

doi: 10.7690/bgzdh.2026.06.017

## 定向破片迫弹对小型无人机的毁伤效应研究

陈雨浩<sup>1</sup>, 何永<sup>1</sup>, 王冕<sup>2</sup>, 王宇硕<sup>2</sup>, 袁晋<sup>1</sup>, 常博然<sup>1</sup>

(1. 南京理工大学机械工程学院, 南京 210094; 2. 西安北方华山机电有限公司南京研究所, 南京 210094)

**摘要:** 为解决目前低速小型无人机及集群打击能效比低的问题, 提出一种基于 60 mm 迫击炮定向破片迫弹的打击方案。利用 Autodyn 软件对定向战斗部静爆状态进行仿真, 根据典型目标无人机的结构特性建立无人机的易损性模型; 从坐标毁伤定律的角度出发, 建立毁伤概率计算模型, 确定多工况下命中目标的有效破片数量、对无人机目标不同等级的毁伤概率以及针对无人机集群不同排列方式下对多目标的杀伤效果。结果表明: 该方案在定距引信条件下, 可对“低慢小”无人机及蜂群造成有效杀伤。

**关键词:** 低慢小无人机; 反无人机; 定向破片迫弹; 毁伤概率; 易损性建模

**中图分类号:** TJ31 **文献标志码:** A

## Research on Damage Effect of Directional Fragment Mortar to Small UAV

Chen Yuhao<sup>1</sup>, He Yong<sup>1</sup>, Wang Mian<sup>2</sup>, Wang Yushuo<sup>2</sup>, Yuan Jing<sup>1</sup>, Chang Boran<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science And Technology, Nanjing 210094, China;

2. Nanjing Research Institute of Xi'an North Huashan Mechanical & Electric Co., Ltd., Nanjing 210094, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of low cost-benefit ratio in the attack of low-speed small UAVs and their swarms, an attack scheme based on 60 mm mortar directed fragment mortar was proposed. Autodyn software is used to simulate the static explosion state of the aimed warhead, and the vulnerability model of the UAV is established according to the structural characteristics of the typical target UAV; Based on the coordinate damage law, the damage probability calculation model is established to determine the number of effective fragments hitting the target under multiple working conditions, the damage probability of different levels of UAV targets, and the damage effect of UAV groups on multiple targets under different arrangements. The results show that the scheme can cause effective damage to "low, slow and small" UAV and swarm under the condition of fixed distance fuze.

**Keywords:** low speed and small UAV; anti-UAV; directed fragment mortar; damage probability; vulnerability modeling

### 0 引言

近年小型无人机系统使用逐渐增多, 被广泛应用于情报、监视、侦察甚至承担一些打击任务角色, 商用无人机也在作战中展现了其实用性对战争形态产生重大影响。对于以步战为主的士兵而言, 无人机随时可能在战场上出现, 可传统的防空武器系统对于微型无人机而言, 其成本与毁伤的风险是不对称的, 在这种情况下, 确保前线的班排士兵具备对抗无人机的有效手段变得迫切且必要, 但引入新的应对手段往往需要士兵们携带额外的装备, 这可能会在不扩充原有编制的前提下增加他们的负担。在这一背景下, 对现有武器装备进行改进, 赋予其有效对抗无人机能力, 为该问题提供了另一种可能的解决方案。

传统迫击炮由于结构、射击条件和弹丸速度的限制, 在对抗无人机或无人机集群上并不高效, 其主要攻击目标是敌方固定障碍物, 无法在面对敌人

的无人机集群时发挥其优势。主要原因在于: 1) 传统迫击炮是一款曲射幅度很大的武器, 其射角一般较大; 2) 炮弹的初速较慢, 在空中飞行时间长, 难以命中目标; 3) 无人机由于其材料等原因不容易被检测, 导致感应引信通常失效。近年来, 为实现新一代迫击炮的直瞄射击、自动装填和高射速功能, 各国研究人员采用了不同的技术创新, 诸如前冲技术、迫弹后装填的闭气与定位技术等这些创新让新一代迫击炮在不同地形和环境中都能更加灵活运用<sup>[1-2]</sup>。

武器装备的毁伤概率是发展现代武器的研究重点, 针对火炮对不同目标进行射击时毁伤概率的研究, 文献[3-7]分别提出了不同的计算模型和方法, 考虑了不同的射击误差、目标毁伤等级与着发射击等因素, 通过理论分析和数值仿真验证了模型的有效性和适用性。基于 AHEAD 弹, Ji<sup>[8]</sup>从无人机集群损伤效能出发, 建立了毁伤概率模型, 并分析了不

收稿日期: 2024-12-02; 修回日期: 2025-01-16

第一作者: 陈雨浩(1996—), 男, 江苏人, 硕士。

同射击条件下的损伤效果和策略。对于传统破片杀伤战斗部存在的不足，文献[9-11]对不同起爆方式下战斗部破片的飞散特性，并计算了不同起爆方式下破片的速度和密度分布。AHEAD 弹和定向破片弹<sup>[12]</sup>具有相似之处，两者都通过集束式设计，致力于在特定区域内集中释放破片或子弹，以最大限度地损害目标；但相对于 AHEAD 弹，定向破片弹拥有更大的口径范围，具有更广泛的应用领域，包括对装甲车辆、人员、建筑物等目标的打击能力，使得定向破片弹在多样化的战场环境中显示出极大的适应性。宫小泽等<sup>[13]</sup>以某典型武装直升机为打击目标，深入研究了 AHEAD 弹对目标的毁伤效能和所需的平均命中弹数。王歌等<sup>[14]</sup>研究了多束定向预制破片弹的开舱距离对目标毁伤效能的影响，分析了不同射击距离和不同目标特性情况下多束定向预制破片弹开舱距离对目标毁伤概率的影响，得出了不同作战情况多束定向预制破片弹达到最大化毁伤的开舱距离规律。

笔者在 60 mm 迫击炮的基础上，提出了一种新型的定向破片迫弹，旨在使班排战士在面对无人机及其蜂群时能够快速反击。以“低慢小”无人机作为典型目标，在探究其易损性的理论基础上，采用了坐标毁伤定律结合解析法，计算对无人机目标的命中概率，并据此求取了一次点射毁伤概率。这些计算结果验证了所设计的武器系统方案的可行性，具有一定的现实意义。

### 1 定向破片弹分析

定向破片迫弹是针对无人机或无人机集群等目标而设计的。该弹药采用轴向预制破片战斗部，通过弹头预制破片对无人机裸露组件实施有效打击，从而使其失去执行任务的能力，也可对近距离的有生力量和轻型车辆造成杀伤。

为了实现高速飞行条件下的稳定外弹道飞行，定向破片迫弹的弹头外形需要调整。传统迫弹的气动外形难以实现初速较高的直接瞄准发射，因此需要对其头部外形进行优化设计。与此同时，为了改善气动外形，尾翼管应尽可能缩短。

定向破片迫弹采用轴向预制破片战斗部，其终点弹道如下：采用定距引信，当弹丸飞行到指定距离后，弹丸底部的引信将装药引爆，产生的气体压力将给头部的预制破片以向前的作用力，从而形成沿轴线向前飞散的破片云。针对典型目标毁伤的需求，考虑到相应的接口设计，该定向破片弹的战斗

部初步方案设计如图 1 所示。

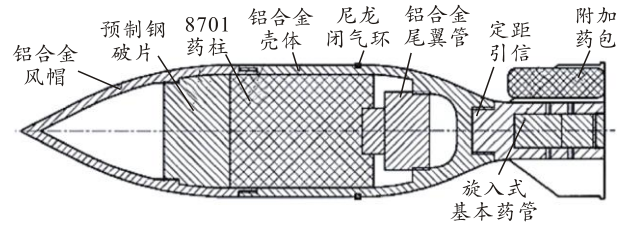


图 1 60 mm 定向破片迫弹

根据弹丸不同的初速需求，在翼片间夹放不同数量的附加药包，调整发射药量。翼梢后部留有突起，弹丸在膛内运动时起到定心的作用。

战斗部初步方案周向预制破片弹设计数量为  $N$  颗 4 mm 钢球，预制破片的平均静爆初速<sup>[15]</sup>，可得：

$$v_a = \sqrt{2E} * \sqrt{m_\delta / (m_s + m_k + 0.5m_\delta)} \quad (1)$$

式中： $E$  为 Gurney 能； $m_\delta$  为有效装药质量； $m_s$  为预制破片质量； $m_k$  为铝壳体对应质量。

在实际应用中，理论计算的破片最大飞散角与试验结果往往误差较大，需要进行战斗部威力仿真，以更准确地预测战斗部的效果。使用 Autodyn 进行战斗部威力仿真能够更加真实地模拟出炸药爆炸后预制破片的飞散情况，从而有效评估战斗部的杀伤能力。

该模型包括铝合金风帽和壳体、8701 药柱、预制钢球破片及底板。在模拟中，底板扮演了底部空腔和引信的角色，其材料为塑性材料，气化后为理想气体。为了提高计算效率，建立 1/4 对称模型，起爆方式为中心起爆，仿真模型如图 2 所示。



(a) 战斗部主视图 (b) 战斗部侧视图

图 2 战斗部仿真模型

装药 8701 用 HIHG\_EXPLOSIVE\_BURN 材料模型与 JWL 状态方程描述：

$$P = A(1 - \frac{\omega}{R_1 v})e^{-R_1 v} + B(1 - \frac{\omega}{R_2 v})e^{-R_2 v} + \frac{\omega E}{v} \quad (2)$$

式中： $E$  为单位初始体积内能； $v$  为体积比； $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $\omega$  为常数。8701 炸药的主要参数值如表 1 所示<sup>[16]</sup>。

表 1 8701 材料参数

$\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^3)$	$A / \text{GPa}$	$B / \text{GPa}$	$R_1$	$R_2$	$\omega$
1.787	581.4	6.801	4.1	1	0.35

值得注意的是，破片飞散的分布情况可能对结构的破坏造成不同程度的影响；因此，在研究中对破片飞散的分布情况进行充分探究。仿真结果显示，破片云形态及速度云图的数据具有明显的集中趋势。破片云的分布呈现出中间密集、边缘疏散的特点。破片主要集中在前端部分，而在直径的圆环区域内破片分布较少且不均匀。该区域可以被称为过饱和和杀伤区域。此外，受风帽影响，前方破片的飞散角及速度相对较小。破片速度云图的结果表明，静爆下的破片最大速度为 856 m/s，最小速度为 383 m/s；中间速度相对较低，而边缘破片速度相对较高，符合客观规律。破片云形态及速度云图如图 3 所示。

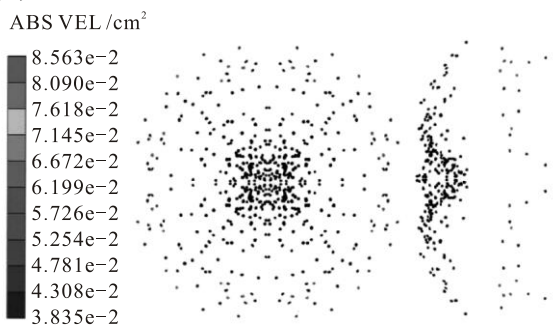


图 3 预制速度云图

### 2 典型目标特性分析

为了分析目标的毁伤概率，需要对目标进行简化，并从物理角度出发，着重考虑目标的功能和结构易损性。笔者采用正交平面建模的方式对无人机进行目标易损性建模，该模型将目标投影到两两相交的平面上，得到目标的三向面积：水平截面面积  $S_B$ 、纵向截面面积  $S_S$  和横向截面面积  $S_F$ ，如图 4 所示。该模型简单明了，为计算分析目标武器的毁伤概率提供了便利。

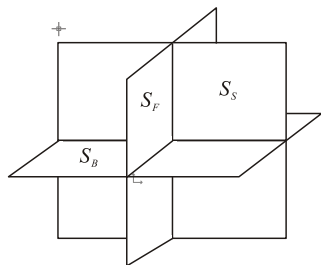


图 4 简化后的正交平面模型

目前，小型无人机的重要结构都是基于复合材料来制备的，如玻璃纤维复合材料。一般而言，只有一些特定的结构采用合金制备，其余结构均大量使用复合材料。假定目标选用了碳纤维复合材料，以较为典型的东丽 T300-3K/934 碳纤维材料为例，

采用平纹织物和环氧树脂，常温真空固化工艺制作其构件。该材料的性能参数如表 2 所示。

表 2 碳纤维复合材料性能参数

1 方向弹性模量/ MPa	2 方向弹性模量/ MPa	1 方向拉伸强度/ MPa	2 方向拉伸强度/ MPa	泊松比 $\mu_{12}$	固化后 单层厚度 /mm
62 400	62 400	628	607	0.13	0.22

破片击穿利用破片动能穿透目标，毁伤目标。评估破片击穿目标的严重程度，通常用单位厚度为  $h$  硬铝靶板比动能作为衡量指标，其他材料需根据强度转换为对应的硬铝板厚度进行分析，以便更好地工程计算。以常用的 LY12 合金铝板作为等效标准，采用以下折算公式：

$$b_0 = b_1 \frac{\sigma_{b_1}}{\sigma_{b_0}} \tag{3}$$

式中： $b_1$  为目标部件的实际厚度， $m$ ； $\sigma_{b_1}$  为目标材料的强度极限，MPa； $\sigma_{b_0}$  为硬铝 LY12 的强度极限，MPa。

在无人机的易损性建模中，需要对其结构进行简化处理，考虑其主要要害部件。图 5 为无人机结构组成。



图 5 四轴小型无人机的 3 维建模

机体内部芯片和传感器在机体内部排列紧密，如果四轴无人机被击穿，芯片和传感器极可能受到损伤，因为它们通常位于机体内部，与外界环境隔离；因此，在进行易损性建模时，考虑击穿机体对芯片和传感器的影响是合理的。从无人机外部结构易损性的角度考虑，可以将四轴小型无人机分为以下舱段<sup>[17]</sup>：飞行控制电路舱段（机体）、电机和螺旋桨组成的推进系统舱段、电池舱段与挂载附件舱段（通常根据小型无人机的用途搭载摄像机等工具）。

国内目前对小型无人机毁伤等级的划分尚未明确，通常采用载人作战飞机毁伤等级划分作为参照<sup>[18]</sup>。考虑到“低慢小”无人机的目标特性，毁伤等级可从高到低分为：KK 级，即电池、机体内部控制系统被击中，导致无人机失去控制并在极短时间内解体破坏；B 级，即无人机受到攻击后未能完

成设定任务。在进行毁伤概率仿真时将目标简化等效，得到如图 6 所示的简化模型。

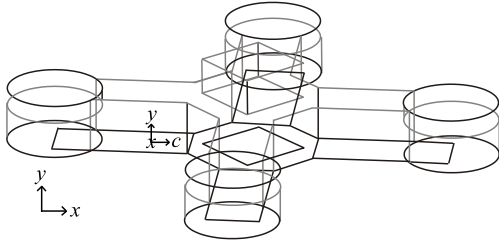


图 6 无人机的简化模型

对各个舱段进行正交平面建模，分别计算该段 3 项面积并划分毁伤等级，如表 2 所示。

表 2 各舱段 3 项面积及毁伤等级 mm<sup>2</sup>

名称	机体	推进系统	电池	附件
$S_B$	62 500	152 050	12 100	5 400
$S_F$	14 142	1 980	9 300	7 200
$S_S$	14 142	1 980	9 300	4 800
毁伤等级	KK 级	KK 级	KK 级	B 级

### 3 毁伤概率数值计算

射击时，弹丸对目标的毁伤概率依赖于炸点坐标，故称为坐标毁伤定律<sup>[19]</sup>。无人机由于其材料等原因不容易被检测，传统高炮使用的近炸引信失去作用，为此选择定距引信作为引爆方式。当弹丸飞离炮口一定距离之后引爆，形成的定向破片云，从而实现目标的有效打击与驱逐。通过建立坐标毁伤定律的数学模型，可有效计算战斗部在其弹道上炸点位置爆炸后，飞散的破片对目标的命中概率与击穿概率。

#### 3.1 坐标毁伤定律的数学模型

在实际战斗中，由于火炮的震动、弹丸形状、气象条件等多种因素的影响，多次发射的弹丸在爆炸过程中的爆点位置是随机的，从而使得在射击时弹着点对目标产生偏差。目标的毁灭过程可以分为：1) 迫弹在空中爆炸；2) 形成的定向碎片会迅速扩散，对目标造成打击。在这个过程中，依据迫弹在空中爆炸时遵循的坐标毁伤原理，建立了毁伤概率的仿真计算模型，如图 7 所示。

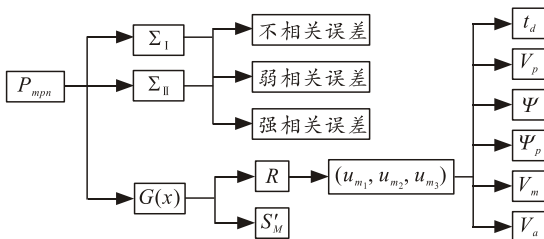


图 7 毁伤概率计算模型

设  $x_c(t)$  为不相关误差，其协方差矩阵为

$\Sigma_c = [\sigma_{ij}^c]$  ( $i, j=1, 2$ )； $x_n(t)$  为弱相关误差，其协方差矩阵为  $\Sigma_n = [\sigma_{ij}^n]$ ； $x_g(t)$  为强相关误差，其协方差矩阵为  $\Sigma_g = [\sigma_{ij}^g]$ ； $A_{IV}(t)$  为单炮的系统误差； $A(t)$  为武器综合体的系统误差。射击误差分解如图 8 所示。

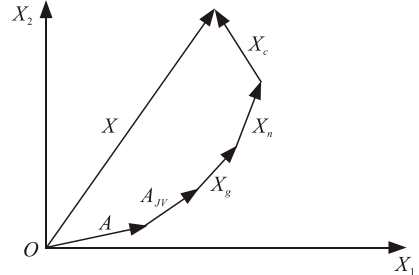


图 8 射击误差分解

按照弱相关误差中的强相关项与不相关项可将三类误差转换二类误差，其中第一类误差与第二类误差的协方差分别表示为：

$$\left. \begin{aligned} \Sigma_I &= \Sigma_c + (1-C)\Sigma_n \\ \Sigma_{II} &= C\Sigma_n + \Sigma_g \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中  $C$  为待定系数，指弱相关误差中强相关部分的比重。

通过抽取 3 个相互独立的标准正态分布  $N(0, 1)$  随机数  $\xi_1$ 、 $\xi_2$ 、 $\xi_3$ ，按式(6)计算第  $k$  次模拟时的点射散布中心坐标：

$$\begin{bmatrix} x_1^{(k)} \\ x_2^{(k)} \\ x_3^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & 0 & 0 \\ b_{21} & b_{22} & 0 \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \xi_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中：变换矩阵的各项非零元素  $b_{ij} = \frac{\sigma_{ij}^{II} - \sum_{k=1}^{j-1} b_{ik} b_{jk}}{\sqrt{\sigma_{jj}^{II} - \sum_{k=1}^{j-1} b_{jk}^2}}$ ；

$\sigma_{ij}^{II}$  为二类误差协方差阵  $\Sigma_{II}$  的各项系数； $a_i$  为武器综合体系系统误差协方差矩阵的系数。

计算第  $k$  次模拟时的第  $i$  发射弹的炸点坐标时，抽取 3 个相互独立的标准正态分布  $N(0, 1)$  随机数  $\zeta_1$ 、 $\zeta_2$ 、 $\zeta_3$ ：

$$\begin{bmatrix} x_1^{(k,i)} \\ x_2^{(k,i)} \\ x_3^{(k,i)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & 0 & 0 \\ c_{21} & c_{22} & 0 \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \zeta_1 \\ \zeta_2 \\ \zeta_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_1^{(k)} \\ x_2^{(k)} \\ x_3^{(k)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{jv1}^{(k)} \\ a_{jv2}^{(k)} \\ a_{jv3}^{(k)} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中：变换矩阵的各项非零元素  $c_{ij} = \frac{\sigma_{ij}^I - \sum_{k=1}^{j-1} c_{ik} c_{jk}}{\sqrt{\sigma_{jj}^I - \sum_{k=1}^{j-1} c_{jk}^2}}$ ；

$\sigma_{ij}^1$  为一类误差协方差阵  $\Sigma_1$  的各项系数； $a_{jvi}^{(k)}$  为单炮系统误差协方差矩阵的系数，由于本文中只考虑单门单管迫击炮进行  $k$  次点射，因此  $a_{jvi}^{(k)} = 0$ 。假设破片的运动轨迹忽略重力对破片的影响，即将其视为直线飞行，则可以确定炸点位置。由于破片自炸点  $P$  点飞行到命中目标  $M_m=(u_{m1}, u_{m2}, u_{m3})^T$  的飞行时间与目标由提前点  $M_q=(u_1, u_2, u_3)^T$  到  $M_m$  点的飞行时间相等，即可得到下列方程组：

$$\left. \begin{aligned} u_{m_i} &= u_i + t_d v_m \cos(v_m, u_i) \\ t_d &= \frac{A}{v_{d_0}} (e^{R/A} - 1) \\ R &= \sqrt{u_{m_1}^2 + u_{m_2}^2 + u_{m_3}^2} \\ v_{d_0} &= \sqrt{v_p^2 + v_a^2 + 2v_p v_a \cos \psi_p} \\ \tan \psi &= v_a \sin \psi_p / (v_a \cos \psi_p + v_p) \\ \psi_p &= \psi + \psi_a = \psi + \arcsin\left(\frac{v_p}{v_a} \sin \psi\right) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中： $v_p$  为弹丸的存速； $v_a$  为附加速度； $v_{d_0}$  为破片初速； $v_m$  为目标飞行速度； $\psi_p$  为破片的静态散飞角； $\psi$  为破片的动态散飞角； $\cos(v_m, u_i)$  为目标速度矢量在以炸点建立的坐标系下的速度矢量，可由高低角、提前点处的弹道倾角、目标倾斜角与航路角求取； $A$  由预制破片阻力系数、空气密度、高度  $H$  处的相对空气密度、破片的迎风面积与单个破片的质量求取。

通过迭代法对式(7)求解，可得到破片命中目标  $M_m$  的坐标、破片自炸点至命中目标位置的距离  $R$ 、对应的飞行时间  $t_d$  与破片的动态散飞角  $\psi$ 。破片命中目标的过程如图 9 所示。

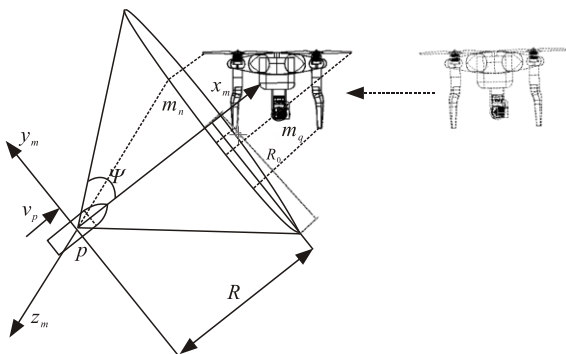


图 9 破片命中目标的过程

若迫弹战斗部有  $N$  个预制破片弹，由第一节的仿真分析可知，破片云分布呈现出中间密集、边缘疏散的特点，故假设破片在飞散角上按正态分布。假设在同一环带上的破片分布均匀，则可计算出在

环带角度很小时的环带面积。

当目标易损面面积  $S_M'$  与球面上任意点的破片分布密度  $P(\psi)$  为已知时，可得到单枚破片对目标易损部位的命中概率：

$$P(s) = S_M' P(\psi) \quad (8)$$

设单枚自然破片击穿等效靶板的概率为  $P_K$ ，则目标要害部位被击穿的概率为：

$$P_K = \begin{cases} 0 & E_b \leq 0 \\ 1 - e^{-(E_b/14 - 0.235)} & E_b > 3.3 \end{cases} \quad (9)$$

式中  $E_b = 10^{-5} * \frac{m * v_{dm}}{2 * b_0 * s}$  为质量  $m$  的破片作用在目标上的比动能。

由此可得到坐标毁伤定律  $G(x)$ ：

$$G(x) = 1 - e^{-N * P(s) * P_K} \quad (10)$$

毁伤概率模拟计算的步骤如图 10 所示。

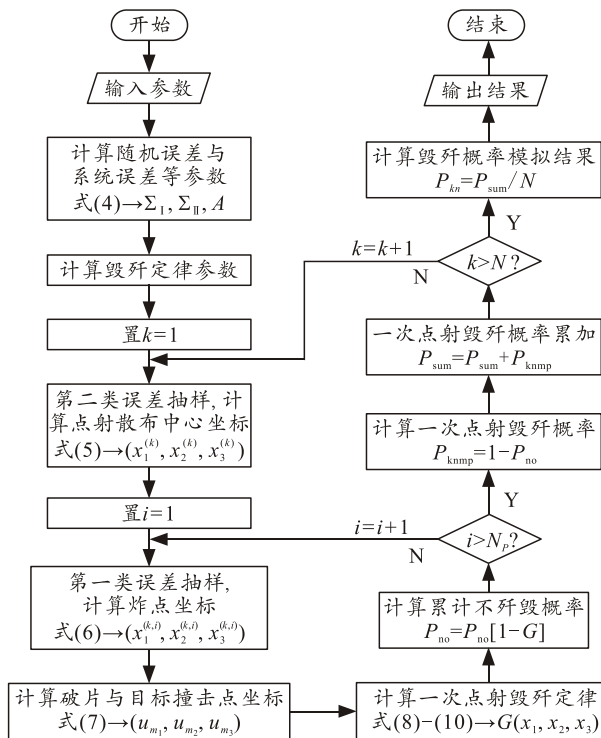


图 10 单炮单管一次点射毁伤概率程序

### 3.2 各工况数值计算结果及分析

为了验证该武器在实际战场环境下的可行性，笔者引入计算、装定引信的作用时间误差、点射散布误差、初速散布误差等引起的第一类误差协方差矩阵  $\Sigma_1$  与第二类误差协方差矩阵  $\Sigma_2$  和武器综合体的系统误差  $A$ 。根据不同的工况，从弹丸不同的初速、目标的斜距离、一次点射的弹数等多角度，计算出对目标毁伤概率。

引入的各项误差如表 3 所示。

表 3 计算毁伤概率的误差数值

误差种类	数值
武器系统射角系统误差/mil	2.5
武器系统提前方位角系统误差/mil	2.5
点射高低散布均误差/mil	1.9
点射方向散布均误差/mil	1.9
火控计算机射角误差均方差/mil	4.2
火控计算机提前方位角误差均方差/mil	6.4
火炮传动装置射角误差均方差/mil	2.9
火炮传动装置提前方位角误差均方差/mil	2.9
稳定装置射角误差均方差/mil	0
稳定装置提前方位角误差均方差/mil	0
引信作用时间系统误差/%	0.15
引信作用时间误差均方差/%	0.3
引信装定与作用时间散布均方差/s	0.002
计算机输出误差衰减系数	0.86
火炮传动装置输出误差衰减系数	5

续表 3 计算毁伤概率的误差数值

误差种类	数值
稳定装置输出误差衰减系数	0
单炮初速散布均方差/%	0.3
修正初速误差的均方差/%	0.4
修正空气密度误差的均方差/%	1.3
修正纵风误差的均方差/(m/s)	2.2
修正横风误差的均方差/(m/s)	2.2

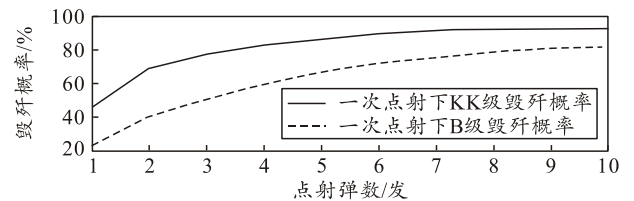
“低慢小”无人机速度为 50 m/s，战斗部预制破片数为 600，在不同的工况条件下，对战斗部对目标不同舱段的有效破片数和毁伤概率进行计算。通过 Matlab 程序的仿真计算，得到了各工况下点射的毁伤概率数据。在不同的工况下，“低慢小”无人机毁伤的具体数据如表 4 所示。

表 4 “低慢小”无人机有效中弹数与毁伤概率

%

参数	直线距离 600 m			直线距离 900 m			直线距离 1 200 m			直线距离 1 500 m		
	1发	2发	5发	1发	2发	5发	1发	2发	5发	1发	2发	5发
KK 级毁伤概率	63.84	84.75	95.95	50.41	72.21	90.65	43.03	60.68	82.55	31.83	48.42	75.16
B 级毁伤概率	36.88	52.58	82.66	25.36	44.89	72.51	19.36	32.54	59.28	12.18	23.95	45.48

通过对“低慢小”型无人机目标的打击进行计算，得到的结果如表 4 和图 11 所示。表 4 展示了在不同距离下，采取一次点射条件下不同射弹数，对无人机 KK 级与 B 级的毁伤概率。可以观察到，在全航路下，使用多发弹药相对于单发弹药，都具有更高的毁灭概率。在 900 m 距离下，无人机造成 KK 级的毁伤概率从单发的 50.41% 增加到 5 发的 90.65%。类似的趋势在其他距离下也得到了验证，且随着与目标距离的增长，导致弹着点对目标产生的偏差增大，使得毁伤概率逐渐变低，符合实际情况。



(d) 1 000 m 时点射弹数与毁伤概率关系

图 11 全航路毁伤概率曲线

假设不考虑误差的影响，为了对无人机集群中每个单元具有相同的毁伤概率，瞄准目标的提前点与无人机集群内的每个单元之间的距离应该相等；因此，对于常规无人机集群阵列，可以选择阵列的中心点作为提前点；对于不规则的无人机集群阵列，瞄准点与无人机集群中各单元之间的距离应尽可能相等。为了便于计算，笔者基于图 12 中无人机集群的 2 种典型规则排列，等边三角形排列与六边形排列来分析毁伤效率。

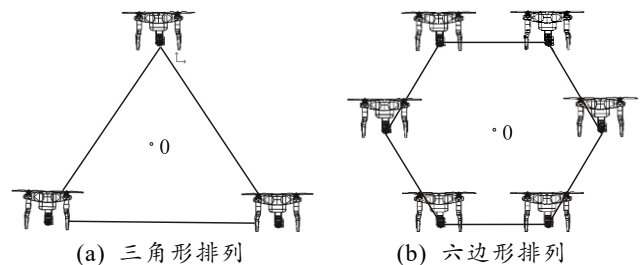
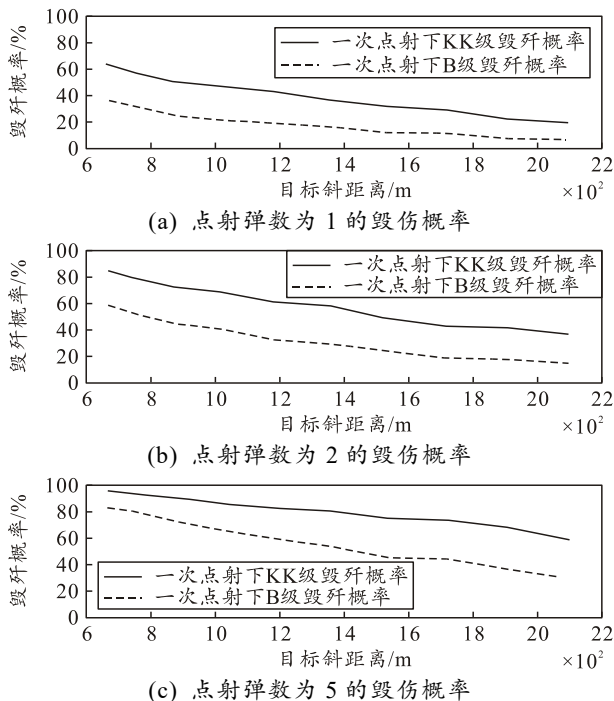


图 12 无人机集群的布置

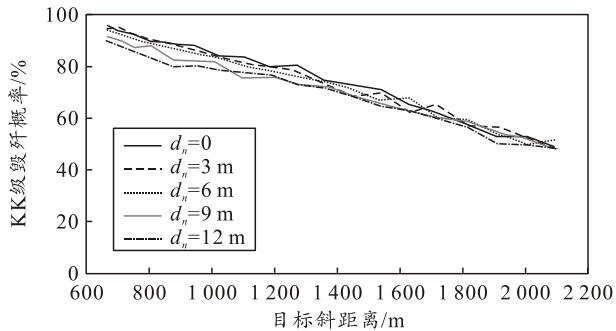
假设相邻无人机之间的距离为  $d_n$ ，则以正三角形排列的无人机集群的中心点到每个个体的距离为  $d_n = \sqrt{3}/4$ ，以正六边形排列的无人机集群的中心点

到每个个体的距离为  $d_n$ 。

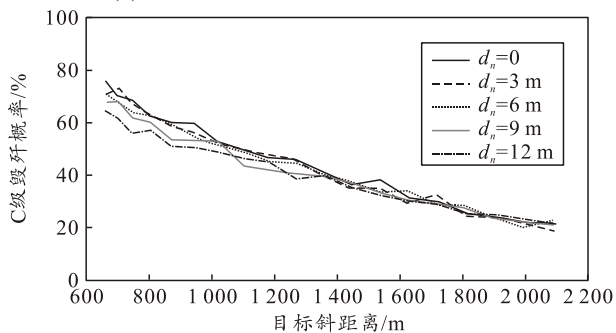
假设一个无人机集群中有  $n$  架无人机，目标提前点是无人机集群的中心点，那么每架无人机的毁伤概率是相同的，表示为  $p$ ，因此，摧毁  $i$  架无人机的概率为：

$$P(i) = C_n^i p^i (1-p)^{n-i} \quad (11)$$

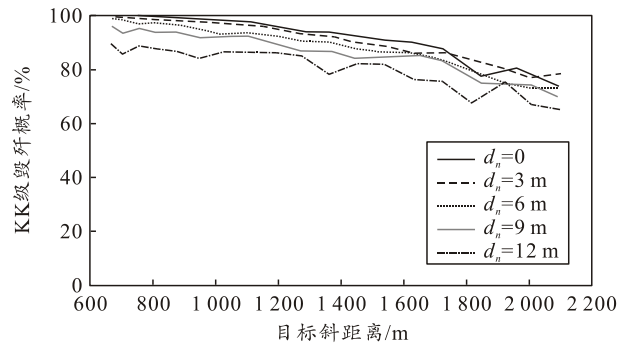
多目标全航路下至少毁伤 1 架的概率如图 13 所示。



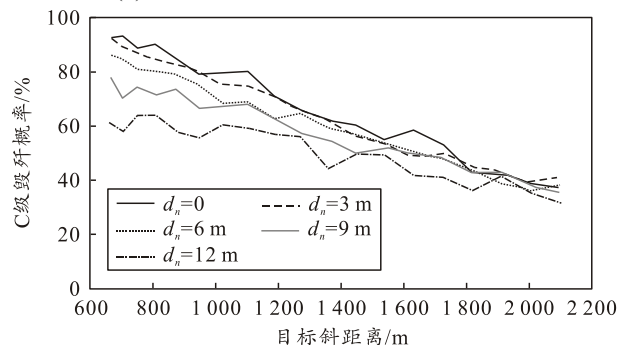
(a) 三角形排列下的 KK 级毁伤概率



(b) 三角形排列下的 B 级毁伤概率



(c) 六边形排列下的 KK 级毁伤概率



(d) 六边形排列下的 B 级毁伤概率

图 13 多目标全航路下至少毁伤 1 架的概率

从图 13 中可以看出：当倾斜距离不变时，随着集群中相邻无人机之间距离  $d_n$  的增加，无人机集群的毁伤概率降低。

当一次点射弹数为 1 时，引入高炮系统误差与随机误差，进一步分析正三角形和正六边形排列的无人机集群的毁伤概率，如表 5 和 6 所示。

表 5 无人机集群呈等边三角形的 KK 级毁伤概率

%

歼毁无人 机数量	$d_n=0$			$d_n=3\text{ m}$			$d_n=6\text{ m}$			$d_n=9\text{ m}$			$d_n=12\text{ m}$		
	900	1200	1500	900	1200	1500	900	1200	1500	900	1200	1500	900	1200	1500
0	12.2	19.8	29.2	13.8	21.9	30.4	15.2	24.2	33.3	17.8	26.3	34.5	20.2	27.2	35.6
1	37.2	42.5	44.4	38.6	43.3	44.4	39.7	43.8	44.2	41.7	44.3	44.1	42.6	44.3	43.9
2	37.8	30.4	22.6	36.2	28.5	21.7	34.9	26.6	19.6	32.2	24.7	18.8	30.2	24.1	18.1
3	12.8	7.3	3.8	11.4	6.3	3.5	10.2	5.4	2.9	8.3	4.7	2.6	7.1	4.4	2.4

表 6 无人机集群呈六边形的 KK 级毁伤概率

%

歼毁无人 机数量	$d_n=0$			$d_n=3\text{ m}$			$d_n=6\text{ m}$			$d_n=9\text{ m}$			$d_n=12\text{ m}$		
	900	1200	1500	900	1200	1500	900	1200	1500	900	1200	1500	900	1200	1500
0	1.7	5.9	10.8	3.8	6.7	11.1	4.3	8.1	13.0	8.1	10.0	14.7	13.1	17.0	19.7
1	9.8	21.3	29.1	16.5	22.8	29.4	17.8	25.2	31.6	25.3	28.1	33.2	31.7	35.0	36.8
2	23.9	32.1	32.9	29.9	32.5	32.6	30.7	32.9	32.0	32.9	32.8	31.3	32.0	30.1	28.6
3	31.2	25.9	19.6	28.9	24.7	19.3	28.2	22.9	17.2	22.8	20.5	15.7	17.2	13.8	11.8
4	22.9	11.7	6.6	15.7	10.6	6.4	14.6	9.0	5.2	8.9	7.2	4.5	5.2	3.6	2.7
5	9.0	2.8	1.2	4.6	2.4	1.1	4.0	1.9	0.8	1.8	1.3	0.7	0.8	0.4	0.3
6	1.5	0.3	0.1	0.6	0.2	0.1	0.5	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

从表 5 和 6 可以看出：无人机集群的布置对毁伤概率有很大影响。在与目标斜距离为 900 m，无人机集群呈正三角形排列、集群中相邻无人机之间的距离  $d_n$  为 3 m 时，目标提前点位置修正量为 1.2 m，一次点射至少一架无人机受到 KK 级损坏的概率达 86.1%，3 架无人机均被 KK 级摧毁的概率为

11.4%；而同样距离下，目标呈六边形排列、集群中相邻无人机之间的距离  $d_n$  为 3 m 时，一次点射至少一架无人机受到 KK 级损坏的概率达 96.2%，6 架无人机均被 KK 级摧毁的概率为 0.6%。随着集群中相邻无人机之间距离的增加，摧毁无人机集群的概率迅速降低。在六边形排列时，当集群中相邻无

人机之间的距离  $d_n$  从 3 m 增加到 12 m 时, 一次点射摧毁至少一架无人机的概率将从 96.2% 下降到 86.9%。在这种情况下, 对无人机集群造成有效破坏概率虽有所下滑, 但该方案仍具备对目标击毁与驱逐的能力。

综上所述, 该方案的打击范围较广, 能够有效地消灭多个目标, 但在对抗无人机时, 还应尽可能减少系统误差与目标位置的分散误差, 以增加击中单个无人机的概率。其次, 根据无人机集群的布置, 选择相邻无人机在适当的瞄准点进行射击, 以确保对无人机集群造成最佳伤害, 提高武器系统的毁伤能力。

#### 4 结论

笔者提出了一种基于 60 mm 迫击炮的定向破片迫弹的方案, 通过理论计算和仿真计算, 验证了预制定向战斗部的破片速度及散飞角数据和模型的准确性。结合“低慢小”无人机的特性和飞机类目标的毁伤准则, 确定“低慢小”无人机各部件的毁伤等级, 并建立了无人机的易损性模型。从坐标毁伤定律的角度出发, 引入随机误差与系统误差, 计算出破片速度的衰减趋势与命中坐标, 得出了命中目标的有效破片数量和毁伤概率, 并同时计算了呈不同形态布置的无人机集群毁伤效果。研究结果表明, 利用预制的定向破片迫弹, 能够有效打击无人机及蜂群。这些计算结果和分析可为后续研究武器的具体方案提供参考, 同时对“低慢小”无人机蜂群提出了一种费效高的解决方案, 能够有效地应对小型无人机的攻击威胁, 从而保障战斗部队的安全和作战效能, 具有一定的实际意义。

#### 参考文献:

- [1] 范天峰, 崔青春, 田亚锋, 等. 一种迫弹自动装填的新型结构技术研究[J]. 火炮发射与控制学报, 2014, 35(3): 54-57.
- [2] 寇海军, 赵刚, 王鹏, 等. 迫击炮新型瞄准系统安装托架结构模态与强度分析[J]. 火力与指挥控制, 2020, 45(9): 161-165.
- [3] 姚志军, 谢杰涛, 赵志明, 等. 高炮弱相关射击误差的

毁伤概率计算模型[J]. 兵工学报, 2018, 39(6): 1082-1087.

- [4] 史海龙, 王晶晶, 李文才, 等. 基于误差投影的着发射击高炮毁伤概率计算方法[J]. 兵工自动化, 2018, 37(9): 37-41.
- [5] 许诚, 袁有宏, 赵杰, 等. 目标毁伤等级及毁伤数据库系统的研究[J]. 舰船电子工程, 2011, 31(11): 104-107.
- [6] 邓辉咏, 何循来, 殷军辉, 等. 小口径高炮对高速目标毁伤概率研究[J]. 火炮发射与控制学报, 2019, 40(3): 20-23, 49.
- [7] 谢杰涛, 吴娟, 王树恩, 等. 以毁伤数为判据的高炮毁伤概率试验方法研究[J]. 兵工学报, 2020, 41(4): 634-640.
- [8] JI F. Research on the damage effectiveness of AHEAD against the LSS UAV clusters[J]. Conference Series, 2023, 2460(1): 012013.
- [9] 王娟娟, 郭双锋, 袁宝慧, 等. 聚焦战斗部破片聚焦性能数值计算和试验研究[J]. 火炸药学报, 2013, 36(2): 87-90.
- [10] 李鑫, 王伟力, 梁争峰. 不同起爆方式下战斗部破片飞散特性[J]. 弹箭与制导学报, 2022, 42(4): 35-42.
- [11] 崔瀚, 张国新. 定向战斗部研究现状及展望[J]. 飞航导弹, 2019(3): 84-89.
- [12] 李翔宇, 卢芳云, 王志兵, 等. 可变形定向破片战斗部模型试验和数值模拟研究[J]. 国防科技大学学报, 2006(1): 121-124.
- [13] 宫小泽, 周兰伟, 姚志军, 等. AHEAD 弹毁伤武装直升机所需平均命中弹数研究[J]. 南京理工大学学报, 2018, 42(5): 564-570.
- [14] 王歌, 张春, 林智伟, 等. 多束定向预制破片弹开舱距离研究[J]. 兵工学报, 2022, 43(S1): 115-120.
- [15] 凌琦, 何勇, 何源. 定向战斗部破片飞散的数值模拟与试验研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(3): 234-241.
- [16] 徐梦林, 印立魁, 黄文龙, 等. 轴向聚焦式预制破片战斗部破片飞散角研究[J]. 弹箭与制导学报, 2022, 42(4): 108-113.
- [17] 姜颖资, 宋海博. 爆炸冲击波对“低慢小”无人机毁伤效应研究[J]. 弹箭与制导学报, 2022, 42(2): 117-121.
- [18] 赵汝岩, 卢洪义, 朱敏. 高速动能体对飞机毁伤数值仿真[J]. 四川兵工学报, 2013, 34(1): 28-31.
- [19] 肖元星, 张冠杰. 地面防空武器系统效费分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.