

改进 APF 的无人机编队避障最优一致性控制方法

李亚文^{1,2}, 张鹏飞², 何 印^{1,2}, 马振华^{1,2}

1. 中北大学航空宇航学院, 太原 030051

2. 中北大学智能武器研究院, 太原 030051



摘要 针对传统人工势场(Artificial Potential Field, APF)解决避障问题时出现的局部极小值、目标不可达等缺点,提出了一种结合 APF 和具有协同避障效果的最优一致性控制方法。基于固定无向通信拓扑的双积分器无人机编队模型,引入具有避障代价函数的最优一致性控制协议,解决 APF 避障的局限性问题,同时对多无人机进行编队控制,使无人机编队控制系统的一致性性能指标、控制消耗性能指标和避障性能指标达到最优解。此外,通过对每架无人机构建虚拟斥力势场,防止在避障过程中出现机间碰撞。仿真结果表明,与改进 APF 的非最优一致性控制相比,本文提出的改进 APF 的最优一致性控制能够缩短任务用时 32%,且能够极大程度上保持队形完整性,减少避障所造成的一致性消耗和控制损耗。

关键词 无人机编队;协同避障;人工势场法;最优一致性控制

中图分类号: V249 **文献标识码:** A

文章编号: 1006-3242(2024)01-0017-07

Optimal Consistency Control of UAVs Formation Obstacle Avoidance with Improved APF

LI Yawen^{1,2}, ZHANG Pengfei², HE Yin^{1,2}, MA Zhenhua^{1,2}

1. School of Aerospace Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China

2. Research Institute of Intelligent Weapons, North University of China, Taiyuan 030051, China

Abstract Aiming at the shortcomings of traditional artificial potential field (APF) for solving obstacle avoidance problems, such as local minimum value and unreachable target, an optimal consensus control method taking advantage of obstacle avoidance effect and combination with APF is proposed. Based on the double integrator UAVs formation model with fixed undirected communication topology, the optimal consensus control protocol with obstacle avoidance cost function is introduced to solve the limitation of APF obstacle avoidance. At the same time, the formation control of multiple UAVs is developed to make the consensus performance index, control consumption performance index and obstacle avoidance performance index of UAVs formation control system reach the optimal solution. In addition, by establishing a virtual repulsion potential field for each UAVs, the collisions among the UAVs during the obstacle avoidance process are prevented.

资助项目: 山西省基础研究计划资助项目(202103021224182);山西省基础研究计划资助项目(202103021224187)

收稿日期: 2023-07-11

作者简介: 李亚文(1993-),男,硕士研究生,主要研究方向为无人机编队协同控制;张鹏飞(1986-),男,博士,副教授,主要研究方向为导航制导与控制,本文通信作者, E-mail: zhangpf@nuc.edu.cn;何 印(1997-),男,硕士研究生,主要研究方向为无人机编队协同控制;马振华(1996-),男,硕士研究生,主要研究方向为无人机编队协同定位。

The simulation results show that compared with the non-optimal consistency control of the improved APF, the optimal consistency control of the improved APF proposed can shorten the task time by 32 % and can greatly maintain the integrity of the formation and reduce the consistency consumption and control loss caused by obstacle avoidance.

Key words UAVs formation; Collaborative obstacle avoidance; Artificial potential field; Optimal consensus control

0 引 言

近年来,无人机在各个方面都得到越来越广泛的应用,随着社会和经济的快速发展,无人机执行任务变得多样化和复杂化,单一无人机已经无法满足人们的任务要求,多无人机协同控制技术应运而生,在各个领域得到广泛应用和发展^[1-2]。无人机编队控制技术主要分为集中式和分布式,其中分布式一致性控制理论仅需收集邻近无人机的相关信息,具有计算量小、灵活性和鲁棒性强等优点^[3],在无人机编队协同控制中使用非常广泛。

在无人机编队执行任务时,集群编队、队形重构、任务分配、协同定位以及协同避障都是必不可少的环节。无人机编队发生碰撞不仅会造成经济损失,还会导致任务失败。因此,多无人机协同避障是无人机编队执行任务的关键。

无人机编队避障问题主要分为避障控制问题和机间防碰撞问题。APF 作为局部避障算法,具有计算量小、实时性好及不依赖全局信息等优点,被广泛应用于解决先验信息不足的实时避障场景,但存在局部极小值和目标不可达等局限性问题。代冀阳等^[4]提出利用分段思想修正势场函数,解决目标不可达问题。引入回环力和机间作用力解决局部极小值和机间碰撞问题,但没有解决无人机编队队形保持及避障后队形重构问题。孙翊君等^[5]在此基础上增加分布式一致性控制,解决了编队队形避障后的重构问题,但是忽略了在避障过程中如何选择更好的避障路线。Zhao 等^[6]提出基于领航者-跟随者法控制无人机编队,认为在无人机编队避障时,编队与避障不可同时进行,并且避障优先于编队任务。在避障时需要解除编队队形,避障后恢复。该算法避障时无法保证编队队形的完整性,避障后队形重构也会造成极大损耗。成成等^[7]提出基于虚拟结构与 APF 结合,设计无人机编队避障控

制方法,可高精度地保持队形,但没有解决在无人机编队避障过程中保持编队队形的问题。孙景亮等^[8]提出最优一致性避障算法,通过设计一致性性能指标、控制性能指标和避障性能指标达到控制系统的最优值,但该方法存在局限性,无法同时避障多个障碍物。

上述文献主要针对无人机编队解决了避障问题,但是忽略了在避障过程中编队队形的保持、避障损耗以及复杂环境中避障后队形重构等问题,这些问题在协同避障中具有重要意义。针对此类问题,提出了 APF 和具有避障功能的最优一致性控制相结合的控制方法,通过改进后的 APF 进行避障,利用最优一致性控制算法设计最优解控制器使编队系统的一致性性能指标、控制消耗性能指标以及避障性能指标达到最优值,实现一致性收敛和编队保持。最后,加入机间斥力势场,防止避障过程中出现机间碰撞问题。

1 问题描述

1.1 无人机编队建模

本文将无人机和障碍物都视为质点模型。基于双积分器动力学模型,在二维空间下,建立具有 n 架无人机的编队模型,其中第 i 架无人机运动学方程为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_i(t) = \mathbf{v}_i(t), & i = 1, 2, \dots, n \\ \dot{\mathbf{v}}_i(t) = \mathbf{u}_i(t), & i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{x}_i = [x_{ix}, x_{iy}]$ 为无人机 i 的位置状态; $\mathbf{v}_i = [v_{ix}, v_{iy}]$ 为其速度状态; $\mathbf{u}_i = [u_{ix}, u_{iy}]$ 表示其控制输入。

则 n 架无人机的系统状态变量和控制变量可表示为

$$\begin{cases} \mathbf{x} = [\mathbf{x}_1^T & \mathbf{x}_2^T & \dots & \mathbf{x}_n^T]^T \in \mathbf{R}^{n \times 2} \\ \mathbf{v} = [\mathbf{v}_1^T & \mathbf{v}_2^T & \dots & \mathbf{v}_n^T]^T \in \mathbf{R}^{n \times 2} \\ \mathbf{u} = [\mathbf{u}_1^T & \mathbf{u}_2^T & \dots & \mathbf{u}_n^T]^T \in \mathbf{R}^{n \times 2} \end{cases} \quad (2)$$

当 $t \rightarrow \infty$ 时,

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} \|\mathbf{x}_i(t) - \mathbf{x}_j(t)\| \rightarrow \delta, & i, j = 1, 2, \dots, n \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \|\mathbf{v}_i(t) - \mathbf{v}_j(t)\| \rightarrow 0, & i, j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (3)$$

式中: δ 为固定队形中无人机 i 与 j 的间距。

当无人机编队速度一致且间距趋于指定队形相对距离,则称系统状态达到一致性状态。

1.2 图论及通信拓扑建立

无人机编队间的信息交流需要建立通信拓扑完成,通信拓扑结构可以用一个图表示为 $G = (N, E)$, 这里 $N = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ 称为图的节点集,节点个数 $|N| = n$ 称为图 G 的阶,即编队中无人机个数。 E 表示图的有限边集合, $E = \{(e_i, e_j) | e_i, e_j \in N, i \neq j\}$, (e_i, e_j) 表示无人机 i 和 j 之间的通讯, $i = 1, 2, \dots, n$ 。对于图 G 的每一个节点 p , 进入这个节点的边的个数称为这个节点的入度,记作 $\lambda_i(p)$ 。

在图论的矩阵表示中,图 G 可用一个 $N \times N$ 的邻接矩阵表示,记为: $\mathbf{A}(G) = [a_{ij}]_{N \times N}$, 其中,

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & (i, j) \in E \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

图 G 的拉普拉斯矩阵 $\mathbf{L} = \mathbf{D}(G) - \mathbf{A}(G)$ 。其中,度矩阵为 $\mathbf{D}(G) = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N)$ 。

2 无人机编队协同避障控制器设计

为了解决传统 APF 在避障时存在的局限性问题,本文对 APF 的斥力势场函数进行改进,加快无人机进入斥力势场时的反应速度,同时,在控制器设计中增加判断机制,当判断无人机陷入局限性区域时,关闭势场,即无人机不再受到引力和斥力,对最优一致性控制协议中避障代价函数进行赋值计算,躲避该障碍物,使无人机离开局限性区域,待无人机离开局限区域后利用 APF 重新规划避障路线。

2.1 基于幂函数的 APF

针对传统人工势场法避障时存在局限性的问题,以及在多无人机避障时存在无法保证编队队形和避障后队形重构问题,通过改进 APF 的势场函数,加快避障时斥力变化速度。并且构建机间斥力势场函数,防止在避障过程中发生无人机碰撞。

2.1.1 传统人工势场法

APF 由 Khatib^[9] 于 1986 年提出,基本思想是构造目标位置引力场和障碍物周围斥力场共同作用

的人工势场。通过引力和斥力的合力来控制移动无人机的移动进行避障,最终到达目的地。

引力势函数表示为

$$U_{\text{att}}(\mathbf{P}) = \frac{1}{2}k\|\mathbf{P} - \mathbf{P}_g\|^2 \quad (5)$$

式中: k 为正比例距离增益系数; $\|\mathbf{P} - \mathbf{P}_g\|$ 表示无人机位置 \mathbf{P} 到目标点位置 \mathbf{P}_g 的相对距离。

根据引力场的负梯度得到引力 $F_{\text{attr}}(\mathbf{P})$ 为

$$F_{\text{attr}}(\mathbf{P}) = -\text{grad}[U_{\text{att}}(\mathbf{P})] = -k\|\mathbf{P} - \mathbf{P}_g\| \quad (6)$$

斥力势场定义为

$$U_0(d) = \begin{cases} \frac{m}{2}\left(\frac{1}{d} - \frac{1}{d_0}\right)^2, & d < d_0 \\ 0, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: m 为斥力势场距离增益系数; d 为无人机与障碍物的距离; d_0 为障碍物斥力势场范围半径。

同理,由斥力场的负梯度得到斥力 $F_{\text{rep}}(d)$

$$F_{\text{rep}}(d) = -\text{grad}[U_0(d)] = \begin{cases} \frac{m}{d^2}\left(\frac{1}{d} - \frac{1}{d_0}\right), & d < d_0 \\ 0, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (8)$$

当无人机周围有多个障碍物时,受力情况如图 1 所示。

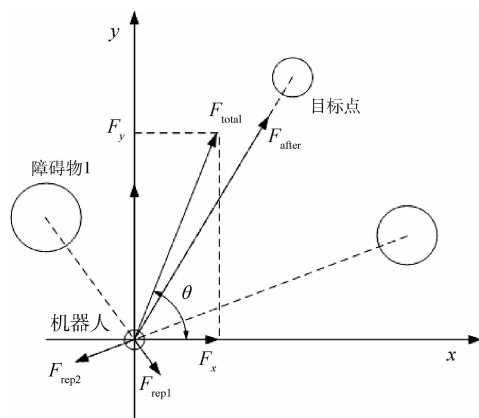


图 1 无人机在多个障碍物势场内的受力情况

$F_{\text{rep}i}$ 表示第 i 个障碍物对无人机的斥力,无人机所受到的合斥力为 $\sum_{i=1}^n F_{\text{rep}i}$, 无人机受到的合力 F_{total} 为

$$F_{\text{total}} = F_{\text{attr}}(\mathbf{P}) + \sum_{i=1}^n F_{\text{rep}i}(d) \quad (9)$$

APF 因其原理简单和实时性好等优点,在无人机编队控制和航迹规划领域得到了广泛应用,但存

在以下局限性:

1) 目标不可达问题, 无人机离目标点距离越近, 所受到的引力越小; 无人机离障碍物越近, 所受到的斥力越大; 如果在目标点附近有障碍物存在时, 无人机会在附近徘徊, 无法到达目标点。

2) 局部极小值问题。无人机的移动方向由合力决定, 当无人机在某一点所受到的合力 F_{total} 为 0, 或者合力方向与引力和斥力共线时, 会出现局部极小值问题。

2.1.2 基于幂函数的改进人工势场法

针对传统人工势场法的斥力变化过于缓慢的问题, 基于幂函数变化速度快的特点, 对斥力函数进行改进, 加快避障时斥力变化速度, 解决当无人机速度过快, 无人机所受引力过大, 斥力变化缓慢导致避障失败的问题。同时构建机间斥力势场函数, 防止在避障过程中发生无人机碰撞。

因此, 改进后的斥力函数定义为

$$F_{\text{rep}}(d) = \begin{cases} m \times \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{d_0} \right) \left(\frac{d_0}{d} \right)^\beta, & d < d_0 \\ 0, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (10)$$

式中: β 越大 $F_{\text{rep}}(d)$ 随 d 变化越迅速。

在无人机编队约束条件中, 设定了固定队形和无人机之间的间距, 为防止避障过程中造成无人机碰撞, 构建机间斥力势场, 以解决机间碰撞问题, 其机间斥力势场范围可根据无人机机间距离设定。机间斥力函数定义为

$$F_{c(i,j)} = \begin{cases} \left(\frac{p_0}{r_{c(i,j)}} \right)^\mu, & r_{c(i,j)} < p_0 \\ 0, & r_{c(i,j)} \geq p_0 \end{cases} \quad i \neq j \quad (11)$$

式中: $r_{c(i,j)}$ 为这两架无人机间的距离; p_0 为无人机机间斥力势场范围半径; $F_{c(i,j)}$ 为第 i 架无人机和第 j 架无人机间的相互斥力。

故第 i 架无人机在该时刻受到的合力 F 为

$$F = F_{\text{attr}}(\mathbf{P}) + \sum_{i=1}^n F_{\text{rep}i}(d) + F_{c(i,j)} \quad (12)$$

2.2 最优一致性编队控制方法

基于双积分器系统的基础一致性协议为

$$\mathbf{u}_i = - \sum_{j=1}^N a_{ij}(t) \{ [x_i(t) - x_j(t)] + \gamma(t) \cdot [v_i(t) - v_j(t)] \}, i, j \in 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

式中: $a_{ij}(t)$ 为 $\mathbf{A}_N(t) \in \mathbf{R}^{N \times N}$ 的第 (i, j) 项; $\gamma(t)$ 为 t

时刻的正数参数; \mathbf{x}_i 和 \mathbf{v}_i 分别表示无人机 i 的位置和速度。

在最优一致性控制设计中, 需要在无人机遇到局部极小值问题时, 利用最优一致性的避障功能离开 APF 的局限性区域。因此需要增加避障代价函数。故一致性协议由 3 部分组成

$$\begin{cases} \min: \mathbf{J} = \mathbf{J}_1 + \mathbf{J}_2 + \mathbf{J}_3 \\ \text{s. t.} \\ \vdots \\ \dot{\hat{\mathbf{X}}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{X}} + \mathbf{B}\mathbf{U} \end{cases} \quad (14)$$

式中: $\mathbf{J}_1, \mathbf{J}_2$ 和 \mathbf{J}_3 分别代表一致性代价函数、避障代价函数和控制消耗代价函数; $\mathbf{X} = [\mathbf{x}_1^T, \mathbf{x}_2^T, \dots, \mathbf{x}_N^T, \mathbf{v}_1^T, \mathbf{v}_2^T, \dots, \mathbf{v}_N^T]$ 为输入状态; $\mathbf{U} = [\mathbf{u}_1^T, \mathbf{u}_2^T, \dots, \mathbf{u}_N^T]$ 为控制状态; $\hat{\mathbf{X}}$ 为误差状态; $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{N \times N} & \mathbf{I}_{N \times N} \\ \mathbf{0}_{N \times N} & \mathbf{0}_{N \times N} \end{bmatrix} \otimes \mathbf{I}_n$

$$\mathbf{I}_n, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{N \times N} \\ \mathbf{I}_N \end{bmatrix} \otimes \mathbf{I}_n.$$

一致性代价函数为

$$\mathbf{J}_1 = \int_0^\infty \hat{\mathbf{X}}^T \mathbf{R}_1 \hat{\mathbf{X}} dt \quad (15)$$

式中: $\mathbf{R}_1 = \begin{bmatrix} w_p^2 \mathbf{L}^2 & \mathbf{0}_N \\ \mathbf{0}_N & w_v^2 \mathbf{L}^2 - 2w_p w_c \mathbf{L} \end{bmatrix} \otimes \mathbf{I}_n$, 且 \mathbf{R}_1 是半正定的; \mathbf{L} 是拉普拉斯矩阵。 w_p, w_v 和 w_c 分别表示位置一致性、速度一致性和控制消耗的权重。

控制消耗代价函数

$$\mathbf{J}_3 = \int_0^\infty \mathbf{U}^T \mathbf{R}_2 \mathbf{U} dt \quad (16)$$

式中: $\mathbf{R}_2 = w_c^2 \mathbf{I}_N \otimes \mathbf{I}_n$ 是正定的。

避障代价函数

$$\mathbf{J}_2 = \int_0^\infty h(\hat{\mathbf{X}}) dt \quad (17)$$

由于无人机编队通信拓扑是无向和连通的, 必然存在足够大的 w_v 及足够小的 w_p 和 w_c , 满足反馈控制律

$$\phi(\mathbf{X}) = - \frac{w_p}{w_c} (\mathbf{L} \otimes \mathbf{I}_n) \mathbf{x} - \frac{w_v}{w_c} (\mathbf{L} \otimes \mathbf{I}_n) \mathbf{v} - \frac{1}{2w_c^2} g'_v(\mathbf{X}) \quad (18)$$

式中: $g'_v(\hat{\mathbf{X}})$ 是避障势能函数的速度误差的偏微分。

避障势能函数

$$g(\hat{\mathbf{X}}) = \frac{1}{2} \hat{\mathbf{v}}^T (\mathbf{G}_x \otimes \mathbf{I}_n) (\mathbf{L} \otimes \mathbf{I}_n) \hat{\mathbf{v}} \quad (19)$$

式中: $\mathbf{G}_x = \text{diag}[g(\mathbf{x}_1), g(\mathbf{x}_2), \dots, g(\mathbf{x}_n)]$; $\hat{\mathbf{v}}$ 为速度误差。

$$g(\mathbf{x}_i) = \begin{cases} \mathbf{0}, & R < \|\mathbf{x}_i - \mathbf{O}_b\| \\ \left(\frac{R^2 - \|\mathbf{x}_i - \mathbf{O}_b\|^2}{(\|\mathbf{x}_i - \mathbf{O}_b\|^2 - r^2)^3} \right)^2, & r < \|\mathbf{x}_i - \mathbf{O}_b\| < R \\ \text{无定义}, & \|\mathbf{x}_i - \mathbf{O}_b\| \leq r \end{cases} \quad (20)$$

式中: \mathbf{O}_b 是障碍物的中心; r 是障碍物的半径; R 是检测区域半径。

根据 Hamilton-Jacobi-Bellman 方程的稳态解是非线性系统的李雅普诺夫函数, 确定选择权重 w_p, w_v 和 w_c 的最优值, 保证无人机编队控制的全局稳定性, 并且在约束条件下, 使计算得到一致性代价函数、控制消耗代价函数和避障代价函数的和为最小值。

2.3 改进 APF 的最优一致性控制器设计

为了保持编队队形和无人机间距, 在一致性协议基础上增加无人机编队的队形间距约束条件 δ , 使编队在无障碍情况下保持队形, 在避障后按编队信息重构队形。在一致性协议中增加目标位置信息 \mathbf{x}_g , 使无人机在未进入障碍物势场时, 仍然向着目标点飞行。同时, 在避障时设置速度限制, 防止

$$\Phi(\mathbf{X}) = \begin{cases} \phi(\mathbf{X}), & (x_{ix}, x_{iy}) \notin S, i = 1, 2, \dots, n \\ \phi(\mathbf{X}) - \frac{F}{M}, & (x_{ix}, x_{iy}) \in S \text{ 且 } \notin S_1, i = 1, 2, \dots, n \\ \phi(\mathbf{X}) - \frac{1}{2w_c} g'_v(\mathbf{X}), & (x_{ix}, x_{iy}) \in S_1, i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (22)$$

式中: S 为斥力势场范围; S_1 为局限性区域(三点共线且进入该障碍物势场范围); M 为无人机质量。

3 仿真校验

3.1 仿真条件

通过仿真实验验证文中所提改进 APF 的最优一致性控制的有效性。以传统人工势场法、改进 APF 的非最优一致性控制和改进 APF 的最优一致性控制 3 组数据, 分别进行仿真对比。实验仿真参数设置如表 1 所示, 采用无人机编队通信拓扑结构为无向图, 假设有 4 架无人机, 即 $n = 4$, 其通信拓扑结构如图 2 所示。

其邻接矩阵和拉普拉斯矩阵可分别表示为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{L} = \begin{bmatrix} 3 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & -2 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & 3 \end{bmatrix}$$

对于节点 UAV1 和 UAV4, 其度为 3, 对于节点

由于速度过快导致避障损耗增加甚至避障失败的情况发生。通过上述优化方法, 解决了基础的最优一致性协议中无队形间距、无速度限制设置以及无法向目标点飞行的问题。

基于最优一致性控制协议增加编队信息和约束条件, 改进后的未避障时一致性协议为

$$\phi(\mathbf{X}) = -\frac{w_p}{w_c} (\mathbf{L} \otimes \mathbf{I}_n) (\mathbf{x} - \delta) - \frac{w_v}{w_c} (\mathbf{L} \otimes \mathbf{I}_n) \mathbf{v} - \alpha (\mathbf{x} - \mathbf{x}_g) \quad (21)$$

式中: $\delta \in \mathbf{R}^{n \times 2}$ 为编队队形间距; $\mathbf{x}_g \in \mathbf{R}^{n \times 2}$ 为编队目标位置; α 为调节参数。

当无人机未处于障碍物斥力势场范围时, 通过最优一致性控制协议控制无人机编队保持队形和速度向目标点飞行; 当无人机处于障碍物区域时, 基于 APF 进行避障控制, 同时在控制器中引入判断机制以及避障代价函数改进 APF, 解决传统人工势场法的局限问题, 减少避障过程中的损耗, 缩短避障后无人机编队队形重构速度。

改进 APF 的最优一致性控制协议

UAV2 和 UAV3, 其度为 2。

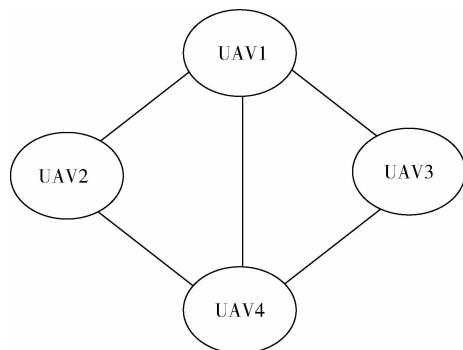


图 2 无人机编队通信拓扑结构

表 1 仿真参数

参数	值	参数	值
n	4	p_0/m	0.8
k	10	$v_{\max}/(m \cdot s^{-1})$	3
m	40	α	0.11
d_0/m	5	μ	2
β	20	M/kg	50

根据 Hamilton-Jacobi-Bellman 方程和李雅普诺夫函数得到最优一致性最优解位置、速度一致性和控制消耗的权重分别为 $w_p = 2$, $w_v = 4$ 和 $w_c = 0.5$ 。

设置对照组:改进 APF 的非最优一致性控制,随机选取权重参数为: $w_{p1} = 1$, $w_{v1} = 1$, $w_{c1} = 1$ 。

基于式(22)进行仿真实验,其中无人机编队初始信息如表 2 所示,障碍物位置信息如表 3 所示。

表 2 无人机编队信息

无人机编号	初始位置/m	初始速度/(m · s ⁻¹)	目标位置/m
UAV1	(0,0)	(1,1)	(50,50)
UAV2	(-1,0)	(1,1)	(49,50)
UAV3	(0,-1)	(1,1)	(50,49)
UAV4	(-1,-1)	(1,1)	(49,49)

表 3 障碍物位置信息

编号	1	2	3	4	5
位置	(5,5)	(15,12)	(20,22)	(30,20)	(25,27)

仿真实验中将障碍物、目标点及无人机模型都简化为质点模型,小圆表示为障碍物,势场影响范围为大圆,三角形表示目标点位置。

3.2 仿真分析

基于式(22)改进 APF 的最优一致性控制方法进行仿真,并传统人工势场法和改进 APF 的非最优一致性控制两组数据进行仿真对比分析,其仿真结果如图 3 所示。

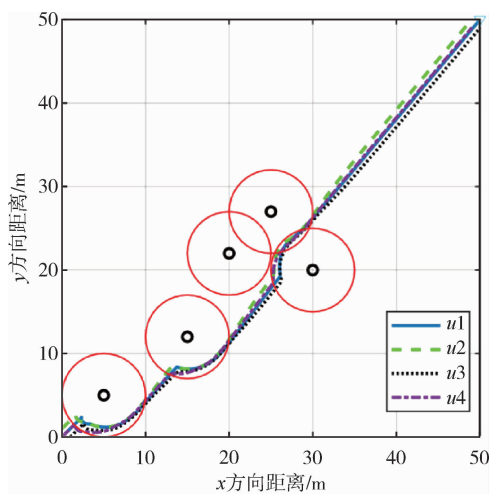


图 3 改进 APF 的最优一致性控制避障路径图

由图 3 可以看出,在 UAV1 和 UAV4 进入障碍

物 1 的斥力势场后,进行避障时遇到了局部极小值问题,单独利用传统人工势场法时会陷入局部最优导致任务失败。改进 APF 的最优一致性控制利用避障代价函数 J_2 进行避障,使无人机离开局限区域后,再进行避障路径计算,成功完成避障任务。

对照组改进 APF 的非最优一致性控制,由于 w_c , w_v 和 w_p 权重参数不是最优解,在避障时,避障路线的选择不同,导致无人机编队队形被破坏,极大增加了避障损耗和收敛时间,任务用时 25.7 s,而使用改进 APF 的最优一致性控制极大程度上保证了无人机编队队形的相对完整,并且在避障后快速收敛完成队形重构,完成避障用时 17.48 s,减少用时 32%。

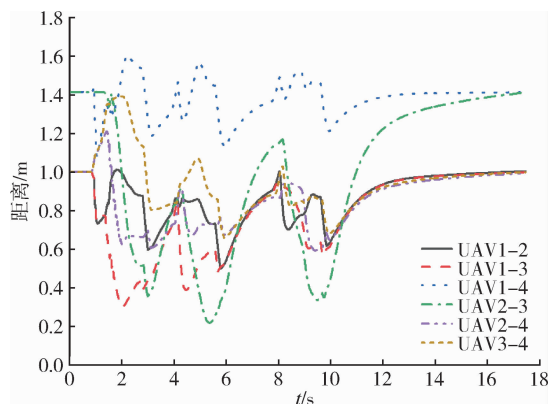


图 4 无人机机间间距

由图 4 可以看出,在避障全过程中未出现间距为 0 的情况,说明无人机编队均未发生机间碰撞,且无人机间距变化小,充分说明了在避障过程中无人机编队队形整体性更好,避障后收敛速度更快。

综上所述,证明改进 APF 的最优一致性控制在面对多个障碍物复杂避障情况下,无人机编队能够在完成避障任务的基础上,极大程度地保持编队队形、减少避障损耗、提高避障效率和减少任务用时。

4 结 论

针对 APF 的局限性和避障过程中编队队形难以保持等问题,利用改进后的 APF 和具有避障效果的最优一致性控制方法相结合的控制方法,进行无人机编队协同避障,能够有效克服 APF 的局限性问题,证明改进 APF 的最优一致性控制进行避障任务的可行性和高效性,保证无人机编队系统控制的稳定性和最优性,实现避障时

极大程度上的队形保持以及在避障后无人机编队快速达到速度和位置一致性。此外,通过构建无人机之间的斥力势场,能有效解决避障过程中机间碰撞问题。

参 考 文 献

- [1] XU D, CHEN G. Autonomous and cooperative control of UAV cluster with multi-agent reinforcement learning [J]. The Aeronautical journal, 2022, 126 (Jun. TN. 1300): 932-951.
- [2] SHEN Y, WEI C. Multi-UAV flocking control with individual properties inspired by bird behavior [J]. Aerospace science and technology, 2022, 130 (Nov.): 107882.1-107882.14.
- [3] 王佳楠,王春彦,王丹丹,等. 多飞行器协同控制理论及应用[M]. 北京:科学出版社,2020:003-014.
- [4] 代冀阳,王村松,殷林飞,等. 飞行器分层势场路径规划算法[J]. 控制理论与应用, 2015, 32(11):1505-1510. (DAI Jiyang, WANG Cunsong, YIN Linfei, et al. Hierarchical potential field algorithm of path planning for aircraft [J]. Control Theory & Applications, 2015, 32(11): 1505-1510.)
- [5] 孙翊君,代冀阳,应进,等. 基于改进势场法的无人机编队协同避障控制算法[J]. 计算机应用与软件, 2022, 39(5): 299-312. (SUN Yijun, DAI Jiyang, YING Jin, et al. Cooperative obstacle avoidance control algorithm for UAV formation based on improved potential field method [J]. Computer Applications and Software, 2022, 39(5): 299-312.)
- [6] ZHAO Y, JIAO L, ZHOU R, et al. UAV formation control with obstacle avoidance using improved artificial potential fields [C]// Proceedings of the 36th Chinese Control Conference, Dalian, China, July 26-28, 2017.
- [7] 成成. 多无人机协同编队飞行控制关键技术研究 [D]. 长春:中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2018. (CHENG Cheng. Research on key technologies of multi-UAVs cooperative formation flight control [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2018.)
- [8] 孙景亮,刘春生,史浩明. 基于动态势场法的最优一致性避障算法研究[J]. 飞行力学, 2015, 33(4): 376-380. (SUN Jingliang, LIU Chunsheng, SHI Haoming. Optimal consensus algorithm for obstacle avoidance based on dynamic potential field [J]. Flight Dynamics, 2015, 33(4): 376-380.)
- [9] KHATIB O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots [J]. International Journal of Robotics Research, 1986, 5(1): 90-98.