基于改进自抗扰控制器的四旋翼海空两栖 机器人位姿控制

刘占宇*

上海理工大学机械工程学院,上海

收稿日期: 2025年3月14日; 录用日期: 2025年4月7日; 发布日期: 2025年4月16日

摘要

本文主要围绕四旋翼海空两栖机器人的跨介质位姿控制系统进行研究,提出了一种改进的自抗扰控制策略。介绍了四旋翼海空两栖机器人的结构组成与飞行原理,分别建立了机体坐标系和地球坐标系以及其 坐标变换矩阵,对四旋翼海空两栖机器人基于基本假设进行动力学建模。建立了基于改进自抗扰控制的 级联控制器,采用了任意阶鲁棒精确微分器的高阶滑模观测器实现对扰动的精确估计。此外,引入改进 的非线性函数,以减轻传统非线性函数带来的抖振现象,从而提高了四旋翼海空两栖机器人的稳定性。 并使用MATLAB/Simulink对其进行了位置、姿态以及干扰情况下的仿真。验证了所提出的级联控制器的 相较于传统的自抗扰控制器在干扰情况下具有更优的位姿控制性能和抗干扰能力。

关键词

海空两栖机器人,位姿控制,自抗扰控制,高阶滑模观测器

Attitude and Position Control for Hybrid Aerial Underwater Vehicles via Improved Active Disturbance Rejection Controller

Zhanyu Liu*

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Mar. 14th, 2025; accepted: Apr. 7th, 2025; published: Apr. 16th, 2025

Abstract

This paper mainly focuses on the research of the trans-media attitude and position control system *通讯作者。

文章引用: 刘占宇. 基于改进自抗扰控制器的四旋翼海空两栖机器人位姿控制[J]. 建模与仿真, 2025, 14(4): 394-407. DOI: 10.12677/mos.2025.144296

of the Hybrid aerial underwater vehicle (HAUV), and proposes an improved Active disturbance rejection control (ADRC) strategy. The structure composition and flight principle of the HAUV are introduced. The body coordinate system and earth coordinate system as well as the matrix paradigm of the coordinate transformation are established, and the dynamics modeling of the quadrotor HAUV is carried out based on the basic assumptions. A cascade controller based on improved ADRC is established, and a high-order sliding mode observer (HOSMO) based on arbitrary order robust precise differentiator is used to estimate the lumped disturbance accurately. In addition, an improved nonlinear function is introduced to reduce the chattering caused by the traditional nonlinear function, thus improving the stability of the HAUV. MATLAB/Simulink is used to verify that the proposed cascaded controller has better attitude and position control performance and anti-disturbance ability than the traditional ADRC controller.

Keywords

Hybrid Aerial Underwater Vehicle, Attitude and Position Control, Active Disturbance Rejection **Control, Higher-Order Sliding Mode Observer**

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/ (c) (i)

Open Access

1. 引言

随着海洋科学的迅速发展以及人类在海洋领域的活动日益多样化,海洋科学和工程领域涌现出许多 新的需求。常见的潜水器包括自主式水下航行器(Autonomous Underwater Vehicles, AUVs) [1]-[4]、水下滑 翔机(Underwater Gliders, UGs) [5] [6]以及遥控潜水器(Remotely Operated Vehicles, ROVs) [7]。这些传统的 水下潜水平台具备携带不同勘探设备和操作工具的能力,并已被广泛应用于海洋采样和观测[8]、水下勘 探[9]、水下监测和巡逻[10]、水下作业[11] [12]以及水下搜救[13]-[15]等多种任务。然而,现有的潜水器 技术已经无法满足新兴的海陆空跨域任务的要求。海空两栖机器人(Hybrid Aerial Underwater Vehicles, HAUVs) [16]作为一种新型的水陆两栖运载工具,凭借其能够同时在空中、水面和水下进行探测的独特能 力,已被广泛应用于农业、商业、民用和军事等多个领域。

值得注意的是,在 HAUV 技术领域,必须充分解决的关键问题是跨介质过程中对 HAUV 位姿的控 制。HAUV 在跨介质过程中会遇到复杂的动力学问题。其次是系统的非线性、时变性和不确定性。不仅 如此,HAUV 在跨介质过程中除了受到系统固有特性的影响,还面临复杂的外部扰动。在自然海况下跨 介质过程中会受到未知风浪的联合扰动,HAUV 的运动控制需要更强的鲁棒性来应对这些复杂环境。

自抗扰控制(Active Disturbance Rejection Control, ADRC)是一种先进的控制策略,由韩京清研究员提 出。该方法成功应用于航空航天系统[17]、无人机[18]、移动机器人[19]等。哈尔滨工程大学的研究团队 提出了一种基于 ADRC 的水下航行器路径跟踪控制方法,以实现高质量的干扰估计[20]。西班牙马德里 理工大学的研究人员讨论了将 ADRC 与模型预测控制相结合的方法,以解决外部干扰和不确定参数的问 题[21]。然而,传统自抗扰控制方法也存在一定的缺陷,可能会导致无法保证收敛速度的缺点,以及对"总 扰动"的实时估计效率低等问题。

为提高在复杂干扰环境下 HAUV 跨介质稳定位姿控制,本文提出了一种改进的自抗扰控制策略,引 入高阶滑模观测器(Higher-Order Sliding Mode Observer, HOSMO)来替换传统的扩张状态观测器(Extended State Observer, ESO)。此外,采用改进的非线性状态误差控制函数,解决了传统非线性函数特性曲线并不

平滑,这补偿扰动后容易引起振荡的问题。利用 MATLAB/Simulink 仿真实验,验证了本文所设计的改进 自抗扰控制器能够在干扰情况下实现位姿的稳定控制,体现了该控制器的有效性和合理性。

2. 四旋翼海空两栖机器人数学模型

本文设计的 HAUV 采用四旋翼结构,保持设备重心在浮心之下并处于设备中轴线上。通过控制四个 电机的旋转方向和转速就可以实现 HAUV 的跨介质运动,如图1所示。



Figure 1. The structure of the HAUV 图 1. 四旋翼海空两栖机器人结构

建立了 HAUV 的两个坐标系:地球坐标系和机体坐标系,如图 2 所示。地球坐标系与机体坐标系之间的相对位置和方向可以通过横滚角 ϕ ,俯仰角 θ ,偏航角 ψ 来表示,分别是 X_G 轴与 X_B 轴在 X_GY_G 平面上的投影之间的角度、 Y_G 轴与 Y_B 轴在 X_GY_G 平面上的投影之间的角度、 Z_G 轴与 Z_B 轴在 X_GY_G 平面上的投影之间的角度。



Figure 2. Motion coordinate system of the HAUV 图 2. 四旋翼 HAUV 运动坐标系

本文采用欧拉角法对 HAUV 的姿态进行表示,进而获得转换矩阵。其中,3次旋转对应的坐标变换矩阵分别为 *R*₁、*R*₂、*R*₃:

$$R_{1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C_{\varphi} & S_{\varphi} \\ 0 & -S_{\varphi} & C_{\varphi} \end{bmatrix}$$
(1)

$$R_2 = \begin{bmatrix} C_\theta & 0 & -S_\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ S_\theta & 0 & C_\theta \end{bmatrix}$$
(2)

$$R_{3} = \begin{bmatrix} C_{\psi} & S_{\psi} & 0\\ -S_{\psi} & C_{\psi} & 0\\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(3)

根据欧拉定理,任何刚体在空间中的旋转都可以分解为绕三个固定坐标轴的一系列旋转的组合。本 文采用 *X-Y-Z* 的旋转顺序,即首先绕 *X* 轴旋转,然后绕 *Y* 轴旋转,最后绕 *Z* 轴旋转,表达式如下:

$$\begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C_{\varphi} & S_{\varphi} \\ 0 & -S_{\varphi} & C_{\varphi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{\theta} & 0 & -S_{\theta} \\ 0 & 1 & 0 \\ S_{\theta} & 0 & C_{\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{\psi} & S_{\psi} & 0 \\ -S_{\psi} & C_{\psi} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \end{bmatrix}$$
(4)

其中, $[X_B, Y_B, Z_B]^T$ 和 $[X_G, Y_G, Z_G]^T$ 分别表示 HAUV 在机体坐标系和地球坐标系下的坐标。用 $\eta_1 = (x, y, z)$ 和 $\eta_2 = (\phi, \theta, \psi)$ 分别表示地球坐标系下的 HAUV 位置向量和姿态向量, v = (u, v, w) 和 $\boldsymbol{\omega} = (\omega x, \omega y, \omega z)$ 分 别表示机体坐标系下 HAUV 的线速度和角速度,那么地球坐标系到机体坐标系的转换矩阵 *R* 可表示为:

$$\dot{\eta}_1 = Rv \tag{5}$$

$$R = R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 = \begin{bmatrix} C_{\psi} C_{\theta} & S_{\psi} C_{\theta} & -S_{\theta} \\ C_{\psi} S_{\theta} S_{\varphi} - S_{\psi} C_{\varphi} & S_{\psi} S_{\theta} S_{\varphi} + C_{\psi} C_{\varphi} & C_{\theta} S_{\varphi} \\ C_{\psi} S_{\theta} C_{\varphi} + S_{\psi} S_{\varphi} & S_{\psi} S_{\theta} C_{\varphi} - C_{\psi} S_{\varphi} & C_{\theta} C_{\varphi} \end{bmatrix}$$
(6)

相应地,机体坐标系到地球坐标系的转换矩阵 R^T:

$$R^{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix} C_{\psi}C_{\theta} & C_{\psi}S_{\theta}S_{\varphi} - S_{\psi}C_{\varphi} & C_{\psi}S_{\theta}C_{\varphi} + S_{\psi}S_{\varphi} \\ S_{\psi}C_{\theta} & S_{\psi}S_{\theta}S_{\varphi} + C_{\psi}C_{\varphi} & S_{\psi}S_{\theta}C_{\varphi} - C_{\psi}S_{\varphi} \\ -S_{\theta} & C_{\theta}S_{\varphi} & C_{\theta}C_{\varphi} \end{bmatrix}$$
(7)

两个坐标系下的姿态角向量转换矩阵 P 可表示为:

$$\dot{\eta}_2 = P\omega \tag{8}$$

$$P = \begin{bmatrix} 1 & S_{\varphi}T_{\theta} & C_{\varphi}T_{\theta} \\ 0 & C_{\varphi} & -S\varphi \\ 0 & S_{\varphi}/C_{\theta} & C_{\varphi}/C_{\theta} \end{bmatrix}$$
(9)

其中, $S(\cdot)$, $C(\cdot)$ 和 $T(\cdot)$ 分别表示 sin(·), cos(·)和 tan(·)。为了建立一个简单实用的 HAUV 数学模型, 给出以下假设来简化问题[22] [23]:

1) HAUV 为一个刚体,具有严格的对称性,其质量在飞行过程中保持不变。

2) 不论在何种飞行高度,重力加速度都被认为是恒定的,不会发生变化。

3) 机体坐标系的原点被设定在 HAUV 的几何中心。

4) 每个旋翼产生的升力与其转速的平方成正比。

在这些假设的基础上,利用牛顿-欧拉法来推导 HAUV 在跨介质运动过程中的动力学模型:

$$\begin{cases} m\dot{\mathbf{v}} + (m - \rho V)g + (\mathbf{v} \times m\omega) = \mathbf{F} \\ \mathbf{I}_{T}\dot{\omega} + C(\omega) + (\omega \times I\omega) = \tau \end{cases}$$
(10)

其中, F 和 τ 表示 HAUV 所受推进器的合力和转动力矩, m 表示 HAUV 的质量, ρ 表示水的密度, V 表

示 HAUV 的体积, $I_T = I + I_a = (I_x, I_y, I_z)$ 表示 HAUV 总的惯性力, I表示 HAUV 的惯性力, I_a 是附加 惯性力, 代表 HAUV 加速时造成周围流体运动所消耗的额外力, 且附加惯性力与潜入水中的深度近似成 正比, $\omega \times I\omega$ 表示刚体旋转产生的回转效应; $C(\omega)$ 表示螺旋桨产生的回转效应力矩。

$$C(\boldsymbol{\omega}) = \boldsymbol{J} \boldsymbol{r} \boldsymbol{\omega} \boldsymbol{\Omega}_d \tag{11}$$

其中, J_r 表示转动惯量, 且 $\Omega_d = \Omega_1 - \Omega_2 + \Omega_3 - \Omega_4$ 。HAUV 的位姿控制是通过操控四个电机的旋转方向 和速度实现的,因此将电机的转动速度设为 HAUV 动力学模型的输入变量,电机的转速向量 U 可表示 为:

$$\boldsymbol{F} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{U}_{1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{C}_{f} \sum_{i=1}^{4} (\boldsymbol{\Omega}_{i})^{2} \end{bmatrix}$$
(12)
$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{U}_{2} \\ \boldsymbol{U}_{3} \\ \boldsymbol{U}_{4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l\boldsymbol{C}_{f} (\boldsymbol{\Omega}_{2}^{2} - \boldsymbol{\Omega}_{4}^{2}) \\ l\boldsymbol{C}_{f} (\boldsymbol{\Omega}_{3}^{2} - \boldsymbol{\Omega}_{1}^{2}) \\ l\boldsymbol{C}_{d} \sum_{i=1}^{4} (-1)^{i+1} (\boldsymbol{\Omega}_{i})^{2} \end{bmatrix}$$
(13)

其中, Ω_i 表示 *i* 号电机的转动速度, C_f 表示螺旋桨系数,L表示电机到 HAUV 中轴的距离, C_d 表示阻力 系数,则 HAUV 位置环的动力学方程可以写为:

$$\begin{cases} \ddot{x} = (c\psi s\theta c\phi + s\psi s\phi) \frac{U_1}{m} \\ \ddot{y} = (s\psi s\theta c\phi - c\psi s\phi) \frac{U_1}{m} \\ \ddot{z} = -g + (c\phi c\theta) \frac{U_1}{m} \end{cases}$$
(14)

结合(8)和(9),由于 HAUV 在实际飞行过程中横滚角和俯仰角的变化量很小,因此 HAUV 的姿态角和角速度的转换矩阵可以简化为:

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} & \dot{\theta} & \dot{\psi} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix} \omega x & \omega y & \omega z \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$
(15)

结合(12)和(13), HAUV 的姿态环动力学方程可以描述为:

$$\begin{cases}
\ddot{\phi} = \dot{\theta} \dot{\psi} \left(\frac{I_{yy} - I_{zz}}{I_{xx}} \right) - \frac{J_r}{I_{xx}} \dot{\theta} \Omega_d + \frac{U_2}{I_{xx}} \\
\ddot{\theta} = \dot{\phi} \dot{\psi} \left(\frac{I_{zz} - I_{xx}}{I_{yy}} \right) + \frac{J_r}{I_{yy}} \dot{\theta} \Omega_d + \frac{U_3}{I_{yy}} \\
\ddot{\psi} = \dot{\theta} \dot{\phi} \left(\frac{I_{xx} - I_{yy}}{I_{zz}} \right) + \frac{U_4}{I_{zz}}
\end{cases}$$
(16)

因此联立(14)和(16)得到 HAUV 的位置及姿态动力学模型为:

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= \left(c\psi s\theta c\phi + s\psi s\phi\right) \frac{U_1}{m} \\ \ddot{y} &= \left(s\psi s\theta c\phi - c\psi s\phi\right) \frac{U_1}{m} \\ \ddot{z} &= -g + \left(c\phi c\theta\right) \frac{U_1}{m} \\ \ddot{\phi} &= \dot{\theta} \dot{\psi} \left(\frac{I_{yy} - I_{zz}}{I_{xx}}\right) - \frac{J_r}{I_{xx}} \dot{\theta} \Omega_d + \frac{U_2}{I_{xx}} \\ \ddot{\theta} &= \dot{\phi} \dot{\psi} \left(\frac{I_{zz} - I_{xx}}{I_{yy}}\right) + \frac{J_r}{I_{yy}} \dot{\phi} \Omega_d + \frac{U_3}{I_{yy}} \\ \ddot{\psi} &= \dot{\theta} \dot{\phi} \left(\frac{I_{xx} - I_{yy}}{I_{zz}}\right) + \frac{U_4}{I_{zz}} \end{aligned}$$
(17)

3. 基于改进自抗扰的四旋翼海空两栖机器人控制系统

为了确保 HAUV 能够实现精确且稳定的跨介质控制,本章研究设计了一种创新的级联控制器架构。这种控制器由两个主要部分组成: 姿态控制内环和位置控制外环。在位置控制外环中,控制任务进一步 细分为水平位置控制和高度控制。水平位置控制负责调节 HAUV 沿 X 轴和 Y 轴的位置,确保其在水平 面上的精确定位。通过结合 HOSMO 和改进的非线性函数,能够提高系统的收敛速度和实时估计效率,从而更好地适应快速变化的控制需求。所提出的级联控制器方案如图 3 所示。



其中, Z_d 、 X_d 、 Y_d 表示位置控制环的期望位置输入, ϕ_d 、 θ_d 和 ψ_d 表示横滚,俯仰和偏航通道中的期 望姿态输入。 U_x 、 U_y 表示位置控制通道中的虚拟控制信号。 U_1 、 U_2 、 U_3 、 U_4 表示系统传递给 HAUV 的 控制信号。由于水平位置控制与姿态控制之间存在耦合特性,即水平位置的变化可能会影响 HAUV 的姿 态。为了解决这一问题,本设计将水平方向上的位置信号进行解耦,转化为姿态信号,以减少控制之间 的耦合效应,使得控制更加精确和独立。在解耦后的信号基础上,采用改进的自抗扰控制器来生成控制 变量:

$$\begin{cases} \phi_d = \arcsin\left[\left(U_x \sin\psi_d - U_y \cos\psi_d\right)/U_1\right] \\ \theta_d = \arcsin\left[\left(U_x \cos\psi_d + U_y \sin\psi_d\right)/U_1 \cos\phi_d\right] \end{cases}$$
(18)

3.1. 跟踪微分器

跟踪微分器是一种非线性滤波器,其主要功能是在存在噪声或外部干扰的情况下,实现对输入信号 的精确跟踪以及对其导数的准确估计,核心思想是构建一个动态系统,使输出信号迅速准确地逼近输入 信号,并提供输入信号的高阶导数信息。

二阶跟踪微分器的离散系统表达式为:

$$\begin{cases} x_1(k+1) = x_1(k) + Tx_2(k) \\ x_2(k+1) = x_2(k) + Tu(k) \end{cases}$$
(19)

其中, x_1 、 x_2 为系统状态量,T为采样周期。最速控制综合函数 $fhan(x_1, x_2, r, h)$ 为:

$$\begin{cases} d = rh \\ d_{0} = dh \\ y = x_{1}(k) + hx_{2}(k) \\ a_{0} = \sqrt{d^{2} + 8d |y|} \\ \\ a = \begin{cases} x_{2}(k) + \frac{a_{0} - d}{2} \operatorname{sign}(y), |y| > d_{0} \\ x_{2}(k) + \frac{y}{h}, & |y| \le d_{0} \\ \\ x_{2}(k) + \frac{y}{h}, & |y| \le d_{0} \end{cases}$$
(20)
$$fhan = -\begin{cases} r \frac{a}{d}, & |a| \le d \\ r \operatorname{sign}(a), |a| > d \end{cases}$$

其中, r和 h 分别为能影响输入信号跟踪信号的速度因子和对噪声起滤波作用的滤波因子。因此最终得到的离散形式的二阶跟踪微分器形式如下:

$$\begin{cases} x_1(k+1) = x_1(k) + Tx_2(k) \\ x_2(k+1) = x_2(k) + Tfhan(x_1(k) - x_d(k), x_2(k), r, h) \end{cases}$$
(21)

3.2. 高阶滑模观测器

在 HAUV 进行跨介质运动时,由于参数的不确定性和外部干扰,传统 ADRC 控制器的性能可能变得 不稳定,难以准确估计"总扰动"。为了解决这一问题,本文设计了一种基于任意阶精确鲁棒微分器结 构的高阶滑模观测器来替换传统 ADRC 控制器中的扩张状态观测器。高阶滑模观测器具有快速收敛的特 点,能够实时估计 HAUV 的当前状态,从而提高系统的鲁棒性和控制精度。以 *n* 阶的非线性系统为例, 定义外部干扰情况下的单输入单输出对象为:

$$\begin{cases} x^{(n)} = f\left(x, \dot{x}, \cdots x^{(n-1)}, \xi\left(t\right)\right) + bU\\ y = x \end{cases}$$
(22)

其中 $f(x, \dot{x}, \dots x^{(n-1)}, \xi(t))$ 为综合了内外部干扰的"总扰动", $\xi(t)$ 为未知的外部干扰, x为控制变量, U为控制量。令 $x_1 = x$, $x_2 = \dot{x}$, $x_n = x^{(n-1)}$,则(22)可改写为:

$$\begin{cases} \dot{x} = x_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1} = x_n \\ \dot{x}_n = f(x_1, x_2, \cdots, x_n, \xi) + bU \end{cases}$$
(23)

DOI: 10.12677/mos.2025.144296

假设可以实时测量电机的控制变量 U和输出信号 y,总扰动为 Lipschitz 连续,且 Lipschitz 利普希茨 常数 L > 0,则所提出的高阶滑模观测器可写为:

$$\begin{aligned} \dot{z}_{1} &= x_{1} \\ x_{1} &= -\beta_{n+1} L^{1/(n+1)} \left| z_{1} - y \right|^{n/(n+1)} \operatorname{sign} \left(z_{1} - y \right) + z_{2} \\ \vdots \\ \dot{z}_{n-1} &= x_{n-1} \\ v_{n-1} &= -\beta_{3} L^{1/3} \left| z_{n-1} - x_{n-2} \right|^{2/3} \operatorname{sign} \left(z_{n-1} - x_{n-2} \right) + z_{n} \\ \dot{z}_{n} &= \hat{f} + bU \\ \dot{f} &= -\beta_{2} L^{1/2} \left| z_{n} - x_{n-1} \right|^{1/2} \operatorname{sign} \left(z_{n} - x_{n-1} \right) + z_{n+1} \\ \dot{z}_{n+1} &= -\beta_{1} L \operatorname{sign} \left(z_{n+1} - \hat{f} \right) \end{aligned}$$

$$(24)$$

其中, z_n 表示 x_n 的估计值, β_n 表示观测器的增益参数 $(n=1,2,3,\cdots)$, \hat{f} 表示集总扰动的估计值。

定理 1: 假设高阶滑模观测器的增益参数 $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ 根据递归方法选择, y 和 U 是有界的,并且是 勒贝格可测的。那么以下等式在有限时间内成立:

$$\begin{cases} z_i = x_i, \ \forall i = 1, \cdots, n \\ z_{n+1} = f\left(x_1, x_2, \cdots, x_n, \xi\right) \end{cases}$$
(25)

定义以下公式:

$$\begin{cases}
\kappa_{1} = z_{1} - x_{1} \\
\vdots \\
\kappa_{n} = z_{n} - x_{n} \\
\kappa_{n+1} = z_{n+1} - f(x_{1}, x_{2}, \dots, \xi)
\end{cases}$$
(26)

将式(23)与式(24)提出的 HOSMO 结合可得:

$$\begin{cases} z_{2} - x_{1} = z_{2} - \dot{z}_{1} = z_{2} - \dot{\kappa}_{1} - \dot{x}_{1} = \kappa_{2} - \dot{\kappa}_{1} \\ \vdots \\ z_{n} - x_{n-1} = z_{n} - \dot{z}_{n-1} = z_{n} - \dot{\kappa}_{n-1} - \dot{x}_{n-1} = \kappa_{n} - \dot{\kappa}_{n-1} \\ z_{n+1} - \hat{f} = z_{n+1} - \dot{z}_{n} + bU = \kappa_{n+1} - \dot{\kappa}_{n} \end{cases}$$
(27)

利用上述的推导, (24)可改写为:

$$\begin{cases} \dot{\kappa}_{1} = -\beta_{n+1} L^{1/(n+1)} |\kappa_{1}|^{n/(n+1)} \operatorname{sign}(\kappa_{1}) + \kappa_{2} \\ \dot{\kappa}_{2} = -\beta_{n} L^{1/n} |\kappa_{2} - \dot{\kappa}_{1}|^{(n-1)/n} \operatorname{sign}(\kappa_{2} - \dot{\kappa}_{1}) + \kappa_{3} \\ \vdots \\ \dot{\kappa}_{n} = -\beta_{2} L^{1/2} |\kappa_{n} - \dot{\kappa}_{n-1}|^{1/2} \operatorname{sign}(\kappa_{n} - \dot{\kappa}_{n-1}) + \kappa_{n+1} \end{cases}$$
(28)

若每个方程右侧的导数可以忽略不计,那么可以得到:

$$t \to qt \text{ and } \kappa \to q^{n-i+1}\kappa_i, \ \forall q > 0, i = 0, \cdots, n.$$
 (29)

因此,系统表现出同质性,于是在有限时间内可得:

$$\begin{cases} \kappa_{1} = z_{1} - x_{1} = 0 \rightarrow z_{1} = x_{1} \\ \vdots \\ \kappa_{n-1} - \dot{\kappa}_{n-2} = 0 \rightarrow z_{n-1} = x_{n-1} \\ \kappa_{n} - \dot{\kappa}_{n-1} = 0 \rightarrow z_{n} - x_{n-1} - \dot{z}_{n-1} - \dot{x}_{n-1} \Longrightarrow z_{n} = x_{n} \\ \kappa_{n+1} - \dot{\kappa}_{n} = 0 \rightarrow z_{n+1} - f(x_{1}, x_{2}, \dots, \xi) - \dot{z}_{n} + \dot{x}_{n} = 0 \\ \rightarrow z_{n+1} = f(x_{1}, x_{2}, \dots, \xi) \end{cases}$$
(30)

根据(30)可得到所提出的自抗扰控制器能够准确估计"总扰动"并在有限时间内实现收敛。考虑滚动 通道为二阶系统,结合(24),本文的高阶滑模观测器设计为:

$$\begin{cases} \dot{z}_{\phi 1} = x_{1} \\ x_{1} = -\beta_{3}L^{1/3} \left| z_{\phi 1} - y \right|^{2/3} \operatorname{sign} \left(z_{\phi 1} - y \right) + z_{\phi 2} \\ \dot{z}_{\phi 2} = \hat{f}_{\phi} + b_{2}U_{2} \\ \hat{f}_{\phi} = -\beta_{2}L^{1/2} \left| z_{\phi 2} - x_{1} \right|^{1/3} \operatorname{sign} \left(z_{\phi 2} - x_{1} \right) + z_{\phi 3} \\ \dot{z}_{\phi 3} = -\beta_{1}L\operatorname{sign} \left(z_{\phi 3} - \hat{f}_{\phi} \right) \end{cases}$$
(31)

3.3. 改进的非线性状态误差控制函数

针对传统非线性误差反馈控制律中的非线性函数的特性曲线并不平滑,在原点和分段点不可微,导 致连续性和平滑性差,在补偿干扰后很容易导致抖振的问题,本文引入改进的非线性函数,改善由传统 非线性函数因特性曲线不平滑而引起的振荡问题,有助于减少在补偿扰动后的振荡现象,从而提高系统 的稳定性和响应质量。其函数形式如下:

$$\begin{cases} nfal(e,\alpha,\eta,\gamma) = \alpha\eta \tan \frac{\left[\alpha(e-\gamma) - \mu_0\right]}{\pi/2 - \mu_0} \\ \mu_0 = \alpha \tan \left[\alpha(0-\gamma)\right] \end{cases}$$
(32)

其中, η 表示曲线范围, y 表示曲线中心位置。为了证明改进的非线性函数相比传统非线性函数更平滑, 将传统非线性函数与改进的非线性函数的特征曲线进行对比,如图4所示。



Figure 4. Comparison of nonlinear function characteristic curves 图 4. 非线性函数特征曲线对比图 其中, $\delta = 0.5$, $\eta = 1$, $\gamma = 0.01$ 。如图可以明显看出改进后的非线性函数比传统的非线性函数平滑度 明显提高。传统的非线性函数在 $x = \pm 0.5$ 处有拐点。相比之下,改进后的非线性函数具有更好的连续性 和平滑性。

4. 基于单输入模糊 P + ID 和改进自抗扰的控制系统仿真

为了验证改进的 ADRC 控制器在 HAUV 跨介质运动过程中对位姿控制的有效性和鲁棒性,建立了 HAUV 动力学系统的 Simulink 仿真模型。通过仿真实验,将常规 ADRC 控制器作为对照组,并且加入外 部干扰,验证所提出的级联控制器位姿控制效果以及所提出的 HOSMO 对外部干扰的精准估计。仿真过 程可以描述为: HAUV 从高度 1 m 处开始,大约在 5 s 时潜入水中。然后在 10 s 到 15 s 内保持-1 m 的深 度。随后,HAUV 在 20 s 时上升并出水。最后,在 25 s 时,HAUV 返回到初始深度并保持该位置,直到 模拟结束。系统和控制器的主要参数如表 1~3 所示。

参数名称	参数值
l	0.3 m
m	1.7 kg
I_{xx}	$6.5 imes 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
I_{yy}	$6.5 imes 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
I_{zz}	$12.5\times10^{-3}~kg{\cdot}m^2$
J_r	$1.25\times10^{-5}kg{\cdot}m^2$
C_{f}	$4.1 imes10^{-5}$
C_d	$4.1 imes 10^{-5}$

Table 1. Parameters of the HAUV 表 1. HAUV 系统参数

Table	e 2. Parameters of the improved	ADRC controller
表 2.	改进自抗扰控制器参数	

	参数名称	参数值
TD	r	100
ID	h	0.002
HOSMO	L	1
	β_1	50
	β_2	300
	β ₃	150
NLSEF	α1	1.3
	α2	1.5
	k_1	50
	k_2	2
	η_1	1
	η_2	1
	γ	0.01
	b_0	40

	参数名称	参数值
TD	r	10
	h	0.01
ESO	δ	0.01
	β_1	200
	β_2	300
	β ₃	1000
NLSEF	α_1	0.75
	α2	1.5
	k_1	0.3
	k_2	0.1
	b_0	120

Table 3. Parameters of the traditional ADRC controller
表 3. 传统自抗扰控制器参数

HAUV 在跨介质过程中会遇到海浪的外部干扰。在仿真实验中,在入水和出水阶段 4 s 和 19 s 时分别加入两种类型的外部信号作为外部扰动,如图 5 所示,其中, *f*_{入*}代表在入水阶段的干扰,*f*_{出*}代表在出水阶段的干扰,由以下公式产生:

$$f_{\lambda,k} = 2\cos(1.5t)\sin(0.5t),$$

$$f_{\pm k} = \sin(0.9t)\cos(t) + \sin(t).$$
(33)



Figure 5. The wave disturbance and its estimation during water-entry and water-exit stage when using the HOSMO and ESO 图 5. HOSMO 和 ESO 入水和出水阶段的海浪干扰信号及其估计值

从图 5 中可以看出,估计误差的波动主要归因于扰动信号的突然出现。控制器需要时间来计算、逐渐估计和补偿扰动。传统扩张状态观测器的干扰估计最终在 2.2 s 内收敛到零,而高阶滑模观测器只需要 1.6 s,减少了 27%的收敛时间。在入水和出水阶段,最大偏差值相较传统的扩张状态观测器分别减少了 30%和 8%。



Figure 6. Position control responses of traditional and improved ADRC controllers under wave disturbances 图 6. 海浪干扰下常规 ADRC 和改进 ADRC 控制器的位置控制对比图

图 6显示了各控制器在入水阶段的位置响应,常规 ADRC 控制器的位置响应在 4s 开始,然后在 6.0 s 稳定。随后,在出水阶段,常规 ADRC 控制器的位置响应在 19 s 开始,在 20.9 s 稳定。相比之下,所 提出的级联控制器的位置响应分别在 5.7 s 和 20.6 s 稳定,这意味着在入水阶段和出水阶段,所提出的级 联控制器比常规 ADRC 控制器的收敛时间最多缩短了 27%。通过观察图 6 各个阶段的放大图,常规 ADRC 控制器的最大位置偏差为 0.07 m,而所提出的级联控制器为 0.04 m,最大位置偏差量减少 42%。



Figure 7. Attitude responses of traditional and improved ADRC controllers under wave disturbances 图 7. 海浪干扰下常规 ADRC 和改进 ADRC 控制器的姿态响应

图 7 给出了各个控制器在海浪干扰下的姿态响应。在各个通道上,相比其他两种控制器,所提出的 级联控制器都表现出了很好的效果。在横滚和俯仰通道上,所提出的级联控制器的最大角度偏差相比常 规 ADRC 控制器分别减少了 54%。这表明所提出的级联控制器在海浪扰动下的姿态控制相比常规 ADRC 控制器有更好的精度和鲁棒性。

5. 结论

本文研究了在干扰情况下四旋翼海空两栖机器人的跨介质位姿控制。针对 HAUV 系统的特点展开改进 ADRC 控制器的设计工作,引入高阶滑模观测器来替代传统的扩张状态观测器,设计改进的非线性状态 误差控制函数,以提高系统的鲁棒性和响应速度,形成级联控制器结构。详细阐述了级联控制器的控制原 理,并对 HAUV 的飞行控制总体方案进行了介绍。为了验证所提出控制策略的有效性,在 MATLAB/Simulink 环境中搭建了仿真平台。通过仿真实验分析了 HAUV 位置和姿态控制的响应曲线。仿真结果表明,相比 于常规的 ADRC 控制器,所提出的级联控制器能够有效地实现 HAUV 姿态与高度的控制目标。高阶滑模 观测器相比于传统的扩张状态观测器,在实时估计干扰和精准补偿方面表现出良好的能力。未来,将进 一步研究四旋翼海空两栖机器人在实际飞行环境中的位姿控制问题。

参考文献

- Lomax, A S., Corso, W. and Etro, J.F. (2005) Employing Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) as an Element of the Integrated Ocean Observing System. *Proceedings of OCEANS* 2005 *MTS/IEEE*, Washington DC, 17-23 September 2005, 184-190.
- [2] McGillivary, P.A., Borges de Sousa, J. and Rajan, K. (2013) Networking Multiple Autonomous Air and Ocean Vehicles for Oceanographic Research and Monitoring. *AGU Fall Meeting Abstracts*, San Francisco, CA, 9-13 December 2013.
- [3] Jacobs, T., Jacobi, M., Rogers, M., Adams, J., Coffey, J., Walker, J., *et al.* (2015) Testing and Evaluating Low Altitude Unmanned Aircraft System Technology for Maritime Domain Awareness and Oil Spill Response in the Arctic. *Marine Technology Society Journal*, 49, 145-150. <u>https://doi.org/10.4031/mtsj.49.2.23</u>
- [4] 曹洪涛, 张拯宁, 李明, 等. 无人机遥感海洋监测应用探讨[J]. 海洋信息, 2015(1): 51-54.
- [5] Rudnick, D.L. and Cole, S.T. (2011) On Sampling the Ocean Using Underwater Gliders. *Journal of Geophysical Research*, 116, C08010. <u>https://doi.org/10.1029/2010jc006849</u>
- [6] Alvarez, A., Garau, B. and Caiti, A. (2007) Combining Networks of Drifting Profiling Floats and Gliders for Adaptive Sampling of the Ocean. *Proceedings* 2007 *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Rome, 10-14 April 2007, 157-162. <u>https://doi.org/10.1109/robot.2007.363780</u>
- [7] Vigo, M., Navarro, J., Aguzzi, J., Bahamón, N., García, J.A., Rotllant, G., et al. (2023) ROV-Based Monitoring of Passive Ecological Recovery in a Deep-Sea No-Take Fishery Reserve. Science of the Total Environment, 883, Article ID: 163339. <u>https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163339</u>
- [8] 邓才龙, 刘焱雄, 田梓文, 等. 无人机遥感在海岛海岸带监测中的应用研究[J]. 海岸工程, 2014, 33(4): 41-48.
- [9] 葛清忠, 王芳, 张震, 等. 固定翼无人机在威海湾调查中的应用[J]. 海洋技术, 2013, 32(3): 37-39, 49.
- [10] O'Young, S. and Hubbard, P. (2007) RAVEN: A Maritime Surveillance Project Using Small UAV. 2007 IEEE Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (EFTA 2007), Patras, 25-28 September 2007, 904-907. https://doi.org/10.1109/efta.2007.4416878
- [11] 刘方. 混合驱动水下滑翔机系统设计与运动行为研究[D]: [博士学位论文]. 天津: 天津大学, 2014.
- [12] Liu, F., Wang, Y., Wu, Z. and Wang, S. (2017) Motion Analysis and Trials of the Deep Sea Hybrid Underwater Glider Petrel-ii. *China Ocean Engineering*, **31**, 55-62. <u>https://doi.org/10.1007/s13344-017-0007-4</u>
- [13] Wu, J., Song, C., Ma, J., Wu, J. and Han, G. (2022) Reinforcement Learning and Particle Swarm Optimization Supporting Real-Time Rescue Assignments for Multiple Autonomous Underwater Vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23, 6807-6820. <u>https://doi.org/10.1109/tits.2021.3062500</u>
- [14] Li, K., Liu, Q. and Li, X. (2023) Key Technologies and Evaluation of a Minisar Experimental System for Unmanned Underwater Vehicle Detection. Sensors, 23, Article 2490. <u>https://doi.org/10.3390/s23052490</u>
- [15] Stankiewicz, P., Tan, Y.T. and Kobilarov, M. (2020) Adaptive Sampling with an Autonomous Underwater Vehicle in Static Marine Environments. *Journal of Field Robotics*, 38, 572-597. <u>https://doi.org/10.1002/rob.22005</u>

- [16] Lu, D., Xiong, C., Zeng, Z. and Lian, L. (2020) Adaptive Dynamic Surface Control for a Hybrid Aerial Underwater Vehicle with Parametric Dynamics and Uncertainties. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 45, 740-758. <u>https://doi.org/10.1109/joe.2019.2903742</u>
- [17] Qiao, H., Meng, H., Ke, W., Gao, Q. and Wang, S. (2020) Adaptive Control of Missile Attitude Based on Bp-ADRC. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 92, 1475-1481. <u>https://doi.org/10.1108/aeat-05-2020-0081</u>
- [18] Sun, H., Sun, Q., Wu, W., Chen, Z. and Tao, J. (2019) Altitude Control for Flexible Wing Unmanned Aerial Vehicle Based on Active Disturbance Rejection Control and Feedforward Compensation. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, **30**, 222-245. <u>https://doi.org/10.1002/rnc.4758</u>
- [19] Muñoz-Hernandez, G.A., Díaz-Téllez, J., Estevez-Carreon, J. and García-Ramírez, R.S. (2023) ADRC Attitude Controller Based on ROS for a Two-Wheeled Self-Balancing Mobile Robot. *IEEE Access*, **11**, 94636-94646. <u>https://doi.org/10.1109/access.2023.3308948</u>
- [20] Lamraoui, H.C. and Qidan, Z. (2019) Path Following Control of Fully-Actuated Autonomous Underwater Vehicle in Presence of Fast-Varying Disturbances. *Applied Ocean Research*, 86, 40-46. <u>https://doi.org/10.1016/j.apor.2019.02.015</u>
- [21] Arcos-Legarda, J. and Gutiérrez, Á. (2023) Robust Model Predictive Control Based on Active Disturbance Rejection Control for a Robotic Autonomous Underwater Vehicle. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11, Article 929. <u>https://doi.org/10.3390/jmse11050929</u>
- [22] Fang, W. and Chen, Z. (2021) Modeling and Control Design of Quadrotor UAVs Using Symbolic Regression. 2021 *China Automation Congress (CAC)*, Beijing, 22-24 October 2021, 4201-4204. https://doi.org/10.1109/cac53003.2021.9727549
- [23] Haider, Z., Zohaib, M.M., Haider, F. and Shaghaei, E. (2021) Mathematical Modeling and Control System Design of Flapping Wing Unmanned Air Vehicle. 2021 4th International Conference on Robotics, Control and Automation Engineering (RCAE), Wuhan, 4-6 November 2021, 224-228. <u>https://doi.org/10.1109/rcae53607.2021.9638883</u>