

欠驱动无人船预设性能轨迹跟踪控制

杨铭宣¹, 王保防^{1,2}, 蔡明洁^{1,2}, 于金鹏^{1,2†}

(1. 青岛大学自动化学院, 山东 青岛 266071; 2. 山东省工业控制重点实验室, 山东 青岛 266071)

摘要: 针对欠驱动无人船高精度轨迹跟踪控制, 本文提出了一种基于扰动观测器的有限时间预设性能轨迹跟踪控制方法. 首先, 引入预设性能函数, 对误差变量进行限制, 并通过变换函数对限制后的误差变量进行转换, 用于控制设计过程, 确保轨迹跟踪控制系统按预设性能收敛; 其次, 采用动态面技术, 令虚拟控制信号通过一阶滤波器, 避免对虚拟控制律的直接求导, 简化控制律设计过程; 随后, 针对时变的外部扰动, 设计了有限时间扰动观测器, 对扰动进行估计和补偿, 通过理论分析证明了系统的实际有限时间稳定性; 最后, 通过设计对比仿真, 验证了所提控制方法的有效性和优越性.

关键词: 欠驱动无人船; 轨迹跟踪; 预设性能控制; 有限时间扰动观测器; 动态面控制

引用格式: 杨铭宣, 王保防, 蔡明洁, 等. 欠驱动无人船预设性能轨迹跟踪控制. 控制理论与应用, 2026, 43(4): 927–935

DOI: 10.7641/CTA.2024.40229

Prescribed performance control for trajectory tracking of underactuated unmanned surface vehicle

YANG Ming-xuan¹, WANG Bao-fang^{1,2}, CAI Ming-jie^{1,2}, YU Jin-peng^{1,2†}

(1. College of Automation, Qingdao University, Qingdao Shandong 266071, China;

2. Shandong Key Laboratory of Industrial Control Technology, Qingdao Shandong 266071, China)

Abstract: This paper offers a finite-time prescribed performance tracking control framework for underactuated unmanned surface vehicles based on disturbance observers, adapting it to the tracking challenges. Firstly, the prescribed performance control is employed to limit the tracking error variables, and the limited error variable is transformed by the transformation function and applied to the control design process to ensure that the trajectory tracking control system converges according to the prescribed performance control. Secondly, the dynamic surface is adopted to make the virtual control signal pass through the first-order filter, avoiding the direct derivation of the virtual control law and simplifying the design process of the control law. Thirdly, in the presence of disturbances, a disturbance observer is proposed to estimate and compensate for the disturbances in finite time. Finally, theoretical analysis demonstrates that the system is finite-time stable. The effectiveness of the proposed control protocol is validated by the simulation results.

Key words: underactuated unmanned surface vehicle; trajectory tracking; prescribed performance control; finite-time disturbance observer; dynamic surface control

Citation: YANG Mingxuan, WANG Baofang, CAI Mingjie, et al. Prescribed performance control for trajectory tracking of underactuated unmanned surface vehicle. *Control Theory & Applications*, 2026, 43(4): 927–935

1 引言

近年来, 由于常规水面船舶导航主要依靠海员的人工操作, 存在显著的人工成本和安全风险等问题, 无人船 (unmanned surface vehicle, USV) 在环境监测, 军事行动和海洋科学研究等领域的应用已经越来越

广泛^[1-2]. 由于缺乏横向控制输入, 欠驱动水面无人船的运动模型通常被建立为一个欠驱动的非线性系统, 仅在纵荡和艏摇运动中推进.

针对水面无人船的轨迹跟踪问题, 目前主要控制方法有模型预测控制^[3-4]、反步法控制^[5-7]、滑模控

收稿日期: 2024-04-22; 录用日期: 2024-12-24.

†通信作者. E-mail: yjp1109@126.com; Tel.: +86 532-85953690.

本文责任编辑: 孙长银.

国家自然科学基金项目(62473220, 62103212), 教育部“长江学者奖励计划”特聘教授项目(T2022265), 山东省重点研发计划项目(2022CXGC020901), 青岛市关键技术攻关及产业化示范类项目(RH2300004017)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (62473220, 62103212), the Chang Jiang Scholars Program (T2022265), the Major Innovation Project of Shandong Province (2022CXGC020901) and the Qingdao Key Technology and Industrialization Demonstration Program (RH2300004017).

制^[8-10]、模糊控制^[11-13]等. 根据文献[14], 被动有界性导致欠驱动船舶的横荡运动是被动有界的. 利用这一特性, 可以不再考虑横荡运动, 通过纵荡和艏摇运动消除横荡位置上的跟踪误差, 这一思想为基于反步法的控制设计提供了方便. 文献[15]介绍了一种实现水面无人船轨迹跟踪的方法, 他们采用反步法和反馈线性化技术来构建欠驱动USV的轨迹跟踪控制器. 然而, 在他们的研究中没有考虑外部干扰对控制器的影响. 文献[16]提出了一种容错自适应反步控制方法, 用于在存在未知干扰的情况下跟踪期望的轨迹. 但由于上述研究是在反步法框架内产生的, 因此, 虚拟控制信号的求导会产生“复杂性爆炸”问题, 为了解决这个问题, 文献[17-18]利用了动态面技术避免了对虚拟控制信号的求导.

现有控制方法已实现水面无人船基本的轨迹跟踪控制, 然而, 随着应用领域的推广, 水面无人船轨迹跟踪精度及动态性能方面控制需求不断提高. 实际应用中, 水面无人船在狭窄或拥挤的航道中航行是不可避免的. 若无人船不能精准的按照期望轨迹行进, 会潜在地提高碰撞的可能性. 预设性能控制 (prescribed performance control, PPC) 通常被用来处理这一问题. PPC是指系统误差达到预定误差范围内某一水平的情况, 收敛速度和最大超调量也限制在预先定义的值^[19]. 文献[20]针对欠驱动水面无人船控制偏差较大的问题, 提出了一种预设性能函数的约束控制方法, 令轨迹跟踪误差的超调量减小, 并使轨迹跟踪误差保持在设定的约束范围内. 文献[21]提出了一种自适应预设性能控制方案, 解决了传统预设性能控制中因跟踪误差越界而引起的奇异性问题. 此外, 文献[22]针对满足状态约束的严格反馈非线性系统提出了一种自适应动态规划控制方法. 但上述控制方案只对跟踪误差进行限制, 使其能在有限时间内收敛到预设区间, 并未对其他误差信号作出限制, 因此无法保证系统中所有误差信号均在有限时间内收敛.

现实中, 水面无人船不仅在不可预测的环境中不断航行, 而且还会受到未知的风、浪和洋流的干扰, 这些干扰会对船舶轨迹跟踪控制的稳定性产生负面影响. 在这种情况下, 要建立可靠的无人潜航器控制系统, 需要提高系统的鲁棒性和抗扰能力. 在USV轨迹跟踪控制问题中, 通常使用干扰观测器对误差进行估计和补偿. 干扰观测器的估计能力直接影响控制性能. 因此, 构造一个性能优良的扰动观测器对无人船的轨迹跟踪控制是至关重要的.

在上述讨论的启发下, 本文致力于解决USV轨迹跟踪控制中未知干扰、有限时间收敛和欠驱动等问题. 为此, 本文将预设性能控制、动态面技术及干扰观测器相结合应用于欠驱动水面无人船. 假设集总干扰和相关状态量存在上界, 根据假设条件进行虚拟控制律

及控制器的设计. 同时, 通过选择合理预设性能函数的参数使位置误差满足预设的暂态和稳态性能.

2 预备知识与问题描述

2.1 预备知识

引理 1^[7] 对于任意 $x \in \mathbb{R}, y \in \mathbb{R}$, 以及正实数 m, n, l , 下列不等式成立:

$$|x|^m |y|^n \leq \frac{m}{m+n} l |x|^{m+n} + \frac{n}{m+n} l^{-\frac{m}{n}} |y|^{m+n}.$$

引理 2^[7] 对于任意 $x_i \in \mathbb{R}, i = 1, \dots, n$ 和 $q \in (0, 1)$, 则不等式 $(\sum_{i=1}^n |x_i|)^q \leq \sum_{i=1}^n |x_i|^q$ 成立.

引理 3^[6] 对于连续系统 $\dot{x} = f(x), f(0) = 0$, 其中 $x \in \mathbb{R}$. 假设存在一个李雅普诺夫函数 $V(x) > 0$, 且 $\dot{V}(x) \leq -bV(x) - cV^\alpha(x) + d$, 其中: $b > 0, c > 0, 0 < \alpha < 1, d > 0$, 则系统实际有限时间稳定.

2.2 系统模型

在海上应用中, 水面无人船的3自由度数学模型被广泛使用, 该模型仅包含纵荡、横荡和艏摇运动. 为了描述USV的运动学和动力学, 通常指定惯性坐标系和固定坐标系, 如图1中所示. 根据文献[23], 水面无人船的三自由度运动和动力回路微分方程可表示为

$$\begin{cases} \dot{x} = u \cos \psi - v \sin \psi, \\ \dot{y} = u \sin \psi + v \cos \psi, \\ \dot{\psi} = r, \\ \dot{u} = \frac{m_v}{m_u} vr - \frac{d_u}{m_u} u + \frac{\tau_u}{m_u} + \frac{\tau_{wu}}{m_u}, \\ \dot{v} = -\frac{m_u}{m_v} ur - \frac{d_v}{m_v} v + \frac{\tau_{wv}}{m_v}, \\ \dot{r} = \frac{m_u - m_v}{m_r} uv - \frac{d_r}{m_r} r + \frac{\tau_r}{m_r} + \frac{\tau_{wr}}{m_r}, \end{cases} \quad (1)$$

式中: (x, y, ψ) 表示USV的 $x-y$ 位置坐标和惯性坐标系中的艏摇角; (u, v, r) 表示在固定坐标系中的纵荡、横荡和艏摇的速度; 在动力学回路中, (m_u, m_v, m_r) 为惯性系数; (d_u, d_v, d_r) 为阻尼系数; τ_u 和 τ_r 是控制输入, 分别为控制力和力矩; $(\tau_{wu}, \tau_{wv}, \tau_{wr})$ 为风、海浪和洋流等外部环境扰动.

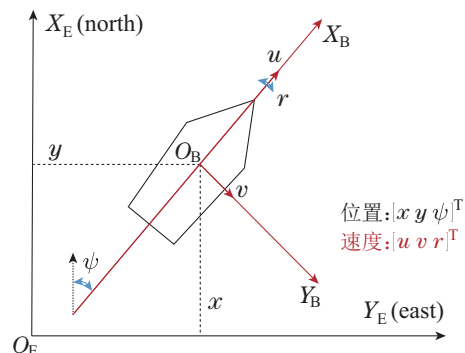


图1 USV位置变量的描述

Fig. 1 The description of USV motion variables

假设 1 时变环境扰动 $\tau_{wu}, \tau_{wv}, \tau_{wr}$ 及其时间导数是未知但有界的, 即

$$\begin{aligned} |\tau_{wu}| \leq \mu_u, |\tau_{wv}| \leq \mu_v, |\tau_{wr}| \leq \mu_r, \\ |\dot{\tau}_{wu}| \leq \omega_u, |\dot{\tau}_{wv}| \leq \omega_v, |\dot{\tau}_{wr}| \leq \omega_r, \end{aligned}$$

其中: $\mu_u, \mu_v, \mu_r, \omega_u, \omega_v, \omega_r$ 为正实数.

假设 2 期望速度 u_d, v_d, r_d 及其导数 $\dot{u}_d, \dot{v}_d, \dot{r}_d$ 均是有界的, 且期望速度的导数可微.

假设 3 横荡速度 v 是被动有界的.

注 1 在实际中, 风、海浪、洋流等外部扰动是不断变化的, 能量是有限的, 这些扰动可以看作是有界信号. 假设 2 要求期望速度及其一阶导数有界且一阶导数可微, 表明期望轨迹为光滑曲线^[11]. 在实际应用中 v 满足被动有界性, 即系统中其他所有动力学变量有界时 v 有界^[14]. 因此, 假设 1-3 是合理的.

3 控制器设计

根据式(1), 将期望轨迹设置如式(3)所示:

$$\begin{cases} \dot{x}_d = u_d \cos \psi_d - v_d \sin \psi_d, \\ \dot{y}_d = u_d \sin \psi_d + v_d \cos \psi_d, \\ \dot{\psi}_d = r_d, \end{cases} \quad (3)$$

其中: u_d, v_d, r_d 为期望速度. 控制目标为设计(2)中的 τ_u, τ_r , 使实际轨迹 (x, y, ψ) 在有限时间内跟踪到期望轨迹 (x_d, y_d, ψ_d) .

定义跟踪误差 x_e, y_e, ψ_e 如式(4)所示:

$$\begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \psi_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_d \\ y - y_d \\ \psi - \psi_d \end{bmatrix}, \quad (4)$$

由式(4)可得, 当 $x_e=0$ 和 $y_e=0$ 时, $x = x_d, y = y_d$. 因此, 跟踪问题被转换为镇定 x_e, y_e 和 ψ_e 的任务. 对式(4)求导并将式(1)和式(3)代入, 得到

$$\begin{cases} \dot{x}_e = u + ry_e - u_d \cos \psi_e - v_d \sin \psi_e, \\ \dot{y}_e = v - rx_e + u_d \sin \psi_e - v_d \cos \psi_e, \\ \dot{\psi}_e = r - r_d. \end{cases} \quad (5)$$

3.1 扰动观测器设计

对于无人船的动力学模型, 可以用以下受外部扰动的一阶非线性动态系统来描述:

$$m\dot{v} = f(v) + \tau + \tau_w, \quad (6)$$

其中: $v \in \mathbb{R}$ 为系统状态, $f(v)$ 为非线性动态函数, τ 为控制输入, τ_w 为未知时变外部扰动, m 为已知常数. 为了估计未知的外部干扰, 引入辅助变量 Θ 来设计干扰观测器.

$$\Theta = mv - \chi, \quad (7)$$

χ 的导数设计如下:

$$\dot{\chi} = f(v) + \tau + \hat{\tau}_w, \quad (8)$$

对扰动的估计值设计为

$$\hat{\tau}_w = \epsilon_1 \text{sig}^\delta \Theta + \epsilon_2 \int \text{sig}^\delta \Theta dt, \quad (9)$$

其中: $\text{sig}^\delta \Theta = |\Theta|^\delta \text{sgn} \Theta$, $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数; $\epsilon_1, \epsilon_2, \delta$ 均为正实数, 且 $0.5 < \delta < 1$.

取式(7)的导数得

$$\begin{aligned} \dot{\Theta} = \tau_w - \hat{\tau}_w = \\ -\epsilon_1 \text{sig}^\delta \Theta - \epsilon_2 \int \text{sig}^\delta \Theta dt + \tau_w, \end{aligned} \quad (10)$$

令 $Z = -\epsilon_2 \int \text{sig}^\delta \Theta dt + \tau_w$, 将式(10)改写为如下形式:

$$\begin{cases} \dot{\Theta} = -\epsilon_1 \text{sig}^\delta \Theta + Z, \\ \dot{Z} = -\epsilon_2 \text{sig}^\delta \Theta + \dot{\tau}_w, \end{cases} \quad (11)$$

若 Θ, Z 在有限时间内趋近于0, 则 $\dot{\Theta}$ 在有限时间内趋近于0且 $\hat{\tau}_w = \tau_w$.

由文献[5]可得, Θ 和 Z 可在有限时间内收敛到0. 因此, 未知外部扰动能够在有限时间内由 $\hat{\tau}_w$ 观测到.

3.2 虚拟控制律设计

为了提高系统的控制性能, 对跟踪误差进行以下限制:

$$\begin{cases} -\rho_{x1}q(t) < x_e < \rho_{x2}q(t), \\ -\rho_{y1}q(t) < y_e < \rho_{y2}q(t), \end{cases} \quad (12)$$

其中: $\rho_{x1}, \rho_{x2}, \rho_{y1}$ 和 ρ_{y2} 为正边界常数; $q(t)$ 是一个光滑, 严格递减的函数, 满足

$$q(t) = (q_0 - q_\infty)e^{-at} + q_\infty, \quad (13)$$

其中: $a > 0$ 为待设计的正参数, $q_0 > 0$ 和 $q_\infty > 0$ 分别为 $q(t)$ 的初值和终值. 由于 $q(t)$ 是严格单调递减的, 因此合理选择参数可以使纵荡和横荡的跟踪误差收敛到 $[-\rho_{x1}q_\infty, \rho_{x2}q_\infty]$ 和 $[-\rho_{y1}q_\infty, \rho_{y2}q_\infty]$. 为简化控制律设计, 引入变换函数为

$$\begin{cases} \eta_x = \frac{1}{10} [\ln(\rho_{x1} + \frac{x_e}{q}) - \ln(\rho_{x2} - \frac{x_e}{q}) - \ln(\frac{\rho_{x1}}{\rho_{x2}})], \\ \eta_y = \frac{1}{10} [\ln(\rho_{y1} + \frac{y_e}{q}) - \ln(\rho_{y2} - \frac{y_e}{q}) - \ln(\frac{\rho_{y1}}{\rho_{y2}})], \end{cases} \quad (14)$$

取变量 η_x 的导数可得

$$\begin{aligned} \dot{\eta}_x = \iota_x (\dot{x}_e - \frac{\dot{q}}{q} x_e) = \\ \iota_x (u + ry_e - u_d \cos \psi_e - v_d \sin \psi_e - \frac{\dot{q}}{q} x_e), \end{aligned} \quad (15)$$

其中 $\iota_x = \frac{1}{10} (\frac{1}{x_e + \rho_{x1}q} - \frac{1}{x_e - \rho_{x2}q})$, 显然当位置跟踪误差 $x_e \in (-\rho_{x1}q, \rho_{x2}q)$ 时, $\iota_x > 0$.

选择Lyapunov函数 $V_x = \frac{1}{2} \eta_x^2$. 对 V_x 求导得

$$\begin{aligned} \dot{V}_x &= \eta_x \dot{\eta}_x = \\ & \eta_x \iota_x (u + r y_e - u_d \cos \psi_e - \\ & v_d \sin \psi_e - \frac{\dot{q}}{q} x_e), \end{aligned} \quad (16)$$

选取 u 的虚拟控制律为

$$\begin{aligned} \alpha_u &= -\frac{k_1}{\iota_x} \eta_x - r y_e + u_d \cos \psi_e + v_d \sin \psi_e + \\ & \frac{\dot{q}}{q} x_e - \frac{\xi_1}{\iota_x} \text{sig}^\delta \eta_x, \end{aligned} \quad (17)$$

其中 ξ_1 为正实数。

将式(17)代入式(16)可得

$$\dot{V}_x = -k_1 \eta_x^2 + \iota_x \eta_x (u - \alpha_u) - \xi_1 \eta_x \text{sig}^\delta \eta_x. \quad (18)$$

取变量 η_y 的导数可得

$$\begin{aligned} \dot{\eta}_y &= \iota_y (\dot{y}_e - \frac{\dot{q}}{q} y_e) = \\ & \iota_y (v - r x_e + h - \frac{\dot{q}}{q} y_e), \end{aligned} \quad (19)$$

其中: $\iota_y = \frac{1}{10} (\frac{1}{y_e + \rho_{y1} q} - \frac{1}{y_e - \rho_{y2} q})$, $h = u_d \sin \psi_e - v_d \cos \psi_e$. 显然, 当 $y_e \in (-\rho_{y1} q, \rho_{y2} q)$ 时, $\iota_y > 0$.

选择Lyapunov函数 $V_y = \frac{1}{2} \eta_y^2$. 对 V_y 求导, 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_y &= \eta_y \dot{\eta}_y = \\ & \iota_y \eta_y (v - r x_e + h - \frac{\dot{q}}{q} y_e), \end{aligned} \quad (20)$$

选取 h 的虚拟控制律为

$$\alpha_h = -\frac{k_2}{\iota_y} \eta_y - v + r x_e + \frac{\dot{q}}{q} y_e - \frac{\xi_2}{\iota_y} \text{sig}^\delta \eta_y, \quad (21)$$

其中 ξ_2 为正实数。

将式(21)代入式(20)可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_y &= \\ & \iota_y \eta_y (v - r x_e + h - \frac{\dot{q}}{q} y_e + \alpha_h - \alpha_h) = \\ & -k_2 \eta_y^2 + \iota_y \eta_y (h - \alpha_h) - \xi_2 \eta_y \text{sig}^\delta \eta_y. \end{aligned} \quad (22)$$

令 α_h 通过以下一阶低通滤波器, 以避免 α_h 的求导。

$$\gamma_h \dot{\alpha}_{hf} + \alpha_{hf} = \alpha_h, \alpha_{hf}(0) = \alpha_h(0), \quad (23)$$

其中: α_{hf} 为一阶滤波器输出信号, $\gamma_h > 0$ 为时间常数。定义滤波误差为 $\alpha_{he} = \alpha_{hf} - \alpha_h$, 虚拟误差为 $h_e = h - \alpha_{hf}$. 由式(23)可得, $\dot{\alpha}_{he} = A_h(\eta_y, v, r, x_e, \iota_y) - \frac{\alpha_{he}}{\gamma_h}$, 其中 $A_h(\cdot)$ 为连续函数且最大值为 M_h ^[24].

选择Lyapunov函数

$$V_\psi = \frac{1}{2} h_e^2 + \frac{1}{2} \alpha_{he}^2, \quad (24)$$

对 V_ψ 求导可得

$$\dot{V}_\psi = h_e (\dot{h} - \dot{\alpha}_{hf}) + \alpha_{he} \dot{\alpha}_{he} =$$

$$\begin{aligned} & h_e (\dot{u}_d \sin \psi_e - \dot{v}_d \cos \psi_e - \dot{\alpha}_{hf}) + \\ & h_e (u_d \cos \psi_e + v_d \sin \psi_e) \dot{\psi}_e + \\ & \alpha_{he} \dot{\alpha}_{he} = \\ & h_e (\dot{u}_d \sin \psi_e - \dot{v}_d \cos \psi_e - \dot{\alpha}_{hf}) + \\ & \alpha_{he} \dot{\alpha}_{he} + h_e U_d \cos(\psi_e - \beta) \times \\ & (\alpha_r + r - \alpha_r - r_d), \end{aligned} \quad (25)$$

其中: $U_d = \sqrt{v_d^2 + u_d^2}$, $\beta = \arctan \frac{v_d}{u_d}$.

选取 r 的虚拟控制律为

$$\begin{aligned} \alpha_r &= -(U_d \cos(\psi_e - \beta))^{-1} [k_3 h_e - \\ & (\dot{u}_d \sin \psi_e - \dot{v}_d \cos \psi_e - \frac{\alpha_h - \alpha_{hf}}{\gamma_h}) - \\ & \xi_3 \text{sig}^\delta h_e] + r_d, \end{aligned} \quad (26)$$

其中 ξ_3 为正实数, 当 $\psi_e - \beta = \pm \frac{\pi}{2}$, α_r 是未定义的。因此, 实际工程中通常假设条件 $|\psi_e - \beta| < \frac{\pi}{2}$ 成立, 由式(27)保证了这一假设成立。

$$\begin{cases} \psi_e - \beta - \pi, & \psi_e - \beta > 0.5\pi, \\ \psi_e - \beta, & -0.5\pi < \psi_e - \beta < 0.5\pi, \\ \psi_e - \beta + \pi, & \psi_e - \beta < -0.5\pi. \end{cases} \quad (27)$$

将式(26)代入式(25)可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_\psi &= -k_3 h_e^2 + \alpha_{he} \dot{\alpha}_{he} - \xi_3 h_e \text{sig}^\delta h_e + \\ & h_e U_d \cos(\psi_e - \beta) (r - \alpha_r). \end{aligned} \quad (28)$$

3.3 控制律设计

令 α_u 通过以下一阶低通滤波器, 以避免 α_u 的求导问题。

$$\gamma_u \dot{\alpha}_{uf} + \alpha_{uf} = \alpha_u, \alpha_{uf}(0) = \alpha_u(0), \quad (29)$$

其中: α_{uf} 为一阶滤波器输出信号, $\gamma_u > 0$ 为时间常数。定义滤波误差为 $\alpha_{ue} = \alpha_{uf} - \alpha_u$, 虚拟误差为 $u_e = u - \alpha_{uf}$. 由式(29)可得 $\dot{\alpha}_{ue} = A_u(\eta_x, r, y_e, \psi_e, u_d, v_d, \iota_x) - \frac{\alpha_{ue}}{\gamma_u}$, 其中 $A_u(\cdot)$ 为连续函数且最大值为 M_u .

选择Lyapunov函数 $V_u = V_x + \frac{1}{2} m_u u_e^2 + \frac{1}{2} \alpha_{ue}^2$ 并对 V_u 求导得

$$\begin{aligned} \dot{V}_u &= -k_1 \eta_x^2 + \iota_x \eta_x (u - \alpha_u) - \\ & \xi_1 \eta_x \text{sig}^\delta \eta_x + m_u u_e \dot{u}_e + \dot{\alpha}_{ue} \alpha_{ue} = \\ & -k_1 \eta_x^2 - \xi_1 \eta_x \text{sig}^\delta \eta_x + u_e (\tau_u + \\ & m_v v r - d_u u + \tau_{wu} - m_u \frac{\alpha_u - \alpha_{uf}}{\gamma_u} + \\ & \iota_x \eta_x) + \iota_x \eta_x \alpha_{ue} + \dot{\alpha}_{ue} \alpha_{ue}. \end{aligned} \quad (30)$$

设计控制律 τ_u 为

$$\begin{aligned} \tau_u &= -k_4 u_e + d_u u - m_v v r - \hat{\tau}_{wu} - \\ & \xi_4 \text{sig}^\delta u_e + m_u \frac{\alpha_u - \alpha_{uf}}{\gamma_u} - \iota_x \eta_x, \end{aligned} \quad (31)$$

其中: k_4, ξ_4 为正实数; $\hat{\tau}_{wu}$ 为外部扰动在如下观测器中的观测值:

$$\Theta_u = m_u u - \chi_u, \quad (32)$$

$$\dot{\chi}_u = f_u(v) + \tau_u + \hat{\tau}_{wu}, \quad (33)$$

$$\hat{\tau}_{wu} = \epsilon_{u1} \text{sig}^\delta \Theta_u + \epsilon_{u2} \int \text{sig}^\delta \Theta_u dt, \quad (34)$$

其中 ϵ_{u1} 和 ϵ_{u2} 为正实数.

将式(31)代入式(30), 可以得到

$$\begin{aligned} \dot{V}_u \leq & -k_1 \eta_x^2 - \xi_1 \eta_x \text{sig}^\delta \eta_x - k_4 u_e^2 - \\ & \xi_4 u_e \text{sig}^\delta u_e + u_e \sigma_u + \iota_x \eta_x \alpha_{ue} + \dot{\alpha}_{ue} \alpha_{ue}, \end{aligned} \quad (35)$$

其中 $\tilde{\tau}_{wu} = \tau_{wu} - \hat{\tau}_{wu}$ 为扰动观测误差, $\tilde{\tau}_{wu}$ 在有限时间内收敛且有界, 存在正实数使得 $|\tilde{\tau}_{wu}| \leq \sigma_u$.

令 α_r 通过以下一阶低通滤波器, 以避免 α_r 的求导问题.

$$\gamma_r \dot{\alpha}_{rf} + \alpha_{rf} = \alpha_r, \quad \alpha_{rf}(0) = \alpha_r(0), \quad (36)$$

其中: α_{rf} 为一阶滤波器输出信号, $\gamma_r > 0$ 为时间常数. 定义滤波误差为 $\alpha_{re} = \alpha_{rf} - \alpha_r$, 虚拟误差为 $r_e = r - \alpha_{rf}$. 同样, $\dot{\alpha}_{re} = A_r(h_e, \psi_e, u_d, v_d, r_d, \dot{u}_d, \dot{v}_d, \dot{r}_d, \beta) - \frac{\alpha_{re}}{\gamma_r}$, 其中 $A_r(\cdot)$ 为连续函数且最大值为 M_r .

选择Lyapunov函数 $V_r = V_y + V_\psi + \frac{1}{2} m_r r_e^2 + \frac{1}{2} \alpha_{re}^2$, 对 V_r 求导得

$$\begin{aligned} \dot{V}_r = & -k_2 \eta_y^2 + \iota_y \eta_y (h - \alpha_h) - \\ & \xi_2 \eta_y \text{sig}^\delta \eta_y - k_3 h_e^2 + \alpha_{he} \dot{\alpha}_{he} - \\ & \xi_3 h_e \text{sig}^\delta h_e + m_r r_e \dot{r}_e + \dot{\alpha}_{re} \alpha_{re} + \\ & h_e U_d \cos(\psi_e - \beta) (r - \alpha_r) = \\ & -k_2 \eta_y^2 - \xi_2 \eta_y \text{sig}^\delta \eta_y - k_3 h_e^2 - \\ & \xi_3 h_e \text{sig}^\delta h_e + \alpha_{re} h_e U_d \cos(\psi_e - \beta) + \\ & \alpha_{he} \dot{\alpha}_{he} + \alpha_{re} \dot{\alpha}_{re} + r_e [\tau_r - d_r r + \tau_{wr} + \\ & (m_u - m_v) uv - m_r \frac{\alpha_r - \alpha_{rf}}{\gamma_r} + \\ & h_e U_d \cos(\psi_e - \beta)] + \iota_y \eta_y (h_e + \alpha_{he}), \end{aligned} \quad (37)$$

设计控制律 τ_r 为

$$\begin{aligned} \tau_r = & -k_5 r_e + d_r r - (m_u - m_v) uv + \\ & m_r \left(\frac{\alpha_r - \alpha_{rf}}{\gamma_r} \right) - h_e U_d \cos(\psi_e - \beta) - \\ & \hat{\tau}_{wr} - \xi_5 \text{sig}^\delta r_e, \end{aligned} \quad (38)$$

其中: k_5, ξ_5 为正实数; $\hat{\tau}_{wr}$ 为外部扰动在如下观测器中的观测值.

$$\Theta_r = m_r r - \chi_r, \quad (39)$$

$$\dot{\chi}_r = f_r(v) + \tau_r + \hat{\tau}_{wr}, \quad (40)$$

$$\hat{\tau}_{wr} = \epsilon_{r1} \text{sig}^\delta \Theta_r + \epsilon_{r2} \int \text{sig}^\delta \Theta_r dt, \quad (41)$$

其中: ϵ_{r1} 和 ϵ_{r2} 为正实数.

将式(38)代入到式(37)得

$$\begin{aligned} \dot{V}_r \leq & -k_2 \eta_y^2 - \xi_2 \eta_y \text{sig}^\delta \eta_y - k_3 h_e^2 - \\ & \xi_3 h_e \text{sig}^\delta h_e - k_5 r_e^2 - \xi_5 r_e \text{sig}^\delta r_e + \\ & \iota_y \eta_y (h_e + \alpha_{he}) + r_e \sigma_r + \alpha_{he} \dot{\alpha}_{he} + \\ & \alpha_{re} \dot{\alpha}_{re} + \alpha_{re} h_e U_d \cos(\psi_e - \beta), \end{aligned} \quad (42)$$

其中 $\tilde{\tau}_{wr} = \tau_{wr} - \hat{\tau}_{wr}$ 为扰动观测误差, $\tilde{\tau}_{wr}$ 在有限时间内收敛且有界, 存在正实数使得 $|\tilde{\tau}_{wr}| \leq \sigma_r$.

3.4 稳定性分析

定理 1 考虑具有时变扰动的欠驱动水面无人船模型(1)-(2). 满足假设1-3时, 采用虚拟控制律(17)(21)(26), 干扰观测器(32)-(34)(39)-(41)和控制律(31)(38), 并选择适当的设计参数, 可以使无人船跟踪到指定的期望轨迹, 跟踪误差是有限时间有界的, 且闭环系统中的其他信号均是有界的.

证 选择Lyapunov函数 $V = V_u + V_r$ 并对其求导可得

$$\dot{V} = \dot{V}_u + \dot{V}_r, \quad (43)$$

将式(35)(42)代入得

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -k_1 \eta_x^2 - k_2 \eta_y^2 - k_3 h_e^2 - k_4 u_e^2 - k_5 r_e^2 + \\ & u_e \sigma_u + r_e \sigma_r + \iota_x \eta_x \alpha_{ue} + \\ & \iota_y \eta_y (h_e + \alpha_{he}) - \xi_1 \eta_x \text{sig}^\delta \eta_x - \\ & \xi_2 \eta_y \text{sig}^\delta \eta_y - \xi_3 h_e \text{sig}^\delta h_e - \\ & \xi_4 u_e \text{sig}^\delta u_e - \xi_5 r_e \text{sig}^\delta r_e + \\ & \dot{\alpha}_{ue} \alpha_{ue} + \alpha_{he} \dot{\alpha}_{he} + \alpha_{re} \dot{\alpha}_{re} + \\ & \alpha_{re} h_e U_d \cos(\psi_e - \beta), \end{aligned} \quad (44)$$

由Young's不等式可得

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -(k_1 - \frac{1}{2} \iota_x^2) \eta_x^2 - (k_2 - \iota_y^2) \eta_y^2 - \\ & (k_3 - \frac{1}{2} - \frac{1}{2} U_d^2) h_e^2 - (k_4 - \frac{1}{2}) u_e^2 - \\ & (k_5 - \frac{1}{2}) r_e^2 - (\frac{1}{\gamma_r} - \frac{1}{2} A_r^2 - \frac{1}{2}) \alpha_{re}^2 - \\ & (\frac{1}{\gamma_h} - \frac{1}{2} A_h^2 - \frac{1}{2}) \alpha_{he}^2 - \xi_1 \eta_x \text{sig}^\delta \eta_x - \\ & (\frac{1}{\gamma_u} - \frac{1}{2} A_u^2 - \frac{1}{2}) \alpha_{ue}^2 - \xi_2 \eta_y \text{sig}^\delta \eta_y - \\ & \xi_3 h_e \text{sig}^\delta h_e - \xi_4 u_e \text{sig}^\delta u_e - \\ & \xi_5 r_e \text{sig}^\delta r_e + \frac{1}{2} \sigma_u^2 + \frac{1}{2} \sigma_r^2, \end{aligned} \quad (45)$$

令 $\frac{1}{\gamma_h} = \frac{1}{2} M_h^2 + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} g_h, \frac{1}{\gamma_u} = \frac{1}{2} M_u^2 + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} g_u, \frac{1}{\gamma_r} = \frac{1}{2} M_r^2 + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} g_r$. 其中: g_u, g_h 和 g_r 为正实数. 将

其代入式(45)并结合引理2得到

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -(k_1 - \frac{1}{2}l_x^2)\eta_x^2 - (k_2 - l_y^2)\eta_y^2 - \\ & (k_3 - \frac{1}{2} - \frac{1}{2}U_d^2)h_e^2 - (k_4 - \frac{1}{2})u_e^2 - \\ & (k_5 - \frac{1}{2})r_e^2 + \frac{1}{2}\sigma_u^2 + \frac{1}{2}\sigma_r^2 - \frac{1}{2}g_h\alpha_{he}^2 - \\ & \frac{1}{2}g_u\alpha_{ue}^2 - \frac{1}{2}g_r\alpha_{re}^2 - \xi_1|\eta_x|^{\delta+1} - \\ & \xi_2|\eta_y|^{\delta+1} - \xi_3|h_e|^{\delta+1} - \xi_4|u_e|^{\delta+1} - \\ & \xi_5|r_e|^{\delta+1}, \end{aligned} \quad (46)$$

由引理1可得

$$\frac{1}{2}g_h|\alpha_{he}|^{\delta+1} \leq \frac{\delta+1}{4}g_h\alpha_{he}^2 + \frac{1-\delta}{4}g_h, \quad (47)$$

$$\frac{1}{2}g_u|\alpha_{ue}|^{\delta+1} \leq \frac{\delta+1}{4}g_u\alpha_{ue}^2 + \frac{1-\delta}{4}g_u, \quad (48)$$

$$\frac{1}{2}g_r|\alpha_{re}|^{\delta+1} \leq \frac{\delta+1}{4}g_r\alpha_{re}^2 + \frac{1-\delta}{4}g_r, \quad (49)$$

进一步可得

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -(k_1 - \frac{1}{2}l_x^2)\eta_x^2 - (k_2 - l_y^2)\eta_y^2 - \\ & (k_3 - \frac{1}{2} - \frac{1}{2}U_d^2)h_e^2 - (k_4 - \frac{1}{2})u_e^2 - \\ & (k_5 - \frac{1}{2})r_e^2 - \xi_1|\eta_x|^{\frac{\delta+1}{2}} - \xi_2|\eta_y|^{\frac{\delta+1}{2}} - \\ & \xi_3|h_e|^{\frac{\delta+1}{2}} - \xi_4|u_e|^{\frac{\delta+1}{2}} - \xi_5|r_e|^{\frac{\delta+1}{2}} - \\ & \frac{1}{2}g_h(\alpha_{he}^2)^{\frac{\delta+1}{2}} - \frac{1}{2}g_u(\alpha_{ue}^2)^{\frac{\delta+1}{2}} - \\ & \frac{1}{2}g_r(\alpha_{re}^2)^{\frac{\delta+1}{2}} + \frac{1}{2}\sigma_u^2 + \frac{1}{2}\sigma_r^2 + \\ & \frac{(1-\delta)(g_h + g_u + g_r)}{4} - \\ & \frac{1-\delta}{4}g_h\alpha_{he}^2 - \frac{1-\delta}{4}g_u\alpha_{ue}^2 - \\ & \frac{1-\delta}{4}g_r\alpha_{re}^2. \end{aligned} \quad (50)$$

令

$$\begin{aligned} c_1 = & \min\{2k_1 - l_x^2, 2k_2 - 2l_y^2, 2k_3 - 1 - U_d^2, \\ & 2k_4 - 1, 2k_5 - 1, \frac{1-\delta}{2}g_h, \frac{1-\delta}{2}g_u, \frac{1-\delta}{2}g_r\}, \\ c_2 = & 2^{\frac{\delta+1}{2}} \min\{\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4, \xi_5, \frac{1}{2}g_h, \frac{1}{2}g_u, \frac{1}{2}g_r\}, \\ d = & \frac{(1-\delta)(g_h + g_u + g_r)}{4} + \frac{1}{2}\sigma_u^2 + \frac{1}{2}\sigma_r^2, \end{aligned}$$

则式(50)可改写为

$$\dot{V} \leq -c_1V - c_2V^{\frac{\delta+1}{2}} + d. \quad (51)$$

由式(51)和引理3可得, $V(t)$ 有限时间有界, 进一步可得 x_e, y_e, u_e, r_e, h_e 也是有界的. 进而USV的位置 (x, y) 与艏摇角 ψ 有界. 由假设2可得, 虚拟控制律 $\alpha_u,$

α_h, α_r 有界, 那么USV的纵荡速度 u 与艏摇角速度 r 有界, 则无人船的控制输入 τ_u, τ_r 也是有界的. 此外, 由式(51), V 在有限时间 T 内收敛, 且 T 满足

$$T \leq \frac{1}{c_1(1 - \frac{\delta+1}{2})} \ln \frac{c_1V(0)^{1-\frac{\delta+1}{2}} + \lambda c_2}{\lambda c_2}, \quad (52)$$

其中 λ 为正实数.

综上, 无人船的轨迹跟踪误差是有限时间有界的, 且闭环系统的其他信号均为有界信号.

4 仿真实验

选取文献[25]中的原型船模型进行仿真实验. 模型船的长度为1.2 m, 质量为17.5 kg. USV的模型参数为: $m_u = 25.8$ kg, $m_v = 33.8$ kg, $m_r = 2.76$ kg · m², $d_u = 12$ kg/s, $d_v = 17$ kg/s, $d_r = 0.5$ kg · m²/s. 无人船的初始位置和航向角设置为: $[-2 \ 0 \ 0]$, 其他初始值均为0. 控制参数选取为: $k_1 = 1, k_2 = 0.001, k_3 = 20, k_4 = 5, k_5 = 10, \gamma_u = 0.8, \gamma_h = 0.07, \gamma_r = 1.1, \delta = 0.7, \xi_1 = 0.001, \xi_2 = 0.001, \xi_3 = 0.001, \xi_4 = 3, \xi_5 = 0.01, \delta_{x1} = 10, \delta_{x2} = 10, \delta_{y1} = 10, \delta_{y2} = 10, q_0 = 1, q_\infty = 0.01, a = 0.4, \epsilon_{u1} = 2.5, \epsilon_{u2} = 3, \epsilon_{r1} = 1.7, \epsilon_{r2} = 2$. 为体现本文设计控制器的有效性及优越性, 采用文献[26]提出的自适应滑模反步控制方法和[27]中反步法与神经分流模型相结合的控制方法进行对比, 文献[26]中的控制参数选取为: $k_1 = 0.05, k_2 = 1, k_3 = 0.55, k_4 = 0.3, k_5 = 0.5, w_u = 100, w_r = 20, k_u = 10, k_r = 0.1$. 文献[27]中的控制参数为: $k_1 = 20, k_2 = 0.4, k_3 = 8, k_4 = 0.025, k_5 = 6, A_1 = 26, A_2 = 23, A_3 = 1, B_1 = 1, B_2 = 24, B_3 = 3, D_1 = 30, D_2 = 5, D_3 = 7$.

注2 文献[27]中通过单层神经网络对无人船的惯性矩阵等参数进行了估计, 为了使对比结果不受估计误差的影响, 在对比仿真中未使用文献[27]中的神经网络, 而是将本文中用到的确切的无人船参数代入到控制律中进行对比仿真.

无人船的期望轨迹设计为

$$\begin{cases} u_d = 3 \text{ m/s}, \\ r_d = 0 \text{ rad/s}, & t < 10, \\ u_d = 3 \text{ m/s}, \\ r_d = \frac{t}{700} + \frac{1}{40\pi} \sin(\frac{2\pi}{35}t) \text{ rad/s}, & 10 \leq t \leq 100. \end{cases}$$

未知外部扰动设计为

$$\begin{cases} \tau_{wu} = 1.5[\sin(0.4t) + \cos(0.3t)] \text{ N/s}, \\ \tau_{wv} = 0.5[\sin(0.1t) + \cos(0.4t)] \text{ N/s}, \\ \tau_{wr} = [\sin(0.3t) + \cos(0.2t)] \text{ N/s}. \end{cases}$$

为了量化系统的综合控制性能, 设计了平均跟踪

误差(mean tracking error, MTE)、最大位置误差(maximum position error, MPE)和跟踪误差的均方根值(root mean square, RMS)指标, 计算公式如下:

$$\begin{aligned} \text{MTE} \cdot x_e &= \frac{\int_5^{100} |x_e| dt}{95}, \\ \text{MTE} \cdot y_e &= \frac{\int_5^{100} |y_e| dt}{95}, \\ \text{RMS} \cdot x_e &= \sqrt{\frac{\int_5^{100} x_e^2 dt}{95}}, \\ \text{RMS} \cdot y_e &= \sqrt{\frac{\int_5^{100} y_e^2 dt}{95}}, \\ \text{MPE} &= \max\{\sqrt{x_e^2 + y_e^2}\}, \end{aligned}$$

为了评估系统的跟踪性能及稳态性能, 在计算上述各指标时仅使用5 s之后的跟踪误差. 图2-5为相同扰动条件下的3种控制方法的仿真对比结果.

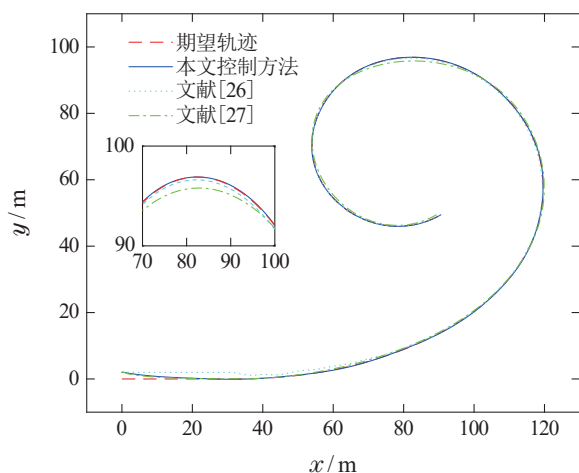


图2 水平面中的期望轨迹和实际轨迹

Fig. 2 Reference trajectory and actual trajectory in plane

图2为水平面上的跟踪轨迹, 从图中可以看出3种方法最终均能成功的跟踪期望轨迹, 但在本文控制方案下, 无人船可以快速行驶到期望轨迹上, 并且从局部放大图中可以看出, 本文的控制方法具有更高的跟踪精准度. 第8 s时, 在本文的控制方法下, 无人船的轨迹误差为0.135 m, 而在文献[26-27]的控制方法下, 该误差分别为2.11 m和0.412 m. 第70 s时轨迹误差分别为0.025 m, 0.029 m和1.226 m. 图3为 x, y 方向的位置误差和角度误差, 从图中可以看出在本文的控制方案下, 位置误差可以快速收敛到预设性能函数曲线之内, 并将误差保持在预设性能函数曲线之内, 且角度误差可以收敛至原点邻域内. 而文献[26-27]中位置误差收敛速度较慢, 且无法收敛到预设性能函数曲线之内. 在第8 s时, 本文控制方法下位置误差(x_e, y_e)为 $(-0.020, 0.134)$. 在文献[26-27]的控制方法下误差分

别为 $(0.680, 2), (0.401, 0.097)$. 第70 s时, 本文控制方法下该误差为 $(-0.002, -0.025)$, 文献[26-27]中分别为 $(0.007, 0.029), (0.097, 1.149)$.

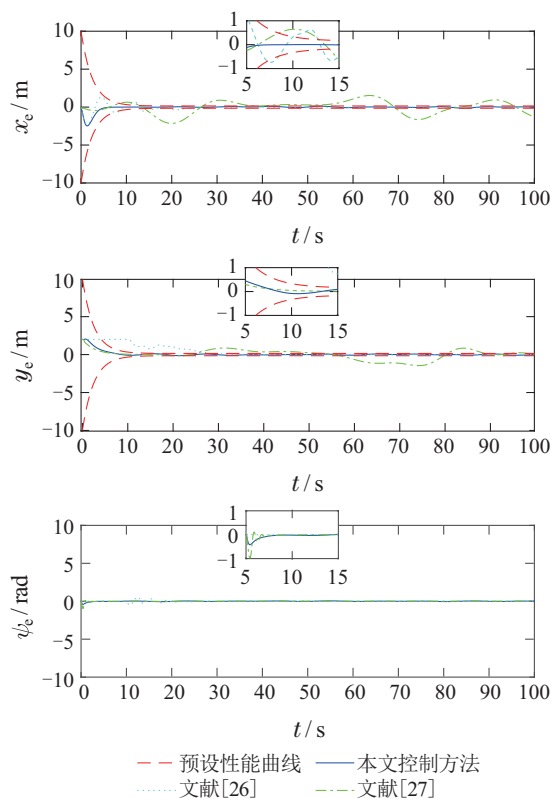
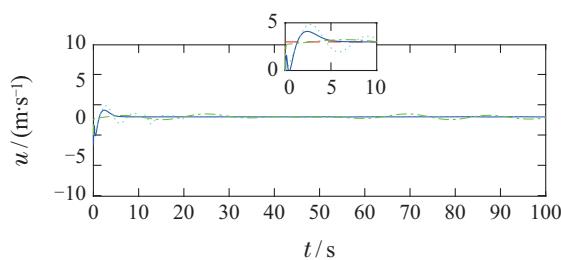


图3 位置误差和角度误差

Fig. 3 Position error and angle error

图4为跟踪速度曲线, 从中可以看出3种控制方案均能跟踪到期望速度, 但相较于文献[26-27], 在本文提出的控制方案下, 无人船的速度跟踪具有更好的动态性能及稳态精度.

图5为扰动的实际值和观测值, 从图中可以看出本文设计的扰动观测器可以在短时间内估计出扰动值, 使无人船应对外部干扰的能力得到提升. 图6为各个量化指标的柱形图, 通过突出指标的柱形图可以得到, 相较于文献[26-27]所提出的控制方案的 x_e 的误差均值分别减少了98%和99%, y_e 的误差均值分别减少了91%和94%, 最大位置误差分别减少了97%和99%, x_e 的均方根值都减少了99%, y_e 的均方根值分别减少了98%和99%.



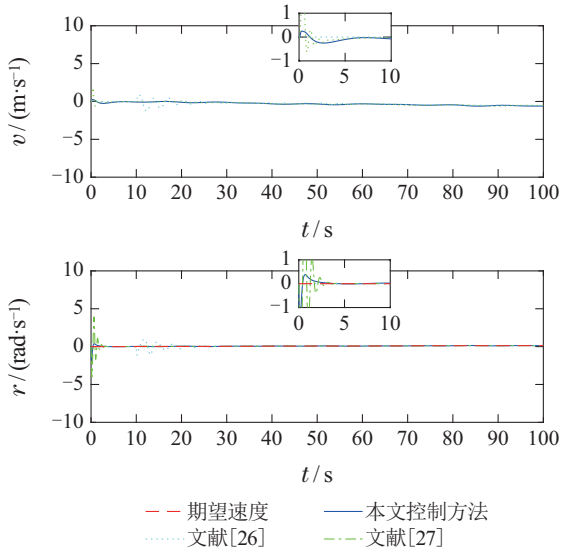


图4 跟踪速度

Fig. 4 Tracking velocity

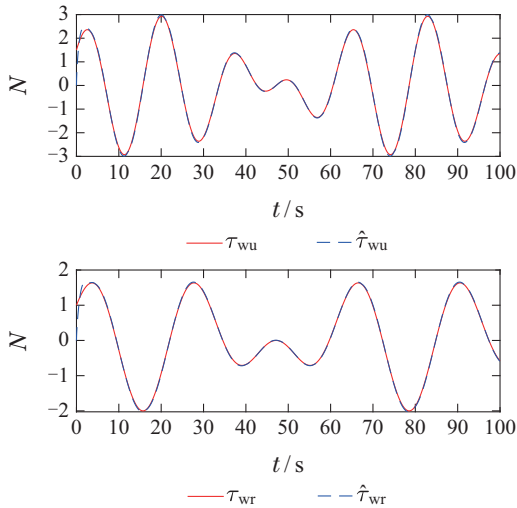


图5 外部扰动及观测值

Fig. 5 External interference and observer observations

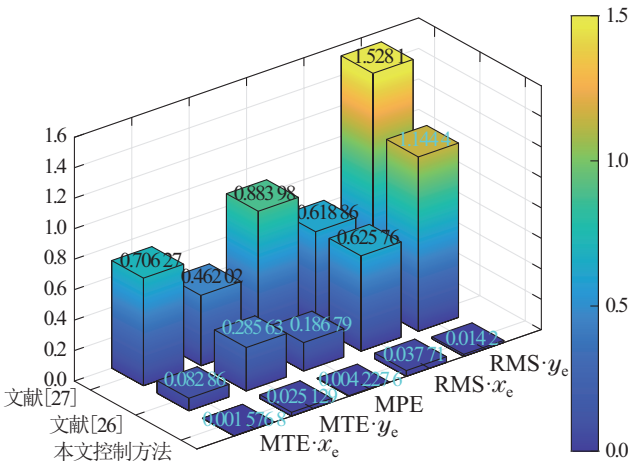


图6 平均跟踪误差、最大位置误差和误差均方根值

Fig. 6 MTE, MPE and RMS

通过与文献[26–27]的对比仿真体现了所提控制

方案的有效性和优越性.

5 结论

针对存在外部干扰的欠驱动水面无人船, 本文提出了一种基于观测器的预设性能控制方案. 首先, 设计了有限时间扰动观测器对时变的外部扰动进行估计和补偿, 使无人船能在外部扰动中完成轨迹跟踪任务, 提高了无人船系统的鲁棒性; 其次, 利用变换函数将无人船的位置误差限制到预设的区间, 使无人船在航行中能够穿过狭窄或拥挤的航道. 并将动态面技术和反步法相结合, 避免了传统反步法中虚拟控制信号的求导问题; 最后, 利用Lyapunov函数稳定性理论证明闭环系统信号的有界性和稳定性. 仿真结果表明, 本文所提出的控制方案在鲁棒性和控制效果方面具有良好的性能, 验证了本文所提出控制方案的有效性.

参考文献:

- [1] MOUSAZADEH H, JAFARBIGLU H, ABDOLMALEKI H, et al. Developing a navigation, guidance and obstacle avoidance algorithm for an unmanned surface vehicle (USV) by algorithms fusion. *Ocean Engineering*, 2018, 159: 56 – 65.
- [2] ZHANG J, SUN T, LIU Z. Robust model predictive control for path-following of underactuated surface vessels with roll constraints. *Ocean Engineering*, 2017, 143: 125 – 132.
- [3] DONG Z, ZHANG Z, QI S, et al. Autonomous cooperative formation control of underactuated USVs based on improved MPC in complex ocean environment. *Ocean Engineering*, 2023, 270: 113633.
- [4] OH S R, SUN J. Path following of underactuated marine surface vessels using line-of-sight based model predictive control. *Ocean Engineering*, 2010, 37(2/3): 289 – 295.
- [5] XIA G, SUN C, ZHAO B, et al. Cooperative control of multiple dynamic positioning vessels with input saturation based on finite-time disturbance observer. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2019, 17: 370 – 379.
- [6] QIN J, DU J, LI J. Adaptive finite-time trajectory tracking event-triggered control scheme for underactuated surface vessels subject to input saturation. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023, 24(8): 8809 – 8819.
- [7] ZOU A M, KUMAR K D, DE RUITER A H J. Fixed-time attitude tracking control for rigid spacecraft. *Automatica*, 2020, 113: 108792.
- [8] WANG Yuanhui, WANG Haibin, ZHANG Xiaoyun. Robust adaptive fault-tolerant tracking control for dynamic positioning vessel. *Control Theory & Applications*, 2021, 38(2): 287 – 300. (王元慧, 王海滨, 张晓云. 动力定位船轨迹跟踪鲁棒自适应容错控制. *控制理论与应用*, 2021, 38(2): 287 – 300.)
- [9] RODRIGUEZ J, CASTAÑEDA H, GONZALEZ-GARCIA A, et al. Finite-time control for an unmanned surface vehicle based on adaptive sliding mode strategy. *Ocean Engineering*, 2022, 254: 111255.
- [10] HUANG B, SONG S, ZHU C, et al. Finite-time distributed formation control for multiple unmanned surface vehicles with input saturation. *Ocean Engineering*, 2021, 233: 109158.
- [11] DONG Yinghui, CHEN Jian, LÜ Chengxing, et al. Design of adaptive fuzzy controller for unmanned surface vessel based on disturbance observer. *Control Theory & Applications*, 2024, 41(2): 261 – 272. (董颖慧, 陈健, 吕成兴, 等. 基于扰动观测器的水面无人船自适应模糊控制器设计. *控制理论与应用*, 2024, 41(2): 261 – 272.)

- [12] WU D, LIAO Y, HU C, et al. An enhanced fuzzy control strategy for low-level thrusters in marine dynamic positioning systems based on chaotic random distribution harmony search. *International Journal of Fuzzy Systems*, 2021, 23: 1823 – 1839.
- [13] DENG Y, ZHANG X. Event-triggered composite adaptive fuzzy output-feedback control for path following of autonomous surface vessels. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2020, 29(9): 2701 – 2713.
- [14] LI J H, LEE P M, JUN B, et al. Point-to-point navigation of underactuated ships. *Automatica*, 2008, 44(12): 3201 – 3205.
- [15] GODHAVN J M. Nonlinear tracking of underactuated surface vessels. *Proceedings of 35th IEEE Conference on Decision and Control*. Kobe: IEEE, 1996, 1: 975 – 980.
- [16] CHEN X, TAN W. Tracking control of surface vessels via fault-tolerant adaptive backstepping interval type-2 fuzzy control. *Ocean Engineering*, 2013, 70: 97 – 109.
- [17] WANG Yuanqing, ZHANG Guichen, SHI Zhubin, et al. Robust simultaneous formation tracking and stabilization of nonholonomic wheeled mobile robots. *Control Theory & Applications*, 2021, 38(3): 407 – 415.
(王源庆, 张桂臣, 施祝斌, 等. 未知死区输入非线性系统的双观测器动态面控制. *控制理论与应用*, 2021, 38(3): 407 – 415.)
- [18] SHEN Zhipeng, ZOU Tianyu, WANG Ru. Extended state observer based adaptive dynamic surface output feedback control for underactuated surface vessel trajectory tracking with low-frequency learning. *Control Theory & Applications*, 2019, 36(6): 867 – 876.
(沈智鹏, 邹天宇, 王茹. 基于扩张观测器的欠驱动船舶轨迹跟踪低频学习自适应动态面输出反馈控制. *控制理论与应用*, 2019, 36(6): 867 – 876.)
- [19] QU Y, ZHAO W, YU Z, et al. Distributed prescribed performance containment control for unmanned surface vehicles based on disturbance observer. *ISA Transactions*, 2022, 125: 699 – 706.
- [20] WANG Yuanhui, WANG Haibin, FU Mingyu. Trajectory tracking control of a dynamic positioning ship with performance function constraints. *Journal of Harbin Engineering University*, 2019, 40(10): 1703 – 1708.
(王元慧, 王海滨, 付明玉. 性能函数约束下的动力定位船轨迹跟踪控制. *哈尔滨工程大学学报*, 2019, 40(10): 1703 – 1708.)
- [21] BAI Yijie, SUN Ruisheng, CHEN Wei, et al. Aircraft adaptive prescribed performance attitude control design. *Unmanned Systems Technology*, 2022, 5(4): 23 – 31.
(白奕杰, 孙瑞胜, 陈伟, 等. 飞行器自适应预设性能姿态控制设计. *无人系统技术*, 2022, 5(4): 23 – 31.)
- [22] DENG Y, ZHANG Z, GONG M, et al. Event-triggered asymptotic tracking control of underactuated ships with prescribed performance. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 24(1): 645 – 656.
- [23] FOSSEN T I. *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. Trondheim, Norway: John Wiley & Sons, 2011.
- [24] WANG D, HUANG J. Neural network-based adaptive dynamic surface control for a class of uncertain nonlinear systems in strict-feedback form. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2005, 16(1): 195 – 202.
- [25] DO K D, PAN J. Robust path-following of underactuated ships: Theory and experiments on a model ship. *Ocean Engineering*, 2006, 33(10): 1354 – 1372.
- [26] LIAO Y, ZHANG M, WAN L, et al. Trajectory tracking control for underactuated unmanned surface vehicles with dynamic uncertainties. *Journal of Central South University*, 2016, 23(2): 370 – 378.
- [27] PAN C, LAI X, YANG S, et al. A biologically inspired approach to tracking control of underactuated surface vessels subject to unknown dynamics. *Expert Systems with Applications*, 2015, 42(4): 2153 – 2161.

作者简介:

杨铭宣 硕士研究生, 目前研究方向为欠驱动无人船轨迹跟踪控制, E-mail: whalesongyyy@163.com;

王保防 副教授, 硕士生导师, 目前研究方向为机器人智能控制、伺服系统和非线性系统控制, E-mail: baofangtc@163.com;

蔡明洁 副教授, 硕士生导师, 目前研究方向为多智能体系统的分布式控制和非线性系统控制, E-mail: c_mj0810@163.com;

于金鹏 教授, 博士生导师, 目前研究方向为非线性控制与电机控制, E-mail: yjp1109@126.com.