

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2313943

基于运动预测与改进 APF 的无人机路径规划方法<sup>\*</sup>黄 郑<sup>1</sup> 谢彧颖<sup>2</sup> 张 欣<sup>1</sup> 王红星<sup>1</sup> 刘 威<sup>1</sup>

(1.江苏方天电力技术有限公司 南京 211102; 2.南京航空航天大学自动化学院 南京 211106)

**摘 要:** 动态路径规划是保障无人机在复杂干扰环境下飞行安全的关键要素。针对动态路径规划中存在的迭代次数高、收敛速度慢以及动态障碍物避障问题,提出了一种基于障碍物运动预测与改进 APF 的无人机动态路径规划方法。首先,针对动态障碍物,设计了基于激光雷达的目标检测算法和基于卡尔曼滤波的运动预测算法估计动态障碍物信息,并提出速度方向相似性检测方法进行局部位置脱离决策。其次,针对静态障碍物,引入模拟退火法扰动当前状态,并结合基于目标点的邻域优化函数进行动态路径规划。仿真结果表明,本文算法在应对静态障碍物时可缩短 69% 动态避障时间,应对动态障碍物时可缩短了 19.7% 的避障距离与 23.6% 的任务耗时,提高了无人机任务执行的安全性和效率。

**关键词:** 路径规划;动态避障;运动预测;人工势场法;邻域优化函数

**中图分类号:** TP242.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

## Unmanned aerial vehicle path planning method based on motion prediction and enhanced APF

Huang Zheng<sup>1</sup> Xie Yuying<sup>2</sup> Zhang Xin<sup>1</sup> Wang Hongxing<sup>1</sup> Liu Wei<sup>1</sup>

(1. Jiangsu Fangtian Electric Power Technology Co., Ltd., Nanjing 211102, China;

2. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

**Abstract:** Dynamic path planning is a critical factor in ensuring the safe flight of unmanned aerial vehicles (UAVs) in complex interference environments. To address the issues of high iteration counts, slow convergence, and dynamic obstacle avoidance in dynamic path planning, this paper proposes a UAV dynamic path planning method based on obstacle motion prediction and improved artificial potential fields (APF). First, for dynamic obstacles, a target detection algorithm based on laser radar and a motion prediction algorithm based on Kalman filtering are designed to estimate dynamic obstacle information. A velocity direction similarity detection method is introduced for local position evasion decisions. Secondly, for static obstacles, a simulated annealing algorithm is introduced to perturb the current state, coupled with a neighborhood optimization function based on target points for dynamic path planning. Simulation results show that the proposed algorithm reduces dynamic obstacle avoidance time by 69% when dealing with static obstacles and reduces obstacle avoidance distance by 19.7% and task duration by 23.6% when dealing with dynamic obstacles, thereby enhancing the safety and efficiency of UAV mission execution.

**Keywords:** path planning; dynamic obstacle avoidance; motion prediction; artificial potential field method; neighborhood optimization function

## 0 引 言

随着无人机技术的日趋成熟,其在军用与民用领域都有着广泛的应用,例如军事侦察<sup>[1]</sup>、编队飞行<sup>[2]</sup>、环境监测<sup>[3]</sup>以及电力巡检<sup>[4-5]</sup>等。在无人机的各类应用中,如何保障无人机能够无碰撞、安全地抵达目的地始终是其需要解

决的核心问题之一<sup>[6]</sup>。与其他载体不同,无人机通常只能配备着极为有限的资源<sup>[7-8]</sup>,而且空中飞行往往要求更高的容错率,这就对目前的无人机路径规划技术提出了更高的要求。

目前的路径规划方法主要分为静态和动态路径规划两种<sup>[9]</sup>。在静态方法中,首先会对飞行环境进行三维建模,通

收稿日期:2023-06-20

<sup>\*</sup> 基金项目:江苏方天电力技术有限公司科技项目(KJ202013)、国家自然科学基金(62273178)项目资助

过高精度 3D 点云离线标注目标位置,实现离线航迹规划。静态路径规划算法主要包括 A\* 搜索算法<sup>[10]</sup>、粒子群算法<sup>[11]</sup>、快速扩展随机树算法<sup>[12]</sup>以及遗传算法<sup>[13]</sup>。这种方法的有效性在于其要求获取全局障碍信息,因此更适用于已知且静态环境下的应用场景。然而,当飞行环境发生变化或遇到飞行障碍时,其安全性会受到威胁。例如,在遭遇移动障碍物时,无人机可能会与障碍物发生碰撞;或者当飞行线路由于迁移改造与地图不符时,无人机也可能发生碰撞危险。动态路径规划方法能够提升无人机在复杂干扰环境下的安全性与高效性,使无人机可以根据环境中障碍物与目标位置进行自主避障并且安全稳定到达检测目标<sup>[14-15]</sup>。

人工势场法<sup>[16]</sup>是一种常用的无人机动态避障算法,具有计算量小、规划速度快的优点。然而,传统人工势场法容易陷入局部最优解,导致无人机停止运行或者产生震荡。针对于此,国内外学者对传统人工势场法进行了改进优化。文献[17]通过增加垂直引导解决局部极小值缺陷问题。文献[18]提出了一种基于分区思想的人工势场法,将其人工势场环境进行三百六十度扇形划分,可以有效解决无人机避障过程中存在的目标点附近震荡问题。文献[19]采用网络法描述障碍物环境,利用演化人工势场法优化避障路径。文献[20]提出了“选择穿越法”,无人机在陷入极小值状态时迅速激活穿越行为,可以有选择性地穿越过障碍物,从而顺利到达目标点。文献[21]提出了结合正六边形导向法引导无人机逃离局部极小值问题。文献[22]通过建立相对速度斥力势场解决目标不可达以及局部最优问题,并通过 B 样条筛选合适路径。文献[23]修正引力函数与斥力函数为同一量级,使机器人可以获得更多的环境信息,设定安全随机方向摆脱局部极小值。文献[24]考虑结合 A\* 算法的局部目标点从而摆脱局部最优,并加入机器人和目标点的位置关系改进势场函数。然而,上述方法虽然可以解决局部最优问题,但未考虑动态路径规划效率,在应用时会增加飞行时间。

基于人工势场法,在存在动态障碍物的场景下,文献[25]提出了一种针对动态障碍物的斥力场建立方法,人为定义动态障碍物的斥力场形状以达到避障效果。文献[26]通过实时采样获取动态障碍物运动方向和速度来修正控制量以保证无人平台安全行驶。文献[27]采用 APF-Bug 混合算法,提升了对动态障碍物的反应速度与安全性。文献[28]在两大势场函数的计算中引入了速度和加速度因子,提升了算法处理动态问题的能力。文献[29]引入了基于动态障碍物运动速度的自适应斥力增益项,改进了障碍物斥力场函数,使机器人能对移动障碍物进行规避。文献[30]考虑了障碍物与移动机器人的相对速度,在基于水流场的人工势场法基础上构建了速度斥力场,以此应对人工势场法在动态避障中存在的问题。然而,前述算法大多通过改变障碍物斥力场的参数大小和作用范围,或者采用叠加场的

方法,以在当前帧中实现动态避障,这种方法与传统人工势场法没有本质区别。此外,前述算法仅仅依赖于障碍物的速度、位置信息,缺乏对障碍物运动行为的预测,缺乏前瞻性。当障碍物具有较高的速度时,这些算法通常难以确保规划路径与障碍物之间维持足够的安全距离,甚至可能在路径的某一位置发生碰撞,从而极大地降低了任务执行的安全性水平。且当环境存在动态障碍物时,前述部分算法可能会出现合势力方向与障碍物运行方向接近的情况,从而导致无人机与障碍物伴飞,大大增加了飞行距离,降低了任务执行的效率。

本文针对传统人工势场法迭代次数高、收敛速度慢的问题,提出了基于目标位置改进邻域函数的无人机动态路径规划方法,可以有效提升无人机动态路径规划效率与成功率。同时,在存在动态障碍物时,针对现有算法缺乏前瞻性、鲁棒性差、存在路径跟随的问题,提出了一种基于障碍运动预测与速度方向相似性检验的局部位置脱离策略,并结合动、静态障碍物位置约束进行停障判断,减少了对动态障碍物进行避障时的距离代价,使算法更具前瞻性。

## 1 基于障碍运动预测的动态障碍物避障

### 1.1 基于激光雷达的动态障碍物目标检测

动态环境下,准确快速获取环境中的障碍物信息对于后续的障碍物运动预测、路径规划具有十分重要的作用。三维激光雷达作为主动探测传感器,具有探测范围广、距离长、分辨率高等优点,加之近年来激光雷达在轻量化程度上不断取得进展,已经逐渐成为机器人感知领域的主流传感器。因此本文采用基于激光雷达的动态目标检测算法对障碍物实时信息进行获取。基于激光雷达的目标检测算法基本流程如图 1 所示。

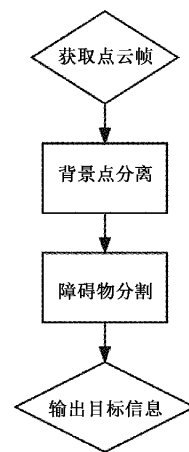


图 1 目标检测算法基本流程

基于激光雷达的目标检测算法大致由以下四个部分组成,算法示意图如图 2 所示。

1) 获取点云帧。即获取激光雷达输入的点云信息,并根据需求进行降采样、距离滤波等处理,使之成为方便使用

的信息供后续算法使用。

2)背景点分离。背景点分离是在点云序列中提取出背景点云。背景为场景中静止不动的景物。为避免将环境点云误识别为障碍物,需采用相应算法对背景进行分离。常用的背景分离算法有光流法、基于先验信息的背景分离方法等。

3)障碍物分割。点云分割的目的是提取点云中的不同物体。针对无人机执行任务的不同,遭遇障碍物形态存在差别、距离障碍物远近各不相同,可以通过相应的点云分割算法将障碍物点云进行分割,得到相应的障碍物点云聚类。

4)输出障碍物信息。得到障碍物点云信息后,最终通过对齐点云等方式解算出障碍物的相对定位信息。

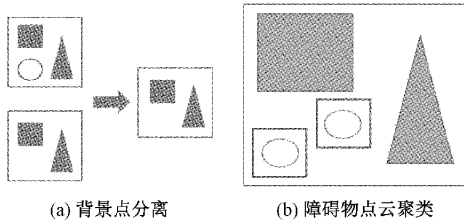


图 2 部分相关算法示意图

## 1.2 基于卡尔曼滤波的动态障碍物运动预测

存在动态障碍物的环境中,障碍物在下一时刻的运动数据是未知的,为使路径规划算法更具前瞻性,需要采取一定方法对障碍物未来一定时间的运动数据进行预测以规划安全合理的线路。

卡尔曼滤波是一种优化估计算法,在含有不确定信息的动态系统中使用卡尔曼滤波能对系统下一步的走向做出有根据的预测。针对不同目标使用卡尔曼滤波估计其状态,需要先对待估计对象建立运动模型,随后结合当前时刻的预测值与量测值得到当前的最优估计值。

在无人机实际应用场景中,动态障碍物多为飞鸟等。此类目标在行进过程中,加速度较小,可以将其简化为匀速直线运动。因此,该类目标的运动模型为恒定速度模型。设障碍物在  $t$  时刻的状态为  $\mathbf{x}_t = [\mathbf{p}_{ot}, \mathbf{v}_{ot}]^T$ , 其中  $\mathbf{p}_{ot}$  为  $t$  时刻时障碍物相对无人机的位置坐标  $\mathbf{v}_{ot}$  为  $t$  时刻的障碍物速度。 ${}^R\mathbf{R}_{it}$ ,  ${}^R\mathbf{p}_{it}$  为已知量,描述  $t$  时刻不同坐标系之间的变换关系。则在经过  $\Delta t$  时间后,其状态变换为  $\mathbf{x}_{t+\Delta t} = [\mathbf{p}_{ot} + \Delta t \times \mathbf{v}_{ot} + {}^R\mathbf{p}_{it} - {}^R\mathbf{p}_{it+\Delta t}, \mathbf{v}_{ot}]^T$ 。

则状态转移方程为:

$$\mathbf{x}_{t-\Delta t} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{3 \times 3} & \Delta t \cdot \mathbf{I}_{3 \times 3} \\ \mathbf{O}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \mathbf{x}_t + \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{O}_{3 \times 3} \\ \mathbf{O}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^R\mathbf{p}_{it} - {}^R\mathbf{p}_{it+\Delta t} \\ \mathbf{O}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (1)$$

进而得到障碍物运动状态方程为:

$$\mathbf{x}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{3 \times 3} & \Delta t \cdot \mathbf{I}_{3 \times 3} \\ \mathbf{O}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \mathbf{x}_{k-1} + \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{O}_{3 \times 3} \\ \mathbf{O}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^R\mathbf{p}_{ik-1} - {}^R\mathbf{p}_{ik} \\ \mathbf{O}_{3 \times 3} \end{bmatrix} + \mathbf{w}_k \quad (2)$$

## 1.3 基于速度方向相似性检测的动态障碍物避障策略

在无人机任务环境存在动态障碍物时,基于人工势场法,如图 3 所示当无人机所受到的合力方向与动态障碍物运动方向接近时,可能会出现为了避开障碍物而与障碍物保持一定距离的伴飞现象,直至绕飞障碍物,会在一定程度上增加不必要的路径飞行长度。

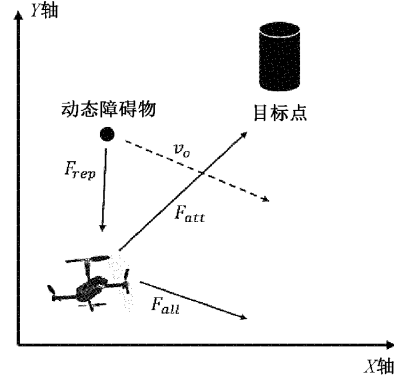


图 3 势场合力方向动态障碍物速度方向相似

因此,针对上述问题,本节提出了一种基于速度方向相似性检测的动态障碍物避障策略。即当机体期望速度方向与动态障碍物运行方向之间的夹角小于设定阈值时,根据障碍物速度方向施加一个反向位置扰动,直至重新计算出的速度方向能够保证无人机安全且高效地通行。同时,在进行位置扰动时,遍历各静态障碍物与机体之间的距离,当最短距离小于设定的安全距离时,使无人机停障。

定义速度方向系数  $sign$ , 其计算表达式为:

$$sign = round(\sin(|\alpha_F - \alpha_O| - \delta)) \quad (3)$$

其中,  $\alpha_F$  为当前斥力与引力的合力方向;  $\alpha_O$  为动态障碍物速度方向;  $\delta$  为角度阈值参数;  $round$  为四舍五入函数。当障碍物速度方向与势场合力方向夹角绝对值小于  $30^\circ + \delta$  时,相似性较大,速度方向系数为 0,反之则为 1。

定义障碍物距离反馈  $K_r$  为:

$$K_r = \begin{cases} 0, & r_{min} \leq r_{safe} \\ -1, & r_{min} > r_{safe} \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $r_{min}$  为遍历所有静态障碍物得到的距离当前位置最近障碍物的距离,  $r_{safe}$  为设定的安全距离。

动态障碍物避障策略思路如算法 1 所示。当无人机处于动态障碍物影响范围内时,通过计算运动速度方向相似性,得到速度方向系数,再根据与静态障碍物之间的最短距离来决定对无人机施加反向位置扰动或者停障措施。

### 算法 1: 动态障碍物避障策略思路

- 1 Get dynamic obstacle influence radius  $R_d$  and  $\alpha_F, \alpha_O$
- 2  $\Delta L \leftarrow \mathbf{P}_{robot} - \mathbf{P}_{obs}$
- 3 if  $\Delta L < R_d$  then
- 4     Calculate  $sign$
- 5     if  $sign = 0$  then

```

6      Search  $r_{min}$ 
7      Compare  $r_{min}$  with  $r_{safe}$  to get  $K_r$ 
8       $sign \leftarrow sign + K_r$ 
9      end
10     end
11      $\alpha_F \leftarrow \alpha_F \times sign$ 

```

经过仿真实验验证,本节提出的基于障碍运动预测与速度方向相似性检验的局部位置脱离策略能防止无人机与障碍物运行方向一致的问题,使无人机更倾向于从障碍物运行方向后方进行绕行或停障,增加了算法的整体效率,减少了完整运行轨迹长度。

## 2 基于领域优化函数的改进人工势场法动态路径规划

### 2.1 传统人工势场法

传统人工势场法的主要原理是梯度势场法,假设无人机受到的斥力势场为  $U_{rep,i}$ 、引力势场为  $U_{att}$ 、斥力为  $F_{rep}$ 、引力为  $F_{att}$ ,假设存在  $n$  个障碍物与无人机的距离小于影响距离  $l$  时,无人机所受合力大小为:

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (5)$$

式中:

$$F_x = -\left(\frac{dU_{att}}{dx} + \sum_{i=1}^n \frac{dU_{rep,i}}{dx}\right) \quad (6)$$

$$F_y = -\left(\frac{dU_{att}}{dy} + \sum_{i=1}^n \frac{dU_{rep,i}}{dy}\right) \quad (7)$$

由此可知无人机下一时刻的位置坐标为:

$$x_{j+1} = x_j + l \times \cos\left(\arctan\left(\frac{F_y}{F_x}\right)\right) \quad (8)$$

$$y_{j+1} = y_j + l \times \sin\left(\arctan\left(\frac{F_y}{F_x}\right)\right) \quad (9)$$

人工势场法的基本思想是将无人机在周围环境中的飞行设计成一种抽象的人造引力场中的运动。目标点对移动机器人产生“引力”,障碍物对移动机器人产生“斥力”,最后通过合力求解来控制无人机的飞行轨迹。但是这种方法会存在局部最优的问题,当无人机逼近目标时,障碍物的斥力变的很小,甚至可以忽略,无人机将只受到引力的作用而直达目标。但在无人机的飞行环境中,可能存在多个障碍物。此时,当无人机逼近目标的同时,它也将向障碍物靠近。如果利用传统引力场函数与斥力场函数定义,斥力将远大于引力,目标点将不是整个势场的全局最小点,从而导致无人机陷入局部最优解,难以到达目标。

### 2.2 现有改进人工势场法的缺陷分析

为解决局部最优问题,传统的人工势场算法通常结合模拟退火算法使用。模拟退火算法具有渐近收敛性,是一种以一定概率收敛于全局最优解的全局优化算法。当无人机使用人工势场法陷入局部最优时,模拟退火法通过扰动

无人机的当前状态使其脱离局部最优解状态,从而继续对无人机的引导。

模拟退火法是一种随机大范围搜索算法,传统算法中生成的点  $X(j+1)$  是在其邻域圆上随机选取的一点,如图 4 所示。将无人机当前位置  $X(j)$  作为邻域圆的圆心,选择随机值  $r$  作为邻域圆半径构建邻域圆。

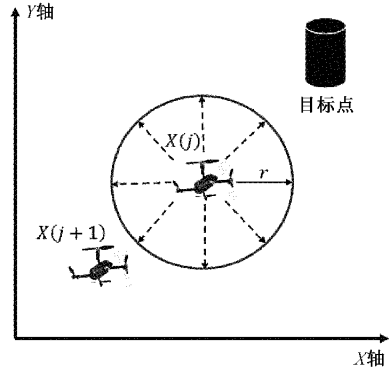


图 4 传统邻域函数随机点位置选取示意图

传统模拟退火法的邻域函数随机点位置表示为:

$$x_{j+1} = x_j + r \times \cos(2\pi \times \text{rand}(1)) \quad (10)$$

$$y_{j+1} = y_j + r \times \sin(2\pi \times \text{rand}(1)) \quad (11)$$

其中,  $X(j) = (x_j, y_j)$  为当前位置,邻域函数生成的随机点为  $X(j+1) = (x_{j+1}, y_{j+1})$ ,  $\text{rand}(1)$  为随机生成均匀分布在  $[0,1]$  内的数。

由于邻域圆半径、圆上点选取随机性较大,会出现远离目标点的随机点。当以概率接受随机点时,产生的随机点可能会出现远离全局最优解现象,甚至会再次进入局部最优解,导致路径规划失败。虽然增加算法路径的迂回次数可以一定程度上解决上述问题,但会导致全局最优解的搜索时间变长,降低算法收敛速度。

### 2.3 基于领域优化函数的改进人工势场动态避障方法

由上述分析可知,传统模拟退火法存在迂回次数多、收敛速度低等问题。针对于此,论文构建了基于飞行目标点的邻域优化函数,对人工势场环境进行约束,进而提高算法的搜索效率,具体的算法流程如图 5 所示。

#### 1) 势场环境建立

假设无人机当前位置为  $X(x, y)$ , 障碍物坐标为  $X_o(x_o, y_o)$ , 目标位置为  $X_g(x_g, y_g)$ , 引力与斥力增益分别为  $K_{att}$ 、 $K_{rep}$ ,  $\rho(X, X_o)$  为无人机与障碍物之间相对距离,  $\rho_{max}$  为障碍物对无人机的最大影响距离。

#### (1) 引力函数

无人机到目标点的距离表示为:

$$\rho(X, X_g) = \|X - X_g\| \quad (12)$$

引力势场函数建立为:

$$U_{att}(X) = \frac{1}{2} K_{att} \rho^2(X, X_g) \quad (13)$$

通过引力势场的负梯度可求得引力为:



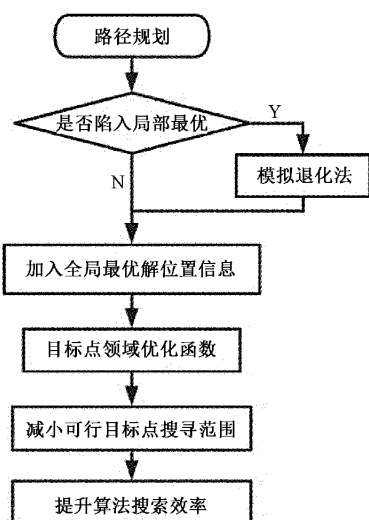


图 5 改进人工势场算法流程

$$F_{att}(X) = -K_{att}\rho(X, X_g) \frac{\partial \rho(X, X_g)}{\partial X} \quad (14)$$

(2) 斥力函数

无人机到障碍物的距离可表示为:

$$\rho_0 = \rho(X, X_0) = \|X - X_0\| \quad (15)$$

斥力势场函数建立为:

$$F_{rep}(X) = \begin{cases} \frac{K_{rep}}{2} \left( \frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_{max}} \right)^2, & \rho_0 \leq \rho_{max} \\ 0, & \rho_0 > \rho_{max} \end{cases} \quad (16)$$

通过斥力势场的负梯度可求得斥力为:

$$F_{rep}(X) = \begin{cases} \frac{K_{rep}}{\rho_0^2} \left( \frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_{max}} \right) \frac{\partial \rho(X, X_0)}{\partial X}, & \rho_0 \leq \rho_{max} \\ 0, & \rho_0 > \rho_{max} \end{cases} \quad (17)$$

2) 基于邻域优化函数的改进人工势场法

本文在传统算法的基础上对邻域函数进行优化,在邻域优化函数中增加目标点约束,使得在逃离局部最优时具备目标指向性,提高了算法效率。如图 6 所示,在邻域函数随机点生成过程中引入了目标点位置信息,即全局最优解的位置点信息。通过加入目标角度的限制条件,可有效降低随机点远离全局最优解的概率,从而可以减少算法的迭代次数,提高算法收敛速度。

改进邻域函数随机位置表达式为:

$$x_{j+1} = x_j + r \times \cos\left(\theta - \frac{\pi}{2} + \pi \times \text{rand}(1)\right) \quad (18)$$

$$y_{j+1} = y_j + r \times \sin\left(\theta - \frac{\pi}{2} + \pi \times \text{rand}(1)\right) \quad (19)$$

其中,  $\theta$  是当前位置与目标位置之间的方位角,计算公式为:

$$\theta = \arctan\left(\frac{y_g - y_j}{x_g - x_j}\right) \quad (20)$$

如图 6 所示,加入目标点与当前位置的方位角  $\theta$ , 邻域

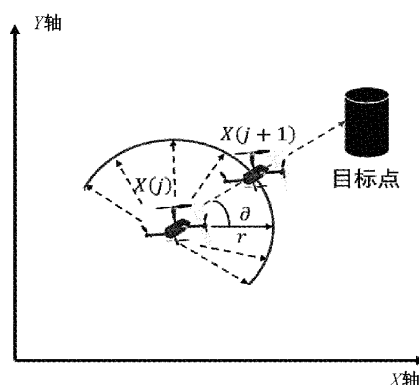


图 6 改进邻域函数随机点位置选取示意图

函数产生的随机点作用范围则为图中的半圆周。随机点的生成同时受到当前位置与目标点的双重影响,使模拟退火法更具有目标趋向性,减小了远离目标点的随机点生成概率,降低了路径的迂回性,提高算法的收敛速度。

## 2.4 无人机状态判断条件

1) 基于阈值对比的局部最优状态判断

当无人机陷入局部最优解时会停止运行或者产生震荡,此时无人机运动幅度较小,因此选择阈值对比算法。由于人工势场法中无人机陷入局部最优解的表现状态主要为停止与振荡,因此针对这两种状态的判断条件分别为:无人机受到的斥力与引力的合力大小为零,或者无人机在  $N$  个步长内的移动距离小于设定阈值。当判断无人机处于局部最优解状态,工作系统通过屏蔽人工势场中的势场力作用,调用基于改进的邻域函数的模拟退火法对当前状态进行扰动,最终使无人机跳出局部最优解点。当无人机跳出局部最优解后,系统会结束对人工势场法的屏蔽作用,使其继续对无人机进行引导,直至下一个局部最优解出现或者到达全局最优解。

2) 局部最优解脱状态判断

模拟退火法判断无人机进入局部最优点时,需解算随机点的势能  $U(j+1)$  与当前点的势能并进行比较  $U(j)$ 。但是在动态避障的问题中,相对距离相比于势能计算更加简单直观,因此本文选择解算当前位置与随机位置之间的相对距离,通过与设定值的对比关系作为判断条件。

## 3 仿真验证与分析

本文主要针对无人机动态避障问题,提出了一种基于邻域优化函数的改进人工势场动态路径规划方法,同时针对动态障碍物避障问题,提出了一种基于速度方向相似性检测的动态障碍物避障策略。为了验证所提算法优势,设计了 3 种仿真环境,通过对比不同仿真环境下无人机动态避障的表现,证明本文提出方法的有效性。

仿真环境 1、2 均为  $700 \text{ m} \times 700 \text{ m}$  大小的飞行环境(如图 7 所示):其中空心圆圈表示需要进行飞行过程中的目标点,实心圆圈表示障碍物,右下角的三角形表示飞行的起

点,左上角的五角星是飞行的终点。在仿真环境 1 中,障碍物代表飞行线路上交叉生长的树木。在仿真环境 2 中,障碍物代表由于迁移改造而发生的地图改变。仿真环境中障碍物的数量根据避障难度的不同,其数量与位置也不相同。

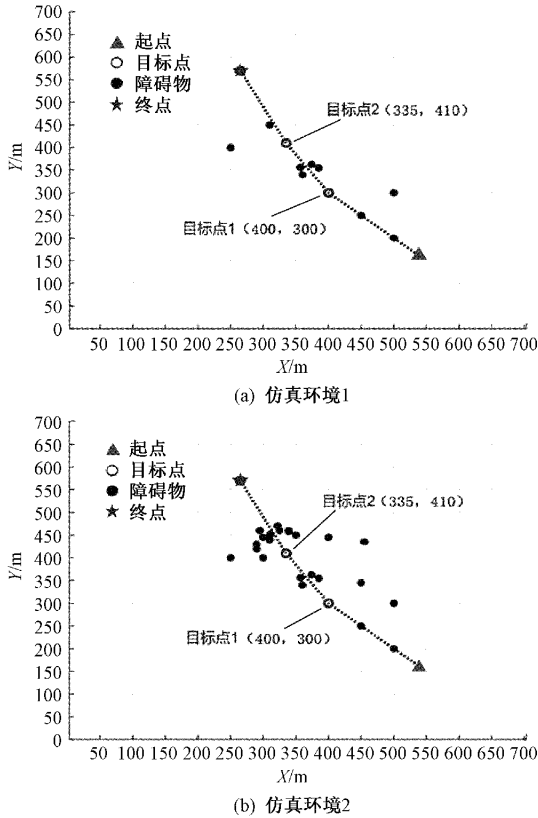
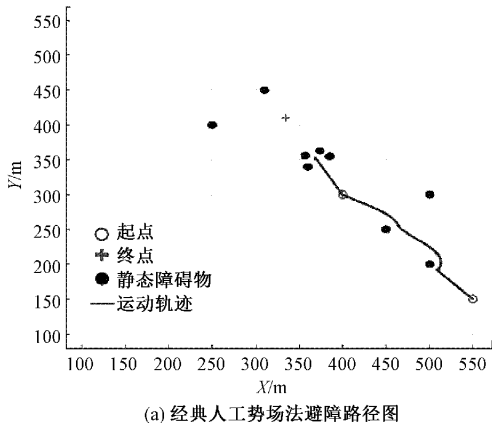


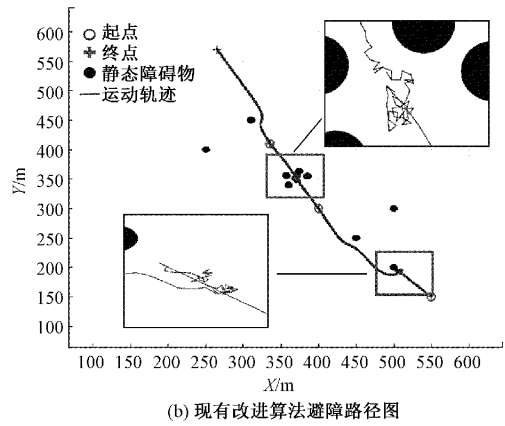
图 7 仿真环境示意图

为了验证改进算法的有效性,实验对比了经典人工势场法、现有优化算法(模拟退火法)与本文所提改进算法在不同仿真环境中的路径规划与避障效果,结果如图 8、9 所示。

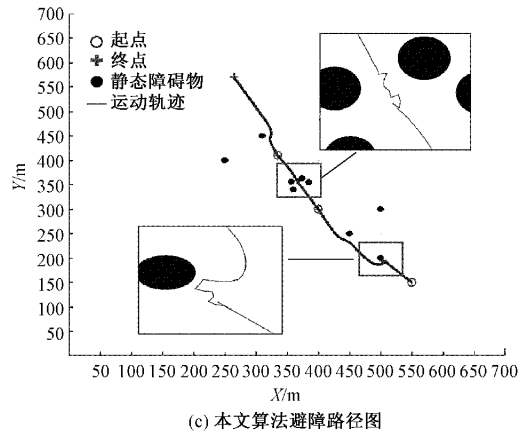
由仿真对比可知,经典人工势场法在复杂环境下容易陷入局部最优解,无法找到可通行路径。模拟退火法虽然可以完成飞行任务,但是避障路径的迂回性高、迭代次数



(a) 经典人工势场法避障路径图

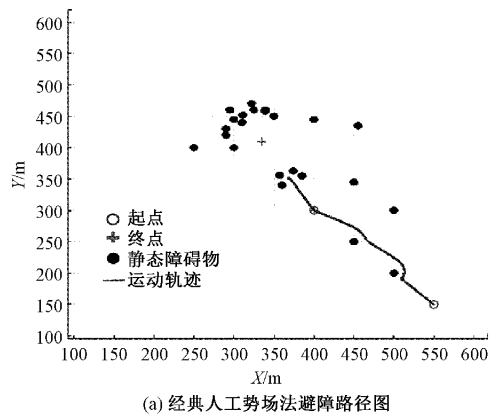


(b) 现有改进算法避障路径图

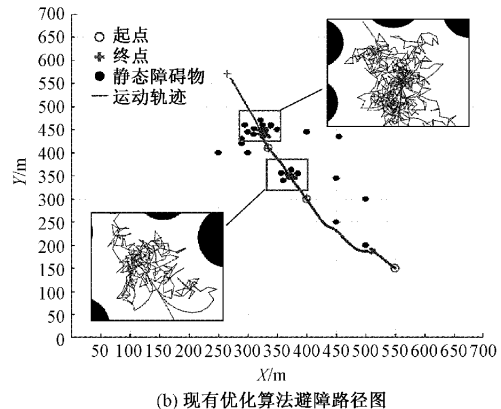


(c) 本文算法避障路径图

图 8 仿真环境 1 下不同算法对比图



(a) 经典人工势场法避障路径图



(b) 现有优化算法避障路径图

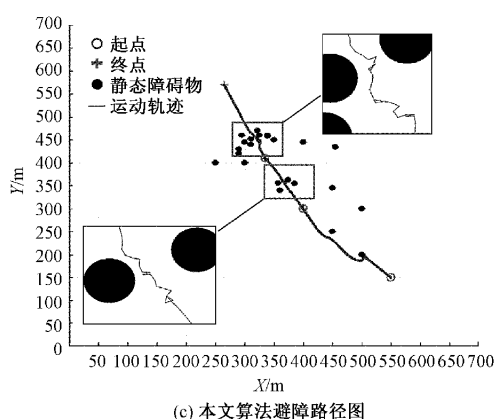


图 9 仿真环境 2 下不同算法对比图

多、任务执行效率低,成功率下降严重。而本文所提改进算法加入邻域优化函数后,无人机在动态避障时具有目标趋向性,减少了算法的迭代次数,提高了无人机避障效率与安全性。

为进一步量化改进算法优势,分别在两种仿真环境下进行 10 次仿真,统计模拟退火法与本文提出改进算法的动态避障时间。其中,若动态避障 500 s 内未能完成,认定为路径规划失败。实验的硬件平台搭载了 14 nm 英特尔 10 代酷睿处理器及 GeForceMX350 独立显卡,仿真结果如表 1 所示。

表 1 不同仿真环境下两种算法动态避障耗时对比

序号	仿真环境 1 时间/s		仿真环境 2 时间/s	
	对比算法	本文算法	对比算法	本文算法
均值	85.299	27.754	161.48	31.558
标准差	38.54	0.48	62.95	2.41
成功率/%	100	100	50	100

由表 1 可以看出:

1) 在障碍物分布较为简单的仿真环境 1 中,本文提出的改进算法将动态避障时间缩减了 69%,且有效降低了路径规划的不确定性;

2) 在障碍物分布较为复杂的仿真环境 2 中,本文提出的改进算法将动态避障时间缩减了 81%。此外,现有改进算法存在 50% 的失败概率,而本文提出算法避障成功率可达到 100%。

上述实验分别考虑了简单与复杂环境下、场景中不存在静态障碍物时的算法效率,实验结果充分说明了在此类环境下,本文所提算法的优势。下面考虑环境中存在动态障碍物的情况。

仿真环境 3 为 100 m×100 m 大小的飞行环境。如图 10 所示,其中设置了多个实心圆圈来模拟实际环境中的静态障碍物;左上角的星号为动态障碍物运动的起点;左下角的空心圆圈为无人机运动起点;右上角的十字标记为环

境中的目标点。

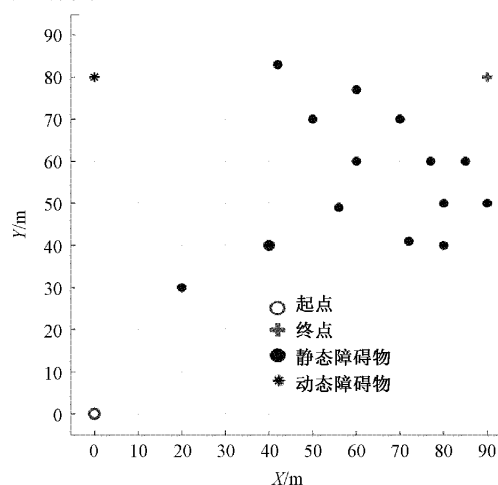


图 10 仿真环境 3

本文提出方法与文献[27]提出的 APF-Bug 混合算法对比结果如图 11 所示。

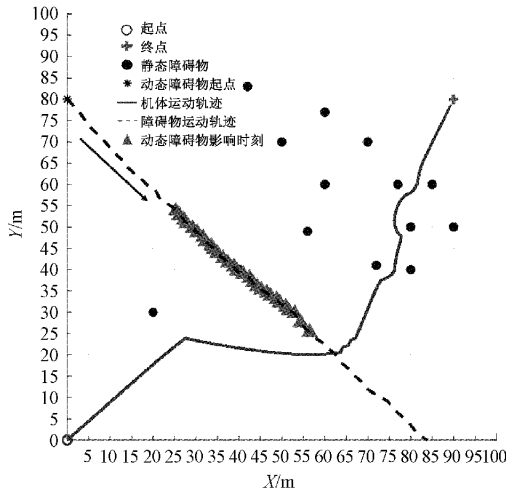
图中虚线轨迹为动态障碍物运行轨迹,三角形点构成的轨迹是动态障碍物对路径规划产生影响的区间。由仿真结果可知,现有优化算法虽然可以实现对动态障碍物的避障,但当避障轨迹与障碍物运动轨迹接近时,无人机会产生伴飞的情况(如图 11(a)),直至无人机从障碍物前方绕飞,导致飞行距离大大增加。而本文提出算法能够通过检测无人机速度与障碍物运动速度进行相似性检测,及时采取停障或反向绕障的策略,大大提高了无人机飞行的安全性以及路径规划的高效性。

为进一步量化算法优势,本文进行了 5 次仿真对比实验,分别设置了不同的动态障碍物运动状态。原算法和改进算法的轨迹总长与总耗时如表 2 所示。

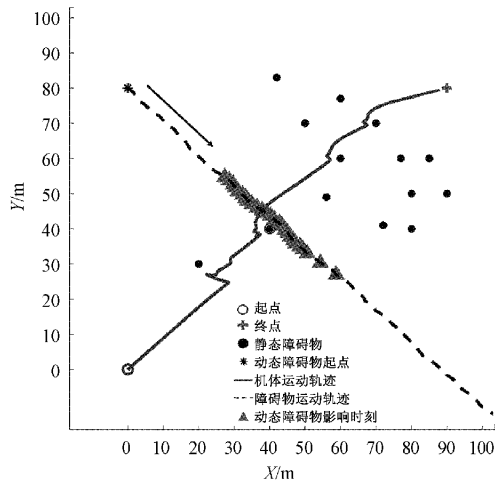
表 2 原算法与改进算法耗时与轨迹长度对比

序号	耗时/s		轨迹长度/m	
	对比算法	改进算法	对比算法	改进算法
1	15.3	11.2	148	115
2	23.8	18.7	176	132
3	14.4	10.6	97	88
4	13.1	10.5	128	104
5	14.0	10.7	113	92
均值	16.1	12.3	132.4	106.2
优化/%		23.6		19.7

由表 2 可知,加入了基于速度方向相似性检测的避障策略的改进算法后,无人机在成功避障抵达目标点的同时缩短了 19.7% 路径长度,减少了 23.6% 飞行时长,同时对障碍物的运动方向进行了前瞻判断,选择了一条更优路径。



(a) 对比算法APF-Bug动态障碍物避障路径图



(b) 本文算法动态障碍物避障路径图

图 11 仿真环境 3 下动态障碍物避障对比图

## 4 结 论

本文针对经典人工势场法易陷入局部最优所引起的收敛速度降低问题、现有改进算法存在的路径迂回问题,提出了基于邻域优化函数的改进人工势场无人机动态路径规划方法。邻域优化函数基于目标点设置,可为无人机逃离局部最优时提供指向性约束,提高算法收敛速度。同时,针对现有算法在处理环境中存在动态障碍物的不足,本文提出了基于障碍运动预测与速度方向相似性检验的局部位置脱离策略,通过基于卡尔曼滤波的动态障碍物运动预测获得对动态障碍物的运动参数预测值,根据速度方向约束、障碍物距离约束来生成无人机的不同避障决策。通过仿真对比,表明本文算法可缩短动态避障时间 69%,可提升复杂障碍物场景下的避障成功率,并对存在动态障碍物的情况具有较强适应性、缩短了 19.7% 的避障距离与 23.6% 的任务耗时,具有十分优良的避障效果,大大提高了任务执行的安全性。

## 参考文献

- [1] 莫骏超. 国外无人侦察机研究现状及关键技术[J]. 飞航导弹, 2016, DOI: 10.16338/j.issn.10091319. 2016.09.10.
- [2] 王海风, 郑柏超, 卢世堃, 等. 基于观测器的无人机编队自适应容错控制[J]. 电子测量技术, 2022, 45(17): 56-64.
- [3] 胡义强, 杨骥, 荆文龙, 等. 基于无人机遥感的海岸带生态环境监测研究综述[J]. 测绘通报, 2022, DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2022.0165.
- [4] 张东东, 万武艺, 刘欣, 等. 基于无人机的绝缘子带电零值检测技术[J]. 电力工程技术, 2023, 42(1): 234-242.
- [5] 刘江, 关向雨, 温跃泉, 等. 基于改进 YOLOv4 的 GIS 红外特征识别与温度提取方法[J]. 电力工程技术, 2023, 42(1): 162-168.
- [6] AGGARWAL S, KUMAR N. Path planning techniques for unmanned aerial vehicles: A review, solutions, and challenges [J]. Computer Communications, 2020, DOI: 10.1016/j.comcom.2019.10.014.
- [7] 都基焱, 张振. 小型无人机飞行控制系统硬件设计[J]. 兵工自动化, 2014, 33(9): 64-67.
- [8] 魏业文, 李梅, 解园琳, 等. 基于改进 Faster-RCNN 的输电线路巡检图像检测[J]. 电力工程技术, 2022, 41(2): 171-178.
- [9] 刘玄冰, 周绍磊, 肖支才, 等. 无人机避障方法研究综述[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(5): 40-47.
- [10] 孙淑光, 孙涛. 基于融合 A\* 算法的无人机路径规划研究[J]. 电子测量技术, 2022, 45(9): 82-91.
- [11] 方群, 徐青. 基于改进粒子群算法的无人机三维航迹规划[J]. 西北工业大学学报, 2017, 35(1): 66-73.
- [12] 路引, 郭昱津, 王道波. 基于 RRT 算法的某型无人机航路在线规划设计[J]. 兵器装备工程学报, 2016, 37(12): 18-21.
- [13] YANG X. Mobile robot path planning with a non-dominated sorting genetic algorithm [J]. Applied Sciences, 2018, 8(11): 2253.
- [14] 李朝钦, 彭晓涛. 考虑无人机杆塔巡视避障的两阶段路径优化[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(4): 155-158, 202.
- [15] 刘跃波, 马立新. 电力巡检无人机避障技术研究[J]. 电子测量技术, 2019, 42(13): 1-5.
- [16] 徐钊, 胡劲文, 马云红, 等. 无人机碰撞规避路径规划算法研究[J]. 西北工业大学学报, 2019, 37(1): 100-106.
- [17] 李奕铭, 于传, 陈伟, 等. 基于改进人工势场法的移动机器人动态环境避障研究[J]. 现代工业经济和信化, 2017, 7(13): 8-10.
- [18] ZHANG Q, CHEN D, CHEN T. An obstacle



- avoidance method of soccer robot based on evolutionary artificial potential field [J]. *Energy Procedia*, 2012, 16(5):1792-1798.
- [19] 卢艳军,李月茹. 基于改进人工势场法的四旋翼飞行器航迹规划[J]. *火力与指挥控制*, 2018, 43(11): 119-122,12.
- [20] 周兰凤,孔明月. 基于改进人工势场法的无人机三维避障[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2022, 1(6): 54-67.
- [21] 刘公伟,赵强. 改进人工势场法的无人车换道避障路径规划[J]. *导航定位学报*, 2023, 11(3):112-118,178.
- [22] SIMING W, TIAN TIAN Z, WEI JIE L. Mobile robot path planning based on improved artificial potential field method [C]. *IEEE International Conference of Intelligent Robotic & Control Engineering*. IEEE, 2018:29-33.
- [23] 余翔,姜陈,段思睿,等. 改进 A\* 算法和人工势场法的路径规划[J/OL]. *系统仿真学报*, 2023, <https://doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.23-0255>.
- [24] HUANG Z, CHU D, WU C, et al. Path planning and cooperative control for automated vehicle platoon using hybrid automata[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019, DOI: 10.1109/TITS.2018.2841967.
- [25] 李友为,巩秋野,李鹏宇,等. 基于人工势场法的无人平台避障控制研究[C]. 2022 年无人系统高峰论坛(USS2022)论文集, 2022:6.
- [26] 孙伶俐,付主木,陶发展,等. 改进人工势场的智能车避障算法研究[J]. *河南科技大学学报(自然科学版)*, 2022, 43(5):28-34,41,5-6.
- [27] 杜婉茹,王潇茵,田涛,等. 面向未知环境及动态障碍的人工势场路径规划算法[J]. *计算机科学*, 2021, 48(2): 250-256.
- [28] 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.
- [29] 张贺,缪存孝,唐友军,等. 移动机器人自主动态避障方法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2022, 48(6):1013-1021.

### 作者简介

黄郑,高级工程师,主要研究方向为无人机智能运检技术方向。

E-mail: hz10@vip.qq.com

谢彧颖(通信作者),硕士研究生,主要研究方向为无人机自主探索。

E-mail: xieyuying@nuaa.edu.cn