

# 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

周云<sup>1,2,3</sup>, 周赛<sup>2,3</sup>, 裴熠麟<sup>2,3</sup>, 程依婷<sup>2,3</sup>, 李紫玮<sup>2,3</sup>

(1. 工程结构损伤诊断湖南省重点实验室, 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体系研究中心, 湖南长沙 410082)

**摘要:**影响线在桥梁结构状态评估方面具有重要意义, 针对现有影响线测量方法在实桥测试上的局限与不足, 提出了一种基于大数据与区间仿射算法的中小型桥梁结构影响线非接触识别方法。首先, 基于车辆参数统计结果, 建立了车辆类型与轴重区间的映射关系; 然后, 结合车辆参数的区间不确定性, 运用仿射算法计算反演多工况影响线区间; 最后, 基于大数据挖掘分析, 采用支持向量机二分类算法从多工况的影响线区间中提取真实影响线。通过开展车桥耦合数值模拟分析及实验室缩尺模型试验, 分别对所提方法的稳定性与有效性进行测试, 初步验证了本文的非接触影响线识别方法较传统方法具有更好的发展前景。

**关键词:**结构健康监测; 桥梁影响线; 区间分析; 仿射算法; 大数据; 支持向量机; 车桥耦合  
**中图分类号:**P315.9 **文献标志码:**A

## A non-contact identification of bridge influence line based on big data using interval analysis and affine algorithm

ZHOU Yun<sup>1,2,3</sup>, ZHOU Sai<sup>2,3</sup>, PEI Yilin<sup>2,3</sup>, CHENG Yiting<sup>2,3</sup>, LI Ziwei<sup>2,3</sup>

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

**Abstract:** The influence line (IL) plays an significant role in fields of bridge condition evaluation. In view of the limitations and shortcomings of existing IL measurement methods in real bridge testing, a non-contact method for IL identification for small and medium bridges based on big data and affine algorithm is proposed. First, the mapping relations between vehicle types and axle-weight intervals are established on the basis of statistic data. Subsequently, combined with the axle-weight intervals of the traveling vehicles, the IL intervals of the bridge under multiple cases can be successfully back-calculated by utilizing interval analysis and affine algorithm. Finally, based on the big data mining and analysis, the two-classification algorithm of support vector machine (SVM) is employed to extract the real IL from the IL intervals of multiple testing cases. By carrying out the numerical simulation analysis and laboratory scale model test, the stability and effectiveness of the proposed method are tested, which preliminarily verifies that the non-contact IL identification method in this paper has a better development prospect than the tra-

收稿日期:2019-10-02; 修订日期:2020-12-11

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:周赛(1995-),女,硕士研究生,主要从事桥梁结构健康监测方面研究. E-mail: zhousai2017@163.com

ditional methods.

**Key words:** structural health monitoring (SHM); bridge influence line; interval analysis; affine algorithm; big data; support vector machine (SVM); coupled vehicle-bridge system

## 引言

桥梁是现代交通运输的重要连接枢纽,目前我国公路桥梁超80万座,其中构造简单、受力明确的中小型桥梁虽然量大面广,但由于传统意义的监测仪器设备费用昂贵、消耗大量时间与人力,鲜有成为长期监测或定期检测的工程对象。日益增大的交通流和普遍的超载现象致使桥梁劣化进程加快、桥梁坍塌事故频发,如何在缩减成本投入的前提下对现役中小型桥梁的承载能力、营运状态、耐久能力进行可靠、有效、快速的评估一直是桥梁结构健康监测领域亟待解决的问题。

桥梁结构影响线在桥梁动态称重系统标定、有限元模型修正、承载力评估以及结构损伤识别等方面有着重要应用<sup>[1-3]</sup>。早期的桥梁影响线是依据桥梁最初设计参数通过理论方法或有限元模型计算得到<sup>[4-6]</sup>,但结果往往因为边界条件不确定、材料特性改变等因素与实际情况大相径庭。学者们为此提出了一些修正方法来提高理论影响线的准确性<sup>[7-8]</sup>,但这些方法在使用上仍然存在很大的局限性。相比理论影响线,实际测量的影响线更符合客观实际,由O'Brien和Quilligan<sup>[9]</sup>提出的直接由实测车致响应反演影响线方法是经典的野外实地测量方法,计算无需获知桥梁的支座边界条件和材料等参数信息,通过构造一个包含标定车辆轴重、轴距、位置等重要信息的大规模参数矩阵,便可以应用最小二乘法解得合理的结果曲线。随后,国内外学者对实测影响线方法提出一系列改进和试验研究,不仅提取出了更精确更具鲁棒性的桥梁结构影响线投入到实际工程应用,而且对影响线实测方法的适用桥梁类型进行了拓展<sup>[10-13]</sup>。计算机视觉图像识别技术和深度学习技术在土木工程领域的兴起<sup>[14-16]</sup>使得桥梁结构识别可以通过更为先进的方法予以实现。Catbas等<sup>[17]</sup>建立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。类似地,T.Ojio<sup>[18]</sup>将视频监控中车辆的定位与结构动位移时程响应进行同步,从而利用标定的挠度影响线反演车辆轴重,并提出了不依赖于传感器测量的非接触动态称重的概念。

以上基于实测响应获取影响线的方法虽然较传统方法有很大改进,但是仍然存在三个方面的问题,一是对于中小型桥梁,传统的接触式传感器监测方式代价昂贵,容易受到经费成本的制约,而且对运营期间的桥梁进行传感器安装需要暂时封闭车流,给通行带来不便;二是依赖于车辆称重标定过程,要求被测桥梁附近有称重站,使用已称重的车辆实施影响线标定,条件难以满足且过程费时费力;三是桥梁结构影响线的计算结果依赖输入轴重参数的准确性,而目前常用的实测方法并没有考虑实际过程中由轴重估计误差带来的影响线识别不确定性,利用车辆轴重信息计算影响线归结为一类由响应推导结构特征参数的反问题,如何根据带有不确定性的输入参数衡量输出结果的可靠性对于改进现有实测影响线方法是一个值得探讨的问题。

为了顺应现代化需求,实现桥梁智能检测和非接触结构状态评估,有必要将先进的计算机视觉、深度学习、大数据分析和机器学习技术融合起来,寻求一种“无需封闭交通”、“无需接触式传感”、“无需人工干预”的高效智能桥梁结构影响线测定方法。在前述研究的基础上,本文提出了一种适用于中小型桥梁的新型非接触式影响线识别方法,在已知车辆轴重分布区间的前提下,基于含有不确定输入参数的区间分析理论,结合仿射矩阵求逆算法由实际测量的桥梁动位移响应反算推演出影响线区间,再立足大数据分析原理,通过支持向量机从多工况的影响线区间数据中识别出确定性的影响线。经过数值模拟和室内车桥模型的初步试验验证,该方法能有效地从多工况响应信息和估计的轴重区间中识别出桥梁结构影响线,且识别的结果具有较高的准确性和良好的稳定性,在实际工程中也有很好的应用前景。

## 1 影响线实测原理与方法

### 1.1 由测量响应推导桥梁结构影响线

桥梁影响线反映了单个移动荷载在桥梁不同位置处引发的监测点位移、应变、弯矩等响应,当同时作用多个移动荷载,则总响应近似等效为单个荷载作用响应的线性叠加。本文基于Catbas<sup>[11]</sup>采用的矩阵方法利

用实测响应计算影响线,在已知轴重、轴距、位置等信息的前提下构造与行驶车辆相关的大规模参数矩阵求解线性方程组。在采取相同解方程技巧时,该法与 O'Brien<sup>[9]</sup>提出的基于最小二乘原理求解影响线的计算结果基本等效,适用于边界条件等各项参数未知的桥梁以及多跨连续桥梁,一般在形式简单、桥面较窄的中小型简支单跨桥上的实际测试效果较好。假设一  $k$  轴车辆以速度  $v$  保持匀速行驶,各轴重为  $w_1, w_2, \dots, w_k$ , 前轴(编号 1)至各车轴的距离依次为  $d_1, d_2, \dots, d_k$ , 如采样频率设置为  $f$ , 则轴距  $d_i$  对应的采样点数为  $d_i * f/v$  ( $i = 1, 2, \dots, k$ )。当动态响应取车辆前轴进入桥梁至后轴离开桥梁期间的时程值  $\{r_1, r_2, \dots, r_m\}^T$ , 则整座桥梁的影响线数值解、结构测量响应、车辆参数三者的数学关系建立如下:

$$\begin{Bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_m \end{Bmatrix}_m = \begin{bmatrix} w_1 & 0 & \cdots & w_2 & 0 & \cdots & w_k & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & w_1 & 0 & \cdots & w_2 & 0 & \cdots & w_k & \cdots & 0 \\ \vdots & & \ddots & & & \ddots & & & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & w_1 & 0 & \cdots & w_2 & 0 & \cdots & w_k \end{bmatrix}_{n \times m} * \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{Bmatrix}_n \quad (1)$$

其中  $n \times m$  维的矩阵为包含轴重、轴距、位置等信息的大规模车辆参数矩阵,  $\{u_1, u_2, \dots, u_n\}^T$  为桥全长的影响线向量, 每个采样点记录的响应值即为该时刻下各个轴重与对应位置影响线值的乘积效应叠加。上述影响线的求解归结为动力学第一类反问题, 方程求解可以通过最小二乘法、奇异值分解法(SVD)、正则化法等求参数矩阵的伪逆, 以克服反问题中时常出现的病态解情况<sup>[19-21]</sup>。

## 1.2 含有不确定输入参数的区间反问题求解

早在 20 世纪中期, 针对工程实际问题中含有不确定参数的区间分析方法便被提出<sup>[22]</sup>, 由于其无需获知与不确定性相关的先验概率分布, 只注重输入参量与输出结果的变化取值范围, 使得区间分析模型在结构有限元的静动力分析、结构反问题分析以及工程结构优化方面得到广泛应用<sup>[23-25]</sup>, 也有一些涉及车桥振动领域的相关研究<sup>[26-27]</sup>。为了使区间分析的结果更准确更具有参考价值, 高斯消去法、迭代法、分解法、摄动法、仿射算法、蒙特卡罗模拟法、优化算法等先后被提出用于更有效地求解区间运算和区间方程组等区间数学问题, 对此苏静波做了较为全面的概述<sup>[28]</sup>。其中仿射算法<sup>[29-30]</sup>由于考虑了变量间的相关性从而能够有效抑制区间结果扩张, 相比之下能计算出更为紧凑的结果区间, 具有准确、高效的显著优点。

基于深度学习对交通流监测视频中的车辆进行目标追踪和车型分类技术正在日益发展不断完善<sup>[17]</sup>, 为了从车型检测分类中获取本文所关注的轴重区间, 湖南大学结构健康监测团队([www.hnutest.com](http://www.hnutest.com))对国内常见的四千余种车辆进行出厂参数统计和车型分类, 统计包括出厂空车轴重、各轴额定限重、轴数轴距、整车外观尺寸等信息; 依据统计信息将其中常见二轴车分为七类, 即小轿车、面包车、中型客车、大型客车、公交车、二轴四轮货车、二轴六轮货车。实际交通路网中车辆真实轴重的随机性还无法用一种客观规律或概率分布来准确描述, 引入区间变量的概念来描述车辆轴重的波动范围可以使研究问题落实于包络边界值上, 让研究过程变得简明扼要。基于此, 本文提出了不依赖于标定卡车的影响线快速标定法, 不必提前获知行驶车辆的准确轴重, 只需将车辆分类映射到对应的轴重估计区间, 进而根据区间分析方法计算出单工况的影响线区间, 便可以基于真实轴重在估计区间中随机分布以及区间解总是包含真实解的两个重要前提, 从多重工况的桥梁响应大数据中识别出确定性的影响线。这是一个从不确定性输入到确定性输出的过程, 其中多工况的大数据输入是辨识出确定解的基础与关键。

将区间的概念引申到影响线的求解算法上来, 当用区间变量  $[w_i, \bar{w}_i]$  来描述第  $i$  轴轴重  $w_i$  的极小、极大边界值, 则单次工况下的真实轴重被包含于此区间, 同时对应于该工况下的车轴荷载作用效应叠加引起的动态总响应  $r$  被采集以反算影响线区间。以二轴车为例, 体现轴重不确定性的轴重区间矩阵  $W^I$  如式(2)所示, 影响线区间向量  $u^I$  可由式(3)计算得到。

$$W^I = \begin{bmatrix} [w_1, \bar{w}_1] & 0 & \cdots & [w_2, \bar{w}_2] & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & [w_1, \bar{w}_1] & 0 & \cdots & [w_2, \bar{w}_2] & 0 & \vdots \\ \vdots & & \ddots & & & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & [w_1, \bar{w}_1] & 0 & \cdots & [w_2, \bar{w}_2] \end{bmatrix}^T \quad (2)$$

$$u^I = [W^I]^{-1} r \quad (3)$$

纯粹的区间运算求解该线性方程组容易由于区间变量的相关性引起解值域扩张导致解区间失去其参考价值,故在此引入基于纽曼展开的仿射求逆算法抑制区间扩张问题来获得紧凑的解区间<sup>[30]</sup>。

将轴重区间变换为中值-半径仿射形式,引入值域为 $[-1, 1]$ 的噪声元保留并传递参量的不确定性。

$$\begin{cases} [\underline{w}_1, \overline{w}_1] = x_0 + x_1 \times \varepsilon_1, \varepsilon_1 \in [-1, 1] \\ [\underline{w}_2, \overline{w}_2] = y_0 + y_1 \times \varepsilon_2, \varepsilon_2 \in [-1, 1] \end{cases} \quad (4)$$

其中 $x_0, y_0$ 代表区间中值, $x_1, y_1$ 代表区间半径; $\varepsilon_i$ 为噪声元,决定变量之间相关性强弱。依此类推将区间矩阵中的区间变量替换为仿射变量得到如式(5)的仿射矩阵形式,则影响线区间向量可由式(6)计算得到。

$$W' = W_0 + W_1 \times \varepsilon_1 + W_2 \times \varepsilon_2 \quad (5)$$

$$u' = [W_0^{-1}W']^{-1}W_0^{-1}r = (I + W_0^{-1}W_1\varepsilon_1 + W_0^{-1}W_2\varepsilon_2)^{-1}W_0^{-1}r \quad (6)$$

$$A' = (I + W_0^{-1}W_1\varepsilon_1 + W_0^{-1}W_2\varepsilon_2)^{-1} \quad (7)$$

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 $W_0^{-1}W_1 = X_1, W_0^{-1}W_2 = X_2$ ,对式(7)使用一阶纽曼展开并对值域适当近似后得到式(8):

$$A' \approx I - (X_1\varepsilon_1 + X_2\varepsilon_2) + (X_1\varepsilon_1 + X_2\varepsilon_2)^2 (I + X_1\varepsilon_1 + X_2\varepsilon_2)^{-1} \quad (8)$$

引入新噪声元 $\varepsilon_e \in [-1, 1]$ ,基于 $X_i\varepsilon_i \subseteq |X_i|\varepsilon_e$ 对区间矩阵 $A'$ 适当放大,得到 $A'$ 的值域如式(9),当 $\varepsilon_e$ 取 $\pm 1$ 时,该式能取到区间边界值,则计算区间影响线 $u'$ 向量如式(10)所示。

$$A' \subseteq I - (|X_1| + |X_2|)\varepsilon_e + (|X_1| + |X_2|)^2\varepsilon_e^2 [I + (|X_1| + |X_2|)\varepsilon_e]^{-1} = [\underline{A}, \overline{A}] \quad (9)$$

$$u' = A'W_0^{-1}r = [\underline{u}, \overline{u}] \quad (10)$$

由区间单向包含关系这一本质特性<sup>[22-23]</sup>,当输入参数在区间内,真实解也必然被包含在输出区间内,即按真实轴重计算的确定性影响线 $u = f(w_1, w_2, r)$ 总被包含于区间影响线 $u' = f(w'_1, w'_2, r)$ 中, $f$ 为从车辆参数和结构响应到结构影响线的映射关系。经过对影响线区间的一系列计算与研究发现,真实轴重取到估计区间的边界值,真实的影响线解会趋向计算的区间影响线边界,由此可以推测当工况充足使得真实轴重能在区间内随机满布时,真实影响线实际上位于影响线上界和下界交汇处,则总存在一条合理的分界线将所有工况下计算的影响线上界、下界有机隔离,且该分界线能近似代替真实影响线。

### 1.3 基于大数据的支持向量机识别影响线

桥梁健康监测领域数据的海量特征催生着大数据与结构识别的相互融合,大数据不仅仅是直观的海量原始数据,其蕴藏的丰富参考决策价值需要经过特殊分析处理手段才能得以显现。机器学习的意义在于借用计算机强大的学习能力从有限的训练集中寻找规律,从大数据中挖掘到有价值的信息,不仅可以对未来数据进行预测还能对未知数据进行分类。常用的机器学习方法有善于分类决策的支持向量机、基于条件概率的朴素贝叶斯、无监督学习的K-均值聚类 and 擅长复杂问题学习的神经网络,其中支持向量机的泛化错误率低、计算效率高,在二分类方面具有显著优势。

基于结构风险最小化原理的支持向量机<sup>[31-33]</sup>可以完成区间上下界数据的二分类,将二维坐标中的上界数据赋予“+”类标签,下界数据赋予“-”类标签,则可利用现有数据构成训练集与测试集,实施交叉验证获得最高分类正确率的最大间隔分离超平面,如图1所示。实际测量的响应存在局部振动或误差以及仿射求逆算法对解值域有所放大,使得这两类数据界限呈非线性且非清晰可分特征,故需采用软间隔非线性分类法,通过引入罚函数,建立惩罚机制处理两类数据的交叉重叠现象;通过非线性核函数将非线性数据映射到高维特征空间转化为简单的线性可分问题。最后,将原始寻求最大间隔问题转化为的式(11)所示的拉格朗日对偶优化问题。经过一系列条件转换,最终根据式(12)的目标函数和约束条件求解

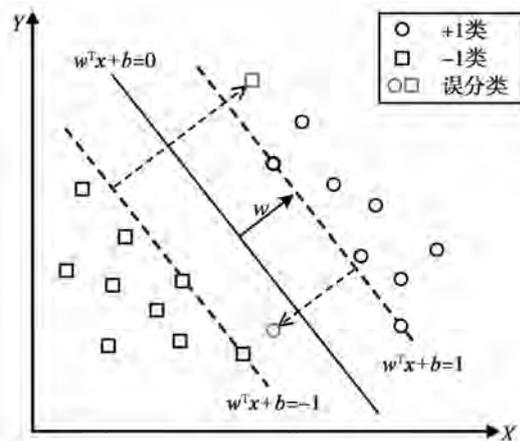


图1 支持向量机二分类

Fig. 1 The SVM two-classification

最终根据式(12)的目标函数和约束条件求解

出最优的分类超平面。在二维平面数据散点中应用该模型进行分类即可将隐式的分类超平面可视化,得到与结构真实影响线近似的 SVM 识别影响线。

$$\begin{cases} L(w, b, \varepsilon, \alpha, \mu) = \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \cdot \sum_{i=1}^n \varepsilon_i - \sum_{i=1}^n \alpha_i (y_i (w \cdot x_i + b) - 1 - \varepsilon_i) - \sum_{i=1}^n \mu_i \varepsilon_i \\ \max_{\alpha \geq 0} \min_{w, b, \varepsilon} L(w, b, \varepsilon, \alpha, \mu) \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \min_{0 \leq \alpha_i \leq C} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_i \alpha_j y_i y_j \kappa(x_i, x_j) - \sum_{i=1}^n \alpha_i \\ \text{s. t. } \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i = 0 \end{cases} \quad (12)$$

上式中  $w, b$  分别为超平面法向量和截距;  $x_i$  指二维平面向量,  $y_i$  为数据分类标签;  $\alpha_i$  和  $\mu_i$  为每一个数据点对应的拉格朗日乘子;  $C$  为惩罚参数; 核函数  $\kappa(x_i, x_j)$  代表将二维数据映射到高维空间求内积运算, 高斯核是常用的非线性核。为了找到满足约束条件的最优  $\alpha_i$  值且保证较高计算效率, 一般采用序列最小优化算法对上述目标函数最小化求解。

## 2 车桥耦合数值算例

### 2.1 ANSYS 车桥耦合振动模型

本文建立了车桥耦合数值模型模拟区间影响线的识别。为了提高计算效率, 分别建立 ANSYS 桥梁有限元模型和 MATLAB 车辆数值模型, 由主程序控制桥梁子系统与车辆子系统在每一个时间步内耦合迭代至收敛, 同时考虑路面不平顺影响, 采用国家标准 GB7031-2005 “C 级” 路面<sup>[34]</sup>, 最终输出行车道跨中节点的动位移时程响应。

桥梁模型采用常见的钢筋混凝土梁板式桥梁结构, 为了降低时间成本获得更高的计算效率, 在 ANSYS 中采用梁格法将整座桥梁模拟为纵横向梁单元组成的结构体系, 如图 2 所示。桥梁各项参数如下: 桥全长 30 m, 横截面由 5 根 T 梁组成, 每根 T 梁抗弯刚度  $EI = 10.8 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2$ , 线密度  $\rho A = 1.868 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ , 沿桥长每隔 6m 设置横隔板, 横向单元的抗弯刚度按照矩形单元和 T 形单元计算分别为  $2.9 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}^2$  和  $5.1 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2$ 。经分析得到该简支桥梁的前 3 阶弯曲模态频率分别为 2.621 8、10.458 和 23.425, 采用前两阶频率计算瑞雷阻尼系数  $\alpha = 0.790 3$ ,  $\beta = 7.300 8 \times 10^{-4}$ 。

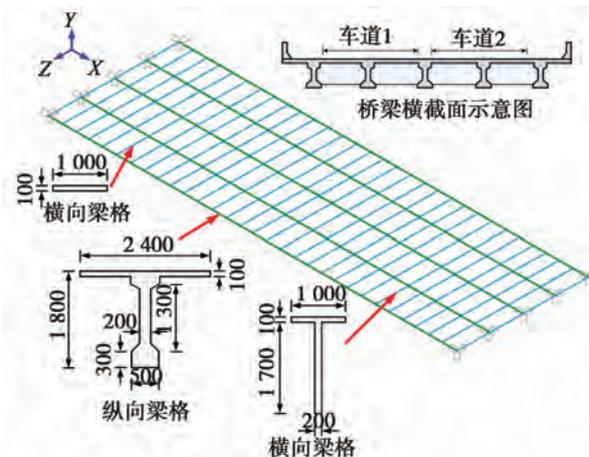


图2 桥梁有限元模型(单位:mm)

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

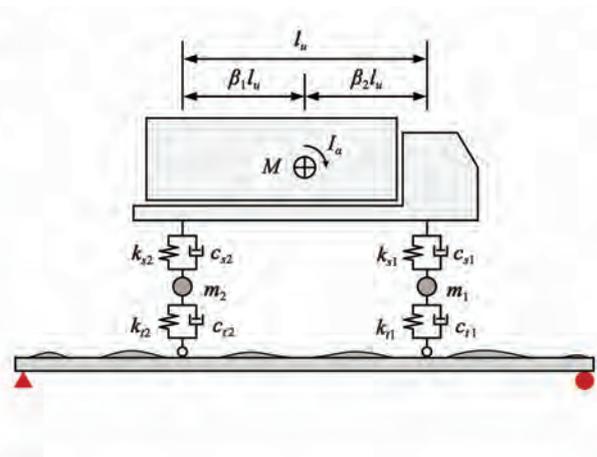


图3 车辆数值模型

Fig.3 Numerical model of the vehicle

车辆模型采用二轴半车模型, 如图 3 所示, 在 MATLAB 中建立四自由度的车辆参数动力学方程, 采用 ode45 求常微分方程数值解。文中对随机车流数值模拟进行了简化, 将重点放在车辆类型、速度、轴重、轴距这四个方面的随机性的体现上。在该小节内容中仅给出基于统计结果的大客车单一车型对本文主要方法思想的初步验证, 基于客观统计的大客车模拟工况区间取值列于表 1, 其余车辆模型参数取值列于表 2。表 1

中  $v$  为速度区间,  $d$  为依据国内车辆出厂参数统计得到的轴距分布区间,  $w_1$ 、 $w_2$  为依据车辆整备质量和前后桥最大允许载荷数据统计得到的轴重分布区间; 表 2 中  $m_1$ 、 $m_2$  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  $I_a$  根据经验公式估算<sup>[35]</sup>, 以上参数参考车桥耦合数值模拟相关研究与文献[36-37]取值。为提高行车模拟的多样性随机性, 采取多轴重多轴距多速度的多重工况进行 300 次跑车模拟, 单次工况的速度、轴距和轴重分别从表 1 的对应区间中随机生成并组合。

表 1 大客车区间工况设置

Table 1 Interval cases of the vehicle

参数	$v$ (m/s)	$d$ (m)	$w_1$ (kg)	$w_2$ (kg)
取值	[10,30]	[3.8,6.05]	[700,6500]	[700,11500]

表 2 大客车数值模型参数取值

Table 2 Simulated parameters of the vehicle

参数	$m_1$ (kg)	$m_2$ (kg)	$k_{t1}$ (N/m)	$k_{t2}$ (N/m)	$k_{s1}$ (N/m)	$k_{s2}$ (N/m)	$c_{t1}$ (N·s/m)	$c_{t2}$ (N·s/m)	$c_{s1}$ (N·s/m)	$c_{s2}$ (N·s/m)
取值	500	600	1 200 000	2 000 000	500 000	500 000	3 000	3 000	12 000	27 000

### 2.2 基于数值模拟动位移响应计算区间影响线

轴重和速度对车致响应的幅值与振动具有显著影响, 图 4 是大客车模型在不同速度和载重下的桥梁结构跨中节点动位移时程响应曲线, 横轴为车辆前轴至桥梁起点的行驶距离。由这 3 条响应计算的确定性影响线如图 5 所示, 可以观察到 3 条包含动力效应的影响线均在静力影响线的附近波动, 说明本文使用的实测影响线计算方法对不同的工况均具有良好的鲁棒性。

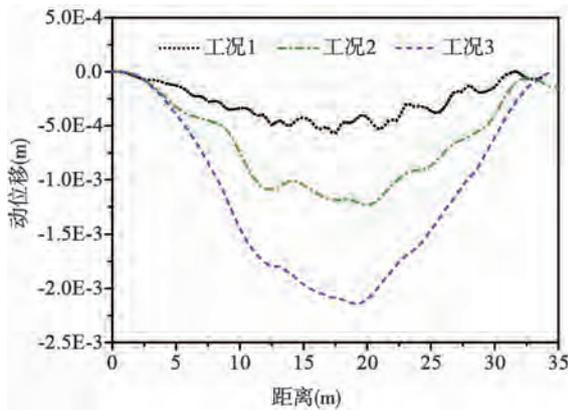


图 4 模拟桥梁跨中动位移时程曲线

Fig. 4 The mid-span time-history responses of simulation

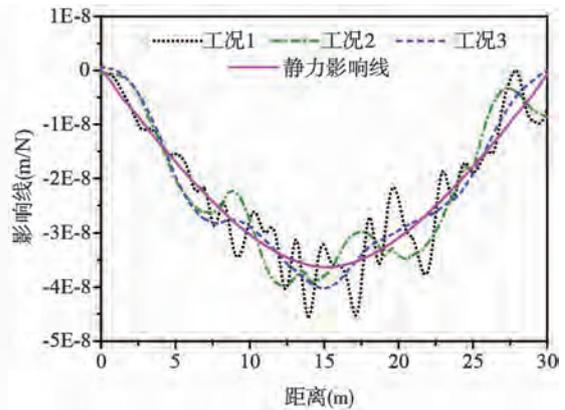


图 5 桥梁跨中动位移影响线计算曲线

Fig. 5 The calculated mid-span IL

继而将确定性问题延伸到区间分析问题, 为了能清楚发现输入区间与输出区间的内在联系, 根据大客车车型的各项参数设计了 3 个测试工况列于表 3, 除了前后轴取值不同, 其余输入参数和轴重估计区间均相同。表 3 中各影响线区间宽度和静力影响线均取结构跨中同一节点处的数值进行对比, 由各工况真实轴重作用下的实测响应计算出的影响线区间曲线绘制于图 6 中。鉴于数值模拟中由于动力特性引起的响应局部振动幅值不大, 该部分振动没有采用滤波或拟合的方法去掉, 否则容易导致结果失真。联合表 3 和图 6, 可以清楚地看出输入区间与输出区间两者的内在联系, 即轴重估计区间固定不变时, 真实轴重越接近区间下限, 实测的动位移响应越小, 计算的影响线区间下界越趋近真实影响线, 反之亦然。同时, 由于仿射求逆算法中的逆阵  $A'W_0^{-1}$  作为系数与响应  $r$  相乘得到影响线向量, 故不同工况的影响线区间宽度 (定义整条曲线区间上下界之间的最大差值为区间宽度) 与响应幅值成正比, 即车致响应越大, 结果区间越宽; 下界曲线较上界曲线分布更为稀疏的现象亦是受逆阵系数的影响。

为了校验区间算法计算的区间边界的正确性, 图 7 分别给出了针对工况 2 区间问题求解的全局优化遗

传算法与仿射求逆算法的计算结果。在常用的几种区间线性方程组求解方法中,传统的消去法与迭代法对区间矩阵有严格条件限制,且计算过程中缺乏变量间的相关性的考虑使结果误差增大,故本文没有使用该方法计算;遗传算法虽然能通过种族的择优机制在区间中搜索出最优解,但是时间代价巨大,当种群规模不足或交叉、变异概率较小时容易陷入局部最优。本文算例中设置种群规模为2 000,遗传代数100,交叉、变异概率均取0.4,对影响线区间向量的每一个变量依次进行优化,使用计算机(CPU@2.5 GHz)运行计算共计耗时11 944 s(3.3 h);应用仿射求逆算法的区间计算效果较好,虽然没有遗传算法的精确解紧致,但是计算效率高、计算结果稳定,故在区间反问题分析方面有显著优势。

表3 不同工况下计算的影响线区间结果

Table 3 Calculated results of IL under different cases

工况	前轴区间(kg)	后轴区间(kg)	实际前轴重(kg)	实际后轴重(kg)	影响线区间 ( $m/N \times 10^{-8}$ )	静力影响线 ( $m/N \times 10^{-8}$ )
1	[700,6 500]	[700,11 500]	1 000	1 000	[-4.15, -1.24]	-3.63
2	[700,6 500]	[700,11 500]	3 600	6 100	[-8.14, -2.44]	-3.63
3	[700,6 500]	[700,11 500]	6 000	11 000	[-11.69, -3.51]	-3.63

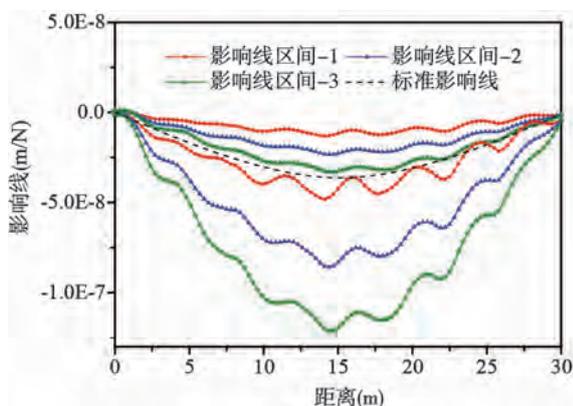
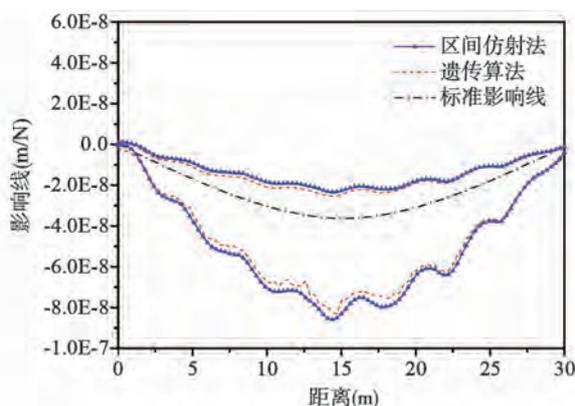
图6 影响线区间计算结果( $v = 10\text{m/s}$ )Fig. 6 The calculated interval result of IL  
( $v = 10\text{m/s}$ )

图7 两种方法识别影响线区间结果对比

Fig. 7 A comparison of the calculated IL intervals  
by two methods

### 2.3 SVM 分类学习识别确定性影响线

本文涉及到的基于视频检测与深度学习技术的车型分类与轴重估计是依据国内现有车辆的相关出厂参数与统计调查结果做出的粗分类,估计的轴重区间范围较大,区间跨越最高达到10吨,故计算所得影响线区间宽度也较宽。本文对大客车车型计算了300个工况,每个工况均对应一个动位移响应和计算的影响线区间,鉴于数值模拟的桥梁节点动位移响应局部振动幅度不大,对上下界数据的分类没有太大干扰,故没有使用滤波或曲线拟合方法消除动力效应。

基于区间数学中区间解总是包含真实解的根本前提,输入区间与真实参数的包含关系会继承给输出区间和真实解。利用多工况输入的随机概率分布原则,多工况下影响线区间重叠区域会逐步缩小直至达到稳定收敛,进而利用支持向量机的二元分类方法,从复杂的区间边界分布中寻找影响线真实解的位置,体现了大数据识别的思想。图8为数值算例SVM影响线识别结果,从中可以看出,SVM分类法不仅能很好地给一系列存在交叉重叠冲突现象的二维带标签数据散点划定一条平面内的合理分界线,而且能较完整地保留影响线的形状趋势。但从图9的对比中不难发现,SVM识别影响线较静力影响线数值稍偏大,拟合误差为5.42%,其中部分原因在于影响线中的动力放大效应没有完全剔除,另一部分原因在于真实轴重在轴重区间的取值分布影响到真实影响线在影响线区间的相对位置分布。

为了探究引起识别误差的原因,图10对单车识别300次工况中真实轴重取值情况进行了统计,由于增加了前后轴荷分布系数合理范围限制,剔除了不合理的轴重组合,最终统计结果呈现区间非均匀分布,轴重达到区间极小值与极大值的概率很低,前后轴同时取到极值的概率则更低,较为贴近实际交通流中车辆轴重的分布情况,但这也意味着上下界交叉重叠区域数据不足,使得识别影响线结果偏向下界。故大数据的工况

输入是提高识别结果准确性的基本前提。

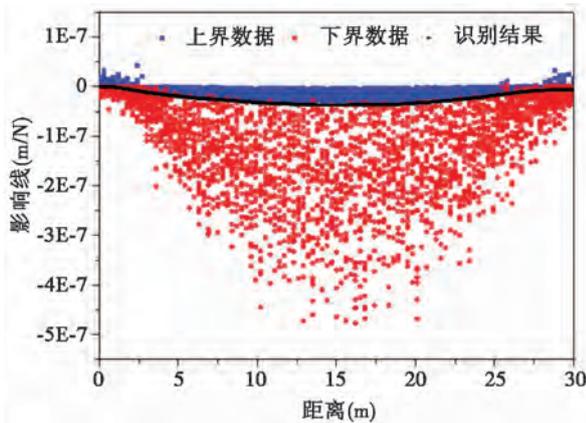


图8 大客车算例的SVM识别影响线  
Fig. 8 The IL identified by SVM of the vehicle

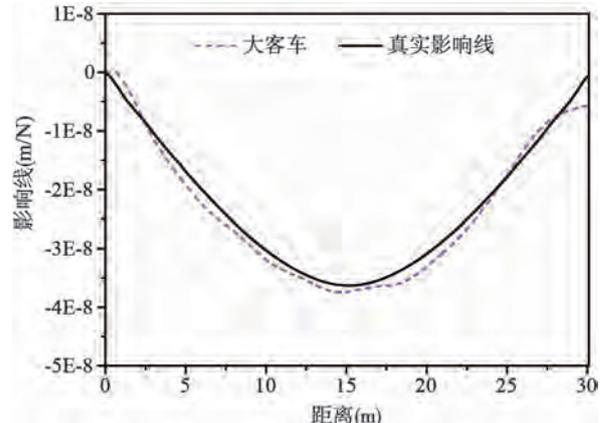


图9 数值模拟的识别影响线结果对比  
Fig. 9 A comparison of static IL and identified result in simulation

另外,结合实际工程测量中不可避免会受到外界误差干扰的事实,在上述数值模拟输出响应中分别添加5%、10%、15%和20%高斯白噪声,进一步研究不同程度的随机噪声污染对SVM识别影响线结果的影响。图11(a)为在各工况动位移响应中添加20%高斯白噪声后,运用支持向量机从300次工况对应的影响线区间中识别的影响线结果,相比图8的区间边界值分布情况,噪声使得原边界曲线出现大幅波动,离散程度增大,识别曲线幅值增大、位置下移;图11(b)则是运用smooth平滑滤波处理响应信号后得到的SVM识别结果,对噪声的干扰具有明显的削弱作用。图12(a)为添加5%、10%、15%和20%噪声后得到的SVM识别曲线,相对于真实值的误差分别为6.67%、10.40%、15.54%和20.83%;噪声的出现的确会大幅降低SVM的识别准确性,但经过smooth函数平滑噪声之后,最终误差分别降低为5.26%、6.58%、7.59%和9.23%,极大的改善了噪声对本方法的不利影响,平滑滤波后的识别曲线绘于图12(b)。

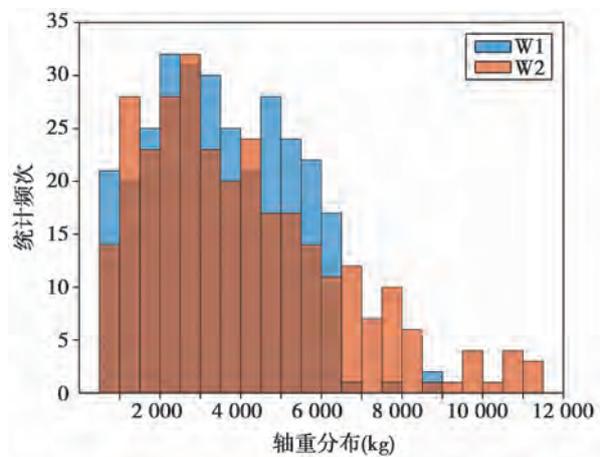


图10 大客车轴重分布统计  
Fig. 10 A histogram for axle weights of the vehicle

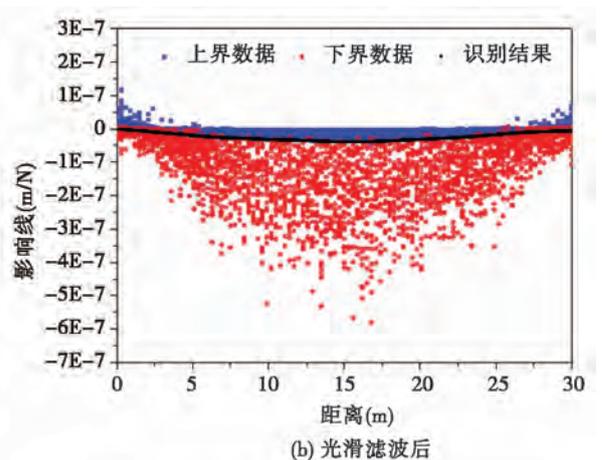
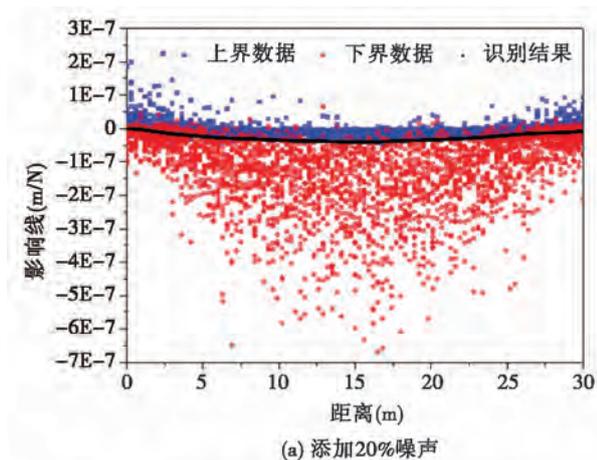


图11 噪声干扰对SVM识别影响线的影响  
Fig. 11 The IL identification by SVM with 20% noise interference

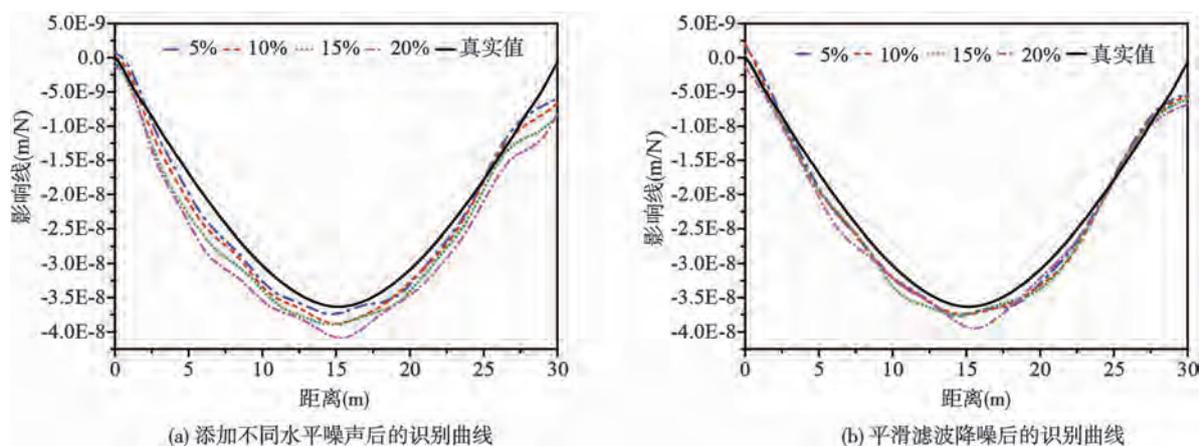


图12 含噪声和降噪后的SVM识别影响线结果

Fig. 12 SVM results before and after denoising

### 3 实验室模型试验

#### 3.1 缩尺车桥模型与试验工况设置

本文采用一简支T梁桥与三轴货车缩尺模型<sup>[38]</sup>进行简化的车桥耦合振动测试,获取可靠的结构动力响应,用以验证所提出的区间分析识别影响线方法。

桥梁模型全长2.38 m,桥面宽1.01 m,横截面由4根T梁组合而成,如图13(a)所示。试验中车辆模型通过加速坡道释放(如图13(b)),以一定速度穿越全桥,用于测量竖向动挠度的激光位移计(Keyence S-025,精度达5 μm)由固定磁性支座垂直安装于主梁2跨中附近(距离桥梁驶入端1.24 m位置处),连同贴于桥面两端的用于测速的电阻式应变片一起接入信号采集仪,并设置信号采样频率为1 000 Hz。车辆的速度由加速坡道上的释放高度决定,控制试验速度为1~4 m/s,由于桥上行车过程中存在车身与导轨、车轮与桥面之间的摩擦力,车速在行驶过程中有所衰减,故取平均速度计算各采样时刻车轴位置。车辆总重与分轴重通过43块配重块的加载数量控制,试验配重工况为M0~M43共44个工况(M0为空车,M43为满载),经过称重得到 $W_1, W_2, W_3$ 三个车轴的轴重区间依次为 $[5.48, 5.60], [4.77, 20.98], [3.30, 16.78]$ (单位:kg),每组配重均进行1 m/s, 2 m/s, 3 m/s, 4 m/s四组不同速度的跑车工况,以增加样本的多样性与随机性。

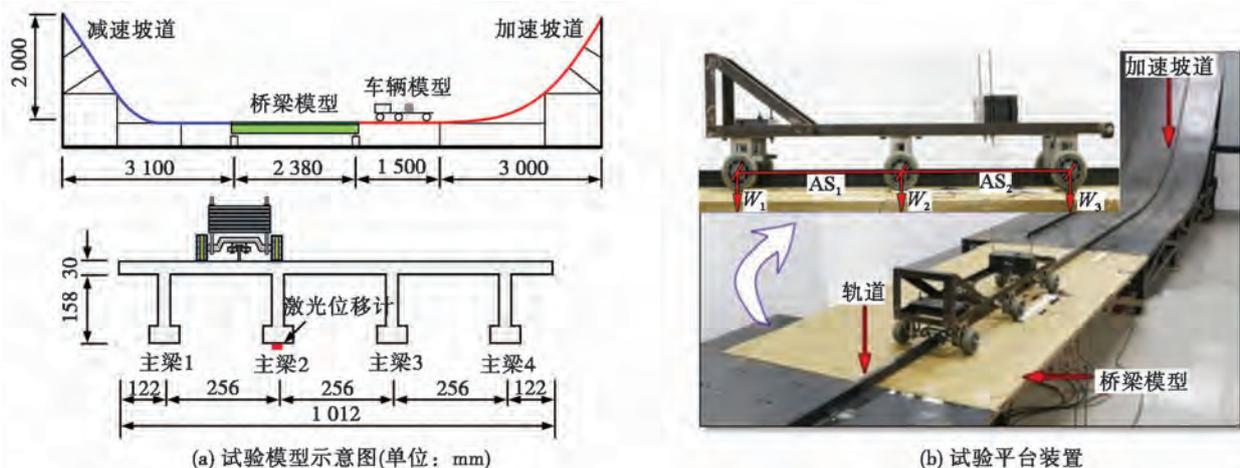


图13 室内车桥耦合试验模型与装置

Fig. 13 The laboratory test model and setup

本实验中激光位移计测量具有自动平均滤波降噪及多点参照特性,采集的信号具有很高的信噪比,信号曲线的局部振动由车桥间动力相互作用引起,与车辆速度、轴重、轴距、阻尼和刚度等因素均相关。图14(a)为不同配重工况下计算的主梁2跨中位移影响线,随着配重增加,模型车的振动冲击减小,曲线的局部振动

有所减弱;图 14(b)为各个速度等级对应的影响线计算结果,可以看出,车辆对桥面的振动冲击与速度之间并非呈简单的线性关系。图 14 中不同工况计算出的多条桥梁动位移影响线形状与趋势基本一致,证实了由实测动位移信号反算结构影响线的算法较为准确,车轴在入桥和出桥时由于坡道水平段与桥面存在微小竖向高差和水平间隙,使得影响线在桥两端位置处出现陡升或陡降的现象。考虑到 M30 工况的影响线结果更平稳,于是对图 14(b)中的 4 条未经滤波的影响线取均值得到一条确定性影响线作为标准曲线,以便与后续 SVM 识别的影响线结果曲线作对比参照。

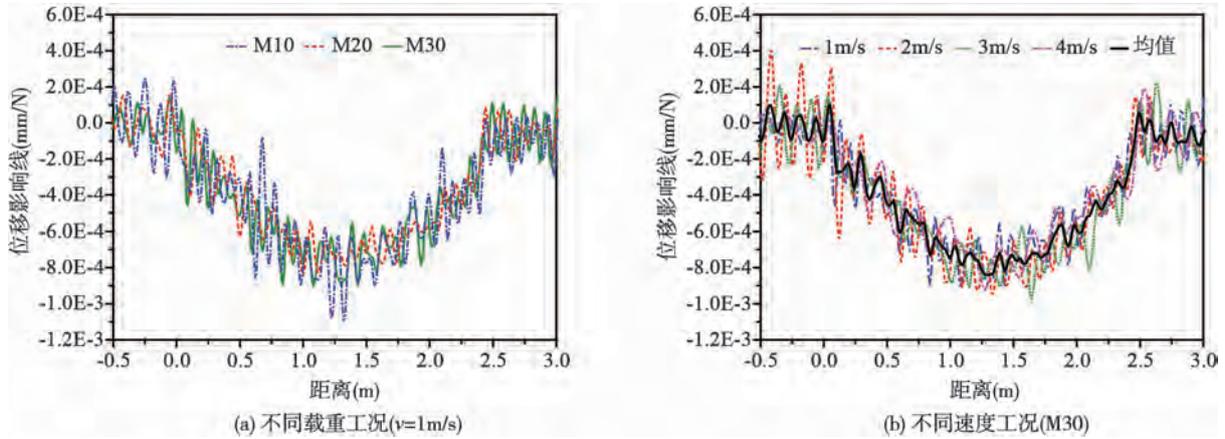


图 14 不同载重和速度下试验动位移影响线

Fig. 14 The calculated ILs under different speed and load cases

### 3.2 实测影响线识别与试验结果分析

在由实测动位移计算区间影响线时,响应中的振动成分会在区间影响线计算结果中放大,使得单个工况的影响线区间上下界数据相互交叉,区分不明朗,不利于后续多工况的识别,故在此采用移动平均滤波方法滤去振动,得到准静态的区间影响线进行分类识别。

同样将每次工况下计算的区间影响线按照横坐标统一原则转换成二维平面上的离散数据点进行 SVM 数据类别训练与预测,图 15 为从多重工况影响线区间中识别的结果,识别曲线位于两类数据的交叉重叠区域,基本能反映影响线的总体形状与变化趋势。图 16 中将实测确定性影响线标准曲线与本次 SVM 算法识别的影响线进行对比,两者吻合很好,除了桥梁起始端和末端由于动力效应滤波误差引起较大偏差外,整体形状走势和桥梁跨中幅值都具有很好的识别效果,由此可以看出本文提出方法在实际应用中的潜力。

结合数值模拟试验,实验室试验识别结果要优于数值模拟结果,主要是由于该区间算法对输入的轴重区间准确性存在依赖,且数值模拟中轴重区间宽度远大于试验车辆模型设置的轴重区间,故误差被放大,引起数值识别结果误差增大。

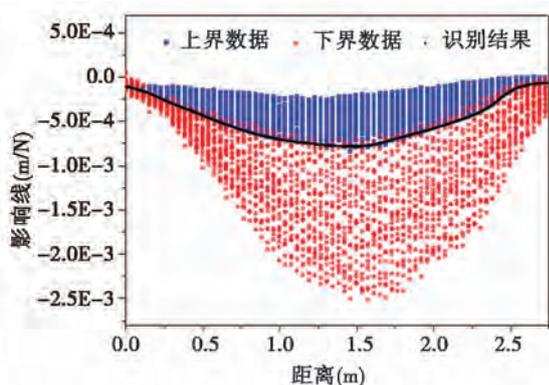


图 15 SVM 识别试验实测动位移影响线  
Fig. 15 The identified IL of test with SVM

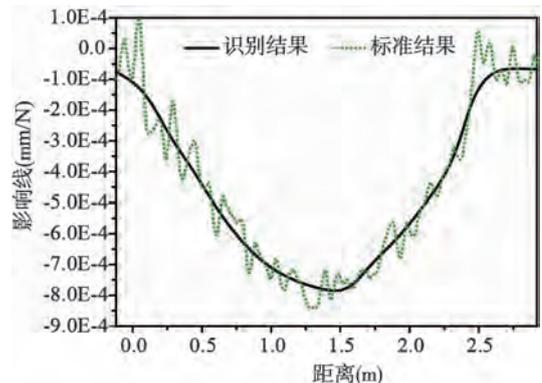


图 16 SVM 影响线识别结果与标准结果对比  
Fig. 16 A comparison of SVM result with standard curve

## 4 结论

本文提出了一种基于大数据与区间仿射算法进行非接触式桥梁结构影响线识别的新方法,综合利用影响线实测理论、区间反演分析、大数据原理、支持向量机分类等技术手段,从不确定的车辆轴重区间输入中识别桥梁结构影响线,并在数值模拟和室内车桥模型试验中获得较好的识别结果,初步验证了该方法的可行性与正确性,但也存在不完善、不全面之处。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)在车辆轴重未知的情况下,本文将车辆轴重估计区间作为输入,建立区间反演模型分析该类参数不确定性反问题,计算的影响线分布区间能包络结构真实影响线,且真实值在估计区间中的相对位置关系会随输入至输出的计算过程传递、保留。

(2)本文采用仿射求逆算法求解区间线性方程组,能有效克服变量间的相关性导致解区间扩张的问题,且经过全局优化遗传算法的验证,证明该区间计算结果具有较好的紧凑性且计算效率较高。

(3)基于最大间隔的支持向量机二分类法能从多工况的区间影响线结果中识别出最优的分界面作为结构影响线,不仅能保留影响线的形状趋势、具有一定的平滑效果,而且识别结果较为准确。经数值分析发现,测量响应中的噪声会降低该方法的识别准确性,但通过滤波处理可以极大地削弱噪声的不利影响。

(4)本文方法的识别结果依赖于轴重区间的估计准确性,一方面可以从车型检测细分类方面着手突破改进,提高输入区间的可信度,从而得到更准确的影响线识别结果;另一方面,严重超载车辆会对大数据的可靠性产生干扰、导致识别误差,应在本文研究的基础上建立数据异常识别机制,自动识别并剔除异常、无效工况,进一步完善该方法,提高其在实际应用中的稳定性。同时,还有待于进行相关实桥测试验证该方法的有效性。

### 参考文献:

- [1] Zolghadri N, Halling M W, Johnson N, et al. Field verification of simplified bridge weigh-in-motion techniques[J]. Journal of Bridge Engineering, 2016, 21(10): 04016063-1-16.
- [2] Catbas F N, Zaurin R, Gul 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, 2011, 17(4): 662-670.
- [3] Chen, ZhiWei, et al. Damage detection in long suspension bridges using stress influence lines[J]. Journal of Bridge Engineering, 2014, (20)3: 05014013-1-11.
- [4] Moses F. Weigh-in-motion system using instrumented bridges[J]. Transportation Engineering Journal, 1979, 105(3): 233-249.
- [5] Znidaric A, Baumgartner W. Bridge weigh-in-motion systems-An overview[C]//Second European Conference on Weigh-In-Motion of Road Vehicles. Held Lisbon, Portugal; Office for Official Publications of the European Communities, 1998: 14-16.
- [6] Eiki Yamaguchi, Shin-ichi Kawamura, Kazushi Matuso1, 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.
- [7] Znidaric A, Lavric I, Kalin J. Extension of bridge WIM systems to slab bridges[C]//Second European Conference on Weigh-In-Motion of Road Vehicles. Held Lisbon, Portugal; Office for Official Publications of the European Communities, 1998: 263-71.
- [8] MCNULTY P, OBRIEN E. J. Testing of bridge weigh-in-motion system in sub-arctic climate[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2003, 31(6): 1-10.
- [9] OBrien E J, Quilligan M J, Karoumi R. Calculating an influence line from direct measurements[J]. Proceedings of the ICE-Bridge Engineering, 2006, 159(1): 31-34.
- [10] Hirachan J, Chajes M. Experimental influence lines for bridge evaluation[J]. Bridge Structures, 2005, 1(4): 405-412.
- [11] Zaurin Ricardo, F Necati Catbas. Structural health monitoring using video stream, influence lines, and statistical analysis[J]. Structural Health Monitoring, 2011, 10(3): 309-332.
- [12] Zhao H, Uddin N, OBrien 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, 2013, 19(3): 04013008-1-16.
- [13] Ieng S S. Bridge influence line estimation for bridge weigh-in-motion system[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2014, 29(1): 06014006-1-4.
- [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): 015019-1-15.
- [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, 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.
- [18] 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.
- [19] Yu Yang, C S Cai, Lu Deng. State-of-the-art review on bridge weigh-in-motion technology[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2016, 19(9): 1514–1530.
- [20] Yu Ling, Tommy H T Chan. Moving force identification based on the frequency-time domain method[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, 261(2): 329–349.
- [21] Rowley C W, Obrien E J, Gonzalez A, et al. Experimental testing of a moving force identification bridge weigh-in-motion algorithm[J]. *Experimental Mechanics*, 2009, 49(5): 743–746.
- [22] Moore R E. Interval analysis[J]. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, N. J. 1966.
- [23] Qiu Z, Ma Y, Wang X. Comparison between non-probabilistic interval analysis method and probabilistic approach in static response problem of structures with uncertain-but-bounded parameters[J]. *Communications in Numerical Methods in Engineering*, 2010, 20(4): 279–290.
- [24] Liu J, Han X, Jiang C, et al. Dynamic load identification for uncertain structures based on interval analysis and regularization method[J]. *International Journal of Computational Methods*, 2011, 8(4): 667–683.
- [25] Jiang C, Han X, Liu G R. Optimization of structures with uncertain constraints based on convex model and satisfaction degree of interval[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2007, 196(49–52): 4791–4800.
- [26] 李炜明, 朱宏平, 夏勇. 基于车辆响应的桥梁结构参数的统计区间估计[J]. *工程力学*, 2008, 25(S2): 254–258.  
LI Weiming, ZHU Hongping, XIA Yong. Statistic interval estimation on bridge parameters based on noised vehicle response[J]. *Engineering Mechanics*, 2008, 25(S2): 254–258. (in Chinese)
- [27] Liu N, Gao W, Song C, et al. Interval dynamic response analysis of vehicle-bridge interaction system with uncertainty[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2013, 332(13): 3218–3231.
- [28] 苏静波, 邵国建. 基于区间分析的工程结构不确定性研究现状与展望[J]. *力学进展*, 2005, 35(3): 338–344.  
SU Jingbo, SHAO Guojian. Current research and prospects on interval analysis in engineering structures uncertainty analysis[J]. *Advances in Mechanics*, 2005, 35(3): 338–344. (in Chinese)
- [29] Stolfi J, De Figueiredo L H. An introduction to affine arithmetic[J]. *Tema Tend. mat. apl. comput*, 2003, 4(3): 297–312.
- [30] 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.
- [31] Amari S, Wu S. Improving support vector machine classifiers by modifying kernel functions[J]. *Neural Networks*, 1999, 12(6): 783–789.
- [32] 萧嵘, 王继成, 张福炎. 支持向量机理论综述[J]. *计算机科学*, 2000, 27(3): 1–3.  
XIAO Rong, WANG Jicheng, ZHANG Fuyan. Survey of support vector machine theory[J]. *Computer Engineering and Application*, 2000, 27(3): 1–3. (in Chinese)
- [33] 赵学风, 段晨东, 刘义艳, 等. 基于小波包变换的支持向量机损伤诊断方法[J]. *振动、测试与诊断*, 2008, 28(2): 104–107.  
ZHAO Xuefeng, DUAN Chendong, LIU Yiyan, et al. Diagnosis of structure damage by support vector machine based on wavelet packet transform[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2008, 28(2): 104–107. (in Chinese)
- [34] GB7031–2005 振动输入路面平度表示方法[S].  
GB7031–2005 Vehicle Vibration Describing Method for Road Surface Irregularity[S]. (in Chinese)
- [35] 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)
- [36] 邓露, 段林利, 何维. 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)
- [37] 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.
- [38] He W, Deng L, Shi H, et al. Novel virtual simply supported beam method for detecting the speed and axles of moving vehicles on bridges[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2016, 22(4): 04016141–1–16.