文章编号：1674－2869(2025)02－0224－07

随机车流荷载下基于正则化的位移影响线识别方法研究

孙 畅[1,2]，咎建航[1,2]，李 斌[3]，黄民水*[1,2]
1. 武汉工程大学土木工程与建筑学院，湖北 武汉 430074；
2. 绿色土木工程材料与结构湖北省工程研究中心，湖北 武汉 430074；
3. 广西壮族自治区贵港市公路发展中心，广西 贵港，537100

摘 要：为贴合桥梁运营的实际交通状况，考虑过桥交通流的随机性，提出一种在随机车流荷载作用下的简支梁桥影响线识别方法。该方法通过建立随机车流荷载模型并获取随机车流下的桥梁响应数据，结合车流参数建立影响线识别的数学模型，将随机车流荷载转化为车轴响应叠加，进而采用稀疏正则化方法识别桥梁影响线。通过20 m简支梁桥的数值模型，提取桥梁在4种车速及随机车流荷载下的跨中位移响应，基于经验模态分解剔除车辆动力响应并采用正则化提取桥梁影响线，验证方法的可行性与有效性，利用全局误差和峰值相对误差定量评价其识别效果。研究结果表明：提出的方法能够有效去除车辆荷载产生的动态波动，在单辆车及随机车流荷载下均能准确识别出简支梁桥的位移影响线，并具有较高的识别精度。单辆车过桥时，车速为72 km/h的识别误差最大，全局误差和峰值相对误差分别为4.959%和9.897%；随机车流荷载下识别影响线的全局误差为4.53%，峰值相对误差7.89%。

关键词：随机车流；影响线识别；车致响应；稀疏正则化
中图分类号：U443 **文献标识码**：A **DOI**：10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202405001

Regularization-based identification method for displacement influence lines under random traffic loads

SUN Chang[1,2], *ZAN Jianhang*[1,2], *LI Bin*[3], *HUANG Minshui*[*1,2]
1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;
2. Hubei Provincial Engineering Research Center for Green Civil Engineering Materials and Structures, Wuhan 430074, China
3. Guangxi Highway Development Center, Guigang 537100, China

Abstract: To fit the actual traffic conditions of bridge in operation, considering the randomness of traffic flow crossing the bridge, a method was proposed to identify the influence line of a simply supported beam bridge under random traffic loads. By establishing a model for random traffic loads and collecting bridge response data under such conditions, a mathematical model for influence line identification was developed based on traffic parameters. This model transforms random traffic loads into axle response superposition and utilizes a sparse regularization method to identify the bridge influence line. Using a numerical model of a 20 m simply supported beam bridge, midspan displacement responses under four different vehicle speeds and random traffic loads were extracted. Employing empirical mode decomposition to remove vehicle dynamic response and regularization to extract the bridge influence line, the feasibility and effectiveness of the method were

收稿日期：2024-05-08
基金项目：贵港市自筹经费科研项目(贵路养函[2023]40号)
作者简介：孙 畅，硕士研究生。Email：905964766@qq.com
***通信作者**：黄民水，博士，教授。Email：huangminshui@tsinghua.org.cn
引文格式：孙畅，咎建航，李斌，等. 随机车流荷载下基于正则化的位移影响线识别方法研究[J]. 武汉工程大学学报，2025，47(2)：224-230.

confirmed. The identification effects were quantitatively evaluated by using global error and peak relative error. Results demonstrated that the proposed method effectively eliminates dynamic fluctuations due to vehicle loads, accurately identifies the displacement influence line of simply supported beam bridges under both single vehicle and random traffic load scenarios, and exhibits high recognition accuracy. Notably, the largest identification error occurred when a single vehicle travelled at a speed of 72 km/h, with global and peak relative errors of 4.959% and 9.897% respectively. Under random traffic load conditions, the global error in identifying the influence line was 4.53%, with a peak relative error of 7.89%.

Keywords: random traffic load; influence line identification; vehicle-induced response; sparse regularization

桥梁影响线作为描述桥梁在单位移动荷载作用下桥梁截面响应变化的曲线[1]，能综合反映桥梁的边界条件和截面刚度，因此被广泛应用于桥梁模型修正[2]、损伤识别[3-4]和状态评估[5-6]等领域，而准确识别桥梁影响线是上述研究工作的基础和前提。国内外学者针对影响线识别问题进行了一系列研究，通过物理方法或数学手段实现影响线拟合。例如，Wang等[7]采用分段多项式和正弦曲线分离了多轴车辆的动态响应和准静态响应，并通过最小二乘法拟合得到桥梁影响线。陈志为等[8]构建了影响线的数学模型，并利用L_2正则化结合B样条基函数字典重构了桥梁的准静态影响线。Ieng[9]结合桥梁动态称重（bridge weigh-in-motion，BWIM）系统与最大似然估计法识别桥梁影响线，并证实了该方法的可行性。尽管现有方法取得了显著成果，但仍在实际应用中面临一些局限性：（1）实测响应的获取多依赖于静力测量，费时且需中断交通；（2）现有的响应计算往往忽略了车辆的动力效应，仅基于准静态响应建立的识别模型可能会降低识别的准确性。因此，许多学者通过处理桥梁结构的动力响应，去除动态波动并利用准静态响应计算影响线，以获得更准确的响应数据。Pimentel等[10]使用低通滤波器去除高于桥梁基频的频率分量，成功应用于铁路BWIM系统。Wu等[11]采用经验模态分解（empirical mode decomposition，EMD）处理桥梁响应数据，并结合B样条正则化方法，在未知动力特性条件下实现了影响线识别。周宇等[12]利用EMD与Tikhonov正则化将车辆效应转化为单位荷载，准确地识别出简支梁与连续梁桥的应变影响线。然而，这些方法在采集响应数据时仍需中断交通，与桥梁的实际运营状况存在差异，且未充分考虑交通流的随机性。

因此，在考虑实际交通流的情况下，本文提出一种基于正则化的位移影响线识别方法。首先建立随机车流模型并获取随机车流下的桥梁响应数据，将随机车流荷载转化为车轴响应的叠加，再通过EMD剔除响应中的动态部分，最后采用稀疏正则化的方法求解影响线。通过简支梁桥数值算例，计算不同交通流下桥梁的跨中位移时程响应，进而验证所提方法识别影响线的有效性。

1　随机车流荷载模型建立

桥梁上行驶的车辆类型众多，且车辆运行具有显著的随机性，会受到多种因素（包括地理位置、气候条件以及意外事件等）的综合影响。通过分析实际观测到的过桥交通流和BWIM系统所收集的车辆数据并参考文献[14]报道的研究成果发现，虽然车流具有随机性，但其特征参数仍然遵循特定的分布规律和概率属性。因此，本研究采用蒙特卡罗抽样方法生成了大量随机车流荷载样本，用以模拟实际交通流中作用于桥梁的车辆荷载。

1.1　车流特征参数选取

（1）车型和车道。依据车辆分类准则以及采集的随机车流荷载样本，将过桥车辆归纳为6种典型车型[14]，各车型及车辆行驶车道的统计数据如表1所示，均采用均匀分布函数模拟生成。

表1　车型和车道统计数据表

Tab. 1　Model and lane statistics sheet

车型	各车型统计占比 / %	车道分配比例 / %	
		超车道	行车道
双轴轿车	84.61	61.57	38.43
双轴货车	8.31	14.72	85.28
三轴货车	1.46	9.02	92.78
四轴货车	3.18	4.38	94.12
五轴货车	0.31	8.51	89.63
六轴货车	2.13	2.95	94.49

（2）车距和车重。车辆在桥上的间距是衡量交通流密度和车流长度的重要指标，且车距会随时间发生变化。根据实际交通状况，可将交通流分为常规、稀疏和密集3个等级。在常规车流条件下，桥梁上的车辆间距遵循对数正态分布的模式；

在稀疏车流条件下较符合威布尔分布；而在密集车流条件下，桥梁上的车辆间距更贴近伽马分布。各概率密度曲线如图1所示。基于3种车流状况推导车距分布参数，并生成车距样本。而车辆质量呈现多峰分布的特性，采用高斯混合模型模拟车重样本。

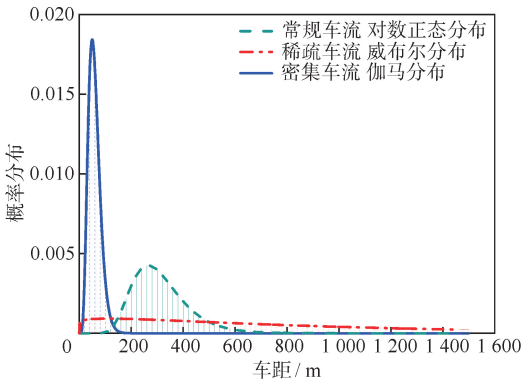

图1 车辆间距概率密度曲线

Fig. 1 Probability density curves of vehicle spacing

(3)车速。车辆的行驶速度受其车型和载重的影响显著，且不同的交通状况也会对车速产生影响。通过对BWIM系统的监测数据进行统计分析，发现各车型的车速大致遵循正态分布的规律。每种车型的车速参数分布汇总如表2所示。

表2 车速参数分布

Tab. 2 Vehicle speed statistical parameter

车型	车速均值 /（km/h）	标准差 /（km/h）
双轴轿车	89.1	14.4
双轴货车	75.2	11.8
三轴货车	64.3	6.76
四轴货车	68.2	10.2
五轴货车	64.2	20.5
六轴货车	68.0	9.7

1.2 随机车流生成

综合考虑车辆类型、车道、车距、车重以及车速的随机参数特性后，进一步构建了模拟随机车流荷载的模型，流程如图2所示。

1.3 随机车流荷载下的动力响应分析

当车辆在桥上行驶时，桥梁结构会产生振动响应，并影响车辆的行驶状态，形成复杂的车桥耦合振动系统。影响此系统的因素包括车辆参数、桥梁的动力学属性、路面粗糙度以及环境条件等。因此，人们已发展多种分析模型来研究车桥耦合系统，在各模型中桥梁均被简化为弹性连续体。而车辆荷载则通过多种复杂度的模型进行表示，车辆荷载模型从最初的集中力，到考虑车辆惯性的移动质量模型，再提出了由弹簧和阻尼元件构成的复杂移动弹簧-质量块模型。本文采用移动弹簧-质量块模型近似计算桥梁的位移响应，具体模型示意如图3所示，图3中$F(t)$表示车辆荷载，v为车辆移动速度，k为弹簧刚度。

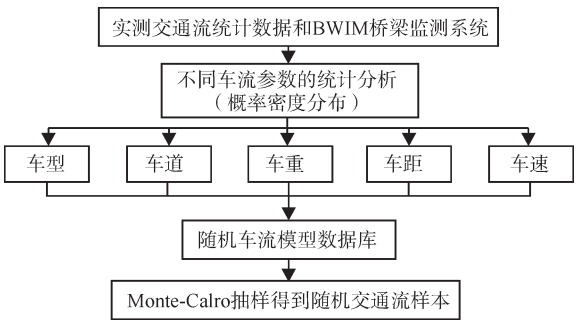

图2 随机车流模型建立流程

Fig. 2 Building process of random traffic load model

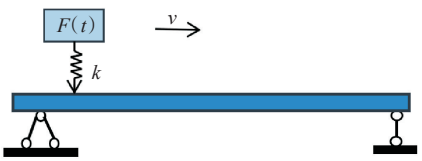

图3 移动弹簧-质量块模型

Fig. 3 Moving spring-mass block model

梁桥的运动微分方程可表示为：

$$EI\frac{\partial^4 u(x,t)}{\partial x^4}+\bar{m}\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2}+c\frac{\partial u(x,t)}{\partial x}=\delta(x-vt)F(t) \tag{1}$$

式(1)中：E为弹性模量；I为惯性矩；$u(x,t)$为t时刻截面x处的位移响应；$\bar{m}$为桥梁单位长度的质量；c为桥梁阻尼；δ为表示移动荷载的Dirac函数，其表达式与取值如式(2)所示：

$$\delta(x-vt)=\begin{cases}1, x=vt\\0, x\neq vt\end{cases} \tag{2}$$

选用振型分解法对式(1)进行求解，将简支梁结构进行坐标变换，变为模态坐标：

$$u(x,t)=\sum_{i=1}^{n}q_i(t)\phi_i(x) \tag{3}$$

式(3)中：$q_i(t)$为第i阶振型所对应的振型坐标，$\phi_i(x)$为第i阶振型在x位置处的位移。将式(3)代入式(1)，可得

$$EI\sum_{i=1}^{n}\frac{\mathrm{d}^4\phi_i(x)}{\mathrm{d}x^4}q_i(t)+\sum_{i=1}^{n}\bar{m}\phi_i(x)\ddot{q}_i(t)+\sum_{i=1}^{n}c\phi_i(x)\dot{q}_i(t)=\delta(x-vt)F(t) \tag{4}$$

$$EI\frac{\mathrm{d}^4\phi_i(x)}{\mathrm{d}x^4}=\bar{m}\omega_i^2\phi_i(x) \tag{5}$$

式(5)中，ω_i为结构的第i阶频率。根据振型的正

交性，当$i \neq n$时，$\int_0^L \phi_i(x)\phi_n(x)\mathrm{d}x = 0$。在等式(4)两边同时乘以$\phi_n(x)$，联立式(4)和式(5)并沿梁长积分可得简支梁桥结构的位移响应解如式(6)所示：

$$\begin{aligned}&\bar{m}\omega_n^2 q_n(t)\int_0^L \phi_n^2(x)\mathrm{d}x + \bar{m}\ddot{q}_n(t)\int_0^L \phi_n^2(x)\mathrm{d}x + \\ &c\dot{q}_n(t)\int_0^L \phi_n^2(x)\mathrm{d}x = \phi_n(vt)F(t)\end{aligned} \tag{6}$$

2　随机车流荷载下基于正则化的影响线识别方法

2.1　基于EMD的车辆动力响应剔除

Huang等[15]提出，信号本质可视为多个固有模态函数(intrinsic mode function，IMF)的叠加，而EMD作为一种自适应的信号处理技术，能够将含有显著噪声干扰的时程响应信号分解为多个IMF分量和1个残差项，再利用傅里叶变换将这些时域信号转换到频域，以桥梁结构的基频作为判定标准，将各IMF中主频率超过该阈值的信号识别为动态扰动，并从桥梁响应中剔除，从而获得结构的准静态成分。采用EMD处理桥梁位移响应数据的具体步骤如下：

(1)将原始时程响应信号$u(t)$作为输入，并识别其局部极大值与极小值点；通过三次样条差值法对极值点进行拟合，进而生成上包络线$\max(t)$和下包络线$\min(t)$。

(2)计算上述包络线在各时间点的局部均值$s(t)$，将原始响应信号减去局部均值得到第一个分量函数，即$h_1(t) = u(t) - s(t)$。

(3)对新序列$h_n(t)$进行评估，确定其是否满足IMF的预设标准(低于基频阈值)。若满足条件，则将其作为新的IMF分量保留；否则将$x(t)$更新为$h_n(t)$并重复前述步骤直至满足标准。

(4)确定首个$\mathrm{IMF}_1(t)$后，计算相应的残差$r_1(t) = u(t) - \mathrm{IMF}_1(t)$，并将此残差作为新的输入信号继续上述分解过程，以确定$\mathrm{IMF}_2(t)$，依次类推。

(5)对分解得到的IMF分量进行快速傅里叶变换，获得其主频率。当IMF主频率低于结构基频时，分解过程停止。最终，通过重构所有满足条件的IMF分量，得到桥梁的准静态时程响应$[u(t)]$：

$$u(t) = \sum_{i=1}^{k}\mathrm{IMF}_i(t) + r_n(t) \tag{7}$$

2.2　基于正则化的影响线识别模型

当车辆匀速通过桥梁时，可将荷载简化为各车轴垂直力的集合。桥梁响应可视为这些垂直力叠加的累积效果，即：

$$\boldsymbol{R}_s(x) = \sum_{i=1}^{N} A(i) \times \boldsymbol{\Phi}\left[x - D(i)\right] \tag{8}$$

式(8)中：$\boldsymbol{R}_s(x)$表示首个车轴荷载施加于桥梁的x位置时传感器截面的位移响应；N代表车辆的总轴数；$A(i)$代表第i个车轴的荷重；$\boldsymbol{\Phi}(x)$表示单位竖向荷载作用下的桥梁影响线；$D(i)$表示第i个车轴到第1个车轴的距离。

当桥梁上有M个移动车辆通过时，式(8)可写为

$$\boldsymbol{R}_s(x) = \sum_{j=1}^{M}\sum_{i=1}^{N_j} A(i) \times \boldsymbol{\Phi}\left[x - D(i)\right] \tag{9}$$

因此，如果已知车辆荷载的移动速度，则实测结构响应$\boldsymbol{R}_s(x)$可通过$x = vt$转换为$\boldsymbol{R}_s(t)$，并根据采样频率进行离散化处理，即

$$\boldsymbol{R}_s = \boldsymbol{L}\boldsymbol{\Phi} \tag{10}$$

式(10)中，$\boldsymbol{L}$为依据车辆的轴重、轴距等参数构建的车辆参数矩阵，故式(10)可表示为：

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{R}_s(1)\\ \boldsymbol{R}_s(2)\\ \vdots\\ \boldsymbol{R}_s(p)\end{bmatrix}_{p\times 1} = \begin{bmatrix} A_{1,1+D(1)} & 0 & \cdots & A_{2,2+D(1)} & \cdots & \cdots & A_{i,i+D(1)} & 0 & \cdots & 0 & \cdots \\ 0 & A_{1,1+D(2)} & \cdots & \cdots & A_{2,2+D(2)} & \cdots & \cdots & A_{i,i+D(2)} & \cdots & \cdots & \cdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \ddots \\ 0 & 0 & \cdots & A_{1,1+D(N)} & \cdots & \cdots & A_{2,2+D(N)} & \cdots & \cdots & A_{i,i+D(N)} & \cdots \end{bmatrix}_{p\times q}\begin{bmatrix}\boldsymbol{\Phi}(1)\\ \boldsymbol{\Phi}(2)\\ \vdots\\ \boldsymbol{\Phi}(q)\end{bmatrix}_{q\times 1} \tag{11}$$

式(11)中：p为桥梁的采样点数；q为影响线因子的个数；$A_{i,i+D(1)}$为第i辆车中第1个车轴的轴重。

对于已标定的车辆，其荷载矩阵是预先确定的，结构响应则可以通过部署传感器实时测得。然而，在实际测量得到的结构响应中，除了桥梁的准静态响应外，还包含了由车辆的动力冲击以及测量过程中的误差等因素引起的动态波动。因此，实测结构响应由2部分组成：

$$\boldsymbol{R}_s = \boldsymbol{L}\boldsymbol{\Phi} + \boldsymbol{e} \tag{12}$$

式(12)中，$\boldsymbol{e}$为由于车辆效应以及环境噪声或测量误差引起的动态波动。

车辆荷载矩阵$\boldsymbol{L}$和实测响应$\boldsymbol{R}_s$均为已知，而误差项$\boldsymbol{e}$的存在引入了不确定性，求解影响线系数向量$\boldsymbol{\Phi}$会面临不适定问题。针对此类问题的求

解，目前常用方法有最小二乘法与正则化方法等。本文选用稀疏正则化方法求解影响线，相应的数学模型表示如下：

$$\boldsymbol{\Phi} = \operatorname{argmin}\left\|\boldsymbol{R}_{\mathrm{m}} - \boldsymbol{L}\boldsymbol{\Phi}\right\|_2^2 + \lambda\left\|\boldsymbol{T}\boldsymbol{\Phi}\right\|_1 \quad (13)$$

式(13)中，$\operatorname{argmin}\left\|\boldsymbol{R}_{\mathrm{m}} - \boldsymbol{L}\boldsymbol{\Phi}\right\|_2^2$代表误差项平方和最小时影响线向量$\boldsymbol{\Phi}$的取值；$\lambda$为正则化参数，用于控制模型的复杂度；罚函数选用$\left\|\boldsymbol{T}\boldsymbol{\Phi}\right\|_1$，以获得在小范围内波动且具有平滑滤波特性的近似解。此外，采用正则化曲线法确定正则化参数，平衡误差项的平方和与模型复杂度之间的关系λ。

本文选取的正则化矩阵$\boldsymbol{T}$定义如下：

$$\boldsymbol{T} = \begin{pmatrix} 1 & -2 & 1 & & \\ & 1 & -2 & 1 & \\ & & \ddots & \ddots & \ddots \\ & & & 1 & -2 & 1 \end{pmatrix}_{(n-2)\times n} \quad (14)$$

2.3 影响线识别步骤

为了实现随机车流下桥梁的影响线识别，根据前述理论基础，提出了一种考虑随机车流荷载的正则化影响线识别方法，具体步骤如下：

(1)根据桥梁交通流参数，构建随机车流荷载模型，通过蒙特卡罗抽样在给定的采样时段内抽取车辆信息，形成车辆信息矩阵，并采用Newmark-β法计算车流通过时桥梁的动态响应。

(2)为提高影响线识别的准确性，采用EMD对桥梁时程响应数据进行预处理，剔除随机车流过桥时引起的动态响应，从而提取桥梁的静态响应分量。

(3)以随机车流荷载模型中生成的车辆信息矩阵作为荷载输入，将实测的多轴车辆荷载等效转换为单位集中力，结合稀疏正则化方法求解桥梁影响线的精确解。

3 初步验证：基于单辆车过桥的位移影响线识别

3.1 简支梁数值模型

为验证本文方法的有效性，通过一个简支梁桥数值算例进行测试，桥梁算例模型如图4所示。跨径为20 m，沿桥长共划分为200个单元，弹性模量E为3.96×10^{10} N/m^2，惯性矩I=1.5×10^2 m^4，每1 m梁的质量为2 800 kg，选用弹簧-质量块模型进行模拟。

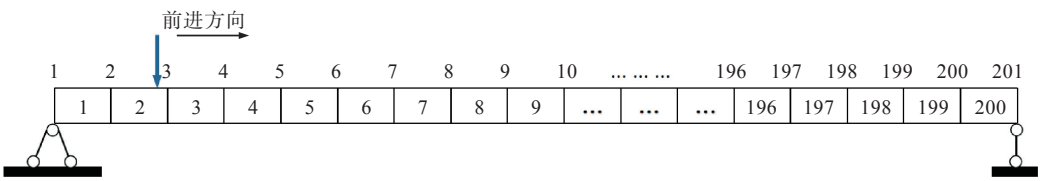

图4 简支梁桥算例模型

Fig. 4 Simple supported beam bridge example model

3.2 不同行车工况的影响线识别

考虑单辆车在不同车速下通过简支梁桥的行车情况，提取桥梁跨中位置的位移时程响应。选用双轴车作为研究对象，前轴和后轴质量均为m=1 650 kg，弹簧刚度k=5×10^{10} N/m。模拟车辆分别以0.01、36、54、72 km/h的速度通过桥梁，其中以车速0.01 km/h的时程响应作为桥梁的静态响应。以车辆与桥梁的接触位置为横坐标，各车速下桥梁的跨中位移时程曲线如图5所示。

利用图5中各车速下得到的跨中位移响应数据构造向量$\boldsymbol{R}_{\mathrm{m}}$，并结合车辆荷载矩阵$\boldsymbol{L}$，分别以36、54 km/h的车速为例的影响线识别结果如图6所示。

由图6可以看出，所提出的基于正则化的梁桥影响线识别方法在单辆车通过桥梁时具有良好的适用性，可有效识别不同车速下的简支梁的跨中位移影响线，并剔除由于车辆产生的动态响应，与基准影响线吻合较好。为进一步定量评价本文所提方法的识别效果，定义2个误差指标：全局误差(E_{G})与峰值相对误差(E_{PRE})，如式(15)和式(16)所示。

$$E_{\mathrm{G}} = \frac{\left\|\boldsymbol{\Phi} - \boldsymbol{\Phi}_B\right\|_1}{\left\|\boldsymbol{\Phi}_B\right\|_1} \times 100\% \quad (15)$$

$$E_{\mathrm{PRE}} = \frac{\left\|\boldsymbol{\Phi} - \boldsymbol{\Phi}_B\right\|_\infty}{\left\|\boldsymbol{\Phi}_B\right\|_\infty} \times 100\% \quad (16)$$

式(15)和式(16)中，$\boldsymbol{\Phi}$和$\boldsymbol{\Phi}_B$分别表示识别影响线与基准影响线向量。

计算得到各车速下的影响线识别结果，如图7所示。各车速下的影响线峰值均与基准影响线峰值接近，且在跨中位置附近的影响线识别效果较好，而两端与基准影响线的一致性较差。识别误

差列于表3中，计算结果表明本文所提方法的影响线识别效果随车辆速度的提升而有所下降，当车速为72 km/h时误差最大，此时全局误差为4.959%，峰值相对误差达到了9.897%。

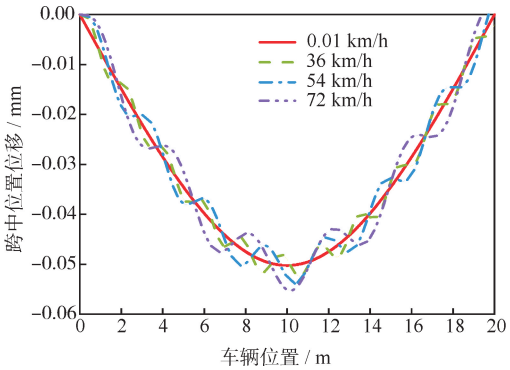

图5　各车速下简支梁桥的跨中位移时程曲线

Fig. 5　The time history curve of mid-span displacement of simply-supported beam bridge at different speeds

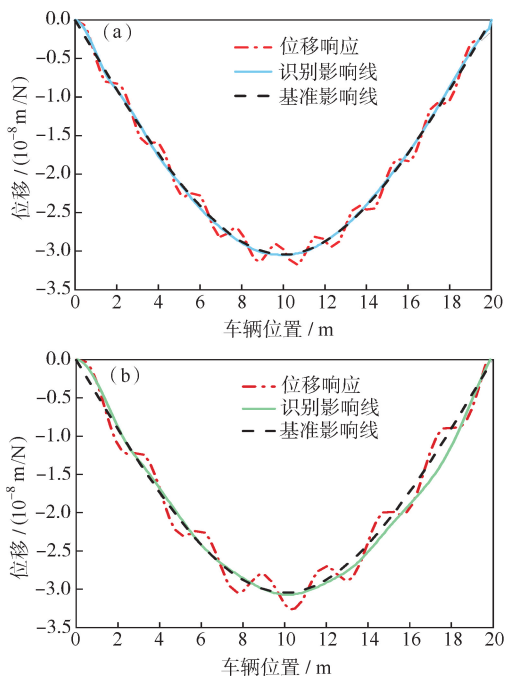

图6　各车速下的影响线识别结果：（a）36 km/h，（b）54 km/h

Fig. 6　Identification results of influence lines at each speed：（a）36 km/h，（b）54 km/h

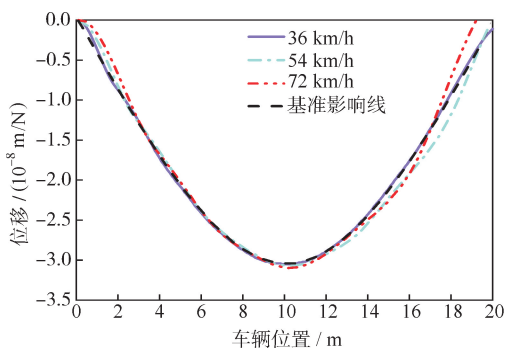

图7　影响线识别结果

Fig. 7　Influence line identification results

表3　影响线识别误差

Tab. 3　Influence line identification errors

车速 /（km/h）	全局误差 / %	峰值相对误差 / %
0.01	/	/
36	1.029	2.913
54	3.943	6.629
72	4.959	9.897

4　随机车流荷载下的桥梁位移影响线识别

采用蒙特卡罗抽样方法从随机车流模型中抽取车流荷载参数，验证本文方法在随机车流荷载下的有效性。假定车流数量为2，从随机车流模型中抽取车辆参数进行动力响应计算，生成的随机车流荷载参数如表4所示。将车流荷载从首轴上桥至尾轴下桥时间段内的跨中位移时程响应进行叠加，如图8所示。

表4　车流荷载参数

Tab. 4　Traffic flow load parameters

车辆编号	车型	车重 / kg	车距 / m	车速 /（km/h）
1	双轴轿车	2 679	4.0	91.6
2	双轴轿车	1 531	3.6	89.1

以图8中叠加后的车流响应数据作为输入，通过EMD剔除车辆造成的动态响应，再采用正则化方法进行影响线识别，识别结果如图9所示。

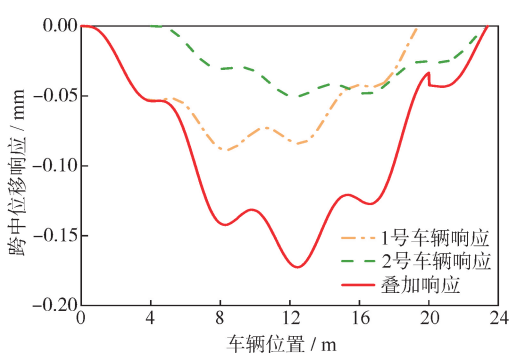

图8　随机车流响应叠加图

Fig. 8　Random traffic response superposition

由图9可以看出，本文提出的基于正则化的位移影响线识别方法可实现随机车流荷载下简支梁桥跨中影响线的识别，并与基准影响线吻合较好。影响线识别的全局误差 E_G 为4.53%，峰值相对误差 E_{PRE} 仅7.89%。综上，说明本文方法在随机车流通过桥梁时仍能实现精准的影响线识别。

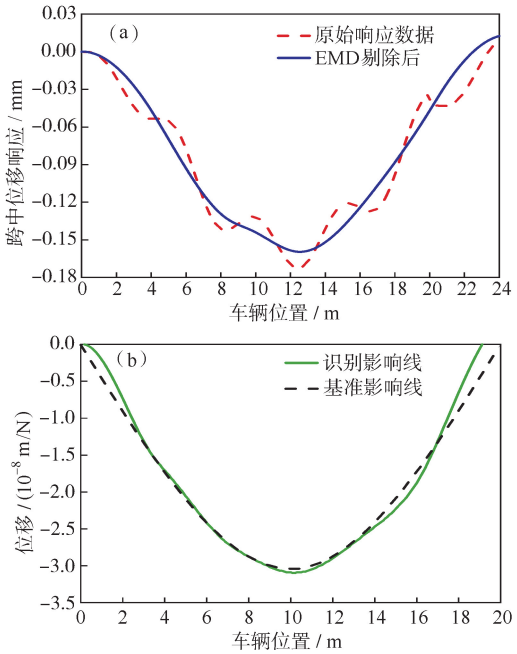

图9 随机车流荷载下的影响线识别结果：(a)EMD剔除车辆动态响应，(b)识别结果

Fig. 9 Identification results of influence lines under random traffic load:(a) EMD eliminates vehicle dynamic response, (b) identification results

5 结 论

本文为研究随机车流荷载下的影响线识别方法，运用EMD先剔除车流产生的部分动力响应，再结合随机车流的车辆信息矩阵，求得桥梁结构影响线的稳定解。利用模拟随机车流行驶通过简支梁桥的数值算例，验证了在随机车流荷载作用下基于正则化的桥梁位移影响线识别方法的可行性、适用性与精确性，主要结论如下：

(1)随机车流荷载下的桥梁响应由于车辆影响存在较明显的动态波动，为影响线识别提供了难度，本文利用车辆信息矩阵与正则化方法中的荷载矩阵相结合，将作用于桥梁的多轴车辆荷载转化为单位集中力，简化桥梁影响线方程的求解过程。

(2)通过简支梁桥数值算例验证了本文所提方法的有效性。在单辆车过桥情况下，位移影响线在跨中位置附近的识别效果较好，而两端的一致性较差，且随车辆移动速度增大而降低，在最大车速为72 km/h时的影响线识别误差最大，全局误差为4.959%，峰值相对误差为9.897%。

(3)在随机车流模拟情况下，本文所提方法仍能有效识别简支梁桥的位移影响线，并与基准影响线吻合较好，全局误差为4.53%，峰值相对误差达到7.89%。因此，本文方法为复杂车流情况下的影响线识别应用奠定了一定的基础。

参考文献

[1] LIN S W, DU Y L, YI T H, et al. Influence lines-based model updating of suspension bridges considering boundary conditions [J]. Advances in Structural Engineering, 2023, 26(2): 316-328.

[2] 陈堃,卢海林,杨宏印,等.基于动静载试验的连续刚构桥梁模型修正[J].武汉工程大学学报,2019,41(2):150-154.

[3] 黄民水,雷勇志.基于模态参数的结构损伤识别应用综述[J].武汉工程大学学报,2021,43(4):417-427.

[4] 周宇,狄生奎,李喜梅,等.基于弹性约束梁应变影响线曲率的桥梁结构损伤识别[J].应用基础与工程科学学报,2021,29(4):901-914.

[5] SUN Z, SIRINGORINGO D M, FUJINO Y. Load-carrying capacity evaluation of girder bridge using moving vehicle [J]. Engineering Structures, 2021, 229: 111645.

[6] ZHENG X, YI T H, ZHONG J W, et al. Rapid evaluation of load-carrying capacity of long-span bridges using limited testing vehicles [J]. Journal of Bridge Engineering, 2022, 27(4): 04022008.

[7] WANG N B, HE L X, REN W X, et al. Extraction of influence line through a fitting method from bridge dynamic response induced by a passing vehicle [J]. Engineering Structures, 2017, 151: 648-664.

[8] 陈志为,杨维彪,程棋锋,等.基于正则化与B样条曲线的桥梁影响线识别方法[J].中国公路学报,2019,32(3):101-108.

[9] IENG S S. Bridge influence line estimation for bridge weigh-in-motion system [J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2015, 29(1): 06014006.

[10] PIMENTEL R, RIBEIRO D, MATOS L, et al. Bridge weigh-in-motion system for the identification of train loads using fiber-optic technology [J]. Structures, 2021, 30: 1056-1070.

[11] WU B T, WU G, YANG C Q. Parametric study of a rapid bridge assessment method using distributed macro-strain influence envelope line [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 120: 642-663.

[12] 周宇,尚稳齐,吴德义,等.基于经验模态分解与Tikhonov正则化的梁桥影响线识别方法[J].振动工程学报,2025,38(1):144-153.

[13] 长安大学.一种基于实测数据的公路桥梁随机车流模拟方法:201510075950.5[P].2015-09-23.

[14] 陈水生,赵辉,李锦华,等.随机车流作用的公路斜拉桥振动响应分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2022,38(1):84-94.

[15] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. Proceedings of the Royal Society A, 1998, 454(1971): 903-995.

[16] 彭真.基于位移影响线的桥梁损伤识别及传感器优化布置研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.

本文编辑:苗 变