

基于最小二乘支持向量机的 码头结构裂缝监控模型

陈安¹, 林学军¹, 陈旭东², 霍中艳³

(1. 台州市港航管理局建设管理处, 浙江 台州 318000; 2. 郑州大学 水利与环境学院, 河南 郑州 450001;
3. 浙江海洋大学 港航与交通运输工程学院, 浙江 舟山 316000)

摘要: 以台州市椒江区某码头修复加固工程为依托, 对修复加固后的码头裂缝监测数据进行采集, 并结合码头所在区域的气象资料, 对码头裂缝的变化状况进行监控分析。最小二乘支持向量机算法训练效率高、学习能力强, 对非线性问题具有较强的鲁棒性, 在对其原理研究的基础上, 建立了基于最小二乘支持向量机的码头裂缝监控模型, 对码头裂缝的状况进行监测与分析, 实例表明该方法具有较高的精度, 可用于码头裂缝安全监控。

关键词: 裂缝; 安全监控模型; 码头; 最小二乘支持向量机

中图分类号: U654; TB115.1

文献标志码: A

文章编号: 2095-7874(2017)09-0001-04

doi: 10.7640/zggwjs201709001

Crack monitoring model for wharf structure based on least squares support vector machine

CHEN An¹, LIN Xue-jun¹, CHEN Xu-dong², HUO Zhong-yan³

(1. Construction Management Office of Taizhou Port and Shipping Administration Bureau, Taizhou, Zhejiang 318000, China;
2. School of Conservancy and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450001, China;
3. School of Port and Transportation Engineering, Zhejiang Ocean University, Zhoushan, Zhejiang 316000, China)

Abstract: Relying on the repair and reinforcement engineering of a harbor in Jiaojiang District of Taizhou, we collected the crack monitoring data of reinforced wharf, and according to the meteorological data within wharf area, we monitored and analyzed the change of wharf cracks. The least squares support vector machine algorithm has high trained efficiency, strong learning ability and robustness in nonlinear problem. On the basis of study on its theory, it was adopted to build the crack monitor models of this port, which could be used to monitor and analyze the status of cracks. The results show that the method has high precision, which can be used for safety monitoring of the wharf cracks.

Key words: crack; safety monitoring model; port; least squares support vector machine

0 引言

港口码头在为国民经济做出重要贡献的同时, 也常年经受着自然环境的考验, 基础约束、气候变化、冲磨、氯离子侵蚀等因素会使码头出现破坏^[1-5]; 另一方面, 我国加入 WTO 后, 外贸集装箱

运输大幅度增长, 进出口物资结构也发生重大变化, 原油、成品油、铁矿石等大宗物资的进出口量也大幅度增加, 使得一些码头超负荷、疲劳运行, 造成港口码头的损伤, 因此, 研究码头安全监控方法至关重要。随着数学技术的发展, 专家系统法、模糊评判法、时间序列法、神经网络等方法也被引入到码头的安全监控研究中。专家系统法实际是一个(或一组)能在某特定领域内, 以人类专家水平去解决该领域中困难问题的计算程

收稿日期: 2017-03-01

基金项目: 国家自然科学基金 (51609217); 水文水资源与水利工程科学
国家重点实验室开放基金 (2015491411)

作者简介: 陈安 (1968—), 男, 浙江台州人, 工程师, 研究方向为港口航道工程建设与管理。E-mail: silviahuo@qq.com

序。模糊评判法则是利用模糊数学原理,用隶属函数做桥梁将码头结构的某些不确定性参数,在形式上转化为确定性参数,即将模糊性加以数量化,从而利用传统的数学方法进行分析处理。时间序列法是将某种统计指标的数值,按时间先后顺序排列所形成的数列,时间序列预测法就是通过编制和分析时间序列,根据时间序列所反映出来的发展过程、方向和趋势,进行类推或延伸。近年来,人工智能技术的发展,也为港口码头的健康监控提供了新的思路^[6-8]。神经网络建模是通过对人脑思维方式的某种简化、抽象和模拟来反映码头网络结构,已被广泛应用,然而神经网络易陷入局部最优,有些甚至无法得到最优解,最小二乘支持向量机方法弥补了这个缺陷,并且在处理非线性问题时表现出较强的鲁棒性^[9]。码头裂缝的产生与扩展受到诸多因素的影响,是一个复杂的非线性问题,为了更好地解决该问题,本文引入最小二乘支持向量机原理,建立了码头裂缝的最小二乘支持向量机模型。

1 最小二乘支持向量机算法的基本原理

作为一种机器学习算法,最小二乘支持向量机因其训练效率高、学习能力强被广泛用于数据分析中。它使用等式约束代替标准支持向量机的不等式约束,将不易求解的全局凸二次规划优化问题转变为易求解的线性 Karush-Kuhn-Tucker 系统,该算法克服了人工神经网络局部优化的缺点,结合函数的复杂性和拟合误差,最小二乘支持向量机的优化问题可表示为:

目标函数:

$$\min J(\mathbf{w}, b, \xi) = \frac{1}{2} \mathbf{w}^T \mathbf{w} + \gamma \frac{1}{2} \sum_{i=1}^l \xi_i^2 \quad (1)$$

约束条件:

$$y_i = \mathbf{w}^T \varphi(x_i) + b + \xi_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, l \quad (2)$$

式中:超参数 γ 为正则化参数,用于避免过拟合; ξ_i 为第 i 个样本点的训练误差。

建立 Lagrangian 方程:

$$L(\mathbf{w}, b, \xi, a) = J(\mathbf{w}, b, \xi) - \sum_{i=1}^l a_i \{ \mathbf{w}^T \varphi(x_i) + b - y_i + \xi_i \} \quad (3)$$

式中: $a_i \in R$ 为 Lagrange 乘子,根据优化条件:

$$\frac{\partial L}{\partial \mathbf{w}} = 0, \quad \frac{\partial L}{\partial b} = 0, \quad \frac{\partial L}{\partial \xi_i} = 0, \quad \frac{\partial L}{\partial a_i} = 0 \quad (4)$$

可得:

$$\mathbf{w} = \sum_{i=1}^l a_i \varphi(x_i), \quad \sum_{i=1}^l a_i = 0, \quad a_i = \gamma \xi_i, \quad \mathbf{w}^T \varphi(x_i) + b + \xi_i - y_i = 0 \quad (5)$$

消去变量 w 和 ξ 可得:

$$\begin{bmatrix} 0 & \mathbf{1}^T \\ \mathbf{1} & \Omega + \gamma^{-1} I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ \mathbf{a} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{y} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_l]^T$; $\mathbf{1} = [1, 1, \dots, 1]^T$; $\mathbf{a} = [a_1, a_2, \dots, a_l]^T$ 并在 Ω 矩阵中应用 Mercer 条件:

$$\Omega_{ij} = y_i y_j \varphi(x_i)^T \varphi(x_j) = y_i y_j K(x_i, x_j) \quad (7)$$

可得最小二乘支持向量机的回归函数为:

$$f(x) = \sum_{i=1}^l a_i K(x, x_i) + b \quad (8)$$

式中: a_i 、 b 为线性系统的解; $K(x, x_i)$ 为核函数,任意满足 Mercer 条件的对称函数均可作为核函数,常用的核函数有:多项式核函数、径向基核函数和 Sigmoid 函数。

在实际应用中,最小二乘支持向量机模型的求解在于主要参数正则化参数 γ 和核参数 α ,这两个参数在很大程度上决定了最小二乘支持向量机的学习和泛化能力,可以采用遗传算法(Genetic Algorithm, 简称 GA)来确定这两个参数。

采用 GA 优化最小二乘支持向量机时,首先对优化的参数进行编码,通常采用二进制进行编码,一个染色体对应一个待求的解;根据适应度函数随机产生初始群体,一般地,高适应度的群体被选到的几率更高,初始群体分别根据相应的概率进行重组、交叉和变异,重组操作根据适应度选择个体并允许它通过直接复制染色体遗传给下一代,交叉操作通过随机选择一个交叉点并交换交叉点后的染色体信息产生新的染色体,变异操作通过随机改变当前染色体的信息产生新的染色体,经过群体的重组、交叉和变异后便产生了新的群体;然后对新产生群体的适应度进行评价并依据取代策略取代之前群体;重复进行这样的 GA 循环直到得到最优适应度的群体,此时群体的染色体对应的解就是参数的最优解。

2 码头结构裂缝最小二乘支持向量机模型

在基础约束、气候变化、氯离子侵蚀等因素的影响下,码头构件上常存在混凝土胀裂,钢筋外露锈蚀的病害,其中码头平台后横梁、纵梁、面板、桩基也会因为这些因素作用存在不同程度混凝土开裂和破损,裂缝的实测数据是码头裂缝

变化的宏观反映,然而实测数据序列与这些影响因素之间的关系复杂,根据《港口工程荷载规范》、《高桩码头结构分段设计理论和方法》等资料可知,码头裂缝的主要影响因素有温度、码头堆货量与风荷载,同时由于海水侵蚀、钢筋混凝土徐变及周期性波浪压力的作用,使得码头裂缝开合度产生时效部分,也就是裂缝开合度主要受温度、风、堆荷和时效因素影响。利用最小二乘支持向量机对数据处理的优势,首先将温度、风压等影响因素输入最小二乘支持向量机,将计算值与实测值最为接近作为目标函数:

$$\min S(y) = \sum_{i=1}^n (y_i - y_i')^2 \quad (9)$$

式中: y_i 为实测值; y_i' 为输出值; n 为序列长度。

以式(9)为终止条件,对参数进行优化,优化算法采用上节提到的遗传优化算法,其具体流程如图1所示。

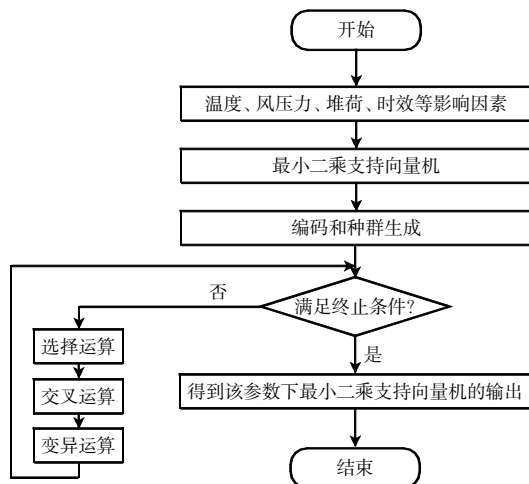


图1 采用GA优化的最小二乘支持向量机模型流程图

Fig. 1 Flow chart of least squares support vector machine model with GA optimization

根据上述模型,可以对裂缝实测值序列进行预报,其方法为:

- 1) $|y - \hat{y}| \leq 2S$ 正常
- 2) $2S < |y - \hat{y}| \leq 3S$ 测值若无趋势性变化,基本正常
- 3) $2S < |y - \hat{y}| \leq 3S$ 测值若有趋势性变化,异常
- 4) $|y - \hat{y}| > 3S$ 险情,必要时采取措施

(10)

式中: y 为实测值; \hat{y} 为最小二乘支持向量机模型

计算值; S 为模型标准差。

3 工程实例

某码头位于台州市椒江区海门港区,码头平台总长 162 m,宽 14 m,引桥总长 66 m,宽 10 m。码头采用高桩梁板式结构,桩基采用 550 mm × 550 mm 空心方桩,分为斜桩及直桩 2 种形式,现浇横梁嵌入桩帽,横梁上布置预制纵梁、预制面板及铺装层。引桥桩基采用预应力空心方桩,桩顶采用 1 000 mm × 1 000 mm 桩帽,之间采用纵横系梁,桩帽顶采用立柱,立柱上采用现浇帽梁,面板采用预制面板,其上铺设铺装层。平台前沿设置靠船构件、水平撑以及橡胶护舷,平台顶面设置系船柱和护轮坎。

修复加固之前检测结果表明:码头各构件均存在不同程度混凝土开裂和破损,裂缝是该码头主要病害。因此,2015 年 8 月对该码头进行了裂缝修复,并对 11 处典型裂缝位置布设了表面测缝计,以监测修复加固后的裂缝变化情况,起测日为 2015 年 10 月 21 日。

选取典型测点 5089 和测点 5093,其中测点 5089 在面板 15-5 上,具体位置如图 2 所示,测点 5093 在纵梁 15-5 南侧,具体位置如图 3 所示。利用最小二乘支持向量机算法建立其最小二乘支持向量机监控模型,分析资料系列起止日期为 2015-10-21—2016-06-24。

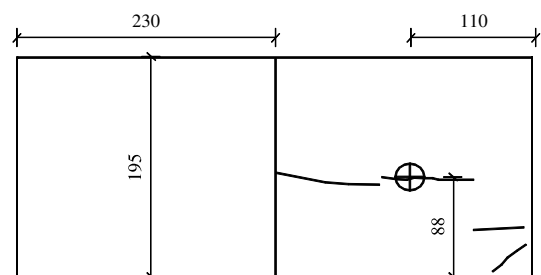


图2 测点5089在面板15-5上位置图

Fig. 2 Position of measuring point 5089 at panel 15-5

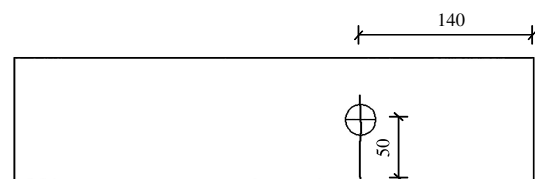


图3 测点5093在纵梁15-5南侧位置图

Fig. 3 Position of measuring point 5093 at south of longitudinal beam 15-5

通过程序计算,得到测点 5089 和测点 5093 最小二乘支持向量机模型的复相关系数 R 分别为 0.90 和 0.94,标准差 S 分别为 0.035 mm 和 0.015 mm。其实测值、拟合值和残差过程线分别如图 4 和图 5 所示。

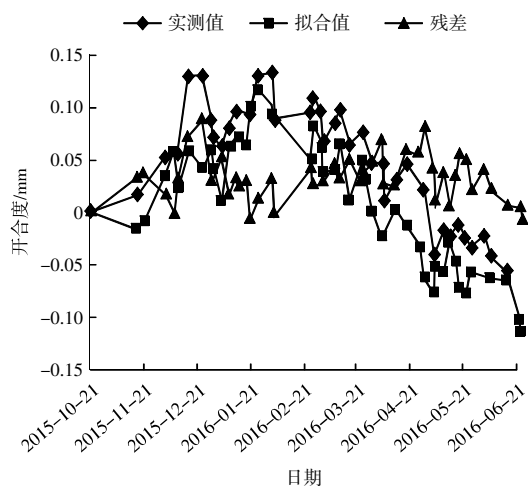


图 4 测点 5089 实测值、拟合值与残差过程线

Fig. 4 Measured and fitted values and residuals line of measuring point 5089

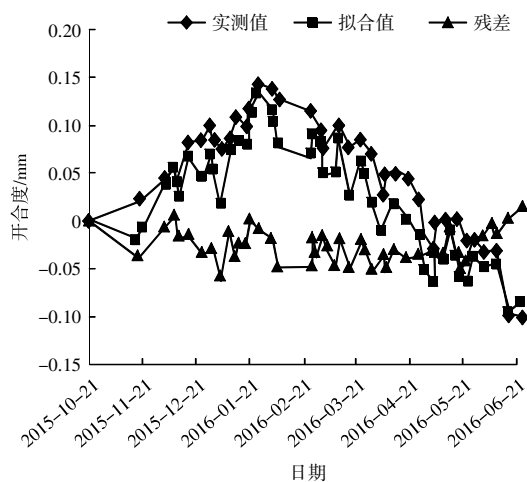


图 5 测点 5093 实测值、拟合值与残差过程线

Fig. 5 Measured and fitted values and residuals line of measuring point 5093

从图 4、图 5 以及复相关系数 R 和标准差 S 计算结果可见,测点 5089 和测点 5093 的复相关系数较高、标准差较小,实测值与拟合值较为接

近,说明最小二乘支持向量机模型在分析码头裂缝变化时较为合理,可利用式(10)对测点 5089 和测点 5093 的裂缝情况进行预报。

4 结语

本文针对台州椒江区某码头存在的病变裂缝,采用最小二乘支持向量机方法建立裂缝监测的分析模型,实例验证表明该方法具有较高的精度,可用于监控码头裂缝的安全性。

参考文献:

- [1] 蔡涛,王海霞,吴晓磊.我国沿海港口 30 年来发展浅析[J].中国港口,2008(11):8-10.
CAI Tao, WANG Hai-xia, WU Xiao-lei. Development of coastal ports in China in the past 30 years[J]. China Ports, 2008(11): 8-10.
- [2] 史青芬.高桩码头结构安全性评估[D].重庆:重庆交通大学,2010.
SHI Qing-fen. Safety evaluation of high-piled wharf structures[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2010.
- [3] 时蓓玲,吴锋,孙穆.高桩码头结构承载力检测与评估方法[J].中国港湾建设,2009(1):1-2,44.
SHI Bei-ling, WU Feng, SUN Mu. Detection and evaluation method of bearing capacity of high-piled wharf structures[J]. China Harbour Engineering, 2009(1): 1-2, 44.
- [4] 孙熙平,张宝华,张强,等.重力式码头基床遭水流冲刷后的稳定性分析[J].岩土力学,2010,31(10):3184-3190.
SUN Xi-ping, ZHANG Bao-hua, ZHANG Qiang, et al. Stability analysis of gravity quay when rubble bedding was eroded by water flow[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(10): 3184-3190.
- [5] 杨会来.高桩码头的检测与评估[D].重庆:重庆交通大学,2009.
YANG Hui-lai. Detection and evaluation of high-piled wharf[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2009.
- [6] 单红仙,秦建敏,贾永刚,等.青岛港木质高桩码头变性破坏监测与预报[J].岩石力学与工程学报,2004,23(5):814-820.
SHAN Hong-xian, QIN Jian-min, JIA Yong-gang, et al. Monitoring and prediction of displacement and failure of high-rise wood piled wharf in Qingdao harbour[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(5): 814-820.
- [7] 孟静,李鑫.在役高桩码头横梁剩余寿命预测[J].中国港湾建设,2014(5):9-13.
MENG Jing, LI Xin. Life prediction of beams of high-pile wharf in service life[J]. China Harbour Engineering, 2014(5): 9-13.
- [8] 李蔚.人工神经网络在高桩码头位移监测、预报中的应用研究[D].天津:天津大学,2006.
LI Wei. Application of artificial neural network to displacement monitoring and prediction of high-piled wharf[D]. Tianjin: Tianjin University, 2006.