

# 动力定位船舶自适应滑模无源观测器设计

谢文博<sup>†</sup>, 付明玉, 施小成

(哈尔滨工程大学 自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 针对带有模型参数不确定性的动力定位船舶, 提出一种动力定位船全速域自适应滑模无源观测器, 解决了现有观测器只能应用于低速作业动力定位系统的问题. 采用速度估计误差作为滑模面, 设计切换自适应律估计模型不确定项上界, 保证了观测器增益的有界性和系统鲁棒性. 对速度估计回路的无源性进行了分析, 并证明了观测器的稳定性. 最后利用船舶动力定位系统半实物仿真平台, 验证了算法的有效性.

**关键词:** 观测器; 动力定位; 滑模; 自适应; 无源性

**中图分类号:** TP273      **文献标识码:** A

## Adaptive sliding-mode passive observer design for dynamic positioning vessel

XIE Wen-bo<sup>†</sup>, FU Ming-yu, SHI Xiao-cheng

(College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin Heilongjiang 150001, China)

**Abstract:** Because the existing observers can only be applied to low-speed dynamic positioning systems, we propose an adaptive sliding-mode passive observer for all speed envelopes of the dynamic positioning vessel with uncertain model parameters. The velocity estimation error is used as the sliding-mode surface; a switching adaptive update law is designed to estimate the upper bound of model uncertainties for restricting the observer gains and improving the robustness of the system. The passivity analysis of the loop for speed estimation is given; the stability of the observer is proved. The algorithm is validated through a hardware-in-the-loop simulation of a dynamic positioning system.

**Key words:** observer; dynamic positioning; sliding-mode; adaptive; passivity

### 1 引言(Introduction)

动力定位(dynamic positioning, DP)船舶在海洋中作业会受到海浪等外界干扰, 海洋环境对DP船舶的影响可以分为两部分: 一部分是风、流和二阶波浪漂移力使船舶产生的低频运动; 另一部分是一阶波浪产生的船舶高频振荡. 高频运动可看成船舶在位置和艏向低频值附近周期性的振荡, 不会造成船体偏离平衡位置, 同时为了避免推进器不必要的磨损, DP系统只针对船舶低频运动进行控制. DP测量系统能够给出高低频叠加的船体位置、艏向和速度值, 这就要利用观测器将测量值中的高低频量进行分离, 通过滤波得到无法直接测量的低频状态量.

文献[1-2]设计了无源非线性状态观测器, 可根据船体位姿(位置和艏向)测量信息估计出船舶低频位姿和速度. 文献[3-4]设计了具有海浪频率自适应功能的增广无源观测器, 通过对船舶与海浪遭遇频率的估计和对观测误差的滤波, 提高了无源观测器的估计效果. 文献[5-6]基于收缩理论设计了海浪频

率自适应观测器. 文献[7]在船舶惯量矩阵和线性水动力系数未知时设计了自适应观测器, 可以对定常模型不确定项进行估计. 上述文献忽略了船舶非线性水动力系数, 只针对低速域DP船舶进行观测器设计, 由于船舶运动速度越高, 非线性水动力系数的影响越明显, 所以上述文献中的成果不能用于2节以上中高速域的DP作业, 工程上存在很大局限性. 文献[8-10]针对DP模型中的不确定噪声项设计了滑模无源观测器, 滑模面选取为高低频位姿和慢变环境力估计误差的加权, 实际应用时无法测量这些状态量, 得不到文中所设计的滑模面. 文献[11]设计了位姿误差为滑模面的观测器以提高系统对外界干扰的鲁棒性, 文中没有讨论如何选取滑模控制增益以保证观测器的鲁棒性. 文献[12]对水下机器人(remote operated vehicle, ROV)设计了扩展Kalman滤波器, 考虑了非线性水动力系数, 但要求ROV非线性水动力矩阵已知, 可以在观测器中对该项进行精确补偿. 针对存在未知非线性时变水动力系数的全速域DP系

统设计观测器,有重要的工程应用价值,目前还鲜有文献对此进行讨论。

本文提出了一种自适应滑模无源观测器,针对带有非线性水动力的全速域DP模型进行设计,解决了上述问题。首先基于DP系统中GPS和电罗经的船舶位姿、速度测量值设计滑模观测器,利用速度估计误差作为滑模面,保证实际测量系统可以获得滑模面中状态量。将DP模型中非线性水动力矩阵看作模型时变不确定项,设计切换自适应律估计不确定项上界,将上界估计值作为滑模面增益,避免了增益过大产生的估计量振荡和增益过小造成的系统不稳定。分析了速度估计误差回路的无源性,并证明了观测器的稳定性。最后基于DP系统半实物仿真平台,进行船舶动力定位作业,验证了算法的有效性。

## 2 DP系统模型(DP System model)

建立水平面三自由度大地坐标系 $NOE$ 和船舶随体坐标系 $xoy$ 。 $xoy$ 相对于 $NOE$ 的速度为 $\nu = [u \ v \ r]^T$ ,船舶在坐标系中的位置和艏向为 $\eta = [n \ e \ \psi]^T$ ,所研究船舶左右对称, $xoy$ 坐标系原点选于船体重心处,如图1所示。

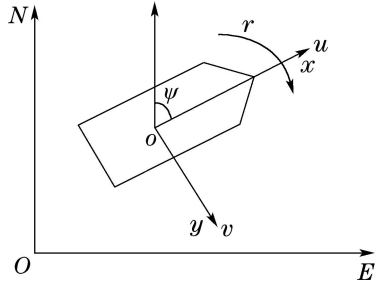


图1 大地与船体坐标系

Fig. 1 Earth fixed and body fixed frame

根据文献[13],船舶运动学和低频动力学方程为

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

$$M\dot{\nu} = \tau - [D + D(\nu) + C(\nu)]\nu + R^T(\psi)b, \quad (1b)$$

其中坐标转换矩阵为

$$R(\psi) = \begin{pmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

式(1b)中 $M, D, D(\nu), C(\nu) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 分别为船体惯性矩阵,线性、非线性水阻尼矩阵和科里奥利-向心力矩阵,给出 $M$ 和 $D$ 矩阵形式如下:

$$M = \begin{pmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & -Y_{\dot{r}} \\ 0 & -Y_{\dot{r}} & I_z - N_{\dot{r}} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

$$D = \begin{pmatrix} -X_u & 0 & 0 \\ 0 & -Y_v & -Y_r \\ 0 & -Y_r & -N_r \end{pmatrix}, \quad (4)$$

式中水动力系数见参考文献[13],对于常规单体船型,矩阵 $M$ 和 $D$ 有 $M = M^T > 0, D > 0$ 。 $\tau, b \in \mathbb{R}^3$ 为控制量和低频环境干扰。将海风、海流和二阶波漂力的作用看作低频慢变环境干扰如下:

$$\dot{b} = -T^{-1}b. \quad (5)$$

上式采用一阶滤波器的形式, $T = \text{diag}\{T_1, T_2, T_3\}$ 为时间常数对角阵,其中 $T_i \gg 0 (i = 1, 2, 3)$ 表征环境干扰变化速度。真实海洋环境是时刻变化的,但变化速度相对于船舶运动来说十分缓慢,所以引入大时间常数矩阵 $T$ 是合理的。一阶海浪作用导致的船舶高频运动模型如下:

$$\dot{\xi} = A_\omega \xi + F_\omega w, \quad (6)$$

高频状态量

$$\xi = [\xi_1 \ \xi_2 \ \xi_3 \ \xi_4 \ \xi_5 \ \xi_6]^T \in \mathbb{R}^6$$

分别表示船体在 $NOE$ 坐标系下高频位置、艏向和坐标系下高频速度、角速度, $A_\omega \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ 和 $F_\omega \in \mathbb{R}^{6 \times 3}$ 为系数矩阵, $w$ 为零均值高斯白噪声。基于高精度GPS和电罗经可以测量船舶位置、艏向、(角)速度,测量模型为

$$y_\eta = \eta + C_\omega \xi, \quad (7a)$$

$$y_\nu = \nu + E_\omega \xi, \quad (7b)$$

其中: $y_\eta \in \mathbb{R}^3$ 为位置和艏向测量值, $y_\nu \in \mathbb{R}^3$ 为速度和艏向角速度测量值, $C_\omega, E_\omega \in \mathbb{R}^{3 \times 6}$ 为系数矩阵。

**假设1** 在观测器设计和稳定性分析中,忽略高斯白噪声项,即 $w = 0$ 。

**注1** 对于假设1,不失一般性。一方面高斯白噪声 $w$ 为零均值附近震荡的高频量,只会对观测器估计值造成围绕真实值的震荡,平均值为零;另一方面,在稳定性分析中考虑噪声项只能得到观测器是一致毕竟有界的而不是一致指数稳定的。

将式(1b)中非线性水动力项 $D(\nu)$ 和 $C(\nu)$ 作为模型未知不确定项:

$$X(\nu) = -[D(\nu) + C(\nu)]\nu. \quad (8)$$

综上所述,得到DP系统模型如下:

$$\begin{cases} \dot{\xi} = A_\omega \xi, \\ \dot{\eta} = R(\psi)\nu, \\ M\dot{\nu} = \tau + X(\nu) - D\nu + R^T(\psi)b, \\ \dot{b} = -T^{-1}b, \\ y_\eta = \eta + C_\omega \xi, \\ y_\nu = \nu + E_\omega \xi. \end{cases} \quad (9)$$

## 3 观测器设计(Observer design)

设 $\hat{\xi} \in \mathbb{R}^6$ 为高频估计值, $\hat{\eta}, \hat{b} \in \mathbb{R}^3$ 为低频和环境干扰估计值, $\tilde{y}_\eta = y_\eta - \hat{y}_\eta$ 为位置艏向估计误差。

$K_1 \in \mathbb{R}^{6 \times 3}; K_{2,3,4} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  为观测器系数矩阵. 设计自适应滑模观测器形式如下:

$$\begin{cases} \dot{\hat{\xi}} = A_\omega \hat{\xi} + K_1 \tilde{y}_\eta, \\ \dot{\hat{\eta}} = R(y_\eta(3))\hat{\nu} + K_2 \tilde{y}_\eta, \\ \dot{\hat{b}} = -T^{-1}\hat{b} + K_3 \tilde{y}_\eta, \\ M\dot{\hat{\nu}} = -D\hat{\nu} + R^T(y_\eta(3))(\hat{b} + K_4 \tilde{y}_\eta) + \\ \quad \tau + \hat{L} \operatorname{sgn} s, \\ \hat{y}_\eta = \hat{\eta} + C_\omega \hat{\xi}, \\ \hat{y}_\nu = \hat{\nu} + E_\omega \hat{\xi}. \end{cases} \quad (10)$$

**假设 2** 假定  $y_\eta(3) = \psi + \xi_3 \approx \psi$ , 得到坐标转换矩阵为  $R(\psi + \xi_3) \approx R(\psi)$ .

**注 2** 对于假设 2, 即使在极端海况下作业的实际 DP 船舶, 艏向高频摇荡相对也很小, 一般  $|\xi_3| \leq 5^\circ$ , 所以假定艏向测量值约等于低频值合理.

根据假设 2, 运动学和动力学观测器方程变为

$$\begin{cases} \dot{\hat{\eta}} = R(y_\psi)\hat{\nu} + K_2 \tilde{y}_\eta, \\ M\dot{\hat{\nu}} = -D\hat{\nu} + R^T(y_\psi)(\hat{b} + K_4 \tilde{y}_\eta) + \\ \quad \tau + \hat{L} \operatorname{sgn} s. \end{cases} \quad (11)$$

根据式(9)–(10), 速度估计误差为

$$\tilde{y}_\nu = \nu + E_\omega \xi - \hat{\nu} - E_\omega \hat{\xi} = \tilde{\nu} + E_\omega \tilde{\xi}, \quad (12)$$

其中:  $\tilde{\xi} = \xi - \hat{\xi}$  为高频位姿和速度估计误差,  $\tilde{\nu}$  为低频速度估计误差.

**假设 3** 速度估计误差模型中认为  $E_\omega \tilde{\xi} \approx 0$ , 即  $\tilde{y}_\nu = \tilde{\nu} + E_\omega \tilde{\xi} \approx \tilde{\nu}$ .

**注 3** 对于假设 3, 与假设 1 相仿, 速度估计误差模型中的  $E_\omega \tilde{\xi}$  为零均值附近震荡的高频量, 只会对观测器估计值造成围绕真实值的震荡, 平均值为零, 不会导致误差的累加.

选取速度估计误差作为滑模面  $s$ :

$$s = \tilde{y}_\nu \approx \tilde{\nu}. \quad (13)$$

设列向量  $\hat{L} \in \mathbb{R}^3$  为观测器滑模面增益的估计值. 针对模型不确定性设计切换自适应律<sup>[14]</sup>: 在滑模面误差较大时, 使增益快速增加, 保证系统鲁棒性; 滑模面误差较小时, 使得增益增长率趋向于零, 避免振荡过大, 自适应律选取如下:

$$\dot{\hat{L}} = \gamma^{-1} [|s_1| \ |s_2| \ |s_3|]^T, \quad (14)$$

其中对角阵  $\gamma \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  为自适应律增益矩阵:

$$\gamma = \begin{cases} \operatorname{diag}\{\gamma_i^{-1}\}, & s^T s \geq \sigma, \\ \operatorname{diag}\{l_i \exp(-\gamma_i \int_{t_0}^t |s_i| dt)\}, & s^T s < \sigma. \end{cases} \quad (15)$$

上式中  $i = 1, 2, 3$ . 可知  $\gamma$  为正定对角阵, 其中  $\gamma_i > 0$ ,

$l_i > 0$  为定常增益,  $\sigma > 0$  为切换阈值,  $t$  为时间变量,  $t_0$  为初始时刻. 对式(15)求导得到  $\dot{\gamma}$  为负半定矩阵:

$$\dot{\gamma} = \begin{cases} \operatorname{diag}\{0\}, & s^T s \geq \sigma, \\ \operatorname{diag}\{-l_i \gamma_i |s_i| \exp(-\gamma_i \int_{t_0}^t |s_i| dt)\}, & s^T s < \sigma. \end{cases} \quad (16)$$

## 4 稳定性分析(Stability analysis)

### 4.1 低频速度估计的无源性分析(Passivity analysis of low frequency speed)

设  $\tilde{b} = b - \hat{b}$  为环境干扰估计误差,  $\tilde{\eta} = \eta - \hat{\eta}$  为低频位置艏向估计误差, 由式(9)–(11)得到误差系统为

$$\begin{cases} \dot{\tilde{\xi}} = A_\omega \tilde{\xi} - K_1 \tilde{y}_\eta, \\ \dot{\tilde{\eta}} = R(y_\psi)\tilde{\nu} - K_2 \tilde{y}_\eta, \\ \dot{\tilde{b}} = -T^{-1}\tilde{b} - K_3 \tilde{y}_\eta, \\ M\dot{\tilde{\nu}} = R^T(\psi)(\tilde{b} - K_4 \tilde{y}_\eta) + X(\nu) - \\ \quad \hat{L} \operatorname{sgn} s - D\tilde{\nu}, \\ \tilde{y}_\eta = \tilde{\eta} + C_\omega \tilde{\xi}, \tilde{y}_\nu = \tilde{\nu}. \end{cases} \quad (17)$$

定义  $\tilde{x} = [\tilde{\xi}^T \ \tilde{\eta}^T \ \tilde{b}^T]^T$ ,  $\tilde{z} = C\tilde{x}$ , 其中系数矩阵  $C$  为  $C = [K_4 C_\omega \ K_4 \ -I_{3 \times 3}]$ , 可将误差系统转化为

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}} = A\tilde{x} + BR(\psi)\tilde{\nu}, \\ \dot{\tilde{\nu}} = M^{-1}[X(\nu) - \hat{L} \operatorname{sgn} s - R^T(\psi)\tilde{z} - D\tilde{\nu}], \\ \tilde{z} = C\tilde{x}, \end{cases} \quad (18)$$

式中:

$$A = \begin{pmatrix} A_\omega - K_1 C_\omega & -K_1 & 0_{6 \times 3} \\ -K_2 C_\omega & -K_2 & 0_{3 \times 3} \\ -K_3 C_\omega & -K_3 & -T^{-1} \end{pmatrix},$$

$$B = [0_{3 \times 6} \ I_{3 \times 3} \ 0_{3 \times 3}]^T,$$

定义  $\varepsilon_z = -R^T(\psi)\tilde{z}$ , 根据式(18)可得观测器误差系统结构如图 2 所示.

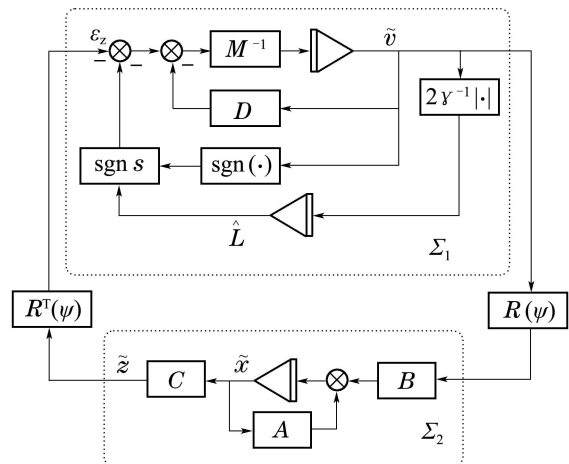


图 2 观测器结构

Fig. 2 Observer structure

**定理 1** 观测器误差系统中的低频速度估计误差回路, 即图2中 $\Sigma_1$ 回路是严格无源的。

**证** 选取存储函数 $S_1$ 为

$$S_1 = 2^{-1}(\tilde{\nu}^T M \tilde{\nu} + \tilde{L}^T \gamma \tilde{L}). \quad (19)$$

对 $S_1$ 求导有

$$\begin{aligned} \dot{S}_1 = & -\tilde{\nu}^T R^T(\psi) \tilde{z} - 2^{-1}(\tilde{\nu}^T (D + D^T) \tilde{\nu} + \tilde{L}^T \gamma \tilde{L} \cdot \\ & \tilde{\nu}^T [X(\nu) - \hat{L} \text{sgn } s] + 2^{-1} \tilde{L}^T \dot{\gamma} \tilde{L}). \end{aligned} \quad (20)$$

设滑模面增益上界为常量 $L_i \geq |X(\nu)_i|$ ,  $i = 1, 2, 3$ , 增益估计误差为 $\tilde{L} = L - \hat{L}$ , 得到 $\dot{S}_1$ :

$$\begin{aligned} \dot{S}_1 = & s^T [X(\nu) - L \text{sgn } s] - 2^{-1}(\tilde{\nu}^T (D + D^T) \tilde{\nu} + \\ & \varepsilon_z^T \tilde{\nu} + s^T \tilde{L} \text{sgn } s - \tilde{L}^T \dot{\gamma} \tilde{L} + 2^{-1} \tilde{L}^T \dot{\gamma} \tilde{L}), \end{aligned} \quad (21)$$

其中

$$s^T [X(\nu) - L \text{sgn } s] = \sum_{i=1}^3 (s_i X(\nu)_i - |s_i| L_i) \leq 0.$$

根据式(14), 得到

$$s^T \tilde{L} \text{sgn } s - \tilde{L}^T \dot{\gamma} \tilde{L} = \sum_{i=1}^3 (|s_i| \tilde{L}_i - \tilde{L}_i \gamma_i \dot{L}_i) = 0. \quad (22)$$

将以上各式代入 $\dot{S}_1$ 得到

$$\begin{aligned} \varepsilon_z^T \tilde{\nu} = & -s^T [X(\nu) - L \text{sgn } s] + \dot{S}_1 + \\ & 2^{-1}(\tilde{\nu}^T (D + D^T) \tilde{\nu} - 2^{-1} \tilde{L}^T \dot{\gamma} \tilde{L}), \end{aligned} \quad (23)$$

$$\varepsilon_z^T \tilde{\nu} \geq \dot{S}_1 + 2^{-1}(\tilde{\nu}^T (D + D^T) \tilde{\nu} - 2^{-1} \tilde{L}^T \dot{\gamma} \tilde{L}), \quad (24)$$

其中 $2^{-1}(\tilde{\nu}^T (D + D^T) \tilde{\nu} - 2^{-1} \tilde{L}^T \dot{\gamma} \tilde{L})$ 为正定项, 低频速度估计回路 $\Sigma_1$ 输入为 $\varepsilon_z$ , 输出为 $\tilde{\nu}$ , 可知包含自适应律的 $\Sigma_1$ 回路是严格无源的。

## 4.2 误差系统稳定性(Stability of error system)

**定理 2** 观测器误差系统(18)是全局一致指数稳定的。

**证** 选设存在正定对称矩阵 $P = P^T$ 和 $Q = Q^T$ , 使 $PA + A^T P = -Q$ 和 $C = B^T P$ 成立. 针对系统(18)选取Lyapunov函数:

$$\begin{aligned} V = & 2^{-1} \tilde{x}^T P \tilde{x} + S_1, \\ & 2^{-1}[\lambda_{\min}(M) \tilde{\nu}^T \tilde{\nu} + \lambda_{\min}(\gamma) \tilde{L}^T \tilde{L} + \\ & \lambda_{\min}(P) \tilde{x}^T \tilde{x}] \leq V \leq \\ & 2^{-1}[\lambda_{\max}(M) \tilde{\nu}^T \tilde{\nu} + \lambda_{\max}(\gamma) \tilde{L}^T \tilde{L} + \lambda_{\max}(P) \tilde{x}^T \tilde{x}]. \end{aligned} \quad (25)$$

对 $V$ 求导有

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -2^{-1} \tilde{x}^T Q \tilde{x} + \tilde{\nu}^T R^T(\psi) B^T P \tilde{x} + \dot{S}_1 = \\ & -2^{-1} \tilde{x}^T Q \tilde{x} + \tilde{\nu}^T R^T(\psi) B^T P \tilde{z} + \tilde{\nu}^T \varepsilon_z + \\ & 2^{-1} \tilde{L}^T \dot{\gamma} \tilde{L} - 2^{-1}(\tilde{\nu}^T (D + D^T) \tilde{\nu} + \\ & s^T [X(\nu) - L \text{sgn } s]) = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & -2^{-1} \tilde{x}^T Q \tilde{x} - 2^{-1}(\tilde{\nu}^T (D + D^T) \tilde{\nu} + \\ & 2^{-1} \tilde{L}^T \dot{\gamma} \tilde{L} + s^T [X(\nu) - L \text{sgn } s]), \end{aligned} \quad (27)$$

$\dot{V} \leq$

$$\begin{aligned} & -2^{-1} \tilde{x}^T Q \tilde{x} - 2^{-1}(\tilde{\nu}^T (D + D^T) \tilde{\nu} + 2^{-1} \tilde{L}^T \dot{\gamma} \tilde{L} \leq \\ & -2^{-1}[\lambda_{\min}(Q) \tilde{x}^T \tilde{x} - \lambda_{\min}(D + D^T) \tilde{\nu}^T \tilde{\nu} + \\ & \lambda_{\min}(\dot{\gamma}) \tilde{L}^T \tilde{L}]. \end{aligned} \quad (28)$$

根据文献[15]中定理4.10, 观测器是全局一致指数稳定的。

为了避免切换函数导致的估计值震颤, 在误差较小时将滑模面修正到薄边界层 $\text{sat}(s_i/\mu)$ 中<sup>[16]</sup>,  $\mu > 0$ 为边界层厚度. 用下式代替符号函数 $\text{sgn } s$ :

$$\text{swh}(s) = \begin{cases} \text{sat}(s_i/\mu), & \max s_i < \mu, \\ \text{sgn } s, & \max s_i \geq \mu. \end{cases} \quad (29)$$

根据式(19)得到

$$\varepsilon_z^T \tilde{\nu} \geq \dot{S}_1 + \tilde{\nu}^T f(\tilde{\nu}), \quad (30)$$

其中 $f(\tilde{\nu}) = \tilde{\nu}^T [X(\nu) - \hat{L} \cdot \text{swh}(s)]$ , 此时低频速度估计误差回路 $\Sigma_1$ 为输出反馈无源的.  $\dot{V}$ 变为

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -2^{-1}[\tilde{x}^T Q \tilde{x} - \tilde{\nu}^T (D + D^T) \tilde{\nu} + \tilde{L}^T \dot{\gamma} \tilde{L}] + \\ & s^T [X(\nu) - \hat{L} \cdot \text{swh}(s)] + \\ & \sum_{i=1}^3 (\text{swh}(s_i) s_i \tilde{L}_i - \tilde{L}_i \gamma_i \dot{L}_i). \end{aligned} \quad (31)$$

上式对于 $\|s\|_2 \geq 3\|\mu\|_2$ 时, 有

$$\dot{V} \leq -2^{-1} \tilde{x}^T Q \tilde{x} - 2^{-1} \tilde{\nu}^T (D + D^T) \tilde{\nu} + 2^{-1} \tilde{L}^T \dot{\gamma} \tilde{L}. \quad (32)$$

根据文献[15]定理4.19, 观测器为输入-状态稳定的, 误差全局一致有界。

## 5 仿真结果(Simulation results)

基于某大型工程船舶DP控制系统半实物仿真平台进行算法验证, 仿真平台中船舶模型包括非线性水动力项 $D(\nu)$ 和 $C(\nu)$ 如下所示, 在设计观测器时将其作为未知项:

$$\begin{aligned} C(\nu) = & \begin{pmatrix} 0 & 0 & \mathcal{A} \\ 0 & 0 & m u - X_{\dot{u}} u \\ -\mathcal{A} & -m u + X_{\dot{u}} u & 0 \end{pmatrix}, \\ D(\nu) = & \begin{pmatrix} -X_{|u|u} |u| & 0 & 0 \\ 0 & \mathcal{B} & -Y_{|v|r} |v| - Y_{|r|r} |r| \\ 0 & \mathcal{C} & -N_{|v|r} |v| - N_{|r|r} |r| \end{pmatrix}, \end{aligned}$$

其中:

$$\begin{aligned} \mathcal{A} = & -m v + Y_{\dot{v}} v + Y_{\dot{r}} r, \quad \mathcal{B} = -Y_{|v|v} |v| - Y_{|r|r} |r|, \\ \mathcal{C} = & -N_{|v|v} |v| - N_{|r|r} |r|, \end{aligned}$$

在设计观测器时将其作为未知项。船舶初始位置和艏向为  $\eta_0 = [0 \ 0 \ 0]^T$ , 定位目标点设为  $\eta_d = [50 \ 50 - 0.1]^T$ , 其中位置单位为m, 艏向单位为rad。观测中滑模面边界层厚度设为  $\mu = 0.01$ , 自适应增益初值为  $\hat{L} = 0_{3 \times 1}$ , 时间常数矩阵  $T = 2000I_{3 \times 3}$ ,  $\gamma$  选取为

$$\gamma = \begin{cases} \text{diag}\{2 \times 10^3, 2 \times 10^3, 10^7\}, & s^T s < 0.001, \\ \text{diag}\{40 \exp(-0.01 \int_{t_0}^t |s_i| dt)\}, & s^T s \geq 0.001. \end{cases}$$

仿真平台界面如图3所示, 内置仿真器可以模拟船舶在海洋环境干扰下的动力定位作业, 仿真实验海况设置如表1。将观测器算法写入仿真平台, 在仿真实验过程中观测器接收测量数据, 对船舶各状态量进行估计, 完成实验后将测量和估计数据导出进行绘图分析。

表 1 仿真海况设置

Table 1 Sea state of simulation case

风速	14.0 kn	风向	30°
浪高	1.3 m	浪向	30°
流速	1.0 kn	流向	30°

低频位置、艏向估计值和测量值如图4-5所示, 低频速度估计值和测量值如图6所示, 切换自适应律得到的增益估计值  $\hat{L}$  如图7所示。

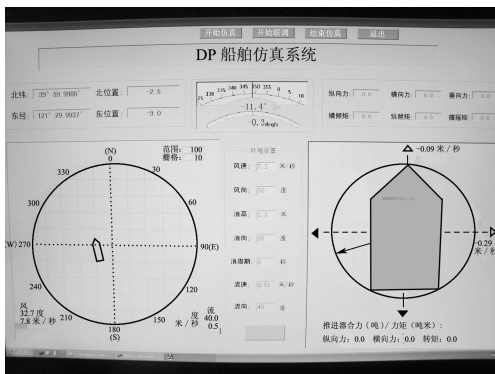


图 3 动力定位系统半实物仿真平台界面

Fig. 3 Hardware-in-the-loop interface of DP system

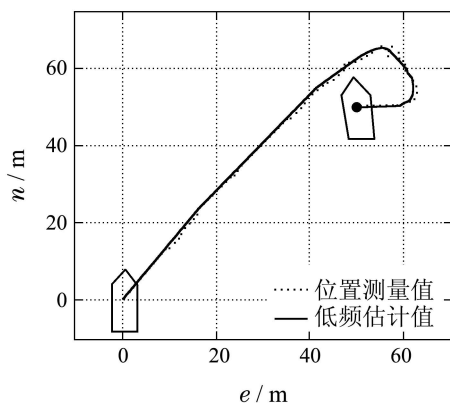


图 4 位置测量值和低频估计值

Fig. 4 Position measurements and low frequency estimates

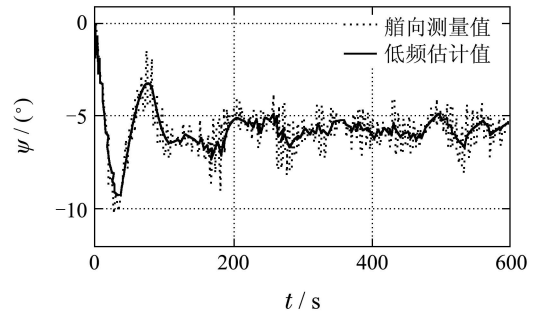


图 5 艏向测量值和低频估计值

Fig. 5 Heading measurements and low frequency estimates

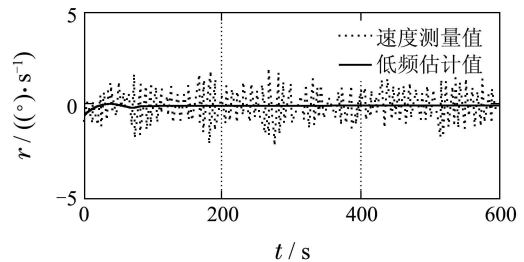
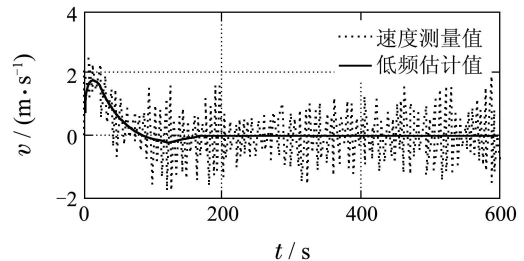
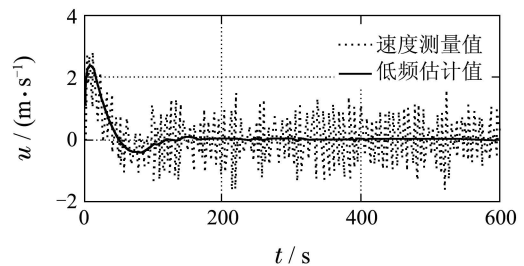


图 6 速度测量值和低频估计值

Fig. 6 Velocity measurements and low frequency estimates

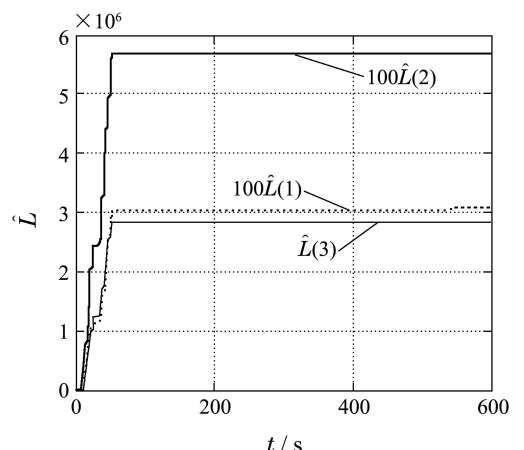


图 7 滑模面增益估计值

Fig. 7 Gain estimates of sliding mode surface

仿真过程船舶经历了高速域航行和低速域定点两个不同阶段,用于验证观测器在不同速域中的有效性.在仿真初始阶段船舶具有较高航行速度,不确定项 $X(\nu)$ 较大,此时自适应律能够保证 $\hat{L}$ 的快速增长,可以很好的补偿掉模型不确定项的影响,避免了增益小于不确定项 $X(\nu)$ 时系统的不稳定问题.在船舶到达设定点之后,船体速度降低,自适应律能够在观测器误差达到设定阈值以下时,保证增益的有界性,即 $\hat{L}$ 趋于常值,但此时 $X(\nu)$ 较小, $\hat{L}$ 相对于不确定项仍是过大切换增益,由于在滑模面误差较小时引入了边界层消除震颤,虽然 $\hat{L}$ 相对于 $X(\nu)$ 过大,但低频估计值基本没有震颤现象.仿真过程中,观测器在假设艏向和速度测量值约等于其低频值的情况下,仍然很好的滤除了位置、艏向和速度测量值中的高频分量,得到较精确的低频估计值.从图6低频速度估计结果看,仿真中边界层厚度 $\mu = 0.01$ 所限制的误差界,能够对估计精度起到较好限制.

## 6 结论(Conclusions)

本文针对带有非线性水动力系数的全速域DP船舶模型,设计了一种自适应滑模无源观测器.将非线性水动力作为模型未知不确定项,利用不连续饱和函数消除其对观测器精度的影响,采用自适应律对滑模面增益进行估计,保证了观测器的鲁棒性.为避免增益项趋于无穷,设计了切换自适应增益方法,使增益随着误差的减小逐渐趋于一个上界.该算法在动力定位系统半实物仿真平台上的实验取得了良好效果,其可以用于动力定位船舶全速域测量值滤波和状态量观测,为控制系统提供精确的船体状态低频估计值.

## 参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] 何黎明, 田作华, 施颂椒. 动力定位船舶的非线性观测器设计 [J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(6): 964 – 968.  
(HE Liming, TIAN Zuohua, SHI Songjiao. A nonlinear observer design for dynamic positioning ship [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2003, 37(6): 964 – 968.)
- [3] NIJMEIJER H, FOSSEN T I. *New Directions in Nonlinear Observer Design* [M]. London: Springer, 1999: 113 – 134.
- [4] HASSANI V, PASCOAL A M, AGUIAR A P, et al. A multiple model adaptive wave filter for dynamic ship positioning [C] // *Proceedings of the 8th IFAC Conference: Control Applications in Marine Systems*. Rostock: CAMS, 2010: 120 – 125.
- [5] TORSETNES G. *Nonlinear control and observer design for dynamic positioning using contraction theory* [D]. Trondheim: Norwegian University of Technology and Science, 2004.
- [6] TORSETNES G, JEROME J, FOSSEN T I. Nonlinear dynamic positioning of ships with gain-scheduled wave filtering [C] // *The 43rd IEEE Conference on Decision and Control*. Nassau: CDC, 2004: 5340 – 5347.
- [7] DO K D. Global robust and adaptive output feedback dynamic positioning of surface ships [J]. *Journal of Marine Science and Application*, 2011, 3(10): 325 – 332.
- [8] KIM M H, INMAN D J. Development of a robust nonlinear observer for dynamic positioning of ships [J]. *Journal of Systems and Control Engineering*, 2004, 218(1): 1 – 12.
- [9] KIM M H. *Nonlinear control and robust observer design for marine vehicles* [D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2000.
- [10] KIM M H, INMAN D J. Application of a sliding mode observer for dynamic positioning of ships [C] // *The 18th Biennial Conference on Mechanical Vibration and Noise: ASME Design Engineering Technical Conference*. Pittsburgh: ASME, 2011, 6: 2573 – 2582.
- [11] VALENZUELA J M, ZUPPA L A. Dynamic positioning control of ships via relay observer design [J]. *Asian Journal of Control*, 2004, 6(3): 398 – 406.
- [12] DUKAN F, LUDVIGSEN M, SORENSEN A J. Dynamic positioning system for a small size ROV with experimental results [C] // *Oceans 2011 MTS/IEEE*. Santander: IEEE Computer Society, 2011: 114 – 119.
- [13] THOR I F. *Marine Control Systems* [M]. Trondheim: Tapir Trtkkeri, 2002: 49 – 115.
- [14] 宋立忠, 鄢圣茂, 杨立秋. 不确定系统鲁棒自适应离散变结构控制 [J]. 自动化学报, 2011, 37(8): 1024 – 1028.  
(SONG Lizhong, YAN Shengmao, YANG Liqiu. Robust adaptive discrete-time variable structure control of uncertain systems [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2011, 37(8): 1024 – 1028.)
- [15] KHALIL H. *Nonlinear Systems* [M]. 3rd Edition. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2002: 111 – 181.
- [16] 李鹏, 郑志强. 非线性积分滑模控制方法 [J]. 控制理论与应用, 2011, 28(3): 421 – 426.  
(LI Peng, ZHENG Zhiqiang. Sliding mode control approach with nonlinear integrator [J]. *Control Theory & Applications*, 2011, 28(3): 421 – 426.)

## 作者简介:

谢文博 (1985–), 男, 博士研究生, 目前研究方向为船舶运动控制, E-mail: danielhrbeu@163.com;

付明玉 (1964–), 女, 博士生导师, 目前研究方向为船舶运动控制, E-mail: fumingyu@hrbeu.edu.cn;

施小成 (1957–), 男, 博士生导师, 目前研究方向为船舶运动控制, E-mail: shixiaocheng@hrbeu.edu.cn.