

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.12.004

# 重型车辆三维随机路面道路友好性仿真<sup>\*</sup>

刘大维 蒋荣超 陈焕明 严天一

(青岛大学机电工程学院, 青岛 266071)

**【摘要】** 基于谐波叠加法和三角网格法的基本原理,建立了三维随机路面数学模型。将车辆轮胎和钢板弹簧视为柔体,橡胶垫块和限位块简化为具有非线性刚度和阻尼特性的力元,建立了刚柔耦合的重型车辆整车多体动力学模型。在 SIMPACK 软件中将整车虚拟样机和三维随机路面集成,建立了三维随机路面激励下重型车辆行驶动力学模型。利用动载荷系数、95 百分位四次幂和力两种道路友好性评价指标对不同行驶速度的重型车辆整车道路友好性进行分析。结果表明:车辆以 60~90 km/h 行驶在 B 级和 C 级三维随机路面时,随着车速的提高,中、后两轴车轮的道路友好性下降,前轴车轮的道路友好性并不随车速的增加而下降,在车速超过 80 km/h 后,道路友好性开始提高;整车随行驶速度的提高,道路友好性下降,B 级路面道路友好性下降幅度较小,C 级路面道路友好性下降幅度较大。

**关键词:** 重型车辆 三维随机路面 轮胎动载荷 道路友好性 仿真

**中图分类号:** U416.5<sup>+</sup>1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)12-0016-06

## Simulation of Road-friendliness of Heavy Vehicle on 3-D Random Road

Liu Dawei Jiang Rongchao Chen Huanming Yan Tianyi

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China)

### Abstract

A mathematical model of 3-D random road surface was established based on the basic principles of harmonic superposition and triangulated irregular network. A rigid flexible coupling multi-body dynamic model of a heavy truck was established by using SIMPACK software, which included front suspension, rear balance suspension, steering system, tire system, etc. The tires and leaf springs were treated as deformable body, and rubber pads and limit block were reduced to force elements with non-linear stiffness and damping characteristics. Then a ride dynamic model of heavy vehicle was established, which combined virtual prototype vehicle with 3-D random road surface model by using SIMPACK software. The dynamic load coefficient and 95 percentage fourth power aggregate forces were used as the road-friendliness criterions for analyzing the road-friendliness of heavy vehicles with different speed. Simulation results indicated that, when the vehicle drove on the B- and C-grade 3-D random road at the speed of 60~90 km/h, the road friendliness of mid-axle and rear-axle reduced as the vehicle speed increased. The road friendliness of front-axle didn't increase as the vehicle speed increased. When the vehicle speed surpassed 80 km/h, the road friendliness of front-axle began to decrease. The road friendliness of the vehicle reduced as the vehicle speed increased. The road friendliness of B-grade road reduced by a big margin, while the road friendliness of C-grade road reduced by a small margin.

**Key words** Heavy vehicle, 3-D random road surface, Tire dynamic load, Road-friendliness, Simulation

收稿日期: 2012-05-06 修回日期: 2012-05-17

<sup>\*</sup> 教育部留学回国人员科研启动基金资助项目(2006)、山东省自然科学基金资助项目(ZR2009FM044)和青岛大学优秀研究生学位论文培育项目(YSKY2011005)

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

## 引言

车辆道路友好性是指车辆在路面上行驶时, 轮胎载荷引起的路面损伤程度。损伤程度越大, 道路友好性越差。道路友好性评价指标有多种, 如动载荷系数、动载荷应力因子、95 百分位四次幂和力等<sup>[1]</sup>。采用这些评价指标时, 必须要准确获得轮胎载荷。多年来, 国内外已有许多学者对车辆道路友好性及轮胎载荷做了大量的工作<sup>[1-8]</sup>。但在上述研究中, 采用的是时域单边或双边路面不平度激励。实际上路面是三维路面, 路面长度方向和宽度方向均呈现出 不平度特征, 采用单边或双边路面不平度模拟是不完善的。特别是在时域状态, 随机生成的路面激励随车辆行驶速度发生变化, 会影响轮胎载荷计算、预测的效果<sup>[9-10]</sup>。为实现三维路面环境中的车辆动态性能研究, 许多学者对三维路面模型进行了研究, 并取得了一些成果<sup>[11-17]</sup>。本文针对机械系统动力学仿真分析软件 SIMPACK 自带的路面模型无法满足三维路面车辆动态仿真的需求, 创建适用于 SIMPACK 的三维随机路面模型, 并建立三维随机路面激励下重型车辆行驶动力学模型, 在三维空间域路面激励下研究车辆道路友好性。

## 1 谐波叠加法的三维随机路面建模

路面不平度激励为随机过程, 常用路面功率谱密度描述。模拟随机对路面的方法主要有谐波叠加法、白噪声法、基于离散时间序列的 AR/ARMA 法和基于 PSD 离散采样法等。谐波叠加法计算量相对较大, 但该法理论基础严密、数学意义明确, 是一种较好的随机路面模拟方法。因此, 本文采用幂函数路面功率谱密度的谐波叠加法。

幂函数路面功率谱密度拟合表达式为<sup>[18]</sup>

$$G_q(n) = G_q(n_0) \left( \frac{n}{n_0} \right)^{-W} \quad (1)$$

式中  $n$ ——空间频率,  $\text{m}^{-1}$

$W$ ——路面功率谱密度频率结构的频率指数

$n_0$ ——参考空间频率, 取  $0.1 \text{ m}^{-1}$

$G_q(n_0)$ ——参考空间频率  $n_0$  下路面功率谱密度, 又称路面不平度系数,  $\text{m}^2/\text{m}^{-1} = \text{m}^3$

对于路面功率谱密度  $G_q(n)$ , 在空间频率  $n_1 < n < n_2$  内根据式(1)利用平稳随机过程的频谱展开性质, 其方差为

$$\sigma_q^2 = \int_{n_1}^{n_2} G_q(n) \text{d}n \quad (2)$$

谐波叠加法是一种离散化数值模拟路面的方

法, 通过离散 Fourier 分析变换, 将路面不平度随机信号分解为一系列具有不同频率和幅值的正弦波, 谱密度就等于由带宽划分的这些正弦波幅值的平方。

将空间频率区间  $(n_1, n_2)$  划分为  $m$  个小区间, 取每个小区间的中心频率  $n_{\text{mid-}i}$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) 处的谱密度  $G_q(n_{\text{mid-}i})$  为  $G_q(n)$  在第  $i$  区间内的值, 则式(2)经离散化后近似写为

$$\sigma_q^2 = \sum_{i=1}^m G_q(n_{\text{mid-}i}) \Delta n_i \quad (3)$$

对应每个小区间, 具有频率  $n_{\text{mid-}i}$  且其标准差为  $\sqrt{G_q(n_{\text{mid-}i}) \Delta n_i}$  的正弦波函数为

$$q_i(x) = \sqrt{2G_q(n_{\text{mid-}i}) \Delta n_i} \sin(2\pi n_{\text{mid-}i} x + \theta_i) \quad (4)$$

式中  $x$ ——路面长度方向位置

$\theta_i$ —— $[0, 2\pi]$  上均匀分布的相互独立的随机变量

将  $m$  个小区间的正弦波函数叠加起来, 可得到路面长度方向的不平度

$$q(x) = \sum_{i=1}^m \sqrt{2G_q(n_{\text{mid-}i}) \Delta n_i} \sin(2\pi n_{\text{mid-}i} x + \theta_i) \quad (5)$$

假设路面不平度具有各向同性特征, 路面长度方向和宽度方向均具有随机、平稳和各态历经的特性<sup>[12-13]</sup>。因此可将式(5)得到的路面长度方向的不平度, 沿宽度方向随机分布, 即可得到三维空间路面的不平度

$$q(x, y) = \sum_{i=1}^n \sqrt{2G_q(n_{\text{mid-}i}) \Delta n_i} \sin(2\pi n_{\text{mid-}i} x + \theta_i(x, y)) \quad (6)$$

式中  $y$ ——路面宽度方向位置

$\theta_i(x, y)$ ——在路面上任意点  $(x, y)$  处属于  $[0, 2\pi]$  区间的随机数

由式(6)得到三维空间路面节点的坐标集合后, 可采用三角网格法构建三维虚拟空间路面。

三角网格法是通过 3 个节点连接形成的三角路面单元(ELEMENT), 并按要求连在一起组成路面轮廓。图 1 所示为由 6 个节点将 A、B、C、D 4 个三角单元连接成的一段路面, 箭头方向为三角单元的法线方向。由图 1 可知, 只需得知构成路面的节点坐标和构建路面三角网格时节点之间的连接关系, 就

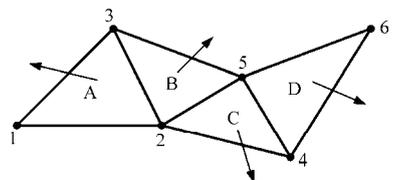


图 1 三角网格法建立的路面模型

Fig. 1 Road model built by triangulated irregular network

可以重构相应的路面信息文件。

按照上述原理,通过式(6)编写节点坐标矩阵,利用 Delaunay 规则编写单元矩阵<sup>[14]</sup>,采用 Matlab 软件编制路面模型文件生成程序,得到三维空间路

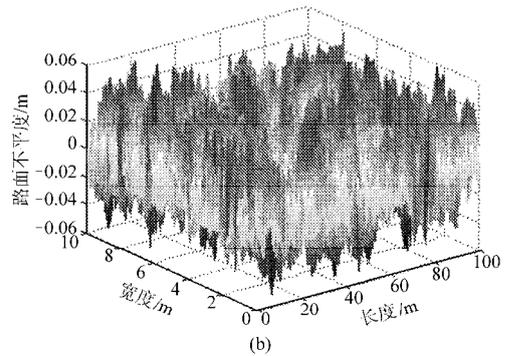
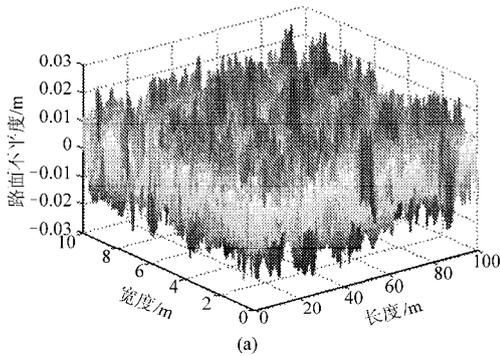


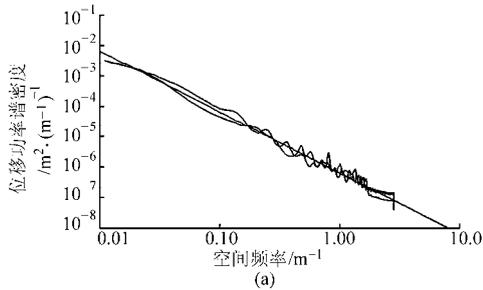
图2 三维随机路面

Fig.2 3-D random road surface

(a) B级路面 (b) C级路面

为验证谐波叠加法模拟的路面不平度的正确性,利用 Matlab 中的基于 AR 模型的功率谱密度估计函数 Pyulear 对创建的 B 级、C 级不平度路面进行了谱分析。谱分析得到的 B 级、C 级某两列纵向剖面路面功率谱密度曲线如图 3 所示。图中直线为 ISO/DIS8608 和国家标准 GB/T 7031—2005《车辆振动输入路面平度表示方法》中给定的路面不平度分级线<sup>[18]</sup>。

由图 3 可看出,B 级、C 级纵向剖面路面功率谱密度与 ISO/DIS8608 和国家标准 GB/T 7031—2005



《车辆振动输入路面平度表示方法》中给定的路面不平度分级线非常接近,表明利用谐波叠加法所建立的路面不平度是正确的。

图 4 为 B 级、C 级三维路面某两列纵向剖面路面不平度的相干函数曲线和双边路面不平度的相干函数曲线,双边路面不平度的相干函数曲线为 SIMPACK 软件提供的考虑双轮迹间相干特性的 B 级、C 级双边路面不平度相干函数曲线。

由图 4 可看出,三维路面某两列纵向剖面路面不平度的相干函数变化规律和考虑双轮迹间相干特

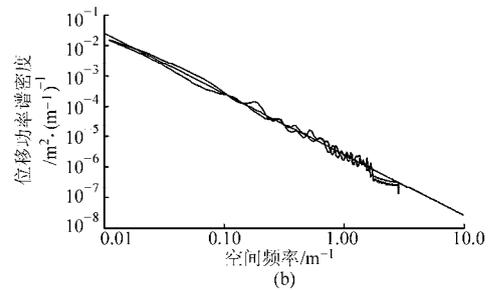


图3 三维路面某两列长度方向路面不平度功率谱密度

Fig.3 Power spectral density of 3-D road surface's two row longitudinal road surface roughness

(a) B级路面 (b) C级路面

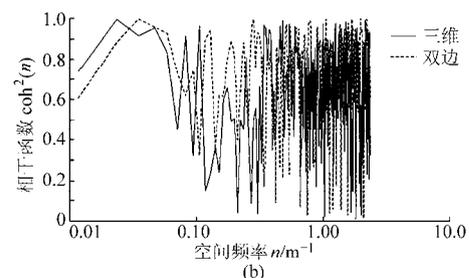
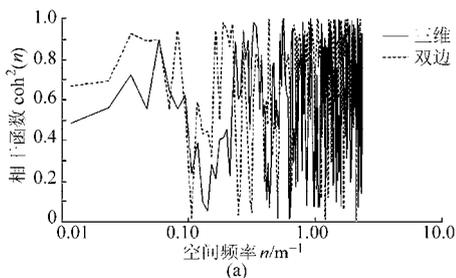


图4 三维路面不平度和双边路面不平度相干函数比较

Fig.4 Comparison of coherent function of 3-D road roughness with two wheels correlated road roughness

(a) B级路面 (b) C级路面

性的路面不平度相干函数变化规律基本相似,说明本文所建三维随机路面是正确的,符合路面实际状况的,可以用于车辆动态性能研究。

## 2 整车行驶系统动力学建模

建模时所用车辆为某公司生产的 6×4 重型自卸汽车,其主要参数见表 1 所示。

表 1 整车参数

Tab.1 Vehicle parameters

参数	数值
满载质量/kg	27 000
满载前轴荷/kN	70 000
满载中、后轴荷/kN	200 000
轴距/mm	3 825 + 1 360
前轮轮距/mm	2 220
后轮轮距/mm	1 830
前钢板弹簧刚度系数/ $N \cdot mm^{-1}$	200
后钢板弹簧刚度系数/ $N \cdot mm^{-1}$	2 200
轮胎型号	11.00 R20

在建立整车虚拟样机模型时,将轮胎和钢板弹簧视为柔体,其余构件均视为刚体;将橡胶垫块和限位块简化为具有非线性刚度和阻尼特性的力元,并通过曲线拟合的方法将橡胶垫块、限位块的刚度和阻尼特性导入 SIMPACK 中,模拟非线性元件的力学特性。钢板弹簧利用 SIMPACK 软件中的离散体概念,建立钢板弹簧柔体模型。轮胎模型采用 Pacejka 教授提出的“魔术公式”轮胎模型<sup>[19]</sup>。

将 Matlab 软件编制的三维随机路面谱文件导入 SIMPACK 软件中,在 SIMPACK 软件中创建三维随机路面模型。

在 SIMPACK 软件中,将建成的整车虚拟样机模

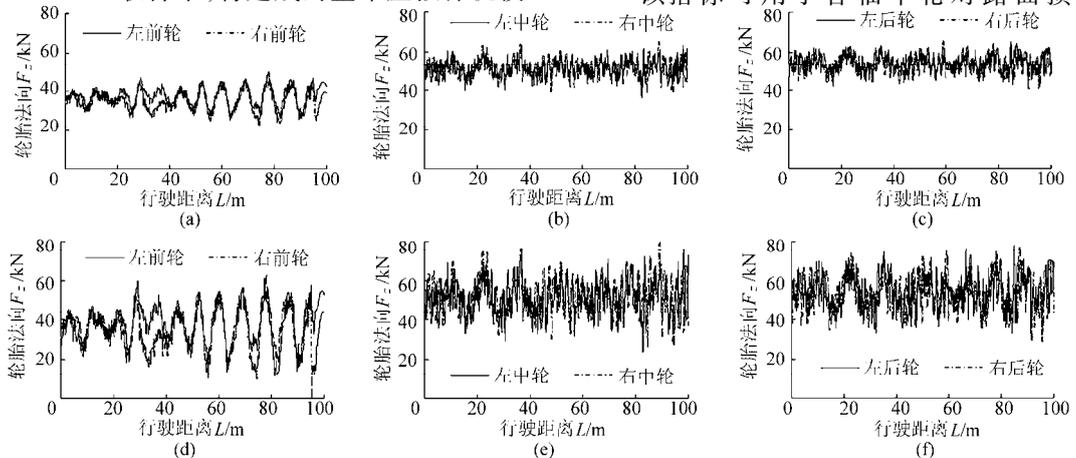


图 6 B、C 级路面各轴两侧轮胎的法向力

Fig.6 Tire normal force of vehicle on B- and C-grade road

(a) B 级前轴 (b) B 级中轴 (c) B 级后轴 (d) C 级前轴 (e) C 级中轴 (f) C 级后轴

型和三维路面模型集成创建整车行驶动力学模型,如图 5 所示。通过仿真计算可得到重型车辆在三维随机路面激励下,不同行驶速度时的各轴轮胎载荷。

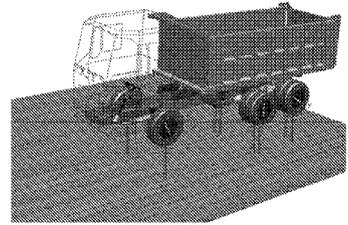


图 5 重型车辆行驶动力学模型

Fig.5 Ride dynamic multi-body model of heavy vehicle

## 3 仿真结果及分析

### 3.1 轮胎法向载荷

图 6、7 分别为车辆以 70 km/h 行驶在 B 级和 C 级三维随机路面时前、中、后轴轮胎法向载荷变化曲线和功率谱密度曲线。

由图 6、7 可看出,三维随机路面激励下,各轴左、右两侧轮胎法向载荷的数值和变化频率相差不大,主要由低频分量组成;前轴轮胎法向载荷频谱峰值只出现一个,而中、后轴轮胎法向载荷频谱峰值出现两个以上,前轴轮胎法向载荷频谱峰值大于中、后轴轮胎法向载荷频谱峰值。

### 3.2 车辆道路友好性评价

动载荷系数  $D$  作为道路友好性的评价指标,用于说明轮胎载荷对路面的损伤程度,即

$$D = \frac{1}{F} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (F_i - \bar{F})^2}{N - 1}} \times 100\% \quad (7)$$

式中  $F_i$ ——任一时刻的轮胎载荷

$\bar{F}$ ——轮胎载荷均值

该指标可用于各轴车轮对路面损伤的初步

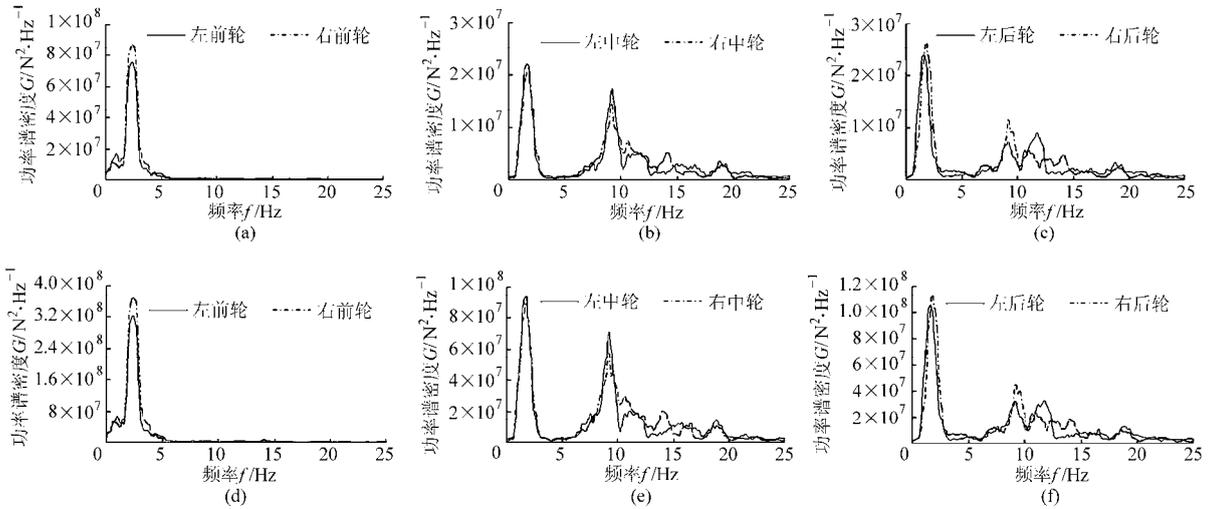


图7 B、C级路面各轴两侧轮胎法向力功率谱密度

Fig. 7 Tire normal force power spectral density of vehicle on grade B- and C-grade road

(a) B级前轴 (b) B级中轴 (c) B级后轴 (d) C级前轴 (e) C级中轴 (f) C级后轴

评价。

95百分位四次幂和力是 Cole 和 Cebon 在四次幂定律的基础上,基于轮胎动载荷的空间重复性,提出的评价方法<sup>[20]</sup>,用四次幂和力的峰值表示路面损伤的大小,提高了车辆对路面损伤的评价准确度。这种方法把车辆各个轮胎动载荷的四次幂叠加,可以用来评价整车的道路友好性。根据这种评价方法定义的路面损伤系数为

$$J \approx 1 + \frac{1.65\sigma_{A^4}}{m_{A^4}} \quad (8)$$

式中  $A^4$ ——车辆对路面的四次幂和力

$\sigma_{A^4}$ —— $A^4$ 的标准偏差

$m_{A^4}$ —— $A^4$ 的均值

图8和图9分别给出了B级和C级三维随机路面、行驶速度为60~90 km/h时,前、中、后车轴动载荷系数和动载荷标准差随行驶速度变化的曲线。

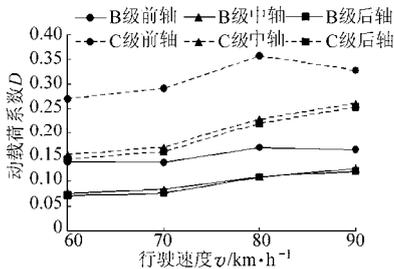


图8 不同行驶速度时动载荷系数

Fig. 8 Dynamic load coefficient changes with vehicle speed

由图8可看出,无论是B级路面还是C级路面,在三维空间域路面激励下的中、后轴车轮动载荷系数随行驶速度的提高基本均呈增加趋势,道路友好性下降;前轴车轮动载荷系数明显大于中、后轴车

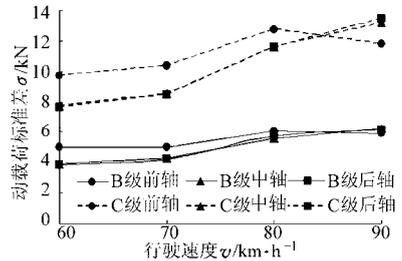


图9 不同行驶速度时动载荷标准差

Fig. 9 Dynamic load standard deviation changes with vehicle speed

轮动载荷系数,前轴道路友好性低于中、后轴道路友好性;前轴车轮动载荷系数并不随车速的增大而增大,在车速超过80 km/h后,车轮动载荷系数开始下降,车轮对路面的路面损伤程度开始减小;这是因为在车速超过80 km/h后,前轴轮胎动载荷标准差值减小的缘故(图9)。

图10给出了B级和C级三维随机路面、行驶速度为60~90 km/h时,整车路面损伤系数 $J$ 随行驶速度的变化曲线。

由图10可看出,无论是B级路面还是C级路面,在三维空间域路面激励下的整车路面损伤系数 $J$ 随行驶速度的提高呈增加趋势,道路友好性下降;B级路面道路友好性下降幅度较小,C级路面道路

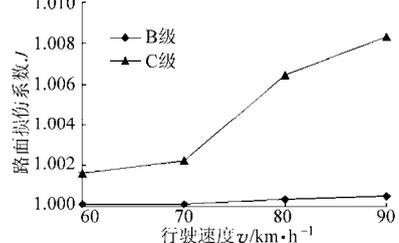


图10 不同行驶速度时路面损伤系数

Fig. 10 Pavement damage coefficient changes with vehicle speed

友好性下降幅度较大。

## 4 结论

(1) 采用谐波叠加法和三角网格法, 建立了三维随机路面模型, 对创建的 B 级、C 级不平度路面进行 AR 谱分析和相干分析表明, 所建三维随机路面是正确的, 符合路面实际状况的, 可以用于车辆动态性能研究。

(2) 利用 Matlab 软件编制了三维随机路面谱文件生成器, 并将三维随机路面谱文件集成到 SIMPACK 软件中, 扩展了该软件在车辆动态性能研

究中的应用。同时, 还可将三维随机路面谱文件用于其他软件进行车辆性能的分析 and 评价。

(3) 在 B 级和 C 级三维随机路面, 随着车速的提高, 中、后两轴车轮的道路友好性下降; 前轴车轮的道路友好性并不随车速的增大而下降, 在车速超过 80 km/h 后, 车轮对路面的路面损伤程度开始减小。

(4) 整车随行驶速度的提高, 重型车辆道路友好性下降, B 级路面道路友好性下降幅度较小, C 级路面道路友好性下降幅度较大。

## 参 考 文 献

- 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 full heavy vehicle multi-body dynamic model [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(4): 92 ~ 96. (in Chinese)
- 杨建伟, 李敏, 孙守光. 基于半主动自适应悬架系统的整车道路友好性研究[J]. 中国公路学报, 2011, 24(2): 120 ~ 126.  
Yang Jianwei, Li Min, Sun Shouguang. Study of full vehicle road-friendliness based on semi-active adaptive suspension system [J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(2): 120 ~ 126. (in Chinese)
- 魏建华, 杜恒, 方向, 等. 基于 ADAMS/ Simulink / AMESim 的油气悬架道路友好性分析[J]. 农业机械学报, 2010, 41(10): 11 ~ 17.  
Wei Jianhua, Du Heng, Fang Xiang, et al. Road-friendliness of interconnected hydro-pneumatic suspension based on ADAMS / Simulink / AMESim [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10): 11 ~ 17. (in Chinese)
- 曹源文, 梁乃兴, 于清, 等. 路面不平整引起的车辆动载计算方法[J]. 交通运输工程学报, 2008, 8(2): 69 ~ 73.  
Cao Yuanwen, Liang Naixing, Yu Qing, et al. Calculating method of vehicle dynamic load caused by uneven pavement [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008, 8(2): 69 ~ 73. (in Chinese)
- Kropác O, Múčka P. Effect of obstacles in the road profile on the dynamic response of a vehicle [J]. Proc. IMech. E., Part D: Journal of Automobile Engineering, 2008, 222(3): 353 ~ 370.
- 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)
- 何兆益, 刘炳森, 杜子学, 等. 重型车辆与路面耦合作用的仿真分析研究[J]. 公路交通科技, 2009, 26(3): 22 ~ 26.  
He Zhaoyi, Liu Bingsen, Du Zixue, et al. Analysis of coupling vibration caused by heavy-duty vehicles and road pavement [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26(3): 22 ~ 26. (in Chinese)
- 王登峰, 郝赫, 刘盛强, 等. 车架弹性对重型载货汽车行驶平顺性的影响[J]. 农业机械学报, 2010, 41(12): 7 ~ 12.  
Wang Dengfeng, Hao He, Liu Shengqiang, et al. Frame flexibility's effect on ride comfort of heavy-duty truck [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(12): 7 ~ 12. (in Chinese)
- 蒋荣超, 刘大维, 王松, 等. 时域和空间域路面激励下重型车辆动载荷仿真分析[J]. 公路交通科技, 2012, 29(5): 152 ~ 158.  
Jiang Rongchao, Liu Dawei, Wang Song, et al. Simulation analysis of heavy vehicle dynamic load under road excitation [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29(5): 152 ~ 158. (in Chinese)
- Shi X M, Cai C S. Simulation of dynamic effects of vehicles on pavement using a 3D interaction model [J]. Journal of Transportation Engineering, 2009, 135(10): 736 ~ 744.
- 张永林, 易启伟, 丁世云, 等. 三维随机路面时序臻模研究[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(8): 92 ~ 95.  
Zhang Yonglin, Yi Qiwei, Ding Shiyun, et al. Research on time series modeling method of 3D stochastic road [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 29(8): 92 ~ 95. (in Chinese)
- 徐延海. 随机路面谱的计算机模拟[J]. 农业机械学报, 2007, 38(1): 33 ~ 36, 29.  
Xu Yanhai. Computer simulation on stochastic road irregularities [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(1): 33 ~ 36, 29. (in Chinese)

- 3 Pacjka H B. The wheel shimmy phenomenon[D]. Netherland: Delft University of Technology, 1966.
- 4 钱珠声. 独立悬架汽车转向轮摆振的研究[D]. 北京: 清华大学, 1995.  
Qian Zhusheng. The study of steering wheel shimmy for vehicle with independent front suspension [D]. Beijing: Tsinghua University, 1995. (in Chinese)
- 5 王威, 宋玉玲, 李瑰贤. 独立悬架汽车转向系间隙与干摩擦对其 Hopf 分岔特性的影响[J]. 机械工程学报, 2011, 47(2): 130 ~ 135.  
Wang Wei, Song Yuling, Li Guixian. Influence of independent suspension automotive steering clearance and coulomb friction on Hopf bifurcation characteristic[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(2): 130 ~ 135. (in Chinese)
- 6 李胜. 分岔理论在汽车转向轮摆振机理及其控制策略研究中的应用[D]. 长春: 吉林大学, 2005: 10 ~ 37.  
Li Sheng. Study on mechanism and control strategies of vehicle steering wheel shimmy with bifurcation theories [D]. Changchun: Jilin University, 2005: 10 ~ 37. (in Chinese)
- 7 韩同群, 邹汉华. 越野汽车前轮摆振影响因素仿真[J]. 农业机械学报, 2007, 38(5): 27 ~ 31, 26.  
Han Tongqun, Zou Hanhua. Simulation of influence factors on front wheel shimmy of off-road vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(5): 27 ~ 31, 26. (in Chinese)
- 8 卢剑伟, 顾馼, 王其东. 含运动副间隙汽车摆振系统非线性动力学建模[J]. 农业机械学报, 2007, 38(12): 1 ~ 4, 10.  
Lu Jianwei, Gu Jue, Wang Qidong. Modeling on nonlinear dynamics of vehicle shimmy with clearance of movement pair[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(12): 1 ~ 4, 10. (in Chinese)
- 9 林逸, 贺丽娟. 汽车前轮摆振非线性研究综述[J]. 农业机械学报, 2007, 38(11): 174 ~ 177, 195.  
Lin Yi, He Lijuan. Overview of automobile front wheel shimmy in nonlinear field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(11): 174 ~ 177, 195. (in Chinese)
- 10 蒋良生, 魏道高. 前轮主销后倾角对汽车自激摆振影响研究[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2012, 35(1): 9 ~ 12, 61.  
Jiang Gensheng, Wei Daogao. Study of the effect of front wheel caster angle on self-excited shimmy of vehicle[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2012, 35(1): 9 ~ 12, 61. (in Chinese)
- 11 魏道高, 周孔亢, 刘广, 等. 厢式运输车前轮主销后倾角改进设计[J]. 农业机械学报, 2004, 35(4): 12 ~ 15.  
Wei Daogao, Zhou Kongkang, Liu Guang, et al. Improved design of castes on a vans[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(4): 12 ~ 15. (in Chinese)
- 12 Pacjka H B. Tyre and vehicle dynamics[M]. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002.

~~~~~

(上接第 21 页)

- 13 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)
- 14 程超, 王登峰, 李承德. ADAMS 中三维虚拟路面的实现[J]. 汽车工程, 2006, 28(2): 163 ~ 166.  
Cheng Chao, Wang Dengfeng, Li Chengde. Creation of 3-D virtual road with ADAMS[J]. Automotive Engineering, 2006, 28(2): 163 ~ 166. (in Chinese)
- 15 吴参, 王维锐, 陈颖, 等. 三维路面谱的仿真建模与验证[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2009, 43(10): 1 935 ~ 1 938.  
Wu Can, Wang Weirui, Chen Ying, et al. Simulation and validation of three dimensional road surface spectrum[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2009, 43(10): 1 935 ~ 1 938. (in Chinese)
- 16 侯永涛, 王国林, 刘建, 等. 汽车三维虚拟道路重构系统的设计与实现[J]. 机械工程学报, 2011, 47(8): 126 ~ 133.  
Hou Yongtao, Wang Guolin, Liu Jian, et al. Design and implementation of the 3D virtual road reconstruction system for vehicle [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(8): 126 ~ 133. (in Chinese)
- 17 王若平, 李成彬, 王国林, 等. 汽车仿真中三维路面模型生成系统开发[J]. 汽车工程, 2009, 31(11): 1 049 ~ 1 052.  
Wang Ruoping, Li Chengbin, Wang Guolin, et al. Development of 3-D road model generation system for vehicle simulation [J]. Automotive Engineering, 2009, 31(11): 1 049 ~ 1 052. (in Chinese)
- 18 余志生. 汽车理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- 19 喻凡, 林逸. 汽车系统动力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- 20 Cole D J. Truck suspension design to minimize road damage [J]. Proc. IMech. E., Part D: Journal of Automobile Engineering, 1996, 210(2): 95 ~ 107.