

# 基于蚁群算法的无人机航路规划

柳长安, 李为吉, 王和平

(西北工业大学 航空学院, 陕西 西安 710072)

**摘要:**为了提高无人机(UAV)作战任务的成功率,在执行敌方防御区域内攻击任务前必需规划设计出高效的无人机飞行航路,保证无人机能够以最小的被发现概率及可接受的航程到达目标点。针对这一问题,对新近发展的蚁群算法进行了讨论,提出适用于航路规划的优化方法,并对无人机的攻击任务航路进行了仿真计算。仿真结果表明该方法是一种有效的航路规划方法。

**关键词:**无人机;航路规划;蚁群算法;生物信息激素

**中图分类号:**V279 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2004)02-0009-04

蚁群算法(Ant Algorithm)是一种新型的概率搜索算法,它利用生物信息激素(Pheromone/Stigmergy)作为蚂蚁选择后续行为的依据,并通过蚂蚁的协同来完成寻优过程。这种算法具有一些特点和优点,本文对蚁群算法在航路规划中的应用进行了一些讨论。

## 1 航路规划问题

如果把无人机进入敌方防御区域的方位作为起始点,而把战役/战术攻击目标所处方位定为目标点,通过对规划空间进行网格划分形成连接起始点和目标点的网络图,则寻求优化航路问题的本质就是路径优化问题。这种方法是一种确定性状态空间搜索方法,可以减小规划空间的规模,降低了航路规划的难度<sup>[1-2]</sup>。假设无人机在执行任务过程中保持高度不变、速度不变,而且考虑敌方防御区处于平坦地域,那么无人机就无法利用地形因素进行威胁回避机动,航路规划问题就可以被简化成为一个二维航路(也就是水平航路)规划问题<sup>[3-5]</sup>。由于水平航路规划仍然需要考虑无人机在执行作战任务过程中的生存性和执行任务的有效性,并且考虑规划算法的实时性,所以仍是较为特殊的优化问题<sup>[3]</sup>。

### 1.1 航路优化指标

本文常采用低于某一探测性指标,而且具有可接受航程的航路作为任务航路,按最短航路和最小可探测性航路加权方法计算代价函数作为描述航路的性能指标<sup>[4-5]</sup>

$$\min W = \int_0^L [kw_t + (1-k)w_f] ds \quad (1)$$

式中: $L$ 为航路的长度; $W$ 为广义代价函数; $w_t$ 为航路的威胁代价; $w_f$ 为航路的油耗代价;系数 $k$ 表示根据任务安排,航路制订人员在制订航路过程中所做出的倾向性选择。油耗代价是航程的函数。威胁代价与无人机的可探测性指标相关联,而可探测性指标是根据无人机的雷达可探测概率计算的。

### 1.2 边的代价权重

在对节点进行搜索过程中,依据式(1)计算网络图中每条边的代价权值,以第 $i$ 条边为例有下式:

$$w_i = kw_{t,i} + (1-k)w_{f,i} \quad (0 \leq k \leq 1) \quad (2)$$

式中: $w_i$ 为第 $i$ 条边的广义代价; $w_{t,i}$ 为第 $i$ 条边的威胁代价; $w_{f,i}$ 为第 $i$ 条边的油耗代价。在本文计算中,系数 $k$ 简单地取为0.9。

收稿日期:2003-06-30

作者简介:柳长安(1974-),男,陕西西安人,博士生,主要从事无人机航路规划方法研究;  
李为吉(1939-),男,陕西西安人,教授,博士生导师,主要从事优化方法研究。

本文简单地认为敌方防御区域内的各个雷达均相同且无相互联系,并对雷达威胁模型进行了简化处理,认为雷达信号正比于  $1/d^4$  ( $d$  是无人机到敌方雷达、导弹威胁阵地的距离),故当无人机沿网络图的第  $i$  条边飞行时,两节点间的威胁代价可近似地认为正比于  $1/d^4$  沿这条边的积分,文中简单地将该条边划分为 5 段进行计算,见图 1,故有式(3)。

$$w_{i,j} = L_i \sum_{j=1}^N \left( \frac{1}{d_{0.1,i,j}^4} + \frac{1}{d_{0.3,i,j}^4} + \frac{1}{d_{0.5,i,j}^4} + \frac{1}{d_{0.7,i,j}^4} + \frac{1}{d_{0.9,i,j}^4} \right) \quad (3)$$

式中:  $L_i$  为第  $i$  条边的长度,  $N$  为雷达、导弹等威胁阵地的数目,  $d_{0.1,i,j}$  等为第  $i$  条边的 1/10 处距第  $j$  个威胁点的距离。

另外,速度一定情况下可简单认为  $w_f = L$ , 则有  $w_{f,i} = L_i c$ 。

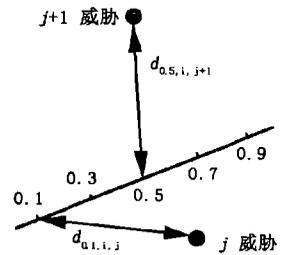


图 1 威胁代价的计算

## 2 蚁群算法

### 2.1 算法的原理

在蚁群算法中,一只蚂蚁在行动中留下一些信息激素能被同一蚁群中后来的蚂蚁感受到,并作为一种信号影响后到者的行动,而后到者留下的信息激素会对原有的信息激素进行加强,并如此循环下去。这样,经过蚂蚁越多的路径,被后到蚂蚁选中的可能性就越大。由于在一定的时间内,越短的路径会被越多的蚂蚁访问,因而积累的信息激素也就越多,在下一个时间内被其他蚂蚁选中的可能性也就越大。这个过程会一直持续到几乎所有的蚂蚁都走最短的那一条路径为止<sup>[6-7]</sup>。

从数学角度来看,蚂蚁构建的这一连接巢穴和食物源的路网组成了最小树,使得蚂蚁在道路上为搜寻食物和把食物搬运到巢穴所消耗的能量最小。图论的知识已为我们提供了计算最小树的算法,但蚂蚁采用了散布生物信息激素的方法来协同搜索最小树。这一全局最优的道路结构会随着不同个体在路网中散布生物信息激素并感知其它蚂蚁留下的气味而逐步浮出水面<sup>[8]</sup>。

### 2.2 算法的实现

模仿蚂蚁的这种行为方式,在求解航路规划问题时,将  $m$  个人工蚂蚁定位于起始点,每个蚂蚁使用一定的状态转换规则按式(4)从一个状态转到另一个状态(即从一个节点转到另一个节点),直到最终到达目标点,完成一条候选航路(航路规划问题的一个可行解)。在所有  $m$  个蚂蚁都完成了各自的候选航路选择后,再利用生物信息激素修改规则按式(5)利用当前  $m$  条候选航路以及历史上得到的一条代价最小的候选航路信息修正网络图中各条边的生物信息激素强度。这一修正过程模拟了蚂蚁释放生物信息激素以及生物信息激素的自然挥发作用。生物信息激素的修改规则可以引导蚂蚁搜索到问题的最优解。上面提到的两个规则可表示如下<sup>[6-7]</sup>。

#### 2.2.1 蚂蚁状态转换规则

一个人工蚂蚁选择新可行节点的概率是由两节点间的边的代价以及生物信息激素的强度决定的,按式(4)计算的概率从当前节点  $r$  转换到可行节点  $s$ :

$$P_k(r,s) = \begin{cases} \frac{\tau(r,s)^\alpha \cdot \eta(r,s)^\beta}{\sum_{s \in J_k(r)} \tau(r,s)^\alpha \cdot \eta(r,s)^\beta} & s \in J_k(r) \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $P_k(r,s)$  表示蚂蚁  $k$  从节点  $r$  转移到节点  $s$  的概率;  $\tau(r,s)$  表示蚂蚁储存在边  $V(r,s)$  上的生物信息激素强度;  $\eta(r,s)$  表示节点  $s$  相对于节点  $r$  的可见性,  $\eta(r,s) = 1/c_{rs}$ ,  $c_{rs}$  表示边  $V(r,s)$  的代价;  $J_k(r)$  是第  $k$  个蚂蚁由节点  $r$  可以到达的所有可行节点集合,这些节点均是节点  $r$  的相邻节点,而且它们比节点  $r$  更接近目标点;  $\alpha, \beta$  为控制参数,确定生物信息激素和可见性的相对重要性。蚂蚁从状态  $r$  转移到状态  $s$  所选可行节点的概率会随着生物信息激素强度的增大而增大,随着通路代价的增大而减少<sup>[6-7]</sup>。

#### 2.2.2 生物信息激素修改规则

一旦所有蚂蚁完成了各自候选航路的选择过程(找到一条航路规划问题的可行解),必须对各边上的生物信息激素作一次全面的修正,修正规则如下:

$$\tau(r,s) \leftarrow (1-\rho)\tau(r,s) + \rho \cdot [\Delta\tau(r,s) + e \cdot \Delta\tau^e(r,s)] \quad (5)$$

式中:  $\Delta\tau(r, s) = \sum_{k=1}^m \Delta\tau^k(r, s)$ ;  $\Delta\tau^k(r, s) = \begin{cases} Q/W_k & \text{边 } V(r, s) \text{ 属于 } k \text{ 候选航路} \\ 0 & \text{不属于} \end{cases}$ ;  $\Delta\tau^e(r, s) =$

$\begin{cases} Q/W_k & \text{边 } V(r, s) \text{ 属于当前最好的候选航路} \\ 0 & \text{不属于} \end{cases}$   $0 < \rho < 1$  是参数,用来蒸发储存在边上的生物信息激素

以减弱原有的信息。 $W_k$  是蚂蚁  $k$  选择的航路的广义代价,而  $W_e$  是当前最小的航路代价, $m$  是蚂蚁数。生物信息激素修正的目的是分配更多的生物信息激素到具有更小威胁代价航路的边上,这类似于增强学习格式中的算子<sup>[4]</sup>,如遗传算法中的选择算子。这个修正规则不仅存储生物信息激素,还适当地蒸发它们。修正规则不是由个别蚂蚁来实现,而是通过图的边来存储,起到了一个分布式长期记忆的效果<sup>[6-7]</sup>。

### 2.3 算法总结

根据上述的原理和规则,采用蚂蚁算法求解航路规划问题的过程可归纳为:

Begin

nc ← 0; (nc 为迭代次数)

初始化;

Repeat

将各蚂蚁置于航路的起始点;

按转移概率将各蚂蚁由当前节点移动到可行的相邻节点,直到各只蚂蚁到达目标点;

按修正原则修改更新生物信息素强度;

记录当前蚂蚁选择的最佳航路;

Until nc 大于预定的迭代次数;

End

## 3 仿真计算

图 2 描述了无人机的任务示意图。敌方阵地大小为 60 km × 60 km,其中三角形代表无人机,矩形方块代表目标点,圆点代表雷达、导弹等威胁阵地,其具体方位见表 1。进入敌方防御区域后,无人机需要根据自身所处的威胁环境完成航路优化计算。为了制订、规划出

一条连接起始点及目标点的航路,文中以起始点为原点进行网格划分,将敌方区域划分为 2 km × 2 km 的正交网络图,则各节点即为无人机的可行途经节点,其坐标也随之确定。

表 1 威胁点及起始点和目标点坐标方位

|       |         |           |    |         |    |           |
|-------|---------|-----------|----|---------|----|-----------|
| 起始点坐标 | (0,0)   |           |    |         |    |           |
| 目标点坐标 | (36,48) |           |    |         |    |           |
|       | 编号      | 坐标        | 编号 | 坐标      | 编号 | 坐标        |
| 威胁点坐标 | 1       | (33.5,52) | 2  | (31,43) | 3  | (40.5,50) |
|       | 4       | (30,48)   | 5  | (40,46) | 6  | (36,43)   |

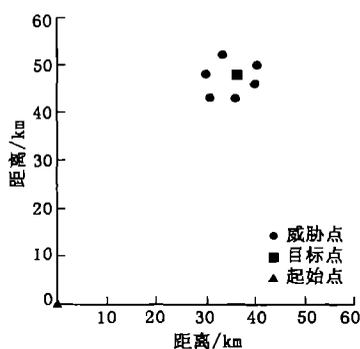


图 2 任务示意图

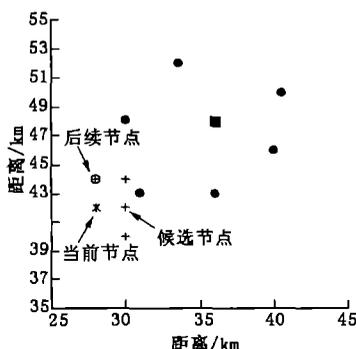


图 3 后续节点的选择

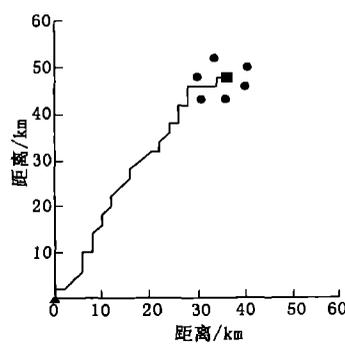


图 4 优化航路

为了确定无人机依次经过的可行节点,文中采用上述基于蚁群算法的航路规划方法,利用仿真技术对无人机任务航路进行了规划,其中各参数的取值分别为: $\alpha = 1. , \beta = 1.1, e = 2. , \rho = 0.5, Q = 15. , m = 50$ 。在其中一步转移过程中蚂蚁是这样搜索各自路线的:当前蚂蚁  $k$  所处节点坐标为(28,42),如图 3 中星号所示。可供选择的可行节点有 4 个,分别为(28,44)、(30,44)、(30,42)和(30,40),如图 3 中加号所示。依据式(2)可计算出连接这 4 个节点的边的代价分别是 0.224、0.302、0.841、0.481,此时刻各条边的生物信息激素强度为

0.01、0.015、0.011、0.013,根据式(4)可计算出由该节点出发的各条边的选择概率分别是0.345、0.373、0.088、0.194。蚂蚁 $k$ 会按轮盘赌依据各条边的选择概率从这四个节点中选择该节点的后续节点,其坐标为(28,44),如图3中圆圈所示。依次类推,最终得到的优化航路如图4所示,从中可以看出飞行航路尽可能远离威胁点,避开了敌方防空阵地。

## 4 结论

本文提出了一种基于蚁群算法的无人机航路规划方法,能够保证在航路制订时得到一条具有较小可探测概率及可接受航程的无人机飞行航路。可以看出,这种航路规划方法具有如下特点:

1)在蚂蚁不断散布生物信息激素的加强作用下,新的信息会很快被加入到环境中。而由于生物信息激素的蒸发更新,旧的信息会不断被丢失。体现出一种动态特性。

2)由于许多蚂蚁在环境中感受散发的生物信息激素同时自身也散发生物信息激素,这使得不同的蚂蚁会有不同的选择策略,具有分布性。

3)最优路线是通过众多蚂蚁的合作被搜索得到的,并成为大多数蚂蚁所选择的路线,这一过程具有协同性。

这些特点与未来战场的许多要求是相符的,因而采用蚁群算法对无人机的航路进行规划具有重要意义,应继续对其进行深入研究、探讨。

### 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] Ma Tao, Ben Abbott. Optimal Route Re-planning for Mobile Robots: A Massively Parallel Incremental A\* Algorithm [A]. Proc. of IEEE Conference on Robotics and Automation [C]. 1997:2727-2733.
- [3] 邱晓红,张林昌,高金源. 战术飞行任务的水平航迹快速生成算法[J]. 北京航空航天大学学报,1996,22(6):775-779.
- [4] Timothy W M, Randal W B. Trajectory Planning For Coordinated Rendezvous of Unmanned Air Vehicles [R]. AIAA-2000-4339-CP,2000.
- [5] Chandler P R, Rasmussen S. UAV Cooperative Path Planning [R]. AIAA-2000-4370-CP,2000.
- [6] 彭斯俊,黄樟灿,刘道海,黄小为. 基于蚂蚁系统的 TSP 问题的新算法. 武汉汽车工业大学学报[J],1998,20(5):88-92.
- [7] 马良,项培军. 蚂蚁算法在组合优化中的应用. 管理科学学报[J],2001,4(2):32-37.
- [8] H Van Dyke Parunak, Michael Purcell, Robert O Connell. Digital Pheromones for Autonomous Coordination of Swarming UAV's [R]. AIAA-2002-3446-CP,2002

(编辑:姚树峰)

## Path Planning for Reconnaissance UAV Based on Ant Algorithm

LIU Chang-an, LI Wei-ji, WANG He-ping

(Aeronautical Institute, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China)

**Abstract:** To improve the efficiency of UAV in combat mission, a highly effective flight path for the UAV in the execution of the mission should be planned before the mission. This can ensure that the UAV should arrive at the target with a higher survivability and an acceptable path length. In view of this problem, this paper presents an optimal method of path planning based on the Ant Algorithm. The simulation results show that the method has some good characteristics and is effective in path planning.

**Key words:** UAV; path planning; Ant Algorithm; pheromone/stigmergy