

· 航道及通航建筑物 ·



受限水域开普型船舶安全距离 确定方法研究*

谭志荣^{1,2,3}, 章熠^{1,2}, 张泽虎^{1,2}, 马杰^{1,2,3}, 雷涛^{1,2}

(1. 武汉理工大学 航运学院, 湖北 武汉 430063; 2. 水路交通控制全国重点实验室, 湖北 武汉 430063;
3. 内河航运技术湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430063)

摘要: 开普型船舶在长江江苏段受限水域航行时, 易引发船吸与扰动风险。提出一种基于二维计算流体力学(CFD)仿真的船间效应分析方法, 建立开普型船舶与小型船舶交汇过程的简化流体物理模型。通过设置不同相对速度与横向间距, 使用动网格与非结构化加密区域构建模型, 分析两船相对速度为 1.0 m/s 时的压力场、速度场、涡量场及流线演变规律。结果表明, 在 1 倍船宽(50 m)的间距下两船存在强吸力区, 小型船舶的航向偏移幅度可达到 5°, 并且船舶之间的水动力扰动持续时间为 15 s, 确定江苏段受限水域中开普型船舶与小型船舶的安全距离为 50 m。对比 PIANC 准则与引航试验航迹宽度, 提出最小动态安全距离建议值。

关键词: 船间效应; 受限水域; 开普型船舶; 流体数值模拟

中图分类号: U676.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)02-0095-09

Quantitative method on safety distance of Cape vessels in restricted waters

TAN Zhirong^{1,2,3}, ZHANG Yi^{1,2}, ZHANG Zehu^{1,2}, MA Jie^{1,2,3}, LEI Tao^{1,2}

(1. School of Navigation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;
2. National Key Laboratory of Waterway Traffic Control, Wuhan 430063, China;
3. Hubei Key Laboratory of Inland Shipping Technology, Wuhan 430063, China)

Abstract: The risk of ship suction and disturbance that Cape vessels are prone to when navigating in the restricted waters of the Jiangsu section of the Yangtze River. We propose an inter-ship effect analysis method based on two-dimensional computational fluid dynamics(CFD) simulation and establish a simplified fluid physics model of the intersection process between Cape vessels and small vessels. By setting different relative speeds and lateral spacers, and using dynamic grids and unstructured encrypted regions to construct models, the pressure field, velocity field, vorticity field and streamline evolution laws of the two ships are analyzed when the relative speed of the two ships is 1.0 m/s. The results show that at a distance of 1 times the ship width (50 m), there is a strong suction zone between the two ships. The course deviation of the small vessel can reach 5°, and the duration of the hydrodynamic disturbance between the ships is 15 s. It is determined that the safe distance between the Cape vessel and the small vessel in the restricted waters of Jiangsu section is 50 m. By comparing the PIANC guidelines with the width of the pilotage test track, the recommended value of the minimum dynamic safety distance is proposed.

Keywords: ship-ship interaction; restricted waters; Cape vessel; fluid numerical simulation

近年来, 随着长江江苏段航运密度的增加和船舶尺寸的扩大, 尤其是开普型船舶的航行, 航道的通行能力与船舶安全距离问题逐渐成为焦点。江苏段的受限水域由于水深不足、航道狭窄以及

收稿日期: 2025-06-10 录用日期: 2025-07-29

*基金项目: 国家自然科学基金项目(52271366)

作者简介: 谭志荣(1978—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为载运工具运用工程与交通系统安全性评价。

复杂的通航环境,使得船舶航行中的安全隐患更加突出,尤其是在船舶相互作用及船间效应方面。传统的安全距离计算模型,如藤井模型、跟驰模型及经验公式,通常基于理想化假设,忽视了受限水域中船舶实际的运动特性和水动力效应,导致计算出的安全距离偏大,难以满足实际需求。根据引航实践,开普型船舶在江苏段受限水域的实际安全距离尺度偏小,此时复杂受限水域下船舶失控漂移模型用于分析船舶安全距离显得更具代表性。

钟恒毅等^[1]提出船舶失控漂移撞桥的数值分析方法,并建立相关的概率预报模型,研究预测了船舶失控后可能撞击桥梁的危险区域和概率,结果显示船舶失控后的撞桥概率较高;居尧^[2]提出深水航道边坡自然水深的利用标准,指出船舶密集和航道宽度存在互斥关系,更大概率导致船舶失控的风险逐渐增加。

针对长江上游受限河段船舶安全距离,汪再荣等^[3]以130 m代表船型为研究对象,在三门子、龙船沱等典型急弯航段开展系统性研究,提出航标配布优化模型,调整航标可将船舶安全距离至2.5倍船长以内。王超峰等^[4]针对鄱阳湖水利枢纽的船舶失控漂移进行建模分析,研究发现,在水利枢纽上、下游的航道口门,船舶失控后的碰撞频率为7~13次/a;通过数值模拟,分析失控船舶与水利枢纽碰撞的概率,并为水利枢纽的安全防护提供量化依据。对于深圳铜鼓航道的船舶失控风险,赵仓龙等^[5]通过建立船舶失控漂移计算模型,分析船舶失控对海底管道的风险,发现船舶失控的危险区域在靠近海底管道的水域更为集中,提出在该区域加强风险防控的建议。

二维简化模型是数值模拟主导的研究范式,其通过降维建模可有效平衡计算精度与效率,在船舶安全距离计算方面,主要考虑船间效应、岸壁效应和桥墩紊流宽度等船舶流体力学场景。

Jiang等^[6]采用直接数值模拟(direct numerical simulation, DNS)方法系统辨析二维与三维流动的临界条件,发现当雷诺数 $Re > 165.7$ 时三维模

型的不稳定性会导致横向力脉动幅值较二维模型预测值增加52%。Rastan等^[7]分析串列双柱流动模式的临界转变条件,发现当无量纲间距小于临界间距时,涡脱落起始雷诺数较单柱体提高28%,与船舶追越场景中前船尾流对后船流场的抑制作用类似;为研究高速运动的影响^[8],继续构建双旋转柱体流固耦合模型,发现同向旋转使柱体间产生排斥力,而反向旋转诱发吸引力。在多柱体复杂排列研究方面,Wang等^[9]通过粒子图像测速(particle image velocimetry, PIV)试验揭示四方柱在 $Re=8\ 000$ 情况下的流动分区特性,发现在间距为2倍方柱尺度时具有典型涡脱落频率双峰化特征;Kumar等^[10]针对九方柱横向排列的极端多体干扰开展研究,发现当间距超过6倍直径时尾流交互作用可忽略,而间距缩减至方柱直径的30%时出现混沌流态。

船舶安全距离的计算主要考虑船舶完全失控状态和部分失控状态,处于非常态航行场景,对常态下船舶安全域的定量研究较为薄弱,且传统模型在受限水域的适用性不足,导致理论计算值偏离实际航行需求。数值模拟技术为船舶安全距离提供了新路径,参考单柱和并列双柱流场的研究,可为本文船舶间水动力相互作用的分析提供理论参考。

本文创新性地采用二维计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)数值模拟技术,结合动网格方法,系统地分析了船舶在不同相对速度和横向间距条件下的水动力学变化。这个方法能够提供更加精确的船舶安全距离计算,克服传统模型在受限水域应用中的不足。同时基于仿真结果,提出一种动态安全距离计算公式,为江苏段航道的船舶安全提供了新的理论依据,并支持航道标准的优化调整。

1 安全距离模型的构建

1.1 船舶选取

本文选取长江江苏段目前最大的20万吨级开普型船舶和110 m的代表船型作为研究对象,相

关参数见表 1, 将开普型船舶的船宽记为特征尺度 B , $B=50$ m。

表 1 数值仿真船舶参数

Tab. 1 Parameters of simulated vessels m					
类型	船舶总长	型宽	型深	满载吃水	实际吃水
开普型船舶	300	50	25.5	18.5	11.5
他船	110	22	6.6	4.9	4.5

1.2 开普型船舶航行场景

根据《长江江苏段船舶定线制规定(2021年)》^[11], 通航分道内航行的其他船舶尽可能避免妨碍受限船舶的正常航行。若开普型船舶沿着通航分道中心线保向保速直线航行, 此时船舶正前方有其他船舶正在航行, 警戒艇在开普型船舶左舷或者右舷正横前 $22.5^\circ \sim 112.5^\circ$ 扇形区前方水域对他船疏通驱离, 他船以舵角 δ 采取避让行动, 通过减速并转向至安全方位, 直至与开普型船舶建立安全会遇距离。

警戒艇与开普型船舶纵向上的距离记为 L , 根据开普型船舶的紧急制动性能和交通流态势, L 取值范围为 $0.6 \sim 0.8$ n mile。因此, 开普型船舶常态下的航行可简化为类似船舶追越的场景, 警戒艇在前方水域对船舶进行疏通驱离, 前方船舶减速靠左或者靠右让请航道, 然后开普型船舶保持直线航行经过前方船舶, 简化的运动场景见图 1。为后续便于设置来流速度和效果展示, 将开普型船舶与他船的横向间距设置为两船中纵剖面的距离, 记为 S ; 将开普型船舶设置为“移动物体”, 记为 P, 船舶 P 的速度为 u_1 ; 临近的前方他船设置为“静止物体”, 记为 F, 速度为 u_2 。

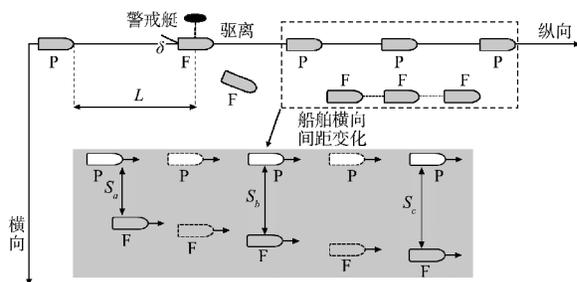


图 1 开普型船舶常态航行物理场景

Fig. 1 Physical scenario of typical Cape vessel navigation

2 数值模拟方案

2.1 计算域及边界条件

计算域尺度选择需要兼顾计算效率与物理场解析精度。考虑到开普型船舶的尺寸选用 20 万吨级散货船, 平面尺度为 $300 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ (总长 \times 型宽), 近似为 $6B \times B$, 船舶 F 的平面尺度 $110 \text{ m} \times 22 \text{ m}$ 。结合开普型船舶停车性能和 12.5 m 深水航道宽度, 将纵向计算域尺度设定为 3000 m ($60B$), 横向尺度设定为 600 m ($12B$), 计算域尺度见图 2。

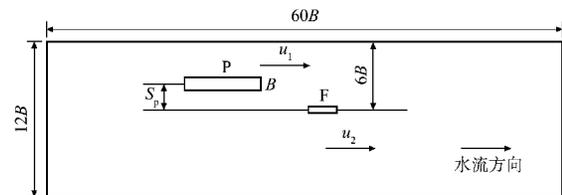


图 2 开普型船舶并行经过他船场景计算域尺度

Fig. 2 Computational domain scale for Cape vessel passing by other ships in parallel

为避免模拟初始阶段两船水动力场的非物理耦合, 纵向初始间距采用开普型船舶船长的 50%, 取值为 150 m , 从而覆盖船舶操纵响应的初始相位特征。横向间距 S 的取值为船宽的 $50\% \sim 150\%$, 参考船舶与船身与桥墩间的试验数据中 1 倍桥墩直径下流场的压力梯度突变效应最为显著。

船舶水动力数值模拟的可靠性高度依赖于物理场边界的精准表征, 本文基于 CFD 理论与航道实际工况, 设置物理场边界条件。1) 进口边界条件: 采用均匀来流速度入口 (velocity_inlet), 流速垂直边界分布, 湍流参数通过强度-尺度关联模型定义; 2) 出口边界条件: 结合回流湍动能抑制算法设置自由出流 (outflow); 3) 对称边界: 通过对称边界 (symmetry) 与流体体积 (volume of fluid, VOF) 模型耦合, 表征无约束气液界面动力学特性; 4) 船体边界: 开普型船舶 P、前方临近小船 F 的域壁面均设置为无滑移壁面 (wall); 5) 船舶运动: 通过用户自定义函数 (user defined function, UDF) 定义匀速直线运动, 利用 Fluent 软件中的 profile 文件定义为沿 x 轴方向做匀速直线运动, 速度取值等同于开普型船舶 P 相对小船 F 的速度, 相对速度范围为 $1 \sim 5 \text{ kn}$, 从而将动态变量参数确定为 2.0 m/s 。

2.2 计算工况的确定

简化物理场景中船舶 P 通过视作相对静止状态的船舶 F，开普型船航行在江苏段顺直航段航速最高可为 15 kn，弯曲段航速也可以达到 10~12 kn，而一般货船速度较慢，为 9~13 kn。将两船间的相对运动作为输入来流速度，为探索船间效应中水动力影响特征模拟来流速度工况参数区间为 1.0~5.0 m/s，见表 2。

表 2 模拟工况
Tab. 2 Simulation working conditions

工况	相对速度/ (m·s ⁻¹)	开普型船舶尺度		横向 距离
		总长	型宽	
1	1	6B	B	B
2	2	6B	B	B
3	3	6B	B	B
4	4	6B	B	B
5	5	6B	B	B

2.3 网格划分

在模拟开普型船舶 P 经过前方他船 F 的相互作用时，采用三自由度平面运动模型描述船舶 P 的运动特性，避免了传统静态网格方法中网格畸变导致计算发散。

本文模型采用动网格更新策略，将计算域背景网格划分为四边形非结构网格^[12-13]，对开普型船舶 P 周边网格进行结构化四边形网格加密处理，动网格划分见图 3。

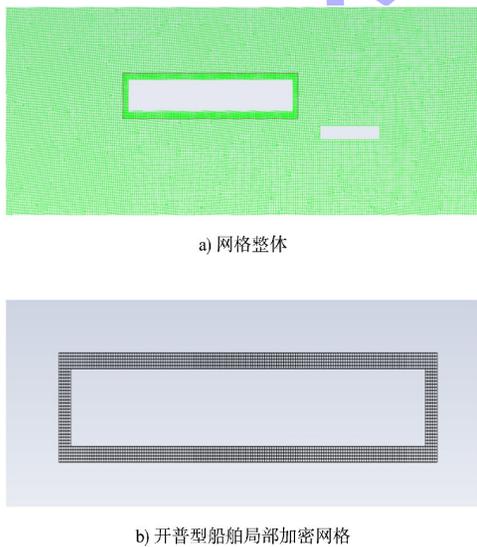


图 3 动网格模型划分

Fig. 3 Mesh generation of dynamic grid model

3 结果分析

开普型船舶 P 沿通航分道中央直线匀速行驶，前方船舶 F 在警戒艇的驱逐下减速避让，开普型船舶 F 航行通过该船。针对开普型船舶 P 与前方临近他船 F 在不同相对位置下的流场特性，选取两船交互过程中 6 个典型阶段($t_1 \sim t_6$)开展数值模拟研究，其中 $t_1 \sim t_2$ 阶段为船舶 P 临近船舶 F 船尾过程， $t_3 \sim t_4$ 阶段为船舶 P 经过船舶 F 两船船身中点相对应的过程， $t_5 \sim t_6$ 阶段为船舶 P 船尾经过船舶 F 船尾过程。因此，选择开普型船舶 F 在相对速度为 2.0 m/s、流速为 1.0 m/s 时的典型工况进行仿真。

3.1 压力场分析

压力场的时空演化与开普型船舶运动状态紧密相关，对开普型船舶 P 与前方他船 F 在不同相对位置下的压力场的分析，开普型船舶 P 和他船 F 在 1 倍船宽间距下存在显著水动力耦合作用与船吸效应压力驱动机制。不同阶段压力分布见图 4。

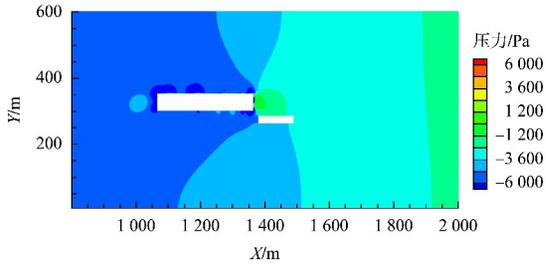
$t_1 \sim t_2$ 阶段，船舶 P 临近他船 F 船尾时，船舶 P 的船首因高速运动引发流体滞止效应，其船首形成局部高压区域，其船首和船尾的高压区叠加导致非对称合成压力场，使船舶 P 向船首右侧方向偏移，他船 F 向船尾左侧偏移且船尾外摆，船首向航道中心线偏移。

$t_3 \sim t_4$ 阶段，两船船身中点对应时，文丘里效应主导两船之间的压力场分布，使船间流速增大、压力骤降，形成非对称负压区，船舶 P 右舷负压大于左舷，他船 F 靠近船舶 P 侧负压明显大于右舷，船舶 P 形成强吸力核心区，他船 F 尾流分离致失稳风险明显加剧。

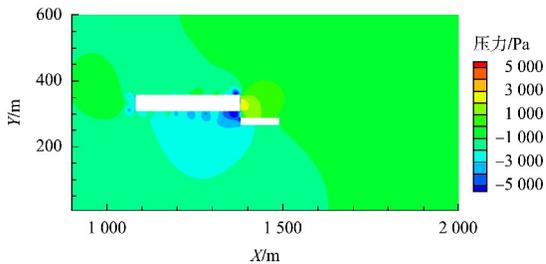
$t_5 \sim t_6$ 阶段，船舶 P 船尾驶离他船 F，压力场动态恢复， t_5 时刻即开普型船舶的船尾与他船 F 重叠时，压力区仍然相互干扰，且开普型船舶的船尾压力区对他船 F 的左舷干扰较大，当开普型船驶离他船后距离逐渐增大时，开普型船船尾压力扰动强度对他船 F 压力扰动强度逐渐减小， t_6 时刻基本恢复平衡。

整体而言，两者交互压力场呈非对称分布，

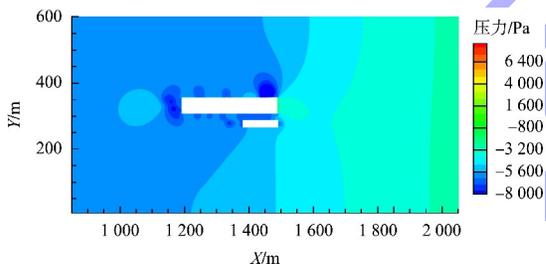
压力场由高压滞止与低压分离效应主导, 船舶尺度差异与压力场作用范围差异导致小型船舶更易受压力干扰, 从而引发他船 F 船尾外摆与船首内偏转现象。



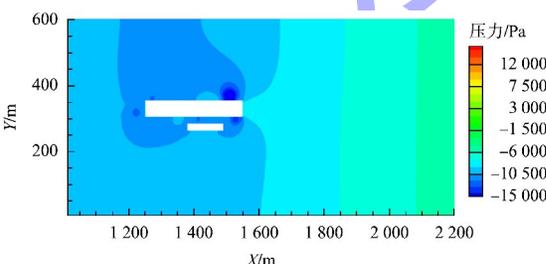
a) t_1 时刻



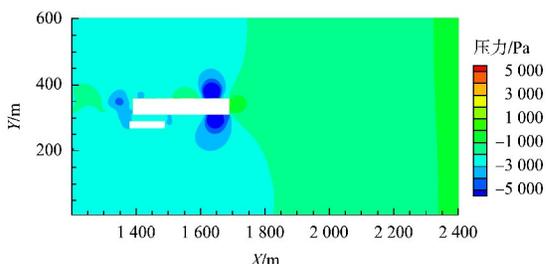
b) t_2 时刻



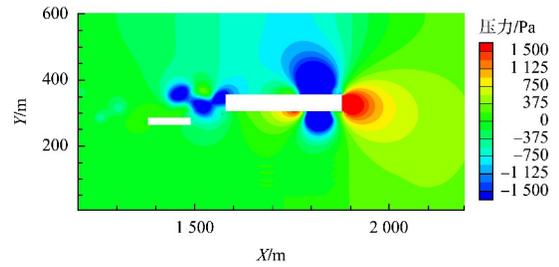
c) t_3 时刻



d) t_4 时刻



e) t_5 时刻

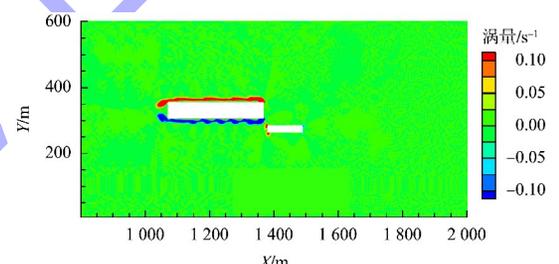


f) t_6 时刻

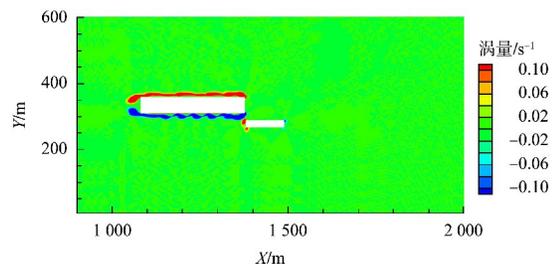
图 4 $t_1 \sim t_6$ 阶段压力分布
Fig. 4 Pressure distribution from t_1 to t_6

3.2 涡量场分析

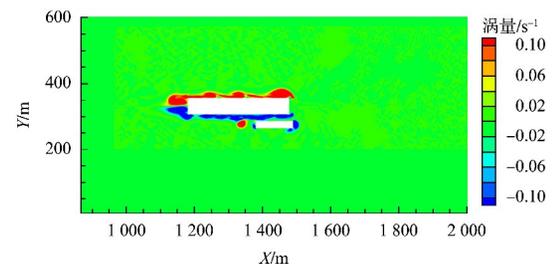
针对开普型船舶 P 与前方他船 F 在不同相对位置下的涡量场演化特征, 数值模拟揭示了船间相互作用中涡量生成、输运与耗散的非线性动力学机制, 其时空分布特征与船舶运动状态及横向间距呈现显著耦合关系。不同阶段涡量分布见图 5。



a) t_1 时刻



b) t_2 时刻



c) t_3 时刻

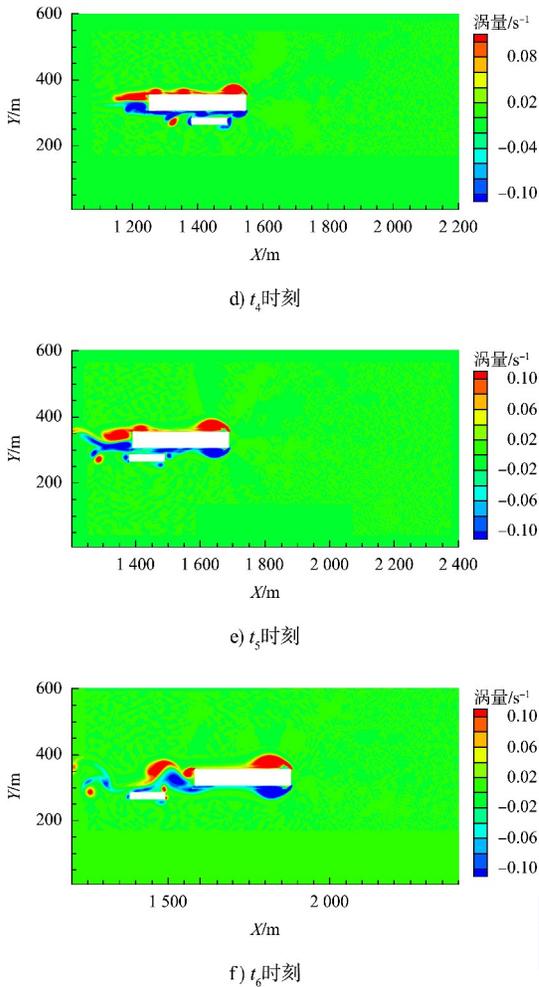


图5 $t_1 \sim t_6$ 阶段涡量分布

Fig.5 Vorticity distribution from t_1 to t_6

$t_1 \sim t_2$ 阶段，船舶 P 临近他船 F 船尾，船体两侧形成空间涡量分层结构，左舷产生逆时针正展向涡量，右舷产生顺时针负展向涡量，尾部流场呈现准对称特性；当船舶 P 接近他船 F 时，他船 F 尾迹卡门涡街与 P 船首部分离区相位锁定，涡脱落频率提升，脱落涡旋不对称分布。

$t_3 \sim t_4$ 阶段，船舶 P 进入他船 F 尾迹区，两船间狭窄流道内剪切流动耦合效应加剧，船舶 P 右侧及他船 F 左侧尾涡脱落涡核间距缩小，形成密集涡量带，船舶 P 右侧涡量占优，形成高速涡条带状分布。

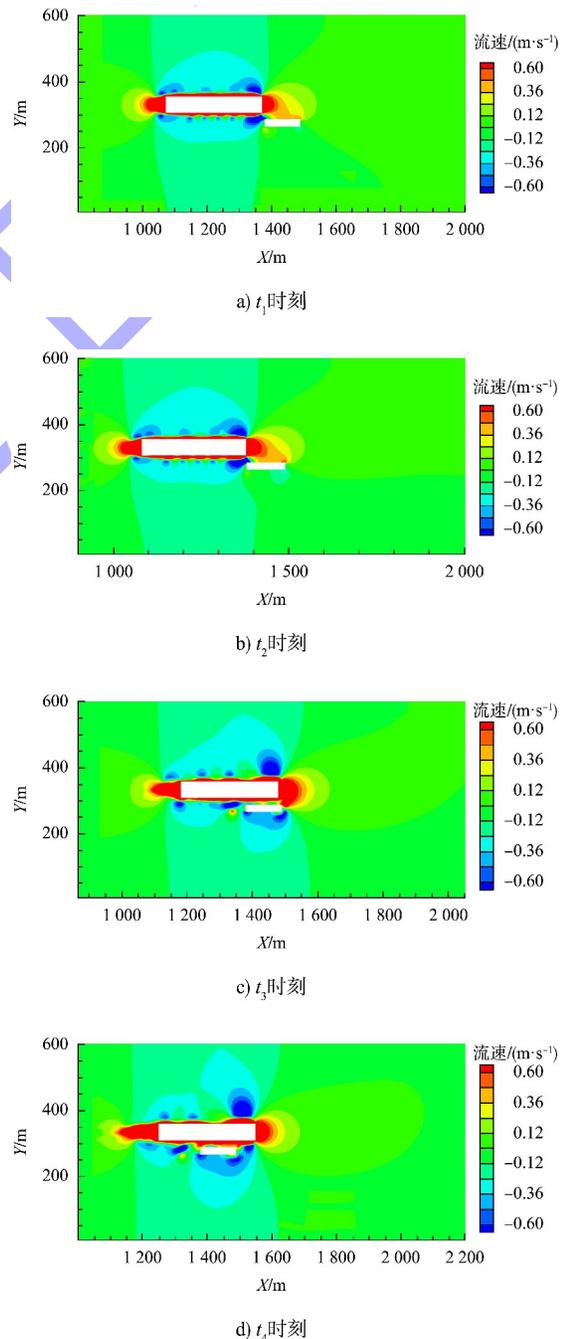
$t_5 \sim t_6$ 阶段，两船涡量场相互剥离进入再平衡状态，此时船舶 P 船尾涡量层从右侧流场剥离，尾部涡量分布波动扰动，随两船间距增大，他船 F 对船舶 P 尾流涡量干扰减弱，船舶 P 尾部涡量对

称性恢复，流场和操纵稳定性趋于动态平衡。

总体而言，开普型船舶 P 与他船 F 涡量场交互作用呈现非对称演化特征，涡量生成与船舶 P 运动状态相关，在 1 倍船宽狭窄横向距离下涡量场与船体耦合效应显著。

3.3 速度场分析

开普型船舶 P 与他船 F 在不同相对位置下的速度场与船舶间距、相对速度及尺度差异等参数呈非线性耦合关系，横向流速非对称分布会降低船舶操纵稳定性。不同阶段速度分布见图 6。



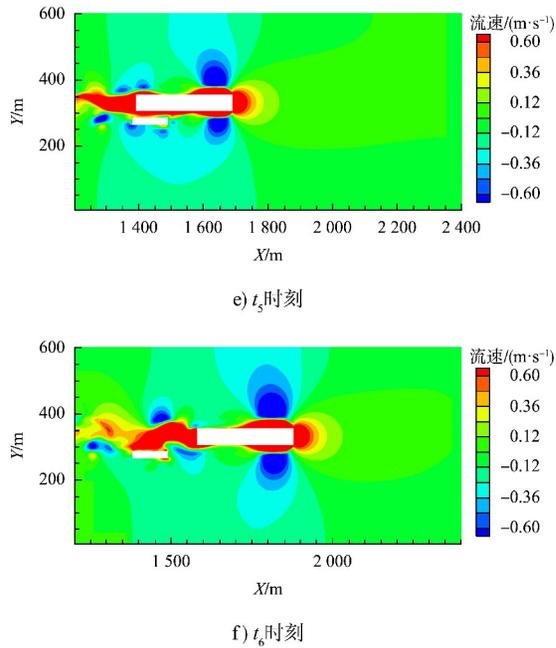


图 6 $t_1 \sim t_6$ 阶段横向流速分布

Fig. 6 Lateral flow velocity distribution from t_1 to t_6

$t_1 \sim t_2$ 阶段, 船舶 P 船首右侧与他船 F 船尾的正负横向流速区交错分布, 导致横向动量失衡, 他船 F 左侧出现交替分布的正负横向流速带, 船舶 P 右舷负横向流速与他船 F 尾流负流速区初步耦合, 形成局部低流速带, 加剧了船舶 P 船首和他船 F 船尾两侧的压力梯度。

$t_3 \sim t_4$ 阶段, 船舶 P 船首右侧负横向流速区与他船 F 左侧负流速区强烈耦合, 复合低流速带覆盖范围扩大, 他船 F 左侧正横向流速区受抑制, 两船间纵向流速骤增。

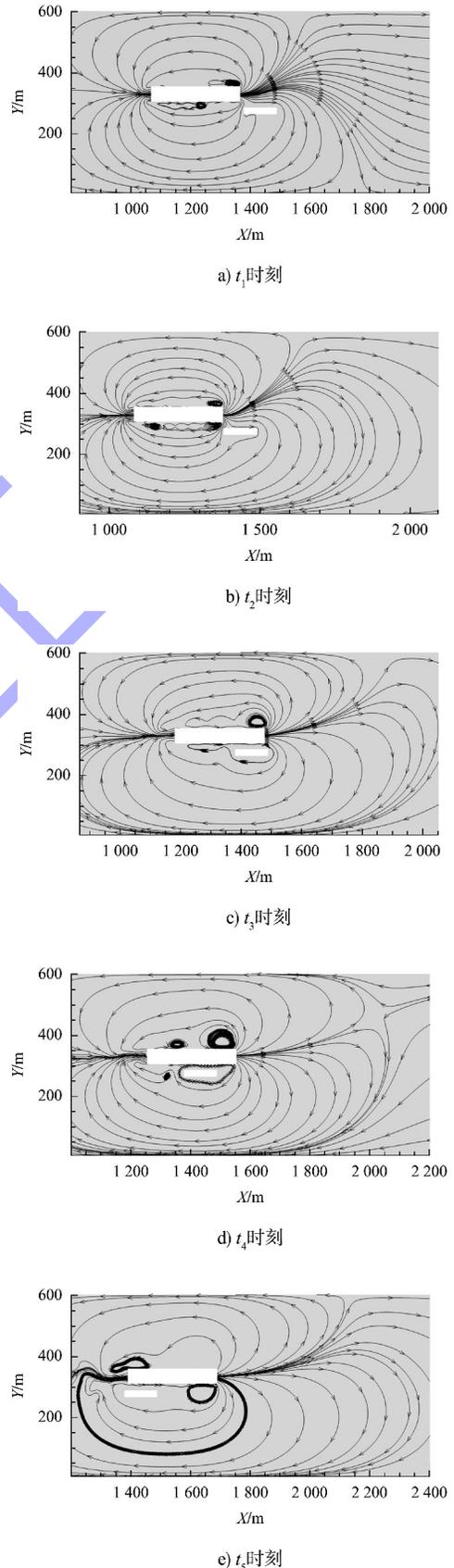
$t_5 \sim t_6$ 阶段, 船舶 P 船尾负横向流速与他船 F 左侧流速区相互作用, 激发大范围正向横向流速区, 船舶 P 尾部瞬时承受逆时针环流作用, 航向控制难度增加。随着船舶 P 逐渐脱离他船 F 影响范围, 尾部涡流扰动强度快速衰减, 横向流速非对称性逐步恢复。

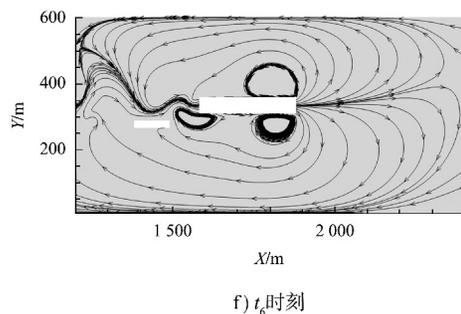
速度场数值模拟表明, 开普型船舶 P 与他船 F 交互流场中横向流速非对称分布与纵向流速骤增加剧横向动量失衡, 船尾脱离阶段流速区大幅变化, 增加航向偏移风险。

3.4 流线分析

流线分布的特征可以看出开普型船舶 P 与前

方他船 F 流线分离及附着涡核形成规律, 分析两船运动时水流的动力学过程。不同阶段水流流线见图 7。



图7 $t_1 \sim t_6$ 阶段水流流线Fig. 7 Streamlines of water flow from t_1 to t_6

$t_1 \sim t_2$ 阶段, 船舶 P 高速航行, 其船首和两侧形成高速环线挤压水流, 流线场呈现空间重构特征, 船首右舷流线向他船 F 倾斜形成剪切层, 左舷流线向外发散产生局部流线环, 他船 F 尾流区受挤压, 船首流线发展受抑制。

$t_3 \sim t_4$ 阶段, 两船间狭窄流道内流线急剧收缩、密度增加、纵向流速提升, 他船 F 左侧流线呈螺旋状分离, 右侧流线受遮挡扩张, 两船间剪切诱发涡核生成。

$t_5 \sim t_6$ 阶段, 船舶 P 船尾脱离时尾部流线与他船 F 尾流交叉干涉, 形成环形交汇结构, 涡核撞击他船 F 船尾产生逆时针环流, 随船舶 P 远离, 他船 F 后方流线涌入尾涡区域, 负压区流线扩展, 流线扰动减弱。

流线数值模拟显示, 开普型船舶 P 与他船 F 间的狭窄流道内流线存在动态重构与剪切分离现象, 呈现密集收缩与螺旋分离特征, 脱离阶段的流线交叉干涉可能导致船舶横摇与艏摇, 导致船舶稳性下降。

4 对比与验证

4.1 PIANC 导则的计算结果

开普型船舶航迹带宽度是分析安全距离的重要参数。根据国际航运协会(Permanent International Association of Navigation Congresses, PIANC)的 *Harbour Approach Channels-Design Guidelines*^[14], 直航段进港航道的总体底宽 W , 对于单向航道的计算公式为:

$$W = W_{BM} + \sum W_i + W_{BR} + W_{BG} \quad (1)$$

对于双向航道, 计算公式为:

$$W = 2W_{BM} + 2\sum W_i + W_{BR} + W_{BG} + \sum W_p \quad (2)$$

式中: W_{BM} 为基本操纵航道的宽度, 取设计船舶宽度 B 的倍数; $\sum W_i$ 为考虑风、流等因素影响的附加宽度; W_{BR} 、 W_{BG} 为左、右船岸富余距离; $\sum W_p$ 为会船距离, 包括两个通航分道之间的分隔带距离。

Harbor Approach Channels-Design Guidelines 中推荐散货船舶, 譬如开普型船舶的基本操纵航道的宽度 W_{BM} 取值为 1.8 倍船宽, 约 90 m。

4.2 引航员模拟试验结果

以 20 万吨级开普型船舶在镇江段通过五峰山大桥水域最后靠泊大港港区航行轨迹为例, 选取镇江引航站高级引航员进行船舶操纵模拟试验, 针对不同的风、流条件, 进行不同工况的一系列模拟试验。

根据模拟试验结果, 统计出开普型船舶进港的实际航迹带宽度和需要的宽度。在极端工况(防洪流量 $8.54 \text{ 万 m}^3/\text{s}$)和风力 6 级条件下, 航迹带最大宽度为 61 m, 仅为船宽(50 m)的 1.22 倍, 表示经验引航对航道效能的提升作用, 引航员通过优化操纵策略减少操舵频次和保持良好的航向稳定性, 可大幅降低航道占用宽度, 能有效降低开普型船舶的安全距离阈值。

4.3 安全距离确定方法

数值模拟结果显示, 开普型船舶和他船保持 1 倍船宽约 50 m 时, 对他船航行影响较大。基于数值模拟、规范对比结果, 以及江苏段通航分道 225 m 的航宽限制, 综合考虑船舶运动特性、环境干扰及航道约束条件, 基于引航员经验与规范提出安全距离确定方法, 即取最小值。对比流体力学仿真的 50 m, *Harbor Approach Channels-Design Guidelines* 数值计算的 90 m 和引航操船模拟轨迹线的 61 m; 齐传新^[15]结合苏联内河经验航道宽度 200 m 时允许的船舶相遇中安全横距为 50 m。可以验证运用船舶间水动力学关系确定船间效应的安全距离是可靠的。

5 结论

1) 本文构建的二维 CFD 船间效应模型及 50 m 安全距离结论, 为长江江苏段 12.5 m 深水航道船舶最大吃水控制标准提供技术依据, 可为后续三维精细化流场分析作可靠的基础。

2) 受限水域船间效应仿真中,构建二维流场并用动网格技术模拟两船 50 m 间距下的运动状态,发现压力场呈非对称高压滞止与低压分离,横向流速分布非对称加剧了船舶横向动量失衡,增加了小型船舶航向偏移的风险。

3) 通过数值模拟与流体动力学分析,本文提出开普型船舶与小型船舶在受限水域中的安全距离为 50 m。对比 PIANC 导则建议航道宽度 90 m 和苏联内河的经验值 50 m,进一步支持了 50 m 安全距离的合理性。验证了简易物理流场下调用 Profile 文件开展船间效应分析的仿真结果具有合理性。

4) 综合考虑了船舶运动特性、环境干扰以及航道约束条件,提出了一种基于流体动力学仿真的动态安全距离确定方法,为开普型船舶在江苏段航道的安全航行提供了新的理论依据。

参考文献:

- [1] 钟恒毅,袁浩. 船舶失控漂移撞桥的数值分析和概率预报[J]. 水上安全, 2022(5): 17-21.
ZHONG H Y, YUAN H. Numerical analysis and probabilistic forecasting of ship's uncontrolled drift and crashes into bridge[J]. Maritime safety, 2022(5): 17-21.
- [2] 居尧. 长江口北槽 12.5 m 深水航道边坡自然水深利用标准研究[J]. 水运工程, 2021(7): 157-162.
JU Y. Natural water depth utilization standard of the Yangtze Estuary 12.5 m deep-water channel slope [J]. Port & waterway engineering, 2021(7): 157-162.
- [3] 汪再荣,杨忠超. 三峡库尾乌江河口—涪陵白涛段航道大型船舶适航条件分析[J]. 水运工程, 2022(8): 148-154.
WANG Z R, YANG Z C. Navigation condition of large ships in channel from Wujiang estuary to Fuling Baitao at tail of the Three Gorges Reservoir [J]. Port & waterway engineering, 2022(8): 148-154.
- [4] 王超峰,刘明俊,张磊,等. 鄱阳湖水利枢纽船舶失控漂移建模方法[J]. 中国航海, 2023, 46(2): 67-73.
WANG C F, LIU M J, ZHANG L, et al. Modeling of ship out of control and drifting in area of Poyang Lake water control project [J]. Navigation of China, 2023, 46(2): 67-73.
- [5] 赵仓龙,冯爱国. 深圳铜鼓航道失控船舶对海底管道风险分析[J]. 中国航海, 2017, 40(1): 64-68, 72.
ZHAO C L, FENG A G. Risk analysis of underwater pipeline damage by uncontrolled drifting vessels in Shenzhen Tonggu Channel [J]. Navigation of China, 2017, 40(1): 64-68, 72.
- [6] JIANG H Y, CHENG L. Hydrodynamic characteristics of flow past a square cylinder at moderate Reynolds numbers[J]. Physics of fluids, 2018, 30(10): 12-46.
- [7] RASTAN M R, ALAM M M. Transition of wake flows past two circular or square cylinders in tandem [J]. Physics of fluids, 2021, 33(8): 62-66.
- [8] RASTAN M R, SOHANKAR A, ALAM M M. Flow and heat transfer across two inline rotating cylinders: effects of blockage, gap spacing, Reynolds number, and rotation direction [J]. International journal of heat and mass transfer, 2021, 174: 121324.
- [9] WANG X K, GONG K, LIU H, et al. Flow around four cylinders arranged in a square configuration [J]. Journal of fluids and structures, 2013, 43: 179-199.
- [10] KUMAR S R, SHARMA A, AGRAWAL A. simulation of flow around a row of square cylinders[J]. Journal of fluid mechanics, 2008, 606: 369-397.
- [11] 交通运输部. 长江江苏段船舶定线制规定(2021年)[R]. 北京: 交通运输部, 2021.
Ministry of Transport. Regulations on vessel routing system in Jiangsu Section of the Yangtze River (2021) [R]. Beijing: Ministry of Transport, 2021.
- [12] 谭志荣,陈彬,李青云,等. 弯曲航道串列桥墩紊流宽度研究及应用[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2022, 46(1): 166-170.
TAN Z R, CHEN B, LI Q Y, et al. Study and application of turbulent width of crossbridge piers in curving channel [J]. Journal of Wuhan University of Technology (transportation science and engineering), 2022, 46(1): 166-170.
- [13] 谭志荣,熊劭,王洋,等. 高雷诺数下串列三圆柱绕流的大涡模拟[J]. 水运工程, 2022(12): 25-33.
TAN Z R, XIONG M, WANG Y, et al. LES on flow past three tandem cylinders at high Reynolds number [J]. Port & waterway engineering, 2022(12): 25-33.
- [14] Harbor approach channels-design guidelines[S]. Brussels: PINAC, 2014.
- [15] 齐传新. 内河船舶运输安全学[M]. 大连: 大连海运学院出版社, 1991: 136-140.
QI C X. Inland vessel transport safety studies [M]. Dalian: Dalian Maritime Institute Press, 1991: 136-140.