

文章编号:1671-1637(2012)06-0082-07

车辆超载对公路使用寿命的影响

张 犇¹, 张宜民², 魏 朗¹, 段 翔³, 陈加宏³

(1. 长安大学 汽车运输安全保障技术交通行业重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 汽车学院, 陕西 西安 710064; 3. 云南交通咨询有限公司, 云南 昆明 650031)

摘 要:分析了轴载与公路使用寿命的关系,根据路面不平度的频域模型和时域模型,建立了4自由度车辆动力学模型。利用Mathcad软件进行数值仿真计算,获得不同工况下车辆前后轮的最大动载荷,分析了车轮动载荷与车速、车轮载荷与超载、轮荷冲击系数与超载之间的关系,并预测了不同载荷条件下公路的实际使用寿命。研究表明:车轮动载荷和轮荷冲击系数与车速成线性增大关系,当车速由 $10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 增大到 $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,车轮动载荷增大2.5~3.1倍,轮荷冲击系数增大17%~20%;超载降低了车辆的轮荷冲击系数,但使得车轮的实际最大载荷大幅增大;在超载100%的情况下,当以沥青层层底拉应力为设计指标时,公路实际使用寿命下降96%,当以半刚性材料层层底拉应力为设计指标时,公路实际使用寿命下降99%。

关键词:公路使用寿命;路面不平度;超载;车轮载荷;动载荷;轴载

中图分类号:U491.12

文献标志码:A

Influence of vehicle overloading on service life of highway

ZHANG Wei¹, ZHANG Yi-min², WEI Lang¹, DUAN Xiang³, CHEN Jia-hong³

(1. Key Laboratory for Automotive Transportation Safety Technology of Ministry of Transport, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 3. Yunnan Traffic Consulting Co., Ltd., Kunming 650031, Yunnan, China)

Abstract: The relationship between axle load and the service life of highway was analyzed. Based on the frequency domain model and time domain model of pavement roughness, vehicle dynamics model with four degrees of freedom was set up. Numerical simulation calculation was carried out by using Mathcad software, and the maximum dynamic loads of front and rear wheels under different conditions were obtained. The relationships among wheel dynamic load and vehicle velocity, wheel load and overloading, wheel load impact factor and overloading were analyzed respectively, the actual service lives of highway under different conditions were forecasted. Analysis result shows that there are linear increasing relationships between wheel dynamic load and vehicle velocity, wheel load impact factor and vehicle velocity. When vehicle velocity increases from $10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ to $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, wheel dynamic load increases by 2.5-3.1 times, and wheel load impact factor increases by 17%-20%. Overloading decreases wheel load impact factor, but increases the real maximum wheel load greatly. Under the condition of overloading 100%, the actual service life of highway will decrease by 96% while the bottom layer tensile stress of asphalt layer is taken as design index, and the actual service life of highway will decrease by 99% while the bottom layer tensile stress of semi-rigid material layer is taken as design index. 10 figs, 14 refs.

Key words: service life of highway; pavement roughness; overloading; wheel load; dynamic load;

收稿日期:2012-07-24

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划项目(2009BAG13A07);中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2012JC061)

作者简介:张 犇(1973-),男,陕西佳县人,长安大学副教授,工学博士,从事道路交通安全研究。

axle load

Author resume: ZHANG Wei(1973-), male, associate professor, PhD, +86-29-82334367, zhweijx@chd.edu.cn.

0 引言

近年来,随着公路运输事业的飞速发展,超载超限运输已经成为了一种普遍现象,有些重载车辆的单轴载荷超过了 180 kN,甚至达到了 240 kN,而且轮胎压力也从 0.7 MPa 提升到了 0.9 MPa 以上。根据长安大学陈荫三教授 2002、2003 年所做的公路运输量统计,货车超载率在 60%左右,超载 30%以上的车辆比例达到 18%~22%,超载 100%的车辆的比例为 2.5%~10.0%^[1]。针对这一严峻的现实,2004 年国家七部委联合开展了车辆超限超载集中治理工作,在高速公路上实行计重收费,治超工作取得了明显成效,2010 年全国高速公路运输量统计结果表明,货车超限率为 28.66%~30.34%,超限 30%的货车比例为 4.62%~4.85%^[2],明显小于 2004 年之前的统计数据。但由于缺乏常态机制,超限超载车辆检查站难以覆盖所有公路,使得在某些地方仍有反弹。为了适应超载运输的需要,轮胎压力也在逐步提高,甚至有 49%的车辆轮胎压力超过了 1.1 MPa,远远大于 0.7 MPa 的额定压力^[3-4],可见中国的公路超载超限运输形势仍然不容乐观。

张桦等研究发现超载不仅会大大增加事故的发生率,而且会加重公路路面的负担,使得路面结构遭到破坏,大大降低了公路的实际使用寿命^[5];Park 对低交通流量下柔性路面的路面应力响应用有限元模型进行了分析,提出了载荷与应力的非线性依赖关系,通过对车辆载荷与路面损坏之间关系的研究,发现对路面直接影响的是车轮载荷,而不是车辆总质量^[6-7];郑南翔等建立了基于温度、轴载、轴次的车辙预估模型,对重载条件下沥青路面车辙预估进行了研究,揭示了车辙深度与环境温度和车轮载荷存在着正相关的关系^[8];许佳等对超载作用下高速公路路面结构受力进行了分析,结果表明路面结构的损坏程度与轴载呈指数级增大关系^[9];蔡玉贺等分别采用轴载换算公式与质量分割推算方法研究了超限超载货物运输对路面的破坏机理^[10];裴建中等研究了多轴车辆对沥青路面的动态响应,提出了轴载的不均匀分布与路面破坏之间的关系^[11];高梦起等研究了基于交通流荷载的高速公路沥青路面的使用寿命^[12];秦旻等基于路面平整度研究了沥青路面的

剩余使用寿命^[13]。

在实际运输过程中,路面不仅受到车轮静载荷的作用,而且还要承受相当程度的车轮动载荷的作用。车轮动载荷属于行驶动力学的研究范畴,研究已经相当成熟,汽车领域的相关专家学者不仅建立了比较简单的四分之一车辆模型和二分之一车辆模型,而且还建立了包括驾驶人、乘客以及货物在内的多自由度模型,汽车振动有限元模型的自由度已经达到了上万个。车轮载荷是路面早期损坏的主要原因之一,车轮载荷包括动载荷和静载荷两部分,车辆超载必然使得路面所承受的实际载荷大幅增大,公路实际使用寿命大幅下降。本文通过对重型车辆的动力学建模与仿真,以研究车辆超载对动载荷、轮荷冲击系数和公路实际使用寿命的影响。

1 实际轴载与标准轴载关系分析

半刚性基层沥青混凝土路面结构始终处在交通荷载和温度荷载的循环作用之下,其破坏主要体现为疲劳破坏,所以公路的设计使用寿命通常用标准当量轴载的作用次数来表示,由于一般情况下车辆轴载不可能正好等于标准轴载,世界各国都根据本国国情确定标准轴载,中国路面设计以双轮组单轴载 100 kN 作为标准轴载,标准轮胎接地压力为 0.70 MPa。由于公路上行驶的车辆型号与装载各不相同,为了便于计算,应将各种轴载作用次数统一换算为标准轴载作用次数。

由于不同力学参数的疲劳等效效应不同,故标准轴载的换算公式也不相同。根据现行国标《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2006)规定,实际轴载的当量换算为

$$N_0 = \sum_{i=1}^k C_1 C_2 N_i \left(\frac{P_i}{P_0} \right)^k \quad (1)$$

式中: N_0 为标准轴载的当量轴次; N_i 为实际轴载车辆作用次数; P_0 为标准轴载; P_i 为第 i 次实际轴载; C_1 为轮组系数,当以沥青层层底拉应力为设计指标时,双轮组取 1.00,单轮组取 6.40,四轮组取 0.38,当以半刚性材料层层底拉应力为设计指标时,双轮组取 1.00,单轮组取 18.50,四轮组取 0.09; C_2 为轴数系数; k 为相关系数,当以沥青层层底拉应力为设计指标时,如果实际载荷小于 130 kN 时, k 取

4.35, 实际载荷大于 130 kN 时, k 取 5.00, 当以半刚性材料层层底拉应力为设计指标时, 如果实际载荷小于 130 kN 时, k 取 8.00, 实际载荷大于 130 kN 时, k 取 9.00。

由式(1)可知, 对同一车型的车辆, 标准轴载作用次数与实际轴载作用次数的关系为

$$\frac{N_0}{N_1} = \left(\frac{P}{P_0}\right)^k \quad (2)$$

式中: P 为实际轴载(kN)。

公路的使用寿命实际上就是在一定交通流量情况下, 公路能够承受标准轴载最大作用次数的使用年限。假设车辆以标准轴载运行时, 公路的使用年限为 T_0 , 当车辆以实际轴载运行时, 公路的实际使用年限为 T , 则有

$$T_0 = \left(\frac{P}{P_0}\right)^k T \quad (3)$$

当以沥青层层底拉应力为设计指标, 公路的实际使用寿命 T_1 为

$$T_1 = \begin{cases} T_0 \left(\frac{P_0}{P}\right)^{4.35} & P \leq 130 \text{ kN} \\ T_0 \left(\frac{P_0}{P}\right)^{5.00} & P > 130 \text{ kN} \end{cases} \quad (4)$$

当以半刚性材料层层底拉应力为设计指标时, 公路的实际使用寿命 T_2 为

$$T_2 = \begin{cases} T_0 \left(\frac{P_0}{P}\right)^8 & P \leq 130 \text{ kN} \\ T_0 \left(\frac{P_0}{P}\right)^9 & P > 130 \text{ kN} \end{cases} \quad (5)$$

超载对公路寿命影响的研究有很多, 不过在轴载换算时一般都以静载荷直接进行计算。但车辆对路面的实际作用力是动载荷, 公路所承受的最大载荷为最大动载荷, 由于车辆行驶的随机性, 使得每次最大动载荷不可能落在同一路面位置上, 所以利用式(5)对公路进行寿命估算时车辆轴载应该采用动载荷的均方根值, 而不是静载荷。

2 路面不平度模型

2.1 路面不平度的频域模型

路面不平度是指道路实际轮廓相对于基准面的偏离程度。作为车辆振动输入的路面不平度, 主要采用路面功率谱密度来描述其统计特性, 根据国标《机械振动 道路路面谱测量数据报告》(GB/T 7031—2005), 路面不平度功率谱密度 $G(n)$ 为

$$G(n) = G_0 \left(\frac{n}{n_0}\right)^{-p} \quad (6)$$

式中: G_0 为路面不平度系数; p 为频率指数, 一般为双对数坐标上斜线的斜率; n 为空间频率; n_0 为参考空间频率, 一般 n_0 取 0.1 m^{-1} 。

按照式(6), 当空间频率趋于 0 时, 所表达的路面输入振幅将趋于无穷大, 而实际路面谱密度在低频段时趋于平稳; 另外, 当空间频率达到一定程度时, 路面输入的振幅将可以看作是 0。为了使模型更加符合道路实际情况, 可以引入下截止频率 n_L 和上截止频率 n_H , 当 $n \leq n_L$ 时, 谱密度幅值保持恒定, 当 $n > n_H$ 时, 谱密度幅值等于 0。路面不平度功率谱密度 $G(n)$ 又可表示为

$$G(n) = \begin{cases} G_0 \left(\frac{n_L}{n_0}\right)^{-p} & n \leq n_L \\ G_0 \left(\frac{n}{n_0}\right)^{-p} & n_L < n \leq n_H \\ 0 & n > n_H \end{cases} \quad (7)$$

2.2 路面不平度的时域模型

在实际工作中, 一般不能直接获得路面的功率谱密度值, 而是用国际平整度指数来评价路面的平整度性能, 因此, 在实际应用时应将实测的平整度指数值与功率谱密度值进行换算, 然后再进行仿真。参考文献[14], 路面平整度指数 I 与路面不平度系数的关系为

$$I = 0.60\sqrt{G_0} \quad (8)$$

为了适应车辆振动的时域模型, 激励输入的路面不平度也必须采用时域模型。路面不平度的时域模型有白噪声积分模型、幂函数模型与三角级数叠加模型等, 其中三角级数叠加法理论和计算上比较简单, 因而得到了较为广泛的应用。

将路面不平度空间频率范围($n_L \sim n_H$) N 等分, 每个等分宽度 Δn 为

$$\Delta n = \frac{n_H - n_L}{N}$$

路面不平度可表示为

$$q(x) = \sum_{j=1}^N \sqrt{2G(n_j)\Delta n} \sin(2\pi n_j x + \theta_j) \quad (9)$$

$$n_j = n_L + \left(j - \frac{1}{2}\right)\Delta n$$

式中: $G(n_j)$ 为空间频率为 n_j 的路面不平度功率谱密度; j 为等分编号; $q(x)$ 为时域路面随机高程; x 为路面的纵向位置; θ_j 为属于 $[0, 2\pi]$ 上的均匀分布的随机参数。

当空间频率间划分足够细密即 N 取得足够大时, 由式(9)生成的时域路面随机激励输入的频率特

征与给定的路面谱是一致的。以 B 级路面为例,通过 Mathcad 软件仿真计算得随机路面不平度,仿真参数 G_0 取 $6.4 \times 10^{-5} \text{ m}^3$, p 取 2, n_0 取 0.1 m^{-1} , n_L 取 0.01 m^{-1} , n_H 取 3 m^{-1} 时,路面不平度仿真结果见图 1。

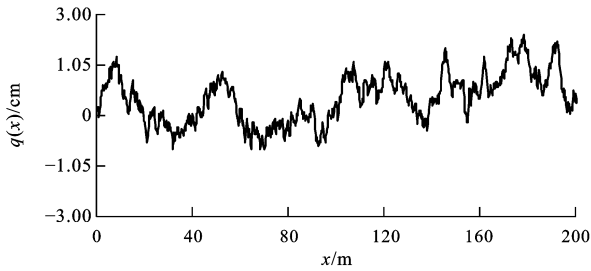


图 1 路面不平度仿真结果

Fig. 1 Simulation result of road roughness

3 车辆振动模型

车辆在路面上行驶时,由于路面不平度的激励,车辆会产生不同程度的振动,当振动达到一定程度时,不仅会影响到乘坐舒适性,而且还会由于动载荷的存在,加剧了路面的损毁。为此,建立了包括车轮垂直振动、车身垂直振动和车身俯仰振动的 4 自由度二分之一车辆振动模型(图 2),以研究运动车辆随机动载荷对路面的破坏。

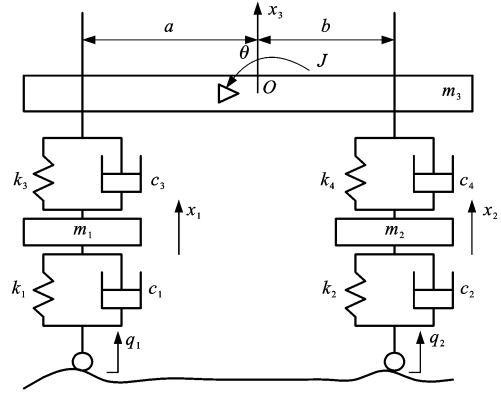


图 2 车辆振动模型

Fig. 2 Vehicle vibration model

令 m_1 、 m_2 分别为车辆前、后轮非悬挂质量(kg); m_3 为车身质量(kg); J 为车身转动惯量($\text{kg} \cdot \text{m}^2$); q_1 、 q_2 分别为前、后轮路面不平度激励(m); x_1 、 x_2 分别为车辆前、后轮垂向位移(m); x_3 为车身质心垂向位移(m); θ 为车身俯仰角(rad); k_1 、 k_2 分别为前、后轮的轮胎刚度($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$); k_3 、 k_4 分别为车辆前、后悬挂的刚度($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$); c_1 、 c_2 分别为前、后轮轮胎阻尼系数($\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$); c_3 、 c_4 分别为车辆前、后悬挂阻尼系数($\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$); a 、 b 分别为前、后悬挂至车身质心的距离(m)。以车辆振动系统的静平衡位置为坐标原点,车辆振动系统的动力学方程为

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 = k_1(q_1 - x_1) + c_1(\dot{q}_1 - \dot{x}_1) + k_3(x_3 - a\theta - x_1) + c_3(\dot{x}_3 - a\dot{\theta} - \dot{x}_1) \\ m_2 \ddot{x}_2 = k_2(q_2 - x_2) + c_2(\dot{q}_2 - \dot{x}_2) + k_4(x_3 + b\theta - x_2) + c_4(\dot{x}_3 + b\dot{\theta} - \dot{x}_2) \\ m_3 \ddot{x}_3 = k_3(x_1 - x_3 + a\theta) + c_3(\dot{x}_1 - \dot{x}_3 + a\dot{\theta}) + k_4(x_2 - x_3 - b\theta) + c_4(\dot{x}_2 - \dot{x}_3 - b\dot{\theta}) \\ J\ddot{\theta} = [k_3(x_1 - x_3 + a\theta) + c_3(\dot{x}_1 - \dot{x}_3 + a\dot{\theta})]a + [k_4(x_2 - x_3 - b\theta) + c_4(\dot{x}_2 - \dot{x}_3 - b\dot{\theta})]b \end{cases} \quad (10)$$

由式(10)可知,车辆在不平路面上行驶时,前、后轮的动载荷 F_1 、 F_2 分别为

$$\begin{cases} F_1 = k_1(q_1 - x_1) + c_1(\dot{q}_1 - \dot{x}_1) \\ F_2 = k_2(q_2 - x_2) + c_2(\dot{q}_2 - \dot{x}_2) \end{cases} \quad (11)$$

4 计算结果分析

利用 Mathcad 软件,对式(10)、(11)微分方程组进行求解,即可得到路面受到车轮的动载荷。仿真时选取标准双轴载重车作为参考车辆,参数 m_1 、 m_2 、 m_3 分别为 297、524、6 451 kg; J 为 46 250 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; a 、 b 分别为 3.79、2.31 m; k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 分别为 788 100、875 670、1 198 250、1 138 370 $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$; c_1 、 c_2 、 c_3 、 c_4 分别为 2 000、2 000、15 000、15 000 $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$; 车速分别为 10、20、30、40、50、60、70、80、90、100 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$; 总质量分别为满载、超载 20%、超载

60%、超载 100%。

4.1 超载对车轮动载荷的影响

通过仿真计算,可以得到不同工况下车辆前、后轮的动载荷,结果分别见图 3、4,从中可以看出,由于后悬挂刚度远远大于前悬挂刚度,后轮静载荷也

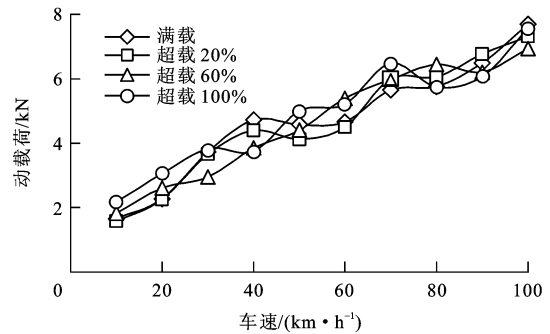


图 3 前轮动载荷

Fig. 3 Dynamic loads of front wheel

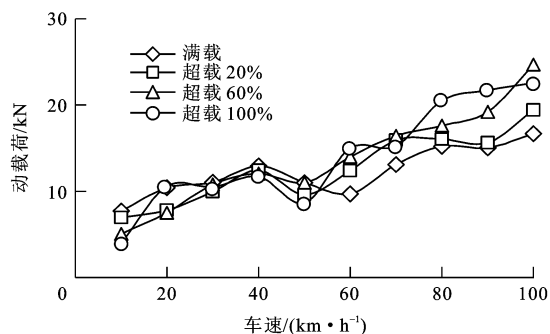


图 4 后轮动载荷

Fig. 4 Dynamic loads of rear wheel

明显大于前轮静载荷,使得后轮动载荷明显大于前轮动载荷,后轮平均动载荷是前轮的 2.8 倍。当车速由 $10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 增大到 $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,车轮动载荷增大 2.5~3.1 倍。另外当车速分别为 40、80 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,动载荷出现了 2 次峰值,说明在车辆振动系统的固有频率附近发生了共振,使得车轮动载荷明显增大。对于满载、超载 20%、超载 60% 与超载 100% 工况而言,当车速小于 $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,车轮动载荷没有明显变化,而当车速大于 $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 后,后轮动载荷随载荷的增大而增大。

虽然超载对车轮动载荷的影响不是太大,但由于超载使车轮静载荷大幅增大,所以车轮的总体载荷也得到了大幅增大。超载与平均车轮载荷的关系见图 5,从中可以看出,当满载时,前轮平均载荷为 60 kN,后轮平均载荷为 119 kN,当超载 100% 时,前轮平均载荷为 106 kN,后轮平均载荷为 207 kN。

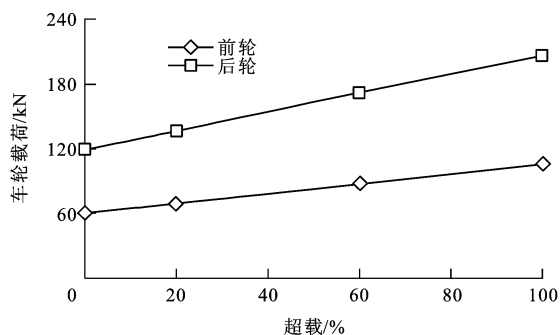


图 5 车轮载荷与超载的关系

Fig. 5 Relationship between wheel load and overloading

4.2 超载对轮荷冲击系数的影响

为了研究超载工况下动载荷与静载荷的关系,引入了轮荷冲击系数 λ ,即

$$\lambda = \frac{F_{zm}}{F_{zs}} \quad (12)$$

式中: F_{zm} 为最大车轮载荷; F_{zs} 为静态车轮载荷。

由于最大车轮载荷 F_{zm} 是静态车轮载荷 F_{zs} 与车轮最大动载荷 F_{dm} 之和,则有

$$\lambda = 1 + \frac{F_{dm}}{F_{zs}} \quad (13)$$

不同车速条件下,前、后轮的轮荷冲击系数分别见图 6、7,从中可以看出,随着车速的增大,轮荷冲击系数也同时增大,当车速由 $10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 增大到 $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,轮荷冲击系数增大 17%~20%。图 8 为轮荷冲击系数与车辆超载率的关系,随着超载的增大,轮荷冲击系数明显减小,当满载时,前轮平均轮荷冲击系数为 1.26,后轮平均轮荷冲击系数为 1.18,当超载 100% 时,前轮平均轮荷冲击系数为 1.16,后轮平均轮荷冲击系数为 1.10。

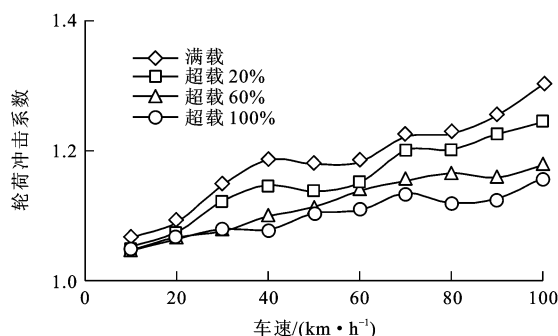


图 6 前轮轮荷冲击系数

Fig. 6 Wheel load impact factors of front wheel

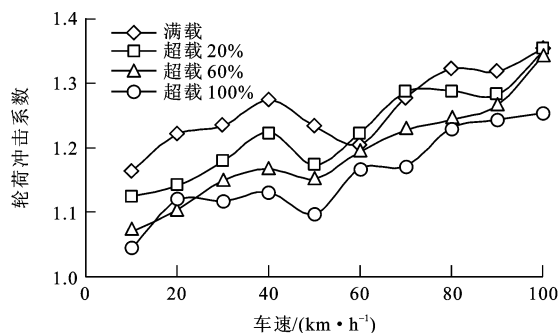


图 7 后轮轮荷冲击系数

Fig. 7 Wheel load impact factors of rear wheel

4.3 超载对公路使用寿命的影响

为了估算车辆实际轴载工况下公路的实际使用寿命,将前、后轴单次作用的轴次换算为标准轴次,并以车轮动载荷的均方根值作为路面实际承受的动载荷,然后利用式(4)、(5),即可分别计算以弯沉值和沥青层层底拉应力为设计指标与以半刚性材料层层底拉应力为设计指标时一级公路和二级公路的实际使用寿命。一级公路的设计寿命为 15 年,二级公路的设计使用寿命为 12 年,计算结果分别见图 9、10,从中可以看出,随着超载率的增大,公路的实际

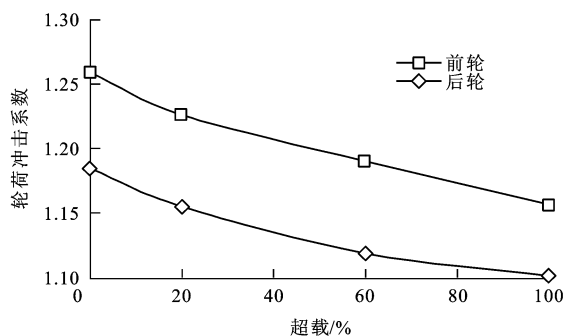


图8 超载与轮荷冲击系数的关系

Fig.8 Relationship between overloading and wheel load impact factor

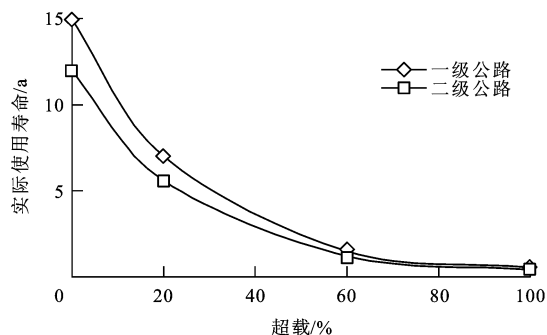


图9 基于沥青层层底拉应力的实际使用寿命

Fig.9 Actual service lives based on bottom layer tensile stress of asphalt layer

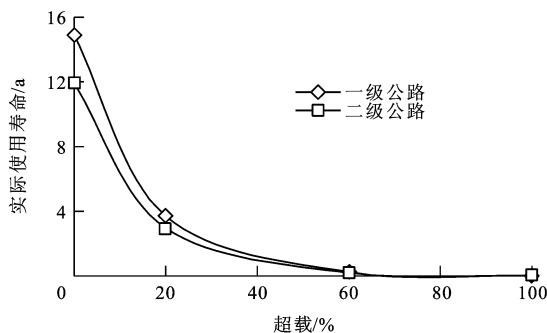


图10 基于半刚性材料层层底拉应力的实际使用寿命

Fig.10 Actual service lives based on bottom layer tensile stress of semi-rigid material layer

使用寿命急剧下降。当以沥青层层底拉应力为设计指标时,超载 20%会使使用寿命下降 53%,超载 60%会使使用寿命下降 90%,超载 100%会使使用寿命下降 96%。当以半刚性材料层层底拉应力为设计指标时,公路的实际使用寿命下降更快,超载 20%会使使用寿命下降 75%,超载 60%会使使用寿命下降 98%,超载 100%会使使用寿命下降 99%。

5 结 语

(1)根据公路实际轴载当量换算关系,给出了基

于沥青层层底拉应力和半刚性材料层层底拉应力为评价指标的公路实际使用寿命预测公式。

(2)建立了 4 自由度的车辆动力学模型,利用 Mathcad 软件对不同工况下的车轮动载荷进行了仿真计算,为公路寿命预测提供了数据依据。

(3)随着车辆行驶速度的提高,车轮动载荷与轮荷冲击系数同时增大,当车速由 $10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 增大到 $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,车轮动载荷增大 2.5~3.1 倍,轮荷冲击系数增大 17%~20%,因此,在公路运输过程中,要适当限制大型车辆的最高车速。

(4)超载虽然会使轮荷冲击系数小幅降低,但由于静载荷的增大使得动载荷依然得到提高,故应重点关注重型车辆后轮对路面的破坏作用。

(5)由于超载运输使得路面承受的车轮载荷大幅增大,公路的实际使用寿命将随超载率的增大呈负指数级递减,为了延长公路的实际使用寿命,必需限制超载车辆上路行驶。

参考文献:

References:

- [1] 陈荫三. 运用经济杠杆长效治理超载超限运输[J]. 中国公路学报, 2004, 17(2): 94-99.
CHEN Yin-san. Long-term effective solution to the overload transportation with economic lever [J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(2): 94-99. (in Chinese)
- [2] 陈荫三, 李 彬, 肖润谋. 2010 年中国高速公路网运输状态[J]. 交通运输工程学报, 2011, 11(6): 68-73.
CHEN Yin-san, LI Bin, XIAO Run-mou. Transportation status of Chinese expressway network in 2010[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(6): 68-73. (in Chinese)
- [3] 刘 儒, 周丽涛. 机动车超载行为的博弈分析及治理措施[J]. 长安大学学报: 社会科学版, 2005, 7(3): 9-11, 19.
LIU Ru, ZHOU Li-tao. Game analysis and the administration for motor vehicle overloading[J]. Journal of Chang'an University: Social Science Edition, 2005, 7(3): 9-11, 19. (in Chinese)
- [4] 黄文元, 王旭东, 刘瀚彪, 等. 公路货运超载运输现状及对策的建议[J]. 公路交通科技, 2003, 20(2): 148-152.
HUANG Wen-yuan, WANG Xu-dong, LIU Han-biao, et al. Overloaded trucking in China and counter measures [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2003, 20(2): 148-152. (in Chinese)
- [5] 张 桦, 魏 朗, 彭绍勇. 基于能量守恒理论的山区公路线形安全评价[J]. 交通运输工程学报, 2009, 9(4): 85-91.
ZHANG Wei, WEI Lang, PENG Shao-yong. Safety evaluation of road alignment based on energy conservation law[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009, 9(4): 85-91. (in Chinese)
- [6] PARK S W. Analysis of stress-dependent behavior in conven-

- tional asphalt pavements[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2001, 5(4): 387-395.
- [7] PARK S W. Load limits based on rutting in pavement foundations[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2004, 8(1): 23-28.
- [8] 郑南翔,牛思胜,许新权.重载沥青路面车辙预估的温度-轴载-轴次模型[J].中国公路学报,2009,22(3):7-13.
ZHENG Nan-xiang, NIU Si-sheng, XU Xin-quan. Temperature, axle load and axle load frequency model of rutting prediction of heavy-duty asphalt pavement[J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(3): 7-13. (in Chinese)
- [9] 许佳,曾小军.超载作用对高速公路路面结构的影响分析[J].公路与汽运,2011(2):107-111.
XU Jia, ZENG Xiao-jun. The analysis of the affect of overload on pavement structure of expressway[J]. Highways and Automotive Applications, 2011(2): 107-111. (in Chinese)
- [10] 蔡玉贺,丰伟,罗霞,等.超限超载货物运输对路面破损的影响分析[J].公路,2006(10):63-66.
CAI Yu-he, FENG Wei, LUO Xia, et al. Analysis of impact of overload and oversize freight transport on pavement distress[J]. Highway, 2006(10): 63-66. (in Chinese)
- [11] 裴建中,吴浩,陈勇,等.多轴移动荷载下沥青路面的动态响应特性[J].中国公路学报,2011,24(5):26-31.
- PEI Jian-zhong, WU Hao, CHEN Yong, et al. Dynamic response characteristics of asphalt pavement under multi-axle moving load[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(5): 26-31. (in Chinese)
- [12] 高梦起,李安生,张军,等.基于交通流荷载的高速公路沥青路面使用寿命分析[J].交通运输工程与信息学报,2011,9(2):55-60.
GAO Meng-qi, LI An-sheng, ZHANG Jun, et al. Analysis on the service life of expressway based on traffic flow loads[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2011, 9(2): 55-60. (in Chinese)
- [13] 秦旻,曹源文,梁乃兴,等.基于平整度的沥青路面剩余寿命预估方法[J].长安大学学报:自然科学版,2010,30(3):14-17.
QIN Min, CAO Yuan-wen, LIANG Nai-xing, et al. Residual life forecast method of asphalt pavement based on evenness[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(3): 14-17. (in Chinese)
- [14] 吴庆雄,陈宝春.钢管混凝土拱桥桥面平整度评价[J].交通运输工程学报,2010,10(4):23-28.
WU Qing-xiong, CHEN Bao-chun. Deck roughness evaluation of concrete-filled steel tubular arch bridge[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(4): 23-28. (in Chinese)
- (上接第81页)
- [4] RAUBAL M, WINTER S. Enriching wayfinding instructions with local landmarks[J]. Geographic Information Science, 2002(2478): 243-259.
- [5] EGENHOFER M J, FRANZOSA R D. Point-set topological spatial relations[J]. International Journal for Geographical Information System, 1991, 5(2): 161-174.
- [6] MILLER H J. Human wayfinding, environment-behavior relationships, and artificial intelligence[J]. Journal of Planning Literature, 1992, 7(2): 139-150.
- [7] 黄敏.道路交通指路标志系统建模的理论和方法[D].广州:中山大学,2006.
HUANG Min. Modeling theory and method for road guide sign system[D]. Guangzhou: Sun Yat-sen University, 2006. (in Chinese)
- [8] 黄敏,余志,张小兰.基于交叉口特征的指路标志建模方法[J].西南交通大学学报,2007,42(1):110-114.
HUANG Min, YU Zhi, ZHANG Xiao-lan. Modeling method for road guide signs based on intersection features[J]. Journal of South-west Jiaotong University, 2007, 42(1): 110-114. (in Chinese)
- [9] 黄敏,赵建华,吴海宾,等.基于道路标线布设方案的交通路网数据库构建研究[J].测绘科学,2012,37(1):189-191.
HUANG Min, ZHAO Jian-hua, WU Hai-bin, et al. Transportation network database construction based on traffic markings deployment[J]. Science of Surveying and Mapping, 2012, 37(1): 189-191. (in Chinese)
- [10] 沙志仁,黄敏.道路交叉口指路标志定量分析指标及方法研究[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2009,28(5):926-929.
- SHA Zhi-ren, HUANG Min. Quantitative analysis index and method for guide signs at intersection[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2009, 28(5): 926-929. (in Chinese)
- [11] 牟振华,胡光明,韦栋.基于城市道路功能划分的交叉口指路标志信息分级体系[J].道路交通与安全,2007(7):15-19.
MOU Zhen-hua, HU Guang-ming, WEI Dong. Classification system of intersection guide sign information based on the urban road classified by function[J]. Road Traffic and Safety, 2007(7): 15-19. (in Chinese)
- [12] 杜志刚,潘晓东,郭雪斌.交通指路标志信息量与认知性关系[J].交通运输工程学报,2008,8(1):118-122.
DU Zhi-gang, PAN Xiao-dong, GUO Xue-bin. Relationship between information quantity and visual cognition of traffic guide sign[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008, 8(1): 118-122. (in Chinese)
- [13] 樊大可,王建军,常振文,等.道路交通标志信息过载阈值的计算[J].长安大学学报:自然科学版,2009,29(6):82-87.
FAN Da-ke, WANG Jian-jun, CHANG Zhen-wen, et al. Overload threshold of traffic sign information[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(6): 82-87. (in Chinese)
- [14] 王建军,陈梦月,常振文,等.基于驾驶人出行心理的道路网指路系统设计[J].长安大学学报:自然科学版,2009,29(2):75-79.
WANG Jian-jun, CHEN Meng-yue, CHANG Zhen-wen, et al. Design of guidance system of road network based on driver trip psychology[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(2): 75-79. (in Chinese)