

基于粒子群优化算法的低空突防航迹规划

成玉柱¹, 李站生², 陈晓鹏¹

(1. 南京陆军指挥学院, 江苏 南京 210045; 2. 国防科学技术大学, 湖南 长沙 410073)

摘要: 针对飞机低空突防的约束性问题, 提出了运用粒子群优化算法来对飞机低空突防进行航迹规划的方法。首先, 说明了飞机突防需要满足的物理限制和战术要求。其次, 根据低空突防航迹规划约束多、计算复杂的特点引入粒子群优化算法, 并且对其进行简要的介绍。应用粒子群优化算法对低空突防战术进行航迹规划。最后实验结果表明, 该方法能够对飞机低空突防过程规划出可行的飞行航迹。

关键词: 低空突防; 航迹规划; 粒子群优化算法

中图分类号: E917

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1673-3819.2014.04.010

Low Altitude Penetration Technology Based on Particle Swarm Optimization

CHENG Yu-zhu¹, LI Zhan-sheng², CHEN Xiao-peng¹

(1. Nanjing Army Command Academy, Nanjing 210045;

2. National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: This paper attempts to discuss flight path planning to low altitude penetration tactical by using Particle Swarm optimization. First, physical limitation and tactical requirement of low altitude penetration for flight are analyzed. Then, Particle Swarm optimization is introduced based on the restrains of flight path planning and the complicated calculations, and Particle Swarm optimization is introduced in brief. The paper makes flight path planning by using Particle Swarm optimization. At last, experiments demonstrate that the method can plan the feasible path for low altitude penetration.

Key words: low altitude penetration; flight path planning; Particle Swarm optimization

低空突防是现代空袭作战运用最普遍、突防效果最好的一种方式。据有关资料统计, 飞机以大于马赫数的速度中高空突防, 被地面雷达发现的概率为100%; 而若以低空突防, 被地面雷达发现的概率降至20%以下。因此, 抗低空突防被列为当前雷达“四抗”内容之一, 成为各国雷达情报系统中的一个重要研究课题。受地表面强杂波、地球曲率、地球多径效应和地形起伏的影响, 低空空域是大多数雷达探测的盲区, 因此, 低空是现代防空火力的薄弱空域^[1]。

本文在分析飞机突防需要满足的物理限制和战术要求的基础上, 运用粒子群优化算法对飞机进行航迹规划, 使得飞机具有地形跟随、地形回避、威胁回避等能力, 并且通过实验验证了航迹的可行性。

1 航迹规划决策模型

飞机低空突防航迹规划的目的是要找到一条能够保证飞机安全突防的最优飞行航迹, 既要满足飞机的物理限制, 又要满足低空突防的战术要求; 既要尽量减

少被敌防空设施捕获和摧毁的概率, 又要降低坠毁的概率, 因此在航迹规划中需要满足多种因素的限制。

1.1 飞机突防需要满足的战术要求

飞机低空突防需要满足的战术要求包括以下几个方面。

1) 地形跟随(如图1所示): 飞行按预定的最小离地高度在垂直平面内随地形的变化作机动飞行。这种突防方式, 可利用地形掩护, 也可以以较短的航程到达目的地。

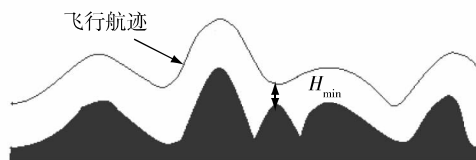


图1 地形跟随示意图

2) 地形回避(如图2所示): 飞机在水平平面内作机动飞行, 飞绕山峰等高大障碍物。这种低空突防方式能充分利用地形作掩护, 不易被敌方发现。

3) 威胁回避(如图3所示): 飞机在水平平面内作机动飞行, 避开了敌方的探测和防空武器的攻击。

飞机低空突防航迹规划的过程中, 航迹受到的约束条件比较多, 并且约束因素间相互耦合, 改变其中某一因素就会引起其他因素的变化。例如飞机在某个区

收稿日期: 2014-01-02

修回日期: 2014-03-12

作者简介: 成玉柱(1983-), 男, 河北定州人, 硕士研究生, 研究方向为作战指挥理论。

李站生(1985-), 男, 硕士研究生。

陈晓鹏(1980-), 男, 博士研究生。

域需要转弯的时候,由于最小航迹段的限制,有可能不能完成转弯的动作;飞机在地形跟随的时候,由于离地面距离比较近,被地面击中的概率很大,需要考虑威胁回避;飞机在地形跟随的时候,受到最大爬升/俯冲角的限制,不能完全跟随地形的走势。飞机的各个限制条件相互制约,因此在航迹规划过程中需要协调多种因素之间的关系。本文选择粒子群优化算法来协调这些因素之间的关系,对飞行航迹进行规划。

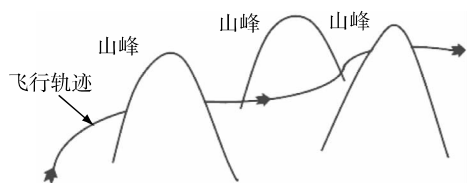


图2 地形回避示意图

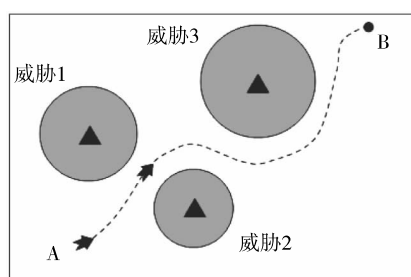


图3 威胁回避示意图

1.2 飞机突防需要满足的物理限制

具体来说,飞机低空突防航迹规划需要考虑的物理限制有如下几个方面^[3]。

- 1) 最大转弯角: 飞机在水平平面内转弯的最大角度。该约束条件取决于具体飞机的性能和飞行任务。
- 2) 最大爬升/俯冲角: 飞机在垂直平面内上升和下滑的最大角度,由飞机自身的机动性能决定。
- 3) 最小航迹段: 飞机在开始改变飞行姿态之前必须直飞的最短距离。
- 4) 最低飞行高度: 飞机飞得过低往往会使得与地面相撞的坠毁概率增加。一般在保证离地高度大于某一给定高度的前提下,使飞行高度尽量降低,这个给定的高度就是最低飞行高度。
- 5) 最大航迹距离: 飞机航迹的总长度小于一个预先设置的最大距离,对应于燃料的供应量或根据作战需要在某一固定时间内必须到达目标。

2 基于粒子群优化算法的低空突防航迹规划

2.1 粒子群优化算法简介

粒子群优化算法是由美国的 Kennedy 和 Elberhart

受鸟群觅食行为的启发,于 1995 年提出的。最初的设想是仿真简单的社会系统,研究复杂的社会行为,后来发现粒子群优化算法可以用于复杂优化问题的求解^[4]。

粒子群优化算法的基本思想是通过群体中个体之间的协作和信息共享来寻找最优解:

$$\min f(x) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad x_i \in [L_i, U_i], \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

在最早 Kennedy 和 Eberhart 提出的 PSO 模型中,用 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})$ 表示为第 i 个微粒,它经历过的最好位置(有最好的适应值)记为 $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{id})$,也称为 $pbest$ 。在群体所有微粒经过的最好位置的索引号用符号 g 表示,即 P_g ,也称为 $gbest$ 。微粒 i 的速度用 $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id})$ 表示。对每一代,其第 d 维($1 \leq d \leq D$)根据如下方程迭代:

$$v_{id}(t+1) = v_{id}(t) + c_1 r_1 [p_{id} - x_{id}(t)] + c_2 r_2 [p_{gd} - x_{id}(t)] \quad (2)$$

$$x_{id}(t+1) = x_{id}(t) + v_{id}(t+1) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

式中 c_1 和 c_2 都是正常数,称为加速系数,是两个在 $[0, 1]$ 范围内变化的随机数。 t 为代数, p_{id} 为每一个粒子在第 d 维度的速度, i 为粒子的编号, d 为维数, c_1, c_2 为学习常数, r_1, r_2 为一介于 0 至 1 的随机数, p_{id} 为每一粒子到目前为止,所出现的最优位置, p_{gd} 为所有粒子到目前为止,所出现的最优位置, x_{id} 为粒子目前所在位置。

在搜索时,微粒的位置被最大位置和最小位置限制。如果某微粒在某维的位置超出该维的最大位置或最小位置,则该粒子的位置被限制为该维的最大位置或最小位置。同样,微粒的速度也被限制于最大速度和最小速度之间。

2.2 粒子群优化算法与其他智能优化算法

1) 粒子算法和遗传算法共性: ①都属于仿生算法; ②都属于全局优化算法; ③都属于随机搜索算法; ④都隐含并行性; ⑤根据个体的适配信息进行搜索,因此不受函数约束条件的限制,如连续性、可导性等; ⑥对高维复杂问题,往往会遇到早熟收敛和收敛性能差的缺点,都无法保证收敛到最优值。

同时,它们之间存在差异: ①粒子算法有记忆,好的解的知识所有粒子都保存,而遗传算法,以前的知识随着种群的变化被改变; ②粒子算法中的粒子仅仅通过当前搜索到最优值进行共享信息,所以很大程度上这是一种单共享信息机制,而遗传算法中,染色体之间相互共享信息,使得整个种群都向最优区域移动; ③遗传算法的编码技术和遗传操作比较简单,而粒子算法相对于遗传算法,没有交叉和变异操作,粒子只是通过

内部速度进行更新,因此原理更简单、参数更少、实现更容易。

2) 粒子算法与神经网络

遗传算法可以用来研究神经网络的三个方面: 网络连接权重、网络结构、学习算法。优势在于可处理传统方法不能处理的问题,例如不可导的节点传递函数或没有梯度信息。缺点是: 在某些问题上性能不是特别好,网络权重的编码和遗传算子的选择有时比较麻烦。

粒子算法已被用于进行神经网络训练。研究表明粒子算法是一种很有潜力的神经网络算法,速度较快且有较好结果,没有遗传算法碰到的问题。

2.3 问题描述

对于飞机低空突防的航迹规划就是寻找满足飞机飞行物理限制和低空突防战术约束所必需经过的点的集合。如图 4 所示,在坐标系 $O-XYZ$ 中, O 为作战区域最左上角端点, A 为飞机的起点, B 为飞机飞行的终点。

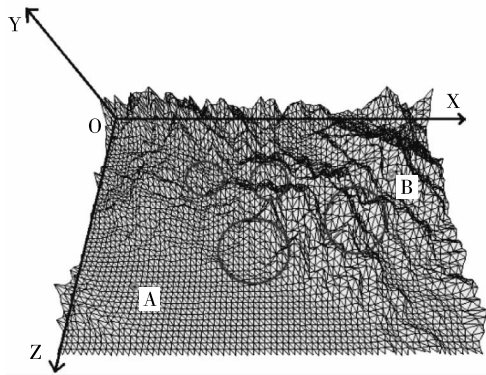


图 4 坐标系 $O-XYZ$ 中作战想定

图 4 中圆形区域代表威胁区域。为了简单起见,设威胁区域为圆形。飞机的航迹是寻找一个点集合 $P = \{A, p_1, p_2, p_3, \dots, p_n, B\}$, 其中 $\{p_1, p_2, p_3, \dots, p_n\}$ 为全局地图中一个点的序列,即规划目标。对点 $p_j (j = 1, 2, \dots, n)$ 的要求是: p_j 与相邻点满足飞行的物理限制,并且满足低空突防的战术要求。在全局航迹规划中为了处理方便,以 A 点为原点, AB 方向为 Z' 轴的正方向, X' 和 Y' 轴可适当选择,生成坐标系 $O'-X'Y'Z'$, 如图 5 所示。坐标系 $O'-X'Y'Z'$ 与 $O-XYZ$ 之间的变换关系为

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\alpha_x & \cos\alpha_y & \cos\alpha_z \\ \cos\beta_x & \cos\beta_y & \cos\beta_z \\ \cos\gamma_x & \cos\gamma_y & \cos\gamma_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} \quad (4)$$

式(4)中, $\alpha_x, \beta_x, \gamma_x$ 分别为 X 轴与 X', Y', Z' 轴的夹角; $\alpha_y, \beta_y, \gamma_y$ 分别为 Y 轴与 X', Y', Z' 轴的夹角; $\alpha_z, \beta_z, \gamma_z$ 分别为 Z 轴与 X', Y', Z' 轴的夹角。

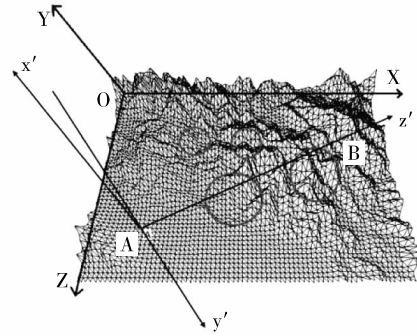


图 5 坐标系 $O-XYZ$ 与坐标系 $O'-X'Y'Z'$ 的关系

如图 6 所示,将 AB 进行 $(n+1)$ 等分,过每个等分点,作垂直于 AB 的 n 个平面 $\Pi_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 。

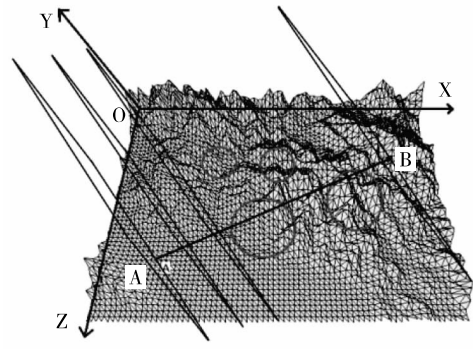


图 6 坐标系 $O'-X'Y'Z'$ 中作垂直平面

在平面 Π_i 与 AB 的交点为圆心做一个正六边形的点阵。如图 7 所示,在平面 $\Pi_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 上形成一个点阵图,点阵以交点为圆心,分别以 $\frac{L}{m}, 2\left(\frac{L}{m}\right), 3\left(\frac{L}{m}\right), \dots, m\left(\frac{L}{m}\right)$ 为半径的圆与正多边形的交集集合,

那么第 i 层平面第 k 层的第 j 个点在 $\Pi_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 平面上的极坐标为 $P^i(k, j) = \left(k\left(\frac{L}{m}\right), j \cdot \left(\frac{2\pi}{6k}\right)\right)$, 其在坐标系 $O'-X'Y'Z'$ 中的实际坐标为

$$\begin{pmatrix} x_{kj}^i \\ y_{kj}^i \\ z_{kj}^i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{L}{m} \cos\left(j \cdot \frac{2\pi}{6k}\right) \\ \frac{L}{m} \sin\left(j \cdot \frac{2\pi}{6k}\right) \\ \frac{i \cdot h}{n} \end{pmatrix} \quad (5)$$

其中 $j = 1, 2, \dots, 6k; k = 1, 2, \dots, m; i = 1, 2, \dots, n; h$ 为 AB 的长度 L 为一个固定长度,限制点阵的大小,点计数的顺序为从 X 轴方向的点开始逆时针方向依次计数。

2.4 算法的实现过程

Step1 初始化

按公式计算出各障碍物在坐标系中 $O'-X'Y'Z'$ 的坐标。

作 AB 和平面 $\Pi_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 的交点,以交点为

圆心 ,分别以 $\frac{L}{m}, 2(\frac{L}{m}), 3(\frac{L}{m}), \dots, m(\frac{L}{m})$ 为半径的圆与正多边形的交点的点阵集合。

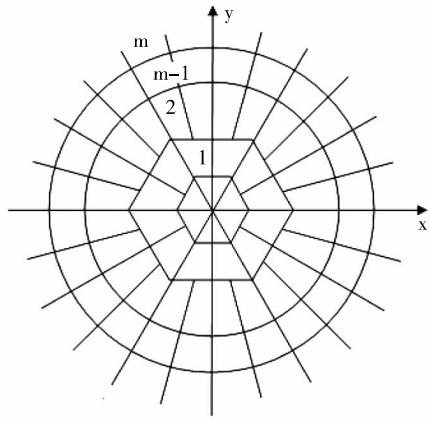


图 7 待选取的点阵阵列图

计算平面 $\Pi_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 上所有点的允许列表 $allowed^i(k, j) \quad j = 1, 2, \dots, \rho_k \quad k = 1, 2, \dots, m \quad i = 1, 2, \dots, n$ 。

粒子群初始化。随机分配每个粒子的初始位置和速度 ,并且设每个粒子的初始最优位置为其自身。其中取粒子的维数为 $n + 1$,其中第 1 维和第 $n + 1$ 维分别为点 A 和点 B ,其在粒子的速度和位置更新过程中保持不变。其他维的粒子在平面 $\Pi_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 上所有点的允许列表 $allowed^i(k, j)$ 中随机选取 ,这样就可以保证随机产生的粒子所代表的路径满足约束条件。

Step2 按照粒子群更新的公式对每个粒子进行更新 ,其中第 i 个粒子的第 d 维向量更新公式为:

$$V_{k,j,d,i}^d(t+1) = \omega \cdot V_{k,j,d,i}^d(t) + \alpha \cdot \text{rand}() \cdot (p_{i,d} - X_{k,j,d,i}^d(t)) + \beta \cdot \text{rand}() \cdot (p_{g,d} - X_{k,j,d,i}^d(t)) \quad (6)$$

$$X_{k,j,d,i}^d(t+1) = X_{k,j,d,i}^d(t) + V_{k,j,d,i}^d(t+1) \quad (7)$$

$$V_{k,j,d,i}^d(t+1) = \begin{pmatrix} vx_{k,j,d,i}^d(t+1) \\ vy_{k,j,d,i}^d(t+1) \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$vx_{k,j,d,i}^d(t+1) = \omega \cdot vx_{k,j,d,i}^d(t) + \alpha \cdot \text{rand}() \cdot (p_{i,d} - x_{k,j,d,i}^d(t)) + \beta \cdot \text{rand}() \cdot (p_{g,d} - x_{k,j,d,i}^d(t)) \quad (9)$$

$$vy_{k,j,d,i}^d(t+1) = \omega \cdot vy_{k,j,d,i}^d(t) + \alpha \cdot \text{rand}() \cdot (p_{i,d} - y_{k,j,d,i}^d(t)) + \beta \cdot \text{rand}() \cdot (p_{g,d} - y_{k,j,d,i}^d(t)) \quad (10)$$

$$x_{k,j,d,i}^d(t+1) = \begin{pmatrix} x_{k,j,d,i}^d(t+1) + vx_{k,j,d,i}^d(t+1) \\ y_{k,j,d,i}^d(t+1) + vy_{k,j,d,i}^d(t+1) \end{pmatrix} \quad (11)$$

速度更新的范围为正多边形的点阵范围 ,以至于粒子不会跑到点阵外面。

Step3 检查更新后的粒子是否满足低空突防战术

要求 ,即检查更新后的粒子每一位的取值是否在相应的允许列表中 $allowed^i(k, j)$,如果允许列表不为空 ,选择下一个平面上的点 ,否则该粒子失效 ,然后添加新的粒子到粒子群中 ,进行优化。

Step4 对每个粒子进行适应值的计算和更新个体粒子最优位置和粒子群整体的最优位置。

Step5 如果停机条件满足 ,则输出最优解; 否则转 Step 2。

3 仿真验证

在仿真前 ,先读入地形数据并处理地形数据 ,应用 OpenGL 和 VC++ 联合编程绘出场景 ,然后读入想定参数并进行威胁设置。飞行任务区域为 $27\text{km} \times 36\text{km}$,地形最低海拔高度为 0 ,最高海拔高度为 1553m。

飞机起点坐标: (1.0km ,20.0km) ,飞机终点坐标: (26.0km ,3.0km) 。

已知有六个威胁区域 ,圆心坐标和威胁半径如表 1 所示。

表 1 威胁区域参数

威胁	圆心坐标	半径
威胁 1	(6.0km ,8.0km)	2.0km
威胁 2	(8.0km ,14.0km)	3.0km
威胁 3	(16.0km ,12.0km)	4.0km
威胁 4	(11.5km ,7.5km)	1.5km
威胁 5	(19.0km ,7.0km)	2.0km
威胁 6	(21.0km ,12.0km)	2.0km

想定参数设置完毕后 ,效果如图 8 所示。

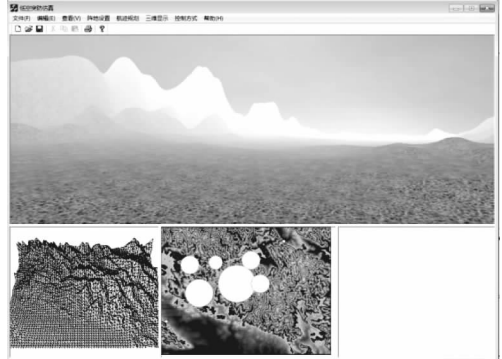


图 8 想定设置效果图

然后进行低空突防航迹规划 ,规划算法中的各个参数初始化如表 2 所示。

表 2 粒子群算法参数

参数	c1	c2	Kmax	Dim	Pnum
取值	1.8	1.8	100	60	20

表 2 中 c_1 、 c_2 为加速度因子, K_{max} 为迭代次数, Dim 为粒子的维数, P_{num} 为粒子数。

飞机的物理限制如表 3 所示。

表 3 飞机物理限制参数

限制	φ	θ	l_{min}	H_{min}	L_{max}
取值	30°	60°	0.5km	0.1km	40km

表 3 中 φ 为最大转弯角, θ 为最大爬升/俯冲角, l_{min} 为最小航迹段, H_{min} 为最低飞行高度, L_{max} 为最大航迹距离。

最后, 根据规划出来的航迹进行可视化仿真。可视化仿真效果如图 9~11 所示。仿真的过程中, 可以看到地形的全局地貌所示。通过三张效果图实时显示区域的对比, 可以清楚地看到飞机的飞行过程, 飞机能够进行地形回避和地形跟随。通过三张效果图水平显示区域的对比, 可以清楚地看到飞机可以能够进行威胁回避以及飞机的飞行轨迹。通过三张效果图垂直显示区域的对比可以清楚地看到飞机的高度随地形的变化。

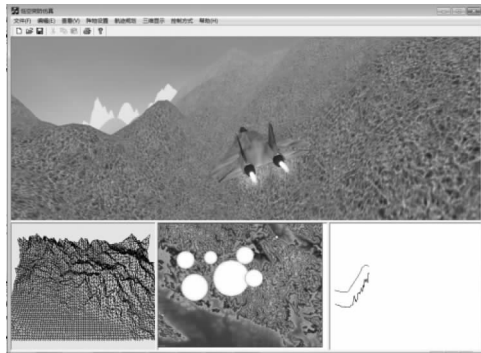


图 9 效果显示图一

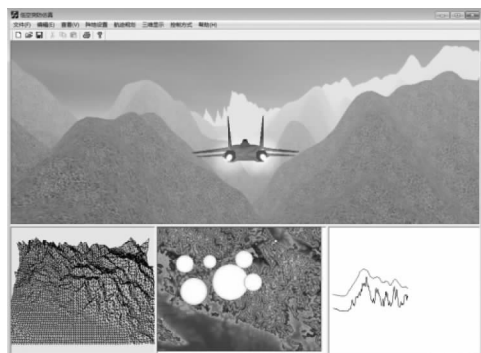


图 10 效果显示图二

仿真结果表明, 规划出来的航迹满足飞机的物理限制和低空突防的战术要求, 达到了预期的目的。

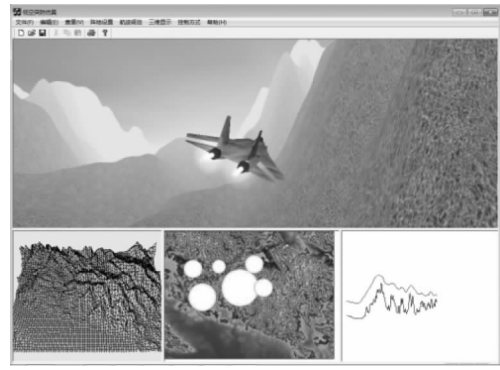


图 11 效果显示图三

4 结束语

针对飞机低空突防航迹规划中存在的约束多、计算复杂等问题, 本文提出了航迹规划决策模型, 采用粒子群优化算法进行航迹规划, 将约束和搜索算法相结合, 有效地减小搜索空间。实验结果表明, 使用该方法得到的飞行航线能够使飞机突防的过程中综合代价最小, 有效提高飞机的任务生存率。

参考文献:

- [1] 陈永光. 组网雷达作战能力分析与评估[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [2] 丁明跃. 无人飞行器航迹规划[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [3] 阎昌万, 袁建平. 军用飞行器航迹规划综述[J]. 飞行力学, 1998, 16(4): 14-19.
- [4] 梁艳春. 群智能优化算法理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [5] 和平鸽工作室. OpenGL 高级编程与可视化系统开发——系统开发篇[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [6] 杜培军. 计算机地图制图原理与方法[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2006.
- [7] 郭蓬松. 基于 OpenGL 的飞机虚拟场景漫游系统的实现[J]. 计算机工程与设计, 2005, 26(7): 1938-1941.
- [8] 龙涛. 防空训练中的巡航导弹空袭仿真[J]. 系统仿真学报, 2002, 14(9): 1141-1144.
- [9] 叶文. 低空突防航路规划算法综述[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(10): 2357-2361.
- [10] 范洪达. 飞机低空突防航路规划技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [11] 白建军. OpenGL 三维图形设计与制作[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1999.