

基于改进PH曲线的无人机航迹规划

刘永兰,李为民,肖金科,吕诚中,许伟

空军工程大学防空反导学院,西安 710051

摘要 航迹规划是无人机任务规划的重要组成部分。针对现有航迹规划存在的不足,提出一种基于改进pythagorean hodograph(PH)曲线的航迹规划方法。该方法结合了PH曲线的曲率连续性和粒子群优化算法的快速搜索特点,将PH曲线的控制点选取通过粒子群算法进行优化,可以快速得到避障安全、满足最大曲率限制和曲率连续的最优PH路径。仿真结果表明了该方法的有效性。

关键词 无人机;航迹规划;PH曲线;粒子群优化

中图分类号 V249.121

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.11.012

Track planning for unmanned aerial vehicles based on improved PH curves

LIU Yonglan, LI Weimin, XIAO Jinke, LÜ Chengzhong, XU Wei

Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China

Abstract Track planning is one important factor of UAV mission planning. To aim at the shortage currently existing in track planning, a method of track planning based on improved PH curves is proposed. The characteristic of PH curves' continuous curvature is combined with the fast search of particle swarm optimization algorithm, by which choosing PH curves' control point is optimized. The optimal PH path that avoids the obstacles in the environment meets the constraint of maximum curvature, and continuous curvature can be obtained quickly. Simulation results show the validity of the method.

Keywords unmanned aerial vehicles; track planning; PH curves; particle swarm optimization

随着无人机各种技术的日益成熟,性能的日益提高,在作战中的优势愈加突出,致使现代战场对无人机的需求出现了指数增加的现象。随着作战需求的增加,以及承担任务难度的增大,提升任务规划能力也成为无人机研制过程中亟需解决的关键问题。在无人机任务规划中,航迹规划成为无人机研究重点。目前,解决无人机航路规划问题的方法:梯度法、样条插值法、非线性规划法、动态规划、图论、A*搜索算法、模拟退火法、遗传算法等。张得舒等^[1]利用A*算法对无人机的飞行航迹进行求解,复杂度较低,可快速获取攻击航迹,但计算的精确度存在不足;华珊珊^[2]运用遗传退火算法可在较短的时间内规划出距离较短、威胁代价小的航路,局部满足了平滑的需求,但忽略了航迹的整体平滑和最大曲率约束的需求。魏天权等^[3]将威胁回避、粒群算法和遗传算法的变

异操作相结合,规划出能确保自身安全且使威胁代价最小的航路,但仅考虑了威胁规避和燃油、时间等约束,缺乏对无人机自身的动力性能约束。

PH曲线(pythagorean hodograph)又称勾股速端曲线,具有曲率连续、曲线平滑及曲线长度和曲率均有有理表达式的特性,它是一条完整的曲线,而不是由一系列单个曲线段连接而成^[4]。与一般的智能优化算法相比,粒子群优化算法具有概念简单、易于实现、搜索速度快、搜索范围大且需要调整的参数少等优点^[5,6]。针对现有航迹规划算法的不足,本文结合PH曲线的特殊性和粒子群算法的快速搜索性能,提出一种基于改进PH曲线的无人机航迹规划方法,在满足避障的同时,满足无人机的最大曲率约束,将保证航迹连续可飞及航路长度最短。

收稿日期:2014-12-15;修回日期:2015-03-03

作者简介:刘永兰,博士研究生,研究方向为防空反导作战规划,电子信箱:liuyonglanco1.hi@163.com;李为民(通信作者),教授,研究方向为防空反导作战运筹分析,电子信箱:2576000402@qq.com

引用格式:刘永兰,李为民,肖金科,等.基于改进PH曲线的无人机航迹规划[J].科技导报,2015,33(11):69-74.

1 路径规划分析

在已知或部分已知的地图或区域上,有一些已知或未知的障碍点,无人机航迹规划是从起始点起飞到达目标点结束的过程。在整个飞行过程中,无人机不仅需要确保自身安全,避开障碍物,还要满足自身性能等方面的约束。因此,航迹规划问题可以描述为寻优问题,其目标函数为飞行的路径长度最短,即付出的代价最小;其约束条件:避开障碍物、满足最大曲率限制、路径曲率保持连续。此外,鉴于无人机燃料和时间等方面的约束在一定路径范围内不构成主要约束,可不加以考虑。

假定无人机运动的区域在同一高度范围内,则航迹规划可等效为在二维平面内进行求解。无人机在任意点的信息可用两部分进行描述:所处位置 (x, y) 和速度方向角 ϕ (即速度方向与水平正方向的夹角,在水平方向上方为正,否则为负),即 (x, y, ϕ) 可表示无人机在任意一点带方向的位置,称为位姿点。起始位姿点为 (x_s, y_s, ϕ_s) , 终止位姿点为 (x_t, y_t, ϕ_t) 。则航迹规划可表示为

$$(x_s, y_s, \phi_s) \xrightarrow{(\Pi_{\text{safe}}) \cap (\Pi_{G,k}) \cap (\Pi_{L,k}), r(q)} (x_t, y_t, \phi_t) \quad (1)$$

式中, Π_{safe} 为无人机的安全约束,即能够避开所有的障碍物; $\Pi_{G,k}$ 为无人机的全局曲率约束,即 $K \leq K_{\text{max}}$; $\Pi_{L,k}$ 为无人机的局部曲率约束,即航迹每处曲率的变化是连续的; $r(q)$ 为规划的无人机航迹。

2 改进 PH 曲线的航迹规划算法设计

航迹曲率连续的最低要求是存在二阶连续导数。具有曲率连续的可行路径才是航迹规划问题的可行解。两个位姿点间的最短路径是 Dubins 路径,由圆弧段及与其相切的直线段组成^[4]。显然,曲线的曲率在圆弧段与直线相切的位置出现了跳变。Clothoid 路径同样是由圆弧段和直线段组成,与 Dubins 路径不同的是曲率随路径长度线性变化形成回旋曲线,使路径在直线段与圆弧段间平滑过渡,但其曲线的一阶导数同样在圆弧段与直线段的连接处出现跳变,即曲率非连续变化,且构成该复合路径的生成过程复杂,灵活性差。Farouki 和 Sakkalis 于 1990 年率先提出了 pythagorean hodograph 曲线(PH 曲线),并将 PH 曲线定义为多项式曲线的形式,满足曲率连续变化的最低需求^[4]。

2.1 PH 曲线的基本特性

以 q 为参数的路径 $r(q)$ 的长度可写成

$$h(q) = \int_{q_1}^{q_2} \dot{r}(q) \, dq = \int_{q_1}^{q_2} \sqrt{\dot{x}(q)^2 + \dot{y}(q)^2} \, dq \quad (2)$$

式中, $q \in [q_1, q_2]$, $\dot{x}(q) = dx/dq$ 、 $\dot{y}(q) = dy/dq$ 分别为是 x 方向和 y 方向的速度矢端曲线。

若一条多项式曲线的矢端矢量满足勾股条件,即 $\sigma(q)^2 = \dot{x}(q)^2 + \dot{y}(q)^2$, 便称其为 PH 曲线,曲线长度为 $h(q) = \int_{q_1}^{q_2} |\sigma(q)| \, dq$ 。PH 曲线是具有有理特性的参数化曲线,具

有弯曲能量小,曲线上曲率和长度均有闭合解等优势^[7],在满足曲率连续变化的约束中,拥有独特的优势。一般情况下,路径长度的计算没有闭合解,需要通过迭代法求解,会带来精确性和计算量等问题,而 PH 曲线的路径长度具有闭合解。

PH 路径可写成 Bézier 形式的 n 阶多项式:

$$r(q) = \sum_{k=0}^n b_k \binom{n}{k} q^k (1-q)^{n-k} = \sum_{k=0}^n b_k \frac{n!}{k!(n-k)!} q^k (1-q)^{n-k} \quad (3)$$

式中, $b_k = (x_k, y_k)$ ($k = 1, 2, \dots, n$) 为是控制点, $q \in [0, 1]$ 。 $r(q)|_{q=0}$ 为路径的起点, $r(q)|_{q=1}$ 为路径的终点,此时 q 是被正规化后的路径参数。

PH 曲线多项式的最低阶数是 3 次,才能保证曲率的连续变化,但含有拐点的 PH 曲线的最低阶数是 5 次。拐点可使路径有更好的柔性,进而能更好地规划航迹。因此,本文选取 5 次 PH 曲线进行无人机航迹规划。

5 次 PH 曲线 Bézier 形式的多项式为

$$\begin{aligned} r(q) &= \sum_{k=0}^5 b_k \binom{5}{k} q^k (1-q)^{5-k} \\ &= b_0 C_5^0 q^0 (1-q)^5 + b_1 C_5^1 q^1 (1-q)^4 + b_2 C_5^2 q^2 (1-q)^3 \\ &\quad + b_3 C_5^3 q^3 (1-q)^2 + b_4 C_5^4 q^4 (1-q)^1 + b_5 C_5^5 q^5 (1-q)^0 \\ &= b_0 (1-q)^5 + 5b_1 q (1-q)^4 + 10b_2 q^2 (1-q)^3 \\ &\quad + 10b_3 q^3 (1-q)^2 + 5b_4 q^4 (1-q) + b_5 q^5 \end{aligned} \quad (4)$$

路径 $r(q)$ 的一阶导数为

$$\begin{aligned} \dot{r}(q) &= \frac{dr(q)}{dq} \\ &= 5(b_1 - b_0)(1-q)^4 + 20(b_2 - b_1)q(1-q)^3 + 30(b_3 - b_2)q^2(1-q)^2 \\ &\quad + 20(b_4 - b_3)q^3(1-q) + 5(b_5 - b_4)q^4 \end{aligned} \quad (5)$$

可运用 Hermite 插值方法^[4]进行两位姿点间的插值运算,进而确定连接曲线的形状。文献[8]详细证明了式(4)是一条 PH 曲线,并给出了 5 次 PH 曲线的 Hermite 插值方法。本文仅给出关键的计算公式。

给定 Hermite 插值条件,即曲线的起始和终止位姿点分别为 (x_s, y_s, ϕ_s) 、 (x_t, y_t, ϕ_t) , 利用式(4)和式(5),可确定 5 次 Bézier 曲线的 4 个控制量 b_0, b_1, b_4, b_5 , 即

$$\begin{cases} b_0 = (x_s, y_s) \\ b_5 = (x_t, y_t) \\ b_1 = b_0 + \frac{1}{5}d_0 \\ b_4 = b_5 - \frac{1}{5}d_5 \\ d_0 = (\cos \phi_s, \sin \phi_s) \\ d_5 = (\cos \phi_t, \sin \phi_t) \end{cases} \quad (6)$$

令 α 为 x 轴正方向沿逆时针方向到向量 $(b_1 - b_0)$ 的有向角,并令 β 为向量 $(b_4 - b_5)$ 沿逆时针方向到 x 轴负方向的有向角。记 $\vec{e}_x = (1, 0)$ 为 x 轴正方向, $L_1 = |b_1 - b_0|$, $\vec{e}_{-x} = (-1, 0)$ 为 x 轴负方向, $L_5 = |b_4 - b_5|$ 。可得:

$$\begin{cases} \alpha = \arccos\left(\frac{\vec{e}_x \cdot (b_1 - b_0)}{|\vec{e}_x| \cdot L_1}\right) \\ \beta = \arccos\left(\frac{(b_4 - b_3) \cdot \vec{e}_x}{L_5 \cdot |\vec{e}_x|}\right) \end{cases} \quad (7)$$

则 $L_3 = \frac{1}{3}\sqrt{L_1 L_5}$, $\theta_3 = k\pi - \frac{\alpha + \beta}{2}$ (k 为任意整数), 根据角度表示的周期性, k 可取为 0 或 1。 L_2 和 θ_1 的值则可由以下方程获得 (L_3 、 θ_3 、 L_2 和 θ_1 的具体含义参见文献[8])。

$$w_2 Z^2 + w_1 Z - w_0 = 0 \quad (8)$$

式中, $w_2 = 2L_1(\cos \alpha + i \sin \alpha)/3$, $w_1 = 3w_2/2 + \sqrt{\frac{L_1}{L_5}}(w_{1,1} \cdot w_{2,1})$, $w_{1,1} = \cos(\pi - \theta_3) + i \sin(\pi - \theta_3)$, $w_{2,1} = (x_{b_3} - x_{b_4}) + i(y_{b_3} - y_{b_4})$, $w_0 = (x_{b_4} - x_{b_1} - L_3 \cos(\alpha + \theta_3)) + i(y_{b_4} - y_{b_1} - L_3 \sin(\alpha + \theta_3))$ 。

式(8)一般有两个复根, 分别对应两个 θ_1 的值。由 $Z = \frac{L_2}{L_1}(\cos(-\pi + \theta_1) + i \sin(-\pi + \theta_1))$, 可得:

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{i \operatorname{imag}(Z)}{\operatorname{real}(Z)}\right) + \pi \quad (9)$$

由式(7)~式(9)对 θ_1 和 θ_3 的求解过程可知, θ_1 和 θ_3 分别具有两种不同的取值, 为了后续能得到能量最小、质量最佳的 PH 曲线, 取 $k = 1$, 方程的复根取 $Z = \frac{-w_1 + \sqrt{w_1^2 - 4w_2 w_0}}{2w_2}$, 可获取 θ_1 和 θ_3 的单一值。

进而可得:

$$\theta_2 = \pi + \theta_3 - \theta_1 \quad (10)$$

$$\begin{cases} L_2 = |Z| L_1 \\ L_4 = |Z| \sqrt{L_1 L_5} \end{cases} \quad (11)$$

剩下的两个控制点 b_2 和 b_3 的计算公式为

$$\begin{cases} b_2 = b_1 + L_2(-\cos(\alpha + \theta_1), -\sin(\alpha + \theta_1)) \\ b_3 = b_4 + L_4(-\cos(\beta + \theta_2), -\sin(\beta + \theta_2)) \end{cases} \quad (12)$$

由 PH 曲线 Bézier 形式的 5 次多项式 $r(q)$ 及其一阶导数 $\dot{r}(q)$, 可以获取 PH 曲线的长度和曲率的有理表示。运用 Matlab 进行仿真, 无人机的起始和终止位姿点分别为 (0,5,0) 和 (5,10,0) 可得到 PH 曲线路径及曲率变化的直观表示, 如图 1 和图 2 所示。

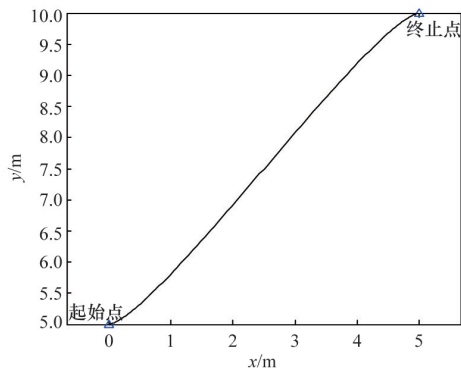


图 1 Bézier 形式的 5 次 PH 曲线路径

Fig. 1 Path of quintic PH curves in the form of Bézier

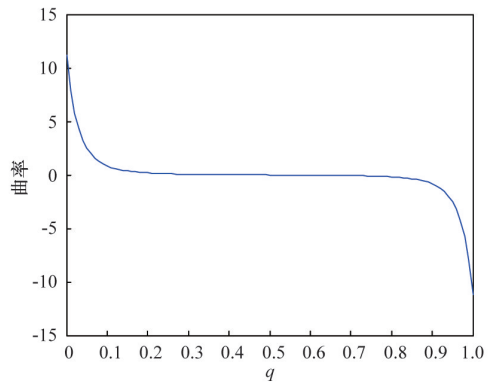


图 2 PH 曲线曲率随路径参数 q 的变化

Fig. 2 Curvature changes of PH curves with path parameter q

可见, PH 曲线的路径和曲率均呈现连续变化, 便于后续的路径长度和曲率计算, 可更好地满足曲率约束限制。曲率值为负, 表示 PH 曲线的凹凸特性发生了改变。

2.2 PH 曲线的改进原理

原始 PH 曲线仅保证了路径曲线的曲率连续变化, 对于无人机的避障安全及最大曲率限制, 还存在一定的欠缺。因此, 需要对原始 PH 曲线进行改进。

从式(6)可以看出, b_0 和 b_5 根据起始和终止位姿点的位置确定, 不能改变; b_1 和 b_4 是在 b_0 和 b_5 的基础上, 随速度方向角而改变, 可考虑不更改方向角的大小, 增加方向矢量的幅值, 即可通过给 d_0 和 d_5 增加控制幅度的系数, 改变控制点 b_1 和 b_4 的值, 进而改变控制点 b_2 和 b_3 的值, 最终改变 PH 曲线的弯曲变化, 同时保留其曲率的连续变化。

$$d_0 = c_0(\cos \phi_s, \sin \phi_s) \quad (13)$$

$$d_5 = c_5(\cos \phi_t, \sin \phi_t) \quad (14)$$

式中, $c_0 \in [1, +\infty]$, $c_5 \in [1, +\infty]$ 。

改变 c_0 和 c_5 的值, 可间接控制 PH 曲线的弯曲变化程度, 但如何确定 c_0 和 c_5 , 使其满足避障和最大曲率的约束, 成为需要解决的问题。一般采用迭代法, 将可飞行路径与 Dubins 路径进行匹配, 以得到满足曲率约束的可飞行路径。但该方法较繁琐, 且需要逐次进行比较, 运算效率较低。

本文采用粒子群算法, 可快速找到避障安全、满足最大曲率约束的可飞行 PH 路径。在使用粒子群算法时, 需要考虑适应度函数的设置和粒子更新速度。

1) 适应度函数的确定。采用 PH 曲线后, 无人机的局部曲率约束 $\Pi_{l,k}$ 已得到满足。因此, 在设定适应度函数时, 只需考虑路径 $h(q)$ 最短的目标函数, 避障安全 Π_{safe} 及最大曲率限制 $\Pi_{G,k}$ 的约束条件。可得适应度函数为

$$\begin{aligned} F &= \omega_h h(q) + \sum_i \omega_{s,i} \Pi_{\text{safe},i} + \omega_G \Pi_{G,k} \\ &= \omega_h \int_0^1 \dot{r}(q) dq + \sum_i \omega_{s,i} \frac{1}{\min(\sqrt{(x(q) - x_{\text{ob},i})^2 + (y(q) - y_{\text{ob},i})^2}) - r_{\text{ob},i}} \\ &\quad + \omega_G \frac{1}{|K_{\text{max}} - \max(K(q))|} \end{aligned} \quad (15)$$

式中, ω_h 、 $\omega_{s,i}$ 、 ω_G 分别代表路径长度、避开第 i 个障碍物及满足最大曲率约束的权值,可根据各项的重要性进行赋值。本文将所有的障碍物均看做圆形, $x_{ob,i}$ 、 $y_{ob,i}$ 、 $r_{ob,i}$ 依次代表第 i 个障碍圆的圆心横坐标、纵坐标及半径。

在处理障碍圆和最大曲率约束时,需要增加判断条件,使适应度函数最小时,满足约束条件。当PH路径与第 i 个障碍圆圆心的最小距离小于 $r_{ob,i}$ 时,将该最小距离值赋值为 $r_{ob,i}$ 。同理,当PH曲线的曲率最大值大于 K_{max} 时,将曲率的最大值赋值为 K_{max} ;当PH曲线的曲率最大值等于 K_{max} 时,将曲率的最大值赋值为 $K_{max} - 1$ 。

2) 粒子速度和位置更新。在标准粒子群算法中,可通过惯性权重 ω 协调 PSO (particle swarm optimization) 算法的全局和局部寻优能力^[9]。假设一个由 M 个粒子组成的群体,在 D 维空间以一定的速度进行搜索,则粒子速度更新方程为

$$v_{id}^{t+1} = \omega v_{id}^t + c_1 r_1 (p_{id}^t - x_{id}^t) + c_2 r_2 (p_{g,d}^t - x_{id}^t) \quad (16)$$

粒子位置更新方程为

$$x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + v_{id}^{t+1} \quad (17)$$

其中, v_{id}^{t+1} 和 x_{id}^{t+1} 分别为粒子 i 在第 d 维方向, $t+1$ 时刻的速度和位置; v_{id}^t 和 x_{id}^t 分别为粒子 i 在第 d 维方向, t 时刻的速度和位置; c_1 、 c_2 为学习因子,分别代表粒子向自身经验的学习和向社会同伴粒子经验的学习,通常取为 2。 r_1 、 r_2 为均匀分布在 $[0,1]$ 区间的随机数。 p_{id}^t 为粒子 i 在第 d 维方向的个体最优位置; $p_{g,d}^t$ 为所有粒子在第 d 维方向的全局最优位置。 ω 为惯性权重,可进行调整,大小决定了粒子对当前速度继承的程度。

Shi 等^[10]提出,若在迭代计算过程中采用线性递减惯性权重,PSO 算法在开始时能够迅速定位到接近全局最优点的区域,而在后期能够精确地得到全局最优解,建议若采用从 0.9 线性递减到 0.4 的策略,通常会获得比较好的算法性能^[11]。则惯性权重的线性递减公式为

$$\omega = \omega_{start} - \frac{\omega_{start} - \omega_{end}}{t_{max}} t \quad (18)$$

式中, ω_{start} 为初始惯性权重,取 0.9; ω_{end} 为终止惯性权重,取 0.4; t_{max} 为最大迭代次数, t 为当前迭代次数。

2.3 算法步骤设计

结合 2.1 节 PH 曲线的基本特性,及 2.2 节 PH 曲线的改进原理。基于改进 PH 曲线的无人机航迹规划具体步骤如下:

1) 给定无人机航迹的起始位姿点 (x_s, y_s, ϕ_s) 和终止位姿点 (x_t, y_t, ϕ_t) , 最大飞行曲率限制 K_{max} , 并将处于飞行平面内的障碍物用圆表示出来,可得 $x_{ob,i}$ 、 $y_{ob,i}$ 、 $r_{ob,i}$ 的具体数值。

2) 标准粒子群算法参数的初始化,粒子数目 M , 搜索空间维数 $D=2$, 搜索空间的上下限 $[l, c_{max}]$, 最大迭代次数 t_{max} 或收敛精度 ξ , 学习因子 c_1 、 c_2 , 粒子速度范围 $[v_{min}, v_{max}]$, 随机初始化搜索粒子的位置 $x_i = (c_{i0}, c_{is})$ 及其速度 v_i ($i=1, 2, \dots, M$)。设每个粒子的当前位置为 p_i , 且视为每个粒子最优位置,记录当前每个粒子的序号及其位置 p_i 。

3) 评价每一个粒子,通过式(4)、式(5)、式(6)、式(12)

计算路径 $r(q)$ 及其一阶导数 $\dot{r}(q)$, 通过计算可获得 $h(q)$ 和 $K(q)$, 将其带入式(15), 可以计算当前每个粒子的适应值;从个体极值中找出全局极值,记录该最优值的粒子序号及其位置 p_g 。

4) 粒子状态的更新。通过式(16)、式(17)对每个粒子的速度和位置进行更新,如果 $v_i > v_{max}$, 将 v_i 置为 v_{max} ; 如果 $v_i < v_{min}$, 将 v_i 置为 v_{min} ; 其他情况保留原值不变。

5) 重新评价每一个粒子。计算当前每个粒子的适应值,如果好于该粒子当前的个体极值,则将 p_i 设置为该粒子的位置,且更新个体极值。如果所有粒子的个体极值中最好的优于当前的全局极值,则将 p_g 设置为该粒子的位置,更新全局极值 p_g 及其序号。

6) 检验是否符合结束条件。如果当前的迭代次数达到预定最大次数 t_{max} , 或最终结果小于预定收敛精度 ξ , 则停止迭代,输出最优解,否则转移到步骤 4。

算法的流程如图 3 所示。

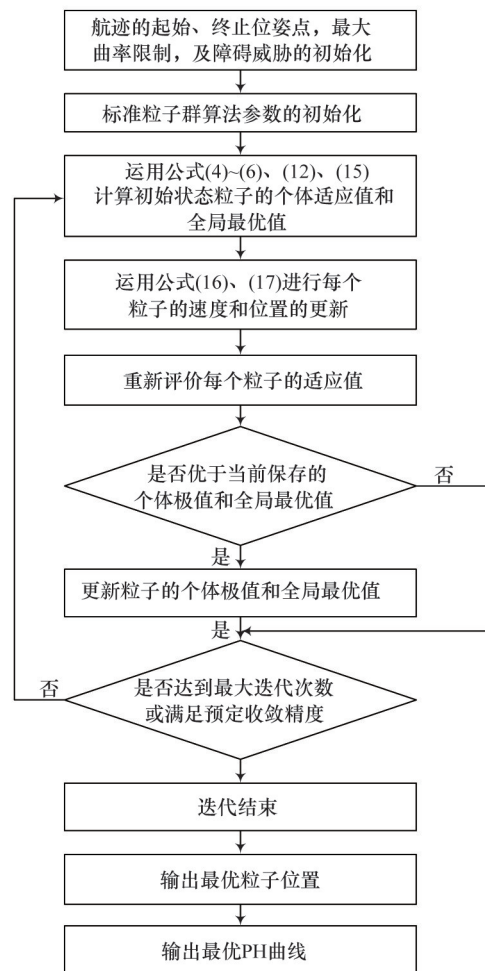


图 3 改进 PH 曲线的算法流程

Fig. 3 Algorithm flow of the improved PH curves

3 算法验证

仿真环境设置:无人机的起始位姿点 $(x_s, y_s, \phi_s) =$

(0 m, 100 m, $\pi/6$), 终止位姿点 $(x_t, y_t, \phi_t) = (500 \text{ m}, 600 \text{ m}, 0)$, 最大曲率约束 $K_{\max} = 0.2$; 处于飞行平面内的障碍圆分布如图4中的圆所示; 粒子数目 $M = 10$, 搜索空间维数 $D = 2$, 搜索空间的上下限 [1, 1000], 最大迭代次数 $t_{\max} = 100$ 或收敛精度 $\xi = 1$, 学习因子 $c_1 = c_2 = 2$, 粒子速度范围 [0.1, 100]。
 $\omega_n = 0.6, \omega_c = 0.2, \sum_i \omega_{s,i} = 0.2$ 。

运用 Matlab 进行仿真, 得到的仿真结果是: 最优粒子位置为 (832.7199, 296.2154); 最优适应度为 436.1038。原始 PH 曲线的长度为 707.1449 m, 见图4中的蓝色点划线; 输出的最优 PH 路径的长度为 725.0187 m, 见图4中的红色曲线; 参考文献[7]模拟遗传退火方法获取 PH 路径, 得出最优适应度为 436.3617, 获取的 PH 路径长度为 725.4531 m, 见图4中的黑色带三角形曲线; 原始 PH 曲线的曲率变化如图5所示; 最优 PH 曲线与模拟遗传退火方法的 PH 曲线的曲率变化如图6所示; 不同方法的适应度函数随迭代次数的变化如图7所示。

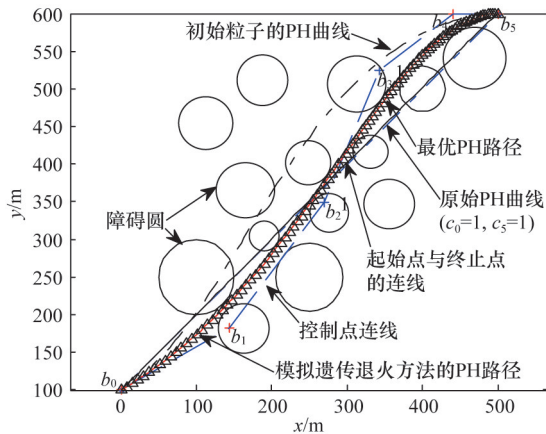


图4 基于PH曲线的无人机最优路径对比
 Fig. 4 Comparison of optimal track for UAVs based on PH curves

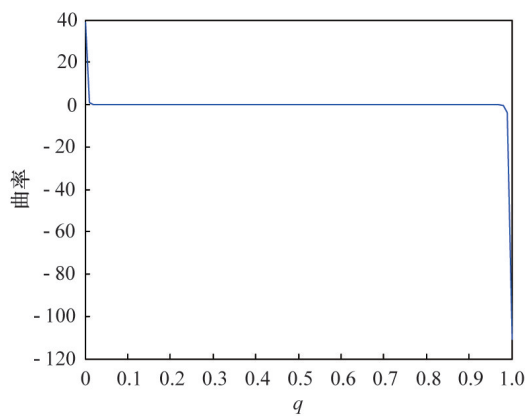


图5 原始PH曲线的曲率随路径参数q的变化情况
 Fig. 5 Curvature changes of the original PH curves with path parameter q

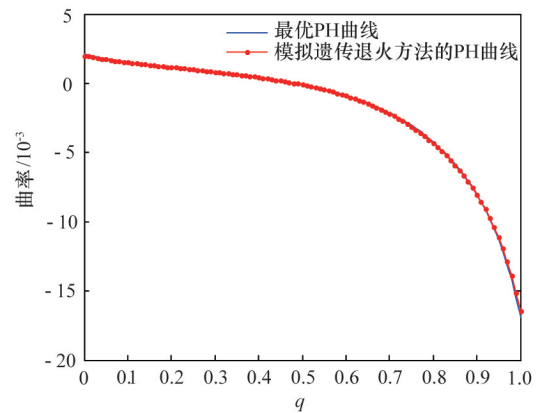


图6 改进PH曲线的曲率随路径参数q的变化情况
 Fig. 6 Curvature changes of the improved PH curves with path parameter q

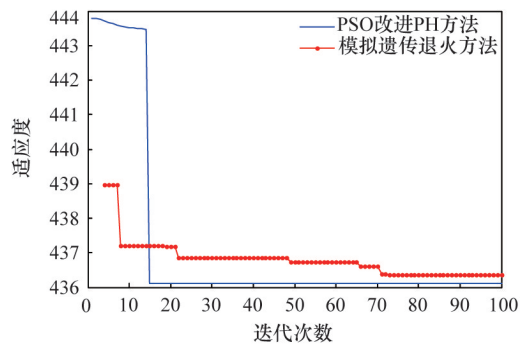


图7 适应度函数随迭代次数的变化趋势
 Fig. 7 Changes trend of fitness function with the number of iterations

从图4可以看出, 原始PH曲线虽然路径较短, 且保持了曲线连续的特性, 但缺乏灵活性, 与多个障碍圆相交, 不能安全避开环境中的障碍物; 随机产生的初始粒子输出的PH路径, 不仅路径增加幅度较大, 而且没有很好地避开障碍物; 最优PH路径较之原始PH路径长度增加了20 m, 但灵活地避开了威胁环境中的障碍物; 文献[7]模拟遗传退火方法获取的PH路径与最优PH路径基本重合, 两者长度差约0.45 m。对比图5和图6可以看出, 原始PH曲线的曲率在临近起始和终止位置处远超出了曲率的最大值0.2, 而最优PH曲线的曲率最大值约0.017, 满足最大曲率限制; 模拟遗传方法的PH曲线的曲率与最优PH曲线的曲率基本重合。从图7可看出, 本文中改进PH方法的适应度函数能够快速收敛, 迭代次数在15左右就达到最优值, 而模拟遗传退火方法的适应度函数虽然在10次以内就快速收敛到较优数值, 但随着迭代次数的增加, 收敛速度降低, 在70次左右才能达到最优数值, 容易陷入局部最优。

因此, 与原始PH曲线相比, 经过改进后的PH曲线灵活性增加, 能够安全避开环境中的障碍物, 满足最大曲率限制, 路径长度增加较少, 仅增加了2.53%; 而且迭代次数较少, 能

够较快得到最优PH路径,此外,通过与参考文献[7]中的模拟遗传退火方法进行比较,两者获取的PH路径基本一致,但在收敛效果上,改进PH方法的收敛速度和效果优于模拟遗传退火方法。验证了改进后的算法性能较好。

4 结论

由于无人机的可飞行路径要求曲率保持连续变化,本文根据PH曲线的特殊性,将PH曲线应用到无人机航迹规划中,保证了规划出的航迹可飞;同时结合粒子群算法的快速搜索特性,可得到避开威胁体、且满足最大曲率限制的最优PH航迹。仿真验证表明,改进PH曲线的算法提高了原始PH曲线的灵活性,且满足各种约束,能够在障碍环境中获得最优航迹,保证无人机航迹的安全可飞。然而在考虑约束当中,对实际情况进行了一定的简化,下一步将研究,考虑无人机长时间飞行,会出现的飞行时间和燃油限制,以及高度的变化等约束下的航迹规划。

参考文献(References)

- [1] 张得舒, 黄长强, 丁达理, 等. 基于A*算法的无人机攻击轨迹解算[J]. 电光与控制, 2011, 18(3): 18-20.
Zhang Deshu, Huang Changqiang, Ding Dali, et al. Attacking track calculation of UAVs based on A* algorithm[J]. Electronics Optics & Control, 2011, 18(3): 18-20.
- [2] 华珊珊. 基于遗传退火算法的无人机航路规划[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(3): 712-715.
Hua Shanshan. Simulation of genetic annealing algorithm for route planning of unmanned aerial vehicle[J]. Computer Measurement & Control, 2013, 21(3): 712-715.
- [3] 倪天权, 王建东, 刘以安. 交叉粒群算法在无人机航路规划中的应用[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(4): 806-810.
Ni Tianquan, Wang Jiandong, Liu Yi'an. Application of particle swarm algorithm in route planning of UAV[J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 33(4): 806-810.
- [4] Tsourdos A, White B, Shanmugavel M. 无人机协同路径规划[M]. 祝小平, 周洲, 王恽, 译. 北京: 国防工业出版社, 2013.
Tsourdos A, White B, Shanmugavel M. Cooperative path planning of unmanned aerial vehicles[M]. Zhu Xiaoping, Zhou Zhou, Wang Yi, tran. Beijing: National Defence Industry Press, 2013.
- [5] 陈小双, 翟为刚, 赵万里. 基于粒子群优化算法的无人机航迹规划[J]. 现代计算机, 2011, 10(25): 8-11.
Chen Xiaoshuang, Zhai Weigang, Zhao Wanli. Route planning for unmanned aerial vehicles based on the particle swarm optimization[J]. Modern Computer, 2011, 10(25): 8-11.
- [6] 王新增, 慈林林, 李俊山, 等. 基于改进粒子群优化算法的无人机实时航迹规划[J]. 微电子学与计算机, 2011, 28(4): 87-90.
Wang Xinzeng, Ci Linlin, Li Junshan, et al. Real-time route planning for UAV based on improved PSO algorithm[J]. Microelectronics & Computer, 2011, 28(4): 87-90.
- [7] 王恽, 祝小平, 周洲. 基于PH曲线的无人机路径规划算法[J]. 计算机仿真, 2013, 30(3): 76-79.
Wang Yi, Zhu Xiaoping, Zhou Zhou. Path planning based on PH curves for unmanned aerial vehicles[J]. Computer Simulation, 2013, 30(3): 76-79.
- [8] 雍俊海, 郑文. 一类五次PH曲线 Hermite插值的几何方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(5): 990-995.
Yong Junhai, Zheng Wen. Geometric method for Hermite interpolation by a class of PH quintics[J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2005, 17(5): 990-995.
- [9] 丁明跃, 郑昌文, 周成平, 等. 无人飞行器航迹规划[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
Ding Mingyue, Zheng Changwen, Zhou Chengping, et al. Route planning for unmanned aerial vehicles[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009.
- [10] Shi Y, Eberhart R, Empirical C. Study of particle swarm optimization [C]//Proceeding of the World Multi-conference on Systemics, Cybernetics and Informatics. Orlando, FL: International Institute of Informatics and Systemics, 2000: 1945-1950.
- [11] 李丽, 牛奔. 粒子群优化算法[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
Li Li, Niu Ben. Particle swarm optimization[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009.

(编辑 陈华姣)

·学术动态·



第13届全国博士生学术年会在广州召开

2015年5月22日,第13届全国博士生学术年会开幕式暨特邀报告会在广州召开。中国科协党组书记、常务副主席、书记处第一书记尚勇,广东省人民政府副省长陈云贤,中船重工集团公司719研究所研究员、中国工程院院士黄旭华,中国科学院广州能源研究所研究员、中国工程院院士陈勇,华南理工大学校长王迎军,“千人计划”专家、宁波江丰电子材料有限公司董事长姚力军,以及来自全国高校和科研院所、广东省高校的博士生代表参加了开幕式。中国科协副主席冯长根主持开幕式及报告会。

结合举办地广东省重点产业发展需求,本届博士生年会的学术交流聚焦在智能制造装备、新能源、新材料、物联网4个专题。

详见中国科协网<http://www.cast.org.cn/n35081/n35096/n10225918/16403636.html>。