

doi:10.12068/j.issn.1005-3026.2024.11.004

基于改进人工势场的多UUV编队避障方法

徐红丽, 贾本卿, 栾阔

(东北大学 机器人科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110169)

摘要: 针对多自主水下航行器(unmanned underwater vehicle, UUV)编队在水下未知环境协同避障时, 易陷入局部最小值问题和编队分散而导致的编队通信丢失问题, 提出一种基于改进人工势场法的编队避障策略来优化UUV的协同避障路径。首先, 基于领航跟随法建立UUV之间的编队控制, 采用指数形式的改进人工势场函数, 解决传统形式的势场因势场突变而导致的紧急转向问题, 同时在斥力场引入前向速度、偏离角度, 并引入偏离度斥力结合修正角来优化最终避障控制指令, 采用一种虚拟点导引法解决局部最小值问题。最后, 兼顾编队影响, 设计一种UUV的协同避障策略, 优化队形偏离度与恢复队形时间。实验结果验证了本文算法在多UUV编队避障的有效性。

关键词: 自主水下航行器编队; 局部极小值; 改进人工势场法; 协同避障; 队形恢复时间

中图分类号: TP 242.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2024)11-1547-10

Multi-UUV Formation Obstacle Avoidance Method Based on Improved Artificial Potential Field

XU Hong-li, JIA Ben-qing, LUAN Kuo

(School of Robot Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110169, China. Corresponding author: JIA Ben-qing, E-mail: jiabenqing@stumail.neu.edu.cn)

Abstract: A formation obstacle avoidance strategy is proposed based on the improved artificial potential field method to optimize the cooperative obstacle avoidance path of multi-UUV in an unknown underwater environment, which is prone to the local minimum problem and the loss of formation communication due to formation dispersion. Firstly, the formation control between multi-UUV is established based on the pilot-following method, and an improved artificial potential field function in exponential form is used to solve the emergency steering problem caused by the sudden change of the potential field in the traditional form. Meantime, while the effects of forward speed and deviation angle are introduced in the repulsion field, and the deviation degree repulsion combined with the trim angle is introduced to optimize the final obstacle avoidance control command, and a virtual point guidance method is used to solve the local minimum problem. Finally, a cooperative obstacle avoidance strategy for UUV is designed to optimize the formation deviation and recovery time, taking into account the effect of formation. The experimental results verify the effectiveness of the proposed algorithm in multi-UUV formation obstacle avoidance.

Key words: UUV formation; local minimum; improved artificial potential field method; collaborative obstacle avoidance; formation recovery time

随着人类对海洋探索不断深入, 越来越多的任务需要自主水下航行器协作完成。在水下航行过程中, 多UUV编队易受到水下未知障碍物的碰撞, 避障过程易打乱队形, 且存在个体脱离编

队过远而导致通信丢失等问题, 无法完成指定任务的同时造成大量的经济损失。

目前常见的避障算法有人工势场法、速度障碍法、动态窗口法等^[1-4]。人工势场法(artificial

收稿日期: 2023-06-12

基金项目: 装备预先研究共用技术项目(50911020604)。

作者简介: 徐红丽(1978-), 女, 辽宁沈阳人, 东北大学教授, 博士生导师。

potential field method, APF) 因其计算量小、效率高, 在避障中很受欢迎. 目前 APF 研究热点在改进其势场函数和解决易陷入局部最小值的经典问题上, 在改进势函数形式上, 徐博等^[5]采用指数形式引力势场来优化函数, 但未考虑载体和障碍物之间的运动或位置状态等影响; 朱旭等^[6]也改进了势场函数, 并且在斥力势中引入了与障碍物相对速度的辅助斥力势; Song 等^[7]定义了预测人工势场函数, 将无人水面潜艇与障碍物之间的位置状态考虑到势函数中, 能使载体提前预测并避开障碍物, 但是容易出现预测过度即避障路径过大问题; Sahu 等^[8]引用分离控制的非典型势函数作为斥力势函数, 能使 UUV 安全躲避障碍物, 还研究了针对所检测的障碍物点, 利用最小等高线圆面积法建立新的椭圆形势场空间^[9-10], 优化避障轨迹, 但应用的场景局限性较大. 在局部最小值问题上, 付雷等^[11]通过建立旋转势场, 使机器人逃离局部最小值; Matoui 等^[11]用非最小速度算法处理局部最小问题, 但计算速度慢, 快速场景不适合; Weerakoon 等^[12]用改变势场函数的形式来克服局部最小值问题, 当机器人检测到障碍物时, 产生一个新的排斥力; Sun 等^[4]使用动态窗口来解决该问题, 使用一个代价函数来评估轨迹, 在前一步找到局部最小值区域, 从而避免陷入. 针对 APF 存在问题的改进方法研究热度很高, 基本上是通过修改势函数形式或在势场中构建机间相对速度、距离等参量的辅助斥力影响, 提高避障的效率^[5-10]. 前人的研究和 APF 的方法理论, 在实现简单高效的避障算法方面仍有一定的优化空间. 然而多 UUV 避障过程不仅要考虑单独避障, 还要考虑编队协同性等问题, 而针对协同性避障研究较少, Yan 等^[13]和 Zhen 等^[14]将 APF 与虚拟解构编队算法相结合, 可以保证在避障的过程中, 结合队形约束、变换和形成合适的队形, 使编队躲避障碍物. 张玉超等^[15]定义基于机间势场增益项和机间通信权重的机间势函数来解决机器人脱离编队问题, 刘亚等^[16]分别为领航者和跟随者设计不同的行为以及行为选择模式, 来解决协同避障问题.

综上所述, 目前在 APF 的势场函数的设计上形式很多, 但仍容易造成势场突变, 易使 UUV 紧急转向, 且遇到复杂和凹形障碍物时运动轨迹不合理, 易陷入局部最小值, 产生局部震荡或小范围转圈等问题. 同时针对 UUV 编队避障研究较少, 存在编队遇到大型或复杂障碍物可能导致编

队分散严重等现象, 造成编队间通信丢失问题, 故本文提出一种基于改进 APF 算法的编队避障策略来优化编队整体避障轨迹.

1 模型与问题陈述

1.1 UUV 运动学与动力学模型

如图 1 所示, 模型主要考虑两个参考坐标系, 即固定的载体坐标系 $\{B\}$ 和惯性坐标系 $\{E\}$, 载体坐标系的原点与 UUV 的质心重合. UUV 的 6 自由度运动一般可以通过式 (1) 来描述:

$$\left. \begin{aligned} \boldsymbol{\eta} &= [\zeta, \eta, \zeta, \phi, \theta, \psi]^T, \\ \mathbf{v} &= [u, v, w, p, q, r]^T, \\ \boldsymbol{\tau} &= [X, Y, Z, K, M, N]^T. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $\boldsymbol{\eta}$ 是在惯性参考坐标系中的三维位置和三维方向向量, 其中 ζ, η, ζ 分别代表 3 个方向的线性位置, ϕ, θ, ψ 分别表示姿态信息; \mathbf{v} 是在载体坐标系中的速度向量, 其中 u, v, w 表示三轴线速度分量, p, q, r 表示三轴角速度; $\boldsymbol{\tau}$ 是在载体坐标系中 6 自由度的推力, 其中 X, Y, Z 表示三轴推力, K, M, N 表示三轴力矩.

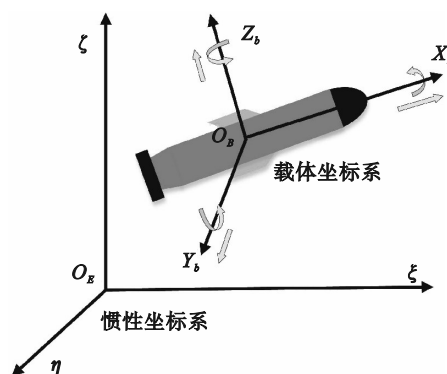


图 1 UUV 模型

Fig. 1 UUV model

Fossen 在文献 [17] 中提出运动的非线性运动学和动力学方程表示为

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})\mathbf{v}, \quad (2)$$

$$\mathbf{M}(\mathbf{v})\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau}. \quad (3)$$

式中: $\mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})$ 为 $\{B\}$ 和 $\{E\}$ 坐标系之间的状态转换关系; \mathbf{M} 是附加质量惯性矩阵; $\mathbf{C}(\mathbf{v})$ 是科氏矩阵和包括附加质量在内的向心项; $\mathbf{D}(\mathbf{v})$ 表示水动力阻力和升力矩阵; $\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})$ 表示重力和力矩的矢量.

由于 UUV 真实 6 自由度运动模型结构复杂, 结合控制律非常复杂, 并且有些高阶参数无法精确获取, 控制不当可能会产生不可预知的后果, 因此本文针对研究的问题对 UUV 运动模型进行

相应简化.实验中 UUV 模型水动力参数由沈阳自动化研究所提供,将 6 自由度模型分解为水平面和垂直面运动模型.

1.2 协同避障问题描述

传统的避障概念指 UUV 在航行过程中,其行进路径上应避免与障碍物发生碰撞,并与障碍物保持一定的安全距离,表示为

$$\|\eta_i - \eta_{\text{obs}}\| \geq d_s. \quad (4)$$

式中: η_i 表示第 i 个 UUV 的位置; η_{obs} 表示障碍物的位置; d_s 表示安全距离.

在编队协同避障中,UUV 不仅需要避障,而且避障过程中需要考虑到编队队形的约束.在单个 UUV 执行避障策略时,需要考虑编队中其他 UUV 的位置与速度,并利用编队中其他机器人的状态信息做到在避障的过程中要满足编队队形的要求,使得避障过程中队形误差小、避障完成后队形恢复速度快.

2 基于改进人工势场避障方法研究

2.1 改进人工势场

由于 APF 实时与控制决策紧密结合并实时更新,适合考虑速度和角速度等轨迹变量来约束修改 APF^[7].APF 目前存在许多弊端,如斥力势场边界处的控制指令切换频繁,容易造成 UUV 摇摆,易出现急转弯现象,另外传统 APF 仅考虑 UUV 与障碍物的距离,没有考虑 UUV 编队的运动状态和运动趋势的影响,进而造成避障轨迹不平滑等问题,因此需要综合考虑以上因素对其进行优化.本文通过设计指数型势场函数来改进传统的 APF,使运动轨迹更加平滑,避免急转弯现象的发生.同时在斥力函数引入运动状态的影响,设计了改进人工势场(improving artificial potential fields, IAPF).由于在避障过程中,改变航向比改变速度更有利于改变运动轨迹和进行避障,故本研究中 IAPF 法侧重改变 UUV 的航向而不是速度大小.

在传统 APF 算法中,UUV 在斥力场范围内即可受到障碍物的斥力作用,在 UUV 远离障碍物且在斥力场范围内,还受斥力场的干扰,容易造成轨迹偏移,影响正常行驶轨迹.一般来说,在远离障碍物时,应当不考虑障碍物驶离障碍物群的影响,从而排除非影响障碍物对运动轨迹的干扰.本文根据 UUV 当前的速度方向和其与障碍物之间的相对位置方向确定 UUV 编队是驶向或

驶离障碍,在避障前作出判断,避免造成不必要的机动,影响轨迹.

如图 2 所示,设 γ 表示 UUV 速度方向和 UUV 与障碍物中心点连线之间的夹角,记作偏离角:

$$\gamma = \gamma_u - \gamma_d. \quad (5)$$

式中: γ_u 表示 UUV 速度方向角; γ_d 表示 UUV 与障碍物中心点连线之间的夹角.当 $\cos\gamma > 0$ 即 $\gamma \in (-\pi/2, \pi/2)$ 时,表示 UUV 驶向障碍物,需要对其执行避障决策;当 $\cos\gamma < 0$ 即 $\gamma \in (\pi/2, 3\pi/2)$ 时,表示 UUV 驶离障碍物,忽略障碍物的影响.

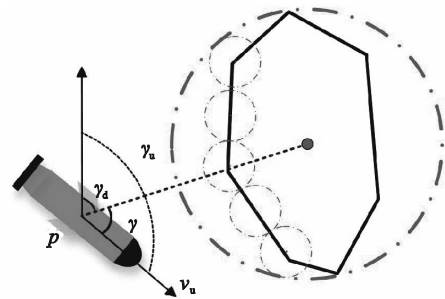


图 2 γ 夹角示意图

Fig. 2 Schematic diagram of included angle γ

1) 引力势场.根据 UUV 航行任务的目标点信息,建立引力势场函数,计算引力矢量.根据最新的传统人工势场法^[7](traditional artificial potential field, TAPF)的介绍,借用其对引力势场函数的设计,TAPF 的引力势为

$$U_{\text{att}} = \begin{cases} \frac{1}{2} K_{\text{att}} d_g^2, & d_g \leq d_m; \\ d_m K_{\text{att}} d_g - \frac{1}{2} K_{\text{att}} d_m^2, & d_g > d_m. \end{cases} \quad (6)$$

式中: K_{att} 表示目标点引力系数; d_g 表示 UUV 与目标点的距离; d_m 表示引力势变化的距离阈值.

对引力势场函数求负梯度,得到目标点引力为

$$\mathbf{F}_{\text{att}} = -\nabla U_{\text{att}} = \begin{cases} -K_{\text{att}} d_g \cdot \mathbf{n}_g, & d_g \leq d_m; \\ d_m K_{\text{att}}, & d_g > d_m. \end{cases} \quad (7)$$

$$F_{\text{att}}^x = \mathbf{F}_{\text{att}} \cdot \sin(\theta_{\text{att}}), \quad (8)$$

$$F_{\text{att}}^y = \mathbf{F}_{\text{att}} \cdot \cos(\theta_{\text{att}}).$$

$$\theta_{\text{att}} = a \tan[(x_g - x)/(y_g - y)]. \quad (9)$$

引力方向由 UUV 指向目标点,在 d_m 范围内,保持线性变化,与到目标点的距离呈正比关系,为了防止目标点过远、吸引力太大导致斥力被忽略现象发生,在 d_m 范围外设为固定值; \mathbf{n}_g 表示 UUV 指向目标点的单位矢量; $F_{\text{att}}^x, F_{\text{att}}^y$ 分别表示引力沿 X, Y 坐标轴的分量; θ_{att} 表示指向目标点所提供引力的方向角.固定任务目标点产生的引力矢

量根据 F_{att} 决定.

2) 斥力势场. 建立斥力势场函数, 根据声呐获取障碍坐标信息, 计算斥力矢量. 将斥力势场函数改进成指数函数形式, 额外引入 UUV 运动状态以及偏离角 γ 的影响, 使斥力不仅受障碍物距离影响, 还综合考虑 UUV 当前的速度大小、速度方向与障碍物的偏离程度的影响, 避免斥力势场突变导致的急转向, 使避障轨迹更平滑, 设计函数势场:

$$U_{rep} = \begin{cases} K_{rep} \cdot K_u \cdot \exp(-d_o/R - |\gamma|), \gamma \in (-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}); \\ 0, \text{其他.} \end{cases} \quad (10)$$

$$K_u = \exp(|v_u|/k). \quad (11)$$

其中: K_{rep} 表示斥力系数; K_u 表示速度大小影响系数; d_o 表示 UUV 与障碍物的距离; R 表示斥力势场的有效范围; v_u 表示 UUV 的前向速度; k 表示前向速度影响系数, 且该斥力势场只在 UUV 驶向障碍物的情况下存在.

对 U_{rep} 求偏导, 即可得到斥力 F_{rep} , 斥力势场沿距离和偏离角呈指数递减, 没有突变边界. 受 UUV 与障碍物的距离和偏离角度的影响, 固将 F_{rep} 拆分成经典的位置斥力 F_{rep}^a 和偏离斥力 F_{rep}^b , 如式(12)、图 3 所示. 两方向上的斥力均实时变化, 通过引入 UUV 的速度 v_u 来影响两斥力矢量的大小, 且两斥力的大小与速度呈正相关. 引入偏离斥力 F_{rep}^b 补偿, 以避免 UUV 距离障碍物较近的情况下, 引力和斥力近乎在一条直线上, 合力对航向影响较小, 无法快速改变航向导致碰撞发生.

$$F_{rep} = -\nabla U_{rep} = F_{rep}^a + F_{rep}^b, \quad (12)$$

$$F_{rep}^a = \begin{cases} U_{rep}/R, \gamma \in (-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}); \\ 0, \text{其他.} \end{cases} \quad (13)$$

$$F_{rep}^b = \begin{cases} U_{rep}, \gamma \in (-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}); \\ 0, \text{其他.} \end{cases} \quad (14)$$

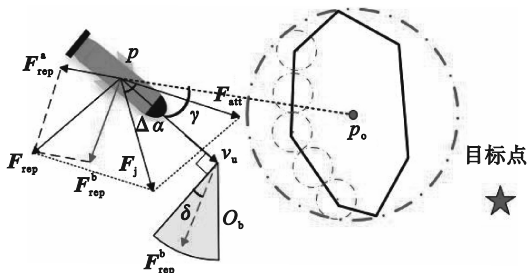


图 3 IAPF 模型

Fig. 3 IAPF model

假设位置斥力 F_{rep}^a 的角度为 θ_{rep}^a , 偏离斥力 F_{rep}^b 的角度为 θ_{rep}^b , 其表达式为

$$\theta_{rep}^a = a \tan[(x - x_o)/(y - y_o)], \quad (15)$$

$$\theta_{rep}^b = \begin{cases} \gamma_i + \pi/2 - \delta, \gamma \in [0, \pi/2]; \\ \gamma_i - \pi/2 + \delta, \gamma \in [-\pi/2, 0). \end{cases} \quad (16)$$

式中: θ_{rep}^a 方向由第 i 个障碍物群指向 UUV; θ_{rep}^b 中 γ_i 表示 UUV 与第 i 个障碍物群的偏离度. 为了使 UUV 的控制力更好地结合实际情况, 在探测到障碍物时, 由于补偿力的作用, 可能会导致避障方向控制较大, 使 UUV 编队本身在避障风险较低的情况下, 增加躲避障碍的路径, 存在避障路径非最优问题, 应用到协同编队避障中, 严重可能导致编队偏离、混乱等现象, 因此本文引入速度方向修正角 δ 来修正 F_{rep}^b 的角度 θ_{rep}^b , 进而优化避障过程中的控制决策, 保证 UUV 避障效果的优良性.

如图 3 所示, 定义可选择 F_{rep}^b 的扇形区域, 以 UUV 速度的垂向 v_u^\perp 作为该区域的下边界, 以 $v_u^\perp + \max(\delta)$ 作为该扇形区域的上边界. 根据修正角 δ 的影响, 将偏离度斥力 F_{rep}^b 落在扇形区域限制内, 扇形的半径 O_b 即为 F_{rep}^b 的最大上限值, 在程序中根据情况设定.

δ 的大小与 γ_i 呈正相关关系, γ_i 过大, 表示 UUV 的速度方向偏离障碍物大, 碰撞障碍物的风险较小, 调整 δ 小一些, 来适当修正偏离, 避免造成过度避障现象发生; γ_i 过小, 表示 UUV 的速度方向偏离障碍物小, UUV 径直撞向障碍物, 碰撞障碍物的风险较大, 调整 δ 大一些, 产生的 F_{rep}^b 方向更容易使 UUV 偏离障碍物, 避免 UUV 航行撞向障碍物, 故设计 δ 表达式为

$$|\delta| = |k_\delta a \tan \gamma|. \quad (17)$$

式中: k_δ 表示修正角调整系数; 修正角 δ 作用是根据当前的碰撞情况进行预测修正, 避免局部振荡现象, 且在保证 UUV 安全性的前提下, 优化避障轨迹, 减小避障任务对编队队形的影响.

在 UUV 避障过程中, 假设声呐探测区域有 N 个障碍物群区域, 则根据 IAPF 计算所受到的斥力的和为 $\sum_{i=1}^N F_{rep}^i$.

依据上述分析, 合理调整算法系数, 计算 IAPF 的合力. 合力 F_{join} 公式为

$$F_{join} = F_{att} + \sum_{i=1}^N F_{rep}^i. \quad (18)$$

UUV 的避障决策即为所计算的 F_{join} .

2.2 局部最小值问题解决

上述 IAPF 根据拆分斥力的原理, 在一定程

度上已经避免了局部最小值问题,但面对凹形障碍物时,还是存在陷入局部最小点的可能性.故本文提出一种可变菱形虚拟点导引法(variable diamond virtual point guidance method, VDPG)来帮助 UUV 编队进一步减小陷入局部最小值的可能性.

首先,根据合力进行势场力检测,判断是否陷入局部最小值.由于 UUV 实际运动控制的复杂性,在实际过程中,UUV 所受合力小于一定值会导致其陷入局部绕小圈运动或停止运动,即产生局部最小值现象,如图 4 所示,采用式(19)判断.

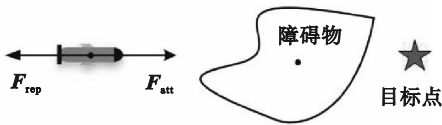


图 4 局部最小值问题

Fig. 4 Local minimum problem

$$F_{\text{join}} < \min F. \quad (19)$$

当合力小于设定值时,且 UUV 的航向在 15 s 的仿真步长内,航向变化超过 360°,即判断陷入局部最小值.

若判断当前 UUV 编队陷入局部最小值,则使用 VDPG 来帮助 UUV 编队摆脱局部最小值,如图 5 所示. VDPG 原理:假设 UUV 编队领航者位置为 p ,当障碍物群中心位置为 p_0 时,集群陷入局部最小区域,以 p 和 p_0 为菱形两对角顶点,以 H 为另外两对角顶点的距离建立菱形.如图所示,两对称五角星为虚拟点,性质为引力,引导 UUV 摆脱局部最小区域. $d(p, p_0)$ 表示 UUV 领航者到障碍物群中心的距离, H 表示左右两虚拟点的距离, H 可根据实际情况改变,其表达式为

$$H = \begin{cases} O_1, & d(p, p_0) \leq 20 \text{ m}; \\ \frac{\sigma \cdot v_u}{\sqrt{d(p, p_0)}}, & d(p, p_0) > 20 \text{ m}. \end{cases} \quad (20)$$

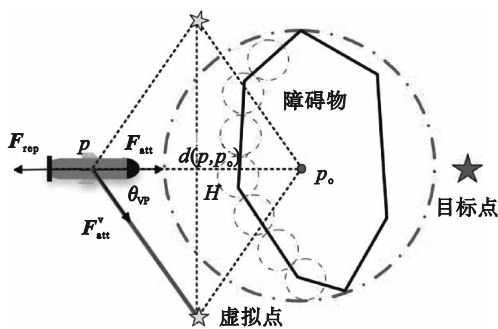


图 5 可变菱形虚拟点导引法

Fig. 5 Variable diamond virtual point guidance method

根据 UUV 的操纵性,当距离障碍物小于等于 20 m 时,即进入极度危险区,需要采取紧急避障,因此如果在极度危险区陷入局部最优需要将 H 设置为上限值 O_1 ,使虚拟点提供的方向尽可能地偏离障碍物, O_1 通常根据任务场景设定.当距离障碍物大于 20 m 时,为安全避障区, H 的表达式如式(20)所示, σ 为大于 0 的任意实数,表示虚拟点距离修正系数, v_u 表示领航 UUV 的前向速度,陷入局部最优时虚拟点的位置跟随 H 进行动态调整.

菱形上两虚拟点的位置根据 UUV 陷入局部最小值时的速度状态和与障碍物之间的距离有关,经计算可确定两虚拟点的坐标,通过判断左右两个虚拟点距离目标点的距离,选择距离短的点作为摆脱局部最小值的真实虚拟引力点,并在程序中引入.

当陷入局部最小点时,虚拟点提供引力势场,改变合力平衡的状态,设计虚拟点引力势场函数 $U_v(p, p_v)$ 表达式为

$$U_v(p, p_v) = \frac{1}{2} K_v d^2(p, p_v). \quad (21)$$

式中: K_v 表示虚拟点引力系数; $d(p, p_v)$ 表示 UUV 距离虚拟点的距离.

虚拟点提供的引力及其角度 θ_{vp} 表达式为

$$F_v(p, p_v) = -\nabla U_v(p, p_v) = -K_v d(p, p_v), \quad (22)$$

$$\theta_{vp} = a \tan(H/d(p, p_v)). \quad (23)$$

综上所述,当 UUV 集群陷入局部最小点时,即达到势场力检测条件时,领航 UUV 所受合力为虚拟点提供的引力 $F_v(p, p_v)$,以此来摆脱该状态.

3 多 UUV 协同避障方法

3.1 多 UUV 编队控制设计方法

一致性理论的基本思想是编队中 UUV 个体间通过邻居节点进行通信,通过一种分布式的算法设计,使 UUV 集群的状态变量达成一致,实现 UUV 编队之间的任务协作^[18].本文在一致性理论的框架下采用领航跟随法的 1-1 算法^[19]作为 UUV 集群的编队算法,使跟随者与领航者保持一定的距离,由于该理论实现简单、机理清晰,因此被广泛应用.

在仿真中简化 UUV 的运动学和动力学模型,假设 UUV 的位姿用 (x, y, ψ) 表示,如图 6 所示,根据期望编队队形参数来确定跟随者的期望位姿:

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_f^i \\ \hat{y}_f^i \\ \hat{\psi}_f^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 + (\Delta x_i \cdot \cos \psi_1 + \Delta y_i \cdot \sin \psi_1) \\ y_1 + (-\Delta x_i \cdot \sin \psi_1 + \Delta y_i \cdot \cos \psi_1) \\ \text{calPsi}(p_f^i, \hat{p}_f^i) \end{bmatrix}. \quad (24)$$

其中: $\hat{x}_f^i, \hat{y}_f^i, \hat{\psi}_f^i$ 分别表示第 i 个跟随者期望的横向位移、纵向位移、航向角; x_1, y_1, ψ_1 分别表示领航者的横向位移、纵向位移、航向角; $\Delta x_i, \Delta y_i$ 分别表示第 i 个跟随者与领航者之间的横向、纵向距离; $\text{calPsi}(p_f^i, \hat{p}_f^i)$ 表示根据第 i 个跟随者的当前位置和期望位置来计算期望航向角的函数, 即可得到编队控制的航向指令, 编队的跟随者的速度设定根据其离期望编队点的距离进行加减速设定, 来保持编队完整性。

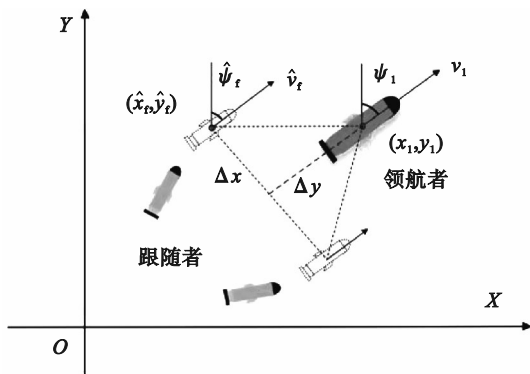


图6 领航跟随者模型

Fig. 6 Leader-follower model

3.2 多UUV协同避障控制设计方法

为解决UUV编队在避障过程中, 因面临较大障碍物而导致编队分散所造成的通信丢失问题, 本文将采取预测编队虚拟点和领航点提供引力的策略来降低避障过程中队形的偏离和编队恢复时间。

如图7所示, UUV编队单纯依靠人工势场法进行避障可能因为所躲避障碍物过大造成编队分散现象, 也就是未考虑协同性所存在的问题, 若编队分散较远, 则会造成通信丢失, 导致整个UUV编队系统无法正常工作。为了解决上述问题, 必须在协同避障的过程中将编队考虑为一个整体运转, 既能高效地躲避障碍, 还能保证UUV间的通信不会被中断, 故提出多UUV协同避障方法。

首先, 当前视多波束声呐探测到障碍物群, 进入协同避障任务指令, 根据领航UUV当前位置、当前速度和当前航向预测保持当前状态 T_s 时间后领航UUV所抵达的位置, T_s 一般取 10 s, 将预测时间后领航者的位置记作点 M' , 当前时刻领航UUV的位置到预测点 M' 的位置的距离为 d_p ,

表示为

$$d_p = v_m \times T_s. \quad (25)$$

其中: v_m 为领航UUV的速度; T_s 表示预测时间。

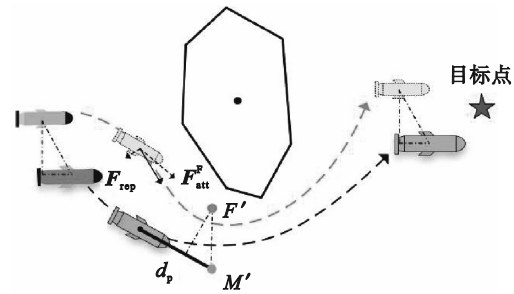


图7 UUV协同避障原理示意图

Fig. 7 UUV collaborative obstacle avoidance principle

预测点 M' 的位置表示为

$$M'_x = x + d_p \cdot \sin(\psi_1), \quad (26)$$

$$M'_y = y + d_p \cdot \cos(\psi_1). \quad (27)$$

式中: x, y 分别表示当前时刻下领航UUV的坐标。获取 M' 点的位置, 根据设定的编队形式即可求得预测虚拟编队点 F' 的坐标, F' 在编队避障的过程中向跟随UUV提供引力势场, 其表达式为

$$U_{att}^F = K_f \times \exp[d(p, p_{F'})/m]. \quad (28)$$

虚拟编队点引力:

$$F_{att}^F = K_f/m \times \exp[d(p, p_{F'})/m]. \quad (29)$$

式中: K_f 表示预测虚拟编队点引力系数; m 表示调整系数; $d(p, p_{F'})$ 表示跟随UUV到预测编队虚拟点的距离。跟随UUV的斥力设计与引力相同, 不再赘述, 其在系统执行避障指令的情况下, 可以更好地保证编队队形的完整度, 较大程度上避免了编队掉落情况。

考虑到避障过程可能会存在不确定因素导致个别跟随UUV严重掉队, 造成UUV间断开通信, 无法正常工作。本文设定增加一种策略, 当跟随UUV与领航UUV之间的距离大于编队安全阈值半径 \tilde{R} , 跟随UUV增加由领航UUV提供的吸引力, 目的是让掉队的跟随UUV尽快回到领航UUV安全编队范围内, 如图8所示。

编队安全阈值半径 \tilde{R} 表示为

$$\tilde{R} = 1.5d_f. \quad (30)$$

式中: d_f 为领航UUV到期望编队点的距离。

在编队避障的过程中向跟随UUV提供引力势场, 其表达式为

$$U_{att}^M = K_m \cdot \exp[d(p, p_M)/n]. \quad (31)$$

虚拟编队点引力:

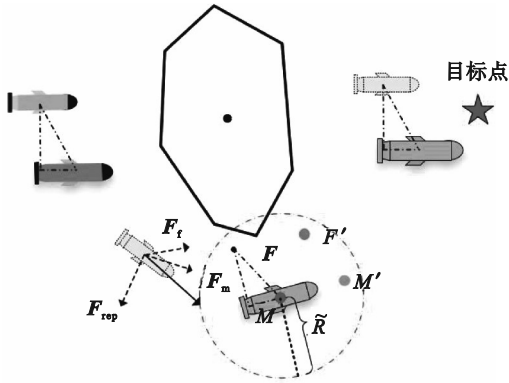


图 8 严重掉队解决策略示意图

Fig. 8 Strategies for resolving serious straggles

$$F_{att}^M = K_m/n \cdot \exp[d(p, p_M)/n]. \quad (32)$$

式中: K_m 表示领航者引力系数; n 表示调整系数;

$d(p, p_M)$ 表示跟随 UUV 到领航 UUV 之间的距离. 超过安全阈值后, 距离主 UUV 越远, 说明脱离编队的从 UUV 距离编队越远, 产生的引力越大, 进一步保证 UUV 编队系统的完整性.

4 协同避碰控制系统设计及流程

协同避碰控制系统包含信息感知层、算法决策层、底层控制层. UUV 编队根据声纳获取障碍物信息, 利用上述编队协同避障控制方法得到实际的速度、航向, 深度控制指令作用到 UUV 底层. 实际控制系统结构和控制流程分别如图 9, 图 10 所示.

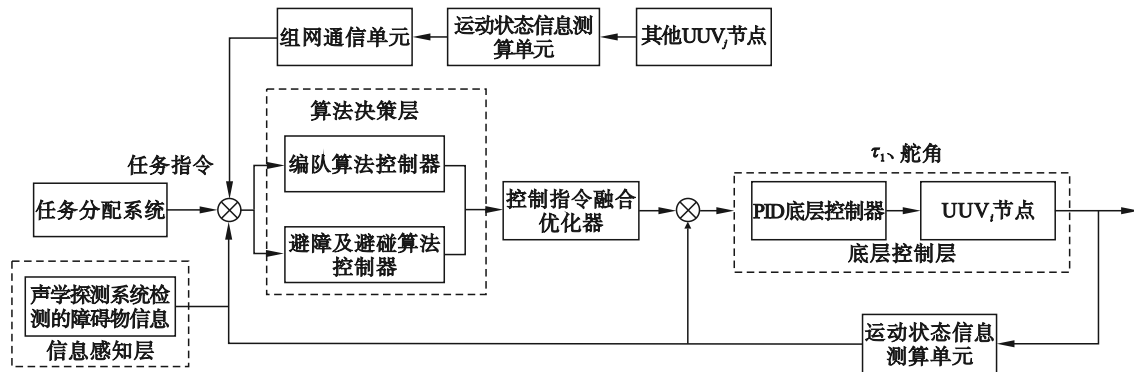


图 9 UUV 编队避障控制系统结构图

Fig. 9 Structure diagram of UUV formation obstacle avoidance control system

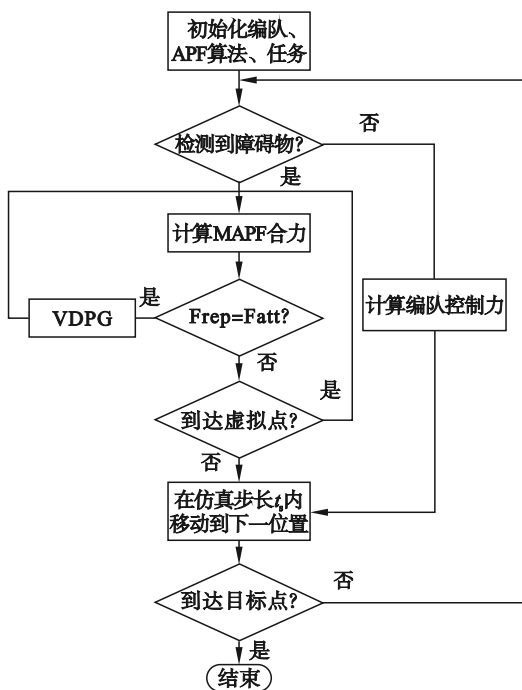


图 10 UUV 编队避障控制流程

Fig. 10 UUV formation obstacle avoidance control process

5 仿真实验与分析

本文基于改进算法验证单 UUV 和多 UUV 避障的合理性, 将算法应用于单体和协同避障仿真. 仿真环境为 Intel^(R) Core^(TM) i5-10 400 CPU@2.90 GHz, RAM 16.0 GB, 2.90 GHz.

5.1 单 UUV 避障仿真实验

首先, 为了验证本文改进 APF 算法生成避障轨迹的优越性, 设置单 UUV 避障仿真实验. 选取避障困难的复杂大障碍物场景和凹形障碍物场景进行对比实验, 结果如图 11 所示. 图 11a, 图 11b 对比实验中, 传统人工势场法轨迹不平滑, 存在很多急转弯和过度避障等现象, 并且在 (1 800, 1 700) m 位置处陷入了局部最小值. 图 11c, 图 11d 对比实验中, 传统人工势场法在 (250, 220) m 位置处遇到凹型障碍物时立刻陷入局部最小值, 无法摆脱; 利用本文算法, 在检测到陷入局部最小值时, 即刻采取措施, 脱离最小值区域.

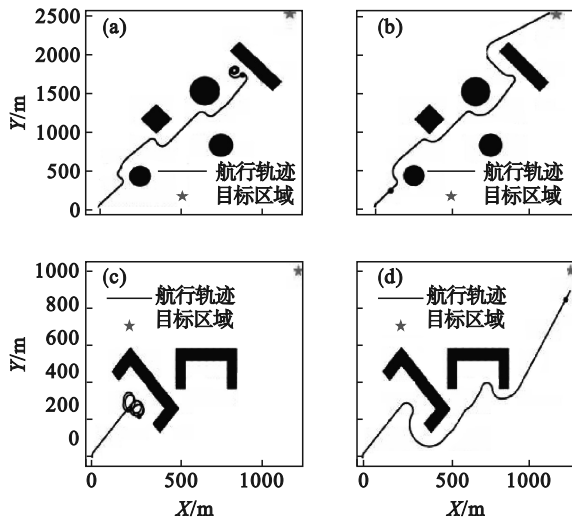


图 11 单 UUV 避障仿真结果

Fig. 11 Single UUV obstacle avoidance simulation results

(a)—复杂大障碍,传统算法; (b)—复杂大障碍,本文算法;
(c)—凹型障碍,传统算法; (d)—凹型障碍,本文算法.

实验结果表明,本文算法所生成的路径相较于人工势场法更为平滑,避免了急转弯且有效解决了局部最小值问题.

5.2 多 UUV 协同避障仿真实验

为验证协同避障算法有效性,采用 1 台领航和 3 台跟随 UUV 为对象,将改进算法应用于协同避障的仿真,设定编队队形如图 12 所示,每台 UUV 搭载的声呐开角 120° ,探测的距离为 150 m. 仿真场景选取复杂多障碍场景和大型障碍场景. 设置实验参数如表 1 所示.

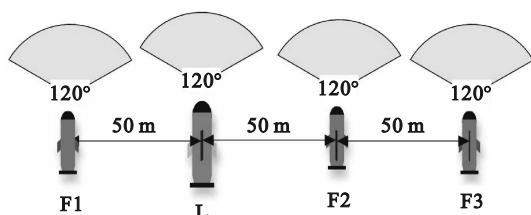


图 12 编队仿真设定

Fig. 12 Formation simulation setting

采用最大队形偏离度,以及编队队形恢复时间作为算法评价的指标.其中队形偏离度定义为编队中任意两个 UUV 之间的期望队形距离与实际距离差的绝对值之和的平均值:

$$\alpha = \frac{\sum_{i,j} |l_{i,j} - d_{i,j}|}{m'} \quad (33)$$

式中: m' 代表 UUV 的数量; $l_{i,j}, d_{i,j}$ 分别表示第 i 个 UUV 与第 j 个 UUV 的期望队形距离和实际距离; $i=1, 2, \dots, m'; j=i, i+1, \dots, m'$.

表 1 实验参数数据
Table 1 Experimental parameters data

参数	值
目标点引力系数 K_{att}	35
斥力系数 K_{rep}	80
前向速度影响系数 k	3.0
修正角影响系数 k_θ	30
虚拟点引力系数 K_v	30
预测虚拟编队点引力系数 K_f	1 000
领航者引力系数 K_m	10
调整系数 m	3.0
调整系数 n	1.5
扇形区域半径 O_b/m	120
左右两虚拟点距离的上限 O_l/m	1 250

编队队形恢复时间 τ 定义为编队避障过程开始到最后一台 UUV 避障结束,再到队形偏离度小于 8 所用的时间.

5.2.1 复杂场景多 UUV 协同避障实验

设定实验的仿真时间为 1 400 s,在复杂仿真场景中分别验证了本文改进算法和传统 APF 算法协同避障效果,两种方法对比结果如图 13,图 14,表 2 所示.

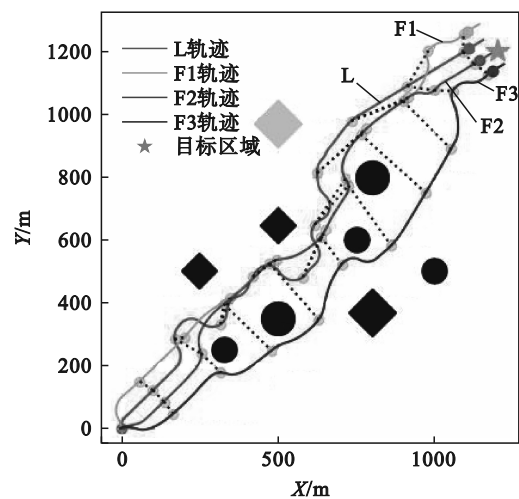


图 13 传统 APF 算法

Fig. 13 Traditional APF algorithm

实验结果表明,在复杂障碍物场景中,本文改进算法相比传统 APF 算法所生成的避障轨迹更为平滑和协调,能够有效避免急转弯等现象,并且在较大程度上,能够有效地减小最大队形偏离度,缩短队形恢复时间,有利于 UUV 编队避障过程中的编队保持.

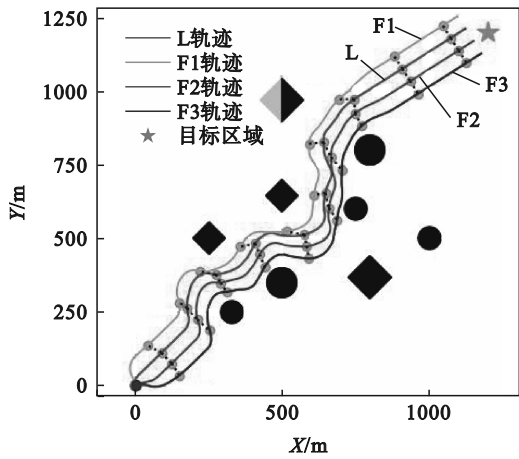


图 14 改进算法

Fig. 14 Improved algorithm

表 2 实验结果对比

Table 2 Comparison of experimental results

算法	最大队形偏离度/m	队形恢复时间/s
本文算法	32.41	657.2
传统 APF 算法	249.05	712.6

5.2.2 大型场景多 UUV 协同避障实验

设定仿真时间为 2 210 s,在大仿真场景中分别验证了 APF 算法和本文改进算法的避障效果,如图 15,图 16,表 3 所示.

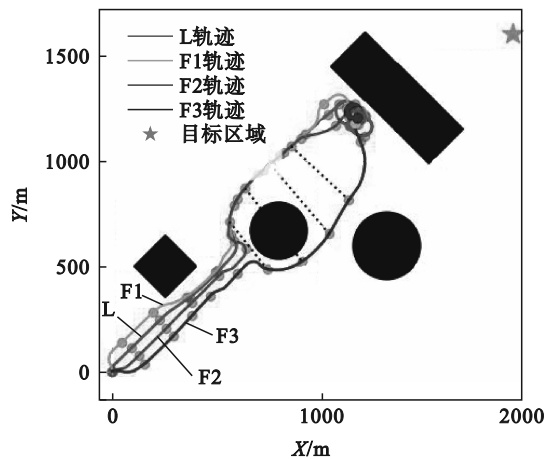


图 15 传统 APF 算法

Fig. 15 Traditional APF algorithm

在大型障碍物场景中,UUV 各自避障,编队中的 UUV 可能选择从障碍物两侧绕行,如果绕行障碍物较大,导致 UUV 间距离较远,则可能导致通信中断,如图 15 所示.UUV 编队在 (700, 550) m 位置处,产生编队分离现象,导致编队之间通信距离较远,产生通信中断,实际环境中队形无法恢复,无法协同作业,故不考虑队形恢复时间,且在 (1 200, 1 250) m 海域处,陷入了局部

最小值,原地转圈.采用本文算法,在协同避障过程中,如图 16 所示,较好地避免了上述现象.

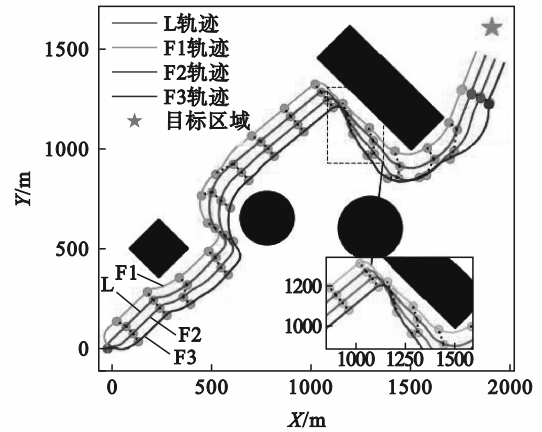


图 16 改进算法

Fig. 16 Improved algorithm

表 3 实验结果对比

Table 3 Comparison of experimental results

算法	最大队形偏离度/m	队形恢复时间/s
本文算法	61.62	155.3 304.4 473.3
传统 APF 算法	287.97	— — —

注:队形恢复时间为 3 次避障到队形恢复所用时间.

故本文改进算法能够保证 UUV 在保持编队队形的前提下完成避障,可以有效避免遇到大障碍物导致编队分散的现象发生,且可以完全避免陷入局部最小值问题发生.

6 结 语

本文讨论了多 UUV 编队协同避障问题,基于改进人工势场法设计了多 UUV 的协同避障策略.首先,将人工势场函数改进成指数形式,在经典位置斥力的基础上,引入偏离度斥力,并结合修正角来优化势场力,针对 APF 法存在的局部最小值问题,设计一种可变菱形虚拟点导引法来使 UUV 摆脱局部最小值的束缚.在协同避障方面,设计编队虚拟点和领航虚拟点引导策略,经过在复杂障碍物场景和大型障碍物场景仿真实验验证表明,所提出的算法能够优化多 UUV 编队的避障路径,解决局部最小值问题,并且能够有效减小最大队形偏离度,缩短队形恢复时间,以及避免编队分散.提高了 UUV 编队海洋航行的安全性和复杂环境的适应性.

在研究过程中,本文未在协同避障层面上对

UUV 速度进行优化,未来将针对该层面,对 UUV 编队的速度选择进行设计优化,并将研究场景扩充至动态.

参考文献:

- [1] 付雷,秦一杰,何顶新,等.基于改进人工势场法的多机器人编队避障[J].控制工程,2022,29(3):388-396.
(Fu Lei, Qin Yi-jie, He Ding-xin, et al. Obstacle avoidance in multi-robot formation based on improved artificial potential field [J]. *Control Engineering of China*, 2022, 29(3):388-396.)
- [2] Wang D Y, Wang P, Zhang X T, et al. An obstacle avoidance strategy for the wave glider based on the improved artificial potential field and collision prediction model [J]. *Ocean Engineering*, 2020, 206: 107356.
- [3] Van Den-Berg J, Guy S J, Lin M, et al. Reciprocal n-body collision avoidance [M]//Springer Tracts in Advanced Robotics. Berlin: Springer, 2011: 3-19.
- [4] Sun J B, Liu G L, Tian G H, et al. Smart obstacle avoidance using a danger index for a dynamic environment [J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(8): 1589.
- [5] 徐博,张娇,王超.一种基于人工势场多UUV编队的实时避障方法[J].中国舰船研究,2018,13(6):66-71.
(Xu Bo, Zhang Jiao, Wang Chao. A real-time obstacle avoidance method based on artificial potential field multi UUV formation [J]. *China Shipbuilding Research*, 2018, 13(6):66-71.)
- [6] 朱旭,闫茂德,张昌利,等.基于改进人工势场的无人机编队防碰撞控制方法[J].哈尔滨工程大学学报,2017,38(6):961-968.
(Zhu Xu, Yan Mao-de, Zhang Chang-li, et al. UAV formation collision avoidance control method based on improved artificial potential field [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2017, 38(6):961-968.)
- [7] Song J, Hao C, Su J C. Path planning for unmanned surface vehicle based on predictive artificial potential field [J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2020, 17(2): 172988142091846.
- [8] Sahu B K, Subudhi B. Potential function-based path-following control of an autonomous underwater vehicle in an obstacle-rich environment [J]. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2017, 39(8): 1236-1252.
- [9] Liu Y B, Ding P F, Wang T H. Autonomous obstacle avoidance control for multi-UUVs based on multi-beam sonars [C]//Global Oceans 2020. Biloxi, 2020: 1-5.
- [10] Fan X J, Guo Y J, Liu H, et al. Improved artificial potential field method applied for AUV path planning [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, 2020: 6523158.
- [11] Matoui F, Boussaid B, Abdelkrim M N. Distributed path planning of a multi-robot system based on the neighborhood artificial potential field approach [J]. *Simulation*, 2019, 95(7): 637-657.
- [12] Weerakoon T, Ishii K, Ali-Forough-Nassiraei A. An artificial potential field based mobile robot navigation method to prevent from deadlock [J]. *Journal of Artificial Intelligence and Soft Computing Research*, 2015, 5(3): 189-203.
- [13] Yan X, Jiang D P, Miao R L, et al. Formation control and obstacle avoidance algorithm of a multi-USV system based on virtual structure and artificial potential field [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, 9(2): 161.
- [14] Zhen Q Z, Wan L, Li Y L, et al. Formation control of a multi-AUVs system based on virtual structure and artificial potential field on SE(3) [J]. *Ocean Engineering*, 2022, 253: 111148.
- [15] 张玉超,蒋沅,代冀阳.三阶多机器人协同编队动态避障控制[J].系统仿真学报,2022,34(8):1762-1774.
(Zhang Yu-chao, Jiang Yuan, Dai Ji-yang. Dynamic obstacle avoidance control of three-order multi-robot cooperative formation [J]. *Journal of System Simulation*, 2022, 34(8): 1762-1774.)
- [16] 刘亚,曾俊宝.未知环境下多AUV协同避障方法研究[J].计算机应用研究,2022,39(10):2929-2934,3032.
(Liu Ya, Zeng Jun-bao. Research on multi-AUV cooperative obstacle avoidance method in unknown environment [J]. *Application Research of Computers*, 2022, 39(10): 2929-2934, 3032.)
- [17] Fossen T I. Marine control systems—guidance navigation, and control of ships, rigs and underwater vehicles [M]. Trondheim: Marine Cybernetics, 2002.
- [18] Ren W. Consensus strategies for cooperative control of vehicle formations [J]. *IET Control Theory & Applications*, 2007, 1(2): 505-512.
- [19] Desai J P, Ostrowski J, Kumar V. Controlling formations of multiple mobile robots [C]//Proceedings of 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Leuven, 1998: 2864-2869.