

# 基于粒子群优化算法的子母弹 最佳抛撒半径选择\*

张金巍<sup>1</sup>, 谭守林<sup>1</sup>, 陈 力<sup>1</sup>, 杨 其<sup>2</sup>

(1 第二炮兵工程学院, 西安 710025; 2 第二炮兵士官学院, 山东青州 262500)

**摘要:**子母弹抛撒半径是由产品和射击条件决定的,是评定子母弹打击效果的必要条件。为了使子母弹对目标的打击效果达到最佳,需要确定子母弹最佳抛撒半径。针对子母弹打击机场跑道问题,通过 Monte Carlo 方法模拟子弹落点并计算机场跑道的失效率。基于粒子群优化算法,对子母弹抛撒半径进行优化求解,使跑道失效率达到最大值。仿真结果表明,粒子群优化算法能够有效的达到或接近全局最优。同时,与遗传算法相比,粒子群优化算法收敛速度更快,精度更高,能够有效的求解子母弹最佳抛撒半径问题。

**关键词:**子母弹;最佳抛撒半径;跑道失效率;粒子群优化算法;Monte Carlo 方法

中图分类号:TJ414.5 文献标志码:A

## Selection of Submunition Missile's Best Separation Radius Based on Particle Swarm Optimization (PSO)

ZHANG Jinwei<sup>1</sup>, TAN Shoulin<sup>1</sup>, CHEN Li<sup>1</sup>, YANG Qi<sup>2</sup>

(1 The Second Artillery Engineering College, Xi'an 710025, China;

2 The Second Artillery NCO School, Shandong Qingzhou 262500, China)

**Abstract:** The separation radius of submunition is decided by the manufacture and the condition of shooting, which is the condition of estimating the damage effect of submunition missile. For the sake of the best striking effect of submunition, ascertainment of the best separation of submunition is needed. Aimed to the issue of the submunition against runway, the points of bullets are simulated by using Monte Carlo methods, and the computer simulating calculation of disable probability of runway (DPR) is carried out. Based on PSO arithmetic, the separation radius of submunition is optimized, and the best DPR is achieved. The simulation results show that, PSO arithmetic can achieve the whole optimization or be more close to it more efficiently. Compared with genetic algorithm (GA), PSO has swifter speed of convergence, higher efficiency of calculation for the calculation of submunition missile's best separation radius.

**Keywords:** submunition; best separation radius; disable probability of runway; PSO; Monte Carlo methods

### 0 引言

现代军事斗争中,夺取制空权是赢得战争胜利的重要保证。导弹是主要的作战武器之一,利用子母弹封锁敌机场跑道,阻止其作战飞机起飞,是夺取制空权的重要手段。

在武器数量一定的情况下,机场跑道的毁伤效果与跑道的大小形状、飞机的升降性能、导弹的射击精度、子弹头个数、弹头威力和子弹抛撒半径有关。武器系统定型后,其精度基本确定,

子母弹的子弹头个数和子弹头威力也一般确定了,而子母弹的抛撒半径是可以调整的。子母弹的抛撒半径主要由子弹的侧向抛撒速度和子弹飞行时间决定,还与母弹在抛撒点的运动状态有关。通过对子母弹抛撒半径的优化选择,可以使跑道失效率达到最大,为作战决策提供依据。

在弹道设计时通过改变射击诸元可以调整抛撒高度和母弹速度来获得最佳抛撒半径。因此研究子母弹最佳抛撒半径问题可以为子母弹弹道设计提供重要依据。另外,在弹头设计时也

\* 收稿日期:2009-02-20

基金项目:第二炮兵武器发展科研基金资助

作者简介:张金巍(1983-),男,河南上蔡人,硕士研究生,研究方向:导弹总体性能论证与评估。

可以通过改变子母弹侧向抛撒速度达到最佳抛撒半径,所以研究子母弹最佳抛撒半径问题还可以为子母弹弹头设计提供重要参考。

文中基于粒子群优化算法,对子母弹最佳抛撒半径问题进行了探讨,并将仿真结果与遗传算法进行了比较。

# 1 基于 Monte Carlo 的机场跑道失效率计算模型

## 1.1 瞄准点选择

取原点  $o'$  为跑道中心点,  $x'$  轴过原点与跑道方向平行,  $y'$  轴在跑道平面内过原点垂直于  $x'$  轴并与  $x'$  成直角坐标系, 构造目标坐标系  $x'o'y'$ 。

机场跑道 ( $L \times B$ ) 是一类典型的窄长形面目标, 一般机场长  $L$  为 3000m, 宽  $B$  为 46m, 长宽比达 65 : 1, 导弹子母弹的抛撒半径一般在 100m 与 400m 之间, 子母弹抛撒圆环直径远远大于跑道宽度, 故可假设跑道为均匀线目标。因此在研究子母弹对跑道目标打击时, 瞄准点按均匀选点的原则进行选取, 以目标的中心作为中心点, 瞄准点以中心点为对称等间隔分布, 间距  $d_x = L/M$ 。其中  $M$  为发射导弹数。

设第  $i$  导弹的瞄准点为  $(x_i, y_i)$ , 则:

$$x_i = d_x(i - (M - 1)/2) \quad i = 0, \dots, M - 1 \quad (1)$$

$$y_i = 0 \quad i = 0, \dots, M - 1 \quad (2)$$

## 1.2 子弹落点散布模拟

### 1.2.1 母弹随机落点模型<sup>[2]</sup>

设导弹的圆概率偏差为 CEP, 母弹落点  $(m_x, m_y)$  服从  $(\mu_1, \mu_2, \sigma_1, \sigma_2, \rho)$  二维正态分布, 其中  $\mu_1, \mu_2$  分别表示母弹落点坐标的均值, 即瞄准点  $(x_i, y_i)$ ,  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$  表示导弹的射击精度,  $\rho$  表示  $X$  方向和  $Y$  方向的相关系数。若坐标轴与主散布轴平行, 则射向与侧向散布互相独立, 即相关系数  $\rho = 0$ 。射击精度与 CEP 的关系如下:

$$CEP = 1.17741002\sigma \quad (\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma) \quad (3)$$

第  $i$  母弹落点坐标为:

$$\begin{cases} m_{ix} = x_i + \sigma \cdot \sqrt{-2 \cdot \ln(\mu_1)} \cdot \cos(2\pi\mu_2) \\ m_{iy} = y_i + \sigma \cdot \sqrt{-2 \cdot \ln(\mu_1)} \cdot \sin(2\pi\mu_2) \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $x_i, y_i$  为第  $i$  导弹的瞄准点坐标,  $\mu_1, \mu_2$  为  $(0, 1)$  区间上相互独立的均匀分布随机数。

### 1.2.2 子弹随机落点模型<sup>[3]</sup>

以子弹的抛撒中心为原点  $o$ , 建立子弹落点坐标系  $xoy$ , 子弹落点在以母弹落点为圆心的圆环内服从均匀分布, 圆环外径为子弹抛撒半径  $R$ , 内径为盲区半径  $r$ , 取  $\frac{r}{R} = 0.3$ 。假设子弹在圆环中服从径向均匀分布, 设第  $i$  枚导弹第  $j$  个子子弹的落点坐标为  $(x_{ij}, y_{ij})$ 。其模拟计算方法如下:

$$\begin{cases} x_{ij} = R \cdot v_1 \cos(2\pi v_2) \\ y_{ij} = R \cdot v_1 \sin(2\pi v_2) \end{cases} \quad (5)$$

其中:  $v_1$  为  $(r/R, 1)$  区间上均匀分布随机数,  $v_2$  为  $(0, 1)$  区间上均匀分布随机数, 与  $v_1$  相互独立。

为了方便计算对目标的毁伤效果, 通常把子弹落点坐标转换到目标坐标系。子弹落点在目标坐标系中的坐标为:

$$\begin{cases} x'_{ij} = m_{ix} + x_{ij} \\ y'_{ij} = m_{iy} + y_{ij} \end{cases} \quad (6)$$

用 Matlab 编程模拟子弹落点如图 1 所示, 其中用“+”表示的是有效子弹。

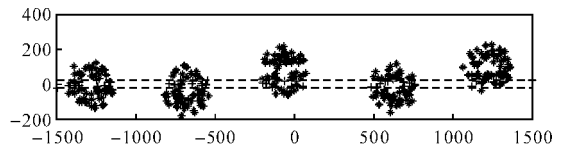


图 1 子弹落点模拟图

### 1.3 跑道失效率计算

机场跑道目标是一类典型的窄长形目标, 对跑道主要采用跑道失效率作为毁伤指标, 下面给出跑道失效率的计算方法。

1) 判断子弹落点是否在跑道上

设弹坑半径为  $r_0$ , 如果  $-\frac{L}{2} - r_0 \leq x'_{ij} \leq \frac{L}{2} + r_0$  且  $-\frac{B}{2} - r_0 \leq y'_{ij} \leq \frac{B}{2} + r_0$ , 则  $(x'_{ij}, y'_{ij})$  在跑道上, 记为  $(x(k), y(k))$ ,  $k = 1, 2, 3, \dots, S$ 。  $S$  为落在跑道上子弹的个数。

2) 判断是否存在最小升降窗口

最小升降窗口是指飞机在跑道上安全起飞或降落所需的最小完好矩形区域, 设其长度为

$W_L$ , 宽度为  $W_B$ 。

对整个跑道, 边界条件取为:

$$\begin{cases} x(0) = -\frac{L}{2} \\ y(0) = -\frac{B}{2} \\ x(S+1) = \frac{L}{2} \\ y(S+1) = \frac{B}{2} \end{cases} \quad (7)$$

将  $(x(k), y(k))$  按  $x(k)$  的大小顺序排列, 使得  $x(0) \leq x(1) \leq \dots \leq x(S) \leq x(S+1)$ 。如果存在  $x(k) - x(k-1) \leq W_L, k = 1, \dots, S+1$ , 则封锁失败, 停止搜索; 否则, 以  $x$  向坐标最小的落点  $x(0)$  为起点, 在跑道上以最小的升降窗口长度  $W_L$  为定步长, 得到一个区间, 搜索其中的弹着点, 对它们的  $y$  向坐标进行排序, 判断是否存在相邻两点的  $y$  向间距大于最小升降窗口的宽度  $W_B$ , 如果存在, 封锁失败, 停止搜索; 否则进行下一步, 以区间  $x$  向坐标次小点的弹着点  $x(1)$  为起点, 重复操作。当以  $x(k)$  为起点搜索, 如此时  $x(k)$  与  $x(S+1)$  的  $x$  向间距小于  $W_L$ , 则跑道失效, 停止搜索; 否则以  $x(k+1)$  为起点进行搜索。直到确认跑道上没有最小升降窗口或者封锁失败。

### 3) 计算跑道失效率

记下跑道失效的次数  $N_1$  和总的模拟次数  $N$ , 则跑道失效率  $P$  为:

$$P = \frac{N_1}{N} \quad (8)$$

文中  $N$  取 5000, 仿真结果表明这样计算的跑道失效率较为准确, 从而保证了优化的科学性。

## 2 基于粒子群优化算法求解最佳抛撒半径的模型

粒子群优化算法是一种基于群体智能的演化计算技术, 算法中每个粒子代表一个解, 系统随机初始化一组解, 通过迭代在解空间内进行搜索来寻找最优解<sup>[4-5]</sup>。相对于其它的演化计算方法, 它最大的一个优点是搜索速度比较快, 精度比较高。相关问题的研究目前在国内外已经逐渐

形成了智能优化算法中一个新的热点, 研究粒子群优化算法的文献很多, 文献[6-7]对其作了详细的综述。下面将此算法应用到子母弹最佳抛撒半径求解问题中。

其优化求解的基本步骤如下:

1) 首先在解空间随机地产生初始化的粒子种群, 取种群大小为  $m$ 。由于子母弹抛撒半径一般在 500m 以内, 故可设最佳抛撒半径的解空间为  $[0, 500](m)$ 。种群中的粒子, 即为子母弹的抛撒半径  $R_i$ , 其中  $i = 0, \dots, m$ 。相应的对每个粒子也随机初始化其飞行速度  $V_i$ 。

2) 为评价粒子位置的优劣, 引入适应度函数  $f(R_i)$ , 取适应度函数为抛撒半径为  $R_i$  时的跑道失效率。计算每个粒子的适应度, 即对  $R_i$  通过 Monte Carlo 计算出对应的跑道失效率  $f(R_i)$ 。

3) 比较适应度函数的大小, 根据每个粒子的适应度函数, 将粒子个体  $R_i$  迄今搜索到的最佳位置记为  $P_i$ ; 将整个粒子群迄今搜索到的最佳位置记为  $P_g$ 。

4) 根据下面的两个式子调整粒子的速度和位置。

$$v_i = \omega \cdot v_i + c_1 \cdot r_1 \cdot (P_i - x_i) + c_2 \cdot r_2 \cdot (P_g - x_i) \quad (9)$$

$$x_i = x_i + v_i \quad (10)$$

其中:  $i = 0, \dots, m$ ;  $\omega$  为惯性权重, 反映了算法在全局搜索和局部搜索之间的权衡, 大的  $\omega$  倾向于全局搜索, 小的  $\omega$  则倾向于局部搜索。 $\omega$  一般随搜索的进行逐渐减小;  $c_1, c_2$  为学习因子, 其大小反映了粒子自身学习和全局学习的能力;  $r_1, r_2$  是  $[0, 1]$  之间均匀分布的随机数。

5) 重复 2) 至 4) 的过程, 直到满足终止条件, 终止条件设为达到最大迭代次数。

## 3 仿真结果及分析

### 3.1 仿真条件

设跑道长  $L = 3000m$ , 跑道宽  $B = 46m$ , 最小升降窗口长  $W_L = 800m$ , 最小升降窗口宽  $W_B = 20m$ , 弹坑半径  $r_0 = 1m$ 。武器精度  $CEP = 100m$ , 子弹个数 70, 导弹数量 5 枚。粒子种群大小为 20, 惯性权值  $\omega = 0.9$ , 学习因子  $c_1 = c_2 = 2$ , 最大进化代数 50。

### 3.2 仿真流程图

由前文提出的求解模型,可得仿真流程图,如图 2 所示。

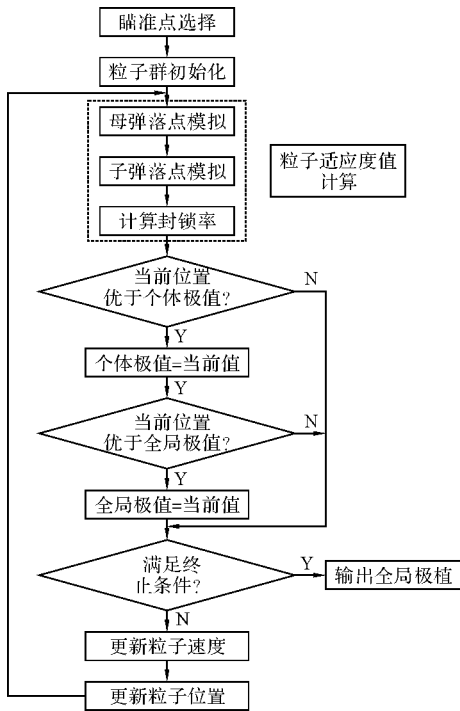


图 2 仿真流程图

### 3.3 仿真结果

根据上述的求解模型及仿真条件,利用 VC++6.0 编制仿真软件,在 CPU 为 3.0GHz、内存为 512M 的计算机环境下进行仿真计算,并用 Matlab 将仿真结果绘图如图 3、图 4 所示。

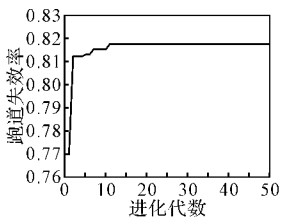


图 3 跑道失效率进化图

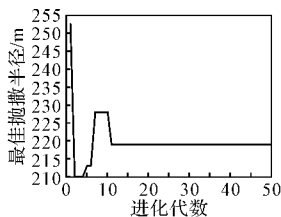


图 4 抛撒半径进化图

### 3.4 结果分析

由图 3 可以看出:在迭代的初期,随着进化代数的增加,跑道封锁率迅速提高,在进化到 12 代左右收敛于最优值 0.835;由图 4 可以看出:在迭代初期,抛撒半径在最优值附近上下波动,最后收敛于最佳值 219.5m。随后,虽然进化代数增加,跑道封锁率和子母弹的抛撒半径基本没有变化。下面将用粒子群优化算法得到的结果与采

用遗传算法得到的结果进行比较分析,其结果如表 1 所示。

表 1 粒子群优化算法与遗传算法比较

比较项目	粒子群优化算法	遗传算法
最优解(R/P)	219.5/0.835	210/0.821
出现最优解的代数	12	34
计算用时	约 8min	约 20min

由表 1 可知:粒子群优化算法对于解决子母弹最佳抛撒半径问题,搜索速度快,求解的效率,解的精度也较遗传算法高,因此是十分有效的。

## 4 结束语

利用粒子群优化算法对子母弹抛撒半径进行优化选择,可以有效提高子母弹对机场跑道的打击效果。相比遗传算法求解子母弹最佳抛撒半径问题,粒子群优化算法用时更少,计算效率更高。由于子母弹的抛撒半径与抛撒高度直接相关,因此在下一步工作中可以根据打击效果的要求研究子母弹的最佳抛撒高度。也可以研究不同 CEP 下子母弹最佳抛撒半径问题,为多型号战术导弹子母弹复合打击决策提供理论依据。

### 参考文献:

- [1] 邱成龙. 地地导弹火力运用原理[M]. 北京:国防工业出版社,2001.
- [2] 雷宁利,唐雪梅. 侵彻子母弹对机场跑道的封锁概率研究[J]. 系统仿真学报,2004,16(9):2030-2032.
- [3] 舒健生,李亚雄,苏国华. 子母弹抛撒盲区对毁伤效果的影响研究[J]. 弹箭与制导学报,2008,28(3):150-152.
- [4] 王伯成,施锦丹,王凯. 粒子群优化算法的研究现状与发展概述[J]. 电讯技术,2008,48(5):7-11.
- [5] 王晓英,邢志栋,黄瑞平. 改进的粒子群优化算法[J]. 计算机应用与软件,2008,25(5):85-86.
- [6] Kennedy J, Eberhart R C. Particle swarm optimization[C]// Proceedings of IEEE Conference on Neural Networks, Australia,1995:1942-1948.
- [7] Wen Y K. Method for random vibration of hysteretic systems[J]. Proceedings of ASCE, Journal of Engineering Mechanics, 1976(12):249-263.