

文章编号:1001-7372(2015)04-0001-12

重载汽车-路面-路基垂向耦合动力学模型

张 锋^{1,2}, 冯德成¹, 凌贤长², 李琼林²

(1. 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090;

2. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要:为了研究路面不平度激励下移动重载汽车、路面结构和路基的动力相互作用,将重载汽车简化为由弹簧和阻尼器并联的匀速移动多自由度刚体模型,面层简化为离散基层块体支撑的带内部阻尼连续薄板模型,基层简化为支撑于粘弹性路基上的离散块体模型,并采用 Wilson- θ 法对建立的重载汽车-路面-路基垂向耦合动力学模型求解,同时验证模型的可靠性。研究结果表明:移动重载汽车产生的动力效应显著,五轴汽车产生的轮胎接地力和路面动位移最大,随着后轴轴重的增加,轮胎接地力和路面位移呈线性增加;随着行车速度增加,轮胎接地力峰值和路面动位移峰值增加,但路面动位移均值变化较小;路面不平度等级由 A 级降为 D 级时,轮胎接地力放大倍数增大了 1 倍多,且路面动位移峰值增幅达 72%;路基刚度对轮胎接地力影响较小,但路面位移的影响则较为显著。

关键词:道路工程;重载汽车-路面-路基;数值模拟;耦合动力学模型;垂向振动

中图分类号:U416.01

文献标志码:A

Vertical Coupling Dynamics Model of Heavy Truck-pavement-subgrade

ZHANG Feng^{1,2}, FENG De-cheng¹, LING Xian-zhang², LI Qiong-lin²

(1. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090,

Heilongjiang, China; 2. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology,

Harbin 150090, Heilongjiang, China)

Abstract: In order to investigate the dynamic interaction of heavy truck, pavement and subgrade induced by road roughness, a heavy truck-pavement-subgrade vertical coupling dynamics model was formulated. In this model, the heavy truck was modeled as a multi-degrees of freedom rigid body in uniform motion, which was connected by a series of springs and damping devices. The surface layer was modeled as a continuous thin plate with inner damping supported by discrete base block. The base layer was modeled as several discrete bodies supported by the viscoelastic subgrade. Then Wilson- θ method was used to solve the coupling dynamics model and to verify the reliability of the model. The results show that the dynamic effects of the moving heavy truck are remarkable. The tire force and dynamic displacement of pavement induced by 5-axial heavy truck are greater than other axis types, which display an linear increase with the increase of rear axis loads. The peaks of tire force and dynamic displacement of pavement increase with the increase of moving speed, but the average of dynamic displacement of pavement changes a little. When the

收稿日期:2014-06-02

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)项目(2012CB026104);国家自然科学基金项目(51408163);

“十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAG05B07);黑龙江省自然科学基金重点项目(ZD201218);

中国博士后科学基金项目(2012M520751);中央高校基本科研业务费专项资金项目(HIT. NSRIF. 2014078)

作者简介:张 锋(1981-),男,陕西蒲城人,讲师,工学博士,E-mail:zhangf@hit.edu.cn.

grade of road roughness descends from grade A to grade D, tire force amplification increases more than one time, and the peak of pavement displacement increases by 72%. Subgrade stiffness show a little effect on tire force, but a great effect on dynamic displacement of pavement.

Key words: road engineering; heavy truck-pavement-subgrade; numerical simulation; coupling dynamics model; vertical vibration

0 引言

中国道路交通量日益增大,重型货运汽车数量急剧增多、载重量加大,致使公路长期处于超负荷运营状态。称重调查结果发现^[1],干线公路上运行的汽车超载现象十分严重,单轴超过 10 t 轴重限制的比例为 35.64%,最高的轴重达到 17 t;双联轴超过 18 t 轴重限制的比例为 49.51%,最高轴重达到 30 t,这已远大于中国公路设计的荷载限值。而且,随着运输的集装箱化,重型、特重型货运汽车的行驶振动使得路基、路面动力学与振动问题日益突出,加剧了路面的车辙、开裂、推挤、断裂以及路基沉陷、翻浆等病害。因此,有必要针对移动重载汽车、路面和路基之间的耦合振动问题进行深入研究。

国外学者关于汽车与道路耦合振动方面的研究开展较早:Cebon 等^[2-3]将汽车简化为刚体质量-弹簧-阻尼体系,合理考虑了车轮悬挂方式并建立了重型汽车整车模型,以计算得到的轮胎接地荷载为输入,研究了路面的疲劳性能;Hardy 等^[4]将路面简化为粘弹性地基支撑的梁模型,研究了四分之一汽车模型在路面高差激励下的路面位移冲击响应;Wu 等^[5]将汽车模拟为带有弹簧和阻尼器悬挂系统支撑的集中质量,混凝土路面被模拟为 Kevin 地基上的实体弹性单元,并采用三维有限元方法验证了模型的可靠性;Lin 等^[6]建立了单自由度线性简化汽车模型,采用频域分析方法评价了匀速行驶于刚性路面上的峰值路面荷载;Shi 等^[7]建立了可考虑车体沉浮和转动的整车模型,并将路面简化为有限元模型,分别研究了路面不平度、汽车参数和行驶速度对轮胎接地荷载的影响。在国内:Sun 等^[8-9]经过多年的研究积淀,较为系统地阐述了汽车-路面的相互作用理论及相关应用;刘大维等^[10]采用 SIMPACK 软件建立了重型载货汽车整车模型,提取各轴车轮的轮胎法向作用力,将其施加至沥青路面三维有限元模型中,分析了汽车随机动荷载作用下路面的应力响应和应变响应;李韶华^[11]将面层与基层用非线性粘弹性地基上双层薄板模拟,并考虑路面与路基的非线性特

性,建立了双轴非线性汽车-路面-路基耦合模型,并分析了模型参数对车体加速度与路面振动位移的影响;史石荣^[12]建立了七自由度振动整车模型,将道路离散为多层体系的有限元模型,利用轮胎与路面的振动耦合关系建立了汽车-道路耦合振动方程,并分析了耦合动荷载对沥青道路结构的瞬态动力响应。综上,已有研究在重载汽车模型、道路模型方面已有一定的积累,针对重载汽车系统、路面(包括面层与基层)系统与路基系统的动力相互作用,建立精细的重载汽车-路面-路基耦合动力学模型,研究路面动力响应特性与规律十分必要。

本文在已有研究基础上,以三轴重载汽车为例,合理考虑移动重载汽车的运动、面层的内部阻尼作用和抗弯作用、基层对面层的粘弹性支撑作用和对路基的压缩作用,以及轮胎与路面的接触模型,建立重载汽车-路面-路基垂向耦合动力学模型,并基于已有文献资料对该模型的有效性 with 可靠性进行验证,进而分析重载汽车轴型、行车速度、后轴轴重、路面不平度等级和路基刚度对汽车接地荷载和路面动力响应的影响。

1 建模原则

移动的重载汽车一方面引起路面、路基和场地的振动,反过来,路面和路基的振动也影响重载汽车的振动,二者通过车轮与路面相互作用组成一个密不可分的统一整体。将道路和移动重载汽车视为一个复杂的系统(图 1),它是由重载汽车系统、轮胎与路面相互作用系统、路面系统和路基系统组成。其中:重载汽车系统由车体、轮胎组、连接车体与轮胎组的弹簧组成;路面系统由面层和基层组成;轮胎与路面相互作用系统是连接重载汽车系统、路面与路基系统的纽带,其由轮胎接地关系和路面高低不平度描述。

已有的汽车、路面、路基动力相互作用分析方法中,有的为了研究汽车动力特性而简化路面和路基的作用,有的为了研究路面和路基的动力特性而简化考虑汽车的行驶振动作用,如此均会导致模型的分析精度降低。本文在建立重载汽车-路面-路基

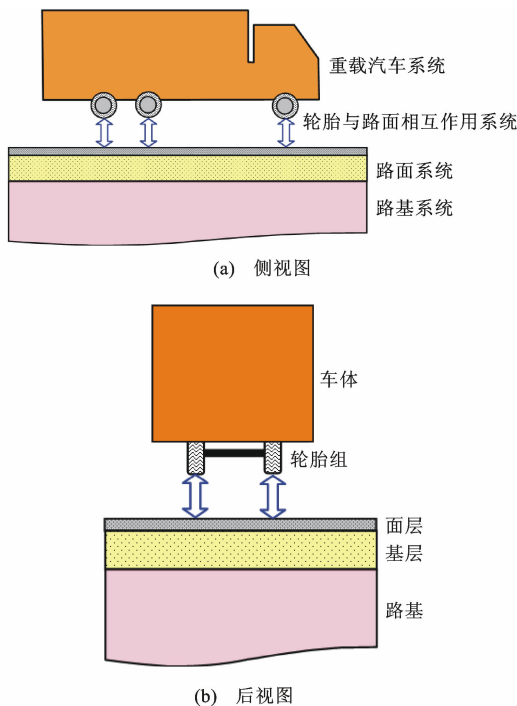


图 1 重载汽车-路面-路基垂向耦合系统

Fig. 1 Vertical Coupling System of Heavy Truck-pavement-subgrade

动力学模型时,尽可能考虑主要影响因素以反映模型的本质,从而使模型有较高的计算精度,但又避免模型形式和计算过程过于复杂。

2 耦合动力学模型的建立

2.1 重载汽车振动模型

在建立重载汽车振动模型时,假设:①车体为刚体,且质量均匀分布,质心为上下、左右对称,前后可变;②悬架由线性弹簧和线性阻尼器并联模拟,且刚度和阻尼为常数;③弹簧下质量包括车轮和车轴质量,轮胎刚度和阻尼为常数;④不考虑重载汽车运动过程中车轮滚动和滑动。

重载汽车模型中,考虑了车体的俯仰、侧倾和沉浮运动,以及车轮的垂向运动,将其模拟为匀速移动的由弹簧和阻尼器并联连接的多自由度集中质量刚体系统,车体和轮胎之间的悬架由线性弹簧和线性阻尼器并联连接;轮胎的压缩变形由线性弹簧和线性阻尼器并联来模拟。以三轴重载汽车为例,九自由度三轴重载汽车行驶振动模型如图 2 所示。图 2 中: M_c 、 J_c 和 I_c 分别为车体质量、俯仰惯量和侧倾惯量; K_{ck} 和 C_{ck} 为悬架刚度和阻尼, $k=1,2,\dots,N_p$, N_p 为悬架组数; K_{tk} 和 C_{tk} 为轮胎组等效刚度和等效阻尼; M_{wk} 为轮胎组质量; Z_c 、 β_c 和 φ_c 分别为车体的

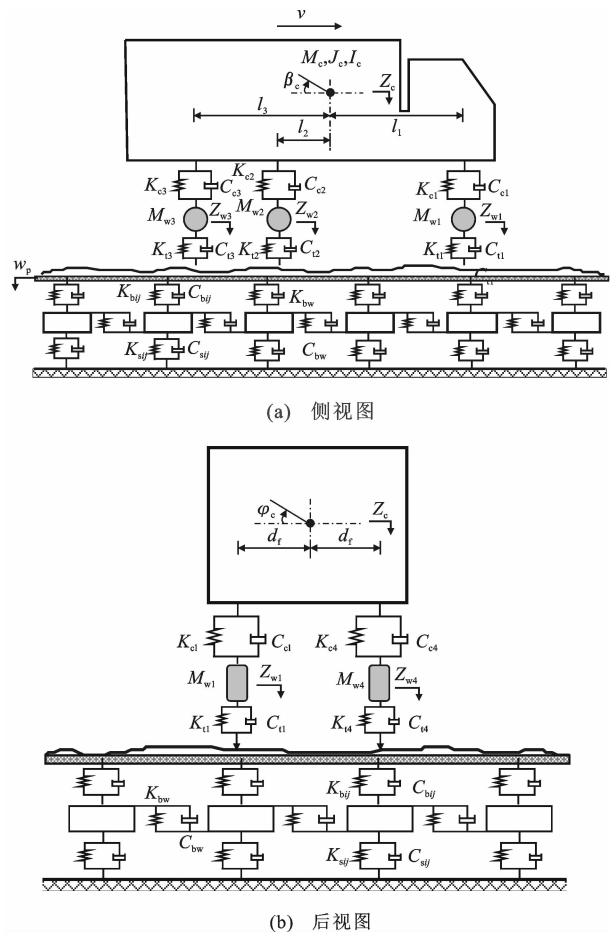


图 2 重载汽车-路面-路基垂向耦合动力学模型

Fig. 2 Vertical Coupling Dynamics Model of Heavy Truck-pavement-subgrade

沉浮位移、俯仰角位移和侧倾角位移; Z_{wk} 为轮胎组位移; l_1 , l_2 和 l_3 分别为车体质心至前轴、第 2 轴和第 3 轴的距离。

基于 D'Alembert 原理,重载汽车振动方程为

$$M_c \ddot{Z}_c + C_c \dot{Z}_c + K_c Z_c + F_t = F_c \quad (1)$$

式中: M_c 、 C_c 和 K_c 分别为重载汽车的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; Z_c 、 \dot{Z}_c 、 \ddot{Z}_c 分别为集中质量的位移、速度、加速度矢量; F_c 为重载汽车的自重矢量; F_t 为轮胎与路面之间的垂向作用力矢量。各参数的具体表达式见文献[13]。

2.2 面层振动模型

假设面层在水平方向呈层状分布且无间断,考虑到面层纵向和横向的延伸远大于竖向厚度,因此,将面层简化为支撑于连续粘弹性基层和粘弹性地基上的连续粘弹性薄板模型。

该模型中,面层的弹性模量、泊松比、粘滞阻尼系数、质量密度和厚度分别记为 E_p , μ_p , χ_p , ρ_p , h_p ; K_{bij} 和 C_{bij} 分别为基层的竖向压缩刚度和竖向压缩

阻尼,其中 i, j 为离散基层块个数, $i=1, 2, \dots, N_L$, $j=1, 2, \dots, N_W$, N_L 和 N_W 分别为 x 向和 y 向支撑点个数; K_{bw} 和 C_{bw} 分别为基层竖向剪切刚度和竖向剪切阻尼; K_{sij} 和 C_{sij} 分别为路基的竖向压缩刚度和竖向压缩阻尼; 面层的垂向位移记为 w_p ; 模型长度为 L , 宽度为 W 。

考虑面层内部阻尼作用, 移动重载汽车荷载下粘弹性基层上的面层垂向振动微分方程为

$$D_p \frac{\partial^4 w_p(x, y, t)}{\partial x^4} + 2D_p \frac{\partial^4 w_p(x, y, t)}{\partial x^2 \partial y^2} + D_p \frac{\partial^4 w_p(x, y, t)}{\partial y^4} + D_p' \frac{\partial^5 w_p(x, y, t)}{\partial x^4 \partial t} + 2D_p' \frac{\partial^5 w_p(x, y, t)}{\partial x^2 \partial y^2 \partial t} + D_p' \frac{\partial^5 w_p(x, y, t)}{\partial y^4 \partial t} + \rho_p h_p \frac{\partial^2 w_p(x, y, t)}{\partial t^2} = \sum_{k=1}^{N_p} F_{tk}(t) \delta(x - x_{tk}) \delta(y - y_{tk}) - \sum_{i=1}^{N_L} \sum_{j=1}^{N_W} F_{bij}(t) \delta(x - x_{sij}) \delta(y - y_{sij}) \quad (2)$$

式中: F_{tk} 为轮胎与路面之间的垂向作用力; $F_{bij}(t)$ 为 t 时刻基层对面层的垂向支撑力, $F_{bij}(t) = C_{bij} \cdot [\dot{w}_p(x, y, t) - \dot{Z}_{bij}(t)] + K_{bij} [w_p(x, y, t) - Z_{bij}(t)]$; x_{tk} 和 y_{tk} 分别为 F_{tk} 的 x 向和 y 向坐标; x_{sij} 和 y_{sij} 分别为 F_{bij} 的 x 向和 y 向坐标; D_p 为面层抗弯刚度, $D_p = E_p h_p^3 / [12(1 - \mu_p^2)]$; D_p' 为考虑面层内阻尼的抗弯刚度, $D_p' = \chi_p D_p$ 。

为了描述重载汽车在路面上的移动特性, 建立了移动轮胎接地坐标来模拟重载汽车运动状态。匀速移动的重载汽车作用下面层的受力模型见图 3。

面层受力分析模型中, Ox 为固定于路面-路基体系上的固定坐标系, $O'x'$ 是以速度 v 匀速运动的重载汽车移动坐标系。因此, 在第 t 时刻, 各轮胎质心的坐标为

$$\left. \begin{aligned} x_{t1} &= x_0 + l_1 + l_3 + vt, y_{t1} = y_0 \\ x_{t2} &= x_0 + l_3 - l_2 + vt, y_{t2} = y_0 \\ x_{t3} &= x_0 + vt, y_{t3} = y_0 \\ x_{t4} &= x_0 + l_1 + l_3 + vt, y_{t4} = y_0 + 2d_f \\ x_{t5} &= x_0 + l_3 - l_2 + vt, y_{t5} = y_0 + 2d_r \\ x_{t6} &= x_0 + vt, y_{t6} = y_0 + 2d_r \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: x_0 为初始时刻后轴距离 x 向原点的水平距离; y_0 为初始时刻后轴左侧轮胎距离 y 向原点的水平距离; d_f 和 d_r 分别为前轴和中、后轴的轴距之半。

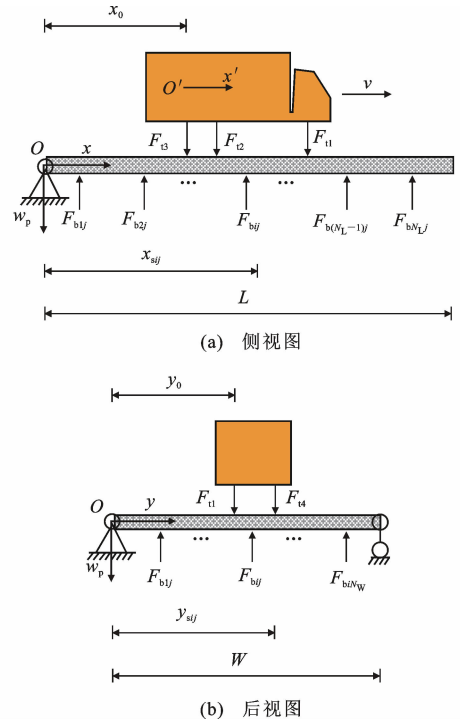


图3 面层受力分析模型

Fig. 3 Stress Analysis Model of Surface Layer

面层下部离散基层块体的支撑作用点坐标为

$$\left. \begin{aligned} x_{sij} &= i l_s \\ y_{sij} &= j l_w \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: l_s 为 x 向离散点间距; l_w 为 y 向离散点间距。

式(2)为五阶偏微分方程, 可用 Ritz 法将其转化为二阶常微分方程, 再用双向梁函数组合级数逼近方法可获得较为满意的结果^[14-15]。因此, 假设面层的边界条件为对边简支, 其振型 W_p 可简化为

$$W_p(x, y) = X_m(x) Y_n(y) \quad (5)$$

式中: $X_m(x)$ 为面层 x 方向的振型函数; $Y_n(y)$ 为面层 y 方向的振型函数。

面层的垂向位移(挠度) $w_p(x, y, t)$ 为

$$w_p(x, y, t) = \sum_{m=1}^{N_M} \sum_{n=1}^{N_N} X_m(x) Y_n(y) T_{mn}(t) = \sum_{m=1}^{N_M} \sum_{n=1}^{N_N} \sin\left(\frac{m\pi x}{L}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{W}\right) T_{mn}(t) \quad (6)$$

式中: T_{mn} 为面层的正则坐标; N_M 为面层 x 方向的截止模态阶数; N_N 为面层 y 方向的截止模态阶数。

将式(6)代入式(2)后可得

$$D_p \left[\sum_{m=1}^{N_M} \sum_{n=1}^{N_N} X_m''''(x) Y_n(y) + 2 \sum_{m=1}^{N_M} \sum_{n=1}^{N_N} X_m''(x) Y_n''(y) + \sum_{m=1}^{N_M} \sum_{n=1}^{N_N} X_m(x) Y_n''''(y) \right] T_{mn}(t) +$$

$$\begin{aligned}
& D_p' \left[\sum_{m=1}^{N_M} \sum_{n=1}^{N_N} X_m''(x) Y_n(y) + \right. \\
& 2 \sum_{m=1}^{N_M} \sum_{n=1}^{N_N} X_m''(x) Y_n''(y) + \\
& \left. \sum_{m=1}^{N_M} \sum_{n=1}^{N_N} X_m(x) Y_n''(y) \right] \dot{T}_{mm}(t) + \\
& \rho_p h_p \sum_{m=1}^{N_M} \sum_{n=1}^{N_N} X_m(x) Y_n(y) \dot{T}_{mm}(t) = \\
& \sum_{k=1}^{N_p} F_{tk}(t) \delta(x - x_{tk}) \delta(y - y_{tk}) - \\
& \sum_{i=1}^{N_L} \sum_{j=1}^{N_W} F_{bij}(t) \delta(x - x_{sij}) \delta(y - y_{sij}) \quad (7)
\end{aligned}$$

将式(7)两边同乘以面层振型函数 $W_p(x, y)$, 并对面层分别在 x 向和 y 向沿长度积分, 利用梁振型函数的正交性, 可得面层垂向振动关于正则坐标的二阶常微分方程为

$$\begin{aligned}
\ddot{T}_{mm}(t) + \frac{A_p'}{\rho_p h_p B_1 B_2} \dot{T}_{mm}(t) + \frac{A_p}{\rho_p h_p B_1 B_2} T_{mm}(t) = \\
\frac{1}{\rho_p h_p B_1 B_2} \left[\sum_{k=1}^{N_p} F_{tk}(t) X_m(x_{tk}) Y_n(y_{tk}) - \right. \\
\left. \sum_{i=1}^{N_L} \sum_{j=1}^{N_W} F_{bij}(t) X_m(x_{sij}) Y_n(y_{sij}) \right] \quad (8)
\end{aligned}$$

式中: $A_p = D_p B_3 B_2 + 2D_p B_4 B_5 + D_p B_1 B_6$; $A_p' = D_p' B_3 B_2 + 2D_p' B_4 B_5 + D_p' B_1 B_6$; $B_1 = \int_0^L X_m^2(x) dx$; $B_2 = \int_0^W Y_n^2(y) dy$; $B_3 = \int_0^L X_m''(x) X_m(x) dx$; $B_4 = \int_0^L X_m'(x) X_m(x) dx$; $B_5 = \int_0^W Y_n'(y) Y_n(y) dy$; $B_6 = \int_0^W Y_n''(y) Y_n(y) dy$.

基层垂向支撑力 $F_{bij}(t)$ 为

$$\begin{aligned}
F_{bij}(t) = C_{bij} [\dot{w}_p(x_{sij}, y_{sij}, t) - \dot{Z}_{bij}(t)] + \\
K_{bij} [w_p(x_{sij}, y_{sij}, t) - Z_{bij}(t)] = \\
\sum_{m=1}^{N_M} \sum_{n=1}^{N_N} C_{bij} \sin\left(\frac{m' \pi x_{sij}}{L}\right) \sin\left(\frac{n' \pi y_{sij}}{W}\right) \dot{T}_{m'n'}(t) - \\
C_{bij} \dot{Z}_{bij}(t) + \sum_{m=1}^{N_M} \sum_{n=1}^{N_N} K_{bij} \sin\left(\frac{m' \pi x_{sij}}{L}\right) \cdot \\
\sin\left(\frac{n' \pi y_{sij}}{W}\right) T_{m'n'}(t) - K_{bij} Z_{bij}(t) \quad (9)
\end{aligned}$$

若轮胎采用点接触模型, 代入简支边界条件下的振型函数, 整理后可得面层垂向振动关于正则坐标的二阶常微分方程为

$$\ddot{T}_{mm}(t) + \frac{4A_p'}{\rho_p h_p L W} \dot{T}_{mm}(t) + \frac{4A_p}{\rho_p h_p L W} T_{mm}(t) +$$

$$\begin{aligned}
& \frac{4}{\rho_p h_p L W} \sum_{i=1}^{N_L} \sum_{j=1}^{N_W} \left[\sum_{m=1}^{N_M} \sum_{n=1}^{N_N} C_{bij} \sin\left(\frac{m' \pi x_{sij}}{L}\right) \cdot \right. \\
& \sin\left(\frac{n' \pi y_{sij}}{W}\right) \dot{T}_{m'n'}(t) - C_{bij} \dot{Z}_{bij}(t) + \sum_{m=1}^{N_M} \sum_{n=1}^{N_N} \\
& K_{bij} \sin\left(\frac{m' \pi x_{sij}}{L}\right) \sin\left(\frac{n' \pi y_{sij}}{W}\right) T_{m'n'}(t) - \\
& K_{bij} Z_{bij}(t) \left. \right] \sin\left(\frac{m \pi x_{sij}}{L}\right) \sin\left(\frac{n \pi y_{sij}}{W}\right) = \\
& \frac{4}{\rho_p h_p L W} \sum_{k=1}^{N_p} \left[C_{tk} (\dot{Z}_{wk} - \dot{q}_{wk}) + K_{tk} (Z_{wk} - \right. \\
& q_{wk}) - \sum_{m=1}^{N_M} \sum_{n=1}^{N_N} C_{tk} \sin\left(\frac{m' \pi x_{tk}}{L}\right) \sin\left(\frac{n' \pi y_{tk}}{W}\right) \cdot \\
& \dot{T}_{m'n'}(t) - \sum_{m=1}^{N_M} \sum_{n=1}^{N_N} C_{tk} \frac{m' \pi v}{L} \cos\left(\frac{m' \pi x_{tk}}{L}\right) \cdot \\
& \sin\left(\frac{n' \pi y_{tk}}{W}\right) T_{m'n'}(t) - \sum_{m=1}^{N_M} \sum_{n=1}^{N_N} K_{tk} \cdot \\
& \sin\left(\frac{m' \pi x_{tk}}{L}\right) \sin\left(\frac{n' \pi y_{tk}}{W}\right) T_{m'n'}(t) \left. \right] \cdot \\
& \sin\left(\frac{m \pi x_{tk}}{L}\right) \sin\left(\frac{n \pi y_{tk}}{W}\right) \quad (10)
\end{aligned}$$

2.3 基层振动模型

基层被模拟为支撑于粘弹性路基之上的集中质量块体。为了考虑基层在水平面的整体性, 块体之间采用并联的弹簧和阻尼器模型, 以实现竖向剪切刚度和剪切阻尼的模拟。

图4为基层块受力分析模型。图4中: M_{bij} 和 Z_{bij} 分别为第 i, j 个离散基层块的集中质量和垂向位移; $F_{sij}(t)$ 为路基对其作用力; F_{bxrij} 和 $F_{bxfij}(t)$ 分别为 x 方向上后侧剪切作用力和前侧剪切作用力; $F_{byrij}(t)$ 和 $F_{byfij}(t)$ 分别为 y 方向上后侧剪切作用力和前侧剪切作用力。第 i, j 个离散基层块的运动方程为

$$\begin{aligned}
M_{bij} \ddot{Z}_{bij}(t) = F_{bij}(t) - F_{sij}(t) - F_{bxrij}(t) - \\
F_{bxfij}(t) - F_{byrij}(t) - F_{byfij}(t) \quad (11)
\end{aligned}$$

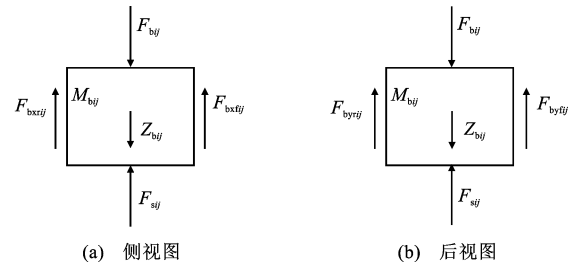


图4 基层块受力分析模型

Fig. 4 Stress Analysis Model of Base Block
基层块体的6个作用力分别为

$$\left. \begin{aligned}
 F_{bij}(t) &= C_{bij} [\dot{w}_p(x_{sij}, y_{sij}, t) - \dot{Z}_{bij}(t)] + \\
 &\quad K_{bij} [w_p(x_{sij}, y_{sij}, t) - Z_{bij}(t)] \\
 F_{sij}(t) &= C_{sij} \dot{Z}_{bij}(t) + K_{sij} Z_{bij}(t) \\
 F_{bxrij}(t) &= C_{bwij} [\dot{Z}_{bij}(t) - \dot{Z}_{b(i-1)j}(t)] + \\
 &\quad K_{bwij} [Z_{bij}(t) - Z_{b(i-1)j}(t)] \\
 F_{bxfij}(t) &= C_{bwij} [\dot{Z}_{bij}(t) - \dot{Z}_{b(i+1)j}(t)] + \\
 &\quad K_{bwij} [Z_{bij}(t) - Z_{b(i+1)j}(t)] \\
 F_{byrij}(t) &= C_{bwij} [\dot{Z}_{bij}(t) - \dot{Z}_{bi(j-1)}(t)] + \\
 &\quad K_{bwij} [Z_{bij}(t) - Z_{bi(j-1)}(t)] \\
 F_{byfij}(t) &= C_{bwij} [\dot{Z}_{bij}(t) - \dot{Z}_{bi(j+1)}(t)] + \\
 &\quad K_{bwij} [Z_{bij}(t) - Z_{bi(j+1)}(t)]
 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

将式(12)代入式(11)中,整理得基层振动微分方程为

$$\begin{aligned}
 M_{bij} \ddot{Z}_{bij}(t) &+ (C_{bij} + C_{sij} + 4C_{bwij}) \dot{Z}_{bij}(t) + \\
 &\quad (K_{bij} + K_{sij} + 4K_{bwij}) Z_{bij}(t) - \\
 &\quad C_{bij} \dot{w}_p(x_{sij}, y_{sij}, t) - K_{bij} w_p(x_{sij}, y_{sij}, t) - \\
 &\quad C_{bwij} \dot{Z}_{b(i+1)j}(t) - K_{bwij} Z_{b(i+1)j}(t) - \\
 &\quad C_{bwij} \dot{Z}_{b(i-1)j}(t) - K_{bwij} Z_{b(i-1)j}(t) - \\
 &\quad C_{bwij} \dot{Z}_{bi(j+1)}(t) - K_{bwij} Z_{bi(j+1)}(t) - \\
 &\quad C_{bwij} \dot{Z}_{bi(j-1)}(t) - K_{bwij} Z_{bi(j-1)}(t) = M_{bij} g \quad (13)
 \end{aligned}$$

式中: g 为重力加速度。

式(13)的边界条件为

$$\left. \begin{aligned}
 Z_{b0j} &= \dot{Z}_{b0j} = 0, Z_{b(N_L+1)j} = \dot{Z}_{b(N_L+1)j} = 0 \\
 Z_{bi0} &= \dot{Z}_{bi0} = 0, Z_{bi(N_M+1)} = \dot{Z}_{bi(N_M+1)} = 0
 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

由此可知,该面层-基层-路基垂向耦合振动微分方程组的阶数为 $N_M N_N + N_L N_W$ 。

2.4 轮胎与路面的耦合关系

2.4.1 路面不平度激励

路面不平度是重载汽车-路面-路基动力耦合相互作用的附加激励,是影响重载汽车轮胎接地力的重要因素之一。中国规范《机械振动 道路路面谱测量数据报告》(GB/T 7031-2005)中用功率谱密度(PSD)来描述路面高低不平的统计特性^[16],其位移功率谱密度 $G_d(N')$ 和速度功率谱密度 $G_v(N')$ 可分别表示为

$$\left. \begin{aligned}
 G_d(N') &= G_d(n_0) \left(\frac{N'}{n_0} \right)^{-w} \\
 G_v(N') &= (2\pi N')^2 G_d(n_0) \left(\frac{N'}{n_0} \right)^{-w}
 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式中: N' 为空间频率; n_0 为参考空间频率,取 $n_0 = 0.1 \text{ m}^{-1}$; w 为频率指数,一般取 $w=2$; $G_d(n_0)$ 为参考空间频率 n_0 下的路面功率谱密度,称为路面不平度系数,数据取决于公路路面不平度等级。

取 A, B, C 和 D 级路面不平度对应的路面不平度系数分别为 16×10^{-6} , 64×10^{-6} , 256×10^{-6} , $1024 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{m}^{-1}$, 根据文献[17]中的方法,可得到路面不平度等级分别为 A, B, C 和 D 级时的路面不平度空间分布曲线。

2.4.2 轮胎与路面接触模型

轮胎可以将重载汽车行驶振动荷载传递至道路表面,从而影响路面-路基系统的振动反应,同时,路面-路基系统的振动也可以通过轮胎影响重载汽车的行驶振动。

常用的轮胎简化模型包括点接触模型、滚子模型、固定印迹模型、径向弹簧模型、环模型和有限元模型等^[18-19]。其中,点接触模型形式简单,在汽车动力学和路面动力学中应用较为广泛。

当轮胎与地面的接触关系采用点接触模型时,第 k 组轮胎接地力 $F_{tk}(t)$ 为

$$F_{tk}(t) = C_{tk} \Delta \dot{Z}_{tk}(t) + K_{tk} \Delta Z_{tk}(t) \quad (16)$$

式中: $\Delta \dot{Z}_{tk}$ 为轮胎与路面之间的相对振动速度; ΔZ_{tk} 为轮胎与路面之间的相对振动位移。

$\Delta \dot{Z}_{tk}$ 和 ΔZ_{tk} 分别为

$$\Delta \dot{Z}_{tk}(t) = \begin{cases} \dot{Z}_{wk}(t) - \dot{q}_{wk}(x_{tk}, y_{tk}, t) - \dot{w}_{pk}(x_{tk}, y_{tk}, t) & \Delta \dot{Z}_{tk}(t) > 0 \\ 0 & \Delta \dot{Z}_{tk}(t) \leq 0 \end{cases} \quad (17)$$

$$\Delta Z_{tk}(t) = \begin{cases} Z_{wk}(t) - q_{wk}(x_{tk}, y_{tk}, t) - w_{pk}(x_{tk}, y_{tk}, t) & \Delta Z_{tk}(t) > 0 \\ 0 & \Delta Z_{tk}(t) \leq 0 \end{cases} \quad (18)$$

式中: \dot{Z}_{wk} 为车轮垂向振动速度; \dot{q}_{wk} 为轮胎质心对应处路面不平度变化速度; \dot{w}_{pk} 为轮胎质心对应处路面垂向振动速度; Z_{wk} 为车轮垂向振动位移; q_{wk} 为轮胎质心对应处路面不平度。

2.5 耦合动力学方程的求解

联立(1), (10), (13), (14), (17) 和式(18)形成重载汽车-路面-路基垂向耦合动力学模型方程组,并建立体系振动方程的矩阵形式,可表述为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{F} \quad (19)$$

式中: \mathbf{M} , \mathbf{C} 和 \mathbf{K} 分别为重载汽车-路面-路基动力分析系统的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $\ddot{\mathbf{x}}$, $\dot{\mathbf{x}}$ 和 \mathbf{x} 分别为动力分析系统的广义加速度矢量、广义速度矢量和广义位移矢量; \mathbf{F} 为动力分析系统广义载荷矢量,是与 $\dot{\mathbf{x}}$ 和 $\ddot{\mathbf{x}}$ 有关的非线性过程量。

式(19)的阶数为 $9 + N_M N_N + N_L N_W$ 。采用 Wilson- θ 法求解动力体系方程组, θ 取 1.4 时式(19)的解是无条件稳定的,且满足计算精度要求,其

求解步骤见文献[13]。

3 动力学模型验证

3.1 重载汽车作用下路面动应力响应

3.1.1 测试概况

王珣等^[20]进行了重载汽车下路面结构动力响应测试。其试验的路面结构形式为沥青混凝土复合路面,厚度为 15 cm,各结构层自上而下分别为:4 cm 的改性沥青 AK-13A 抗滑表层,5 cm 的 AC20 型中面层,6 cm 的 AC25 下面层,1 cm 的改性乳化沥青稀释封层和透层,16 cm 的 5%水泥稳定碎石上基层,16 cm 的 5%水泥稳定碎石下基层和 18 cm 的 4%水泥稳定砂砾底基层。

试验汽车为三轴 10 轮“东风”重型普通货车(EQ1166G2),后轴双轮,轮距 2.05 m;前轴单轮,轮距 1.90 m,前轴与最近后轴距 5.90 m。

3.1.2 结果比较

假定路面不平度等级为 A 级,边界为对边简支。计算模型长为 30 m,宽为 12 m。路面-路基模型离散尺寸为 0.25 m×0.25 m,模态阶数 N_M 为 144, N_N 为 60,时间步长为 5.0×10^{-4} s。表 1 为重载汽车、路面与路基计算参数^[7,21]。

表 1 重载汽车、路面与路基计算参数

Tab.1 Calculation Parameters of Heavy Truck,
Pavement and Subgrade

参数	参数值
前轴簧上刚度/(N·m ⁻¹)	242 604
前轴簧上阻尼/(N·s·m ⁻¹)	2 190
第 2,3 轴簧上刚度/(N·m ⁻¹)	1 903 172
第 2,3 轴簧上阻尼/(N·s·m ⁻¹)	7 882
前轴簧下刚度/(N·m ⁻¹)	875 082
前轴簧下阻尼/(N·s·m ⁻¹)	2 000
第 2,3 轴簧下刚度/(N·m ⁻¹)	3 503 307
第 2,3 轴簧下阻尼/(N·s·m ⁻¹)	4 000
面层弹性模量/Pa	1.2×10^9
面层泊松比	0.30
面层质量密度/(kg·m ⁻³)	2 300
面层粘性系数	0.10
面层厚度/m	0.15
基层弹性模量/Pa	8.0×10^8
基层泊松比	0.25
基层厚度/m	0.50
基层质量密度/(kg·m ⁻³)	2 300
基层竖向剪切刚度/(Pa·m ⁻¹)	2.5×10^8
基层竖向剪切阻尼/(N·s·m ⁻¹)	1.5×10^5
路基竖向刚度/(Pa·m ⁻¹)	4.0×10^7
路基竖向阻尼/(N·s·m ⁻¹)	3.5×10^4

以重载汽车行进方向右侧轮迹线与路面纵向长度中线的交点为采样点,记录该点基层顶面压应力时程曲线。图 5~7 为行车速度 80 km·h⁻¹ 时载重分别为 120,300,420 kN 下,基层顶面动压应力计算曲线和实测曲线。可以看出,基层顶面动压应力的实测曲线与计算曲线波形吻合较好,说明该模型能够较好地模拟各轴对道路结构的动力作用。

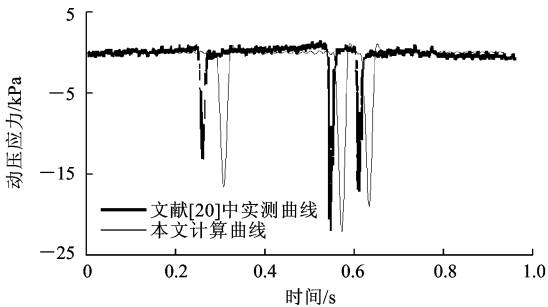


图 5 载重 120 kN 时基层顶面动应力时程曲线比较
Fig.5 Comparison of Time History Curves of Dynamic Stress on Top of Base Layer with 120 kN Load

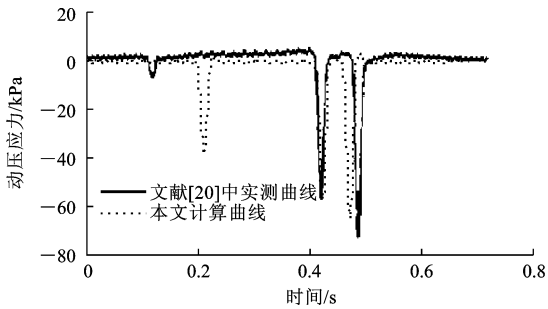


图 6 载重 300 kN 时基层顶面动应力时程曲线比较
Fig.6 Comparison of Time History Curves of Dynamic Stress on Top of Base Layer with 300 kN Load

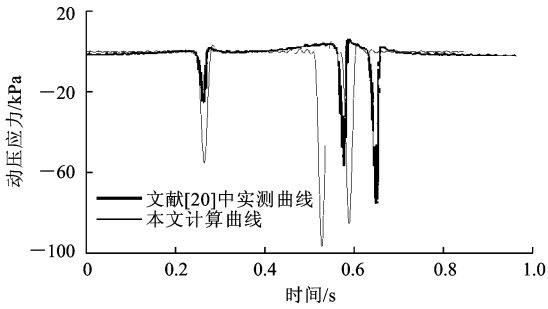


图 7 载重 420 kN 时基层顶面动应力时程曲线比较
Fig.7 Comparison of Time History Curves of Dynamic Stress on Top of Base Layer with 420 kN Load

表 2 为基层顶面动压应力峰值的计算结果与实测结果的对比。由表 2 可见:载重为 120 kN 时,各轴对应的动压应力计算值与实测值的误差分别为 4.7,0.2,2.5 kPa;载重为 300 kN 时,误差分别为

表 2 基层顶面动压应力峰值比较

Tab. 2 Comparison of Peak Dynamic Stress on Top of Base Layer

载重/kN	文献[20]中实测值/kPa			本文计算值/kPa		
	前轴	中轴	后轴	前轴	中轴	后轴
120	12.5	22.2	17.6	17.2	22.4	19.1
300	5.2	58.3	74.6	39.0	58.5	65.4
420	25.0	55.3	75.1	55.3	97.8	85.2

33.8,0.2,9.2 kPa;载重为 420 kN 时,误差分别为 30.3,42.5,10.1 kPa。经过分析,这些误差主要源自:①计算中所采用重载汽车模型参数参考了较多国内外文献,但与实测汽车参数仍存在一定差异,而且模型参数的非线性也有一定的影响;②计算中路面不平度等级为 A 级,与实测路面状况尚有区别;③由于重载汽车在行驶过程中的沉浮运动、俯仰运动和侧倾运动,造成轮胎接地力在路面纵向上存在一定的波动性^[13],而所有现场实测中均采用 1 条横断面,不能反映轮胎接地力的空间分布特性,由此也会导致计算值与实测值之间的差异。

3.2 移动汽车荷载下路面动位移响应

3.2.1 概 况

Wu 等^[5]将汽车简化为匀速行驶的单自由度质量体系,路面视为弹性的三维块体单元,路基视为线性的粘弹性模型(Kelvin 模型),建立了汽车-路面-路基模型,并采用 Newmark 方法求解动力方程,研究了移动汽车荷载下路面中点的垂向动位移反应。其建立的汽车-路面-路基模型见图 8,图 8 中, τ 为汽车沿 x 方向相对于起点的距离。

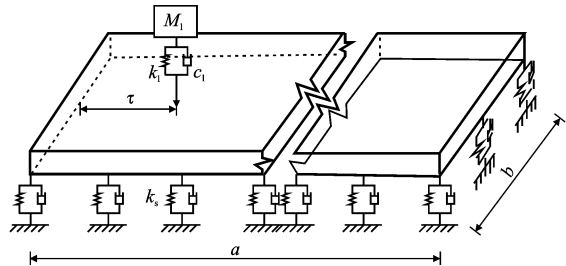


图 8 文献[5]中汽车-路面-路基模型

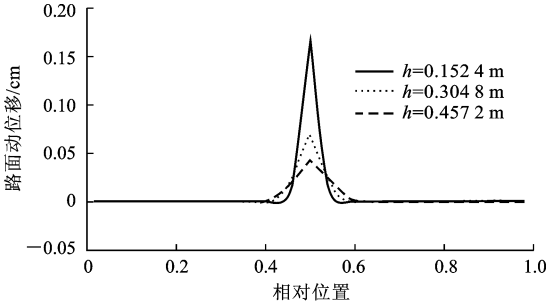
Fig. 8 Model of Truck-pavement-subgrade^[5]

汽车-路面-路基模型参数同文献[5]取值。其中:悬挂质量 M_1 为 3.425×10^4 kg,悬挂刚度 k_1 为 1.715×10^4 N·m⁻¹,悬挂阻尼 c_1 为 0.005;路面的弹性模量 E 为 2.480×10^{10} Pa,泊松比 μ 为 0.15,密度 ρ 为 2.324×10^3 kg·m⁻³, a 为 38.1 m, b 为 3.81 m;土的刚度 k_s 分别为 27.143,81.430,135.717 MN·m⁻³。

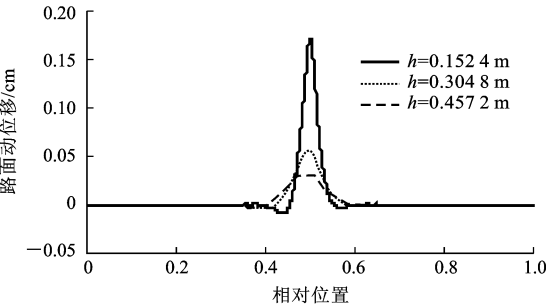
3.2.2 结果比较

本算例中取对边简支对边自由的路面振型^[15],将其代入路面振动微分方程(2)中,经过推导,得到路面垂向振动微分方程(限于文章篇幅,未给出详细推导过程),并忽略路面不平度的影响,基于 Ritz 法建立体系动力方程并求解。通过试算,确定出模态阶数为 100×20 。

图 9,10 分别为不同厚度和刚度下本文计算的路面动位移相对时程曲线与 Wu 等^[5]计算结果的比较,其中,相对位置为汽车在 x 方向上的距离 τ 与路面模型长度 a 的比值。由图 9,10 可以看出,本文计算结果与文献[5]中计算结果一致,且随着路面厚度和地基刚度的增加,路面中点动位移幅值降低。



(a) 文献[5]中计算结果



(b) 本文计算结果

图 9 不同厚度下路面动位移相对时程曲线对比

Fig. 9 Comparisons of Time History Curves of Dynamic Displacement of Pavement Under Different Pavement Thicknesses

表 3 为路面中点动位移幅值比较。从表 3 可以看出,采用本文方法得到的路面中点位移幅值与文献[5]和文献[11]中结果基本接近,说明本文采用的模态叠加法与有限单元法能满足工程计算要求。

4 模型分析

以典型三轴重载汽车为例,计算参数见表 1。取路面模型长度为 40 m,宽度为 10.5 m,离散间距为 $0.25 \text{ m} \times 0.25 \text{ m}$,时间步长为 5.0×10^{-4} s,模态阶数为 190×50 。分别分析了汽车轴型、行车速度、后轴载重、路面不平度等级和路基刚度对汽车接地

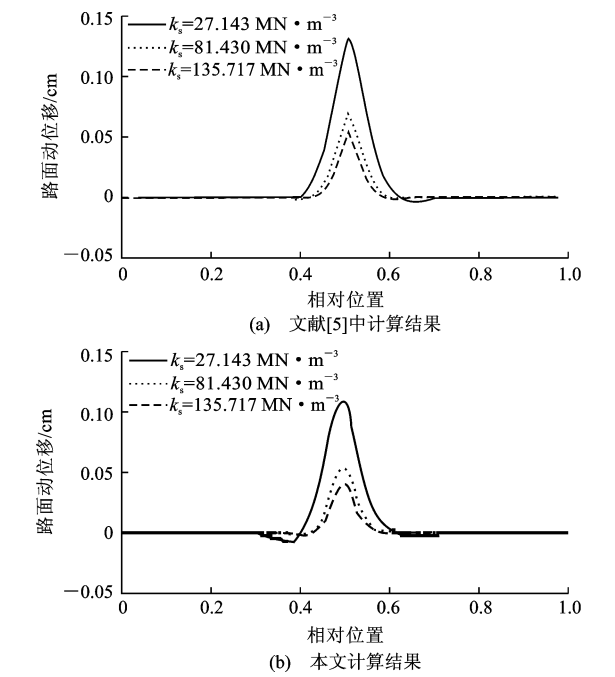


图 10 不同路基刚度下路面动位移相对时程曲线对比
Fig. 10 Comparisons of Time History Curves of Dynamic Displacement of Pavement Under Different Subgrade Stiffness

表 3 路面中点动位移幅值比较

计算结果	不同路面厚度(m)			不同地基刚度(MN·m ⁻³)		
	下路面中点动位移幅值/cm			下路面中点动位移幅值/cm		
	0.152 4	0.304 8	0.457 2	27.143	81.430	135.717
文献[5]中结果	0.165	0.065	0.035	0.125	0.065	0.050
文献[11]中结果	0.155	0.060	0.028	0.100	0.060	0.046
本文结果	0.170	0.055	0.031	0.111	0.055	0.041

力和路面动力响应的影响规律。

第 k 组轮胎的轮胎接地力放大倍数 A_k 为

$$A_k=\frac{\max F_{tk}+F_{sk}}{F_{sk}} \tag{20}$$

式中: F_{sk} 为第 k 组轮胎的接地静力。

路面动位移均值 $\overline{w_p}$ 为

$$\overline{w_p}=\frac{1}{X}\sum_{q=1}^X\overline{w_{p,q}} \tag{21}$$

式中: $\overline{w_{p,q}}$ 为第 q 时间步的路面动位移; X 为总时间步。

4.1 汽车轴型的影响

对于不同轴型汽车(1+2 型,1+5 型,1+1+5

型,1+2+7 型和 1+5+7 型),当后桥单轴轴载为 100 kN,以 60 km·h⁻¹的速度匀速行驶在 A 级路面上时,汽车轴型对轮胎接地力和路面动位移的影响如图 11 所示。由图 11(a)可见,双轴汽车、三轴汽车、四轴汽车和六轴汽车轮胎接地力相差不大,而五轴汽车(轴型为 1+2+7 型)产生的轮胎接地力较大;然而,5 种轴型重载汽车中,五轴汽车对应的轮胎接地力放大倍数最小,但整体上轮胎接地力放大倍数均大于 1,即在汽车行驶过程中,轮胎接地力大于车体质量分配在各轮胎上的静荷载。由图 11(b)可知:随着后桥轴数的增加,相同后桥载重下路面动位移峰值较小;三轴重载汽车产生的路面动位移平均值较大,整体上各轴型重载汽车产生的路面动位移平均值约为路面动位移峰值的 1/4。

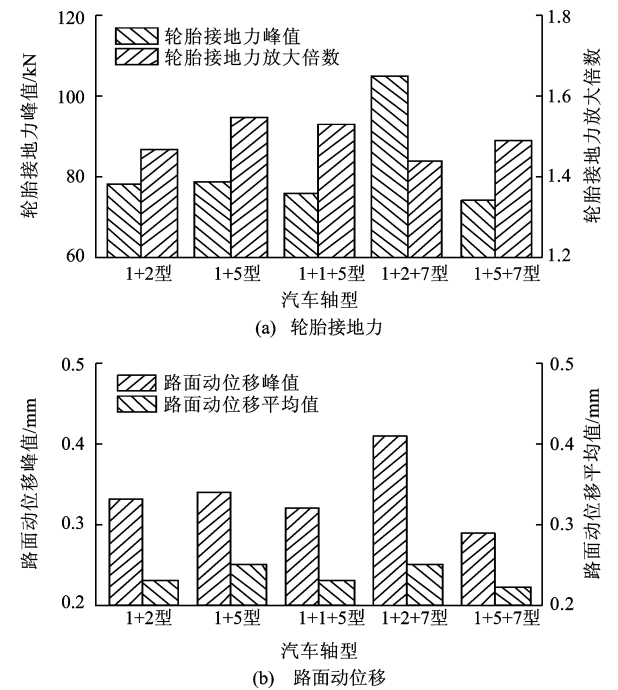


图 11 汽车轴型对轮胎接地力和路面动位移的影响
Fig. 11 Influences of Truck Axis Type on Tire Force and Dynamic Displacement of Pavement

4.2 后轴轴重的影响

以三轴重载汽车(1+5 型)为例,图 12(a)为后轴轴重对轮胎接地力的影响。由图 12(a)可见,随着轴重成倍增加,轮胎接地力呈线性增加,轮胎接地力的放大倍数先增加后逐渐降低。其原因在于汽车轴重的增加意味着车体质量增加,由此导致车体转动惯量增加,车体俯仰运动和侧倾运动幅度减小,使得车轮接地动荷载降低。图 12(b)为后轴轴重对路面动位移的影响。由图 12(b)可见,随着轴重由 50 kN 增加至 250 kN,路面动位移峰值和路面动位移

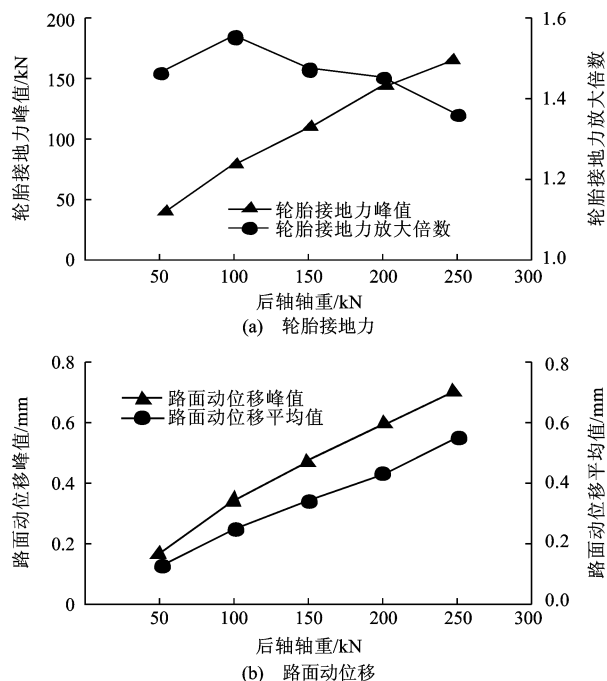


图 12 后轴轴重对轮胎接地力和路面动位移的影响

Fig. 12 Influences of Rear Axis Load on Tire Force and Dynamic Displacement of Pavement

平均值相差不大,路面动位移峰值由 0.16 mm 增加至 0.71 mm,增大了 344%;而且路面动位移平均值由 0.12 mm 增加至 0.55 mm,增大了 358%。

4.3 行车速度的影响

图 13(a)为行车速度对轮胎接地力的影响。由图 13(a)可见:行车速度对轮胎接地力影响较为复杂,随着行车速度增大,轮胎接地力有增大趋势,速度从 $5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 增加至 $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,轮胎接地力峰值增大了 20%;轮胎接地力放大倍数由 1.37 增加至 1.65,汽车行驶过程中产生的轮胎接地力大于静止轮胎接地力。图 13(b)为行车速度对路面动位移的影响。由图 13(b)可见,随着行车速度从 $5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 增加至 $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,路面动位移峰值由 0.28 mm 增加至 0.36 mm,增大了 28.6%。其原因在于,随着行车速度的增加,汽车轮胎对路面不平顺点的瞬时冲击作用增加,轮胎接地的瞬时压力增大,路面位移峰值呈现增加的现象。然而,随着行车速度的增加,路面动位移平均值变化趋势不明显,很大程度上是路面不平度等级整体较好(计算中采用的不平度等级为 A 级)的原因造成的。

4.4 路面不平度等级的影响

图 14(a)为路面不平度等级对轮胎接地力的影响。由图 14(a)可见,路面不平度等级对轮胎接地

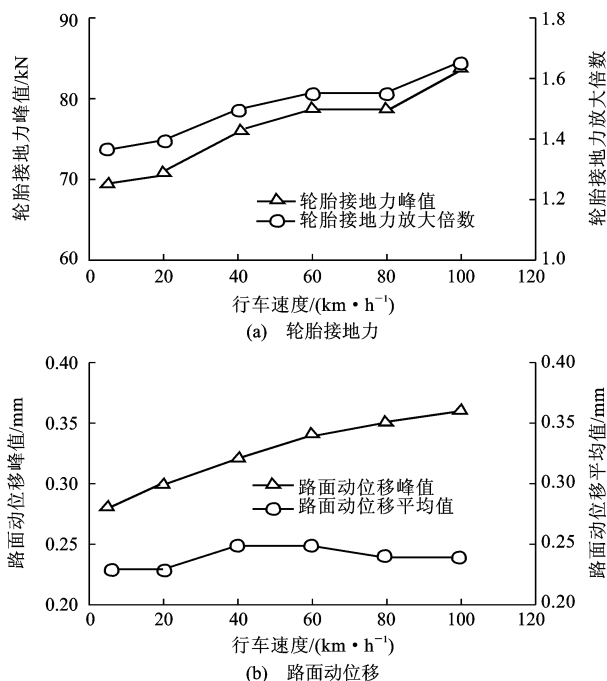


图 13 行车速度对轮胎接地力和路面动位移的影响

Fig. 13 Influences of Running Speed on Tire Force and Dynamic Displacement of Pavement

力的影响非常显著,随着路面不平度等级的增加,重载汽车轮胎接地力呈线性增加,轮胎接地力放大倍数可增加至 A 级路面时的 2 倍多。图 14(b)为路面不平度等级对路面动位移的影响。由图 14(b)可见,随着路面不平度等级的增加,路面动位移平均值约为路面动位移峰值的一半,路面振动位移峰值呈线性显著增加,其幅值由 0.34 mm 增加至 0.76 mm,增大了 124%;路面振动位移峰值由 0.25 mm 增加至 0.43 mm,增大了 72%。

4.5 路基刚度的影响

图 15(a)为路基刚度对轮胎接地力和基层顶面压应力峰值的影响。由图 15(a)可以看出,随着路基刚度的增加,轮胎接地力微弱的增加,基层顶面压应力峰值线性增加,由 78 kPa 增加至 82.3 kPa,增大了 5.5%。图 15(b)为路基刚度对路面动位移的影响。由图 15(b)可见,地基刚度由 10 MPa 增加至 130 MPa,路面动位移峰值由 0.51 mm 降低至 0.20 mm,降低了 60.8%;路面动位移均值由 0.37 mm 降低至 0.15 mm,降低了 59.5%。

5 结语

(1)以路面不平度为激励,考虑移动重载汽车的俯仰、侧倾和沉浮运动、面层的内部阻尼与抗弯作用、基层与路基的粘弹性支撑作用,建立了重载汽

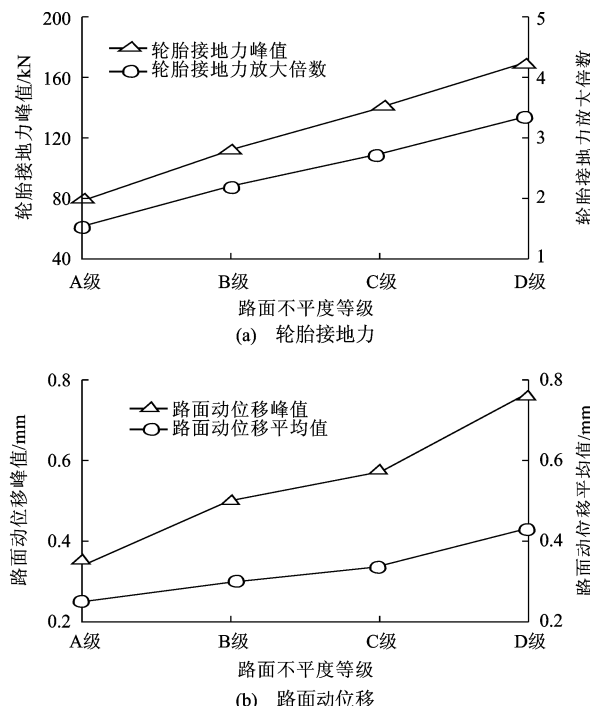


图 14 路面不平度等级对轮胎接地力和路面动位移的影响

Fig. 14 Influences of Grade of Road Roughness on Tire Force and Dynamic Displacement of Pavement

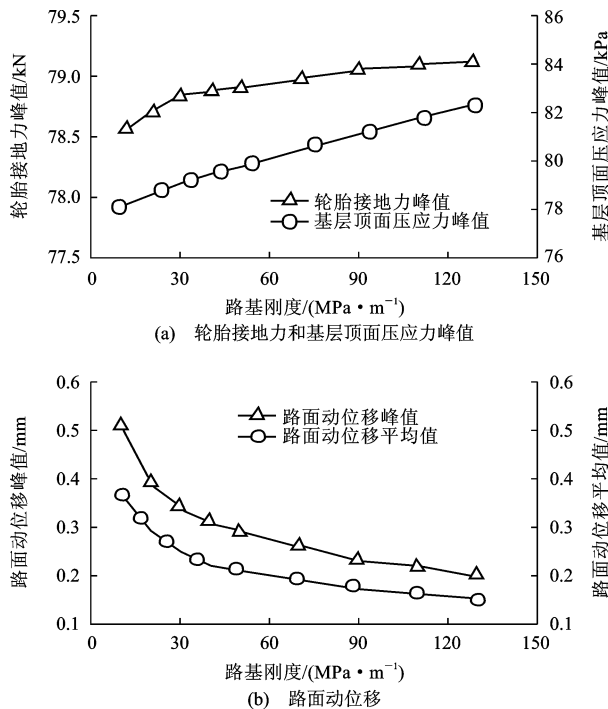


图 15 路基刚度对轮胎接地力、基层顶面压应力峰值和路面动位移的影响

Fig. 15 Influences of Subgrade Stiffness on Tire Force, Peak of Pressure on Top of Base Layer, and Dynamic Displacement of Pavement

车-路面-路基垂向耦合动力学模型,对其耦合方程进行了求解,并验证了模型的可靠性。结果表明,该模型可以有效地模拟重载汽车、路面与路基之间的动力相互作用。

(2)五轴汽车(轴型为 1+2+7 型)产生的轮胎接地力相对其他轴型车的较大;随着后轴轴重的增加,轮胎接地力和路面位移呈线性增加,轮胎接地力的放大倍数先增加后逐渐降低。随着行车速度增加,轮胎接地力峰值和路面动位移峰值增加,路面动位移均值变化不明显。

(3)路面不平度等级由 A 级降为 D 级,轮胎接地力放大倍数可增加至 A 级路面时的 1 倍有余。路面动位移峰值由 0.25 mm 增加至 0.43 mm,增加幅度最低可达 72%。路基刚度由 $10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{-1}$ 增加至 $130 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{-1}$,轮胎接地力有较小幅度的增加,基层顶面压应力增大了 5.5%,路面位移降低了 59.5%。

(4)值得关注的是,随着公路交通运输的快速发展,重载汽车轴重大的特点将会日益突出,今后应该在重载汽车模型和路面-路基模型的非线性特征,以及更为合理的轮胎接地模型等方面进行更为深入的研究。

参考文献:

References:

- [1] 曾凡奇,黄晓明. 超载对沥青路面的影响[J]. 交通运输工程学报,2004,4(3):8-10.
ZENG Fan-qi, HUANG Xiao-ming. Asphalt Pavement Stress Under Overloading[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2004,4(3):8-10.
- [2] CEBON D. Handbook of Vehicle-road Interaction [M]. Lisse:Swets & Zeitlinger,1999.
- [3] GILLESPIE T D, KARAMIHAS S M, CEBON D, et al. Effects of Heavy Vehicle Characteristics on Pavement Response and Performance[R]. Ann Arbor: University of Michigan Transportation Research Institute,1992.
- [4] HARDY M S A, CEBON D. Response of Continuous Pavements to Moving Dynamic Load[J]. Journal of Engineering Mechanics,1993,119(9):1762-1780.
- [5] WU C P, SHEN P A. Dynamic Analysis of Concrete Pavement Subjected to Moving Loads[J]. Journal of Transportation Engineering,1996,122(5):367-373.
- [6] LIN J H, WENG C C. Analytical Study of Probable Peak Vehicle Load on Rigid Pavement[J]. Journal of Transportation Engineering,2001,127(6):471-476.

- [7] 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.
- [8] SUN L, LUO F Q. Nonstationary Dynamic Pavement Loads Generated by Vehicle Travelling at Varying Speed [J]. Journal of Transportation Engineering, 2007, 133(4): 252-263.
- [9] 邓学钧, 孙璐. 车辆-地面结构系统动力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.
DENG Xue-jun, SUN Lu. Dynamics of Vehicle-ground Pavement Structure System[M]. Beijing: China Communications Press, 2000.
- [10] 刘大维, 李国政, 陈焕明, 等. 车辆随机动载作用下路面动态响应研究[J]. 农业机械学报, 2011, 42(2): 28-33.
LIU Da-wei, LI Guo-zheng, CHEN Huan-ming, et al. Dynamic Response of Pavement Based on Random Dynamic Load of Vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(2): 28-33.
- [11] 李韶华. 重载汽车-路面-路基耦合系统动力学研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
LI Shao-hua. Investigation on Dynamic of Heavy Vehicle-pavement-foundation Coupled System[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008.
- [12] 史石荣. 重载车辆条件下的车路耦合动力分析模型和车路相互作用分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2012.
SHI Shi-rong. Coupled Dynamic Analysis Model of Vehicle and Road Under Condition of Heavy Vehicle and Interaction Analysis of Vehicle and Road[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2012.
- [13] 张锋. 深季节冻土区重载汽车荷载下路基动力响应与永久变形[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
ZHANG Feng. Dynamic Response and Permanent Deformation of Subgrade Induced by Heavy Truck Load in Deep Seasonally Frozen Region[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [14] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
ZHAI Wan-ming. Vehicle-track Coupling Dynamics [M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [15] 曹志远. 板壳振动理论[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1989.
CAO Zhi-yuan. Vibration Theory of Plate and Shell [M]. Beijing: Chinese Railway Press, 1989.
- [16] GB/T 7031—2005, 机械振动 道路路面谱测量数据报告[S].
GB/T 7031—2005, Mechanical Vibration-Road Surface Profiles—Reporting of Measured Data[S].
- [17] 刘献栋, 邓志党, 高峰. 公路路面不平度的数值模拟方法研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(9): 843-846.
LIU Xian-dong, DENG Zhi-dang, GAO Feng. Research on the Method of Simulating Road Roughness Numerically [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 29(9): 843-846.
- [18] 管迪华, 范成建. 用于不平路面车辆动力学仿真的轮胎模型综述[J]. 汽车工程, 2004, 26(2): 162-167.
GUAN Di-hua, FAN Cheng-jian. A Review of Tire Models for Vehicle Dynamics Simulation on Uneven Road[J]. Automotive Engineering, 2004, 26(2): 162-167.
- [19] YANG S P, LI S H, LIU Y J. Dynamics of Vehicle-pavement Coupled System Based on a Revised Flexible Roller Contact Tire Model[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009, 52(3): 721-730.
- [20] 王 晔, 张家生, 杨果岳, 等. 重载作用下公路路基及基层动应力测试研究[J]. 振动与冲击, 2007, 26(6): 169-173.
WANG Xuan, ZHANG Jia-sheng, YANG Guo-yue, et al. Test on Dynamic Stress of Roadbed and Pavement under Heavy Loads[J]. Vibration and Shock, 2007, 26(6): 169-173.
- [21] 张 锋, 冯德成, 凌贤长, 等. 春融期重载车辆-路面-路基垂向动力分析模型[J]. 中国公路学报, 2011, 24(4): 7-14.
ZHANG Feng, FENG De-cheng, LING Xian-zhang, et al. Vertical Dynamical Analysis Model of Heavy Vehicle-pavement-subgrade During Spring-thawing Period[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(4): 7-14.