

[引用格式] 孙浩楠, 王磊. 基于三级递阶航速调节的 AUV 平面运动航迹跟踪控制方法研究 [J]. 水下无人系统学报, 2025, 33(3): 441-449.

基于三级递阶航速调节的 AUV 平面运动 航迹跟踪控制方法研究

孙浩楠, 王磊*

(中国船舶科学研究中心, 江苏 无锡, 214082)

摘要: 针对自主水下航行器(AUV)水下运动时经常出现的航迹超调问题, 文中提出了一种融合自适应视线导引算法与三级递阶航速控制架构的协同控制策略, 将航迹末端距离参数引入控制决策, 通过三级递阶控制策略实现航速的动态分配。仿真结果验证了基于三级递阶控制策略的动态航速调节机制的有效性, 通过实时计算 AUV 与期望航迹段终点的距离偏差, 控制器能够在大曲率转向需求触发前, 主动实施分级减速策略, 从而有效抑制因动量累积引发的轨迹偏移现象。对比航向航速双闭环算法, 在相同的轨迹下, 文中方法超调量减少了 34.15%, 使得 AUV 在转弯时仍能准确沿预定轨迹行驶, 显著减少轨迹偏差。

关键词: 自主水下航行器; 视线导引法; 航迹跟踪; 航速控制

中图分类号: TJ630; U674.941

文献标识码: A

文章编号: 2096-3920(2025)03-0441-09

DOI: 10.11993/j.issn.2096-3920.2025-0029

Trajectory Tracking Control Method for AUV Planar Motion Based on Three-Level Hierarchical Speed Regulation

SUN Haonan, WANG Lei*

(China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, China)

Abstract: Autonomous undersea vehicle(AUV) often encounter the problem of track overshoot when moving underwater. To address this issue, this paper proposed a cooperative control strategy that integrated the adaptive line-of-sight guidance algorithm and the three-level hierarchical speed control architecture. In this study, the distance parameter at the end of the track was introduced into the control decision, and the dynamic allocation of the speed was achieved through a three-level hierarchical control strategy. The simulation results verify the effectiveness of the dynamic speed regulation mechanism based on the three-level hierarchical control strategy. By calculating the distance deviation between the AUV and the end of the expected track section in real time, the controller can actively implement the hierarchical deceleration strategy before the large curvature turning requirement is triggered, thereby effectively suppressing the trajectory offset phenomenon caused by momentum accumulation. Compared with the heading-speed double closed-loop algorithm, under the same trajectory, the overshoot of the method in this paper is reduced by 34.15%, enabling the AUV to still accurately travel along the predetermined trajectory when turning and significantly reducing the trajectory deviation.

Keywords: autonomous undersea vehicle; line of sight guidance method; trajectory tracking; speed control

0 引言

自主水下航行器(autonomous undersea vehicle,

AUV)在军事、海洋资源勘探、环境监测和应急救援等关键领域都发挥了重要作用。AUV 水下航行运动主要是在已知航行器位置的条件下, 控制其

收稿日期: 2025-02-24; 修回日期: 2025-04-13; 录用日期: 2025-04-24.

作者简介: 孙浩楠(2001-), 男, 在读硕士, 主要研究方向为 AUV 运动控制与轨迹跟踪.

OPEN ACCESS

舵角与推进器的旋转,进行前进的转向运动。航迹跟踪是指由位置和预期航路得到预期航向,控制算法通过调整舵角角度和电机转速,保证 AUV 能够按照预先设定的航向和速度要求,沿预期航迹稳定航行。随着应用场景和范围的不断扩大,AUV 的轨迹跟踪能力已成为影响其任务执行效率和精度的重要因素。然而,由于水下环境的复杂性及 AUV 高航速运动的非线性特点,轨迹跟踪控制成为一个非常具有挑战性的问题。

在航迹制导算法领域,视线(line of sight, LOS)导引算法^[1]得到的期望航向仅由 AUV 的实时位置和预先设定的期望航迹确定,计算量相对较小。此外,自适应 LOS 导引算法的设计参数极其简单,只有前视距离这一核心参数可调。LOS 导引算法有效地将复杂的跟踪误差问题简化为单个航向角误差,具有优异的收敛特性,这一优点使其在航迹跟踪控制领域得到了广泛的应用^[2]。陆智强等^[3]提出改进 LOS 算法,通过构建航迹夹角-切换圆半径非线性映射关系优化航段切换策略,有效提升了轨迹跟踪精度与抗干扰鲁棒性,但其参数整定依赖人工经验阈值划分,且算法核心参数前视距离仍采用固定值设计,未建立前视距离与航行状态的动态关联关系。Du 等^[4]在水平面上提出了将相对距离和终端 LOS 角纳入相对加速度的航向控制策略,以更精确地跟踪预定路径。陈世利等^[5]针对 AUV 高速转向时轨迹超调问题,提出了基于航向控制回路的偏航角反馈机制,通过动态调节 AUV 参考航速,实现纵向运动与横向控制的解耦优化,该方法在传统 LOS 导引算法基础上,构建了航向

偏差-速度补偿的非线性映射关系。仿真结果表明,该策略通过降低转向段推进功率,有效抑制了高速工况下的惯性累积超调现象,然而,该方法未建立前视距离的动态调节机制,无法根据航行器运动状态实时优化前视参数。

在航迹控制算法方面,由于不依赖系统的动态特性或精确建模具有较强的通用性和适应性,比例-积分-微分(proportional-integral-derivative, PID)算法及其基础上的改进算法^[6]能够广泛应用于各种没有精确数学描述的复杂或非线性系统。Sahoo 等^[7]引入模糊逻辑动态调整 PID 增益,其输入为位置误差和误差变化率,输出为增益修正量,模糊规则通过经验设计,隶属度函数采用三角形和钟形分布。但其未考虑航速调节的局限性可能限制其在大曲率航迹跟踪任务中的应用。计算机技术的进步使得实时计算、优化与高效算法成为可能,在此背景下,滑模控制、模型预测控制^[8]与各种控制算法的综合应用等先进控制方法应运而生。然而,上述方法也面临着对数学模型精度和计算硬件要求高等挑战,因此目前在工程应用中,PID 控制仍为主流方法。

针对 AUV 平面运动航迹跟踪航向角变化较大的情况,提出了一种基于 LOS 导引算法的 AUV 路径跟踪控制策略,通过设计随横向误差变化的前向距离参数,提高了 AUV 的机动灵活性。文中提出了一种三级递阶航速调节函数,修正期望速度随距离偏差的实时变化,将模糊理论与 PID 相结合用于舵角控制器,该函数可连续调节预期航行速度,有效地减小了 AUV 快速航行工况下的跟踪误差。上述控制策略如图 1 所示,输入模块提供

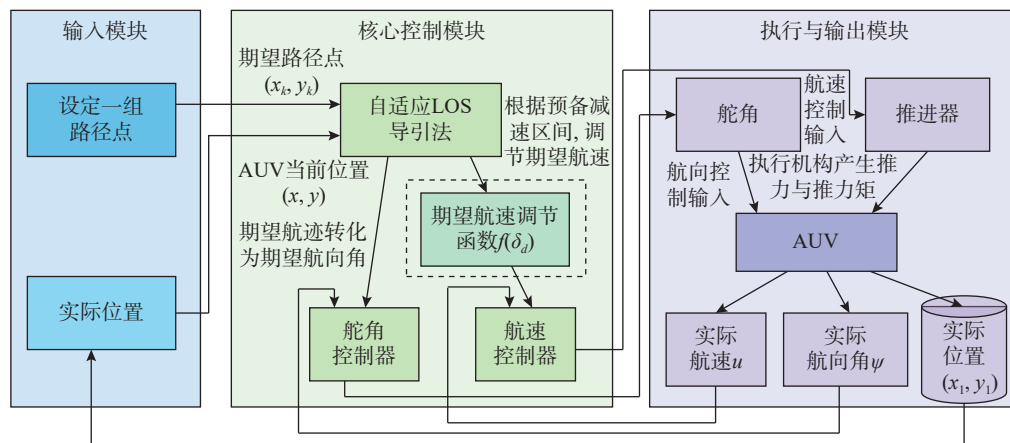


图 1 水下航行器路径跟踪控制策略系统框图

Fig. 1 Block diagram of the path tracking control strategy system for underwater vehicle

设定路径点与实际位置; 核心控制模块通过自适应 LOS 导引法, 结合期望路径点 (x_k, y_k) 与航行器当前位置 (x, y) , 将期望航迹转化为期望航向角, 并利用期望航速调节函数 $f(\delta_d)$ 调节航速, 经舵角控制器与航速控制器处理; 执行与输出模块根据控制输入驱动推进器等执行机构, 产生推力与推力矩, 获取实际航速 u 、实际航向角 ψ 及实际位置 (x_1, y_1) , 形成闭环控制。

1 AUV 模型建立和航迹跟踪设计关键点

1.1 AUV 运动模型建立

文中所采用的 AUV 水平面模型参数参照文献 [9] 提供的数据进行。AUV 在深海水平面中拥有 3 个运动自由度, 每个自由度的运动学参数及符号定义如表 1 所示。

表 1 AUV 运动学参数及符号定义
Table 1 Kinematics parameters and symbol definition of AUV

运动自由度	力与力矩	线速度及角速度	位置与姿态变量
沿x轴方向平移(进退)	X	u	x
沿y轴方向平移(侧移)	Y	v	y
绕z轴方向转动(回转)	N	r	ψ

AUV 水平面动力学模型为

$$\mathbf{M}_{RB}\dot{\mathbf{V}} + \mathbf{C}_{RB}\mathbf{V} + \mathbf{M}_A\dot{\mathbf{V}} + \mathbf{C}_A\mathbf{V} + \mathbf{D}_V\mathbf{V} + \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{M}_{RB}$ 为刚体正定惯性矩阵; $\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ 为恢复力矩阵; $\mathbf{M}_A$ 为附加质量正定惯性矩阵; $\mathbf{C}_{RB} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 为刚体科氏力; $\boldsymbol{\tau} = [X, Y, N]^T$ 为 AUV 受到的控制力矩阵; $\mathbf{V} = [u, v, r]^T$ 为 AUV 的线速度及角速度; $\mathbf{C}_A \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 为类科氏力矩阵; $\mathbf{D}_V \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 为阻尼矩阵。

文中假设 AUV 的垂直舵与方向舵相互独立作用, 并聚焦于 AUV 在特定深度下水平面的轨迹跟踪, 忽略横滚力对水平面运动的影响。在此基础上, 建立 AUV 动力学模型, 用于研究分析其在水平面内的轨迹运动特性, 其水平面动力学方程为

$$\begin{cases} (m - X_{\dot{u}})\dot{u} = X_{|u|u}|u| + (X_{vr} + m)vr + X_{rr}r^2 + X_{\text{prop}} \\ (m - Y_{\dot{v}})\dot{v} = Y_{|v|v}|v| + (Y_{ur} - m)ur + Y_{uv}uv \\ (I_z - N_{\dot{r}})\dot{r} - N_{\dot{v}}\dot{v} = N_{|v|r}|v|r + N_{|r|r}r|r| + N_{ur}ur + \\ N_{uv}uv + N_{uu\delta_r}u^2\delta_r \end{cases} \quad (2)$$

式中: m 为 AUV 的质量; $X_{\dot{u}}$ 、 $Y_{\dot{v}}$ 、 $N_{\dot{v}}$ 与 $N_{\dot{r}}$ 为附加质量; $X_{|u|u}$ 、 $Y_{|v|v}$ 、 $Y_{|r|r}$ 、 $N_{|v|r}$ 与 $N_{|r|r}$ 为阻尼力系数; X_{vr} 、

X_{rr} 、 Y_{ur} 、 Y_{uv} 、 N_{ur} 与 N_{uv} 为科氏力系数, X_{prop} 为 AUV 推进器推力; I_z 为 AUV 的 Z 轴转动惯量; δ_r 为垂直舵舵角; $N_{uu\delta_r}$ 为垂直舵舵角系数。

AUV 水平面运动学方程为

$$\begin{cases} \dot{x} = u \cdot \cos \psi_1 - v \cdot \sin \psi_1 \\ \dot{y} = u \cdot \sin \psi_1 + v \cdot \cos \psi_1 \\ \dot{\psi}_1 = r_1 \end{cases} \quad (3)$$

式中: x 、 y 为 AUV 大地坐标系水平面上的位置信息; ψ_1 为偏航角; r_1 为偏航角速度。

1.2 航迹跟踪控制目标

AUV 水平面期望航迹跟踪控制研究中, 核心控制目标可解构为航向与航速双重维度。

1) 航向控制层面: 通过自适应 LOS 导引法实现艏向角期望输出的精确解算, 并设计具有强鲁棒性的控制算法, 确保 AUV 艏向角实时跟踪期望输出, 解决传统固定前视距离导致的航向滞后问题, 从而推动 AUV 从当前位置渐进收敛至预设航迹, 提升路径切换的平滑性。

2) 航速控制层面: 构建基于模糊比例积分系数自适应调节的三级递阶速度调控结构, 依据 AUV 与目标路径点的距离偏差动态调控航速, 解决传统固定航速无法适应路径几何特征的问题, 确保实时航速趋近并稳定保持于期望航速, 同时抑制转弯时离心力引发的轨迹发散。

2 水平面运动轨迹跟踪算法与控制方法

2.1 自适应前视距离的 LOS 导引法

传统 LOS 导引算法原理如图 2 所示, 图中 R 为切换圆半径, Δ 为前视距离, ψ_d 为期望航向角, $y_e(t)$ 为横向误差, 通过将期望点的位置误差映射为

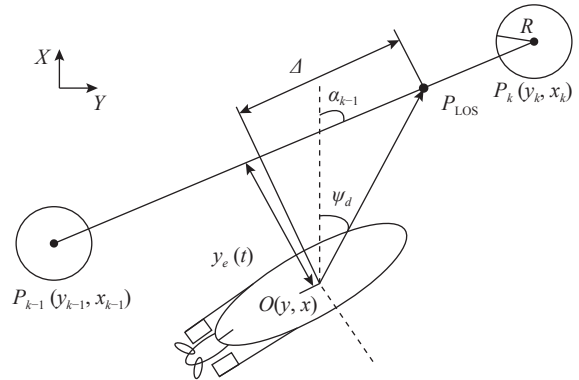


图 2 LOS 导引法原理图

Fig. 2 LOS schematic diagram

航向误差, 构建动态虚拟目标点 P_{LOS} , 引导 AUV 朝向该目标点的方向进行航向调整, 从而实现对期望路径的逐步跟踪^[10-11]。

在图 2 坐标系中给出由 1 组期望航迹目标点 $P_k(k=0, 1, 2, 3\cdots)$ 组成的 AUV 期望航迹, AUV 的当前位置为 $O(x, y)$, 利用四象限反正切计算点 P_{k-1} 、 P_k 组成期望航迹的航向方位角, 即

$$\alpha_k = \text{atan2}(y_k - y_{k-1}, x_k - x_{k-1}) = \begin{cases} \arctan\left(\frac{y_k - y_{k-1}}{x_k - x_{k-1}}\right) & x > 0 \\ \arctan\left(\frac{y_k - y_{k-1}}{x_k - x_{k-1}}\right) + \pi & x < 0, y \geq 0 \\ \arctan\left(\frac{y_k - y_{k-1}}{x_k - x_{k-1}}\right) - \pi & x < 0, y < 0 \\ +\frac{\pi}{2} & x = 0, y > 0 \\ -\frac{\pi}{2} & x = 0, y < 0 \\ \text{无定义} & x = 0, y = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: a 为 2 个相邻期望航迹点所构成的与 x 轴的夹角; x_k, y_k 为期望航迹点的坐标; AUV 实时位置 $O(x, y)$ 与航迹点 $P_{k-1}(x_{k-1}, y_{k-1})$ 的坐标差为 $(x - x_{k-1}, y - y_{k-1})$; 期望航迹段 $P_{k-1} - P_k$ 的方向角为 α_{k-1} , 单位向量为 $(\cos\alpha_{k-1}, \sin\alpha_{k-1})$, 其垂直方向即横向误差方向的单位向量可以通过逆时针旋转 90° 得到, 垂直方向单位向量为 $(-\sin\alpha_{k-1}, \cos\alpha_{k-1})$, 将 AUV 位置与 P_{k-1} 的坐标差投影到垂直方向单位向量上, AUV 相对期望航迹的垂直偏差由式(5)表示, 其本质是利用旋转后的垂直方向向量量化位置与航迹的偏离程度。

$$y_e(t) = (y - y_{k-1})\cos\alpha_{k-1} - (x - x_{k-1})\sin\alpha_{k-1} \quad (5)$$

前视距离 Δ 是 AUV 当前位置在期望轨迹上的垂足与期望路径上 LOS 点之间的水平距离, 式(6)为当前 AUV 坐标与期望路径段的航向角。

$$\psi_d = \alpha_k - \text{atan2}(y_e(t), \Delta) \quad (6)$$

由式(6)可以得出, 在传统 LOS 导航算法中, 距离误差向航向误差映射的过程存在一个关键缺陷, 即 Δ 采用预先定义的固定值。该参数的设定具有显著的静态特征, 即在导航过程中, 无论 AUV 当前位置与期望航迹间的横向偏差如何变化, Δ 始终保持初始给定的恒定数值。这种参数配置方式使得系统缺乏对动态导航环境的自适应性调节能力,

无法根据实时横向误差的幅值变化进行智能补偿, 导致控制性能下降。因此在 Δ 中引入 $y_e(t)$ 作为时变参数, 实现自适应前视距离, 即

$$\Delta = (\Delta_{\max} - \Delta_{\min})\exp(-\lambda y_e^2(t)) + \Delta_{\min} \quad (7)$$

式中: 前视距离的最小值和最大值为 $\Delta_{\min}$ 和 $\Delta_{\max}$; λ 为给定的常数系数。该自适应控制策略通过构建 Δ 与 $y_e(t)$ 的非线性映射关系, 有效提升了路径跟踪的动态性能。具体而言, 当 AUV 处于大偏差状态时, 采用较小的 Δ 值可增强航向调整增益, 形成强反馈控制机制, 能够在确保系统稳定性的前提下加快 $y_e(t)$ 收敛速度; 当 AUV 进入小偏差区域时, 通过动态增大 Δ 值可平滑衰减航向调整增益, 形成弱反馈控制模式, 从而有效抑制 $y_e(t)$ 的波动幅值, 避免传统固定参数系统在临界区域出现的超调振荡现象。

随着 AUV 逐渐逼近目标点, $y_e(t)$ 不断减小。当 AUV 与当前目标路径点之间的距离小于预设的切换半径, 路径跟踪算法将当前目标点切换为下一个路径点, 并重新计算期望航向角。在路径点切换过程中, 为避免切换过早或过迟可能引发的路径偏离, LOS 导引法通常结合切换圆进行目标点的过渡性引导。AUV 逐渐减小 $y_e(t)$ 并切换到下一跟踪点的过程是 $y_e(t)$ 修正与路径点切换的动态结合, LOS 导引法依次切换期望航迹点, 直到遍历所有期望航迹点, 完成期望轨迹的跟踪, 设置切换圆半径 R 满足

$$(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2 < R^2 \quad (8)$$

2.2 AUV 航行控制方法

传统 AUV 航速控制策略中, 恒定航速期望值的设定方法存在显著局限性, 其核心缺陷体现在动态路径跟踪过程中, 当 AUV 遭遇大曲率航段时, 存在恒定推进力与路径几何约束之间的不匹配问题。具体表现为: 在航向角变化率超过临界阈值的工况下, 保持恒定航速将导致横向控制力不足, 使得实际航迹与期望轨迹间的横向偏差超出系统带宽限制, 形成典型的“过冲-修正”振荡模式。图 3 描述了一种基于横向偏差的多模态分级航速动态调控方法, 该策略通过构建误差量级与控制参数的非线性映射关系, 在不同偏差区间实施差异化的航速调节策略。

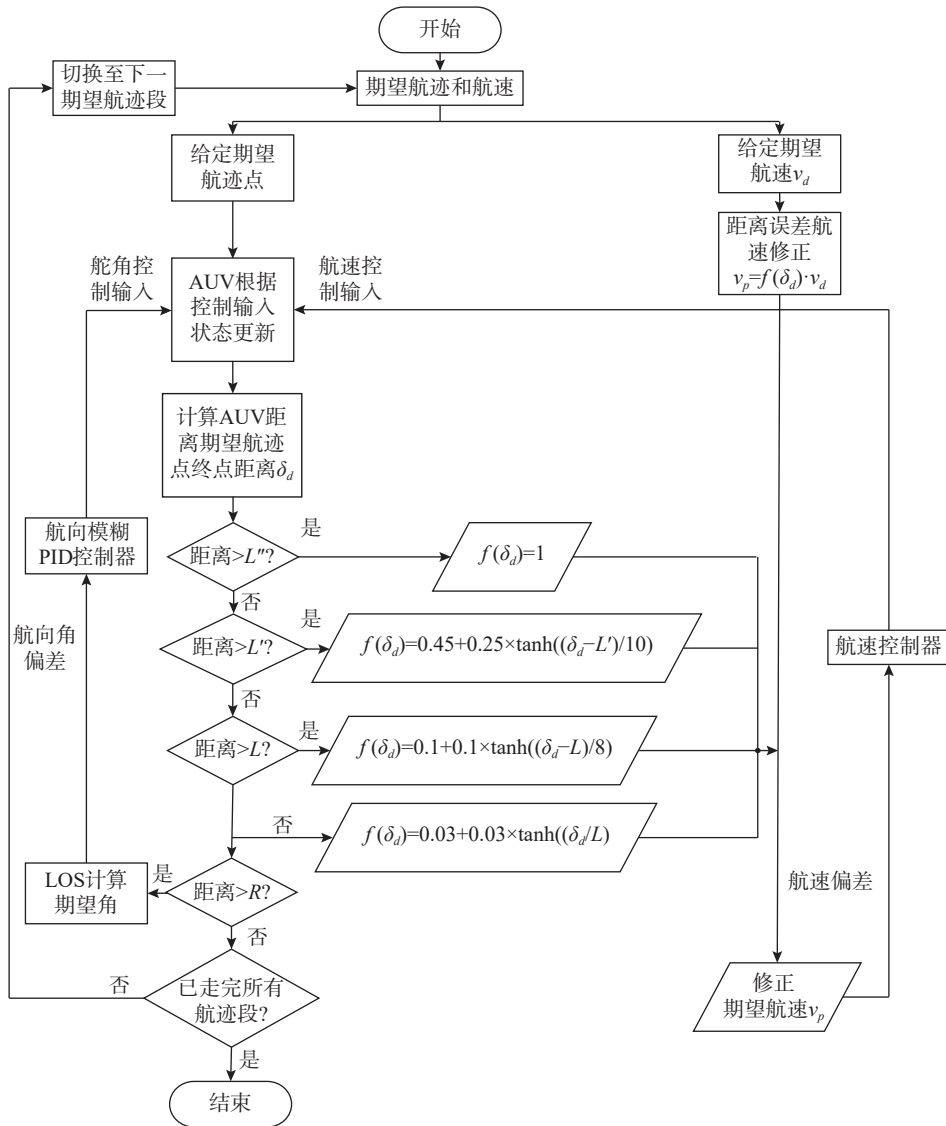


图 3 三级递阶航速调节控制算法流程图

Fig. 3 Flow chart of three-level hierarchical speed loop control algorithm

核心流程包括路径段切换、航向调整及速度控制等多个环节。该机制基于 AUV 与目标点之间的几何关系及 $y_e(t)$ 的反馈, 使用不同的距离反馈函数调整 AUV 航速, 使其适应当前的跟踪需求。定义 AUV 当前位置与当前目标路径点之间的直线距离为 δ_d , 其作为自变量调节 AUV 的航速, 具体修正函数为

$$v_d = f(\delta_d) v_{LOS} \quad (9)$$

式中: v_d 为经过三级递阶航速调节的最终期望航速; $f(\delta_d)$ 为三级递阶航速更新模型; v_{LOS} 为设定的基础期望航速。航速修正的 AUV 轨迹跟踪控制策略如图 4 所示, 目的是确保 AUV 在航迹段内保持

高速航行, 并在接近航迹切换区域时适当减速, 以提高转向过程中轨迹跟踪的精度, 减少航迹超调, 从而优化航迹跟踪性能。式(10)构建的航速函数是基于 AUV 当前位置与目标路径点距离 δ_d 构建的分段连续函数, 从而实现航速的分阶段递减调控策略。

$$f(\delta_d) = \begin{cases} 1, & |\delta_d| > L'' \\ 0.45 + 0.25 \times \tanh\left(\frac{\delta_d - L'}{10}\right), & L' < |\delta_d| < L'' \\ 0.1 + 0.1 \times \tanh\left(\frac{\delta_d - L}{8}\right), & L < |\delta_d| < L' \\ 0.03 + 0.03 \times \tanh\left(\frac{\delta_d}{L}\right), & |\delta_d| < L \end{cases} \quad (10)$$

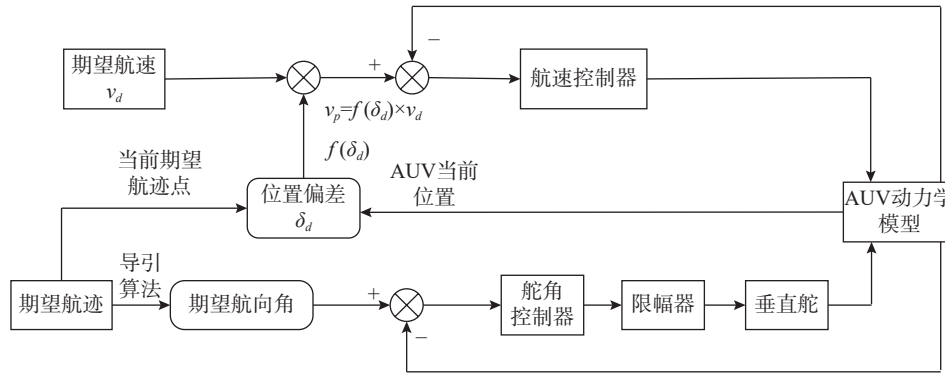


图 4 AUV 轨迹跟踪控制框图

Fig. 4 Block diagram of AUV trajectory tracking control

式中, L 、 L' 与 L'' 为常量, 为预备减速距离。该分段函数的设计主要基于以下逻辑:

1) 距离分层调控需求。通过设置距离阈值 L 、 L' 与 L'' , 将 AUV 与目标路径点的距离 δ_d 划分为不同区间, 对应不同调控强度。远距离($\delta_d > L''$)时采用固定值 1, 快速建立调控基准; 中远距离($L' < \delta_d < L''$)、中近距离($L < \delta_d < L'$)及近距离($\delta_d < L$)则通过不同系数的双曲正切函数, 实现航速分阶段精细递减, 匹配 AUV 靠近目标路径点过程中对航速调节精度的差异化需求。

2) 平滑过渡特性: 各区间内融入双曲正切函数 $\tanh(\cdot)$, 利用其连续平滑的非线性映射特性, 避免航速调节值骤变。例如, 在($L' < \delta_d < L''$)区间, $(0.45 + 0.25\tanh(\cdot))$ 的形式可使航速调节量随 δ_d 变化平稳过渡, 规避因调节突变引发的系统振荡。

3) 转向稳定性约束: 鉴于转向过程中航速变化幅度过大易导致全局控制时长增加, 对航迹跟踪任务整体完成度产生不利影响, 故对最小阶航速变化函数的系数实施下限约束, 避免其取值过小。

传统 PID 控制如式(11)所示。

$$u_c = K_p \left(e(t) + \frac{1}{K_i} \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (11)$$

式中: u_c 为传统 PID 控制输出的控制量; K_p 、 K_i 、 K_d 为 PID 参数; $e(t)$ 为误差; t 为当前时刻。为了使控制系统能够根据实时误差及其变化率动态调整控制策略, 提高系统的自适应能力与控制精度, 采用传统 PID 控制与模糊比例-微分 (proportional-derivative, PD) 控制相结合的策略, 共同作用于控制输入^[12], 如图 5 所示。

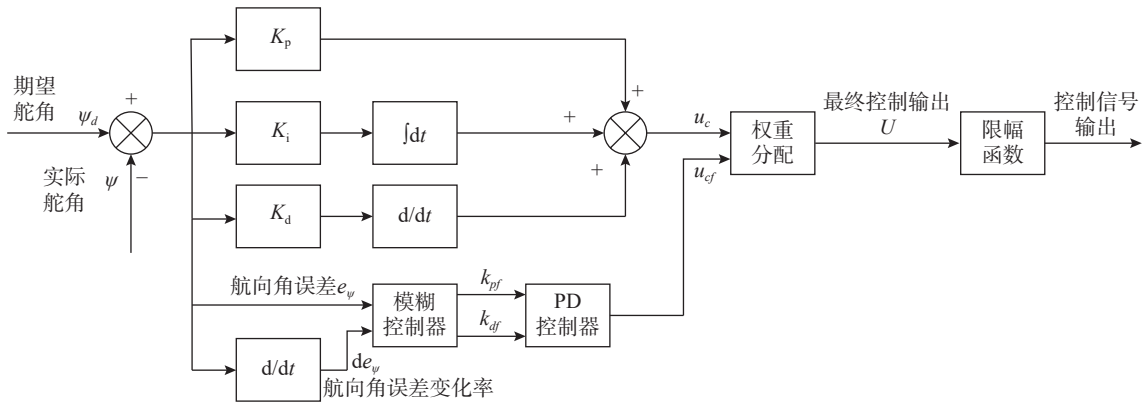


图 5 AUV 舵角控制器设计

Fig. 5 Design of AUV rudder Angle controller

在该框架下, 当误差 $e(t)$ 及误差变化率 $\Delta e(t)$ 处于不同的状态组合时, 模糊控制器依据设定规则输出相应的比例系数 K_p 、积分系数 K_i 与微分系数

K_d , 从而调整 PID 控制参数, 使控制器能够自适应地输出系统的控制量 u_{cf} 。基于上述分析, 进一步设计权重函数, 以合理分配传统 PID 控制与模糊

PD控制的作用。通过将式(11)所表示的传统PID方法改进为式(12)所描述的模糊PD与PID耦合的控制方法,从而有效提升系统的控制性能与鲁棒性,从而提升系统的控制性能与鲁棒性。

$$U(u_c, u_{cf}) = \frac{\sin(\ln(u_c + 1)) + u_c^{1/3} \cdot e^{\cos(u_{cf})}}{u_c^{0.5} + u_{cf}^{0.5}} \cdot \left(1 + \frac{\sin(u_c)}{1 + u_{cf}^2} \right) \quad (12)$$

式中: u_c 为PID控制器的控制输出; u_{cf} 为模糊PD的控制输出; $U(u_c, u_{cf})$ 为使用权重函数进行权重配比后的最终控制器输出。

3 仿真实验结果与分析

为评估所提出算法的性能和实用价值,借助MATLAB/Simulink软件搭建了用于AUV线性轨迹跟踪控制的仿真模型。仿真中使用的AUV模型参数参照文献[9]提供的数据进行设置,初始状态设定为:位置 $x=0\text{ m}$, $y=0\text{ m}$, 纵向速度 $u=0\text{ m/s}$, 横向速度 $v=0\text{ m/s}$, 航向角 $\psi=0^\circ$, 以及角速度 $r=0\text{ rad/s}$ 。规划了包含多段航向角变化的路径,其中典型的Z形路径包含目标点 $A(0, 0)$ 、 $B(400, 0)$ 、 $C(0, -400)$ 和 $D(400, -400)$ (单位: m), 期望航速为 2.5 m/s 。

在路径跟踪算法的设计中,设置前视距离的上下限为(6 m, 16 m), 轨迹切换圆半径 $R=6.0\text{ m}$, 自适应常数系数 $\lambda=4$ 。为优化航速控制,设计了减速距离参数,其中缓冲区外偏差 $L''=65\text{ m}$, 缓冲区内偏差 $L'=40\text{ m}$, 缓冲区内偏差 $L=20\text{ m}$ 。

分别采用文献[5]提出的航向航速双闭环PID控制算法和文中提出的三级递阶航速调节自适应模糊PD控制算法进行仿真。对于航向航速双闭环控制,舵角PD控制器的系数与航速PID控制器的系数如表2所示。

表2 航向航速双闭环控制的舵角PD与航速PID控制器系数

Table 2 Rudder angle PD controller coefficient and speed PID controller coefficient under the heading-speed double closed-loop control

	K_p	K_i	K_d
舵角PD控制器	0.157 9	—	1.248 1
航速PID控制器	11.701 5	0.698 8	22.574 9

对于三级递阶航速调节模糊控制,提出基于模糊推理的自适应PD控制策略,通过在线调整 K_p 和 K_d 参数。在模糊控制器设计中,以误差 $E=e(t)$ 、误差变化率 $E_c=de(t)$ 为输入变量, K_p 、 K_i 、 K_d 为输出变量,并划分负大(NB)、负中(NM)、负小(NS)、零(ZO)、正小(PS)、正中(PM)、正大(PB)7个语言变量,借助三角形隶属函数实现变量到语言值的平滑映射,对应的模糊规则曲面如图6所示。模糊规则逻辑遵循“误差与误差变化率状态组合调控控制参数”原则,即误差较大时,以调整 K_p 快速缩小误差为主;误差中等时,结合误差变化率协同调节 K_p 、 K_d ;误差较小时,侧重通过 K_d 抑制超调,最终实现PID控制参数的自适应优化,输出匹配系统动态特性的控制量 u_{cf} 提升系统控制性能。传统PID控制器的参数设计与航向航速双闭环的参数设计一致。

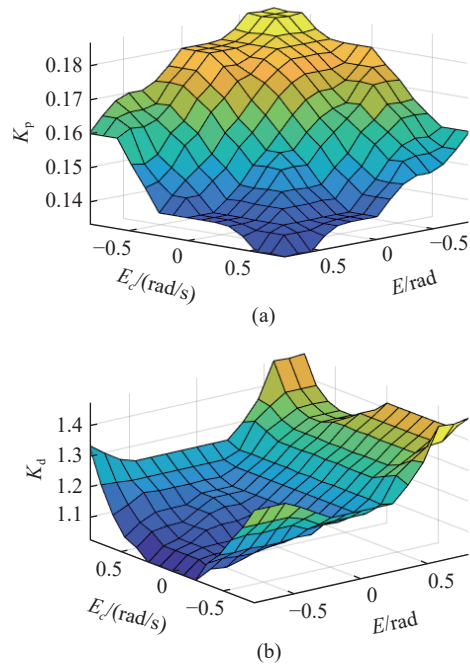


图6 舵角模糊PD控制器模糊规则曲面

Fig. 6 Fuzzy regular surface of rudder angle fuzzy PD controller

仿真结果如图7所示。从图7(a)所示的航迹跟踪曲线可见,在整个航迹跟踪过程中,2种闭环控制算法均能够有效实现AUV对期望航迹的准确跟踪,且实际航迹迅速收敛至目标轨迹,表明2种算法在稳定性和精度方面具有较好的表现。特别是三级递阶航速调节控制策略,通过缓冲区

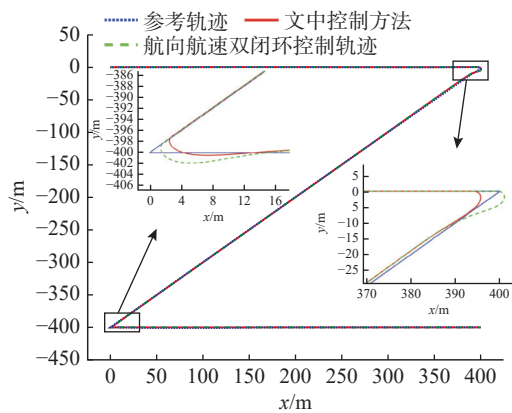


图 7 三级递阶航速控制与航向航速双闭环控制航迹跟踪仿真结果对比

Fig. 7 Comparison of trajectory tracking simulation results between three-level hierarchical speed control and heading-speed double closed-loop control

外环和缓冲区内环的层次化调节, 确保了系统在不同航行阶段的平稳过渡和高效运行。图 7(b)与图 7(c)进一步展示了在转角处的轨迹跟踪效果, 尤其在(0, -300)处, 采用带有距离修正的三级递阶航速的模糊 PD 控制算法显著提高了轨迹跟踪性能。

性能指标如表 3 所示, 相较于航向航速双闭环控制策略, 该方法通过优化轨迹切换算法, 使航迹超调量降低 34.15%, 有效提升了路径跟踪的平滑性与系统动态稳定性。然而值得注意的是, 由于航速调节函数在转向过程中引导 AUV 降速更为明显, 导致系统调节时间较传统双闭环控制有所延长。这一现象主要归因于三级递阶航速控制的减速区间大于航向航速双闭环控制, 提前减速导致调节时间延长, 此外航速调节模块对横向加速度的主动抑制作用, 在保证转向精度的同时, 不可避免地引入了航速调节的滞后效应。表 3 的性能指标结果验证了文中控制方法在路径跟踪过程中对误差的有效抑制能力和较高的精度。

表 3 航迹跟踪控制性能指标

Table 3 Performance indicators of track tracking control

控制方法	最大误差/m	稳态误差/m	航速调节时间/s
三级递阶航速调节控制	4.656	0.08	147
航向航速双闭环航速控制	7.071	0.09	119

图 8 展示了 2 种控制算法下 AUV 航速的变化, 图 9 展示了 AUV 的航向角变化情况。从图中可以观察到, 2 种控制算法均能有效降低 AUV 在

路径切换过程中的航速。在三级递阶航速算法的控制下, AUV 能够提前减速, 采用较小的航速进行转向, 从而有效减少了航迹的超调现象。从图 9 可知, 三级递阶航速算法控制算法下, 航向角的变化幅度略小于航向航速双闭环算法。这一特点在实际工程应用中具有重要意义, 能够有效减少不必要的航迹超调, 从而提高系统的控制效率和能源利用率。

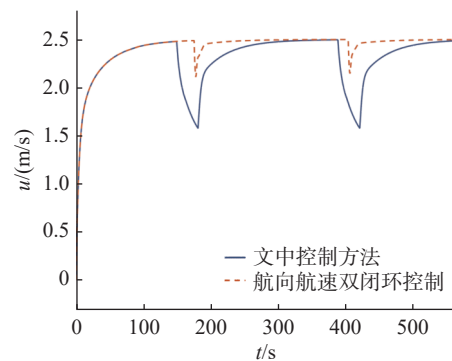


图 8 三级递阶航速控制与航向航速双闭环控制的航速-时间曲线

Fig. 8 Speed-time curves of three-level hierarchical speed control and heading-speed double closed-loop control

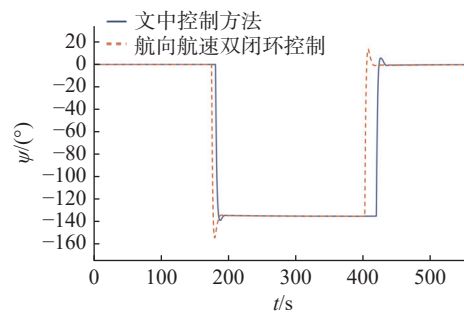


图 9 三级递阶航速控制与航向航速双闭环控制的航向角-时间曲线

Fig. 9 Heading angle-time curves of three-level hierarchical speed control and heading-speed double closed-loop control

4 结论

文中针对 AUV 平面运动航迹跟踪中存在的航迹超调问题, 提出一种融合自适应 LOS 导引算法与三级递阶航速控制架构的协同控制策略, 构建基于 $y_e(t)$ 反馈的航速动态调控闭环控制架构, 实现航速指令的实时优化与闭环修正; 仿真验证其相较传统双闭环 PID 算法, 使转弯航迹超调量降

低 34.15%, 显著提升 AUV 路径切换平稳性、路径跟踪精度与系统稳定性。主要结论如下:

1) 通过时变前视距离的 LOS 导引法, AUV 能够根据当前位置与目标点之间的距离动态调整前视距离, 从而实时计算期望航向角。

2) 引入模糊控制算法对 PD 参数进行自适应调整, 并结合传统 PID 控制方法设计了一种权重函数。基于 AUV 与期望轨道末端之间的距离偏差, 动态调节航速, 形成三级递阶航速控制结构。

3) 仿真结果表明, 与航向航速双闭环 PID 算法相比, 所提出的三级递阶航速调节函数能够在转弯过程中有效减少航迹的超调, 确保 AUV 在路径切换时更加平稳, 并提高了路径跟踪的精度与稳定性。

参考文献:

- [1] CHEN W, LIU X L, FENG Z A, et al. Improved line-of-sight nonlinear trajectory tracking control of autonomous underwater vehicle exposed to high variable speed ocean currents[J]. *Ocean Engineering*, 2023(277): 114149.
- [2] DU P Z, YANG W C, CHEN Y, et al. Improved indirect adaptive line-of-sight guidance law for path following of under-actuated AUV subject to big ocean currents[J]. *Ocean Engineering*, 2023(281): 114729.
- [3] 陆智强, 庄子昊, 王建辉, 等. 基于 LOS+PID 的无人船行驶路径跟踪控制[J]. *微型电脑应用*, 2024, 40(10): 1-5.
- LU Z Q, ZHUANG Z H, WANG J H, et al. Path tracking control of unmanned ship based on LOS+PID[J]. *Micro-computer Application*, 2024, 40(10): 1-5.
- [4] DU B, YANG K D, ZHANG W D, et al. Terminal line-of-sight angle-constrained target tracking guidance for unmanned surface vehicles[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024(73): 12515-12529.
- [5] 陈世利, 卫民, 李一博, 等. 基于双闭环的矢量推进器的 AUV 转向控制方法[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2014, 47(6): 530-534.
- CHEN S L, WEI M, LI Y B, et al. AUV steering control method based on double closed loop vector thruster[J]. *Journal of Tianjin University (Natural Science and Engineering Technology)*, 2014, 47(6): 530-534.
- [6] BINGUL Z, GUL K. Intelligent-PID with PD feedforward trajectory tracking control of an autonomous underwater vehicle[J]. *Machines*, 2023, 11(2): 300.
- [7] SAHOO A, DWIVEDY S K, ROBI P S. Adaptive fuzzy PID controller for a compact autonomous underwater vehicle[C]//*Global Oceans 2020: Singapore-U.S. Gulf Coast, Biloxi, MS, USA: IEEE*, 2020: 1-6.
- [8] 史峻桥, 刘程, 郭玮丽, 等. 基于神经动态优化与模型预测控制的欠驱动船舶精确路径跟踪[J]. *中国舰船研究*, 2025, 20(1): 1-10.
- SHI J Q, LIU C, GUO W L, et al. Accurate path tracking of underactuated ships based on neural dynamic optimization and model predictive control[J]. *Chinese Ship Research*, 2025, 20(1): 1-10.
- [9] PRESTERO T. Verification of a six-degree of freedom simulation model for the REMUS autonomous underwater vehicle[D]. California: University of California at Davis, 2001.
- [10] 王浩亮, 任恩帅, 卢丽宇, 等. 面向海底管道巡检的 AUV 三维自适应路径跟踪[J]. *船舶工程*, 2024, 46(4): 166-174.
- WANG H L, REN E S, LU L Y, et al. AUV 3D adaptive path tracking for submarine pipeline inspection[J]. *Ship Engineering*, 2019, 46(4): 166-174.
- [11] 付少波, 关夏威, 张昊. 基于自抗扰理论的欠驱动 AUV 无模型自适应路径跟踪控制[J]. *水下无人系统学报*, 2024, 32(2): 328-336, 375.
- FU S B, GUAN X W, ZHANG H. Model-free adaptive path tracking control of underactuated AUV based on active disturbance rejection theory[J]. *Journal of Unmanned Underwater Systems*, 2019, 32(2): 328-336, 375.
- [12] 毛竞航, 吕海宁, 杨建民, 等. 基于模糊 PID 的深海采矿机器人路径跟踪控制[J]. *海洋工程*, 2021, 39(5): 151-161.
- MAO J H, LÜ H N, YANG J M, et al. Path tracking control of deep-sea mining robot based on fuzzy PID[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 39(5): 151-161.

(责任编辑: 靳潇倩)