

基于改进粒子群算法的对地攻击最优航迹规划

曹 晖^{1,2}, 王 瑾¹, 李震宇¹, 贺 刚^{1,2}

(1. 空军工程大学综合电子信息系统与电子对抗技术研究中心, 陕西西安, 710051;
2. 空军工程大学装备管理与安全工程学院, 陕西西安, 710051)

摘要 提出了一种基于粒子群算法的战斗机空地攻击航迹规划模型, 针对传统算法收敛精度低的问题, 基于算法参数和迭代公式做了改进。通过构造战斗机作战攻击中面对敌防空火力、地形等威胁要素和战斗机战术性能等各种约束条件, 设计了一种适用于战斗机航迹性能评价函数作为粒子群的适应度函数, 用 VC++ .NET 进行算法仿真并将最优航迹在 MATLAB 中显示。仿真结果表明: 改进后的粒子群算法规划出的最优航迹能较好地实现威胁规避, 较传统算法收敛精度高, 运算速度快, 满足了战斗机机动性能约束和航程较短要求, 且规划的效率和精度较高。

关键词 空地攻击; 改进粒子群算法; 航迹规划

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.01.005

中图分类号 V249 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2013)01-0020-05

Air to Ground Attack Route Planning by Using Method of PSO

CAO Hui^{1,2}, WANG Jin¹, LI Huan-yu¹, HE Gang^{1,2}

(1. Research Center for Integrated Electronic & Information System and Electronic Countermeasure Technology, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;
2. Equipment Management and Safety Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: According to the route planning of air-to-ground attack of a fighter, this paper proposes a model of programming the air-to-ground airline based on PSO. Because the traditional arithmetic is low in constringency precision, based on the algorithm parameters and iterative expressions, the traditional algorithm is improved. Through constructing a variety of constrain conditions during attacking and fighting, such as antiaircraft fire, landform, technique and tactic performance of fighters etc., VC++ .NET is used to conduct the algorithm simulation and the optimal airline is shown in MATLAB. The result suggests that the optimal route programmed by the modified PSO has a better performance of avoiding the threat, which satisfies the requirement of constrain technique and tactic performance and shorter voyage of fighters. And furthermore, the planning is better and higher in efficiency and precision.

Key words: air to ground attack; DPSO; route planning

航迹规划作为实施远程精确打击, 提高飞行器 作战效能的有效手段, 广泛应用于各类巡航导弹、武

收稿日期: 2012-05-22

基金项目: 陕西省电子信息系统综合集成重点实验室基金资助项目(201102Y02)

作者简介: 曹 晖(1988-), 男, 安徽太湖人, 硕士生, 主要从事战术数据链与武器协同数据链研究。

E-mail: eminemkelly@gmail.com

装直升机、战斗机的任务规划系统中^[1-2]。战斗机要突入敌地面防空火力网攻击地面目标^[3-4],战前作战航迹规划具有非常大的现实意义。航迹规划使用的算法主要有稀疏 A-Star 搜索算法、遗传算法和粒子群算法等。其中粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)虽易于操作、收敛速度快且调整参数少,但收敛精度不高、利用信息不充分,在每次迭代时,仅仅利用了个体极值和全局极值的信息^[5]。针对这些缺点,本文提出了基于算法参数和进化迭代公式的改进方法。

1 航迹规划理论

要实现地形跟随、地形回避和威胁回避,规划出的航迹必须满足战斗机性能的约束,生存概率大,可有效规避敌防空火力威胁。航迹规划空间是一个预先设定好分布着敌防空火力威胁的区域, (x, y, z) 定义为规划空间内某一点的坐标, x, y 表示经纬度, z 表示高度,则航迹的规划空间表示为:

$$S = \{(x, y, z) \mid 0 \leq x \leq X_{\max}, 0 \leq y \leq Y_{\max}, 0 \leq z \leq h_{\max}\} \quad (1)$$

图 1 为 MATLAB 模拟的平面规划空间模型, 为一个 $1\,000\text{ km} \times 1\,000\text{ km}$ 的正方形区域。模型中把防空威胁区域、地面雷达、地形威胁在这个截面上都等效看成是中心位置固定、有一定威胁半径的圆, 设定起始点 A 和目标点 E, 寻找一条从 A 到 E 的最优路径。

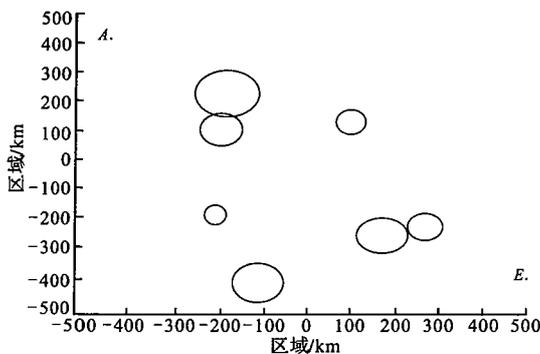


图 1 规划空间模型图

Fig. 1 Planning space model diagram

战斗机实际的飞行航迹是三维空间上的连续曲线,航迹规划通常是通过规划算法得出一系列可行的特征点即航迹点,连接形成最终航迹。一条航迹实际上是一组航迹点序列。该航迹表示在水平面上的投影或某个高度截面的二维平面航迹,见图 2。实心圆点即为航迹点,3 个圆圈表示威胁覆盖区域。

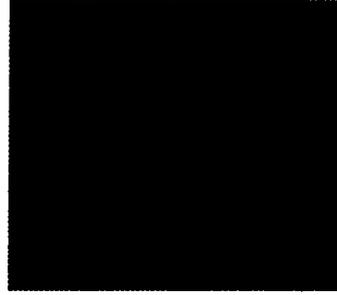


图 2 航迹的二维投影

Fig. 2 2D projection of the track

2 改进粒子群算法(DPSO)

将 PSO 初始化为一组随机解,通过迭代搜寻最优值^[6]。粒子在每一次迭代中,通过跟踪 2 个极值来更新自己:一个是粒子本身的最优解,即个体极值 p_i ;另一个是整个种群的最优解,即称为全局极值 p_g ^[7-8]。本文改进后的粒子群算法表达式如下:

$$v_{ik}(t+1) = \omega v_{ik}(t) + (u_1 c_1 r_1 [p_{ik}(t) - x_{ik}(t)] + u_2 c_2 r_2 [p_{ik}(t) - x_{ik}(t)] + c_3 r_3 [p_{gk}(t) - x_{ik}(t)]) / \Delta t \quad (2)$$

$$x_{ik}(t+1) = x_{ik}(t) + \frac{v_{ik}(t+1) + v_{ik}(t)}{2} \Delta t \quad (3)$$

式中: $p_{ik} = (x_{1k} + x_{2k} + \dots + x_{mk}) / m$, m 为粒子数; Δt 表示每次迭代所需的时间步长。

与标准的 PSO 算法相比,改进后的算法引入了 2 个参数 u_1, u_2 , 用来刻画个体极值和平均极值在速度更新过程中的作用。另外,为了更好地约束速度的变化,符合飞行实际,将单位时间改成时间步长 Δt , 把位置迭代公式中的 $v_{ik}(t+1)$ 改成 $[v_{ik}(t+1) + v_{ik}(t)] / 2$ 。加速常数 c_1, c_2, c_3 是固定常数,一般设为 2。 r_1, r_2, r_3 为 $[0, 1]$ 区间上正态分布的随机数。惯性权重 ω 较大时有利于全局寻优,较小时有利于局部寻优。研究表明, ω 线性递减有利于寻找最优解,计算如下:

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{g_{\max}} g \quad (4)$$

式中: $\omega_{\max}, \omega_{\min}$ 分别为惯性权重的初始值和最终值; g_{\max} 为最大迭代次数, g 为当前迭代次数。 u_1, u_2 的取值要确保改进后公式的平衡性,令 $u_1 c_1 + u_2 c_2 = 2$ 。 $m, g_{\max}, \Delta t$ 和最大速度 v_{\max} 都需要在仿真实现时具体设定。

3 基于改进算法的最优航迹规划

用粒子群优化算法规划航迹的主要思想是用函数表达航迹的水平投影和规划的约束条件^[9],使航

迹规划问题变成在函数的系数空间中寻找最佳系数组合问题。

3.1 航迹评价函数和威胁规避

见图 3,由起始点 A 向不同方向随机产生 m 个粒子组成初始的粒子种群,假设全局最优点为粒子 1,则其下一步的速度方向基本保持不变,而其它粒子将受到全局极值和平均极值的吸引产生速度分量,与其本身速度进行矢量合成得到下一步速度。最优航迹的产生不是从 m 条航迹中选一条,而是依次连接每一步的全局极值点得到。通过航迹评价函数和威胁规避策略得到的航迹能规避威胁,且航迹较短^[10]。

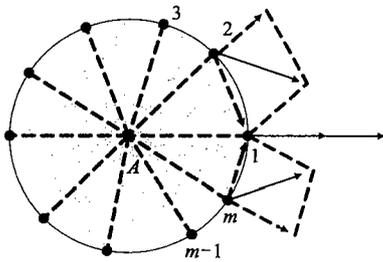


图 3 粒子群算法规划航迹的示意图
Fig. 3 PSO planning path diagram

战斗机空地攻击时在完成攻击目标的基础上要求航程尽量短,同时满足战斗机的机动性能约束。但是在设计评价函数时,很难把所有约束条件都考虑在公式中,本文只考虑“航程尽量短”这个因素,将当前航迹点与目标点的直线距离最短视为最优位置。因此航迹的评价函数可以设计为:

$$F = \sqrt{[x_{\text{end}} - x(t)]^2 + [y_{\text{end}} - y(t)]^2} \quad (5)$$

式中: $(x_{\text{end}}, y_{\text{end}})$ 表示目标点的坐标, $[x(t), y(t)]$ 表示当前时刻航迹点的坐标。

图 4 为规避威胁处置的示意图。在实际作战中,模拟战斗机的飞行趋势即将进入威胁区,此时的粒子群收敛速度较快。当前最优点向航迹左(或右)偏离一个 θ 角(θ 必须满足战斗机的机动性约束),如果左右偏离后都能找到不经过威胁区的航迹,则判断最终的航程长短,以较短航程为最优航迹;如果有一条航迹穿过威胁区,则取另一条为最优航迹;如果两条航迹都穿过威胁区,则把当前全局最优值点 $x_1(t)$ 退回上一个全局最优值点 $x_1(t-1)$,重复以上步骤,直至找到最优航迹。

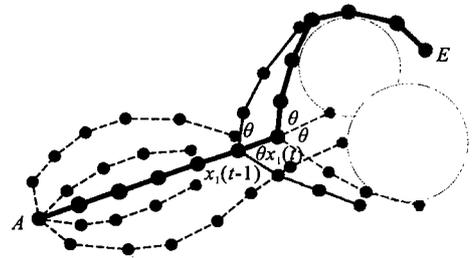


图 4 规避威胁处置示意图

Fig. 4 Avoid threat disposal plan

3.2 航迹规划中战斗机的适应度函数

利用 PSO 算法进行航迹规划时,算法中的适应度函数等同于其他算法的性能指标函数,即航迹规划的优劣通过适应度函数的计算来评价。在战机的航迹规划中,除了要求到达目标的距离越短越好^[5,11],还需要考虑以下几个因素:

1) 飞行高度。在保证最低飞行高度的前提下实现低空突防,设最小离地飞行高度为 $f_h(x_i)$,则:

$$\min f_h(x_i) = h(x_i)/h \quad (6)$$

式中: $h(x_i)$ 为战机的当前高度; h 为战机的实用升限。

2) 航迹长度。限制战机必须在一定燃料供应量或作战半径内完成任务返航。如果没有给定航迹长度的极大值,则要规划出尽可能短的航迹,即:

$$\min f_l(x_i) = l(x_i)/l \quad (7)$$

式中: $l(x_i)$ 为待选航迹节点到目标点的距离; l 为起始点到目标点的距离。

3) 威胁规避。战机需要规避雷达探测威胁和火力威胁。雷达接收到的回波信号越少,越难做出正确判断,战机生存概率就越高。攻击威胁是指敌防空火力击中飞机的概率,其值由武器本身性能决定。则战场上战机受到的威胁就是攻击概率 b_j 和探测概率 T^{detect} 的乘积^[6],可计算为:

$$f_{TA} = b_j T^{\text{detect}} = \max_{j=1}^n \frac{b_j k_j^{\text{detect}}}{D_j^4} = \max_{j=1}^n \frac{k_j}{D_j^4} \quad (8)$$

式中: k_j 是一个常数,随威胁源 j 变化; D_j 为战机距威胁源 j 的距离; n 为威胁源总数。式(8)说明距离威胁源越远战机越安全,即规避威胁度应满足:

$$\min f_{TA}(x_i) = \max_{j=1}^n \frac{1}{\sum_{j=1}^n d_j^4(x_i)} \quad (9)$$

式中 $d_j(x_i)$ 为航迹节点 x_i 到威胁源 j 的距离。这里对不同威胁源的 k_j 值均设为 1,即威胁度相同。

综合以上因素,航迹规划的模型为:

$$\begin{aligned} \min F &= \lambda_1 f_h(x_i) + \lambda_2 f_l(x_i) + \lambda_3 f_{TA}(x_i) \\ \text{s. t. } & \lambda_1 \geq 0, \lambda_2, \lambda_3 \leq 1, \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1, \quad (10) \end{aligned}$$

$$\sum_{i=1}^n l(x_i) \leq L, x \leq X_{\text{max}}, y \leq Y_{\text{max}}$$

式中 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 为 3 个加权因子,可以根据决策者不

同的战略、战术意图取值; L 为战机的作战半径; X_{max}, Y_{max} 为坐标约束条件。

4 仿真分析

分别利用 PSO 算法和 DPSO 算法进行仿真,结果见图 5,具体步骤如下:

1) 规划空间模型。建立一个 $1\ 000\ \text{km} \times 1\ 000\ \text{km}$ 的方形区域,使最后得出的航迹长度基本不超出作战半径;水平最大转弯角 α 设为 70° ;航迹最小步长 L_{min} 设为 $5\ \text{km}$;粒子的最大飞行速度以战机最大巡航速度 $0.8\ Ma$ 为依据设为 $v=250\ \text{m/s}$,规划过程中若超过最大速度,则把当前速度设为 v_{max} 。

2) 规划空间中威胁的设置。整个规划空间截面的高度取为 $1\ 500\ \text{m}$ 。假设远程地空导弹的有效防御半径为 $80\ \text{km}$,近程导弹的有效防御半径为 20

km ,地形环境中山峰的截面半径为 $5\ \text{km}$ 。

3) 算法规划的结束条件。假设机载空地导弹的有效射程为 $60\ \text{km}$,只要粒子搜索到以目标为中心、 $60\ \text{km}$ 为半径的圆内,即可满足结束条件。

图中攻击机由起始点 A 出发攻击目标点 E ,途中要经过 2 个部分重叠的威胁圈;由起始点 A 随机产生 100 个不同方向的粒子分布于图中左上角的圈上,该圈称为种群迭代的初始位置。

综合分析仿真结果,PSO 算法寻优迭代 54 次,而 DPSO 算法迭代 51 次就达到结束条件。另外,虽然都找到了规避威胁的最优航线,但改进后的 PSO 算法求解出的最优航线长度明显较短,规划的时间也较少,为 $2.58\ \text{s}$,而改进前则需 $3.25\ \text{s}$ 。原始 PSO 算法后期收敛性不强,局部搜索精度不高。而加入平均极值后规划的航迹收敛性好、精度较高,能得到最优航迹。最优航迹图见图 5(c)。

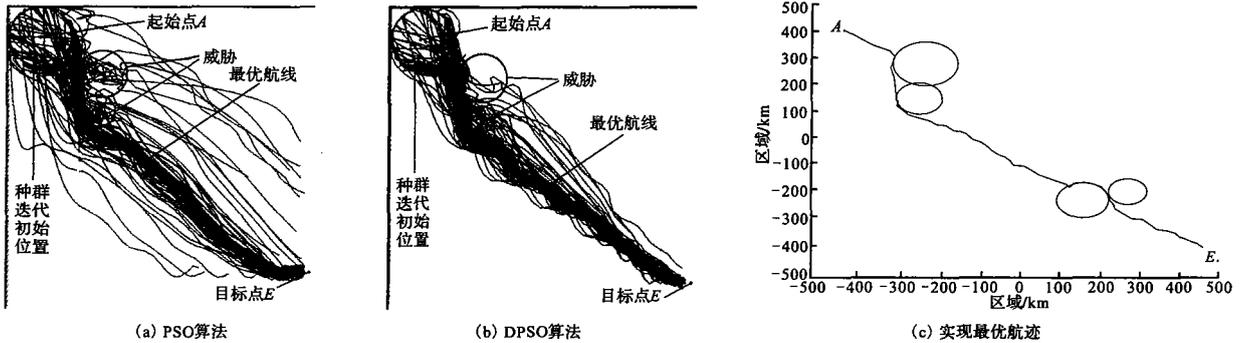


图 5 PSO 算法改进前后规划航迹及最优航迹实现

Fig. 5 PSO algorithm and the improved planning track and optimal path to realize

DPSO 算法产生的航迹点的坐标值、全局极值及平均极值的部分坐标见表 1。其中起始点坐标为 $(-400, 400)$,目标点坐标为 $(500, -400)$,每个粒子的个体极值即比较每次迭代后的坐标和目标点距

离。由表 1 可以看出,每个粒子不断受到个体极值、全局极值、平均极值的吸引,向全局极值靠拢,最终收敛于目标点附近。

表 1 最优航迹实现过程的坐标记录

Tab. 1 The optimal path to realize the process of coordinate record

坐标记录	迭代次数							
	1	2	3	4	...	50	51	
粒子 1	X	-312.64	-293.47	-287.56	-291.80	...	411.22	425.96
	Y	351.34	329.05	303.01	288.39	...	-381.63	-381.94
粒子 2	X	-306.01	-294.22	-299.42	-300.43	...	414.87	444.11
	Y	434.14	424.26	394.26	364.26	...	-295.43	-325.43
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
粒子 100	X	-466.81	-470.13	-448.44	-418.44	...	366.68	396.68
	Y	325.59	320.03	336.10	342.51	...	-366.10	-379.80
全局极值点	X	-321.75	-294.32	-278.78	-281.72	...	454.82	474.31
	Y	337.74	327.48	304.68	281.74	...	-369.06	-388.07
平均极值点	X	-397.66	-388.90	-372.42	-355.26	...	399.86	417.65
	Y	405.13	398.62	385.52	371.21	...	-335.19	-350.64

5 结语

本文结合空地攻击特点,给出了战机在规避地面威胁后的空地攻击航迹规划方法,并应用改进 PSO 算法对航迹进行了优化。利用 VC++、NET 和 MATLAB 工具仿真实现了最优航迹的生成和显示。仿真结果表明,用改进的粒子群算法规划出的最优航迹能较好地实现威胁规避,满足了战斗机在作战攻击中的各类性能要求,且规划的效率和精度较高,提高了实际应用价值。文中的规划方法基于威胁源已知且固定不变,如果威胁源发生了动态变化,则需要进行实时的动态航迹规划,本文下一步将对此进行研究。

参考文献(References):

- [1] 郑昌文,严平,丁明跃,等. 飞行器航迹规划研究现状与趋势[J]. 宇航学报,2007,28(6):1141-1146.
ZHENG Changwen, YAN Ping, DING Mingyue, et al. Research status and trend of route planning for flying vehicles[J]. Journal of astronautics,2007,28(6):1141-1146. (in Chinese)
- [2] 陈前洋. 飞行器并行航迹规划算法研究[D]. 武汉:华中科技大学,2005.
CHEN Qianyang. Vehicle parallel path planning algorithms[D]. Wuhan: Huazhong university of science and technology,2005. (in Chinese)
- [3] 唐强,张新国,刘锡成. 一种用于低空飞行的在线航迹重规划方法[J]. 西北工业大学学报,2005,23(2):271-275.
TANG Qiang, ZHANG Xinguo, LIU Xicheng. Exploring an online method of vehicle route re-planning for low altitude flight [J]. Journal of northwest industry university, 2005, 23(2): 271-275. (in Chinese)
- [4] 王铀,赵辉,臧守飞,等. 考虑多约束的UCAV对地攻击航迹规划[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2012,13(6):6-10.
WANG You, ZHAO Hui, ZANG Shoufei, et al. Research on air-to-ground trajectory planning for UCAVs [J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2012,13(6):6-10. (in Chinese)
- [5] 焦巍,刘光斌,张金生,等. 基于粒子群算法的地磁匹配航迹规划[J]. 系统工程理论与实践,2010,11(6):2107-2110.

- JIAO Wei, LIU Guangbin, ZHANG Jinsheng, et al. Geomagnetic matching path planning based on PSO algorithm[J]. Systems engineering-theory & practice, 2005,23(2):271-275. (in Chinese)
- [6] Kennedy J, Eberhart R. Swarm intelligence[M]. San Francisco, CA: Morgan kaufman publishers,2001.
- [7] Mason Z. Programming with stigmergy: using swarms for construction[M]. Artificial life III, Abba-ss B, Massachusetts: MIT press,2002;371-374.
- [8] Kennedy J, Eberhart R C. Particle swarm optimization[C]//Proceedings of IEEE international conference on neural networks. Perth, Australia: IEEE press,1995.
- [9] 吴亮红,王耀南,袁晓芳,等. 复合最优模型微粒群优化算法研究及应用[J]. 系统工程与电子技术,2006,28(7):1087-1090.
WU Lianghong, WANG Yaonan, YUAN Xiaofang, et al. Research and application compound optimum model particle swarm optimization[J]. Systems engineering and electronics,2006,28(7):1087-1090. (in Chinese)
- [10] 李炜,张伟. 基于粒子算法的多无人机任务分配方法[J]. 控制与决策,2010,9(5):1360-1363.
LI Wei, ZHANG Wei. Method of tasks allocation of multi-UAVs based on particles swarm optimization [J]. Control and decision, 2010,9(5):1360-1363. (in Chinese)
- [11] 丁达理,宋磊,贺建良,等. 基于 Voronoi 图和离散微粒群优化算法的UCAV攻击轨迹决策[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2012,13(2):2-3.
DING Dali, SONG Lei, HE Jianliang, et al. Attack trajectory decision-making for UCAV based on voronoi diagram and DPSO algorithm[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition,2012,13(2):2-3. (in Chinese)

本刊相关链接文献:

- [1] 姚佩阳,薛艺莉,王冬旭. 迎头抢攻飞行轨迹数学建模及评估[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2010,11(2):6-10.
- [2] 韩贝贝,舒涛,程永强,等. 基于混合粒子群算法的通用导弹固定平台布局优化[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2010,11(4):42-46.
- [3] 丁达理,宋磊,贺建良,张洪波. 基于 Voronoi 图和离散微粒群优化算法的UCAV攻击轨迹决策[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2012,13(2):1-5.

(编辑:徐敏)