



# 涌浪作用下系泊于岸壁式码头船舶的 动态响应与安全性分析\*

胡杰<sup>1</sup>, 钱丽云<sup>2</sup>, 龙四立<sup>3</sup>, 张春泽<sup>1</sup>, 侯极<sup>1</sup>, 张绪进<sup>1</sup>

(1. 重庆交通大学, 重庆西南水运工程科学研究所, 重庆 400074;

2. 长江勘测规划设计研究院, 重庆 400016;

3. 广西壮族自治区水利电力勘测设计研究院, 广西南宁 530023)

**摘要:** 涌浪的发生对相应水域内的船只和码头的安全稳定具有重要影响。在顺直河道中, 通过建立码头与船舶的三维数值模型, 模拟涌浪作用下系泊于岸壁式码头船舶的运动响应过程, 分析不同涌浪高度下船舶运动及各缆绳受力特征, 总结出相应的动态响应规律和系泊安全情况。研究表明: 系统船舶遭遇 0.5、1.0 及 2.0 m 高度涌浪时, 各平动、转动参数变化幅值随浪高增大而增大, 其中涌浪对船舶横摇转动角度影响最显著, 各工况下船只均失稳。同时, 艏艉系缆力随涌浪高度增大交替出现峰值, 且艏横缆受力大于艉横缆, 随浪高增大接近或超过破断值, 影响系泊稳定性。针对抛锚离岸工况开展研究, 发现遭遇 2.0 m 高度涌浪时, 抛锚离岸船只摇动参数较系泊船只降低 26.7%~42.3%。因此, 为保障涌浪影响区靠泊船只安全, 建议其在靠泊前, 采取“提前在离岸侧下开锚, 当接到涌浪预警后, 立即解除系统, 绞锚离岸”的预防措施。

**关键词:** 涌浪; 岸壁式码头; 船舶运动响应; 系统力; 抛锚离岸

中图分类号: U675; TV147

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)02-0056-07

## Dynamic response and safety analysis of ships moored at bulkhead wharf under surge wave action

HU Jie<sup>1</sup>, QIAN Liyun<sup>2</sup>, LONG Sili<sup>3</sup>, ZHANG Chunze<sup>1</sup>, HOU Ji<sup>1</sup>, ZHANG Xujin<sup>1</sup>

(1. Chongqing Southwestern Research Institute for Water Transport Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Changjiang Institute of Survey Planning Design and Research, Chongqing 400016, China;

3. Guangxi Water & Power Design Institute, Nanning 530023, China)

**Abstract:** The occurrence of surge waves significantly affects the safety and stability of ships and wharves in the corresponding waters. In straight river channels, a three-dimensional numerical model of the wharf and ships is established to simulate the motion response process of ships moored at bulkhead wharf under surge wave action. The ship motion characteristics and the force-bearing characteristics of each cable under different surge wave heights are analyzed, and the corresponding dynamic response laws and mooring safety conditions are summarized. The study shows that when moored ships encounter surge waves with heights of 0.5, 1.0, and 2.0 m, the variation amplitudes of all translational and rotational parameters increase with the increase of surge waves height. Among them, the surge waves have the most significant impact on the ship's rolling angle, and the ship loses stability under all working conditions. Meanwhile, the bow and stern mooring forces alternately reach peaks as the surge waves increase, and the force on the bow transverse cable is greater than that on the stern transverse

收稿日期: 2025-06-29 录用日期: 2025-08-13

\*基金项目: 重庆市水利科技项目(CQSLK-202402)

作者简介: 胡杰(2000—), 男, 硕士研究生, 从事水力学及河流动力学方向的研究工作。

通信作者: 龙四立(1982—), 男, 高级工程师, 从事水利水电及航运工程规划研究工作。E-mail:51540919@qq.com

cable. As the wave height increases, the force approaches or exceeds the breaking limit, affecting the mooring stability. Research on offshore anchoring conditions revealed that when encountering surge waves at a height of 2.0 m, the rolling parameters of anchored offshore ships decrease by 26.7%–42.3% compared with those of moored ships. Therefore, to ensure the safety of anchored ships in the surge waves impact zone, it is recommended to adopt the following preventive measures before berthing: “Anchor off the offshore side in advance, immediately release the moorings, and anchor offshore upon receiving a surge wave warning”.

**Keywords:** surge wave; bulkhead wharf; ship motion response; mooring force; anchor offshore

内河涌浪通常由水下地震、山体滑坡或极端天气等自然因素引发,能够在短时间内向四周水域释放巨大能量,具有传播速度快、能量集中和波浪结构复杂的特点。涌浪不仅会显著改变局部水域的流场特征,还会对航道内的船舶、码头设施及系泊系统产生多方面的灾害性影响。由于涌浪的波高、周期和传播方向存在显著差异,其对系泊船舶的作用机制表现出不同的特征,可能引发船舶的剧烈运动响应(如横摇、纵摇和垂荡等),并导致系泊缆绳承受复杂的动态载荷。在极端情况下,甚至可能造成断缆、船舶漂移、倾覆或码头结构损坏等严重后果。

涌浪胁迫下的系泊船只运动一直是地水灾害学科和水运工程学科关注的难点问题,早期通常采用缩尺物理模型试验开展相关研究。袁培银等<sup>[1]</sup>通过大缩尺比模型试验,研究张紧式首尾2条锚链和舷侧4条锚链2种锚泊形式下船舶在不同滑坡涌浪作用后的运动响应,分析涌浪特性及船舶运动特性。薛丁源等<sup>[2]</sup>研究长周期涌浪对码头船舶系缆稳定性的影响。重点分析波浪周期、波高及浪向的作用,并对比不同缆绳材质效果。结果表明各因素对船舶运动量和缆绳受力影响各异。陈里等<sup>[3]</sup>选择内河3 000 t甲板驳船开展物理模型试验。分析滑坡涌浪作用下系泊船舶系缆力和撞击能的影响因素及变化规律,得出经验计算式,确定影响程度并提出对策。胡杰龙等<sup>[4]</sup>通过小比尺物理试验研究了三峡库区滑坡涌浪作用下船舶锚链拉力。

涌浪传播对船舶的强时变非线性流固耦合作用过程中,能量在水体、船体和岸壁之间进行动态交换,不仅传递方向多样,且形式持续转换,

涵盖直接传递、间接传递等多种模式。这种复杂性极大地加剧了物理试验中的比尺效应,对计算机算力及数值模型的稳定性也构成了严峻挑战。曹光磊等<sup>[5]</sup>基于线性势流理论,采用高阶边界元法建立两浮体运动响应数值模型,给出整体坐标系下质量阵、恢复力阵完整形式及坐标转换关系,验证模型正确性。陈徐均等<sup>[6]</sup>建立系泊单浮体的数值计算模型,模拟静水自由衰减试验并与实测数据进行对比,验证了数值模型的合理性。Faltinsen<sup>[7]</sup>基于CFD与VOF技术体系,显著提升了数值模拟的精度。

大多数研究更多集中于海船海况,现有对内河航道的研究也存在对峡谷河道复杂反射效应考虑不足的问题、系缆非线性动态响应分析及应急策略量化验证还有一定局限。本文针对三峡库区奉节段航道特征,构建岸壁式码头与系泊船舶的三维数值模型,结合六自由度船舶运动分析,系统探究0.5~2.0 m浪高范围内系泊船舶的横摇失稳机制、系缆力动态变化规律及其对系泊系统安全性影响,根据研究成果提出系泊船舶应急措施,并开展有效性验证。

## 1 数学模型及验证

### 1.1 数值模型

本文研究采用Flow-3D软件作为主要模拟工具。Flow-3D以连续性方程以及不可压缩黏性流体运动的Navier-Stokes方程作为控制方程,选用在模拟高应变率紊流运动方面较为精准的湍流模型,通过VOF方法对自由液面进行追踪,同时运用FAVOR技术模拟复杂的边界情况<sup>[8]</sup>。

连续方程:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z \quad (4)$$

式中:  $\rho$  为水密度;  $V_F$  为可流动的体积分;  $A_x$ 、 $A_y$  和  $A_z$  分别为  $x$ 、 $y$  和  $z$  方向可流动的面积分数;  $u$ 、 $v$  和  $w$  分别为对应  $x$ 、 $y$  和  $z$  方向的速度分量;  $G_x$ 、 $G_y$  和  $G_z$  分别为物体在  $x$ 、 $y$  和  $z$  方向上的重力加速度;  $f_x$ 、 $f_y$  和  $f_z$  分别为物体在  $x$ 、 $y$  和  $z$  方向上的黏滞力加速度;  $p$  为水的压强。

### 1.2 模拟验证

根据文献的物理试验成果<sup>[9]</sup>验证本文所采用数值方法研究波浪作用下水面浮体运动与停泊系统受力过程的计算精度,计算域内水深  $H$  为 20 m,波浪为波高 2.5 m,周期 5~15 s 的重力波。箱式浮标的固定采用锚链系统,锚链一端系于河底,另一端与箱式浮标水下部分相连,系泊点距水面 2.4 m。锚链链环杆直径  $d$  为 100 mm,每根锚链长 60 m,锚链水中质量为 230 kg/m,浮箱静止时锚链拖地长度为 20 m。具体浮标试验系统布置见图 1,沿波浪传播方向方箱的宽度为 20 m,高 4.8 m,吃水深度 4.0 m。

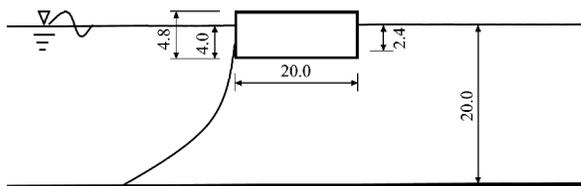


图 1 单箱浮标试验系统布置(单位: m)

Fig. 1 Layout of single-pontoon buoy experimental system (unit: m)

与物理试验设置相同的边界条件,进口边界采用波浪边界,定义水深、波高以及周期。出口边界采用自由出流边界,两侧采用对称边界条件,底部采用壁面边界条件,顶部设置压力边界条件,模型总网格数 350 万个。

在给定波浪周期得到浮箱的最大移动距离,即水平漂移量,对该最大移动距离下的水平力、垂向力进行对比验证。

模拟与试验所得的浮箱顶端作用力与水平漂移量对比结果见图 2。在 5~15 s 波浪周期中选取 5 个波浪周期进行数值模拟验证,得到的顶端水平力和垂向力与文献数据吻合较好,说明所用的数值试验及其参数设置基本上可以满足本文数值模型研究的要求。

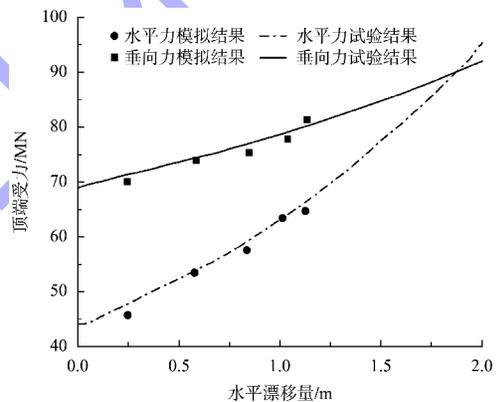


图 2 浮箱顶端作用力与水平漂移量关系

Fig. 2 Correlation between applied force on pontoon top and horizontal displacement

### 2 数值模型设计

参照长江三峡库区奉节段干流河道特征,所建立的部分数字河道模型见图 3,河道总长 5 km,河道净宽 450 m,水深 160 m。采用笛卡尔正交网格,河道网格尺寸 6 m,码头与船舶区域逐级加密,最小网格度 1 m。为模拟河岸一侧滑坡或危岩坠江涌浪,在河道入口下游右岸 1 km 处设置涌浪入口边界,在涌浪入口下游 1 km 处左岸布置岸壁式码头。

为确保计算精度并避免边界条件对水流特性产生干扰,模型中概化河道长度充足,能够有效避免因边界设置不当引起的水流反射现象。分别

对岸壁式码头区域遭遇 0.5、1.0、2.0 m 这 3 种高度涌浪船舶处于系泊状态或采取应急措施后的工况展开模拟研究。

需要注意的是,与浅水河道内滑坡涌浪呈现出类孤立波状态不同,研究河段作为三峡库区航道,由于水深充裕,生成的涌浪具有完整的峰谷。然而,本文采用与传统滑坡涌浪研究相同的定义习惯,将码头区域水面的显著隆高与原水面高程的差定义为浪高。因此,在同样浪高条件,本文定义值较海运研究中的浪高更低。

所系船只选取研究河段的典型代表货船,即排水量约 1 507 m<sup>3</sup> 的集装箱货运船(船长×型宽×型深,130 m×16 m×8.8 m)。码头系缆配备 4 根钢缆,具体系缆方式见图 4,每根缆绳直径 84 mm,破断力为 3.68 MN。船舶模拟过程中开启 6 个自由度。

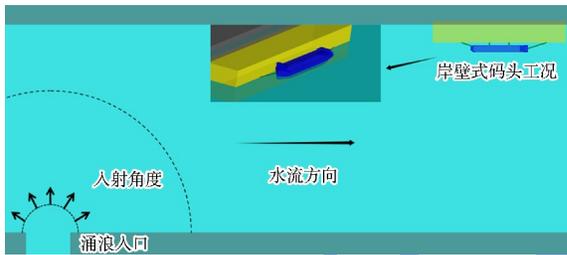


图 3 河道特征及岸壁式码头三维示意(部分河段)  
Fig. 3 3D schematic of river channel characteristics and bulkhead wharf (partial river reach)



图 4 岸壁式码头系缆方式  
Fig. 4 Mooring arrangement at bulkhead wharf

### 3 结果与分析

#### 3.1 涌浪作用下系泊船舶运动特性

涌浪生成后,携带巨大能量向四周呈扇形扩散。受河道岸壁的限制,涌浪射向对岸后发生直接反射,并在爬坡、回落、再入水的过程中形成新的波浪<sup>[10]</sup>。这些新生成的波浪紧随初始涌浪,持续向河道上下游传播。当涌浪传至

码头区域时,水体的峰谷运动迫使停泊的船体随之产生相应的起伏响应。在遭遇不同高度涌浪时,系泊状态集装箱货运船运动姿态响应过程见图 5。在不同高度涌浪的作用下,系缆船舶 6 个自由度中,横摇最为剧烈,纵摇和艏摇相对较小,船舶的横摇角度远远大于纵摇和艏摇角度。随着遭遇涌浪高度的增加,横荡、纵荡和垂荡的幅度增大。

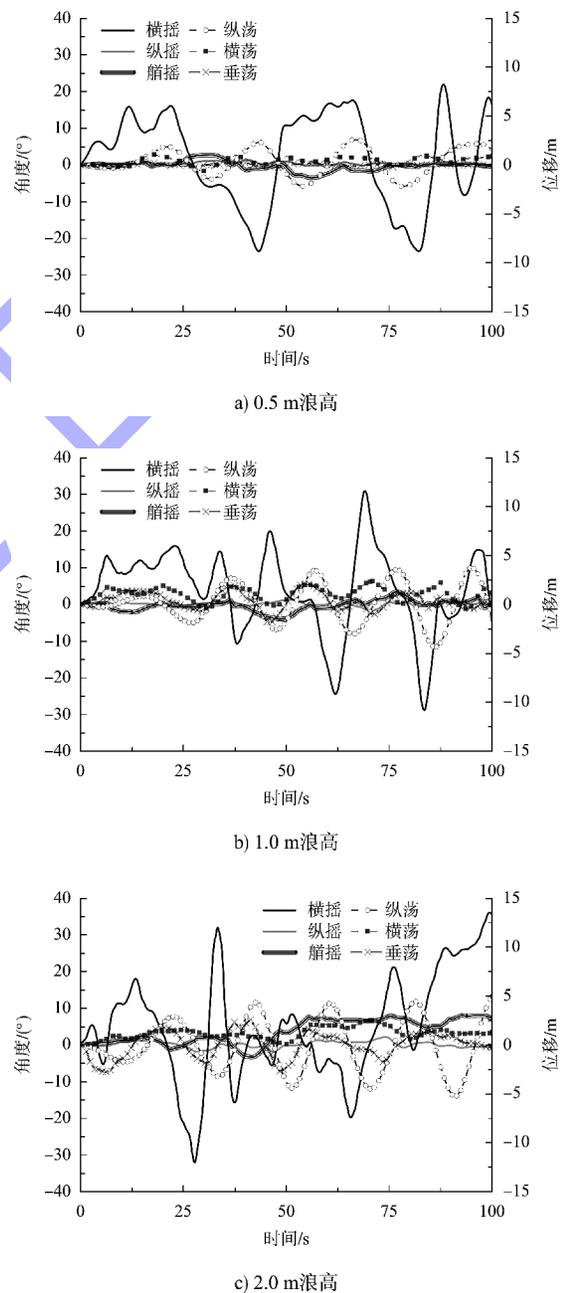


图 5 系泊状态集装箱货运船遭遇不同高度涌浪时运动姿态响应过程  
Fig. 5 Motion response of moored container ship under surge waves of varying heights

在系缆情况下，系缆布置主要限制船舶的纵向与横向平移，难以有效抑制绕纵轴旋转产生的横摇力矩；而且当垂直于码头岸线的横向波浪作用于船舶时，岸壁结构会加剧波浪反射，因船舶纵向、横向平移及艏摇等自由度受缆绳约束，这些集中的能量无法通过上述自由度释放，便主要转化为横摇运动。因此，各涌浪工况下，船舶横摇角度远较纵、艏摇更显著。

在遭遇不同高度涌浪时，系泊状态集装箱货运船6个自由度变化范围参数见表1。涌浪高度为0.5 m时，船舶最大横摇角度范围为-25°~20°，

随着系泊船舶遭遇涌浪高度的增加，船舶受到冲击的能量增大，涌浪高分别为1.0和2.0 m时，船舶横摇角度范围将增加40%~60%。而船舶纵摇与艏摇的响应值虽然均呈现出随浪高增加的趋势，但其响应绝对值均较小，各浪高条件下，最大纵摇值小于5°，最大艏摇值小于10°。

对于平动参数，其响应特征受涌浪和约束条件下船只自由平动量决定。其中船舶垂荡高度与遭遇涌浪高度基本一致，横荡和纵荡波动幅度较大，由于码头与缆绳对船舶的横向约束比纵向约束更强，船舶纵荡距离响应绝对值约为横荡距离的2倍。

表1 系泊状态集装箱货运船遭遇不同高度涌浪时6个自由度变化范围参数  
Tab.1 Variation ranges parameters of six degrees of freedom for moored container cargo ships under different heights of surge waves

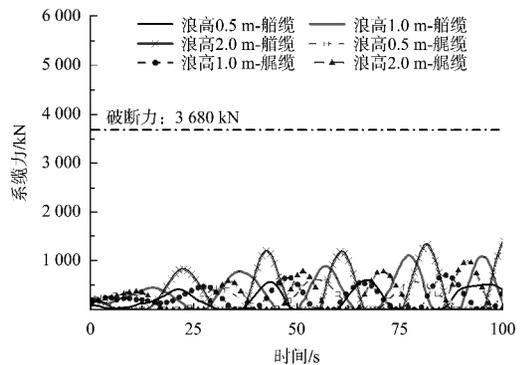
涌浪高度/m	横摇角度/(°)	纵摇角度/(°)	艏摇角度/(°)	横荡/m	纵荡/m	垂荡/m
0.5	-25.0~20.0	-0.5~1.3	-3.5~2.8	-0.6~1.1	-2.2~2.6	-0.2~0.28
1.0	-35.0~30.0	-1.7~1.2	-4.0~3.4	-0.4~2.3	-4.3~3.7	-1.5~1.8
2.0	-35.0~40.0	-1.9~2.1	-4.0~8.1	0.2~2.5	-5.3~5.0	-2.7~2.5

### 3.2 涌浪作用下系缆力动态响应特征

在涌浪作用下，集装箱货运船与岸壁式码头形成复杂的非线性耦合系统。船舶受涌浪推力向码头移动时，系缆绳松弛，约束力减弱，导致船体与码头结构碰撞。随后，在码头反作用力与涌浪推力的共同作用下，船舶向离岸方向运动，系缆绳迅速绷紧，系缆力骤增并可能达到峰值，可能超出极限强度发生断裂<sup>[11]</sup>。集装箱船系泊系统包括艏缆、艉缆、横缆(艏横缆以及艉横缆)，协同作用以稳定船舶。艏、艉缆控制纵向与横向位移，抑制船体摆动，确保泊稳性，横缆主要抵抗横向运动。

在遭遇不同高度涌浪时，艏、艉以及横缆受力历时曲线见图6。艏艉系缆力峰值交替出现，当涌浪传到船舶时，船首最先遭受涌浪冲击，艏缆此时遭受最大冲击，且处于紧绷的状态，系缆力达到最大峰值。而艉缆处于松弛状态，系缆力受力最小。其后，船舶受涌浪和撞击，发生往复运动，艏、艉缆也随之发生松弛紧绷往复变化，使

得艏艉系缆力交替峰值出现。随着遭遇涌浪高度的增加，艏艉系缆力不断增大，而系泊船舶的艏、艉横缆受力历时曲线基本一致。由于艏部受到的波浪冲击较大，导致船舶产生更大的横向摆动，使得艏横缆承担更多的约束力，艏横缆所受系缆力值大于艉横缆。随着遭遇涌浪高度的增加，艏横缆以及艉横缆受力增加，其中1.0 m浪区以及2.0 m浪区的艏横缆和艉横缆受力值均已接近和超过破断值。船舶在受到涌浪冲击时，横缆传递涌浪横向分力，承受船舶横摇附加荷载，其受力值大于艏艉缆受力。



a) 艏艉缆受力变化

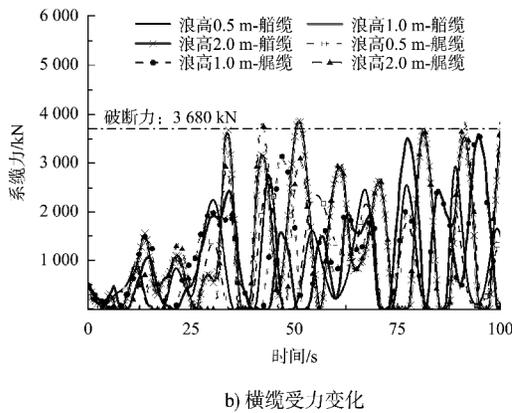


图 6 涌浪作用下船舶系缆力变化  
Fig. 6 Variation of mooring forces of ships under surge wave action

### 3.3 涌浪作用下系泊船只紧急应对措施

假设船只在靠泊前, 提前在河心下锚, 在突遇涌浪时, 采取紧急措施, 断开船舶与码头系缆, 通过绞锚快速驶离码头。在遭遇 2.0 m 高度涌浪时, 船舶远离码头并下锚工况下摇动参数特征见图 7。当船舶抛锚且离岸后, 不再受到周期性的侧向缆绳约束以及撞击码头反作用力的影响。与此相对, 锚链将提供一定的横向稳定力, 使船首方向固定在波浪主流方向上, 减少横向流动的影响。船舶在远离码头后具有更大的自由度, 波浪能量也不会立即反射且叠加作用于船舶, 其横摇的剧烈程度被削弱, 并逐步趋于平稳。

在遭遇 2.0 m 涌浪时, 0~20 s 船舶横摇幅度基本一致。20 s 过后, 抛锚且离岸船舶横摇角度幅度逐渐减小, 绝对值处于 10° 范围内; 同时系泊船舶的横摇角度逐渐增大, 约达到 40°。抛锚离岸后, 遭遇同样浪高时, 船舶纵摇、艏摇参数的转动角度也显著减小, 均不超过 5°。对比抛锚离岸及系泊船舶的运动响应姿态, 其最大横摇、艏摇与纵摇角度分别降低了 42.3%、41.4% 和 26.7%。可知断开系缆并离岸下锚的措施可以有效降低各摇动参数幅值, 尤其横摇角度方面更加明显。

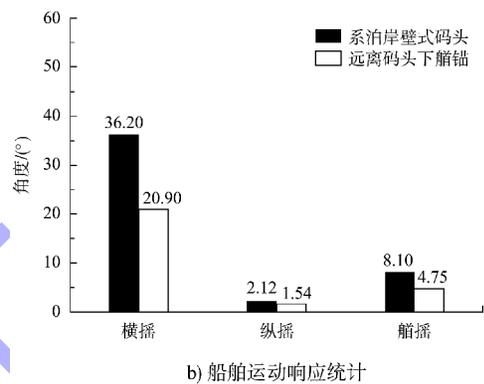
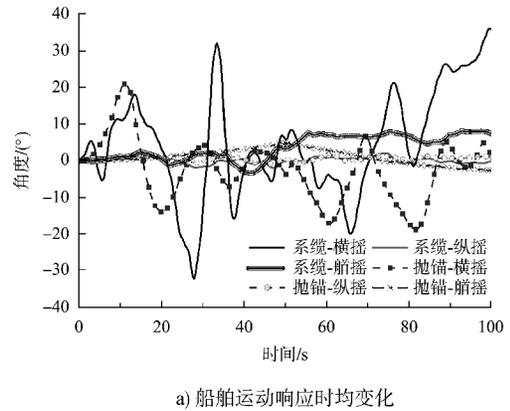


图 7 遭遇 2.0 m 高度涌浪时, 船舶远离码头并下锚工况下摇动参数特征  
Fig. 7 Ship motion parameters during anchor-assisted unberthing maneuver under 2.0 m waves

在实际情况下, 靠泊的船只不可能一直处于备车状态。然而, 涌浪产生并传播的速度极快, 通常以秒为单位, 此时的船舶大概率处于无动力状态。因此, 对于在涌浪胁迫区停靠的船只, 建议其在靠泊前, 采取“提前在离岸侧下开锚, 当接到涌浪预警后, 立即解除系缆, 绞锚离岸”的预防措施。

## 4 结论

1) 在不同高度的涌浪作用下, 系缆船舶的横摇响应最为剧烈, 远大于纵摇和艏摇。各平动及转动参数均随浪高度增大而增大, 尤其横摇角度变化最为显著, 纵摇和艏摇的角度变化相对较小。

2) 在不同涌浪作用下, 艏艉系缆力峰值交替出现, 且随涌浪高度增大而增大。艏横缆受力大于艉横缆, 且两者受力随涌浪增强接近或超过破限值, 影响系泊安全。

3) 为降低系泊船舶遭遇涌浪风险, 建议其在靠泊前, 采取“提前在离岸侧下锚, 当接到涌浪预警后, 立即解除系缆, 绞锚离岸”的预防措施。在遭遇 2.0 m 高度涌浪时, 该措施可以有效降低各摇动参数幅值, 使船舶最大横摇、艏摇与纵摇角度分别降低了 42.3%、41.4% 和 26.7%。

#### 参考文献:

- [1] 袁培银, 李渝锋. 滑坡涌浪对锚泊船舶运动响应的试验研究[J]. 舰船科学技术, 2022, 44(12): 33-38.  
YUAN P Y, LI Y F. Experimental study on response of bulk landslide-induced wave to motion of anchor ship river [J]. Ship science and technology, 2022, 44 ( 12 ): 33-38.
- [2] 薛丁源, 邵昌浩, 杨婷. 长周期涌浪作用下码头船舶系缆稳定性研究[J]. 水运工程, 2017(3): 80-83.  
XUE D Y, SHAO C H, YANG T. Movement and mooring force of mooring system in long period wave [J]. Port & waterway engineering, 2017(3): 80-83.
- [3] 陈里, 杨渠锋, 喻涛, 等. 滑坡涌浪作用下系泊船舶安全试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2017(1): 80-86.  
CHEN L, YANG Q F, YU T, et al. Model experimental studies of safety of moored ship under landslide surge action [J]. Hydro-science and engineering, 2017 ( 1 ): 80-86.
- [4] 胡杰龙, 王平义, 任晶轩, 等. 三峡库区滑坡涌浪作用下船舶锚链拉力试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2017(6): 14-21.  
HU J L, WANG P Y, REN J X, et al. Experimental study of ship mooring force under action of landslide in Three Gorges Reservoir area [J]. Hydro-science and engineering, 2017(6): 14-21.
- [5] 曹光磊, 勾莹, 赵海涛, 等. 波浪作用下两浮体系统运动响应的数值计算[C]//第十七届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(上). 北京: 中国海洋工程学会, 2015: 172-179.  
CAO G L, GOU Y, ZHAO H T, et al. Numerical calculation of motion response of two-floating-body system under wave action [C]//The Ocean Engineering Society of China. Proceedings of the 17th China Ocean (Coastal) Engineering Academic Symposium (Part I). Beijing: Chinese Ocean Engineering Society, 2015: 172-179.
- [6] 陈徐均, 计淞, 陆凯, 等. 基于 AQWA 的系泊参数对单浮体动力响应的影响[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2021, 45(3): 459-463.  
CHEN X J, JI S, LU K, et al. Effects of mooring parameters on the dynamic responses of single floating structure based on AQWA [J]. Journal of Wuhan University of Technology (transportation science & engineering), 2021, 45(3): 459-463.
- [7] FALTINSEN O M. Hydrodynamics of high-speed marine vehicles [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [8] 侯仲荃, 李锐, 李晓舟, 等. 基于 Flow-3D 的新型半圆形构件水动力特性研究[J]. 水运工程, 2023(4): 20-25, 128.  
HOU Z Q, LI R, LI X Z, et al. Hydrodynamic characteristics of new semi-circular member based on Flow-3D [J]. Port & waterway engineering, 2023 ( 4 ): 20-25, 128.
- [9] 汤小霞. 波浪作用下锚泊系统动力响应的数值模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.  
TANG X X. Numerical simulation on hydrodynamic response of wave action on mooring system [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.
- [10] 张婕. 山区弯曲河道型水库滑坡涌浪对直立式码头作用的试验研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.  
ZHANG J. Experimental investigation of the landslide surge's effect on the vertical wharf in hill bend channel type reservoir [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016.
- [11] 徐晓菲. 山区河道型水库滑坡涌浪对斜坡式码头-趸船-船舶体系作用的试验研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2020.  
XU X F. Experimental study on the effect of landslide surge on sloping wharf-pontoon-ship system in watercourse reservoir in mountainous area [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2020.