文章编号:1674-2974(2022)05-0111-09

DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2022055

适用于随机车流的二维桥梁动态称重应用

谭承君 1,2,赵华 1,2+,张斌 1,郭泓捷 1

(1. 湖南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410082;

2. 风工程与桥梁工程湖南省重点实验室(湖南大学),湖南长沙 410082)

摘要:为解决桥梁动态称重(Bridge weigh-in-motion, BWIM)中多车共存时的轴、总重识 别难题,基于桥梁的二维(2D)结构特性,考虑车辆的横向位置,提出了一种2D-BWIM算法.该 算法仅利用移动车辆所在车道下方的梁底响应信号以及结构梁底影响线来计算轴重,利用横 向分布系数的概念将轴重分配至各片梁上.桥梁每片梁底的实际结构影响线通过标定试验获 得.针对多辆车同时经过桥梁的情况,2D-BWIM算法提出了一种迭代方法来识别多车道上每 辆车的轴、总重.该迭代方法基于一种假设,即单辆车过桥时的梁底响应按照横向分布系数成 比例缩放.通过标定试验分析了这种假设的实际误差,结果表明,其绝对误差非常小,对后续 车辆轴重及总重识别影响甚小.随后,通过三次随机车流现场测试对2D-BWIM算法展开验 证.结果表明,当单辆车经过目标桥梁时,相较于BWIM中传统Moses算法,2D-BWIM算法考 虑了车辆的实时横向位置,因而能够显著提高车辆轴重及总重识别精度.三次随机车流试验 结果显示,单辆车过桥事件中(Moses、2D-BWIM)算法的总重识别误差平均值及方差分别为 (7.9%、3.1%)和(13.5%、4.8%).此外,三次随机车流试验中多车过桥事件(Moses、2D-BWIM)

关键词:桥梁工程;桥梁动态称重;随机车流;Moses算法;横向分布系数;影响线 中图分类号:U446,U492.321 文献标志码:A

A 2-Dimension Bridge Weigh-in-Motion System under Random Traffic

TAN Chengjun^{1,2}, ZHAO Hua^{1,2†}, ZHANG Bin¹, GUO Hongjie¹

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

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

Abstract: To identify the axle/total weight in the case of multiple vehicles, this paper proposes a twodimensional (2D)-BWIM algorithm considering the lateral position of passing vehicles. In this algorithm, only the responses of girders underneath the traveling lane are adopted to calculate the axle/total weight via using the concept of influence line. Considering the bridge's 2D behavior, the axle weight is distributed on each girder based on the transverse distribution factors. The influence line of each girder was obtained through a calibration test with known

作者简介:谭承君(1990—),男,湖南邵阳人,湖南大学博士后,博士

^{*} 收稿日期:2021-05-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52008162), National Natural Science Foundation of China(52008162);湖南省重点领域研发计划项目(2019SK2172), Key Research and Development Program of Hunan Province (2019SK2172);湖南省科技创新计划项目(2020RC2018), Science and Technology Innovation Program of Hunan Province (2020RC2018);中国博士后科学基金资助项目(2020M680114), Postdoctoral Science Foundation of China (2020M680114)

[†]通信联系人,E-mail: zhaohua@hnu.edu.cn

vehicle information. In this study, an iterative method is used to identify the axle/total weight of passing vehicles in multiple vehicles present. This iterative method gives an assumption that the response of each girder is proportional to the transverse distribution factor when a single vehicle crosses the bridge. Using the assumption, the corresponding error is calculated based on the calibration test, and the results show that the absolute error is very small and will not affect the accuracy of axle/total weight identification later. Then, three field tests under random traffic were carried out to validate the proposed 2D–BWIM algorithm. For a single–vehicle passing over the bridge, the results show that the 2D–BWIM algorithm can significantly improve the accuracy of vehicle axle/total weight recognition comparing to the traditional Moses' algorithm. In this case, for the 2D–BWIM algorithm, the average and variance of errors in total weight identification are 3.1% and 4.8%, respectively. While for traditional Moses' algorithm, errors of those are 7.9% and 13.5%, respectively. For multiple vehicles presents, the average and variance of errors in axle weight identification of (Moses, 2D–BWIM) algorithms are (7.34%, 1.53%) and (26.33%, 3.12%), respectively.

Key words: bridge engineering; BWIM (bridge weigh-in-motion); random traffic; Moses' algorithm; transverse distribution factors; influence line

超载车辆严重威胁公路桥梁的安全运营.针对 超载现象,世界各国推出了一系列惩罚措施进行控 制,但如何高效识别超载车辆是各国交通部门面临 的挑战.传统的静态称重是最直接、最准确的检测方 法,但该方法效率低,且在一定程度上阻碍交通.为 解决此问题,20世纪中期,欧洲率先提出了车辆动态 称重(Weigh-in-motion,WIM)技术,即车辆在行驶过 程中被称重^[1].早期的WIM系统通过埋置在路面的 传感器识别车辆轴重信息,因此也被称为路面称重 系统.该类方法因传感器截面尺寸小,车辆-传感器 相互作用时间短等,导致车辆轴重识别精度不高^[2]. 此外,在安装、更换传感器时,WIM系统需在路面开 挖基坑,中断交通,且传感器也存在耐久性问题^[3].

针对WIM技术的不足,桥梁动态称重(Bridge weigh-in-motion,BWIM)技术被提出.该方法通过测 量移动车辆荷载作用下的桥梁响应信号,利用反问 题求解方法反算出车辆轴重等信息.BWIM系统中 的称重传感器安装于桥梁下方.与WIM系统相比, BWIM系统具有以下优点:1)质量轻,体积小,方便 运输和转移;2)安装及测试隐蔽,能够检测真实交通 状况;3)桥梁长度比路面称重系统中的秤台长,车桥 相互作用时间长,因此称重精度受车辆动态载荷的 影响小;4)安装、测试、更换时不需中断交通^[4-5].

全球多个地区已开展了BWIM技术现场应用研究,试验桥梁也包含有混凝土简支T梁、正交异性钢桥面、斜拉桥、混凝土连续箱梁等^[6-9].经过40年的发展,目前BWIM技术不仅发展成为车辆静态称重的 有效补充手段,同时也能为交通监控、交通运输管理 等方面提供有力数据基础^[10].近来,Gonzalez等^[11]和 Obrien等^[12]基于机器学习或数理统计方法,利用 BWIM数据提出了有效的桥梁损伤检测方法,进一 步提升了BWIM技术应用范围.

BWIM 技术一般基于 Moses 算法^[13]识别车轴重 量. Moses 算法是根据桥梁结构影响线,利用桥梁响 应信号来计算车轴轴重.传统 Moses 算法通常将桥 梁视为一维结构,与实际桥梁的二维结构受力特性 不符.为此,Quilligan 等^[14]和 Yu等^[15]将一维 Moses 算 法扩展到二维空间,提出了利用结构影响面来考虑 桥梁的二维特性,但获取结构影响面十分困难,现实 中难以实现.此外,龙波^[16]提出了利用车道影响线来 提高宽桥中 Moses 算法识别精度,即不同车道拥有不 同的影响线. Zhao 等^[17]考虑了桥梁的横向分布效 应,提出了基于多条结构影响线的二维 BWIM 算法. 虽然这些方法考虑了桥梁结构的二维特性,但仍然 无法解决 BWIM 技术实际应用中最大的挑战——多 辆车同时经过桥梁时的轴重识别难题.

宫亚峰等^[18]基于桥梁弯矩影响面来处理多车并 存时每个车轴识别问题.但如上所述,结构影响面在 实际应用中难以准确获得,极大地限制了该方法的 工程实际应用.Chen等^[19]提出了一种基于长距离光 纤布拉格光栅传感器的BWIM系统,该系统利用传 感器信号所形成的面积来计算车轴轴重.目前该方 法仅仅通过室内简化模型进行了验证,其实际应用 可行性还有待进一步验证.

本文提出了一种不考虑影响面的 2D-BWIM 算法.该方法通过获取桥梁每片梁的影响线以及实时

的横向分布系数来提高随机车流中车轴识别精度. 同时针对多车并存,该算法提出了基于横向分布系数的迭代方法.本文首先基于理论分析,推导了2D-BWIM算法的计算公式,然后通过基于实际桥梁的标定试验以及三次随机车流试验验证该算法的准确 性和可行性.

1 BWIM 现场试验

现场试验桥梁为3×12.8 m的三跨全预应力混凝 土简支T梁结构,位于美国亚拉巴马州78号高速公 路.该试验由本文作者参加完成,详见文献[20].试 验桥梁立面图如图1所示.桥梁上部结构由4片T梁 构成(见图2),且每片T梁跨中梁底安装一个应变传 感器,称之为称重传感器.此外,为了获得行驶过桥 的车辆有效信息,每个车道布置有一对FAD(Free of Axle Detector)传感器.



图1 试验桥梁立面图(单位:m)







Fig.2 Schematic diagram of sensor layout(unit:cm)

1.1 标定试验

标定试验车辆为两辆5轴车,具体参数如表1所示(标记为车辆A和B).标定试验过程可详见文献 [17].车辆A和B分别沿车道一、二重复5次跑车试验(共计20趟).此外,试验中车辆A和B同时经过试验跨一次.试验采样频率为500Hz.

表1 标定车辆信息

Tab.1 Calibration	ı vehicle	information
-------------------	-----------	-------------

车辆		3	轴重/kg	5	轴距/cm				
	1^{st}	2^{nd}	3 rd	4 th	5 th	$1^{st}-$	$2^{nd}-$	3 rd -	$4^{th}-$
						2^{nd}	$3^{\rm rd}$	4^{th}	$5^{\rm th}$
А	5 012	7 099	7 303	8 255	8 165	432	135	1 118	130
В	4 559	7 257	7 167	8 301	8 187	434	135	1 113	127

1.2 随机车流试验

随后,课题组开展了该桥在实际车流下的 BWIM系统测试研究.如图3所示,为了检测BWIM 系统识别精度,在测试期间,经过测试桥梁的所有卡 车(忽略小车)均会在距离试验跨不远处被当地交警 拦下,利用可携带地磅进行静态称重.因此,该随机 车流试验仅仅关注卡车,相互影响车道数为两个车 道,且车辆沿同一方向行驶,试验过程中均为正常交 通状况.随机车流试验共进行3次,每次持续几小 时,表2记录了试验所有卡车分布情况,其中,共记 录了8次多车过桥事件.





(a)BWIM系统称重
 (b)静态称重
 图 3 随机车流BWIM系统测试
 Fig.3 BWIM test under random traffic

2 2D-BWIM 算法理论

2.1 桥梁结构影响线

Obrien 等^[21]提出了利用最小二乘法来获得目标 桥梁实际影响线,计算公式见式(1).

$$\epsilon = \sum_{k=1}^{N_{\mathrm{t}}} (R_k^{\mathrm{m}} - R_k^{\mathrm{t}})^2.$$
⁽¹⁾

式中:*R*^m_k为桥梁实测响应值;*R*^l_k为理论响应值;*k*为时间步长;*N*₁为总步长;*c*为理论值与实际值之间的误差. 在移动车辆荷载作用下,桥梁每片T梁所分配的荷载 是不一致的,一般通过桥梁横向分布系数来考虑桥梁 主》 随机左达测试出上左八左峡的

				1×4 PU17	山十加山火山	T + 11	同月の				
Tab.2Distribution of trucks in random traffic											
白日	标定试验间隔	测试时长/				随机车流	流中卡车分	布情况/辆			
庁丂	时间/d	h	2轴	3轴	4轴	5轴	6轴	共计	车道1	车道2	多车情况
1	2	3.5	0	1	1	17	0	19	3	16	2
2	38	6.0	2	13	0	14	1	30	1	29	3
3	48	6.5	1	8	0	19	1	29	2	27	3

的二维特性.对于车道j的车轴荷载P(x),梁i#分配的荷载为 $F_{ij}P(x)$,其中 F_{ij} 为桥梁横向分布系数,可通过梁底之间响应比值来计算,计算公式如下^[17]:

$$F_{ij} = \frac{\varepsilon_{ij}}{\sum_{i=1}^{4} \varepsilon_{ij}}, i = 1, 2, 3, 4, j = 1, 2.$$
(2)

式中:*ε_{ij}*为车辆沿车道*j*经过桥梁时,桥梁最大响应 时刻梁*i*#的响应值(因为响应幅值大时受噪声信号 和桥梁振动的影响相对更小).显然,*F_{ij}*为车道荷载 下横向分布因子,车辆在不同车道时,其分布因子是 不同的.根据上述标定试验跑车20趟(每个车道10 趟),车道一的梁1#~4#的横向分布系数(平均值)分 别为0.36、0.40、0.21、0.03;车道二的梁1#~4#的横向 分布系数(平均值)分别为0.08、0.22、0.43、0.27.

当车辆沿车道*j*经过桥梁时,对于每一片梁,根据公式(1)可以得到:

$$\epsilon_{i} = \sum_{k=1}^{N_{i}} (R_{i,k}^{m} - R_{i,k}^{t})^{2}.$$
(3)

式中:R^m_{i,k}为梁*i*#桥梁实测响应值;Rⁱ_{i,k}为梁*i*#理论响应值.根据车道荷载横向分布系数,梁*i*#理论值为:

$$R_{i,k}^{i} = \sum_{k=1}^{N_{s}} F_{ij} A_{s} \times I_{k-P_{s}}.$$
 (4)

式中: N_a 为车轴数目; A_s 为车轴重量; I_{k-P_i} 为k时刻下 第s车轴对应结构影响线的坐标值; P_s 为第s车轴与 第1个车轴之间的采样滞后点,可以通过 $P_s = D_s flv$ 计算得到,其中 D_s 为第s车轴与第1个车轴之间间 距,f为采样频率,v为车速.因此,上述公式(3)可以 另表述为:

$$\boldsymbol{\epsilon}_{i} = \left(\boldsymbol{R}_{i}^{\mathrm{m}} - \boldsymbol{F}_{ij}\boldsymbol{A}\boldsymbol{I}_{i}\right)^{\mathrm{T}} \left(\boldsymbol{R}_{i}^{\mathrm{m}} - \boldsymbol{F}_{ij}\boldsymbol{A}\boldsymbol{I}_{i}\right).$$
(5)

式中: R_i^m 为梁*i*#实测响应值向量;A为车轴轴重相关 矩阵; I_i 为梁*i*#影响线相关矩阵(包括了所有车轴对 应影响线).在标定试验中 R_i^m 和A是已知的, I_i 未知. 为了获得最小 ϵ_i (极值点),可以对 I_i 求导,并令其等 于0,结果如下:

$$\frac{\partial \epsilon_i}{\partial I_i} = 2F_{ij}A^{\mathrm{T}} \Big(R_i^{\mathrm{m}} - F_{ij}AI_i \Big) = 0.$$
(6)

由此,通过标定试验可获得每片梁的实际影响线:

$$I_i = \frac{1}{F_i} (\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{A})^{-1} \boldsymbol{A}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{R}_i^m.$$
(7)

如式(7),由于不同车道荷载下F_i有所不同,因此,不同车道荷载下计算的I_i也不相同.理论上,在标定试验中,无论是车道一或车道二,根据公式(7),都能获得梁1#~4#对应的结构影响线,但一般来说,响应幅值越大,其抗信号干扰能力越强,保真度越高,因此,梁1#、2#的影响线通过标定车辆沿车道一的跑车来获得,而梁3#、4#的影响线通过标定车辆沿车道二的跑车来获得.相对应地,梁1#、2#的影响线仅用于车道一的移动荷载识别,而梁3#、4#的影响线仅用于车道二的移动荷载识别.图4为标定试验中所得到的梁1#~4#的平均影响线.





2.2 移动荷载识别

已知桥梁影响线求轴重时,上述公式(5)中 R_i^m 和 I_i 是已知的,A未知.同理,为了获得最小 ϵ_i ,可对A求导,并令其为0,从而得到轴重计算公式:

$$\boldsymbol{A}_{i} = \frac{1}{F_{ij}} \left(\boldsymbol{I}_{i}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{I}_{i} \right)^{-1} \boldsymbol{I}_{i}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{R}_{i}^{\mathrm{m}}.$$

$$\tag{8}$$

由公式(8)可知,理论上可以通过一片梁的影响 线来计算轴重.为了降低偶然误差,可以利用梁1#、 2#的影响线来共同计算车道一车辆荷载.一般情况 下可以通过平均梁1#、2#的计算荷载作为车道一的 最终车辆轴重.但是考虑到响应幅值越大其受噪声 信号和桥梁振动的影响相对越小,保真度越高,因此 本文对更大的幅值响应信号分配更高的权重,即按 横向分布系数进行权重分配,计算公式见式(9).

$$A_{\text{lane},j} = \frac{F_{2j-1,j}}{F_{2j-1,j} + F_{2j,j}} A_{2j-1} + \frac{F_{2j,j}}{F_{2j-1,j} + F_{2j,j}} A_{2j}, j = 1, 2.$$
(9)

在随机车流中,根据公式(9)可以直接计算出单辆车经过桥梁时的轴重信息.为解决多车同时过桥的轴重识别难题,在2D-BWIM算法基础上,本文提出了一种迭代方法,具体如图5所示.





当多车事件发生时,BWIM系统首先认为梁底 响应信号仅为率先进入桥梁的那一辆车所产生.为 了阐述方便,假设车道一的车辆先进入桥梁.根据公 式(9),利用梁1#、2#响应信号S₁、S₂来计算车道一的 初始轴重A_{lane-1},显然该计算结果将大于真实值,因 为梁1#、2#部分响应信号由车道二的车辆所造成. 同时,该算法提出一个假设,即梁底响应按照横向分 布系数成比例缩放,因此,可以计算得到初始轴重 A_{lane-1} 对梁3#、4#造成的响应信号 S_3^v, S_4^v .同时,为了 获得车道二车辆单独作用下对梁3#、4#造成的响应 信号,将桥梁简单视为线弹性结构,可以利用梁3#、 4#实测响应信号 S_3, S_4 分别减去计算生成信号 S_3^v, S_4^v , 得到车道二计算轴重的输入信号 S_3^1, S_4^1 .因为 S_3^v, S_4^v , 得到车道二计算轴重的输入信号 S_3^1, S_4^1 .因为 S_3^v, S_4^v , 得到车道二计算轴重的输入信号 S_3^1, S_4^1 与真实 值相比降低了.因此,车道二初始轴重将明显小于其 真实值,但经过迭代算法, A_{lane-1} 将逐渐减小而 A_{lane-2} 将逐渐增加,直至轴重识别结果稳定,迭代结束.

如上所述,本文提出的迭代方法基于一个假设 (即单辆车过桥事件中,梁底响应按照横向分布系数 成比例缩放),下面将对该假设的准确性、有效性进 行验证.图6记录了标定试验中标定车辆A沿车道 一经过桥梁时所采集的信号.FAD1-1和FAD1-2信 号均显示了5个明显的峰值信号,对应于车辆A的5 个车轴经过对应传感器的时刻,根据FAD1-1与 FAD1-2中对应峰值信号时间间隔及其实际距离,则 可以获得该车辆的实际速度,然后根据FAD1-1或 FAD1-2信号中峰值信号时间间隔和车速便可以计 算出车辆的轴距参数^[8].



图 7显示了该趟跑车下基于假设计算出的生成 信号与实测信号之间的差异,即利用梁 1#、2#响应信 号以及横向分布系数计算梁 3#、4#的生成响应信号. 其中"计算 1"结果根据该趟的横向分布系数获得, "计算 2"结果根据车道一的 10 趟标定试验平均横向 分布系数获得.由图 7 可见,梁 3#、4#中"计算 1"与 "计算 2"之间的差别甚小,而且它们与实测结果也都 非常接近,其绝对误差值很小.本文利用平均误差值 来量化基于此假设下的计算误差:



and the generated signal

$$E_{\rm ave} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^{N} (r_i - s_i)^2} \,. \tag{10}$$

式中:r_i为计算生成信号;s_i为实测信号;i为时间步 长;N为信号采集长度.值得一提的是,多车并存事 件中,每一辆车的实时横向分布系数无法通过公式 (2)获得.考虑到多车并存时,各个车道的车辆均不 会明显偏离其车道中心线,车辆行驶轨迹与标定试 验相差不大(标定试验中车辆大致沿车道中心线行 驶).因此,针对多车并存事件,各车道的横向分布系 数可以采用标定试验中平均横向分布系数计算,即 采用"计算2"结果.根据公式(10),该趟跑车平均误 差如图8第1趟所示.



此外,图 8绘出了标定试验中车道一其余9趟计 算生成信号的误差结果.对于这10趟标定试验,梁 3#、4#平均误差值分别为0.056 13µε、0.030 59µε,其 标准差分别为0.013 74µε、0.049 18µε,可见,基于该 假设计算生成的响应信号的绝对误差值均非常小, 结果离散度也很小.这些结果亦表明,基于横向分布 系数,利用主响应信号预测非主响应信号的准确性 很高,其绝对应变误差值非常小,而BWIM系统计算 轴重算法与梁底信号应变绝对值相关.因此,可初步 得到以下结论,迭代方法提出的假设对后续BWIM 系统中移动车辆轴重及总重的识别精度影响较小.

2.3 多车并存时2D-BWIM算法的验证

为了进一步验证多车共存时 2D-BWIM 算法中 迭代方法的准确性,以标定试验中两辆标定车同时 经过桥梁(标定车A沿车道二行驶,标定车B沿车道 一行驶)的工况为例,利用 2D-BWIM 算法识别移动 车辆 A 和 B 的轴重及总重.图 9 记录了该工况下 FAD 传感器信号和梁底响应信号.如图 9 所示,车道 一、二的 FAD 信号均显示 5 个明显峰值,且发现车道 二的标定车A 较先进入桥梁.

利用图 5 算法对该多车并行工况进行轴重识别,其结果如图 10 所示.与上述分析一致,车道二的车辆率先驶入桥梁,因此车道二初始轴重识别结果明显大于其理论值,反之,车道一初始轴重小于理论值,经历7次迭代,最终车道一和车道二总重识别误差分别为-3.26%和2.68%,其单个轴重识别误差分别不超过-5.89%和-6.11%,进一步验证了图 5 算法的可行性与准确性.



Fig.9 Signals of two calibration trucks cross the bridge



Fig.10 Axle weight recognition results in iteration

3 随机车流试验结果分析

随机车流试验中传感器布置与标定试验一致, 可以通过FAD传感器来识别行驶车辆的车道分布、 速度、车轴数量和车轴间距.三次随机车流测试中, 绝大部分车辆车速位于55~105 km/h,组轴(轴距非 常近,约1.4 m)轴距识别最大误差为16.0%,其误差 平均值和方差分别为7.1%和3.9%;非组轴轴距识别 最大误差为8.4%,其误差平均值和方差分别为0.7% 和1.7%.车轴轴距识别精度较高,在可接受范围内.

3.1 随机车流中单辆车过桥事件测试结果

针对上述三次随机车流测试中每一趟单辆车过 桥事件,分别利用传统 Moses 算法以及本文提出的 2D-BWIM 算法对其进行轴重识别,车辆总重识别结 果如图 11 所示.结果表明,随机车流测试中 Moses 算 法存在较大的识别误差,且结果离散度较大.其原因 主要有以下两点:1)当仅有一辆车经过目标桥梁时, 车辆可能严重偏离行驶,即车辆行驶中心线与对应 车道中心线偏离较远;2)一些卡车处于空载状态,车 皮重较轻(比如2、3轴车),因此,尽管识别绝对误差 值可能不大,但其误差百分比可能较大.本文提出的 2D-BWIM 算法考虑了车辆过桥时实时的横向位置, 因此,该2D算法能够大幅提高车辆总重识别精度. 对三次随机车流测试中所有单辆车过桥事件进行统 计分析, Moses 最大识别误差为47.3%, 而 2D-BWIM 算法总重识别误差在 13.7% 以内, Moses 与 2D-BWIM算法对车辆总重识别误差平均值分别为 7.9%、3.1%, 识别误差方差分别为13.5%、4.8%.



图 12 通过箱形图绘出了随机车流测试中单个 车轴轴重识别误差分布图.箱形图是一种常见的统 计图,能够表现出一组离散数据的上边缘、下边缘、 中位数和两个四分位数,以及数据异常点.由图 12 可见,相较于Moses算法,2D-BWIM算法的轴重识别 精度更高,且具有明显的较小离散型.(2D-BWIM算 法,Moses算法)在试验(1)(2)(3)中的轴重识别误差 中位数分别为(7.8%,13.1%),(1.0%,3.9%)和 (3.6%,7.2%).综合三次随机车流试验,2D-BWIM算 法和Moses算法识别误差箱形图中的上边缘、上四分 位数、中位数、下四分位数和下边缘分别为(25.6%、 8.3%、3.6%、-1.1%、-17.6%)和(53.6%、16.9%、 6.9%、-1.8%、-35.7%).由此可见,尽管剔除了一些 奇异值,Moses算法针对随机车流中的轴重识别精度 离散程度依然很大,本文提出的2D-BWIM算法考虑 了车辆实时的横向位置,其轴重识别精度明显高于 传统Moses算法,且算法保真度较高,轴重识别误差 离散程度非常小.



3.2 随机车流中多车并存事件测试结果

多车事件是指某一辆车未完全驶出桥梁时,有 另外一辆车已驶入桥梁.由于试验桥梁跨径小,多车 事件均为一、二车道上同时各出现一辆车.图13显 示了试验中两次多车事件的现场照片.3次试验中 多车事件的轴重及总重识别结果如表 3 所示. 8 次多 车事件均为一辆卡车与另外一辆小(货)车同时经过 桥梁的情形,其中1、2、8工况的卡车沿车道一(快车 道)行驶,小车沿车道二行驶,其余工况的车道分布 与之相反.事实上Moses算法没有处理多车并存时 的特定办法,仅仅是认为该卡车单独经过桥梁(认为 另一车道上无车辆经过).由于小车本身重量较轻, Moses算法对其总重识别结果可能影响不大,而对车 辆轴重识别结果影响可能更为突出.如表3所示,本 文提出的2D-BWIM算法能够显著提高其中卡车的 轴重识别精度.针对表3中8趟多车并存工况,Moses 算法轴重的识别误差平均值和方差分别为3.12%和 26.33%, 2D-BWIM 算法轴重的识别误差平均值和方

差分别为1.53%和7.34%.其中,Moses算法最大轴重 识别误差高达58.3%,而2D-BWIM算法的轴重最大 识别误差仅为-13.5%.多车事件中,由于多辆车同时 作用,因此无法根据文中公式(2)来计算每一辆车的 实时横向分布系数,本文利用了标定试验值进行计 算.不可否认,多车事件中实际横向分布系数与标定 试验存在一定的差异,但由于多辆车并存时,车辆的 偏离程度很小,因此这种差异不大,结果也表明,该 方法识别的轴重精度在可接受范围内.



图 13 随机车流中多辆车同时过桥照片 Fig.13 Multi-presents photo under random traffic

表 3 随机车流中多辆车同时过桥时轴重识别结果 Tab.3 Axle weight recognition result in multi-presents

ᅮᄱ	皙汁	轴重识别结果/%							
_L.0L	异伝	1^{st}	2^{nd}	$3^{\rm rd}$	4^{th}	5^{th}	总重		
1	Moses	-39.5	-13.0	-10.5	13.8	19.9	-2.4		
	2D-BWIM	-8.5	5.8	9.0	5.5	11.1	5.9		
	Moses	44.9	-11.4	-6.8	-12.8	-8.2	-3.8		
2	2D-BWIM	-6.5	4.5	9.9	4.2	9.7	5.5		
3	Moses	14.8	-0.6	3.7	21.9	5.1	8.5		
	2D-BWIM	-13.5	-10.2	-6.4	5.7	-8.9	-6.5		
4	Moses	-45.4	-3.9	0.7	0.4	2.2	-5.5		
	2D-BWIM	-8.0	0.4	5.2	2.5	4.3	1.7		
5	Moses	29.3	44.9	—	—	—	39.9		
5	2D-BWIM	3.6	0.5	—	—	—	1.5		
6	Moses	-32.8	-24.6	-14.9	58.3	74.9	9.3		
	2D-BWIM	6.9	1.3	14.3	-0.9	9.5	6.1		
7	Moses	-5.6	6.7	12.0	-17.9	-13.3	-1.8		
/	2D-BWIM	1.0	-10.8	-6.3	0.0	5.7	-2.6		
8	Moses	-34.0	-13.6	20.8	32.7	17.5	5.0		
	2D-BWIM	-9.3	13.3	3.6	4.9	3.4	4.1		

注:序号5中卡车为2轴车,其余均为5轴车.

4 结 论

1)基于桥梁的二维结构特性,本文提出了一种 适用于随机车流的2D-BWIM算法,并通过理论推 导、标定试验以及随机车流试验综合验证了该算法 的可行性及准确性.

2)针对单辆车经过目标桥梁的情况,相较于传统 Moses 算法,2D-BWIM 算法考虑了车辆的实时横向位置,因而能够显著提高车辆轴重及总重识别精度.根据3次随机车流测试结果,(Moses、2D-BWIM)算法的总重识别误差平均值及方差分别为(7.9%、3.1%)和(13.5%、4.8%).

3)基于一种假设,2D-BWIM算法提出了多辆车 同时经过桥梁的轴重识别算法,在随机车流试验中 显现出了良好的识别精度.由3次随机车流试验的 多车过桥事件结果可知,(Moses、2D-BWIM)算法的 轴重识别误差平均值及方差分别为(7.34%,1.53%) 和(26.33%,3.12%).

4)分析结果表明,相较于传统 Moses 算法,2D-BWIM 算法能够有效提高过桥车辆轴重及总重的识 别精度.该算法不受桥梁跨径限制,但是,目前2D-BWIM 算法仅在拥有两个车道(车辆沿同一方向行 驶)且车辆均正常行驶情况下进行了验证,该方法针 对其他复杂交通状况以及更多车道的桥梁的有效性 还有待进一步研究.

参考文献

- HOPKINS R C. Weighing vehicles in motion [J]. Highway Research Board Bulletin, 1952, 50: 3-31.
- [2] 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, 27(7): 45-53.
 REN W X, ZUO X H, WANG N B, et al. Review of non-pavement bridge weigh-in-motion[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(7): 45-53. (In Chinese)
- [3] 邓露,李树征,淡丹辉,等.桥梁动态称重技术在中小跨径混凝 土梁桥上的适用性研究[J].湖南大学学报(自然科学版), 2020,47(3):89-96.
 DENG L, LI S Z, DAN D H, et al. Study on applicability of bridge weigh-in-motion technology in short-to medium-span concrete girder bridges [J]. Journal of Hunan University (Natural Sci-
- ences),2020,47(3):89-96.(In Chinese)
 [4] 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,2013,46(3):79-85.
 LI X N, CHEN A R, MA R J. Review of bridge weigh-in-motion
 [J]. China Civil Engineering Journal, 2013,46(3):79-85.(In Chinese)
- [5] JACOB B, OBRIEN E J. European specification on weigh-inmotion of road vehicles (COST323) [C]//Proceedings of Second European Conference on Weigh-in-motion of Road Vehicles. Held Lisbon, Portugal, 1998: 25-33.
- [6] SEKIYA H. Field verification over one year of a portable bridge weigh-in-motion system for steel bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, 2019, 24(7):04019063.
- [7] OBRIEN E J, ZHANG L W, ZHAO H, et al. Probabilistic bridge

weigh-in-motion [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2018,45(8):667-675.

 [8] 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, 43(7):111-119.
 ZHAO H, TAN C J, ZHANG L W, *et al.* Improved identification of vehicular axles in BWIM system based on wavelet transform[J].

Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43(7): 111-119.(In Chinese)

- [9] PETERS R J. Axway—a system to obtain vehicle axle weights [J]. Australian Road Research, 1984, 12(1):10–18.
- [10] ZHANG L X. An evaluation of the technical and economic performance of weigh-in-motion sensing technology [D]. Waterloo, Canada: University of Waterloo, 2007: 15-21.
- [11] GONZALEZ I, KAROUMI R. BWIM aided damage detection in bridges using machine learning [J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2015, 5(5):715-725.
- [12] OBRIEN E, KHAN M A, MCCRUM D P, et al. Using statistical analysis of an acceleration-based bridge weigh-in-motion system for damage detection [J]. Applied Sciences, 2020, 10(2):663.
- [13] MOSES F. Weigh-in-motion system using instrumented bridges
 [J]. Transportation Engineering Journal of ASCE, 1979, 105(3): 233-249.
- [14] QUILLIGAN M, KAROUMI R, OBRIEN E. Development and testing of a 2-dimensional multi-vehicle bridge-WIM algorithm [C]//Proceedings of 3rd International Conference on Weigh-in-Motion(ICWIM3). Orlando, United States, 2002: 199-208.
- [15] YU Y, CAI C S, DENG L. Nothing-on-road bridge weigh-inmotion considering the transverse position of the vehicle [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2018, 14 (8): 1108-1122.
- [16] 龙波. 移动车辆轴重识别 MOSES 算法在宽桥中的应用研究
 [D]. 长沙:湖南大学,2014:21-36.
 LONG B. The application of Moses algorithm on the identification of axle weights of moving vehicles on wide bridge[D]. Changsha: Hunan University,2014:21-36.(In Chinese)
- [17] ZHAO H, UDDIN N, O' BRIEN E J, et al. Identification of vehicular axle weights with a bridge weigh-in-motion system considering transverse distribution of wheel loads [J]. Journal of Bridge Engineering, 2014, 19(3):04013008.
- [18] 宫亚峰,宋加祥,谭国金,等. 多车桥梁动态称重算法[J].吉林 大学学报(工学版),2021,51(2):583-596.
 GONG Y F, SONG J X, TAN G J, et al. Multi-vehicle bridge weigh-in-motion algorithm[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition),2021,51(2):583-596. (In Chinese)
- [19] CHEN S Z, WU G, FENG D C. Development of a bridge weigh-inmotion method considering the presence of multiple vehicles [J]. Engineering Structures, 2019, 191:724-739.
- [20] ZHAO H. Bridge weigh-in-motion for bridge safety and maintenance [D]. Birmingham, United State: University of Alabama at Birmingham, 2010: 103-110.
- [21] OBRIEN E J, QUILLIGAN M J, KAROUMI R. Calculating an influence line from direct measurements [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Bridge Engineering, 2006, 159 (1): 31–34.