

具有预设性能约束的无人艇预设时间轨迹跟踪控制方法

随博文¹ 贾廷见¹ 金世航²

(1. 商丘师范学院电气工程与智能控制学院, 商丘 476000; 2. 河南师范大学国际教育学院, 新乡 453007)

摘要: 为解决具有外部海洋环境干扰、模型不确定性以及推进器输入饱和和约束的水面无人艇高精度轨迹跟踪控制问题,本文提出一种具有预设性能约束的预设时间轨迹跟踪控制方案。首先,设计一种预设时间集总扰动观测器,对由外界环境干扰和模型不确定性构成的集总非线性进行快速精确重构和补偿。其次,设计一种新的预设时间性能约束函数,提高系统的瞬态和稳态性能。基于扰动观测器技术、预设性能约束、预设时间稳定性理论和动态面控制技术,提出一种预设时间精确跟踪控制算法,使得系统跟踪误差在预设时间内快速精确收敛并始终保持在预设性能约束边界内。通过李雅普诺夫稳定性理论证明了闭环系统的预设时间稳定性。最后,设计仿真实验验证了所提控制方案的有效性和优越性。

关键词: 水面无人艇; 预设时间控制; 预设性能约束; 预设时间集总扰动观测器; 输入饱和

中图分类号: TP24

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2026)19-0063-10

OSID:



Prescribed-time Trajectory Tracking Control for USV with Prescribed Performance Constraints

Sui Bowen¹ Jia Tingjian¹ Jin Shihang²

(1. School of Electrical Engineering and Intelligent Control, Shangqiu Normal University, Shangqiu 476000, China

2. School of International Education, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

Abstract: In order to address the issue of high-precision trajectory tracking control of unmanned surface vehicles with marine environmental disturbances, model uncertainties and thruster saturation, a prescribed-time trajectory tracking control scheme with prescribed performance constraints was proposed. Firstly, a prescribed-time lumped disturbance observer (PTLDO) was designed to accurately reconstruct and compensate the lumped nonlinearities composed of external environmental disturbances and model uncertainties. Secondly, a novel prescribed-time prescribed performance function (PTPPF) was designed to improve the transient and steady-state performance of system. Based on the disturbance observer technology, prescribed performance constraints, prescribed-time stability theory and dynamic surface control technique, a prescribed-time precision tracking control scheme was proposed, which made the trajectory tracking error converge quickly and accurately within the prescribed time and always remain within the prescribed performance constraint boundary. In addition, the rigorous prescribed-time stability analysis of the entire closed-loop control system was carried out and strictly proved by employing the standard Lyapunov stability theory, which further demonstrated that all internal signals of the closed-loop system remain uniformly bounded and the tracking error can converge to a sufficiently small neighborhood of the origin within the prescribed time. Finally, a series of comparative numerical simulation experiments were systematically designed and implemented under different working conditions to comprehensively verify the effectiveness, feasibility and superior control performance of the proposed prescribed-time trajectory tracking control scheme with prescribed performance constraints.

Key words: unmanned surface vessel; prescribed-time control; prescribed performance constraint; prescribed-time lumped disturbance observer; input saturation

收稿日期: 2026-04-02 修回日期: 2026-04-09

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目青年项目(27AQ413002)和商丘师范学院博士人才科研启动经费项目(SQNUQDF2529)

作者简介: 随博文(1992—),男,讲师,博士,主要从事多智能体编队协同控制研究,E-mail: d21382601@nue.edu.cn

通信作者: 贾廷见(1972—),男,副教授,主要从事非线性系统控制研究,E-mail: jiasqnu304@163.com

0 引言

水面无人艇作为典型的海洋无人智能动力平台,在渔业领域具有广泛应用前景^[1]。高精度的轨迹跟踪控制作为无人艇自主安全航行的关键技术之一,具有重要战略研究价值,因而引起各国研究人员的普遍重视。然而,由于无人艇动力学模型的高度非线性、强耦合性、执行机构输入饱和以及易受外部环境干扰等特点,使得无人艇的高精度跟踪控制系统的设计面临极大困难^[2]。另一方面,随着各种任务需求的进一步增加以及对任务精度要求的提高,也对控制器的控制性能提出了更为严苛的要求^[3]。近年来,研究人员尝试了多种控制方案用于解决无人艇的轨迹跟踪控制问题。但已有研究^[4-8]均基于渐近收敛理论,收敛速度缺乏明确的理论上界,在海洋环境突发干扰或任务需要快速响应时,难以满足时间约束要求;同时,部分方案未充分考虑执行机构饱和与模型参数摄动的耦合影响,在复杂工况下易出现跟踪精度下降或超调过大的问题。

目前,现有方法只能保证系统的渐进收敛性,因此无法满足具有特定收敛时间要求的高精度控制任务需求。Wang 等^[9]提出一种基于有限时间扩张状态观测器的轨迹跟踪控制方案来解决精确轨迹跟踪问题,实现了整个闭环系统的全局有限时间稳定性。考虑到受输入饱和、参数不确定性、外界环境干扰和有限传输资源的无人艇轨迹跟踪问题,Qin 等^[10]提出一种鲁棒自适应有限时间事件触发方案,使得跟踪误差在有限时间内收敛的同时降低了信息传输负担和控制执行频率。但有限时间控制的收敛时间严格依赖系统初始状态,当无人艇初始跟踪误差较大或受突发干扰导致状态突变时,收敛时间会显著延长,难以保证任务的时间约束^[11]。为此,研究人员提出了固定时间稳定性理论,其优点在于存在一个与初始状态无关的固定收敛时间上界,具有更快的收敛速度^[12]。Fan 等^[13]针对不可测速度和未知扰动影响的无人艇轨迹跟踪问题,通过结合固定时间扩张状态观测器和固定时间微分器,提出一种固定时间滑模控制律,实现了整个闭环系统的全局固定时间稳定性。Yang 等^[14]提出一种自适应固定时间终端滑模算法,使得跟踪误差在固定时间收敛到零,获得了较高的跟踪精度。固定时间控制虽能保证收敛时间上界与初始状态无关,但该上界是由系统参数推导的理论值,用户无法根据实际任务需求主动设定,灵活性不足;且现有固定时间控制方案多未充分考虑预设性能约束与模型不确定性的耦合影响,在复杂海洋环境下的跟踪鲁棒性有待提升。为此,

Song 等^[15]提出一种预设时间控制理论,其优势在于系统稳定时间与初始状态无关并且可由用户提前设置。Li 等^[16]提出一种具有预设性能约束的预设时间轨迹跟踪控制算法,设计扰动观测器估计外界干扰并利用屏障函数对跟踪误差施加约束,使得跟踪误差在预设时间内收敛到预定义性能约束内。然而,Li 等^[16]仅考虑了外界环境干扰的影响,忽略了无人艇在实际航行中普遍存在的模型不确定性和推进器输入饱和问题,而这两类因素与外部干扰的耦合作用会严重影响控制律的鲁棒性和跟踪精度,难以适配复杂海洋工程场景。

基于上述研究,本文针对存在外界环境干扰、模型不确定性以及推进器输入饱和的水面无人艇跟踪问题,提出一种基于预设时间扰动观测器的预设时间预设性能精准轨迹跟踪控制方案。首先,设计预设时间扰动观测器精确重构系统集总非线性。其次,设计新的预设时间预设性能函数使得系统具有更好的瞬态和稳态性能。最后,结合扰动观测器、动态面控制算法以及预设时间预设性能控制理论提出一种鲁棒精准轨迹跟踪控制方案,使得轨迹跟踪误差在预设时间内快速精确收敛到预定义性能约束内。

1 问题描述与预备知识

1.1 USV 动态模型

基于图 1 中大地坐标系 $OX_oY_oZ_o$ 和附体坐标系 $OXYZ$,建立 USV 三自由度数学模型

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{\eta}} = \boldsymbol{J}(\boldsymbol{\psi})\boldsymbol{v} \\ \boldsymbol{M}\dot{\boldsymbol{v}} = -\boldsymbol{C}(\boldsymbol{v})\boldsymbol{v} - \boldsymbol{D}(\boldsymbol{v})\boldsymbol{v} + \boldsymbol{\tau}_p + \boldsymbol{d} \end{cases} \quad (1)$$

其中 $\boldsymbol{\eta} = [x, y, \psi]^T$ 和 $\boldsymbol{v} = [u, v, r]^T$ 分别表示 $OX_oY_oZ_o$ 坐标系和 $OXYZ$ 坐标系下的位姿向量和速度向量; $\boldsymbol{\tau}_p$ 为推进器的实际控制力和力矩; $\boldsymbol{d} \in \mathbf{R}^3$ 为外界环境干扰; $\boldsymbol{J}(\boldsymbol{\psi})$ 为旋转矩阵,表示为

$$\boldsymbol{J}(\boldsymbol{\psi}) = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

并且满足

$$\begin{cases} \boldsymbol{J}^T(\boldsymbol{\psi})\boldsymbol{J}(\boldsymbol{\psi}) = \boldsymbol{I} \\ \|\boldsymbol{J}(\boldsymbol{\psi})\| = 1 \\ \dot{\boldsymbol{J}}(\boldsymbol{\psi}) = \boldsymbol{J}(\boldsymbol{\psi})\boldsymbol{S}(r) \\ \boldsymbol{J}^T(\boldsymbol{\psi})\boldsymbol{S}(r)\boldsymbol{J}(\boldsymbol{\psi}) = \boldsymbol{J}(\boldsymbol{\psi})\boldsymbol{S}(r)\boldsymbol{J}^T(\boldsymbol{\psi}) = \boldsymbol{S}(r) \end{cases} \quad (3)$$

式中 $\boldsymbol{I}$ ——单位矩阵
 $\boldsymbol{S}(r)$ ——绕 z 轴的角速度反对称矩阵
 ψ ——艏向角

其中, $S(r)$ 表示为

$$S(r) = \begin{bmatrix} 0 & -r & 0 \\ r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中 r ——艏摇角速度

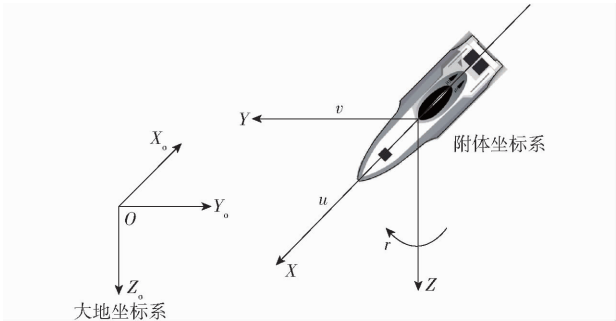


图 1 大地坐标系和附体坐标系

Fig. 1 Earth-fixed frame and body-fixed frame

M 、 $C(\nu)$ 、 $D(\nu)$ 为惯性矩阵、科里奥利向心力矩阵和水动力阻尼矩阵,具体表示为

$$\begin{cases} M = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & m_{23} \\ 0 & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \\ C(\nu) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & c_{13}(\nu) \\ 0 & 0 & c_{23}(\nu) \\ -c_{13}(\nu) & -c_{23}(\nu) & 0 \end{bmatrix} \\ D(\nu) = \begin{bmatrix} d_{11}(\nu) & 0 & 0 \\ 0 & d_{22}(\nu) & d_{23}(\nu) \\ 0 & d_{32}(\nu) & d_{33}(\nu) \end{bmatrix} \end{cases} \tag{5}$$

式中参数详细定义见表 1。

表 1 参数矩阵的具体表示

Tab. 1 Specific representation of parameter matrices

参数	定义	参数	定义
m_{11}	$m - X_{du}$	c_{23}	$m_{11}u$
m_{22}	$m - Y_{dv}$	d_{11}	$-X_u - X_{uu} u - X_{uuu}u^2$
m_{23}	$mx_g - Y_{dr}$	d_{22}	$-Y_v - Y_{vv} v - Y_{rv} r $
m_{32}	$mx_g - Y_{dr}$	d_{23}	$-Y_r - Y_{vr} v - Y_{rr} r $
m_{33}	$I_z - N_{dr}$	d_{32}	$-N_v - N_{vv} v - N_{rv} r $
c_{13}	$-m_{22}v - m_{23}r$	d_{33}	$-N_r - N_{vr} v - N_{rr} r $

表中, m 为无人艇质量; I_z 为惯性力矩; X_u 、 Y_v 、 N_r 为作用于无人艇上的水动力参数,下标 * 表示 du 、 dv 、 dr 、 u 、 v 、 r 、 uu 、 vv 、 ur 、 rr 、 rv 、 uuu 等。

考虑模型不确定性,对上述矩阵作如下处理

$$\begin{cases} M = M_0 + \Delta M \\ C(\nu) = C_0(\nu) + \Delta C(\nu) \\ D(\nu) = D_0(\nu) + \Delta D(\nu) \end{cases} \tag{6}$$

式中 M_0 、 $C_0(\nu)$ 、 $D_0(\nu)$ ——模型标称参数矩阵
 ΔM 、 $\Delta C(\nu)$ 、 $\Delta D(\nu)$ ——不确定部分

此外,考虑到推进器饱和约束,有

$$\tau_{pi} = \begin{cases} \text{sign}(\tau_{ci})\tau_{Mi} & (|\tau_{ci}| \geq \tau_{Mi}) \\ \tau_{ci} & (|\tau_{ci}| < \tau_{Mi}) \end{cases} \tag{7}$$

($i = u, v, r$)

$$\Delta\tau = \tau_p - \tau_c$$

式中 τ_c ——由控制器计算得到的指令控制向量

$\Delta\tau$ ——输入饱和误差

τ_M ——推进器所能提供的力和力矩最大值

接着,为便于后续控制器设计,式(1)重新表示为

$$\begin{cases} \dot{\xi} = \dot{\eta} \\ \dot{\xi} = J(\psi)M^{-1}\tau_p + A \end{cases} \tag{8}$$

其中 $A = S(r)\xi + J(\psi)M^{-1}d -$

$$J(\psi)M^{-1}(C(\nu) + D(\nu))J^T(\psi)\xi$$

式中 A ——由外界海洋环境干扰和模型不确定性构成的集总非线性项

ξ ——位置向量的一阶导数

1.2 预设时间预设性能约束

为提高跟踪控制系统的瞬态和稳态性能,建立预设性能约束

$$-\lambda_1\varphi(t) < z(t) < \lambda_2\varphi(t) \quad (z(t) \in \mathbf{R}^3) \tag{9}$$

式中 $z(t)$ ——设计的跟踪误差向量

λ_1 、 λ_2 ——设计参数

$\varphi(t)$ ——预设性能的约束边界

其中, $\varphi(t)$ 的一阶导数设计为

$$\dot{\varphi}(t) = -\left(\alpha + \beta \frac{\dot{\gamma}_\varphi}{\gamma_\varphi}\right)(\varphi(t) - \varphi(T_f)) + \vartheta \tag{10}$$

式中 T_f ——可提前设定的稳定时间

α 、 β ——正常数

此外

$$\gamma_\varphi(t) = \begin{cases} \frac{T_f^h}{(T_f + t_0 - t)^h} & (t \in [t_0, T_f]) \\ 1 & (t \in [T_f, \infty)) \end{cases} \tag{11}$$

式中 h ——设计参数

此外,受文献[17]启发, ϑ 设计为

$$\vartheta = \begin{cases} \varphi_f \left(\alpha + \beta \frac{\dot{\gamma}_\varphi}{\gamma_\varphi} \right) \left[1 - \rho \left(1 - \cos \left(\frac{\pi t}{T_m} \right) \right) \right] & (t \in [0, T_m]) \\ \varphi_f \left(\alpha + \beta \frac{\dot{\gamma}_\varphi}{\gamma_\varphi} \right) \left(\frac{1}{2} - \rho \right) \left(1 + \cos \left(\frac{\pi t - \pi T_m}{T_f - T_m} \right) \right) & (t \in [T_m, T_f]) \\ 0 & (t \in [T_f, \infty)) \end{cases} \tag{12}$$

其中

$$0 < T_m < T_f$$

$$\varphi_f = \varphi(0) - \varphi(T_f)$$

$$\rho = \frac{\check{\rho}}{\hat{\rho}}$$

$$\bar{\gamma} = \alpha - \beta \frac{\dot{\gamma}_\varphi}{\gamma_\varphi}$$

$$k_\alpha = \bar{\gamma}^2 + \left(\frac{\pi}{T_m}\right)^2$$

$$k_\beta = \bar{\gamma}^2 + \left(\frac{\pi}{T_f - T_m}\right)^2$$

$$\check{\rho} = \left(\frac{1}{2\gamma} - \frac{\bar{\gamma}}{2k_\beta}\right) \exp(-\bar{\gamma}(T_f - T_m)) + \frac{1}{2\gamma} - \frac{\bar{\gamma}}{2k_\beta} \tag{13}$$

$$\hat{\rho} = \left(\frac{\bar{\gamma}}{k_\alpha} - \frac{1}{\gamma}\right) \exp(-\bar{\gamma}T_f) + \left(\frac{1}{k_\alpha} - \frac{1}{k_\beta}\right) \exp(-\bar{\gamma}(T_f - T_m)) + \frac{1}{\gamma} - \frac{\bar{\gamma}}{k_\beta} \tag{14}$$

如图 2 所示,与渐进收敛预设性能函数 (PPF)^[18]、有限时间预设性能函数 (FTPPF)^[19]和固定时间预设性能函数 (FXPPF)^[20]相比,本文设计的预设时间预设性能函数 (PTPPF) 的收敛速度更快,并且稳定时间可由用户提前设定。

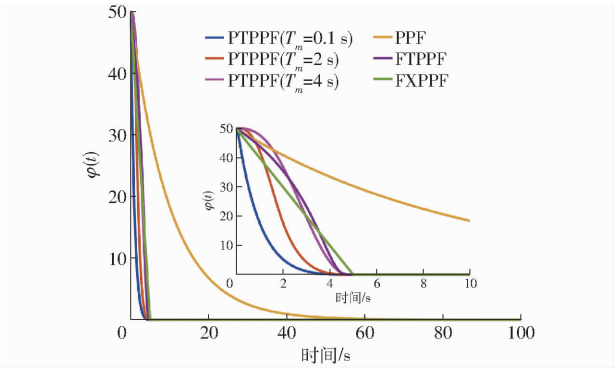


图 2 不同预设性能函数收敛曲线对比
Fig. 2 Comparison of convergence curves of different prescribed performance functions

T_f 是设计者根据任务需求预先设定的终端时间, T_m 是一个常数参数且满足 $T_m < T_f$ 。一般来说, T_m 的选择并不唯一, T_m 越小,则 PTPPF 函数收敛越快,但与之相对的会导致较高的控制资源消耗,反之亦然。因此,所提出的 PTPPF 在设置相同的 T_f 前提下,通过选择不同的 T_m ,可以使得性能约束具有更灵活的收敛形态,有利于根据实际需求更灵活地设计高性能控制器。

1.3 预备知识

首先,设计时变函数

$$\gamma(t) = \begin{cases} \frac{T^h}{(T + t_0 - t)^h} & (t \in [t_0, T)) \\ 1 & (t \in [T, \infty)) \end{cases} \tag{15}$$

式中 T ——预设时间

此外, $\gamma(t)$ 在 $t = T_f$ 处的右导数为

$$\dot{\gamma} = \begin{cases} \frac{h}{T} \gamma^{1+\frac{1}{h}} & (t \in [t_0, T)) \\ 0 & (t \in [T, \infty)) \end{cases} \tag{16}$$

引理 1^[21]:对于动态系统 $\dot{x} = p(x) + q(x)u$,若存在一个连续可导 Lyapunov 函数满足

$$\dot{V}(t) \leq -ka(t)V(t) + a(t)Y(t) \tag{17}$$

其中, $k \in \mathbf{R}^+$, $Y(t) \leq \bar{Y}$, $\bar{Y} \in \mathbf{R}^+$; $a(t) = T_s/(T_s - t)$, $a(t)$ 为时变动态增益,即 $a(t): [0, T_s) \rightarrow [1, +\infty)$, 则该系统是预设时间稳定的。

假设 1^[22]:系统集总非线性项 Λ 连续可微有界,并且满足 $\|\dot{\Lambda}\| \leq \delta$, δ 是一个正常数。

假设 2^[17]:初始辅助误差满足条件

$$-\lambda_1 \varphi(0) < z(0) < \lambda_2 \varphi(0)$$

2 控制器设计及稳定性分析

2.1 控制器设计

首先,定义轨迹跟踪误差

$$\boldsymbol{e} = \boldsymbol{\eta} - \boldsymbol{\eta}_d \tag{18}$$

其中

$$\boldsymbol{e} = [x_e, y_e, \psi_e]^T$$

$$x_e = x - x_d, y_e = y - y_d, \psi_e = \psi - \psi_d$$

式中 $\boldsymbol{\eta}$ ——被控无人艇的真实轨迹

$\boldsymbol{\eta}_d$ ——需要被跟踪的参考轨迹

$\boldsymbol{e}$ ——跟踪误差

x_d, y_d, ψ_d ——参考轨迹的横坐标、纵坐标、艏向角

为在预设时间内获得预设性能,设计辅助误差向量

$$\boldsymbol{z} = \left(k_e + c_e \frac{\dot{\gamma}}{\gamma}\right) \boldsymbol{e} \tag{19}$$

式中, $k_e > 1, c_e > 0$ 。对式 (19) 求导可得

$$\dot{\boldsymbol{z}} = \frac{c_e(\gamma \ddot{\gamma} - \dot{\gamma}^2)}{\gamma^2} \boldsymbol{e} + \left(k_e + c_e \frac{\dot{\gamma}}{\gamma}\right) \dot{\boldsymbol{e}} \tag{20}$$

由于无法直接通过预设性能约束 (9) 设计控制器,引入中间辅助动态 $\boldsymbol{\varepsilon}$

$$\boldsymbol{z} = \lambda_2 \varphi(t) Y(\boldsymbol{\varepsilon}, \boldsymbol{\lambda}) \tag{21}$$

式中, $\boldsymbol{\lambda} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$; $Y(\boldsymbol{\varepsilon}, \boldsymbol{\lambda}) = \frac{e^\varepsilon - e^{-\varepsilon}}{e^\varepsilon + \boldsymbol{\lambda}^{-1} e^{-\varepsilon}}$ 严格单调递增。

通过求 $Y(\boldsymbol{\varepsilon}, \boldsymbol{\lambda})$ 的逆变换可得

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{2} \ln(\lambda_1 \varphi + \boldsymbol{z}) - \frac{1}{2} \ln(\lambda_2 \varphi - \boldsymbol{z}) \tag{22}$$

定义转换误差 s_1

$$s_1 = \boldsymbol{\varepsilon} - \frac{1}{2} \ln \frac{\lambda_1}{\lambda_2} =$$

$$\frac{1}{2} \ln(\lambda_1 \lambda_2 \varphi + \lambda_2 \boldsymbol{z}) - \frac{1}{2} \ln(\lambda_1 \lambda_2 \varphi - \lambda_1 \boldsymbol{z}) \tag{23}$$

同时,求 s_1 关于时间的导数,可得

$$\dot{s}_1 = \partial(\dot{z} - z\dot{\varphi}\varphi^{-1}) \quad (24)$$

$$\text{其中 } \partial = \frac{1}{2(z + \lambda_1\varphi)} - \frac{1}{2(z - \lambda_2\varphi)}$$

接着,构造 Lyapunov 函数

$$V_1 = \frac{1}{2}s_1^T s_1 \quad (25)$$

求 V_1 关于时间的导数可得

$$\dot{V}_1 = s_1^T \partial(\dot{z} - z\dot{\varphi}\varphi^{-1}) = s_1^T \partial \left(\frac{c_e(\gamma\ddot{\gamma} - \dot{\gamma}^2)}{\gamma^2} e + \left(k_e + c_e \frac{\dot{\gamma}}{\gamma} \right) (\xi - \dot{\eta}_d) - z\dot{\varphi}\varphi^{-1} \right) \quad (26)$$

设计虚拟控制律 α

$$\alpha = \left(k_e + c_e \frac{\dot{\gamma}}{\gamma} \right)^{-1} \left[z\dot{\varphi}\varphi^{-1} - \partial^{-1}\kappa_1 s_1 - \frac{c_e(\gamma\ddot{\gamma} - \dot{\gamma}^2)}{\gamma^2} e \right] + \dot{\eta}_d \quad (27)$$

式中 κ_1 ——正的控制增益

定义速度跟踪误差

$$s_2 = \xi - \alpha_f \quad (28)$$

$$\sigma = \alpha_f - \alpha \quad (29)$$

式中 σ ——滤波误差 α_f ——滤波器输出

$$\iota \dot{\alpha}_f + \alpha_f = \alpha \quad (30)$$

其中 $\alpha_f(0) = \alpha(0)$

式中 ι ——滤波器时间常数

根据式(24)和式(25)可得

$$\dot{\sigma} = -\frac{1}{\iota}\sigma + \Delta \quad (31)$$

其中 $\Delta = -\dot{\alpha}$

求 s_2 关于时间的导数并结合式(7)和式(23)

可得

$$\begin{aligned} \dot{s}_2 &= J(\psi)M^{-1}\tau_p + \Gamma - \dot{\alpha}_f = \\ &J(\psi)M^{-1}(\tau_e + \Delta\tau) + \Gamma - \dot{\alpha}_f \end{aligned} \quad (32)$$

为处理推进器饱和问题,引入线性抗饱和补偿器

$$\dot{\Xi} = -K_{\Xi}\Xi + \Delta\tau \quad (\Xi \in \mathbf{R}^3) \quad (33)$$

式中 K_{Ξ} ——正定矩阵 Ξ ——补偿器状态向量

因此,预设时间预设性能控制器设计为

$$\tau_p = MJ^T(\psi)(-\kappa_2 s_2 + \dot{\alpha}_f - \hat{\Lambda}) + \kappa_3 \Xi \quad (34)$$

其中, $\kappa_2 > 0$; $\hat{\Lambda}$ 为系统集总非线性项 Λ 的估计值; κ_3 为一个大于零的设计参数。

2.2 预设时间集总扰动观测器设计

为获得集总非线性项的估计值,设计预设时间扰动观测器

$$\dot{\hat{s}}_2 = J(\psi)M^{-1}\tau_p + \hat{\Lambda} - \dot{\alpha}_f \quad (35)$$

$$\hat{\Lambda} = \left(k_1 + c_1 \frac{\dot{\gamma}}{\gamma} \right) \hat{s}_2 + \int_0^t \Phi \text{sign}(\hat{s}_2(\varpi)) d\varpi \quad (36)$$

其中 $\hat{s}_2 = s_2 - \hat{s}_2$

式中 k_1, c_1, Φ ——正常数

定理 1: 对于系统(式(8)),在满足假设 1 的条件下,所设计的预设时间扰动观测器(式(35)、(36))能够在预设时间 T_o 内快速精确估计系统集总非线性项。

证明: 根据式(32)和式(35)可得

$$\dot{\hat{s}}_2 = \dot{s}_2 - \dot{\hat{s}}_2 = \Lambda - \hat{\Lambda} = \tilde{\Lambda} \quad (37)$$

选择 Lyapunov 函数

$$V_{s_2} = \frac{1}{2}\hat{s}_2^T \hat{s}_2 \quad (38)$$

对式(38)求导可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_{s_2} &= \hat{s}_2^T \dot{\hat{s}}_2 = \hat{s}_2^T (\dot{s}_2 - \dot{\hat{s}}_2) = \hat{s}_2^T (\Lambda - \hat{\Lambda}) = \\ &= -\hat{s}_2^T \left(k_1 + c_1 \frac{\dot{\gamma}}{\gamma} \right) \hat{s}_2 + \\ &= \hat{s}_2^T \left(\int_0^t \dot{\Lambda}(\varpi) d\varpi - \int_0^t \Phi \text{sign}(\hat{s}_2(\varpi)) d\varpi \right) \leq \\ &= -\hat{s}_2^T \left(k_1 + c_1 \frac{\dot{\gamma}}{\gamma} \right) \hat{s}_2 = -k_1 V_{s_2} - c_1 \frac{\dot{\gamma}}{\gamma} V_{s_2} \end{aligned} \quad (39)$$

由引理 1 可知,扰动器的观测误差在预设时间 T_o 内收敛到 0,即观测器可以在预设时间 T_o 内精确估计系统集总非线性项。定理 1 证明完成。

2.3 稳定性分析

基于上述内容,给出定理 2。

定理 2: 对于存在推进器饱和及集总非线性无人艇跟踪控制系统(式(8)),在本文所设计的预设时间扰动观测器(式(36))、运动学控制器(式(27))和动力学控制器(式(34))作用下,无人艇轨迹跟踪误差 e 能够在预设时间 T 内收敛到预设性能约束内并始终处于性能约束边界内。

证明: 构造 Lyapunov 函数

$$V = \frac{1}{2}s_1^T s_1 + \frac{1}{2}s_2^T s_2 + \frac{1}{2}\Xi^T \Xi + \frac{1}{2}\sigma^T \sigma \quad (40)$$

求 V 关于时间的导数可得

$$\dot{V} = s_1^T \dot{s}_1 + s_2^T \dot{s}_2 + \Xi^T \dot{\Xi} + \sigma^T \dot{\sigma} \quad (41)$$

结合式(19)、(23)、(24),可得

$$\begin{aligned} s_1^T \dot{s}_1 &= s_1^T \partial(\dot{z} - z\dot{\varphi}\varphi^{-1}) = s_1^T \partial \left(\frac{c_e(\gamma\ddot{\gamma} - \dot{\gamma}^2)}{\gamma^2} e + \left(k_e + c_e \frac{\dot{\gamma}}{\gamma} \right) (\xi - \dot{\eta}_d) - z\dot{\varphi}\varphi^{-1} \right) = \\ &= s_1^T \partial \left(\frac{c_e(\gamma\ddot{\gamma} - \dot{\gamma}^2)}{\gamma^2} e + \left(k_e + c_e \frac{\dot{\gamma}}{\gamma} \right) (s_2 + \sigma + \alpha - \dot{\eta}_d) - z\dot{\varphi}\varphi^{-1} \right) \end{aligned} \quad (42)$$

接着,将式(19)代入式(32)可得

$$\begin{aligned} s_1^T \dot{s}_1 &= s_1^T \left(\partial \left(k_e + c_e \frac{\dot{\gamma}}{\gamma} \right) (s_2 + \sigma) - \kappa_1 s_1 \right) = \\ &= \partial \left(k_e + c_e \frac{\dot{\gamma}}{\gamma} \right) s_1^T s_2 + \partial \left(k_e + c_e \frac{\dot{\gamma}}{\gamma} \right) s_1^T \sigma - \kappa_1 s_1^T s_1 \end{aligned} \quad (43)$$

根据杨氏不等式可得

$$\begin{aligned} s_1^T \dot{s}_1 &= \partial \left(k_e + c_e \frac{\dot{\gamma}}{\gamma} \right) s_1^T s_2 + \partial \left(k_e + c_e \frac{\dot{\gamma}}{\gamma} \right) s_1^T \sigma - \\ &\kappa_1 s_1^T s_1 \leq \partial \left(k_e + c_e \frac{\dot{\gamma}}{\gamma} \right) \left(\frac{1}{2} s_1^T s_1 + \frac{1}{2} s_2^T s_2 \right) + \\ &\partial \left(k_e + c_e \frac{\dot{\gamma}}{\gamma} \right) \left(\frac{1}{2} s_1^T s_1 + \frac{1}{2} \sigma^T \sigma \right) - \kappa_1 s_1^T s_1 \leq \\ &- \left[\kappa_1 - \partial \left(k_e + c_e \frac{\dot{\gamma}}{\gamma} \right) \right] s_1^T s_1 + \frac{1}{2} \partial \left(k_e + c_e \frac{\dot{\gamma}}{\gamma} \right) s_2^T s_2 + \\ &\frac{1}{2} \partial \left(k_e + c_e \frac{\dot{\gamma}}{\gamma} \right) \sigma^T \sigma \end{aligned} \tag{44}$$

此外,由式(24)和式(26)可得

$$\sigma^T \dot{\sigma} = \sigma^T \left(-\frac{1}{\iota} \sigma + \Delta \right) \tag{45}$$

$$\Xi^T \dot{\Xi} = \Xi^T \left(-K_{\Xi} \Xi + \Delta \tau \right) \tag{46}$$

根据式(42)~(44),式(41)可以进一步表示为

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq - \left[\kappa_1 - \partial \left(k_e + c_e \frac{\dot{\gamma}}{\gamma} \right) \right] s_1^T s_1 + \\ &\frac{1}{2} \partial \left(k_e + c_e \frac{\dot{\gamma}}{\gamma} \right) s_2^T s_2 + \frac{1}{2} \partial \left(k_e + c_e \frac{\dot{\gamma}}{\gamma} \right) \sigma^T \sigma - \\ &\frac{1}{\iota} \sigma^T \sigma + \sigma^T \Delta - \Xi^T K_{\Xi} \Xi + \Xi^T \Delta \tau - \kappa_2 s_2^T s_2 \end{aligned} \tag{47}$$

考虑紧集 $\Omega_1 = \{[s_1^T, s_2^T, \Xi^T, \sigma^T]^T: V \leq \lambda_0, \lambda_0 > 0\}$ 和 $\Omega_d = \{[\eta_d^T, \dot{\eta}_d^T, \ddot{\eta}_d^T]^T: \|\eta_d\|^2 + \|\dot{\eta}_d\|^2 + \|\ddot{\eta}_d\|^2 \leq B_0, B_0 > 0\}$, $\Omega_1 \Omega_d$ 同样也为紧集,则存在一个非负连续函数 $\beta(\cdot)$ 使得 $\|\zeta\| \leq \beta(\cdot)$ 并且 $\beta(\cdot)$ 在集合 $\Omega_1 \Omega_d$ 上有最大值 $N^{[23]}$ 。因此,结合杨氏不等式可得

$$\sigma^T \Delta \leq a_1 \sigma^T \sigma + \frac{N^2}{4a_1} \tag{48}$$

将式(48)代入式(47)可得

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq - \left[\kappa_1 - \partial \left(k_e + c_e \frac{\dot{\gamma}}{\gamma} \right) \right] s_1^T s_1 - \\ &\left[\kappa_2 - \frac{1}{2} \partial \left(k_e + c_e \frac{\dot{\gamma}}{\gamma} \right) \right] s_2^T s_2 + \frac{1}{2} \partial \left(k_e + c_e \frac{\dot{\gamma}}{\gamma} \right) \sigma^T \sigma - \\ &\frac{1}{\iota} \sigma^T \sigma + a_1 \sigma^T \sigma + \frac{N^2}{4a_1} - \Xi^T K_{\Xi} \Xi + \Xi^T \Delta \tau \end{aligned} \tag{49}$$

令 $k_{\Xi} = \lambda_{\min}(K_{\Xi})$ 并结合杨氏不等式有

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq - \left[\kappa_1 - \partial \left(k_e + c_e \frac{\dot{\gamma}}{\gamma} \right) \right] s_1^T s_1 - \\ &\left[\kappa_2 - \frac{1}{2} \partial \left(k_e + c_e \frac{\dot{\gamma}}{\gamma} \right) \right] s_2^T s_2 - \\ &\left[\frac{1}{\iota} - \frac{1}{2} \partial - a_1 \left(k_e + c_e \frac{\dot{\gamma}}{\gamma} \right) \right] \sigma^T \sigma - \\ &\left(k_{\Xi} - \frac{1}{2} \right) \|\Xi\|^2 + \frac{1}{2} \|\Delta \tau\|^2 + \frac{N^2}{4a_1} \end{aligned} \tag{50}$$

通过选择合适的参数使得 $\Phi_1 = \kappa_1 - \partial \left(k_e + c_e \frac{\dot{\gamma}}{\gamma} \right) > 0, \Phi_2 = \kappa_2 - \frac{1}{2} \partial \left(k_e + c_e \frac{\dot{\gamma}}{\gamma} \right) > 0, \Phi_3 = \frac{1}{\iota} -$

$$\frac{1}{2} \partial - a_1 \left(k_e + c_e \frac{\dot{\gamma}}{\gamma} \right) > 0, \Phi_4 = k_{\Xi} - \frac{1}{2} > 0。$$

综上可得

$$\dot{V} \leq -2\omega V + \Omega \tag{51}$$

其中, $\omega = \min \{ \Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4 \}; \Omega = \frac{1}{2} \|\Delta \tau\|^2 + \frac{N^2}{4a_1}$ 。选择适当的参数使得 $\omega > \frac{\Omega}{2p}$ 成立,因此 $V \leq p$ 是一个不变集,即当 $V(0) \leq p$,则对于任意 $t \geq 0$ 有 $V(t) \leq p$ 。接着,通过求解微分不等式(51)可得

$$V(t) \leq e^{-2\omega t} V(0) + \frac{\Omega}{2\omega} (1 - e^{-2\omega t}) \tag{52}$$

因此,当 $V(t) \in L_{\infty}$, $\|s_1\|、\|s_2\|$ 和 $\|\Xi\|$ 是有界的。结合 s_1 的定义可知, $\|e\|、\|z\|$ 和 $\|\alpha\|$ 也是有界的。此外, $\|e\|$ 和 $\|s_2\|$ 有界意味着 $\|\eta\|$ 和 $\|\nu\|$ 有界。注意,由于控制输入是一个关于 $s_2、\alpha、\Xi$ 和 $\hat{A}$ 的连续函数,因此控制律 τ_e 也有界。基于上述分析可知,闭环系统中所有信号均为最终一致有界。同时,根据不等式(9)可知,对于 $\forall t \geq 0$ 有 $z \in (-\lambda_1 \varphi, \lambda_2 \varphi)$,本文选取 $\lambda_1 = \lambda_2 = 1$,进一步可得 $|z| < \varphi$ 。结合式(15)、(16)、(18)可知

$$|e| < \begin{cases} \frac{\varphi(T+t_0-t)}{k_e(T+t_0-t)+c_e h} & (t \in [t_0, T)) \\ \frac{\varphi}{k_e} & (t \in [T, \infty)) \end{cases} \tag{53}$$

显然,根据式(53)可知,轨迹跟踪误差可以在预设时间 T 内收敛到预定义精度内,即 $|e| < \frac{\varphi}{k_e}$,定理2证明完成。

3 仿真实验与结果分析

为验证本文所提PTPPC控制策略的有效性和优越性,选取Cybership II船模进行数值仿真^[24],模型水力参数见表2。

表 2 Cybership II 模型参数
Tab. 2 Model parameters of Cybership II

参数	数值	参数	数值
m	23.8	Y_{dr}	0
I_z	1.76	N_{dv}	0
x_g	0.046	N_{dr}	-1
X_u	-0.722 5	Y_{rv}	0.014
X_{uu}	-1.327 4	Y_{vr}	1.12
X_{uuu}	-5.866 4	Y_{rr}	0.394
Y_v	-0.861 2	N_{rv}	1.49
Y_{vv}	-36.282 3	N_r	0
Y_r	0.107 9	N_{vr}	0
N_v	0.105 2	N_{rr}	1.99
N_{vv}	5.043 7	Y_{dv}	-10
X_{du}	-2		

需要跟踪的参考轨迹设计为 $\eta_d = [6\sin(0.05t), 6(1 - \cos(0.05t)), 0.01t]^T$ 。为反映真实海洋环境干扰的物理特性,将风浪流引起的海洋环境干扰描述为具有高斯白噪声的一阶马尔可夫过程^[25]: $\dot{d}(t) = -G^{-1}d + \Psi n$,其中 $G \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ 为时间常数正定对角矩阵; $\Psi \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ 为高斯白噪声幅值正定对角矩阵; G 和 Ψ 分别选取为 $\text{diag}(100, 100, 100)$ 和 $\text{diag}(1.5, 1.5, 0.5)$; $n \in \mathbf{R}^3$ 为有界零均值高斯白噪声向量。模型不确定性定义为 $\Delta M = 0.2M_0$, $\Delta C = 0.2C_0$, $\Delta D = 0.2D_0$ 。预设时间预设性能参数取 $\lambda_1 = \lambda_2 = 1, \alpha = 1, \beta = 2, \varphi(0) = [6, 6, \pi/9]^T$, $\varphi(T_f) = [0.15, 0.15, \pi/360]^T$, $T_f = 3$ s。预设时间扰动观测器参数为 $k_1 = 25, c_1 = 25, T_o = 3$ s。预设时间控制器参数选取为 $\kappa_1 = \text{diag}(1, 1, 1)$ $\kappa_2 = \text{diag}(50, 50, 50)$, $\kappa_3 = \text{diag}(10, 10, 10)$, $T = 3$ s。此外,为充分验证所提控制方案的跟踪性能,将数值仿真验证分为以下两部分。

3.1 预设时间收敛性能评估

为验证所提控制方案的收敛时间与系统初始状态无关,设计 4 种不同初始状态进行仿真验证,见表 3。

表 3 4 种不同初始状态
Tab.3 Four different initial states

初始状态序号	参数	数值
1	$\eta_1(0)$	$[1\text{ m}, 2.8\text{ m}, \pi/18]^T$
	$\nu_1(0)$	$[0.01\text{ m}, 0.02\text{ m}, 0\text{ rad/s}]^T$
2	$\eta_2(0)$	$[-1\text{ m}, 2\text{ m}, -\pi/18]^T$
	$\nu_2(0)$	$[-0.01\text{ m}, 0.02\text{ m}, 0.01\text{ rad/s}]^T$
3	$\eta_3(0)$	$[-1\text{ m}, -2\text{ m}, -\pi/36]^T$
	$\nu_3(0)$	$[0.03\text{ m}, -0.01\text{ m}, 0.02\text{ rad/s}]^T$
4	$\eta_4(0)$	$[1.2\text{ m}, -2.2\text{ m}, \pi/18]^T$
	$\nu_4(0)$	$[0.01\text{ m}, -0.02\text{ m}, -0.01\text{ rad/s}]^T$

仿真结果如图 3~6 所示。图 3 为 4 种不同初始状态下的无人艇轨迹跟踪曲线。不难发现,即便设置不同的初始值,无人艇也能够 在预设时间内快速精准跟踪参考轨迹。图 4 给出了 4 种不同初始状态下的位置和艏向角的跟踪曲线。图 5 为不同初始状态下的轨迹跟踪误差曲线,由图可知,跟踪误差能够在预设时间 3 s 内收敛到预设性能约束内并始终处于约束边界内不超出。图 6 给出了几种初始状态下的控制输入曲线。综上可知,在考虑外界海洋扰动、模型不确定性以及推进器饱和约束的情况下,本文提出的 PTPPC 轨迹跟踪控制方案下的轨迹跟踪误差能够在预设时间内快速精确收敛到预定义性能约束内,且收敛时间与初始状态无关。

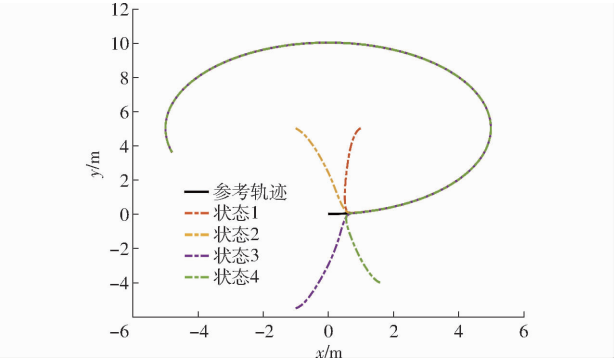


图 3 4 种不同初始状态下的跟踪轨迹
Fig.3 Tracking trajectories in four different initial states

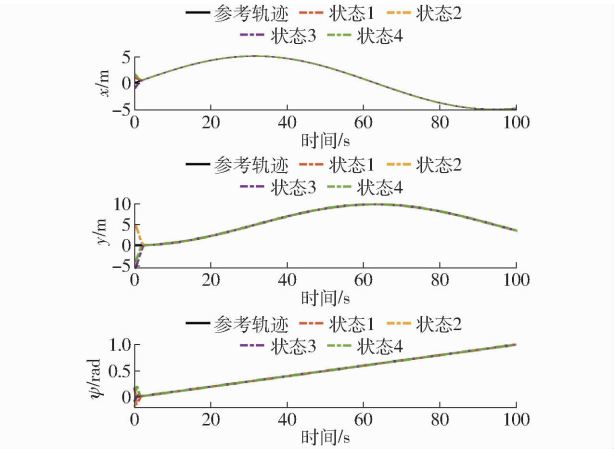


图 4 4 种不同初始状态下的位置及艏向角跟踪曲线
Fig.4 Position and heading angle tracking curves under four different initial states

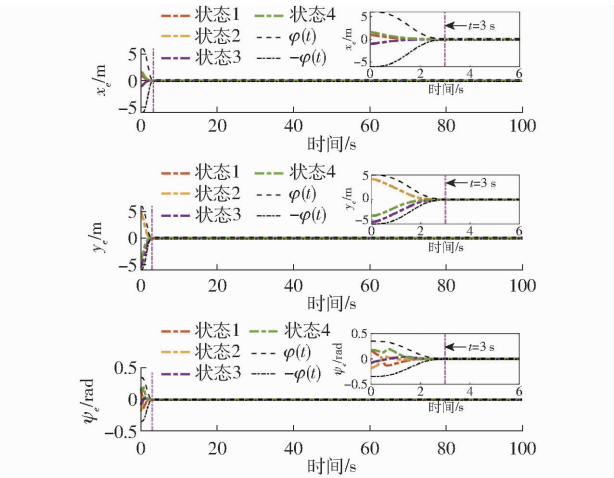


图 5 4 种不同初始状态下的轨迹跟踪误差曲线
Fig.5 Trajectory tracking errors in four different initial states

3.2 不同控制方案性能对比

为进一步验证所设计的 PTPPC 策略的优越性,采用非线性动态面控制算法 (Nonlinear dynamic surface control, NDSC)^[26]、有限时间控制算法 (Finite-time control, FTC)^[27] 以及固定时间控制算法 (Fixed-time control, FXC)^[28] 进行对比仿真分析。此外,采用有限时间扰动观测器 (Finite-time disturbance observer, FTDO)^[29] 和固定时间扰动观

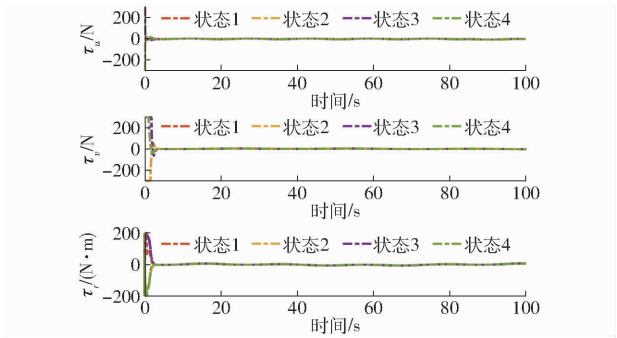


图 6 4 种不同初始状态下的控制输入
Fig. 6 Control inputs in four different initial states

测器(Fixed-time disturbance observer, FXDO)^[30]与本文的预设时间扰动观测器(Prescribed-time lumped disturbance observer, PTLDO)进行对比分析。无人艇的初始位置和速度分别设置为 $\eta(0)=[1\text{ m}, 5\text{ m}, \pi/18]^\text{T}$, $\nu(0)=[0\text{ m}, 0\text{ m}, 0\text{ rad/s}]^\text{T}$ 。其他参数设置与 3.1 节保持一致。

仿真结果如图 7~11 所示。图 7 为本文设计的预设时间扰动观测器对系统集总非线性估计曲线。由图可知,本文提出的 PTLDO 扰动观测器能够在预设时间 3 s 内快速精确估计由外部环境干扰及模型不确定性构成的系统集总非线性。而有限时间扰动观测器 FTD0 和固定时间扰动观测器 FXDO 在 $t=3\text{ s}$ 时刻都没有收敛到真实扰动曲线。图 8 给出了 4 种轨迹跟踪控制方案下的跟踪轨迹曲线,可以看出在本文 PTPPC 控制策略下无人艇轨迹可以快速收敛到参考轨迹。图 9 表示 4 种控制方案下无人艇的位置和艏向角跟踪曲线。图 10 为 4 种跟踪控制方案下的跟踪误差曲线,由图 9、10 可知,PTPPC 控制方案下的轨迹跟踪误差能够在预设时间 3 s 内收敛到预定义性能约束内,并且收敛时间可由用户提前设定并与初始状态无关。而在其余 3 种对比控制方案作用下的轨迹跟踪误差在预设时间内不能收敛到指定性能约束内,从而证明本文所提控制策略具备更快的收敛速度和更高的精度。图 11 给出了

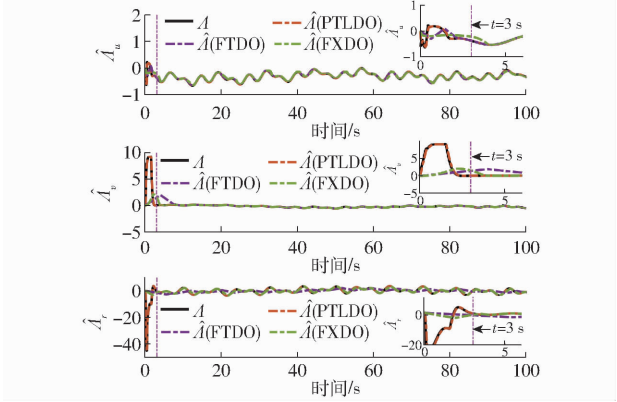


图 7 3 种扰动观测器估计曲线
Fig. 7 Three disturbance observer estimation curves

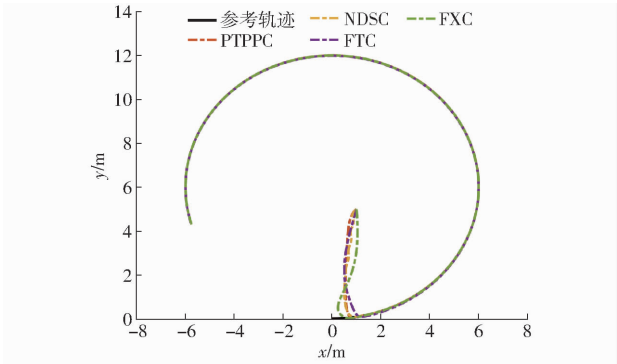


图 8 4 种控制方案下的跟踪轨迹
Fig. 8 Tracking trajectory under four control schemes

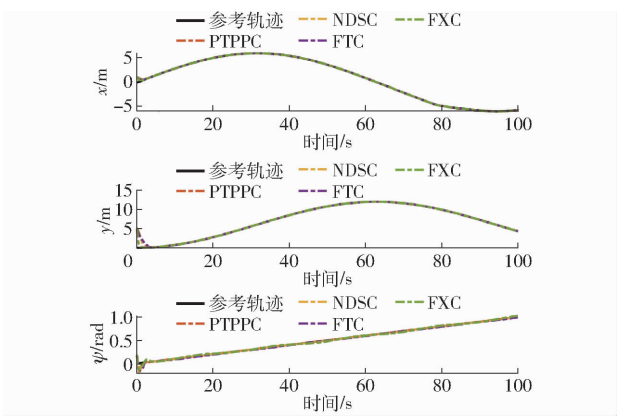


图 9 4 种控制方案下的位置及艏向角度跟踪曲线
Fig. 9 Position and heading angle tracking curves under four control schemes

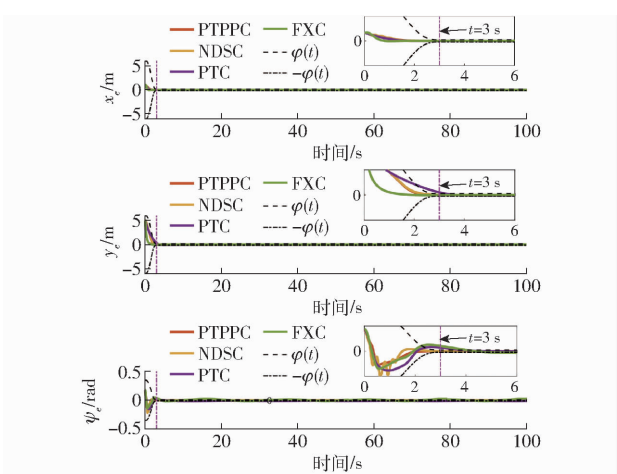


图 10 4 种控制方案下的轨迹跟踪误差曲线
Fig. 10 Trajectory tracking error curves under four control schemes

4 种不同控制方案下的控制器响应曲线。此外,为量化跟踪控制方案的控制性能,采用绝对误差积分(Integrated absolute error, IAE) IAE_i (i 分别表示 x 、 y 、 φ) 和时间乘以绝对误差积分(Integrated time absolute error, ITAE) $ITAE_i$ 两种性能指标进行对比分析,数学表示式为

$$IAE_i = \int_0^t |e_i(t)| dt \quad (54)$$

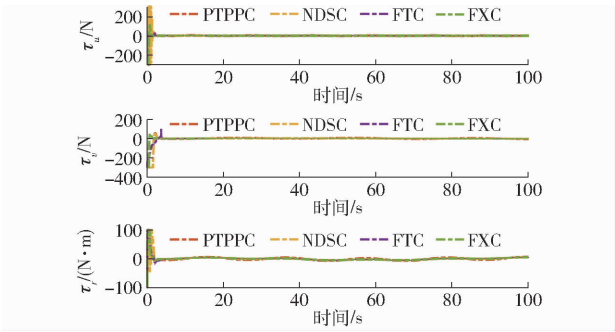


图 11 4 种控制方案作用下的控制输入曲线
Fig. 11 Control input curves under action of four control schemes

$$ITAE_i = \int_0^t t |e_i(t)| dt$$

(55)

根据表 4 可知,在外部海洋环境干扰、模型不确定性及推进器输入饱和的影响下,本文设计的 PTPPC 轨迹跟踪控制方案取得最佳指标值,获得最高的暂态和稳态性能。综上可知,本文设计的 PTPPC 控制策略能够在预设时间内完成对参考轨迹

表 4 4 种控制方案的 IAE 和 ITAE

Tab. 4 IAE and ITAE of four control schemes

控制方案	IAE _x	IAE _y	IAE _ψ	ITAE _x	ITAE _y	ITAE _ψ
PTPPC	0.699	2.019	0.140	0.618	4.056	0.278
NDSC	0.771	5.671	0.158	0.651	4.226	0.295
FTC	0.822	8.248	0.958	5.309	7.163	37.459
FXC	0.733	5.524	1.225	14.687	8.779	52.354

的高精度跟踪,并且收敛时间可由用户根据工程需求设置且不受初始状态影响,显著提高无人艇跟踪控制系统的收敛性和实用性。

4 结论

- (1)本文针对具有外部环境干扰、模型不确定性以及推进器输入饱和约束的水面无人艇高精度轨迹跟踪问题,提出一种预设时间预设性能鲁棒精准跟踪控制方案。
- (2)设计预设时间集总扰动观测器,可在预设时间 $T_o = 3\text{ s}$ 内对由外部海洋环境干扰和模型不确定构成的系统集总非线性进行精确重构和补偿,此外收敛时间 T_o 可由用户提前设置且与初始状态无关,显著提高观测器的鲁棒性和实用性。
- (3)构建一种新型预设时间预设性能函数,约束轨迹跟踪误差,并利用误差转换函数将其转换为无约束误差状态,从而在预设时间内取得指定的暂态和稳态性能。
- (4)结合预设时间集总扰动观测器、预设时间控制技术以及预设性能理论,提出具有预设性能约束的预设时间控制策略,保证跟踪系统在实际预设时间 $T = 3\text{ s}$ 内稳定且跟踪误差严格处于指定的性能约束边界内,此外跟踪误差的收敛时间 T 可由用户提前设定且不受初始状态影响,验证了本文算法的有效性和优越性。

参 考 文 献

[1] 吴清云,王东,陶军,等. 基于改进 QMIX 算法的远洋捕捞多无人艇全覆盖路径规划策略研究[J]. 农业机械学报, 2025, 56(10): 63 – 70.
Wu Qingyun, Wang Dong, Tao Jun, et al. Complete coverage path planning strategy for offshore fishing multi-USV based on improved QMIX algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(10): 63 – 70. (in Chinese)

[2] 丁渔庆,张博,李家旺. 拒绝服务攻击下欠驱动无人艇事件触发编队控制[J]. 兵工学报, 2026, 47(5): 221 – 232.
Ding Yuqing, Zhang Bo, Li Jiawang. Event-triggered formation control of underactuated USVs under DoS attacks[J]. Acta Armamentarii, 2026, 47(5): 221 – 232. (in Chinese)

[3] Liu Haitao, Zhou Xuecheng, Tian Xuehong, et al. Adaptive self-structuring neural network tracking control for underactuated USVs with actuator faults and input saturation[J]. Ocean Engineering, 2024, 309: 118535.

[4] Chen Zheng, Zhang Yougong, Nie Yong, et al. Adaptive sliding mode control design for nonlinear unmanned surface vessel using RBFNN and disturbance-observer[J]. IEEE Access, 2020, 8: 45457 – 45467.

[5] Cao Haitian, Xu Renjie, Zhao Song, et al. Robust trajectory tracking for fully-input-bounded actuated unmanned surface vessel with stochastic disturbances: an approach by the homogeneous nonlinear extended state observer and dynamic surface control [J]. Ocean Engineering, 2022, 243: 110113.

[6] Liu Wei, Ye Hui, Yang Xiaofei. Super-twisting sliding mode control for the trajectory tracking of underactuated USVs with disturbances[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 11(3): 636.

[7] Shen Zhipeng, Wang Qun, Dong Sheng, et al. Prescribed performance dynamic surface control for trajectory-tracking of unmanned surface vessel with input saturation[J]. Applied Ocean Research, 2021, 113: 102736.

[8] Zhang Jinxi, Yang Tao, Chai Tianyou. Neural network control of underactuated surface vehicles with prescribed trajectory tracking performance[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2024, 35(6): 8026 – 8039.

[9] Wang Ning, Zhu Zhongben, Qin Hongde, et al. Finite-time extended state observer-based exact tracking control of an unmanned surface vehicle[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2021, 31(5): 1704 – 1719.

- [10] Qin Junfeng, Du Jialu. Minimum-learning-parameter-based adaptive finite-time trajectory tracking event-triggered control for underactuated surface vessels with parametric uncertainties[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 271: 113634.
- [11] Sui Bowen, Zhang Jianqiang, Liu Zhong, et al. Fixed-time trajectory tracking control of fully actuated unmanned surface vessels with error constraints[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2024, 12(4): 584.
- [12] Polyakov A, Efimov D, Perruquetti W. Finite-time and fixed-time stabilization: implicit Lyapunov function approach[J]. *Automatica*, 2015, 51: 332 – 340.
- [13] Fan Yunsheng, Qiu Bingbing, Liu Lei, et al. Global fixed-time trajectory tracking control of underactuated USV based on fixed-time extended state observer[J]. *ISA Transactions*, 2023, 132: 267 – 277.
- [14] Yang Yana, Wang Jiale, Hua Changchun, et al. Saturation-tolerant adaptive fixed-time control of underactuated surface vessel with improved given performances[J/OL]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2024. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10449370>. DOI: 10.1109/TIV.2024.3370150.
- [15] Song Yongdong, Wang Yujuan, Holloway J, et al. Time-varying feedback for regulation of normal-form nonlinear systems in prescribed finite time[J]. *Automatica*, 2017, 83: 243 – 251.
- [16] Li Jinjiang, Xiang Xianbo, Zhang Qin, et al. Robust practical prescribed time trajectory tracking of USV with guaranteed performance[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 302: 117622.
- [17] Wang Shasha, Dai Dongchen, Peng Zhouhua, et al. Prescribed-time prescribed performance-based distributed formation control of surface vessels with system uncertainties[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 295: 116930.
- [18] Wang Yuchao, Qu Yinsong, Zhao Shiquan, et al. Adaptive neural containment maneuvering of underactuated surface vehicles with prescribed performance and collision avoidance[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 297: 116779.
- [19] Wang Shasha, Dai Dongchen, Wang Dan, et al. Nonlinear extended state observer-based distributed formation control of multiple vessels with finite-time prescribed performance[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, 11(2): 321.
- [20] Gao Zhenyu, Zhang Yi, Guo Ge. Fixed-time prescribed performance adaptive fixed-time sliding mode control for vehicular platoons with actuator saturation[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(12): 24176 – 24189.
- [21] Li Jun, Song Shenmin. Prescribed-time collision-free trajectory tracking control for spacecraft with position-only measurements[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2024, 60(4): 4035 – 4043.
- [22] Zhao Jie, Cai Chengtao, Liu Yongchao. Barrier Lyapunov function-based adaptive prescribed-time extended state observers design for unmanned surface vehicles subject to unknown disturbances[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 270: 113671.
- [23] Dong Sheng, Shen Zhipeng, Zhou Lu, et al. Event-triggered trajectory tracking control of marine surface vessels with time-varying output constraints using barrier functions[J]. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2023, 21(8): 2708 – 2717.
- [24] Roger Skjetne, Thor I F, Petar V K. Adaptive maneuvering, with experiments, for a model ship in a marine control laboratory[J]. *Automatica*, 2005, 41(2): 289 – 298.
- [25] 胡鑫, 巩庆涛, 祝贵兵, 等. 基于事件触发机制的船舶补给同步抗干扰控制[J]. *中国舰船研究*, 2024, 19(5): 87 – 94.
- Hu Xin, Gong Qingtao, Zhu Guibing, et al. Event-triggered synchronization anti-disturbance control method for ship replenishment[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2024, 19(5): 87 – 94 (in Chinese)
- [26] Zhang Xiaoling, Bi Yannan, Zou Tianyu, et al. Nonlinear disturbance observer based adaptive dynamic surface control for full actuated ship trajectory tracking[C]//2018 13th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA). IEEE, 2018: 1617 – 1622.
- [27] Dai Yong, Yang Chenglong, Yu Shuanghe, et al. Finite-time trajectory tracking for marine vessel by nonsingular backstepping controller with unknown external disturbance[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 165897 – 165907.
- [28] Gao Zhenyu, Guo Ge. Command-filtered fixed-time trajectory tracking control of surface vehicles based on a disturbance observer[J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2019, 29(13): 4348 – 4365.
- [29] Wang Ning, Hamid R K, Li Hongyi, et al. Accurate trajectory tracking of disturbed surface vehicles: a finite-time control approach[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2019, 24(3): 1064 – 1074.
- [30] Fu Mingyu, Wang Taiqi, Wang Chenglong. Fixed-time trajectory tracking control of a full state constrained marine surface vehicle with model uncertainties and external disturbances[J]. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2019, 17(6): 1331 – 1345.