

【引用格式】周新力, 胡庆玉. 基于非线性干扰观测器的 UUV 反演滑模深度控制[J]. 数字海洋与水下攻防, 2024, 7(3): 310-317.

# 基于非线性干扰观测器的 UUV 反演滑模深度控制

周新力<sup>1,2</sup>, 胡庆玉<sup>1,2</sup>

(1. 中国船舶集团有限公司第七一〇研究所, 湖北 宜昌 443003;

2. 清江创新中心, 湖北 武汉 430200)

**摘要** 针对水下无人航行器 (UUV) 在浅水海洋环境下的悬停作业需求, 提出一种基于非线性干扰观测器的 UUV 反演滑模深度控制算法。首先, 根据全驱动 UUV 的悬停运动特性, 建立五自由度及解耦的垂荡通道动力学模型。然后, 采用非线性干扰观测器 (NDO) 对时变海浪扰动与模型的不确定进行有效估计, 并证明了 NDO 的指数收敛特性。根据 UUV 的标称模型及 NDO 对扰动状态的估计, 采用反演思路, 设计了反演滑模控制器。通过引入双曲正切函数取代不连续切换函数, 改进滑模趋近律, 进而降低滑模的抖振效应。根据 Lyapunov 理论证明了系统的稳定性。最后, 通过仿真实验验证了该控制算法的有效性与优越性。

**关键词** 水下无人航行器; 深度控制; 干扰观测器; 反演滑模控制

中图分类号 U664.82

文献标识码 A

文章编号 2096-5753(2024)03-0310-08

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2024.03.009

## Nonlinear Disturbance Observer Based Backstepping Sliding Mode Depth Control for UUVs

ZHOU Xinli<sup>1,2</sup>, HU Qingyu<sup>1,2</sup>

(1. No. 710 R&D Institute, CSSC, Yichang 443003, China;

2. Qingjiang Innovation Center, CSSC, Wuhan 430200, China)

**Abstract** A nonlinear disturbance observer based backstepping sliding mode depth control algorithm is proposed for hovering operation of unmanned underwater vehicles (UUVs) in shallow marine environment. Firstly, based on the hovering characteristics of a fully actuated UUV, a five-degree-of-freedom decoupled heave channel dynamic model is established. Then, a nonlinear disturbance observer (NDO) is used to effectively estimate the time-varying wave disturbance and model uncertainty, and the exponential convergence property of the NDO is proved. Based on the UUV nominal model and the estimated disturbance state by the NDO, a backstepping sliding mode controller is designed using the backstepping method. By introducing a hyperbolic tangent function instead of a discontinuous switching function, the sliding mode approach law is improved and the chattering effect of the sliding mode is reduced. The stability of the system is proved using Lyapunov theory. Finally, the effectiveness and superiority of the control algorithm is verified through simulation experiments.

**Key words** unmanned underwater vehicle; depth control; disturbance observer; backstepping sliding mode control

## 0 引言

近年来,水下无人飞行器(Unmanned Underwater Vehicle, UUV)在海洋资源勘探开发、海洋环境监测与搜索搜救等领域扮演着愈发重要的角色<sup>[1]</sup>。随着 UUV 水下作业任务的多样化及复杂程度逐渐提高,对 UUV 系统的控制要求也更加严格<sup>[2]</sup>。尤其在恶劣的浅水海洋环境下,受到海流、海浪等多种外界环境扰动与内部模型不确定因素的影响,UUV 系统表现为时变强耦合的非线性特性,控制性能急剧恶化<sup>[3-4]</sup>。因此,如何使 UUV 在恶劣浅水海洋环境下实现高精度的动力定位悬停控制,已成为 UUV 领域研究的热点。

经典的 PID 控制算法工程上易实现,具有一定的环境自适应性,可满足 UUV 的大部分作业场合,但在复杂环境下执行较为严格任务时,出现的控制精度不够高与扰动抑制能力不足的问题会导致任务执行失败。SMALLWOOD 等人尝试了线性化控制理论及非线性自适应控制等方法,通过仿真与实验的方式研究了解耦的 UUV 动力定位控制问题<sup>[5]</sup>。QIAO 等人提出一种积分滑模控制算法,采用自适应动态补偿技术抑制 UUV 外界扰动与不确定<sup>[6]</sup>。葛晖等人提出了一种动力定位最优控制策略,采用神经网络自适应反演控制器实现了洋流条件下的 UUV 最优能耗的精准控位<sup>[7]</sup>。高宏博等人针对水下机器人执行探伤任务中遇到的模型参数变化的问题,提出一种基于模型逼近的 RBF 神经网络的自适应滑模控制方法<sup>[8]</sup>。谢争鸣等采用一种基于扩张状态观测器的滑模控制方法应用于全驱动 AUV,在洋流环境扰动下改善了全驱动 AUV 动力定位性能<sup>[9]</sup>。RIEDEL 等人针对 UUV 的多通道解耦模型,提出了基于滑模控制的干扰补偿控制器解决不确定扰动的问题<sup>[10]</sup>。高剑等人研究了 UUV 在参数不确定情况下的单通道解耦位置跟踪控制问题,提出了自适应反步滑模控制器,可在线估计水流模型参数,并克服了未建模动态<sup>[11-12]</sup>。窦刚等人为解决 UUV 定常海流扰动下的垂直面悬停控制,采用反步设计思路,设计了自适应滑模控制算法<sup>[13]</sup>。胡守一等人研究了复杂海洋环境干扰下的 UUV 回收过程问题,采用了自抗扰控制算法实现高精度的回

收控制<sup>[14]</sup>。TANG 等人提出了一种基于扩张状态观测器的自适应模糊积分滑模控制方法提高了全驱动 UUV 对海浪突变扰动的抑制效果<sup>[15]</sup>。赵洪坛等人提出了一种模型预测与自适应滑模级联的控制策略实现了全驱动 UUV 对海流扰动的自适应补偿<sup>[16]</sup>。

本文针对 UUV 在复杂浅海区域作业的任务场景下,为应对海浪大、不确定扰动等引起的动力控位精度低的问题,提出一种基于非线性干扰观测器的反演滑模控制算法。首先,在无需对于外部与内部扰动进行精确建模的前提下,采用非线性干扰观测器有效地估计海浪等不确定扰动,并对其进行实时的补偿,相比常规的干扰观测器,非线性干扰观测器具有指数收敛特性,能更快更准的跟踪扰动信号。然后,采用反演设计法的思路,设计了具有改进趋近律的滑模控制器,相比常规的滑模趋近律的优势为可增强鲁棒性的同时减小滑模面切换引起的抖振。根据 Lyapunov 稳定性原理证明了反演滑模控制器的收敛性。最后以 UUV 垂直面的垂荡模型进行了仿真实验验证。

## 1 水下无人飞行器建模

### 1.1 运动学模型

本文依据国际水池会议和造船与轮机工程学会术语的推荐<sup>[17]</sup>,建立了大地坐标系  $E$  和艇体坐标系  $O$  共 2 种坐标系。本文 UUV 示意图及坐标如图 1 所示。

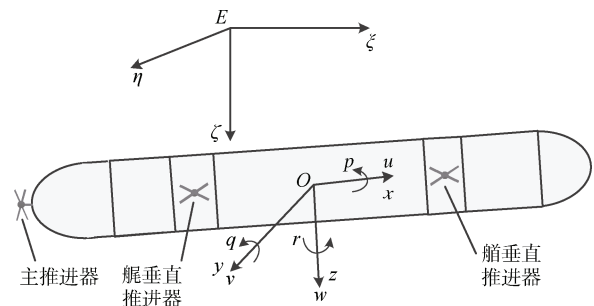


图 1 简化的 UUV 示意图

Fig. 1 UUV Simplified Schematic diagram

UUV 的位置与姿态角信息可表示为  $p = [p_1 \ p_2] = [x \ y \ z \ \varphi \ \theta \ \psi]$ , 六自由度向量分别表示纵荡位置、横荡位置、垂荡位置、纵摇角度、横摇角度、艏摇角度。线速度与角速度信息可表示

为  $\mathbf{v}=[\mathbf{v}_1 \ \mathbf{v}_2]=[\mathbf{u} \ \mathbf{v} \ \mathbf{w} \ \mathbf{p} \ \mathbf{q} \ \mathbf{r}]$ , 六自由度向量依次表示纵荡速度、横荡速度、垂荡速度、纵摇角速度、横摇角速度与艏摇角速度。

UUV 的运动学方程可表示为<sup>[18]</sup>

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{p}}_1 \\ \dot{\mathbf{p}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1(\mathbf{p}_1) & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{J}_2(\mathbf{p}_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{v}_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\mathbf{J}_1(\mathbf{p}_1) = \begin{bmatrix} 1 & s\psi t\theta & c\phi t\theta \\ 0 & c\phi & s\phi \\ 0 & s\phi/c\theta & c\phi/c\theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{J}_2(\mathbf{p}_2) = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & -s\psi c\phi + c\psi s\theta s\phi & s\psi s\phi + c\psi c\phi s\theta \\ s\psi c\theta & c\psi c\phi + s\psi s\theta s\phi & -c\psi s\phi + s\psi s\theta c\phi \\ -s\theta & c\theta s\psi & c\theta c\phi \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:  $\mathbf{J}_1(\mathbf{p}_1)$  为线速度转换矩阵;  $\mathbf{J}_2(\mathbf{p}_2)$  为角速度转换矩阵, 表示大地坐标系和艇体坐标系之间的转换关系;  $s(\cdot)$  表示  $\sin(\cdot)$ ,  $c(\cdot)$  表示  $\cos(\cdot)$ ,  $t(\cdot)$  表示  $\tan(\cdot)$ 。

## 1.2 动力学模型

在艇体坐标系中, 水下无人飞行器六自由度动力学模型可表示为

$$\mathbf{M} \cdot \dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C} \cdot \mathbf{v} + \mathbf{D} \cdot \mathbf{v} + \mathbf{g} + \mathbf{d}_0 = \boldsymbol{\tau} \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{M}$  为惯性矩阵, 包含 UUV 自身的质量矩阵  $\mathbf{M}_{\text{RB}}$  及水的粘性产生的附加质量矩阵  $\mathbf{M}_{\text{A}}$ , 即  $\mathbf{M} = \mathbf{M}_{\text{RB}} + \mathbf{M}_{\text{A}}$ ;  $\mathbf{C}$  为科氏向心力矩阵, 包括刚体科氏向心力矩阵  $\mathbf{C}_{\text{RB}}$  和附加质量  $\mathbf{M}_{\text{A}}$  引起的科氏向心力矩阵  $\mathbf{C}_{\text{A}}$ , 即  $\mathbf{C} = \mathbf{C}_{\text{RB}} + \mathbf{C}_{\text{A}}$ ;  $\mathbf{D}$  为水阻尼矩阵, 当 UUV 高速航行时, 水阻尼呈高度非线性和强耦合性, 当 UUV 低速航行时, 可通过忽略阻尼耦合项及高于二阶的阻尼项, 得到较为精准的水阻尼模型  $\mathbf{D} = \mathbf{D}_{\text{L}} + \mathbf{D}_{\text{Q}} |\mathbf{v}|$ , 其中  $\mathbf{D}_{\text{L}}$  为线性阻尼项,  $\mathbf{D}_{\text{Q}}$  为二阶阻尼项;  $\mathbf{g}$  为广义恢复力及力矩;  $\boldsymbol{\tau}$  为驱动力及力矩;  $\mathbf{d}_0$  为外部环境扰动, 主要表现为海浪扰动。

海浪是由一系列复杂的随机不规则的波组成, 具有非线性与时变性。波浪力可分为一阶高频波浪力与二阶波低频浪力, 一阶波浪力可描述为<sup>[19]</sup>

$$d_1 = d_{|z|} \cdot e^{-\nu|z|} \cos(\omega t) \quad (5)$$

式中:  $d_1$  为海浪一阶波浪力;  $d_{|z|}$  为波幅;  $\nu = 2\pi/\lambda$  为波数,  $\lambda$  为波长。

二阶波浪作用力变化缓慢, 可用一阶马尔科夫

过程对其描述<sup>[20]</sup>:

$$\dot{d}_2 = -\zeta_d^{-1} d_2 + \xi_d w_d \quad (6)$$

式中:  $d_2$  为海浪的低频扰动即二阶波浪力;  $\zeta_d$  为时间常数;  $w_d$  为零均值的高斯白噪声;  $\xi_d$  为高斯白噪声幅值。

本文针对 UUV 在近水面低速航行与悬停作业情况下的深度控制进行分析。对 UUV 动力学模型进行如下处理: 1) 忽略科氏向心力矩阵  $\mathbf{C}_{\text{A}}$  的作用; 2) 忽略 UUV 惯性矩阵非对角元素的作用; 3) 忽略 UUV 在横荡自由度上的运动; 4) UUV 作业过程中, 假设其重心与浮心的大小相等, 位置重合且不变; 5) 将 UUV 作为具有恒定质量的刚体, 忽略水的温度、密度等因素的变化。

基于以上简化条件及假设, UUV 的五自由度动力学模型可表示为

$$(\mathbf{M}_{\text{RB}} + \mathbf{M}_{\text{A}}) \cdot \dot{\mathbf{v}} + (\mathbf{D}_{\text{L}} + \mathbf{D}_{\text{Q}} |\mathbf{v}|) \cdot \mathbf{v} + \mathbf{g} + \mathbf{d}_0 = \boldsymbol{\tau} \quad (7)$$

UUV 在近水面低速航行与悬停时用艏艉 2 个垂直推进器实现深度的控制。本文对垂荡 (深度) 自由度进行研究, 假设艏艉两垂推沿垂向输出的力矩平衡, 使俯仰力矩极小, 且纵荡与横荡方向无推力, 则忽略纵荡、横荡、纵摇、横摇和艏摇方向的运动, 此时飞行器主要在垂荡方向上运动。当忽略其它自由度耦合的影响, 垂荡 (深度) 通道动力学模型可表示为

$$\dot{v}_w = 1/M_w (-D_{\text{Qw}} |v_w| \cdot v_w - D_{\text{Lw}} v_w - g_0 - d + T) \quad (8)$$

式中:  $v_w$  为垂向速度;  $M_w$  为垂向质量及附加质量系数;  $D_{\text{Lw}}$  为一次项水阻尼系数;  $D_{\text{Qw}}$  为二次项水阻尼系数;  $g_0$  为恢复力;  $d$  为外界环境扰动;  $T$  为前后两垂直推进器的垂向合成推力。

选取深度为状态变量  $x_1$ , 垂荡方向速度为状态变量  $x_2$ , 垂荡 (深度) 通道动力学模型可进一步表示为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{M_w} (-D_{\text{Qw}} |x_2| x_2 - D_{\text{Lw}} x_2 - g_0 - d + T) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (9)$$

## 2 基于非线性干扰观测器的反演滑模控制

本文所涉及的 UUV 外形为回转体形, 在高速行

驶的情况下采用水平舵对深度进行控制, 在低速或者悬停情况下执行任务时, 舵效下降, 故采用艏艉两个辅助垂直推进器进行深度控制。本文针对UUV在垂直面的垂荡方向通道, 设计了基于非线性干扰观测器的反演滑模控制器。该控制器分为2个部分, 第1部分为非线性干扰观测器(Nonlinear Disturbance Observer, NDO)的设计, 第2部分为反演滑模控制的设计(Backstepping Sliding Mode, BSSM)。设计的控制算法框图如图2所示。

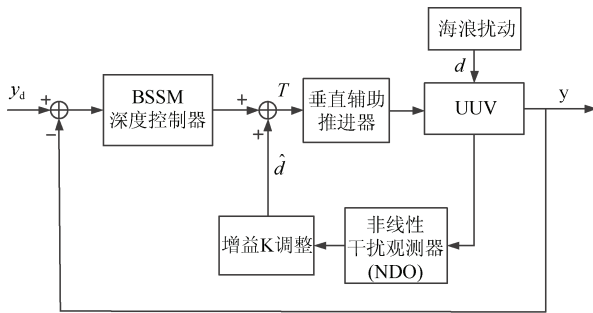


图2 控制算法框图

Fig. 2 Block diagram of control algorithm

## 2.1 非线性干扰观测器设计

定义 $\hat{d}$ 为 $d$ 的估计值, 取

$$\dot{\hat{d}} = K(d - \hat{d}) \quad (10)$$

定义辅助参量:

$$z = \hat{d} - q_0(x_2) \quad (11)$$

式中,  $q_0(x_2)$ 为待设计的非线性函数。

则 $\dot{z} = \dot{\hat{d}} - q_0(x_2)$ 。

根据UUV垂荡方向模型, 设计非线性干扰观测器为

$$\begin{cases} \dot{z} = K(D_{Qw} |x_2| x_2 + D_{Lw} x_2 - T) - K\hat{d} \\ \hat{d} = z + q_0(x_2) \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $z$ 为定义的辅助参量向量;  $K$ 为非线性观测器增益, 取 $q_0(x_2)$ 为

$$q_0(x_2) = KM_w x_2 \quad (13)$$

将式(13)代入式(12)得

$$\begin{aligned} \dot{z} &= K(M_w \dot{x}_2 + D_{Qw} |x_2| x_2 + D_{Lw} x_2 - T) - \\ &K(Z + KM_w x_2) = \\ &K(M_w \dot{x}_2 + D_{Qw} |x_2| x_2 + D_{Lw} x_2 - \\ &T + KM_w x_2) - KZ \end{aligned} \quad (14)$$

定义非线性干扰观测器的观测误差 $\tilde{d}$ 为

$$\tilde{d} = d - \hat{d} \quad (15)$$

通常在实际情况下没有干扰 $d$ 的微分先验值, 假设相对观测器的动态特性, 干扰的变化是缓慢的或者是常值, 即干扰 $d$ 满足

$$\dot{d} = 0 \quad (16)$$

根据干扰观测器(12)、观测误差(15)及条件(16)得:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{d}} &= \dot{d} - \dot{\hat{d}} = -\dot{\hat{d}} = -\dot{z} - q_0(x_2) = \\ &-K(D_{Qw} |x_2| x_2 + D_{Lw} x_2 + T - KM_w \dot{x}_2) + \\ &Kz - KM_w \dot{x}_2 = K(Z + KM_w x_2) - \\ &K(D_{Qw} |x_2| x_2 + D_{Lw} x_2 - T) \end{aligned} \quad (17)$$

将式(11)及式(12)代入式(17)得:

$$\dot{\tilde{d}} = K\hat{d} - Kd = -K\tilde{d} \quad (18)$$

可知干扰观测器系统的动态误差方程为

$$\dot{\tilde{d}} + K\tilde{d} = 0 \quad (19)$$

式(19)的解为

$$\tilde{d}(t) = \tilde{d}(t_0) \exp(Kt) \quad (20)$$

由于 $\tilde{d}(t_0)$ 值是确定的, 观测器的收敛精度取决于增益参数 $K$ 值。通过设计合适的增益 $K$ , 可使估计值 $\hat{d}$ 按指数收敛于干扰项 $d$ , 即 $\tilde{d}$ 有界收敛, 干扰观测器稳定。

采用干扰观测器后, 系统模型可表示

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{M_w} [-D_{Qw} |x_2| x_2 - D_{Lw} x_2 - g_0 - (\tilde{d} + \hat{d}) + T] \quad (21)$$

## 2.2 反演滑模控制器设计

为了便于研究, 将系统模型转换成如下形式:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{M_w} (-D_{Qw} |x_2| x_2 - D_{Lw} x_2 - g_0 - d + T) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (22)$$

设 $y_d$ 为UUV的深度控制指令, 根据反演控制设计思想, 结合滑模控制的相关理论, 对UUV的深度控制器进行设计, 主要包括2个步骤:

步骤1:

将控制系统的深度输出误差 $\varepsilon_1$ 定义为

$$\varepsilon_1 = y - y_d \quad (23)$$

对式(23)微分得

$$\dot{\varepsilon}_1 = \dot{y} - \dot{y}_d = \dot{x}_1 - \dot{y}_d \quad (24)$$

定义第1个Lyapunov函数:

$$V_1 = \frac{1}{2} \varepsilon_1^2 \quad (25)$$

定义虚拟控制量  $\alpha_1 = c_1 \varepsilon_1$ ，其中  $c_1$  为常数。

定义  $\varepsilon_2$  为

$$\varepsilon_2 = \dot{\varepsilon}_1 + \alpha_1 = \dot{x}_1 - \dot{y}_d + \alpha_1 \quad (26)$$

对式 (25) 微分，结合式 (24) 可得：

$$\dot{V}_1 = \varepsilon_1(\dot{x}_1 - \dot{y}_d) = \varepsilon_1(\varepsilon_2 - \alpha_1) = \varepsilon_1 \varepsilon_2 - c_1 \varepsilon_1^2 \quad (27)$$

式 (27) 中，当  $\varepsilon_2 = 0$  时， $\dot{V}_1$  为系统控制误差  $\varepsilon_1$  的二次函数，有  $\dot{V}_1 \leq 0$ 。因此，需要进行下一步设计。

步骤 2：

对式 (26) 进行求导得：

$$\dot{\varepsilon}_2 = \ddot{x}_1 - \ddot{y}_d + \dot{\alpha}_1 \quad (28)$$

结合式 (21) 与式 (28) 得：

$$\dot{\varepsilon}_2 = \frac{1}{M_w} (-D_{Qw} |x_2| x_2 - D_{Lw} x_2 - g_0 - d + T) - \ddot{y}_d + \dot{\alpha}_1 \quad (29)$$

定义第 2 个 Lyapunov 函数：

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} \sigma^2 \quad (30)$$

式 (30) 中， $\sigma$  为滑模面函数，定义为

$$\sigma = k_1 \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (31)$$

式中， $k_1$  为正常数。

设计改进的滑模趋近律为

$$\dot{\sigma} = -h(\sigma - \beta \cdot \tanh(\sigma)) \quad (32)$$

式 (32) 中  $h$  与  $\beta$  为正常数。改进的滑模趋近律采用了连续的双曲正切函数  $\tanh(\cdot)$  取代传统滑模控制中的不连续函数  $\text{sign}(\cdot)$ ，保证滑模控制的平滑性及连续切换性能，从而可削弱滑模控制本身抖振的影响。

$$\tanh(\sigma) = \frac{e^\sigma - e^{-\sigma}}{e^\sigma + e^{-\sigma}} \quad (33)$$

对式 (31) 求导得：

$$\dot{\sigma} = k_1(\dot{x}_1 - \dot{y}_d) + \dot{x}_1 - \dot{x}_d + \dot{\alpha}_1 \quad (34)$$

结合式 (27) 与式 (34)，对式 (30) 求导：

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \dot{V}_1 + \dot{\sigma} = \varepsilon_1 \varepsilon_2 - c_1 \varepsilon_1^2 + \dot{\sigma} = \\ & \varepsilon_1 \varepsilon_2 - c_1 \varepsilon_1^2 + \sigma(k_1 \dot{\varepsilon}_1 + \dot{\varepsilon}_2) = \\ & \varepsilon_1 \varepsilon_2 - c_1 \varepsilon_1^2 + \sigma[k_1(\varepsilon_2 - c_1 \varepsilon_1) + \\ & \frac{1}{M_w} (-D_{Qw} |x_2| x_2 - D_{Lw} x_2 - g_0 - d + T) - \ddot{y}_d + \dot{\alpha}_1] \quad (35) \end{aligned}$$

设计控制律为

$$\begin{aligned} T &= -k_1 M_w (\varepsilon_2 - c_1 \varepsilon_1) + D_{Qw} |x_2| x_2 + D_{Lw} x_2 + \\ & g_0 + \hat{d} + M_w (\ddot{y}_d - \dot{\alpha}_1) - M_w h (\sigma + \beta \cdot \tanh(\sigma)) \quad (36) \end{aligned}$$

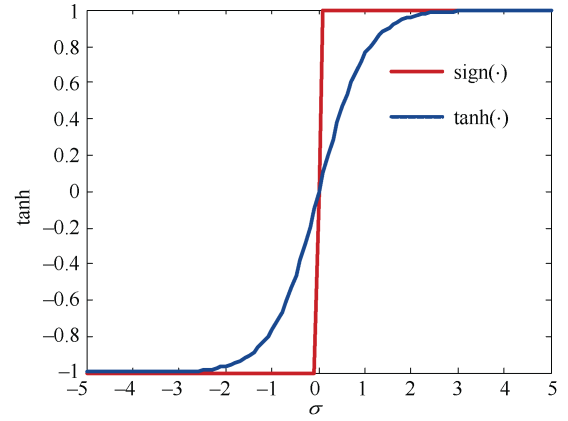


图 3 tanh 函数曲线

Fig. 3 Tanh function curve

### 2.3 控制系统设计稳定性分析

将控制律 (35) 与式 (36) 结合得：

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \varepsilon_1 \varepsilon_2 - c_1 \varepsilon_1^2 + \sigma[(d - \hat{d}) - h(\sigma + \beta \cdot \tanh(\sigma))] = \\ & \varepsilon_1 \varepsilon_2 - c_1 \varepsilon_1^2 - h\sigma^2 - h\beta\sigma \tanh(\sigma) + \tilde{d} |\sigma| \quad (37) \end{aligned}$$

取矩阵  $Q$

$$Q = \begin{bmatrix} c_1 + hk_1^2 & hk_1 - 1/2 \\ hk_1 - 1/2 & h \end{bmatrix} \quad (38)$$

则

$$\begin{aligned} \varepsilon^T Q \varepsilon &= [\varepsilon_1 \quad \varepsilon_2] \begin{bmatrix} c_1 + hk_1^2 & hk_1 - 1/2 \\ hk_1 - 1/2 & h \end{bmatrix} [\varepsilon_1 \quad \varepsilon_2]^T = \\ & c_1 \varepsilon_1^2 + hk_1^2 \varepsilon_1^2 + 2hk_1 \varepsilon_1 \varepsilon_2 - \varepsilon_1 \varepsilon_2 + h\varepsilon_2^2 = \\ & c_1 \varepsilon_1^2 - \varepsilon_1 \varepsilon_2 + h\sigma^2 \quad (39) \end{aligned}$$

式中， $\varepsilon^T = [\varepsilon_1 \quad \varepsilon_2]$

将式 (39) 代入式 (37) 得：

$$\dot{V}_2 \leq -\varepsilon^T Q \varepsilon - h\beta\sigma \tanh(\sigma) + \tilde{d} |\sigma| \quad (40)$$

式中： $h$  与  $\beta$  为正常数； $\sigma$  与  $\tanh(\sigma)$  的符号相同，即  $\sigma \tanh(\sigma) \geq 0$  成立，故  $h\beta\sigma \tanh(\sigma) \geq 0$  成立。由前文推导的干扰观测器稳定性可知，估计误差  $\tilde{d}$  最终有界。且  $|Q|$  可转换为

$$|Q| = h(c_1 + hk_1^2) - (hk_1 - 1/2)^2 = h(c_1 + k_1) - 1/4 \quad (41)$$

通过调整参数  $h$ 、 $c_1$  和  $k_1$  的值，可使  $|Q| > 0$ ，从而保证  $Q$  为正定矩阵。

则  $\dot{V}_2 \leq 0$ ，可知系统跟踪误差最终有界。



### 3 仿真实验验证与结果分析

为了验证本文提出的基于干扰观测器的反演滑模控制算法 (BSSM+NDO) 的有效性及扰动抑制性能, 采用基于 MATLAB/Simulink 仿真环境搭建仿真系统, 忽略其它自由度对深度通道耦合的影响, 对 UUV 的深度单通道进行仿真实验研究。仿真实验的对比控制器采用常规的滑模 (Sliding Mode Controller, SMC) 控制器, 并对 2 种控制器进行了 2 组仿真实验, 仿真的运行步长设置为 0.1 s。

在第 1 组仿真实验中, UUV 的前向速度设置为 0, 深度以阶跃信号的形式设定值为 5 m, 一阶波浪力设置为多正弦扰动与高斯白噪声叠加, 其多正弦信号包含的幅值分量分别为 50 N 与 50 N, 频率分量分别为 0.03 Hz 与 0.2 Hz, 高斯白噪声扰动力的幅值为 10 N。二阶波浪力设置为常值扰动以模拟波浪漂移力, 幅值为 20 N 并在 250 s 切换方向为 -20 N。考虑到实际使用中飞行器处于正浮力状态, 假设恢复力为 5 N。

第 2 组仿真实验采用阶跃叠加正弦信号的形式, UUV 的前向速度设置为 0, 深度设定值以 5 m 的阶跃信号为基础, 加上幅值为 1.5 m, 频率为 0.003 Hz 正弦信号, 扰动信号类型与第一组的形式相同, 用正弦扰动与高斯白噪声模拟一阶波浪力, 用随时间切换的常值扰动模拟二阶波浪漂移力。

仿真实验中的 UUV 深度通道模型相关参数如下:  $M_w = 495$ ,  $D_{Qw} = 304$ ,  $D_{Lw} = 0.161$ ,  $g_0 = 5$ 。且 UUV 的初始深度设定为 0.5 m。本文提出的基于干扰观测器的反演滑模算法的控制参数设置为  $k_1 = 16$ ,  $c_1 = 10$ ,  $h = 2.5$ ,  $\beta = 0.5$ ,  $K = 0.45$ 。

第 1 组深度阶跃仿真实验结果如图 4-7 所示。图 4 为海浪扰动下设定深度与实际深度控制效果图, 图 5 为海浪扰动下 2 种算法的深度控制误差图, 由实验效果图可知本文提出的 BSSM+NDO 算法不仅能较好的抑制多正弦形式的扰动, 还能较好地抑制常值扰动, 跟踪误差明显小于常规的 SMC 算法。经计算, 在仿真的 500 s 过程中 BSSM+NDO 算法误差的均方根为 0.329, 小于 SMC 算法的均方根 0.426。图 6 为垂直辅推的推力变化曲线。图 7 为设计的非线性干扰观测器对扰动的估计值。通过调整合适的

观测增益  $K$ , 估计值可较为快速准确的反映实际扰动量的变化趋势。

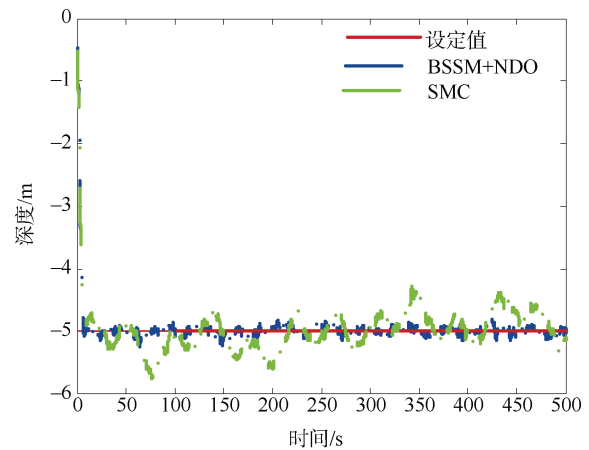


图 4 海浪扰动下深度运动曲线

Fig. 4 Depth motion curves under wave disturbance

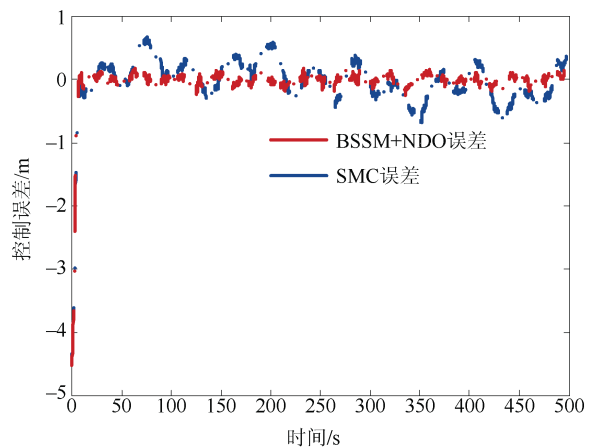


图 5 海浪下深度控制误差曲线

Fig. 5 Depth control error curves under wave disturbance

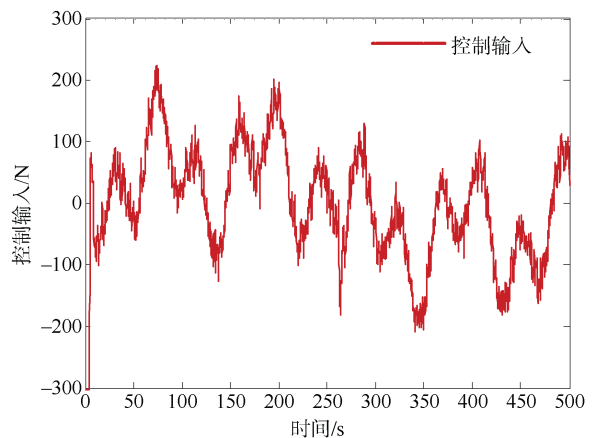


图 6 垂直辅推推力变化曲线

Fig. 6 Vertical auxiliary thrust change curve

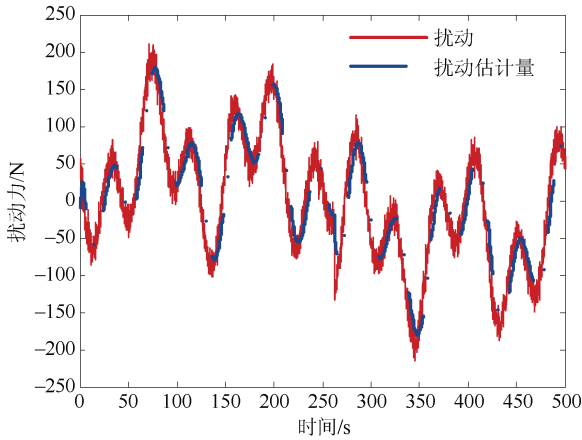


图 7 干扰观测器曲线  
Fig. 7 Disturbance observer curves

第 2 组深度阶跃叠加正弦的仿真实验结果如图 8-11 所示。图 8 为海浪扰动下设定深度与实际深度控制曲线，图 9 为海浪扰动下的 2 种算法的深度控制误差曲线，BSSM+NDO 算法的控制误差明显小于 SMC 算法的控制误差，经计算，在仿真的 500 s 过程中 BSSM+NDO 算法误差的均方根为 0.326，小于 SMC 算法的均方根 0.418。图 10 为垂直辅推的推力变化曲线。图 11 为设计的非线性干扰观测器对扰动的估计值，与实验 1 对比可知，非线性干扰观测器在设定复杂深度变化曲线时仍能较快速准确的反映实际扰动变化值。

通过实验 2 与实验 2 可知，本文提出的 BSSM+NDO 算法能够较好的抑制波浪扰动，可满足复杂浅水环境作业下的深度控制要求。

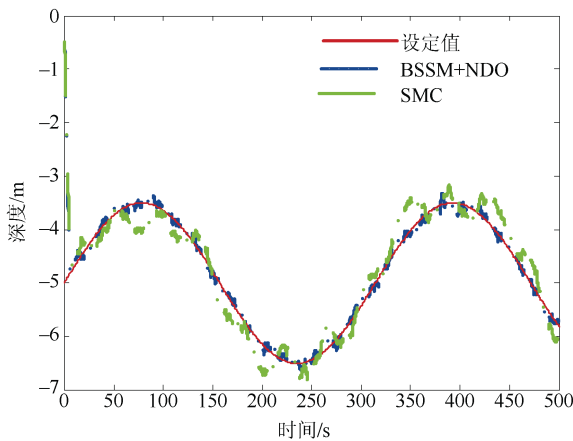


图 8 海浪扰动下深度运动曲线  
Fig. 8 Depth motion curves under wave disturbance

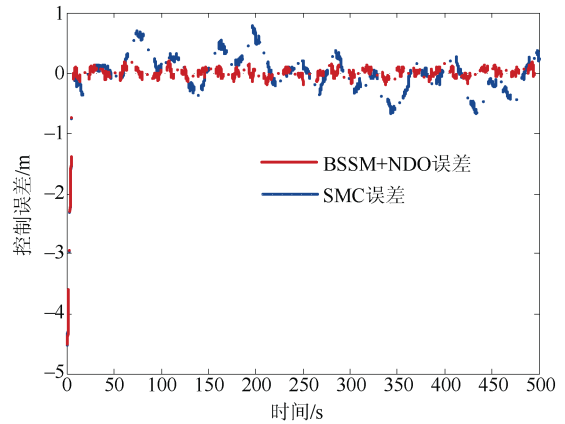


图 9 海浪下深度控制误差曲线  
Fig. 9 Depth control error curves under wave disturbance

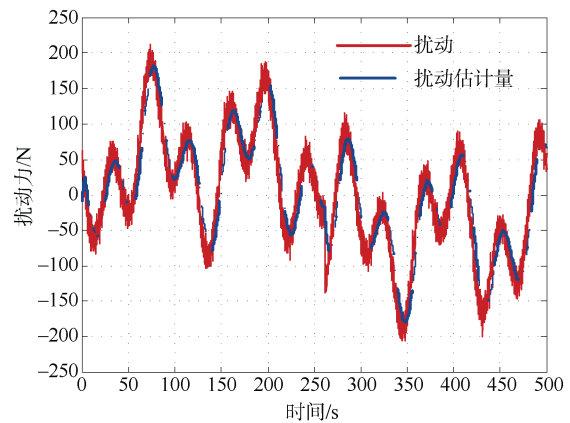


图 10 干扰观测器曲线  
Fig. 10 Disturbance observer curves

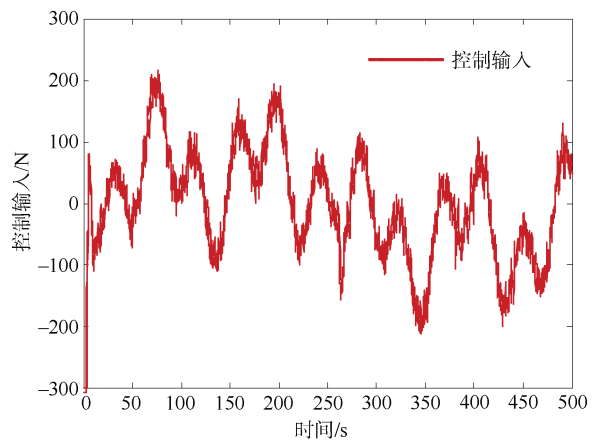


图 11 垂直辅推推力变化曲线  
Fig. 11 Vertical auxiliary thrust change curve

#### 4 结束语

针对 UUV 在浅水海洋环境下的高精度、强鲁棒性的悬停作业需求，本文提出一种基于 NDO 的反演

滑模控制算法。该算法结合了 NDO 与反演滑模控制器两者的优势, 通过 NDO 对时变海浪扰动与系统的模型不确定进行有效地估计进而增强系统的扰动抑制能力, 并证明了 NDO 的指数收敛特性, 在此基础上, 采用了反演滑模控制器, 提高控制精度, 将双曲正切函数引入到滑模趋近律降低滑模抖振。最后通过实验结果表明, 相比传统的滑模控制算法, 本文提出的控制方法可有效地抑制外部海浪扰动, 提高深度控制精度。

### 参考文献

- [1] 孙彧, 潘宣宏, 王幸军, 等. 无人潜航器装备技术发展及作战运用研究[J]. 舰船科学技术, 2023, 45(21): 105-109.
- [2] 邱志明, 马炎, 孟祥尧, 等. 水下无人装备前沿发展趋势与关键技术分析[J]. 水下无人系统学报, 2023, 31(1): 1-9.
- [3] LI J Y, BIAN X Y, HUANG H, et al. Hybrid visual servoing control for underwater vehicle manipulator systems with multiple cameras[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2024, 54(3): 1742-1754.
- [4] YANG N K, CHANG D, JOHNSON-ROBERSON M, et al. Energy-optimal control for autonomous underwater vehicles using economic model predictive control[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2022, 30(6): 2377-2390.
- [5] QIAO L, ZHANG W D. Double-loop integral terminal sliding mode tracking control for UUVs with adaptive dynamic compensation of uncertainties and disturbances[J]. IEEE Journal of Ocean Engineering, 2019, 44(1): 29-53.
- [6] SMALLWOOD D A, WHITCOMB L L. Model-based dynamic positioning of underwater robotic vehicle: theory and experiment[J]. IEEE Journal of Ocean Engineering, 2004, 29(1): 169-186.
- [7] 葛晖, 敬忠良. 海流环境下全驱动自主水下航行器环境最优动力定位控制[J]. 上海交通大学学报, 2011, 45(7): 961-965.
- [8] 高宏博, 戴晓强, 赵强, 等. 一种水下探伤机器人动力定位控制方法[J]. 计算机与数字工程, 2023, 50(3): 644-649.
- [9] 谢争明, 曾庆军, 朱志宇, 等. 全驱动 AUV 动力定位系统滑模控制研究[J]. 扬州大学学报: 自然科学与工程版, 2023, 50(3): 644-649.
- [10] RIEDEL J S. Shallow water station keeping of an autonomous underwater vehicle: the experimental results of a disturbance compensation controller, ADA436011[R]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2005.
- [11] 高剑, 徐德民, 李俊, 等. 自主水下航行器轴向运动的自适应反演滑模控制[J]. 西北工业大学学报, 2007, 25(4): 552-555.
- [12] 高剑, 赵宁宁, 徐德民, 等. 水下航行器轴向运动的自适应积分反演跟踪控制[J]. 兵工学报, 2008, 29(3): 374-378.
- [13] 窦刚, 姜文刚, 张楠楠, 等. 海流环境自主水下机器人动力定位控制器设计[J]. 重庆理工大学学报: 自然科学与工程版, 2018, 32(11): 179-186.
- [14] 胡守一. UUV 水下回收自抗扰控制方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
- [15] TANG J, DANG Z K, DENG Z C, et al. Adaptive fuzzy nonlinear integral sliding mode control for unmanned underwater vehicles based on ESO[J]. Ocean Engineering, 2022, 266(5): 113154.
- [16] 赵洪坛, 朱大奇. UUV 水下模型预测滑模跟踪控制算法[J]. 控制工程, 2022, 29(7): 1196-1203.
- [17] FOSSEN T I. Marine Control Systems: Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles[M]. Trondheim: Marine Cybernetics, 2002.
- [18] FOSSEN T I. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control[M]. Chichester: John Wiley and Sons Ltd, 2011.
- [19] 施生达. 潜艇操纵性[M]. 北京: 国防工业出版社, 2021.
- [20] 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.

(责任编辑: 张曼莉)