

控制与决策

Control and Decision

带有执行器故障的多水面船固定时间分布式滑模协同控制

夏国清, 任哲达, 孙显信, 夏天

引用本文:

夏国清, 任哲达, 孙显信, 夏天. 带有执行器故障的多水面船固定时间分布式滑模协同控制[J]. *控制与决策*, 2023, 38(5): 1239–1248.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.0747>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

欠驱动无人船非奇异固定时间鲁棒包容控制

Nonsingular fixed-time robust containment control for underactuated unmanned surface vehicle
控制与决策. 2023, 38(5): 1286–1294 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.1038>

基于固定时间扰动观测器的水面无人艇精确编队控制

Fixed-time disturbance observer-based accurate formation control of unmanned surface vehicles
控制与决策. 2023, 38(2): 379–387 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.1208>

基于扩张状态观测器的二质量系统非奇异快速终端滑模控制

Nonsingular fast terminal sliding mode control based on extended state observer for two mass systems
控制与决策. 2023, 38(3): 850–856 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.1076>

基于未知系统动态估计器的Buck型变换器快速固定时间控制

Unknown system dynamic estimator-based fast fixed-time control of Buck converters
控制与决策. 2022, 37(3): 746–752 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1087>

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>

带有执行器故障的多水面船固定时间分布式滑模协同控制

夏国清^{1†}, 任哲达¹, 孙显信¹, 夏 天²

(1. 哈尔滨工程大学 智能科学与工程学院, 哈尔滨 150001; 2. 上海船舶工艺研究所, 上海 200032)

摘要: 针对未知环境干扰、未知执行器故障等多水面船协同控制问题, 提出一种带有执行器故障的多水面船固定时间分布式滑模协同控制方法, 可保证协同控制系统的全局固定时间的稳定性. 首先, 设计一种固定时间干扰观测器, 用于估计集总扰动 (包括未知环境扰动和未知执行器故障); 其次, 引入固定时间非奇异快速终端滑模面, 可有效地消除系统的奇异性, 改善系统的抖振; 然后, 提出一种基于固定时间非奇异快速终端滑模面和固定时间干扰观测器的分布式容错控制器, 使得收敛时间上界与系统初始状态无关; 最后, 通过仿真实验验证所提出控制律的有效性.

关键词: 多水面船系统; 固定时间干扰观测器; 固定时间非奇异快速终端滑模控制器; 执行器故障; 未知环境干扰

中图分类号: TP273 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.0747

引用格式: 夏国清, 任哲达, 孙显信, 等. 带有执行器故障的多水面船固定时间分布式滑模协同控制[J]. 控制与决策, 2023, 38(5): 1239-1248.

Fixed-time distributed sliding mode cooperative control for multiple surface vessels with actuator faults

XIA Guo-qing^{1†}, REN Zhe-da¹, SUN Xian-xin¹, XIA Tian²

(1. College of Intelligent Systems Science and Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. Shanghai Shipbuilding Technology Research Institute, Shanghai 200032, China)

Abstract: Aiming at the problems of cooperative control for multiple surface vessels, such as unknown environmental disturbances and actuator faults, a fixed-time distributed sliding mode cooperative control method for multiple surface vessels with actuator faults is proposed. The scheme ensures the global fixed time stability of the cooperative control system. Firstly, a fixed-time disturbance observer is designed to provide the estimations of lumped disturbances including unknown environmental disturbances and actuator faults. Secondly, fixed-time non-singular fast terminal sliding mode manifold is introduced to effectively eliminate singularity and improve chattering of system. Thirdly, a distributed fault tolerant controller based on the fixed-time non-singular fast terminal sliding mode manifold and the fixed-time disturbance observer is proposed to make the upper bounds of convergence time is independent of the initial state. Finally, simulations are given to demonstrate the proposed control law.

Keywords: multiple surface vessels; fixed-time disturbance observer; fixed-time non-singular fast terminal sliding mode control; actuator faults; unknown environmental disturbances

0 引言

随着海洋工程作业种类和数目不断增多, 水面船需要完成更复杂或者大型的海洋作业任务^[1-2]. 一些复杂的海洋任务, 如救援行动, 单艘水面船的作业能力有限, 需要较长的时间才能完成. 如果采用多水面船协同作业的方式, 则可从多方位、多角度快速有效地执行任务, 从而极大地减少损失^[3].

由于一些紧急任务需要快速、精确地完成, 多水面船系统的快速收敛特性被认为是衡量其动态性能的一个重要指标. 大多数协同控制系统是渐近稳定的, 这意味着只有当时间趋于无穷时, 系统才能收敛^[4]. 为了提高被控系统的收敛性能, 有限时间控制方法应运而生. 该方法具有收敛速度快、精度高, 对模型参数不确定性和外部扰动具有较好的鲁棒性等优

收稿日期: 2022-05-03; 录用日期: 2022-08-09.

基金项目: 第七代超深水钻井装置创新项目.

责任编辑: 杨涛.

[†]通讯作者. E-mail: xiaguqing@hrbeu.edu.cn.

点,优于渐近稳定控制方法.文献[5]将有限时间控制方法与自适应滑模控制相结合应用于船舶动力定位系统,实现了快速收敛.文献[6-7]将有限时间理论应用于二阶多智能体系统来解决轨迹跟踪问题,然而,这种控制策略的收敛时间上界取决于系统的初始状态,即当初始状态不可获得时,收敛时间的上界无法提前预知.为此,文献[8]首次提出了固定时间控制方法,用来克服有限时间控制方法的弊端,即收敛时间上界独立于系统的初始状态.

多水面船协同控制系统中存在的模型不确定性和未知环境干扰影响了控制系统的性能.在非线性控制中,滑模控制方法对不确定性和外部环境扰动具有良好的鲁棒性^[9-12].文献[13]提出了一种终端滑模控制方法,以保证滑模控制的强鲁棒性和强抗干扰能力.文献[14]提出了一种快速终端滑模控制方法,实现了滑模面的快速收敛.然而,将上述方法推广到二阶系统时,在设计中会遇到奇异性问题.因此,文献[15]提出了非奇异终端滑模控制方法来解决奇异性问题.此外,文献[16]提出了一种非奇异快速终端滑模控制方法,既可以避免奇异问题,又可以实现快速收敛.

在一些方法中,利用滑模控制的鲁棒性来处理未知环境干扰,这意味着牺牲了其原本的控制性能.因此,近年来为了提高滑模控制的性能和自适应能力,许多研究人员使用各种观测器来处理环境干扰,如扩展状态观测器^[17]、神经自适应观测器^[3]和干扰观测器^[18].然而,上述观测器都是渐近稳定的,只能保证估计误差收敛到有界区域,这意味着在有限时间内不能精确地估计扰动^[19].估计的暂态时间越长,意味着收敛速度越慢,估计精度也就越差,并且估计精度还影响着控制精度.为了在有限时间内精确地估计干扰,文献[20]提出了有限时间干扰观测器.但是,有限时间干扰观测器的估计时间取决于初始估计误差,这意味着初始估计的误差越大,估计时间越长.为解决上述问题,文献[21]提出了固定时间干扰观测器.对于固定时间干扰观测器,估计时间的上界只与设计参数有关,不再与初始估计误差有关,这意味着固定时间干扰观测器可以实现快速收敛,并有很大的灵活性来调整估计时间.

在实际工程应用中,为了保证多水面船协同控制的性能和可靠性,考虑执行器故障是必要的.执行器故障是多水面船系统中最典型的控制输入约束的情况之一,这可能会降低控制性能^[22].近年来,许多学者开发了容错控制策略^[23-25].一般来说,容错控制方

法可分为两类:被动容错控制和主动容错控制^[16].被动容错控制方案利用控制器中的鲁棒项来处理执行器故障^[26],这种方法通常需要预先准确了解故障信息.相反,对于主动容错控制方案,无需提前预知故障信息,只需设计故障诊断观测器^[27]即可在线识别故障信息,该方法在一定程度上具有较好的故障检测和补偿性能.文献[28]设计了一种自适应容错控制方法,并将所提出的固定时间扩展状态观测器用于估计未知速度、集总扰动和执行器故障信息.该方案取得了良好的控制效果.

综上,本文设计一种新型的带有执行器故障的固定时间分布式滑模协同控制方案.首先,设计固定时间干扰观测器用于估计未知环境干扰和执行器故障,估计误差在固定时间内收敛;其次,引入的固定时间非奇异快速终端滑模控制方案不仅可以消除奇异性,而且能够实现快速收敛;最后,设计固定时间容错控制器,避免了系统因执行器故障所产生的影响,并确保系统在固定时间内收敛.所提出控制方案的主要贡献如下:

1) 与文献[18]和文献[20]设计的观测器相比,所提出的固定时间干扰观测器估计误差的收敛速度更快,收敛时间的上界与初始状态无关.此外,与文献[21]相比,该方案考虑了未知执行器故障.

2) 本文所提出的固定时间非奇异快速终端滑模控制方案首次被应用到分布式协同控制中,与文献[5]所提出的有限时间非奇异终端滑模控制方案相比,本文方案的收敛速度更快,跟踪误差可以在固定时间内收敛,并且收敛时间上界与初始状态无关.

1 预备知识与问题描述

1.1 注释

$\mathbf{R}^{n \times n}$ 是 $n \times n$ 维欧几里德空间, $|\cdot|$ 代表绝对值, $\|\cdot\|$ 表示欧几里德范数. $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \in \mathbf{R}^n$, $\text{sig}^\alpha(x) = [\text{sig}^\alpha(x_1), \text{sig}^\alpha(x_2), \dots, \text{sig}^\alpha(x_n)]^T$. 其中: $\text{sig}^\alpha(x_i) = |x_i|^\alpha \text{sign}(x_i)$ ($i = 1, 2, \dots, n$), $x_i \in \mathbf{R}$, $\alpha \in (0, 1)$. $\text{sign}(\cdot)$ 可表示为

$$\text{sign}(x) = \begin{cases} -1, & x < 0; \\ 0, & x = 0; \\ 1, & x > 0. \end{cases} \quad (1)$$

1.2 代数图论

图论用于描述 n 个水面船的通信拓扑. 一个有序二元数组 $\mathcal{G} = (\mathcal{V}_{\mathcal{G}}, \mathcal{E})$ 被用来抽象描述一个通信网络, 这个二元组 \mathcal{G} 可以成为一个图. 其中: 集合 $\mathcal{V}_{\mathcal{G}} = \{1, 2, \dots, n\}$ 表示这组节点的集合, 集合 $\mathcal{E} =$

$\{(i, j) \in \mathcal{V}_G \times \mathcal{V}_G\}$. $(i, j) \in \mathcal{E}$ 表示链接的集合, i 船可以获得 j 船的信息, j 船是 i 船的邻船. 集合 $\mathcal{N}_i = \{j \in \mathcal{V}_G, (i, j) \in \mathcal{E}\}$ 表示 i 船的所有邻船的集合. 定义一个邻接矩阵 $\mathcal{A} = [a_{ij}] \in \mathbf{R}^{n \times n}$, 如果 $(i, j) \in \mathcal{E}$, 则 $a_{ij} = 1$; 否则 $a_{ij} = 0$. 拉普拉斯矩阵 $\mathcal{L} = [l_{ij}] \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 是对一个图的矩阵描述, 被定义为 $\mathcal{L} = \mathcal{D} - \mathcal{A}$. 其中: $\mathcal{D} = \text{diag}\{d_i\} \in \mathbf{R}^{n \times n}$, $d_i = \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij}$. 一个对角阵 $\mathcal{A}_0 = \text{diag}\{a_{i0}\}$ 被定义为领航船的邻接矩阵. 如果 i 船能够获得虚拟0船的参考信号, 则定义 $a_{i0} = 1$; 否则定义 $a_{i0} = 0$. 最后定义信息交换矩阵为 $\mathcal{H} = \mathcal{L} + \mathcal{A}_0$.

假设1 在图中至少存在一条从0船到其他船的有向路径.

1.3 定义与引理

考虑如下系统:

$$\dot{x} = f(x(t)), f(0) = 0, x(0) = 0. \quad (2)$$

其中: $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$, $f(\cdot)$ 是连续非线性函数.

定义1 对于系统(2), 如果它能满足以下条件, 则原点 $x = 0$ 称为固定时间平衡点^[29]:

- 1) 系统(2)是全局有限时间稳定的;
- 2) 存在一个固定时间函数 $T(x) \leq T_{\max}$, 其中 T_{\max} 是一个正常数.

引理1^[28] 考虑一个李雅普诺夫函数 $V(x)$, 如果它在原点的邻域 D 上满足 $\dot{V}(x) \leq -(\alpha V(x)^p + \beta V(x)^q)^k$, 则系统(2)在原点是固定时间稳定的, 这表明在固定时间内, $V(x)$ 在区域 D 中从任意初值收敛到 $V(x) = 0$, 收敛时间为

$$T \leq \frac{1}{\alpha^k(1-pk)} + \frac{1}{\beta^k(gk-1)}.$$

其中: α, β, p, g, k 是正常数, 并且 $pk < 1, gk > 1$.

引理2^[21] 如果 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\} \in \mathbf{R}, p > 0$, 则 $(|x_1| + |x_2| + \dots + |x_n|)^p \leq \max(n^{p-1}, 1)(|x_1|^p + |x_2|^p + \dots + |x_n|^p)$. 如果 $p = m/n \leq 1$, 其中 m, n 是奇数, 则 $|x_1^p - x_2^p| \leq 2^{1-p}|x_1 - x_2|^p$.

引理3^[21] 考虑一个动态系统为

$$\dot{y} = -l_1 \text{sig}^{m_1} y - l_2 \text{sig}^{m_2} y, y(0) = y_0. \quad (3)$$

其中: $0 < m_2 < 1, m_1 > 1, l_1 > 0, l_2 > 0$. 则系统(3)是固定时间稳定的, 收敛时间上界为

$$T \leq \frac{1}{l_1(m_1-1)} + \frac{1}{l_2(1-m_2)}. \quad (4)$$

1.4 系统模型与问题描述

考虑一个含有 n 艘水面船的网络. $\eta_i = [x_i, y_i, \psi_i]^T \in \mathbf{R}^3$ 表示第 i 艘水面船在大地坐标系 $X_E O_E Y_E$ 中的位姿向量, 如图1所示. $\nu_i = [u_i, v_i, r_i]^T \in \mathbf{R}^3$ 表

示第 i 艘水面船在船体坐标系 $X_B O_B Y_B$ 中的速度向量. 然后, 给出第 i 艘水面船三自由度水平运动的数学模型^[3]为

$$\dot{\eta}_i = R_i(\psi_i)\nu_i, \quad (5)$$

$$M_i \dot{\nu}_i = -D_i(\nu_i)\nu_i - C_i(\nu_i)\nu_i + \tau_i + \tau_{id}. \quad (6)$$

其中: $\tau_{id} = [\tau_{id1}, \tau_{id2}, \tau_{id3}]^T \in \mathbf{R}^3$ 表示风、浪、流作用于第 i 艘水面船上的干扰力与力矩组成的向量; $\tau_i = [\tau_{i1}, \tau_{i2}, \tau_{i3}]^T \in \mathbf{R}^3$ 表示第 i 艘水面船产生的控制力和力矩向量; $M_i \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ 为第 i 艘水面船的惯性矩阵; $D_i(\nu_i) \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ 是第 i 艘水面船的阻尼矩阵; $C_i(\nu_i) \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ 为第 i 艘水面船的水动力引起的科里奥利向心力矩; $R_i(\psi_i) \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ 表示两个坐标系之间的旋转矩阵, 其具体形式为

$$R_i(\psi_i) = \begin{bmatrix} \cos \psi_i & -\sin \psi_i & 0 \\ \sin \psi_i & \cos \psi_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

并具有以下性质^[30]:

$$\dot{R}_i(\psi_i) = R_i(\psi_i)S_i(r_i), \quad (8)$$

$$R_i^T(\psi_i)S_i(r_i)R_i(\psi_i) =$$

$$R_i(\psi_i)S_i(r_i)R_i^T(\psi_i) = S_i(r_i), \quad (9)$$

$$S_i(r_i) = \begin{bmatrix} 0 & -r_i & 0 \\ r_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$R_i^T(\psi_i)R_i(\psi_i) = I_3, \quad (11)$$

$$\|R_i(\psi_i)\| = 1. \quad (12)$$

为下文方便起见, 令 $R_i = R_i(\psi_i), S_i = S_i(r_i)$.

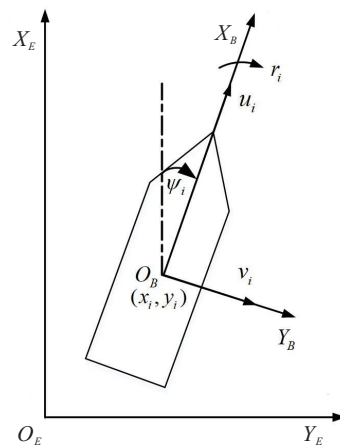


图1 大地坐标系和船体坐标系

根据文献[30]中对执行器故障的定义, 其转矩的数学模型为

$$\tau_i = \tau_{hi} + B_i(t - t_0)((E - I)\tau_{hi} + \bar{\tau}_i). \quad (13)$$

其中: $\tau_i = [\tau_{i1}, \tau_{i2}, \tau_{i3}]^T \in \mathbf{R}^3$ 表示第 i 艘水面船的

实际控制输入; $\tau_{hi} = [\tau_{hi1}, \tau_{hi2}, \tau_{hi3}]^T \in \mathbf{R}^3$ 表示第 i 艘水面船的期望控制输入; $\bar{\tau}_i = [\bar{\tau}_{i1}, \bar{\tau}_{i2}, \bar{\tau}_{i3}]^T \in \mathbf{R}^3$ 表示第 i 艘水面船的叠加故障输出转矩; $E_i = \text{diag}(e_{i1}, e_{i2}, e_{i3})$ 表示第 i 艘水面船的执行器的运行状况, $0 \leq e_{ii} \leq 1$; 矩阵 $B_i(t - t_0) = \text{diag}(b_{i1}(t - t_{01}), b_{i1}(t - t_{01}), b_{i1}(t - t_{01}))$ 为发生在 t_0 故障的时间配置函数 t_0 , 定义如下:

$$b_{im}(t - t_{0m}) = \begin{cases} 0, & t < t_{0m}; \\ 1 - e^{-a_{im}(t - t_{0m})}, & t \geq t_{0m}; \end{cases} \quad m = 1, 2, 3. \quad (14)$$

$a_{im} > 0$ 为未知故障演化速率, t_{0m} 为故障发生的时间. 如果 a_{im} 很小, 故障演化很慢, 则该故障被认为是初期故障; 相反, 如果 a_{im} 很大, 导致函数 $b_{im}(t - t_{0m})$ 近似为阶跃函数, 则称之为突发故障.

注1 执行机构的物理约束 τ_{hi} 和 $\bar{\tau}_i$ 是有界的, 执行器故障的输出转矩也是有界的.

相应地, 第 i 艘带有执行器故障的水面船的数学模型可表示为

$$\dot{\eta}_i = R_i(\psi_i)\nu_i, \quad (15)$$

$$M_i\dot{\nu}_i = -D_i(\nu_i)\nu_i - C_i(\nu_i)\nu_i + \tau_{hi} + \tau_{ilump}, \quad (16)$$

其中 $\tau_{ilump} = \tau_{id} + B_i(t - t_0)((E_i - I)\tau_{hi} + \bar{\tau}_i)$ 代表第 i 艘水面船的集总扰动.

为简化后续设计, 提出一种新的辅助速度矢量

$$w_i = R_i\nu_i, \quad (17)$$

其中 $w_i = [w_{i1}, w_{i2}, w_{i3}]^T \in \mathbf{R}^3$. 根据式(8)~(12), 第 i 艘水面船的数学模型(5)和(6)可重写为

$$\dot{\eta}_i = w_i, \quad (18)$$

$$\dot{w}_i = R_i M_i^{-1} \tau_{hi} + \Gamma_i + R_i M_i^{-1} \tau_{ilump}, \quad (19)$$

$$\dot{\eta}_d = w_d. \quad (20)$$

其中: $\Gamma_i = R_i S_i \nu_i - R_i M_i^{-1} C_i(\nu_i) \nu_i - R_i M_i^{-1} D_i(\nu_i) \nu_i$, $\eta_d = [x_d, y_d, \psi_d]^T$, $w_d = [w_{d1}, w_{d2}, w_{d3}]^T$ 是期望的辅助速度矢量.

假设2 期望参考信号 η_d 足够光滑, 并且 η_d 的一阶导数和二阶导数存在并有界.

假设3 未知环境扰动 τ_{id} 及其一阶导数 $\dot{\tau}_{id}$ 均有界. 联合注1所述, 存在未知正常数 $\bar{\tau}_{ilump}$ 和 ϖ_i , 使得 $\|\tau_{ilump}\| \leq \bar{\tau}_{ilump}$ 和 $\|\dot{\tau}_{ilump}\| \leq \varpi_i$.

假设4 第 i 艘水面船模型中的参数矩阵 M_i 、 $C_i(\nu_i)$ 、 $D_i(\nu_i)$ 是已知的.

假设5 多水面船之间的通信拓扑是有向的, 虚拟领航船到每个水面船至少有一条有向路径, 即保证矩阵 \mathcal{H} 是正定的.

控制目标: 针对每艘带有未知环境干扰和执行器故障的水面船, 设计一种固定时间分布滑模协同控制方案, 使其在固定时间内精确跟踪参考信号 η_d .

2 观测器设计

本节设计一个固定时间干扰观测器, 它可以估计集总扰动 τ_{ilump} , 估计误差能在固定时间内收敛. 固定时间干扰观测器设计如下:

$$M_i \dot{\hat{\nu}}_i = \tau_{hi} - C_i(\nu_i)\nu_i - D_i(\nu_i)\nu_i + \rho_i + \hat{\tau}_{ilump}, \quad (21)$$

其中 $\hat{\tau}_{ilump}$ 表示集总干扰 τ_{ilump} 的估计值. 为便于设计干扰更新律 $\hat{\tau}_{ilump}$ 和 ρ_i , 定义一个新的变量

$$\Xi_i = M_i \nu_i - M_i \hat{\nu}_i, \quad (22)$$

于是 ρ_i 和 $\hat{\tau}_{ilump}$ 的更新律^[21]可设计为

$$\rho_i = \kappa_{i1}(\text{sig}^{1/2}(\Xi_i) + \mu \text{sig}^{3/2}(\Xi_i)), \quad (23)$$

$$\hat{\tau}_{ilump} = \int_0^t \kappa_{i2} \left(2\mu \Xi_i + \frac{3}{2} \mu^2 \text{sig}^2(\Xi_i) + \text{sign}(\Xi_i) \right) dt. \quad (24)$$

定理1 在假设3下, 固定时间干扰观测器可以精确估计集总干扰, 并且估计误差在固定时间 T_1 内收敛. 同时, 值得注意的是, 参数 κ_{ipq} ($p = 1, 2; q = 1, 2, 3$) 应满足如下集合:

$$\begin{aligned} \bar{h}_i = & \left\{ (\kappa_{i1q}, \kappa_{i2q}) \in \mathbf{R}^2 \mid 0 < \kappa_{i1q} \leq 2\sqrt{\varpi_i}, \right. \\ & \left. \kappa_{i2q} > \frac{\kappa_{i1q}^2}{4} + \frac{4\varpi_i^2}{\kappa_{i1q}^2} \right\} \cup \\ & \left\{ (\kappa_{i1q}, \kappa_{i2q}) \in \mathbf{R}^2 \mid \kappa_{i1q} > 2\sqrt{\varpi_i}, \kappa_{i2q} > \varpi_i \right\}. \end{aligned} \quad (25)$$

证明 对式(22)求导, 得

$$\dot{\Xi}_i = M_i \dot{\nu}_i - M_i \dot{\hat{\nu}}_i = \tau_{ilump} - \rho_i - \hat{\tau}_{ilump}. \quad (26)$$

定义估计误差为 $Z_i = \tau_{ilump} - \hat{\tau}_{ilump}$, 则观测器的误差系统可以表示为

$$\begin{cases} \dot{\Xi}_i = -\kappa_{i1}(\text{sig}^{1/2}(\Xi_i) + \mu \text{sig}^{3/2}(\Xi_i)) + Z_i, \\ \dot{Z}_i = \dot{\tau}_{ilump} - \kappa_{i2} \left(2\mu \Xi_i + \frac{3}{2} \mu^2 \text{sig}^2(\Xi_i) + \text{sign}(\Xi_i) \right). \end{cases} \quad (27)$$

根据文献[31]对固定时间干扰观测器的证明过程, Ξ_i 和 Z_i 在固定时间 T_1 之后收敛到零. 因此, 未知环境干扰和执行器故障的估计误差可以在固定时间内收敛. \square

3 控制器设计

本节结合固定时间干扰观测器设计带有执行器故障的固定时间非奇异快速终端滑模控制器. 控制律设计过程分为以下几个步骤:

step 1: 根据多水面船之间的通信关系, 利用图论和相邻船的位置信息, 定义第 i 艘水面船的跟踪误差为

$$z_{i1} = \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij}(\eta_i - \eta_j - \vartheta_{ij}) + a_{i0}(\eta_i - \eta_d - \vartheta_i), \quad (28)$$

$$z_{i2} = \dot{z}_{i1} = a_{id}w_i - \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij}w_j - a_{i0}w_d. \quad (29)$$

其中: \mathcal{N}_i 、 a_{ij} 和 a_{i0} 的定义参考图论部分; ϑ_i 是一个常数向量, 表示第 i 艘水面船与参考点之间的期望相对位置; ϑ_{ij} 也是一个常数向量, 表示相对于相邻的第 j 艘水面船的期望位置, 并且 $a_{id} = a_{i0} + d_i$.

对式(29)求导, 得

$$\dot{z}_{i2} = a_{id}(R_i M_i^{-1} \tau_{hi} + \Gamma_i + R_i M_i^{-1} \tau_{ilump}) - \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} \dot{w}_j - a_{i0} \dot{w}_d. \quad (30)$$

step 2: 设计固定时间非奇异快速终端滑模面, 即

$$S_i = \text{sig}^{a_1}(z_{i1}) + \frac{k_2 a_2}{2a_2 - 1} \text{sig}^{2 - \frac{1}{a_2}}(z_{i2} + k_1 \text{sig}^{a_1}(z_{i1})). \quad (31)$$

其中: $k_1 > 0, k_2 > 0, a_2 > 1, 1 < a_1 < 2 - 1/a_2$.

定理 2 结合固定时间干扰观测器部分, 如果 $S_i = 0$, 则 z_{i1} 和 z_{i2} 可以在固定时间 T_2 内收敛到零, 收敛时间的上界为

$$T_2 \leq T_1 + \frac{1}{k_1(a_1 - 1)} + \frac{1}{\left(\frac{2a_2 - 1}{k_2 a_2}\right)^{\frac{a_2}{2a_2 - 1}} \left(1 - \frac{a_1 a_2}{2a_2 - 1}\right)}. \quad (32)$$

证明 如果满足滑模面 $S_i = 0$, 则式(31)可被重写为

$$z_{i2} = -k_1 \text{sig}^{a_1}(z_{i1}) - \left(\frac{2a_2 - 1}{k_2 a_2}\right)^{\frac{a_2}{2a_2 - 1}} \text{sig}^{\frac{a_1 a_2}{2a_2 - 1}}(z_{i1}). \quad (33)$$

令 $\bar{k}_1 = k_1, \bar{a}_1 = a_1, \bar{k}_2 = \left(\frac{2a_2 - 1}{k_2 a_2}\right)^{\frac{a_2}{2a_2 - 1}}$ 和 $\bar{a}_2 = \frac{a_1 a_2}{2a_2 - 1}$. 因此, 式(31)可以改写为

$$z_{i2} = -\bar{k}_1 \text{sig}^{\bar{a}_1}(z_{i1}) - \bar{k}_2 \text{sig}^{\bar{a}_2}(z_{i1}). \quad (34)$$

由引理 3 可知, 式(34)是固定时间稳定的, 收敛时间上界为

$$T_S \leq \frac{1}{\bar{k}_1(\bar{a}_1 - 1)} + \frac{1}{\bar{k}_2(1 - \bar{a}_2)}. \quad (35)$$

定理得证. \square

step 3: 根据式(21)的固定时间干扰观测器和式

(31)的固定时间非奇异快速终端滑模面, 控制律设计为

$$\tau_{hi} = -\frac{M_i R_i^{-1}}{a_{id}} \left[k_1 a_1 \text{diag}(|z_{i1}|^{a_1 - 1}) \left(\frac{A_i}{k_1} + z_{i2} \right) + a_{id} R_i M_i^{-1} \hat{\tau}_{ilump} + \alpha \text{sig}^{r_1}(S_i) + \beta \text{sig}^{r_2}(S_i) + a_{id} \Gamma_i - \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} \dot{w}_j - a_{i0} \dot{w}_d \right], \quad (36)$$

$$A_i = \frac{1}{k_2} \text{sig}^{\frac{1}{a_2}}[z_{i2} + k_1 \text{sig}^{a_1}(z_{i1})] + \frac{k_1 a_1}{2a_2 - 1} [z_{i2} + k_1 \text{sig}^{a_1}(z_{i1})]. \quad (37)$$

其中: $\alpha > 0, \beta > 0, r_1 > 1, 0 < r_2 < 1$.

定理 3 对于控制系统(5)和(6), 结合所设计的固定时间控制律和固定时间干扰观测器, 跟踪误差可以在固定时间内收敛到零, 收敛时间的上界为

$$T \leq T_2 + T_3 + T_d. \quad (38)$$

证明 选择如下的李雅普诺夫函数:

$$V_i = \frac{1}{2} S_i^T S_i, \quad (39)$$

对式(39)求导, 得

$$\begin{aligned} \dot{V}_i &= S_i^T \dot{S}_i = \\ & S_i^T [a_1 \text{diag}(|z_{i1}|^{a_1 - 1}) z_{i2} + \\ & k_2 \text{diag}(|z_{i2} + k_1 \text{sig}^{a_1}(z_{i1})|^{1 - \frac{1}{a_2}}) \cdot \\ & (\dot{z}_{i2} + k_1 a_1 \text{diag}(|z_{i1}|^{a_1 - 1}) z_{i2})]. \end{aligned} \quad (40)$$

将 \dot{z}_{i2} 代入, 得

$$\begin{aligned} \dot{V}_i &= S_i^T \left\{ a_1 \text{diag}(|z_{i1}|^{a_1 - 1}) z_{i2} + \right. \\ & k_2 \text{diag}(|z_{i2} + k_1 \text{sig}^{a_1}(z_{i1})|^{1 - \frac{1}{a_2}}) \cdot \\ & \left[a_{id}(R_i M_i^{-1} \tau_{hi} + \Gamma_i + R_i M_i^{-1} \tau_{ilump}) - \right. \\ & \left. \left. \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} \dot{w}_j - a_{i0} \dot{w}_d + k_1 a_1 \text{diag}(|z_{i1}|^{a_1 - 1}) z_{i2} \right] \right\}. \end{aligned} \quad (41)$$

将式(36)代入, 得

$$\begin{aligned} \dot{V}_i &= S_i^T \left\{ a_1 \text{diag}(|z_{i1}|^{a_1 - 1}) z_{i2} + \right. \\ & k_2 \text{diag}(|z_{i2} + k_1 \text{sig}^{a_1}(z_{i1})|^{1 - \frac{1}{a_2}}) \cdot [-\alpha \text{sig}^{r_1}(S_i) - \\ & \left. \beta \text{sig}^{r_2}(S_i) - a_1 \text{diag}(|z_{i1}|^{a_1 - 1}) A_i] \right\}. \end{aligned} \quad (42)$$

为证明稳定性, 结合式(31)和(37)可得

$$k_2 \text{diag}(|z_{i2} + k_1 \text{sig}^{a_1}(z_{i1})|^{1 - \frac{1}{a_2}}) A_i = z_{i2} + k_1 S_i. \quad (43)$$

将上式代入式(42), 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_i &= S_i^T \left\{ -a_1 \text{diag}(|z_{i1}|^{a_1 - 1}) \cdot (k_1 S_i) + \right. \\ & k_2 \text{diag}(|z_{i2} + k_1 \text{sig}^{a_1}(z_{i1})|^{1 - \frac{1}{a_2}}) \cdot \\ & \left. [-\alpha \text{sig}^{r_1}(S_i) - \beta \text{sig}^{r_2}(S_i)] \right\} = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -k_1 a_1 S_i^T \text{diag}(|z_{i1}|^{a_1-1}) S_i + S_i^T \Pi_i \cdot \\
 & [-\alpha \text{sig}^{r_1}(S_i) - \beta \text{sig}^{r_2}(S_i)]. \quad (44)
 \end{aligned}$$

其中 $\Pi_i = k_2 \text{diag}(|z_{i2} + k_1 \text{sig}^{a_1}(z_{i1})|^{1-\frac{1}{a_2}})$. 由于 $-k_1 a_1 S_i^T \text{diag}(|z_{i1}|^{a_1-1}) S_i$ 是负定的, 由式(44)可得

$$\begin{aligned}
 \dot{V}_i & \leq S_i^T \Pi_i (-\alpha \text{sig}^{r_1}(S_i) - \beta \text{sig}^{r_2}(S_i)) \leq \\
 & \sum_{m=1}^3 (-\alpha \Pi_{im} |S_{im}|^{r_1+1} - \beta \Pi_{im} |S_{im}|^{r_2+1}). \quad (45)
 \end{aligned}$$

结合引理2可得

$$\begin{aligned}
 \dot{V}_i & \leq -\alpha \frac{1}{3^{(r_1+1)/2}} 2^{(r_1+1)/2} \min(\Pi_i) (V_i)^{(r_1+1)/2} + \\
 & \beta \frac{1}{3^{(r_2+1)/2}} 2^{(r_2+1)/2} \min(\Pi_i) (V_i)^{(r_2+1)/2}. \quad (46)
 \end{aligned}$$

令 $\chi_i = z_{i2} + k_1 \text{sig}^{a_1}(z_{i1})$, $\Pi_i = k_2 \text{diag}(|\chi_i|^{1-\frac{1}{a_2}})$, 如果 $\chi_i \neq 0$, 则 $\Pi_i > 0$. 因此, 系统状态分为如下两个不同的区域:

$$\Omega_1 = \{(z_{i1}, z_{i2}) | \Pi_i \geq I_{3 \times 1}\}, \quad (47)$$

$$\Omega_2 = \{(z_{i1}, z_{i2}) | \Pi_i < I_{3 \times 1}\}. \quad (48)$$

如果 $\Pi_i \geq I_{3 \times 1}$, 则得到 $|\chi_i| \geq (1/k_2)^{a_2/(a_2-1)}$, 然后式(46)可以转换为

$$\dot{V}_i \leq -(A)(V_i)^{(r_1+1)/2} - (B)(V_i)^{(r_2+1)/2}. \quad (49)$$

其中

$$\begin{aligned}
 A & = \alpha \frac{1}{3^{(r_1+1)/2}} 2^{(r_1+1)/2}, \\
 B & = \beta \frac{1}{3^{(r_2+1)/2}} 2^{(r_2+1)/2}.
 \end{aligned}$$

根据引理1, 系统状态将达到滑模面 $S_i = 0$ 或在固定时间 T_3 内进入 Ω_2 区域, 收敛时间为

$$T_3 \leq \frac{2}{B(1-r_2)} + \frac{2}{A(r_1-1)}. \quad (50)$$

如果 $0_{3 \times 1} < \Pi_i < I_{3 \times 1}$, 则根据式(46)易知 $S_i = 0$ 仍是一个吸引区. 接下来证明 $\chi_i = 0$ 除了零以外不是一个吸引区. 如果 $\chi_i = z_{i2} + k_1 \text{sig}^{a_1}(z_{i1}) = 0$, 则可以得到

$$\Lambda_i = 0. \quad (51)$$

将式(51)代入(36), 得

$$\begin{aligned}
 \tau_{hi} & = -\frac{M_i R_i^{-1}}{a_{id}} \left[k_1 a_1 \text{diag}(|z_{i1}|^{a_1-1}) z_{i2} + \right. \\
 & a_{id} R_i M_i^{-1} \hat{\tau}_{ilump} + \alpha \text{sig}^{r_1}(S_i) + \beta \text{sig}^{r_2}(S_i) + \\
 & \left. a_{id} \Gamma_i - \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} \dot{w}_j - a_{i0} \dot{w}_d \right]. \quad (52)
 \end{aligned}$$

对 χ_i 求导数, 可得到

$$\begin{aligned}
 \dot{\chi}_i & = \dot{z}_{i2} + k_1 a_1 \text{diag}(|z_{i1}|^{a_1-1}) z_{i2} = \\
 & a_{id} R_i M_i^{-1} \tau_{hi} + a_{id} \Gamma_i + a_{id} R_i M_i^{-1} \tau_{ilump} -
 \end{aligned}$$

$$\sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij} \dot{w}_j - a_{i0} \dot{w}_d + k_1 a_1 \text{diag}(|z_{i1}|^{a_1-1}) z_{i2}. \quad (53)$$

将式(52)代入(53), 得

$$\dot{\chi}_i = -\alpha \text{sig}^{r_1}(S_i) - \beta \text{sig}^{r_2}(S_i). \quad (54)$$

如果 $S_i > 0$, 则 $\dot{\chi}_i < 0$; 如果 $S_i < 0$, 则 $\dot{\chi}_i > 0$. 由此可知, 系统状态将在有限时间内单调地从 Ω_2 通过到达 Ω_1 . 对于 $\delta > 0$, 则存在一个常数 $\varepsilon(\delta) > 0$, 用来特指通过区域 Ω_2 的时间间隔. 因此, 总收敛时间为 $T \leq T_2 + T_3 + \varepsilon(\delta)$. \square

4 仿真结果及分析

水面船的参数与文献[32]相同. 建立时变环境干扰模型为 $\tau_{id} = R_i^T b_i$, 一阶马尔可夫过程为 $\dot{b}_{id} + \Psi_{id} b_{id} = d_i$. 其中: $\Psi_{id} \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ 是正常数, $d_i \in \mathbf{R}^3$ 是高斯白噪声. 图2为有向通信拓扑. 其中: 0表示虚拟领航船, 1~5表示5艘跟随船. 参考轨迹 $\eta_d = [x_d, y_d, \psi_d]^T$, 期望参考轨迹信号为 $x_d = 0.06t$, $y_d = 12 \sin(0.005t)$. 5艘跟随船的初始位置分别为 $\eta_1 = [-1.4, 0.2, \pi/8]^T$, $\eta_2 = [0.1, 1, \pi/8]^T$, $\eta_3 = [0.2, 0.1, \pi/8]^T$, $\eta_4 = [1.3, 0.2, \pi/8]^T$ 和 $\eta_5 = [0.1, -1.5, \pi/8]^T$. 5艘跟随船与虚拟领航船之间的期望位置分别为 $\vartheta_1 = [1.2, 0, 0]^T$, $\vartheta_2 = [0, 1.2, 0]^T$, $\vartheta_3 = [0, 0, 0]^T$, $\vartheta_4 = [-1.2, 0, 0]^T$, $\vartheta_5 = [0, -1.2, 0]^T$. 每艘船的初始速度为 $v_i(0) = [0, 0, 0]^T$, 每艘船的初始位姿为 $\eta_i(0) = [0, 0, 0]^T$.

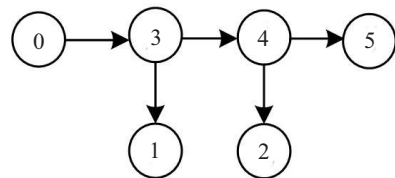


图2 通信拓扑

固定时间干扰观测器的参数分别为 $\kappa_{i1} = \text{diag}\{3, 3, 2\}$, $\kappa_{i2} = \text{diag}\{1, 1, 1\}$, $\mu = 8$. 固定时间非奇异快速终端滑模面以及控制器的参数分别为 $a_1 = 1.1$, $a_2 = 2.2$, $k_1 = 1.2$, $k_2 = 1.2$, $\alpha = \beta = 0.02$, $r_1 = 1.8$ 和 $r_2 = 0.5$. 执行器故障的模型参数分别为 $E_i = \text{diag}\{0.5, 0.5, 0.5\}$, $\bar{\tau}_i = \text{diag}\{1, 1, 0.5\}$, $a_i = [20, 10, 5]^T$ 和 $t_0 = [10, 15, 20]^T$.

4.1 固定时间干扰观测器的估计性能

为了展现固定时间干扰观测器(FxDO)的估计性能, 本文将它与文献[20]的有限时间干扰观测器(FTDO)和文献[18]中的干扰观测器(DO)分别进行比较. 选择本文所提出的控制器, 有限时间干扰观测

器如下所示:

$$M_i \dot{\nu}_i = \tau_i - C_i(\nu_i)\nu_i - D_i(\nu_i)\nu_i + \kappa_{i1a} \text{sig}^{1/2}(\Xi_i) + \int_0^t \kappa_{i2a} \text{sign}(\Xi_i) dt, \quad (55)$$

$$\hat{\tau}_{ilump} = \int_0^t \kappa_{i2a} \text{sign}(\Xi_i) dt, \quad (56)$$

其中 $\kappa_{i1a} = \kappa_{i2a} = \text{diag}\{5, 5, 5\}$.

干扰观测器如下所示:

$$\hat{\tau}_{ilump} = \varepsilon_i + \kappa_{i1b} M_i \nu_i, \quad (57)$$

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_i &= -\kappa_{i1b} \varepsilon_i + \kappa_{i1b} [C_i(\nu_i)\nu_i + D_i(\nu_i)\nu_i - \\ &\quad \tau_i - \kappa_{i1b} M_i \nu_i], \end{aligned} \quad (58)$$

其中 $\kappa_{i1b} = \text{diag}\{1.5, 1.5, 1.5\}$.

为了更清晰地展示仿真结果, 本文选择1船来比较观测器的估计性能. 图3展示了FxDO对比FTDO和DO的估计性能的仿真结果, 其中actual代表实际的集总干扰变化曲线. 可以看出, FxDO能够快速识别集总干扰; 从局部放大图可看出, FxDO对时变环境干扰的识别性能最好, 并且估计误差最小. 说明FxDO的估计性能优于FTDO和DO.

为了定量比较3种观测器的估计性能, 表1中展

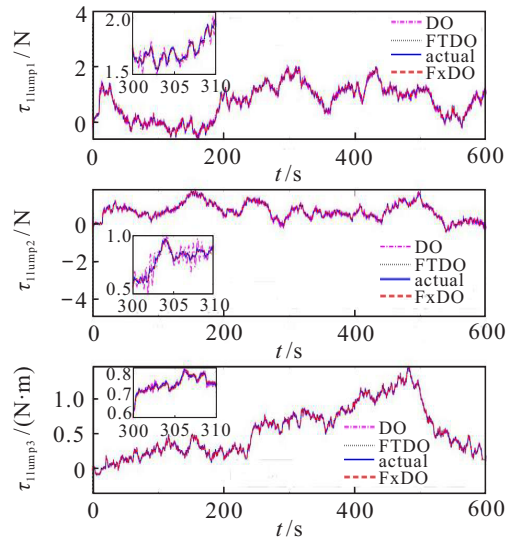


图3 1船的集总扰动及其估计

示了1船的3种观测器的性能指标对比. 从表1中可知, FxDO的稳定时间和累计估计误差都远小于DO和FTDO. 本文定义所有估计误差为 $|\tilde{\tau}_{1lumpn}|$, $n = 1, 2, 3$. $\tilde{\tau}_{1lumpn} = \tau_{1lumpn} - \hat{\tau}_{1lumpn}$ 达到并保持在其最终值的2%误差范围内所需的时间为稳定时间. t_{final} 为仿真运行时间, $t_{\text{final}} = 600 \text{ s}$.

表1 1船的观测器的性能指标对比

观测器	稳定时间	$\int_0^{t_{\text{final}}} \tilde{\tau}_{1lump1} dt$	$\int_0^{t_{\text{final}}} \tilde{\tau}_{1lump2} dt$	$\int_0^{t_{\text{final}}} \tilde{\tau}_{1lump3} dt$
FxDO	0.91	0.7879	0.6974	1.4351
FTDO	4.53	13.0701	13.8489	3.8771
DO	7.98	34.4860	41.2682	6.9069

4.2 所提出控制方案的控制性能

对以下3种方案进行仿真比较:

1) 第1种方案为本文所提出的方案, 控制律见式(36), 这种方案称为FxNFTSMM.

2) 第2种方案为通过不估计执行器故障来观察执行器故障对系统性能的影响, 该方案称为FxNFTSMM-(1), 控制律如下:

$$\begin{aligned} \tau_{hi} = & -\frac{M_i R_i^{-1}}{a_{id}} \left[k_1 a_1 \text{diag}(|z_{i1}|^{a_1-1}) \left(\frac{A_i}{k_1} + z_{i2} \right) + \right. \\ & a_{id} R_i M_i^{-1} \hat{\tau}_{id} + \alpha \text{sig}^{r_1}(S_i) + \beta \text{sig}^{r_2}(S_i) + \\ & \left. a_{id} \Gamma_i - \sum_{j \in N_i} a_{ij} \dot{w}_j - a_{i0} \dot{w}_d \right], \end{aligned} \quad (59)$$

其中 $\hat{\tau}_{id}$ 是 τ_{id} 的估计值.

3) 第3种方案为文献[5]中的控制器与本文提出的固定时间干扰观测器相结合, 该方案称为FTNTSMM. 因此, 文献[5]中有限时间非奇异终端滑模面和控制器的重构如下:

$$S_i = z_{i2} + k\beta(z_{i1}), \quad (60)$$

$$\begin{aligned} \tau_{hi} = & -\frac{M_i R_i^{-1}}{a_{id}} \left[k\dot{\beta}(z_{i1}) + k_1 S_i + k_1 \text{sig}^{r_1}(S_i) + \right. \\ & a_{id} \Gamma_i + a_{id} R_i M_i^{-1} \hat{\tau}_{ilump} - \\ & \left. \sum_{j \in N_i} a_{ij} \dot{w}_j - a_{i0} \dot{w}_d \right]. \end{aligned} \quad (61)$$

有限时间非奇异终端滑模面和控制器的参数均与文献[5]相同.

为了更清晰对比3种方案仿真结果, 本文选择1船来比较3种方案的性能. 图4和图5给出了1船的3种方案的滑模面的仿真比较, 可以看出: 由于FxNFTSMM-(1)方案没有对执行器故障进行处理, 这对所提出系统的滑模面有显著影响; 而考虑执行器故障的FxNFTSMM方案和FTNTSMM方案能够快速识别执行器故障, 从而对其进行补偿, 所以执行器故障对系统的滑模面几乎没有影响. 在图5中对比FxNFTSMM方案和FTNTSMM方案可以看出, 固定时间非奇异快速终端滑模面的收敛速度明显快于有限时间非奇异终端滑模面.

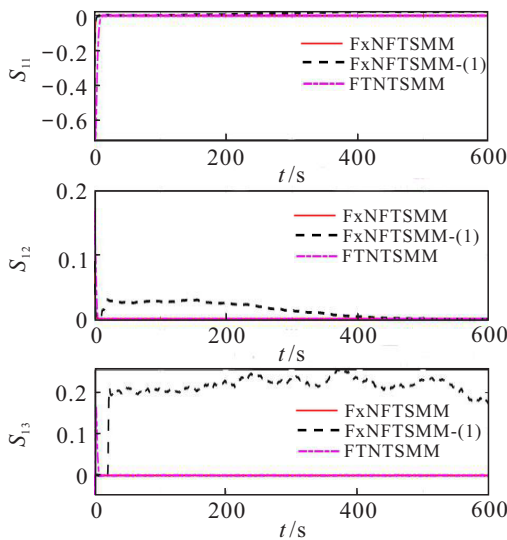


图4 1船的集总扰动及其估计

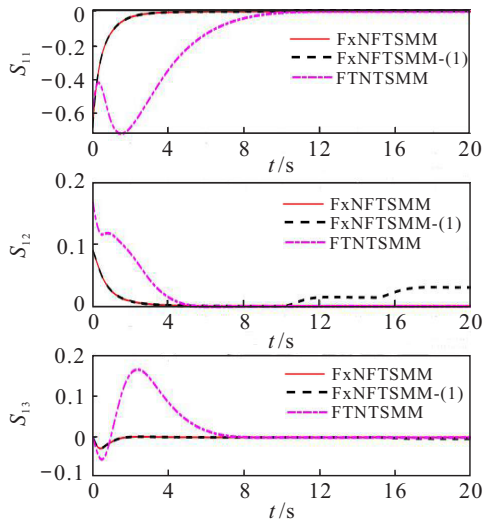


图5 1船的初始滑模面比较

图6和图7给出了1船的3种方案的跟踪误差的仿真比较,可以看出:如果在FxNFTSMM-(1)方案中不考虑执行器故障,则对所提出系统的跟踪性能有明显影响;而考虑执行器故障的FxNFTSMM方案和FTNTSMM方案因为能够快速对执行器故障进行补偿,所以它对系统的跟踪性能几乎没有影响,都能较好地跟踪参考轨迹.从图7中可以看出,固定时间非奇异快速终端滑模控制器的收敛速度明显快于有限时间非奇异终端滑模控制器.

图8给出了1船3种方案的控制输入的仿真比较.为了定量比较所提出控制器的优势,表2中展示了1船控制器的性能指标对比.从表2中可知,FxNFTSMM方案的稳定时间和累计跟踪误差都远小于FTNTSMM方案.表2中的 x_e 、 y_e 、 ψ_e 分别为1船3个方向上的跟踪误差,稳定时间为所有跟踪误差达到且稳定在0.001范围内所需的时间. t_{final} 为仿真运行时间, $t_{\text{final}} = 600\text{ s}$.

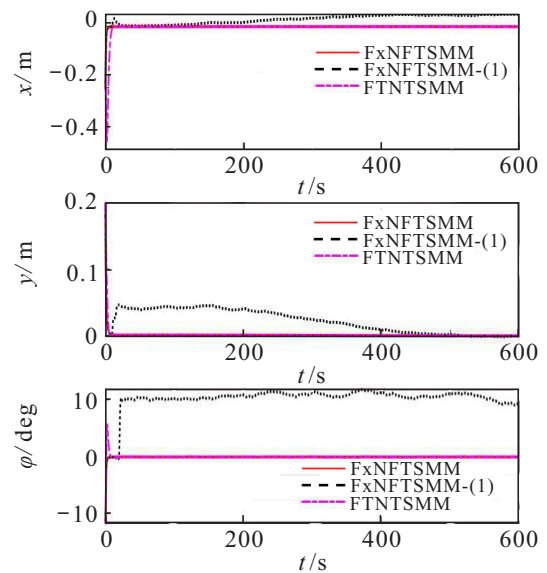


图6 1船的跟踪误差比较

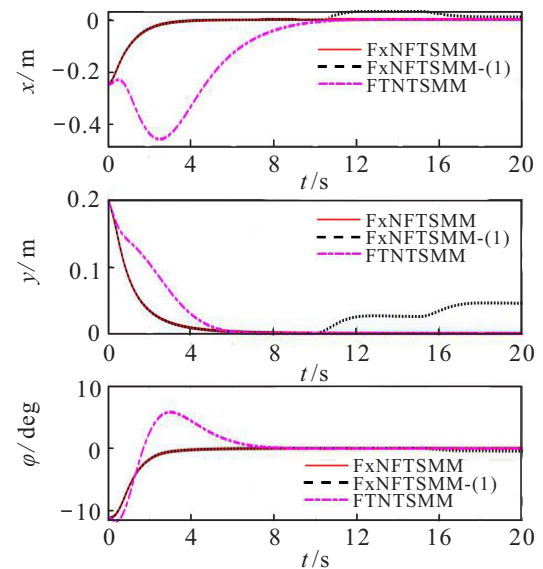


图7 1船的初始跟踪误差比较

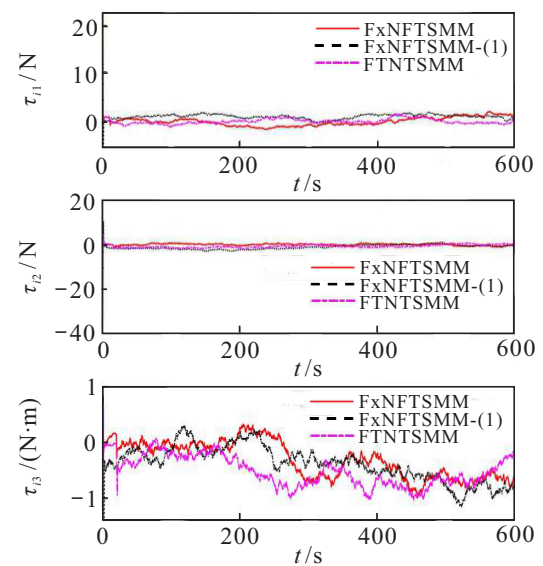


图8 1船的控制输入比较

表 2 1 船的控制器的性能指标对比

控制器	稳定时间	$\int_0^{t_{\text{final}}} x_{1e} dt$	$\int_0^{t_{\text{final}}} y_{1e} dt$	$\int_0^{t_{\text{final}}} \psi_{1e} dt$
FxNFTSMM	6.27	1.235 2	1.022 1	0.827 8
FTNTSMM	12.59	2.914 7	2.253 6	2.853 4

图9~图11为本文所提出控制方案的多水面船协同控制的仿真结果. 其中: 图9展示了多水面船的编队轨迹; 图10为多水面船协同控制的控制输入; 图11为多水面船协同控制的协同跟踪误差, 在执行器

故障和带有未知环境干扰的情况下, 本文所提出的控制方案可以使得多水面船能以预设的编队形式快速精确地跟踪参考轨迹.

5 结论

本文提出了一种新型的固定时间滑模控制方法来解决多水面船协同控制问题. 设计了固定时间干扰观测器来估计未知环境干扰和执行器故障, 以提高控制系统的鲁棒性, 并且使得估计误差在固定时间内收敛; 设计了固定时间非奇异快速终端滑模控制方案并应用于多水面船的协同控制策略, 取得了较好的控制效果, 不仅消除了奇异问题, 而且实现了系统在固定时间内收敛, 收敛时间独立于系统的初始状态; 最后, 以全驱船为例进行了仿真, 验证了所提出方案的有效性. 然而, 本文没有将模型不确定性和执行器饱和等问题考虑在内, 这将是下一阶段研究的重点.

参考文献(References)

- [1] Mahacek P, Kitts C A, Mas I. Dynamic guarding of marine assets through cluster control of automated surface vessel fleets[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2012, 17(1): 65-75.
- [2] Berntsen P I B, Morten Aamo O, Leira B J, et al. Structural reliability-based control of moored interconnected structures[J]. Control Engineering Practice, 2008, 16(4): 495-504.
- [3] Xia G Q, Sun C, Zhao B, et al. Neuroadaptive distributed output feedback tracking control for multiple marine surface vessels with input and output constraints[J]. IEEE Access, 2019, 7(1): 123076-123085.
- [4] Huang Y, Jia Y M. Fixed-time consensus tracking control of second-order multi-agent systems with inherent nonlinear dynamics via output feedback[J]. Nonlinear Dynamics, 2018, 91(2): 1289-1306.
- [5] Liang K, Lin X G, Chen Y, et al. Adaptive sliding mode output feedback control for dynamic positioning ships with input saturation[J]. Ocean Engineering, 2020, 206: 107245.
- [6] 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.
- [7] Guan Z H, Sun F L, Wang Y W, et al. Finite-time consensus for leader-following second-order multi-agent networks[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2012, 59(11): 2646-2654.

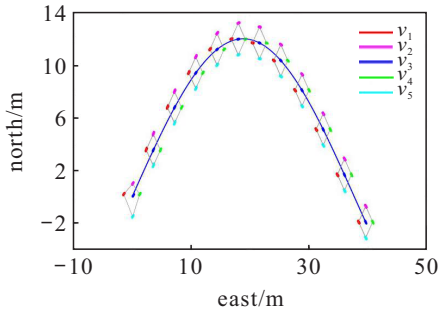


图 9 多水面船在协同控制下的轨迹

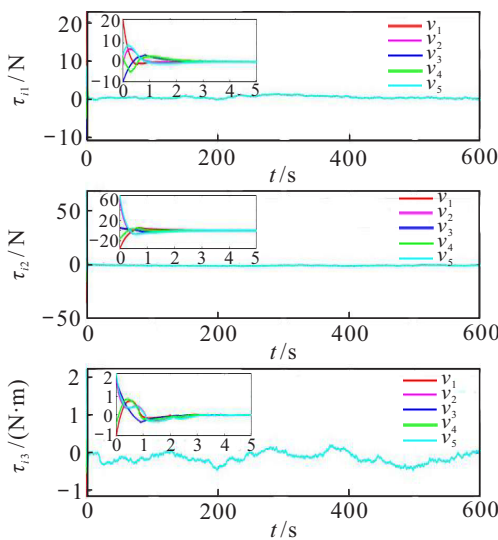


图 10 多水面船的控制输入

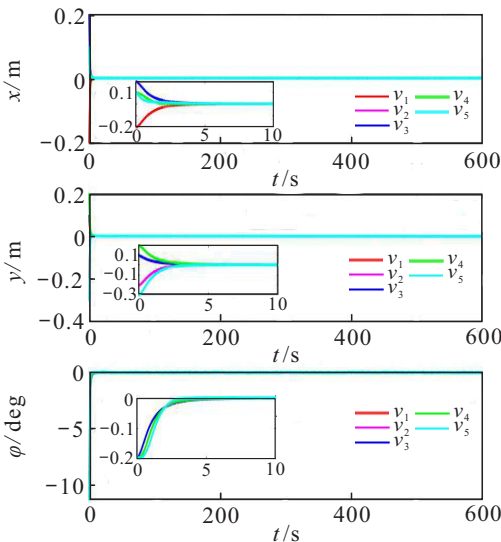


图 11 多水面船的协同跟踪误差

- [8] Polyakov A. Nonlinear feedback design for fixed-time stabilization of linear control systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2012, 57(8): 2106-2110.
- [9] Tian B L, Zuo Z Y, Yan X M, et al. A fixed-time output feedback control scheme for double integrator systems[J]. *Automatica*, 2017, 80: 17-24.
- [10] Li H J, Cai Y L. On SFTSM control with fixed-time convergence[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2017, 11(6): 766-773.
- [11] Mishra J P, Li C J, Jalili M, et al. Robust second-order consensus using a fixed-time convergent sliding surface in multiagent systems[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2020, 50(2): 846-855.
- [12] Huang Y, Jia Y M. Adaptive fixed-time six-DOF tracking control for noncooperative spacecraft fly-around mission[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2019, 27(4): 1796-1804.
- [13] Shao S K, Zong Q, Tian B L, et al. Finite-time sliding mode attitude control for rigid spacecraft without angular velocity measurement[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2017, 354(12): 4656-4674.
- [14] Ni S B, Shan J Y. Smooth second-order nonsingular terminal sliding mode control for reusable launch vehicles[J]. *International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics*, 2014, 7(1): 95-110.
- [15] Zhu Y K, Fei J T. Adaptive global fast terminal sliding mode control of grid-connected photovoltaic system using fuzzy neural network approach[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 9476-9484.
- [16] Van M, Mavrouniotis M, Ge S S. An adaptive backstepping nonsingular fast terminal sliding mode control for robust fault tolerant control of robot manipulators[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2019, 49(7): 1448-1458.
- [17] Xiong S F, Wang W H, Liu X D, et al. A novel extended state observer[J]. *ISA Transactions*, 2015, 58: 309-317.
- [18] Do K D. Practical control of underactuated ships[J]. *Ocean Engineering*, 2010, 37(13): 1111-1119.
- [19] Ni J K, Liu L, Chen M, et al. Fixed-time disturbance observer design for brunovsky systems[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2018, 65(3): 341-345.
- [20] Xia G Q, Sun C, Zhao B, et al. Cooperative control of multiple dynamic positioning vessels with input saturation based on finite-time disturbance observer[J]. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2019, 17(2): 370-379.
- [21] Zhang J Q, Yu S H, Wu D F, et al. Nonsingular fixed-time terminal sliding mode trajectory tracking control for marine surface vessels with anti-disturbances[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 217: 108158.
- [22] Wang N, Pan X X, Su S F. Finite-time fault-tolerant trajectory tracking control of an autonomous surface vehicle[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2020, 357(16): 11114-11135.
- [23] Chen G, Song Y D, Lewis F L. Distributed fault-tolerant control of networked uncertain Euler—Lagrange systems under actuator faults[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2017, 47(7): 1706-1718.
- [24] Ben-Gharbia K M, Maciejewski A A, Roberts R G. A kinematic analysis and evaluation of planar robots designed from optimally fault-tolerant jacobians[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2014, 30(2): 516-524.
- [25] Hoover R C, Roberts R G, Maciejewski A A, et al. Designing a failure-tolerant workspace for kinematically redundant robots[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2015, 12(4): 1421-1432.
- [26] Wang R R, Wang J M. Passive actuator fault-tolerant control for a class of overactuated nonlinear systems and applications to electric vehicles[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2013, 62(3): 972-985.
- [27] He X, Wang Z D, Qin L G, et al. Active fault-tolerant control for an Internet-based networked three-tank system[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2016, 24(6): 2150-2157.
- [28] Zhang L, Wei C Z, Wu R, et al. Adaptive fault-tolerant control for a VTVL reusable launch vehicle[J]. *Acta Astronautica*, 2019, 159: 362-370.
- [29] Basin M, Yu P, Shtessel Y. Finite- and fixed-time differentiators utilising HOSM techniques[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2017, 11(8): 1144-1152.
- [30] Wang N, Lv S L, Er M J, et al. Fast and accurate trajectory tracking control of an autonomous surface vehicle with unmodeled dynamics and disturbances[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2016, 1(3): 230-243.
- [31] Yao Q J. Robust fixed-time trajectory tracking control of marine surface vessel with feedforward disturbance compensation[J]. *International Journal of Systems Science*, 2022, 53(4): 726-742.
- [32] Skjetne R, Fossen T I, Kokotovi P V. Adaptive maneuvering, with experiments, for a model ship in a marine control laboratory[J]. *Automatica*, 2005, 41(2): 289-298.

作者简介

夏国清(1962—),男,教授,博士生导师,从事动力定位、无人水面船等研究, E-mail: xianguoqing@hrbeu.edu.cn;

任哲达(1992—),男,博士生,从事船舶运动控制和多船协同控制的研究, E-mail: renzheda@hrbeu.edu.cn;

孙显信(1990—),男,博士生,从事多无人水面船集群控制的研究, E-mail: hrbsunxianxin@hrbeu.edu.cn;

夏天(1988—),男,学士,从事无人水面船的研究, E-mail: 921803279@qq.com.

(责任编辑:孙艺红)