

# 控制与决策

Control and Decision

## 纵向速度和艏向角受限的水面艇有限时间协同路径跟踪

李莉莉, 董凯, 郭戈

引用本文:

李莉莉, 董凯, 郭戈. 纵向速度和艏向角受限的水面艇有限时间协同路径跟踪[J]. *控制与决策*, 2021, 36(2): 363–370.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0977>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 四旋翼无人机抗干扰轨迹跟踪控制

Anti-interference trajectory tracking control of quadrotor UAV

控制与决策. 2021, 36(2): 379–386 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0875>

### 基于神经动态优化的非线性系统近似最优跟踪控制

Approximate optimal tracking control for nonlinear systems based on neurodynamic optimization

控制与决策. 2021, 36(1): 97–104 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0056>

### 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>

### 一类非线性大系统分散自适应预设性能有限时间跟踪控制

Decentralized adaptive prescribed performance finite-time tracking control for a class of large-scale nonlinear systems

控制与决策. 2020, 35(12): 3045–3052 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0623>

### 基于强化学习的小型无人直升机有限时间收敛控制设计

Finite time control based on reinforcement learning for a small-size unmanned helicopter

控制与决策. 2020, 35(11): 2646–2652 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0328>

# 纵向速度和艏向角受限的水面艇有限时间协同路径跟踪

李莉莉<sup>1</sup>, 董凯<sup>1</sup>, 郭戈<sup>1,2†</sup>

(1. 大连海事大学 船舶电气工程学院, 辽宁 大连 116026;

2. 东北大学 流程工业综合自动化国家重点实验室, 沈阳 110004)

**摘要:** 研究多个欠驱动水面艇在纵向速度和艏向角受限情况下的协同有限时间直线路径跟踪问题. 针对水面艇在位置和速度方向上受到的干扰, 考虑欠驱动水面艇同时受到匹配和不匹配扰动的情况, 通过在控制方案中引入积分视线制导律和有限时间观测器来估计并补偿两类扰动. 设计非对称障碍 Lyapunov 函数来保证欠驱动水面艇在航行过程中不违反约束条件, 之后通过加入一个功率积分器构造有限时间控制器, 确保系统误差能在有限时间内收敛到零. 最后, 通过 Simulink 仿真结果进一步表明所设计控制器的有效性.

**关键词:** 直线路径跟踪; 积分视线制导律; 有限时间干扰观测器; 障碍 Lyapunov; 有限时间收敛

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.0977

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



**引用格式:** 李莉莉, 董凯, 郭戈. 纵向速度和艏向角受限的水面艇有限时间协同路径跟踪[J]. 控制与决策, 2021, 36(2): 363-370.

## Finite-time cooperative path following of surface vessels with surge velocity and yaw angle constraints

LI Li-li<sup>1</sup>, DONG Kai<sup>1</sup>, GUO Ge<sup>1,2†</sup>

(1. College of Marine Electrical Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China; 2. State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

**Abstract:** This paper addresses a straight-line finite-time path following cooperative control problem for multiple underactuated surface vessels (USVs) subjected to surge velocity and yaw angle constraints. Aiming at the navigation environment of USVs, we consider the matched and mismatched disturbances which are estimated and compensated by introducing the integral line-of-sight guidance law and finite-time observer in the control scheme. An asymmetric barrier Lyapunov function is designed to ensure the constraints are not violated during USV's navigation. Then a finite-time controller is constructed via adding a power integrator to guarantee that the system error can converge to zero within finite time. Finally, the simulation results further show the effectiveness of the proposed method.

**Keywords:** straight-line path following; integral line-of-sight; finite-time observer; asymmetric barrier Lyapunov function; finite-time convergence

## 0 引言

由于海洋作业需求的日益多样化,近年来,多无人艇协同控制的研究越来越广泛地用于工业、军事和商业领域,协同路径跟踪是其中的一个基本问题.此外,水面艇实际上是一类欠驱动系统,一般由推进器和舵这两个相互独立的推进装置提供纵向动力和旋转力矩,但缺少横向的直接推动力.因此,为提高控制的可靠性和准确性,保障船队航行安全,多欠驱

动水面艇的协同路径跟踪控制已成为水面艇控制领域中的一个重要且具有挑战性的研究热点,引起了学者们的广泛关注<sup>[1]</sup>.

欠驱动水面艇协同路径跟踪是指多个欠驱动水面艇能保持某种队形沿着给定路径以期望速度航行,且给定路径与时间无关.文献[2]将视线制导律用于欠驱动船队的直线路径跟踪控制;文献[3]在视线制导律的基础上加入积分项,有助于欠驱动水面艇更

收稿日期: 2019-07-10; 修回日期: 2019-09-27.

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1808205, 61573077, 11671184); 大连市高层次人才创新支持计划项目(2016RQ049, 2019RQ057); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(3132019105).

责任编辑: 解学军.

†通讯作者. E-mail: geguo@yeah.net.

准确地到达给定的路径;文献[4]在视线制导律的基础上使用扩展状态观测器来估计欠驱动水面艇的侧滑角,从而有助于以更高的精度跟踪所需的路径.由上述文献可知,积分视线制导律可以提高路径跟踪的准确性,并且能处理欠驱动水面艇所受到的不匹配扰动,即作用在欠驱动水面艇位移上的扰动.例如,文献[5-6]使用积分视线制导律处理欠驱动水面艇所受到的不匹配常值扰动.但是,实际的不匹配扰动往往是时变的,因此,考虑欠驱动水面艇所受到的时变不匹配扰动也十分有必要.

值得指出的是,由于外部环境的限制及其自身电机转速有限等原因,欠驱动水面艇的纵向速度和艏向角往往存在一定的约束,这就需要考虑状态受限的情况.为了解决受限问题,文献[7]提出了构造障碍Lyapunov函数的方法;文献[8]将障碍Lyapunov函数用于解决全驱动水面艇在状态受限情况下的轨迹跟踪问题;文献[9]使用非对称障碍Lyapunov函数来解决欠驱动水面艇编队控制的误差约束问题.因此,使用非对称障碍Lyapunov函数来处理欠驱动水面艇的受限问题是一个十分有意义的研究内容.

另一方面,从时间优化的角度来看,有限时间控制具有明显的优越性,多智能体的有限时间控制问题<sup>[10]</sup>也有了长足的发展.由于模型的复杂性,有限时间控制在欠驱动水面艇协同控制方面的研究还比较少,现有的欠驱动水面艇编队跟踪控制成果大多只能保证跟踪误差渐近收敛<sup>[11]</sup>或指数收敛<sup>[12]</sup>.然而,由于任务的时效性,往往需要各水面艇在有限时间内达到期望状态,欠驱动水面艇的有限时间编队控制问题引起了人们的广泛关注.文献[13]提出了一种新的非线性滑模控制方法,让欠驱动水面艇在有限时间内实现编队;文献[14]在考虑欠驱动水面艇编队的视线距离和角度存在约束的情况下,实现了有限时间容错控制,但是其最后得到的结论是有界稳定.所以,考虑欠驱动水面艇在受限情况下的有限时间渐近稳定问题具有一定的研究价值.

本文的主要贡献可以概括如下:

1) 考虑船舶的匹配和不匹配两种扰动,在使用积分视线制导律的基础上,采用有限时间观测器来估计外部环境干扰,以便进行干扰补偿.

2) 为了保证欠驱动水面艇航行过程中不违反纵向速度和艏向角的约束,没有使用常规的Lyapunov函数,而是构造了非对称障碍Lyapunov函数.

3) 在保证受限的同时,所设计的控制器使纵向速度和艏向角跟踪误差能够在有限时间内收敛到零.

## 1 系统模型和问题描述

### 1.1 欠驱动水面艇模型

考虑3自由度的欠驱动水面艇模型<sup>[15]</sup>

$$\dot{\eta}_j = R_j(\psi_j)v_j + \omega_{\eta_j}, \quad (1)$$

$$M_j\dot{v}_j = -C_j(v_j)v_j - D_jv_j + \Gamma_j + W_j. \quad (2)$$

其中: $j = 1, 2, \dots, n$ ;  $\eta_j = [x_j, y_j, \psi_j]^T$ 为第 $j$ 艘欠驱动水面艇的质心位置和艏向角; $\omega_{\eta_j} = [\omega_{x_j}, \omega_{y_j}, 0]^T$ 表示欠驱动水面艇受到的不匹配扰动; $v_j = [u_j, v_j, r_j]^T$ 是速度向量,包括纵向速度、横摇速度、艏摇角速度;控制输入向量为 $\Gamma_j = [\Gamma_{u_j}, 0, \Gamma_{r_j}]^T$ ,  $\Gamma_{u_j}$ 是前进方向输入,  $\Gamma_{r_j}$ 是转角方向输入;  $W_j = [W_{u_j}, W_{v_j}, W_{r_j}]^T$ 表示匹配扰动;  $R_j(\psi_j)$ 为艏摇旋转矩阵;  $M_j$ 为质量和惯性矩阵;  $C_j(v_j)$ 是科里奥利力和向心力矩阵;  $D_j$ 是水动力阻尼矩阵.

### 1.2 模型变换

由于系统中矩阵 $M_j$ 和 $D_j$ 的非对角元素不为零,引入如下变换<sup>[16]</sup>:

$$\begin{cases} \tilde{x}_j = x_j + \varepsilon_j \cos \psi_j, \\ \tilde{y}_j = y_j + \varepsilon_j \sin \psi_j, \\ \tilde{v}_j = v_j + \varepsilon_j r_j, \end{cases} \quad (3)$$

其中 $\varepsilon_j = m_{23j} \cdot m_{22j}^{-1}$ .将变换(3)代入式(1)、(2)后可得

$$\dot{\tilde{x}}_j = u_j \cos \psi_j - \tilde{v}_j \sin \psi_j + \omega_{x_j}, \quad (4a)$$

$$\dot{\tilde{y}}_j = u_j \sin \psi_j + \tilde{v}_j \cos \psi_j + \omega_{y_j}, \quad (4b)$$

$$\dot{\psi}_j = r_j, \quad (4c)$$

$$\dot{u}_j = F_{u_j}(u_j, \tilde{v}_j, r_j) + \tau_{u_j} + \omega_{u_j}, \quad (4d)$$

$$\dot{\tilde{v}}_j = X_j r_j + Y_j \tilde{v}_j + \omega_{\tilde{v}_j}, \quad (4e)$$

$$\dot{r}_j = F_{r_j}(u_j, \tilde{v}_j, r_j) + \tau_{r_j} + \omega_{r_j}. \quad (4f)$$

其中

$$F_{u_j} = \frac{1}{m_{11j}} \left[ -d_{11j}u_j + m_{22j}(\tilde{v}_j - \varepsilon_j r_j) + \frac{1}{2}(m_{23j} + m_{32j})r_j^2 \right],$$

$$F_{r_j} = \frac{1}{m_{22j}m_{33j} - m_{32j}m_{23j}} \left[ (m_{11j}m_{22j} - m_{22j}^2)u_j(\tilde{v}_j - \varepsilon_j r_j) + (m_{11j}m_{32j} - \frac{1}{2}m_{22j}(m_{23j} + m_{32j}))u_j r_j + (m_{23j}d_{22j} - m_{22j}d_{32j})(\tilde{v}_j - \varepsilon_j r_j) - (m_{22j}d_{33j} - m_{32j}d_{23j})r_j \right],$$

$$X_j = -\frac{m_{11j}}{m_{22j}}u_j + \frac{d_{22j}m_{23j}}{m_{22j}^2} - \frac{d_{23j}}{m_{22j}},$$

$$Y_j = -\frac{d_{22j}}{m_{22j}},$$

$\tau_{u_j}$  和  $\tau_{r_j}$  是待设计的新控制输入。

### 1.3 控制目标

本文的目标是设计分布式控制律,使各欠驱动水面艇在有限时间内跟踪上期望的纵向速度和艏向角,沿着理想的直线路径移动。每艘欠驱动水面艇根据自身和其他水面艇传递过来的位置信息,设计控制律控制自身行驶。根据期望路径  $P$  选择相应的  $x$  轴位置,欠驱动水面艇在编队中的位置可由从第  $j$  艘欠驱动水面艇到  $P$  的期望距离  $\chi_j$  和第  $j$  艘欠驱动水面艇与第  $i$  艘之间的纵向期望距离  $\mu_{ji}$  确定。所以,控制目标可以表示为

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (y_j - \chi_j) = 0, \quad (5)$$

$$\lim_{t \rightarrow t_{f\psi}} (\psi_j - \psi_d) = 0, \quad (6)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (x_j - x_i - \mu_{ji}) = 0, \quad (7)$$

$$\lim_{t \rightarrow t_{fu}} (u_j(t) - u_{dj}) = 0. \quad (8)$$

其中:  $t_{f\psi} < \infty$ ,  $t_{fu} < \infty$ , 会在后面计算得出。

## 2 相关准备工作

### 2.1 积分视线制导律

由于存在不匹配扰动,航向角由以下积分视线制导律<sup>[6]</sup>决定:

$$\psi_{\text{ILOS}_j} = -\arctan\left(\frac{\tilde{y}_j - \chi_j + \sigma_j y_{\text{int}j}}{\Delta_j}\right),$$

$$\dot{y}_{\text{int}j} = \frac{\Delta_j(\tilde{y}_j - \chi_j)}{((\tilde{y}_j - \chi_j) + \sigma_j y_{\text{int}j})^2 + \Delta_j^2}. \quad (9)$$

其中:参数  $\Delta_j > 0$ ,  $\sigma_j > 0$  分别是前向视线距离和积分增益。

为了便于讨论欠驱动水面艇的有限时间协同跟踪问题,对系统(4)作出如下假设。

**假设1** 扰动  $\omega_{\ell_j}$  有界,且  $\dot{\omega}_{\ell_j}$  也有界。即存在正常数  $\delta_{\ell_j}$  和  $\delta_{1\ell_j}$ ,使得  $\omega_{\ell_j} \leq \delta_{\ell_j}$ ,  $\dot{\omega}_{\ell_j} \leq \delta_{1\ell_j}$ ,  $\ell_j \in \{\tilde{x}_j, \tilde{y}_j, u_j, \tilde{v}_j, r_j\}$ 。

**假设2** 期望的纵向速度  $u_{dj}$  满足如下情况:

$$u_{dj} > \max\left\{\delta_{\tilde{x}\tilde{y}_j} + \frac{5}{2}\left|\frac{\delta_{\tilde{v}_j}}{Y_j}\right|, 2\delta_{\tilde{x}\tilde{y}_j} + 2\left|\frac{\delta_{\tilde{v}_j} + \delta_{1\tilde{v}_j}}{Y_j}\right|\right\}, \quad (10)$$

其中  $\delta_{\tilde{x}\tilde{y}_j} = \sqrt{\delta_{\tilde{x}_j}^2 + \delta_{\tilde{y}_j}^2}$ 。

**注1** 假设1表示欠驱动水面艇受到的干扰是有界的,且干扰的导数也有界。实际中的扰动大多满足该假设,如文献[17-18]也作出了如此假设。

由于在实际中,欠驱动水面艇的纵向速度和艏向角不能无限增大和减小,为了让研究更符合实际,本文作出如下假设。

**假设3** 存在常数  $\bar{u}_j$ 、 $\underline{u}_j$ 、 $\bar{\psi}_j$ 、 $\underline{\psi}_j$ ,使得

$$\underline{u}_j \leq u_j \leq \bar{u}_j, \quad (11)$$

$$\underline{\psi}_j \leq \psi_j \leq \bar{\psi}_j. \quad (12)$$

为了达到控制目标(5)和(6),引入如下定义。

**定义1**<sup>[6]</sup> 对于满足假设1的子系统(4a)~(4c),若前向视线距离和积分增益满足条件

$$\Delta_j > \frac{|X_j|}{|Y_j|} A(\sigma_j) \left[ \frac{5}{4} \frac{u_{dj} + \delta_{\tilde{x}\tilde{y}_j} + \sigma_j}{u_{dj} - \delta_{\tilde{x}\tilde{y}_j} - \sigma_j} + 1 \right],$$

$$0 < \sigma_j < u_{dj} - \delta_{\tilde{x}\tilde{y}_j} - \frac{5}{2} \left| \frac{\delta_{\tilde{v}_j}}{Y_j} \right|,$$

则控制目标(5)和(6)可以达成。其中

$$A_j(\sigma_j) = \frac{u_{dj} - \delta_{\tilde{x}\tilde{y}_j} - \sigma_j}{u_{dj} - \delta_{\tilde{x}\tilde{y}_j} - \sigma_j - \frac{5}{2} \left| \frac{\delta_{\tilde{v}_j}}{Y_j} \right|},$$

$$\psi_{dj} = \psi_{\text{ILOS}_j}.$$

为了达到控制目标(7)和(8),引入如下定义。

**定义2**<sup>[2]</sup> 如果第  $j$  艘欠驱动水面艇的纵向速度  $u_j$  能够跟踪上其期望的纵向速度

$$u_{dj} = u_{c_j}(t) - g\left(\sum_{i \in \Omega_j} (x_j - x_i - \mu_{ji})\right) - \hat{\omega}_{x_j}, \quad (13)$$

则控制目标(7)和(8)可以完成。其中:  $u_{c_j}$  为欠驱动水面艇达到稳态时的纵向速度;  $\Omega_j$  为所有向第  $j$  艘欠驱动水面艇传递信息的节点组成的集合;  $\hat{\omega}_{x_j}$  为  $\omega_{x_j}$  的估计值;  $g(s)$  是一个连续可微饱和类函数,满足  $|g(s)| \leq g_{\max}$ ,  $g(0) = 0$ ,  $0 < g'(s) \leq \varsigma$ ,  $\forall s \in R$ ,  $g_{\max} > 0$ ,  $\varsigma > 0$ 。本文选取  $g(s) = \frac{0.4}{\pi} \arctan s$ 。

### 2.2 有限时间扰动观测器设计

设计有限时间观测器来对扰动  $\omega_{\ell_j}$  进行估计,有

$$\dot{\hat{x}}_j = z_{\tilde{x}_j} + u_j \cos \psi_j - \tilde{v}_j \sin \psi_j,$$

$$\dot{\hat{y}}_j = z_{\tilde{y}_j} + u_j \sin \psi_j + \tilde{v}_j \cos \psi_j,$$

$$\dot{\hat{v}}_j = z_{\tilde{v}_j} + X_j r_j + Y_j \tilde{v}_j,$$

$$\dot{\hat{u}}_j = z_{u_j} + F_{u_j} + \tau_{u_j},$$

$$\dot{\hat{r}}_j = z_{r_j} + F_{r_j} + \tau_{r_j},$$

$$z_{\ell_j} = -\lambda_{\ell_0} \sqrt{L_{\ell_j} |\hat{\ell}_j - \ell_j|} \text{sign}(\hat{\ell}_j - \ell_j) + \hat{\omega}_{\ell_j},$$

$$\dot{\hat{\omega}}_{\ell_j} = -\lambda_{\ell_1} L_{\ell_j} \text{sign}(\hat{\omega}_{\ell_j} - z_{\ell_j}). \quad (14)$$

其中:  $z_{\ell_j} \in \{z_{\tilde{x}_j}, z_{\tilde{y}_j}, z_{u_j}, z_{\tilde{v}_j}, z_{r_j}\}$ ,  $\lambda_{\ell_0}$  和  $\lambda_{\ell_1}$  是待设计的观测器系数,  $\hat{\ell}_j$  和  $\hat{\omega}_{\ell_j}$  分别是  $\ell_j$  和  $\omega_{\ell_j}$  的估计值。定义估计误差为  $e_{\ell_j} = \hat{\ell}_j - \ell_j$ ,  $e_{\omega_{\ell_j}} = \hat{\omega}_{\ell_j} - \omega_{\ell_j}$ , 则由式(14)可得观测器的误差动态方程为

$$\begin{aligned} \dot{e}_{\ell_j} &= -\lambda_{\ell 0} \sqrt{L_{\ell_j}} |e_{\ell_j}| \text{sign}(e_{\ell_j}) + e_{\omega \ell_j}, \\ \dot{e}_{\omega \ell_j} &= -\lambda_{\ell 1} L_{\ell_j} \text{sign}(e_{\omega \ell_j} - \dot{e}_{\ell_j}) - \dot{\omega}_{\ell_j}. \end{aligned} \quad (15)$$

2.3 相关引理

**引理1**<sup>[19]</sup> 对于式(15),在假设1的条件下,如果观测器增益  $L_{\ell_j}$  满足  $L_{\ell_j} > \delta_{\ell_j}$ ,则观测器误差可以在有限时间内收敛到零,即存在一个时间常数  $t_{f\omega}$  对于任意的  $t > t_{f\omega}$ ,都能满足  $e_{\ell_j} = 0, e_{\omega \ell_j} = 0$ .

**引理2**<sup>[20]</sup> 对于一个二阶非线性系统

$$\begin{cases} \dot{\theta}_1 = \theta_2 + f_1(\theta_1, \theta_2, u, t), \\ \dot{\theta}_2 = u + f_2(\theta_1, \theta_2, u, t), \end{cases}$$

一定存在一个正的  $C^1$  函数  $C(\theta_1)$ , 满足

$$\left| \frac{\partial(\theta_2^{*5/3})}{\partial \theta_1} \right| \leq C(\theta_1),$$

其中  $\theta_2^*$  为虚拟输入.

3 协同控制器设计

3.1 设计控制器  $\tau_{rj}$

考虑子系统(4c)和(4f)及有限时间观测器(14), 可得

$$\dot{\psi}_j = r_j, \quad (16a)$$

$$\dot{r}_j = F_{rj}(u_j, \tilde{v}_j, r_j) + \tau_{rj} + \hat{\omega}_{rj}. \quad (16b)$$

接下来设计分布式控制器  $\tau_{rj}$ , 使船队中的各欠驱动水面艇能在有限时间内达到期望的艏向角.

**定理1** 对于系统(16),如果控制器  $\tau_{rj}$  满足

$$\tau_{rj} = -F_{rj} - \hat{\omega}_{rj} - \xi_{2j}^{6/5} (\zeta_{1j} + \zeta_{2j} + 1), \quad (17)$$

则系统(16)能够在有限时间内达到稳态,且不违反约束(12),即艏向角能在有限时间内跟踪上期望值且不违反约束条件,其中  $\xi_{2j}, \zeta_{1j}$  和  $\zeta_{2j}$  在证明中给出.

**证明** 首先,定义  $\psi_{ej} = \psi_j - \psi_{dj}, r_{ej} = r_j - \alpha_{rj}$ , 为子系统(16a)设计非对称障碍Lyapunov函数

$$V_1 = \frac{q_{\psi j}}{2} \ln \frac{k_{bj}^2}{k_{bj}^2 - \psi_{ej}^2} + \frac{1 - q_{\psi j}}{2} \ln \frac{k_{aj}^2}{k_{aj}^2 - \psi_{ej}^2}. \quad (18)$$

其中  $k_{bj} = \bar{\psi} - \psi_{dj}, k_{aj} = \psi_{dj} - \underline{\psi}$ , 而

$$q_{\psi j}(\psi_{ej}) = \begin{cases} 1, & \psi_{ej} > 0; \\ 0, & \psi_{ej} \leq 0. \end{cases}$$

将  $q_{\psi j}(\psi_{ej})$  简记为  $q_{\psi j}$ . 对式(18)求导,可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= \frac{q_{\psi j} \psi_{ej}}{k_{bj}^2 - \psi_{ej}^2} \left( r_{ej} + \alpha_{rj} - \dot{\psi}_{dj} - \psi_{ej} \frac{\dot{k}_{bj}}{k_{bj}} \right) + \\ &\quad \frac{(1 - q_{\psi j}) \psi_{ej}}{k_{bj}^2 - \psi_{ej}^2} \left( r_{ej} + \alpha_{rj} - \dot{\psi}_{dj} - \psi_{ej} \frac{\dot{k}_{aj}}{k_{aj}} \right). \end{aligned} \quad (19)$$

设计虚拟控制输入

$$\begin{aligned} \alpha_{rj} &= -\psi_{ej}^{3/5} [(2 + l_{\psi j}(\psi_{ej})) \kappa_{1j} - \psi_{ej}^{7/5} \kappa_{2j}] + \dot{\psi}_{dj} = \\ &\quad -\psi_{ej}^{3/5} \varphi_j + \dot{\psi}_{dj}. \end{aligned} \quad (20)$$

其中

$$\kappa_{1j} = q_{\psi j} (k_{bj}^2 - \psi_{ej}^2) + (1 - q_{\psi j}) (k_{aj}^2 - \psi_{ej}^2),$$

$$\kappa_{2j} = q_{ej} \frac{\dot{k}_{bj}}{k_{bj}} + (1 - q_{ej}) \frac{\dot{k}_{aj}}{k_{aj}},$$

$$l_{\psi j}(\psi_{ej}) = \left( \frac{1}{2\kappa_{1j}} \right)^{4/5}.$$

因此

$$\dot{V}_1 \leq -(l_{\psi j}(\psi_{ej}) + 2) \psi_{ej}^{8/5} + \frac{1}{\kappa_{1j}} |\psi_{ej}| |r_{ej}|. \quad (21)$$

然后,令  $\xi_{1j} = \psi_{ej}, \xi_{2j} = r_j^{5/3} - \alpha_{rj}^{5/3}$ , 选择

$$V_2 = V_1 + W_1, \quad (22)$$

其中

$$W_1 = \int_{\alpha_{rj}}^{r_j} (s^{5/3} - \alpha_{rj}^{5/3})^{7/5} ds. \quad (23)$$

对式(22)求导,可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \dot{V}_1 + \dot{W}_1 \leq \\ &\quad -(l_{\psi j}(\xi_{1j}) + 2) \xi_{1j}^{8/5} + \frac{1}{\kappa_{1j}} |\xi_{1j}| |r_{ej}| + \\ &\quad \xi_{2j}^{2/5} (F_{rj} + \tau_{rj} + \hat{\omega}_{rj}) + \left| \frac{\partial W_1}{\partial \xi_{1j}} \dot{\xi}_{1j} \right|, \end{aligned} \quad (24)$$

其中

$$\frac{\partial W_1}{\partial \xi_1} = -\frac{7}{5} \cdot \frac{\partial(\alpha_r^{5/3})}{\partial \xi_1} \int_{\alpha_{rj}}^{r_j} (s^{5/3} - \alpha_{rj}^{5/3})^{2/5} ds. \quad (25)$$

由文献[21]中的引理2.3,有

$$|r_{ej}| \leq 2^{2/5} |r_j^{5/3} - \alpha_{rj}^{5/3}|^{3/5} \leq 2 |\xi_{2j}|^{3/5}, \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \left| \int_{\alpha_{rj}}^{r_j} (s^{5/3} - \alpha_{rj}^{5/3})^{2/5} ds \right| &\leq \\ |r_j - \alpha_{rj}| |r_j^{5/3} - \alpha_{rj}^{5/3}|^{2/5} &\leq \\ 2^{2/5} |r_j^{5/3} - \alpha_{rj}^{5/3}|^{3/5} |r_j^{5/3} - \alpha_{rj}^{5/3}|^{2/5} &\leq \\ 2 |\xi_{2j}|. \end{aligned} \quad (27)$$

再由文献[22]中的引理2.1和式(26),得

$$\begin{aligned} |\xi_{1j}| |r_{ej}| &\leq 2 |\xi_{1j}| |\xi_{2j}|^{3/5} \leq \\ \frac{5}{4} \gamma_{1j} |\xi_{1j}|^{8/5} + \frac{3}{4} \gamma_{1j}^{-5/3} |\xi_{2j}|^{8/5}. \end{aligned} \quad (28)$$

其中

$$\gamma_{1j} = \frac{2}{5} \kappa_{1j}, \quad \zeta_{1j} = \frac{3}{4 \kappa_{1j}} \left( \frac{5}{2 \kappa_{1j}} \right)^{5/3}.$$

由式(28)可得

$$\frac{1}{\kappa_{1j}} |\xi_{1j}| |r_{ej}| \leq \frac{1}{2} |\xi_{1j}|^{8/5} + \zeta_{1j} |\xi_{2j}|^{8/5}. \quad (29)$$

由引理2可知,存在函数  $C_{\psi j}(\psi_{ej})$  能够满足

$$\left| \frac{\partial(\alpha_{rj}^{5/3})}{\partial\psi_{ej}} \right| \leq C_{\psi j}(\psi_{ej}). \quad (30)$$

注意到

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_{1j} &\leq |\dot{\psi}_{ej}| = |r_{ej} + \alpha_{rj} - \dot{\psi}_{dj}| = \\ &|r_{ej} - \psi_{ej}\varphi| \leq |r_{ej}| + |\xi_{1j}||\varphi_j|. \end{aligned} \quad (31)$$

将式(25)、(27)、(30)、(31)代入(24),并结合文献[21]中的引理2.3,可得

$$\begin{aligned} \left| \frac{\partial W_1}{\partial\psi_{ej}} \dot{\xi}_{1j} \right| &= \\ \frac{7}{5} \left| \frac{\partial(\alpha_{rj}^{5/3})}{\partial\xi_{1j}} \int_{\alpha_{rj}}^{r_j} (s^{5/3} - \alpha_{rj}^{5/3})^{2/5} ds \right| |\dot{\xi}_{1j}| &\leq \\ \frac{14}{5} (|\xi_{1j}|^{3/5} |\varphi_j| + 2|\xi_{2j}|^{3/5}) |\xi_{2j}| C_{\psi j}. \end{aligned} \quad (32)$$

对于式(32),使用文献[22]中的引理2.1,得

$$|\xi_{1j}|^{3/5} |\xi_{2j}| \leq \frac{3}{8} \gamma_{2j} |\xi_{1j}|^{8/5} + \frac{5}{8} \gamma_{2j}^{-3/5} |\xi_{2j}|^{8/5}. \quad (33)$$

其中

$$\begin{aligned} \gamma_{2j} &= \frac{10}{21} C_{\psi j}^{-1} \varphi_j^{-1}, \\ \zeta_{2j} &= \frac{5}{8} \left( \frac{21}{10} C_{\psi j} |\varphi_j| \right)^{3/5} + \frac{28}{5} C_{\psi j}. \end{aligned}$$

将式(33)代入(32),得

$$\left| \frac{\partial W_1}{\partial\psi_{ej}} \dot{\xi}_{1j} \right| \leq \frac{1}{2} |\xi_{1j}|^{8/5} + \zeta_{2j} |\xi_{2j}|^{8/5}. \quad (34)$$

将式(29)、(34)代入(24),得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &\leq -l_{\psi j}(\xi_{1j})\xi_{1j}^{8/5} + \xi_{2j}^{2/5}(F_{rj} + \tau_{rj} + \hat{\omega}_{rj}) - \\ &\xi_{1j}^{8/5} + \xi_{2j}^{8/5}(\zeta_{1j} + \zeta_{2j}). \end{aligned} \quad (35)$$

将式(17)代入(35),得

$$\dot{V}_2 \leq -l_{\psi j}(\xi_{1j})\xi_{1j}^{8/5} - (\xi_{1j}^{8/5} + \xi_{2j}^{8/5}) \leq 0. \quad (36)$$

所以,系统(16)能够在不违反约束(12)的条件下稳定,即欠驱动水面艇的艏向角能够跟踪上期望值.

下面证明艏向角能在有限时间内跟踪上期望值. 定义  $\beta_1 = \frac{4}{5} \in (0, 1)$ , 可得

$$\begin{aligned} V_2^{\beta_1} &= \\ \left[ \left( \frac{q_{\psi j}}{2} \ln \frac{k_{bj}^2}{k_{bj}^2 - \psi_{ej}^2} + \frac{1 - q_{\psi j}}{2} \ln \frac{k_{aj}^2}{k_{aj}^2 - \psi_{ej}^2} \right) + \right. \\ \left. \int_{\alpha_{rj}}^{r_j} (s^{5/3} - \alpha_{rj}^{5/3})^{7/5} ds \right]^{\beta_1} &\leq \\ \left( \frac{q_{\psi j}}{2} \ln \frac{k_{bj}^2}{k_{bj}^2 - \psi_{ej}^2} + \frac{1 - q_{\psi j}}{2} \ln \frac{k_{aj}^2}{k_{aj}^2 - \psi_{ej}^2} \right)^{\beta_1} + \\ \left| \int_{\alpha_{rj}}^{r_j} (s^{5/3} - \alpha_{rj}^{5/3})^{7/5} ds \right|^{\beta_1}. \end{aligned} \quad (37)$$

由文献[6]中的引理2,易得

$$\begin{aligned} \left( \frac{q_{\psi j}}{2} \ln \frac{k_{bj}^2}{k_{bj}^2 - \psi_{ej}^2} + \frac{1 - q_{\psi j}}{2} \ln \frac{k_{aj}^2}{k_{aj}^2 - \psi_{ej}^2} \right)^{\beta_1} &\leq \\ \left( \frac{q_{\psi j}}{2} \cdot \frac{\psi_{ej}^2}{k_{bj}^2 - \psi_{ej}^2} + \frac{1 - q_{\psi j}}{2} \cdot \frac{\psi_{ej}^2}{k_{aj}^2 - \psi_{ej}^2} \right)^{\beta_1} &= \\ \psi_{ej}^{2\beta_1} \left[ \frac{q_{\psi j}}{2(k_{bj}^2 - \psi_{ej}^2)} + \frac{1 - q_{\psi j}}{2(k_{aj}^2 - \psi_{ej}^2)} \right]^{\beta_1} &\leq \\ 2l_{\psi j}(\xi_{1j})\xi_{1j}^{8/5}. \end{aligned} \quad (38)$$

由文献[21]中的引理2.3,有

$$\left| \int_{\alpha_{rj}}^{r_j} (s^{5/3} - \alpha_{rj}^{5/3})^{7/5} ds \right|^{\beta_1} \leq 2\xi_{2j}^{8/5}. \quad (39)$$

将式(38)、(39)代入(37)中,得

$$V_2^{\beta_1} \leq 2l_{\psi j}(\xi_{1j})\xi_{1j}^{8/5} + 2\xi_{2j}^{8/5}. \quad (40)$$

结合式(36)和(40),得

$$\dot{V}_2 + \frac{1}{2} V_2^{\beta_1} \leq -\xi_{1j}^{8/5} \leq 0. \quad (41)$$

因此,当  $t > t_{f\psi}$  时,系统(16)能达到稳态,  $t_{f\psi} = 10V_2^{1/5}(0)$ . 即各欠驱动水面艇能够在有限时间  $t_{f\psi}$  内跟踪上期望的艏向角,且不违反艏向角所受的约束(12). □

### 3.2 设计控制器 $\tau_{uj}$

考虑有限时间观测器(14),子系统(4d)可变为

$$\dot{u}_j = F_{uj}(u_j, \tilde{v}_j, r_j) + \tau_{uj} + \hat{\omega}_{u_j}. \quad (42)$$

接着设计控制器  $\tau_{uj}$ ,使编队中的各欠驱动水面艇能在有限时间内达到期望的纵向速度.

**定理2** 对于系统(42),若控制器  $\tau_{uj}$  满足

$$\begin{aligned} \tau_{uj} &= -F_{uj} - \hat{\omega}_{u_j} + \dot{u}_{dj} - \\ &u_{ej}^{3/5} [(l_{uj}(u_{ej}) + 1)\kappa_{3j} - u_{ej}^{2/5} \kappa_{4j}], \end{aligned} \quad (43)$$

则系统(42)能在不违反约束(11)的前提下在有限时间内达到稳态,即各欠驱动水面艇能在有限时间内达到期望的纵向速度,且其始终不违反约束. 其中

$$\kappa_{3j} = q_{uj}(k_{dj}^2 - u_{ej}^2) + (1 - q_{uj})(k_{cj}^2 - u_{ej}^2),$$

$$\kappa_{4j} = q_{uj} \frac{\dot{k}_{dj}}{k_{dj}} + (1 - q_{uj}) \frac{\dot{k}_{cj}}{k_{cj}},$$

$$l_{uj}(u_{ej}) = \left( \frac{1}{2\kappa_{3j}} \right)^{4/5}.$$

**证明** 定义  $u_{ej} = u_j - u_{dj}$ ,构造非对称障碍

Lyapunov 函数

$$V_3 = \frac{q_{uj}}{2} \ln \frac{k_{dj}^2}{k_{dj}^2 - u_{ej}^2} + \frac{1 - q_{uj}}{2} \ln \frac{k_{cj}^2}{k_{cj}^2 - u_{ej}^2}. \quad (44)$$

其中:  $k_{cj} = \bar{u} - u_{dj}$ ,  $k_{dj} = u_{dj} - \underline{u}$ .

对式(44)求导,得

$$\dot{V}_3 = \frac{q_{uj}u_{ej}}{k_{dj}^2 - u_{ej}^2} (F_{uj} + \tau_{uj} + \hat{\omega}_{u_j} - \dot{u}_{cj} - u_{ej} \frac{\dot{k}_{dj}}{k_{dj}}) +$$

$$\frac{(1 - q_{uj})u_{ej}}{k_{dj}^2 - u_{ej}^2} \left( F_{uj} + \tau_{uj} + \hat{\omega}_{uj} - \dot{u}_{cj} - u_{ej} \frac{\dot{k}_{dj}}{k_{dj}} \right). \quad (45)$$

将式(43)代入(45),得

$$\dot{V}_3 = -(l_{uj}(u_{ej}) + 1)u_{ej}^{8/5} \leq 0. \quad (46)$$

由式(46),在 $u_j$ 不违反约束(11)的前提下, $u_{ej}$ 能收敛到零,即各欠驱动水面艇的纵向速度能在不违反约束的前提下跟踪上期望值.

下面证明 $u_{ej}$ 能在有限时间内收敛到零.定义 $\beta_2 = \frac{4}{5} \in (0, 1)$ ,由文献[7]中的引理2,有

$$\begin{aligned} V_3^{\beta_2} &= \left( \frac{q_{uj}}{2} \ln \frac{k_{dj}^2}{k_{dj}^2 - u_{ej}^2} + \frac{1 - q_{uj}}{2} \ln \frac{k_{cj}^2}{k_{cj}^2 - u_{ej}^2} \right)^{\beta_2} \leq \\ & \left( \frac{q_{uj}}{2} \cdot \frac{u_{ej}^2}{k_{dj}^2 - u_{ej}^2} + \frac{1 - q_{uj}}{2} \cdot \frac{u_{ej}^2}{k_{cj}^2 - u_{ej}^2} \right)^{\beta_2} = \\ & l_{uj}(u_{ej})u_{ej}^{8/5}. \end{aligned} \quad (47)$$

式(46)与(47)相加,得

$$\dot{V}_3 + V_3^{\beta_2} \leq -u_{ej}^{8/5} \leq 0. \quad (48)$$

因此,当 $t > t_{fu}$ 时,系统(42)能达到稳态, $t_{f\psi} = 5V_3^{1/\beta_2}(0)$ .即船队中的各欠驱动水面艇的纵向速度能在有限时间 $t_{fu}$ 内达到期望值,且不违反纵向速度所受约束(11).□

**定理3** 由定义1和定义2可知,只要船队中的各欠驱动水面艇的纵向速度和艏向角能够达到期望值,船队就可以达成控制目标(5)~(8).由定理1和定理2可知,这两个条件都能在有限时间内达成,所以船队可以按照队形沿期望的直线路径航行.

**注2** 欠驱动水面艇在实际航行中也经常会遇到未建模动态、单向输入约束和控制器死区等问题,目前某些系统中上述问题已经有了相应的解决方案.如文献[23],把气动人工肌肉系统的控制器分为两部分,对于不确定性和控制器死区集中的一部分,使用双层神经网络估计该部分,解决了参数不确定和控制器死区等问题;文献[24]也是将船用起重机系统的不确定性、单项输入约束等集中起来,通过自适应的方法来估计这些未知量.本文的结论也可扩展到模型中包含未建模动态、单向输入约束和控制器死区等情况,此时,子系统(4d)和(4f)可变为

$$\begin{aligned} \dot{u}_j &= F_{uj} + \tau_{uj} + \Delta F_{uj} + \Delta \tau_{uj} + \omega_{uj}, \\ \dot{r}_j &= F_{rj} + \tau_{rj} + \Delta F_{rj} + \Delta \tau_{rj} + \omega_{rj}. \end{aligned}$$

然后将上式观测器(14)对 $\Delta F_{uj} + \Delta \tau_{uj} + \omega_{uj}$ 和 $\Delta F_{rj} + \Delta \tau_{rj} + \omega_{rj}$ 进行观测,再用其观测值代替控制器(42)和(17)中的 $\hat{\omega}_{uj}$ 和 $\hat{\omega}_{rj}$ ,定理1和定理2的结果仍然有

效.

### 4 仿真实验和分析

为了验证本文所提出方法的有效性,在Simulink中对3艘欠驱动水面艇进行仿真,模型各参数选择参照文献[25], $m_{11j} = 25.8, m_{22j} = 33.8, m_{23j} = m_{32j} = -11.748, m_{33j} = 6.813, d_{11j} = 2.0, d_{22j} = 7.0, d_{23j} = d_{32j} = -2.545, d_{33j} = 1.422$ .分别选取3艘欠驱动水面艇的初始状态为 $[0, 0, 0, 0, 0, 0], [0, 1, 0, 0, 0, 0.5], [0, -1, 0, 0, 0, 1]$ .为模拟欠驱动水面艇在航行中所受干扰,将环境扰动取为 $[\omega_{xj}, \omega_{yj}, \omega_{vj}, \omega_{uj}, \omega_{rj}] = [0.1 \sin(0.2t) + 0.1 \cos(0.1t), 0.1 \cos(0.1t) + 0.2 \sin(0.2t), 0.4 \sin(0.1t) + 0.1 \cos(0.1t), 0.3 \sin(0.1t) + 0.2 \cos(0.1t), 0.5 \sin(0.1t)]$ .编队中的参数 $\chi_1 = 0, \chi_2 = 0.5, \chi_3 = -0.5, \mu_{13} = 1, \mu_{21} = -1, \mu_{32} = 0$ .定义1中的参数 $\Delta_j = 5, \sigma_j = 0.1$ .定义2中, $u_{cj} = 0.6$ .观测器参数 $\lambda_{\ell 0} = \lambda_{\ell 1} = 1, L_{\ell j} = 3$ .欠驱动水面艇受到的限制为 $\bar{u}_j = 0.8, \underline{u}_j = -0.2, \bar{\psi}_j = \pi/2, \underline{\psi}_j = -\pi/2$ .欠驱动水面艇之间的通信拓扑如图1所示.图2~图5给出了仿真曲线.

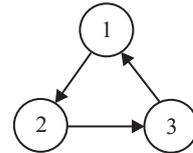


图1 通信拓扑

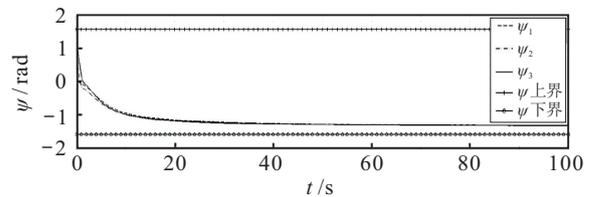


图2 艏向角和纵向速度

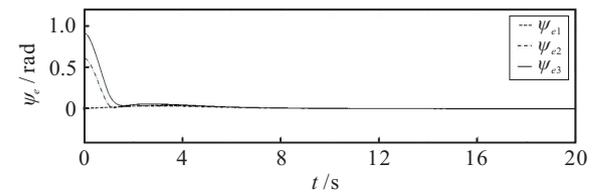


图3 艏向角和纵向速度误差

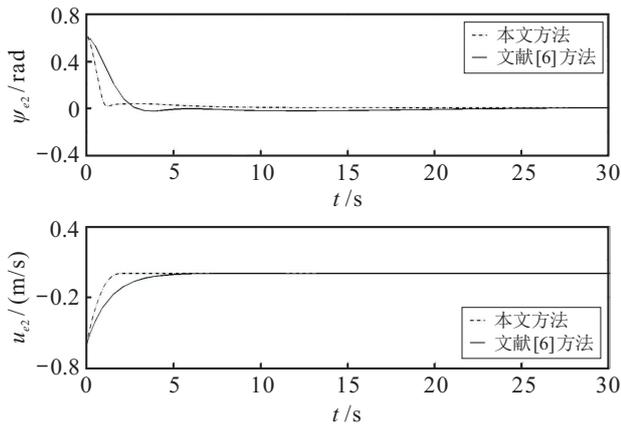


图4 艏向角和纵向速度误差对比

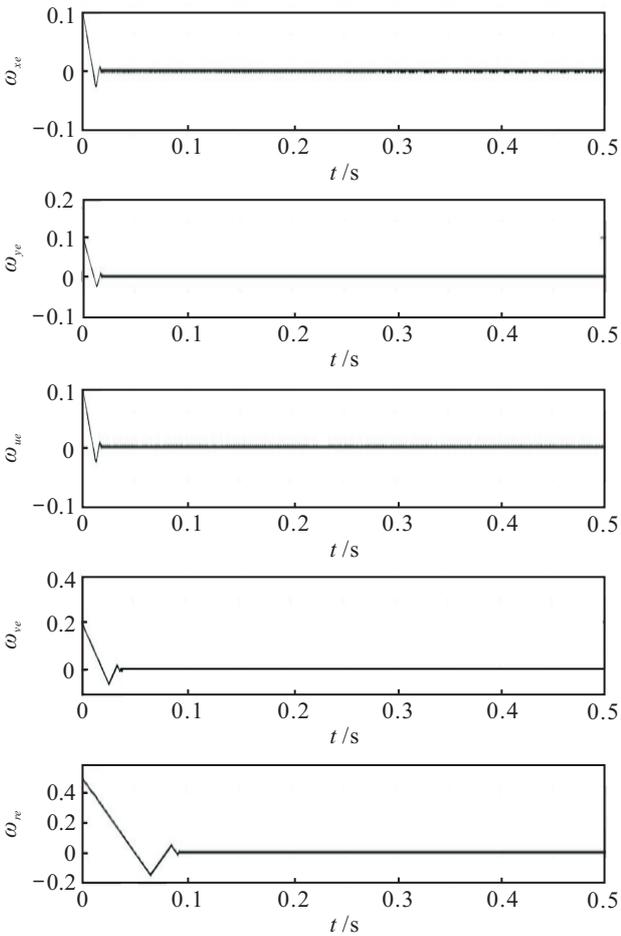


图5 扰动观测器误差

由图2可知,3艘欠驱动水面艇的艏向角和纵向速度都可以在受限条件下达到稳态. 由图3可知,欠驱动水面艇的艏向角和纵向速度误差均可以快速收敛到零. 以第2艘水面艇为例,与文献[6]做对比. 由图4可知,本文提出的方法收敛速度较快,能够让欠驱动水面艇的纵向速度和艏向角尽快达到期望值,以达到尽快形成期望队形进行路径跟踪的目的. 如图5所示,所有扰动误差均可以尽快收敛到零,即文中设计的观测器可以让观测值在有限时间内跟踪上实际的扰动值.

## 5 结论

本文主要研究了多欠驱动水面艇的有限时间协同直线路径跟踪控制问题,同时考虑了水面艇受到不匹配扰动以及纵向速度和艏向角受限的情况. 通过使用积分视线制导律和有限时间观测器同时补偿了匹配和不匹配扰动的影响,通过构造非对称障碍Lyapunov函数解决了欠驱动水面艇的受限问题. 之后通过设计控制器 $\tau_{u_j}$ 和 $\tau_{r_j}$ ,使系统能够在有限时间内让艏向角和纵向速度跟踪上期望值,尽快完成编队和直线路径跟踪. 最后通过仿真结果表明,在匹配和不匹配扰动的同时作用下,各欠驱动水面艇控制误差都能在有限时间内收敛到零,且不违反所受约束.

## 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] Borhaug E, Pavlov A V, Panteley E, et al. Straight line path following for formations of underactuated marine surface vessels[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2011, 19(3): 493-506.
- [3] Lekkas A M, Fossen T I. Integral LOS path following for curved paths based on a monotone cubic hermite spline parametrization[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2014, 22(6): 2287-2301.
- [4] Liu L, Wang D, Peng Z H. ESO-based line-of-sight guidance law for path following of underactuated marine surface vehicles with exact sideslip compensation[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2017, 42(2): 477-487.
- [5] Borhaug E, Pavlov A, Pettersen K Y. Integral LOS control for path following of underactuated marine surface vessels in the presence of constant ocean currents[C]. Proceedings of the 47th Conference on Decision and Control. Mexico: IEEE, 2008: 4984-4991.
- [6] Caharija W, Pettersen K Y, Bibuli M, et al. Integral line-of-sight guidance and control of underactuated marine vehicles: Theory, simulations, and experiments[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2016, 24(5): 1623-1642.
- [7] Ren B, Ge S S, Tee K P, et al. Adaptive neural control for output feedback nonlinear systems using a barrier lyapunov function[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2010, 21(8): 1339-1345.
- [8] Zhao Z, He W, Ge S S. Adaptive neural network control of A fully actuated marine surface vessel with multiple

- output constraints[J]. *IEEE Transactions on Control System Technology*, 2014, 22(4): 1536-1543.
- [9] Ghommam J, Saad M. Adaptive leader-follower formation control of underactuated surface vessels under asymmetric range and bearing constraints[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(2): 852-865.
- [10] Zuo Z, Han Q L, Ning B, et al. An overview of recent advances in fixed-time cooperative control of multiagent systems[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, 14(6): 2322-2334.
- [11] 朱齐丹, 马俊达, 刘志林, 等. 多欠驱动自主水面船的鲁棒协调控制器设计[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2017, 38(12): 1897-1905.  
(Zhu Q D, Ma J D, Liu Z L, et al. A robust coordination-control design for multiple underactuated autonomous surface vehicles[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2017, 38(12): 1897-1905.)
- [12] 林安辉, 蒋德松, 曾建平. 具有输入饱和的欠驱动船舶编队控制[J]. *自动化学报*, 2018, 44(8): 1496-1504.  
(Lin A H, Jiang D S, Zeng J P. Underactuated ship formation control with input saturation[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2018, 44(8): 1496-1504.)
- [13] Li T, Zhao R, Chen C L P, et al. Finite-time formation control of underactuated ships using nonlinear sliding mode control[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2018, 48(11): 3243-3253.
- [14] Jin X. Fault tolerant finite-time leader-follower formation control for autonomous surface vessels with LOS range and angle constraints[J]. *Automatica*, 2016, 68: 228-236.
- [15] Fossen T I. *Marine control systems*[M]. Trondheim: Marine Cybernetics, 2002: 175-223.
- [16] Do K D, Pan J. Global tracking control of underactuated ships with nonzero off-diagonal terms in their system matrices[J]. *Automatica*, 2005, 41(1): 87-95.
- [17] Wang N, Sun Z, Yin J, et al. Finite-time observer based guidance and control of underactuated surface vehicles with unknown sideslip angles and disturbances[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 14059-14070.
- [18] Lu Y, Zhang G, Sun Z, et al. Robust adaptive formation control of underactuated autonomous surface vessels based on MLP and DOB[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2018, 94: 503-519.
- [19] Shtessel Y B, Shkolnikov I A, Levant A. Smooth second-order sliding modes: Missile guidance application[J]. *Automatica*, 2007, 43(8): 1470-1476.
- [20] Huang X Q, Lin W, Yang B. Global finite-time stabilization of a class of uncertain nonlinear systems[J]. *Automatica*, 2005, 41(5): 881-888.
- [21] Qian C J, Lin W. Non-Lipschitz continuous stabilizers for nonlinear systems with uncontrollable unstable linearization [J]. *Systems & Control Letters*, 2001, 42(3): 185-200.
- [22] Lin W, Qian C. Adding one power integrator: A tool for global stabilization of high-order lower-triangular systems[J]. *Systems & Control Letters*, 2000, 39(5): 339-351.
- [23] Yang T, Sun N, Chen H, et al. Neural network-based adaptive antiswing control of an underactuated ship-mounted crane with roll motions and input dead zones[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2020, 31(3): 901-914.
- [24] Sun N, Liang D K, Wu Y M, et al. Adaptive control for pneumatic artificial muscle systems with parametric uncertainties and unidirectional input constraints[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 16(2): 969-979.
- [25] Breivik M. *Nonlinear maneuvering control of underactuated ships*[D]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2003: 10-30.

### 作者简介

李莉莉 (1982—), 女, 副教授, 博士, 从事切换系统、输出调节和船舶运动控制等研究, E-mail: lilili@dlmu.edu.cn;

董凯 (1994—), 男, 硕士生, 从事欠驱动水面艇运动控制的研究, E-mail: 18840867696@163.com;

郭戈 (1972—), 男, 教授, 博士生导师, 从事智能交通系统、运动目标检测跟踪网络等研究, E-mail: geguo@yeah.net.

(责任编辑: 李君玲)