

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

林昀和¹, 韩冰^{1,2}, 彭周华², 段载誉¹

(1. 上海船舶运输科学研究所有限公司 船舶运输控制系统国家工程研究中心, 上海 200135;
2. 大连海事大学 船舶电气工程学院, 辽宁 大连 116026)

摘要: 面向载货运输船舶自主航行过程中或对时间与位置控制较为严格的要求, 需开展高精度轨迹跟踪控制研究。针对现有研究对货运船舶关注较少, 对船舶执行器特性考虑不够充分, 将力与力矩视为可控输入直接进行控制律设计, 工程可实现性相对较弱的问题, 提出一种虚拟船领导法与积分视线法相结合的控制方法。该方法基于桨转速估计算法使实船及时跟随虚拟船的速度, 再通过速度反馈校正以补偿干扰。为提高轨迹跟踪精度, 利用实船与虚拟船的相对位置关系, 通过改进的积分视线法获得期望航向, 将问题简化为航向保持, 最终实现船舶轨迹跟踪。仿真试验表明: 被控船舶在环境干扰中完成轨迹跟踪, 稳态误差小于 ± 0.5 m, 误差收敛时间小于 50 s, 舵角抖动降低 86%, 螺旋桨转速抖动降低 71%。所提出的控制方法原理简明, 且具有较好的性能, 可为商业运输自主船舶的轨迹跟踪工程应用提供方法参考。

关键词: 欠驱动水面船舶; 轨迹跟踪; 航向控制; 视线法; 虚拟船领导法

中图分类号: U664.82 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1000-4653.2025.04.007

Trajectory tracking control of underactuated vessel by combining virtual ship leading and Line-of-Sight methods

LIN Yunhe¹, HAN Bing^{1,2}, PENG Zhouhua², DUAN Zaiyu¹

(1. National Engineering Research Center of Ship Transportation Control System, Shanghai Ship and Shipping Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200135, China; 2. College of Marine Electrical Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: To support the autonomous navigation of cargo-carrying vessels with specific time and position requirements, research on high-precision trajectory tracking control is necessary. In response to the limited existing studies on cargo vessels and the insufficient consideration of actuator characteristics—where thrust and torque are often treated as directly controllable inputs, leading to limited practical feasibility—a control method combining a virtual vessel leader and an Integral Line-of-Sight (ILOS) approach is proposed. This method uses a propeller speed prediction algorithm to synchronize the real vessel with the virtual vessel and employs speed feedback correction to compensate for disturbances. To improve tracking accuracy, the relative positions are utilized to determine the desired heading through the improved ILOS method, thereby reducing the problem to one of course keeping. Ultimately, vessel trajectory tracking is achieved. Simulation results show that the controlled vessel accomplishes trajectory tracking under disturbance, with a steady-state error of less than ± 0.5 m, an error convergence time of less than 50 s, an 86% reduction in rudder jitter, and 71% reduction in propeller speed jitter. The proposed control method is straight forward, demonstrating high performance, can serve as a valuable reference

收稿日期: 2024-09-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC2807004); 上海市科技计划项目(22XD1431000)资助

第一作者: 林昀和(2000—), 男, 硕士生, 研究方向为船舶运动控制。E-mail: lin.yunhe@coscoshipping.com

通信作者: 韩冰(1981—), 男, 博士, 研究员, 研究方向为船舶运动控制。E-mail: han.bing@coscoshipping.com

引用格式: 林昀和, 韩冰, 彭周华, 等. 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.

LIN Y H, HAN B, PENG Z H, et al. Trajectory tracking control of underactuated vessel by combining virtual ship leading and Line-of-Sight methods[J]. Navigation of China, 2025, 48(4): 59-69. (in Chinese)

for engineering applications.

Key words: underactuated surface vessels; trajectory tracking; course control; line-of-sight; virtual ship leading

智能船舶的研发与应用是“航行更安全、水域更清洁”的必然要求,已成为行业焦点与发展趋势,各国都正在大力发展智能船舶^[1]。船舶自主航行不仅能通过减少人为失误减少事故,而且能降低对船员人数的需求,从而帮助解决航海人才短缺的问题^[2]。

自主航行的一项基础技术是航迹跟踪,即船舶从初始位置按计划航线抵达终点,又分为轨迹跟踪和路径跟踪。其中:轨迹跟踪的要求为船舶应具有指定速度、在特定时刻到达航迹上的特定位置,实现难度通常大于路径跟踪;路径跟踪是不考虑时间的几何位置跟踪,要求仅为船舶与计划航线之间的偏差收敛,无需对船舶速度进行闭环控制。船舶在交通管制区域航行、浅水域乘潮或进出港口接送引水员等任务场景,对时间要求较为严格,需采取轨迹跟踪控制^[3]。

目前,海上航行的大多数船舶仅装备定向主推进器和舵装置,分别负责推进和操纵艏向。部分船舶虽然有侧推器,但仅在低速靠离泊时工作,在航程中不起作用。根据欠驱动系统的定义,此类船舶即为欠驱动船舶。在欠驱动船舶或无人艇(Unmanned Surface Vehicle, USV)实现轨迹跟踪,并追求更高的跟踪精度、更快的收敛速度和更强的鲁棒性,是轨迹跟踪控制的主要任务与目标。研究者们对此开展了一系列工作。

王巍凯等^[4]结合双曲正切函数与滑模控制,基于径向基神经网络与最小参数学习法对系统内外的不确定项进行逼近,在固定时间内实现 USV 轨迹跟踪误差的快速收敛。袁亮亮等^[5]将一种基于屏障函数的自适应滑模容错控制方法应用于 USV,避免初值设置过小导致无法估计干扰的问题,屏障函数保证滑动变量收敛到与干扰上界无关的界内,减少系统的抖振。张磊等^[6]使用滑模控制与自适应控制算法设计 USV 无模型参数的控制策略,并通过设计动态事件触发机制,避免控制器信号频繁更新,证明系统一致最终有界且不存在芝诺现象。杜朋柱等^[7]基于欠驱动船舶非线性模型进行模型预测控制(Model Predictive Control, MPC),设计目标函数,考虑控制约束,采用序列二次规划算法求解,通过扩展卡尔曼滤波减少计算量。曹兴飞等^[8]通过龙格-库塔法离散化 USV 的运动模型,基于 MPC 转化为最优化问题,考虑到控制量、控制增量和输出约束。雷超凡等^[9]针对 USV 参考航速时变的场景进

行 MPC,在 Serret-Frenet 坐标系寻找期望点,使用参考速度在控制区间内构造参考量序列,设计综合目标函数,求解中考虑控制约束。分析上述工作可知:研究者多以小型 USV 作为研究对象,而针对中大型载货运输船舶的研究相对较少;研究中普遍将力与力矩视为可控输入,直接进行控制律设计,然而实际中,二者需由推进器与舵机伺服系统根据车令与舵令产生,存在非线性环节;部分方法理论性强,控制精度较高,但算法复杂,控制参数物理量不够明确,因此工程可实现性相对较弱。

本文针对上述问题,依据工程实际对被控船舶及其伺服系统建模,并选用虚拟船领导法和积分视线(Integral Line-of-Sight, ILOS)法两种原理简明且具有强实用性的方法。

1) 由计划航线上的虚拟船领导,控制船舶有效跟踪虚拟船的运动,从而实现对计划航线的有效跟踪控制策略,适用于轨迹跟踪与自动靠泊的抵泊阶段^[10-11]。部分研究^[9,12]未使用该术语归类其控制策略,但其本质亦为虚拟船领导法。

2) 积分视线法是基于航迹偏差积分计算参考航向的制导方法,后续再执行航向保持以完成路径跟踪。其中,积分的目的是补偿持续横向干扰。ILOS 法常见,然而其应用却常被局限于路径跟踪任务中。本文对经典 ILOS 法进行改进适配,使其可用于轨迹跟踪任务。

本文将虚拟船领导法与 ILOS 法有机结合,各取所长,提出一种简明实用的轨迹跟踪控制方法。结合虚拟船速度与实际场景,估计命令转速,并利用纵向位置误差进行转速校正,以实现及时且低超量的航速跟踪控制;为使航迹偏差快速且平稳地收敛,利用船舶与虚拟船的位置关系,采用改进的 ILOS 法完成制导,将任务简化为航向保持。在控制中,力求降低指令的调整频率、抑制舵桨抖振。通过受到外部环境干扰的曲线轨迹跟踪仿真试验,对所提出方法的有效性进行对比检验。

1 数学模型

本文以中远海运集团 700 TEU 集装箱船“中远海运绿水 01”轮为对象开展研究。该船舶为纯电驱动,相较于普通船舶,电动船的动力系统组成与结构更简单、响应速度更快。且该船为江海直达船,航行水域涵盖内河航道与近海航道。因此,适合基于该船开展自主航行控制的研究。

对该船舶使用三自由度运动模型进行描述,采用较为贴近工程实际、工程应用合理的动力学模型,充分考虑实船执行器的能力限制,使研究成果更具合理性与可行性。通过外部干扰模型,模拟航行中的环境干扰,以验证控制的鲁棒性。

1.1 船舶运动学模型

在船舶自主航行控制中,通常仅关心艏摇角以及位置坐标的变化,即船舶在水平面内的运动。在地球坐标系中,定义位姿向量 $\boldsymbol{\eta} = [x \ y \ \Psi]^T$, Ψ 为艏向角;在附体坐标系中,定义速度向量 $\boldsymbol{\nu} = [u \ v \ r]^T$, u, v 为纵、横向速度, r 为转艏角速度。则三自由度的船舶运动学方程为

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \begin{bmatrix} \cos(\Psi) & -\sin(\Psi) & 0 \\ \sin(\Psi) & \cos(\Psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \boldsymbol{\nu} \quad (1)$$

该对象船舶只配备主推进器和舵机,分别负责驱动前进和转艏运动,而没有侧推器来调节横移运动。由于可控输入量(2个)少于运动自由度(3个),因此该船属欠驱动船舶。

1.2 船舶动力学模型

本节讨论舵角、螺旋桨转速对船舶角速度、航速的影响。使用 Nomoto 模型反映操舵对 r 的作用。

$$\begin{aligned} K &= \xi K_0 \\ T &= T_0 / \xi \\ \frac{r(s)}{\delta(s)} &= \frac{K}{Ts + 1} \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)中: δ 为舵角; K 为旋回性指数; T 为追随性指数; K_0 和 T_0 分别为在 4 m/s 航速下使用 Clarke 流体动力导数估计公式等计算的旋回性指数和追随性指数,均为常数^[13];定义 $\xi = u_r/4$, u_r 为纵向对水速度,以获取不同速度下的 K, T 参数。

船舶的横漂与转艏强耦合,横向对水速度 v_r 与 r 的关系为^[13]

$$\begin{aligned} (m' - Y'_v) \dot{v}_r + L(m'x'_c - Y'_r) \dot{r} = \\ \frac{u_r Y'_v}{L} v_r + u_r (Y'_r - m') r + \frac{u_r^2 Y'_\delta}{L} \delta \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)中: m' 为无量纲船舶质量; L 为船两柱间长; x'_c 为无量纲重心到中心距离; $Y'_v, Y'_r, Y'_v, Y'_r, Y'_\delta$ 均为无量纲流体动力导数,亦使用 Clarke 公式计算。

桨转速与对水速度数据见表 1。该组数据在设计工况和额定吃水条件下,通过水池试验测得。拟合表 1 数据,获得 u_r 与螺旋桨转速 n 的对应关系见式(4),简记为 $u_r = f(n), n = g(u_r)$ 。

$$\begin{cases} u_r = -3.520 \times 10^{-5} n^2 + 0.0451 n - 0.455 \text{ 1} \\ n = 0.758 u_r^2 + 20.607 u_r + 13.432 \end{cases} \quad (4)$$

表 1 从水池试验中获得的桨转速与对水速度数据

Tab.1 Data of propeller speed and velocity relative to the water obtained from experiments

u_r/kn	$n/(\text{r}/\text{min})$	u_r/kn	$n/(\text{r}/\text{min})$
7.0	97.35	9.5	132.24
7.5	104.25	10.0	139.40
8.0	111.17	10.5	146.71
8.5	118.14	11.0	154.25
9.0	125.16	11.5	162.04

注:1 kn \approx 0.514 4 m/s

在实际航行过程中,对象船舶的转速能基本维持不变,或变化幅度小而缓慢,故可用该模型完成螺旋桨转速 n 与纵向对水速度 u_r 的对应转换。

1.3 执行伺服系统模型

对象船舶的执行伺服系统由电力传动推进器系统与舵机伺服系统组成。在实际工程中,执行伺服系统的动态响应过程对控制性能有一定的影响,必须纳入考量^[14]。推进器模型框图见图 1,其通过幅值限制、速率限制和惯性(时延)特性,模仿从命令转速 n_c 到实际转速 n 过程中执行机构的效用^[10]。在线性区域的模型仅有惯性特性见式(5)。

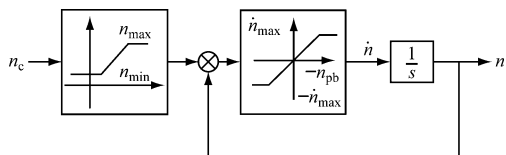


图 1 推进器模型框图

Fig. 1 Block diagram of the thruster model

$$\frac{n(s)}{n_c(s)} = \frac{1}{(\dot{n}_{\max}/n_{\text{pb}})s + 1} \quad (5)$$

式(5)中: n_{pb} 为比例带^[15]。

舵机模型的结构与推进器模型相同,只是将 n 相关变量替换为舵角 δ 相关^[14-15]。执行伺服系统模型参数取值见表 2,表 2 中:舵角 δ 的正值表示右舵;负值表示左舵。

表 2 执行伺服系统模型参数取值

Tab.2 Values of the actuator servo system

model parameters			
参数	数值	参数	数值
$n_{\max}/(\text{r}/\text{min})$	164	δ_{\max}/rad	0.610 90
$n_{\min}/(\text{r}/\text{min})$	96	δ_{\min}/rad	-0.610 90
$\dot{n}_{\max}/(\text{r}/\text{min} \cdot \text{s})$	30	$\dot{\delta}_{\max}/(\text{rad}/\text{s})$	0.061 09

1.4 外部干扰模型

本节介绍仿真中对船舶外部环境干扰的模拟,包括风与流的生成方式以及两者如何干扰船舶的运

动状态。

风速 U_T 由平均风 U_m 与阵风 U_g 叠加, U_m 与风向 Ψ_T 由带限幅一阶 Gauss-Markov 过程生成, U_g 使用 NORSOK 谱生成^[16]。本文从实用性出发, 采用蒲福风力等级描述风强度, 风级与风速范围通过文献^[17]查表转换。

作用于船体的风压力与力矩为

$$\begin{cases} \tau_{WX} = \rho_a A_f U_R^2 C_{WX}(\alpha_R)/2 \\ \tau_{WY} = \rho_a A_s U_R^2 C_{WY}(\alpha_R)/2 \\ \tau_{WN} = \rho_a A_s L U_R^2 C_{WN}(\alpha_R)/2 \\ \tau_W = [\tau_{WX} \quad \tau_{WY} \quad \tau_{WN}]^T \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中: $\rho_a = 1.205 \text{ kg/m}^3$ 为空气密度; A_f 和 A_s 分别为船舶水上正投影和侧投影面积; U_R 为相对风速; α_R 为风舷角; C_{WX} 、 C_{WY} 、 C_{WN} 为风压系数, 使用汤忠谷回归公式等获得^[18]。

风干扰反映在 ν 的摄动量 $\dot{\nu}_w$ 上, 有

$$\begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & m_{23} \\ 0 & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \dot{\nu}_w = \tau_w + \begin{bmatrix} m_{23}r^2 + m_{22}vr \\ -m_{11}ur \\ -m_{23}ur \end{bmatrix} \quad (7)$$

式(7)中: $m_{11} = m + m_x$ 、 $m_{22} = m + m_y$ 、 $m_{33} = I_{zz} + J_{zz}$ 、 $m_{23} = m_{32} \approx mx_C$ 、 $J_{zz} = mL^2/16$ 为转动惯量; 附加质量 m_x 、 m_y 与附加转动惯量 J_{zz} 使用周昭明回归公式获得^[18]。

本文使用具有慢时变特性的流干扰模型。流速 v_c 由带限幅一阶 Gauss-Markov 过程生成^[19], 流向 Ψ_C 为

$$\Psi_C(t) = (\Psi_b + 0.5\sin(\pi/90 \cdot t) + 0.1w(t))\pi/180 \quad (8)$$

式(8)中: Ψ_b 为给定基准流向; w 为标准高斯噪声序列; t 为时间。

v_c 在附体坐标系上的分量为

$$\begin{cases} u_c = v_c \cos(\Psi_C - \Psi) \\ v_c = v_c \sin(\Psi_C - \Psi) \end{cases} \quad (9)$$

流干扰通过速度叠加而实现, 并且不影响 r 。

$$\begin{cases} u = u_r + u_c \\ v = v_r + v_c \end{cases} \quad (10)$$

由于航行中二阶波浪对船舶漂移的作用通常相对较弱, 因此省略了波浪模型。

2 轨迹跟踪控制方法

ILOS 法和虚拟船领导法都是航迹跟踪控制的有效方法。ILOS 法简明、易实现, 然而其应用多被局限于路径跟踪问题; 虚拟船领导法专为轨迹跟踪

问题而设计, 但普遍与反步法与滑模控制结合使用, 其控制律设计复杂、算法参数繁多。

本文结合二者的优势, 提出一种轨迹跟踪控制方法。为增强论文的可读性, 更容易地掌握本文的核心成果, 一组与控制方法密切相关的关键变量被选择出来, 关键变量和参数的解释见表3。

表3 关键变量和参数的解释

Tab.3 Explanation of key variables and parameters

变量和参数	解释说明
Ψ_i/rad	虚拟船的船向
Ψ_k/rad	航迹方位角
Ψ_d/rad	由 ILOS 法给出的期望船向
$u_i/(\text{m/s})$	虚拟船的纵向速度
$\hat{u}_i/(\text{m/s})$	实船纵向对水速度的估计值
$\hat{n}/(\text{r/min})$	螺旋桨命令转速的估计值
$n_{\text{corr}}/(\text{r/min})$	螺旋桨命令转速的校正值
$n_c/(\text{r/min})$	螺旋桨命令转速
Δ/m	可变的前视向量的长度
ζ	控制 Δ 变化程度的参数
Y_{dZ}/rad	死区环节的阈值参数
I_{max}/m	在 ILOS 法中积分项的上限
e_y^*/m	经过积分项校正后的横向误差
λ	轨迹上取点的步长
$\delta_c/(\text{°})$	命令舵角
J	反映控制性能的代价函数

结合工程应用的需要, 在控制器中包含利用死区与低通滤波抑制高频动作命令的环节, 以降低指令的调整频率, 减少有害的高频抖振。

2.1 生成虚拟船

为实现轨迹跟踪控制, 引入虚拟船的概念。虚拟船是假想中严格遵循参考轨迹运动的船舶, 其状态量仅从参考轨迹中获得。在现实场景下, 船舶参考轨迹的规划通常与当前时刻的船舶位置有关, 或者是先由人工操控船舶至参考轨迹起点附近、再要求船舶遵循参考轨迹进行自主航行。因此, 在研究中引入虚拟船并基于此设计控制方法是合理的^[10]。

生成虚拟船的表达式为

$$\begin{cases} x_i(t) = x_d(t) \\ y_i(t) = y_d(t) \\ u_i(t) = \sqrt{\dot{x}_i(t)^2 + \dot{y}_i(t)^2} \\ \Psi_i(t) = \tan^{-1}\left(\frac{\dot{y}_i(t)}{\dot{x}_i(t)}\right) \\ v_i(t) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

式(11)中: x_i, y_i 为虚拟船的位置坐标; x_d, y_d 组成的序列为参考轨迹; u_i 和 v_i 分别为虚拟船的纵向速度和横向速度; Ψ_i 为虚拟船的船向。

第 1.1 节 ~ 第 1.3 节所描述的作为被控对象的船舶则被称为实船,该命名与虚拟船相对应。与实船相比,虚拟船具备以下特点: v_i 恒为 0;运动模式只由参考轨迹决定;不考虑执行器非线性特性。

引入虚拟船后,实船只需进行虚拟船目标的跟踪,使两船的位置误差收敛,即可完成轨迹跟踪^[11]。位置误差在地球坐标系和实船附体坐标系下,其变换关系为

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \Psi & \sin \Psi \\ -\sin \Psi & \cos \Psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \end{cases} \quad (12)$$

式(12)中: E_x 和 E_y 为地球坐标系下南北和东西方向的误差; e_x 和 e_y 为实船附体坐标系下纵向和横向误差。

2.2 跟随虚拟船的航速控制

1) 本文提出的航速控制方法,首先利用先验信息计算得到估计命令转速 \hat{n} ,其使实船具有与虚拟船同步前进的速度。

2) 将实船与虚拟船的纵向位置误差 e_x 反馈输入到比例积分微分 (Proportional-Integral-Derivative, PID) 算法,输出校正量 n_{corr} 。

3) 经校正的命令转速 n_c 作用于实船,从而使 e_x 收敛,同时实现对外部未知扰动的补偿。航速控制系统框图见图 2。图 2 中,一阶低通滤波器 (Low Pass Filter, LPF) 模块将于第 2.4 节讨论。

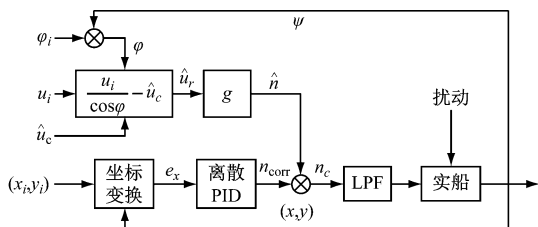


图2 航速控制系统框图

Fig. 2 Block diagram of speed control system

由于航道水流短期内变化不显著,因此可知历史同期测量数据为 \hat{v}_c 和 $\hat{\Psi}_c$ 。定义 \hat{u}_c 为 \hat{v}_c 在实船附体坐标系纵向的分量,即

$$\hat{u}_c = \hat{v}_c \cos(\hat{\Psi}_c - \Psi) \quad (13)$$

实船与虚拟船的速度与位置关系见图 3。图 3 中: u_c 为实际流速分量,而非 \hat{u}_c 。当实船与虚拟船

同步前进时,有

$$\begin{cases} \varphi = \Psi - \Psi_i \\ u_i = u \cos \varphi \\ u = u_r + u_c \end{cases} \quad (14)$$

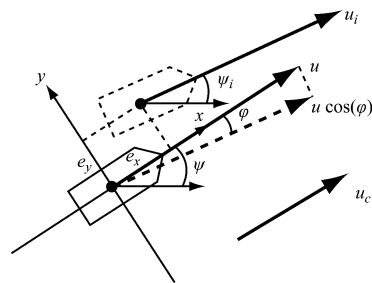


图3 实船与虚拟船的速度与位置关系示意

Fig. 3 Schematic diagram of the velocity and position relationship between realistic vessel and virtual vessel

由此,可求出实船对水速度为

$$u_r = \frac{u_i}{\cos \varphi} - u_c \quad (15)$$

u_c 在航海实践中往往难以准确测量,使用已知的近似值 \hat{u}_c 将其取代可得 u_r 的估计值为

$$\hat{u}_r = \frac{u_i}{\cos \varphi} - \hat{u}_c \quad (16)$$

由式(4)可求出其对应的转速,即为估计桨转速,有

$$\hat{n} = g(\hat{u}_r) \quad (17)$$

由此可得,当实船螺旋桨转速为 \hat{n} 时, $u_i \approx u \cos \varphi$, 表现为实船大致与虚拟船同步前进。

图 3 中实船与虚拟船在纵向上存在的位置误差 e_x , 主要由以下因素产生:在零时刻就存在的误差;推进系统特性导致实际转速 n 与 n_c 不完全相等,尤其是当 n_c 变化时更是如此;实际水流 v_c, Ψ_c 同历史数据 $\hat{v}_c, \hat{\Psi}_c$ 存在一定的差异,当实际流速分量 u_c 与 \hat{u}_c 相差过大时, \hat{n} 将失准;外部环境风浪干扰持续扰动实船的 u_r 。

为使 e_x 收敛,需将 e_x 通过反馈通道传入控制器,计算校正量 n_{corr} 为

$$n_{\text{corr}} = S_p e_x + S_i \int_0^t e_x dt + S_d \dot{e}_x \quad (18)$$

式(18)中, S_p, S_i, S_d 分别为航速控制的比例增益、积分增益、微分增益参数。

综上所述,本文通过估计算法得到控制量的基准值 \hat{n} ,叠加校正量 n_{corr} 进行微调即得 n_c ,因此可实现较为迅速的控制响应与极小的超调量,并对外部扰动有一定的补偿能力。

2.3 跟随虚拟船的航向控制

依据船舶航迹保持的分离控制方案^[13],若能获得使位置误差 e_y 收敛的期望航向 Ψ_d ,就能将航迹保持简化为航向保持。在求取 Ψ_d 时,本文选用ILOS法,其对视线法进行改进,可使实船克服外力

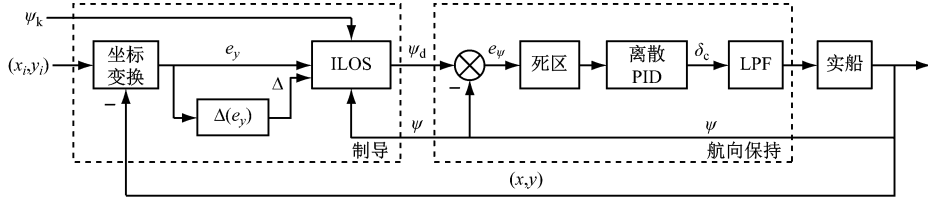


图4 航向控制系统框图

Fig. 4 Block diagram of course control system

在合成 Ψ_d 的过程中,对前视向量长度 Δ 的设定是尤为重要的^[21]。 Δ 一般在船长 L 的1~6倍范围内取值。 Δ 较大时,实船转向平稳,但 e_y 收敛速度慢; Δ 较小时,实船转向激进, e_y 收敛速度快但容易发生震荡;适中的 Δ 有助于 e_y 较快收敛的同时减少震荡,使实船更加平稳地追踪参考轨迹。本文将 Δ 设计为

$$\Delta(e_y) = L + \zeta \cdot \iota(e_y), \quad \zeta \in [0, 5L] \quad (19)$$

式(19)中: ζ 为控制器参数; $\iota(e_y)$ 的定义为

$$\iota(e_y) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(1 + \cos\left(\frac{e_y}{10\pi}\right) \right), & |e_y| \leq 10 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (20)$$

设计 Δ 的依据为当实船远离参考轨迹时, $|e_y|$ 增大,此时为使其尽快收敛,应当减小 Δ ,使实船加快转向;相反,应当增大 Δ ,使实船平稳转向。

基于BØRHAUG等^[22]提出的算法,计算ILOS法中的积分项 I_e 。该算法使参数的选取更有依据,而且被证明是稳定的^[20]。其表达式为

$$\dot{I}_e = \frac{\Delta \cdot e_y}{\sqrt{\Delta^2 + (e_y + \sigma \cdot I_e)^2}} \quad (21)$$

式(21)中: $\sigma > 0$ 为积分项增益参数。在此基础上,为防止积分项过大并导致过冲,给出 I_e 计算方法为

$$I_e = \begin{cases} \text{sign}(I_e) I_{\max}, & |I_e| > I_{\max} \\ \int_0^t \dot{I}_e dt, & |e_y| \leq \varepsilon_i \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (22)$$

式(22)中: $I_{\max} > 0$ 为积分项限幅参数; $\varepsilon_i > 0$ 为积分区域分界参数,取 $\varepsilon_i = 10$,当实船距离轨迹较远时($|e_y| > \varepsilon_i$),积分项极易饱和,为防止过冲,直接将其清零,实质是从ILOS法切换到LOS法。

结合实船与虚拟船的位置关系,本文将经典的

横向干扰^[20]。先利用 e_y 计算前视向量长度 Δ ,再由ILOS法综合 e_y , Δ 与航迹方向角 Ψ_k ,合成期望航向 Ψ_d ,最后采用船载PID自动舵获得命令舵角 δ_c ,并作用于实船。航向控制系统框图见图4。

直线ILOS法适配到轨迹跟踪控制任务中,合成期望航向 Ψ_d ,具体过程见式(23)~式(28)。

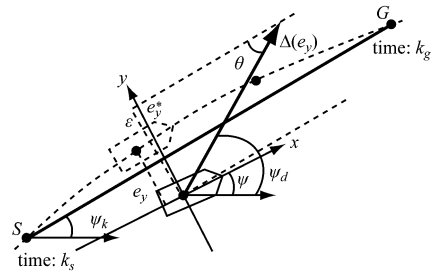


图5 合成期望航向示意

Fig. 5 Schematic diagram of synthetic desired heading angle

$$e_y^* = e_y + \sigma \cdot I_e \quad (23)$$

$$\Psi_k = \tan^{-1} \left(\frac{y_i(k_g) - y_i(k_s)}{x_i(k_g) - x_i(k_s)} \right) \quad (24)$$

$$\varepsilon = e_y^* \cos(\Psi - \Psi_k) \quad (25)$$

$$\theta = \begin{cases} \sin^{-1}(\varepsilon/\Delta), & |\varepsilon| \leq \Delta \\ \text{sign}(\varepsilon)\pi/2, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (26)$$

$$\Psi_d = \Psi_k + \theta \quad (27)$$

式(23)~式(27)中: Ψ_k 为航迹方向角; ε 为 e_y^* 在垂直于 \overline{SG} 方向上投影的长度,对应经典ILOS法中的航迹偏差; θ 为 $\overline{\Delta}$ 与 \overline{SG} 的夹角。

k_s 与 k_g 为时刻值,实质上确定了 \overline{SG} 。其定义为

$$\begin{cases} k = (t-1)/\lambda + 1 \\ k_s = (k-1)\lambda + 1 \\ k_g = k_s + \lambda \end{cases} \quad (28)$$

式(28)中: $\lambda \in N^+$ 为取点步长,属于控制参数。在参考轨迹中,从起点开始,每间隔 λ 步取点,则相邻点连成的直线 \overline{SG} 是对此段参考轨迹的近似。

本文改进的ILOS方法,相较经典方法有以下几处区别:通过结合虚拟船领航法,利用虚拟船信息,

简化了航迹偏差的计算步骤;移除经典方法中的参数, R_s 为切换半径;该方法适用于轨迹跟踪,而非路径跟踪;为避免超调,进行积分项限幅,并引入不应用积分的选项,而在经典方法中为避免超调,只能降低 σ 值,但会导致积分项的效果减弱;设计简单的前视向量函数,使 Δ 自适应变化。

当 $|e_y|$ 小于某阈值时,不通过 ILOS 法计算 Ψ_d , 而是令 $\Psi_d = \Psi_i$, 换言之,若 $|e_y|$ 极小则不进行修正。目的是节约自主船舶的计算资源,同时使 Ψ_d 更为稳定。该阈值取 0.5 m, 相对于船体尺寸是极小的。

Ψ_d 确定后,可得航向误差 $e_\psi = \Psi_d - \Psi$ 。结合实际船舶上装载的舵机控制器,最终经过 PID 算法获得命令舵角 δ_c 为

$$\delta_c = Y_P e_\psi + Y_I \int_0^t e_\psi dt + Y_D \dot{e}_\psi \quad (29)$$

式(29)中, Y_P 、 Y_I 、 Y_D 依次为航向控制的比例增益、积分增益、微分增益参数。

2.4 抑制高频动作命令

在工程实际中,命令信号 n_c 、 δ_c 高频变化,导致舵桨工作状态的调整频率过高,是有害的现象。高频动作命令会引起不必要的抖振,不利于系统稳定性,增加功耗,影响机械部件的寿命,甚至可能损坏设备。因此,在工程应用中,需采取应对措施。

控制器产生高频动作命令,部分归因于控制参数设定不当,但固有原因是外部高频干扰不断地摄动实船位姿 $[x \ y \ \Psi]^T$ 。因输入控制算法的误差与状态量而表现出高频抖动,使输出的控制量也随之高频变化。

本文应用 2 种抑制高频动作命令的方法:在控制器输入端,引入死区环节,降低敏感性;在控制器输出端,引入一阶低通滤波器,平滑命令信号。所用方法具有易于工程实现、物理意义明确的优势。

在航向控制中,误差 e_ψ 通过死区环节。若 $|e_\psi(t)| \leq Y_{ds}$ ($Y_{ds} > 0$ 为控制参数),则以式(30)计算 δ_c , 否则保留 $e_\psi(t)$ 并以式(29)计算。

$$\begin{cases} e_\psi(t) = 0 \\ \dot{\delta}_c(t) = 0 \end{cases} \quad (30)$$

无论是在航向控制还是在航速控制中,均使用低通滤波平滑命令信号。离散化的一阶低通滤波器为

$$\begin{cases} Y(s) = \frac{a}{s+a} X(s) \\ a = 2\pi f_c \end{cases} \quad (31)$$

式(31)中: X 为输入; Y 为输出; a 和 f_c 为截止频率,

单位分别为 rad/s 和 Hz。

本文通过试验确定 f_c : 给予较强外部干扰(风力 7 级,风舷角约 45° ,流速约 1.5 m/s),在控制参数调优后,利用快速傅里叶变换,获取 n_c 与 δ_c 信号的频谱,依据频谱选择截止频率,再重复试验进行微调。作用于 n_c 的 f_c 为 0.025 Hz,作用于 δ_c 的 f_c 为 0.235 Hz,可使指令变化极缓慢。

3 仿真试验

由于需使用计算机完成仿真试验,因此,试验变量与过程实际都是离散的。积分用累加近似替代,微分用差分近似替代。仿真中控制时间取为 1 s。

3.1 试验设计

本文研究的对象船舶“中远海运绿水 01”轮见图 6,其主要参数见表 4。



图 6 “中远海运绿水 01”轮

Fig. 6 Photo of “ZYHY LVSHUI 01”

表 4 被控船舶的主要参数

Tab. 4 Values of the main values of the vessel under control

参数	数值	参数	数值
L/m	119.8	$I_{zz}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	3.608×10^9
B/m	23.6	$J_{zz}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	2.740×10^3
D/m	5.5	A_s/m^2	13.02
C_b	0.835	A_r/m^2	85.70
x_c/m	-0.51	A_s/m^2	435.0
m/kg	4.022×10^6	K_0	0.034 48
m_x/kg	2.629×10^5	T_0	22.12
m_y/kg	2.185×10^6	Z_c/m	1.04

外部环境条件与速度的设定值见表 5。表 5 中:风速对应 4 级风, u_{ir} 为虚拟船对水速度且在航程中间改变一次。设定正弦形曲线参考轨迹,其起点位置为(0,110.8),起点处 Ψ_i 为 0.200 9 rad。设定实船初始位置为(4.507, 113.1),初始 Ψ 为 0.190 0 rad。

表5 外部环境条件与速度的设定值

Tab.5 Setting values for external environmental conditions and sailing speeds

参数	数值	参数	数值
$U_m(0)/(m/s)$	5.087 8	$V_c(0)/(m/s)$	1.25
$\Psi_T(0)/rad$	$\pi/3$	Ψ_b/rad	$\pi/6$
$u_v/(m/s)$	5→5.14	$u_r(0)/(m/s)$	3.57

为更直观地评估与比较控制效果,设计代价函数 J 为

$$J = \frac{1}{t_{\max}} \int_0^{t_{\max}} (w_1 e_x^2 + w_2 e_y^2 + w_3 e_\psi^2 + w_4 \delta^2 + w_5 n^2) dt \quad (32)$$

式(32)中:权重 $w_1=1$ 、 $w_2=5$ 、 $w_3=0.5$ 、 $w_4=5$ 、 $w_5=2$ 。权重的设计考虑了各项目的数量级与受重视的程度,且最终通过试验确定。

J 不仅综合多个目标作为评估控制效果的指标,而且有助于利用智能算法如粒子群优化等进行控制参数调优。此外,为使优化算法更快速地产生结果,在控制结果明显不佳的情况下, J 可被定义为正无穷。如果 $\max(|e_y|) > 20$ m 或者 $\min(\dot{\delta}) > 0.06$ rad/s 时,则令此时的 $J = +\infty$ 。

本文设计了两部分的试验。在试验 I,完整使用所提出的控制方法,称之为控制策略 A,实施仿真测试。在试验 II,本文定义 4 种变体控制策略,命名为控制策略 B~控制策略 E;B 中,速度使用 PID 控制,其余同 A;C 中, $\Delta \equiv 6L$,其余同 A;D 中,不限制 I_e 、始终累计 \dot{I}_e ,其余同 A;E 中,不抑制高频动作命令,其余同 A。

试验 I 重点在于验证所提出控制方法的有效性。试验 II 重点则在于对比控制策略 A~控制策略 E 各策略的效果,验证方法中各项设计的优势与重要性。评估指标包括: J 的数值; e_x 与 e_y 的收敛时间,特指其首次进入并维持在 $[-0.5, 0.5]$ m 内的耗时, s; δ 与 n 的抖振程度,分别采用 $\sum (\Delta\delta)^2(i)/(t_{\max} - 1)$, $\sum (\Delta n)^2(i)/(t_{\max} - 1)$ 进行量化。在上述所有试验中,各控制策略均使用已调优的参数值,包括控制策略 C 中 Δ 的值。

3.2 试验结果

进行试验 I,在控制策略 A 中进行仿真,2 组 PID 增益、ILOS 法参数等控制参数的优化值见表 6。控制结果见图 7~图 11。

实船与虚拟船的位置图如图 7 所示,图 7 中:两

表6 借助粒子群优化算法取得的控制参数值

Tab.6 Control parameter values obtained by particle swarm optimization algorithm

参数	数值	参数	数值
S_p	3.651	Y_{dz}	$0.022\ 42\ \frac{\pi}{180}$
S_I	0.072 5	I_{\max}	2.137
S_D	0.001 0	ζ	473.8
Y_p	20.62	σ	3.717
Y_I	2.381	λ	2
Y_D	247.6	-	-

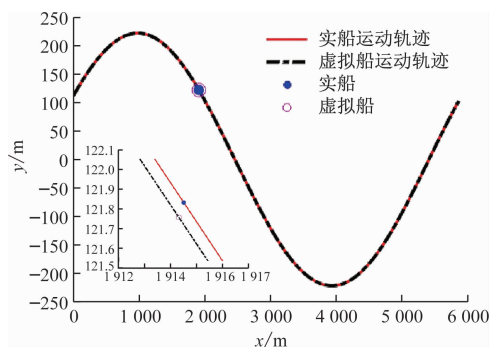


图7 实船与虚拟船在航行中的位置以及全部位置连成的运动轨迹(小图为局部放大)

Fig.7 Positions of the realistic vessel and the virtual vessel during the voyage and the motion trajectory connected by all the positions, with a partial enlargement

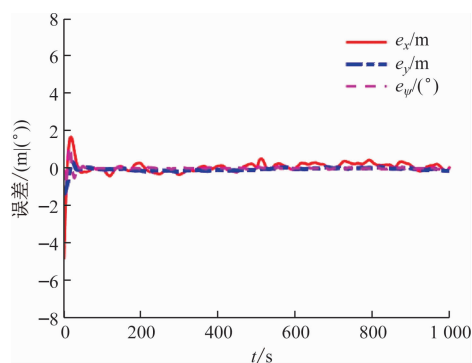


图8 位置跟踪误差 e_x 、 e_y 以及航向误差 e_ψ 的历时曲线
Fig.8 Duration curves of errors e_x , e_y and e_ψ

者的运动轨迹几乎完全重叠。从局部放大可见,在图 7 所示时刻,实船与虚拟船的位置误差约为 0.1 m。虚拟船是严格遵循参考轨迹而运动的,因此,该结果说明实船完成了轨迹跟踪任务,且跟踪精度较高。

误差 e_x 、 e_y 、 e_ψ 的历时曲线如图 8 所示,图 8 中,各误差均在零时刻与仿真的前 50 s 内较为显著,但随后便可收敛在 $[-0.5, 0.5]$ m 区间内,验证控制的有效性 with 准确性。 e_y 与 e_ψ 平稳收敛至 0 附近,而

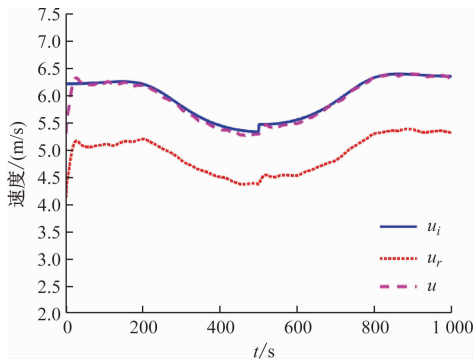


图9 虚拟船速度 u_i 、实船对水速度 u_r 、实船速度 u 的历时曲线

Fig. 9 Duration curves of virtual vessel's velocity u_i , realistic vessel's velocity relative to the water u_r , and realistic vessel's velocity u

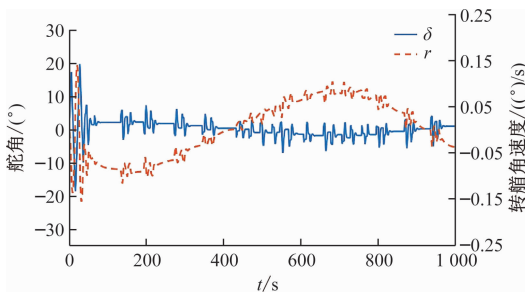


图10 实船舵角 δ 与转舵角速度 r 的历时曲线

Fig. 10 Duration curves of rudder angle δ and yaw angular velocity r of the realistic vessel

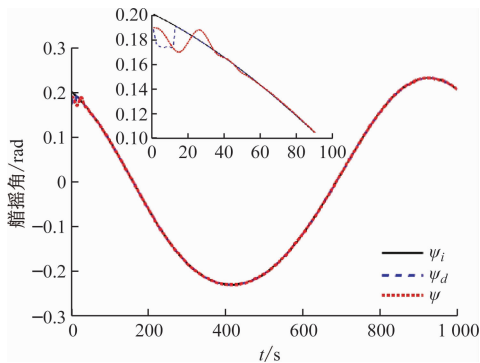


图11 虚拟船船向 Ψ_i 、制导律给出的期望航向 Ψ_d 、实船船向 Ψ 的历时曲线(小图为局部放大)

Fig. 11 Duration curves of virtual vessel's heading Ψ_i , the desired heading Ψ_d given by guidance law, and realistic vessel's heading Ψ , with a partial enlargement

e_x 相对存在波动,可能是多方因素共同作用的结果,如流在实船纵向上的干扰更剧烈、参考速度在 500 s 处存在跳变、转速 n 对 n_c 的响应延时较慢等。

速度历时曲线如图 9 所示,实船的速度基本实现了对虚拟船速度的跟随。实船速度的超调量极小,最大超调量仅约 3%,对 500 s 处虚拟船速度跳变的响应迅速。 u_r 历时曲线则反映出 n 的变化整

体是平缓的;曲线也存在局部不光滑,此现象是由于需要抵消外部随机干扰。

舵角 δ 与转舵角速度 r 历时曲线如图 10 所示, r 的整体变化趋势明显,遵循着正弦参考轨迹而变化, δ 同样具有明显的整体趋势,并非全程往复摇摆。其间歇的局部抖振是抵消外部随机干扰的需要,考虑到对 $\dot{\delta}$ 的限制已存在于被控对象中,故该抖动是被允许的。

实船 Ψ 跟随 Ψ_d 变化、在 50 s 后误差 e_ψ 收敛至 0、最终与虚拟船 Ψ_i 实现一致且平稳变化的过程如图 11 所示,是对图 8 和图 10 结果的印证。

进行试验 II,对比不同控制策略的表现,其对比试验结果见表 7。

表 7 不同控制策略对比试验结果

Tab. 7 Results of comparative experiments with different control strategies

策略	J	e_x 收敛	e_y 收敛	δ 抖振	n 抖振
A	0.360 3	50	50	0.000 503	0.060 8
B	6.603 7	200	100	0.003 727	1.365 1
C	0.424 9	80	150	0.000 213	0.061 3
D	0.478 8	50	130	0.000 633	0.067 7
E	0.594 2	40	60	0.003 609	0.209 1

由表 7 可知:

1) 代价函数 J 最小的是策略 A、策略 C、策略 D、策略 E 次之,而 J 最大的是策略 B。本文为加快误差收敛、防范超调和抑制抖振,设计一系列方法并形成策略 A,其余策略则是从策略 A 中取消某种方法。各策略中 A 的 J 值最低,说明策略 A 的控制性能在各策略中最优,从而证明本文中设计的方法产生积极的影响。

2) 在误差收敛方面,收敛最快的是控制策略 A 与策略 E,策略 C 与策略 D 次之,而策略 B 在 e_x 收敛上显著地耗时过长。策略 A 与策略 E 差别较小,表明策略 A 中抑制抖振的方法不会显著影响误差收敛。策略 A 比策略 C 与策略 D 收敛略为快速,是因为策略 A 采用了优化的 ILOS 制导律,即可变的 Δ 、受限制的积分项 I_c 。策略 B 对比策略 A,没有先求解基准值 \hat{n} ,因此,仿真中对速度的跟踪较慢且超调,最终收敛耗时过长。

3) 在舵桨抖振方面,策略 A、策略 C、策略 D 表现相近,策略 E 的抖振相对严重,但抖振最显著的是策略 B。策略 B 中, n 抖振异常是由于速度跟踪中发生超调;初期极大的位置误差则使 δ 幅度增大,

导致 δ 抖振也异常。策略E取消死区与低通滤波,使控制器更为敏感,同时,命令信号未经平滑,导致抖振严重。策略A对比E, δ 抖振降低86.06%, n 抖振降低70.92%,抑制效果显著,证明抑制高频命令方法的有效性与必要性。

4 结束语

本文研究欠驱动水面船舶的轨迹跟踪控制问题,提出一种将虚拟船领导法与ILOS法结合的制导与控制方法。该方法原理简明、贴近实际、工程可实现性较强。

本文建立贴近工程应用且较为全面的数学模型,涵盖了船舶运动学、动力学、执行伺服系统与外部环境干扰。根据虚拟船领导法和ILOS法的核心原理,结合二者优势,改进ILOS法,设计航速控制器与航向控制器。本文完整地给出了设计步骤,同时对细节进行了充分的分析和讨论。本文进行有外部干扰的曲线轨迹跟踪控制仿真,并设计控制策略变体对比试验,检验所提出控制方法的有效性。

由于在航海实践中通常使用转向点来给出船舶的既定航线,因此,在未来的研究中,有必要增加使用转向点与期望航速,生成参考轨迹点序列的环节,使控制方法更加完整,实用性进一步增强。本研究针对电驱动船开展,基于电船情况设计控制方法,对传统动力船舶是否适用,则需进一步验证。

参 考 文 献

- [1] 温济聪. 大连海事大学智能研究与实训两用船下水[EB/OL]. (2023-12-25)[2024-02-20]. <https://www.jingjiribao.cn/static/detail.jsp?id=498601>.
WEN J C. Dalian maritime university launches dual-purpose smart ship for research and training[EB/OL]. (2023-12-25)[2024-02-20]. <https://www.jingjiribao.cn/static/detail.jsp?id=498601> (in Chinese).
- [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] 郭晨, 汪洋, 孙富春, 等. 欠驱动水面船舶运动控制研究综述[J]. *控制与决策*, 2009, 24(3): 321-329.
GUO C, WANG Y, SUN F C, et al. Survey for motion control of underactuated surface vessels[J]. *Control and Decision*, 2009, 24(3): 321-329. (in Chinese)
- [4] 王巍凯, 苏航, 张恩华. 欠驱动无人艇固定时间轨迹跟踪控制[J]. *中国舰船研究*, 2024, 19(增刊1): 10-17.
WANG W K, SU H, ZHANG E H. Fixed-time trajectory tracking control for underactuated surface vessels[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2024, 19(Suppl. 1): 10-17. (in Chinese)
- [5] 袁亮亮, 阎妍, 于双和, 等. 基于屏障函数的无人水面艇自适应滑模容错轨迹跟踪控制[J/OL]. *控制工程*, 2023, (2023-09-12)[2024-02-20]. <https://doi.org/10.14107/j.cnki.kzgc.JACA2022-84>.
YUAN L L, YAN Y, YU S H, et al. Barrier function based adaptive sliding mode fault-tolerant trajectory tracking control of unmanned surface vehicle[J/OL]. *Control Engineering of China*, 2023, (2023-09-12)[2024-02-20]. <https://doi.org/10.14107/j.cnki.kzgc.JACA2022-84>. (in Chinese).
- [6] 张磊, 郑宇鑫, 黄兵, 等. 动态事件触发机制下的无人艇无模型控制[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2024, 45(1): 85-92.
ZHANG L, ZHENG Y X, HUANG B, et al., Modelless control for an unmanned surface vehicle under the dynamic event-triggered mechanism[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2024, 45(1): 85-92. (in Chinese)
- [7] 杜朋柱, 张砚北, 隆武强, 等. 基于非线性模型预测的欠驱动船舶轨迹跟踪控制研究[J]. *大连理工大学学报*, 2023, 63(6): 494-500.
DU P Z, ZHANG Y B, LONG W Q, et al. Research on trajectory tracking control of underactuated ship based on nonlinear model prediction[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2023, 63(6): 494-500. (in Chinese)
- [8] 曹兴飞, 刘树锋, 史国友, 等. 基于模型预测控制的无人艇轨迹跟踪[J]. *船舶工程*, 2023, 45(增刊1): 354-357.
CAO X F, LIU S F, SHI G Y, et al. Trajectory tracking of unmanned surface vehicle based on model predictive control[J]. *Ship Engineering*, 2023, 45(Suppl. 1): 354-357. (in Chinese)
- [9] 雷超凡, 初秀民, 柳晨光, 等. 参考航速时变的无人船轨迹跟踪控制方法[J]. *舰船科学技术*, 2023, 45(12): 83-87.
LEI C F, CHU X M, LIU C G, et al. USV trajectory tracking control method with time-varying reference speed[J]. *Ship Science and Technology*, 2023, 45(12): 83-87. (in Chinese)
- [10] 张国庆, 张显库. 船舶智能航行制导与控制[M]. 北京: 科学出版社, 2022.
ZHANG G Q, ZHANG X K. Ship intelligent navigation guidance and control[M]. Beijing: Science Press, 2022. (in Chinese)
- [11] 刘佳仑, 董智霖, 李诗杰, 等. 基于改进反步滑模控

- 制算法的拖轮自主靠泊控制[J/OL]. 中国舰船研究. (2023-05-09)[2024-03-09]. <https://doi.org/10.19693/j.isn.1673-3185.03227>.
- LIU J L, DONG Z L, LI S J, et al. Autonomous berthing control of tug based on improved backstepping sliding mode control algorithm[J/OL]. Chinese Journal of Ship Research. (2023-05-09)[2024-03-09]. <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03227>. (in Chinese)
- [12] 张强, 朱雅萍, 孟祥飞, 等. 欠驱动船舶自适应神经网络有限时间轨迹跟踪[J]. 中国舰船研究, 2022, 17(4): 24-31.
- ZHANG Q, ZHU Y P, MENG X F, et al. Finite time trajectory tracking of underactuated ship based on adaptive neural network[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2022, 17(4): 24-31. (in Chinese)
- [13] 张显库, 贾欣乐. 船舶运动控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- ZHANG X K, JIA X L. Ship motion control[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [14] 王文新, 刘上, 张国庆, 等. 考虑舵机故障的船舶鲁棒自适应航向保持控制[J]. 中国舰船研究, 2023, 18(1): 116-123.
- WANG W X, LIU S, ZHANG G Q, et al. Robust adaptive course-keeping control of under-actuated ships with the rudder failure[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2023, 18(1): 116-123. (in Chinese)
- [15] TRISTAN P, MOGENS B. Mathematical ship modeling for control applications[R]. Callaghan: the University of Newcastle, 2002.
- [16] SØRENSEN A J. Marine control systems: propulsion and motion control of ships and ocean structures[M]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2013.
- [17] FOSSEN T I. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control[M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2011.
- [18] 贾欣乐, 杨盐生. 船舶运动数学模型[M]. 大连: 大连海事大学出版社, 1999.
- JIA X L, YANG Y S. Mathematical modeling of ship motion[M]. Dalian: Dalian Maritime University Press, 1999. (in Chinese)
- [19] 陈勇青. 海洋环境影响下的船舶航迹预测方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
- CHEN Y Q. Research on vessel track prediction method considering the influence of marine environment[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019. (in Chinese)
- [20] 瞿洋, 徐海祥, 余文墨, 等. 基于 ILOS 的欠驱船舶循迹控制[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2016, 40(6): 834-838.
- QU Y, XU H X, YU W Z, et al. Integral line-of-sight guidance for path following of underactuated marine surface vessels[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2016, 40(6): 834-838. (in Chinese)
- [21] 于立新. 基于 LOS 法的 USV 滑模控制与路径跟踪研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
- YU L X. Research on USV sliding mode control and path tracking based on LOS method[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019. (in Chinese)
- [22] BØRHAUG E, PAVLOV A, PETTERSEN K Y. Integral LOS control for path following of underactuated marine surface vessels in the presence of constant ocean currents[C]. Proceedings of 47th IEEE Conference on Decision and Control, 2008: 4984-4991.
- [23] 左川. 从一起海上船舶碰撞事故论协议避让在船舶避碰行动中的运用条件[J]. 中国海事, 2020(12): 30-32.
- ZUO C. Discussion on the application condition of consensus collision prevention on ships collision prevention action on the base of one ship collision accident case[J]. China Maritime Safety, 2020(12): 30-32. (in Chinese)
- [24] The Investigation Boards From Cyprus, Italy And Tunisia. Marine investigation report: collision, CSL VIRGINIA struck by ULYSSE on 7 October 2018, off cap Corse [M]. French: Marine Occurrence Investigation Bureau, 2019.

(上接第 58 页)

YANG K, ZHUANG Y, LYU P F, et al. Emergency decision-making method for grounding ships handling in inland waterway based on Bayesian network [J]. Navigation of China, 2017, 40 (3): 77-82. (in Chinese)

[22] ENDRINA N, RASERO J C, KONOVESSIS D. Risk analysis for RoPax vessels: a case of study for the Strait of Gibraltar [J]. Ocean Engineering, 2018, 151: 141-151.

[23] WU B, YIP T L, YAN X P, et al. Fuzzy logic based approach for ship-bridge collision alert system [J]. Ocean Engineering, 2019, 187:1-12.

[24] XUE J, YIP T L, WU B, et al. A novel fuzzy Bayesian network-based MADM model for offshore wind turbine