

基于有限时间超螺旋滑模控制的 船舶动力定位控制律设计

贺广健, 刘海波, 宫勋, 彭程, 曹策

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘要:针对海上作业动力定位船舶未知环境干扰补偿控制问题,将有限时间控制技术、扩张状态观测器与超螺旋滑模控制相融合,提出一种基于有限时间超螺旋滑模的新颖船舶动力定位控制策略。应用李雅普诺夫稳定性理论证明了所设计的控制律能迫使船舶实际位置和艏摇角以有限时间的方式定位到期望值上,并保证该闭环系统的所有信号全局一致最终有界。所提出的控制策略具有收敛速度快与抗干扰能力强的优点。最后基于Marine Systems Simulator的仿真研究验证了所提控制策略的有效性。

关键词:动力定位;有限时间控制技术;扩张状态观测器;超螺旋滑模控制

中图分类号: U661.33

文献标志码: A

文章编号: 1672-9870(2022)06-0001-09

Control Law Design of Dynamic Positioning for Ship Based on Finite-time Super Twisting Sliding Mode Control

HE Guangjian, LIU Haiibo, GONG Xun, PENG Cheng, CAO Ce

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033)

Abstract: Aiming at the problem of compensation and control of unknown environmental disturbances for dynamic positioning ships, a finite-time super twisting sliding mode for ship dynamic positioning control is proposed by combining finite-time control technology, extended state observer and super twisting sliding mode control method. By using the Lyapunov function, it was proved that the proposed control law could force the ship's position and heading in finite time to converge and keep at the desired target values and guarantee the uniformly ultimate boundedness of all signals in the closed-loop system. The proposed control strategy has the advantages of fast convergence and strong anti-interference ability. Finally, the simulation results based on Marine Systems Simulator verify the effectiveness of the proposed control strategy.

Key words: dynamic positioning; finite-time control technology; extended state observer; super twisting sliding mode control

随着人类对海洋资源的不断开发以及船舶自动化技术的日渐成熟,船舶动力定位技术已经被广泛地运用在海洋作业中。船舶动力定位技术迫使船舶依靠自身的动力推进系统,来抵御风浪流等海洋环境所造成的扰动,使得船舶在

海面某一固定位置或者沿着目标轨迹以一定的姿态保持航行^[1-3]。动力定位技术具有不受水深限制、定位精度高与操控性强等优点,已在救助打捞船、科考船以及海洋钻井平台等领域广泛应用,是开发利用海洋工作中不可或缺的技术^[4]。

收稿日期: 2022-05-11

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(20200201294JC)

作者简介: 贺广健(1993-),男,硕士,助理研究员, E-mail: 1401474257@qq.com

通讯作者: 刘海波(1981-),男,硕士,副研究员, E-mail: 1064826070@qq.com

船舶动力定位技术最开始采用经典的PID控制,利用低通滤波器处理高频信号,作为第一代动力定位系统取得了阶段性的成果,但存在滤波技术引起的相位滞后以及定位精度低等缺点^[5]。进入20世纪70年代,采用将干扰分为高频与低频的线性二次型高斯控制,利用卡尔曼滤波技术处理高频信号,可以解决低通滤波器引起的相位滞后,被称为第二代动力定位系统,由于线性二次型高斯控制基于线性模型,但船舶动力定位模型是非线性的并且准确度不高,因此定位精度一般^[6]。随着控制理论的发展,文献[7]采用自适应PID控制器,利用李雅普诺夫稳定性理论证明了船舶动力定位系统一致全局稳定,并通过仿真验证控制器的有效性。文献[8]利用了非线性模型预测控制技术,实现了船舶动力定位控制器的设计,通过仿真验证其有效性。文献[9]采用将动态面技术与矢量逆推方法相结合设计船舶动力定位控制器,控制船舶的动力定位。文献[10]基于滑膜控制算法,直接对控制输入进行设计,提出一种二阶滑膜控制算法,通过仿真验证控制器的有效性。这些方法在动力定位控制中取得了一定的成效,但在工程实践中风浪流等海洋环境对于船舶动力定位影响巨大,因此需要对风浪流等海洋环境扰动进行处理才能够获得较好的控制效果。

在20世纪90年代,韩京清^[11]提出基于扩张状态观测器(Extended State Observe,简称ESO)的控制策略。ESO的基本思想是将被控系统的内部不确定项与外部干扰视为总扰动,通过设计一个理想的观测器对被控系统的总扰动进行观测,获得总扰动的估计值,在控制通道中设计前馈补偿器将可估计总扰动给予精确抵消,从而实现抗扰动的目的^[12]。韩京清提出的ESO是非线性结构的,早期对于ESO的研究主要针对其理论证明^[13-14]。文献[15]首次提出线性自抗扰控制,将韩京清提出的非线性结构线性化,并引入带宽思想,使得越来越多的学者关注ESO。文献[16]利用线性状态观测器估计总扰动,将线性

自抗扰控制器应用于伺服控制系统,仿真实验证明相对于PID具有更好的鲁棒性。近年来,随着现代控制理论的进一步发展,有限时间控制获得越来越多的学者关注,文献[17]与文献[18]表明与非有限时间控制器相比,有限时间控制系统具有更好的抗干扰性与鲁棒性。船舶动力定位系统所受环境干扰较大,因此研究船舶动力定位有限时间控制具有重要的意义。

受上述文献启发,通过融合有限时间控制技术、扩张状态观测器与超螺旋滑模控制方法,本文提出一种基于有限时间超螺旋滑模的船舶动力定位控制策略。将船舶的未建模动态和未知时变扰动视为总扰动,并构造有限时间超螺旋扩张状态观测器实时估计总扰动。进而利用超螺旋滑模方法设计船舶动力定位超螺旋滑模控制律,取得了有限时间的船舶动力定位控制性能,同时设计保证船舶动力定位闭环控制系统的所有信号一致最终有界。应用Marine Systems Simulator工具箱进行仿真试验,结果表明所提出的控制方案的实用性。

为了便于船舶动力定位控制律设计,给出如下符号定义:

$$\begin{cases} \text{Sign}^{\lambda}(\chi) = \left[|\chi_1|^{\lambda} \text{sign}(\chi_1), \dots, |\chi_n|^{\lambda} \text{sign}(\chi_n) \right]^T \\ \text{Sign}(\chi) = \left[\text{sign}(\chi_1), \dots, \text{sign}(\chi_n) \right]^T \end{cases}$$

式中, $\chi = [\chi_1, \dots, \chi_n]^T$, $\chi_i \in \mathbb{R}$, ($i = 1, \dots, n$), $\lambda \in (0, 1)$, $\text{sign}(\cdot)$ 表示符号函数。

1 问题描述及先验知识

船舶动力定位系统仅考虑纵摇、横摇和艏摇3个自由度的水平面运动,因此船舶动力定位数学模型如下^[19]:

$$\dot{\eta} = J(\psi)v \quad (1)$$

$$M\dot{v} = -Dv + \tau + d \quad (2)$$

式中, $\eta = [x \ y \ \psi]^T$ 表示船舶的位置向量,由北东坐标系下的位置 (x, y) 和船舶艏摇角 ψ 组成; $v = [u \ v \ r]^T$ 表示船舶的速度向量,由附体坐标

系下的船舶横摇速度 u 、纵摇速度 v 和艏摇角速度 r 组成; $J(\psi)$ 为北东坐标系与附体坐标系之间

的旋转矩阵,表达式为 $J(\psi) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$;

$M \in R^{3 \times 3}$ 表示包含附加质量的惯性矩阵,且正定对称的; $D \in R^{3 \times 3}$ 表示线性阻尼矩阵; $\tau = [\tau_1 \ \tau_2 \ \tau_3]^T$ 表示船舶推进系统提供给船舶的等效合力与力矩组成的控制向量,由纵摇控制力 τ_1 、横摇控制力 τ_2 与艏摇控制力矩 τ_3 组成; $d = [d_1 \ d_2 \ d_3]^T$ 表示风、浪流等海洋环境对船舶的等效扰动合力及力矩向量,由纵荡扰动力 d_1 、横荡扰动力 d_2 与艏摇扰动力矩 d_3 组成。

假设:

(1) 船舶动力定位运动数学模型中的 M 与 D 是不确定的;

(2) 船舶速度 v 的变化率是有界的;

(3) 由海洋环境中风浪等对船舶的扰动 d 是未知时变且有界的,且变化率同样是有界的。

注:由于船舶的动态性能与本身特性以及外部环境因素等均有联系,因此船舶的动态模型很难准确获得,具有较为明显的不确定性;海洋中风浪流时常发生变化,但它们的能量是有限的,故对船舶产生的扰动也是界的,因此假设是合理的。

控制目标:考虑到动力定位船舶的动态不确定性与遭遇外界未知时变扰动情况下,构造有限时间超螺旋扩张状态观测器估计总扰动,基于此设计船舶动力定位超螺旋滑模控制律,以保证船舶的实际位置 η 达到并保持于期望的位置 $\eta_d = [x_d \ y_d \ \psi_d]^T$, 其中 (x_d, y_d) 为北东坐标系下的期望位置, ψ_d 为期望的船舶艏摇角。

引理 1^[20] 存在如下动态系统:

$$\dot{x}_a(t) = f(x_a(t)) \quad (3)$$

式中, $f: D \rightarrow R^n$ 在 $D \in R^n$ 在原点附近开区间是连续的, 并有 $f(0) = 0$ 。如果存在连续方程 $V: D \rightarrow R$ 满足如下条件:

(1) V 是正定的;

(2) 存在 $c > 0, \theta \in (0, 1)$, 并且在 $\varpi \subseteq D$ 原点附近的开区间有:

$$\dot{V}_a(x_a(t)) + c(V_a(x_a(t)))^\theta \leq 0, x_a(t) \in \varpi \setminus \{0\} \quad (4)$$

则原点是动态系统(2)的平衡点。调节时间函数 T_1 可以表示为:

$$T_1 \leq \frac{1}{c(1-\theta)} (V_a(x_a(t_0)))^{1-\theta} \quad (5)$$

式中, $V_a(x_a(t_0))$ 表示 $V_a(x_a(t))$ 的初始值; T_1 是连续的。

2 控制律设计与稳定性分析

2.1 有限时间超螺旋扩张状态观测器设计

将船舶的动态不确定与未知时变的外界扰动视为总扰动, 则动力定位船舶非线性数学模型可改写成如下形式:

$$\dot{\eta} = J(\psi)v \quad (6)$$

$$\dot{v} = L + M_0^{-1}\tau \quad (7)$$

式中, $L = M^{-1}(-Dv + d) + (M^{-1} - M_0^{-1})\tau$ 表示总扰动; M_0 表示数学模型中 M 的标称值。根据假设可知, 动力定位船舶总扰动 L 是未知时变的, 且光滑可导。其导数满足 $\|\dot{L}(t)\| \leq \delta_1, \delta_1$ 为正数。

设计滑模面如下:

$$S = \varepsilon_2 + \lambda \varepsilon_1 \quad (8)$$

式中, $\varepsilon_1 = \eta - \eta_d; \varepsilon_2 = v - v_d; v_d$ 为船舶的期望速度; $\lambda > 0$ 为设计参数。

将式(8)对时间求导, 并结合式(6)与式(7), 可得滑模面 S 对时间的导数如下:

$$\begin{aligned} \dot{S} &= \dot{\varepsilon}_2 + \lambda \dot{\varepsilon}_1 = \lambda J(\psi)v + M_0^{-1}\tau + L - \dot{v}_d - \\ &\quad \lambda \dot{\eta}_d = \lambda J(\psi)v + M_0^{-1}\tau + L - S_d \end{aligned} \quad (9)$$

式中, $S_d = \lambda \dot{\eta}_d + \dot{v}_d$ 。

将式(9)中的船舶总扰动 L 扩张为一个新的状态向量 N , 可得如下增广系统:

$$\begin{cases} \dot{S} = \lambda J(\psi)v + M_0^{-1}\tau + N - S_d \\ \dot{N} = \dot{L} \end{cases} \quad (10)$$

进一步,构造如下形式的有限时间超螺旋扩张状态观测器:

$$\begin{cases} \dot{Z}_1 = Z_2 + \lambda J(\psi)v + M_0^{-1}\tau \\ -\beta_1 \text{Sign}^{1/2}(Z_1 - S) - S_d \\ \dot{Z}_2 = -\beta_2 \text{Sign}(Z_1 - S) \end{cases} \quad (11)$$

式中, $Z_1 \in R^3$ 、 $Z_2 \in R^3$ 分别为向量 S 与 $N(t)$ 的估计值; $\beta_1 = \text{diag}(\beta_{11}, \beta_{12}, \beta_{13}) > 0$ 与 $\beta_2 = \text{diag}(\beta_{21}, \beta_{22}, \beta_{23}) > 0$ 为设计参数。

依据所设计的有限时间超螺旋扩张状态观测器式(11),给出如下定理:

定理1 在假设下,构造有限时间超螺旋扩张状态观测器式(11),通过选择合适的参数 β_1 与 β_2 ,可以满足系统(10)的估计误差在有限时间 t_{s1} 内收敛于零。

证明:首先,定义观测器式(11)的估计误差如下:

$$\begin{cases} E_1 = Z_1 - S \\ E_2 = Z_2 - N \end{cases} \quad (12)$$

将式(12)对时间求导,并结合式(10)和式(11),可得:

$$\begin{cases} \dot{E}_1 = -\beta_1 \text{Sign}^{1/2}(E_1) + E_2 \\ \dot{E}_2 = -\beta_2 \text{Sign}(E_1) - \dot{N} \end{cases} \quad (13)$$

取 $p_1 = \text{Sign}^{1/2}(E_1)$ 与 $p_2 = E_2$, 记:

$$p(t) = [p_1^T \ p_2^T]^T \quad (14)$$

将 p_1 对时间求导,并结合式(13),可得:

$$\begin{aligned} \dot{p}_1 &= \frac{d[\text{Sign}^{1/2}(E_1(t))]}{dt} = \\ \frac{1}{2} \text{diag}(|E_{11}(t)|^{-1/2}, |E_{12}(t)|^{-1/2}, |E_{13}(t)|^{-1/2}) \dot{E}_1(t) &= \\ \frac{1}{2} \mu (E_2 - \beta_1 \text{Sign}^{1/2}(E_1(t))) \end{aligned} \quad (15)$$

式中, $\mu = \text{diag}(|E_{11}(t)|^{-1/2}, |E_{12}(t)|^{-1/2}, |E_{13}(t)|^{-1/2})$ 。

对式(14)求导,并结合式(13)与式(15),可得:

$$\frac{dp(t)}{dt} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \mu (E_2 - \beta_1 \text{Sign}^{1/2}(E_1)) \\ -\beta_2 \text{Sign}(E_1) - \dot{N} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \mu & 0_3 \\ 0_3 & \mu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} (E_2 - \beta_1 \text{Sign}^{1/2}(E_1(t))) \\ -\beta_2 \text{Sign}^{1/2}(E_1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0_3 \\ -\dot{N} \end{bmatrix} = \mu' A_1 p(t) - B_1 \dot{N} \quad (16)$$

式中, $\mu' = \begin{bmatrix} \mu & 0_3 \\ 0_3 & \mu \end{bmatrix}$, $A_1 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -\beta_1 & I_3 \\ -2\beta_2 & 0_3 \end{bmatrix}$, $B_1 = [0_3 \ I_3]^T$, I_3 为 3×3 阶的单位矩阵, 0_3 为 3×3 阶的零矩阵。

构造如下李雅普诺夫预选函数:

$$V_1 = p(t)^T W_1 p(t) \quad (17)$$

$$\text{式中, } W_1 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} (4\beta_2 + \beta_1^2) & -\beta_1 \\ -\beta_1 & 2I_3 \end{bmatrix}。$$

对式(17)求导,并结合式(16),得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= (\mu' A_1 p(t) - B_1 \dot{N})^T W_1 p(t) + \\ p^T(t) W_1 (\mu' A_1 p(t) - B_1 \dot{N}) &= \\ p^T(t) (A_1^T \mu' W_1 + W_1 \mu' A_1) p(t) - 2 \dot{N}^T B_1^T W_1 p(t) &\leq \\ -\lambda_{\min}(\mu) p^T(t) Q_1 p(t) - 2 \dot{N}^T B_1^T W_1 p(t) \end{aligned} \quad (18)$$

式中,

$$Q_1 = -A_1^T W_1 - W_1 A_1 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} (2\beta_1 \beta_2 + \beta_1^3) & -\beta_1^2 \\ -\beta_1^2 & \beta_1 \end{bmatrix}。$$

由于 $p_1 = \text{Sign}^{1/2}(E_1)$ 与 $\mu = \text{diag}(|E_{11}(t)|^{-1/2}, |E_{12}(t)|^{-1/2}, |E_{13}(t)|^{-1/2})$, 那么 $\|\eta_1\| = \sqrt{|E_{11}| + |E_{12}| + |E_{13}|} \geq \lambda_{\min}^{-1}(\mu)$, 进而有:

$$\|p_1\| \cdot \lambda_{\min}(\mu) \geq 1 \quad (19)$$

根据完全平方不等式定理与式(18),可以得到:

$$\begin{aligned} -2 \dot{N}^T B_1^T W_1 p(t) &\leq \|-2 \dot{N}^T B_1^T W_1 p(t)\| \leq \\ \delta_1 \|\beta_1 p_1 - 2p_2\| &\leq \lambda_{\min}(\mu) \delta_1 \|p_1\| \|\beta_1 p_1 - 2p_2\| \leq \\ \lambda_{\min}(\mu) \delta_1 (\beta_1 p_1^T p_1 + 2\|p_1\| \|p_2\|) &\leq -\lambda_{\min}(\mu) p^T Q_1 p \end{aligned} \quad (20)$$

$$\text{式中, } Q'_1 = \begin{bmatrix} -\delta_1 (\beta_1 + I_3) & 0_3 \\ 0_3 & -\delta_1 I_3 \end{bmatrix}。$$

将式(20)代入式(18)中,有:

$$\dot{V}_1 \leq -\lambda_{\min}(\mu) p^T(t) Q_1 p(t) - \lambda_{\min}(\mu) p^T Q'_1 p \leq$$

$$-\lambda_{\min}(\mu)p^T(t)\tilde{Q}_1p(t) \quad (21)$$

式中,

$$\tilde{Q}_1 = \begin{bmatrix} \beta_1\beta_2 + \frac{1}{2}\beta_1^3 - \delta_1(\beta_2 + I_3) & -\frac{1}{2}\beta_1^2 \\ -\frac{1}{2}\beta_1^2 & \frac{1}{2}\beta_1 - \delta_1I_3 \end{bmatrix}。$$

根据式(19)以及 $p(t) = [p_1^T \ p_2^T]^T$ 得:

$$\lambda_{\min}^{-1}(\mu) \leq \|p_1\| \leq \|p\| \quad (22)$$

将式(22)代入式(21)中可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_I &\leq -\lambda_{\min}(\tilde{Q}_1)\lambda_{\min}(\mu)\|p(t)\|^2 \leq -\lambda_{\min}(\tilde{Q}_1)\|p(t)\| \\ &\leq -\gamma_1 V_I^{1/2}(p(t)) \end{aligned} \quad (23)$$

$$\text{式中, } \gamma_1 = \frac{\lambda_{\min}(\tilde{Q}_1)\lambda_{\min}^{1/2}(W_1)}{\lambda_{\max}(W_1)}。$$

根据引理1,估计误差系统(12)在有限的时间 t_{s1} 内收敛于零。

$$t_{s1} \leq \frac{1}{\gamma_1/2} V_I^{1/2}(p(t)) \leq \frac{1}{\gamma_1/2} V_I^{1/2}(p(t_0)) \quad (24)$$

通过选择合适的设计参数 β_1 与 β_2 ,使得矩阵 $\tilde{Q}_2$ 为正定矩阵,可以保证系统(12)的估计误差 E_1 与 E_2 在有限时间 t_{s1} 内收敛于零。综上定理1证明完毕。

2.2 基于超螺旋滑模控制的船舶动力定位控制律设计及稳定性分析

采用超螺旋滑模控制方法,设计船舶动力定位超螺旋滑模控制律 τ 如下:

$$\begin{aligned} \tau &= M_0(-\lambda J(\psi)v - L + S_d - \alpha_1 \text{Sign}^{1/2}(S) \\ &\quad - \int \alpha_2 \text{Sign}(S)) \end{aligned} \quad (25)$$

式中, $\alpha_1 = \text{diag}(\alpha_{11}, \alpha_{12}, \alpha_{13}) > 0$ 与 $\alpha_2 = \text{diag}(\alpha_{21}, \alpha_{22}, \alpha_{23}) > 0$ 是设计参数。

由上一部分知 Z_2 为总扰动 $L(t)$ 的估计值,结合式(25)可得:

$$\begin{aligned} \tau &= M_0(-\lambda J(\psi)v - Z_2 + S_d - \alpha_1 \text{Sign}^{1/2}(S) \\ &\quad - \int \alpha_2 \text{Sign}(S)) \end{aligned} \quad (26)$$

根据所设计的船舶动力定位控制律式(26),给出如下定理。

定理2 在假设的条件下,考虑动力定位船舶具有动态不确定性与未知时变扰动,对于船舶动力定位数学模型式(6)与式(7),设计基于超螺旋扩张状态观测器(11)的船舶动力定位控制律式(26),通过选择合适的设计参数 α_1 与 α_2 ,可以使得系统(28)在有限时间 t_{s2} 内收敛于零,即船舶跟踪误差在有限时间收敛,并且使得船舶动力定位控制系统的所有信号一致最终有界。

证明:将控制律式(26)代入式(9)可得:

$$\dot{s} = -\alpha_1 \text{Sign}^{1/2}(S) - \int \alpha_2 \text{Sign}(S) - E_2 \quad (27)$$

进行如下坐标变换:

$$\begin{cases} \phi_1 = S \\ \phi_2 = -\int \alpha_2 \text{Sign}(S) \end{cases} \quad (28)$$

将式(28)对时间求导,并结合式(27),可得:

$$\begin{cases} \dot{\phi}_1 = -\alpha_1 \text{Sign}^{1/2}(\phi_1) + \phi_2 - E_2 \\ \dot{\phi}_2 = -\alpha_2 \text{Sign}(\phi_1) \end{cases} \quad (29)$$

根据估计误差式(13),存在正常数 $\delta_2^{[21-22]}$,使得:

$$\|E_2\| \leq \delta_2 \|\phi_1\|^{1/2} \quad (30)$$

取 $X_1 = \text{Sign}^{1/2}(\phi_1)$, $X_2 = \phi_2$,记:

$$X = [X_1^T \ X_2^T]^T \quad (31)$$

将 X_1 对时间求导,并结合式(31),可得:

$$\begin{aligned} \dot{X}_1 &= \frac{d[\text{Sign}^{1/2}(\phi_1)]}{dt} = \\ &\frac{1}{2} \text{diag}(|\phi_{11}(t)|^{-1/2}, |\phi_{12}(t)|^{-1/2}, |\phi_{13}(t)|^{-1/2}) \dot{\phi}_1(t) = \\ &\frac{1}{2} \omega (-\alpha_1 \text{Sign}^{1/2}(\phi_1) + \phi_2 - E_2) \end{aligned} \quad (32)$$

式中, $\omega = \text{diag}(|\phi_{11}(t)|^{-1/2}, |\phi_{12}(t)|^{-1/2}, |\phi_{13}(t)|^{-1/2})$ 。

对式(31)求导,并结合式(29)与式(32),可得:

$$\begin{aligned} \dot{X} &= \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \omega (-\alpha_1 \text{Sign}^{1/2}(\phi_1) + \phi_2 - E_2) \\ -\alpha_2 \text{Sign}(\phi_1) \end{bmatrix} = \\ &\begin{bmatrix} \omega & 0_3 \\ 0_3 & \omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} (-\alpha_1 \text{Sign}^{1/2}(\phi_1) + \phi_2) \\ -\alpha_2 \text{Sign}^{1/2}(\phi_1) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \omega E_2 \\ 0_3 \end{bmatrix} = \end{aligned}$$

$$\omega' A_2 X - \omega' B_2 E_2 \quad (33)$$

式中, $\omega' = \begin{bmatrix} \omega & 0_3 \\ 0_3 & \omega \end{bmatrix}$, $A_2 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -\alpha_1 & I_3 \\ -2\alpha_2 & 0_3 \end{bmatrix}$, $B_2 = \begin{bmatrix} I_3/2 & 0_3 \end{bmatrix}^T$ 。

构造李雅普诺夫预选函数如下:

$$V_2 = X^T W_2 X \quad (34)$$

$$\text{式中, } W_2 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} (4\alpha_2 + \alpha_1^2) & -\alpha_1 \\ -\alpha_1 & 2I_3 \end{bmatrix}。$$

对式(34)求导,并结合式(33),可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= (\omega' A_2 X + \omega' B_2 \rho_2)^T W_2 X + \\ &X^T W_2 (\omega' A_2 X - \omega' B_2 E_2) = \\ &X^T (A_2^T \omega' W_2 + W_2 \omega' A_2) X - 2\omega' E_2^T B_2^T W_2 X \leq \\ &X^T \omega' Q_2 X - 2\omega' E_2^T B_2^T W_2 X \end{aligned} \quad (35)$$

$$\text{式中, } Q_2 = -A_2^T W_2 - W_2 A_2 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} (2\alpha_1 \alpha_2 + \alpha_1^3) & -\alpha_1^2 \\ -\alpha_1^2 & \alpha_1 \end{bmatrix}。$$

由于 $X_1 = \text{Sign}^{1/2}(\phi_1)$, 那么 $\|X_1\| = \sqrt{|\phi_{11}| + |\phi_{12}| + |\phi_{13}|} \geq \|\phi_1\|^{1/2}$, 进而有:

$$\|X_1\| \cdot \|\phi_1\|^{-1/2} \geq 1 \quad (36)$$

根据完全平方不等式、式(30)以及式(36),可以得到:

$$\begin{aligned} -2\omega' E_2^T B_2^T W_2 X &\leq \|-2\omega' E_2^T B_2^T W_2 X\| \leq \\ \delta_2 \|\phi_1\|^{1/2} \left\| -\frac{1}{2} (4\alpha_2 + \alpha_1^2) \omega X_1 + \frac{1}{2} \alpha_1 \omega X_2 \right\| &\leq \\ \delta_2 \|X_1\| \left\| \frac{1}{2} (4\alpha_2 + \alpha_1^2) \|\omega X_1\| + \frac{1}{2} \alpha_1 \|\omega X_2\| \right\| &\leq \\ -X^T Q'_2 \omega' X \end{aligned} \quad (37)$$

$$\text{式中, } Q'_2 = \begin{bmatrix} -\delta_2 (2\alpha_2 + 3\alpha_1^2/4) & 0_3 \\ 0_3 & -\delta_2/4 \end{bmatrix}。$$

将式(36)代入式(34)中,可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= X^T \omega' Q_2 X - 2\omega' E_2^T B_2^T W_2 X \leq \\ X^T \omega' Q_2 X - X^T \omega' Q'_2 X &\leq -\lambda_{\min}(\omega) X^T \tilde{Q}_2 X \end{aligned} \quad (38)$$

$$\text{式中, } \tilde{Q}_2 = \begin{bmatrix} \alpha_1 \alpha_2 + \frac{1}{2} \alpha_1^3 - \left(2\alpha_2 + \frac{3}{4} \alpha_1^2 \right) \delta_2 & -\frac{1}{2} \alpha_1^2 \\ -\frac{1}{2} \alpha_1^2 & \frac{1}{2} \alpha_1 - \frac{1}{4} \delta_2 \end{bmatrix}。$$

由于 $X = [X_1^T \ X_2^T]^T$, $X_1 = \text{Sign}^{1/2}(\phi_1)$ 与 $\omega = \text{diag}(|\phi_{11}(t)|^{-1/2}, |\phi_{12}(t)|^{-1/2}, |\phi_{13}(t)|^{-1/2})$, 那么 $\|X_1\| = \sqrt{|\phi_{11}| + |\phi_{12}| + |\phi_{13}|} \geq \lambda_{\min}^{-1}(\omega)$, 进而有:

$$\lambda_{\min}^{-1}(\omega) \leq \|X_1\| \leq \|X\| \quad (39)$$

将式(39)代入式(38)中,可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &\leq -\lambda_{\min}(\tilde{Q}_2) \lambda_{\min}(X) \|X(t)\|^2 \leq \\ -\lambda_{\min}(\tilde{Q}_2) \|X(t)\| &\leq -\gamma_2 V_2^{1/2} \end{aligned} \quad (40)$$

$$\text{式中, } \gamma_2 = \frac{\lambda_{\min}(\tilde{Q}_2) \lambda_{\min}^{1/2}(P_2)}{\lambda_{\max}(P_2)}。$$

根据引理1,系统式(28)在有限的时间 t_{s2} 内收敛到零:

$$t_{s2} \leq \frac{1}{\gamma_2/2} V_2^{1/2}(X(t)) \leq \frac{1}{\gamma_2/2} V_2^{1/2}(X(t_0)) \quad (42)$$

显然,通过选择合适的设计参数 α_1 与 α_2 ,使得矩阵 $\tilde{Q}_2$ 为正定矩阵,可以保证系统(28)在有限时间内收敛于零,即船舶动力定位系统稳定误差 ε_1 与 ε_2 在有限时间 t_{s2} 内收敛于零。综上定理2得证。

3 仿真研究

3.1 控制律验证

本文采用挪威科技大学的 Fossen 等人针对船舶控制系统,依据船舶的数学模型开发的 Simulink 工具箱 MSS^[22]进行仿真研究。本文选择 DP Motion RAO model 中的供给船(Supply Vessel)为例进行仿真验证控制算法的有效性,该供给船的相关参数如表1所示。

表1 船舶模型主要参数

参数名称	参数值
总长/m	103.63
垂线间长/m	82.8
型宽/m	19.2
吃水/m	6
质量/kg	6 362 200

本文设定船舶所遭受的海浪参数如下:海浪谱的类型为 ITTC 双参数谱,有义波高为 3 m,平

均波向为 30° , 波浪扩散因子数值为 2, 对应海况等级为 4 级。船舶初始状态 $\eta(0) = [5\text{ m}, 5\text{ m}, 5^\circ]^\text{T}$ 与 $v(0) = [0, 0, 0]^\text{T}$, 船舶的期望状态 $\eta_d = [0\text{ m}, 0\text{ m}, 0^\circ]^\text{T}$ 与 $v_d = [0, 0, 0]^\text{T}$; 控制器的相关参数的选择如下, 有限时间超螺旋扩张状态观测器部分: $\lambda = 1, \beta_1 = \text{diag}(1, 1, 5), \beta_2 = \text{diag}(1, 1, 20)$; 船载稳定平台超螺旋滑模稳定控制律部分: $\alpha_1 = \text{diag}(10, 10, 1), \alpha_2 = \text{diag}(2, 2, 2)$ 。

仿真结果如图 1~图 3 中实线所示, 性能指标如表 2 所示。图 1 为船舶状态变化曲线, 表明了船舶以较快的速度趋向于期望状态 $\eta_d = [0\text{ m}, 0\text{ m}, 0^\circ]^\text{T}$ 上, 并且能够保持在期望位置附近; 图 2 为船舶的速度变化曲线, 表明了船舶以一定速度到达期望位置后, 可以保持在期望位置上, 即 $v_d = [0, 0, 0]^\text{T}$; 图 3 为船舶推进力和力矩变化曲线, 曲线变化光滑合理符合实际需求。通过以上仿真结果验证了控制律的有效性。

3.2 控制性能比较

将本文所设计的控制律与现在大部分船舶动力定位系统采用的 PID 控制方法进行比较。在两种不同的海洋环境下, 船舶初始条件、期望位置与控制参数相同。通过仿真对两种控制方法进行比较分析, 海洋环境(a)中船舶所遭遇的环境扰动与 3.1 节中相同, 海洋环境(b)中船舶所遭遇的环境扰动的海浪有义波高为 5 m, 其余海浪参数与 3.1 节中相同。在海况(a)下先调整 PID 的控制参数, 获得较好的控制效果, 其具体参数 $K_p = \text{diag}(1.0 \times 10^6, 1.0 \times 10^6, 1.0 \times 10^7)$, $K_i = \text{diag}(1.4 \times 10^3, 1.4 \times 10^3, 1.4 \times 10^3)$ 与 $K_d = \text{diag}(3.0 \times 10^7, 3.0 \times 10^7, 3.0 \times 10^8)$ 。

在海况(b)下超螺旋滑模控制仿真结果如图 4~图 6 中实线所示, 性能指标如表 2 所示。PID 控制律在海况(a)和(b)下的仿真结果分别用虚线描绘在图 1~图 3 和图 4~图 6 中, PID 控制律的性能指标列在表 2 中。通过图 1~图 6 与表 2 可以看出, 在两种不同海况下, 本文所提出的控制方

案的定位误差的收敛速度都明显优于 PID 控制, 同时船舶定位的稳态误差明显小于 PID 控制方案的稳态误差, 并且海况越大, 本方案的优越性越明显。

表 2 控制方法性能指标比较

海况	(a)		(b)	
控制方案	本文	PID	本文	PID
调节时间/s	3.15	20.7	5.25	40.5
$\int_0^{200} x - x_d dt / (\text{m} \cdot \text{s})$	6.57	14.7	7.87	21.4
$\int_0^{200} y - y_d dt / (\text{m} \cdot \text{s})$	8.24	19.6	13.40	28.9
$\int_0^{200} \psi - \psi_d dt / (^\circ \cdot \text{s})$	15.20	23.1	25.30	30.0

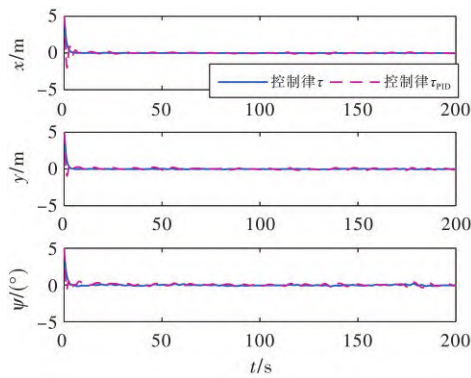


图 1 海况(a)下船舶位置与艏向角曲线

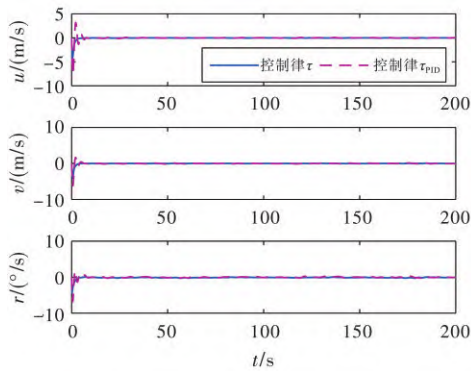


图 2 海况(a)下船舶速度曲线

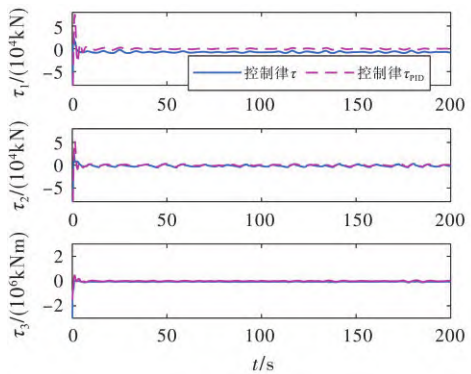


图 3 海况(a)下船舶控制力与力矩曲线

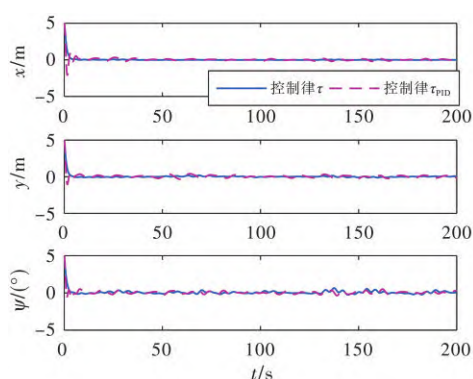


图4 海况(b)下船舶位置与艏向角曲线

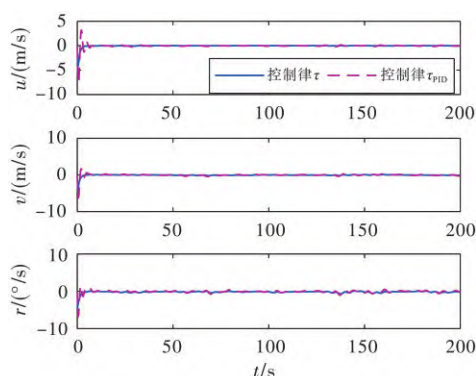


图5 海况(b)下船舶速度曲线

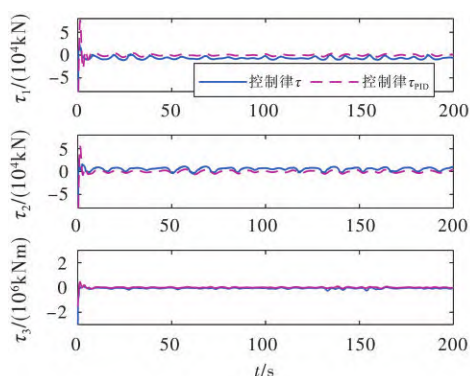


图6 海况(b)下船舶控制力与力矩曲线

4 结论

本文考虑到海上作业动力定位船舶存在未建模动态和未知时变扰动,将船舶的未建模动态和时变未知海洋扰动视为总扰动,设计了有限时间超螺旋扩张状态观测器估计该总扰动。借助李雅普诺夫稳定性理论,证明了所设计的控制律通过选择合适的控制参数,能够使得船舶的实际位置趋向并保持在目标值上。最后,利用一艘 Supply Vessel 进行仿真研究验证了所提出控制方案的有效性。

参考文献

- [1] SØRENSEN A J. A survey of dynamic positioning control systems [J]. Annual Reviews in Control, 2011, 35 (1): 123-136.
- [2] STRAND J P, ASGEIR J S, MÆRIT R, et al. The ocean engineering handbook, Chapter 3: position control systems for offshore vessels [M]. Boca Raton: CRC Press, 2000.
- [3] 边信黔,付明玉,王元慧. 船舶动力定位[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [4] HASSANI V, SØRENSEN A J, PASCOAL A M. A novel methodology for robust dynamic positioning of marine vessels: theory and experiments [C]. Proceedings of the 2013 American Control Conference, Washington, USA, 2013: 560-565.
- [5] FOSSEN T I. Marine control systems: guidance, navigation and control of ships, rigs and underwater vehicles [M]. Trondheim: Marine Cybernetics AS, 2002.
- [6] J G BALCHEN, JENSSEN N A, SÆLID S. Dynamic positioning using kalman filtering and optimal control theory [C]. Proceedings of IFAC/IFIP Symposium on Automation in Offshore Oil Field Operation, Bergen, Norway, 1976: 183-186.
- [7] 杜佳璐,张显库,汪思源,等. 船舶动力定位系统的自适应非线性控制器设计[C]. 北京: 中国控制会议, 2010.
- [8] 王元慧,隋玉峰,吴静. 基于非线性模型预测的船舶动力定位控制器设计[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2013, 34(1): 110-115.
- [9] 杜佳璐,杨杨. 基于动态面控制的船舶动力定位控制律设计[J]. 交通运输工程学报, 2014, 14(5): 36-50.
- [10] 刘勇,卜仁祥,孙大铭. 基于二阶滑模算法的船舶航向控制[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2017, 40(4): 69-72.
- [11] 韩京清. 一类不确定对象的扩张状态观测器 [J]. 控制与决策, 1995(1): 85-88.
- [12] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用[J]. 控制与决策, 1998, 13(1): 19-23.
- [13] 韩京清,张荣. 二阶扩张状态观测器的误差分析 [J]. 系统科学与数学, 1999, 19(4): 465-471.

- [14] GAN Z X, HUANG Y, HAN J Q. Phase plane analysis of second order ESO [C]. Chinese Control and Decision Conference. Piscataway, NJ, USA, 2001: 42–45.
- [15] GAO Z Q. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning [C]. 2003 American Control Conference. Piscataway, NJ, USA, 2003: 4989–4996.
- [16] 史红伟, 李松阳, 李哲康, 等. 一种提高伺服控制系统性能的设计方法 [J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2017, 40(6): 78–81.
- [17] 黄成, 王岩. 交会对接模拟系统姿态跟踪有限时间抗干扰控制 [J]. 控制与决策, 2017, 32(7): 1189–1195.
- [18] XIA G, SUN C, ZHAO B, et al. Cooperative control of multiple dynamic positioning vessels with input saturation based on finite-time disturbance observer [J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2019, 17(2): 370–379.
- [19] FOSSEN T I. Marine control systems [M]. Trondheim: Marine Cybernetics, 2002.
- [20] LI S, WANG X. Finite-time consensus and collision avoidance control algorithms for multiple AUVs [J]. Automatica, 2013, 49(11): 3359–3367.
- [21] MORENO J A, OSORIO M A. A Lyapunov approach to second-order sliding mode controllers and observers [C]. 2008 47th IEEE Conference on Decision and Control, Cancun, Mexico 2008: 2856–2861.
- [22] IN A, CE B. A multivariable super-twisting sliding mode approach – ScienceDirect [J]. Automatica, 2014, 50(3): 984–988.
- [23] MCCUE L. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control [J]. IEEE Control Systems, 2016, 36(1): 78–79.