

基于混合粒子群优化的巡航导弹低空突防航迹规划

王建青, 李帆, 赵建辉

北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191

摘要: 将模拟退火算法嵌入到粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 算法中, 并对 PSO 产生的最优适应值进行重新评价, 以此构成混合粒子群优化算法 (PSO-SA). 将 PSO-SA 算法应用于巡航导弹的航迹规划, 不仅可以避免 PSO 陷入局部最优, 而且能快速有效地完成离线和在线规划任务, 获得理想的三维航迹. 仿真结果验证了该算法的有效性, 且对同一起始位置所规划出的航程较 PSO 算法短, 可有效节约导弹燃料.

关键词: 低空突防; 离线规划; 在线规划; 粒子群优化; 模拟退火

中图分类号: V249.122+.6

文章编号: 0255-8297(2012)03-0317-07

Route Planning in Low Altitude Penetration for Cruise Missile Based on a Hybrid Particle Swarm Optimization

WANG Jian-qing, LI Fan, ZHAO Jian-hui

School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China

Abstract: A hybrid planning algorithm PSO-SA is presented, which is an integration of the simulated annealing algorithm (SA) and the particle swarm optimization (PSO) algorithm. PSO-SA is used to evaluate the optimal fitness value generated by PSO. PSO-SA used in route planning of cruise missile can avoid the common defect of premature convergence, accomplish the static and dynamic route planning assignment quickly, and produce an ideal 3-D flight path. Simulations demonstrate feasibility of the algorithm. Compared to PSO, PSO-SA achieves a shorter range in the same initial locations, thus, cruise missiles consume less fuel.

Keywords: low altitude penetration, static route planning, dynamic route planning, particle swarm optimization (PSO), simulated annealing (SA)

巡航导弹广泛用于现代战争中, 但具有飞行时间长、速度慢、低空突防能力弱的缺点. 航迹规划恰好可以有效弥补该缺点, 是巡航导弹实施精确打击、低空突防和提高实战效能的关键技术. 因此, 对航迹规划算法的研究具有重要的意义.

目前, 有关导弹航迹规划的研究尚少, 且研究方向侧重于离线航迹规划, 很少涉及在线航迹规划. 离线航迹规划限制了导弹的可飞行路线, 不能规避新出现的威胁. 在实战中, 当导弹探测到新的威胁信息时, 必须通过在线规划重新对路径寻优, 同时要尽可能兼顾导弹航程、机动能力、突防进入方位角等约束要求.

现有航迹规划算法主要有^[1]: 动态规划法、电势理论法、启发式 A* 搜索法、遗传算法和粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 算法. 其中前 3 种算法规划出的为二维航迹, 不能兼顾地形/威胁回避和地形跟踪. 在后两种算法中, 遗传算法虽然可规划三维航迹, 但编程比较复杂, 需要根据经验调整许多参数^[2]. 粒子群优化算法可以实现三维空间的地形/威胁回避和地形跟踪, 简单且无需调整许多参数, 但容易陷入局部最优, 进化后期收敛速度慢, 精度低^[3]. 模拟退火 (simulated annealing, SA) 算法在搜索工程中具有概率突跳的能力, 能有效避免搜索过

收稿日期: 2011-04-17; 修订日期: 2011-09-22

基金项目: 国家自然科学基金 (No.91016004) 资助

通信作者: 李帆, 副教授, 研究方向: 航天器制导与控制、智能算法, E-mail: lifan@buaa.edu.cn

程陷入局部最优^[4],故本文将粒子群优化算法与模拟退火算法相结合,并用于导弹的航迹规划,不仅具有很好的全局搜索能力,而且规划出的航程短,航迹平缓,既能满足导弹的实时性要求,又能基本满足导弹低空飞行的要求。

1 导弹航迹规划的最小威胁曲面

最小威胁曲面由地形信息、威胁信息和最小离地高度三个要素构成^[5]。通常用于航迹规划的地形信息由地形高程采样得到,本文是在假设地形信息已知的前提下进行设计的。将威胁信息的中心位置和作用范围处理成特殊的地形叠加到地形数据上,从而构成地形威胁模型,使地形数据能同时考虑地形信息和威胁信息。此外,为了避免巡航导弹低空飞行时撞击地面,设置一个最佳离地高度,也就是将考虑了地形信息和威胁信息的地形数据整体抬高某一高度。本文根据巡航导弹在平原、海面等的最低飞行高度取最佳离地高度为0.05 km。文献[5]证明了导弹飞行的最佳航迹应位于最小威胁曲面上,表达式为

$$z(x, y) = T(x, y) + f(x, y) + 0.05 \quad (1)$$

式中, $T(x, y)$ 为威胁信息, $f(x, y)$ 为地形信息。威胁建模采用使用广泛的山峰威胁建模方法,表达式为

$$T(x, y) = \left\{ \sum_{i=1}^M T_i \exp \left[- \left[\frac{x - x_{oi}}{x_{si}} \right]^2 - \left[\frac{y - y_{oi}}{y_{si}} \right]^2 \right] \right\} \quad (2)$$

式中, T_i 、 (x_{oi}, y_{oi}) 、 (x_{si}, y_{si}) 分别为山峰模拟算法参数中的峰高、山峰中心、峰衰减系数。由于实际的地形是离散的,必须通过拟合逼近光滑的曲面,本文是在地形 $f(x, y)$ 已经拟合完成的基础上进行的。

建模后最小威胁曲面的三维地形图见图1,二维等高图见图2。其中,绘制二维等高图是为了更好地观察所规划航迹对于威胁的规避效果。

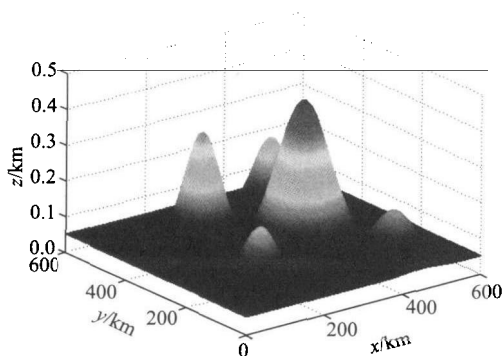


图1 三维地形图

Figure 1 3-D terrain map

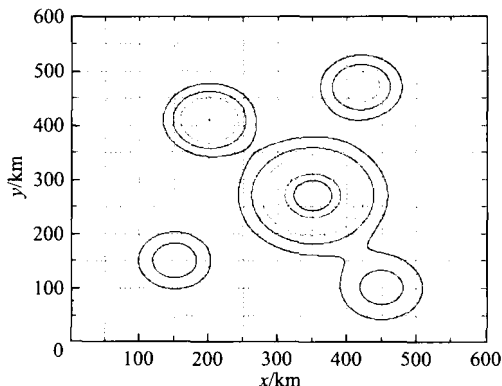


图2 二维等高图

Figure 2 2-D contour map

在图2中,中心位置为(150 km, 150 km)的威胁信息由于离我方导弹发射基地较近,不可能是敌方的防空火力点,故视为地形威胁信息,其他位置均为敌方火力威胁信息。

如上文所述,只要给定航迹规划的起始点和终点,最小威胁曲面上的任一条曲线就与其在水平面内的投影一一对应。可采用一个有限项的一元多项式函数来描述水平面内的航迹投影曲线,再根据投影曲线反推出最小威胁曲面上相应的最佳航迹。水平航迹投影的一元多项式函数为

$$y = y(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \cdots + a_n x^n \quad (3)$$

式中, $[a_0, \cdots, a_n]$ 为水平航迹的系数空间, x 和 y 为水平航迹的坐标值。

导弹的质点运动学模型为

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = v \cos \theta \cos \psi \\ \frac{dy}{dt} = -v \cos \theta \sin \psi \\ \frac{dz}{dt} = v \sin \theta \end{cases} \quad (4)$$

式中, x, y, z 为三维坐标系的坐标值, t 为时间, v 为导弹速度, θ 和 ψ 分别为弹道倾角和弹道偏角。导弹突防进入方位角可以用 ψ 表示,则所要求的突防进入方位角已知,用 ψ_m 表示,根据式(5)得

$$\frac{dy}{dx} = -\tan \psi_m = a_1 + 2a_2 x + \cdots + na_n x_m^{n-1} \quad (5)$$

巡航导弹的当前和目标位置已知,分别为 (x_0, y_0) 和 (x_m, y_m) , 则有

$$\begin{cases} y_0 = a_0 + a_1 x_0 + a_2 x_0^2 + \cdots + a_n x_0^n \\ y_m = a_0 + a_1 x_m + a_2 x_m^2 + \cdots + a_n x_m^n \end{cases} \quad (6)$$

联立式(5)和(6), 则 a_0, a_1, a_2 可由 $[a_3, \dots, a_n]$ 线性表示, 故系数空间可缩小为 $[a_3, \dots, a_n]$. 本文用六阶系数多项式来逼近二维航迹, 即在系数空间 $[a_3, \dots, a_5]$ 中寻优, 进而反推出三维航迹.

2 粒子群优化算法及其改进

由于PSO在解决实际优化问题时存在容易陷入局部最优等缺点, 而模拟退火算法具有概率突跳的能力, 恰好可以弥补其不足. 因此, 将SA算法嵌入到PSO算法中构成PSO-SA, 并对PSO算法产生的最优值进行重新评价, 使PSO能以一定的概率选择其他较优的航迹, 进而提高PSO算法跳出局部最优以及保证其全局搜索的能力.

2.1 粒子群优化(PSO)算法

文献[6]提出的PSO算法是一种模拟鸟群飞行的仿生算法, 可描述如下: 假设在 d 维搜索空间中有 N 个粒子组成的群体, 其中第 i 个粒子在 D 维空间中的位置表示为向量 $\mathbf{X}_i = (x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,d})$, 每个粒子的飞行速度为 $\mathbf{V}_i = (v_{i,1}, v_{i,2}, \dots, v_{i,d})$, 第 i 个粒子经历过的最好位置为 p_i , 则在整个群体中所有粒子经历过的最好位置为 p_g . PSO算法中每一代粒子根据式(8)~(10)来更新自己的速度和位置

$$V_{ij}(k+1) = wV_{ij}(k) + c_1r_1(p_{ij} - x_{ij}(k)) + c_2r_2(p_{gj} - x_{ij}(k)) \quad (7)$$

$$x_{i,j}(k+1) = x_{i,j}(k) + V_{i,j}(k+1), j = 1, 2, \dots, d \quad (8)$$

$$w = w_{\max} - \frac{w_{\max} - w_{\min}}{i_{\max}}k \quad (9)$$

式中, c_1 和 c_2 为常数, 被称为学习因子; r_1 和 r_2 是 $[0, 1]$ 上的随机数; w 为惯性权重; k 表示第 k 代粒子的迭代次数; i_{\max} 为最大进化代数; w_{\min} 与 w_{\max} 为 $w(k)$ 的取值范围.

2.2 混合粒子群优化算法

2.2.1 PSO-SA 算法的原理

SA算法来源于固体退火原理: 将固体加温至充分高, 再让其徐徐冷却, 最后在常温状态下达至基态, 内能减为最小^[7]. 具体退火过程如下:

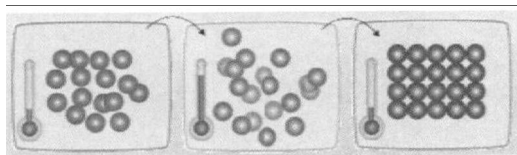


图3 固体退火原理

Figure 3 Principle of solid anneal

SA在搜索过程中具有概率突跳的能力, 能够有效避免搜索过程陷入局部极小解. 在运动过程中, 粒子不会直接盲目扑向下一代位置, 而是以SA算法中温度 T 控制的某一概率“试探”后再行动. 这样, 粒子不会轻易跳出有“希望”的搜索区域, 从而增强了粒子的局部搜索能力^[8].

2.2.2 PSO-SA 算法的流程图

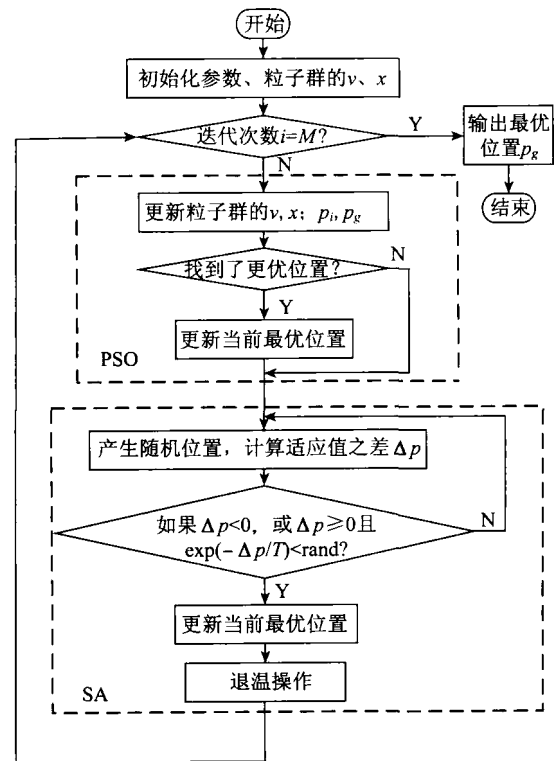


图4 PSO-SA 算法的流程图

Figure 4 Algorithm flow-chart of PSO-SA

3 应用实例

3.1 问题描述及参数的初始化

适应度函数 J 用于判别航迹规划效果

$$J = \sum ((x(i+1) - x(i))^2 + (y(i+1) - y(i))^2 + \alpha(z(i+1) - z(i))^2)^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

式中, α 为加权系数, 可趋使算法寻找合适高度的飞行航迹, 本文取 $\alpha = 1$, 即以航程值来评价航迹规划效果. 适应度函数 J 值越小, 即航程值越小, 则导弹飞行过程所需的燃料越省, 规划效果也越好.

PSO-SA基本参数设置为: 迭代次数 $M = 800$, 退火起始温度 $T = 5000$, 粒子数为20, 搜索空间为三维. 各参数的选取说明如下: 粒子数一般取维数的5倍左右, 即可满足全局的搜索能力. 经多次仿真

发现,当 $M < 800$ (每次仿真以 50 为步长) 时,不能规划出满意的航迹;当 $M > 800$ 时,所规划航迹基本不变,但规划时间却大幅增加,故本文将 M 取为 800. 退火起始温度 T 越高,规划效果越好,但规划时间随之变长. 综合考虑到时间和规划效果,本文选取了上述的仿真参数.

3.2 离线航迹规划

离线航迹规划在导弹起飞前就已经装载在弹载计算机上,本文采用 PSO-SA 算法进行静离线航迹规划设计,按照导弹规划起点和终点在规划区域的不同分布选取两种典型情形设置规划参数,并对仿真结果进行分析.

表 1 情形 1 和 2 的离线规划参数及结果

Table 1 Static route planning parameters and results of case one and two

离线航迹规划	情形 1	情形 2
航迹起点 (x,y) /km	(100, 50)	(50, 150)
航迹终点 (x,y) /km	(50, 150)	(500, 350)
突防方位角 $\psi/ (^{\circ})$	15	30
规划航程 J /km	794.6	542.3
规划时间 t /s	28.3	21.7

表 1 中航迹起点和终点的高度均为 0.05 km. 情形 1 离线航迹规划的航程值 (适应度函数值)、二维、三维航迹图和高度变化曲线如图 5~8 所示:

情形 2 离线航迹规划的航程 (适应度函数值)、二维、三维航迹和高度变化曲线如图 9~12 所示:

从情形 1 和 2 离线规划的航程值图 5 和 9 可以看出,粒子搜索的航程值递减,证明了该算法具备搜

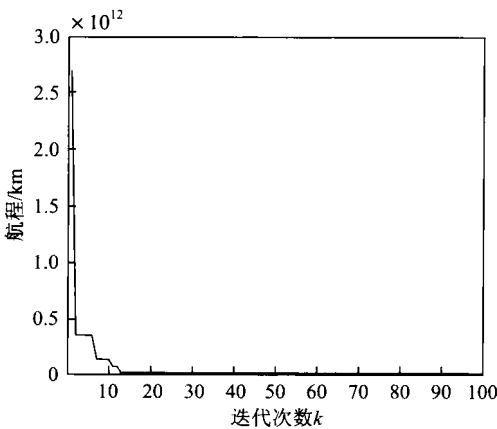


图 5 航程值

Figure 5 Flight range

索到最短航程的能力. 同时,仿真结果表明,情形 1 和 2 所规划出的航迹高度较低,弹道较平缓,达到了很好的规避效果.

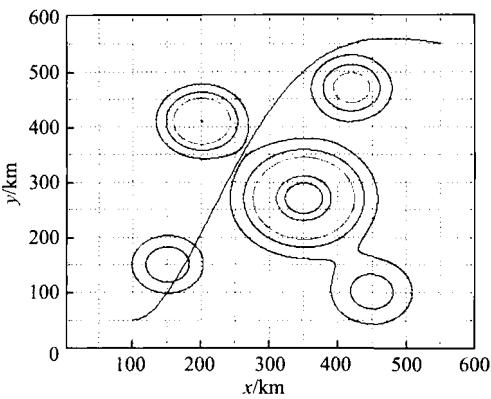


图 6 离线规划后的二维图

Figure 6 2-D map after static route planning

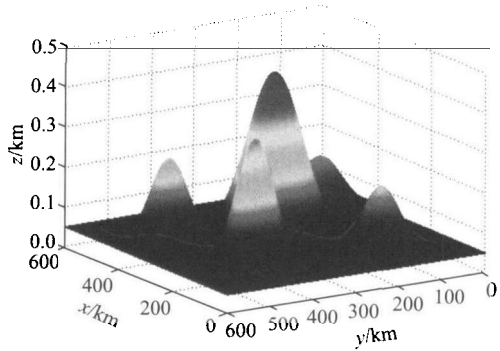


图 7 离线规划后的三维图

Figure 7 3-D map after static route planning

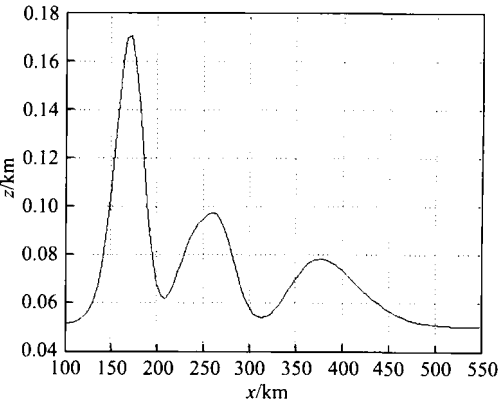


图 8 高度变化曲线

Figure 8 Curve of altitude

3.3 在线航迹规划

在线航迹规划根据探测到的新威胁的位置确定重规划的起点和终点,从本质上来说也是一种路径寻优,仍然可以采用 PSO-SA 算法进行规划,具体流程图见

图 11. 为了更好地对比离线和在线规划效果, 本文在上述已经离线规划好的情形 1 和 2 的基础上增加新威胁进行在线航迹规划, 以验证本文算法在线规避威胁的能力. 在线航迹规划参数设置见表 2, 情形 1 的规划结果见图 12 和 13, 情形 1 的规划结果见图 14 和 15:

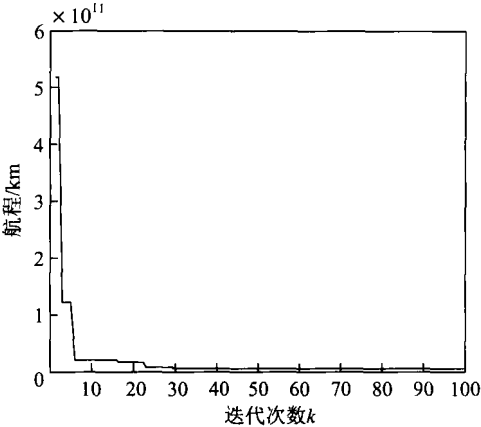


图 9 航程值
Figure 9 Flight range

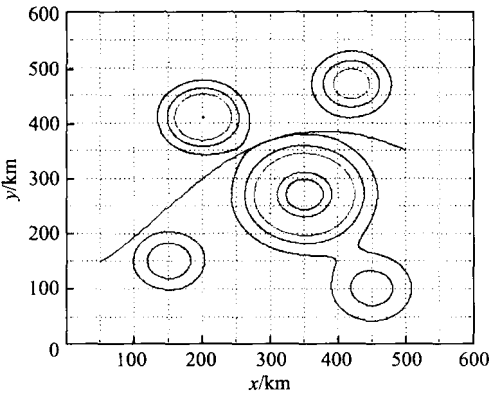


图 10 离线规划后的二维图
Figure 10 2-D map after static route planning

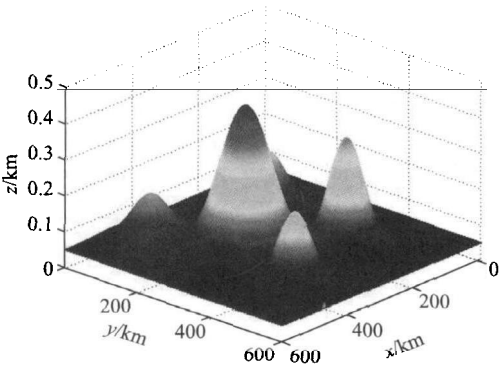


图 11 离线规划后的三维图
Figure 11 3-D map after static route planning

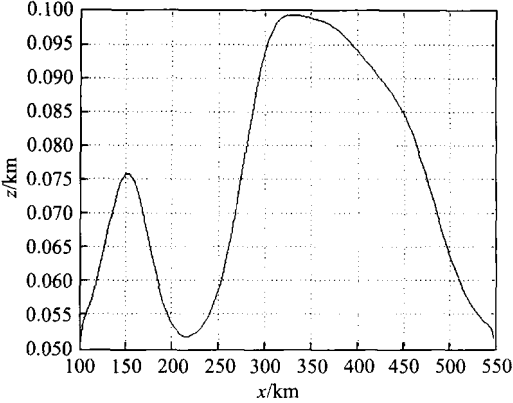


图 12 高度变化曲线
Figure 12 Curve of altitude

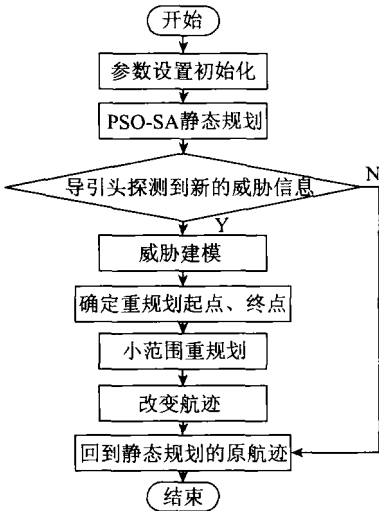


图 13 在线规划流程图
Figure 13 Flow-chart of dynamic route planning

表 2 情形 1 和 2 的在线规划参数及结果

Table 2 Dynamic route planning parameters and results of case one and two

在线航迹规划	情形 1	情形 2
新威胁位置 (x,y) /km	(325, 470)	(150, 300)
重规划起点 (x,y) /km	(275, 381)	(125, 220)
重规划终点 (x,y) /km	(350, 500)	(250, 340)
突防方位角 $\psi/ (^{\circ})$	15	30
规划时间 t/s	2.09	2.07

表 2 中起点、终点以及新威胁位置的高度同表 1, 情形 1 在线航迹规划的二维航迹、三维航迹图和高度变化曲线如图 14~16 所示.

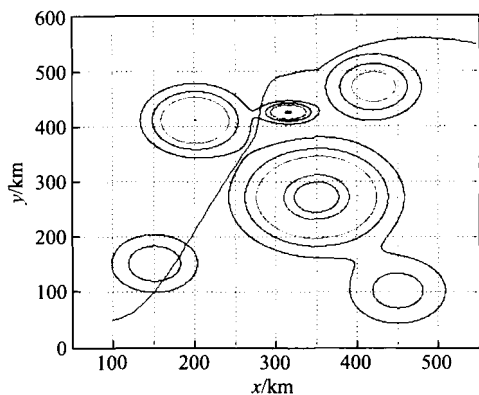


图 14 在线规划后的二维图

Figure 14 2-D map after dynamic route planning

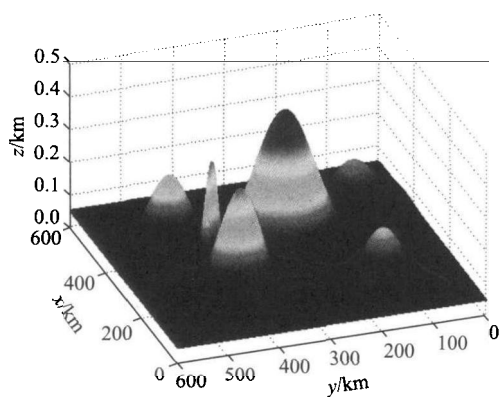


图 15 在线规划后的三维图

Figure 15 3-D map after dynamic route planning

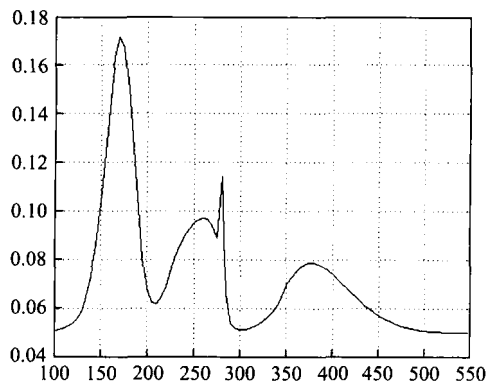


图 16 高度变化曲线

Figure 16 Curve of altitude

情形2在线航迹规划的二维航迹、三维航迹图和高度变化曲线如图17~19.

3.4 结果分析

本文算法在实时性、航迹规划效果以及航程三方面具有如下优势:

1) 实时性

本文所设计的在线航迹规划对于时速为300 m/s且匀速飞行的巡航导弹,只要导弹在到达

障碍物前1 km探测到威胁信息即可,而一般导引头雷达的探测距离不小于10 km.因此,本文算法完全满足实时性的任务需求,应用于导弹航迹规划具有很大的时间优势,对实战有利.

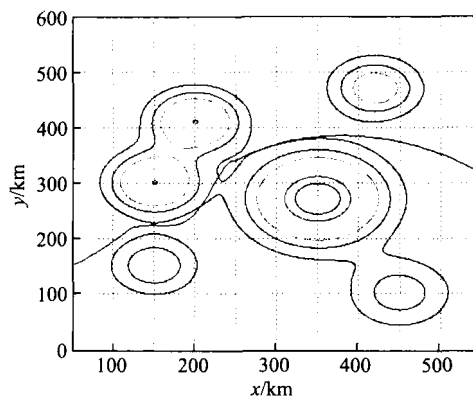


图 17 在线规划后的二维图

Figure 17 2-D map after dynamic route planning

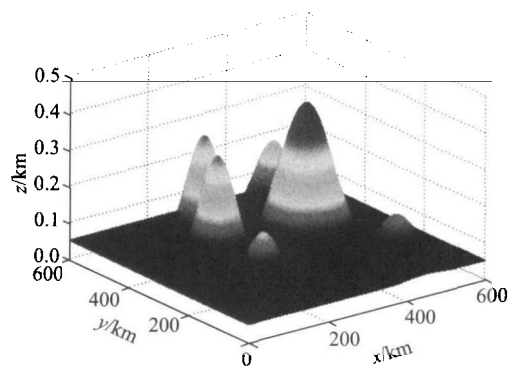


图 18 在线规划后的三维图

Figure 18 3-D map after dynamic route planning

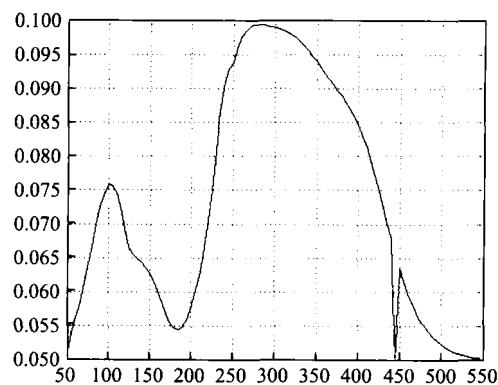


图 19 高度变化曲线

Figure 19 Curve of altitude

2) 规划航迹平缓

目前,已公开的相关文献大部分都展示了各自的规划结果,但以二维航迹结果居多.有些文献规划的航迹飞行高度太高,如文献[9];有些几乎是贴地飞行,如文献[10];有些航迹不够平缓,这就要求导弹有足

够的过载. 本文设计的导弹飞行航迹高度较低, 弹道较为平缓, 过载较小, 可大大节省燃料.

3) 航程较 PSO 算法短

选取同一离线规划起点和终点, 采用 PSO 算法进行航迹规划, 结果如表 3 所示:

表 3 情形 1 和 2 的离线规划参数及结果

Table 3 Static route planning parameters and results of case one and two

离线航迹规划	情形 1	情形 2
航迹起点/km	(100, 50)	(50, 150)
航迹终点/km	(50, 150)	(500, 350)
突防方位角 $\psi/ (^{\circ})$	15	30
规划航程/km	797.9	673.4
规划时间/s	36.7	24

表 3 中起点、终点以及新威胁位置的高度同表 1. 将表 3 与表 1 的结果进行比较可知: 当起点和终点位于同一位置时, PSO-SA 算法较 PSO 算法规划出的航程短, 耗时少, 且燃料消耗较省. 因此, PSO-SA 算法优于 PSO 算法.

4 结 语

本文提出将基于 PSO-SA 的规划算法用于巡航导弹航迹规划, 可有效避免粒子群优化算法陷入局部最优. 理论研究和仿真结果表明, 该算法可以在满足巡航导弹航程约束的前提下, 快速对航迹进行离线和在线最优规划. 规划时间短, 从而能及时规避威胁; 规划航程短, 从而能有效节约导弹燃料. 本文算法能够满足巡航导弹的战术需求. 但航迹规划是一个复杂的优化过程, 涉及众多的约束和限制条件, 本文考虑了航程值和突防进入方位角两个约束并获得了满意的仿真结果, 当然在实际应用中还可以考虑导弹飞行高度等约束条件.

参考文献:

- [1] 王维平, 刘娟. 无人飞行器航迹规划方法综述 [J]. 飞行力学, 2010, 28(2): 6-10.

- WANG Weiping, LIU Juan. Introduction to unmanned air vehicle route planning methods [J]. Flight Dynamics, 2010, 28(2): 6-10. (in Chinese)
- [2] 李强, 王民钢, 李磊. 基于遗传算法的飞行器参考航迹规划 [J]. 计算机仿真, 2010, 27(2): 34-37.
LI Qiang, WANG Mingang, LI Lei. Reference route planning for aircraft based on genetic algorithm [J]. Computer Simulation, 2010, 27(2): 34-37. (in Chinese)
- [3] CHEN Sanfeng, MEI Tao, LUO Minzhou, YANG Xi-uting. Identification of nonlinear system based on a new hybrid gradient-based PSO algorithm [C]//2007 IEEE International Conference on Information Acquisition. Reading, 2007: 265-268.
- [4] LUO Yazhong, TANG Guojin. Parallel simulated annealing using simplex method [C]//2004 AIAA Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference. Reading, 2004: 1-18.
- [5] 唐强, 王建元, 朱志强. 基于粒子群优化的三维突防航迹规划仿真研究 [J]. 系统仿真学报, 2004, 16(9): 2033-2036
TANG Qiang, WANG Jianyuan, ZHU Zhiqiang. The simulation study of PSO based 3-D vehicle route planning for low attitude penetration [J]. Acta Simulata Systematica Sinica, 2004, 16(9): 2033-2036. (in Chinese)
- [6] KENNEDY J, EBERHART R C. Particle swarm optimization [C]//1995 IEEE International Conference on Neural Networks, Reading, 1995: 1942-1948.
- [7] KEIKHA M M. Improved simulated annealing using momentum terms [C]//2011 IEEE Second International Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation, Reading, 2011: 44-48.
- [8] ZHANG Tao, ZHANG Chunmei, ZHANG Yuejie, YU Chuoya. A mixed PSO algorithm for the VRPSD [C]//2008 IEEE Control and Decision Conference, Reading, 2008: 4017-4021.
- [9] 黄玲玲. 巡航导弹的三维精确末制导律及三维动画仿真研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007: 12-17.
HUANG Lingling. Research on cruise missiles three-dimension precise terminal guidance law and 3D animation simulation [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007: 12-17. (in Chinese)
- [10] 余伟龙, 吴庆宪, 姜长生. 粒子群法在三维航迹规划及优化中的应用 [J]. 电光与控制, 2008, 15(5): 1-6.
YU Weilong, WU Qingxian, JIANG Changsheng. Application of particle swarm algorithm in 3-D route planning and optimization of air vehicles [J]. Electronics Optics and Control, 2008, 15(5): 1-6. (in Chinese)

(编辑: 秦 巍)