

中低层框架建筑物毁伤效能评估模型及 用弹量算法

黄建涛^{1, 2}, 彭永^{1*}, 陈浩¹

(1. 国防科技大学理学院, 湖南长沙 410073;

2. 95889 部队, 甘肃酒泉 735018)

摘要: 针对中低层框架建筑物毁伤效能评估问题, 提出采用毁伤范围矩阵表征武器战斗部毁伤能力的思想和方法, 结合投射精度建立了以房间平均毁伤数量占比为毁伤效能表征的单弹和多弹打击建筑物目标的毁伤效能评估模型。研究了基于卷积运算的毁伤程度计算方法。在此基础上, 为实现多弹打击下建筑目标毁伤的最大化, 结合多弹毁伤效能评估模型与遗传算法, 研发了打击中低层框架建筑物的瞄准点优化及用弹量测算计算程序, 并结合案例对相关影响因素进行了分析。结果表明: 所提方法可高效获取达到预定毁伤效果时的最佳瞄准点策略和相应的最少用弹量, 并可在程序中展示给定策略下的房间毁伤分布。

关键词: 建筑物目标; 毁伤评估; 导弹打击策略; 遗传算法; 用弹量优化

中图分类号: TJ760

文献标志码: A

文章编号: 2097-2741(2024)03-009-009

Damage Effectiveness Assessment Model and Algorithm of Ammunition Usage Amount for Missile Strikes on Low-to-mid-rise Frame Buildings

HUANG Jiantao^{1, 2}, PENG Yong^{1*}, CHEN Hao¹

(1. College of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan;

2. Troops No. 95889, Jiuquan 735018, Gansu)

ABSTRACT: To solve problems in damage effectiveness assessment of missile strikes on low-to-mid-rise frame buildings, the idea and method of characterizing the damage capability of a weapon's combat part by using the damage range matrix were proposed. Combined with the projection accuracy, a damage effectiveness assessment model for single-shot and multiple-shot strikes against building targets was established with the average damage ratio of rooms as the characterisation of the damage effectiveness. Thereby, a convolutional algorithm-based damage level calculation method was explored. On this basis, in order to maximize the damage to building targets under multi-shot strikes, a program for optimizing the aiming point and calculating the amount of ammunition usage in missile strikes on low-to-mid-rise frame buildings was developed based on the multi-shot damage effectiveness evaluation model and genetic algorithm. Simultaneously, rel-

收稿日期: 2024-03-23

第一作者: 黄建涛 (2001—), 男, 助理工程师, 主要从事毁伤评估研究。E-mail: 1617142165@qq.com

*通信作者: 彭永 (1989—), 男, 博士, 副教授, 主要从事侵彻机理及武器毁伤效能评估研究。E-mail: pengy116@163.com

引用格式: 黄建涛, 彭永, 陈浩. 中低层框架建筑物毁伤效能评估模型及用弹量算法[J]. 火箭军工程大学学报, 2024, 38 (3): 9-17.

evant influencing factors were discussed and analyzed with real cases. Results showed that the proposed method can efficiently obtain the optimal aiming point strategy to achieve the predetermined damage effect and the corresponding minimum amount of ammunition usage, and show the distribution of damage to a room under the given strategy in the program.

KEYWORDS: building target; damage assessment; missile strike strategy; genetic algorithm; optimization of ammunition usage amount

中低层框架建筑物是一种常见的建筑形式,其作为导弹打击目标具有不易倒塌、不存在明显薄弱位置等特点。对于常见的常规导弹而言,中低层框架建筑物是典型的大目标,当单枚导弹难以对其实现有效毁伤时,将涉及多弹打击和瞄准点策略优化问题。因此,开展针对中低层框架建筑物的毁伤效能评估及用弹量算法研究具有重要的实际意义。

针对瞄准点策略优化问题,贾正荣等^[1]提出反舰导弹的区域射击方法,较为有效地降低了所需导弹用弹量,但给出的瞄准点间隔计算方法的计算精度有待提高;针对导弹打击毁伤覆盖面积问题,毕义明^[2]、冯海川^[3]等提出引入遗传算法等方法对导弹打击不规则面目标^[4-5]策略优化提供了思路,但是运算所需资源较大,且不适用于框架建筑物。

毁伤效能评估模型是进行用弹量计算和瞄准点优化的核心与基础,而合理表征弹药对建筑目标的毁伤能力是建立单弹毁伤效能评估模型的前提。为此,本文提出采用毁伤范围矩阵表征武器战斗部毁伤能力的思想和方法,结合投射精度,建立了以房间平均毁伤数量占比为毁伤效能表征的单弹打击建筑物目标的毁伤效能评估模型。基于此模型,进一步建立了多弹打击的毁伤效能评估模型,并引入遗传优化算法,给出了快速计算最少用弹量和最佳瞄准点的模型,并分析了导弹瞄准点随战斗部毁伤能力、投射精度等因素影响的分布规律。

1 单弹打击下建筑物毁伤效能评估模型

毁伤效能评估是结合武器战斗部的毁伤能力以及投射精度来综合预测目标毁伤程度或毁伤概率平均值的过程^[4]。考虑单枚导弹在给定瞄准点下对建筑物的毁伤效果时,由于射击诸元的偏差影响,导弹的落点会以瞄准点为基准产生一定的随机偏差。因此,对单弹打击建筑物目标的毁伤

预测只能给出平均期望值,而不是确定性的毁伤结果。

1.1 导弹毁伤范围矩阵

房间是建筑物的基本功能单位,以房间毁伤为表征可较为真实地反映建筑物目标的功能毁伤。对于给定建筑物目标,1发导弹或弹药的威力可以通过其毁伤的房间范围来表征。比如:当导弹或弹药威力较小时,其只能毁伤落点房间;当导弹威力较大时,其落点房间及相邻几个房间可能都被毁伤。因此,将建筑物以房间为基本单元进行网格化,构建三维导弹毁伤范围矩阵^[5]来表征导弹毁伤能力。

设某型号导弹在某一层单一方向能毁伤的房间数为 n ,则在爆心层坐标平面(xOy 平面)上,毁伤范围矩阵为 $(2n-1)$ 行、 $(2n-1)$ 列,如图1所示。其中,矩阵的中心位置代表爆点所在房间,其余矩阵位置代表相应的房间。

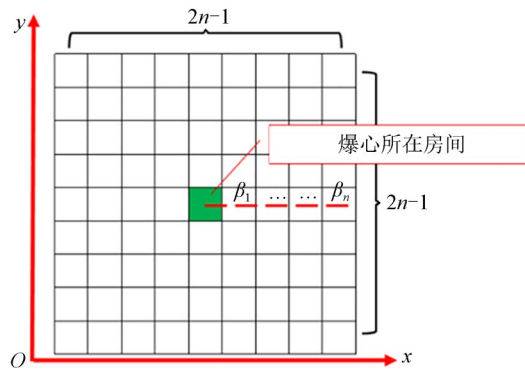


图1 毁伤范围矩阵

Fig. 1 Damage range matrix

容易理解,导弹爆炸所在房间毁伤程度最严重,相邻房间的毁伤情况依次减弱。可设定每个矩阵元素的值来表征相应房间的毁伤程度,矩阵元素值介于0~1之间,其中,1代表重度毁伤、0代表无毁伤。引入牵连系数 $\beta_i (i = 0, 1, \dots, n)$ 来表征导弹毁伤范围矩阵内部的数值,数值大小取决于导弹的次级毁伤效果。爆心所在房间层的二维毁伤范围矩阵 V 可表示为

$$V = \begin{bmatrix} \dots & \beta_n & \dots \\ \beta_n & \dots & \beta_0 & \dots & \beta_n \\ \dots & \vdots & \dots \\ \dots & \beta_n & \dots \end{bmatrix}$$

导弹除对爆心所在房间层有毁伤外, 相邻层甚至次相邻层也可能产生毁伤, 各层房间的毁伤也可由二维毁伤矩阵来表征。所以, 若干二维毁伤矩阵最终构成某一导弹对建筑毁伤能力表征的三维毁伤矩阵。

以导弹在单一方向上能有效毁伤 3 个房间为例。假定横向和纵向上房间毁伤效果相同, 爆心所在房间层的二维毁伤矩阵记为 V_0 , 相邻的上层毁伤矩阵记为 V_{+1} , 相邻下层二维毁伤矩阵记为 V_{-1} , 则三维毁伤范围矩阵可表示为

$$V_0 = \begin{bmatrix} \beta_2 & \beta_1 & \beta_2 \\ \beta_1 & \beta_0 & \beta_1 \\ \beta_2 & \beta_1 & \beta_2 \end{bmatrix}$$

$$V_{-1} = V_{+1} = \begin{bmatrix} \beta_3 & \beta_2 & \beta_3 \\ \beta_2 & \beta_1 & \beta_2 \\ \beta_3 & \beta_2 & \beta_3 \end{bmatrix}$$

式中: 矩阵 V_0 的中心位置数值 β_0 为爆心所在房间毁伤程度; 矩阵 V_{-1} 、 V_{+1} 的中心位置数值为爆心下层、上层房间的毁伤程度; 其余为对应房间位置的毁伤程度。 β 值通过实验、仿真等方法确定, 本文中 β 为输入项, $\beta_0 = 1$ 、 $\beta_1 = 0.8$ 、 $\beta_2 = 0.4$ 、 $\beta_3 = 0.0$ 。

典型建筑物目标的结构多种多样, 针对不同纵向层数的建筑物, 构造毁伤范围矩阵 V 的方法同样适用。

导弹毁伤范围矩阵元素的数量及其数值由导弹威力、建筑物目标特性及毁伤定义等因素决定。给定建筑物, 弹道的威力越大, 毁伤范围矩阵元素越多; 给定导弹, 建筑物越坚固, 毁伤范围矩阵元素越少。如导弹只能毁伤一个房间, 则毁伤范围矩阵仅一个数值。当弹药和建筑物目标特性给定后, 毁伤范围矩阵 (含内部矩阵元素的值) 就确定了。

1.2 导弹落点规律

设导弹的瞄准点坐标为 $M = (X, Y, Z)$, 其中 Y 为高度方向。由于随机误差影响, 导致导弹真实落点坐标为 $m = (x, y, z)$ 。导弹的随机散布规律一般服从正态分布^[4], 所以, 导弹落点分布在坐标轴 3 个方向上的概率密度函数可表示为

$$f_x(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-X)^2}{2\sigma_x^2}\right)$$

$$f_y(y) = \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(y-Y)^2}{2\sigma_y^2}\right)$$

$$f_z(z) = \frac{1}{\sigma_z \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(z-Z)^2}{2\sigma_z^2}\right)$$

式中: σ_x 、 σ_y 、 σ_z 分别为 x 、 y 和 z 方向上分布的标准差。

设定导弹的散布在 3 个方向上相互独立, 故导弹落点分布密度函数为

$$f(x, y, z) = f_x(x)f_y(y)f_z(z)$$

以房间数为索引号, 设定在坐标轴 x 向第 i 个、坐标轴 y 向第 j 个、坐标轴 z 向第 k 个房间的几何中心坐标为 $R_{(i,j,k)} = (X'_i, Y'_j, Z'_k)$, 房间的 x 向、 y 向、 z 向长度分别为 l 、 w 、 h 。则导弹落入房间 $\{i, j, k\}$ 的概率为

$$F(i, j, k) = \int_{X'_i - \frac{l}{2}}^{X'_i + \frac{l}{2}} \int_{Y'_j - \frac{w}{2}}^{Y'_j + \frac{w}{2}} \int_{Z'_k - \frac{h}{2}}^{Z'_k + \frac{h}{2}} f(x, y, z) dV \quad (1)$$

落点概率计算通常选择蒙特卡洛方法, 但需要大量模拟得到落点分布, 计算量大。因此, 引入数值积分、正态累积分布函数等统计学原理, 基于概率积分方法, 引入命中概率标尺计算命中概率矩阵, 记为 P , 其同样为三维矩阵, 具体流程如图 2 所示。

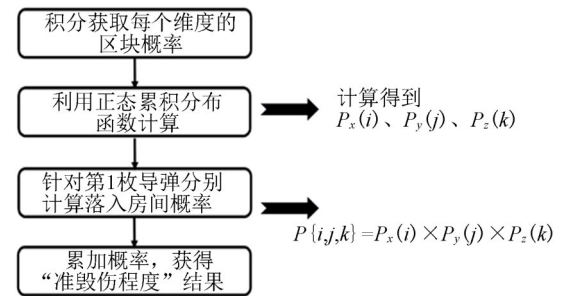
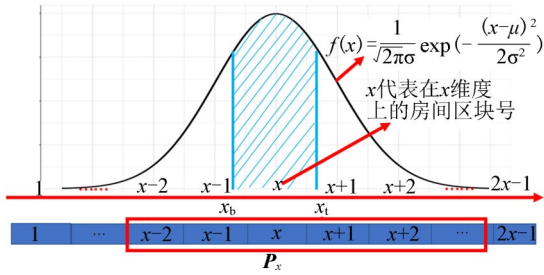


图 2 命中概率标尺计算流程

Fig. 2 Operational flow of the hit probability scale calculation method

以 x 维度概率计算为例。导弹在 x 、 y 、 z 方向的偏移均服从正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$, 对 x 方向区块分类如图 3 所示。假设有 $2c-1$ 个房间, 其中 c 为单一方向上房间数量。按式 (1) 进行积分, 得到每个房间的命中概率。设定一个长度为 c 的滑动窗口, 对于 x 方向上区块号为 n 的房间, 以房间索引为 $x+1-n$ 起始房间, 命中概率标尺窗口里的值则为真实建筑对应房间的落点概率, 即命中概率。

图 3 x 维度命中概率标尺Fig. 3 x -dimensional hit probability scale

所求区块号记为 i , 设定 x_b 为目标区块的下限值, x_t 为目标区块的上限值, $f(x)$ 为 x 维度的概率密度函数, $F(x)$ 为 x 维度的概率密度累积函数, 故 $P_x(i)$ 可表示为

$$P_x(i) = \int_{x_b}^{x_t} f(x) dx = F(x_t) - F(x_b)$$

通过积分获取各维度的区块概率后, 利用正态累积分布函数计算各维度指定位置的概率, 各维度上概率相对独立。因此, 房间 $\{i, j, k\}$ 的落点概率计算公式为

$$P\{i, j, k\} = P_x(i) \times P_y(j) \times P_z(k)$$

依据此方法计算得到各房间命中概率后, 即可输出命中概率矩阵 P 。

1.3 平均毁伤程度计算

1.3.1 房间的毁伤预测

基于毁伤范围矩阵, 再结合投射精度, 可计算得到单弹打击情况 (不考虑突防、干扰等因素) 下各房间的平均毁伤程度 $D(i, j, k)$, 计算公式为

$$D(i, j, k) = \sum \sum \sum V(n-r, n-s, n-t) \times P(i-r, j-s, k-t) \quad (2)$$

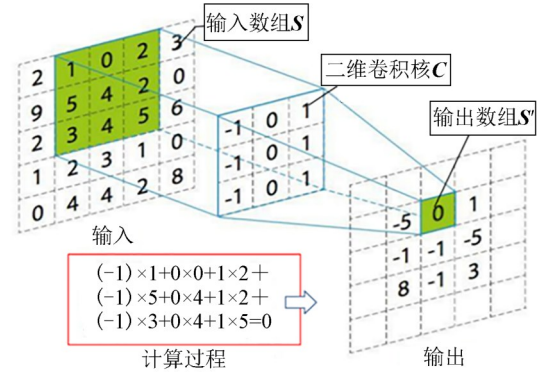
式中: 三维矩阵 D 记录了整个建筑内每个房间的平均毁伤程度; P 为每个房间的命中概率矩阵; r, s, t 取值范围为 $[-(n-1), (n-1)]$ 。

式 (2) 右侧本质就是一类卷积运算, 运用成熟卷积计算程序可快速计算出建筑毁伤矩阵 D 。简单的卷积运算就是将矩阵中给定范围内的对应元素相乘并累加, 作为新矩阵的数值填入给定位置内。卷积核在运算中作为数据处理的一个“滑动窗口”, 覆盖于初始矩阵 S 上, 其中的对应元素相乘后累加, 作为新的数值计入矩阵 S' 中, 具体流程如图 4 所示。

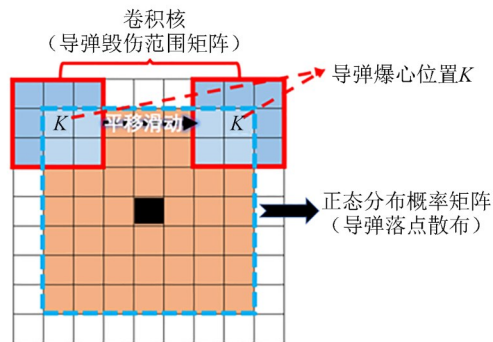
对于式 (2) 而言, 导弹毁伤范围矩阵 V 为卷积计算中的卷积核, 各房间命中概率矩阵 P 为输入矩阵, 即可计算出同时考虑导弹毁伤能力及投射精度情况下建筑物的整体平均毁伤程度矩阵。

1.3.2 建筑物的整体毁伤程度

计算得到毁伤概率矩阵, 需进一步判定建筑物是否毁伤、毁伤程度如何。本文提出以毁伤房间数与建筑房间总数之比来判断建筑物目标整体毁伤程度的思想, 可较为真实地反映建筑目标的毁伤情况。关于毁伤房间数的判定, 得到建筑物的整体平均毁伤程度矩阵 D 后, 其数值则可以等效为毁伤房间数。以某个房间为例, D 中其毁伤程度数值为 0.35, 则该毁伤效果就可以等效为毁伤房间数为 0.35 个。



(a) 二维卷积计算过程



(b) 导弹打击下建筑物平均毁伤计算过程

图 4 卷积 (“same” 模式) 运算过程

Fig. 4 Procedure of the convolution (“same” mode) operation

对于建筑物目标而言, 毁伤程度计算公式为

$$P_d = \frac{\sum \sum \sum D(i, j, k)}{N} \quad (3)$$

式中: N 是建筑物目标的房间总数。设定建筑物整体达到某种毁伤程度的判定阈值为 $\bar{\gamma}$, 当建筑物毁伤程度大于等于给定阈值 $\bar{\gamma}$ 时, 则认定该建筑物达到该某种毁伤程度。

综上所述, 基于战斗部毁伤能力 (此处即毁伤范围矩阵) 和投射精度, 通过卷积运算得到矩阵 D , 再结合建筑目标整体的毁伤判据, 便可以得到建筑目标的平均毁伤程度预测结果。

2 用弹量计算方法和瞄准点优化

2.1 多弹毁伤效能评估模型

多枚导弹打击建筑物的毁伤评估模型可以基于单弹模型发展而来, 不同的是, 多弹模型存在多个不同的导弹瞄准点。设定各导弹之间相互独立, 可建立多弹毁伤效能评估模型, 模型的具体计算步骤如下。

Step1 基于单弹模型, 计算每发导弹对应的毁伤矩阵 D_r 。其中: 下标 r 代表第 r 枚弹, 其取值范围为 $1 \sim n$; n 为多弹的具体数目。

Step2 计算每个房间在多弹打击下的平均毁伤程度。考虑到多弹打击下单个房间的最大毁伤程度是 1, 且当单弹毁伤程度较低时多弹结果近似为累加, 可基于幸存者法则获得多弹打击下房间的平均毁伤程度为

$$D(i, j, k) = 1 - \prod_{r=1}^n [1 - D_r(i, j, k)]$$

Step3 计算建筑物目标整体平均毁伤程度。根据多弹打击下表征每个房间平均毁伤程度的矩阵 D , 统计毁伤房间数与总房间数之比, 代入式 (3), 得到最终的建筑物毁伤程度结果。

2.2 基于遗传算法的瞄准点优化

为达到对建筑目标的最优毁伤效果, 需要对导弹的瞄准点进行优化设计, 保证在完成目标毁伤的情况下消耗尽量少的弹药, 或是在完全利用弹药的情况下对建筑造成最大毁伤效果。根据上文的建筑毁伤程度关于导弹瞄准点的计算公式, 可以利用遗传算法^[6-7]进行瞄准点的优化。算法步骤如下。

Step1 染色体编码。基因是遗传中生物性状的决定性因素, 本文中即为导弹的打击目标坐标。基于此坐标, 便可以得到建筑的命中概率矩阵 P 。由于基因为一维的链式数据, 因此需要按照一定规律将房间的三维坐标 (i, j, k) 映射为一维坐标 $\{x\}$ ($x = 1, 2, \dots, N$), 映射规律可自定义。

Step2 种群初始化。建立一定数量的个体并构成种群。本文中种群大小即为导弹用弹量。

Step3 适应度函数。适应度函数表征解的优劣性, 针对不同问题, 适应度函数的定义不同。本文中适应度函数为建筑物毁伤程度。具体来说, 当导弹用弹量 n 确定的情况下, 适应度函数表征 n 发弹打击条件下的建筑物毁伤程度最大值。

Step4 调整迭代和进化次数以保证遗传算法寻优的可靠性与高效性。第 1 种方式, 限定进化次数, 理论上进化次数越多越好, 但是次数过多将影响算法的效率; 第 2 种方式, 限定允许范围, 涉及算法的精确性。需要平衡这两方面, 共同限定迭代次数。

算法程序模仿大自然的发展, 将适应度高的基因保留下来并加以发展, 最终达到一个较优基因, 即获得了可以达到目标毁伤程度较优的瞄准策略。简单来说, 就是输入一个导弹用弹量值, 算法将输出该用弹量下的导弹对建筑物的最大毁伤程度以及相应瞄准点策略。

2.3 用弹量计算方法

从 2.2 节得到每一个导弹用弹量对应的最优打击策略, 根据战场火力打击筹划, 判断适应度值是否满足要求, 来启动或者终止算法, 并最终得到算法终止时的用弹量以及瞄准点策略结果, 具体运行步骤如图 5 所示。

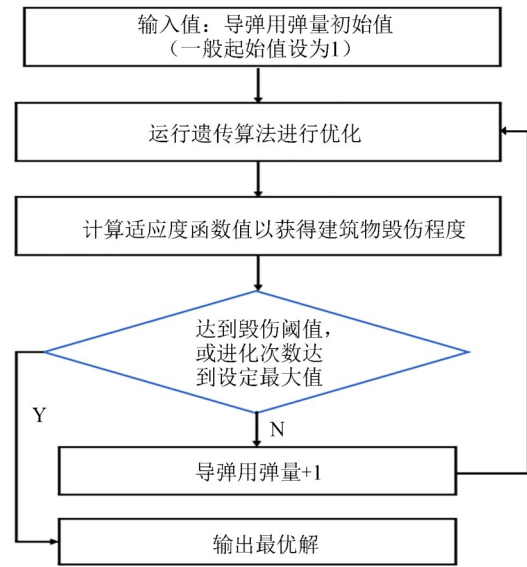


图 5 用弹量计算步骤

Fig. 5 Calculation procedure of ammunition usage amount

经过算法多次迭代运算, 当适应度函数 (即建筑物毁伤程度) 达到预设阈值时, 就可以输出最小用弹量值及相应瞄准点策略。

3 典型案例分析

3.1 参数设定

3.1.1 建筑物目标模型

为了便于分析, 本文以如图 6 所示的建筑进行

方法示例, 并对图 6 所示建筑进行以下假设: (1) 建筑设定为纵向三层类型建筑, 其纵向依次为房间、走廊、房间; (2) 选用笛卡尔坐标系, 原点设定在建筑的左下角。

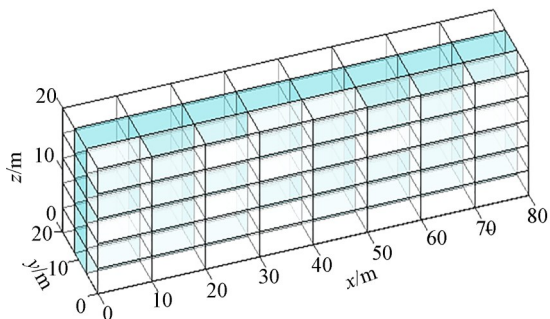


图 6 建筑及坐标系

Fig. 6 Diagram of building and coordinate system

3.1.2 导弹毁伤范围矩阵设定

多枚导弹齐落打击时, 每次发射的外部条件完全相同, 各枚导弹间相互独立; 设定单枚导弹的落点分布在 3 个基底方向上相互独立, 且服从正态分布; 导弹打击精度用圆概率误差 (Circular Error Probable, CEP) 来表征。设定导弹毁伤范围矩阵参数为 $n = 2$, $\beta_0 = 1$, $\beta_1 = 0.8$, $\beta_2 = 0.4$, $\beta_i = 0$ ($i \geq 3$), 故导弹毁伤范围矩阵表示为

$$V_{+1} = V_{-1} = \begin{bmatrix} 0.0 & 0.4 & 0.0 \\ 0.4 & 0.8 & 0.4 \\ 0.0 & 0.4 & 0.0 \end{bmatrix}$$

$$V_0 = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.8 & 0.4 \\ 0.8 & 1.0 & 0.8 \\ 0.4 & 0.8 & 0.4 \end{bmatrix}$$

3.1.3 遗传算法参数设定

研究导弹打击建筑物目标, 预设建筑物整体毁伤程度阈值为 70%, 故可设定目标函数为

$$P_d \geq 70\%$$

式中: P_d 为建筑目标毁伤程度。

3.2 瞄准点优化实例

利用得到的多弹毁伤评估模型, 输入导弹数量和各自瞄准点, 计算建筑物毁伤程度。首先, 均匀选取瞄准点作为导弹打击瞄准点策略 (记为策略 1), 再基于遗传算法进行瞄准点策略优化 (记为策略 2), 分别计算建筑物毁伤程度, 对比分析计算结果, 验证遗传算法的优化效果。

当导弹用弹量 N 分别为 10 与 8 时, 具体的瞄准点策略见表 1。2 种瞄准点策略下分别计算建筑物毁伤程度, 结果如图 7 所示。

表 1 不同导弹瞄准点策略

Tab. 1 Missile aiming point strategies

瞄准点 编号	程序均匀生成 瞄准点策略	基于遗传算法优化生 成瞄准点策略
1	(2, 1, 2)	(1, 2, 2)
2	(4, 1, 3)	(3, 2, 2)
3	(6, 1, 4)	(5, 2, 2)
4	(2, 2, 2)	(7, 2, 2)
5	(4, 2, 3)	(2, 2, 4)
6	(5, 2, 3)	(4, 2, 4)
7	(6, 2, 4)	(6, 2, 4)
8	(2, 3, 2)	(8, 2, 4)
9	(4, 3, 3)	—
10	(6, 3, 2)	—

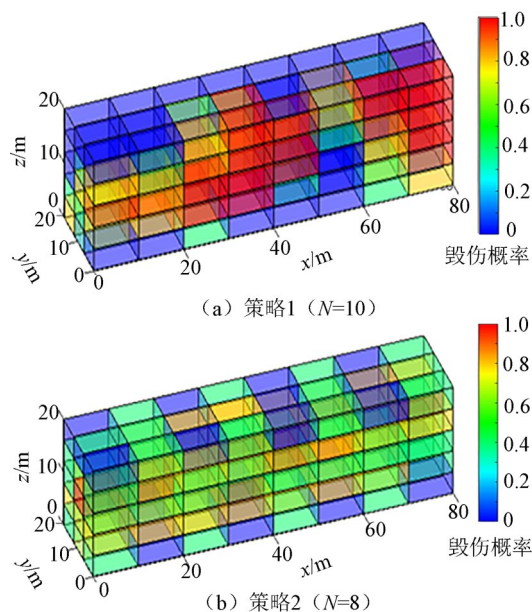


图 7 建筑物各房间毁伤结果

Fig. 7 Damage results of rooms in the target building

由图 7 可以看出, 均匀选取瞄准点策略的结果中: 给定弹药数目为 10 枚, 房间毁伤数为 61.2 个; 而基于遗传算法的瞄准点策略中, 给定弹药数目仅为 8 枚 (少于前者 2 枚), 但房间毁伤数量达到 71.6 个。验证了基于遗传算法进行瞄准点选择的优化效果较好。

3.3 影响因素分析

为了研究导弹投射精度与毁伤能力对用弹量的影响, 依据控制变量法原理合理改变相关参数, 比对不同参数值的结果进行分析。设定导弹在单一方向上有效牵连影响房间数为 2 个, 建筑物整体毁伤阈值 $\bar{y} = 70\%$ 。

3.3.1 导弹投射精度的影响

改变圆概率误差，可计算得到建筑物在不同条件下的毁伤情况和瞄准点位置分布，结果如表2和图8所示。

表 2 不同 CEP 下建筑物毁伤情况

Tab. 2 Destruction of the building under different CEPs

编号	CEP/m	用弹量/枚	毁伤房间数/个	毁伤房间数占比/%
1	0	12	89.93	76.67
2	5	14	87.26	74.39
3	10	24	86.54	72.12

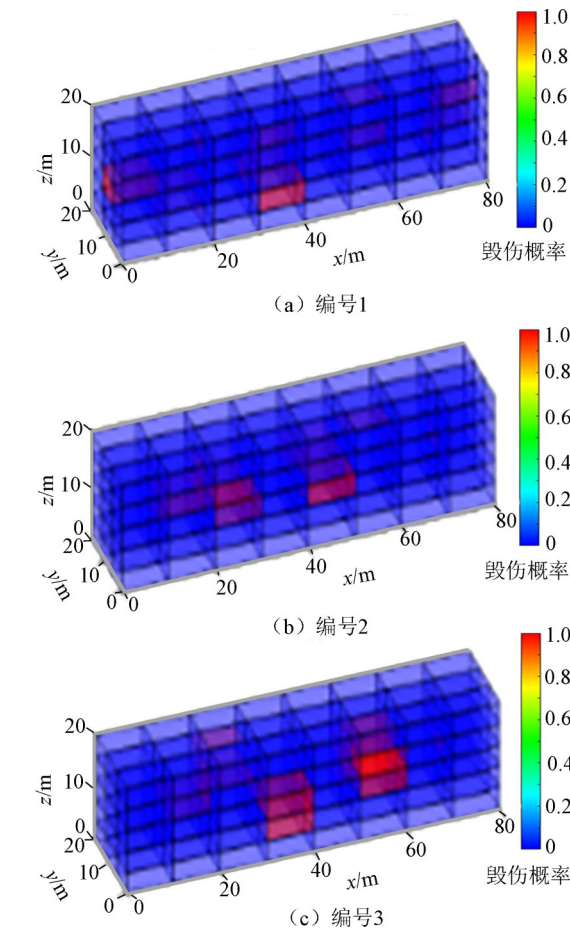


图 8 不同 CEP 下瞄准点位置分布

Fig. 8 Distribution of aiming points under different CEPs

对比不同 CEP 下的瞄准点位置可以看出：在毁伤阈值为 70% 的条件下，CEP 越小，即导弹打击精度越高，瞄准点将相对分散，重复打击情况较少，用弹量将减少并有更好的毁伤效果，且各瞄准点间隔与导弹毁伤范围有关；当导弹打击精度低时，瞄准点大部分集中在中间区域，且重复打击情况较多。

因此，在指挥决策层面：如果导弹精度高，可以根据导弹毁伤范围选择合适的间隔来选取瞄准点；如果精度较低，则瞄准点选择要相对集中于建筑物的中心位置。

3.3.2 导弹毁伤能力的影响

改变上述定义的导弹毁伤范围矩阵参数，设定 CEP 为 2，牵连系数的具体影响结果如表 3 和图 9 所示。

表 3 不同牵连系数下建筑物毁伤情况

Tab. 3 Destruction of the building under different implicating factors

编号	CEP/m	牵连系数	用弹量/枚	毁伤房间数/个	毁伤房间数占比/%
1	2	$\beta_0 = 0.8$ $\beta_1 = 0.4$	12	87.28	72.73
2	2	$\beta_0 = 0.6$ $\beta_1 = 0.2$	18	87.22	72.69
3	2	$\beta_0 = 0.4$ $\beta_1 = 0$	33	85.70	71.41

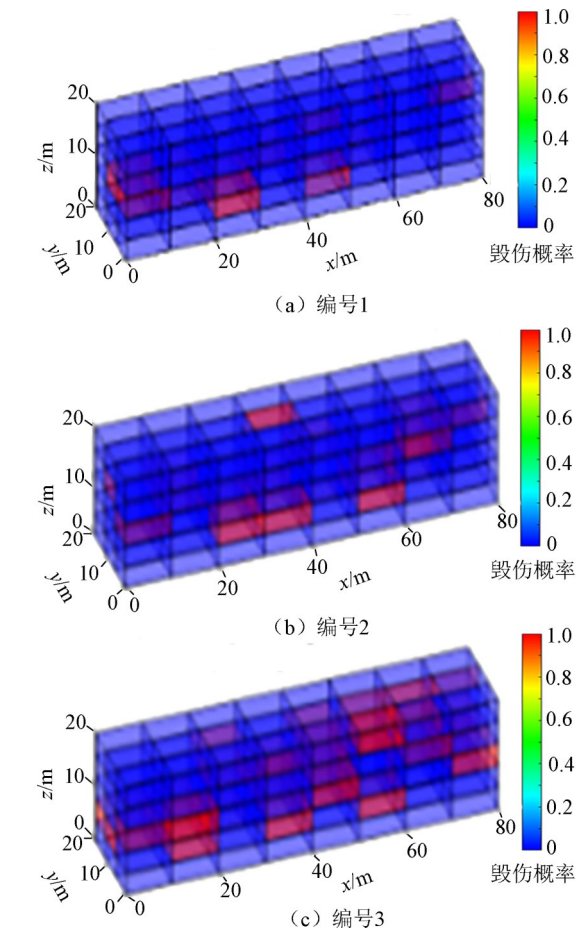


图 9 不同牵连系数下瞄准点位置分布

Fig. 9 Distribution of aiming points under different implicating factors

对比分析不同导弹毁伤范围矩阵参数计算结果可知：在毁伤阈值为 70% 的条件下，导弹毁伤范围矩阵中牵连系数越大，导弹用弹量越少，房间毁伤数增多，符合理论预测。故当知道导弹威力时，调整牵连系数大小即可利用模型计算用弹量和瞄准点策略。

同时，根据图 9 中瞄准点分布位置可以得出：当导弹威力较大时，瞄准点在建筑的每层都有分布且各层相对分散；对于威力较小的导弹来说，用弹量比较大，瞄准点的选择基本上遍布建筑物各个位置。

3.3.3 走廊权重的影响

结合实际需求可知，对于典型建筑物目标，房间的毁伤价值一般高于走廊。综合实际价值因素，对遗传算法优化过程中的目标函数进行修改并赋权重，设定不同权重系数来表征实际战争规划中不同建筑物目标走廊层重要性的不同，需要注意的是，这种情况下总房间数也将相应发生变化，走廊层房间的最终等效毁伤房间数需要用毁伤程度再乘权重系数来表征，计算结果如表 4 和图 10 所示。

表 4 不同走廊权重下建筑物毁伤情况
Tab. 4 Destruction of the building under different corridor weights

编号	走廊权重	用弹量/枚	毁伤房间数/个	毁伤房间数占比/%
1	0	12	57.22	71.53
2	0.2	12	62.25	70.74
3	0.4	13	71.77	74.77
4	0.6	12	72.84	70.04

对比分析不同走廊权重下的瞄准点策略可知：走廊权重为 0 时，导弹瞄准点全部集中于第 1 层和第 3 层；走廊权重为 0.2 和 0.4 时，导弹瞄准点主要集中在第 1 层和第 3 层；但是当走廊权重提高至 0.6 时，导弹瞄准点在第 2 层出现频次增大，表示虽然直接打击走廊的实际价值小于房间，但受导弹次级毁伤的牵连毁伤效应影响，瞄准点同样可以瞄准走廊层。

综上所述可以得出以下结论：当走廊的实际价值过低时，即走廊权重系数较小，走廊权重是导弹瞄准点选择的主要影响因素；当走廊的权重系数较大时，走廊权重和牵连毁伤效果共同决定导弹

瞄准点策略。

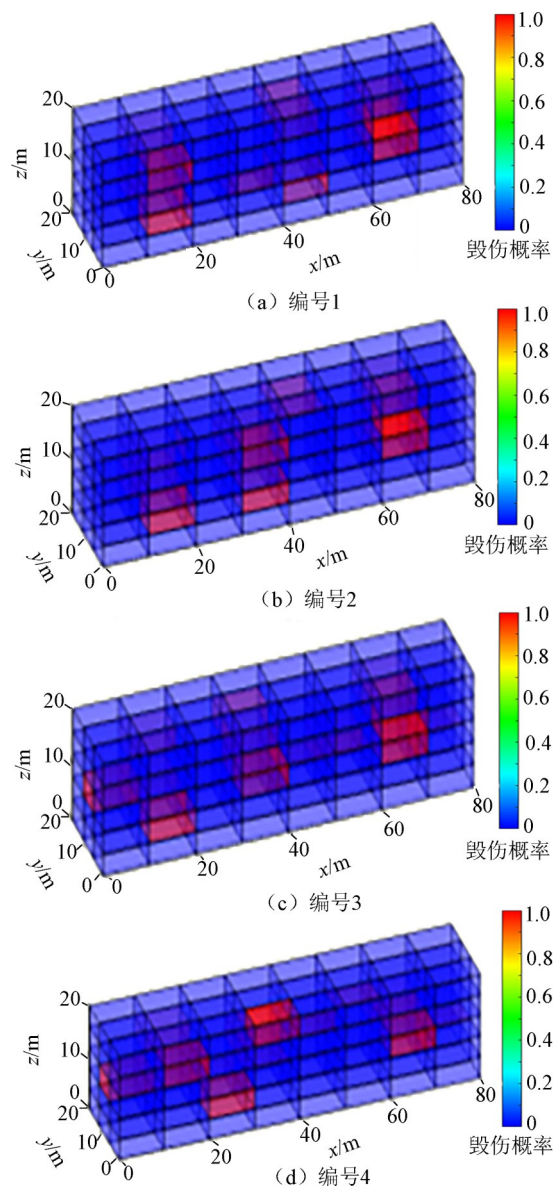


图 10 不同走廊权重下的瞄准点分布

Fig. 10 Distribution of aiming points under different corridor weights

4 结论

本文以打击中低层框架建筑物为背景，建立了针对中低层建筑目标的毁伤效能评估模型，提出了最少用弹量和最佳瞄准点的计算方法。论文主要工作和创新如下：提出采用毁伤范围矩阵表征武器战斗部毁伤能力的方法；提出基于遗传算法优化思路，在导弹打击策略上有明显的优化效果；综合研究分析了不同因素对于用弹量与瞄准策略的影响规律，可用于指挥决策建议。

参考文献:

- [1] 贾正荣, 卢发兴, 王航宇. 反舰导弹区域射击方法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(11): 2490-2497.
- JIA Z R, LU F X, WANG H Y. Research on area shoot method for anti-ship missile[J]. Systems Engineering and Electronics, 2018, 40(11): 2490-2497.
- [2] 毕义明, 张红文, 黄超会, 等. 多枚导弹打击不规则面目标瞄准点的遗传算法优化[C]//中国系统工程学会第十四届学术年会论文集. 香港: Global-link Publisher, 2006: 447-451.
- BI Y M, ZHANG H W, HUANG C H, et al. Aim-point's genetic algorithm optimization for multi-missiles attacking irregular area target[C]// The Fourteenth Academic Annual Conference of the Chinese Society of Systems Engineering. Hong kong: Global-link Publisher, 2006: 447-451.
- [3] 冯海川, 谢文. 远程火箭炮对不规则面目标分布式多点毁伤计算[J]. 火力与指挥控制, 2023, 48(5): 146-151.
- FENG H C, XIE W. Distributed multi-point damage calculation of long-range rocket launcher attacking targets with irregular areas[J]. Fire Control & Command Control, 2023, 48(5): 146-151.
- [4] 彭永, 卢芳云, 李翔宇. 针对侵爆弹的毁伤效能评估方法[J]. 兵器装备工程学报, 2024, 45(1): 159-165.
- PENG Y, LU F Y, LI X Y. Evaluation of damage effectiveness method for earth penetrating bomb [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2024, 45(1): 159-165.
- [5] 魏庆栋, 王忠, 江光德, 等. 导弹打击建筑目标的一种立体毁伤计算模型[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(S01): 197-201.
- WEI Q D, WANG Z, JIANG G D, et al. Research on three-dimensional damage model of building target under missile warhead attack[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2022, 43(S01): 197-201.
- [6] 汪民乐, 房茂燕. 导弹对面积目标射击效能的智能优化算法[J]. 弹道学报, 2014, 26(1): 45-49.
- WANG M L, FANG M Y. Intelligence optimization algorithm for attacking efficiency of missile attacking surface target[J]. Journal of Ballistics, 2014, 26(1): 45-49.
- [7] 王煦法. 遗传算法及其应用[J]. 小型微型计算机系统, 1995, 16(2): 59-64.
- WANG X F. Genetic algorithm and its application [J]. Journal of Chinese Computer Systems, 1995, 16(2): 59-64.
- [8] 杨奇松, 王然辉, 王顺宏, 等. 基于向量网格法评估面目标毁伤效果[J]. 火力与指挥控制, 2017, 42(6): 175-178, 182.
- YANG Q S, WANG R H, WANG S H, et al. Evaluating damage efficiency based on vector-grid [J]. Fire Control & Command Control, 2017, 42(6): 175-178, 182.
- [9] 陈智江, 毕义明. 多枚导弹打击复杂形状面目标毁伤面积解析算法[J]. 火力与指挥控制, 2008, 33(10): 130-134.
- CHEN Z J, BI Y M. Holomorphic algorithm of effective damage area on multi-missiles attacking irregular area targets[J]. Fire Control & Command Control, 2008, 33(10): 130-134.

通信作者及其研究团队介绍

彭永, 男, 博士, 1989年1月出生, 国防科技大学理学院副教授, 硕士研究生导师, 主要从事侵彻机理及武器毁伤效能评估研究工作。主持国家自然科学基金等国家和军队科研项目6项, 获军队科技进步一等奖1项、中国爆协科技进步特等奖1项, 授权发明专利/软著15项, 出版学术专著2部(Springer出版社1部), 发表学术论文40余篇, 其中SCI检索22篇、EI检索11篇。担任《高压物理学报》青年编委、湖南省核学会计算物理专业委员会主任, *International Journal of Impact Engineering*、*Defence Technology*、*Thin-Walled Structures*等多个SCI期刊的论文审稿人, 在武器毁伤效能评估理论、空腔膨胀理论、弹体侵彻尺寸效应、超高性能混凝土抗侵彻机理等方面取得了创新成果, 实现了高强混凝土抗侵彻机理、侵彻尺寸效应研究的突破, 以此为基础形成了高抗力防护结构计算方法、典型目标抗力评估软件系统, 已在多个单位得到应用。