

[引用格式] 毕成, 段富海. 结合 ILOS 及 IPID-GWO 的无人水翼航行器路径跟踪优化 [J]. 水下无人系统学报, 2025, 33(4): 648-656.

结合 ILOS 及 IPID-GWO 的无人水翼 航行器路径跟踪优化

毕 成, 段富海

(大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连, 116024)

摘 要: 为解决新型无人水翼航行器的路径跟踪问题, 提出了一种基于视线制导法(LOS)并结合增量式比例-积分-微分控制器(IPID)的跟踪策略。首先, 建立了航行器的 3 自由度运动学和动力学模型, 并通过控制策略实现控制输入解耦; 结合可变前视距离与积分项改进了 LOS 制导法, 得到 ILOS 算法; IPID 控制器使用 ILOS 算法得到的期望航向角进行跟踪过程的动态控制, 同时在算法中增加跟踪点切换时的补偿输入, 避免了因剧烈变化导致的系统失控; 分别使用灰狼优化算法(GWO)与遗传算法(GA)对 IPID 控制器的权重系数进行优化和对比。在 Matlab 中使用 ILOS 及 IPID 控制器对给定的直线-曲线混合路径在无干扰与有干扰时进行路径跟踪仿真, 通过分析跟踪效果和横向误差, 验证了 ILOS 和 IPID-GWO 算法结合的可行性和先进性。

关键词: 无人水翼航行器; 路径跟踪; 视线制导法; 增量式比例-积分-微分控制器; 灰狼优化算法

中图分类号: TJ630; U674.941

文献标识码: A

文章编号: 2096-3920(2025)04-0648-09

DOI: 10.11993/j.issn.2096-3920.2024-0177

Path Tracking Optimization for Unmanned Hydrofoil Vehicle Based on ILOS and IPID-GWO

BI Cheng, DUAN Fuhai

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: In order to solve the path tracking problem of a new type of unmanned hydrofoil vehicle, a tracking strategy based on line of sight(LOS) guidance combined with an incremental proportional-integral-differential(IPID) controller was proposed. Firstly, the 3-DOF kinematic and dynamic models of the vehicle were established, and the control input was decoupled through the control strategy. The LOS guidance method was improved by combining the variable foresight distance and integral term, and the ILOS algorithm was obtained. The IPID controller used the desired heading angle obtained by the ILOS algorithm to dynamically control the tracking process. The compensation input when switching the tracking point was added to the algorithm to avoid the system's out-of-control problem caused by excessive changes. The weight coefficients in the IPID controller were optimized and compared using the grey wolf optimizer(GWO) algorithm and genetic algorithm(GA). In Matlab, the ILOS and IPID controllers were used to track the given straight and curved mixed path in the absence and presence of interference. The tracking effect and lateral error were analyzed, and the feasibility and advancement of the combination of ILOS and IPID-GWO algorithms were verified.

Keywords: unmanned hydrofoil vehicle; path tracking; line-of-sight guidance method; incremental proportional-integral-differential controller; grey wolf optimizer

收稿日期: 2024-12-23; 修回日期: 2025-01-19; 录用日期: 2025-02-08.

作者简介: 毕 成(1999-), 男, 在读硕士, 主要研究方向为无人水翼航行器路径跟踪控制.

OPEN ACCESS

0 引言

当前科技环境下, 无论是军用还是民用领域, 都迫切需要开发与利用海洋资源, 使得对无人艇 (unmanned surface vessel, USV) 的需求与日俱增^[1]。USV 凭借独特设计和高效性能, 在海洋资源开发、海洋环境监测、科学研究和军事等领域展现出巨大潜力。无人水翼航行器是在普通 USV 的基础上增加水翼, 充分利用水翼的特殊性, 高速运动时将浮体托出水面, 大幅降低阻力, 以实现更低能耗、更快速度的一种航行器。要充分发挥无人水翼航行器优势, 对其路径跟踪能力的研究十分重要。王宁等^[2]提出一种有限时间正切漂角的视线制导 (line-of-sight, LOS) 方法, 能够有效估计漂角; 马天珩等^[3]设计非线性干扰观测器用于非线性模型预测控制 (nonlinear model predictive control, NMPC), 从而进行路径跟踪控制; Liu 等^[4]在使用模型预测控制 (model predictive control, MPC) 进行路径跟踪控制时, 设计了线性状态扩张观测器来抵消外部干扰和模型非线性项的影响; Fan 等^[5]提出一种有限时间反步控制算法, 设计误差补偿机制来确保路径跟踪中的精确逼近。以上算法及控制器的结合存在模型精确度要求高、控制器计算量大以及参数未寻优等问题, 导致实际应用局限性较强。

LOS 是一种广泛应用于船舶、无人机及自动驾驶汽车等领域的路径跟踪控制算法, 通过计算期望的航向角和偏航率, 使目标沿着预定的路径行驶, 虽不依赖被控对象的精确模型, 但 LOS 无法解决存在干扰时的固定偏差问题。灰狼优化算法 (grey wolf optimizer, GWO) 是 Mirjalili 等^[6]提出的一种基于群体智能的元启发式优化算法, 模拟了灰狼的社会层次结构和捕食行为, 特别是灰狼族群在狩猎时的合作与领导机制。该算法广泛应用于各种优化问题, 具有搜索策略多样化、收敛速度快、参数少及易理解等优点。

文中以一款欠驱动的新型无人水翼航行器为研究对象, 以路径跟踪控制为研究目标, 建立航行器的三维模型以及动力学模型, 并对控制输入进行了解耦处理; 改进了 LOS 算法, 并将增量比例-积分-微分 (incremental proportional-integral-derivative, IPID) 控制器与改进后的 LOS 算法相结合, 并

增加跟踪点切换时的补偿项; 然后使用遗传算法 (genetic algorithm, GA) 及 GWO 对 IPID 控制器的各项系数进行优化和对比; 最后在 Matlab 中仿真验证了在有/无干扰情况下结合积分视线制导法 (integrated LOS, ILOS) 的 IPID-GWO 控制器的可行性与先进性。

1 无人水翼航行器模型建立

无人水翼航行器是一个典型的欠驱动系统, 其动力系统由 2 个对称布置的电机组成, 无尾舵等控制转向的结构。为简化模型, 在风、浪、流干扰下, 无人水翼航行器仅考虑 3 个自由度的受力影响, 即船舶前进、横漂和艏摇, 忽略起伏、横摇和纵摇 3 个自由度, 动力源仅考虑对称布置的双电机, 文中在以上的基础上仅考虑翼航状态进行研究。

1.1 三维模型

无人水翼航行器三维模型如图 1 所示。由浮体、连接杆、前后翼、1 对对称布置的电机、电池、配重块以及控制组件构成, 电池、配重块以及控制组件等布置在浮体内。航行器的水翼呈飞机式布局, 即大水翼在前, 小水翼在后, 航行器的姿态控制由前水翼板上对称安装的襟翼来完成, 转向功能由两电机差速配合来完成。



图 1 无人水翼航行器三维模型

Fig. 1 Three dimensional model of an unmanned hydrofoil vehicle

1.2 数学模型

无人水翼航行器运动学模型为

$$\dot{\eta} = \mathbf{R}(\psi) \cdot \mathbf{v} \quad (1)$$

式中: $\eta = [x, y, \psi]^T$ 为航行器的位置状态向量, 其中 x 、 y 、 ψ 分别为航行器在世界坐标系 OXY 中的 OX 方向坐标、 OY 方向坐标以及方位角; $\mathbf{R}(\psi)$ 为船体坐标系到大地坐标系的转换矩阵; $\mathbf{v} = [u, v, r]^T$ 为航行器的速度状态向量, 其中 u 、 v 、 r 分别为航行

器在自身坐标系 oxy 中的前进速度、横漂速度以及艏摇角速度。

$$\mathbf{R}(\psi) = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

动力学建模中, 航行器在水面航行时的水动力阻尼项通常采用线性形式, 即航行器所受阻力和速度、角速度成线性关系^[7], L 为航行器长度, 具体关系见表 1。

表 1 无人水翼航行器建模参数及公式
Table 1 Modeling parameters and formulas of unmanned hydrofoil vehicles

参数	取值/公式	参数	取值/公式
m	53.89	x_g	0
$X_{\dot{u}}$	-2.29	$Y_{\dot{v}}$	-13.71
$Y_{\dot{r}}$	2.23	$N_{\dot{v}}$	2.23
I_z	8.71	$N_{\dot{r}}$	3.19
b	0.48	L	0.8
d_{11}	$2.29 + 1.33 u $	d_{22}	$13.71 + 36.47 v + 0.81 r $
d_{23}	$-2.23 + 0.85 v - 0.13 r $	d_{32}	$-2.23 + 0.85 v - 0.13 r $
d_{33}	$-3.19 - 0.08 v + 0.75 r $		

无人水翼航行器动力学方程^[8]为

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v} = \boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\tau}_d \quad (3)$$

式中: $\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & m_{23} \\ 0 & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix}$ 为航行器的惯性质量矩阵, $m_{11} = m - X_{\dot{u}}$, $m_{22} = m - Y_{\dot{v}}$, $m_{23} = m_{32} = m x_g - Y_{\dot{r}}$, $m_{33} = I_z - N_{\dot{r}}$, m 为航行器质量, x_g 为重心到船舶坐标原点的纵向距离, I_z 为艏摇的转动惯量, $X_{\dot{u}}$ 、 $Y_{\dot{v}}$ 、 $Y_{\dot{r}}$ 、 $N_{\dot{v}}$ 、 $N_{\dot{r}}$ 为附加质量; $\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & c_{13} \\ 0 & 0 & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & 0 \end{bmatrix}$ 为向心力和科氏力系数矩阵, $c_{31} = -c_{13} = m_{22}v + m_{23}r$, $c_{23} = -c_{32} = m_{11}u$; $\mathbf{D} = \begin{bmatrix} d_{11} & 0 & 0 \\ 0 & d_{22} & d_{23} \\ 0 & d_{32} & d_{33} \end{bmatrix}$ 为水动力阻尼矩阵; $\boldsymbol{\tau}$ 为推力及其力矩向量; $\boldsymbol{\tau}_d$ 为干扰向量^[9]。

1.3 控制输入解耦

采用的双电机推进无人水翼航行器是典型的欠驱动系统, 其横向运动不受直接力的作用, 转向主要靠电机差速进行控制。因此, 该系统的动力学控制输入主要通过左右电机的推力来实现, 记为

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} T_1 + T_2 & 0 & \frac{b}{2}(T_1 - T_2) \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

式中: T_1 、 T_2 为航行器左右电机的推力; b 为两电机螺旋桨轴向间距。推力系统的电机为直流无刷电机, 其控制通过脉宽调制(pulse width modulation, PWM)波的占空比进行调节。占空比与电压之间存在如下紧密关系

$$V = \frac{t_1}{t_2} \cdot V_{\max} \quad (5)$$

式中: t_1 为接通时间; t_2 为脉冲时间; $V_{\max}$ 为最大电压值。根据电机参数可知无人水翼航行器螺旋桨产生的推力与控制电压呈近似线性关系, 即 $T = kV$, k 为电机输入电压与推力之间的转换系数, 由电机参数进行拟合后可获得。

因此, 通过调节 PWM 占空比控制电机转速, 实际上等同于通过电压控制电机转速。这使得可以通过调整两侧电机的输入电压来做到控制无人水翼航行器进行前进和转向。设左、右两侧电机的控制电压分别为 $V_L = \sigma_u + \sigma_r$ 和 $V_R = \sigma_u - \sigma_r$ 。其中, σ_u 主要控制航行器的前向运动, σ_r 主要控制航行器的转向运动。当 $\sigma_u > 0, \sigma_r = 0$ 时, 无人水翼航行器作直线航行运动; 当 $\sigma_u > 0, |\sigma_r| < \sigma_u$ 时, 航行器进行左转或右转运动。则控制输入矩阵可以改写为 $\boldsymbol{\tau} = [2k\sigma_u \quad 0 \quad bk\sigma_r]^T$; 由于水翼的特殊性, 不考虑航行器倒退的情形。通过适当选择 σ_u 和 σ_r , 就可以独立控制无人水翼航行器的纵荡速度和艏摇角速度, 从而实现有效的解耦控制。这一方法不仅简化了控制策略的设计, 还提高了航行器对不同任务需求的适应性和响应效率。

2 制导算法

2.1 LOS 制导算法

传统 LOS 制导法是自动驾驶循迹领域中广泛采用的一种经典算法。该方法不仅适用于跟踪直线路径, 还能通过将具有非零曲率的曲线路径分割成多个短段的近似直线路径, 进而有效地进行跟踪。其方法要义主要是在跟踪过程中, 维持航行器的航向在特定的“视线角”范围内。只要能够及时调整航向以匹配期望的角度, 就能确保航行器逐渐接近并最终对准预期的航线^[10]。如图 2 所示, 传统 LOS 制导法的基本原理直观地展示了如何通过持续调整航向来最小化位置偏差, 从而实现精确的路径跟踪。具体而言, 算法通过不断更新航行

器的航向角,使其与期望的 LOS 角度保持一致,进而减小横向误差,确保航行器沿着预定路径平稳行驶。这种方法不仅提高了路径跟踪的精度,还增强了系统的鲁棒性和适应性,让其能够在复杂多变的环境中保持良好的性能^[11]。

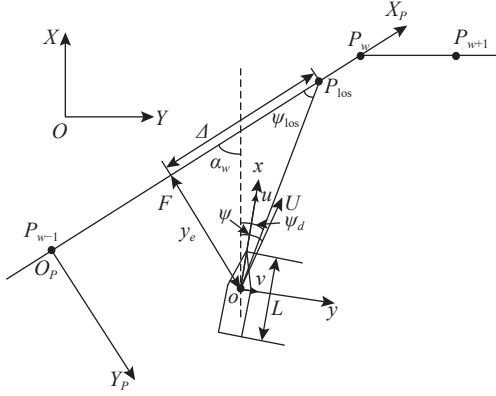


图2 传统 LOS 制导算法

Fig. 2 Traditional LOS guidance algorithm

图2中, P_{w-1} 、 P_w 及 P_{w+1} 分别为上一个跟踪点、当前跟踪点及下一个跟踪点。LOS 引导航行器收敛于目标直线 $P_{w-1}P_w$ 上的点 $P_{los}(x_{los}, y_{los})$, 其中, $P_{w-1} = [x_{w-1}, y_{w-1}]$, $P_w = [x_w, y_w]$, 并保持航行器的方位角 ψ 和目标直线的航向角 α_w 一致^[12]。航行器在世界坐标系 OXY 中的位置坐标为 $P = [x, y]$ 。作航行器重心位置至期望直线的垂线, 确定 $P_{w-1}P_w$ 上与垂足 F 相距前视距离 Δ 的位置为 $P_{los}(x_{los}, y_{los})$ 。以 P_{w-1} 为原点, $P_{w-1}P_w$ 为 X_P 轴, 建立一个参考坐标系($O_P X_P Y_P$), 则 OXY 坐标系中的航向角表示为

$$\alpha_w = \arctan 2(y_w - y_{w-1}, x_w - x_{w-1}) \quad (6)$$

路径跟踪过程中的沿向误差 x_e 和横向误差 y_e 可以表示为

$$\begin{bmatrix} x_e \\ y_e \end{bmatrix} = \mathbf{R}^T(\alpha_w) \begin{bmatrix} x - x_{w-1} \\ y - y_{w-1} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中, $\mathbf{R}^T$ 为世界坐标系(OXY)到参考路径坐标系($O_P X_P Y_P$)的转换矩阵, 表示为

$$\mathbf{R}^T(\alpha_w) = \begin{bmatrix} \cos \alpha_w & \sin \alpha_w \\ -\sin \alpha_w & \cos \alpha_w \end{bmatrix} \quad (8)$$

展开式(8)可得跟踪的横向距离误差为

$$y_e = -(x - x_{w-1}) \sin \alpha_w + (y - y_{w-1}) \cos \alpha_w \quad (9)$$

2.2 ILOS 制导算法

在海上航行时, 航行器的实际航迹跟踪会受到

风、浪、流等外界干扰的影响, 导致其航迹角(即航行器实际行驶方向的角度)与艏向角(即船艏指向的角度)之间产生夹角, 这一夹角被称为漂角, 记为 β 。漂角的存在可能会使 ψ_{los} 无法趋近于零, 即导致横向误差无法趋近于零, 进而影响控制系统的性能, 甚至导致其失效。为了有效应对漂角的影响, 在设计制导算法时必须考虑对其进行补偿。此外, 还需根据航行器相对于期望航线的位置动态调整控制策略: 当航行器距离期望航线较远时, 须快速逼近期望航线, 以减小横向误差; 而当航行器接近期望航线时, 重点则转向精确跟踪期望航迹, 避免位置超调和震荡行为^[13]。针对以上问题, 提出了一种可变前视距离的 ILOS 制导法。该方法通过动态调整前视距离, 既能确保航行器在远离期望航线时迅速靠近, 又能在接近航线时实现高精度的路径跟踪, 从而提高了整个系统的稳定性和鲁棒性。同时, 通过引入对漂角的补偿机制, 优化了传统 LOS 制导算法的局限性, 提升了航行器在面对外部干扰时的跟踪精度和响应速度, 进一步增强了系统在复杂海洋环境下的适应能力。

设计的算法如下

$$\psi_d = \alpha_w - \arctan \left(\frac{y_e(t)}{\Delta} + y_{int} \right) \quad (10)$$

$$\dot{y}_{int} = \frac{kU\Delta y_e(t)}{\sqrt{\Delta^2 + (y_e + \Delta y_{int})^2}} \quad (11)$$

$$\Delta = (\Delta_{max} - \Delta_{min})e^{-2y_e^2(t)} + \Delta_{min} \quad (12)$$

$$k = \begin{cases} 0, & |y_e(t)| \geq 2\Delta \\ \frac{e^{-\rho y_e^2(t)}}{\Delta^2 + (y_e + \Delta y_{int})^2}, & |y_e(t)| < 2\Delta \text{ \& } y_e(t)\tilde{\beta} \geq 0 \\ \frac{U + e^{-\rho y_e^2(t)}}{U(\Delta^2 + (y_e + \Delta y_{int})^2)}, & |y_e(t)| < 2\Delta \text{ \& } y_e(t)\tilde{\beta} < 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中: ψ_d 为期望航向角; y_{int} 为要设计的虚拟控制输入; t 为时间; k 、 ρ 为要设计的严格大于零的常值参数; Δ_{max} 、 Δ_{min} 分别为前视距离 Δ 的最大和最小值, Δ 的取值与 L 有关。记 $\tilde{\beta}$ 为自适应观测器对漂角 β 的估计值, 且估计误差为 $\tilde{\beta} = \hat{\beta} - \beta$, 取 $y_{int} = \hat{\beta}$ 。

从以上可知: 当航行器距离期望航线较远即 $|y_e(t)| \geq 2\Delta$ 时, $k = 0$, 则此时积分项 y_{int} 不起作用; 当航行器在期望航线附近即 $|y_e(t)| < 2\Delta$ 时, 积分增益

开始起作用,此时积分项 y_{int} 起到估计和补偿扰动漂角的作用,能够避免产生固定横向误差,确保航行器能够精确地完成航迹跟踪任务。同时,可变前视距离能够保证航行器距离期望路径较远时较快逼近期望路径,逼近过程中逐渐增大前视距离以保证逼近过程中的稳定性^[14]。

2.3 ILOS 制导稳定性证明

条件: 漂角 β 一般很小($|\beta| < 5^\circ$),则可以近似认为 $\sin\beta = \beta$ 。

由式(9)可得

$$\begin{aligned} \dot{y}_e &= -\dot{x}\sin\alpha_w + \dot{y}\cos\alpha_w = -(u\cos\psi - v\sin\psi)\sin\alpha_w + \\ &\quad (u\sin\psi + v\cos\psi)\cos\psi = u\sin(\psi - \alpha_w) + \\ &\quad v\cos(\psi - \alpha_w) = U\sin(\psi - \alpha_w + \beta) \end{aligned} \quad (14)$$

式中, $U = \sqrt{u^2 + v^2} \geq 0$ 为航行器的航行速度。将式(10)代入,则式(14)等价于^[15]

$$\begin{aligned} \dot{y}_e &= U\sin(\psi - \alpha_w + \beta) = U\sin\left(-\arctan\left(\frac{y_e}{\Delta} + y_{\text{int}}\right) + \beta\right) = \\ &\quad U\left[\sin\left(-\arctan\left(\frac{y_e}{\Delta} + y_{\text{int}}\right)\right)\cos\psi + \right. \\ &\quad \left.\cos\left(-\arctan\left(\frac{y_e}{\Delta} + y_{\text{int}}\right)\right)\sin\psi\right] = \\ &\quad U\left[-\frac{y_e + \Delta y_{\text{int}}}{\sqrt{\Delta^2 + (y_e + \Delta y_{\text{int}})^2}} + \frac{\Delta}{\sqrt{\Delta^2 + (y_e + \Delta y_{\text{int}})^2}}\beta\right] = \\ &\quad -U\frac{y_e + \Delta y_{\text{int}} - \Delta\beta}{\sqrt{\Delta^2 + (y_e + \Delta y_{\text{int}})^2}} = -U\frac{y_e + \Delta\tilde{\beta}}{\sqrt{\Delta^2 + (y_e + \Delta y_{\text{int}})^2}} \end{aligned} \quad (15)$$

证明: 选取正定且径向无界的李雅普诺夫函数

$$V_1 = \frac{1}{2}y_e^2 + \frac{1}{2k}\tilde{\beta}^2 \quad (16)$$

对式(16)进行微分,得

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= y_e\dot{y}_e + \frac{1}{k}\tilde{\beta}\dot{\tilde{\beta}} = y_e\dot{y}_e + \frac{1}{k}\tilde{\beta}\dot{y}_{\text{int}} = \\ &\quad -U\frac{y_e^2 + \Delta\tilde{\beta}y_e}{\sqrt{\Delta^2 + (y_e + \Delta y_{\text{int}})^2}} + \frac{U\Delta\tilde{\beta}y_e}{\sqrt{\Delta^2 + (y_e + \Delta y_{\text{int}})^2}} = \\ &\quad \frac{-Uy_e^2}{\sqrt{\Delta^2 + (y_e + \Delta y_{\text{int}})^2}} < 0 \end{aligned} \quad (17)$$

因此,在平衡点 $y_e = 0$ 处, ILOS 制导系统是一致全局渐近稳定的。

3 IPID 控制器设计及优化

3.1 PID 控制算法

PID 控制器通过计算误差(即设定值与实际值之间的差)的比例、积分和微分来调整控制变量,从而达到控制目的。PID 控制器的优点在于其简单性和鲁棒性,适用于多种控制系统。

PID 控制器的输出可表示为

$$u(k) = K_p e(k) + K_i \sum_{t=1}^k e(t) + K_d [e(k) - e(k-1)] \quad (18)$$

式中: K_p 为比例系数; K_i 为积分系数; K_d 为微分系数。 K_p 主要与系统响应速度相关,但其值过大会影响系统的稳定性; K_i 作为误差累积的积分增益项,与系统的稳态误差消除有关,但其值过大也会影响系统的稳定性; K_d 为系统最近 2 个误差差值的微分增益项,与系统的超调及响应速度息息相关; $e(k)$ 为当前航向角与参考航向角之间的差值。

3.2 IPID 控制算法

IPID 控制器是一种变体的 PID 控制器,计算的是控制信号的变化量(即增量),而不是直接计算控制信号本身。这种控制器与传统的 PID 控制器相比,没有了误差的累积项,仅与最近的 3 个误差项相关,避免了误动大带来的系统稳定性差甚至失控,且能够减少积分饱和时的影响^[16]。

IPID 的模型为

$$\begin{aligned} \Delta u(k) &= u(k) - u(k-1) = K_p [e(k) - e(k-1)] + \\ &\quad K_i e(k) + K_d [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \end{aligned} \quad (19)$$

从式(19)中可知,利用近 3 次的误差量,通过 PID 的加权计算,可以得到控制量的增量,能够取得比较好的控制效果。

将式(3)展开,在不考虑扰动的情况下,通过运算可得

$$\begin{aligned} \tau_c &= bk\sigma_r = \frac{m_{22}m_{33} - m_{32}m_{23}}{m_{22}}\dot{r} - c_{13}u + \\ &\quad \frac{(-m_{32}d_{22} - m_{22}c_{23} + m_{22}d_{32})}{m_{22}}v + \\ &\quad \frac{(-m_{32}c_{23} - m_{32}d_{23} + m_{22}d_{33})}{m_{22}}r \end{aligned} \quad (20)$$

将 τ_c 计算结果作为每次更新控制量时的原有控制量,则可将控制律设计为

$$\tau_{\text{pid}}(k) = \tau_c(k) + \Delta u(k) + \delta \quad (21)$$

式中: δ 为切换路径跟踪点时防止 $\dot{r}$ 变化过大导致的系统失控所增加的控制项, 定义 $\delta = c \cdot \dot{r}$, 其中 c 为权重系数。

3.3 GWO 算法

GWO 算法按照灰狼的社会等级, 将狼群划分为 4 个等级, 分别为 α 狼、 β 狼、 δ 狼以及 ω 狼。狼群中每个狼的位置代表着一个可行解。狼群通过包围、追捕及攻击猎物来更新位置。以上 3 种捕食行为对应的数学模型如下^[17]。

1) 包围猎物

灰狼通过以下策略调整自身的位置进行围捕, 公式为

$$\begin{aligned} D &= |C \cdot X_{\text{prey}} - X(t)| \\ X(t+1) &= X_{\text{prey}} \cdot A \cdot D \end{aligned} \quad (22)$$

式中: $X(t)$ 为灰狼的位置; X_{prey} 为猎物的位置; D 为灰狼与猎物之间的距离; A 和 C 为控制灰狼探索或逼近猎物的权重向量, 分别定义为

$$\begin{aligned} A &= 2 \cdot a \cdot r_1 - a \\ C &= 2 \cdot r_2 \end{aligned} \quad (23)$$

式中: a 为灰狼从探索向逼近过程中由 2 线性递减至 0 的参数; r_1 、 r_2 为范围在 $[0, 1]$ 之间的随机数。

2) 追捕猎物

灰狼根据 α 、 β 以及 δ 狼的位置来预估猎物的位置, 并更新自身的位置, 更新的公式为

$$X(t+1) = \frac{X_\alpha + X_\beta + X_\delta}{3} \quad (24)$$

3) 攻击猎物

灰狼在探索猎物和逼近猎物之间的平衡主要由 A 和 C 来决定。

当 $|A| > 1$ 时, 灰狼更倾向探索猎物, 寻找新的目标, 强调全局搜索; 当 $|A| < 1$ 时, 灰狼更倾向于逼近猎物, 围绕猎物进行细致搜索, 强调局部开发。权重向量 C 的作用主要是增加算法的随机性, 避免陷入局部最优的情况, 保证全局搜索, 全局最优。

3.4 基于 GWO 的 IPID 控制器优化

IPID 控制器的控制效果, 主要取决于 K_p 、 K_i 、 K_d 以及 c 等 4 个系数的选取, 则可通过使用 GWO 对系数进行寻优, 提高 IPID 控制器的性能。常用的优化方法有粒子群算法、GA、鲸鱼算法和 GWO 等, GWO 的全局搜索能力强, 鲁棒性好, 简单易实

现, 则使用 GWO 对以上 4 个系数进行优化。优化目标: 1) 无人水翼航行器跟踪过程中的横向偏差; 2) 纵向速度稳定性, 即相对于平均速度的偏差; 3) 无人水翼航行器完整跟随期望路径所需时间。

在跟踪开始时以及路径逼近过程中, 可以通过调整参数的大小来侧重不同的控制项, 以达到更好的控制效果。则设置以下规则

$$\begin{cases} K_d = 8, K_p = 5, K_i = 0.1, c = -1.5 & t < 2 \\ K_d = 10, K_p = 7, K_i = 0.4, c = -1.5 & t \geq 2, e(k) < 0.3 \\ K_d = 10, K_p = 5, K_i = 0.2, c = -1.5 & t \geq 2, e(k) \geq 0.3 \end{cases} \quad (25)$$

则可将系数的优化转化为一个多目标优化问题, GWO 的目的是计算当前可行解的适应度值, 并逐步找到最优解, 适应度函数设计为

$$\begin{aligned} f(u, t, Y_e) &= a_1 \frac{\left(\sum_{t=1}^{t=n_1} (u(t) - \bar{u})^2 \right) / n_1}{\left(\sum_{t=1}^{t=n_0} (u_0(t) - \bar{u}_0)^2 \right) / n_0} + a_2 \frac{t_1}{t_0} + \\ &\quad a_3 \frac{\sum_{t=1}^{t=n_1} (Y_e(t) - Y_r(t))^2 / n_1}{\sum_{t=1}^{t=n_0} (Y_{e0}(t) - Y_{r0}(t))^2 / n_0} \end{aligned} \quad (26)$$

式中: a_1 、 a_2 和 a_3 为加权系数; u_0 、 u 分别为系数优化前后航行器的纵向速度; $\bar{u}_0$ 、 $\bar{u}$ 分别为系数优化前后航行器的平均纵向速度, $\bar{u}_0 = \left(\sum_{t=1}^{t=n_0} u_0(t) \right) / n_0$, $\bar{u} = \left(\sum_{t=1}^{t=n_1} u(t) \right) / n_1$; t_0 、 t_1 分别为系数优化前后航行器跟踪期望路径所需时间; Y_{e0} 、 Y_e 分别为系数优化前后航行器的横向坐标; Y_{r0} 、 Y_r 分别为系数优化前后跟踪路径点的横向坐标; n_0 、 n_1 为采样点数。ILOS+IPID-GWO 的路径跟踪控制结构见图 3。

4 仿真结果及分析

为验证改进后路径跟踪算法的普适性, 选取参考路径为直线段与曲线段的混合路径, 路径方程为

$$x = \begin{cases} y/5, 25 \leq y < 775 \\ 15y/2 - 5657.5, 775 \leq y < 875 \\ 2y/27 + 840, 875 \leq y < 1037 \\ 500\sin[(y-1037)/100] + 916.81, 1037 \leq y \leq 2000 \end{cases} \quad (27)$$

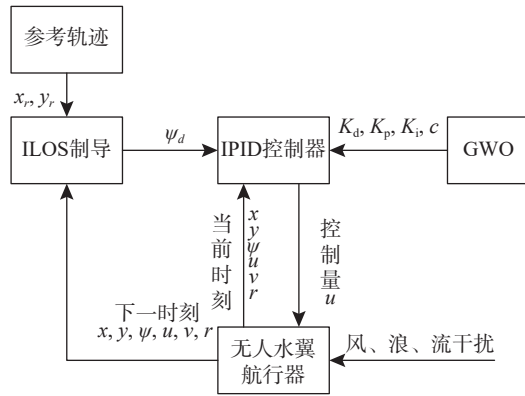


图 3 ILOS+IPID-GWO 路径跟踪控制结构

Fig. 3 Path tracking control structure of ILOS guidance combined with IPID-GWO

ILOS 制导算法中定义参数如下: $A_{\min} = 5L = 4$, $A_{\max} = 15L = 12$, 改进前的可视距离 $A=10$; $\rho=1.5$. 风浪流干扰采取随机数来进行模拟, 即 $\tau_d = \begin{bmatrix} -4 + 8\text{rand}(1) \\ -8 + 16\text{rand}(1) \\ -10 + 20\text{rand}(1) \end{bmatrix}$, $\text{rand}(1)$ 为生成范围在 $(0, 1)$ 之间的随机数。航行器的初始位置设为 $(50, -5)$, 采样间隔 0.1 s ; 初始状态量设为 $(0.1, 0.1, 0)$; a_1, a_2, a_3 分别取 $6, 1$ 以及 9 。GWO 优化算法中, 灰狼数量设置为 50 , 迭代次数设置为 100 , K_d, K_p, K_i, c 的上界设置为 $[50, 50, 10, 10]$, 下界设置为 $[-10, -10, -10, -10]$,

$$\begin{cases} K_d = 20.745 \ 0, K_p = 9.023 \ 7, K_i = 4.319 \ 8, c = -1.663 \ 1 & t < 2 \\ K_d = 12.154 \ 0, K_p = 8.779 \ 4, K_i = 0.589 \ 1, c = -1.663 \ 1 & t \geq 2, e(k) < 0.3 \\ K_d = 14.855 \ 4, K_p = 6.573 \ 5, K_i = 0.729 \ 9, c = -1.663 \ 1 & t \geq 2, e(k) \geq 0.3 \end{cases} \quad (28)$$

经 GWO 优化后的系数为

$$\begin{cases} K_d = 17.062 \ 0, K_p = 27.091 \ 2, K_i = 4.688 \ 8, c = -1.574 \ 1 & t < 2 \\ K_d = 14.215 \ 5, K_p = 19.730 \ 7, K_i = 4.736 \ 8, c = -1.574 \ 1 & t \geq 2, e(k) < 0.3 \\ K_d = 13.672 \ 8, K_p = 12.298 \ 3, K_i = 4.625 \ 0, c = -1.574 \ 1 & t \geq 2, e(k) \geq 0.3 \end{cases} \quad (29)$$

从图 4 和图 5 中可见, 无论有无干扰, ILOS+IPID-GWO 的路径跟踪效果均较好; ILOS+IPID-GWO 的响应速度快, 超调量小, 跟踪时局部细节保留较好, 尤其是在有干扰时的鲁棒性较佳。

为了更加接近曲线, 曲线段所取路径跟踪点较多, 转向跟踪较为频繁。由于路径中曲线段占比较多, 其效果可参考整体效果。排除转向和起步时候的调整, 取 $(10, 50)$ 至 $(150, 750)$ 这段直线的各项数据进行分析, 无干扰时, 4 种算法的差距不大; 有干扰时, ILOS+IPID 算法较 LOS+IPID 在横向跟踪误差项上有所提高, 但是牺牲了部分前进速度的稳定性; 使用 GA 算法进行优化后, 各项数据均有提高, 但未达到最优; 使用 GWO 算法优化后, 在进一

且同时考虑起步和逼近过程中的参数调整。为验证 GWO 算法的先进性, 同时采取 GA 对上述系数进行优化, 适应度函数、迭代次数、种群数量以及上下界与 GWO 保持一致, 精英比例 0.1 , 交叉比例 0.4 。设定以上参数, 在 Matlab 中建立模型, 首先考虑采样时间与代码运行时间的兼容性。经测试, 代码每次迭代的运行时间约为 $0.006 \ 5 \text{ s}$, 考虑传感器的回传速率和电机的响应时间, 取市面上常见九轴高精度传感器采样频率 100 Hz , 取常见直流电机响应时间 0.02 s , 则每个迭代周期代码运行时间加上传感器回传时间及电机响应时间约为 $0.036 \ 5 \text{ s}$, 远小于本模型采样时间 0.1 s , 故模型具有可用性。由于不涉及复杂的嵌套及微积分运算, 代码运行时间较短, 对航行器的控制影响较小。可以通过升级微处理器及传感器来缩短以上时间, 从而进一步缩短模型的采样时间, 进而达到更平滑的控制。

在 Matlab 建立的模型中分别采取 LOS+IPID、ILOS+IPID、ILOS+IPID-GA 以及 ILOS+IPID-GWO 的控制策略在无干扰和随机干扰的情况下对路径进行跟踪, 并对跟踪轨迹、横向误差以及纵向速度的稳定性进行分析。

经 GA 优化后的系数为

步缩小横向跟踪误差的同时减小了前进速度的方差, 保证了速度的稳定, 验证了该算法的鲁棒性。

路径跟踪不同于轨迹追踪需要对时间加以严格限制, 其主要目标为更加平滑的跟踪效果, 通过更频繁的转向变换来换取更小的跟踪误差。由表 2 可见, 无干扰时, ILOS+IPID-GWO 算法较 LOS+IPID 算法跟踪时间增加了 5.8 s , 比例为 1.498% , 横向跟踪误差较其减少了 8.275% , 结合直线段以及图 4 的分析, 减小的误差主要集中在起步、曲线及转向段; 有干扰时, ILOS+IPID-GWO 算法较 LOS+IPID 算法跟踪时间增加了 0.7 s , 比例为 0.172% , 横向跟踪误差较其减少了 101.63% , ILOS+IPID 算法以及 ILOS+IPID-GA 算法较 LOS+IPID 算法在跟

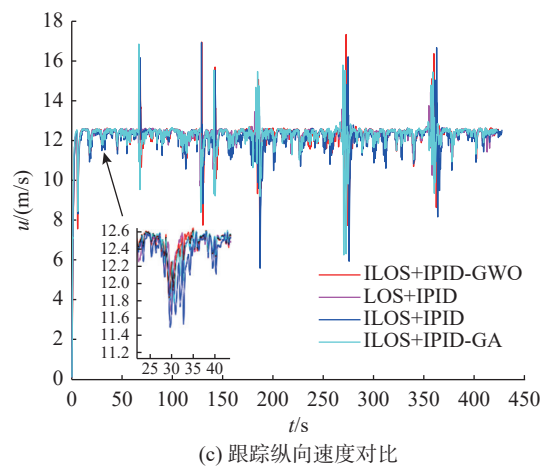
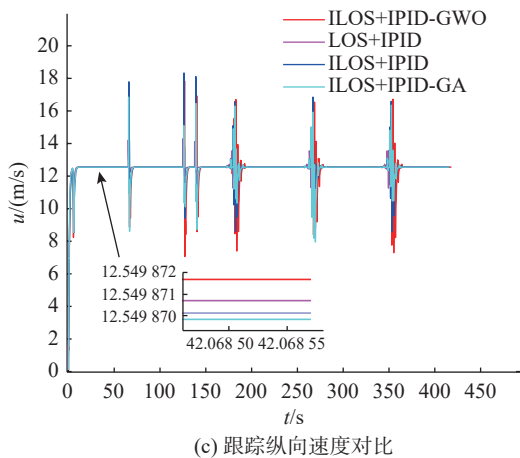
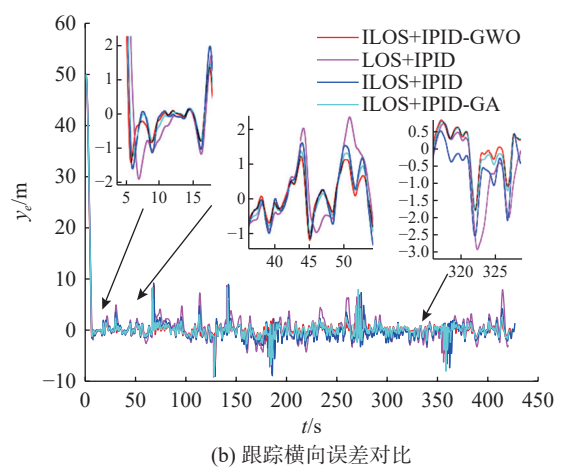
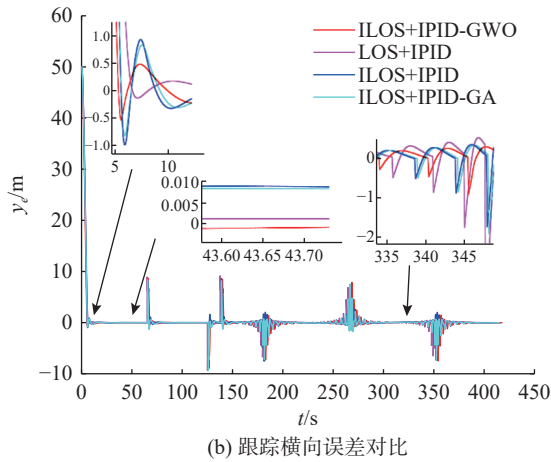
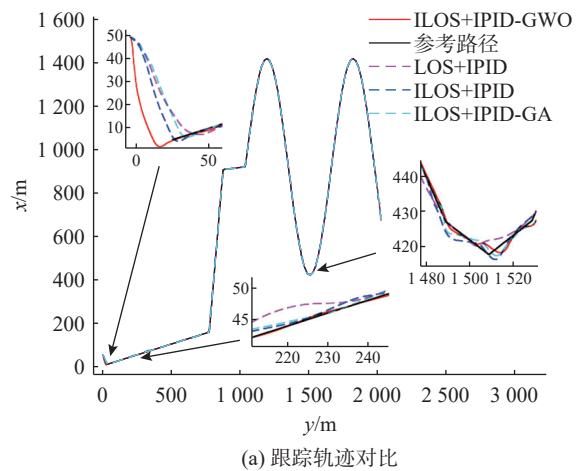
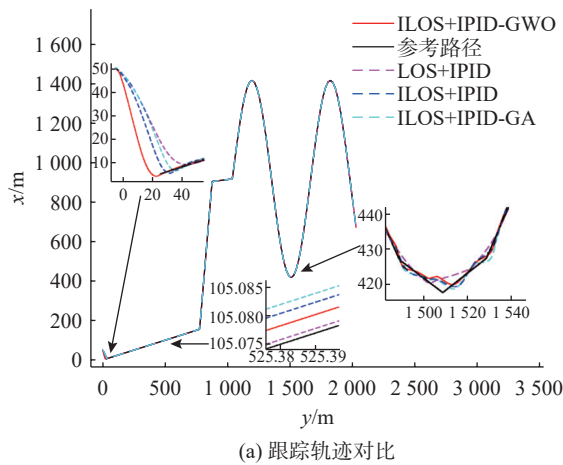


图 4 无干扰时路径跟踪效果对比图

Fig. 4 Comparison of path tracking effects when there is no interference

踪时间上有些许提高, 在横向跟踪误差有一定程度的减少, 但效果均不如 ILOS+IPID-GWO 算法。综上, ILOS+IPID-GWO 算法在无干扰及有干扰时的综合效果较佳, 尤其是抗干扰能力和鲁棒性。

图 5 有干扰时路径跟踪效果对比图

Fig. 5 Comparison of path tracking effect when there is interference

5 结束语

文中针对一种欠驱动的新型无人水翼航行器, 建立了 3 自由度动力学模型, 并进行了输入的解耦

表 2 仿真结果数据
Table 2 Simulation result data

	跟踪时间/s		y_e 绝对值和				u 方差	
	无干扰	有干扰	无干扰	有干扰	部分直线-无干扰	部分直线-有干扰	部分直线-无干扰	部分直线-有干扰
LOS+IPID	400.5	407.9	2 746.4	7 583.1	10.914 4	563.794 7	0.002 058	0.034 333
ILOS+IPID	404.2	415.0	2 694.0	5 903.0	30.240 5	397.614 7	0.012 211	0.092 868
ILOS+IPID-GA	403.8	410.2	2 685.4	4 826.3	30.520 6	308.041 4	0.008 972	0.044 648
ILOS+IPID-GWO	406.3	408.6	2 536.5	3 760.9	25.458 2	197.470 7	0.003 199	0.018 585

控制; 改进了 LOS 算法, 引入了可变前视距离及积分项, 用于消除干扰引起的固定偏差; 设计了 IPID 控制器, 并引入了避免期望跟踪点切换时可能造成系统失控的补偿项; 利用 GWO 对 IPID 控制器的系数进行优化; 在 Matlab 中验证了无干扰及有干扰 2 种情况下 ILOS+IPID-GWO 算法的可行性及较其他算法的先进性, 为欠驱动差速无人水翼航行器自主航行的路径跟踪提供了理论参考, 下一步可以考虑采用更加复杂且先进的控制器进行控制。

参考文献:

[1] 孙佳宇, 段富海. 基于 AKF 的无人水翼航行器纵向姿态控制研究[J]. 兵器装备工程学报, 2023, 44(2): 108-112.
SUN J Y, DUAN F H. Research on longitudinal attitude control of unmanned hydrofoil vehicles based on AKF[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2023, 44(2): 108-112.

[2] 王宁, 贾薇, 吴浩峻. 欠驱动无人船路径跟踪: 一种有限时间正切漂角视线制导方法[J]. 控制与决策, 2025, 40(1): 187-195.
WANG N, JIA W, WU H J. Path following of underactuated marine vehicles: A finite-time sideslip-tangent LOS guidance approach[J]. Control and Decision, 2025, 40(1): 187-195.

[3] 马天珩, 宁杨阳. 基于非线性模型预测控制的无人船航迹跟踪控制方法[J]. 船舶工程, 2023, 45(2): 123-130, 166.
MA T H, NING Y Y. Trajectory tracking control method of unmanned surface vehicles based on nonlinear model predictive control[J]. Ship Engineering, 2023, 45(2): 123-130, 166.

[4] LIU Z, SONG S, YUAN S, et al. ALOS-Based USV path-following control with obstacle avoidance strategy [J]. Journal of Marine Science & Engineering, 2022, 10(9): 1203.

[5] FAN Z, XU Y, FU M. Finite-time command filtered backstepping control for USV path following[C]// OCEANS 2023-Limerick. Limerick, Ireland: IEEE, 2023: 1-6.

[6] MIRJALILI S, MIRJALILI S M, LEWIS A. Grey wolf optimizer[J]. Advances in Engineering Software, 2014, 69(3): 46-61.

[7] 王泽文. 水面无人驾驶的动力学建模与路径跟踪控制算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.

[8] 任帅. 固定双桨推进无人船的自抗扰运动控制研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2019.

[9] 林孝工, 丁福光, 赵大威. 无人船状态估计和路径跟踪控制[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2022.

[10] SHAMSUDDIN P N F B M, MANSOR M A B. Motion control algorithm for path following and trajectory tracking for unmanned surface vehicle: A review paper[C]// 2018 3rd International Conference on Control, Robotics and Cybernetics. Penang, Malaysia: IEEE, 2018.

[11] FOSSEN T I, BREIVIK M, SKJETNE R. Line-of-sight path following of underactuated marine craft[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2003, 36(21): 211-216.

[12] 韩鹏, 刘志林, 周泽才, 等. 基于 LOS 法的自航模航迹跟踪控制算法实现[J]. 应用科技, 2018, 45(3): 5.
HAN P, LIU Z L, ZHOU Z C, et al. Path tracking control algorithm based on LOS method for surface selfpropulsion vessel[J]. Applied Science and Technology, 2018, 45(3): 5.

[13] 裴志远, 戴永寿, 李立刚, 等. 无人船运动控制方法综述[J]. 海洋科学, 2020, 44(3): 153-162.
PEI Z Y, DAI Y S, LI L G, et al. Overview of unmanned surface vehicle motion control methods[J]. Marine Sciences, 2020, 44(3): 153-162.

[14] 陈霄, 刘忠, 罗亚松, 等. 海洋环境下欠驱动无人艇航迹跟踪控制算法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(10): 8.
CHEN X, LIU Z, LUO Y S, et al. Path tracking control algorithm for the underactuated USV in the marine environment[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(10): 8.

[15] LIU S, XU C, ZHANG L. Hierarchical robust path following control of fully submerged hydrofoil vessels[J]. IEEE Access, 2017, 5: 21472-21487.

[16] 黄凤娇, 杨雪, 许祥威. 改进增量式 PID 算法在物料分拣流水线中的应用[J]. 兵工自动化, 2020, 39(9): 4.
HUANG F J, YANG X, XU X W. Application of improved incremental PID algorithm in material sorting pipeline[J]. Ordnance Industry Automation, 2020, 39(9): 4.

[17] JIANG W X. Enhancing the application of the grey wolf optimizer algorithm in USV path planning: A research study[C]//Third International Conference on High Performance Computing and Communication Engineering. Changsha, China: SPIE, 2024: 130730N.1-130730N.7.

(责任编辑: 许妍)