

基于虚拟简支梁法的桥梁动态称重研究

邓 露¹, 施 海¹, 何 维¹, 罗 杰²

(1. 湖南大学 风工程与桥梁工程湖南省重点实验室, 长沙 410082; 2. 湖南省交通科学研究院, 长沙 410015)

摘 要: Moses 算法是桥梁动态称重 (BWIM) 技术中最可靠的算法之一, 是目前各商业 BWIM 系统的基础。然而, 受影响线标定的约束, 当前的商用 BWIM 系统仅适用于短跨径桥梁。针对这一情况, 提出了虚拟简支梁法。该方法利用桥梁上的某一区段的隔离应变计算车辆的轴重和总重, 不受桥梁跨径的限制。建立了跨径为 20 m 和 40 m 的简支 T 梁桥有限元模型, 基于车桥耦合振动理论模拟获得桥梁响应, 并利用提出的新方法识别了车辆的轴重和总重。分析了路面平整度、车辆行驶速度等因素对识别精度的影响。结果表明: 对于较短跨径的 20 m T 梁桥, 常见三轴车的总重识别误差平均值在 2% 左右, 五轴车的总重识别误差平均值低于 1%, 精度都稍优于传统 Moses 算法; 而对于传统 Moses 算法不适用的 40 m T 梁桥, 该方法识别车辆总重的误差平均值仍可控制在 3% 以内, 表明该方法不受桥梁跨径的限制, 具有更广的应用前景。

关键词: 桥梁工程; 动态称重 (BWIM); 虚拟简支梁; Moses 算法

中图分类号: U466.2

文献标志码: A

DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2018.15.029

Vehicles' BWIM based on virtual simply-supported beam method

DENG Lu¹, SHI Hai¹, HE Wei¹, LUO Jie²

(1. Key Laboratory for Wind and Bridge Engineering of Hunan Province, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Hunan Communications Research Institute, Changsha 410015, China)

Abstract: Moses algorithm is one of the most reliable algorithms in bridge weigh-in-motion (BWIM) techniques, and is the basis of commercial BWIM systems. However, restricted by calibration of influence lines, the current commercial BWIM systems are only applicable to short-span bridges. Here, aiming at this situation, the virtual simply-supported beam method was proposed. With this method, the strain of an isolated section of a bridge was used to calculate the axle load and the weight of a vehicle not restricted by bridge span. The finite element models of two simply-supported T-beam bridges with spans of 20 m and 40 m were built, respectively. Based on the theory of vehicle-bridge coupled vibration, the two bridges' responses when a vehicle passes through them were obtained. Then the proposed method was used to identify the axle load and the weight of a vehicle. The influences of road surface roughness and vehicle speed, etc. on the identified accuracy were analyzed. The results showed that for the T-beam bridge with a shorter span of 20 m, the average identification errors for the weight of a three-axle vehicle and a five-axle one are about 2% and less than 1%, respectively, the accuracies are slightly higher than those using the traditional Moses algorithm; for the T-beam bridge with a longer span of 40 m to which the traditional Moses algorithm is not applicable, the average identification errors for vehicles' weights can be controlled within 3% by using the proposed method; so, the proposed method is not restricted by bridge span and has wider application prospects.

Key words: bridge engineering; bridge weigh-in-motion (BWIM); virtual simply-supported beam; Moses algorithm

桥梁动态称重 (Bridge Weigh-in-Motion, BWIM) 是一种利用桥梁作为称重载体, 通过测量车辆荷载作用

下的桥梁结构动力响应来反算车辆的轴重、总重、轴距等信息的技术, 具有识别快速准确、耐久性好、安装维护方便等优点, 为超载车辆监控提供非常便利的工具。BWIM 的概念和计算原理最初由 Moses^[1] 于 1979 年提出, Moses 算法也成为随后发展的 BWIM 技术的最基本算法。1997 年, 欧洲 COST 323 (WIM-LOAD) 计划^[2] 颁布了《欧洲动态称重指南》, 确定了动态称重系统的精

基金项目: 国家自然科学基金 (51478176); 湖南省杰出青年基金 (14JJ1014); 桥梁车辆荷载动态识别技术的开发与应用研究 (900201451)

收稿日期: 2016-12-23 修改稿收到日期: 2017-03-31

第一作者 邓露 男, 教授, 博士生导师, 1984 年生

度等级、使用条件和标定方法等标准。2001年, WAVE (Weighing-in-motion of Axles and Vehicles for Europe) 项目^[3]开发了 SiWIM 系统, 实现了 BWIM 的商业运营且使其在欧洲多个国家得到了广泛应用, 并于 2008 年推出了 FAD (Free of Axle Detector) 版本, 进一步精简了设备需求和操作程序。

虽然桥梁动态称重技术在过去三十多年里获得了较大的发展^[4-5], 然而研究发现, 桥梁跨径对 Moses 算法的识别精度具有较大的影响。Znidaric 等^[6-7]发现, 将传统 Moses 算法应用于较短跨径桥梁时车重识别误差一般不超过 10%, 但应用于比如 32 m 跨径的桥梁时的车重识别误差甚至可能大于 100%。COST 323 指南也指出, 在选用安装动态称重系统的桥梁时, 应优先选择跨径为 5~15 m 的梁桥或涵洞^[8]。因此, 探索新的方法进一步扩大 BWIM 的适用桥梁跨径范围已成为一个急需解决的重要问题。

基于此现状, 本文提出了隔离响应概念, 并基于该理论提出了虚拟简支梁法 (Virtual Simply-supported Beam Method, VSSB)。该方法在桥梁纵长方向上任选一区段作为虚拟简支梁, 并采集桥梁应变和计算隔离应变。相对于传统 Moses 算法, 该方法仅需利用虚拟简支梁区段的隔离应变进行车辆轴重和总重的计算, 可有效减少该区段外因素对车重识别精度的影响, 且可适用于任意跨径的受弯桥梁结构。通过车桥耦合振动数值模拟, 获得了跨径为 20 m 和 40 m 的简支 T 梁桥在车辆荷载作用下的随机振动响应, 并分别利用传统 Moses 算法和虚拟简支梁法对车辆轴重和总重进行了识别, 分析了路面平整度、车辆行驶速度等因素对车重识别精度的影响。并将虚拟简支梁法与传统 Moses 算法的识别精度进行了对比研究。

1 车桥耦合动力响应求解理论

根据车桥接触点作用力与位移的协调关系, 车桥耦合振动系统的动力学方程可表达为^[9-10]

$$\begin{bmatrix} M_b \\ M_v \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{d}_b \\ \ddot{d}_v \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_b + C_{b-b} & C_{b-v} \\ C_{v-b} & C_v \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{d}_b \\ \dot{d}_v \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_b + K_{b-b} & K_{b-v} \\ K_{v-b} & K_v \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_b \\ d_v \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_{b-r} \\ F_G + F_{v-r} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中: M 、 C 、 K 分别为质量、阻尼、刚度矩阵; d 为位移向量; F 为车桥相互作用力向量; 下标 v 、 b 分别为车辆与桥梁结构; 下标 r 、 G 分别为由路面平整度及车辆自重引起的的作用力。式(1)可利用 Runge-Kutta 方法求解。

本文基于 D'Alembert 原理建立车辆模型, 采用 Ansys 14.5 建立桥梁模型并导出桥梁模型的质量和刚度矩阵, 使用 Rayleigh 阻尼模型建立桥梁模型的阻尼

矩阵, 并建立了车桥耦合振动系统。该车桥耦合振动系统数值模拟的准确性与可靠性已通过先前的现场试验结果进行了验证, 详见文献^[11-12], 此处不再重述。

2 桥梁、车辆及路面平整度模型

2.1 桥梁有限元模型

根据《公路桥梁结构上部构造系列通用设计图》(2010年版), 建立了两座跨径 20 m 和 40 m 的简支 T 梁桥有限元模型。桥梁跨中 1/2 横断面如图 1 所示。

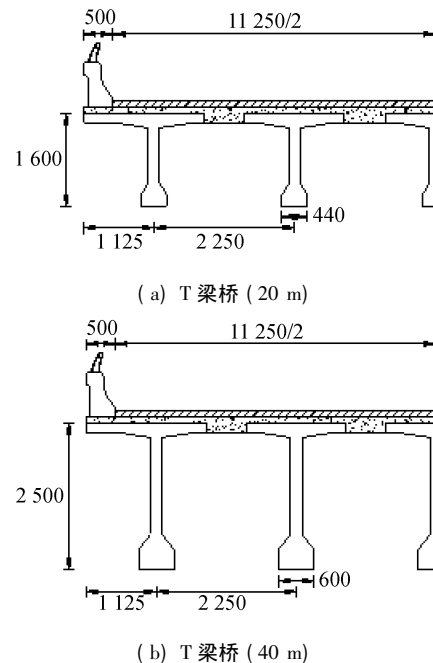


图1 桥梁跨中 1/2 横断面图 (单位: mm)

Fig. 1 1/2 Cross sections of the two bridges at midspan (unit: mm)

2.2 车辆有限元模型

本文选用具有代表性的三轴车和五轴车两种车辆模型用于数值模拟。车辆模型由车体、悬挂系统和车轮组成, 其示意图如图 2、图 3 所示。车辆模型的详细参数可参考文献^[13], 车辆模型轴距及静轴重参数见表 1。各工况下车辆均沿桥面中心线行驶, 车辆加载位置如图 4 所示。研究表明, 当轴距很小时, 准确识别各轴轴重将变得困难, 实际应用中可将轴距很小的多个车轴视为轴组进行计算^[14], 因此五轴车的后三轴在后续计算过程中将被作为单根轴来进行识别。

2.3 路面平整度

路面不平整是车-桥系统耦合振动的重要激励源。数值模拟中, 路面不平整度可基于功率谱密度函数通过级数方法生成^[15]。国际标准化组织 (ISO, 1995) 将路面平整度由好到差分为 5 个等级^[16]。本文采用其中的好、较好、一般 3 个等级, 路面不平整度样本利用公式(2)生成

$$r(x) = \sum_{k=1}^N \sqrt{2\varphi(n_k) \Delta n} \cos(2\pi n_k x + \theta_k) \quad (2)$$

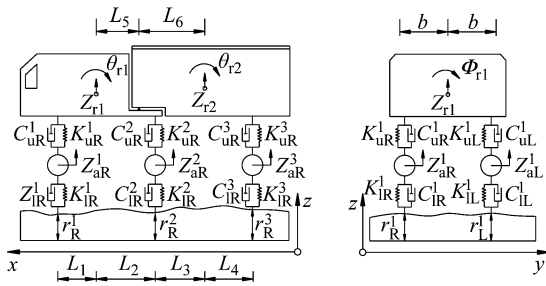


图 2 三轴车模型

Fig. 2 3-axle vehicle model

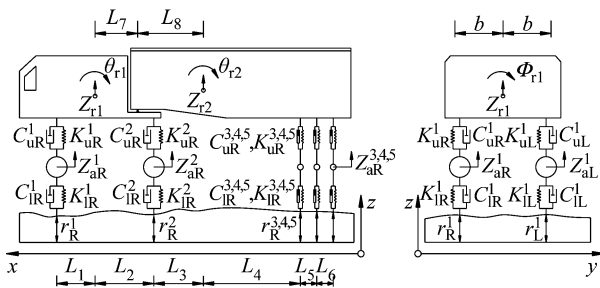


图 3 五轴车模型

Fig. 3 5-axle vehicle model

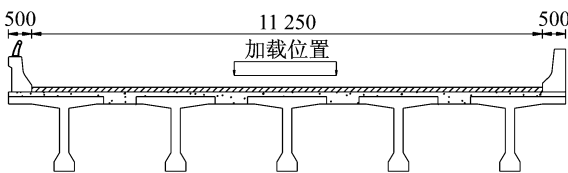


图 4 车辆加载位置 (单位: mm)

Fig. 4 Vehicle loading position (unit: mm)

表 1 车辆模型轴距及静轴重参数表

Tab. 1 The wheelbases and static axle loads of 2 vehicles under study

参数	三轴车	五轴车
1~2 轴距 $D1/m$	4.27	3.00
2~3 轴距 $D2/m$	4.26	5.10
3~4 轴距 $D3/m$		1.10
4~5 轴距 $D4/m$		1.10
第 1 轴轴重 $AW1/t$	3.63	5.79
第 2 轴轴重 $AW2/t$	14.50	11.94
第 3 轴轴重 $AW3/t$	14.53	7.80
第 4 轴轴重 $AW4/t$		7.44
第 5 轴轴重 $AW5/t$		7.08
总重 GVW/t	32.66	40.05

3 Moses 算法及虚拟简支梁法介绍

3.1 Moses 算法

车辆荷载作用在桥梁上时,利用静力影响线加载方法,可估算在 k 时刻桥梁的静响应理论值 M_k^T

$$M_k^T = \sum_{i=1}^N A_i I_{k,i} \quad (3)$$

式中: N 为总车轴数; A_i 为第 i 根车轴轴重; $I_{k,i}$ 为 k 时刻第 i 根车轴所在位置对应的桥梁弯矩影响线坐标。

在车辆荷载作用下,桥梁响应存在动力效应,使得结构的实测响应与理论静响应之间存在偏差。Moses 算法定义以车辆轴重 $A = \{A_1, A_2, \dots, A_N\}$ 为自变量的误差函数 E 如式(4)所示,并将使 E 取最小值的车辆轴重值作为真实车辆轴重的估计值,然后将各轴重估计值之和作为车辆总重的估计值。

$$E = \sum_{k=1}^K [M_k^M - M_k^T]^2 \quad (4)$$

3.2 虚拟简支梁法

如图 5(a) 所示,一根具有任意边界条件的线弹性梁 mn , 假设 $i \rho j$ 为 mn 梁上连续的 3 个点,相邻点间的距离如图中所示。当在梁 mn 上距 i 点 x 处施加一个集中力 F 时,记梁 mn 两端点支座反力分别为 F_m, F_n, M_m, M_n , 则 $i \rho j$ 三点的弯矩可表示为梁 mn 端点支座反力在相应位置引起的弯矩 M_v^R 与集中力 F 在相应位置引起的弯矩 M_v^F 之和

$$M_v = M_v^R + M_v^F \quad v = \{i \rho j\} \quad (5)$$

从图 5(a) 中容易获得

$$\begin{cases} M_i^R = M_m(x) + F_m(x) l_m \\ M_o^R = M_m(x) + F_m(x) (l_m + l) \\ M_j^R = M_m(x) + F_m(x) (l_m + 2l) \end{cases} \quad (6)$$

$$M_i^F = \begin{cases} Fx, & x < 0 \\ 0, & x \geq 0 \end{cases}$$

$$M_o^F = \begin{cases} F(x-l), & x < l \\ 0, & x \geq l \end{cases}$$

$$M_j^F = \begin{cases} F(x-2l), & x < 2l \\ 0, & x \geq 2l \end{cases} \quad (7)$$

从式(5)~式(7)可得

$$M_o^R - \frac{1}{2}(M_i^R + M_j^R) = 0 \quad (8)$$

$$M_o - \frac{1}{2}(M_i + M_j) =$$

$$\begin{cases} 0, & (x < 0 \text{ or } x \geq 2l) \\ \frac{1}{2}Fx, & (0 \leq x < l) \\ \frac{1}{2}F(2l-x), & (l \leq x < 2l) \end{cases} \quad (9)$$

定义 M_s 为

$$M_s = M_o - \frac{1}{2}(M_i + M_j) \quad (10)$$

从式(9)和式(10)可知 M_s 仅与点 $i \rho j$ 之间的距离和集中力 F 加载位置有关,而与梁 mn 的边界条件等梁段 ij 之外的影响因素无关,故称 M_s 为点 o 的“隔离

弯矩”。此外,注意到长度与*ij*点之间距离相等的简支梁其跨中弯矩影响线与式(10)的形式完全相同,故将梁段*ij*称为虚拟简支梁。由于虚拟简支梁的长度可以远小于桥梁总跨径,且隔离响应具有不受外部因素影响的特点,因此具有提高大跨径桥梁上BWIM识别精度的潜力。称该方法为虚拟简支梁法(Virtual Simply-supported Beam Method, VSSB)。

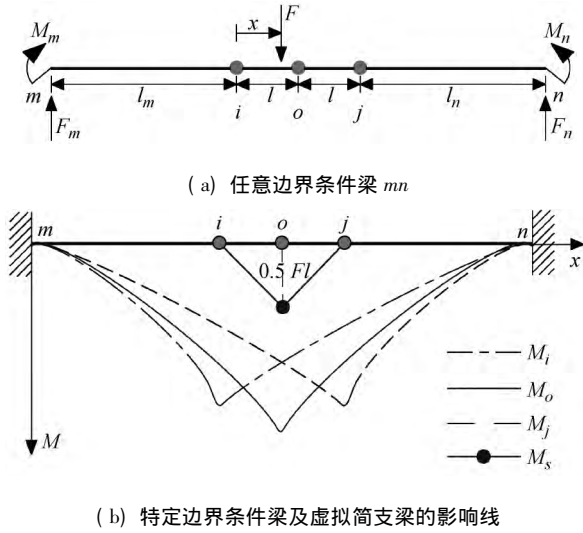


图5 虚拟简支梁法原理图

Fig. 5 Schematics of the virtual simply-supported beam method

图5(b)所示为一两端固支梁上虚拟简支梁示意图,图中曲线分别为*o*、*i*、*j*三截面的弯矩影响线及*o*点的隔离弯矩影响线。

4 结果分析

由于桥梁应变与弯矩呈线性关系,故本文取桥梁第3根主梁的应变响应进行轴重识别。取虚拟简支梁长度为10 m,对于20 m梁桥,传感器分别安装于5 m, 10 m和15 m 3个截面的主梁梁底处;对于40 m梁桥,传感器则分别安装于15 m, 20 m和25 m 3个截面的主

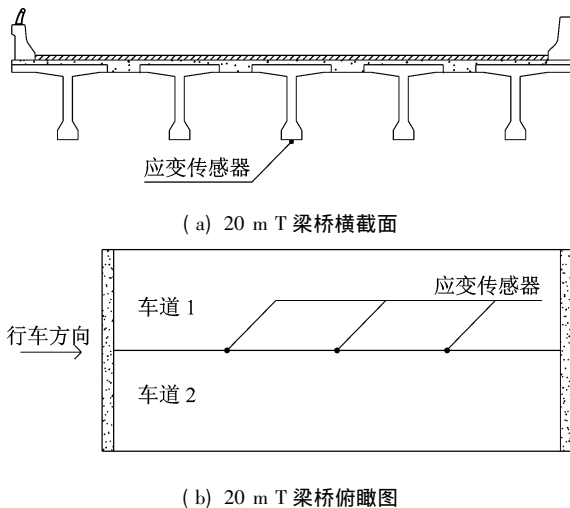


图6 应变传感器布置示意图

Fig. 6 Arrangement of strain sensors

梁梁底处。两辆车辆(三轴车、五轴车)分别以10~30 m/s共5种不同速度行驶经过桥梁上,图7为三轴车以10 m/s通过20 m T梁桥时,虚拟简支梁和完整梁跨中的应变时程曲线。由图可见,完整梁的跨中应变在车辆刚上桥就有响应,而虚拟简支梁上的应变在车轴驶入虚拟简支梁的范围内才开始有明显响应,因此可以不受区段外各种外因(如伸缩缝导致跳车)对隔离响应的影响。以下基于数值模拟,研究路面平整度、车辆行驶速度以及桥梁跨径对识别结果精度的影响。

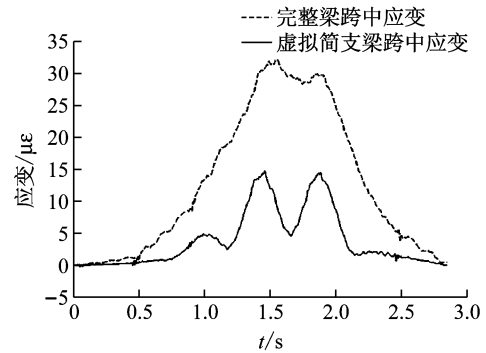


图7 虚拟简支梁和完整梁跨中应变时程曲线图

Fig. 7 Strain curves at the midspan of the isolated beam and the full beam

4.1 不同路面平整度的识别精度

对不同路面平整度和各种行车速度下的本方法的识别精度进行了研究。由于篇幅所限,仅选取部分工况进行说明。图8总结了三轴车和五轴车在3种路面

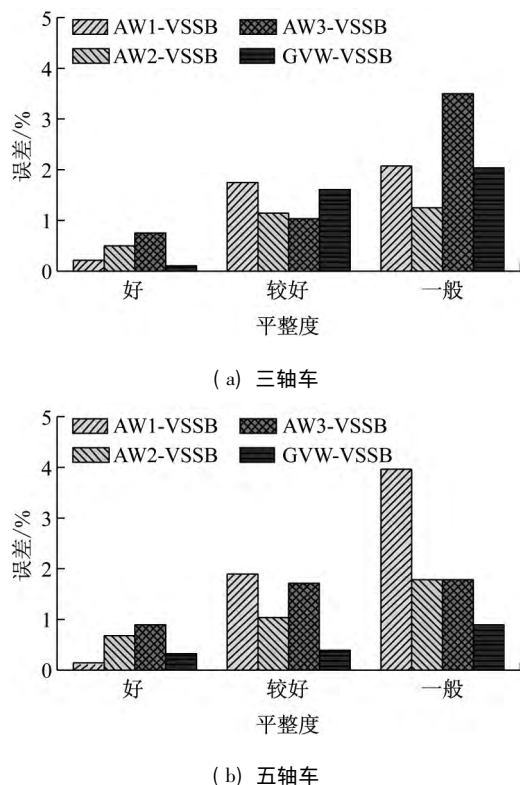


图8 不同路面平整度下识别误差

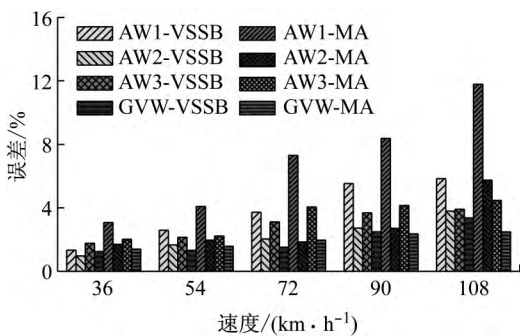
Fig. 8 Identification errors under different RSCs

平整度下以 36 km/h 的速度驶过 20 m T 梁桥时的各种情况下的识别误差。图中“VSSB”表示基于 VSSB 法的计算结果“AW1”、“AW2”和“AW3”分别表示第 1 轴、第 2 轴和第 3 轴轴重“GVW”表示车辆总重。

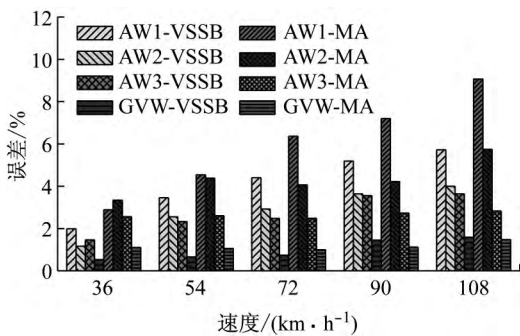
由图 8 可见,车辆轴重及总重识别误差随路面平整度变差而增大。当路面平整度为一般时,三轴车的轴重识别误差为 3.5%,总重识别误差为 2%;五轴车的轴重识别误差为 3.9%,总重识别误差则低于 1%。并且,大部分工况下车辆轴重及总重识别误差均低于 2%,说明 VSSB 法对轴重及总重具有较高的识别精度。

4.2 不同行驶速度的识别精度

利用传统 Moses 算法和本文提出的虚拟简支梁 (VSSB) 法对不同的工况进行了分析。不同车辆行驶速度下的轴重及总重识别误差如图 9 所示。图中“MA”表示基于传统 Moses 算法“VSSB”表示基于 VSSB 法。由图可知,在绝大多数情况下,VSSB 算法无论是在车辆轴重识别还是总重识别上均比传统 Moses 算法具有更高的精度,轴重识别的优势更为明显。事实上,已有研究指出,在商业桥梁动态称重系统中,传统 Moses 算法一般只适用于车辆总重识别,并不适合车辆的轴重识别^[17]。从图 9 中也可以发现,VSSB 算法的车辆轴重和总重识别误差随车速的提高有增大的趋势,但车辆总重的识别误差能始终控制在较低的范围,最大总重识别误差为 3.3%。



(a) 三轴车



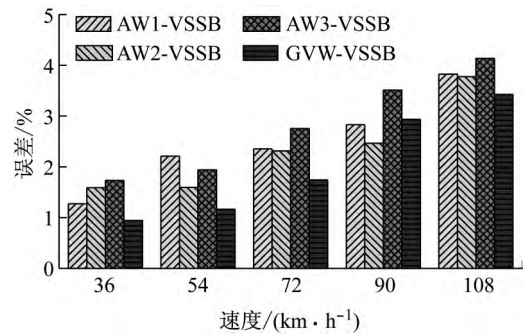
(b) 五轴车

图 9 不同速度及算法下识别误差

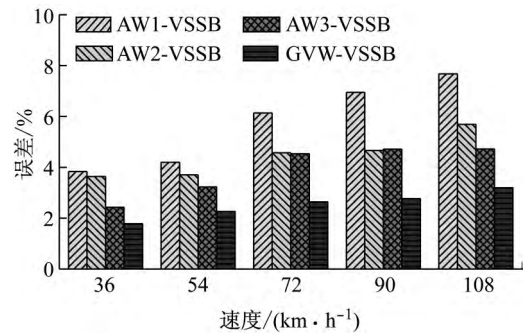
Fig. 9 Identification errors under different speeds with two algorithms

4.3 较大跨径桥梁的识别精度

已有研究表明,传统 Moses 算法仅适用于较小跨径 (5~15 m) 桥梁。本文选取一跨径为 40 m 的 T 梁桥来检验 VSSB 方法的适用范围和精度。基于 VSSB 方法,各工况下的车辆轴重及总重识别误差如图 10 所示。由图可知,三轴车平均总重识别误差为 2%,轴重识别误差不超过 5%;五轴车平均总重识别误差为 2.5%,轴重识别误差均低于 8%。由图 9 和图 10 比较可知,在 20 m T 梁桥与 40 m T 梁桥上,基于 VSSB 法的车辆轴重识别精度相当,三轴车总重识别误差不超过 4%,五轴车总重识别误差一般不超过 3%。因此,VSSB 法的车辆轴重和总重识别精度完全没有受到桥梁跨径的影响,具有扩大商用 BWIM 系统适用范围的潜力。



(a) 三轴车



(b) 五轴车

图 10 40 m 跨径 T 梁桥下的识别误差

Fig. 10 Identification errors of the 40 m-span T-beam bridge

5 实验验证

在实验室建立了一个车桥耦合振动实验平台,建立了一座简支梁桥和一个三轴车的缩尺模型并进行了实验研究,验证了 VSSB 算法的有效性及其准确性。

5.1 实验介绍

实验平台如图 11 所示,由加速段、桥梁模型、车辆模型及减速段组成。其中,简支梁桥模型由有机玻璃材料制作,桥梁长度为 2.38 m,桥面宽度为 1.01 m,桥梁模型各参数相似比见表 2。车辆为三轴车模型,各轴距及静轴重见表 3。车辆模型沿车道 1 中间行驶,车速可通过车辆放置在加速段的初始高度进行调整,并可

以通过桥面两根 PVDF 电缆间距及车辆压过电缆的时间差计算得到。桥梁模型横断面及车辆加载位置如图 12 所示。本实验取桥梁第 2 根主梁的应变响应进行轴重识别。如图 13 所示,取虚拟简支梁长度为 1.19 m,传感器分别安装于桥梁模型 1/4 跨、1/2 跨及 3/4 跨三个截面的主梁梁底处。由于实验条件限制,选取了车辆模型分别以 1~5 m/s(对应于实际情况中 10.4~52.2 km/h)共 5 种速度经过桥梁的工况进行了研究。图 14 为三轴车模型以 3 m/s 通过简支梁桥模型时,虚拟简支梁和完整梁跨中的应变时程曲线。

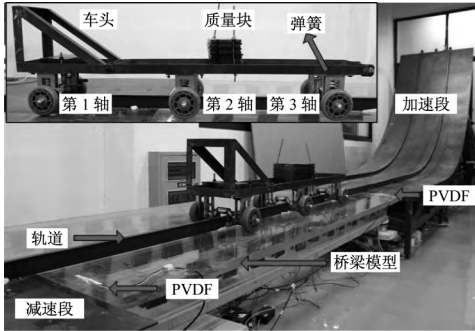


图 11 实验平台
Fig. 11 Test platform

表 2 实验桥梁模型相似比

Tab. 2 Ratios of similitude of the bridge model

参数	相似比
体积	0.119
弹性模量	0.081
应变	1.00
应力	0.081
挠度	0.119
截面惯性矩	2.01×10^{-4}
面积	0.014
质量	1.15×10^{-3}
刚度	9.64×10^{-3}
固有频率	2.899
车速	0.345
荷载	1.15×10^{-3}

表 3 实验车辆模型轴距及静轴重参数表

Tab. 3 The wheelbases and static axle loads of the truck model

参数	三轴车模型
1~2 轴轴距 $D1/m$	0.455
2~3 轴轴距 $D2/m$	0.475
第 1 轴轴重 $AW1/kg$	9.16
第 2 轴轴重 $AW2/kg$	14.54
第 3 轴轴重 $AW3/kg$	5.93
总重 GVW/kg	29.63

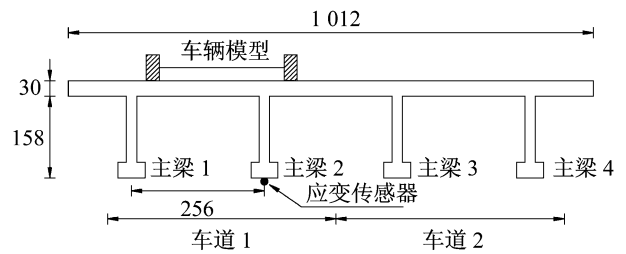


图 12 实验桥梁模型横断面及车辆加载位置图 (单位: mm)
Fig. 12 Cross section of the scaled bridge model and truck loading position (unit: mm)

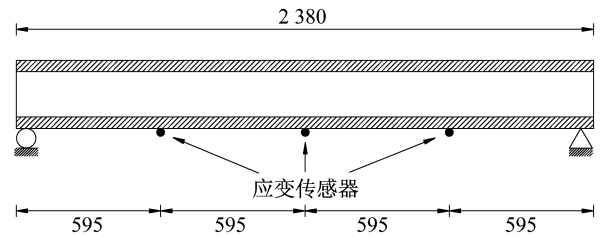


图 13 实验桥梁模型上应变传感器布置示意图 (单位: mm)
Fig. 13 Sensor positions on the scaled bridge model (unit: mm)

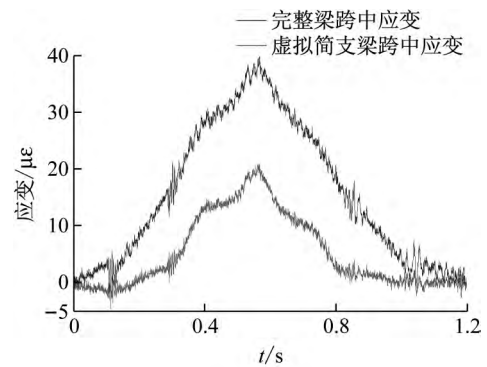


图 14 实验中实测应变时程曲线图
Fig. 14 Strain curves of the experiment

5.2 实验结果分析

不同车辆行驶速度下的轴重及总重识别误差如图 15 所示。由图可知,实验中 VSSB 法的车辆轴重和总重识别误差随车速的提高有增大的趋势,最大总重识别误差为 3.4%。轴重识别误差则不超过 6%。在所有工况中,车辆总重识别精度均优于轴重识别精度,平均总重识别误差仅为 2% 左右。因此,实验结果表明本文

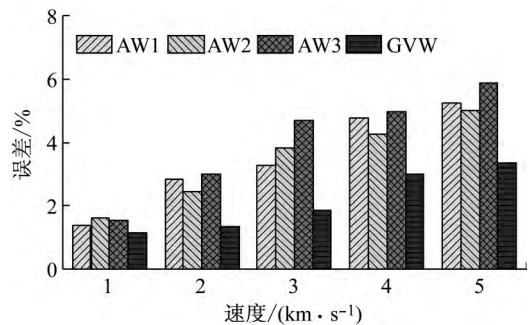


图 15 实验车重识别误差

Fig. 15 Identification errors in the experiment

提出的 VSSB 法具有较好的识别精度。

6 结 论

为解决传统 Moses 算法适用跨径较短的瓶颈, 本文提出了动态称重识别新方法—虚拟简支梁法(VSSB)。基于数值模拟, 计算分析了不同路面平整度、行驶速度等因素对车辆轴重、总重识别精度的影响, 并与传统 Moses 算法作了对比。此外, 利用实验室缩尺比例模型进行了实验研究, 对提出的方法进行了实验验证。得到如下结论:

(1) 在本文选用的两座不同跨径桥梁上, VSSB 法的识别精度均较高且不受跨径的影响。对于 20 m T 梁桥, 三轴车的平均总重识别误差为 2% 左右; 五轴车的平均总重识别误差则低于 1%。对于 40 m T 梁桥, 三轴车的平均总重识别误差为 1% 左右; 五轴车的平均总重识别误差为 2.5% 左右。

(2) 在大部分工况下, VSSB 法的车重识别精度略优于传统 Moses 算法, 尤其轴重识别精度的优势更为明显。

(3) VSSB 方法在原理上只需要利用整座桥梁的一个区段来实现车重识别, 因此不受桥梁跨径的局限, 为扩大商用 BWIM 系统的适用桥梁跨径范围提供可能。

参 考 文 献

- [1] MOSES F. Weigh-in-motion system using instrumented bridges[J]. Transportation Engineering Journal, 1979, 105(3): 233-249.
- [2] CHAPUIS M, BERNARD V. Collection and analysis of requirements as regards weighing vehicles in motion [R]. Brussels: European Cooperation in Science and Technology, 1996.
- [3] O'BRIEN E J, ZNIDARIC A. Report of work package 1. 2-bridge WIM systems (B-WIM) [R]. Paris: LCPC, 2001.
- [4] KOBAYASHI Y, MIKI C, TANABE A. Long-term monitoring of traffic loads by automatic real-time weigh-in-motion[J]. Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering, 2004, 69(773): 99-111.
- [5] O'BRIEN E J, ZNIDARIC A, OJIO T. Bridge weigh-in-motion: latest developments and applications worldwide[C]// Proceedings of the International Conference on Heavy Vehicles. Paris: John Wiley, 2008.
- [6] ZNIDARIC A, BAUMGARTNER W. Bridge weigh-in-motion systems—an overview[C]// Pre-Proceedings of 2nd European Conference on Weigh-in-Motion of Road Vehicles. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 1998.
- [7] 耿少波, 石雪飞, 阮欣. 基于桥梁结构的动态称重系统算法研究[J]. 石家庄铁道大学学报, 2011, 24(4): 40-44. GENG Shaobo, SHI Xuefei, RUAN Xin. Algorithm analysis of bridge weigh-in-motion system based on bridge response [J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University, 2011, 24(4): 40-44.
- [8] COST 323. European specification on weigh-in-motion of road vehicles [R]. Paris: LCPC, 1999.
- [9] 邓露, 何维, 王芳. 不同截面类型简支梁桥的动力冲击系数研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(14): 70-75. DENG Lu, HE Wei, WANG Fang. Dynamic impact factors for simply supported bridges with different cross-section types [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(14): 70-75.
- [10] 郭文华, 陈代海, 李整. 二期恒载对大跨度斜拉桥车桥耦合振动的影响 [J]. 中南大学学报, 2011, 42(8): 2423-2429. GUO Wenhua, CHEN Daihai, LI Zheng. Influence of secondary dead load on vehicle-bridge coupling vibration of long-span cable-stayed bridges [J]. Journal of Central South University, 2011, 42(8): 2423-2429.
- [11] DENG L, CAI C S. Identification of parameters of vehicles moving on bridges [J]. Engineering Structures, 2009, 31(10): 2474-2485.
- [12] DENG L, CAI C S. Development of dynamic impact factor for performance evaluation of existing multi-girder concrete bridges [J]. Engineering Structures, 2010, 32(1): 21-31.
- [13] ZHANG Y, CAI C S, SHI X M, et al. Vehicle-induced dynamic performance of FRP versus concrete slab bridge [J]. Journal of Bridge Engineering, 2006, 11(4): 410-419.
- [14] O'BRIEN E J, ROWLEY C W, GONZALEZ A, et al. A regularised solution to the bridge weigh-in-motion equations [J]. International Journal of Heavy Vehicle Systems, 2009, 16(3): 310-327.
- [15] HUANG D, WANG T L. Impact analysis of cable-stayed bridges [J]. Computers & Structures, 1992, 43(5): 897-908.
- [16] Mechanical vibration road surface profiles—reporting of measured data: ISO 8068 [S]. Geneva: International Standard Organization, 1995.
- [17] ZHAO Zhisong, UDDIN N, O'BRIEN E J. Bridge weigh-in-motion algorithms based on the field calibrated simulation model [J]. Journal of Infrastructure Systems, 2016(1): 04016021.