

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2417223

基于时延估计与终端滑模的无人船跟踪控制^{*}

刘超 叶华生 沈跃 刘慧 沈亚运

(江苏大学电气信息工程学院 镇江 212013)

摘要: 针对欠驱动无人船动力学模型参数获取困难、跟踪控制易受水流及自然风等干扰的问题,本文提出了一种基于自适应时延估计与超螺旋快速终端滑模的轨迹跟踪控制方法。首先通过手部位置点坐标变换方法,对欠驱动无人船数学模型进行状态扩展重新构建;然后采用自适应时延估计技术,估计无人船未知动力学模型部分及外部扰动,并设计超螺旋快速终端滑模控制策略补偿时延估计产生的误差,提高控制系统鲁棒性;最后,基于仿真分析与航行跟踪实验验证本研究控制方法可行性。在航行跟踪实验中,位置平均误差相比于PID算法、滑模算法及自适应时延估计滑模算法分别降低了35.1%、24.7%、20.8%,轨迹跟踪精度高。本文提出的控制方法不依赖动力学模型参数,可实现欠驱动无人船精准轨迹跟踪控制,且收敛速度快、鲁棒性高,为欠驱动无人船轨迹跟踪控制提供了可供借鉴的方法。

关键词: 欠驱动无人船;自适应时延估计;超螺旋快速终端滑模控制;轨迹跟踪控制

中图分类号: TP273;TN79 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8

Unmanned surface vehicle tracking control based on time delay estimation and terminal sliding mode

Liu Chao Ye Huasheng Shen Yue Liu Hui Shen Yayun

(College of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: To solve the problem of difficulty in obtaining the parameters of the dynamic model of underactuated unmanned surface vehicle, and the tracking control is susceptible to interference from water flow and natural wind, this paper proposes a trajectory tracking control method based on adaptive time delay estimation and super-twisting fast terminal sliding mode. First, the hand position point coordinate transformation method is used to reconstruct the state expansion of the underactuated unmanned surface vehicle mathematical model; then adaptive time delay estimation technology is used to estimate the unknown dynamic model part of the unmanned surface vehicle and external disturbances, and design a super-twisting fast terminal sliding mode control strategy compensates for errors caused by time delay estimation and improves the robustness of the control system; finally, the feasibility of the control method in this study is verified based on simulation analysis and navigation tracking experiments. In the trajectory tracking experiment, the average positional error was reduced by 35.1%, 24.7%, and 20.8% compared to the PID algorithm, sliding mode algorithm, and adaptive delay estimation sliding mode algorithm, respectively, demonstrating high trajectory tracking accuracy. The control method proposed in this paper does not rely on the parameters of the dynamic model and can achieve precise trajectory tracking control for underactuated unmanned surface vehicles. It features fast convergence speed and high robustness, providing a reference method for trajectory tracking control of underactuated unmanned surface vehicles.

Keywords: underactuated unmanned surface vehicle; adaptive delay estimation; super-twisting fast terminal sliding mode control; trajectory tracking control

0 引言

水面无人船(unmanned surface vehicle, USV)因安全

性高、成本低以及消耗少等优点,已被广泛应用于水质监测、水上搜救、资源开发等各种水域研究任务中^[1-2]。面向不同的任务需求,精确轨迹跟踪技术是USV自主作业的关

收稿日期:2024-10-28

* 基金项目:中国高校产学研创新基金-无人集群协同智能项目(2021ZYB02002)资助

键基础,其研究意义和实际应用价值巨大^[3]。但 USV 动力学模型具有欠驱动、非线性、强耦合等特点,且易受模型不确定性、外部时变性扰动的影响,使得 USV 跟踪控制系统的设计极具挑战性^[4-5]。

目前常用的欠驱动 USV 跟踪控制方法主要有模型预测控制、反步控制、滑模控制(sliding mode control, SMC)等。文献[6]利用非线性模型预测控制将欠驱动 USV 轨迹跟踪问题设计为优化问题,迭代优化求解获得良好的控制效果。文献[7]提出了一种自适应反步有限时间跟踪控制方法,解决了欠驱动 USV 在输入死区约束下的跟踪问题。文献[8]将神经网络与 SMC 相结合,利用神经网络估计系统未知扰动,有效提高了欠驱动 USV 的抗干扰能力。上述控制方法均能实现欠驱动 USV 的跟踪控制,但 SMC、模型预测控制等都是基于模型的控制方法,建立在 USV 部分或者全部动力学参数已知的基础上。目前常用的 USV 动力学参数获取方法主要有理论计算法、数值模拟法及试验法等。文献[9]将切片理论和普通细长体理论相结合,能够更高效计算出细长船舶的水动力参数,但其理论计算适用范围有限且计算精度较低。文献[10]利用 CFD 技术对船体进行二维数值模拟,通过最小二乘法拟合得到其水动力参数,但其计算量大、结果验证困难。试验法测量结果较为准确且通用性强,但需通过斜拖、旋臂等试验才能得出水动力参数,故其所需人力物力成本高^[11]。

时延估计(time delay estimation, TDE)技术通过利用前一个采样时刻的时延信息估计机器人动力学中复杂的非线性项,能有效克服上述控制方法的局限性^[12-14]。该技术具有简单、高效、鲁棒性强等优点,且不依赖模型的特性利于实际工程应用^[15-16]。但时延估计误差是与状态有关的非线性项,其大小影响系统的鲁棒性^[17]。由于 SMC 具有对扰动变化不灵敏、鲁棒性强等优点^[18-20],通常用于抑制时延估计误差。传统 TDE 技术只考虑上一时刻时延信息,在应对间歇性扰动时,估计效果较差,影响系统稳定性^[21]。文献[21]对传统 TDE 技术进行了改进,通过考虑估计变化梯度,提出了自适应时延估计(adaptive time delay estimation, ATDE)策略,结合 SMC 应用于机械臂运动控制中,在外部时变扰动下具有良好的控制性能。然而现有国内外 TDE 技术的研究均是基于机械臂、水下航行器等设备,尚未有应用于欠驱动 USV 控制器设计的研究。

针对上述问题,本文提出了一种基于自适应时延估计与超螺旋快速终端滑模的轨迹跟踪控制方法。引入手部位置点坐标变换方法,解决了欠驱动 USV 跟踪控制器直接构建的奇异性问题,使得 ATDE 技术可应用于欠驱动 USV 控制器设计之中。ATDE 技术用以估计欠驱动 USV 未知动力学模型部分及外部扰动,实现无需动力学模型参数的控制器设计,利于实际工程应用。而超螺旋快速终端滑模控制器的设计,能有效修正和补偿 ATDE 产生的估计误差,提高系统鲁棒性及跟踪精度,并利用李雅普诺夫方法分

析了系统的稳定性,通过仿真分析与航行实验验证了控制器的可靠性与优越性。

1 欠驱动 USV 数学模型

1.1 数学模型建立

考虑欠驱动 USV 纵荡、横荡及艏摇三自由度的运动,忽略垂荡、纵摇和横摇运动的影响,建立欠驱动 USV 平面运动坐标系,如图 1 所示,其中 $\{O_E X_E Y_E\}$ 表示惯性坐标系, $\{O_B X_B Y_B\}$ 表示机体坐标系。假设 USV 为刚体,质量分布均匀,机体坐标系原点 O_B 位于 USV 的重心处。

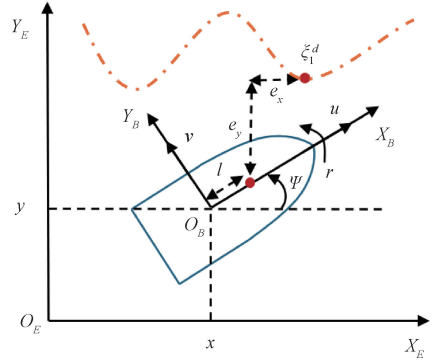


图 1 欠驱动 USV 平面运动坐标系示意图

Fig. 1 Schematic diagram of underactuated USV plane motion coordinate system

基于上述假设,建立欠驱动 USV 数学模型^[22]:

$$\begin{cases} \dot{x} = u \cos \psi - v \sin \psi \\ \dot{y} = u \sin \psi + v \cos \psi \\ \dot{\psi} = r \\ \dot{u} = (m_v v r + X_u u + X_{|u|} |u| |u| + \tau_u) / m_u + \Delta_u \\ \dot{v} = (-m_u u r + Y_v v + Y_{|v|} |v| |v|) / m_v + \Delta_v \\ \dot{r} = [(m_u - m_v) r u + N_r r + N_{|r|} |r| |r| + \tau_r] / m_r + \Delta_r \end{cases} \quad (1)$$

式中: x 、 y 与 ψ 分别表示 USV 相对惯性坐标系的位置坐标与艏向角; u 、 v 、 r 分别表示机体坐标系下的纵向、横向速度及艏摇角速度; τ_u 、 τ_r 分别表示作用于 USV 的纵向推力及艏摇力矩; $m_u = m - X_a$ 、 $m_v = m - Y_a$ 、 $m_r = I_z - N_r$ 表示为 USV 惯性质量; m 表示 USV 的质量; I_z 表示为惯量力矩; $X_{(\cdot)}$ 、 $Y_{(\cdot)}$ 、 $N_{(\cdot)}$ 表示作用于 USV 的水动力参数; Δ_u 、 Δ_v 、 Δ_r 表示为未建模部分、参数摄动和外部扰动等未知项。

1.2 手部位置点坐标变换

由于欠驱动 USV 在横向上没有驱动力,仅使用 τ_u 、 τ_r 两个控制输入控制纵向、横向位置及艏向的跟踪误差,若直接将其轨迹跟踪问题转化为跟踪误差镇定问题,跟踪控制器构建中会产生奇异性问题。为克服上述问题,引入手部位置点坐标变换的方法^[23],将系统运动学由基于坐标变换的状态扩展重新构建,将艏向控制包涵在横向、纵向位置误差跟踪控制中。新定义的状态扩展向量为:

$$\xi_1 = \begin{bmatrix} \xi_x \\ \xi_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x + l \cos\psi \\ y + l \sin\psi \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: l 为机体坐标系重心原点沿纵轴的距离,且 $l > 0$ 。

故欠驱动 USV 的动力学模型在状态空间中可以表示为:

$$\begin{cases} \dot{\xi}_1 = \xi_2 \\ \dot{\xi}_2 = \mathbf{R}(\psi) \mathbf{f}(\xi_1) + \mathbf{R}(\psi) \mathbf{g}(\xi_1) \boldsymbol{\tau}_\xi + \mathbf{R}(\psi) \boldsymbol{\Delta}(\xi_1) \end{cases} \quad (3)$$

式中: ξ_1 与 ξ_2 为状态变量; $\boldsymbol{\tau}_\xi = [\tau_u, \tau_r]^T$ 为控制输入向量; $\mathbf{R}(\psi)$ 、 $\mathbf{f}(\xi_1)$ 、 $\mathbf{g}(\xi_1)$ 、 $\boldsymbol{\Delta}(\xi_1)$ 的具体表达式为:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}(\psi) &= \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi \\ \sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix} \\ \mathbf{g}(\xi_1) &= \begin{bmatrix} 1/m_u & 0 \\ 0 & l/m_r \end{bmatrix} \\ \mathbf{f}(\xi_1) &= \begin{bmatrix} f_u(u) - vr - lr^2 \\ f_v(v) + ur + lf_r(r) \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{\Delta}(\xi_1) &= \begin{bmatrix} \Delta_u \\ \Delta_v + l\Delta_r \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

上述表达式可具体表示为:

$$\begin{aligned} f_u(u) &= (m_v vr + X_u u + X_{|u|} |u| |u|) / m_u \\ f_v(v) &= (-m_u ur + Y_v v + Y_{|v|} |v| |v|) / m_v \\ f_r(r) &= [(m_u - m_v)vu + N_r r + N_{|r|} |r| |r|] / m_r P \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{R}(\psi)$ 与 $\mathbf{g}(\xi_1)$ 为非奇异矩阵,未知项用向量 $\boldsymbol{\Delta}(\xi_1) = [\Delta_x, \Delta_y]^T$ 的分量表示,并设未知项 Δ_x 与 Δ_y 有界。

2 轨迹跟踪控制器设计

2.1 基于时延估计的 USV 动力学模型

手部位置点坐标系的引入,克服了 USV 跟踪控制器直接构建的奇异性问题,使得 TDE 技术可用估计动力学模型中未知部分,解决欠驱动 USV 动力模型参数难以获取的问题。为了便于后续推导,将 TDE 技术应用于欠驱动 USV 的控制器设计中,将式(3)改写为:

$$\boldsymbol{\tau}_\xi = \mathbf{M}\mathbf{R}_n(\psi)\dot{\xi}_1 + \mathbf{H} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{H} = -\mathbf{g}(\xi_1)^{-1}(\mathbf{f}(\xi_1) + \boldsymbol{\Delta}(\xi_1))$, $\mathbf{M} = \mathbf{g}(\xi_1)^{-1}$, $\mathbf{R}_n(\psi) = \mathbf{R}(\psi)^{-1}$ 。

引入惯性矩阵估计值 $\hat{\mathbf{M}}$, 将式(6)进一步改写为:

$$\boldsymbol{\tau}_\xi = \hat{\mathbf{M}}\mathbf{R}_n(\psi)\dot{\xi}_1 + \mathbf{N} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{N} = [\mathbf{M} - \hat{\mathbf{M}}]\mathbf{R}_n(\psi)\dot{\xi}_1 + \mathbf{H}$, $\hat{\mathbf{M}}$ 为一个正定常对角矩阵, \mathbf{N} 包含了惯性矩阵估计值与实际值的偏差、动力学模型中的未建模部分以及外部扰动项,采用 TDE 技术对其进行估计。

设 $\hat{\mathbf{N}}$ 为 \mathbf{N} 的估计值,则有:

$$\hat{\mathbf{N}} = \hat{\mathbf{N}}_t = \mathbf{N}_{t-L} = \boldsymbol{\tau}_{\xi,t-L} - \hat{\mathbf{M}}\mathbf{R}_n(\psi_{t-L})\dot{\xi}_{1,t-L} \quad (8)$$

式中: (\cdot) 表示 (\cdot) 当前时刻状态量, $(\cdot)_{t-L}$ 表示 (\cdot) 前一采样时刻状态量, L 为采样时间间隔,其大小与传感器采样频率有关, L 越小 $\hat{\mathbf{N}}$ 估计值越准确。

在式(8)中,系统前一时刻的加速度 $\ddot{\xi}_{1,t-L}$, 可通过对位置信号进行二阶差分运算得到:

$$\ddot{\xi}_{1,t-L} = (\xi_1 - 2\xi_{1,t-L} + \xi_{1,t-2L})/L^2 \quad (9)$$

引入权重系数矩阵 $\boldsymbol{\Lambda}$, 降低 $\hat{\mathbf{N}}$ 对控制器的影响,结合式(7)与(8)得:

$$\boldsymbol{\tau}_\xi = \hat{\mathbf{M}}\mathbf{R}_n(\psi)\dot{\xi}_1 + \boldsymbol{\Lambda}\hat{\mathbf{N}} \quad (10)$$

式中: $\boldsymbol{\Lambda}$ 为一个正定常对角矩阵。

2.2 超螺旋快速终端滑模控制器设计

时延估计技术能对 USV 原动力学模型中具有线性特征的因子进行估算,但会产生非线性部分的估计误差,其误差可能会影响系统的稳定性。因此,为了提高系统的跟踪精度和鲁棒性,本文将超螺旋滑模算法(super-twisting algorithm, STA)与快速终端滑模控制(fast terminal sliding mode control, FTSMC)结合,提出了一种超螺旋快速终端滑模控制策略抑制和补偿估计误差,利用 FTSMC 减少稳态误差、提高动态性能,通过 STA 加快系统状态收敛至滑模面、减小抖震现象。

定义欠驱动 USV 跟踪误差为:

$$\begin{cases} e_1 = \xi_1^d - \xi_1 \\ \dot{e}_1 = \dot{\xi}_1^d - \dot{\xi}_1 \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\xi_1^d = [x_d, y_d]^T$ 为期望轨迹,且 $\dot{\xi}_1^d$ 为期望轨迹时间导数。

传统线性滑模面会使系统产生较大的稳态跟踪误差,且收敛速度较慢,为了加快系统响应速度,进一步减小稳态误差,选取二阶快速终端滑模面:

$$s = \dot{e}_1 + \lambda_1 e_1 + \lambda_2 e_1^{q/p} \quad (12)$$

式中: $s = [s_1, s_2]^T$, λ_1 与 λ_2 为正定常对角矩阵, p 与 q 为待设正奇常数。当系统偏离稳定状态时, $\lambda_2 e_1^{q/p}$ 项能加快系统收敛速度,并且 $q > p$, 即 e_1 与 \dot{e}_1 不存在负指数项,避免了非奇异性问题。

对式(12)求导,并将式(10)、(11)带入得到等效控制项 $\boldsymbol{\tau}_{eq}$ 为:

$$\boldsymbol{\tau}_{eq} = \hat{\mathbf{M}}\mathbf{R}_n(\psi)(\dot{\xi}_1^d + \lambda_1 \dot{e}_1 + \lambda_2 \dot{e}_1 e_1^{q/p-1} \times q/p) + \boldsymbol{\Lambda}\hat{\mathbf{N}} \quad (13)$$

STA 算法简单,能有效抑制抖振,且鲁棒性强,为了削弱抖震现象,加快系统状态到达终端滑模面上,设计超螺旋滑模切换控制律为:

$$\boldsymbol{\tau}_{sw} = -k_1 |s|^{1/2} \text{sgn}(s) - k_2 \int_0^t \text{sgn}(s) dt - k_3 s \quad (14)$$

式中: $k_3 s$ 是控制律中加入的线性项,旨在加快趋近速度, k_1, k_2, k_3 为正定常对角阵, $\text{sgn}(\cdot)$ 表示 (\cdot) 的符号函数。

超螺旋滑模切换控制律中,符号函数具有非光滑性,易导致切换律在某些情况下出现抖振现象,对控制器产生不

稳定的影响。因此,本文引用双曲正切函数替换符号函数以改善控制量的连续性。其表达式为:

$$\tanh(\cdot) = (e^{\cdot} - e^{-\cdot}) / (e^{\cdot} + e^{-\cdot}) \quad (15)$$

优化后的超螺旋趋近律为:

$$\tau_{sw} = -k_1 |s|^{1/2} \tanh(\beta s) - k_2 \int_0^t \tanh(\beta s) dt - k_3 s \quad (16)$$

式中: β 为待设的正正常系数。

将式(13)与(16)相结合得到总控制律,如式(17)所示。

$$\begin{cases} \tau_{\xi} = \bar{M}R_n(\psi)(\ddot{\xi}_1^d + \lambda_1 \dot{e}_1 + \lambda_2 \dot{e}_1 e_1^{q/p-1} \times q/p - \tau_{sw}) + \Delta \hat{N} \\ \tau_{sw} = -k_1 |s|^{1/2} \tanh(\beta s) - k_2 \int_0^t \tanh(\beta s) dt - k_3 s \end{cases} \quad (17)$$

2.3 自适应时延估计策略

为了提高 TDE 技术估计准确性,降低环境时变扰动对估计效果的影响,引入基于滑模变量的自适应模型估计策略^[21],考虑估计变化的梯度,更准确地估计未知动力学模型及环境扰动,提升控制器跟踪性能。

设 $\hat{N}a$ 为 N 通过测量梯度自适应计算的动态估计值,则 $\hat{N}a$ 表达式为:

$$\hat{N}a = \hat{N}a_t = N_{t-L} + W(N_{t-L} - \Delta N_{t-2L}) \quad (18)$$

式中: $W = \text{diag}(w_{11}, w_{22})$ 为对角矩阵,用于实现基于滑模变量的估计梯度自适应调整。 W 的具体表达式为:

$$\begin{cases} \dot{w}_{ii} = -\alpha_{ii} s_i \dot{s}_i e^{-\gamma_{ii} s_i^2}, & w_{ii} \geq w_{ii}^- \\ \dot{w}_{ii} = w_{ii}^-, & w_{ii} < w_{ii}^- \end{cases} \quad (19)$$

式中: $(\cdot)_i$ 和 $(\cdot\cdot)_{ii}$ 分别是向量 (\cdot) 的第 i 个元素和对角矩阵 $(\cdot\cdot)$ 的第 ii 个对角元素; γ_{ii} 和 α_{ii} 是正自适应增益,用于改变 w_{ii} 的速率; w_{ii}^- 是一个非负常数,主要用于保证自适应估计策略的稳定性。

由式(18)、(19)可知, W 会随着滑模变量的变化而变化,当变量收敛至滑模面时, W 才会收敛,由此实现对 N 更为有效的动态估计。

用式(18)中的 \hat{N}^a 代替式(17)中的 \hat{N} , 得到总控制律为:

$$\begin{cases} \tau_{\xi} = \underbrace{\bar{M}R_n(\psi)(\ddot{\xi}_1^d + \lambda_1 \dot{e}_1 + \lambda_2 \dot{e}_1 e_1^{q/p-1} \times q/p)}_{\text{FTSMC}} - \underbrace{\tau_{sw}}_{\text{STA}} + \underbrace{\Delta \hat{N}^a}_{\text{ATDE}} \\ \tau_{sw} = -k_1 |s|^{1/2} \tanh(\beta s) - k_2 \int_0^t \tanh(\beta s) dt - k_3 s \end{cases} \quad (20)$$

本文所提控制器主要由 3 部分组成:FTSMC 项、STA 项与 ATDE 项。ATDE 项用于在线估计和实时补偿系统未知动力学模型、外部环境干扰等集总扰动;FTSMC 项用于加快系统从滑模面上收敛至平衡点,调节系统动态响应特性;STA 项用于加快系统状态到达终端滑模面上,抑制

抖震现象,增强系统鲁棒性。ATDE 的引入能有效降低期望动态项所需的增益,提高系统的抗扰性能,而 STFTSMC 的设计能够有效抵消 ATDE 估计误差对系统的影响,提高系统的稳定性。控制器结构框图如图 2 所示。

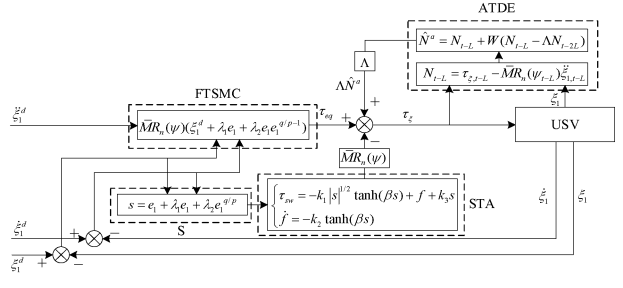


图 2 控制器结构框图

Fig. 2 Controller structure block diagram

2.4 稳定性分析

为证明本文所设控制器的稳定性,对 ATDE 估计误差进行了有界性分析,系统稳定性证明过程分为以下 3 个步骤:

1) TDE 估计误差有界性分析

先定义 TDE 估计误差为:

$$\varepsilon = R(\psi) \bar{M}^{-1} (N - \hat{N}) \quad (21)$$

令 $F = \ddot{\xi}_1^d + \lambda_1 \dot{e}_1 + \lambda_2 \dot{e}_1 e_1^{q/p-1} \times q/p - \tau_{sw}$, 将其带入式(17)得:

$$\tau_{\xi} = \bar{M}R_n(\psi) F + \Delta \hat{N} \quad (22)$$

将式(22)与式(7)结合可得:

$$F - \ddot{\xi}_1 = s - \tau_{sw} = \varepsilon \quad (23)$$

则有:

$$\bar{M}R_n(\psi) \varepsilon = \bar{M}R_n(\psi) (F - \ddot{\xi}_1) \quad (24)$$

将式(6)代入式(24)中,再结合式(22),可得:

$$\bar{M}R_n(\psi) \varepsilon = (M - \bar{M})R_n(\psi) F - (\Delta \hat{N} - H) \quad (25)$$

由式(6)可得:

$$\tau_{\xi, t-L} = M_{t-L} R_n(\psi_{t-L}) \ddot{\xi}_{1, t-L} + H_{t-L} \quad (26)$$

将式(26)代入式(8),得:

$$\hat{N} = M_{t-L} R_n(\psi_{t-L}) \ddot{\xi}_{1, t-L} + H_{t-L} - \bar{M}R_n(\psi_{t-L}) \ddot{\xi}_{1, t-L} \quad (27)$$

再将式(27)代入式(25),结合式(23)简化得:

$$\begin{aligned} \bar{M}R_n(\psi) \varepsilon &= \Lambda (M - \bar{M}) R_n(\psi_{t-L}) \varepsilon_{t-L} + \\ & (M - \bar{M}) R_n(\psi) F - \Lambda (M - \bar{M}) R_n(\psi_{t-L}) F_{t-L} - \\ & \Lambda (M_{t-L} - M) R_n(\psi_{t-L}) \ddot{\xi}_{1, t-L} + H - \Lambda H_{t-L} \end{aligned} \quad (28)$$

最后将式(28)重新构建得:

$$\begin{cases} R_n(\psi) \varepsilon = \Lambda (I - M^{-1} \bar{M}) R_n(\psi_{t-L}) \varepsilon_{t-L} + \\ \quad \Lambda (I - M^{-1} \bar{M}) \eta_1 + \eta_2 \\ \eta_1 = \Lambda^{-1} R_n(\psi) F - R_n(\psi_{t-L}) F_{t-L} \\ \eta_2 = M^{-1} [\Lambda (M - M_{t-L}) R_n(\psi_{t-L}) \ddot{\xi}_{1, t-L} + \Lambda] \\ \Lambda = H - \Lambda H_{t-L} \end{cases} \quad (29)$$

由文献[16]中的稳定性证明可知,当采样时间间隔 L 足够小,且矩阵 $(\mathbf{I} - \mathbf{M}^{-1}\bar{\mathbf{M}})$ 的每一个特征值的绝对值都小于 1 时,式(29)中的 $\mathbf{R}_n(\psi)\boldsymbol{\varepsilon}$ 有界,即存在常数 Γ ,使得 $\|\mathbf{R}_n(\psi)\boldsymbol{\varepsilon}\| \leq \Gamma$ 。由于 $\mathbf{R}_n(\psi)$ 为旋转矩阵,其范数为 1,故可证得 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 有界如式(30)所示。

$$\|\mathbf{R}_n(\psi)\boldsymbol{\varepsilon}\| = \|\boldsymbol{\varepsilon}\| \leq \Gamma \quad (30)$$

2) ATDE 估计误差有界性分析

为证明 ATDE 估计误差有界,需先证明式(18)中的自适应梯度调整矩阵 \mathbf{W} 有界,即证明 ω_{ii} 有界。

对 $\dot{\omega}_{ii}$ 从初始时间 t_0 到当前时间 t 积分得:

$$\int_{t_0}^t \dot{\omega}_{ii,\tau} d\tau = \int_{t_0}^t -\alpha_{ii}s_i \dot{s}_i e^{-\gamma_{ii}^2 s_i^2 \tau} d\tau = \alpha_{ii} (e^{-\gamma_{ii}^2 s_i^2 t} - e^{-\gamma_{ii}^2 s_i^2 t_0}) / \gamma_{ii} \quad (31)$$

对式(31)的左侧进行积分,得到:

$$\omega_{ii,t} = \alpha_{ii} (e^{-\gamma_{ii}^2 s_i^2 t} - e^{-\gamma_{ii}^2 s_i^2 t_0}) / \gamma_{ii} + \omega_{ii}^- \quad (32)$$

式中: ω_{ii}^- 为一个非负常数。

由式(32)可知,若 $s_{i,t}$ 趋向于无穷大时, $\omega_{ii,t}$ 减小并收敛至 $-\alpha_{ii} e^{-\gamma_{ii}^2 s_i^2 t_0} / \gamma_{ii} + \omega_{ii}^-$ 。若 $s_{i,t}$ 趋向于 0 时, $\omega_{ii,t}$ 增大并收敛至 $\alpha_{ii} (1 - e^{-\gamma_{ii}^2 s_i^2 t_0}) / \gamma_{ii} + \omega_{ii}^-$ 。故可知, $\omega_{ii,t}$ 以 $\alpha_{ii} / \gamma_{ii} + \omega_{ii}^-$ 为界,即存在 ω_{ii}^+ 使得 $\omega_{ii,t} < \alpha_{ii} / \gamma_{ii} + \omega_{ii}^- = \omega_{ii}^+$ 。则可设 \mathbf{W} 以 ω^+ 为界。

由上易知, TDE 估计误差有界,则有 $\|\boldsymbol{\varepsilon}\| \leq \Gamma$, $\|\boldsymbol{\varepsilon}_{t-L}\| \leq \Gamma_{t-L}$, 可设 Γ 与 Γ_{t-L} 以 Γ^{Lim} 为界。ATDE 估计误差 $\boldsymbol{\varepsilon}^a$ 可以表示为:

$$\|\boldsymbol{\varepsilon}^a\| = \mathbf{R}(\psi)\bar{\mathbf{M}} - 1 \|\mathbf{N} - \mathbf{A}\hat{\mathbf{N}}\mathbf{a}\| = \|\Gamma - \mathbf{A}\mathbf{W}\Gamma_{t-L}\| < |\Gamma^{Lim} - \mathbf{A}\omega^+ \Gamma^{Lim}| \quad (33)$$

故可设 $\boldsymbol{\varepsilon}^a$ 以 Γ_a^{Lim} 为界。

3) 控制器稳定性证明

为了方便分析,后续证明中采用符号函数替换切换控制律中的双曲正切函数。

设李雅普诺夫函数为:

$$\mathbf{V} = \frac{1}{2} \mathbf{s}^T \mathbf{s} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{\alpha_{ii}} (\omega_{ii} - \omega_{ii}^-) \quad (34)$$

由式(19)可知, $\omega_{ii} \geq \omega_{ii}^-$, 即对于非零 \mathbf{s} , 均有 $\mathbf{V} > 0$ 。对式(34)求导得:

$$\dot{\mathbf{V}} = \frac{1}{2} \mathbf{s}^T \dot{\mathbf{s}} + \dot{\mathbf{V}}_w = \mathbf{s}^T [-\mathbf{k}_1 |\mathbf{s}|^{1/2} \text{sgn}(\mathbf{s}) - \mathbf{k}_3 \mathbf{s} - \int_0^t \mathbf{k}_2 \text{sgn}(\mathbf{s}) dt + \mathbf{R}(\psi)\bar{\mathbf{M}}^{-1} (\mathbf{N} - \mathbf{A}\hat{\mathbf{N}}\mathbf{a})] + \dot{\mathbf{V}}_w \quad (35)$$

式中: $\dot{\mathbf{V}}_w = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\alpha_{ii}} \dot{\omega}_{ii}$, 由上可知 ATDE 估计误差以 Γ_a^{Lim} 为界。故可将式(35)改写为:

$$\dot{\mathbf{V}} < \sum_{i=1}^n -k_{1i} |s_i|^{3/2} - \sum_{i=1}^n |s_i| \int_0^t k_{2i} dt - \sum_{i=1}^n k_{3i} s_i^2 + \sum_{i=1}^n |s_i| \Gamma_{a,i}^{Lim} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{\alpha_{ii}} \dot{\omega}_{ii} < - \sum_{i=1}^n k_{3i} s_i^2 + \sum_{i=1}^n \frac{1}{\alpha_{ii}} \dot{\omega}_{ii} +$$

$$\sum_{i=1}^n |s_i| (\Gamma_{a,i}^{Lim} - \int_0^t k_{2i} dt) \quad (36)$$

若选取 k_{2i} 使得 $\int_0^t k_{2i} dt > \Gamma_{a,i}^{Lim}$, 可得:

$$\dot{\mathbf{V}} < - \sum_{i=1}^n k_{3i} s_i^2 + \sum_{i=1}^n \frac{1}{\alpha_{ii}} \dot{\omega}_{ii} \quad (37)$$

如果 ω_{ii} 等于 ω_{ii}^- 或者保持固定值时, $\sum_{i=1}^n \frac{1}{\alpha_{ii}} \dot{\omega}_{ii} = 0$,

由式(37)可得 $\dot{\mathbf{V}} < 0$ 。否则,式(37)可改写为:

$$\dot{\mathbf{V}} < - \sum_{i=1}^n k_{3i} s_i^2 - \sum_{i=1}^n s_i \dot{s}_i e^{-\gamma_{ii}^2 s_i^2 t} < - \sum_{i=1}^n k_{3i} s_i^2 + \sum_{i=1}^n k_{3i} s_i^2 e^{-\gamma_{ii}^2 s_i^2 t} < - \sum_{i=1}^n k_{3i} s_i^2 (1 - e^{-\gamma_{ii}^2 s_i^2 t}) \quad (38)$$

由上可得,对于非零 s_i , 李雅普诺夫函数的时间导数始终为负,满足李雅普诺夫稳定条件,系统渐近稳定。

3 仿真分析

为了验证本文算法 ATDE+STFTSMC 的有效性,本文以 CyberShip II 的数学模型作为仿真对象,基于 MATLAB/simulink 仿真平台搭建了仿真模型并设计了轨迹跟踪仿真实验。

CyberShip II 模型的相关参数如表 1 所示。

表 1 CyberShip II 模型的相关参数

Table 1 Related parameters of CyberShip II model

参数	数值	参数	数值
m	23.8	$X_{ u u}$	-1.327 4
I_z	1.76	Y_v	-0.086 12
X_a	-2	$Y_{ v v}$	-36.472 8
Y_r	-10	N_r	-1.9
N_r	-1	$N_{ r r}$	-0.75
X_u	-0.722 5		

为模拟水面复杂实际环境,选择 $\mathbf{d}_1(t)$ 正弦波叠加信号作为连续扰动,引入频率 2 Hz、方差为 0.5 高斯噪声作为随机扰动,并在不同时间段加入 $\mathbf{d}_2(t)$ 阶跃信号作为阶跃扰动。

$$\mathbf{d}_1(t) = \begin{bmatrix} 3 - 2\sin(0.15t) - 1.2\sin(0.5t) \\ 3 - 3\sin(0.15t - \pi/8) + 0.8\sin(1.5t) \\ 3 + 2.5\sin(0.3t + \pi/6) - 2\sin(0.05t) \end{bmatrix} \quad (39)$$

$$\mathbf{d}_2(t) = \begin{cases} [12; 0; 0] (10 \text{ s} < t < 20 \text{ s}) \\ [0; 8; 0] (20 \text{ s} \leq t \leq 30 \text{ s}) \\ [8; 0; 8] (30 \text{ s} < t) \end{cases} \quad (40)$$

为验证所设计控制器的跟踪性能,设期望轨迹为:

$$[x_d, y_d] =$$

$$\left\{ \begin{aligned} & [t/1.58 + 0.5, -0.5] \quad (2.37 \text{ s} < t) \\ & [2 + 3\sin((t - 2.37)\pi/15), \\ & 2.5 - 3\cos((t - 2.37)\pi/15)] \quad (2.37 \text{ s} \leq t \leq 17.37 \text{ s}) \\ & [13 - t/1.58, 5.5] \quad (17.37 \text{ s} < t < 19.74 \text{ s}) \\ & [-3\sin((t - 19.74)\pi/15 + 0.5), \\ & 8.5 - 3\cos((t - 19.74)\pi/15)] \quad (19.74 \text{ s} \leq t \leq 34.74 \text{ s}) \\ & [-21.5 + t/1.58, 11.5] \quad (34.74 \text{ s} < t) \end{aligned} \right. \quad (41)$$

设 USV 的初始状态为:

$$\begin{cases} [x(0), y(0), \psi(0)]^T = [0, 0, 0]^T \\ [u(0), v(0), r(0)]^T = [0, 0, 0]^T \end{cases} \quad (42)$$

控制器参数设定为:

$$\begin{aligned} l &= 0.01, \lambda_{r_1} = \text{diag}(3.5, 2.5), \lambda_{r_2} = \text{diag}(0.1, \\ & 0.1), L = 0.01, k_1 = \text{diag}(2.5, 2.5), k_2 = \text{diag}(0.1, \\ & 0.1), \beta = 100, k_3 = \text{diag}(0.1, 0.1), \bar{M} = \text{diag}(42, 65), \\ & \mathbf{A} = \text{diag}(0.21, 0.65), \boldsymbol{\alpha} = \text{diag}(0.4, 0.4), p = 3, q = 5, \\ & \boldsymbol{\gamma} = \text{diag}(0.1, 0.1), \mathbf{w}^- = \text{diag}(0.3, 0.1). \end{aligned}$$

为了验证算法的优越性,采用 PID、SMC 与自适应时延估计滑模控制(ATDE+SMC)算法作为对比算法。其中,PID 算法易于实现且最为成熟,与本文算法应用时无需模型参数特性相同,可对比验证本文算法的工程易用性;SMC 算法是目前较为常用的基于模型的跟踪控制算法,可验证本文算法中 ATDE 技术的有效性;ATDE+SMC 算法可验证本文算法中 STFTSMC 算法设计的优越性能。其控制器设计分别为:

1) SMC:

$$\begin{cases} \boldsymbol{\tau}_\xi = \mathbf{M}\mathbf{R}_n(\psi)(\ddot{\xi}_1^d + \lambda_1 \dot{e}_1 + \mathbf{K}_{sw} \tanh(\beta s)) + \mathbf{H} \\ \mathbf{s} = \dot{e}_1 + \lambda_1 e_1 \end{cases} \quad (43)$$

2) ATDE+SMC:

$$\begin{cases} \boldsymbol{\tau}_\xi = \bar{\mathbf{M}}\mathbf{R}_n(\psi)(\ddot{\xi}_1^d + \lambda_1 \dot{e}_1 + \lambda_2 \mathbf{s} + \mathbf{K}_{sw} \tanh(\beta s)) + \\ \mathbf{A}(\mathbf{N}_{i-L} + \mathbf{W}(\mathbf{N}_{i-L} - \Delta \mathbf{N}_{i-2L})) \\ \mathbf{s} = \dot{e}_1 + \lambda_1 e_1 \end{cases} \quad (44)$$

3) PID:

$$\boldsymbol{\tau}_\xi = \mathbf{M}\mathbf{R}_n(\psi)(k_p e_1 + k_i \int_0^t e_1 dt + k_D \dot{e}_1) \quad (45)$$

在相同初始条件与扰动的情況下,将本文算法与 PID、SMC、ATDE+SMC 3 种算法得到的结果进行相应比较,通过 $e_d = \sqrt{e_x^2 + e_y^2}$ 分析位置误差,手部位置点的引入会使位置跟踪误差收敛到 $[0, l]$ m 区域内。此外,采用平均绝对误差(MAE)、积分绝对误差(AE)量化分析整体性能。控制性能指标如表 2 所示。上述指标对应数学表达式分别为:

$$MAE_i = \frac{1}{m} \sum_{n=1}^m |e_{i,n}| \quad (46)$$

$$IAE_i = \int_0^t |e_i| dt \quad (47)$$

表 2 仿真实验位置误差性能指标

Table 2 Simulation experiment position error performance index

方法	MAE/m	IAE/m
PID	0.038 8	1.550 7
SMC	0.032 4	1.292 7
ATDE+SMC	0.029 5	1.176 1
ATDE+STFTSMC	0.021 2	0.843 8

图 3 展示了 USV 在 4 种控制方法下跟踪期望轨迹的跟踪情况,由图 3 可知,在复杂的扰动下,4 种方法均能跟踪上期望轨迹,但本文算法的运动轨迹更接近期望轨迹,跟踪效果更好。

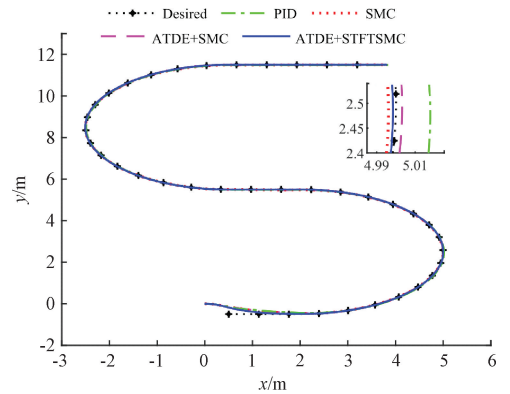


图 3 实际轨迹与期望轨迹跟踪曲线

Fig. 3 Actual trajectory and expected trajectory tracking curve

图 4 为位置跟踪误差曲线图,从图 4 中可以看出,本研究所提算法相比于 PID、SMC 与 ATDE+SMC 这 3 种算法的收敛速度更快,其中 SMC 与 ATDE+SMC 算法的收敛时间分别为 5.81、5.16 s,本研究所提算法的收敛时间为 2.64,相较于 SMC 与 ATDE+SMC 算法分别减少了 3.17、2.52 s,说明了超螺旋快速终端滑模控制器的设计能够加快系统收敛;从图 4 及表 2 可看出,本研究算法的位置的平均误差以及累计误差为 0.021 2 m、0.843 8 m,其值均小于其他两种算法,其中本研究算法的位置跟踪平均误差相较于 PID、SMC 与 ATDE+SMC 算法分别降低了 45.4%、34.6%、28.1%,证明了自适应时延估计技术有效性,超螺旋快速终端滑模控制器能够有效抑制时延估计误差,提高系统的跟踪精度及鲁棒性。

图 5 为本研究算法中控制器输出的纵向推力及艏摇力矩曲线图,从图 5 可以看出,在复杂的扰动下,本研究所提算法能有效跟踪抑制外部扰动,使系统输出平稳的力及力矩,且仅有极少的信号突变,说明了本研究算法中超螺旋滑模及双曲正切函数的设计,能够有效抑制滑模控制中的抖振现象,提高控制系统的稳定性。

图 6~7 分别为本研究算法中 USV 纵向、横向速度变化

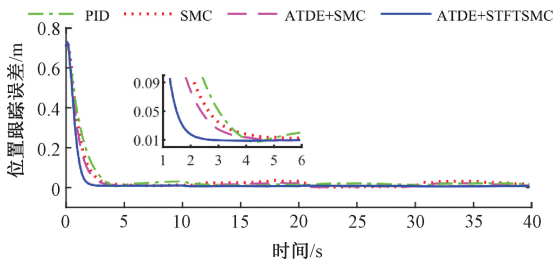


图4 位置跟踪误差曲线

Fig. 4 Position tracking error curve

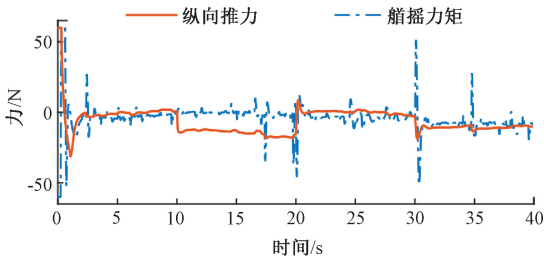


图5 纵向推力及艏摇力矩曲线

Fig. 5 Longitudinal thrust and yaw moment curves

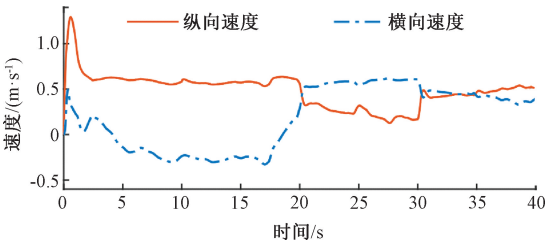


图6 纵向、横向速度变化曲线

Fig. 6 Longitudinal and transverse speed change curves

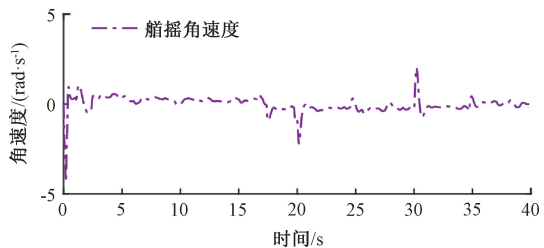


图7 艏摇角速度变化曲线

Fig. 7 Yaw angle speed change curve

曲线及艏摇角速度变化曲线图,USV速度变化主要由位置跟踪精度决定,从速度变化曲线图中可以看出,本文算法中的速度状态波形总体变化较为平缓,验证了本文算法在复杂扰动下系统的稳定性。

4 航行跟踪实验验证

4.1 实验平台

本文采用自主设计的多旋翼空气动力船作为水面航行轨迹跟踪实验平台,如图8所示。多旋翼空气动力船整体结构主要由“H”型四电机旋翼与浮板组成,具备在水域环

境中前进、后退、转弯等功能;采用STM32F407芯片作为处理器的主控系统,主控系统中集成了RM3100型磁力计与BMI088型惯性测量单元等部件,船体配备有以司南K823高精度GNSS模块为核心的RTK实时定位系统,安装了无线数传、无线程序下载器等模块,具有实时获取位置与姿态信息、数据收发、远程遥控等功能。

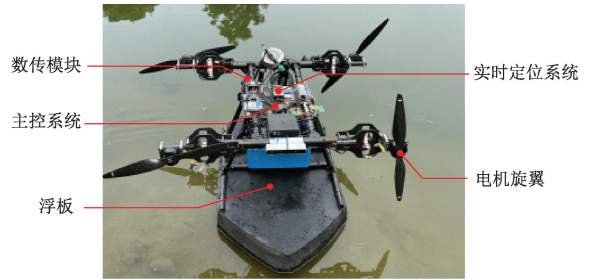


图8 多旋翼空气动力船

Fig. 8 Multi-rotor aerodynamic boat

4.2 航行跟踪实验

为验证本文所提算法在真实场景下的有效性与可靠性,在湖中开展了水面航行轨迹跟踪实验。设计期望轨迹为“S”型,并分别设计了PID、SMC与ATDE+SMC算法在相同实验平台的对比实验。图9为空气动力船采用本文算法在湖中的航行状态,该过程中空气动力船姿态平稳,跟踪效果良好。



图9 多旋翼空气动力船航行实验图

Fig. 9 Multi-rotor aerodynamic boat sailing experiment

从图10~11可以看出,在复杂的水面环境下,本文提出的控制方法在无需动力学模型参数的情况下能够实现欠驱动无人船的轨迹跟踪控制,总体跟踪轨迹较为平滑,验证了自适应时延估计技术有效性与工程易用性。从图11及表3可以看出,本文算法的跟踪误差更小,位置的平均误差为0.1653 m,相比于PID、SMC与ATDE+SMC算法分别降低了35.1%、24.7%、20.8%,其累计误差亦小于其他3种算法,由此可知,本文所提算法的跟踪精度更高,抗干扰能力更强。

图12~13分别为控制器输出的纵向推力及艏摇力矩曲线图,从图中可以看出本文所提算法的控制器输出总体变化较为平稳,验证了本文所提算法的稳定性与可靠性。

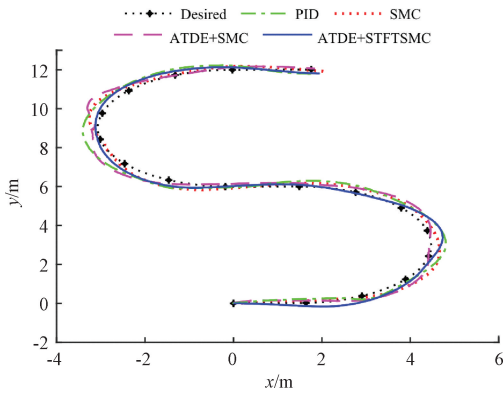


图 10 实际轨迹与期望轨迹跟踪曲线

Fig. 10 Actual trajectory and expected trajectory tracking curve

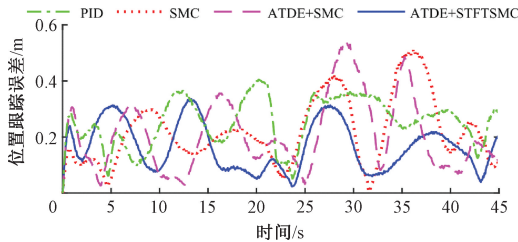


图 11 位置跟踪误差曲线

Fig. 11 Position tracking error curve

表 3 航行实验位置误差性能指标

Table 3 Navigation experiment position error performance index

方法	MAE/m	IAE/m
PID	0.254 8	10.191 9
SMC	0.219 7	8.716 3
ATDE+SMC	0.208 6	8.343 5
ATDE+STFSMC	0.165 3	6.610 9

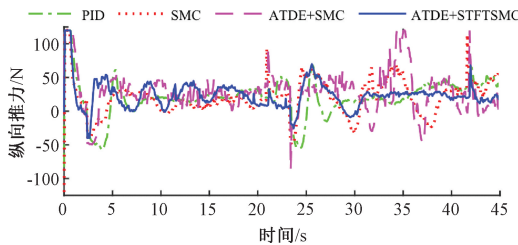


图 12 控制器输出纵向推力曲线

Fig. 12 Controller output longitudinal thrust curve

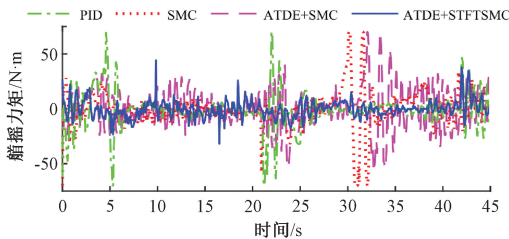


图 13 控制器输出艏摇力矩曲线

Fig. 13 Controller output pitching torque curve

5 结 论

针对欠驱动无人船动力学模型参数获取困难、跟踪控制易受水流与自然风等干扰的问题,本文提出了一种基于自适应时延估计与超螺旋快速终端滑模的轨迹跟踪控制方法。通过与PID、SMC及ATDE+SMC算法进行仿真与航行实验对比,可以得出以下结论:将ATDE技术用于估计欠驱动USV未知动力学模型部分及外部扰动,实现了无需动力学模型参数的轨迹跟踪控制器设计,工程易用性强;STFTSMC算法能有效抑制和补偿时延估计误差,在复杂扰动下,能够实现欠驱动USV精准的轨迹跟踪控制,降低了抖振现象,提高了系统的鲁棒性;航行实验中,ATDE+STFTSMC算法的位置平均误差相比于PID算法、SMC算法及ATDE+SMC算法分别降低了35.1%、24.7%、20.8%,ATDE+STFTSMC算法抗扰能力强、轨迹跟踪精度高。

参考文献

- [1] ER M J, MA CH, LIU T H, et al. Intelligent motion control of unmanned surface vehicles: A critical review[J]. Ocean Engineering, 2023, 280: 114562.
- [2] ZHAO L, BAI Y, PAIK J K. Global path planning and waypoint following for heterogeneous unmanned surface vehicles assisting inland water monitoring[J]. Journal of Ocean Engineering and Science, 2025, 10 (1):88-108.
- [3] LI J Q, ZHANG G Q, JIANG CH Y, et al. A survey of maritime unmanned search system: Theory, applications and future directions [J]. Ocean Engineering, 2023, 285: 115359.
- [4] 王宁, 高颖, 王仁慧. 状态测量不确定和动力学未知的无人艇固定时间容错控制[J]. 自动化学报, 2023, 49(5): 1050-1061.
WANG N, GAO Y, WANG R H. Fixed-time fault-tolerant control for unmanned surface vehicles with state measurement uncertainty and unknown dynamics [J]. Acta Automatica Sinica, 2023, 49(5): 1050-1061.
- [5] 冯成涛, 陈威, 陶睿楠, 等. 无人船自适应超螺旋轨迹跟踪滑模控制[J]. 电子测量技术, 2024, 47(5): 37-44.
- [6] FENG CH T, CHEN W, TAO R N, et al. Adaptive super-twisting trajectory tracking sliding mode control for unmanned surface vessels [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(5): 37-44.
- [6] LIU C, HU Q ZH, WANG X G, et al. Event-triggered-based nonlinear model predictive control for trajectory tracking of underactuated ship with multi-obstacle avoidance [J]. Ocean engineering, 2022,

- 253: 111278.
- [7] 王元慧, 王心玮, 邵兴超, 等. 带有输入死区的欠驱动水面船有限时间路径跟踪控制[J]. 控制理论与应用, 1-9 [2025-01-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1240.tp.20240416.0933.010.html>.
WANG Y H, WANG X W, SHAO X CH, et al. Underactuated with input dead zone Finite-time path tracking control for surface ships[J]. Control theory and application, 1-9 [2025-01-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1240.tp.20240416.0933.010.html>.
- [8] 朱栋, 陶睿楠, 陈威, 等. 基于 LSTM 的无人船轨迹跟踪滑模控制算法研究[J]. 电子测量技术, 2024, 47(7):61-68.
ZHU D, TAO R N, CHEN W, et al. Research on sliding mode control algorithm for unmanned surface vessel trajectory tracking based on LSTM [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(7): 61-68.
- [9] 王正锐, 朱仁传, 徐德康, 等. 统一理论计算船舶水动力的实用性研究[J]. 中国舰船研究, 2024, 19(4): 210-218.
WANG ZH R, ZHU R CH, XU D K, et al. Practicality study of unified theory for calculating ship hydrodynamics [J]. China Ship Research, 2024, 19(4):210-218.
- [10] 席海峰, 王神龙, 徐亚杰. 基于 CFD 数值模拟的船舶横摇附加质量系数和阻尼系数[J]. 船舶工程, 2021, 43(6): 49-55.
XI H F, WANG SH L, XU Y J. Added mass and damping coefficients of ship rolling based on CFD numerical simulation [J]. Ship Engineering, 2021, 43(6): 49-55.
- [11] LIU ZH X, ZHANG Y M, YU X, et al. Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges[J]. Annual Reviews in Control, 2016, 41: 71-93.
- [12] 戚荣志, 丁力. 绳驱动空中机械臂的自适应分数阶终端滑模控制[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(6): 206-213.
QI R ZH, DING L. Adaptive fractional-order terminal sliding mode control for rope-driven aerial manipulators[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(6): 206-213.
- [13] 王尧尧, 顾临怡, 陈柏, 等. 水下机器人-机械手系统非奇异终端滑模控制[J]. 浙江大学学报(工学版), 2018, 52(5): 934-942.
WANG Y Y, GU L Y, CHEN B, et al. Nonsingular terminal sliding mode control for underwater robot-manipulator systems [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2018, 52(5): 934-942.
- [14] 李德昀, 徐德刚, 桂卫华. 基于时间延时估计和自适应模糊滑模控制器的双机械臂协同阻抗控制[J]. 控制与决策, 2021, 36(6): 1311-1323.
LI D Y, XU D G, GUI W H. Cooperative impedance control of dual robotic arms based on time-delay estimation and adaptive fuzzy sliding mode controller [J]. Control and Decision, 2021, 36(6): 1311-1323.
- [15] BOUDJEDIR C E, BOURI M, BOUKHETALA D. An enhanced adaptive time delay control-based integral sliding mode for trajectory tracking of robot manipulators [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2022, 31(3): 1042-1050.
- [16] KIM J, JOE H, YU S, et al. Time-delay controller design for position control of autonomous underwater vehicle under disturbances[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 63(2): 1052-1061.
- [17] 张建宇, 高天宇, 于潇雁, 等. 基于自适应时延估计的空间机械臂连续非奇异终端滑模控制[J]. 机械工程学报, 2021, 57(11): 177-183.
ZHANG J Y, GAO T Y, YU X Y, et al. Continuous nonsingular terminal sliding mode control for space manipulators based on adaptive time-delay estimation [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(11): 177-183.
- [18] 周向阳, 舒通通, 吕子豪, 等. 基于模糊切换增益调节的惯性稳定平台滑模控制[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(12): 263-271.
ZHOU X Y, SHU T T, LYU Z H, et al. Sliding mode control of inertial stabilization platforms based on fuzzy switching gain adjustment [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(12): 263-271.
- [19] 刘洋, 马家庆, 吴钦木, 等. 同步 BUCK 电路中的新型非奇异终端滑模控制性能研究[J]. 电子测量技术, 2024, 47(15): 1-7.
LIU Y, MA J Q, WU Q M, et al. Performance study of novel nonsingular terminal sliding mode control in synchronous BUCK circuits [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(15): 1-7.
- [20] 李至勇, 杨杰, 周发助, 等. 电磁悬浮系统的改进滑模控制方法[J]. 电子测量技术, 2024, 47(4): 87-94.
LI ZH Y, YANG J, ZHOU F ZH, et al. Improved sliding mode control method for electromagnetic suspension systems [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(4): 87-94.

- [21] BAEK S, BAEK J, KWON W, et al. An adaptive model uncertainty estimator using delayed state-based model-free control and its application to robot manipulators [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2022, 27(6): 4573-4584.
- [22] ALVARO-MENDOZA E, GONZALEZ-GARCIA A, CASTAÑEDA H, et al. Novel adaptive law for super-twisting controller; USV tracking control under disturbances [J]. ISA Transactions, 2023, 139: 561-573.
- [23] 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

刘超, 副教授, 主要研究方向为计算机通信网 QoS 监测与管理、光伏电站云计算、认知无线网络信道分配与控制等。
E-mail: Lc96222@163.com

叶华生, 硕士研究生, 主要研究方向为无人船运动控制。
E-mail: 2434048459@qq.com

沈跃(通信作者), 教授, 主要研究方向为特种飞行器控制、无人驾驶与自主导航控制、多机协同控制、嵌入式系统。
E-mail: shen@ujs.edu.cn

刘慧, 教授, 主要研究方向为智能感知与控制、多传感器信息融合、生物医学信号处理。
E-mail: amity@ujs.edu.cn

沈亚运, 博士研究生, 主要研究方向为农业机器人运动规划与控制策略。
E-mail: 2501554329@qq.com