



基于良好船艺的内河弯曲航道船舶 车舵协同控制方法

陈勇¹, 黄立文², 陈家豪²

(1. 安徽省港航建设投资集团有限公司, 安徽 合肥 230000; 2. 武汉理工大学 航运学院, 湖北 武汉 430000)

摘要: 针对传统控制方法在内河弯曲航道中因局限于对航道中心线的精确跟随, 而忽略“挂高取矮”等关键航行实践导致安全裕度不足的问题, 提出一种融合该良好船艺的船舶车舵协同控制方法。该方法在制导层设计了改进的视线制导律, 通过引入基于船速与水流等工况计算的横向偏移量, 主动生成一条偏离中心线的策略性参考航迹, 在算法层面实现“挂高取矮”, 且其自适应积分机制可有效补偿环境扰动、消除稳态误差。控制层采用常规PID控制器对舵角进行精确控制, 构成完整的车舵协同控制系统。仿真结果表明, 在2 m/s横流干扰下, 该方法可成功执行预定策略, 使船舶至凹岸的最小安全距离相较于传统方法提升34.4%, 展现出优越鲁棒性。研究证实, 该方法将航行实践与现代控制理论有效融合, 为提升复杂受限水域船舶航行安全提供了新的解决方案。

关键词: 良好船艺; 内河弯曲航道; 车舵协同; PID控制

中图分类号: U675.9

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)05-0159-08

A rudder-propeller coordinated control method in inland curved waterways based on good seamanship

CHEN Yong¹, HUANG Liwen², CHEN Jiahao²

(1. Anhui Port and Shipping Construction Investment Group Co., Ltd., Hefei 230000, China;

2. School of Navigation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430000, China)

Abstract: To address the insufficient safety margins caused by traditional control methods for inland curved waterways, which are limited to precise centerline tracking and neglect key navigation practices such as “holding high and taking low”, a ship rudder-propeller coordinated control method integrating this good seamanship is proposed. The method features an improved LOS (line-of-sight) guidance law at the guidance layer. It algorithmically implements “holding high and taking low” by introducing a lateral offset, calculated based on operational conditions like vessel speed and current, to proactively generate a strategic, off-centerline reference trajectory. Furthermore, its adaptive integral mechanism effectively compensates for environmental disturbances and eliminates steady-state errors. The control layer employs a conventional PID (proportional-integral-derivative) controller for precise control of the rudder angle, forming a complete rudder-propeller coordinated control system. Simulation results verify that under a 2 m/s cross-current disturbance, the proposed method successfully executes the predetermined strategy, increasing the minimum safety distance to the concave bank by 34.4% compared with traditional methods and exhibiting superior robustness. The research confirms that the method effectively integrates navigation practice with modern control theory, providing a new solution for enhancing the navigational safety of ships in complex and confined waterways.

Keywords: good seamanship; inland curved waterway; rudder-propeller coordinated control; PID control

收稿日期: 2025-09-18 录用日期: 2025-10-28

作者简介: 陈勇(1983—), 男, 高级工程师, 研究方向为港口与航道工程。

内河航运作为国家综合运输体系的骨干组成部分,在全球物流网络中扮演着关键角色。随着船舶大型化和航运密度的增加,内河航道,特别是弯曲航段,因其航道狭窄、水动力环境复杂,对船舶的操纵精度与航行安全提出了严峻挑战^[1]。因此,研究适用于该类限制性水域的船舶运动控制方法,对于保障航行安全、推动船舶自动化进程具有重要的理论与实践意义。

船舶路径跟踪控制的研究通常建立在“制导-控制”分层架构之上,即由上层制导系统生成期望航向,再由下层控制系统操纵舵机等执行机构来跟踪该指令^[2]。在制导层面,视线(line-of-sight, LOS)制导律因其原理直观、计算简单,已成为应用最广泛的基准算法。然而,传统 LOS 制导律存在根本性缺陷:在遭遇横向水流等持续性环境扰动时,系统会产生无法消除的稳态横向跟踪误差,严重影响航行精度^[3]。为解决此问题,国内外学者提出了多种改进方案。其中,积分视线制导律(integral LOS, ILOS)通过在制导律中引入横向误差的积分项来估计和补偿由环境力引起的漂移角,从而有效消除了稳态误差^[4]。在此基础上,自适应 LOS^[5]、滑模 LOS^[6]等技术也相继被提出,进一步增强了制导系统对时变环境的鲁棒性。

然而,尽管这些方法在扰动抑制方面取得了显著进展,其设计目标仍普遍局限于对航道中心线的精确跟随。这一局限性导致现有算法与驾驶员在长期实践中形成的“良好船艺”存在显著鸿沟^[7]。在实际航行中,驾驶员并不会固定地沿中心线航行,而是会依据航道形态和水流条件,主动采取“挂高取矮”等策略性航法,以规避风险、提升效率。现有制导算法恰恰缺乏这种融合航行实践的决策能力,使得自动控制系统在安全性与智能性方面存在固有不足。在控制层面,比例-积分-微分(proportional-integral-derivative, PID)控制器凭借其结构简单、性能可靠的优点,至今仍是船舶航向控制中的主流算法^[8]。虽然固定增益的 PID 控制器对船舶时变动力学的适应性有限,但上层制导系统作为一个快速校正环路,其高频更

新的指令序列能够动态地对航向进行修正,从而有效弥补了底层控制器因参数固定而产生的非最优性,保证了系统整体的跟踪性能。

为弥合自动控制理论与航行实践之间的差距,本文聚焦于制导策略的创新,提出一种基于“挂高取矮”航行实践的内河弯曲航道船舶车舵协同控制方法。本文的主要创新点在于:设计了一种新型 LOS 制导律,通过主动生成偏离中心线的策略性参考航迹,将“挂高取矮”这一航行实践予以算法化实现;同时,该制导律集成了自适应积分机制以保证强扰动下的跟踪精度。在控制层,则采用常规 PID 控制器,构成简洁高效的车舵协同系统。本文将通过仿真试验,系统地验证所提方法在提升内河弯曲航道航行安全方面的有效性。

1 船舶运动与环境数学模型

1.1 船舶运动数学模型

船舶运动建模主要包括 Abkowitz 整体型模型、Nomoto 响应型模型^[9]和 MMG 分离型模型^[10]。其中,Abkowitz 模型难以解析复杂环境的耦合效应,而 Nomoto 模型无法精确描述多自由度运动。相比之下,MMG 模型采用分离式建模思想,将船体、螺旋桨和舵的水动力解耦,其模块化结构能够有效表征风、流等外部扰动,且支持参数动态修正,可满足高精度的仿真需求。因此,该研究选取 MMG 模型作为动力学基础。

在船舶运动控制研究中,通常忽略横摇、纵摇和垂荡的影响,聚焦于横荡、纵荡与艏摇 3 个核心自由度。据此,本文建立了一个考虑风、流影响的三自由度 MMG 模型,其数学表达式如下:

$$\begin{cases} (m + m_x)\dot{u} + (m + m_y)rv = X_H + X_P + X_R + X_E \\ (m + m_y)\dot{v} - (m + m_x)ru = Y_H + Y_P + Y_R + X_E \\ (I_{zz} + J_{zz})\dot{r} = N_H + N_P + N_R + N_E \end{cases} \quad (1)$$

式中: m 、 m_x 、 m_y 为船舶质量及附加质量; I_{zz} 、 J_{zz} 为转动惯量及附加转动惯量; u 、 r 、 v 分别为纵荡、横荡及艏摇速度; \dot{u} 、 \dot{v} 、 \dot{r} 为其对应的加速

度; X 、 Y 、 N 分别为 3 个自由度上的总作用力与力矩, 由船体(H)、螺旋桨(P)、舵(R)及外部环境(E)共同产生。各参数的具体计算参考文献[11]。

1.2 弯曲航道数字模型

为实现船舶在内河弯曲航段的轨迹跟踪控制, 首先需对航行环境进行数字化表示。该过程核心是通过将航道边界、助航标志等原始数据, 转化为结构化的、计算机可读的几何模型。本文采用将复杂航道分解为连续的、相互连接直线段的策略。该方法将船舶控制问题有效地转化为一个分段线性路径的跟踪问题。每一个航段 S_i 由一个四顶点多边形 $\{a, b, c, d\}$ 定义, 其内部构成可航区域。连接各航段出入口中点所形成的中心线 $\{L_{ef}, i\}$, 构成了船舶需要跟踪的参考轨迹。通过连接所有局部轨迹, 形成一条完整的、供船舶循迹的分段线性路径, 进而形成的弯曲航道数字化模型见图 1。这种数字化模型构建将连续的航行环境转化为一组离散的几何约束, 为运动控制器提供了必要的输入和边界条件。

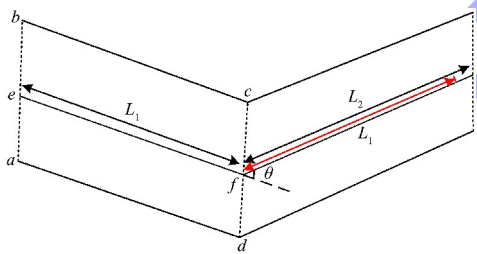


图 1 弯曲航道数字化模型

Fig. 1 Digital model of curved waterway

然而, 这种分段线性的路径表示在其航段连接处存在尖锐的转角, 这对于模拟弯道中连续变化的水动力效应(如横向水流)带来了困难。因此, 为确保仿真环境的高保真度, 本文并非对船舶的跟踪路径进行平滑处理, 而是将该折线路径在转角处等效为一段虚拟的圆弧曲线^[12]。目的是为该弯道航段建立一个连续的几何模型, 从而能够求出其等效曲率半径 R 。该曲率半径是后续估算弯道内横流角的关键参数, 而横流角直接决定了船舶所受环境作用力。连接两段长度分别为 L_1 和 L_2 、转角为 θ 的航段的等效曲率半径 R , 可由下式

确定:

$$R = \frac{\min(L_1, L_2)}{2\sin(\theta/2)} \quad (2)$$

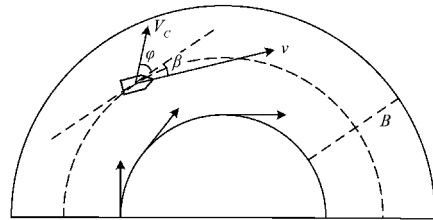


图 2 弯曲航道横流角

Fig. 2 Cross-current angle of curved waterway

在航道数字化模型基础上, 为准确模拟弯道内的关键环境扰动, 本文构建了内河弯道水流模型。横流角 φ , 即横向水流速度与航道中心线切线之间的夹角, 是决定船体所受横向力的主导因素, 流速为 V_c 。通过假设横流在弯道内沿凸岸切线方向流动, 并基于此理想化的几何模型构建的弯曲航道横流环境模型见图 2, 可推导横流角 φ 的估算公式:

$$\cos\varphi = 1 - C \frac{B}{R} \quad (3)$$

式中: B 为航道宽度; C 为挂高系数, $0 \leq C \leq 1$, 在一般航道中 C 可取 0.5。

2 融合航行实践的车舵协同控制方法

2.1 自适应航线跟踪方法

为解决传统控制方法对复杂系统模型的依赖, 本文采用间接路径跟踪策略, 将控制问题解耦为制导与航向控制两个子问题。在制导层面, 对经典视线制导法进行改进, 构建一个既能执行策略性航行又能抵抗环境扰动的制导方法, 见图 3。

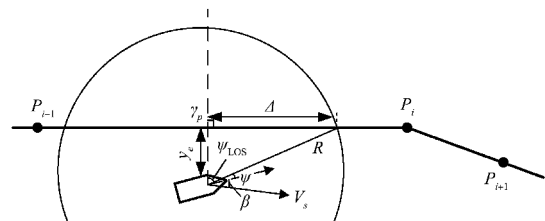


图 3 改进的 LOS 制导算法

Fig. 3 Improved LOS guidance algorithm

传统 LOS 制导的核心是通过动态更新航迹上的虚拟目标点,生成期望航向 ψ_{LOS} ,如图 3 所示。该目标点位于船舶在路径上正交投影点前方一个前视距离 Δ 的位置。控制系统的首要目标是消除横向跟踪误差 $y_e(t)$,即 $y_e(t) \rightarrow 0$ 。前视距离 Δ 决定了 LOS 制导的收敛性能:较小的 Δ 收敛快,但易因船舶惯性产生超调;较大的 Δ 虽较稳定但收敛慢。为兼顾跟踪效率与稳定性,本文引入可变前视距离 Δ ,使其根据横向误差 $y_e(t)$ 自适应调整:

$$\psi_{\text{LOS}} \triangleq \gamma_p - \tan^{-1} \left(\frac{y_e(t)}{\Delta} \right) \quad (4)$$

$$\Delta = \Delta_{\min} + (\Delta_{\max} - \Delta_{\min}) [1 - f(y_e(t))] \quad (5)$$

式中: γ_p 为当前船舶所在航段的方向; $f(x)$ 为一个平滑切换函数(如 Sigmoid 函数), Δ_{\min} 和 Δ_{\max} 分别为前视距离的最小和最大界限。该机制的核心思想是:当横向误差较大时, Δ 趋近于最小值 Δ_{\min} ,以实现快速、无控制饱和的修正;反之,当误差较小时, Δ 趋近于最大值 Δ_{\max} ,以保证平滑、无超调的稳定收敛。

在内河航行中,水流等外部扰动会使船舶的对地航迹向与实际航向间存在漂角 β 。此时,为保持在预定航线上,控制器必须主动将航向 ψ 维持在 $\gamma_p - \beta$ 附近,以产生一个横向的速度分量来抵消环境扰动。为实现对未知漂移角 β 的在线估计与补偿,本文在制导律中引入积分虚拟控制项 y_{int} ,构建自适应积分 LOS 制导律:

$$\psi_{\text{LOS}} \triangleq \gamma_p - \tan^{-1} \left(\frac{y_e(t)}{\Delta} + y_{\text{int}} \right) \quad (6)$$

其中,积分项 y_{int} 的更新律为:

$$\dot{y}_{\text{int}} = k_\beta \frac{\Delta y_e(t)}{\sqrt{[y_e(t) + \Delta y_{\text{int}}]^2 + \Delta^2}} \quad (7)$$

针对传统的积分环节容易引发的积分饱和问题,本文进一步引入自适应积分增益 k_β :

$$k_\beta = k_i e^{-\gamma y_e^2(t)} \quad (8)$$

当船舶远离路径($y_e(t)$ 较大)时,指数项 $e^{-\gamma y_e^2(t)}$ 趋近于 0,使得积分增益 k_β 被有效抑制,从而暂停积分作用,避免了积分饱和。当船舶收敛至参考航迹($y_e(t)$ 较小)时,指数项趋近于 1,增益

k_β 恢复正常值,积分项被完全激活, y_{int} 得以精确估计并消除由漂移角 β 引起的稳态误差。

2.2 基于挂高取矮的航行策略

在内河航行中,弯曲航段因其固有的几何与水文特征,对船舶航行安全构成了严峻挑战。此类航道往往狭窄且曲率多变,加之弯道环流的显著影响,会在表层水流形成强烈的“扫弯水”现象。这股水流会持续将船舶推向岸壁,极易引发扫岸或触坡等航行事故。同时,弯道环流作用还会导致凹岸一侧泥沙淤积、水深变浅,进一步增加了船舶发生搁浅的风险。这些复杂且非对称的水动力作用,不仅使航道内斜流、横流等水文情势变化不定,还会严重削弱船舶的舵效,使得大型船舶在此类航段的船位控制变得异常困难,对其操纵性提出了极高要求。为应对弯道复杂水流,经验丰富的驾驶员并不会墨守成规地沿航道中心线航行,而是采用“挂高取矮”的航行策略。

“挂高取矮”策略的核心原则,可量化为一个关键的不等式约束:船舶响应操舵所需的横向水域宽度 B_0 ,必须小于水流所能允许的横向漂移距离 D ,即: $B_0 \leq D$ 。其中,所需的横向水域宽度 B_0 可由船舶的纵距 Re 和漂移角 β 计算得出($B_0 = Re \sin \beta$)。纵距 Re 则与船速 V_s 、船舶时间常数 T 和舵执行时间 t_0 相关:

$$D = (u \sin \varphi + V_s \sin \beta) \frac{S}{u \cos \varphi + V_s \cos \beta} \quad (9)$$

依据我国内河航道通航标准,将单位航段 S 定义为航向每改变 3° 所航行的距离。遵循 $B_0 < D$ 这一约束,为“挂高取矮”的航行策略提供了坚实的量化依据,确保了船舶在整个转弯过程中始终保有充足的操纵空间。

为验证前文所述“挂高取矮”策略量化约束的有效性,并探究船速对安全转弯的影响,本节对特定船型在下行通过弯道时的操纵性能进行仿真研究。基于弯道航速与横向偏移的计算方法,设定了 3 组不同流速的工况进行模拟,揭示了可用航行水域宽度 B_0 、所需动态航迹带宽度 D 与船速之间的内在关系见图 4,船舶转弯操纵的分析结果清晰地展示了航速与上述两个关键参数的关联性。

随着航速的增加, B_0 呈逐渐减小的趋势, 而 D 则呈线性增加的趋势。

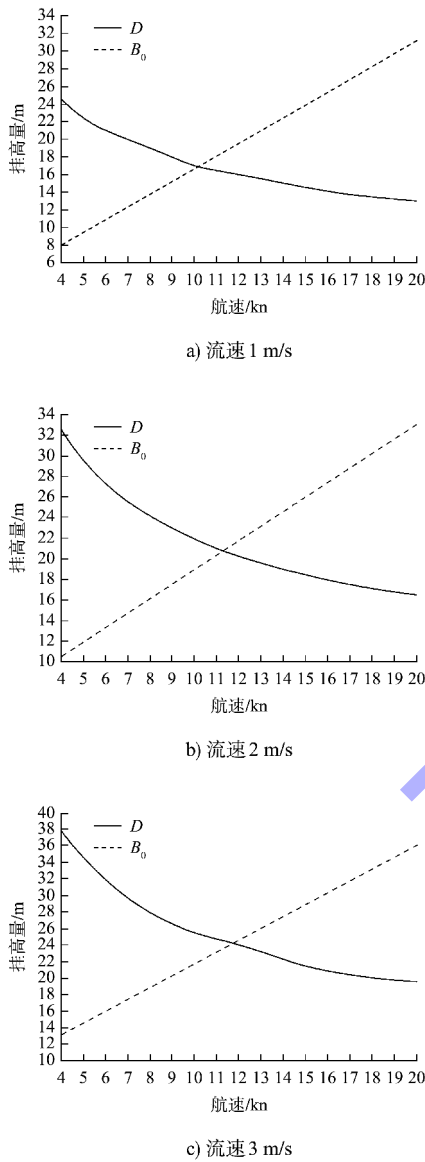


图 4 流致漂移与不同流速下舵转所需的航宽

Fig. 4 Drift caused by current and the required course width for rudder turning at different flow velocities

图 4 中两条曲线的交点, 定义了临界过弯航速。该速度代表了船舶能够安全通过该顺水弯道的最大航速。其物理意义在于: 在此临界航速下, 船舶操纵所需的动态航迹带宽度恰好等于航道所能提供的可用水域宽度, 这确保了船舶的动态包络线能够完全保持在航道边界之内, 是保证航行安全的关键阈值。因此, 在本文的控制策略中, 船舶会在入弯前主动调整主机工况, 将航速降至该安全阈值以下, 出弯后再恢复航速。在速度得

到有效控制的基础上, 为主动对抗弯道中的横向水流, 本文受“挂高取矮”航行实践的启发, 提出一种优化的航迹跟踪策略。该策略核心是引入一个基于航速和流速计算的横向偏移量(即挂高量), 并以此通过船舶车钟和舵机协同控制船舶在弯道的航线跟踪行为。

进入弯道前, 系统执行“挂高”操纵, 即主动将船舶引导至航道上游一侧。其关键创新在于, LOS 制导律在计算期望航向时, 并非基于船舶当前的实际位置, 而是基于一个未施加该横向偏移的虚拟参考点。改进后的内河弯曲航道航迹跟踪模型见图 5, 该设计会产生一个更大的制导转角, 从而引导船舶更果断地“切入”弯道。其最终效果是, 船舶能与弯道横流保持较小角度差, 以平衡横流的侧向推力, 在操纵上实现“取矮”的效果。该方法不仅能有效抵消水流的侧向力, 显著降低船舶在凹岸一侧的搁浅风险, 还使得整个转弯过程更平顺、稳定, 成功地将“良好船艺”转化为一种鲁棒的自动控制算法。

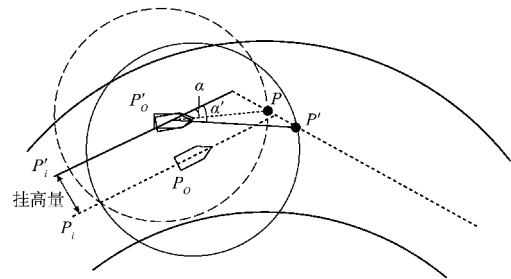


图 5 内河弯曲航道航迹跟踪模型

Fig. 5 Trajectory tracking model for inland curved waterways

2.3 基于 PID 的航向控制方法

在制导层输出船舶需要跟踪的期望航向 ψ_d 后, 控制层的任务是精确地操纵舵角 δ , 使船舶的实际航向 ψ 能够快速、准确地跟随该指令。在船舶航向控制领域, PID 控制器因其结构简单、性能稳定、可靠性高以及工程实现方便等优点, 获得了最为广泛的应用。因此, 本文选用 PID 控制器作为底层航向控制器。

航向控制器的设计目标是通过计算出合适的指令舵角 δ_c 来驱动舵机, 从而消除期望航向与实

际航向间的偏差。首先，定义航向跟踪误差 $e_{\psi(t)}$ 为：

$$e_{\psi(t)} = \psi_d(t) - \psi(t) \quad (10)$$

标准的 PID 控制器将指令舵角 δ_c 表示为航向误差的比例、积分和微分 3 个部分的线性组合，其连续形式的控制律如下：

$$\delta_c(t) = K_p e_{\psi(t)} + K_i \int_0^{t_0} e_{\psi(\tau)} d\tau + K_d \frac{d(e_{\psi(t)})}{dt} \quad (11)$$

式中： K_p 为比例增益，比例项 $K_p e_{\psi(t)}$ 与当前的航向误差成正比，是控制作用的主体，负责快速响应并减小误差； K_i 为积分增益，积分项 $K_i \int_0^{t_0} e_{\psi(\tau)} d\tau$ 累积历史误差，其主要作用是消除系统在受到持续干扰（如恒定水流）后可能产生的稳态误差，保证跟踪的精确性； K_d 为微分增益，微分项 $K_d(d(e_{\psi(t)})/dt)$ 与误差的变化率成正比，能够预测误差的变化趋势，从而起到阻尼作用，可有效抑制系统的超调，增强系统的动态稳定性。

3 仿真试验与结果分析

为全面验证船舶运动控制方法的有效性，本文通过一系列仿真试验进行系统性评估。试验选取位于长江中游的观音洲水道作为研究水域，见图 6，该水道以其航道狭窄曲折、水文航行环境复杂而著称，能够充分考验控制算法在真实场景下的性能。为此，本文设计了由简到难的两种仿真工况：1) 在静水环境下检验控制方法的基础性能与优势；2) 通过引入主流与横流等环境扰动，验证控制方法在强扰动下的鲁棒性，以及融合“良好船艺”的航行策略在保障航行安全方面的实际效果。

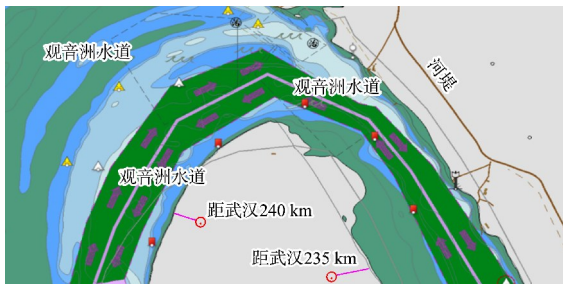


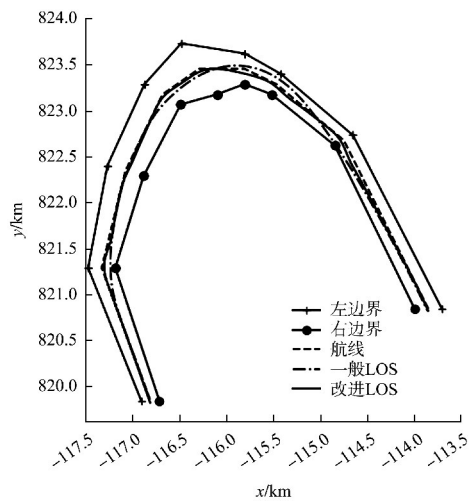
图 6 研究水域
Fig. 6 Research waters

3.1 控制方法有效性验证分析

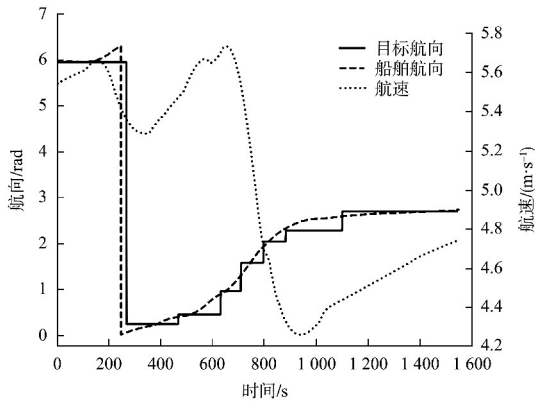
为验证控制方法的有效性，首先在无风无流静水环境中，将其与一般 LOS 制导方法进行对比。仿真结果清晰地揭示了两种策略在航行效果上的本质区别。

静水环境下的航迹控制仿真结果见图 7，图 7a) 中，两种方法均以航道中心线为跟踪目标，但控制效果存在显著差异。一般 LOS 方法（点画线）在进入和通过弯道时，表现出明显的超调现象，其航迹向弯道外侧偏移较大，未能精确地保持在中心线上。相比之下，本文的改进 LOS 方法（实线）能够更有效地抑制转弯时的动态偏差，与航道中心线的贴合度更高，表现出优越的跟踪精度。

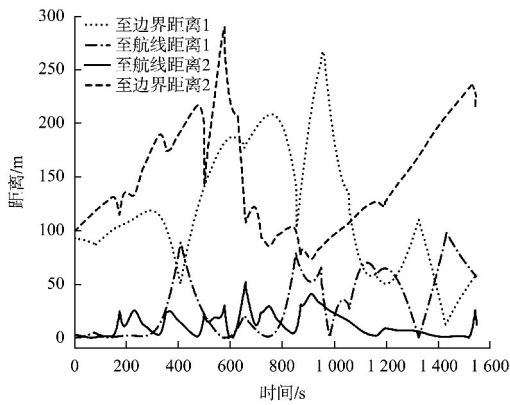
两种方法在航行安全性上的表现，在图 7c) 的量化对比中得到进一步验证。由于一般 LOS 方法在弯道处产生超调（即其至航线距离 1，出现峰值），这直接导致其至边界距离 1 急剧减小，在某些时刻逼近危险值，安全裕度严重不足。而改进 LOS 方法的至航线距离 2 始终保持在极低的水平，因此其至边界距离 2 在弯道处也始终维持在大于前者的安全范围内。相比于一般方法，平均绝对航向误差较低 62%，与航线偏差的均方根误差降低 45.6%。仿真结果清晰地表明，即便在无环境扰动的理想条件下，本文提出的改进 LOS 制导方法凭借其更优的动态响应特性，实现了比一般 LOS 方法更高的航迹跟踪精度。



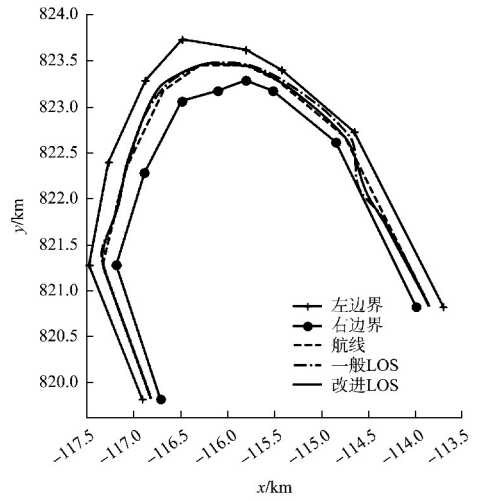
a) 过弯控制航迹



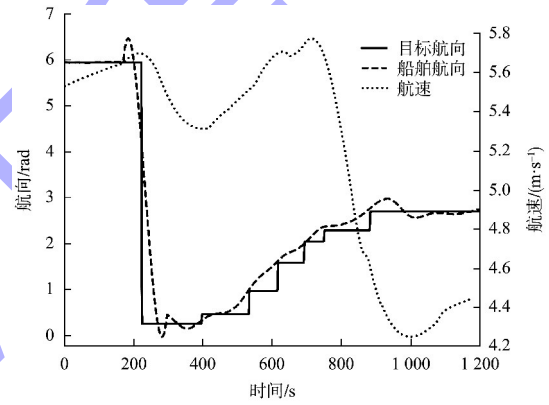
b) 航向和航速变化



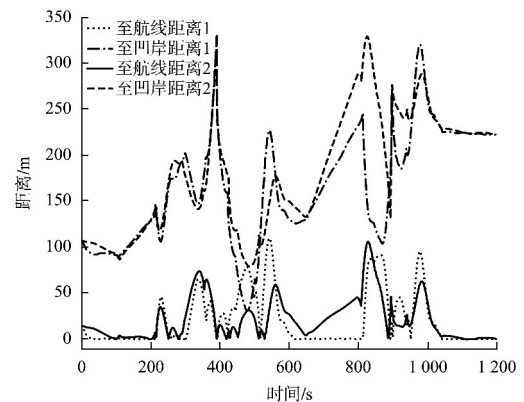
c) 距离变化



a) 过弯控制航迹



b) 航向和航速变化



c) 距离变化

图 7 静水环境下的航迹控制仿真结果

Fig. 7 Simulation results of trajectory control in calm water environments

3.2 横流扰动下的控制方法验证分析

为验证所提方法在真实航行条件下的鲁棒性, 在仿真中引入了恒定的主流(2m/s)与横流(2 m/s)。在此严苛工况下, 将提出的融合“挂高取矮”良好船艺的改进 LOS 方法与一般 LOS 方法进行对比。

横流干扰下的航迹控制仿真结果见图 8, 图 8a)中, 改进 LOS 方法(实线)成功执行了“挂高取矮”这一关键的航行实践。船舶在入弯前提早占据主流上侧, 为抵抗横流预留了充足的安全裕度, 随后在水流作用下平滑地通过弯道。与之相反, 一般 LOS 方法(点画线)因缺乏前瞻性规划, 被横流严重推向凹岸。

图 8 横流干扰下的航迹控制仿真结果

Fig. 8 Simulation results of trajectory control under cross-current disturbances

值得注意的是, 尽管存在强大的横流, 改进 LOS 方法下的船舶航迹在宏观上并未发生灾难性的偏离, 这也印证了控制系统的有效性。如图 8b) 所示: 在强横流作用下, 船舶的航向响应在弯道处相较于静水工况, 产生了一定程度的超调与调整时间。这正是船舶在抵抗强大外部扰动时所表现出的正常动态响应。然而, 由于改进的 LOS 制导方法内置了自适应积分机制, 能够持续对由横流引起的漂移进行估计与补偿, 从而有效抑制了航向偏差的进一步扩大, 并引导船舶最终稳定在期望航向上。因此, 航迹的相对稳定是制导律的抗扰动设计与底层 PID 控制共同作用的结果。

两种方法的安全性差距在图 8c) 中得到了最终验证。一般 LOS 方法的航迹至凹岸距离 1 在弯道处骤降至危险水平, 与凹岸的最小距离仅为 48 m, 而本文方法得益于“挂高取矮”策略, 甚至凹岸距离 2 在弯道处可维持在一个高于前者的安全阈值之上, 可保持 64.5 m 的最小距离, 安全裕度提升了 34.4%。通过将“挂高取矮”的良好船艺融入制导律, 即使在环境干扰条件下, 依然能够确保船舶安全、可控地通过弯道, 展现了极高的有效性和鲁棒性。

4 结论

1) 提出一种融合“挂高取矮”航行实践的船舶车舵协同控制方法。该方法通过改进 LOS 制导律, 将依赖良好船艺的航行策略予以算法化, 有效弥合了航行实践与自动控制理论间的鸿沟。

2) 该方法在提升航行安全方面具有良好的有效性。仿真结果定量表明, 在强横流干扰下, 该方法可使船舶至凹岸的最小安全距离提升 34.4%, 显著增强了船舶规避搁浅、触碰岸壁风险的能力。

3) “前瞻性制导+反应式控制”分层架构具有可行性。研究表明, 上层自适应的制导方法能够有效弥补下层常规控制器的性能局限, 为设计简洁高效的船舶运动控制系统提供有益参考。

4) 未来研究可集中于提升控制器对时变工况的自适应能力、完善环境模型保真度以及通过模

型试验或实船试验对算法进行验证, 以推动研究成果走向工程化应用。

参考文献:

- [1] 黄立文, 纪孟阳, 刘进来, 等. 长江弯曲航道船舶航迹控制方法研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2024, 48(5): 991-998.
HUANG L W, JI M Y, LIU J L, et al. Study on ship track control method in the Yangtze River curved channel[J]. Journal of Wuhan University of Technology (transportation science & engineering), 2024, 48 (5): 991-998.
- [2] XU H T, SOARES C G. Review of path-following control systems for maritime autonomous surface ships [J]. Journal of marine science and application, 2023, 22(2): 153-171.
- [3] TANGIRALA A K. Principles of system identification[M]. Boca Raton: CRC Press, 2015.
- [4] BORHAUG E, PAVLOV A, PETERSEN K Y. Integral LOS control for path following of underactuated marine surface vessels in the presence of constant ocean currents[C]//2008 47th IEEE Conference on Decision and Control. New York: IEEE Press, 2009: 4984-4991.
- [5] 于特, 刘佳鹏, 吴超, 等. 基于非线性干扰观测器的无人船与自主水下航行器协同运动控制策略[J]. 上海交通大学学报, 2023, 57(S1): 114-123.
YU T, LIU J P, WU C, et al. USV and AUV cooperative control strategy based on nonlinear disturbance observer[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2023, 57(S1): 114-123.
- [6] 秦梓荷, 林壮, 李平, 等. 基于 LOS 导航的欠驱动船舶滑模控制[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(10): 3605-3611.
QIN Z H, LIN Z, LI P, et al. Sliding-mode control of underactuated ship based on LOS guidance[J]. Journal of Central South University (science and technology), 2016, 47(10): 3605-3611.
- [7] LIU J L, HUANG L W, YU D Q, et al. The control method for ship tracking when navigating through narrow and curved sections [J]. Applied ocean research, 2024, 145: 103943.