DOI：10.13245/j.hust.250598

浅水岸壁效应下船舶自主航行决策方法

黄浩然[1,2] 黄立文[1,2] 徐录平[3] 赵兴亚[1,2] 贺益雄[1,2]
(1．武汉理工大学航运学院，湖北 武汉 430063；2．武汉理工大学内河航运技术湖北省重点实验室，湖北 武汉 430063；3．华中科技大学船舶与海洋工程学院，湖北 武汉 430074)

摘要 为解决受限水域浅水效应与岸壁效应影响下的船舶自主航行决策问题，基于浅水岸壁效应下的船舶操纵运动模型，结合力矩平衡原理，提出一种计算朝近岸侧补偿舵角量的方法；结合航向控制方法，分析不同离岸距离下的船舶航行状态，构建适应浅水岸壁效应的船舶领域．针对受限航道不同会遇场景，融合通航规则与环境约束，明确不同局面下的决策逻辑．为准确反映浅水岸壁效应的非线性特性，建立航道边界风险计算模型，基于帕累托最优理论求解出既能安全避让来船又能确保边界风险可控的避让方案．结果表明：提出的方法能在浅水岸壁效应下有效控制船舶运动，安全避让所有目标船．

关键词 受限水域；浅水岸壁效应；航行决策；避碰机理；航向航速控制
中图分类号 U675.96 **文献标志码** A **文章编号** 1671-4512(2026)10-0066-07

Autonomous ship navigation decision-making method under shallow water and bank effects

HUANG Haoran[1,2] *HUANG Liwen*[1,2] *XU Luping*[3] *ZHAO Xingya*[1,2] *HE Yixiong*[1,2]
(1．School of Navigation，Wuhan University of Technology，Wuhan 430063，China；2．Hubei Key Laboratory of Inland Shipping Technology，Wuhan University of Technology，Wuhan 430063，China；3．School of Naval Architecture and Ocean Engineering，Huazhong University of Science and Technology，Wuhan 430074，China)

Abstract To solve the problem of autonomous navigation decision-making in restricted waters under the influence of shallow-water and bank effects，a method for calculating the compensating rudder angle toward the near-bank side was proposed based on a ship maneuvering motion model under shallow-water and bank effects and the principle of moment balance．Combined with the course control method，the navigation states of a ship at different distances from the bank were analyzed，and a ship domain adapted to shallow-water and bank effects was constructed．For different encounter scenarios in restricted channels，navigation rules and environmental constraints were integrated，and the decision-making logic under different encounter situations was clarified．To accurately reflect the nonlinear characteristics of shallow-water and bank effects，a channel boundary risk calculation model was established．Based on Pareto optimality theory，collision avoidance schemes that could not only safely avoid target ships but also ensure controllable boundary risks were obtained．Results show that the proposed method can effectively control ship motion under shallow-water and bank effects and safely avoid all target ships．

Key words restricted waters；shallow water and bank effects；navigation decision-making；collision avoidance mechanism；course and speed control

在全球化和国际贸易不断发展的背景下，水路运输在物流领域占据重要地位[1]．船舶作为水路运输的重要载体，承担着大量的货物运输任务，当在港口、进港航道等受限水域航行时，易受浅水效应

收稿日期 2025-12-10．
作者简介 黄浩然(2001—)，男，博士研究生，E-mail：huang6423@foxmail.com．
基金项目 国家自然科学基金面上项目(52071249)．

与岸壁效应的影响，操纵难度增大，因此开展此类效应下的船舶自主航行决策方法研究具有重要的理论意义与实践价值．

智能避碰算法一直是船舶自主航行决策研究的核心．文献[2]提出的改进 PPO 算法生成单船和多船会遇时的有效避让方案．文献[3-4]从航行安全与经济性角度构建了避碰目标函数，并结合多目标优化算法获取最优避碰策略．文献[5]模拟经验丰富的驾驶员决策，开发了一种在线自主学习能力的拟人化避碰算法．针对海峡等特殊水域，文献[6]运用 Q 学习和近端策略优化算法进行了船舶避碰研究．文献[7]结合矢量场制导与模型预测控制(MPC)实现了船舶自主路径跟踪与避碰．针对复杂内河水域，文献[8]提出基于自适应加权遗传算法改进的动态窗口法，为受限水域避碰提供了参考方法．上述研究多聚焦于开阔水域，忽略了受限水域中非线性流体动力干扰对船舶操纵性的影响，导致生成的避碰决策难以满足该特定水域下的航行安全需求．

浅水岸壁效应也一直是船舶水动力系数研究的热点之一．文献[9]通过构建三维黏性数值波浪水池模型，精确预测了船舶在浅水波浪中顺浪行驶时的水动力特性与运动响应．文献[10]利用 Fortran 语言建立了水流数学模型，分析了不同水深吃水比下浅水效应对船舶的影响．文献[11]利用平面运动机构(PMM)试验系统，对超大型油轮模型进行了不同船岸距离和水深下的近岸航行试验，深入分析了航迹控制问题，为实船操纵提供了理论依据．尽管上述水动力研究对浅水和岸壁效应的机理探讨已较为深入，但复杂的计算流体力学模型计算量大，缺乏能兼顾考虑计算效率与环境干扰的决策模型．

针对浅水岸壁效应影响下的自主航行决策问题，亟待解决以下关键问题：如何准确量化环境效应对船舶运动的非线性干扰，建立合适的船舶领域；如何在通航规则和航道受限的约束下，进行自主航行决策．围绕这些问题，本研究基于力矩平衡原理量化浅水岸壁干扰并构建船舶领域，融合通航规则与航道约束，实现兼顾安全与环境适应性的多目标自主避让决策．

1　基础理论方法

1.1　船舶操纵运动模型

在船舶避碰研究中，通常关注的是船舶的水平面运动，船舶的三自由度运动模型参见文献[12]．

1.1.1　岸壁效应对船舶运动的影响

船舶受岸壁效应影响时，靠近航道边界航行会发生船首“岸推”和船尾“岸吸”的现象[13]，如图 1 所示，图中 F_{NS} 和 F_{YS} 分别为船舶靠近岸壁所产生的岸推力矩和岸吸力矩，其主要计算公式见文献[14]．

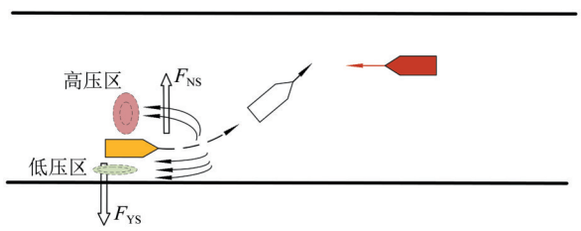


图 1　岸壁效应原理

1.1.2　浅水岸壁效应下船舶操纵运动模型

在浅水域航行的船舶会出现沉底现象，若此时航道受限，则船舶受岸壁效应影响更为显著．浅水效应与岸壁效应共同作用于船舶的原理如图 2 所示．

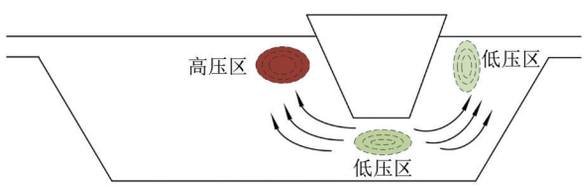


图 2　浅水及岸壁效应对船舶的影响

本研究建立考虑受限水域效应的船舶操纵运动模型为

$$(m+m_{Xh})\dot{u}-(m+m_{Yh})vr=F_{XHh}+F_{XPh}+F_{XRh}+F_{X1}+F_{X2};$$

$$(m+m_{Yh})\dot{v}+(m+m_{Xh})ur=F_{YHh}+F_{YPh}+F_{YRh}+F_{YS}+F_{Y1}+F_{Y2};$$

$$(I_{ZZ}+J_{ZZh})\dot{r}=F_{NHh}+F_{NPh}+F_{NRh}+F_{NS}+F_{N1}+F_{N2},$$

式中：m 为船舶质量；m_{Xh} 为浅水效应下纵向附加质量；m_{Yh} 为浅水效应下横向附加质量；I_{ZZ} 为浅水效应下船舶转动惯量；J_{ZZh} 为浅水效应下附加转动惯量；u 为船舶纵向速度；v 为船舶横向速度；r 为船舶艏摇角速度；$\dot{u}$ 为纵向加速度；$\dot{v}$ 为横向加速度；$\dot{r}$ 为艏摇角加速度；F_{XHh} 为浅水效应下船体纵向水动力；F_{YHh} 为浅水效应下船体横向水动力；F_{NHh} 为浅水效应下船体艏摇力矩；F_{XPh} 为浅水效应下螺旋桨纵向推力；F_{YPh} 为浅水效应下螺旋桨产生的横向力；F_{NPh} 为浅水效应下螺旋桨产生的艏摇力；F_{XRh} 为浅水效应下舵产生的纵向力；F_{YRh} 为浅水效应下舵产生的横向力；F_{NRh} 为浅水效应下舵产生的艏摇力；F_{YS} 为岸壁效应产生的横向作用力；F_{NS} 为岸壁效应产生的艏摇力；F_{X1} 为风产生的纵向

力；F_{Y1}为风产生的横向力；F_{N1}为风产生的艏摇力；F_{X2}为浪产生的纵向力；F_{Y2}为浪产生的横向力；F_{N2}为浪产生的艏摇力.

F_{XHh}的浅水中直航阻力F_{Cth}和浅水中附加阻力F_{Xv1}由深水中修正得到

$$F_{Cth}=F_{Ct}(A+Bd/h);$$

$$F_{Xv1}=F_{Xv2}[1-0.987\,9d/h+21.912\,3(d/h)^2-73.816\,1(d/h)^3+71.140\,9(d/h)^4],$$

式中：A和B为船模试验系数；F_{Xv2}为附加阻力；d为船舶吃水；h为水深．F_{XRh}，F_{YRh}和F_{NRh}与深水情况基本一致，须根据水深条件修正的舵效增额系数a_{Hh}及其作用中心位置x_{Hh}为

$$a_{Hh}=a_H[1+0.362\,1d/h+1.172\,4(d/h)^2];$$

$$x_{Hh}=x_H[1+0.332\,8d/h-3.213\,4(d/h)^2+2.591\,6(d/h)^3].$$

本试验的船舶为一艘巴拿马型散货船，构建上述的船舶运动模型，基本参数如下：排水量约为9×10^4 t；船长约为225 m；船宽约为32.5 m；最大吃水为14.5 m.

1.2　航向控制方法

针对受限水域对航向控制精度的要求，引入内模PID控制(IMC-PID)方法[15]，其系统结构如图3所示，图中：G_{IMC}为内模控制器的传递函数，根据船舶航向偏差计算控制量；G为本船航向响应模型，反映船舶实际动态特性；G_{model}为航向控制模型，用于内模控制器中实现预测和补偿；x为低通滤波器的柔化航向阶跃信号．有

$$G_{IMC}(s)=G_{model}^{-1}(s)x(s),$$

式中$x(s)=(3\tau s+1)/(1+\tau s)^3$为用于描述控制器输入信号动态特性的辅助传递函数，其中，s为拉普拉斯算子，τ为滤波器时间常数．G_{model}选用二阶Nomoto模型，有

$$G_{model}=K/[s(Ts+1)],$$

式中：K为船舶操纵性指数；T为船舶操纵时间常数，具体计算方法详见文献[13].

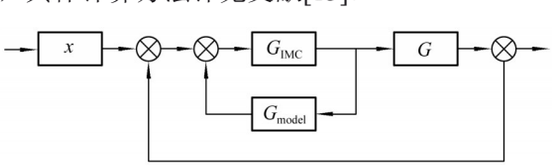


图3　内模航向控制器结构

引入PID传递函数$G_{PID}(s)$，有

$$G_{PID}(s)=K_p\left(1+\frac{1}{T_i s}+\frac{T_d s}{1+\gamma s}\right),$$

式中：K_p为PID比例系数；T_i为积分时间常数；T_d为微分时间常数；γ为微分滤波系数.

令$G_{PID}(s)=G_{IMC}(s)$，得出PID参数

$$\gamma=\tau/3;\quad K_p=(T+8\tau/3)/(3K\tau^2);$$

$$K_i=1/(3K\tau^2);$$

$$K_d=(8\tau T/3-8\tau^2/9)/(3\tau^2K),$$

式中：K_i为PID积分系数；K_d为PID微分系数.

设置航道总宽为396 m，船舶初始航向为0°、航速为6.5 m/s、距岸边距离为40 m．在浅水和岸壁效应影响下航行200 s后开始控制航向，目标航向设置为0°，IMC-PID与PID和OP-PID控制器[16]的控制性能对比如图4所示.

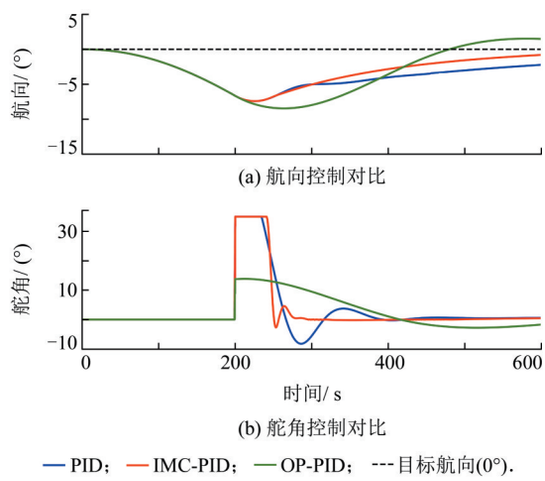


图4　航向与舵角对比

结果表明：在浅水岸壁效应的扰动下，IMC-PID相较于传统PID与OP-PID具有更快的航向收敛速度、较小的超调与振荡，并能生成幅度适中且更平滑的舵角指令.

2　浅水岸壁效应下的航行决策

2.1　基于操纵性能特征的船舶领域

根据《海港总体设计规范》[17]，船舶与航道底边线间应保持一定的富裕宽度，对于散货船或集装箱船，当航速不大于6 kn时，船舶与航道底边线之间的最小富裕宽度应不小于船宽的一半；当航速大于6 kn时，最小富裕宽度应不小于船宽的75%.

为探究适应浅水岸壁效应的船舶领域模型，设C为船舶与航道边界的富裕宽度，以富裕宽度C取$0.75B$为基准，设置初速度为6 m/s、目标航向为0°，船舶在不同离岸距离下的航向变化如图5所示.

当距航道边界为C时，即便进行了航向控制，船首仍有偏移趋势；当距边界为$1.5C$及$2C$时，航行状态较稳．为此，基于力矩平衡原理计算各工况

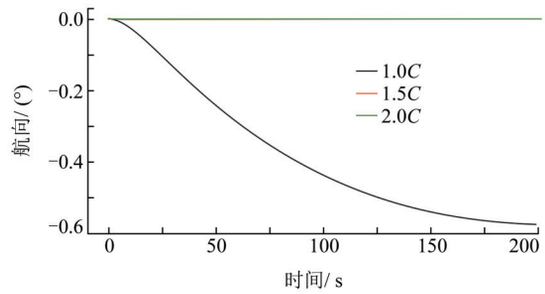


图5　航向稳定性对比

下维持预定航向所需的平衡舵角，以量化控制代价，有

$$N_{\mathrm{R}}(\delta)+N_{\mathrm{S}}=0, \tag{1}$$

式中：N_{S}为偏航力矩；$N_{\mathrm{R}}(\delta)$为舵产生的艏摇力矩，为获得平衡条件所需的舵角控制量，采用三阶多项式对其进行描述有

$$N_{\mathrm{R}}(\delta)=a_3\delta^3+a_2\delta^2+a_1\delta+a_0,$$

其中，δ为舵角控制量，a_3，a_2，a_1和a_0为经验系数或通过模型计算得到的常数.

在深水与浅水条件下通过多次操舵试验得到的舵角-力矩关系如图6所示，拟合值符合良好，该映射关系被用于求解式(1)中的平衡舵角，即根据当前岸壁效应产生的偏航力矩，求取能够产生等量反向力矩所需的舵角，以估计维持预定航向所需的平衡舵角.

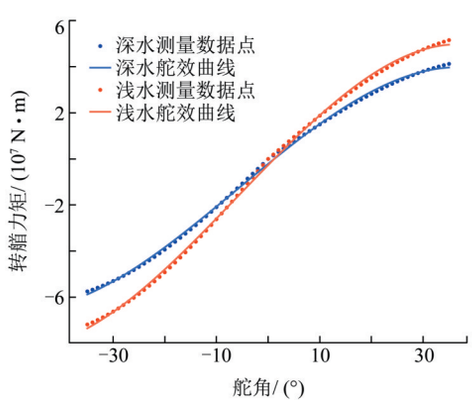


图6　舵角-力矩关系

图7展示了不同离岸距离下的舵角补偿量. 当距航道边界1.5C航行时，船首没有偏移的趋势，但舵角补偿较大；当距离航道边界2.0C航行时，整体航行状态都较为稳定. 因此建立长轴为1.3L(L为船舶长度)，短轴为2C的船舶领域.

2.2　环境与规则约束下的决策逻辑

受限航道的决策逻辑受目标船状态、浅水岸壁效应及通航规则的多重约束，区别于开阔水域大角度避让方法，本研究基于目标船对本船的碰撞危险度实时演化，融合环境与规则要素，针对不同会遇局面采取的决策逻辑如下.

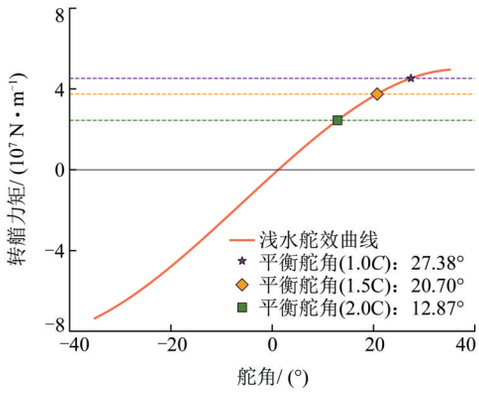


图7　舵角补偿量

a. 对遇局面：遵循靠右航行与车让为主原则. 当碰撞危险初显时适当减速；若持续升高，则右转避让.

b. 追越局面：追越行为的决策逻辑受制于航道的通航管理规则，当单向通航时禁止追越；当双向通航时在安全的条件下可实施改向追越.

c. 交叉相遇：横向机动受限，优先采取变速避让；若仅凭变速无效，则考虑改向避让方案.

2.3　边界约束下的避让方案

针对浅水岸壁效应的非线性特征，构建融合位置-态势的边界风险模型作为避让约束. 该模型以富裕宽度表征静态风险，引入边界趋近速度作为动态因子，并通过指数加权放大逼近风险. 设本船距航道边界距离为R_{R}，航道边界邻近风险值为

$$\theta(R_{\mathrm{R}})=\begin{cases}1 & (R_{\mathrm{R}}<R_{\mathrm{R1}});\\ \dfrac{1}{2}-\dfrac{1}{2}\sin\left[\dfrac{\pi}{R_{\mathrm{R2}}-R_{\mathrm{R1}}}\left(R_{\mathrm{R}}-\dfrac{R_{\mathrm{R1}}+R_{\mathrm{R2}}}{2}\right)\right] & (R_{\mathrm{R1}}\leqslant R_{\mathrm{R}}\leqslant R_{\mathrm{R2}});\\ 0 & (R_{\mathrm{R2}}<R_{\mathrm{R}}),\end{cases}$$

式中：R_{R1}为船舶能保持正常航行状态的最近安全距离；R_{R2}为船舶会受浅水岸壁效应影响的临界距离.

根据2.1的试验结果，设置$R_{\mathrm{R1}}=C$，$R_{\mathrm{R2}}=4C$. 接近速度风险计算为

$$W(v_1)=\mathrm{e}^{-CV_1},$$

式中：$C=1$，其数值越大，对速度风险越敏感；V_1为船舶靠近边界的速度. 综上建立的航道边界风险模型为$\theta_{\mathrm{bank}}=\theta(R_{\mathrm{R}})^{W(v_1)}$.

当船舶靠近岸壁时，航道边界风险被显著放大；当船舶远离岸壁时，风险虽被有效削弱，但并未完全消除，保留了近岸航行本身固有的基础风险.

最终的避让方案本质上是要保障既能安全避让目标船，又确保航道边界风险不会过高，设定边界风险阈值为0.7，以兼顾船舶正常航行与必要的安全裕度．为求解这一多目标优化问题，避让方案的求取步骤如下．

a．可行避让方案集

基于船舶动态轨迹推演，在改向过程中目标船不会侵入本船领域，且航道边界风险不高于安全阈值，则认为改向方案可行．

b．基于帕累托前沿的避让方案

针对可行避让方案集，对每一种改向方案 k，从开始避让到满足复航条件的整个过程中提取四个关键性能指标，构成多目标评价函数

$$f_k=(d_k,\theta_k,A_k,T_k),$$

式中：d_k为方案k在满足复航条件情况下的最小会遇距离(DCPA)；θ_k为方案k过程中出现的最大航道边界风险值；A_k为方案k须要改变的角度；T_k为方案k完成避让所需时间．研究希望找到一个可行方案k使得DCPA最大、航道边界风险最小、改向角度最小、避让耗时最少．

对于任意两个可行方案α和β，若方案α在所有评价指标上均不劣于方案β，且至少存在一个评价指标优于方案β，则称方案β支配方案α．

a．在所有评价指标上β不劣于α

$$\left\{(d_\beta\geqslant d_\alpha)\cap(\theta_\beta\leqslant\theta_\alpha)\cap(A_\beta\leqslant A_\alpha)\cap(T_\beta\leqslant T_\alpha)\right\}.$$

b．至少一个评价指标上β严格优于α

$$\left\{(d_\beta>d_\alpha)\cup(\theta_\beta<\theta_\alpha)\cup(A_\beta<A_\alpha)\cup(T_\beta<T_\alpha)\right\}.$$

得到由全部非支配解构成的集合，即为本场景下的帕累托前沿，最后采用加权评分，以求取适应本场景的改向角，有

$$J_k=\omega_1Y(d_k)-\omega_2Y(\theta_k)-\omega_3Y(A_k)-\omega_4Y(T_k),$$

式中：$Y(\cdot)$为归一化后的值；ω_1，ω_2，ω_3和ω_4为各评价指标权重．为优先保障船舶航行安全，将涉及核心安全的碰撞风险与边界距离指标赋予主导权重(ω_1=ω_2=0.4)，将涉及操纵代价的改向幅度与避让时长作为次要优化项(ω_3=ω_4=0.1)．计算取值最高的解即被确定为兼顾多重目标的避让方案．

2.4　航行决策方法

综合上述方法，针对动态交通环境与多重约束条件所构建的航行决策方法如图8所示，图中MMG为浅水岸壁效应影响下的船舶操纵运动模型．

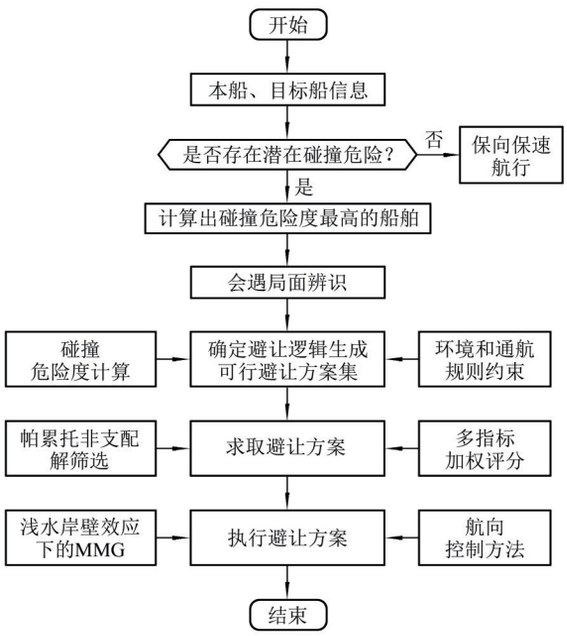


图8　航行决策方法

3　仿真结果与分析

3.1　试验环境设置

天津港主航道水深23 m，底宽397 m，主航道以外水深4～7 m．曾出现过与岸壁效应相关的险情，因此本研究选取天津港主航道为实验场景．

a．静态交通环境设置

利用python平台对电子海图CN201304，CN423111的数据进行提取并建模，构建的静态交通环境结果如图9所示．

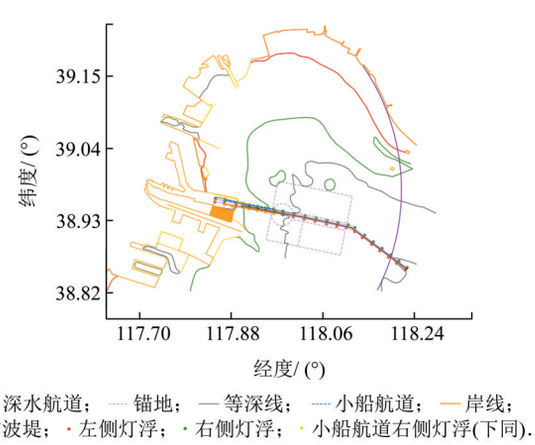


图9　静态交通环境

在受限水域中，水深数据对于船舶航行安全同样至关重要，因此基于海图水深点构建插值函数$h=w(x,y)$，根据船舶实时位置，动态计算当前位置的水深值供给船舶模型调用，水深点数据如图10所示．

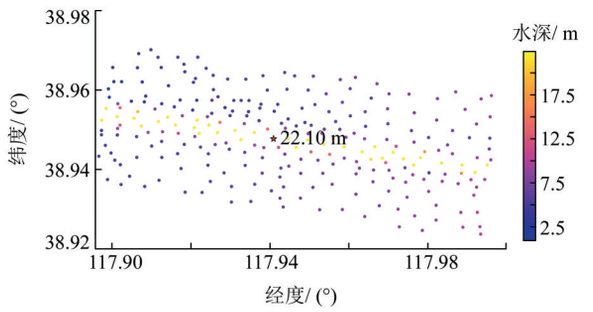


图 10　试验水域水深数据

b．动态交通环境设置

选取 2024 年 10 月 13 日 14:00 时刻的天津港主航道实时交通环境数据，本船和目标船信息如表 1 所示，表中 MMSI 为船舶在自动识别系统(AIS)中的唯一身份识别编号．

表 1　目标船信息

船舶类别	位置坐标/(°)	航向/(°)	航速/kn	MMSI
本船	(117.859，38.958)	101	12.5	
目标船 1	(117.951，38.954)	235	9.8	413234770
目标船 2	(118.192，38.902)	296	9.3	413697110
目标船 3	(118.093，38.944)	299	9.2	413191000
目标船 4	(118.022，38.944)	275	15.0	413018020
目标船 5	(118.035，38.935)	320	13.7	413018060
目标船 6	(118.195，38.904)	289	16.9	414210000
目标船 7	(117.890，38.982)	135	7.5	412288552
目标船 8	(117.959，38.924)	51	2.7	413453940
目标船 9	(117.931，38.948)	100	5.1	413263140

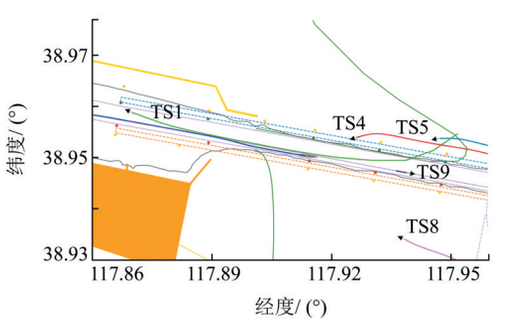
3.2　仿真实验

根据交通环境的初始信息，在 python 平台进行仿真试验．实验全程如图 11 所示，避让方案求取如图 12 所示．图 11 中：TS1～TS9 分别表示不同航行任务下的目标船舶；TS1 和 TS4 为由锚地驶向港区的进港船舶；TS2 和 TS6 为由主航道驶向锚地的锚泊船舶；TS3 为沿主航道进港的船舶；TS5 为由锚地出发并沿复式航道进港的船舶；TS7 和 TS8 为穿越航道的船舶；TS9 为沿主航道出港的船舶．

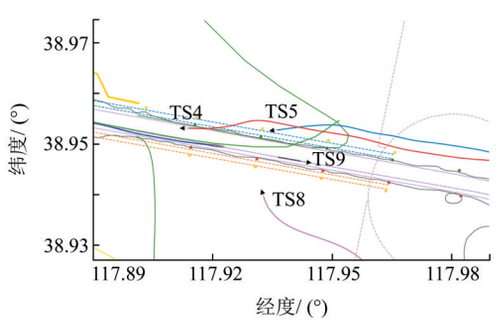
本船与 TS1 对遇全程如图 11(a)所示，当 t_1=391 s 时，TS1 穿过航道中线，与本船形成对遇局面，本船减速；当 t_2=553 s 时，本船右转并于 t_3=716 s 让清 TS1；当 t_5=1 254 s 时如图 11(b)所示，TS8 与本船形成交叉局面，本船减速避让并于 t_6=1 442 s 让清 TS8(见图 11(c))．本船与 TS9 追越全程如图 11(d)所示，当 t_7=1 762 s 时，判断能右转避让，本船开始改向追越；当 t_8=1 858 s 时，本船沿航道边界追越 TS9；当 t_9=2 154 s 时，让清 TS9 开始复航．具体时刻船舶运动状态及避碰效果见图 13～14．

对遇局面时的改向角求取如图 12(a)所示，结果保留了 6 个非支配解，在尽可能低的航道边界风险及尽可能大的 DCPA 的基础上，选择尽可能小的角度即改向 5°作为最终选择．追越局面的改向角求取如图 12(b)所示，其求解过程同理．

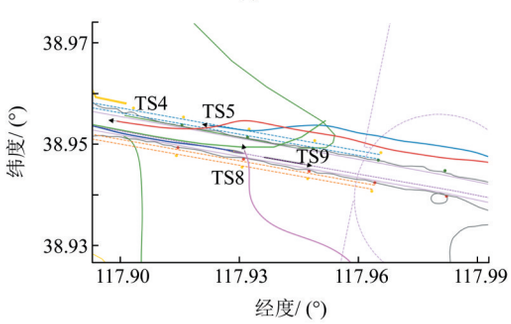
实验中避让危险船的运动状态及避让效果如图 13 和 14 所示．图中：t_1～t_4(分别为 391，553，716，



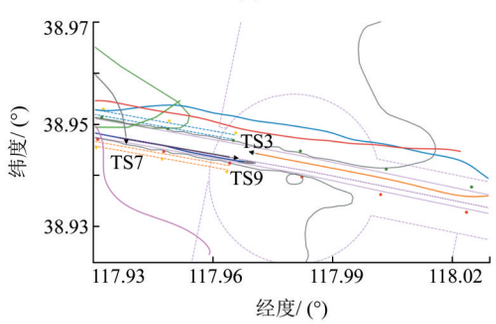
(a) 对遇全程



(b) 交叉减速

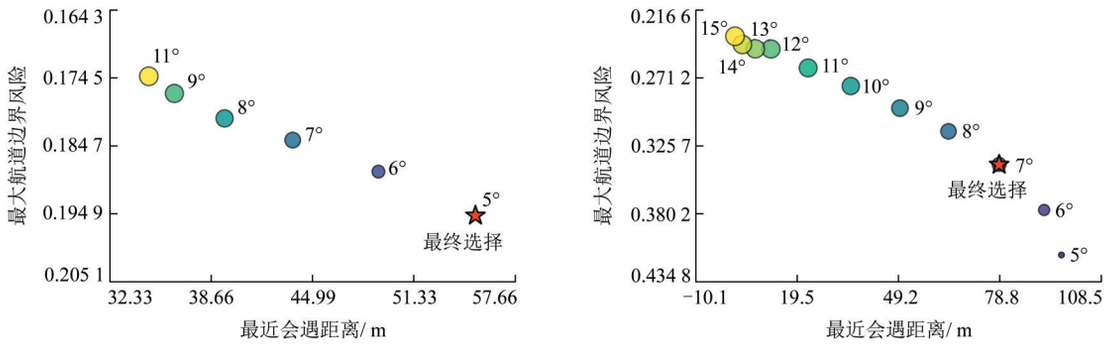


(c) 交叉复航



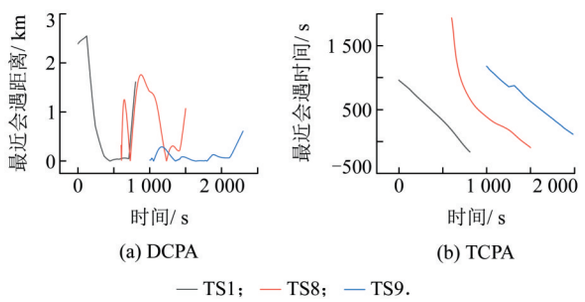
(d) 追越全程

图 11　仿真实验结果



(a) 对遇改向求取　　(b) 追越改向求取

图 12　避让方案求取结果

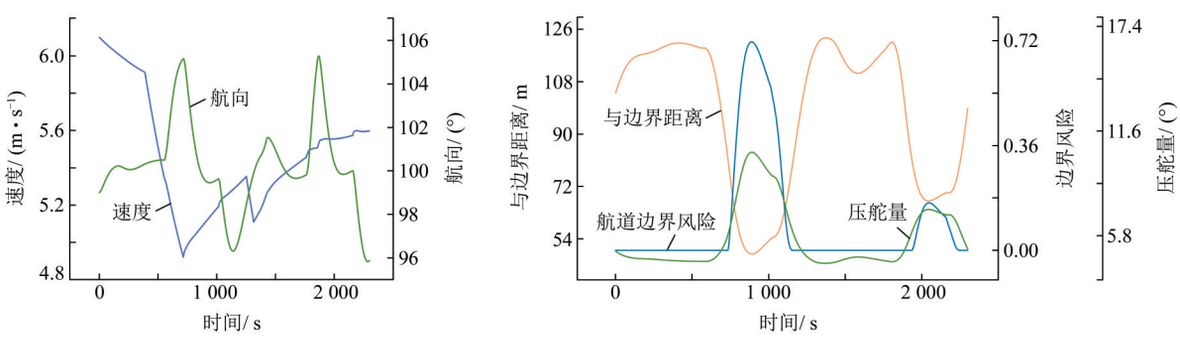


(a) DCPA　　(b) TCPA

图 13　仿真过程避让效果

823 s)表示本船避让对遇船舶的全过程；t_5～t_6(分别为 1 254 s，1 442 s)表示本船避让交叉相遇船舶全过程；t_7～t_9(分别为 1 762，1 858，2 154 s)表示追越目标船的全过程.

结果表明：本船均能 TCPA(最近会遇时间)归零前及时响应，通过调整航向航速将 DCPA(最近会遇距离)维持在安全阈值之上，避让过程中边界风险始终处于安全范围.



(a) 航向及航速　　(b) 与边界距离、航道边界风险及压舵量

图 14　仿真全过程的本船状态

4　结语

通过构建适应浅水岸壁效应的船舶领域与边界风险模型，基于帕累托最优理论求取避让方案. 结果表明该方法能保障受限水域避碰安全. 鉴于实际航行环境的复杂性，未来将进一步探讨不规则岸壁形态，以及气象环境(风、流)与岸壁效应耦合对船舶操纵性及决策的复杂影响.

参　考　文　献

[1] 严新平，涂敏，杨家其，等. 我国建设世界一流海洋港口的路径研究[J]. 中国工程科学，2025，27(1)：236-247.

[2] 关巍，崔哲闻，罗文哲. 基于改进 PPO 算法的船舶自主避碰决策[J]. 大连海事大学学报，2023，49(4)：28-36.

[3] 郝增瑞. 基于多目标优化的船舶转向变速自主避碰决策[D]. 大连：大连海事大学，2023.

[4] 胡文兴. 基于改进多目标麻雀搜索算法的多船避碰决策[D]. 大连：大连海事大学，2023.

[5] 李丽娜，陈国权，杨凌波，等. 船舶拟人智能避碰决策算法测试及应用[J]. 中国航海，2022，45(1)：1-7.

[6] 陈楷达. 基于深度强化学习的海峡水域船舶避碰研究[D]. 大连：大连海事大学，2023.

[7] 何宇，欧阳子路，邹璐，等. 基于矢量场制导法和模型预测控制的船舶路径跟踪与避碰[J]. 上海交通大学学报，2024，58(11)：1644-1653.

[8] 肖进丽，廖洪涛，甘浪雄，等. 基于 awGA 改进 DWA 的内河 USV 局部路径规划[J]. 华中科技大学学报(自然科学版)，2026，54(4)：22-29.

[9] 叶斌. 浅水中船舶迎浪直航与回转操纵数值仿真研究[D]. 武汉：华中科技大学，2023.

(下转第 80 页)