

车辆随机动载作用下路面动态响应研究*

刘大维 李国政 陈焕明 康忠亮 蒋荣超

(青岛大学机电工程学院, 青岛 266071)

【摘要】 为研究车辆随机动载对半刚性沥青路面性能的影响,利用 SIMPACK 软件建立了重型载货汽车整车行驶动力学模型,提取了各轴车轮轮胎法向作用力。在此基础上建立了半刚性沥青路面三维有限元分析模型,分析了车辆随机动载作用下路面的动态响应。结果表明,随机动载作用下路面应力变化与车辆轴数有关,当三轴车辆车轮依次通过路面某一确定位置时,路面各层应力出现 3 次突变,最大应力出现在中、后轴车轮通过时;在车辆行驶区域,路面各点的最大拉、压应力均随车辆行驶距离和轮胎法向作用力不同而随机变化,轮迹中心线路面各点的垂直应力、水平应力、横向应力和水平剪应力变化频率与中、后轴轮胎法向作用力的变化频率相似,横向剪应力的变化频率与前轮的轮胎法向作用力变化频率相似,而轮迹边缘路面各点横向剪应力变化频率与中、后轮的轮胎法向作用力变化频率相似。

关键词: 车辆 路面不平度 随机动载 半刚性沥青路面 动态响应

中图分类号: U416.223 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)02-0028-06

Dynamic Response of Pavement Based on Random Dynamic Load of Vehicle

Liu Dawei Li Guozheng Chen Huanming Kang Zhongliang Jiang Rongchao
(College of Mechanical and Electronic Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China)

Abstract

In order to study the influence of the random dynamic load of vehicles on the performance of half rigid asphalt road, the driving dynamic model of heavy truck was established by SIMPACK and each dynamic normal tyre force was extracted. A 3-D finite element analysis (FEA) model of half rigid asphalt road was established, and the dynamic responses of half rigid asphalt road under random dynamic load was analyzed. The results showed that the stress change of half rigid road was relative to the number of axles. When the wheels of a triaxial vehicle ran over the road in turn, the stress of each layer changed abruptly three times, and the maximal stress appeared when the middle axle and rear axle ran over. Within the vehicle driving region, the maximal press and tensile stress of each point on the pavement varied with the changes of driving distance and dynamic normal tyre force. The varied frequencies of the vertical stress, horizontal stress, transverse stress and horizontal shear stress of the points on the central line of the wheel track were similar to the varied frequency of the dynamic normal tyre force of middle and rear axles; and the varied frequency of transverse shearing stress were similar to the dynamic normal tyre force of front axle. However, the varied frequency of transverse shear stress of the points on the edge of wheel track was similar to the dynamic normal tyre force of middle and rear axles.

Key words Vehicle, Road roughness, Random dynamic load, Half rigid asphalt road, Dynamic response

引言

由路面不平度产生的车辆随机动载是造成路面

出现早期损坏、影响路面使用寿命和服务能力的关键因素之一。传统路面结构性能分析中,作用在路面上的车辆载荷都假设为静态和移动恒载^[1-6],或

收稿日期: 2010-01-15 修回日期: 2010-02-23

* 教育部重点实验室开放基金资助项目(KF01-K200702)和山东省自然科学基金资助项目(ZR2009FM044)

作者简介: 刘大维,教授,主要从事地面-车辆系统与控制技术研究,E-mail: ldw@qdu.edu.cn

将车辆动载简化为稳态简谐振动,以振动的幅值、频率及其周期性变化来描述动载的变化^[7-8]。实际上车辆作用在路面上的载荷是一种幅值和作用空间都随时间变化的动态载荷,当路面比较平整、车速较低及车辆振动较小时,可以用空间上变化、载荷大小恒定的移动载荷来描述车辆对路面作用的动态载荷;采用各种波形载荷加载,只能反映载荷大小的变化,而不能反映其运动特性。因此,采用移动恒载或简化的随机动载研究路面的动态响应,其周期变化、载荷大小、作用时间等都与实际情况不相符,无法模拟实际车辆动态载荷作用下路面的动态响应。采用多体动力学仿真软件建立车辆整车行驶动力学模型,可得到较为准确且接近实际的车辆作用于路面的随机动载^[9-11]。基于此,本文采用多体动力学仿真软件 SIMPACK 建立重型车辆整车行驶动力学模型,利用有限元分析软件 ANSYS 建立半刚性沥青路面三维有限元分析模型,研究车辆随机动载作用下路面的动态响应特性,为进一步深入分析路面的损伤机理、路面的结构设计提供参考依据。

1 整车行驶动力学模型的建立及随机动载提取

建立整车虚拟样机模型时,将轮胎、钢板弹簧视为柔体,其余构件视为刚体;橡胶垫块、限位块简化为具有非线性刚度和阻尼特性的力元,并通过曲线拟合方法将橡胶垫块、限位块的刚度和阻尼特性导入,模拟非线性元件的力学特性;忽略动力装置结构及其振动对整车性能的影响。建模时所用重型车辆为某公司生产的6×4轮系布置型式的载货汽车,其主要参数见表1所示。

表1 整车参数
Tab.1 Vehicle parameters

参数	数值
载质量/kg	13 805
整备质量/kg	10 990
满载总质量/kg	24 990
满载前轴荷/kN	59 050
满载中后轴荷/kN	190 850
车厢尺寸/mm×mm×mm	9 500×2 300×700
满载质心高度/mm	1 300
轴距/mm	5 865+1 350
前轮轮距/mm	1 914
后轮轮距/mm	1 847
前钢板弹簧刚度系数/N·mm ⁻¹	200
后钢板弹簧刚度系数/N·mm ⁻¹	2 200
轮胎型号	11.00R20

基于多体动力学仿真分析软件 SIMPACK,参考整车拓扑关系,按子结构建模技术建立包括车架、驾驶室、货箱、前桥、前钢板弹簧、中后桥、后桥、后钢板弹簧、转向系和轮胎在内13个子系统的整车虚拟样机模型。前、后钢板弹簧利用离散体概念,建立钢板弹簧柔体模型;轮胎模型采用的“魔术公式”是由 Pacejka 教授提出,以三角函数组合的形式来拟合轮胎试验数据,得出的一套形式相同并可同时表达纵向力、侧向力和回正力矩的轮胎模型。路面不平度是一种随机信号^[10-11],采用谐波叠加法建立B级随机路面。将建成的整车虚拟样机模型和随机路面模型集成,可得到整车行驶动力学模型^[12-13](图1)。

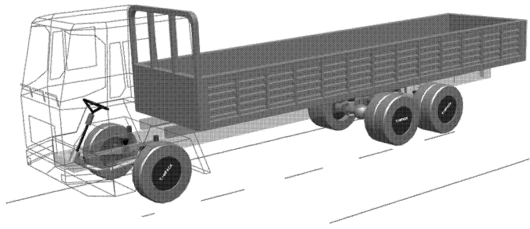


图1 整车行驶动力学模型
Fig.1 Vehicle driving dynamics model

通过仿真计算可得到重型车辆满载以60 km/h的车速行驶在B级路面上各轴车轮的轮胎法向作用力(为清晰可见,仅给出加载所用的40 m)(图2)。

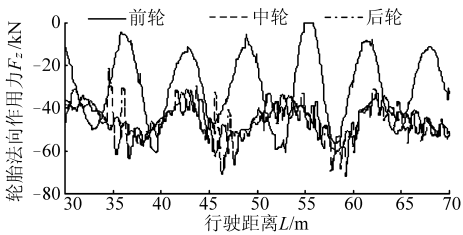


图2 轮胎法向作用力曲线
Fig.2 Vehicle dynamic normal tyre force curves

2 路面在车辆随机动载作用下的有限元分析模型

2.1 路面有限元动力学方程

根据弹性动力学理论建立路面在车辆随机动载作用下的有限元动力学方程为^[1]

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F$$

式中 M ——路面系统质量矩阵
 C ——路面系统阻尼矩阵
 K ——路面系统刚度矩阵
 u ——路面离散点位移矩阵
 F ——车辆随机动载矩阵

2.2 半刚性路面有限元分析模型

2.2.1 路面模型

在路面三维有限元分析中,可将半刚性沥青路面结构简化为沥青面层、半刚性基层、半刚性底基层和土基层。各层材料具有不同的属性,均采用线性弹性模型。路面模型参数如表 2 所示。弹性层状连续体系在水平和垂直方向上都是无限的,本文在计算中取路面模型的长、宽、高为 100 m、20 m、8 m,选用 ANSYS 有限元软件中的 Solid45 (3-D Structural Solid)8 节点实体单元进行网格划分。划分网格时,在车辆行驶区域网格划分较密,而将其他区域网格粗化。各层之间用 MERGE 方法连接到一起,以满足各层间接触面完全连续的假设。单元数目为 378 577 个,节点数目为 686 864 个,路面有限元模型如图 3 所示。

表 2 路面模型参数
Tab.2 Parameters of road model

层类型	层厚 δ/m	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	密度 ρ $/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	阻尼率 $/\%$
沥青面层	0.18	1 200	0.35	2 613	0.05
半刚性基层	0.20	1 100	0.35	2 083	0.05
半刚性底基层	0.20	400	0.40	1 932	0.05
土基层	7.42	50	0.40	1 926	0.05

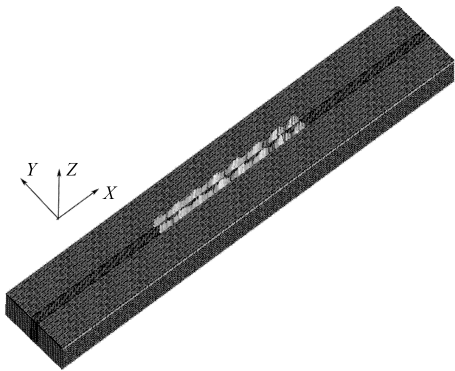


图 3 路面有限元模型及加载方式示意图
Fig.3 Road finite element model and loading mode

为模拟实际路面两侧周边土的压力,将土壤的粘弹塑性简化为弹簧-阻尼系统,用 ANSYS 有限元软件中的三维弹簧元来模拟。路面地基简化为粘弹性地基,用三维弹簧元来模拟。路面两端采用固定约束。

2.2.2 随机动载加载

我国现行的沥青路面设计规范中采用圆形均布载荷模式。实际上,轮胎与路面的接地印迹并不完全是圆形,而是更接近于矩形,并且载荷越大,矩形形状越明显^[14]。重型车辆的轴荷较大,因此将轮胎与路面接地印迹简化为矩形比圆形更符合实际。满

载时,前轴单轮轮胎与路面接触印迹简化为 0.21 m × 0.15 m 的矩形,当量轮胎接地面积为 0.031 5 m²;中轴和后轴双轮轮胎与路面的接触印迹均简化为 0.19 m × 0.27 m 的矩形,当量轮胎接地面积为 0.051 3 m²。

加载随机动载时,将 SIMPACK 软件输出的各轴车轮轮胎法向作用力数值读入定义好的数组中,利用 ANSYS 中的 APDL 语言编写加载程序以实现加载随机动载(见图 3)。其加载方法如下:

(1)将轮胎法向作用力数值按照 ANSYS 中规定的格式进行编辑,定义载荷数组,利用 ANSYS 中的 *VREAD 命令将数据读入到定义好的载荷数组中。

(2)确定各个车轮在路面有限元模型轮迹区域的加载位置,并根据所施加的载荷步数确定前、中、后各轴车轮的起始位置。

本文载荷步数为 150,加载时间间隔 0.12 s,相当于每载荷步车辆行驶 20 cm,车辆共行驶了 30 m,载荷作用区域为 37.2 m。

3 有限元计算结果与分析

图 4a、b、c、d、e 为车辆驶过路面某一确定位置时轮迹中心路面各层垂直应力、水平应力、横向应力、水平剪应力和横向剪应力时间历程曲线,图 4f 为轮迹边缘路面各层横向剪应力时间历程曲线。

由图 4 可以看出,三轴车辆随机动载作用下路面某一确定位置的各项应力均出现 3 个较大峰值,每个波形对应于三轴车轮作用该位置时的应力状态。因前轴轮胎法向作用力小于中、后轴轮胎法向作用力(图 2),故前轴轮胎作用点处各层垂直应力、水平应力和横向应力均小于中、后轴轮胎作用点处各层垂直应力、水平应力和横向应力(图 4a、b、c)。重型车辆的中、后桥为平衡悬架式驱动桥,中、后两轴轮胎法向作用力相差较小(图 2),轮胎作用点处各层的垂直应力、水平应力和横向应力也相差不大。后轴轮胎作用点处的水平剪应力小于前轴和中轴轮胎作用点处的水平剪应力,且中轴轮胎作用点处的水平剪应力最大(图 4d)。由于中轴与前轴轴距较大,而与后轴的轴距较小,中轴车轮驶过路面确定位置后的负水平剪应力未能完全恢复,与后轴车轮作用该位置时引起的正水平剪应力相互抵消一部分,使后轴轮胎作用点处的正水平剪应力减小。沿车辆行驶方向,轮迹左侧边缘主要承受正横向剪应力,轮迹右侧边缘主要承受负横向剪应力(图 4f)。由于轮迹左、右两侧的横向剪应力正好相反,在轮迹中心相互抵消,故轮迹中心各层的横向剪应力小于轮迹边

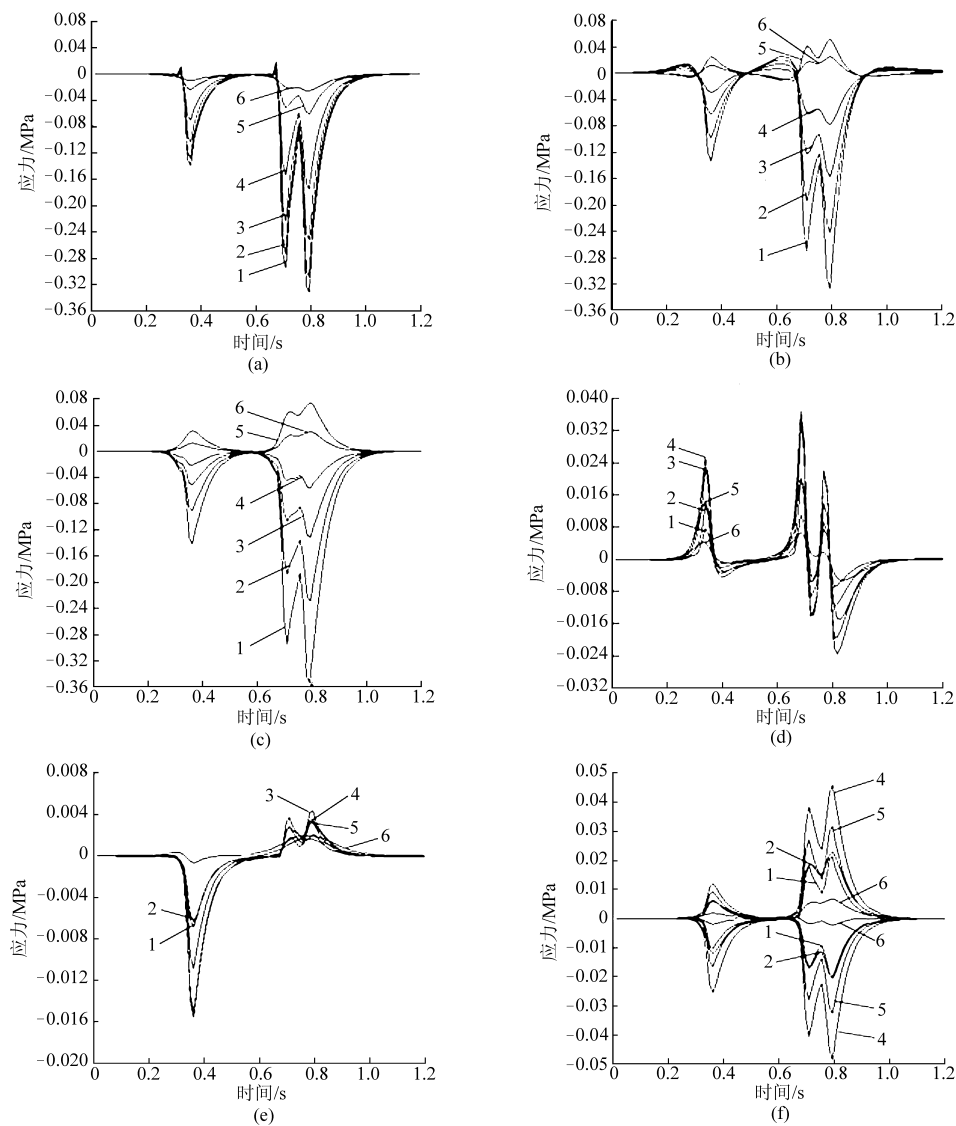


图 4 路面应力-时间历程曲线

Fig. 4 Stress - time history curves of pavement

(a) 垂直应力 (b) 水平应力 (c) 横向应力 (d) 水平剪应力 (e) 横向剪应力 (f) 横向剪应力(轮迹边缘两侧)

1. 沥青表面层顶部 2. 沥青表面层底部 3. 沥青中面层底部 4. 沥青底面层底部与半刚性基层结合处 5. 半刚性基层底部与半刚性底基层结合处 6. 半刚性底基层底部与土基层结合处

缘各层的横向剪应力(图 4e)。随机动载作用下路面各项应力对路面性能的影响与移动恒载相似^[6]。

图 5a、b、c、d、e 为车辆行驶区域轮迹中心线路面各点各层垂直应力、水平应力、横向应力、水平剪应力和横向剪应力最大值曲线,图 5f 为轮迹边缘路面各点各层横向剪应力最大值曲线。

由图 5a、b、c、d 可以看出,车辆行驶区域路面各点各层的垂直应力、水平应力、横向应力和水平剪应力大小随车辆行驶距离变化,其变化频率与中、后轮的轮胎法向作用力变化频率相似(见图 2)。由图 5e、f 可以看出,车辆行驶区域轮迹中心线路面各点各层横向剪应力大小随车辆行驶距离和轮胎法向

作用力而变化,其变化频率与前轮的轮胎法向作用力变化频率相似;而轮迹边缘路面各点各层横向剪应力变化频率与中、后轮的轮胎法向作用力变化频率相似。各层垂直应力主要是压应力,且沥青层顶部的压应力最大(图 5a)。沥青层顶部和沥青层底部承受水平压应力和横向压应力作用,且沥青层顶部的压应力最大;半刚性基层底部和半刚性底基层底部承受水平拉应力和横向拉应力作用(图 5b、c)。正向的水平剪应力大于负向水平剪应力,且沥青层底部的水平剪应力最大(图 5d)。负向的横向剪应力大于正向的横向剪应力,且沥青层底部的横向剪应力最大(图 5e)。轮迹边缘两侧的路面各层横向剪应力相差不大(图 5f)。

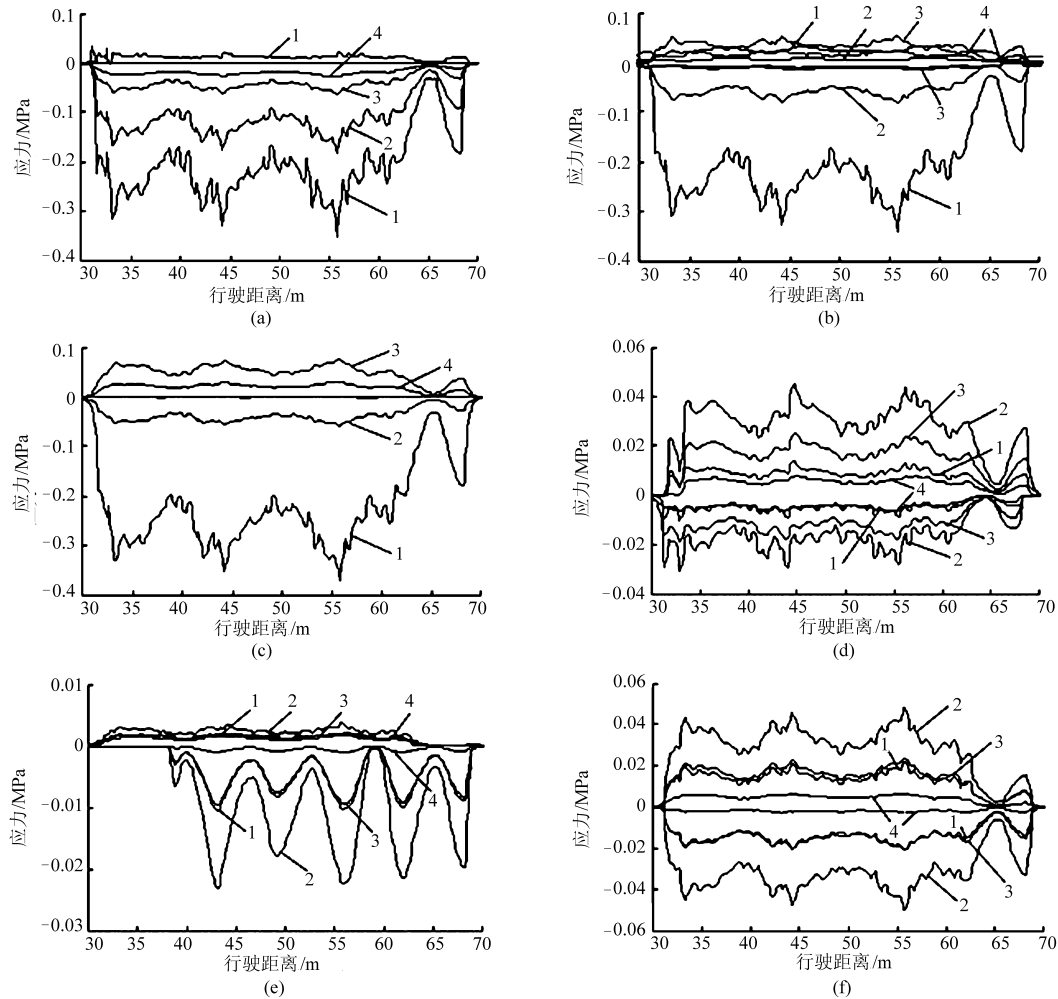


图5 路面各点最大应力曲线

Fig.5 Maximum stress of points on the pavement

(a) 垂直应力 (b) 水平应力 (c) 横向应力 (d) 水平剪应力 (e) 横向剪应力 (f) 横向剪应力(轮迹边缘两侧)
1. 沥青层顶部 2. 沥青层底部 3. 半刚性基层底部 4. 半刚性底基层底部

4 结束语

采用多体动力学仿真软件 SIMPACK 建立了6 × 4 重型载货汽车整车行驶动力学模型,提取了车辆

各轮胎作用于路面的法向随机动载。在此基础上采用有限元分析软件 ANSYS 建立了路面有限元分析模型,研究了车辆随机动载作用下路面的动态响应特性。

参 考 文 献

1 陈静,刘大维,霍伟,等.路面对于车辆动载响应研究[J].农业机械学报,2002,33(2):11~14.
Chen Jing, Liu Dawei, Huo Wei, et al. Response of pavement to vehicle dynamic load[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2002,33(2):11~14. (in Chinese)

2 刘大维,陈静,霍伟,等.车辆行驶速度对路面损伤的研究[J].农业机械学报,2003,34(1):11~13.
Liu Dawei, Chen Jing, Huo Wei, et al. Effect of vehicle speed on damage of pavement[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2003,34(1):11~13. (in Chinese)

3 Mostafa Y D, David P T, Andveas N, et al. Dynamic response of concrete pavements under vehicular loads[C]//Response to Tomorrow's Challenges in Structural Engineering-proceedings IABSE Symposium, Brisbane Australia: Queensland University of Technology, 2006: 104~105.

4 蒋建群,周华飞,张土乔.移动荷载下粘弹性地基上无限大板的稳态响应[J].中国公路学报,2006,19(1):6~11.
Jiang Jianqun, Zhou Huafei, Zhang Tuqiao. Steady state response of infinite plate on visco-elastic foundation subjected to moving load[J]. China Journal of Highway and Transport,2006,19(1):6~11. (in Chinese)

- 5 单景松,黄晓明,廖公云. 移动荷载下路面结构应力响应分析[J]. 公路交通科技,2007,24(1):10~13.
Shan Jingsong, Huang Xiaoming, Liao Gongyun. Dynamic response analysis of pavement structure under moving load[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2007,24(1):10~13. (in Chinese)
- 6 李国政,刘大维,陈焕明,等. 三轴移动载荷对半刚性路面性能影响分析[J]. 青岛大学学报:工程技术版,2009,24(3):88~94.
Li Guozheng, Liu Dawei, Chen Huanming, et al. Analysis of the performance of half rigid road under three-axle vehicle moving loads[J]. Journal of Qingdao University: Engineering & Technology Edition,2009,24(3):88~94. (in Chinese)
- 7 王暄. 随机载荷作用下柔性路面结构及路基动力响应研究[D]. 长沙:中南大学,2006.
Wang Xuan. Study on the dynamical response of flexible pavement foundations under random loads[D]. Changsha:Central South University,2006. (in Chinese)
- 8 张文斌,王祁,马松林,等. 刚性路面动态应变响应的变换域分析[J]. 交通运输工程学报,2007,7(4):48~53.
Zhang Wenbin, Wang Qi, Ma Songlin, et al. Transform domain analysis of rigid pavement dynamic strain response[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2007,7(4):48~53. (in Chinese)
- 9 任卫群,张云清,金国栋. 公路车辆对道路破坏性研究的系统化方法[J]. 中国公路学报,2005,18(4):110~114.
Ren Weiqun, Zhang Yunqing, Jin Guodong. Systematic research method for vehicle generated road damage[J]. China Journal of Highway and Transport,2005,18(4):110~114. (in Chinese)
- 10 彭佳,何杰,丛颖,等. 三维随机路面通用模型建立与仿真[J]. 农业机械学报,2009,40(3):1~4,25.
Peng Jia, He Jie, Cong Ying, et al. Modeling and simulation of general 3D virtual stochastic road model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009,40(3):1~4,25. (in Chinese)
- 11 陈杰平,陈无畏,祝辉,等. 基于 Matlab/Simulink 的随机路面建模与不平度仿真[J]. 农业机械学报,2010,41(3):11~15.
Chen Jieping, Chen Wuwei, Zhu Hui, et al. Modeling and simulation on stochastic road surface irregularity based on Matlab/Simulink[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(3):11~15. (in Chinese)
- 12 刘大维,刘伟,陈焕明,等. 基于多体模型的重型车辆对路面的动载特性研究[J]. 农业机械学报,2009,40(11):7~12.
Liu Dawei, Liu Wei, Chen Huanming, et al. Dynamic load characteristics of heavy vehicle based on multi-body dynamic model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009,40(11):7~12. (in Chinese)
- 13 刘大维,陈焕明,刘伟,等. 基于整车多体模型的重型车辆对路面的损伤评价[J]. 振动与冲击,2010,29(4):92~96.
Liu Dawei, Chen Huanming, Liu Wei, et al. Evaluation of road damage based on a full heavy vehicle multi-body dynamic model[J]. Journal of Vibration and Shock,2010,29(4):92~96. (in Chinese)
- 14 胡小弟,孙立军. 不同车型非均匀布轮载作用力对沥青路面结构应力影响的三维有限元分析[J]. 公路交通科技,2003,20(1):1~5.
Hu Xiaodi, Sun Lijun. The stress response analysis of asphalt pavement structure under non-uniform distributed tire pressure of different vehicles with 3D finite element method[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2003,20(1):1~5. (in Chinese)