

文章编号:1001-7372(2019)03-0101-08

基于正则化与 B 样条曲线的桥梁 影响线识别方法

陈志为^{1,2}, 杨维彪^{1,3}, 程棋锋^{4,5}, 高 婧^{1,2}

- (1. 厦门大学 建筑与土木工程学院, 福建 厦门 361005; 2. 厦门大学 厦门市交通基础设施智能管养工程技术研究中心, 福建 厦门 361005; 3. 中建海峡建设发展有限公司, 福建 福州 350015;
4. 合诚工程咨询集团股份有限公司, 福建 厦门 361006;
5. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要:为了快速评估既有桥梁的安全性,研究了基于多源实测信息快速准确识别桥梁影响线的方法。首先利用桥梁动力响应及车辆移动的实测信息,建立影响线识别的数学模型。在模型中引入 Tikhonov 正则化方法以解决病态矩阵求解问题,通过设置罚函数项以取得较光滑并贴近真实的影响线。然后通过基函数扩展法重构影响线,将其表示为一系列三次 B 样条基函数的线性组合,从而将问题从识别众多影响线因子简化为识别少量基函数权重系数。为了验证上述方法的可行性,先在实验室模拟钢制试验小车在钢筋混凝土三跨连续梁模型上移动的过程。基于实测布置于梁底的多测点挠度和应变响应时程以及相应的试验车信息,可识别出不同位置测点的挠度和应变影响线。试验结果表明无论是影响线的总体形状还是局部峰值,识别解与基准解均能较好地吻合。该方法还被进一步应用到一座简支现浇预应力混凝土箱梁桥。该试验通过实测检测车过桥期间的桥梁跨中截面若干测点的动应变、动挠度以及车辆重力、实时位置等信息,准确识别了对应于不同车道的挠度和应变影响线。通过对比桥梁静载实测和影响线虚拟加载结果,发现两者偏差绝对值在 5% 以内。在一定程度上表明了该影响线识别方法具有较高精度,并具备工程应用的良好潜力。

关键词:桥梁工程;影响线识别;Tikhonov 正则化;桥梁影响线;B 样条曲线;试验验证

中图分类号:U443 文献标志码:A DOI:10.19721/j.cnki.1001-7372.2019.03.011

Bridge Influence Line Identification Method Based on Regularization and B-spline Curves

CHEN Zhi-wei^{1,2}, YANG Wei-biao^{1,3}, CHENG Qi-feng^{4,5}, GAO Jing^{1,2}

- (1. School of Architecture and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China;
2. Xiamen Engineering Technology Center for Intelligent Maintenance of Infrastructures,
Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China; 3. CSCEC Strait Construction and
Development Co., Ltd., Fuzhou 350015, Fujian, China; 4. Holsin Engineering
Consulting Group Co., Ltd., Xiamen 361006, Fujian, China; 5. School of
Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, Fujian, China)

Abstract: To evaluate the safety of existing bridges quickly, the bridge influence line (BIL) identification method based on multiple sources of measured information was studied. First, the

收稿日期:2018-02-15

基金项目:国家自然科学基金项目(NSFC-51778550);福建省自然科学基金项目(2017J01101);
厦门市科技局科技计划项目(3502Z20163002);厦门大学校长基金项目(20720180060)

作者简介:陈志为(1980-),男,福建漳州人,副教授,工学博士,E-mail:cezhwei@xmu.edu.cn.

measured information for the dynamic responses of the bridge and moving vehicle were used to establish a mathematical model for the influence line identification. In the model, the Tikhonov regularization method was used to solve the problem of an ill-conditioned matrix, and the penalty function was established to identify a smooth BIL that would replicate the real BIL faithfully. The influence line was then reconstructed using the basis function extension method, which uses a linear combination of a series of cubic B-spline basis functions for the representation; thus, the identification problem was transformed from solving for many influence line factors into a small number of basis function weight coefficients. To verify the feasibility of the above method, simulations were first conducted for the process where the loaded vehicle made of steel moved on a reinforced concrete three-span continuous beam model. Based on the measured deflection and strain response time history of the beam and the corresponding vehicle information, the deflection and strain influence lines of different measurement points were identified. The experimental results show that both the overall shapes and local peak values of the BILs are in good agreement with the baseline solutions. Furthermore, this method was applied to a simply supported cast-in-situ prestressed concrete box girder bridge. Based on the dynamic strain and deflection responses measured at the mid-span of the beam, as well as the axle weight and real-time position of the moving vehicle, the deflection and strain influence lines were accurately identified for different lanes. By comparing the results of static load testing of the bridge and BIL-based virtual loading, it is found that the deviation of the absolute value is within 5%, which indicates that the influence line identification method has high accuracy and good potential for engineering applications.

Key words: bridge engineering; influence line identification; Tikhonov regularization; bridge influence line; B-spline curve; experimental verification

0 引言

桥梁结构使用周期长,在其长达几十、甚至上百年的服役期内,环境腐蚀、材料老化、荷载长期效应、疲劳效应等不利因素的耦合作用,将不可避免导致结构损伤累积和抗力衰减,极端情况甚至会引发灾难性事故^[1-2]。运营桥梁管养的关键在于保障服役期内桥梁的安全性。经过多年探索,已有多种不同的状态评估方法^[3-7]。在桥梁评估的具体实践中,中小桥梁通常采用以评估承载力为主的安全评估方法,其中静载试验法是目前相对最为可靠的一种方法^[8]。作为该方法的主要评价指标,结构校验系数可直观反映桥梁实际状态与理论状态的关系。在桥梁运营初期,由于桥梁设计考虑了一定的安全储备,实测影响线比理论影响线更趋于安全,此时结构校验系数小于1,表明桥梁实际工作状态优于理论状态。随着桥梁性能退化,安全储备逐渐耗尽,实测影响线也随之改变,此时结构校验系数接近甚至超过1,表明桥梁实际工作状态差于理论状态。但是,静载试验需要长时间中断交通且费用较高,导致该试验难以常态化开展。为了弥补现有静载试验的不

足,需要研究快速准确评估桥梁状态的方法。影响线不仅与结构校验系数联系紧密,且具有对损伤敏感和对环境变化较不敏感的显著优点^[9]。因此,监测桥梁在不同使用阶段的影响线状态及其变化趋势,对于评估桥梁服役性能具有重要意义。

近年来,国内外已有学者开展了桥梁影响线识别的相关研究。O'Brien等^[10]较早提出了基于测量信息反演计算影响线的思路,通过最小二乘法识别影响线,并利用重车经过简支梁桥的应变响应对该方法加以验证。为了综合考虑不同车型/车速的多组数据,Leng等^[11]进一步提出了基于最大似然估计的影响线识别方法。Chen等^[12]基于实测的移动火车信息和桥梁关键构件应变响应,采用Tikhonov正则化方法识别大跨悬索桥影响线。Sun等^[13]提出引入桥梁有限元模型辅助影响线识别的方法,对于改进影响线识别精度有不错的效果,缺点是大幅增加了工作量且引入了模型建模的不确定性。王宁波等^[14]提出对初始影响线结果进行多项式分段拟合,以提取具有准静态特性的影响线的方法,该方法对理想的简支梁桥具有良好效果,但对于支撑条件复杂的桥梁仍有待深入研究。通过上述研究可以发

现,桥梁实测响应不可避免地受到行驶车辆的动力效应及其他荷载的干扰,从而增加了精确识别影响线的难度。

识别桥梁影响线本质上属于一类参数识别的反问题,精确识别的关键在于妥善处理反问题求解的不适定性,避免影响线识别对测量噪声等误差过于敏感。在数学上,可以用变换拓扑度量,增加信息等方法改善参数识别反问题的不适定性。Tikhonov 正则化是处理不适定问题的经典方法^[15]。该方法采用 l_2 范数作为罚项,为了逼近目标泛函引进了稳定泛函,使原不适定问题的近似解在较小范围里变动并满足一定的光滑特性,从而得到稳定的近似解。合理确定正则化系数是关键难点:系数选得过大,所建立的辅助问题与原问题相差特别大;选得过小,则原问题的不适定性保留太多而难以处理。学者们提出了多种确定正则化系数的方法,如 Morozov 偏差原理^[16]、L-Curve 准则^[17]等。目前,现有的桥梁影响线识别方法尚未达到后续工程应用所需精度,深入细致的研究还有待继续开展。

为了使识别的影响线满足数学最优的同时,抑制影响线解中不符合物理意义的波动。本文首先基于桥梁动力响应及车辆移动的实测信息,建立影响线识别的数学模型。采用 Tikhonov 正则化方法解决病态矩阵求解问题,设置罚函数项以取得较光滑并贴近真实的影响线。然后通过基函数扩展法重构

$$\begin{bmatrix} R_s(1) \\ R_s(2) \\ \vdots \\ R_s(p) \end{bmatrix}_{p \times 1} = \begin{bmatrix} A_{1,1+D(1)} & 0 & 0 & A_{1,1+D(2)} & 0 \\ 0 & A_{2,2+D(1)} & 0 & 0 & A_{2,2+D(2)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & A_{p,p+D(1)} \end{bmatrix}_{p \times q} \begin{bmatrix} \Phi(1) \\ \Phi(2) \\ \vdots \\ \Phi(q) \end{bmatrix}_{q \times 1} \quad (3)$$

式中: R_s 为桥梁某位置的准静态成分向量; p 为响应测量的采样数; L 为根据车辆轴重和轴间距等信息建立的荷载矩阵,其中 $A_{j,j+D(i)}$ ($j=1,2,\dots,p$) 为对应于第 j 个采样数据车辆的第 i 个车轴轴重。 Φ 为由连续影响线离散出的影响线因子组成的向量; $\Phi(1),\Phi(2),\dots,\Phi(q)$ 为单位力作用在对应位置的影响线因子; q 为影响线离散后的影响线因子个数。

车辆移动通过桥梁所实测的桥梁响应中,除了有可通过影响线重构的移动荷载准静态成分,还有桥梁自振、车辆动力效应、其他动荷载(如风荷载)以及温度效应等成分。因此,实测响应 R_m 可以简单表示成两部分的叠加,即

$$R_m = L\Phi + \eta \quad (4)$$

式中: η 为实测响应误差项,特指实测响应去除移动荷载准静态成分(可通过影响线构造)的剩余部分。

影响线,将其表示为一系列三次 B 样条基函数的线性组合,从而将问题从识别影响线简化成识别少量基函数权重系数。最后,将该影响线识别方法应用到实验室钢筋混凝土三跨连续 T 梁模型和一座简支现浇预应力混凝土箱梁桥,以验证该方法的可行性和准确性。

1 方法简介

1.1 影响线识别的数学模型

假设车辆沿固定车道朝某一方向在桥上行驶,各车轴对桥的影响相互独立,则移动车辆所引起的响应可近似为各轴引起响应的叠加,即

$$R_s(x) = \sum_{i=1}^N A(i) \times \Phi[x-D(i)] \quad (1)$$

式中: $R_s(x)$ 为车辆作用在顺桥向位置 x (首个车轴所在位置)时,引起的所关心位置的桥梁响应; $\Phi(x)$ 为单位力在对应位置的影响线函数; N 为车辆的轴数; $A(i)$ 为车辆第 i 个轴的轴重; $D(i)$ 为车辆第 i 个轴与首轴的间距。

为了方便求解,将连续影响线的识别转换成识别影响线上离散节点的影响线因子问题,则可将连续函数 $R_s(x)$ 和 $\Phi(x)$ 分别离散成向量 R_s 和 Φ 。上式可写成矩阵形式

$$R_s = L\Phi \quad (2)$$

或者

$$\begin{bmatrix} 0 & A_{1,1+D(k)} & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & A_{2,2+D(k)} & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & A_{p,p+D(2)} & 0 & \dots \end{bmatrix}_{p \times q} \begin{bmatrix} \Phi(1) \\ \Phi(2) \\ \vdots \\ \Phi(q) \end{bmatrix}_{q \times 1} \quad (3)$$

若基于测量信息构造式(4)中的 R_m 和 L ,那么影响线向量 Φ 的识别可视为一类反问题。相比于实测响应峰值,虽然误差项 η 的幅值较小,却足以导致矩阵求解的病态化,可使影响线识别解严重偏离真实解。

Tikhonov 正则化(l_2 型正则化)方法常被用于处理反问题求解的病态矩阵,本文采用该方法建立如下的影响线识别数学模型^[11]

$$\Phi = \arg \min_{\Phi \in R^q} \| R_m - L\Phi \|_2^2 + \lambda \| \Phi \|_2^2 \quad (5)$$

式中: $\{\text{argmin}\}$ 为使目标函数取得最小值的自变量集合; $\Phi \in R^q$ 表示自变量 Φ 属于 q 维向量空间元素; $\| R_m - L\Phi \|_2^2$ 为响应误差平方和; $\| \Phi \|_2^2$ 为罚函数; λ 为罚函数的正则化系数。

采用 l_2 范数作为罚函数,可使原不适定问题的

近似解在较小范围里变动并满足一定的光滑特性,从而得到稳定的近似解。本文采用 L-Curve 准则法确定正则化参数^[17]。

1.2 基于 B 样条曲线的影响线识别

结合桥梁影响线的物理意义与结构内力分析,可知桥梁特定位置的实际挠度或应力影响线应有相对光滑的特性。即便桥梁结构受到了轻微或中等程度的损伤,内力重分布作用也会将损伤效应弥散至周围构件,使得影响线曲线仍然表现得较为光滑。但是,通过上述影响线识别模型所得到的影响线解常包含许多不同幅值的周期性波动。究其原因,主要是该模型假定的待识别影响线因子间彼此不相关。事实上,相邻或距离较近的 2 个影响线因子具有显著相关性。因此,本文尝试结合三次 B 样条曲线解决影响线识别方法的上述问题。

从数学上讲,样条曲线是由多项式函数分段定义的数值函数,它在多项式分段连接处可具有高阶导数连续性^[18]。三次样条曲线(阶数为 3)最为常用,其中非均匀有理 B 样条曲线被广泛应用于描述自由曲线和曲面等。三次 B 样条曲线已通过研究证明可适用于构造桥梁挠度和应变影响线^[6]。因此,引入基函数扩展法用于表示影响线,将影响线视为一系列三次 B 样条基函数的线性组合,即

$$\Phi = Nw \tag{6}$$

式中: $N = (N_{0,3}, N_{1,3}, \dots, N_{i',3}, \dots, N_{n,3})$,为三次 B 样条基函数矩阵,其中 $N_{i',3}$ 表示第 i' 个三次 B 样条基函数; $w = (\omega_0, \omega_1, \dots, \omega_{i'}, \dots, \omega_n)^T$,为基函数权重系数向量。

三次 B 样条基函数 $N_{i',3}$ 采用 Cox-de Boor 递推公式建立,即

$$N_{i',0}(\xi) = \begin{cases} 1 & \xi_i \leq \xi < \xi_{i+1} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \tag{7}$$

$$N_{i',k}(\xi) = \frac{\xi - \xi_i}{\xi_{i+k} - \xi_i} N_{i',k-1}(\xi) + \frac{\xi_{i+k+1} - \xi}{\xi_{i+k+1} - \xi_{i+1}} N_{i+1,k-1}(\xi) \tag{8}$$

式中: ξ_i 称为节点。

B 样条基函数是建立在节点向量上的一系列函数,一维情况下,节点向量为定义在参数空间的一组坐标,记为 $\Xi = \{\xi_0, \xi_1, \dots, \xi_{n+k+1}\}$,其中 $\xi_i \in \Xi$ 为第 i' 个节点, i' 表示节点序号。通常要求节点向量 Ξ 的节点非递减,即 $\xi_i \leq \xi_{i+1}$ 。

将式(6)代入式(5),则影响线识别的目标函数可以改写成

$$w = \arg \min_{w \in R^{n+1}} \|R_m - LNw\|_2^2 + \lambda \|w\|_2^2 \tag{9}$$

计算式(9)的最优解可得权重系数向量 w ,进而通过式(6)构造影响线向量 Φ 。上述方法可将问题从求解众多的影响线因子转化为少量的权重系数,有助于得到光滑的影响线,可与真实解更好地吻合。

2 实验室验证

将多跨连续梁桥简化为实验室的钢筋混凝土三跨连续梁,并采用钢制试验小车模拟梁桥上的移动车辆。为便于试验小车在梁上行驶,连续梁横断面设计成 T 形。翼缘处布置横向钢筋,以防止试验小车作用引起梁面翼缘开裂。钢筋混凝土三跨连续梁的构造详见图 1,三跨 T 梁总质量约 3 t。

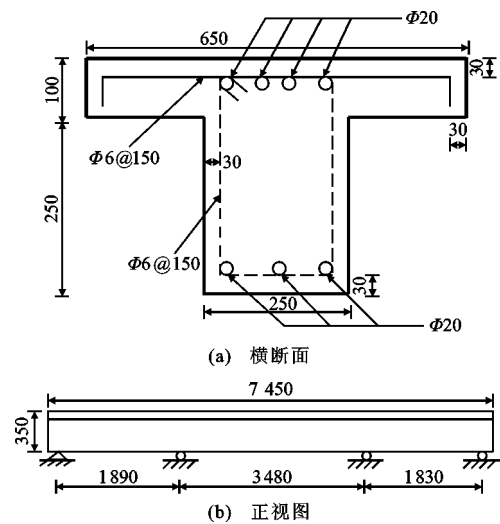


图 1 钢筋混凝土三跨连续梁构造(单位:mm)

Fig. 1 Layout of Continuous RC Beam (Unit: mm)

如图 2 所示,在连续梁中跨的不同位置 1/4, 3/8, 1/2, 5/8, 3/4 跨测点上安装了 5 个应变片和 5 个挠度计,并且采集小车行驶过程中梁的应变和挠度响应,用于识别这些位置的应变和挠度影响线。应变片编号依次为 S1~S5,挠度计编号依次为 D1~D5。



图 2 传感器位置示意

Fig. 2 Layout of Sensors on Beam

载重小车质量约为 1 t,在牵引系统的作用下,车辆移动速度约为 $0.24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 3)。当移动车辆行驶至不同位置时,关键测点的应变与挠度会相应变化。图 4(a)、(b)分别是中跨跨中 S3 和 D3 位置测得的应变和挠度时程曲线。由图 4 可知,当小

车位于传感器附近时,响应出现峰值。该连续梁跨度小,刚度大,即便在 1 t 重的移动小车作用下,中跨跨中测点的挠度峰值也仅为 0.6 mm,应变峰值仅为 30×10^{-6} 。边跨跨径小于中跨,边跨跨中的响应峰值约为中跨跨中的 1/2。由于边跨测点响应幅值过小,信号信噪比太低,导致影响线难以准确识别,故影响线识别仅针对中跨的 5 个测点。若试验采用轻质小车,将导致移动小车产生的桥梁动应变或动挠度响应减小,信号信噪比降低,会增加影响线准确识别的难度。另外,由于车辆动力效应、仪器噪声等因素的干扰,实测响应时程存在一定程度的波动。随着车辆移动速度的增加,响应中的动力成分会相应增大,也将增加影响线识别的难度。



图 3 钢筋混凝土三跨连续梁及试验小车

Fig. 3 Three-span Continuous RC Beam and Testing Vehicle

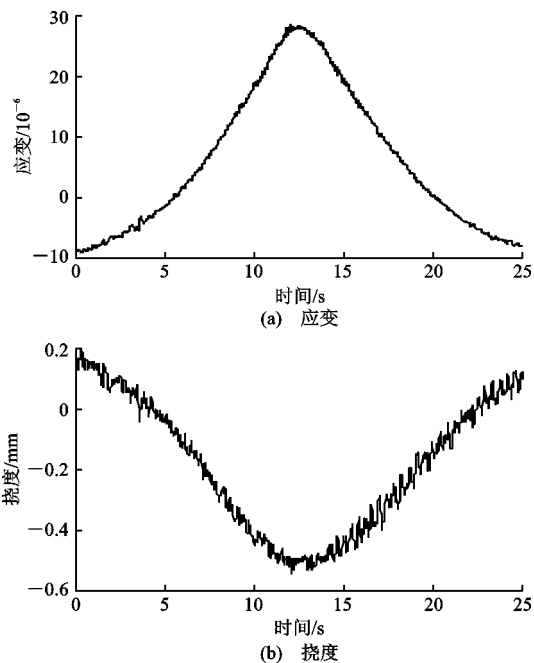


图 4 车辆移动过程中的实测响应

Fig. 4 Moving Vehicle-induced Dynamic Response

通过实测的应变与挠度响应时程,可构造影响线识别所需的实测响应 R_m 。另外,影响线识别还需移动车辆的相关信息(包括轴重、轴间距、实时位置等),用于构造荷载矩阵 L 。试验中移动小车的基本

参数详见表 1。移动车辆的实时位置通过背景差分法识别。背景差分被广泛用于识别视频中的移动目标,其原理是基于当前帧和参考帧(通常称为“背景图像”)的差异判断并识别出移动目标,通过分析连续的前后多帧图像,可计算出目标运动轨迹。因此,先选取静止的背景图像中某固定点作为参考点,试验过程中移动小车质心的实时位置可采用背景差分法确定。

表 1 移动车辆基本参数

Table 1 Basic Parameters of Moving Vehicle

轴间距/m	轴重/kN		总重/kN	实时位置/m
	第 1 轴	第 2 轴		
0.4	4.82	4.82	9.65	背景差分法确定

采用 Cox-de Boor 递推公式构造三次 B 样条基函数矩阵,结合响应向量和荷载矩阵,通过式(6)、(9)可识别桥梁影响线。图 5(a)、(b)分别为 S3 和 D3 位置(中跨跨中)识别得到的应变和挠度影响线。其中,横坐标表示竖向单位力(1kN)作用在梁上的位置,纵坐标表示单位力作用在相应位置所引起的应变或挠度。为了检验影响线识别的精度,通过将重物加载在较窄的木条上以近似模拟单点加载,相邻加载点间距 10 cm,以此方法可得离散点的影响线因子,经拟合得到基准影响线绘于图 5。蓝色虚线是最小二乘法识别得到的影响线解,红色实线是正则化方法结合 B 样条曲线识别的影响线解。可以看出,虽然最小二乘解大致捕捉到基准影响线的趋势,但存在非常大的跳动,并不符合影响线的物理意义。相比之下,正则化解与基准影响线无论是总体形状还是局部峰值,两者均吻合良好。另外,如图 2 所示的 5 个挠度与应变测点(D1~D5 和 S1~S5),识别影响线与基准影响线峰值的相对误差基本保持在 10%以内。另外,由于影响线识别所需的桥梁响应时长较短,可认为测量时段内环境温度基本保持一致,故影响线具有对温度变化较不敏感的优点。

3 实桥验证

采用一座简支现浇预应力混凝土箱梁桥来验证影响线识别方法的有效性,该桥全长 30.06 m,跨径 25 m,桥面按行车方向分为左右 2 幅,宽 42.5 m。桥梁立面和右侧半幅横断面如图 6 所示。

在影响线检测试验中,检测车沿某一车道行驶通过桥梁[图 7(a)],记录该过程车辆的实时位置及桥梁跨中截面测点的动应变与动挠度响应。如图

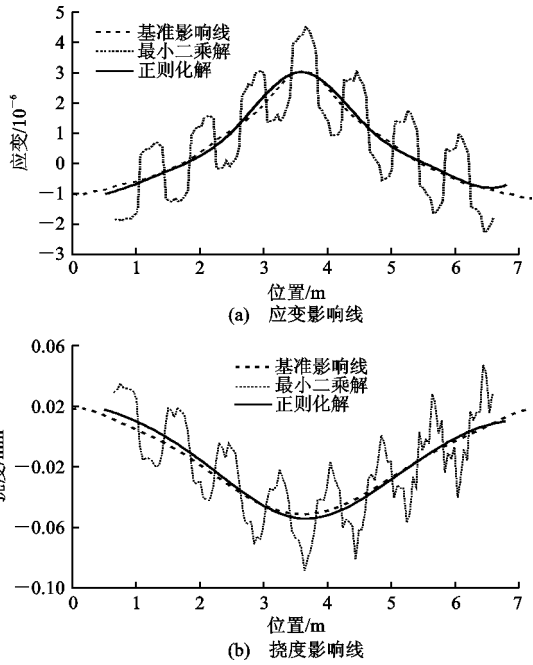


图5 影响线识别结果比较

Fig. 5 Comparison of Identified Influence Lines Results

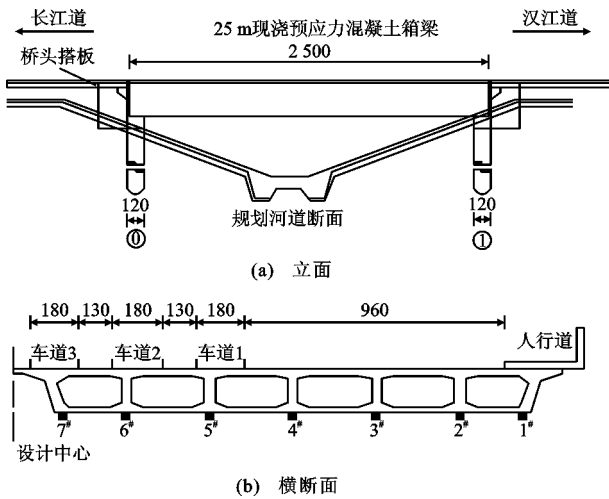


图6 桥梁构造(单位:cm)

Fig. 6 Layout of Bridge (Unit: cm)

7(b)所示,检测车是一辆总重 716 kN 的四轴车,轴重分别为 119, 119, 392, 392 kN,轴间距为 1.95, 4.25, 1.40 m。为了测量行驶车辆引起的动应变和动挠度,在桥梁跨中截面布置了多个应变计和挠度计。另外,为获取车辆实时位置信息,采用实时动态控制(RTK)技术测量车辆位置移动。该技术需在桥外不动点布置静止参考基站,并在检测车车顶布置了随车移动的接收器。为了准确建立车辆位置与桥梁响应的关系,采用无线自组网多跳技术,以保证移动车辆、动应变和动挠度多套系统信号的同步采集。

检测车沿车道1[图6(b)]行驶,图8是检测车



(a) 实桥照片



(b) 检测车

图7 简支钢筋混凝土梁桥与检测车

Fig. 7 Simple-supported RC Beam Bridge and Testing Vehicle

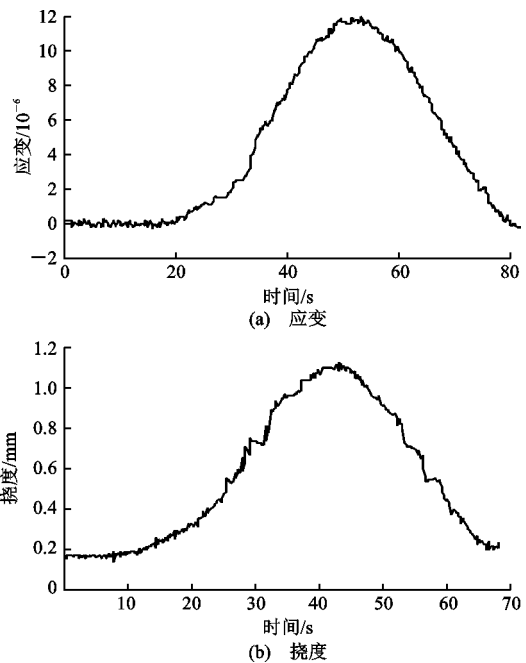


图8 检测车过桥时的桥梁响应

Fig. 8 Bridge Responses During Vehicle Moving on Bridge 从桥上通过引起的跨中截面 3# 测点[图 6(b)]的应变和挠度时程。由图 8 可知,应变和挠度响应时程的波动幅值均较小,由于存在车辆动力效应、仪器噪声等干扰,实测响应有较明显的波动。

基于上述无线测量系统实测车辆的过桥信息,可构造影响线识别所需的实测响应 R_m 和荷载矩阵 L ,并通过式(6)、(9)识别桥梁影响线。简支梁跨中测点的应变和挠度影响线识别结果如图 9 所示。图

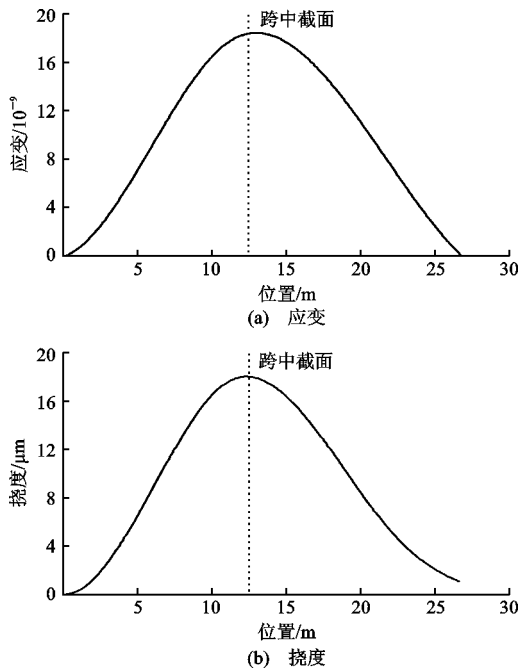


图 9 跨中测点的桥梁响应影响线

Fig. 9 Influence Lines of Bridge Responses at Mid-span

9 中影响线在简支梁跨径内同为正值,峰值均出现在跨中(12.5 m)附近,在支座处幅值接近 0,符合了简支梁的特点,识别结果较为合理。

由于桥面较宽,车辆横向分布对桥梁响应有较大影响,本文识别了同一测点不同车道的响应影响线。检测车分别沿车道 1~5 行驶,车道 1~3 位于右半幅桥面(详见图 6(b)),车道 4~5 位于左半幅桥面,沿桥面中心线与车道 2~3 对称。采用上述影响线识别方法,可得跨中截面 3# 测点对应不同车道的 5 条应变影响线,如图 10 所示,随检测车道距离 3# 测点的横向距离增大,对应车道的应变影响线峰值减少,并呈现较好的线性规律。

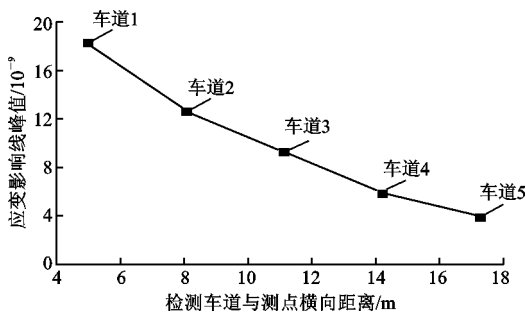


图 10 不同车道的应变影响线峰值

Fig. 10 Amplitudes of Strain Influence Lines for Different Traffic Lanes

通过对比桥梁静载试验的实测值可验证影响线识别结果的准确性。桥梁静载试验通常选择在控制截面附近布置一定数量重车作为试验荷载,为使试

验荷载能充分反映结构的受力特点,一般通过荷载试验效率加以控制。简支梁桥通常选择跨中作为控制截面,本文桥梁的静载试验选择在跨中截面的 5 个车道各布置一辆重车,测量仅考虑重车组作用所引起的静应变和静挠度。利用移动检测车运行在不同车道上的相关测量数据,分别识别以上 5 个车道的影响线。基于事先识别的车道跨中测点影响线,整理静载试验某工况所有重车的车轴信息(车轴重、轴间距和加载位置),将车轴荷载虚拟加载到对应车道的跨中测点影响线上,计算挠度/应变响应。对比计算响应和实测响应,根据偏差程度检验影响线识别的准确性。基于该桥静载试验跨中测点的挠度与应变,表 2 对比了虚拟加载值和静载实测值,发现两者偏差的绝对值在 5% 以内。综合分析所提出的影响线识别方法在实验室及实桥验证的结果,可知该方法在一定程度上具有较高识别精度以及进一步工程应用的良好潜力。

表 2 虚拟加载值与静载实测值对比

Table 2 Comparison Between Virtual Loading and Static Loading

跨中测点	虚拟加载	静载实测	偏差
应变/ 10^{-6}	32.47	34	-4.50%
挠度/mm	3.71	3.7	0.27%

4 结 语

(1)影响线反映桥梁结构的固有特性,监测桥梁在不同使用阶段的影响线状态及其变化趋势,对于评估桥梁服役性能具有重要意义。本文提出的快速准确识别桥梁影响线方法是实现该类桥梁状态评估的前提和基础。

(2)本文利用桥梁动力响应及车辆移动的实测信息,建立了影响线识别的数学模型。通过引入 Tikhonov 正则化方法以解决病态矩阵求解问题,通过设置罚函数项以取得较光滑并贴近真实的影响线。

(3)通过基函数扩展法重构影响线,将其表示为一系列三次 B 样条基函数的线性组合,将识别的模型参数简化为少量基函数权重系数,从而提升识别方法的效率和精度。

(4)将该影响线识别方法分别应用到了实验室钢筋混凝土三跨连续 T 梁模型和一座简支现浇预应力混凝土箱梁桥上,通过与基准值和实测值的对比验证,在一定程度上表明该方法具有较高精度,并具备工程应用的良好潜力。

(5)后续研究还应开展更全面的实桥试验以验证该方法的鲁棒性,并进一步考虑包括桥梁类型(梁桥、拱桥、刚构桥、斜拉桥、悬索桥)、检测环境(温度、湿度、风环境)与检测车(车型、车重、车速)等因素对识别结果的影响。

参考文献:

References:

- [1] 李惠,周文松,欧进萍,等.大型桥梁结构智能健康监测系统集成技术研究[J].土木工程学报,2006,39(2):46-52.
LI Hui, ZHOU Wen-song, OU Jin-ping, et al. A Study on System Integration Technique of Intelligent Monitoring Systems for Soundness of Long-span Bridges [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39 (2): 46-52.
- [2] 李兆霞,王滢,吴佰建,等.桥梁结构劣化与损伤过程的多尺度分析方法及其应用[J].固体力学学报,2010,31(6):731-755.
LI Zhao-xia, WANG Ying, WU Bai-jian, et al. Multi-scale Modeling and Analyses on Structural Deterioration and Damage in Long-span Bridges and Its Application [J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2010, 31 (6): 731-755.
- [3] 李亚东.既有桥梁评估方法研究[J].铁道学报,1997,19(3):109-115.
LI Ya-dong. Research on Methods for Assessment of Existing Bridges [J]. Journal of the China Railway Society, 1997, 19 (3): 109-115.
- [4] SARAF V, NOWAK A S. Proof Load Testing of Deteriorated Steel Girder Bridges [J]. Journal of Structural Engineering, 1998, 3 (2): 82-90.
- [5] MELCHERS R E. Assessment of Existing Structures—Approaches and Research Needs [J]. Journal of Structural Engineering, 2001, 127 (4): 406-411.
- [6] 宗周红,任伟新,郑振飞.既有桥梁承载能力评估方法[J].地震工程与工程振动,2005,25(5):147-152.
ZONG Zhou-hong, REN Wei-xin, ZHENG Zhen-fei. Load-carrying Capacity Assessment Methods of Existing Bridges [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2005, 25 (5): 147-152.
- [7] 陈孝珍,朱宏平,陈传尧.基于静载试验的桥梁安全性评价[J].华中科技大学学报:城市科学版,2005,22(3):37-40.
CHEN Xiao-zhen, ZHU Hong-ping, CHEN Chuan-yao. Bridge Safety Assessment Based on Static Loading Test [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Urban Science Edition, 2005, 22 (3): 37-40.
- [8] 林贤坤,张令弥,郭勤涛,等.基于模态挠度法的预应力连续箱梁桥状态评估[J].土木工程学报,2010,43(10):83-90.
LIN Xian-kun, ZHANG Ling-mi, GUO Qin-tao, et al. Application of Modal Deflection Method for Condition Assessment of Prestressed Concrete Continuous Box-girder Bridges [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43 (10): 83-90.
- [9] CHEN Zhi-wei, CAI Qin-lin, LEI Ying, et al. Damage Detection of Long-span Bridges Using Stress Influence Lines Incorporating Control Charts [J]. Science China Technological Sciences, 2013, 57 (9): 1689-1697.
- [10] O'BRIEN E J, QUILLIGAN M J, KAROUMI R. Calculating an Influence Line from Direct Measurements [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Bridge Engineering, 2006, 159 (1): 31-34.
- [11] LENG S S. Bridge Influence Line Estimation for Bridge Weigh-in-motion System [J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2015, 29 (1): 06014006.
- [12] CHEN Zhi-Wei, ZHU Song-ye, XU You-lin, et al. Damage Detection in Long Suspension Bridges Using Stress Influence Lines [J]. Journal of Bridge Engineering, 2015, 20 (3): 05014013.
- [13] SUN Shou-wang, SUN Li-Ming, CHEN Lin. Damage Detection Based on Structural Response Induced by Traffic Load: Methodology and Application [J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2015, 16 (4): 1640026.
- [14] 王宁波,任伟新,何立翔.基于桥梁动力响应的应变影响线提取[J].中南大学学报:自然科学版,2014,45(12):4362-4369.
WANG Ning-bo, REN Wei-xin, HE Li-xiang. Extraction of Influence Line of Bridge from Dynamic Responses [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2014, 45 (12): 4362-4369.
- [15] TIKHONOV A N. Solution of Incorrectly Formulated Problems and the Regularization Method [J]. Soviet Mathematics Doklady, 1963, 5 (4): 1035-1038.
- [16] SCHERZER O. The Use of Morozov's Discrepancy Principle for Tikhonov Regularization for Solving Nonlinear Ill-posed Problems [J]. Computing, 1993, 51 (1): 45-60.
- [17] HANSEN P C. Analysis of Discrete Ill-posed Problems by Means of the L-curve [J]. SIAM Review, 1992, 34 (4): 561-580.
- [18] JUDD K L. Numerical Methods in Economics [M]. Cambridge: MIT Press, 1998.