

· 港口 ·



基于 EMD-VMD-LSTM 预测算法的 高桩码头结构安全预警方法*

栾宏¹, 高刚刚², 沈龙清³, 沈思程³, 苏静波³

(1. 中交上海三航科学研究院有限公司, 上海 200032; 2. 中交三航局第三工程有限公司, 江苏 南京 210011;
3. 河海大学, 江苏 南京 210024)

摘要: 基于高桩码头健康监测数据, 针对存在复杂环境因素影响监测精度问题, 提出 EMD-VMD-LSTM 组合算法处理并预测高桩码头结构中的监测信息, 通过对比分析验证在高桩码头结构现场监测大数据的预测预警分析中采用 EMD-VMD-LSTM 组合算法的可行性。同时, 基于 EMD-VMD-LSTM 方法和固定预警阈值, 提出动态预警阈值的确定方法, 设计动静态预警结合的高桩码头结构预警方法, 构建多指标、多层次的高桩码头结构安全预警体系以及相应的预警流程。研究成果可以提升高桩码头结构安全预警的准确性和效率, 也可为类似工程结构的安全预警管理提供一定的参考。

关键词: 高桩码头; 现场监测; 组合预测算法; 监测预警; 安全性评估

中图分类号: U656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)07-0035-07

Safety warning method for high-pile wharf structures based on EMD-VMD-LSTM prediction algorithm

LUAN Hong¹, GAO Ganggang², SHEN Longqing³, SHEN Sicheng³, SU Jingbo³

(1. CCCC Shanghai Third Harbor Engineering Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200032, China;

2. No. 3 Engineering Co., Ltd. of CCCC Third Harbor Engineering Co., Ltd., Nanjing 210011, China;

3. Hohai University, Nanjing 210024, China)

Abstract: Based on the health monitoring data of the high-pile wharf, aiming at the problem that complex environmental factors affect the monitoring accuracy, this paper proposes an EMD-VMD-LSTM combined algorithm to process and predict the monitoring information in the high-pile wharf structure, and it verifies the feasibility of using the EMD-VMD-LSTM combined algorithm for prediction and early warning analysis of large-scale monitoring data in the field of high-pile wharf structure through comparative analysis. At the same time, based on the EMD-VMD-LSTM method and a fixed warning threshold, a method for determining dynamic warning thresholds is proposed, the early warning method combining static and dynamic warning is designed, and a multi-index and multi-level high-pile wharf structure safety warning system and corresponding warning process are constructed. The research results can improve the accuracy and efficiency of safety early warning of high-pile wharf structure, and also provide a certain reference for the safety early-warning management of similar engineering structures.

Keywords: high-pile wharf; on site monitoring; combination prediction algorithm; monitoring and early warning; security assessment

收稿日期: 2023-11-11

*基金项目: 国家自然科学基金项目 (51679081)

作者简介: 栾宏 (1966—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港口水工建筑物技术研发及施工管理工作。

随着全球贸易的快速发展和海洋资源的深入开发，高桩码头作为重要的水上交通基础设施，其结构安全直接关系到港口运营的安全与效率^[1]。随着使用年限的增加和环境因素的作用，码头结构可能出现损伤和老化，从而引发安全隐患^[2]。因此，建立有效的基于监测数据的结构安全预警方法，对确保码头安全运营具有重要意义。

目前，关于高桩码头结构安全预警方法研究已有一定的成果。Liu 等^[3]和何宁等^[4]提出光纤布拉格光栅传感器技术对港口新建高桩码头结构的健康监测技术与设备创新，提高监测精度和效率，为安全预警提供数据支持。Diez 等^[5]和于树华^[6]在数据清洗、去噪、预处理等方面进行深入研究，提高了数据质量。陈红^[7]将数据挖掘、机器学习等技术应用于码头结构损伤识别、老化分析等方面，取得良好效果。国内外学者结合工程实践提出了多种码头结构安全预警方法，如基于风险评估^[8-9]、可靠性分析^[10-11]、损伤识别^[12-14]和有限元分析^[15-17]等方法，为码头结构安全预警提供了有力支持。

然而，目前高桩码头结构安全预警大多以固定预警值为判断标准，存在一定的误判。本文在 EMD-VMD-LSTM 组合预测基础上提出动态预警阈值计算方法，设计动静态预警结合的高桩码头结构预警方法，构建多指标、多层次的高桩码头结构安全预警体系以及相应的预警流程。

1 高桩码头基桩应力监测数据

以某港口高桩梁板结构基桩应力监测为研究对象，现场监测传感器布置如图 1 所示，以传感器 PHC126-1-2-a(第 126 排①号桩第 2 个测试截面的靠江侧传感器) 2020-10-01—2020-10-02 的应力监测数据为研究对象。PHC 管桩混凝土应力某段时间内的变化曲线见图 2，数据监测采样频率为 1 Hz。

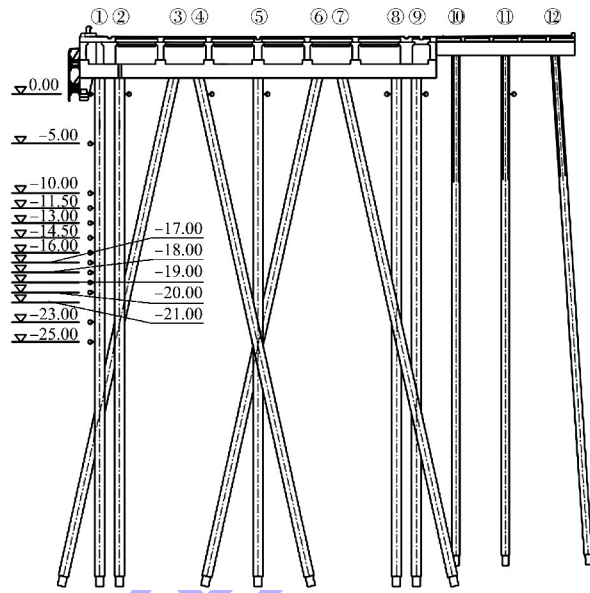


图 1 PHC 管桩传感器布置 (单位: m)

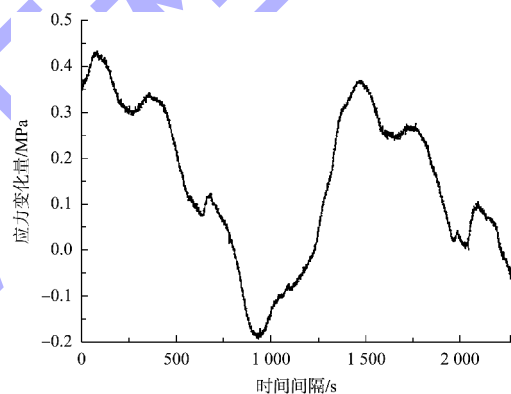


图 2 基桩测点 PHC126-1-2-a 实测应力变化曲线

2 基于高桩码头结构的组合预测算法

由于现场条件的限制以及数据的时间跨度较大，将环境效应从监测数据中剥离难以实现。首先通过经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)与变分模态分解(variational mode decomposition, VMD)方法对现场监测数据进行降噪处理，再采用 LSTM 神经网络算法对监测数据进行预测，利用预测数据和监测数据的变化波动对固定预警阈值进行修正，以达到准确预警的目的。

2.1 基于 EMD 与 VMD 的数据降噪处理

EMD 的核心思想是将监测信号分离，得到若干本征模态函数 $IMF_i(t)$ 与残差 $r_n(t)$ 。 $IMF_i(t)$ 是监测数据中不同频率上的分量，其最鲜明的特征是低阶本征模态函数的频率较高，随着阶数的增大，本征模态函数的频率逐渐降低；而残差可以

看作是最高阶的本征模态函数分量,故频率最低,常呈现单调趋势。

EMD进行降噪处理的核心在于从监测数据中分离出高频分量和低频分量,一般认为数据中的有效信息存在于低频分量中,然后通过确定本征模态函数的阶数阈值,重构满足阈值的低频分量,

实现降噪。利用EMD方法对监测数据进行分解以区别出高频数据和低频数据,经过数据分解可以得到5个IMF,见图3。从图3可以看出,IMF₁和IMF₂的频率明显大于其他本征模态函数,且规律性较差。因此在对数据进行预测时,这两组本征模态函数的预测误差可能较大,需进一步处理。

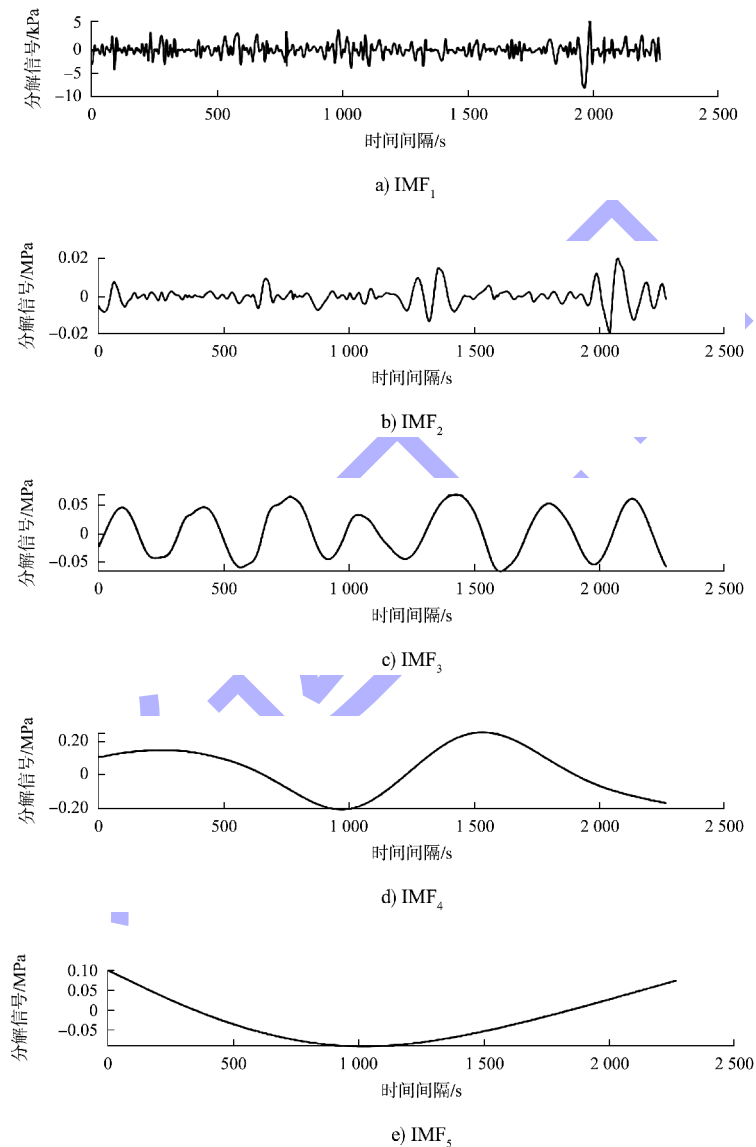


图3 EMD分解得到的本征模态函数

VMD是一种复杂监测信号的自适应分解算法,它有很强的鲁棒性,同时具有较高的运算速率,能够抑制EMD算法中可能出现的模态混叠现象,降低边界效应的干扰。对图3中IMF₁和IMF₂两组本征模态函数使用更加先进的VMD算法,进一步剥离高频数据和低频数据,以降低最终的

LSTM神经网络数据预测误差。IMF₁和IMF₂组合的高频分量见图4。经过二次分解数据可以得到5个IMF分量和余量结果,本征模态函数的排列见图5。从图5中可以看出,IMF₁、IMF₂和IMF₃的频率明显大于后面几阶本征模态函数,且规律性均较好,说明VMD预测误差合理。遵循尽量降低监

测数据频率的原则，应选择将 IMF_4 、 IMF_5 以及余项进行信号重新合成，得到去噪后的预处理数据。

经过预处理后的时间序列监测数据曲线变化见图 6。从图 6 可以发现，降噪后的数据在一定程度上去除了噪声的影响，从而可以提高 LSTM (长短期记忆) 神经网络的数据预测的精度。而利用 LSTM 神经网络算法进行预测时，将整体数据的前 90% 作为训练集，通过训练得到隐含在监测数据中的数据变化信息，通过这些变化信息将后 10% 的数据作为测试集进行训练。

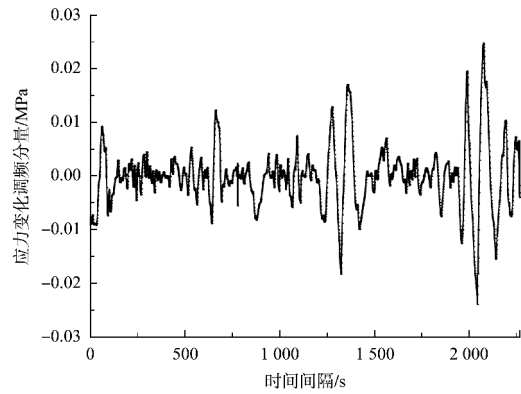


图 4 应力变化监测数据高频分量

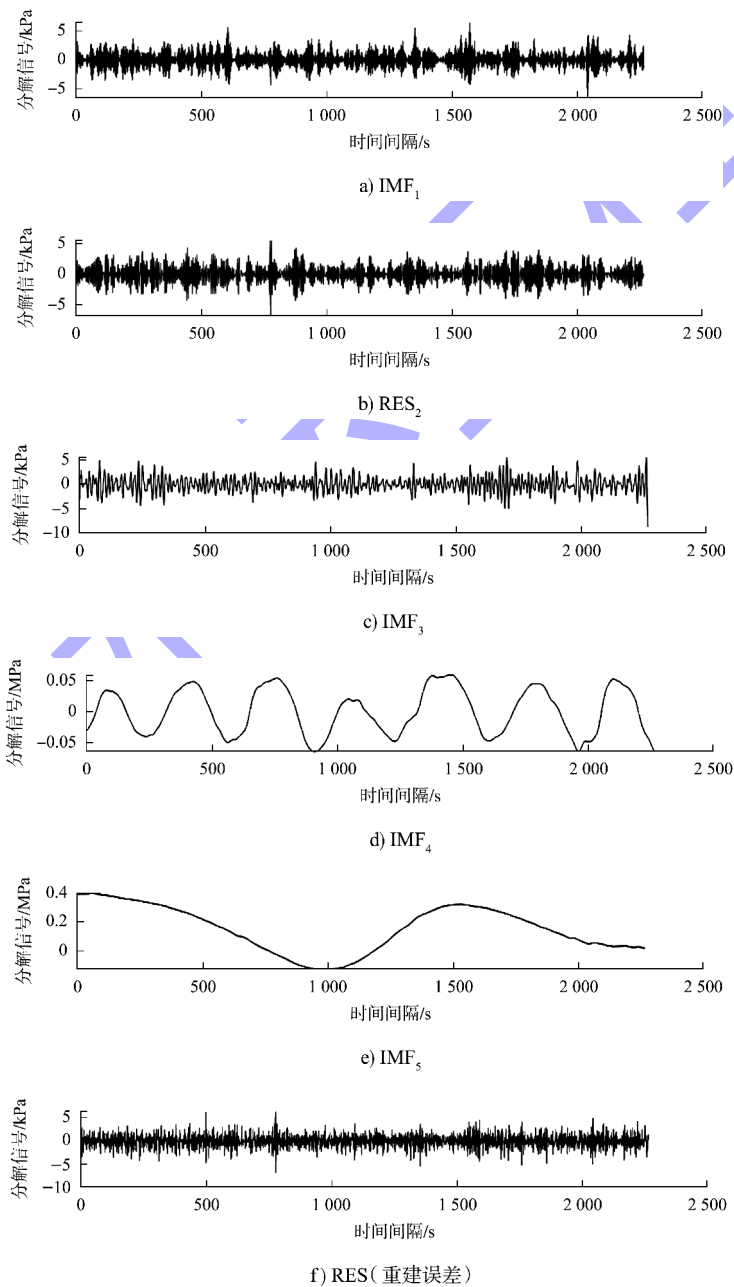


图 5 VMD 分解得到的本征模态函数

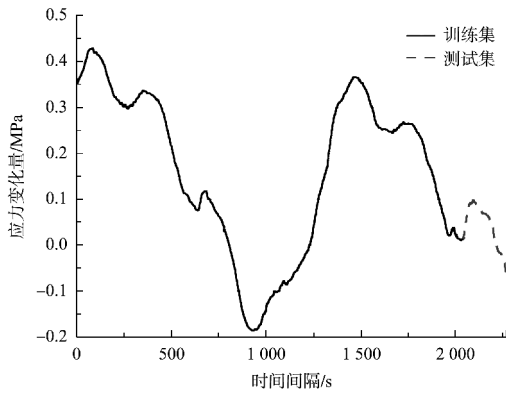


图 6 预处理后的时间序列监测数据

2.2 LSTM 神经网络预测

LSTM 模型是一种通过门控改进的循环神经网络, 目前最有效的确定方法就是使用控制变量法, 根据 LSTM 神经网络的预测误差最终确定 LSTM 神经网络超参数的取值。在研究 LSTM 神经网络超参数选取时, 发现网络层数与网络参数密切相关, 网络参数随着网络层数的增大而成倍增大, 出现过拟合等现象, LSTM 神经网络对健康监测数据的预测误差也增大, 因此进行分析时 LSTM 神经网络层数均取为 1。在此基础上采用控制变量法, 通过进行模型预测精度的评估, 对 LSTM 神经网络的超参数进行分析选择。模型精度的评估采用平均绝对百分误差 M 。

LSTM 神经网络隐藏单元数量对模型预测精度的影响评估如表 1 所示。

LSTM 隐藏单元数量	16	32	64	128
模型预测精度 $M/\%$	4.273 25	4.132 31	3.746 9	3.628 46

由表 1 可知, 随着 LSTM 隐藏单元数量的增加, M 一直降低, 隐藏单元数量从 64 增大到 128 时, M 仅仅降低 3%, 降低速率较之前明显较小, 但是隐藏单元数量越小, LSTM 参数数量也越少, 此时 LSTM 神经网络结构简单, 计算效率快速提升, 因此确定 LSTM 神经网络隐藏单元数量取为 64。

在 LSTM 神经网络中, 迭代次数对最终预测结果的影响也较为显著。因此在控制 LSTM 神经网络层数为 1 和隐藏单元数量取 64 时, 通过改变最大迭代次数, 分别对实际监测数据进行预测分析, 分析模型精度的变化如图 7 所示。

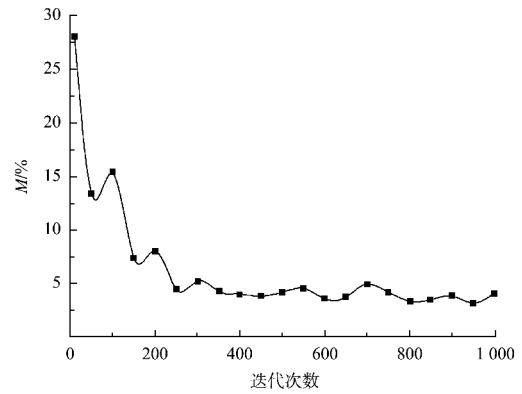


图 7 最大迭代次数影响下的预测误差变化曲线

在最大迭代次数的影响下, LSTM 神经网络对健康监测数据预测的平均绝对百分误差先断崖式下降, 在最大迭代次数达到 250 次后, 其预测误差呈现小范围波动, 其中最小值出现在迭代次数为 950 时, 此时模型预测效果最佳, 故确定 LSTM 神经网络的最大迭代次数为 950, LSTM 神经网络的其他参数设置为优化器 Adam、学习率 0.001、LSTM 层数 1、LSTM 隐藏单元数量 64。最终得到经过 EMD-VMD-LSTM 算法的预测结果与原始数据的对比见图 8。从图 8 可以发现, EMD-VMD-LSTM 预测算法的结果与原始监测数据的变化趋势相同, 相关性较好。因此, 对高桩码头结构现场监测大数据的预测预警分析采用 EMD-VMD-LSTM 组合算法, 可以提高工程预警的准确度。

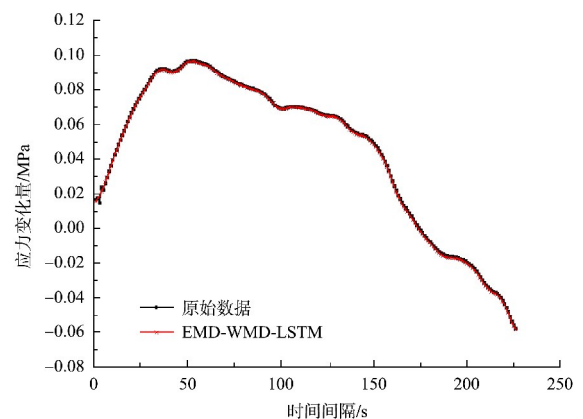


图 8 多种组合算法的预测结果

3 基于动静态结合的高桩码头结构安全预警方法

3.1 阈值确定

在高桩码头结构的安全健康监测中, 由于其工作环境较为恶劣, 作用荷载种类繁多, 传感器

的监测数据受干扰概率较大,根据对现场监测数据的分析可以明显发现其健康监测数据受温度影响较大,如果只设置固定预警阈值可能无法准确对高桩码头结构做出及时准确的预警。

固定预警阈值根据国家、行业等有关规范、规程和设计阶段确定的控制值设定,动态预警阈值通过将 EMD-VMD-LSTM 方法获得的预测数据与其平均值的相对波动变化加入到固定预警阈值中,实现动态预警阈值的设置,如图 9 所示。

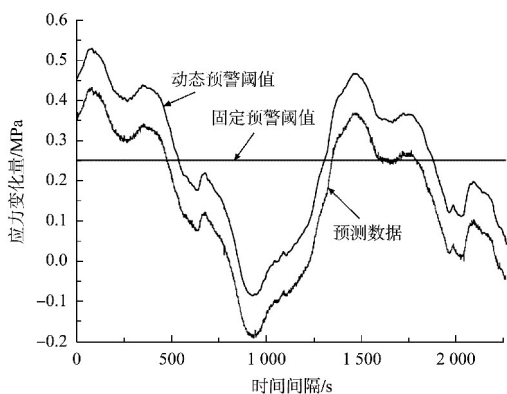


图 9 高桩码头结构的应力安全监测曲线

根据高桩码头结构失效模式的特点以及对高桩码头结构健康监测数据的处理分析,制定 3 级预警指标。1) 一级监测预警:以高桩码头结构正常使用控制指标值的 70% 结合 EMD-VMD-LSTM 组合预测算法得到的预测数据和实测数据平均值的波动变化量,作为动态一级预警阈值,当监测数据超过此波动曲线,进入一级预警状态;2) 二级监测预警:以高桩码头结构正常使用控制指标值的 85% 结合 EMD-VMD-LSTM 组合预测算法得到的预测数据和实测数据平均值的波动变化量,作为动态二级预警阈值,当监测数据超过此波动曲线,进入二级预警状态;3) 三级监测预警:以高桩码头结构正常使用控制指标值作为固定三级预警阈值,当监测数据超过此上限,进入三级预警状态。

3.2 高桩码头结构健康监测系统预警状态

在针对高桩码头结构安全性的预警中,可根据不同的结构状态,将预警状态分为 5 个层次。

1) 正常使用状态。高桩码头结构健康监测系统中的各类指标监测数据均未超过一级预警阈值,

高桩码头结构处于正常使用状态。

2) 一级预警状态。分为两种情况,存在监测数据连续时间内超过了一级动态阈值,但没有达到二级动态预警阈值;或者某个传感器监测数据发生突变跳动,但在极短时间内恢复正常。这可能是由于传感器受到干扰、波浪潮流等动荷载较大等各类原因,但问题较为轻微,且一般很快能够恢复,高桩码头结构基本仍处于未见异常状态。

3) 二级预警状态。分为 3 种情况,存在多个传感器监测数据同时超过一级动态预警阈值、某个传感器监测数据一段时间内均超过一级动态预警阈值或者某个传感器监测数据超过二级动态预警阈值。该状态出现时,高桩码头结构中某些构件可能出现了损伤,也可能是高桩码头结构受到极端荷载和运营工程中发生突发事件,需要采取防范措施。

4) 三级预警状态。当存在传感器的监测数据连续时间内超过三级固定预警阈值。这可能是由于高桩码头结构中可能出现了相当程度的损伤,或者发生了超过高桩码头承载极限的极端荷载,需要进行安全状态评估,并采取一些规避危险的措施。

5) 变化预警状态。当高桩码头结构的重要构件的位移监测数据超过了变化预警阈值,则进入变化预警状态。此时高桩码头结构的重要构件可能发生了较大的不均匀变化,影响高桩码头的正常使用,需要及时检修和维护。

4 结论

1) 考虑到高桩码头健康监测数据中的复杂环境因素可能对预警精度的影响,提出在高桩码头结构中使用 EMD-VMD-LSTM 组合预测算法,并通过对比 EMD-VMD-LSTM 预测算法的结果与原始监测数据的变化趋势,验证了在高桩码头结构现场监测大数据的预测预警分析采用 EMD-VMD-LSTM 组合算法的可行性,该方法可以提高工程预警的准确度。

2) 由于高桩码头独特的结构和复杂的工作环境,高桩码头结构预警方法仍不完善,基于国家、行业等有关规范、规程以及桥梁工程等预警方法的研究,结合高桩码头结构自身的特点,设计了

动静态预警结合的高桩码头结构预警方法,实现了多指标、多层次的高桩码头结构安全预警。研究成果可以为在役高桩码头的安全管理和预测预警工作提供参考。

参考文献:

- [1] 王帆,黄锦佳,刘作仪.港口管理与运营:新兴研究热点及其进展[J].管理科学学报,2017,20(5):111-126.
- [2] 陈秀瑛.港口码头的老化机理与病害评估[J].水运工程,2010(2):95-98.
- [3] LIU H B, ZHANG Q, ZHANG B H. Structural health monitoring of a newly built high-piled wharf in a harbor with fiber Bragg grating sensor technology: design and deployment [J]. Smart structures and systems, 2017, 20(2): 163-173.
- [4] 何宁,马桂珍,何斌,等.基于分布式光纤监测技术的板桩码头试验研究[J].水利水运工程学报,2021(4):85-91.
- [5] DIEZ A, KHOA N L D, ALAMDARI M M, et al. A clustering approach for structural health monitoring on bridges[J]. Journal of civil structural health monitoring, 2016, 6(3): 429-445.
- [6] 于树华.码头系泊舰艇机械噪声源测试分析方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2017.
- [7] 陈红.基于支持向量机的码头框架结构损伤识别方法研究[D].重庆:重庆交通大学,2021.
- [8] SERAP G, OZCAN A. A quantitative dynamic risk assessment for ship operation using the fuzzy FMEA: The case of ship berthing/unberthing operation [J]. Ocean engineering, 2023, 287: 115548
- [9] ECH-CHEIKH H, HAQ S L E, DOURAID A. Container terminal risk evaluation and management: A case study of a Moroccan port [J]. International journal of safety and security engineering: An interdisciplinary journal for research and applications, 2021, 11(6): 635-640.
- [10] 范军甫.考虑土体参数不确定性影响的高桩码头-岸坡体系可靠性分析[D].大连:大连海事大学,2023.
- [11] JIANG F Y, DONG S. An integrated reliability analysis model of sheet pile wharfs based on virtual support beam model and artificial intelligence algorithm [J]. KSCE journal of civil engineering, 2021, 25(7): 2613-2630.
- [12] 郑永来,肖飞,潘坦博,等.基于BP神经网络的高桩码头基桩损伤识别研究[J].建筑技术,2024,55(3):371-376.
- [13] 张汝学,郑永来,韩雨莘,等.基于模态柔度的高桩码头损伤识别方法研究[J].施工技术(中英文),2023,52(21):26-32.
- [14] ZHENG Y L, XIAO F, ZHANG R X, et al. Experimental investigation and damage identification of high-pile wharf framed bents under horizontal impact loads[J]. Sensors, 2024, 24: 563.
- [15] AN J J, CHEN X, WU F. Finite element analysis of sheet pile wharf with separated relieving platform[J]. Applied mechanics and materials, 2015, 3843 (744/746): 137-140.
- [16] 潘新颖,费华平,史宏达,等.高桩码头BIM孪生建模及有限元模型转换方法研究[J].水运工程,2023(9):165-170.
- [17] 许旭兵,郑永来,侯晨煜,等.板桩码头浚深改造遮帘桩效应有限元数值分析[J].施工技术(中英文),2023,52(23):118-123.

(本文编辑 王传瑜)

(上接第23页)

参考文献:

- [1] 王勇.基于动态二叉树的西江航运干线多梯级船闸链调度[J].水运工程,2021(3):159-163,190.
- [2] 罗怡菲.西江航运干线的黄金十年从“千帆待发”到“万舸争流”[J].中国航务周刊,2022(52):40-43.
- [3] 马爱兴,曹民雄,胡颖,等.多重因素影响下西江长洲枢纽至界首段枯水位降落特征[J].中国水运(下半月),2020,20(11):97-98,101.
- [4] 张家豪,王寿猛,覃华爱.内河航道断航影响分析和应对措施研究:以大藤峡水利枢纽工程截流断航为例[J].人民长江,2020,51(10):150-154,196.
- [5] 董宇,姜晔,何良德.内河航道通过能力计算方法研究[J].水运工程,2007(1):59-65.
- [6] 陈恺,张玮,李瀛.基于船舶交通流的内河航道通过能力研究[J].中国水运(下半月),2012,12(12):38-40.
- [7] 长江航道局.航道工程手册[M].北京:人民交通出版社,2004.

(本文编辑 王璁)