

# 基于改进人工势场法的车辆编队避障研究

赵晓鹏 王国权

(北京信息科技大学机电工程学院 北京 100192)

**摘要:** 针对传统人工势场法在多车协同编队避障中易陷入局部最优、路径振荡及目标不可达等问题,本文提出一种改进型人工势场法。通过限定引力势场的最小势能、在斥力势场中引入欧氏距离、构建道路边界斥力势场及非线性编队稳定力势场,优化了引力和斥力的动态平衡机制,提升了编队的避障能力和行驶稳定性。数值仿真结果表明,针对三角形编队避障场景,改进算法将到达时间缩短至 22.3 s(较传统方法减少 37.7%),路径总长度缩短 23.2%(55.7 m),编队恢复时间降低至 2.5 s(缩短 61.5%),且避免了局部最优问题,目标不可达率从 25%降至 2%。实物模型实验进一步验证了算法在动态环境中的鲁棒性,编队在避障后能快速恢复三角形队形。本文方法为多车协同避障提供了高效、稳定的解决方案,对智能交通系统具有重要应用价值。

**关键词:** 多车协同编队;领航跟随法;人工势场法;编队避障策略;编队稳定力势场

中图分类号: TP242.6; TN929.5 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.99

## Research on vehicle formation obstacle avoidance based on the improved artificial potential field method

Zhao Xiaopeng Wang Guoquan

(School of Electromechanical Engineering, Beijing Information Science &amp; Technology University, Beijing 100192, China)

**Abstract:** To address the issues of local optima, path oscillations, and goal unreachability in traditional artificial potential field (APF) methods for multi-vehicle collaborative formation obstacle avoidance, this paper proposes an improved APF approach. By implementing four key enhancements—defining the minimum potential energy for gravitational fields, incorporating Euclidean distance into repulsive fields, constructing road boundary repulsive potential fields, and establishing nonlinear formation stabilization force potential fields—the dynamic equilibrium mechanism between attraction and repulsion forces is optimized, thereby improving formation obstacle avoidance capability and driving stability. Numerical simulations demonstrate that in triangular formation obstacle avoidance scenarios, the improved algorithm achieves a 37.7% reduction in arrival time (22.3 s), 23.2% shorter total path length (55.7 m), and 61.5% faster formation recovery (2.5 s), while eliminating local optima and reducing goal unreachability rate from 25% to 2%. Physical prototype experiments further validate the algorithm's robustness in dynamic environments, showing rapid restoration of triangular formations post-obstacle avoidance. This method provides an efficient and stable solution for multi-vehicle collaborative obstacle avoidance, demonstrating significant application value for intelligent transportation systems.

**Keywords:** multi-vehicle cooperative formation; leader-follower method; artificial potential field method; formation obstacle avoidance strategy; formation stability force field

## 0 引言

提高道路交通运输的智能化是解决交通拥堵和交通运输安全性的关键途径。通过自动驾驶技术和车联网技术的融合,实现多辆自动驾驶车辆的高效通信与协同控制,进而实现车辆编队稳定行驶,可以全面提升公路运输的效能。

随着车辆编队技术的发展,车辆编队避障策略也成为智能交通系统研究的重要方向。目前常用的编队控制方法有领航跟随法<sup>[1-2]</sup>、虚拟结构法<sup>[3]</sup>、基于行为法<sup>[4]</sup>等。领航-跟随法因其结构简单、扩展性强成为主流方案。车辆编队避障策略需兼顾实时性与稳定性,人工势场法 (artificial potential field, APF) 因其简单易实现且与车辆匹配度高,

能够以较低的计算成本处理环境中的大量障碍物,因此在车辆避障策略中具有优势。然而,传统 APF 在复杂场景中易陷入局部最优且路径振荡,国内外的研究者们在基于人工势场法的车辆避障策略上进行了许多研究。

Wang 等<sup>[5]</sup>通过引入碰撞预测机制改进了传统人工势场法,有效解决了局部极小值问题,并在静态障碍物场景中验证了模型的有效性。在此基础上,Li 等<sup>[6]</sup>提出了一种基于势函数的滑模控制策略,通过构建动态滑模面约束参考轨迹远离碰撞区域,进一步规避了局部极小值问题。何乃峰等<sup>[7]</sup>提出利用模拟退火算法重建 APF 函数模型,重新规划全局路径,尽管避免了局部极小值,但路径规划的全局最优性仍有待提升。许万等<sup>[8]</sup>通过对凹形障碍物补齐,防止机器人进入局部最小值区域。然后,通过新增距离影响因子,改进了斥力场函数,使目标点成为全局势场中的最小点,防止机器人陷入目标不可达区域。伍锡如等<sup>[9]</sup>针对避障、外部干扰和迟滞等实际的多机器人编队控制问题,提出了一种基于分布式参考校正的控制方法。通过采用人工势场法和干扰观测器,解决了非匹配不确定性的避障问题。

为进一步增强系统在动态环境中的适应能力,Bai 等<sup>[10]</sup>提出了一种基于双层架构的深度强化学习编队控制框架,通过执行层实现局部运动控制,决策层完成全局路径规划,有效解决了多机器人在未知障碍环境中的自适应编队问题。与此同时,Semsar-Kazerooni 等<sup>[11]</sup>通过将势函数分解为排斥势函数和吸引势函数,并在排斥势函数中用多项式函数代替类莫尔斯函数,显著提高了设计的灵活性和适应性。吴金霆等<sup>[12]</sup>通过施加随机扰动的方法改善人工势场法中容易出现的局部最小值问题。此外,Yu 等<sup>[13]</sup>通过在顶视图上进行横向和纵向车辆控制,并引入行驶方向的势场,为势场增加了第 3 个维度,进一步提升了算法的多维控制能力。最后,Hong 等<sup>[14]</sup>设计了一种基于改进人工势场法的确定性算法,通过将最优路径分解为多个子目标点并生成子目标点序列,不仅降低了无人水面航行器陷入局部最小值的可能性,还通过目标点切换机制实现了局部最小值的快速脱离,为复杂环境下的路径规划提供了新的解决方案。

尽管在已公开的研究中,文献[15]提出虽然也有学者采用编队力模型的方法实现多智能体编队控制。但并没有解决车辆编队运行过程中目标点不可达与初始阶段引力过大的问题。梅艺林等<sup>[16]</sup>在合适位置增加临时引导点的方法,引导其跳出局部极小值点,但依然存在局部最优问题;文献[16]提出了一次型编队稳定性,但其线性特性限制了全局稳定性。在复杂避障场景中,编队形态的动态调整能力有限,可能导致跟随车辆与领航车辆的相对位置偏差较大,影响编队稳定性。

本文将通过对传统 APF 的引力和斥力势场函数进行改进,并引入道路边界斥力势场函数和编队稳定性函数,优化了车辆编队避障策略的安全性和稳定性。通过

MATLAB 仿真和实物模型验证,证明了该改进算法在多障碍物环境下的有效性和实时性。

## 1 传统人工势场法基本原理

人工势场法是一种通过构建吸引力和排斥力的模型来实现路径规划的算法。目标对车辆的吸引势引导车辆向其移动,而障碍物则产生的排斥势阻止向其靠近,吸引势和排斥势的叠加成合势力场,车辆将沿着合势力场梯度下降最快的方向移动。

### 1.1 引力势与吸引力

设二维空间上的目标点  $(x_g, y_g)$  对位于  $q(x, y)$  点车辆的引力势场函数用式(1)表示:

$$U_{att}(q) = \frac{1}{2} K_{att} (q - q_g)^2 \quad (1)$$

其中,  $K_{att}$  为所描述引力势场的增益系数。则目标点对车辆的吸引力为:

$$F_{att}(q) = -\text{grad}(U_{att}(q)) = -K_{att}(q - q_g) \quad (2)$$

### 1.2 斥力势与排斥力

设二维空间上位于  $q_i = [x_i, y_i]$  的障碍物对位于  $q(x, y)$  点车辆的斥力势场用式(3)表示:

$$U_{req}(q) = \begin{cases} \frac{1}{2} K_{req} \left( \frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_i} \right)^2, & \rho \leq \rho_i \\ 0, & \rho > \rho_i \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $K_{req}$  为所描述斥力势场的增益系数;  $\rho$  为运动车辆当前位置  $q$  与障碍点  $q_i$  的直线距离;  $\rho_i$  为障碍物的影响距离。则障碍物对车辆排斥力为:

$$F_{req}(q) = -\text{grad}(U_{req}(q)) = \begin{cases} K_{req} \left( \frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_i} \right) \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial \rho}{\partial q}, & \rho \leq \rho_i \\ 0, & \rho > \rho_i \end{cases} \quad (4)$$

### 1.3 合成势与车辆所受合力

合成势的势场函数用式(5)表示:

$$U(q) = U_{att}(q) + U_{req}(q) \quad (5)$$

受控车辆所受合力用式(6)表示:

$$F(q) = -\text{grad}(U(q)) = F_{att}(q) + \sum_{i=1}^N F_{req}(q) \quad (6)$$

其中,  $N$  为障碍物数目。合力势场图如图 1 所示。

## 2 改进型人工势场法领航跟随避障策略

### 2.1 改进的引力势场函数

在文献[17]中研究发现,在利用人工势场引导车辆向目标移动时,如果对式(1)表示引力势场限定一个最小引力势能  $U_{min}$ ,即引力势场函数改为:

$$U_{att}(q) = \max \left\{ \frac{1}{2} K_{att} (q - q_g)^2, U_{min} \right\} \quad (7)$$

其中,  $U_{min}$  为最小引力势能。

引力势场函数改进后所得的相应吸引力为:

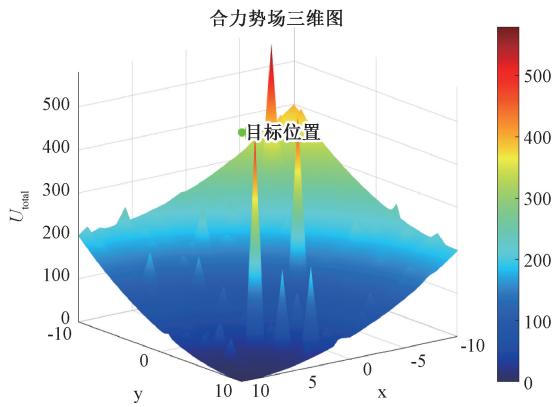


图 1 合力势场图

Fig. 1 Combined potential field diagram

$$\begin{cases} F_{att}(q) = -\text{grad}(U_{att}(q)) = \\ \left\{ \begin{array}{ll} -K_{att}(q - q_g), & U_{min} \leq U_{att}(q) \\ F_{min}, & U_{min} > U_{att}(q) \end{array} \right. \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $F_{min}$  为最小引力势场下  $U_{min}$  所对应的吸引力。

## 2.2 改进的斥力势场函数

传统势场法在靠近目标点时, 斥力显著增大, 导致车辆难以到达目标。为解决这一问题, 引入当前点与目标点的欧氏距离, 使车辆在接近目标点时能更好地应对障碍物斥力。通过添加欧氏距离, 避免斥力过度增大, 确保车辆顺利向目标移动, 改进后的斥力势场函数如下:

$$U_{req}(q) = \begin{cases} \frac{1}{2}K_{req}\left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_i}\right)^2(q - q_g)^n, & \rho \leq \rho_i \\ 0, & \rho > \rho_i \end{cases} \quad (9)$$

相应的斥力计算如下:

$$F_{req}(q) = -\text{grad}(U_{req}(q)) = \begin{cases} F_{req\_1} + F_{req\_2}, & \rho \leq \rho_i \\ 0, & \rho > \rho_i \end{cases} \quad (10)$$

## 2.3 构建道路边界斥力势场函数

为确保车辆在规定的车道线以内安全行驶, 构建立道路边界斥力势场函数。该函数根据车辆与边界的距离动态调整斥力, 车辆接近边界时斥力增强, 防止偏离并保持安全距离。同时, 斥力设计也考虑车辆速度, 高速行驶时斥力更明显, 提升响应灵敏度。因此, 构建的道路边界示意图如图 2 所示。



图 2 道路边界示意图

Fig. 2 Schematic diagram of road boundaries

道路边界斥力函数为:

$$F_{rep(e)} = \begin{cases} n_e v^* e^{\left(-\frac{d-y}{2}\right)}, & -d + \frac{w}{2} < y < -\frac{d}{2} \\ \frac{1}{3} n_e y^2, & -\frac{d}{2} < y < -\frac{w}{2} \\ -\frac{1}{3} n_e y^2, & \frac{w}{2} < y < \frac{d}{2} \\ n_e v^* e^{\left(\frac{y-d}{2}\right)}, & \frac{d}{2} < y < \frac{d+w}{2} \end{cases} \quad (11)$$

其中,  $n_e$  为边界斥力系数;  $w$  车辆运行的道路宽度;  $d$  运行车辆宽度。

## 2.4 构建车辆编队稳定力势场函数

构建编队稳定力势场函数旨在保持编队内部车辆的安全距离。该函数基于弹簧-质量模型, 模拟车辆间的吸引力和排斥力。维持编队中车辆的相对位置和距离。此外, 如果某辆车陷入局部最优状态, 编队稳定力可以帮助其脱困。所定义的编队稳定力势场函数为:

$$U_{stab} = \frac{1}{2}K_{stab1}(\rho_{ij(t)} - \rho_{ij})^2 + \frac{1}{4}K_{stab2}(\rho_{ij(t)} - \rho_{ij})^4 \quad (12)$$

相应地求得的编队稳定力为:

$$F_{stab} = -K_{stab1}(\rho_{ij(t)} - \rho_{ij}) - K_{stab2}(\rho_{ij(t)} - \rho_{ij})^3 \quad (13)$$

其中,  $K_{stab1}, K_{stab2}$  分别为编队稳定力系数;  $\rho_{ij(t)}$  为  $t$  时刻车辆  $i$  与车辆  $j$  之间的距离;  $\rho_{ij}$  为车辆  $i$  与车辆  $j$  之间的期望距离。

利用改进型的人工势场法确定车辆编队避障策略时, 编队车辆所受的力是吸引力、排斥力、道路边界力和编队稳定力的合力  $F_{total}$ :

$$F_{total} = F_{att}(q) + F_{req}(q) + F_{rep(e)} + \sum_{i=1}^{n-1} F_{stab} \quad (14)$$

其中,  $n$  为参与编队的车辆数目。

与文献[16]中所设计的一次型编队稳定力函数与本文包含四次项的二次型函数稳定力变化图对比如图 3 所示。

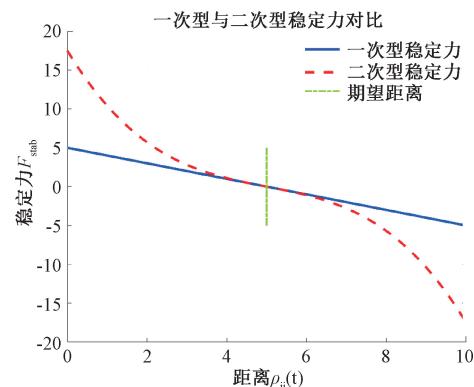


图 3 稳定力变化图对比

Fig. 3 Variation diagram of stabilizing forces

### 3 数值仿真与分析

为了评估改进型人工势场法领航跟随避障,在 MATLAB 2021a 平台对单车避障和三角形车辆编队避障进行仿真分析。

#### 3.1 单车避障仿真分析

单车避障仿真实验设置:单车起始点坐标(0,0),目标终点坐标(10,10),起点和终点之间分布有 15 个障碍物,汽车要避开复杂的障碍物到达终点目标。

在单车避障行驶工况下,对传统人工势场法、文献[16]的改进人工势场法和本文构建的车辆避障策略进行仿真计算。图 4~6 分别展示了传统人工势场法、文献[16]改进算法和本文算法确定的车辆避障仿真图。

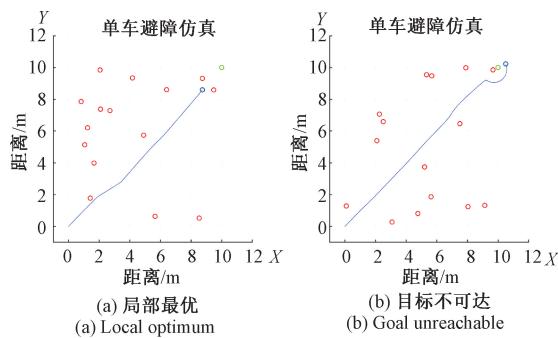


图 4 传统人工势场法仿真图

Fig. 4 Simulation diagram of the traditional artificial potential field method

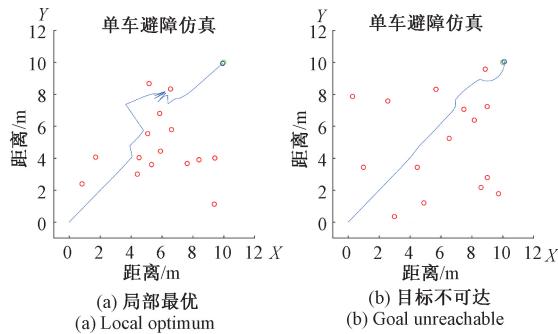


图 5 文献[16]下人工势场法仿真图

Fig. 5 Simulation diagram of the artificial potential field method under reference [16]

传统人工势场法在接近目标点时易陷入局部最优,无法前进;文献[16]改进算法虽能到达目标,但路径存在抖动且不够平滑。本文算法通过优化引力和斥力计算、引入最小引力势能和动态调整斥力系数,显著改善了这些问题,路径更平滑,车辆能平稳避障并顺利到达目标。多障碍物下不同算法的仿真数据对比如表 1 所示。传统人工势场法无法到达目标点;文献[16]改进算法耗时 0.026 s,经过 106 次迭代,路径存在震荡;本文算法仅需 0.013 s 和 80 次迭代,规划出更光滑的路径,成功避开所有障碍物并到达目标

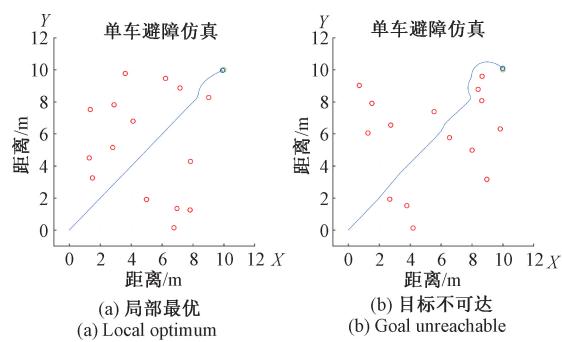


图 6 改进型人工势场法仿真图

Fig. 6 Simulation diagram of the improved artificial potential field method

点。相比文献[16]改进算法,本文算法耗时减少约 50%,迭代次数下降约 24.5%,显示出更高的规划效率和更少的资源消耗。

表 1 多障碍物下各算法仿真数据对比表

Table 1 Simulation data comparison table of various algorithms under multiple obstacles

算法	时间 $t/s$	迭代次数 $k$	避障路径
传统算法			无法达到目标点
文献[16]算法	0.026	106	存在震荡,不光滑
本文算法	0.013	80	较光滑

#### 3.2 三角形编队避障仿真分析

与直线编队相比,三角形编队具有更高的灵活性和适应性,尤其是在复杂环境中,能够更好地应对动态障碍物和路径变化,从而提高编队的整体稳定性和安全性。

三角形编队的实验设置:在长 50 m,宽 4 m 的直线道路上放置三辆车,初始位置为:车辆 1 位于(0, -1),车辆 2 位于 $(-\frac{\sqrt{3}}{2}, -\frac{1}{2})$ ,车辆 3 位于 $(-\frac{\sqrt{3}}{2}, -\frac{3}{2})$ 。目标是领航车辆 1 安全抵达目标点(50, -1),同时确保整个编队在整个移动过程中维持三角形编队运行,以实现编队高效且稳定的编队行驶。

改进型人工势场法下的三角形编队模型避障仿真结果如图 7 所示。

在改进型人工势场法下的三角形编队模型避障仿真中,车辆编队在多动态障碍物环境下能够稳定运行,并成功到达目标点,同时保持三角形编队结构。当车辆进行避障并改变原有队形后,编队稳定力和领航跟随法控制器能够共同调节,使编队重新恢复为三角形结构。相较于传统人工势场法,改进型算法有效避免了局部最优和目标不可达问题,提升了编队的避障效率和稳定性。

为进一步验证本文改进方法的优越性,本文从到达时间、路径总长度、迭代次数、编队恢复时间、局部最优发生次数以及目标不可达率等多个指标,与传统人工势场法及文

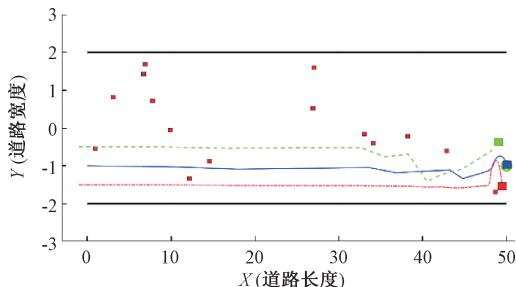


图 7 改进型人工势场法下的三角形编队模型避障仿真结果图

Fig. 7 Simulation results of obstacle avoidance for the triangular formation model under the improved artificial potential field method

献[16]中的改进方法进行了对比分析。具体仿真数据对比如表 2 所示。

表 2 三角形编队避障算法仿真数据对比表

Table 2 Comparative simulation data of triangular formation obstacle avoidance algorithms

指标	传统人工势场法	文献[16] 改进方法	本文改进 方法
到达时间/s	35.8	28.5	22.3
路径总长度/m	72.5	63.2	55.7
迭代次数	150	110	78
编队恢复时间/s	6.5	4.2	2.5
局部最优发生次数	5	3	1
目标不可达率/%	25	6	2

本文改进型方法在到达时间上较传统人工势场法减少了 37.7%，路径总长度缩短了 23.2%，编队恢复时间缩短了 61.5%。较文献[16]的改进方法分别缩短了 21.8%、23.2%、11.9%。此外，本文方法避免了局部最优问题，并将目标不可达率从传统的 25% 降低至 2%。这些改进提升了编队在复杂环境中的避障效率和稳定性，为多车协同作业提供了更优的解决方案。

## 4 实物模型试验验证

为了验证本文构建的动态调整人工势场函数在实际环境中的车辆避障的可行性和可靠性，用装有激光雷达的智能小车进行了单车避障、三角形编队避障实物验证。

### 4.1 实物试验平台与参数设定

实物试验模型是搭载乐动 LD14 型号单线程激光雷达智能小车，如图 8 所示。该智能小车前轮从动、后轮双驱，驱动轮是直径 65 mm 橡胶轮、从动轮是 60 mm 金属全向轮。

进行人工势场法避障试验时，为了排除周围障碍物的影响，将激光雷达的探测范围设定为 1 m。乐动 LD14 型号单线程激光雷达参数表如表 3 所示。

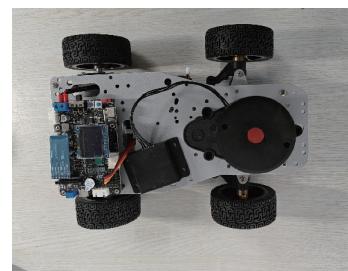


图 8 实物试验智能小车模型

Fig. 8 Physical test model of the smart car

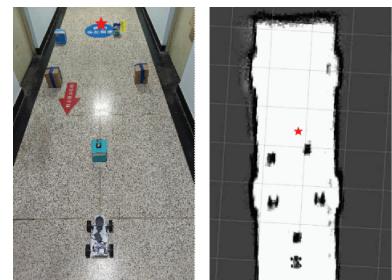
表 3 激光雷达参数表

Table 3 LiDAR parameters table

参数类型	乐动 LD14
测距类型	近距离、中距离
测距原理	三角测距
支持环境	支持室内环境应用
扫描角度	360°
外形尺寸	96.3×59.8×38.8 mm
测量距离精度	测距小于 1 m: ±5 mm
驱动方式	内置直流有刷电机
ROS 支持	ROS1/ROS2
通信接口	标准串口 115 200 bps

### 4.2 单车避障实验验证

选择的试验场地尺寸为长 10 m，宽 2 m。地面为平整的地砖铺设，确保表面光滑且无明显起伏，避免车辆行驶过程中出现颠簸或倾斜。确保满足实验要求。确定出起始点、目标点和障碍物位置。如图 9(a)为在室内搭建的单车避障实验环境，并且通过激光雷达的 360°扫描收集环境中的障碍物信息，利用同步定位与地图构建(simultaneous localization and mapping, SLAM)技术，将收集到的数据处理成栅格地图。建立的单车避障全局地图<sup>[18]</sup>。如图 9(b)所示。



(a) 实物图 (b) 栅格图  
(a) Physical diagram (b) Grid diagram

图 9 单车避障环境实物图和栅格图

Fig. 9 Physical image and grid map of the bicycle obstacle avoidance environment

单车避障的实验验证中，单车的时刻运动状态如图 10

所示。在初始时刻  $t=0$  s 时, 智能小车位于规定的起点位置准备启动。在  $t=5$  s 时, 智能小车探测到前方障碍物, 小车调整了自身行驶方向并进行了减速, 安全通过了第 1 个障碍物。在  $t=15$  s 时, 通过了分布在路径两侧的第 2、第 3 障碍物。在  $t=20$  s 时, 智能小车到达规定的目标点。通过改进型人工势场法的作用, 单车顺利通过了存在局部最优的问题区域。最终顺利达到目标点并且没有与障碍物发生碰撞。

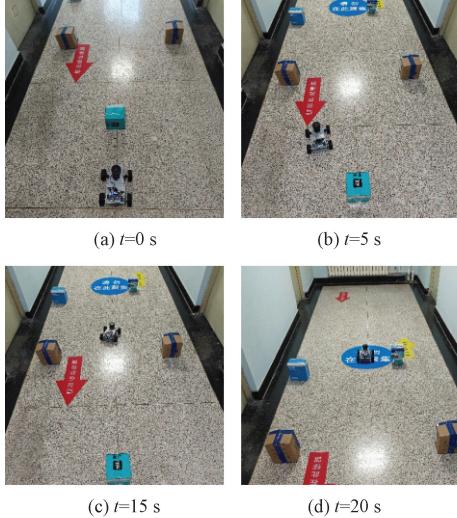


图 10 单车避障运动状态图

Fig. 10 Motion state diagram of the bicycle obstacle avoidance environment

#### 4.3 三角形编队避障实验验证

如图 11(a)为在室内搭建的三角形编队模型避障实验环境, 并且通过激光雷达的 360°扫描收集环境中的障碍物信息, 利用 SLAM 技术, 将收集到的数据处理成栅格地图。建立的三角形编队模型避障全局地图。如图 11(b)所示。

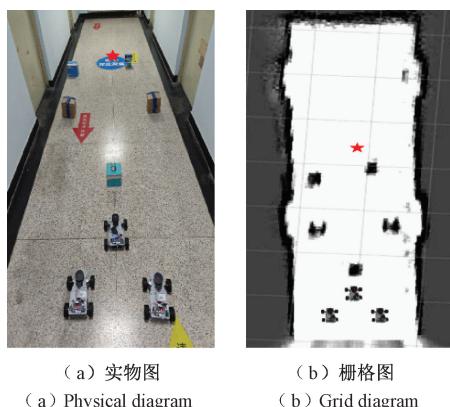


图 11 三角形编队避障环境实物图和栅格图  
Fig. 11 Physical image and grid map of the triangular formation obstacle avoidance environment

在三角形编队模型的避障实验中, 编队状态随着关键时间节点的推进动态变化如图 12 所示。初始时刻  $t=0$  s,

三辆智能小车以三角形编队排列。 $t=5$  s 时, 领航车探测到前方障碍物, 通过调整航向和减速, 编队形态由标准三角形过渡为不规则形态, 领航车率先绕过障碍物, 两车随后调整队形。 $t=10$  s 时, 前车成功绕过障碍, 其余两车分别从障碍物两侧绕过, 编队逐渐恢复三角形形态。 $t=15$  s 时, 编队通过路径两侧的障碍物, 尽管形态短暂变化, 整体结构依然稳固。 $t=20$  s 时, 编队完成所有避障任务, 恢复三角形编队。 $t=25$  s 时, 编队成功抵达目标点。实验结果表明, 改进的人工势场法在复杂避障场景中提升了编队的实用性。

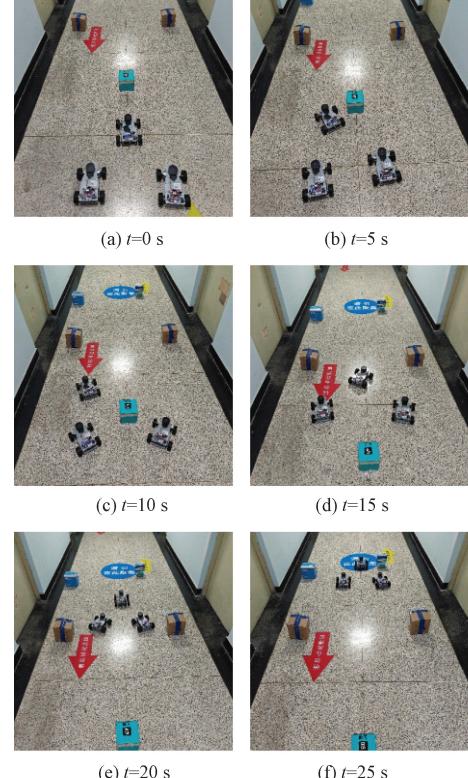


图 12 三角形编队避障运动状态图

Fig. 12 Motion state diagram of the triangular formation obstacle avoidance environment

## 5 结论

本文针对多车编队避障问题, 提出了一种改进型人工势场法, 通过对引力势场限定最小引力势下界以确保车辆接近目标时维持必要的引力水平, 斥力势场添加欧氏距离避免斥力过大增大, 构建了一种可以动态调整的人工势场函数, 解决了人工势场法局部最优和目标不可达问题, 并帮助编队车辆快速脱困。通过引入道路边界斥力势场函数和构建编队稳定力函数, 保证车辆在道路的安全区域内行驶并实现车间距的精确控制, 防止碰撞和脱离编队。有效解决了现有人工势场法中局部最优、路径振荡和目标不可达等瓶颈问题。仿真与实验结果表明: 改进算法在复杂多障

碍物环境下显著提升了路径规划效率,耗时减少50%,迭代次数降低24.5%,且路径平滑性更优;在三角形编队场景中,编队到达时间缩短37.7%,路径总长度减少23.2%,目标不可达率降低至2%,同时通过非线性稳定力函数快速恢复队形。实物模型验证进一步证明了算法在实际环境中的可行性和鲁棒性。

未来研究将聚焦于动态障碍物环境下的自适应参数优化及大规模编队协同控制,以进一步提升算法的普适性和实时性。

## 参考文献

[1] 李娟,袁锐锟,张宏瀚.基于领航跟随法的多AUV编队控制算法研究[J].仪器仪表学报,2019,40(6):237-246.

LI J, YUAN R K, ZHANG H H. Research on multi-AUV formation control algorithm based on leader-follower method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(6): 237-246.

[2] 胡锦帆.基于虚拟领航者的无人机一致性编队控制[J].电子测量技术,2023,46(22):70-77.

HU J F. UAV consensus formation control based on virtual leader[J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(22): 70-77.

[3] CHEN X L, HUANG F H, ZHANG Y G, et al. A novel virtual-structure formation control design for mobile robots with obstacle avoidance [J]. Applied Sciences, 2020, 10(17):5807-5830.

[4] KESSLER T, KNOLL A. Cooperative multi-vehicle behavior coordination for autonomous driving [C]. 2019 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). IEEE, 2019: 1953-1960.

[5] WANG D, WANG P, ZHANG X, 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.

[6] LI X, SONG S, GUO Y. Robust finite-time tracking control for Euler-Lagrange systems with obstacle avoidance[J]. Nonlinear Dynamics, 2018, 93(2): 443-451.

[7] 何乃峰,宿一凡,刘子弘,等.基于改进人工势场法的移动机器人路径规划算法研究[J].现代制造技术与装备,2020,56(12): 1-3.

HE N F, SU Y F, LIU Z H, et al. Research on path planning algorithm for mobile robots based on improved artificial potential field [J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2020, 56(12): 1-3.

[8] 许万,程兆,朱力,等.一种基于改进人工势场法的局部路径规划算法[J].电子测量技术,2022,45(19):83-88.

XU W, CHENG ZH, ZHU L, et al. A local path planning algorithm based on improved artificial potential field method [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(19): 83-88.

[9] 伍锡如,杨子儒.基于分布式参考校正的多机器人编队控制[J].电子测量技术,2024,47(10):93-100.

WU X R, YANG Z R. Multi-robot formation control based on distributed reference correction [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47 (10): 93-100.

[10] BAI C, YAN P, PAN W, et al. Learning-based multi-robot formation control with obstacle avoidance [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(8): 11811-11822.

[11] SEMSAR-KAZEROONI E, ELFERINK K, PLOEG J, et al. Multi-objective platoon maneuvering using artificial potential fields [J]. IFAC PapersOnLine, 2017, 50(1): 15006-15011.

[12] 吴金霆,王琢,张子超,等.基于领航-跟随法和人工势场法的巡检机器人编队[J].国外电子测量技术,2024,43(1):182-188.

WU J T, WANG ZH, ZHANG Z CH, et al. Inspection robot formation based on leader-follower method and artificial potential field [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2024, 43 (1): 182-188.

[13] YU J, HOU J, CHEN G. Improved safety-first A-star algorithm for autonomous vehicles[C]. 2020 5th International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics(ICARM). IEEE, 2020: 706-710.

[14] HONG Q S, YU S Y, XIU J S, et al. The hybrid path planning algorithm based on improved A\* and artificial potential field for unmanned surface vehicle formations[J]. Ocean Engineering, 2021, 223 (1): 1-17.

[15] 黄庆东,杜昭强,蒋彦渊,等.基于模糊逻辑的智能群体编队移动控制方法[J].光电子·激光,2022,33(5):543-553.

HUANG Q D, DU ZH Q, JIANG Y Y, et al. Intelligent group formation movement control method based on fuzzy logic[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2022, 33(5): 543-553.

[16] 梅艺林,崔立堃,胡雪岩.基于人工势场法的无人车路径规划与避障研究[J].兵器装备工程学报,2024,45(9): 300-306.

MEI Y L, CUI L K, HU X Y. Research on path planning and obstacle avoidance for unmanned vehicles based on artificial potential field [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2024, 45 (9): 300-306.

[17] 闫为佳,杨旗,黄星卓,等.改进人工势场法解决局部最小值路径规划研究[J].组合机床与自动化加工技术,2024,(5):36-39.

YAN W J, YANG Q, HUANG X ZH, et al. Research on improved artificial potential field method for solving local minimum path planning[J]. Combined Machine Tools and Automated Manufacturing Technology, 2024,(5): 36-39.

[18] 何佳泽,张寿明.2D激光雷达移动机器人slam系统研究[J].电子测量技术,2021,44(4):35-39.

HE J Z, ZHANG SH M. Research on 2D LiDAR mobile robot SLAM system[J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(4): 35-39.

## 作者简介

赵晓鹏,硕士研究生,主要研究方向为智能网联汽车。

E-mail: 15227985318@163.com

王国权(通信作者),博士,教授,硕士生导师,主要研究方向为车辆动力学、车辆虚拟试验技术与无人机技术。

E-mail: wang.guoquan@bistu.edu.cn