

本文网址: <http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03415>

期刊网址: www.ship-research.com

引用格式: 柳俊杰, 王健, 王幸, 等. 基于相对时变跟踪点位的无人艇目标跟踪策略[J]. 中国舰船研究, 2024, 19(1): 169–177.
LIU J J, WANG J, WANG X, et al. Target tracking strategy of unmanned surface vehicle based on relative time-varying tracking position[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2024, 19(1): 169–177 (in Chinese).

基于相对时变跟踪点位的 无人艇目标跟踪策略



扫码阅读全文

柳俊杰¹, 王健^{*1}, 王幸^{1,2}, 汪俊¹, 梁晓锋¹

1 上海交通大学 海洋智能装备与系统教育部重点实验室, 上海 200240

2 中国舰船研究设计中心, 湖北 武汉 430064

摘要: [目的] 无人艇(USV)进行目标跟踪时, 采用相对固定跟踪点位(RFTP)策略得到的参考轨迹含有拐点, 导致跟踪不稳定, 针对该问题提出相对时变跟踪点位(RTTP)策略以提高跟踪的稳定性。[方法] 首先, 使用一阶滞后滤波对目标艇艏向变化量进行处理; 然后, 根据滤波后的数据设计时变跟踪点位, 将目标跟踪问题转化为轨迹跟踪问题, 并得到参考轨迹; 最后, 使用模型预测控制(MPC)方法实现对目标艇的跟踪。[结果] 仿真结果表明, USV在RTTP策略下的跟踪效果更稳定, 跟踪距离均方根差(RMSE)下降了28.06%, 能耗降低了5.93%, 且控制量更加平稳。[结论] 相比传统的RFTP策略, 采用RTTP策略可有效提高USV目标跟踪的稳定性, 为USV的目标跟踪提供了新策略。

关键词: 无人艇; 目标跟踪; 相对固定跟踪点位; 相对时变跟踪点位

中图分类号: U664.82

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.03415

Target tracking strategy of unmanned surface vehicle based on relative time-varying tracking position

LIU Junjie¹, WANG Jian^{*1}, WANG Xing^{1,2}, WANG Jun¹, LIANG Xiaofeng¹

1 Key Laboratory of Marine Intelligent Equipment and System of Ministry of Education,

Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

2 China Ship Development and Design Center, Wuhan 430064, China

Abstract: [Objective] Target tracking is an important application of unmanned surface vehicles (USVs). This study proposes a relative time-varying tracking position (RTTP) strategy to improve the tracking stability and address the problem that the reference trajectory obtained by the relative fixed tracking position (RFTP) strategy contains inflection points and leads to tracking instability. [Methods] A first-order hysteresis filter is used to process the target USV's heading variation. The time-varying tracking position is then designed according to the filtered data, the target tracking problem is transformed into a trajectory tracking problem and the reference trajectory is obtained. Finally, model predictive control (MPC) is used to achieve the tracking of the target USV. [Results] The simulation experimental results show that the tracking effect of the USV under the RTTP strategy is more stable with the root mean square error (RMSE) of the tracking distance decreased by 28.06% and the energy consumption reduced by 5.93%. It also has advantages in the smoothness of the control volume. [Conclusions] Compared with the traditional RFTP strategy, the proposed RTTP strategy can effectively improve the stability of USV target tracking, giving it practical significance for the target tracking of USVs.

Key words: unmanned surface vehicle; target tracking; relative fixed tracking position strategy; relative time-varying tracking position strategy

收稿日期: 2023-06-17 修回日期: 2023-08-01 网络首发时间: 2024-02-05 21:13

基金项目: 上海交通大学深蓝计划资助项目(SL2022MS003)

作者简介: 柳俊杰, 男, 1998年生, 硕士生。研究方向: 无人艇路径规划与控制。E-mail: LJ69919981005@sjtu.edu.cn

王健, 男, 1989年生, 博士, 助理研究员。研究方向: 多航态海洋无人飞行器, 海洋多智能体协同控制。

E-mail: nsms_sjtu@sjtu.edu.cn

梁晓锋, 男, 1976年生, 博士, 研究员。研究方向: 水下无人系统总体设计。E-mail: liang_xiaofeng@sjtu.edu.cn

*通信作者: 王健

0 引言

随着人类对海洋资源的加速探索,水面无人艇(USV)在海洋物理环境监控、近海安全等科学领域发挥了越来越重要的作用^[1]。从作业场景来看,无人艇可用于执行拦截、监测、巡逻、目标跟踪等任务,其中,目标跟踪在军事和民用领域具有重要的应用价值^[2]。周鸿祥^[3]认为目标跟踪问题按对象可分为图像目标跟踪和实体目标跟踪,而实体目标跟踪可以分为沿目标轨迹跟踪和非目标轨迹跟踪,沿目标轨迹跟踪又可分为路径跟踪和轨迹跟踪。在限制区域内,尾随式跟踪场景下的实体目标跟踪问题,可通过设计最佳跟踪点位将目标跟踪问题转化为轨迹跟踪问题。

轨迹跟踪是指在设定时间内控制对象到达参考轨迹的设定位置,且参考轨迹一般与时间相关^[4]。在控制器设计方面,目前实现轨迹跟踪控制的方法主要有反步法、模糊控制、滑模控制(SMC)、模型预测控制(MPC)等^[5-6]。张昕^[7]针对欠驱动无人艇轨迹跟踪控制问题,结合反步法和 Lyapunov 非线性理论,通过引入动态滑模设计了欠驱动无人艇轨迹跟踪控制器,利用 Lyapunov 稳定性判据证明了无人艇所有的误差变量和虚拟控制变量是收敛的,但该方法没有考虑无人艇的输入输出限制。Elmokadem 等^[8]提出了一种基于终端滑模控制(TSMC)的控制器,用于解决欠驱动自主水下航行器在水平面内的轨迹跟踪问题,经仿真实验,验证了该控制器在有界环境干扰下的鲁棒性。陈天元等^[9]通过将轨迹跟踪问题简化成基于视线(LOS)法的艏向控制问题,设计显式 MPC 艏向控制器,提高了 MPC 的实时性,实现了轨迹跟踪控制,但该方法将无人艇纵荡速度取为常值,与实际情况不符。张丽珍等^[10]针对半潜式无人艇在导航航行过程中轨迹跟踪误差较大的问题,提出基于 MPC 的轨迹跟踪控制方法,使得半潜式无人艇的导航轨迹跟踪精度比原有 PID(比例-积分-微分)控制方法提高了 50% 左右,但该方法在建立 MPC 控制模型时只考虑了控制量约束而没有考虑状态量约束。在跟踪策略方面,何志强等^[11]提出基于区域人工势场的无人艇目标跟踪策略,通过构建限制跟踪区域的径向和切向势力场,使得区域内的最佳跟踪点为零势点,控制无人艇在限制跟踪区域内进行目标跟踪,并维持在最佳跟踪点位置附近,但该方法没有说明如何解决人工势场法存在局部极小值的问题。Jiang 等^[12]基于 LOS 法提出了一种针对目标包围任务的跟踪策

略,结合洋流观测器实现了围绕速度时变的运动目标的圆周运动,但设计的控制器形式复杂且参数整定困难。综上,无人艇轨迹跟踪问题策略的研究多集中在制导方面,而且鲜有研究考虑参考轨迹的生成。

本文将针对无人艇在限制区域内的尾随式跟踪问题,提出相对时变跟踪点位策略,建立限制区域内最佳跟踪点位与目标艇艏向角变化量之间的关系,解决相对固定跟踪点位策略在目标艇转向阶段因跟踪参考轨迹存在拐点而导致跟踪不稳定的问题。在控制器方面,考虑无人艇输入输出的限制,采用 MPC 控制方法进行无人艇仿真跟踪实验,通过两种跟踪策略得到参考轨迹,并从能耗、路径长度、跟踪效果等指标分析两种策略在跟踪稳定性方面的性能,再从统计学角度分析控制量数据的离散程度,探究两种策略下控制量平稳性的差异。

1 相对时变跟踪点位策略

1.1 任务场景

本文研究无人艇在理想环境条件下的跟踪问题。假设航行区域海面空旷,忽略外界干扰,无人艇可以感知到目标艇的相对位置和艏向角信息,目标跟踪方式为限制区域内尾随式跟踪。以目标艇为中心,设置最大、最小跟踪距离,当两船之间的距离大于最大跟踪距离时,无人艇离目标艇较远,对艇上感知设备的性能有影响,可能导致无法获取目标的精确信息,影响跟踪效果;当两者之间距离小于跟踪任务距离时,无人艇失去隐蔽性,两种情况下均认为跟踪任务失败。

根据限制区域尾随式跟踪的定义,跟踪任务场景的建模如图 1 所示。首先,以目标艇为中心,分别以最大跟踪距离 L_1 和最小跟踪距离 L_2 绘制圆;然后,为防止无人艇在跟踪过程中因艏向角变化剧烈而引起回转半径变大导致跟踪目标丢失,以目标艇艏向为中心,在目标艇后方对称设置一个扇环偏角 θ ,且认为在此偏角内目标丢失的概率较小;最后,无人艇的跟踪区域被限定在一个开角为 2θ 、外径为 L_1 内径为 L_2 的扇环域内。

1.2 跟踪策略

对于上述任务场景下的跟踪问题,通常将扇环域中心位置作为最佳跟踪点位,而且位于无人艇正后方、艏向角反向延长线上并距离目标艇 $(L_1 + L_2)/2$ 处,即图 1 中 A 点。该距离也是期望的跟踪距离,跟踪点的位置可由式(1)计算:

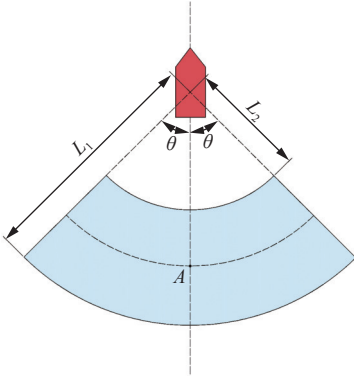


图 1 跟踪区域示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the tracking area

$$\begin{cases} x_{tra} = x_{tar} - \frac{(L_1 + L_2)}{2} \cos \varphi_{tar} \\ y_{tra} = y_{tar} - \frac{(L_1 + L_2)}{2} \sin \varphi_{tar} \end{cases} \quad (1)$$

式中: (x_{tra}, y_{tra}) 为设计的最佳跟踪点位; (x_{tar}, y_{tar}) 为目标艇的位置; φ_{tar} 为目标艇的艏向角。该方法得到的跟踪点位相对于目标艇位置固定, 本文称之为相对固定跟踪点位 (relative fixed tracking position, RFTP) 策略。

RFTP 策略的弊端在于: 当目标艇进行大机动转向时, 艏向角变化程度剧烈, 跟踪点位会发生较大偏移, 无人艇初期的艏向变化方向与目标艇的艏向变化方向相反, 如图 2 所示。当目标艇从 P_1 点运动到 P_2 点时, 目标艇的艏向变化方向为逆时针方向, 而最佳跟踪点沿顺时针方向从 A_1 点偏移至 A_2 点。为了保证跟踪上目标点位, 无人艇艏向在当前基础上会沿顺时针方向偏移, 但之后无人艇为保持与目标艇艏向大致在同一方向上, 艏向角要沿逆时针方向变化。在此过程中, 无人艇艏向经历了“先反向背离目标艇艏向变化方向, 再回正方向, 然后跟踪目标艇艏向”的过程。这种方式增大了无人艇艏向变化的幅度, 增大了跟踪任务失败的风险。

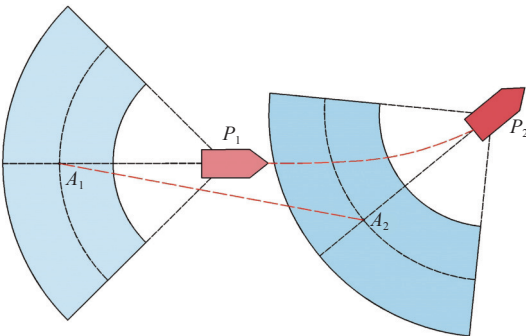


图 2 RFTP 策略跟踪过程

Fig. 2 Trajectory tracking process under the RFTP strategy

图 3 为 RFTP 策略得到的参考轨迹示意图。由图可知, 以目标艇转向结束为时间节点, 在转

向结束前, 参考轨迹较为平滑且没有艏向角突变, 但当目标艇转向趋于结束并保持艏向继续航行时, 参考轨迹中出现“拐点” (虚线矩形框), 这意味着无人艇在 RFTP 策略下的参考轨迹时面临艏向角突变的问题, 无法稳定地跟踪目标艇。

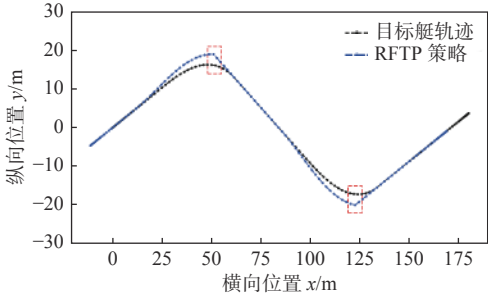


图 3 RFTP 策略所得参考轨迹

Fig. 3 Reference trajectory under the RFTP strategy

针对 RFTP 策略的弊端, 本文提出相对时变跟踪点位 (relative time-varying tracking position, RTTP) 策略, 该策略可使跟踪点位相对于目标艇艏向延长线方向按照一定规律向两侧偏移一定角度, 充分利用扇环域的约束空间, 从而有利于跟踪参考轨迹接近目标艇实际航行轨迹, 避免参考轨迹拐点的影响。在此过程中, 核心步骤是偏移角的设计, 经分析后, 设计了如式 (2) 所示偏移角形式。

$$\begin{cases} \alpha = -\text{sign}(\Delta\varphi)\theta(1 - e^{-K|\Delta\varphi|}) \\ \text{sign}(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x = 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

式中: α 为跟踪点偏移角度; $\Delta\varphi$ 为艏向角变化量; $\text{sign}(x)$ 为符号函数; $K \in \mathbf{R}^+$, 为调节参数。

偏移角的设计, 需要考虑以下几点因素:

- 1) 偏移角应小于扇环偏角 θ , 否则跟踪点将超出扇环区域导致跟踪失败;
- 2) 目标艇的 $\Delta\varphi$ 越大, 表示目标艇艏向角变化幅度越大, 相应偏移角 α 越大, 即偏移角大小与 $\Delta\varphi$ 正相关;
- 3) 当 $\Delta\varphi > 0$ 时, 目标艇顺时针转向, 此时要求 $\alpha < 0$ 。同理, 当 $\Delta\varphi < 0$ 时, $\alpha > 0$; 当 $\Delta\varphi = 0$ 时, $\alpha = 0$, 表示目标艇直行, 跟踪点不发生偏移, 在目标艇正后方。

无人艇与目标艇之间的绝对方位角 φ_R 、目标艇的艏向角 φ_{tar} 之间的关系为

$$\varphi_R = \varphi_{tar} + \alpha \quad (3)$$

RTTP 策略下无人艇跟踪点的位置可由式 (4) 计算:

$$\begin{cases} x_{tra} = x_{tar} - \frac{(L_1 + L_2)}{2} \cos \varphi_R \\ y_{tra} = y_{tar} - \frac{(L_1 + L_2)}{2} \sin \varphi_R \end{cases} \quad (4)$$

图 4 为前文所述两种不同跟踪点设计策略得到的跟踪参考轨迹对比图。由图可知,在目标艇转向前期,RTTP 策略得到的参考轨迹比 RFTP 策略得到的参考轨迹更接近目标艇的轨迹,说明偏移角的设计是合理的。通过偏移可以改善参考轨迹的形状,使之与目标艇的运动轨迹更相似,避免无人艇在跟踪过程中艏向角“先反向背离目标艇,再回正方向跟踪目标艇”,降低无人艇艏向角变化幅度,有利于无人艇稳定地跟踪目标艇。

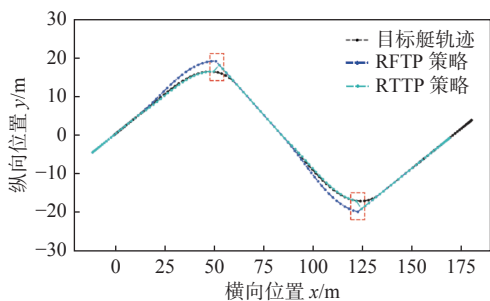


图 4 不同跟踪策略下的参考轨迹

Fig. 4 Reference trajectories under various tracking strategies

然而,在目标艇转向结束阶段,RTTP 策略得到的参考轨迹同 RFTP 策略一样也出现了拐点,但这种拐点本质上是一种跳跃点,产生的根本原因是相邻两次采样时目标艇的艏向角变化量 $\Delta\varphi$ 发生突变,如图 5 所示。

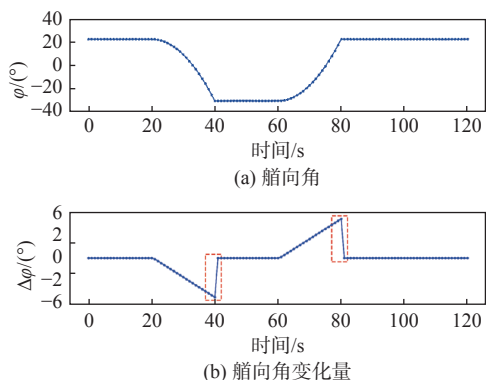


图 5 目标艇艏向角及其变化量

Fig. 5 Target USV's heading angle and its variation

由式(2)可知,偏移角是关于目标艇艏向角变化量 $\Delta\varphi$ 的连续函数,因此突变会传递到偏移角,经过式(3)传递到绝对方位角,进而影响到跟踪点位的计算。若相邻两次采样的 $\Delta\varphi$ 发生突变,则引起 φ_R 发生突变,导致跟踪点位发生跳跃。为消除目标艇艏向角变化量 $\Delta\varphi$ 突变的影响,有必要对采样数据进行平滑处理。

现有的数据平滑处理方式很多,考虑选择简

单、有效的方法,因此采用了比较常见的一阶滞后滤波法进行数据处理。一阶滞后滤波是对当前时刻的采样数据和前一时刻的滤波结果进行加权平均,计算得到新的滤波结果,计算方法为

$$Y(n) = aX(n) + (1-a)Y(n-1) \quad (5)$$

式中: $a \in (0,1)$, 为权重因子; $Y(n-1)$ 为前一时刻的滤波结果; $X(n)$ 为当前时刻的采样数据; $Y(n)$ 为当前时刻的滤波结果。采用一阶滞后滤波方法对图 5 的目标艇艏向角变化量 $\Delta\varphi$ 进行数据平滑处理,结果如图 6 所示。经过滤波处理后,目标艇 $\Delta\varphi$ 突变的问题得到解决,可从极值逐步变化到 0 值,并且数据由极值过渡到 0 值的变化规律与原始数据相似。使用滤波后的数据,并结合式(2)~式(4)求出跟踪点位,可得到图 7 所示的参考轨迹。显然,对采样数据进行平滑处理后,再结合 RTTP 策略得到的参考轨迹几乎与目标艇的运动轨迹一致,参考轨迹不存在拐点。

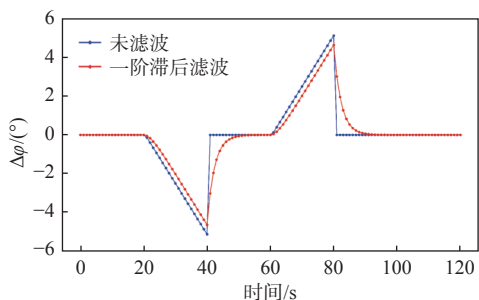


图 6 滤波后目标艇艏向角变化量

Fig. 6 Variation of the target USV's heading after filtering

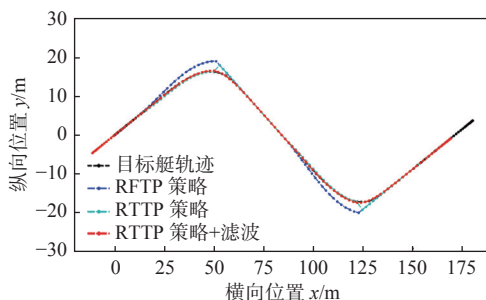


图 7 滤波前、后参考轨迹

Fig. 7 Reference trajectories before and after filtering

综合以上分析可知,本文所提的 RTTP 策略,主要包括两个重要部分:一是使用一阶滞后滤波对采样所得的目标艇艏向角变化量进行数据平滑处理,有助于消除参考轨迹中的拐点;二是通过设计偏移角建立最佳跟踪点位与目标艇艏向角变化量之间的关系,得到跟踪参考轨迹。

2 跟踪控制算法模型

2.1 无人艇数学模型

欠驱动水面船舶是指在缺少横向推力的情况

下只依靠纵向推力和转艏力矩(控制自由度小于船舶运动自由度)来控制运动的一类水面船舶,其是海上和内河航行的主要船舶类型。在欠驱动无人艇的航行过程中,主要关注附体坐标系中的纵向、横向运动和转艏运动,通常忽略升沉、纵向转动以及横向转动,因此对其动力学模型进行一定的简化处理,仅考虑无人艇横荡、纵荡和艏摇这 3 个自由度的动力学响应^[13]。参考 Fossen^[14]提出的简化水面船舶状态空间模型,本文无人艇动力学模型为:

$$\begin{cases} \dot{\eta} = J(\eta)v \\ M\dot{v} + C(v)v + D(v)v = \tau \end{cases} \quad (6)$$

其中,

$$J(\eta) = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, M = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & 0 \\ 0 & 0 & m_{33} \end{bmatrix}$$

$$C(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -m_{22}v \\ 0 & 0 & m_{11}u \\ m_{22}v & m_{11}u & 1 \end{bmatrix}, D(v) = \begin{bmatrix} d_{11} & 0 & 0 \\ 0 & d_{22} & 0 \\ 0 & 0 & d_{33} \end{bmatrix}$$

式中: $\eta = [x, y, \varphi]^T$, 为位置状态量(其中, x, y 为无人艇在北东地坐标系(NED)下的位置, φ 为无人艇的艏向角); $v = [u, v, r]^T$, 为速度状态量(其中 u, v, r 分别为无人艇的纵向、横向线速度和艏摇角速度); $\tau = [\tau_u, \tau_r]^T$, 为输入(其中 τ_u, τ_r 分别为纵向推力和转艏力矩); $J(\eta)$ 为坐标转换矩阵; M 为考虑附加质量在内的惯性矩阵; $C(v)$ 为科里奥利向心力矩阵; $D(v)$ 为阻尼矩阵; m_{11}, m_{22}, m_{33} 为无人艇的惯性系数; d_{11}, d_{22}, d_{33} 为无人艇阻尼系数。

本文研究无人艇的轨迹跟踪问题,系统的输出量为无人艇的位置坐标。记 X 为系统的状态, $X = [x, y, \varphi, u, v, r]^T$, Y 表示系统的输出, $Y = [x, y]^T$, U 为控制输入, $U = [\tau_u, \tau_r]^T$ 。无人艇轨迹跟踪问题的状态空间方程表示为:

$$\dot{X} = A(X) \cdot X + BU, Y = CX \quad (7)$$

式中: $A(X)$ 为关于状态量 X 的状态转移矩阵; B 为控制输入矩阵; C 为输出矩阵。具体形式如下:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{d_{22}}{m_{11}} & \frac{m_{22}}{m_{11}}r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{m_{11}}{m_{22}}r & -\frac{d_{22}}{m_{22}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{m_{11}}{m_{33}}v & -\frac{m_{22}}{m_{33}}u & \frac{d_{33}}{m_{33}} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{1}{m_{11}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{m_{33}} \end{bmatrix}^T$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

2.2 模型预测控制

2.2.1 系统模型离散化

预测模型是优化控制问题的基础,一般由系统的数学模型经离散化得到,主要作用是根据 k 时刻的系统状态和控制输入预测 $k+1$ 时刻的系统状态,结合 $k+1$ 时刻的控制输入预测 $k+2$ 时刻的系统状态。依次类推,可以得到由 N_c 个控制输入预测的 N_p 个系统状态。考虑到对未来有限个时刻的预测是基于当前时刻系统状态的递推得到,因此对无人艇的数学模型进行离散处理。使用前向欧拉法对式(7)所示的无人艇数学模型进行离散处理,可推导出用于预测未来时刻系统状态和输出的递推关系式:

$$\begin{aligned} X(k+1) &= [I_6 + \Delta t \cdot A_k] \cdot X(k) + BU(k) \\ Y(k+1) &= CX(k+1) \end{aligned} \quad (8)$$

式中: I_6 为六阶单位矩阵; A_k 为 k 时刻系统的状态转移矩阵; $U(k)$ 为 k 时刻系统的控制输入; Δt 为离散时间间隔。

2.2.2 目标函数设计

目标函数是模型预测控制优化求解环节的依据,通常考虑输出准确性指标和控制平稳性指标。本文研究无人艇的轨迹跟踪问题,要求无人艇的实际运动轨迹尽量贴合参考轨迹,因此准确性指标 $J_1(k)$ 定义为 k 时刻得到的预测时域内的输出量 $[Y_{\text{pre}}(k+1|k), Y_{\text{pre}}(k+1|k), \dots, Y_{\text{pre}}(k+N_p|k)]$ 与参考值 $[Y_{\text{ref}}(k+1|k), Y_{\text{ref}}(k+1|k), \dots, Y_{\text{ref}}(k+N_p|k)]$ 差值的平方之和:

$$J_1(k) = \sum_{i=1}^{N_p} \|Y_{\text{ref}}(k+i|k) - Y_{\text{pre}}(k+i|k)\|^2 \quad (9)$$

式中, N_p 为预测的状态量序列长度。

针对平稳性指标,要求无人艇在航行过程中控制输入的变化情况尽可能平稳,避免纵向推力和转艏力矩的突变,即控制输入增量的积分最小,因此将平稳性指标 $J_2(k)$ 定义为控制时域内相邻两控制量差值的平方和:

$$J_2(k) = \sum_{i=1}^{N_c} \|U(k+i|k) - U(k+i-1|k)\|^2 = \sum_{i=1}^{N_c} \|\Delta U(k+i|k)\|^2 \quad (10)$$

式中: N_c 为控制序列的长度; $\mathbf{U} = [\tau_u, \tau_r]$, 为控制输入, 当 $i = 1$ 时, $\mathbf{U}(k|k)$ 为系统状态从 $k-1$ 时刻过渡到 k 时刻作用的控制输入, 也是以 k 时刻作为初始状态时的初始输入, 同理, $\mathbf{U}(k+1|k)$ 为在 k 时刻做预测时, 系统状态由 k 时刻过渡到 $k+1$ 时刻的控制输入。

综合考虑两部分指标对无人艇轨迹跟踪控制性能的影响, 对二者进行加权求和得到总的性能指标函数。此外, 由于自变量个数和约束条件较多, 且预测模型是非线性的, 增加了优化问题求解的难度, 求解算法不能保证在每个优化过程中都得到最优解。为避免这一问题, 目前普遍采用且较为有效的解决办法是在目标函数中引入松弛因子^[15], 最终的目标函数形式如式(11)所示。

$$J(k) = \sum_{i=1}^{N_p} \|\mathbf{Y}_{\text{ref}}(k+i|k) - \mathbf{Y}_{\text{pre}}(k+i|k)\|_Q^2 + \sum_{i=1}^{N_c} \|\Delta \mathbf{U}(k+i|k)\|_R^2 + \sum_{i=1}^{N_p} \|\boldsymbol{\varepsilon}_i - \boldsymbol{\varepsilon}_{i,c}\|_\rho^2 \quad (11)$$

式中: $\|\boldsymbol{\varepsilon}_i - \boldsymbol{\varepsilon}_{i,c}\|_\rho^2$ 是约束罚项, 其中, $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为约束变量, $\boldsymbol{\varepsilon}_c$ 为约束区域中心; ρ 为松弛因子, 取值为非负实数, 用于控制罚项在目标函数中的影响程度。

2.2.3 约束条件设置

在无人艇实际航行过程中, 执行机构的能力通常有限, 无人艇自身的性能也有极限, 因此有必要对算法的控制量、控制量增量和状态量施加约束。参考柳晨光等^[16]的研究成果, 本文对约束条件的设置如下所示。

控制量约束:

$$\mathbf{U}_{\min} \leq \mathbf{U}_i(k+i|k) \leq \mathbf{U}_{\max} \quad i = 1, 2, \dots, N_c \quad (12)$$

控制增量约束:

$$\Delta \mathbf{U}_{\min} \leq \Delta \mathbf{U}_i(k+i|k) \leq \Delta \mathbf{U}_{\max} \quad i = 1, 2, \dots, N_c \quad (13)$$

状态量约束:

$$\tilde{\mathbf{X}}_{\min} \leq \tilde{\mathbf{X}}(k+i|k) \leq \tilde{\mathbf{X}}_{\max} \quad i = 1, 2, \dots, N_p \quad (14)$$

式中, $\tilde{\mathbf{X}} = [\varphi, u, v, r]$, 为部分状态量。

综合以上分析, 基于 MPC 的无人艇目标跟踪控制算法模型可表示为:

$$\begin{aligned} \min J(k) = & \sum_{i=1}^{N_p} \|\mathbf{Y}_{\text{ref}}(k+i|k) - \mathbf{Y}_{\text{pre}}(k+i|k)\|_Q^2 + \\ & \sum_{i=1}^{N_c} \|\Delta \mathbf{U}(k+i|k)\|_R^2 + \sum_{i=1}^{N_p} \|\boldsymbol{\varepsilon}_i - \boldsymbol{\varepsilon}_{i,c}\|_\rho^2 \\ \text{s.t. } & \mathbf{U}_{\min} \leq \mathbf{U}_i(k+i|k) \leq \mathbf{U}_{\max} \\ & \Delta \mathbf{U}_{\min} \leq \Delta \mathbf{U}_i(k+i|k) \leq \Delta \mathbf{U}_{\max} \\ & \tilde{\mathbf{X}}_{\min} \leq \tilde{\mathbf{X}}(k+j|k) \leq \tilde{\mathbf{X}}_{\max} \\ & i = 1, 2, \dots, N_c; j = 1, 2, \dots, N_p \end{aligned} \quad (15)$$

3 仿真实验与结果分析

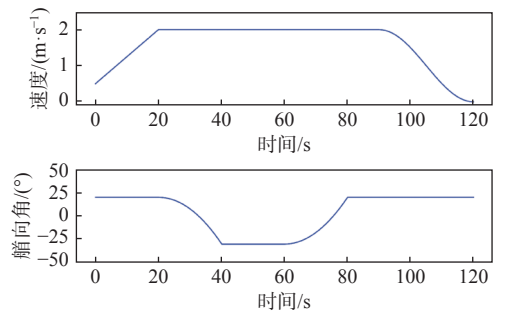
本文使用相同的控制方法和无人艇模型, 采用两种跟踪策略, 实现目标艇对参考轨迹的跟踪。仿真实验的设计思路如下: 首先, 设计目标艇运动的速度和艏向角变化规律, 得到目标艇的运动轨迹; 然后, 分别依据传统的 RFTP 策略和本文所提的 RTTP 策略得到跟踪艇运动的参考轨迹, 并使用 MPC 控制方法分别完成无人艇对两种参考轨迹的跟踪; 最后, 对两种策略下无人艇轨迹跟踪的效果进行对比分析, 比较两种跟踪策略的优劣。

3.1 仿真工况设定

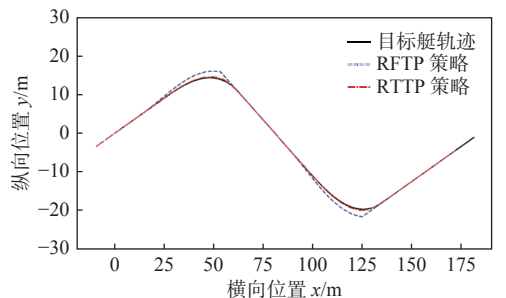
仿真实验中所用无人艇模型的部分参数取值为: $m_{11} = 200 \text{ kg}$, $m_{22} = 250 \text{ kg}$, $m_{33} = 80 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $d_{11} = 70 \text{ kg/s}$, $d_{22} = 100 \text{ kg/s}$, $d_{33} = 50 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$, 纵向推力和转舵力矩范围分别为:

$$\begin{cases} -300 \text{ N} < \tau_u < 300 \text{ N} \\ -100 \text{ N} \cdot \text{m} < \tau_r < 100 \text{ N} \cdot \text{m} \end{cases} \quad (16)$$

设定目标艇最大运动速度为 2 m/s , 运动速度和艏向角变化如图 8(a) 所示, 得到目标艇的轨迹和参考轨迹如图 8(b) 所示。无人艇的初位置设定在初始期望跟踪位置附近, 跟踪区域最大、最小距离分别为: $L_1 = 12 \text{ m}$, $L_2 = 8 \text{ m}$, 期望跟踪距离为 10 m , 扇环偏角 $\theta = 30^\circ$, 控制时域 $N_c = 3$, 预测时域 $N_p = 7$, 目标函数的权重系数分别设置为



(a) 目标艇速度和艏向角变化



(b) 参考轨迹

图 8 目标艇运动及相关轨迹的参考工况

Fig. 8 Reference working conditions for target vessel motion and associated trajectories

$Q = \text{diag}(1\ 000, 1\ 000)$, $R = \text{diag}(0.1, 0.1)$, 无人艇的初始状态为: $X(0) = [-9.4, -3.4, 0, 0, 0, 0]^T$, 控制量初值为 $U(0) = [20, 5]^T$ 。仿真时长为 120 s。

3.2 仿真结果及分析

3.2.1 跟踪稳定性分析

该工况下得到的无人艇实际跟踪结果如图 9 所示。其中, 图 9(a) 为跟踪轨迹对比, 在目标艇运动初期, 两种策略下无人艇的实际运动轨迹与参考轨迹基本重合, 说明 MPC 控制器具备完成跟踪任务的能力, 验证了其性能。实际跟踪轨迹表明: 由 RFTP 策略得到的参考轨迹在目标艇转向时存在拐点, 使得无人艇在轨迹跟踪过程中产生艏向角突变, 导致无人艇运动偏离参考轨迹, 在参考轨迹两侧反复调整艏向; 而无人艇在 RTTP 策略下, 实际运动轨迹与参考轨迹基本重合, 保持稳定跟踪。图 9(b) 为无人艇与目标艇间跟踪相对距离的变化图, 目标艇采用 RFTP 策略时相对距离发生明显变化, 而 RTTP 策略的跟踪相对距离在收敛后始终稳定在期望值 10 m。图 9(c) 为无人艇与目标艇间跟踪相对方位角的变化情

况, 该角度并未超出扇环域偏角。结合图 9(b) 可知, 无人艇在跟踪过程中均未脱离限制区域, 说明两种跟踪策略下无人艇均可完成跟踪任务, 但在跟踪相对距离稳定性方面, RTTP 策略更优。

为比较两种策略的性能, 本文从路径长度、能耗、跟踪距离等方面来分析跟踪效果, 相关指标的计算结果及对比如表 1 所示。

表 1 两种策略下的跟踪结果分析						
Table 1 Analysis of tracking results under the two strategies						
	能耗/J	轨迹长度/m		跟踪距离/m		
		参考	实际	平均值	RMSE	最大距离
RFTP	27 379.25	197.42	201.18	10.13	0.36	11.03
RTTP	25 755.92	195.27	196.75	10.05	0.26	10.09
变化/%	-5.93				-28.06	

从能耗来看, 若仅考虑纵向推力的能耗, 将纵向推力乘以速度后对时间积分, 可得能耗值, 无人艇采用 RFTP 策略的能耗为 27 379.25 J, RTTP 策略的能耗为 25 755.92 J, 下降了 5.93%。从路径长度来看, RFTP 策略和 RTTP 策略得到的参考轨迹的路径长度分别为 197.42 和 195.27 m, 实际跟踪轨迹路径长度分别为 201.18 和 196.75 m, 虽然二者相差均不明显, 但 RTTP 策略得到的参考轨迹和实际跟踪轨迹路径长度均略小。从跟踪距离来看, RFTP 策略下跟踪距离的平均值为 10.13 m, 均方根差(RMSE)为 0.36 m, 稳定收敛后跟踪距离的最大值为 11.03 m; 而 RTTP 策略下跟踪距离的平均值为 10.05 m, RMSE 为 0.26 m, 稳定收敛后跟踪距离的最大值为 10.09 m。无论是跟踪距离平均值还是稳定收敛后的最大跟踪距离, RTTP 策略下的结果都较 RFTP 策略更小, 且跟踪距离的 RMSE 下降了 28.06%, 这说明 RTTP 策略在跟踪距离稳定性方面的性能更优。

3.2.2 控制平稳性分析

图 10 和图 11 分别描述了两两种跟踪策略下无人艇状态量和控制量的变化情况。

由图 10 可知: 目标艇在 0~20 s 内开始变速直线运动, 此时两种策略下无人艇速度和艏向角的变化规律基本一致, 并逐渐趋近于目标艇速度和艏向角的变化规律; 目标艇在 20~100 s 内开始匀速运动, 无人艇在 RFTP 策略下跟踪参考轨迹时, 速度曲线发生振荡, 经过不断调整后恢复到与目标艇速度一致, 而无人艇在 RTTP 策略下, 其速度始终保持与目标艇速度基本一致, 体现了跟踪速度上的稳定性。从艏向角的变化情况来看, 在实现稳定跟踪后, 无人艇在 RTTP 策略下, 艏向

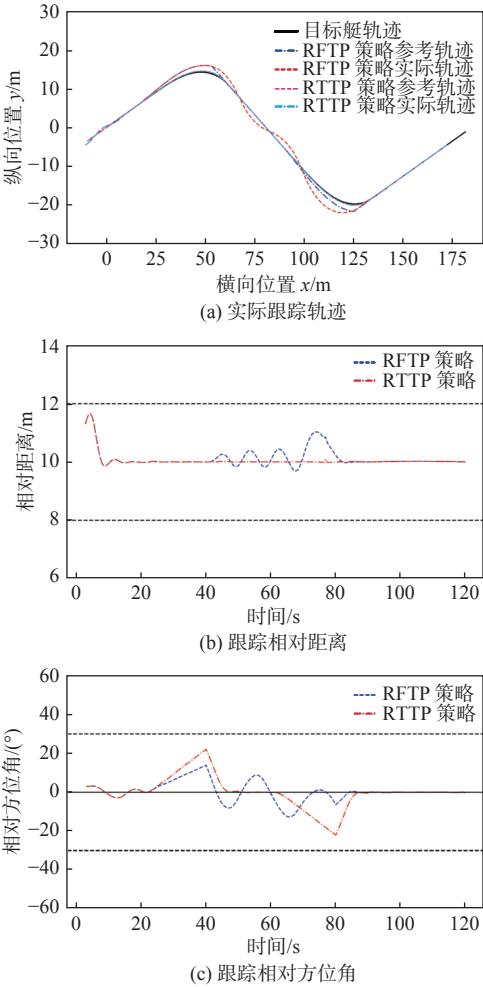


图 9 跟踪结果对比

Fig. 9 Comparison of tracking results

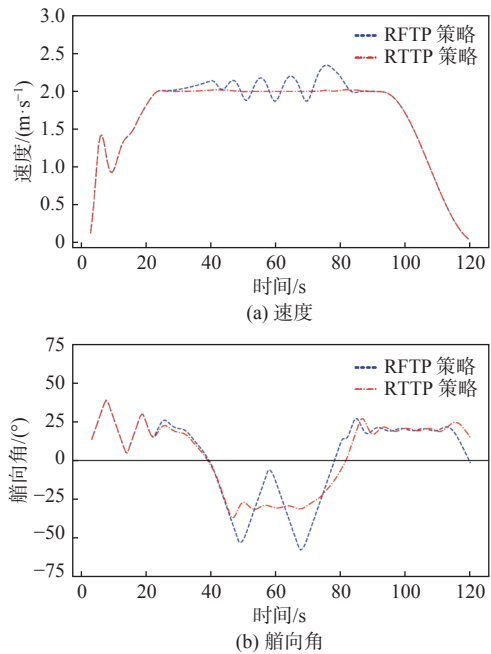


图 10 无人艇状态量
Fig. 10 USV's status volume

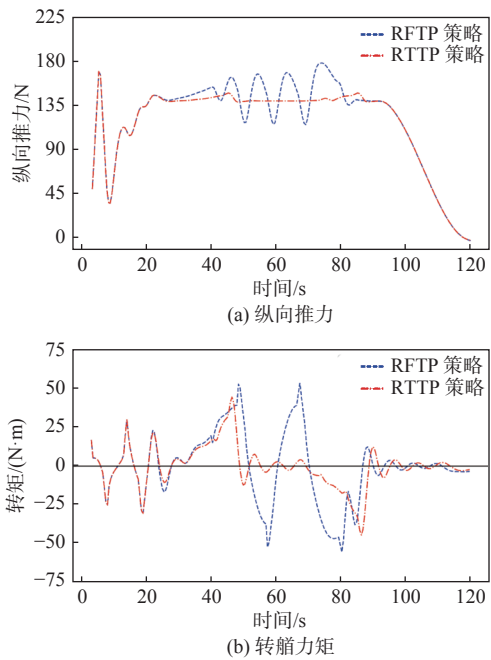


图 11 无人艇控制量
Fig. 11 USV's control volume

角变化规律与目标艇的艏向角变化规律几乎一致，基本稳定在目标艇艏向角附近，而在 RFTP 策略下，在 40~70 s 内无人艇艏向角变化剧烈，起伏较大，艏向角变化不够稳定。

由图 11 可知，在 RTTP 策略下，无人艇的纵向推力和转艏力矩的变化情况更加柔和，突变的范围较小，有利于执行机构的控制。

为进一步说明跟踪策略对执行机构的影响，从极差、标准差和四分位差这 3 个数据特征值分析仿真结果的纵向推力和转艏力矩。极差可描述

一组数据的离散程度，反映变量分布的变异范围和离散幅度。极差越大，离散程度越大；反之，离散程度越小。标准差是一组数据平均值分散程度的度量，标准差越大，代表大部分数值与平均值间的差异越大；标准差越小，代表这些数值较接近平均值。四分位差不受极值的影响，其反映了中间 50% 的数据的离散度，数值越小，说明中间的数据越集中；数值越大，说明中间的数据越分散。对纵向推力数据和转艏力矩数据进行上述分析，结果如表 2 所示，并得到图 12 所示的柱状图。

表 2 控制量数据分析

Table 2 Analysis of control volume data

	纵向推力/N			转艏力矩/(N·m)		
	极差	标准差	四分位差	极差	标准差	四分位差
RFTP	181.29	45.51	38.98	108.67	22.20	21.29
RTTP	172.25	42.04	30.98	88.95	13.37	9.10
变化/%	-4.98	-7.63	-20.50	-18.15	-39.78	-57.24

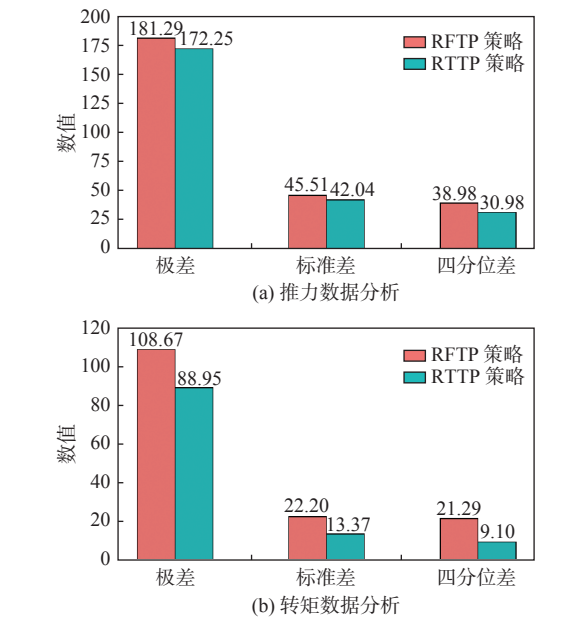


图 12 控制量数据分析
Fig. 12 Analysis of control volume data

根据表 2 的结果可知，RTTP 策略下纵向推力和转艏力矩的极差较 RFTP 策略分别下降 4.98% 和 18.15%，说明 RTTP 策略下控制量的变异程度更低，数据离散程度低；同时 RTTP 策略控制量的标准差也分别下降了 7.63% 和 39.78%，说明 RTTP 策略的控制量数据与均值相比更加集中。离散程度小意味着变化幅度较小，其中转艏力矩的标准差的下降程度尤为明显，可推知无人艇在轨迹跟踪过程中操舵的幅度大为减小，通过小幅度的操舵即可完成跟踪任务。四分位差反映中间 50% 的数据量的离散程度，不考虑初始状态影响跟踪效果，因此更具有代表性。据表可知 RTTP 策略

下控制量数据的四分位差较 RFTP 策略分别下降了 20.50% 和 57.24%, 转艏力矩四分位差下降得极为明显。综上所述, 无人艇采用 RTTP 策略相比 RFTP 策略, 控制量变化平缓且数据更加集中, 控制量超过执行机构输出能力的风险更低, 对执行机构的运转更加有利。

因此, 无人艇在 RTTP 策略下跟踪参考轨迹时, 不仅在跟踪效果的稳定性方面具有明显效果, 而且在控制平稳性方面也具有显著优势。

4 结 论

为解决无人艇的目标跟踪问题, 本文建立了限制区域尾随式跟踪任务场景, 分析了 RFTP 策略的不足, 创新性地提出了 RTTP 策略, 改善了跟踪参考轨迹; 然后, 以三自由度欠驱动无人艇为对象, 使用 MPC 进行仿真实验。从跟踪稳定性和控制平稳性的角度对实验结果进行分析, 结果证明了本文所提方法的有效性。得到的结论如下:

1) 所提 RTTP 的参考轨迹设计方式将实体目标跟踪问题转化为轨迹跟踪问题, 可解决 RFTP 策略存在拐点而导致目标跟踪不稳定的不足, 提高无人艇目标跟踪任务的稳定性。

2) 通过分析使用 MPC 对两种策略设计的仿真实验结果, 验证了 RTTP 策略在提高目标跟踪稳定性方面具有明显效果, 以及在控制平稳性方面的优势。

本文使用 MPC 控制器结合非线性系统完成了目标跟踪控制, 跟踪效果较好。未来将深入研究线性和非线性系统在该任务场景下的差异, 探究 MPC 控制器参数与轨迹跟踪效果间的关系。

参考文献:

[1] 王石, 张建强, 杨舒卉, 等. 国内外无人艇发展现状 & 典型作战应用研究 [J]. *火力与指挥控制*, 2019, 44(2): 11–15. WANG S, ZHANG J Q, YANG S H, et al. Research on development status and combat applications of USVs in Worldwide[J]. *Fire Control & Command Control*, 2019, 44(2): 11–15 (in Chinese).

[2] 初庆栋, 尹羿博, 龚小旋, 等. 基于双偶极向量场的欠驱动无人船目标跟踪制导方法 [J]. *中国舰船研究*, 2022, 17(4): 32–37. CHU Q D, YIN Y B, GONG X X, et al. Method for target tracking and guidance of under-actuated unmanned surface vehicle based on two-dimensional dipolar vector field[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2022, 17(4): 32–37 (in Chinese).

[3] 周鸿祥. 无人艇的目标跟踪策略研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018. ZHOU H X. Research on target tracking strategy for unmanned surface vehicle[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018 (in Chinese).

[4] LEFEBER E, PETTERSEN K Y, NIJMEIJER H. Track-

ing control of an underactuated ship[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2003, 11(1): 52–61.

[5] 杨宇. 欠驱动无人水面艇轨迹跟踪控制研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2021. YANG Y. Research on trajectory tracking control of underactuated unmanned surface vessel[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2021 (in Chinese).

[6] 刘佳伦, 谢玲利, 李诗杰, 等. 面向船舶智能航行测试的变稳船控制系统设计 [J]. *中国舰船研究*, 2023, 18(3): 38–47, 74. LIU J L, XIE L L, LI S J, et al. Design of variable stability ship control system for ship intelligent navigation test[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2023, 18(3): 38–47, 74 (in both Chinese and English).

[7] 张昕. 欠驱动水面无人艇轨迹跟踪的反步滑模控制 [J]. *数字技术与应用*, 2020, 38(1): 170–173. ZHANG X. Backstepping sliding mode control for trajectory tracking of underactuated USV[J]. *Digital Technology and Application*, 2020, 38(1): 170–173 (in Chinese).

[8] ELMOKADEM T, ZRIBI M, YUCEF-TOUMI K. Terminal sliding mode control for the trajectory tracking of underactuated autonomous underwater vehicles[J]. *Ocean Engineering*, 2017, 129: 613–625.

[9] 陈天元, 袁伟, 俞孟蓁. 基于显式模型预测控制的无人船航迹控制方法 [J]. *船舶工程*, 2020, 42(9): 122–127. CHEN T Y, YUAN W, YU M H. Tracking control method for unmanned surface vehicle based on explicit model predictive control[J]. *Ship Engineering*, 2020, 42(9): 122–127 (in Chinese).

[10] 张丽珍, 高浩, 吴迪, 等. 基于 MPC 的半潜式无人艇导航轨迹跟踪控制研究 [J]. *全球定位系统*, 2020, 45(3): 63–70. ZHANG L Z, GAO H, WU D, et al. Research on trajectory tracking control of semi-submersible unmanned vehicle navigation based on MPC[J]. *GNSS World of China*, 2020, 45(3): 63–70 (in Chinese).

[11] 何志强, 专祥涛, 梁杰, 等. 基于区域人工势场的无人船目标跟踪策略研究 [J]. *中国造船*, 2023, 64(1): 236–245. HE Z Q, ZHUAN X T, LIANG J, et al. Research on target tracking strategy of unmanned surface vessel based on regional artificial potential field[J]. *Shipbuilding of China*, 2023, 64(1): 236–245 (in Chinese).

[12] JIANG Y, PENG Z H, WANG D, et al. Line-of-Sight target enclosing of an underactuated autonomous surface vehicle with experiment results[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 16(2): 832–841.

[13] 范云生, 王国峰, 赵永生. 无人水面艇运动建模与自主控制 [M]. 大连: 大连海事大学出版社, 2020: 45–47. FAN Y S, WANG G F, ZHAO Y S. Unmanned surface vehicle motion modeling and autonomous control [M]. Dalian: Dalian Maritime University Press, 2020: 45–47 (in Chinese).

[14] FOSSEN T I. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control[M]. Hoboken: Wiley, 2011: 152–153.

[15] 梁政焘, 赵克刚, 裴锋, 等. 基于 MPC 的智能车轨迹跟踪算法 [J]. *机械与电子*, 2019, 37(1): 66–70. LIANG Z T, ZHAO K G, PEI F, et al. The trajectory tracking algorithm of intelligent vehicle based on MPC[J]. *Machinery & Electronics*, 2019, 37(1): 66–70 (in Chinese).

[16] 柳晨光, 初秀民, 王乐, 等. 欠驱动水面船舶的轨迹跟踪模型预测控制器 [J]. *上海交通大学学报*, 2015, 49(12): 1842–1848, 1854. LIU C G, CHU X M, WANG L, et al. Trajectory tracking controller for underactuated surface vessels based on model predictive control[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2015, 49(12): 1842–1848, 1854 (in Chinese).