

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2016.03.039

基于支持向量机的桥梁冲刷深度识别方法研究

张效忠, 孙延华, 孙国民

(贵州工程应用技术学院 土木建筑工程学院, 贵州 毕节 551700)

摘要: 针对应用检测设备检测桥梁冲刷深度比较困难的情况, 提出一种新的桥梁冲刷损伤识别研究方法。该方法综合应用特征系统实现算法和支持向量机方法, 在环境激励的条件下对桥梁的冲刷深度进行识别。在该方法应用过程中, 关键是通过样本库找到对下部结构冲刷深度敏感的点, 并在敏感点进行采集环境激励下的加速度振动响应信号。通过实桥验证证明了该方法具有较高的识别精度并具有较好的鲁棒性。该方法为桥梁的冲刷损伤识别提供了新的途径。

关键词: 桥梁工程; 识别方法; 特征系统实现算法(ERA); 支持向量机(SVM); 冲刷深度; 随机减量法

中图分类号: U446.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2016)03-0206-05

Identification Method of Scour Depth for Bridge Based on ERA and SVM

ZHANG Xiaozhong, SUN Yanhua, SUN Guomin

(School of Civil and Architectural Engineering, Guizhou University of Engineering Science, Bijie, Guizhou 551700, China)

Abstract: A new damage identification method for bridge scour was proposed in this research, in the situation when it was difficult to detect bridge scour depth by equipment. Eigen system realization algorithm (ERA) and support vector machine (SVM) were applied simultaneously to identify the scour depths of bridge under conditions of ambient excitation. The following three steps are necessary for the application of this method to identify bridge scour. Firstly, a sample library about scour depth and superstructure vibration response was established using numerical methods and support vector machine method. Secondly, free response signal of bridge were extracted from random vibration signal of bridge superstructure using random decrement technique. Thirdly, the bridge scour depth were identified using ERA and SVM. In the process of applying the method to identify bridge scour depth, the key is to find the sensitive points for scour depth using sample library under ambient excitation response signal. It was identified that the method has higher accuracy and better robustness than the experiments of actual bridge scour. The method could provide a new way to identify scour depth of bridges.

Keywords: bridge engineering; identification method; ERA; SVM; scour depth; random decrement technique

国内外桥梁倒塌事故调查研究表明,冲刷是引起在役桥梁倒塌事故的主要原因^[1-4]。为了避免洪水冲刷引起桥梁的倒塌,需要定期对桥梁的健康状况进行检测评估,特别是在洪水冲刷后,应及时快速的对桥梁的冲刷情况进行检测并估计桥梁的冲刷损伤状况,从而采取措施保证在役桥梁的安全运营。但是,直接测量桥梁基础的冲刷状况比较困难,因为跨河和沿海桥梁的基础都在水面以下^[5-6]。应用水下检测仪器检测冲刷状况,不但检测费用高昂、费时

费力,需要专业的技术培训,而且容易受到洪水等外界干扰环境的影响,检测结果不能满足测量的精度要求^[7-8]。基于此,国内外学者在最近二十多年里,针对不依靠水下检测仪器的桥梁冲刷损伤识别技术展开了一系列的理论和实验研究^[9-10],并取得了阶段性的研究成果。但现有文献已证明桥梁冲刷和桥墩或者桥台的形状和尺寸、水的深度和水的流速有关联,现阶段也主要应用这四个参数来进行桥梁冲刷计算^[11-12]。但是,桥梁冲刷过程中,水-土-桥

收稿日期:2016-01-01

修稿日期:2016-02-20

基金项目:桥梁工程安全控制技术与装备湖南省工程技术研究中心(长沙理工大学)开放基金资助项目(13KC05);国家自然科学基金“考虑微观结构的海相软黏土三维弹塑性模型”(41402271)

作者简介:张效忠(1978—),男,山东菏泽人,讲师,博士研究生,主要从事结构损伤识别方面的研究工作。E-mail: zhangxiaozhong@126.com

组成了一个耦合作用的体系,并且对冲刷具有很大的影响,如何在对桥梁冲刷损伤识别时充分考虑水-土-桥耦合作用体系来提高桥梁损伤识别的精度,成为一个具有挑战性的课题。

针对以上存在的问题,结合作者已有的研究基础,本文利用上部结构基于振动特性的损伤识别成熟技术,并应用支持向量机方法(SVM)建立一种基于上部结构振动的桥梁冲刷损伤的健康检测技术。该方法仅需要通过桥梁上部结构振动特性的分析,就能够对桥墩冲刷损伤状况进行快速识别,包括冲刷的位置、冲刷的程度以及对冲刷可能发展的趋势进行分析,为桥梁维护单位对洪涝灾害发生后及时对桥梁的安全评估提供可靠的参考数据。

1 基本理论

1.1 特征系统实现算法

特征系统实现算法(ERA)实质就是通过脉冲响应(或自由响应)信号 $h(k)$ 来构造 Hankel 矩阵 $H(k)$,应用奇异值分解方法得到系统的最小实现 $[R, S, T]$ 。在脉冲(自由)响应矩阵为已知的情况下,Hankel 矩阵可以用下式表示:

$$H(k) = \begin{bmatrix} h(k+1) & \cdots & h(k+\alpha) \\ \vdots & & \vdots \\ h(k+\beta) & \cdots & h(k+\alpha+\beta+1) \end{bmatrix} \quad (1)$$

响应信号 $h(k)$ 的阶数理论上应等于系统的阶次,为一固定值,但由于在采集信号时噪声的存在, $h(k)$ 会产生秩的亏损。只有在 α, β 足够大时,Hankel 矩阵 $H(k)$ 的秩才稳定。所以,为得到不变的 $H(k)$ 的秩,需要选择合适的 α, β 值,并保证其阶数最小。一个系统一般存在无穷多个实现,不同的激励会产生不同的响应,但不同激励的最小实现是相同的,系统的最小实现是系统的固有特性参数。

根据最小实现的定义, $H(k)$ 可由最小实现的参数表示为:

$$H(k) = \begin{bmatrix} TR^k S & \cdots & TR^{k+\beta-1} S \\ \vdots & & \vdots \\ TR^{k+\alpha-1} S & \cdots & TR^{k+\alpha+\beta-1} S \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\text{令: } P_\alpha = [T \ TR \ \cdots \ TR^{\alpha-1}]^T \quad (3)$$

$$Q_\beta = [S \ SR \ \cdots \ SR^{\beta-1}] \quad (4)$$

$$\text{则: } H(k) = P_\alpha R^k Q_\beta \quad (5)$$

假设 I_i 为阶数为 i 的单位矩阵, 0_i 为阶数为 i 的零矩阵,引入矩阵 E_m, E_n :

$$E_n^T = [I_n \ 0_n \ \cdots \ 0_n] \quad (6)$$

$$E_n^T = [I_n \ 0_n \ \cdots \ 0_n] \quad (7)$$

综合以上各式可得:

$$H(k+1) = E_m^T H(k) E_n \quad (8)$$

$$\text{令: } P_\alpha = U_n \sum_n^{1/2}, Q_\beta = \sum_n^{1/2} V_n^T$$

其中, \sum 为方阵, $\sum_n = \text{diag}(d_1, d_2, \dots, d_n)$,

U 和 V 为正交矩阵,即满足: $U^T U = V^T V = I$,并由 $H(0)$ 确定:

$$H(0) = U \sum V^T \quad (9)$$

综合以上各式可得:

$$H(k+1) = E_m^T U \sum^{\frac{1}{2}} \left[\sum^{-\frac{1}{2}} U^T H(1) V \sum^{-\frac{1}{2}} \right]^k \sum^{\frac{1}{2}} V^T E_n \quad (10)$$

公式(10) 就为特征系统实现算法的基本公式,联合公式(5) 可以得到系统的最小实现:

$$R = \sum^{-\frac{1}{2}} U H(1) V \sum^{-\frac{1}{2}} \quad (11)$$

$$S = \sum^{\frac{1}{2}} V^T E_n \quad (12)$$

$$T = E_m^T U \sum^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

最后通过对式(11) ~ 式(13) 进行特征值分解,就可以求得系统的模态参数。

1.2 支持向量机理论

支持向量机(SVM)是一种数据优化处理方法,其理论基础是统计学习理论。应用支持向量机能够非常成功的处理模式识别和回归问题,并能推广应用与预测和评估等领域。SVM 的机理是寻找一个满足分类要求的超平面,并且使训练集中的点距离分类面尽可能的远,也就是寻找一个分类面使它两侧的空白区域(Margin)最大。如图 1 所示,平面内有 C1 和 C2 两类数据,过两类样本中离分类面最近的点且平行于最优分类面的超平面上 H1, H2 的训练样本就叫做支持向量。

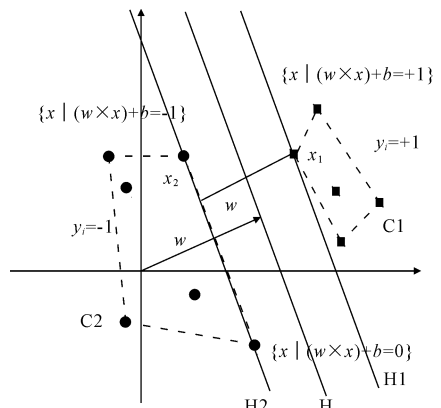


图 1 支持向量机分类示意图

1.3 桥梁冲刷损伤的识别方法

(1) 桥梁结构振动相应分析。通过特征值实现算法可知,通过振动响应信号后,可以应用特征值实现算法快捷方便的计算出结构各阶模态参数,算法的整体思路如图 2 所示。为了获得更加稳定精确的自由响应信号,本文采用多割线随机减量技术,消除了环境激励对信号产生的影响。

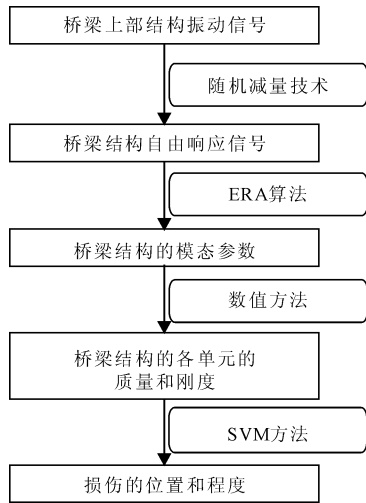


图 2 整体算法思路

(2) 采用 ERA 方法计算桥梁结构的模态参数。应用 ERA 方法对桥梁结构矩阵的特征值进行分解,得到连续系统模态参数固有频率和模态阻尼比,得到结构系统的阵型向量,这样就可以得到划分单元的质量和刚度。

(3) 应用数值方法建立冲刷深度和模态参数变化的关系。应用有限元的方法建立桥梁结构的有限元模型,通过数值分析建立冲刷深度和桥梁结构模态参数建立对应的样本数据库。

(4) 采用支持向量机的方法计算桥梁结构冲刷深度。根据在桥梁结构上部采集的数据以及建立冲刷深度和模态参数变化的关系来判定桥梁的冲刷深度。

2 实例验证

2.1 工程概况

颗珠山大桥(见图 3)为港桥连接段主桥采用主跨 332 m 双塔双索面—混凝土叠合梁斜拉桥,主桥采用双钢主梁加钢横梁断面,桥面板为钢筋混凝土结构。引桥采用 50 m 跨预应力混凝土连续梁。该桥下水流速度大,桥墩的冲刷比较严重。

2.2 上部结构振动信号采集

上部结构按照需要设置加速度传感器,具体的

布置如图 4 所示,每个断面上在 A、B、C、D、E、F、G 七点布置加速度传感器,每 5 m 布置一排,本桥梁上部结构一共布置加速度传感器 140 个。在环境激励下采用 LMS 数据采集系统(图 5),对 140 个传感器进行数据采集,对采集的数据进行保存。图 6 为 125 m 处断面上(塔柱、中间横梁、桥面板塔柱横梁处)三个测点采集的加速度数据。本文以 125 m 处的截面为例说明基于 ERA 和 SVM 的桥梁冲刷损伤识别方法的优越性。

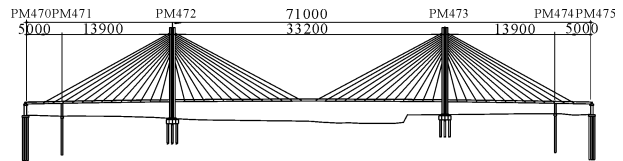


图 3 颗珠山大桥立面图

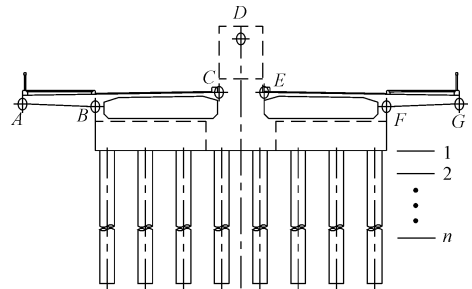


图 4 加速度传感器在桥梁上的布置



图 5 LMS 数据采集系统

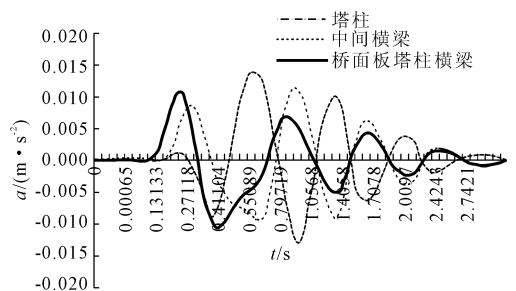


图 6 125 m 处测点检测的加速度数据

2.3 应用数值方法建立样本库

首先根据设计图纸建立桥梁结构的有限元模型,如图 7 所示。桥墩设置不同的埋深,根据实际工程地质情况,模型共设置了 0, -0.1 m, -0.2 m, -0.3 m, ..., 2 m 的 21 个埋置深度(图 4),分别进行

瞬态激励下的自由响应振动。125 m 处截面 A - G 测点振动响应和埋置深度对应关系见图 8 和图 9 所示。由图 8、图 9 可以看出,在 125 m 截面处桥梁冲刷深度和 A、E、F、G 点 Z 向加速度有比较敏感的关系,而在 125 m 截面处桥梁冲刷深度和 F、G 点 Y 向加速度 F 有较敏感关系。

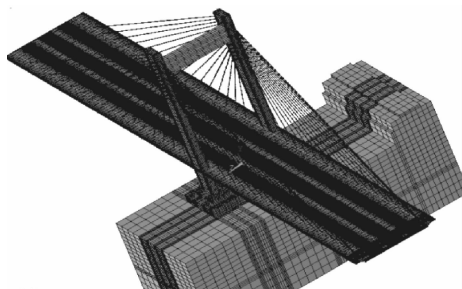


图 7 有限元模型

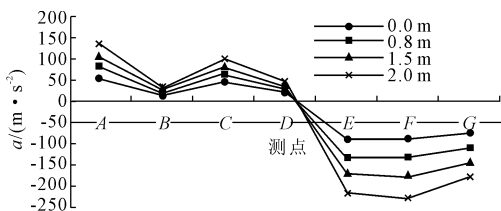


图 8 Z 向加速度图

结构的模态参数,并得到下部结构埋在土中各单元的刚度。以 125 m 处截面 78 号桥墩为例进行说明,78 号墩的单元划分如图 10 所示,共划分 41 个单元。这 41 个单元中在不同埋深下计算刚度见表 1 所示。由表 1 可知,随着埋置深度的变化,冲刷后桥墩水平刚度具有明显的变化,未冲刷部分水平刚度几乎没有变化,从而我们可以判断桥墩的冲刷深度。

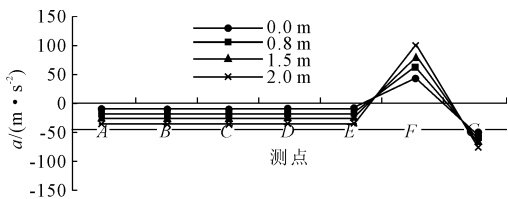


图 9 Y 向加速度图

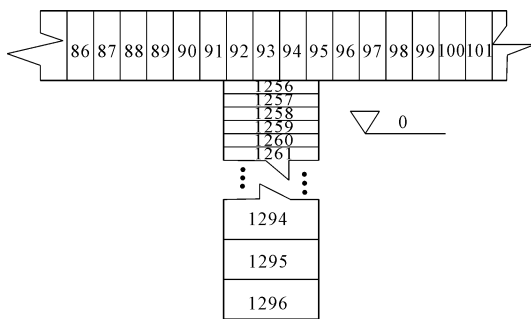


图 10 78 号桥墩单元划分

2.4 桥梁冲刷损伤识别

应用采集的数据根据 ERA 方法获得桥梁下部

表 1 78 号桥墩不同埋深下各单元水平刚度

单位:kN/m

| 单元编号 | 不同埋深下各单元水平刚度 | | | | 单元编号 | 不同埋深下各单元水平刚度 | | | |
|------|--------------|-------|-------|-------|------|--------------|-------|-------|-------|
| | 0 m | 0.8 m | 1.5 m | 2.0 m | | 0 m | 0.8 m | 1.5 m | 2.0 m |
| 1256 | 17.90 | 16.87 | 15.98 | 13.56 | 1277 | 17.96 | 17.96 | 17.96 | 17.45 |
| 1257 | 17.90 | 16.87 | 15.98 | 13.67 | 1278 | 17.96 | 17.96 | 17.96 | 17.67 |
| 1258 | 17.93 | 16.75 | 16.13 | 13.69 | 1279 | 17.96 | 17.96 | 17.96 | 17.77 |
| 1259 | 17.95 | 16.75 | 16.12 | 13.74 | 1280 | 17.96 | 17.96 | 17.96 | 17.84 |
| 1260 | 17.95 | 16.69 | 16.12 | 13.74 | 1281 | 17.96 | 17.96 | 17.96 | 17.90 |
| 1261 | 17.96 | 16.68 | 16.12 | 13.96 | 1282 | 17.96 | 17.96 | 17.96 | 17.94 |
| 1262 | 17.96 | 16.62 | 16.24 | 13.97 | 1283 | 17.96 | 17.96 | 17.96 | 17.96 |
| 1263 | 17.96 | 16.61 | 16.24 | 14.05 | 1284 | 17.96 | 17.96 | 17.96 | 17.96 |
| 1264 | 17.96 | 16.60 | 16.60 | 14.08 | 1285 | 17.96 | 17.96 | 17.96 | 17.96 |
| 1265 | 17.96 | 16.60 | 16.60 | 14.11 | 1286 | 17.96 | 17.96 | 17.96 | 17.96 |
| 1266 | 17.96 | 17.96 | 16.79 | 14.20 | 1287 | 17.96 | 17.96 | 17.96 | 17.96 |
| 1267 | 17.96 | 17.96 | 16.86 | 15.86 | 1288 | 17.96 | 17.96 | 17.96 | 17.96 |
| 1268 | 17.96 | 17.96 | 16.93 | 15.93 | 1289 | 17.96 | 17.96 | 17.96 | 17.96 |
| 1269 | 17.96 | 17.96 | 16.96 | 15.96 | 1290 | 17.96 | 17.96 | 17.96 | 17.96 |
| 1270 | 17.96 | 17.96 | 16.97 | 15.97 | 1291 | 17.96 | 17.96 | 17.96 | 17.96 |
| 1271 | 17.96 | 17.96 | 17.59 | 16.59 | 1292 | 17.96 | 17.96 | 17.96 | 17.96 |
| 1272 | 17.96 | 17.96 | 17.77 | 16.77 | 1293 | 17.96 | 17.96 | 17.96 | 17.96 |
| 1273 | 17.96 | 17.96 | 17.84 | 17.04 | 1294 | 17.96 | 17.96 | 17.96 | 17.96 |
| 1274 | 17.96 | 17.96 | 17.93 | 17.13 | 1295 | 17.96 | 17.96 | 17.96 | 17.96 |
| 1275 | 17.96 | 17.96 | 17.96 | 17.16 | 1296 | 17.96 | 17.96 | 17.96 | 17.96 |
| 1276 | 17.96 | 17.96 | 17.96 | 17.38 | | | | | |

2.5 桥梁冲刷深度识别

综合应用 ERA 方法和 SVM 方法,对桥墩冲刷深度进行识别。通过对 G 点和 F 点处理后根据识别出的 125 m 处截面 78 号桥墩各个单元的水平刚度,识别的结构刚度见图 11 所示。由图 11 可知,从 F 和 G 两个测点都能够较好的识别出单元 1256-1265 被冲刷,这样根据单元的尺寸就可识别出 78 号墩冲刷的深度为 $10\text{ m} \times 0.1\text{ m}$ 。

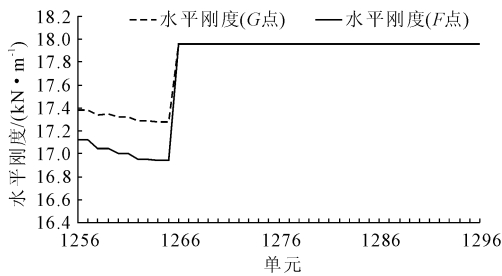


图 11 78 号桥墩的单元识别刚度

3 结 语

本文通过理论推导建立了基于 ERA 和 SVM 的桥梁结构冲刷损伤识别方法,并通过实桥实验验证了该方法在环境激励下识别的精度和鲁棒性。具体的结论如下:

(1) 基于 ERA 和 SVM 的桥梁结构冲刷损伤识别方法能够较好的利用上部结构易测性来识别下部结构(水中)冲刷深度。

(2) 通过实桥实验可以知道,本文提出的桥梁冲刷损伤识别方法具有较高的识别精度,并且方便快捷。

(3) 基于 ERA 和 SVM 的桥梁结构冲刷损伤识别方法研究为跨河跨海大桥的冲刷深度监测提供了一种新的方法。

参考文献:

[1] 吉伯海,傅中秋.近年国内桥梁倒塌事故原因分析[J]. 土木工程学报,2010,43(S1):495-498.

- [2] Wardhaha, Hadipriono F C. Analysis of recent bridge failure in the United States[J]. Corporate Governance An International Review, 2003,17(3):24-35.
- [3] Robertson I N, Riggs H R, Yim S C S, et al. Lessons from hurricane Katrina storm surge on bridges and building[J]. Journal of Waterway Port Coastal & Ocean Engineering, 2007,133(6):463-466.
- [4] Park I, Lee J, Cho W. Assessment of bridge scour and riverbed variation by a ground penetrating radar[C]//Proceeding of the 10th International Conference on Ground Penetrating Radar, 2004:411-414.
- [5] Humar J L. Dynamics of Structure[M]. London, UK: Taylor & Francis Group plc, 2005.
- [6] Deng L, Cai C S. Bridge scour: predicting, modeling, monitoring, and counter measures-review[J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 2010,15(2):125-134.
- [7] Yu X. Time domain reflectometry automatic bridge scour measurement system: principles and potentials[J]. Structural Health Monitoring, 2009,8(16):463-476.
- [8] Lin Y B, Chen J C, Chang K C, et al. Real-time monitoring of local scour by using fiber Bragg grating sensors[J]. Smart Materials and Structures, 2005,14(4):664-670.
- [9] Lu J Y, Hong J H, Su C C, et al. Field measurements and simulation of bridge scour depth variation during floods[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008,134(6):810-821.
- [10] Fan Wei, Qiao Pizhong. A strain energy-based damage severity correction factor method for damage identification in plate-type structures[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012,28(2):660-678.
- [11] Ren Weixin, Sun Zengshou, Xia Yong, et al. Damage identification of shear connectors with Wavelet packet energy: laboratory test study[J]. Journal of Structural Engineering, 2008,134(5):832-841.
- [12] Lu Jiyun, Liang Dakai, Zhang Xiaoli, et al. Research on structural health monitoring for wing box based on support vector regression machine[J]. Journal of scientific Instrument, 2009,30(3):486-491.