

# 复杂水文条件下的港口散货系泊船舶运动响应分析

肖 强

天津大学 天津 300350

**摘要:** 针对复杂水文条件易导致港口散货系泊船舶运动超限、引发安全事故的问题,本文系统分析风浪、水流及多要素耦合的水文类型与特征,剖析水文条件、船舶自身、港口码头对运动响应的影响机制,提出理论分析、数值模拟、物理模型试验三类分析方法,并阐述结果在系泊系统优化、港口运营管控、港口规划改造中的应用。为提升港口散货系泊船舶运动安全性与港口工程设计科学性提供参考。

**关键词:** 复杂水文条件; 港口散货船舶; 系泊系统; 运动响应; 安全管控

引言: 港口散货系泊船舶是散货运输的关键节点,其运动稳定性直接决定港口运营安全与效率。我国沿海及河口港口常面临强风浪、急流、多水文要素耦合等复杂条件,易引发船舶纵荡、横摇等超限运动,导致缆绳断裂、船舶碰撞码头等事故。当前对该类船舶运动响应的系统研究不足,难以有效应对复杂水文挑战。因此,开展针对性分析对保障港口散货运输安全具有重要现实意义。

## 1 复杂水文条件的主要类型与特征分析

### 1.1 风浪条件及其特征

港口常见的风浪类型包括台风引发的强风浪、季风导致的持续风浪、局地对流形成的短时阵风。台风强风浪强度大且影响范围广,强风与巨浪对系泊船舶形成强烈冲击;季风持续风浪强度较弱但持续时间长,易使船舶长期波动累积疲劳效应;局地对流短时阵风风浪突发性强,风速与波高短时间内剧烈变化,导致船舶运动响应骤增<sup>[1]</sup>。风浪的特征参数有风速、风向、有效波高、波周期、波谱分布,风速决定风对船舶的作用力大小,风向影响力的作用方向,有效波高反映波浪能量集中程度,波周期关联船舶运动共振风险,波谱分布体现波浪能量在不同频率的分配。风浪在港口水域传播时会因地形发生绕射与折射,绕射使波浪绕过防波堤扩散至港内,折射因水深变化改变传播方向,影响港内风浪分布均匀性。风浪对系泊船舶的作用形式为波浪力与风压力,波浪力通过水体振动引发船舶垂向与横向运动,风压力作用于船体表面推动船舶水平漂移与扭转。

### 1.2 水流条件及其特征

港口水域的水流类型涵盖潮汐水流、河口急流、沿岸流、人工航道水流。潮汐水流呈往复流动,涨潮与落潮时流向相反,流速随时间周期性变化;河口急流受地形与径流影响,流速大且能量集中;沿岸流沿岸边定向流动,流速平稳且覆盖范围广;人工航道水流受岸壁约

束,分布规则但局部因航道宽窄变化产生流速波动。水流的关键特征参数包括流速、流向、水流分布均匀性、脉动强度,流速决定水流对船舶的推力大小,流向明确推力方向,分布均匀性影响船舶受力均衡性,脉动强度反映流速瞬时波动程度。不同水流对系泊船舶的作用力与影响不同,往复流因流向周期性切换,导致船舶横向摆动方向反复变化,增加系泊缆绳受力波动;河口急流的强推力加剧船舶纵荡运动,若与船舶轴线平行,可能使船舶沿水流方向产生较大位移,对系泊系统约束能力要求更高。

### 1.3 多水文要素耦合条件及其特征

多水文要素叠加的复杂场景包括风浪与潮汐叠加、风浪与水流耦合、潮汐与河口急流组合。风浪与潮汐叠加时,高水位改变船舶吃水深度,限制垂向运动空间,同时波浪作用于船体更高位置,放大垂向运动幅度;风浪与水流耦合时,顺流风浪使波浪与水流速度叠加,增强对船舶的冲击力,放大垂荡运动,逆流风浪则因波流相互作用形成复杂水体扰动,加剧运动不规则性;潮汐与河口急流组合时,涨落潮导致水流方向周期性切换,使船舶推力方向反复变化,引发运动方向频繁切换,增加响应复杂性。耦合条件下水文要素存在协同作用机制,并非简单叠加而是相互影响强化。风浪与水流协同改变水体运动状态,调整波浪形态与水流结构,增强对船舶的综合作用力;潮汐水位变化改变船舶与水流、波浪的作用位置,间接影响运动响应特征。这种协同作用使船舶运动响应出现叠加效应,不仅运动幅度显著增大,还可能产生单一水文要素下不存在的复杂运动形式,如横摇与垂荡的耦合振动,大幅提升系泊安全风险。

## 2 港口散货系泊船舶运动响应的影响因素

### 2.1 水文条件因素

水文条件各参数对船舶运动响应的影响具有显著差

异性。风浪参数中,波高增大直接增强波浪对船体的冲击力,使船舶横摇与垂荡的幅度同步提升;波周期缩短时,波浪作用频率更接近船舶固有频率,易引发共振效应,进一步加剧横摇与垂荡运动。风向与船舶轴线夹角变化会改变风压力的作用方向,夹角增大时,风对船舶横向的推力增强,导致横荡幅度明显提升,增加系泊缆绳的横向受力<sup>[2]</sup>。水流参数方面,流速提升会增大水流对船体的水平推力,使船舶纵荡与横荡的驱动力增强,运动幅度随之扩大;流向与系泊方向垂直时,水流推力会形成绕船舶重心的力矩,易引发船舶旋转运动,破坏系泊系统的受力平衡。多水文要素耦合时,各参数的协同作用会产生叠加影响,高流速叠加强风浪时,水流的水平推力与风浪的垂向、横向作用力相互强化,导致船舶纵荡、横荡、垂荡等多自由度运动同步加剧,运动响应的复杂性与风险显著提升。

## 2.2 船舶自身因素

船舶自身特性从惯性、稳定性等方面影响运动响应。船舶尺度上,大型散货船因船长、船宽与吃水较大,整体惯性更强,纵荡与横荡运动的启动与停止响应相对滞后,而一旦开始运动,受惯性作用,其运动幅度会更为显著;小型散货船质量较轻,对波浪作用更敏感,横摇与垂荡运动的频率更高、响应更迅速,易出现高频小幅振动。船舶装载状态改变会影响重心位置与吃水深度,满载时船舶吃水深、重心低,船体稳定性提升,横摇幅度较小,但水下船体面积增大,受波浪垂向作用力更显著,垂荡运动相对明显;空载时船舶吃水浅、重心高,稳定性下降,横摇运动的恢复力矩减弱,横摇幅度易超限,且易受风浪影响产生剧烈摇摆。船舶系泊状态中,缆绳数量不足或预张力不足会降低对船舶的约束能力,导致船舶运动幅度超限;护舷缓冲性能差时,船舶与码头碰撞瞬间的冲击力无法有效衰减,会加剧船舶的反弹运动,增加碰撞损坏风险。

## 2.3 港口码头因素

港口码头条件通过改变船舶周边环境与约束能力影响运动响应。码头结构类型上,突堤式码头因伸入水域,前沿水域水流易受码头阻挡形成漩涡,漩涡产生的局部流场会对船舶局部产生不规则推力,加剧船舶局部振动与摇摆;顺岸式码头对水流的阻挡作用较弱,流场相对平稳,船舶运动受流场扰动较小。码头前沿水深不足时,船舶吃水与水深差距缩小,会限制船舶垂向运动空间,船舶垂荡时底部易与海底发生摩擦,不仅阻碍运动还可能造成船体损伤,间接改变运动响应特征。系泊设备配置中,缆桩间距不合理会导致缆绳受力分布不均,部分缆绳因受力过大产

生过度拉伸,降低整体约束效果;高强度缆绳能减少拉伸变形,维持对船舶的稳定约束;弹性护舷可通过自身变形缓冲船舶与码头的碰撞力,削弱碰撞后的反弹运动,间接抑制船舶过度运动,保障系泊安全。

## 3 港口散货系泊船舶运动响应的分析方法

### 3.1 理论分析方法

理论分析方法以力学模型为核心构建分析框架。建立船舶运动动力学模型时,需结合势流理论、莫里森方程等经典理论,将风浪与水流对船舶的作用力拆解为波浪力、风压力、水流力,通过数学公式量化各力的大小与方向,再代入船舶运动微分方程,求解不同水文条件下船舶纵荡、横摇等运动形式的位移与加速度数据,明确运动响应的变化规律<sup>[1]</sup>。构建系泊系统力学模型需重点考虑缆绳与护舷的力学特性,用弹性系数模拟缆绳的拉伸变形,用阻尼系数体现护舷的缓冲效果,通过力学方程关联船舶运动与系泊设备受力,推导船舶运动幅度与系泊力之间的定量关系,判断系泊系统对船舶运动的约束能力。理论方法的优势在于可单独控制变量,量化分析单一因素对运动响应的影响,逻辑清晰且计算成本低;局限性则体现在难以完全复现多要素耦合的复杂流场与船舶运动状态,对非线性因素的简化处理可能导致结果精度受限。

### 3.2 数值模拟方法

数值模拟方法依托专业软件工具实现运动响应分析。首先选择适配的数值模拟软件,导入港口水域的地形数据、船舶的几何参数与装载状态、系泊系统的缆绳弹性系数与护舷缓冲参数,同时输入风浪谱、水流场分布等水文条件数据,构建港口水域-系泊船舶的耦合模型。设置模拟边界条件时,需定义码头结构的约束范围、海底地形的边界效应,再根据分析需求选择时域或频域模拟模式,时域模拟可输出运动响应的时间序列数据,频域模拟则聚焦不同频率下的运动幅值特征。模拟过程中需计算船舶各自由度的位移、速度、加速度及系泊缆绳的张力变化,完成模拟后通过网格无关性验证排除网格密度对结果的影响,通过参数敏感性分析优化关键参数取值,进一步提升模拟结果的准确性与可靠性。

### 3.3 物理模型试验方法

物理模型试验方法基于相似原理开展实测分析。按照几何相似、运动相似、动力相似的原则,按比例缩小制作港口散货系泊船舶模型,模型需完整还原船舶外形及系泊设备的力学特性,同时制作匹配的港口水域物理模型,包含码头结构、港池地形等关键要素。试验过程中通过造波机生成不同波高与周期的风浪,通过水流循

环系统模拟不同流速与流向的水流,复现复杂水文条件。在船舶模型关键部位布置位移传感器采集各自由度运动数据,在缆绳上安装力传感器记录张力变化,获取船舶运动响应的实测数据。分析试验数据可验证理论模型与数值模拟结果的合理性,同时捕捉计算方法难以获取的细节,如船舶局部振动规律、缆绳瞬时张力峰值,为运动响应分析提供更全面的支撑。

#### 4 港口散货系泊船舶运动响应的分析结果应用

##### 4.1 系泊系统优化设计

系泊系统优化设计需以运动响应分析结果为核心依据,结合船舶吨位与作业频次进一步细化参数。根据不同水文条件下船舶运动响应规律,若横荡幅度较大,需增加横向缆绳数量并调整布置角度至30-45度,强化对船舶横向运动的约束,同时匹配缆绳刚度与船舶惯性特征;针对强风浪区域,选用高强度聚酯缆绳并适当提高预张力至设计值的八成,增强缆绳抗拉伸能力,避免风浪引发过度运动导致缆绳断裂<sup>[4]</sup>。护舷优化需结合水流冲击方向与船舶碰撞风险,在水流冲击侧增加弹性护舷数量并优化布置位置,间距控制在船舶船长的十分之一以内,提升缓冲效果,减少船舶与码头碰撞力度。优化方案确定后,通过运动响应模拟验证其有效性,模拟不同复杂水文场景下船舶运动幅度与系泊力变化,确保优化后的系泊系统能有效约束船舶运动,显著降低缆绳断裂与船舶碰撞码头的风险。

##### 4.2 港口运营安全管控

运动响应分析结果为港口作业安全决策提供关键支撑,助力构建动态管控机制。基于水文条件与运动响应的关联规律,明确船舶靠离泊作业的水文条件阈值,当风速超过15m/s、波高大于2m或流速超1.5m/s时,暂停靠离泊作业,避免作业过程中发生安全事故。针对不同水文场景制定差异化系泊检查频次,强风浪来临前24小时内增加缆绳张力检查次数至每2小时1次,及时发现张力异常并调整;暴雨、急流等特殊水文条件下,加密船舶运动状态监测,采用实时数据传输系统确保异常运动能被及时察觉。同时优化港口应急处置方案,预判高风险

水文条件时,提前调整船舶装载状态以优化重心分布,将重心高度降低十分之一到十五分之一,加固系泊设备提升约束能力,从多方面降低事故发生概率。

##### 4.3 港口规划与升级改造

在新建散货港口规划中,运动响应分析结果指导码头选址与结构设计,提升工程适配性。结合区域水文特征与船舶运动响应数据,避开高流速、强风浪频发区域选择码头位置,优先选取波能衰减系数大于0.6的水域,减少复杂水文对船舶运动的不利影响;往复流区域优先采用顺岸式码头结构,码头轴线与主流向夹角控制在10度以内,降低水流对船舶运动的干扰,同时确定码头前沿水深与系泊设备配置参数,适配船舶运动需求。既有港口升级改造时,针对运动响应超限的薄弱环节制定改造方案,若某区域船舶横摇幅度过大,可增设透空式防波堤削弱风浪能量,或调整缆桩布置方式优化系泊力分布,使缆绳水平夹角偏差不超过5度,通过针对性改造提升港口应对复杂水文条件的能力,保障港口长期安全稳定运营。

##### 结束语

复杂水文条件下港口散货系泊船舶的运动响应研究,对提升港口安全运营水平具有重要意义。通过理论、数值与试验方法的综合应用,可深入揭示船舶运动与水文、船舶及码头因素的内在关联,为系泊系统优化与风险管控提供有效手段。未来研究需进一步聚焦多要素非线性耦合效应及极端工况下的运动响应预测,通过技术创新与工程实践相结合,持续推动港口系泊安全管理的精细化与智能化发展。

##### 参考文献

- [1]周伟康.港口护岸越浪灾害的船舶关联性风险预警体系研究[J].船舶物资与市场,2025,33(9):118-120.
- [2]何广华,沈文君,金瑞佳.复杂条件下港内外船舶运动响应的预报研究[J].中国科技成果,2024,25(2):12-13,19.
- [3]张奥博,关宏旭,徐言民,等.基于船舶模拟试验的泊稳条件影响分析[J].水运工程,2025(4):64-72.
- [4]李小军,闻鸣,诸云鹏,等.超大型船舶码头舳装作业抗台系泊模型试验研究[J].海洋工程,2025,43(4):89-99.