

## 航空末敏子母弹地面散布研究

马宗成<sup>1</sup>, 刘占辰<sup>1</sup>, 杨昊东<sup>2</sup>

(1. 空军工程大学航空航天工程学院, 西安 710038; 2. 中国人民解放军 94040 部队, 新疆 库尔勒 841000)

**摘要:** 研究了航空末敏子母弹地面散布问题。与炮射末敏子母弹做对比, 分析了航空末敏子母弹的特点。在此基础上, 提出了一种基于子弹落点上、下界快速估计子弹落点散布的方法; 对比分析了不同抛撒条件对航空末敏子母弹地面散布的影响规律和影响程度, 并收集数据进行仿真。仿真结果表明: 该估计方法的极限误差在作战允许的误差范围内; 抛撒点速度和弹道倾角对子弹散布半径有重要影响。

**关键词:** 航空末敏弹; 抛撒; 地面散布

**中图分类号:** TJ761.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)10-0077-04

## On Ground Dispersion of Aerial Terminal Sensitive Submunition

MA Zong-cheng<sup>1</sup>, LIU Zhan-chen<sup>1</sup>, YANG Hao-dong<sup>2</sup>

(1. Aeronautics and Astronautics Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;  
2. No. 94040 Unit of PLA, Korla 841000, China)

**Abstract:** The ground dispersion of aerial terminal sensitive submunition was studied. The characteristics of terminal sensitive submunition were analyzed based on the comparison with the gun shot terminal sensitive submunition. Then, a method was proposed for quick estimation of the bullet dispersion based on the upper and lower bounds of bullet drop-points. How the different scattering conditions influence the bullet dispersion was also studied, and data was collected for simulation. The result shows that, the limiting error of the estimation method is within the allowable combat range, and the scattering velocity and trajectory angle have an important influence on the bullet dispersion's radius.

**Key words:** aerial terminal sensitive submunition; scattering; ground dispersion

### 0 引言

航空末敏子母弹的抛撒过程是整个飞行过程中最为复杂的一个阶段, 直接决定着子弹的地面散布, 影响子母弹的面杀伤能力及作战使用情况。但是由于末敏子弹(伞弹系统)运动过程复杂, 很难用精确的数学模型模拟出真实的落点分布。目前, 国内对航空末敏弹的散布问题研究得还比较少。文献[1-2]根据子弹的数学模型, 给出了地面炮射子母弹子弹的落点计算方法; 文献[3]利用 Monte-Carlo 方法估算出地面炮射子母弹子弹的落点分布区域; 文献[4]利用子母弹的解法, 分别从动力学模型和数理统计方法的角度, 给出了航空子母弹的落点分布计算方法及影响因素; 文献

[5]给出了单个末敏弹的弹道计算方法, 但并未指出抛撒弹道诸元对散布的影响。

本文提出了一种基于子弹落点上、下界快速估计子弹落点散布的方法。相比 Monte-Carlo 数理统计方法给出的概率分布图, 本文的研究方法不需要多次仿真模拟, 更加快速, 散布区域更加明确, 便于决策。仿真结果表明: 该方法的极限误差在作战允许的误差范围内; 抛撒点速度对地面散布的短(纵)轴影响较大, 而抛撒点弹道倾角对子弹散布长(横)轴有重要影响。

### 1 理论分析

#### 1.1 航空末敏子母弹的特点

航空末敏子母弹是以常规航空炸弹作为母弹, 由飞机平台发射打击地面装甲目标的一种武器。与炮射末敏子母弹相比, 航空末敏子母弹有以下特点: 飞机发射母弹的初始速度有限, 不超过声速; 以常规炸弹作为

母弹,转速很低,可以忽略不计。

## 1.2 航空末敏弹子弹落点分布建模

在建立末敏弹子弹地面散布模型时,做如下假设:

- 1) 航空炸弹作为母弹,弹轴与速度方向一致,即飞行过程中,攻角为零;
- 2) 子弹径向抛撒,抛出瞬时即获得最大的侧抛速度;
- 3) 减速伞、旋转降落伞瞬间打开,并将它们对末敏子弹的作用简化为与速度方向相反的力。

根据子弹的弹道特性及其地面分布规律,末敏子弹的地面分布范围可以由上、下、左、右4枚特殊位置的子弹的落点来决定<sup>[6]</sup>。

### 1.2.1 末敏子弹自由坠落阶段

末敏子弹被抛出后,脱离母弹壳体以及其他零件,在重力和空气阻力的作用下运动,使子弹充分散布开。由于末敏子弹近似圆柱体,不像母弹拥有流线型壳体,因而,将末敏子弹视为高阻弹。根据牛顿第二定律,可以得到末敏子弹自由坠落段的质点运动学微分方程组为

$$\begin{cases} \frac{dv_x}{dt} = -\frac{1}{m} \left[ \frac{1}{2} \rho S_d C_d v_x^2 \right] \\ \frac{dv_y}{dt} = -\frac{1}{m} \left[ \frac{1}{2} \rho S_d C_d v_y^2 \right] + g \\ \frac{dv_z}{dt} = -\frac{1}{m} \left[ -\frac{1}{2} \rho S_d C_d v_z^2 \right] \\ \frac{dx}{dt} = v_x \\ \frac{dy}{dt} = v_y \\ \frac{dz}{dt} = v_z \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\rho$ 为所在高度的空气密度; $m$ 为子弹的质量; $S_d$ 为子弹的最大横截面积; $C_d$ 为子弹的阻力系数,是子弹速度的函数。

### 1.2.2 末敏子弹减速阶段

子弹自由下落一段时间后,为了减少旋转降落伞的开伞动载,需要打开减速伞,降低末敏子弹的速度。根据牛顿第二定律,可得末敏子弹质心运动方程

$$\begin{cases} \frac{dv_x}{dt} = -\frac{1}{m} \left[ \frac{1}{2} \rho (S_d C_d + S_s C_s) v_x^2 \right] \\ \frac{dv_y}{dt} = -\frac{1}{m} \left[ \frac{1}{2} \rho (S_d C_d + S_s C_s) v_y^2 \right] + g \\ \frac{dv_z}{dt} = -\frac{1}{m} \left[ -\frac{1}{2} \rho (S_d C_d + S_s C_s) v_z^2 \right] \end{cases} \quad (2)$$

式中: $S_s$ 为减速伞的横截面积; $C_s$ 为减速伞的阻力系数。

### 1.2.3 末敏子弹稳态扫描阶段

末敏子弹经过减速阶段,打开旋转降落伞,对地面进行螺旋扫描。进入稳态扫描阶段的限制条件为<sup>[7]</sup>:

- 1) 末敏子弹的速度 $v$ 约为12~15 m/s;2) 子弹距地面的高度 $l$ 为100~150 m。稳态扫描阶段数学模型与减速阶段相似,只是将减速伞的阻力系数 $C_s$ 改为旋转降落伞的阻力系数 $C'_s$ 。

### 1.3 航空末敏弹子弹落点分布研究方法

在实际情况下,伞弹系统是一种刚柔耦合多柔体动力学模型,需要经历开伞充气过程,其所受的空气阻力的平均值小于上述简化的模型的平均值,因此以上所得的子弹地面落点 $(x_i, z_i)$ 为相应子弹实际落点的下限;并考虑航空末敏子弹整个过程不受减速伞、旋转降落伞的作用,可以得到子弹的落点坐标 $(x'_i, z'_i)$ ,其必为相应子弹实际落点的上限。将伞对子弹的实际作用以及安装偏差等因素考虑为正态噪声,则子弹的实际落点在此区间符合二维正态分布,即

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2} \exp \left\{ -\frac{1}{2(1-\rho^2)} \left[ \frac{(x-\mu_1)^2}{\sigma_1^2} + \frac{(y-\mu_2)^2}{\sigma_2^2} \right] \right\} \quad (3)$$

期望为 $\mu_{1i} = \frac{x_i + x'_i}{2}$ ,  $\mu_{2i} = \frac{y_i + y'_i}{2}$ ;方差为 $C_{CEP} = 1.17741\sigma$ ,取其上下限均值为估计落点坐标。

## 2 仿真分析

### 2.1 仿真参数的确定

选用文献[8]中子弹的参数。对于确定弹型的末敏弹,母弹抛撒点的高度是确定的,侧抛速度也是确定的。因而基本抛撒条件为:抛撒点为300 m,侧抛速度为50 m/s<sup>[9]</sup>,开旋转伞高度为150 m,母弹在抛撒点的速度为100~300 m/s,弹道倾角为60°~80°,并采用标准的大气条件。

### 2.2 子弹的地面散布

母弹抛撒点的速度为200 m/s、弹道倾角为70°时,子弹的速度变化和地面估值区间散布仿真结果如图1和图2所示。由图可知,子弹的稳态扫描速度均为13.8 m/s。上子弹抛撒后直到落地的时间为11.07 s,下子弹整个过程持续时间最短为10.17 s,左右子弹整个过程持续时间为10.46 s,时间变化差距不大。

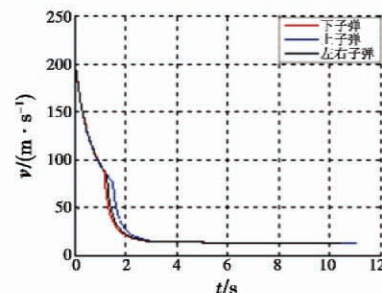


图1 子弹速度变化

Fig. 1 Change of bullet velocity

子弹的地面散布区域在上下限之间,如图 2 阴影所示。上子弹的分布区间最大为 50 m,考虑到末敏子弹的扫描攻击区域一般是以落点为中心、半径大于 60 m 的圆,因而攻击区域能够完全覆盖子弹落点的分布区域,且子弹落点在上下限之间符合正态分布,因此以落点分布的期望值代表真实落点。子弹的地面散布情况近似椭圆,其长轴为 118.45 m,短轴为 41.6 m,子弹的估计落点组成的四边形边长 58.24 m 和 67.34 m。

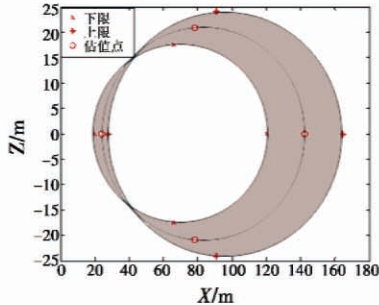


图 2 子弹落点的地面分布

Fig.2 Dispersion of the bullet fall points

### 2.3 地面散布随母弹弹道倾角的变化

其他抛撒条件不变,母弹抛撒点的速度为 200 m/s、弹道倾角变化为 60°~80°时,末敏子弹落点分布情况仿真结果如图 3 所示。由图 3 可知,抛撒点弹道倾角为 60°时,末敏子弹的地面落点相距更远而且地面分布更加均匀。图 4 是地面近似散布椭圆的长(横)轴和短(纵)轴随弹道倾角变化的插值仿真结果。

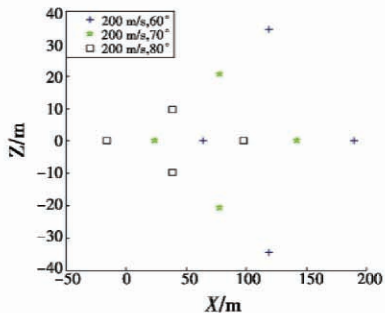


图 3 母弹弹道倾角对散布的影响

Fig.3 Effect of ballistic trajectory inclination angle on the dispersion

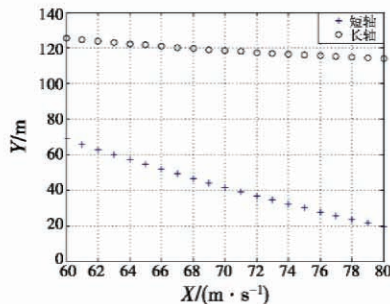


图 4 母弹弹道倾角对椭圆散布轴的影响

Fig.4 Effect of ballistic trajectory inclination angle on the axis of the ellipse dispersion

由图 4 可知,随着抛撒速度的提高,子弹的间距随之减小,且短(纵)轴随速度的变化较大。

### 2.4 地面散布随抛撒速度的变化

其他抛撒条件不变,母弹在抛撒点的弹道倾角为 70°、速度变化为 100~300 m/s 时,末敏子弹落点分布情况仿真结果如图 5 所示。由图可知,在此条件下,末敏子弹的地面散布都比较均匀且母弹抛撒速度为 100 m/s 时,子弹落点相距更远。图 6 是地面近似散布椭圆的长短轴随抛撒点速度变化的插值仿真结果。随着抛撒速度的提高,子弹的间距随之减小,且长(横)轴随抛撒角度的变化较大。

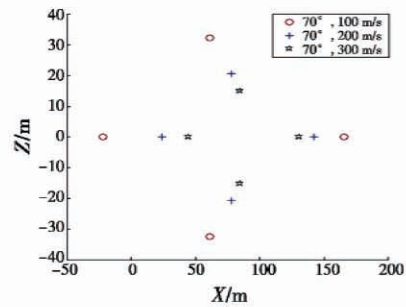


图 5 母弹速度对散布的影响

Fig.5 Effect of parent bullet velocity on the dispersion

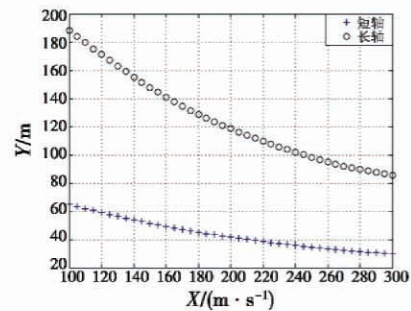


图 6 母弹速度对椭圆散布轴的影响

Fig.6 Effect of the parent bullet velocity on the axis of the ellipse dispersion

## 3 结论

本文针对航空末敏子母弹的特点,建立了一种估算其地面散布的方法,并比较了不同的抛撒条件对子弹地面散布的影响。研究表明,本文方法的极限误差在作战需求的范围内,且抛撒点速度对短(横)轴的影响较大,弹道倾角对长(纵)轴的影响较大。在航空末敏子母弹研制中,应合理确定子弹的攻击区域,较好地控制重叠区域和盲区;在作战中,应根据目标队形和间距,合理选择投弹方式,进而控制抛撒点母弹的姿态,以控制子弹地面散布的长短轴。

### 参考文献

[1] 游宁,马宝华. 火炮子母弹抛撒段子弹运动规律初探

- [J]. 兵工学报, 1997, 18(4): 302-307. (YOU N, MA B H. Researching on the fall section of cluster bomb[J]. Journal of Materials Engineering, 1997, 18(4): 302-307.)
- [2] 杨世荣, 李小强, 王才宏. 子母弹子弹落点模拟计算方法[J]. 火力与指挥控制, 2008, 33(4): 87-89. (YANG S R, LI X Q, WANG C H. Simulated computation method of the cluster warhead's fall point[J]. Fire Control and Command Control, 2008, 33(4): 87-89.)
- [3] 谭守林, 张金巍, 陈力. 子母弹最佳抛撒半径与导弹精度关系研究[J]. 武汉科技大学学报, 2010, 33(1): 109-112. (TAN S L, ZHANG J W, CHEN L. Relation between the best separation radius of submunition and missile's precision[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2010, 33(1): 109-112.)
- [4] 孔维红, 姜春兰, 王在成. 某型航空子母弹子弹地面散布研究[J]. 航空兵器, 2005(4): 43-46. (KONG W H, JIANG C L, WANG Z C. Study for bomblets distribution on ground of aerial cluster bomb[J]. Aviation Weapon, 2005(4): 43-46.)
- [5] 郭锐, 刘荣忠, 史争军, 等. 基于 MATLAB/Simulink 的末敏弹弹道仿真[J]. 弹箭与制导学报, 2005, 25(1): 169-171. (GUO R, LIU R Z, SHI Z J, et al. The simulation of target sensitivity projectile trajectory based on MATLAB/Simulink[J]. Journal of Missiles and Guidance, 2005, 25(1): 169-171.)
- [6] 杨启仁. 子母弹飞行动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999. (YANG Q R. Cluster bomb flight dynamics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999.)
- [7] 杨昊东, 刘占辰, 马尊成, 等. 航空反坦克末敏弹投弹区计算的建模与仿真[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(8): 163-167. (YANG H D, LIU Z C, MA Z C, et al. The modeling and simulation about calculating the bombing ranges of aviation anti-tank terminal-sensitive cluster warhead[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(8): 163-167.)
- [8] 杨少卿. 灵巧弹药工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010. (YANG S Q. Smart ammunition engineering[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.)
- [9] 徐文旭, 张靖, 齐占元, 等. 子母弹抛撒内弹道建模及仿真[J]. 兵工学报, 2006, 27(5): 797-801. (XU W X, ZHANG J, QI Z Y, et al. The modeling and simulation of interior trajectory for cluster munition dispersing[J]. Journal of Materials Engineering, 2006, 27(5): 797-801.)

(上接第 76 页)

- analysis[D]. Xi'an: A Dissertation Submitted to the 213th Research Institute China Academy of Ordnance Science for the Master Degree of Technology, 2013.)
- [4] 麻宏亮, 张蕊, 李芳, 等. 趋势线分析方法在火工品寿命评估中的应用[J]. 火工品, 2013, 25(3): 53-56. (MA H L, ZHANG R, LI F, et al. The application of trend-line analysis in life prediction of initiating explosive device[J]. Initiators & Pyrotechnic, 2013, 25(3): 53-56.)
- [5] WALPOE R E. 理工科概率统计[M]. 8 版. 周勇, 译. 北京: 机械出版社, 2009: 192-200. (WALPOE R E. Probability & statistics for engineers & scientists[M]. 8th ed. Translated by ZHOU Y. Beijing: China Machine Press, 2009: 192-200.)
- [6] STEVEN D G, LANGHANS I, VANDEBROEK M. Using the correct intervals for prediction: a tutorial on tolerance intervals for ordinary least-squares regression[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2007(87): 147-154.
- [7] YOUNG D S. Tolerance: an R package for estimating tolerance intervals[J]. Journal of Statistical Software, 2010, 36(5): 31-32.
- [8] WALLIS W A. Tolerance intervals for linear regression [C]//In J Neyman (ed.), Second Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, 2008: 43-51.
- [9] 李博. 催泪弹贮存失效特性与寿命趋势预测研究[D]. 西安: 武警工程大学, 2014. (LI B. Research on the storage failure factors of tear-gas grenade and trend prediction for the lifetime[D]. Xi'an: Engineering University of CAPF, 2014.)

本刊国内邮发代号为 36-693 欢迎订阅