

基于改进蚁群算法的飞机 低空突防航路规划

叶文, 范洪达

(海军航空工程学院 军械工程系, 山东 烟台 264001)

摘要: 采用蚁群算法实现了飞机低空突防的航路规划, 为航路规划问题提供了新的解决思路。并对原始蚁群算法进行了改进, 提出了保留最优解、自适应选择策略和自适应信息素调整准则, 有效地提高了算法的收敛速度和求解的性能。最后用计算机进行了仿真, 取得了较好的结果。

关键词: 蚁群算法; 航路规划; 保留最优解; 自适应搜索

中图分类号: V249

文献标识码: A

引言

航路规划是指在特定约束条件下, 寻找运动体从初始点到目标点满足某种性能指标最优的运动轨迹。飞机低空突防航路规划是以实现地形跟随、地形回避和威胁回避飞行为目的的新一代低空突防技术, 其目的就是要利用地形和敌情等信息, 规划出生存概率最大的飞机突防航路。在防空技术日益完善的现代战争中, 航路规划是提高飞机的作战效能, 实施远程精确打击的有效手段^[1,2]。

本文描述了基于蚁群算法的搜索最优(次优)飞机飞行航路的策略。该策略将蚁群算法进行了适当改进, 并提出最优保留方法和自适应搜索方法, 使之适用于飞机低空突防航路规划, 经过蚁群的协同工作, 找到一条优化航路。

1 蚁群算法的原理

研究表明, 蚂蚁具有找到蚁巢与食物之间最短路径的能力。这种能力是靠其在所经过的路径上留下一种挥发性分泌物 pheromone(称为信息素, 该物质随着时间的推移会逐渐挥发消失)来实现的。蚂蚁

在一条路上前进时, 会留下挥发性信息素, 后来的蚂蚁选择该路径的概率与当时这条路径上该物质的强度成正比。对于一条路径, 选择它的蚂蚁越多, 则在该路径上蚂蚁所留下的信息素的强度就越大, 而强度大的信息素会吸引更多的蚂蚁, 从而形成一种正反馈。通过这种正反馈, 蚂蚁最终可以发现最短路径(具体原理可参见文献[3])。

2 问题的描述

2.1 航路的表示

飞机飞行任务区如图1所示, 其飞行任务是从

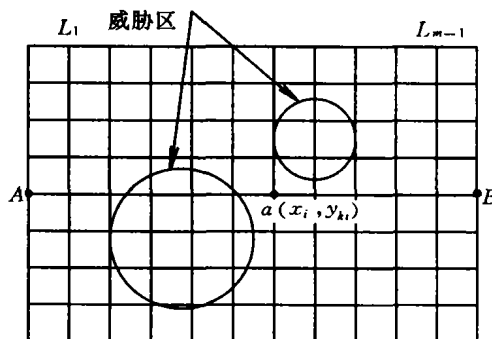


图1 飞机飞行任务区示意图

收稿日期: 2003-05-19; 修订日期: 2004-07-11

作者简介: 叶文(1979-), 男, 安徽黄山人, 硕士, 研究方向为低空突防、航路规划、导航、制导与控制;

范洪达(1940-), 男, 辽宁昌图人, 硕士, 教授/博导, 研究方向为航路规划、导航、制导与控制、C³I 综合信息处理。

A 低空飞行到 B, A 和 B 之间存在威胁区, 飞机航路规划就是搜索出一条从 A 点到 B 点的既短又安全的航路。

设 A, B 点的距离为 L, 飞机允许的最大偏航距离为 C, 由于飞行是一个连续过程, 可能的飞行路线必然在以 AB 为中线, 长为 L, 宽为 2C 的长方形区域内。现在以 A 为坐标原点, AB 方向为 x 轴, 垂直 AB 的方向为 y 轴, 定义坐标系。将线段 AB 进行 m 等分, 在每个等分点作 AB 的垂线, 就得到线段 L_1, L_2, \dots, L_{m-1} , 再以 x 轴为中心, 将每条线段进行 2n 等分, 每条垂线上就有 (2n+1) 个点。在可行飞行区域内, 就有 (m-1)(2n+1) 个路径点 (见图 1), 即:

$$L_1(x_1, y_1), L_1(x_1, y_2), \dots, L_1(x_1, y_{2n+1})$$

⋮

$$L_{m-1}(x_{m-1}, y_1), L_{m-1}(x_{m-1}, y_2), \dots, L_{m-1}(x_{m-1}, y_{2n+1})$$

其中, $L_i(x_i, y_j)$ 表示第 i 条垂线上的第 j 点, 则从起始点 A 到终点 B 的航路可以表示为:

$$\text{Path} = \{S, L_1(x_1, y_{k_1}), L_2(x_2, y_{k_2}), \dots, L_{m-1}(x_{m-1}, y_{k(m-1)}), G\} \quad (k_i = 1, 2, \dots, 2n+1) \quad (1)$$

2.2 航路性能指标

在研究飞机航路优化问题之前, 必须确定优化问题的性能指标, 一般采用如下的代价方程来描述性能指标:

$$J = \int_0^t (w_1 C^2 + w_2 h^2 + w_3 f_{rw}) dt \quad (2)$$

式中, 第一项处罚偏离起始点与目标点连线太大的间距, 使飞机飞行航路最短, 降低其油耗和飞行时间; 第二项使飞行高度 h 极小, 驱使优化算法寻找低高度的飞行航路, 提高地面掩护效果; 第三项处罚与已知地面威胁点靠得太近的飞行航路, 其中 f_{rw} 可看作为当前位置的威胁指标, 该指标综合了该位置处所有可能的威胁信息, 并考虑了地形的遮蔽作用, 使得飞机有效地回避威胁。

本文算法只进行水平方向的航路规划, 不考虑飞机垂直方向上的地形跟随航路, 因此, 这里主要考虑距离和威胁处罚, 即使得优化航路的航程最短, 并且能够安全避开威胁区。目标函数的表达式为^[4]:

$$J = L_k + \delta \sum_{i=1}^{m-1} \frac{1}{d_{i\min}} \quad (3)$$

式中, L_k 为航路的航程距离; $d_{i\min}$ 为节点到最近威胁的距离; δ 为威胁回避系数, δ 越大, 则飞机安全系数就越高。

航路的航程距离为航路上各节点之间直线段距离的和。垂线 L_i 上的路径点 $a(x_i, y_g)$ 到下一个垂线

L_{i+1} 上的路径点 $b(x_{i+1}, y_j)$ 的距离用 $d_{ab} = \sqrt{(|AB|/m)^2 + (y_j - y_g)^2}$ ($j, g = 1, 2, \dots, 2n+1$) 来表示。则航程距离为:

$$L_k = \sqrt{\left(\frac{|AB|}{m}\right)^2 + (y_{k_i} - 0)^2} + \sum_{i=1}^{m-2} \sqrt{\left(\frac{|AB|}{m}\right)^2 + (y_{k(i+1)} - y_{k_i})^2} + \sqrt{\left(\frac{|AB|}{m}\right)^2 + (y_{k(m-1)} - 0)^2} \quad (4)$$

假设飞行任务区域内共有 q 个威胁区, 每个威胁区用圆心为 (x_j, y_j) , 威胁半径为 r_j 的圆来表示, 则节点 (x_i, y_{k_i}) 到威胁区的距离可表示为:

$$d = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_{k_i} - y_j)^2} - r_j$$

因此, 该节点到最近威胁区的距离可表示为:

$$d_{i\min} = \{(\sqrt{(x_i - x_1)^2 + (y_{k_i} - y_1)^2} - r_1), \dots, \sqrt{(x_i - x_q)^2 + (y_{k_i} - y_q)^2} - r_q)\} \quad (5)$$

3 算法的实现

首先, 对飞机飞行区域的网格图上所有节点给出合适的初始值, 形成初始信息素矩阵。在这里, 设定威胁区域内节点处的初始值为 0, 其余各节点的初始值为一常数, 这样, 威胁区域内的各节点处就无气味, 搜索蚂蚁将不会到达该点, 因此, 蚂蚁只会安全区域内进行搜索, 这样搜索得到的航路就很好地回避了威胁。接着, 将蚂蚁全部放在起始点, 一起同时向目标方向行进, 最终到达目标点。每只蚂蚁在行进中运用状态转移规则在其可能到达的下一垂线上各节点集合中进行选择, 在选择时还可以适当添加一些启发式规则, 如在相同值下可优先选择偏离航路方向较小的节点。假设蚂蚁从垂线段 L_i 上的节点 a 到下一个垂线段 L_{i+1} 上任意节点 b 的时间相等, 与距离无关, 那么全部蚂蚁将同时到达目标点, 同时完成一次循环。当所有的蚂蚁都搜索完到达目标点后, 依据各只蚂蚁搜索得到的可行航路的目标函数, 对其上各节点进行全局信息素更新, 对没有经过的各节点只是进行信息素挥发, 重复这个过程, 直到求出优化航路。

3.1 航路点选择准则

在 t 时刻, 蚁群移动到垂线段 L_i 处, 设蚂蚁 k 在点 $a(x_i, y_g)$ 处, $b_j (j = 1, 2, \dots, 2n+1)$ 为线段 L_{i+1} 上

的节点, $\tau(j)$ 为 t 时刻在节点 j 上残留的信息素。蚂蚁 k 在运动过程中, 根据各条路径线上的信息素决定转移方向。 t 时刻蚂蚁 k 由位置 $a(x_i, y_g)$ 转移到 $b(x_{i+1}, y_j)$ 的概率为:

$$p_{kab} = \begin{cases} \frac{\tau_{ab}^a(t) \eta_{ab}^b(t)}{\sum \tau_{ab}^a(t) \eta_{ab}^b(t)} & (b \in \text{安全区域}) \\ 0 & (b \in \text{威胁区域}) \end{cases} \quad (6)$$

式中, η_{ab} 为线段 ab 上的能见度, 为 a 点和 b 点距离的倒数, 即 $\eta_{ab} = 1/d_{ab}$; α 为信息激素物质的相对重要性 ($\alpha \geq 0$); β 为能见度的相对重要性 ($\beta \geq 0$)。

3.2 信息素调整准则

蚂蚁根据状态转移规则通过到达下一个节点的概率来确定要经过的下一点, 重复这个过程, 直到找到目标点 B 。在一次迭代中, 当所有蚂蚁都搜索到一可行路径后, 应用全局更新规则, 对网格图各节点上的信息素进行更新。仅对所有已走过路径上各端点的信息素进行更新, 其它端点的信息素只是进行衰减。全局更新规则如下式所示:

$$\tau(j) = (1 - \rho)\tau(j) + \rho\Delta\tau(j) \quad (7)$$

式中, ρ 为信息素蒸发因子 ($0 < \rho < 1$); $\Delta\tau(j)$ 为全局更新因子, 由下式确定:

$$\Delta\tau(j) = \sum_{k=1}^h \Delta\tau_k(j) \Delta\tau(j) = \sum_{k=1}^h \Delta\tau_k(j)$$

其中:

$$\Delta\tau_k(j) = \begin{cases} \frac{Q}{J_k} & (\text{蚂蚁 } k \text{ 经过节点 } j) \\ 0 & (\text{否则}) \end{cases}$$

式中, Q 为常数; J_k 为蚂蚁 k 在本次循环中搜索到的可行航路目标函数值。

3.3 算法的改进

经仿真发现, 蚁群算法可以有效地解决航路规划问题, 其仿真结果与遗传算法相当。但在仿真过程中发现, 基本的蚁群算法同其它仿生算法一样, 具有会收敛于局部最小值及收敛速度慢等缺陷。为了克服这些缺陷, 提高蚁群算法的全局搜索能力及其搜索速度, 在基本蚁群算法基础上作了以下改进:

(1) 保留最优解

在每次循环结束, 求出最优解, 将其保留。

(2) 自适应航路点选择策略

基本蚁群算法在构造解的过程中, 利用概率随机选择策略, 这种选择策略使得进化速度较慢, 正反馈原理旨在强化性能较好的解, 却容易出现停滞现象。因而从选择策略方面进行修改, 采用确定性选择

和随机选择相结合的选择策略, 并且在搜索过程中动态地调整作确定性选择的概率。当搜索到一定代数后, 搜索方向已经基本确定, 这时适当加大随机选择的概率, 以利于对解空间的更完全搜索, 从而可以有效地克服基本蚁群算法的不足^[5]。

在 t 时刻, 蚁群移动到垂线段 L_i 处, 设蚂蚁 k 在点 $a(x_i, y_g)$ 处, 则按照下式确定蚂蚁 k 下一时刻将到达的节点 j :

$$j = \begin{cases} \max_{u \in \text{安全区域}} \{\tau_{au}^a(t) \eta_{au}^b(t)\} & (r \leq r_0) \\ \text{依概率 } p_{kab}(t) \text{ 选择 } b & (r > r_0) \end{cases} \quad (8)$$

式中, r 为 $(0, 1)$ 中均匀分布的随机数, $r_0 \in (0, 1)$, 随着搜索的进行, 可以动态地调整 r_0 的值。此改进不仅能够加快收敛速度, 节省搜索时间, 而且还能够克服停滞行为的过早出现, 有利于发现更好的解, 十分有利于求解大规模优化问题。

(3) 自适应信息素全局调整准则

当问题规模比较大时, 由于信息素蒸发因子 ρ 的存在, 使那些从没有被搜索到的节点上信息素会减少到接近于 0, 降低了算法的全局搜索能力, 而且 ρ 过小时, 以前搜索过的解被选择的可能性过大, 也会影响算法的全局搜索能力。通过增大 ρ , 虽然可以提高算法的全局搜索能力, 但又会使算法的收敛速度降低。因此, 在本文中, 将自适应地改变 ρ 的值, ρ 的初值为 0.1。当求得的最优值在 N 次循环内没有明显改变时, ρ 增加为:

$$\rho = \begin{cases} 1.05\rho(t-1) & (\rho \leq \rho_{\max}) \\ \rho_{\max} & (\rho > \rho_{\max}) \end{cases} \quad (9)$$

式中, ρ_{\max} 为最大值, 以防止因 ρ 过大而降低算法的收敛速度。

3.4 算法的步骤

采用蚂蚁算法搜索飞机最优航路的步骤为:

(1) 初始化飞行区域网格图上所有节点处的信息素, 形成初始信息素矩阵;

(2) M 只蚂蚁位于起始点 A 等待出发;

(3) 每只蚂蚁根据状态转移规则选择网格图上的下一点, 最终达到目标点, 形成一条可行航路;

(4) 计算各蚂蚁得到的可行航路的目标函数, 保存最优航路解;

(5) 根据目标函数, 依据信息素调整准则(式(7))对各点的信息素进行调整;

(6) 查看最优解, 判断是否需要调整 ρ 的值, 如果需要, 就依据式(9)对其进行调整;

(7) 判断是否满足迭代条件(即达到设定的迭代次数或最小目标函数), 若满足, 则完成搜索; 若不满足

足,则返回步骤(2),重新执行,直到满足迭代条件。

4 仿真实例

假设飞行任务区内有四个威胁区,将威胁区域简化为圆形,将起始点 A 到目标点 B 进行 60 等分。蚁群算法的参数经实验确定为: $\alpha=3$, $\beta=3$, $Q=100$ 。这里启用了 20 只蚂蚁,分别应用原始的蚁群算法和改进的蚁群算法进行仿真,经过 100 次计算,其实验结果如图 2 和图 3 所示。图 2 为 $\rho=0.2$, $\delta=0.1$

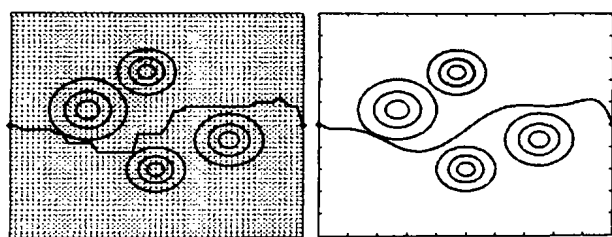
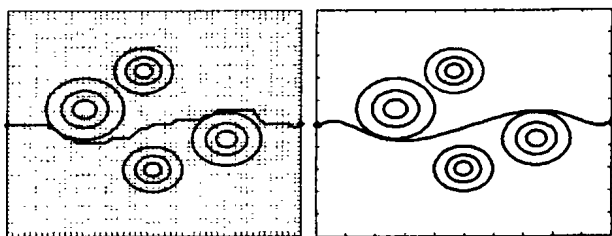
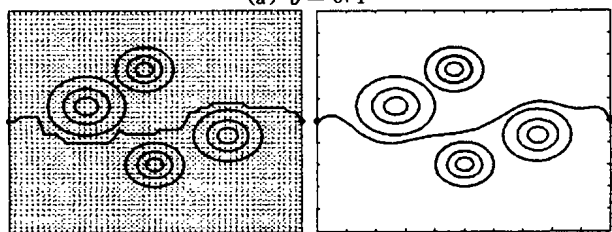


图 2 原始蚁群算法优化航路及其拟合航路



(a) $\delta = 0.1$



(b) $\delta = 0.9$

图 3 改进蚁群算法优化航路及其拟合航路

时的原始蚁群算法优化航路及其拟合航路;图 3 为 $\rho=0.1$, $r_0=0.7$ 时的改进蚁群算法优化航路及其拟合航路。仿真结果显示该算法可以有效地解决飞机低空突防航路规划问题,算法中通过调整威胁回避系数,可以得到不同的优化轨迹,从而扩展了飞机对具体问题的适应性。

5 结束语

利用蚁群算法对解决飞机低空突防航路规划问题进行了讨论,仿真结果表明,蚁群算法可得到较优的可行解,为航路规划问题提供了新的解决思路。本文对原始蚁群算法进行了改进,提出了保留最优解、自适应选择策略和自适应信息素调整准则,有效地克服了收敛速度慢、易于限于局部最小值的缺陷,改进算法相对于原始的蚁群算法来说,收敛速度和解的性能都有一定的提高。蚁群算法的研究刚刚起步,还有许多问题有待解决,但仿真结果表明了蚁群算法在解决航路规划等优化问题方面有良好的前景。

参考文献:

- [1] 闵昌万,袁建平. 军用飞行器航迹规划综述[J]. 飞行力学,1998,16(4):14-19.
- [2] 高 晖,陈 欣,夏云程. 无人机航路规划研究[J]. 南京航空航天大学学报,2001,33(2):135-138.
- [3] 张素兵,刘泽民. 基于蚂蚁算法的时延受限分布式多播路由研究[J]. 通信学报,2001,22(3):70-74.
- [4] 金飞虎,洪炳熔,高庆吉. 基于蚁群算法的自由飞行空间机器人路径规划[J]. 机器人,2002,24(6):526-529.
- [5] 王 颖,谢剑英. 一种自适应蚁群算法及其仿真研究[J]. 系统仿真学报,2002,14(1):31-33.

Low Altitude Penetration Route Planning of the Plane Based on Improved Ant Colony Algorithm

YE Wen, FAN Hong-da

(Department of Armament Engineering, Naval Aeronautical Engineering Academy, Yantai 264001, China)

Abstract: The ant colony algorithm is a new class of popular basic algorithm. The route planning is realized by the use of ant colony algorithm when the plane executes the low altitude penetration, which provides a new method for the route planning. In the paper, the original ant colony algorithm is improved, and measures of keeping optimization, adaptively selecting and adaptively adjusting are applied, which can find better path at higher convergence speed. Finally the algorithm is implemented with computer simulation and preferable results are obtained.

Key words: ant colony algorithm; route planning; keeping optimization; adaptively adjusting

(编辑:姚妙慧)