

基于高增益观测器的船舶动力定位系统的输出反馈控制

杜佳璐[†], 杨 杨, 郭 晨, 李广强

(大连海事大学 信息科学技术学院, 辽宁 大连 116026)

摘要: 针对动力定位船舶的速度向量不可测的问题, 考虑外部环境扰动, 将高增益观测器、动态面控制技术和矢量backstepping方法相结合, 设计仅依赖于船舶位置和艏摇角测量值的船舶动力定位系统输出反馈控制律. 动态面控制技术的引入, 使控制律结构简单, 易于工程实现. 应用Lyapunov函数证明了所设计的控制律能迫使船舶的位置和艏摇角收敛于期望值, 并保证船舶动力定位输出反馈闭环系统所有信号均一致最终有界. 基于一艘供给船的仿真研究验证了所设计的基于高增益观测器的船舶动力定位输出反馈控制律的有效性.

关键词: 动力定位; 高增益观测器; backstepping; 动态面控制; 输出反馈

中图分类号: U661.33; TP271+.62 文献标识码: A

Output feedback control for dynamic positioning system of a ship based on a high gain observer

DU Jia-lu[†], YANG Yang, GUO Chen, LI Guang-qiang

(School of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian Liaoning 116026, China)

Abstract: Because the velocity vector of the ship is not available, we propose output feedback control for dynamic positioning system of a ship with external disturbances by integrating the high gain observer, the dynamic surface control technique and the vectorial backstepping design. The proposed control scheme only relies on measurements of the ship position and heading. Because of the introduction of the dynamic surface control, the designed control law is simpler and more easily to be implemented in engineering practice. It is proved by means of Lyapunov function that the proposed control law can force the position and heading of the ship to approach the desired values while guaranteeing the uniform ultimate boundedness for all signals of the closed-loop dynamic positioning system. The simulation results on a supply ship are presented to demonstrate the effectiveness of the proposed strategy.

Key words: dynamic positioning; high gain observer; backstepping; dynamic surface control; output feedback

1 引言(Introduction)

船舶动力定位技术, 是指船舶利用自身的推进装置抵御风、浪、流扰动的影响, 以一定的姿态保持在海面的某位置或使船舶精确地跟踪某一给定轨迹. 已被广泛应用于打捞救助、海底管道铺设、钻探等领域^[1].

上世纪60年代, 船舶动力定位系统采用PID控制器级联低通和/或陷波滤波器抵御海浪的影响^[2]; 到了70年代, Kalman滤波器为动力定位系统的海浪滤波和状态估计提供了解决方案^[3-4], 但要求将船舶运动数学模型在多个预先设定的工作点处线性化. 另一方面, 船舶的速度往往不可直接测量, 设计带状态观测器的输出反馈控制对于船舶动力定位控制系统更具实际意义. 文献[5]使用backstepping工具设计非线性观测器, 实现了船舶动力定位系统的非线性输出反馈控制,

但设计过程没有考虑外界环境干扰; 文献[6]考虑了有界的环境扰动, 应用串级理论提出一种非线性观测器-控制器设计方案, 实现船舶动力定位输出反馈控制; 文献[7]提出了一个带有偏的状态估计和海浪滤波的无源非线性观测器; 文献[8]在文献[7]的基础上设计了仅用船舶的位置测量信息的PD型输出反馈控制器^[8], 并对模型船进行实验研究, 验证了控制策略的有效性; 文献[9]扩展了文献[7]的结果, 设计滑模观测器, 并进一步设计了船舶动力定位系统鲁棒输出反馈控制器; 文献[10]改善了文献[7]中的海浪扰动模型, 基于多模型自适应估计理论提出新的自适应海浪滤波器, 可适应海况的变化. 文献[11]在船舶参数及环境扰动未知的假设下, 设计了船舶动力定位鲁棒自适应输出反馈控制器, 可使船舶位置和艏摇角全局收敛

收稿日期: 2012-11-07; 收修改稿日期: 2013-05-10.

[†]通信作者. E-mail: dujl66@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51079013, 61074053); 辽宁省教育厅高等学校科研资助项目(LT2010013); 交通运输部交通应用基础研究资助项目(2012-329-225-070, 2011-329-225-390); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2012TD031).

于期望值。

另一方面, 高增益观测器^[12]能够根据系统的输出估计系统输出的导数项, 且不依赖于系统的数学模型, 在非线性输出反馈控制中得到广泛应用^[13-14]。此外, 文献[15]提出了一种动态面控制方法, 解决了传统的backstepping方法固有的计算复杂性问题。受上述文献启发, 本文考虑船舶所遭受的外部环境扰动, 将高增益观测器、动态面控制技术与矢量backstepping方法相结合, 设计船舶动力定位系统非线性输出反馈控制律。利用高增益观测器, 依船舶的位置测量信息估计不可测的速度向量, 解决船舶速度向量不能直接测量的问题; 采用动态面控制技术简化控制律, 使其更易于工程实现。

为叙述方便, 本文对文中所使用符号做如下说明: $\lambda_{\min}(\cdot)$, $\lambda_{\max}(\cdot)$ 分别表示矩阵的最小特征值和最大特征值; $|\cdot|$ 记为标量的绝对值; $\|\cdot\|$ 记为矩阵或向量的2-范数。

2 问题的描述及预备知识(Problem formulation and preliminaries)

建立图1所示的船舶水面运动坐标系。图中, OX_oY_o 为大地坐标系, OX_o 轴指向正北, OY_o 轴指向正东, AXY 为原点在船舶重心处的随船坐标系, AX 轴指向船首, AY 轴指向右舷; 两个坐标系的 Z 轴均向下, XY 平面与静水面重合。假设船舶关于 XZ 平面对称, 动力定位船舶的非线性数学模型通常描述为^[2]

$$\dot{\eta} = J(\psi)\nu, \tag{1a}$$

$$M\dot{\nu} + D\nu = \tau + d(t), \tag{1b}$$

式中: $\eta = (x, y, \psi)^T$ 定义大地坐标系下的船舶位置 (x, y) 和艏摇角 ψ , 速度向量 $\nu = (u, v, r)^T$ 定义随船坐标系 AXY 下的船速, 旋转矩阵 J 定义为

$$J(\psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \tag{2}$$

且具有特性 $J^{-1}(\psi) = J^T(\psi)$ 和 $\|J(\psi)\| = 1$, M 为包含附加质量的惯性矩阵, 为可逆的对称正定阵; D 为阻尼阵; $\tau = (\tau_1, \tau_2, \tau_3)^T$ 为船舶推进器提供的控制力和力矩; $d(t) = (d_1(t), d_2(t), d_3(t))^T$ 代表风、浪、流等环境因素对船舶综合作用的等效外界干扰力和力矩。

假设 1 考虑到海况时常发生变化, 但其能量是有限的, 故假设干扰 $d(t)$ 为时变未知的, 且满足下式:

$$\|d(t)\| \leq \kappa, \tag{3}$$

式中 κ 为正常数。

引理 1^[13] 假设系统输出 $g(t)$ 及其前 n 阶导数都是有界的, 存在正的常数 F_k , 使得 $|g^{(k)}| < F_k (k = 1, 2, \dots, n)$ 成立。考虑如下线性系统:

$$\begin{cases} \varepsilon \dot{\pi}_i = \pi_{i+1}, i = 1, \dots, n-1, \\ \varepsilon \dot{\pi}_n = -\bar{\gamma}_1 \pi_n - \dots - \bar{\gamma}_{n-1} \pi_2 - \pi_1 + g(t), \end{cases} \tag{4}$$

式中 ε 是任意小的正常数, 选择参数 $\bar{\gamma}_1, \bar{\gamma}_2, \dots, \bar{\gamma}_{n-1}$, 使多项式 $s^n + \bar{\gamma}_1 s^{n-1} + \dots + \bar{\gamma}_{n-1} s + 1$ 是Hurwitz的。则有如下结论:

1) $\frac{\pi_k}{\varepsilon^{k-1}} - g^{(k-1)} = -\varepsilon \zeta^{(k)}, k = 1, 2, \dots, n$, 其中: $\zeta = \pi_n + \bar{\gamma}_1 \pi_{n-1} + \dots + \bar{\gamma}_{n-1} \pi_1$, $\zeta^{(k)}$ 表示 ζ 的 k 阶导数;

2) 存在仅依赖于 F_k, ε 和 $\bar{\gamma}_i (i = 1, 2, \dots, n-1)$ 的正常数 t^* 和 h_k , 使得对于 $\forall t > t^*$, 有 $|\zeta^{(k)}| \leq h_k (k = 1, 2, \dots, n)$ 。

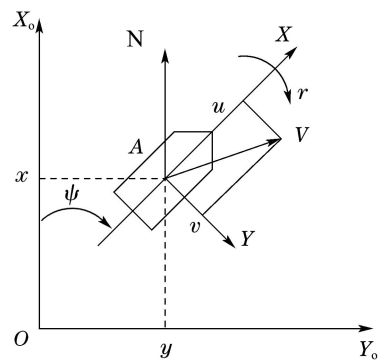


图 1 船舶水面运动大地与随船坐标系
Fig. 1 Earth-fixed OX_oY_o and body-fixed AXY coordinate frame of vessel surface motion

本文的控制目标是针对船舶动力定位系统(1), 在仅有船舶位置 (x, y) 和艏摇角 ψ 可测情况下, 考虑船舶所遭受的界已知的未知环境扰动, 设计基于高增益状态观测器的输出反馈控制律 τ , 使船舶的实际位置 (x, y) 和艏摇角 ψ 达到并保持期望的目标位置 $\eta_d = (x_d, y_d, \psi_d)^T$ 。

3 船舶动力定位系统输出反馈控制设计 (Output feedback control design for dynamic positioning system of a ship)

在这一部分, 考虑外部环境扰动, 采用高增益观测器, 结合矢量backstepping和动态面控制方法来设计船舶动力定位输出反馈控制律, 并给出闭环控制系统的稳定性分析。设期望的船舶位置和艏摇角为 $\eta_d = (x_d, y_d, \psi_d)^T$, 整个设计过程由两步组成。

步骤 1 定义动力定位船舶的位置误差向量 $S_1 \in \mathbb{R}^3$ 为

$$S_1 = \eta - \eta_d, \tag{5}$$

则依式(1a), 有

$$\dot{S}_1 = J\nu. \tag{6}$$

这里, 视 ν 为虚拟控制向量, 选择其虚拟镇定函数向量 $\phi_1 \in \mathbb{R}^3$ 为

$$\phi_1 = -J^{-1}K_1S_1, \quad (7)$$

式中 $K_1 \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 为正定对称的设计参数矩阵. 为了避免传统的backstepping方法固有的项数爆炸问题, 依据动态面控制的思想, 定义新的状态向量 $X_d \in \mathbb{R}^3$, 对虚拟镇定函数向量 ϕ_1 引进如下—阶低通滤波器:

$$T\dot{X}_d + X_d = \phi_1, \quad X_d(0) = \phi_1(0), \quad (8)$$

式中 $T > 0$ 为滤波器时间常数. 滤波器的状态微分项 \dot{X}_d 可用来代替 ϕ_1 的一阶导数项, 避免逆推法中对虚拟镇定函数向量直接求导, 简化了控制律, 使其更易于工程实现.

步骤 2 定义动力定位船舶的速度误差面向量 $S_2 \in \mathbb{R}^3$:

$$S_2 = \nu - X_d. \quad (9)$$

为解决实际工程中船舶的速度向量 $\nu = (u, v, r)^T$ 通常不易测量的问题, 本文采用高增益观测器估计船舶速度向量. 考虑到船舶动力定位系统的输出 $\eta(t)$ 及其一、二阶导数 $\dot{\eta}(t), \ddot{\eta}(t)$ 的有界性, 依引理1, 利用高增益观测器来估计船舶动力定位系统输出 $\eta(t)$ 的一阶导数向量如下:

$$\hat{\eta} = \frac{\chi_2}{\varepsilon}. \quad (10)$$

进而可得动力定位船舶速度向量的估值

$$\hat{\nu} = J^{-1}(\psi) \frac{\chi_2}{\varepsilon}, \quad (11)$$

其中状态向量 $\chi_2 \in \mathbb{R}^3$ 来自于如下线性动态系统:

$$\begin{cases} \varepsilon\dot{\chi}_1 = \chi_2, \\ \varepsilon\dot{\chi}_2 = -\bar{\gamma}_1\chi_2 - \chi_1 + \eta(t), \end{cases} \quad (12)$$

式中 $\chi_1 \in \mathbb{R}^3$. 则由引理1可知, $\frac{\chi_k}{\varepsilon^{k-1}} (k = 1, 2)$ 将渐近收敛于 $\eta^{k-1} (k = 1, 2)$. 定义船舶动力定位系统输出的一阶导数 $\dot{\eta}$ 的估计偏差向量为

$$\tilde{\xi}_2 = \hat{\eta} - \dot{\eta}, \quad (13)$$

则依据引理1, 可得

$$\tilde{\xi}_2^T \tilde{\xi}_2 \leq \varepsilon^2 \delta_2^2, \quad (14)$$

其中 δ_2 为正常数. 可见, $\tilde{\xi}_2$ 是有界的, 因此, 动力定位船舶速度向量的估计误差 $\hat{\nu} - \nu$ 是有界的.

定义动力定位船舶的速度估计误差面向量 $\hat{S}_2 \in \mathbb{R}^3$:

$$\hat{S}_2 = \hat{\nu} - X_d. \quad (15)$$

定义系统的边界层误差向量

$$Y_2 = X_d - \phi_1 = X_d + J^{-1}K_1S_1. \quad (16)$$

考虑到式(8), Y_2 关于时间的导数为

$$\begin{aligned} \dot{Y}_2 &= \dot{X}_d + J^{-1}K_1S_1 + J^{-1}K_1\dot{S}_1 = \\ &= -\frac{Y_2}{T} + J^{-1}K_1S_1 + J^{-1}K_1\dot{S}_1. \end{aligned} \quad (17)$$

可见

$$\|\dot{Y}_2 + \frac{Y_2}{T}\| \leq \beta(S_1, S_2, \eta_d), \quad (18)$$

式中 $\beta(S_1, S_2, \eta_d)$ 是某一连续函数. 其在有界区间的上确界记为 $N = \sup\{\beta\}$.

设计船舶动力定位控制律

$$\tau = M\dot{X}_d - K_2\hat{S}_2 + D\hat{\nu} - \frac{\kappa^2\hat{S}_2}{2\gamma}, \quad (19)$$

其中: $K_2 \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 为正定对称的设计参数矩阵, $\gamma > 0$ 为正的常数.

选择Lyapunov函数

$$V = \frac{1}{2}S_1^T S_1 + \frac{1}{2}S_2^T M S_2 + \frac{1}{2}Y_2^T Y_2, \quad (20)$$

上式两边对时间求导, 得到

$$\dot{V} = S_1^T \dot{S}_1 + S_2^T M \dot{S}_2 + Y_2^T \dot{Y}_2. \quad (21)$$

根据式(6)(9)和式(15)–(16), 考虑到特性 $\|J\| = 1$, 可得

$$\begin{aligned} S_1^T \dot{S}_1 &= S_1^T J(S_2 + X_d) = \\ &= -S_1^T K_1 S_1 + S_1^T (J S_2 + J Y_2) \leq \\ &= -S_1^T K_1 S_1 + \|S_1\| \cdot \|S_2\| + \|S_1\| \cdot \|Y_2\| \leq \\ &= -S_1^T K_1 S_1 + \frac{\|S_1\|^2 + \|S_2\|^2}{2} + \frac{\|S_1\|^2 + \|Y_2\|^2}{2}. \end{aligned} \quad (22)$$

考虑到式(1b)(9)(15)和式(19), 则有

$$\begin{aligned} S_2^T M \dot{S}_2 &= \\ S_2^T (-D\nu + D\hat{\nu} + M\dot{X}_d - K_2\hat{S}_2 - \\ &= \frac{\kappa^2\hat{S}_2}{2\gamma} + d - M\dot{X}_d) = \\ &= -S_2^T K_2 S_2 - \frac{\kappa^2 S_2^T S_2}{2\gamma} + S_2^T d + S_2^T [D(\hat{\nu} - \nu) - \\ &= K_2(\hat{\nu} - \nu) - \frac{\kappa^2(\hat{\nu} - \nu)}{2\gamma}] = \\ &= -S_2^T K_2 S_2 - \frac{\kappa^2 S_2^T S_2}{2\gamma} + S_2^T d + S_2^T (D - \\ &= K_2 - \frac{\kappa^2}{2\gamma} I_{3 \times 3}) J^{-1} \tilde{\xi}_2. \end{aligned} \quad (23)$$

令

$$\Xi = (D - K_2 - \frac{\kappa^2}{2\gamma} I_{3 \times 3}) J^{-1}. \quad (24)$$

记

$$\varsigma = \sqrt{\lambda_{\max}(\Xi^T \Xi)}. \quad (25)$$

考虑假设1、式(14)和式(25), 则式(23)可简化为

$$\begin{aligned} S_2^T M \dot{S}_2 &\leq -S_2^T K_2 S_2 - \frac{\kappa^2 S_2^T S_2}{2\gamma} + \|S_2\| \kappa + \\ &\leq \varsigma \|S_2\| \|\tilde{\xi}_2\| \leq \end{aligned}$$

$$-S_2^T K_2 S_2 + \frac{\gamma}{2} + \frac{\|S_2\|^2 + (\varsigma \varepsilon \delta_2)^2}{2}. \quad (26)$$

根据式(17)–(18), 可得

$$\begin{aligned} Y_2^T \dot{Y}_2 &= Y_2^T \left(-\frac{Y_2}{T} + J^{-1} K_1 S_1 + J^{-1} K_1 \dot{S}_1 \right) \leq \\ &-\frac{Y_2^T Y_2}{T} + \beta \|Y_2\| \leq \\ &-\frac{Y_2^T Y_2}{T} + \frac{\|Y_2\|^2 + N^2}{2}. \end{aligned} \quad (27)$$

综合式(22)和式(26)–(27), 式(21)为

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq \\ &-(\lambda_{\min}(K_1) - 1) S_1^T S_1 - \frac{\lambda_{\min}(K_2) - 1}{\lambda_{\max}(M)} S_2^T M S_2 - \\ &\left(\frac{1}{T} - 1 \right) Y_2^T Y_2 + \frac{\gamma}{2} + \frac{(\varsigma \varepsilon \delta_2)^2}{2} + \frac{N^2}{2} \leq \\ &-\sigma V(t) + C, \end{aligned} \quad (28)$$

式中:

$$\sigma = \min \left\{ 2[\lambda_{\min}(K_1) - 1], \frac{2[\lambda_{\min}(K_2) - 1]}{\lambda_{\max}(M)}, \frac{2}{T} - 2 \right\}, \quad (29)$$

$$0 < T < 1, \quad (30)$$

$$\lambda_{\min}(K_1) > 1, \lambda_{\min}(K_2) > 1, \quad (31)$$

$$C = \frac{\gamma}{2} + \frac{(\varsigma \varepsilon \delta_2)^2}{2} + \frac{N^2}{2}. \quad (32)$$

根据上面的分析, 给出如下的定理.

定理 1 针对船舶动力定位系统数学模型(1), 考虑船舶速度不可测问题, 设计高增益观测器(11)–(12)和输出反馈控制律(19), 使船舶的位置 (x, y) 及艏摇角 ψ 收敛于并保持在期望值 $\eta_d = (x_d, y_d, \psi_d)^T$ 上, 且保证动力定位系统中的所有信号一致最终有界, 通过适当地选择观测器参数 $\bar{\gamma}_1, \varepsilon$, 控制律设计参数矩阵 K_1, K_2 和设计参数 γ 以及滤波器的时间常数 T , 满足式(30)–(31), 可使船舶定位误差达到期望的精度.

由式(28)可得

$$0 \leq V(t) \leq \frac{C}{\sigma} + \left[V(0) - \frac{C}{\sigma} \right] e^{-\sigma t}. \quad (33)$$

可见, $V(t)$ 是一致最终有界的, 再根据式(20)可知系统中的信号 S_1, S_2 和 Y_2 一致最终有界, 则 ϕ_1, X_d 和 η 是一致最终有界的, 从而 ν 是一致最终有界的. 进一步, 由于动力定位船舶速度向量估计误差是有界的, $\hat{\nu}$ 是一致最终有界的, 从而由式(17)可知 \hat{S}_2 是一致最终有界的. 因此, 动力定位闭环控制系统中的所有信号是一致最终有界的.

由式(20)和式(33)可得

$$\|S_1\| \leq \sqrt{\frac{2C}{\sigma} + 2 \left[V(0) - \frac{C}{\sigma} \right] e^{-\sigma t}}, \quad (34)$$

因此, 对任意的 $\mu_{S_1} > \sqrt{2C/\sigma}$, 存在常数 $T_{S_1} > 0$, 使得对于所有的 $t > T_{S_1}$, 有 $\|S_1\| \leq \mu_{S_1}$, 即船舶定位误差 S_1 收敛于紧集 $\Omega_{S_1} = \{S_1 \in \mathbb{R}^3 \mid \|S_1\| \leq \mu_{S_1}\}$. 可见, 通过恰当地选取设计参数矩阵 K_1, K_2 和设计参数 $\bar{\gamma}_1, \varepsilon, \gamma$ 以及滤波器的时间常数 T , 可以使紧集 Ω_{S_1} 任意小, 即船舶定位误差任意的小. 因此, 船舶的位置 (x, y) 和艏摇角 ψ 将以任意期望的精度收敛并保持在期望值 $\eta_d = (x_d, y_d, \psi_d)^T$ 上, 定理1得证. 证毕.

4 仿真研究(Simulation)

为验证所设计的船舶动力定位输出反馈控制律的性能, 以一艘供给船为例进行仿真研究. 该船长度为76.2 m, 质量为 4.591×10^6 kg, 动力定位船舶数学模型(1)中的动态参数为^[2]

$$M = \begin{bmatrix} 5.3122 \times 10^6 & 0 & 0 \\ 0 & 8.2831 \times 10^6 & 0 \\ 0 & 0 & 3.7454 \times 10^9 \end{bmatrix},$$

$$D = \begin{bmatrix} 5.0242 \times 10^4 & 0 & 0 \\ 0 & 2.7229 \times 10^5 & -4.3933 \times 10^6 \\ 0 & -4.3933 \times 10^6 & 4.1894 \times 10^8 \end{bmatrix}.$$

仿真中, 干扰信号为

$$\begin{aligned} d &= (2(1.1 + 1.2 \sin(0.02t)) + 1.5 \sin(0.1t)) \text{ kN}, \\ &13(-1.1 + 2.0 \sin(0.02t - \pi/6) + \\ &1.5 \sin(0.3t)) \text{ kN}, 200(\sin(0.09t + \pi/3) + \\ &3 \sin(0.01t)) \text{ kN} \cdot \text{m}^T, \end{aligned}$$

相当于4级海况, 相应地选取干扰的界 $\kappa = 8 \times 10^5$. 设船舶的期望位置为 $\eta_d = (0 \text{ m}, 0 \text{ m}, 0^\circ)^T$. 初始位置为 $\eta(0) = (20 \text{ m}, 20 \text{ m}, 20^\circ)^T$, 表明船舶在水平面上的初始位置偏差为(20 m, 20 m), 艏摇角的初始偏差为 20° ; 设船舶初始速度为 $\nu(0) = (0 \text{ m/s}, 0 \text{ m/s}, 0^\circ/\text{s})^T$; 选取高增益观测器的初始状态 $\chi_1(0) = (20, 20, 20)^T$, $\chi_2(0) = (0, 0, 0)^T$, 高增益观测器参数 $\bar{\gamma}_1 = 2, \varepsilon = 0.3$; 控制律的设计参数选取为: $K_1 = \text{diag}\{1.5, 1.5, 1.5\}$, $K_2 = \text{diag}\{1 \times 10^6, 1 \times 10^6, 1 \times 10^9\}$, $\gamma = 1 \times 10^5, T = 0.6$. 仿真结果如图2–5所示. 图2为船舶在水平面的位置变化曲线, 表明所设计的控制律能够使船舶克服环境扰动, 趋向并保持在期望的目标位置 $\eta_d = (0 \text{ m}, 0 \text{ m}, 0^\circ)^T$. 图3为船舶实际位置 (x, y) 和艏摇角 ψ 的曲线, 表明50 s后船舶就达到了期望值. 图4为所设计的船舶动力定位系统控制力和力矩曲线, 光滑合理. 图5是船舶速度及其高增益观测器估计值. 由图5可见, 所设计的观测器经过约10 s过渡过程后能估计出系统的速度. 而文献[6]中, 船舶初始位置在横、纵方向偏离期望值均为5 m, 艏摇角的初始偏差为 2° , 小于本文的情况, 船舶动力定位调节时间100 s. 可见, 本文控制方法的仿真结果与文献[6]相比, 船舶动力定

位控制的瞬态过程时间较短, 船舶速度估计值收敛较快.

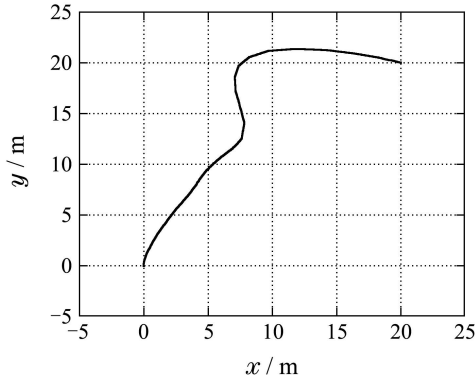


图2 船舶在 xy 平面位置变化曲线
Fig. 2 Trajectory of the ship in xy -plane

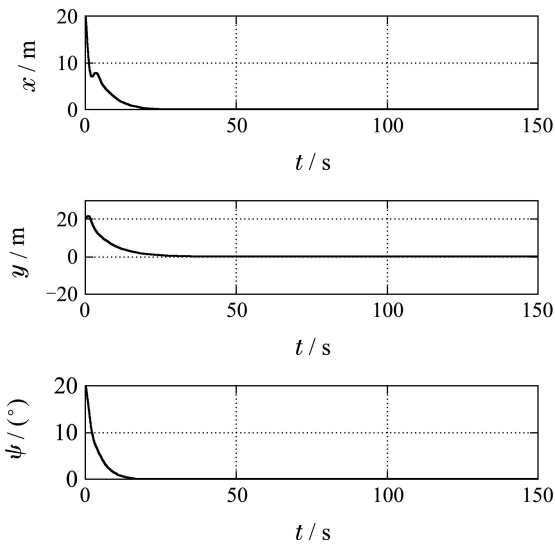


图3 船舶实际位置 (x, y) 和艏摇角 ψ
Fig. 3 Actual ship position (x, y) and heading ψ

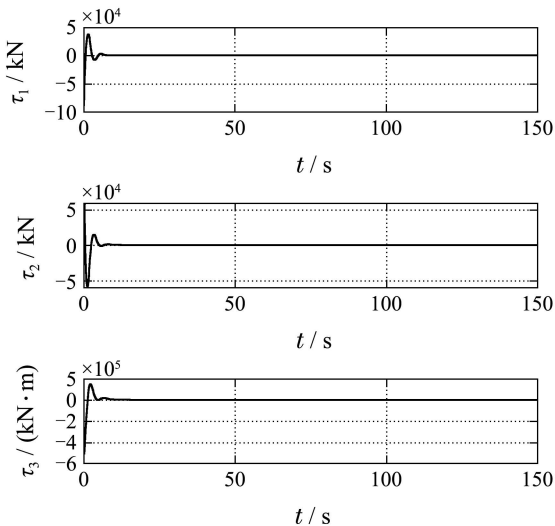


图4 控制力和控制力矩
Fig. 4 Control forces and torque

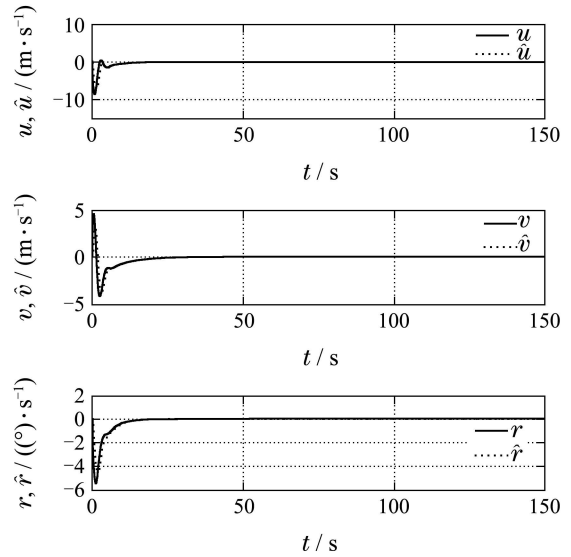


图5 船舶速度 $\nu = (u, v, r)^T$ 及其估计值 $\hat{\nu} = (\hat{u}, \hat{v}, \hat{r})^T$
Fig. 5 Velocities $\nu = (u, v, r)^T$ and their estimations
 $\hat{\nu} = (\hat{u}, \hat{v}, \hat{r})^T$

5 结论(Conclusions)

本文针对考虑界已知的未知扰动的船舶动力定位控制问题, 在只有船舶位置和艏摇角可测的情况下, 设计了含有高增益观测器的船舶动力定位系统非线性输出反馈控制律. 应用Lyapunov稳定性理论, 证明了所设计的输出反馈动力定位控制律能使船舶的实际位置 (x, y) 和艏摇角 ψ 趋向于并保持在期望值 η_d 上, 同时保证船舶动力定位闭环系统中的所有信号一致最终有界. 由于将高增益观测器、动态面控制技术与矢量backstepping设计工具相结合, 使得所设计控制律具有不要求提供船舶速度的测量值, 且控制律简单, 易于工程实现等优越性. 进一步, 对一艘供给船的仿真实验研究验证了所提出控制方案的有效性.

参考文献(References):

- [1] SØRENSEN A J. A survey of dynamic positioning control systems [J]. *Annual Reviews in Control*, 2011, 35(1): 123 – 136.
- [2] FOSSEN T I. *Marine Control Systems: Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles* [M]. Throdheim, Norway: Marine Cybernetics AS, 2002.
- [3] BALCHEN J G, JENSSEN N A, SALID S. Dynamic positioning using Kalman filtering and optimal control theory [C] // *Proceedings of in the IFAC/IFIP Symposium on Automation in Offshore Oil Field Operation*. Bergen, Norway: IEEE, 1976, 6: 183 – 186.
- [4] FUNG P T, GRIMBLE M J. Dynamic ship positioning using a self-tuning Kalman filter [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1983, 28(3): 339 – 350.
- [5] FOSSEN T I, GRØVLEN 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.
- [6] 杜佳璐, 李文华, 郑凯, 等. 船舶动力定位系统的非线性输出反馈控制 [J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(2): 70 – 75.

- (DU Jialu, LI Wenhua, ZHENG Kai, et al. Nonlinear output feedback control of dynamic positioning system of ships [J]. *Journal of South China university of Technology (Natural Science Edition)*, 2012, 40(2): 70 – 75.)
- [7] 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.
- [8] LORIA A, FOSSEN T I. A separation principle for dynamic positioning of ships: theoretical and experimental results [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2000, 8(2): 332 – 343.
- [9] KIM M H, INMAN D J. Development of a robust non-linear observer for dynamic positioning of ships [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 2004, 218(1): 1 – 11.
- [10] HASSANI V, SØRENSEN A J, PASCOAL A M, et al. Multiple model adaptive wave filtering for dynamic positioning of marine vessels [C] // *Proceedings of 2012 American Control Conference*. Montréal, Canada: IEEE, 2012, 6: 6222 – 6228.
- [11] 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.
- [12] ESFANDIARI F, KHALIL H K. Observer-based design of uncertain systems: recovering state feedback robustness under matching conditions [C] // *Proceedings of Allerton Annual Conference on Communication, Control and Computing*. Urbana-Champaign, IL: University of Illinois, 1987: 97 – 106.
- [13] GE S S, ZHANG J. Neural-network control of nonaffine nonlinear system with zero dynamics by state and output feedback [J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2003, 14(4): 900 – 918.
- [14] KHALIL H K. High-gain observers in nonlinear feedback control [C] // *International Workshop on New Directions in Nonlinear Observer Design*. London: Springer-Verlag, 1999: 249 – 268.
- [15] SWAROOP D, HEDRICK J K, YIP P P, et al. Dynamic surface control for a class of nonlinear systems [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2000, 45(10): 1893 – 1899.

作者简介:

杜佳璐 (1966–), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事非线性控制理论、智能控制、船舶运动控制的研究, E-mail: dujl66@163.com;

杨 杨 (1986–), 男, 博士生, 主要从事船舶运动非线性控制的研究, E-mail: yangyangmxl@126.com;

郭 晨 (1956–), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事智能控制理论与应用、船舶系统仿真、虚拟现实技术等的研究, E-mail: guoc@dlmu.edu.cn;

李广强 (1973–), 男, 副教授, 主要从事智能系统与优化、复杂布局、船舶运动控制的研究, E-mail: gqllimail@163.com.