

doi: 10.7690/bgzd.2026.05.009

远程制导火箭弹毁伤评估仿真研究

冯海川, 谢文

(陆军炮兵防空兵学院南京校区, 南京 211132)

摘要: 为解决各型精确制导弹药在部队演训中对目标的毁伤难以评估的问题, 提出一种远程制导火箭弹毁伤评估仿真研究。基于统计实验法、毁伤理论和计算机仿真技术改进像素仿真法, 将目标和毁伤区域由点的集合来表示, 结合典型弹种对典型目标的毁伤特点, 分别提出制导杀爆弹对轻毁伤类目标重叠式毁伤、制导侵彻(爆)弹对坚固类目标条件式毁伤、制导子母弹对面积目标散布式毁伤模型, 并设计了实现方法和步骤。算例仿真结果表明: 该方法有效可行, 且能够实现毁伤效果可视化, 可为指挥员组织相关训练提供直观依据和技术参考。

关键词: 远程火箭炮; 制导火箭弹; 毁伤评估; 仿真

中图分类号: TJ393 **文献标志码:** A

Simulation Research on Damage Assessment of Long-range Guided Rockets

Feng Haichuan, Xie Wen

(Nanjing Campus, Army Academy of Artillery and Air Defense Force, Nanjing 211132, China)

Abstract: To address the challenge of evaluating the damage caused by various types of precision-guided munitions during military exercises and training, a simulation study on the damage assessment of long-range guided rockets is proposed. Based on statistical experimental methods, damage theory, and computer simulation technology, the pixel simulation method is improved. Targets and damage areas are represented as collections of points. Combining the damage characteristics of typical munitions against typical targets, models for overlapping damage of guided fragmentation bombs against lightly damaged targets, conditional damage of guided penetration (explosive) bombs against solid targets, and distributed damage of guided cluster bombs against area targets are proposed, along with the design of implementation methods and steps. The simulation examples results show that this method is effective and feasible, and can achieve visual damage effects, providing intuitive basis and technical reference for commanders to organize relevant training.

Keywords: long-range rocket launcher; guided rocket; damage assessment; simulation

0 引言

从近几场局部战争可以看出, 远程火箭炮已成为适应多域作战需求、提升遂行新时代远程精确打击能力和构建完备火力体系的重要力量, 愈加受到各国军队的重视, 大量新装备新弹药不断更新、持续迭代。与此同时, 如何实现各型火箭弹对不同类目标的精确毁伤评估^[1], 打通指挥链路中“评”这一关键环节, 已成为部队演训面临的重大现实难题。在当前关于毁伤评估的研究中, 利用解析法进行毁伤计算, 通常将目标简化为等效矩形, 依据弹着分布密度函数和目标毁伤函数建立毁伤模型^[2-5], 计算过程较为复杂, 且适用性有限。随着计算机性能的提升和仿真技术的发展, 采用蒙特卡洛法进行仿真实验统计, 逐渐成为主流毁伤评估手段。唐伟峰等^[6-7]利用像素仿真法, 通过模拟多个弹着点作用区域与目标相交区求解毁伤面积, 解决了解析法面临的难题。但模拟计算繁琐冗长^[8], 未考虑不同弹

种及其匹配目标因素, 且未能实现炸点毁伤效果可视化, 不便于为指挥员决策提供直观依据。笔者基于统计实验法和计算机仿真技术改进像素仿真法, 用点的集合来表示目标和毁伤圆, 并通过集合运算代替海量毁伤点的遍历算法, 提高了运算速度, 实现炸点毁伤效果可视化; 根据制导杀爆弹、制导侵彻(爆)弹、制导子母弹等弹型的毁伤特点, 分别设计提出毁伤模型及其实现方法, 实用性和适用性显著增强, 可为指挥员组织相关训练和毁伤评估提供参考。

1 毁伤评估模型

毁伤概率指由于射击造成的目标毁伤程度的概率数值, 是表征射击效率的核心内容。远程制导火箭弹不同弹型对不同目标毁伤的计算方法各不相同, 其大小主要取决于弹药的毁伤效应和目标易损性²方面, 可通过弹药对目标的毁伤函数、射击误差(制导弹通常用 CEP 描述)、目标位置和形状等参数来计算。

收稿日期: 2024-12-09; 修回日期: 2025-01-09

第一作者: 冯海川(1986—), 男, 河北人, 博士。

1.1 制导杀爆弹对轻毁伤类目标重叠式毁伤

如图 1 所示, 制导杀爆弹通常在近炸或触发引信作用下, 形成冲击波和高速破片等杀伤元, 对雷达天线、导弹发射车、火力点等轻毁伤类目标进行打击。

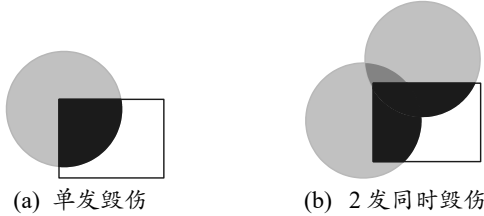


图 1 制导杀爆弹对目标的毁伤

若发射单枚制导杀爆弹时, 毁伤区域 H 表示为图 1(a) 中深色阴影部分所示; 若目标同时被 2 枚及以上火箭弹的杀伤半径所覆盖时, 以不累加重复毁伤率为衡量指标, 即目标区域中重复覆盖区域按一次计算^[9], 目标的总体毁伤区域 H 表示为各弹着点毁伤区域 H_i 之和减去重叠部分 H' , 如图 1(b) 中深色阴影部分所示, 重复毁伤区域可表示为:

$$H = \sum H_i - H' \quad (1)$$

目标的毁伤状态用毁伤比例来衡量, 可采用 0-1 毁伤或连续(CON)毁伤, 可用 E 来表示^[10]:

$$E(0-1) = \begin{cases} 1, & (H/S) \geq p \\ 0, & (H/S) < p \end{cases} \quad (2)$$

$$E(CON) = H/S$$

式中: H 为目标的毁伤区域; S 为该目标的面积; p 为毁伤阈值($0 \leq p \leq 1$)。

1.2 制导侵彻(爆)弹对坚固类目标条件式毁伤

如图 2 所示, 制导侵彻(爆)弹采用纯动能侵彻体制, 依靠侵爆战斗部的高速动能对地面加固目标和地下深层设施进行侵彻。侵彻(爆)弹是一种能够钻入目标深层引爆的弹药, 需要侵入目标后, 才能更好地依靠破片的高速动能和爆轰波进行毁伤。

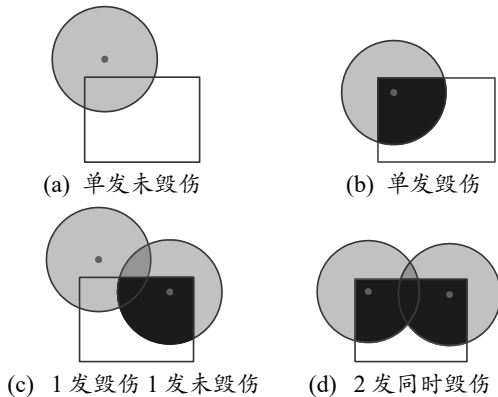


图 2 制导侵彻(爆)弹对目标的毁伤

当发射单发制导侵彻(爆)弹时, 若弹着点(圆心)未落达目标区域内, 则目标不被毁伤, 如图 2(a)所示; 若弹着点落达目标区域内, 目标毁伤区域为图中深色阴影部分, 如图 2(b)所示。当发射多发制导侵彻(爆)弹时, 目标毁伤区域为各发火箭弹不累加重复毁伤的叠加, 如图 2(c)-(d)所示。目标毁伤状态计算同式(2)。

1.3 制导子母弹对面积目标散布式毁伤

制导子母弹是一种大面积杀伤弹药, 母弹发射到目标区上空时, 以一定的抛撒半径将众多子弹抛撒出去, 以稠密的火力毁伤目标, 如图 3 所示。

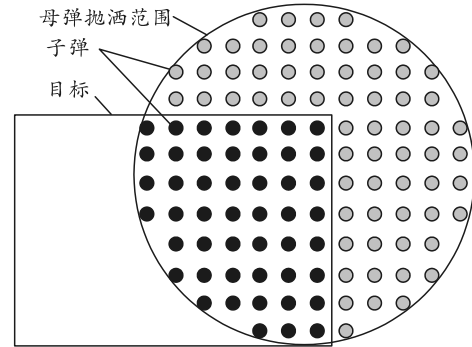


图 3 制导子母弹对目标的毁伤

若子弹落达目标区, 则形成以子弹毁伤半径为半径的毁伤圆; 若子弹未落达目标区, 则对目标不构成毁伤。目标毁伤区域为目标区域内所有子弹作用圆之和(子弹在抛洒范围内均匀分布^[11]), 若多发制导子母弹同时对目标进行打击, 需要去除落点重复的子弹。毁伤状态的计算同式(2)。

2 计算方法的设计与实现

2.1 建立网格坐标系, 划定目标幅员

建立一个单位网格目标坐标系 xoz , 坐标系单位间隔越小精度越高, 其取值通常要综合考虑目标幅员与弹药的毁伤半径。目标可依据其位置、大小和形状, 通过点集合来表示, 如矩形目标、圆形目标可分别由式(3)-(4)表示。

$$S_{\text{矩形}} = \{(x, z) | a - l_x \leq x \leq a + l_x, b - l_z \leq z \leq b + l_z, x \in Z, z \in Z\} \quad (3)$$

式中: (a, b) 为矩形目标中心点坐标; $2l_x$ 、 $2l_z$ 分别为矩形目标的正面和纵深。

$$S_{\text{圆形}} = \{(x, z) | (x - c)^2 + (z - d)^2 \leq r_m^2, x \in Z, z \in Z\} \quad (4)$$

式中: (c, d) 为圆形目标中心点坐标; r_m 为圆形目标的半径。

不规则目标可增加限定条件:

$$S_{\text{不规则}} = \{(x, z) | a \leq x \leq b, c \leq z \leq d, z \leq ex + f, \dots\}. \quad (5)$$

式中 a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 f 、 \dots 为常数。

2.2 选择瞄准点，获取弹着点位置

远程制导火箭弹精度高、毁伤能力强，通常遂行“精确拔点”任务。对点目标的打击，瞄准点一般选择目标中心位置或要害部位 (x^*, z^*) ；对体系目标的打击，瞄准点选择目标最重要的几个关键节点；制导子母弹对面积目标的火力覆盖，瞄准点选择需要根据目标幅员、母弹散布半径等因素确定。瞄准点集合为：

$$M^* = \{(x_1^*, z_1^*), (x_2^*, z_2^*), \dots, (x_i^*, z_i^*)\}. \quad (6)$$

弹着点 (x_i, z_i) 符合以瞄准点 (x_i^*, z_i^*) 为中心的正态分布，产生落点位置为：

$$D = \left\{ (x, z) \mid f(x, z) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_z} \exp\left(-\frac{(x-x^*)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(z-z^*)^2}{2\sigma_z^2}\right), (x^*, z^*) \in M^* \right\}. \quad (7)$$

式中： (x, z) 为弹着点成对的独立随机变量，其联合密度函数服从正态分布； (σ_x, σ_z) 为正态分布的标准差，由目标定位误差和弹药制导精度综合决定。

2.3 生成毁伤圆，计算各弹种的毁伤区域

2.3.1 制导杀爆弹对软毁伤类目标打击的毁伤区域

制导杀爆弹落入目标区，形成以弹着点为圆心，以 r 为毁伤半径形成的毁伤圆。则第 i 枚火箭弹产生的毁伤圆为：

$$U_i = \{(x, z) | (x-x_i)^2 + (z-z_i)^2 \leq r^2, x \in Z, z \in Z\}. \quad (8)$$

第 i 枚制导杀爆弹火箭弹对目标的毁伤区域 H_i ，即为该弹形成的毁伤圆在目标上的投影。各枚火箭弹形成的毁伤区域间可能存在重叠区域，由于采用不累加重复毁伤率，可通过集合的并集运算，汇总统计不同位置的毁伤点，计算 i 枚火箭弹对目标的总毁伤区域 H ，可表示为：

$$\left. \begin{aligned} H_i &= U_i \cap S \\ H &= H_1 \cup H_2, \dots, H_i \end{aligned} \right\}. \quad (9)$$

2.3.2 制导侵彻(爆)弹对坚固类目标打击的毁伤区域

第 i 枚制导侵彻(爆)弹对目标进行打击时，毁伤圆的计算同式(8)。若弹着点在目标区域内，毁伤区域 H_i 的计算同式(9)，否则为 0。则 i 枚火箭弹对目标的总毁伤区域，可表示为：

$$\left. \begin{aligned} H_i &= \left\{ \begin{aligned} U_i \cap S, & (x_i, z_i) \in S \\ 0, & (x_i, z_i) \notin S \end{aligned} \right\}. \\ H &= H_1 \cup H_2, \dots, H_i \end{aligned} \right\}. \quad (10)$$

2.3.3 子母弹对均匀分布面积目标打击的毁伤区域

第 i 枚制导子母弹对面积目标进行火力覆盖时，母弹以弹着点 (x_i, z_i) 抛洒子弹，形成以抛洒半径为 R 的均匀分布子弹群，则子弹的落点可表示为^[12]：

$$D_{\text{子弹}} = \{(x, z) | g(x, z) = 1/(\pi R^2), (x-x_i)^2 + (z-z_i)^2 \leq R^2\}. \quad (11)$$

若第 i 枚制导子母弹的第 j 发子弹落点 (x_{ij}, z_{ij}) 落达目标区，则对目标造成毁伤，判断为有效子弹，可表示为：

$$N_{ij} = \left\{ \begin{aligned} 1, & (x_{ij}, z_{ij}) \in S \\ 0, & (x_{ij}, z_{ij}) \notin S \end{aligned} \right\}. \quad (12)$$

统计有效子弹数量。假设子弹毁伤半径为 r ，则 i 枚火箭弹对目标的总毁伤区域需要剔除落点重叠子弹，可表示为：

$$\left. \begin{aligned} H_i &= \sum N_{ij} \cdot \pi r^2 \\ H &= H_1 \cup H_2, \dots, H_i \end{aligned} \right\}. \quad (13)$$

2.4 多次模拟，评估毁伤程度

根据式(2)和式(11)-(13)可分别计算各弹种对目标的毁伤程度：

$$\left. \begin{aligned} E(0-1) &= \left\{ \begin{aligned} 1, & \frac{\text{card}(H)}{\text{card}(S)} \geq p \\ 0, & \frac{\text{card}(H)}{\text{card}(S)} < p \end{aligned} \right\}. \\ E(\text{CON}) &= \frac{\text{card}(H)}{\text{card}(S)} \end{aligned} \right\}. \quad (14)$$

按照上述弹着点和毁伤点的散布特征，建立抽样模型模拟产生弹着点和毁伤点，并反复多次模拟，统计得出毁伤效率的平均值，即为目标总体的毁伤程度。

3 实例分析

3.1 制导杀爆弹对轻毁伤类目标的毁伤计算

某型远程制导杀爆弹对半径为 20 m 的雷达天线进行打击。火箭弹对目标的毁伤半径为 30 m，制导误差 CEP 为 20 m，目标定位误差为 20 m，瞄准点为目标中心，求发射 2 发火箭弹对目标造成的毁伤程度。

按照上述方法步骤和射击条件进行作业。为了提高计算精度，以 0.1 m 为单位建立网格坐标系，利

用 Python3 软件可以绘出某次打击模拟效果，如图 4 所示。

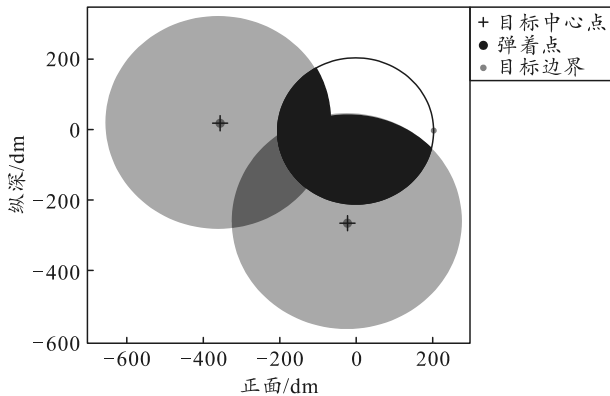


图 4 制导杀爆弹对目标的模拟毁伤效果

由图 4 可知：制导火箭弹对目标的毁伤区域为多个毁伤圆与目标的重叠部分，即图中黑色区域。

按照上述方法进行模拟计算，可以看到随着模拟次数的增加，概率值逐渐收敛于固定值，如图 5 所示。

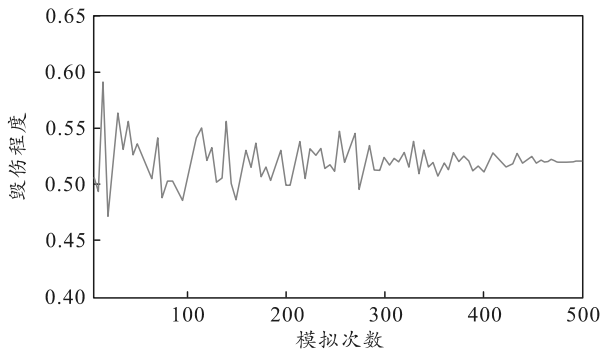


图 5 毁伤程度随模拟次数的变化

通过 500 次模拟，统计出火箭弹的毁伤程度平均值为 0.519。同样方法，可以求取多发火箭弹对目标的毁伤程度，如图 6 所示。

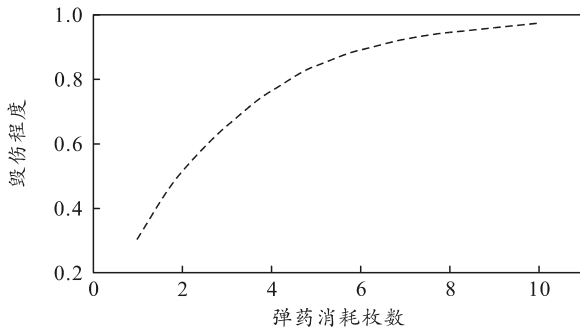


图 6 毁伤程度随弹药消耗变化

也可依据所需要的毁伤要求，反求弹药消耗量。

3.2 制导侵彻(爆)弹对坚固类目标的毁伤计算

某型制导侵彻(爆)弹对幅员为 8 m×8 m 工事进行射击，假设目标定位误差为 5 m，制导误差 CEP 为 5 m，毁伤半径为 6 m，瞄准点为目标中心，试求发射 2 发火

箭弹对目标造成的毁伤程度。

只有弹着点落在目标区域内，才能造成有效毁伤。为了提高计算精度，以 0.1 m 为单位建立网格坐标系。利用软件 Python3 可以绘出某次打击模拟效果，如图 7 所示。

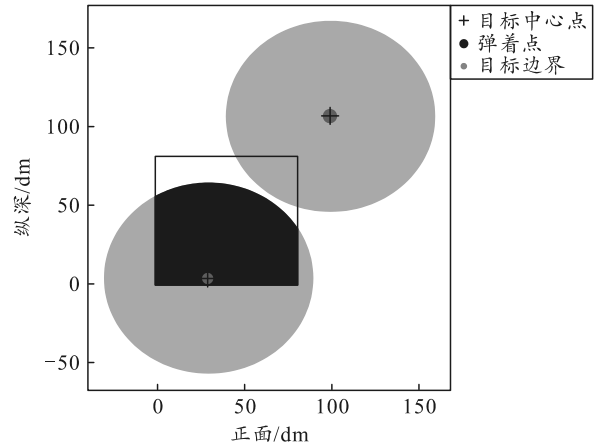


图 7 制导侵彻(爆)弹某次对目标打击的模拟毁伤效果

由图 7 可知：图中目标右上方炸点的弹着点未落在目标区域内，目标未被毁伤；目标下方炸点的弹着点落在目标区域内，毁伤区域为黑色区域。同样方法，通过多次模拟可得出概率值逐渐收敛于固定值，即火箭弹的目标毁伤程度平均值为 0.362。

3.3 制导子母弹对均匀分布面积目标的毁伤计算

某型制导子母弹对幅员 300 m×300 m 面积目标打击，假设定位精度为 20 m，母弹 CEP 为 60 m(携带 500 枚子弹)，散布圆半径 100 m，子弹有效杀伤半径 2 m，求发射 9 发火箭弹(均匀分布)对目标的毁伤程度。

同样方法绘出某次打击模拟效果，如图 8 所示。

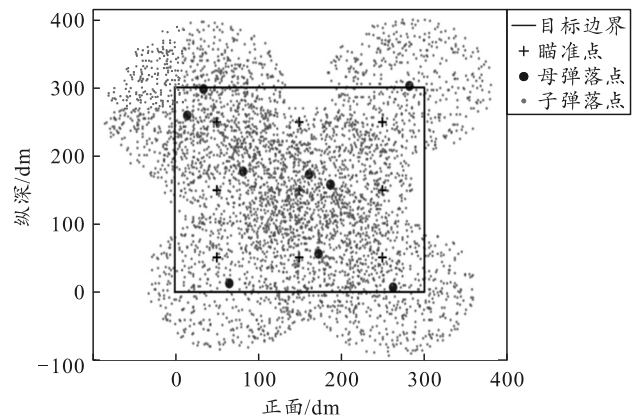


图 8 制导子母弹对面积目标毁伤仿真

可以统计出该次打击中有 2 859 枚子弹为有效子弹(落入目标区不同位置)，对目标的毁伤程度为 0.399。通过 500 次模拟，统计出毁伤程度平均值为 0.402。