

# 应用于大跨混凝土箱梁桥的 BWIM 试验研究

吴汉立<sup>1,2</sup>, 赵华<sup>1\*</sup>, 安家禾<sup>1</sup>, 张斌<sup>1</sup>

(1. 湖南大学 土木工程学院风工程与桥梁工程湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410082;

2. 密苏里科技大学 土木建筑与环境工程学院)

**摘要:**桥梁动态称重(BWIM)系统将桥梁结构视为一个称重平台,并以桥梁结构影响线为参照,计算过桥车辆的重量。车辆信息的精确高效获取将对现代交通管理和桥梁健康监测等领域产生重要影响。与理论影响线相比,现场标定的影响线可以更加真实地反映桥梁的受力特性,因而可以获得更好的车辆称重精度。传统的 BWIM 系统利用安装在路面的车轴探测传感器获得车轴识别信息(轴数、轴距、车速)。为了实现车轴信息的无损探测,该文提出基于快速傅里叶变换的 BWIM 算法,利用安装在桥底的 FAD 传感器识别车轴信息,并利用现场标定的影响线识别车辆轴重,将 BWIM 系统的应用扩展到大跨混凝土箱梁桥。试验结果表明:快速傅里叶变换可以有效提高车轴信息识别精度,对于整体刚度大、横向效应不明显的桥梁,各车道可采用统一的影响线计算车辆轴重和总重。

**关键词:**桥梁动态称重;大跨混凝土箱梁桥;Moses 算法;影响线;车轴识别;轴重计算

## 1 概述

公路货运超载不仅带来重大的交通安全隐患,也加速了公路、桥梁等基础设施的老化损坏,使得基础设施的使用年限大幅缩短,修路养路成本不断增加,当前中国公路运输中超载超限时有发生,基于以上原因,对超载车辆的监控和管理显得尤为重要。

目前中国高速公路称重系统最为常见的是静态称重系统。虽然静态称重系统具有非常高的称重精度,但是需要车辆在静止条件下才能采集轴重数据,因而费时费力。桥梁动态称重系统(BWIM)利用传感器测试技术,将传感器安装在桥底下,可以实时采集过桥车辆的轴数、轴距、车速和轴重等信息,且无须中断交通,因而得到了越来越广泛的研究与应用。

早期的路面称重系统(PWIM)和桥梁动态称重系统都采用安装在路面的车轴探测器获取车轴信息(轴数、轴距和车速),安装过程不仅会破坏路面结构,而且需要中断交通,因此安装成本较高。近年来发展起来的无损 BWIM 系统有效地解决了这一问题。Znidaric 等发现安装在桥面板下的传感器可以识别车辆过桥时

的车轴峰值信号,并提出了无损车轴探测技术的概念。随后 FAD 车轴探测技术成功实现了这一设想,由于该技术对结构无损伤,安装成本低,使用寿命长,因此引起了学术界的广泛关注。

美国学者 Moses 于 1979 年率先提出了利用桥梁结构影响线计算过桥车辆轴重的 Moses 算法,并提出了 BWIM 的概念。随后众多专家学者为 BWIM 系统的研发与应用做出了贡献。早期的 BWIM 系统利用优化的理论影响线计算车辆轴重,由于真实桥梁结构与理论模型之间存在显著的边界条件差异、受力特性差异,因而采用理论影响线计算车辆轴重时往往产生较大的计算误差。O'Brien 等和 Zhao 等均指出,采用现场标定的桥梁结构影响线计算车辆轴重时可以获得更高的精度。

为了获得明显的车轴峰值信号以及高质量的称重传感器信号,早期 BWIM 系统研究主要集中于简支梁桥、板桥、T 梁桥、钢箱梁桥等活载—恒载比值较大、局部效应较明显的桥型。对于大跨混凝土梁桥这种整体刚度大、活载—恒载比值较小的桥型研究非常有限。

该文基于广东省清远市伦洲大桥的现场试验,以桥梁结构实际影响线为参照计算车辆轴重,提出基于

收稿日期:2020-10-26(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51178178);广东省交通运输厅科技项目(编号:2010-02-013)

作者简介:吴汉立,男,硕士研究生。E-mail: hl.wu@hnu.edu.cn

\* 通信作者:赵华,男,博士,副教授。E-mail: zhaohua@hnu.edu.cn

快速傅里叶变换的新型 FAD BWIM 系统算法,通过信号处理有效提高车轴探测精度,探讨不同车道标定影响线对于各车道行驶车辆轴重计算的影响。

2 BWIM 系统现场测试

2.1 试验桥梁简介

伦洲大桥为变截面预应力混凝土刚构—连续梁桥,主桥跨径组合为(65+2×110+65) m,箱梁采用单箱单室结构。下部结构主墩采用实体墩,中主墩采用刚构体系与主梁固结,边主墩设置支座,为结构连续体系。设计车速为 60 km/h。

2.2 测试方案

试验过程中采用一辆已知轴重、轴距等信息的四轴标定车,在测试桥跨进行跑车试验。

传感器布置如图 1、2 所示。该试验在测试跨的跨中横隔板前后 5.0 m 处的 A、C 截面,分别布置两排车轴识别传感器(FAD 传感器),用来探测车轴过桥的具体时刻,以获取行驶车辆的车轴数目、车轴间距及车辆速度等信息,以车道 1 为例,FAD1-1 表示车道 1 下的第 1 个传感器,FAD1-2 表示车道 1 下的第 2 个 FAD 传感器。FAD1-1'和 FAD1-2'代表车道 1 下的另一组备用 FAD 传感器。同样,FAD 2-1 和

FAD2-2 以及 FAD2-1'和 FAD2-2'代表车道 2 下的两组车轴探测传感器。为避免跨中横隔板刚度集中对应变测试产生干扰,B 截面 4 个称重传感器布置在跨中截面梁底距南岸 2.0 m 位置处,编号为 W1~W4,该组传感器用于采集移动车辆过桥时的桥梁结构梁底动态应变信号。

标定车的轴数、轴距、轴重等信息均已知,标定车信息如表 1 所示。试验时标定车分别在车道 1、2 以桥梁设计车速 60 km/h 分别进行 10 次独立重复的跑车试验,并对采集的数据进行分析。

表 1 标定车信息

轴距/mm			轴重及总重/kN				
L1	L2	L3	P1	P2	P3	P4	GVW
1 950	3 100	1 350	41.3	53.8	124	123.3	342.4

注:① L1、L2、L3 分别为标定车的前轴距、中轴距和后轴距;② P1、P2、P3、P4 分别为标定车从前轴至后轴的第 1、2、3、4 个轴重;③ GVW 为标定车总重量。

3 基于快速傅里叶变换的车轴探测技术

3.1 车轴信号探测

由于路面的不平整、车桥耦合振动等原因,FAD 车轴探测信号往往会夹杂环境噪声,从而严重影响车轴信息识别精度,利用快速傅里叶变换进行时域、频域分析,可以有效去除环境噪声,获得清晰的车轴峰值信号,降低车轴识别错误的概率,进而为精确的车轴信息识别提供有效的保证(图 3、4)。

由图 3 可知:设置低通频率 0.06 Hz 时,获得的车轴识别信号与采集的原始信号差异并不明显;当采用高通 0.01 Hz 时,可以有效滤除低频干扰信号,然而依然存在大量高频干扰信号;经调试设置带阻频率范围为 0.01~0.06 Hz 时则可获得清晰的车轴信号,即设置带阻 0.01~0.06 Hz 可以直观地观察到被滤除的干扰信号。

由图 4 可知:通过快速傅里叶变换,FAD 传感器采集的车轴识别信号可以获得 4 个明显的峰值信号,代表标定车的 4 个车轴。两个后轴的峰值信号要明显高于两个前轴的峰值信号,这与车辆实际轴重分布是一致的。

当车辆行驶在车道 1 时,车道 1 下面布置的 FAD 传感器信号比较强,车道 2 下面布置的 FAD 传感器信

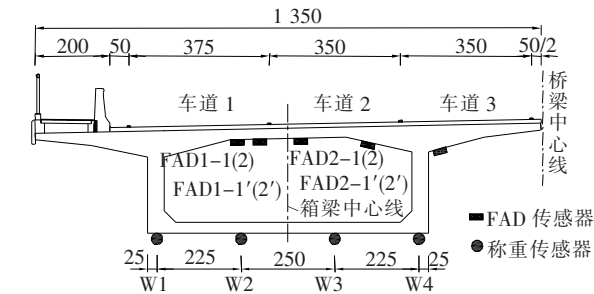


图 1 传感器横向位置示意图(单位:cm)

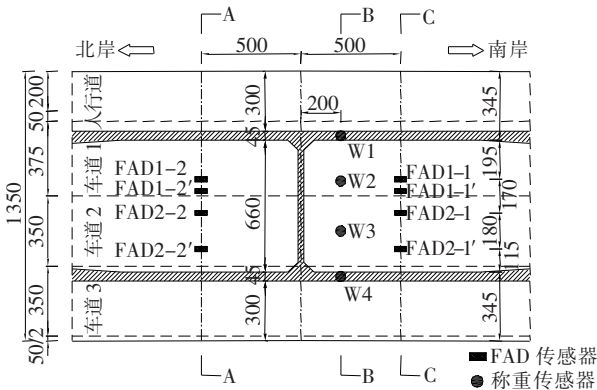


图 2 传感器平面位置示意图(单位:cm)

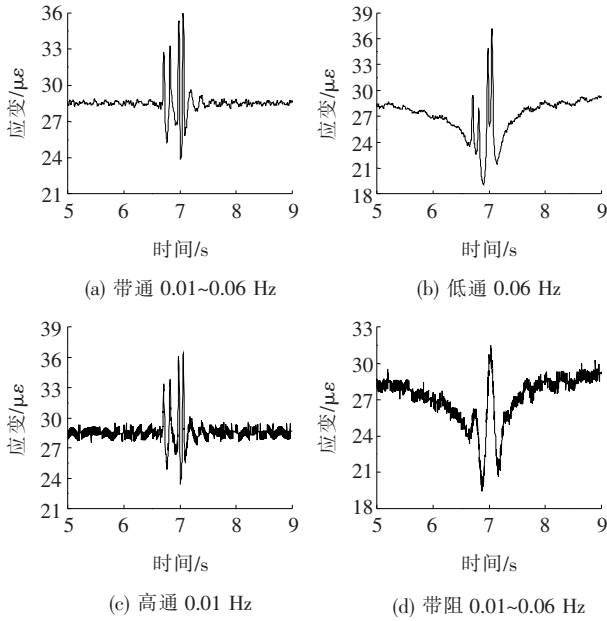


图 3 FAD 信号快速傅里叶变换时域分析(FAD1-1'信号)

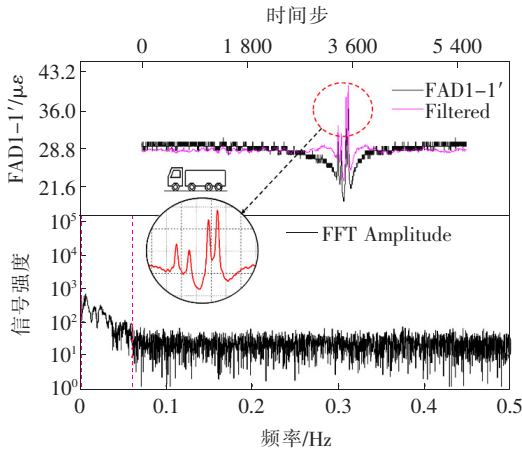


图 4 FAD 信号快速傅里叶变换频域分析

号较弱,甚至无法识别车轴信息,由此可判断车辆行驶于车道 1(图 5)。同样,对于车道 2 跑车试验可以得出相同的结论。因为 FAD 传感器对于车轴位置极为敏感,由此可依据各车道下的 FAD 传感器响应信号强弱编制计算机程序来判定车辆的具体行车位置,进而为智能交通监控与管理提供数据支持。

3.2 车轴参数识别

利用 FAD 传感器产生峰值信号的具体时刻可以推算过桥车辆的轴数、轴距和车速等信息(图 6)。

以车道 1FAD 信号为例,FAD1-2'的 4 个峰值信号对应的时刻分别为  $t_{A1}$ ,  $t_{A2}$ ,  $t_{A3}$ ,  $t_{A4}$ 。FAD1-1'的 4 个峰值信号对应的时刻分别为  $t_{C1}$ ,  $t_{C2}$ ,  $t_{C3}$ ,  $t_{C4}$ 。车辆经过 A、C 截面的时间间隔为  $\Delta T$ 。从图 2

可知:同一车道上每对 FAD 传感器的安装距离为  $L=10.0\text{ m}$ 。

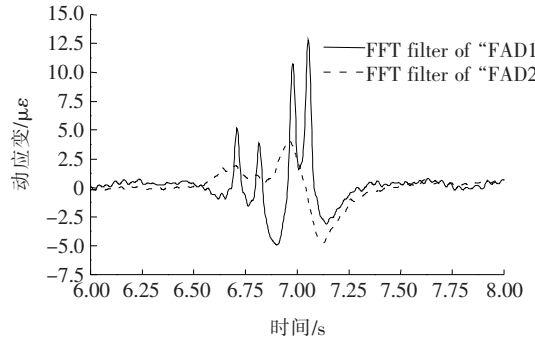


图 5 标定车在车道 1 时 FAD 传感器动态响应信号

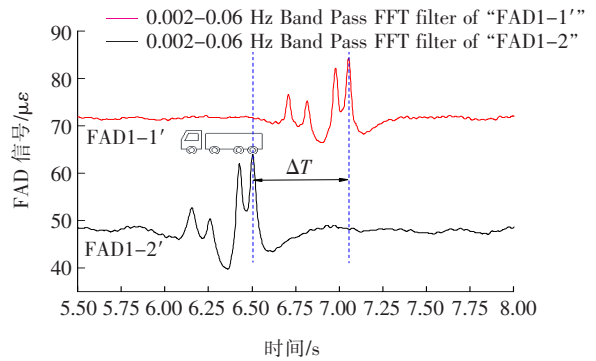


图 6 车道 1FAD 传感器车轴信号识别

则车辆车速  $v$  可以表示为:

$$v = \frac{L}{\Delta T}; \text{其中 } \Delta T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n=4} |t_{Ci} - t_{Ai}| \quad (1)$$

式中: $n$  为车轴数。

车辆轴距可以表示为:

$$L_i = v \cdot (t_{A(i+1)} - t_{Ai}) \quad i=1,2,3 \quad (2)$$

因此,过桥车辆的车轴信息(轴数、轴重、车速)以及行车方向等信息可以通过 BWIM 系统精准获取。

3.3 车轴信息识别结果分析

以车道 1 为例,表 2 为根据标定车在车道 1 的 10 次跑车试验所识别的车轴信息及车速。

由表 2 可以看出:轴距识别具有非常高的精度。前轴距  $L1$ 、中轴距  $L2$ 、后轴距  $L3$  的标准差分别为 1.3%,1.2%,0.5%,表明轴距识别具有非常高的稳定性。前轴轴距  $L1$  误差为 0.0%~4.3%,误差均值为 2.7%,中轴轴距  $L2$  误差为-3.3%~0.8%,误差均值为-2.2%,后轴轴距  $L3$  误差为-0.4%~1.4%,误差均值为 0.6%。由以上数据可以看出:车轴识别具有相当高的精度。与此同时,计算的车速也与目标车速 60 km/h 相当接近。

表2 车道1车轴识别结果

项目	识别速度/ (km·h <sup>-1</sup> )	轴距/m		
		前轴距 L1	中轴距 L2	后轴距 L3
1	64.1	1.851	3.025	1.352
		(0.0)	(0.8)	(0.2)
2	61.4	1.877	2.935	1.365
		(1.5)	(-2.2)	(1.1)
3	59.6	1.887	2.914	1.358
		(2.0)	(-2.9)	(0.6)
4	61.4	1.911	2.935	1.365
		(3.3)	(-2.2)	(1.1)
5	57.0	1.930	2.911	1.361
		(4.3)	(-3.0)	(0.8)
6	62.1	1.897	2.931	1.345
		(2.5)	(-2.3)	(-0.4)
7	63.2	1.895	2.912	1.368
		(2.4)	(-2.9)	(1.4)
8	55.6	1.914	2.901	1.358
		(3.4)	(-3.3)	(0.6)
9	60.8	1.926	2.939	1.351
		(4.1)	(-2.0)	(0.1)
10	59.4	1.914	2.937	1.353
		(3.5)	(-2.1)	(0.2)
平均值		1.900	2.934	1.358
		(2.7)	(-2.2)	(0.6)
标准差		0.024	0.035	0.007
		(1.3)	(1.2)	(0.5)

注:括号中数据为所识别的轴距相对于静态测量轴距的百分比误差,其单位为%。

4 影响线标定

4.1 影响线标定原理

影响线反映了结构的基本受力特性,因此获得真实合理的影响线对车辆轴重计算至关重要。与理论影响线相比,现场标定的影响线可以更真实地反映结构的边界条件和力学特性。该文以现场标定的跨中梁底弯矩影响线为参照对车辆轴重进行识别。

以  $N$  轴车为例,当标定车行驶到桥面某一位置处时,第  $k$  时刻,跨中梁底处的理论纵向弯矩可以表示为:

$$M_k^{theo} = EZ\epsilon_k^t \tag{3}$$

式中: $E$  和  $Z$  分别为桥梁结构的杨氏模量和跨中截面的几何模量; $\epsilon_k^t$  为第  $k$  时刻跨中梁底应变。

与此同时,梁底纵向弯矩亦可以表示为对应于第  $i$  个车轴轴重  $P_i$  与对应于时刻  $k$  的影响线  $I_k^i$  的乘积之和:

$$M_k^{predict} = \sum_{i=1}^N P_i I_k^i \quad i=1,2,3,\dots,N \tag{4}$$

同时,第  $k$  时刻的理论总弯矩和预测弯矩可以表示为以下等量关系:

$$M_k^{theo} = M_k^{predict} \tag{5}$$

进而,从式(3)~(5)可将  $\epsilon_k^t$  表示为  $I_k^i$  的函数:

$$\epsilon_k^t = \frac{1}{EZ} \sum_{i=1}^N P_i I_k^i \quad i=1,2,3,\dots,N \tag{6}$$

利用理论应变与称重传感器测量的梁底应变  $\epsilon_k^m$  构造误差函数  $f_{error}$ :

$$f_{error} = \sum_{k=1}^K (\epsilon_k^m - \epsilon_k^t)^2 \tag{7}$$

再利用误差函数  $f_{error}$  对相关影响线纵坐标  $I_R$  求偏导数。进而可以推算出影响线纵坐标向量:

$$\frac{\partial (f_{error})}{\partial I_R} = 0 \tag{8}$$

$$\{I\} = [W]^{-1} \times \{\epsilon\} \tag{9}$$

式中: $[W]$  为一个与轴重因素相关联的稀疏对称矩阵; $\{I\}$  为影响线纵坐标向量; $\{\epsilon\}$  为一个与测量应变和轴重相关的向量。

4.2 影响线标定结果分析

在现场影响线标定试验中,利用车道1和车道2共20次有效数据标定了20条影响线,为减小影响线标定过程中的偶然误差,分别对各车道影响线取平均值,利用平均影响线计算各车道行驶车辆的轴重。图7为车道1、2平均影响线对比结果。

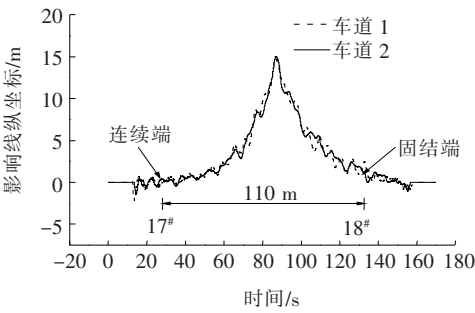


图7 车道1、2平均影响线对比

由图7可以看出:车道1、2影响线具有非常高的吻合度,这是由于刚构—连续梁桥整体刚度大,车辆重量相对桥梁恒载非常小,因而桥梁体现出很强的整体效应。因此,可以将刚构—连续梁桥视为单梁模型而无需考虑各车道横向分布效应,各车道可采用统一的



影响线,以简化影响线的标定步骤。影响线以 17# 墩前 30 m 作为起点,以 18# 墩后 30 m 作为终点,并统一于相同的距离坐标系下,同时采用车辆过桥 17# 墩至 18# 墩全桥跨 110 m 的影响线计算车辆轴重。

当影响线标定完成后,可以据此影响线预测结构应变。取车道 1 的第 1 次跑车数据实测应变(W1、W4 传感器所测应变的平均值)与预测应变进行对比,如图 8 所示。

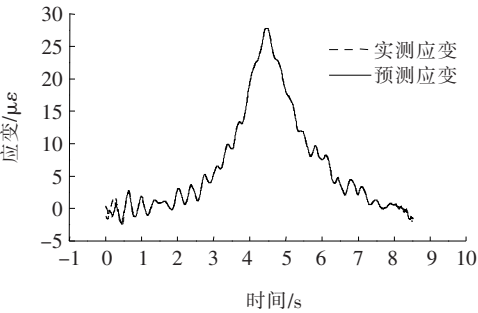


图 8 实测应变与程序预测应变对比图

由图 8 可以看出:实测应变与预测应变完全吻合,反映出程序设计的有效性。

5 车辆轴重识别

5.1 车辆轴重识别原理

轴重识别算法为影响线标定的逆运算,根据 Moses 算法,以桥梁影响线为参照,通过对误差函数求偏导数,进而可以计算出车辆轴重向量。

在影响线标定算法中,已得出式(6),轴重算法中  $I_k^i$  已由标定算法算出,则  $\epsilon_k^i$  表示为轴重  $P_i$  的函数。

将式(7)定义的误差函数表示为向量形式  $\{f_{\text{error}}\}$ ,再根据最小二乘法原理,对轴重向量  $\{P\}$  求偏导数,进而计算出轴重向量  $\{P\}$ 。

$$\frac{\partial \{f_{\text{error}}\}}{\partial \{P\}} = -2 \left( \frac{1}{EZ} \right) [I]^T \{\epsilon^m\} + 2 \left( \frac{1}{EZ} \right) [I]^T [I] \{P\} = 0$$

(10)

$$\{P\} = EZ [[I]^T [I]]^{-1} [I]^T \{\epsilon^m\}$$

(11)

将求得的各车轴重量求和,即可通过计算得出车辆总重(GVW):

$$GVW = \sum_{i=1}^N P_i$$

(12)

5.2 车辆轴重识别结果分析

影响线的标定对车辆轴重识别至关重要,为探求各车道影响线对轴重识别的影响,以现场标定的各车道的平均影响线作为参照计算车辆组轴重和总重。

以现场跑车试验所标定的车道 1、2 平均影响线为基础,分 case 1 和 case 2 两种工况进行识别(表 3、4)。例如车道 1 跑车试验中 Lane1—case1 表示基于车道 1 标定的平均影响线对标定车沿车道 1 行驶时所计算的轴重误差,Lane1—case2 表示基于车道 2 标定的平均影响线对标定车沿车道 1 行驶时所计算的轴重误差。同理,车道 2 跑车试验中 Lane2—case1 表示基于车道 1 标定的平均影响线对标定车沿车道 2 行驶时所计算的轴重误差,Lane2—case2 表示基于车道 2 标定的平均影响线对标定车沿车道 2 行驶时所计算的轴重误差。

表 3 车道 1 轴重识别误差结果

项目	Lane1—case1/%			Lane1—case2/%		
	GOA1 (P1+P2)	GOA2 (P3+P4)	GVW	GOA1 (P1+P2)	GOA2 (P3+P4)	GVW
1	31.0	-12.0	1.0	37.8	-12.3	2.8
2	-1.0	1.0	0.0	6.0	0.0	2.0
3	-7.0	1.0	-1.0	-28.0	12.0	0.0
4	-1.0	-1.0	-1.0	15.0	-5.0	1.0
5	-25.0	10.0	0.0	-27.0	13.0	1.0
6	4.0	-2.0	0.0	22.0	-8.0	1.0
7	22.0	-10.0	-1.0	38.0	-15.0	1.0
8	-7.0	2.0	-1.0	22.0	-8.0	1.0
9	-10.0	6.0	1.0	-9.0	8.0	3.0
10	-8.0	6.0	2.0	-31.0	18.0	3.0
平均值	-0.1		0.0	2.4		1.6
标准差	12.1		1.1	20.2		1.0

注:(1) GOA1 表示前组轴重(为 P1、P2 车轴重之和),GOA2 表示后组轴重(为 P3、P4 车轴重之和),GVW 为标定车总重。

以车道 1 的轴重计算结果为例(表 3),对于 Lane1—case1,组轴重 GOA 识别误差为-25.0%~31.0%,均值为-0.1%,标准差为 12.1%,总重 GVW 识别误差为-1.0%~2.0%,均值为 0.0%,标准差为 1.1%。对于 Lane1—case2,组轴重 GOA 识别误差为-31.0%~38.0%,均值为 2.4%,标准差为 20.2%,总重 GVW 识别误差为 0.0%~3.0%,均值为 1.6%,标准差为 1.0%。由表 3 可以看出:Lane1—case1 和 Lane1—case2 的组轴重识别结果稳定性较差,部分结果出现较大的识别误差,这主要是由于刚构—连续梁桥整体刚度大,局部效应微弱,车辆轴重荷载作用于桥面,耦合作用下轴重无法有效分离造成的。然而,两种情况下总重识别无明显差异,均呈现非常高的识别精度,这说明大跨混凝土桥梁刚度大,可采用单梁模型进

行影响线标定,且不会造成总重识别精度下降。对于车道2的识别结果(表4)可以得出相同的结论。

表4 车道2轴重识别误差结果

项目	Lane1-case1/%			Lane1-case2/%		
	GOA1 (P1+P2)	GOA2 (P3+P4)	GVW	GOA1 (P1+P2)	GOA2 (P3+P4)	GVW
1	20.0	-10.0	-1.0	7.2	-1.7	1.0
2	17.0	-10.0	-2.0	5.6	-2.6	-0.1
3	14.0	-16.0	-6.0	0.1	-7.1	-4.9
4	16.0	-12.0	-4.0	0.0	-3.0	-2.0
5	7.0	-8.0	-4.0	-3.9	-1.3	-2.1
6	21.0	-10.0	-1.0	4.2	-0.5	0.9
7	18.0	-9.0	-1.0	0.0	2.0	1.0
8	17.0	-6.0	1.0	-2.9	4.4	2.2
9	15.0	-6.0	1.0	-11.0	8.0	2.0
10	19.0	-9.0	0.0	-1.0	2.0	1.0
平均值	3.4		-1.7	-0.1		-0.1
标准差	13.8		2.3	4.6		2.2

注:表中参数意义同表3。

图9 为标定车总重识别误差箱线图。

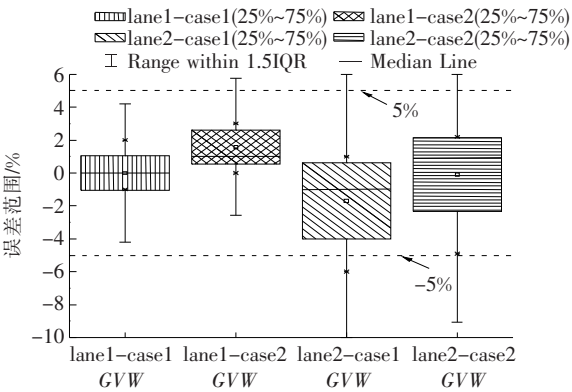


图9 标定车总重识别误差箱线图

由图9可以看出:采用不同车道影响线识别的各车道行驶车辆总重精度无明显差异,总重识别稳定性非常好。同时,车辆总重计算误差范围均在5%以内,误差均值都在2%以内,呈现出非常高的精度。

6 结论

- (1) 早期的 BWIM 系统需要在桥面安装车轴探测器,会对路面造成损伤,如今已被基于 FAD 传感器的新型 BWIM 系统所取代。
- (2) 快速傅里叶变换可以滤除传感器采集的电压

信号中的高频和低频噪声,从而提高车轴识别准确度,进而有效提高轴重识别精度。

- (3) 大跨混凝土梁桥具有很强的刚度和结构自重,活载一恒载比值较小,整体效应明显,可以对其中一个车道进行影响线标定代替各车道影响线,以简化影响线的标定步骤。
- (4) 该文针对新型 FAD BWIM 系统,利用快速傅里叶变换优化的 Moses 算法,通过现场试验,成功将 BWIM 系统应用拓展到大跨混凝土刚构一连续梁桥,获得了极高的车辆总重识别精度。

参考文献:

[1] 龙波. 移动车辆轴重识别 MOSES 算法在宽桥中的应用研究[D]. 湖南大学硕士学位论文,2014.

[2] Yu, Y., Cai, C. S., and Deng, L. State-of-the-Art Review on Bridge Weigh-in-Motion Technology[J]. Advances in Structural Engineering, 2016, 19(9):1514-1530.

[3] 刘君健,朱成李,杨芳. 随机车载下连续刚构桥动力可靠度分析[J]. 中外公路,2017(5).

[4] 邓扬,颜巍,刘扬,等. 基于 WIM 数据的公路桥梁车辆疲劳荷载模型研究[J]. 中外公路,2018(1).

[5] 王宁波. 非路面式桥梁动态称重理论与试验研究[D]. 中南大学博士学位论文,2013.

[6] 韦锋,杨洋,苏成,等. 华南地区混凝土刚构桥典型病害调查及分析[J]. 中外公路,2018(1).

[7] 耿豪,马鹏飞,吴汉立,等. 桥梁动态称重系统在板桥中的应用研究[J]. 公路工程,2017(6).

[8] 张阿敏,吴汉立,马鹏飞,等. BWIM 系统应用于正交异性钢桥面的整体效应分析[J]. 公路工程,2017(6).

[9] Zhao, H., Uddin, N., Shao, X., et al. Field-Calibrated Influence Lines for Improved Axle Weight Identification with a Bridge Weigh-in-Motion System[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2005, 11(6): 721-743.

[10] 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).

[11] Lydon, M., Taylor, S. E., et al. Recent Developments in Bridge Weigh in Motion (B-WIM) [J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2015, 6(1): 69-81.

[12] Richardson, J., Jones, S., Brown, A., et al. On the Use of Bridge Weigh-in-Motion for Overweight Truck Enforcement[J]. International Journal of Heavy Vehicle Systems, 2014, 21(2): 83-104.