

基于区间分析的非接触式影响线识别 方法及复合反演机制研究

周云^{1,2,3} 胡健鑫^{2,3} 周赛^{2,3} 裴熠麟^{2,3} 程依婷^{2,3}

(1. 工程结构损伤诊断湖南省重点实验室(湖南大学) 湖南长沙410082; 2. 湖南大学土木工程学院 湖南长沙410082;
3. 周绪红院士湖南大学新型结构体系研究中心 湖南长沙410082)

摘要:近年来,一种不需要在桥梁结构布置传感器的非接触桥梁动态称重(cBWIM)方法被提出。为了对cBWIM系统的实现提供支持,文中验证了基于区间分析的支持向量机(SVM)识别影响线方法的效果。考虑到实际应用中,会出现汽车总重量无法布满总重估计区间而导致对轴重区间过宽估计的情况,文中通过车桥数值模拟发现轴重区间过宽估计会降低SVM影响线识别的精确性。基于影响线区间与轴重区间的相互映射关系,提出了大数据影响线识别的复合反演校验机制。所提出方法可以有效减小区间过宽估计造成的SVM影响线识别误差,并通过数值模拟对所提出方法进行了验证,其中影响线的识别误差从初始的26.09%降低到1.36%,达到了提高影响线识别准确性的目的。

关键词:结构健康监测;桥梁影响线;桥梁动态称重;非接触式识别;复合反演
中图分类号:P315.9 文献标识码:A

Research on contactless influence line identification method and composite inversion mechanism based on interval analysis

ZHOU Yun^{1,2,3}, HU Jianxin^{2,3}, ZHOU Sai^{2,3}, PEI Yilin^{2,3}, CHENG Yiting^{2,3}

(1. Hunan Provincial Key Laboratory of Damage Detection(Hunan University), Changsha 410082, China;
2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 3. Research Center of New Structural System, Academician Zhou Xuhong, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: In recent years, a contactless bridge dynamic weighing (cBWIM) method is proposed, which does not need to arrange sensors in bridge structures. In order to support the realization of cBWIM system, this paper verifies the effect of the support vector machine (SVM) method of identifying influence lines based on interval analysis. Considering that in practical application, the total weight of automobile can't be filled with the total weight estimation interval, which leads to the over-wide estimation of axle weight interval, this paper finds that the over-wide estimation of axle weight interval will reduce the accuracy of SVM influence line recognition. Based on the mutual mapping relationship between the influence line interval and the axial load interval, a compound inversion verification mechanism for identifying the influence line of big data is proposed. The proposed method can effectively reduce the recognition error of SVM influence line caused by over-wide interval estimation, and the proposed method is verified by numerical simulation, in which the recognition error of influence line is reduced from the initial 26.09% to 1.36%, thus achieving the purpose of improving the accuracy of influence line recognition and

收稿日期:2020-07-22; 修订日期:2020-10-27

基金项目:国家自然科学基金项目(51878264);湖南省重点研发计划项目(2017SK2220)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (51878264); Key Research and Development Program of Hunan Province (2017SK2220)

作者简介:周云(1979-),男,教授,博士,主要从事结构健康监测及非接触桥梁无损检测方面研究。E-mail: zhouyun05@hnu.edu.cn

通讯作者:胡健鑫(1995-),男,硕士研究生,主要从事桥梁结构健康监测方面研究。E-mail: 980753688@qq.com

non-contact dynamic axle load recognition.

Key words: structural health monitoring (SHM); bridge influence line; bridge weight-in-motion; contactless identification; composite inversion

引言

至 2018 年底,我国公路桥梁总数已达到 85.15 万座,总里程超 5 568.59 万 m^[1]。由于施工质量和设计缺陷等先天不足,加上环境侵蚀、自然灾害、交通量增大及频繁超载的后天影响,我国桥梁总体疲劳劣化进程加快、损伤程度增加。2015 年我国公路危桥统计数量达 7.6 万座^[2],其中多数桥梁服役超过 20 年,存在严重的安全隐患,也有很多新建桥梁服役不到 10 年就已经出现了较为严重的病害甚至失效^[3]。如何快速高效地对现役中小型桥梁的承载能力、营运状态和耐久能力进行评估成为桥梁结构健康监测领域亟待解决的问题。

在现代桥梁健康检测领域中,对桥梁荷载输入的监测成为一大热点课题。通过对运营阶段桥梁上的车流荷载信息的评估可以实现桥梁的高效、安全和经济管理^[4]。桥梁动态称重系统(BWIM)是一种使用桥梁结构本身在移动车辆激励下的响应测量值来估算通过桥梁的交通荷载特征的结构监测系统。BWIM 的概念和计算原理最初由 Moses^[5]于 1979 年提出,由于传统桥面传感器耐久性差和安装过程需要中断交通的缺点,现代的 BWIM 多采用在桥底安装车轴探测传感器的方式获取通行车辆的轴距、轴数和速度信息,轴重信息则通过桥底的应变或位移传感器输出的动态响应信号计算获得^[6-8]。学者们对基于影响线(面)理论的 BWIM 桥梁应用形式进行了拓展。Xiao 等^[9]通过测量一正交异性箱梁桥的纵向加劲肋缘应力标定出车轮作用覆盖范围内各根纵肋构件的影响线,并利用这些影响线计算出通行卡车的轴重; Yamaguchi 等^[10]在一曲线型两跨连续梁板式公路桥上进行了应变影响线标定和卡车总重识别; Kalin 等^[11]在不同类型桥梁上对比测试了 BWIM 实际识别效果;这些现场试验研究有效验证了通过影响线(面)进行车辆荷载识别方法在多种桥梁形式上均能适用,且在车道较少、跨度不大的梁桥与板桥上应用效果较理想。邓露等^[12]利用车桥耦合振动理论和影响面的线性叠加原理识别车辆动力轴荷载。王宁波^[13]通过数值模拟探究了影响线和 BWIM 的适用桥型和计算精度影响因素,并提出了一套 BWIM 精度等级评定方法。目前,基于影响线的 BWIM 系统已在国内外多座桥梁上投入使用,基于影响线(面)的车辆轴重识别具有良好的稳定性和抗噪声干扰能力,因此在实际工程中拥有广泛的应用前景。

伴随着计算机视觉技术和深度学习技术在土木工程领域的应用^[14-16],计算机视觉由于具有成本低、非接触式、非破坏性的优势,其较传统传感器的优越性逐渐凸显。Catbas 等^[17-19]提出了基于视频图像监测技术和传感器测量数据进行桥梁影响线标定和结构损伤识别的框架体系,并通过实验室试验和实桥试验验证了所提方法的有效性。Ojio 等^[20]提出了一个完整的 cBWIM 系统,该系统不需要在桥梁结构上布置接触式传感器,利用望远镜和相机设备实现了桥上行驶车辆的轴重反演。Zhou 等^[21]提出一种基于深度学习算法和机器视觉技术的桥梁车辆荷载非接触式自动辨识方法,通过路边交通监控摄像机拍摄的监控视频获取运动中车辆的载荷、类型及时空位置信息。周云等^[22]提出了一种新型非接触式桥梁结构影响线识别方法,通过车辆大数据统计结果、区间仿射算法及 SVM 分类识别算法进行桥梁影响线的识别。Feng 等^[23]提出一种基于计算机视觉的非接触式车辆动态称重系统,通过计算机视觉系统监控车辆轮胎与路面的接触情况,结合车载胎压监控传感器,可以有效估算移动中车辆的载荷。

综上所述,目前通过测量桥梁结构在车辆载荷作用下的动态响应信号结合机器视觉技术,从而实现反演车辆信息的 cBWIM 系统正逐步走向成熟,但依然存在需要短暂封闭交通以及估算精度不高的问题。本文在应用湖南大学结构健康监测团队(www.hnutest.com)提出的基于大数据与区间仿射算法的非接触式桥梁结构影响线识别方法的过程中,发现通过所提的非接触识别方法进行动态称重时,影响线的识别精度易受到轴重区间过宽估计的影响,从而导致轴重识别误差。尤其在视频识别车辆类型进而匹配轴重区间的过程中,不可避免的需要考虑到载重区间范围估计的不准确性。在采集工况数量有限的情况下,实际轴重无法满布估计区间,导致估计区间比实际区间更宽泛,从而降低影响线识别的准确性。针对以上问题,本文利用区间影响线识别和支持向量机(SVM)识别影响线的过程,用数值模拟的方式测试了支持向量机(SVM)识别影响

线的效果,提出了一种基于区间分析的影响线识别复合反演机制,评估了区间过宽估计对影响线识别精度的影响,建立了影响线识别结果和车辆初始轴重估计区间的复合反演校正机制,在影响线区间和轴重区间的反复迭代中形成良性循环,最终提高桥梁影响线识别的准确性。

1 基于影响线的轴重识别理论

经典的 BWIM 系统主要由用于获取车辆车轴位置信息的车轴探测器、用于测量桥梁响应的称重传感器(通常为应变传感器)以及用于计算和输出车辆重量信息的计算中心几部分组成,具有稳定可靠的车辆重量监测能力,其中准确的桥梁影响线和可靠的车轴位置信息是获得高精度轴重识别结果的前提。

轴重识别问题本质上是动力学第二类反问题,具体计算过程中系统的输出(桥梁响应)和系统特性参数(影响线)是已知的,待求的是系统的输入,包括车辆轴重、加载位置等。假设已知车速、轴距,则基于响应叠加原理可以根据影响线和实测响应识别车辆总重与分轴重。桥梁动态称重经典理论 Moses 算法就是基于桥梁的标定影响线,求理论响应和实测响应的误差平方和最小化,计算准确的轴重值^[13]。计算公式如下:

$$L'W = S \quad (1)$$

其中 L' 为 $k \times k$ 维的主对角线对称矩阵,包含桥梁影响线信息, W 则为车辆轴重矩阵, S 为响应与影响线竖标的乘积,组成元素分别计算如下:

$$L'_{ij} = \sum_{p=1}^n (l_{p-C_i} \cdot l_{p-C_j}) \quad (2)$$

$$S_j = \sum_{p=1}^n (r_p \cdot l_{p-C_j}) \quad (3)$$

式中 C_i 为第 1 轴至第 i 轴间距所对应的采样点数, $l_{1-C_1}, l_{2-C_1}, \dots, l_{n-C_1}$ 是车轴在各采样点对应的影响线竖标值, n 是总采样点数。已知桥梁影响线矩阵 L' 和桥梁响应矩阵 S , 通过解方程(1)可获得车辆各轴重 $W = \{w_1, w_2, \dots, w_k\}^T$, 第 1 轴轴重表示为 w_1 , 这就是 Moses 算法拟合实测响应实现车辆动态称重原理。

另外,如令 $W = \{w_1, w_2, \dots, w_k\}^T$, $L = [L_1, L_2, \dots, L_k]$, 若将理论叠加响应等效为实测总响应 R , 则直接解下式方程可以求得轴重向量^[24]

$$LW = R \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} L_1 & L_{1-C_2} & \dots & L_{1-C_k} \\ L_2 & L_{2-C_2} & \dots & L_{2-C_k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_n & L_{n-C_2} & \dots & L_{n-C_k} \end{bmatrix}_{n \times k} \times \begin{Bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_k \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_n \end{Bmatrix} \quad (5)$$

方程(5)是式(4)的扩展形式。方程(1)和式(4)虽然形式上有所差异,但采用相同的方程组求解技巧时这两种方法的计算结果一致。

2 桥梁结构影响线区间识别

基于车辆轴重、桥梁影响线、桥梁响应三者可以知二求一的数学关系,为了获取桥梁结构影响线区间,首先应当建立与车型对应的车辆轴重区间数据库。湖南大学结构健康监测团队(www.hnutest.com)统计了国内常见的 4 000 余种车辆包括出厂空车轴重、各轴额定限重、轴数轴距和整车外观尺寸等信息^[25],将统计车辆分为 7 大类,以此确定各类车辆的轴重区间。随后,通过视频识别技术^[21]获取运营阶段桥上车辆的类别信息,从而通过数据库得到识别车辆的轴重区间,继而采用不依赖于车辆确定性重量的影响线标定法,在不必提前了解行驶车辆准确轴重的情况下,仅需根据区间分析方法计算出单工况的影响线区间。最终,基于区间解总是包含真实解的原理,从多重工况的桥梁响应大数据中识别出确定性的影响线。

2.1 基于实测响应的影响线区间反演模型^[26]

基于区间概念的影响线求解算法思路如下:首先用区间变量 $[w_i, \bar{w}_i]$ 来描述 k 轴车辆的第 i 轴轴重 w_i 的取值范围 ($i = 1, \dots, k$), 则影响线计算模型中的参数矩阵可用式(6)的区间矩阵 W' 表示。

$$W' = \begin{bmatrix} [w_1 \ \bar{\mu}_1] & 0 & \cdots & [w_2 \ \bar{\mu}_2] & 0 & \cdots & [w_k \ \bar{\mu}_k] & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & [w_1 \ \bar{\mu}_1] & 0 & \cdots & [w_2 \ \bar{\mu}_2] & 0 & \cdots & [w_k \ \bar{\mu}_k] & 0 & \vdots \\ \vdots & & \ddots & & & \ddots & & & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & [w_1 \ \bar{\mu}_1] & 0 & \cdots & [w_2 \ \bar{\mu}_2] & 0 & \cdots & [w_k \ \bar{\mu}_k] \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

设该 k 轴车各轴轴重区间为 w_i' , 引入基于纽曼展开的仿射求逆算法来获得紧凑的解区间^[27]。将轴重区间变量转化为仿射型变量, 同时引入值域为 $[-1, 1]$ 的噪声元:

$$\begin{cases} w_1' = [w_1 \ \bar{\mu}_1] = x_0 + x_1 \times \varepsilon_1, \varepsilon_1 \in [-1, 1] \\ w_2' = [w_2 \ \bar{\mu}_2] = y_0 + y_1 \times \varepsilon_2, \varepsilon_2 \in [-1, 1] \\ \vdots \end{cases} \quad (7)$$

其中 x_0, y_0 代表区间中值, x_1, y_1 代表区间半径; ε_i 为噪声元, 决定变量之间相关性强弱。依此类推将区间矩阵 W' 中的区间变量替换为仿射变量, 则影响线区间向量可由式 (8) 计算得到。

$$L' = [W_0^{-1} W']^{-1} W_0^{-1} R = (I + W_0^{-1} W_1 \varepsilon_1 + W_0^{-1} W_2 \varepsilon_2 + \cdots + W_0^{-1} W_k \varepsilon_k)^{-1} W_0^{-1} R \quad (8)$$

式中 W_0 指包含各变量区间中值的中值矩阵, W_1, W_2 为包含各变量区间半径的半径矩阵。令 $X_i = W_0^{-1} W_i$, $A' = (I + X_1 \varepsilon_1 + X_2 \varepsilon_2 + \cdots + X_k \varepsilon_k)^{-1}$, 对 A' 使用一阶纽曼展开并对值域适当近似后得到式 (9):

$$A' \approx I - \left(\sum_{i=1}^k X_i \varepsilon_i \right) + \left(\sum_{i=1}^k X_i \varepsilon_i \right)^2 [I + \left(\sum_{i=1}^k X_i \varepsilon_i \right)]^{-1} \quad (9)$$

根据 $X_i \varepsilon_i \subseteq |X_i| \varepsilon_e$ 的放大关系, 对区间矩阵 A' 适当放大, 引入新噪声元 $\varepsilon_e \in [-1, 1]$, 得到 A' 的值域如式 (10), 当 ε_e 取 ± 1 时, 该式能取到区间边界值, 则计算区间影响线 L' 向量如式 (11) 所示。

$$A' \subseteq I - \left| \sum_{i=1}^k X_i \right| \varepsilon_e + \left| \sum_{i=1}^k X_i \right|^2 \varepsilon_e^2 [I + \left| \sum_{i=1}^k X_i \right| \varepsilon_e]^{-1} = [A, \bar{A}] \quad (10)$$

$$L' \subseteq A' W_0^{-1} R = [L, \bar{L}] \quad (11)$$

根据轴重估计区间与影响线区间反演模型即可得到区间影响线的大数据, 每一个工况对应的数据由两条分别代表包络影响线的区间上界曲线和下界曲线组成。运用空间分割的思想, 可认为影响线 (Influence line, IL) 的基准曲线 (Base line, BL) 是位于多工况影响线区间在平面上的公共重叠区域, 利用善于处理二值化分类学习问题的支持向量机 (SVM) 则可将区间搜索解的问题转化为上下界两类数据的全局性界限识别问题。结合影响线区间大数据在平面上的非线性分布, 选择 SVM 软间隔非线性分类模型对 IL 区间的两类边界数据进行二元分类学习和训练, 即可得到与结构真实影响线近似的 SVM 识别影响线。详细的 SVM 识别影响线步骤, 参考文献 [26]。

3 影响线与轴重的复合反演交互验证

本文在建立车辆轴重数据库时, 通过汽车的空车整备质量、最大额定载重量以及轴重分配系数, 计算得到该车型各车轴的轴重区间, 其中轴重分配系数根据文献 [25] 中数据的统计值得到。故车辆的额定载重量出现估计误差时, 也将导致分轴重的估计区间产生误差。鉴于轴重区间上限值比下限值数量级更大, 因此最大载重量 (上限值) 的估计偏差对最终的 SVM 识别结果具有较大影响。考虑到载重量对轴重估计的影响以及数值试验中车辆总重识别精度较轴重更高的优势, 在影响线区间与轴重区间的交互迭代过程中, 将总重上限值作为影响线反演信息的直接校核对象, 通过车辆的轴荷比分配得到对应的轴重区间。

实际情况中, 由于实际载重量无法满布估计区间, 导致轴重区间上限值比实际值大, 会产生轴重区间的过宽估计。这种过宽估计的现象会降低区间影响线大数据和支持向量机识别的准确性, 于是本文提出一种反演校验机制, 以区间迭代计算为基础, 将影响线的位置信息作为反演直接校正车辆总重上限值, 进而通过反复的双向迭代不断校正总重和轴重的上限值, 使之向真实值逼近收敛, 缩小总重和轴重的估计区间, 最终达到提高大数据方法识别影响线准确性目的。

该反演机制将根据空车质量和载重区间估计得到的初始轴重区间作为输入,根据影响线区间反演模型计算多工况的影响线区间,然后基于区间重叠程度提取真实影响线区间,并将之作为一种反演信息,结合各工况的桥梁动态响应重新计算出每组工况的车辆总重区间值,从而根据多工况总重区间的重叠程度确定新的总重区间,并按轴荷比计算得到新的轴重区间,视此为一次完整迭代。上述反演校验机制的详细迭代计算流程如图1所示。

在该复合反演流程中,第1步输入 n 组桥梁响应和初始分轴重区间,其中分轴重区间通过空车轴重值、初始载重估计区间以及轴荷分配比例运算得到;第2步根据2.1节影响线区间反演模型计算 n 组影响线区间;第3步计算影响线区间的重叠程度,通过设置阈值获取重叠程度较高的影响线区间;第4步利用重叠程度较高的影响线区间与 n 组桥梁响应反算 n 个工况下总重区间;第5步计算总重区间的重叠程度,通过设置阈值获取重叠程度较高的总重区间;第6步不断循环上述步骤,直至总重区间上限收敛,最终输出校正后的载重区间和轴重区间。

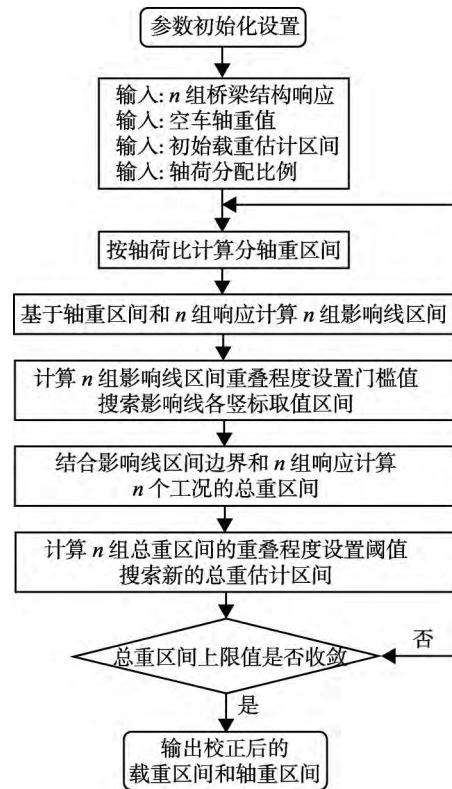


图1 轴重区间和影响线区间的复合反演校验流程
Fig. 1 Compound inversion mechanism for axle weight interval and IL interval

4 非接触轴重识别数值算例

4.1 车桥数值模型

本文使用的桥梁模型是一个30 m长的典型双车道钢筋混凝土梁板式桥梁结构。选取梁格法建立桥梁ANSYS有限元分析模型,用等效的纵横向梁单元来代替桥梁上部结构,通过分析梁格的受力状态得到桥梁的动力响应。同时考虑路面不平顺影响,采用国家标准GB7031-2005“C级”路面^[28]。桥梁有限元模型如图2所示,桥梁各项参数如下:桥梁长为30 m,宽12 m,桥面下沿桥宽度方向布置5根等距T梁,沿桥梁长度方向上每隔6 m设置横隔板,每根T梁的抗弯刚度 $EI = 10.8 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2$,线密度 $\rho A = 1.868 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,横向梁格单元的抗弯刚度按照矩形单元和T形单元计算分别为 $2.9 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}^2$ 、 $5.1 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2$,桥梁动力响应计算采用瑞利阻尼,阻尼系数 $\alpha = 1.76076$, $\beta = 1.19871 \times 10^{-3}$ 。

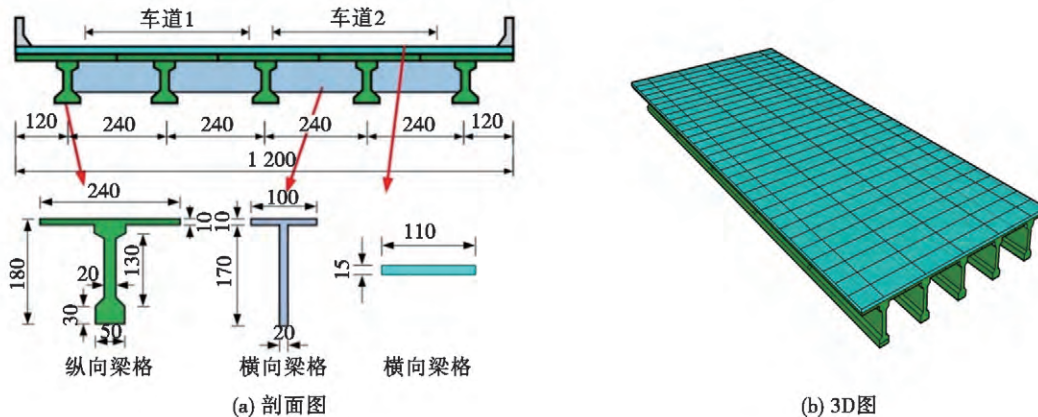


图2 桥梁有限元模型(单位:cm)

Fig. 2 Finite element model of the bridge (unit: cm)

本文采用图 3 所示的典型二轴平面半车模型, 这种模型基本能反映车辆的各部分结构特性参数, 在模拟桥梁结构车致动态响应的研究中已能满足精度要求。表 1 中数据参考车桥耦合数值模拟相关研究^[29-30] m_1 、 m_2 分别为前后轴悬挂质量, k_{t1} 、 k_{t2} 分别为前后轴轮胎刚度, k_{s1} 、 k_{s2} 分别为前后轴悬架刚度; c_{t1} 、 c_{t2} 为前后轴轮胎阻尼, c_{s1} 、 c_{s2} 为前后轴悬架阻尼; 车体转动惯量 I_a 根据文献 [31] 中经验公式估算。

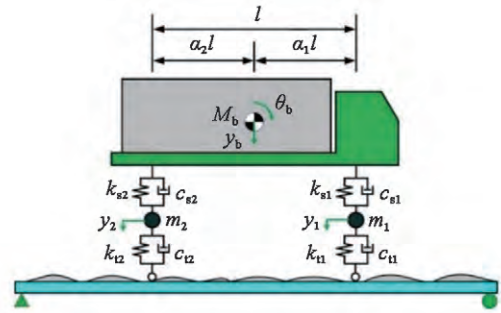


图 3 车辆数值模型

Fig. 3 Numerical model of the vehicle

从文献 [25] 选取大型客车、公交车、2 轴 6 轮货车 3 种具有代表性的车辆, 将各车型对应的参数区间作为模拟单车行驶工况的依据。对于数值算例中的每一次工况, 车辆模型的轴荷载取值、轴距大小均从对应车型的参数统计区间中随机均匀抽样。增加轴荷分配值位于 0.35 ~ 0.65 的限制以保证车辆模型荷载取值的合理性, 行驶速度从 10 ~ 30 m/s (对应时速 36 ~ 108 km/h) 区间随机产生, 通过参数的随机组合增加模拟试验工况的多样性和随机性。由于车辆模型悬架与轮胎的刚度、阻尼参数对车致响应的影响不大, 故将之简化为确定值, 直接从相关文献^[29-31] 的典型数值算例中取用。数值算例中各项参数的区间取值列于表 2。

表 1 双轴车辆数值模型固定参数取值

Table 1 Fixed parameters values of two-axis vehicle numerical model

车型	m_1, m_2 (kg)	k_{t1}, k_{t2} (kN/m)	k_{s1}, k_{s2} (kN/m)	c_{t1}, c_{t2} (kN · s/m)	c_{s1}, c_{s2} (kN · s/m)
大客车	500, 600	1 200, 2 000	500, 500	3, 3	12, 27
公交车	600, 600	1 500, 1 800	400, 400	3, 3	15, 20
两轴 6 轮货车	400, 600	2 000, 2 500	400, 400	3, 3	18, 25

表 2 双轴车辆数值模型区间参数取值

Table 2 Interval parameter values of two-axle vehicle numerical model

车型	速度 v (m/s)	轴距 d (m)	前轴重 w_1 (kg)	后轴重 w_2 (kg)
大客车	[10, 30]	[3.8, 6.3]	[700, 6 500]	[700, 11 500]
公交车	[10, 30]	[3.3, 6.1]	[2 100, 6 500]	[3 300, 11 500]
两轴 6 轮货车	[10, 30]	[2.3, 5.8]	[500, 7 000]	[900, 11 500]

4.2 影响线识别数值算例

依据 4.1 节中 3 种车型(车型 1 为大客车、车型 2 为公交车、车型 3 为二轴六轮货车) 的区间参数, 按照随机均匀分布原则和随机参数组合原则, 生成了在车道 1 上加的 300 个车桥耦合模拟工况, 并从 3 种车型中各自随机抽取 100 个工况组成混合车型识别算例。图 4 是模拟单一车型和混合车型下车道 1 的 SVM 影响线识别结果。对比车道 1 的不同车型影响线识别结果, 可以得出车型 1 至车型 3 识别准确性依次降低的规律, 识别误差分别为 5.42%、9.07% 和 20.78%, 混合车型识别误差为 10.90%。影响线识别结果的误差主要来源于动力荷载冲击引起的局部振动。

4.3 轴重过宽估计对影响线识别的影响

由于实际载重量无法满布估计区间, 导致轴重区间上限值比实际值大, 会产生轴重区间的过宽估计。为了研究轴重区间的过宽估计对影响线识别效果的影响, 本节设计了单一车型的 100 组数值算例, 按随机均匀分布从载重区间 [0, 5 000] kg 中产生 100 组

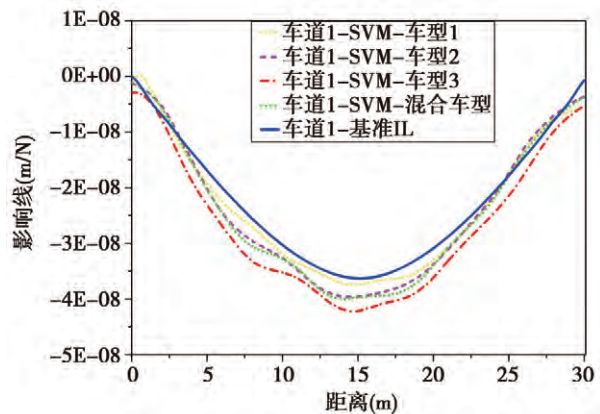


图 4 模拟算例中 SVM 识别影响线结果

Fig. 4 Identification results of IL based on the SVM method in simulation examples

随机数作为测试工况中车辆模型的实际载重,为了减少其他因素的干扰,车辆模型的其余参数均采用固定值,车速取为 10 m/s,进行车桥耦合数值模拟获得各组工况的动位移响应。根据不同型号车辆出厂参数的统计规律^[25]将载重区间按照轴荷比 0.4:0.6 分配到前后轴得到前轴载重区间为 [600, 2 600] kg、后轴载重区间为 [600, 3 600] kg,这是轴重的真实分布区间,联合响应便可以计算出每一组工况对应的区间影响线。假设对该车型最大额定载重量存在过大估计误差,按估计最大载重量分别为 5 000、6 000、7 500、10 000 kg 设计算例,即 4 个工况中估计值较额定值依次放大 0%、20%、50% 和 100%,由此得到各工况下总重和轴重的过宽估计区间并列于表 4 中。将表中 4 类工况所对应的前轴重区间和后轴重区间作为初始估计区间,反演计算影响线区间,图 5 分别是上述 4 类过宽估计工况下计算的影响线区间大数据和执行 SVM 算法识别的影响线。

表 4 过宽估计轴重区间设置

Table 4 Setting of axle weight interval for overwide estimation

工况描述(%)	估计载重(kg)	前轴区间(kg)	后轴区间(kg)	总重区间(kg)
载重放大 0	[0, 5 000]	[600, 2 600]	[600, 3 600]	[1 200, 6 200]
载重放大 20	[0, 6 000]	[600, 3 000]	[600, 4 200]	[1 200, 7 200]
载重放大 50	[0, 7 500]	[600, 3 600]	[600, 5 100]	[1 200, 8 700]
载重放大 100	[0, 10 000]	[600, 4 600]	[600, 6 600]	[1 200, 11 200]

图 5(a) 是额定载重区间上限值被放大 0% 的识别结果。对比上述工况,随着区间过宽估计程度的增大,上界数据和下界数据之间的交汇区域减少,两者间空白区域增大,区分度逐渐清晰,对影响线的识别产生不利影响。以静力标定影响线作为标准基线,4 个工况下 SVM 识别结果的误差分别达到 1.36%、1.59%、14.09% 和 26.09%。图 6 是 4 个工况识别曲线的直接对比,随着过宽估计误差水平的增大,影响线识别的准确性大幅下降。利用支持向量机算法从大量区间数据中准确识别影响线的前提是两类影响线边界数据存在一定宽度的交汇区域,如果两类数据没有交汇区域或者交汇程度较浅,则识别的影响线准确性便会显著降低。进一步由影响线计算原理(式(12))可知,响应不变时,车辆的增重会引起影响线幅值的降低,所以随着载重估计区间上界的增大,影响线计算区间的上界数据随之上移,进而导致 SVM 影响线识别结果上移。

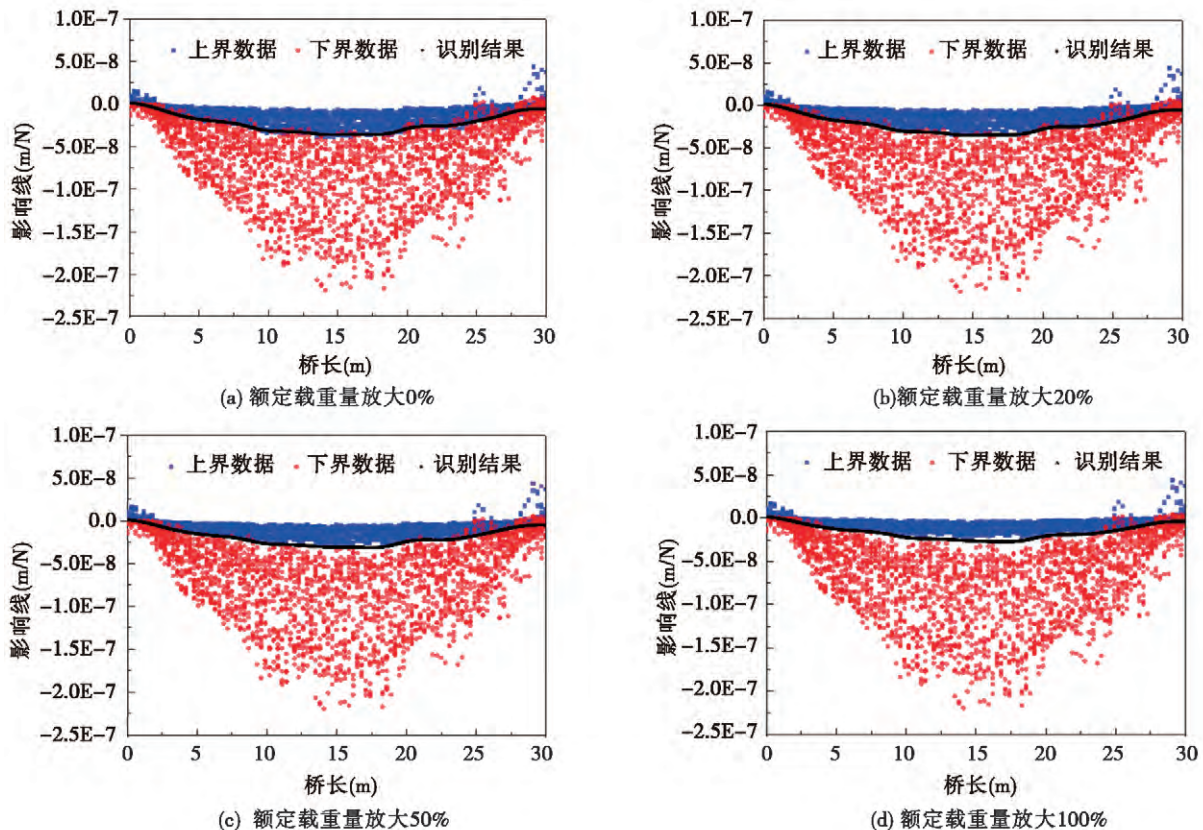


图 5 过宽估计区间下 SVM 识别影响线

Fig. 5 SVM recognition of IL under overwide estimation interval

4.4 区间重叠程度的应用

设 n 组工况中, 第 i 组工况 ($i = 1 \sim n$) 所对应的影响线区间向量为 $L = \{ [l_1], [l_2], \dots, [l_m] \}$, 其中区间数 $[l_j]$ ($j = 1 \sim m$) 是序号为 j 的影响线竖标值。影响线区间在二维平面上是上边界和下边界围成的区域, 真实的影响线就位于其中。采用网格数字矩阵赋值的方法, 将位于边界曲线包络区域内的网格点赋值为 1, 其余区域赋值为 0, n 组影响线区间的重叠程度 (IOD) 是每一个工况的网格数字矩阵在 Z 轴方向上的数值累加, 累加后的矩阵元素数值大小便代表该点 IOD 的大小。4.3 节中 4 个工况所对应的 100 组算例的整体影响线区间 IOD 以三维等高线展示如图 7 所示, 随着初始区间上限放大程度增大, 最高重叠区域的宽度也随之增加。

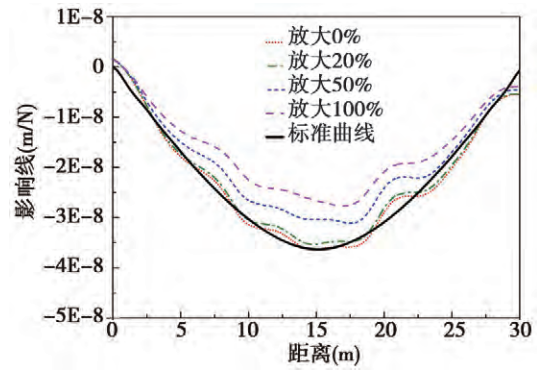


图 6 载重区间过宽估计的影响线识别误差
Fig. 6 Influence line identification error of overdue interval estimation

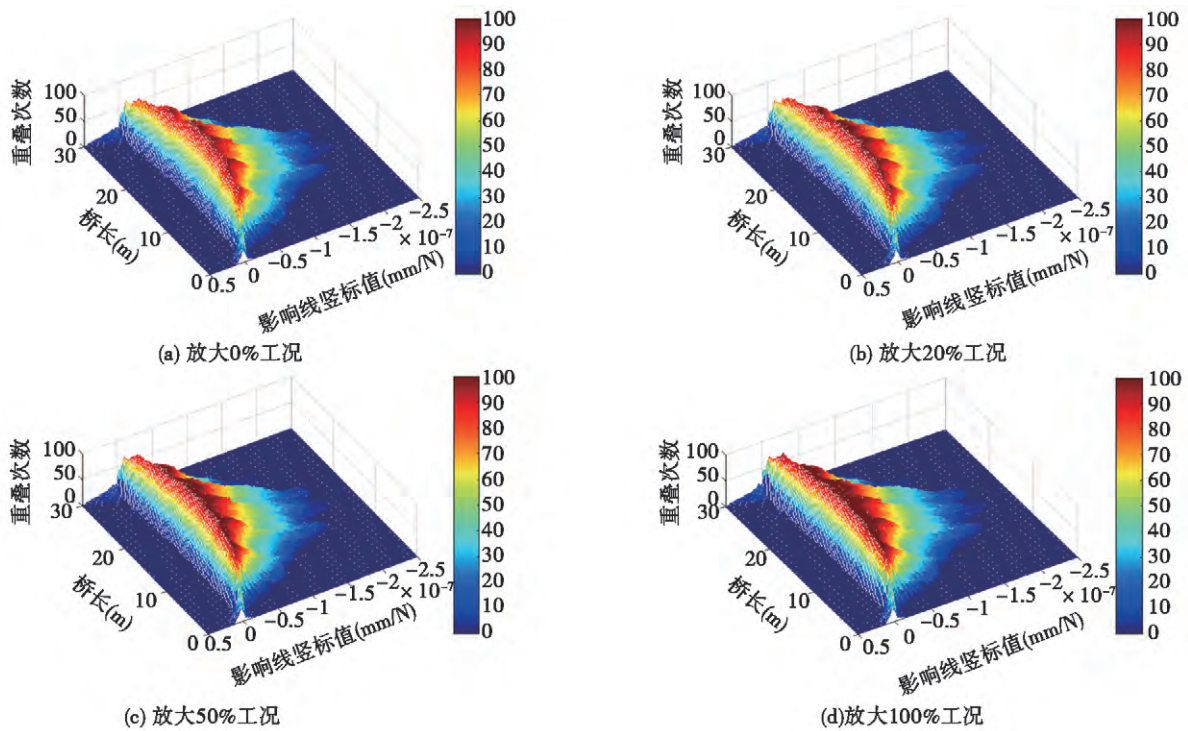


图 7 影响线区间重叠程度
Fig. 7 Overlapping degree of IL interval

文中计算的影响线向量统一取长度为 101 的竖标值序列, 对应横轴距离 0 ~ 30 m 中的 101 个等间距节点并依次编号为 1 ~ 101。图 8 中展示了序号为 10、30、50、70 和 90 的影响线竖标值区间重叠程度柱状分布统计图。依次寻找各序号 j ($j = 1 \sim 101$) 对应的最大重叠程度值 $MIOD_j$, 根据经验将门槛值取为 $0.95 MIOD_j$, 则 IOD 值大于 $0.95 MIOD_j$ 的区域成为第 j 个影响线竖标值 $[l_j]$ 新的取值范围, 由此得到新的影响线向量区间 $L' = \{ [l'_1], [l'_2], \dots, [l'_{101}] \}$ 。结合响应和新的影响线向量区间 L' 的上界与下界, 依据动态称重方法计算出 n 个工况各自的总重估计区间, 然后计算总重区间的重叠程度, 对重叠程度很低的总重取值区域进行剔除以得到新一

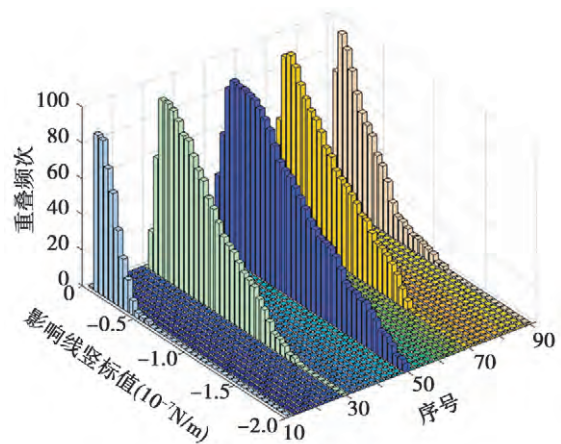


图 8 影响线竖标区间重叠程度
Fig. 8 Overlapping degree of vertical mark interval of IL

轮总重估计区间。

总重区间重叠程度计算与影响线区间重叠程度计算的方法类似,而且是更简单的一维搜索叠加问题。与影响线区间重叠不同的是,校正总重区间并非截取重叠程度最高的局部区域,而考虑为 n 个总重估计区间的并集。为了达到校正缩小初始区间的目的,在此同样引入一个经验阈值 0.1,将对重叠频次低于 0.1 MI-OD 的总重取值区域剔除,保留重叠频次较高的区域作为新的总重区间参考值。当初始估计区间上界较真实值大时,便可以通过影响线区间和总重区间的交互迭代,缩小总重区间的上界并最终收敛为真实的总重区间,同时根据轴荷载分配系数得到校正后的分轴重区间,使之在作为输入参数时能提高大数据识别影响线的准确度。载重量放大 100% 工况的总重区间迭代计算过程如图 9 所示。

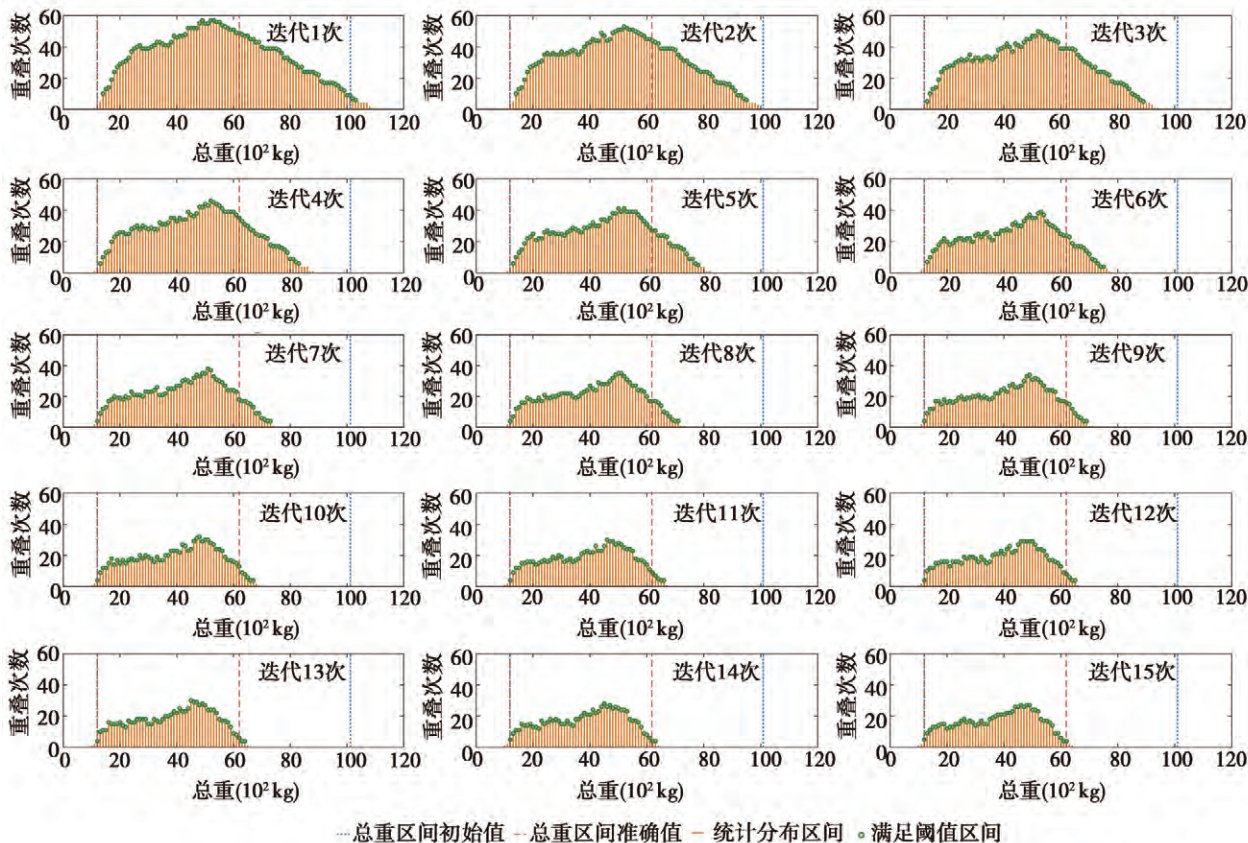


图 9 放大 100% 工况的总重迭代结果

Fig. 9 Enlarge the total weight iteration result of 100%

一轮迭代后的总重区间上限值小于初始区间上限值是迭代最终收敛的判断标准。图 9 中,初始总重估计区间为 [1 200, 11 200] kg,经过第一轮迭代,直接统计出的总重分布区间上限值大于 11 200 kg,但引入阈值剔除两侧较低 IOD 值区域后,得到新的总重区间上限为 10 300 kg,满足了迭代收敛条件,也使总重上限值在重复迭代中具有向准确值逼近的趋势,因此阈值的取用在复合反演迭代过程中十分必要。

4.5 总重迭代校验结果分析

在载重量过高估计的情况下,引入轴重与影响线区间复合反演机制校正总重估计区间上限值,可以改善最终影响线的识别误差。在 4.3 的算例基础上,分别对实际最大载重量放大估计 0%、20%、

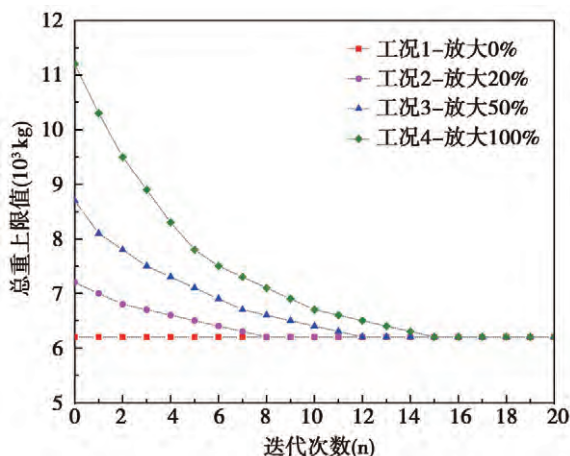


图 10 各工况总重迭代收敛结果

Fig. 10 Iterative convergence results for total weight of various working conditions

50% 和 100% 的 4 个工况进行复合反演双向推导迭代, 最终验证了该校验机制的可行性和有效性。图 10 是载重量放大不同倍数后执行迭代反演校验机制过程中的收敛情况, 可以看出总重的上限估计值在迭代过程中不断向准确值 6 200 kg 靠近, 这意味着区间过宽估计的问题可以在迭代中得到解决, 放大 100% 的工况经过 15 次复合反演迭代最终被校核成为准确值, 影响线的识别误差从初始的 26.09% 降低到 1.36%, 改善效果显著。而对于初始估计区间较准确(放大 0% 的工况), 第一次迭代结果便会收敛, 不会出现迭代结果逐渐偏离准确值的现象。

5 结论

本文基于车辆大数据和区间仿射算法的非接触式影响线标定方法, 提出非接触影响线识别复合反演机制。利用区间影响线识别和支持向量机(SVM)识别影响线的过程, 用数值模拟的方式测试了支持向量机(SVM)识别影响线的效果。评估了区间过宽估计对影响线识别精度的影响, 建立了影响线识别结果和车辆初始轴重估计区间的复合反演校正机制, 采用影响线区间和轴重区间的反复迭代提高桥梁影响线识别的准确性。用算例验证了所提迭代方法可以校正过宽估计的初始轴重输入区间, 以此作为改善 SVM 影响线识别效果的复合反演自适应误差调节机制。针对本文所提出的方法以及试验结果分析, 得出以下结论:

(1) 介绍了区间反演分析识别区间影响线、SVM 识别影响线的理论基础和相关原理, 验证了基于实测响应和 SVM 算法的影响线识别方法。通过模拟实际桥梁的单车通行随机工况, 在单车型和混合车型几组测试工况中发现利用 SVM 算法提取的影响线较标准影响线幅值偏大, 但仍处于可接受误差水平范围内, 识别结果的准确性主要受车辆动力冲击效应以及轴重实际分布情况的影响。

(2) 通过单一车型数值试验评估了区间过宽估计对影响线识别精度的影响。在设置的 0%、20%、50% 和 100% 载重区间过宽估计中, 最终识别的影响线误差分别为 1.36%、1.59%、14.09% 和 26.09%。随着过宽估计误差水平的增大, 影响线识别的准确性大幅下降。

(3) 建立了轴重和影响线互为已知量、相互迭代校正的复合反演机制。这种反演机制以总重为直接校核对象, 通过总重区间与影响线区间的双向迭代克服轴重区间过宽估计在影响线标定中带来的负面影响, 并经算例验证效果良好, 进一步提高了基于大数据与区间仿射算法的影响线非接触标定方法的鲁棒性, 使该方法具备自适应纠偏功能。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国交通运输部. 2018 年交通运输行业发展统计公报 [EB/OL]. [2019-04-12]. http://xxgk.mot.gov.cn/jigou/zhghs/201904/t20190412_3186720.html.
Ministry of Transport, PRC. Statistical Bulletin on the Development of the Transport Industry in 2018 [EB/OL]. [2019-04-12]. http://xxgk.mot.gov.cn/jigou/zhghs/201904/t20190412_3186720.html. (in Chinese)
- [2] 谢福君, 张家生. 基于实用效应的桥梁加固或拆除重建方案比选 [J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(7): 1714-1718.
XIE Fujun, ZHANG Jiasheng. Scheme comparison of bridges reinforcement or reconstruction based on practical effects [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(7): 1714-1718.
- [3] 刘 波. 高速公路桥梁典型病害及建管养对策研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2012.
LIU Bo. Research on the Typical Disease of Bridge and Countermeasure of Construction Management and Maintenance on Highway [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2012. (in Chinese)
- [4] SIVAKUMAR B, SHEIKH IBRAHIM F I. Enhancement of bridge live loads using weigh-in-motion data [J]. Bridge Structures, 2007, 3(3/4): 193-204.
- [5] MOSES F. Weigh-in-motion system using instrumented bridges [J]. Journal of Transportation Engineering, 1979, 105(3): 233-249.
- [6] O'BRIEN E J, ŽNIDARIC A, DEMPSEY A T. Comparison of two independently developed bridge weigh-in-motion systems [J]. International Journal of Heavy Vehicle Systems, 1999, 6(1/2/3/4): 147-161.
- [7] O'BRIEN E J, ŽNIDARIC A, BAUMGÄRTNER W, et al. Weighing-In-Motion of Axles and Vehicles for Europe (WAVE) WP1. 2: Bridge WIM Systems [M]. Ireland: University College Dublin, 2001.
- [8] O'BRIEN E J, ŽNIDARIC A, OJIO T. Bridge weigh-in-motion-Latest developments and applications world wide [C] // Proceedings of the International Conference on Heavy Vehicles Paris, France: John Wiley, 2008: 19-22.
- [9] XIAO Z G, YAMADA K, INOUE J, et al. Measurement of truck axle weight by instrumenting longitudinal ribs of orthotropic bridge [J]. Journal of Bridge Engineering, 2006, 11: 526-532.
- [10] EIKI YAMAGUCHI, SHIN-ICHI KAWAMURA, KAZUSHI MATUSOL, et al. Bridge-weigh-in-motion by two-span continuous bridge with skew

- and heavy-truck flow in Fukuoka Area ,Japan[J]. *Advances in Structural Engineering* ,2009 ,12(1) :115 – 125.
- [11] KALIN ,JAN ,ALEŠŽNIDARIČ ,IGOR LAVRIČ. Practical implementation of nothing-on-the-road bridge weigh-in-motion system[C]//International Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions ,2006:1 – 11.
- [12] DENG L U ,CAI C S. Identification of dynamic vehicular axle loads: theory and simulations[J]. *Journal of Vibration and Control* ,2010 ,16(14) :2167 – 2194.
- [13] 王宁波. 非路面式桥梁动态称重理论与试验研究[D]. 长沙:中南大学,2013.
WANG Ningbo. Non-Pavement Bridge Weigh-In-Motion: Theoretical and Experimental Study[D]. Changsha: Central South University 2013. (in Chinese)
- [14] WAHBEH A M ,CAFFREY J P ,MASRI S F. A vision-based approach for the direct measurement of displacements in vibrating systems[J]. *Smart Materials and Structures* ,2003 ,12(5) :785 – 794.
- [15] ZAURIN R ,CATBAS F N. Integration of computer imaging and sensor data for structural health monitoring of bridges[J]. *Smart Materials and Structures* ,2009 ,19(1) :15 – 19.
- [16] LYDON D ,LYDON M ,DEL RINCÓN J M , et al. Development and field testing of a time-synchronized system for multi-point displacement calculation using low-cost wireless vision-based sensors[J]. *IEEE Sensors Journal* ,2018 ,18(23) :9744 – 9754.
- [17] ZAURIN R ,NECATICATBAS F. Structural health monitoring using video stream ,influence lines , and statistical analysis[J]. *Structural Health Monitoring* ,2011 ,10(3) :309 – 332.
- [18] CATBAS F N ,ZAURIN R ,GUI M , et al. Sensor networks , computer imaging , and unit influence lines for structural health monitoring: Case study for bridge load rating[J]. *Journal of Bridge Engineering* ,2012 ,17(4) :662 – 670.
- [19] ZAURIN R ,KHUC T ,CATBAS F N. Hybrid sensor-camera monitoring for damage detection: case study of a real bridge[J]. *Journal of Bridge Engineering* ,2016 ,21(6) :05016002 ,1 – 13.
- [20] OJIO T ,CAREY C H ,OBRIEN E J , et al. Contactless bridge weigh-in-motion[J]. *Journal of Bridge Engineering* ,2016 ,21(7) :04016032 ,1 – 11.
- [21] ZHOU Y ,PEI Y ,LI Z , et al. Vehicle weight identification system for spatiotemporal load distribution on bridges based on non-contact machine vision technology and deep learning algorithms[J]. *Measurement* ,2020 ,159(3) :107801 ,1 – 16.
- [22] 周云,周赛,裴熠麟,等. 基于大数据与区间仿射算法的非接触式桥梁结构影响线识别[J]. *地震工程与工程振动* ,2020 ,40(3) :20 – 31.
ZHOU Yun ,ZHOU Sai ,PEI Yilin , et al. A non-contact identification of bridge influence line based on big data using interval analysis and affine algorithm[J]. *Earthquake Engineering And Engineering Dynamics* ,2020 ,40(3) :20 – 31. (in Chinese)
- [23] FENG M Q ,LEUNG R Y ,ECKERSLEY C M. Non-contact vehicle weigh-in-motion using computer vision[J]. *Measurement* ,2020 ,153:107415 – 1 – 9.
- [24] 王宁波,任伟新,李苗. 基于影响线的桥梁移动荷载识别[J]. *振动与冲击* ,2013 ,32(3) :139 – 143.
WANG Ningbo ,REN Weixin ,LI Miao. Moving load identification of a bridge based on influence line[J]. *Journal of Vibration and Shock* ,2013 ,32(3) :139 – 143. (in Chinese)
- [25] 李紫玮. 基于深度学习理论的桥梁上车型识别与检测跟踪研究[D]. 长沙:湖南大学,2019.
LI Ziwei. Vehicle Recognition and Tracking Research Based on Deep Learning Theory[D]. Changsha: Hunan University ,2019. (in Chinese)
- [26] 周赛. 基于车辆大数据与区间仿射求逆算法的中小桥梁结构识别[D]. 长沙:湖南大学,2019.
ZHOU Sai. The Structural Identification of Small and Medium Bridges Based on Big Data of Vehicles and Interval Inverse Analysis with Affine Arithmetic[D]. Changsha: Hunan University ,2019. (in Chinese)
- [27] DEGRAUWE D ,LOMBAERT G ,ROECK G D. Improving interval analysis in finite element calculations by means of affine arithmetic[J]. *Computers & Structures* ,2010 ,88(3/4) :247 – 254.
- [28] GB7031 – 2005 机械振动道路路面谱测量数据报告[S]. 北京:中国标准出版社,2005.
GB7031 – 2005 Mechanical Vibration Road Surface Profiles Reporting of Measured Data [S]. Beijing: Standards Press of China ,2005. (in Chinese)
- [29] 邓露,段林利,何维等. 中国公路车-桥耦合振动车辆模型研究[J]. *中国公路学报* ,2018 ,31(7) :92 – 100.
DENG Lu ,DUAN Linli ,HE Wei. Study on vehicle model for vehicle-bridge coupling vibration of highway bridge in China[J]. *China Journal of Highway and Transport* ,2018 ,31(7) :92 – 100. (in Chinese)
- [30] OBRIEN E J ,CANTERO D ,ENRIGHT B , et al. Characteristic dynamic increment for extreme traffic loading events on short and medium span highway bridges[J]. *Engineering Structures* ,2010 ,32(12) :3827 – 3835.
- [31] 郭正康. 汽车整车转动惯量的计算与选取[J]. *汽车研究与开发* ,1993 ,8(6) :42 – 44.
GUO Zhengkang. Calculation and selection of vehicles moment of inertia [J]. *Research and Development of Car* ,1993 ,8(6) :42 – 44. (in Chinese)