

· 航道及通航建筑物 ·



河口潮流对大型船舶航行安全影响分析 ——以长江口北槽深水航道为例*

王建平¹, 沈 淇², 王佑铭³, 戚定满²

(1. 上海海事局船员考试中心, 上海 200092; 2. 上海河口海岸科学研究中心, 上海 201201;
3. 上海河口海岸工程咨询有限公司, 上海 201201)

摘要: 长江口北槽深水航道是上海港和长江沿岸港口重载大型船舶航行的唯一水道。针对北槽东端大型进口船舶频繁失控现象, 采用三维潮流数值模拟研究手段, 分析了北槽东端大型进口船舶航行失控的水动力原因。研究表明, 转流及局部工程边界条件约束导致的航道横流突增是造成了北槽东端船舶失控的主要原因之一。涨转落期间, 南槽口门水域率先落潮的落潮水流延南导堤头绕流顶冲北槽航道, 导致北槽东端航道横流突增; 落转涨期间, 涨潮水流沿北岛堤头绕流进入北槽航道, 造成了北槽东端航道横流的增加。近期, 横沙大道外延工程会增加落转涨期间北槽航道东端局部横流大小, 需引起重视。上述研究成果为保障北槽航段通航安全提供研究支撑, 为推广数值模拟技术在通航安全管理应用提供借鉴。

关键词: 长江口北槽; 深水航道; 航行安全; 横流; 横沙大道外延工程

中图分类号: U61

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)03-0065-10

Impact of estuarine tidal currents on navigation safety of large vessels

— a case study of deep-water channel at North Passage of the Yangtze River Estuary

WANG Jianping¹, SHEN Qi², WANG Youming³, QI Dingman²

(1. Crew Examination Center, Shanghai Maritime Safety Administration, Shanghai 200092, China;

2. Shanghai Estuarine and Coastal Science Research Center, Shanghai 201201, China;

3. Shanghai Estuarine and Coastal Engineering Consulting Co., Ltd., Shanghai 201201, China)

Abstract: The deep-water channel at north passage of the Yangtze Estuary serves as the exclusive waterway for heavily laden large vessels accessing Shanghai Port and ports along the Yangtze River. In view of the frequent loss of control of large inbound vessels at the eastern end of the North Passage, a three-dimensional tidal current numerical simulation method is adopted to analyze the hydrodynamic causes for the loss of control of large inbound vessels. The results indicate that the sudden increase in cross-currents at the navigational channel caused by tidal reversal and the constraints of local construction boundary is one of the main reasons for the vessel loss of control at the eastern end of the North Passage. During the flood-to-ebb transition period, the ebb current that first starts ebbing at the South Passage Estuary flows around the head of the South Dike and impinges on the channel of North Passage, resulting in a sudden increase in the cross-current in the eastern end of the North Passage. During the ebb-to-flood transition period, the flood current-currents around the head of the North Dike into the North Passage, leading to an increase in the cross-current in the waterway at the eastern end of the North Passage.

收稿日期: 2025-07-09

录用日期: 2025-08-25

*基金项目: 国家重点研发项目(2024YFB2605902)

作者简介: 王建平(1970—), 男, 四级调研员, 从事船员管理、船员考试评估及航海模拟器开发应用等相关工作。

通信作者: 沈淇(1985—), 男, 副研究员, 博士, 从事河口水沙动力过程及模拟研究工作。E-mail: shenqimath@hotmail.com

Recently, the Extension Project of Hengsha Avenue may further intensify cross-current effects at the eastern end of the North Passage during the the ebb-to-flood transition period, which needs to be taken seriously. The above research results provide research support for ensuring the navigation safety of the North Passage and offer a reference for promoting the application of numerical simulation technology in navigation safety management.

Keywords: North Passage of the Yangtze Estuary; deep-water channel; navigation safety; cross-current; Extension Project of Hengsha Avenue

长江口是长江流域与海洋的交汇地带,是实现江海联运,发挥长江黄金水道航运效益的重要纽带,在我国航运体系中占据着举足轻重的地位。近年来,随着长江沿江港口吞吐量急速增长^[1],船舶大型化日趋明显,长江口已成为我国船舶流量最密集、通航条件最复杂、管理难度最高的水域之一。长江口大型船舶航行安全风险识别及应对措施研究已成为水运安全领域的重大关注课题。

目前,国内很多专家、学者就长江河口段大型船舶航行安全风险识别、航行事故原因分析等方面开展了研究论述。已有研究表明,船舶航行途中因船舶失控带来的经济损失巨大。王新^[2]统计了长江江阴大桥至宝山交接区近十年的1 237起引航船舶失控案例,指出长江船舶失控主要以主机失控为主,失控事故多发于船舶在长江航道水域的航行途中。马军^[3]同样指出长江上海段70%以上的船舶故障是在航行途中发生的。造成船舶航行中主机失控的主要原因除船舶老旧等船况差以外,主要受船舶航经通航密度大、桥区/汽渡等复杂水域时主机频繁操纵、船舶使用大舵角转向时舵机负荷急剧增加等。上述通航复杂水域往往与航段自然水流条件及大型涉水建筑物影响有关,如在干支流交汇水域^[4]、连云港主港防波堤水域^[5]、东海大桥附近水域^[6]、长江口深水航道水域^[7]等。

长江口北槽深水航道自上海港长江口灯船至圆圆沙灯船,全长约80 km,是进出上海港和长江沿岸各港口重载大型船舶的唯一水道。北槽航段周边水域先后建有长江口深水航道治理工程^[8](一~三期)、长江口12.5 m北槽深水航道南坝挡沙堤加高工程、长江口12.5 m北槽深水航道南坝挡沙堤加高完善工程以及正在建设的横沙大道外延工程^[9],在显著提升航段水深条件的同时,也

加大了大型船舶通航管理难度。已有的多年引航经验指出^[10],在北槽深水航道两端(东端D6灯浮水域、西端圆圆沙灯船附近水域)船舶航行事故时有发生。薛一东等^[11]指出潮流对船舶航行的影响不可小觑,洪水季大潮汛时,北槽深水航道流速的增加,对船舶的航行安全造成了一定的影响。张程程^[12]重点分析了北槽深水航道下段重点高风险水域的复杂潮流特征,指出流向突变效应是造成船舶失控的原因。杨亦林^[13]浅谈北槽导堤端口存在的切变流和河口环流对船舶航行的影响,强调驾引人员应加倍重视河口环流和切变流对大型船舶安全航行的影响。

虽然上述研究成果在长江河口段船舶安全风险识别及船舶失控原因方面取得了重要的研究认识,但已有成果多基于既往经验、案例的定性分析,缺乏定量的研究成果。鉴于长江口北槽深水航道通航安全具有极其重大的研究价值,本文基于长江口三维水沙数学模型(SWEM3D),结合近期北槽深水航道通航风险事件,定量分析当期北槽航道水动力条件对北槽通航风险航段的影响过程,探讨近期正在实施的横沙大道外延工程对北槽大型船舶通航的潜在影响,研究成果可为保障北槽航段通航安全提供研究支撑,为推广数值模拟技术在通航安全管理的应用提供借鉴。

1 研究航段概况

长江口属中等强度潮汐型河口,上游流域来水丰富,2011—2022年平均径流量约为9 030亿m³(长江大通站)。长江口外潮汐属正规半日潮,一个潮周期为12 h 24 min。潮波进入长江口以后,由于水深变浅,加上径流作用逐步发生变形进而成为非正规半日潮。潮差从口外向口内逐渐增大,

外海平均潮差约 2~3 m, 口内可达 3~4 m。长江口最大潮差发生于 8—10 月, 最小潮差发生在 2 月^[14]。长江口平面上呈现“三级分汊、四口入海”的平面格局, 其中, 长江口第一级分汊被崇明岛分成南、北支, 南支为主汊; 第二级分汊由南支主汊被长兴岛分成南、北港, 多年来基本维持“五五开”分流分沙格局; 第三级分汊由南港于江亚南沙附件分成南、北槽。

长江口 12.5 m 深水航道位于长江口北槽水域, 是进出上海港和长江沿岸各港口重载大型船

舶的唯一水道, 长江口北槽周边水域、已建及在建工程信息见图 1。自 1998 年起, 长江口北槽及临界水域先后建设了长江口深水航道治理工程一期~三期工程(1998—2010 年)、横沙东滩促淤圈围工程一期~八期(2003—2018 年)、南坝田挡沙堤加高工程(2016—2017 年)及加高完善工程(2019—2020 年)、南槽一期江亚南沙护滩堤工程(2018—2020 年)以及目前正在建设的横沙浅滩固沙保滩稳定河势先行段工程(包括横沙大道外延及北缘护底工程)。

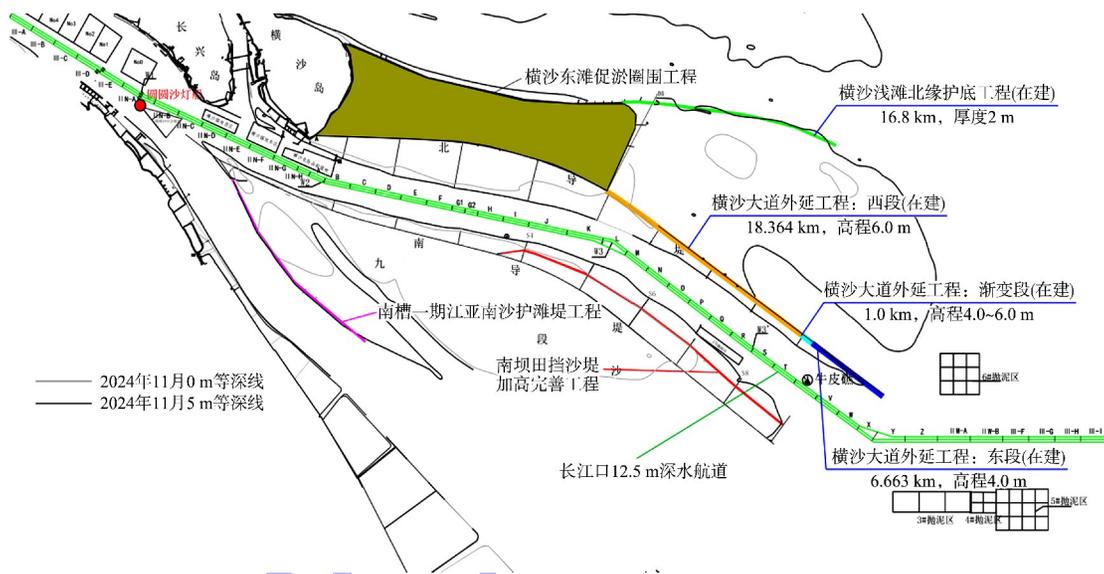
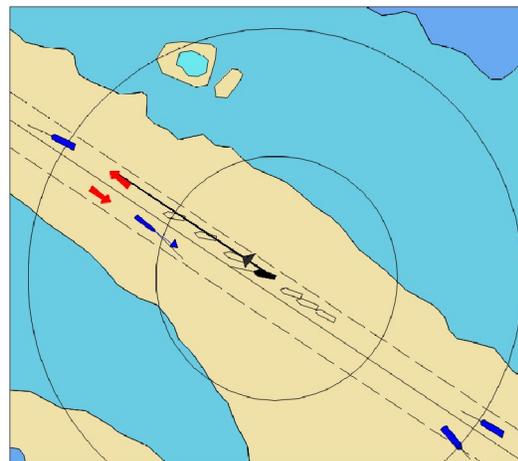


图 1 长江口 12.5 m 深水航道位置及周边大型涉水工程建设示意
 Fig. 1 Location of the 12.5 m deep-water channel at the Yangtze River Estuary and the surrounding large-scale construction projects

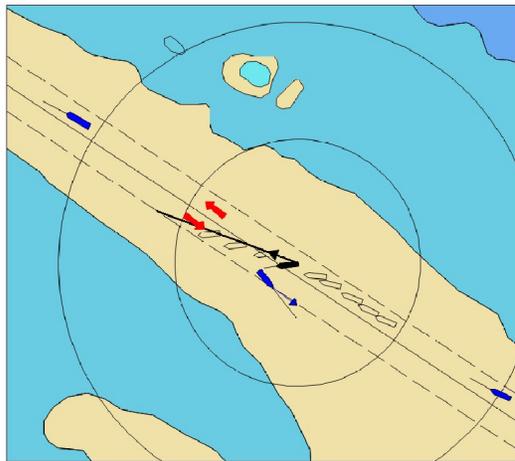
2 长江口北槽出口失控案例

长江口北槽东端时常出现大型船舶失控的风险事件。2024 年 7 月 31 日 20 时 25 分左右, 进口船 A 轮(长 165 m、宽 23 m、吃水 8.7 m)航经深水航道 15 灯浮附近时(近牛皮礁水域, 见图 1), 船首发生大幅度向左偏转, 用右舵无法抑制, 与出口船产生紧迫局面, 见图 2。约半小时后, 于 21 时 05 分左右, 进口船 B 轮(长 190 m、宽 32 m、吃水 10.9 m)也航经 15 灯浮附近, 船首出现大幅度左转, 采用右舵无法抑制, 发生船舶失控事件, 见图 3。此时, 与出口船轮产生紧迫危险, 最终出口船轮采取右满舵旋回, 进行了紧急避让, 才使事

件得到了妥善处置。

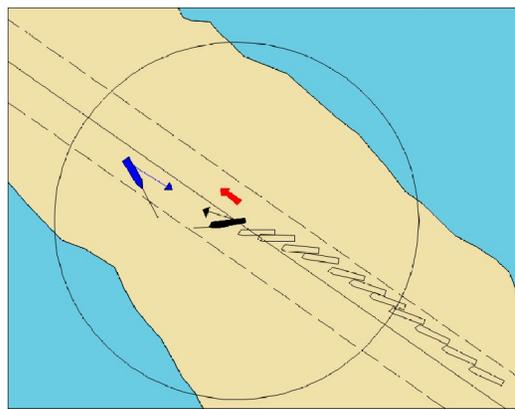


a) A 轮开始左偏

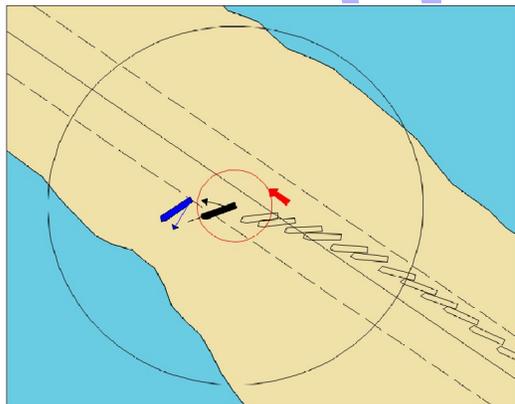


b) A轮驶入下行航道

图2 2024-07-31T20:25:00 进口船A轮航行失控过程
Fig.2 Navigation loss of control process of inbound Vessel A at 20:25:00 on July 31, 2024



a) B轮开始左偏



b) B轮与下行船舶紧迫

图3 2024-07-31T21:05:00 进口船B轮航行失控过程
Fig.3 Navigation loss of control process of inbound Vessel B at 21:05:00 on July 31, 2024

综上,长江口北槽东端是北槽进口船航行的高风险航段,且紧邻正在实施的横沙大道外延工程,因此,有必要结合数值模拟技术,分析造成该航段船舶失控的水动力原因,把握周边工程边界建设对该水域大型船舶安全航行的潜在影响。

3 长江口三维潮流模型建立

研究采用“上海河口海岸科学研究中心”自主研发的长江口三维水沙盐数值模型(SWEM3D)。模型采用有限体积法离散三维浅水方程及物质输运方程,采用无结构网格刻画长江口复杂的岸滩及工程边界条件。模型具有较好的复杂边界适应能力和质量守恒性,并已多次应用于长江口大型涉水工程建设影响分析中,为北槽航段减淤方案研究提供技术支撑^[45]。数值模型计算范围及北槽东端网格布置见图4。模型上游为流量边界,位于长江大通水文站;下游为外海潮位边界,由16个天文调和常数计算给出。模型计算采用2024年最新长江口地形数据。水文资料验证期间,模型设定的上游大通流量为13 673 m³/s。

在已有模型参数率定的基础上,验证了2024年1月长江口北槽东端最新的实测水文数据。2024年1月北槽东端牛皮礁站与北槽中站潮位验证结果见图5。由图可知,模型较好地反演了北槽东段中潮至大潮期间潮位变化过程,计算的平均潮位和潮差均与实测结果一致。2024年1月大潮期间北槽东端(CS10S、CS4S、CS7S及CS3S)分层流速、流向变化验证结果见图6。模型反演了北槽东端自外海旋转流态向北槽内往复流态的变化过程,模拟的表、中、底层流速、流向变化过程与均实测结果吻合良好。上述模型验证结果表明,本文所建立的三维潮流模型能较好地反演关注水域水动力变化过程,可以用于北槽东端船舶航行失控水动力原因分析。

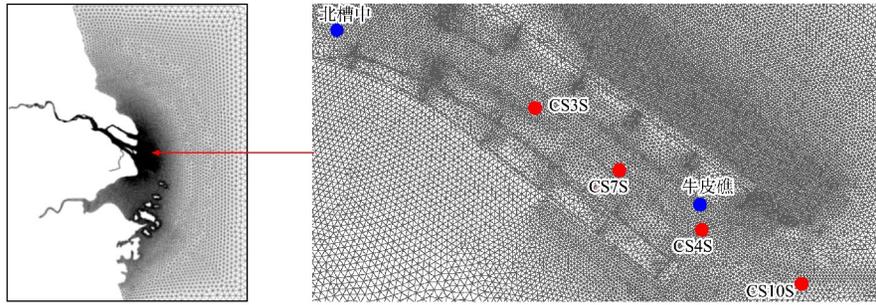
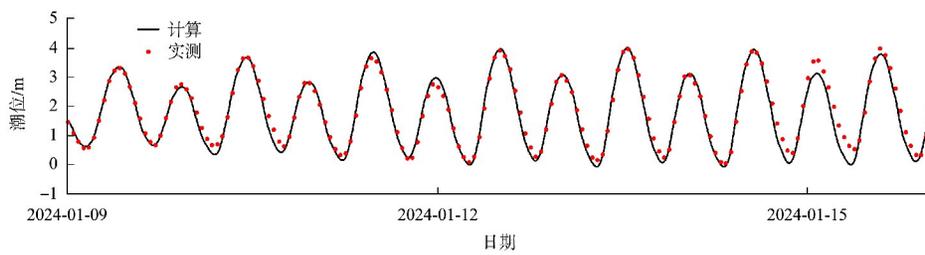
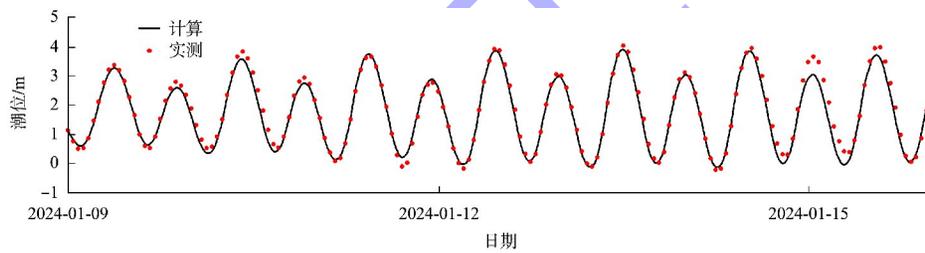


图4 模型计算网格及验证点位

Fig. 4 Model computation grid and validation point location



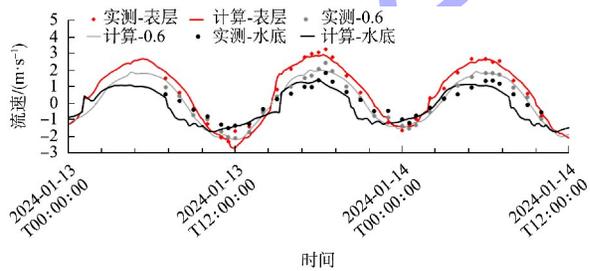
a) 北槽中潮流验证



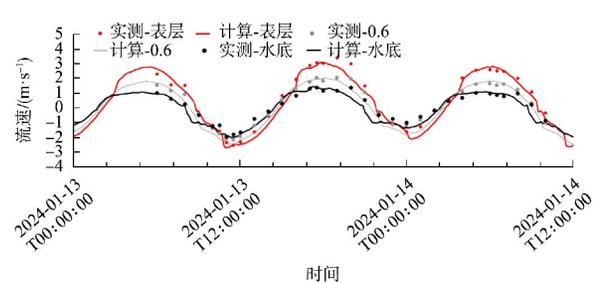
b) 牛皮礁潮流验证

图5 模型潮位验证(2024年1月)

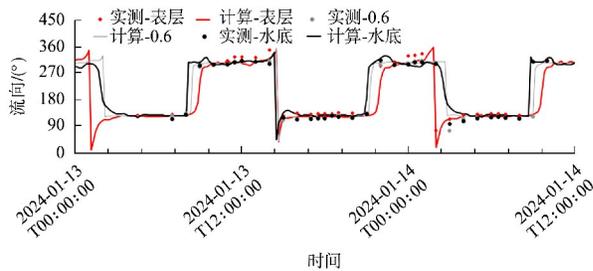
Fig. 5 Model validation for tidal levels (January 2024)



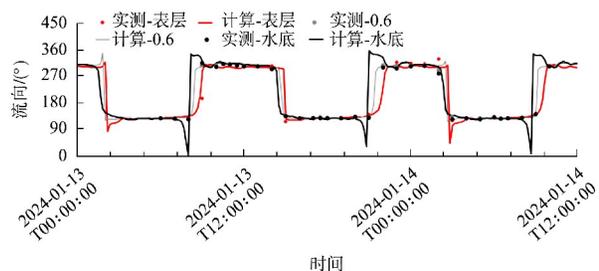
a) CS3S流速拟合情况



c) CS7S流速拟合情况



b) CS3S流向拟合情况



d) CS7S流向拟合情况

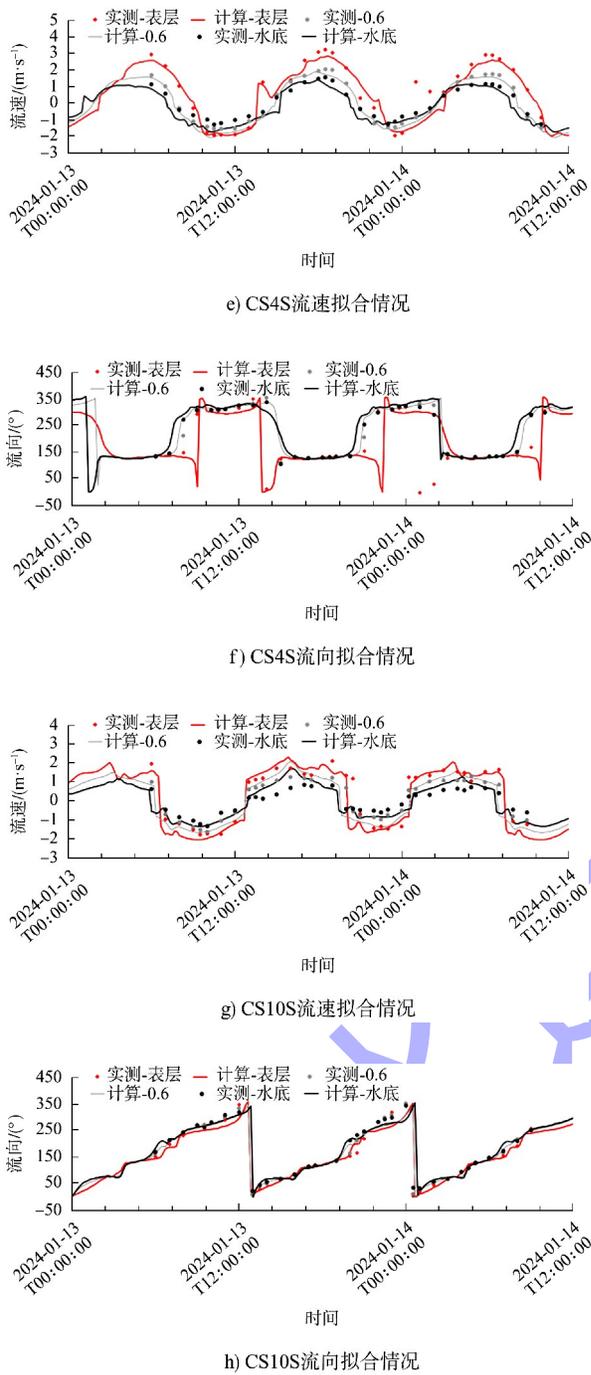


图6 模型分层流速验证图(2024年1月)

Fig. 6 Model validation for stratified current velocities (January 2024)

为分析事故水动力原因, 本文数值模型计算方案见表1。计算方案模拟时段位于船舶航行失控期间, 考虑的工程边界包括现状方案及周边在建

工程两类。根据事故期间实际大通流量, 模型上游大通流量取为 5.8 万 m³/s。

表1 模型计算方案

Tab. 1 Numerical calculation scheme

| 方案 | 模拟分析时段 | 工程边界条件 |
|-------------------|--------|---|
| 2024-07-31 (事故期间) | 现状方案 | 现状边界(包括长江口深水航道治理工程、横沙东滩促淤圈围工程、南坝田挡沙堤加高完善工程、南槽一期江亚南沙护滩堤工程) |
| | 工程方案 | 现状边界+横沙大道外延工程 |

4 计算结果分析

4.1 北槽东端船舶失控原因分析

进口船 A 轮和 B 轮事故期间长江口水域流态分布模拟结果见图 7。进口船 A 轮事故发生期间(2024-07-31T20:25:00), 长江口北槽东端潮位处于高潮期, 潮流处于涨潮末期至落潮初期转换阶段。北槽口外涨潮流基本呈正北向流。在北导堤堤头的附近水域, 涨潮流受整治建筑物影响, 沿着北导堤向西北方向流动。由于南槽口外潮流率先处于涨转落的转流阶段, 受北槽东端丁坝及南坝田挡沙堤加高工程影响, 北槽南导堤堤头水域涨潮流态呈现逆时针绕流。对照进口船 A 轮事故发生期间位置, 南导堤堤头附近水域逆时针绕流会导致北槽航道局部横流骤增, 进而易引起进口船舶操纵失控。

进口船 B 轮事故发生期间(2024-07-31T21:05:00), 长江口潮流延续涨潮流向落潮流转变阶段, 且南槽水域潮流率先呈现出落潮态势。在长江口南导堤水域, 南槽落潮流沿堤流出南导堤堤头后, 受北槽口门涨潮流顶托后呈逆时针偏转, 并顶冲北槽东端航道水域。在此背景下, 进口船 B 轮事故位置正处于绕流顶冲水域, 进而造成船舶局部横流骤增, 难以把舵, 致使船舶失控。

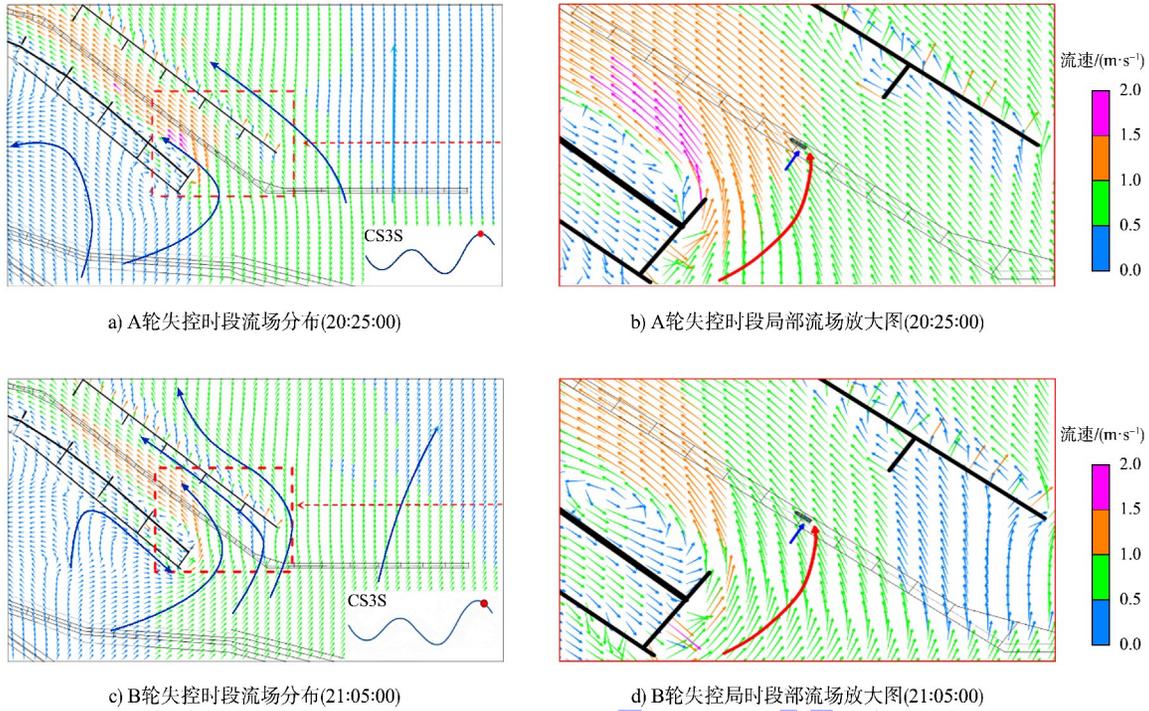


图7 长江口北槽东端 2024 年 7 月 31 日船舶失控期间北槽东端流态分布

Fig. 7 Tidal currents distribution at the eastern end of the North Passage during vessel loss of control on July 31, 2024

为进一步分析进口船舶失控过程,以 200 m 为间隔(初步代表事故船舶船首与船尾距离),统计的事故船舶航行过程中所受横流强度分布见图 8。统计发现,船舶沿 P₈ 至 P₁ 测点上行,航道横流呈现突增态势,横流强度由 0.25 m/s 增加至 0.31 m/s,且船首、船尾所受横流于 P₁~P₄ 水域差异明显,船首尾横流受力不均,致使船舶操纵难度进一步增加。根据以上两次典型连续事故成因的初步分析,长江口北槽东端涨转落阶段易出现局部较强横流,是重点高风险航行时段,应谨慎操纵。基于连续事故时段横流大小统计结果,初步估计当航道横流强度约在 0.28 m/s 以上时,大型船舶失控隐患较大,需重点关注。

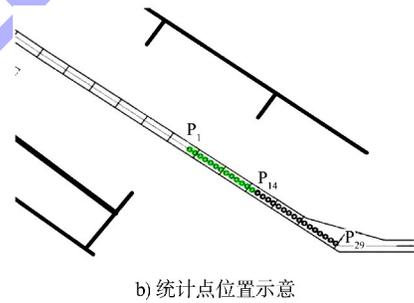
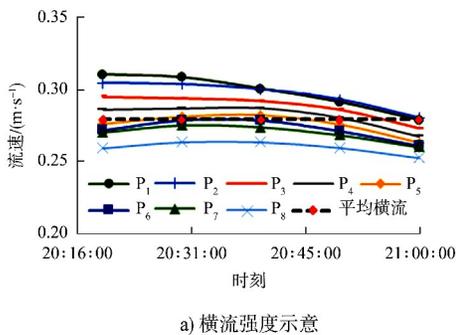


图8 船舶失控时段途径航道水域横流大小分布
Fig. 8 Cross-currents magnitude distribution in the waterway passed through during the period of vessel out of control



a) 横流强度示意

4.2 北槽东端进出口船舶航行安全分析

北槽东端水域在单个潮周期下横流大小变化过程见图 9。根据上述典型事故期间航道横流统计结果,初步以横流强度达 0.28 m/s 为阈值,进一步识别在单个潮周期过程下北槽东端大型船舶航行高风险时段。相应的北槽东端航行高风险时段局部流场变化过程见图 10、11。统计结果表明,北槽东端大型船舶航行不仅需关注涨转落期间横流突变影响,还需关注落转涨期间的横流变化。

涨转落期间(如 2024 年 7 月 31 日 08:10:00—10:10:00), 造成北槽航道东端横流增加的原因是涨转落过程中, 南槽水域落潮水体率先在南导流堤头水域沿堤绕流, 注入北槽东端航道水域, 致使在近 2 h 的时间内, 北槽东端横流突增(横流指向东北侧), 流态较为紊乱。

落转涨时期(如 2024 年 7 月 31 日 14:50:00—18:20:00), 造成北槽航道东端横流增加的原因是落转涨过程中, 北槽东端外侧涨潮流自西南向西北顺时针旋转, 北槽东端受北导堤堤头涨潮流绕流顶冲北槽东端航道水域, 致使在此期间, 北槽东端横流较大(横流指向西南侧), 流态较为紊乱。

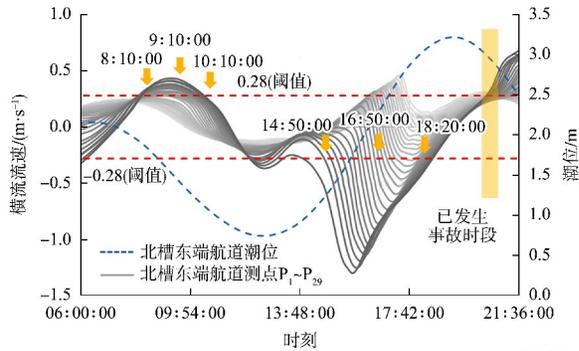


图 9 单个潮周期内北槽东端水域横流大小变化分布 (2024 年 7 月 31 日)
 Fig. 9 Cross-currents magnitudes distribution during one tidal cycle at the eastern end of the North Passage (July 31, 2024)

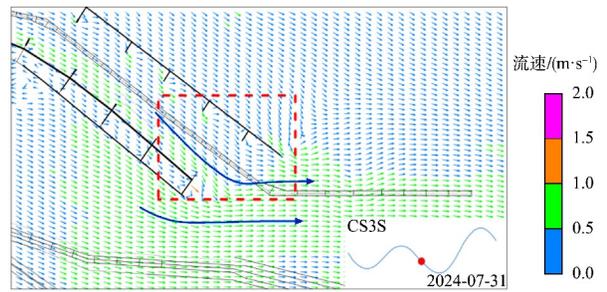
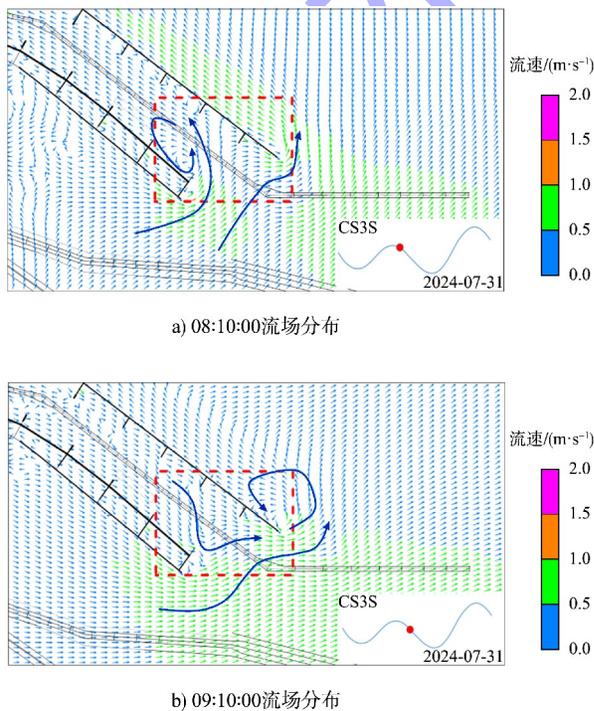


图 10 北槽东端涨转落过程中流场分布
 Fig. 10 Flow field distribution during flood-to-ebb transition at the eastern end of the North Passage

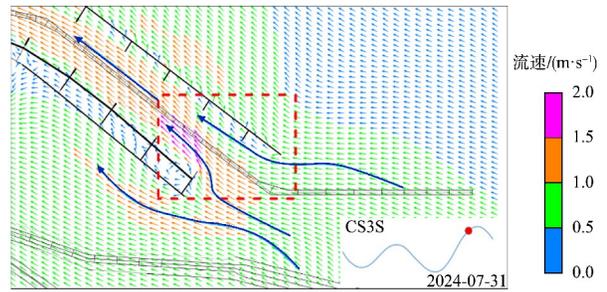
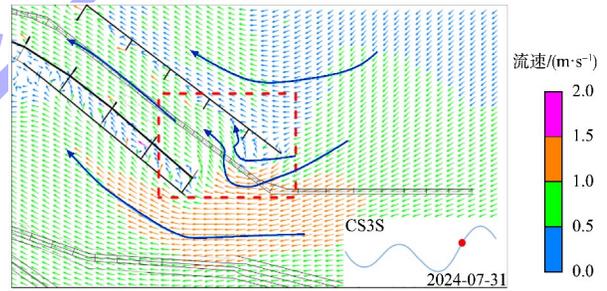
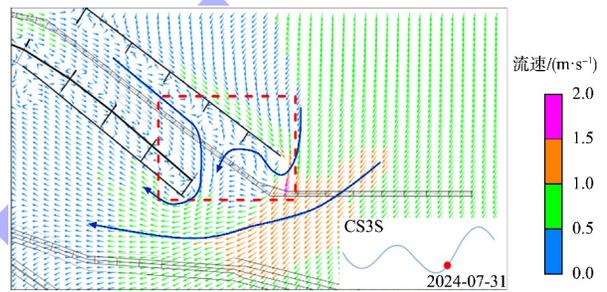


图 11 北槽东端落转涨过程中流场分布
 Fig. 11 Flow field distribution during ebb-to-flood transition at the eastern end of the North Passage

4.3 横沙大道外延工程对北槽东端船舶航道影响
 横沙大道外延工程实施后, 北槽东端转流期

间横流变化统计结果见图 12。计算结果表明, 横沙大道外延工程对北槽航道东端横流不利影响主要集中于落转涨期间。在北槽东端 $P_{26} \sim P_{29}$ 测点水域, 北槽横流增加约在 $0.02 \sim 0.04 \text{ m/s}$ 。同时, 工程会引起案例事故水域 ($P_1 \sim P_{14}$) 局部横流流速增加, 增加幅度普遍在 0.02 m/s 以内。工程对涨转落期间横流的不利影响较小, 工程普遍引起北槽东端横流减小, 减小幅度为 $0.02 \sim 0.05 \text{ m/s}$ 。原因主要是由于横沙大道外延工程进一步归集了北槽落潮水流, 使得北槽主槽在涨转落期间落潮动力更强, 减弱了南槽率先转流水体沿南导堤绕流顶冲北槽航道的影 响。

为分析横沙大道外延工程引起落转涨期间北槽东端横流增加的原因, 落转涨期间横沙大道外延工程实施前后流态变化分布见图 13。计算结果表明, 由于横沙大道外延工程主要位于北槽东端北导堤水域, 且工程设计高程高于现行北导堤 2.0 m 的设计高程, 因此, 该项工程进一步阻隔北槽与横沙浅滩水沙交换, 增强了北导堤沿堤导流效果。在北导堤北沿沿堤水域附近, 横沙大道外延实施前, 转流期间, 仍存在由横沙浅滩流向北槽的转流流态, 而横沙大道外延工程实施后, 上述流态明显减弱, 沿堤落潮流态显著增强。在此背景下, 归集的沿堤水流集中于北导堤堤头流出, 使得落转涨期间北导堤堤头局部绕流作用增强, 并顶冲北槽东端局部航段。这是造成落转涨期间北槽东端深水航道横流增加的主要原因, 应引起重视。

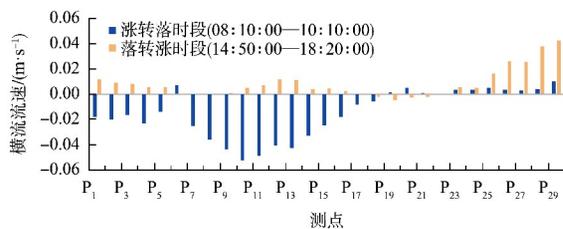
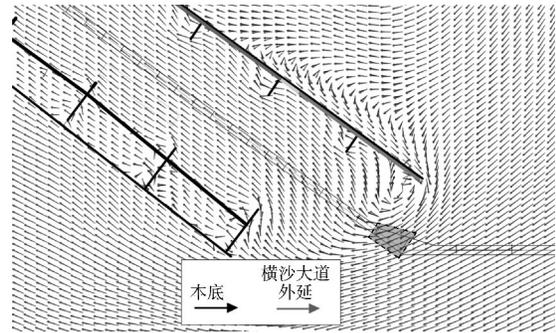


图 12 横沙大道外延工程对北槽航道东端典型转流时段横流影响

Fig. 12 Impact of Hengsha Avenue Extension Project on cross-currents during typical tidal reversal periods at the eastern end of the North Passage



注: 虚线部分为横流增加水域。

图 13 横沙大道外延实施前后北槽东端落转涨期间流态对比
Fig. 13 Comparison of flow patterns during ebb-to-flood transition at the eastern North Passage before and after the implementation of Hengsha Avenue Extension Project

5 结论

1) 造成本文案例中船舶失控的主要原因之一是事故期间航道横流强度的增加。事故发生于北槽东端涨转落期间, 南槽落潮流率先转流并沿堤流出南导堤堤头, 顶冲北槽东端航道水域, 致使航道局部横流突增, 平均横流流速达 0.28 m/s , 易引起进口船舶操纵失控。

2) 单个潮周期内, 北槽东端大型船舶航行风险时段主要位于转流期间。其中, 涨转落期间, 南槽率先落潮的落潮流延堤头绕流顶冲北槽航道, 导致北槽东端航道横流突增; 落转涨期间, 涨潮流将沿北岛堤堤头绕流进入北槽水域, 顶冲北槽局部航段, 造成了北槽东端局部航道横流突增。

3) 横沙大道外延工程对北槽航道东端横流不利影响主要集中于落转涨期间, 在建工程将引起北槽东端横流增加约 $0.02 \sim 0.04 \text{ m/s}$ 。考虑该水域是北槽重点事故风险水域, 应引起重视。

参考文献:

- [1] 赵德招. 长江南京以下沿江港口对 12.5 m 深水航道的效益响应[J]. 水运工程, 2019(6): 8-14.
ZHAO D Z. Benefit response of ports along the Yangtze River below Nanjing to 12.5 m deepwater navigation channel [J]. Port & waterway engineering, 2019 (6): 8-14.
- [2] 王新. 引航船舶失控成因的统计分析及防控对策[J]. 航海, 2021(5): 47-50.

- WANG X. Statistical analysis of causes and prevention measures for loss-of-control of piloted vessels [J]. Navigation, 2021 (5): 47-50.
- [3] 马军. 关于长江上海段航行船舶故障频繁的危害和思考[J]. 中国海事, 2007(8): 48-50.
- MA J. Thought about the hazards of frequent ship fault in Shanghai section of Yangtze River [J]. China maritime safety, 2007(8): 48-50.
- [4] 盛小曼. 长江上游干支交汇水域船舶航行安全风险评估研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2024.
- SHENG X M. Research on the risk assessment of ship navigation safety in the waters at the confluence of the main and tributaries of the upper Yangtze River [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2024.
- [5] 杨光, 朱武斌. 连云港主港防波堤水域船舶失控应急措施[J]. 中国水运, 2019(7): 69-70.
- YANG G, ZHU W B. Emergency measures for ship loss-of-control in the breakwater area of Lianyungang main port [J]. China water transport, 2019(7): 69-70.
- [6] 王亮, 王巍. 东海大桥及附近水域船舶通航风险和安全航行建议[J]. 航海, 2019(6): 21-24.
- WANG L, WANG W. Navigation risks and safety recommendations for vessels in Donghai Bridge and nearby waters [J]. Navigation, 2019 (6): 21-24.
- [7] 郑晓清, 俞正惠. 长江口深水航道 D45 灯浮附近水域船舶航行的思考[J]. 珠江水运, 2014(7): 75-76.
- ZHENG X Q, YU Z H. Reflections on ship navigation near D45 light buoy in Yangtze Estuary deepwater channel [J]. Pearl River water transport, 2014(7): 75-76.
- [8] 沈淇, 高钦钦, 顾峰峰, 等. 长江口深水航道三期工程后北槽洪枯季水沙运动特征研究[J]. 海洋学报(中文版), 2014, 36(7): 118-124.
- SHEN Q, GAO Q Q, GU F F, et al. Analysis of the sediment motion at north passage in flood and dry season after 3rd phase engineering of the deep waterways in Changjiang Estuary [J]. Acta oceanologica sinica, 2014, 36(7): 118-124.
- [9] 包起帆, 楼飞, 孟舒. 长江口航道疏浚土综合利用及新横沙生态成陆探索[J]. 水运工程, 2018 (11): 80-84, 125.
- BAO Q F, LOU F, MENG S. Comprehensive utilization of dredged soil in the Yangtze estuary channel and exploration of ecological land formation in Xinhengsha [J]. Port & waterway engineering, 2018(11): 80-84, 125.
- [10] 杨亦林. 船舶在北槽航道端口航行时遇船舶高峰期时的注意事项及建议[J]. 中国水运(下半月), 2016, 16(3): 21-21, 139.
- YANG Y L. Precautions and suggestions for ships navigating at North Passage entrance during peak traffic periods [J]. China water transport (the second half of the month), 2016, 16(3): 21-21, 139.
- [11] 薛一东, 胡建国. 长江口深水航道船舶速度骤降和倒航的原因与预防[J]. 中国航海, 2012, 35(4): 119-123, 127.
- XUE Y D, HU J G. Reasons and prevention of abrupt ship speed reduction and back ward movement in deepwater channels of the Yangtze Estuary [J]. Navigation of China, 2012, 35(4): 119-123, 127.
- [12] 张程程. 长江口北槽深水航道下段牛皮礁附近潮流特点与分析[J]. 中国水运(下半月), 2022, 22(12): 70-71.
- ZHANG C C. Tidal current characteristics near Niupijiao in the lower section of North Passage deepwater channel [J]. China water transport(the second half of the month), 2022, 22(12): 70-71.
- [13] 杨亦林. 浅谈北槽导堤端口存在的切变流和河口环流对船舶航行的影响[J]. 航海技术, 2023(5): 21-23.
- YANG Y L. Influence of shear flow and estuarine circulation at North Passage guide levee entrance on ship navigation [J]. Marine technology, 2023(5): 21-23.
- [14] 王佑铭, 沈淇, 李俊花, 等. 长江口主要分潮振幅时空变化特征及原因初探[J]. 水利水电工程学报, 2025(1): 25-36.
- WANG Y M, SHEN Q, LI J H, et al. Preliminary exploration of the spatiotemporal variation characteristics and causes of the main tidal amplitude in the Yangtze Estuary [J]. Hydro-science and engineering, 2025 (1): 25-36.
- [15] SHEN Q, HUANG W R, QI D M. Integrated modeling of typhoon damrey's effects on sediment resuspension and transport in the north passage of Changjiang Estuary, China [J]. Journal of waterway, port, coastal and ocean engineering, 2018, 144(6): 04018015.

(本文编辑 赵娟)