

具有未知动态的船舶编队输出反馈控制

林安辉^{1,2}, 蒋德松², 曾建平^{1†}

(1. 厦门大学 航空航天学院, 福建 厦门 361005; 2. 集美大学 轮机工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 研究了仅利用相对位置信息和相对航向信息的船舶编队输出反馈控制问题. 首先使用 leader-follower 策略, 建立了船舶编队的运动学模型. 然后应用微分同胚变换将系统解耦成 3 个子系统. 根据船舶低频运动的特点, 在跟随船水动力学模型中粘性水动力和力矩未知以及所有船舶速度都不可测量的假定下, 提出了一种高增益广义比例积分观测器来估计这些未知和不可测量动态. 在高增益广义比例积分观测器的基础上, 分别设计了线性输出反馈控制器和输入饱和和受限的输出反馈控制器, 并分析了闭环系统的稳定性. 最后仿真结果表明了方法的有效性.

关键词: 船舶编队控制; 速度不可测量; 粘性水动力和力矩未知; 输出反馈; 状态估计; 输入饱和

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Ship formation control via output feedback with unknown dynamics

LIN An-hui^{1,2}, JIANG De-song², ZENG Jian-ping^{1†}

(1. School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen Fujian 361005, China;

2. School of Marine Engineering, Jimei University, Xiamen Fujian 361021, China)

Abstract: This paper focuses on the ship formation control problem via output feedback, with only the information of the relative positions and relative heading angles available. Firstly, the kinematic model of the ship formation is established using the leader-follower strategy. Then the system is decoupled into three subsystems via the diffeomorphism transformation. According to the low frequency characteristics of the ship motion, and the assumption that the viscous hydrodynamic forces and moments in the hydrodynamic models of the follower ships are unknown and the velocities of all the ships are unmeasurable, the high-gain generalized proportion-integral observers are proposed to estimate the unknown and unmeasurable dynamics. On the basis of the high-gain generalized proportion-integral observers, the linear output feedback controllers and the output feedback controllers with input saturation are designed respectively, and the stability of the closed-loop systems is analyzed. Finally, the simulation results show the effectiveness of the proposed approach.

Key words: ship formation control; unmeasurable velocity; unknown viscous hydrodynamic forces and moments; output feedback; state estimation; input saturation

1 引言(Introduction)

船舶在惯性坐标系下的速度是通过位移对于时间的导数来求取, 但位移大多是动态变化的没有数学表达式, 所以往往无法获得速度的精确值. 速度的测量通常采用位移的差分来估计. 在位置测量存在扰动时, 虽然使用卡尔曼滤波器可以抑制扰动, 但通过差分方法仍然无法准确估计出速度. 因此, 研究输出为位置和航向信息的船舶运动控制具有意义. 高增益观测器^[1-3]和跟踪-微分器^[4-5]具有滤波功能又不依赖对象模型, 成为估计速度的有效工具. 高增益观测器为线性观测器, 而跟踪-微分器为非线性观测器. 当增益取

充分大时, 高增益观测器将产生微分峰值现象. 跟踪-微分器中引入了符号函数, 具有快速收敛的特性但存在抖振现象. 文[6-7]应用高增益观测器来估计船舶的速度, 分别实现了船舶航向和动力定位系统的控制.

现代船舶多数配备主推进装置、侧推器和舵机用于控制船舶在水面上纵向、横荡和艏摇 3 个自由度的运动, 属于全驱动控制系统. 使用 leader-follower 策略和一致性协议是研究编队控制的两种重要方法. 在船舶编队控制领域, 基于速度可知的状态反馈控制已经取得了较多成果^[8-13], 但速度不可测量下的输出反馈控制研究较少. 文[14]在缺乏领航者速度和加速度信

收稿日期: 2016-10-13; 录用日期: 2017-04-13.

†通信作者. E-mail: jpzeng@xmu.edu.cn; Tel.: +86 592-2580036.

本文责任编辑: 武玉强.

国家自然科学基金项目(61374037), 福建省自然科学基金项目(2015J01641, 2016J01736)资助.

Supported by National Natural Science Foundation of China (61374037) and Natural Science Foundation of Fujian Province, China (2015J01641, 2016J01736).

息的情形下, 通过设计虚拟航行器跟踪领航者, 进而其它跟随者再跟踪虚拟航行器来实现编队控制, 但控制器中仍然需要跟随者的速度信息. 文[15]使用高增益观测器估计船舶的速度信息, 应用一阶低通滤波器来估计速度虚拟控制输入的微分, 并采用神经网络方法估计干扰和不确定动态来研究船舶编队路径跟随控制.

在系统具有未知动态以及受到未知干扰时, 采用观测器估计并在控制器中补偿, 能够有效地克服未知动态和抑制扰动. 目前, 对未知动态和干扰的估计方法有干扰观测器^[16]、扩张观测器^[5,17]、广义比例积分观测器^[18-19]、高增益扩张观测器^[20]等. 这些观测器都是通过增加维数来观测系统, 其中扩张观测器、广义比例积分观测器和高增益扩张观测器不仅可估计干扰而且可估计信号微分. 在运动体系中的动力学模型含有外扰和速度不可测量的情形下, 较难设计一阶干扰观测器来估计外扰. 三阶扩张观测器和高增益扩张观测器仅估计外扰和速度, 广义比例积分观测器通过扩展更多的维数来提高估计精度. 但若广义比例积分观测器的增益选取较小时, 可能造成估计的不准确.

本文在各船舶速度不可测量和水动力学模型中粘性水动力和力矩未知的假定下, 采用leader-follower策略研究了基于观测器的船舶编队输出反馈控制问题. 首先, 应用微分同胚变换, 将编队模型转化为3个解耦的子系统, 所得到的虚拟状态分别为领航船与跟随船的距离偏差、航向偏差和相对速度. 这样, 只需设计领航船与跟随船相对速度观测器, 不必分别设计领航船和跟随船的速度观测器, 减少了观测器的数量. 距离偏差的测量可以不使用全球导航卫星系统等绝对定位设备. 然后, 根据船舶低频运动的特点, 提出了一种高增益广义比例积分观测器, 该观测器不仅可估计领航船与跟随船的相对速度还可估计系统的未知动态. 在广义比例积分观测器中, 加入高增益项有利于减少观测器的维数, 能够加快观测器估计误差的收敛速度. 进一步, 考虑跟随船控制输入幅值受限的情形, 受文[21]的启发, 在控制器中引入约束函数使得控制输入不会进入饱和区, 将领航船与跟随船的相对速度作为虚拟控制输入, 使得闭环系统表现为级联形式并分析了系统的稳定性.

2 系统模型与问题描述(System model and problem description)

船舶编队由1艘领航船和n艘跟随船组成, 使用 $\{O\}$, $\{B_0\}$ 和 $\{B_i\}$ 分别表示惯性坐标系、领航船的船体坐标系和跟随船 $i(1, 2, \dots, n)$ 的船体坐标系, $(x_{0/i}, y_{0/i})$ 表示领航船在坐标系 $\{B_i\}$ 的坐标, ψ_0 和 ψ_i 分别表示领航船和跟随船 i 与坐标系 $\{O\}$ 纵轴偏差角度即航

向. 领航船和跟随船 i 在水面上纵向、横荡和船摇3个自由度的运动示意图如图1所示.

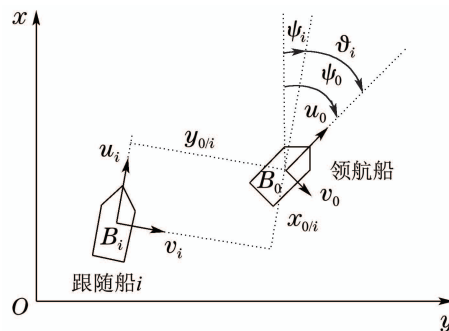


图1 船舶编队的运动示意图

Fig. 1 Motion sketch map of the ship formation

在图1中: u_0, v_0 和 r_0 分别表示领航船的纵向速度、横荡速度和船摇角速度; u_i, v_i 和 r_i 分别表示跟随船 i 的纵向速度、横荡速度和船摇角速度.

由图1可得, 领航船与跟随船 i 距离偏差 $(x_{0/i}, y_{0/i})$ 和航向偏差 $\vartheta_i = \psi_0 - \psi_i$ 的运动学模型为

$$\begin{cases} \dot{x}_{0/i} = -u_i + u_0 \cos \vartheta_i - v_0 \sin \vartheta_i + r_i y_{0/i}, \\ \dot{y}_{0/i} = -v_i + u_0 \sin \vartheta_i + v_0 \cos \vartheta_i - r_i x_{0/i}, \\ \dot{\vartheta}_i = -r_i + r_0. \end{cases} \quad (1)$$

跟随船 i 在水面上纵向、横荡和船摇3个自由度运动的水动力学模型为

$$\begin{cases} (m_i - X_{\dot{u}i})\dot{u}_i = X_i + X_{\tau i}, \\ (m_i - Y_{\dot{v}i})\dot{v}_i + (m_i x_{g_i} - Y_{\dot{r}i})\dot{r}_i = Y_i + Y_{\tau i}, \\ (m_i x_{g_i} - N_{\dot{v}i})\dot{v}_i + (I_{z_i} - N_{\dot{r}i})\dot{r}_i = N_i + N_{\tau i}, \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} X_i = m_i v_i r_i + m_i x_{g_i} r_i^2 + X_{H_i}, \\ Y_i = -m_i u_i r_i + Y_{H_i}, \\ N_i = -m_i x_{g_i} u_i r_i + N_{H_i}, \end{cases}$$

其中: m_i 为跟随船 i 的质量; $X_{\dot{u}i}, Y_{\dot{v}i}, Y_{\dot{r}i}, N_{\dot{v}i}, N_{\dot{r}i}$ 为跟随船 i 的附加质量和附加惯性矩; $(x_{g_i}, 0)$ 为跟随船 i 船体重心在坐标系 $\{B_i\}$ 的坐标; $X_{\tau i}, Y_{\tau i}, N_{\tau i}$ 为跟随船 i 主推进装置、侧推器和舵机等装置作用下产生的控制力和力矩;

$$X_{H_i} = X_{H_i}(u_i, v_i, r_i), \quad Y_{H_i} = Y_{H_i}(u_i, v_i, r_i),$$

$$N_{H_i} = N_{H_i}(u_i, v_i, r_i)$$

为跟随船 i 未知的粘性水动力和力矩.

若领航船与跟随船 i 的距离偏差 $(x_{0/i}, y_{0/i})$ 保持固定, 航向偏差 ϑ_i 保持为零, 则各船舶保持固定队形. 设领航船与跟随船 i 的期望距离偏差为常数 x_{di} 和 y_{di} . 记距离偏差实际值与期望值误差

$$x_{ei} = x_{0/i} - x_{di}, \quad y_{ei} = y_{0/i} - y_{di},$$

则误差满足如下方程:

$$\begin{cases} \dot{x}_{ei} = -u_i + u_0 \cos \vartheta_i - v_0 \sin \vartheta_i + r_i(y_{ei} + y_{di}), \\ \dot{y}_{ei} = -v_i + u_0 \sin \vartheta_i + v_0 \cos \vartheta_i - r_i(x_{ei} + x_{di}), \\ \dot{\vartheta}_i = -r_i + r_0. \end{cases} \quad (3a)$$

令矩阵

$$\begin{bmatrix} m_{11i} & m_{12i} \\ m_{21i} & m_{22i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_i - Y_{\dot{v}i} & m_i x_{gi} - Y_{\dot{r}i} \\ m_i x_{gi} - N_{\dot{v}i} & I_{zi} - N_{\dot{r}i} \end{bmatrix}^{-1},$$

则跟随船*i*的水动力学模型(2)可写为

$$\begin{cases} \dot{u}_i = (m_i - X_{\dot{u}i})^{-1}(X_i + X_{\tau i}), \\ \dot{v}_i = m_{11i}(Y_i + Y_{\tau i}) + m_{12i}(N_i + N_{\tau i}), \\ \dot{r}_i = m_{21i}(Y_i + Y_{\tau i}) + m_{22i}(N_i + N_{\tau i}). \end{cases} \quad (3b)$$

本文考虑的是系统(3)在以下假定的编队控制问题:

- 1) 跟随船*i*的纵向速度 u_i 、横荡速度 v_i 和艏摇角速度 r_i 不可测量;
- 2) 跟随船*i*无法获取领航船的纵向速度 u_0 、横荡速度 v_0 和艏摇角速度 r_0 ;
- 3) 跟随船*i*水动力学模型中的粘性水动力和力矩 X_{Hi} , Y_{Hi} , N_{Hi} 未知;
- 4) 领航船与跟随船*i*的距离偏差 $(x_{0/i}, y_{0/i})$ 和航向偏差 ϑ_i 是可测量的。

注1 领航船的航向 ψ_0 和跟随船*i*的航向 ψ_i 可由电罗经测量, 航向偏差 $\vartheta_i = \psi_i - \psi_0$. 跟随船*i*与领航船的距离偏差可采用视距(line-of-sight, LOS)测量, 记 ρ_i 和 α_i 分别为跟随船*i*与领航船的船体中心视线距离和视线角, 则纵向和横向距离偏差分别为 $x_{0/i} = \rho_i \cos \alpha_i$, $y_{0/i} = \rho_i \sin \alpha_i$. 若采用全球导航卫星系统等绝对定位设备, 记 (x_0, y_0) 和 (x_i, y_i) 分别为领航船船体中心和跟随船*i*船体中心在坐标系 $\{O\}$ 的坐标点, 则纵向和横向距离偏差分别为

$$\begin{aligned} x_{0/i} &= (x_0 - x_i) \cos \psi_i + (y_0 - y_i) \sin \psi_i, \\ y_{0/i} &= (y_0 - y_i) \cos \psi_i - (x_0 - x_i) \sin \psi_i. \end{aligned}$$

注2 附加质量和附加惯性矩 $X_{\dot{u}i}$, $Y_{\dot{v}i}$, $Y_{\dot{r}i}$, $N_{\dot{v}i}$, $N_{\dot{r}i}$ 可由经验公式计算; 而粘性水动力和力矩 X_{Hi} , Y_{Hi} , N_{Hi} 往往需要由船模试验才能得到。

定义 $(x_{ei}, y_{ei}, \vartheta_i)$ 为系统(3)的输出, $(X_{\tau i}, Y_{\tau i}, N_{\tau i})$ 为系统(3)的输入. 若系统(3)在输出反馈控制器

$$\begin{aligned} X_{\tau i} &= X_{\tau i}(x_{ei}, y_{ei}, \vartheta_i), \\ Y_{\tau i} &= Y_{\tau i}(x_{ei}, y_{ei}, \vartheta_i), \\ N_{\tau i} &= N_{\tau i}(x_{ei}, y_{ei}, \vartheta_i) \end{aligned}$$

作用下是渐近稳定的, 则

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x_{0/i} = x_{di}, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} y_{0/i} = y_{di}, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \vartheta_i = 0,$$

即各船舶形成期望队形. 这样, 船舶编队控制问题转化为系统(3)的输出反馈镇定控制问题.

3 船舶编队输出反馈控制 (Ship formation control via output feedback)

3.1 微分同胚变换(Diffeomorphism transformation)

对于系统(3), 取新的坐标变量

$$\begin{cases} z_{11i} = x_{ei}, \\ z_{12i} = u_0 \cos \vartheta_i - v_0 \sin \vartheta_i - u_i + r_i(y_{ei} + y_{di}), \\ z_{21i} = y_{ei}, \\ z_{22i} = u_0 \sin \vartheta_i + v_0 \cos \vartheta_i - v_i - r_i(x_{ei} + x_{di}), \\ z_{31i} = \vartheta_i, \\ z_{32i} = r_0 - r_i, \end{cases}$$

则微分同胚变换后的方程为

$$\begin{cases} \dot{z}_{11i} = z_{12i}, \\ \dot{z}_{12i} = \dot{f}_{1i} - (m_i - X_{\dot{u}i})^{-1}(X_i + X_{\tau i}), \end{cases} \quad (4a)$$

$$\begin{cases} \dot{z}_{21i} = z_{22i}, \\ \dot{z}_{22i} = \dot{f}_{2i} - m_{11i}(Y_i + Y_{\tau i}) - m_{12i}(N_i + N_{\tau i}), \end{cases} \quad (4b)$$

$$\begin{cases} \dot{z}_{31i} = z_{32i}, \\ \dot{z}_{32i} = \dot{r}_0 - m_{21i}(Y_i + Y_{\tau i}) - m_{22i}(N_i + N_{\tau i}), \end{cases} \quad (4c)$$

其中:

$$\begin{aligned} f_{1i} &= u_0 \cos \vartheta_i - v_0 \sin \vartheta_i + r_i(y_{ei} + y_{di}), \\ f_{2i} &= u_0 \sin \vartheta_i + v_0 \cos \vartheta_i - r_i(x_{ei} + x_{di}). \end{aligned}$$

在系统(4)中, z_{12i} , z_{22i} 和 z_{32i} 的物理意义分别为领航船相对跟随船*i*的相对纵向速度、相对横荡速度和相对艏摇角速度. 这样, 系统(3)就解耦为二阶子系统(4a)–(4c). 将系统(4a)–(4c)中未知和不可测量的动态记为

$$\begin{cases} w_{1i} = -(m_i - X_{\dot{u}i})^{-1}X_i + \dot{f}_{1i}, \\ w_{2i} = -m_{11i}Y_i - m_{12i}N_i + \dot{f}_{2i}, \\ w_{3i} = -m_{21i}Y_i - m_{22i}N_i + \dot{r}_0, \end{cases}$$

则系统(4)可改写为

$$\begin{cases} \dot{z}_{j1i} = z_{j2i}, \\ \dot{z}_{j2i} = w_{ji} + \tau_{ji}, \end{cases} \quad j = 1, 2, 3, \quad (5)$$

其中: $\tau_{1i} = -(m_i - X_{\dot{u}i})^{-1}X_{\tau i}$, $\tau_{2i} = -m_{11i}Y_{\tau i} - m_{12i}N_{\tau i}$, $\tau_{3i} = -m_{21i}Y_{\tau i} - m_{22i}N_{\tau i}$.

在系统(5)中, 由于 w_{ji} 未知, 不能直接采用反馈线性化方法消除, 控制器 $X_{\tau i}$, $Y_{\tau i}$ 和 $N_{\tau i}$ 无法直接设计, 可先采用观测器估计这些动态.

3.2 高增益广义比例积分观测器(High-gain generalized proportional-integral observers)

记 w_{ji} 的 c_{ji} 阶微分为 $w_{ji}^{(c_{ji})}$. 对于系统(5), 取高增益广义比例积分观测器为

$$\begin{cases} \dot{\xi}_{j1i} = \xi_{j2i} + \varepsilon_{ji}\beta_{j1i}(z_{j1i} - \xi_{j1i}), \\ \dot{\xi}_{j2i} = \xi_{j3i} + \varepsilon_{ji}^2\beta_{j2i}(z_{j1i} - \xi_{j1i}) + \tau_{ji}, \\ \dot{\xi}_{j3i} = \xi_{j4i} + \varepsilon_{ji}^3\beta_{j3i}(z_{j1i} - \xi_{j1i}), \\ \vdots \\ \dot{\xi}_{j[c_{ji}+3]i} = \xi_{j[c_{ji}+4]i} + \varepsilon_{ji}^{c_{ji}+3}\beta_{j[c_{ji}+3]i}(z_{j1i} - \xi_{j1i}), \\ \dot{\xi}_{j[c_{ji}+4]i} = \varepsilon_{ji}^{c_{ji}+4}\beta_{j[c_{ji}+4]i}(z_{j1i} - \xi_{j1i}), \end{cases} \quad (6)$$

其中: $\varepsilon_{ji} > 0$ 为高增益参数; 可调参数 $(\beta_{j1i}, \dots, \beta_{j[c_{ji}+4]i})$ 使得 $s^{c_{ji}+4} + \beta_{j1i}s^{c_{ji}+3} + \dots + \beta_{j[c_{ji}+4]i} = 0$ 的特征根具有负实部.

观测器(6)中的估计值与实际值误差为

$$\begin{cases} e_{j1i} = z_{j1i} - \xi_{j1i}, \\ e_{j2i} = z_{j2i} - \xi_{j2i}, \\ e_{j3i} = w_{ji} - \xi_{j3i}, \\ \vdots \\ e_{j[c_{ji}+3]i} = w_{ji}^{(c_{ji})} - \xi_{j[c_{ji}+3]i}, \\ e_{j[c_{ji}+4]i} = w_{ji}^{(c_{ji}+1)} - \xi_{j[c_{ji}+4]i}, \end{cases}$$

则观测器估计误差满足方程

$$\begin{cases} \dot{e}_{j1i} = e_{j2i} - \varepsilon_{ji}\beta_{j1i}e_{j1i}, \\ \dot{e}_{j2i} = e_{j3i} - \varepsilon_{ji}^2\beta_{j2i}e_{j1i}, \\ \dot{e}_{j3i} = e_{j4i} - \varepsilon_{ji}^3\beta_{j3i}e_{j1i}, \\ \vdots \\ \dot{e}_{j[c_{ji}+3]i} = e_{j[c_{ji}+4]i} - \varepsilon_{ji}^{c_{ji}+3}\beta_{j[c_{ji}+3]i}e_{j1i}, \\ \dot{e}_{j[c_{ji}+4]i} = w_{ji}^{(c_{ji}+2)} - \varepsilon_{ji}^{c_{ji}+4}\beta_{j[c_{ji}+4]i}e_{j1i}. \end{cases} \quad (7)$$

定理 1 若 $\varepsilon_{ji}^{-1}w_{ji}^{(c_{ji}+2)} = 0$, 则观测器估计误差系统(7)是渐近稳定的.

证 沿用文[2]中的思路, 取 $\varepsilon_{ji}^{-c_{ji}-4}\eta_{j1i} = e_{j1i}, \dots, \varepsilon_{ji}^{-1}\eta_{j[c_{ji}+4]i} = e_{j[c_{ji}+4]i}$.

由于 $\varepsilon_{ji}^{-1}w_{ji}^{(c_{ji}+2)} = 0$, 则观测器估计误差系统(7)可写为

$$\dot{\eta}_{ji} = \varepsilon_{ji}A_{ji}\eta_{ji}, \quad (8)$$

其中:

$$\eta_{ji} = \begin{bmatrix} \eta_{j1i} \\ \eta_{j2i} \\ \vdots \\ \eta_{j[c_{ji}+3]i} \\ \eta_{j[c_{ji}+4]i} \end{bmatrix},$$

$$A_{ji} = \begin{bmatrix} -\beta_{j1i} & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ -\beta_{j2i} & 0 & 1 & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ -\beta_{j[c_{ji}+3]i} & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ -\beta_{j[c_{ji}+4]i} & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}.$$

由于特征方程

$$|sI - A_{ji}| = s^{c_{ji}+4} + \beta_{j1i}s^{c_{ji}+3} + \dots + \beta_{j[c_{ji}+4]i} = 0$$

的根具有负实部, 那么矩阵 $\varepsilon_{ji}A_{ji}$ 的特征根也具有负实部, 则系统(8)是渐近稳定的. 从而可得, 观测器估计误差系统(7)是渐近稳定的. 由此定理得证.

船舶运动属于低频运动, 随着 w_{ji} 微分次数 c_{ji} 的增大, $w_{ji}^{(c_{ji})}$ 越来越小. 并且 ε_{ji} 是高增益参数, 则可将 $\varepsilon_{ji}^{-1}w_{ji}^{(c_{ji}+2)}$ 近似为零.

注 3 不同于文[19]中的广义比例积分观测器, 本文在观测器(6)中加入高增益参数, 使得观测器估计误差系统(7)能够快速收敛.

注 4 为避免文[22]所提的高增益观测器存在微分峰值现象, 观测器(6)中 ξ_{j1i} 应取和 z_{j1i} 相同的初值.

3.3 基于观测器的输出反馈控制(Output feedback control based on the observers)

取跟随船 i 的控制力和力矩为

$$\begin{cases} X_{\tau i} = (m_i - X_{\dot{u}i})(k_{11i}x_{ei} + k_{12i}\xi_{12i} + \xi_{13i}), \\ Y_{\tau i} = (m_i - Y_{\dot{v}i})(k_{21i}y_{ei} + k_{22i}\xi_{22i} + \xi_{23i}) + (m_ix_{gi} - Y_{\dot{r}i})(k_{31i}\vartheta_i + k_{32i}\xi_{32i} + \xi_{33i}), \\ N_{\tau i} = (m_ix_{gi} - N_{\dot{v}i})(k_{21i}y_{ei} + k_{22i}\xi_{22i} + \xi_{23i}) + (I_{zi} - N_{\dot{r}i})(k_{31i}\vartheta_i + k_{32i}\xi_{32i} + \xi_{33i}), \end{cases} \quad (9)$$

其中: 可调参数 k_{j1i} 和 k_{j2i} 使得

$$s^2 + k_{j2i}s + k_{j1i} = 0$$

的特征根具有负实部.

采用观测器(6)和控制器(9), 则系统(5)与观测器估计误差系统(7)构成的闭环系统为

$$\dot{\tilde{z}}_{ji} = \tilde{A}_{ji}\tilde{z}_{ji}, \quad (10)$$

其中:

$$\tilde{z}_{ji} = [z_{j1i} \ z_{j2i} \ e_{j1i} \ \cdots \ e_{j[c_{ji}+4]i}]^T, \\ \tilde{A}_{ji} = \begin{bmatrix} A_{ji11} & A_{ji12} \\ 0 & A_{ji22} \end{bmatrix}, \quad A_{ji11} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -k_{j1i} & -k_{j2i} \end{bmatrix}, \\ A_{ji12} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & k_{j2i} & 1 & \cdots & 0 \end{bmatrix},$$

A_{ji22} 为观测器估计误差系统(7)的状态矩阵.

由于闭环系统(10)是线性系统并且矩阵 A_{ji11} 的特

征根具有负实部,根据定理1和分离原理可得如下结果:

定理 2 若系统(5)采用观测器(6)和控制器(9),则闭环系统(10)是渐近稳定的.

由定理2可知,在基于观测器的输出反馈控制器(9)作用下,跟随船*i*与领航船的距离偏差收敛到固定值,航向偏差收敛到零,即 $\lim_{t \rightarrow \infty} x_{0i} = x_{di}, \lim_{t \rightarrow \infty} y_{0i} = y_{di}, \lim_{t \rightarrow \infty} \vartheta_i = 0$.

注 5 若系统(5)中受到未知慢变外扰的影响,可将外扰包含在 w_{ji} 中,那么定理1和定理2的结论仍然适用.

3.4 具有输入饱和的输出反馈控制(Output feedback control with input saturation)

对于系统(5),进一步考虑跟随船*i*的控制力和力矩存在幅值饱和的情形,即

$$|X_{\tau i}| \leq X_{\max i}, |Y_{\tau i}| \leq Y_{\max i}, |N_{\tau i}| \leq N_{\max i}.$$

取跟随船*i*的虚拟控制输入为

$$\begin{cases} u_{\tau i} = -\tilde{k}_{11i} \tanh(\tilde{k}_{12i} x_{ei}), \\ v_{\tau i} = -\tilde{k}_{21i} \tanh(\tilde{k}_{22i} y_{ei}), \\ r_{\tau i} = -\tilde{k}_{31i} \tanh(\tilde{k}_{32i} \vartheta_i), \end{cases} \quad (11)$$

其中 $\tilde{k}_{j1i} > 0$ 和 $\tilde{k}_{j2i} > 0$ 为可调参数.

取跟随船*i*的控制力和力矩为

$$\begin{cases} X_{\tau i} = (m_i - X_{\dot{u}i})(\tilde{\tau}_{1i} + \tilde{k}_{15i} \text{sat}(\tilde{k}_{15i}^{-1} \xi_{13i})), \\ Y_{\tau i} = (m_i - Y_{\dot{v}i})(\tilde{\tau}_{2i} + \tilde{k}_{25i} \text{sat}(\tilde{k}_{25i}^{-1} \xi_{23i})) + \\ \quad (m_i x_{gi} - Y_{\dot{r}i})(\tilde{\tau}_{3i} + \tilde{k}_{35i} \text{sat}(\tilde{k}_{35i}^{-1} \xi_{33i})), \\ N_{\tau i} = (m_i x_{gi} - N_{\dot{v}i})(\tilde{\tau}_{2i} + \tilde{k}_{25i} \text{sat}(\tilde{k}_{25i}^{-1} \xi_{23i})) + \\ \quad (I_{zi} - N_{\dot{r}i})(\tilde{\tau}_{3i} + \tilde{k}_{35i} \text{sat}(\tilde{k}_{35i}^{-1} \xi_{33i})), \end{cases} \quad (12)$$

其中:

$$\begin{aligned} \tilde{\tau}_{1i} &= \tilde{k}_{11i} \tanh(\tilde{k}_{14i} |\xi_{12i} - u_{\tau i}|) \tanh(\tilde{k}_{14i} (\xi_{12i} - u_{\tau i})), \\ \tilde{\tau}_{2i} &= \tilde{k}_{21i} \tanh(\tilde{k}_{24i} |\xi_{22i} - v_{\tau i}|) \tanh(\tilde{k}_{24i} (\xi_{22i} - v_{\tau i})), \\ \tilde{\tau}_{3i} &= \tilde{k}_{31i} \tanh(\tilde{k}_{34i} |\xi_{32i} - r_{\tau i}|) \tanh(\tilde{k}_{34i} (\xi_{32i} - r_{\tau i})), \\ \tilde{k}_{15i} &= \tilde{k}_{12i} - \tilde{k}_{11i} \tanh(\tilde{k}_{14i} |\xi_{12i} - u_{\tau i}|), \\ \tilde{k}_{25i} &= \tilde{k}_{22i} - \tilde{k}_{21i} \tanh(\tilde{k}_{24i} |\xi_{22i} - v_{\tau i}|), \\ \tilde{k}_{35i} &= \tilde{k}_{32i} - \tilde{k}_{31i} \tanh(\tilde{k}_{34i} |\xi_{32i} - r_{\tau i}|). \end{aligned}$$

可调参数 $\tilde{k}_{j4i} > 0, \tilde{k}_{j2i} > \tilde{k}_{j1i} > 0$ 且满足:

$$\begin{aligned} |(m_i - X_{\dot{u}i})\tilde{k}_{12i}| &\leq X_{\max i}, \\ |(m_i - Y_{\dot{v}i})\tilde{k}_{22i}| + |(m_i x_{gi} - Y_{\dot{r}i})\tilde{k}_{32i}| &\leq Y_{\max i}, \\ |(m_i x_{gi} - N_{\dot{v}i})\tilde{k}_{22i}| + |(I_{zi} - N_{\dot{r}i})\tilde{k}_{32i}| &\leq N_{\max i}, \end{aligned}$$

则 $|X_{\tau i}| \leq X_{\max i}, |Y_{\tau i}| \leq Y_{\max i}, |N_{\tau i}| \leq N_{\max i}$.

令 $z_{12i}, z_{22i}, z_{32i}$ 与虚拟控制输入 $u_{\tau i}, v_{\tau i}, r_{\tau i}$ 的误差为 $z_{e12i} = z_{12i} - u_{\tau i}, z_{e22i} = z_{22i} - v_{\tau i}, z_{e32i} =$

$z_{32i} - r_{\tau i}$. 将虚拟控制输入的微分 $\dot{u}_{\tau i}, \dot{v}_{\tau i}, \dot{r}_{\tau i}$ 视为未知动态,即包含在 w_{ji} 之中. 则系统(5)在观测器(6)、虚拟控制输入(11)和控制器(12)作用下的闭环系统为

$$\begin{cases} \dot{z}_{j1i} = -\tilde{k}_{j1i} \tanh(\tilde{k}_{j2i} z_{j1i}) + z_{ej2i}, \\ \dot{z}_{ej2i} = -\tilde{k}_{j3i} \tanh(\tilde{k}_{j4i} (z_{ej2i} - e_{j2i})) + \\ \quad e_{j3i} + \xi_{j3i} - \tilde{k}_{j5i} \text{sat}(\tilde{k}_{j5i}^{-1} \xi_{j3i}), \end{cases} \quad (13)$$

其中:

$$\begin{aligned} \tilde{k}_{13i} &= \tilde{k}_{11i} \tanh(\tilde{k}_{14i} |\xi_{12i} - u_{\tau i}|), \\ \tilde{k}_{23i} &= \tilde{k}_{21i} \tanh(\tilde{k}_{24i} |\xi_{22i} - v_{\tau i}|), \\ \tilde{k}_{33i} &= \tilde{k}_{31i} \tanh(\tilde{k}_{34i} |\xi_{32i} - r_{\tau i}|). \end{aligned}$$

为了分析系统(13)的稳定性,引入如下的引理:

引理 1^[23] 考虑以下系统

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}_1 = f(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2), \\ \dot{\tilde{x}}_2 = p(\tilde{x}_2). \end{cases} \quad (14)$$

若 $\dot{\tilde{x}}_2 = p(\tilde{x}_2)$ 和 $\tilde{x}_1 = f(\tilde{x}_1, 0)$ 分别在平衡点 $\tilde{x}_1 = 0$ 和 $\tilde{x}_2 = 0$ 处是渐近稳定的,则系统(14)在平衡点 $(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2) = (0, 0)$ 处是渐近稳定的.

定理 3 若未知动态 $|w_{ji}| \leq \tilde{k}_{j5i}$, 则系统(13)在零平衡点处是渐近稳定的.

证 当 $[e_{j2i} \ e_{j3i}]^T = 0$ 时, 由 $|\xi_{j3i}| = |w_{ji}| \leq \tilde{k}_{j5i}$, 可得 $\tilde{k}_{j5i} \text{sat}(\tilde{k}_{j5i}^{-1} \xi_{j3i}) = \xi_{j3i}$. 则系统(13)可写为

$$\begin{cases} \dot{z}_{j1i} = -\tilde{k}_{j1i} \tanh(\tilde{k}_{j2i} z_{j1i}) + z_{ej2i}, \\ \dot{z}_{ej2i} = -\tilde{k}_{j3i} \tanh(\tilde{k}_{j4i} z_{ej2i}). \end{cases} \quad (15)$$

显然,由引理1可得,系统(15)在零平衡点处是渐近稳定的.

进一步,令 $\tilde{x}_1 = [z_{j1i} \ z_{ej2i}]^T, \tilde{x}_2 = [e_{j2i} \ e_{j3i}]^T$. 由于观测器估计误差系统(7)和系统(15)在零平衡点处是渐近稳定的,由引理1可得,系统(13)在零平衡点处是渐近稳定的. 由此定理得证.

4 数值仿真(Numerical simulation)

对三船编队进行仿真,跟随船1和2采用两柱间长51.5 m、船宽8.6 m的船舶,水动力学模型和参数见文[24],其中:

$$\begin{aligned} m_i &= 364.78 \times 10^3, X_{\dot{u}i} = -1.74 \times 10^4, \\ x_{gi} &= -5.93, Y_{\dot{v}i} = -1.9022 \times 10^6, \\ Y_{\dot{r}i} &= -1.4 \times 10^6, N_{\dot{v}i} = 5.38 \times 10^5, \\ I_{zi} &= 3.3818 \times 10^7, N_{\dot{r}i} = -4.3958 \times 10^7. \end{aligned}$$

设控制输入的饱和值为 $X_{\max i} = 10^5 \text{ N}, Y_{\max i} = 1.5 \times 10^5 \text{ N}, N_{\max i} = 4 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}$. 领航船 (x_0, y_0, ψ_0) 初值为 $(0, 0, 0)$, 纵向速度、横荡速度和艏摇角速度分别为

$$u_0 = 5 + \sin(0.1t) \text{ m/s},$$

$$v_0 = 0.4 + 0.2 \sin(0.05t) \text{ m/s},$$

$$r_0 = 0.015 \sin(0.02t) \text{ rad/s}.$$

跟随船 1 和 2 中, 期望队形参数 (x_{di}, y_{di}) 分别为 $(50, 50), (50, -50)$; 速度初值 (u_i, v_i, r_i) 分别为 $(4, 0, 0), (3.5, 0, 0)$; 位置和航向 (x_i, y_i, ψ_i) 初值分别为 $(-60, -60, 0.5236), (-100, 100, -0.3491)$. 高增益广义比例积分观测器(6)中参数取 $\varepsilon_{1i} = \varepsilon_{2i} = \varepsilon_{3i} = 10$, $\beta_{11i} = \beta_{21i} = \beta_{31i} = 2$, $\beta_{12i} = \beta_{22i} = \beta_{32i} = 1.5$, $\beta_{13i} = \beta_{23i} = \beta_{33i} = 0.5$, $\beta_{14i} = \beta_{24i} = \beta_{34i} = 0.0625$; 跟随船 1 的观测器初值为

$$(31.9615, 0, 0, 0), (-28.0385, 0, 0, 0),$$

$$(-0.5236, 0, 0, 0).$$

跟随船 2 的观测器初值为

$$(78.1713, 0, 0, 0), (-9.7672, 0, 0, 0),$$

$$(0.3491, 0, 0, 0).$$

当 $160 \text{ s} < t < 200 \text{ s}$ 时, 设跟随船 1 和 2 在纵向、横向和艏摇方向受到的外扰为

$$X_{wi} = (\sin(0.4t) + 2 \sin(0.6t) + \sin(0.8t))10^4 \text{ N},$$

$$Y_{wi} = (2 \sin(0.4t) + 4 \sin(0.6t) + 2 \sin(0.8t))10^4 \text{ N},$$

$$N_{wi} = (4 \sin(0.4t) + 8 \sin(0.6t) + 4 \sin(0.8t))10^4 \text{ N} \cdot \text{m}.$$

分别使用定理 2 和定理 3 中的控制器进行仿真. 定理 2 中, 控制器(9)参数 $(k_{11i}, k_{12i}, k_{21i}, k_{22i}, k_{31i}, k_{32i})$ 取 $(0.01, 0.2, 0.0025, 0.1, 0.25, 1)$. 定理 3 中, 虚拟控制输入(11)参数 $(\tilde{k}_{11i}, \tilde{k}_{12i}, \tilde{k}_{21i}, \tilde{k}_{22i}, \tilde{k}_{31i}, \tilde{k}_{32i})$ 取 $(2, 0.1, 0.5, 0.1, 0.02, 10)$, 由输入饱和值取控制器(12)参数 $(\bar{k}_{11i}, \bar{k}_{12i}, \bar{k}_{14i}, \bar{k}_{21i}, \bar{k}_{22i}, \bar{k}_{24i}, \bar{k}_{31i}, \bar{k}_{32i}, \bar{k}_{34i})$ 为 $(0.13, 0.26, 2, 0.025, 0.05, 8, 0.0017, 0.0034, 200)$.

仿真结果如图 2-5 所示. 由图 2-4 的对比, 可知采用控制器(9)和控制器(12)时系统都能稳定. 若高增益

广义比例积分观测器(6)中增益 $\varepsilon_{1i} = \varepsilon_{2i} = \varepsilon_{3i}$ 取值较小时, 如 $\varepsilon_{1i} = \varepsilon_{2i} = \varepsilon_{3i} = 1$, 将导致系统不稳定.

由图 5 中可看出, 采用控制器(9)时: 跟随船 1 和 2 的控制输入进入饱和区时间较长, 跟随船 2 的控制输入在 $t = 50 \text{ s}$ 附近出现抖振现象. 采用控制器(12)时的控制输入更为平滑. 因此, 采用饱和约束函数的控制方法是有效的, 有利于克服控制输入进入饱和区.

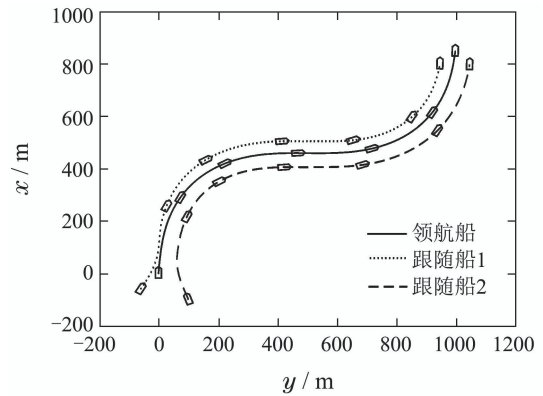


图 2 采用控制器(9)时船舶编队运动

Fig. 2 Motion of the ship formation using the controllers (9)

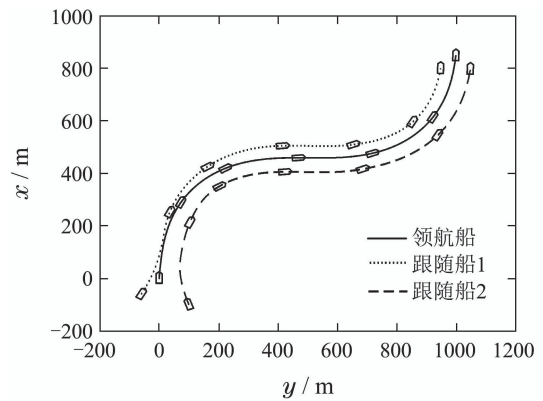
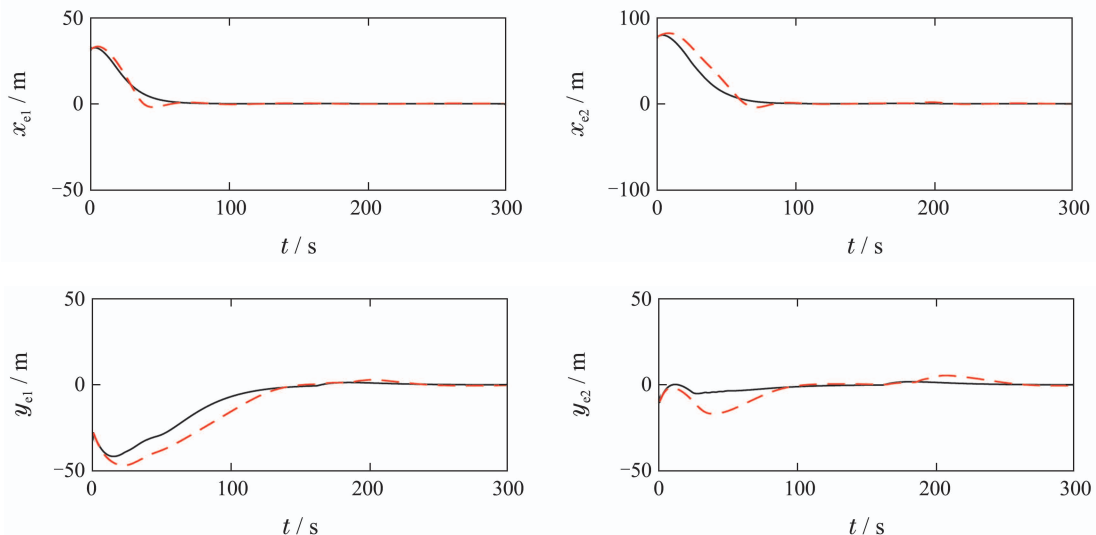


图 3 采用控制器(12)时船舶编队运动

Fig. 3 Motion of the ship formation using the controllers (12)



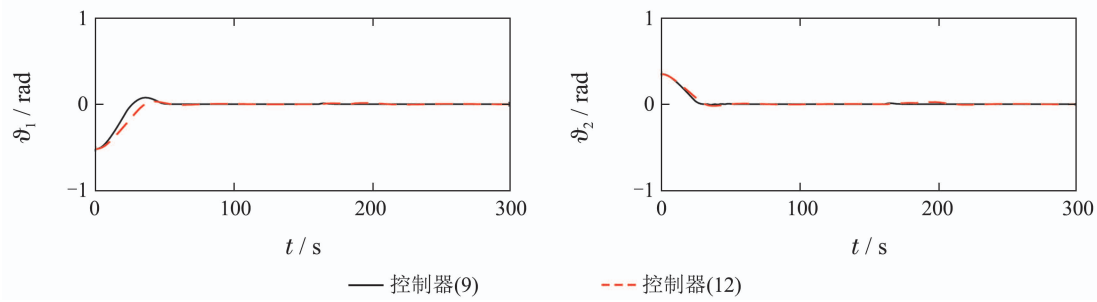


图4 船舶编队队形误差

Fig. 4 Error of the ship formation

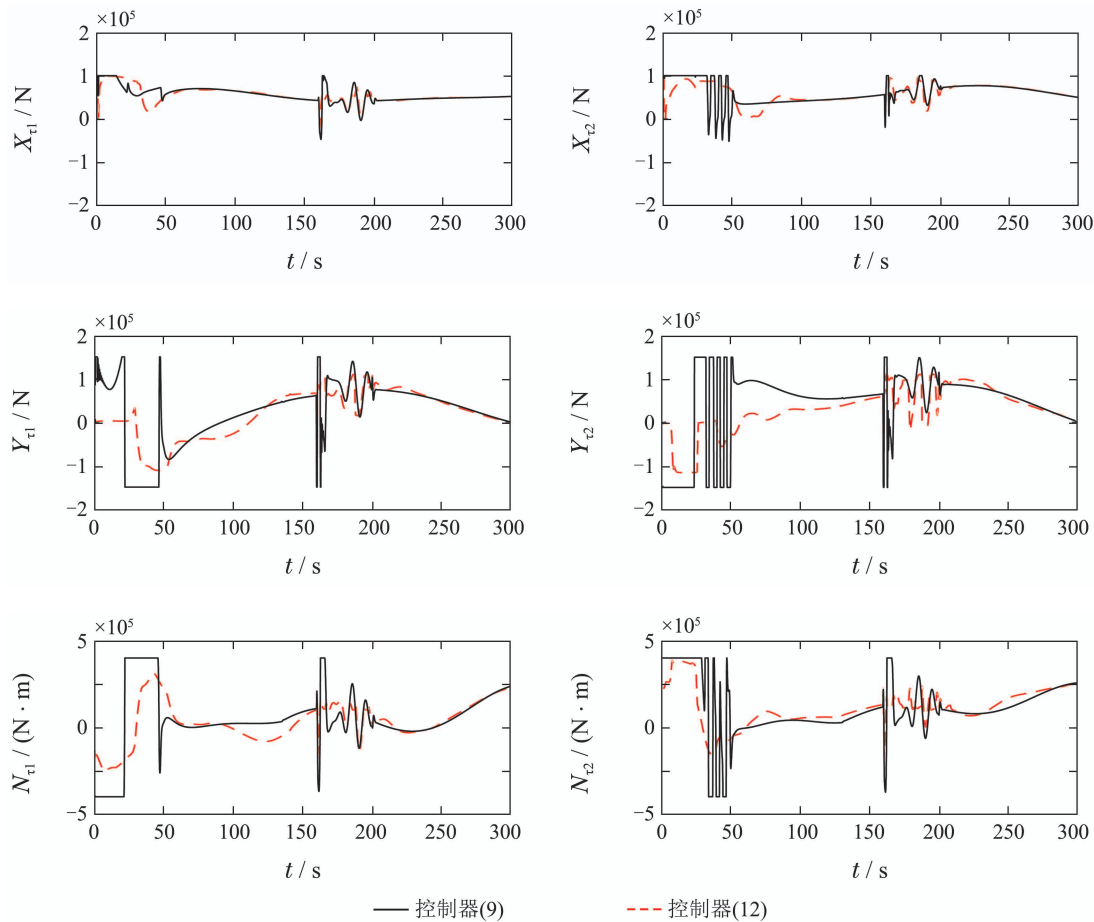


图5 跟随船的控制输入

Fig. 5 Control inputs of the follower ships

5 结论(Conclusions)

本文使用leader-follower策略研究了船舶编队输出反馈控制问题. 应用微分同胚变换, 将编队模型转化为3个解耦的子系统. 然后, 分别设计了高增益广义比例积分观测器、基于观测器的线性输出反馈控制器和输入饱和和受限的输出反馈控制器. 仿真结果表明: 高增益广义比例积分观测器能够估计系统中含有的未知和不可测量动态; 相对于线性输出反馈控制器, 饱和输出反馈控制器有利于克服控制输入饱和问题, 控制输入更为平滑. 文中所设计的控

制器仅利用领航船与跟随船的相对位置信息和相对航向信息, 适用于跟随船水动力学模型中粘性水动力和力矩未知以及受到慢变外扰的情形.

参考文献(References):

- [1] KHALIL H K. Robust servomechanism output feedback controllers for feedback linearizable systems [J]. *Automatica*, 1994, 30(10): 1587 – 1599.
- [2] ATASSI A N, KHALIL H K. Separation results for the stabilization of nonlinear systems using different high-gain observer designs [J]. *Systems & Control Letters*, 2000, 39(3): 183 – 191.

- [3] KHALIL H K, PRALY L. High-gain observers in nonlinear feedback control [J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2014, 24(6): 993 – 1015.
- [4] HAN Jingqing, WANG Wei. Nonlinear tracking-differentiator [J]. *Journal of Systems Science and Mathematical Sciences*, 1994, 14(2): 177 – 183.
(韩京清, 王伟. 非线性跟踪—微分器 [J]. *系统科学与数学*, 1994, 14(2): 177 – 183.)
- [5] HAN J. From pid to active disturbance rejection control [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(3): 900 – 906.
- [6] YANG Yansheng. Output feedback robust control algorithm applied to ship steering autopilot with uncertain nonlinear system [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2002, 2(1): 118 – 121.
(杨盐生. 船舶航向非线性系统的输出反馈鲁棒控制 [J]. *交通运输工程学报*, 2002, 2(1): 118 – 121.)
- [7] DU Jialu, YANG Yang, GUO Chen, et al. Output feedback control for dynamic positioning system of a ship based on a high gain observer [J]. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(11): 1486 – 1491.
(杜佳璐, 杨杨, 郭晨, 等. 基于高增益观测器的船舶动力定位系统的输出反馈控制 [J]. *控制理论与应用*, 2013, 30(11): 1486 – 1491.)
- [8] BREIVIK M, HOVSTEIN V E, FOSSEN T I. Ship formation control: a guided leader-follower approach [C] // *Proceedings of the 17th IFAC World Congress*. Seoul: IFAC, 2008: 16008 – 16014.
- [9] THORVALDSEN C F L, SKJETNE R. Formation control of fully-actuated marine vessels using group agreement protocols [C] // *Proceedings of the 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference*. Orlando: IEEE, 2011: 4132 – 4139.
- [10] PEYMANI E, FOSSEN T I. Leader-follower formation of marine craft using constraint forces and lagrange multipliers [C] // *Proceedings of the 51st IEEE Conference on Decision and Control*. Maui: IEEE, 2012: 2447 – 2452.
- [11] CUI R, GE S S, HOW B V E, et al. Leader-follower formation control of underactuated autonomous underwater vehicles [J]. *Ocean Engineering*, 2010, 37(9): 1491 – 1502.
- [12] PENG Z, WANG D, HU X. Robust adaptive formation control of underactuated autonomous surface vehicles with uncertain dynamics [J]. *IET Control Theory and Applications*, 2010, 5(12): 1378 – 1387.
- [13] PENG Z, WANG D, CHEN Z, et al. Adaptive dynamic surface control for formations of autonomous surface vehicles with uncertain dynamics [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2013, 21(2): 513 – 520.
- [14] CUI Rongxin, XU Demin, YAN Weisheng. Leader-follower formation control of autonomous underwater vehicles using position information only [J]. *Acta Armamentarii*, 2008, 29(8): 980 – 984.
(崔荣鑫, 徐德民, 严卫生. 仅利用位置信息的自主水下航行器主从式编队控制方法 [J]. *兵工学报*, 2008, 29(8): 980 – 984.)
- [15] WANG H, WANG D, PENG Z. Neural network based adaptive dynamic surface control for cooperative path following of marine surface vehicles via state and output feedback [J]. *Neurocomputing*, 2014, 133(8): 170 – 178.
- [16] CHEN W H, YANG J, GUO L, et al. Disturbance-observer-based control and related methods—an overview [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(2): 1083 – 1095.
- [17] HUANG Yuanchan, HAN Jingqing. Continuous-time system identification with the extended states observer [J]. *Control and Decision*, 1998, 13(4): 381 – 384.
(黄远灿, 韩京清. 扩张状态观测器用于连续系统辨识 [J]. *控制与决策*, 1998, 13(4): 381 – 384.)
- [18] FLIESS M, MARQUEZ R, DELALEAU E, et al. Generalized proportional-integral controllers [J]. *ESAIM: Control, Optimisation and Calculus of Variations*, 2002, 7: 23 – 41.
- [19] SIRA-RAMIREZ H, OLIVER-SALAZAR M A. On the robust control of buckconverter dc-motor combinations [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, 28(8): 3912 – 3922.
- [20] FREIDOVICH L B, KHALIL H K. Performance recovery of feedback-linearization-based designs [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2008, 53(10): 2324 – 2334.
- [21] SUN N, FANG Y, CHEN H, et al. Amplitude-saturated nonlinear output feedback antiswing control for underactuated cranes with double-pendulum cargo dynamics [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(3): 2135 – 2146.
- [22] AHRENS J F, KHALIL H K. High-gain observers in the presence of measurement noise: a switched-gain approach [J]. *Automatica*, 2009, 45(4): 936 – 943.
- [23] ISIDORI A. *Nonlinear Control Systems* [M]. London: Springer, 1995.
- [24] PEREZ T. *Ship Motion Control: Course Keeping and Roll Stabilisation Using Rudder and Fins* [M]. London: Springer, 2005.

作者简介:

林安辉 (1983–), 男, 博士研究生, 目前研究方向为船舶运动控制、复杂系统控制, E-mail: anhuilin@gmail.com;

蒋德松 (1975–), 男, 副教授, 博士, 目前研究方向为动力装置自动化及测试, E-mail: jiangdesong@jmu.edu.cn;

曾建平 (1966–), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为鲁棒控制、非线性控制、复杂系统控制, E-mail: jpzeng@xmu.edu.cn.