

车辆轮轴竖向振动时域特征试验研究<sup>\*</sup>刘晓<sup>1</sup>, 胡朋<sup>2</sup>, 李岩涛<sup>1</sup>

(1.烟台市莱州公路管理局, 山东 烟台 261400; 2.山东交通学院 交通土建工程学院, 山东 济南 250023)

**摘要:** 为了研究车辆动荷载时域特征, 现场实测高、低等级两种道路的路面平整度指标, 利用自主研发的车辆轮轴动荷载测量仪进行现场试验, 测试重型货车和小型货车在不同速度下的轮轴竖向振动加速度, 并对振动加速度标准差进行分析。结果表明, 车辆轮轴振动加速度标准差随着速度的增加而增加, 小型货车的振动加速度标准差小于大型货车; 车辆装载质量对轮轴振动加速度的影响较大; 平整度对车辆振动加速度有一定影响, 车辆空载时影响较小, 满载时影响较大。

**关键词:** 公路; 车辆动荷载时域特征; 竖向振动加速度

**中图分类号:** U416.01

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-2668(2017)03-0059-04

车辆荷载是造成路面早期损坏、影响路面使用寿命和服务能力的关键因素。目前中国沥青路面设计规范以车辆静荷载作为设计标准, 未考虑车辆振动引起的动荷载。对动荷载的研究基本停留在理论阶段, 主要围绕动荷载大小进行仿真分析, 试验研究动荷载特征将有助于进一步认识路面破坏机理。

在国内, 钟阳等把汽车简化为两自由度模型, 分析了车辆载荷与行车速度的关系; 黄晓明、孙璐等进行了路面平整度和动荷载之间关系研究; 邓学钧将车辆与地面结构视为综合体系, 研究了在路面随机振动影响下车辆对地面结构的各种运动荷载; 宋一帆、姚时音、郑仲浪、张洪亮建立多自由度车辆模型, 研究了车辆—地面动力学。在国外, Todd K. B. 等利用 1/2 货车模型模拟了行驶质量和路面车辆动荷载之间的关系; Hunt H. E. 提出了计算地面振动功率谱的理论模型, 能较好地预测由随机地面不平度引起的车辆振动; Watts G. R. 等研究了路面局部缺陷对车辆振动的影响; O. Javier 等的研究表明轮胎施加于路面的竖向动态荷载不仅取决于路面的竖向剖面, 也取决于车辆的其他轮胎, 而且同一根轴上的轮胎影响更大; Dae-Wook Park 等建立二维货车模型, 分析了路面平整度、车辆速度、汽车悬挂刚度、阻尼等因素对车辆动荷载的影响。以上研究成果为车路联合作用下车辆动荷载特征分析提供了理论基础。但多数是通过建立多自由度车辆振动模型, 仿真或计算分析车辆轮轴竖向振动加速度, 考虑车辆自重计算出车辆的动荷载, 动荷载的特征取决于车

辆轮胎的振动竖向加速度。

该文采用自主研发的车辆轮轴动荷载测量仪 (ZL201420364837.X), 通过现场试验, 直接测出不同车型在不同速度条件下的轮轴竖向振动加速度, 从时域上分析车辆振动特征。

## 1 车辆轮轴竖向振动加速度和动荷载的关系

理论分析研究动荷载都是通过建立不同自由度的车辆振动模型, 考虑车辆自重计算出车辆前轮或后轮的动荷载。为简化分析, 运用两自由度振动系统模型分析车辆动荷载和轮轴加速度之间的关系。

如图 1 所示, 将车辆上部结构看作刚性体质量, 即簧载质量, 记为  $m_2$ ; 每个轮轴的轮胎质量为  $m_1$ ;  $K_t$  为汽车轮胎刚度系数,  $K$  为汽车悬架刚度系数;  $C_t$  为汽车轮胎阻尼系数,  $C$  为汽车悬架阻尼系数;  $q$  为路面不平度激励; 两自由度分别为  $m_2$  和  $m_1$  的竖向位移。则车辆静载  $G = (m_1 + m_2)g$ , 车轮动载  $F_d = K_t(Z_1 - q)$ 。

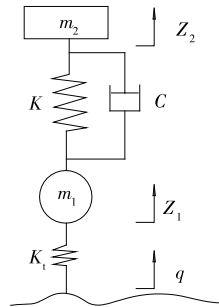


图 1 两自由度车辆模型

<sup>\*</sup> 基金项目: 山东省优秀中青年科学家科研奖励基金项目 (BS2013SF007); 交通运输部应用基础项目 (2014319817250)

根据随机过程理论,对于平稳过程的输入,线性时不变系统的输出也是平稳过程。对于一个线性系统,受到振幅为  $x_0$ 、频率为  $\omega$  的  $x_0 e^{i\omega t}$  激励,经过一个瞬态滞后,该线性系统的稳态响应输出与输入形式类似,表示为:

$$Z_1 = Z_{10} e^{i(\omega t + \phi)}, Z_2 = Z_{20} e^{i(\omega t + \phi)} \quad (1)$$

式中:  $Z_{10}$  和  $Z_{20}$  为响应输出的振幅大小;  $\phi$  为滞后的相位角。

1/4 车辆模型中,车轮和车身质量块的速度、加速度可分别写为:

$$\dot{Z}_1 = i\omega Z_1, \ddot{Z}_1 = -\omega^2 Z_1 \quad (2)$$

$$\dot{Z}_2 = i\omega Z_2, \ddot{Z}_2 = -\omega^2 Z_2 \quad (3)$$

车轮动荷载为:

$$F_d = K_t(Z_1 - q) = -K_t\left(\frac{1}{\omega^2} \ddot{Z}_1 + q\right) \quad (4)$$

由式(4)可知,在车辆和路面平整度一定的情况下,车辆动荷载与轮轴加速度线性相关,同时车辆动荷载作用频率和轮胎竖向振动频率一致。因此,加速度特征可反映动荷载特征。

## 2 车辆轮轴振动测试

### 2.1 试验道路

选择济南地区低等级公路和高速公路作为试验道路,分别为县级公路长孝路、济南绕城高速公路。

### 2.2 平整度测试

低等级公路和高等级公路分别采用连续式平整度测量仪、激光平整度测量仪测试平整度。检测结果如下:长孝路平整度标准差  $\sigma$  为 1.2 mm;高速公路国际平整度指数  $IRI$  平均值为 1.40 m/km。根据文献[18]~[20],  $\sigma = 0.6 IRI$ , 得高速公路路面平整度标准差为 0.84 mm。

### 2.3 试验车辆

选择小型货车和重型货车作为测试车辆,在其上安装车辆轮轴振动测试仪,分别在低等级公路和高速公路上以空载、满载两种工况完成不同速度条件下轮轴振动测试。

## 3 轮轴振动时域特征分析

### 3.1 车辆轮轴振动时域结果

小型货车分别在试验路上以不同速度、按空载和满载两种工况进行试验,得到低等级公路和高等级公路上车辆轮轴振动时程曲线。其中空载下在低

等级公路上以 60 km/h 速度行驶时的轮轴振动时程曲线见图 2,满载下在高等级公路上以 80 km/h 速度行驶时的轮轴振动时程曲线见图 3。

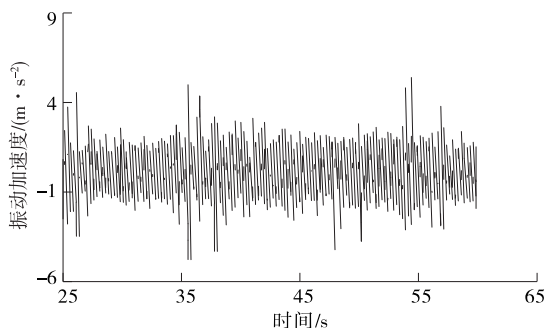


图2 小型货车空载下在低等级公路上以 60 km/h 速度行驶时的振动时程曲线

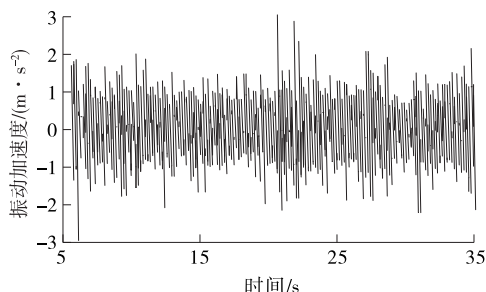


图3 小型货车满载下在高等级公路上以 80 km/h 速度行驶时的振动时程曲线

重型货车分别在试验路上以不同速度、按空载和满载两种工况进行试验,得到低等级公路和高等级公路上车辆轮轴振动时程曲线。其中空载下在低等级公路上以 40 km/h 速度行驶时的轮轴振动时程曲线见图 4,满载下在高等级公路上以 60 km/h 速度行驶时的轮轴振动时程曲线见图 5。

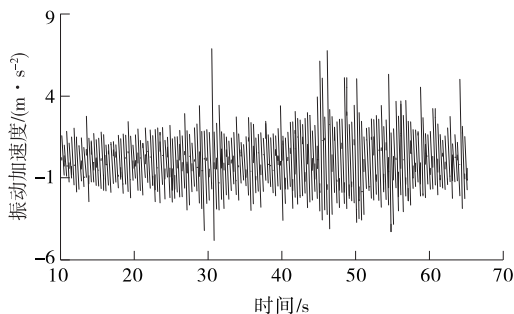


图4 大型货车空载下在低等级公路上以 40 km/h 速度行驶时的振动时程曲线

### 3.2 振动加速度标准差分析

#### 3.2.1 车辆振动加速度均方值

统计不同情况下车辆轮轴竖向振动加速度均方

值,结果见表 1。

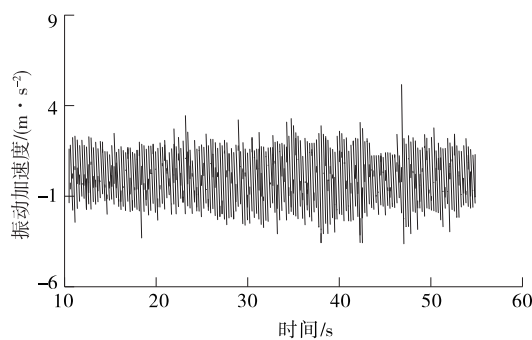


图 5 大型货车满载下在高等级公路上以 60 km/h 速度行驶时的振动时程曲线

表 1 竖向振动加速度均方值

公路等级	车辆速度 (km · h <sup>-1</sup> )	竖向振动加速度均方值/(m · s <sup>-2</sup> )			
		重型货车		小型货车	
		空载	满载	空载	满载
低等级公路	70	1.65	1.53	1.77	1.30
	60	1.63	1.12	1.36	0.85
	50	1.24	1.03	1.32	0.79
	40	1.22	0.96	1.17	0.66
高速公路	100	1.89	—	1.90	0.86
	80	1.59	1.42	1.67	0.81
	60	1.51	1.06	1.26	0.70

注:重型货车满载情况下速度无法达到 100 km/h。

从表 1 可以看出:空载时重型货车的竖向振动加速度均方值为 1.5 m/s<sup>2</sup> 左右,满载时略有降低;空载时小型货车的竖向振动加速度均方值为 1.5 m/s<sup>2</sup>,满载时为 0.8 m/s<sup>2</sup> 左右。

3.2.2 不同车型的振动加速度标准差对比

由于车辆悬架、轮胎、装载质量不同,车辆在行驶过程中受路面不平度激励所表现出的响应不同,车辆轮轴振动特征也不同。对不同车型在不同等级公路上的轮轴振动加速度标准差进行对比,以高等级公路为例,结果见图 6。

从图 6 可看出:小型货车和大型货车的轮轴振动加速度标准差都随着速度的增加而增加;空载时两车型的轮轴振动加速度标准差相近,满载时小型货车的振动加速度标准差小于大型货车。

3.2.3 不同装载情况下的振动加速度标准差对比

装载质量对车辆作用于路面的动荷载有显著影响。分别对满载和空载下小型货车和大型货车轮轴振动加速度标准差进行分析,以高等级公路为例,结果见图 7。

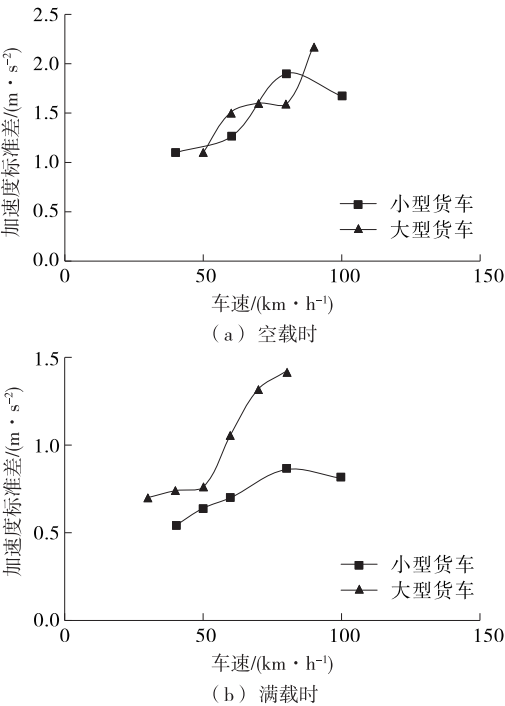


图 6 高等级公路上不同车型轮轴振动加速度标准差对比

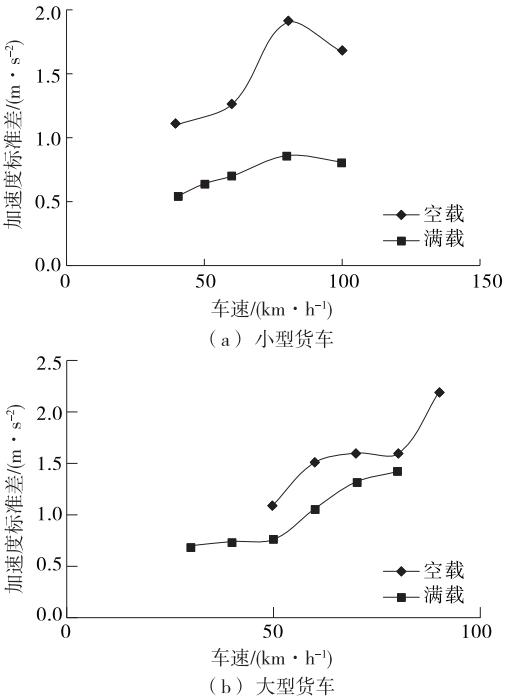


图 7 高等级公路上不同装载情况下车辆轮轴振动加速度标准差对比

从图 7 可看出:车辆装载质量对车辆轮轴振动加速度的影响较大;满载时的振动加速度标准差小于空载时的标准差,但由于装载质量的增加,车辆动荷载不一定会减小。

### 3.2.4 路面平整度对车辆轮轴振动特征的影响

公路等级越高,路面平整度越好。为了分析路面平整度对车辆振动的影响,分别对高等级公路和低等级公路上车辆轮轴振动加速度标准差进行对比分析,以小型货车为例,结果见图8。

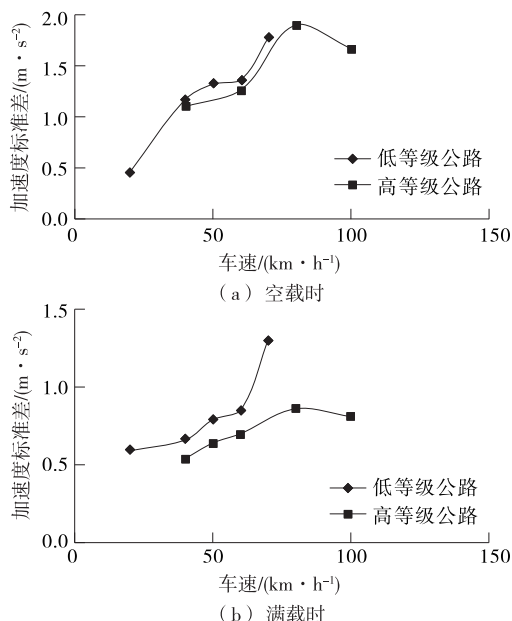


图8 不同等级公路上小型货车轮轴振动加速度标准差对比

从图8可看出:路面平整度越好,车辆轮轴振动加速度标准差越小;车辆空载时影响较小,满载时影响较大。

## 4 结论

(1) 小型货车和大型货车的轮轴振动加速度标准差都随着车速的增加而增加;空载时其标准差大小相近,满载时小型货车的振动加速度标准差小于大型货车。

(2) 装载质量对车辆轮轴振动加速度的影响较大,满载时的振动加速度标准差小于空载时。

(3) 平整度对车辆振动加速度有一定影响,车辆空载时影响较小,满载时影响较大。

### 参考文献:

- [1] 钟阳,王哲人,张肖宁.不平整路面上行驶的车辆对路面随机压力的分析[J].中国公路学报,1992,5(2).
- [2] 黄晓明.路面动荷载与路面平整度关系的随机分析[J].东南大学学报:自然科学版,1993,23(1).
- [3] 孙路,邓学均.车辆一路面相互作用产生的动力荷载[J].东南大学学报:自然科学版,1996,26(5).
- [4] 邓学均.车辆地面结构系统动力学研究[J].东南大学学

报:自然科学版,2002,32(3).

- [5] 姚时音,孙仁云.基于七自由度车辆模型的稳定性仿真研究[J].西华大学学报:自然科学版,2008,27(2).
- [6] 张洪亮,胡长顺.基于五自由度车辆模型的桥头搭板容许纵坡变化值研究[J].土木工程学报,2005,38(6).
- [7] 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).
- [8] 郑仲浪,吕彭民.多轴大货车对路面的动作用力研究[J].郑州大学学报:工学版,2009,30(4).
- [9] 张洪亮,杨万桥.基于人一车一路五自由度振动模型的路面平整度评价方法[J].交通运输工程学报,2010,10(4).
- [10] Dodds C J, Robson J D. The description of road surface roughness[J]. Journal of Sound and Vibration, 1973, 31(2).
- [11] Todd K B, Kulakowski B T. Simple computer models for predicting ride quality and pavement loading for heavy trucks[J]. Transportation Research Record, 1989, 1215.
- [12] Hunt H E. Modeling of road vehicles for calculation of traffic-induced ground vibration as a random process[J]. Journal of Sound and Vibration, 1991, 44(1).
- [13] Hunt H E. Stochastic modeling of traffic-induced ground vibration[J]. Journal of Sound and Vibration, 1991, 144(1).
- [14] Watts G R. The generation and propagation of vibration in various soils produced by dynamic loading of road pavement[J]. Journal of Sound and Vibration, 1992, 156(2).
- [15] Watts G R, Krylov V V. Ground-borne vibration generated by vehicles crossing road humps and speed control cushions[J]. Applied Acoustics, 2000, 59(3).
- [16] O Javier, José M Goicolea Astiz, á Miguel, et al. Fully three-dimensional vehicle dynamics over rough pavement[A]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Transport[C], 2013.
- [17] Dae-Wook Park, A T Papagiannakis. Analysis of dynamic vehicle loads using vehicle pavement interaction model[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2014, 18(7).
- [18] 周晓青,孙立军.国际平整度指数与行驶车速的关系[J].同济大学学报:自然科学版,2005,33(10).
- [19] 吴庆雄,陈宝春,奚灵智.路面平整度 PSD 和 IRI 评价方法比较[J].交通运输工程学报,2008,8(1).
- [20] 张向东,闫维明,葛惠娟,等.由国际平整度指数模拟路面不平度方法研究[J].公路交通科技,2009,26(4).

收稿日期:2016-11-09