

doi: 10.7690/bgzdh.2020.04.020

集束子弹药落点分布关键影响因素分析

许胜刚, 蔡汝山, 李 劲

(工业和信息化部电子第五研究所, 广州 510610)

摘要: 为研究子弹药不同抛撒初始条件对子弹药抛撒散布特性的影响规律, 以某种集束弹药为研究对象, 考虑随机因素对子弹药抛撒散布的影响, 建立子弹药抛撒运动学模型。通过仿真分析得到子弹药抛撒运动规律和落点散布规律, 选取母弹抛撒高度、母弹存速、母弹转速和母弹俯仰角 4 种子弹药抛撒关键因素, 运用数值仿真的方法分析单一因素不同初始条件对子弹药落点散布的影响, 并总结 4 种关键因素的影响规律。

关键词: 子弹药; 抛撒; 落点分布; 数值仿真

中图分类号: TJ410.1 **文献标志码:** A

Analysis on Key Influence Factors of Cluster Sub-munitions Drop Point Distribution

Xu Shenggang, Cai Rushan, Li Jin

(No. 5 Electronics Research Institute of Ministry of Industry & Information Technology, Guangzhou 510610, China)

Abstract: In order to study on the influence regularities that the different dispersion initial conditions of the sub-munitions make on the dispersion distribution characteristics, this paper takes a certain cluster munitions as the research object, and the sub-munitions dispersion kinematic model is established with considering the influence that the random parameters make on the dispersion distribution. The dispersion motion regularity and the drop point distribution regularity of the sub-munitions are obtained by simulation. Selecting 4 key factors making influence on the dispersion as the dispersion height, the velocity, rotation angular velocity and pitch angle of the mother bomb, the influences exerted on the drop point distribution of sub-munitions by different initial conditions of the single factor are analyzed with the numerical simulation method. At last the influence regularities of 4 key factors are summarized.

Keywords: sub-munitions; dispersion; drop point distribution; numerical simulation

0 引言

子弹药抛撒是指母弹开舱并将子弹药抛出的过程^[1]。子弹药抛撒特性的研究是子弹药研制过程中的重要内容^[2]。子弹药的落点分布又是子弹药抛撒特性研究的重要内容, 其中, 子弹药落点分布的均匀性是影响其作战效能的关键指标^[3]。子弹药抛撒落地后, 应形成一个合理的散布范围, 实现对特定区域的有效覆盖, 达到一个理想的散布密度, 在散布区域内要尽可能地实现均匀分布^[1]。子弹药落点散布受多种因素影响, 在实验和实战中呈现较强的随机性。在使用子弹药之前, 有必要明确不同发射和抛撒条件下子弹药的落点散布特性^[4]。目前, 研究子弹药落点散布的方法主要有数值模拟法和近似模拟法^[5]。数值模拟法是指根据子弹药的抛撒运动规律, 建立子弹药弹道模型, 进而对子弹药的落点分布进行仿真分析^[6-8]。近似模拟法是对子弹药的运动做出简化, 假设子弹药在椭圆内分布, 利用此分

布模拟子弹药的落点^[9-11]。目前, 对子弹药抛撒及落点分布已有部分研究, 已有一些子弹药抛撒分布模型, 如圆域内均匀分布模型、圆周上均匀分布模型等, 但是这些模型对影响子弹药散布的关键因素的分析尚不深入^[3,12-13]。笔者以某一种集束子弹药为研究对象, 运用数值模拟的方法建立子弹药抛撒运动学模型, 研究子弹药的抛撒特性及落点分布规律。仿真分析母弹开舱高度、母弹存速、母弹转速及母弹俯仰角对子弹药落点散布的影响, 以及 4 种因素对子弹药散布特性的影响规律。

1 子弹药抛撒运动学模型

1.1 坐标系的建立及转换关系

为了描述子弹药的运动规律, 需建立坐标系, 确定各个坐标系之间的转换关系。建立地面、平动和速度 3 个坐标系。

1) 地面坐标系。

收稿日期: 2019-12-05; 修回日期: 2020-01-11

基金项目: 装备发展部预先研究项目(51305040401)

作者简介: 许胜刚(1987—), 男, 河南人, 博士, 从事装备技术与理论研究。E-mail: xushengang@163.com。

地面坐标系记为 $O-XYZ$, O 为弹道起点, OX 平行于水平面, 指向母弹射向; OY 铅直向上; OZ 依照右手法则确定。

2) 平动坐标系。

平动坐标系记为 $O_1-X_1Y_1Z_1$ 。 O_1 为母弹质心, 平动坐标系各轴平行于地面坐标系, 平动坐标系与地面坐标系的关系如图 1 所示, 其中 H 为抛撒高度。

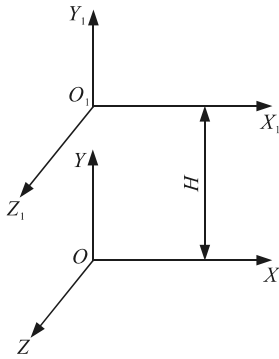


图 1 地面坐标系与平动坐标系的关系

3) 速度坐标系。

速度坐标系又称弹道坐标系, 记为 $O_2-X_2Y_2Z_2$, 原点 O_2 与 O_1 重合, O_2X_2 轴与母弹飞行速度方向一致; O_2Y_2 在铅直面内垂直于 O_2X_2 轴向上; O_2Z_2 轴依照右手法则确定。

平动坐标系与速度坐标系的关系如图 2 所示。平动坐标系 $O_1-X_1Y_1Z_1$ 绕 O_1Z_1 轴旋转 θ 角, 得到速度坐标系 $O_2-X_2Y_2Z_2$ 。 θ 角称为弹道倾角, 也称为母弹倾角、母弹俯仰角。

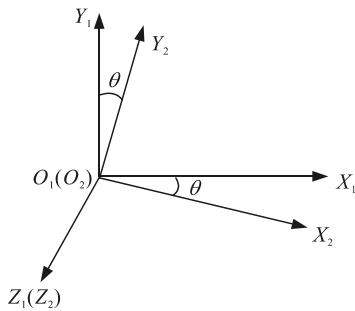


图 2 平动坐标系与速度坐标系关系

由图可得, 速度坐标系转换为平动坐标系的转换矩阵为:

$$L_{O_2 \rightarrow O_1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

即

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

1.2 运动学模型的建立

1.2.1 基本假设

子弹药包含弹体、引信体、稳点带和稳旋翼片等结构。子弹药被抛撒出母弹后, 首先进行无规律的翻滚飞行, 经过一段时间的稳定带和稳旋翼片的减速调姿飞行^[14], 之后子弹药稳定下落。为便于建立子弹药抛撒运动学模型, 对子弹药及其飞行过程进行合理简化和假设:

- 1) 母弹开舱后, 子弹药被瞬时抛出, 子弹药轴线与母弹轴线平行;
- 2) 将子弹药看作一个三自由度的小球体, 以简化计算;
- 3) 子弹药在抛撒点获得初始速度后, 将沿理想弹道飞行, 将子弹药的运动视为质点运动。

1.2.2 模型建立

子弹药从母弹中被抛出后, 以 v_0 为初速度飞行, 所受到的空气阻力为:

$$R = \frac{1}{2} C_x (Ma) \rho S v^2 \quad (3)$$

式中: $C_x(Ma)$ 为子弹药的空气阻力系数; ρ 为空气密度; S 为子弹药的特征面积; v 为子弹药相对于空气的速度。

子弹药在飞行过程中所受到的重力为:

$$G = mg \quad (4)$$

式中: m 为单个子弹药的质量; g 为重力加速度。

在子弹药飞行过程中, 速度为 v 。

在地面坐标系中, 子弹药抛撒运动学模型为:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dv_x}{dt} &= -\frac{1}{2m} \rho C_x (Ma) S v (v_x - v_{wx}) \\ \frac{dv_y}{dt} &= -\frac{1}{2m} \rho C_x (Ma) S v (v_y - v_{wy}) - g \\ \frac{dv_z}{dt} &= -\frac{1}{2m} \rho C_x (Ma) S v (v_z - v_{wz}) \\ \frac{dx}{dt} &= v_x \\ \frac{dy}{dt} &= v_y \\ \frac{dz}{dt} &= v_z \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: v_{wx} 、 v_{wy} 、 v_{wz} 分别为风速 v_w 在地面坐标系 X 、 Y 、 Z 轴上的分量; v 为子弹药速度, 初速为 v_0 , 表达式为

$$\mathbf{v}_0 = \mathbf{v}_p + \mathbf{v}_d + \mathbf{v}_\omega \quad (6)$$

式中： \mathbf{v}_p 为母弹存速； \mathbf{v}_d 为抛撒速度； \mathbf{v}_ω 是子弹药切向速度。

母弹存速 \mathbf{v}_p 是指母弹在抛出子弹药前具有的速度，方向如图 3 所示。

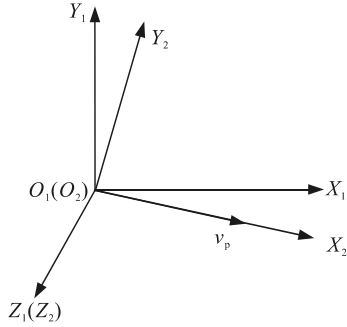


图 3 母弹存速方向

在速度坐标系 $O_2-X_2Y_2Z_2$ 中，母弹存速表示为：

$$\mathbf{v}_{p2} = \begin{bmatrix} v_p \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

结合式(2)，母弹存速在平动坐标系 $O_1-X_1Y_1Z_1$ 中表示为：

$$\mathbf{v}_{p1} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_p \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_p \cos\theta \\ -v_p \sin\theta \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

抛撒速度 \mathbf{v}_d 是母弹抛射机构赋予子弹药的速度，方向如图 4 所示。图中 φ 为 \mathbf{v}_d 与 O_2Y_2 轴正方向的夹角。

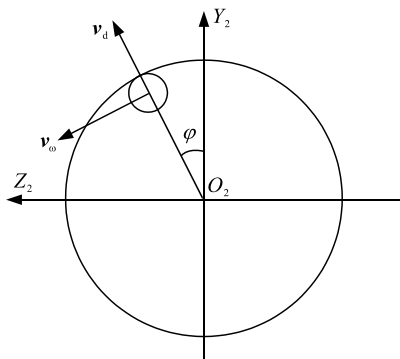


图 4 抛撒速度和切向速度方向

在速度坐标系 $O_2-X_2Y_2Z_2$ 中，抛撒速度表示为：

$$\mathbf{v}_{d2} = \begin{bmatrix} 0 \\ v_d \cos\varphi \\ v_d \sin\varphi \end{bmatrix} \quad (9)$$

结合式(2)，在平动坐标系 $O_1-X_1Y_1Z_1$ 中，抛撒速度表示为：

$$\mathbf{v}_{d1} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ v_d \cos\varphi \\ v_d \sin\varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_d \cos\varphi \sin\theta \\ v_d \cos\varphi \cos\theta \\ v_d \sin\varphi \end{bmatrix} \quad (10)$$

子弹药切向速度 \mathbf{v}_ω 是母弹旋转赋予子弹药的速度，方向如图 4 所示。

在速度坐标系 $O_2-X_2Y_2Z_2$ 中，子弹药切向速度表示为：

$$\mathbf{v}_{\omega 2} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\omega r \sin\varphi \\ \omega r \cos\varphi \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中： ω 为母弹旋转角速度； r 为子弹药中心轴距母弹弹轴的距离。结合式(2)，在平动坐标系 $O_1-X_1Y_1Z_1$ 中，子弹药切向速度表示为：

$$\mathbf{v}_{\omega 1} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -\omega r \sin\varphi \\ \omega r \cos\varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\omega r \sin\varphi \sin\theta \\ -\omega r \sin\varphi \cos\theta \\ \omega r \cos\varphi \end{bmatrix} \quad (12)$$

在地面坐标系中， $\mathbf{v}_p = \mathbf{v}_{p1}$ 、 $\mathbf{v}_\omega = \mathbf{v}_{\omega 1}$ 、 $\mathbf{v}_d = \mathbf{v}_{d1}$ 。

因此，子弹药初始速度为：

$$\mathbf{v}_0 = \mathbf{v}_p + \mathbf{v}_d + \mathbf{v}_\omega = \begin{bmatrix} v_p \cos\theta + v_d \cos\varphi \sin\theta - \omega r \sin\varphi \sin\theta \\ -v_p \sin\theta + v_d \cos\varphi \cos\theta - \omega r \sin\varphi \cos\theta \\ v_d \sin\varphi + \omega r \cos\varphi \end{bmatrix} \quad (13)$$

2 子弹药抛撒特性弹道仿真

某种集束弹药，母弹内装有 42 枚子弹药，子弹药的排列共有 3 层，最内层 6 枚，中间层 12 枚，最外层 24 枚。3 层子弹药在母弹内的排列分布距离母弹弹轴的半径分别为： $r_1=0.07$ m、 $r_2=0.11$ m 和 $r_3=0.15$ m。单个子弹药的质量为 $m=232$ g，子弹药的特征面积为 $S=1.268 \times 10^{-3}$ m²，母弹的开舱抛撒高度为 2~4 km，母弹存速为 100~300 m/s。

结合上述子弹药抛撒运动学模型，设定初始计算条件如表 1 所示。

表 1 初始计算条件

参数	参数值
母弹开舱抛撒高度 H/m	3 000
母弹存速 $v_p/(m/s)$	200
抛撒速度 $v_d/(m/s)$	30
母弹旋转角速度 $\omega/(rad/s)$	50
空气密度 $\rho/(kg/m^3)$	1.206
母弹倾角 $\theta(^{\circ})$	0

在地面坐标系中，选取某一枚子弹药作为研究对象，此处选取最外层 $\varphi=0$ 的子弹药，其位移变化规律如图 5 所示。

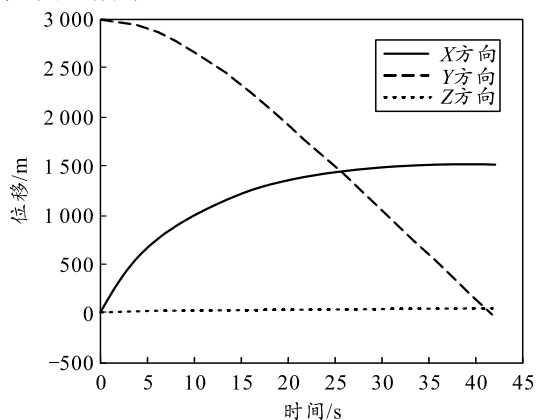


图 5 子弹药位移变化规律

由图可知：子弹药在 X 方向的位移逐渐增大，增速逐渐变慢。这是因为子弹药在 X 方向的初速度较大，在阻力的作用下速度逐渐减小；在重力和空气阻力作用下，子弹药在 Y 方向位移逐渐减小。子弹药在 X 和 Y 方向的位移变化较大，是因为子弹药在这 2 个方向上的速率较大；子弹药在 Z 方向的速率较小，位移变化也较小。

子弹药在 X、Y、Z 方向的速度变化规律如图 6 所示。

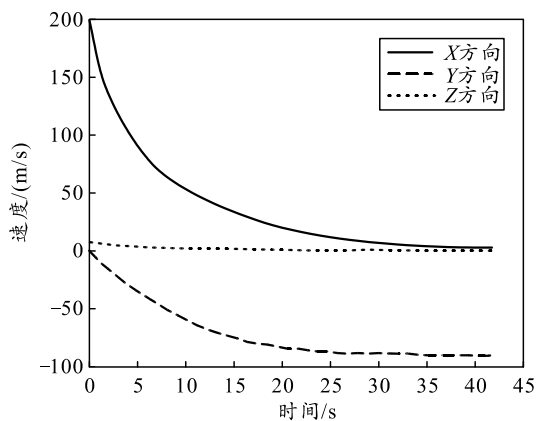


图 6 子弹药速度变化规律

由图可知：子弹药在 X 方向的初始速度值较大，在飞行过程中，子弹药在 X 方向的阻力值较大，速度减小较快；子弹药在 Y 方向的初始值较小，在重力加速度的影响下，速度值衰减较快；子弹药在 Z 方向的速度初始值较小，衰减较慢，这是因为子弹药在该方向的阻力较小。

如图 7 所示，在地面坐标系中，以全部 42 枚子弹药为研究对象，对其落点分布规律进行研究。

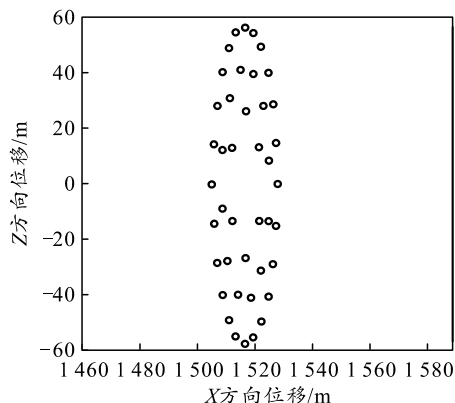


图 7 子弹药落点分布

由图可知：子弹药各层子弹药的落点呈椭圆形状分布，最外层子弹散布范围最大，最内层子弹散布范围最小，3 层子弹药落点的椭圆分布中心相同。落点分布中心在 X 轴方向坐标约为 1 518 m，Z 轴方向坐标为 0；最外圈子弹药落点椭圆分布长轴长约为 110 m，短轴长约为 20 m；子弹药的散布较为均匀。

3 子弹药落点分布关键影响因素分析

影响子弹药落点分布的因素有很多，主要包括母弹抛撒高度、母弹存速、母弹转速以及母弹俯仰角。这些因素会对子弹药落点分布的形状、中心位置以及散布范围产生影响。

1) 抛撒高度。

如图 8 所示，设定母弹的抛撒高度初始条件分别为 2、3 和 4 km，在不同抛撒高度下对子弹药分布特性进行分析。

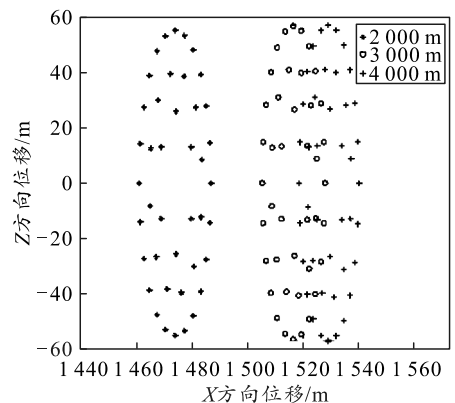


图 8 不同抛撒高度时子弹药落点分布

由图可以看出：在不同抛撒高度下，子弹药落点分布中心在 Z 轴方向的坐标值基本相同；子弹药散布均为椭圆形状；不同的抛撒高度下，最外层子弹药落点椭圆分布长轴长度相差较小，短轴长度相

差也较小；随着抛撒高度的增加，子弹药落点椭圆分布中心在 X 轴方向的坐标逐渐增大。

2) 母弹存速。

如图 9 所示，设定母弹存速的初始条件分别为 180、200 和 220 m/s，研究在不同母弹存速下子弹药的散布特性。

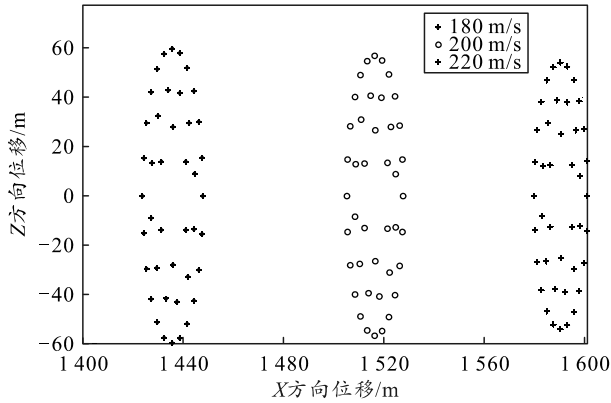


图 9 不同母弹存速时子弹药落点分布

由图可以看出：在不同母弹存速下，子弹药落点分布中心在 Z 轴方向的坐标基本相同；子弹药散布均为椭圆形状；随着母弹存速的增加，子弹药落点分布中心在 X 轴方向的坐标值逐渐增大，最外层子弹药落点椭圆分布的长轴和短轴长度逐渐减小。

3) 母弹转速。

如图 10 所示，设定母弹转速的初始条件分别为 25、50 和 100 rad/s，研究在不同母弹转速下子弹药的散布特性。

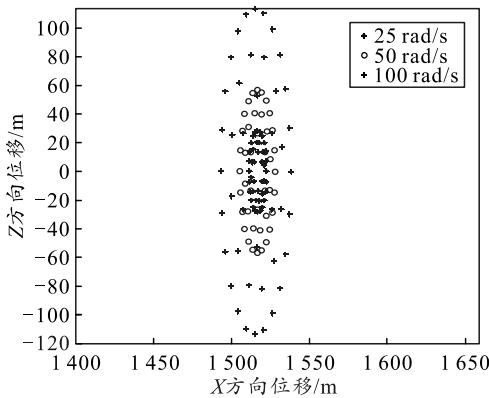


图 10 不同母弹转速时子弹药落点分布

由图可知：在不同母弹转速下，子弹药落点分布中心在 X 轴方向的坐标基本相同，在 Z 轴方向的坐标也基本相同；子弹药落点散布均为椭圆；随着母弹转速的增加，子弹药最外层子弹药落点椭圆分布长轴长度逐渐增加，短轴长度也逐渐增加。

4) 母弹俯仰角。

如图 11 所示，设定母弹俯仰角的初始条件分别

为 -30° 、 0° 和 30° ，研究在不同母弹俯仰角时子弹药落点散布特性。

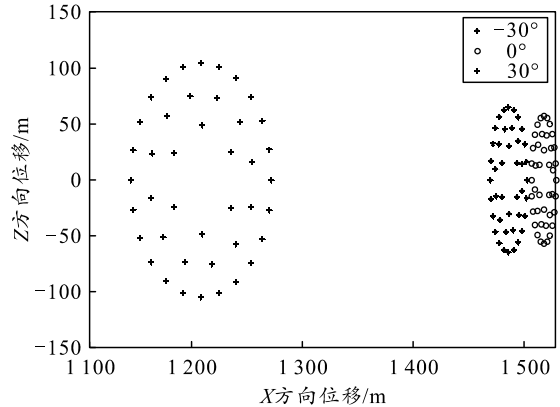


图 11 不同母弹俯仰角时子弹药落点散布

由图可以看出：对于不同的母弹俯仰角，子弹药落点散布中心在 Z 轴方向的坐标值基本相同；子弹药落点散布均为椭圆；随着母弹俯仰角的增加，子弹药落点散布中心在 X 轴的坐标值先增加后减少，最外层子弹药落点椭圆分布长轴长度先减小后增大，短轴长度同样是先减小后增大。

由上述分析可以得出以下结论：

- 1) 子弹药散布形状为椭圆，该特性不随母弹抛撒高度、存速、转速及其俯仰角的变化而改变。
- 2) 子弹药散布中心在 Z 轴方向的坐标值同样不随上述因素的变化而改变。
- 3) 子弹药散布中心在 X 轴方向的坐标值随母弹抛撒高度和母弹存速的增加而增大；随着母弹俯仰角的增加，该坐标值先增大后减小；该坐标值不随母弹转速的变化而改变。
- 4) 子弹药落点散布最外层椭圆长轴长度随母弹存速的增加而减小，随母弹转速的增加而增加，随母弹俯仰角的增加先减小后增大，受母弹抛撒高度的变化影响较小。
- 5) 子弹药落点散布最外层椭圆短轴长度随母弹存速的增加而减小；随母弹转速的增加而增大；随着母弹俯仰角的增加，短轴长度先减小后增大；受母弹抛撒高度的变化影响较小。

4 结束语

- 1) 结合集束子弹药的抛撒运动过程，建立了地面坐标系、平动坐标系和速度坐标系，并确定了坐标系之间的转换关系；
- 2) 确定了子弹药抛撒运动过程各物理量的表达形式，建立子弹药抛撒运动学模型；

化了 128 和 136.5 m。该研究对带有微气泡致动器弹丸的应用研究具有一定的参考作用。

参考文献:

- [1] 王广. 基于微泡的弹丸飞行稳定性研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2012: 10-15
- [2] 郭亚超, 吴玉斌, 郝永平, 等. 微气泡尾翼弹丸流场主动流控制研究[J]. 弹箭与制导学报, 2016, 2(6): 122-124.
- [3] 马炳和, 王艳, 邓进军, 等. 一种用于主动流动控制的气泡致动器[J]. 航空学报, 2007, 28(5): 1242-1246.
- [4] LEU T S, CHANG J R, LU P J. Experimental investigation of side force control on cone-cylinder

slender bodies with flexible micro balloonactuators[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2005, 29(8): 909-918.

- [5] 潘雷, 吴玉斌, 郝永平, 等. 二维修正迫弹的气动特性及修正能力研究[J]. 弹箭与制导学报, 2019, 1(2): 30-33
- [6] 韩子鹏. 弹箭外弹道学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014: 100-101.
- [7] 徐明友. 火箭外弹道学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004: 41-66.
- [8] 刘玉文, 蒋明, 李泳, 等. 高原条件下无控旋转弹丸弹道建模与仿真研究[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(5): 6-9, 46.

(上接第 88 页)

3) 结合具体实例, 运用笔者建立的子弹药抛撒运动学模型分析子弹药的抛撒运动特性, 对影响子弹药落点分布特性的关键影响因素进行分析, 总结了各影响因素对子弹药落点分布的影响规律;

4) 母弹抛撒高度、母弹存速、母弹转速和母弹俯仰角对子弹药落点分布的中心点位置、分布形状和散布范围的影响规律不同, 在设计和使用集束子弹药时, 应根据实际要求, 对这些因素进行优化配置, 以达到预期的作战效能。

参考文献:

- [1] 徐文旭, 张靖, 齐占元. 子弹药抛撒内弹道建模及仿真[J]. 兵工学报, 2006, 27(5): 797-801.
- [2] 房玉军, 蒋建伟. 子弹药抛撒随机外弹道模型及其蒙特卡洛解法[J]. 北京理工大学学报, 2009, 29(10): 850-853.
- [3] 郑伟, 贾沛然, 刘世勇. 子弹药散布模型及其仿真分析[J]. 弹箭技术, 1998, 27(4): 25-28.
- [4] 孔维红, 姜春兰, 王在成. 某型航空子弹药地面散布研究[J]. 航空兵器, 2005, 20(4): 43-46.
- [5] 薛模根, 袁宏武, 韩裕生. 侦察评估子弹落点散布仿真

研究[J]. 计算机仿真, 2005, 22(11): 46-49.

- [6] 石喜林, 谭俊峰. 飞机跑道失效率计算的统计试验方法[J]. 火力与指挥控制, 2000, 25(1): 74-76.
- [7] 王志军, 陈超. 机载布撒器对机场跑道封锁效率的 Monte-Carlo 仿真[J]. 弹箭与制导学报, 2001, 21(2): 73-76.
- [8] 唐建, 秦子增, 郑荣跃. 攻击大目标子弹药射击效率的分析与估算[J]. 国防科技大学学报, 1997, 19(6): 25-29.
- [9] 夏胜平, 谢红卫, 万拔. 子弹散布中心正态总体分布参数的融合估计[J]. 国防科技大学学报, 2000, 22(2): 11-14.
- [10] 程光显, 张士峰. 导弹落点精度的鉴定方法-概率圆方法[J]. 国防科技大学学报, 2001, 23(5): 13-16.
- [11] 袁天保, 程文科, 秦子增. 末敏子弹落点的近似模拟[J]. 国防科技大学学报, 2002, 24(5): 33-36.
- [12] 李亚雄, 刘新学, 舒健生. 两种子弹药抛撒模型对跑道失效率的影响分析[J]. 弹箭与制导学报, 2005, 25(2): 48-51.
- [13] 李军营, 张毅, 马清华. 弹道导弹子弹药弹头落点散布分析[J]. 飞行力学, 2003, 21(2): 45-48.
- [14] 李勇, 汪民乐, 毕义明. 末修子弹对机场跑道封锁概率计算方正研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(9): 2397-2400.