

# 控制与决策

Control and Decision

## 船舶动力定位系统的精细抗干扰控制

魏新江, 魏永丽, 张慧凤

引用本文:

魏新江, 魏永丽, 张慧凤. 船舶动力定位系统的精细抗干扰控制[J]. *控制与决策*, 2022, 37(10): 2593–2599.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1271>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 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>

#### 基于扩张状态观测器的四旋翼无人机快速非奇异终端滑模轨迹跟踪控制

Fast nonsingular terminal sliding mode trajectory tracking control of a quadrotor UAV based on extended state observers

*控制与决策*. 2022, 37(9): 2201–2210 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.1819>

#### 输入饱和的充液航天器抗干扰有限时间滑模控制

Anti-disturbance finite-time sliding mode control for liquid-filled spacecraft with input saturation

*控制与决策*. 2021, 36(5): 1078–1086 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0820>

#### 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>

#### 输出误差约束下四旋翼无人机预定性能反步控制

Prescribed performance backstepping control for quadrotor UAV with output error constraint

*控制与决策*. 2021, 36(5): 1059–1068 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1249>

# 船舶动力定位系统的精细抗干扰控制

魏新江, 魏永丽, 张慧凤<sup>†</sup>

(鲁东大学 数学与统计科学学院, 山东 烟台 264025)

**摘要:** 船舶在航行过程中不可避免地受到海平面上多种干扰的影响. 动力定位 (DP) 是一种船舶在受到外界干扰的情形下依然能够保持在一定位置或沿固定轨迹航行的技术. 与传统的锚定位方法相比, DP 技术具有机动性强、可深海作业、定位精度高等优点. 针对带有慢变环境干扰和复杂非线性项的船舶动力定位系统, 研究其精细抗干扰控制问题. 首先, 利用模糊逻辑系统逼近船舶动力定位系统中的复杂非线性项. 其次, 通过构造自适应干扰观测器 (ADO) 来估计部分信息已知的慢变环境干扰. 在此基础上, 将基于干扰观测的控制 (DOBC) 与模糊控制算法相结合, 提出基于复合分层抗干扰控制框架的精细抗干扰控制 (EADC) 策略, 从而实现船舶动力定位系统的高精度抗干扰控制. 最后, 基于供给船模型的仿真研究验证所提控制策略的有效性.

**关键词:** 动力定位系统; 慢变干扰; 非线性项; 干扰观测器; 模糊逻辑系统; 精细抗干扰控制

中图分类号: TP273 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2020.1271

引用格式: 魏新江, 魏永丽, 张慧凤. 船舶动力定位系统的精细抗干扰控制 [J]. 控制与决策, 2022, 37(10): 2593-2599.

## Elegant anti-disturbance control for dynamic positioning system of ships

WEI Xin-jiang, WEI Yong-li, ZHANG Hui-feng<sup>†</sup>

(School of Mathematics and Statistics Science, Ludong University, Yantai 264025, China)

**Abstract:** In the process of navigation, ships are inevitably affected by various disturbances on the sea level. Dynamic positioning (DP) refers to a technology that ships can still maintain a certain position or navigate along a fixed track under the existence of external disturbances. Compared with the traditional anchor positioning method, DP technology has the advantages of strong mobility, deep-sea operation and high positioning accuracy. The anti-disturbance control problem of dynamic positioning system of ships with slowly varying environmental disturbances and complex nonlinear term is investigated in this paper. Firstly, the fuzzy logic system is used to approximate the complex nonlinear term in the dynamic positioning system of ships. Secondly, to estimate the slowly varying environmental disturbances with partially-known information, an adaptive disturbance observer (ADO) is constructed. Based on this, an elegant anti-disturbance control (EADC) strategy is proposed by integrating disturbance observer based control (DOBC) and fuzzy control algorithm to achieve high accuracy anti-disturbance control. Finally, the simulation results on supply ship model are presented to demonstrate the effectiveness of the proposed strategy.

**Keywords:** dynamic positioning system; slowly varying disturbances; nonlinear term; disturbance observer; fuzzy logic system; elegant anti-disturbance control

## 0 引言

船舶在航行过程中不可避免地受到海平面上多种干扰的影响. 动力定位 (DP) 是一种船舶利用自身推进装置产生推力来抵抗外界干扰, 使船舶保持在一定位置或沿固定轨迹航行的技术. 与传统的锚定位方法相比, DP 技术具有机动性强、可深海作业、定位精度高等优点<sup>[1]</sup>. 为了减小干扰对船舶的影响, 学者们先后提出了不同的抗干扰控制策略<sup>[2-3]</sup>.

基于干扰观测器的控制 (DOBC) 是一种重要的

抗干扰控制策略, 其设计思想是构造干扰观测器在线估计外部干扰, 通过前馈补偿与传统反馈控制器相结合来达到干扰补偿的目的<sup>[4]</sup>. DOBC 方法结构简单, 可以根据不同的控制要求进行在线调整, 并与不同的控制策略相结合<sup>[5-6]</sup>, 已在风力发电系统和机器人等工程系统中得到了广泛的应用<sup>[7]</sup>. 众所周知, 模糊系统具有良好的逼近性能, 可以在紧集上近似一致地逼近光滑的非线性函数<sup>[8]</sup>. 文献 [8] 设计了一种鲁棒自适应模糊控制策略, 实现了船舶在恒定流干扰情况下

收稿日期: 2020-09-12; 录用日期: 2021-08-09.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61973149); 山东省自然科学基金重点项目 (ZR2020KF029).

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: zhanghui Feng05@163.com.

的直线航迹控制。

受上述文献的启发,本文研究DP系统的抗干扰控制问题,提出一种基于DOBC和模糊控制的精细抗干扰控制(EADC)策略。本文的主要创新为:1)充分利用干扰信息,同时考虑了风、浪、流等环境因素引起的慢变环境干扰和船舶动力定位系统建模误差产生的复杂非线性项。2)利用DOBC抵消部分信息已知的慢变环境干扰,通过模糊逻辑系统逼近船舶动力定位系统中的复杂非线性项,将DOBC与模糊控制相结合,基于复合分层抗干扰控制思想提出精细抗干扰控制策略,为船舶动力定位系统的抗干扰研究提供了一种新的途径。

## 1 问题的描述及预备知识

如图1所示,建立CXYZ随船坐标系,原点C位于船舶重心,CX轴方向从船尾指向船首,CY轴指向右舷,CZ轴向下。OX<sub>0</sub>Y<sub>0</sub>Z<sub>0</sub>为大地坐标系,OX<sub>0</sub>轴、OY<sub>0</sub>轴和OZ<sub>0</sub>轴分别指向正北、正东和下方。原点O为地球表面任何一点,XY平面与静水面重合。 $\eta = [x, y, \psi]^T$ 为船舶位置向量,由大地坐标系下船舶的位置(x, y)和艏摇角 $\psi$ 组成。 $\varpi = [u, v, r]^T$ 为随船坐标系下船舶的速度向量,由纵荡速度u、横荡速度v和艏摇速度r组成。

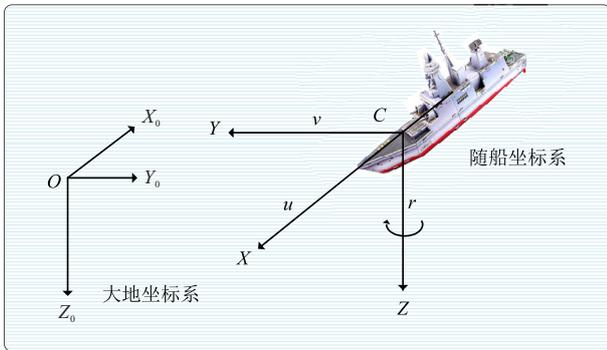


图1 大地与随船坐标系

DP系统的运动学模型和动力学模型分别描述为

$$\dot{\eta} = R(\psi)\varpi, \quad (1)$$

$$M\dot{\varpi}(t) + D(\varpi)\varpi(t) = \tau(t) + H(t). \quad (2)$$

其中: $\tau = [\tau_1, \tau_2, \tau_3]^T$ 为船舶推进器提供的控制力和力矩。 $H(t)$ 为慢变环境干扰,代表风、浪、流等环境因素对船舶作用的等效外界干扰力和力矩,表示为

$$\begin{cases} H(t) = R^{-1}(\psi)b(t), \\ \dot{b}(t) = -T^{-1}b(t) + \Psi\xi_1(t). \end{cases} \quad (3)$$

$T \in R^{3 \times 3}$ 为时间常数对角矩阵; $b(t)$ 为偏置力和力矩向量; $\xi_1(t) \in R^3$ 为有界的零均值高斯白噪声向量,且满足 $\|\xi_1(t)\|^2 \leq a_0$ , $a_0$ 为正常数; $\Psi \in R^{3 \times 3}$ 为描述

$\xi_1(t)$ 振幅的正定对角矩阵。旋转矩阵 $R(\psi)$ 定义为

$$R(\psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

$M$ 为包含水力附加质量的惯量矩阵,满足 $M = M^T > 0$ , $D(\varpi)$ 为水阻尼矩阵, $M$ 和 $D(\varpi)$ 分别表示为

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & m_{23} \\ 0 & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$D(\varpi) = \begin{bmatrix} d_{11}(u) & 0 & 0 \\ 0 & d_{22}(v, r) & d_{23}(v, r) \\ 0 & d_{32}(v, r) & d_{33}(v, r) \end{bmatrix}. \quad (6)$$

其中

$$d_{11}(u) = -X_u - X_{|u|u}|u|,$$

$$d_{22}(v, r) = -Y_v - Y_{|v|v}|v| - Y_{|r|v}|r|,$$

$$d_{23}(v, r) = -Y_r - Y_{|v|r}|v| - Y_{|r|r}|r|,$$

$$d_{32}(v, r) = -N_v - N_{|v|v}|v| - N_{|r|v}|r|,$$

$$d_{33}(v, r) = -N_r - N_{|v|r}|v| - N_{|r|r}|r|,$$

$$m_{11} = m - X_{\ddot{u}}, \quad m_{22} = m - Y_{\ddot{v}}, \quad m_{33} = I_Z - N_{\ddot{r}},$$

$$m_{23} = mx_g - Y_{\ddot{r}}, \quad m_{32} = mx_g - N_{\ddot{v}}.$$

这里: $x_g$ 为船舶重心距随船坐标系原点的距离; $m$ 为船舶质量; $I_Z$ 为转矩惯量; $X_{\ddot{u}}$ 、 $Y_{\ddot{v}}$ 、 $N_{\ddot{r}}$ 为由纵荡、横荡、艏摇3个方向的各自水力加速度所引起的附加质量; $Y_{\ddot{r}}$ 为艏摇与横荡的互相耦合引起的附加质量; $Y_{|v|v}$ 为船舶水动力系数,具体可参见文献[9]。

水阻尼矩阵分为线性和非线性水阻尼矩阵两部分,即

$$D(\varpi) = D + D_n(\varpi). \quad (7)$$

其中:线性水阻尼矩阵为

$$D = \begin{bmatrix} -X_u & 0 & 0 \\ 0 & -Y_v & -Y_r \\ 0 & -N_v & -N_r \end{bmatrix}, \quad (8)$$

非线性水阻尼矩阵为

$$D_n(\varpi) = \begin{bmatrix} -X_{|u|u}|u| & 0 \\ 0 & -Y_{|v|v}|v| - Y_{|r|v}|r| \\ 0 & -N_{|v|v}|v| - N_{|r|v}|r| \\ 0 & 0 \\ \leftarrow -Y_{|v|r}|v| - Y_{|r|r}|r| \\ -N_{|v|r}|v| - N_{|r|r}|r| \end{bmatrix}. \quad (9)$$

由式(1)~(9)得

$$M\dot{\varpi}(t) = -D(\varpi) + G(\varpi) + \tau(t) + H(t), \quad (10)$$

这里,非线性水动力项  $G(\varpi)$  可以表示为

$$G(\varpi) = -D_n(\varpi)\varpi = [g_1(\varpi), g_2(\varpi), g_3(\varpi)]^T, \quad (11)$$

其中  $g_i(\varpi)(i = 1, 2, 3)$  为未知光滑非线性函数.

**假设 1** 对于船舶 DP 系统,当船舶船摇角很小时有

$$R(\psi) \cong I. \quad (12)$$

**注 1** 由式 (4),当船舶船摇角  $\psi$  足够小时,有  $\cos \psi \cong 1, \sin \psi \cong 0$  且  $R(\psi) \cong I$ .

令  $U = \tau$ , DP 船的状态空间模型表示为

$$\dot{X}(t) = AX(t) + B(G(\varpi) + U(t) + H(t)), \quad (13)$$

$$X(t) = \begin{bmatrix} \eta(t) \\ \varpi(t) \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ 0 & -M^{-1}D \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1} \end{bmatrix}.$$

其中:  $X(t) \in R^6, A \in R^{6 \times 6}, B \in R^{6 \times 3}, U(t) \in R^3$  分别是状态向量、系统矩阵、输入矩阵和控制输入向量,  $(-T^{-1}, B)$  能观.

## 2 主要结果

假设系统状态可获得,并且假设 1 成立. 本节将利用模糊逻辑系统逼近复杂非线性项,构造自适应干扰观测器估计干扰,提出复合 DOBC 和模糊控制的精细抗干扰控制策略.

### 2.1 模糊逻辑系统逼近复杂非线性项

通过模糊逻辑系统对非线性函数  $g_1(\varpi)$  进行逼近,满足如下 IF-THEN 规则.

$R^l$ : 如果  $\varpi_1$  是  $G_1^l$ ,  $\varpi_2$  是  $G_2^l$ , 以此类推至  $\varpi_n$  是  $G_n^l$ , 则  $p_1$  是  $F^l, l = 1, 2, \dots, N$ .

这里,  $\varpi = [\varpi_1, \dots, \varpi_n]^T$  和  $p_1$  分别是模糊逻辑系统的输入和输出,  $G_i^l(i = 1, 2, \dots, n)$  和  $F^l$  分别是与隶属度函数  $\mu_{G_i^l}(\varpi_i)$  和  $\mu_{F^l}(p_1)$  相关的模糊集合,  $N$  是规则个数<sup>[6]</sup>.

构造模糊逻辑系统

$$p_1(\varpi) = \frac{\sum_{l=1}^N \bar{p}_{1l} \prod_{i=1}^n \mu_{G_i^l}(\varpi_i)}{\sum_{l=1}^N \left[ \prod_{i=1}^n \mu_{G_i^l} \right]}, \quad (14)$$

其中  $\bar{p}_{1l} = \max_{p_1 \in R} \mu_{F^l}(p_1)$ . 定义模糊基本函数为

$$\alpha_{1l}(\varpi) = \frac{\prod_{i=1}^n \mu_{G_i^l}(\varpi_i)}{\sum_{l=1}^N \left[ \prod_{i=1}^n \mu_{G_i^l} \right]}. \quad (15)$$

令  $\theta_1 = [\bar{p}_{11}, \bar{p}_{12}, \dots, \bar{p}_{1N}]^T = [\theta_{11}, \theta_{12}, \dots, \theta_{1N}]^T$ ,  $\alpha_1(\varpi) = [\alpha_{11}(\varpi), \alpha_{12}(\varpi), \dots, \alpha_{1N}(\varpi)]^T$ , 则模糊逻辑系统 (14) 可进一步表示为

$$p_1(\varpi) = \theta_1^T \alpha_1(\varpi). \quad (16)$$

模糊逻辑系统  $p_1(\varpi) = \hat{g}_1(\varpi|\theta_1)$  可以以任意精度逼近未知函数  $g_1(\varpi)$ , 即

$$\hat{g}_1(\varpi|\theta_1) = \theta_1^T \alpha_1(\varpi). \quad (17)$$

定义最优参数  $\theta_1^\dagger$  为

$$\theta_1^\dagger = \arg \min_{\theta_1 \in \Omega_1} \left[ \sup_{\varpi \in \Omega_\varpi} \|\hat{g}_1(\varpi|\theta_1) - g_1(\varpi|\theta_1)\| \right], \quad (18)$$

其中  $\Omega_1, \Omega_\varpi$  分别是关于  $\theta_1$  和  $\varpi$  的紧集, 则模糊最小逼近误差

$$\varepsilon_1(\varpi) = g_1(\varpi) - \hat{g}_1(\varpi|\theta_1^\dagger). \quad (19)$$

令  $\tilde{\theta}_1 = \theta_1^\dagger - \theta_1$ , 其中  $\theta_1^\dagger$  为  $\theta_1$  的最优参数. 因此, 有

$$g_1(\varpi) = \theta_1^T \alpha_1(\varpi) + \tilde{\theta}_1^T \alpha_1(\varpi) + \varepsilon_1(\varpi). \quad (20)$$

同理可得

$$\begin{aligned} g_2(\varpi) &= \theta_2^T \alpha_2(\varpi) + \tilde{\theta}_2^T \alpha_2(\varpi) + \varepsilon_2(\varpi), \\ g_3(\varpi) &= \theta_3^T \alpha_3(\varpi) + \tilde{\theta}_3^T \alpha_3(\varpi) + \varepsilon_3(\varpi). \end{aligned} \quad (21)$$

基于式 (10)~(21), DP 系统 (1) 和 (2) 可以表示为

$$\begin{aligned} \dot{X}(t) &= AX(t) + B[U(t) + H(t) + \theta^T \alpha(\varpi)] + \\ &B\tilde{\theta}^T \alpha(\varpi) + B\varepsilon(\varpi). \end{aligned} \quad (22)$$

其中

$$\begin{aligned} \alpha^T &= [\alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \alpha_3], \\ \theta &= \begin{bmatrix} \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & \theta_2 & 0 \\ 0 & 0 & \theta_3 \end{bmatrix}, \tilde{\theta} = \begin{bmatrix} \tilde{\theta}_1 & 0 & 0 \\ 0 & \tilde{\theta}_2 & 0 \\ 0 & 0 & \tilde{\theta}_3 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

### 2.2 自适应干扰观测器 (ADO)

设计如下自适应干扰观测器:

$$\begin{cases} \hat{H}(t) = R^{-1}(\psi)\hat{b}(t), \\ \hat{b}(t) = q(t) - LX(t), \\ q(t) = [-T^{-1} + LBR^{-1}(\psi)][q(t) - LX(t)] + \\ L[AX(t) + BU(t)] + LB\theta^T \alpha(\varpi). \end{cases} \quad (23)$$

其中:  $\hat{H}(t)$  为干扰  $H(t)$  的估计值,  $\hat{b}(t)$  为干扰状态  $b(t)$  的估计值,  $L$  为干扰观测器增益矩阵,  $q(t)$  为自适应干扰观测器的中间辅助变量.

根据文献 [10], 由  $dW(t)/dt$  替代干扰 (3) 中的  $\xi_1(t)$ , 则系统 (3) 和 (22) 等价于

$$\begin{cases} dX(t) = AX(t)dt + B[G(\varpi) + U(t) + H(t)]dt, \\ db(t) = -T^{-1}b(t)dt + \Psi dW(t), \\ H(t) = R^{-1}(\psi)b(t). \end{cases} \quad (24)$$

其中  $W(t) \in R$ , 是定义在完备概率空间  $(\Omega; F; P)$  上的独立标准 Wiener 过程.

令  $e_b(t) = b(t) - \hat{b}(t)$ , 由式(23)和(24)得

$$de_b(t) = [-T^{-1} + LBR^{-1}(\psi)]e_b(t)dt + \Psi dW(t) + LB\tilde{\theta}^T\alpha(\varpi)dt + LB\varepsilon(\varpi)dt. \quad (25)$$

因为  $R^{-1}(\psi) \cong I$ , 所以  $(-T^{-1}, BR^{-1}(\psi)) \cong (-T^{-1}, B)$ , 根据  $(-T^{-1}, B)$  能观, 可按照极点配置理论来调整  $L$ , 从而使干扰观测器具有很好的干扰估计性能.

2.3 复合 DOBC 和模糊控制

设计如下复合控制器:

$$U(t) = -\hat{H}(t) + KX(t) - \theta^T\alpha(\varpi), \quad (26)$$

其中  $K$  为控制器增益矩阵. 将式(26)代入(22)得到如下闭环系统:

$$dX(t) = (A + BK)X(t)dt + BR^{-1}(\psi)e_b(t)dt + B\tilde{\theta}^T\alpha(\varpi)dt + B\varepsilon(\varpi)dt. \quad (27)$$

联立式(25)和(27), 得到如下复合系统:

$$d\bar{X}(t) = \bar{A}\bar{X}(t)dt + \bar{B}_1\tilde{\theta}^T\alpha(\varpi)dt + \bar{B}_2\varepsilon(\varpi)dt + \bar{\Psi}dW(t). \quad (28)$$

其中

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} A + BK & BR^{-1}(\psi) \\ 0 & -T^{-1} + LBR^{-1}(\psi) \end{bmatrix},$$

$$\bar{\Psi} = \begin{bmatrix} 0 \\ \Psi \end{bmatrix}, \bar{X}(t) = \begin{bmatrix} X(t) \\ e_b(t) \end{bmatrix},$$

$$\bar{B}_1 = \begin{bmatrix} B \\ LB \end{bmatrix}, \bar{B}_2 = \begin{bmatrix} B \\ LB \end{bmatrix}.$$

下面通过设计基于 DOBC 方法与模糊控制相结合的 EADC 策略, 使得复合系统(28)的状态  $\bar{X}(t)$  满足依均方渐近有界. 根据文献[4]中的引理 1, 得到如下定理.

**定理 1** 考虑带有慢变环境干扰(3)的船舶动力定位系统(13), 在满足假设 1 的条件下, 如果存在常数  $\beta > 0$ , 矩阵  $P_1 = Q_1^{-1} > 0$ ,  $P_2 = Q_2^{-1} > 0$  和  $R_1$  满足如下 LMI 成立:

$$\Theta = \begin{bmatrix} A_1 & BR^{-1}(\psi)Q_2 & B \\ * & A_2 & LB \\ * & * & -\beta^{-1}I \end{bmatrix} < 0. \quad (29)$$

其中

$$A_1 = AQ_1 + Q_1^T A^T + BR_1 + R_1^T B^T,$$

$$A_2 = LBR^{-1}(\psi)Q_2 + Q_2^T (R^{-1}(\psi))^T B^T L^T - T^{-1}Q_2 - Q_2^T (T^{-1})^T.$$

通过设计带有观测增益  $L$  的 ADO(23), 带有控制增益

$K = R_1 Q_1^{-1}$  的复合模糊控制器(26), 以及自适应律

$$\dot{\theta} = \gamma^{-1}\alpha(\varpi)\tilde{X}^T(t)P\bar{B}_1. \quad (30)$$

这里  $\tilde{X}^T(t) = [X(t) \ \hat{b}(t)]$ ,  $\gamma > 0$  为设计参数. 此时, 复合系统(28)依均方渐近有界.

**证明** 对于复合系统(28), 选取如下 Lyapunov 函数:

$$V(\bar{X}(t), \tilde{\theta}, t) = \bar{X}^T(t)P\bar{X}(t) + \text{Tr}(\tilde{\theta}^T\gamma\tilde{\theta}), \quad (31)$$

其中

$$P = \begin{bmatrix} P_1 & 0 \\ 0 & P_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_1^{-1} & 0 \\ 0 & Q_2^{-1} \end{bmatrix} > 0. \quad (32)$$

基于式(28)和(31), 得

$$LV(\bar{X}(t), \tilde{\theta}, t) = \frac{\partial V}{\partial \bar{X}}[\bar{A}\bar{X}(t) + \bar{B}_1\tilde{\theta}^T\alpha(\varpi) + \bar{B}_2\varepsilon(\varpi)] + \text{Tr}(\bar{\Psi}^T P \bar{\Psi}) - 2\text{Tr}(\tilde{\theta}^T\gamma\dot{\theta}) \leq \bar{X}^T(t)(P\bar{A} + \bar{A}^T P)\bar{X}(t) + \text{Tr}(\bar{\Psi}^T P \bar{\Psi}) + \beta\varepsilon^T(\varpi)\varepsilon(\varpi) + \bar{X}^T(t)\beta^{-1}P\bar{B}_2\bar{B}_2^T P\bar{X}(t) + 2\text{Tr}(\bar{X}^T(t)P\bar{B}_1\tilde{\theta}^T\alpha(\varpi)) - 2\text{Tr}(\tilde{\theta}^T\gamma\dot{\theta}) = \bar{X}^T(t)(P\bar{A} + \bar{A}^T P)\bar{X}(t) + \text{Tr}(\bar{\Psi}^T P \bar{\Psi}) + \beta\varepsilon^T(\varpi)\varepsilon(\varpi) + \bar{X}^T(t)\beta^{-1}P\bar{B}_2\bar{B}_2^T P\bar{X}(t) + 2\text{Tr}((I_1\bar{X}(t) + I_2\bar{X}(t))^T P\bar{B}_1\tilde{\theta}^T\alpha(\varpi)) - 2\text{Tr}(\tilde{\theta}^T\gamma\dot{\theta}) = \bar{X}^T(t)(P\bar{A} + \bar{A}^T P + \beta^{-1}P\bar{B}_2\bar{B}_2^T P)\bar{X}(t) + \beta\varepsilon^T(\varpi)\varepsilon(\varpi) + 2\text{Tr}(\bar{X}^T(t)P\bar{B}_1\tilde{\theta}^T\alpha(\varpi)) - 2\text{Tr}(\tilde{\theta}^T\gamma\dot{\theta}) + 2\text{Tr}([0 \ b(t)]^T(t)P\bar{B}_1\tilde{\theta}^T\alpha(\varpi)) + \text{Tr}(\bar{\Psi}^T P \bar{\Psi}). \quad (33)$$

其中

$$I_1 = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, I_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix}, \bar{X}(t) = \begin{bmatrix} X(t) \\ \hat{b}(t) \end{bmatrix}. \quad (34)$$

令

$$\text{Tr}(\bar{X}^T(t)P\bar{B}_1\tilde{\theta}^T\alpha(\varpi)) = \text{Tr}(\tilde{\theta}^T\gamma\dot{\theta}), \quad (35)$$

根据  $\text{Tr}(SZ) = \text{Tr}(ZS)$ , 其中  $S$  和  $Z$  是适当维数的已知矩阵, 且有  $SZ$  和  $ZS$  为方阵, 则

$$\text{Tr}(\bar{X}^T(t)P\bar{B}_1\tilde{\theta}^T\alpha(\varpi)) = \text{Tr}(\tilde{\theta}^T\alpha(\varpi)\bar{X}^T(t)P\bar{B}_1). \quad (36)$$

由式(35)和(36), 得自适应律

$$\dot{\theta} = \gamma^{-1}\alpha(\varpi)\tilde{X}^T(t)P\bar{B}_1, \quad (37)$$

则有

$$LV(\bar{X}(t), \tilde{\theta}, t) \leq \bar{X}^T(t)\Theta_1\bar{X}(t) + \iota(t). \quad (38)$$

其中

$$\begin{aligned} \Theta_1 &= P\bar{A} + \bar{A}^T P + \beta^{-1} P\bar{B}_2\bar{B}_2^T P, \\ \iota(t) &= \beta\varepsilon^T(\varpi)\varepsilon(\varpi) + \text{Tr}(\bar{\Psi}^T P\bar{\Psi}) + \\ & 2\text{Tr}([0 \ b(t)]^T(t)P\bar{B}_1\bar{\theta}^T\alpha(\varpi)). \end{aligned} \quad (39)$$

因此

$$LV(\bar{X}(t), \tilde{\theta}, t) \leq \bar{X}^T(t)\Theta_1\bar{X}(t) + \iota(t), \quad (40)$$

$\tilde{\theta}^T$  是最优参数与实际值的误差, 因此  $\tilde{\theta}^T$  有界. 基于式 (39) 和 (40), 存在常数  $\delta > 0$ , 当  $\bar{\Psi}$ 、 $P$ 、 $\bar{B}_1$  为有界矩阵时,  $0 < \iota(t) < \delta$  成立. 因此

$$\begin{aligned} LV(\bar{X}(t), \tilde{\theta}, t) &\leq \bar{X}^T(t)\Theta_1\bar{X}(t) + \iota(t) \leq \\ &\bar{X}^T(t)\Theta_1\bar{X}(t) + \delta. \end{aligned} \quad (41)$$

下面, 通过 3 个步骤来证明  $\Theta < 0 \Leftrightarrow \Theta_1 < 0$ .

1) 证明  $\Theta_1 < 0 \Leftrightarrow \Theta_2 < 0$ . 根据式 (29)、(41) 和 Schur 补公式,  $\Theta_1 < 0$  等价于  $\Theta_2 < 0$ , 其中

$$\Theta_2 = \begin{bmatrix} \Xi_1 & P_1 B R^{-1}(\psi) & P_1 B \\ * & \Xi_2 & P_2 L B \\ * & * & -\beta^{-1} I \end{bmatrix} < 0. \quad (42)$$

这里

$$\begin{aligned} \Xi_1 &= P_1 A + A^T P_1 + P_1 B K + K^T B^T P_1, \\ \Xi_2 &= P_2 L B R^{-1}(\psi) + (R^{-1}(\psi))^T B^T L^T P_2 - \\ & P_2 T^{-1} - (T^{-1})^T P_2. \end{aligned}$$

2) 证明  $\Theta_2 < 0 \Leftrightarrow \Theta_3 < 0$ . 将  $\Theta_2 < 0$  分别左乘和右乘  $\text{diag}\{Q_1, Q_2, I\}$ , 得

$$\Theta_3 = \begin{bmatrix} \Pi_1 & B R^{-1}(\psi) Q_2 & B \\ * & \Pi_2 & L B \\ * & * & -\beta^{-1} I \end{bmatrix} < 0. \quad (43)$$

其中

$$\begin{aligned} \Pi_1 &= A Q_1 + Q_1^T A^T + B K Q_1 + Q_1^T K^T B^T, \\ \Pi_2 &= L B R^{-1}(\psi) Q_2 + Q_2^T (R^{-1}(\psi))^T B^T L^T - \\ & T^{-1} Q_2 - Q_2^T (T^{-1})^T. \end{aligned}$$

3) 证明  $\Theta_3 < 0 \Leftrightarrow \Theta < 0$ . 令式 (43) 中的  $K = R_1 Q_1^{-1}$ , 得到  $\Theta_3 < 0 \Leftrightarrow \Theta < 0$ .

根据步骤 1)~步骤 3), 有  $\Theta < 0 \Leftrightarrow \Theta_3 < 0 \Leftrightarrow \Theta_2 < 0 \Leftrightarrow \Theta_1 < 0$ . 因此, 存在一个常数  $\chi > 0$ , 使得

$$\Theta < 0 \Leftrightarrow \Theta_1 < 0 \Leftrightarrow \Theta + \chi I < 0. \quad (44)$$

根据式 (41) 和 (44), 选择  $\kappa = \lambda_{\min}(P)|\bar{X}|^p$ ,  $\vartheta = \frac{\chi}{\lambda_{\max}(P)}$  和  $p = 2$ , 得

$$\begin{aligned} \kappa(|\bar{X}|^p) &= \lambda_{\min}(P)|\bar{X}|^2 \leq \\ \bar{X}^T(t)P\bar{X}(t) &= V(\bar{X}(t), \tilde{\theta}, t), \end{aligned}$$

$$LV(\bar{X}(t), \tilde{\theta}, t) \leq -\vartheta V(\bar{X}(t)) + \delta. \quad (45)$$

则有

$$EV(\bar{X}(t), \tilde{\theta}, t) \leq V(\bar{X}(0))e^{-\vartheta t} + \frac{\delta}{\chi}. \quad (46)$$

由式 (45) 和 (46), 可得

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \sup E|\bar{X}(t; t_0, \bar{X}_0)|^p \leq \frac{\delta}{\vartheta \lambda_{\max}(P)} = \frac{\delta}{\chi}. \quad (47)$$

当  $\chi$  足够大时, 边界值足够小. 根据文献 [4] 中的引理 1, 复合系统 (28) 为依均方渐近有界的.  $\square$

### 3 仿真实例

考虑到系统 (13) 存在较强的非线性  $G(\varpi)$ , 根据文献 [10], 假设  $G(\varpi) = [g_1(\varpi), g_2(\varpi), g_3(\varpi)]^T$  中的非线性函数为

$$\begin{aligned} g_1(\varpi) &= -1.3274\varpi_1^2, \\ g_2(\varpi) &= -36.47287\varpi_2^2 - 3.45\varpi_3^2 - 1.65\varpi_2\varpi_3, \\ g_3(\varpi) &= 3.95645\varpi_2^2 + 0.21\varpi_2\varpi_3 - 0.075\varpi_3^2. \end{aligned}$$

确定模糊逻辑系统规则数  $N = 5$ , 选取模糊隶属度函数为

$$\begin{aligned} \mu_{G_i^1}(\varpi_i) &= \exp\left(\frac{-0.5(\varpi_i + 0.5k)^2}{4}\right), \\ \mu_{G_i^2}(\varpi_i) &= \exp\left(\frac{-0.5(\varpi_i + 0.5k)^2}{5}\right), \\ \mu_{G_i^3}(\varpi_i) &= \exp\left(\frac{-0.5(\varpi_i + 0.5k)^2}{6}\right), \end{aligned}$$

$$i = 1, \dots, 3, \quad l = 1, \dots, 5, \quad k = 2, 1, 0, -1, -2.$$

基于式 (26), 复合控制器设计如下:

$$\begin{aligned} U(t) &= \\ & -\hat{H}(t) + KX(t) - [\alpha_1(\varpi)\theta_1 \ \alpha_2(\varpi)\theta_2 \ \alpha_3(\varpi)\theta_3]^T. \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} \theta_s &= [\theta_{s1}, \dots, \theta_{s5}]^T; \\ \alpha_s(\varpi) &= [\alpha_{s1}(\varpi), \dots, \alpha_{s5}(\varpi)]^T; \\ \alpha_{sl}(\varpi) &= \frac{\prod_{i=1}^n \mu_{G_i^{sl}}(\varpi_i)}{\sum_{l=1}^N \left[ \prod_{i=1}^n \mu_{G_i^{sl}} \right]}, \quad s = 1, 2, 3. \end{aligned}$$

在仿真中采用挪威科技大学海洋控制论实验室供应船 1:70 比例的 CyberShip II 数据参数<sup>[10]</sup>. 初始条件选为  $X(0) = [1, 1, 0, 0, 0, 0]^T$ , 表示船舶初始位置为 (1 m, 1 m), 初始艏摇角为 0 rad, 初始速度为 0 m/s. 时间常数矩阵  $T = 0.35I_{3 \times 3}$ , 高斯白噪声幅值矩阵  $\Psi = \text{diag}(6.5, 2.3, 2.5)$ . 将式 (23) 中的极点配置到  $[-0.6, -0.6, -0.6]$ , 得到干扰观测增益矩阵

$$L =$$

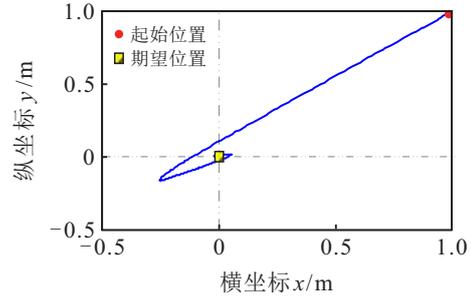
$$\begin{bmatrix} 0 & 0.0001 & 0 & -73.6988 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0001 & 0 & 0 & -96.5511 & -3.1273 \\ 0 & 0.0001 & 0 & 0 & -3.1273 & -53.5887 \end{bmatrix}.$$

根据定理1,得

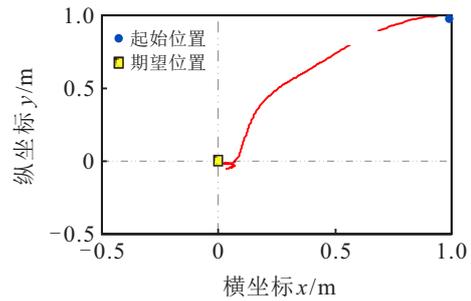
$$K = \begin{bmatrix} -33.8625 & 0 & 0 \\ 0 & -44.2777 & 0.0167 \\ 0 & -4.0559 & -24.7073 \\ -23.4650 & 0 & 0 \\ 0 & -30.5434 & 3.3031 \\ 0 & -1.6332 & -15.9420 \end{bmatrix}.$$

图2为EADC和PID控制的船舶位置变化曲线对比,表明本文所提的EADC策略能够更好地使船舶趋向并保持期望位置(0m,0m)。图3为EADC和PID控制的船舶位置(x,y)、艏摇角ψ和船舶速度的对比曲线,可以看出EADC策略比PID控制具有更高的抗干扰控制精度。本文所提的EADC策略通过构造干扰观测器估计干扰,对干扰进行实时抵消,并利用模糊逻辑系统逼近复杂非线性项,将DOB与模糊控制相结合,达到高精度抗干扰控制,相比PID控制具有较强的鲁棒性和适应性。图4为干扰估计图,表

明本文所设计的自适应干扰观测器是有效的。如图5所示,自适应律θ̂在参照参数θ的上下波动,说明θ̂能够有效地估计θ。



(a) EADC 船舶位置



(b) PID 控制船舶位置

图2 船舶位置变化曲线对比

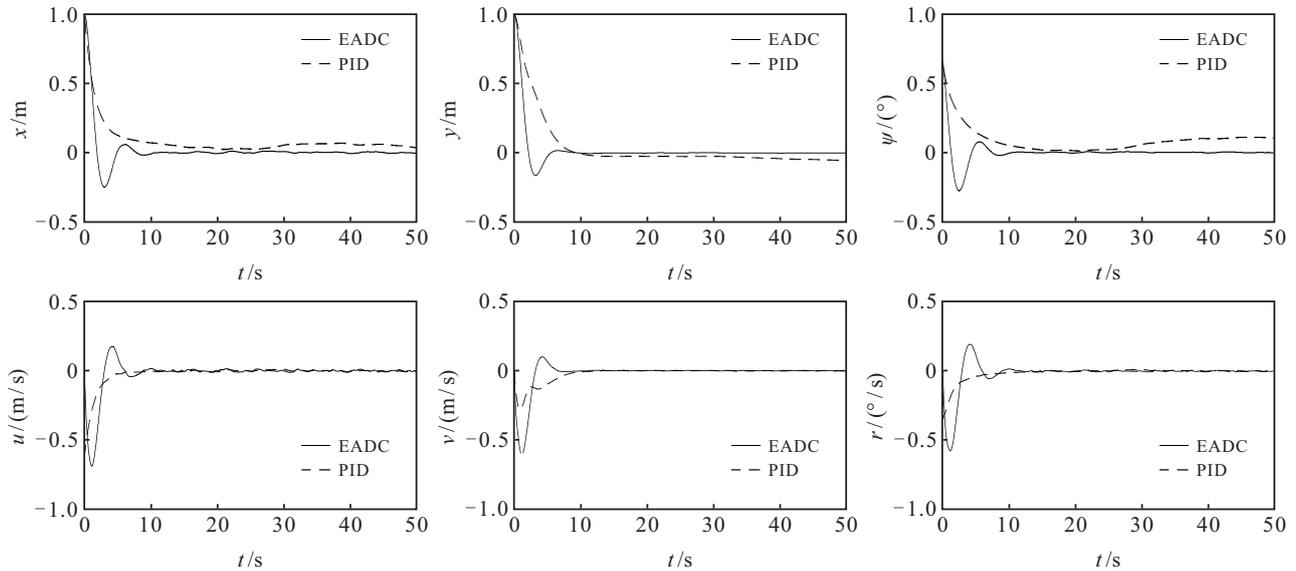


图3 EADC和PID控制的船舶位置(x,y)、艏摇角ψ和速度v=(u,v,r)<sup>T</sup>对比

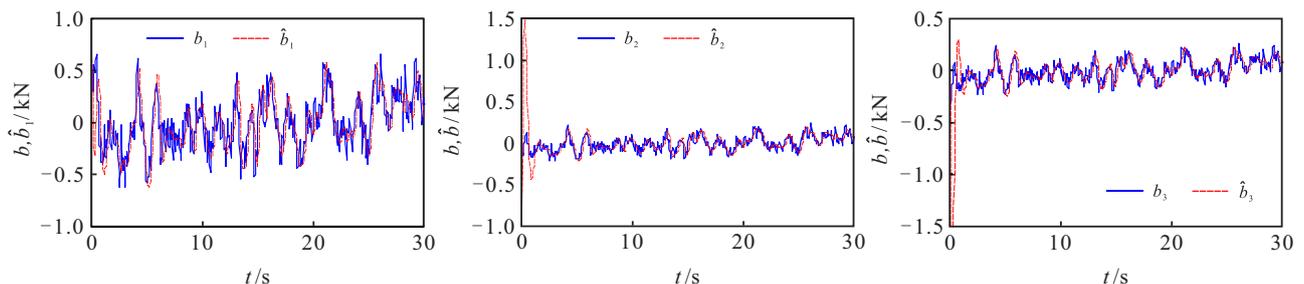


图4 干扰状态b=[b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub>, b<sub>3</sub>]<sup>T</sup>及其估计值b̂=[b̂<sub>1</sub>, b̂<sub>2</sub>, b̂<sub>3</sub>]<sup>T</sup>

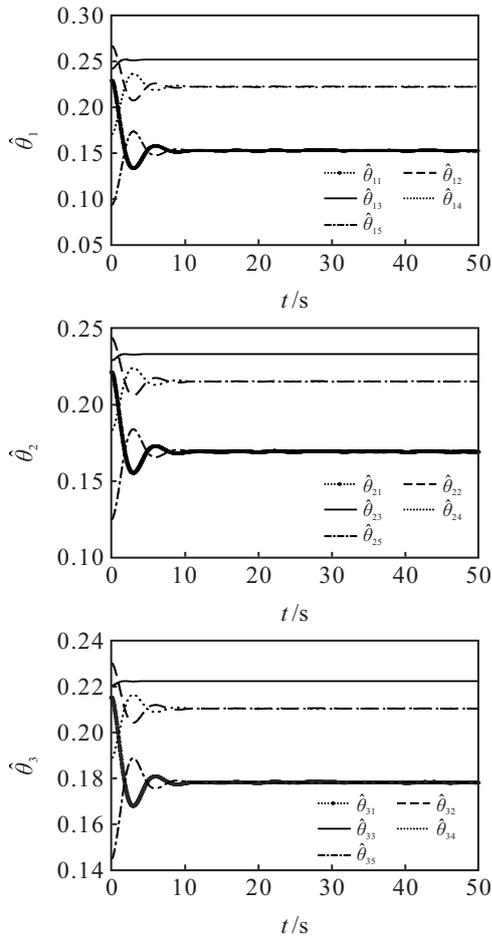


图5 参数 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 的估计值 $\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2, \hat{\theta}_3$

### 4 结论

本文针对带有慢变环境干扰和复杂非线性项的船舶动力定位系统设计复合控制器,提出了DOBC与模糊控制相结合的精细抗干扰控制策略,为船舶动力定位系统的抗干扰研究提供了一种新方法。

### 参考文献(References)

[1] Fossen T I, Grovlen A. Nonlinear output feedback control of dynamically positioned ships using vectorial observer backstepping [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 1998, 6(1): 121-128.

[2] Fossen T I, Strand J P. Passive nonlinear observer design for ships using Lyapunov methods: Full-scale experiments with a supply vessel[J]. Automatica, 1999, 35(1): 3-16.

[3] Do K D. Global robust and adaptive output feedback

dynamic positioning of surface ships[J]. Journal of Marine Science and Application, 2011, 10(3): 325-332.

[4] Wei X J, Wu Z J, Karimi H R. Disturbance observer-based disturbance attenuation control for a class of stochastic systems[J]. Automatica, 2016, 63: 21-25.

[5] Wei X J, Chen N. Composite hierarchical anti-disturbance control for nonlinear systems with DOBC and fuzzy control[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2014, 24(2): 362-373.

[6] 魏新江,孙式香,张慧凤. 随机多源干扰系统的复合DOBC和容错控制[J]. 控制与决策, 2019, 34(3): 668-672.  
(Wei X J, Sun S X, Zhang H F. Fault-tolerant control based on disturbance observer for stochastic systems with multiple disturbances[J]. Control and Decision, 2019, 34(3): 668-672.)

[7] Wen X Y, Guo L, Yan P. Composite hierarchical anti-disturbance control for robotic systems with multiple disturbances[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2014, 12(3): 541-551.

[8] 李铁山,杨盐生,洪碧光,等. 船舶航迹控制鲁棒自适应模糊设计[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(3): 445-448.  
(Li T S, Yang Y S, Hong B G, et al. Robust adaptive fuzzy design for ships track-keeping control[J]. Control Theory & Applications, 2007, 24(3): 445-448.)

[9] Skjetne R, Smogeli Ø, Fossen T I. Modeling, identification, and adaptive maneuvering of CyberShip II: A complete design with experiments[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2004, 37(10): 203-208.

[10] Øksendal B. Stochastic differential equations an introduction with applications[M]. New York: Springer-Verlag, 1985: 1731-1732.

### 作者简介

魏新江(1977-),男,教授,博士,从事随机系统控制、非线性控制、基于干扰观测器的抗干扰控制等研究, E-mail: weixinjiang@163.com;

魏永丽(1994-),女,硕士生,从事非线性系统控制、抗干扰控制的研究, E-mail: weiyongli95@126.com;

张慧凤(1975-),女,讲师,博士,从事鲁棒控制、非线性控制等研究, E-mail: zhanghuifeng05@163.com.

(责任编辑: 齐 霖)