

# 基于改进人工势场法的无人船路径规划

张丰<sup>1</sup>, 廖卫强<sup>1,2</sup>, 乔中飞<sup>1</sup>, 李光泽<sup>1</sup>

(1. 集美大学轮机工程学院, 福建 厦门 361021; 2. 福建省船舶与海洋工程重点实验室, 福建 厦门 361021)

[摘要] 针对传统人工势场法无人船路径规划中无法到达目标点、局部极小值、路径振荡的问题, 提出了一种改进人工势场法。修改斥力函数, 解决无人船无法到达目标点问题; 施加艏角限制, 增加随机扰动, 解决无人船存在的两种局部极小值问题; 进行路径简化, 解决无人船路径振荡的问题。将改进人工势场法与传统人工势场法进行仿真比较, 结果证明, 改进人工势场法可以有效地克服无法到达目标点的问题, 并能够在陷入局部极小值之后成功跳出, 路径振荡的问题也得到改善。可为无人船的路径规划技术研究提供更多思路。

[关键词] 无人船; 路径规划; 人工势场法; 局部极小值; 随机扰动; 路径振荡

[中图分类号] U 665.13

## Path Planning of Unmanned Ship Based on Improved Artificial Potential Field Method

ZHANG Feng<sup>1</sup>, LIAO Weiqiang<sup>1,2</sup>, QIAO Zhongfei<sup>1</sup>, LI Guangze<sup>1</sup>

(1. School of Marine Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. Fujian Provincial Key Laboratory of Naval Architecture and Marine Engineering, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** In this paper, an improved artificial potential field method is proposed to solve the problems of the traditional artificial potential field method in the path planning of unmanned ship, such as the inability reaching the target point, local minimum value and path oscillation. Firstly, the repulsion function was modified to solve the problem that unmanned ship cannot target. Secondly, the two local minimum problems of unmanned ship were solved by applying bow angle limit and random disturbance. Thirdly, the problem of unmanned ship path oscillation was solved by simplifying the path. Finally, comparisons were conducted between the results from simulations from the improved artificial potential field method and the traditional artificial potential field method. The results show that the improved artificial potential field method can effectively overcome the problem of being unable to reach the target point, and can successfully jump out after falling into the local minimum value, and the problem of path oscillation also can be improved. provided more ideas for the research of path planning technology for unmanned ships.

**Keywords:** unmanned ship; path planning; artificial potential field method; local minimum; random disturbance; path of oscillation

[收稿日期] 2022-04-06

[基金项目] 国家自然科学基金项目(52171308)

[作者简介] 张丰(1998—), 男, 硕士生, 从事智能船舶方面的研究。通信作者: 廖卫强(1976—), 男, 博士, 副教授, 硕导, 从事船舶微电网及智能无人船的研究。

## 0 引言

无人船集船舶设计、人工智能、信息处理和运动控制等专业技术于一体,能够在海洋环境中自主航行并完成各种任务<sup>[1]</sup>。其中路径规划是无人船技术的重要组成部分,合理的路径规划不仅能使无人船安全避开海上障碍物,还能使其节省时间及能耗。因此,路径规划对于无人船来说有着重要的意义。

目前针对无人船路径规划的算法主要有:粒子群算法、人工势场法、遗传算法、禁忌搜索算法等。其中,人工势场法(artificial potential field, APF)算法具有计算量小、原理简单和生成路径平滑等优点,因此,被广泛应用于无人船的路径规划<sup>[2-4]</sup>。但经典人工势场法尚存在一些不足<sup>[5-8]</sup>,如:目标点不可达、局部极小值、路径振荡及冗余等。因此需要对该方法进行改进。

对于传统人工势场法存在的问题,目前已有多种改进方法。刘翰培等<sup>[9]</sup>在危险区域融合模糊控制算法,克服了传统人工势场法的局部极小值问题;Zhou等<sup>[10]</sup>将人工势场法结合粒子群算法优化切向向量,改善了目标点不可达问题;林洁等<sup>[11]</sup>通过引用模拟退火算法,改进传统人工势场函数,提出“沿边走”的策略,有效解决了容易陷入局部极小值问题;任工昌等<sup>[12]</sup>在传统势力场基础上引入障碍物速度斥力场函数,实现机器人的动态路径规划;胡杰等<sup>[13]</sup>提出一种用偏转角度来构建附加牵引力的方法,以解决局部极小值问题;Guang等<sup>[14]</sup>提出利用分段混合算法改进势场函数,解决目标点不可达及局部极小值问题。

本文针对无人船人工势场法路径规划中的问题,对斥力函数进行改进,以解决目标不可达问题。通过艏向角限制,使船舶无法进行大角度折返运动,限制船舶下一点位移,使其离开单一障碍物引起的局部极小值问题;通过增加随机扰动量,从而使引力出现误差,解决多个障碍物造成的局部极小值问题;通过路径优化,减小路径振荡,实现路径的平滑性。

## 1 传统人工势场法基本原理

人工势场法由引力势场和斥力势场组成<sup>[15]</sup>。目标点对机器人产生引力作用,障碍物对无人船产生斥力作用,在引力与斥力合力作用下无人船向目标点移动。

传统引力势场函数为: $E_a = k_a r_j^2 / 2$ ,  $r_j = \sqrt{(x_j - x_1)^2 + (y_j - y_1)^2}$ <sup>[16]</sup>。式中: $E_a$ 为引力势能; $k_a$ 为引力系数; $r_j$ 为无人船当前的位置与目标点之间的距离; $x_j$ 、 $y_j$ 分别表示无人船当前位置的横、纵坐标; $x_1$ 、 $y_1$ 分别表示目标点的横、纵坐标。对引力势场函数进行求导,可以得到引力函数  $F_a = dE_a/dr_j = k_a r_j$ ,  $F_a$ 为目标点对无人船的引力。

传统的斥力势场函数为:

$$E_r = \begin{cases} k_r [(1/d_{ji}) - (1/d_0)]^2 / 2, & d_{ji} \leq d_0; \\ 0, & d_{ji} > d_0. \end{cases} \quad (1)$$

式中: $E_r$ 为斥力势能; $k_r$ 为斥力系数; $d_{ji}$ 表示无人船当前位置与第*i*个障碍物之间的距离,  $d_{ji} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}$ 。 $x_i$ 、 $y_i$ 分别表示第*i*个障碍物的横、纵坐标; $d_0$ 为障碍物的斥力影响距离,当无人船与障碍物之间的距离超过障碍物的斥力影响距离,无人船就不受障碍物的斥力影响<sup>[11]</sup>。对式(1)进行求导,可以得到斥力函数为:

$$F_r = dE_r/dd_{ji} = \begin{cases} k_r \{ [1/(d_0 \cdot d_{ji}^2)] - [1/(d_{ji}^3)] \}, & d_{ji} \leq d_0; \\ 0, & d_{ji} > d_0. \end{cases} \quad (2)$$

式中: $F_r$ 为障碍物对无人船的斥力。

结合式(1)和式(2)可以发现,当  $d_{ji} \leq d_0$  时,随着无人船和障碍物之间的距离  $d_{ji}$  的减小,斥力势能  $E_r$  和斥力  $F_r$  都会上升;当  $d_{ji}$  趋近于0时,斥力  $F_r$  会接近无穷大。

## 2 改进人工势场法

### 2.1 斥力函数修改

从式 (1) 可以知, 当目标点和障碍物之间的距离很近时, 障碍物斥力会大于目标点引力, 导致无人船无法到达目标点。在传统的斥力势场函数上, 添加无人船与目标之间的距离, 修改斥力函数, 从而解决目标点不可达问题。改进斥力势场函数为:

$$E'_r = \begin{cases} (1/2)k_r [(1/d_{ji}) - (1/d_0)]^2 \cdot r_j^a, & d_{ji} \leq d_0; \\ 0, & d_{ji} > d_0. \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $r_j^a$  为无单位的斥力影响因子。在无人船与目标点之间的距离很小时, 障碍物的斥力势能会受到影响而降低, 当目标点周围存在障碍物, 无人船会因障碍物的斥力减小而准确到达目标点。式 (3) 对无人船与障碍物之间的距离及无人船与目标之间的距离分别进行求导, 得到新的斥力函数式为:  $F'_{r1} = \partial E'_r / \partial d_{ji} = k_r [(1/d_{ji}^2) - (1/(d_0 d_{ji}^2))] \cdot r_j^a$ ;  $F'_{r2} = \partial E'_r / \partial r_j = (a/2)k_r [(1/d_{ji}) - (1/d_0)]^2 \cdot r_j^{a-1}$ 。其中:  $F'_{r1}$  为障碍物对无人船的斥力, 方向由障碍物指向无人船;  $F'_{r2}$  为目标点对无人船的引力, 方向由无人船指向目标点。

分析可知: 1) 当  $0 < a < 1$  时, 若  $r_j$  很小时,  $F'_{r1}$  接近 0,  $F'_{r2}$  无限大, 即斥力分量由无人船指向目标点。2) 当  $a = 1$  时,  $F'_{r2}$  为常数, 只受目标引力作用。3) 当  $a > 1$  时,  $\lim_{r_j \rightarrow 0} F'_{r1} \rightarrow 0$ ,  $\lim_{r_j \rightarrow 0} F'_{r2} \rightarrow 0$ , 总的斥力大小无限趋向 0。所以在目标点附近斥力逐渐增大, 从而解决目标不可达问题。

### 2.2 施加艏向角限制增加随机扰动

局部极小值问题是指船舶在移动过程中的某个时刻, 在当前位置下目标船舶受到的引力与斥力大小相等, 方向相反, 导致当前位置点船舶合力为 0, 船舶不再移动或者在小范围内往复抖动的现象。典型的局部极小值问题可以细分为两种情况。1) 在船舶与目标点之间存在单一障碍物, 且船舶、障碍物和目标点处于同一直线。此时, 随着船舶逐步向目标点运动, 斥力逐渐增大, 引力逐渐减小, 当运动到某个斥力与引力大小相近的位置, 船舶在该处停止或者在该点处往复抖动, 导致船舶无法到达目标点, 如图 1a 所示)。2) 在复杂障碍物情况下, 多个障碍物组成的复杂障碍物环境所产生的总斥力与目标点产生的引力合力为 0, 导致船舶无法到达目标点, 如图 1b) 所示。

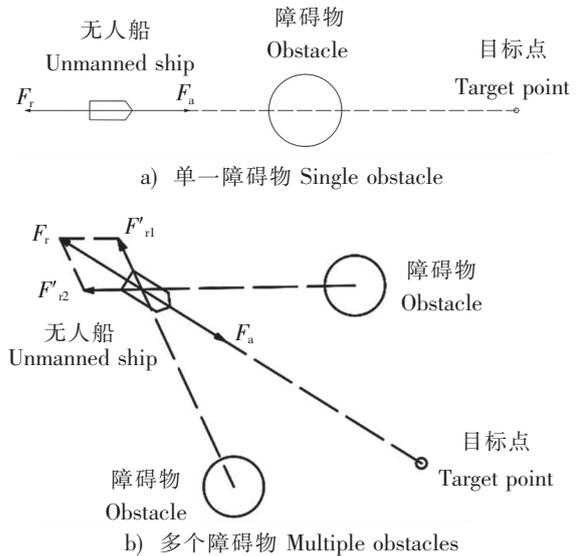


图 1 局部极小值问题  
Fig.1 Local minimum problem

对情况 1 与情况 2 分别进行处理。局部极小值状态判别为  $\rho(X_j, X_{j-b}) < kbl$ 。式中:  $\rho(X_j, X_{j-b})$  为在第  $j$  个周期, 船舶的位置与在第  $j - b$  周期船舶的位置之间的距离;  $k$  为极小值判断系数;  $l$  为步长。本文  $k, l$  分别取值为 1, 0.5。

针对情况 1), 通过加入艏向角限制, 使船舶无法进行大角度折返运动, 其最大艏向角为  $60^\circ$ 。该限制能够对船舶在后续位置的位移施加控制, 使其离开局部受力平衡状态。

针对情况 2), 施加随机扰动。当出现多个障碍物的局部极小值时, 无人船下一步计算出的引力随机地出现误差, 引力偏离正常值, 使无人船跳出局部极小值。若仍陷于局部极小值, 则继续产生新的随机误差, 直至无人船走出局部极小值。  $F_a = dE_a/dr_j = k_a r_j \cdot k_b$ 。式中:  $k_b$  为随机扰动量, 取值  $50\% \sim 200\%$ 。为了避免在随机扰动之下船舶会撞上障碍物, 扰动量的大小必须适当, 太大船舶可能撞上障碍物, 太小可能不足以跳出局部极小值。此外, 施加随机扰动后, 虽然无人船会跳出局部极小

值,但是由于随机性,无人船很有可能会在原地来回走动多次才会成功跳出,在这个过程中,会产生冗余的路径。

### 2.3 路径简化

针对增加随机扰动后产生多余路径的弊端,采取措施减小路径振荡,使路线变得平滑。在路径规划过程中,第j点的位置与第j+2点的位置之间的距离小于一个步长的话,即认为无人船可从j点走到第j+2点的位置,第j+1步的路径是多余的。因此,可以把路径规划中的此类路径点消去,即

$\sqrt{(X_j - X_{j+2})^2 + (Y_j - Y_{j+2})^2} < l$ 。式中: $X_{j+2}, Y_{j+2}$ 为第j+2步路径点的横、纵坐标。如此往复,路径的振荡就会大大地减小,路径的平滑性也会得到改善,如图2所示。图2中实线为原有路径,虚线为修改后的路径。

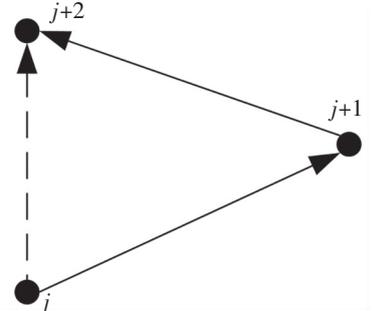


图2 减小路径振荡示意图  
Fig.2 Schematic diagram of reducing path oscillation

## 3 仿真结果与分析

### 3.1 目标不可达现象仿真分析

按照斥力修改方案,修改传统人工势场法的斥力函数,然后进行仿真模拟。引力系数  $k_a = 15$ ; 斥力系数  $k_r = 5$ ; 障碍物的斥力影响距离  $d_0 = 2.5$ ;  $r_j$  的指数  $a$  取值为2。

运行修改斥力函数后的人工势场法,结果如图3所示。图3a)显示传统人工势场法无法到达目标点;图3b)为修改斥力函数后人工势场法的仿真结果,成功抵达目标点。证明修改斥力函数之后,解决了无法到达目标点的问题。

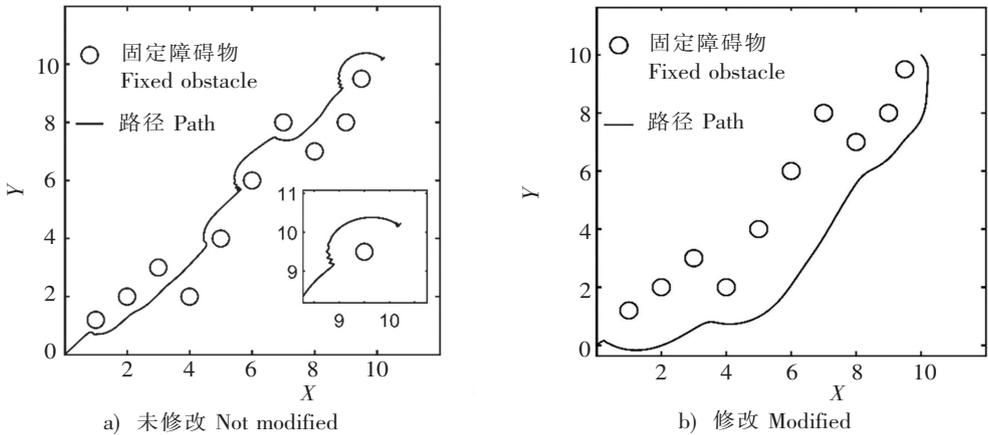


图3 斥力函数修改前后的仿真对比

Fig.3 Comparisons of the results from simulations before and after repulsion function modification

### 3.2 局部极小值现象仿真分析

在修改斥力函数的基础上,施加随机扰动,使无人船具有跳出局部极小值的能力,随机扰动设置为使引力在正常值的50%~200%之间变化。

创造含有以下两种的局部极小值环境。

1) 在没有施加艏向角限制的情况下进行仿真,运行结果如图4a)所示,无人船在坐标点(4,5)周围陷入局部极小值。随后在施加艏向角限制的情况下进行仿真,运行结果如图4b)所示,已经具备了解决局部极小值的能力。

2) 在没有施加随机扰动的情况下进行仿真,运行结果如图5a)所示,无人船在坐标点(5,6)周围陷入局部极小值。随后在施加随机扰动的情况下进行仿真,运行结果如图5b)所示,已经具备了解决局部极小值的能力,但是会形成冗余及部分振荡路径。

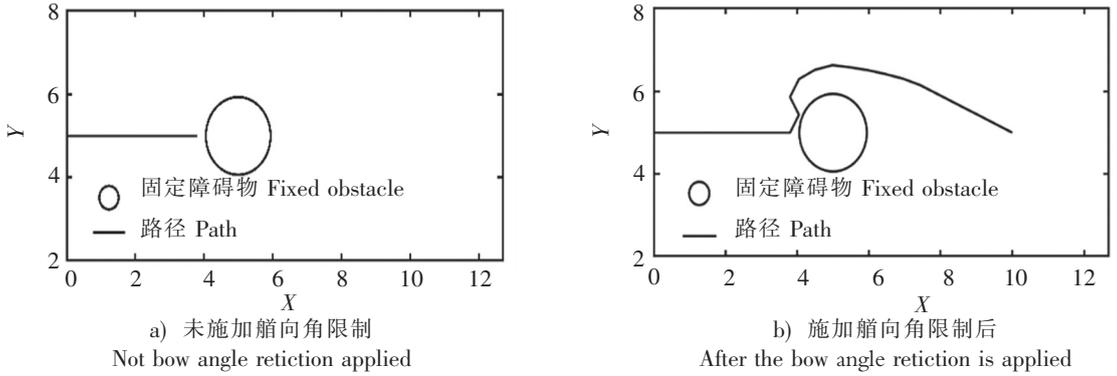


图 4 施加艏向角限制前后仿真对比

Fig.4 Comparisons of the results from simulations before and after applying bow angle restriction

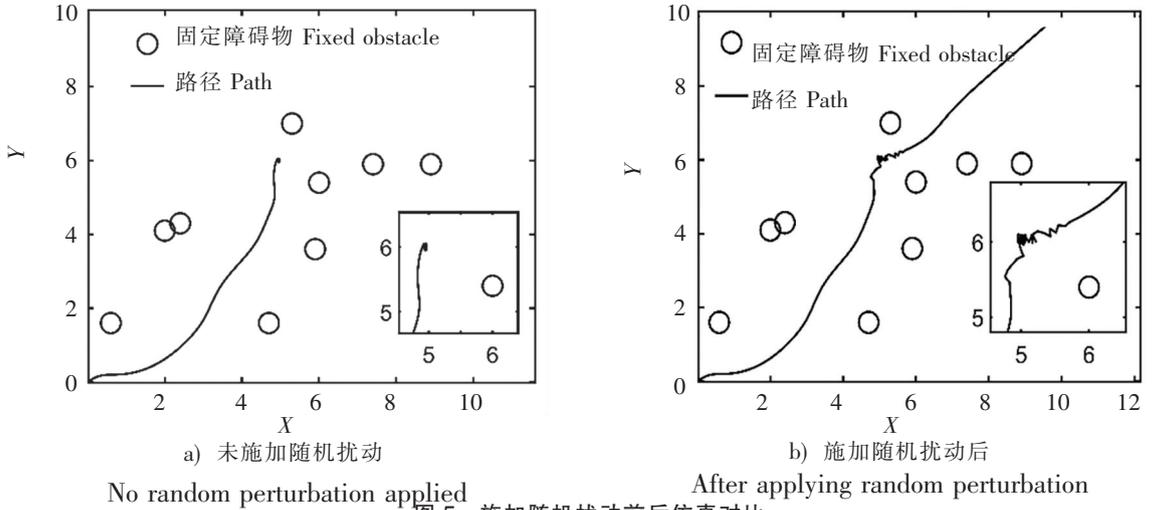


图 5 施加随机扰动前后仿真对比

Fig.5 Comparisons of the results from simulations with and without random perturbation

### 3.3 路径振荡现象仿真分析

针对无人船在海面上因为增加随机扰动而产生路径振荡的问题，进行减小路径振荡的仿真，着重选择出现路径振荡的环境进行仿真。仿真结果如图 6 所示，比较图 6a)、图 6b) 可以看出，减小路径振荡之后，路径的平滑性提高了。

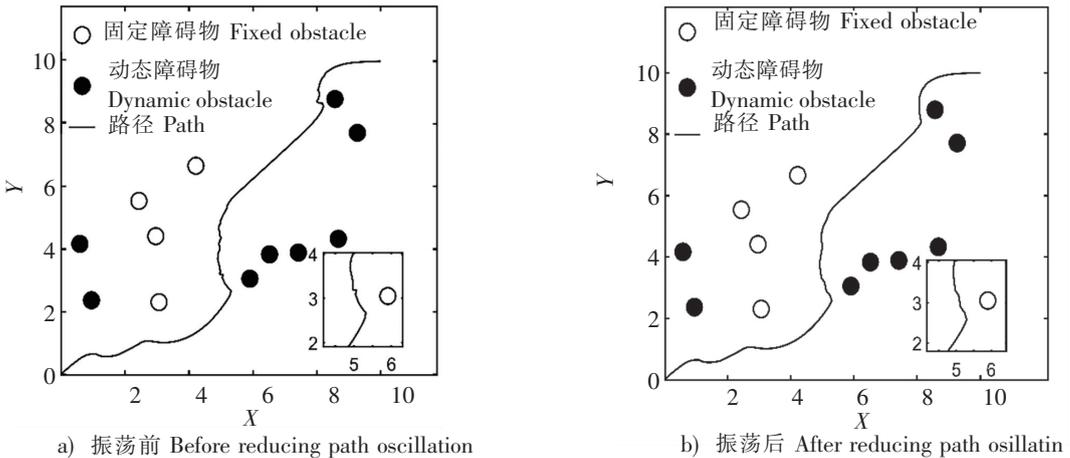


图 6 减小路径振荡前后仿真对比

Fig.6 Comparisons of the results from simulations before and after reducing path oscillation

## 4 结语

本文在传统的人工势场法基础之上, 通过修改斥力函数, 加入了无人船和目标之间的距离这个因素, 克服了船舶无法到达目标点的问题, 提高了人工势场法的可行性, 但需要注意目标点上存在障碍物的情况。采用施加船向角和增加随机扰动的方法来应对局部极小值问题, 仿真结果显示, 路径在陷入局部极小值之后, 会经过一段路程后跳出, 但是由于其随机性, 在路径跳出局部极小值的过程中会留下一段无效的路径。为了改善路径振荡和施加随机扰动时产生的无效路径, 提出一种路径简化的措施, 通过去除一些振荡的路径点, 让路径变得平滑。

改进后的人工势场法具有静态和动态障碍物的仿真环境中进行路径规划, 探索将人工势场法应用在无人船路径规划的可行性, 为无人船技术的研究提供了更多的思路。

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] 支奕博. 自动驾驶车辆自主避障和路径规划技术综述[J]. 自动化应用, 2018(11): 128 - 129.
- [2] 马小轩, 吴韵哲, 吴浩峻, 等. 基于改进人工势场法的水下自主航行器路径规划[J]. 船舶工程, 2021, 43(9): 89 - 93, 100.
- [3] ZHANG C. Path planning for robot based on chaotic artificial potential field method[J]. Science Technology & Engineering, 2018, 317(1): 012056.
- [4] 刘涛. 基于模糊改进人工势场法的无人船路径规划研究[J]. 舰船科学技术, 2022, 44(3): 63 - 66.
- [5] SUN Y L, ZHANG D Y, SHENG L L. Research on multi-agent obstacle avoidance based on artificial potential field method[J]. China New Communications, 2019, 21(16): 87.
- [6] XU X L, PAN W, HUANG Y B, et al. Dynamic collision avoidance algorithm for unmanned surface vehicles via layered artificial potential field with collision cone[J]. Journal of Navigation, 2020, 73(6): 1306 - 1325.
- [7] CHEN J X, DONG J, ZHU X F. Improved artificial potential field method for mobile robot path planning[J]. Command Control and Simulation, 2019, 41(3): 116 - 121.
- [8] ABDALLA, TURKI, Y. Mobile robot navigation using PSO - optimized fuzzy artificial potential field with fuzzy control[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems: Applications in Engineering and Technology, 2017, 32(6): 3892 - 3908.
- [9] 刘翰, 王东署, 汪宇轩, 等. 移动机器人路径规划的模糊人工势场法研究[J]. 控制工程, 2022, 29(1): 33 - 38. DOI: 10.14107/j.cnki.kzgc.20200187.
- [10] ZHOU Z Y, WANG J J, ZHU Z F, et al. Tangent navigated robot path planning strategy using particle swarm optimized artificial potential field[J]. Optik, 2018, 158: 639 - 651.
- [11] 林洁, 张志安. 改进人工势场法的路径规划研究[J]. 机械与电子, 2022, 40(3): 65 - 70 + 75.
- [12] 任工昌, 郭维鹏, 刘朋. 基于改进人工势场法的移动机器人避障研究[J]. 软件导刊, 2021, 20(2): 97 - 101.
- [13] 胡杰, 张华, 傅海涛, 等. 改进人工势场法在移动机器人路径规划中的应用[J]. 机床与液压, 2021, 49(3): 6 - 10.
- [14] GUANG X L, GUAN S J, SONG H W. Research on path planning based on artificial potential field algorithm[J]. association for Computing Machinery, 2022(10): 125 - 129.
- [15] 徐小强, 刘芑辉, 冒燕. 改进人工势场法和 ID - BFS 融合算法的无人艇路径规划研究[J]. 武汉理工大学学报, 2021, 43(5): 85 - 91.
- [16] 周克帅, 范平清. 改进 A \* 算法与人工势场算法移动机器人路径规划[J]. 电子器件, 2021, 44(2): 368 - 374.

(责任编辑 陈敏 英文审校 郑青榕)