

基于 TCPA 与 DCPA 的自主船舶应急避碰场景下 优化人工势场算法

王宗开¹, 孙强², 刘洋³, 林南均⁴

1. 泉州师范学院交通与航海学院, 福建 泉州 336200; 2. 集美大学航海学院, 福建 厦门 361021;
3. 山东交通学院航运学院, 山东 威海 264200; 4. 木浦海洋大学航运学院, 韩国 木浦 58628

摘要:针对传统人工势场(traditional artificial potential field, T-APF)算法在自主船舶应急避碰场景中存在的局部最优问题和动态障碍物避碰局限性问题,提出一种基于最近会遇时间(time to closest point of approach, TCPA)和最近会遇距离(distance to closest point of approach, DCPA)的优化人工势场(enhanced artificial potential field, E-APF)算法,通过重构斥力势场函数,引入动态权重调整机制,并结合相对运动态势设计自适应斥力方向策略。仿真结果表明:在静态障碍物场景中,E-APF算法比T-APF算法能更早识别碰撞风险并规划更优路径;在动态障碍物场景中,可有效增大安全距离并减小转向幅度,显著提高障碍物风险评估和避碰决策的准确性。

关键词:自主船舶;应急避碰场景;T-APF算法;E-APF算法;TCPA;DCPA

中图分类号:U675.96

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2025)04-0100-08

引用格式:王宗开,孙强,刘洋,等.基于TCPA与DCPA的自主船舶应急避碰场景下优化人工势场算法[J].山东交通学院学报,2025,33(4):100-107.

WANG Zongkai, SUN Qiang, LIU Yang, et al. Artificial potential field optimization algorithm for autonomous vessel emergency collision avoidance scenarios based on TCPA and DCPA [J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2025, 33(4): 100-107.

0 引言

在自主船舶路径规划与避碰系统的研究开发中,避碰距离足够时,自主船舶应遵循规则^[1]避碰场景进行避让。针对该场景的避碰问题,李丽娜等^[2]基于船舶拟人智能避碰决策算法开发航行避碰辅助决策系统,在海上试验与远洋商船进行示范,该算法具备在线自主学习和拟人化解决问题的能力,可实现对会遇船舶的自动感知、碰撞危险与危险度的自动认知和避碰决策问题的自动求解及优化,为驾驶员提供开阔水域多目标船会遇危险预警与避碰辅助决策支持。当处于应急避碰场景,避让时间较紧迫,自主船舶需采取紧急避让措施,可采用随机树、动态窗口法及强化学习等解决应急避让问题。传统人工势场(traditional artificial potential field, T-APF)算法原理简单、计算效率高、易实现,广泛应用于船舶避障、导航及自动驾驶领域^[3]。

在复杂动态环境下,T-APF算法对动态障碍物的避碰效果较差。Lü等^[4]提出一种路径引导混合人工势场算法,融合势场法与梯度法,包含针对任意静态障碍物的势场路径规划、针对动态目标船的梯度决策机制,以及融合先验路径与航路点选择优化的协同系统3个核心模块,能在包含动态目标船与静态障碍物的多变环境中提供快速反馈,确保自主船舶安全航行。此算法通过确定性计算,在受限水域中快速

收稿日期:2025-02-07

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51879119);泉州师院博士启动费项目(H24026)

第一作者简介:王宗开(1984—),男,江西上饶人,讲师,工学博士,主要研究方向为船舶路径规划,E-mail:307152986@qq.com。

2 势场构建

2.1 斥力

针对船舶应急避碰场景,以最近会遇时间 t_{TCPA} 和最近会遇距离 x_{DCPA} 为动态变量优化 APF 算法,融合船舶与障碍物的实时运动信息,提高自主船舶对动态障碍物的避碰效能。自主船舶(本船和目标船)应急会遇场景如图 2 所示。

目标船相对自动驾驶船舶的速度矢量

$$\mathbf{v}_r = \mathbf{v}_T - \mathbf{v}_O。$$

最近会遇距离

$$x_{\text{DCPA}} = D_r \sin(C_r - a_T - \pi)。 \quad (3)$$

最近会遇时间

$$t_{\text{TCPA}} = D_r \cos(C_r - a_T - \pi) / \|\mathbf{v}_r\|。 \quad (4)$$

由式(3)(4)可知,最近会遇距离和最近会遇时间包含船舶与障碍物间距、相对方位以及相对速度等避让动态信息。结合式(2),构建最近会遇距离的斥力函数

$$y_{\text{TCPA}} = \begin{cases} \|\mathbf{v}_r\| t_{\text{TCPA}}, & t_{\text{TCPA}} \geq 0 \\ \infty, & t_{\text{TCPA}} < 0 \end{cases}。$$

最近会遇时间的斥力函数

$$g(x_{\text{DCPA}}, y_{\text{TCPA}}) = \begin{cases} \log_a[(|x_{\text{DCPA}}| + y_{\text{TCPA}} + \delta) / \rho_{\text{DCPA}}], & |x_{\text{DCPA}}| \leq \rho_{\text{DCPA}} \\ 0, & |x_{\text{DCPA}}| > \rho_{\text{DCPA}} \end{cases},$$

式中: ρ_{DCPA} 为常数,根据船舶尺寸人为设定; δ 为较小的常数,防止输入为 0。

根据实际工程特性,动态障碍物距自主船舶的距离 d_x 越小越危险, d_x 小于一定阈值时产生斥力。根据 d_x 构建距离斥力场模型为:

$$g(d_x) = \begin{cases} \log_a[(d_x + \delta) / \rho_{\text{obs}}], & d_x \leq \rho_{\text{obs}}, a \in (0, 1) \\ 0, & d_x > \rho_{\text{obs}} \end{cases},$$

式中 ρ_{obs} 为自主船舶与障碍物的阈值距离。

d_x 越小,斥力越强,促使船舶主动调整航向或航速以保持安全距离。根据船舶与障碍物间距离,自主船舶斥力场

$$\mathbf{F}_{\text{rev}(\text{dis})} = \eta_{\text{rep}2} g(d_x) \mathbf{e}_1,$$

式中 $\eta_{\text{rep}2}$ 为斥力系数。

障碍物船舶对本船产生的最近会遇距离和最近会遇时间斥力场

$$\mathbf{F}_{\text{rep}(\text{DCPA})} = \eta_{\text{rep}1} g(x_{\text{DCPA}}, y_{\text{TCPA}}) \mathbf{e}_2,$$

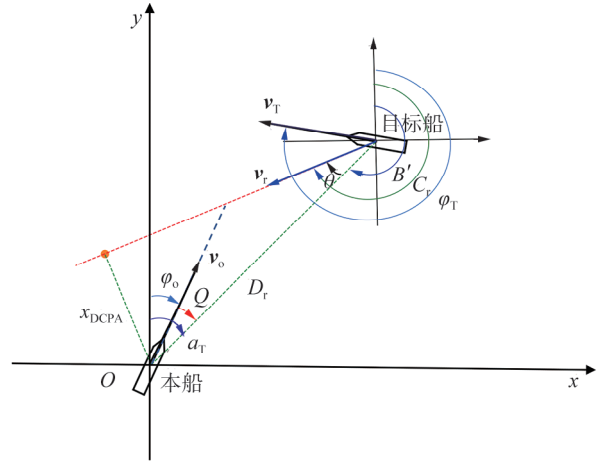
式中: $\eta_{\text{rep}1}$ 为斥力系数, $\mathbf{e}_2$ 为斥力矢量的单位向量。

2.2 引力

根据人工势力场的原理,路径中的目标点会产生虚拟引力场^[15-20]。传统的引力场与自主船舶所在位置和目的点间的距离成正比^[6],目标点虚拟引力场方程为:

$$U_{\text{att}}(d_{\text{goal}}) = \frac{1}{2} \xi d_{\text{goal}}^2 \mathbf{e}_{\text{og}}, \quad (5)$$

式中: ξ 为引力系数,决定目标点引力; d_{goal} 为自主船舶距目标点的距离,即函数输入量。



注: D_r 为本船与目标船间距; $\mathbf{v}_O$ 为本船速度; $\mathbf{v}_T$ 为目标船速度; φ_0 为本船航向; φ_T 为目标船航向; Q 为目标船位于本船的舷角; C_r 为真方位; a_T 为目标船的真方位; B' 为本船位于目标船的真方位; θ 为目标船相对运动方向与本船真方位间的夹角。

图 2 自主船舶应急会遇场景

目标点虚拟引力矢量方程为:

$$\mathbf{F}_{\text{att}} = \nabla U_{\text{att}}(d_{\text{goal}}) = \xi d_{\text{goal}} \mathbf{e}_{\text{og}} \circ$$

虚拟引力 $\mathbf{F}_{\text{att}}$ 为恒力,不随目标点的距离变化而变化。目标点的引力与自主船舶和目标点的距离成正比,距离越大,引力越大,可能掩盖障碍物产生的斥力,对总虚拟场产生不利影响。

对式(5)进行优化,优化后的引力场矢量方程为:

$$U_{\text{att}}(d_{\text{goal}}) = \xi d_{\text{goal}}^2 \mathbf{e}_{\text{og}} \circ$$

优化后的引力矢量方程为:

$$\mathbf{F}_{\text{att}} = \nabla U_{\text{att}}(d_{\text{goal}}) \mathbf{e}_{\text{og}} = \xi \mathbf{e}_{\text{og}} \circ$$

优化后的引力不再与目标点距离相关,只与目标点方向有关,可避免因传统人工势场引力过大而忽略障碍物的斥力问题。

2.3 综合势力场

构建所有虚拟势力场后,需合理规划虚拟场力,在自主船舶应用场景下进行有效耦合和应用。各虚拟场力耦合应用流程见图3。

自主船舶在应急避碰状态下探测周围障碍物,如果自主船舶与障碍物的距离小于 ρ_{obs} ,需判断是静态还是动态障碍物。若障碍物为静态且与自主船舶距离小于 ρ_{obs} ,对自主船舶施加斥力

$$\mathbf{F}_{\text{rep}(2)} = \mathbf{F}_{\text{rep}(\text{dis})} \circ$$

若为静态障碍物且与自主船舶距离不小于 ρ_{obs} ,则不产生斥力。

同理,若为动态障碍物且与自主船舶距离小于 ρ_{obs} ,对自主船舶施加动态斥力

$$\mathbf{F}_{\text{rep}(1)} = \mathbf{F}_{\text{rep}(\text{DCPA})} + \mathbf{F}_{\text{rep}(\text{dis})} \circ$$

若为动态障碍物且与自主船舶距离不小于 ρ_{obs} ,则不产生任何力。

斥力场矢量与引力场矢量叠加,共同作用于自主船舶周围。自主船舶依据综合矢量方向确定最优局部路径规划方向。在时间步 t 时,外界对自主船舶的综合势力

$$\mathbf{F}_t = \mathbf{F}_{\text{att}} + \sum_{i=1}^n \mathbf{F}_{\text{rep}(i)},$$

式中: n 为障碍物总数, $\mathbf{F}_{\text{rep}(i)}$ 为第 i 个障碍物施加的斥力。

3 仿真测试

采用基于船舶动力学的船舶运动模型(maneuvering modeling group, MMG)仿真平台。MMG 模型属于分离式模型,在船舶运动仿真领域应用广泛,该模型的总方程为^[19]:

$$\begin{cases} (m + m_x) \dot{\mathbf{u}} - (m + m_y) \mathbf{v} \mathbf{r} = X \\ (m + m_y) \dot{\mathbf{v}} + (m + m_x) \mathbf{u} \mathbf{r} = Y, \\ (I_{zz} + J_{zz}) \dot{\mathbf{r}} = N \end{cases}$$

式中: X 、 Y 分别为船舶的纵向力和横向力, N 为船舶转动力矩, I_{zz} 为船舶转动惯量, J_{zz} 为额外转动惯量, $\mathbf{u}$ 、 $\mathbf{v}$ 、 $\mathbf{r}$ 分别为船舶前进、横移、转向的速度矢量, m 为船舶质量, m_x 为纵向额外质量, m_y 为横向额外质量, $\dot{\mathbf{u}}$ 、 $\dot{\mathbf{v}}$ 、 $\dot{\mathbf{r}}$ 分别为船舶前进、横移、转向的加速度。

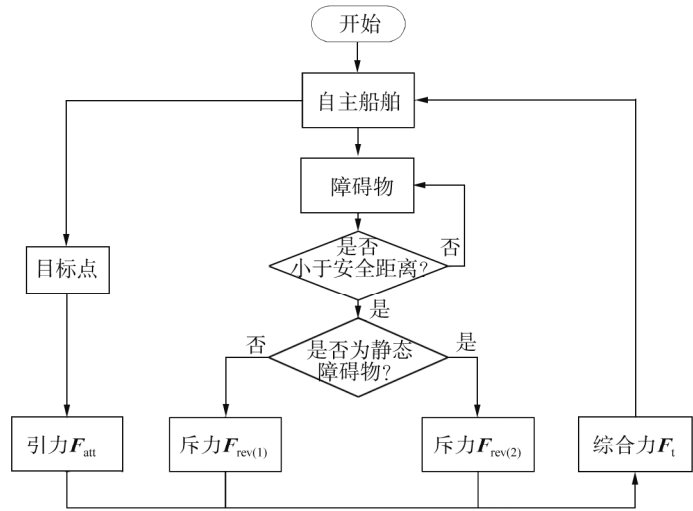


图3 虚拟场力耦合应用流程

采用木浦海洋大学训练船参数^[11]作为MMG仿真平台中的模型参数,并结合比例积分微分控制器控制算法,输入方位角差,输出舵角控制信号,设定控制系统参数为 $K_p = 0.02$, $K_i = 0.03$, $K_d = 0$ 。采用Pygame编写仿真平台(Python 3.9版及以上),仿真计算机的操作系统为Windows 10,处理器为Intel Core i7,内存为32 GiByte。

3.1 静态避碰仿真测试

进行静态避碰仿真测试,设置一个静态障碍物,对比T-APF算法和E-APF算法下避让静态障碍物的能力。设定自主船舶出发点位置为 $(-3\ 000\text{ m}, 300\text{ m})$,初始速度为 7.1 m/s ,初始航向为 090° 。障碍物初始位置为 $(1\ 300\text{ m}, 300\text{ m})$,障碍物为边长 300 m 的正方形。采用T-APF算法设定 $\eta_{\text{rep}} = 10^4$, $\rho_s = 3\ 000\text{ m}$, $\zeta = 1$;采用优化人工势场设定 $\eta_{\text{rep1}} = \eta_{\text{rep2}} = 1$, $\rho_{\text{DCPA}} = 3\ 000\text{ m}$, $\rho_{\text{TCPA}} = 600\text{ s}$, $\rho_{\text{obs}} = 600\text{ m}$, $\alpha = 0.8$, $\zeta = 1$ 。

不断调试参数的最佳值才能使自主船舶的避障效率达到较佳状态。采用E-APF算法与T-APF算法,自主船舶避让静态障碍物情景中的运动轨迹见图4。由图4可知:E-APF、T-APF算法回归原航线时间分别为 $1\ 224\text{ s}$ 、 $1\ 424\text{ s}$,前者比后者回归航线时间缩短约 14.0% 。

自主船舶避碰静态障碍物过程中指标变化

如图5所示。由图5a)可知:采用T-APF算法启动避碰较迟,在第 408 s 时开始启动转向,航向在 $072^\circ \sim 252^\circ$ 震荡,变化幅度较大,第 538 s 最接近目标船;采用E-APF算法约在第 202 s 开始转向,转向行动更早,且航向更平稳,航向在 $072^\circ \sim 144^\circ$ 震荡,决策时间提前约 50.5% ,优势明显,在第 776 s 最接近目标船。由图5b)可知:采用E-APF算法始终保持较远的避碰距离,最近会遇距离由 351 m 增至 $1\ 576\text{ m}$,增大 3.5 倍。由图5c)可知:采用E-APF算法显著增大平均会遇距离,避碰效果更优。由图5d)可知:采用E-APF算法,最近会遇时间由正转负,稳定性优于T-APF算法,表明优化算法减小避碰过程中的震荡,提高避碰稳定性。

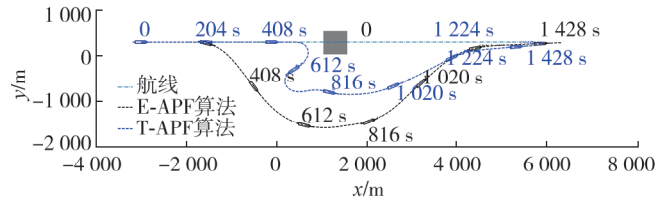


图4 自主船舶避让静态障碍物的运动轨迹

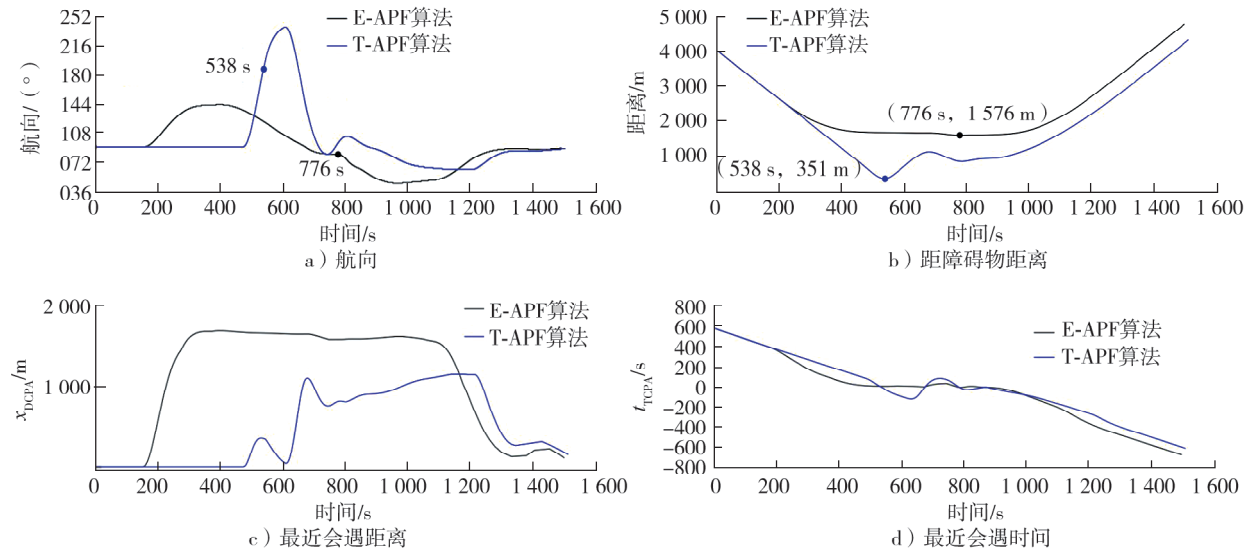


图5 自主船舶避碰静态障碍物过程中指标变化

3.2 动态避碰仿真测试

为验证E-APF算法在动态避碰中的效果,设定2艘动态相向行驶的自主船舶进行对比测试,初始设置:自主船舶 O_s 的出发点位置为 $(-1\ 600\text{ m}, 400\text{ m})$,航向 090° ,速度为 10 m/s ;自主船舶 T_1 的出发点位置为 $(1\ 600\text{ m}, 400\text{ m})$,航向 270° ,速度为 10 m/s 。仿真测试船舶运动轨迹如图6所示。T-APF算法和

E-APF 算法下动态避碰的参数变化如图 7 所示。

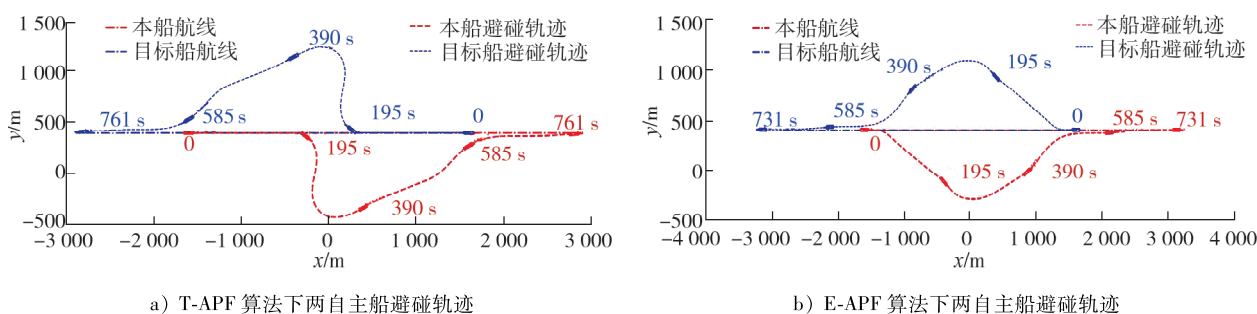


图 6 仿真测试 T-APF 算法和 E-APF 算法下船舶运动轨迹

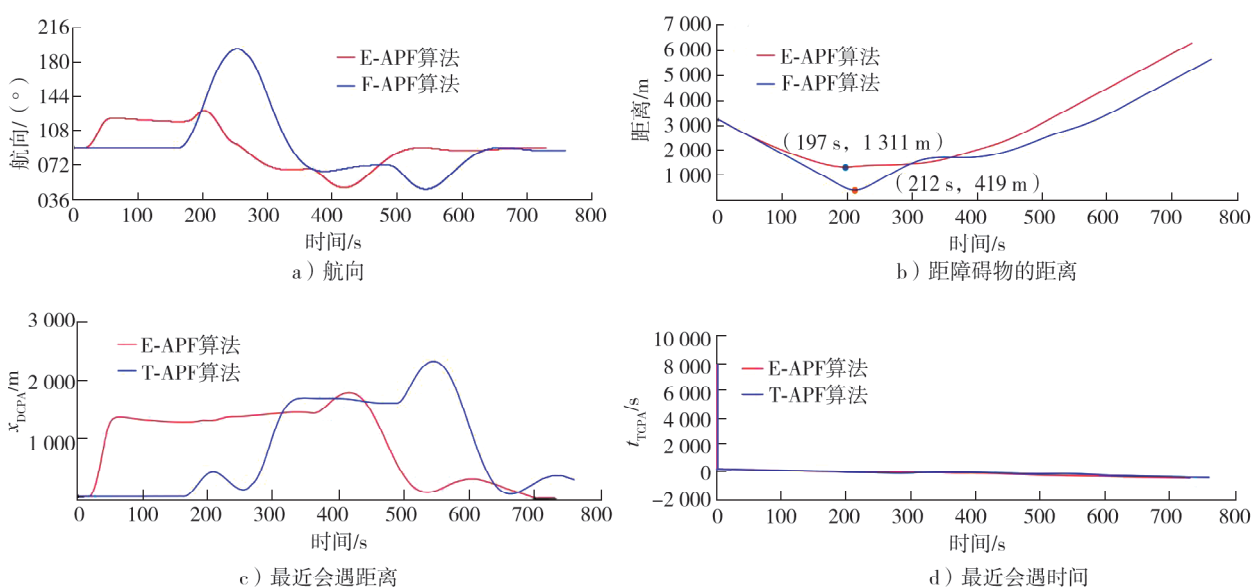


图 7 自主船舶动态避让障碍物过程中指标变化曲线

由图 6 可知:采用 E-APF 算法提前转向时间比采用 T-APF 算法早,同时航向的改变(幅度不大)较平顺,符合船舶惯性大的转向特点,转向后两自主船舶间距较大,转向时回舵时间及时。

由图 7a)可知:采用 E-APF 算法航向变化范围为 $036^{\circ} \sim 140^{\circ}$ (幅度 104°),经过约 11 s 启动转向,而 T-APF 算法的航向变化范围为 $036^{\circ} \sim 216^{\circ}$ (幅度 180°),经过约 195 s 启动转向;优化后的航向变化幅度更小,控制更精确;采用 E-APF 算法经过 520 s 完成转向并稳定航行,而 T-APF 算法经过 610 s 才回归航线,采用 E-APF 算法使回归时间提前 14.8%。由图 7b)可知:两船会遇时的最近距离由 T-APF 算法的 419 m 增至 F-APF 算法的 1 311 m,增大 2.1 倍。由图 7c)可知:采用 E-APF 算法的最近会遇距离变化平稳,并在避让过程中稳定维持大于 1 200 m,优于 T-APF 算法。由图 7d)可知:两种算法的最近会遇时间变化趋势相似,均由正转负,符合预期结果。

4 结束语

为提高自主船舶在应急避碰场景下动静态障碍物的避碰效果,在优化人工势场算法中,引入最近会遇时间和最近会遇距离作为斥力函数的输入变量,调整虚拟势场力的方向,将斥力函数改为对数形式,并改进引力函数。与传统人工势场算法相比,优化人工势场算法后,自主船舶更及时、有效地避让静态和动态障碍物,更快地恢复原航向,避碰持续时间更短,转向幅度更小,显著提高避碰效果。

在仿真测试中,优化人工势场算法仍需预先设定多个参数,且需通过人工调试确定最优取值,方可获得较优的避碰效果。为提高优化人工势场算法的实用性与泛化能力,可进一步优化优化人工势场算法,减少参数依赖,提高优化人工势场算法的泛化能力和实用性。

参考文献:

- [1] 中国人民解放军海军海道测量局. 国际海事组织 1972 年国际海上避碰规则[M]. 天津:中国航海图书出版社,2010.
- [2] 李丽娜,陈国权,杨凌波,等. 船舶拟人智能避碰决策算法测试及应用[J]. 中国航海,2022,45(1):1-7.
- [3] 陈佳,张珂,杜英森,等. 基于改进势场法的多无人机避碰控制方法[J]. 探测与控制学报,2024,46(4):93-100.
- [4] LYU H G, YIN Y. Fast path planning for autonomous ships in restricted waters[J]. Applied Sciences, 2018, 8(12): 8122592.
- [5] 廉博洋,林明星. 蚁群算法引导人工势场法的机器人路径规划[J]. 机械设计与制造工程,2024,53(8):67-71.
- [6] 梅艺林,崔立堃,胡雪岩,等. 基于人工势场法的复杂环境下多无人车避障与编队控制[J]. 工程科学学报,2025,47(2):364-373.
- [7] 葛甜,岳佳豪. 改进人工势场法的避障轨迹规划[J]. 汽车实用技术,2023,48(23):50-55.
- [8] 王浩. 基于改进人工势场法的车辆避障路径规划研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.
- [9] 修彩靖,陈慧. 基于改进人工势场法的无人驾驶车辆局部路径规划的研究[J]. 汽车工程,2013,35(9):808-811.
- [10] 杜卓洋. 无人驾驶车辆轨迹规划算法研究[D]. 杭州:浙江大学,2019.
- [11] WANG Z K, IM N. Enhanced artificial potential field for MASS's path planning navigation in restricted waterways[J]. Applied Ocean Research, 2024, 149: 104052.
- [12] 朱茂飞,胡方亚,李娜可,等. 无人驾驶汽车路径规划算法综述[J]. 农业装备与车辆工程,2023,61(11):18-22.
- [13] AHN J H, RHEE K P, YOU Y J. A study on the collision avoidance of a ship using neural networks and fuzzy logic[J]. Applied Ocean Research, 2012, 37: 162-173.
- [14] 丛玉华,赵宗豪,邢长达,等. 基于改进人工势场的无人机动态避障路径规划[J]. 兵器装备工程学报,2021,42(9):170-176.
- [15] CHEN P F, HUANG Y M, PAPADIMITRIOU E, et al. An improved time discretized non-linear velocity obstacle method for multi-ship encounter detection[J]. Ocean Engineering, 2020, 196: 106718.
- [16] LAZAROWSKA A. A discrete artificial potential field for ship trajectory planning[J]. Journal of Navigation, 2020, 73(1): 233-251.
- [17] LI M X, MOU J M, CHEN L Y, et al. Comparison between the collision avoidance decision-making in theoretical research and navigation practices[J]. Ocean Engineering, 2021, 228: 108881.
- [18] 刘洲洲. 基于改进人工势场法的智能无人车路径规划仿真研究[J]. 计算技术与自动化,2013,32(2):133-136.
- [19] YASUKAWA H, YOSHIMURA Y. Introduction of MMG standard method for ship maneuvering predictions[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2015, 20(1): 37-52.

Artificial potential field optimization algorithm for autonomous vessel emergency collision avoidance scenarios based on TCPA and DCPA

WANG Zongkai¹, SUN Qiang², LIU Yang³, IM Namkyun⁴

1. College of Transportation and Navigation, Quanzhou Normal University, Quanzhou 336200, China;

2. College of Navigation, Jimei University, Xiamen 361021, China;

3. School of Navigation and Shipping, Shandong Jiaotong University, Weihai 264200, China;

4. School of Navigation and Shipping, Mokpo National Maritime University, Mokpo 58628, Republic of Korea

Abstract: To address the local optimum problem of the traditional artificial potential field (T-APF) algorithm and the limitations of dynamic obstacle avoidance in emergency collision avoidance scenarios for autonomous

vessels, an enhanced artificial potential field (E-APF) algorithm based on time to closest point of approach (TCPA) and distance to closest point of approach (DCPA) is proposed. This algorithm reconstructs the repulsive potential field function, introduces a dynamic weight adjustment mechanism, and combines relative motion dynamics to design an adaptive repulsive direction strategy. Simulation results indicate that in static obstacle scenarios, the E-APF algorithm can identify collision risks earlier and plan better paths compared to the T-APF algorithm; in dynamic obstacle scenarios, it effectively increases safety distances and reduces steering angles, significantly improving the accuracy of obstacle risk assessment and collision avoidance decision-making.

Keywords: autonomous vessel; emergency collision avoidance scenary; T-APF algorithm; E-APF algorithm; TCPA; DCPA

(责任编辑:王惠)

.....
(上接第 51 页)

periodic changes with variations in the river channel water level; during the dry season, the river channel water level decreases, which leads to increased settlement and lateral displacement of the comprehensive utility tunnel, while during the wet season, the river channel water level rises, causing the comprehensive utility tunnel to return to its original position, with the displacement near the river channel and road surface being significantly affected by the fluctuations in the river channel water level. 4) As the groundwater level decreases, the shallower the burial depth of the comprehensive utility tunnel, the greater the settlement; the displacement of shallow-buried tunnels is significantly affected by changes in the groundwater level. In practical engineering applications of comprehensive utility tunnels, shallow burial is not advisable in high water level areas.

Keywords: comprehensive utility tunnel; finite element analysis; ground water level; riverway level; displacement

(责任编辑:王惠)

.....
(上接第 99 页)

the linear quadratic regulator (LQR), and a steering control system is designed based on the sliding mode variable structure controller (SMVSC). Simulation experiments are conducted on the LQR forward control system and SMVSC steering control system. Simulation results show that: the actual steering angle of TWSBR reaches the desired steering angle after 1.2 s, the actual body tilt angle reaches the desired body tilt angle after 2 s, and the actual speed reaches the desired speed after 3 s. A trajectory tracking generator is designed, and a TWSBR trajectory tracking control system is constructed, and a TWSBR experimental platform is built. TWSBR trajectory tracking experiment is conducted. The experimental results show that the errors of TWSBR body tilt angle, body tilt angular velocity, steering angle, and steering angular velocity stabilize near 0 after 1 s, while the displacement error and speed error stabilize near 0 after 2 s. The fluctuation range of each state variable of TWSBR is small after stabilization. Considering factors such as sensor acquisition errors and motor drive precision, the results indicate that the TWSBR demonstrates good trajectory tracking performance, and achieves displacement tracking, speed tracking, body tilt angle tracking, and steering angle tracking.

Keywords: TWSBR; LQR forward control system; SMVSC steering control system; trajectory tracking; experimental platform

(责任编辑:边文超)