

# 基于MPC的USV自主航行仿真研究

陈国权<sup>1</sup>, 李裕钦<sup>2</sup>, 杨神化<sup>3</sup>

(1. 集美大学航海学院, 福建厦门 361021; 2. 集美大学航海学院, 福建厦门 361021;  
3. 集美大学航海学院, 福建厦门 361021)

**摘要:** 水面无人艇的主要任务包括按照设定航线循迹航行以及在面临复杂环境下能够安全经济地避开海上静态障碍物和/或动态障碍物并最终顺利到达目的地。本文基于模型预测控制的设计框架, 在船舶运动模型中充分考虑船舶的水动力特性以及风流等外界的干扰, 以航迹偏移量、航速变化量、碰撞危险度和规则符合度构造评价函数, 以无人艇执行机构的动力为约束条件, 设计实现了一种水面无人艇自主航行模型。通过仿真实验, 验证了所设计的控制算法可实现水面无人艇在期望航迹上的自主航行。

**关键词:** 模型预测控制; 水面无人艇; 航迹偏移量; 航速变化量; 避碰规则

**中图分类号:** P715 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-7649(2023)01-0083-07 **doi:** 10.3404/j.issn.1672-7649.2023.01.015

## Research on the simulation of USV autonomous navigation based on MPC

CHEN Guoquan<sup>1</sup>, LI Yuqin<sup>2</sup>, YANG Shenhua<sup>3</sup>

(1. Navigation College, Jimei University, Xiamen 361021, China; 2. Navigation College, Jimei University, Xiamen 361021, China;  
3. Navigation College, Jimei University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** The main tasks of unmanned surface vehicle include following a set route and being able to safely and economically avoid static and/or dynamic obstacles at sea in a complex environment and finally reach the destination smoothly. Based on the design framework of model predictive control, this paper fully considers the ship's hydrodynamic characteristics and additional disturbances such as wind and current in the ship motion model, and constructs the evaluation function based on track offset, speed variation, collision risk and rule compliance. Taking the power of the unmanned surface vehicle's executive mechanism as the constraint condition, the design and realization of an unmanned surface vehicle autonomous navigation model is achieved. The simulation experiment verifies that the involved control algorithm can realize the autonomous navigation of the unmanned surface vehicle on the desired trajectory.

**Key words:** model predictive control; unmanned surface vehicles; track offset; speed variation; COLREGs

## 0 引言

在计划航线上航行并对于航行时遇到的航行障碍物采取合理的避让措施是水面无人艇(unmanned surface vehicle, USV)的基本功能之一。海上避障避碰是实现USV自主航行的关键问题。

针对USV自主航行过程中的避碰问题国内外专家开展大量的研究, 形成了以速度障碍法<sup>[1-2]</sup>(velocity obstacles, VO)、人工势场法<sup>[3-4]</sup>(artificial potential field, APF)、遗传算法<sup>[5-6]</sup>(genetic algorithm, GA)、动态窗口法<sup>[7-8]</sup>(dynamic window, DW)和模型预测控制<sup>[9-12]</sup>(model predictive control, MPC)等为主的智能避碰决

策算法。其中遗传算法、速度障碍法和人工势场法在进行航路规划时通常不考虑船舶的动力学特性, 导致求解得到的避碰决策方案与实际船舶运动存在较大的差距; 动态窗口法虽然能够提供多种避让方案, 但存在不适用于动态环境的缺点。相比于遗传算法、速度障碍法、人工势场法和动态窗口法, MPC从船舶运动模型着手, 充分考虑船舶运动控制中的软硬件约束条件, 将避碰决策行为与控制策略结合起来, 因此能够较好满足USV的实际自主航行设计要求。

在使用MPC算法解决船舶智能避碰和自主航行问题的研究中, Johansen等<sup>[9]</sup>通过离散船舶航向偏转控制

收稿日期: 2021-12-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(面上)(51879119); 福建省自然科学基金-面上(2021J01822; 2022J01323)

作者简介: 陈国权(1981-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为船舶自动避碰与无人船。

序列的方式, 结合 MPC 算法并考虑部分《国际海上避碰规则》(international regulations for preventing collisions at sea, COLREGs) 实现了 ASV 的自主避碰决策。Eriksen 等<sup>[11-12]</sup>利用 MPC 与非线性规划模型结合, 将动态船舶、静态障碍物和 ASV 的航速大小作为模型约束实现了 ASV 在期望航迹上的自主航行。现有研究中均没有考虑船舶安全领域和风流对 ASV 在自主航行过程中的影响。

为了解决需要同时满足 USV 自身动力特性约束、风流影响、静态障碍物和动态障碍物的安全领域约束和避碰规则约束的 USV 自主航行问题, 本文提出一种基于 MPC 的 USV 自主航行模型。根据存在外界环境干扰的船舶动力学模型构造 MPC 的预测模型, 使得算法的解更符合 USV 的动力学特性; 通过 USV 自主航行过程中对于期望航迹的航迹偏移量、对于期望速度大小的航速变化量、碰撞危险度以及对于避碰规则中的 Rule-14 和 Rule-15 符合程度构造 MPC 的评价函数; 考虑自主航行过程中所遇到的航行障碍物 (主要包括静态障碍物和动态障碍物) 的安全领域和 USV 执行机构的动力输出构造该模型的约束条件。为了验证算法的可行性, 本文设定期望航迹和航行过程中的期望速度, 并随机设置静态障碍物和动态障碍物展开算法准确性验证。仿真结果表明, 该模型能够实现复杂水域内 USV 在设定的期望航迹上自主航行, 并在能够对所遭遇的一些静态障碍物或动态障碍物进行自主合理避碰。

## 1 USV 动力学模型

本文研究对象为 USV, 按照常规水面舰船的设计要求, 在动力学模型上进行一定简化处理, 即只考虑船舶纵荡、横荡和首摇 3 个自由度上的动力学响应。参考 Fossen<sup>[13]</sup>提出的船舶状态空间模型, USV 的动力学模型如下式:

$$\begin{cases} \dot{\eta} = R(\psi)v, \\ M\dot{v} + C(v)v + D(v)v = \tau + \omega. \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $\eta = [x, y, \psi]^T$  为 USV 在大地坐标系上的位置和航向;  $v = [u, v, r]^T$  为 USV 在附体坐标系上的线速度和转首速度。坐标系如图 1 所示<sup>[14]</sup>。

$R(\psi)$  为从附体坐标系到大地坐标系的转换矩阵, 计算如下式:

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

式中:  $M$  为计算船舶刚体质量和附加质量的矩阵, 计算式为

$$M = M_{RB} + M_A. \quad (3)$$

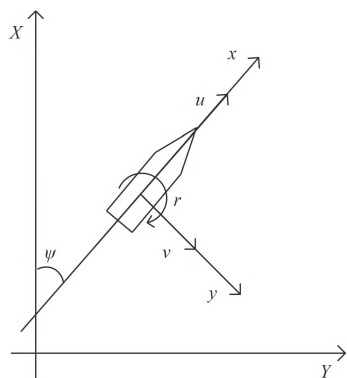


图 1 USV 的大地坐标系和附体坐标系示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the north-east frame and the body-fixed frame of USV

式 (3) 中的  $M_{RB}$  为船舶刚体质量矩阵, 计算如下式:

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix}. \quad (4)$$

式中:  $m$  为船舶的质量;  $I_z$  为船舶绕  $Z$  轴的转动惯量。

$M_A$  为船舶附加质量矩阵, 本文做了模型简化处理, 令  $M_A = 0$ 。

$C(v)$  是科里奥利力和向心力矩阵, 计算如下式:

$$C(v) = C(v)_{RB} + C(v)_A, \quad (5)$$

由于  $M_A = 0$  可得  $C(v)_A = 0$ 。  $C(v)_{RB}$  的计算如下式:

$$C(v)_{RB} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -mv \\ 0 & 0 & mu \\ mv & -mu & 0 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$D(v)$  表示系统的阻尼效应矩阵, 计算如下式:

$$D(v)v = D_L v + D_{NL}(v)v. \quad (7)$$

式中:

$$\begin{cases} D_L = \begin{bmatrix} X_u & 0 & 0 \\ 0 & Y_v & Y_r \\ 0 & N_v & N_r \end{bmatrix}, \\ D_{NL}(v)v = - \begin{bmatrix} X_{|u|u}|u|u + X_{uuu}u^3 \\ Y_{|v|v}|v|v + Y_{vvv}v^3 \\ N_{|r|r}|r|r + N_{vvv}v^3 \end{bmatrix}. \end{cases} \quad (8)$$

$\tau = [\tau_X, \tau_Y, \tau_N]^T$  分别表示船舶作用在  $X$ ,  $Y$  轴上的推力和在  $Z$  轴上的转船力矩。

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_X \\ \tau_Y \\ \tau_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_X \\ F_Y \\ lF_Y \end{bmatrix}. \quad (9)$$

式中,  $l$  为作用在  $F_Y$  的有效力臂。

$\omega$  为受外界环境因素影响的总和, 为了简化模型, 忽略波浪对船舶运动的影响, 着重考虑风、流对 USV 运动的影响。风流对船舶的动力学响应建模如下式:

$$\omega = \tau_w + \tau_{cu},$$

$$\tau_w = \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ N_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\rho_w V_w C_{WX}(\theta_w) A_{FW} \\ \frac{1}{2}\rho_w V_w C_{WY}(\theta_w) A_{LW} \\ \frac{1}{2}\rho_w V_w C_{WN}(\theta_w) A_{LWL} \end{bmatrix},$$

$$\tau_{cu} = \begin{bmatrix} X_{cu} \\ Y_{cu} \\ N_{cu} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\rho_{cu} V_{cu} C_{cuX}(\theta) A_F \\ \frac{1}{2}\rho_{cu} V_{cu} C_{cuY}(\theta) A_L \\ \frac{1}{2}\rho_{cu} V_{cu} C_{cuN}(\theta) A_F \end{bmatrix}. \quad (10)$$

式中:  $\tau_w$  为风载荷;  $\tau_{cu}$  为流载荷;  $\rho_w$  为空气密度;  $V_w$  为相对风速;  $\theta_w$  为相对风向角;  $A_{FW}$  为船舶水线以上正投影面积;  $A_{LW}$  为船舶水线以上侧投影面积;  $L$  为船舶长度;  $C_{WX}(\theta_w)$  和  $C_{WY}(\theta_w)$  分别为  $X$ 、 $Y$  轴上的风压力系数;  $C_{WN}(\theta_w)$  是绕  $Z$  轴的风压力矩系数;  $\rho_{cu}$  为流体密度;  $V_{cu}$  为流速;  $\theta$  为流向角;  $A_F$  为船舶水下部分正投影面积;  $A_L$  为船舶水下部分侧投影面积;  $C_{cuX}(\theta)$  和  $C_{cuY}(\theta)$  分别为  $X$ 、 $Y$  轴上的流载荷系数;  $C_{cuN}(\theta)$  是绕  $Z$  轴的流载荷转矩系数<sup>[15]</sup>。

## 2 算法基本原理

基于 MPC 的 USV 自主航行算法的基本原理包括预测模型、滚动优化和反馈校正<sup>[16]</sup>。

1) 预测模型是指在预测时域内根据 USV 动力学模型预测 USV 的运动状态;

2) 滚动优化是指利用评价函数和相关约束选择最优的控制输入  $\tau$ ;

3) 反馈校正是指 USV 在控制时域内执行控制输入序列后输出新的运动状态, 利用新的运动状态重新执行预测模型和滚动优化得到新的最优的控制输入。

算法基本流程如图 2 所示<sup>[17]</sup>。

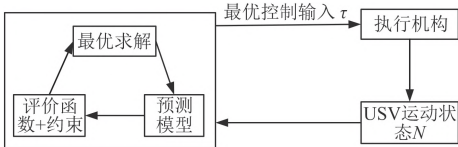


图 2 基于 MPC 的 USV 自主航行算法流程

Fig. 2 The flow chart of MPC based USV autonomous navigation algorithm

### 2.1 动态障碍航物运动轨迹预测

USV 在自主航行过程中遭遇的动态障碍物一般为动态船舶。针对动态船舶的未来轨迹进行准确预测非常困难。为了简化问题, 假定目标船舶以当前时刻的运动状态在未来做一个直线运动<sup>[18]</sup>。在  $t$  时刻目标船舶的位置预测方程如下:

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} x_T(t) \\ y_T(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_T(t_0) \\ y_T(t_0) \end{pmatrix} + \Delta t A \begin{pmatrix} u_T(t_0) \\ v_T(t_0) \end{pmatrix}, \\ \Delta t = t - t_0, \\ A = \begin{pmatrix} \cos(\psi_T) & -\sin(\psi_T) \\ \sin(\psi_T) & \cos(\psi_T) \end{pmatrix}. \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $[x_T(t), y_T(t)]^T$  为目标船舶在  $t$  时刻的位置;  $[x_T(t_0), y_T(t_0)]^T$  为目标船舶在  $t_0$  时刻的位置;  $\psi_T$  为目标船舶在  $t_0$  时刻的航向;  $[u_T(t_0), v_T(t_0)]^T$  为目标船舶在  $t_0$  时刻的纵荡速度和横荡速度。

### 2.2 静态障碍物建模

将 USV 自主航行过程中遇到的静态障碍物进行简单处理, 将障碍物所在的最小外接圆进行适当缩放, 并将该圆所在的外界边界作为 USV 的安全边界<sup>[19]</sup>, 如图 3 所示。

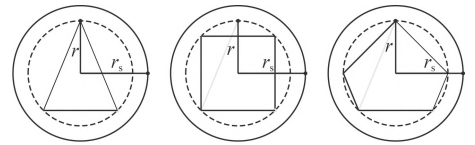


图 3 静态障碍物建模

Fig. 3 The model of static obstacle

静态障碍航物模型如下:

$$\begin{cases} (x_s - x_{s0})^2 + (y_s - y_{s0})^2 = r_s^2, \\ r_s = kr. \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $(x_{s0}, y_{s0})$  为静态障碍物的位置坐标;  $r_s$  为安全边界的半径;  $r$  为障碍物外接圆的半径;  $k$  为  $r$  的放大系数。

## 3 基于 MPC 的 USV 自主航行模型

本文设计的 USV 自主航行模型如下:

$$\begin{aligned} \min \quad & C(\tau) = K_p C_p(\tau) + K_U C_U(\tau) + K_{COL} C_{COL}(\tau), \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} h_s(N(\tau), p_s, Np, r_s) \leq 0, \\ h_T(N(\tau), p_T, Np, r_T) \leq 0, \\ h_\tau(\tau) \leq 0, \\ g_\tau(\tau) = 0. \end{cases} \end{aligned}$$

模型中评价函数  $C(\tau)$  主要由航迹偏移量  $C_p(\tau)$ 、航速变化量  $C_U(\tau)$  和避碰规则的执行成本函数  $C_{COL}(\tau)$  三部分组成。其中  $K_p$ 、 $K_U$  和  $K_{COL}$  分别为其权重参数。权重参数根据实际情况进行设定。

基于 MPC 的 USV 自主航行的约束条件主要由外部环境约束  $h_s(N(\tau), p_s, Np, r_s)$  和  $h_T(N(\tau), p_T, Np, r_T)$  与 USV 执行机构本身的约束  $h_\tau(\tau)$  和  $g_\tau(\tau)$  两大部分组成。其中约束条件  $h_s(N(\tau), p_s, Np, r_s) \leq 0$  确保 USV 在自主航行过程中不会与静态障碍物发生碰撞;  $h_T(N(\tau), p_T, Np, r_T) \leq 0$  确保 USV 在自主航行过程中不会与动态障碍物发生碰撞;  $h_\tau(\tau) \leq 0$  以及  $g_\tau(\tau) = 0$  确保模型计算得到的动力分配  $\tau$  是满足 USV 执行机构的内部机械特性约束。

### 3.1 航迹偏移量

航迹偏移量  $C_p(\tau)$  主要是用于描述 USV 在预测时域中的预测轨迹与期望轨迹之间的偏差值。 $C_p(\tau)$  越小说明 USV 在预测时域中的预测轨迹更接近期望轨迹。

将 USV 的期望航迹按一定距离间隔离散化为期望轨迹序列  $pd_{1:all} = [pd_1, pd_2, \dots, pd_{all}]$ 。其中:

$$pd_q = [x_q, y_q]^T, \quad q \in [1, all],$$

$t_0$  时刻 USV 在预测时域 ( $Np$ ) 中的期望轨迹序列为:

$$pd_{t_0+1:Np} = [pd_{t_0+1}, pd_{t_0+2}, \dots, pd_{t_0+Np}],$$

以  $\tau$  为控制器输入后在预测时域中的预测轨迹序列为:

$$p_{t_0+1:Np}(\tau) = [p_{t_0+1}(\tau), p_{t_0+2}(\tau), \dots, p_{t_0+Np}(\tau)],$$

其中:

$$p_{t_0+k}(\tau) = \begin{pmatrix} N_{t_0+k,1}(\tau) \\ N_{t_0+k,2}(\tau) \end{pmatrix}, \quad k \in [1, Np].$$

$N(\tau)$  是一个  $k \times 6$  的矩阵, 表示的是预测时域内 USV 的运动状态空间矩阵。

USV 在预测时域中的航迹偏移量计算如下式:

$$C_p(\tau) = \sum_{k=1}^{Np} \frac{\|p_{t_0+k}(\tau) - pd_{t_0+k}\|_2^2}{\|pd_{t_0} - pd_{t_0+k}\|_2^2}. \quad (13)$$

### 3.2 航速变化量

航速变化量  $C_U(\tau)$  主要是 USV 在自主航行过程中航速大小与期望航速大小之间的偏差值。 $C_U(\tau)$  越小说明 USV 在自主航行过程中航速大小越接近期望航速。

USV 在期望航迹上行驶时, 如果设定期望航速大小为  $U_d$ , 则 USV 在预测时域中的航速变化量  $C_U(\tau)$  计算如下式:

$$C_U(\tau) = \sum_{k=1}^{Np} \frac{|U_{t_0+k}(\tau) - U_d|}{U_d}. \quad (14)$$

式中:

$$\begin{aligned} U_{t_0+k}(\tau) &= \sqrt{u_{t_0+k}^2(\tau) + v_{t_0+k}^2(\tau)}, \\ u_{t_0+k}(\tau) &= N_{t_0+k,4}(\tau), \\ v_{t_0+k}(\tau) &= N_{t_0+k,5}(\tau). \end{aligned}$$

### 3.3 避碰规则的成本函数

本文设计的自主航行 USV 遵守 COLREGs 中第 7、第 8、第 14 与第 15 条规则。设计违反规则的成本函数如下式:

$$C_{COL}(\tau) = - \sum_{k=1}^{Np} \mu R \frac{Vp_k(\tau)}{\|p_{t_0+k} - p_{t_0}\|_2}, \quad (15)$$

式中:  $\mu$  是一个布尔变量, 当两船形成对遇或右交叉局面时  $\mu = 1$ , 此时本船为让路船舶并向右转向避让他船, 否则  $\mu = 0$ ;  $R$  是船舶碰撞危险度, 采用最近会遇距离 (DCPA) 与最近会遇时间 (TCPA) 相结合的方式来计算船舶间的碰撞危险度。计算模型如下:

$$R = \alpha_1 R_{DCPA} + \alpha_2 R_{TCPA}. \quad (16)$$

式中:  $R_{DCPA}$  为 DCPA 的隶属度函数;  $R_{TCPA}$  为 TCPA 的隶属度函数;  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  为  $R_{DCPA}$  和  $R_{TCPA}$  的权重。

$R_{DCPA}$  和  $R_{TCPA}$  的计算模型如下:

$$\begin{aligned} R_{DCPA} &= \begin{cases} 1, & 0 \leq |D| < d_1, \\ \left(\frac{d_2 - D}{d_2 - d_1}\right)^2, & d_1 \leq |D| < d_2, \\ 0, & |D| > d_2, \end{cases} \\ R_{TCPA} &= \begin{cases} 1, & 0 \leq |T| < t_1, \\ \left(\frac{t_2 - T}{t_2 - t_1}\right)^2, & t_1 \leq |T| < t_2, \\ 0, & |T| > t_2, \end{cases} \\ t_1 &= \begin{cases} \frac{\sqrt{d_1^2 - D^2}}{V}, & D \leq d_1, \\ 0, & D > d_1, \end{cases} \\ t_2 &= \begin{cases} \frac{\sqrt{d_2^2 - D^2}}{V}, & D \leq d_2, \\ 0, & D > d_2. \end{cases} \end{aligned} \quad (17)$$

式中:  $D$  为本船与目标船之间的 DCPA;  $T$  为本船与目标船之间的 TCPA;  $d_1$  为船舶的安全会遇距离;  $d_2$  为船舶的绝对安全会遇距离;  $V$  为目标船的相对运动速度。

$Vp_k(\tau)$  是指 USV 在  $t_0 + k$  时刻的位置在  $t_0$  时刻的附体坐标系上的投影。其含义如图 4 所示。

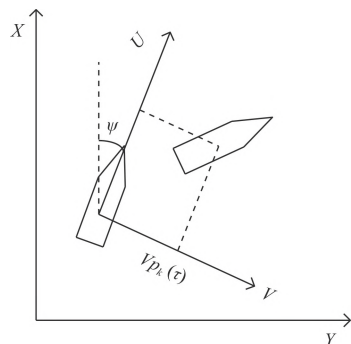


图 4  $Vp_k(\tau)$  含义示意图

Fig. 4 The meaning of  $Vp_k(\tau)$

当 USV 往右转向时  $Vp_k(\tau) > 0$ , 当 USV 往左转弯时  $Vp_k(\tau) < 0$ 。

式 (15) 表明在  $R > 0$  且  $\mu = 1$  的情况下, USV 执行向右转向的避让措施所得到的  $C_{COL}(\tau)$  更小, 确保 USV 遵循规则并有效降低成本。



### 3.4 约束条件

模型的约束主要包括 USV 外部环境约束和内部执行机构约束两部分。

1) 外部环境约束主要是指 USV 在自主航行过程中除按照预先设定的航线航行外, 还需避让航行障碍物 (静态的障碍物与动态的障碍物), 其中动态障碍物为在航的目标船。

假设在  $t_0$  时刻有  $n$  个静态障碍物, 它们的位置坐标分别为:

$$p_s = [p_{s1}, p_{s2}, \dots, p_{sn}]。$$

式中:  $p_{si} = (x_i, y_i)$ ,  $i \in [1, n]$ , 静态障碍物安全领域半径分别为  $r_s = [r_{s1}, r_{s2}, \dots, r_{sn}]。$

在预测时域 ( $Np$ ) 中, 防止 USV 与静态障碍物发生碰撞的约束为:

$$h_s(N(\tau), p_s, Np, r_s) \leq 0。 \quad (18)$$

式中:

$$h_s(N(\tau), p_s, Np, r_s) = \begin{bmatrix} h_{s1}(N(\tau), p_{s1}, Np, r_{s1}) \\ h_{s2}(N(\tau), p_{s2}, Np, r_{s2}) \\ h_{s3}(N(\tau), p_{s3}, Np, r_{s3}) \\ \vdots \\ h_{sn}(N(\tau), p_{sn}, Np, r_{sn}) \end{bmatrix},$$

$$h_{si}(N(\tau), P_{si}, Np, r_{si}) = \begin{bmatrix} h_{si1}(N_{t_0+1}(\tau), P_{si}, Np, r_{si}) \\ h_{si2}(N_{t_0+2}(\tau), P_{si}, Np, r_{si}) \\ h_{si3}(N_{t_0+3}(\tau), P_{si}, Np, r_{si}) \\ \vdots \\ h_{siNp}(N_{t_0+Np}(\tau), P_{si}, Np, r_{si}) \end{bmatrix},$$

$$h_{sik}(N_{t_0+k}(\tau), P_{si}, Np, r_{si}) = r_{si}^2 - \left\| \begin{pmatrix} N_{t_0+k,1}(\tau) \\ N_{t_0+k,2}(\tau) \end{pmatrix} - P_{si} \right\|_2^2。$$

其中:  $k \in [1, Np]$ ,  $i \in [1, n]$ 。

对于动态船舶, 本文目标船的船舶领域简化为圆形。设在  $t_0$  时刻有  $m$  个动态目标船, 它们的位置坐标分别为:

$$p_T = [p_{T1}, p_{T2}, \dots, p_{Tm}],$$

$$p_{Tj} = (x_j, y_j), \quad j \in [1, m],$$

对应的船舶领域半径为:

$$r_T = [r_{T1}, r_{T2}, \dots, r_{Tm}],$$

在预测时域 ( $Np$ ) 中, 防止 USV 与动态障碍物发生碰撞的约束为:

$$h_T(N(\tau), p_T, Np, r_T) \leq 0。 \quad (19)$$

式中:

$$h_T(N(\tau), p_T, Np, r_T) = \begin{bmatrix} h_{T1}(N(\tau), p_{T1}, Np, r_{T1}) \\ h_{T2}(N(\tau), p_{T2}, Np, r_{T2}) \\ h_{T3}(N(\tau), p_{T3}, Np, r_{T3}) \\ \vdots \\ h_{Tm}(N(\tau), p_{Tm}, Np, r_{Tm}) \end{bmatrix},$$

$$h_{Tj}(N(\tau), P_{Tj}, Np, r_{Tj}) = \begin{bmatrix} h_{Tj1}(N_{t_0+1}(\tau), P_{Tj1}, Np, r_{Tj}) \\ h_{Tj2}(N_{t_0+2}(\tau), P_{Tj2}, Np, r_{Tj}) \\ h_{Tj3}(N_{t_0+3}(\tau), P_{Tj3}, Np, r_{Tj}) \\ \vdots \\ h_{TjNp}(N_{t_0+Np}(\tau), P_{TjNp}, Np, r_{Tj}) \end{bmatrix},$$

$$h_{Tjk}(N_{t_0+k}(\tau), P_{Tjk}, Np, r_{Tj}) = r_{Tj}^2 - \left\| \begin{pmatrix} N_{t_0+k,1}(\tau) \\ N_{t_0+k,2}(\tau) \end{pmatrix} - P_{Tjk} \right\|_2^2。$$

其中:  $k \in [1, Np]$ ,  $j \in [1, m]$ 。

2) 内部约束主要是指 USV 执行机构的动力特性。为简化研究, 只考虑执行机构所提供的  $\tau$  的大小范围作为其内部约束条件。

在预测时域 ( $Np$ ) 中, USV 执行机构内部约束为:

$$\begin{aligned} h_\tau(\tau) &\leq 0, \\ g_\tau(\tau) &= 0。 \end{aligned} \quad (20)$$

式中:

$$h_\tau(\tau) = \begin{bmatrix} h_{\tau1}(\tau) \\ h_{\tau2}(\tau) \\ h_{\tau3}(\tau) \\ \vdots \\ h_{\tau Np}(\tau) \end{bmatrix},$$

$$h_{\tau k}(\tau) = \begin{bmatrix} \tau_k - \tau_{\max} \\ \tau_{\min} - \tau_k \end{bmatrix},$$

$$g_\tau(\tau) = \begin{bmatrix} g_{\tau1}(\tau) \\ g_{\tau2}(\tau) \\ \vdots \\ g_{\tau Np}(\tau) \end{bmatrix},$$

$$g_{\tau k}(\tau) = \tau_3 - l\tau_2。$$

其中,  $k \in [1, Np]$ 。

## 4 仿真实验

采用的 USV 基础数据来自挪威科技大学的 Auto-sea 项目, 相关模型参数详见参考文献 [18]。

设置风速  $U_W = 4 \text{ m/s}$ , 风向角  $\psi_W = 30^\circ$ ; 流速为  $V_{cu} = 1 \text{ m/s}$ , 流向角为  $\theta = 0^\circ$ 。

设置 USV 在  $t = t_1$  时刻的运动状态为:

$$N_{t_0} = [0, 0, 0, 8, 0, 0]^T。$$

此时 $\tau_1 = [9\ 040, 0, 0]^T$ ; 设置期望航速大小为 $8\text{ m/s}$ ; 设置预测时域为 $Np = 24\text{ s}$ 。

在期望航迹上设置 3 个静态障碍物, 静态障碍物信息如表 1 所示。

表 1 静态障碍物信息

Tab. 1 Information of static obstacles

静态障碍物序号	位置坐标	安全领域半径/m
A	(0, 1800)	200
B	(821, 3800)	300
C	(5536, 2536)	150

设置 2 个动态船舶作为动态障碍物, 动态障碍物信息如表 2 所示。

表 2 动态障碍物信息

Tab. 2 Information of moving obstacles

目标船	运动状态	船舶领域半径/m	避碰时需要满足的规则
TS1	$N_{TS1}$	100	Rule-14
TS2	$N_{TS2}$	100	Rule-15

表 2 中目标船 TS1 运动状态为:

$$N_{TS1} = [800, 900, 270, 9, 0, 0]^T,$$

目标船 TS2 运动状态为:

$$N_{TS2} = [10\ 208, 3536, 180, 8, 0, 0]^T.$$

USV 自身能够提供的 $\tau$ 的大小范围信息如表 3 所示。

表 3  $\tau$  的大小范围信息

Tab. 3 Range of  $\tau$

	最大值	最小值
$\tau_1 = F_X$	13 100 N	-6 550 N
$\tau_2 = F_Y$	645 N	-45 N
$\tau_3 = F_N$	2 580 N·m	-2 580 N·m

USV 中转船力臂 $l = 4\text{ m}$ , 即满足 $\tau_3 = 4\tau_2$ 的约束条件。

仿真结果如图 5 所示。

其中从 $t_1$ 时刻到 $t_3$ 时刻 USV 与 TS1 距离, 从 $t_8$ 时刻到 $t_{11}$ 时刻 USV 与 TS2 距离分别如图 6 和图 7 所示。

自主航行过程中 USV 航行速度大小如图 8 所示。

自主航行过程中 USV 的航向如图 9 所示。

根据图 5 和图 6 可以看出: 针对静态障碍物 A, B 和 C, USV 能够进行有效避让; 针对动态障碍物的目标船 TS1 与目标船 TS2, USV 均从右侧安全避让, 符合 COLREGS 中的第 Rule-14 和 Rule-15 条规定。从图 7 可以看出, 当不需要对障碍物进行避让时, USV 航速稳定在 $8\text{ m/s}$ 左右, 符合设定的期望航速。

## 5 结 语

本文提出一种基于 MPC 的 USV 自主航行模型充分考虑了船舶动力学特性、航行经济性、规则适用性以及执行机构的动力输出约束, 所形成的控制器策略更加贴近实际 USV 的航行特性。通过仿真实验实现了 USV 在期望航迹上的自主航行, 同时也验证了航行过程中合理避让动/静态障碍物的能力。但在 USV 动力控制方面仅对 $\tau$ 的最大值和最小值作为约束, 尚未以 USV 的螺旋桨转速和舵角直接控制输入作为模型的约束条件, 未来将进一步对该问题进行优化。

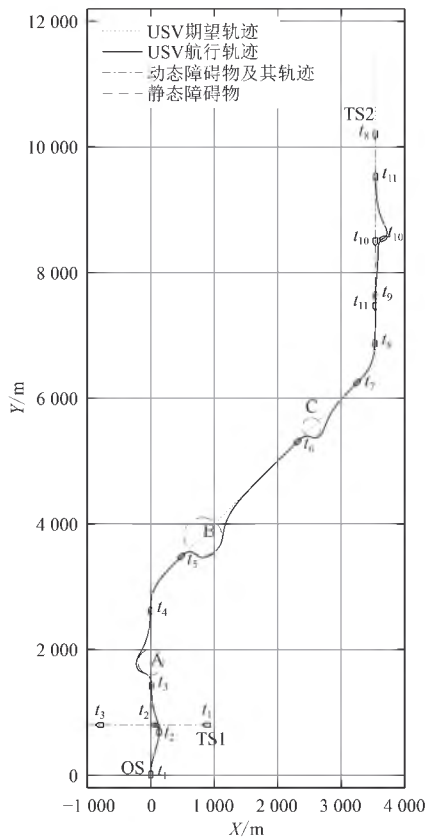


图 5 仿真结果

Fig. 5 The result of simulation

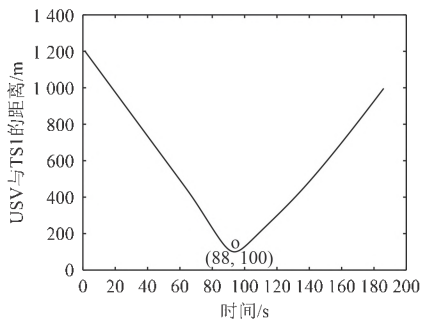


图 6 从 $t_1$ 时刻到 $t_3$ 时刻 USV 与 TS1 距离

Fig. 6 The distance between USV and TS1 from  $t_1$  to  $t_3$

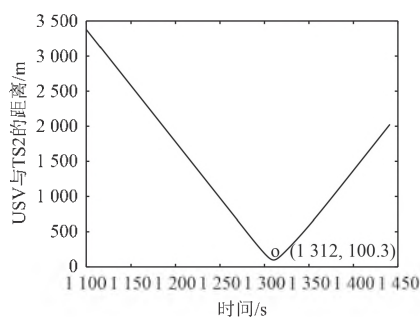


图 7 从  $t_8$  时刻到  $t_{11}$  时刻 USV 与 TS2 距离

Fig. 7 The distance between USV and TS2 from  $t_8$  to  $t_{11}$

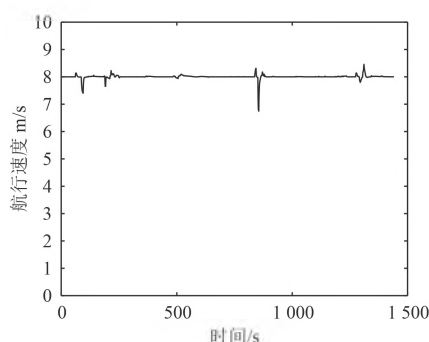


图 8 USV 航行速度变化

Fig. 8 The speed variation of USV

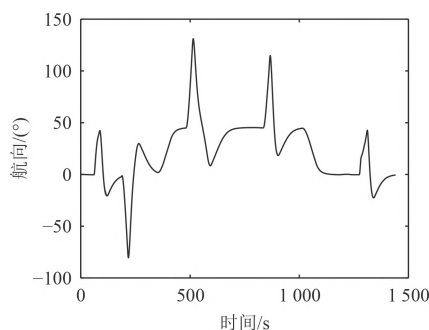


图 9 USV 航向变化

Fig. 9 The course variation of USV

## 参考文献:

- [1] 洪晓斌, 徐郑攀, 魏新勇, 等. 基于改进速度障碍法的水面无人艇动态避障[J]. 光学精密工程, 2021, 29(9): 2126–2139.
- [2] YOSHIKAWA, KUWATA, MICHAEL, et al. Safe maritime autonomous navigation with COLREGS, using velocity obstacles[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2014, 39(1): 110–119.
- [3] HONGGUANG Lyu, YONG Yin. Fast path planning for autonomous ships in restricted waters[J]. Applied Sciences, 2018, 8(12): 2592–2615.
- [4] 林晓杰. 基于改进势场法的受限水域中船舶自动避碰模型研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015.
- [5] TSOU M C, KAO S L, Su C M. Decision support from genetic algorithms for ship collision avoidance route planning and alerts[J]. Journal of Navigation, 2010, 63(1): 167–182.
- [6] 曾勇, 张金奋, 张明阳, 等. 基于粒子群-遗传优化算法的船舶避碰决策[J]. 中国航海, 2020, 43(1): 1–6, 28.
- [7] CHEN Zheng, ZHANG Youming, NIE Yong, et al. A Hybrid path planning algorithm for unmanned surface vehicles in complex environment with dynamic obstacles[J]. IEEE Access, 2019, 7: 126439–126449.
- [8] ERIKSEN B, BREIVIK M, PETTERSEN K Y, et al. A Modified dynamic window algorithm for horizontal collision avoidance for AUVs[C]// 2016 IEEE Conference on Control Applications (CCA). IEEE, Argentina, 2016: 499–506.
- [9] JOHANSEN T A, PEREZ T, CRISTOFARO A. Ship collision avoidance and COLREGS compliance using simulation-based control behavior selection with predictive hazard assessment[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17(12): 3407–3477.
- [10] HAGEN I B, KUFOALOR D, BREKKE E F, et al. MPC-based collision avoidance strategy for existing marine vessel guidance systems[C]// 2018: 7618–7623.
- [11] ERIKSEN B, BREIVIK M. MPC-Based mid-level collision avoidance for ASVs using nonlinear programming[C]// IEEE Conference on Control Technology and Applications. IEEE, USA, 2017: 766–772.
- [12] ERIKSEN B, BITAR G, BREIVIK M, et al. Hybrid collision avoidance for ASVs compliant with COLREGS rules 8 and 13–17[J]. 2019, 7(1): 11–28.
- [13] TRISTAN P, FOSSEN T I. Kinematic models for manoeuvring and seakeeping of marine vessels[J]. Modeling, Identification and Control (MIC), 2007, 28(1): 19–30.
- [14] 贾欣乐, 杨盐生. 船舶运动数学模型——机理建模与辨识[M]. 大连: 大连海事大学出版社, 1999: 7–8.
- [15] 徐海洋, 冯辉, 等. 船舶动力定位系统原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016: 32–38.
- [16] 陈虹. 模型预测控制[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 6–7.
- [17] 龚建伟, 姜岩, 徐威. 无人驾驶车辆模型预测控制[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014: 39–40.
- [18] Inger Berge Hagen. Collision avoidance for ASVs using model predictive control[D]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2017.
- [19] 刘晨申. 针对国际海事规则的无人船路径规划算法的设计[D]. 海口: 海南大学, 2020.