

无人船自适应超螺旋轨迹跟踪滑模控制^{*}

冯成涛 陈 威 陶睿楠 朱 栋 储开斌

(常州大学微电子与控制工程学院 常州 213159)

摘 要: 针对无人船受到风浪等不确定性干扰时易出现轨迹跟踪误差大、自适应增益范围小、滑模控制方法的抖振等问题,提出了一种新型自适应超螺旋滑模控制算法。根据无人船结构建立数学模型,引入轨迹参考点将数学模型转换为二阶系统微分方程;设计自适应超螺旋滑模控制器;构造 Lyapunov 函数,推导满足系统闭环稳定性的自适应增益。在考虑风阻、浪阻的情况下,将本文方法分别与超螺旋滑模控制和传统自适应超螺旋滑模控制这两种方法进行仿真实验对比。结果显示,在仿真实验的 30 s 中,本文方法的轨迹跟踪平均绝对误差比超螺旋滑模控制和传统自适应超螺旋滑模控制分别减少了 0.60 m 和 0.27 m,仿真结果表明本文方法能够有效提高系统控制性能,抑制抖振,减小轨迹跟踪误差。

关键词: 自适应增益;超螺旋滑模控制;无人船;轨迹跟踪

中图分类号: TM341 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8020

Adaptive super-twisting trajectory tracking sliding mode control for unmanned surface vessel

Feng Chengtao Chen Wei Tao Ruinan Zhu Dong Chu Kaibin

(College of Microelectronics and Control Engineering, Changzhou University, Changzhou 213159, China)

Abstract: This paper addresses challenges in unmanned surface vessel (USV) trajectory tracking, such as significant errors induced by wind and waves, limited adaptability of adaptive gains, and vibrations in sliding mode control. A novel adaptive Super-Twisting sliding mode control algorithm is proposed to mitigate these issues. The USV mathematical model, derived from its structure, is transformed into a second-order system differential equation using trajectory reference points. An adaptive Super-Twisting sliding mode controller is designed, and adaptive gains ensuring closed-loop system stability are derived through the construction of a Lyapunov function. Simulation experiments, considering wind and wave resistance, compare the proposed method with Super-Twisting sliding mode control and traditional adaptive Super-Twisting sliding mode control. Results demonstrate a reduction in average tracking errors of 0.60 m and 0.27 m, respectively, over a 30-second simulation period, affirming the effectiveness of the proposed method in enhancing system control performance, suppressing vibrations, and reducing trajectory tracking errors.

Keywords: adaptive gain; super-twisting sliding mode control; unmanned surface vessels; trajectory tracking

0 引 言

因为水面无人船具有运动灵活、能自主执行水上任务等特点,其在海洋科学研究、环境水质监测、水面数据采集和水面搜救等方面得到了广泛应用^[1]。水面无人船轨迹跟踪控制问题是其能否自主运行的关键,且外界环境力和传感器测量误差等外界不确定性干扰因素的存在使轨迹跟踪控制变得更加复杂。国内外学者针对轨迹跟踪控制问题提出了诸多方法,如反步法^[2-4]、非线性模型预测控制^[5-6]、滑模控制^[7-8]、神经网络控制^[9-10]、模糊逻辑控制^[11-12]等。

在传统滑模控制方法中,滑模趋近律设计不合理、控制参数选择不当和无人船数学模型非线性特性等问题容易引发抖振。超螺旋滑模控制是一种改进的滑模控制方法,其通过积分获取实际控制量,避免高频切换,能有效减少抖振问题。刘文吉等^[13]提出基于超螺旋扩张状态观测器的超螺旋滑模控制,实现了无人船精准镇定控制,但其并未涉及船舶的轨迹跟踪控制。刘彦呈等^[14]针对欠驱动船舶轨迹跟踪滑模控制的抖振问题,通过反步法设计虚拟控制律,利用超螺旋滑模控制方法设计纵向速度和艏摇角速度控制器,以实现船舶的轨迹跟踪控制,但未针对外界不确定性干

收稿日期:2024-01-08

^{*} 基金项目:横向项目(KYH22020349)、江苏省高等学校自然科学研究面上项目(19KJB510017)、江苏省科技支撑项目(DFJH202131)资助

扰等复杂情况设计轨迹跟踪控制器。

无人船模型外界不确定性干扰导致无人船轨迹跟踪误差增大,为了减小轨迹跟踪误差,必须实时地调整超螺旋滑模控制中的参数。因此,本文引入自适应增益实时调整超螺旋滑模控制参数。Haghighi 等^[15]针对四阶系统提出自适应超螺旋解耦终端滑模控制技术,将非线性四阶系统解耦为两个二阶子系统。Gutierrez 等^[16]针对四旋翼无人机的运动控制问题,提出了一种自适应增益算法的超螺旋控制方法,但其自适应增益相对复杂。Alvaro 等^[17]提出了一种结合自适应超螺旋控制器和自适应高阶滑模观测器的无传感器永磁同步电机控制策略,在存在外界不确定性干扰的情况下使系统具有有限时间收敛性和鲁棒性。Gonzalez 等^[18]提出了一种基于无人船自适应积分终端超螺旋制导控制算法,该算法通过自适应增益来减小抖振,但其自适应增益算法的参数相对繁冗。

综上所述,现有超螺旋滑模控制中的自适应增益方法仍然存在自适应范围小、参数需要多次调整等问题。此外,由外界不确定性干扰引起的控制器增益非平滑变化会使模型频繁输出信号突变,对船舶控制器和推进系统存在潜在危害。针对以上问题,本文提出一种新型自适应超螺旋(novel adaptive super-twisting, NAST)轨迹跟踪滑模控制方法,能够动态调整控制器增益以减少抖振,使模型输出稳定的信号,从而增强控制器对无人船模型外界不确定性干扰的应对能力。本文根据测试船平台建立无人船数学模型,设计基于 NAST 的无人船轨迹跟踪控制器,使用 Lyapunov 稳定性理论证明系统的稳定性,通过仿真实验证明控制方法的有效性。

1 无人船数学模型

无人船数学模型是进行操控性能研究、控制系统分析与设计、运动仿真的基础。船舶运动共分为前进、横漂、升沉、横摇、纵摇和艏摇等 6 个自由度,但对于常规水面无人船而言,一般只讨论其水平面内的运动控制问题,即前进、横漂和艏摇运动,忽略横摇、纵摇和升沉运动的影响,无人船水平面运动模型如图 1 所示。

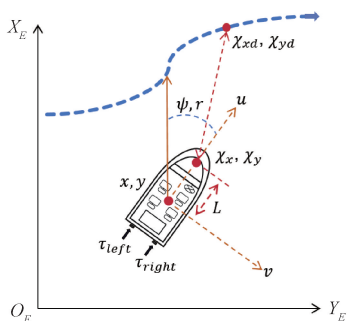


图 1 无人船水平面运动模型和二阶模型轨迹参考点示意图

在水平面运动模型的基础上,为了简化分析,本文假设

船舶为刚性,质量分布均匀,形状结构左右对称,且船体坐标系中的原点位于船体的重心位置^[19]。综上,本文所建立的无人船数学模型为:

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta}) \mathbf{v} \\ \dot{\mathbf{v}} = \mathbf{M}^{-1} [\boldsymbol{\tau} - \mathbf{C}(\mathbf{v})\mathbf{v} - \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v}] + \boldsymbol{\delta} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\boldsymbol{\eta} = [x \ y \ \psi]^T$ 代表船在大地坐标系 $O_E - X_E Y_E$ 中的 X_E 轴坐标位置、 Y_E 轴坐标位置和艏向角; $\mathbf{v} = [u \ v \ r]^T$ 对应船体坐标系下船舶自身的纵向速度、横向

速度和艏摇角速度; $\mathbf{J}(\boldsymbol{\eta}) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 为

大地坐标系和船体坐标系之间进行转化的转化矩阵; $\boldsymbol{\tau} = [\tau_u \ 0 \ \tau_r]^T$ 中控制输入 τ_u 和 τ_r 分别为船体坐标系下船的纵向推力和艏摇力矩;双推进器的推力与船的纵向推力和转向力矩之间数学关系为 $\tau_{left} = \frac{\tau_u}{2} + \frac{\tau_r}{B}$, $\tau_{right} = \frac{\tau_u}{2} -$

$\frac{\tau_r}{B}$, 式中: B 为船纵轴中心线至推进器纵轴中心线之间的距离;质量矩阵 \mathbf{M} 为刚体质量矩阵与水动力附加质量矩阵之和,记为:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & 0 \\ 0 & 0 & m_{33} \end{bmatrix} \quad (2)$$

由标准向心力刚体矩阵和水动力附加向心力矩阵组成的向心力矩阵 $\mathbf{C}(\mathbf{v})$ 定义为:

$$\mathbf{C}(\mathbf{v}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -m_{11}v \\ 0 & 0 & m_{22}u \\ m_{22}v & -m_{11}u & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $m_{11} = m - X_u$, $m_{22} = m - Y_v$, $m_{33} = I_{ZZ} - N_r$, m 为船体质量, X_u 、 Y_v 和 N_r 为质量惯性参数,同理,线性阻尼矩阵与非线性阻尼矩阵之和组成的阻尼矩阵为:

$$\mathbf{D}(\mathbf{v}) = - \begin{bmatrix} d_{11} & 0 & 0 \\ 0 & d_{22} & 0 \\ 0 & 0 & d_{33} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $d_{11} = X_u + X_{u|u|}$, $d_{22} = Y_v + Y_{v|v|}$, $d_{33} = N_r + N_{r|r|}$, X_u 、 Y_v 和 N_r 为线性阻尼系数, $X_{u|u|}$ 、 $Y_{v|v|}$ 和 $N_{r|r|}$ 为非线性阻尼系数,由式(1)~(4)可以得到船舶数学模型:

$$\begin{cases} \dot{\psi} = r \\ \dot{x} = u \cos(\psi) - v \sin(\psi) \\ \dot{y} = u \sin(\psi) + v \cos(\psi) \\ \dot{u} = \frac{m_{22}vr + d_{11}u + \tau_u}{m_{11}} + \delta_u \\ \dot{v} = \frac{-m_{11}ur + d_{22}v}{m_{22}} + \delta_v \\ \dot{r} = \frac{m_{11}uv - m_{22}uv + d_{33}r + \tau_r}{m_{33}} + \delta_r \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\boldsymbol{\delta} = \boldsymbol{\tau}_{wind} + \boldsymbol{\tau}_{wave} = [\delta_u \ \delta_v \ \delta_r]^T$ 为无人船模型外界

不确定性干扰。其中,外界不确定性干扰主要包括风阻力

$\tau_{wind} = [X_{wind} \ Y_{wind} \ N_{wind}]^T$ 和浪阻力 $\tau_{wave} = [X_{wave} \ Y_{wave} \ N_{wave}]^T$, 其具体形式为:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} X_{wind} \\ Y_{wind} \\ N_{wind} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \rho_a V_{rw}^2 \begin{bmatrix} C_X(\gamma_{rw}) A_{FW} \\ C_Y(\gamma_{rw}) A_{LW} \\ C_N(\gamma_{rw}) A_{LW} L_{OA} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} X_{wave} \\ Y_{wave} \\ N_{wave} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{wave} \cos(\beta_{wave} - \phi) \\ F_{wave} \sin(\beta_{wave} - \phi) \\ N_{wave} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\rho_a \approx 1.29 \text{ kg/m}^3$ 为本地空气密度,并且风阻中参数:

$$\begin{cases} V_{rw} = \sqrt{u_{rw}^2 + v_{rw}^2} \\ \gamma_{rw} = -\arctan\left(\frac{v_{rw}}{u_{rw}}\right) \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} u_{rw} = u - V_w \cos(\beta_{wind} - \phi) \\ v_{rw} = v - V_w \sin(\beta_{wind} - \phi) \end{cases} \quad (8)$$

式中: F_{wave} 为浪对船产生的漂流力, N_{wave} 为浪对船产生的漂流力矩, A_{FW} 、 A_{LW} 分别表示船舶投影面积和船身侧边投影面积, L_{OA} 是无人船的总长度, β_{wind} 和 V_w 分别表示无人船所受风阻的方向和风速, $C_X(\gamma_{rw})$ 、 $C_Y(\gamma_{rw})$ 和 $C_N(\gamma_{rw})$ 为风的力和力矩计算系数^[18], 具体形式为:

$$\begin{cases} C_X(\gamma_{rw}) = CD_{lAF} \frac{\cos(\gamma_{rw})}{1 - \frac{\phi}{2} \left(1 - \frac{CD_l}{CD_t}\right) \sin^2(2\gamma_{rw})} \\ C_Y(\gamma_{rw}) = CD_t \frac{\sin(\gamma_{rw})}{1 - \frac{\phi}{2} \left(1 - \frac{CD_t}{CD_l}\right) \sin^2(2\gamma_{rw})} \\ C_N(\gamma_{rw}) = -0.18 \left(\gamma_{rw} - \frac{\pi}{2}\right) C_Y(\gamma_{rw}) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $CD_l = CD_{lAF} \frac{A_{FW}}{A_{LW}}$ 为纵向阻力、 CD_t 和 ϕ 分别为横向阻力和横向力参数, CD_{lAF} 为纵向阻力系数。

浪阻参数为:

$$\begin{cases} \dot{x}_{F1} = x_{F2} \\ \dot{x}_{F2} = -\omega_e^2 x_{F1} - 2\lambda_w \omega_e x_{F2} + K_w \omega_F \\ F_{wave} = x_{F2} + d_F \\ \dot{x}_{N1} = x_{N2} \\ \dot{x}_{N2} = -\omega_e^2 x_{N1} - 2\lambda_w \omega_e x_{N2} + K_w \omega_N \\ N_{wave} = x_{N2} + d_N \\ \omega_e = \left| \omega_0 - \frac{\omega_0^2}{g} \sqrt{u^2 + v^2} \cos(\beta_{wave}) \right| \end{cases} \quad (10)$$

式中: x_{F1} 、 x_{F2} 、 x_{N1} 和 x_{N2} 为浪阻模型中的变量参数, K_w 和 λ_w 为浪阻模型中的正实数参数, \dot{d}_F 、 \dot{d}_N 、 ω_F 和 ω_N 为高斯白噪声, ω_0 为波谱峰值频率, β_{wave} 为浪的方向, $g \approx 9.81 \text{ m/s}^2$ 为地球重力加速度。最后,设定 f_u 、 f_v 和 f_r 为:

$$\begin{cases} f_u = \frac{m_{22}vr + d_{11}u}{m_{11}} \\ f_v = \frac{-m_{11}ur + d_{22}v}{m_{22}} \\ f_r = \frac{m_{11}uv - m_{22}uv + d_{33}r}{m_{33}} \end{cases} \quad (11)$$

以方便后续控制器设计的计算。

2 无人船轨迹跟踪控制器设计

将无人船数学模型转化为标准柯西形式^[20]的二阶系统微分方程,为了保证无人船模型船摇力矩不丢失,设立二阶系统的轨迹参考点 $\chi = [\chi_x \ \chi_y]^T$, L 为图1船体坐标系重心原点延纵轴的距离,可以得出:

$$\begin{cases} \chi_x = x + L \cos(\phi) \\ \chi_y = y + L \sin(\phi) \end{cases} \quad (12)$$

对 χ 进行一次求导和二次求导可得 $\dot{\chi}$ 和 $\ddot{\chi}$ 为:

$$\begin{cases} \dot{\chi}_x = u \cos(\phi) - v \sin(\phi) - Lr \sin(\phi) \\ \dot{\chi}_y = u \sin(\phi) + v \cos(\phi) + Lr \cos(\phi) \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \ddot{\chi}_x = \dot{u} \cos(\phi) - ur \sin(\phi) - \dot{v} \sin(\phi) - vr \cos(\phi) - L\dot{r} \sin(\phi) - Lr^2 \cos(\phi) \\ \ddot{\chi}_y = \dot{u} \sin(\phi) + ur \cos(\phi) + \dot{v} \cos(\phi) - vr \sin(\phi) + L\dot{r} \cos(\phi) - Lr^2 \sin(\phi) \end{cases} \quad (14)$$

式中:定义 $\tau_\Delta = [\tau_u \ \tau_r]^T$, $F = [F_x \ F_y]^T$ 和 G 的具体形式为:

$$\begin{cases} F_x = (f_u + \delta_u - vr - Lr^2) \cos(\phi) - (\delta_v + f_v + Lf_r + L\delta_r + ur) \sin(\phi) \\ F_y = (f_u + \delta_u - vr - Lr^2) \sin(\phi) + (\delta_v + f_v + Lf_r + L\delta_r + ur) \cos(\phi) \end{cases} \quad (15)$$

$$G = \begin{bmatrix} \frac{\cos(\phi)}{m_{11}} & -\frac{L \sin(\phi)}{m_{22}} \\ \frac{\sin(\phi)}{m_{11}} & \frac{L \cos(\phi)}{m_{22}} \end{bmatrix} \quad (16)$$

最终便将无人船数学模型转化为:

$$\ddot{\chi} = F + G\tau_\Delta \quad (17)$$

定义期望轨迹为 $\chi_d = [\chi_{xd} \ \chi_{yd}]^T$, 跟踪误差 $e = \chi - \chi_d = [e_x \ e_y]^T = [\chi_x - \chi_{xd} \ \chi_y - \chi_{yd}]^T$, 并设计滑模面 $\sigma = [\sigma_x \ \sigma_y]^T$ 为:

$$\sigma = \dot{e} + \lambda e = \dot{\chi} - \dot{\chi}_d + \lambda(\chi - \chi_d) \quad (18)$$

式中: $\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_x & 0 \\ 0 & \lambda_y \end{bmatrix}^T > 0$ 为滑模面参数。对滑模面 σ 进行时间求导和等式变换,可得轨迹跟踪控制器:

$$\tau_\Delta = G^{-1}(\ddot{\chi}_d - \lambda \dot{e} + \ddot{\sigma} - F) \quad (19)$$

式中: G^{-1} 为 G 的逆矩阵,选取的自适应超螺旋滑模控制趋近律 $\dot{\sigma} = [\dot{\sigma}_x \ \dot{\sigma}_y]^T$ 为:

$$\begin{cases} \dot{\sigma}_i = -2K_i(t) |\sigma_i|^{\frac{1}{2}} \text{sgn}(\sigma_i) + \dot{s}_i \\ s_i = -\frac{K_i^2(t)}{2} \text{sgn}(\sigma_i) \end{cases} \quad (20)$$

式中: $i = x, y$, 设计自适应增益 $K(t)$ 的自适应解为:

$$\dot{K}(t) = \alpha \left(\frac{4\xi_2^2 - 2\xi_1\xi_2}{K(t)} - K(t) + K_{\min} \right) \quad (21)$$

式(21)成立的条件为 $K(t) \geq K_{\min}$; 当 $K(t) < K_{\min}$ 时, $K(t) = K_{\min} > 0$, 便可确保整个系统不存在奇异点, $\alpha > 0$ 为自适应增益的参数, 式(21)中的 ξ_1 和 ξ_2 具体为:

$$\begin{cases} \xi_1 = |\sigma|^{\frac{1}{2}} \text{sgn}(\sigma) \\ \xi_2 = -\frac{1}{K(t)} \int \frac{K^2(t)}{2} \text{sgn}(\sigma) dt \end{cases} \quad (22)$$

该增益提供了平滑的变化率, 同时减少了调整的参数量。当滑模面的绝对值较大时, 自适应增益会增加其数值, 以抑制外界不确定性干扰的扰动。相反的情况下, 当滑模面的绝对值较小时, 自适应增益会减小, 以减缓抖振, 降低控制成本。整体的轨迹跟踪控制流程如图 2 所示。

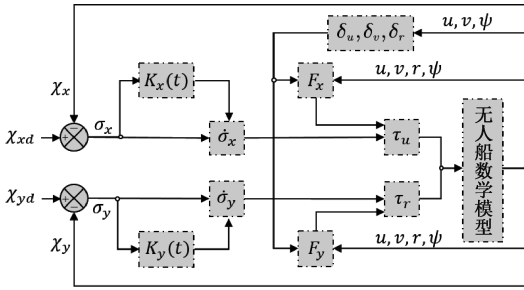


图 2 轨迹跟踪控制流程图

3 稳定性证明

定义域中零点为平衡点, 接下来讨论排除零点的定义域中, 由式(22)可将原系统的收敛问题转化为证明 ξ_1 和 ξ_2 的收敛问题^[16], 对 ξ_1 和 ξ_2 进行求导:

$$\begin{cases} \dot{\xi}_1 = \frac{\dot{\sigma} \text{sgn}^2(\sigma)}{2|\sigma|^{\frac{1}{2}}} = \frac{K(t)}{2|\sigma|^{\frac{1}{2}}} (-2\xi_1 + \xi_2) \\ \dot{\xi}_2 = \frac{K(t)}{2|\sigma|^{\frac{1}{2}}} (-\xi_1) - \xi_2 \frac{\dot{K}(t)}{K(t)} \end{cases} \quad (23)$$

将式(23)变换为矩阵形式:

$$\dot{\xi} = \frac{K(t)}{2|\sigma|^{\frac{1}{2}}} (\mathbf{A} - \mathbf{H}^{-1} \mathbf{P}^T \mathbf{P}) \xi - \mathbf{B} \mathbf{B}^T \xi \frac{\dot{K}(t)}{K(t)} \quad (24)$$

$$\text{式中: } \xi = \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix}, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 2 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (25)$$

矩阵 \mathbf{H} 是下式矩阵方程的对称正定矩阵解:

$$\mathbf{H} + \mathbf{A}^T \mathbf{H} + \mathbf{H} \mathbf{A} - \mathbf{P}^T \mathbf{P} = 0 \quad (26)$$

依托 Lyapunov 稳定性理论, 考虑选取以下 Lyapunov 备选函数:

$$V_{\langle \xi, K \rangle} = V_{\xi} + V_K = \xi^T \mathbf{H} \xi + \frac{1}{2} [K(t) - K_{\min}]^2 \geq 0 \quad (27)$$

对选取的 Lyapunov 备选函数式(27)求导可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{\langle \xi, K \rangle} &= \xi^T \mathbf{H} \dot{\xi} + \dot{\xi}^T \mathbf{H} \xi + [K(t) - K_{\min}] \dot{K}(t) = \\ &= \frac{K(t)}{2|\sigma|^{\frac{1}{2}}} \xi^T (\mathbf{H} \mathbf{A} + \mathbf{A}^T \mathbf{H}) \xi - \frac{K(t)}{2|\sigma|^{\frac{1}{2}}} \xi^T \mathbf{P}^T \mathbf{P} \xi - \\ &= 2\xi^T \mathbf{H} \mathbf{B} \mathbf{B}^T \xi \frac{\dot{K}(t)}{K(t)} + [K(t) - K_{\min}] \dot{K}(t) \end{aligned} \quad (28)$$

将式(26)带入式(28)可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{\langle \xi, K \rangle} &= -\frac{K(t)}{2|\sigma|^{\frac{1}{2}}} \xi^T (\mathbf{H} + \mathbf{P}^T \mathbf{P}) \xi + \\ &= \left[K(t) - K_{\min} - \frac{2\xi^T \mathbf{H} \mathbf{B} \mathbf{B}^T \xi}{K(t)} \right] \dot{K}(t) \end{aligned} \quad (29)$$

对称正定矩阵 \mathbf{H} 满足不等式:

$$\lambda_{\min}(\mathbf{H}) \|\xi\|^2 \leq \xi^T \mathbf{H} \xi \leq \lambda_{\max}(\mathbf{H}) \|\xi\|^2 \quad (30)$$

$\lambda_{\min}(\mathbf{H})$ 和 $\lambda_{\max}(\mathbf{H})$ 分别为正定矩阵 \mathbf{H} 的最小特征值和最大特征值, 可以得出以下不等式:

$$\sqrt{\frac{\lambda_{\min}(\mathbf{H})}{\xi^T \mathbf{H} \xi}} \leq \frac{1}{\|\xi\|} \leq \frac{1}{|\xi_1|} = \frac{1}{|\sigma|^{\frac{1}{2}}} \quad (31)$$

将式(31)带入式(29), 同时考虑 $-\xi^T \mathbf{P}^T \mathbf{P} \xi \leq 0$ 则有:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{\langle \xi, K \rangle} &\leq -\frac{1}{2} K(t) \sqrt{\lambda_{\min}(\mathbf{H})} \xi^T \mathbf{H} \xi + \\ &= \left[K(t) - K_{\min} - \frac{2\xi^T \mathbf{H} \mathbf{B} \mathbf{B}^T \xi}{K(t)} \right] \dot{K}(t) \end{aligned} \quad (32)$$

式中: $\omega = \frac{1}{2} K(t) \sqrt{\lambda_{\min}(\mathbf{H})} > 0$, 根据式(32), 只需找出

合适的自适应增益 $\dot{K}(t)$ 的解使得 $\dot{V}_{\langle \xi, K \rangle} \leq 0$, 则满足不等式 $\dot{V}_{\langle \xi, K \rangle} \leq 0$ 成立的自适应增益 $\dot{K}(t)$ 的解为:

$$\dot{K}(t) = \alpha \left[\frac{4\xi_2^2 - 2\xi_1\xi_2}{K(t)} - (K(t) - K_{\min}) \right] \quad (33)$$

式中: $\alpha > 0, K(t) \geq K_{\min}$, 最终便推导出不等式:

$$\dot{V}_{\langle \xi, K \rangle} \leq -\omega V_{\xi}^{\frac{1}{2}} - \alpha \left[K(t) - K_{\min} - \frac{4\xi_2^2 - 2\xi_1\xi_2}{K(t)} \right]^2 \quad (34)$$

根据式(34)可得 $\dot{V}_{\langle \xi, K \rangle} \leq 0$, 根据 Lyapunov 稳定性理论, 本节选择备选函数 $V_{\langle \xi, K \rangle}$ 在零点处存在平衡点。排除零点之外的定义域 $V_{\langle \xi, K \rangle}$ 为半正定, $\dot{V}_{\langle \xi, K \rangle}$ 为半负定, 在有限时间内 ξ_1 和 ξ_2 收敛, 便可以得出 σ 同样有限时间收敛, 且不存在奇异点, 二阶系统控制器满足 Lyapunov 稳定性条件, 系统稳定。

4 仿真实验与分析

将本文的控制方法与超螺旋(super-twisting, ST)滑模

控制和传统自适应超螺旋(adaptive super-twisting, AST)滑模控制进行仿真实验对比,仿真时间采用 $0 \leq t \leq 30$ s,仿真实验采取的圆形期望轨迹为:

$$\begin{cases} x_d = 15\sin\left(\frac{\pi}{14}t\right) + 2 \\ y_d = 15\cos\left(\frac{\pi}{14}t\right) - 14 \end{cases} \quad (35)$$

选取的 ST 和 AST 具体形式为:

1) ST

$$\sigma_i = -l_1 |\sigma_i|^{\frac{1}{2}} \text{sgn}(\sigma_i) - l_2 \int \text{sgn}(\sigma_i) dt \quad (36)$$

2) AST

$$\begin{cases} \dot{K}_{\alpha j} = \begin{cases} K_{\gamma j} \text{sgn}(|\sigma_j| - \mu) & K_{\alpha j} \geq K_{\min j} \\ K_{\min j} & K_{\alpha j} < K_{\min j} \end{cases} \\ K_{\beta j} = 2l_j K_{\alpha j} \\ \sigma_j = -K_{\alpha j} |\sigma_j|^{\frac{1}{2}} \text{sgn}(\sigma_j) - K_{\beta j} \int \text{sgn}(\sigma_j) dt \end{cases} \quad (37)$$

式中: $i = x, y, j = x, y, K_{\alpha j}$ 和 $K_{\beta j}$ 是 AST 控制器的时变自适应增益, $K_{\gamma j}, \mu, K_{\min j}$ 和 l_j 为大于 0 的 AST 控制器参数; l_1 和 l_2 为 ST 控制器中大于 0 的参数,按照图 2 控制流程图搭建数学仿真模型,具体的控制器仿真实验参数值如表 1 所示。

表 1 各控制器选取的参数

| NAST | AST | ST |
|------------------|----------------------|--------------|
| $\alpha = 3$ | $K_{\gamma j} = 0.1$ | $l_1 = 0.2$ |
| $K_{\min} = 0.1$ | $\mu = 0.1$ | $l_2 = 0.05$ |
| | $K_{\min j} = 0.1$ | |
| | $l_j = 0.01$ | |

测试船的基本参数和运动学基本参数如表 2 和表 3 所示。

表 2 测试船的基本参数

| 基本参数 | 参数值 |
|--------------------------------|----------------------------|
| 总长度 (L_{OA}) | 3.50/m |
| 船的质量 (m) | 569/kg |
| 转动惯量 (I_{ZZ}) | 175.6/(kg·m ²) |
| 船纵轴中心线至推进器纵轴中心线之间的垂直距离 (B) | 0.70/m |

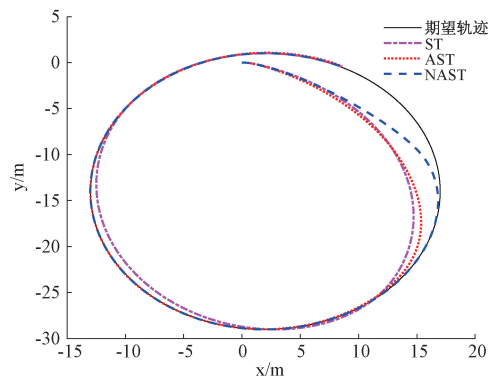
本文选取无人船二阶模型的参考点数值 $L = 0.1$, 代表此参考点为船体坐标原点延纵轴正方向 0.1 m 的位置点,无人船的起始状态为 $x = y = \psi = u = v = r = 0$, $L_{OA} = 3.50$ m 如表 2 所示。对于模型由风和浪引起的外界不确定性干扰,选取风速 $V_w = 10$ m/s,风向 $\beta_{wind} = 2.3$ rad,分别表示船艏投影面积和船身侧边投影面积取值分别是 $A_{FW} = 0.32$ m²、 $A_{LW} = 0.72$ m²,选取的测试船仿真数据

表 3 测试船的运动学基本参数

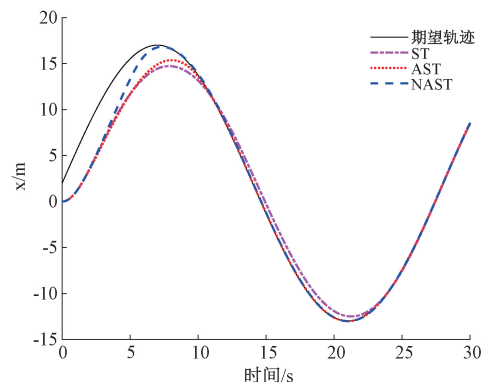
| 基本参数 | 参数值 |
|------------|---------------------------|
| X_a | -42.67 |
| Y_s | -395.8 |
| N_r | -552.1 |
| X_u | -157.6 |
| Y_v | -24 074.89 v |
| N_r | -30.79 $\sqrt{u^2 + v^2}$ |
| $X_{u u }$ | -15.7 |
| $Y_{v v }$ | -770 |
| $N_{r r }$ | -1 077 |

接近客船,所以选取风的力和力矩计算系数中涉及的参数值 $CD_i = 0.9, CD_{LAF} = 0.4$ 和 $\phi = 0.8$;浪涌模型参数 $K_w = 5, \lambda_w = 0.2, \dot{d}_F, \dot{d}_N, \omega_F$ 和 ω_N 都选取为频率为 5 Hz 且标准差为 25 的高斯噪声采样波,波谱峰值频率 $\omega_0 = 2.1$,浪的方向 $\beta_{wave} = 1.3$ 。

图 3 绘制了 NAST 和现有其他控制方法的轨迹跟踪效果图,圆形期望轨迹下控制器的轨迹跟踪曲线如图 3(a)所示,控制器的 x 轴轨迹跟踪控制曲线如图 3(b)所示,控制器的 y 轴轨迹跟踪控制曲线如图 3(c)所示。结果表明,与其他控制器的性能相比,NAST 在外界不确定性干扰下表现出较高的跟踪精度,能够快速缩小轨迹跟踪误差,且更加稳定。



(a) 圆形期望轨迹和控制轨迹跟踪曲线



(b) 控制器x轴轨迹跟踪曲线

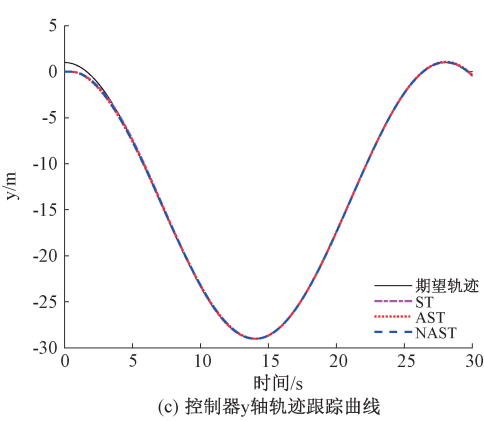


图 3 期望轨迹和轨迹跟踪曲线

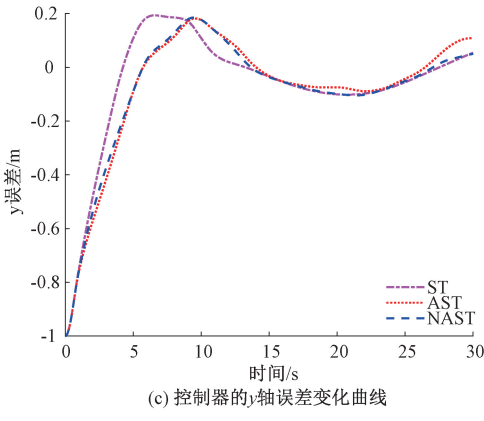


图 4 控制器的轨迹误差曲线

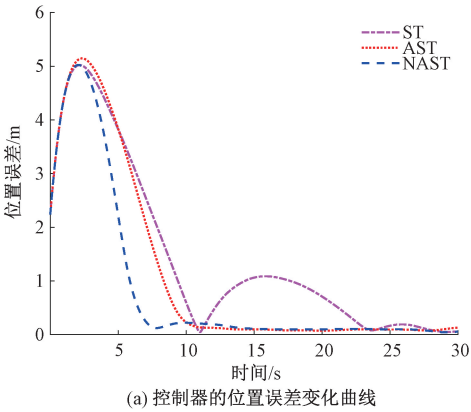
同时,本节引入 $e_d = \sqrt{e_x^2 + e_y^2}$ 分析位置误差,控制器的位置误差随时间的变化曲线如图 4(a)所示,控制器的 x 轴误差随时间的变化曲线如图 4(b)所示,控制器的 x 轴误差随时间的变化曲线如图 4(c)所示。在相同时间内,本文提出的 NAST 方法位置误差收敛速度最快,轨迹跟踪误差最小。

本节采用了平均绝对误差(MAE)和均方误差(MSE)计算对比误差性能,外界不确定性干扰下各方法的误差指标分析结果如表 4 所示。综合表 4 所反映的误差性能数据,本文提出的 NAST 方法均表现优异。

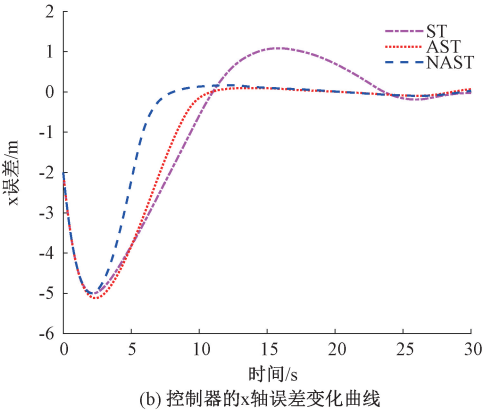
表 4 误差指标分析表

| | NAST | | AST | | ST | |
|-------|-------------|------|------|------|------|------|
| | MAE | MSE | MAE | MSE | MAE | MSE |
| e_x | 0.80 | 2.93 | 1.07 | 4.12 | 1.43 | 4.48 |
| e_y | 0.14 | 0.06 | 0.15 | 0.06 | 0.13 | 0.05 |
| e_d | 0.84 | 2.99 | 1.11 | 4.18 | 1.44 | 4.53 |

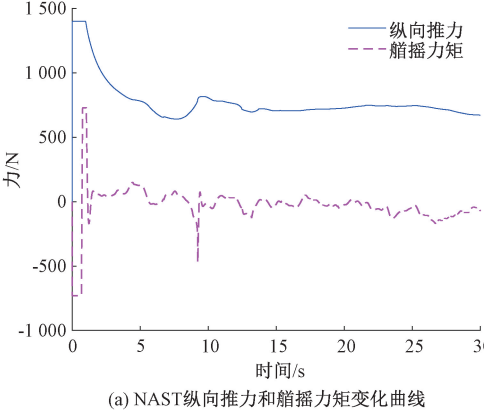
从 NAST 控制器输出,输入到无人船数学模型的纵向推力和艏摇力矩如图 5(a)所示,无人船数学模型输出的双



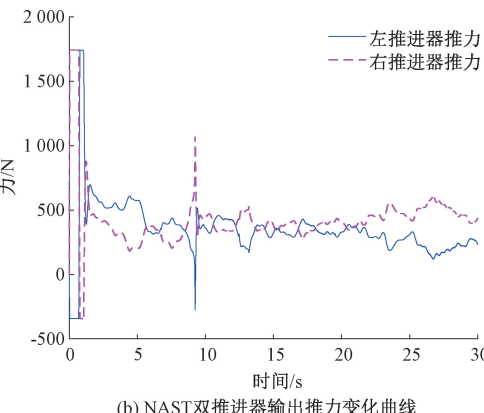
(a) 控制器的位置误差变化曲线



(b) 控制器的x轴误差变化曲线



(a) NAST纵向推力和艏摇力矩变化曲线

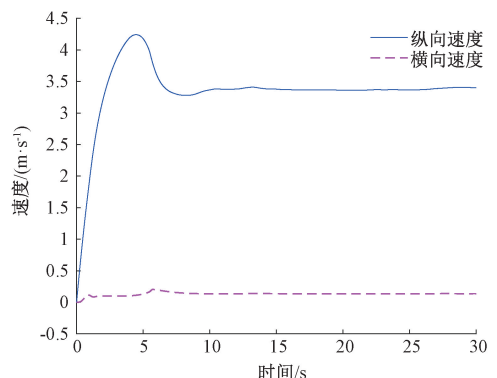


(b) NAST双推进器输出推力变化曲线

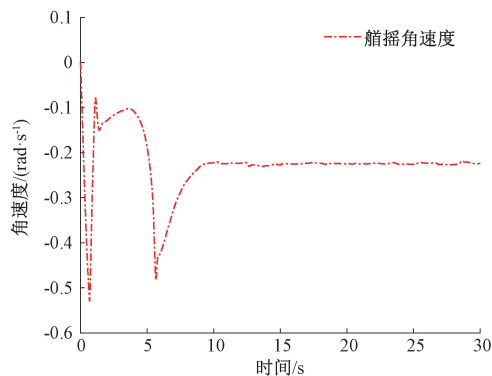
图 5 NAST 控制器输出的推力和力矩

推进器推力随时间的变化曲线如图5(b)所示,曲线的变化同时反映出本文所提出的 NAST 控制方法可以在外界不确定性干扰下使系统输出平稳的力和力矩,且仅有极少的信号突变,这样可以有效地保护系统和推进器,证明了 NAST 控制方法的性能优异。

NAST 船舶数学模型输出的速度矢量如图6(a)和图6(b)所示,模型输出了没有突变、整体稳定的纵向速度、横向速度和艏摇角速度,验证了所提方法在外界不确定性干扰的情况下系统的稳定性。



(a) NAST船舶数学模型输出纵向速度和横向速度变化曲线



(b) NAST船舶数学模型输出艏摇角速度变化曲线

图6 NAST 船舶数学模型输出的速度矢量

NAST 控制器的自适应增益变化曲线如图7所示,曲线可以直观地反映本文提出的自适应增益变化较为平滑,从而不会导致过多增益的产生。

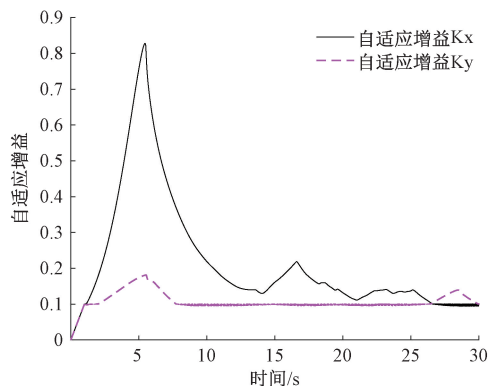


图7 NAST 控制器时变自适应增益

5 结 论

本文提出并设计了一种新型自适应超螺旋轨迹跟踪滑模控制方法,这种控制方法提高了控制性能,能够实现快速、准确的轨迹跟踪,且在整个过程中能够有效抑制滑模控制中存在的抖振现象,减少调整参数的工作量。本文核心技术难点在于自适应算法能有效地判断扰动变化,外部扰动较大时,设计的轨迹跟踪控制器仍然可以有效跟踪外部扰动,在此基础上,通过与其他控制方法进行仿真对比实验,实验结果验证了所提出方法的性能和稳定性。自适应增益的导数必须为非负数才可保证系统无奇点,所以进一步提升自适应增益算法的适用范围和进行实船测试,将放在下一步的工作中。

参考文献

- [1] WANG N, SUN Z, YIN J, et al. Finite-time observer based guidance and control of underactuated surface vehicles with unknown sideslip angles and disturbances[J]. IEEE Access, 2018, 6: 14059-14070.
- [2] ZOU A M, KUMAR K D, RUITER A H J. Fixed-time attitude tracking control for rigid spacecraft[J]. Automatica, 2020, 113: 108792.
- [3] 张凯,王玉龙,刘兆清.带扰动观测器的欠驱动水面无人船轨迹跟踪控制[J].舰船科学技术,2019,41(23): 127-132,139.
- [4] 高继勋,黄全振,高振东,等.基于反演法的移动机器人轨迹跟踪控制[J].中国测试,2022,48(8):130-135.
- [5] 柳晨光,初秀民,王乐,等.欠驱动水面船舶的轨迹跟踪模型预测控制器[J].上海交通大学学报,2015, 49(12):1842-1848,1854.
- [6] LIANG H, LI H, XU D. Nonlinear model predictive trajectory tracking control of underactuated marine vehicles: Theory and experiment [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 68(5): 4238-4248.
- [7] 于华成,艾自东.基于终端滑模控制的移动机器人轨迹跟踪[J].电子测量技术,2022,45(11):78-82.
- [8] PATRE B M, LONDHE P S, WAGHMARE L M, et al. Disturbance estimator based non-singular fast fuzzy terminal sliding mode control of an autonomous underwater vehicle [J]. Ocean Engineering, 2018, 159: 372-387.
- [9] 董早鹏,刘涛,万磊,等.基于 Takagi-Sugeno 模糊神经网络的欠驱动无人艇直线航迹跟踪控制[J].仪器仪表学报,2015,36(4):863-870.
- [10] 文元桥,周阳,高欣国,等.双推进无人艇轨迹跟踪控制系统设计[J].船海工程,2019,48(4):122-126,130.
- [11] DENG Y, ZHANG X, IM N, et al. Adaptive fuzzy

- tracking control for underactuated surface vessels with unmodeled dynamics and input saturation [J]. ISA Transactions, 2020, 103: 52-62.
- [12] 葛媛媛,张宏基.基于自适应模糊滑模控制的机器人轨迹跟踪算法[J].电子测量与仪器学报,2017,31(5): 746-755.
- [13] 刘文吉,杜佳璐,李健,等.基于超螺旋滑模的船载稳定平台镇定控制[J].系统工程与电子技术,2022,44(5): 1662-1669.
- [14] 刘彦呈,许晨,赵友涛,刘△源,梁晓玲.基于超螺旋滑模的欠驱动船舶航迹跟踪控制[J].信息与控制,2020, 49(5): 578-584,597.
- [15] HAGHIGHI D A, MOBAYEN S. Design of an adaptive super-twisting decoupled terminal sliding mode control scheme for a class of fourth-order systems[J]. ISA Transactions, 2018, 75: 216-225.
- [16] GUTIERREZ S V, LEÓN-MORALES J, PLESTAN F, et al. A simplified version of adaptive super-twisting control [J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2019, 29(16): 5704-5719.
- [17] ALVARO M E, LEÓN M S J, HAMIDA M A, et al. Adaptive sensorless control for interior permanent magnet synchronous motor based on sliding mode approach [J]. ISA Transactions, 2023, Vol. 139: 524-547.
- [18] GONZALEZ G A, CASTAÑEDA H. Adaptive integral terminal super-twisting with finite-time convergence for an unmanned surface vehicle under disturbances[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2022, 32(18): 10271-10291.
- [19] GONZALEZ G A, CASTAÑEDA H. Guidance and control based on adaptive sliding mode strategy for a USV subject to uncertainties [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2021, 46(4): 1144-1154.
- [20] PALIOTTA C, LEFEBER E, PETTERSEN K Y, et al. Trajectory tracking and path following for underactuated marine vehicles[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2018, 27(4): 1423-1437.

作者简介

冯成涛,博士,硕士生导师,主要研究方向为无人船运动控制、惯性导航室内定位。

E-mail:fengct@cczu.edu.cn

陈威,硕士研究生,主要研究方向为无人船运动控制。

E-mail:s22060858005@smail.cczu.edu.cn

陶睿楠,硕士研究生,主要研究方向为无人船运动控制。

E-mail:s22060809037@smail.cczu.edu.cn

朱栋,副教授,硕士生导师,主要研究方向为图像处理、计算电磁学(FDTD)、微纳光子学、数字信号处理等。

E-mail:zhudong@cczu.edu.cn

储开斌,教授,硕士生导师,主要研究方向为应用电子技术。

E-mail:ckb910@cczu.edu.cn