

# 影响子母弹终端效应的关键参数及其搜索方法

杨鹏飞, 方洋旺, 雍霄驹, 毛东辉

(空军工程大学航空航天工程学院, 陕西西安, 710038)

**摘要** 为解决航空子母弹抛撒点抛撒高度、速度等参数设定问题, 基于一种子弹单圈多段排布的航空子母弹模型, 通过建立子弹的外弹道方程, 研究它的地面散布并且寻找其散布规律; 然后根据在实战中要求的所要摧毁的目标形状、面积, 从子母弹作战效能角度出发, 提出一种搜索算法, 用该算法能搜索出覆盖目标范围所要求的子母弹的几种抛撒参数。仿真验证表明: 该算法能够使子弹有效地覆盖目标, 最大误差 2.5%, 提高了航空子母弹的作战效能。

**关键词** 子母弹; 地面散布; 搜索方法; 关键参数

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.03.011

**中图分类号** V218; TN973 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2013)03-0046-04

## The Key Parameters Affecting the Longitudinal End Effect of the Shrapnel and the Search Method

YANG Peng-fei, FANG Yang-wang, YONG Xiao-ju, MAO Dong-hui

(Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** In order to get the key parameters of the Projectile Point of the sub-warheads, the external trajectory equation of bullets is constructed and the rule of the cluster warhead's fall point is analyzed based on a model of warhead with sub-warheads and the structure of excessive segments arrangement. This paper proceeds from the operational effectiveness, elects a search algorithm based on the shape and area of target. After simulation investigation, the use of this algorithm can ensure that the warheads effectively cover the whole area of the target, and the maximum error is only 2.5%. Therefore, the algorithm is efficient in improving the operational effectiveness of the shrapnel, and also can provide a new thought for the use and the development of the shrapnel.

**Key words:** shrapnel; fall point; search arithmetic; key parameters

子母弹是大规模杀伤地面目标的有效武器, 其作用日益受到重视。子弹的落点分布直接影响到子弹的终端毁伤效应, 在文献[1]中, 作者为了确定子弹的抛射机构, 从子弹的最佳分布范围求出子弹所需的抛射速度, 得到了比较好的效果, 但是其缺乏一般性, 不能随目标大小的变化实时求出最佳抛射速

度等参数。

本文在文献[1]的基础上, 提出一种搜索方法, 搜索子弹合适的抛撒参数如抛撒高度、速度, 弹道倾角等, 以提高子母弹的作战效能。

收稿日期: 2012-11-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60874040)

作者简介: 杨鹏飞(1988-), 男, 陕西商洛人, 硕士生, 主要从事机载武器系统效能评估研究。

E-mail: yangpengfei1988909@163.com

# 1 子母弹抛撒模型

## 1.1 子母弹结构

假设某型航空子母弹的子弹在弹仓内分 5 段排列<sup>[1]</sup>,每段 7 枚子弹排成一圈,采用橡胶管燃气径向抛射。5 段子弹在地面分 3 圈分布,最上 2 段分布最外圈,中间 2 段分布中圈,最下 1 段子弹分布内圈。分布在同一圈的 2 端子母弹抛射速度相同,并使它们在母弹内相差  $2\pi/14$ ,这样不仅使它们在地面处在同一圈,并且能保证间隔均匀。子弹抛射高度范围  $H:100\sim 300\text{ m}$ ,母弹速度范围  $V_p:200\sim 400\text{ m/s}$ 。

## 1.2 子弹运动

### 1.2.1 子弹初始状态

由抛点开始作自由运动的子弹,初始状态由其初始速度矢量  $V_0$  决定。由文献[1]可知初始速度的来源有 3 个<sup>[2]</sup>:母弹存速传给子弹的速度  $V_p$ ,也就是抛射时刻母弹的速度;母弹的转速赋予子弹的速度  $V_w$ ;抛射机构赋予子弹的速度  $V_d$ 。其计算公式分别为:

$$\begin{cases} V_p = (V_p, 0, 0)^T \\ V_d = (0, v_d \cos \phi, v_d \sin \phi)^T \\ V_w = (0, -w r \sin \phi, w r \cos \phi)^T \end{cases} \quad (1)$$

设平动坐标系  $OX_1Y_1Z_1$  和速度坐标系  $OX_2Y_2Z_2$  的基坐标分别为<sup>[1]</sup>:

$$\begin{cases} l_1 = (l_{x_1}^1, l_{y_1}^1, l_{z_1}^1) \\ l_2 = (l_{x_2}^2, l_{y_2}^2, l_{z_2}^2) \end{cases} \quad (2)$$

则速度坐标系到平动坐标系转换矩阵为:

$$A = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中  $\theta$  为弹道倾角。子弹在地面坐标系中的速度矢量为:

$$\begin{aligned} V_0 &= [V_{0x}, V_{0y}, V_{0z}]^T = \\ &A^{-1} (V_p + V_d + V_w) = \\ &A^{-1} \begin{bmatrix} V_p \cos \theta + (V_d \cos \phi - w r \sin \phi) \sin \theta \\ -V_p \sin \theta + (V_d \cos \phi - w r \sin \phi) \cos \theta \\ V_d \sin \phi + w r \cos \phi \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

### 1.2.2 子弹运动方程

由质点外弹道学<sup>[9-10]</sup>可知,空气阻力为  $R = S\rho V^2/2iC_x$ ,式中: $S$ 为子弹的横截面积; $\rho$ 为子弹所处高度的空气密度; $V$ 为子弹的速度; $i$ 为弹形系数; $C_x$ 为标准弹的阻力系数。通过计算得到阻力随

高度变化的关系式<sup>[3]</sup>:  $R = -1/2iC_x(M_a)S\rho_m V^2(1 - 219 \times 10^{-5} y)^{4.4016}$ ,式中: $\rho_m$ 为地面空气密度,其值是  $1.206\text{ kg/m}^3$ ;  $y$  为子弹所处高度。子弹运动方程<sup>[4]</sup>为:

$$\begin{cases} \frac{dV_x}{dt} = -\frac{1}{2m}iC_x(M_a)S\rho_m V(1 - 219 \times 10^{-5} y)^{4.4016} V_x \\ \frac{dV_y}{dt} = -\frac{1}{2m}iC_x(M_a)S\rho_m V(1 - 219 \times 10^{-5} y)^{4.4016} V_y + g \\ \frac{dV_z}{dt} = -\frac{1}{2m}iC_x(M_a)S\rho_m V(1 - 219 \times 10^{-5} y)^{4.4016} V_z \\ V^2 = V_x^2 + V_y^2 + V_z^2 \\ \frac{dx}{dt} = V_x; \frac{dy}{dt} = V_y; \frac{dz}{dt} = V_z \end{cases} \quad (5)$$

式中: $m$ 为子弹质量; $g$ 为重力加速度; $V_x, V_y, V_z$ 分别为子弹速度  $V$  在  $x, y, z$  轴上的分量。在地面坐标系中初始条件为式(4)和  $x_0 = z_0 = 0, y_0 = h, t = 0$ ,终止条件为  $y = 0$ 。

## 2 关键参数的仿真及分析

### 2.1 子弹典型分布

由于方程(5)是多元微分方程,因此选用数值解法,运用 MATLAB 编程计算。微分方程用精度较高的四阶 Runge-Kutta 法求解<sup>[5]</sup>,假设  $C_x = 0.38, N = 7, m = 3.5\text{ kg}, i = 1.05, \phi = 0, r = 152\text{ mm}, S = 0.06^2 \pi\text{ m}^2$ ,当高度  $H = 300\text{ m}$ ,弹道倾角为  $\theta = 60^\circ$ ,母弹速度  $V_p = 300\text{ m/s}$ ,3 段的抛射速度分别为  $v_{d1} = 37\text{ m/s}, v_{d2} = 26\text{ m/s}, v_{d3} = 11\text{ m/s}$  时,子弹的地面散布见图 1。

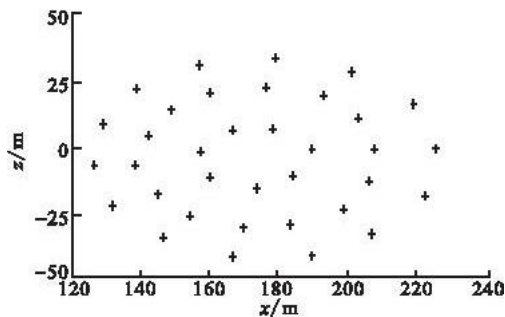


图 1 子弹落点分布

Fig.1 The fall point of cluster warheads

此时,该子母弹覆盖面积为  $6201\text{ m}^2$ ,子母弹地面散布近似椭圆状。通过最小二乘法拟合,得到其每圈子母弹散布的椭圆形方程。为计算不同参数时子弹覆盖面积,只考虑最外圈子母弹分布即可。

### 2.2 不同抛撒高度对散布形状的影响

假设  $\theta = 60^\circ, V_p = 300\text{ m/s}, H:250\sim 300\text{ m}$ 。仿真结果见图 2。

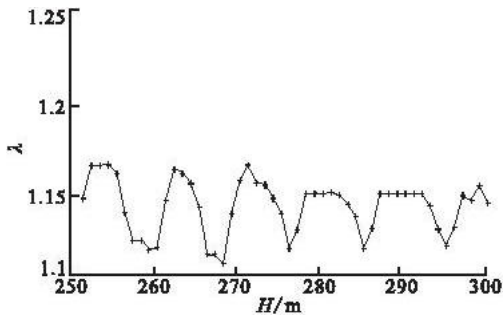
图2 抛撒高度对长短轴之比  $\lambda$  的影响

Fig.2 Height influence on the ratio of the major axis to the minor axis

由仿真结果可以看出,当抛撒点  $P$  的高度降低时,  $\lambda = X_c/Y_c$  变化范围很小,  $\lambda \in (1.1, 1.18)$ , 因此, 可以得出结论: 抛撒点高度的变化不影响散布椭圆的长短轴之比。

### 2.3 不同母弹速度对散布形状的影响

假定  $H = 300 \text{ m}$ ,  $\theta = 60^\circ$ ,  $V_p: 300 \sim 350 \text{ m/s}$ 。仿真结果见图 3。

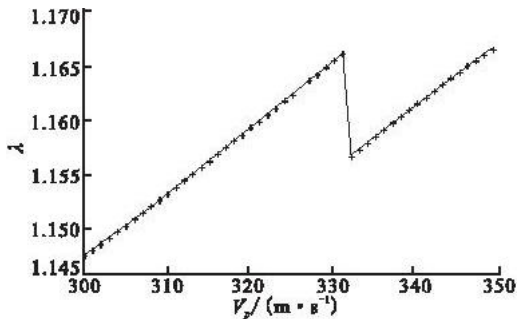
图3 速度对  $\lambda$  的影响

Fig.3 The velocity influence on the ratio of the major axis to the minor axis

从图 3 可看出,随着抛撒点母弹速度的增加,其  $\lambda \in (1.14, 1.17)$ , 变化量非常小, 可以认为, 抛撒点母弹速度的变化并不会影响椭圆长短轴之比。

### 2.4 不同弹道倾角对散布形状的影响

假定  $H = 300 \text{ m}$ ,  $V_p = 300 \text{ m/s}$ ,  $\theta: 90^\circ \sim 20^\circ$ , 仿真结果见图 4。

由图 4 可以看出,随着弹道倾角的增加,椭圆的长短轴减小,当  $\theta = 90^\circ$  时,  $X_c = Y_c$ ,  $\lambda \in (1, 2.5)$ , 变化比较明显。

根据上面的仿真结果及分析,可以看出,当抛撒点的高度、母弹速度变化时,子弹散布成的椭圆其  $\lambda$  基本保持不变,只有当抛撒点的弹道倾角  $\theta$  变化时,  $\lambda$  才有显著变化。

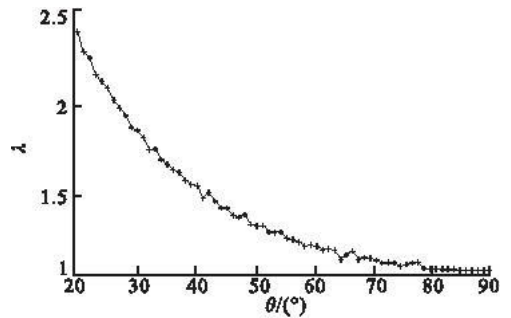
图4 弹道倾角对  $\lambda$  的影响

Fig.4 The trajectory inclination angle influence on the ratio of the major axis to the minor axis

## 3 基于作战效能的关键参数搜索

### 3.1 目标形状

假设所要摧毁的目标区域为长方形  $A$ , 见图 5。图中  $a, b$  分别为长方形的长和宽, 要用该型航空子母弹摧毁该区域, 并且使得无效毁伤区域最小, 就要使子弹的毁伤范围覆盖  $A$ , 基本上等同于其最小外接椭圆的面积  $B$ , 由几何学可知,  $A$  的最小外接椭圆的长短半轴为:  $X_c = a/\sqrt{2}$ ;  $Y_c = b/\sqrt{2}$ 。该椭圆为最外圈子弹散布的椭圆, 其面积为  $S = p \cdot X_c Y_c$  [8]。

同时, 由于该型子母弹存在最大毁伤面积 [9], 因此, 当  $B$  过大时, 就不能进行有效毁伤, 这里假定该型子母弹最大毁伤面积  $S_{\max} = 8000 \text{ m}^2$ 。

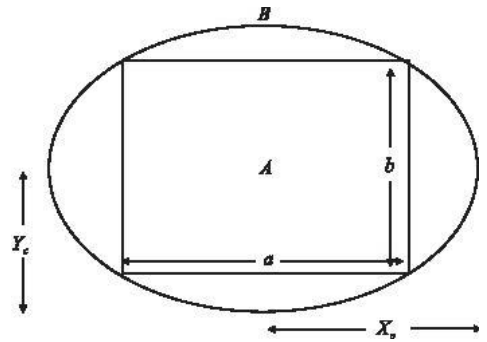


图5 目标区域和最小外接椭圆

Fig.5 The target area and the minimum circumscribed ellipse

### 3.2 关键参数搜索

#### 3.2.1 搜索方法

首先将  $H, V_p$  固定为常值, 变化  $\theta$ , 步长  $\Delta = 1^\circ$ , 每进行一步, 计算最外圈  $\lambda$ , 当  $\lambda = a/b$  时, 停止计算。然后固定  $\theta$ , 搜索  $H$  和  $V_p$ , 搜索范围  $H$  为  $100 \sim 300 \text{ m}$ ;  $V_p$  为  $200 \sim 400 \text{ m/s}$ 。对该区域的每个点进行计算, 并且计算每个点得到的椭圆长短半轴  $X_c, Y_c$ , 再计算与实际期望得到的长短半轴  $X_c, Y_c$  的方差  $D = (X_c - X_c)^2 + (Y_c - Y_c)^2$ , 方差  $D$  最小的点, 即为理想的  $H$  和  $V_p$ 。

3.2.2 搜索步骤

根据以上分析,将搜索抛射点参数分为以下几个步骤:

- 1)输入目标 A 的长、宽,计算最小外接 S;
- 2)若  $S \geq S_{max}$ ,则转向步骤 3),否则转向步骤 4);
- 3)显示“无法进行饱和攻击”;
- 4)计算  $\lambda$ ,搜索  $\theta$ ;

- 5)搜索  $H, V_p$ ;
- 6)计算实际毁伤面积  $S'$ ;
- 7)计算误差  $\eta = |S' - S|/S$ 。

用该搜索方法得到的实验结果见表 1,使用该搜索方法得到的参数,子弹可以比较理想地毁伤目标区域,最大误差不超过 2.5%,表中第 3 行表示目标区域过大无法进行饱和攻击。

表 1 仿真实验参数及结果

Tab.1 The test conditions and results

a,b/m	S/m <sup>2</sup>	子母弹参数			S'/m <sup>2</sup>	$\eta/\%$
		H/m	$V_p/(m \cdot s^{-1})$	$\theta/(^\circ)$		
(100,50)	7 840	139	307	27	7 641	2.5
(80,60)	7 538	126	310	49	7 408	1.7
(95,55)	8 205	—	—	—	—	—
(70,50)	5 496	97	298	44	5 381	2.0

4 结语

本文首先根据子母弹经典弹道,用 Runge-Kutta 法求得其数值解,再用 MATLAB 仿真该子弹地面散布图形,通过分析其诸多影响因素,确定了其中几个关键参数,即抛撒高度,母弹速度及弹道倾角,并且提出了一种搜索方法,根据目标的形状推算出其最佳抛射点参数。该算法在搜索  $H, V_p$  时,由于范围过大,每次搜索都需要较长的时间,因此,实时性并不理想。如何在实时性和搜索范围之间达到平衡以及进一步减小该算法的误差,将是下一步研究的方向。

参考文献(References):

[1] 孔维红,姜春兰,王在成,等.某型航空子母弹子弹地面散布研究[J].航空兵器,2005,11(4):25-28.  
KONG Weihong,JIANG Chunlan,WANG Zaicheng, et al.Study for bomblets distribution on ground of aerial cluster bomb[J].Aero weaponry, 2005,11(4): 25-28. (in Chinese)

[2] Nikolaos Gatsis, Antonio G Marques, Giannakis Georgios B. Power control for cooperative dynamic spectrum access networks with diverse QoS constraints [J]. IEEE transactions on communications, 2010, 58(3):933-944.

[3] 杨世荣,王才宏,李小强,等.子母弹椭圆散布模型的建立与仿真[J].火力与指挥控制,2008,14(4):57-61.  
YANG Shirong,WANG Caihong,LI Xiaoqiang, et al. Simulated computation method of the cluster warhead's fall point[J].Fire control and command control,2008,14(4):57-61. (in Chinese)

[4] Wang Wenjun, Huang Desuo, Zheng Yu, et al. Re-

search on arithmetic of searching minimum lift window in blocking airdrome runway used intrusive submunition missile [J]. Command control and simulation, 2007, 29(6): 31-34.

[5] 韩统,魏贤智,肖新长,等.航空子母弹对地攻击效果评估方法[J].空军工程大学学报:自然科学版,2007,8(1):57-61.  
HAN Tong, WEI Xianzhi, XIAO Xinchang, et al. A study of air-to-ground attacking effectiveness assessment of cluster bomb [J]. Journal of air force engineering university, natural science edition, 2007, 8(1): 57-61. (in Chinese)

[6] WU Qisong, XING Mengdao, BAO Zheng, et al. Wide swath high range resolution imaging with MIMO-SAR [C]// Radar conference. Guilin: IET press, 2009: 1-6.

[7] Auer Gunther, Dammann Armin, Sand Stephan. Channel estimation for OFDM systems with multiple transmit antennas by exploiting the properties of the discrete fourier transform [C]// PIMRC2003. Beijing: IEEE press, 2003: 7-10.

[8] Proakis J. Digital communications [M]. New York: Mc Graw-hill, 2005.

[9] Gilbo Eugene P. Optimizing airport capacity utilization in air traffic flow management subject to constraints at arrival and departure fixes [J]. IEEE transactions on control systems technology, 1997, 5(5): 490-503.

[10] 黄寒砚,王正明.末端修正子母弹对面目标的设计效能评估[J].系统仿真学报,2008,20(23):12-16.  
HUANG Hanyan, WANG Zhengming. Fire effectiveness assessment for terminal correction cluster warhead attacking area target [J]. Journal of system simulation, 2008, 20(23): 12-16. (in Chinese)

(编辑:田新华)