

【引用格式】胡红波, 李晨. 基于自抗扰的双环路 UUV 航向角控制方法[J]. 数字海洋与水下攻防, 2024, 7(2): 170-176.

基于自抗扰的双环路 UUV 航向角控制方法

胡红波, 李 晨

(海军装备部驻宜昌地区军事代表室, 湖北 宜昌 443003)

摘要 针对水下无人航行器 (UUV) 受到海流海浪等外部扰动与内部模型不确定导致航向角控制品质下降的问题, 提出一种基于自抗扰 (ADRC) 的双环路航向角控制方法。首先, 建立了 UUV 的六自由度动力学、运动学模型与水平面动力学模型。然后, 设计了一种非线性控制器, 将自抗扰控制与双控制环路相结合, 针对系统航向控制所受内部与外部等非线性因素的影响, 采用扩张状态观测器对“总和”扰动进行观测与补偿。在采用自抗扰控制的航向角反馈控制回路的基础上, 增加航向角速度内环, 降低系统对扰动的灵敏度, 改造被控对象的传递函数, 为外环路提供良好的被控对象模型。最后, 通过仿真实验验证了该控制方法的有效性。

关键词 水下无人航行器; 自抗扰控制; 双控制环路; 非线性控制器

中图分类号 U664.82

文献标识码 A

文章编号 2096-5753(2024)02-0170-07

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2024.02.005

A Dual Loop Heading Angle Control Method of UUVs Based on Active Disturbance Rejection Control

HU Hongbo, LI Chen

(Military Representative Bureau of the Naval Armaments Department in Yichang, Yichang 443003, China)

Abstract A dual loop heading angle control method based on Active Disturbance Rejection (ADRC) is proposed to address the issue of degraded heading angle control quality caused by external disturbances such as ocean currents and waves and internal model uncertainties for unmanned underwater vehicles (UUV). Firstly, a six-degree-of-freedom dynamic and kinematic model and a horizontal plane dynamic model of the UUV are established. Then, a nonlinear controller is designed that combines ADRC with dual control loops. To tackle with the influences of internal and external nonlinear factors on system heading control, an extended state observer is used to observe and compensate for the "sum" disturbance. On the basis of the heading angle feedback control loop using ADRC, an inner loop of heading angle velocity is added, the sensitivity of the system to disturbances is reduced, and the transfer function of the controlled object is modified to provide a good controlled object model for the outer loop. Finally, the effectiveness of the control method is verified through simulation experiments.

Key words unmanned underwater vehicle; ADRC; dual control loop; nonlinear controller

0 引言

水下无人航行器 (Unmanned Underwater Vehicle,

UUV) 是一种智能化的无人水下运载平台, 在海洋环境监测、石油勘探、地形测绘、搜索搜救等民用科技领域有着广阔的应用前景, 在监视测量、态势

收稿日期: 2023-10-23

作者简介: 胡红波 (1979-), 男, 博士, 工程师, 主要从事 UUV 总体技术研究。

感知、水雷侦察等高科技战争军事领域的作用也日益显著^[1-2]。UUV 是典型的多变量、强耦合非线性系统, 在实际复杂海洋环境中, 会受到海流、海浪的影响, 且自身模型存在参数摄动与不确定导致其运动姿态变化^[3-4]。因此, 如何克服上述技术难题实现高精度的 UUV 姿态跟踪控制, 引起各国相关领域科研人员的高度重视。

UUV 大多采用 PID 控制算法实现姿态的控制, 虽然 PID 控制器在工程上易实现, 具有一定的适应性与鲁棒性, 但在面对海洋环境中较强的非线性扰动时, 控制品质会显著下降。为此, REZAZADEGAN 等人提出了一种自适应鲁棒控制器, 以满足 UUV 的六自由度的轨迹跟踪控制^[5]。DO 等人提出一种基于 Lyapunov 函数与反步设计法的反馈控制器, 解决了欠驱动 UUV 的水平面的轨迹跟踪与控制器全局渐进收敛问题^[6]。PARK 等人利用自适应神经网络算法逼近 UUV 水动力的阻尼项、模型不确定及洋流扰动, 利用 Lyapunov 稳定性理论分析了基于神经网络的非线性控制器的收敛性^[7]。BESSA 等人针对 UUV 的轨迹跟踪问题提出了一种自适应模糊算法, 利用自适应模糊项补偿被控对象的模型不确定与外部扰动, 通过 Lyapunov 稳定性理论及 Barbalat 引理证明了控制系统的稳定性^[8]。SHEN 等人采用模型预测控制方法, 利用计算资源在线优化与基于 Lyapunov 的反步控制律, 改善 UUV 的轨迹跟踪性能^[9]。KIM 等人针对 UUV 在复杂海洋环境下的模型不确定与洋流扰动, 设计了一种积分滑模控制器实现了其轨迹抗扰跟踪控制^[10]。ZAKERI 等人验证了滑模控制相对反馈线性化控制器的优势, 利用不连续函数减轻滑模控制的抖振效应^[11]。YAN 等人提出一种终端滑模用于航行器在参数摄动与外扰动条件下的位置与速度控制, 控制系统的位置与速度误差在有限时间内收敛^[12]。李文魁等人采用改进的 S 面控制, 降低了控制器参数的整定难度, 提高了 UUV 的抗干扰性能^[13]。总的来说, 针对 UUV 系统的控制策略, 主要有 PID 控制、反步控制、自适应控制、模糊控制、S 面控制和神经网络控制等。

自抗扰控制由学者韩京清于 20 世纪 90 年代提

出, 用于解决被控对象的内部与外部不确定性非线性扰动引起的控制性能下降问题^[14]。黄健等人采用线性自抗扰控制, 提升了 UUV 航向角的动静特性与鲁棒性^[15]。胡守一等人将自抗扰控制应用在 UUV 的自主回收控制, 提高了水平面与垂直面的抗扰性能与解耦效果^[16]。GUO 等人将自抗扰控制技术与反步积分滑模相结合, 实现了 UUV 的空间三维路径跟踪控制任务^[17]。TANG 等人结合了自抗扰控制与模糊积分滑模控制技术, 有效地提升了 UUV 鲁棒性与抗扰性能^[18]。本文针对航行器在复杂的海洋环境中会受到浪与流等干扰, 且模型摄动及水动力参数难以精准获取, 会造成航向角控制的偏差较大问题, 本文提出一种将双闭环控制与自抗扰控制相结合的算法, 在无需对系统与扰动进行精确建模的前提下, 可有效地提高航向角的控制精度与抗扰性能。相比常规的单回路自抗扰控制, 双回路控制可减轻扩张状态观测器(ESO)的观测负担, 降低系统对扰动的灵敏度, 具有更强的鲁棒性, 采用的非线性 ESO 相比线性 ESO 具有更准确的扰动估计性能。本文首先对水下无人航行器进行建模, 然后设计了该控制算法, 最后通过仿真实验验证该方法的有效性。

1 水下无人航行器建模

1.1 动力学与运动学模型

水下无人航行器的六自由度动力学模型为^[19]

$$M_{RB} \cdot \dot{v} + C_{RB} \cdot v + M_A \cdot \dot{v} + C_A \cdot v + D_v \cdot v + g(\eta) = \tau \quad (1)$$

式中: M_{RB} 为 UUV 刚体本身的惯性矩阵; C_{RB} 为刚体的科氏力和向心力矩阵; M_A 为附加的水动力惯性矩阵; C_A 为附加质量部分引起的科氏力矩阵; D_v 为阻尼矩阵; $g(\eta)$ 为广义恢复力矩阵; v 为刚体的速度; \dot{v} 为刚体的加速度; τ 为控制力矩。

水下无人航行器的运动学模型^[20]:

$$\begin{cases} \dot{x} = u \cdot \cos \psi - v \cdot \sin \psi \\ \dot{y} = u \cdot \sin \psi + v \cdot \cos \psi \\ \dot{\psi} = r \end{cases} \quad (2)$$

图 1 为 UUV 结构, 图中: $\{E\}$ 为惯性坐标系; $\{O\}$ 为 UUV 艇体坐标系; $\eta = (x, y, \psi)^T$ 为 UUV 在惯性坐标系下的位置向量。

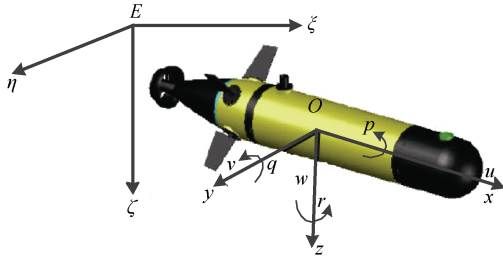


图 1 UUV 结构示意图

Fig. 1 UUV schematic diagram

1.2 水平面动力学模型

本文针对水平面运动进行分析,考虑在某一特定深度的平面运动,忽略舵的安装与加工误差对刚体的影响,忽略横滚效应,建立某一深度的水平面的动力学模型^[21]:

$$\begin{cases} (m - X_{\dot{u}})\dot{u} = X_{|u|u}|u| + (X_{vr} + m)vr + \\ X_{rr}r^2 + X_{prop} + d_u \\ (m - Y_{\dot{v}})\dot{v} - Y_{\dot{r}}\dot{r} = Y_{|v|v}|v| + Y_{|r|r}|r| + \\ (Y_{ur} - m)ur + Y_{uv}uv + d_v \\ (I_Z - N_{\dot{r}})\dot{r} - N_{\dot{v}}\dot{v} = N_{|v|v}|v| + N_{|r|r}|r| + \\ N_{ur}ur + N_{uv}uv + \\ N_{urr}u^2\delta + d_r \end{cases} \quad (3)$$

式中: m 为被控对象 UUV 的质量; $X_{\dot{u}}$ 、 $Y_{\dot{v}}$ 、 $Y_{\dot{r}}$ 、 $N_{\dot{v}}$ 、 $N_{\dot{r}}$ 为流体动力附加质量; I_Z 为 UUV 绕 Z 轴的转动惯量; $X_{|u|u}$ 、 $Y_{|v|v}$ 、 $Y_{|r|r}$ 、 $N_{|v|v}$ 、 $N_{|r|r}$ 为流体动力阻尼系数; X_{vr} 、 X_{rr} 、 Y_{ur} 、 Y_{uv} 、 N_{ur} 、 N_{uv} 为科氏力系数; N_{urr} 为垂直舵舵效系数; u 、 v 分别为 UUV 在图 1 所示坐标系 XOY 下的纵向、横向线速度, r 为航向角速度, \dot{u} 、 \dot{v} 分别为 UUV 的纵向、横向线加速度, δ 为垂直舵舵角, X_{prop} 为主推螺旋桨输出的推力。 d_u 、 d_v 、 d_r 分别为前向、右向、航向的未建模动态与外部洋流扰动。

对 UUV 系统作如下假设:

设定的参考输入指令信号有界且可导,且其导数有界。

外界不确定洋流等 d_u 、 d_v 、 d_r 为有界扰动,存在常数 $\xi_{u,v,r}$, 满足 $|d_u| \leq \xi_u$ 、 $|d_v| \leq \xi_v$ 、 $|d_r| \leq \xi_r$ 。

UUV 驱动器存在饱和,航行器的螺旋桨推力有界,满足 $X_{prop} \leq X_{pmax}$,航行器的舵角有界,满

足 $\delta \leq \delta_{max}$,舵机可用如下模型表示:

$$T_r \dot{\delta}_\tau = K_r \delta_r - \delta_\tau \quad (4)$$

$$\delta_\tau = \begin{cases} \tau_{max} & \tau > \tau_{max} \\ \tau & \tau_{min} \leq \tau \leq \tau_{max} \\ \tau_{min} & \tau < \tau_{min} \end{cases} \quad (5)$$

式中: δ_r 为指令舵角; T_r 为舵机时间常数; K_r 为舵机控制增益。

2 基于自抗扰的航向角双闭环控制器设计

本文所涉及的欠驱动 UUV 外形为回转体形,与鱼雷外形相似。本文采用的航向角控制结构图如图 2 所示,欠驱动 UUV 航向角采用双闭环控制策略。控制环路的外环为航向角控制回路,采用自抗扰控制器,内环为航向角速度控制回路,采用 PID 控制器。航向角速度内环可增加系统的阻尼,改造被控对象的传递函数,降低系统对扰动的灵敏度,为外环路提供良好的被控对象模型,而外部航向角自抗扰控制环路可有效地提升控制精度与鲁棒性。

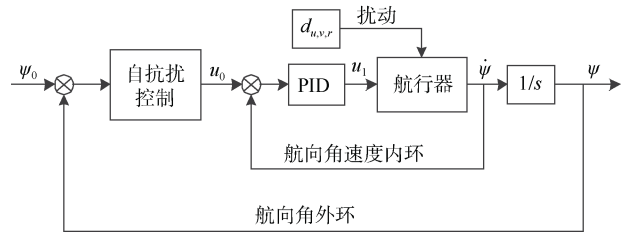


图 2 航向角控制框图

Fig. 2 Block diagram of heading angle control

2.1 外环路自抗扰控制器

自抗扰控制框图如图 3 所示,由 3 个部分组成,包括微分跟踪器、扩张状态观测器及非线性状态误差反馈控制律,微分跟踪器的作用是将输入指令信号平滑滤波,并提取其微分量,安排航向角的过渡

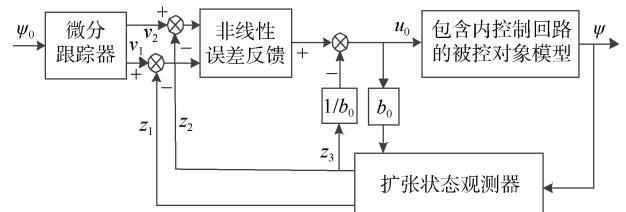


图 3 基于自抗扰控制的外环路控制框图

Fig. 3 External loop control block diagram based on ADRC

过程。扩张状态观测器对航向角的实时量进行观测, 对未建模动态、外部扰动及时变慢扰动等非线性不确定因素进行观测与估计。非线性状态误差反馈控制律根据微分跟踪器提取与观测器估计之间误差的非线性组合以及观测器估计的扰动量补偿生成的控制律。

微分跟踪器的安排过渡可减小初始误差, 使系数控制输出量缓慢增加, 避免初始阶段控制量过大对系统造成较大的冲击。定义等 $x_1 = \psi$, $x_2 = \dot{\psi} = r$, $y = x_1$ 。微分跟踪器的离散化形式可表示为

$$\begin{cases} x_1(k+1) = x_1(k) + h \cdot x_2(k) \\ x_2(k+1) = x_2(k) + h \cdot \text{fhan}(x_1(k) - \psi_0(k), x_2(k), r, h) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\psi_0(k)$ 是输入的航向角期望值; h 为采样步长; $x_1(k)$ 跟踪输入信号是 $v(k)$; r 是速度因子, 可调节跟踪速度的快慢与滤波效果。 $\text{fhan}(x_1(k) - v(k), x_2(k), r, h)$ 为最速综合控制函数, 可表示为式 (7) - (9):

$$\begin{cases} y = x_1 + h \cdot x_2 \\ d_0 = h \cdot d \\ d = r \cdot h \\ a_0 = \sqrt{d^2 + 8r|y|} \end{cases} \quad (7)$$

$$a = \begin{cases} x_2 + (a_0 - d)\text{sign}(y)/2 & |y| > d_0 \\ x_2 + y/h & |y| \leq d_0 \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{fhan} = \begin{cases} r \cdot \text{sign}(a) & |a| > d \\ r \cdot a/d & |a| \leq d \end{cases} \quad (9)$$

扩张状态观测器(ESO)是自抗扰控制的核心, 通过对航行器系统所受到“总和扰动”进行观测与估计, 然后在控制环路中进行补偿。通过 ESO, 可将含有受到外部扰动、内部模型不确定的非线性系统补偿成线性积分串联标准系统。采用 ESO 的三阶形式:

$$\begin{cases} e(k) = z_1(k) - y(k) \\ z_1(k+1) = z_1(k) + h \cdot (z_2(k) - \beta_1 e) \\ z_2(k+1) = z_2(k) - h \cdot (b \cdot u - \beta_2 \cdot \text{fal}(e(k), 0.5, \delta) + z_3(k)) \\ z_3(k+1) = z_3(k) - h \cdot \beta_3 \cdot \text{fal}(e(k), 0.25, \delta) \end{cases} \quad (10)$$

式中: z_1 、 z_2 为状态变量的估计值; z_3 为总和扰动的估计值; b_0 为扰动补偿增益量; $\text{fal}(e, \alpha, d)$ 函数为

$$\text{fal}(e, \alpha, d) = \begin{cases} ed^{(\alpha-1)} & |e| > d \\ |e|^{\alpha \cdot \text{sign}(e)} & |e| \leq d \end{cases} \quad (11)$$

非线性状态反馈控制律为

$$\begin{cases} e_1(k) = v_1(k) - z_1(k) \\ e_2(k) = v_2(k) - z_2(k) \\ u_0(k) = k_1 \cdot \text{fal}(e_1(k), \alpha_1, \delta) + k_2 \cdot \text{fal}(e_2(k), \alpha_2, \delta) \\ u(k) = u_0(k) - z_3(k)/b_0 \end{cases} \quad (12)$$

式中: e_1 、 e_2 分别为航向角误差与航向角速度误差; k_1 、 k_2 为反馈控制增益; u_0 为非线性反馈控制律, 结合了微分跟踪器给出的安排过渡和扩张状态观测器的状态估计, 将状态误差进行非线性组合, 可有效地减小系统的跟踪误差。

在 $\text{fal}(e, \alpha, d)$ 函数中, 当 $\alpha > 1$ 时具有小误差小增益的特性, 当 $\alpha < 1$ 时具有小误差大增益的特性。控制器利用 $\text{fal}(e, \alpha, d)$ 函数具有非光滑的误差反馈特性, 可用于改善闭环系统的性能。当 $d=1$, α 取不同值时, $\text{fal}(e, \alpha, d)$ 函数的非光滑特性如图 4 所示。

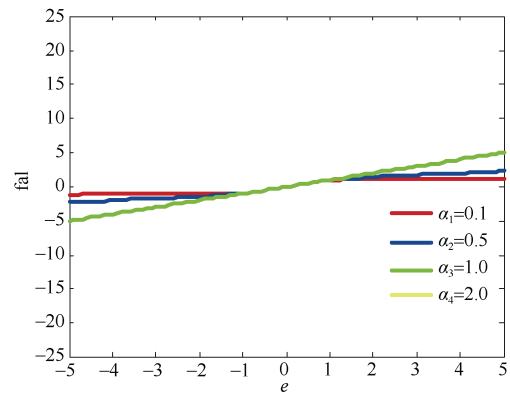


图 4 fal 函数特性

Fig. 4 Characteristics of fal function

2.2 内环路 PID 控制器

与外环路不同, 内环路采用典型的 PID 控制器, 如图 5 所示。航向角速度内部回路的反馈控制律:

$$\begin{cases} e_3(k) = u(k) - z_2(k) \\ u_1(k) = k_3 \cdot e_3(k) + k_4 \cdot (e_3(k) - e_3(k-1)) + \\ k_5 \cdot \sum e_3(k) \end{cases} \quad (13)$$

式中: e_3 为航向角速度误差; k_3 、 k_4 、 k_5 为反馈控制增益; u_1 为航向角速度误差反馈控制律。

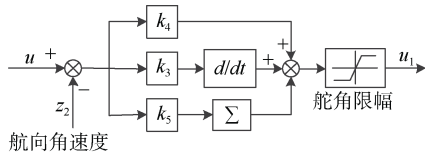


图 5 内环路 PID 控制框图

Fig. 5 Block diagram of inner loop PID control

3 仿真实验验证与结果分析

为了验证本文提出控制器的有效性,采用仿真实验的验证所提出轨迹跟踪控制器的有效性与鲁棒性。仿真实验中的被控对象模型主要动态系统相关参数如下:

$$\begin{aligned}
 m &= 45 \text{ kg}, & Y_{\dot{v}} &= -39 \text{ kg}, \\
 X_{\dot{u}} &= -1.25 \text{ kg}, & N_{\dot{r}} &= -5.32 \text{ kg}, \\
 N_{\dot{v}} &= 2.2 \text{ kg} \cdot \text{m}, & X_{\dot{u}} &= 17 \text{ kg/s}, \\
 X_{u|u|} &= 2.34 \text{ kg/m}, & Y_{\dot{v}} &= 72 \text{ kg/s}, \\
 Y_{v|v|} &= 148 \text{ kg/m}, & N_{\dot{r}} &= 8.87 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}, \\
 N_{r|r|} &= 13.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, & Y_{ur} &= 6.89 \text{ kg/rad}, \\
 X_{vr} &= 6.56 \text{ kg/rad}, & N_{ur} &= -2.3 \text{ kg} \cdot \text{m/rad}, \\
 N_{uv} &= -25.5 \text{ kg} \cdot \text{m/rad}, & I_{zz} &= 4.15 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, \\
 I_{zz} &= 4.15 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, & N_{uur} &= -7.37 \text{ kg/rad}.
 \end{aligned}$$

仿真实验采用的控制参数的参数如下:

$$\begin{aligned}
 k_1 &= 2.3, & k_2 &= 3.2, & k_3 &= 1.2, & k_4 &= 3.8, & b_0 &= 6.4, \\
 \alpha_1 &= 0.5, & \alpha_2 &= 1.5, & \delta &= 1.0, & \beta_1 &= 150, & \beta_2 &= 500, \\
 \beta_3 &= 1500.
 \end{aligned}$$

采用的对比控制器为 PID 控制器, 参数如下: $k_p = 3.1, k_i = 0.25, k_d = 5.6$ 。

第 1 组仿真实验中, UUV 设定的前向速度为 3.0 kn。如图 6-9 为仿真实验结果。图 6 为提出控制器下的期望航向角与实际航向角, 图 7 为提出控制器下垂直舵角的响应指令, 图 8 为 PID 控制器下的期望航向角与实际航向角, 图 9 为 PID 控制器下垂直舵角的响应指令。由实验结果可知, 在双环路自抗扰控制器的作用下, 航向角能够准确的跟踪上期望航向角信号, 跟踪误差保持在 $\pm 1.8^\circ$ 以内, 而 PID 控制器存在着 $\pm 3.5^\circ$ 的误差波动。自抗扰控制器的角度跟踪性能优于 PID 控制器。

第 2 组仿真实验中, UUV 设定的前向速度为 3.0 kn, 增加了 2 kn 的 90° 洋流扰动。如图 10-13 为仿真实验结果。图 10 为提出控制器下的期望航

向角与实际航向角, 图 11 为提出控制器下垂直舵角的响应指令, 图 12 为 PID 控制器下的期望航向角与实际航向角, 图 13 为 PID 控制器下垂直舵角的响应指令。由实验结果可知, 在自抗扰控制器的作用下, 航向角能够准确的跟踪上期望航向角信号, 误差保持在 $\pm 2^\circ$ 以内, 而 PID 控制器由于受到洋流的扰动, 跟踪误差增大, 存在着 $\pm 4^\circ$ 的波动误差。可知, 自抗扰控制器在洋流扰动下的角度跟踪性能优于 PID 控制器。

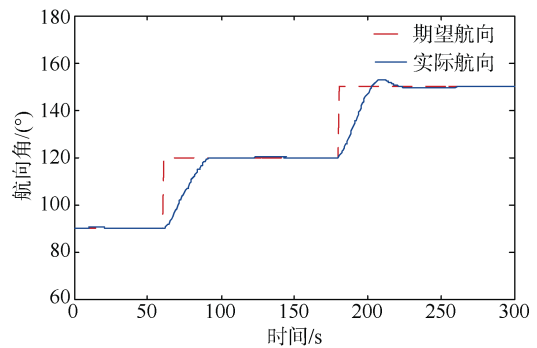


图 6 ADRC 航向角曲线

Fig. 6 Heading angle curves of ADRC

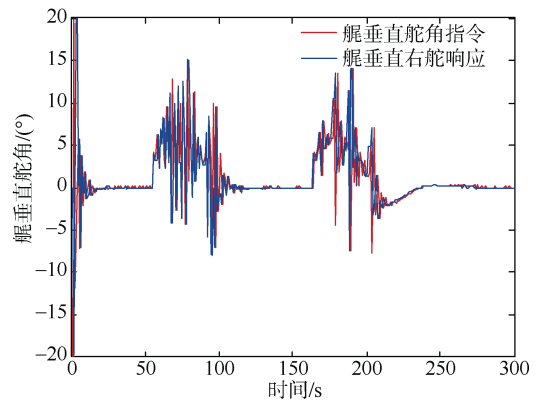


图 7 ADRC 舵角曲线

Fig. 7 Rudder angle curves of ADRC

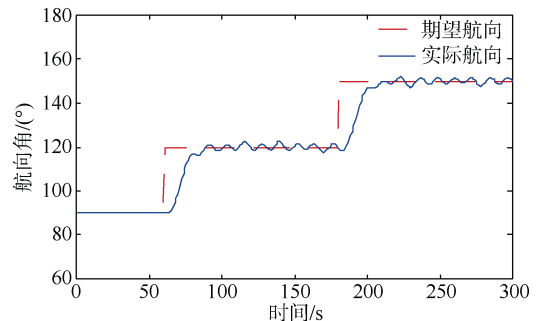


图 8 PID 航向角曲线

Fig. 8 Heading angle curves of PID

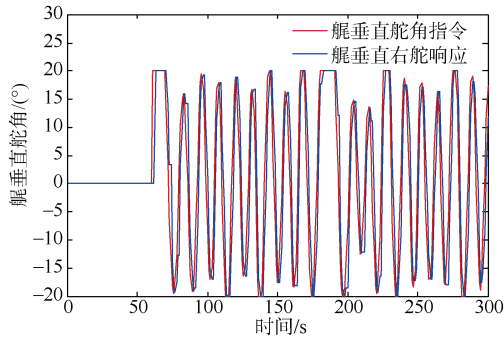


图 9 PID 舵角曲线

Fig. 9 Rudder angle curves of PID

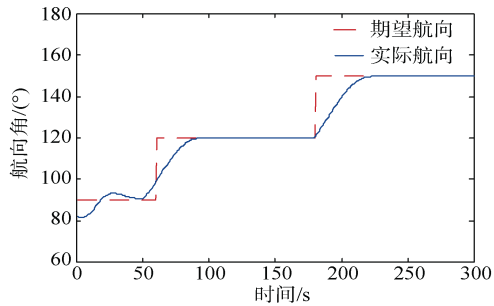


图 10 洋流下 ADRC 航向角曲线

Fig. 10 Heading angle curves of ADRC under ocean currents

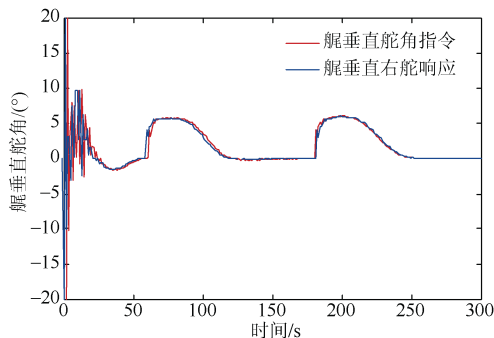


图 11 洋流下 ADRC 舵角曲线

Fig. 11 Rudder angle curves of ADRC under ocean currents

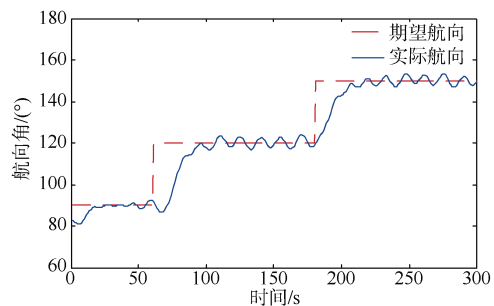


图 12 洋流下 PID 航向角曲线

Fig. 12 Heading angle curves of PID under ocean currents

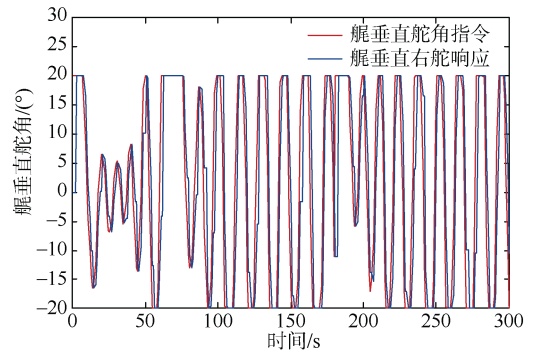


图 13 洋流下 PID 舵角曲线

Fig. 13 Rudder angle curves of PID under ocean currents

4 结束语

本文提出一种基于 ADRC 的双环路航向角控制方法, 用于提升 UUV 受到海流海浪等外部扰动与内部模型不确定状态下的航向角控制性能。该控制方法将自抗扰控制与双控制环路相结合, 包括基于自抗扰的航向角外部控制环路与基于 PID 的航向角速度内部控制环路。自抗扰外环控制利用 ESO 估计与补偿 UUV 所受内部与外部等非线性扰动, 提升系统的控制精度与扰动抑制能力。经过内部航向角速度控制环路改造后的被控对象模型, 可增加系统的阻尼, 降低系统对扰动的灵敏度, 进一步提升扰动抑制能力。通过半实物仿真平台实验, 在洋流扰动条件下与常规 PID 控制算法对比, 验证了该算法的有效性与优越性。

参考文献

- [1] 吴有生, 赵羿羽, 郎舒妍, 等. 智能无人潜水器技术发展研究[J]. 中国工程科学, 2020, 22 (6): 26-31.
- [2] 李硕, 吴园涛, 李琛, 等. 水下机器人应用及展望[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37 (7): 910-920.
- [3] 艳彤, 郑荣, 于闯. 过渡目标值的非线性 PID 对自治水下机器人变深运动的稳定控制[J]. 控制理论与应用, 2018, 35 (8): 1120-1125.
- [4] 何彦霖, 董明利, 孙广开, 等. 复合式驱动小型两栖机器人水下运动控制研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40 (1): 219-226.
- [5] REZAZADEGAN F, SHOJAEI K, SHEIKHOLESLAM F, et al. A novel approach to 6-DOF adaptive trajectory tracking control of an AUV in the presence of parameter uncertainties[J]. Ocean Engineering, 2015, 107: 246-258.
- [6] DO K D, JIANG Z P, PAN J, et al. A global output-feedback controller for stabilization and tracking

- of underactuated ODIN: a spherical underwater vehicle[J]. *Automatica*, 2004, 40 (1): 117-124.
- [7] PARK B S. Neural network-based tracking control of underactuated autonomous underwater vehicles with model uncertainties[J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 2015, 137 (2): 021004.
- [8] BESSA W M, DUTRA M S, KREUZER E. An adaptive fuzzy sliding mode controller for remotely operated underwater vehicles[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2010, 58 (1): 16-26.
- [9] SHEN C, SHI Y, BUCKHAM B. Trajectory tracking control of an autonomous underwater vehicle using Lyapunov-based model predictive control[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 65 (7): 5796-5805.
- [10] KIM M, JOE H, KIM J, et al. Integral sliding mode controller for precise manoeuvring of autonomous underwater vehicle in the presence of unknown environmental disturbances[J]. *International Journal of Control*, 2015, 88 (10): 2055-2065.
- [11] ZAKERI E, FARAHAT S, MOEZI S A, et al. Robust sliding mode control of a mini unmanned underwater vehicle equipped with a new arrangement of water jet propulsions: simulation and experimental study[J]. *Applied Ocean Research*, 2016, 59 (C): 521-542.
- [12] YAN Z P, YU H M, ZHANG W, et al. Globally finite-time stable tracking control of underactuated UUVs[J]. *Ocean Engineering*, 2015, 107: 132-146.
- [13] 李文魁, 周铸, 宦爱奇. 自主水下航行器自适应 S 面三维轨迹跟踪的仿真实验[J]. *中国舰船研究*, 2022, 17 (4): 1673-1685.
- [14] HAN J Q. From PID to active disturbance rejection control[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56 (3): 900-906.
- [15] 黄健, 舒晓葳. 基于线性自抗扰控制的 UUV 航向控制器设计[J]. *计算机仿真*, 2015, 32 (6), 324-328.
- [16] 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.
- [17] GUO C, HAN Y N, YU H M. Spatial path-following control of underactuated AUV with multiple uncertainties and input saturation[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 98014-98022.
- [18] Tang J, Dang Z K, Deng Z C, et al. Adaptive fuzzy nonlinear integral sliding mode control of unmanned underwater vehicles based ESO[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 26 (5): 113154.
- [19] GU N, WANG D, PENG Z H, et al. Disturbance observers and extended state observers for marine vehicles: a survey[J]. *Control Engineering Practice*, 2022, 123: 105158.
- [20] FOSSEN T I. *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*[M]. New York: Wiley, 2011.
- [21] MIAO J F, WANG S P, ZHAO Z P, et al. Spatial curvilinear path following control of underactuated AUV with multiple uncertainties[J]. *ISA Transactions*, 2017, 67: 103-130.

(责任编辑: 张曼莉)