

文章编号: 1007-7294(2026)01-0050-11

模型参数不确定下基于自适应控制和多目标遗传算法的水面无人艇轨迹跟踪

王子铭^{1,2}, 陈顺怀^{1,2}, 方 晟³

(1. 武汉理工大学 船海与能源动力工程学院, 武汉 430063; 2. 武汉理工大学 高性能船舶技术教育部重点实验室, 武汉 430063; 3. 中国船级社舟山办事处, 浙江 舟山 316000)

摘要: 为解决模型参数具有不确定性时水面无人艇 (USV) 的轨迹跟踪问题, 本文基于自适应控制和非支配快速排序多目标遗传算法 (NSGA II), 设计了 USV 的轨迹跟踪控制策略。首先, 建立平面三自由度 USV 运动学及动力学模型; 其次, 基于李雅普诺夫理论设计了具有不确定性的模型参数的在线参数估计策略以及自适应轨迹跟踪控制器, 并基于李雅普诺夫理论证明了轨迹跟踪误差的收敛性; 随后, 为选取控制器中大量需要人工设置的控制器参数的最优值, 以最小跟踪误差和最小控制输入为目标建立了多目标控制器参数优化模型, 并通过 NSGA II 求解控制器参数优化模型得到最优的控制器参数, 从而加强控制器性能; 最后, 进行了数值仿真实验, 实验结果验证了本轨迹跟踪控制算法的有效性。

关键词: 水面无人艇; 轨迹跟踪; 模型参数不确定; 自适应控制; NSGA II

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1007-7294.2026.01.006

Trajectory tracking of Unmanned Surface Vehicles based on adaptive control and multi-objective genetic algorithm considering model parameter uncertainty

WANG Zi-ming^{1,2}, CHEN Shun-huai^{1,2}, FANG Sheng³

(1. School of Naval Architecture, Ocean and Energy Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 2. Key Laboratory of High-Performance Ship Technology, Wuhan University of Technology, Ministry of Education, Wuhan 430063, China; 3. China Classification Society Zhoushan Office, Zhoushan 316000, China)

Abstract: To solve the trajectory tracking problem of Unmanned Surface Vehicle (USV) when the parameters of model are uncertain, this paper designs a trajectory tracking strategy for USV based on adaptive control and non-dominated fast sorting multi-objective genetic algorithm (NSGA II). Firstly, a three degree of freedom USV kinematic and dynamic model is established. Secondly, based on Lyapunov theory, an online parameter estimation strategy and an adaptive trajectory tracking controller are designed for model parameters with uncertainty, and the convergence of trajectory tracking error is proved based on Lyapunov theory. Subsequently, to obtain the optimal values of a large number of controller parameters that require manual setting in the controller, a multi-objective controller parameter optimization model is established with the

收稿日期: 2025-07-04

基金项目: 广西科技重大专项(桂科 AA23023013; AA23062037)

作者简介: 王子铭(1996-), 男, 博士; 陈顺怀(1966-), 男, 博士, 教授, 通讯作者, E-mail: shchen@whut.edu.cn;

方 晟(1996-), 男, 硕士。

objectives of minimizing tracking error and minimizing control input. By solving the controller parameter optimization model through NSGA II, the optimal controller parameters are obtained, thereby enhancing the controller performance. Finally, numerical simulation experiments are conducted, and the experimental results verify the effectiveness of the trajectory tracking control algorithm.

Key words: USV; trajectory tracking; model parameter uncertainty; adaptive control; NSGA II

0 引 言

随着陆地资源的日渐匮乏,人类对海洋资源的开发已是未来发展的重要趋势。水面无人艇(Unmanned Surface Vehicle, USV)作为可以在水面自主航行、高机动的水上机器人,具有低成本和多功能等优点,经常被用于在复杂海域执行海事巡航、气象监测、反潜以及扫雷等特定任务,在军用和民用领域均具有重要的研究价值和广泛的研究前景^[1]。USV 的运动控制作为实现其自主航行的重要技术,可根据不同的控制目标分为定位控制^[2]、路径跟随^[3]以及轨迹跟踪^[4]。其中,轨迹跟踪具体指设计控制器使 USV 不但能按照预先设定的路线航行,而且能使 USV 在指定时间点到达航线上指定的位置。因此,实现 USV 轨迹的精确跟踪对提高 USV 的自主化航行能力具有重要的意义。

得益于非线性控制理论的发展,近年来各国学者通过反步法、鲁棒控制、模型预测控制等方法对 USV 的轨迹跟踪进行了一定程度的研究。董早鹏等^[5]使用反步法得到了 USV 直线轨迹和曲线轨迹通用的跟踪控制器。Yuan 等^[6]将船舶运动数学模型简化成模型预测控制(MPC)离散形式,并结合事件触发机制设计控制器 ETHMPC 来对 USV 自主泊靠过程的轨迹进行跟踪。Sami 等^[7]设计了具有时变边界层的滑膜控制器,解决了具有未知环境干扰的 USV 轨迹跟踪问题。Zheng 等^[8]基于反步法和 Nussbaum gain 法设计了 USV 的轨迹跟踪控制器。USV 的模型参数对其运动具有重要的影响,这些模型参数具体包括 USV 的质量、重心坐标、附加质量、水动力系数等反映其惯性和水动力特性的参数,这些模型参数通常需要通过成本高昂的船舶操纵性实验获取。实际上,这些模型参数在很多应用场景下是未知或具有不确定性的。上述作者采用的研究方法很难处理 USV 的模型参数具有不确定性时的轨迹跟踪问题,也难以获取不确定的 USV 模型参数。

自适应控制作为重要的非线性控制方法,通过动态系统的反馈信号自动地调节控制器中的未知参数,可以很好地处理模型参数未知的 USV 轨迹跟踪问题。Bao 等^[9]针对船舶参数不确定时的船舶航向控制问题,通过模型参考自适应设计了船舶航向控制器。Zhu 等^[10]针对含有不确定参数的船舶模型,结合模糊逻辑系统和最优控制算法,提出了船舶航向自适应控制策略。Zhang 等^[11]提出了一种具有高增益观测的自适应轨迹跟踪控制方法,并通过 RBFNN 网络和二阶微分器解决模型的不确定性。但以上研究难以处理全部 USV 模型参数均具有不确定性时的 USV 轨迹跟踪问题。同时,通过自适应控制方法设计的控制器通常具有许多需要人为设置的控制器参数,这些控制器参数极大地影响着控制器的性能。选择最佳的控制器参数通常需要大量的人工经验,这也产生了巨大的成本。遗传算法是模拟生物在自然环境中的遗传和进化过程而形成的一种自适应全局优化的搜索算法,在 USV 的相关领域中已具有了一定程度的应用^[12-13]。非支配快速排序多目标遗传算法(NSGA II)降低了非劣排序遗传算法的复杂性,具有运行速度快,解集收敛性好的优点,很适合解决本文的待优化控制器参数较多时的优化问题^[14]。

本文针对全部模型参数不确定的全驱动 USV 轨迹跟踪问题,结合自适应控制和 NSGA II 设计了 USV 的轨迹跟踪控制器。首先,建立了三自由度的 USV 运动学模型和动力学模型。其次,基于自适应控制理论,根据轨迹跟踪误差的反馈信号设计了自适应轨迹跟踪控制器和 USV 全部模型参数的在线估计方法,并通过李雅普诺夫第二方法证明了轨迹跟踪误差的全局收敛性。随后,根据轨迹跟踪误差和模型参数估计误差建立控制器参数的多目标优化模型,并通过 NSGA II 算法优化了控制器参数,提升了

控制器性能。最后,通过仿真实验验证了方法的有效性。

本文的结构如下:第1章建立三自由度的 USV 数学模型,并定义 USV 的轨迹跟踪问题。第2章介绍自适应轨迹跟踪控制器以及参数估计方法的细节。第3章对仿真实验的过程及结果进行分析。第4章为本文的结论。

1 USV 数学模型

1.1 USV 运动学及动力学模型

为方便描述 USV 在水平面上三个自由度的运动,如图1所示,建立 USV 空间固定坐标系 $O-XYZ$ 。其中, OX 轴指向正北, OY 轴指向正东, x, y 分别为 USV 船艏在空间固定坐标系 $O-XYZ$ 中的 OX 轴坐标和 OY 轴坐标, ψ 为 USV 的航向角。同时,以 USV 船艏位置 O_o 为坐标原点建立随船运动坐标系 $O_o-x_o y_o z_o$ 。其中, u, v 和 r 分别为 USV 的纵向速度、横向速度以及回转速度, U 为船舶合速度。USV 运动学模型^[15]如式(1)所示。

$$\dot{\eta} = R(\psi)\mu \quad (1)$$

式(1)中, $\eta^T = [x, y, \psi]$, $\mu^T = [u, v, r]$, $R(\psi)$ 为艏摇旋转矩阵,定义为

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

可见,艏摇旋转矩阵 $R(\psi)$ 满足关系式: $R^{-1}(\psi) = R^T(\psi)$ 以及 $\|R(\psi)\| = 1$ 。USV 的动力学模型如式(3)所示。

$$M\dot{\mu} + C(\mu)\mu + D(\mu)\mu = \tau \quad (3)$$

式(3)中, $\tau^T = [\tau_1, \tau_2, \tau_3]$ 为控制输入向量, M 为惯性系数矩阵,定义为

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & m_{23} \\ 0 & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(4)中, $m_{11} = m - X_{\dot{u}}$, $m_{22} = m - Y_{\dot{v}}$, $m_{23} = m_{32} = m x_g - Y_{\dot{r}}$, $m_{33} = I_z - N_{\dot{r}}$ 。其中, m 为 USV 的质量, x_g 为 USV 重心在随船坐标系的坐标, $X_{\dot{u}}$ 、 $Y_{\dot{v}}$ 、 $Y_{\dot{r}}$ 、 $N_{\dot{r}}$ 均为反映 USV 附加质量的系数。式(3)中的 $D(\mu)$ 为阻尼系数矩阵,定义为

$$D(\mu) = \begin{bmatrix} -X_u - X_{u|u|}|u| & 0 & 0 \\ 0 & -Y_v - Y_{v|v|}|v| - Y_{r|v|}|r| & -Y_r - Y_{v|r}|v| - Y_{r|r|}|r| \\ 0 & -N_v - N_{v|v|}|v| - N_{r|v|}|r| & -N_r - N_{v|r}|v| - N_{r|r|}|r| \end{bmatrix} \quad (5)$$

上式中, X_u 、 $X_{u|u|}$ 、 Y_v 、 Y_r 、 $Y_{v|v|}$ 、 $Y_{r|v|}$ 、 $Y_{v|r|}$ 、 $Y_{r|r|}$ 、 N_v 、 N_r 、 $N_{v|v|}$ 、 $N_{r|v|}$ 、 $N_{v|r|}$ 、 $N_{r|r|}$ 均为水动力系数。式(3)中的 $C(\mu)$ 为科氏力和向心力矩阵,定义为

$$C(\mu) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -m_{22}v - m_{23}r \\ 0 & 0 & m_{11}u \\ m_{22}v + m_{23}r & -m_{11}u & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

1.2 执行器饱和和约束

USV 的控制输入通常由舵、螺旋桨等执行器产生。根据具体任务以及船型的不同, USV 会装配不同的执行器。USV 的轨迹跟踪只需得到这些执行器所需的控制力。得到这些控制力后,便可以根据具

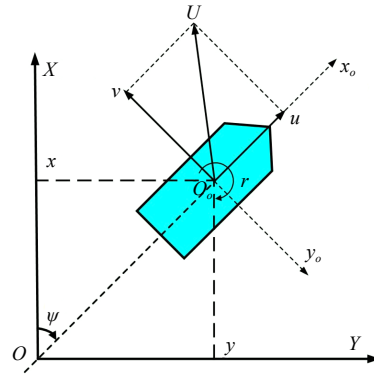


图1 用于 USV 运动分析的坐标系

Fig.1 Coordinate systems

体的 USV 执行器配置,通过推力分配算法得到该 USV 诸如螺旋桨转速或舵角等具体的执行器操作指令^[16]。由于这些执行器受到其自身材料、尺寸参数以及机械摩擦等因素的影响,使得其所能产生的控制力受到如下式所示的执行器饱和约束。

$$\tau_i = \begin{cases} \tau_{Mi} & \tau_i > \tau_{Mi} \\ \tau_i - \tau_{Mi} \leq \tau_i \leq \tau_{Mi} & \\ -\tau_{Mi} & \tau_i < -\tau_{Mi} \end{cases} \quad (7)$$

式中: τ_{Mi} 为 USV 执行器所能产生的最大控制力。

1.3 问题描述

根据式(3)所示的 USV 动力学模型,将 USV 动力学模型中包括水动力系数以及附加质量的所有 18 个参数作为模型参数向量 α 。故而,

$$\alpha^T = [X_u, Y_v, Y_r, N_v, N_r, X_{u|u|}, Y_{v|v|}, Y_{r|r|}, N_{v|v|}, N_{r|r|}, N_{v|v|}, N_{r|r|}, m_{11}, m_{22}, m_{23}, m_{33}]$$

定义 USV 目标轨迹的跟踪误差 $\bar{\eta} = \eta - \eta_d$ 和目标速度的跟踪误差 $\bar{\mu} = \mu - \mu_d$ 。定义 USV 模型参数 α 的估计:

$$\hat{\alpha}^T = [\hat{X}_u, \hat{Y}_v, \hat{Y}_r, \hat{N}_v, \hat{N}_r, \hat{X}_{u|u|}, \hat{Y}_{v|v|}, \hat{Y}_{r|r|}, \hat{N}_{v|v|}, \hat{N}_{r|r|}, \hat{N}_{v|v|}, \hat{N}_{r|r|}, \hat{m}_{11}, \hat{m}_{22}, \hat{m}_{23}, \hat{m}_{33}]$$

同时,定义参数估计误差 $\bar{\alpha} = \hat{\alpha} - \alpha$ 。定义 USV 轨迹跟踪的目标轨迹 $\eta_d^T = [x_d, y_d, \psi_d]$ 和目标轨迹的速度 $\mu_d^T = [u_d, v_d, r_d]$, 其中, (x_d, y_d) 和 ψ_d 分别为目标轨迹的坐标和航向角, u_d 、 v_d 、 r_d 分别为目标轨迹的纵向速度、横向速度以及回转角速度。为准确描述本文模型参数具有不确定性时的 USV 轨迹跟踪问题,做出如下假设:

假设 1: 向量 α 中所有的模型参数均具有不确定性。

假设 2: 目标轨迹 η_d 和目标速度 μ_d 都是光滑有界的, 并且目标轨迹 η_d 的一阶导数和二阶导也是有界的, 目标速度的一阶导数是有界的。即存在正常数 $\rho_i (i = 1, 2, 3)$ 和 $\sigma_i (i = 1, 2)$, 使得 $\|\eta_d\| \leq \rho_1$, $\|\dot{\eta}_d\| \leq \rho_2$, $\|\ddot{\eta}_d\| \leq \rho_3$ 以及 $\|\mu_d\| \leq \sigma_1$, $\|\dot{\mu}_d\| \leq \sigma_2$ 。

故而, 本文模型参数具有不确定性时的 USV 轨迹跟踪问题定义如下:

控制问题: 针对运动学模型和动力学模型分别如式(1)和式(3)所示的全驱动 USV, 当面对假设 1 和具有假设 2 的目标轨迹时, USV 轨迹跟踪的控制目标为设计控制输入 τ 的控制器和模型参数 α 的自适应估计策略, 使目标轨迹的跟踪误差 $\bar{\eta} = \eta - \eta_d$ 和 $\dot{\bar{\eta}} = \dot{\eta} - \dot{\eta}_d$ 全局一致最终收敛到 0。

2 USV 自适应控制器

本节根据轨迹跟踪误差的反馈信号设计 USV 模型参数的参数估计策略和控制输入的控制器。随后, 基于李雅普诺夫理论对轨迹跟踪误差的收敛性进行证明。

2.1 控制率及参数估计策略

在设计控制器和参数估计策略之前, 先做出如下的假设。

假设 3: USV 可以装载惯性测量单元(IMU)和高精 GPS, 通过解算后获取自身的位置 (x, y) 、航向角 ψ 、速度分量 $[u, v, r]$ 以及加速度分量 $[\dot{u}, \dot{v}, \dot{r}]$ 的精确实时数据。

USV 在同一个航次下通常装载情况不变, 能量损耗导致的质量减小也可忽略不计。同时, USV 的水动力系数主要与船型有关, 航行过程中通常变化不大。因此, 再做出假设 4。

假设 4: 同一个航次下, USV 的模型参数 α 是定常的。

故而根据假设 4, 在同一个航次下, USV 的模型参数 α 随时间的导数为零。但模型参数的估计 $\hat{\alpha}$ 随时间的导数与后文设计的参数估计策略有关, 不恒为零。即 $\dot{\alpha} = 0$, $\dot{\hat{\alpha}} \neq 0$ 。定义如式(8)所示误差变量来衡量 USV 的轨迹跟踪误差。

$$s = \dot{\bar{\eta}} + T\bar{\eta} \quad (8)$$

上式中, $s^T = [s_1, s_2, s_3]$ 。 T 为 3×3 正定对角矩阵, 即 $T = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ 。 为方便控制器的设计, 定义 USV 的虚拟速度如下所示

$$\mu_r = \mu - s = \mu - R\mu + \dot{\eta}_d - T\eta + T\eta_d \quad (9)$$

上式中, $\mu_r^T = [\mu_{r1}, \mu_{r2}, \mu_{r3}]$ 。 建立如下式所示的和误差变量 s 及模型参数估计误差 $\bar{\alpha}$ 有关的正定李雅普诺夫函数

$$V = \frac{1}{2}s^T Ms + \frac{1}{2}\bar{\alpha}^T A^{-1}\bar{\alpha} \quad (10)$$

根据假设 4 可知 $\dot{\alpha} = 0$, $\dot{M} = 0$ 。 故而, 对上述李雅普诺夫函数求导后得到

$$\dot{V} = s^T M\dot{s} + \dot{\bar{\alpha}}^T A^{-1}\bar{\alpha} \quad (11)$$

将误差变量 s 的导数 $\dot{s} = \dot{\mu} - \dot{\mu}_r$ 代入式(11)得到

$$\dot{V} = s^T (M\dot{\mu} - M\dot{\mu}_r) + \dot{\bar{\alpha}}^T A^{-1}\bar{\alpha} \quad (12)$$

将式(3)所示的 USV 动力学模型代入式(12)得到

$$\dot{V} = s^T (\tau - C(\mu)\mu - D(\mu)\mu - M\dot{\mu}_r) + \dot{\bar{\alpha}}^T A^{-1}\bar{\alpha} \quad (13)$$

根据式(9), 将 $\mu = s + \mu_r$ 代入式(13)后, 我们得到

$$\dot{V} = s^T (\tau - C(\mu)\mu_r - D(\mu)\mu - M\dot{\mu}_r) - s^T C(\mu)s + \dot{\bar{\alpha}}^T A^{-1}\bar{\alpha} \quad (14)$$

为将 $M\dot{\mu}_r + C(\mu)\mu_r + D(\mu)\mu$ 中所包含的 USV 模型参数与 USV 速度和加速度分了解耦, 将式(4)~(6)所示的 M 、 $C(\mu)$ 以及 $D(\mu)$ 的具体形式代入 $M\dot{\mu}_r + C(\mu)\mu_r + D(\mu)\mu$ 后, 可将 $M\dot{\mu}_r + C(\mu)\mu_r + D(\mu)\mu$ 化为式(15)所示形式, 从而将 $M\dot{\mu}_r + C(\mu)\mu_r + D(\mu)\mu$ 中的模型参数与速度和加速度分量进行了解耦。

$$M\dot{\mu}_r + C(\mu)\mu_r + D(\mu)\mu = Y\alpha \quad (15)$$

其中, Y 为 3×18 的矩阵, Y 的具体形式为

$$\begin{bmatrix} -u & 0 & 0 & 0 & 0 & -|u|u & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{\mu}_{r1} & -v\mu_{r3} & -r\mu_{r3} & 0 \\ 0 & -v & -r & 0 & 0 & 0 & -|v|v & -|v|r & -|r|v & -|r|r & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & u\mu_{r3} & \dot{\mu}_{r2} & \dot{\mu}_{r3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -v & -r & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -|v|v & -|v|r & -|r|v & -|r|r & -u\mu_{r2} & v\mu_{r1} & r\mu_{r1} + \dot{\mu}_{r2} & \dot{\mu}_{r3} \end{bmatrix}$$

根据式(6)所示的科氏力和向心力矩阵 $C(v)$ 的具体形式可知, 矩阵 $C(v)$ 具有如下性质^[15]

$$\xi^T C(\mu)\xi = 0; \forall \xi \in \mathcal{R}^{n \times 1} \quad (16)$$

从上式可知 $s^T C(\mu)s = 0$ 。 故而, 将式(15)代入式(14)后, 我们得到

$$\dot{V} = s^T (\tau - Y\alpha) + \dot{\bar{\alpha}}^T A^{-1}\bar{\alpha} \quad (17)$$

在这里, 设计 USV 全部模型参数的参数估计率和 USV 控制输入的控制率分别如下式(18)和式(19)所示

$$\dot{\hat{\alpha}} = -AY^T s \quad (18)$$

$$\tau = Y\hat{\alpha} - K_D s \quad (19)$$

式(18)中的参数自适应增益矩阵 A 为 18×18 的正定对角矩阵, 即 $A = \text{diag}(a_1, a_2, \dots, a_{18})$ 。 式(19)中的控制增益矩阵 K_D 为 3×3 的正定对角矩阵, 即 $K_D = \text{diag}(k_{d1}, k_{d2}, k_{d3})$ 。 在实际 USV 轨迹跟踪应用过程中, 先通过式(18)所示参数估计率计算得到当前时刻的参数估计率 $\dot{\hat{\alpha}}$ 后, 再根据式(20)欧拉法得到当前时刻的 USV 模型参数估计 $\hat{\alpha}$, 随后就可以根据式(19)所示的控制率计算得到当前时刻三自由度的控制力 τ 。

$$\hat{\alpha}[t] = \hat{\alpha}[t-1] + \dot{\hat{\alpha}}[t]\Delta t \quad (20)$$

上式中, $\hat{\alpha}[t]$ 和 $\hat{\alpha}[t-1]$ 分别为当前时间步和上一时间步的 USV 模型参数估计, $\dot{\hat{\alpha}}[t]$ 为当前时刻参数估计率, Δt 为各时间步的时间间隔。 将式(18)和式(19)代入式(17)后, 可得

$$\dot{V} = -s^T K_D s \quad (21)$$

2.2 收敛性证明

式(21)两边分别对时间求导得

$$\dot{V} = -2s^T K_D \dot{s} \quad (22)$$

式(10)所示的李雅普诺夫函数是正定的,所以可知 $V \geq 0$ 。由式(21)可知 $\dot{V} \leq 0$,故而,李雅普诺夫函数 V 有上界。如此,根据式(10)可得: s 和 $\dot{s}$ 有界。因为 s 有界,根据式(9)所示的 $s = \mu - \mu_r$ 可得: μ 、 μ_r 均有界。因为艏摇旋转矩阵 $R(\psi)$ 有界,根据式(1)可知 $\dot{\eta}$ 有界。根据式(7)知 τ 有界,再根据式(3)所示的 USV 动力学模型和物理性质可知加速度量 $\ddot{\mu}$ 有界。因为 $\mu^T = [u, v, r]$ 有界,故而从 $\dot{R}$ 的具体形式 $\dot{R} = \begin{bmatrix} -r \sin \psi & -r \cos \psi & 0 \\ r \cos \psi & -r \sin \psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ 中可知 $\dot{R}$ 有界。由假设 2 知 $\ddot{\eta}_d$ 和 $\dot{\eta}_d$ 均有界。根据式(11)得 $\dot{\mu}_r = \dot{\mu} - \dot{R}\mu - R\dot{\mu} + \ddot{\eta}_d - T\dot{\eta} + T\dot{\eta}_d$,根据上述证明知: $\dot{\mu}$ 、 μ 、 R 、 $\dot{R}$ 、 $\dot{\eta}$ 、 η_d 以及 $\ddot{\eta}_d$ 均有界,故虚拟加速度量 $\dot{\mu}_r$ 有界。从而,根据 $\dot{s} = \dot{\mu} - \dot{\mu}_r$ 得 $\dot{s}$ 有界。由于 s 和 $\dot{s}$ 均有界,由式(22)知 $\dot{V}$ 有界。

综上所述,可知 V 正定, $\dot{V}$ 半负定。因为 $\dot{V}$ 有界,所以 $\dot{V}$ 一致连续。根据 Barbalat 引理^[17],当 $t \rightarrow \infty$, $\dot{V} \rightarrow 0$ 。当 $\dot{V} \rightarrow 0$ 时,根据式(21)可知 $s \rightarrow 0$ 。当 $s = 0$ 时,根据式(8)易得 $\bar{\eta}$ 和 $\dot{\eta}$ 指数收敛到 0。从而,可证得 $t \rightarrow \infty$,目标轨迹的跟踪误差 $\bar{\eta}$ 和 $\dot{\eta}$ 全局一致最终收敛到 0。

3 控制器参数优化模型

式(19)等诸式所表征的自适应控制器(SA)中,矩阵 $T = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$,参数自适应增益矩阵 $A = \text{diag}(a_1, a_2, \dots, a_{18})$,以及控制增益矩阵 $K_D = \text{diag}(k_{d1}, k_{d2}, k_{d3})$ 均需要人工设置。这些矩阵中的参数即为控制器参数。这些控制器参数对自适应控制器的控制性能影响很大。控制器的控制输入整体越小,意味着控制能耗也越小,有利于节省能源并提高控制器使用寿命。同时,USV 的跟踪误差整体越小也代表控制器的性能更好。故而,希望能人工选择出最佳的控制器参数,使 USV 整条轨迹的跟踪误差和控制输入整体最小。然而,选择这些控制参数的最优值通常需要人工经验以及巨大的成本。同时,本自适应控制中需要调优的控制器参数共 24 个。过多的待优化变量也增大了本控制器参数优化问题的难度。而 NSGA II 作为一种重要的多目标优化算法,很适合解决本文输入变量较多的多目标优化问题。在多目标优化中,通常没有单一的最优解,而是存在多个解,每个解在不同目标上有不同的性能。NSGA II 通过非支配排序方法来识别这些解的相对优劣,其非支配排序的主要思路可以概括为以下几个步骤:

第 1 步:遍历整个种群,得到种群中所有个体相互之间的支配关系。其中,如果个体 A 在所有目标上都不比个体 B 差,且在至少一个目标上比个体 B 好,则称个体 A 支配个体 B。

第 2 步:根据种群中各个体的支配关系,将种群分成 M 个非支配层。其中,同一层的个体之间存在弱支配或互不支配的关系,但每层中每个个体都支配下面层中的所有个体。即第一层个体支配从第二层到第 M 层的所有个体,第二层个体支配从第三层到第 M 层的所有个体,以此类推。

第 3 步:对于包含多个个体的非支配层,通过下式计算每个个体的拥挤度。在每个非支配层内,根据拥挤度对个体进行排序,拥挤度越高的个体排序越靠前。

$$i_d = \sum_j^m (|f_j^{i+1} - f_j^{i-1}|) \quad (23)$$

式中: i_d 为 i 的拥挤度, f_j^{i+1} 为第 $i+1$ 个个体的第 j 个目标的函数值, f_j^{i-1} 为第 $i-1$ 个个体的第 j 个目标的函数值。从而,NSGA II 通过非支配排序对种群中的所有个体进行了排序。NSGA II 算法的基本流程概述如下:

第 1 步:随机生成一个规模为 N 的初始种群。

第 2 步:对初始种群进行非支配排序,根据个体间的非支配关系将其分成多个非支配层。

第 3 步:应用遗传算法的选择、交叉和变异操作,从初始种群生成第一代子代种群。

第 4 步:从第二代开始,将父代种群与子代种群合并,形成一个规模为 $2N$ 的新种群。

第5步: 对合并后的种群进行非支配分层, 并计算每层中个体的拥挤度。

第6步: 根据个体的非支配层和拥挤度对整个种群进行排序, 选取排序前 N 个个体组成新的父代种群。

第7步: 重复第3步至第6步, 直到满足终止条件, 如达到最大迭代次数或解的质量满足要求。

定义如下各绝对误差积分 (IAE): $IAE_x = \int_0^t |\bar{x}| dt$, $IAE_y = \int_0^t |\bar{y}| dt$, $IAE_\psi = \int_0^t |\bar{\psi}| dt$, $IAE_u = \int_0^t |\bar{u}| dt$, $IAE_v = \int_0^t |\bar{v}| dt$, $IAE_r = \int_0^t |\bar{r}| dt$, $IAE_{\tau_1} = \int_0^t |\tau_1| dt$, $IAE_{\tau_2} = \int_0^t |\tau_2| dt$, $IAE_{\tau_3} = \int_0^t |\tau_3| dt$, 用以衡量整体轨迹的跟踪误差和控制输入。选择最优的控制参数, 从而使 USV 的跟踪误差和控制输入整体最小, 定义如下多目标控制参数优化模型。

$$\begin{cases} f_1 = IAE_x + IAE_y + IAE_\psi + IAE_u + IAE_v + IAE_r \\ f_2 = \int_0^t |\tau_1| dt + \int_0^t |\tau_2| dt + \int_0^t |\tau_3| dt \end{cases} \quad (24)$$

式中: f_1 为整条轨迹的最小跟踪误差目标函数, f_2 为整条轨迹的最小控制输入目标函数。多目标控制参数优化模型的优化变量即为各增益矩阵 $T = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ 、 $A = \text{diag}(a_1, a_2, \dots, a_{18})$ 、 $K_D = \text{diag}(k_{d1}, k_{d2}, k_{d3})$ 中的控制器参数。设置各控制器参数的约束如下: $0 < \lambda_i \leq 2$; $0 < a_i \leq 0.5$; $0 < k_{di} \leq 40$ 。在实际应用过程中, 可事先根据目标轨迹, 在计算机系统中模拟整个轨迹跟踪过程, 并根据式 (24) 计算该轨迹跟踪过程的目标函数, 从而通过 NSGA II 来优化控制器参数。随后, 自适应控制器将使用优化后的控制器参数进行 USV 的轨迹跟踪控制。故而, 对这种使用经过 NSGA II 优化的控制参数的自适应控制器, 本文称其为 SA-GA 控制器。SA-GA 控制器的整体计算流程如图 2 所示。

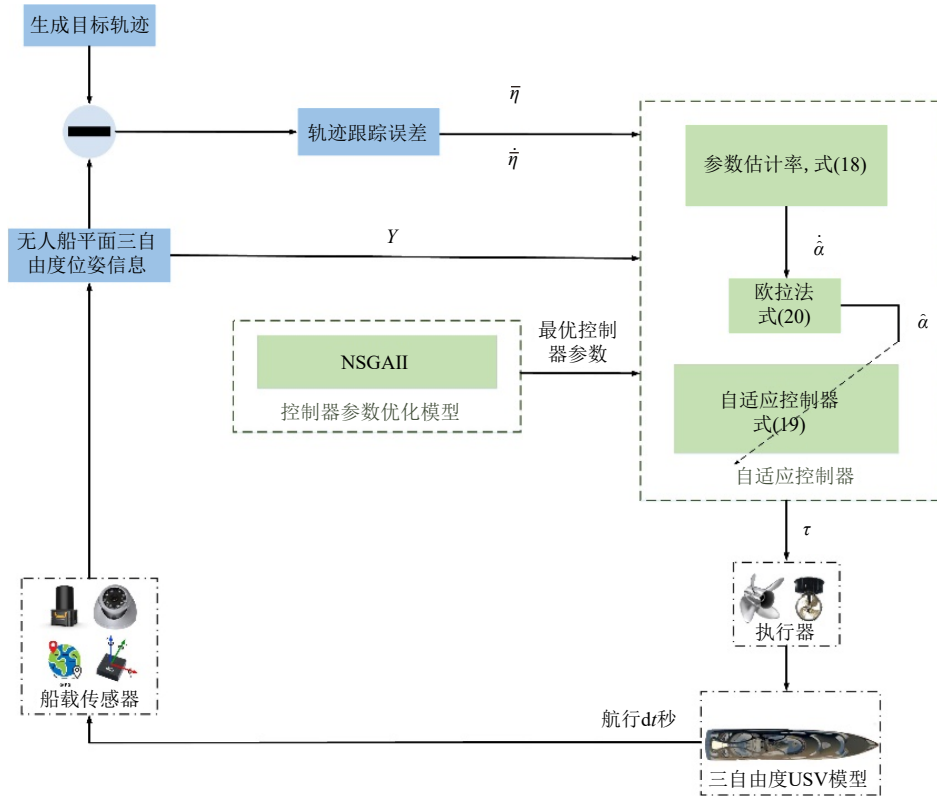


图2 SA-GA 控制器计算框图

Fig.2 Calculation block for SA-GA controller

4 仿真实验

本文选取 CyberShip II^[10] 作为目标船来验证本轨迹跟踪算法的有效性, CyberShip II 的控制力限制

$\tau_M = [2, 2, 1.5]$ 。首先, 假设 CyberShip II 的模型参数是具有不确定性的。CyberShip II 水动力系数等相关的模型参数的实际值和假设 CyberShip II 模型参数的初始值如表 1 所示。从而, 将表 1 中 USV 模型参数的初始值作为式(20)中 USV 模型参数在仿真实验里每个航次初始时刻的估计值 $\hat{\alpha}[0]$ 。

表 1 USV 模型参数的实际值与初始值

Tab.1 Actual and initial values of USV model parameters

参数	实际值/初始值	参数	实际值/初始值	参数	实际值/初始值
m	23.8/10	Y_r	0.1079/0	$Y_{ rv }$	-0.805/0
I_z	1.76/0	$Y_{\dot{r}}$	0/0	$Y_{ v r}$	-0.845/0
x_g	0.046/0	N_v	0.1052/0	$Y_{r v }$	-3.45/0
X_u	-0.7225/0	N_r	-0.5/0	$N_{ v v }$	5.0437/0
$X_{\dot{u}}$	-2.0/0	$N_{\dot{r}}$	-1.0/0	$N_{ rv }$	0.13/0
Y_v	-0.8612/0	$X_{u u }$	-1.3274/0	$N_{ v r}$	0.08/0
$Y_{\dot{v}}$	-10.0/-5	$Y_{ v v }$	-36.2823/-20	$N_{r v }$	-0.75/0

为获取式(19)所示自适应控制器中的增益矩阵 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{T}$ 以及 $\mathbf{K}_D$ 中需要人工设置的控制器参数的最优值, 提升自适应控制器的性能, 设置种群规模为 50, 最大迭代次数为 100。使用 NSGA II 对式(24)所示的多目标控制参数优化模型进行求解, 求解后得到 Pareto 最优解集。最优解集中的所有解都可作为控制器参数。相比于轨迹跟踪过程中的整体最小控制输入, 整体最小跟踪误差是衡量一个控制器优劣更重要的指标。故而, 选取最优解集中最小跟踪误差目标函数 f_1 最小的解作为最优控制器参数。控制器参数的优化结果如表 2 所示。

表 2 控制器参数优化结果

Tab.2 Optimization results of controller parameters

参数	优化结果	参数	优化结果	参数	优化结果
λ_1	0.833	a_3	0.119	a_{11}	0.045
λ_2	0.945	a_4	0.117	a_{12}	0.368
λ_3	0.838	a_5	0.404	a_{13}	0.462
k_{d1}	26.596	a_6	0.168	a_{14}	0.021
k_{d2}	38.284	a_7	0.116	a_{15}	0.481
k_{d3}	11.9	a_8	0.22	a_{16}	0.248
a_1	0.234	a_9	0.094	a_{17}	0.466
a_2	0.195	a_{10}	0.334	a_{18}	0.06

本文中, 使用原始自适应控制器参数的自适应控制器称为 SA 控制器, 其参数设置分别为 $\lambda_i = 2(i = 1, 2, 3)$, $k_{di} = 30(i = 1, 2, 3)$, $a_i = 0.3(i = 1, 2, 3, \dots, 18)$; 而使用表 2 中经由 NSGA II 优化后的控制器参数的自适应控制器在本文中被称为 SA-GA 控制器。实验主机 CPU 型号为: Intel Core i7-8750H。USV 轨迹跟踪仿真实验的目标轨迹如式(25)所示。

$$\begin{cases} x_d(t) = 3 \left(1 - \cos \left(0.03t + \frac{1}{4}\pi \right) \right) (1 - \cos(0.03t)) \\ y_d(t) = 3 \sin \left(0.03t + \frac{1}{4}\pi \right) \\ \psi_d(t) = \sin \left(0.12t + \frac{1}{3}\pi \right) \end{cases} \quad (25)$$

目标船初始坐标为 $(-1, 2)\text{m}$, 初始航向角为 60° , 初始纵向速度、横向速度以及回转角速度均为 0。USV 的轨迹跟踪仿真结果如图 3~8 所示。

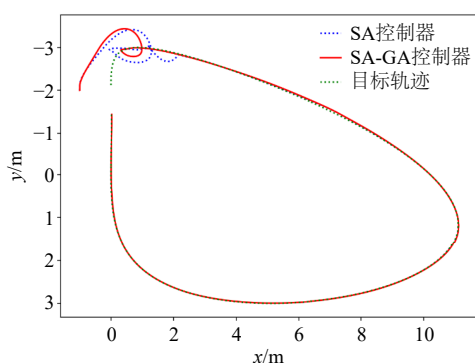


图3 USV 的航行轨迹

Fig.3 Navigation trajectory of USV

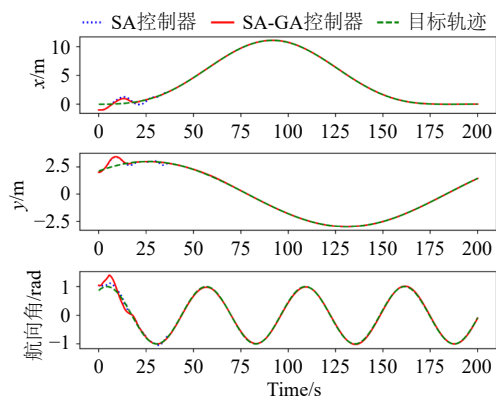


图4 USV 轨迹坐标以及航向角

Fig.4 USV trajectory coordinates and heading angles

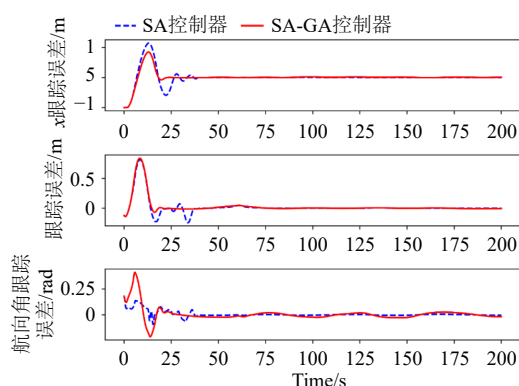


图5 USV 轨迹坐标以及航向角的跟踪误差

Fig.5 Tracking error of USV trajectory coordinates and heading angles

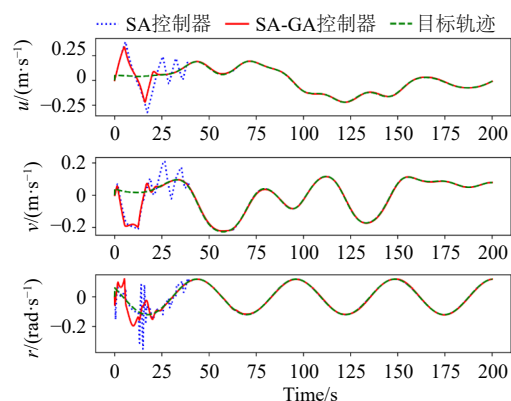


图6 USV 的速度分量

Fig.6 Velocity components of USV

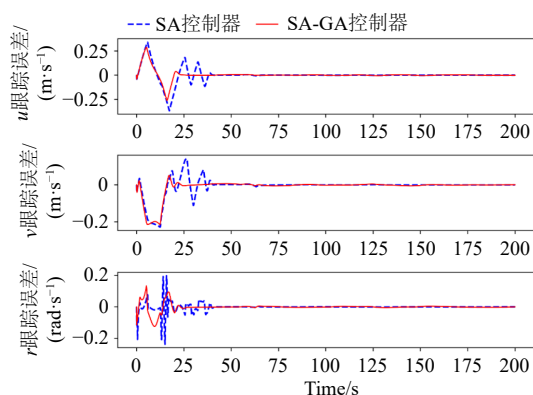


图7 USV 的速度分量的跟踪误差

Fig.7 Tracking error of velocity components of USV

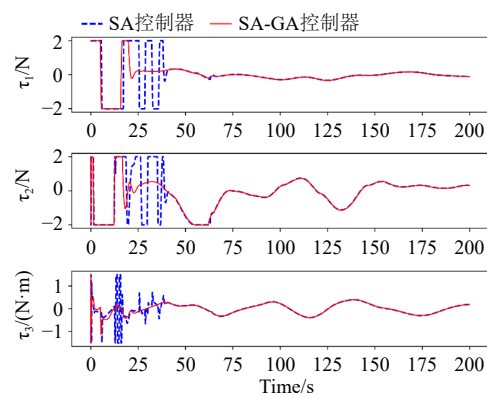


图8 USV 的控制力

Fig.8 Control force of USV

如图3~5所示, 尽管USV的模型参数都是不确定的, SA控制器与SA-GA控制器均能使USV的轨迹坐标和航向角的跟踪误差收敛到0。但从图5可以看出, 使用SA-GA控制器的USV前期轨迹坐标跟踪误差相对更小, 并且更快地收敛到0。如图6~7所示, 尽管USV的模型参数都是不确定的, SA控制器与SA-GA控制器均能使USV的纵向速度、横向速度以及回转角速度的跟踪误差收敛到0。但使用SA-GA控制器的USV, 其前期纵向速度、横向速度以及回转角速度的跟踪误差震荡更小,

能更快更稳定地收敛。图 8 所示为目标船的纵向控制力、横向控制力以及回转控制力矩。可以看出, 使用 SA-GA 控制器的 USV, 其控制输入前期震荡更小、更平滑, 并且使用 SA-GA 控制器的 USV 前期整体控制输入更小, 这也有效地减小了能耗并有助于延长 USV 执行器的寿命。同时, 从图 8 可以看出, SA-GA 控制器和 SA 控制器计算得到的控制力, 均不适用于采用常规的舵结合螺旋桨的推进方式来推进的 USV, 需采用全回转推进器或其他矢量推进方式来推进。使用 SA 控制器和 SA-GA 控制器的 USV 的跟踪误差和控制输入的 IAE 指标分别如表 3~4 所示。

表 3 USV 跟踪误差的 IAE

Tab.3 IAE of USV tracking error

控制器	IAE _x	IAE _y	IAE _ψ	IAE _u	IAE _v	IAE _r
SA	17.407	8.515	2.506	5.039	3.485	1.379
SA-GA	12.174	7.619	6.311	2.955	2.729	1.679

表 4 USV 控制输入的 IAE

Tab.4 IAE of USV control input

控制器	IAE _{r1}	IAE _{r2}	IAE _{r3}
SA	96.352	155.866	43.641
SA-GA	64.608	125.057	37.595

如表 3 所示, 使用 SA-GA 控制器的 USV 的 IAE_x、IAE_y、IAE_ψ、IAE_u 以及 IAE_r 相比于使用 SA 控制器的 USV 均有所减小。其中 IAE_u 减小比例最大, 达到了 44.34%。如表 4 所示, 使用 SA-GA 控制器的 USV 的 IAE_{r1}、IAE_{r2} 以及 IAE_{r3} 相比于使用 SA 控制器的 USV 均有所减小。其中 IAE_{r1} 减小比例最大, 达到了 32.95%。可见, SA-GA 控制器使 USV 轨迹跟踪误差下降的同时, 还大幅度地减小了轨迹跟踪的控制输入, 这降低了 USV 的控制能耗和执行器的损耗。

从上述分析可知, 尽管 USV 的全部模型参数具有不确定性, 但本文结合自适应控制理论和 NSGA II 设计的 SA-GA 控制器, 能在保证无人船的控制输入满足执行器饱和约束的同时, 还使 USV 的轨迹跟踪误差收敛到 0; 并且, 相比于 SA 控制器, SA-GA 控制器在使用了 NSGA II 优化的最优控制器参数后, USV 的轨迹跟踪误差和控制输入均有所降低。从而, 提升了控制器的性能, 并增强了 USV 的自主航行性能。

5 结 语

本文针对模型参数不确定的水面无人艇 (USV), 提出了一种无人艇轨迹跟踪方法。首先, 建立了平面三自由度的 USV 模型; 通过李雅普诺夫理论和自适应控制方法设计了 USV 的自适应轨迹跟踪控制器 (SA)。随后, 为选择最优的自适应控制器参数, 以最小跟踪误差和最小控制输入为目标建立了多目标控制器参数优化模型, 并通过非支配快速排序多目标遗传算法 (NSGA II) 对该模型进行求解, 得到了最优控制器参数。通过设计数值仿真实验, 验证了使用最优控制器参数的自适应控制器 (SA-GA) 可在跟踪误差收敛的基础上, 使跟踪误差和控制输入均有所降低, 有效提升了 USV 轨迹跟踪的性能。实际上, 本文研究并未考虑 USV 航行时会受到未知时变环境的干扰。故而, 同时考虑环境干扰和模型参数不确定性的 USV 轨迹跟踪是后续研究的方向。

参 考 文 献:

- [1] 钱正芳, 陆江, 孙小帅. 浅析深度学习在未来水面无人艇平台的应用[J]. 中国造船, 2020, 61(S1): 6-13.
Qian Z F, Lu J, Sun X S. Brief analysis of deep learning application in future unmanned surface vehicle platform[J]. Shipbuilding of China, 2020, 61(S1): 6-13. (in Chinese)
- [2] Zhang J, Yu S, Yan Y. Fixed-time extended state observer-based trajectory tracking and point stabilization control for marine surface vessels with uncertainties and disturbances[J]. Ocean Engineering, 2019, 186: 106109.
- [3] Zhilin L, Simeng S, Shouzheng Y, et al. ALOS-based USV path-following control with obstacle avoidance strategy[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2022, 10(9): 1203-1203.

- [4] Zhang J, Yu S, Yan Y. Fixed-time velocity-free sliding mode tracking control for marine surface vessels with uncertainties and unknown actuator faults[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 201: 107107.
- [5] 董早鹏, 万磊, 廖煜雷, 等. 基于非对称模型的欠驱动 USV 路径跟踪控制[J]. *中国造船*, 2016, 57(1): 116–126.
Dong Z P, Wan L, Liao Y L, et al. Path following control of underactuated USV based on asymmetric model[J]. *Shipbuilding of China*, 2016, 57(1): 116–126. (in Chinese)
- [6] Yuan S Z, Liu Z L, Sun Y X, et al. An event-triggered trajectory planning and tracking scheme for automatic berthing of unmanned surface vessel[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 273: 113964.
- [7] Sami S, Mohamed B. Time-varying nonsingular terminal sliding mode control of autonomous surface vehicle with predefined convergence time[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 263: 112264.
- [8] Zheng Z, Huang Y, Xie L, et al. Adaptive trajectory tracking control of a fully actuated surface vessel with asymmetrically constrained input and output[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2017: 1–9.
- [9] Bao Z K, Zhu Q, Yang S H, et al. Ship heading model reference adaptive control and optimal control methods research[J]. *Applied Science and Technology*, 2022, 49(1): 8–14.
- [10] Zhu L Y, Li T S, Shan Q H. Optimal adaptive fuzzy control for ship course discrete-time systems[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2019, 40(9): 1576–1581.
- [11] Zhang C, Wang C, Wang J, et al. Neuro-adaptive trajectory tracking control of underactuated autonomous surface vehicles with high-gain observer[J]. *Applied Ocean Research*, 2020, 97(8): 102051.
- [12] Al-Awad N A. Model reference adaptive control-based genetic algorithm design for heading ship motion[J]. *Acta Polytechnica*, 2020, 60(3): 197–205.
- [13] Hamid N, Dharmawan W, Nambo H. Dynamic path planning for unmanned surface vehicles with a modified neuronal genetic algorithm[J]. *Applied System Innovation*, 2023, 6(6): 109.
- [14] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA II [J]. *IEEE Trans on Evolutionary Computation*, 2002, 6(2): 182–197.
- [15] Fossen T I. *Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control*[M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2011.
- [16] Johansen T A, Fossen T I. Efficient optimal constrained control allocation via multiparametric programming[J]. *Journal of Guidance Control & Dynamics*, 2005, 28(3): 506–515.
- [17] Khalil H K. *Nonlinear systems*[M]. Upper Saddle River: Dearson, 2002.