

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2019.01.018

# 基于支座反力的桥梁动态称重方法

朱全军<sup>1</sup>, 肖强<sup>2</sup>, 邓露<sup>2\*</sup>

(1.湖南省交通科学研究院, 湖南 长沙 410015; 2.湖南大学 工程结构损伤诊断湖南省重点实验室)

**摘要:**为了解决传统基于应变的桥梁动态称重(BWIM)方法存在的精度不高和车轴探测传感器存在的可适用桥型有限、复杂工况下可靠度低的问题,提出了一种基于支座反力识别移动车辆行驶速度、轴距、轴重和总重的桥梁动态称重新方法。首先介绍了车桥耦合振动系统的建立和求解过程以及基于桥梁支座反力的车轴识别理论,建立了试验室车桥振动缩尺模型,并通过模型试验对提出方法的有效性和精度进行了验证。然后基于数值模拟,研究了路面不平整度、车辆行驶速度、噪声水平等重要因素对该方法识别精度的影响。最后,将此方法与既有基于桥梁弯曲应变的桥梁动态称重方法进行了对比。研究结果表明:该方法能够准确识别车辆的行驶速度、轴距、轴重和总重信息,模型试验和数值模拟结果均显示车辆行驶速度、轴距、轴重的识别误差能控制在5%以内,车辆总重误差能控制在2%以内;该方法的识别精度优于传统基于弯曲应变的动态称重方法,且车速越高时,该方法精度优势越明显;该方法在路面不平整、噪声等因素的干扰下仍然具有良好的稳定性。

**关键词:**桥梁动态称重; 支座反力; 车重; 识别精度

## 1 前言

超重车辆容易对公路基础设施造成较大的损伤,其过大的轮压往往导致路面迅速破坏,甚至,由超重车辆引发的桥梁垮塌事故也屡有发生。因此,准确快速识别超载车辆并进行有效管控对于公路安全运营具有非常重要的意义。传统路面式动态称重系统利用安装在路面上的接触式传感器所采集的信号来估算车辆的轴重和总重,具有称重自动化、效率高等优点。但由于传感器与车辆轮胎接触时间极短,因此称重精度易受车辆动态效应影响。此外,该类技术严重依赖传感器与路面的接触状况,因此长期稳定性难以保证。桥梁动态称重(BWIM)技术把既有桥梁作为称重平台,基于车辆和桥梁接触全过程中的桥梁响应时程曲线识别过往车辆重量,具有更高的精度。经过近40年的发展,国外多个桥梁动态称重设备已实现商业化,而中国在桥梁动态称重方面的研究尚处于起步阶段。

桥梁动态称重的概念首先由 Moses 提出,其基于弯矩影响线并利用桥梁跨中应变来反算车辆的轴重和总重。Zhao 指出传统的 Moses 算法虽然识别车辆总

重精度较高,但识别轴重精度较低,并提出通过调整现场测试获得的弯矩模拟影响线来提高轴重识别精度。另外一些研究者则利用遗传算法和梯度法等方法来降低 Moses 算法的识别误差。除了采用梁底应变之外,也有研究者利用主梁底部裂缝宽度和竖向位移等响应来识别移动车辆的轴重和总重。任伟新在其综述中指出识别精度仍然是桥梁动态称重技术发展的重要制约因素。此外,获得准确的车辆速度和轴距仍然是桥梁动态称重的前提条件。因此,目前的 BWIM 系统还需要一套额外的设备来识别车辆的车轴信息,但目前常用的车轴探测传感器(FAD)技术亦仍然存在可适用桥型有限、复杂工况下识别可靠度低的问题。

针对传统基于应变的 BWIM 方法存在的精度不够理想和既有 FAD 技术存在的车轴检测准确度不高的问题,该文提出基于支座反力的车重识别方法,并利用试验室缩尺模型试验验证新方法的有效性。该方法直接利用桥梁支座反力同时实现车轴检测和车重测量两个目的,因而无需安装额外的车轴探测装置。基于数值仿真的详细参数分析也进一步表明该方法在不同的路面不平整度、车速、噪音水平、桥头跳车等因素影响下仍然具有良好的鲁棒性。

收稿日期:2018-05-13

作者简介:朱全军,男,工程师.E-mail:jtjr@foxmail.com

\*通信作者:邓露,男,教授,博士生导师.E-mail:denglul@hnu.edu.cn

## 2 车桥耦合振动模型

### 2.1 车辆模型及其运动方程

该文选取了具有代表性的两种车辆模型,一辆为两轴车,一辆为三轴车,车辆参数取自参考文献[13]。车辆运动方程可表示为:

$$M_V \ddot{Y}_V + C_V \dot{Y}_V + K_V Y_V = P_{V-b} + F_G \quad (1)$$

式中: $Y_V$  为车辆位移; $M_V$ 、 $C_V$ 、 $K_V$  分别为车辆的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $P_{V-b}$  和  $F_G$  分别为车轮与路面的接触力向量和车辆重力向量。

### 2.2 桥梁模型及其运动方程

该文桥梁模型采用《公路桥梁结构上部构造系列通用设计图》(2010 版)中 20 m 跨径简支 T 梁桥作为数值模拟和试验室模型试验的原型桥梁,桥梁的横截面如图 1 所示。

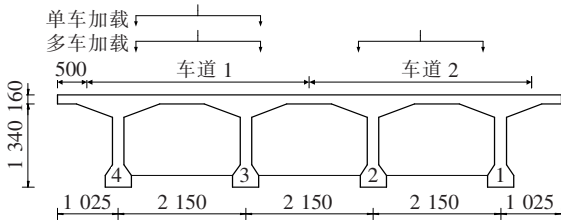


图 1 桥梁横截面及加载位置图(单位:mm)

车辆荷载作用下桥梁的运动方程为:

$$M_b \ddot{Y}_b + C_b \dot{Y}_b + K_b Y_b = -P_{b-b} \quad (2)$$

式中: $Y_b$  为桥梁位移; $M_b$ 、 $C_b$ 、 $K_b$  分别为桥梁的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $P_{b-b}$  为车辆荷载作用下桥梁有限元模型的等效节点荷载。

### 2.3 路面平整度模型

路面平整度是影响车桥之间动力响应的重要因素,可用零均值高斯概率分布进行随机过程模拟,表达式如下:

$$r(X) = \sum_{j=1}^N \sqrt{2\varphi(n_j)\Delta n} \cos(2\pi n_j X + \theta_j) \quad (3)$$

式中: $\theta_j$  为由  $0 \sim 2\pi$  均匀分布的随机相位角; $\varphi(\cdot)$  为路面平整度的功率谱密度 [ $m^2/(\text{cycle}/m)$ ]; $n_j$  为波数 (cycle/m)。

### 2.4 车一桥耦合振动系统

根据车辆和桥梁接触点的位移和相互作用力的关系,建立了如下车桥耦合振动方程:

$$\begin{bmatrix} M_b & \\ & M_V \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{Y}_b \\ \ddot{Y}_V \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_b + C_{b-b} & C_{b-V} \\ C_{V-b} & C_V \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{Y}_b \\ \dot{Y}_V \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_b + K_{b-b} & K_{b-V} \\ K_{V-b} & K_V \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Y_b \\ Y_V \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_b \\ P_V + F_G \end{Bmatrix} \quad (4)$$

式中: $C_{b-b}$ 、 $C_{b-V}$ 、 $C_{V-b}$ 、 $K_{b-b}$ 、 $K_{b-V}$ 、 $K_{V-b}$  为由车桥之间耦合作用产生的阻尼项和刚度项。车体的位移  $Y_V$ 、桥梁在车桥接触点的挠度  $Y_b$ 、轮胎弹簧的压缩值  $\Delta_l$  和路面不平整度  $r(x)$  间的关系如下:

$$Y_V = Y_b + \Delta_l + r(x) \quad (5)$$

$$\dot{Y}_V = \dot{Y}_b + \dot{\Delta}_l + \dot{r}(x) \quad (6)$$

式中: $\dot{r}(x) = \frac{dr(x)}{dx} \frac{dx}{dt} = \frac{dr(x)}{dx} v(t)$ ;  $v(t)$  为车速。

方程(4)可使用 Newmark- $\beta$  数值积分方法求解。该文首先基于 Ansys 平台建立桥梁有限元模型,然后利用基于 Matlab 平台开发的直接积分法程序求解车辆荷载作用下的桥梁响应。

## 3 称重原理

### 3.1 速度和轴距测量

利用支座反力影响线在桥梁支座处具有突变的特性,可直接从车辆过桥时桥梁支座反力的时程曲线提取车轴信息。图 2 为基于车桥耦合振动数值模拟得到的一辆三轴车通过简支梁桥时桥梁的动态支座反力。

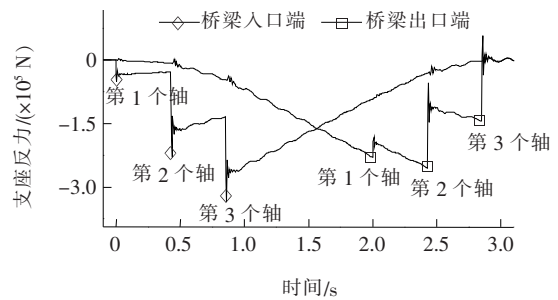


图 2 三轴车作用下简支梁桥的支座反力时程

由图 2 可见:桥梁支座反力曲线上存在多个显著的突变时刻,这些时间点对应车辆各轴上桥和下桥时刻。为方便识别车轴上下桥时刻,对支座反力时程曲线进行差分运算(即  $T_{k+1}$  时刻支座反力值减去  $T_k$  时刻支座反力值),结果如图 3 所示。

显然:图 3 的峰值分别对应于车辆各轴上桥时刻 ( $t_1^1$ 、 $t_2^1$ 、 $t_3^1$ ) 和下桥时刻 ( $t_1^2$ 、 $t_2^2$ 、 $t_3^2$ )。因此,车辆速度和轴距可以通过以下公式求得:

$$v = \frac{L}{t_1^1 - t_1^2} \text{ 或 } v = \frac{L}{t_2^1 - t_2^2} \text{ 或 } v = \frac{L}{t_3^1 - t_3^2} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} d_1 &= v(t_2^1 - t_1^1) \text{ 或 } d_1 = v(t_2^2 - t_1^2) \\ d_2 &= v(t_3^1 - t_2^1) \text{ 或 } d_2 = v(t_3^2 - t_2^2) \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $L$  为简支梁桥两端支座中心的距离; $v$  为车辆行驶速度; $d_1$ 、 $d_2$  为车辆轴距。

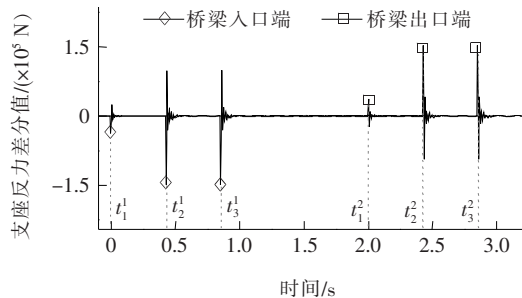


图 3 简支梁桥支座反力差分值

### 3.2 影响线提取

令已知轴重的标定车辆低速行驶通过桥梁,并采集桥梁支座反力时程响应,从而提取桥梁各支座总反力的真实影响线  $I$ 。图 4 为从图 2 所示桥梁支座反力时程数据中提取的支反力影响线。

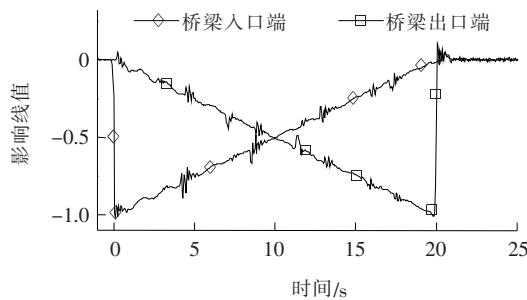


图 4 简支梁桥支座反力影响线

### 3.3 车辆轴重和总重识别

基于车辆过桥引起的桥梁响应反算车辆的轴重是一个典型的“动力学反问题”。随着大吨位压力传感器技术,尤其是桥梁智能测力支座的发展,中小跨径桥梁在移动荷载作用下的动态支座反力已经可以通过大型测力支座和动态数据采集设备直接测得。另一方面,通过求得任意时刻各车轴轴重与其对应位置的支座反力影响线坐标的乘积之和可以得到该时刻移动车辆作用下桥梁支座反力的理论计算值。因此,基于真实的轴重应使支座反力的理论值与实测值之间误差最小的逻辑关系,可以建立以车辆轴重为未知数的误差函数。然后通过求解误差函数的极小值,反算出车辆各轴轴重。具体过程如下:

设一辆  $N$  轴车以速度  $v$  匀速驶过简支 T 梁桥, $K$  时刻测量得到桥梁入口处各主梁支座处的总反力为:

$$F_K^m = \sum_{i=1}^n F_{K,i}^m \quad (9)$$

式中: $n$  为桥梁主梁根数。

同时,利用影响线加载方法可得总支座反力的理论值为:

$$F_K = \sum_{i=1}^N A_i I_{(K-C_i)v} \quad (10)$$

$$C_i = \frac{D_i f}{v} \quad (11)$$

式中: $A_i$  为第  $i$  个车轴轴重,为待求解的未知数; $I_{(K-C_i)v}$  为  $K$  时刻车辆第  $i$  轴对应的影响线坐标; $f$  为采样频率; $D_i$  为第  $i$  个车轴与第 1 个车轴的距离。

由于车辆过桥会引发桥梁振动,导致支反力测量值  $F_K^m$  与理论值  $F_K$  存在偏差,因此通过令如下误差函数取最小值来获得真实轴重的估计值:

$$E = \sum_{K=t_1}^T (F_K^m - F_K)^2 = \sum_{K=t_1}^T \left[ F_K^m - \sum_{i=1}^N A_i I_{(K-C_i)v} \right]^2 \quad (12)$$

对误差函数  $E$  关于轴重  $A$  取偏导,并令偏导数等于 0,从而得到以车辆轴重为未知数的冗余线性方程组,求解该线性方程即可得到轴重的估计值:

$$A = (LL^T)^{-1} LF \quad (13)$$

式中:矩阵  $A$ 、 $F$ 、 $L$  分别为:

$$A = [A_1, A_2, \dots, A_N]^T$$

$$F = [F_{t_1}^m, F_{t_2}^m, \dots, F_{t_T}^m]^T$$

$$L = \begin{bmatrix} I_{(t_1-C_1)} & I_{(t_2-C_1)} & \dots & I_{(T-C_1)} \\ I_{(t_1-C_2)} & I_{(t_2-C_2)} & \dots & I_{(T-C_2)} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ I_{(t_1-C_N)} & I_{(t_2-C_N)} & \dots & I_{(T-C_N)} \end{bmatrix}$$

显然,由于该方法仅从桥梁支座反力中提取车辆的轴距和轴重信息,因此不仅适用于简支梁桥,也适用于其他类型支座反力可测的桥梁。

## 4 试验验证

为验证基于支座反力的桥梁动态称重方法识别速度、轴距、轴重和总重的有效性,依据相似比原理,制作了 1:0.119 的缩尺桥梁模型及相应的车桥振动试验平台。试验平台包括车辆加速斜坡段、桥梁模型、车辆减速段、导轨等。详细的材料和荷载相似比值见表 1。

表 1 车—桥模型相似比值

属性	相似比值	属性	相似比值
尺寸(L)	0.119	质量(M)	$1.15 \times 10^{-3}$
弹性模量(E)	0.081	面积(A)	0.014
应力( $\sigma$ )	0.081	刚度(K)	$9.64 \times 10^{-3}$
应变( $\epsilon$ )	1	固有频率( $\omega$ )	2.899
挠度( $\delta$ )	0.119	速度(v)	0.345
横截面转动惯量(I)	$2.01 \times 10^{-4}$	荷载(F)	$1.15 \times 10^{-3}$

图 5 为等效的桥梁缩尺模型横截面及试验车辆横向加载位置,其中车辆横向加载位置可通过改变导轨的位置进行调整。将模型车辆在加速斜坡上的设定高度释放可获取所需的目标行驶速度。模型车辆原型采用常见的三轴卡车,如图 6 所示,车辆的轴数、轴距以及车辆重量均可进行调整。桥梁支座反力通过安装于桥梁支座下方的称重传感器采集(图 7)。作为对比,桥面同时安装了可用于测量车辆速度信息的压电聚氟乙烯(PVDF)电缆。车辆模型轴距和轴重信息见表 2。

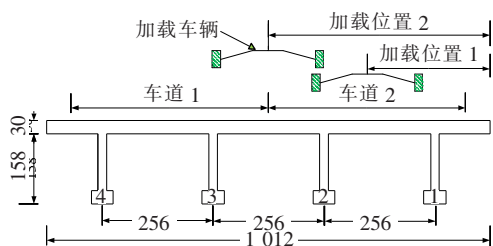


图 5 试验桥梁横截面及加载位置图(单位:mm)

受限于加速斜坡的高度,模型车辆能获得的最大速度约为 5 m/s(相当于实桥车辆速度 52 km/h)。试

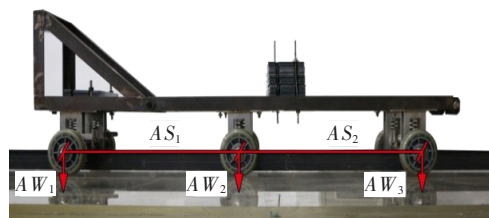


图 6 模型试验三轴车辆

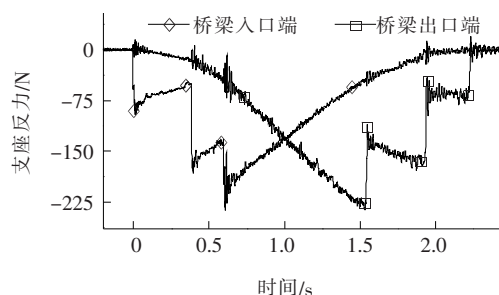


图 7 简支梁桥支座反力时程

表 2 车辆模型轴距和轴重信息

项目	AS <sub>1</sub> / m	AS <sub>2</sub> / m	AW <sub>1</sub> / kg	AW <sub>2</sub> / kg	AW <sub>3</sub> / kg
缩尺模型	0.455	0.475	9.16	14.54	5.93
原型车辆	3.820	3.990	$7.96 \times 10^3$	$12.64 \times 10^3$	$5.16 \times 10^3$

注:AS<sub>1</sub>、AS<sub>2</sub>、AW<sub>1</sub>、AW<sub>2</sub>、AW<sub>3</sub> 分别为轴距 1、轴距 2、轴重 1~3。

验中令车辆分别以 1~5 m/s 速度行驶。

表 3 为不同工况下的车辆信息模型识别结果的相对误差。表中 AS、AW 和 GVW 分别表示轴距、轴重和总重。

表 3 不同工况下的识别结果相对误差

车辆加载位置	$V^p /$ ( $m \cdot s^{-1}$ )	$V^{full} /$ ( $km \cdot h^{-1}$ )	相对误差/%						
			V	AS <sub>1</sub>	AS <sub>2</sub>	AW <sub>1</sub>	AW <sub>2</sub>	AW <sub>3</sub>	GVW
加载位置 1	1.03	10.75	-0.12	-3.58	-4.10	-1.10	-1.58	3.62	-0.39
	2.12	22.12	-1.81	-2.90	-2.52	-1.55	0.81	1.55	0.23
	3.08	32.14	-1.93	-3.21	-2.05	0.20	2.07	-2.41	0.59
	3.87	40.38	0.04	1.21	-0.13	4.83	0.64	-3.32	1.14
	4.90	51.13	-1.33	-0.97	0.06	4.18	-4.80	0.75	0.92
加载位置 2	1.03	10.75	1.16	0.12	4.57	2.48	0.34	-2.19	0.50
	2.27	23.35	-1.47	1.77	0.80	0.29	2.22	-2.36	0.71
	2.99	31.20	-2.65	1.99	1.38	0.19	1.10	1.90	1.00
	3.91	40.80	2.48	0.67	-0.63	-0.23	1.97	1.28	1.15
	5.06	52.80	-0.64	1.06	-0.57	2.05	-1.87	2.54	0.22

注:表中  $V^p$  为使用 PVDF 电缆信号计算得到的速度; $V^{full}$  为按相似比换算得到的实桥上车辆速度。

从表 3 可以看出:车速、轴距、轴重和总重识别结果相对误差最大分别为 2.65%、4.57%、4.83%、1.15%,表明该文提出的基于支座反力的动态称重方法能够准确地识别速度、轴距、轴重和总重。

### 5 参数分析

基于图 1 所示简支 T 梁桥,利用数值模拟手段获得了多种工况下的桥梁动力响应,然后基于获得的桥梁支座反力对两轴车和三轴车模型的轴重和总重进行了识别,并研究了车辆行驶速度、路面不平度、噪音水平和桥头跳车等因素对识别精度的影响。数值仿真试验工况如表 4 所示。根据 ISO 1995,该文考虑了 3 种路面不平度对轴重和总重识别误差的影响。为了消除路面不平度样本随机性对识别结果的影响,对于给定的不同路面不平度级别,分别设定车桥耦合程序运行 20 次,并取 20 次识别结果相对误差的均方根值进行统计分析。

表 4 数值仿真试验工况

工况	影响因素	取值
单车工况	车辆速度	10、15、20、25、30 m/s
	不平度等级	一般、好、非常好
	噪声水平	0、5%、10%
	桥头错台高度	1.0、2.0、3.8 cm
双车工况	车头间距	0、5、10、15 m

#### 5.1 车速和轴距识别

表 5 为两种车型在不同车速条件下的车速和轴距的识别误差。

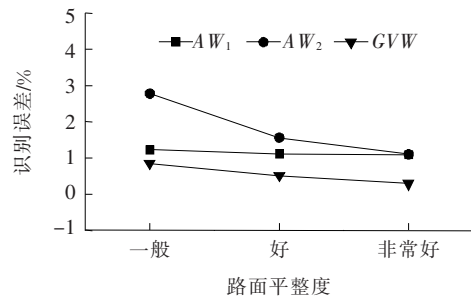
表 5 车速和轴距识别误差

车速/ (m · s <sup>-1</sup> )	两轴车/%		三轴车/%		
	轴距 1	车速	轴距 1	轴距 2	车速
10	0.63	0	0.40	0.40	0
15	0.07	0.25	1.32	0.44	0.25
20	1.27	0	1.08	0.10	0.50
25	0.31	0.63	0.23	0.23	0.63
30	1.02	0.25	1.32	1.32	0.25

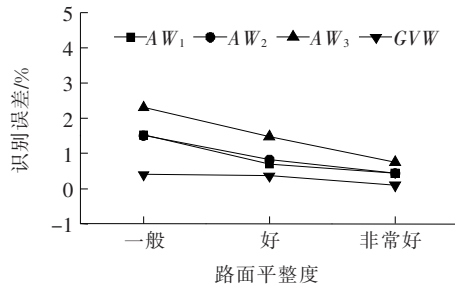
从表 5 可以看出:该文方法对车速和轴距具有较高的识别精度,相对误差基本控制在 2% 以内。

#### 5.2 路面不平度的影响

图 8 为不同路面不平度条件下两轴车和三轴车以车速 20 m/s 通过桥梁时的轴重和总重识别误差。



(a) 两轴车



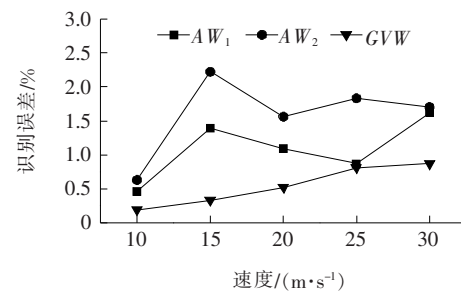
(b) 三轴车

图 8 不同路面平整度时识别误差

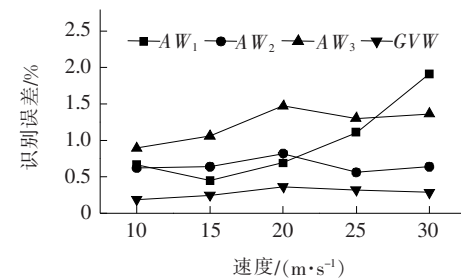
从图 8 可以看出:路面状况越差,识别误差越大,但车辆总重误差均控制在 1% 以内。

#### 5.3 车速的影响

车辆以 5 种不同车速过桥时,轴重和总重识别误差如图 9 所示。



(a) 二轴车



(b) 三轴车

图 9 不同速度时识别误差

由图 9 可以看出:车辆轴重和总重识别误差具有随车速的增大而略有增大的趋势但并不明显。整体而



言,识别的两轴车总重相对误差不大于 1.0%,且轴重的识别误差控制在 2.3%以内;识别的三轴车总重相对误差不大于 0.5%,轴重的识别误差也控制在 2%以内。表明在数值模拟中考察的车辆行驶速度下,该方法具有较好的识别精度。

#### 5.4 噪声的影响

实测桥梁响应通常会不可避免地混入随机噪声。为研究该方法在噪声干扰下的可靠性,分别将 0、5%、10%共 3 种不同水平的白噪声掺入桥梁支反力时程,然后进行车辆信息识别。图 10、11 分别为不同噪声水平下的支座反力时程曲线和车重识别误差。

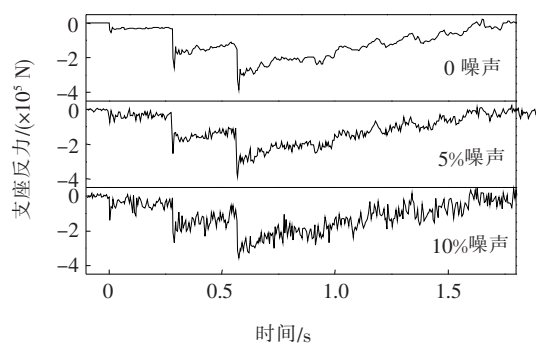


图 10 不同噪声水平下支座反力(桥梁入口、三轴车)

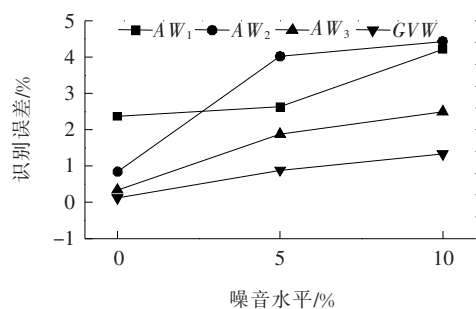


图 11 不同噪音水平时三轴车识别误差

由图 10、11 可见:即使在强噪声干扰下,支座反力突变的特性仍然非常明显,因而可以顺利地识别车辆速度和轴距。而随着噪声水平由 0 增大至 10%,尽管车辆的轴重和总重的识别误差均有一定程度的增大,但轴重和总重识别误差仍能分别控制在 4.5%和 1.5%以内,这主要是因为基于最小二乘法的 Moses 算法可以很好地抑制零均值噪声的影响,表明该方法在噪声干扰下具有很好的鲁棒性。

#### 5.5 桥头跳车的影响

由于桥台与路堤刚度的不同,往往容易出现沉降差异,导致桥梁引道与桥梁相接处形成错台。此种情况对支座的冲击作用较大,因此,该文研究了 3 种错台高度(1.0、2.0、3.8 cm)对基于支座反力的桥梁动态称

重方法识别误差的影响,结果如图 12、13 所示。

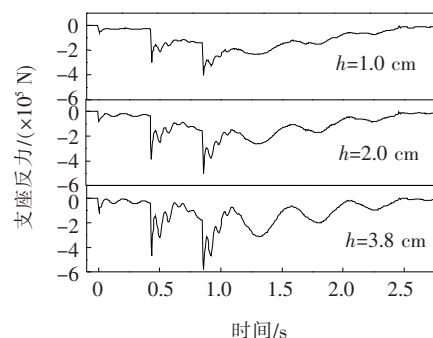


图 12 不同错台高度下支座反力(桥梁入口、三轴车)

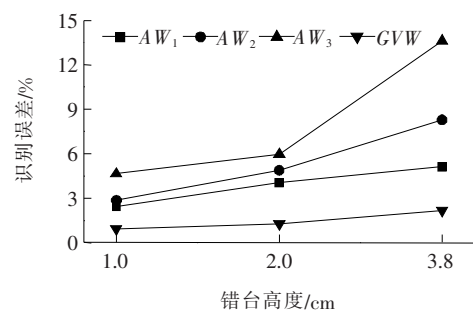


图 13 不同错台高度下车重识别误差(桥梁入口、三轴车)

由图 12、13 可知:随着错台高度的增大,车辆经过桥头时振动愈加明显,车重识别误差随之增大。当错台高度不大于 2 cm 时,该文提出的方法对轴重和总重识别均具有较好的识别精度(分别控制在 6.0%和 1.5%以内)。

#### 5.6 多车识别

桥梁上多车同时通过时多车-桥梁耦合效应可能对识别精度产生影响,因此,该文模拟了双车同时通过桥梁时的桥梁响应并识别了车辆轴重和总重。数值模拟中三轴车和两轴车分别沿左车道和右车道以相同速度行驶,如图 1 所示。行车方向上车头间距分别取 0、5、10、15 m。图 14 为双车同时通过时的典型桥梁支座响应。详细的识别结果相对误差有效值如表 6 所示。

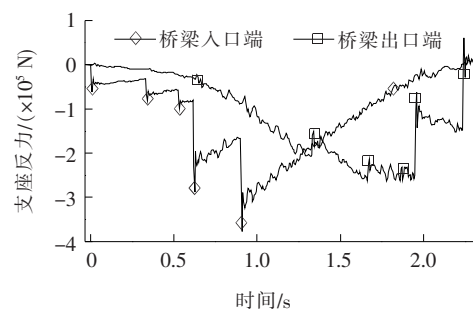


图 14 双车通行时的桥梁支座反力(车头间距:5 m)

表6 双车识别结果的相对误差

车头间距/m	两轴车/%			三轴车/%			
	AW <sub>1</sub>	AW <sub>2</sub>	GVW	AW <sub>1</sub>	AW <sub>2</sub>	AW <sub>3</sub>	GVW
0	1.14	7.72	2.96	2.29	0.78	1.77	1.16
5	1.02	3.50	1.68	2.49	1.03	0.63	0.64
10	0.66	2.12	1.09	3.02	0.59	0.50	0.33
15	0.70	2.18	1.24	1.07	0.31	0.39	0.14

由表6可见:双车并行时,较轻的两轴车(总重7.5 t)的识别精度受到的影响比较明显,但较重的三轴车(总重32 t)受到的影响则很小。并且,随着车头间距的增大,两车的误差都会迅速降低。实际上两车车头相距5 m时,该方法识别两辆车的轴重和总重的识别误差已降到了3.50%以内。

### 5.7 方法对比

传统桥梁动态称重系统大都基于桥梁弯曲应变反算车辆轴重。为了验证基于桥梁支座反力算法的精度优势,将该文方法与传统基于应变方法得到的轴重和总重识别误差进行了对比,结果如图15所示。图中“RF”表示桥梁支座反力(该文方法)，“NS”表示桥梁跨中弯曲正应变(传统方法)。

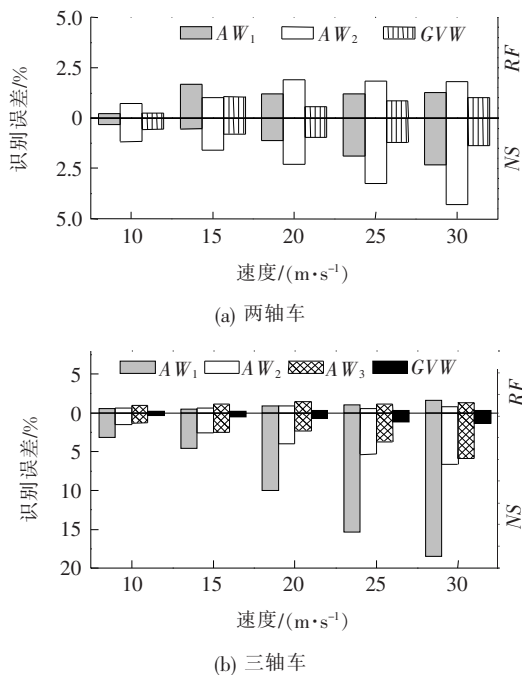


图15 两种方法识别误差对比

从图15可知:对于选取的两种常见车辆,基于桥梁支座反力方法的识别误差远小于基于应变的识别方法,且车速越高,该文方法的精度优势更加明显。

## 6 结论

提出了一种基于桥梁支座反力识别过往车辆的轴重和总重的动态称重方法。与传统方法相比,该方法无需在路面安装车轴探测传感器,因此安装与维护无需中断交通,同时也具有更高的使用寿命。基于数值模拟和模型试验结果,获得如下结论:

(1) 通过桥梁两端的支座反力时程可以实现对车辆速度、轴距和车辆轴重的识别。

(2) 该文提出的方法比传统基于应变的动态称重方法具有更高的识别精度,且车速越高时,该方法精度优势越明显。

(3) 在该文研究的各类影响因素中,路面不平整度(尤其是桥头错台)对动态称重精度的影响最为明显。但在通常情况下,车重识别误差均可以控制在较理想的范围之内。

除该文研究的简支T梁桥外,理论上该方法也适用于空心板、箱梁等不同截面形式的简支梁桥。同时也适用于连续梁桥等其他可测得车辆作用下桥梁支反力的桥梁。该文研究结果表明:该方法在20 m的中等跨径桥梁上可以取得较高的精度。但对于活恒载比偏小的中大跨径桥梁,车辆荷载导致的支座反力在桥梁总支座反力中占比较小,可能会对识别精度有一定的影响。这些问题有待后续进一步研究。

### 参考文献:

- [1] 吉伯海,傅中秋.近年国内桥梁倒塌事故原因分析[J].土木工程学报,2010(s1).
- [2] Bao T, Babanajad S K, Taylor T, et al. Generalized Method and Monitoring Technique for Shear - Strain - Based Bridge Weigh - in - Motion[J]. Journal of Bridge Engineering, 2016, 21(1).
- [3] Moses F. Weigh - in - Motion System Using Instrumented Bridges[J]. Transportation Engineering Journal, 1979, 105(3): 233 - 249.
- [4] Cantero D, González A. Bridge Damage Detection Using Weigh - in - Motion Technology[J]. Journal of Bridge Engineering, 2015, 20(5).
- [5] 李小年,陈艾荣,马如进.桥梁动态称重研究综述[J].土木工程学报,2013(3).
- [6] Zhao Z, Uddin N, O'brien E J. Bridge Weigh - in - Motion Algorithms Based on the Field Calibrated Simulation Model[J]. Journal of Infrastructure Systems, 2017, 23(1).

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2019.01.019

# BFRP 约束损伤混凝土柱轴压力学性能试验研究

马高<sup>1,2</sup>, 齐亮<sup>1</sup>

(1.湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2.长沙理工大学 桥梁结构安全控制湖南省工程实验室)

**摘要:** 为了研究玄武岩纤维增强复合材料(BFRP)约束有初始损伤的混凝土圆柱体的轴压力学性能,对 26 个直径 150 mm、高 300 mm 的圆柱体试件进行了轴压试验,包括 24 个 BFRP 约束混凝土试件和 2 个素混凝土试件。研究的主要参数是 BFRP 约束层数(1、3、5 层)和试件初始损伤程度。其中 18 个混凝土试件在包裹 BFRP 之前分别轴压加载至 3 种不同的应力水平然后卸载,分别代表轻微、中等和严重损伤。试验结果表明:BFRP 约束完好及初始损伤混凝土试件相比于素混凝土试件,峰值强度和极限应变均有明显提高,初始损伤会影响 BFRP 约束试件的峰值强度,但对极限应变影响很小。在试验结果的基础上,提出了一个修正强度模型和应变模型来预测初始损伤对 BFRP 约束混凝土柱轴压力学性能的影响,预测值与试验结果吻合较好。

**关键词:** FRP 约束; 初始损伤; 峰值强度; 极限应变; 应力—应变曲线

## 1 前言

纤维增强复合材料(Fiber-Reinforced Polymer, FRP)以其优良的性能如轻质、高强、耐腐蚀和易于施工等特点,在过去 20 年里被广泛应用于土木工程结构加固领域。目前,应用较广泛的纤维增强复合材料主要有碳纤维(Carbon FRP, CFRP)、玻璃纤维(Glass

FRP, GFRP)和芳纶纤维(Aramid FRP, AFRP),但是这些纤维材料存在如下缺点:CFRP 成本较高,高性能 CFRP 依赖进口;AFRP 和 GFRP 力学性能相对较差,耐久性问题比较突出。而玄武岩纤维(BFRP)是玄武岩石料在高温(1 450~1 500 ℃)熔融后,通过高速拉制而成的高性能无机纤维,具有较高的抗拉强度、低廉的价格以及良好的耐高温、耐久性能。基于此,该文选用 BFRP 作为加固材料。

- \*\*\*\*\*
- [7] Deng L, Cai C S. Bridge Model Updating Using Response Surface Method and Genetic Algorithm[J]. Journal of Bridge Engineering, 2009, 15(5): 553-564.
- [8] 王宁波, 任伟新, 万华平. 基于动应变的桥梁动态称重及其优化算法[J]. 振动与冲击, 2013(4).
- [9] 任伟新, 左小晗, 王宁波, 等. 非路面式桥梁动态称重研究综述[J]. 中国公路学报, 2014(7).
- [10] Zolghadri N, Halling M W, Johnson N, et al. Field Verification of Simplified Bridge Weigh-in-Motion Techniques[J]. Journal of Bridge Engineering, 2016, 21(10): 04016063.
- [11] 赵华, 谭承君, 张龙威, 等. 基于小波变换的桥梁动态称重系统车轴高精度识别研究[J]. 湖南大学学报: 自然科

- 学版, 2016(7).
- [12] 邓露, 何维, 王芳. 不同截面类型简支梁桥动力冲击系数研究[J]. 振动与冲击, 2015(14).
- [13] Deng L, Wang F. Impact Factors of Simply Supported Prestressed Concrete Girder Bridges due to Vehicle Braking[J]. Journal of Bridge Engineering, 2015, 20(11).
- [14] 庄一舟, 傅公康. 桥梁健康的智能测力支座. CN202492796U[P], 2012.
- [15] He W, Deng L, Shi H, et al. Novel Virtual Simply Supported Beam Method for Detecting the Speed and Axles of Moving Vehicles on Bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2016, 22(4).

收稿日期: 2018-05-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 51408211); 长沙理工大学桥梁结构安全控制湖南省工程实验室开放基金资助项目(编号: 14KD02); 湖南省自然科学基金资助项目(编号: 2015JJ3032); 国家留学基金委资助项目(编号: 201606135057)

作者简介: 马高, 男, 博士, 助理教授. E-mail: magao@hnu.edu.cn