

文章编号: 1674-8190(XXXX)XX-001-10

改进势场法在无人机编队三维路径规划上的应用研究

许海涛, 陈龙胜, 王宇翔

(南昌航空大学 飞行器工程学院, 南昌 330063)

摘要: 无人机编队在与现实复杂环境交互时, 合理地进行路径规划非常重要。人工势场法在引导无人机进行三维路径规划时存在目标点不可达和局部最小值的缺陷。针对该问题, 首先通过改进传统人工势场法的斥力计算公式来解决目标点不可达问题, 并对局部最值进行分类, 针对不同类型的局部平衡点采用不同的斥力计算方法, 有效地解决了传统人工势场法易陷入局部最小值的问题。最后结合领航跟随法将改进后的人工势场法应用于多无人机编队的路径规划问题。仿真结果表明: 所研究的基于改进人工势场法的多无人机编队三维路径规划算法在静态环境下可有效地解决多无人机编队飞行的路径规划问题。

关键词: 无人机编队; 路径规划; 人工势场法; 领航跟随法; 改进斥力函数

中图分类号: V279

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.XXXX.XX.01

Application research on improved artificial potential field method in three-dimensional path planning for uav formation

XU Haitao, CHEN Longsheng, WANG Yuxiang

(College of Aircraft Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: Rational path planning becomes particularly crucial when unmanned aerial vehicle (UAV) formations interact with complex real-world environments. The artificial potential field method exists some drawbacks, such as unreachable target points and local minimum for guiding UAVs through three-dimensional path planning. First, the repulsion calculation formula of the traditional artificial potential field method is improved to address the issue of unreachable target points in this paper. Then the local minimum is categorized. Different repulsion calculation methods are adopted to address different types of local equilibrium points, and effectively resolving the local minimum problem of the traditional artificial potential field method. Finally, the improved artificial potential field method is applied to the path planning problem of multi-UAV formations by combing with the leader-follower method. Simulation results demonstrate that the multi-UAV formations three-dimensional path planning algorithm based on the improved artificial potential field method effectively solves the path planning problem of multi-UAV formations in static environments.

Key words: unmanned aerial vehicle formation; path planning; artificial potential field; leader-follower method; improved repulsion function

收稿日期: 2024-01-15; 修回日期: 2024-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(61963029); 江西省自然科学基金(20224BAB202027, 20232ACB202007)

通信作者: 陈龙胜(1983-), 博士, 副教授。E-mail: lschen2008@163.com

引用格式: 许海涛, 陈龙胜, 王宇翔. 改进势场法在无人机编队三维路径规划上的应用研究[J]. 航空工程进展, XXXX, XX(XX): 1-10.

XU Haitao, CHEN Longsheng, WANG Yuxiang. Application research on improved artificial potential field method in three-dimensional path planning for uav formation[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, XXXX, XX(XX): 1-10. (in Chinese)

0 引言

无人机由于摆脱了搭载人员的限制,解放了其设计的灵活性。相比于有人机,无人机具有重量轻、体积小、维护成本低、机动性能强等特点^[1],更适合执行危险系数高的任务。然而,单架无人机的能力十分有限,对于一些综合性任务,单架无人机通常是难以胜任的;而多次派遣又需要考虑任务的时效性,对无人机的作用产生了极大的限制。因此无人机编队技术在军事^[2]与民用方面^[3]的需求越来越广泛^[4]。

多无人机编队控制的算法目前主要有:领航跟随法^[5-6]、行为控制法^[7-8]、虚拟结构法^[9-10]等。此外,无人机编队进行任务时,编队必须与工作环境进行交互,而任意一种工作环境都或多或少地存在障碍物,编队能否快速、合理地躲避障碍物是影响编队任务执行效率的关键因素^[11]。常见的无人机路径规划算法主要有人工势场法^[12-16]、A*算法^[17-18]、蚁群算法^[19-20]以及神经网络^[21]等。相比于其他路径规划算法,人工势场法因其计算简单、实时性能好、容易实现等优点,得到了广泛的应用。但人工势场法也存在不足之处,该算法在进行路径规划时,在某些特定的状态会出现目标点不可达、陷入局部最小值以及局部路径震荡等问题。对于局部路径震荡问题,可以采用后期的路径优化来解决,但对于目标不可达以及局部最小值问题,若无法及时在线处理,将会导致路径规划失效。除此之外,对于无人机编队的路径规划问题,还需要结合编队控制算法来维持编队队形。

利用人工势场法进行路径规划方面,Single-tary等^[12]将人工势场法与控制障碍物函数相结合,得到的新算法所规划的路径更加光滑,但其仅在二维环境下进行了理论分析,且障碍物单一、数量较少,缺乏说服力;郭一聪等^[13]基于启发函数设计启发式子目标点以解决人工势场法的局部最小值问题,该方法还考虑了无人机最大爬升角和转向角的物理约束,但该方法寻找启发式子目标点的过程计算繁琐,实时性欠佳;周兰凤等^[14]设计了一种正六边形导向法解决人工势场法的局部最小值问题,该方法虽然在二维平面能够很好地逃脱局部平衡点,但在三维空间里只能引导无人机在竖直平面里跨越障碍物,且该方法所规划出来的路径通常不是最优路径;刘砚菊等^[15]针对地面多机

机器人避障问题,通过调整斥力方向和大小,打破局部平衡点以实现多地面机器人的有效避障,但在三维空间里由于斥力的方向难以确定,该方法难以达到预期效果;Sabattini等^[16]提出了将人工势场法与分散控制策略相结合的方法来控制机器人编队,并证明了该方法不受局部最小值问题的影响,但其并未提及如何解决目标点不可达问题,且该研究中的对象为二维环境中的机器人,能否将该方法应用到三维无人机路径规划中尚不可知。

鉴于此,本文对传统人工势场法中的斥力场函数进行改进,从而避免目标不可达情况的发生;对于局部最小值问题,通过改变斥力方向或者加权多个斥力来实现无人机在陷入局部最小值时能够快速摆脱局部平衡点,实现在三维空间中对多无人机编队进行路径规划,并建立合理的障碍物模型对改进后的算法进行仿真验证;基于领航跟随法建立多无人机编队模型以验证改进后的多无人机编队路径规划算法的可行性和有效性。

1 问题描述

假设静态环境下存在 N 个障碍物,无人机编队由一架领航者与 n 架跟随者构成。通过圆柱或圆锥的模型来模拟实际环境下的障碍物。第 j , $j=1, 2, \dots, N$ 个圆柱形障碍物或圆锥形障碍物模型可用式(1)或(2)予以描述:

$$(x_j - x_{aj})^2 + (y_j - y_{aj})^2 = r_{aj}^2, \quad z_j < h_{aj} \quad (1)$$

$$(x_j - x_{aj})^2 + (y_j - y_{aj})^2 = \left(\frac{h_{aj} - z_j}{h_{aj}} r_{aj} \right)^2, \quad z_j < h_{aj} \quad (2)$$

式中: $\vec{X}_j^{\text{obs}} = (x_j, y_j, z_j)$ 为第 j 个障碍物边缘点坐标; (x_{aj}, y_{aj}) 为第 j 个圆柱形障碍物或圆锥形障碍物模型底面圆心坐标,默认底面在 xoy 平面上; h_{aj} 为圆柱形障碍物或圆锥形障碍物模型的高; r_{aj} 为圆柱形障碍物或圆锥形障碍物模型底面圆的半径。

由式(1)和(2)可知,第 i , $i=0, 1, \dots, n$ 架无人机与第 j , $j=1, 2, \dots, N$ 个障碍物距离 $\rho_{i,j}^{\text{obs}}$ 可通过式(3)或(4)表示,其中, $i=0$ 时表示该架无人机为领航者无人机。若该障碍物为圆柱形障碍物,则

$$\rho_{i,j}^{obs} = \begin{cases} \sqrt{(X_i - x_{aj})^2 + (Y_i - y_{aj})^2} - r_{aj} & Z_i \leq h_{aj} \\ \infty & Z_i > h_{aj} \end{cases} \quad (3)$$

若该障碍物为圆锥形障碍物,则

$$\rho_{i,j}^{obs} = \begin{cases} \sqrt{(X_i - x_{aj})^2 + (Y_i - y_{aj})^2} - \frac{h_{aj} - Z_i}{h_{aj}} r_{aj} & Z_i \leq h_{aj} \\ \infty & Z_i > h_{aj} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\vec{X}_i = (X_i, Y_i, Z_i)$ 为第 i 架无人机的位置坐标。

第 i 架无人机与其目标点之间的距离 ρ_i^g 可由式(5)表示:

$$\rho_i^g = \sqrt{(X_i - X_i^g)^2 + (Y_i - Y_i^g)^2 + (Z_i - Z_i^g)^2} \quad (5)$$

式中: $\vec{X}_i^g = (X_i^g, Y_i^g, Z_i^g)$ 为第 i 架无人机的目标点坐标。

对于无人机编队飞行,还需要考虑无人机与无人机之间的距离,防止编队内部发生碰撞。记第 i 架无人机与第 k 架无人机之间的距离为 $\rho_{i,k}^{rep}$, $i, k = 0, 1, \dots, n, k \neq i$, 其可以用式(6)来描述:

$$\rho_{i,k}^{rep} = \sqrt{(X_i - X_k)^2 + (Y_i - Y_k)^2 + (Z_i - Z_k)^2} \quad (6)$$

2 多无人机编队路径规划

多无人机编队的三维路径规划问题,需要满足以下两个基本条件:能够合理规划安全路径,规避任务环境中的障碍物;编队内各个体之间安全避碰。传统的人工势场法在实践中存在的目标不可达、局部最小点以及局部路径震荡的问题会导致路径规划及避障效果差强人意^[22]。其中,局部路径震荡问题可以通过后续的路径优化来解决,本文主要提出改进人工势场法以解决传统人工势场法进行路径规划时存在的目标不可达和局部最小值问题,并与领航跟随法相结合实现在三维空间中的无人机编队路径规划。

2.1 多无人机编队的人工势场法

人工势场法在1986年由Khatib首次提出用来解决机器人避障问题^[23]。当该算法应用在无人机编队路径规划时,通过对无人机编队的任务环境建立一个势场,其中目标点对无人机表现出引力,障碍物对无人机表现出斥力,为了避免编队内部

相互碰撞,无人机与无人机之间也会产生斥力。综合引力与斥力对每一架无人机的作用,就可以为无人机编队规划出一条从出发点到目标点的安全路线。将第 i 架无人机的目标点产生的引力势场记为 U_i^{att} , 第 j 个障碍物对第 i 架无人机产生的斥力势场记为 $U_{i,j}^{obs}$; 编队中第 i 架无人机与第 k 架无人机之间斥力势场记为 $U_{i,k}^{rep}$ 。目标点距离无人机越远,以其为中心的引力场对无人机的引力越大,距离越近,对无人机的引力越小。对于障碍物及其他无人机所产生的斥力势场,其作用效果与引力场相反,当与无人机的距离越近时,所产生的斥力越大^[24]。 U_i^{att} , $U_{i,j}^{obs}$ 和 $U_{i,k}^{rep}$ 可分别用式(7), (8)和(9)予以描述。

$$U_i^{att} = \frac{1}{2} K_{att} (\rho_i^g)^m \quad (7)$$

$$U_{i,j}^{obs} = \begin{cases} \frac{1}{2} K_{obs} \left(\frac{1}{\rho_{i,j}^{obs}} - \frac{1}{\rho_{obs}} \right)^2 & 0 < \rho_{i,j}^{obs} \leq \rho_{obs} \\ 0 & \rho_{i,j}^{obs} > \rho_{obs} \end{cases} \quad (8)$$

$$U_{i,k}^{rep} = \begin{cases} \frac{1}{2} K_{rep} \left(\frac{1}{\rho_{i,k}^{rep}} - \frac{1}{\rho_{rep}} \right)^2 & 0 < \rho_{i,k}^{rep} \leq \rho_{rep} \\ 0 & \rho_{i,k}^{rep} > \rho_{rep} \end{cases} \quad (9)$$

式中: K_{att} , K_{obs} 及 K_{rep} 分别为引力势能系数、障碍物对无人机的斥力势能系数和无人机机间的斥力势能系数; m 为引力势场因子,通常取 $m = 2$; ρ_{obs} 为编队内无人机与障碍物之间的安全距离阈值,当无人机与障碍物之间的距离 $\rho_{i,j}^{obs}$ 大于等于 ρ_{obs} 时,无人机与障碍物之间不会表现出力的作用,反之,它们之间就会产生斥力; ρ_{rep} 为编队内无人机与无人机之间的安全距离阈值,同理,当无人机与无人机之间的距离 $\rho_{i,k}^{rep}$ 大于等于 ρ_{rep} 时,无人机与无人机之间不会表现出力的作用,反之,它们之间也会产生斥力。

根据式(7), (8)和(9)可将第 i 架无人机受到的总势能 U_i^{all} 描述为

$$U_i^{all} = U_i^{att} + U_{i,j}^{obs} + U_{i,k}^{rep} \quad (10)$$

将第 i 架无人机受到的引力记为 F_i^{att} , 第 j 个障碍物对第 i 架无人机产生的斥力记为 $F_{i,j}^{obs}$, 第 k 架无人机对第 i 架无人机产生的斥力记为 $F_{i,k}^{rep}$, 无人机受到的引力与斥力为其对应势场的负梯度。于

$$F_{i,j}^{obs} = -\nabla(U_{i,j}^{obs}) = \begin{cases} K_{obs} \left(\frac{1}{\rho_{i,j}^{obs}} - \frac{1}{\rho_{obs}} \right) \left(\frac{1}{\rho_{i,j}^{obs}} \right)^2 \frac{\partial \rho_{i,j}^{obs}}{\partial \vec{X}_i} & 0 < \rho_{i,j}^{obs} \leq \rho_{obs} \\ 0 & \rho_{i,j}^{obs} > \rho_{obs} \end{cases} \quad (12)$$

$$F_{i,k}^{rep} = -\nabla(U_{i,k}^{rep}) = \begin{cases} K_{rep} \left(\frac{1}{\rho_{i,k}^{rep}} - \frac{1}{\rho_{rep}} \right) \left(\frac{1}{\rho_{i,k}^{rep}} \right)^2 \frac{\partial \rho_{i,k}^{rep}}{\partial \vec{X}_i} & 0 < \rho_{i,k}^{rep} \leq \rho_{rep} \\ 0 & \rho_{i,k}^{rep} > \rho_{rep} \end{cases} \quad (13)$$

于是, 第 i 架无人机受到的合力 F_i^{all} 可描述为

$$F_i^{all} = F_i^{att} + \sum_{j=1}^N F_{i,j}^{obs} + \sum_{k=0, k \neq j}^n F_{i,k}^{rep} \quad (14)$$

式(14)描述的第 i 架无人机受到的合力 F_i^{all} 可以为第 i 架无人机提供飞行前进方向, 当编队内第 i 架无人机与障碍物或者其他无人机相距过近时, 合力 F_i^{all} 中斥力便会远大于引力, 合力主要表现为斥力, 引导第 i 架无人机进行避障或者避碰。当在第 i 架无人机的安全距离阈值内无障碍物或者其他无人机, 则合力主要表现为引力。编队内第 i 架无人机以当前位置为球心, 每次运动步长 d 为半径形成球体, 沿合力 F_i^{all} 的方向由球心位置运动到当前球面的对应位置, 如此循环, 逐步向目标点逼近, 如图 1 所示。

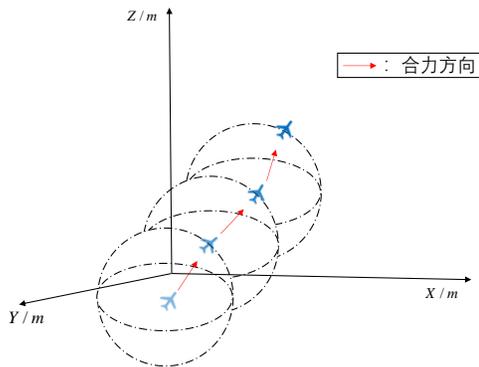


图 1 编队内第 i 架无人机运动示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the movement of the i -th drone in the formation

应注意: 式(14)定义的基于传统人工势场法的多无人机编队路径规划算法在大部分情况下均能引导编队内的无人机安全避开障碍物且不会发生机间碰撞, 顺利抵达目标点。但是, 在某些特定

是, 根据式(7), (8)和(9)可以将 F_i^{att} , $F_{i,j}^{rep}$ 和 $F_{i,k}^{rep}$ 分别用式(11), (12)和(13)予以描述。

$$F_i^{att} = -\nabla(U_i^{att}) = -K_{att} \rho_i^g \frac{\partial \rho_i^g}{\partial \vec{X}_i} \quad (11)$$

的情况下, 该算法在引导编队内无人机进行路径规划时会发生潜在的目标不可达及陷入局部最小值问题, 导致路径规划失败。

2.2 目标不可达问题优化设计

目标点不可达问题指的是无人机在传统的人工势场算法下无法保证最后到达的平衡点是所期望的目标点。由式(11)可知: 无人机与目标点之间的距离越近, 目标点引力势场产生的引力越大。随着无人机逐渐接近目标点, 引力势场对无人机的吸引力逐渐减小。当无人机到达目标点时, 引力势场对无人机的作用变为零。若在目标点附近存在障碍物, 且障碍物与目标点之间的距离小于 ρ_{obs} 时, 那么当无人机到达目标点时, 其还会受到该障碍物所产生的斥力作用, 导致无人机离开目标点, 即出现目标点不可达问题。

针对目标点不可达问题, 对势能场函数进行改进, 在第 i 架无人机与障碍物之间的斥力场函数中引入无人机与目标点之间的距离 ρ_i^g 。改进后的障碍物斥力势场函数可采用式(15)予以描述。

$$U_{i,j}^{obs} = \begin{cases} \frac{1}{2} K_{obs} \left(\frac{1}{\rho_{i,j}^{obs}} - \frac{1}{\rho_{obs}} \right)^2 (\rho_i^g)^{\mathfrak{R}} & 0 < \rho_{i,j}^{obs} \leq \rho_{obs} \\ 0 & \rho_{i,j}^{obs} > \rho_{obs} \end{cases} \quad (15)$$

式中: \mathfrak{R} 为调节系数。

根据式(15)可进一步获得如下斥力函数:

$$F_{i,j}^{obs} = -\nabla(U_{i,j}^{obs}) = \begin{cases} F_{i,j}^{obs1} + F_{i,j}^{obs2} & 0 < \rho_{i,j}^{obs} \leq \rho_{obs} \\ 0 & \rho_{i,j}^{obs} > \rho_{obs} \end{cases} \quad (16)$$

其中, $F_{i,j}^{obs1}$ 与 $F_{i,j}^{obs2}$ 具体形式如式(17)与(18)所示:

$$F_{i,j}^{obs1} = K_{obs} \left(\frac{1}{\rho_{i,j}^{obs}} - \frac{1}{\rho_{obs}} \right) \frac{(\rho_i^g)^{\Re}}{(\rho_{i,j}^{obs})^2} \frac{\partial \rho_{i,j}^{obs}}{\partial \vec{X}_i} \quad (17)$$

$$F_{i,j}^{obs2} = -\frac{\Re}{2} K_{obs} \left(\frac{1}{\rho_{i,j}^{obs}} - \frac{1}{\rho_{obs}} \right)^2 (\rho_i^g)^{\Re-1} \frac{\partial \rho_i^g}{\partial \vec{X}_i} \quad (18)$$

根据式(16),(17)和(18)易知,新的斥力函数除了障碍物对无人机的斥力外,还引入了目标点对无人机的斥力 $F_{i,j}^{obs2}$,当 \Re 取(0,1)时,无人机接近目标点时,不仅 $F_{i,j}^{obs1}$ 逐渐减小, $F_{i,j}^{obs2}$ 也随着无人机接近目标点而减小。在无人机到达目标点时, ρ_i^g 趋近于零, $F_{i,j}^{obs2}$ 趋近于负无穷。

2.3 局部最小值问题优化设计

人工势场法是通过引力与斥力的共同作用来引导无人机寻找一条避开所有障碍物且到达目标点的安全路径。而局部最小值问题指的是无人机在路径规划时陷入某一局部平衡点。在该点处,无人机受到的引力与斥力的合力大小相等,方向相反。无人机受到的合外力为零,无法进行下一步运动,导致路径规划失败。由于编队内所有的无人机均为动态的,各无人机之间的相互斥力时刻发生变化,即便在某一时刻使某架无人机陷入局部最小值点,在下一时刻也可以主动改出,所以此处对于局部最小值问题的研究只考虑障碍物产生的斥力与目标点引力大小相等,方向相反的情况。这种局部最小值点可分为两类:(1)无人机受到单个障碍物的斥力,无人机、障碍物和目标点在同一条直线上,斥力与引力大小相等,方向相反;(2)无人机受到多个障碍物的斥力,斥力的合力与目标点产生的引力等大反向。根据牛顿第一定律,物体将保持静止或匀速直线运动,除非受到外力的作用。因此,要使无人机逃离局部平衡点,必须打破其当前的平衡状态。通过改变无人机的受力状态,使其受到合外力的影响,即可实现逃离局部平衡点的目的。

当无人机陷入局部平衡点时,势能场几乎不会发生变化。据此定义如下的可判断无人机是否陷入局部平衡点的判定条件:

$$|U_i^{all}(t+1) - U_i^{all}(t)| < U_{\min} \quad (19)$$

式中: $U_i^{all}(t+1)$ 为第*i*架无人机 $t+1$ 时刻的总势能值, $U_i^{all}(t)$ 为第*i*架无人机 t 时刻的总势能值, U_{\min} 为判定阈值,当第*i*架无人机 $t+1$ 时刻与 t 时

刻总势能值变化量小于 U_{\min} ,则可判定为该架次无人机陷入局部平衡点。 U_{\min} 取值越小,此判据公式越灵敏。

当第*i*架无人机的状态被判定为陷入局部平衡点时,先对平衡点的情况进行分辨,若在安全距离阈值 ρ_{obs} 内只存在第*j*个障碍物,可判定第*i*架无人机陷入第(1)种情况的局部平衡点。针对第(1)种情况的局部平衡点问题,通过对第*i*架无人机增加一个摆脱力以保证第*i*架无人机能逃脱局部平衡点,摆脱力的大小等于此处斥力的大小,方向为第*i*架无人机前进方向在 xoy 平面投影方向顺时针转动 θ_i , θ_i 具体形式如下:

$$\theta_i = \arcsin \frac{r_j}{\rho_{i,j}^{obs}} \quad (20)$$

式中: r_j 为第*j*个障碍物的当前水平面的半径。

若此障碍物为圆柱形障碍物模型,则 $r_j = r_{aj}$,若此障碍物模型为圆锥形障碍物模型,则 $r_j = r_{aj}(h_{aj} - Z_i)/h_{aj}$ 。

若无人机受到多个斥力,则其陷入第(2)种情况的局部平衡点。针对第(2)种情况的局部平衡点问题,通过对无人机所受到的斥力进行加权处理以保证无人机能逃脱局部平衡点。新的斥力如下式所示:

$$F_{i,j}^{obs} = \frac{\sum_{j=1}^n F_{i,j}^{obs} / \rho_{i,j}^{obs}}{\rho_{i,j}^{obs}} \quad (21)$$

由式(21)可知,新的摆脱力既可以避免无人机陷入多个斥力引起的局部最小值时,又能保证距离最近的障碍物产生的新斥力最大,使无人机向远离最近障碍物的方向逃脱局部最优点,提高安全性能。

2.4 基于领航跟随法的多无人机编队路径规划

领航跟随法指的是在无人机编队队列中,指定一个或多个无人机作为领航者无人机,队列中其他无人机作为跟随者无人机跟随领航者无人机运动,领航跟随法可分为 $l-l$ 与 $l-\varphi$ 两种编队模式^[25]。 $l-l$ 编队模式需要两架领航者无人机,跟随者无人机以一定的距离跟随两个领航者无人机,保持期望队形。 $l-\varphi$ 编队模式下跟随者要以一定的距离和角度跟随一架领航者无人机进行运

动,本文采用 $l-\varphi$ 编队模式。 $l-\varphi$ 编队模式下,编队中第 $i, i=1, 2, \dots, n$ 架跟随者无人机的坐标 $\vec{X}_i=(X_i, Y_i, Z_i)$ 与领航者无人机的实时坐标 $\vec{X}_0=(X_0, Y_0, Z_0)$ 之间满足如下关系:

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} (l_i^d - l_i) = 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} (\alpha_i^d - \alpha_i) = 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} (\beta_i^d - \beta_i) = 0 \end{cases} \quad (22)$$

其中, α_i 为第 i 架跟随者无人机与领航者无人机之间的实际水平面夹角,实际铅垂面夹角为 β_i , l_i 为第 i 架跟随者无人机与领航者无人机之间的实际跟随距离, l_i^d , α_i^d 和 β_i^d 分别表示第 i 架跟随者与领航者之间期望的跟随距离、水平面夹角以及铅垂面夹角,如图 2 所示。结合人工势场法来引导多无人机编队进行路径规划时,应当将人工势场法中第 i 架跟随者无人机的目标位置 $X_i^g=(X_i^g, Y_i^g, Z_i^g)$, $i=1, 2, \dots, n$ 设定为领航跟随法中跟随者无人机的期望位置。根据图 2 可将第 i 架跟随者的期望位置 $X_i^g=(X_i^g, Y_i^g, Z_i^g)$, $i=1, 2, \dots, n$, 即其目标点位置坐标描述为:

$$\begin{cases} X_i^g = X_0 - l_i \cos \alpha_i \cos \beta_i \\ Y_i^g = Y_0 - l_i \sin \alpha_i \cos \beta_i \\ Z_i^g = Z_0 - l_i \sin \beta_i \end{cases} \quad (23)$$

至此,即可实现多无人机编队飞行路径规划。

上述由一架领航者无人机和 n 架跟随者无人机组成的编队系统在具有 N 个障碍物静态环境下的路径规划算法可归结为:

步骤 1 给定领航者无人机的目标点位置坐标 $\vec{X}_0^g=(X_0^g, Y_0^g, Z_0^g)$;

步骤 2 根据式 (11), (13), (16), (17), (18) 和 (14) 计算出领航者无人机所受到的合力 F_0^{all} , 以控制领航者无人机向期望的目标点 $X_0^g=(X_0^g, Y_0^g, Z_0^g)$ 逐渐移动, 保证与编队内各跟随者无人机以及障碍不发生碰撞, 且不出现目标不可达和局部最小值的问题;

步骤 3 根据领航者无人机的实时位置坐标 $\vec{X}_0=(X_0, Y_0, Z_0)$ 和式 (23) 计算出第 $i, i=1, 2, \dots, n$ 架跟随者无人机目标位置 $X_i^g=(X_i^g, Y_i^g, Z_i^g)$;

步骤 4 根据式 (11), (13), (16), (17), (18) 和 (14) 计算出第 $i, i=1, 2, \dots, n$ 架跟随者无人机所受到的合力 F_i^{all} , 以控制第 $i, i=1, 2, \dots, n$ 架跟随

者无人机向期望的目标点 $X_i^g=(X_i^g, Y_i^g, Z_i^g)$ 逐渐移动, 保证与编队内各跟随者无人机和领航者无人机以及障碍不发生碰撞, 且不出现目标不可达和局部最小值的问题;

步骤 5 如此循环, 即可最终实现由一架领航者无人机和 n 架跟随者无人机组成的编队系统在具有 N 个障碍物的静态环境下实现路径规划。

领航跟随法示意图如图 2 所示。

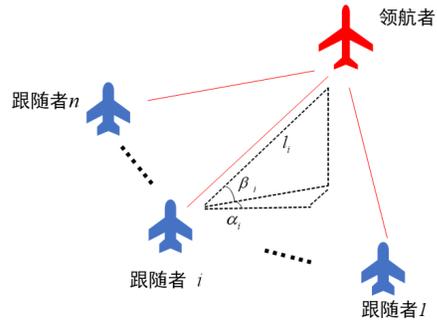


图 2 领航跟随法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of leader-follower method

3 仿真实证

为保证无人机在避障时所规划的路径平滑可靠, 本文采用障碍物模型为圆柱及圆锥状模型。一般来说, 传统的人工势场法在大部分的情况下都能引导无人机进行路径规划, 但在某些特定的场景中, 还需要对其进行进一步的完善。并且, 对于多无人机编队来说, 单单通过人工势场法进行路径规划还存在一定的难度。由于人工势场法的缺陷主要在无人机与环境交互情形中, 与编队内部无关。所以针对人工势场法改进部分为了可以更加清晰地体现对比效果, 此处采用单架无人机来进行仿真说明。算法参数如表 1 所示。

表 1 人工势场法参数设置

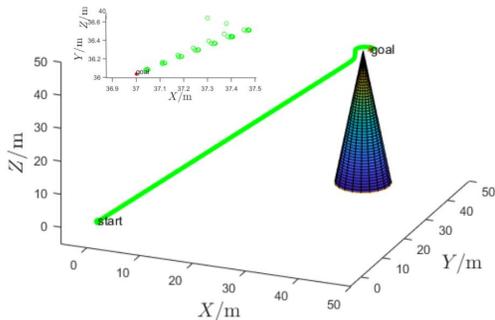
Table 1 Artificial potential field method parameter settings

参数	数值	参数	数值
引力场系数 K_{att}	1	安全距离阈值 ρ_{obs}/m	3
斥力场系数 K_{rep}	10	步长 d/m	0.1

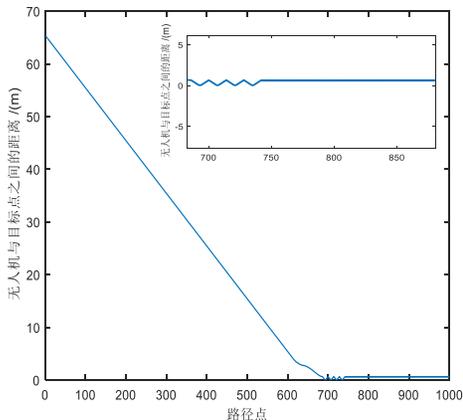
1) 单机路径规划的目标可达性仿真分析

考虑具有一个圆锥形障碍物的静态环境, 圆锥的底面圆心坐标为 $(36, 35, 0)m$, 无人机的起始点坐标为 $(0, 0, 0)m$, 无人机的目标点坐标为

(37, 36, 40)m。易知目标点与圆锥状障碍物之间的距离小于设定的安全距离阈值 $\rho_{obs} = 3m$, 则当无人机到达目标点后引力为零, 但仍会受到斥力的作用, 便会再次离开目标点, 即传统人工势场法的目标不可达问题, 传统人工势场法的仿真结果如图 3 所示, 可以看出: 无人机在到达目标点附近后会出现来回震荡, 始终无法到达目标点。



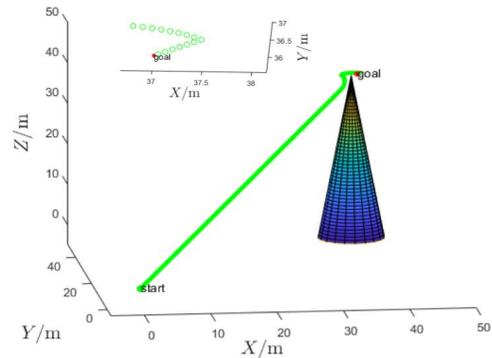
(a) 规划路径图



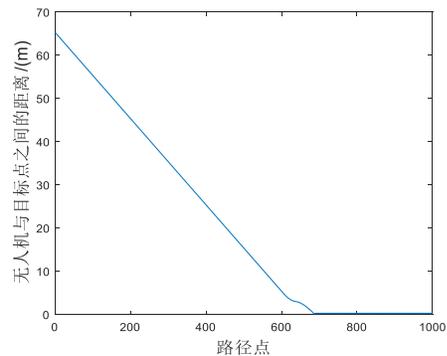
(b) 路径点与目标点距离

图 3 传统人工势场法单机路径规划目标不可达仿真结果
Fig. 3 Simulation results of unreachable target points of traditional artificial potential field for single UAV path planning

基于本文所提出的改进人工势场法的仿真结果如图 4 所示, 仿真时其调节系数 α 取为 0.7。可以看出: 在改进后人工势场法的作用下, 无人机在目标点附近不会出现来回震荡, 能够准确的到达目标点。仿真结果表明本文基于本文所研究的基于改进人工势场法的无人机路径规划算法可有效的解决传统人工势场法目标不可达问题。



(a) 规划路径图



(b) 路径点与目标点距离

图 4 改进人工势场法单机路径规划目标可达仿真结果
Fig. 4 Simulation results of unreachable target points of improved artificial potential field for single UAV path planning

2) 单机路径规划的局部最小值点仿真分析

对于传统人工势场法存在的局部平衡点问题, 本节将针对两类局部最小值点分别展开仿真分析。

① 无人机、障碍物和目标点在同一条直线上

考虑具有一个圆柱形障碍物的静态环境, 圆柱状障碍物底面圆心坐标为 (30, 30, 0)m, 无人机的起始点坐标为 (0, 0, 20)m, 目标点坐标为 (45, 45, 20)m。易知无人机、障碍物和目标点会在同一条直线上, 基于传统人工势场法的无人机路径规划算法在某点可能会出现无人机受到的引力与斥力的合力大小相等, 方向相反, 即无人机受到的合外力为零, 无法继续向目标点移动。基于传统人工势场法和改进人工势场法的单机路径规划的仿真结果如图 5 所示, 可以看出: 基于传统人工势场法的路径规划算法在无人机接近障碍物附近会陷入局部平衡, 无法完成避障; 然而, 本文所研

究的基于改进人工势场法的路径规划算法在无人机接近障碍物陷入局部平衡时,可借助摆脱力该出局部平衡点,并最终达到目标点。

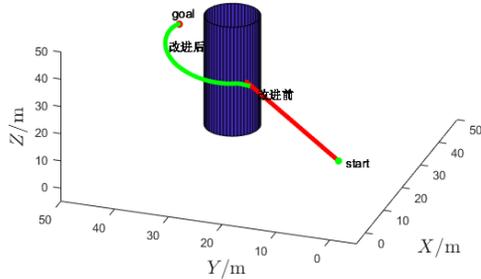


图5 单机路径规划的第一类局部最小值点仿真结果
Fig. 5 Simulation results of the first type of local minimum for single UAV path planning

② 无人机受到多个障碍物的斥力,陷入局部最小值

此类情况中无人机受到的斥力合力与其所受到的引力等大方向,导致无人机受到的合外力为零。仿真考虑具有两个圆柱形障碍物的静态环境,圆柱状障碍物底面圆心坐标分别为 $(26, 15, 0)m$ 和 $(15, 26, 0)m$,障碍物高度设置为 $40m$,半径分别为 $5m$ 和 $6m$,无人机的起始点坐标为 $(0, 0, 20)m$,目标点坐标设置为 $(40, 40, 20)m$ 。在无人机接近两个障碍物间的的中点时基于传统人工势场法的无人机路径规划算法可能会出现无人机受到的合外力为零,无法继续向目标点移动的情况。基于传统人工势场法和改进人工势场法的单机路径规划的仿真结果如图6所示。

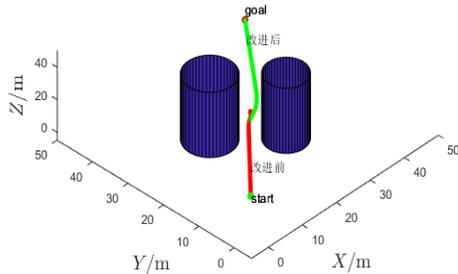


图6 单机路径规划的第二类局部最小值点仿真结果
Fig. 6 Simulation results of the second type of local minimum for single UAV path planning

从图6可以看出:基于传统人工势场法的路径规划算法在无人机接近两个障碍物间的的中点时会陷入局部平衡,无法完成后续的路径规划;然而,本文所研究的基于改进人工势场法的路径规划算法在无人机接近两个障碍物间的的中点陷入局部平

衡时,可借助摆脱力先向一侧偏移,进而摆脱由两个障碍物产生的局部平衡点,最后成功到达目标点。

3) 多无人机编队路径规划仿真分析

考虑由一架领航者无人机和5架跟随者无人机在具有1个圆锥形和5个圆柱形障碍物环境下的路径规划问题,其中,6架无人机采用三角形编队队形,无人机之间的安全间隔阈值为 $\rho_{rep} = 3m$,无人机初始位置坐标以及领航者无人机目标点位置坐标参数如表2所示,与无人机编队交互的障碍物环境信息如表3所示。在本文所研究的改进人工势场法的作用下,6架无人机编队路径规划仿真结果如图7所示。

表2 无人机编队初始信息

Table 2 Initial information of UAV formation

n	出发点位置	目标位置
0	$(0, 0, 0)m$	$(72, 73, 40)m$
1	$(-3, 0, 1.5)m$	—
2	$(-3, 0, -1.5)m$	—
3	$(-6, 0, 3)m$	—
4	$(-6, 0, 0)m$	—
5	$(-6, 0, -3)m$	—

表3 环境信息

Table 3 Information of environment

N	底面圆心坐标/ m	高度/ m	底面半径/ m
1(圆柱形)	$(8, 9, 0)$	30	1
2(圆柱形)	$(15, 12, 0)$	31	2
3(圆柱形)	$(20, 23, 0)$	27	2
4(圆柱形)	$(25, 18, 0)$	20	3
5(圆柱形)	$(27, 28, 0)$	30	4
6(圆锥形)	$(56, 55, 0)$	40	5

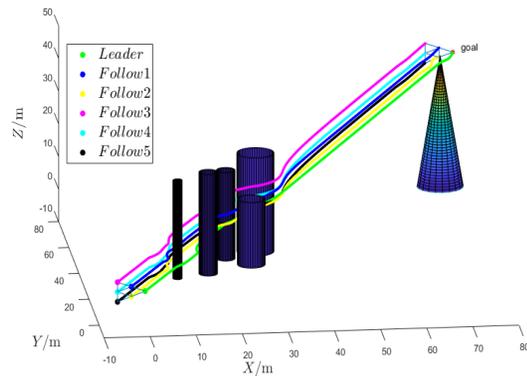


图7 多无人机编队路径规划仿真结果
Fig. 7 Simulation results of multi-UAV formation path planning

从图7可以看出:6架无人机在未探索到障碍物时,保持着稳定的队形向目标点方向前进;当在安全距离阈值内出现障碍物时,编队队形分散进行避障及避碰,6架无人机在绕过障碍物抵达目标点后又迅速恢复到原始队形。

4 结 论

1) 本文通过圆柱圆锥模型模拟现实环境中无人机编队可能交互的障碍物,得到的仿真结果具有更强的可信度。

2) 相比于传统的人工势场法,本文改进后的人工势场法能够有效地避免目标点不可达以及陷入局部最小值问题,保证无人机能够成功完成路径规划。

3) 将人工势场法与领航跟随法相结合,能够应用于多无人机编队的路径规划问题,为多无人机编队路径规划问题提供了一种切实可行的方案。

参考文献

- [1] 邵将,徐扬,罗德林. 无人机多机协同对抗决策研究[J]. 信息与控制, 2018, 47(3): 347-354.
SHAO Jiang, XU Yang, LUO Delin. Cooperative combat decision-making research for multi UAVs[J]. Information and Control, 2018, 47(3): 347-354. (in Chinese)
- [2] 吴依伦,孙春生. 军用无人机载紧凑型光电吊舱发展及作战运用[J]. 激光与红外, 2023, 53(10): 1568-1574.
WU Yilun, SUN Chunsheng. Development and operational application of compact photoelectric pod for military UAV [J]. Laser & Infrared, 2023, 53(10): 1568-1574. (in Chinese)
- [3] 宋晨晖. 民用无人机应用进展[J]. 机电工程技术, 2018, 47(11): 149-152.
SONG Chenhui. The civil UAV application progress [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2018, 47(11): 149-152. (in Chinese)
- [4] 袁建华,李尚. 无人机三维路径规划及避障方法[J]. 信息与控制, 2021, 50(1): 95-101.
YUAN Jianghua, LI Shang. UAV 3D path planning and obstacle avoidance method [J]. Information and Control, 2021, 50(1): 95-101. (in Chinese)
- [5] 罗京,刘成林,刘飞. 多移动机器人的领航一跟随编队避障控制[J]. 智能系统学报, 2017, 12(2): 202-212.
LUO Jing, LIU Chenglin, LIU Fei. Piloting-following formation and obstacle avoidance control of multiple mobile robots[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2017, 12(2): 202-212. (in Chinese)
- [6] SHI Haotian, WANG Min, WANG Cong. Leader-follower formation learning control of discrete-time nonlinear multi-agent systems [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2023, 53(2): 1184-1194.
- [7] 庞师坤,梁晓锋,李英辉,等. 基于零空间行为法的自主水下机器人避障策略[J]. 上海交通大学学报, 2020, 54(3): 295-304.
PANG Shikun, LIANG Xiaofeng, LI Yinhui, et al. Collision avoidance strategy for autonomous underwater vehicle based on null-based behavioral approach [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2020, 54(3): 295-304. (in Chinese)
- [8] 常路,单梁,戴跃伟,等. 未知环境下基于改进DWA的多机器人编队控制[J]. 控制与决策, 2022, 37(10): 2524-2534.
CHANG Lu, SHAN Liang, DAI Yuewei, et al. Multi-robot formation control in unknown environment based on improved DWA [J]. Control and Decision, 2022, 37(10): 2524-2534. (in Chinese)
- [9] REN Wei, SORENSEN N. Distributed coordination architecture for multi-robot formation control[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2008, 56: 324-333.
- [10] YAN Xun, JIANG Dapeng, MIAO Runlong, et al. Formation control and obstacle avoidance algorithm of a multi-USV system based on virtual structure and artificial potential field[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2021, 9(2): 1-17.
- [11] 韩忠华,冯兴浩,吕哲,等. 一种改进的无人机路径规划环境建模方法[J]. 信息与控制, 2018, 47(3): 371-378.
HAN Zhonghua, FENG Xinghao, ZheLYU, et al. An improved UAV path planning environment modeling method [J]. Information and Control, 2018, 47(3): 371-378. (in Chinese)
- [12] SINGLETARY A, KLINGEBIEL K, BOURNE J, et al. Comparative analysis of control barrier functions and artificial potential fields for obstacle avoidance[C]// 2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Prague: Czech Republic, 2021: 8129-8136.
- [13] 郭一聪,刘小雄,章卫国,等. 基于改进势场法的无人机三维路径规划方法[J]. 西北工业大学学报, 2020, 38(5): 977-986.
GUO Yichong, LIU Xiaoxiong, ZHANG Weiguo, et al. 3D path planning method for UAV based on improved artificial potential field[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2020, 38(5): 977-986. (in Chinese)
- [14] 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(6): 54-67.
ZHOU Lanfeng, KONG Mingyue. 3D obstacle-avoidance for unmanned aerial vehicle based on the improved artificial potential field method [J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2022(6): 54-67. (in Chinese)

- nese)
- [15] 刘砚菊, 代涛, 宋建辉. 改进人工势场法的路径规划算法研究[J]. 沈阳理工大学学报, 2017, 36(1): 61-65.
LIU Yanju, DAI Tao, SONG Jianhui. Research of path planning algorithm based on improved artificial potential field [J]. Journal of Shenyang Ligong University, 2017, 36(1): 61-65. (in Chinese)
- [16] SABATTINI L, SECCHI C, FANTUZZI C. Arbitrarily shaped formations of mobile robots: artificial potential fields and coordinate transformation[J]. Auton Robot, 2011, 30: 385-397.
TANG Gang, TANG Congqiang, CLARAMUNT C, et al. Geometric A-Star algorithm: an improved A-Star algorithm for AGV path planning in a port environment [J]. IEEE Access, 2021, 9: 59196-59210.
- [17] 张哲, 吴剑, 代冀阳, 等. 基于改进 A-Star 算法的隐身无人机快速突防航路规划[J]. 航空学报, 2020, 41(7): 254-264.
ZHANG Zhe, WU Jian, DAI Jiyang, et al. Fast penetration path planning for stealth UAV based on improved A-Star algorithm[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(7): 254-264. (in Chinese)
- [18] 杨永刚, 武楚健, 杨正全. 基于改进蚁群算法的无人机三维航路规划[J]. 航空计算技术, 2023, 53(2): 16-19.
YANG Yonggang, WU Chujian, YANG Zhengquan. 3D route planning of UAV based on improved ant colony algorithm [J]. Aeronautical Computing Technique, 2023, 53(2): 16-19. (in Chinese)
- [19] 沈智鹏, 丁文娜, 刘雨宸, 等. 基于改进自适应蚁群算法的无人帆船路径规划[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2023, 6: 1-7.
SHENG Zhipeng, DING Wenna, LIU Yuchen, et al. Unmanned sailboat path planning based on improved adaptive ant colony algorithm[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2023, 6: 1-7. (in Chinese)
- [20] 李波, 杨志鹏, 贾卓然, 等. 一种无监督学习型神经网络的无人机全区域侦察路径规划[J]. 西北工业大学学报, 2021, 39(1): 77-84.
LI Bo, YANG Zhipeng, JIA Zhuoran, et al. An unsupervised learning neural network for planning UAV full-area reconnaissance path [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2021, 39(1): 77-84. (in Chinese)
- [21] 光晓亮. 基于无人机编队的路径规划研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2020.
GUANG Xiaoliang. Research on path panning based on UAV formation[D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2020. (in Chinese)
- [22] KHATIB O. Realtime obstacle avoidance for manipulators and mobile robots[J]. International Journal of Robotics Research, 1986, 5(2): 90-98.
- [23] 巫茜, 曾青, 罗金彪, 等. 改进人工势场法在无人机路径规划中的应用研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2022, 36(3): 144-151.
WU Qian, ZENG Qing, LUO Jinbiao, et al. Application research on improved artificial potential field method in UAV path planning [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2022, 36(3): 144-151. (in Chinese)
- [24] DESAI J P, OSTROWSKI J, KUMAR V. Controlling formations of multiple mobile robots [C] // Proceedings 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation Leuven. Belgium: IEEE, 1998: 2864-2869.

(编辑: 马文静)