

# 基于 SSA-模糊 PID 的 AUV 姿态控制研究

王景楠, 齐向东, 刘丹

(中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051)

**摘要:** 针对 AUV 高精度、高稳定性姿态控制的提升需求, 提出一种结合麻雀算法 (SSA) 和模糊 PID 控制的姿态控制器; 采用麻雀算法对模糊 PID 控制器参数进行优化, 并将寻优后模型用于算法的反馈补偿, 有效解决了模糊 PID 控制过度依赖经验, 难以应对水下复杂工况的问题; 仿真结果表明, SSA-模糊 PID 控制器在 AUV 姿态调节中表现出较传统模糊 PID 控制器更好的响应速度和抗干扰能力, 有效改善了 AUV 姿态控制性能; 经实际应用验证, 控制器在复杂工况下可快速收敛至期望姿态并维持稳定。

**关键词:** 自主水下航行器 (AUV); 姿态控制; 麻雀算法 (SSA); 模糊 PID; 控制优化

## Research on AUV Attitude Control Based on SSA-Fuzzy PID

WANG Jinnan, QI Xiangdong, LIU Dan

(Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement, Ministry of Education,  
North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** In order to improve the attitude control of autonomous underwater vehicles (AUV) with high precision and stability, an attitude controller combining sparrow search algorithm (SSA) and fuzzy PID control was proposed. The SSA is used to optimize the parameters of the fuzzy PID controller, and the optimized model is applied in the feedback compensation of the algorithm, which effectively solves the problem that the fuzzy PID control is overly dependent on experience and difficult to deal with complex underwater conditions. The simulation results show that the SSA-fuzzy PID controller has better response speed and anti-interference ability than traditional fuzzy PID controllers in attitude adjustment of AUV, and it effectively improves the attitude control performance of AUV. After the practical application verification, the controller can quickly converge to the desired attitude and maintain stability under complex working conditions.

**Keywords:** AUV; attitude control; SSA; fuzzy PID; control optimization

## 0 引言

随着海洋资源开发和海洋科学研究的日益深入, 自主水下航行器 (AUV) 在水下勘探、环境监测、科学采样等诸多领域发挥着重要作用。AUV 的性能优劣直接影响到其执行任务的效率和准确性, 在所有性能指标中, 姿态控制尤为关键, 它关乎 AUV 对复杂水下环境的应对能力以及执行精密作业的稳定性。尽管传统的 PID 控制器在许多工程系统中被广泛应用, 但因其参数设置缺乏动态适应性, 面临模型不确定性及外部扰动时, 控制效果往往难以满足日益严苛的应用需求。现有的研究多聚焦于提高模糊控制和 PID 控制在特定场景下的应用效果, 文献 [1] 将专家控制与 S 面控制结合设计 UUV 姿态控制器, 可根据环境变化实时调整控制参数, 具有一定的自适应性, 但比较依赖准确的数据模型<sup>[1]</sup>; 文献 [2] 提出一种基于 RBF 神经网络补偿的线性自抗扰控制方法, 利用神经网络的自学习和自适应能力, 将其用于扰动观测器的改进, 实现在不同阶跃信号

下对扰动的准确估计, 但存在收敛速度较慢的问题<sup>[2]</sup>; 文献 [3] 提出了一种基于遗传算法整定 PID 控制器, 通过遗传算法优化 PID 3 个参数, 采用惩罚参数抑制超调, 适用于复杂系统, 具备一定鲁棒性, 但可能存在局部最优解问题<sup>[3]</sup>。文献 [4] 用动态定位策略和自调模糊 PID 方法, 对水下 AUV 的控制进行了研究, 并采用自调模糊 PID 理论设计了 AUV 四自由度控制器, 控制精度较高, 但涉及多传感器融合, 在复杂环境下仍可能存在一定的局限性<sup>[4]</sup>。文献 [5] 提出一种分数阶 PID 策略。它是传统整数阶 PID 控制器的一种更广义的形式, 保持了其简单性, 并利用了广义导数和积分控制动作<sup>[5]</sup>。文献 [6] 提出了设计两个独立的简单控制器控制, LQR 控制器用于稳定车辆深度和侧倾/俯仰姿态; 自整定 PID 控制器用于浪涌速度和偏航姿态的轨迹跟踪, LQR/自适应 PID 控制架构相结合, 以最小的计算工作量很好地处理噪声和不确定性<sup>[6]</sup>。文献 [7] 设计了一种基于扰动观测器 (DO) 的可变积分 PID 控制器, 控制

收稿日期: 2024-02-05; 修回日期: 2024-03-20。

基金项目: 山西省科技创新人才团队专项资助(202304051001030)。

作者简介: 王景楠(1998-), 男, 硕士研究生。

通讯作者: 齐向东(1973-), 男, 教授, 硕士研究生导师。

引用格式: 王景楠, 齐向东, 刘丹. 基于 SSA-模糊 PID 的 AUV 姿态控制研究[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(5): 144-150.

器设计简单易行, 控制参数选择方便, 但收敛速度较慢, 并且控制任务单一, 不能快速跟踪复杂的期望轨迹<sup>[7]</sup>。文献 [8] 引入级联自适应动力学模型 (AdaptDM) 控制律来补偿环境扰动, 控制器基于级联结构, 架构的增益是根据控制器组件之间的交互来估计的<sup>[8]</sup>。综上, 现有的研究多聚焦于提高模糊控制和 PID 控制在特定场景下的应用效果, 但对于如何在动态变化的海洋环境下对控制策略的自适应性调整, 研究仍相对不足, 控制器设计中如何快速有效地响应环境变化, 确保 AUV 稳定可靠地完成任任务, 仍是一个挑战且有待解决的问题。因此本文提出引入麻雀算法 (SSA), 将其作为预处理手段, 用于控制参数的实时优化, 以此来增强模糊 PID 控制系统在面对环境不确定性和参数变化时的鲁棒性, 提高了 AUV 姿态控制的实用性和可靠性, 提升了系统的自适应能力。最后进行了仿真和湖试试验, SSA-模糊 PID 控制器对于 AUV 的姿态调整和稳态维持具有显著的改善效果, 无论是响应速度还是抗干扰性均优于传统模糊 PID 控制策略。

## 1 水下航行器模型建立

### 1.1 建立坐标系

当前运动坐标系分为两种, 一种是国际拖曳船模水池会议推荐的坐标系定义, 称为通用坐标系或 ITTC 坐标系; 另一种是前苏联等国家的非通用坐标系, 称为 CCCP 坐标系<sup>[9]</sup>。本文采用 ITTC 坐标系, 定义了地坐标系和体坐标系。

#### 1.1.1 地坐标系 $E-\xi\eta\zeta$

地坐标系与地球表面固连, 也称为固定坐标系。在海洋空间内任取一点  $E$  为原点, 轴  $\xi$  在水平面内指向任意方向。我们通常把原点  $E$  选在发射点, 轴  $\xi$  为发射方向, 轴  $\zeta$  垂直水平面向下, 轴  $\eta$  满足右手坐标系, 垂直于轴  $\xi$  和轴  $\zeta$ , 三坐标轴相互垂直, 且均以  $E$  点出发的方向为正方向。固定坐标系也可理解为惯性坐标系, 是以固定的参考点  $E$  为参考来描述 AUV 的相对位置。

#### 1.1.2 体坐标系 $B-xyz$

体坐标系与水下航行器固连, 为了表述方便, 通常把 AUV 的重心点选作坐标系原点,  $Bx$  轴方向选取为 AUV 前进的方向,  $Bz$  轴与  $Bx$  轴相互垂直, 正方向规定为向下方向,  $By$  轴垂直于  $Bxz$  平面, 体坐标系满足右手坐标系, 也将其称为运动坐标系, 具有非惯性性质, 其转动惯量是恒定不变的, 更方便我们研究水动力问题<sup>[10-12]</sup>。坐标示意图如图 1 所示。

### 1.2 坐标系转换

设水下航行器相对体坐标系的坐标为  $(x, y, z)$ , 相对地坐标系的坐标为  $(\xi, \eta, \zeta)$ , 水下航行器的姿态角即俯仰角  $\theta$ , 航向角  $\psi$ , 横滚角  $\varphi$ 。两坐标系之间的转换关系如式 (1) 所示:

$$\begin{bmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{bmatrix} = C_E^B \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (1)$$

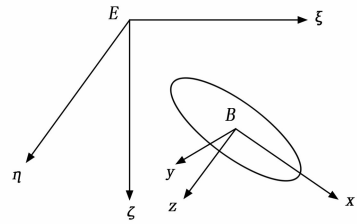


图 1 坐标系示意图

其中转换矩阵如式 (2) 所示:

$$\begin{bmatrix} \cos\psi\cos\theta & \cos\psi\sin\theta\sin\varphi - \sin\psi\cos\varphi \\ \sin\psi\cos\theta & \sin\psi\sin\theta\sin\varphi + \cos\psi\cos\varphi \\ -\sin\theta & \cos\theta\sin\varphi \\ \cos\psi\sin\theta\cos\varphi + \sin\psi\sin\varphi \\ \sin\psi\sin\theta\cos\varphi - \cos\psi\sin\varphi \\ \cos\theta\cos\varphi \end{bmatrix} \quad (2)$$

### 1.3 水下航行器运动学模型建立

UUV 在水下的运动可视为刚体运动, 其六自由度方程可表示如下<sup>[7]</sup>:

平移方程:

$$\begin{cases} X = m[\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] \\ Y = m[\dot{v} - wp + ur - y_G(r^2 + p^2) + y_G(qr - \dot{p}) + x_G(qp + \dot{r})] \\ Z = m[\dot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) + z_G(rq + \dot{p})] \end{cases} \quad (3)$$

旋转方程:

$$\begin{cases} K = [y_G(-qu + pv + \dot{w}) - z_G(ru + \dot{v} - pw)] + pI_{xx} + qr(I_{xx} - I_{yy})m \\ M = [-x_G(-qu + pv + \dot{w}) + z_G(\dot{u} - rv + qw)] + qI_{yy} + pr(I_{xx} - I_{zz})m \\ N = [x_G(ru + \dot{v} - pw) - y_G(\dot{u} - rv + qw)] + rI_{zz} + pq(I_{yy} - I_{xx})m \end{cases} \quad (4)$$

为便于建立模型, 取 AUV 的重心作为原点构建体坐标系, 其重心坐标如式 (3) 所示:

$$r_G = \begin{bmatrix} x_G \\ y_G \\ z_G \end{bmatrix} \quad (5)$$

AUV 航行过程中主要考虑俯仰和航向角的控制稳定, 因此将 AUV 模型简化为垂直面和水平面方程进行仿真分析<sup>[22]</sup>。

垂直面的运动分为在  $B-xz$  平面的平移运动和绕  $By$  轴的旋转运动, 纵向运动时  $v_1 = [u \ 0 \ w]^T, v_2 = [0 \ q \ 0]^T$ , 得到垂直面简化运动方程为:

$$\begin{cases} \dot{\xi} = u\cos\theta - w\sin\theta \\ \dot{\zeta} = -u\sin\theta + w\cos\theta \\ \dot{\theta} = q \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $\xi, \zeta, \theta$  分别表示从体坐标系转换到惯性坐标系下线

速度： $u, w$  分别表示航行器在  $x$  轴、 $z$  轴的线速度， $q$  表示绕  $y$  轴旋转的角速度， $\theta$  表示俯仰角。

水平面的运动分为在  $B-xy$  平面的平移运动和绕  $Bz$  轴的旋转运动。横向运动时  $v_1 = [u \ v \ 0]^T, v_2 = [0 \ 0 \ r]^T$ ，得到水平面简化运动方程为：

$$\begin{cases} \dot{\xi} = u\cos\psi - v\sin\psi \\ \dot{\eta} = u\sin\psi + v\cos\psi \\ \dot{\psi} = r \end{cases} \quad (8)$$

式中， $\dot{\xi}, \dot{\eta}, \dot{\psi}$  分别表示  $u, v, r$  分别表示从体坐标系转换到惯性坐标系下线速度， $u, v$  分别表示航行器在  $x$  轴、 $y$  轴的线速度， $r$  表示绕  $z$  轴旋转的角速度， $\psi$  表示偏航角。

## 2 SSA-模糊 PID 姿态控制器设计

### 2.1 模糊 PID 控制

模糊 PID 控制是一种应用于控制系统中的自适应控制方法。它结合了模糊逻辑与 PID 控制器的优点，能够有效地解决传统 PID 控制器在非线性、时变等复杂系统中的性能问题。传统的 PID 控制器通过测量系统输出与期望输出之间的误差，并根据比例、积分、微分 3 个控制项的权重系数进行调节来实现控制系统的稳定性和响应速度。然而，传统 PID 控制器往往需要事先确定这些权重系数，且对于非线性或时变系统，效果可能不尽如人意。

模糊 PID 控制则不同，它基于模糊逻辑的概念，将模糊集合论应用于控制系统中。通过构建模糊化的输入量、输出量和规则库，可以根据系统的实际情况来自动调整 PID 控制器的权重系数，从而提高控制器的适应性。

### 2.2 模糊 PID 控制器设计

本文利用 MATLAB 软件平台搭建模糊 PID 控制器，首先确定模糊语言输入输出，确定模糊子集的隶属度函数，编辑模糊控制规则，最后导入到 simulink 模块中的模糊 PID 控制器中进行仿真分析。

#### 2.2.1 模糊语言变量的确定

变量  $E, EC$  作为模糊控制器输入，变量  $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$  作为输出。

#### 2.2.2 模糊子集的隶属度函数

首先，输入量  $E, EC$  以及输出变量  $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$  进行模糊化处理，将精确的输入偏差  $E$  转换为区间  $[-a, a]$ ；精确的输入偏差变化率  $EC$  转换为区间  $[-b, b]$ ，输出控制量  $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$  转换为区间  $[-c, c]$ 。其中， $a, b, c$  是经过离散处理后的区域值，该区域值需要根据实际情况选择适当的值。本文在隶属度函数选用时，分别选取 S 型隶属度函数和 Z 型隶属度函数放在误差大的起始和末尾区域，中间部分就选择精确度较高三角形函数，提高系统的响应速度、控制精度以及稳定度。如图 2 所示为输出量  $\Delta K_p$  的隶属度函数图。

#### 2.2.3 模糊规则

在进行模糊控制时，需要提前设定模糊规则，模糊规则是以相关人员的历史经验为依据，通过概括归纳，把它变成控制系统可以引用的规律，进而可以对被控对象自动

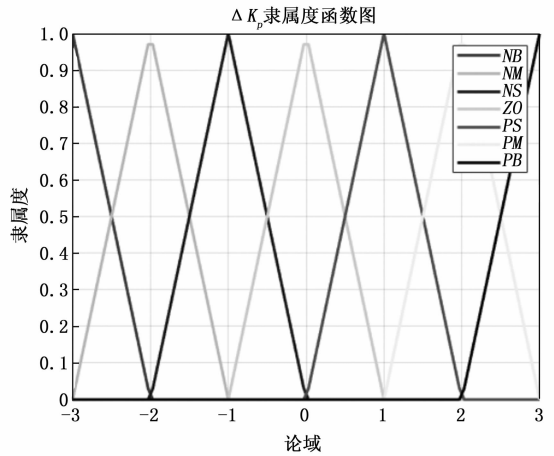


图 2 输出量隶属度函数图

调整，达到令人满意的控制效果。模糊 PID 控制参数选取时要考虑参数之间在不同时刻的关联性，不同的  $e$  和  $ec$ ，相对应的  $K_p, K_i, K_d$  调整规则如下：如果  $e$  比较大，为了保证系统响应的增快，不使误差在系统启动过程中突然增大而导致微分饱和和情况出现，那么就选相对大一些的  $K_p$ 、小一些的  $K_d$ ；并且不允许系统输出结果超调过大，避免积分饱和和现象的发生，然后对积分环节进行约束，取更小的数值，通常取为  $K_i=0$ 。如果  $e$  适中，为了使系统输出结果能够达到目标效果，应选用较小的  $K_p$  值使超调量尽可能地减少； $K_d$  和  $K_i$  的值根据具体情况确定，保证良好的控制效果。如果  $e$  比较小，为了保证系统在响应过程中避免引起大的起伏， $K_p, K_i$  的数值选取略大；同时要考虑外界干扰，避免达到预期值时发生震荡。

#### 2.2.4 模糊推理

模糊推理就是利用模糊逻辑来拟定给定输入向输出映射。在此过程中，隶属度函数、模糊规则都会参与其中。模糊规则直接关系到模糊推理算法，其复杂性取决于模糊规则语句中模糊集合隶属函数的确定。本文在控制器设计中选择了应用最广泛 Mamdani 模糊推理方法，输出  $U$  为：

$$U = (E \times EC)^T \circ R \quad (9)$$

式中，“ $\circ$ ”表示模糊集运算， $R$  表示系统总模糊控制规则。

#### 2.2.5 反模糊化

模糊控制器的中的模糊推理单元，其输入和输出都是模糊值，执行机构不能直接输入模糊值，需要通过反模糊化过程将输出模糊值转化为控制精确值<sup>[16-18]</sup>。本论文选用一种响应速度快，即使输入信号发生微小的变化都能及时响应并且输出比较平滑的重心法，由于其优点众多，在反模糊化中得到广泛应用。计算公式为：

$$u = \frac{\sum_{j=1}^n x_j \mu(x_j)}{\sum_{j=1}^n \mu(x_j)} \quad (10)$$

式中， $x_j$  为模糊论域元素， $\mu(x_j)$  为论域元素的隶属度。

模糊 PID 控制流程如图 3 所示，在 AUV 执行目标任务时通过姿态传感器反馈实时姿态角，得到数据后与输入期

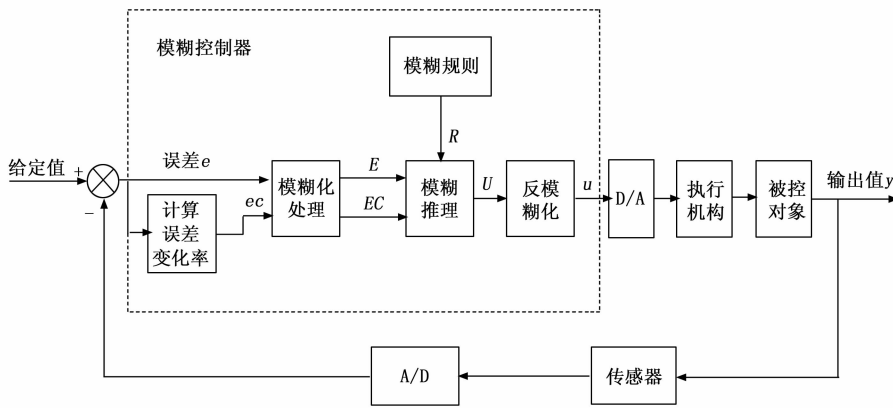


图 3 模糊 PID 控制器结构图

望值计算偏差值及偏差变化率, 以此作为控制器输入, 经模糊控制一系列处理后, 控制器输出可被 PID 控制器接受的 PID 参数, 最后将输出量传递给 AUV 完成姿态调整。

### 2.3 麻雀搜索算法

麻雀算法 (SSA) 是一种基于群体智能的优化算法, 灵感来自于麻雀鸟群的集体行为<sup>[19]</sup>。麻雀算法的核心思想是通过个体之间的相互影响和信息交流, 从而实现全局最优解的搜索。同时, 麻雀算法具有良好的鲁棒性和全局搜索能力, 能够有效地避免局部最优解。在麻雀搜索算法中分别设置发现者、加入者和侦察者, 每一只麻雀位置对应一个解。

#### 2.3.1 发现者模型

在麻雀种群中, 当一些发现者的适应度较高时, 就会率先获得食物, 并且给加入者指引食物的来源方向。发现者的位置更新情况如式所示:

$$x_i^{t+1} = \begin{cases} X_i \cdot \exp\left(-\frac{i}{\alpha \cdot iter_{\max}}\right), & R_2 < ST \\ X_i + Q \cdot L, & R_2 \geq ST \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $t$  表示迭代次数,  $X_{ij}$  表示所在位置第  $i$  个麻雀在第  $j$  维,  $iter_{\max}$  为最大迭代次数,  $\alpha$  是一个随机数,  $R_2 \in (0, 1)$  代表预警值;  $ST \in (0.5, 1)$  代表安全阈值。Q 为正态分布的随机数, L 是各匀速均为 1 的矩阵。

当  $R_2 < ST$  时, 表明种群中的麻雀个体尚未对危险产生知觉, 全部麻雀种群都在安全区域内, 发现者可以指导种群进行广泛地寻找食物; 当  $R_2 \geq ST$  时, 意味着种群中的一些麻雀个体已经感受到了危险, 并且发出警报信号, 放弃觅食, 整个种群会紧急避险, 重新飞往安全区域觅食。

#### 2.3.2 加入者模型

在麻雀种群中, 还有一部分麻雀的身份是加入者, 加入者和发现者的种群总数是固定不变的, 但在寻找食物过程中, 两者单独的数量是可以不断变化的, 二者身份可以互换以便于搜寻到更好的食物。加入者的位置更新情况如下:

$$X_i^{t+1} = \begin{cases} Q \cdot \exp\left(\frac{x_{\text{trust}}^t - x_i^t}{i^2}\right), & i > n/2 \\ X_p + |X_i - X_p| \times A^+ \times L, & i \leq n/2 \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $X_p$  表示当前发现者的最优位置;  $X_{\text{trust}}$  表示全局中最

差的位置, A 表示搜索方向, 矩阵中元素随机赋值  $\pm 1$ ,  $A^+ = A^T \cdot (AA^T)^{-1}$ 。

当  $i < n/2$  时, 说明加入者中第  $i$  只麻雀的觅食位置在最优位置 X 的附近; 当  $i > n/2$  时, 说明加入者群体中的第  $i$  只麻雀个体适应度较低, 没有食物来源, 该只麻雀将飞往其他区域去寻找食物。

#### 2.3.3 侦察者模型

侦察者的初始位置并不是固定的, 是随机产生的, 是加入者群体的一部分, 其比例为种群数量的 10% 到 20%, 数学表达式如式 (13) 所示:

$$X_i^{t+1} = \begin{cases} X_{\text{best}}^t + \beta \cdot |X_i^t - X_{\text{best}}^t|, & f_i > f_g \\ X_i^t + K \left( \frac{X_i^t - X_{\text{worst}}^t}{(f_i - f_w) + \epsilon} \right), & f_i \leq f_g \end{cases} \quad (13)$$

式中,  $f_i$  表示个体当前的适应度,  $f_g$  和  $f_w$  分别表示全局中最佳和最差位置的适应度,  $X_{\text{best}}$  和  $X_{\text{worst}}$  分别表示运行过程中最好和最差的位置;  $\beta$  是方差为 1 的正态分布随机数, 表示步长参数。当  $f_i < f_g$  时, 说明麻雀个体即将脱离种群, 具有很大的危险性, 容易遭受袭击; 当  $f_i > f_g$  时, 表明位于中心的个体意识到危险, 接近其余个体, 最大限度降低被袭击的概率; 当  $f_i = f_g$  时说明这些麻雀已处于最优质的位置。

### 2.4 SSA-模糊 PID 控制

由于 SSA 算法较好的寻优效果, 可利用麻雀搜索算法, 对模糊 PID 控制输入和输出进行了连续在线迭代优化, 也就是优化偏差、偏差变化率和比例因子, 然后通过模糊控制算法中的模糊化与反模糊化处理, 动态的调节权重因子让系统的动态性能以及控制精度达到最优效果。首先, 建立 AUV 姿态控制的数学模型, 明确系统的性能指标, 如偏差、偏差变化率和比例因子。这些性能指标将作为 SSA 算法的优化目标, 即适应度函数, 用于评价 PID 参数的优劣。其次, 初始化麻雀群体位置, 即 PID 控制器的 P、I、D 参数。每个麻雀个体代表了一组可能的 PID 参数, 通过随机或者其他方法生成初始参数。随后, 根据 SSA 算法的捕食行为, 设计搜索更新策略。SSA 算法中的麻雀通过跟随当前的最佳解或随机搜索空间中其他位置来更新自己的位置, 即更新 PID 参数。在更新过程中, 通过模糊控制对算法的

参数进行自适应调整，以增强算法的搜索能力和适应性。接着，计算每个麻雀个体的适应度值，即将每组 PID 参数代入 AUV 姿态控制系统，通过模拟系统响应评价其性能。适应度值高的个体将有更高的概率成为领头麻雀，引导群体进行搜索。

在迭代过程中，持续更新麻雀个体的位置和适应度函数，并记录下最佳的 PID 参数及其对应的性能指标，直到满足终止条件，如达到最大迭代次数或适应度值满足预定阈值，算法结束。将得到的最佳 PID 参数设置到 AUV 姿态控制系统中，并进行验证。SSA-模糊 PID 控制器结构如图 4 所示。

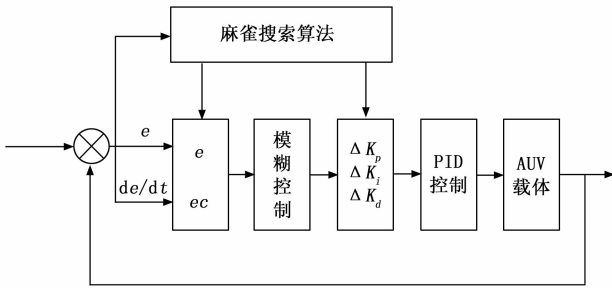


图 4 SSA-模糊 PID 控制器结构图

SSA-模糊 PID 算法的流程图如图 5 所示。

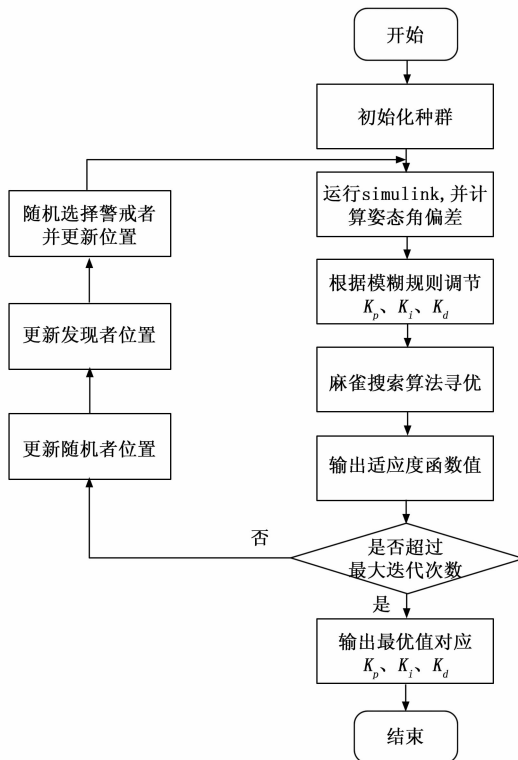


图 5 SSA-模糊 PID 算法的流程图

### 3 仿真分析

在 MATLAB 环境中根据 SSA 算法设计 Simulink 模型并编写相应的程序，SSA 算法参数设置如下：种群规模为 50，迭代次数为 50，预警值  $ST=0.6$ ，发现者  $PD=0.26$ ，

警戒者  $SD=0.2$ ，对模糊 PID 中的输入输出五个参数进行优化，采样周期为 0.01 s。

#### 3.1 俯仰角控制仿真

根据前文在垂直面的简化模型，在这里列出拉氏变换的传递函数，得到俯仰角传递函数为<sup>[11]</sup>：

$$G_1(s) = \frac{0.946s + 0.379}{2.866s^3 + 3.737s^2 + s} \quad (14)$$

仿真得出 SSA 算法适应度值迭代图如图 6 所示，可以看出 SSA 的下降速度快，寻优能力强，在第 26 次迭代寻找到最优解。

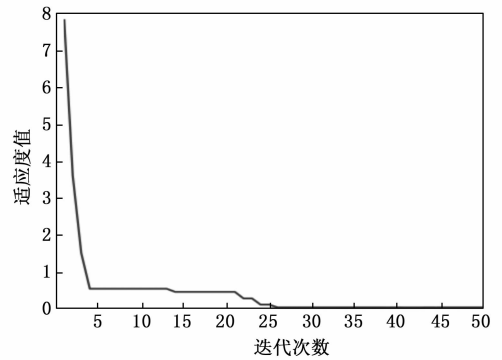


图 6 SSA 适应度值迭代图

设置期望角为 45°，运行时间 10 s，在阶跃响应下得到有无扰动添加的俯仰角模糊 PID 控制仿真曲线对比图如图 7 所示，横坐标表示时间，纵坐标表示角度值。

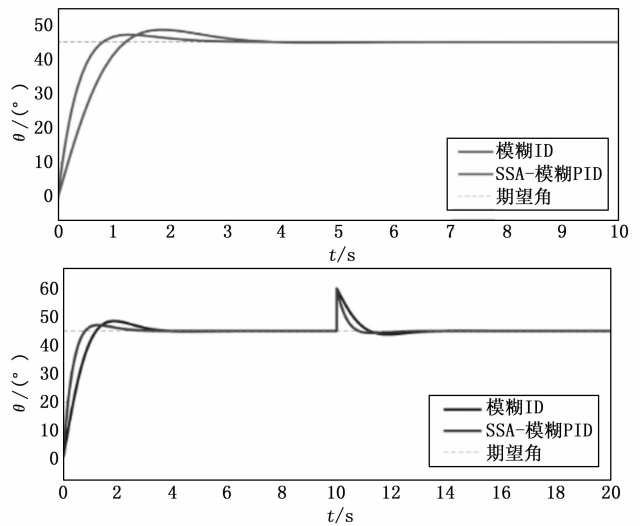


图 7 有无扰动俯仰角响应对比图

由图 6 可以看出，经麻雀搜索算法对模糊 PID 进行优化后，响应速度更快，调节时间变短，模糊 PID 控制的调节时间为 6.36 s，优化后调节时间为 4.24 s，超调量也相对下降，提高了系统的动态性能，加快了收敛速度。在 10 s 时阶跃响应达到稳定后加入持续干扰信号，设置期望角为 45°，运行时间 20 s，加入扰动后模糊 PID 控制的姿态稳定时间为 5.8 s，优化后姿态稳定时间为 4.4 s，稳定过程中最

大误差角为  $0.59^\circ$ , 最小误差角为  $0.1^\circ$ , AUV 的航行速度 6 节, 在俯仰角稳定过程中, 定深误差为 8.95 cm; 经 SSA 优化后, 俯仰角控制器的姿态稳定性得到提升, 定深误差也大大减小。

### 3.2 偏航角控制仿真

根据前文在水平面的简化模型, 在这里列出拉氏变换的传递函数为<sup>[12]</sup>:

$$G_2(s) = \frac{0.513s + 1.35}{0.165s^3 + 1.61s^2 + s} \quad (15)$$

SSA 算法适应度值迭代图适如图 8 所示, 可以看出 SSA 的下降速度快, 寻优能力强, 在第 33 次迭代寻找到最优解。

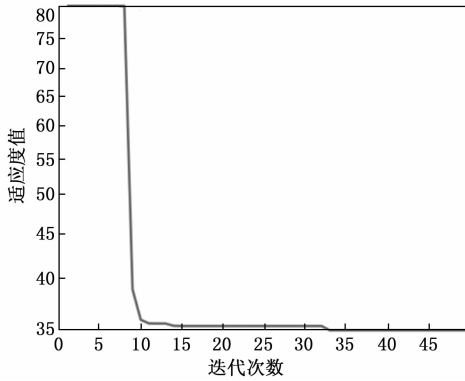


图 8 SSA 适应度值迭代图

对上述模型进行仿真, 设置期望角  $60^\circ$ , 在阶跃响应下得到的偏航角模糊 PID 控制优化前和优化后的仿真曲线对比图如图 8 所示, 横坐标表示时间, 纵坐标表示角度值。加入扰动后的仿真曲线对比图如图 9 所示。

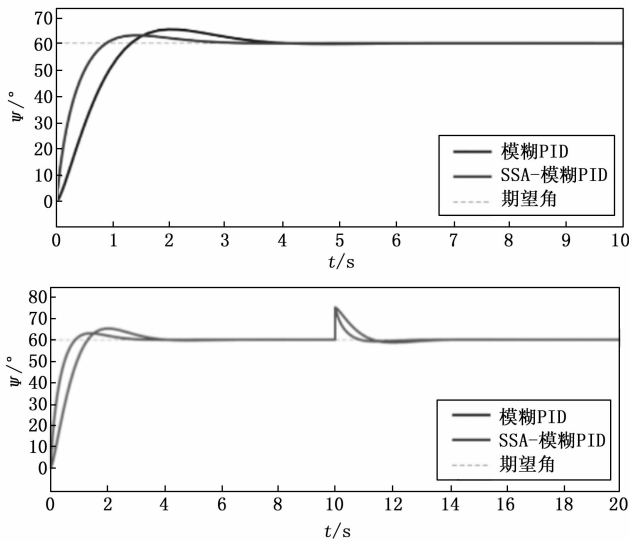


图 9 有无扰动偏航角响应对比图

由图 9 可以看出, 对模糊 PID 控制器优化后, 偏航角控制器的调节时间和超调量都得到了提升, 达到稳定后加入扰动, 优化后的 SSA-模糊 PID 控制器能够更快的恢复稳

定, 姿态稳定时间为 3.58 s, 提升了鲁棒性和抗干扰能力。由上可知, 经麻雀搜索算法优化后模糊 PID 对偏航角的控制效果得到了提升。

结合对俯仰角和航向角的仿真试验可得, 在受到外部干扰的情况下, SSA-Fuzzy-PID 姿态控制系统能够在 1.4 s 内控制 AUV 重新调整至目标姿态, 姿态精度误差不超过  $0.5^\circ$ 。实际实验结果表明: 与常规模糊 PID 控制方法相比, ISSA-Fuzzy-PID 姿态控制系统使得 AUV 姿态控制精度明显提升, 响应速度更快, 调节时间变短。因此, 通过加入麻雀搜索算法对模糊控制器进行优化, 可以有效提高 AUV 的姿态控制精度, 提升了模糊 PID 的鲁棒性和抗干扰能力。

### 4 水下试验与结果分析

为控制器实际效果, 采用实验室自研 RS-323 型 AUV 搭载 SSA-模糊 PID 控制器在千岛湖开展 AUV 航行试验验证其俯仰角与航向角跟踪能力, 试验路径规划图如图 10 所示。

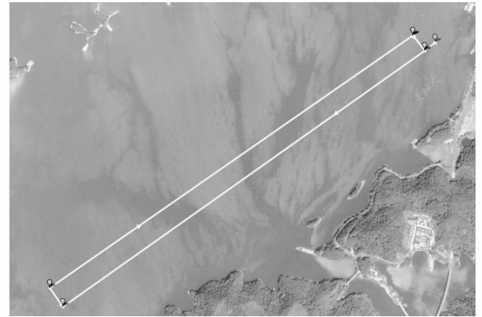


图 10 试验路径规划图

设置 UUV 航速 4 节, 航深 10 米, 任务时间为 15 分钟, UUV 按规划入水点入水, 完成长方形航路后出水, 航行数据存储于内计航行日志, 每秒储存一次。航行过程中俯仰角和航向角设定值与实际值如图 11 和图 12 所示。

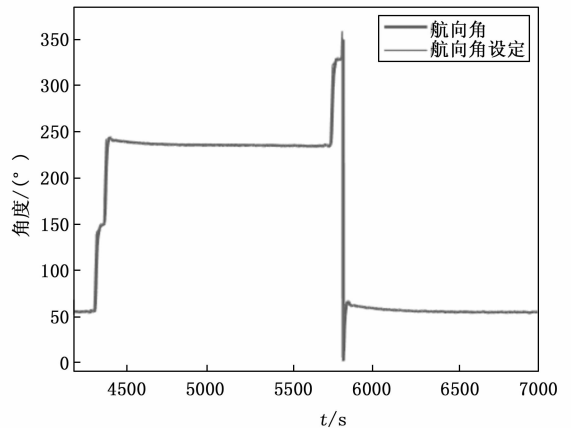


图 11 航向角姿态图

分析数据表明: UUV 在刚进入规划航路时航向角略有波动, 波动值在  $5^\circ$  以内, 进入稳定段后, 航向角波动在  $1^\circ$  以内, 俯仰角变化基本稳定, 波动值在  $0.5^\circ$  以内, 在短边转向处, 由于水流扰动, 航向角跟随会有一定滞后, 平均

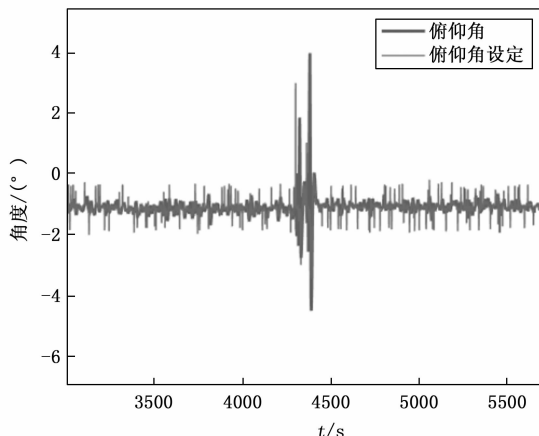


图 12 俯仰角姿态图

误差在  $3^\circ$  以内。综合试验数据表明：SSA-模糊 PID 控制器在实际水流干扰下有较强的跟随能力，控制系统具有一定的自适应能力及抗干扰能力，能够保持较好的控制精度和稳定性。

## 5 结束语

本文围绕自主水下航行器 (AUV) 的姿态控制问题，提出了一种基于麻雀算法 (SSA) 和模糊 PID 控制器相结合的控制策略，弥补了传统模糊 PID 控制算法在动态海洋环境下应对复杂性与不确定性时的不足。仿真结果证明，所提出的 SSA-模糊 PID 控制器能够有效优化 AUV 的姿态控制性能，展现了较高的调节响应速度和抗干扰能力。同时设计了湖试任务，湖试数据表明该控制器能够在实际水下环境中保持 AUV 姿态的稳定，即便在水流扰动和复杂动态响应的条件下，也能够快速收敛至期望姿态，并维持较高的控制精度。本研究仍存在一定的不足，系统仅进行了湖上试验，尚未在真实海洋环境中进行验证，海洋环境中可能存在的非线性因素和极端条件对控制效果的影响尚不明确。未来研究可在此基础上深入探讨控制器的鲁棒性，进一步优化参数调整策略以适应更为复杂多变的海洋环境，结合实际海试数据进行算法验证和优化。

## 参考文献:

- [1] 黄悦华, 刘瑞勇, 杨培培, 等. 基于专家 S 面控制的 UUV 姿态控制系统设计 [J]. 三峡大学学报 (自然科学版), 2015, 37 (6): 80-84.
- [2] 乌云嘎, 徐会希, 姜志斌. 基于 RBF 神经网络的新型 AUV 自抗扰控制方法 [J]. 舰船科学技术, 2023, 45 (18): 85-91.
- [3] 张铭钧, 孟庆鑫. 基于神经网络的无人无缆水下机器人运动建模与控制技术研究 [J]. 中国造船, 1999 (2): 87-96.
- [4] 郭小溪, 李刚, 闫伟杰. 基于遗传算法整定 PID 的自主潜器深度控制 [J]. 长春理工大学学报 (自然科学版), 2010, 33 (3): 37-39.
- [5] ZHANG W, WANG H, BIAN X, et al. The application of self-tuning fuzzy PID control method to recovering AUV [Z].

- 2012 Oceans, Hampton Roads, VA, USA, 2012, 1-5.
- [6] WAN J, HE B, WANG D, et al. Fractional-order PID motion control for AUV using cloud-model-based quantum genetic algorithm [J]. In IEEE Access, (7): 124828-124843.
- [7] BAYUSARI A M, ALFARINO H, HIKMARIKA Z, et al. Position control system of autonomous underwater vehicle using PID controller [C] // 2021 8th International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECS), Semarang, Indonesia, 2021, 139-143.
- [8] LIU H, LIU F W, SHI H J. Design of an AUV heading attitude controller based on a disturbance observer [C] // 2020 International Conference on Electrical Engineering and Control Technologies (CEECT), Melbourne, VIC, Australia, 2020, 1-5.
- [9] 郑凡卓. 基于滑模速度控制器的轴向磁通永磁弧形电机控制研究 [J]. 数字制造科学, 2023, 21 (1): 30-34.
- [10] WAN J, et al. Fractional order PID motion control based on seeker optimization algorithm for AUV [C] // OCEANS 2021 MTS/IEEE Charleston, Charleston, SC, USA, 2021, 1-4.
- [11] CHEN Y G, ZHANG N N, et al. A survey of recent advances on stability analysis state estimation and synchronization control for neural networks [J]. Neurocomputing, 2023, 26-36.
- [12] 李显, 王俊雄, 黄伍德. 基于卷积神经网络的 AUV 水下识别系统 [J]. 船舶与海洋工程, 2021, 37 (1): 20-25.
- [13] 徐博, 李盛新, 等. 基于径向基函数神经网络辅助容积卡尔曼滤波的多自主水下航行器协同定位方法 [J]. 兵工学报, 2019, 40 (10): 2119-2128.
- [14] 胡中惠, 祁江涛, 等. 基于六自由度模型的水下无人航行器操纵运动仿真 [C] // 中国造船工程学会, 2022: 94-97.
- [15] PHAM NGUYEN, et al. A new approach for three-dimensional trajectory tracking control of under-actuated AUVs with model uncertainties [J]. Ocean Engineering, 2021, 228: 108951.
- [16] 邓鲁克, 吕东坡. 基于遗传算法对控制水下机器人运动姿态进行 PID 参数整定 [J]. 制造业自动化, 2023, 45 (1): 177-179.
- [17] 宋璐, 卫亚博. 基于模糊 PID 的无刷直流电机速度控制系统的设计与仿真 [J]. 大电机技术, 2022 (5): 40-44, 82.
- [18] 刘睿, 莫愿斌. 一种改进的麻雀搜索算法 [J]. 计算机技术与发展, 2022, 32 (3): 21-26.
- [19] 戈一航, 杨光永, 等. 基于 SSA 优化 PID 在移动机器人路径跟踪中的研究 [J]. 国外电子测量技术, 2021, 40 (9): 64-69.
- [20] XUE J K, SHEN B. A novel swarmintelligence optimization approach: sparrow search algorithm [J]. Systems Science & Control Engineering, 2020, 8 (1): 22-34.
- [21] 蔡志刚, 李冰, 苏毅, 等. 水下航行器下潜时的深度控制仿真研究 [J]. 舰船科学技术, 2023, 45 (8): 90-96.
- [22] 杜度. 基于 RBF 神经网络参数自整定的 AUV 深度控制 [J]. 水下无人系统学报, 2019, 27 (3): 284-289.