

# 控制与决策

Control and Decision

## 基于ESO的船舶航向鲁棒自适应控制

刘志全, 褚振忠

引用本文:

刘志全,褚振忠. 基于ESO的船舶航向鲁棒自适应控制[J]. *控制与决策*, 2022, 37(8): 2157–2162.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0327>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于降阶扩张状态观测器的重复控制系统设计

A method of designing a reduced-order-extended-observer-based repetitive-control system

*控制与决策*. 2022, 37(4): 933–943 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1377>

#### 具有全状态约束和未建模动态的严格反馈系统有限时间自适应动态面控制

Finite-time adaptive dynamic surface control for strict-feedback systems with full state constraints and unmodeled dynamics

*控制与决策*. 2022, 37(1): 108–118 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1023>

#### 基于神经网络的周期扰动非线性系统自适应渐近跟踪控制

Neural-networks-based adaptive asymptotic tracking control for nonlinear systems with periodic disturbances

*控制与决策*. 2022, 37(4): 922–932 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1252>

#### 输入受限下自主水下航行器路径跟踪的级联控制

Path-following control of an AUV in cascade under input saturation

*控制与决策*. 2021, 36(12): 2964–2972 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0411>

#### 磁悬浮开关磁阻电机的自适应终端滑模控制

Adaptive terminal sliding mode control of bearingless switched reluctance motor

*控制与决策*. 2021, 36(6): 1449–1456 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1064>

# 基于ESO的船舶航向鲁棒自适应控制

刘志全<sup>1†</sup>, 褚振忠<sup>2</sup>

- (1. 上海海事大学 航运技术与控制工程交通运输行业重点实验室, 上海 201306;
2. 上海海事大学 物流工程学院, 上海 201306)

**摘要:** 针对具有内部未建模动态和外部不确定扰动的水面船舶设计一种鲁棒自适应航向控制器, 并同时解决转向过程中的漂角补偿问题. 基于二阶非线性 Nomoto 模型和一阶漂角模型, 建立非积分链结构的漂角-航向非线性状态空间模型, 将航向控制系统未建模动态与外部不确定扰动合并为复合扰动, 应用扩张状态观测器估计模型中的未测量状态和系统复合扰动. 基于 Lyapunov 稳定性理论和自适应反步法设计航向状态反馈控制规律, 为避免反步法控制过程中的微分爆炸问题, 采用动态面控制技术获取虚拟控制信号的近似导数. 所提出的扩张状态观测器和航向控制算法能够保证闭环系统内所有误差信号一致最终有界, 提高航向保持和转向过程中的航向跟踪精度. 仿真结果验证了所提出的航向控制规律的有效性.

**关键词:** 扩张状态观测器; 航向控制; 动态面; 反步法; 自适应; 漂角

中图分类号: TP273 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.0327

引用格式: 刘志全, 褚振忠. 基于 ESO 的船舶航向鲁棒自适应控制 [J]. 控制与决策, 2022, 37(8): 2157-2162.

## NESO based ship heading robust adaptive control

LIU Zhi-quan<sup>1†</sup>, CHU Zhen-zhong<sup>2</sup>

- (1. Key Laboratory of Transport Industry of Marine Technology and Control Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China;
2. Logistics Engineering College, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** A robust adaptive heading controller is designed for surface ships considering the internal un-modelled dynamics and the external uncertain disturbances, and the drift angle compensation problem is solved. Based on the second order Nomoto model and the first order drift angle model, the non-integral chain drift angle-heading nonlinear state space model is established, the heading control system un-modelled dynamics and the external uncertain disturbances are considered as a lumped uncertainty, and the unmeasured states and the lumped uncertainty in the model are estimated by a extended state observer (ESO). Based on the Lyapunov stability theory and the adaptive backstepping methodology, the heading state feedback control law is designed. In order to avoid the explosion of complexity problem in the backstepping control process, the derivative of the virtual control signal is approximated by the dynamic surface control technique. The proposed ESO and heading control scheme can ensure all error signals are uniformly ultimately bounded in the closed-loop system, the tracking accuracy is improved in course keeping and course changing processes. Simulation results illustrate the effectiveness of the proposed heading control law.

**Keywords:** ESO; heading control; dynamic surface; backstepping; adaptive; drift angle

## 0 引言

为简化航向控制系统设计, 工程中通常采用一阶线性模型. 然而, 该模型是一种理想条件, 实际工况下的航向模型必然包含参数不确定和未建模动态等非线性特征. 基于一阶非线性模型, 文献[1]讨论了一种带有物理约束二阶滤波器的自适应模糊补偿航向保持控制方法; 文献[2]基于 Nussbaum 增益技术和反

步法提出了一种指数稳定的鲁棒航向保持控制方法; 文献[3]采用相似手段研究了变航速条件下的航向保持控制. 为了对抗航向控制系统中的未知时变扰动和动态不确定, 人们提出了直接和间接自适应控制方法, 其中基于观测器的控制是较好的选择. 文献[4]研究了一种基于高增益扰动观测器的鲁棒最优航向控制方法; 文献[5]提出了一种复合扰动观测器用于无

收稿日期: 2021-02-25; 录用日期: 2021-06-03.

基金项目: 国家自然科学基金项目(52001197, U2006228).

责任编委: 解学军.

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: liuzhiquan215@sina.com.

人艇的跟踪控制. 为同时估计系统扰动和未测量状态, 扩张状态观测器 (extended state observer, ESO) 被应用于欠驱动船舶的路径跟踪控制系统, 但该观测器要求系统模型为积分链结构<sup>[6-8]</sup>.

船舶航向控制包括航向保持和转向控制, 一阶模型可以满足航向保持控制要求, 但是对于转向控制必须考虑模型中的高阶非线性项. 基于二阶非线性模型, 文献[9]研究了基于Lyapunov的控制 (Lyapunov based control, LBC) 和基于Hurwitz的控制 (Hurwitz based control, HBC) 等航向控制方法, 文献[10]设计了鲁棒 $H_\infty$ 航向跟踪控制器. 然而, 这些研究均忽略了横向漂角 $\beta$ . 漂角是航速方向与船体纵轴方向的夹角, 是不易测量的时变小角度, 漂角的存在会增加航向跟踪稳态误差, 降低航向控制精度, 尤其是在船舶转向过程可能会引起航向超调, 因此, 非零漂角需要加以修正或补偿. 除直接测量外, 漂角信息可以通过估计的方法间接获取, 通常与视线法 (line of sight, LOS) 结合用于水面船舶的路径跟踪控制. 最简单的漂角估算方法是采用公式 $\beta = \arctan(v/u)$ 计算. 其中: $v$ 是横荡速度,  $u$ 是纵荡速度<sup>[11]</sup>. 文献[12]提出了一种自适应漂角补偿方法, 但需要将漂角假设为常量. 此外, 还有变速LOS、有限时间LOS和模糊自适应LOS等算法<sup>[13-15]</sup>.

为修正航向误差, 上述漂角估算方法需要船舶位置、横荡和纵荡等信号的先验信息, 这些方法通常用于基于三自由度运动模型的路径跟踪控制, 不适合基于单自由度运动模型的非线性航向控制. 为获取漂角信息以及能够更真实地模拟船舶运动状态, 本文建立漂角-航向非线性艏摇运动模型用于修正航向误差和描述船舶非线性艏摇运动. 该模型为非积分链结构, 针对该问题提出一种可用于非积分链结构模型的ESO估计漂角和系统不确定扰动, 该方法仅需航向角测量信号, 无需过多运动状态的测量装置和复杂的LOS算法. 针对修正后的航向误差和系统动态不确定, 提出一种基于ESO的鲁棒自适应 (ESO based robust adaptive, ESORBA) 航向控制规律, 该方法能够实现闭环系统误差一致最终有界.

## 1 数学模型

为研究水面船舶的航向保持和转向控制, 选择文献[9]中的改进二阶非线性模型, 即

$$\psi^{(3)} = a_1\dot{\psi}^3 + a_2\dot{\psi} + a_3\ddot{\psi} + b_1\delta + b_2\dot{\delta}. \quad (1)$$

其中: $\psi$ 为实船航向角,  $\delta$ 为舵角,  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 、 $b_1$ 和 $b_2$ 为模型参数.

定义航向误差为 $\psi_e = \psi - \psi_d$ , 由于漂角的存在,

航向角 $\psi$ 不能准确跟踪指令航向角 $\psi_d$ , 尤其是在转向控制过程. 由于漂角现象是由船舶操舵运动引起的, 文献[16]提出了一阶漂角模型 $T\dot{\beta} + \beta = -Kr$ . 其中: 模型参数满足 $T \geq K \geq 1$ ,  $r = \dot{\psi}$ 为艏摇角速度. 由于参数 $T$ 和 $K$ 会受航速和航行阻力等因素的影响, 将该模型改写成摄动形式, 即

$$\dot{\beta} = -c_1\beta - c_2\dot{\psi} + \Delta_\beta. \quad (2)$$

其中: $\Delta_\beta = -\Delta_{c_1}\beta - \Delta_{c_2}\dot{\psi}$ 为有界不确定扰动 (即 $|\Delta_\beta| \leq \Delta_{\beta \max}$ ,  $\Delta_{\beta \max}$ 是未知正常数),  $c_1$ 和 $c_2$ 为模型参数标称值且满足 $0 < c_1 < 1$ 和 $0 < c_2 < 1$ .

将式(1)和(2)合并, 构建漂角-航向非线性状态空间模型, 有

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_3, \\ \dot{x}_2 = -c_1x_2 - c_2x_3 + \Delta_\beta, \\ \dot{x}_3 = x_4, \\ \dot{x}_4 = f(x_3, x_4) + b_1u_0 + w. \end{cases} \quad (3)$$

其中: $x_1 = \psi$ 、 $x_2 = \beta$ 、 $x_3 = \dot{\psi}$ 和 $x_4 = \ddot{\psi}$ 为系统状态,  $w$ 为外部不确定扰动,  $u_0 = \delta + \frac{b_2}{b_1}\dot{\delta}$ 为舵机伺服系统的控制输入, 非线性函数 $f(x_3, x_4) = a_1\dot{\psi}^3 + a_2\dot{\psi} + a_3\ddot{\psi}$ 为系统未建模动态.

**假设1** 漂角模型中的不确定扰动为慢变扰动, 即 $\dot{\Delta}_\beta = 0$ .

**假设2** 闭环控制系统只有航向角信号是测量输出, 其他状态信号均通过估计的方法获取.

**定义1**  $\hat{\bullet}$ 为 $\bullet$ 的估计,  $\tilde{\bullet} = \bullet - \hat{\bullet}$ 为估计误差,  $\bullet$ 可以是标量也可以是向量.

## 2 航向控制器设计

### 2.1 扩张状态观测器

为了有效估计漂角等系统状态和系统扰动, 研究一种适用于非积分链结构模型的ESO. 将模型(3)中的系统未建模动态和外部不确定扰动合并为复合扰动, 并将其定义为新的状态 $x_5 = d(t) = f(x_3, x_4) + w$ , 从而得到扩张状态空间模型为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_3, \\ \dot{x}_2 = -c_1x_2 - c_2x_3 + \Delta_\beta, \\ \dot{x}_3 = x_4, \\ \dot{x}_4 = b_1u_0 + x_5, \\ \dot{x}_5 = h(t). \end{cases} \quad (4)$$

模型(4)可表达为如下矩阵方程形式:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}) + \mathbf{B}b_1u_0 + \mathbf{v}_x, \\ \mathbf{y} = \boldsymbol{\psi} = \mathbf{C}\mathbf{x}. \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5]^T, \mathbf{B} = [0, 0, 0, 1, 0]^T, \\ \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}) &= [\varphi_1(\mathbf{x}), \varphi_2(\mathbf{x}), 0, 0, 0]^T = \\ & [x_3 - x_2, -(1 + c_2)x_3 - c_1x_2, 0, 0, 0]^T, \\ \mathbf{C} &= [1, 0, 0, 0, 0], \mathbf{v}_x = [0, \Delta_\beta, 0, 0, h(t)]^T, \\ \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

假设3  $\varphi_1(\mathbf{x})$  和  $\varphi_2(\mathbf{x})$  同时满足Lipschitz条件, 即存在不等式关系  $\varphi_1(\mathbf{x}) - \varphi_1(\hat{\mathbf{x}}) \leq L_1|\tilde{x}_2| + L_2|\tilde{x}_3|$  和  $\varphi_2(\mathbf{x}) - \varphi_2(\hat{\mathbf{x}}) \leq L_3|\tilde{x}_2| + L_4|\tilde{x}_3|$ , 参数  $L_1, L_2, L_3$  和  $L_4$  为正常数.

构造ESO为如下形式:

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} + \boldsymbol{\varphi}(\hat{\mathbf{x}}) + \mathbf{B}b_1u_0 + \mathbf{H}(y - \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}). \quad (6)$$

其中:  $\mathbf{H} = \left[ \frac{\alpha_1}{\varepsilon}, \frac{\alpha_2}{\varepsilon^2}, \frac{\alpha_3}{\varepsilon^3}, \frac{\alpha_4}{\varepsilon^4}, \frac{\alpha_5}{\varepsilon^5} \right]^T$  为观测器增益向量, 参数满足  $\alpha_1 > 0, \alpha_2 > 0, \alpha_3 > 0, \alpha_4 > 0, \alpha_5 > 0$  和  $0 < \varepsilon < 1$ .

根据扩张状态模型(5)和观测器(6), 可得系统观测误差状态空间模型为

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}} = (\mathbf{A} - \mathbf{H}\mathbf{C})\tilde{\mathbf{x}} + \tilde{\boldsymbol{\varphi}} + \mathbf{v}_x. \quad (7)$$

其中:  $\tilde{\boldsymbol{\varphi}} = \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}) - \boldsymbol{\varphi}(\hat{\mathbf{x}}) = [\tilde{\varphi}_1, \tilde{\varphi}_2, 0, 0, 0]^T$ , 且有  $\tilde{\varphi}_1 = \varphi_1(\mathbf{x}) - \varphi_1(\hat{\mathbf{x}})$  和  $\tilde{\varphi}_2 = \varphi_2(\mathbf{x}) - \varphi_2(\hat{\mathbf{x}})$ .

定义新的误差向量

$$\boldsymbol{\eta} = [\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4, \eta_5]^T = \left[ \frac{\tilde{x}_1}{\varepsilon^4}, \frac{\tilde{x}_2}{\varepsilon^3}, \frac{\tilde{x}_3}{\varepsilon^2}, \frac{\tilde{x}_4}{\varepsilon}, \tilde{x}_5 \right]^T, \quad (8)$$

得到新的观测误差动态模型

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \frac{1}{\varepsilon}\mathbf{A}_\eta\boldsymbol{\eta} + \boldsymbol{\varphi}_\eta + \mathbf{v}_\eta. \quad (9)$$

其中

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\varphi}_\eta &= \left[ \frac{\tilde{\varphi}_1}{\varepsilon^4}, \frac{\tilde{\varphi}_2}{\varepsilon^3}, 0, 0, 0 \right]^T = [\varphi_{\eta 1}, \varphi_{\eta 2}, 0, 0, 0]^T, \\ \mathbf{v}_\eta &= \left[ 0, \frac{\Delta_\beta}{\varepsilon^3}, 0, 0, h(t) \right]^T, \mathbf{A}_\eta = \begin{bmatrix} -\alpha_1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\alpha_2 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\alpha_3 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\alpha_4 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\alpha_5 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

假设4 式(9)中的扰动向量有界, 即  $\|\mathbf{v}_\eta\| \leq v_{\eta 0}$ , 其中  $v_{\eta 0}$  是未知正常数.

由假设3可得  $|\varphi_{\eta 1}| \leq \frac{L_1}{\varepsilon^4}|\tilde{x}_2| + \frac{L_2}{\varepsilon^4}|\tilde{x}_3|$  和  $|\varphi_{\eta 2}| \leq \frac{L_3}{\varepsilon^3}|\tilde{x}_2| + \frac{L_4}{\varepsilon^3}|\tilde{x}_3|$ , 因此有  $\|\boldsymbol{\varphi}_\eta\| \leq L_\eta\|\boldsymbol{\eta}\|$ , 其中  $L_\eta$  为正

常数. 选择参数  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$  和  $\alpha_5$  使  $\mathbf{A}_\eta$  为Hurwitz矩阵, 则存在正定矩阵  $\mathbf{P}$  满足下式:

$$\mathbf{A}_\eta^T\mathbf{P} + \mathbf{P}\mathbf{A}_\eta = -\mathbf{I}. \quad (10)$$

为证明观测误差系统的稳定性, 选择Lyapunov函数为

$$V_\eta = \boldsymbol{\eta}^T\mathbf{P}\boldsymbol{\eta}. \quad (11)$$

对上式求导得

$$\begin{aligned} \dot{V}_\eta &= \dot{\boldsymbol{\eta}}^T\mathbf{P}\boldsymbol{\eta} + \boldsymbol{\eta}^T\mathbf{P}\dot{\boldsymbol{\eta}} = \\ & \frac{1}{\varepsilon}\boldsymbol{\eta}^T(\mathbf{A}_\eta^T\mathbf{P} + \mathbf{P}\mathbf{A}_\eta)\boldsymbol{\eta} + 2\boldsymbol{\eta}^T\mathbf{P}\boldsymbol{\varphi}_\eta + 2\boldsymbol{\eta}^T\mathbf{P}\mathbf{v}_\eta = \\ & -\frac{1}{\varepsilon}\boldsymbol{\eta}^T\boldsymbol{\eta} + 2\boldsymbol{\eta}^T\mathbf{P}\boldsymbol{\varphi}_\eta + 2\boldsymbol{\eta}^T\mathbf{P}\mathbf{v}_\eta \leq \\ & -\frac{1}{\varepsilon}\|\boldsymbol{\eta}\|^2 + 2\lambda_{\max}(\mathbf{P})\|\boldsymbol{\eta}\|\|\boldsymbol{\varphi}_\eta\| + \\ & 2\lambda_{\max}(\mathbf{P})\|\boldsymbol{\eta}\|\|\mathbf{v}_\eta\| \leq \\ & -\frac{1}{\varepsilon}\|\boldsymbol{\eta}\|^2 + 2L_\eta\lambda_{\max}(\mathbf{P})\|\boldsymbol{\eta}\|^2 + \\ & 2v_{\eta 0}\lambda_{\max}(\mathbf{P})\|\boldsymbol{\eta}\| \leq \\ & -\left[ \frac{1}{\varepsilon\lambda_{\max}(\mathbf{P})} - 2L_\eta \right]\boldsymbol{\eta}^T\mathbf{P}\boldsymbol{\eta} + 2v_{\eta 0}\lambda_{\max}(\mathbf{P})\|\boldsymbol{\eta}\| \leq \\ & -\tau_\eta V_\eta + \theta_\eta. \end{aligned} \quad (12)$$

其中: 参数  $\varepsilon$  满足  $\varepsilon < \frac{1}{2L_\eta\lambda_{\max}(\mathbf{P})}$ ,  $\lambda_{\max}(\mathbf{P})$  为矩阵  $\mathbf{P}$  的最大特征值. 因此, 所提出的ESO能够保证所有状态观测误差满足一致最终有界.

## 2.2 控制规律设计

利用自适应反步法和动态面控制设计航向控制规律. 为补偿漂角, 定义虚拟误差为

$$z_1 = \psi_e + \beta = x_1 - \psi_d + x_2. \quad (13)$$

为最小化该虚拟误差, 定义Lyapunov函数如下:

$$V_1 = \frac{1}{2}z_1^2. \quad (14)$$

对上式求导, 得

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= z_1\dot{z}_1 = z_1(\dot{x}_1 - \dot{\psi}_d + \dot{x}_2) = \\ & z_1[-c_1x_2 + (1 - c_2)x_3 - \dot{\psi}_d + \Delta_\beta]. \end{aligned} \quad (15)$$

针对  $V_1$  选择虚拟控制规律

$$q_1 = \frac{1}{1 - c_2}(-k_1z_1 + c_1x_2 + \dot{\psi}_d - \hat{\Delta}_\beta), \quad (16)$$

其中  $k_1$  为设计的正常数.

为避免反步法中对虚拟控制信号求导引起的微分爆炸问题, 利用动态面控制方法求取  $q_1$  的近似导数  $\dot{q}_{1f}$ , 定义一阶滤波器

$$\gamma_1\dot{q}_{1f} + q_{1f} = q_1, \quad q_{1f}(0) = q_1(0). \quad (17)$$

其中:  $\gamma_1 > 0$  为时间常数,  $q_{1f}(0)$  和  $q_1(0)$  为初值. 由上式可得

$$\dot{q}_{1f} = \frac{1}{\gamma_1}(q_1 - q_{1f}). \quad (18)$$

由模型(3)知, 系统状态  $x_1$  和  $x_2$  被状态  $x_3$  直接驱动, 令滤波误差为  $e_1 = q_1 - q_{1f}$ , 定义新的虚拟误差

$$z_2 = x_3 - q_{1f} = x_3 - q_1 + e_1. \quad (19)$$

将式(16)和(19)代入(15), 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 = & -k_1 z_1^2 + (1 - c_2)z_1 z_2 + z_1 \tilde{\Delta}_\beta - \\ & (1 - c_2)z_1 e_1. \end{aligned} \quad (20)$$

为稳定虚拟误差  $z_2$ , 选择Lyapunov函数

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2}z_2^2. \quad (21)$$

求导可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = \dot{V}_1 + z_2 \dot{z}_2 = \dot{V}_1 + z_2(\dot{x}_3 - \dot{q}_{1f}) = \\ -k_1 z_1^2 + z_2[(1 - c_2)z_1 + x_4 - \dot{q}_{1f}] + \\ z_1 \tilde{\Delta}_\beta - (1 - c_2)z_1 e_1. \end{aligned} \quad (22)$$

针对  $V_2$  选择虚拟控制规律

$$q_2 = -k_2 z_2 - (1 - c_2)z_1 + \dot{q}_{1f}, \quad (23)$$

其中  $k_2$  为设计的正常数.

为获取  $q_2$  的近似导数  $\dot{q}_{2f}$ , 定义一阶滤波器

$$\gamma_2 \dot{q}_{2f} + q_{2f} = q_2, \quad q_{2f}(0) = q_2(0). \quad (24)$$

其中:  $\gamma_2 > 0$  为时间常数,  $q_{2f}(0)$  和  $q_2(0)$  为初值. 由上式可得

$$\dot{q}_{2f} = \frac{1}{\gamma_2}(q_2 - q_{2f}). \quad (25)$$

令滤波误差为  $e_2 = q_2 - q_{2f}$ , 定义新的虚拟误差

$$z_3 = x_4 - q_{2f} = x_4 - q_2 + e_2. \quad (26)$$

将式(23)和(26)代入(22), 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = & -k_1 z_1^2 - k_2 z_2^2 + z_2 z_3 + z_1 \tilde{\Delta}_\beta - \\ & (1 - c_2)z_1 e_1 - z_2 e_2. \end{aligned} \quad (27)$$

为稳定虚拟误差  $z_3$ , 选择Lyapunov函数

$$V_3 = V_2 + \frac{1}{2}z_3^2. \quad (28)$$

对上式求导, 得

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 = \dot{V}_2 + z_3 \dot{z}_3 = \dot{V}_2 + z_3(\dot{x}_4 - \dot{q}_{2f}) = \\ \dot{V}_2 + z_3(b_1 u_0 + d - \dot{q}_{2f}) = \\ -k_1 z_1^2 - k_2 z_2^2 + z_3(z_2 + b_1 u_0 + d - \dot{q}_{2f}) + \\ z_1 \tilde{\Delta}_\beta - (1 - c_2)z_1 e_1 - z_2 e_2. \end{aligned} \quad (29)$$

选择控制规律

$$u_0 = \frac{1}{b_1}(-k_3 z_3 - z_2 - d + \dot{q}_{2f}), \quad (30)$$

则式(29)可表达为

$$\dot{V}_3 = \sum_{i=1}^3 -k_i z_i^2 + z_1 \tilde{\Delta}_\beta - (1 - c_2)z_1 e_1 - z_2 e_2. \quad (31)$$

为稳定漂角不确定的估计误差和动态面的滤波误差, 定义Lyapunov函数

$$V = V_3 + \frac{1}{2a_\beta} \tilde{\Delta}_\beta^2 + \frac{1}{2}e_1^2 + \frac{1}{2}e_2^2. \quad (32)$$

求导可得

$$\dot{V} = \dot{V}_3 - \frac{1}{a_\beta} \tilde{\Delta}_\beta \dot{\tilde{\Delta}}_\beta + e_1 \dot{e}_1 + e_2 \dot{e}_2. \quad (33)$$

根据动态面式(17)和(18), 可得如下关系:

$$\dot{e}_i = \frac{dq_i}{dt} - \frac{e_i}{\gamma_i} \leq B_i(\cdot) - \frac{e_i}{\gamma_i} \leq B_{iM} - \frac{e_i}{\gamma_i}, \quad i = 1, 2, \quad (34)$$

其中  $B_i(\cdot)$  是存在最大值  $B_{iM}$  的连续函数, 并且是  $dq_i/dt$  的上界, 即  $|dq_i/dt| \leq B_i(\cdot)$ . 因此, 有不等式关系

$$e_i \dot{e}_i \leq |e_i| B_{iM} - \frac{e_i^2}{\gamma_i} \leq \frac{1}{2}e_i^2 + \frac{1}{2}B_{iM}^2 - \frac{e_i^2}{\gamma_i}, \quad (35)$$

$$-(1 - c_2)z_1 e_1 \leq \frac{(1 - c_2)^2}{2}z_1^2 + \frac{1}{2}e_1^2, \quad (36)$$

$$-z_2 e_2 \leq \frac{1}{2}z_2^2 + \frac{1}{2}e_2^2. \quad (37)$$

定义漂角不确定扰动的自适应规律如下:

$$\dot{\tilde{\Delta}}_\beta = a_\beta(z_1 - \sigma_\beta \tilde{\Delta}_\beta), \quad (38)$$

其中  $a_\beta$  和  $\sigma_\beta$  为设计的正常数.

进一步, 考虑不等式关系

$$\begin{aligned} z_1 \tilde{\Delta}_\beta - \frac{1}{a_\beta} \tilde{\Delta}_\beta \dot{\tilde{\Delta}}_\beta = \sigma_\beta \tilde{\Delta}_\beta (\Delta_\beta - \tilde{\Delta}_\beta) \leq \\ \frac{1}{2}\sigma_\beta \tilde{\Delta}_\beta^2 + \frac{1}{2}\sigma_\beta \Delta_\beta^2 - \sigma_\beta \tilde{\Delta}_\beta^2 \leq \\ \frac{1}{2}\sigma_\beta \Delta_\beta^2_{\max} - \frac{1}{2}\sigma_\beta \tilde{\Delta}_\beta^2. \end{aligned} \quad (39)$$

将式(35)~(39)代入(33), 得

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -\left[k_1 - \frac{1}{2}(1 - c_2)^2\right]z_1^2 - \left[k_2 - \frac{1}{2}\right]z_2^2 - k_3 z_3^2 - \\ & \frac{1}{2}\sigma_\beta \tilde{\Delta}_\beta^2 - \left(\frac{1}{\gamma_1} - 1\right)e_1^2 - \left(\frac{1}{\gamma_2} - 1\right)e_2^2 + \\ & \frac{1}{2}\sigma_\beta \Delta_\beta^2_{\max} + \frac{1}{2}B_{1M}^2 + \frac{1}{2}B_{2M}^2 \leq \\ & -\tau V + \theta. \end{aligned} \quad (40)$$

其中

$$\tau = \min \left\{ 2k_1 - (1 - c_2)^2, 2k_2 - 1, 2k_3, \right.$$

$$\left. a_\beta \sigma_\beta, 2\left(\frac{1}{\gamma_1} - 1\right), 2\left(\frac{1}{\gamma_2} - 1\right) \right\},$$

$$\theta = \frac{1}{2}\sigma_\beta \Delta_\beta^2_{\max} + \frac{1}{2}B_{1M}^2 + \frac{1}{2}B_{2M}^2.$$

根据基于观测器控制的分离原理,状态反馈控制器和观测器可以独立设计.用前面构建的ESO所获取的系统状态估计替换航向控制规律(30)和自适应规律(38)中的状态,即可得到最终的航向控制规律和漂角模型不确定扰动的自适应规律,即

$$u_0 = \frac{1}{b_1}(-k_3 \hat{z}_3 - \hat{z}_2 - \hat{x}_5 + \dot{q}_{2f}), \quad (41)$$

$$\dot{\Delta}_\beta = a_\beta(\hat{z}_1 - \sigma_\beta \Delta_\beta). \quad (42)$$

其中:  $\hat{z}_1 = \hat{x}_1 - \psi_d + \hat{x}_2$ ,  $\hat{z}_2 = \hat{x}_3 - q_{1f}$ ,  $\hat{z}_3 = \hat{x}_4 - q_{2f}$ .

根据前述对Lyapunov函数 $V_\eta$ 和 $V$ 的分析可知,ESOBRA航向控制规律(41)和自适应规律(42)能保证闭环系统内所有误差信号均为一致最终有界,使得闭环系统稳定.

为避免船体转向时消耗过大舵角,采用预滤波方法.将目标航向角 $\psi_r$ 通过一个二阶滤波器获取光滑的指令航向角 $\psi_d$ 及其角速度 $\dot{\psi}_d$ ,滤波器形式为

$$\ddot{\psi}_d + 2\xi\omega\dot{\psi}_d + \omega^2\psi_d = \omega^2\psi_r. \quad (43)$$

其中: $\xi$ 为阻尼系数, $\omega$ 为频率.

### 3 仿真分析

为验证本文方法的有效性,以文献[9]中的船舶模型为研究对象,外部时变扰动和漂角模型不确定扰动如下:

$$w = 0.3[0.1 + 0.1 \cos(0.3t) + 0.1 \sin(0.5t)], \quad (44)$$

$$\Delta_\beta = 0.015[0.1 \sin(0.2t) + 0.1 \cos(0.3t)]. \quad (45)$$

基于二阶非线性模型设计控制规律,将本文研究的ESOBRA方法与文献[9]中的LBC方法进行对比,结果如图1~图4所示.航向角仿真对比结果见图1,

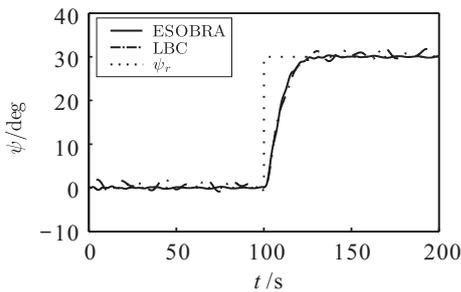


图1 航向角对比

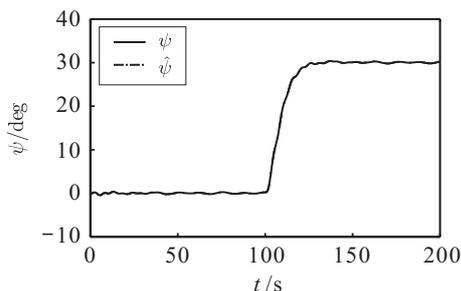


图2 航向角估计

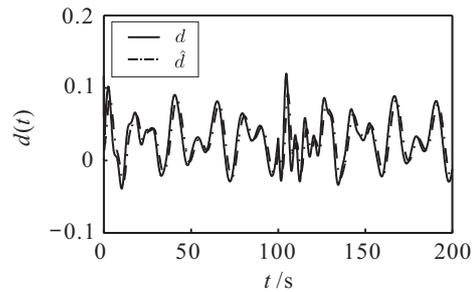


图3 复合扰动估计

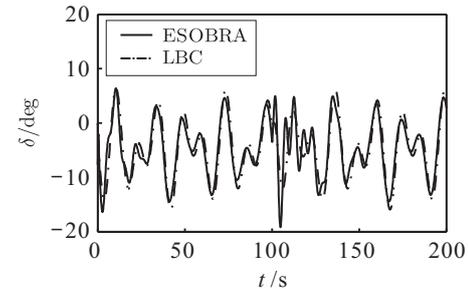


图4 舵角对比

可见,本文方法在航向保持控制过程中能够有效减小航向误差,并在转向过程中能够保证航向平稳快速跟踪,避免了航向超调现象.图2和图3为航向角和扩展状态(即复合扰动)的估计,显然,本文所提出的ESO具有较高的估计精度且仅需航向角的测量反馈信息,而LBC方法则需要系统状态的全部测量信息.图4的仿真结果为两种控制方法的舵角输出对比,所对应的数字特征见表1.可见,两种方法的舵角均值基本相等,但是LBC方法的舵角方差较大(即舵角输出幅值较大).因此,本文方法能够节约舵机系统驱动能量并减少舵机磨损,更加符合实际工程的需要.

表1 舵角的数字特征

	均值/deg	方差/deg <sup>2</sup>
ESOBRA	-4.7	27.06
LBC	-4.71	31.12

### 4 结论

针对水面船舶航向控制中的漂角补偿问题,考虑船舶模型的高阶非线性和未知外部干扰的情况,本文提出了一种ESOBRA航向控制方法.基于所构建的非积分链结构的漂角-航向非线性船摇运动模型构造ESO,估计船舶运动状态、漂角和系统复合扰动.设计了基于反步法的航向控制规律,采用自适应方法估计漂角模型的不确定扰动.本文算法对系统内部扰动和外部扰动均具有较强的鲁棒性,不需要系统未建模动态和不确定扰动的先验信息,能够保证闭环系统所有误差信号均为一致最终有界.本文方法可用于测量装置有限或配置低成本测量装置的自动舵控制系统

统,可为船舶控制工程实践提供理论参考.

### 参考文献(References)

- [1] 朱冬健, 马宁, 顾解仲. 船舶航向非线性系统自适应模糊补偿控制[J]. 上海交通大学学报, 2015, 49(2): 250-254.  
(Zhu D J, Ma N, Gu X C. Adaptive fuzzy compensation control for nonlinear ship course-keeping[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2015, 49(2): 250-254.)
- [2] 田佰军, 刘正江, 郑云峰. 控制方向未知条件下不确定船舶航向鲁棒 $\lambda$ 调节控制[J]. 控制与决策, 2016, 31(11): 2059-2064.  
(Tian B J, Liu Z J, Zheng Y F. Robust  $\lambda$  adaptive control for uncertain ship course keeping with unknown control direction[J]. Control and Decision, 2016, 31(11): 2059-2064.)
- [3] Wu R, Du J L. Adaptive robust course-tracking control of time-varying uncertain ships with disturbances[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2019, 17(7): 1847-1855.
- [4] 王虎军, 王璐. 基于高增益观测器的船舶航迹鲁棒跟踪控制[J]. 中国造船, 2015, 56(3): 146-153.  
(Wang H J, Wang L. Path following control for a surface ship based on high gain observer[J]. Shipbuilding of China, 2015, 56(3): 146-153.)
- [5] Qu Y H, Xiao B, Fu Z Z, et al. Trajectory exponential tracking control of unmanned surface ships with external disturbance and system uncertainties[J]. ISA Transactions, 2018, 78: 47-55.
- [6] 沈智鹏, 邹天宇, 王茹. 基于扩张观测器的欠驱动船舶轨迹跟踪低频学习自适应动态面输出反馈控制[J]. 控制理论与应用, 2019, 36(6): 867-876.  
(Shen Z P, Zou T Y, Wang R. Extended state observer based adaptive dynamic surface output feedback control for underactuated surface vessel trajectory tracking with low-frequency learning[J]. Control Theory & Applications, 2019, 36(6): 867-876.)
- [7] Liu L, Wang D, Peng Z H. State recovery and disturbance estimation of unmanned surface vehicles based on nonlinear extended state observers[J]. Ocean Engineering, 2019, 171: 625-632.
- [8] 柳晨光, 初秀民, 毛庆洲, 等. 无人船自适应路径跟踪控制系统[J]. 机械工程学报, 2020, 56(8): 216-227.  
(Liu C G, Chu X M, Mao Q Z, et al. Adaptive path following control system for unmanned surface vehicles[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(8): 216-227.)
- [9] Perera L P, Soares C G. Lyapunov and Hurwitz based controls for input-output linearisation applied to nonlinear vessel steering[J]. Ocean Engineering, 2013, 66: 58-68.
- [10] Alfi A, Shokrzadeh A, Asadi M. Reliability analysis of  $H_\infty$  control for a container ship in way-point tracking[J]. Applied Ocean Research, 2015, 52: 309-316.
- [11] 朱骋, 庄佳园, 张磊, 等. 基于改进视线法的欠驱动无人艇路径跟踪[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(6): 784-791.  
(Zhu C, Zhuang J Y, Zhang L, et al. Path following of underactuated unmanned surface vehicles based on the improved line-of-sight guidance strategy[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2020, 41(6): 784-791.)
- [12] 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.
- [13] Wang N, Sun Z, Su S F, et al. Fuzzy uncertainty observer-based path-following control of underactuated marine vehicles with unmodeled dynamics and disturbances[J]. International Journal of Fuzzy Systems, 2018, 20(8): 2593-2604.
- [14] Yu Y L, Guo C, Yu H M. Finite-time PLOS-based integral sliding-mode adaptive neural path following for unmanned surface vessels with unknown dynamics and disturbances[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2019, 16(4): 1500-1511.
- [15] Nie J, Lin X G. FAILOS guidance law based adaptive fuzzy finite-time path following control for underactuated MSV[J]. Ocean Engineering, 2020, 195: 106726.
- [16] Yu Z Y, Bao X P, Nonami K. Course keeping control of an autonomous boat using low cost sensors[J]. Journal of System Design and Dynamics, 2008, 2(1): 389-400.

### 作者简介

刘志全(1986—), 男, 副教授, 博士, 从事船舶运动控制的研究, E-mail: liuzhiquan215@sina.com;

褚振忠(1986—), 男, 副教授, 博士, 从事水下机器人运动控制、故障诊断等研究, E-mail: chu\_zhenzhong@163.com.

(责任编辑: 李君玲)