

文章编号: 1007-7294(2025)12-1895-11

基于 NESO 的改进非奇异终端滑模船舶航向控制

常雨芳¹, 王澳黎¹, 夏亚平¹, 严怀成², 黄文聪¹

(1. 湖北工业大学 电气与电子工程学院, 武汉 430068; 2. 华东理工大学 信息科学与工程学院, 上海 200237)

摘要: 针对船舶航行过程航向易受外界环境扰动问题, 本文提出一种基于非线性扩张状态观测器的改进非奇异终端滑模控制策略。首先, 建立船舶航向系统非线性数学模型, 设计了基于双曲正切函数的非线性扩张状态观测器, 对船舶航行过程受到的外界扰动进行估计, 并进行前馈补偿; 然后, 引入改进非奇异终端滑模面和双幂次趋近律, 设计了改进非奇异终端滑模控制律, 降低了滑模控制律抖振, 提高了滑模控制律收敛速度, 并将非线性扩张状态观测器和改进非奇异终端滑模控制律结合构成复合控制律; 最后, 基于李雅普诺夫稳定性理论对控制律的稳定性进行了分析。仿真结果表明, 所提出的控制策略能有效提高船舶航向控制系统的跟踪性能和鲁棒性。

关键词: 船舶; 船舶航向控制; 非奇异终端滑模控制; 非线性扩张状态观测器; 鲁棒性

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1007-7294.2025.12.007

Improved non-singular terminal sliding mode of ship heading control based on NESO

CHANG Yu-fang¹, WANG Ao-li¹, XIA Ya-ping¹, YAN Huai-cheng², HUANG Wen-cong¹

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China; 2. School of Information Science and Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: Aiming at the problem that the ship's course is easily disturbed by the external environment during navigation, an improved non-singular terminal sliding mode control strategy based on Nonlinear Extended State Observer (NESO) is proposed. Firstly, a nonlinear mathematical model of ship's heading system is established, and a nonlinear expanded state observer based on the hyperbolic tangent function is designed to estimate the external disturbances encountered during the ship's navigation and perform feedforward compensation. Then, based on the improved non-singular terminal sliding mode surface and the double power reaching law, an improved non-singular terminal sliding mode control law is designed, which reduces the chattering of the sliding mode control law and improves the convergence speed. The nonlinear extended state observer and the improved non-singular terminal sliding mode control law are combined to form a composite control law. Finally, the stability of the control law is analyzed based on Lyapunov stability theory. Simulation results show the proposed control strategy can effectively improve the tracking performance and robustness of the ship heading control system.

收稿日期: 2025-06-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (62473133)

作者简介: 常雨芳(1980-), 女, 教授, 通讯作者: E-mail: changyf@hbut.edu.cn; 王澳黎(1999-), 男, 硕士研究生; 夏亚平(1990-), 女, 副教授; 严怀成(1977-), 男, 教授; 黄文聪(1977-), 男, 副教授。

Key words: ship; ship heading control; non singular terminal sliding mode control; nonlinear extended state observer; robustness

0 引言

船舶航运是国际贸易的重要组成部分,而航向控制直接影响船舶航行的可靠性、安全性和经济性,因此,船舶航向系统的控制器设计成为船舶设计的关键环节之一^[1]。然而,船舶作为一种大惯性非线性系统,航行过程中通常会受到外界风、浪、流等的干扰,导致对船舶航向的精确控制变得十分困难^[2],因此,如何设计高精度、强鲁棒性的船舶航行控制策略具有十分重要的研究意义^[3-4]。

船舶航向控制通常包含航向保持和航向改变两方面,它们期望以最小的舵角变化控制船舶,使船舶以最小超调量来快速精确跟踪设定航向角,从而提高船舶的经济性和操纵性,优化船舶航速^[5-6]。随着各种先进控制技术的发展,国内外学者针对船舶航向控制提出了多种控制策略。文献[7]提出了一种船舶航向静态抗饱和控制策略;文献[8]提出了一种基于广义动态模糊神经网络的鲁棒自适应无人艇航向控制;文献[9]提出了一种基于自适应反步的船舶航向控制策略;文献[10]提出了一种基于状态空间方程的模型预测控制算法;文献[11]提出了一种自适应模糊最优控制策略;文献[12]提出了一种基于两层前馈神经网络的船舶航向控制策略。上述文献虽然在一定程度上提高了船舶航向的跟踪精度,但是控制策略较为复杂,且受到环境扰动时,系统鲁棒性较差。

滑模控制对系统受到的扰动有强鲁棒性,且易于实现,因此,近年来逐渐被应用于船舶航向控制。文献[13]提出了一种反步滑模自抗扰控制方法,提高了船舶航向系统的鲁棒性。文献[14]设计了三种不同的船舶航向滑模控制器,提高了船舶航向跟踪精度,但三种滑模控制均存在抖振问题。文献[15]提出了一种鲁棒积分反步滑模船舶航向控制器,有效降低了滑模控制抖振。文献[16]提出了一种应用于二阶非线性系统的非奇异终端滑模控制器,通过设计非奇异终端滑模面,降低了传统滑模控制系统抖振。文献[17]对传统非奇异终端滑模面进行改进,提高了系统收敛速度,改善了滑模控制器性能。文献[18]采用了一种双幂次趋近律来设计滑模控制律,改善滑模控制趋近阶段的动态品质,降低了系统抖振。为了进一步抑制非奇异终端滑模控制抖振,文献[19]提出了一种基于扩张状态观测器(Extended state observer, ESO)的非奇异终端滑模控制器,设计 ESO 对系统扰动进行估计并补偿。ESO 可以对系统状态和受到的外界扰动进行实时估计和补偿,抑制外界扰动对系统的影响,从而提高系统鲁棒性^[20]。文献[21]提出一种非线性扩张状态观测器(Nonlinear extended state observer, NESO),抑制了传统 ESO 初始时刻的微分峰值现象,提高了 ESO 估计精度和收敛速度。

基于上述分析,考虑到 NESO 的观测精度更高、收敛速度更快,以及改进非奇异终端滑模控制的抖振更小、收敛速度更快,本文提出一种基于 NESO 的改进非奇异终端滑模船舶航向控制策略。本文的创新点如下:(1)设计基于双曲正切函数的 NESO 对外界环境扰动进行估计,抑制观测器的微分峰值现象,提高观测器的估计精度;(2)设计改进非奇异终端滑模面,来进一步提高滑模控制收敛速度;引入误差系数函数来设计双幂次趋近律,改善滑模控制趋近阶段动态品质,同时将 NESO 的估计值补偿到非奇异终端滑模控制律构成复合控制律,进一步降低非奇异终端滑模控制的抖振。

1 船舶航向系统数学模型

船舶航行过程在 Oxy 坐标系下的简化模型如图 1 所示,其中设定航向角为 ψ_r ,实际航向角为 ψ ,船舶舵角为 δ ,波浪线为受到的外界环境扰动 d 包括风、浪、流等。

船舶航向模型最常用的是野本(Nomoto)方程,但是随着实际工程控制精度的需求提高,考虑船舶自身和环境情况,通常采用野本方程加上一个非线性项构成^[22],得到船舶航向模型为

$$T\ddot{\psi} + n_1\dot{\psi} + n_2\psi^3 = K\delta \quad (1)$$

式中: T 为船舶追随性时间指数, K 为舵机控制增益系数, n_1 、 n_2 为系统参数, 其取值会影响船舶航行稳定性, 通过螺线或逆螺线试验可以确定非线性特征项 $n_1\dot{\psi} + n_2\dot{\psi}^3$ 。

令 $x_1 = \psi$, $x_2 = \dot{\psi}$, $u = \delta$, 考虑船舶系统受到的外界扰动 d , 式(1)可表示为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -\frac{n_1}{T}x_2 - \frac{n_2}{T}x_2^3 + \frac{K}{T}u + d \end{cases} \quad (2)$$

船舶航向系统属于大惯性系统, 快速突变的指令信号会导致航向控制系统初始误差较大, 进而引起较大的系统超调, 为了使船舶航向控制系统能同时保持较小的超调量和快速跟踪性, 可以对设定航向安排过渡过程, 使其变得更加平滑, 过渡过程可表示为

$$\frac{\psi_d}{\psi_r} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi_0\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3)$$

式中: ψ_d 为过渡过程后期望的船舶航向, ψ_r 为设定航向, ξ_0 、 ω_n 为过渡过程需要设定的阻尼比和自然频率。船舶先设定航向角 ψ_r , 通过过渡过程得到期望航向角 ψ_d , 由复合控制器得到命令舵角 δ , 作用于船舶系统, 从而使船舶跟踪设定航向航行。

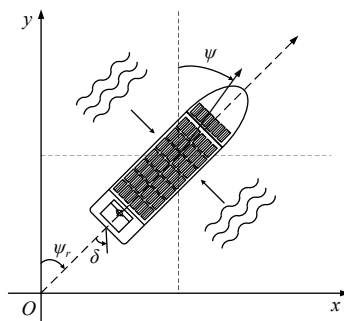


图 1 Oxy 坐标系下船舶航向示意图

Fig.1 Schematic diagram of ship heading in the Oxy coordinate system

2 基于 NESO 的改进非奇异终端滑模控制策略设计

本文提出一种基于 NESO 的改进非奇异终端滑模的船舶航向复合控制策略, 其控制框图如图 2 所示。NESO 对船舶航行过程受到的外界扰动进行估计; 再根据反馈估计值、航向误差和期望航向角设计非奇异终端滑模控制律, 并作用于船舶系统。

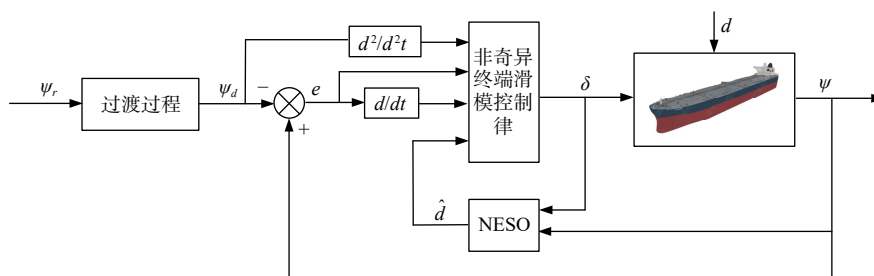


图 2 基于 NESO 的船舶航向非奇异终端滑模控制框图

Fig.2 Block diagram of non-singular terminal sliding mode of ship heading control based on NESO

2.1 非线性扩张状态观测器设计

将式(2)中的外界扰动 d 扩展为一个新的状态变量 x_3 , 即

$$x_3 = d \quad (4)$$

令 $\dot{x}_3 = \xi(t)$, 则式(2)可以扩展为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -\frac{n_1}{T}x_2 - \frac{n_2}{T}x_2^3 + \frac{K}{T}u + x_3 \\ \dot{x}_3 = \xi(t) \end{cases} \quad (5)$$

假设 1: 系统受到的外界扰动 d 是具有未知边界的慢时变扰动, 存在 $D \in \mathbb{R}^+$, 满足 $|d(t)| \leq D$, 且扰动的导数满足 $M = \sup_{t \in (0, \infty)} |\xi(t)| < \infty$ 。

设计非线性扩张状态观测器如下

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = \hat{x}_2 + \alpha_1(x_1 - \hat{x}_1) \\ \dot{\hat{x}}_2 = -\frac{n_1}{T}\hat{x}_2 - \frac{n_2}{T}\hat{x}_2^3 + \frac{K}{T}u + \hat{x}_3 + \alpha_2(x_1 - \hat{x}_1) \\ \dot{\hat{x}}_3 = \alpha_3 \cdot \tanh(b(x_1 - \hat{x}_1)) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\hat{x}_1$ 、 $\hat{x}_2$ 、 $\hat{x}_3$ 分别为 x_1 、 x_2 、 d 的估计值, α_1 、 α_2 、 α_3 为观测器增益, $\tanh(bx)$ 是双曲正切函数, b 是大于零的常数, $\tanh(bx)$ 定义如下

$$\tanh(bx) = \frac{e^{bx} - e^{-bx}}{e^{bx} + e^{-bx}} \quad (7)$$

传统 NESO 采用符号函数 $\text{sign}(x)$, 而 $\text{sign}(x)$ 的特性会引起系统抖振, 针对该问题, 本文采用双曲正切函数 $\tanh(bx)$ 代替 $\text{sign}(x)$ 。 $\tanh(bx)$ 和 $\text{sign}(x)$ 函数的比较如图 3 所示, 由图 3 可知 $\tanh(bx)$ 具有 $\text{sign}(x)$ 函数优点, 同时又克服了其缺点, 因此基于 $\tanh(bx)$ 的 NESO 能够更有效抑制系统抖振。

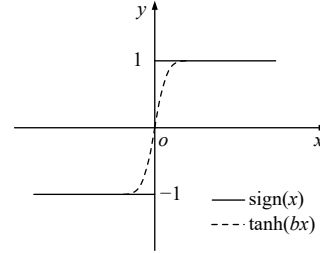


图3 双曲正切函数与符号函数对比图

Fig.3 Comparison between hyperbolic tangent function and sign function

NESO 稳定性分析:

令 $\tilde{x}_i = x_i - \hat{x}_i (i = 1, 2, 3)$ 为 NESO 的估计误差, 式(5)与式(6)相减得

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}_1 = \tilde{x}_2 - \alpha_1 \tilde{x}_1 \\ \dot{\tilde{x}}_2 = \tilde{x}_3 - \alpha_2 \tilde{x}_1 + g(t) \\ \dot{\tilde{x}}_3 = \xi(t) - \alpha_3 \cdot \tanh(b\tilde{x}_1) \end{cases} \quad (8)$$

式中: $g(t) = \frac{n_1}{T}\hat{x}_2 - \frac{n_1}{T}x_2 + \frac{n_2}{T}\hat{x}_2^3 - \frac{n_2}{T}x_2^3$ 。

对于双曲正切函数, 在 $\tilde{x}_1 = 0$ 的邻域内有 $\tanh(b\tilde{x}_1) \approx b \cdot \tilde{x}_1$, 则式(8)可改写为

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}_1 = \tilde{x}_2 - \alpha_1 \tilde{x}_1 \\ \dot{\tilde{x}}_2 = \tilde{x}_3 - \alpha_2 \tilde{x}_1 + g(t) \\ \dot{\tilde{x}}_3 = \xi(t) - b\alpha_3 \tilde{x}_1 \end{cases} \quad (9)$$

将式(9)用矩阵形式表示为

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}\tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{B}_1 g(t) + \mathbf{B}_2 \xi(t) \quad (10)$$

式中: $\tilde{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \tilde{x}_1 \\ \tilde{x}_2 \\ \tilde{x}_3 \end{bmatrix}$, $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\alpha_1 & 1 & 0 \\ -\alpha_2 & 0 & 1 \\ -b\alpha_3 & 0 & 0 \end{bmatrix}$, $\mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$, $\mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ 。

因为 $\mathbf{A}$ 为 Hurwitz 矩阵, 故存在正定矩阵 $\mathbf{P}$, 满足 $\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A} = -\mathbf{I}$, $\mathbf{I}$ 为单位矩阵。

定义 Lyapunov 函数如下

$$V_1 = \tilde{\mathbf{x}}^T \mathbf{P} \tilde{\mathbf{x}} \quad (11)$$

式(11)满足如下关系

$$\begin{cases} V_1 \geq \lambda_{\min}(\mathbf{P}) \|\tilde{\mathbf{x}}\|^2 \\ V_1 \leq \lambda_{\max}(\mathbf{P}) \|\tilde{\mathbf{x}}\|^2 \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\lambda_{\min}(\mathbf{P})$ 和 $\lambda_{\max}(\mathbf{P})$ 分别为矩阵 $\mathbf{P}$ 特征值的最小值和最大值, $\|\cdot\|$ 为欧几里得范数。

对 V_1 求导得

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= \dot{\tilde{\mathbf{x}}}^T \mathbf{P} \tilde{\mathbf{x}} + \tilde{\mathbf{x}}^T \dot{\mathbf{P}} \tilde{\mathbf{x}} = \left[\tilde{\mathbf{x}}^T \mathbf{A}^T + \mathbf{B}_1^T g(t) + \mathbf{B}_2^T \xi(t) \right] \mathbf{P} \tilde{\mathbf{x}} + \tilde{\mathbf{x}}^T \mathbf{P} [\mathbf{A} \tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{B}_1 g(t) + \mathbf{B}_2 \xi(t)] = \\ &= -\|\tilde{\mathbf{x}}\|^2 + 2\tilde{\mathbf{x}}^T \mathbf{P} \mathbf{B}_1 g(t) + 2\tilde{\mathbf{x}}^T \mathbf{P} \mathbf{B}_2 \xi(t) \leq -\|\tilde{\mathbf{x}}\|^2 + 2\tilde{\mathbf{x}}^T \mathbf{P} \mathbf{B}_1 |g(t)| + 2\tilde{\mathbf{x}}^T \mathbf{P} \mathbf{B}_2 |\xi(t)| \end{aligned} \quad (13)$$

根据 Cauchy-Schwarz 不等式可得

$$\begin{cases} 2\tilde{x}^T \mathbf{P} \mathbf{B}_1 \leq 2\|\tilde{x}^T\| \cdot \|\mathbf{P} \mathbf{B}_1\| \leq 2\|\tilde{x}^T\| \cdot \|\mathbf{P}\| \cdot \|\mathbf{B}_1\| = 2\|\tilde{x}^T\| \cdot \|\mathbf{P}\| \leq 2\lambda_{\max}(\mathbf{P})\|\tilde{x}\| \\ 2\tilde{x}^T \mathbf{P} \mathbf{B}_2 \leq 2\|\tilde{x}^T\| \cdot \|\mathbf{P} \mathbf{B}_2\| \leq 2\|\tilde{x}^T\| \cdot \|\mathbf{P}\| \cdot \|\mathbf{B}_2\| = 2\|\tilde{x}^T\| \cdot \|\mathbf{P}\| \leq 2\lambda_{\max}(\mathbf{P})\|\tilde{x}\| \end{cases} \quad (14)$$

定义 $f(x_1, x_2) = -\frac{n_1}{T}x_2 - \frac{n_2}{T}x_2^3$, 则 $g(t)$ 可重新表示为

$$g(t) = f(x_1, x_2) - f(\hat{x}_1, \hat{x}_2) \quad (15)$$

因为 $f(\cdot)$ 是连续 Lipschitz 函数, 所以存在 Lipschitz 常数 $L > 0$, 满足

$$|g(t)| = |f(x_1, x_2) - f(\hat{x}_1, \hat{x}_2)| \leq L \left\| \begin{bmatrix} x_1 & x_2 \end{bmatrix}^T - \begin{bmatrix} \hat{x}_1 & \hat{x}_2 \end{bmatrix}^T \right\| \leq L\|\tilde{x}\| \quad (16)$$

结合式(14)和式(16), 可得

$$\frac{dV_1}{dt} \leq -\|\tilde{x}\|^2 + 2\lambda_{\max}(\mathbf{P})L\|\tilde{x}\|^2 + 2\lambda_{\max}(\mathbf{P})\|\tilde{x}\|M \leq -\frac{V_1(\tilde{x})}{\lambda_{\max}(\mathbf{P})} + \frac{2\lambda_{\max}(\mathbf{P})L}{\lambda_{\min}(\mathbf{P})}V_1 + \frac{2\lambda_{\max}(\mathbf{P})M}{\sqrt{\lambda_{\min}(\mathbf{P})}}\sqrt{V_1} \quad (17)$$

由式(17)得

$$\frac{d\sqrt{V_1}}{dt} < \frac{dV_1}{dt} \quad (18)$$

结合式(17)和式(18)有

$$\frac{d\sqrt{V_1}}{dt} \leq \frac{1}{2\sqrt{V_1}} \left[-\frac{V_1(\tilde{x})}{\lambda_{\max}(\mathbf{P})} + \frac{2\lambda_{\max}(\mathbf{P})L}{\lambda_{\min}(\mathbf{P})}V_1 + \frac{2\lambda_{\max}(\mathbf{P})M}{\sqrt{\lambda_{\min}(\mathbf{P})}}\sqrt{V_1} \right] \quad (19)$$

由式(19)得

$$\sqrt{V_1} \leq (t - t_0) \sqrt{V_1(\tilde{x}(t_0))} \cdot \exp[P_\lambda(t - t_0)] + \frac{\lambda_{\max}(\mathbf{P})M}{\sqrt{\lambda_{\min}(\mathbf{P})}} \times \int_{t_0}^t \exp[P_\lambda(t - \tau)] d\tau \quad (20)$$

式中: $P_\lambda = -\frac{\lambda_{\min}(\mathbf{P}) - 2\lambda_{\max}^2(\mathbf{P})L}{2\lambda_{\max}(\mathbf{P})\lambda_{\min}(\mathbf{P})}$ 。

由式(12)和式(20)得

$$\|\tilde{x}\| \leq \frac{\sqrt{V_1}}{\sqrt{\lambda_{\min}(\mathbf{P})}} \leq \exp[P_\lambda(t - t_0)] \sqrt{\frac{\lambda_{\max}(\mathbf{P})}{\lambda_{\min}(\mathbf{P})}} \|\tilde{x}(t_0)\| + \frac{M}{P_\lambda} \{1 - \exp[P_\lambda(t - t_0)]\} \quad (21)$$

由式(21)可得

$$\|\tilde{x}_i\| \leq \max \left\{ \sqrt{\frac{\lambda_{\max}(\mathbf{P})}{\lambda_{\min}(\mathbf{P})}} \|\tilde{x}(t_0)\|, \frac{M}{P_\lambda} \right\} \quad (22)$$

由式(22)可知, NESO 的估计误差 $\|\tilde{x}_i\|$ ($i = 1, 2, 3$) 的最大值与 $\mathbf{P}$ 阵有关, 而 $\mathbf{P}$ 阵与 $\mathbf{A}$ 阵有关, $\mathbf{A}$ 阵与观测器增益 α_i 有关, 因此, 通过选择适当的观测器增益 α_i ($i = 1, 2, 3$), 可以使 NESO 观测误差收敛到较小的收敛域, 从而确保 NESO 的稳定性。

2.2 改进非奇异终端滑模控制器设计

令 $\psi_d = x_d$, 定义航向跟踪误差为

$$e_1 = x_1 - x_d \quad (23)$$

则航向跟踪误差的导数为

$$e_2 = \dot{e}_1 = \dot{x}_1 - \dot{x}_d \quad (24)$$

根据式(24)和式(2)可得

$$\dot{e}_2 = \ddot{x}_1 - \ddot{x}_d = f(x_1, x_2) + \frac{K}{T}u + d - \ddot{x}_d \quad (25)$$

为了提高非奇异终端滑模控制收敛速度, 降低滑模抖振, 设计改进非奇异终端滑模面^[17]如下

$$s = e_1 + k_a|e_1|^\alpha \text{sign}(e_1) + k_b|e_2|^\beta \text{sign}(e_2) \quad (26)$$

式中: $k_a, k_b \in \mathbb{R}^+$, $1 < \alpha < 2$, $1 < \beta < 2$, $\alpha > \beta$, $\text{sign}(\cdot)$ 是符号函数。滑模面式(26)相较于传统非奇异终端滑模面, 对误差项引入绝对值, 增大了范围; 此外, 当系统误差状态远离滑模面时, $k_a|e_1|^\alpha \text{sign}(e_1)$ 可以保证系统误差状态快速收敛至滑模面, 当系统误差状态接近滑模面时, $k_b|e_2|^\beta \text{sign}(e_2)$ 可保证系统状态在有

限时间内快速收敛至滑模面。

对式(26)求导得

$$\dot{s} = e_2 + k_a \alpha |e_1|^{\alpha-1} e_2 + k_b \beta |e_2|^{\beta-1} \dot{e}_2 \quad (27)$$

为了进一步降低滑模控制抖振,参考文献[18],设计一种改进双幂次趋近律

$$\dot{s} = -H(k_1 |s|^{c_1} \text{sign}(s) + k_2 |s|^{c_2} \text{sign}(s)) \quad (28)$$

式中: $H = (2 + 5 \|e\|_\infty)$, $\|e\|_\infty = \max(|e_1|, |e_2|)$, $k_1, k_2 \in \mathbb{R}^+$, $c_1 > 1$, $0 < c_2 < 1$, 为跟踪误差及其导数的矩阵 ∞ 范数, 趋近律可以改善滑模控制趋近阶段的动态品质, 引入的误差系数函数 H , 可以跟踪系统误差状态调整双幂次趋近律系数, 进一步降低了趋近阶段的抖振。

对于式(2), 采用滑模面式(26)和趋近律式(28), 设计改进非奇异终端滑模控制律为

$$u = -\frac{T}{K} \left[-\frac{n_1}{T} x_2 - \frac{n_2}{T} x_2^3 - \ddot{x}_d + \frac{1}{k_b \beta} (1 + k_a \alpha |e_1|^{\alpha-1}) |e_2|^{2-\beta} \text{sign}(e_2) + H(k_1 |s|^{c_1} \text{sign}(s) + k_2 |s|^{c_2} \text{sign}(s)) \right] \quad (29)$$

选取 Lyapunov 函数

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (30)$$

对式(30)求导得

$$\dot{V} = s \dot{s} = s(e_2 + k_a \alpha |e_1|^{\alpha-1} e_2 + k_b \beta |e_2|^{\beta-1} \dot{e}_2) = s(e_2 + k_a \alpha |e_1|^{\alpha-1} e_2 + k_b \beta |e_2|^{\beta-1} (f(x_1, x_2) + \frac{K}{T} u + d - \ddot{x}_d)) \quad (31)$$

将控制律式(29)代入式(31)得

$$\dot{V} = -s k_b \beta |e_2|^{\beta-1} [H(k_1 |s|^{c_1} \text{sign}(s) + k_2 |s|^{c_2} \text{sign}(s)) + d] = -\lambda_1 H(\lambda_2 |s|^{c_1+1} + k_2 |s|^{c_2+1}) \quad (32)$$

式中: $\lambda_1 = k_b \beta |e_2|^{\beta-1}$, $\lambda_2 = \frac{ds}{H|s|^{c_1+1}} + k_1$, $\lambda_2 > 0$ 。

由于 $H > 0$, 当 $e_2 \neq 0$ 时, 从式(32)易知 $\dot{V}_2 \leq 0$, 可以保证系统在有限时间 t_s 内收敛, 由文献[23]可推导出收敛时间 t_s 为

$$\begin{cases} t_s < \gamma \left[\frac{1 - |s(0)|^{1-c_1}}{k_1(c_1-1)} + \frac{1}{k_2(1-c_2)} \right], & |s(0)| > 1 \\ t_s < \frac{\gamma |s(0)|^{1-c_2}}{k_2(1-c_2)}, & 0 < |s(0)| \leq 1 \end{cases} \quad (33)$$

式中: $\gamma = \frac{1}{2 + 5e_{\min}}$, $e_{\min}$ 表示滑模面 s 从初始位置到达 $s = 0$ 时间内误差 e_1 、 e_2 绝对值的最小值, 即 $e_{\min} = \min(|e_1|, |e_2|)$ 。

结合式(32)和假设 1, 此时的收敛域可以表示为

$$\Omega_1 = |s| \leq \left(\frac{D}{k_1 H} \right)^{1/c_1} \quad (34)$$

同理, 式(31)可以表示为

$$\dot{V} = -\lambda_1 H(k_1 |s|^{c_1+1} + \lambda_3 |s|^{c_2+1}) \quad (35)$$

式中: $\lambda_3 = \frac{ds}{H|s|^{c_2+1}} + k_2$, $\lambda_3 > 0$ 。

当 $e_2 \neq 0$ 时, 此时收敛域可以表示为

$$\Omega_2 = |s| \leq \left(\frac{D}{k_2 H} \right)^{1/c_2} \quad (36)$$

结合式(34)和式(36)可得, 系统在有限时间 t_s 内的收敛域为

$$\Omega = \min(\Omega_1, \Omega_2) \quad (37)$$

当 $e_2 = 0$ 时, 将式(29)代入式(2)得

$$\dot{e}_2 = -(2 + 5|e_1|) [k_1 |s|^{c_1} \text{sign}(s) + \lambda_3 |s|^{c_2} \text{sign}(s)] \quad (38)$$

对于区域 Ω_1 、 Ω_2 之外的滑模面 s , 有 λ_2 、 $\lambda_3 > 0$, $s \neq 0$, 所以由式(37)可得 $\dot{e}_2 \neq 0$, 即在系统状态到达

滑模面邻域 Ω 范围区间的时间内, e_2 不是吸引子, 因此系统状态在趋近阶段可以在有限时间内到达滑模面的邻域。

当状态进入 $|s| \leq \Delta$ 区域时, 存在区域 σ , 且 $|\sigma| \in \Omega$ 满足

$$\sigma = e_1 + k_a |e_1|^\alpha \text{sign}(e_1) + k_b |e_2|^\beta \text{sign}(e_2) \quad (39)$$

由式(39)可得

$$e_1 + k_a |e_1|^\alpha \text{sign}(e_1) + (k_b - \frac{\sigma}{|e_2|^\beta \text{sign}(e_2)}) |e_2|^\beta \text{sign}(e_2) = 0 \quad (40)$$

当 $k_b > \frac{\sigma}{|e_2|^\beta \text{sign}(e_2)}$ 时, 系统状态将收敛到

$$\Omega \leq \frac{\sigma}{|e_2|^\beta \cdot \text{sign}(e_2)} \quad (41)$$

因此, e_2 可在有限时间内收敛到

$$\Omega_{e_2} \leq \left(\frac{\sigma}{k_b} \right)^{1/\beta} \leq \left(\frac{\Omega}{k_b} \right)^{1/\beta} \quad (42)$$

同理, 可知 e_1 可在有限时间内收敛到

$$\Omega_{e_1} \leq \left(\frac{\Omega}{k_a} \right)^{1/\alpha} \quad (43)$$

综上所述, 系统状态将于有限时间内收敛到稳定状态, 证明完毕。

当系统无扰动存在时, 系统误差将在有限时间内快速收敛; 当系统受到扰动时, 通过 NESO 对扰动进行估计, 并补偿到控制律式(29), 系统同样会在有限时间内快速收敛。定义 $\hat{d}$ 为系统受到外界扰动的估计值, 即 $\hat{d} = \hat{x}_3$, 结合 NESO 式(6)和改进非奇异终端滑模控制律式(29), 得到复合控制律为

$$u = -\frac{T}{K} \left[f(x_1, x_2) - \hat{d} + \frac{1}{k_b \beta} (1 + k_a \alpha |e_1|^{\alpha-1}) |e_2|^{2-\beta} + H(k_1 |s|^{c_1} \text{sign}(s) + k_2 |s|^{c_2} \text{sign}(s)) \right] \quad (44)$$

复合控制律式(44)同时具备非奇异终端滑模控制和 NESO 的优点, 改进非奇异终端滑模控制律抖振更小, 跟踪精度更高, NESO 将扰动估计值反馈给非奇异终端滑模控制律, 进一步抑制滑模控制的抖振, 提高了系统鲁棒性。根据前述对 NESO 和非奇异终端滑模控制律的稳定性分析可知, 复合控制律式(44)能保证闭环系统内所有误差信号均为一致最终有界, 使得系统趋于稳定。

3 仿真实验

为了验证本文所述控制策略的有效性, 在 MATLAB/Simulink 平台搭建仿真模型, 以文献[24]中大连海事大学教学实习船“育龙”轮为研究对象进行仿真, 船长 126 m, 型宽 20.8 m, 满载航速 15 kn, 满载吃水 8 m, 船舶模型参数: $n_1 = 1$, $n_2 = 30 \text{ s}^2$, $K = 0.478 \text{ s}^{-1}$, K 为舵机控制增益系数, $T = 216 \text{ s}$, T 为船舵追随性时间指数。

船舶航行过程受到外界扰动设置为^[25] $d = [0.01 \sin(0.5 t) + 0.01 \cos(0.3 t) + 0.01]$, 为了降低船舶舵机的机械损耗以及保证舵机稳定性, 通常会对舵角进行机械限幅, 舵机限幅 $|\delta| \leq 35^\circ$, $|\dot{\delta}| \leq 5^\circ$, 过渡过程参数取: $\xi_0 = 1$, $\omega_n = 0.06$ 。选取传统 PID 控制、传统滑模控制(SMC)和非奇异终端滑模控制(NTSMC)与本文控制策略(NTSMC+NESO)进行对比, PID 控制参数为: $k_p = 7$, $k_i = 0.18$, $k_d = 150$, 本文控制策略参数如表 1 所示。

表 1 本文控制策略参数

Tab.1 Controller parameters

改进非奇异终端滑模控制参数									NESO参数			
参数	k_a	k_b	α	β	k_1	k_2	c_1	c_2	α_1	α_2	α_3	b
取值	2.6	16.1	2	5/3	1.3	0.4	2	0.5	1	8	32	0.2

无外界扰动情况下航向保持仿真如图4所示,四种控制策略均能使船舶航向精确跟踪设定航向角,但是PID控制和SMC超调较大,NTSMC同样存在一定超调,三者超调量分别为:2.39°、1.3°、0.5°,而本文控制策略几乎无超调,超调量仅为0.05°,且到达设定航向角最快,对比分析可知,本文控制策略在跟踪精度、响应速度方面明显优于其他三种控制策略。

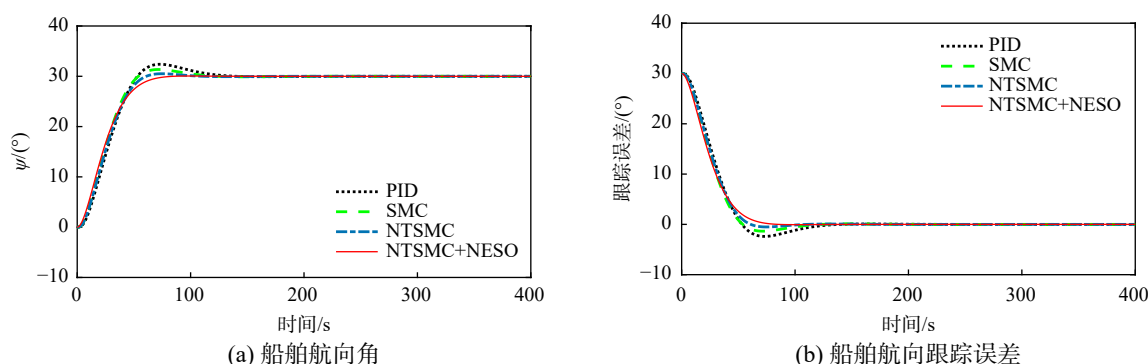


图4 无扰动船舶航向保持仿真结果

Fig.4 Simulation results of undisturbed ship course keeping

有外界扰动情况下航向保持仿真如图5所示,从图5(a)、(b)可知,在船舶受外界扰动情况下,PID、SMC和NTSMC到达设定值后均存在较大的航向跟踪误差,PID控制的鲁棒性最差,而本文控制策略到达设定值后航向跟踪误差最小,系统鲁棒性更强。从图5(c)可知,PID控制下船舶舵角幅值变化最大,SMC和NTSMC舵角幅值变化虽然较小,但是均存在较大抖振;本文提出的方法船舶舵角幅值变化最小,且几乎无抖振。此外,在跟踪设定航向角阶段四种控制策略的最大舵角分别为32.8°、26.8°、25.3°和22.5°,分析比较可知,本文控制策略在航向跟踪保持过程中,能以较小的舵机响应来精确跟踪设定航向角,从而能够降低船舶航向跟踪过程中舵机的机械损耗和燃料消耗。从图5(d)可知,NESO可以精确估计船舶航向保持过程中受到的外界环境扰动,NESO的最大估计误差仅为2.7%。

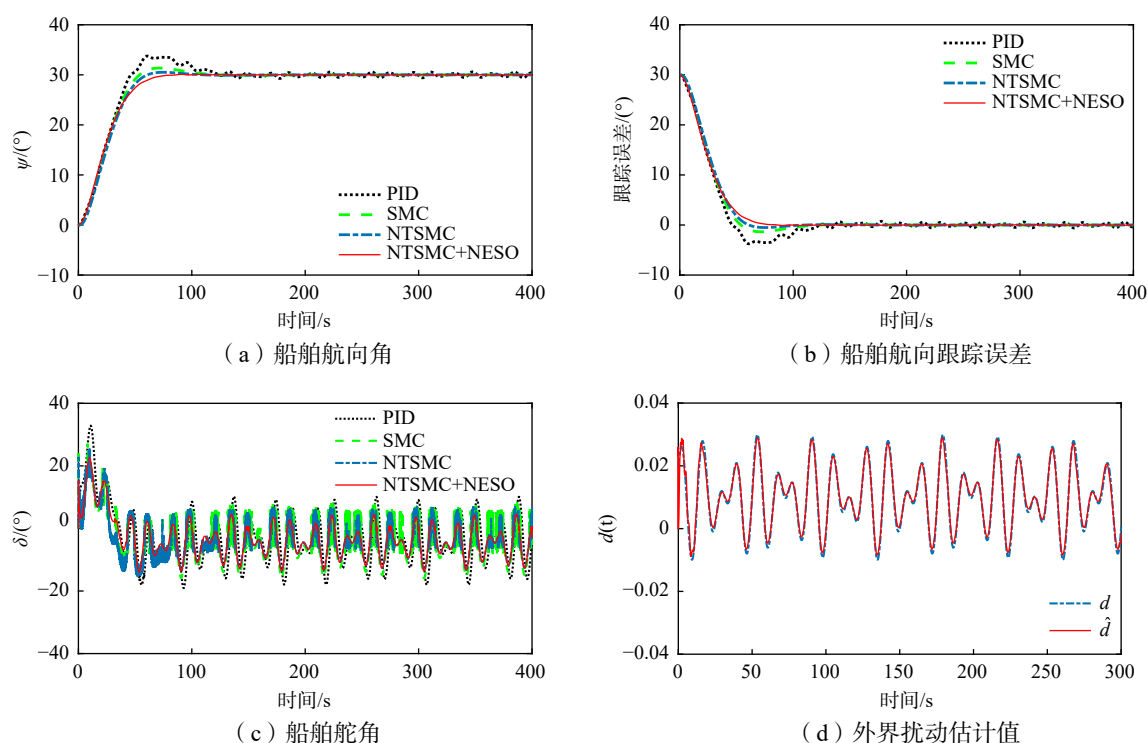
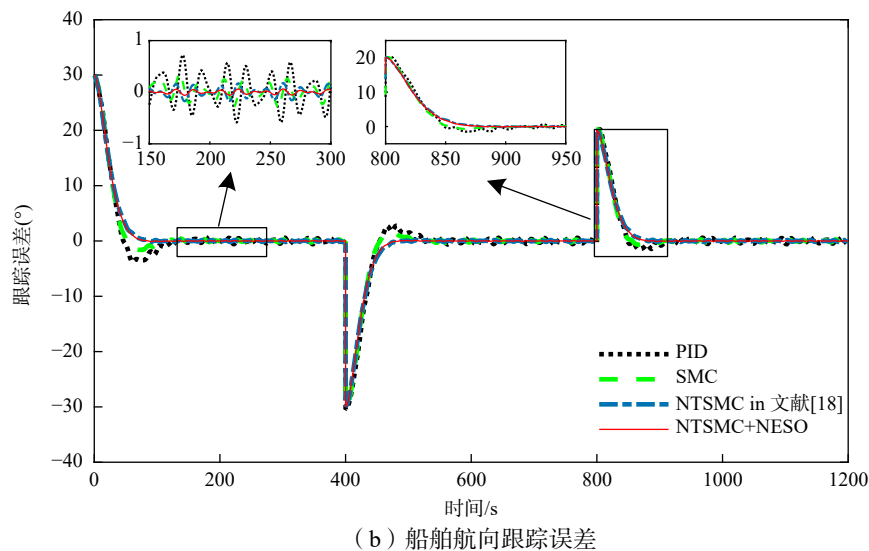
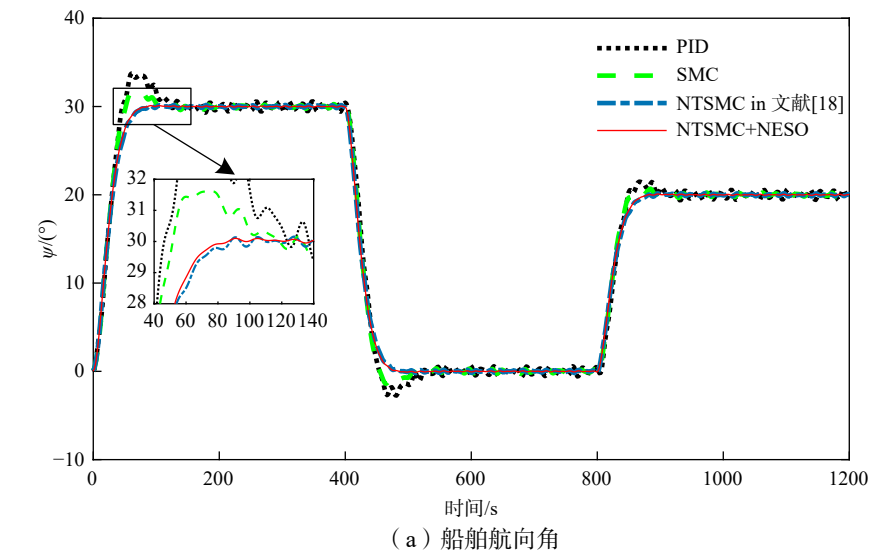


图5 有外界扰动船舶航向保持仿真结果

Fig.5 Simulation results of ship course keeping with external disturbance

为进一步分析验证本文所提控制策略的有效性,将文献[18]所提的 NTSMC 加入仿真实验进行对比。有外界扰动情况下船舶航向改变的仿真结果如图 6 所示,从图 6(a)可知,在设定航向角改变时,PID 和 SMC 均存在一定超调,最大航向角分别为 33.8° 和 31.6° ,文献[18]所提 NTSMC 和本文控制策略几乎无超调,但是本文控制策略 90.4 s 即可达到设定航向角,而 PID、SMC 和文献[18]所提 NTSMC 三者到达设定航向角的时间分别为 122.5 s、110.2 s 和 94.3 s。从图 6(b)可知,PID 控制的航向跟踪误差最大,SMC 和文献[18]所提 NTSMC 均存在一定航向跟踪误差,而本文控制策略的航向跟踪误差最小,船舶达到设定航向角后,在 PID、SMC 和文献[18]所提 NTSMC 控制作用下最大航向跟踪误差分别为 0.78° 、 0.35° 和 0.17° ,而本文控制策略最大航向跟踪误差仅为 0.069° ,分析对比几种控制策略可知,无论是在系统响应速度、跟踪精度还是系统鲁棒性方面,本文控制策略均为最佳。从图 6(c)可知,PID 控制、SMC 和 NTSMC 在设定航向角变化时,船舶舵角幅值变化较大,PID 控制和 SMC 均到达了舵机限幅 35° ,文献[18]所提 NTSMC 最大舵角达到了 30.7° ,而本文控制策略最大舵角仅为 27.1° ,显著低于上述三种控制。相较于 PID 控制与 SMC,本文控制策略的最大舵角降幅达 22.6% 相较于文献[18]所提 NTSMC,本文控制策略的最大舵角降低 11.7%。此外,SMC 控制的舵角存在较大抖振,文献[18]所提 NTSMC 也存在一定的系统抖振,而本文控制策略几乎无抖振,表明本文控制策略能够以较小的舵机幅值变化来精确跟踪设定航向角,从而能够降低船舶航向连续变化过程中舵机的机械损耗和燃料消耗。



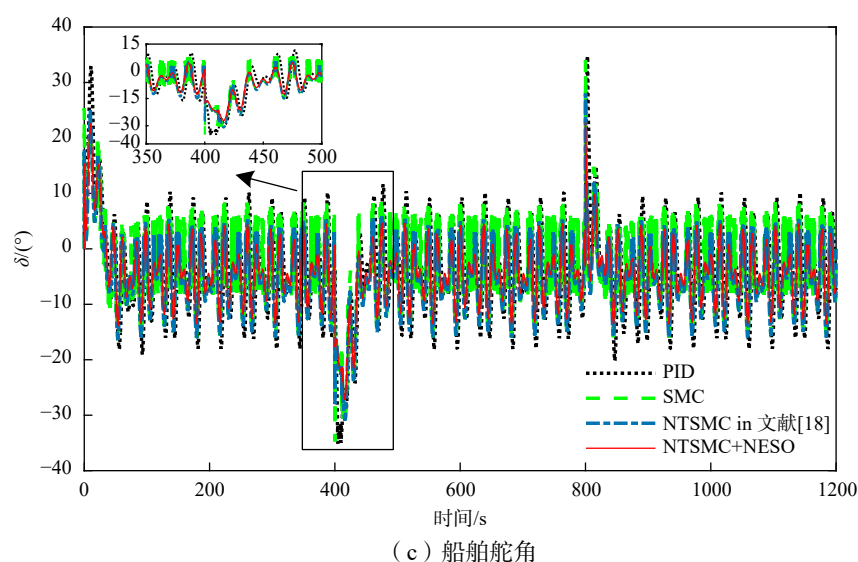


图6 有外界扰动船舶航向改变仿真结果

Fig.6 Simulation results of ship course change with external disturbance

4 结 语

针对船舶航行过程中航向易受外界扰动的问题,本文提出了一种基于 NESO 的改进非奇异终端滑模控制策略。首先,基于双曲正切函数设计了 NESO,对船舶航行过程受到的外界扰动进行估计,并进行反馈补偿;然后,基于改进非奇异终端滑模面和改进双幂次趋近律,设计了改进非奇异终端滑模控制律,提高了滑模控制收敛速度和趋近阶段动态品质;最后,将 NESO 与非奇异终端滑模控制律结合构成复合控制策略。在受外界环境扰动情况下对航向保持控制和航向改变控制进行仿真,结果表明:本文提出的控制策略跟踪精度更高、系统鲁棒性更强。此外,本文的控制策略还能有效降低船舶舵机的幅值变化,进而减少了舵机的机械损耗,提高了船舶航行的经济性和操纵性,为新型船舶航向控制器设计提供了理论参考。

参 考 文 献:

- [1] Dlabac T, Calasan M, Krcum M, et al. PSO-based PID controller design for ship course-keeping autopilot[J]. Brodogradnja, 2019, 70(4): 1–15.
- [2] Liang Lihua, Wen Yu. Rudder roll stabilization with disturbance compensation model predictive control[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2019, 24(1): 249–259.
- [3] Yasukawa H, Sakuno R. Application of the MMG method for the prediction of steady sailing condition and course stability of a ship under external disturbances[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2020, 25(1): 196–220.
- [4] Yang Guangping, Zhang Xianku, Feng Yongxiao. An energy-efficient nonlinear robust track keeping control algorithm for the Maritime Silk Road[J]. Journal of Marine Engineering and Technology, 2020, 19(3): 136–146.
- [5] Psarros G A. Fuzzy logic system interference in ship accidents[J]. Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries, 2018, 28(6): 372–382.
- [6] Xu Xiaofeng, Cui Deqiang, Li Yun, et al. Research on ship trajectory extraction based on multiattribute DBSCAN optimisation algorithm[J]. Polish Maritime Research, 2021, 28(1): 136–148.

- [7] 周丽明, 刘 胜. 船舶航向保持静态抗饱和控制[J]. 船舶力学, 2011, 15(7): 757–762.
Zhou L M, Liu S. Static anti-saturation control of ship course keeping[J]. Journal of Ship Mechanics, 2011, 15(7): 757–762. (in Chinese)
- [8] 包 涛, 董早鹏, 张 波, 等. 基于 GD-FNN 和参考模型的无人艇航向鲁棒自适应控制[J]. 船舶力学, 2021, 25(5): 598–606.
Bao T, Dong Z P, Zhang B, et al. Robust adaptive control of UAV course based on GD-FNN and reference model[J]. Journal of Ship Mechanics, 2021, 25(5): 598–606. (in Chinese)
- [9] Witkowska A, Smierzchalski R. Designing a ship course controller by applying the adaptive backstepping method[J]. International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, 2013, 22(4): 985–997.
- [10] Li Wenhua, Sun Yuqing, Chen Haiquan, et al. Model predictive controller design for ship dynamic positioning system based on state-space equations[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2017, 22(3): 426–431.
- [11] 朱丽燕, 李铁山, 单麒麟. 船舶航向非线性离散系统自适应模糊最优控制[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2019, 40(9): 1576–1581.
Zhu L Y, Li T S, Shan Q H. Adaptive fuzzy optimal control for nonlinear discrete system of ship course[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2019, 40(9): 1576–1581. (in Chinese)
- [12] Tung Thanh L. Ship heading control system using neural network[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2021, 26(3): 963–972.
- [13] Li Ronghui, Li Tieshan, Bu Renxiang, et al. Active disturbance rejection with sliding mode control based course and path following for underactuated ships[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013: 743716.
- [14] Liu Zhiqian. Ship course keeping using different sliding mode controllers[J]. Transactions of FAMENA, 2019, 43(2): 49–60.
- [15] Islam, Muhammad Muzammal, et al. Robust integral backstepping and terminal synergetic control of course keeping for ships[J]. Ocean Engineering, 2021, 221: 108532.
- [16] Zuo Zongyu. Non-singular fixed-time terminal sliding mode control of non-linear systems[J]. IET Control Theory and Applications, 2015, 9(4): 545–552.
- [17] Boukattaya M, Mezghani N, Damak T. Adaptive nonsingular fast terminal sliding-mode control for the tracking problem of uncertain dynamical systems[J]. ISA Transactions, 2018, 77: 1–19.
- [18] Wang Haoping, Zhao Xuankai, Tian Yang. Trajectory tracking control of XY table using sliding mode adaptive control based on fast double power reaching law[J]. Asian Journal of Control, 2016, 18(6): 2263–2271.
- [19] 刘海龙, 史小平. 对非合作目标逼近的非奇异终端滑模控制[J]. 电机与控制学报, 2016, 20(6): 109–116.
Liu H L, Shi X P. Non singular terminal sliding mode control for non-cooperative target approximation[J]. Electric Machines and Control, 2016, 20(6): 109–116. (in Chinese)
- [20] 韩京清. 自抗扰控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
Han J Q. Active disturbance rejection control technique[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008. (in Chinese)
- [21] Zhang Qiang, Wang Cui, Su Xiaojie, et al. Observer-based terminal sliding mode control of non-affine nonlinear systems: Finite-time approach[J]. Journal of the Franklin Institute-Engineering and Applied Mathematics, 2018, 355(16): 7985–8004.
- [22] 陈 卓, 金建海, 张 波, 等. 基于多策略免疫遗传算法的无人艇航向自适应控制[J]. 船舶力学, 2023, 27(9): 1273–1282.
Chen Z, Jin J H, Zhang B, et al. Adaptive heading control of unmanned aerial vehicle based on multi-strategy immune genetic algorithm[J]. Journal of Ship Mechanics, 2023, 27(9): 1273–1282. (in Chinese)
- [23] Fu Minyue, Xie Lihua. Finite-level quantized feedback control for linear systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2009, 54(5): 1165–1170.
- [24] 关 巍, 张显库, 王新屏. 基于积分逆推法的船舶航向非线性鲁棒控制[J]. 中国航海, 2009, 32(3): 66–70.
Guan W, Zhang X K, Wang X P. Nonlinear robust control for ship steering system based on integral backstepping method[J]. Navigation of China, 2009, 32(3): 66–70. (in Chinese)
- [25] 王东委, 富 月. 基于高阶观测器和干扰补偿控制的模型预测控制方法[J]. 自动化学报, 2020, 46(6): 1220–1228.
Wang D W, Fu Y. Model predictive control method based on high order observer and disturbance compensation control[J]. Acta Automatica Sinica, 2020, 46(6): 1220–1228. (in Chinese)