

控制与决策

Control and Decision

基于固定时间扰动观测器的水面无人艇精确编队控制

余明裕, 李仲昆, 王泊桦

引用本文:

余明裕,李仲昆,王泊桦. 基于固定时间扰动观测器的水面无人艇精确编队控制[J]. *控制与决策*, 2023, 38(2): 379–387.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.1208>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于RBF神经网络的多关节机器人固定时间滑模控制](#)

Fixed-time sliding mode control of multi-joint robot based on RBF neural network
控制与决策. 2022, 37(11): 2790–2798 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0421>

[输出受限的不确定非线性系统的自适应固定时间控制](#)

Adaptive fixed-time control for uncertain nonlinear systems with output constraints
控制与决策. 2022, 37(9): 2265–2273 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0310>

[多航天器系统分布式固定时间输出反馈姿态协同跟踪控制](#)

Distributed fixed-time output feedback attitude coordination tracking control for multiple rigid spacecraft
控制与决策. 2021, 36(5): 1049–1058 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0968>

[基于反演算法的严格反馈非线性系统固定时间跟踪控制](#)

Fixed-time tracking control for strict-feedback nonlinear systems based on backstepping algorithm
控制与决策. 2021, 36(1): 173–179 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0658>

[基于领航-跟随的有人/无人机编队队形保持控制](#)

Formation keeping control for manned/unmanned aerial vehicle formation based on leader-follower strategy
控制与决策. 2021, 36(10): 2435–2441 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0453>

基于固定时间扰动观测器的水面无人艇精确编队控制

余明裕^{1†}, 李仲昆², 王泊桦¹

(1. 大连海事大学 船舶电气工程学院, 辽宁 大连 116000; 2. 大连海事大学 轮机工程学院, 辽宁 大连 116000)

摘要: 在水面无人艇(USV)编队控制中,控制效果易受系统初始状态和内外扰动的影响.为此,研究一类具有复杂干扰下的USV编队控制问题,结合固定时间扰动观测器提出一种领航-跟随编队控制方法.首先,提出一种基于固定时间滑模的跟踪控制(FTSM-TC)策略,在固定时间内保证领航艇快速跟踪期望轨迹;然后,为处理内外未知干扰设计固定时间扰动观测器(FTDO),从而保证在固定时间内对编队系统中的未建模动态和外部复杂干扰进行精确辨识.所提出的基于FTDO的编队控制(FTDO-FC)策略,使编队控制系统在固定时间内收敛并保持稳定的期望队形,仿真结果表明,所设计控制方法能够有效解决存在复杂未知扰动情况下的USV编队控制问题,且收敛时间与系统初始状态无关.

关键词: 无人艇; 多智能体编队; 固定时间控制; 滑模控制; 未知扰动; 固定时间扰动观测器

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.1208

引用格式: 余明裕,李仲昆,王泊桦.基于固定时间扰动观测器的水面无人艇精确编队控制[J].控制与决策,2023,38(2): 379-387.

Fixed-time disturbance observer-based accurate formation control of unmanned surface vehicles

YU Ming-yu^{1†}, LI Zhong-kun², WANG Bo-hua¹

(1. College of Marine Electrical Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116000, China; 2. College of Marine Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116000, China)

Abstract: In the formation control of unmanned surface vehicles (USV), the control performance is easily affected by the initial state of the system, internal and external disturbances. In this paper, a leader-follower formation control strategy, which combines with the fixed-time disturbance observer, is proposed to deal with the problem of USV formation control. First of all, a fixed-time sliding mode tracking control (FTSM-TC) strategy is proposed, which ensures the leader USV can track the desired trajectory within a fixed time. Secondly, a fixed-time disturbance observer (FTDO) is designed to estimate unmodeled dynamics and external disturbance, which achieves accurate estimation of disturbances. The proposed FTDO-based formation control (FTDO-FC) strategy can maintain a stable desired formation, and enables that the formation control system can converge in a fixed time. Simulation results show that the proposed control strategy can effectively handle unknown disturbances, and the convergence time is independent of the initial state of the system.

Keywords: unmanned surface vehicle; multi-agent formation; fixed-time control; sliding mode control; unknown disturbance; fixed-time disturbance observer

0 引言

海洋蕴含丰富的矿产资源、生物资源、可再生能源等,是人类文明发展进程中必然深度探索和科学共融的神秘领域.水面无人艇(unmanned surface vehicle, USV)作为重要的作业平台在资源勘探、人员搜救、环境保护、情报收集和军事对抗等领域扮演着重要角色^[1-2].单USV的执行能力容错性低,往往

需要在未知多变的海洋环境下执行复杂多样化的任务.与单USV相比,多USV协同配合作业将大大提高工作效率和任务完成的可靠性,因此得到了研究机构的广泛关注^[3-4].多USV编队控制作为协同控制领域的热点问题之一,目的是使多艘无人艇保持特定队形向指定目标运动或完成复杂的任务.在编队控制系统中,领航-跟随控制策略简便可靠,其将编队控制问

收稿日期: 2021-07-12; 录用日期: 2021-10-09.

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(3132019344).

责任编委: 瞿斌.

[†]通讯作者. E-mail: mjer@dlmu.edu.cn.

题转变为轨迹跟踪问题,通过选取设定一个或多个领航艇,其余成员作为跟随艇,并设计高效的控制器保证领航艇跟踪期望轨迹和跟随艇与领航艇保持稳定的编队队形,从而实现多USV编队控制^[5]. 领航-跟随编队控制策略因其对于USV队形控制的快速性和有效性,得到越来越广泛的应用.

在多USV编队控制系统中,为保证快速精准的控制效果,常采用反步法、滑模控制和神经网络等方法设计控制器. 滑模控制在动态运动过程中,根据系统偏差及各阶导数有针对性地不断变化,迫使系统按照预定的状态轨迹运动,所以滑模控制方法的快速收敛性和强抗干扰能力使其在多智能体系统中得到广泛的应用. 传统的滑模控制方法主要包括终端滑模控制、快速积分滑模控制和非奇异终端滑模控制等. 然而,这些方法只能保证系统稳定性渐近时间收敛或有限时间收敛,存在不可估算收敛时间和收敛速度较慢等缺点. 在有限时间控制的基础上,固定时间控制算法能很好地保证系统在固定时间内收敛,且收敛时间与系统初始状态无关^[6]. 固定时间控制首次由Polyakov^[7]提出,并由Zuo等^[8-9]尝试在多智能体系统中运用,提出一种固定时间终端滑模控制方法,实现了快速精准的控制效果. 然而,该方法具有局限性,在智能体某些系统状态区域内存在奇异性问题,并且当系统状态运动到离平衡点较近时,无法保证系统的光滑性和连续性,维持系统稳定的动态性能. 故本文尝试对固定时间控制理论在多USV编队控制领域进行拓展,将滑模控制与固定时间控制相结合,设计一种新型固定时间滑模(fixed-time sliding mode, FTSM)控制方法,有效弥补了积分滑模和终端滑模等控制方法收敛速度慢且依赖系统初始状态的缺点,提高系统的收敛速度并保证编队系统的稳定动态性能.

多USV编队控制效果易受洋流和风浪等外界复杂扰动和系统内部未建模动态的干扰,给实现稳定的编队控制带来了巨大的挑战. 常用的扰动处理方法有自抗扰控制、神经网络控制和扰动观测器处理. 在传统非线性扰动观测器的研究基础上,后续研究将有限时间扰动观测器^[10]、有限时间不确定观测器^[11]和有限时间扩张状态观测器^[12]运用在USV精确轨迹跟踪控制中,实现了对系统扰动的有效辨识. 然而,上述有限时间扰动观测器在计算收敛时间上界时,受到智能体系统状态初始值的影响,而实际系统的初始状态难以预先精确获得,从而在某些情况下收敛时间无法准确估算,限制了其应用. 为克服收敛时间受初态影响的弊端,在有限时间扰动观测器的基础

上,Guo等^[13]将一种固定时间扰动观测器用于存在执行器饱和和死区的USV系统扰动处理,有效证明了所设计的固定时间扰动观测器能够在固定的时间内对USV跟踪系统中的未知干扰进行辨识. Wu等^[14]将一种固定时间积分滑模扰动观测器用于一种非线性多智能体系统中的干扰处理,大大增强了系统的稳定性,并不受系统状态初值的影响. 目前,该固定时间观测器理论只有少部分运用到多智能体系统的协同编队控制中,故本文尝试将固定时间扰动观测器用于存在复杂干扰下的多USV编队控制系统中的扰动观测处理,设计一种新型固定时间扰动观测器运用于多USV编队控制扰动处理问题,在提高系统收敛速度的同时,确保编队系统的收敛时间和扰动观测误差不受系统初始状态的影响.

综上,本文针对存在系统内部未建模动态和外部未知扰动的多USV编队控制问题,设计一种基于固定时间扰动观测器的多USV编队控制策略. 首先,为方便控制器设计,整个领航-跟随编队控制系统被分为跟踪控制子系统和编队控制子系统,结合固定时间理论和滑模控制提出固定时间滑模跟踪控制策略和多USV编队控制策略,在固定时间内实现快速的轨迹跟踪和精确的编队控制;然后,将复杂外界扰动和系统未建模动态视为集总不确定项,结合固定时间控制理论设计扰动观测器对集总不确定项进行精确的观测估计. 与前期文献相比,本文主要的改进和创新点如下:

1) 将整个多USV编队控制系统分为跟踪控制子系统和编队控制子系统. 针对跟踪控制子系统,设计一种基于固定时间滑模的跟踪控制(FTSM-TC)策略,使领航无人艇在固定时间内快速精确地跟踪期望轨迹. 针对编队控制子系统,设计一种基于固定时间扰动观测器的编队控制(FTDO-FC)策略,在使跟随无人艇和领航无人艇在固定时间内保持稳定精确的编队队形的同时,也使得控制器设计易于在实际工程中实现. 同时通过与积分滑模法(integral sliding mode, ISM)控制策略进行对比论证,进一步证明所设计的固定时间多USV编队控制算法的有效性.

2) 将编队系统内外部扰动视为集总不确定项,设计一种新型的固定时间扰动观测器(fixed-time disturbance observer, FTDO)对集总不确定项进行高效的辨识处理,确保编队系统观测误差在固定时间内收敛,且独立于初始观测误差. 利用Lyapunov稳定性理论证明所设计跟踪控制器和编队控制器的可行性. 最后通过严格的仿真实验验证所设计FTSM-TC

策略和FTDO-FC策略可在固定时间内实现快速的轨迹跟踪和精确的编队控制。

1 基础知识与问题描述

1.1 基础知识

引理1^[15] 考虑如下非线性系统:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= f(x(t)), \\ x(0) &= x_0, f(0) = 0, x \in U_0 \subset R^n. \end{aligned} \quad (1)$$

其中: $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$, $f(\cdot)$ 为定义在原点邻域 U_0 上的连续非线性函数. 如果该系统具有负齐次度并且渐近稳定, 则系统(1)有限时间稳定.

假设存在一个正定函数 $V(x)$ 使得

$$\dot{V}(x) + l_1 V^{l_2} \leq 0. \quad (2)$$

其中: $l_1 > 0, 0 < l_2 < 1$. 则系统(1)有限时间稳定.

引理2^[16] 考虑如下标量系统:

$$\dot{y} = -\gamma_1 y^{a_1/a_2} - \gamma_2 y^{b_1/b_2}, y(0) = y_0. \quad (3)$$

其中: $\gamma_1, \gamma_2 > 0; a_1, a_2, b_1, b_2$ 为正奇数, 满足 $a_1 > a_2, b_1 < b_2$. 系统(3)收敛时间独立于系统的初始状态且在固定时间内收敛, 其收敛时间上界满足

$$T \leq T_{\max,1}(y_0) = \frac{1}{\gamma_1} \cdot \frac{a_2}{a_1 - a_2} + \frac{1}{\gamma_2} \cdot \frac{b_2}{b_2 - b_1}. \quad (4)$$

引理3^[17] 考虑连续径向有界函数 $V: R^n \rightarrow R_+ \cup \{0\}$, 该函数满足:

1) $V(x) = 0 \Leftrightarrow x = 0$.

2) 对于任何 $x(t)$, 均可满足不等式 $\dot{V}(x) \leq -c_1 V^{d_1}(x) - c_2 V^{d_2}(x)$. 其中 c_1, c_2, d_1, d_2 为正常数, 且 $0 < d_1 < 1, d_2 > 1$. 该系统在固定时间内收敛, 其收敛时间上界满足

$$T \leq T_{\max,2} = \frac{1}{c_1(1-d_1)} + \frac{1}{c_2(d_2-1)}. \quad (5)$$

1.2 问题描述

USV 在实际海上航行中具有强耦合、强非线性和复杂度高等特点, 因此在建立 USV 模型时, 不能忽略系统内部未建模动态和各种外部干扰. 船舶运动共有 6 个自由度, 本文忽略船舶的垂荡、横摇和纵摇运动的影响, 考虑船舶的前进、横漂和艏摇 3 个自由度的水平面运动, 建立 USV 运动学和动力学模型如下:

$$\begin{cases} \dot{\eta} = R(\psi)\nu, \\ M\dot{\nu} + C(\nu)\nu + D(\nu)\nu = \tau + \delta. \end{cases} \quad (6)$$

其中: $\eta = [x, y, \psi]^T$ 为在惯性坐标系下的位置向量; $\nu = [u, v, r]^T$ 为附体坐标系下的速度向量; $\tau = [\tau_{i1}, 0, \tau_{i3}]^T$ 为无人艇推进器提供的控制输入, 由前进方向控制力 τ_{i1} 和艏摇方向控制力矩 τ_{i3} 组成; $\delta = MR^T(\psi)d(t)$, $d(t)$ 为由风浪和暗流引起的外部干扰,

$M = M^T > 0$ 为惯性矩阵, 为无人艇刚体惯性矩阵和附体惯性矩阵的叠加; $C(\nu) = -C(\nu)^T$ 为科氏力矩阵, 包含的流体动力导数参数由海试获得; $D(\nu)$ 为阻尼矩阵, 由无人艇所受线性和非线性阻尼效应组成. 参数矩阵分别表示为

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & m_{23} \\ 0 & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$C(\nu) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & c_{13}(\nu) \\ 0 & 0 & c_{23}(\nu) \\ -c_{13}(\nu) & -c_{23}(\nu) & 0 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$D(\nu) = \begin{bmatrix} d_{11}(\nu) & 0 & 0 \\ 0 & d_{22}(\nu) & d_{23}(\nu) \\ 0 & -d_{32}(\nu) & d_{33}(\nu) \end{bmatrix}. \quad (9)$$

参数定义如表 1 所示. m 为 USV 的质量, L 为 USV 的长度, B 为 USV 的宽度, x_g 为 USV 的重心在附体坐标系 x 轴上的坐标值, I_z 为惯性力矩, $N_{\dot{v}} = Y_{\dot{r}}, X_*, Y_*, Z_*$ 为流体动力导数.

表 1 参数定义

参数	定义	参数	定义
m_{11}	$m - X_{\dot{u}}$	$c_{23}(\nu)$	$m_{11}u$
m_{22}	$m - Y_{\dot{v}}$	$d_{11}(\nu)$	$-X_u - X_{ u u} u - X_{uuu}u^2$
m_{23}	$mx_g - Y_{\dot{r}}$	$d_{22}(\nu)$	$-Y_v - Y_{ v v} v $
m_{32}	$mx_g - N_{\dot{v}}$	$d_{23}(\nu)$	$-Y_r - Y_{ v r} v - Y_{ r r} r $
m_{33}	$I_z - N_{\dot{r}}$	$d_{32}(\nu)$	$-N_v - N_{ v v} v - N_{ r v} r $
$c_{13}(\nu)$	$m_{11} - m_{23}r$	$d_{33}(\nu)$	$-N_r - N_{ v r} v - N_{ r r} r $

$R(\psi)$ 表示 USV 附体坐标系与地球坐标系之间的旋转矩阵, 定义为

$$R(\psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

并满足如下特性:

$$\dot{R}(\psi) = R(\psi)S(r),$$

$$R^T(\psi)S(r)R(\psi) = R(\psi)S(r)R^T(\psi) = S(r),$$

$$\|R(\psi)\| = 1, R^T(\psi)R(\psi) = I, \forall \psi \in [0, 2\pi]. \quad (11)$$

矩阵 $S(r)$ 表示为

$$S(r) = \begin{bmatrix} 0 & -r & 0 \\ r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

考虑如下期望轨迹:

$$\dot{\eta}_d = R(\psi_d)\nu_d,$$

$$M_d\dot{\nu}_d + C(\nu_d)\nu_d + D(\nu_d)\nu_d = \tau_d. \quad (13)$$

其中: $\eta_d = [x_d, y_d, \psi_d]^T$ 和 $\nu_d = [u_d, v_d, r_d]^T$ 为期望位置和速度向量, $\tau_d = [\tau_{d1}, 0, \tau_{d3}]^T$ 为期望控制输入.

2 控制器设计与可行性分析

如图1所示,为方便整体USV编队控制框架的设计,将领航-跟随编队控制系统分为跟踪控制子系统和编队控制子系统,独立设计跟踪控制器和编队控制器.

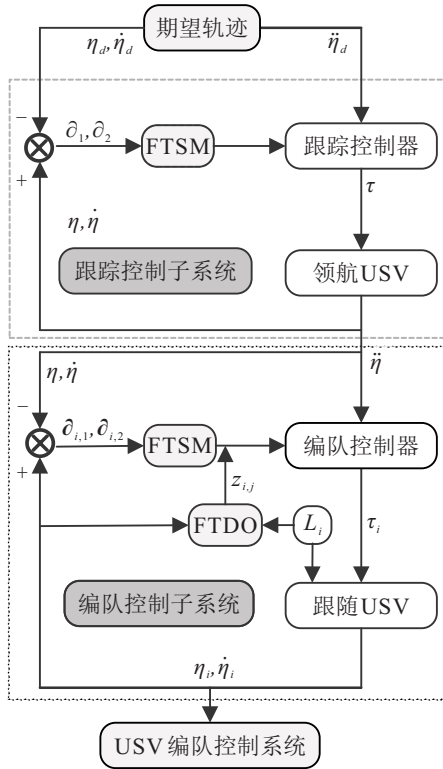


图1 USV编队控制框架

2.1 跟踪控制器设计与分析

为了方便控制器设计,领航USV数学模型表示为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = M^{-1}(x_1)R(x_1)\tau + L_i. \end{cases} \quad (14)$$

其中: $x_1 = \eta, x_2 = \dot{\eta}$; L_i 为USV由内部模型不确定性和外界未知干扰引起的集总不确定项, $L_i = M^{-1}[\delta(t) - C(x_1, x_2)x_2 - D(x_1, x_2)x_2]$. 该集总不确定项满足连续可微且有界, 即 $\|\dot{L}_i\| \leq Z_L$, 其中 Z_L 为正常数.

假设1 在跟踪控制子系统中,为了与后续扰动处理形成对比,暂不考虑系统中存在的集总不确定项,即 $L_i = 0$.

领航USV与期望轨迹之间的动态跟踪误差为

$$\begin{cases} \partial_1 = x_1 - \eta_d, \\ \partial_2 = x_2 - \dot{\eta}_d. \end{cases} \quad (15)$$

求导得到

$$\begin{cases} \dot{\partial}_1 = \partial_2, \\ \dot{\partial}_2 = M^{-1}(x_1)R(x_1)\tau - \ddot{\eta}_d. \end{cases} \quad (16)$$

为了使跟踪控制子系统的系统状态在固定时间内收敛,并保证领航USV快速稳定地跟踪期望轨迹,设计如下固定时间滑模面(FTSM):

$$\varepsilon = \partial_2 + l_1\partial_1 + l_2\partial_1^{\alpha_1/\alpha_2} + l_3\partial_1^{\beta_1/\beta_2}. \quad (17)$$

其中: l_1, l_2, l_3 为正实数; $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ 为正奇数, 且 $\alpha_1 > \alpha_2, \beta_1 < \beta_2$. 求导得到

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\partial}_2 + l_1\dot{\partial}_2 + l_2\frac{\alpha_1}{\alpha_2}\partial_2^{\frac{\alpha_1}{\alpha_2}-1} + l_3\frac{\beta_1}{\beta_2}\partial_2^{\frac{\beta_1}{\beta_2}-1}. \quad (18)$$

设计基于固定时间滑模的跟踪控制(FTSM-TC)策略为

$$\begin{aligned} \tau = & -MR^{-1}\left(-\ddot{\eta}_d + l_1\dot{\partial}_2 + l_2\frac{\alpha_1}{\alpha_2}\partial_2^{\frac{\alpha_1}{\alpha_2}-1} + \right. \\ & \left. l_3\frac{\beta_1}{\beta_2}\partial_2^{\frac{\beta_1}{\beta_2}-1} + \lambda_{0,0} + \lambda_{0,1}\varepsilon^{2-m/n} + \lambda_{0,2}\varepsilon^{m/n}\right), \end{aligned} \quad (19)$$

其中 $\lambda_{0,0}, \lambda_{0,1}, \lambda_{0,2} > 0$.

下面对所设计的FTSM-TC策略进行稳定性分析.

定理1 在无集总扰动干扰 L_i 的情况下,设计的FTSM-TC策略能保证领航USV的位置 η 和速度 $\dot{\eta}$ 在固定时间内快速精准地跟踪期望轨迹.

证明 到达阶段:跟踪误差 ∂_1, ∂_2 能在固定时间内到达滑模面.

选择如下Lyapunov函数:

$$V = \frac{1}{2}\varepsilon^T\varepsilon. \quad (20)$$

求导得到

$$\begin{aligned} \dot{V} = \varepsilon^T\dot{\varepsilon} = & \varepsilon^T\left[\dot{\partial}_2 + l_1\dot{\partial}_2 + l_2\frac{\alpha_1}{\alpha_2}\partial_2^{\frac{\alpha_1}{\alpha_2}-1} + l_3\frac{\beta_1}{\beta_2}\partial_2^{\frac{\beta_1}{\beta_2}-1}\right] = \\ & \varepsilon^T\left[M^{-1}(x_1)R(x_1)\tau - \ddot{\eta}_d + \right. \\ & \left. l_1\dot{\partial}_2 + l_2\frac{\alpha_1}{\alpha_2}\partial_2^{\frac{\alpha_1}{\alpha_2}-1} + l_3\frac{\beta_1}{\beta_2}\partial_2^{\frac{\beta_1}{\beta_2}-1}\right] = \\ & -\varepsilon^T\left[\lambda_{0,0} + \lambda_{0,1}\varepsilon^{2-p/q} + \lambda_{0,2}\varepsilon^{p/q}\right] = \\ & -\lambda_{0,0}\varepsilon^2 - \lambda_{0,1}2^{\frac{3q-p}{2q}}\left(\frac{1}{2}\varepsilon^2\right)^{\frac{3q-p}{2q}} - \\ & \lambda_{0,2}2^{\frac{q+p}{2q}}\left(\frac{1}{2}\varepsilon^2\right)^{\frac{q+p}{2q}} \leq \\ & -\lambda_{0,1}2^{\frac{3q-p}{2q}}V^{2-\frac{p+q}{2q}} - \lambda_{0,2}2^{\frac{p+q}{2q}}V^{\frac{p+q}{2q}} \leq \\ & -\mathfrak{S}_1V^{2-\omega_1/\omega_2} - \mathfrak{S}_2V^{\omega_1/\omega_2}. \end{aligned} \quad (21)$$

其中: $\mathfrak{S}_1 = \lambda_{0,1}2^{\frac{3q-p}{2q}} > 0, \mathfrak{S}_2 = \lambda_{0,2}2^{\frac{p+q}{2q}} > 0; \omega_1 = p + q, \omega_2 = 2q$, 且 $p < q$. 故 $2 - \omega_1/\omega_2 > 1, 0 < \omega_1/\omega_2 < 1$.

根据引理3可得,所设计的跟踪控制策略能够使领航USV在固定时间内跟踪期望轨迹,得到最大收敛时间上界为

$$T_{0,\max} = \frac{\mathfrak{S}_1 + \mathfrak{S}_2}{\mathfrak{S}_1 \mathfrak{S}_2 (\omega_1/\omega_2 - 1)}. \quad (22)$$

到达滑动阶段后, $\varepsilon = \dot{\varepsilon} = 0$. 结合式(17)可得

$$\partial_2 = \dot{\partial}_1 = -(\ell_1 \partial_1 + \ell_2 \partial_1^{\alpha_1/\alpha_2} + \ell_3 \partial_1^{\beta_1/\beta_2}). \quad (23)$$

令 $U = \partial_1^{(\beta_2 - \beta_1)/\beta_2}$, $\partial_1 = U^{\beta_2/(\beta_2 - \beta_1)}$, 可得

$$\dot{\partial}_1 = \frac{\beta_2}{\beta_2 - \beta_1} U^{\frac{\beta_1}{\beta_2 - \beta_1}} \dot{U}. \quad (24)$$

结合式(23)和(24),可得

$$\frac{\beta_2}{\beta_2 - \beta_1} \dot{U} = -(\ell_1 U + \ell_2 U^{\frac{\beta_2 \alpha_1 - \beta_1 \alpha_2}{\beta_2 \alpha_2 - \beta_1 \alpha_2}} + \ell_3). \quad (25)$$

由式(25)可知,到达固定时间滑模面后,跟踪误差 ∂_1 、 ∂_2 将在固定时间内快速收敛到零并不受系统初始状态影响,收敛时间上界为

$$\begin{aligned} \lim_{U \rightarrow \infty} T(U) &= \\ \lim_{U \rightarrow \infty} \int_0^U \frac{\beta_2}{\beta_2 - \beta_1} \left(\frac{1}{\ell_1 U + \ell_2 U^{\frac{\beta_2 \alpha_1 - \beta_1 \alpha_2}{\beta_2 \alpha_2 - \beta_1 \alpha_2}} + \ell_3} \right) dU &< \\ \frac{\beta_2}{\beta_2 - \beta_1} \int_0^1 \frac{1}{\ell_3} dU + & \\ \frac{\beta_2}{\beta_2 - \beta_1} \int_1^\infty \frac{1}{\ell_1 U + \ell_2 U^{\frac{\beta_2 \alpha_1 - \beta_1 \alpha_2}{\beta_2 \alpha_2 - \beta_1 \alpha_2}}} dU = & \\ \frac{\beta_2}{\ell_3 (\beta_2 - \beta_1)} + \frac{\alpha_2}{\ell_1 (\alpha_1 - \alpha_2)} \ln \left(\frac{\ell_1 + \ell_2}{\ell_2} \right). & \quad (26) \end{aligned}$$

故当到达固定时间滑模面后,该系统由任意初始状态到达平衡点的收敛时间上界为

$$T = \frac{\beta_2}{\ell_3 (\beta_2 - \beta_1)} + \frac{\alpha_2}{\ell_1 (\alpha_1 - \alpha_2)} \ln \left(\frac{\ell_1 + \ell_2}{\ell_2} \right). \quad (27)$$

综上所述,所设计的FTSM-TC策略在到达阶段和滑动阶段都能在固定时间内保证领航USV精确跟踪期望轨迹,即 $\eta = \eta_d$ 和 $\dot{\eta} = \dot{\eta}_d$. \square

2.2 编队控制器设计与分析

为了方便编队控制器设计,跟随USV运动学和动力学模型如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_{i,1} = x_{i,2}, \\ \dot{x}_{i,2} = M^{-1}(x_{i,1})R(x_{i,1})\tau_i + L'_i. \end{cases} \quad (28)$$

其中: $i = 1, 2$ 为跟随无人艇1和跟随无人艇2; L'_i 为编队控制子系统集总不确定项,不仅包含内部模型不确定项 $C(x_{i,1}, x_{i,2})x_{i,2}$ 和 $D(x_{i,1}, x_{i,2})x_{i,2}$, 也包括外界未知干扰 δ , 即 $L'_i = M^{-1}[\delta(t) - C(x_{i,1}, x_{i,2})x_{i,2} - D(x_{i,1}, x_{i,2})x_{i,2}]$.

定义跟随USV与领航USV之间的跟踪误差为

$$\begin{cases} \partial_{i,1} = x_{i,1} - \eta, \\ \partial_{i,2} = x_{i,2} - \dot{\eta}. \end{cases} \quad (29)$$

求导得到

$$\begin{cases} \dot{\partial}_{i,1} = \partial_{i,2}, \\ \dot{\partial}_{i,2} = M^{-1}(x_{i,1})R(x_{i,1})\tau_i + L'_i - \ddot{\eta}. \end{cases} \quad (30)$$

假设2 在编队控制子系统中,假设系统中存在集总不确定项 L'_i , 满足连续可微且有界,即 $\|L'_i\| \leq Z'_L$, 其中 Z'_L 为正常数.

为了实现对集总不确定项进行辨识估计,引入如下辅助变量:

$$\phi = \nu_i - \sigma. \quad (31)$$

其中

$$\begin{aligned} \dot{\sigma} = M^{-1} \{ & \kappa_1 \phi + \kappa_2 \text{sign}(\phi) + \kappa_3 \text{sig}^a(\phi) + \\ & \kappa_4 \text{sig}^b(\phi) - [C(\nu_i)\nu_i + D(\nu_i)\nu_i - \tau_i] \}, \end{aligned} \quad (32)$$

$\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3, \kappa_4$ 为扰动观测器参数, $\kappa_2 \leq Z'_L, 0 < a < 1, b > 1$.

设计固定时间扰动观测器(FTDO)为

$$\hat{L}'_i = \kappa_1 \phi + \kappa_2 \text{sign}(\phi) + \kappa_3 \text{sig}^a(\phi) + \kappa_4 \text{sig}^b(\phi). \quad (33)$$

在假设2的情况下,为证明所设计的FTDO为固定时间稳定,选取如下Lyapunov函数:

$$V_r = \frac{1}{2} \phi^T M \phi. \quad (34)$$

对式(34)求导得到

$$\begin{aligned} \dot{V}_r = \phi^T M \dot{\phi} = \phi^T (M \dot{\nu} - M \dot{\sigma}) = & \\ \phi^T (L_i - \kappa_1 \phi - \kappa_2 \text{sign}(\phi) - & \\ \kappa_3 \text{sig}^a(\phi) - \kappa_4 \text{sig}^b(\phi)) = & \\ \phi^T L_i - \kappa_1 \|\phi\|^2 - \kappa_2 \|\phi\| - & \\ \kappa_3 \text{sig}^{a+1}(\phi) - \kappa_4 \text{sig}^{b+1}(\phi) \leq & \\ (Z_L \|\phi\| - \kappa_2 \|\phi\|) - \kappa_1 \|\phi\|^2 - & \\ \kappa_3 \text{sig}^{a+1}(\phi) - \kappa_4 \text{sig}^{b+1}(\phi) \leq & \\ -\kappa_1 \|\phi\|^2 - \kappa_3 \text{sig}^{a+1}(\phi) - \kappa_4 \text{sig}^{b+1}(\phi) \leq & \\ -\kappa_3 \text{sig}^{\frac{a+1}{2}}(\|\phi\|) - \kappa_4 \text{sig}^{\frac{b+1}{2}}(\|\phi\|) \leq & \\ -\kappa_3 \text{sig}^{\frac{a+1}{2}} V_r - \kappa_4 \text{sig}^{\frac{b+1}{2}} V_r. & \quad (35) \end{aligned}$$

其中: $0 < \frac{a+1}{2} < 1, \frac{b+1}{2} > 1$. 由引理2和引理3可知,设计的固定时间扰动观测器为全局固定时间稳定.

考虑式(17)设计的FTSM,有

$$\varepsilon_i = \partial_{i,2} + \ell_1 \partial_{i,1} + \ell_2 \partial_{i,1}^{\alpha_1/\alpha_2} + \ell_3 \partial_{i,1}^{\beta_1/\beta_2}. \quad (36)$$

其中: ℓ_1, ℓ_2, ℓ_3 为正实数, $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ 为正奇数, $\alpha_1 > \alpha_2, \beta_1 < \beta_2$. 求导得到

$$\dot{\varepsilon}_i = \dot{\partial}_{i,2} + \ell_1 \dot{\partial}_{i,1} + \ell_2 \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \partial_{i,1}^{\frac{\alpha_1}{\alpha_2} - 1} + \ell_3 \frac{\beta_1}{\beta_2} \partial_{i,1}^{\frac{\beta_1}{\beta_2} - 1}. \quad (37)$$

设计基于固定时间扰动观测器的编队控制策略 (FTDO-FT) 为

$$\begin{aligned} \tau_i = & -MR^{-1}\left(\hat{L}'_i - \ddot{\eta} + \ell_1 \partial_{i,2} + \ell_2 \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \partial_{i,2}^{\frac{\alpha_1}{\alpha_2}-1} + \right. \\ & \left. \ell_3 \frac{\beta_1}{\beta_2} \partial_{i,2}^{\frac{\beta_1}{\beta_2}-1} + \lambda_{i,0} + \lambda_{i,1} \varepsilon^{2-m/n} + \lambda_{i,2} \varepsilon^{m/n}\right). \end{aligned} \quad (38)$$

其中: $\lambda_{i,0}, \lambda_{i,1}, \lambda_{i,2} > 0; i = 1, 2$ 表示跟随USV1和跟随USV2.

由此得到如下关键定理.

定理2 在编队系统存在集总不确定项时,所设计的FTDO-FT策略能在固定时间内对集总不确定项进行精准地辨识,确保跟随USV快速跟踪领航USV轨迹,并保持期望的编队队形.

证明 到达阶段. 跟踪误差 $\partial_{i,1}, \partial_{i,2}$ 能在固定时间内到达滑模面. 选择如下Lyapunov函数:

$$V_i = \frac{1}{2} \varepsilon_i^T \varepsilon_i. \quad (39)$$

求导得到

$$\begin{aligned} \dot{V}_i = \varepsilon_i^T \dot{\varepsilon}_i = & \varepsilon_i^T \left[\dot{\partial}_{i,2} + \ell_1 \partial_{i,2} + \ell_2 \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \partial_{i,2}^{\frac{\alpha_1}{\alpha_2}-1} + \ell_3 \frac{\beta_1}{\beta_2} \partial_{i,2}^{\frac{\beta_1}{\beta_2}-1} \right] = \\ & \varepsilon_i^T \left[M^{-1}(x_{i,1})R(x_{i,1})\tau_i + L'_i - \ddot{\eta} + \right. \\ & \left. \ell_1 \partial_{i,2} + \ell_2 \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \partial_{i,2}^{\frac{\alpha_1}{\alpha_2}-1} + \ell_3 \frac{\beta_1}{\beta_2} \partial_{i,2}^{\frac{\beta_1}{\beta_2}-1} \right] = \\ & -\varepsilon_i^T [(L'_i - \hat{L}'_i) + \lambda_{i,0} + \lambda_{i,1} \varepsilon_i^{2-p/q} + \lambda_{i,2} \varepsilon_i^{p/q}] = \\ & -\lambda_{i,0} \varepsilon_i^2 - \lambda_{i,1} 2^{\frac{3q-p}{2q}} \left(\frac{1}{2} \varepsilon_i^2\right)^{\frac{3q-p}{2q}} - \\ & \lambda_{i,2} 2^{\frac{q+p}{2q}} \left(\frac{1}{2} \varepsilon_i^2\right)^{\frac{q+p}{2q}} \leq \\ & -\lambda_{i,1} 2^{\frac{3q-p}{2q}} V^{2-\frac{p+q}{2q}} - \lambda_{i,2} 2^{\frac{p+q}{2q}} V^{\frac{p+q}{2q}} \leq \\ & -\mathfrak{S}_{i,1} V^{2-\omega_1/\omega_2} - \mathfrak{S}_{i,2} V^{\omega_1/\omega_2}. \end{aligned} \quad (40)$$

其中: $\mathfrak{S}_{i,1} = \lambda_{i,1} 2^{\frac{3q-p}{2q}} > 0, \mathfrak{S}_{i,2} = \lambda_{i,2} 2^{\frac{p+q}{2q}} > 0; \omega_1 = p + q, \omega_2 = 2q$, 且 $p < q$. 故 $2 - \omega_1/\omega_2 > 1, 0 < \omega_1/\omega_2 < 1$.

根据引理3可得,所设计的编队控制策略能够使跟随USV在固定时间内跟踪领航USV轨迹,得到最大收敛时间上界为

$$T_{i,\max} = \frac{\mathfrak{S}_{i,1} + \mathfrak{S}_{i,2}}{\mathfrak{S}_{i,1} \mathfrak{S}_{i,2} (\omega_1/\omega_2 - 1)}. \quad (41)$$

到达滑动阶段后, $\varepsilon_i = \dot{\varepsilon}_i = 0$. 结合式(36)可得

$$\partial_{i,2} = \dot{\partial}_{i,1} = -(\ell_1 \partial_{i,1} + \ell_2 \partial_{i,1}^{\alpha_1/\alpha_2} + \ell_3 \partial_{i,1}^{\beta_1/\beta_2}). \quad (42)$$

由式(23)~(27)可知,到达固定时间滑模面后,跟踪误差 $\partial_{i,1}, \partial_{i,2}$ 将在固定时间内快速收敛到零,且收

敛时间上界为

$$T' = \frac{\beta_2}{\ell_3(\beta_2 - \beta_1)} + \frac{\alpha_2}{\ell_1(\alpha_1 - \alpha_2)} \ln\left(\frac{\ell_1 + \ell_2}{\ell_2}\right). \quad (43)$$

综上所述,所设计的FTDO-FC策略在到达阶段和滑动阶段都能在固定时间内保证跟随USV快速跟踪领航USV轨迹,并保持精确的编队队形. □

3 数值仿真研究

为了验证所提出无人艇跟踪控制策略和编队控制策略的有效性,选取以挪威科技大学研制的模型艇Cybership II USV进行仿真实验研究,模型质量 $m = 23.8 \text{ kg}$, 长度 $L_i = 1.225 \text{ m}$, 宽度 $B_i = 0.29 \text{ m}$, 重心在附体坐标系 x 轴上距离原点的距离 $x_g = 0.046 \text{ m}$, 惯性力矩 $I_z = 1.76 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$. 其相关模型参数如表2所示.

表2 Cybership II 的海试测量参数

参数	取值	参数	取值
Y_v	-0.8612	$Y_{\dot{v}}$	-10.0
$Y_{ v v}$	-36.2823	Y_r	0.1079
X_u	-0.7225	N_v	0.1052
$X_{ u u}$	-1.3274	$N_{ v v}$	5.0437
X_{uuu}	-5.8664	$X_{\dot{u}}$	-2.0
$N_{\dot{v}}, Y_{\dot{r}}$	0.0	$N_{\dot{r}}$	-1.0

编队控制系统中的期望轨迹初始状态如下:

$$\begin{aligned} \eta_d(0) &= [-0.5, 0, \pi/3]^T, \\ \nu_d(0) &= [2, 0, 0]^T; \end{aligned}$$

领航USV和两艘跟随USV的初始状态如下:

$$\begin{aligned} \eta_0(0) &= [-1, -3, 0.3]^T, \\ \eta_1(0) &= [-2, -4, 0.2]^T, \\ \eta_2(0) &= [-5, 3, \pi/3]^T, \\ \nu_0(0) &= \nu_1(0) = \nu_2(0) = [0, 0, 0]^T. \end{aligned}$$

所设计的FTSM、FTDO和控制器参数如表3所示.

表3 编队系统控制器参数

参数	取值	参数	取值
ℓ_1	3	ℓ_2	2
ℓ_3	2	α_1	7
α_2	5	β_1	5
β_2	9	m	5
n	9	$\lambda_{0,0}, \lambda_{i,0}$	0.3
$\lambda_{0,1}, \lambda_{i,1}$	1.2	$\lambda_{0,2}, \lambda_{i,2}$	0.8
a	0.65	b	1.2
κ_1	diag[3 3 3]	κ_2	diag[8 8 8]
κ_3	diag[4 4 4]	κ_4	diag[4 4 4]

跟随USV1和跟随USV2扰动项定义如下:

$$d_1 = \begin{bmatrix} 8 \cos(0.1\pi t - \pi/4) \\ 6 \cos(0.2\pi t + \pi/3) \\ 2 \cos(0.1\pi t + \pi/6) \end{bmatrix}, \quad (44)$$

$$d_2 = \begin{bmatrix} 6 \cos(0.2\pi t) \\ 4 \cos(0.15\pi t - \pi/4) \\ 3 \cos(0.1\pi t + \pi/3) \end{bmatrix}. \quad (45)$$

为验证所提出FTSM-TC策略的有效性,将其与ISM-TC策略进行对比,仿真结果如图2~图4所示。可以看出,固定时间跟踪控制策略能使领航USV快速精确地跟踪期望轨迹。图5表示在无集总扰动假设情况下,领航USV跟踪期望轨迹的控制输入误差。可以看出,领航USV的控制输入无明显波动,进一步表明所设计的跟踪控制策略的有效性。图6和图7仿真结果表明,存在集总扰动的情况下,3艘USV保持精准稳定的三角形期望直线运动轨迹并能进行平滑的转向运动。图8表明5艘无人艇在存在复杂扰动的情况下也能保持期望的编队队形运动,所设计的FTDO-FC编队控制策略能精准实现3艘以上USV复杂图形编队控制,确保USV编队控制系统的整体高效性。

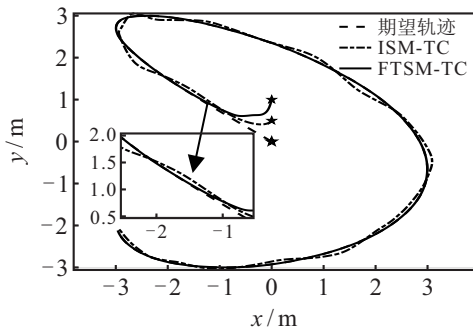


图2 跟踪控制对比效果

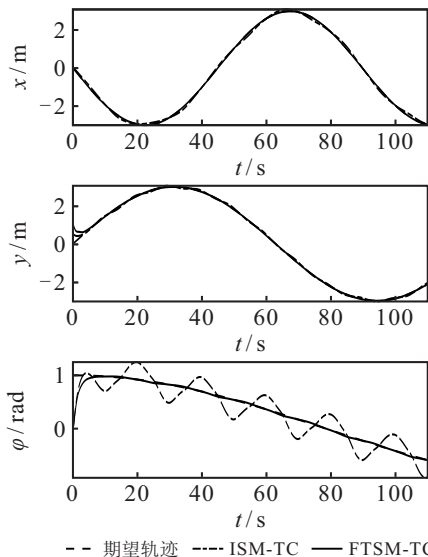


图3 位置跟踪误差曲线

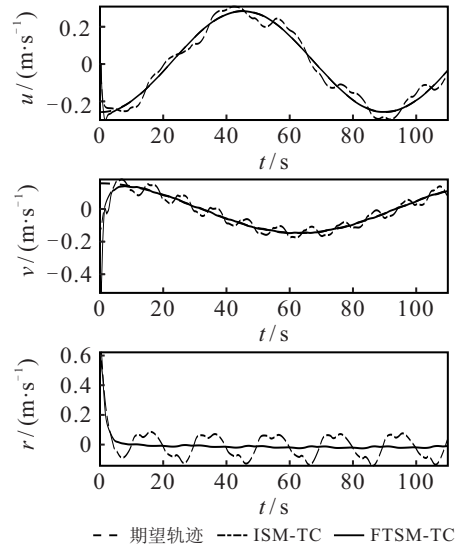


图4 速度跟踪误差曲线

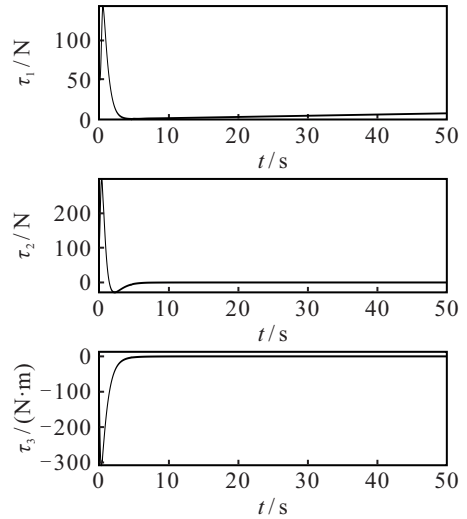


图5 领航USV控制输入误差曲线

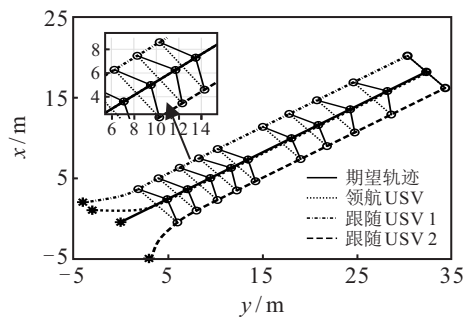


图6 3艘无人艇编队直线效果

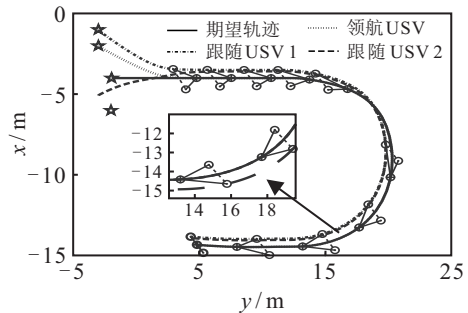


图7 3艘无人艇编队转向效果

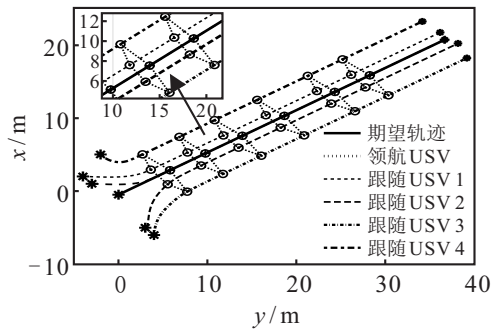


图8 5艘无人艇编队直线效果

图9和图10表示在保持编队运动过程中,领航USV与跟随USV之间的位置和速度跟踪误差动态.图11~图13为所设计的固定时间扰动观测器观测效果和扰动处理后的跟随USV控制输入曲线,表明所设计的FTDO能快速精确地对集总不确定项进行辨识和处理,大大提升编队控制系统的稳定性.

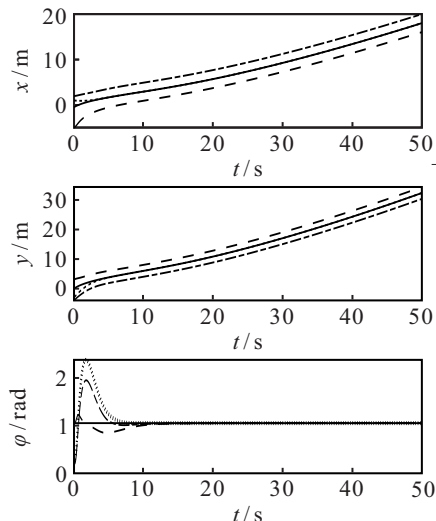


图9 编队控制位置跟踪误差

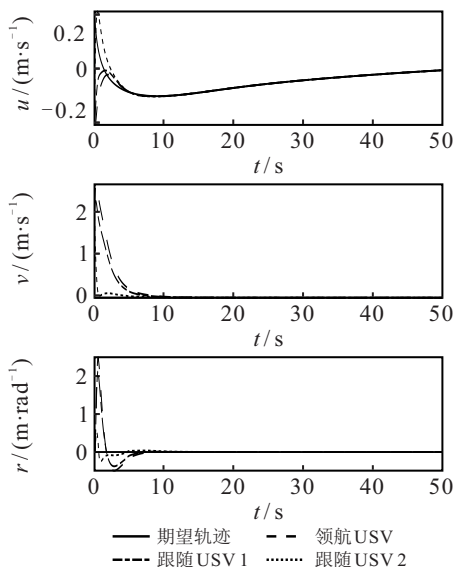


图10 编队控制速度跟踪误差

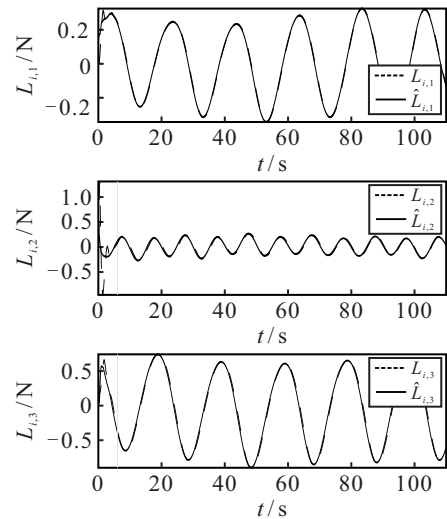


图11 FTDO观测效果

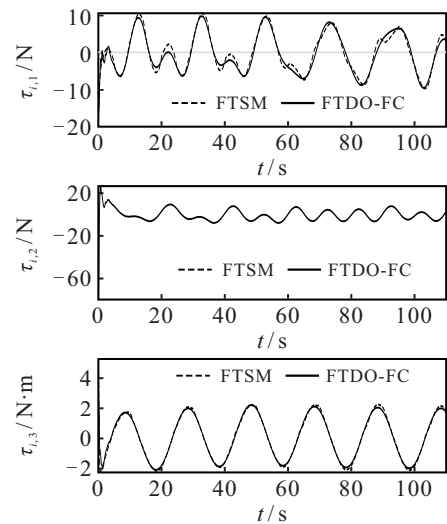


图12 跟随USV控制输入曲线

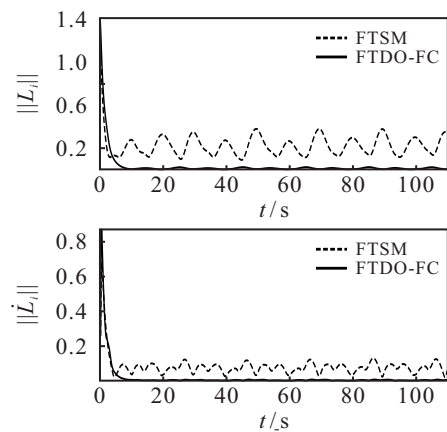


图13 FTDO观测性能

4 结论

本文针对多无人艇系统存在由内部未知参数和外部复杂扰动组成的集总不确定项干扰情况下的精确编队控制问题,结合固定时间控制、滑模控制和扰动观测器提出了一种复杂扰动下的领航-跟随编队控制策略,经过严谨的理论证明和仿真实验表明其有

效性,得到如下结论:1)所提出的FTSM-TC策略,使领航USV能够在固定时间内快速稳定地跟踪期望轨迹,通过与ISM-TC策略进行比较进一步表明其有效性;2)所设计的FTDO能在固定时间内有效地对编队控制系统中的集总不确定项进行辨识处理,大大提升编队系统的稳定性;3)所提出的FTDO-FC策略能实现USV存在集总不确定项的情况下保持快速精准的期望编队队形.所设计的控制策略与传统USV编队控制策略相比,具有更强的稳定性和抗干扰能力,且系统收敛时间不依赖初始状态.

参考文献(References)

- [1] 郭晨,汪洋,孙富春,等.欠驱动水面船舶运动控制研究综述[J].控制与决策,2009,24(3):321-329.
(Guo C, Wang Y, Sun F C, et al. Survey for motion control of underactuated surface vessels[J]. Control and Decision, 2009, 24(3): 321-329.)
- [2] 张卫东,刘笑成,韩鹏.水上无人系统研究进展及其面临的挑战[J].自动化学报,2020,46(5):847-857.
(Zhang W D, Liu X C, Han P. Progress and challenges of overwater unmanned systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2020, 46(5): 847-857.)
- [3] 吴宇,苏析超,崔佳鹏,等.USV&AUV水下目标协同搜索与打击航迹规划[J].控制与决策,2021,36(4):825-834.
(Wu Y, Su X C, Cui J P, et al. Coordinated path planning of USV & AUV for an underwater target[J]. Control and Decision, 2021, 36(4): 825-834.)
- [4] Jin X Z, Er M J. Dynamic collision avoidance scheme for unmanned surface vehicles under complex shallow sea environments[J]. Ocean Engineering, 2020, 218: 108102.
- [5] Guo G, Gao Z Y, Dong K. Prescribed-time formation control of surface vessels with asymmetric constraints on LOS range and bearing angles[J]. Nonlinear Dynamics, 2021, 104(4): 3701-3712.
- [6] Xiong T Y, Gu Z. Observer-based adaptive fixed-time formation control for multi-agent systems with unknown uncertainties[J]. Neurocomputing, 2021, 423: 506-517.
- [7] Polyakov A. Nonlinear feedback design for fixed-time stabilization of linear control systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2012, 57(8): 2106-2110.
- [8] Zuo Z Y, Tie L. Distributed robust finite-time nonlinear consensus protocols for multi-agent systems[J]. International Journal of Systems Science, 2016, 47(6): 1366-1375.
- [9] Zuo Z Y, Tian B L, Defoort M, et al. Fixed-time consensus tracking for multiagent systems with high-order integrator dynamics[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2018, 63(2): 563-570.
- [10] Huang C F, Zhang X K, Zhang G Q. Improved decentralized finite-time formation control of underactuated USVs via a novel disturbance observer[J]. Ocean Engineering, 2019, 174: 117-124.
- [11] Liang X, Qu X R, Hou Y H, et al. Finite-time unknown observer based coordinated path-following control of unmanned underwater vehicles[J]. Journal of the Franklin Institute, 2021, 358(5): 2703-2721.
- [12] Fu M Y, Yu L L. Finite-time extended state observer-based distributed formation control for marine surface vehicles with input saturation and disturbances[J]. Ocean Engineering, 2018, 159: 219-227.
- [13] Guo G, Zhang P F. Asymptotic stabilization of USVs with actuator dead-zones and yaw constraints based on fixed-time disturbance observer[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(1): 302-316.
- [14] Wu Y M, Wang Z S, Huang Z J. Distributed fault detection for nonlinear multi-agent systems under fixed-time observer[J]. Journal of the Franklin Institute, 2019, 356(13): 7515-7532.
- [15] Wang N, He H K. Dynamics-level finite-time fuzzy monocular visual servo of an unmanned surface vehicle[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(11): 9648-9658.
- [16] Zuo Z Y. Non-singular fixed-time terminal sliding mode control of non-linear systems[J]. IET Control Theory & Applications, 2015, 9(4): 545-552.
- [17] 高振宇,郭戈.基于扰动观测器的AUVs固定时间编队控制[J].自动化学报,2019,45(6):1094-1102.
(Gao Z Y, Guo G. Fixed-time formation control of AUVs based on a disturbance observer[J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(6): 1094-1102.)

作者简介

余明裕(1962—),男,教授,博士生导师,从事人工智能、智能控制等研究, E-mail: mjer@dlnu.edu.cn;

李仲昆(1997—),男,硕士生,从事多智能体协同控制、无人艇编队的研究, E-mail: 18342202920@163.com;

王泊桦(1997—),男,硕士生,从事智能控制、电机控制的研究, E-mail: bohuawang@foxmail.com.

(责任编辑:郑晓蕾)