

竖向环境振动对人车路系统耦合振动的影响

张丙强

(福建工程学院土木工程系,福州 350108)

摘要 为分析竖向环境振动对人车路系统耦合振动的影响,人体采用并联动力模型,车辆采用 7 自由度全车模型,路面采用 Kelvin 地基上梁单元进行模拟,通过车路之间的动态轮胎力建立起考虑竖向环境振动作用的人车路耦合振动方程;运用 New-mark 积分法对方程组进行求解,采用人体竖向振动加速度均方根值对车辆乘坐舒适度进行评价;对地震波频率和地震波幅值对系统振动的影响进行讨论,以及车辆乘坐舒适度和乘坐者人体生理反应进行分析.数值分析结果表明:竖向环境振动加剧了人车路系统的振动,显著增大了车辆乘坐舒适度指标;地震波频率和地震波幅值对车辆乘坐舒适度的影响都很大.

关键词 人-车-路系统, 耦合振动, 竖向环境振动, 均方根值, 乘坐舒适度

引言

车辆与路面的耦合振动和车辆乘坐舒适度评价是目前工程研究的一个新课题,文献[1]对重型车辆一路面一路基的耦合振动进行了分析,文献[2,3]对小型车辆与路面的耦合振动及车辆乘坐舒适度进行了分析,以上研究均表明车辆与路面的耦合作用对车辆和路面振动的影响很大,在车辆与路面的相关动力分析中不可忽视,但以上文献所建模型中均未考虑外部荷载的影响.

而随着交通建设在世界范围内的迅速发展,越来越多的环境振动对周围建筑物或者构造物的影响受到人们的关注,例如列车振动荷载、地铁振动荷载或者施工爆破荷载作用下邻近建筑物或者高架桥、地铁等构造物的抗震性能和人体舒适度问题^[4-6],对环境振动作用下车辆与路面的耦合振动进行分析的相关研究有重要的工程意义.同时国内外有关车辆乘坐舒适度评价研究较多,例如文献[7,8]对侧风与桥梁振动对车辆乘坐舒适性影响进行了研究,但这些研究都是采用车体振动情况来评价乘坐者的舒适度情况,忽略了人体与车辆结构耦合振动的影响,而文献[9]研究表明忽略人与结构的耦合作用难以准确地获得环境振动下结构和人体响应信息.

鉴于以上两点,本文将对竖向环境振动作用下

考虑人体与车辆耦合作用和车辆与路面耦合作用的人车路系统振动响应及车辆乘坐舒适度问题进行探讨.

1 竖向环境振动下系统耦合振动方程

1.1 人体—车辆系统振动方程

大量的研究表明人体远非刚体系统,而是一个非常复杂而活跃的生物弹性系统,并且其振动特性随着环境、姿势和心理的变化而变化.此外,每个人之间的差异也较大.近年来,人们开始把振动环境下人体简化成不同自由度的质量、刚度、阻尼模型,

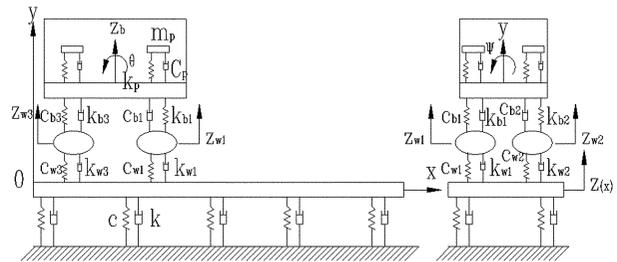


图 1 人车路耦合系统模型

Fig. 1 Body-vehicle-road coupled system

研究人体在各种振动系统中的主客观感受.获得广泛认可的是国际标准化组织颁布的标准 ISO5982-1981 提供人体动力模型,本文采用其提供的人体坐姿下的并联动力模型.车辆模型采用 7 自由度全车模型,将车身和车轮视作刚体,车身具有浮沉、点头和侧滚三个自由度,每个车轮具有一个浮沉自

由度;刚性路面采用 Kelvin 地基上的弹性梁进行模拟;车辆与路面之间通过非线性轮胎力耦合在一起.人车路振动模型及各符号意义参见图 1.

采用一致激励法输入地震动,根据 Lagrange 运动方程,竖向环境振动作用下人体-车辆振动方程写成矩阵形式为:

$$\begin{bmatrix} m_{pp} & 0 & 0 \\ 0 & m_{bb} & 0 \\ 0 & 0 & m_{ww} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{X}_p \\ \ddot{X}_b \\ \ddot{X}_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{pp} & c_{pb} & 0 \\ c_{bp} & c_{bb} & c_{bw} \\ 0 & c_{wb} & c_{ww} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X}_p \\ \dot{X}_b \\ \dot{X}_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{pp} & k_{pb} & 0 \\ k_{bp} & k_{bb} & k_{bw} \\ 0 & k_{wb} & k_{ww} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_p \\ X_b \\ X_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_p a_g \\ m_b a_g \\ F_w + m_w a_g \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: a_g 为竖向环境振动加速度; F_w 为作用在车轮上的荷载:

$$F_w = k_w(z_L + z_0) + c_w(\dot{z}_L + \dot{z}_0) \quad (2)$$

式中: z_0 为路面初始不平顺,可参考文献模拟^[10,11]; z_L 、 \dot{z}_L 分别为车轮与路面接触处路面的位移和速度,可用车辆所在路面梁单元的位移和速度向量来表示:

$$z_L = [N][u_L] \quad (3)$$

$$\dot{z}_L = v \frac{\partial N}{\partial x}[u_L] + [N][\dot{u}_L] \quad (4)$$

式中: $[u_L]$ 、 $[\dot{u}_L]$ 分别为车辆所在路面梁单元的位移和速度列向量; v 为车辆在路面上的运行速度; $[N]$ 为形函数,可采用三次插值函数.其余符号及各子矩阵参考文献[3].

1.2 车辆-路面系统振动方程

根据前面假设, Kelvin 地基上弹性梁在车辆荷载和竖向环境振动作用下的有限元振动方程为:

$$[M]_L \{\ddot{u}\} + [C]_L \{\dot{u}\} + ([K]_L + [K]_s) \{u\} = \{F\}_L + [M]_L \{a_g\} \quad (5)$$

式中: $[M]_L$ 、 $[C]_L$ 、 $[K]_L$ 、 $[K]_s$ 分别地基梁集成总质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵、弹性地基刚度矩阵;

$\{F_L\}$ 为车辆作用在路面上的荷载向量:

$$F_L = [N]^T [k_w(z_w - z_L - z_0) + c_w(\dot{z}_w - \dot{z}_L - \dot{z}_0)] \quad (6)$$

将式(1)与式(5)联合,即为竖向环境振动作用下考虑人体与车辆耦合作用的车辆与路面的耦合振动方程组.该方程组可采用 New - mark 积分法进行求解.

2 车辆乘坐舒适度的评价

为了分析竖向环境振动对车辆振动舒适性的影响,本文将对车辆乘坐者舒适感进行分析,称为乘坐舒适度评价.为了评价在频率为 1~80Hz 振动作用下的人体舒适度,国际标准组织发布了多个标准,如 ISO2631,本文采用其推荐的 1/3 倍频带法对人体乘坐舒适度进行评价^[12].

若人体的竖向加速度为 $\dot{z}_p(t)$,那么它的自相关函数可以表示为:

$$R_{zp}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \dot{z}_p(t) \dot{z}_p(t + \tau) dt \quad (7)$$

式中: T 为响应时程的长度; τ 为延迟时间.

人体的竖向加速度的功率谱密度函数可以通过自相关函数的傅里叶变换得到:

$$S_{zp}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_{zp}(\tau) e^{-i2\pi f\tau} d\tau \quad (8)$$

对应于频带中心频率 f_c 的 1/3 倍频带中心频率的垂直加速度均方根值为:

$$\dot{z}_{1/3-Rms} = \sqrt{\int_{f_1}^{f_2} S_{zp}(f) df} \quad (9)$$

式中: $f_1 = 2^{1/6} f_c$ 、 $f_2 = 2^{-1/6} f_c$ 分别为频带的低频和高频.

采用上述方法得到对应于中心频率的 1/3 倍频的加速度均方根,就可以评价车辆乘坐舒适性.

3 分析实例

一般来说,地震动的特性可以用振幅、频谱、持时、地震动的传播特性和地震波的空间相关性等指标来描述^[13].合理选择地震波来进行直接动力分析是保证计算结果可靠性的重要前提,由于缺少爆破地震波和列车振动波的实测资料,而本文的目的又只是定性分析地震波对人车路耦合系统的影响,故选择频谱比较丰富的 EI Centro 波南北向实际地震记录作为系统激励,其地震波及其频谱图如图 2 所示.车辆参数参考文献[14]取值,参考文献[1],路面宽度 6m,路面厚度 30cm,路面弹性模量 $E = 1.6 \times 10^9 \text{ N/m}^2$,路面密度 $\rho = 2.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,路基反

应模量 $k = 48 \times 10^6 \text{ N/m}^2$, 路基阻尼系数 $c = 3.0 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{s/m}$.

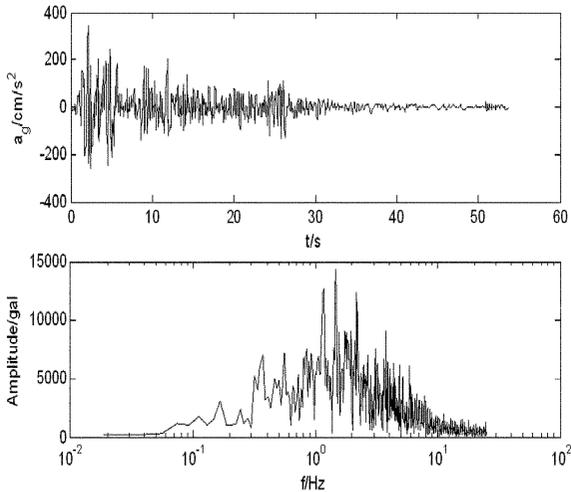


图2 EI Centro 波南北向加速度时程曲线及其频谱

Fig.2 North-south acceleration curve of EI Centro seismic wave and its spectrum

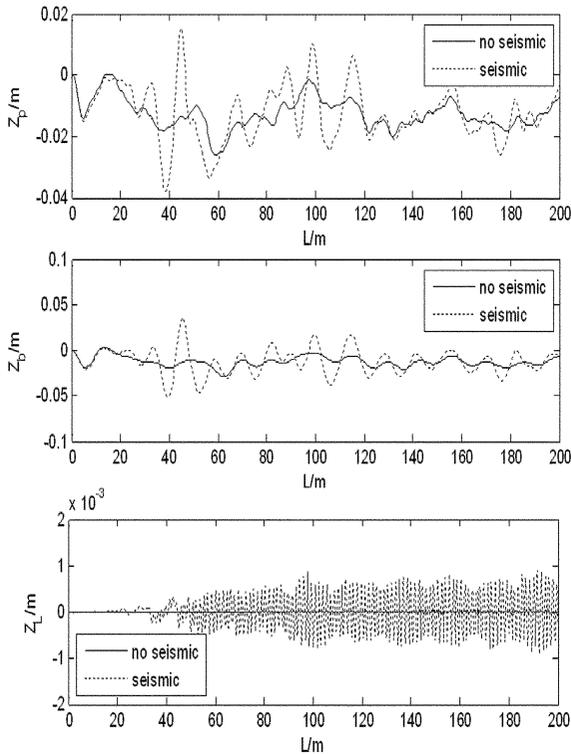


图3 A级不平整路面时系统振动位移时程曲线

Fig.3 Displacement-time curve of system on the roughness road surface

为了探讨竖向地震波对人车路系统振动的影响,用上述数值计算模型和分析理论,对车辆在长为200m的路段上以20m/s速度匀速行驶10s时,无地震波作用和在如图2所示的地震波作用下系统振动位移响应进行了对比,考虑到目前我国高速

公路都是新建的,路面初始不平顺按照A级不平度进行模拟,分析结果如图3所示,可以看出:

a)地震波加剧了人车路系统的耦合振动,地震波对人体、车辆以及路面的振动均有较大影响;在分析人车路系统的耦合振动尤其是对车辆乘坐舒适度进行评价时考虑周围地震波的影响是非常有必要的。

b)地震波作用下人体振动位移最大值约为37.9mm,而车辆竖向振动位移最大值约为51.3mm,两者相差35%,可见在分析竖向环境振动下车辆乘坐舒适度时,应该考虑人体与车辆的相互作用,采用车体振动情况来评价乘坐者的舒适度感觉是不合适的。

为了进一步分析车辆乘坐者出现不舒适感的主要反应,将对人体振动加速度的功率谱进行分析.图4为平整路面和A级不平整路面下人体振动加速度功率谱曲线。

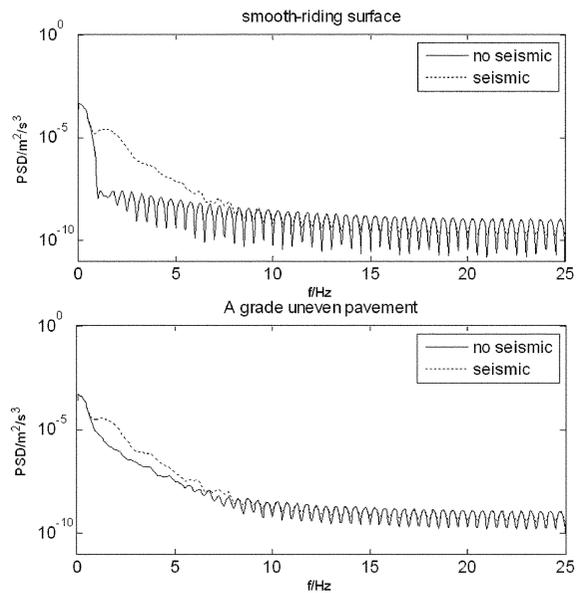


图4 人体振动加速度功率谱密度曲线

Fig.4 Acceleration PSD of human body

从图4中可以看出,竖向环境振动对车辆乘坐者人体振动加速度的特性影响不大,并且两种路面情况下人体振动的频率范围均在1~10Hz,而文献[9]表明人体是由各器官组成的有机体,不同的器官各有其共振频率,其中头部为1~20Hz,眼为20~25Hz,胸部内脏为4~6Hz,手臂为10~20Hz,肩部为2~8Hz,脊柱为3~12Hz,腹部为4~5Hz.据此可预测地震波作用下人体生理反应主要为:头晕、肩部、脊柱振感较强及胸口发闷等。

表 1 平整路面下地震波频率对系统振动的影响 (m/s^2)Table 1 the effect of seismic wave frequency on the system vibration under the smooth - riding surface (m/s^2)

Dominant frequency (time)		4	2	1	2/3	1/2
Body	Maximum	4.73	3.78	2.83	3.11	2.85
	Root mean square value	0.53	0.97	1.14	1.08	0.94
Vehicle	Maximum	3.37	4.17	4.02	4.66	4.05
	Root mean square value	0.47	0.91	1.81	2.10	1.64
Road	Maximum	5.22	3.83	2.73	2.76	2.78

表 2 A 级不平整路面下地震波频率对系统振动的影响 (m/s^2)Table 2 the effect of seismic wave frequency on the system vibration under A grade uneven pavement (m/s^2)

Dominant frequency (time)		4	2	1	2/3	1/2
Body	Maximum	4.79	3.97	3.34	2.92	3.00
	Root mean square value	0.66	1.29	1.43	1.19	1.11
Vehicle	Maximum	3.09	3.88	4.21	4.89	4.21
	Root mean square value	0.55	1.05	1.65	2.27	1.78
Road	Maximum	5.23	3.82	2.72	2.78	2.76

表 3 平整路面下地震波幅值对系统振动的影响 (m/s^2)Table 3 the effect of seismic wave amplitude on the system vibration under the smooth - riding surface (m/s^2)

Dominant frequency (time)		4	2	1	0.5	1/4
Body	Maximum	11.3	5.66	2.83	1.44	1.45
	Root mean square value	18.2	4.55	1.14	0.29	0.07
Vehicle	Maximum	16.2	8.09	4.02	1.99	0.97
	Root mean square value	29.2	7.28	1.81	0.46	0.12
Road	Maximum	10.9	5.46	2.73	1.36	0.68

表 4 A 级不平整路面下地震波幅值对系统振动的影响 (m/s^2)Table 4 the effect of seismic wave amplitude on the system vibration under A grade uneven pavement (m/s^2)

Dominant frequency (time)		4	2	1	0.5	1/4
Body	Maximum	11.7	6.14	3.34	2.89	2.90
	Root mean square value	18.8	4.97	1.43	0.51	0.27
Vehicle	Maximum	16.1	7.99	3.92	1.89	1.54
	Root mean square value	28.3	6.87	1.65	0.41	0.14
Road	Maximum	10.9	5.45	2.72	1.37	1.14

地震波频谱特性是影响人车路系统振动反应的一个主要因素,从以上分析可以看出,人体器官自振频率在 1 ~ 25 Hz;为了对频谱特性对系统的影响进行分析,本文选取 EI Centro 地震波,加速度峰值保持不变,对其进行傅立叶变换,改变其振动卓越频率分别为 0.25 倍、0.5 倍、1 倍、1.5 倍和 2 倍 EI Centro 地震波卓越频率,对平整路面和 A 级不平整路面下人车路系统振动加速度响应进行分析,

并对车辆乘坐舒适度进行比较,结果见表 1 和表 2.

可以看出,平整路面情况下,人体振动加速度最大值基本随着地震波频率的增大而增大,均方根值却随着地震波频率的增大先增大后减小;车辆振动加速度最大值及均方根值均随着地震波频率的增大先增大而后减小;路面振动加速度随着地震波频率的增大而减小. 不平整路面情况下系统振动变化情况基本类似. 因此,不同类型的环境振动对人车路系

统的振动和车辆乘坐舒适度的影响是不一样的,采用场地实测的地震波记录来分析系统的振动才是准确可靠的。

对人车路系统振动反应起控制作用的另一个主要影响因素为地震波强度. 为了对地震波强度对人车路系统的影响进行分析,将对 EI Centro 地震波幅值按 0.25 倍、0.5 倍、1 倍、2 倍和 4 倍换算后的平整路面和 A 级不平整路面下人车路系统振动加速度响应及车辆乘坐舒适度的变化情况进行分析,结果见表 3 和表 4.

可以看出,两种路面情况下,人体、车辆和路面振动加速度最大值及均方根值均随着地震波频率的增大而增大. 根据 ISO 5982 - 1981 标准, A 级不平整路面下,当地震波幅值超过 1/4 倍时车辆乘坐者人体会出现不舒适的感觉;平整路面下,当地震波幅值超过 1/2 倍时车辆乘坐者人体会出现不舒适的感觉. 对于在实际工程,控制环境地震波幅值临界值对控制车辆乘坐者人体生理反应有积极作用,因此可建立起地震波幅值与车辆乘坐舒适度之间的关系,这对控制爆破施工和工程设计有重要意义.

4 结论

(1)建立了竖向环境振动下人-车-路耦合振动运动方程,并对某小型汽车在记录地震波作用下的振动进行了分析;为分析地震波对人车路系统振动的影响提供了理论依据.

(2)在分析竖向环境振动下车辆乘坐舒适度时,应该将人体加入到车路耦合系统中,并考虑竖向地震波影响,采用车辆振动加速度来评价车辆乘坐舒适度是不合适的.

(3)地震波频率对系统振动响应影响规律较为复杂,车辆乘坐舒适度随着地震波频率的增大先增大后减小;不同类型的环境振动对人车路系统的振动和车辆乘坐舒适度的影响也是不一样的.

(4)随着地震波幅值的增大,系统振动响应会显著增大,车辆乘坐舒适度也会逐渐增大;可建立起地震波幅值与车辆乘坐舒适度之间的关系,这对控制爆破施工和工程设计有重要意义.

参 考 文 献

1 李韶华. 重载汽车一路面一路基耦合系统动力学研究. 北

- 京交通大学[博士学位论文],2008 (Li S H. Investigation on dynamics of heavy vehicle-pavement-foundation coupled system [Doctoral Dissertation]. Beijing Jiaotong University, 2008 (in Chinese))
- 2 张丙强,李亮. 车辆-路面耦合振动系统模型与仿真分析. 振动与冲击,2010,29(2):35~38 (Zhang B Q, Li L. Dynamic model and simulation of the vehicle-road coupled system. *Journal of Vibration and Shock*, 2010,29(2):35~38 (in Chinese))
- 3 张丙强,李亮. 人-车-路耦合系统振动分析及舒适度评价. 振动与冲击,2011,30(1):1~5 (Zhang B Q, Li L. Dynamic model and comfortableness evaluation of a Body-vehicle-road coupled system. *Journal of Vibration and Shock*, 2011,30(1):1~5 (in Chinese))
- 4 丁洁民,尹志刚. 地铁引起建筑物振动舒适度分析. 振动与冲击,2008,27(9):96~99 (Ding J M, Yin Z G. Serviceability analysis of Building Vibration Induced by Underground Trains. *Journal of Vibration and Shock*, 2008, 27(9):96~99 (in Chinese))
- 5 陈士海,魏海霞,张安康. 多维爆破地震作用下框架结构动态响应有限元时程分析. 振动与冲击,2010,29(9):134~137 (Chen S H, Wei H X, Zhang A K. Finite element time history analysis of dynamic response of frame structure under multi dimensional blasting vibration. *Journal of Vibration and Shock*, 2010,29(9):134~137 (in Chinese))
- 6 谭长建,祝兵. 地震作用下高速列车与桥梁耦合振动分析. 振动与冲击,2009,28(1):4~8 (Tan C J, Zhu B. Coupled vibration analysis of high speed train and bridge subjected to seismic excitation. *Journal of Vibration and Shock*, 2009,28(1):4~8 (in Chinese))
- 7 Xu Y L, Guo W H. Effects of bridge motion and crosswind on ride comfort of road vehicles. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2004,92:641~662
- 8 韩万水,陈艾荣. 风-汽车-桥梁系统空间耦合振动研究. 土木工程学报,2007,40(9):53~58 (Han W S, Chen A R. Three-dimensional coupling vibration of wind-vehicle-bridge systems. *China Civil Engineering Journal*, 2007,40(9):53~58 (in Chinese))
- 9 何浩祥,闫维明,张爱林等. 竖向环境振动下人与结构相互作用及舒适度研究. 振动工程学报,2008,21(5):446~451 (He H X, Yan W M, Zhang A L. Human-structure dynamic interaction and comfort evaluation in vertical ambient vibration. *Journal of Vibration Engineering*, 2008,21(5):446~451 (in Chinese))

- 10 张立军,张天侠. 车辆四轮相关时域随机输入通用模型的研究. 农业机械学报,2005,Vol. 36(12):29~33 (Zhang L J, Zhang T X. Study on general model of random inputs of the vehicle with four wheels correlated in time domain. *Journal of agricultural machinery*, 2005,36(12):29~33 (in Chinese))
- 11 Dodds C J, Roson J D. The description of road surface roughness. *Journal of Sound and Vibration*, 1973,31(2):175~183
- 12 韩万水,陈艾荣. 侧风与桥梁振动对车辆行驶舒适性影响研究. 土木工程学报,2008,41(4):55~60 (Han W S, Chen A R. Effects of crosswind and bridge motion on ride comfort of road vehicles. *China Civil Engineering Journal*, 2008,41(4):55~60 (in Chinese))
- 13 谢礼立,吕大刚. 结构动力学理论及其在工程中的应用. 高等教育出版社,2007:141~177 (Xie L L, Lu D G. Structural dynamics theory and its application in earthquake engineering. Higher education press, 2007:141~177 (in Chinese))
- 14 徐娟,谭继锦,陈无畏. 基于横向和垂向动力学的整车模型与仿真. 农业机械学报,2005,36(9):9~11 (Xu J, Tan J J, Chen W W. Modeling and simulation of integrated car system for its lateral and vertical dynamics. *Journal of agricultural machinery*, 2005,36(9):9~11 (in Chinese))

INFLUENCE OF VERTICAL AMBIENT VIBRATION ON THE BODY-VEHICLE-ROAD COUPLED VIBRATING SYSTEM

Zhang Bingqiang

(Civil Engineering College, Fujian University of Technology, Fuzhou 350108, China)

Abstract In order to study the effect of vertical ambient vibration on coupling vibration of body-vehicle-road system, the human body was simplified as the parallel dynamic model, the vehicle was simplified as the seven-freedom vibrating model, and the road was supposed as the Euler Beam on the Kelvin base. And then based on the interaction force between the road and the vehicle, the dynamic functions of the vehicle-road coupled system were derived. The functions were solved with the New-mark method. The riding comfort of the vehicle was appraised with the RMS of the body vibrating acceleration. The effects of the seismic wave frequency and its amplitude on the system vibration were analyzed, and the vibrating comfort of the vehicle and human physiological responses were discussed. The numeric analysis results indicate that the vertical ambient vibration aggravates the vibration of the body-vehicle-road coupled system, and also enlarges the value of the vibrating comfort of the vehicle; the seismic wave frequency and its amplitude have great effect on the vibrating comfort of the vehicle.

Key words body-vehicle-road coupled system, dynamic coupling equation, vertical ambient vibration, root-mean-square value, riding comfort