

引用格式: 吴文涛, 彭周华, 王丹, 等. 基于扩张状态观测器的双桨推进无人艇抗干扰目标跟踪控制 [J]. 中国舰船研究, 2021, 16(1): 128–135.

WU W T, PENG Z H, WANG D, et al. ESO based anti-disturbance target tracking control for twin-screw unmanned surface vehicle[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2021, 16(1): 128–135.

# 基于扩张状态观测器的双桨推进 无人艇抗干扰目标跟踪控制



扫码阅读全文

吴文涛, 彭周华\*, 王丹, 刘陆, 姜继洲, 任帅

大连海事大学 船舶电气工程学院, 辽宁 大连 116026

**摘要:** [目的] 针对无人艇(USV)的模型不确定性和未知海洋环境扰动, 提出一种基于扩张状态观测器(ESO)的双桨推进无人艇抗干扰目标跟踪控制算法。[方法] 在运动学层级, 设计基于平行接近制导原理的目标跟踪制导律; 在动力学层级, 针对模型不确定性和未知环境扰动, 设计基于ESO的纵荡速度和艏摇角速度自抗扰控制律, 以减小模型不确定性和环境扰动的影响; 最后, 通过输入状态稳定性定理和级联定理分析所提控制器的稳定性。[结果] 实验结果表明, 基于所提的自抗扰目标跟踪控制方法能使跟踪船有效地跟踪虚拟目标点。[结论] 研究成果可为无人艇在环境扰动下的目标跟踪提供参考。

**关键词:** 无人艇; 扩张状态观测器; 目标跟踪; 平行接近制导

中图分类号: U661.3

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.01665

## ESO based anti-disturbance target tracking control for twin-screw unmanned surface vehicle

WU Wentao, PENG Zhouhua\*, WANG Dan, LIU Lu, JIANG Jizhou, REN Shuai

Marine Electrical Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China

**Abstract:** [Objectives] Focusing on the model uncertainties of unmanned surface vehicles (USVs) and unknown marine environmental disturbances, an anti-disturbance target-tracking control algorithm, based on extended state observer (ESO), is proposed for twin-screw unmanned surface vehicles. [Methods] At the kinematic level, a guidance law based on the principle of constant bearing is presented for USVs. At the kinetic level, aiming at model uncertainties and unknown disturbances, surge velocity and yaw angular velocity anti-disturbance control laws based on ESOs are designed to eliminate the problems caused by model uncertainties and unknown marine environmental disturbances. Finally, the proposed controllers' stabilities are analyzed via in-input-to-state stability and cascade theory. [Results] The results show that such a USV can effectively track the virtual target point using the proposed anti-disturbance target tracking controller. [Conclusions] The effectiveness of the proposed control algorithm is verified via experimental results.

**Key words:** unmanned surface vehicles (USV); extended state observer (ESO); target tracking; constant bearing guidance

## 0 引言

近年来,随着无人驾驶技术的兴起和发展,无人艇(unmanned surface vehicle, USV)作为一种小型化、智能化、多用途无人海洋运载平台,获得了学者们的广泛关注。从运动场景来看,无人艇可用于轨迹跟踪、路径跟踪和目标跟踪,而目标跟

踪技术在军事和民用领域具有重要的应用价值<sup>[1]</sup>。

无人艇的运动控制面临着非线性、模型不确定性、欠驱动和强外部扰动等研究难点,给无人艇有效可靠的目标跟踪控制带来了挑战。目前,研究人员已提出众多方法用于无人艇控制,如滑模控制<sup>[2]</sup>、鲁棒控制<sup>[3]</sup>、模糊控制<sup>[4]</sup>、参数自适应控制<sup>[5]</sup>、神经网络控制<sup>[6]</sup>、扰动观测器<sup>[7]</sup>、扩张状态观

收稿日期: 2019-07-03 修回日期: 2019-09-02 网络首发时间: 2021-01-29 11:11

作者简介: 吴文涛,男,1995年生,硕士生。研究方向:无人船集群运动控制。E-mail:wuwentaodlmu@gmail.com

彭周华,男,1982年生,博士,教授,博士生导师。研究方向:海洋航行器制导与控制,无人船集群控制。

E-mail: zhpeng@dmlu.edu.cn

王丹,男,1960年生,博士,教授,博士生导师。研究方向:智能控制理论,无人船集群控制,电力电子技术。

E-mail: dwang@dmlu.edu.cn

\*通信作者: 彭周华

测器<sup>[8]</sup>等。传统的无人艇运动是通过调节螺旋桨和舵机来实现姿态控制,该方法较适用于大型船舶。因舵机需要频繁调整舵角来控制船舶的航向姿态,故难以满足对灵敏性要求较高的小型无人艇。相较之下,双桨推进无人艇由于是通过2个螺旋桨推力相同或不同来进行速度或航向的控制,能在很大程度上提高无人艇的灵敏性和机动能力,可使无人艇更好地适应工作场景的需要<sup>[9]</sup>。

本文将研究含模型不确定性与未知海洋环境扰动的双桨推进欠驱动无人艇抗干扰目标跟踪控制问题。首先,建立双桨推进欠驱动无人艇的运动数学模型,包括运动学方程和动力学方程。在运动学层级,提出基于平行接近制导(constant bearing, CB)的目标跟踪制导律;在动力学层级,设计基于扩张状态观测器(extended state observer, ESO)的纵荡速度控制律和艏摇角速度控制律,以消除模型不确定性与未知海洋环境扰动问题,实现无人艇的抗干扰目标跟踪控制。最后,通过输入状态稳定性定理和级联定理,分析所提出的基于ESO的纵荡速度和艏摇角速度控制器的稳定性,并用实验证明采用CB制导的抗干扰目标跟踪控制方法的有效性。

## 1 无人艇数学模型

在地球坐标系  $X_E-Y_E$  和艇体坐标系  $X_B-Y_B$  下,双桨推进的欠驱动无人艇运动的数学模型<sup>[10]</sup>如图1所示。

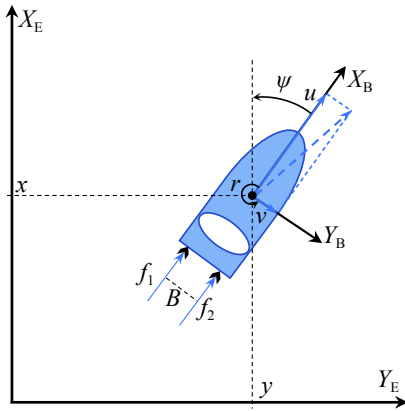


图1 无人艇平面运动示意图

Fig. 1 Schematic diagram of plane motion of USV

图中:  $u, v, r$  分别为无人艇在艇体坐标系  $X_B-Y_B$  下的纵荡速度、横荡速度和艏摇角速度;  $x, y, \psi$  分别为无人艇在地球坐标系下的  $X_E$  坐标、 $Y_E$  坐标和偏航角;  $f_1$  和  $f_2$  分别为左、右螺旋桨产生的推力;  $B$  为左、右螺旋桨之间的横向轴距。

无人艇的运动学模型可由一个三自由度非线性数学模型描述<sup>[11]</sup>:

$$\dot{\eta} = \mathbf{R}(\psi)\mathbf{v} \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{v} = [u, v, r]^T$ , 为无人艇的速度状态向量;  $\eta =$

$[x, y, \psi]^T$ , 为无人艇的位置状态向量;  $\mathbf{R}(\psi)$  为无人艇在地球坐标系和艇体坐标系下的矩阵。

在动力学建模中,无人艇在水面航行时的水动力阻尼项通常采用线性形式,即无人艇所受阻力与速度成线性关系。因此,无人艇的动力学方程可由如下方程描述<sup>[11]</sup>:

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}\mathbf{v} + \mathbf{D}\mathbf{v} = \boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\tau}_d \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{M}$  为无人艇的惯性质量矩阵;  $\mathbf{C}$  为向心力和科氏力系数矩阵;  $\mathbf{D}$  为水动力阻尼矩阵;  $\boldsymbol{\tau}$  为无人艇的推力及其力矩向量;  $\boldsymbol{\tau}_d$  为推力和力矩扰动项向量。

采用双桨推进的无人艇属于典型的欠驱动系统,船舶横向不受力,所以其动力学控制输入为  $\boldsymbol{\tau} = [f_1 + f_2, 0, B \cdot (f_1 - f_2)/2]^T$ 。在静水中对无人艇进行匀速拖曳试验,根据线性回归方程,双桨推进无人艇的螺旋桨产生的推力与控制电压呈近似线性关系<sup>[12]</sup>,即  $f = kV$ 。因此,控制无人艇两侧直流电机的输入电压就可以控制无人艇的纵荡速度和艏摇角速度。设左、右两侧电机的控制电压分别为  $V_L = \sigma_u + \sigma_r$  和  $V_R = \sigma_u - \sigma_r$ 。其中,  $\sigma_u$  为纵荡速度控制电压,  $\sigma_r$  为艏摇角速度控制电压。当  $\sigma_u > 0$ ,  $\sigma_r = 0$  或  $\sigma_u < 0$ ,  $\sigma_r = 0$  时,无人艇只进行前进或者后退动作;当  $\sigma_r > 0$ ,  $\sigma_u = 0$  或  $\sigma_r < 0$ ,  $\sigma_u = 0$  时,无人艇只进行右转或左转动作。因此,式(2)所示的无人艇动力学方程可改写为如下形式:

$$\begin{cases} \dot{u} = -\frac{d_{11}}{m_{11}}u + \frac{1}{m_{11}}\tau_{d1} + \frac{2k}{m_{11}}\sigma_u \\ \dot{r} = -\frac{d_{33}}{m_{33}}r + \frac{1}{m_{33}}\tau_{d3} + \frac{kB}{m_{33}}\sigma_r \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $d_{11}, d_{33}$  为阻尼系数且  $d_{11}, d_{33} \in \mathbf{D}$ ;  $m_{11}, m_{33}$  为惯性质量常数且  $m_{11}, m_{33} \in \mathbf{M}$ ;  $k$  为直流电机输入电压与产生的推力关系参数;  $\tau_{d1} \in \boldsymbol{\tau}$ , 为纵荡速度方向扰动分量,  $\tau_{d3} \in \boldsymbol{\tau}$ , 为艏摇角速度方向扰动分量。由式(3)可知,仅通过调节控制电压  $\sigma_u$  或  $\sigma_r$  就可控制无人艇的动作状态,实现其纵荡速度和艏摇角速度的解耦控制,简化了双桨推进无人艇动力学控制器设计,也解决了运动控制过程中回转运动和推进运动耦合的问题。

## 2 控制器设计

### 2.1 运动学制导律设计

CB制导的基本原理是通过将视距旋转率降低到0,从而使跟踪艇以恒定的方位感知并跟踪目标。目标跟踪是将跟踪艇与目标的视距降低到一个期望值并保持。

定义某时刻跟踪艇和目标的位置矢量分别为  $\mathbf{p}(t) = [x(t), y(t)]^T$  和  $\mathbf{p}_t(t) = [x_t(t), y_t(t)]^T$ , 则跟踪艇和目标的速度矢量分别为  $\boldsymbol{\vartheta}(t) = d\mathbf{p}(t)/dt \triangleq \dot{\mathbf{p}}(t)$  和  $\boldsymbol{\vartheta}_t(t) = \dot{\mathbf{p}}_t(t)$ 。令  $\tilde{\mathbf{p}}(t) = \mathbf{p}_t(t) - \mathbf{p}(t)$ , 为目标和跟踪艇的视距矢量, 则 CB 制导的控制目标可以表述为

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \tilde{\mathbf{p}}(t) = 0 \quad (4)$$

CB 制导律的速度分解关系如图 2 所示。

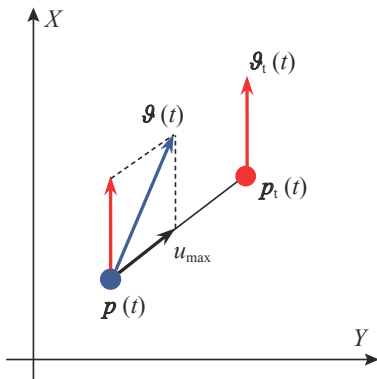


图 2 CB 制导律速度分解图

Fig. 2 The velocity assignment associated with CB guidance

根据图 2, 得<sup>[13]</sup>

$$\boldsymbol{\vartheta}(t) = \boldsymbol{\vartheta}_t(t) + u_{\max} \frac{\tilde{\mathbf{p}}(t)}{\sqrt{\tilde{\mathbf{p}}(t)^T \tilde{\mathbf{p}}(t) + \delta_p^2}} \quad (5)$$

式中:  $u_{\max}$  为跟踪者沿视距方向的最大靠近速度,  $u_{\max} > 0$ ;  $\delta_p$  为防撞常数,  $\delta_p > 0$ 。因此, 基于 CB 原理的运动学制导律如下:

$$\begin{cases} u_r = |\boldsymbol{\vartheta}(t)| = \sqrt{\dot{x}(t)^2 + \dot{y}(t)^2} \\ \psi_r = \text{atan2}(\dot{y}(t), \dot{x}(t)) \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $u_r$  为无人艇的期望速度;  $\psi_r$  为无人艇的期望航向且满足  $\psi_r \in (-\pi, \pi]$ 。由于动力学无法直接对航向进行控制, 设计如下虚拟控制律:

$$r_r = K_r \psi_e \quad (7)$$

式中:  $r_r$  为无人艇的期望角速度;  $\psi_e = \psi_r - \psi$ , 为航向跟踪误差;  $K_r$  为增益常数。

## 2.2 纵荡速度控制器设计及稳定性分析

在不考虑电机特性的情况下, 双桨推进无人艇纵荡速度的响应模型为

$$\dot{u} = f_u + b_u \sigma_u \quad (8)$$

式中:  $f_u$  为纵荡速度方向的不确定项;  $b_u$  为控制增益。为 ESO 子系统的设计和稳定性分析做如下假设。

假设 1:  $f_u$  的导数有界且满足  $|\dot{f}_u| < f_u^*$ , 其中  $f_u^* > 0$  为常数。

受模型不确定性和未知环境扰动的影响, 式 (8) 中的  $f_u$  为未知项。为估计未知项, 设计如下

一阶线性 ESO:

$$\begin{cases} \dot{\hat{u}} = -\beta_{u1}(\hat{u} - u) + \hat{f}_u + b_u \sigma_u \\ \dot{\hat{f}}_u = -\beta_{u2}(\hat{u} - u) \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $\hat{u}$  和  $\hat{f}_u$  分别为  $u$  和  $f_u$  的估计值;  $\beta_{u1}$  和  $\beta_{u2}$  为观测器的增益。

定义估计误差  $\tilde{u} = \hat{u} - u$  和  $\tilde{f}_u = \hat{f}_u - f_u$ , 则一阶 ESO 的误差动态方程为:

$$\begin{cases} \dot{\tilde{u}} = -\beta_{u1}\tilde{u} + \tilde{f}_u \\ \dot{\tilde{f}}_u = -\beta_{u2}\tilde{u} - \tilde{f}_u \end{cases} \quad (10)$$

令  $\mathbf{E}_1 = [\tilde{u}, \tilde{f}_u]^T$ , 将式 (10) 所示的 ESO 子系统改写成如下矩阵形式:

$$\dot{\mathbf{E}}_1 = \mathbf{A}_1 \mathbf{E}_1 - \mathbf{B}_1 \dot{f}_u \quad (11)$$

式中:  $\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} -\beta_{u1} & 1 \\ -\beta_{u2} & 0 \end{bmatrix}$ ;  $\mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ 。

由于  $\mathbf{A}_1$  为赫尔维茨矩阵, 则存在一个正定矩阵  $\mathbf{P}_1$  满足如下不等式:

$$\mathbf{A}_1^T \mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_1 \mathbf{A}_1 \leq -\varepsilon_u \mathbf{I}_1 \quad (12)$$

式中,  $\varepsilon_u \in \mathbf{R}$ , 是一个大于 0 的常数;  $\mathbf{I}_1$  是一个三维对角单位矩阵。

根据式 (8), 为抵消纵荡速度方向扰动, 设计如下纵荡速度自抗扰控制律:

$$\sigma_u = \frac{1}{b_u} [\xi_u(u_r - \hat{u}) - \hat{f}_u] \quad (13)$$

式中,  $\xi_u$  为动力学增益。令  $\hat{u}_e = \hat{u} - u_r$ , 为纵荡速度的跟踪误差, 对  $\hat{u}_e$  求导并将式 (13) 代入, 则跟踪误差动态方程为:

$$\dot{\hat{u}}_e = -\xi_u \hat{u}_e - \beta_{u1} \tilde{u} \quad (14)$$

1) ESO 子系统的稳定性分析。

ESO 子系统式 (11) 的稳定性由引理 1 给出。

引理 1: 在满足假设 1 的条件下, 式 (11) 所示系统状态为  $\mathbf{E}_1$ , 系统输入为  $\dot{f}_u$  的 ESO 子系统是输入状态稳定的。

证明: 构建如下李雅普诺夫方程<sup>[8]</sup>:

$$V_1 = \frac{1}{2} \mathbf{E}_1^T \mathbf{P}_1 \mathbf{E}_1 \quad (15)$$

对方程 (15) 进行求导, 得

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= \mathbf{E}_1^T \mathbf{P}_1 (\mathbf{A}_1 \mathbf{E}_1 - \mathbf{B}_1 \dot{f}_u) = \\ &= -\frac{\varepsilon_u}{2} \mathbf{E}_1^T \mathbf{E}_1 - \mathbf{E}_1^T \mathbf{P}_1 \mathbf{B}_1 \dot{f}_u \leq \\ &= -\frac{\varepsilon_u}{2} \|\mathbf{E}_1\|^2 + \|\mathbf{E}_1\| \|\mathbf{P}_1 \mathbf{B}_1\| \|\dot{f}_u\| \end{aligned} \quad (16)$$

由

$$\|\mathbf{E}_1\| \geq \frac{2\|\mathbf{P}_1 \mathbf{B}_1\| \|\dot{f}_u\|}{\varepsilon_u \bar{\theta}_1} \quad (17)$$

可得

$$\dot{V}_{11} \leq -\frac{\varepsilon_u}{2}(1-\bar{\theta}_1)\|E_1\|^2 \quad (18)$$

式中,  $0 < \bar{\theta}_1 < 1$ 。由此可知, ESO 子系统式 (11) 是输入状态稳定的, 且存在一个  $\mathcal{KL}$  类函数  $\alpha_1$  和一个  $\mathcal{K}_\infty$  类函数  $\gamma_1^\alpha$ , 使其满足:

$$\|E_1(t)\| \leq \alpha_1(E_1(t_0), t-t_0) + \gamma_1^\alpha(\|f_u\|) \quad (19)$$

式中,  $\gamma_1^\alpha(s) = \frac{2\sqrt{\bar{\lambda}(P_1)}\|P_1 B_1\|}{\sqrt{\underline{\lambda}(P_1)}\varepsilon_u\bar{\theta}_1} s$ , 其中  $\bar{\lambda}(P_1)$  和  $\underline{\lambda}(P_1)$

分别为矩阵  $P_1$  的最大和最小特征值。

2) 控制子系统的稳定性分析。

控制子系统式 (14) 的稳定性由引理 2 给出。

引理 2: 式 (14) 所示系统状态为  $\hat{u}_e$ , 系统输入为  $\tilde{u}$  的控制子系统是输入状态稳定的。

证明: 构建如下李雅普诺夫方程:

$$V_2 = \frac{1}{2}\hat{u}_e^2 \quad (20)$$

对  $V_2$  求导, 得

$$\dot{V}_2 = \hat{u}_e \dot{\hat{u}}_e \quad (21)$$

将式 (14) 代入式 (21), 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = \hat{u}_e(-\xi_u \hat{u}_e - \beta_{u1} \tilde{u}) &= \xi_u \hat{u}_e^2 - \beta_{u1} \hat{u}_e \tilde{u} \leq \\ &-\xi_u \hat{u}_e^2 + \beta_{u1} |\hat{u}_e| |\tilde{u}| \end{aligned} \quad (22)$$

由  $\hat{u}_e > \beta_{u1} |\tilde{u}| / (\xi_u \bar{\theta}_2)$ , 可得

$$\dot{V}_2 \leq -\xi_u (1 - \bar{\theta}_2) |\hat{u}_e| \quad (23)$$

式中,  $0 < \bar{\theta}_2 < 1$ 。因此, 控制子系统式 (14) 是输入状态稳定的, 且存在  $\mathcal{KL}$  类函数  $\alpha_2$  和  $\mathcal{K}_\infty$  类函数  $\gamma_2$  使满足:

$$|\hat{u}_e| \leq \alpha_2(\hat{u}_e(t_0), t-t_0) + \gamma_2(|\tilde{u}|) \quad (24)$$

式中,  $\gamma_2(s) = \frac{\beta_{u1}}{\xi_u \bar{\theta}_2} s$ 。

3) ESO 子系统与控制子系统级联稳定性分析。

将 ESO 子系统式 (11) 与控制子系统式 (14) 看作一个级联系统:

$$\begin{aligned} \Sigma_{u1}: \quad \dot{\hat{u}}_e &= -\xi_u \hat{u}_e - \beta_{u1} \tilde{u} \\ \Sigma_{u2}: \quad \begin{cases} \dot{\tilde{u}} &= -\beta_{u1} \tilde{u} + \tilde{f}_u \\ \dot{\tilde{f}}_u &= -\beta_{u2} \tilde{u} - \tilde{f}_u \end{cases} \end{aligned} \quad (25)$$

由  $\Sigma_{u1}$  和  $\Sigma_{u2}$  组成的基于 ESO 的前纵荡速度控制器级联系统稳定性由定理 1 给出。

定理 1: 考虑无人艇纵荡速度式 (8), 在满足假设 1 的条件下, 纵荡速度 ESO 式 (9) 和纵荡速度控制律式 (13) 使  $\Sigma_{u1}$  和  $\Sigma_{u2}$  组成的级联系统是输入状态稳定的。

证明: 引理 1 和引理 2 已经证明。若子系统  $\Sigma_{u1}$  的状态为  $\hat{u}_e$ , 输入为  $\tilde{u}$ , 则该系统是输入状态稳定的; 若子系统  $\Sigma_{u2}$  的状态为  $\tilde{u}$  和  $\tilde{f}_u$ , 输入为  $\tilde{f}_u$ , 则该系统是输入状态稳定的。因此, 根据全局一致渐近稳定性定理, 对于整个纵荡速度闭环系统, 若其状态为  $\hat{u}_e, \tilde{u}, \tilde{f}_u$ , 外部输入为  $\tilde{f}_u$ , 则该系统是输入状态稳定的。即存在一个  $\mathcal{KL}$  类函数  $\varpi_u$  和一个  $\mathcal{K}$  类函数  $\phi_u$ , 使  $E_2(t)$  满足:

$$\|E_2(t)\| \leq \varpi_u(\|E_2(0)\|, t) + \phi_u(\|\tilde{f}_u\|) \quad (26)$$

式中,  $E_2 = [\hat{u}_e, \tilde{u}, \tilde{f}_u]^T$ 。由于外部输入  $\tilde{f}_u$  是有界的, 所以误差信号  $E_2$  有界。

### 2.3 艏摇角速度控制器设计及稳定性分析

在不考虑电机特性的情况下, 双桨推进无人艇艏摇角速度的响应模型为:

$$\dot{r} = f_r + b_r \sigma_r \quad (27)$$

式中:  $f_r$  为艏摇角速度方向的不确定项;  $b_r$  为控制增益。为 ESO 子系统的设计和稳定性分析做出如下假设。

假设 2:  $f_r$  的导数有界且满足  $|\dot{f}_r| < f_r^*$ , 其中  $f_r^*$  为常数,  $f_r^* > 0$ 。

受模型不确定性和未知环境扰动的影响, 式 (27) 中的  $f_r$  为未知项。为估计该未知项, 设计如下阶线性 ESO:

$$\begin{cases} \dot{\hat{r}} = -\beta_{r1}(\hat{r} - r) + \hat{f}_r + b_r \sigma_r \\ \dot{\hat{f}}_r = -\beta_{r2}(\hat{r} - r) \end{cases} \quad (28)$$

式中:  $\hat{r}$  和  $\hat{f}_r$  分别为  $r$  和  $f_r$  的估计值;  $\beta_{r1}$  和  $\beta_{r2}$  为线性状态观测器增益。

定义估计误差  $\tilde{r} = \hat{r} - r$  和  $\tilde{f}_r = \hat{f}_r - f_r$ , 联立式 (27) 和式 (28), 可得 ESO 的误差动态方程为

$$\begin{cases} \dot{\tilde{r}} = -\beta_{r1} \tilde{r} + \tilde{f}_r \\ \dot{\tilde{f}}_r = -\beta_{r2} \tilde{r} - \tilde{f}_r \end{cases} \quad (29)$$

令  $E_3 = [\tilde{r}, \tilde{f}_r]^T$ , 将式 (29) 改写成矩阵形式:

$$\dot{E}_3 = A_2 E_3 - B_2 \dot{f}_r \quad (30)$$

式中:  $A_2 = \begin{bmatrix} -\beta_{r1} & 1 \\ -\beta_{r2} & 0 \end{bmatrix}$ ;  $B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ 。

由于  $A_2$  是赫尔维茨矩阵, 则存在一个正定矩阵  $P_2$  满足如下方程:

$$A_2^T P_2 + P_2 A_2 \leq -\varepsilon_r I_2 \quad (31)$$

式中,  $\varepsilon_r \in \mathbf{R}$ , 是一个大于 0 的常数。

根据式 (27), 为抵消艏摇角速度方向扰动, 设计如下艏摇角速度自抗扰控制律:



所示的 2 艘 CSICST-DH01 号无人艇进行试验。该无人艇装配有全球定位模块、电子罗盘、运动处理单元、飞思卡尔单片机、无刷直流电机、电子调速器、无线通信模块和电源等设备。



图 4 目标跟踪无人艇试验平台

Fig. 4 Experimental platform for target tracking of USV

本次试验的控制器参数为： $u_{\max}=0.7\text{ m/s}$ ， $\delta_{\bar{p}}=4$ ， $\beta_{u1}=1$ ， $\beta_{u2}=0.25$ ， $\beta_{r1}=1$ ， $\beta_{r2}=0.25$ ， $\xi_u=2$ ， $\xi_r=0.5$ ， $b_u=1$ ， $b_r=1$ 。为避免跟踪艇和目标艇发生碰撞，根据坐标平移原理，使跟踪艇跟踪目标艇附近的虚拟目标点，虚拟目标点在  $X_E\text{-}Y_E$  中的位置如下<sup>[14]</sup>：

$$p_v(t) = p_i(t) + R^T(\psi)q \quad (45)$$

式中： $p_v(t)$ 为虚拟目标点位置； $q$ 为位置偏移向量，本试验中选取  $q = [-2, -2]^T$ ； $R^T(\psi)$ 为旋转矩阵，且满足

$$R^T(\psi) = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi \\ \sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix} \quad (46)$$

图 5~图 7 展示了纵荡速度控制试验的结果。图 5 表明，对于给定的期望速度信号，基于 ESO 的估计值和无人艇的实际速度均能在较短的时间内稳定到期望值。图 6 显示，在纵荡速度控制律式 (13) 的作用下，在稳态时，无人艇的速度跟踪误差稳定在 0 左右。图 7 展示了无人艇在暂态和稳态时的扰动变化情况，在稳态时，扰动基本为恒定值，这与实际情况相符，说明了纵荡速度 ESO 式 (9) 的有效性。

图 8~图 10 展示了艏摇角速度控制试验的结果。图 8 表明，对于给定的期望速度信号，基于 ESO 的估计角速度和实际艏摇角速度均能在较短时间内稳定到期望值。图 9 显示，在艏摇角速度控制律式 (32) 的作用下，在稳态时，无人艇的角速度跟踪误差稳定在  $0^\circ$  左右。图 10 显示无人艇在稳态时扰动基本为恒定值，与实际情况相符，说明了艏摇角速度 ESO 式 (28) 的有效性。

图 11~图 14 展示了艏摇角速度控制试验的结果。图 11 显示了跟踪艇(红线)和目标艇(蓝线)的实际轨迹信息，从中可以看出，跟踪艇已稳定至式 (45) 设定的虚拟目标点位置。图 12 展示了

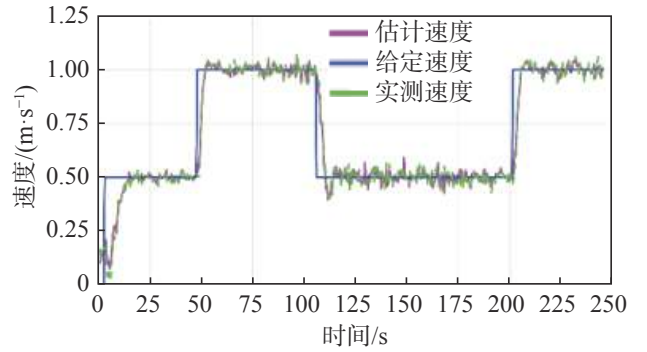


图 5 USV 纵荡速度

Fig. 5 Surge velocity of the USV

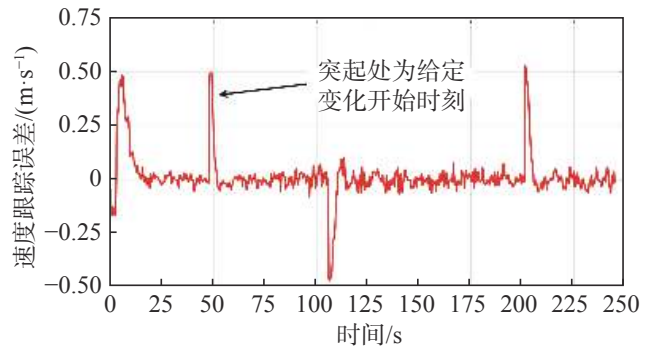


图 6 纵荡速度跟踪误差

Fig. 6 Tracking error of the surge velocity

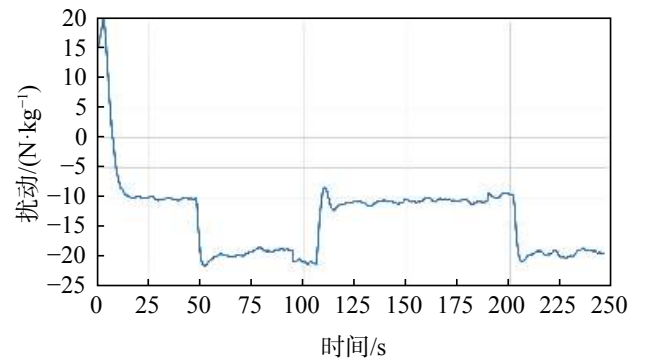


图 7 纵荡速度 ESO 的扰动估计

Fig. 7 Estimated disturbance based on the surge velocity ESO

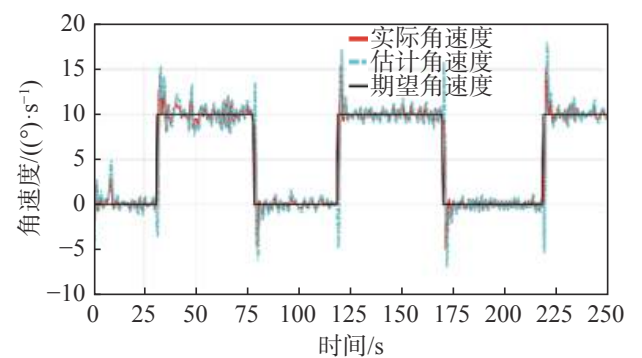


图 8 USV 艏摇角速度

Fig. 8 Yaw angular velocity of the USV

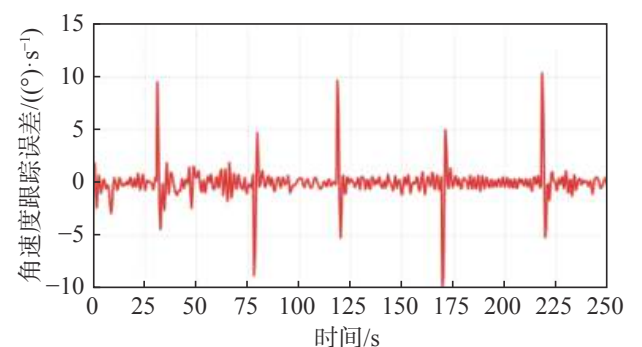


图 9 艏摇角速度跟踪误差

Fig. 9 Tracking error of the yaw angular velocity

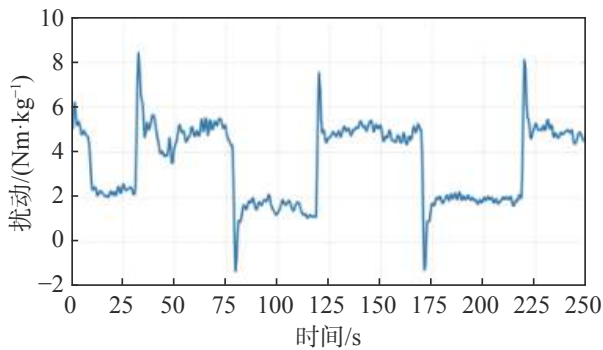


图10 船摇角速度 ESO 的扰动估计

Fig. 10 Estimated disturbance based on the yaw angular velocity ESO

跟踪艇与虚拟跟踪点的跟踪误差,从中可以发现,在所提CB制导律式(6)的作用下,无人艇的位置逐渐收敛至虚拟目标点附近,跟踪误差稳定在0 m左右。由图13和14可知,随着跟踪误差的减小,跟踪艇与虚拟目标点的航向和速度渐趋一致。本次试验湖泊中存在有水草并随机分布于水中。在75 s时经过水草密集区,由于跟踪艇推进器被水草缠绕,导致误差增大,由制导律式(6)和控制律式(13)可知,纵荡速度开始增加,纵荡速度控制输入 $\sigma_u$ 也增加,螺旋桨转速增加,摆脱水草后继续追赶目标,使跟踪状态重新回到稳态。



图11 无人艇的目标跟踪轨迹

Fig. 11 Target tracking trajectory of the USV

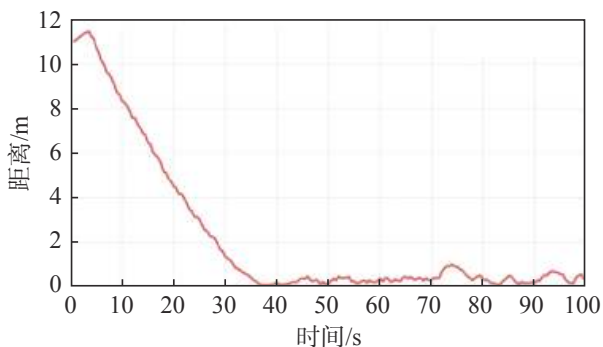


图12 基于CB制导的跟踪误差

Fig. 12 Tracking error based the CB guidance law

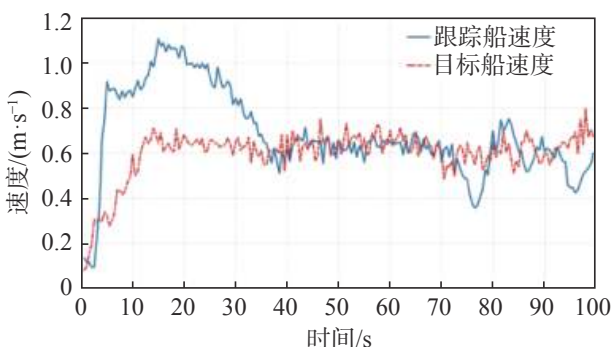


图13 跟踪艇和目标艇的速度

Fig. 13 Actual speed of the target ship and follower ship

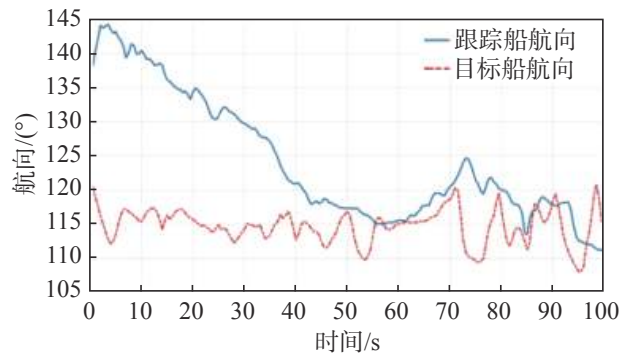


图14 跟踪艇和目标艇的航向

Fig. 14 Actual yaw of the target ship and follower ship

## 4 结 语

本文针对双桨推进无人艇的目标跟踪问题,提出了基于ESO的CB制导抗干扰目标跟踪控制方法。首先,在 $X_E-Y_E$ 和 $X_B-Y_B$ 坐标系下建立了双桨推进无人艇运动模型。接着,在运动学层级提出了基于CB制导的目标跟踪控制律,在动力学层级提出了基于ESO的纵荡速度控制律和船摇角速度控制律,克服了无人艇模型的不确定性和由未知环境扰动带来的问题。通过输入状态稳定性定理和级联定理,证明了所提控制器的稳定性。最后,通过试验证明了所提抗干扰目标跟踪控制方法的有效性。

## 参考文献:

- [1] MORTEN B, HOVSTEIN V E, FOSSEN T I. Straight-line target tracking for unmanned surface vehicles[J]. *Modeling, Identification and Control (MIC)*, 2008, 29(4): 131-149.
- [2] LI T S, ZHAO R, CHEN C L P, et al. Finite-time formation control of under-actuated ships using nonlinear sliding mode control[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2018: 3243-3253.
- [3] DO K D. Global robust adaptive path-tracking control of underactuated ships under stochastic disturbances[J]. *Ocean Engineering*, 2016, 111: 267-278.
- [4] PENG Z H, WANG J, WANG D. Distributed maneuvering of autonomous surface vehicles based on neurodynamic optimization and fuzzy approximation[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2017, 26(3): 1083-1090.
- [5] 胡建章,唐国元,王建军,等.基于自适应反步滑模的水面无人艇集群控制[J]. *中国舰船研究*, 2019, 14(6): 1-7.  
HU J Z, TANG G Y, WANG J J, et al. Swarm control of USVs based on adaptive backstepping combined with sliding mode[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2019, 14(6): 1-7 (in Chinese).
- [6] PENG Z H, WANG J, WANG D. Distributed containment maneuvering of multiple marine vessels via neurodynamics-based output feedback[J]. *IEEE Transac-*

- tions on *Industrial Electronics*, 2017, 64(5): 3831–3839.
- [7] DO K D. Synchronization motion tracking control of multiple underactuated ships with collision avoidance[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(5): 2976–2989.
- [8] 吴文涛, 古楠, 彭周华, 等. 多领航者导引无人船集群的分布式时变队形控制 [J]. *中国舰船研究*, 2020, 15(1): 1–10.  
WU W T, GU N, PENG Z H, et al. Distributed time-varying formation control for unmanned surface vehicles guided by multiple leaders[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2020, 15(1): 1–10 (in Chinese).
- [9] 吴红欣. 双舵双桨船舶的航向/航迹自适应滑模控制 [D]. 大连: 大连海事大学, 2018.  
WU H X. Adaptive iterative sliding mode control of twin-rudder twin-propeller ship course/path tracking[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2018 (in Chinese).
- [10] LYU C X, YU H S, CHI J R, et al. A hybrid coordination controller for speed and heading control of underactuated unmanned surface vehicles system[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 176: 222–230.
- [11] FOSSEN T I. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control[M]. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2011.
- [12] 邵峰. 双体双推进无人船路径跟踪控制研究 [D]. 青岛: 青岛大学, 2015.  
SHAO F. Research on path following control of the catamaran unmanned surface vehicle with two propellers[D]. Qingdao: Qingdao University, 2015 (in Chinese).
- [13] PENG Z H, WANG D, LAN W Y, et al. Robust leader-follower formation tracking control of multiple underactuated surface vessels[J]. *China Ocean Engineering*, 2012, 26(3): 521–534.
- [14] 马超, 张显库, 杨光平. 基于 Lyapunov 稳定性的船舶航向保持控制器非线性反馈改进 [J]. *中国舰船研究*, 2019, 14(1): 150–155, 161.  
MA C, ZHANG X K, YANG G P. Improved nonlinear control for ship course-keeping based on Lyapunov stability[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2019, 14(1): 150–155, 161 (in Chinese).



### (上接第 127 页)

- [11] 陈霄, 刘忠, 罗亚松, 等. 海洋环境下欠驱动无人艇航迹跟踪控制算法 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2018, 50(10): 110–117.  
CHEN X, LIU Z, LUO Y S, et al. Path tracking control algorithm for the underactuated USV in the marine environment[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2018, 50(10): 110–117 (in Chinese).
- [12] 祝镜, 王建华, 赵梦铠, 等. 关于无人水面艇路径跟踪优化控制仿真 [J]. *计算机仿真*, 2016, 33(6): 362–367.  
ZHU J, WANG J H, ZHAO M K, et al. Simulation of path following optimization control of unmanned surface vehicle[J]. *Computer Simulation*, 2016, 33(6): 362–367 (in Chinese).
- [13] 范云生, 郭晨, 赵永生, 等. 时变漂角下 USV 直线路径跟踪控制器设计与验证 [J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(11): 2514–2520.  
FAN Y S, GUO C, ZHAO Y S, et al. Design and verification of straight line path following controller for USV with time-varying drift angle[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(11): 2514–2520 (in Chinese).
- [14] FOSSEN T I, PETTERSEN K Y, GALEAZZI R. Line-of-sight path following for dubins paths with adaptive sideslip compensation of drift forces[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2015, 23(2): 820–827.
- [15] 林政, 吕霞付. 基于改进模糊算法的水面无人艇自主避障 [J]. *计算机应用*, 2019, 39(9): 2523–2528.  
LIN Z, LYU X F. Autonomous obstacle avoidance of unmanned surface vessel based on improved fuzzy algorithm[J]. *Journal of Computer Applications*, 2019, 39(9): 2523–2528 (in Chinese).
- [16] 韩京清. 自抗扰控制技术 [J]. *前沿科学*, 2007(1): 24–31.  
HAN J Q. Auto disturbances rejection control technique[J]. *Frontier Science*, 2007(1): 24–31 (in Chinese).
- [17] 贾欣乐, 杨盐生. 船舶运动数学模型: 机理建模与辨识建模 [M]. 大连: 大连海事大学出版社, 1999.  
JIA X L, YANG Y S. Mathematical model of ship motion: mechanism modeling and identification modeling[M]. Dalian: Dalian Maritime University Press, 1999 (in Chinese).