

# 采用航路点进化的空袭目标突防航路预测

刘胜利<sup>1</sup>, 王 睿<sup>1</sup>, 王 刚<sup>1</sup>, 孙 宁<sup>2</sup>

(1. 空军工程大学防空反导学院, 西安, 710051; 2. 94595 部队, 山东潍坊, 261500)

**摘要** 空袭目标突防航路预测是进行防空兵力部署方案评估的辅助手段之一。在分析突防航路预测问题的基础上建立了空袭目标突防航路预测模型,并针对传统进化算法将航路作为一个整体后导致先前候选航路中高质量航路点利用效果较差的问题,提出了基于航路点进化的空袭目标突防航路预测算法。首先通过改进传统进化算法框架与评价函数使航路点可被分别进化和评价,然后使用自适应差分进化算法(JADE)实现航路点的进化,最后采用多准则决策方法实现航路点的评价与选择,从而提升了高质量航路点的利用效果。为了测试算法的性能,设置了障碍数目分别为 15、30、60、120 的 4 个仿真情景,仿真结果表明算法能够有效实现空袭目标突防航路的预测,并且在障碍数目较多的情景中其性能优于遗传算法。

**关键词** 航路预测;防空部署;突防;进化算法;自适应差分进化算法

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2018.05.003

**中图分类号** V247;TP391 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2018)05-0012-07

## Path Forecasting for Air Strike Aircraft by Evolving Waypoints

LIU Shengli<sup>1</sup>, WANG Rui<sup>1</sup>, WANG Gang<sup>1</sup>, SUN Ning<sup>2</sup>

(1. Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;

2. Unit 94595, Weifang 261500, Shandong, China)

**Abstract:** Path forecasting for air strike aircraft is one of the assistant methods in assessing the schemes of the deployment of air defense forces. A model of path forecasting is built based on analyzing the path forecasting problem for air strike aircraft. Then a path forecasting algorithm by evolving waypoints is presented. The methods of path forecasting by using traditional evolutionary algorithms (EAs) can hardly exploit the high quality waypoints in previous candidate paths for further evolution, since they regard all the waypoints of a path as an integrated individual. The proposed algorithm improves the framework of the traditional EAs and evaluation functions to evaluate and evolve waypoints separately. The waypoints are evolved with JADE, a state-of-the-art variant of the differential evolution (DE) algorithm, and evaluated and selected by using a multi-criteria handling method based on the priorities, exploiting high quality waypoints. To test the capabilities of the new algorithm, 4 scenarios with 15, 30, 60 and 120 obstacles are constructed respectively. The simulation results show that the proposed algorithm meets the needs for the path forecasting for air strike aircraft effectively, and its performance is previous to the genetic algorithm-based path forecasting algorithm in the scenarios with lots of obstacles.

**收稿日期:** 2018-04-02

**基金项目:** 国家自然科学基金(61703412)

**作者简介:** 刘胜利(1994—),男,山东济南人,硕士生,主要从事智能信息处理研究。E-mail:liushengli2010@163.com

**引用格式:** 刘胜利,王睿,王刚,等.采用航路点进化的空袭目标突防航路预测[J].空军工程大学学报(自然科学版),2018,19(5):12-18.  
LIU Sheng-li, WANG Rui, WANG Gang, et al. Path Forecasting for Air Strike Aircraft by Evolving Waypoints[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2018, 19(5): 12-18.

**Key words:** path forecasting; deployment of air defense forces; defense penetration; evolutionary algorithm; JADE

防空兵力部署<sup>[1]</sup>是防空作战战前筹划的重要内容,目前对防空部署方案的评估多是从自身作战能力的角度出发,将防空导弹杀伤区覆盖范围、雷达遮蔽角、通信网络可靠度以及地形约束等因素<sup>[2]</sup>作为评估指标,运用系统评价方法进行综合权衡而做出判断。这种传统方法只能在一定程度上静态反映出部署方案的优劣,缺乏对攻防对抗场景的模拟,难以评价部署方案对作战的动态适应能力。针对这种不足,结合博弈的思想预测空袭目标对防空部署区域可能采取的突防航路,并评价预测突防航路的威胁程度,进而为评估防空部署方案提供依据,不失为一种直观的辅助解决方案。本文对该解决方案中预测空袭目标可能采取的突防航路的问题进行研究,在改进进化算法(Evolutionary Algorithm, EA)<sup>[3]</sup>的基础上,提出了一种基于航路点进化的空袭目标突防航路预测方法。

## 1 问题描述

空袭目标突防航路预测是指在战前针对待评估的防空部署方案,考虑典型突防目标的作战能力、防空武器性能、战场地理环境以及航路代价等约束因素,对目标突防可能采用的航路进行预测,该问题实质上是一个多目标优化问题(Multi-objective Optimization Problem, MOP)<sup>[4]</sup>。一条航路由航路点序列及航路点间连线构成的集合,而航路点间的连线可为直线段<sup>[5]</sup>、B样条曲线<sup>[6]</sup>或贝塞尔曲线<sup>[7]</sup>。因此,航路预测又可描述为寻找从起始点到目标点的航路点序列以及毗邻航路点间连线的过程,以满足约束条件并使目标函数最优化。一般地,曲线虽然能确保航路的平滑性,但其计算代价高,本文采用直线段作为连线。

## 2 空袭目标突防航路预测模型

影响空袭目标突防航路预测的因素可分为 2 类:①仅需根据航路点进行评价,即通过检验航路点的位置和航路点间的几何关系对这些因素进行评价,例如最大转弯角、最大倾斜角、最短航路长度、最低飞行高度和地图限制等因素;②需要根据航路点及其之间的连线进行评价,即航路点不足以确定空袭目标的状态,尽管航路点在可行的位置,但相邻航路点间的连线可能是不可行的,例如最小被毁伤风险、最小被雷达探测风险和地形约束等因素。对于①,可以直接建立评价

函数;对于②,首先将每段连线分为  $N_d$  个分段,然后建立评价函数对  $N_d$  个分割点(其中航路点也被视为分割点)进行评价。在以防空部署区域中一点为原点的空间直角坐标系中,假设  $(d_{x_{ij}}, d_{y_{ij}}, d_{z_{ij}})$  表示连接第  $(i-1)$  个航路点  $(x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1})$  和第  $i$  个航路点  $(x_i, y_i, z_i)$  的连线中的第  $j$  个分割点,其中  $i=2, 3, \dots, N_w, j=1, 2, \dots, N_d$ , 则有:

$$(d_{x_{ij}}, d_{y_{ij}}, d_{z_{ij}}) = (x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1}) + j((x_i, y_i, z_i) - (x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1}))/N_d \quad (1)$$

$N_d$  反映了对计算代价与近似精度的折中,  $N_d$  越大,连线近似实际情况的精度就越高,但求解效率会降低。

MOP 的解是一个 Pareto 解集,因此产生了通过加权求和将多个目标合为单一目标的方法<sup>[8-11]</sup>,但权重系数会因目标函数的值域范围不同而难以确定。针对这一不足,本文采用一种更直观的基于选择规则的方法进行建模,该规则反映了所有目标函数和约束条件的优先级。

### 2.1 目标函数

1) 最短航路长度。

在空袭目标执行突防任务的过程中,突防航路越短,消耗的燃料就越少,被防空武器发现的概率就越小。因此,需要最小化航路总长度,根据文献[6, 12]构建航路长度比函数为:

$$f_1 = \frac{\sum_{i=2}^{N_w} \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2 + (z_i - z_{i-1})^2}}{\sqrt{(x_{N_w} - x_1)^2 + (y_{N_w} - y_1)^2 + (z_{N_w} - z_1)^2}} \quad (2)$$

式中:  $(x_i, y_i, z_i), i=2, 3, \dots, N_w$  为第  $i$  个航路点的三维位置坐标;  $N_w$  为一条航路包含所有航路点(包括起始点和目标点)的个数。

2) 最小被毁伤风险。

空袭目标通常会选择被毁伤风险低的航路。对于每个分割点,若该点在防空导弹的杀伤区内,则防空导弹对位于该点的空袭目标会产生一个确定的被毁伤风险。第  $(i-1)$  个航路点和第  $i$  个航路点间连线的第  $j$  个分割点与第  $k$  个防空导弹之间距离的计算公式如下:

$$D_{ij}^k = \sqrt{(d_{x_{ij}} - m_{x_k})^2 + (d_{y_{ij}} - m_{y_k})^2 + (d_{z_{ij}} - m_{z_k})^2} \quad (3)$$

式中:  $(m_{x_k}, m_{y_k}, m_{z_k})$  表示第  $k$  个防空导弹部署位置坐标,  $k=1, 2, \dots, M$  是防空导弹的数量。因此根据文献[12]构建整条航路的被毁伤风险函数如下:

$$f_2 = \sum_{i=2}^{N_w} \sum_{j=1}^{N_d} \sum_{k=1}^M R_{K_{ij}^k}$$

$$R_{K_{ij}^k} = \begin{cases} \frac{(R_{R_{K_{\max}}^k})^4}{(R_{R_{K_{\max}}^k})^4 + (D_{1ij}^k)^4}, & D_{1ij}^k \leq R_{R_{K_{\max}}^k} \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $R_{K_{ij}^k}$ 为第*j*个分割点被第*k*个防空导弹毁伤的风险; $R_{R_{K_{\max}}^k}$ 为第*k*个防空导弹的最大杀伤距离。

### 3) 最小被雷达探测风险。

被探测风险越低的航路,对于空袭目标就越安全,就越有可能被采用。当突防航路穿过雷达探测区域时,若分割点位于由雷达最大探测距离确定的雷达探测区内,雷达会对分割点上的空袭目标产生确定的被探测风险。根据文献[6,12]构造航路的被雷达探测风险  $R_{RD}$  函数为:

$$f_3 = \sum_{i=2}^{N_w} \sum_{j=1}^{N_d} \sum_{k=1}^R R_{RD_{ij}^k}$$

$$R_{RD_{ij}^k} = \begin{cases} (\frac{\delta}{D_{2ij}^k})^4, & D_{2ij}^k \leq R_{RD_{\max}^k} \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (5)$$

$$D_{2ij}^k =$$

$$\sqrt{(d_{x_{ij}} - r_{x_k})^2 + (d_{y_{ij}} - r_{y_k})^2 + (d_{z_{ij}} - r_{z_k})^2} \quad (6)$$

式中: $\delta$ 为雷达强度; $(r_{x_k}, r_{y_k}, r_{z_k})$ 为第*k*个雷达的部署位置坐标; $R$ 为雷达的数量; $D_{2ij}^k$ 为第*(i-1)*个航路点和第*i*个航路点间连线的第*j*个分割点与第*k*个雷达之间的距离; $R_{RD_{ij}^k}$ 为第*j*个分割点被第*k*个雷达探测发现的风险; $R_{R_{RD_{\max}}^k}$ 为第*k*个雷达的最大探测距离。

### 4) 最低飞行高度。

空袭目标为了成功完成突防任务,突防航路通常处在低空区域,利用地形遮蔽减小被雷达发现的概率。根据文献[6]构造航路的飞行高度(Flight Altitude, FA)函数如下:

$$f_4 = \sum_{i=2}^{N_w} F_{A_i}$$

$$F_{A_i} = \begin{cases} 0, & z_i \leq \text{map}(x_i, y_i) \\ (z_i - \text{map}(x_i, y_i)) / N_w, & \text{others} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\text{map}(x, y)$ 为输出 $(x, y)$ 的地理高程数值。

## 2.2 约束条件

### 1) 最大倾斜角。

与转弯角相似,倾斜角描述了在垂直方向上

$$\theta_i = \arccos\left(\frac{(x_i - x_{i-1}, y_i - y_{i-1}, z_i - z_{i-1})(x_{i+1} - x_i, y_{i+1} - y_i, z_{i+1} - z_i)^T}{\|(x_i - x_{i-1}, y_i - y_{i-1}, z_i - z_{i-1})\| \|(x_{i+1} - x_i, y_{i+1} - y_i, z_{i+1} - z_i)\|}\right) \quad (14)$$

### 2.3 空袭目标突防航路预测规则

根据上述分析可知,目标函数均为取最小值函数,而且只有在约束条件的函数值为零时,所预测航路才能满足约束,成为一条可行航路。此外,为提高

空袭目标的机动能力,包括俯冲角和爬升角。该约束条件采用倾斜角的正弦值,对于航路点 $(x_i, y_i, z_i)$ 有:

$$s = \frac{z_i - z_{i-1}}{\|(x_i - x_{i-1}, y_i - y_{i-1})\|} \quad (8)$$

倾斜角必须介于最大爬升角与最大俯冲角之间。对于一个可行航路,该约束可以表示为:

$$g_1 = \sum_{i=2}^{N_w} c_i^1$$

$$c_i^1 = \begin{cases} 0, & \alpha \leq s \leq \beta \\ 1, & \text{others} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\alpha$ 为最大俯冲角; $\beta$ 为最大爬升角。

### 2) 地形约束。

目标的飞行高度应大于在其下的地表的高度。由于会发生航路点间的连线穿越山脉的情况,因此该约束需要引入连线中的分割点。对于一个可行航路,该约束可以表示为:

$$g_2 = \sum_{i=2}^{N_w} \sum_{j=1}^{N_d} c_{ij}^2$$

$$c_{ij}^2 = \begin{cases} 1, & d_{z_{ij}} \leq \text{map}(d_{x_{ij}}, d_{y_{ij}}) \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (10)$$

### 3) 地图限制。

预测的航路不能超出防空部署区域,对于一个可行航路,该约束可以表示为:

$$g_3 = \sum_{i=2}^{N_w} c_i^3$$

$$c_i^3 = \begin{cases} 0, & \text{InRange}(x_i, y_i) \\ 1, & \text{others} \end{cases} \quad (11)$$

$$\text{InRange}(x_i, y_i) = (l_x \leq x_i \leq h_x) \wedge (l_y \leq y_i \leq h_y) \quad (12)$$

式中: $l_x$ 和 $h_x$ 为*x*坐标的下限和上限; $l_y$ 和 $h_y$ 为*y*坐标的下限和上限。

### 4) 最大转弯角。

为了满足空袭目标的机动性能要求,突防航路需要足够的平滑,这要求航路点的转弯角小于或等于预先设定的最大转弯角。对于一个可行航路,该约束可以表示为:

$$g_4 = \sum_{i=2}^{N_w-1} c_i^4, \quad c_i^4 = \begin{cases} 1, & \theta_i > \theta_{\max} \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $\theta_{\max}$ 为最大转弯角; $\theta_i$ 为第*i*个航路点 $(x_i, y_i, z_i)$ ,  $i = 2, 3, \dots, N_w - 1$ 的转弯角。 $\theta_i$ 计算公式为:

预测结果质量,需要根据具体问题对目标函数设置门限参数。表1描述了目标函数和约束条件的优先级以及约束条件的参数设置,目标函数的参数将在仿真验证部分根据具体情景进行设置。

表 1 目标函数与约束条件优先级

Tab. 1 The priorities of objective functions and constraints		优先级	参数
最大倾斜角	$g_1$	1	0
约束条件	地形约束 $g_2$	1	0
	地图限制 $g_3$	1	0
	最大转弯角 $g_4$	1	0
目标函数	最短航路长度 $f_1$	2	
	最小被毁伤风险 $f_2$	2	
	最小被雷达探测风险 $f_3$	3	
	最低飞行高度 $f_4$	3	

在优先满足约束条件的基础上,预测规则如下:

1) 对于所有  $f_2 = 0$  的可行航路,  $f_1$  最小的航路将被作为最终输出。如果有多个航路具有相同  $f_1$  和  $f_2$  值,则从中随机选择一条航路为最终输出,因为  $f_3$  和  $f_4$  被认为对空袭目标的安全产生相同的影响,不具有区分性。

2) 对于所有  $f_2 > 0$  的可行航路,首先利用第  $i$  条相关航路的  $f_2$ , 记作  $f_2^i$ , 计算  $r_{f_2^i} = f_2^i / \min(f_2^i)$ , 然后设置选择门限  $V$  的值(如  $V = 1.05$ ), 将  $r_{f_2^i} \geq V$  的航路剔除, 则剩余航路的  $f_2$  都未明显大于所有  $f_2 > 0$  的可行航路的  $\min(f_2^i)$ , 最后在剩余航路中选择具有最小  $f_1$  的航路。

### 3 基于航路点进化的突防航路预测算法

传统的基于 EA 的突防航路预测算法在具有较少障碍的搜索空间中进行空袭目标的突防航路预测是非常有效的,但当障碍的数量增加时,由于其将候选航路视为一个整体,难以找到先前候选航路中高质量的点,效率通常会大幅下降。

针对上述问题,提出一种新的基于 EA 的突防航路预测算法,算法框图见图 1。分别评价和进化航路点,对每一代的第  $j$  条航路,按序号的升序分别进化,即第  $(i+1)$  个航路点将在第  $i$  个航路点被进化后得到进化,  $i = 2, 3, \dots, N_w - 1$ 。对第  $j$  条航路的第  $i$  个航路点,它的子代结合所有其他航路的第  $i$  个航路点通过进化操作产生,  $j = 1, 2, \dots, N_p$ , 从而种群中其他所有第  $i$  个航路点的信息可用于提升当前进化的第  $i$  个航路点的质量。通过比较父代与子代航路点的适应度,选择进入新候选航路个体的航路点。为了对航路点进行评价,通过改进第 2 节介绍的函数从而获得一系列新的评价函数,并采用多准则决策的方法选择航路点。单个航路点的进化采用差分进化算法(Differential Evolution, DE)<sup>[13-14]</sup>的变体 JADE<sup>[15]</sup>算法,每个航路点只进行一次进化

(图 1 中的内循环)。此处虽可以执行任意次数的进化,而且次数越多,使用的航路点的局部信息就越多,新生成的航路点的质量就越好,但是需要的运行时间增加,算法的效率下降。

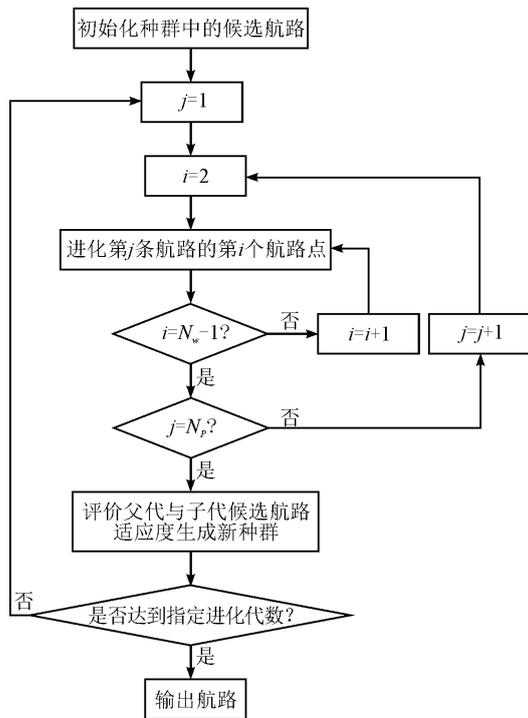


图 1 算法框图

Fig. 1 The diagram of the proposed algorithm

#### 3.1 航路点评价函数

对航路点进行评价,除需要待评价点外,还需要 1 个或 2 个与其相邻的航路点,根据突防航路预测算法框架可知,新候选航路的航路点是依序列生成的,针对这种情况,提出 2 条规则:①需要 2 个航路点的评价函数采用前一航路点和当前航路点;②需要 3 个航路点的评价函数采用前一航路点、当前航路点和目标点。基于上述 2 条规则,对于第  $i$  个航路点  $(x_i, y_i, z_i)$ ,  $i = 2, 3, \dots, N_w - 1$  的评价函数如下:

1) 最小航路长度:

$$f'_{1,i} = \frac{\sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2 + (z_i - z_{i-1})^2}}{\sqrt{(x_{N_w} - x_{i-1})^2 + (y_{N_w} - y_{i-1})^2 + (z_{N_w} - z_{i-1})^2}} \quad (15)$$

2) 最小被毁伤风险:

$$f'_{2,i} = \sum_{j=1}^{N_d} \sum_{k=1}^R R_{kj}^R \quad (16)$$

3) 最小被雷达探测风险:

$$f'_{3,i} = \sum_{j=1}^{N_d} \sum_{k=1}^R R_{RDij}^R - R_{RDij}^k \quad (17)$$

4) 最低飞行高度:

$$f'_{4,i} = F_{A_i} \quad (18)$$

5) 最大倾斜角:航路点的倾斜角的正弦值  $s$  可由式(10)计算得到,则有:

$$g'_{1,i} = \begin{cases} 0, & \alpha \leq s \leq \beta \\ 1, & \text{others} \end{cases} \quad (19)$$

6)地形约束:

$$g'_{2,i} = \sum_{j=1}^{N_d} c_{ij}^2, \quad c_{ij}^2 = \begin{cases} 1, & d_{z_{ij}} \leq \text{map}(d_{x_{ij}}, d_{y_{ij}}) \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (20)$$

$$\theta_i = \arccos\left(\frac{(x_i - x_{i-1}, y_i - y_{i-1}, z_i - z_{i-1})(x_{N_w} - x_i, y_{N_w} - y_i, z_{N_w} - z_i)^T}{\|(x_i - x_{i-1}, y_i - y_{i-1}, z_i - z_{i-1})\| \|(x_{N_w} - x_i, y_{N_w} - y_i, z_{N_w} - z_i)\|}\right) \quad (23)$$

由于航路的起始点与目标点是固定的,所以上述航路点评价函数未对这2个航路点进行评价。

### 3.2 基于JADE的航路点进化算法

采用JADE进化航路点,算法框架见表2。

表2 基于JADE的航路点进化算法框架

Tab. 2 The framework of JADE

步骤	操作内容
1	Begin
2	设置 $t=1, \mu_{CR}^i=0.5, \mu_F^i=0.5, i=2,3,\dots,N_w-1$
3	初始化种群中 $N_p$ 个候选航路,每个候选航路的路点记为 $x_{j,i}^t, j=1,2,\dots,N_p$
4	Repeat 直到达到指定进化代数
5	设置 $S_F^i = \emptyset, S_{CR}^i = \emptyset$
6	For $j=1$ to $N_p$
7	For $i=2$ to $N_w-1$
8	$CR = \text{randn}(\mu_{CR}^i, 0.1), F = \text{randc}(\mu_F^i, 0.1)$
9	从位于前 $q\%$ 的航路点 $x_{1:N_p,i}^t$ 中选择 $x_{qbest}$
10	从 $x_{1:N_p,i}^t$ 中随机选择 $x_{r1} \neq x_{j,i}^t$
11	从 $x_{1:N_p,i}^t$ 中随机选择 $x_{r2} \neq x_{r1} \neq x_{j,i}^t$
12	$v_{j,i} = x_{j,i}^t + F(x_{qbest} - x_{j,i}^t) + F(x_{r1} - x_{r2})$
13	生成 $m_{rand} = \text{randint}(1,3)$
14	For $m=1$ to 3
15	If $m=m_{rand}$ or $\text{rand}(0,1) < CR$
16	$u_{j,i,m}^t = v_{j,i,m}^t$
17	Else
18	$u_{j,i,m}^t = x_{j,i,m}^t$
19	End
20	End
21	If $f(x_{j,i-1}^t, x_{j,i}^t) \leq f(x_{j,i-1}^t, u_{j,i}^t)$
22	$x_{j,i}^{t+1} = x_{j,i}^t$
23	Else
24	$x_{j,i}^{t+1} = u_{j,i}^t, CR \rightarrow S_{CR}^i, F \rightarrow S_F^i$
25	End
26	End
27	End
28	For $i=2$ to $N_w-1$
29	$\mu_{CR}^i = (1-c)\mu_{CR}^i + c\text{mean}_A(S_{CR}^i)$
30	$\mu_F^i = (1-c)\mu_F^i + c\text{mean}_L(S_F^i)$
31	End
32	$t=t+1$
33	End
34	End

7)地图限制:

$$g'_{3,i} = \{0 \text{ InRange}(x_i, y_i)\} \quad (21)$$

8)最大转弯角:

$$g'_{4,i} = \begin{cases} 1, & \theta_i > \theta_{\max} \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (22)$$

表中:  $x_{j,i}^t$  表示第  $t$  代种群中第  $j$  条航路的第  $i$  个航路点,  $i=2,3,\dots,N_w-1, j=1,2,\dots,N_p$ ;  $x_{j,i,m}^t$  表示航路点  $x_{j,i}^t$  第  $m$  个分坐标的值,即  $x, y, z$  坐标的值,  $m=1,2,3$ ;  $\mu_{CR}^i$  和  $\mu_F^i$  表示对第  $i$  个航路点进行交叉和变异操作时,用于更新  $CR$  和  $F$  的自适应参数;  $\text{randn}(\mu_{CR}^i, 0.1)$  是均值为  $\mu_{CR}^i$ , 标准差为 0.1 的高斯分布;  $\text{randc}(\mu_F^i, 0.1)$  是均值为  $\mu_F^i$ , 尺度参数为 0.1 的柯西分布;  $x_{1:N_p,i}^t$  表示第  $t$  代种群中所有航路的第  $i$  个航路点;  $\text{mean}_A(S_{CR}^i)$  表示普通算数平均值,  $\text{mean}_L(S_F^i)$  表示 Lehmer 平均值, 即:

$$\text{mean}_L(S_F^i) = \frac{\sum_{F \in S_F^i} F^2}{\sum_{F \in S_F^i} F} \quad (24)$$

参数  $c$  用于控制  $\mu_{CR}^i$  和  $\mu_F^i$  的变化,文献[15]提出  $c$  的取值范围为  $[0.05, 0.2]$ , 则设置  $c=0.1$ 。

步骤 21 对父代航路点和新生成的子代航路点进行适应度评价与比较,选择进入新候选航路个体的航路点。然而,由于每个航路点的适应度是一个向量而不是标量,所以难以直观地进行比较。针对这一问题,通常的解决方法是将适应度向量的各元素通过加权求和的方式转化为便于比较的标量,但是该方法使用的权重参数因目标函数和约束条件的值域不同而难以确定。因此,本文采用基于优先级的多准则决策方法<sup>[16-17]</sup>选择最佳航路点。航路点评价函数 5)~8)处于第 1 优先级而将被首先满足,航路点评价函数 1)~2)处于第 2 优先级并将被最小化,航路点评价函数 3)~4)处于第 3 优先级。航路点  $a$  优于航路点  $b$  的判断准则如下:

**准则 1**  $a$  和  $b$  都是可行的,即满足航路点评价函数 5)~8),而关于航路点评价函数 1)~2),  $a$  优于  $b$ ;

**准则 2**  $a$  和  $b$  都是可行的,对于航路点评价函数 1)~2),  $a$  不优于  $b$ ,而关于航路点评价函数 3)~4),  $a$  优于  $b$ ;

**准则 3**  $a$  可行,而  $b$  不可行;

**准则 4**  $a$  和  $b$  都不可行,而关于航路点评价函数 5)~8),  $a$  优于  $b$ 。

如果航路点  $a$  优于航路点  $b$ , 则选择  $a$  作为新个体的航路点; 如果航路点  $b$  优于航路点  $a$ , 则选择  $b$  作为新个体的航路点; 如果航路点  $a$  与航路点  $b$  适应度相同, 则维持父代航路点不变。

## 4 仿真验证

为了验证算法的有效性 with 稳定性, 设计了 4 个具有不同数目障碍的情景。情景由地形、障碍以及起始点与目标点 3 个关键部分构成, 地形模拟为:

$$h(x) = \sum_{i=1}^{30} \frac{0.1}{\sum_{j=1}^2 (x_j - a_{ij})^2 + c_i} \quad (25)$$

式中: 参数  $a$  和  $c$  用于改变地形的形状, 防空部署空间大小为  $[0, 10] \times [0, 10] \times [0, 1.5]$ 。

障碍指防空导弹的杀伤空间被设置在  $[1, 9] \times [1, 9]$  的范围内, 4 个情景包含障碍数分别为 15, 30, 60 和 120, 每个防空导弹的位置均设置一部雷达, 导弹的杀伤区直径与雷达的探测区直径分别设置为 0.5 与 1.5。起始点坐标设置为  $(0.5, 5, h(0.5, 5))$ , 目标点坐标设置为  $(9.5, 5, h(9.5, 5))$ 。此外, 种群规模  $N_p = 10$ , 每段连线的分割点数  $N_d = 6$ , 一条突防航路包含航路点的数目  $N_w = 15$ , 目标函数参数  $f_1 \leq 1.5, f_2 = 0, f_3 \leq 30, f_4 \leq 0.5$ 。4 个情景的仿真结果见图 2。

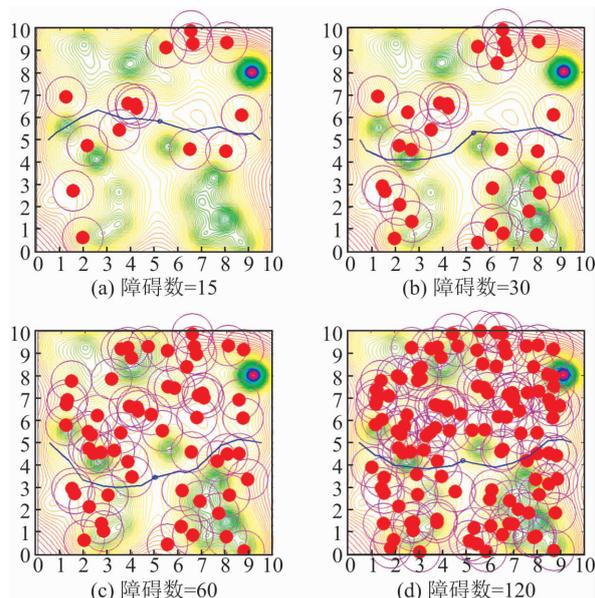


图 2 障碍数为 15、30、60、120 的仿真结果

Fig. 2 The result of simulation in scenario with 15, 30, 60 and 120 obstacles

将本文提出的航路预测算法与基于遗传算法 (Genetic Algorithm, GA) 的航路预测算法进行比较, 通过 25 次重复仿真试验, 得到两算法的性能对

比见表 3, 其中  $G_c$  表示满足约束条件所需的平均进化代数,  $G_{o1}$  表示满足  $P_K$  与  $P_{LR}$  所需的平均进化代数,  $G_{o2}$  表示满足  $R_{RD}$  与  $F_A$  所需的平均进化代数, TIME 表示算法的平均运行时间, SR 表示算法的成功率。每一情景的第 1 行为本文提出算法的性能数据, 第 2 行为基于 GA 的算法的性能数据。

表 3 算法性能对比

情景	$G_c$	$G_{o1}$	$G_{o2}$	TIME	SR
15	8.44	10.44	11.08	8.76	100
	13.24	19.71	23.70	23.01	92
30	11.52	16.68	20.44	10.03	100
	8.92	32.40	29.23	26.59	52
60	13.36	18.32	36.92	12.14	96
	16.21	41.71	40.00	36.68	12
120	19.56	26.29	48.55	16.36	88
	17.16			44.67	0

从仿真结果可以看出, 随着障碍数目的增加, 特别是在障碍数较大的情况下, 本文提出的算法能够预测出空袭目标可能采用的对其较为安全的突防航路, 并且相对于 GA 算法, 其收敛速度快、运行时间短、成功率高。因此本文提出的基于航路点进化的空袭目标突防航路预测算法可行有效, 并且对障碍数目较多情景具有良好的适应性。

## 5 结语

空袭目标突防航路预测是为防空部署方案评估提供辅助决策信息的一种有效直观的方法, 本文基于航路点进化的思想对传统进化算法框架进行改进, 提出了一种采用 JADE 进行航路点进化的空袭目标突防航路预测方法, 充分利用了种群中不同候选航路的航路点信息, 使预测航路的质量得到提升。仿真结果表明, 算法在障碍较多的情况下能够实现空袭目标突防航路的预测, 具有较高应用价值。此外, 可以从确定航路点个数的策略、航路点进化所需航路点的序号范围、航路点的进化策略以及航路的评价准则等方面进行算法的进一步改进。

## 参考文献 (References):

- [1] 邢清华, 刘付显. 区域防空部署优化系统建模[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(5): 712-715.  
XING Q H, LIU F X. Modeling on Area Air Defense Optimization Deployment System[J]. Systems Engineering and Electronics, 2006, 28(5): 712-715. (in Chinese)
- [2] 姜寿春. 地空导弹射击指挥控制模型[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.

- LOU S C. Command and Control Models of Surface-to-Air Missile Firing[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009. (in Chinese)
- [3] 李智勇,黄滔,陈少森,等. 约束优化进化算法综述[J]. 软件学报, 2017, 28(6): 1529-1546.
- LI Z Y, HUANG T, CHEN S M, et al. Overview of Constrained Optimization Evolutionary Algorithms[J]. Journal of Software, 2017, 28(6): 1529-1546. (in Chinese)
- [4] 刘建昌,李飞,王洪海,等. 进化高维多目标优化算法研究综述[J]. 控制与决策, 2018, 33(5): 879-887.
- LIU J C, LI F, WANG H H, et al. Survey on Evolutionary Many-Objective Optimization Algorithms[J]. Control and Decision, 2018, 33(5): 879-887. (in Chinese)
- [5] ZHENG C, LI L, XU F, et al. Evolutionary Route Planner for Unmanned Air Vehicles[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2005, 21: 609-620.
- [6] BESADA-PORTAS E, TORE L De, CRUZ J M De La, et al. Evolutionary Trajectory Planner for Multiple UAVs in Realistic Scenarios[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2010, 26: 619-634.
- [7] PEHLIVANOGLU Y V, BAYSAL O, HACIOGLU A. Vibrational Genetic Algorithm Based Path Planner for Autonomous UAV in Spatial Data Based Environments[C]//Proceedings 3rd Int Conference Recent Adv Space Technol, 2007: 573-578.
- [8] BAKIR L, PAOLO R, ANDREA M Z. Safety Assessment and Control of Robotic Manipulators Using Danger Field[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2013, 29(5): 1257-1270.
- [9] HASIRCIOGLU I, TOPCUOGLU H R, ERMIS M. 3D Path Planning for the Navigation of Unmanned Aerial Vehicles by Using Evolutionary Algorithms[C]//Proceedings Genet Evol Comput Conference, 2008: 1499-1506.
- [10] NIKOLOS I K, TSOURVELOUDIS N C, VALA-VANIS K P. Evolutionary Algorithm Based Path Planning for Multiple UAV Cooperation, in Advances in Unmanned Aerial Vehicles[M]. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2007: 309-340.
- [11] ZHANG R, ZHENG C, YAN P. Route Planning for Unmanned Air Vehicles with Multiple Missions Using an Evolutionary Algorithm[C]//Proceedings IEEE 3rd Int Conference Nat Comput. 2007: 1499-1506.
- [12] ZHANG X, DUAN H. An Improved Constrained Differential Evolution Algorithm for Unmanned Aerial Vehicle Global Route Planning[J]. Applied Soft Computing, 2015, 26: 270-284.
- [13] DAS S, SUGANTHAN P N. Differential Evolution: A Survey of the State-of-the-Art[J]. IEEE Transactions on Evol Comput, 2010, 15(1): 4-31.
- [14] 丁青锋,尹晓宇. 差分进化算法综述[J]. 智能系统学报, 2017, 12(4): 431-442.
- DING Q F, YIN X Y. Research Survey of Differential Evolution Algorithms[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2017, 12(4): 431-442. (in Chinese)
- [15] ZHANG J, SANDERSON A C. JADE: Adaptive Differential Evolution with Optional External Archive[J]. IEEE Transactions on Evol Comput, 2009, 13(5): 945-958.
- [16] FONSECA C M, FLEMING P J. Multi-objective Optimization and Multiple Constraint Handling with Evolutionary Algorithms-Part I: Unified Formulation[J]. IEEE Transactions on Syst, Man Cybern A Syst Humans, 1988, 18(1): 26-37.
- [17] ALI M, SIARRY P, PANT M. An Efficient Differential Evolution Based Algorithm for Solving Multi-objective Optimization Problems[J]. European Journal of Operational Research, 2018, 217(2): 404-416.

(编辑: 徐敏)