DOI：10.13245/j.hust.260203

基于流场在线预测的感潮河段船舶自适应航迹控制方法

贺益雄[1,2,3]　李一凡[1,2]　薛海东[1,2]　张　坤[1,2]　陈厚忠[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．武汉理工大学水路交通控制全国重点实验室，湖北 武汉 430063)

摘要　针对内河感潮河段复杂流场与通航规则限制并存、船舶航迹跟踪易出现失稳、落湾及违规等问题，提出一种考虑时变非均匀流场与通航规则约束的自适应航迹跟踪控制方法。构建通航环境要素参数化模型，建立环境信息与控制变量的映射关系；基于离散海图潮流数据，采用改进径向基函数插值重构时空连续流场。基于考虑流场漂移和相对流速的船舶运动学与动力学模型，引入流场前馈补偿以减小横流影响；设计基于航向误差的增益调度、积分抗饱和与微分调度控制策略，改善弯道及扰动条件下的控制响应；基于地理围栏动态嵌入桥区限速等航行规则约束。以苏通大桥附近水域为例开展仿真实验，结果表明：引入流场前馈后，全航段平均横向偏差由25.32 m降至8.24 m，所提方法进一步降至5.37 m；桥区限速段平均横向偏差为2.03 m，低于对照组的19.35 m。

关键词　数字孪生；航迹控制；时变流场重构；风流耦合动力学；抗饱和控制；通航约束

中图分类号　U675.73　　**文献标志码**　A　　**文章编号**　1671-4512(XXXX)XX-0001-08

Adaptive track control method for ships in tidal reaches based on online flow field prediction

HE Yixiong[1,2,3]　*LI Yifan*[1,2]　*XUE Haidong*[1,2]　*ZHANG Kun*[1,2]　*CHEN Houzhong*[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．State Key Laboratory of Maritime Technology and Safety，Wuhan University of Technology，Wuhan 430063，China)

Abstract　To address the instability, drifting at bends and rule violations in ship track control caused by the coexistence of complex flow fields and navigational rule constraints in inland tidal reaches, an adaptive track control method considering time-varying non-uniform flow fields and navigational rule constraints was proposed. A parameterized model of navigational environment elements was constructed to map environmental information to control variables; based on discrete tidal current data from charts, a spatio-temporally continuous flow field was reconstructed by an improved radial basis function (RBF) interpolation method. Based on ship kinematic and dynamic models considering flow-induced drift and relative flow velocity, flow field feedforward compensation was introduced to reduce the effects of cross-currents; a heading-error-based control strategy combining gain scheduling, integral anti-windup and derivative scheduling was designed to improve the control response in bends and under disturbances; navigational rule constraints such as speed limits in the bridge area were dynamically embedded by geo-fencing. Simulation experiments were conducted taking the waters near the Sutong Bridge as a case study. The results show that, with the flow field feedforward, the mean cross-track error (XTE) over the whole route is reduced from 25.32 m to 8.24 m, and the proposed method further reduces it to 5.37 m; in the speed-limited bridge section, the mean XTE is 2.03 m, lower than 19.35 m of the control group.

Key words　digital twin；track control；time-varying flow field reconstruction；wind-current coupled dynamics；anti-windup

收稿日期　2026-04-23.

作者简介　贺益雄(1976-)，男，教授；陈厚忠(通信作者)，副教授，E-mail：chzwhut@163.com．

基金项目　国家自然科学基金资助项目(52271367)．

control；navigational constraints

感潮河段弯道、桥区常伴随航道束窄与复杂流场，基于已知的地理信息(如电子海图)，开展船舶航行规则限制下的船舶航迹跟踪控制研究具有现实需求[1-2]。

S-57电子海图(ENC)是水上交通地理信息的核心数据源，实现自主航迹控制需要实现通航环境的要素化建模。文献[3-4]研究了海事要素的结构化表达与语义映射方法，文献[5-8]结合势场模型、通航规则与环境约束开展避碰与航行决策。现有研究多将海图作为静态几何信息使用，缺乏面向实时控制的要素建模与语义表达，难以支撑复杂通航规则的执行。

在非均匀流场建模与抗扰控制方面，文献[9]研究了非均匀流场下的弯曲航道路径跟踪，文献[10-11]采用扩张状态观测器(ESO)进行在线估计与补偿，但在复杂流动环境中仍存在适用性限制，如强剪切流条件下的相位滞后问题。同时，高保真CFD方法计算代价较高，难以满足实时需求[12]。此外，现有方法多基于二维假设，未充分考虑水深对流速分布的影响。文献[13]研究了水流特性与桥区船舶通航风险的关系，因此流场建模需兼顾桥区水流特性与实时性。

在航迹跟踪控制方面，LOS与PID方法应用广泛，文献[14-16]分别研究了自适应LOS、狭窄弯曲航段控制及积分LOS方法，文献[17]提出了慢速域操纵运动模型与自适应最优航向控制方法，文献[18-19]探讨了强化学习等方法在复杂扰动环境中的应用。然而，现有研究多将风流作为外部力叠加处理，未显式刻画流场对船水相对速度及舵效的影响。模型预测控制与强化学习等方法虽具优势，但计算复杂度或训练成本较高，限制了其实时应用。

针对感潮水域非均匀流场扰动与通航规则约束下的航迹跟踪问题，本文构建通航要素模型；引入顾及水深影响的三维径向基函数方法重构时变流场，结合船舶动力学模型解耦风流作用；设计融合流场前馈与增益调度的自适应控制策略，实现复杂受限水域下的航迹跟踪与规则约束协同。

1　感潮河段环境要素建模与流场重构

1.1　通航要素建模与ENC数据映射

为描述通航环境对船舶运动的影响，将通航环境表示为由多类要素构成的集合系统，即$E=\{E_{nav},E_{con},E_{obs},E_{hydro}\}$。式中，$E$表示通航环境要素的总体集合；$E_{nav}$、$E_{con}$、$E_{obs}$与$E_{hydro}$分别表示助航引导类、通航约束类、物理阻碍类及水文与地形基准类要素集合，其映射关系如图1所示，通用模型定义如下。

(1)　助航引导类要素

助航要素为航道结构的几何参考，抽象为离散空间点集合，即$E_{nav}=(P,A)$。其中，$P(x,y)$为要素的空间位置坐标，A为属性集合，二者分别用于航道边界拟合与中心线提取以及要素类型区分。基于该类要素的空间分布可生成航道边界及中心线，作为航迹跟踪参考。

(2)　通航约束类要素

通航约束要素用于限定可航空间与规则约束，抽象为闭合多边形区域，即$E_{con}=(V,S_{rule})$。其中，$V=\{v_1,v_2,\cdots,v_n,v_1\}$为构成多边形地理边界的有序二维顶点序列，$S_{rule}$为绑定的约束规则集，用于触发区域性控制指令。

(3)　物理阻碍类要素

物理阻碍要素用于表征桥墩、岸线等实体，采用符号距离场(Signed Distance Field, SDF)建模，即$E_{obs}=(C_{geo},d_{surf}(x))$。其中，$C_{geo}$描述几何结构，$d_{surf}(x)$为空间点$x$至边界的有向距离。用于刻画障碍物空间约束关系。

(4)　水文与地形基准类要素

水文与地形要素用于描述水深分布及流场特性，抽象为高程网格与时变场源锚点集合，即$E_{hydro}=(G_{depth},N_{anchor}(t))$。其中，$G_{depth}$为离散化空间水深高程网格，$N_{anchor}(t)$为场源锚点集合用于流场重构输入。

1.2　感潮河段非均匀流场三维重构

将流场表示为包含时空属性的动态要素模型，即$E_{flow}=(P,v_x,v_y,t)$。其中，$P(x,y)$为大地坐标系中的坐标；v_x与v_y分别为该处沿X、Y轴的流速大小，正负表征流向，两者合成即为该点时刻t的流速矢量V_{flow}。

S-57电子海图中潮流数据以离散观测形式给出，缺乏连续表达能力，需通过时空插值构建连续流场。

(1)　时空耦合的3D-RBF背景流场建模

将潮流观测站(TS_FEB)作为参数化锚点，即

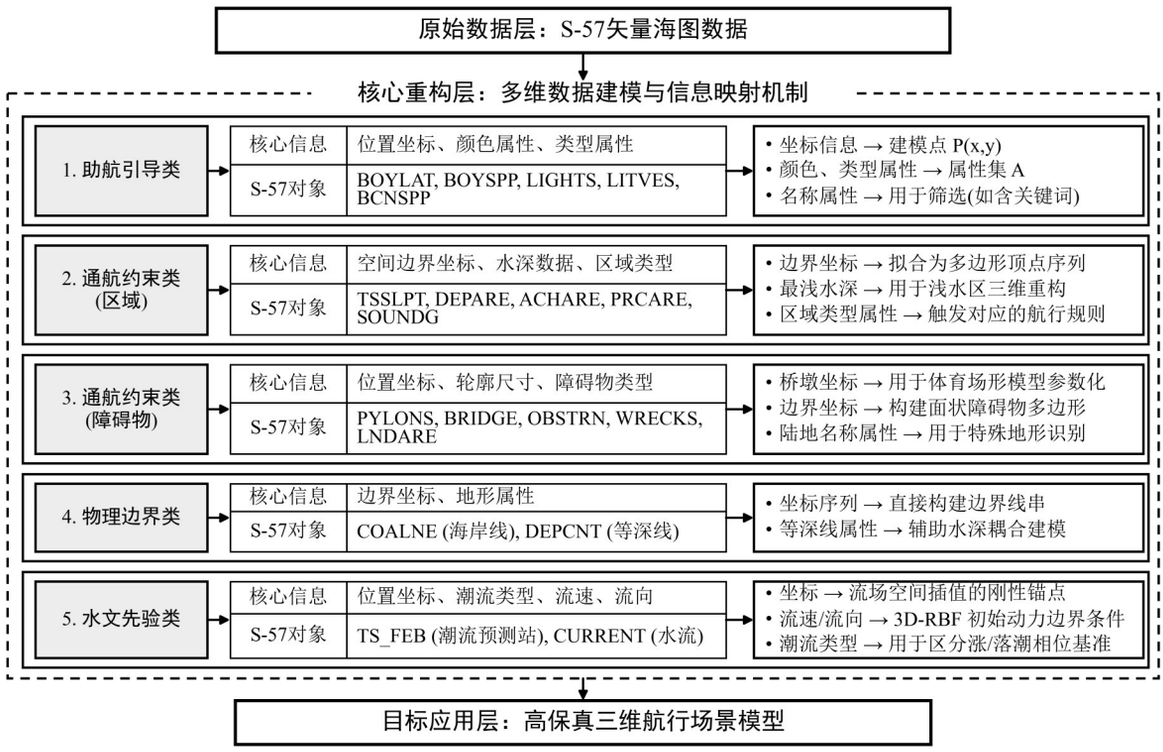


图1　感潮河段通航要素分类与S-57海图映射关系

$S_{tide}=\{P_{obs},V_{max},\theta_{max}\}$。式中，$P_{obs}(x,y)$为观测站在墨卡托坐标系下的绝对地理位置；$\theta_{max}$为从S-57海图该站点基准流向；部分潮流观测站流速属性信息缺失，通过融合感潮河段历史水文测算数据，经空间插值推演获取的流速为V_{max}。

如潮汐周期为T_{cycle}，t时刻的潮汐驱动因子$f_{tide}(t)$为式：

$$f_{tide}(t)=\sin\left(\frac{2\pi t}{T_{cycle}}\right)$$

可将静态锚点转化为带有正负相位的瞬时流速矢量，如式：

$$\mathbf{V}_i(t)=V_{max}\cdot f_{tide}(t)\cdot\begin{bmatrix}\cos(\theta_{max})\\ \sin(\theta_{max})\end{bmatrix}$$

当$f_{tide}(t)>0$时说明涨潮，否则为落潮。

在此基础上，引入考虑水深差异的各向异性核函数，如式：

$$\phi(d_{xy},d_z)=\sqrt{d_{xy}^2+c^2}\cdot\exp\left(-\frac{d_z^2}{2\sigma_z^2}\right)\qquad(1)$$

式中，d_{xy}为考虑了流向各向异性拉伸的水平欧氏距离，c为依据锚点间距动态计算的形状参数；d_z为插值目标点与海图观测锚点的高程水深差，σ_z为垂向水深惩罚权重。

基于式(1)，全域空间内的流速场解算为：

$$\mathbf{V}_{bg}(x,y,t)=\sum_{i=1}^{N}w_i\mathbf{V}_i(t)\phi(\|(x,y)-P_{obs,i}\|,d_z)$$

其中，w_i为待求解的自适应插值权重系数。

为提高数值稳定性，在权重求解中引入Tikhonov正则化，构建方程组$(\mathbf{\Phi}+\mu\mathbf{I})\mathbf{W}=\mathbf{V}(t)$。式中，$W=[w_1,w_2,\cdots,w_N]^T$为权重向量；$V(t)=[V_1(t),V_2(t),\cdots,V_N(t)]^T$为时变观测流速向量；$I$为单位矩阵；$\Phi$为$N\times N$的核函数矩阵，其元素$\Phi=\phi(|P_{obs,i}-P_{obs,j}|,d_{z,ij})$。鉴于海图潮流观测点分布稀疏，本文通过仿真试验整定$\mu=0.1$，该取值在抑制局部振荡的同时保持合理拟合精度，从而提高了流场重构及控制计算的数值稳定性。

(2) 基于SDF边界约束与解析模型的扰流叠加

为描述局部障碍物引起的流场畸变，基于符号距离场$d_{SDF}(x)$施加边界约束。计算背景流在边界法向上的投影速度$v_n=V_{bg}\cdot n$，当$v_n<0$，引入反向补偿流对背景流进行修正，如式：

$$\mathbf{V}_{corr}=\begin{cases}-v_n\cdot\mathbf{n}\cdot\left(1-\dfrac{d_{SDF}}{R_{inf}}\right)^2, & v_n<0\ 且\ d_{SDF}<R_{inf}\\ 0, & 其他\end{cases}$$

式中，n为边界外法向量，R_{inf}为约束影响半径。

为刻画桥墩等结构下游的尾流扰动，构建以瞬时主流向为轴的局部坐标系，并叠加具有时间振荡特性的解析涡旋模型，如式：

$$\mathbf{V}_{wake}(x,y,t)=V_{bg}\cdot f_{dist}(x)\cdot\exp\left(-\frac{y^2}{\sigma_y^2}\right)\cdot\sin(2\pi f_v t-\phi_x)\cdot\mathbf{e}_{\perp}$$

式中，x,y为投影坐标；$f_{dist}(x)$为沿主流方向的纵向耗散衰减函数；f_v为涡脱落频率。

(3)非均匀流场矢量合成

宏观背景流与微观扰动流叠加得瞬态流场如式：

$$\mathbf{V}_{total}(x,y,t)=\mathbf{V}_{bg}(x,y,t)+\mathbf{V}_{corr}(x,y,t)+\mathbf{V}_{wake}(x,y,t)$$

用于航迹控制中的实时流场查询。权重求解复杂度为$O(N^3)$，单点流场查询复杂度为$O(N)$，能够满足航迹控制的实时性需求。以苏通大桥水域为例，所构建流场能够反映岸线约束引起的流线偏转及桥墩尾流特征，如图2。

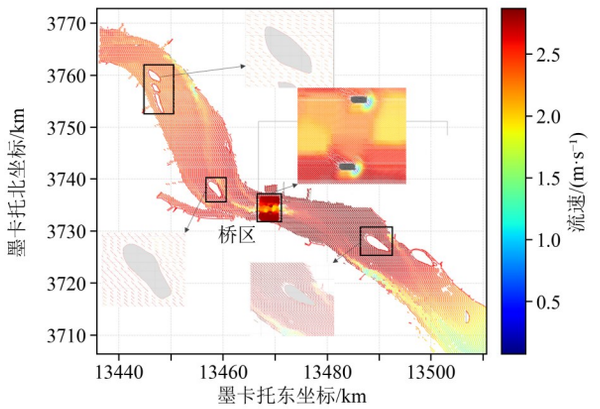


图2　考虑桥墩扰流的涨潮流场

2　固液耦合的动力学船舶操纵运动与自适应控制模型

2.1　船舶操纵运动模型

为描述非均匀流场对船体受力及舵效的影响，基于MMG(Mathematical Modeling Group)模型构建三自由度运动模型。将流场影响分为运动学漂移与动力学受力两部分。

(1)　融合流场漂移的运动学方程

建立随船坐标系$(O-x_by_b)$与大地坐标系$(E-XY)$的基础上，船舶重心位置(X,Y)及艏向角ψ可表示为对水速度与流速的叠加如式：

$$\begin{cases}\dot{X}=u\cos\psi-v\sin\psi+V_{flow}\cos\theta_{flow}\\ \dot{Y}=u\sin\psi+v\cos\psi+V_{flow}\sin\theta_{flow}\\ \dot{\psi}=r\end{cases}$$

式中，u,v,r分别为船舶随船坐标系下的纵向、横向速度与艏摇角速度；V_{flow}与θ_{flow}为流场模型输出的当前位置处流速与流向。

(2)　考虑环境扰动的船舶动力学模型

定义对水速度分量u_r,v_r，如式：

$$\begin{cases}u_r=u-V_{flow}\cos(\theta_{flow}-\psi)\\ v_r=v-V_{flow}\sin(\theta_{flow}-\psi)\end{cases}$$

考虑纵向、横向和转艏运动的三自由度MMG方程，如式：

$$\begin{cases}(m+m_x)\dot{u}-(m+m_y)vr=X_H(u_r,v_r,r)+X_P+X_R(u_r)+X_{wind}\\ (m+m_y)\dot{v}+(m+m_x)ur=Y_H(u_r,v_r,r)+Y_R(u_r)+Y_{wind}\\ (I_{zz}+J_{zz})\dot{r}=N_H(u_r,v_r,r)+N_R(u_r)+N_{wind}-x_GY_H\end{cases}$$

式中，m为船舶质量，m_x,m_y,J_{zz}分别为附加质量与转动惯量；X,Y,N分别代表纵向、横向及转艏方向的受力与力矩。下标H、P和R分别表示船体、螺旋桨和舵；风载荷项$X_{wind},Y_{wind},N_{wind}$采用Isherwood经验模型计算[20]。

2.2　自适应合规循迹控制

构建融合流场前馈、自适应导引与增益调度PID的分层控制架构，如图3。

(1)　自适应前视距离与前向采样的导引机制

传统视线导引(LOS)方法中前视距离固定，无法同时契合弯道和直线航行，引入基于路径曲率与横向偏差的自适应前视距离机制，将前视距离Δ表示为曲率κ与横向偏差y_e的函数，即$\Delta=\Delta_{min}+(\Delta_{max}-\Delta_{min})\exp(-\lambda_1|\kappa|-\lambda_2|y_e|)$。式中，$\lambda_1,\lambda_2$为调节系数。在直线路段保持较大前视距离，在高曲率或大偏差区域适当减小，以平衡跟踪稳定性与路径适应能力。

引入前向采样机制，提取路径前方一段距离(取前方垂线间长L_{pp})处的路径切向角ψ_{ahead}，与当前位置切向角ψ_{path}进行加权，生成参考航向ψ_{ref}，即$\psi_{ref}=\omega\psi_{ahead}+(1-\omega)\psi_{path}$。

(2)　瞬态抑制型流场前馈与稳态误差消除

在积分视线法(ILOS)框架下引入流场前馈补偿项，根据流场计算漂角补偿β_c，如式：

$$\beta_c=\arcsin\left(\mathrm{sat}\left(\frac{V_{flow}\sin(\theta_{flow}-\psi_{ref})}{v}\right)\right)$$

式中，v为船舶对水航速；$\mathrm{sat}(\cdot)$为防奇异限幅函数。

为避免大误差情况下的过度补偿，引入与航向误差相关的调节因子，即$\sigma(e_\psi)=\exp(-\gamma|e_\psi|^2)$。

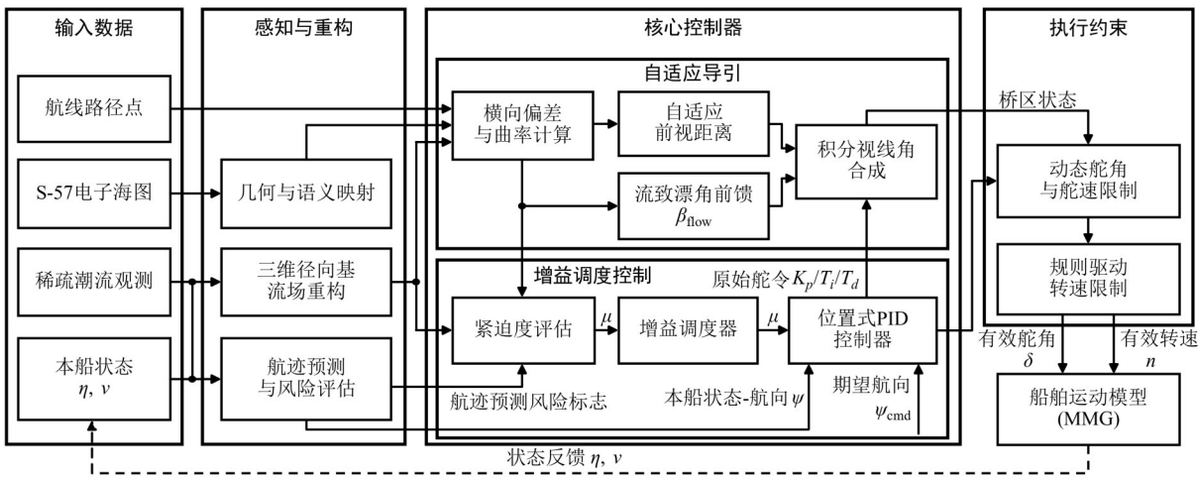


图3　考虑流场补偿与规则约束的船舶分层循迹控制逻辑

最终期望航向ψ_d由预瞄航向、积分视线修正项及前馈补偿项构成，见式：

$$\psi_d = \psi_{ref} + \arctan\left(-\frac{y_e + \gamma_{int}\int y_e\,dt}{\Delta}\right) + \sigma(e_\psi)\beta_c$$

(3) 基于紧迫度调度的抗饱和控制与包络代偿

定义航行紧迫度因子$\mu \in [0,1]$，用于表征航向误差程度，如式：

$$\mu = \left(\mathrm{sat}\left(\frac{|e| - 0.5^\circ}{10^\circ}\right)\right)^{1.5}$$

式中，e为航向误差，$\mathrm{sat}(\cdot)$为区间$[0,1]$内的限幅函数。

基于该紧迫度因子，对PID控制器参数进行动态调度：$K_p(\mu) = K_{p,base} + \mu\cdot(K_{p,max} - K_{p,base})$。

以实现小误差低增益、大误差高增益的自适应控制。为限制积分项在大误差或误差反向变化情况下的过度累积效应，减小积分饱和对系统动态性能的影响，设置积分项约束策略。当满足以下条件之一时，对积分项进行重置，其逻辑如式所示：

$$\begin{cases} |e| > 8^\circ \\ \mu > 0.2 \text{ 且 } e\cdot\int e < 0 \end{cases} \Rightarrow \int e = 0$$

同时，为降低高频噪声对控制输入的不良影响，对微分项进行滤波与参数调整。在误差较大($|e| > 8^\circ$)时适当增大微分时间常数T_d，以增强系统阻尼作用；并引入一阶低通滤波器对微分信号进行平滑处理$D_f(k) = 0.9D_f(k-1) + 0.1D_{raw}(k)$。

在获取期望航向ψ_d后，底层执行机构基于航向误差输出舵角控制指令$\delta_c(t)$。融合紧迫度调度参数以及微分滤波项$D_f(t)$，非线性自适应PID舵角控制律可完整表述如式：

$$\delta_c(t) = K_p(\mu)\left[e(t) + \frac{1}{T_i(\mu)}\int_0^t e(\tau)d\tau + T_d(\mu)\cdot D_f(t)\right]$$

结合地理围栏约束，在受限区域内施加限速控制，并基于紧迫度因子对舵速约束进行动态调整，以保证低速条件下的操纵能力，如式：

$$R_{limit} = 1.0^\circ/\mathrm{s} + \mu\cdot(25.0^\circ/\mathrm{s} - 1.0^\circ/\mathrm{s})$$

所用公式各变量详细参数见表1(表中L为船舶总长)。

核心参数依据目标船型闭环仿真进行工程整定。视距参数(λ_1,λ_2)用于平衡直航稳定性与弯道跟踪能力；设置0.5°死区以抑制微小扰动引起的高频控制输入；通过8.0°切换阈值与遗忘因子($\gamma \to 0$)联动，在大偏差工况下抑制积分累积并改善动态响应；舵角及舵速约束依据执行机构能力设定。

3　仿真实验与结果分析

3.1　仿真平台与场景设置

构建苏通大桥水域数字孪生环境(图4)，开展潮流由落潮向涨潮过渡过程中的仿真实验，总时长为$t \in [33534.5\mathrm{s}, 50247.0\mathrm{s}]$。针对S-57海图中推荐航道缺失的问题，基于助航要素模型$E_{nav} = (P,A)$构建虚拟航道：提取航标位置$P(x,y)$，依据A完成筛选与排序，并采用Catmull-Rom三次样条进行插值生成航道曲线，进一步通过弧长参数重采样得到均匀航道点序列。叠加恒定风场(5 m/s、0°)。系统基于QT4实现，在单线程工控机环境下单次控制周期平均耗时低于1 ms，满足实时性要求。

船舶航行过程可划分为三个阶段：

(1)直航与缓弯阶段(33534.5～42200.0 s)：以

表1　航迹控制系统核心参数配置表

模块类别	参数名称与符号	实际整定取值
自适应视距导引(ALOS)	最大视距Δ_{base}	5.0L(约950 m)
	最小视距Δ_{min}	2.0L(约380 m)
	敏感度权重λ_1	10
	缩放系数λ_2	3
紧迫度与状态切换	紧迫度死区阈值e_{dead}	0.5°
	大误差切换阈值e_{switch}	8.0°
增益调度PID	稳态(直航)PID	K_p=3.0, T_i=40.0, T_d=3.5
	瞬态(弯道)PID	K_p=25.0, T_i=5.0, T_d=1.5
抗饱和与机械包络	动态积分遗忘因子γ	0.995/0.8/0.0
	物理极限舵角δ_{max}	±35.0°
	动态打舵速率极值$\dot{\delta}_{max}$	1.0°/s～15.0°/s

12.5节航速稳定驶入航道，至34100 s为直航段。随后至40200 s，进入曲率较小转弯段。

(2)桥区限速控制阶段(42200～45100 s)：该阶段船舶接近桥区水域，在42800 s触发基于地理围栏(Geo-fence)的限速指令。航速由12.3节非线性骤降，在43400～44500 s期间维持不超过8.0节。

(3)出桥区机动阶段(45100～50247 s)：45100 s后，船舶驶出桥区，航速限制解除并逐渐恢复至12.2节以上。该阶段包含两个大曲率弯道。

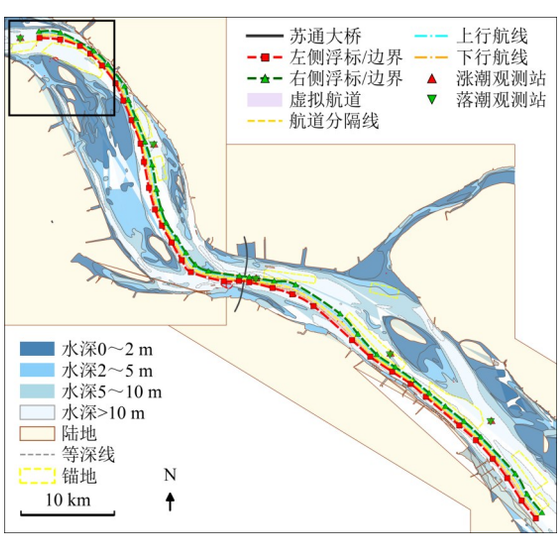


图4　苏通大桥及其附近水域交通环境数字孪生体重构

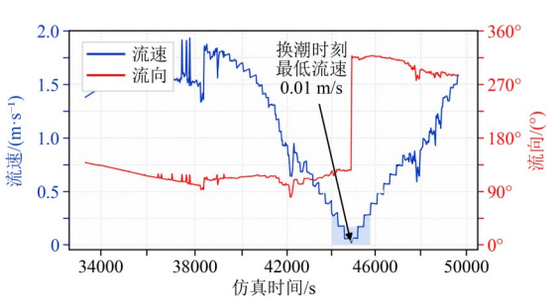


图5　航行全过程实验船受流时历曲线

本船所受流速流向如图5所示。被控船舶模型参数采用内河散货船长航福海，其质量为4.0×10^7 kg，总长189.99 m，船宽32.26 m，设计吃水10.3 m。

3.2　对比实验设计

设置以下三组对比实验：

(1)对照组(组0)：采用固定参数PID控制与固定前视距离LOS导引，不引入流场前馈补偿及限速约束。

(2)消融实验组(组1)：在组0基础上引入流场前馈补偿，其余控制参数与导引策略保持不变。

(3)完全实验组(组2)：采用2.2节所述自适应前视导引、紧迫度增益调度(航向误差超过8°时增大微分时间常数并重置积分项)及流场漂角前馈(航向误差5°～15°时线性衰减，大于15°时关闭)，并引入基于地理围栏的桥区限速约束。

3.3 结果分析

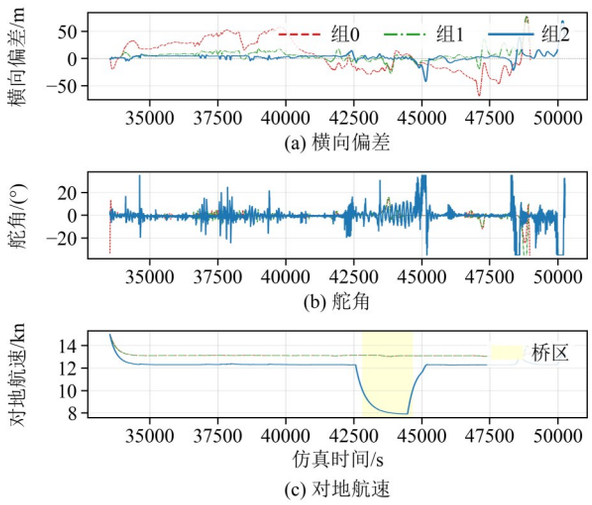


图6 横向偏差、舵角及对地航速时历对比

(1) 流场前馈对横向偏差的影响

如图6(a)，组0无法建立平衡漂角，平均横向偏差(Mean XTE)为25.32 m。组1引入流场动态前馈后，平均横向偏差降低至8.24 m(降幅约67.4%)，证明前馈补偿在减小稳态横向偏差方面具有明显作用。

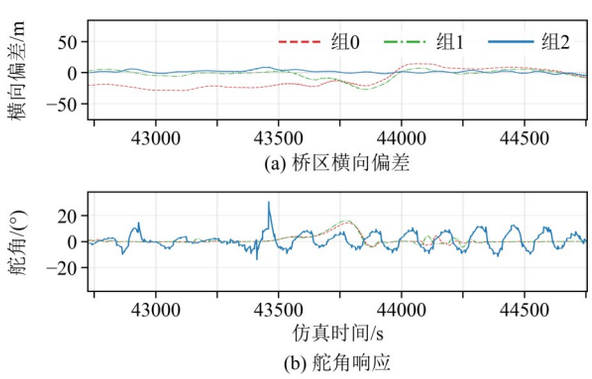


图7 桥区减速段航迹跟踪精度与舵角响应对比

(2) 大曲率弯道工况

跟踪航段最后的大曲率弯道工况中(图4左上框图)，组0与组1的最大横向偏差(Max XTE)均超过77.6 m。组2通过前视导引与控制参数调节，最大偏差为69.65 m，全航段平均偏差为5.37 m，小于组1的8.24 m。

(3) 限速约束下的控制响应特性

如图6(c)，组2执行限速规则，航速降低至约7.91节，其余两组航速不变。根据舵力计算公式，舵面升力与航速的平方成正比，组2中实验船舵的控制效果会明显降低。由图7过桥区段数据可知，未限速的组0与组1舵角标准差为0.8°左右；而组2的舵角标准差为5.64°，表明其控制输入幅度相对增大。在该工况下，组2的平均横向偏差为2.03 m，小于组0(19.35 m)与组1(3.41 m)。

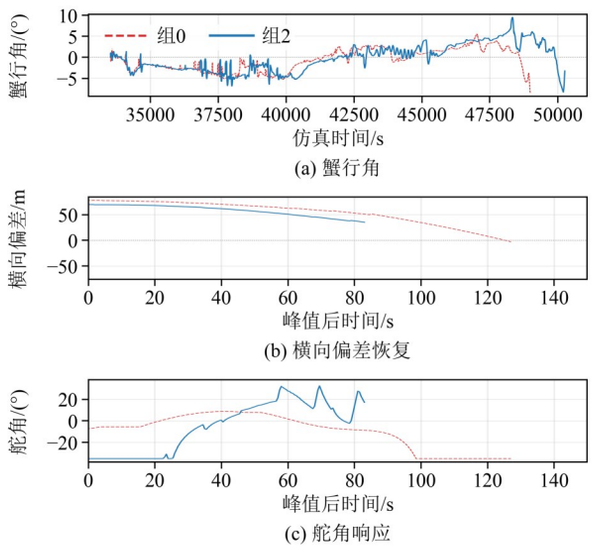


图8 蟹行角与弯道恢复阶段的轨迹及舵角响应

(4) 超调后的瞬态收敛与反超调抑制

在弯道恢复阶段，由图8(b)所示，组0在接近航线、偏差约为7 m时仍出现较大舵角(约−35°)，对应明显的反向超调。组2在最大偏差约69.65 m、距离航线约44 m时对积分项进行处理并调整舵角(约+28.5°)，其舵角变化过程相对平缓，轨迹逐步收敛至航线附近。

4 结论

通过构建通航环境要素模型，实现航道边界、通航约束及物理阻碍等信息的统一表达；结合时空耦合的流场重构方法，对感潮水域非均匀流场进行连续化描述；引入流场前馈补偿与增益调度控制策略，构建航迹跟踪控制方法。仿真结果表明，在直航、弯道及桥区限速等典型工况下，该方法能够有效减小横向偏差并改善轨迹收敛性能。

仍需指出，本文方法主要针对低频、慢时变扰动，在高频非定常扰动条件下仍存在改进空间。未来将引入扩张状态观测器(ESO)及自适应鲁棒控制方法，以增强系统对复杂扰动的在线估计与补偿能力。同时，结合船载传感器数据开展流场在线修正，以提升复杂环境下的感知与建模精度。

参 考 文 献

[1] 严新平．智能船舶的研究现状与发展趋势[J]．交通运输工程学报，2016，16(6)：1-10．

[2] 马枫，陈晨，刘佳仑，等．船岸协同支持下的内河船舶远程驾控系统关键技术研究[J]．中国舰船研究，

2025，20(1)：1-12．

[3] LI Y，LIU X，WANG Z，et al．Construction of a large-scale maritime element semantic schema based on knowledge graph models for unmanned automated decision-making[J]．Frontiers in Marine Science，2024，11：1390931．

[4] LUO Z，WANG Y，SWEVERS J，et al．Inland-LOAM：Voxel-Based Structural Semantic Mapping for Inland Waterways[J]．IEEE Robotics and Automation Letters，2025，10(3)：1234-1241．

[5] 王群朋，李龙浩，关宏旭，等．基于三维势场模型的船舶局部路径规划方法[J]．中国航海，2025，48(1)：130-138．

[6] 贺益雄，柴露通，王兵，等．特殊规则约束下感潮河段船舶自主航行方法[J]．交通信息与安全，2025，43(4)：86-97．

[7] 黄立文，徐录平，陈家豪，等．分道通航制内河宽水域航行决策方法研究[J]．华中科技大学学报(自然科学版)，2024，52(12)：94-102．

[8] 黄浩然，黄立文，徐录平，等．浅水岸壁效应下船舶自主航行决策方法[J]．华中科技大学学报(自然科学版)，2026，54(10)：66-72．

[9] 贺益雄，薛海东，刘霄，等．考虑非均匀流场扰动的弯曲航道路径跟踪方法[J]．上海交通大学学报，2025(网络首发)．

[10] 徐海祥，李超逸，余文照，等．基于扩张状态观测器的智能船舶循迹预测控制[J]．华南理工大学学报，2021，49(12)：143-152．

[11] 王浩亮，柴亚星，王丹，等．基于事件触发机制的多自主水下航行器协同路径跟踪控制[J]．自动化学报，2024，50(5)：1024-1034．

[12] 李松龙．基于CFD和机理模型的船舶操纵运动建模与仿真研究[D]．武汉：武汉理工大学，2022．

[13] 耿艳芬，郭梦雅，陈会，等．基于水流特性的桥区船舶通航风险分析[J]．东南大学学报，2024，54(3)：717-723．

[14] LI Y，WAN J，WANG X，et al．Path-Following Control Based on ALOS Guidance Law for USV[J]．Electronics，2025，14(4)：749．

[15] 黄立文，刘进来，贺益雄，等．狭窄弯曲航段自动航迹控制方法研究[J]．武汉理工大学学报，2023，45(4)：53-62．

[16] 林昀和，韩冰，龚正．虚拟船领导法与积分视线法相结合的欠驱动船舶轨迹跟踪控制[J]．中国航海，2025，48(4)：59-69．

[17] 赵兴亚，贺益雄，黄立文，等．复杂环境下船舶慢速域自主航行决策方法[J]．华中科技大学学报(自然科学版)，2024，52(3)：113-120．

[18] ZHANG W，SHAN L，CHANG L，et al．HDCPO：A PPO-based path following and obstacle avoidance method for USV considering environmental disturbances[J]．Advanced Engineering Informatics，2025，68：103735．

[19] 曲星儒，江雨泽，李初，等．基于改进TD3的欠驱动无人水面艇路径跟踪控制[J]．上海海事大学学报，2024，45(3)：1-9．

[20] ISHERWOOD R M．Wind resistance of merchant ships[J]．Transactions of the Royal Institution of Naval Architects，1972，115：327-338．