

本文网址: <http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.04240>

期刊网址: www.ship-research.com

引用格式: 郭强, 王嘉琪, 张显库, 等. 基于 BLF 的浅水效应下无人船自适应路径跟踪控制 [J]. 中国舰船研究, 2025, 20(1): 263–271.

GUO Q, WANG J Q, ZHANG X K, et al. BLF-based adaptive path following control for unmanned surface vehicles under shallow water effects[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2025, 20(1): 263–271 (in Chinese).

基于 BLF 的浅水效应下无人船 自适应路径跟踪控制



扫码阅读全文

郭强¹, 王嘉琪¹, 张显库^{*2}, 马道成²

1 西安科技大学 电气与控制工程学院, 陕西 西安 710054

2 大连海事大学 航海学院, 辽宁 大连 116026

摘要: [目的] 旨在解决无人船于浅水域路径跟踪控制中面临的路径依赖约束问题。[方法] 基于精确安全需求设立航行过程中的性能与可行性约束条件。针对控制器对路径参数的依赖问题和收敛需求, 结合障碍李雅普诺夫函数(BLF)及固定时间收敛策略, 设计一种依赖于路径参数、能够在固定时间内收敛的控制器, 采用径向基神经网络(RBFNN)和自适应鲁棒项处理非线性项与环境干扰。通过“大智”号智能无人船模型模拟浅水效应环境进行仿真验证。[结果] 结果显示, 在不违反约束要求的前提下, 路径跟踪误差能够快速收敛到预定区域, 在收敛速度和精度上优于无约束的情况, 证明了控制器的有效性和鲁棒性。[结论] 所提控制策略在解决船舶路径依赖约束问题上, 能够确保固定时间内实现精确的路径跟踪, 具有理论和实际应用价值。未来可进一步优化以适应更复杂的水域环境和更高精度的路径跟踪任务。

关键词: 无人船; 导航; 路径规划; 目标跟踪; 路径跟踪控制; 约束优化; 输出约束控制; 浅水效应

中图分类号: U664.82; U675.7

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.04240

0 引言

在现代海洋工程领域, 无人船的应用日益广泛, 其在浅水域的路径跟踪控制成为研究热点与难点。浅水域的特殊环境对无人船控制提出诸多挑战。由于浅水效应, 无人船流体动力特性改变, 且复杂环境要求船舶具有更高的路径跟踪精度与鲁棒性能^[1]。为保障无人船在浅水域航行中的安全性与稳定性, 在路径跟踪控制过程中必须施加一系列约束条件, 以确保航行过程中能够精准跟踪到预定参考路径。这些功能通常可以在控制器中对船舶位置误差和航向角设计约束条件来实现。前者是确保无人船能够以预定的精度规格跟随参考路径, 使跟踪误差的暂态超调和稳态误差处于设定的范围内, 保证航行的稳定性和安全性; 后者可以起到限制无人船航向角变化的作用, 保证船舶航向精确定位, 避免偏离目标方向,

同时防止控制器设计中出现奇异点。位置误差和航向角误差约束能够确保无人船在浅水域路径跟踪过程中准确追踪到期望的参考路径。

目前, 对无人船路径跟踪控制中的输出约束已有大量研究^[2-10]。这些无人船的航行约束控制研究中常用的约束函数基本可以分为恒值约束和时变约束。然而, 现实中无人船在浅水域中航行的约束条件会因面临不同的路径和参数而有所不同。例如, 无人船在拥挤水域或浅水航道中必须避免碰撞, 此时需要遵循既定路径并确保跟踪误差收敛到预定集合, 同时控制跟踪误差的暂态超调, 防止船舶在初始阶段出现过大的航向变化。这些受限情况通常与几何或空间特征相关, 而传统的恒定或时变约束函数往往无法准确反映实际航行中的几何特征。因此, 针对无人船在浅水域的航行, 应开发更符合实际航行状况的、依赖路径的船舶跟踪误差性能约束, 以满足复杂航道的

收稿日期: 2024-10-28 修回日期: 2024-12-05 网络首发时间: 2025-01-08 11:29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51679024)

作者简介: 郭强, 男, 1993年生, 博士, 讲师。研究方向: 自适应控制, 事件触发控制。E-mail: qiangguo@xust.edu.cn

王嘉琪, 男, 2002年生, 硕士生。研究方向: 机器人运动控制。E-mail: 3250468588@qq.com

张显库, 男, 1968年生, 博士, 教授。研究方向: 船舶运动控制。E-mail: zhangxk@dlmu.edu.cn

马道成, 男, 1999年生, 博士生。研究方向: 船舶运动控制。E-mail: madaocheng2022@163.com

*通信作者: 张显库

需求。

在两轮机器人领域,依赖路径参数的约束函数已经得到初步探索^[11-12]。这些研究验证了约束函数设计在改善轮式机器人路径跟踪控制性能方面的潜力。Guo 等^[9-10]将在轮式机器人上研究的成果拓展到了正常水域中自主水面船的性能控制与可行性约束控制中,并应用到一艘 32 m 长的船舶数据进行了仿真验证。与简单的两轮机器人相比,无人船的体积更大,在航行过程中具有更大的惯性、时滞性,因此也更加难控制。虽然 Guo 等^[9-10]研究了依赖于路径参数的约束函数对船舶性能控制的影响,但是在其研究中未考虑浅水效应的影响。同时,在浅水域中,除去浅水效应对无人船舵的影响,伴随浅水域场景的往往是船舶密集、航道狭窄的情况。因此,将根据路径进行参数更新的约束应用于浅水域无人船路径跟踪控制也更加具有难度和实际应用意义,既能够在复杂浅水域环境中降低约束函数对时间的依赖,也能够使无人船准确地跟踪到参考轨迹。

在浅水域中进行路径跟踪控制时,与时变约束函数相比,和路径相关的约束函数更容易设计。这是因为在浅水域航行过程中,无人船的航行路径通常是事先规划好的,操纵人员可以在了解规划路径的基础上,提前设计合适的约束函数。这意味着,依赖于路径的约束函数能够充分利用已规划路径的先验知识,尤其是在避碰路径的设计上。相反,无人船在航行过程中的状态预测则更加困难,尤其在面临众多系统未知因素和外部时变干扰的情况下。此外,Jin 等^[11]指出,提前设计的与时间相关的约束函数可能会显得过于保守,因为这些时间依赖的解决方案需要在线计算最优解,这通常会增加计算的复杂性。因此,基于路径的约束设计在浅水域的无人船路径跟踪控制中具有更高的可行性和效率。

在无人船的控制系统设计,跟踪参考路径是其关键功能之一。在现有研究中,固定时间或规定有限时间收敛设置下的控制算法近年来得到广泛关注^[5,13-16]。与常规有限时间控制方法相比,这些算法的收敛时间估计不依赖于初始条件,表现出了更好的性能^[17-18]。但是,这些控制算法主要适用于处理常数或时变约束,对于路径相关的约束函数的适应性较差。为拓展无人船的控制算法,研究人员在浅水域的路径跟踪控制方面进行了一系列探索。路径跟踪控制要求无人船在复杂和动态的浅水环境中能够更加及时准确地跟踪到参考路径,以应对各种不确定性因素,这对控制算法的实时性和稳定性提出了更高要求。将固定

时间或规定有限时间收敛设置下的控制算法应用于无人船的路径跟踪控制,可以显著提高其航行性能和任务完成效率。在此基础上,研究人员进一步拓展这些算法,以处理路径相关的约束函数,从而使控制框架更加灵活和适应性更强,以满足在浅水域中航行的实际需求。

针对以上问题,本文将提出一种基于障碍李雅普诺夫函数(barrier Lyapunov function, BLF)的固定时间自适应控制策略,并结合径向基神经网络(radial basis function neural networks, RBFNN)和自适应反步法,来应对路径依赖约束和浅水效应带来的挑战。通过引入依赖路径参数的约束函数,所提方法将在确保路径跟踪精度的同时,提高系统的鲁棒性与适应性。相较于现有研究方法,所提控制策略有望在不违反约束条件的情况下在固定时间内精确收敛,以提升无人船在复杂环境中的路径跟踪能力。

1 问题描述

1.1 船舶模型

关于无人船的浅水域路径跟踪控制研究,运动模型描述为:

$$\begin{cases} \dot{x} = u \cos(\psi) - v \sin(\psi) \\ \dot{y} = u \sin(\psi) + v \cos(\psi) \\ \dot{\psi} = r \end{cases} \quad (1)$$

式中: x, y 和 ψ 为无人船在地球坐标系中的位置和偏航角; u, v, r 分别表示前进速度、横摇速度和转舵角速度。

为简化无人船的控制设计,根据文献[19]无人船的动力学模型描述如下:

$$\begin{cases} m \Delta \dot{u} = X_u \Delta u + X_{\dot{u}} \Delta \dot{u} \\ m \dot{v} + m V_0 r + m x_c \dot{r} = Y_v v + Y_r r + Y_{\dot{v}} \dot{v} + Y_{\dot{r}} \dot{r} + Y_{\delta} \delta \\ I_{zz} \dot{r} + m x_c \dot{v} + m x_c V_0 r = N_v v + N_r r + N_{\dot{v}} \dot{v} + N_{\dot{r}} \dot{r} + N_{\delta} \delta \end{cases} \quad (2)$$

式中: m 为无人船的质量; Δu 为前进速度变化量; x_c 为船舶重心与中心之间的距离; I_{zz} 为船舶的惯性矩; $X_u, X_{\dot{u}}, Y_v, Y_r, Y_{\dot{v}}, Y_{\dot{r}}, Y_{\delta}, N_v, N_{\dot{v}}, N_r, N_{\dot{r}}, N_{\delta}$ 为无人船的流体动力参数导数、流体力矩参数导数,舵力和舵力矩参数导数。考虑到简化设计无人船的舵角输入,将式(2)中的模型简化为

$$\dot{r} = f_r(v) + \frac{N_{\delta}}{I_{zz}} \delta + d_{wr} \quad (3)$$

式中, d_{wr} 为转舵角速度方向上的干扰,非线性项 $f_r(v) = (N_v v + N_r r + N_{\dot{v}} \dot{v} + N_{\dot{r}} \dot{r} - m x_c \dot{v} - m x_c V_0 r) / I_{zz}$ 。

1.2 无人船路径输出约束目标

在浅水域无人船的路径跟踪控制中, 理想的参考路径可由坐标 $(x_d(\varpi(t)), y_d(\varpi(t)))$ 表示, 其中 $\varpi(t)$ 表示路径参数。接下来, 定义路径跟踪误差变量:

$$\begin{cases} x_e = x(t) - x_d(\varpi(t)) \\ y_e = y(t) - y_d(\varpi(t)) \\ \psi_e = \psi - \psi_r \\ z_e(t, \varpi(t)) = \sqrt{x_e^2 + y_e^2} \end{cases} \quad (4)$$

式中: ψ_e 为无人船跟踪参考路径点时的航向误差; $z_e(t, \varpi(t))$ 为无人船到参考路径点的距离误差; ψ_r 为船舶到理想路径点的方位角, 可表示为

$$\psi_r \triangleq 0.5[1 - \text{sign}(x_e)]\text{sign}(y_e)\pi + \arctan\left(\frac{y_e}{x_e}\right) \quad (5)$$

当 $z_e(t, \varpi(t))$ 收敛到 0 时, 有 $\psi_r = \psi_d$, 其中 $\psi_d = \arctan(y_e/x_e)$, 为所期望的偏航角。

在浅水域中, 对无人船的位置跟踪误差设计一个性能约束 $M_H(\varpi(t))$, 使路径跟踪控制过程船舶的跟踪误差能够收敛到预定的集合内。

$$z_e(t, \varpi(t)) < M_H(\varpi(t)) \quad (6)$$

在式(6)中, $M_H(\varpi(t)) > 0$ 表示无人船在浅水域路径跟踪控制中位置误差的上界, 其对参数化路径 $\varpi(t)$ 具有二阶可导性。无人船的性能约束要求其准确跟随指定的参考路径, 以避免在狭窄的浅水域中发生碰撞。在此情况下, 无人船必须精准地跟踪预定路径, 确保跟踪误差收敛到设定值, 同时不违反施加的约束。值得注意的是, 约束函数 $M_H(\varpi(t))$ 在式(6)中依赖于路径参数 $\varpi(t)$, 而不是时变或常值约束函数。后续为方便表述, $z_e(t, \varpi(t))$, $M_H(\varpi(t))$ 与 $\varpi(t)$ 分别被写成 z_e , M_H 与 ϖ 。

引入无人船航向角偏差的可行性约束条件, 其定义为

$$|\psi_e| < M_\psi \quad (7)$$

式中, M_ψ 是无人船在浅水域航行的可行性约束。通常, 设计为 $M_\psi = \pi/2$, 可行性约束被施加在无人船舶向角上, 避免突然出现远离既定航线的趋势, 从而确立导航的准确方向。

设计障碍李雅普诺夫函数为

$$\begin{cases} V_{ze} = \frac{1}{2}\eta_z^2 \\ V_\psi = \frac{1}{2}\eta_\psi^2 \end{cases} \quad (8)$$

其中,

$$\begin{cases} \eta_z = \frac{M_H z_e}{(M_H - z_e)(z_e - \lambda)} \\ \eta_\psi = \frac{M_\psi \psi_e}{M_\psi^2 - \psi_e^2} \end{cases} \quad (9)$$

式中, M_H 为性能约束的上界。而值得指出的, 当 $z_e = 0$ 时, 式(5)中的 ψ_r 是不可微的。因此, 引入一个 λ , 使 z_e 在控制过程中接近 0 而不等于 0, 避免奇异的发生。 M_ψ 是航向可行性约束的边界。针对 η_z , 有且仅有 $z_e = 0$ 时 $\eta_z = 0$; 而当 $z_e \rightarrow M_H$ 时, $\eta_z \rightarrow +\infty$; 而当 $z_e \rightarrow \lambda$ 时, $\eta_z \rightarrow -\infty$ 。针对 η_ψ , 有且仅有 $\psi_e = 0$ 时 $\eta_\psi = 0$; 而当 $\psi_e \rightarrow +M_\psi$ 时, $\eta_\psi \rightarrow +\infty$; 而当 $\psi_e \rightarrow -M_\psi$ 时, $\eta_\psi \rightarrow -\infty$ 。

1.3 固定时间控制

定义动态系统 $\dot{x}(t) = f(t, x)$, $x(0) = x_0$, 其中 $x \in \mathbf{R}^n$ 是系统的状态, x_0 是系统的原点(平衡点)^[17], 如果存在一个正定且径向无界函数 $V(x)$:

$$\begin{cases} \alpha_1(\|x\|) \leq V(x) \leq \alpha_2(\|x\|) \\ \dot{V}(x) \leq -\gamma_1 V^p(x) - \gamma_2 V^q(x) + \Psi, t \geq 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中: α_1 和 α_2 为 κ_∞ -函数; $\gamma_1 > 0$, $\gamma_2 > 0$, $0 < p < 1$, $q > 1$ 和 $\Psi > 0$, 为参数, 并且满足 $\Psi < \min\{(1-\varsigma)\gamma_1, (1-\varsigma)\gamma_2\}$ ($\varsigma \in (0, 1)$), 那么系统在实践中是固定时间稳定的, 并且收敛时间 T 是有界的。

$$\left\{ \lim_{t \rightarrow T} x(t) \middle| V(x(t)) \leq \min \left\{ \gamma_1^{-\frac{1}{p}} \left(\frac{\Psi}{1-\varsigma} \right)^{\frac{1}{p}}, \gamma_2^{-\frac{1}{q}} \left(\frac{\Psi}{1-\varsigma} \right)^{\frac{1}{q}} \right\} \right\} \quad (11)$$

$$T \leq T_{\max} = \frac{1}{\varsigma \gamma_1 (1-p)} + \frac{1}{\varsigma \gamma_2 (q-1)} \quad (12)$$

1.4 常用不等式引理

引理 1^[20]: 对于实变量 z 和 ζ , 以及任意正的常数 μ , θ 和 ι , 以下不等式成立

$$|z|^\mu |\zeta|^\theta \leq \frac{\mu}{\mu + \theta} \iota |z|^{\mu + \theta} + \frac{\theta}{\mu + \theta} \iota^{-\frac{\mu}{\theta}} |\zeta|^{\mu + \theta} \quad (13)$$

引理 2^[21]: 对于任意的 $\sigma > 0$ 和 $\omega \in \mathbf{R}$ 以下不等式成立

$$0 \leq |\omega| - \omega \tanh\left(\frac{\omega}{\sigma}\right) \leq 0.2785\sigma \quad (14)$$

引理 3^[14]: 对于 $\forall \omega \geq \chi \geq 0$, 和 $q > 1$, 以下不等式满足

$$\chi(\omega - \chi)^q \leq \frac{q}{q+1}(\omega^{q+1} - \chi^{q+1}) \quad (15)$$

1.5 神经网络逼近理论

由于神经网络具有最大逼近特性, 故经常被

用来处理控制系统中模型不确定性影响系统性能的问题^[22-23]。任何连续的未知函数 $F(\mathbf{X})$ 均可近似为

$$F(\mathbf{X}) = \mathbf{W}^{*T} \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{X}) + \varepsilon \quad (16)$$

式中: $\mathbf{W}^{*T} \in \mathbf{R}^{p \times l}$, 为理想权重向量, 其中 p, l 分别为输出层和隐藏层神经元的数量; $\mathbf{X} \in \mathbf{R}^{m \times l}$, 为神经网络的输入, 其中 m 为输入的个数; ε 为神经网络的逼近误差, 满足 $\|\varepsilon\| \leq \bar{\varepsilon}$, 其中 $\bar{\varepsilon}$ 为一个常数; $\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{X}) = [\varphi_1(\mathbf{X}), \varphi_2(\mathbf{X}), \dots, \varphi_l(\mathbf{X})]$, 为激励函数, 其表达式为

$$\varphi_i(\mathbf{X}) = \exp\left(-\frac{(\mathbf{X} - \boldsymbol{\mu}_i)^T (\mathbf{X} - \boldsymbol{\mu}_i)}{\sigma_i^2}\right), \quad i = 1, 2, \dots, l \quad (17)$$

式中: $\boldsymbol{\mu}_i$ 为第 i 个基函数的中心点, 且 $\boldsymbol{\mu}_i = [\mu_{im}, \mu_{im}, \dots, \mu_{im}]^T$; σ_i 为一个可以自由选择参数, 决定上述基函数围绕中心点的宽度。

2 控制器设计与稳定性分析

控制器设计中利用自适应反步法对无人船进行控制器设计。首先, 对式(9)中的 $\eta_z(t, \varpi(t))$ 进行求导, 得到

$$\begin{cases} \dot{\eta}_z = \frac{\partial \eta_z}{\partial z_e} (u \cos(\psi - \psi_r) - v \sin(\psi - \psi_r)) - \\ \frac{\partial \eta_z}{\partial z_e} \dot{\varpi} \left(\cos \psi_r \frac{dx_d}{d\varpi} + \sin \psi_r \frac{dy_d}{d\varpi} \right) + \dot{\varpi} \frac{\partial \eta_z}{\partial M_H} \frac{dM_H}{d\varpi} \\ \dot{\eta}_\psi = \frac{d\eta_\psi}{d\psi_e} r - \frac{d\eta_\psi}{d\psi_e} \frac{u}{z_e} \sin(\psi - \psi_r) - \frac{d\eta_\psi}{d\psi_e} \frac{v}{z_e} \cos(\psi - \psi_r) + \\ \frac{d\eta_\psi}{d\psi_e} \dot{\varpi} \left(\frac{1}{z_e} \cos \psi_r \frac{dx_d}{d\varpi} - \frac{1}{z_e} \sin \psi_r \frac{dy_d}{d\varpi} \right) \end{cases} \quad (18)$$

式中, $\dot{\varpi}$ 是路径参数的一阶导数。

定义前进速度误差变量 $u_e = \alpha_u - u$, 其中 α_u 为 u 的虚拟控制律。定义转艏角速度误差变量为 $r_e = \alpha_r - r$, 其中 α_r 为 r 的设计虚拟控制律。得到

$$\begin{aligned} \alpha_u = & -K_z \left(\frac{1}{2} \right)^2 \frac{\eta_z^3}{\partial \eta_z} - K_z \left(\frac{1}{2} \right)^4 \frac{1}{\partial \eta_z} \frac{1}{\eta_z} S_u - \\ & \frac{1}{\partial \eta_z} u_d \frac{\partial \eta_z}{\partial M_H} \frac{dM_H}{d\varpi} + 2u \sin^2 \left(\frac{\psi - \psi_r}{2} \right) + \\ & v \sin(\psi - \psi_r) + u_d \left(\cos \psi_r \frac{dx_d}{d\varpi} + \sin \psi_r \frac{dy_d}{d\varpi} \right) \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \alpha_r = & -K_\psi \left(\frac{1}{2} \right)^2 \frac{\eta_\psi^3}{d\eta_\psi} - K_\psi \left(\frac{1}{2} \right)^4 \frac{1}{d\eta_\psi} \frac{1}{\eta_\psi} S_\psi + \\ & \frac{u}{z_e} \sin(\psi - \psi_r) + \frac{v}{z_e} \cos(\psi - \psi_r) - \\ & u_d \left(\frac{1}{z_e} \cos \psi_r \frac{dx_d}{d\varpi} - \frac{1}{z_e} \sin \psi_r \frac{dy_d}{d\varpi} \right) \end{aligned} \quad (20)$$

式中: $K_z > 0$, $K_\psi > 0$, 为控制增益; $z_\varpi = \dot{\varpi} - u_d$ 。

$$S_\ell = \begin{cases} (\eta_\ell^2)^{\frac{3}{4}}, & \text{如果 } |\eta_\ell| \geq \varepsilon_{\ell 0} \\ \sum_{j=1}^2 a_j (\eta_\ell^2)^j (\varepsilon_{\ell 0}^2)^{-j+\frac{3}{4}}, & \text{其他} \end{cases} \quad (21)$$

式中, ℓ 取值为 u, ψ 。

设计李雅普诺夫函数 $V_1 = V_{z_e} + V_\psi$, 依据上述公式, 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 \leq & -K_z \left(\frac{1}{2} \eta_z^2 \right)^2 - K_z \left(\frac{1}{2} \eta_z^2 \right)^{\frac{3}{4}} - K_\psi \left(\frac{1}{2} \eta_\psi^2 \right)^2 - \\ & K_\psi \left(\frac{1}{2} \eta_\psi^2 \right)^{\frac{3}{4}} + z_\varpi \left[-\eta_z \frac{\partial \eta_z}{\partial z_e} \left(\cos \psi_r \frac{dx_d}{d\varpi} + \right. \right. \\ & \left. \left. \sin \psi_r \frac{dy_d}{d\varpi} \right) + \eta_{ze} \frac{\partial \eta_z}{\partial M_H} \frac{dM_H}{d\varpi} \right] - \eta_{ze} \frac{\partial \eta_z}{\partial z_e} u_e - \\ & \eta_\psi \frac{d\eta_\psi}{d\psi_w} r_e + \eta_\psi \frac{d\eta_\psi}{d\psi_e} z_\varpi \left(\frac{1}{z_e} \cos \psi_r \frac{dx_d}{d\varpi} - \right. \\ & \left. \frac{1}{z_e} \sin \psi_r \frac{dy_d}{d\varpi} \right) + \varepsilon_z + \varepsilon_\psi \end{aligned} \quad (22)$$

接下来, 让 α_u, α_r 通过时间常数为 τ_u, τ_r 一阶低通滤波器, 利用动态面控制技术避免对虚拟控制律求导时引起“维度爆炸”问题。滤波器设计为

$$\tau_r \dot{\beta}_r + \beta_r = \alpha_r, \quad \beta_r(0) = \alpha_r(0) \quad (23)$$

重新定义误差变量 $r_e = \beta_r - r$ 。并求导得到

$$\dot{r}_e = \dot{\beta}_r - f_r(v) - \frac{F_r}{m_r} \delta - d_{wr} \quad (24)$$

设计 RBF 神经网络逼近如下:

$$F_r(X_r) = -f_r(v) + \frac{1}{2} r_e \quad (25)$$

利用 $\mathbf{W}^{*T} \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{X})$ 去逼近 $F_r(X_r)$, 得到

$$F_r(X_r) = \mathbf{W}_r^{*T} \boldsymbol{\varphi}_r(X_r) + \varepsilon_r \quad (26)$$

根据杨氏不等式, 有

$$\begin{aligned} r_e F_r(X_r) &= r_e [\mathbf{W}_r^{*T} \boldsymbol{\varphi}_r(X_r) + \varepsilon_r] \leq \\ |r_e| [\|\mathbf{W}_r^*\| \|\boldsymbol{\varphi}_r(X_r)\| + \varepsilon_r] &\leq \frac{1}{2a_r^2} r_e^2 \theta_r \boldsymbol{\varphi}_r^T(X_r) \boldsymbol{\varphi}_r(X_r) + \\ \frac{a_r^2}{2} + \frac{r_e^2}{2} + \varepsilon_r^* \end{aligned} \quad (27)$$

式中: $\theta_r = \|\mathbf{W}_r^*\|^2$; $\varepsilon_r^* = \frac{\varepsilon_r^2}{2}$; $a_r > 0$, 为常数。

在本文设计中, 无人船实际的控制输入是舵角 δ 。为使控制器设计更加简单和方便, 引入理想的中间变量 α_{tr} , 使得 $\alpha_{tr} = \frac{N_\delta}{I_{zz}} \delta$ 。而对于船舶模型中的环境干扰 d_{wr} 与 RBFNN 残差 ε_r^* , 引入一个新的变量 ξ 进行处理, 得到 $\xi_r = -d_{wr} + \varepsilon_r^*$, 其中 $\tilde{\xi} = \hat{\xi} - \xi$ 。

接着, 定义李雅普诺夫函数 V_2 如下:

$$V_3 = \frac{1}{2}r_e^2 + \frac{1}{2\mu_{\theta r}}\tilde{\theta}_r^T\tilde{\theta}_r + \frac{1}{2\mu_{\xi r}}\tilde{\xi}_r^2 \tag{28}$$

对上式求导, 设计理想的中间控制变量 α_{rr} , 得到

$$\begin{aligned} \alpha_{rr} = & K_r\left(\frac{1}{2}\right)^2 r_e^2 + K_r\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{3}{4}} \frac{1}{r_e} S_r + \tanh\left(\frac{r_e}{\chi_r}\right)\hat{\xi}_r + \dot{\beta} + \\ & \frac{1}{2a_r^2}r_e^2\hat{\theta}_r\varphi_r^T(X_r)\varphi(X_r) \end{aligned} \tag{29}$$

其中, 参数估计自适应律设计为

$$\begin{cases} \dot{\hat{\theta}}_r = \frac{\mu_{\theta r}}{2a_r^2}r_e^2\varphi_r^T(X_r)\varphi(X_r) - \sigma_{\theta r1}\hat{\theta}_r - \sigma_{\theta r2}\hat{\theta}_r^3 \\ \dot{\hat{\xi}}_r = \mu_{\xi r}r_e \tanh\left(\frac{r_e}{\chi_r}\right) - \sigma_{\xi r1}\hat{\xi}_r - \sigma_{\xi r2}\hat{\xi}_r^3 \end{cases} \tag{30}$$

S_r 处理如下:

$$S_r = \begin{cases} (r_e^2)^{\frac{3}{4}}, & \text{如果 } |r_e| \geq \varepsilon_{r0} \\ \sum_{j=1}^2 a_j(r_e^2)^j (\varepsilon_{r0}^2)^{-j+\frac{3}{4}}, & \text{其他} \end{cases} \tag{31}$$

其中, ε_{r0} 是任意小的正整数。

依据杨氏不等式, 式 (30) 中的参数可表示为

$$\begin{cases} -\sigma_{\theta}\tilde{\theta}_r^T\hat{\theta}_r \leq -\frac{\sigma_{\theta}\|\tilde{\theta}_r\|^2}{2} + \frac{\sigma_{\theta}\|\theta_r^*\|^2}{2} \\ -\sigma_{\xi}\tilde{\xi}_r\hat{\xi}_r \leq -\frac{\sigma_{\xi}\tilde{\xi}_r^2}{2} + \frac{\sigma_{\xi}\xi_r^2}{2} \end{cases} \tag{32}$$

根据引理 1, 定义 $z = \|\theta_i^*\|^2/2\eta_i, \zeta = 1, \mu = p = 3/4, \theta = 1-p, \iota = 1/p$, 得到

$$\begin{cases} \left(\frac{\|\tilde{\theta}_r\|^2}{2\mu_{\theta r}}\right)^p \leq \frac{\|\tilde{\theta}_r\|^2}{2\mu_{\theta r}} + (1-p)p^{\frac{p}{1-p}} \\ \left(\frac{\xi_r^2}{2\mu_{\xi r}}\right)^p \leq \frac{\xi_r^2}{2\mu_{\xi r}} + (1-p)p^{\frac{p}{1-p}} \end{cases} \tag{33}$$

根据引理 3, 得到不等式

$$\begin{cases} -\tilde{\theta}_r\hat{\theta}_r^3 \leq \frac{3}{4}(\theta_r^4 - \tilde{\theta}_r^4) \\ -\tilde{\xi}_r\hat{\xi}_r^3 \leq \frac{3}{4}(\xi_r^4 - \tilde{\xi}_r^4) \end{cases} \tag{34}$$

接着, 设计李雅普诺夫函数 $V = V_1 + V_2$, 并对 V 求导, 得到

$$\begin{aligned} \dot{V} = \dot{V}_1 + \dot{V}_2 \leq & -K_{ze}\left(\frac{1}{2}\eta_z^2\right)^2 - K_{ze}\left(\frac{1}{2}\eta_z^2\right)^{\frac{3}{4}} - K_{\psi}\left(\frac{1}{2}\eta_{\psi}^2\right)^2 - \\ & K_{\psi}\left(\frac{1}{2}\eta_{\psi}^2\right)^{\frac{3}{4}} - K_r\left(\frac{1}{2}r_e^2\right)^2 - K_r\left(\frac{1}{2}r_e^2\right)^{\frac{3}{4}} - \\ & 3\sigma_{\theta r2}\mu_{\theta r}\left(\frac{\|\theta_r^*\|^2}{2\mu_{\theta r}}\right)^2 - \sigma_{\theta r1}\left(\frac{\|\theta_r^*\|^2}{2\mu_{\theta r}}\right)^{\frac{3}{4}} - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & 3\sigma_{\xi r2}\mu_{\xi r}\left(\frac{\xi_r^2}{2\mu_{\xi r}}\right)^2 - \sigma_{\xi r1}\left(\frac{\xi_r^2}{2\mu_{\xi r}}\right)^{\frac{3}{4}} + \frac{1}{4}\sigma_{\theta r1} + \frac{3\sigma_{\theta r2}}{4\mu_{\theta r}}\theta_r^4 + \\ & \frac{\sigma_{\theta r}\|\tilde{\theta}_r\|^2}{2\mu_{\theta r}} + \frac{1}{4}\sigma_{\xi r1} + \frac{3\sigma_{\xi r2}}{4\mu_{\xi r}}\xi_r^4 + \\ & \frac{\sigma_{\xi r}\xi_r^2}{2\mu_{\xi r}} + \frac{a_r^2}{2} + 0.2785\chi_r\xi_r + \eta_z\frac{\partial\eta_z}{\partial M_H}\frac{dM_H}{d\varpi} + \\ & z_{\varpi}\left[-\eta_z\frac{\partial\eta_z}{\partial z_e}\left(\cos\psi_r\frac{dx_d}{d\varpi} + \sin\psi_r\frac{dy_d}{d\varpi}\right) + \right. \\ & \left. \eta_{\psi}\frac{d\eta_{\psi}}{dz_e}\left(\frac{1}{z_e}\cos\psi_r\frac{dx_d}{d\varpi} - \frac{1}{z_e}\sin\psi_r\frac{dy_d}{d\varpi}\right)\right] + \bar{\varepsilon}^* \end{aligned} \tag{35}$$

式中, $\bar{\varepsilon}^* = \varepsilon_z + \varepsilon_{\psi} + \varepsilon_{re}$ 。对式 (35) 中 z_{ϖ} 处理为 $\dot{z}_{\varpi} = \ddot{\varpi} - \frac{du_d}{d\varpi}\dot{\varpi}$, 设计路径参数控制律为:

$$\begin{aligned} \ddot{\varpi} = & -K_{\varpi}\left(\frac{1}{2}\right)^2 z_{\varpi}^3 - K_{\varpi}\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{3}{4}} \frac{1}{z_{\varpi}} S_{\varpi} + \frac{du_d}{d\varpi}\dot{\varpi} + \\ & \eta_{ze}\frac{\partial\eta_z}{\partial z_e}\left(\cos\psi_r\frac{dx_d}{d\varpi} + \sin\psi_r\frac{dy_d}{d\varpi}\right) - \eta_{ze}\frac{\partial\eta_z}{\partial M_H}\frac{dM_H}{d\varpi} - \\ & \eta_{\psi}\frac{d\eta_{\psi}}{dz_e}\left(\frac{1}{z_e}\cos\psi_r\frac{dx_d}{d\varpi} - \frac{1}{z_e}\sin\psi_r\frac{dy_d}{d\varpi}\right) \end{aligned} \tag{36}$$

$$S_{\varpi} = \begin{cases} (z_{\varpi}^2)^{\frac{3}{4}}, & \text{如果 } |z_{\varpi}| \geq \varepsilon_{\varpi0} \\ \sum_{j=1}^2 a_j(z_{\varpi}^2)^j (\varepsilon_{\varpi0}^2)^{-j+\frac{3}{4}}, & \text{其他} \end{cases} \tag{37}$$

式中, $\varepsilon_{\varpi0}$ 为任意小的正整数。

稳定性证明是控制器设计的必要步骤。依据上述公式推导, 得到

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -K_{ze}\left(\frac{1}{2}\eta_z^2\right)^2 - K_{ze}\left(\frac{1}{2}\eta_z^2\right)^{\frac{3}{4}} - K_{\psi}\left(\frac{1}{2}\eta_{\psi}^2\right)^2 - \\ & K_{\psi}\left(\frac{1}{2}\eta_{\psi}^2\right)^{\frac{3}{4}} - K_r\left(\frac{1}{2}r_e^2\right)^2 - K_r\left(\frac{1}{2}r_e^2\right)^{\frac{3}{4}} - \\ & K_{\varpi}\left(\frac{1}{2}z_{\varpi}^2\right)^2 - K_{\varpi}\left(\frac{1}{2}z_{\varpi}^2\right)^{\frac{3}{4}} - 3\sigma_{\theta r2}\mu_{\theta r}\left(\frac{\|\tilde{\theta}_r^*\|^2}{2\mu_{\theta r}}\right)^2 - \\ & \sigma_{\theta r1}\left(\frac{\|\tilde{\theta}_r^*\|^2}{2\mu_{\theta r}}\right)^{\frac{3}{4}} - 3\sigma_{\xi r2}\mu_{\xi r}\left(\frac{\tilde{\xi}_r^2}{2\mu_{\xi r}}\right)^2 - \sigma_{\xi r1}\left(\frac{\tilde{\xi}_r^2}{2\mu_{\xi r}}\right)^{\frac{3}{4}} + \\ & \frac{3\sigma_{\theta r2}}{4\mu_{\theta r}}\theta_r^4 + \frac{\sigma_{\theta r}\|\tilde{\theta}_r\|^2}{2\mu_{\theta r}} + \frac{1}{4}\sigma_{\theta r1} + \frac{1}{4}\sigma_{\xi r1} + \\ & \frac{3\sigma_{\xi r2}}{4\mu_{\xi r}}\xi_r^4 + \frac{\sigma_{\xi r}\xi_r^2}{2\mu_{\xi r}} + \frac{a_r^2}{2} + 0.2785\chi_r\xi_r + \bar{\varepsilon} \end{aligned} \tag{38}$$

式中, $\bar{\varepsilon} = \bar{\varepsilon}^* + \varepsilon_{\varpi}$ 。

由此得到

$$\dot{V}(x) \leq -\gamma_1 V^p(x) - \gamma_2 V^q(x) + \Psi \tag{39}$$

其中:

$$\gamma_1 = \min\{K_{ze}, K_{\psi}, K_r, K_{\varpi}, \sigma_{\theta u1}, \sigma_{\theta r1}, \sigma_{\xi r1}\}$$

$$\gamma_2 = \min\{K_{ze}, K_\psi, K_r, K_{\varpi},$$
$$3\sigma_{\theta u2}\mu_{\theta u}, 3\sigma_{\theta r2}\mu_{\theta r}, 3\sigma_{\xi u2}\mu_{\xi u}, 3\sigma_{\xi r2}\mu_{\xi r}\}$$

并且

$$\psi = \frac{1}{4}\sigma_{\theta r1} + \frac{3\sigma_{\theta r2}}{4\mu_{\theta r}}\theta_r^4 + \frac{\sigma_{\theta r}\|\tilde{\theta}_r\|^2}{2\mu_{\theta r}} + \frac{1}{4}\sigma_{\xi r1} +$$
$$\frac{3\sigma_{\xi r2}}{4\mu_{\xi r}}\xi_r^4 + \frac{\sigma_{\xi r}\xi_r^2}{2\mu_{\xi r}} + \frac{a_r^2}{2} + 0.2785\chi_r\xi_r + \bar{\varepsilon} \quad (40)$$

由定理 4, 可以推断闭环系统中的信号 $\eta_z, \eta_\psi, u_e, r_e, \theta_r, \xi_r$ 是实际固定时间稳定信号。此外, 所有上述信号均会收敛至原点周围的一个小残差集 $\Omega = \{V|V \leq \min\{\gamma_1^{-1/p}(\Psi/(1-\zeta))^{1/p}, |\gamma_2^{-1/q}(\Psi/(1-\zeta))^{1/q}\}\}$, 收敛时间可通过 $T \leq T_{\max} = 1/\varsigma\gamma_1(1-p) + 1/\varsigma\gamma_2(q-1)$ 来估算。

3 仿真验证

仿真实验选取“大智”号智能无人船进行验证, 水深考虑为 15 m, 此时无人船航行中有明显的浅水效应。“大智”号无人船的尺寸数据如表 1 所示, 表 2 给出了浅水环境下其无量纲水动力参数。

表 1 “大智”号无人船舶参数^[24]

Table 1 Principle parameters of Dazhi unmanned surface vehicle^[24]

参数	数值
垂线间长 L/m	164.0
平均吃水 d/m	9.5
设计船速 V_0/kn	14.0
船宽 B/m	32.0
型深 D/m	15.0
排水体积 V/m^3	37 853.6
方形系数 C_b	0.759

表 2 在浅水效应下“大智”号无人船无量纲水动力参数

Table 2 Dimensionless hydrodynamic parameters of Dazhi unmanned surface vehicle in shallow water

参数	数值	参数	数值
N_δ	-0.000 836	Y_δ	0.001 673
N_r	-0.006 736	N_v	0.000 806
Y_v	-0.012 806	$N_{\dot{v}}$	-0.006 734
Y_r	-0.021 32	$Y_{\dot{v}}$	-0.021 321

参考曲线为 $y_d = 6\varpi + \sin(\pi\varpi/500)$, $x_d = 300\sin(\pi\varpi/500)$, 性能约束的下界 $\lambda = 0.02$, 上界为 $M(\varpi(t)) = 20\exp(-0.5\varpi) + 7.5$ 。定义 $u_d = 15(1 - 0.8\exp(-2\varpi))\exp(-0.5z_e)$ 。此外, 为确保 RBFNN 对未知模型的结构和参数的有效逼近, 在船舶前进

方向输入值 $\dot{u}_i$ 对应的中心值分布区间为 $[-10\text{ m/s}, 10\text{ m/s}]$, 艏摇角速度方向输入值 $\dot{r}_i$ 对应的中心值分布为 $[-1.5\text{ rad/s}, 1.5\text{ rad/s}]$ 。神经网络神经元个数为 25, 中心值扩张宽度常数为 2。初始状态值和一些其他参数设置为: $[x(0), y(0), \psi(0), u(0), v(0), r(0)] = [6, 8, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1]$, $[\hat{\theta}_r(0), \hat{\xi}_r(0)] = [0.1, 0.1]$ 。 $K_{ze} = 0.0012$, $K_\psi = 0.0014$, $k_r = 2$, $k_{\varpi} = 16$, $\tau_r = 0.1$, $\chi_r = 0.01$, $\mu_{\theta r} = 0.1$, $\mu_{\xi r} = 0.1$, $\sigma_{\theta r1} = 0.1$, $\sigma_{\theta r2} = 0.1$, $\sigma_{\xi r1} = 0.1$, $\sigma_{\xi r2} = 0.1$ 。

考虑进出港航道中出现浅水域的情况, 对“大智”号无人船的路径跟踪仿真结果如图 1~图 7 所示。图 1 为船舶路径跟踪情况。由图可看出, 本文设计的控制方案能有效控制“大智”号无人船。

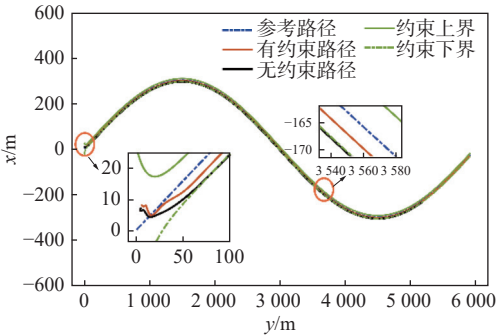


图 1 “大智”号无人船路径跟踪曲线

Fig. 1 The path following curves of Dazhi unmanned surface vehicle

图 2 所示为控制输入的变化, 其中位置初值依旧较小, 旨在贴合实际航行情况与环境。同时, 考虑到该船舶总长接近 180 m, 较小的定位误差有助于降低潜在风险。本文计算中的船舶转艏力矩为 $-2.387 \times 10^{11} \sim 7.921 \times 10^{11}\text{ N}\cdot\text{m}$, 在可执行范围之间。

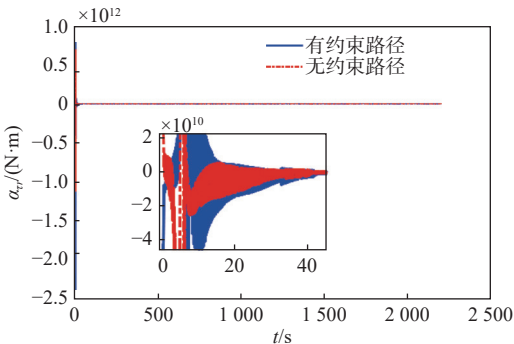


图 2 “大智”号无人船输入变化曲线

Fig. 2 Input change curves of Dazhi unmanned surface vehicle

图 3 为“大智”号无人船前进速度的虚拟控制律, 旨在稳定运动学位置误差。图 4 所示为位置与航向误差, 表明两者的收敛效果良好。图 5 呈现的是转艏角速度误差, 结果显示控制器在镇定船舶方面表现出色。

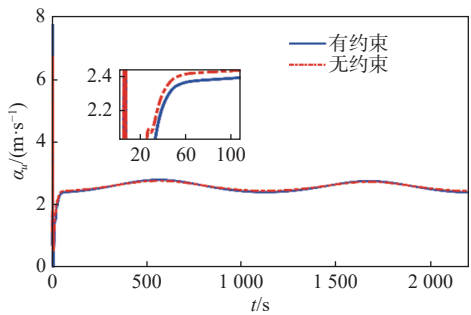


图 3 “大智”号无人船前进速度虚拟控制律曲线

Fig. 3 Surge velocity virtual control law of Dazhi unmanned surface vehicle

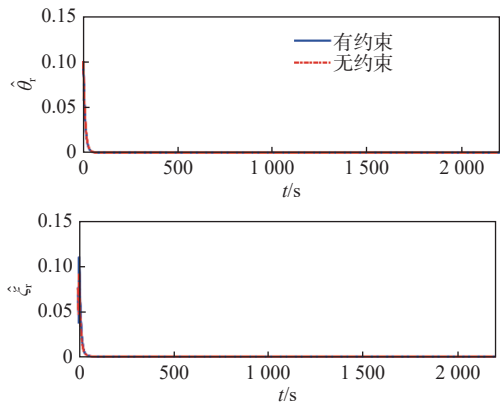


图 7 自适应参数 $\hat{\theta}_r$ 和 $\hat{\xi}_r$

Fig. 7 Adaptive parameters $\hat{\theta}_r$ and $\hat{\xi}_r$

4 结 语

本文提出的控制策略在处理浅水域无人船路径依赖约束问题方面展现出一定的新颖性。首先, 基于 BLF 提出的控制策略可有效解决路径依赖约束问题, 为无人船路径跟踪控制提供一种新的思路; 其次, 结合自适应反步法与 BLF 的设计, 可使控制系统能够在固定时间内达到稳定收敛状态, 相较于传统控制方法, 在一定程度上规避了计算复杂和收敛速度慢的问题; 最后, 依赖路径参数的约束函数设计在确保路径跟踪精度的同时, 也可提升控制器对复杂环境的适应能力。这些策略为无人船路径跟踪控制领域提供了新的理论支撑和实践方法, 尤其在执行复杂水域环境中的路径跟踪任务时, 展示了出显著的优势。

未来研究可进一步探索如何优化控制策略以应对更加复杂的水域环境, 特别是如何处理动态变化的环境因素和任意形状路径的跟踪需求。此外, 结合其他先进技术, 例如强化学习或深度学习方法, 有望进一步提高路径跟踪精度, 并为实际应用提供更为可靠的解决方案。

参考文献:

[1] GUO Q, ZHANG X K, HAN X. Robust adaptive event-triggered path following control for autonomous surface vehicles in shallow waters[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 286: 115571.

[2] TU F W, GE S S, CHOO Y S, et al. Adaptive dynamic positioning control for accommodation vessels with multiple constraints[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2017, 11(3): 329–340.

[3] HE W, YIN Z, SUN C Y. Adaptive neural network control of a marine vessel with constraints using the asymmetric barrier Lyapunov function[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2017, 47(7): 1641–1651.

[4] ZHENG Z W, HUANG Y T, XIE L H, et al. Adaptive

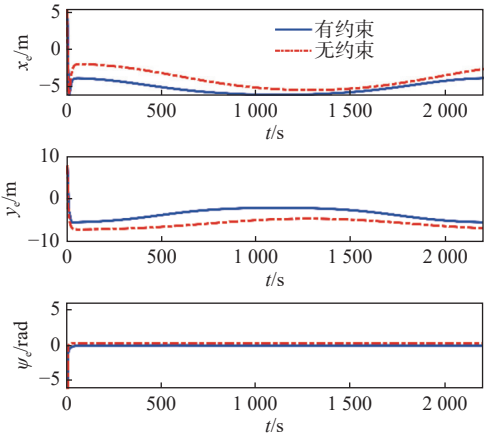


图 4 位置与航向误差

Fig. 4 Position and heading errors

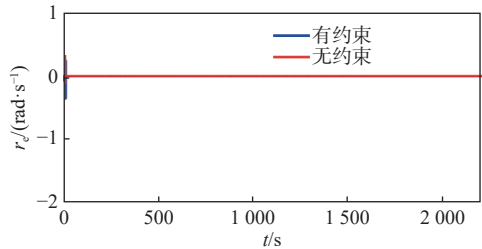


图 5 转舵角速度误差

Fig. 5 Yaw rate errors

图 6 为路径跟踪过程中对期望点的跟踪误差, 结果表明在满足约束要求的情况下, 误差收敛至预定区域, 始终不超过式(6)的约束要求。

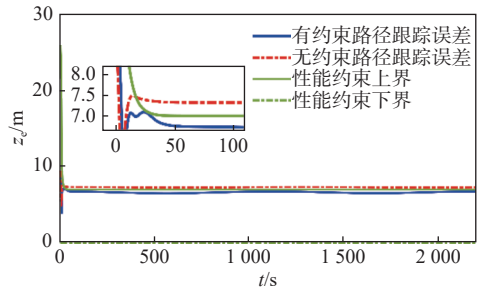


图 6 对期望点的跟踪误差

Fig. 6 Following error curves for desired points

最后, 图 7 为自适应参数的收敛情况, 结果表明控制效果显著。上述结果均验证了本文所设计的控制策略在实际应用中的有效性和可靠性。

- trajectory tracking control of a fully actuated surface vessel with asymmetrically constrained input and output[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2018, 26(5): 1851–1859.
- [5] FU M Y, WANG T Q, WANG C L. Fixed-time trajectory tracking control of a full state constrained marine surface vehicle with model uncertainties and external disturbances[J]. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2019, 17(6): 1331–1345.
- [6] WANG T Q, LIU Y T, ZHANG X F. Extended state observer-based fixed-time trajectory tracking control of autonomous surface vessels with uncertainties and output constraints[J]. *ISA Transactions*, 2022, 128: 174–183.
- [7] NADEROLASLI A, SHOJAEI K, CHATRAEI A. Terminal sliding-mode disturbance observer-based finite-time adaptive-neural formation control of autonomous surface vessels under output constraints[J]. *Robotica*, 2023, 41(1): 236–258.
- [8] JIN X. Fault tolerant finite-time leader–follower formation control for autonomous surface vessels with LOS range and angle constraints[J]. *Automatica*, 2016, 68: 228–236.
- [9] GUO Q, ZHANG X K, MENG Y, et al. Fixed-time adaptive path-following control of autonomous surface vehicles with asymmetric output performance and feasibility constraints[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 288: 115999.
- [10] GUO Q, ZHANG X K, MA D C. Adaptive fixed-time path following cooperative control for autonomous surface vehicles based on path-dependent constraints[J]. *Applied Ocean Research*, 2024, 142: 103826.
- [11] JIN X, DAI S L, LIANG J J. Fixed-time Path-following control of an autonomous vehicle with path-dependent performance and feasibility constraints[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2023, 8(1): 458–468.
- [12] LU K, DAI S L, JIN X. Adaptive angle-constrained enclosing control for multirobot systems using bearing measurements[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2024, 69(2): 1324–1331.
- [13] HUANG C F, XU H T, BATISTA P, et al. Fixed-time leader-follower formation control of underactuated unmanned surface vehicles with unknown dynamics and ocean disturbances[J]. *European Journal of Control*, 2023, 70: 100784.
- [14] WANG F, LAI G Y. Fixed-time control design for nonlinear uncertain systems via adaptive method[J]. *Systems & Control Letters*, 2020, 140: 104704.
- [15] WANG N, QIAN C J, SUN J C, et al. Adaptive robust finite-time trajectory tracking control of fully actuated marine surface vehicles[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2016, 24(4): 1454–1462.
- [16] WU Y F, NIU W K, KONG L H, et al. Neural network fixed-time control of a robotic system under output constraint[C]//2022 International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM). Guilin, China: IEEE, 2022: 838–842.
- [17] ZUO Z Y, TIAN B L, DEFOORT M, et al. Fixed-time consensus tracking for multiagent systems with high-order integrator dynamics[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2018, 63(2): 563–570.
- [18] WANG Y J, SONG Y D. Leader-following control of high-order multi-agent systems under directed graphs: pre-specified finite time approach[J]. *Automatica*, 2018, 87: 113–120.
- [19] 张显库. 船舶运动简捷鲁棒控制 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- ZHANG X K. Simple and robust control of ship motion [M]. Beijing: Science Press, 2012 (in Chinese).
- [20] QIAN C J, LIN W. Non-Lipschitz continuous stabilizers for nonlinear systems with uncontrollable unstable linearization[J]. *Systems & Control Letters*, 2001, 42(3): 185–200.
- [21] POLYCARPOU M M, IOANNOU P A. A robust adaptive nonlinear control design[C]//Proceedings of the 1993 American Control Conference. San Francisco, CA, USA: IEEE, 1993.
- [22] GE S S, HANG C C, WOON L C. Adaptive neural network control of robot manipulators in task space[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1997, 44(6): 746–752.
- [23] HE W, HUANG H F, GE S S. Adaptive neural network control of a robotic manipulator with time-varying output constraints[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2017, 47(10): 3136–3147.
- [24] 张显库, 韩旭. 船舶运输安全保障下的智能船舶运动控制策略 [J]. *中国舰船研究*, 2019, 14(增刊 1): 1–6.
- ZHANG X K, HAN X. The motion control strategy for intelligent ships based on ship transportation safeguard [J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2019, 14(Supp 1): 1–6 (in Chinese).

BLF-based adaptive path following control for unmanned surface vehicles under shallow water effects

GUO Qiang¹, WANG Jiaqi¹, ZHANG Xianku^{*2}, MA Daocheng²

1 School of Electrical and Control Engineering, Xi'an University of Science and Technology,
Xi'an 710054, China

2 Navigation College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China

Abstract: [**Objective**] This study investigates how to effectively address path-dependent constraints during the path-following of unmanned surface vessels in complex waterways while ensuring navigation safety and stability. [**Method**] First, performance and feasibility constraints are established for the vessel's navigation based on the precision and safety requirements of autonomous ships in shallow waters. Next, to address the issues of the path parameter representation and convergence requirements of the controller, a barrier Lyapunov function (BLF) combined with a fixed-time convergence strategy is applied. A path-dependent controller capable of converging within a fixed time is then designed, and radial basis function neural networks (RBFNN) and adaptive robust terms are used to handle nonlinearities and environmental disturbances. Finally, the intelligent unmanned surface vehicle model "Dazhi" is used to simulate shallow water effects, and the controller's performance is analyzed through simulations. [**Results**] The simulation results show that the path tracking error converges rapidly to the desired region without violating the constraints. Compared to the unconstrained case, the controller demonstrates clear advantages in convergence speed and precision, verifying its effectiveness and robustness. [**Conlusions**] The proposed control strategy is innovative and significant in addressing path-dependent constraints for ship navigation, ensures precise path tracking within a fixed time, and has significant theoretical and practical application value. Future research may further optimize the control strategy to address more complex water environments and higher-precision path tracking tasks.

Key words: unmanned vehicles; navigation; path planning; target tracking; path following control; constrained optimization; output-constrained control; shallow water effect

相关论文

[1] 宋利飞, 许传毅, 郝乐, 等. 基于改进 DDPG 算法的无人艇自适应控制 [J]. 中国舰船研究, 2024, 19(1): 137–144. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03122>

[2] 焦宇航, 王宁. 欠驱动无人船集群有限时间跟踪控制 [J]. 中国舰船研究, 2023, 18(6): 76–87. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.02958>

[3] 张兰勇, 韩宇. 基于改进的 RRT*算法的 AUV 集群路径规划 [J]. 中国舰船研究, 2023, 18(1): 43–51. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.02879>

[4] 王浩亮, 尹晨阳, 卢丽宇, 等. 面向海上搜救的 UAV 与 USV 集群协同路径跟踪控制 [J]. 中国舰船研究, 2022, 17(5): 157–165. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.02916>

[5] 余亚磊, 苏荣彬, 冯旭, 郭晨. 基于速变 LOS 的无人船反步自适应路径跟踪控制 [J]. 中国舰船研究, 2019, 14(3): 163–171. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.01377>