

四旋翼无人多飞行器着陆避障轨迹 PID 控制方法

赵国良¹, 孟宪猛²

(1. 盐城工业职业技术学院 智能制造学院, 江苏 盐城 224005;

2. 合肥工业大学 计算机与信息学院, 合肥 230001)

摘要: 四旋翼无人飞行器在复杂环境下的着陆避障控制涉及障碍物规避与精准着陆的双重挑战, 为解决着陆避障轨迹规划效率低、易陷入局部最优等问题, 提出一种四旋翼无人多飞行器着陆避障轨迹 PID 控制方法; 利用栅格法搭建飞行环境, 基于势场法构建障碍物斥力场, 将蚁群算法与势场法结合, 设定蚂蚁个体为飞行器, 以信息素浓度、引力场和斥力场数值为依据挑选前进网格点; 飞行器抵达着陆点后, 更新、扩散轨迹优度, 达到最大轮次后, 采用 B 样条曲线平滑处理优度最高轨迹, 得到最后着陆避障轨迹, 解决了复杂环境下轨迹规划的安全、高效与适应性难题, 通过势场与蚁群算法融合, 使轨迹规划更具智能性; 在飞行器控制方面, 以 PID 控制为技术支持; 油门控制器采用 PD 控制, 姿态控制器采用串级 PID 控制, 分别控制姿态的角速度与角度; 水平位置控制器采用 PID 控制, 通过计算飞行器当前位置与轨迹对应位置的偏差, 得到俯仰角和横滚角, 进而实现水平位置控制; 经测试结果表明: 所提方法能够使四旋翼无人飞行器以始终低于 2 cm 的较小偏距稳定地成功避障, 以趋近于 0 cm 的偏距精准着陆, 实用价值较高。

关键词: 四旋翼无人飞行器; 势场蚁群算法; 着陆避障轨迹; PID; 着陆避障控制

PID Control Method for Obstacle Avoidance Trajectory of Quadcopter UAV Multi Aircraft Landing

ZHAO Guoliang¹, MENG Xianmeng²

(1. School of Intelligent Manufacturing, Yancheng Polytechnic College, Yancheng 224005, China;

2. School of Computer Science and Information, Anhui University of Technology, Hefei 230001, China)

Abstract: The landing obstacle avoidance control of quadcopter unmanned aerial vehicles (UAVs) in complex environments involves dual challenges of obstacle avoidance and precise landing. To solve the low efficiency and susceptibility to local optima in landing obstacle avoidance trajectory planning, a PID control method for quadcopter UAV multi aircraft landing obstacle avoidance trajectory is proposed. Build a flying environment by the grid method, construct obstacle repulsion field based on potential field method, set ant individuals as aircraft by combining ant colony algorithm with potential field method, and select forward grid points based on pheromone concentration, gravity field, and repulsion field values. Update and diffuse the trajectory optimization after the aircraft lands, utilize B-spline curves to smooth the highest optimization trajectory by the maximum round, obtain the final landing obstacle avoidance trajectory, and solve the safety, efficiency, and adaptability of trajectory planning in complex environments. By integrating potential fields with ant colony algorithms, it makes trajectory planning more intelligent. In terms of aircraft control, PID control is used as a technical support. The throttle controller adopts PD control, and the attitude controller adopts cascade PID control, respectively controlling the angular velocity and angle of the attitude. By calculating the deviation between the current position of the aircraft and the corresponding position on the trajectory, the horizontal position controller adopts PID control to obtain its pitch and roll angles, and then achieves its horizontal position control. The test results show that the proposed method can enable the quadcopter UAV to successfully avoid obstacles with a small deviation of less than 2 cm, and land accurately with a deviation approaching 0 cm, which has a high practical value.

Keywords: quadcopter UAVs; potential field ant colony algorithm; landing obstacle avoidance trajectory; PID; landing obstacle avoidance control

收稿日期:2025-07-09; 修回日期:2025-08-18。

基金项目:江苏省产学研合作项目(BY20231081)。

作者简介:赵国良(1989-),男,硕士,讲师。

引用格式:赵国良,孟宪猛.四旋翼无人多飞行器着陆避障轨迹 PID 控制方法[J].计算机测量与控制,2025,33(12):154-160.

0 引言

四旋翼无人飞行器在物流配送、灾害搜救、农业植保、电力巡检等领域中的高度普及, 使其在复杂环境下的着陆避障控制成为关键技术瓶颈^[1-2]。特别是在动态、非结构化的环境中, 无人飞行器不仅需要应对建筑物、树木等静态障碍物, 还需要实时规避其他无人机、车辆或人等移动障碍物, 同时克服风力扰动、传感器噪声等外部干扰^[3]。一旦避障控制技术失效, 就可能导致飞行器撞击障碍物, 甚至引发任务失败或安全事故。因此, 研究高效、鲁棒的四旋翼无人飞行器着陆避障控制方法, 不仅直接影响此类飞行器的任务执行能力, 更关乎无人机协同作业的安全性和可靠性, 具有重要的理论价值与工程应用前景。

现有研究针对无人机的避障控制提出了多种成效显著的解决方案。例如: 文献 [4] 针对时变无人机编队, 创新性地将事件触发机制与人工势场法相结合, 依据网络攻击状态动态调整控制策略。该方法通过实时监测网络攻击频率, 触发相应的避障控制模式, 在理想状态下可有效实现无人机编队的避障控制。然而, 事件触发机制高度依赖网络攻击状态的准确检测与判断, 若攻击频率过高, 将导致控制模式频繁切换, 极易引发系统振荡, 增加系统不稳定风险。尤其在复杂多变的网络环境中, 攻击手段多样且隐蔽, 准确检测攻击频率的难度较大, 进一步限制了该方法的可靠性。文献 [5] 聚焦多旋翼无人机, 充分考虑通信距离限制这一关键因素, 从位置和姿态两个维度设计了分层避障控制策略。该策略通过预设无人机通信距离阈值, 当无人机之间的距离超过阈值时, 触发相应的避障控制动作, 确保无人机编队在通信受限情况下的安全飞行。然而, 在实际复杂障碍物环境中, 障碍物的分布和形状各异, 预设的通信距离阈值难以适应所有场景。一旦通信范围受限, 多旋翼无人机编队可能因无法及时获取队友信息而导致编队分裂, 降低任务执行的成功率。文献 [6] 以无人机集群的领导者—跟随者架构为基础, 领导者采用强化学习结合人工势场法实现避障控制, 跟随者则通过跟踪引导法实现强化学习避障控制。强化学习赋予了无人机在复杂环境中自主学习和决策的能力, 结合人工势场法可有效引导无人机避开障碍物。然而, 深度强化学习的训练过程需要大量与环境交互的数据, 且训练环境与实际部署环境往往存在差异。这种差异可能导致避障控制算法在实际应用中泛化性不足, 无法准确应对各种未知情况, 影响无人机的避障效果和安全性。文献 [7] 以分布式模型预测控制为框架, 设计了两个目标代价函数和两个避障约束, 并融合速度障碍法完成避障控制。分布式模型预测控制能够充分考虑无人机之间的相互影响和约

束, 通过优化目标代价函数实现全局最优控制。然而, 该方法计算复杂度极高, 需要对每个无人机在未来一段时间内的状态进行预测和优化, 对机载处理器的实时性要求极为苛刻。在大规模无人机编队中, 计算量将呈指数级增长, 难以满足实时控制的需求, 限制了其在大规模场景中的应用。

与上述方法相比, 本文针对四旋翼无人飞行器, 以势场蚁群算法为支撑, 提出一种着陆避障控制方法。在轨迹规划层面, 本文将势场法与蚁群算法深度融合。势场法为飞行器提供了直观的障碍物影响信息, 通过构建引力场和斥力场, 引导飞行器避开障碍物, 朝着目标着陆点飞行。蚁群算法则以信息素浓度衡量轨迹优度, 结合引力场和斥力场数值引导蚂蚁个体寻找最优轨迹。这种融合方式使规划出的轨迹能够充分考虑障碍物的分布和动态变化, 在复杂动态环境中更具安全性、高效性和适应性。与文献方法相比, 本文方法不依赖网络攻击状态检测、预设通信距离阈值、大量环境交互数据或高计算性能的处理器, 具有更强的鲁棒性和普适性。在控制策略整体设计上, 本文采用分层控制架构, 针对飞行器的不同控制需求, 设计了油门—姿态控制器和水平位置控制器。油门控制器采用 PD 控制, 姿态控制器采用串级 PID 控制, 内、外环的控制对象分别是姿态的角速度与角度。水平位置控制器则采用 PID 控制, 实现对飞行器水平位置的精确调节。与模糊控制相比, PID 控制具有结构简单、参数易于调整、稳定性好等优点, 能够快速准确地响应控制指令, 确保飞行器的稳定飞行。与自适应控制相比, PID 控制不需要复杂的系统模型和在线辨识过程, 计算量小, 实时性好, 更适合对实时性要求较高的四旋翼无人飞行器控制。这种分层控制架构使控制逻辑更加清晰, 各模块职责明确, 提高了控制系统的稳定性和可靠性, 为四旋翼无人飞行器的安全飞行提供了有力保障。

1 基于势场蚁群的四旋翼无人飞行器着陆避障轨迹规划

利用势场蚁群算法, 规划四旋翼无人飞行器着陆避障轨迹, 以便让规划的轨迹对于复杂动态的障碍物环境而言更安全、更高效且更具适应性^[8-9], 能够为后续的飞行器飞行控制提供可靠的轨迹参考。利用栅格法^[10], 搭建四旋翼无人飞行器的飞行环境, 明确障碍物区域、可行域及飞行器的起飞点与着陆点。基于势场法, 构建飞行器飞行环境中障碍物的斥力场后, 令蚁群在飞行器的起飞点就位。

在构建引力势场时, 将着陆点设定为一个具有强大吸引力的“磁极”。想象着陆点就像一个巨大的引力中心, 四旋翼无人飞行器就像被吸引的物体。随着飞行器

与着陆点距离的拉近，这种吸引力会逐渐增强，引导飞行器朝着着陆点前进。这种引力势场的构建是基于一种直观的物理概念，距离越远，飞行器受到的“拉力”越弱；距离越近，“拉力”越强，就像现实中物体受到重力作用靠近地球一样，确保飞行器能朝着目标方向稳定移动。

对于斥力势场，则将环境中的障碍物视为一个个具有排斥力的“小磁极”。当飞行器靠近障碍物时，就会受到来自障碍物的排斥力。这种排斥力的大小与飞行器和障碍物之间的距离密切相关。在距离障碍物较远时，排斥力几乎可以忽略不计，飞行器可以自由通过；而当飞行器逐渐靠近障碍物，达到一定距离范围内时，排斥力会迅速增大，就像两个同极磁铁相互靠近时产生的强烈排斥力，迫使飞行器改变方向，避开障碍物，从而保障飞行安全。

在蚁群算法里，每只蚂蚁代表四旋翼无人飞行器的一种潜在飞行路径选择。当蚂蚁要从当前位置移动到下一个位置时，会综合考虑两个关键因素：一方面是信息素浓度；另一方面是启发式信息，蚂蚁会根据信息素浓度和启发式信息的综合考量，按照一定的概率来决定下一步的移动方向，从而逐步探索出一条最优的着陆避障轨迹。

由此，设定不同蚂蚁个体为多个四旋翼无人飞行器，综合信息素浓度（即飞行器着陆避障轨迹的优度）与飞行环境的引力场、斥力场数值，作为飞行器挑选栅格化飞行环境中前进网格点的依据。引力场的大小和方向会根据飞行器与着陆区的相对位置和距离动态变化。当飞行器偏离理想路径时，引力场会相应调整，使飞行器重新回到朝着目标着陆区的正确航迹上。如飞行器在飞行过程中受到侧风影响偏离了预定航线，引力场会通过调整引力的方向和大小，引导飞行器纠正航向，继续朝着目标着陆区前进。

引力场还会影响飞行器的姿态控制。为了朝着目标着陆区飞行，飞行器需要根据引力场的方向调整俯仰角、横滚角等姿态角。比如，当引力场方向与飞行器当前飞行方向不一致时，飞行器需要通过调整姿态角来改变飞行方向，使其与引力场方向一致。

已知四旋翼无人飞行器的着陆点是 o ，若对于飞行器当前的网格点 a ，相邻的网格点是 b ，其与 o 的曼哈顿距离^[11]是 $MD(b, o)$ ， a 的全部可达网格点与 o 的最小曼哈顿距离是 $\min\{MD(a, o)\}$ ，则 b 的引力场值 $Attr_b$ 由下式解得：

$$Attr_b = \frac{1}{MD(b, o) + \min\{MD(a, o)\}} \quad (1)$$

已知飞行环境中障碍物的网格点 s ，以该点为圆心的 R_s 半径球体范围内存在斥力，若其作用于网格点 b

的障碍物网格点集合是 S_b ， b 与 s 的欧式距离^[12]是 $OD(b, s)$ ，则通过下式解得 b 的斥力场值 Rep_b ：

$$Rep_b = \frac{1}{1 - \sum_{s \in S_b} \frac{R_s}{OD(b, s)}} \quad (2)$$

当所有飞行器根据各自挑选的前进网格点抵达着陆点后，更新、扩散各飞行器着陆避障轨迹的优度，直至达到最大轮次。若轨迹优度的全局、局部挥发率和扩散率各是 ρ_1 、 ρ_2 、 λ ，扩散半径是 R_λ ，网格点 a 在 t 时的着陆避障轨迹优度是 $\tau_a(t)$ ，轨迹代价及其权重是 C 、 ω_c ，点 a 与 b 的欧式距离是 $OD(a, b)$ ，则更新式和扩散式分别如下所示：

$$\tau_a(t+1) = (1 - \rho_1)\tau_a(t) + (1 - \rho_2)\tau_a(t) + \frac{\omega_c}{C} \quad (3)$$

$$\tau_b = \frac{\lambda \tau_a [R_\lambda - OD(a, b)]}{R_\lambda} \quad (4)$$

式中， $\tau_a(t+1)$ 指网格点 a 在 $t+1$ 时的着陆避障轨迹优度， τ_b 指网格点 a 向 b 扩散的优度。当满足最大轮次时，使用 B 样条曲线^[13] 平滑处理^[14] 优度最高的轨迹，得到四旋翼无人飞行器最终的着陆避障轨迹。已知 B 样条曲线的控制点 p_{c+k} ($k = 1, 2, \dots, K$)，通过下式，可得到 K 阶 B 样条曲线的第 c 个控制点 $p_{c,k}$ ：

$$p_{c,k} = \sum_{k=1}^K p_{c+k} H_{k, K-1}(h) \quad (5)$$

式中， $H_{k, K-1}(h)$ 指基函数^[15]， h 指控制变量，计算公式如下所示：

$$H_{k, K-1}(h) = \frac{\sum_{\Xi=0}^{K-1-k} p_{c+k} (-1)^\Xi C_K^\Xi (h + K - 1 - k - \Xi)^{K-1}}{(K-1)!} \quad (6)$$

式中， Ξ 指求和指标， C_K^Ξ 指二项式系数。令 $K = 4$ ，代入上式中，得到以下 4 个基函数：

$$H_{0,3}(h) = \frac{h^2}{2} - \frac{h^3}{6} - \frac{h}{2} + \frac{1}{6} \quad (7)$$

$$H_{1,3}(h) = \frac{h^3}{2} - h^2 + \frac{2}{3} \quad (8)$$

$$H_{2,3}(h) = \frac{h^2}{2} - \frac{h^3}{2} + \frac{h}{2} + \frac{1}{6} \quad (9)$$

$$H_{3,3}(h) = \frac{h^3}{6} \quad (10)$$

将以上基函数代入公式 (5)，通过改变变量 h 在 $[0, 1]$ 区间内的取值，计算出曲线上的点，从而得到四阶 B 样条曲线。该曲线即为平滑化后的四旋翼无人飞行器着陆避障轨迹。

在利用势场蚁群算法完成四旋翼无人飞行器着陆避障轨迹规划后，需要明确规划结果与后续飞行控制之间的紧密关联，以实现飞行器安全、稳定着陆。

势场蚁群算法规划出的轨迹本质上是由一系列离散

点构成, 这些离散点反映了飞行器在不同时刻应到达的网格位置, 是飞行器在复杂环境中安全飞行的潜在路径。然而, 飞行器的实际飞行控制需要连续、平滑的轨迹作为参考, 以确保控制指令的连续性和稳定性, 避免因轨迹突变导致飞行器姿态失控或能量损耗过大。

因此, 在将规划的离散轨迹应用于控制之前, 需借助 B 样条曲线对其进行平滑处理, 将离散点转化为连续、光滑的曲线轨迹。经过平滑处理后的轨迹, 不仅能更好地贴合飞行器的飞行特性, 还能为后续的油门—姿态控制器和水平位置控制器提供精确的目标位置和速度设定值以及参考路径, 使控制器能够根据连续轨迹实时调整飞行器的油门、姿态和水平位置, 确保飞行器精准跟踪避障轨迹, 顺利完成着陆任务。

2 基于着陆避障轨迹的四旋翼无人飞行器控制

以 PID 控制^[16]为技术支持, 根据势场蚁群算法规划的四旋翼无人飞行器着陆避障轨迹, 为油门和姿态指令生成提供目标位置和速度设定值, 为水平位置控制提供参考路径, 确保飞行器跟踪避障轨迹安全着陆。

2.1 四旋翼无人飞行器着陆避障的油门—姿态控制器

飞行器的油门控制器模式采用 PD 控制^[17]; 姿态控制器模式采用串级 PID^[18], 内、外环的控制对象分别是姿态的角速度与角度。若飞行器的重力是 G , 期望高度是 η' , 实际高度是 η , 高度的比例控制因子和微分控制因子分别是 $f_{p\eta}$ 、 $f_{d\eta}$, 当前横滚、俯仰、偏航姿态角速度分别是 φ 、 θ 、 σ , 规划的着陆避障轨迹所对应的各姿态角速度分别是 φ' 、 θ' 、 σ' , 对应的比例控制因子、积分控制因子和微分控制因子分别是 $f_{p\varphi}$ 、 $f_{d\varphi}$ 、 $f_{i\varphi}$ 和 $f_{p\theta}$ 、 $f_{d\theta}$ 、 $f_{i\theta}$ 以及 $f_{p\sigma}$ 、 $f_{d\sigma}$ 、 $f_{i\sigma}$, 则油门—姿态控制器的数学表达方程式如下所示:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_1 = \frac{f_{p\eta}(\eta' - \eta) + f_{d\eta} \frac{d(\eta' - \eta)}{dt} + G}{\cos\varphi\cos\theta} \\ u_2 = f_{p\varphi}(\varphi' - \varphi) + f_{d\varphi} \frac{d(\varphi' - \varphi)}{dt} + f_{i\varphi} \int (\varphi' - \varphi) dt \\ u_3 = f_{p\theta}(\theta' - \theta) + f_{d\theta} \frac{d(\theta' - \theta)}{dt} + f_{i\theta} \int (\theta' - \theta) dt \\ u_4 = f_{p\sigma}(\sigma' - \sigma) + f_{d\sigma} \frac{d(\sigma' - \sigma)}{dt} + f_{i\sigma} \int (\sigma' - \sigma) dt \end{array} \right. \quad (11)$$

式内, u_1 、 u_2 、 u_3 、 u_4 分别指飞行器油门、横滚、俯仰、偏航 4 个控制通道的输出。

2.2 四旋翼无人飞行器着陆避障的水平位置控制器

飞行器的水平位置控制器模式采用 PID 控制。若飞行器于 X、Y 轴两个方向的当前位置是 (x, y) , 在着陆避障轨迹上的对应位置是 (x', y') , x, y 两参数对应的比例控制因子、积分控制因子和微分控制因子分别是

f_{px} 、 f_{ix} 、 f_{dx} 和 f_{py} 、 f_{iy} 、 f_{dy} , 则对于规划的着陆避障轨迹而言, 飞行器 X 轴方向的俯仰角 θ' 和 Y 方向的横滚角 φ' 由下列两式解得:

$$\theta' = f_{px}(x' - x) + f_{dx} \frac{d(x' - x)}{dt} + f_{ix} \int (x' - x) dt \quad (12)$$

$$\varphi' = f_{py}(y' - y) + f_{dy} \frac{d(y' - y)}{dt} + f_{iy} \int (y' - y) dt \quad (13)$$

若对于着陆避障轨迹, 飞行器在惯性坐标系中的水平位置是 (x'_g, y'_g) , 则飞行器水平位置控制器的数学表达方程式如下所示:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varphi & \sin\theta \\ -\sin\varphi & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_g \\ y'_g \end{bmatrix} \quad (14)$$

3 四旋翼无人飞行器着陆避障控制试验

3.1 实验准备阶段的配置工作

3.1.1 飞行环境搭建

将着陆点设定为具有强大吸引力的“磁极”。随着飞行器与着陆点距离的拉近, 吸引力逐渐增强, 引导飞行器朝着着陆点前进。距离越远, 飞行器受到的“拉力”越弱; 距离越近, “拉力”越强, 确保飞行器稳定移动。引力场大小和方向会根据飞行器与着陆区的相对位置和距离动态变化, 当飞行器偏离理想路径时, 引力场会相应调整, 引导飞行器回到正确航迹。同时, 引力场会影响飞行器的姿态控制, 飞行器需根据引力场方向调整俯仰角、横滚角等姿态角。

将环境中的障碍物视为具有排斥力的“小磁极”。当飞行器靠近障碍物时, 会受到排斥力, 其大小与飞行器和障碍物之间的距离密切相关。距离障碍物较远时, 排斥力可忽略不计; 达到一定距离范围内时, 排斥力迅速增大, 迫使飞行器改变方向, 避开障碍物。

每只蚂蚁代表四旋翼无人飞行器的一种潜在飞行路径选择。蚂蚁移动时综合考虑信息素浓度和启发式信息, 按照一定概率决定下一步移动方向, 逐步探索最优着陆避障轨迹。设定不同蚂蚁个体为多个四旋翼无人飞行器, 综合信息素浓度(即飞行器着陆避障轨迹的优度)与飞行环境的引力场、斥力场数值, 作为飞行器挑选栅格化飞行环境中前进网格点的依据。

3.1.2 关键参数选择与调整依据

1) 信息素初始值: 信息素初始值决定了蚁群算法初始阶段蚂蚁对路径的选择倾向。若初始值设置过大, 蚂蚁容易过早集中在某些路径上, 导致搜索陷入局部最优; 若设置过小, 蚂蚁探索新路径的积极性降低, 搜索效率低下。通过多次实验对比, 当信息素初始值为 0.02 时, 蚂蚁在搜索初期能够较为均匀地分布在各个可能的路径上, 既保证了搜索的广泛性, 又能在后续迭

代中逐渐收敛到较优路径。

2) 信息素强度: 信息素强度反映了蚂蚁在路径上留下信息素的多少, 它影响着后续蚂蚁选择该路径的概率。信息素强度过大, 会使蚂蚁过度依赖已探索的路径, 降低算法的探索能力; 信息素强度过小, 则信息素对蚂蚁的引导作用减弱, 算法收敛速度变慢。经过实验验证, 当信息素强度为 0.98 时, 算法能够在探索和利用之间取得较好的平衡, 既能够快速收敛到较优解, 又能够保持一定的探索能力, 避免陷入局部最优。

3) 全局信息素挥发率: 全局信息素挥发率控制着整个环境中信息素的衰减速度。较高的全局信息素挥发率可以防止信息素过度积累, 使算法能够及时淘汰较差的路径, 但也可能导致优秀路径的信息素过快消失, 影响算法的收敛性; 较低的全局信息素挥发率则有利于优秀路径的信息素积累, 但可能会使算法陷入局部最优, 无法探索到更好的路径。通过实验分析, 当全局信息素挥发率为 0.3 时, 算法能够在保持对优秀路径的记忆的同时, 及时淘汰较差的路径, 提高搜索效率。

4) 局部信息素挥发率: 局部信息素挥发率主要影响蚂蚁在当前路径上的信息素更新。适当的局部信息素挥发率可以使蚂蚁在探索过程中更加灵活地调整路径选择, 避免过度依赖某一条路径。经过多次实验调整, 当局部信息素挥发率为 0.02 时, 算法能够在保证路径选择稳定性的同时, 具有一定的灵活性, 提高搜索到最优路径的概率。

因此, 在 Gazebo 平台^[19] 上搭建虚拟环境, 通过调试着陆避障控制方法, 取得方法中关键参数的最优设定值, 如表 1 所示。

表 1 四旋翼无人飞行器着陆避障控制方法参数

部分	参数名	数值
势场参数	引力系数	1.2
	斥力系数	0.3
	安全距离	5 dm
	相对距离调整系数	1
蚁群算法参数	蚂蚁数量	30 只
	信息素初始	0.02
	信息素强度	0.98
	全局信息素挥发率	0.3
	局部信息素挥发率	0.02
	信息素扩散率	0.6
	信息素启发因子	1
	期望启发因子	5
	启发信息递减函数	3.7
飞行器控制参数	最多轮次	119 轮
	最大下降速度	0.4 m/s
	避障响应频率	15 Hz
	最小避障距离	0.3 m

在实验过程中, 通过多次模拟飞行和实际测试, 观察飞行器在不同距离下的避障表现。当设定为 5 dm 时, 飞行器既能有效避开障碍物, 又能保持较高的机动性, 顺利完成着陆避障任务, 证明该安全距离的设定是合理且有效的。经验证方法的可行性后, 在图 1 所示的场地中进行实物实验。该试验场地带有反光标识的着陆区和带有树木、建筑物等障碍物, 能够满足着陆、避障需求。场地中左侧的动作捕捉系统用于定位、感知四旋翼无人飞行器的位置与姿态; 右侧的地面辅助设备用于辅助飞行器的高度感知。



图 1 四旋翼无人飞行器着陆避障控制现场

3.2 四旋翼无人飞行器着陆避障控制结果分析

基于势场蚁群算法和油门—姿态与水平位置两种控制器, 实现四旋翼无人飞行器着陆避障控制。两种控制器的输出和目标飞行器的着陆避障飞行轨迹如图 2 所示。其中, 球体为由下向上运动的动态障碍物, 其他为静态障碍物。

图 2 (a) 中的油门—姿态控制器输出结果显示: 随着飞行器逐渐接近着陆区, 油门高度曲线平滑下降并收敛, 俯仰角等姿态角变化平稳, 响应无超调并无高频振荡; 图 2 (b) 中的水平位置控制器输出结果显示: 避障时出现平滑的“绕行”曲线, 且无阶跃突变; 图 2 (c) 中的四旋翼无人飞行器着陆避障飞行轨迹显示: 飞行轨迹平滑绕过所有障碍物, 着陆阶段轨迹垂直向下, 并精准着陆。以上结果足以说明, 所提方法凭借势场蚁群算法构建的斥力势场和蚂蚁带有方向性的搜索, 及其与控制器的动态响应协调, 使飞行器稳定地成功避障并着陆, 实用价值较高。

3.3 四旋翼无人飞行器着陆避障控制效果分析

选取基于深度强化学习(文献[6]方法)与基于同步分布式模型预测控制(文献[7]方法)两种避障控制方法作为对比项, 比较分析所提方法在四旋翼无人飞行器着陆避障控制方面的优势。3 种方法控制下的四旋翼无人飞行器着陆轨迹与理想轨迹的偏距如图 3 所示。

在经过势场蚁群算法规划出轨迹后, 轨迹可能存在一些不平滑的地方, 从而影响飞行器的飞行稳定性和控制精度。而 B 样条曲线能够对规划出的轨迹进行平滑处理, 使轨迹更加符合飞行器的飞行特性。从图 3 中可

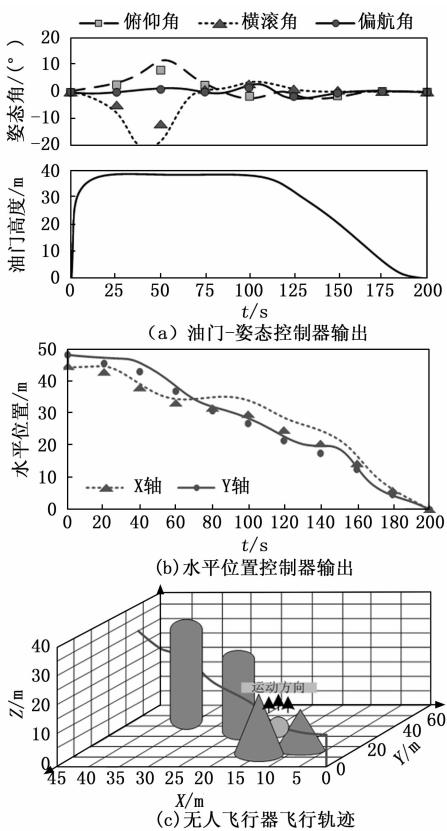


图 2 控制器输出与四旋翼无人飞行器着陆轨迹图

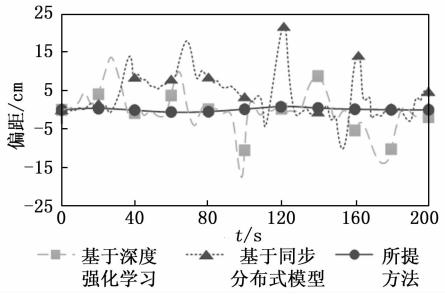


图 3 四旋翼无人飞行器着陆避障控制偏距对比图

以看出, 经过 B 样条处理后的轨迹, 其偏距曲线更加平稳, 没有出现较大的波动。这表明 B 样条方法有效地减少了飞行器在飞行过程中的抖动和不稳定因素, 使飞行器能够更加平稳地沿着轨迹飞行, 使偏距曲线更贴近零轴, 数值始终低于 2 cm, 并令接近着陆点的偏距趋近于 0 cm, 进一步提高了着陆避障控制的精度和可靠性。

3.4 四旋翼无人飞行器着陆避障控制效率分析

为判断本文方法是否能满足飞行器高速飞行时的实时决策需求, 进行控制效率测试, 测试结果如表 2 所示。

由表 2 结果可知, 随着场景复杂度的增加, 无论是最大迭代次数、最小迭代次数还是平均执行时间, 都呈现出上升的趋势。这表明场景复杂度对本文方法的控制效率有显著影响, 复杂场景下算法需要更多的计算资源

和时间来完成控制任务。但本文方法的平均执行时间, 依然在 314 ms 以下, 表明该方法的控制效率较高, 具有一定的实时性。

表 2 本文方法的控制效率测试

场景类型	最大迭代次数	最小迭代次数	平均执行时间/ms
简单场景	10	6	120
中等复杂场景	18	13	225
复杂场景	25	20	314

从图 2、图 3、表 2 中分别可以反映能耗、避障成功率、飞行时间测试。在表 2 控制效率测试中, 不同场景下的迭代次数和执行时间能间接反映飞行时间特性。场景越复杂, 迭代次数和执行时间增加, 意味着算法处理信息耗时增长, 飞行器决策延迟, 整体飞行时间可能延长, 不过平均执行时间在 314 ms 以下, 说明算法实时性较好, 能在合理时间内完成决策, 保障飞行任务按时推进。图 3 偏距对比体现避障成功率, 偏距曲线越平稳且贴近零轴, 表明飞行器避障轨迹精准, 能顺利绕过障碍物, 意味着避障成功率高, 这得益于势场蚁群算法与 B 样条曲线处理, 使飞行器对障碍物感知和轨迹规划更准确。而图 2 主要展示控制器输出和飞行轨迹, 未直接涉及能耗, 但平稳的控制器输出和飞行轨迹暗示飞行器运动稳定, 可减少不必要的能量损耗, 从侧面反映该方法在能耗控制上具有一定合理性。

4 结束语

四旋翼无人飞行器在复杂环境中的应用日益广泛, 其自主着陆过程中的动态避障能力成为关键挑战。人工势场法、蚁群算法等单一避障方法在动态环境适应性、实时路径优化等方面存在局限性, 难以适应高速飞行的四旋翼无人飞行器的实时决策需求。故针对该问题提出一种以势场蚁群算法为支持的四旋翼无人飞行器着陆避障控制方法。在轨迹规划方面, 利用势场蚁群算法, 通过栅格法搭建飞行环境, 将着陆点设为引力“磁极”、障碍物视为斥力“小磁极”, 构建引力场和斥力场, 引导飞行器安全着陆。蚁群算法中, 蚂蚁综合考虑信息素浓度与启发式信息探索最优路径, 设定引力场和斥力场值计算公式, 更新和扩散轨迹优度, 用 B 样条曲线平滑处理优度最高轨迹, 得到最终着陆避障轨迹。在飞行器控制方面, 以 PID 控制为技术支持, 基于规划的轨迹生成油门和姿态指令的目标设定值, 提供水平位置参考路径。油门控制器采用 PD 控制, 姿态控制器采用串级 PID 控制, 水平位置控制器采用 PID 控制, 并给出油门—姿态控制器和水平位置控制器的数学表达式, 确保飞行器跟踪轨迹安全着陆。实验在 Gazebo 平台调试参数后进行实物测试, 分析控制结果、效果与效率, 表

明所提方法能使飞行器稳定避障着陆，经 B 样条处理提高精度，且控制效率较高具有实时性。

参考文献：

- [1] 彭琛, 王硕, 蒲虹宇, 等. 过驱动四旋翼飞行器实验平台姿态跟踪鲁棒控制器的设计与验证 [J]. 航空兵器, 2023, 30 (6): 96–108.
- [2] 朱圣英, 杨贺, 黄翔宇, 等. 地外天体着陆自主避障制导技术研究进展 [J]. 宇航学报, 2023, 44 (12): 1785–1796.
- [3] 刘聪, 刘辉, 韩立金, 等. 基于学习型滑模预测控制的无人驾驶车辆非结构化环境轨迹跟踪及稳定性控制 [J]. 机械工程学报, 2024, 60 (10): 399–412.
- [4] LI J, LIU J J, CHENG P, et al. Event-based obstacle avoidance control for time-varying UAV formation under cyber-attacks [J]. Journal of the Franklin Institute, 2024, 361 (13): 107019–107019.
- [5] XUE X, YUAN B, YI Y, et al. Connectivity preservation and obstacle avoidance control for multiple quadrotor UAVs with limited communication distance [J]. Drones, 2025, 9 (2): 136–136.
- [6] 朱许, 张博涵, 王正宁, 等. 基于深度强化学习的无人机集群编队避障控制 [J]. 飞行力学, 2025, 43 (2): 22–28.
- [7] 何云风, 史贤俊, 卢建华, 等. 基于同步 DMPC 的无人机编队跟踪与避障控制 [J]. 控制与决策, 2024, 39 (11): 3557–3566.
- [8] 唐宇洋, 郑恩辉, 邱潇. 基于优化双向 A* 与人工势场法的无人机三维航迹规划 [J]. 空军工程大学学报, 2024, 25 (5): 69–75.
- [9] 于全友, 徐止政, 段纳, 等. 基于改进 ACO 的带续航 (上接第 110 页)
- [12] ZHANG J B, ZHOU N, ZHANG L H, et al. Optical and electrical anisotropy regulation engineering of low-dimensional materials toward polarized detection and imaging applications [J]. Rare Metals, 2024, 43 (7): 2968–2993.
- [13] WEN D P, CHEN P, LIANG Y, et al. Regulated polarization degree of upconversion luminescence and multiple anti-counterfeit applications [J]. Rare Metals, 2024, 43 (5): 2172–2183.
- [14] OUYANG Y C, YEOM B J, ZHAO Y, et al. Progress and prospects of chiral nanomaterials for biosensing platforms [J]. Rare Metals, 2024, 43 (6): 2469–2497.
- [15] 叶强, 李华俊, 李维斌, 等. 基于 CompactRIO 的脉冲发电机励磁控制器设计 [J]. 大电机技术, 2023 (6): 90–96.
- [16] 赵世超, 左金印, 魏晓, 等. 基于 FPGA 的万兆以太网约束无人机全覆盖作业路径规划 [J]. 航空学报, 2023, 44 (12): 303–315.
- [10] 刘光才, 金松鹏, 李章萍, 等. 基于改进人工电场算法的城市载人电动垂直起降飞行器路径规划 [J]. 科学技术与工程, 2025, 25 (1): 238–244.
- [11] 刘西, 程正钱, 胡远志, 等. 融合改进 A* 算法和动态窗口法的自动驾驶路径规划 [J]. 重庆理工大学学报 (自然科学), 2024, 38 (6): 81–91.
- [12] 王小康, 冀杰, 刘洋, 等. 基于改进 Q 学习算法的无人物流配送车路径规划 [J]. 系统仿真学报, 2024, 36 (5): 1211–1221.
- [13] 齐款款, 李二超, 毛玉燕. 改进 A* 算法融合自适应 DWA 的移动机器人动态路径规划 [J]. 数据采集与处理, 2023, 38 (2): 451–467.
- [14] 张瑞鑫, 王伟, 田泽, 等. 基于模型约束 A* 算法的无人机三维航迹规划 [J]. 国外电子测量技术, 2022, 41 (9): 163–169.
- [15] 肖祖尚, 沈莞茜. 基于 Bernstein 基表示的变次数样条曲线的精确降次算法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2025, 37 (1): 40–50.
- [16] 邱福生, 亢盛杰, 杜一鸣. 舵面 PID 闭环控制虚拟飞行研究 [J]. 计算机仿真, 2024, 41 (11): 41–46.
- [17] 喻乐言, 曾喆昭, 唐钰淇. 欠驱动飞行器横向通道的自耦 PD 控制方法 [J]. 空间控制技术与应用, 2024, 50 (3): 60–67.
- [18] 卢艳军, 郭竟翔, 李忠海. 基于改进粒子群优化的旋翼无人机 PID 参数整定算法 [J]. 探测与控制学报, 2022, 44 (5): 116–124.
- [19] 马丽新, 刘磊, 刘晨. 安全屏障机制下基于 SAC 算法的机器人导航系统 [J]. 南京信息工程大学学报 (自然科学版), 2023, 15 (2): 201–209.
- UDP 协议通信接口设计 [J]. 电子技术应用, 2022, 48 (10): 113–117.
- [17] 黄宁博, 吴远大. 高线性波分复用模拟光链路的设计及实现 [J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60 (5): 107–112.
- [18] 倪子恒, 陆梁军, 刘源彬, 等. 硅基微波光子波束形成器研究进展 [J]. 半导体光电, 2022, 43 (2): 230.
- [19] WANG X D, MI X B, HE J R, et al. Arbitrary topological charge vortex beams from carbon dots random lasers [J]. Rare Metals, 2024, 43 (8): 3844–3853.
- [20] 阮易, 陈明锟, 杨肖, 等. 基于智能充电控制的光纤供能系统 [J]. 光通信技术, 2023, 47 (6): 42–47.
- [21] 王涛, 任帅, 常洪祥, 等. 基于主动偏振控制技术实现高功率线偏振飞秒光纤激光 [J]. 中国激光, 2023, 50 (19): 257–258.
- [22] 肖虎, 潘志勇, 陈子伦, 等. 基于锥形掺镱光纤实现 20 kW 高光束质量激光输出 [J]. 强激光与粒子束, 2024, 36 (1): 94–96.