

doi: 10.7690/bgzd.2014.05.002

基于元胞蚂蚁算法的防空靶机航路规划研究

刘志强¹, 雷宇曜², 阳再清¹

(1. 中国人民解放军 92419 部队, 辽宁 兴城 125106; 2. 海军航空工程学院兵器科学与技术系, 山东 烟台 264001)

摘要: 防空靶机飞行航路设计是实现靶机有效控制, 确保高效完成供靶任务的保障。通过对靶机三维航路规划模型进行分析, 给出了元胞蚂蚁算法的航路规划模型的求解方法及算法实现的具体流程, 并分别应用蚁群算法和元胞蚂蚁算法进行仿真实验。结果表明: 元胞蚂蚁算法克服了蚁群算法收敛速度慢、陷于局部最小值的缺陷, 可得到较优的航路。

关键词: 元胞蚂蚁算法; 防空靶机; 飞行航路

中图分类号: TJ06 **文献标志码:** A

Route Planning of Anti-Air Target Drone
Based on Cellular-Ant Colony AlgorithmLiu Zhiqiang¹, Lei Yuyao², Yang Zaiqing¹

(1. No. 92419 Unit of PLA, Xingcheng 125106, China; 2. Department of Ordnance Science & Technology, Naval University of Aeronautics & Astronautics, Yantai 264001, China)

Abstract: The design of the flight airway of anti-air target is essential to the effective target control and the high effective completion of target supply task. Through the analysis of the three-dimensional airway design model, the solution method and corresponding algorithm flow of the cellular-ant colony algorithm is provided in this paper. The simulation experiment of the ant colony and cellular-ant colony algorithms is carried out, which shows that the cellular ant algorithm over comes the ant colony algorithm disadvantages of the slow convergence and local optima, and it is able to obtain optimal airway.

Keywords: cellular-ant colony algorithm; anti-air target; flight airway

0 引言

防空靶机作为无人飞行器, 其飞行航路规划就是在综合考虑靶机有效飞行时间、装载燃油及耗油率、有效航程、测控距离、供靶次数及安全性、空间威胁及可飞行区域等因素的前提下, 规划出一条最优的飞行航迹。笔者采用元胞蚂蚁算法对某型防空靶机飞行航路进行了优化设计, 合理设计飞行航路, 提高供靶效率^[1-2]。

1 航迹规划建模

笔者涉及的防空靶机是某大型无人机飞行器, 采用火箭助推发射、地面遥控与自主导航相结合的飞行控制模式, 发射后可自主或人工控制完成供靶飞行。该型无人机采用 GPS+航迹推算组合方法进行自主导航飞行, 同时地面指挥员可通过遥测信息及地面雷达信息对无人机进行遥控飞行; 因此, 防空靶机航迹规划路径主要内容靶机发射后程序飞行路径、三维位置信息调整路径、任务飞行路径及坠毁路径。总之, 防空靶机的航路规划是在三维空间中进行搜索, 采取对三维空间进行网格划分方法, 可以得到若干个节点, 设防空靶机在航迹路径上的

某一点的坐标为 (x, y, z) , 其中 x 、 y 表示经纬度, z 表示高度, 则航迹规划空间可以表示为集合 $\{(x, y, z) \mid 0 \leq x \leq \max X, 0 \leq y \leq \max Y, 0 \leq z \leq \max Z\}$, 在实际航路规划中, 需将该空间区域离散化, 从而得到离散化的规划空间。

1.1 性能指标选择

性能指标选择的好坏决定了航路规划的好坏, 通常情况下, 防空靶机的航路规划性能指标主要为油耗代价及安全代价。油耗代价主要由发动机特性、飞行航迹及飞行高度决定; 安全代价主要由规划航程及航点到威胁点距离决定。文中威胁点只考虑航路内影响测控的高山和禁飞区^[3]。

防空靶机的油耗代价通常表示为:

$$W_a = c_i L_i + W_1 \quad (1)$$

其中: W_a 为防空靶机油耗; c_i 为靶机发动机耗油率; L_i 为靶机每阶段航程; W_1 为不可消耗用油。

安全代价通常表示为:

$$W_b = L + \delta \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{d_{i\min}} \quad (2)$$

其中: W_b 为防空靶机安全; L 为防空靶机规划航路航程; δ 为规划航路危险点的回避系数; $d_{i\min}$ 为规划

收稿日期: 2013-12-14; 修回日期: 2014-04-02

作者简介: 刘志强(1974—), 男, 辽宁人, 学士, 工程师, 从事无人机设计与论证、无人供靶使用研究。

航点到威胁点的距离。

综合分析，选择以下函数作为性能指标：

$$\min W = k_1 W_a + k_2 W_{bc} \quad (3)$$

因此，代价函数可变为：

$$\min W = k_1 \left(L + \delta \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{d_{i,\min}} \right) + k_2 (c_i L_i + W_1) \quad (4)$$

式中， k_1 和 k_2 为权值系数，可根据不同的任务要求进行调整。

1.2 航迹约束条件

基于自身的物理限制和使用要求，防空靶机在飞行过程中需要满足一定的航迹基本约束条件，主要包括^[4]：

1) 最小步长 L_{\min} ：该条件限制了靶机改变姿态前必须直飞的距离。该条件必须满足：

$$l_i \geq L_{\min} \quad (i=1, \dots, n) \quad (5)$$

其中 l_i 为靶机每阶段的飞行航迹。

2) 最大偏转角 γ_{\min} 和最大爬升角/俯冲角 θ_{\max} ：该条件限制了靶机在水平方向和垂直方向偏转的最大。假设靶机当前及下一点节点坐标分别为 (x_1, y_1, z_1) 和 (x_2, y_2, z_2) ，则必须满足式 (6)、式 (7)：

$$\left| \arctan \frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)} \right| \leq \gamma_{\min} \quad (6)$$

$$\left| \arctan \frac{(z_2 - z_1)}{(x_2 - x_1)} \right| \leq \theta_{\max} \quad (7)$$

3) 最大航程 L_{\max} ：该条件限制了靶机的最大飞行航程。该条件必须满足：

$$\sum_i \|l_i\| \leq L_{\max} \quad (8)$$

其中 $\|l_i\|$ 为各阶段航程矢量 l_i 的长度标量。

4) 最大飞行高度 H_{\max} 和最小飞行高度 H_{\min} ：该条件限制了靶机飞行高度的最大值和最小值。该条件必须满足：

$$H_{\min} \leq H \leq H_{\max} \quad (9)$$

5) 最大偏航距 d_{\max} ：该条件限制了靶机在供靶段偏航的最大值。该条件必须满足：

$$0 \leq d \leq d_{\max} \quad (10)$$

以上描述了防空靶机航迹规划应满足的基本条件，满足以上约束的飞行航迹称为可行航迹。

2 基于元胞蚂蚁算法的防空靶机航路规划

2.1 元胞蚂蚁算法基本思想

元胞蚂蚁算法的基本思想是采用元胞自动机原

理对在蚂蚁算法的最优解进行更新操作，使其去掉局部极值，局限于一个局部范围；更新完毕后，重复采用蚁群算法搜索及元胞自动机更新，从而得到最终的规划航路^[5]。

在靶机航路规划中，不同系列航路点的组合组成了不同的航路，假设把每一条航路作为一个元胞，所有可行航路的集合就是全体元胞空间。因此航路是由飞行区域中在 $m-1$ 条竖线各取一点所形成的组合，可表示为：

$$\text{Path} = \{S, L_1(x_1, y_{k1}), L_2(x_2, y_{k2}), \dots, L_{m-1}(x_{m-1}, y_{m-1}), G\} \quad (k=1, 2, \dots, 2n+1) \quad (11)$$

所以，元胞空间 C 即是靶机可以飞行航路的集合，可表示为：

$$C = (\text{path}_1, \text{path}_2, \dots, \text{path}_n) \quad (12)$$

在元胞空间中，通过计算元胞间的目标函数值来确定元胞的选择，从而选择最优的元胞进行更新得到最优解。也就是说，将当前搜索的最优航路作为当前元胞，通过比较相邻元胞间的目标函数值，选择最优目标函数值作为最优航路进行更新，并用该元胞对应的最优航路来替换当前航路。

2.2 元胞蚂蚁算法实现流程

2.2.1 选择准则

元胞蚂蚁算法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确定性选择的概率。

在 t 时刻，蚁群移动到水平段 L_i 处，假设某一蚂蚁在点 $a(x_i, y_g)$ 处，那么该蚂蚁下一时刻到达的节点为：

$$j = \begin{cases} \max_{u \in \text{安全区域}} \{ \tau_{au}^\alpha(t) \eta_{au}^\beta(t) \} & (r \leq r_0) \\ \text{依概率 } p_{kab}(t) \text{ 选择 } b & (r > r_0) \end{cases} \quad (13)$$

式中：

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

其中 r 满足 $(0, 1)$ 范围内随机分布， $r_0 \in (0, 1)$ 。 α 、 β 为调节信息强度 τ 和启发式信息 η 的参数。

2.2.2 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，通过反复判断，直到找到目标点 B 。在每次迭代中，所有蚂蚁都搜索

到一条可行航路后，再利用全局更新规则对航路图上各节点的信息素进行更新^[6]。全局更新规则为

$$\tau(j) = (1 - \rho)\tau(j) + \Delta\tau(j) \quad (14)$$

其中：

$$\rho = \begin{cases} 1.05\rho(t-1) & (\rho \leq \rho_{\max}) \\ \rho_{\max} & (\rho > \rho_{\max}) \end{cases} \sqrt{b^2 - 4ac}$$

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

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

其中： Q 表示信息素强度； ρ 为信息素蒸发因子； ρ_{\max} 为最大值。信息素更新完毕后，对其进行阈值判断选择，即

$$\tau(j) = \begin{cases} \tau_{\min} & (\text{若 } \tau(j) < \tau_{\min}) \\ \tau(j) & (\text{若 } \tau_{\min} < \tau < \tau_{\max}) \\ \tau_{\max} & (\text{若 } \tau(j) > \tau_{\max}) \end{cases}$$

2.2.3 算法实现流程

采用元胞蚂蚁算法对防空靶机进行航路规划的步骤如下：

- 1) 建立飞行区域初始信息素矩阵；
- 2) 将蚁群中 N 只蚂蚁准备在起始点，并利用蚂蚁算法计算每只蚂蚁可行航路的目标函数，得到最优航路解；
- 3) 根据元胞自动机原理及元胞演化规则，计算最优解元胞邻居的目标函数，并对当前最优解进行更新；
- 4) 根据目标函数依据信息素调整准则对各点的信息素进行调整；
- 5) 查看最优解，判断是否需要信息进行信息素蒸发因子 ρ 的调整；
- 6) 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，则返回步骤 2)，重新执行，直到满足为止。

3 仿真实验

在仿真实验中，假设无人机从点(0,0,0)飞至点(600,600,20)，区间内有 3 个危险区域，坐标及半径分别为：(100,300)，75；(270,100)，75；(520,550)，40。蚁群算法的参数设定为 $\alpha=4$ ， $\beta=6$ ， $Q=100$ 。在仿真中采用 20 只蚂蚁，循环次数为 20 次， d_{\min} 为路径上每一点到危险点的最近距离， H 为每一点的高度， L 为航程， W 为加权后最优性能指标，仿真时间与 M 和 I 的乘积成正比；因此，蚁群算法和元胞蚂蚁算法的优化结果见表 1。

表 1 2 种算法的优化结果

算法	优化结果				时间/s
	$1/d_{\min}$	H	L	W	
蚁群算法	8.433 7	133	1 157	490	321.6
元胞蚂蚁算法	8.213 2	76	1 025	430	246.8

将 2 种情况仿真得到的曲线见图 1 和图 2。

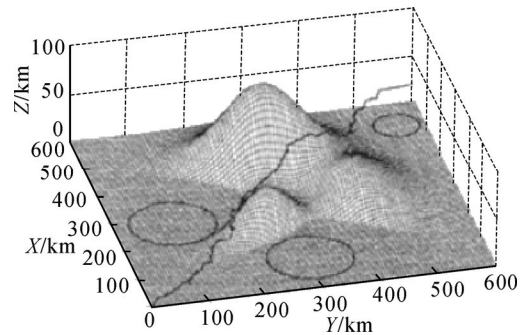


图 1 蚁群算法无人机三维航线

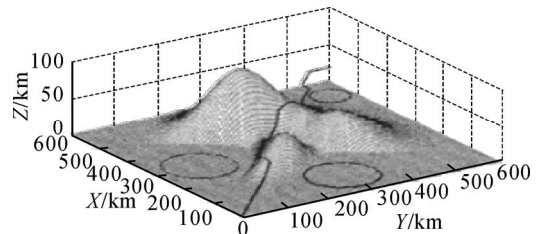


图 2 元胞蚂蚁算法无人机三维航线

仿真实验结果表明，元胞蚂蚁算法可得到较优的航路。

4 结束语

元胞蚂蚁算法是对标准蚁群算法进行改进，通过蚁群算法与元胞自动机理论相结合方法，采取自适应选择策略、自适应信息素调整准则等措施，有效克服了收敛速度慢、易于限于局部等缺陷。故元胞蚂蚁算法能提高防空靶机飞行航路规划的性能。

参考文献：

- [1] 樊琼剑, 杨忠, 方挺, 等. 多无人机协同编队飞行控制的研究现状[J]. 航空学报, 2009, 30(4): 683-691.
- [2] 袁利平, 陈宗基, 周锐, 等. 多无人机同时到达的分散化控制方法[J]. 航空学报, 2010, 31(4): 797-805.
- [3] Ren W, Chao H, Bourgeois W, et al. Experimental validation consensus algorithms for multivehicle cooperative control[J]. IEEE Transactions on Control System Technology, 2008, 16(4): 745-752.
- [4] 叶文, 范洪达, 朱爱红. 无人飞行器任务规划[D]. 北京: 国防工业出版社, 2011, 6(5): 100-108.
- [5] Zhao S Y, Zhou R. Cooperative guidance for multi-missile salvo attack[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2008, 21(6): 533-539.
- [6] 郝永军, 周德云. 多无人机协同攻击路径规划研究[J]. 计算机仿真, 2010, 27(3): 69-72.