

文章编号:1671-6833(2009)04-0044-04

多轴大货车对路面的动作用力研究

郑仲浪, 吕彭民

(长安大学 道路施工技术与装备教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘 要: 为研究大型载重货车对路面的动作用力, 建立了五自由度三轴货车动力学模型, 以路面随机不平度为激励, 研究车辆动载荷和动载系数随路面等级、车速、载重量、悬架参数的变化规律。结果表明: 路面等级下降、提高车速都会使三轴货车各轮动载荷和动载系数增大; 减小平衡悬架阻尼和增大平衡悬架刚度, 则对三轴货车的中间轮和后轮的动载荷影响比较大; 提高载重量, 车辆各轮对路面的总作用力增大。

关键词: 载重货车; 动载荷; 动载系数; 随机振动

中图分类号: U 462

文献标识码: A

0 引言

随着经济的发展, 公路交通网变得致密化, 公路交通突出表现为交通量增大, 汽车轴数、轴重增加, 车速加快。我国的公路交通已经进入重交通阶段, 多轴载重汽车占汽车通行量的比例逐年增加^[1]。重载交通被认为是造成路面早期损坏的一个很重要的原因^[2], 且大型载重货车对路面的破坏远大于其它车辆。在路面动力响应计算中往往采用恒定的移动载荷或将车辆简化为 2 个自由度的 1/4 模型或 4 个自由度的半车模型进行计算^[3], 这与多轴大货车对路面的动作用力差异较大。为了能够比较准确地模拟多轴货车对路面的动作用力, 建立了 5 个自由度的安装有平衡悬架的三轴货车计算模型, 采用随机路面谱作为激励, 研究各种参数下车辆对路面的动作用力, 为路面动态设计提供参考。

1 三轴货车车辆模型的建立

根据车辆实际结构^[4], 建立安装有平衡悬架的三轴货车车辆模型如图 1 所示。由于车辆和路面为弱耦合系统^[5], 仿真时可不考虑动弯沉量对车辆振动的影响。图中: m_1 为货车簧上质量; m_2 、 m_3 、 m_4 为货车簧下质量; J_1 为货车车身转动惯量; J_2 为平衡悬架转动惯量; k_1 、 k_5 为悬架弹性元件的刚度; c_1 、 c_5 为悬架阻尼器的阻尼; k_2 、 k_3 、 k_4

为各轮轮胎刚度; c_2 、 c_3 、 c_4 为各轮轮胎阻尼; a 、 b 为前轴、平衡悬架中心与货车车身质心的距离; d 为平衡悬架长度。 q_1 、 q_2 、 q_3 为各轮的路面不平度激励; z_1 为货车簧上质量的垂向位移; z_2 为货车前轴簧下质量的垂向位移; z_3 为货车平衡悬架簧下质量的垂向位移; θ_1 为货车车身俯仰摆角; θ_2 为平衡悬架俯仰摆角。

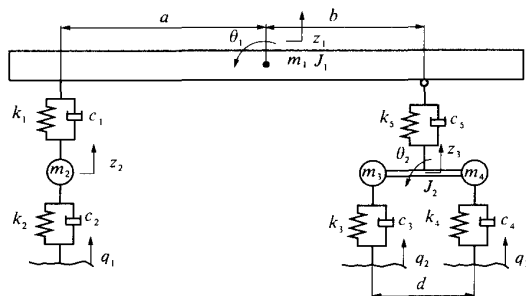


图 1 三轴货车振动模型

Fig. 1 Model of 3-axle vehicle

根据 D'Alembert 原理, 车辆振动方程如下:

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = F \quad (1)$$

式中:

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_3 + m_4 \end{bmatrix},$$

收稿日期:2008-10-19; 修订日期:2008-12-31

基金资助:西部交通建设科技资助项目(200531881212)

作者简介:郑仲浪(1981-), 男, 福建永定人, 长安大学博士研究生, 主要从事机械设计及理论研究。

$$\begin{aligned}
 X &= [z_1 \quad \theta_1 \quad \theta_2 \quad z_2 \quad z_3]^T, \\
 C &= \begin{bmatrix} c_1+c_5 & -ac_1+bc_5 & 0 & -c_1 & -c_5 \\ -ac_1+bc_5 & a^2c_1+b^2c_5 & 0 & ac_1 & -bc_5 \\ 0 & 0 & 0.25d^2(c_3+c_4) & 0 & -0.5d(c_3-c_4) \\ -c_1 & ac_1 & 0 & c_1+c_2 & 0 \\ -c_5 & -bc_5 & -0.5d(c_3-c_4) & 0 & c_3+c_4+c_5 \end{bmatrix}, \\
 K &= \begin{bmatrix} k_1+k_5 & -ak_1+bk_5 & 0 & -k_1 & -k_5 \\ -ak_1+bk_5 & a^2k_1+b^2k_5 & 0 & ak_1 & -bk_5 \\ 0 & 0 & 0.25d^2(k_3+k_4) & 0 & -0.5d(k_3-k_4) \\ -k_1 & ak_1 & 0 & k_1+k_2 & 0 \\ -k_5 & -bk_5 & -0.5d(k_3-k_4) & 0 & k_3+k_4+k_5 \end{bmatrix}, \\
 F &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -0.5d(c_3\dot{q}_2 - c_4\dot{q}_3 + k_3q_2 - k_4q_3) \\ c_2\dot{q}_1 + k_2q_1 \\ c_3\dot{q}_2 + c_4\dot{q}_3 + k_3q_2 + k_4q_3 \end{bmatrix}.
 \end{aligned}$$

由图1可得,三轴货车前轮对路面的附加动载荷随时间变化为:

$$F_1(t) = k_2[q_1(t) - z_2(t)] + c_2[\dot{q}_1(t) - \dot{z}_2(t)] \quad (2)$$

同理,得三轴车中间轮和后轮对路面的附加动载荷随时间变化 $F_2(t)$ 、 $F_3(t)$ 。由于 $F_1(t)$ 、 $F_2(t)$ 、 $F_3(t)$ 均为随机载荷,取前轮胎附加动载荷变化的均方根值作为前轮的附加动载荷:

$$\sigma_{F_1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N F_1^2(t_i)}{N}} \quad (3)$$

式中: N 为采样点总数。同理可得中间轮和后轮的附加动载荷 σ_{F_2} 、 σ_{F_3} 。

则三轴货车前轮的动载系数为:

$$D_1 = \frac{F_{1\text{静}} + \sigma_{F_1}}{F_{1\text{静}}} = \frac{\left(m_2 + \frac{b}{a+b}m_1\right)g + \sigma_{F_1}}{\left(m_2 + \frac{b}{a+b}m_1\right)g} \quad (4)$$

式中: $F_{1\text{静}}$ 为三轴货车前轮的静轴载。同理可得三轴货车中间轮和后轮的动载系数 D_2 、 D_3 。

2 路面随机激励模拟

路面不平度是引起车辆振动的激励源。研究表明,路面不平度是服从 Gaussian 分布的、具有零均值的均匀随机场,若转化为随机过程则具有平稳遍历特性。路面不平度的特性可用功率谱密度函数(PSD) $S_q(\Omega)$ 来表示^[6]:

$$S_q(\Omega) = S_q(\Omega_0) \left(\frac{\Omega}{\Omega_0}\right)^{-w} \quad (5)$$

式中: Ω_0 为参考空间频率, $\Omega_0 = 0.1 \text{ m}^{-1}$; w 为频

率指数,一般取 $w = 2$; $S_q(\Omega_0)$ 为参考空间频率下的路面功率谱密度值,称为路面不平度系数。

基于幂函数的 PSD,可采用谐波叠加法生成随机道路不平度^[7]。所模拟出的路面随机不平度为:

$$q(t) = \sum_{i=1}^n \sqrt{2S_q(f_i) \Delta f} \sin(2\pi f_i t + \theta_i) \quad (6)$$

式中: f_i 为时间频率,与空间频率的关系为: $\Omega = f/v$; v 为车辆行驶速度; θ_i 为 $[0, 2\pi]$ 上均匀分布的随机数。

3 计算机仿真分析

笔者选择 MATLAB 软件和 SIMULINK 工具箱作为仿真工具,对整个系统进行动态仿真分析。选取三轴货车结构参数为^[8]:

$$\begin{aligned}
 m_1 &= 7\,730 \text{ kg}; J_1 = 5\,879 \text{ kg} \cdot \text{m}^2; m_2 = 561.1 \text{ kg}; \\
 m_3 &= 494.7 \text{ kg}; m_4 = 494.7 \text{ kg}; J_2 = 3.37 \text{ kg} \cdot \text{m}^2; \\
 a &= 3.79 \text{ m}; d = 1.72 \text{ m}; b = 2.31 \text{ m}; k_1 = 7\,345\,000 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}; \\
 c_1 &= 4\,546 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}; k_2 = 1\,000\,000 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}; \\
 c_2 &= 3\,000 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}; k_3 = 1\,000\,000 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}; \\
 c_3 &= 3\,000 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}; k_4 = 1\,000\,000 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}; \\
 c_4 &= 3\,000 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}; k_5 = 20\,560\,000 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}; \\
 c_5 &= 66\,884 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}
 \end{aligned}$$

仿真得到三轴车在不同路面等级、不同车速、不同载重量、不同车辆结构参数下各轮的随机动响应,进而求得各轮均方根动载荷和动载系数。这里仅列举三轴货车以 $v = 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (即 $v = 72 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$) 在 A 级路面上行驶时,货车后轮的随机动载荷响应如图2所示。

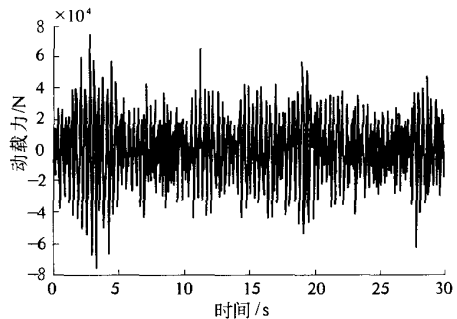


图2 三轴货车后轮随机动载荷随时间的变化

Fig. 2 Random load of 3-axle vehicle rear wheel

3.1 路面等级对三轴货车响应的影响

三轴货车分别在 A、B、C 级路面上行驶,得到车辆各轮均方根动载荷及动载系数与路面等级的关系如图3所示。由图可得,随着路面等级从 A 级到 C 级的下降,路面不平度加剧,车辆对路面作用的动载荷加大,动载系数增加。路面不平度状

况的好坏,对车辆的动载荷大小有很大的影响.因此建设高等级路面,保证路面的施工质量,是减小车辆动载荷的一个重要途径,轴重一定时,各轮的动载荷及动载系数具有相同的变化规律,由于篇幅所限,后文中只列出货车的动载力变化趋势图形.

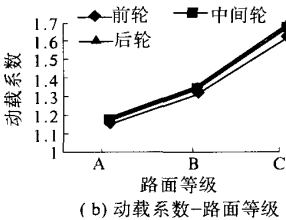
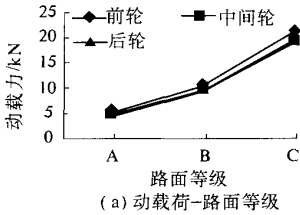


图3 各轮均方根动载系数、动载荷与路面等级关系
Fig.3 Relation of root mean square value of each dynamic load & load coefficient and road level

3.2 车速对三轴货车响应的影响

车辆以 $v = 0 \sim 50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 在 A 级路面行驶作为仿真对象,得到三轴货车各轮的均方根动载荷随速度的变化如图 4 所示.由图可得,车轮的动载荷随着速度的提高逐渐增大.三轴货车的中间轮和后轮的动载系数最大达到了 1.25.在对路面动力学分析取动载系数的时候,应充分考虑车速的影响.

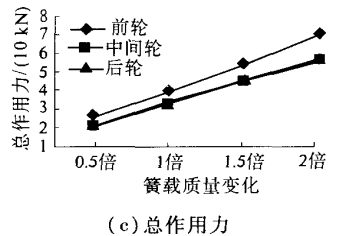
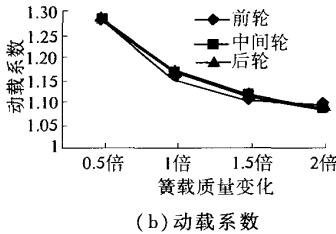
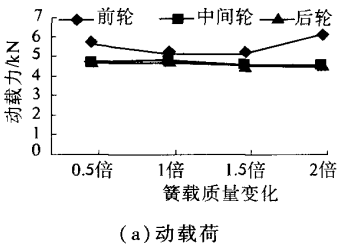


图5 各轮均方根动载荷、动载系数和总作用力与簧载质量变化关系

Fig.5 Relation of the total load, dynamic load & dynamic load coefficient of each wheel and vehicle sprung mass

3.4 悬架参数对三轴货车响应的影响

三轴货车各轮均方根动载荷与平衡悬架阻尼变化的关系如图 6 所示.由图 6 可知,平衡悬架阻尼增大时,三轴货车各轮的动载荷都在减小,而中间轮和后轮的动载荷变化比较快.增大平衡悬架阻尼,能使车辆的垂向振动减小,轮胎对路面的动

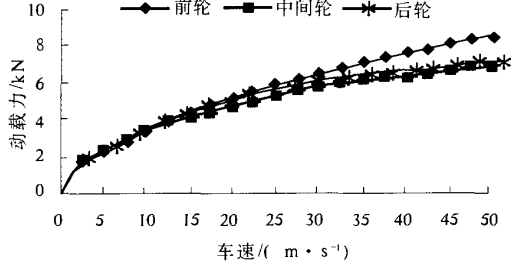


图4 各轮均方根动载荷与车速关系

Fig.4 Relation of root mean square value of each dynamic load and vehicle velocity

3.3 载重量对三轴货车响应的影响

目前国内高速公路上行驶的货车超载情况比较严重,有些车辆超载达到 100% 以上.以三轴货车以 $v = 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 在 A 级路面行驶,用簧载质量的变化来研究三轴车超载时车辆的动载变化,得到各轮均方根动载荷和动载系数随簧载质量变化如图 5.由图可以看出,簧载质量的变化,对车辆的动载力并没有很大影响,但轴载量增大,动载系数数值下降.由于簧载质量变化,静载力变化,考虑各轮对路面的总作用力(静载力 + 动载力均方根值),得到车辆对路面的总作用力与簧载质量变化关系如图 6(c) 所示.由图得,虽然各轮动载力变化不大,但车辆对路面的总作用力线性增加.对于道路来讲,由于车辆作用载荷为移动载荷,因此它对道路内部产生的应力应变均为动态变化的.因此,随着轴载的增加,车辆对路面的总作用力增加,不仅会使路面各结构层正应力应变增加而且会使垂向剪应变增加,从而加快道路的损坏.因此,限制超载是非常必要的.

作用减小,引起道路损伤就小.悬架阻尼对减缓车辆振动的作用是必不可少的.

三轴货车各轮的均方根动载荷与平衡悬架刚度之间关系如图 6 所示.由图可以看出,平衡悬架刚度增大,前轮的动载荷缓慢变小,但中间轮和后轮的动载荷则以较快的速度在增大.因此,在实际

的管理中,应对后悬架的改组(如增加钢板)采取一定的限制。

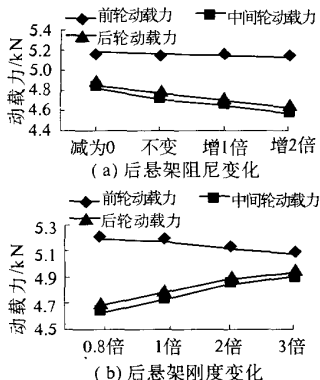


图6 各轮均方根动载荷与平衡悬架刚度及阻尼变化关系

Fig. 6 Relation of root mean square value of each dynamic load and balanced suspension damping & stiffness

4 结论

(1)车辆在公路上行驶时,会对路面产生较大动载荷。动载荷的大小受路面等级、车速、车辆结构参数等因素的影响,可用动载系数进行评价。

(2)车辆对路面的动载荷直接取决于路面的平整度。车辆对路面的动载荷和动载系数随着车速的提高和路面等级的下降而增加。

(3)载重量的变化,各轴的静载力增大,各轮动载荷变化不大,动载系数减小,但车辆对路面的总作用力增大,车辆对路面损坏加剧。限制超载是必要的。

(4)平衡悬架的阻尼增大,能减小车辆对路面的作用力。而其刚度增大,则会增大车辆对路面的动载荷。

参考文献:

- [1] 叶俊杰. 高等级公路车辆轴载特性研究[D]. 西安: 长安大学工程机械学院, 2007.
- [2] THOMAS D, GILLESPIE S M K. Heavy truck properties significant to pavement damage [J]. Vehicle Road Interaction, 1999, (23): 52-63.
- [3] 宋一凡, 陈榕峰. 基于路面不平整度的车辆振动响应分析方法[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(4): 39-43.
- [4] CEBON D. Handbook of vehicle-road interaction: vehicle dynamics, suspension design, and road damage [M]. Netherlands: Zeitlinger B V, Lisse, the Netherlands, 1999: 12-14.
- [5] MARIO F, MARTIN L, MARC S, et al. Dynamic analysis of existing continuous bridge [J]. Journal of Bridge Engineering, 1998, 3(1): 28-37.
- [6] 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.
- [7] 常志权, 罗虹, 褚志刚, 等. 谐波叠加路面输入模型的建立及数字模拟[J]. 重庆大学学报, 2004, 27(12): 5-8.
- [8] 周长峰, 孙蓓蓓, 孙庆鸿, 等. 铰接式自卸车悬架系统动力学建模与仿真[J]. 汽车技术, 2004, 35(9): 15-18.

Dynamic Load of Multi-axle Truck Acting on the Road

ZHENG Zhong-lang, LV Peng-min

(Key Laboratory for Highway Construction Technology and Equipment of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: The 3-axle vehicle model was established for the study of vehicle dynamic load that the trucks act on the road. Based on the road roughness, the change law of vehicle dynamic load and dynamic load coefficient, which are effected by road level, vehicle velocity, weight and suspension parameters, were studied. It was found that when the road level is degraded or the vehicle speed is higher, the dynamic load and the dynamic load coefficient of each wheel are to increase. The reduction of the balanced suspension damping or the increase of the balanced suspension stiffness would cause the dynamic load of the middle and the rear wheels to increase. When the weight is added, the total load acting on the road is raised.

Key words: heavy truck; dynamic load; dynamic load coefficient; random vibration