

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.03.048

基于分数阶自抗扰的水下滑翔机运动控制研究

马玉印¹, 王娜^{1,2}, 丁军航³, 李沛¹

(1. 青岛大学 自动化学院, 山东 青岛 266071; 2. 山东省工业控制技术重点实验室, 山东 青岛 266071;

3. 康复大学 康复科学与工程学院, 山东 青岛 266113)

摘要:水下滑翔机对黑潮等强流进行观测时,其运动轨迹往往会受到严重的影响。为此,针对黑潮流域内水下滑翔机的轨迹跟踪控制问题设计一种分数阶自抗扰控制器,并对其中的扩张状态观测器进行改进。以海燕 II 为研究对象,在考虑洋流的情况下推导并搭建其数学模型,设计一种改进的分数阶自抗扰控制器并对其跟踪控制效果进行仿真验证。仿真结果表明:改进后的分数阶自抗扰控制器能够在一定程度上提高海燕 II 在黑潮流域内运动时的跟踪精度。

关键词:分数阶自抗扰控制;扩张状态观测器;水下滑翔机;黑潮;运动控制

中图分类号:P715.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)03-0250-04

Research on Motion Control of Underwater Glider Based on Fractional Order Active Disturbance Rejection Control

MA Yuyin¹, WANG Na^{1,2}, DING Junhang³, LI Pei¹

(1. School of Automation, Qingdao University, Qingdao 266071, China;

2. Shandong Key Laboratory of Industrial Control Technology, Qingdao 266071, China;

3. School of Rehabilitation Sciences and Engineering, University of Health and Rehabilitation Sciences, Qingdao 266113, China)

Abstract:Regarding the seriously affected trajectory in observing strong currents such as the Kuroshio by underwater glider, a fractional order active disturbance rejection controller is designed for the trajectory tracking control problem of underwater glider in the Kuroshio area. This paper, taking Petrel-II as the research object, deduces and builds a mathematical model by Simulink considering Kuroshio. An improved fractional order controller is designed and its tracking control effect is simulated and verified. The simulation results show that the improved fractional order active disturbance rejection controller can improve the tracking accuracy of Petrel-II in motion in the Kuroshio area to a certain extent.

Keywords:fraction order active disturbance rejection control; extended state observer; underwater glider; Kuroshio; motion control

0 引言

水下滑翔机是一种通过调整净浮力来驱动的无人自主水下航行器,自 1989 年美国海洋学家 STOMMEL^[1]首次提出水下滑翔机的概念以来,经过近几十年的发展已成为重要的水下移动观测平台之一^[2]。但在利用水下滑翔机对海洋进行观测的过程中,海洋中普遍存在的各种海流会对水下滑翔机的运动产生不尽相同的影响,导致水下滑翔机的运动偏离期望运动轨迹,影响其稳定性以及对海洋数据采集的准确性,所以对水下滑翔机运动轨迹的控制显得尤为重要^[3-4]。

在以往水下滑翔机轨迹控制的研究中,FAN 等^[5]通过设计的 PID 控制器来校正水下滑翔机在洋流中运动时的俯仰角与航向角以对其运动姿

态进行控制;BHATTA 等^[6]提出了一种非线性反馈控制率用来稳定水下滑翔机的运动轨迹;SU 等^[7]提出了一种基于自抗扰控制和强化学习的控制策略,用于保证水下滑翔机在洋流中的姿态角稳定进而控制其运动轨迹。但以上轨迹控制研究中未考虑洋流对水下滑翔机运动的影响,或者假设的洋流为流速与方向恒定且变化较小的洋流。

因此本文以海燕 II 为研究对象,同时以全球第二大洋流黑潮为背景,针对黑潮流域内的路径跟踪控制问题,设计了一种兼具分数阶控制与自抗扰控制优点的分数阶自抗扰控制器(fraction order active disturbance rejection controller, FOADRC),并对其中的扩张状态观测器部分进行了改进,最后通过 Simulink 仿真验证了改进型分数阶自抗扰控制器的有效性。

基金项目:2020 年山东省自然科学基金重点项目(ZR2020KF034);崂山实验室科技创新项目(LSKJ202201904)

第一作者简介:马玉印(1998—),男,山东泰安人,硕士研究生,研究方向为智能控制,17861121291@163.com。

1 水下滑翔机的建模

为了研究海燕 II 的运动^[8],以 x 轴为正北方向,根据右手定则建立惯性坐标系 $E-XYZ$ 与本体坐标系 $B-xyz$,两组坐标系统,如图 1 所示。

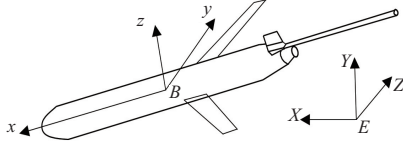


图 1 海燕 II 坐标系定义

海燕 II 的姿态角表示为 $\eta_2 = [\theta \ \phi \ \psi]$, 分别代表俯仰角、横滚角与偏航角,角速度矢量表示为 $\Omega = [p \ q \ r]$, 假设 $v_r = [u_r \ v_r \ w_r]$ 是本体坐标系下滑翔机相对于流体的速度, T_E^B 为本体坐标系到惯性坐标系的坐标变换矩阵, 则根据本体坐标系到惯性坐标系的坐标变换矩阵可知海燕 II 的运动速度方程为^[9]

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{bmatrix} = T_E^B \begin{bmatrix} u_r \\ v_r \\ w_r \end{bmatrix} \quad (1)$$

本体坐标系中水下滑翔机的角速度方程也可由欧拉角表示为^[10]

$$\Omega = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\theta & 0 & 1 \\ \cos\theta\cos\phi & \sin\phi & 0 \\ -\cos\theta\sin\phi & \cos\phi & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\psi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(1)与式(2)共同构成了海燕 II 的运动学方程。

在考虑洋流的情况下,根据动量和动量矩定理,可得到水下滑翔机的动力学方程^[11],并且在考虑到动力学方程的应用与简化后,其动力学方程在本体坐标系下可表示为

$$A_{m\lambda} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \\ \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} + A_{vw} \begin{bmatrix} u_r \\ v_r \\ w_r \\ p \\ q \\ r \end{bmatrix} = A_{FM} \quad (3)$$

式中相关参数 $A_{m\lambda}$ 、 A_{vw} 与 A_{FM} 的具体形式以及海燕 II 的主要几何物理参数可参考文献[11]

和文献[12]。然后代入式(3)便可得到海燕 II 的动力学方程。式(1)、式(2)以及式(3)共同构成了海燕 II 的动力学模型。

2 FOADRC 的设计

自抗扰控制是由韩京清老师在传统 PID 控制算法基础上提出的一种非线性反馈控制策略,主要由跟踪微分器、非线性误差反馈器以及扩张状态观测器组成^[13]。本文以自抗扰控制器为基础,首先针对扩张状态观测器在分界点处会存在控制波动的问题进行了改进,然后将非线性误差反馈控制器用分数阶 PID 控制器取代,从而实现 FOADRC 的设计,这样得到的控制器更加灵活,抗干扰能力也大大提升,其结构框图如图 2 所示。

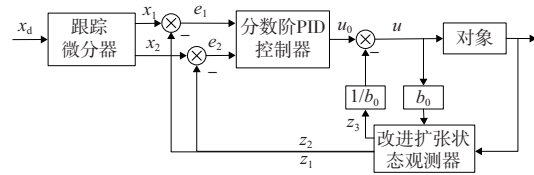


图 2 分数阶自抗扰控制器

2.1 跟踪微分器

跟踪微分器的作用是给系统增加一个过渡过程^[14],将输入信号转化为更加平滑的输入信号及其微分信号。其离散形式为

$$\begin{cases} x_1(k+1) = x_1(k) + h \cdot x_2(k) \\ x_2(k+1) = x_2(k) + h \cdot \text{fhan}(x_1(k) - x_d(k), x_2(k), r_0, h_0) \\ x_2(k), r_0, h_0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: h 是采样周期; k 是第 k 个采样时刻; x_d 为理想输入信号; x_1 为 x_d 的跟踪信号; x_2 为 x_1 的微分信号; $\text{fhan}(x_1(k) - x_d(k), x_2(k), r_0, h_0)$ 为非线性函数:

$$\text{fhan}(x_1(k) - x_d(k), x_2(k), r_0, h_0) = \begin{cases} -r_0 \cdot \text{sign}(a) & |a| > d \\ -r_0 \cdot \frac{a}{d} & |a| \leq d \end{cases} \quad (5)$$

式中: r_0 是速度因子; h_0 是滤波因子; a 与 d 的定义如下:

$$\begin{cases} d = r_0 \cdot h_0 \\ d_0 = h_0 \cdot d \\ y_0 = x_1(k) - x_d(k) + h_0 \cdot x_2(k) \\ a_0 = \sqrt{d^2 + 8r_0 \cdot |y_0|} \\ a = \begin{cases} x_2(k) + \frac{(a_0 - d)}{2} \cdot \text{sign}(y_0) & |y_0| > d_0 \\ x_2(k) + \frac{y_0}{h_0} & |y_0| \leq d_0 \end{cases} \end{cases} \quad (6)$$

2.2 扩张状态观测器

扩张状态观测器是自抗扰控制器中的重要部分,能够对系统所受到的包括黑潮在内的总扰动进行观测,然后将观测到的扰动总量补偿给控制系统^[15]。离散形式的扩张状态观测器为

$$\begin{cases} e = z_1(k) - x(k) \\ z_1(k+1) = z_1(k) + h \cdot (z_2(k) - \beta_1 \cdot e) \\ z_2(k+1) = z_2(k) + h \cdot (z_3(k) - \beta_2 \cdot \text{fal}(e, \alpha_1, \delta) + b \cdot u(k)) \\ z_3(k+1) = z_3(k) - h \cdot \beta_3 \cdot \text{fal}(e, \alpha_2, \delta) \end{cases} \quad (7)$$

式中: z_1, z_2 与 z_3 分别是对系统状态变量 x_1, x_2 以及 x_3 的估计值; β_1, β_2 和 β_3 是观测器增益; fal 为非线性函数:

$$\text{fal}(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} e \cdot \delta^{\alpha-1} & |e| \leq \delta \\ |e|^\alpha \cdot \text{sign}(e) & |e| > \delta \end{cases} \quad (8)$$

式中: α 为 $0 \sim 1$ 之间的幂次; δ 为滤波因子。

对于式(8)中的非线性 fal 函数,当系统误差无限趋近于 0 时, sign 函数会产生抖动现象^[16],这会对水下滑翔机控制系统的设计带来一定的干扰。对式(8)中 fal 函数的误差 e 进行求导,可以得到

$$\text{fal}'(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} 1/\delta^{1-\alpha} & 0 < e \leq \delta, \delta > 0 \\ \alpha e^{\alpha-1} & e > \delta, \delta > 0 \end{cases} \quad (9)$$

当 $e = \delta^-$ 时, $\text{fal}'(e, \alpha, \delta) = e^{\alpha-1}$; 当 $e = \delta^+$ 时, $\text{fal}'(e, \alpha, \delta) = \alpha e^{\alpha-1}$, 表明非线性函数 $\text{fal}(e, \alpha, \delta)$ 虽然是一个连续函数,但是在 δ 点处导数不存在,因此在分界点处会存在控制波动,影响系统的动态稳定性。由于 $\sin(e)$ 和 $\tan(e)$ 在 0 点附近拥有比误差 e 更好的收敛性,故采取将 fal 函数与 $\sin(e)$ 、 $\tan(e)$ 线性组合的 faln 函数^[17],以改良其性能。组合后的 faln 函数为

$$\text{faln}(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} |e|^\alpha \text{sign}(e) & |e| > \delta \\ \frac{(\delta^\alpha - \alpha \cdot \delta^{\alpha-1} \cdot \cos^2 \delta \cdot \tan \delta) \cdot \text{sine}}{\sin^3 \delta} & |e| \leq \delta \\ \frac{(\delta^\alpha \cdot \cos \delta - \alpha \delta^{\alpha-1} \cdot \sin \delta) \cdot \text{tane}}{\sin \delta \cdot \tan^2 \delta} & |e| \leq \delta \end{cases} \quad (10)$$

2.3 分数阶 PID 控制器

分数阶 PID 相较于整数阶 PID 增加了可调的积分阶次 λ 与微分阶次 μ , 因此具有更多的自由度^[18], 对被控系统也有着更好的控制能力。将自抗扰控制器中的非线性误差反馈控制器替换为分数阶 PID 控制器, 设计控制器可得

$$u_0 = K_p e_1 + K_i s^{-\lambda} e_1 + K_d s^\mu e_2 \quad (11)$$

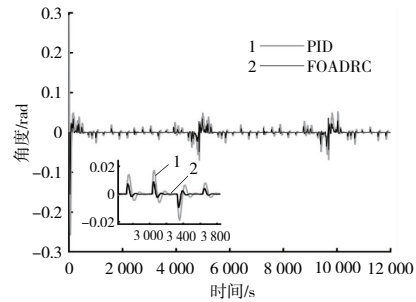
式中: K_p 是比例系数; K_i 是积分系数; K_d 是微分系数。

3 FOADRC 的仿真验证与分析

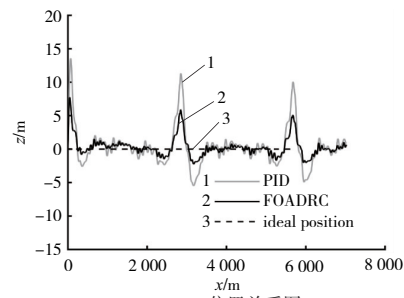
由于水下滑翔机模型复杂, 内部耦合严重, 且是典型的欠驱动系统^[19-20], 无法直接对海燕 II 的运动轨迹进行控制, 因此考虑通过控制其偏航角与俯仰角来分别对水下滑翔机的偏航运动与纵倾运动进行控制。

下面以海燕 II 在无干扰时的运动轨迹作为期望轨迹来验证 FOADRC 的控制效果, 并与现阶段水下滑翔机航向控制中使用最广泛的 PID 方法进行对比。

仿真条件设置如下: 以 2021 年 7 月 3 日吕宋岛东侧东经 17.319 9°, 北纬 123.400 0° 附近处的黑潮数据为干扰, 选择无干扰时海燕 II 的俯仰角 $\pm 0.515 8 \text{ rad}$ 与偏航角 $0.000 0 \text{ rad}$ 为期望姿态角, 仿真时间设定为 1 200 s。图 3 与图 4 分别为两种控制方法对海燕 II 偏航运动与纵倾运动的控制仿真结果对比。

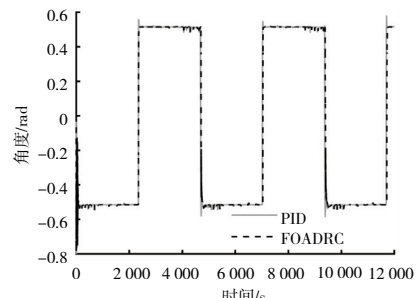


(a) 偏航角控制



(b) x-z 位置关系图

图 3 偏航运动控制曲线图



(a) 俯仰角控制

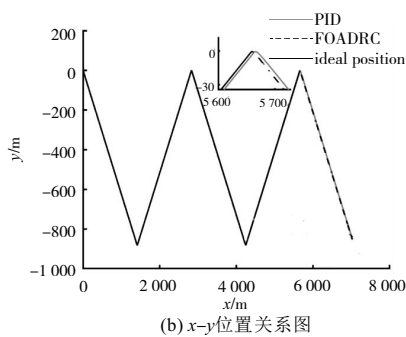


图4 纵倾运动控制曲线图

从图3可以看出,在黑潮流速不断变化的情况下,PID控制器对偏航角的控制效果相对较差,而FOADRC控制器因为具有估计补偿外部干扰的能力,使得水下滑翔机当前时刻的偏航角更接近期望偏航角,相较于传统PID控制器在平均误差方面下降了62.67%,并且最远偏航距离也较小。表1为两种方法对偏航运动控制结果的指标对比。从表中也可以看出,FOADRC控制下的误差更小,表明在对海燕II的偏航运动控制中,FOADRC控制器的控制效果优于PID控制。

表1 偏航运动控制中PID与FOADRC指标对比

控制算法	平均误差	均方误差
PID	1.625 9	7.184 2
FOADRC	0.812 1	1.832 6

由图4可得知,两种方法在对纵倾运动的控制过程中,PID控制器在对俯仰角的控制中会出现超调,特别是在黑潮流速最大的海表附近时,超调尤为明显。而FOAFRC控制器下的俯仰角变化则较为平缓,相较于PID控制均方误差也减少了约19.55%,并且从图4(b)中可以看出相较于传统PID控制对纵倾运动的控制效果也更好。

此外,从图3(b)以及图4(b)中可得知,海燕II的运动轨迹在经过控制后,能够更好地按照期望轨迹来运动,这有效地保证了运动的稳定性以及海洋数据采集的准确性,且在黑潮影响下的运动距离会比无洋流时更远。

4 结语

本文为了对黑潮影响下的水下滑翔机运动进行控制,以保证其稳定性以及对海洋数据采集的准确性,设计了将分数阶控制与自抗扰控制结合的分数阶自抗扰控制器,以此对黑潮的影响作为总扰动之一来进行补偿,同时对自抗扰控制器中的关键部分扩张状态观测器进行了改进,使控制

过程更加平稳。仿真结果表明:无论是在偏航运动还是纵倾运动的控制中,所设计的改进型FOADRC控制器相较于传统PID控制器都具有更高的控制精度,能够更好地完成对水下滑翔机在黑潮区域内的运动轨迹控制。

参考文献:

- [1] STOMMEL H. The Slocum mission[J]. Oceanography, 1989,2(1):22-25.
- [2] 赵佳宝. 基于水下滑翔机的海洋三维声速场重构技术研究[D]. 杭州:杭州电子科技大学,2024.
- [3] 王浩亮,孙定翔,马小轩,等. 基于双层协调体系的多圆碟形AUG路径规划[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2023,44(5):783-792.
- [4] 石晴晴,牛文栋,张润锋,等. 水下滑翔机路径规划研究综述及展望[J]. 中国舰船研究, 2023, 18(1): 29-42,51.
- [5] FAN SS, WOOLSEY C A. Dynamics of underwater gliders in currents[J]. Ocean Engineering, 2014, 84: 249-258.
- [6] BHATTA P, LEONARD N E. Stabilization and coordination of underwater gliders[C] //Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control, 2002. Las Vegas, NV, USA: IEEE, 2002:2081-2086.
- [7] SU Z Q, ZHOU M, HAN F F, et al. Attitude control of underwater glider combined reinforcement learning with active disturbance rejection control[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2019, 24(3):686-704.
- [8] 秦悦,王冠琳,官晟,等. 水下滑翔机中尺度过程空间采样运动仿真[J]. 水下无人系统学报, 2022(4): 474-484,513.
- [9] ZHANG Y L, YIN B J, JIAO H F, et al. Model establishment and parameter identification of remotely operated vehicle (ROV)[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2024, 2785(1):012107.
- [10] 林锐,曹军军,刘纯虎,等. 全姿态水下移动平台模式切换姿态控制研究[J]. 海洋技术学报, 2023, 42(4):1-13.
- [11] 张福斌,汪刚,陈宇航,等. 水下滑翔机建模与运动PID控制[J]. 鱼雷技术, 2011, 19(2):114-119.
- [12] WANG Y Z, NIU W D, YU X, et al. Quantitative evaluation of motion performances of underwater gliders considering ocean currents[J]. Ocean Engineering, 2021, 236:109501.
- [13] 时来富,沈建新,王启盛,等. 四旋翼飞行器的模糊自抗扰姿态控制[J]. 机械制造与自动化, 2021, 50(3):157-162.

(下转第300页)

- 收稿日期:2023-07-26

- [14] WANG S H, GAN H, LUO Y, et al. Active disturbance rejection control with fractional - order model - aided extended state observer [J]. ISA Transactions, 2023, 142:527-537.
- [15] LEE J, YOU S S, KIM W, et al. Extended state observer-actor - critic architecture based output - feedback optimized backstepping control for permanent magnet synchronous motors [J]. Expert Systems with Applications, 2025, 270:126542.
- [16] 张祥, 李广文, 曹睿婷, 等. 基于自抗扰控制方法的自动着陆飞行控制律设计 [J]. 弹箭与制导学报, 2020, 40(5): 98-104.
- [17] 刘伟, 胡磊, 陈雪辉等. 光伏跟踪电机的分数阶自抗扰控制方法 [J]. 电力系统及其自动化学报.

- 收稿日期:2023-09-04