

文章编号: 1000-7598 (2012) 增 2-0311-03

铁路交通引起的地面振动荷载确定

陈士海^{1,2}, 戚桂峰^{1,2}, 毕卫国^{1,2}

(1. 山东科技大学 土木建筑学院, 山东 青岛 266510; 2. 山东科技大学 山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266510)

摘要: 随着铁路交通建设的快速发展, 铁路交通运行引起的环境振动日益引起人们的关注。为了更好地研究地面振动荷载的特性及其传播规律, 根据列车本身的结构和道床结构特性, 将钢轨、轨枕、道床以及高出地面部分的路基作为整体, 建立车厢-转向架-道床结构体的地面振动荷载二系弹簧计算模型, 通过分析现场测试得到的地面振动速度数据和车辆自身的振动情况, 并利用傅立叶变换程序 FFT 对地面振动荷载数据进行傅立叶变换, 得到地面振动荷载的数定表达式。

关键词: 铁路交通; 地面振动; 荷载; 傅立叶变换; 功率谱

中图分类号: U412

文献标志码: A

Determination of ground vibration load caused by rail transport

CHEN Shi-hai^{1,2}, QI Gui-feng^{1,2}, BI Wei-guo^{1,2}

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266510, China;

2. Shandong Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation(SDUST), Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266510, China)

Abstract: With the rapid development of the construction of rail transport, the vibration caused by the operation of rail transport is causing an increasingly concern. In order to study the characteristics of ground vibration load and its law of propagation, we set the rails, sleepers, ballast bed and roadbed above the ground as a whole according to the structure of the train and characteristics of the structure of ballast bed, and build a two-line spring model consisting of a car-bogies-ballast bed structures to calculate the ground vibration load. By analyzing the test data about the velocity of ground vibration and the vibration of the train itself, we can get the number expressions of the ground vibration load by using fast Fourier transform (FFT) program to analyze the ground vibration load data for Fourier transform.

Key words: rail transport; ground vibration; load; Fourier transform; power spectrum

1 引言

随着经济发展, 我国轨道交通的建设速度不断加快, 在为人们的出行提供方便的同时, 其引起的环境振动也日益引起人们的关注。在国外, 美国的 Wilson 等^[1]通过对铁路车辆和道床结构类型对产生环境振动影响的研究和分析, 提出了通过改进列车和道床结构形式来减小环境振动的方法; 日本的 Fujikake^[2]、青木一郎和 Hayakawa 等对轨道交通振动产生机制、传播规律等进行了相关研究, 并提出了环境振动的测试方法。我国一些专家学者也结合北京、上海等城市地铁运行的实际情况进行了相关研究, 并取得了一定的成果, 王田友等^[3]通过对上

海地铁一号线进行振动加速度测试, 建立了地铁列车的二系弹簧模型, 并考虑了轨道的不平顺性, 求得了钢轨的振动荷载曲线。张玉娥等^[4]通过对北京地铁列车进行测试, 建立单自由度简化模型模拟得到了轮系竖向激振荷载曲线。赵红军^[5]通过对“地铁列车-轨道-隧道结构-周围环境地层”复杂系统进行简化, 构建了地铁列车的二系弹簧和阻尼器组成的振动系统, 得到了列车振动荷载时程曲线。

关于确定地面振动荷载数定表达式的研究相对较少, 给地面振动荷载特性和传播规律影响的研究造成了很大的不便。本文在考虑动车结构的二系弹簧和阻尼器系统^[3-6]的同时, 把轨道、轨枕与道床(包括高出地面的路基部分)作为整体, 建立了

收稿日期: 2012-07-12

基金项目: 山东省自然科学基金 (No. ZR2010EM046); 山东省“泰山学者”建设工程专项经费资助 (2008 年)。

第一作者简介: 陈士海, 男, 1964 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程防灾减灾方面的研究工作。E-mail: cshblast@163.com

荷载的计算模型,求解了地面振动荷载的数定表达式。

2 地面振动荷载计算模型

列车运行过程中,车身的振动、车轮与轨道的冲击碰撞、车身的伸缩和左右摇摆,以及轨道的不平顺性等因素都会引起周围环境的振动,因为其竖向振动作用要比横向振动作用大的多,在计算过程中只考虑竖向振动作用。由于动车组车轮与钢轨之间的弹跳作用较弱,而且现场实测的地面振动速度信号在一定程度上已经考虑到了轨道不平顺性的影响,建立地面振动荷载计算模型时可以不再考虑轨道的不平顺性。由于钢轨与轨枕是通过扣件刚性连接的,轨枕是嵌入道床里面的,所以可以将钢轨-轨枕-道床(包括高出地面的路基)作为一个整体(道床结构体)进行分析研究^[7]。取一节车厢体、转向架、道床结构体以及弹簧-阻尼器组成的三自由度振动系统,建立如图 1 所示的地面振动荷载计算模型。图中, m_1 、 m_2 、 m_3 分别为一节列车车厢所对应的道床结构体、转向架、车厢的质量(kg); k_1 、 k_2 、 k_3 分别为道床结构体与地面之间弹簧、一系悬挂弹簧、二系悬挂弹簧的刚度(N/m); c_1 、 c_2 、 c_3 分别为道床结构体与地面之间、一系悬挂弹簧、二系悬挂弹簧的阻尼(N·s/m); y_0 、 y_1 、 y_2 、 y_3 分别为地面、道床结构体、转向架、列车车厢的竖向振动位移(m); $P(t)$ 为地面振动荷载(N)。

分别选取 m_1 、 m_2 、 m_3 为隔离体,根据受力平衡条件,可以得到如下常微分方程:

$$M\ddot{y} + C\dot{y} + Ky = -M\ddot{y}_0 \quad (1)$$

式中:

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix}; \ddot{y} = \begin{bmatrix} \ddot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \\ \ddot{y}_3 \end{bmatrix}; \dot{y} = \begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \\ \dot{y}_3 \end{bmatrix}; y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix}; K = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$\ddot{y}_1$ 、 $\ddot{y}_2$ 、 $\ddot{y}_3$ 分别为列车运行所引起的道床结构体、转向架、列车车厢的加速度; $\ddot{y}_0$ 为通过现场试验数据求得的地面振动加速度; $\dot{y}_1$ 、 $\dot{y}_2$ 、 $\dot{y}_3$ 分别为列车运行所引起的道床结构体、转向架、列车车厢的速度; C 为阻尼矩阵,采用瑞雷阻尼; K 为刚度矩阵; $I = [1 \ 1 \ \cdots \ 1]^T$ 为每个元素均为 1 列向量。

根据图 1 计算模型中的竖向平衡条件,可以得

到列车运行引起的地面振动荷载 $P(t)$ 为

$$P(t) = (m_1 + m_2 + m_3)g + (m_1\ddot{y}_1 + m_2\ddot{y}_2 + m_3\ddot{y}_3) \quad (3)$$

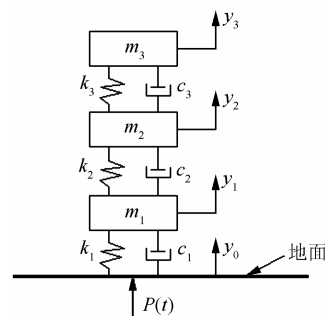


图 1 地面振动荷载计算模型

Fig.1 The analysis model of ground vibration load

3 地面振动荷载算例

已知, $m_1 = 8.8 \times 10^5$ kg, $m_2 = 2\ 000$ kg, $m_3 = 5 \times 10^4$ kg, $k_1 = 5.5 \times 10^7$ N/m, $k_2 = 1.133 \times 10^6$ N/m, $k_3 = 2.4 \times 10^5$ N/m, 计算所采用的地面振动信号来自于利用 IDTS3850 振动记录仪对青岛胶州市西北部胶济铁路沿线动车组运行条件下的地面振动测试,为了保证测试安全,测点布置于离轨道中心线 2.5 m 处的道床坡脚处,其中测得的地面振动速度 $\dot{y}_0$ 典型曲线见图 2。根据振型分解法和式(3),利用 Matlab 编程可以得到地面振动荷载 $P(t)$ 曲线见图 3。

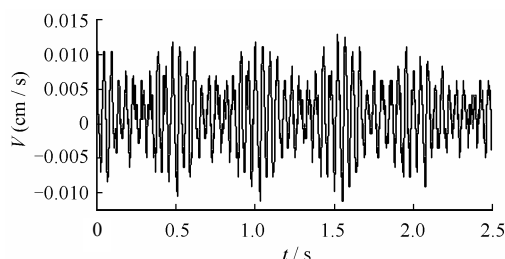


图 2 地面振动速度

Fig.2 Ground vibration velocity

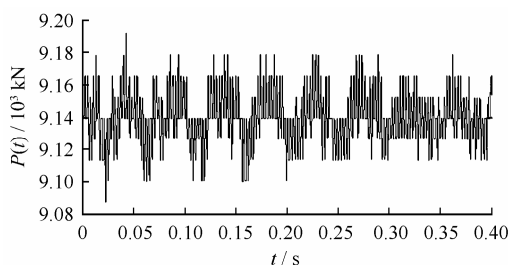


图 3 地面振动荷载

Fig.3 Ground vibration load

4 地面振动荷载的数定表达式

通过现场试验得到地面振动的速度信号,经过整理和计算分析可以得到地面振动荷载曲线(见图

3), 但其表达式是未知的。由于受到列车轴重、车速以及周围介质等因素的综合影响, 列车运行引起的地面振动实际上是一个随机的振动过程, 由于根据现场试验得到的地面振动速度数据求得的地面振动荷载是 1 组个数为 N 的离散点, 可以将地面振动荷载分解成 1 个常数和一系列正弦波和余弦波的组合, 即可以用傅立叶级数^[8-11]表示为

$$F(t) = C_0 + \sum_{n=1}^N C_n \cos(n\omega t + \varphi_n) \quad (4)$$

$$C_0 = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} F(t) dt = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N F_k(t), (k=1, 2, \dots, N) \quad (5)$$

$$A_n = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N F_k(t) \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right), (k=1, 2, \dots, N) \quad (6)$$

$$B_n = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N F_k(t) \sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right), (k=1, 2, \dots, N) \quad (7)$$

$$C_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2}; \varphi_n = \arctan\left(-\frac{B_n}{A_n}\right) \quad (8)$$

式中: T 为记录时间; N 为加速度波形的离散点数; $n=0, 1, 2, \dots, \frac{N}{2}-1$; $\omega = \frac{2\pi}{T}$ 为基频。

通过 Matlab 中的快速傅立叶程序 FFT 对原始信号进行傅立叶变换^[4], 可以得到地面振动荷载信号的功率谱图, 如图 4 所示。

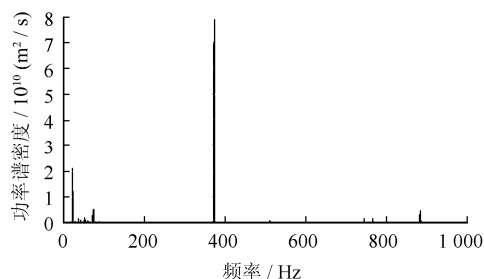


图 4 地面振动荷载信号的功率谱图

Fig.4 The power spectrum of ground vibration load signal

由图 4 可以看出, 引起地面振动荷载的原始信号在频率为 20 Hz 和 370 Hz 附近具有特别大的能量, 虽然其他频率段也会影响地面振动荷载的产生, 但相对于这两个位置的作用而言要小得多, 可以忽略不计。将相应的系数代入式(4)可以得到地面振动荷载 $F(t)(N)$ 的数定表达式:

$$\begin{aligned} F(t) = & C_0 + C_1 \cos(n_1 \omega_1 t) + C_2 \cos(n_2 \omega_2 t) = \\ & 9.139\,192 + 1.446\,82 \times 10^5 \cos(1.15 \times 10^4 t) + \\ & 2.834\,4 \times 10^5 \cos(3.57 \times 10^6 t) \end{aligned} \quad (9)$$

5 结 语

本文综合考虑列车自身结构和列车与轨道、道床相互作用, 在一些简化假定的基础上建立了地面振动荷载的计算模型。通过现场测试得到地面的振动速度曲线, 计算分析得到了地面振动的加速度数字信号, 进而得到地面振动荷载曲线, 利用傅立叶变换得到地面振动荷载的数定表达式。该表达式较为简洁, 便于对地面振动荷载特性的分析和对其传播规律的研究。

参 考 文 献

- [1] WILSON G P, SAURENMAN H J, NELSON J T. Control of ground-borne noise and vibration[J]. *Journal of Sound & Vibration*, 1983, 87(2): 339—350.
- [2] FUJIKAKE T. A prediction method for the propagation of ground vibration from railway trains[J]. *Journal of Sound & Vibration*, 1986, 111(2): 357—360.
- [3] 王田友, 丁浩民, 楼梦麟. 地铁运行引起场地振动的荷载与分析方法[J]. *工程力学*, 2010, 27(1): 195—197.
WANG Tian-you, DING Jie-min, LOU Meng-lin. Load for subway-induced free field vibration and analysis method[J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(1): 195—197.
- [4] 张玉娥, 白宝鸿. 地铁列车振动对隧道结构激振荷载的模拟[J]. *振动与冲击*, 2000, 19(3): 68—70.
ZHANG YU-er, BAI Bao-hong. The simulation of subway train vibration excitation loads on the tunnel structure[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2000, 19(3): 68—70.
- [5] 赵红军. 地铁列车振动引起的地面多层建筑物的响应[D]. 北京: 北京交通大学, 2007.
- [6] 魏鹏勃. 城市轨道交通引起的环境振动预测与评估[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
- [7] 李春峰, 白冰, 贺美德, 等. 轨道交通引起的环境振动及其影响规律[J]. *市政技术*, 2006, 24(4): 220—223.
LI Chun-feng, BAI Bing, HE Mei-de, et al. The environmental vibration and influence regular of railway transit[J]. *Municipal Engineering Technology*, 2006, 24(4): 220—223.
- [8] 袁新敏. 地铁运行对地基土和高层建筑的振动影响[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.
- [9] 潘昌实, 谢正光. 地铁区间隧道列车振动测试与分析[J]. *土木工程学报*, 1990, 23(2): 21—25.
PAN Chang-shi, XIE Zheng-guang. Vibration measurement and analysis of tunnel train[J]. *China Civil Engineering Journal*, 1990, 23(2): 21—25.
- [10] 高峰. 铁路隧道列车振动响应分析[J]. *兰州铁道学院学报*, 1998, 17(2): 6—9.
GAO Feng. Vibration analysis of railway tunnel train[J]. *Journal of Lanzhou Railway Institute*, 1998, 17(2): 6—9.