

· 港 口 ·



基于支持向量机的架空直立式码头 船舶撞击力预测模型 *

周世良^{1,2}, 柯春儒², 吴凡², 舒岳阶¹, 杨逍驰², 熊聪², 唐盟涵²

(1. 重庆交通大学, 西南水运工程科学研究所, 重庆 400016;

2. 重庆交通大学, 内河航道整治技术交通行业重点实验室, 重庆 400074)

摘要: 针对现有结构监测方法尚无法对码头的不规范靠泊进行实时监测的问题。提出了一种基于支持向量机的预测模型用于对架空直立式码头船舶撞击力的实时监测。结合架空直立式码头的结构特点, 基于广义结构刚度对码头桩基的重要性进行评估, 对监测桩基进行优化选择。以重庆新田港码头一期第 10 结构段为概化研究对象, 按 1:20 的比尺构建码头物理模型, 模拟不规范靠泊作用。将采集的优化桩基的应变数据用预测模型进行训练与验证。该预测模型对于撞击力的作用位置识别精度为 0.98, 对于撞击力的作用强度预测的平均相对误差为 0.234%。

关键词: 架空直立式码头; 船舶撞击力; 结构监测; 广义结构刚度; 预测模型; 支持向量机

中图分类号: U656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)08-0021-07

Inversion model of ship impact force of overhead vertical wharf based on support vector machine

ZHOU Shiliang^{1,2}, KE Chunru², WU Fan², SHU Yuejie¹, YANG Xiaochi², XIONG Cong², TANG Menghan²

(1. The Southwestern Research Waterway Engineering Institute, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400016, China;

2. Key Laboratory of Inland Waterway Regulation Engineering Ministry of Transport, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: The existing structural monitoring methods are still unable to monitor the irregular berthing of wharf in real time. This paper proposed an inversion model based on support vector machine for real-time monitoring of ship impact force in overhead vertical wharf. Combined with the structural characteristics of overhead vertical wharf, the importance of wharf pile foundation is evaluated based on generalized structural stiffness, and the monitoring pile foundation is optimized. In this paper, the 10th structural section of Xintian Port Wharf Phase I in Chongqing is taken as the generalized research object, and the physical model of the wharf is constructed according to the scale of 1:20 to simulate the irregular berthing effect. The collected strain data of optimized pile foundation are trained and verified by inversion model. The accuracy of the inversion model for the position of impact force is 0.98, and the average relative error for predicting the strength of impact force is 0.234%.

Keywords: overhead vertical wharf; ship impact force; structural monitoring; generalized structural stiffness; inversion model; support vector machine

内河架空直立式码头具有适应大水位变幅、
泊稳条件好等优点, 是目前三峡库区大型码头建

设的主要结构形式。但由于在运营过程不规范靠
泊作用对桩基的影响程度最大^[1], 而目前尚无有

收稿日期: 2022-11-01

*基金项目: 国家自然科学基金项目(51508059); 重庆市交通局科技项目(No. 2020-08); 重庆市教委科学技术研究项目
(KJQN201800739)

作者简介: 周世良(1972—), 男, 博士, 教授, 研究方向为码头结构设计与结构智能监测。

效方法对重点桩基进行实时性的安全监测。

当前针对码头受不规范靠泊作用的研究方法主要有模态应变能^[2-4]、现场监测研究^[5-6]、时变可靠度分析^[7-8]，这些方法均面向于损伤后的码头结构，而不能在结构损伤前进行预警，为此本文提出一种基于支持向量机的预测模型，对不规范靠泊作用的位置、强度进行准确的识别，旨在指导码头的维护与管养。

1 码头监测桩基的优化选择

1.1 基于广义结构刚度的群桩重要性评价方法

桩基在架空直立式码头众多的结构物中是最为重要的承力结构，桩基的力学特征可作为窥视码头荷载的信息窗口。但由于该类码头的桩基数量多、受力情况复杂。如对所有桩基的应变都重点监测，势必造成不必要的浪费且安装维护的成本较大。本文采用广义结构刚度对码头模型的桩基进行重要性评估。

1.1.1 广义结构刚度的计算方法

叶列平等^[9]提出的广义结构刚度是一种变形能指标参数。该方法采用线弹性分析，以拆除构件对广义结构刚度的影响程度作为构件重要性的评价指标，进一步将该指标转化为结构变形能损失率，不同于结构刚度仅与自身属性有关，广义结构刚度还与结构上的荷载分布密切相关。在此简述广义刚度的求解过程。

结构在外荷载作用下的应变能 U 为：

$$U = 0.5 \mathbf{F}^T \mathbf{D} \quad (1)$$

式中： \mathbf{F} 为荷载向量； \mathbf{D} 为 F 作用下结构系统的位移向量。

在弹性范围内，位移向量 \mathbf{D} 为：

$$\mathbf{D} = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{F} \quad (2)$$

式中： \mathbf{K} 为结构的刚度矩阵。

将荷载向量 \mathbf{F} 用荷载分布向量 \mathbf{V} 和最大荷载数值 F_{\max} 表示为：

$$\mathbf{F} = F_{\max} \mathbf{V} \quad (3)$$

将式(2)(3)代入式(1)中可得：

$$U = 0.5 F_{\max}^2 V^T \mathbf{K}^{-1} \mathbf{V} \quad (4)$$

将广义结构刚度定义为：

$$K_{\text{stru}} = (\mathbf{V}^T \mathbf{K}^{-1} \mathbf{V})^{-1} \quad (5)$$

1.1.2 重要性的评价指标

以拆除构件前后系统的广义结构刚度变化率 I 作为构件重要性评价指标，表示为：

$$I = \frac{K_{\text{stru},0} - K_{\text{stru},f}}{K_{\text{stru},0}} = 1 - \frac{K_{\text{stru},f}}{K_{\text{stru},0}} \quad (6)$$

式中： $K_{\text{stru},0}$ 为完整结构的广义结构刚度； $K_{\text{stru},f}$ 为拆除桩基后结构的广义结构刚度。

I 为区间 $[0, 1]$ 上的一个常数指标。 I 值越趋近 0，表明所计算桩基的重要性越小，桩基损伤对结构系统整体的影响越小； I 值越趋近于 1，表明所计算桩基的重要性越大。结合广义结构刚度定义，将式(6)变换为：

$$I = 1 - \frac{U_0}{U_f} \quad (7)$$

式中： U_0 为完整结构的应变能； U_f 为拆除相应桩基后结构的应变能。

1.2 船舶撞击力作用下的群桩重要性分析

研究以重庆新田港码头第 10 结构段为概化模型，根据资料对桩基进行编号，从右至左，每一列的编号依次为 A、B、C、D、E，由临江一侧至靠岸一侧，每一行依次为 1、2、3、4，共计 20 根桩基，见图 1。

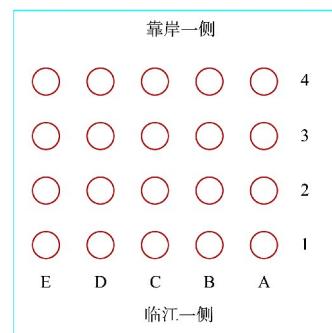


图 1 码头桩基编号

采用有限元分析软件 ABAQUS，根据码头相关设计材料，建立三维有限元模型，见图 2。计算完整结构和分别拆除各桩基后相应结构的应变能，根据广义结构刚度理论计算 160 kN 撞击力作用在高水位中间作用点时，各桩基后码头结构的重要

性系数, 确定码头模型桩基的重要性。

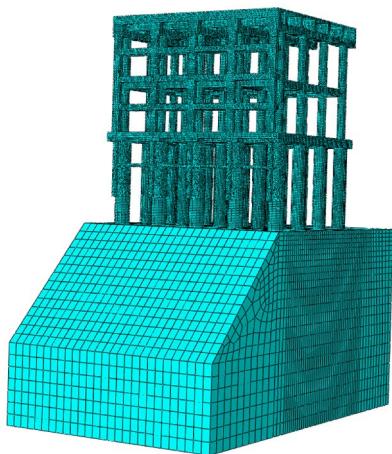


图2 新田港码头有限元分析模型

根据设计要求, 结合 ABAQUS 软件特点, 码头结构及其地基基础的材料参数见表 1。

表1 码头结构材料参数

构件	密度/ (kg·m ⁻³)	弹性模量/ GPa	泊松比	内摩擦角/ (°)	黏聚力/ kPa
桩基	2 500	32.5	0.17	-	-
横梁	2 500	33.5	0.17	-	-
纵梁	2 500	33.5	0.17	-	-
块石	2 300	30.0	0.25	35	5
基岩	2 500	25.0	0.30	32	15

船舶撞击力作用下完整码头结构的位移云图见图 3, 在船舶撞击力作用下, 码头结构整体表现为向靠岸一侧发生位移, 位移量由下向上逐渐增大, 且图中码头顶部靠岸一侧的位移量大于靠江一侧, 码头靠岸一侧顶面的位移量更接近最大值, 且图中码头靠岸一侧桩基的结构位移量由下至上的增大速率大于临江一侧, 因此在撞击力作用下, 码头靠岸一侧桩基整体比临江一侧更为重要。在船舶撞击力作用下, 完整码头结构的应变能 $U_0 = 290.773 \text{ kJ}$ 。

提取相同船舶撞击力作用下, 依此拆除每根桩基后, 剩余码头结构的应变能 U_f , 根据式(7)计算在相同的船舶撞击力作用下, 各桩基的构件重要性系数, 结果见表 2。将桩基重要性系数按照桩基的位置组成矩阵, 绘制出各桩基的重要性色块图, 其颜色按重要性系数由小至大变化, 见图 4。

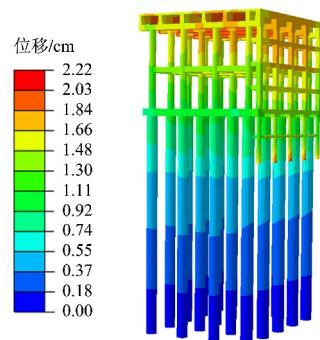


图3 船舶撞击力作用下完整码头结构位移云图

表2 拆除各桩基后结构应变能及重要性评估

拆除的桩基 编号	剩余码头结构的 应变能 U_f/kJ	桩基重要性 系数 I
A-1	298.152	0.024 750
A-2	292.836	0.007 045
A-3	293.187	0.008 234
A-4	294.461	0.012 525
B-1	296.380	0.018 918
B-2	293.030	0.007 702
B-3	293.322	0.008 690
B-4	295.436	0.015 784
C-1	296.708	0.020 003
C-2	293.107	0.007 963
C-3	293.428	0.009 048
C-4	296.699	0.019 973
D-1	296.390	0.018 951
D-2	293.031	0.007 706
D-3	293.326	0.008 704
D-4	295.483	0.015 940
E-1	298.109	0.024 608
E-2	292.823	0.007 001
E-3	293.108	0.007 966
E-4	294.469	0.012 551

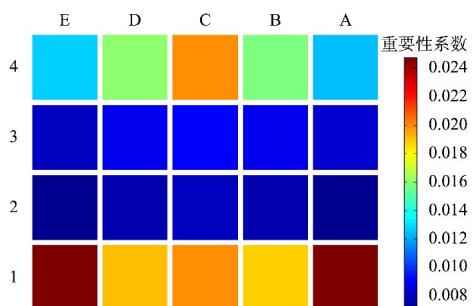


图4 船舶撞击力作用下桩基重要性系数色块

由图 4 可知, 在船舶撞击力作用下, 前排与后排桩基重要性系数大于中间的桩基, 前排桩基

中 A-1、E-1 重要性系数较大，其次是 C-1 桩基。后排桩基中呈现出中间较大，向两边降低的趋势。为充分考虑前后两排桩基对于撞击力的响应，分别在前后两排桩基中选择重要性系数较大的 3 个桩基为应变监测对象。即在 A-1、C-1、E-1、B-4、C-4、D-4 桩上布设应变传感器，监测桩基的分布见图 5。

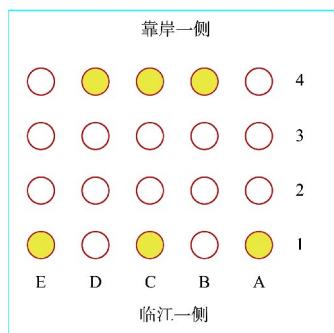


图 5 监测桩基的分布

2 物理模型试验

2.1 物理模型

试验选择重庆万州新田港一期第 10 结构段，按 1:20 进行缩放构建物理模型，并在特定的桩基上安装应变传感器记录桩基的应变数据，物理模型见图 6。



图 6 新田港物理模型

2.2 实验方案

在物理模型上模拟船舶的野蛮靠泊。加载装置见图 7。具体的实现步骤为：在码头前方安装反力架，通过千斤顶模拟船舶撞击作用。加载时采用慢速维持荷载法对码头模型施加船舶撞击力。试验加载的步骤参照 JGJ 106—2014《建筑基桩检

测技术规范》第 5.3.2 条，采用逐级等量分级加载，每级荷载达到相对稳定后加下一级荷载，每级荷载按设计荷载的 10% 计算，共分十级加载。直到设计荷载，然后分级卸载到零，试验测读时间为每间隔 5 min 读数 1 次，直到设计荷载再维持 30 min。



图 7 加载设备

根据 JTS 144-1—2010《港口工程荷载规范》规定，将船舶野蛮靠泊的实验荷载值设计为 8 kN，加载的位置见图 8，其中 1#、2#、3# 作用点为低水位船舶靠泊时撞击力的作用点；4#、5#、6# 作用点为中水位船舶靠泊时撞击力的作用点；7#、8#、9# 作用点为高水位船舶靠泊时撞击力的作用点。加载时分别对不同的作用点施加荷载作用，并记录数据。

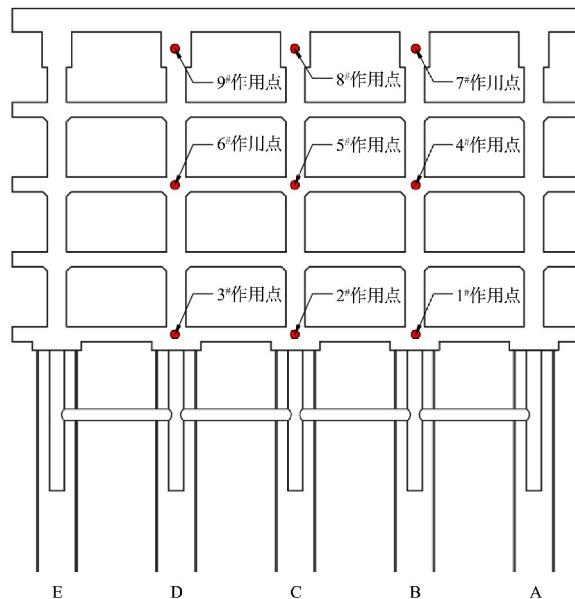


图 8 靠泊时船舶撞击力的作用点

应变传感器的布置与原型相对照, 根据对监测桩基的优化结果, 分别在 A-1、C-1、E-1、B-4、C-4、D-4 这 6 根桩基的原型设计低水位 (143.60 m) 至桩顶这一区域等间距布设 3 个应变传感器。共计 18 个, 传感器布设见图 9。

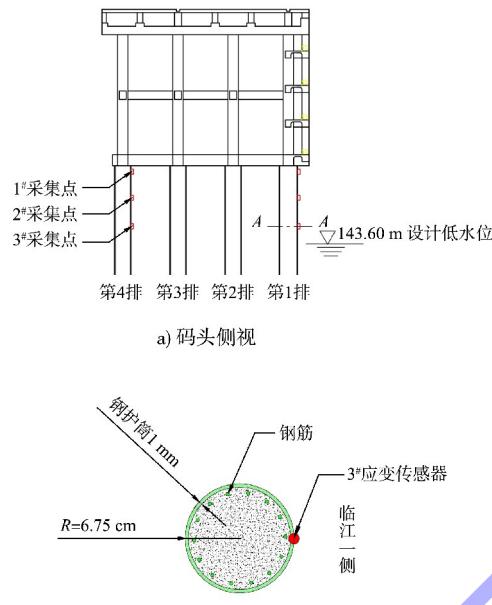


图 9 传感器布置

模型实验的数据采集使用 Dewesoft 动态数据采集系统, 见图 10。

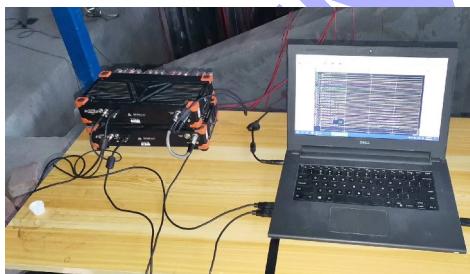


图 10 数据采集系统

3 基于支持向量机的船舶撞击力预测

3.1 支持向量机的原理与评估指标

船舶撞击力的预测模型旨在根据桩基监测的应变数据识别出船舶撞击的位置并预测其作用强度。由于架空直立式码头结构间复杂的耦合作用, 其应变并非呈现线性分布。因此对于作用位置的预测属于非线性多分类问题, 对于作用强度的预测则属于非线性回归问题^[10]。

针对上述问题, Covotes 和 Vapnik^[11]根据统计学习理论结合严密的优化理论与数学逻辑提出的支持向量机, 给出了独特的解答。与神经网络相比, 支持向量机具有结构风险最小化, 求解不存在局部极值的优点, 并以较高精度逼近任意函数^[12]。支持向量机是一种根据不同类间的最大间隔来确定最优的分类决策平面, 在此简述其原理。

设样本集为: $(X_i, y_i), i=1, 2, \dots, k$, 其中 X_i 为样本的特征向量, y_i 为样本上的类别标签, k 为样本数量。最优决策平面见图 11。

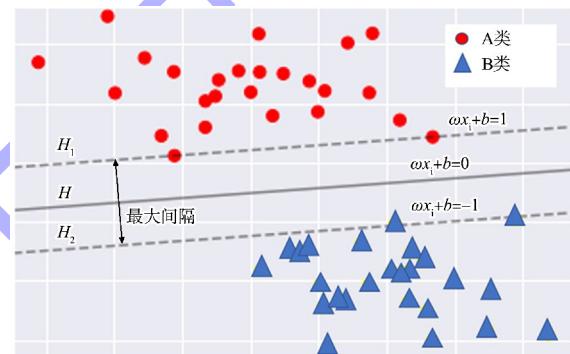


图 11 最优决策面

图 11 中, 圆形表示 A 类的样本点, 三角形表示 B 类的样本点。设 H 为最优决策平面, H_1 、 H_2 为经过两类样本点且离 H 最近的面, H 为二者的平分面。最大分类间隔是指 H_1 与 H_2 之间的距离。因此 H 的方程设为:

$$w^T x_i + b = 0 \quad (8)$$

式中: w 、 b 为待求解的参数向量。 H_1 与 H_2 的方程可以相应的设为:

$$w^T x_i + b = 1 \quad (9)$$

$$w^T x_i + b = -1 \quad (10)$$

图 11 中最大间隔可表示为 $\frac{2}{\|w\|}$, 令 $\frac{2}{\|w\|}$ 最大, 等同令 $\frac{1}{2} \|w\|^2$ 取最小, 故求解最优决策平面参数 w 、 b 的问题可转化为带约束条件下二次凸优化问题, 即:

$$\begin{cases} \min_{w, b} \frac{1}{2} \|w\|^2 \\ \text{s. t. } y_i(w^T x_i + b) \geq 1 \end{cases} \quad (11)$$

式(11)为该二次凸优化的原问题,求解时需要引入拉格朗日乘子 $\alpha_i \geq 0$ 构建拉格朗日函数:

$$L(w, b, \alpha) = \frac{1}{2} \|w\|^2 + \sum_{i=1}^k \alpha_i [1 - y_i (w^T x_i + b)] \quad (12)$$

分别求 w 、 b 的偏导为0,化简后带入式(12)得式(11)的对偶问题,表达式为:

$$\begin{cases} \max_{\alpha} \sum_{i=1}^k \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \alpha_i \alpha_j y_i y_j x_i x_j \\ \text{s. t. } \sum_{i=1}^k \alpha_i y_i = 0 \quad (0 \leq \alpha_i \leq C, i = 1, 2, \dots, k) \end{cases} \quad (13)$$

最后通过 SMO (sequential minimal optimization 序列最小优化算法)^[13]对式(13)求解,得出最优决策面的参数 w 、 b 。

对于非线性数据分类问题引入核函数,映射至高维空间进行求解,得到最优决策平面的表达式为:

$$f(x) = \text{sgn}(w^* x + b^*) = \text{sgn}\left(\sum_{i=1}^k a_i y_i \kappa(x_i, x_j) + b^*\right) \quad (14)$$

其中 $\kappa(x_i, x_j)$ 为核函数,研究表明高斯核函数在处理非线性样本时具有较高的准确性^[14]。因此本文采用高斯核函数。

$$\kappa(x_i, x_j) = \exp\left(-\frac{\|x_i - x_j\|}{2\sigma^2}\right) \quad (15)$$

式中: σ 为高斯核的带宽; x_i 、 x_j 为样本向量。

本文提出了一种基于支持向量机的损伤诱因预测数学模型:

$$\begin{cases} Y^P = \text{SVM}(X) \\ Y^P = (y_1^{\text{pr}}, y_2^{\text{pr}}) \\ X = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_l) \end{cases} \quad (16)$$

式中: Y^P 为待预测的目标向量; SVM 为支持向量机的预测数学模型; y_1^{pr} 、 y_2^{pr} 分别为预测的船舶撞击力的作用位置、作用强度; X 为传感器测得的应变向量; l 为 X 的维数。

该数学模型应用时,首先需要将样本数据拆分为训练与测试样本,将训练样本导入支持向量

机模型,采用5折交叉验证法进行训练求解;之后判断其在训练集上是否满足学习准则,即模型的精度是否满足要求,当模型未达标时则需要重新调整模型的参数,直到达标后输出对应的反演预测模型,并用测试样本对输出模型进行验证,流程见图12。

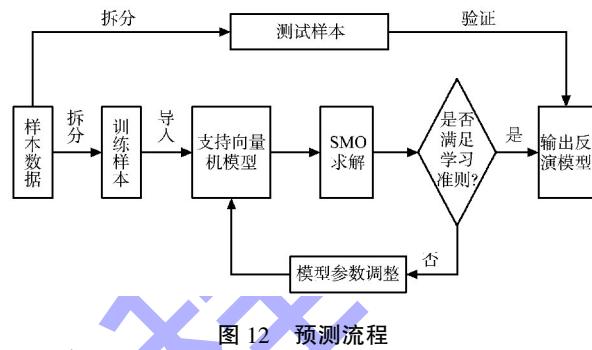


图 12 预测流程

对于作为位置的预测而言,模型的评估指标共有3个,分别是精度、召回率、 F_1 -score,精度表示样本集中被正确预测的样本数量占样本总数的比例;召回率表示某类样本中被正确预测的样本数量占该类样本总数的比例,其值越高表明模型的敏感性越好; F_1 -score 是一种综合性评估指标,为精度和召回率的调和平均数,其值越大,表明模型同时具有较高的敏感度和精度。以上三者取值范围为0~1,其值越接近1代表模型的泛化能力越好。对于作用强度而言,本文采用 R_2 -score、平均绝对误差、平均均方误差3个评估指标。拟合优度指标 R_2 -score 为预测样本对作用强度的变动解释程度,其值越高,表明模型对于作用强度拟合得越好。但对于回归预测模型而言, R_2 -score 不能完全判断模型精度,还需参考其平均绝对误差和平均均方误差的大小。二者的值越小,表示模型对于训练样本集中的数据拟合效果越好。

3.2 船舶撞击力的预测分析

试验对不同作用点施加撞击力后,共采集了79.5587万条应变数据,排除噪声等干扰因素影响后的数据共计13.6566万条。将每个作用点的数据随机抽取80%构建训练样本,余下的20%作为测试样本用于测试模型的性能。导入支持向量机模型,完成模型的训练后,将测试的数据样本

代入模型进行验证, 对于作用点位置的预测结果见表 3。将预测的结果与实际的作用点绘制成热力图, 见图 13。

表 3 船舶撞击力的作用点预测测试

作用点编号	测试样本数量	精度	F_1 -score	召回率
1 [#]	3 261	1.000	1.00	1.00
2 [#]	3 670	1.000	0.99	1.00
3 [#]	3 054	0.998	1.00	1.00
4 [#]	2 698	0.958	0.98	0.96
5 [#]	3 688	1.000	1.00	1.00
6 [#]	2 048	0.890	0.94	0.89
7 [#]	2 756	0.994	0.98	0.99
8 [#]	3 141	0.990	0.99	0.99
9 [#]	2 998	0.998	0.96	1.00
综合评估	27 314	0.980	0.98	0.98

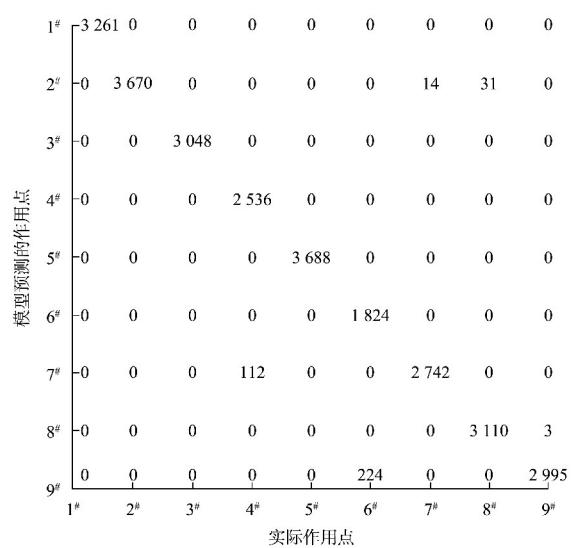


图 13 模型预测作用点与真实作用点的对比

图 13 中每 1 列的数值总和为该作用点测试样本的总数, 对角线上的数值表示被预测模型正确识别的作用点样本数量, 偏离对角线上的数值则表示被错误预测的样本数量。以第 8 行为例, 表示 8[#]作用点的测试样本共计 3 141 组, 其中有 3 110 组样本被正确的预测识别, 有 31 组样本被错误的识别为 2[#]作用点。由表 3 可知, 对于作用点的预测平均精度为 0.98, 对于 6[#]作用点的预测精度为 0.89, 相对较低。由图 13 可知, 主对角线上的数值远大于其他地方的数值, 表明该预测模型具有较高的精度。

模型对于船舶撞击力的作用强度的预测情况见表 4, 随机选择 30 组样本计算模型预测的作用强度的相对误差, 绘制成柱状图, 见图 14。

表 4 船舶撞击力的作用强度预测测试

样本数量	R_2 -score	平均绝对误差	平均均方误差
27 314	0.999 4	3.545 8	6.752 7

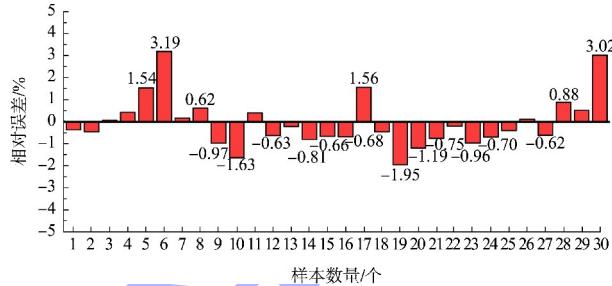


图 14 船舶撞击力作用强度的预测相对误差

对于船舶撞击力作用强度的预测 R_2 -score 为 0.999 4, 平均绝对误差和平均均方误差都小于 10。模型对于作用强度的预测, 最大相对误差为 15.71%, 平均相对误差为 0.234%。表明模型对于船舶撞击力作用强度的预测具有较高的精度。

4 结论

1) 通过广义结构刚度的结构重要性评价方法对架空直立式高桩码头桩基的重要性进行分析, 发现当架空直立式码头受船撞作用时, 前排与后排的桩基重要性大于中间的桩基, 并选取模型前排与后排中重要性系数较大的 A-1、C-1、E-1、B-4、C-4、D-4 桩作为轴向应变的监测对象。

2) 通过船撞作用的物理模型试验, 采集监测桩基的轴向应变数据, 将其作为样本数据与支持向量机结合, 建立对于船撞作用的数学预测模型。该模型对于撞击力的作用位置预测识别的精度为 0.98, 对于作用强度的预测最大相对误差为 15.71%, 平均相对误差为 0.234%。证明对于码头结构对船舶撞击作用的监测识别, 支持向量机是一种有效的方法, 也说明以桩基轴向应变作为预测的依据是可靠的。

(下转第 126 页)