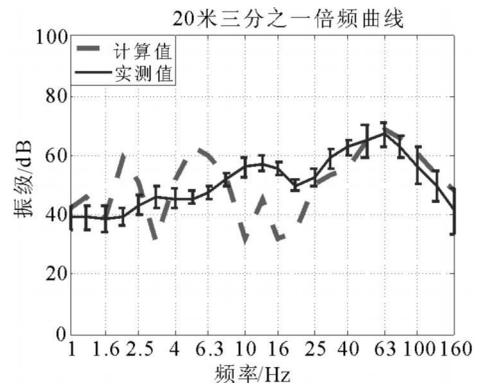


图 14 20m 处三分之一倍频程曲线

参考文献:

- [1] 蒋通. 地基—结构动力相互作用分析方法——薄层法原理及应用 [M]. 上海: 同济大学出版社, 2009: 198—235
- [2] 同济大学. 上海市地震小区划 [R]. 同济大学, 1992
- [3] 雷晓燕. 铁路轨道结构数值分析方法 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1998.
- [4] Eduardo Kausel, José Manuel Roesset. Stiffness Matrices for Layered Soils. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 71, No. 6, December 1981, pp. 1743—1761
- [5] Eduardo Kausel. Fundamental Solutions in Elastodynamics: A Compendium. New York: Cambridge University Press, 2006.
- [6] M. Schevenels. The Impact of Uncertain Dynamic Soil Characteristics on the Prediction of Ground Vibrations. PhD dissertation of Civil Engineering, KU Leuven, 2007.

4 结 论

本文用轮轨耦合模型计算的激励作为地铁的激振力, 使用薄层法—有限单元法模拟了地铁运行对地面的振动影响, 理论计算结果与实测结果基本吻合, 说明使用该方法对于预测地铁对地面的振动影响具有一定的参考价值. 此外, 计算过程中, 也突显了地铁的激振力对计算结果的影响很大, 今后需要进一步的深入研究.

(下转 172 页)

力.因此, AICSA可以通过采用之前提取的先验信息指导搜索过程,避免出现诸如 CSA中无目的和无效的搜索.通过比较研究可以确定 AICSA对动力系统参数识别的适用性很强.而由对模拟结果的分析可见,相较于 CSA, AICSA明显可以提高模拟识别结果的准确性.

参考文献:

[1] J D Farmer, N H Packard and A S Perelson. The Immune System: Adaptation and Machine Learning [M]. Physics D 22, 187 - 204.
 [2] A Kalinli and N Karaboga. Artificial Immune Algorithm for

IR Filter Design [J], Engineering Applications of Artificial Intelligence 2005, 18, 919 - 929.
 [3] G Lun and C Chueh. Multi-objective Optimal Design of Truss Structure with Immune Algorithm [J], Computers and Structures 2004, 82, 829 - 844.
 [4] H F DU, L C JIAO and S A Wang. Clonal Operator and Antibody Cloning Algorithm [J], Proceedings of the First International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Beijing 2002, 506 - 510.
 [5] Z Michalewicz. Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs [M]. The 3rd edn. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1996.

Parameter Estimation Using an Adaptive Immune Clone Selection Algorithm

CHAILin-feng TANGHe-sheng

(Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A novel Artificial Immune Algorithm, namely Adaptive Immune Clone Selection Algorithm, is proposed in this paper for parameter estimation which can be formulated as a multi-modal optimization problem with high dimension. In this method, the secondary response, adaptive mutation regulation and vaccination operator are introduced in the generic Clone Selection Algorithm to improve the convergence speed and global optimum searching ability. Simulation results for identifying the parameters of a dynamic system are presented to demonstrate the effectiveness of the proposed method.

Key words: immune clone selection algorithm; parameter estimation; multi-modal optimization

(上接 167页)

A Coupled TLE - FEM Model for Ground Vibrations Caused by Underground Railways

SHI Jiawu, TANG Hesheng, LIU Jiahua, LIU Yang

(1. Institute of Construction Engineering and Disaster Prevention, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shentong Rail Transit Research and Consulting Co., Ltd, Shanghai 201103, China)

Abstract: In this paper, ground vibrations due to underground railways were studied by the coupling the thin layer element (TLE) method and the finite element (FE) method. The ground accelerations with different distances from tunnel were calculated. The results are correspond with the measured. It is shown that the model can provide a reference for predicting environmental vibration.

Key words: underground railways; vibration; acceleration; TLEM; FEM