

## 应用于 OSD 的两种轴重识别算法对比分析

安家禾<sup>1</sup>, 赵华<sup>2\*</sup>, 马鹏飞<sup>2</sup>, 张斌<sup>2</sup>

(1. 湖南大学 机械与运载工程学院, 湖南 长沙 410082;

2. 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)

**摘要:**为了提高 BWIM 系统在正交异性桥面(Orthotropic Steel Deck:OSD)的识别精度,提高其算法稳定性,该文对比了两种不同轴重计算方法:参数 C 算法和 Moses 算法。通过对实桥开展标定试验,利用两种算法对其车辆的轴重进行识别。识别结果表明:BWIM 系统应用于 OSD 时,采用参数 C 算法所识别的轴重结果,其误差均值和标准差均优于传统 Moses 算法。利用欧洲标准 COST 323 对两种算法的标定结果进行等级评定发现:参数 C 算法的最终等级的评定结果精度等级较高,达到了 C(15)。进一步分析等级评定结果还表明:单个车轴轴重的识别结果直接影响 BWIM 系统应用于 OSD 时的精度等级评定,因此提高算法的精度等级关键在于提高单轴识别精度。

**关键词:** BWIM 系统; 正交异性钢桥面(OSD); 纵向 U 肋; 局部效应; 参数 C 算法

**中图分类号:** U446

**文献标志码:** A

正交异性钢桥面是由加劲肋和桥面板焊接而成,具有轻质和承载力高的显著特性,已经被广泛应用到诸多的大跨桥梁中<sup>[1]</sup>。但是由于其各组件(顶板、纵肋和隔板)之间采用焊接的形式连接,因此正交异性钢桥面在连接焊缝处易产生疲劳开裂。钢桥面直接承受车轮荷载的反复作用,由于横隔板的存在导致内力影响线较短,在重型车辆荷载引起的应力变幅下容易产生疲劳开裂<sup>[2]</sup>。疲劳裂缝是正交异性钢桥面的主要破坏形式之一,且疲劳开裂后的修检会产生大量的经济负担<sup>[3-5]</sup>。

桥梁动态称重作为对桥梁结构中车辆荷载进行监控和车轴识别的有效工具,目前已经成功地应用于混凝土梁桥、钢梁桥和斜拉桥等各种桥梁中<sup>[5-10]</sup>。目前,已有诸多学者研究了关于 BWIM 系统在正交异性桥面中应用的可行性及其适用性。1996年,法国国家路桥中心第一次提出对正交异性钢桥面应用 BWIM 系统的概念;Ojio 等<sup>[8]</sup>首次研究了 BWIM 在钢桥正交异性桥面中应用的可行性并进行了实桥试验(1998);1999年,Demspey 等<sup>[9]</sup>就 BWIM 在正交异性桥面板的应用中提出整体优化识别算法以提高其车轴识别精度;Law 和 Bu<sup>[10]</sup>利用有限元模拟钢梁桥并通过模态叠加的方法获得桥梁动力应变,依据结构空间状态列

出运动方程来识别和求解得到车辆轴重信息;Zhu 等<sup>[13]</sup>研究了正交异性桥面在动力荷载下的受力特性,并指出:由于主梁横隔板的加劲作用,正交异性桥面的纵向 U 肋在动力荷载下其受力特点与多跨连续梁相似;Suzuki<sup>[12]</sup>对正交异性桥面板的横肋、纵肋同时标定,利用横隔板的轴重计算结果对纵肋的识别结果进行修正,也得到精度较高的轴重识别结果。将 BWIM 系统成功应用于正交异性桥面板中,除了改进相应算法以降低其轴重识别误差外,还要提高算法的稳定性,这是其能够应用到实际桥梁的必要条件。

## 1 实桥试验概况

### 1.1 试验桥梁概况

试验桥梁为佛陈新桥,该桥为三跨变截面钢箱梁连续梁桥,桥梁跨径组合为(58.51+112.8+58.51)m,总长 229.82 m,如图 1 所示。主桥箱梁采用单箱单室截面,隔板间距 2.5 m,悬臂长 4.125 m。单幅桥宽 15.75 m,为单向三车道布置。具体横向布置为:3.25 m(人行道+非机动车道)+3×3.75 m(机动车道)+1.25 m(路缘带)。佛陈新桥的两幅主桥钢箱梁形式相同,区别仅在于桥面铺装形式不同。该文所选试验桥梁为普通沥青铺装幅,其箱梁具体形式见图 2。

收稿日期:2020-07-29

基金项目:湖南省重点领域研发计划资助项目(编号:2019SK2172)

作者简介:安家禾,男,硕士研究生。E-mail:anjiahe@hnu.edu.cn

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

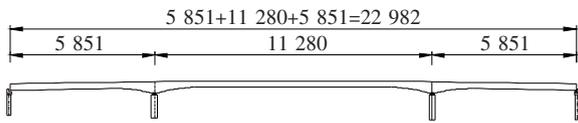


图1 主桥立面图(单位:cm)

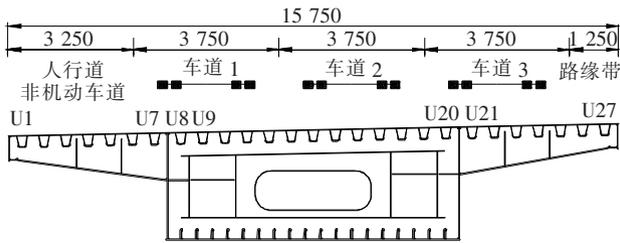


图2 一般横断面图(单位:mm)

## 1.2 实桥试验方案

试验位置位于桥梁中跨四分点处的等截面EF段,主要原因是减小桥梁整体效应对试验的影响并同时有效避开连续梁桥支点变截面段,具体位置见图3。标定车辆分别在车道1和车道2进行试验,通过对对应车道内纵向加劲肋进行标定试验以识别桥面车辆荷载。考虑到车辆在车道行驶的横向位置,车道1下缘纵肋U8~U13处布置了应变传感器,车道2对应为U14~U20,翼缘部分U肋由于操作难度太大未布置传感器。此外,在上述传感器所在断面前后2.5 m处对称布置一排车轴探测传感器(称为Free Axle Detectors:FAD传感器)用于识别车辆车速、轴距等信息,各传感器的具体信息见图4。FAD传感器直接安装于桥面板下面,其对移动车轮荷载极其敏感,因此可用于识别车轮信息。

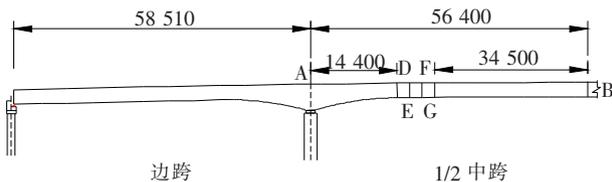


图3 测试截面具体位置图(单位:mm)

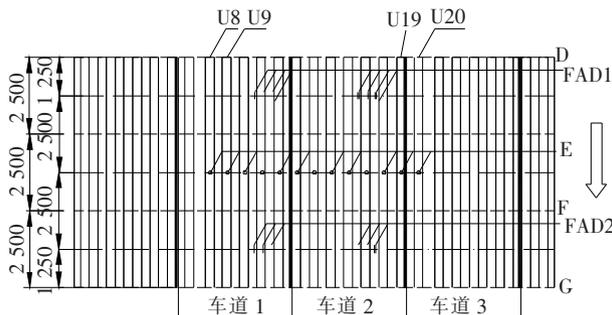


图4 传感器平面布置图(单位:mm)

## 1.3 试验数据采集

试验中,车辆行驶过桥的动态应变采用动态应变仪DC-204采集,仪器采样频率为512 Hz。动态应变采集元件为KD4001。试验标定车辆为三轴车,车辆具体信息见图5。试验共计两个工况,当标定车辆在车道1行驶时,记为工况1;当标定车辆在车道2行驶时,记为工况2。

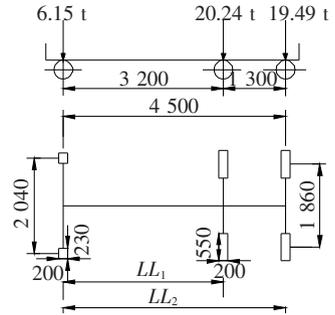


图5 标定车示意图(单位:mm)

## 2 两种轴重识别算法

### 2.1 基于整体影响线的 Moses 算法

利用Moses算法对正交异性桥面上车辆荷载进行识别时,需先获得其标定截面的弯矩影响线。弯矩影响线的计算是依据车辆经过桥面时在该截面上引起的应变利用最小二乘原理推算而来。

对于试验桥梁,当标定车辆行驶在桥面时,任意时刻的弯矩大小可表示为:

$$M_K^T = \sum_{i=1}^N A_i I_{K-C_i} \quad (1)$$

式中: $M_K^T$ 为K时刻标定截面的理论弯矩; $A_i$ 为标定车辆的第*i*个轴轴重; $I_{K-C_i}$ 为该轴K时刻对应的结构影响线数值的大小; $C_i$ 为第*i*个轴距离前轴的步伐。

该标定截面处的实际弯矩大小由其车辆过桥时在该截面上应变大小确定,即为:

$$M_K^R = EZ \epsilon_K \quad (2)$$

式中: $M_K^R$ 为K时刻标定截面处的实际弯矩大小; $E$ 为材料的弹性模量; $Z$ 为标定截面的截面模量; $\epsilon_K$ 为该标定截面处应变大小。

利用最小二乘法,拟定误差函数为:

$$erf = \sum_{K=1}^K [M_K^R - M_K^T]^2 \quad (3)$$

对式中的*I*求偏导,令其等于零即可求得标定截面的弯矩影响线。

在获取结构标定截面处的弯矩影响  $I$  后,利用 Moses 算法对过桥车辆进行轴重识别。当未知轴重的车辆行驶在桥面上时,其在该截面上引起的弯矩为:

$$M_K^M = \sum_{K=1}^N P_i I_{K-C_i} \quad (4)$$

式中:  $P_i$  为车辆第  $i$  轴的轴重。

同样,该截面上由于车辆引起的弯矩大小为:

$$M_K^C = EZ\epsilon_c \quad (5)$$

式中:  $\epsilon_c$  为该车辆引起标定截面处的应变大小。

再次利用最小二乘法并对其最小二乘函数的  $P$  项求偏导即可求得该车辆的轴重。利用 Moses 算法对车辆轴重进行识别时的影响线计算和轴重计算的具体算法见参考文献[13]。

## 2.2 参数 C 算法

该桥的主梁采用闭口肋加劲钢箱梁形式,其纵向 U 肋在整体效应作用下,主要考虑第一受力体系,即纵肋作为主梁的一部分来承担荷载;在局部荷载作用下,钢箱梁主要考虑第三受力体系,纵肋可以看作是主要的受力构件。Ojio 等<sup>[8]</sup>和张龙威等<sup>[14]</sup>研究成果表明:正交异性钢桥面的纵向 U 肋由于横隔板的加劲作用,在桥面车辆轮载局部作用下,其受力与连续梁桥相似,记两横隔板间为一跨(跨径为 2.5 m),纵向 U 肋在两横隔板中间位置产生最大弯矩。由多跨连续梁的受力性质,以五跨连续梁为例,其中跨跨中理论弯矩影响线如图 6 所示。因此,当车辆活载作用在标定截面时,局部车辆轮载会在纵向 U 肋上产生明显应变;与此同时,依据图 7 标定截面的理论弯矩影响线,车辆在过桥时其整体效应在纵向 U 肋上也会引起应变响应。标定截面处纵向 U 肋的应变可以看作是由两部分组成:整体效应部分和局部效应部分。当车辆轴载局部作用于桥面时,将引起纵向 U 肋的明显挠曲,所以当 BWIM 系统应用于正交异性桥面时,利用纵向 U 肋局部效应引起的应变计算车辆轴重会取得较好的结果。

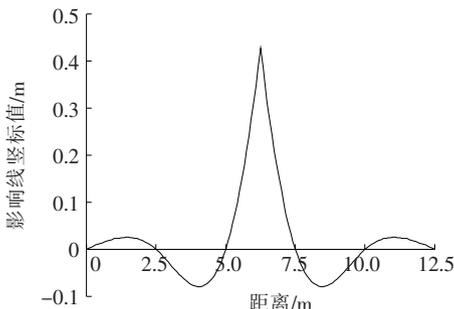


图 6 多跨连续梁中跨跨中理论弯矩影响线

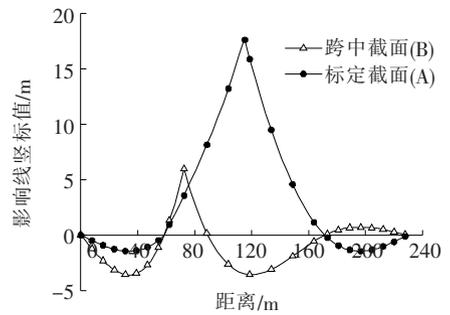


图 7 主桥结构跨中、标定截面理论影响线

根据图 7 标定截面理论弯矩影响线,当车辆行驶在该主桥结构上时,标定截面处弯矩大小与车辆所在位置有关。为了去除采集应变信号中的整体效应,该文利用参考文献[13]所提出的最小二乘法,根据实测应变与理论应变误差最小进行计算,其公式如下:

$$erf2 = \sum [PM_i - S_m]^2 \quad (6)$$

式中:  $S_m$  为实测应变信号;  $P$  为常数;  $M_i$  为理论影响线。

利用最小二乘法理论便能获得  $P$  值,由此  $PM_i$  即为应变中整体响应效应,  $S_m - PM_i$  即分离后局部响应信号。其结果如图 8 所示。U11 的局部效应应变在车辆距离标定较远时其大小接近零值,而在标定截面附近应变大小与原始应变几乎相等,该应变分离结果与上述理论一致。

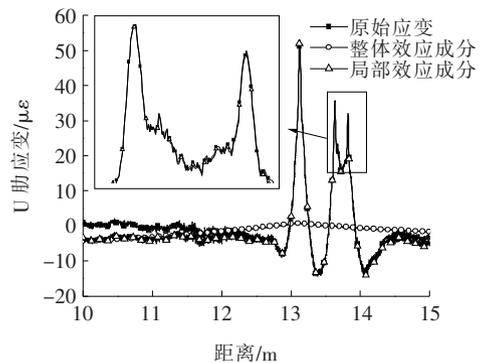


图 8 U11 应变分离结果

根据以上 U 肋应变分离的结果,参数 C 算法对该 U 肋的局部效应应变和理论应变同样利用最小二乘法<sup>[8]</sup>。其理论应变由待求车辆的各轴重与图 6 所示的多跨连续梁理论弯矩影响线的乘积求得。

## 3 轴重识别结果对比

### 3.1 车辆信息识别

图 9 为工况 1 第一趟跑车试验的 FAD 信号。图

中两排传感器都具有3个明显的信号波峰,因此可以确定该标定车是一辆三轴车,符合实际车辆情况。根据试验设计方案,两排FAD传感器之间间距 $L=5\text{ m}$ ,两排FAD传感器其3组波峰之间的时间间隔为 $T_i$ 。因此可以确定标定车行驶速度 $V_i=L/T_i$ ,平均速度 $V=(V_1+V_2+V_3)/3$ 。假定同一FAD信号的后两个波峰与第一个波峰的时间差为 $T'_i$ ,则该车后轴与前轴距离为 $LL_i=V\times T'_i$ ,这样就可以获得标定车轴距信息。

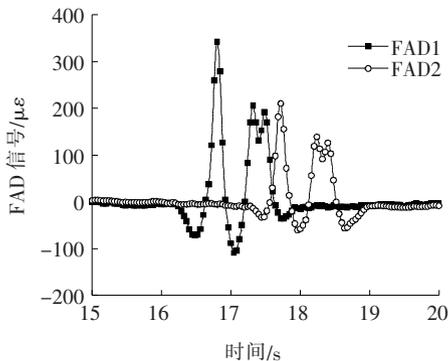


图9 FAD信号

该标定试验的车速和轴距识别结果汇总见表1。其速度与实际试验标定要求速度相差较小,所以满足该标定试验的要求。此外,标定试验的轴距识别误差较小, $LL_1$ 的识别误差为 $-4.68\%\sim 5.00\%$ , $LL_2$ 识别误差为 $-4.67\%\sim 0.27\%$ 。车辆的车速和轴距的识别均在合理的误差范围之内。

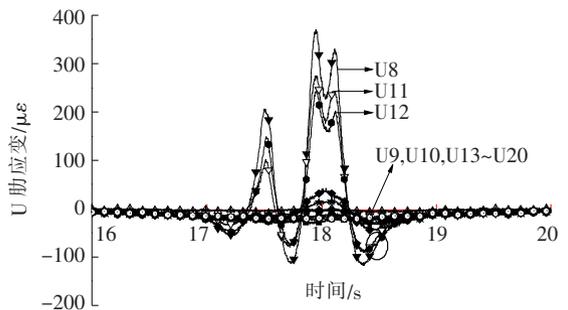
表1 车速、轴距计算

趟次	速度/ ( $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ )	$LL_1$ / m	$LL_2$ / m	$LL_1$ 误 差/%	$LL_2$ 误 差/%
1	26.11	3.16	4.48	-1.25	-0.44
	25.46	3.05	4.29	-4.68	-4.67
3	25.96	3.17	4.48	-0.94	-0.44
4	26.26	3.32	4.50	3.75	0.00
5	26.48	3.18	4.49	-0.63	-0.22
6	27.03	3.18	4.46	-0.63	-0.88
7	25.96	3.17	4.50	0.94	0.00
8	27.93	3.18	4.50	0.63	0.00
9	26.11	3.36	4.52	5.00	0.27

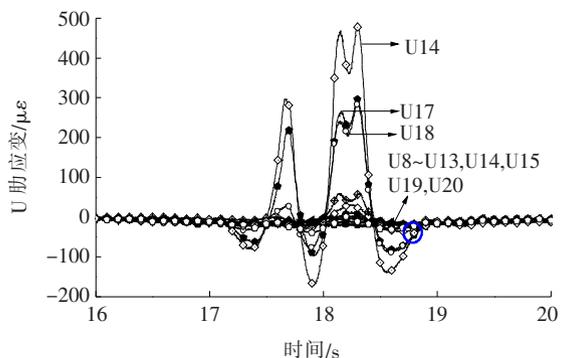
### 3.2 基于Moses算法考虑不同数量U肋的轴重识别

基于Moses算法计算轴重时,需先根据标定试验求得其结构的影响线,再以该影响线作为轴重求解的已知条件求解车辆轴重。该文通过对试验断面进行标

定,获得其断面的弯矩影响线。为了尽可能反映该截面上弯矩的响应,采用标定截面上腹板范围内所有标定U肋(U8~U20)的应变之和来计算该截面的弯矩影响线。此外,为了降低外界因素对车辆信号的干扰,也可以采用部分响应显著的U肋代表该截面上车辆引起的弯矩响应。部分U肋的选择依据是根据每一趟跑车试验中U8~U20的应变大小来确定。车辆沿车道1和车道2行驶时,只有车轮荷载直接作用的部分U肋会呈现明显的响应。根据U肋横向布置,每一趟跑车试验过程中基本会有3~4条U肋的应变数据呈现显著的峰值,因而计算影响线时只采用该部分U肋的应变数据,其他U肋的应变数据在计算中不予考虑。限于篇幅,该文列举了工况1和工况2各一趟实桥试验所采集的原始动态应变数据(图10)。车辆沿车道1行驶时,U肋(U8,U11和U12)有明显峰值;当车辆沿车道2行驶时,U肋(U14,U17和U18)所采集的动态应变数据较为显著。



(a) 车辆沿车道1行驶时的U肋应变(工况1)



(b) 车辆沿车道2行驶时的U肋应变(工况2)

图10 工况1、工况2第5趟试验

当采用标定截面上腹板范围内全部U肋的原始应变来标定截面的弯矩影响线,然后以此影响线为依据并基于原始应变计算车辆轴重时,记为Moses-A(A代表全部U肋);对应地,当采用响应显著的部分U肋原始应变来标定截面弯矩影响线,并以此影响线为依据且以该部分U肋原始应变为基础计算车辆轴重时,

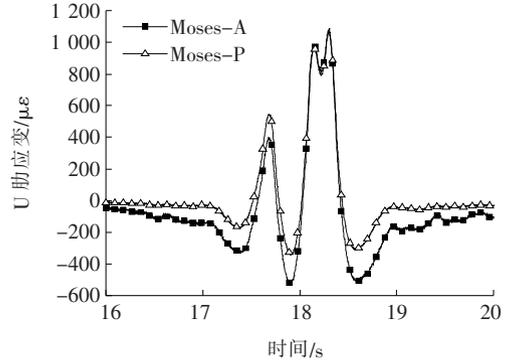
记为 Moses-P (P 代表所考虑的响应显著的部分 U 肋)。以工况 2 第 5 趟跑车试验为例, 两种情况下的所考虑的各 U 肋应变之和如图 11(a) 所示。当车轴经过标定截面时, 两种情况得到的应变之和大小接近; 而当车轴驶近和远离标定截面时, 两者的应变数值存在明显的差异。这个现象也和图 8 所显示的结果一致。对应地, 根据相应应变所标定的影响线如图 11(b) 所示。基于两种情况各自所标定的影响线, 根据 Moses-A 和 Moses-P 这两种情况所考虑的不同 U 肋原始应变之和, 车辆轴重识别结果见表 2。

由表 2 的计算结果可知: 当车辆沿车道 1 行驶时 (工况 1), Moses-A 计算所得的 3 个单轴 (A1, A2, A3) 识别误差均值依次为 2.55%、-1.60% 和 -2.54%, 识别误差均值较小。对比 Moses-P 计算所得的单轴识别结果, 单轴误差均值也较小且基本上与 Moses-A 计算结果相当。对比轴簇和总重的识别误差均值, Moses-A 和 Moses-P 的计算结果仍保持相同水平。考虑其识别误差的标准差, Moses-P 计算轻轴 (A1) 的误差标准差相比 Moses-A 较小, 而其他四项误差标准差接近。类似地, 该结果在工况 2 (车辆沿车道 2 行驶) 的情况下仍成立。因此, 只利用部分响应显著的 U 肋的应变来计算车辆轴重 (Moses-P), 其轴重识别结果精度和考虑全部 U 肋 (Moses-A) 所识别的轴重结果精度一致。

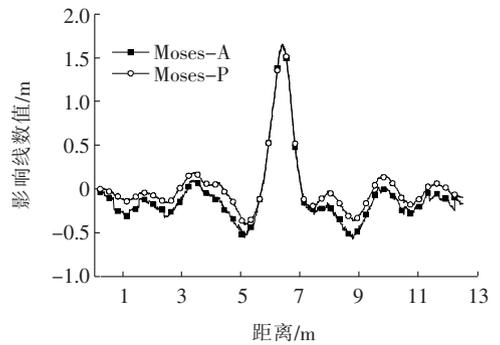
### 3.3 基于参数 C 算法的轴重识别结果

上文展开了 Moses 对于全部 U 肋或部分 U 肋响

应信号轴重识别分析。同理, 针对全部 U 肋或部分 U 肋响应信号进行参数 C 方法 (仅分析局部响应信号) 的轴重识别分析, 当采用部分 U 肋局部效应成分计算车辆轴重时, 记为参数 C-P; 当采用全部 U 肋局部效应成分计算车辆轴重时, 记为参数 C-A, 轴重识别背景见表 3。



(a) 不同情况所考虑各 U 肋原始应变之和



(b) 不同算法对应影响线

图 11 车辆沿车道 2 行驶第 5 趟跑车试验的应变及影响线

表 2 两种 U 肋应变轴重识别误差计算结果

项目	Moses-A					Moses-P					%	
	A1	A2	A3	GVW	A2+A3	A1	A2	A3	GVW	A2+A3		
工况 1	平均值	2.55	-1.60	-2.54	-0.95	-2.06	3.31	-4.70	-0.49	-1.84	-2.64	
	标准差	14.3	5.00	7.10	5.70	5.20	6.25	6.30	5.10	5.09	6.09	
工况 2	平均值	-2.03	-6.63	-1.25	-3.73	-3.99	4.41	0.60	-2.43	1.70	-0.89	
	标准差	12.6	4.40	3.20	2.10	2.60	7.36	5.48	6.25	3.21	4.87	

注: A1 表示车辆的前轴, A2、A3 对应车辆的两后轴; A2+A3 表示轴簇的总重; GVW 表示车辆总重。下同。

表 3 轴重识别算法背景介绍

算法	算法名称	U 肋选取	应变选取
Moses	Moses-A	全部	原响应
	Moses-P	部分	原响应
参数 C	参数 C-A	全部	局部响应
	参数 C-P	部分	局部响应

以工况 2 为例, 首先基于上文 2.2 节计算方法提取出对应局部信号, 如图 12(a) 所示。然后利用此局部信号进行相关参数 C 算法的轴重识别计算, 其结果列于表 4。为了有效展现参数 C 方法与 Moses 算法的区别, 图 12(b) 对比了参数 C-P 和 Moses-P 的标定影响线。工况 1 相关分析结果同样也列于表 4 中。由表 4 可知: 参数 C 方法与 Moses 算法轴重识别结果相当。

参数 C-P 单轴识别误差的均值总体上小于 Moses-P 的计算结果,对应的单轴识别误差标准值总体上也小于 Moses-P,说明其在保证单轴识别误差相当的情况

下,误差离散性较小,识别结果更稳定。为了进一步对比分析各算法的轴重计算精度,该文拟通过 COST 323 欧洲标准进行精度等级评定分析。

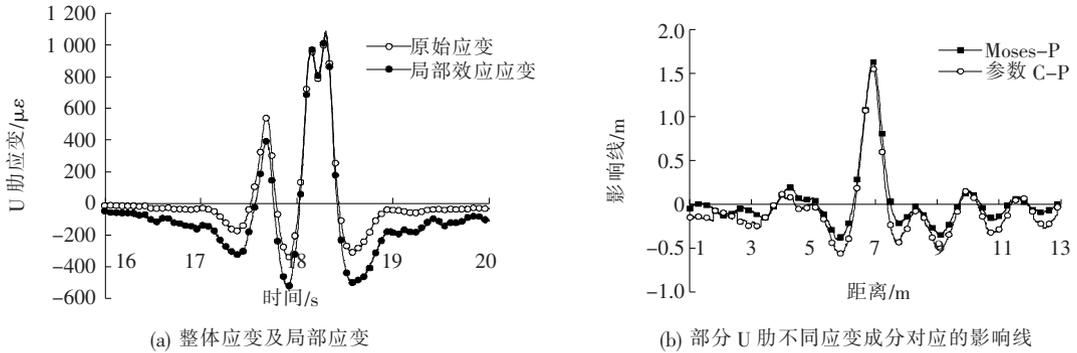


图 12 C-P 方法和 Moses-P 方法对比分析

表 4 参数 C 轴重识别误差结果

项目	参数 C-A					参数 C-P					%
	A1	A2	A3	GVW	A2+A3	A1	A2	A3	GVW	A2+A3	
	工况 1	平均值	3.34	2.98	3.63	3.10	2.66	1.84	-3.20	-4.27	
	标准差	5.27	4.23	2.41	4.17	3.08	7.42	4.50	5.20	4.16	4.55
工况 2	平均值	1.31	3.21	-1.63	1.32	1.53	2.84	-2.05	-1.21	-0.57	-1.65
	标准差	2.97	1.89	2.22	5.32	2.01	2.37	3.10	2.90	1.28	2.94

### 3.4 轴重计算精度等级对比

表 2、4 计算的轴重识别结果都包含了轴重识别误差均值及标准差,利用 COST 323 欧洲标准对该结果进行评价<sup>[10]</sup>。根据 COST 323 标准,该文试验的环境类型为 r1 (environmental repeatability),即采用标定试验车辆试验且试验在较短时间段内完成,试验环境的温度、气候等因素没有明显变化。在既定的试验(试验环境,试验车辆和跑车次数等)条件下,利用 COST 323 标准计算求得该工况下对应的最小置信水平  $\pi_0$ 。

之后展开试验并获取试验数据的样本均值与方差。由此,可以得到不同精度等级对应的中心置信区间  $\delta$  和置信水平  $\pi$ ,并将所得的  $\pi$  与  $\pi_0$  做比较。当  $\pi$  的计算值大于  $\pi_0$  时,即可确定该试验的某项要素可以达到的精度等级。当不满足上述条件时,通过扩大  $\delta$  的取值,直到满足上述条件。对于某一工况下的试验,依据其各参评项中等级评定最差项作为该工况下试验结果等级评定的最终结果。工况 2 轴重识别结果等级评定如表 5 所示。

表 5 Moses-A 算法工况 2 轴重识别结果等级评定

项目	样本数	识别准确率/%	均值/%	标准差/%	$\pi_0$ /%	评定等级	$\delta$ /%	$\delta_{min}$ /%	$\delta_{标准值}$ /%	$\delta_{class}$	$\pi$ /%	$\pi_c$ /%	评定等级
总重	9	100.0	-3.73	2.10	88.8	B(10)	8.0	7.5	9.4	10	90.6	95.5	
车轴组	18	100.0	-3.99	2.60	93.7	C(15)	14.4	12.2	12.2	15	94.6	96.8	C(15)
单轴	9	100.0	-2.03	12.6	94.2	C(15)	16.0	16.0	15.0	15	94.6	94.9	

图 13 为轴重识别误差等级评比结果汇总。由图 13 可知:对于文中所提及的两种轴重识别方法,其最终精度总体上受单轴识别精度的影响,说明单轴识别精度是制约 BWIM 应用于正交异性桥面板识别车轴轴重的主要因素。单轴的识别精度在 B+(7)~

D(25)内,总重的识别精度处于 B+(7)~C(15)范围内,整体上单轴的识别精度等级低于总重的识别精度。通过轴重识别等级评定对比结果,参数 C 识别精度在一定程度上高于 Moses 算法,对于工况 1,参数 C-P 算法和参数 C-A 轴重识别精度相当,对于工况 2,

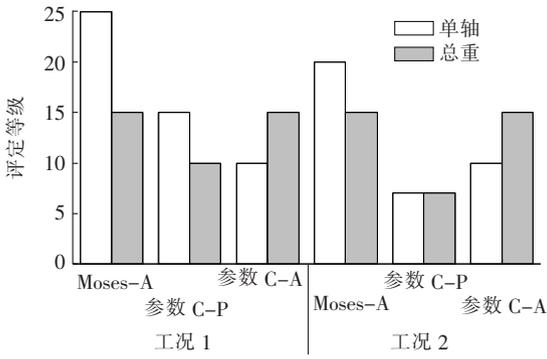


图 13 等级评定结果

参数 C-P 算法明显高于参数 C-A 算法。

## 4 结论

通过对比传统 Moses 算法和参数 C 算法的轴重识别结果,说明利用参数 C 算法于正交异性钢桥面的动态称重时具有一定的优越性。

(1) 通过提出的参数 C 算法对 U 肋的原始应变进行整体效应成分的分离,得到 U 肋的局部效应应变。对其分离结果进行分析,结果表明参数 C 算法能够有效分离 U 肋的整体效应和局部效应应变成分。

(2) 对比 Moses 算法和参数 C 算法的轴重识别结果,后者的单轴识别精度会有提高,总重的识别精度保持与前者相同水平且总体上识别结果更稳定。

(3) 基于 COST 323 对识别结果进行评定,参数 C 算法的轴重识别结果,其等级评定也高于 Moses 算法识别的轴重结果。单个车轴轴重的识别结果直接影响 BWIM 系统应用于 OSD 时的精度等级评定,因此提高算法的精度等级关键在于提高单轴识别精度。

### 参考文献:

- [1] 张清华,刘益铭,卜一之,等.大纵肋正交异性组合桥面板疲劳性能研究[J].中国公路学报,2017,30(3):226-235.
- [2] WANG Chunsheng,FEN Yacheng. Review of Fatigue Research for Orthotropic Steel Bridge Decks[J]. Steel Construction,2009,24(9):10-13.

- [3] ZENG Zhibin. Classification and Reasons of Typical Fatigue Cracks in Orthotropic Steel Deck[J]. Steel Construction,2011,26(2):9-15.
- [4] 王迎军,朱桂新,陈旭东.虎门大桥钢桥面铺装的使用和维护[J].公路交通科技,2004,21(8):64-67.
- [5] 范洪军,刘铁英.闭口肋正交异性板钢桥面的疲劳裂纹及检测[J].中外公路,2009,29(5):171-175.
- [6] 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,2018,38(1):164-171.
- [7] PARK M S,LEE J,KIM S,et al. Development and Application of a BWIM System in a Cable-Stayed Bridge[C]. Proceedings of the 3rd International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure (SHMII-3),2007:13-16.
- [8] OJIO T,YAMADA K,SHINKAI H. Bwim Systems Using Truss Bridges [C]. International Conference on Bridge Management,2000.
- [9] DEMPSEY A T,KEOGH D L,JACOB B. Orthotropic Steel Bridges: Management Tools for Live Load and Fatigue Assessment[C]. Bridge Management 4 - Inspection, Maintenance, Assessment and Repair,2000.
- [10] LAW S S,CHAN T H T,ZENG Q H. Moving Force Identification—A Frequency and Time Domains Analysis [J]. Journal of Dynamic Systems Measurement & Control,1999,121(3):394-401.
- [11] ZHU X Q,LAW S S. Dynamic Behavior of Orthotropic Rectangular Plates under Moving Loads[J]. Journal of Engineering Mechanics,2003,129(1):79-87.
- [12] SUZUKI K,YOSHIKAWA S. Monitoring of Traffic Axle Loads in Orthotropic Steel Deck Structures[C]. Proceedings of the Thirteenth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-13),2013.
- [13] XIAO Z G,YAMADA K,INOUE J,et al. Measurement of Truck Axle Weights by Instrumenting Longitudinal Ribs of Orthotropic Bridge[J]. Journal of Bridge Engineering,2006,11(5):526-532.
- [14] 张龙威,赵华,邵旭东.钢桥面疲劳细节的车辆动力冲击响应研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2016,43(11):26-32.