

# 车辆不规范行驶对平板式动态汽车衡的影响研究

张伟豪<sup>1</sup>,赖征创<sup>1,2</sup>,杨晓翔<sup>1,3</sup>

(1. 福州大学 机械工程及自动化学院,福建 福州 350116;

2. 福建省计量科学研究院,福建 福州 350003; 3. 泉州师范学院,福建 泉州 362046)

**摘要:**目前货车不规范行驶过秤主要以跳秤、冲秤形式为主,通过车辆自身振动来减小汽车衡所测得的称质量值,严重影响动态汽车衡的称质量准确度。以货车不规范行驶引起的振动问题为研究对象,将平板式汽车衡简化为由质量块、弹簧、阻尼器组成的振动模型,针对两轴刚性货车建立考虑车辆轮胎纵向力作用的1/2车辆振动模型。对车辆称质量过程中的振动耦合问题,采用Matlab/Simulink软件仿真模拟车辆不规范行驶下对汽车衡称质量精度的影响。结果表明:车辆跳秤、冲秤过程中随着加速度、减速度增加,前后轴的振动幅度增大,汽车衡的动态称质量精度随之降低;车辆的行驶车速越大,车辆不规范行驶产生的振动波动越不明显。通过实验验证了仿真模型的可行性。

**关键词:**车辆振动;汽车衡;振动分析;动态称质量

**中图分类号:**TH113.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2023)05-0064-06

## Research on Influence of Non-standard Vehicle Driving on Flat-type Dynamic Truck Scale

ZHANG Weihao<sup>1</sup>, LAI Zhengchuan<sup>1,2</sup>, YANG Xiaoxiang<sup>1,3</sup>

(1. College of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China;

2. Fujian Province Institute of Metrology, Fuzhou 350003, China;

3. Quanzhou Normal University, Quanzhou 362046, China)

**Abstract:** As the present irregular driving scale of freight cars is mainly in the form of jumping scale and striking scale, the weighing value measured by the truck scale can be reduced through the vibration of the vehicle itself, which seriously affects the weighing accuracy of the dynamic truck scale. This paper studies the vibration of truck caused by irregular driving. The flat truck scale is simplified into a vibration model composed of mass block, spring and damper, and a half vehicle vibration model considering the longitudinal force of vehicle tire is established for two-axle rigid truck. For the vibration coupling problem in the process of vehicle weighing, Matlab/Simulink software is used to simulate the influence of vehicle non-standard driving on the weighing precision of vehicle scale. The results show that with the increase of acceleration and deceleration, the vibration amplitude of front and rear axles increases, and the dynamic weighing accuracy of truck scale decreases. The greater the vehicle speed, the less obvious the vibration fluctuation caused by the irregular driving. The feasibility of the simulation model is verified by experiments.

**Keywords:** vehicle vibration; truck scale; vibration analysis; dynamic weighing

## 0 引言

目前高速公路收费站广泛采用动态汽车衡来治理货车的超载问题。虽然动态汽车衡提高了高速公路计质量收费的效率,但称质量精度问题一直是当前的主要问题,也导致了司机不规范过秤的逃票现象增多<sup>[1]</sup>。平板式汽车衡属于一种新型的动态汽车衡,与传统动态汽车衡不同之处在于无限位装置<sup>[2]</sup>,不受车辆的影响而发生纵向振动,减轻了车辆因素对称质量精度的影响。

动态称质量中,车辆振动是影响平板式汽车衡称质量准确度的关键因素之一<sup>[3]</sup>,对其车辆振动的影响分析成为了当前的研究热点。OUBRICH L等<sup>[4]</sup>对重型车辆进行

动力学建模和仿真得出车辆的动态载荷与速度的理论关系,得出道路交通产生的动荷载是影响高速动态称质量系统测量误差的主要因素。PHAM X T等<sup>[5]</sup>提出了基于平均法的轴质量估计算法,通过建立车辆与秤台之间的振动力学模型模拟初步验证了算法的有效性,随后实验验证了该算法的实际精度在可接受的范围内。肖润谋等<sup>[6]</sup>根据货车不规范过秤现象,对单车和半挂车进行力学建模模拟分析,提出相应的质量恢复数学模型,有效地提高了对司机非规范行驶情况下的称质量准确度。赖朝晖等<sup>[7]</sup>建立1/4车辆振动模型,分析了不同类型防滑纹的秤台对车辆激振力的影响规律,为汽车衡防滑纹的选择提供参考。

由于平板式汽车衡属于新型的称质量装置,故对其动力学分析的研究资料较少。本文以车辆的垂向振动对称

**基金项目:**福建省属公益类科研院所基本科研专项项目(2019R1016-2);泉州市科技局科技计划项目(2020C055)

**第一作者简介:**张伟豪(1997—),男,福建福州人,硕士研究生,研究方向为汽车动力学,425145585@qq.com。

质量精度影响为研究对象,建立车辆与秤台之间相互耦合的振动模型,分析不规范行驶情况下车轮受力变化的动力学原理,得到匀速行驶与不规范行驶下的称质量精度变化。

## 1 车辆动态称质量振动力学模型

车辆称质量过程的简易流程如图 1 所示。车轮经过平板式汽车衡时,通过安装在内部受力主梁中的称质量传感器输出对应的轴质量<sup>[2]</sup>。依次测量车辆各轴通过秤台时的称质量值,累加各轴称质量值得到被测货车的质量。

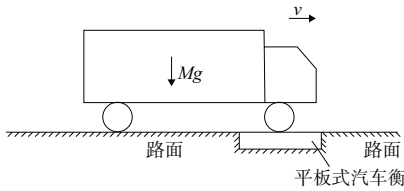


图 1 车辆称质量过程示意图

### 1.1 汽车衡称质量动力学模型

平板式汽车衡输出的称质量信号主要由 3 个部分组成,分别为静态载荷、动态载荷、高频噪声<sup>[8]</sup>。动态载荷主要由车辆、秤台的振动组成。高频噪声主要由传感器、电子内部系统干扰所组成,可由低通滤波器剔除,故振动干扰对称质量精度的影响占主导地位。车辆通过秤台时,车辆与秤台均处于振动状态,其中平板式汽车衡不受车辆作用发生纵向振动,故称质量过程中可忽略纵向振动的影响。将图 1 的车辆称质量过程简化为 2 阶的振动系统,如图 2 所示。用振动微分方程表示为

$$m_c \ddot{x}_c + c_c \dot{x}_c + k_c x_c = F(t) \quad (1)$$

式中: $m_c$ 、 $k_c$ 、 $c_c$ 分别为汽车衡质量、等效刚度和等效阻尼; $x_c$ 为汽车衡的振动位移; $F(t)$ 为车辆作用于秤台上随时间变化的动态载荷。

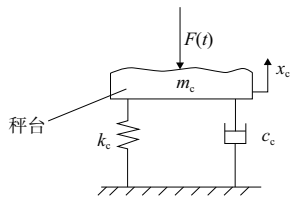


图 2 汽车与称台振动模型图

称质量传感器受到的力为

$$F_n = -(k_c x_c + c_c \dot{x}_c) + m_c g \quad (2)$$

汽车衡轴质量的动态称质量误差为

$$e_i = \frac{F_n - F_{Gi} - m_c g}{F_{Gi}}, \quad i = 1, 2 \quad (3)$$

式中: $F_{Gi}$ 为车辆第  $i$  根轴的静态质量。

### 1.2 两轴刚性车辆动力学模型

本文的车辆模型采用 1、2 车辆振动模型,两轴车的动力学模型如图 3 所示。图 3 中: $m_s$ 为车身质量; $J_s$ 为车身

的转动惯量; $\theta$ 为车身的俯仰角度; $m_1$ 、 $m_2$ 分别为前后轴非簧载质量; $k_1$ 、 $k_3$ 分别为前后悬架的刚度; $k_2$ 、 $k_4$ 分别为前后轮胎的刚度; $c_1$ 、 $c_3$ 分别为前后悬架的阻尼; $c_2$ 、 $c_4$ 分别为前后轮胎的阻尼; $x_s$ 为车身的垂直振动位移; $x_1$ 、 $x_3$ 分别为前后簧载质量的垂直振动位移; $x_2$ 、 $x_4$ 分别为前后轮胎的垂直振动位移; $q_1$ 、 $q_2$ 为前后轴路面输入激励位移; $F_{S1}$ 、 $F_{S2}$ 为前后轮胎受到的纵向力; $H$ 为车辆质心的高度; $l_1$ 、 $l_2$ 为前后轴到车身质心的距离。

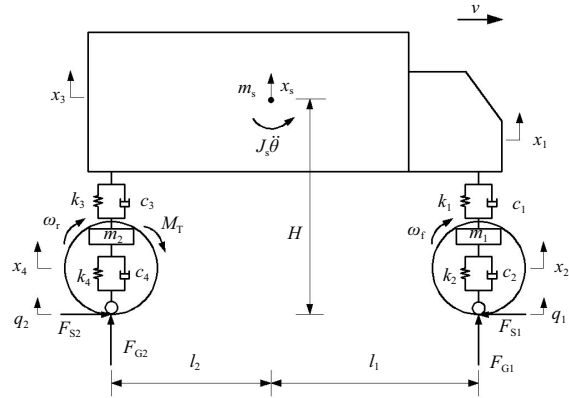


图 3 1/2 刚性车振动模型图

根据达朗贝尔原理,建立振动微分方程组:

$$\begin{cases} m_s \ddot{x}_s = -c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - k_1(x_1 - x_2) - c_3(\dot{x}_3 - \dot{x}_4) - k_3(x_3 - x_4) \\ J_s \ddot{\theta} = -l_1[c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_1(x_1 - x_2)] + l_2[c_3(\dot{x}_3 - \dot{x}_4) + k_3(x_3 - x_4)] - F_{S1}(H + x_s - q_1) + F_{S2}(H + x_s - q_2) \\ m_1 \ddot{x}_2 = -c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_e - \dot{q}_1) - k_2(x_2 - x_e - q_1) + c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_1(x_1 - x_2) \\ m_2 \ddot{x}_4 = -c_4(\dot{x}_4 - \dot{q}_2) - k_4(x_4 - q_2) + c_3(\dot{x}_3 - \dot{x}_4) + k_3(x_3 - x_4) \end{cases} \quad (4)$$

其中前后轴簧载位移计算公式为

$$\begin{cases} x_1 = x_s + l_1 \theta \\ x_3 = x_s - l_2 \theta \end{cases} \quad (5)$$

车辆前后轴的轴质量变化计算公式为

$$\begin{cases} F_1 = \frac{l_2}{l_1 + l_2} (m_s + m_1 + m_2) g - \Delta F_1 \\ F_2 = \frac{l_1}{l_1 + l_2} (m_s + m_1 + m_2) g - \Delta F_2 \end{cases} \quad (6)$$

车辆前后轮的动态力计算公式为

$$\begin{cases} \Delta F_1 = k_2(x_2 - q_1) + c_2(\dot{x}_2 - \dot{q}_1) \\ \Delta F_2 = k_4(x_4 - q_2) + c_4(\dot{x}_4 - \dot{q}_2) \end{cases} \quad (7)$$

将其微分方程矩阵化:

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = F \quad (8)$$

其中  $X = [x_s \quad \theta \quad x_2 \quad x_4 \quad x_c]^T$

式中: $M$ 、 $C$ 、 $K$ 分别为车辆振动模型的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $X$ 为位移矩阵; $F$ 为输入激励矩阵。

## 2 不规范行车时车轮纵向动力学分析

车辆不规范过秤主要以跳秤、冲秤为主。跳秤指车辆前轴即将上秤时,司机猛踩油门,车辆突然加速,产生车身“抬头”现象,使车辆前轴对秤台施加的载荷变小,即秤台所测得的前轴称质量值低于真实质量。冲秤指前轴通过秤台后,当后轮即将上秤时,司机开始刹车,产生车身“点头”现象,后轴大部分质量转移至前轴位置,减小秤台所测得的后轴称质量值。平板式汽车衡属于短秤台类型,故无车辆两轴或多轴同时处于秤台面上称质量的情况。因此本文只针对不规范行车情况下单轴上秤时车轮的纵向作用力变化进行分析。设车辆在上秤时段的加速度  $a$  与在路面上行驶相同。

本文两轴刚性车以后轮为驱动轮,前轴两轮和后轴四轮(2+4)的车辆类型,且设车轮与秤台的滚阻系数  $\delta$  与路面一致。

### 2.1 跳秤时车轮受力分析

跳秤时车辆受驱动力的作用下做加速运动,同时车辆将受惯性力作用,其计算公式为

$$F = Ma \quad (9)$$

式中: $a$  为车辆加速度,  $m/s^2$ ;  $M$  为车辆总质量,即  $M = m_s + m_1 + m_2$ 。

设加速时前后轮处于纯滚动加速状态,车轮的受力分析如图 4 所示。

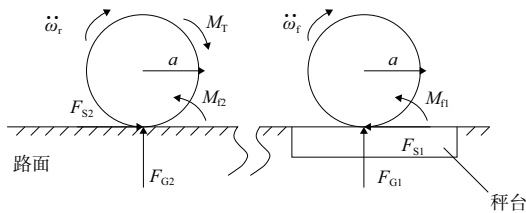


图 4 加速状态下前后轮受力图

设车辆加速度  $a$  为恒定值,根据达朗贝尔原理建立前后轮平衡方程:

$$\begin{cases} F_{S2} - F_{S1} = Ma \\ M_{T1} + 2J_v \ddot{\omega}_r = F_{S1} R \\ M_{T2} + 4J_v \ddot{\omega}_r + F_{S2} R = M_T \\ a = R \ddot{\omega}_r = R \ddot{\omega}_f \end{cases} \quad (10)$$

其中前、后轮的滚动阻力力矩分别为:

$$M_{T1} = \delta F_{S1}, \quad M_{T2} = \delta F_{S2} \quad (11)$$

式中: $R$  为轮胎滚动半径; $J_v$  为轮胎转动惯量;

$\delta$  为车轮与秤台面的滚动摩擦阻系数; $M_T$  为驱动轮驱动力矩; $\ddot{\omega}_r$ 、 $\ddot{\omega}_f$  分别为前、后轮胎滚动角加速度。

由式(10)和式(11)解得跳秤时前、后轮的纵向作用力分别为:

$$F_{S1} = \frac{M_{T1} + 2J_v \frac{a}{R}}{R} \quad (12)$$

$$F_{S2} = \frac{M_{T2} + a \left( MR + \frac{2J_v}{R} \right)}{R} \quad (13)$$

### 2.2 冲秤时车轮受力分析

冲秤时车辆受制动器作用下处于制动减速运动。车辆制动时将中断发动机对驱动轮的动力传输,即驱动轮无驱动力矩  $M_T$  作用。假设车辆制动时车轮做纯滚动减速运动,车轮的受力分析如图 5 所示。

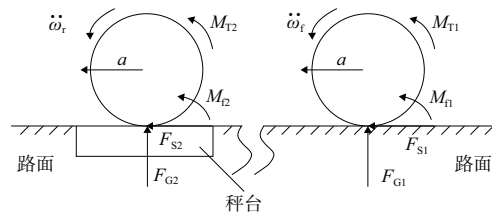


图 5 减速状态下前后轮受力图

前、后轮均受制动力矩的作用,设前、后轮所受到的制动力矩相等,建立前、后轮平衡方程:

$$\begin{cases} F_{S2} + F_{S1} = Ma \\ M_{T1} + M_{T2} - 2J_v \ddot{\omega}_r = F_{S1} R \\ M_{T1} + M_{T2} - 4J_v \ddot{\omega}_r = F_{S2} R \\ a = R \ddot{\omega}_r = R \ddot{\omega}_f \end{cases} \quad (14)$$

式中: $M_{T1}$ 、 $M_{T2}$  分别为前、后轮的制动力矩; $a$  为车辆减速度。

由式(11)和式(14)解得冲秤时前、后轮的纵向作用力分别为:

$$F_{S1} = \frac{a \left( \frac{2J_v}{R} + MR \right) + M_{T1} - M_{T2}}{2R} \quad (15)$$

$$F_{S2} = \frac{a \left( -\frac{2J_v}{R} + MR \right) + M_{T2} - M_{T1}}{2R} \quad (16)$$

## 3 计算仿真分析

本文采用 Matlab 软件的 Simulink 工具箱对车辆动力学模型进行仿真分析。两轴车称质量过程 Simulink 仿真模型如图 6 所示,车辆的结构参数与车轮参数来源于文献 [9],如表 1 所示,秤台的结构参数如表 2 所示。设平板式汽车衡秤台面长度为 1 060 mm。

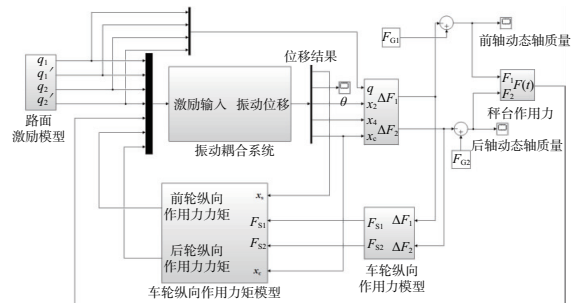


图 6 两轴车称质量 Simulink 仿真模型

表1 两轴车辆结构参数表

参数	数值
车身质量 $m_s/kg$	15 950
车身转动惯量 $J_s/(kg \cdot m^2)$	11 435
前轴非簧载质量 $m_1/kg$	700
后轴非簧载质量 $m_2/kg$	1 000
前轴悬架刚度 $k_1/(N \cdot m^{-1})$	400 000
前轴悬架阻尼 $c_1/(N \cdot s \cdot m^{-1})$	10 000
后轴悬架刚度 $k_3/(N \cdot m^{-1})$	2 500 000
后轴悬架阻尼 $c_3/(N \cdot s \cdot m^{-1})$	14 000
前轴轮胎刚度 $k_2/(N \cdot m^{-1})$	1 900 000
前轴轮胎阻尼 $c_2/(N \cdot s \cdot m^{-1})$	3 000
后轴轮胎刚度 $k_4/(N \cdot m^{-1})$	2 000 000
后轴轮胎阻尼 $c_4/(N \cdot s \cdot m^{-1})$	3 000
前轴到质心距离 $l_1/m$	3.1
后轴到质心距离 $l_2/m$	2.5
质心到地面高度 $H/m$	1.5
轮胎半径 $R/m$	0.519
轮胎转动惯量 $J_v/(kg \cdot m^2)$	7.56
车轮与秤台面的滚动摩擦系数 $\delta/m$	0.006

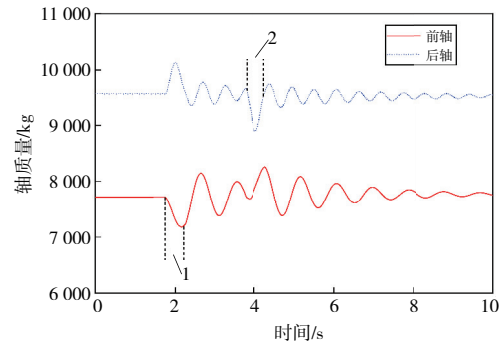
表2 秤台结构参数表

参数	数值
秤台质量 $m_c/kg$	2 000
秤台等效刚度 $k_c/(N \cdot m^{-1})$	$1.5 \times 10^8$
秤台等效阻尼 $c_c/(N \cdot m^{-1})$	53 629

### 3.1 不规范行驶下的称质量误差分析

路面不平度是影响车辆振动的关键因素之一<sup>[10]</sup>,而本文仅分析车辆加速、减速引起的车辆振动响应,故设汽车在路面平整度极为良好的公路上行驶,即  $q_1, q_2$  均为 0,则车辆所产生振动响应的激励来源于前后轮纵向作用力的变化。设车辆的仿真车速为 10 km/h,跳秤、冲秤时的加速度与减速度为  $1 m/s^2$ 。

图 7 显示了车辆不规范行驶下前、后轴的轴质量变化曲线。从图中可看出,前轴在秤上时段,前轴的轴质量呈下降趋势,后轴轴质量上升。后轴上秤时段中,轴质量变化与前轴在秤上时段相反,达到减轻载质量的作弊效果。这是由于跳秤时,前轮摩擦力使车身呈顺时针转动趋势,后轮摩擦力呈逆时针转动趋势,由式(12)和式(13)可知,后轮的纵向作用力远大于前轮的纵向作用力,后轴产生的力矩大于前轴,使车身绕质心做逆时针运动,使前轴轴质量减小。冲秤时,前后轮的纵向作用力均产生顺时针转动趋势,使车身绕质心做顺时针运动,减小后轴轴质量。



1—前轴在秤上;2—后轴在秤上。

图7 车辆各轴轴质量变化曲线

车辆加速度、减速度的大小决定了振动的幅度大小,本文曾通过车辆加速、减速现场实验发现,车辆加速度、减速度最大不超过  $3 m/s^2$ 。因此本文模拟了加速度、减速度为  $1 m/s^2, 2 m/s^2, 3 m/s^2$  这 3 种情况,其车辆的轴质量变化趋势与图 7 基本一致。图 8、图 9 表示了上秤时段中车辆以 10 km/h 匀速过秤和不同的加速度、减速度的轴质量变化曲线。

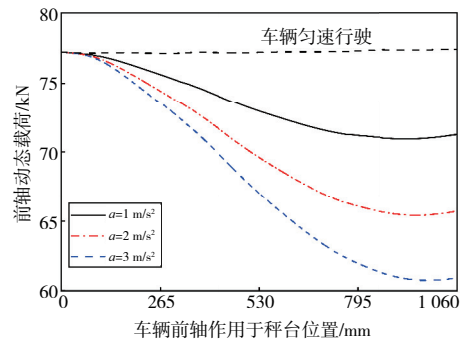


图8 不同加速度下前轴轴质量变化曲线图

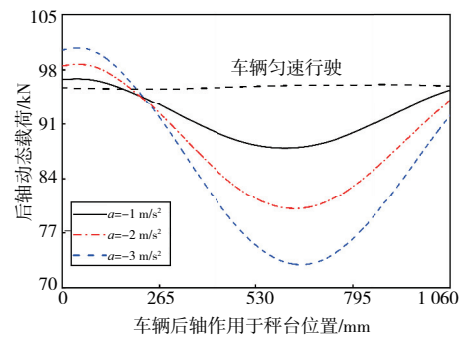


图9 不同减速度下后轴轴质量变化曲线图

从图 8 和图 9 可以看出,随着车辆加速度、减速度增大,车辆前后轴的动态载荷变化幅度增大,振动周期基本不变。

车辆各个轴的轴质量一般采用平均值法<sup>[11]</sup>将在秤台上的受力变化曲线取平均计算得出。根据式(3)计算出匀速行驶与非规范行驶的称质量误差如表 3 所示。车辆匀速行驶状态下,总误差为 0.085%,符合汽车衡的 1 级动态精度要求<sup>[12]</sup>。车辆不规范行驶情况下,随着加速度的增加,前后轴的称质量误差也随之增大,且后轴的称质量



误差大于前轴。当跳、冲秤的加速度达到  $3\text{ m/s}^2$  时,总误差最大可达到 16.74%。本文研究的二轴车载质量为 17.65 t,根据仿真结果,非规范行驶情况下车辆可减轻 2.954 t。

表 3 不同加速度称质量误差表

加速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	前轴/%	后轴/%	总质量/%
0	-0.005	0.158	0.085
1	-5.41	-7.04	-6.31
2	-9.71	-13.78	-11.96
3	-13.05	-19.71	-16.74

### 3.2 不同行驶速度下的称质量误差分析

不同的行车速度使车辆产生不同程度的振动响应,设定车辆跳秤、冲秤时的加速度与减速度为  $1\text{ m/s}^2$ 。图 10、图 11 给出了车辆以不同初速度下,不规范过秤时的前后轴动态载荷变化曲线。可看出,随着车辆初速度增大,前轴的动态载荷变化越平缓,而后轴无呈现明显规律。这是由于车辆振动固有频率与车速无关,故车速越高,前轴作用在秤上的时间越短,所记录的前轴振动曲线时长缩短。根据图 7 前后轴振动规律可知,前轴跳秤后,车辆处于振动衰减运动,当车速加快时,前后轴上秤时间间隔缩短,车辆的衰减振动将影响后轴称质量过程,呈现偏重或偏轻现象。

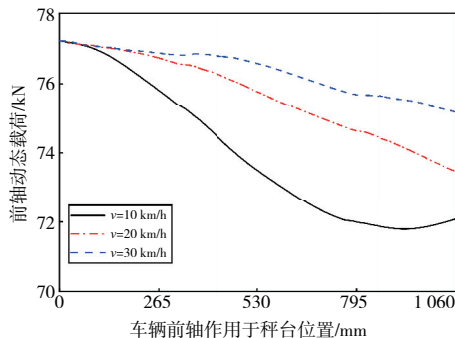


图 10 不同速度下前轴轴质量变化曲线图

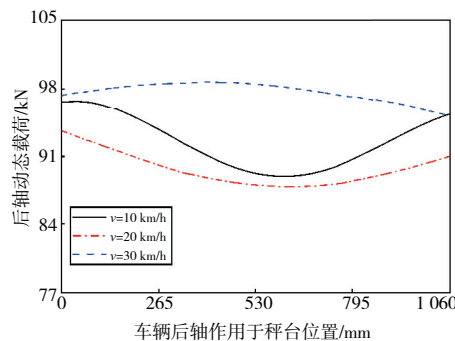


图 11 不同速度下后轴轴质量变化曲线图

表 4 显示了不同车速下,车辆不规范行驶的误差。结果表明:低速下车辆不规范行车对称质量影响较为显著;高速情况下不规范行车,所引起的作弊效果不明显,易发

生增质量情况。

表 4 不同速度称质量误差表

速度/( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	前轴/%	后轴/%	总质量/%
10	-5.41	-7.04	-6.31
20	-1.845	-7.673	-5.071
30	-0.817	2.809	1.19

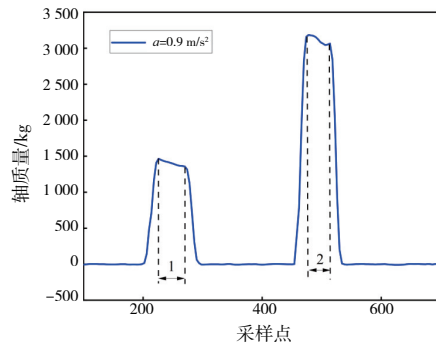
## 4 实验验证

本文通过实车测试用于验证仿真模型的可行性,实验地点选定在福建省计量科学研究院科研基地,实验内容为两轴车的冲、跳秤实验,如图 12 所示。



图 12 车辆过秤示意图

车速  $v$  为  $10\text{ km/h}$ ,加速度、减速度  $a$  为  $0.9\text{ m/s}^2$  的两轴车称质量波形如图 13 所示。从图 13 可以看出,车辆前后轴分别在上秤时段的称质量波形趋势与图 7 的仿真波形相近,表明了车辆不规范行车时,车辆轴质量曲线呈现先下降后上升的趋势。



1—前轴在秤上;2—后轴在秤上。

图 13 车辆称质量波形

由于车辆自身性能因素影响,通过测试,本实验车辆最大加速度不超过  $1.7\text{ m/s}^2$ ,故本实验车辆以  $10\text{ km/h}$  车速行驶、加速度在  $0\sim 1.7\text{ m/s}^2$  区间内进行 8 组实验。

车辆以  $10\text{ km/h}$  车速行驶,在不同加速度、减速度过秤条件下,实验称质量误差曲线与仿真称质量误差曲线对比如图 14 所示。从图中可看出,实验结果中的前、后轴误差曲线变化趋势与仿真结果相近,且后轴基本大于前轴误差。但实验结果下的称质量误差明显大于仿真结

果的误差。这是由于在真实情况下,车辆还受路面不平度的影响,而本文的仿真结果设定车辆在极其良好的路面上行驶。

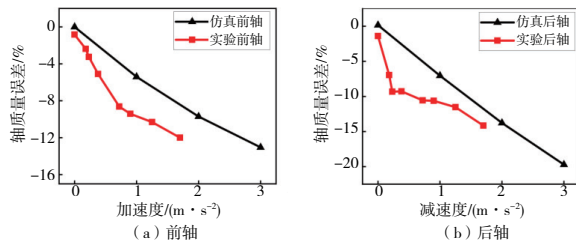


图 14 不同加速度、减速度下实验与仿真对比图

图 15 给出了车辆加速度、减速度保持在  $1 m/s^2$  左右的情况下,不同车速的实验称质量误差曲线与仿真称质量误差曲线对比情况。从图中可看出,实验结果趋势与仿真结果类似。车速越快时,车辆轴质量减轻程度逐渐降低反而出现增质量情况,这是由于车速增大时,司机实行冲跳秤的操作难度增大,不易在车轮刚上秤的时刻进行加速、减速操作,反而容易发生称质量超质量情况。

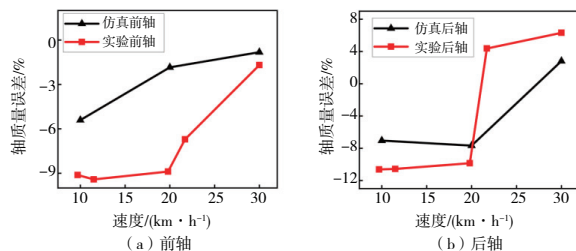


图 15 不同速度下实验与仿真对比图

通过实验验证了仿真模型的可行性,后续可研究优化装置来抑制司机作弊行为,通过本文的理论模型来分析优化后的效果。

## 5 结语

本文建立了考虑车辆轮胎纵向力作用车辆称质量模型。通过数值模拟方法分析车辆不规范行驶情况下称质量过程的轴质量变化。主要结论如下。

1) 车辆跳秤、冲秤时,前后轴上秤时间段的轴质量呈减轻趋势。随着车辆加速度、减速度增大,车辆轴质量变

化幅度增大,动态汽车衡的称质量精度随之降低。

2) 车辆加速度、减速度保持不变的情况下,车辆初始车速越高,车辆通过跳秤、冲秤方式来减轻轴质量的程度越低。在低速行驶下,车辆不规范行驶减小称质量的效果显著。

3) 通过实验验证了仿真模型的可行性,其仿真模型还可为后续的优化研究提供理论指导。

### 参考文献:

- [1] 朱国伟,范长江,周曠,等. 浅谈动态汽车衡发展史[J]. 中国交通信息化,2016(7):98-99,101.
- [2] 李溯. 解剖治超杀手锏—平板式动态汽车衡结构分析[J]. 中国公路,2017(15):54-55.
- [3] ONO T. On dynamic weighing of highway vehicles in motion [C]//SICE 2003 Annual Conference (IEEE Cat. No. 03TH8734). Fukui, Japan: IEEE, :2108-2115Vol.2.
- [4] OUBRICH L, OUASSAID M, MAAROUFI M. Dynamic loads, source of errors of high speed weigh in motion systems[C]//2017 14th International Multi - Conference on Systems, Signals & Devices (SSD). Marrakech, Morocco: IEEE, :354-359.
- [5] PHAM X T, OKUMA M, BUR M, et al. An estimation method for pavement weigh - in - motion system with preliminary experiment[J]. Mechanical Engineering Journal,2020,7(6):20-405.
- [6] 肖润谋,陈李军,韩海伟. 高速公路货车不规范过秤模拟试验及质量恢复方法[J]. 中国公路学报,2011,24(4):87-93.
- [7] 赖朝晖,杨晓翔,姚进辉,等. 汽车衡秤面防滑纹对称重稳定性的影响研究[J]. 中国测试,2019,45(8):118-123,129.
- [8] 杜长东. 低频动态载荷理论分析及称重精度提高算法研究[J]. 公路交通科技,2018,35(4):153-158.
- [9] 谢云. 不平整路面车辆动荷载计算方法研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2014.
- [10] HE L, QIN G, ZHANG Y Q, et al. Non - stationary random vibration analysis of vehicle with fractional damping[C]//2008 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA). Changsha, China: IEEE, :150-157.
- [11] FUKUDA K, KAMEOKA K, ONO T, et al. Evaluation of a new mass-estimation method for axle weights of in-motion vehicles using vehicle models [C]//APMF 2007 International Symposium. [S.I.: s.n.],2007.
- [12] JJG 907—2006. 动态公路车辆自动衡器检定规程[S].

收稿日期:2022-03-21