

车-路弱耦合振动作用下沥青路面动态响应*

严战友^{1,2}, 赵晓林², 赵国叶³, 赵国芳⁴, 赵存宝¹

(1. 石家庄铁道大学省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室 石家庄, 050043)

(2. 石家庄铁道大学土木工程学院 石家庄, 050043) (3. 爱尔康(中国)眼科产品有限公司 北京, 100020)

(4. 河北工业职业技术学院计算机技术系 石家庄, 050091)

摘要 为研究车-路弱耦合作用下沥青路面动态响应, 建立 13 自由度三维整车-橡胶轮胎-沥青路面弱耦合模型。考虑车体悬架、路面不平度及沥青混合料黏弹性, 采用中心差分法求解, 并与实际车-路弱耦合试验进行比较。结果表明: 纵向剪应变计算值与试验值最大误差为 5.74%, 说明本模型具有一定合理性; 轮胎与路面处于三向力接触状态, 车辆动载作用下三向接触力与悬架力均大于移动恒载; 上、中、下面层纵向最大压应力比移动恒载分别大 18.8%, 11.8% 和 7.4%, 竖向最大压应力比移动恒载分别大 18.9%, 19.8% 和 20.4%, 横向最大压应力比移动恒载分别大 10.2%, 4.69% 和 2.1%。

关键词 车辆模型; 橡胶轮胎; 路面模型; 耦合; 动态响应
中图分类号 TH17

引言

车辆行驶稳定性受到路面不平度、车辆速度、轴载及胎压等因素影响, 导致沥青路面各结构层应力复杂多变。针对车辆与路面接触力学行为, 国内外学者进行了大量研究工作。李倩等^[1]基于永久变形理论建立车辆-路面相互作用模型, 分析不平度对沥青路面应力影响。许海亮等^[2]按照线弹性理论建立车辆-路面耦合模型, 分析不同速度、不平度及车辆载重作用下路面各结构层应力响应。刘大维等^[3]利用多体动力学软件 SIMPACK 计算车辆与路面之间动态力, 将动态力导入沥青有限元模型, 研究车辆动态荷载与移动恒载作用下沥青路面各结构层最大响应。为研究温度及非均布荷载作用下沥青路面各结构层响应, 董泽蛟等^[4]采用 ANSYS 建立车辆模型与路面模型, 求解不同温度、不平度作用下的路面各层响应。McGovern 等^[5]为研究车辆荷载作用下路面各结构层疲劳寿命, 将 ADINA 与 ANSYS 相结合, 分析不同荷载作用下的路面使用寿命。Ziari 等^[6]建立二维 5 自由度车辆模型及沥青路面模型, 采用 Newmark- β 法求解路基不均匀沉降作用下的路面各结构层响应。Wu 等^[7]建立轮胎与路面耦合模型, 研究在不同荷载作用下路面各结构层应力和

位移的变化规律。综上所述, 大部分学者建立车辆-路面相互作用模型, 采用多体动力学软件或 Matlab 与有限元软件联合仿真求解, 而考虑橡胶轮胎非线性力学及轮胎与路面非线性接触非常少, 研究成果与实际车路相互作用具有一定差别。

笔者基于多体动力学理论, 考虑橡胶轮胎非线性变形, 构建 13 自由度三维整车-橡胶轮胎及黏弹性沥青路面弱耦合模型。设置路面不平度, 轮胎与路面采用面-面力学接触状态, 重点研究车辆动载与移动恒载作用下, 车体及沥青路面各结构层力学响应, 为车-路弱耦合分析提供参考。

1 整车模型构建

建立 13 自由度整车模型, 车体具有竖向位移 Y_w 、俯仰角 θ 及侧倾角 φ 3 个自由度, 每个车轮存在一个竖向自由度, 10 个车轮共有 10 个自由度 ($Y_{w1} \sim Y_{w10}$)。重载汽车三维视图如图 1 所示。

1.1 车辆简化

实际车辆结构非常复杂, 为了方便建模、提高计算效率并确保仿真结果的准确性, 将车辆模型适当简化。不考虑刚性车体之间的摩擦, 采用固定约束

* 国家自然科学基金资助项目(12072205); 河北省科技计划资助项目(15457605D, 144576106D); 河北省引进留学人员资助项目(C20190514)

收稿日期: 2019-09-09; 修回日期: 2019-11-25

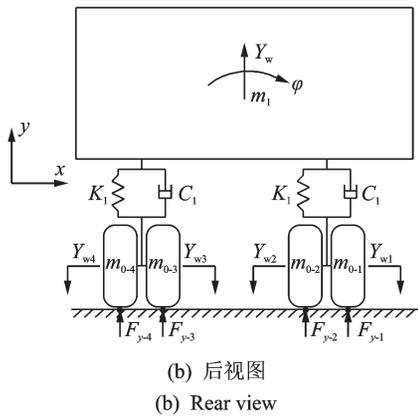
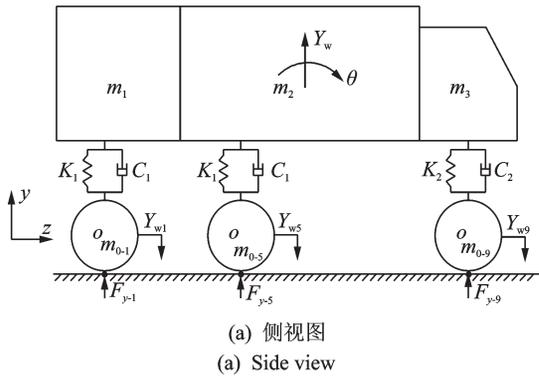


图1 重载汽车三维视图

Fig.1 Three views of heavy duty vehicle

控制车体相对自由度;采用多体连接器模拟车轴与橡胶轮胎之间的关系,赋予车轴合页连接属性,描述橡胶轮胎围绕车轴旋转。采用多体连接器模拟车辆悬架,赋予悬架笛卡尔坐标属性,描述弹簧刚度系数与阻尼系数。给予车体连接器水平速度模拟车辆前进;车辆匀速行驶,不考虑车辆制动与转向。

1.2 车辆连接器属性

车体悬架属性如表1所示。连接器属性如图2所示。

表1 车体悬架属性

Tab.1 The property of suspension

参数	数值
前悬架刚度 $K_2/(N \cdot mm^{-1})$	300
前悬架阻尼 $C_2/(N \cdot s \cdot mm^{-1})$	5
中、后悬架刚度 $K_1/(N \cdot mm^{-1})$	1 000
中、后悬架阻尼 $C_1/(N \cdot s \cdot mm^{-1})$	15

1.3 橡胶轮胎模型构建

1.3.1 建模原则

轮胎采用12.00R20型全钢载重子午线轮胎,轮胎各层结构利用Auto CAD绘制,导入有限元软件ABAQUS生成实体部件。为了提高计算效率并保

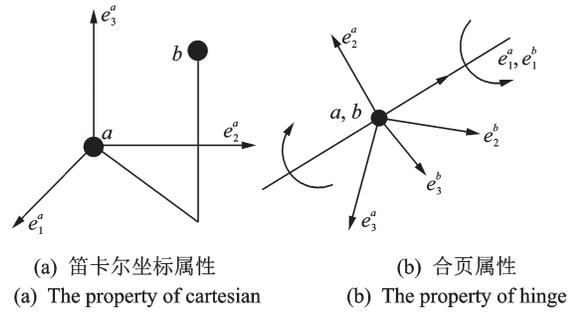


图2 连接器属性

Fig.2 The property of connector

证计算结果准确,依据参考文献将轮胎适当简化^[8-9],图3为轮胎三维有限模型。在ABAQUS软件中轮胎帘线采用Rebar单元嵌入橡胶基体。轮胎结构合并与简化如下:轮胎子口附着于轮辋,轮辋视为刚体,利用固定边界条件描述二者接触关系。忽略其他不同部位复合材料的差异以及轮胎花纹,不考虑轮胎发热。



图3 轮胎三维有限模型

Fig.3 The three-dimensional finite model of tire

1.3.2 橡胶材料本构关系

由于橡胶体属于超弹性材料,采用Mooney-Rivlin本构模拟橡胶体力学行为

$$U = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (\bar{I}_1 - 3)^i (\bar{I}_2 - 3)^j + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J_{el} - 1)^{2i} \quad (1)$$

其中: U 为应变势能; N 为多项式阶数; C_{ij} 为材料剪切特性参数; \bar{I}_1, \bar{I}_2 为材料扭曲度; J_{el} 为弹性体积比; D_i 为材料可压缩参数; $D_1=0$ 为不可压缩材料,可忽略式(1)的第2部分。

当 $N=1$ 时,材料初始剪切模量 μ_0 和体积模量 K_0 可表示为

$$\mu_0 = 2(C_{01} + C_{10}) \quad (2)$$

$$K_0 = \frac{2}{D_1} \quad (3)$$

则式(1)表示为

$$U = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + C_{01}(\bar{I}_2 - 3) + \frac{1}{D_1}(J_{el} - 1)^2 \quad (4)$$

橡胶材料与骨架材料参数^[10-11]如表2,3所示。橡胶材料网格划分采用C3D6H和C3D8H单元,轮胎骨架材料(带束层帘线、胎体帘线)采用SFM3D4R单元。橡胶轮胎网格划分如图4所示。

表2 橡胶材料参数

Tab.2 Mechanical parameters of rubber materials

种类	Mooney-Rivlin模型参数			
	$\rho/(\text{t}\cdot\text{mm}^{-3})$	C_{10}	C_{01}	D_1
胎面	1.112×10^{-9}	0.579 2	0.144 8	0.04
胎体	1.101×10^{-9}	0.615 9	0.154	0.03
带束层	1.144×10^{-9}	1.084 8	0.271 2	0.02

表3 骨架材料参数

Tab.3 Mechanical parameters of reinforcement materials

材料名称	$\rho/(\text{t}\cdot\text{mm}^{-3})$	E/MPa	μ
带束层帘线	7.804×10^{-9}	110 530	0.4
胎体帘线	1.251×10^{-9}	2 710	0.4

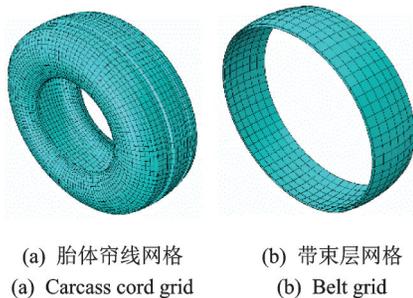


图4 轮胎网格划分
Fig.4 Tire meshing

1.3.3 轮胎模型验证

为验证轮胎模型可用性,轮胎模型顶部逐渐施加竖向荷载,观测轮胎径向变形量,并与经验公式^[12]进行比较。

$$\delta = c \frac{W^{0.85}}{B^{0.7} D^{0.43} p^{0.6}} (0.015B + 0.42) \quad (5)$$

其中: δ 为轮胎径向变形量(cm); c 为轮胎结构参数,子午线轮胎为1.5; B 为轮胎宽度, $B=30.48$ cm; D 为轮胎直径, $D=112.5$ cm; W 为轮胎载荷; p 为轮胎胎压。

轮胎荷载-径向变形曲线如图5所示。由图5可知,仿真结果与经验值最大误差为4.39%,两者误差很小,表明轮胎模型可用于车-路弱耦合计算。

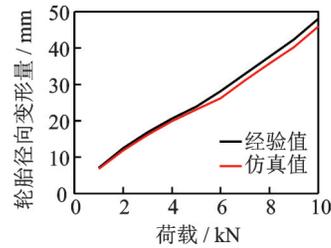


图5 轮胎荷载-径向变形曲线

Fig.5 Tireload-radial eformation curve

2 沥青路面模型构建

沥青路面模型结构尺寸为60 m×16 m×3.74 m,基层与土基等材料均采用线弹性本构关系,采用Pro-ny级数表示黏弹性材料对时间依赖性^[13]。路面结构参数如表4所示。沥青路面网格划分采用C3D8R单元,为计算精确,模型纵向与轮胎接触区域网格加密,最小网格为0.3 m,其余网格逐渐增加,最大网格为2.7 m。横向与轮胎接触区域最小网格为0.4 m,其余网格逐渐增加,最大网格为1.6 m。深度网格划分由上至下网格逐渐增加。网格划分如图6所示。

表4 路面结构参数

Tab.4 Pavement materials' parameters

路面结构	各层厚度/cm	动态弹性模量/MPa	泊松比	密度/ $(10^{-9} \text{ t}\cdot\text{mm}^{-3})$	阻尼系数
AC-13C	4	9 000	0.25	2.30	0.9
ARHM-20	6	10 000	0.25	2.30	0.9
ATB-25	10	8 000	0.25	2.40	0.9
基层	54	9 000	0.25	2.30	0.4
土基	300	60	0.40	1.85	0.4



图6 路面网格划分

Fig.6 Meshing of the pavement

3 车辆-路面弱耦合方程

通过有限元法将车辆-轮胎-路面模型离散化,则车辆-轮胎-路面弱耦合动力学方程为

$$\begin{cases} M_r \ddot{y} + C_r \dot{y} + K_r y = F_{vr} \\ M_v \ddot{z} + C_r \dot{z} + K_v z = F_{rv} + F_{vg} \end{cases} \quad (6)$$

其中: M, C, K 分别为质量、阻尼和刚度矩阵;下标

v, r 分别代表整车、沥青路面; y, z 分别为沥青路面、整车位移向量; F_{vr}, F_{rv} 分别为车-路之间的作用力; F_{vg} 为车辆重力^[14-15], 采用中心差分法进行求解。

4 路面不平度计算

应用《GB 7031-1987 车辆振动输入-路面不平度表示方法》功率谱 $G_q(n)$ 计算不平度^[16-17]为

$$G_q(n) = G_q(n_0) \left(\frac{n}{n_0} \right)^{-w} \quad (7)$$

其中: n 为空间频率; n_0 为参考空间频率, 取 0.1 m^{-1} ; w 为频率指数, $w=2$; $G_q(n_0)$ 为不平度系数。

采用随机相位余弦法描述不平度

$$r(z) = \sqrt{2G_d(n_{\text{mid}-i})\Delta n_i} \sin(2\pi n_{\text{mid}-i}z + \theta_i) \quad (8)$$

其中: $r(z)$ 为路面空间不平度; z 为路面长度; $n_{\text{mid}-i}$ 为区间中心频率; $G_d(n_{\text{mid}-i})$ 为功率谱密度函数; Δn_i 为频率变化量; θ_i 为在 $(0 \sim 2\pi)$ 相位角。

B级路面不平度如图7所示。

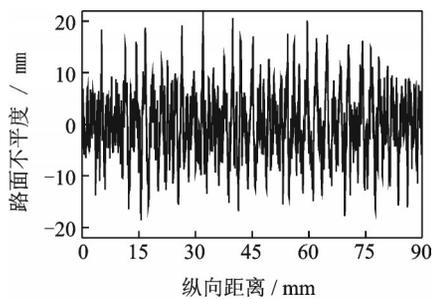


图7 B级路面不平度

Fig.7 Grade B pavement unevenness

5 车-路弱耦合模型验证

采用三轴红岩金刚载重汽车来验证车辆-路面弱耦合模型的准确性, 车辆参数如表5所示。车辆

表5 三轴红岩金刚载重汽车参数

Tab.5 Truck parameters of three-axis Hongyan Kingkan

参数	数值
总质量/t	42.34
实测前轴轴重/t	10.62
实测中、后轴轴重/t	31.72
车头(长×宽×高)/mm	1 275×2 450×1 700
车厢(长×宽×高)/mm	5 125×2 450×1 800
轴数	3
轴距/mm	3 850+1 350
轮胎数	10
前/后轮距/mm	2 050/1 900
轮胎型号	12.00R20

速度为 50 km/h , 沥青路面底部纵向剪应变的测量值与仿真值对比如图8所示。由图8可知, 最大拉应变误差为 5.74% , 最大压应变误差为 5.04% 。以上数据说明笔者所建立的车-路弱耦合模型具有一定可用性。

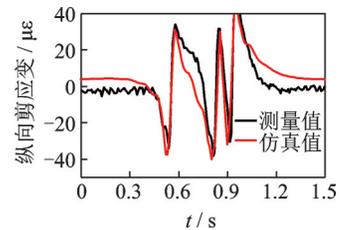


图8 沥青层底部纵向剪应变的测量值与仿真值对比

Fig.8 Longitudinal shearstrain at bottom of asphalt layer

6 动态响应分析

6.1 车辆响应分析

不同速度轮胎转动角速度变化如图9所示。由图9可知: 轮胎开始滚动时, 其角速度为0, 随着时间延续, 角速度呈线性增加, 最终稳定于某一定常数; 速度越大, 角速度越大, 需要达到稳定时间越长。

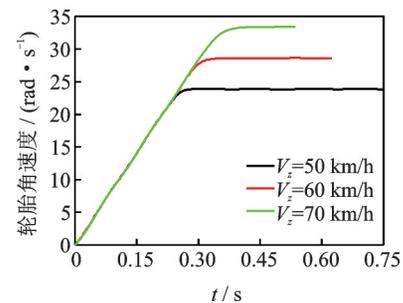


图9 轮胎角速度时程曲线

Fig.9 Time history curve of tire angular velocity

图10为轮胎与路面接触力时程曲线。由图10可知, 轮胎与路面处于纵向、垂向、横向三向力接触状态, 车辆动载作用下三向接触力均大于移动恒载。其中: 车辆动载纵向接触力大部分为负值, 移动恒载纵向接触力几乎为0; 车辆动载垂向接触力正负交替, 移动恒载垂向接触力几乎无变化; 横向接触力随机变化。图11为车体悬架力时程曲线。可见, 车辆动载作用下, 其后轴悬架弹力、阻尼力均大于移动恒载, 车辆动载悬架弹力与阻尼力围绕移动恒载上下震荡。

6.2 路面动态响应

沥青路面各层纵向、竖向及横向应力曲线如图

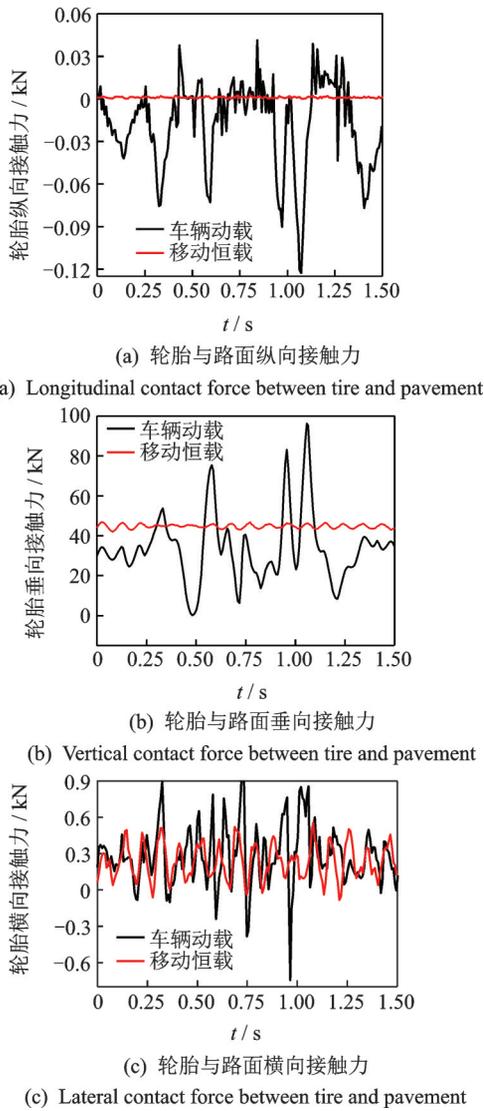


图 10 轮胎与路面接触力时程曲线

Fig.10 Time history curve of contact force between tire and pavement

12~14 所示,车辆速度为 50 km/h。表 6~8 分别为沥青路面各层最大纵向、竖向及横向压应力。

表 6 沥青路面各层最大纵向压应力

Tab.6 Maximum longitudinal compressive stress of asphalt pavement each layer

路面结构层	最大纵向压应力/MPa		误差/%
	移动恒载	车辆动载	
上面层	0.356	0.423	18.8
中面层	0.263	0.294	11.8
下面层	0.163	0.175	7.4

由图 12 可知:路面各结构层纵向主要承受压应力,开始与结束状态出现拉应力,拉应力数值远小于压应力;车辆动载作用下压应力大于移动恒载,前轮产生纵向压应力最小,后轮产生纵向压应力最大。

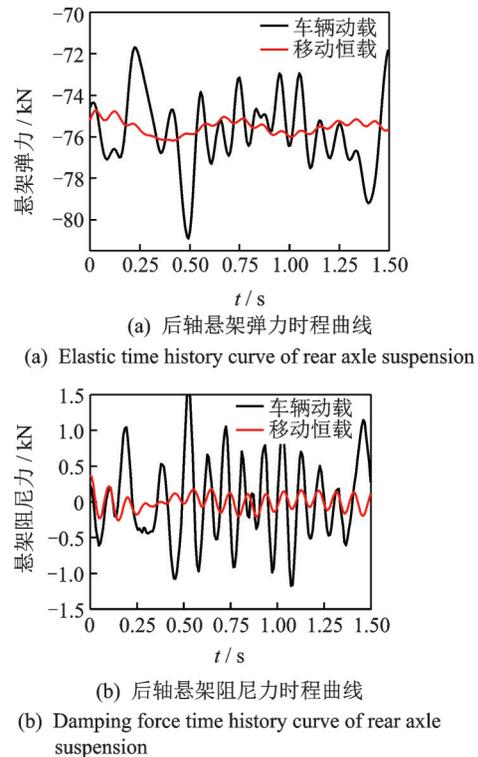


图 11 车体悬架力时程曲线

Fig.11 Suspension force time history curve of vehicle

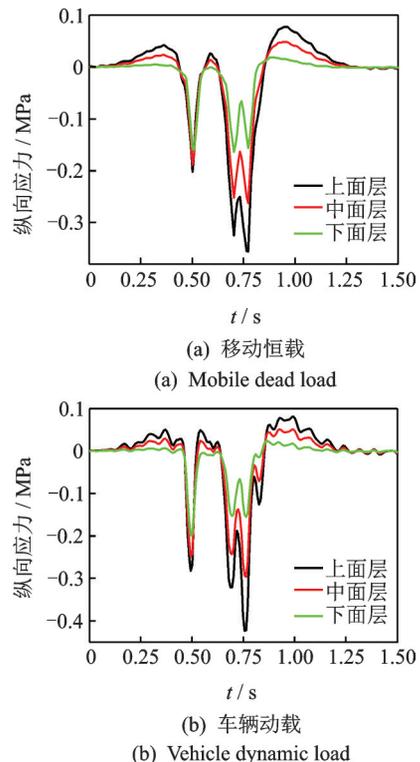


图 12 沥青路面各层纵向应力

Fig.12 Longitudinal stress of asphalt pavement each layer

由图 13 可知:车辆动载作用下,路面各结构层竖向应力大于移动恒载,上面层竖向应力最大,中面层次之,下面层最小;前轮产生竖向应力大于后

轮 23.3%~36.3%，中、后轮竖向动应力几乎相同。

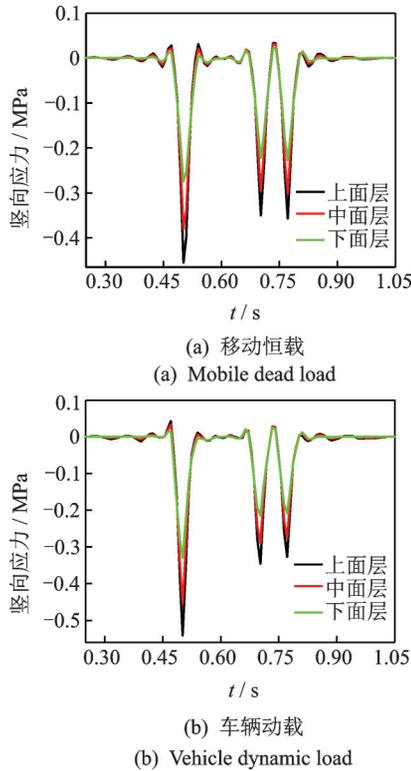


图 13 沥青路面各层竖向应力
Fig.13 Vertical stress of asphalt pavement each layer

表 7 沥青路面各层最大竖向压应力
Tab.7 Maximum vertical compressive stress of asphalt pavement each layer

路面结构层	最大竖向压应力/MPa		误差/%
	移动恒载	车辆动载	
上面层	0.455	0.541	18.9
中面层	0.380	0.453	19.2
下面层	0.275	0.331	20.4

表 8 沥青路面各层最大横向压应力
Tab.8 Maximum transverse compressive stress of asphalt pavement each layer

路面结构层	最大纵向压应力/MPa		误差/%
	移动恒载	车辆动载	
上面层	0.303	0.334	10.20
中面层	0.256	0.268	4.69
下面层	0.194	0.198	2.10

由图 14 可知:车辆动载作用下,路面各结构层横向应力大于移动恒载;前轮产生横向应力较小,中、后轮产生横向应力大于前轮,中、后轮横向应力几乎相同;车辆离开后,路面各结构层产生一部分横向拉应力,但数值远小于压应力。

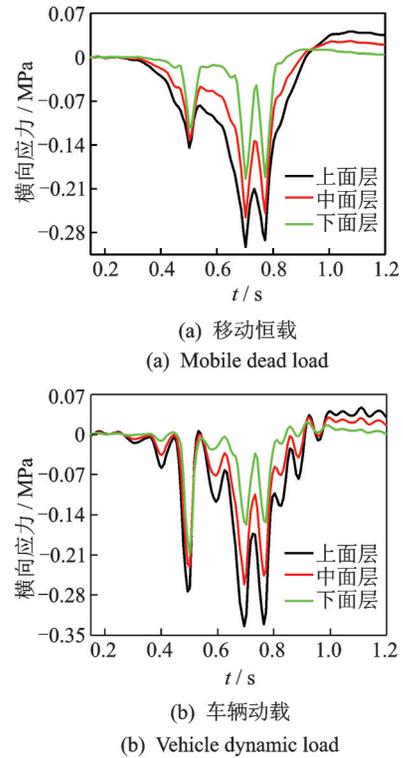


图 14 沥青路面各层横向应力
Fig.14 Transverse stress of asphalt pavement each layer

7 结 论

1) 通过与试验对比,沥青路面结构层纵向剪应变仿真值与试验值误差为 5.74%,说明三维整车-轮胎-路面弱耦合模型具有一定可用性。

2) 轮胎与路面处于垂向、纵向、横向三向力接触状态,车辆动载作用下三向力大于移动恒载,车辆动载三向力曲线围绕移动恒载上下震荡;车辆动载作用下车体悬架力、阻尼力均大于移动恒载。

3) 在车辆动荷载作用下,上、中、下面层最大纵向压应力比移动恒载分别大 18.8%,11.8%和 7.4%;上、中、下面层最大竖向压应力比移动恒载分别大 18.9%,19.8%和 20.4%;上、中、下面层产生最大横向压应力比移动恒载分别大 10.2%,4.69%和 2.1%。

参 考 文 献

[1] 李倩,刘俊卿.基于车路相互作用的沥青路面平整度劣化研究[J].振动与冲击,2018,37(6):77-81.
LI Qian, LIU Junqing. Asphalt pavement evenness deterioration analysis based on the vehicle-pavement interaction [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(6): 77-81. (in Chinese)

[2] 许海亮,何兆才,何炼.车路耦合条件下沥青混凝土路面变形特性时域分析[J].公路交通科技,2017,34(12):16-22.

- XU Hailiang, HE Zhao cai, HE Lian. Analysis on asphalt concrete pavement deformation characteristics time-domain considering vehicle-pavement coupling effect [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2017, 34(12):16-22. (in Chinese)
- [3] 刘大维,戴宗宏,陈洋,等.车辆多轮动载作用下柔性路面动应力响应[J].*中国公路学报*,2017,30(11):36-44.
- LIU Dawei, DAI Zonghong, CHEN Yang, et al. Dynamic stress response of flexible pavement under multiple wheel dynamic loads of vehicle[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2017, 30(11): 36-44. (in Chinese)
- [4] 董泽蛟,潘小康,邵显智,等.温度场及非均布移动恒载作用下沥青路面力学响应分析[J].*同济大学学报(自然科学版)*,2016,44(5):740-746.
- DONG Zejiao, PAN Xiaokang, SHAO Xianzhi, et al. Dynamic response analysis of asphalt pavement due to combined non-uniform moving load and temperature distribution[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2016, 44(5):740-746. (in Chinese)
- [5] MCGOVERN M E, BUTTLAR W, REIS H. Evaluation and life extension of asphalt pavements using rejuvenators and noncollinear ultrasonic wave mixing: a review [J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2018, 1(1): 011002.
- [6] ZIARI H, ALIHA M R M, MONIRI A, et al. Crack resistance of hot mix asphalt containing different percentages of reclaimed asphalt pavement and glass fiber[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 230: 1-10.
- [7] WU S H, MUHUNTHAN B. A mechanistic-empirical model for predicting top-down fatigue cracking in an asphalt pavement overlay [J]. *Road Materials and Pavement Design*, 2019, 20:1322-1353.
- [8] 刘修宇,曹青青,朱晟泽,等.沥青混凝土路面轮胎临界滑水速度数值模拟[J].*东南大学学报(自然科学版)*,2017,47(5):1020-1025.
- LIU Xiuyu, CAO Qingqing, ZHU Shengze, et al. Numerical simulation of tire critical hydroplaning speed on asphalt pavement [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2017, 47(5): 1020-1025. (in Chinese)
- [9] 朱晟泽,黄晓明.横向刻槽混凝土路面轮胎滑水速度数值模拟研究[J].*东南大学学报(自然科学版)*,2016,46(6):1296-1300.
- ZHU Shengze, HUANG Xiaoming. Numerical simulation of tire hydroplaning speed on transverse grooved concrete pavements[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2016, 46(6): 1296-1300. (in Chinese)
- [10] 王扬.复杂轮胎力作用下沥青路面力学行为研究[D].北京:北京交通大学,2017.
- [11] 冯希金.卡车子午线轮胎振动噪声仿真技术研究[D].北京:清华大学,2015.
- [12] 庄继德.汽车轮胎学[M].北京:北京理工大学出版社,1995:127.
- [13] 严明星,王金昌.ABAQUS有限元在路面结构分析中的应用[M].杭州:浙江大学出版社,2016:181-187.
- [14] 董城,周轮,陈丽萍,等.基于不同行驶状态下轮胎-路面接触应力响应研究[J].*公路工程*,2018,43(6):147-150.
- DONG Cheng, ZHOU Lun, CHEN Liping, et al. Study on the stress response of tire-pavement based on different driving conditions [J]. *Highway Engineering*, 2018, 43(6): 147-150. (in Chinese)
- [15] 沈宇鹏,魏庆朝,韩浩,等.不平整条件下过渡段车辆运行平稳性[J].*振动、测试与诊断*,2018,38(4):793-876.
- SHEN Yupeng, WEI Qingchao, HAN Hao, et al. Vehicle smoothness through highway bridge approach under condition of pavement roughness [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2018, 38(4): 793-876. (in Chinese)
- [16] 陈水生,付仵,桂水荣.富山赣江特大桥车桥耦合振动响应及冲击系数研究[J].*华东交通大学学报*,2018,35(5):27-34.
- CHEN Shuisheng, FU Le, GUI Shuirong. Study on vehicle-bridge coupled vibration response and impact coefficient for the Ganjiang bridge in Fushan [J]. *Journal of East China Jiaotong University*, 2018, 35(5):27-34. (in Chinese)
- [17] 邓露,何维,俞扬,等.公路车-桥耦合振动的理论和应用研究进展[J].*中国公路学报*,2018,31(7):38-53.
- DENG Lu, HE Wei, YU Yang, et al. Research progress in theory and application of highway vehicle-bridge coupling vibration [J]. *China Journal Highway Transport*, 2018, 31(7): 38-53. (in Chinese)



第一作者简介:严战友,男,1972年2月生,博士、副教授、硕士生导师。主要研究方向为车路桥动力学耦合。曾发表《Research on mesoscopic response of asphalt pavement structure under vibration load》(《Shock and Vibration》2019, Vol. 2019, No.1)等论文。
E-mail: yanzhanyou@163.com

通信作者简介:赵国芳,女,1974年6月生,副教授。主要研究方向为路面复杂非线性动力学。
E-mail: 921895690@qq.com