

· 港口 ·



## 内河框架直立式码头结构受荷敏感区域研究\*

刘明维<sup>1,2</sup>, 张斯琪<sup>1,2</sup>, 吴林键<sup>1,2</sup>, 李惠酒原<sup>3</sup>, 狄宇涛<sup>1,2</sup>, 代川<sup>1,2</sup>

- 重庆交通大学, 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074;
- 重庆交通大学, 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074;
- 中铁长江交通设计集团有限公司, 重庆 401121)

**摘要:** 为保证内河框架直立式码头长期运营安全, 开展针对该结构服役性能的监测检测工作尤为重要。传感器的布设位置及方案将会直接影响码头监测结果的精度与可靠性, 故应考虑将监测传感器布设在结构的受荷敏感区域内。然而, 由于内河框架直立式码头结构形式复杂、荷载工况组合数量庞大, 在最不利荷载组合下码头结构受荷敏感区的位置及分布目前尚不清楚。依托某内河大型枢纽港, 建立框架直立式码头结构段三维数值仿真模型, 通过编译码头结构重要构件最不利荷载工况组合算法, 获得各构件的最不利荷载组合情况。在此基础上, 结合有限元数值仿真计算方法, 探明最不利荷载组合下码头各构件的受荷响应点分布规律与敏感区范围。结果表明, 复杂组合荷载作用下, 框架直立式码头钢构件的受荷敏感性较混凝土构件更大; 钢构件受荷敏感区主要分布在前排钢靠船构件高、低水位的衔接处与悬臂端。研究成果在一定程度上解决了框架直立式码头结构监测测点冗杂、无效等问题, 为内河枢纽港码头结构的监测传感器布设提供了理论依据。

**关键词:** 框架直立式码头; 荷载组合; 结构受荷敏感区; 数值仿真

中图分类号: U656.1+24

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)02-0051-12

### Structural load sensitive area for inland river frame-structure vertical wharf

LIU Mingwei<sup>1,2</sup>, ZHANG Siqu<sup>1,2</sup>, WU Linjian<sup>1,2</sup>, LI Huijiuyuan<sup>3</sup>, DI Yutao<sup>1,2</sup>, DAI Chuan<sup>1,2</sup>

- National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
- Key Laboratory of the Ministry of Education on Hydraulic & Water Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
- China Railway Changjiang Transport Design Group Co., Ltd., Chongqing 401121, China)

**Abstract:** To ensure the long-term operational safety of frame-structure vertical wharfs in inland waterways, it is crucial to conduct monitoring and inspection of their service performance. The placement and scheme of monitoring sensors directly affect the accuracy and reliability of monitoring results. Therefore, sensors should ideally be positioned within the structural load sensitive areas. However, due to the complexity of frame-structure vertical wharfs and the large number of load combinations, the locations and distributions of structural load sensitive areas under the most adverse load combinations remain unclear. To address this issue, this study, based on a large inland hub port, establishes a three-dimensional numerical simulation model of a frame-structure vertical wharf segment. By developing an algorithm to identify the most adverse load combinations for critical structural components, the most adverse load combinations for each component are determined. On this basis, the distribution patterns of load response points and the ranges of sensitive areas under the most adverse load combinations are identified by using finite element numerical simulation. The results indicate that under complex load combinations, steel components of

收稿日期: 2024-04-17

\*基金项目: 国家自然科学基金项目(52279124); 重庆市技术创新与应用发展专项(CSTB2022TIAD-KPX0097); 中国中铁股份有限公司科技研究开发计划课题(2022-重点-41); 2024年重庆交通大学研究生科研创新项目(2024S0059)

作者简介: 刘明维(1972—), 男, 博士, 教授, 从事港口工程设计计算理论的教学研究工作。

frame-structure vertical wharfs exhibit greater load sensitivity compared to concrete components. The sensitive areas of steel components are primarily located at the junctions of high and low water levels and the cantilever ends of the front-row steel mooring structures. This study addresses issues such as redundancy and ineffectiveness in monitoring point placement, providing a theoretical basis for the deployment of monitoring sensors in inland hub port wharfs.

**Keywords:** frame-structure vertical wharf; load combination; structural load sensitive area; numerical simulation

随着我国水上交通和经济建设的快速发展,截至2021年底,我国大小港口共计412个,其中主要港口283个,国家重要港口34个,其他一般港口95个。作为国家物流体系的关键节点,港口的效率和安全直接关系到经济的持续健康发展。为了适应复杂的大水位差( $>30\text{ m}$ )、大流速( $>2\sim 3\text{ m/s}$ )及深水( $>20\text{ m}$ )等环境条件,长江中上游大型港口码头多采用框架直立式结构。

为了确保内河框架直立式码头能够维持健康运行并延长其使用寿命,近年来许多学者开始关注码头结构的健康监测技术研究。李瑞刚等<sup>[1]</sup>在上海某升级改造码头上安装应变监测系统,测量码头主要构件在实际作业过程中的应变数据。时闽生等<sup>[2]</sup>开发了一个完整的高桩码头结构健康监测系统,用于监测码头的典型结构断面。吴锋等<sup>[3]</sup>运用远程无线自动化技术,对某港口的高桩码头工程实施全生命周期的健康监测。王承强等<sup>[4]</sup>通过无基准动态位移监测技术,对江苏某高桩码头进行实时位移监测。周世良等<sup>[5]</sup>提出一种基于支持向量机的预测模型,监测架空直立式码头受到的船舶撞击力。刘红彪等<sup>[6]</sup>基于阳极梯传感器对天津某高桩码头设计部署结构耐久性监测(structural health monitoring, SDM)系统,用于钢筋混凝土结构的耐久性监测。吴俊等<sup>[7]</sup>基于广义结构刚度提出一种确定不利诱因下桩基的易损伤位置的重要性评价方法,实现对内河架空直立式码头群桩的健康监测。左良栋等<sup>[8]</sup>、周世良等<sup>[9]</sup>分别基于参数化模型和随机森林的方法对内河架空直立式码头结构损伤不良诱因作用进行反演研究。Wu et al.<sup>[10]</sup>基于刘明维等<sup>[11]</sup>、舒丹等<sup>[12]</sup>关于码头

最不利效应组合的算法研究,提出一种适用于搜寻大水位差框架式码头三维结构中各构件最不利荷载工况组合的计算方法,但该研究将码头概化为简单的面、梁单元而非实体单元,仅将截面上轴力、剪力、弯矩等内力进行组合,无法匹配并满足码头监测传感器的测量要素和多项异性。刘明维等<sup>[13-14]</sup>基于有限元方法研究闸门及支承运转件和浮式系船柱在不同工况下的结构应力、应变规律,以此确定其结构监测的敏感区位置。

综上所述,码头结构的健康监测仍是水运领域的研究热点之一。大水位差框架直立式码头结构形式复杂,荷载组合种类繁多,针对该码头各重要构件在其最不利荷载组合工况下的受荷敏感区域研究,目前尚未见专题报告。然而,针对框架直立式码头监测测点的选取暂无相关理论支撑,传统的传感器布设位置主要依赖经验判断,从而导致因监测传感器的布设位置不佳经常出现资源浪费、监测盲区以及数据解读困难等问题,因此有必要对监测传感器的布设位置及结构的受荷敏感区开展有针对性的研究。本文通过分析组合荷载作用下内河框架直立式码头的受力响应规律,探明内河大水位差框架直立式码头结构受荷敏感区域,旨在为监测点位的优化布置提供科学依据。

## 1 模型建立及验证

### 1.1 框架直立式码头结构段三维模型构建

本文依托某大型内河枢纽港,根据其框架直立式码头结构各部件的实际尺寸,基于有限元数值仿真软件 ANSYS 建立码头段结构三维数值仿真模型,如图1所示。



图 1 框架直立式码头三维数值仿真模型

Fig. 1 3D numerical simulation model of frame-structure vertical wharf

## 1.2 模型参数设置

码头结构中钢横撑、钢纵撑、钢护筒以及靠船构件采用 Q235 钢材料, 其余构件均为 C30 混凝土材料。其相关参数见表 1。

表 1 材料参数  
Tab. 1 Material parameters

材料名称	弹性模量 $E/\text{GPa}$	泊松比 $\mu$	密度 $\rho/$ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa
混凝土(C30)	30	0.20	2 300	-	30
钢(Q235)	210	0.33	7 850	250	460

为得到表面应力, 根据框架直立式码头的实际结构特征和受力情况, 选择 ANSYS Workbench 中的 Solid186(3D20N)与 Solid187(3D10N)分别作为二混凝土构件与钢构件的基本计算单元。见图 2。

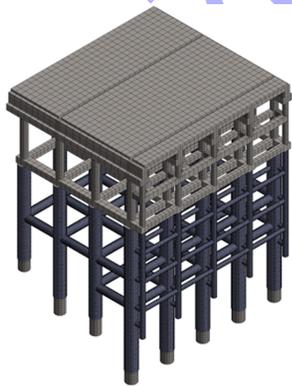


图 2 三维模型网格划分  
Fig. 2 3D model meshing

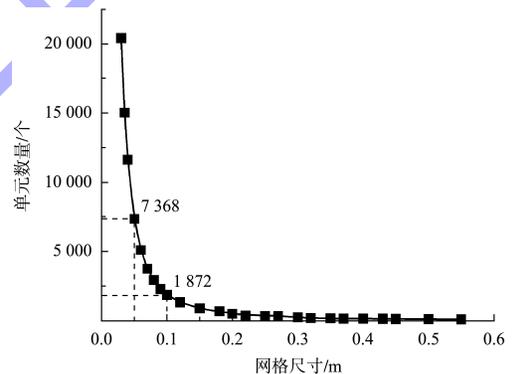
由于桩基多采用钢护筒嵌岩桩, 桩端部嵌固在中风化岩层中, 不考虑桩与土之间的摩擦力和黏结力, 码头结构下部桩基础受弯嵌固点以下的桩身与土体固结为一体, 故对码头结构的整体三

维模型的约束只需将钢护筒嵌岩桩的嵌固点位置设置为固结。

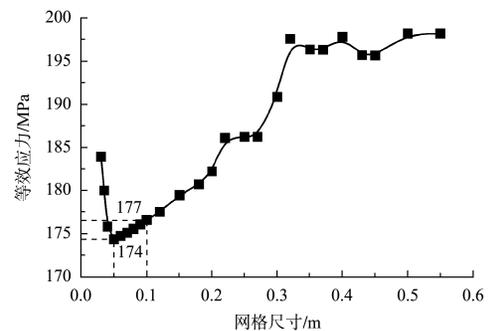
## 1.3 网格考察

为合理地分析码头结构在复杂荷载协同作用下的受荷响应, 选取受主导荷载(撞击力、系缆力)作用的前排靠船构件作为网格考察特征构件, 进行迭代细化验算以确保仿真模型的可靠性。

为使验证效果显著, 撞击力取 1 000 kN 进行验证。由图 3 可见, 随着网格尺寸的减小, 单元数量不断增加。当网格尺寸小于 0.1 m 时, 单元数量随网格尺寸的缩小呈指数型增加, 计算难度也随之大幅上升。与此同时, 随着网格尺寸的不断缩小, 计算结果先呈收敛趋势, 后在 0.05 m 处出现拐点而急剧上升。这是由于为了模拟橡胶护舷的受力特性, 靠船构件存在直角连接, 导致出现了应力奇异现象。因此在达到该拐点精度后, 继续细化网格并不会对模型的计算精度产生有利作用, 反而会导致结果错误。



a) 单元数量



b) 等效应力

图 3 框架直立式码头网格验算结果

Fig. 3 Grid check of frame-structure vertical wharf

由结果可知, 网格尺寸 0.1 m 相对于网格尺寸 0.05 m 而言, 结果精度相差 1.2%, 但网

格数量相差近 4 倍。为保证仿真模型准确性的同时提高计算效率，取 0.1 m 为仿真模型网格尺寸。

## 2 框架直立式码头结构数值仿真试验

### 2.1 重要构件定义及命名

现场调研发现，码头裸露的钢材锈蚀严重，随着受力面积的减少，构件连接处、施工焊接处等薄弱环节的受力状况将发生突变，影响码头的长期运营安全。见图 4。同时，该形式码头的钢构件多为空心薄壁结构，相比于其他的钢筋混凝土构件具有更强的柔性，结构受荷敏感程度更高，应作为监测的重点，故将其视为研究的重要构件，包括靠船梁、靠船构件、系船梁、钢纵撑、钢横撑、前排钢护筒、后排钢护筒。



图 4 钢构件损伤

Fig. 4 Damage of steel component

码头结构各重要构件以其所在平面绘制坐标系辅助命名，各坐标系以该构件上游的最高端为原点，各结构节点为分割数字。构件命名的基本原则为“构件名 X-Y”或“构件名 X-Z”，见图 5。其中，X 方向为结构纵向，同水流方向为正；Y 方向为结构横向，向岸方向为正；Z 方向为结构竖向，向地心方向为正。

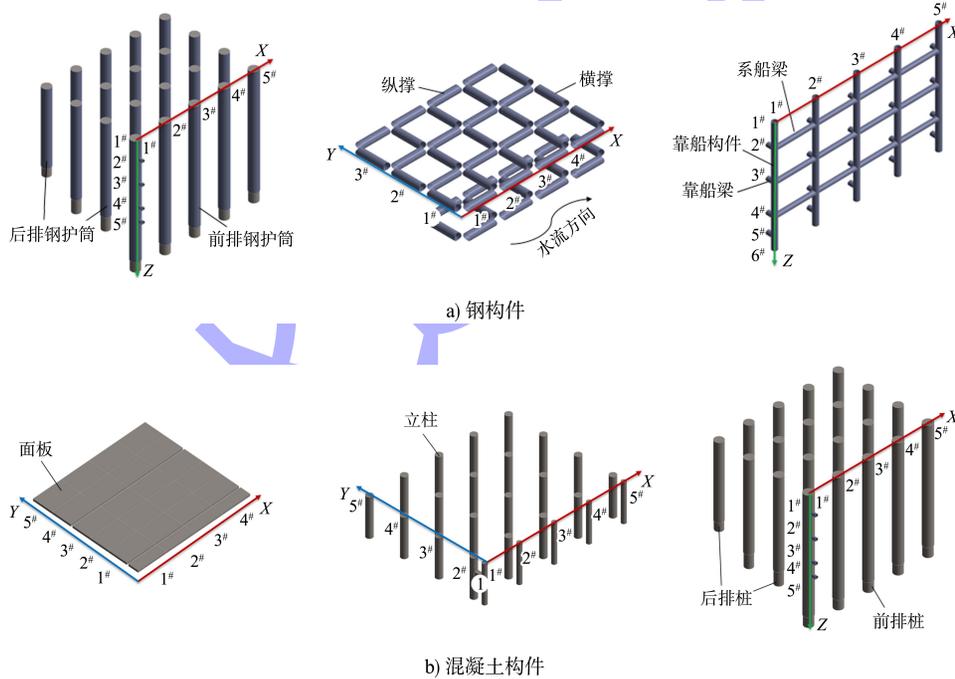


图 5 码头构件编号

Fig. 5 Wharf component number

### 2.2 工况荷载设置

#### 2.2.1 永久荷载

永久荷载包括码头结构中各个构件的自重力，用 ANSYS Workbench 中自带的惯性模块施加，加速度大小为  $9.8 \text{ m/s}^2$ ，为 1 种荷载工况。

#### 2.2.2 可变荷载

##### 2.2.2.1 堆货荷载

已有研究表明，若按各面板间相互独立的模式施加堆货荷载，其全组合模式的工况种类总数量高达 104.857 6 万种，但其中作为主导可变荷载

的比例只占约 2%。故本文仅考虑空堆和满堆 2 种情况, 压强大小取 30 kPa, 初始堆货荷载工况见图 6。

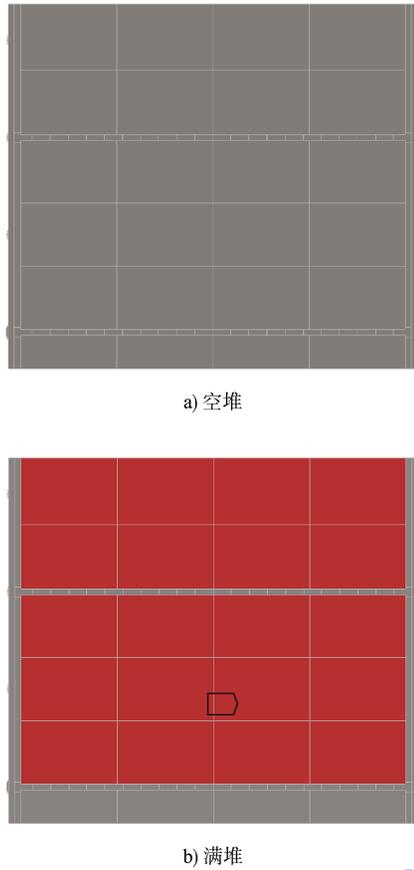


图 6 堆货荷载  
Fig. 6 Cargo loads

### 2.2.2.2 门机荷载

当 2 台型号为 Mh-40-45 的门机同时作业, 考虑门机为最不利的横向悬臂工作状态, 见图 7。

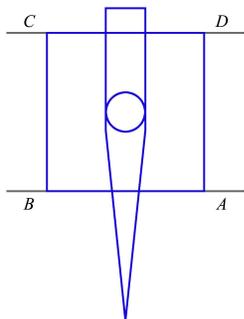


图 7 门机最不利工作状态  
Fig. 7 The worst working condition for portal cranes

根据相关规范<sup>[15]</sup>, 查得此工作状态下门机各支腿 A、B、C、D 的压力分别为 3 500、3 500、1 000、1 000 kN。

为充分考虑两门机在不同位置作业时对码头结构的影响, 门机荷载沿轨道梁间隔 1 m 依次施加模拟移动过程, 初始门机荷载的荷载工况种类为 40 种。

### 2.2.2.3 船舶荷载

1) 撞击力。以相关规范中最大法向靠泊速度  $v_n = 0.2 \text{ m/s}$  为依据, 计算得到船舶撞击力大小  $F_1 = 1\,000 \text{ kN}$ 。根据结构的对称性, 其全部撞击力工况共 21 种, 见图 8。

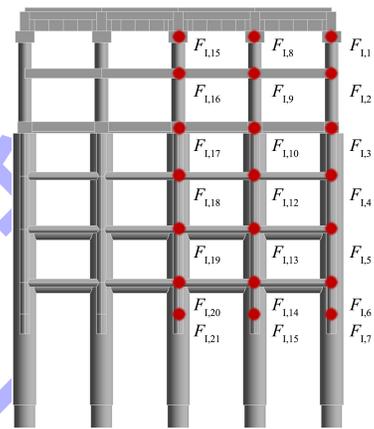


图 8 撞击力工况  
Fig. 8 Load cases of impact force

2) 系缆力。同理, 计算船舶系缆力大小为  $F_M = 436 \text{ kN}$ , 其系缆力工况共 13 种, 见图 9。

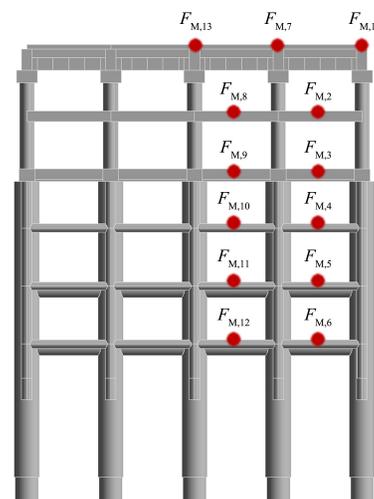


图 9 系缆力工况  
Fig. 9 Load cases of mooring force

## 2.3 荷载工况组合算法

### 2.3.1 荷载工况组合原则

各构件的总体荷载组合方案可按照荷载工况

组合原则分为两类。方案 1：自重力荷载+堆货荷载+船舶荷载(系缆力或撞击力)；方案 2：自重力荷载+堆货荷载+门机系缆力(门机荷载或门机荷载+系缆力)。

各构件荷载工况组合种类可分别通过计算得到，见表 2。

表 2 两种方案荷载工况组合种类

Tab. 2 Types of load case combinations in two schemes

方案	自重力	堆货	船舶荷载			门机系缆力			合计
			无	系缆	撞击	无	门机	门机+系缆	
1	1	2	1	13	21	-	-	-	70
			35						
2	1	2	-	-	-	1	40	520	1 122
						561			

### 2.3.2 荷载工况组合算法流程

根据上述原则，结合已有的最不利荷载工况组合算法的研究思路，利用数值计算软件 Matlab 编写码头结构各构件最不利荷载工况组合算法。组合算法流程见图 10。

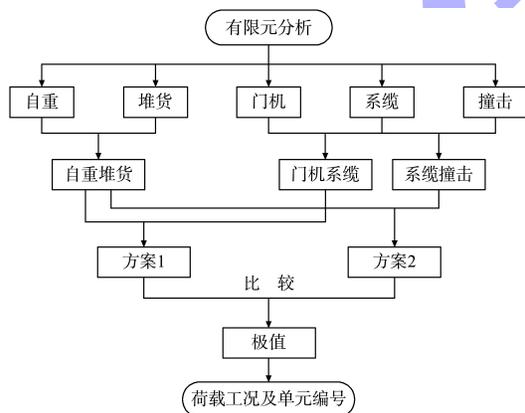


图 10 荷载工况组合算法流程

Fig. 10 Algorithm flow of load case combinations

## 2.4 最不利荷载工况组合

### 2.4.1 计算结果

由于框架直立式码头特殊的结构形式，其钢构件的敏感性和危险性远高于混凝土构件，属码头

结构整体安全的薄弱环节，因此常常作为结构监测的重点。本文基于单荷载工况下的应力、应变、变形的计算结果，对码头 7 种基础钢构件的各节点仿真值按荷载工况组合原则进行组合，得到 21 个最不利计算工况，见表 3。

表 3 码头重要构件最不利荷载工况组合

Tab. 3 The worst load case combinations of important components in wharf

目标构件	计算要素	工况组合
靠船梁	应力	自重+堆货+撞击 14
	应变	自重+堆货+撞击 14
	变形	自重+撞击 4
靠船构件	应力	自重+堆货+撞击 7
	应变	自重+堆货+撞击 7
	变形	自重+撞击 7
系船梁	应力	自重+堆货+撞击 6
	应变	自重+堆货+撞击 6
	变形	自重+堆货+门机 22+系缆 4
横撑	应力	自重+堆货+撞击 2
	应变	自重+堆货+撞击 2
	变形	自重+撞击 4
纵撑	应力	自重+堆货+门机 21+系缆 12
	应变	自重+堆货+门机 21+系缆 12
	变形	自重+撞击 4
前排钢护筒	应力	自重+堆货+门机 26+系缆 4
	应变	自重+堆货+门机 26+系缆 4
	变形	自重+堆货+门机 21+系缆 1
后排钢护筒	应力	自重+堆货+门机 30+系缆 1
	应变	自重+堆货+门机 30+系缆 1
	变形	自重+堆货+撞击 14

### 2.4.2 结果验证

为了验证本文算法计算所得各构件最不利内力组合值的正确性，利用码头三维有限元模型将各构件最不利工况进行数值仿真复算，将复算仿真值与算法组合值进行对比验证，见表 4。结果表明，算法组合值与复算仿真值的相对误差范围在 5.4% 以内，变形工况的误差值均控制在 0.5% 以下，验证了本文数值计算方法的正确性和可行性。

表 4 数值验证

Tab. 4 Numerical verification

目标构件	应力/MPa			应变/ $10^{-3}$			变形/ $\mu\text{m}$		
	组合值	仿真值	误差/1%	组合值	仿真值	误差/1%	组合值	仿真值	误差/1%
靠船梁	247.0	246.0	0.20	1.27	1.26	0.37	1.82	1.81	0.16
靠船构件	214.0	218.0	-1.47	1.22	1.22	0.15	6.30	6.29	0.09
系船梁	149.0	147.0	1.97	7.53	7.35	2.42	-5.83	-5.83	0.03
横撑	18.9	18.7	1.53	0.094 8	0.093 3	1.60	1.23	1.22	0.30
纵撑	18.0	17.1	5.38	0.090 0	0.085 3	5.31	1.15	1.15	0.31
前排钢护筒	30.7	29.6	3.72	0.154	0.148	3.65	-2.24	-2.23	0.15
后排钢护筒	23.7	22.9	3.55	0.120	0.115	3.59	-2.27	-2.26	0.48

### 3 结果与分析

#### 3.1 数值仿真结果

基于上文得到的各构件最不利工况进行数值仿真, 依次统计各工况下码头结构整体及各重要

钢构件的最大受荷响应点位置作为受荷响应点, 并通过分析受荷响应点分布及响应频率判断各区域的敏感程度, 进而评估码头结构的敏感区位置。各响应点位置的响应效率见图 11。

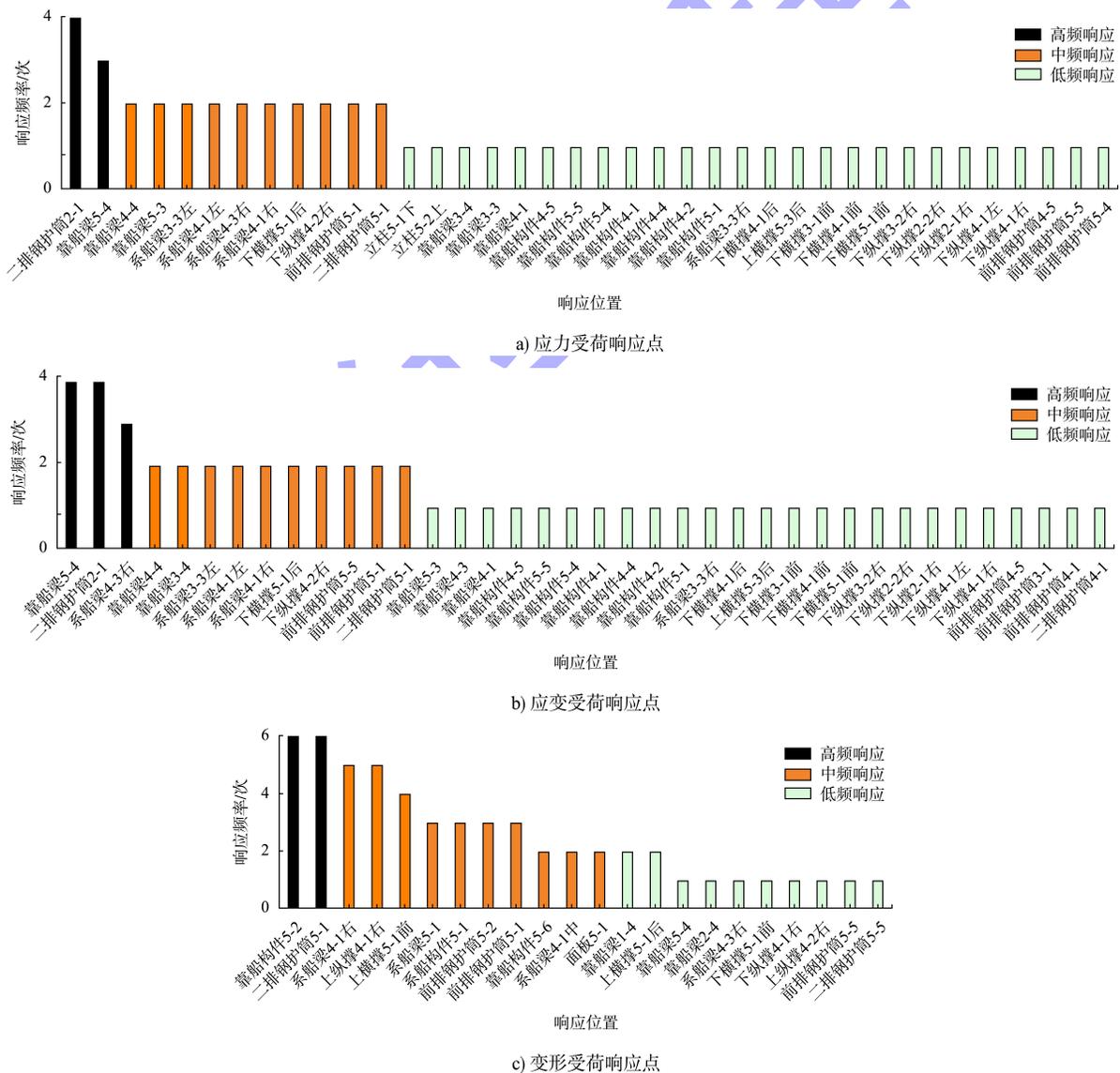


图 11 各响应点位置的响应频率分析

Fig. 11 Response frequency analysis of each response point location

### 3.2 敏感区分析

为便于直观地观测受荷响应点分布及敏感区规律，将各受荷响应点位置按响应次数占比分级绘制在相应码头构件上。由于混凝土构件上的响应次数过少，无法通过统计推断其敏感区分布规律，故不加以考虑，见图 12。为便于探明规律，其余钢构件按类型及功能整合为靠船钢构件、钢护筒、钢纵横撑 3 类。在监测要素上，由于应力、应变的仿真结果及统计规律相似，且在现场监测用同一传感器进行采集解译得到，故将其视为一类，与变形结果分别分析。

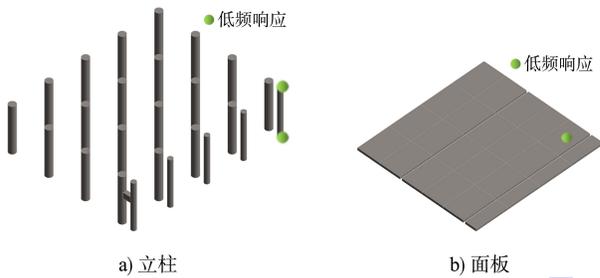


图 12 混凝土构件响应程度  
Fig. 12 Response level of concrete components

#### 3.2.1 应力、应变敏感区分析

##### 3.2.1.1 基于应力、应变的靠船钢构件敏感区分析

前排靠船钢构件由于受主导荷载(冲击力、系缆力)的直接作用，响应最为频繁且敏感。由于结构对称，单侧(右两榀)施加荷载，左侧响应程度与右侧相同，敏感区也呈对称分布。

基于应力、应变的靠船钢构件响应程度及敏感区见图 13。由图可知，对于内河框架直立式码头的靠船钢构件而言，其敏感性分布规律为：1) 纵向：结构段边侧>结构段中间；2) 竖向：低水位>高水位>中间；3) 局部：构件衔接处>构件中心处。敏感区域包括：1) 高水位结构段边侧两榀的钢构件衔接处附近(2<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>>1<sup>#</sup>、5<sup>#</sup>>3<sup>#</sup>)；2) 低水位的靠船梁及各钢构件衔接处(1<sup>#</sup>、5<sup>#</sup>>3<sup>#</sup>>2<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>)。

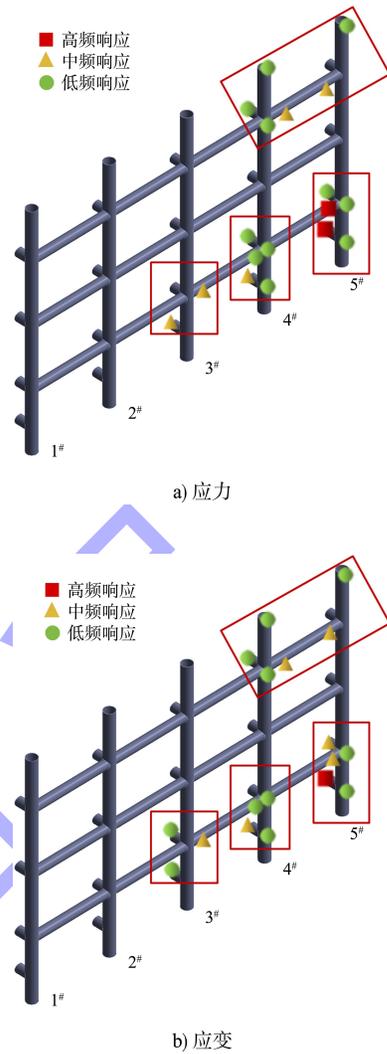


图 13 基于应力、应变的靠船钢构件响应程度及敏感区  
Fig. 13 Response level and sensitive area of steel docking components based on stress and strain

##### 3.2.1.2 基于应力、应变的钢纵横撑敏感区分析

图 14 为基于应力、应变的钢纵横撑响应程度及敏感区。由图可知，对于内河框架直立式码头的钢纵横撑而言，其敏感性分布规律为：1) 纵向：结构段边侧>结构段中间；2) 竖向：第 2 层>第 1 层；3) 局部：构件衔接处>构件中心处。敏感区域包括：1) 第 2 层迎水侧，钢构件衔接处附近；2) 第 2 层背水侧，结构段边侧两榀的钢构件衔接处附近(1<sup>#</sup>、5<sup>#</sup>>2<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>)。

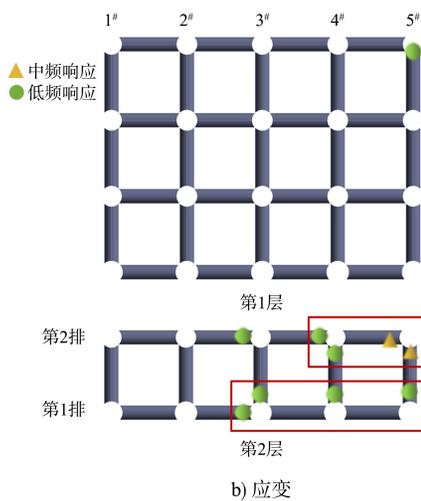
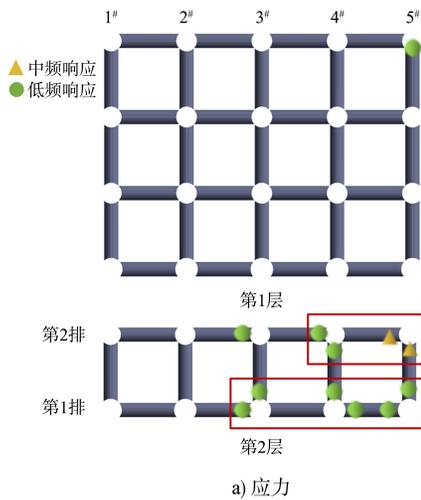


图 14 基于应力、应变的钢纵横撑响应程度及敏感区  
Fig. 14 Response level and sensitive area of steel longitudinal and transverse bracing components based on stress and strain

### 3.2.1.3 基于应力、应变的钢护筒敏感区分析

图 15 为基于应力、应变的钢护筒响应程度及敏感区。由图可知, 对于内河框架直立式码头的钢护筒而言, 其敏感性分布规律为: 1) 纵向: 结构段边侧>结构段中间; 2) 横向: 靠水侧>靠岸侧; 3) 竖向: 高水位>低水位>中间; 4) 局部: 构件衔接处>其他。敏感区域包括: 1) 第 1 排结构段边侧两樘的上端及低水位靠船梁高度附近 ( $1^{\#}$ 、 $5^{\#}$ > $2^{\#}$ 、 $4^{\#}$ > $3^{\#}$ ); 2) 第 2 排结构段边侧两樘的上端 ( $2^{\#}$ 、 $4^{\#}$ 高水位> $1^{\#}$ 、 $5^{\#}$ 高水位)。

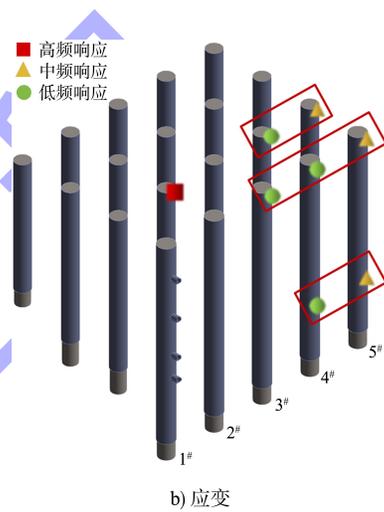
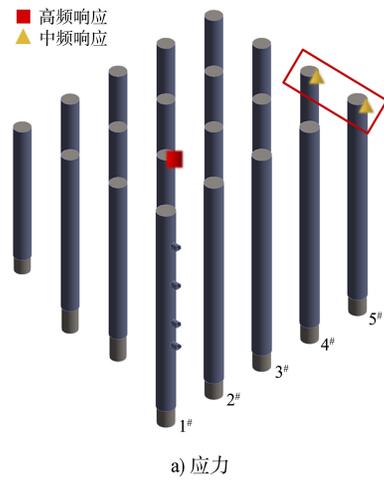


图 15 基于应力、应变的钢护筒响应程度及敏感区  
Fig. 15 Response level and sensitive area of steel sheathing components based on stress and strain

### 3.2.2 变形敏感区分析

#### 3.2.1.1 基于变形的靠船钢构件敏感区分析

图 16 为基于变形的靠船钢构件响应程度及敏感区。由图可知, 对于内河框架直立式码头的靠船钢构件而言, 其敏感性分布规律为: 1) 纵向: 结构段边侧>结构段中间; 2) 竖向: 高水位>低水位>中间; 3) 局部: 构件衔接处>构件中心处。敏感区域包括: 1) 高水位结构段边侧两樘的钢构件衔接处附近 ( $1^{\#}$ 、 $5^{\#}$ > $2^{\#}$ 、 $4^{\#}$ > $3^{\#}$ ); 2) 低水位靠船梁及其附近的钢构件衔接处 ( $1^{\#}$ 、 $5^{\#}$ > $2^{\#}$ 、 $4^{\#}$ > $3^{\#}$ )。

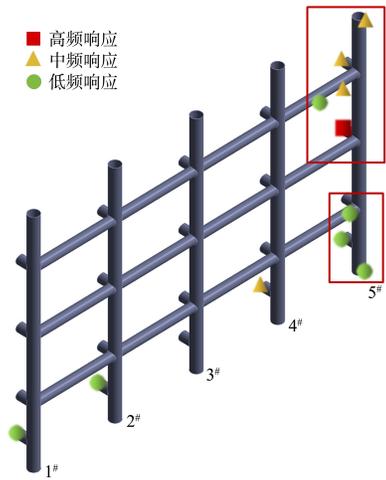


图 16 基于变形的靠船钢构件响应程度及敏感区

Fig. 16 Response level and sensitive area of steel docking components based on deformation

### 3.2.1.2 基于变形的钢纵横撑敏感区分析

图 17 为基于变形的钢纵横撑响应程度及敏感区。由图可知，对于内河框架直立式码头的钢纵横撑而言，其敏感性分布规律为：1) 纵向：结构段边侧>结构段中间；2) 横向：靠水侧>靠岸侧；3) 竖向：第 1 层>第 2 层；4) 局部：构件衔接处>构件中心处。敏感区域包括：1) 第 1 层前 2 排结构段边侧一榀的钢构件衔接处附近；2) 第 2 层第 1 排结构段边侧一榀的钢构件衔接处附近。

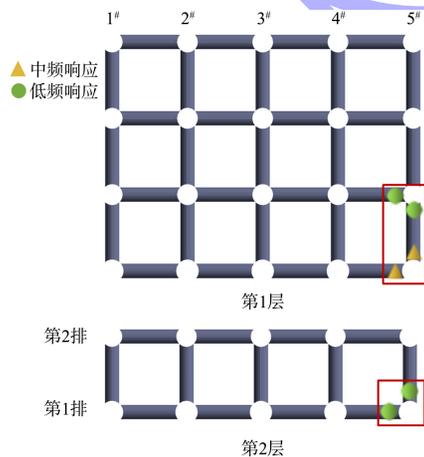


图 17 基于变形的钢纵横撑响应程度及敏感区

Fig. 17 Response level and sensitive area of steel longitudinal and transverse bracing components based on deformation

### 3.2.1.3 基于变形的钢护筒敏感区分析

图 18 为基于变形的钢护筒响应程度及敏感区。由图可知，对于内河框架直立式码头的钢护

筒而言，其敏感性分布规律为：1) 纵向：结构段边侧>结构段中间；2) 横向：靠水侧>靠岸侧；3) 竖向：高水位>低水位>中间；4) 局部：构件衔接处>其他。敏感区域包括：1) 第 1 排结构段边侧两榀的上端及低水位靠船梁高度附近(1#、5#高水位>1#、5#低水位)；2) 第 2 排结构段边侧两榀的上端。

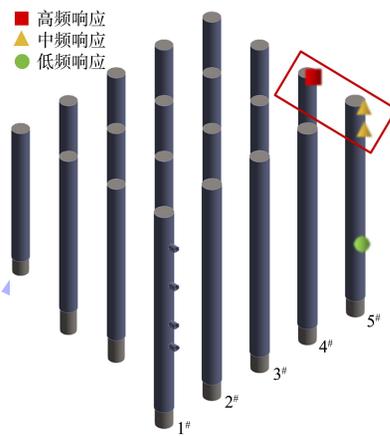


图 18 基于变形的钢护筒响应程度及敏感区

Fig. 18 Response level and sensitive area of steel sheathing components based on deformation

### 3.3 框架直立式码头监测点

通过对各不利工况下结构受荷响应点的统计分析可知，钢靠船构件的优先级高于钢护筒和钢纵横撑。结合上述受荷敏感区提炼得到若干推荐监测敏感点位置，并根据案例所属地区水文条件，将常年位于水下导致施工难度较大的测点标记为预留测点。

针对靠船钢构件而言，其响应程度最大，建议将主体传感器布设在此区域。测点位置可围绕结构段边侧桁架的高低水位靠船梁附近布设，避开结构段中间桁架以及各构件跨中位置，以免浪费，见图 19。

针对钢纵横撑而言，条件允许的情况下可尽量将传感器布设在低水位位置以获得较明显的受荷反馈。若在上部布设，建议将测点位置选取在结构段边侧(尽量靠水侧)，见图 20。

针对钢护筒而言，整体规律与钢靠船构件相似，但响应程度较差。建议作为补充测点，布设在靠近钢靠船构件测点的构件衔接附近，见图 21。

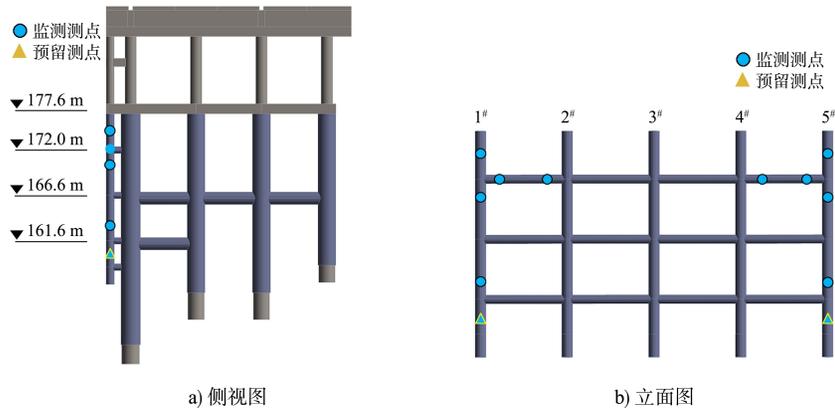


图 19 钢靠船构件监测敏感点

Fig. 19 Monitoring sensitive points of steel docking components

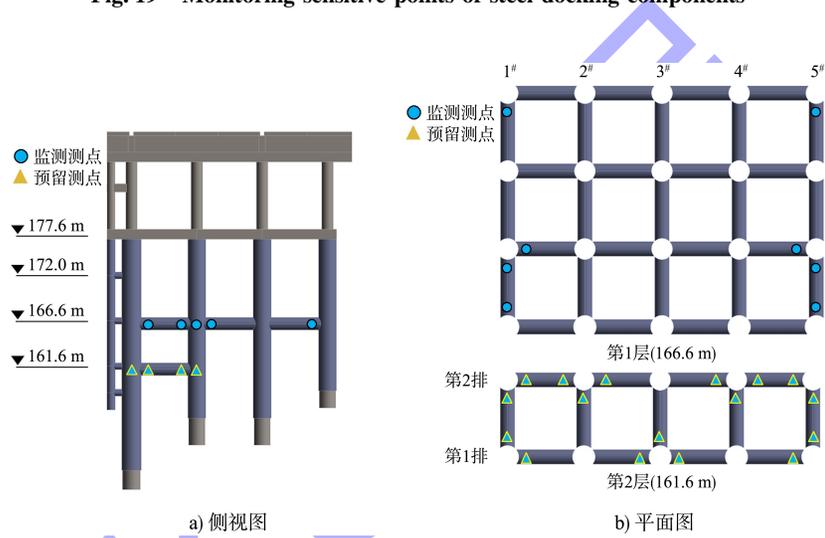


图 20 钢纵横撑监测敏感点

Fig. 20 Monitoring sensitive points of steel longitudinal and transverse bracing components

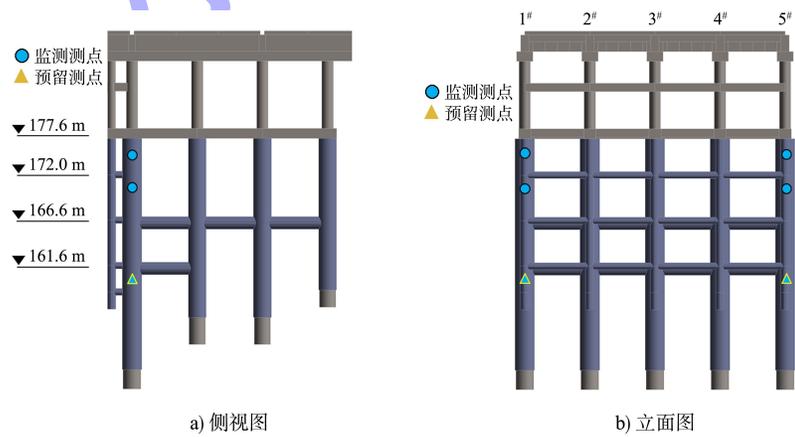


图 21 钢护筒监测敏感点

Fig. 21 Monitoring sensitive points of steel sheathing components

#### 4 结论

1) 建立了框架直立式码头结构段三维数值仿真模型, 并通过对特征构件的网格迭代验证, 考察三维仿真模型的精度。

2) 基于码头结构分别在不同荷载工况单独作用下钢构件的受荷响应结果, 通过矩阵运算的原理来实现对其相应值的组合叠加, 并从中得到各钢构件 3 类共 21 个最不利荷载工况组合情况。

3) 统计了内河框架直立式码头在不同监测要素下各重要钢构件的监测敏感点的分布情况, 明确前排钢靠船构件为主要敏感区, 且低水位情况更为敏感; 钢靠船构件优先级高于钢护筒以及钢纵横撑; 确定了框架直立式码头受荷敏感区域主要分布在钢靠船构件的高、低水位的构件衔接处和悬臂段。

4) 通过对框架直立式码头的受荷敏感区域研究, 可为内河枢纽港监测传感器布设位置提供理论支撑和科学依据, 为进一步研究框架直立式码头受力特征的监测提供技术支撑, 有效填补了框架直立式码头受荷响应问题的部分理论空白。

#### 参考文献:

[1] 李瑞刚, 朱明友. 高桩码头应变监测与结果分析[J]. 水运工程, 2021(10): 236-240.  
LI R G, ZHU M Y. Strain monitoring and results analysis of high-piled wharf [J]. Port & waterway engineering, 2021(10): 236-240.

[2] 时闽生, 刘思国, 张雨雷, 等. 高桩码头结构健康监测系统研究[J]. 中国港湾建设, 2021, 41(3): 67-71.  
SHI M S, LIU S G, ZHANG Y L, et al. Research on structural health monitoring system of high piled wharf[J]. China harbour engineering, 2021, 41(3): 67-71.

[3] 吴锋, 卓杨, 刘旭, 等. 高桩码头全寿命周期的健康监测技术[J]. 水运工程, 2023(2): 44-48, 53.  
WU F, ZHUO Y, LIU X, et al. Health monitoring technique of high piled wharf based on life cycle theory[J]. Port & waterway engineering, 2023(2): 44-48, 53.

[4] 王承强, 贾宇, 王臣, 等. 基于无基准动态位移监测的江

苏某高桩码头变位特征与安全预警[J]. 水运工程, 2024(2): 35-42, 48.

WANG C Q, JIA Y, WANG C, et al. Displacement characteristics and safety warning of a high pile wharf in Jiangsu Province based on dynamic displacement monitoring without reference [J]. Port & waterway engineering, 2024(2): 35-42, 48.

[5] 周世良, 柯春儒, 吴凡, 等. 基于支持向量机的架空直立式码头船舶撞击力预测模型[J]. 水运工程, 2023(8): 21-27, 126.  
ZHOU S L, KE C R, WU F, et al. Inversion model of ship impact force of overhead vertical wharf based on support vector machine [J]. Port & waterway engineering, 2023(8): 21-27, 126.

[6] 刘红彪, 刘海成, 齐方利, 等. 基于阳极梯传感器的高桩码头耐久性监测研究[J]. 水道港口, 2023, 44(3): 422-431.  
LIU H B, LIU H C, QI F L, et al. Study on the long-term durability monitoring data for a high-piled wharf in a harbor with anode-ladder sensors[J]. Journal of waterway and harbor, 2023, 44(3): 422-431.

[7] 吴俊, 吴凡, 马御风, 等. 内河架空直立式码头群桩重要性评价方法[J]. 水道港口, 2023, 44(1): 73-81.  
WU J, WU F, MA Y F, et al. Method for evaluating the importance of pile group piles for overhead vertical wharfs in inland rivers[J]. Journal of waterway and harbor, 2023, 44(1): 73-81.

[8] 左良栋, 周世良, 曹诗宝, 等. 基于参数化模型的架空直立式码头损伤诱因反演[J]. 水运工程, 2022(2): 58-63, 82.  
ZUO L D, ZHOU S L, CAO S B, et al. Inversion of damage inducement of overhead vertical wharf based on parameterization model[J]. Port & waterway engineering, 2022(2): 58-63, 82.

[9] 周世良, 熊聪, 柯春儒, 等. 基于随机森林的内河架空直立式码头损伤诱因反演模型研究[J]. 水运工程, 2023(7): 53-59.  
ZHOU S L, XIONG C, KE C R, et al. Back analysis model of damage incentives of inland river overhead vertical wharf based on random forest [J]. Port & waterway engineering, 2023(7): 53-59.