

考虑积累效应的弹药毁伤效能评估方法

周兰伟¹, 王 俊², 李向东¹

(1. 南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094;

2. 北京航空工程技术研究中心, 江苏 南京 210028)

摘 要: 为提高多发弹药对地面目标毁伤效能评估的精度, 提出了一种考虑毁伤积累效应的多发弹药对地面装备目标毁伤效能评估方法。以典型地面装备为例, 分析了地面装备的易损性, 建立了杀爆类弹药对地面目标的毁伤能力表征方法及弹药毁伤效能评估模型; 在此基础上, 研究了毁伤积累效应对弹药毁伤能力的影响规律, 实现了考虑毁伤积累效应的多发弹药毁伤效能评估。结果表明: 考虑积累效应后, 弹药对目标的毁伤效能指数不再是定值, 而是随着弹药数的增加而逐渐增大, 对目标的毁伤概率也随之增大, 相较于不考虑毁伤积累效应时增大 6% 以上。

关键词: 积累效应; 毁伤效能评估; 杀爆类弹药; 地面装备; 目标易损性

中图分类号: TJ760

文献标志码: A

文章编号: 2097-2741(2024)03-018-008

Estimation of Ammunition Damage Effectiveness with Consideration of Cumulative Effect

ZHOU Lanwei¹, WANG Jun², LI Xiangdong¹

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology,
Nanjing 210094, Jiangsu;

2. Beijing Aeronautical Technology Research Center, Nanjing 210028, Jiangsu)

ABSTRACT: Aiming at the lack of research on damage effectiveness assessment of multi-round ammunition at battlefiled currently, a rapid damage effectiveness estimation of multiple-round ammunition against ground equipment targets, which takes the cumulative damage effect into consideration, was proposed to improve the precision and efficiency. First, the vulnerability of typical ground equipment was analyzed. Accordingly, the method about characterizing the damage capability of anti-explosive ammunition against ground targets was explored and a rapid ammunition damage effectiveness estimation method was presented. On this basis, the influence of the cumulative damage effect on ammunition damage capability was studied to realize the rapid estimation of multi-round ammunition damage effectiveness with consideration of damage cumulative effect. Results showed that when considering the cumulative effect, the ammunition's target damage efficiency index is not constant and increases along with the increment of rounds of ammunition. Simultaneously, the damage probability to the target estimated by the proposed method is over 6% greater than that obtained with the previous method.

KEYWORDS: cumulative effect; damage effectiveness estimation; anti-explosive ammunition; ground equipment; vulnerability

收稿日期: 2023-12-11

基金项目: 航空基金 (20200013059001)

第一作者: 周兰伟 (1988—), 男, 副教授, 主要从事目标易损性及弹药毁伤效能评估技术研究。E-mail: 1wzhou@njust.edu.cn

引用格式: 周兰伟, 王俊, 李向东. 考虑积累效应的弹药毁伤效能评估方法[J]. 火箭军工程大学学报, 2024, 38 (3): 18-25.

弹药毁伤效能评估是战场指挥、火力规划的基础, 国内外学者对此开展了大量研究, Driels 等^[1]提出了基于毁伤效能指数的空对地弹药毁伤效能快速评估方法, Moon^[2]研究了破片式战斗部对地面点目标及面目标的毁伤效数及毁伤函数; Baik^[3]提出了基于目标毁伤的部件分布优化方法; Tan^[4]研究了传统武器对建筑物的快速毁伤评估方法; Chusilp 等^[5]基于毁伤矩阵及卡顿毁伤函数建立了武器毁伤效能蒙特卡洛仿真方法; Eckler 等^[6]研究了武器火力规划与目标战场位置的关系; Ahner 等^[7]研究建立了精确制导破片式弹药毁伤效能的数学模型; 李向东等^[8]研究了弹药对地面、空中目标的毁伤能力评估方法; Seihoon^[9]和 Wang^[10]等建立了多发弹药对地面目标的毁伤评估方法。但现有的研究大多基于单发弹药对目标的毁伤概率, 采用生存法则计算多发弹药的毁伤效能及毁伤目标所需的弹药数目, 难以体现多发弹药之间的相互影响。

为了更准确地评估多发弹药对目标的毁伤效能, 本文建立了一种考虑多发弹药毁伤积累效应的毁伤效能评估算法, 建立了弹药威力表征和目标易损性分析方法, 采用毁伤效能指数表征弹药对目标的毁伤能力, 得到不同弹目交会条件下多发弹药对目标的毁伤效能指数, 从而最终实现对多发弹药毁伤效能的评估。该方法可为火力规划与控制、弹药战场运用等提供参考。

1 弹药威力表征及装备目标易损性分析

1.1 弹药威力表征

杀爆类弹药主要依靠爆炸形成的破片和冲击波毁伤目标, 因此, 杀爆类弹药的威力主要通过冲击波和破片场威力来进行表征。冲击波威力可用战斗部裸装药等效 TNT 质量表征, 破片场包含战斗部静爆形成的破片飞散区间、各区间内破片的质量组数目、各质量组的破片平均质量和数目、破片阻力系数及形状系数。

1.2 装备目标易损性分析

进行装备目标易损性分析的主要步骤是: 分析该装备的结构组成, 确定目标防护及部件材料、尺寸、位置等信息, 划分目标毁伤级别, 分析部件毁伤与目标毁伤之间的逻辑关系, 构建目标不同毁伤级别对应的毁伤树, 根据部件的毁伤模式等参数建立不同类型部件的毁伤准则, 进而形成

目标易损性数字化模型, 以某典型地面装备为例, 其易损性数字化模型如图 1 所示。

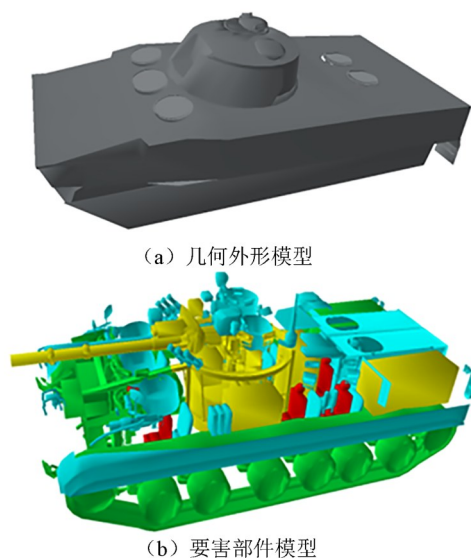


图 1 地面装备目标易损性数字化模型

Fig. 1 Digital vulnerability models of ground equipment targets

战斗部破片威力场数据如图 2 所示。

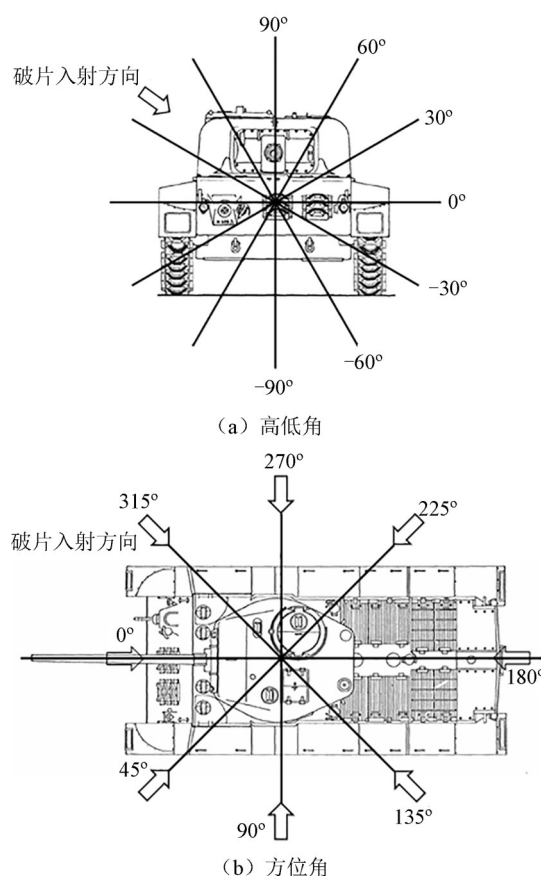


图 2 破片入射目标的相对角度

Fig. 2 Relative angles of fragments incident on the target

根据图2数据,不同速度、质量、入射方向破片作用下目标的易损面积 A_v 为

$$A_v = \iint dA_v = \iint P_k(y, z) dS = \iint P_k(y, z) dydz \quad (1)$$

式中: P_k 为破片沿着入射方向打击目标时目标的毁伤概率,根据破片与目标的交会条件、部件的毁伤概率得到; y, z 表示破片打击位置坐标。

由于目标投影区域的边界很难确定,所以采用数值方法求解式(1),分别计算破片命中每一个网格时对目标的毁伤概率,然后得到目标在此破片和打击方向下的易损面积。

若网格大小相同,则目标的易损面积为

$$A_v = \sum_{i=1}^n P_k(i) \times A_{\text{cell}}$$

式中: n 为网格数; A_{cell} 为单元网格面积。

改变破片的攻击高低角、速度和质量,得到不同高低角、破片速度和质量条件下的目标易损面积表。

2 多发弹药对装备目标的毁伤能力分析

2.1 目标在毁伤元作用下的毁伤概率

2.1.1 破片的毁伤概率

目标位置处破片的数目密度为

$$\rho_{ij} = \frac{K_{ij}}{\pi S^2 (\cos \alpha'_{j+1} - \cos \alpha'_j)}$$

式中: K_{ij} 为第 i 破片质量组、第 j 动态破片飞散区内的破片数目,由对应的破片静态飞散区获得; S 为炸点与目标之间的距离; α'_j, α'_{j+1} 为第 j 个动态破片飞散区间的角度边界。

第 i 破片质量组、第 j 动态破片飞散区内的破片对目标的毁伤概率为

$$P_{K-\text{FRAG}(i,j)}(x, y) = P_{Ei} [1 - \exp(-\rho_{ij} A_{vi})]$$

式中: P_{Ei} 为目标对第 i 个破片质量组的暴露概率; A_{vi} 为第 i 个破片质量作用下目标的易损面积,可由目标易损面积表获得。

如果覆盖目标的动态破片飞散区不止一个(设为 L 个),且考虑各个质量组的破片,则破片对目标的毁伤概率为

$$P_{K-\text{FRAG}}(x, y) = 1 - \prod_{j=1}^L \prod_{i=1}^N [1 - P_{K-\text{FRAG}(i,j)}(x, y)]$$

式中: N 为破片的质量组数目。

2.1.2 冲击波的毁伤概率

战斗部爆炸后形成的冲击波以球面波(以炸

点为中心)的形式向外传播,冲击波对目标的毁伤能力与目标距炸点的距离及目标相对冲击波的易损性有关。

冲击波作用区域如图3所示,其中: $P_{K-\text{BLAST}}$ 为冲击波对目标的毁伤概率。当战斗部距地面一定高度爆炸时,以弹药爆炸瞬间质心沿铅垂线方向在地面的投影点为原点,在地面上形成一个圆形的杀伤区域,该区域的半径与目标的临界超压有关。根据冲击波的衰减规律及目标的临界超压 $\Delta P_{m1}, \Delta P_{m2}$ 及弹药的炸高 h 可以计算得到对应2个圆的半径 R_2 和 R_1 ,目标在不同的区域之内被毁伤的概率不同。

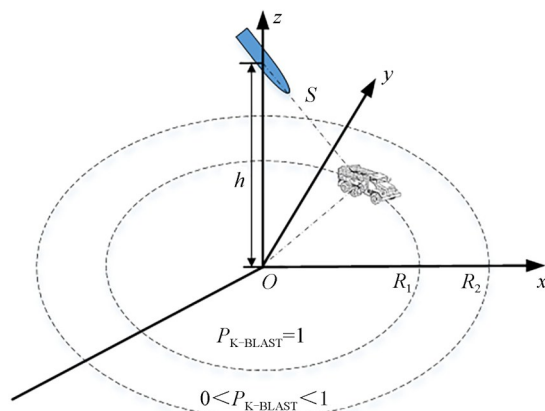


图3 冲击波有效作用区域

Fig. 3 Effective area of the shock wave

地面任意位置处,爆炸冲击波对目标的毁伤概率为

$$P_{K-\text{BLAST}}(x, y) =$$

$$\begin{cases} 1, & \sqrt{x^2 + y^2} < R_1 \\ \frac{\sqrt{x^2 + y^2} - R_2}{R_1 - R_2}, & R_1 \leq \sqrt{x^2 + y^2} \leq R_2 \\ 0, & x^2 + y^2 > R_2 \end{cases}$$

2.1.3 杀爆弹的毁伤概率

假设破片和冲击波对目标的毁伤相互独立,则杀爆类弹药对装备目标的毁伤概率为

$$P_K = 1 - (1 - P_{K-\text{FRAG}}) \cdot (1 - P_{K-\text{BLAST}})$$

2.2 多发弹药对装备目标毁伤能力计算

采用毁伤效能指数表征弹药对目标的毁伤能力。假设弹药与目标的位置关系如图4所示,以弹药爆炸瞬间质心沿铅垂线方向在地面的投影点为原点,以垂直地面向上为 Oz_g 轴,以弹道面与地面的交线为 Ox_g 轴,建立地面坐标系(右手坐标系)。在炸点周围地面上划分网格,尺寸为 $dx \times dy$,计

算弹药对位于任意位置 (x, y) 处目标的毁伤概率 $P_k(x, y)$, 得到弹药对目标的毁伤矩阵。

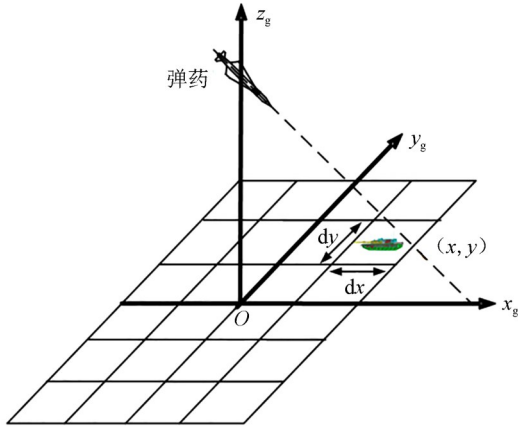


图4 地面坐标系及弹目位置关系

Fig. 4 Relationship between the ground coordinate system and the projectile-target position

定义战斗部对地面目标杀伤面积为

$$A_L = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} P_k(x, y) dx dy \quad (2)$$

杀爆类弹药对装备目标的毁伤效能指数 M_F 等于弹药战斗部对目标的杀伤面积 A_L , 若已知毁伤矩阵, 则

$$M_F = A_L = \sum_{i=1}^{n_i} \sum_{j=1}^{n_j} P_k(i, j) \times A_{\text{cell}} \quad (3)$$

式中: $P_k(i, j)$ 为毁伤矩阵中第 i 行、第 j 列的值, 计算时同时考虑冲击波和破片两种毁伤元; n_i 、 n_j 分别为毁伤矩阵的行数和列数。

当目标在经历过多次打击后, 考虑到毁伤积累效应, 则弹药对目标的毁伤效能指数不再为固定的值。

假设第 i 发弹药作用后, 目标的毁伤概率为 P_b^i , 其中第 i 发弹药对目标造成的毁伤概率为 P_k^i , 根据式 (2) 和式 (3), 有

$$P_b^i = (1 - P_b^{i-1}) P_k^i + P_b^{i-1} \quad (4)$$

将式 (4) 代入式 (3), 可得

$$M_F^i = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} [(1 - P_b^{i-1}) P_k^i] dx dy + \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} P_b^{i-1} dx dy \quad (5)$$

式中: M_F^i 为考虑毁伤积累效应时第 i 发弹药对目标的毁伤效能指数。

进而可得

$$M_F^i = \sum_{j=2}^i \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} [(1 - P_b^{j-1}) P_k^j] dx dy + M_F^1 \quad (6)$$

式中: M_F^1 为第 1 发弹药对目标的毁伤效能指数。

由于式 (6) 中等号右边第 1 项为非负数, 表明随着弹药数的增加, 弹药对目标的毁伤效能指数逐渐增加。

3 弹药对目标毁伤效能评估方法

毁伤效能评估时, 为了简化计算, 用等面积的矩形区域表示弹药的毁伤效能指数, 如图 5 所示。对应的毁伤函数称为“矩形边界 0-1 毁伤函数”, 在矩形边界内 P_k 值为 1, 在矩形边界外 P_k 值为 0, 即

$$P_k(x, y) = \begin{cases} 1, & (x, y) \in \mathbb{R} \\ 0, & (x, y) \notin \mathbb{R} \end{cases}$$

该矩形的长 L_{ET} 和宽 W_{ET} 分别为

$$L_{ET} = \sqrt{M_F \times a}$$

$$W_{ET} = L_{ET} / a$$

式中: a 为与弹药落角 (弹药轴线与水平面的夹角) 相关的常数。

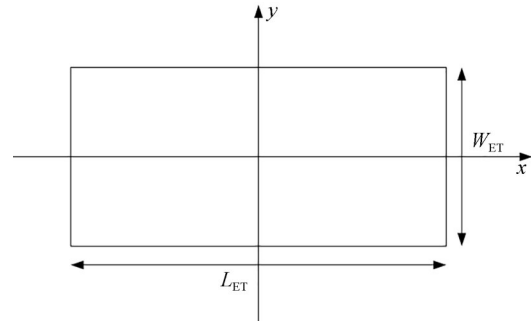


图5 矩形边界 0-1 毁伤函数的有效区域

Fig. 5 Effective area of the damage function with a rectangular boundary of 0-1

弹药对目标的毁伤效能指数越大, 说明弹药对目标的毁伤能力越强, 目标在该弹药作用下越易损。因此, 弹药毁伤效能指数不仅表征了弹药对目标的毁伤能力, 也表征了目标在该弹药作用下的易损性。

杀爆弹打击地面装备目标时, 相对于弹药杀伤面积, 装备目标的尺寸较小, 可看作一个点目标。假设弹药的杀伤区域为矩形, 当弹药杀伤区域覆盖目标时, 目标被毁伤, 否则目标不被毁伤。反过来, 可以把弹药看作一个点, 将目标看作和弹药杀伤区域形状、大小相同的区域, 根据规则边界“0-1”函数的定义, 当落点落入目标区域内时, 目标被毁伤, 落到该区域之外时目标不被毁伤, 如图 6 所示, 称该区域为虚拟目标。

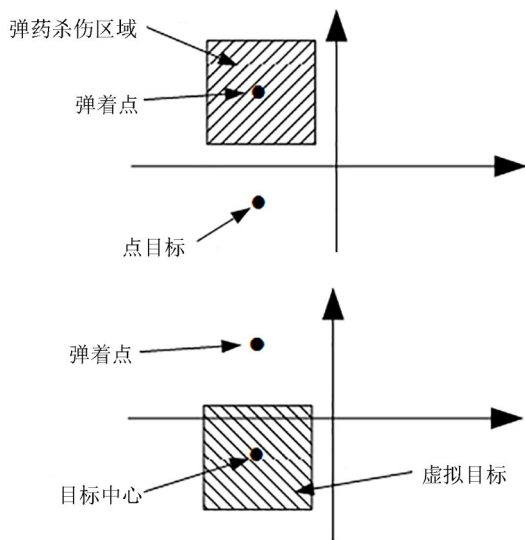


图 6 弹药杀伤区域与等效目标区域的转换

Fig. 6 Conversion between the ammunition killing area and the equivalent target area

计算弹药对目标的毁伤效能既可以按照弹药杀伤区域是否覆盖目标的方法,也可以按照落点是否落入虚拟目标区域内的方法,2种方法得到的计算结果相同,后者计算落点落入虚拟目标的概率更简单。因此,评估弹药毁伤效能并计算用弹量时,采用后一种方法计算弹药对目标的毁伤。

弹药毁伤概率主要是由弹药的弹道散布、武器可靠度及毁伤函数的形式决定的。采用卡尔顿毁伤函数替代弹药对装备的毁伤矩阵,假定目标位于坐标原点,其等效长度和宽度分别为 L_{ET} 和 W_{ET} ,弹药期望弹着点位于地面某处,弹着点与目标的位置关系如图7所示。

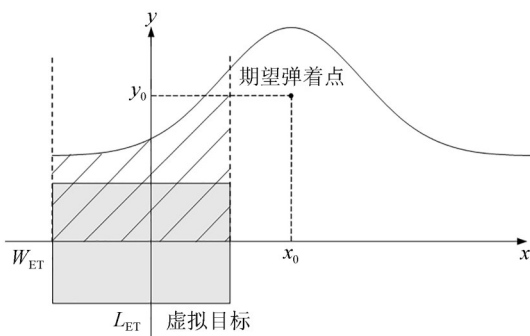


图 7 期望弹着点与等效目标的位置关系

Fig. 7 Relationship between expected points and equivalent targets

考虑弹药命中点的散布误差,弹药实际命中点一般服从正态分布,假设弹药在 x 和 y 方向上散布的标准差分别为 σ_x 和 σ_y ,则弹药在 x 方向上命

中且毁伤目标的概率为

$$P_{K-x} = E(c(x)) = \int_{-\infty}^{+\infty} c(x) g(x) dx \quad (7)$$

式中: $c(x)$ 为卡尔顿毁伤函数一维形式; $g(x)$ 为概率密度函数。 $c(x)$ 和 $g(x)$ 的表达式分别为

$$c(x) = \exp\left(-\frac{4x^2}{L_{ET}^2}\right) \quad (8)$$

$$g(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2}\right] \quad (9)$$

将式(8)和(9)代入式(7),得

$$P_{K-x} = \frac{L_{ET}}{\sqrt{8\sigma_x^2 + L_{ET}^2}} \times \exp\left[-\frac{4x_0^2}{8\sigma_x^2 + L_{ET}^2}\right]$$

同理,弹药在 y 方向命中且毁伤目标的概率为

$$P_{K-y} = \frac{W_{ET}}{\sqrt{8\sigma_y^2 + W_{ET}^2}} \times \exp\left[-\frac{4y_0^2}{8\sigma_y^2 + W_{ET}^2}\right]$$

则弹药对目标毁伤的概率为

$$P_D = P_{K-x} \times P_{K-y} \times R_e$$

式中: R_e 为武器的可靠度。

为了得到毁伤目标所需的弹药数目,根据1~ N 发弹药对目标的毁伤效能指数依次计算 N 发弹药($N=1, 2, \dots$)时对目标的毁伤概率。当得到的毁伤概率大于或等于弹药对目标期望毁伤概率时,停止计算,对应的 N_c 为所需打击次数,即用弹量。

4 算例与分析

以某杀爆弹为例,假设弹药终点处落点服从正态分布规律,圆概率误差为30 m。计算典型终点条件下弹药对某两栖步兵战车的毁伤概率分布,如图8、图9所示。得到弹药对步兵战车的毁伤效能指数,如表1所示。

表 1 不同终点条件下弹药对车辆目标的毁伤效能指数

Tab. 1 Damage effectiveness index of the ammunition to the vehicle target under different terminal conditions

编号	终点条件			单发弹药毁伤效能指数/ m^2	
	落速/ ($m \cdot s^{-1}$)	落角/($^\circ$)	炸高/m	M级	F级
1	1 100	57	30	791.7	1 378.2
2	750	50	30	503.9	923.7
3	450	45	30	361.2	718.1

由表1可知:单发弹药毁伤效能指数与落角相

关, 随着落角增大, 毁伤效能指数逐渐增大; 相同落角情况下 F 级较 M 级毁伤效能指数更大, 说明弹药更容易造成目标 F 级毁伤。第 1 种终点条件下, 计算得到的弹药对目标的毁伤效能指数随着用弹量的变化如图 10 所示。

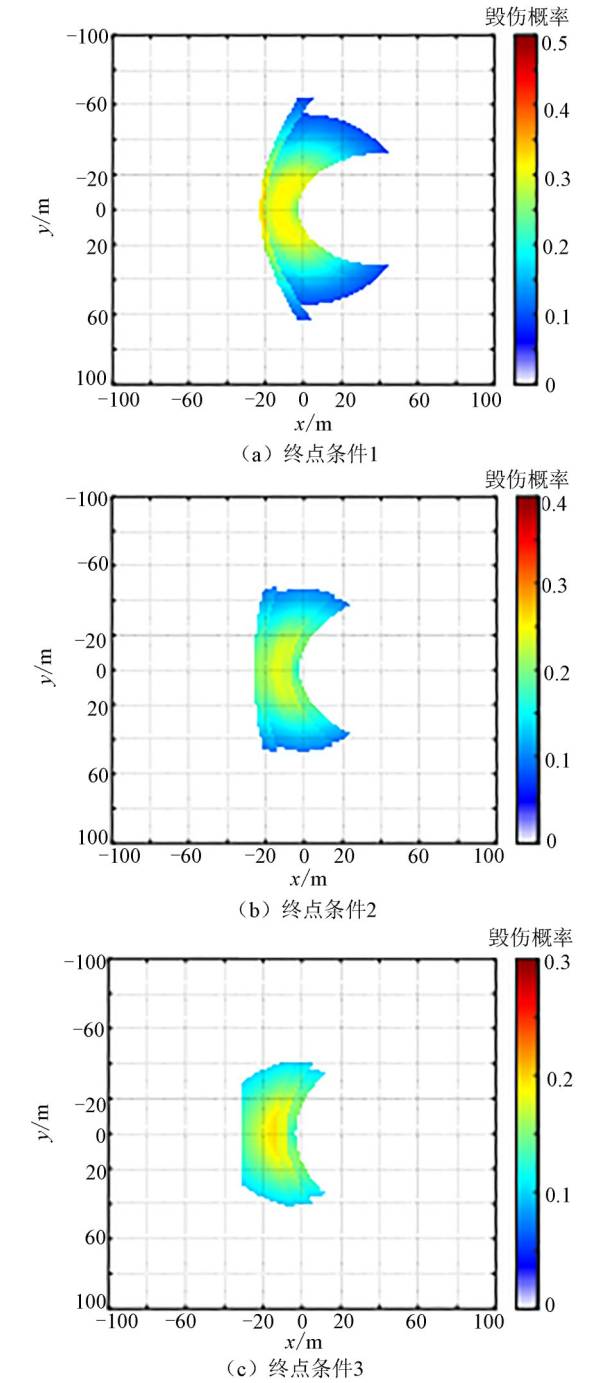


图 8 弹药战斗部对车辆目标运动 (M 级) 毁伤的概率分布 (炸高 30 m)

Fig. 8 Probability distribution maps of the M-class damage of the ammunition warhead to the vehicle target (explosion height:30 m)

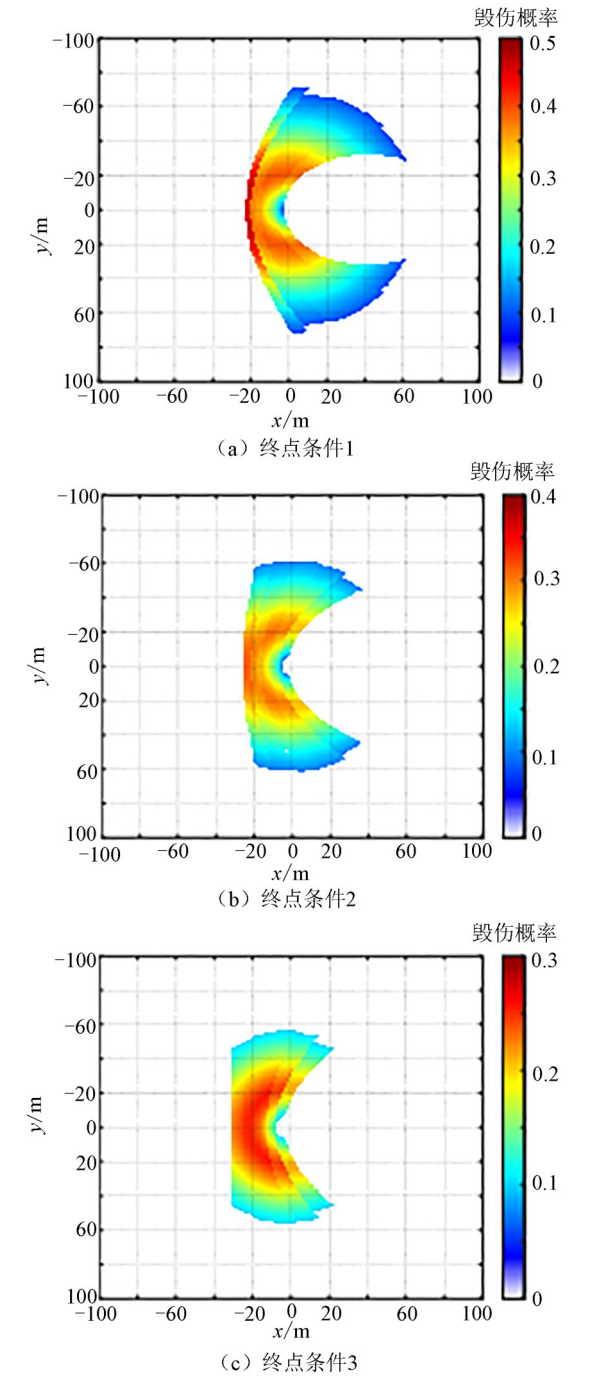


图 9 弹药战斗部对车辆目标火力 (F 级) 毁伤的概率分布 (炸高 30 m)

Fig. 9 Probability distribution maps of the F-class damage of the ammunition warhead to the vehicle target (explosion height:30 m)

图 10 的结果表明: 考虑毁伤积累效应时, 随着弹药数的增加, 弹药对目标的毁伤效能指数随之增加, 而非固定值; 对于 M 级和 F 级毁伤, 第 2 发弹药对目标的毁伤效能指数较第 1 发分别增加 16.3% 和 25.3%。这主要是因为此时目标已是损坏而非完好状态, 更容易受到毁伤。是否考虑毁伤

积累效应, 对毁伤概率的影响如图 11 所示。

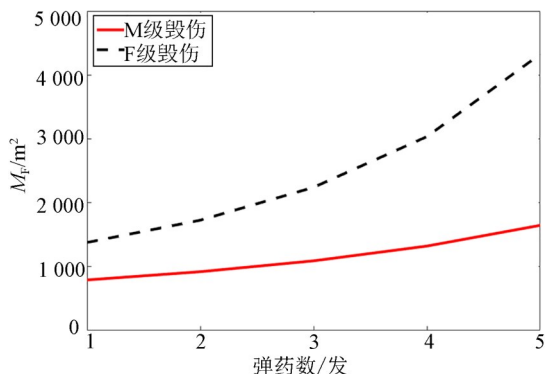


图 10 弹药毁伤效能指数与弹药发数之间的关系
(终点条件 1)

Fig. 10 Relationship between the ammunition damage effectiveness index and the rounds of ammunition (1st terminal condition)

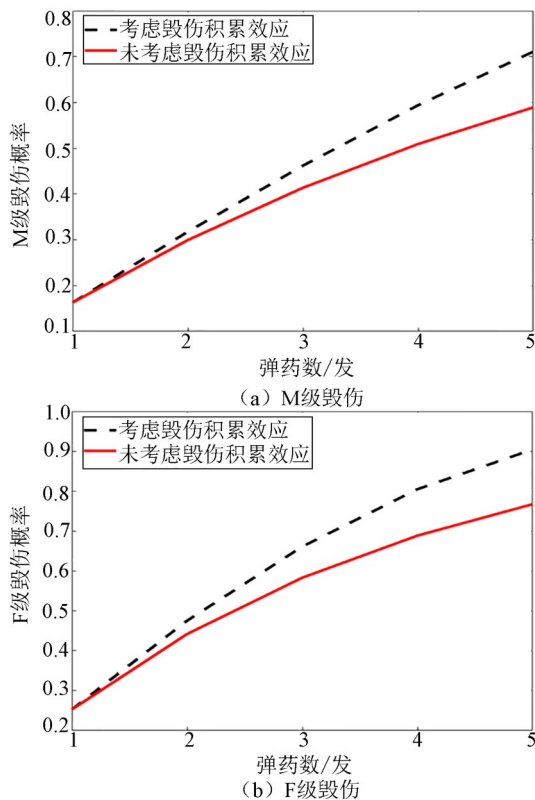


图 11 考虑毁伤积累效应对弹药毁伤概率的影响
(终点条件 1)

Fig. 11 Relationship between the ammunition damage probability and rounds of ammunition (1st terminal condition)

由图 11 可以看出: 考虑毁伤积累效应时, 弹药对目标的毁伤概率大于采用独立事件处理时对应的结果; 考虑毁伤累积效应后, 对于 M 级和 F 级毁伤, 第 2 发弹药的毁伤概率分别比第 1 发增加

6% 和 7.55%, 第 3 发弹药的毁伤概率比第 1 发增大 11.7% 和 13.4%。

5 结论

本文建立了一种考虑多发弹药毁伤积累效应的弹药毁伤效能快速评估方法, 研究结果表明: 考虑积累效应后, 弹药对目标的毁伤效能指数不再是定值, 而随着弹药发数逐渐增加, 对目标的毁伤概率也相应增大, 相较于不考虑毁伤积累效应时增大 6% 以上。该方法综合考虑了弹药战斗部威力、目标易损性分析、弹药投放条件及投放精度, 得到的多发弹药毁伤效能相较于不考虑毁伤积累效应的计算结果更为准确。

参考文献:

- [1] DRIELS M. Weaponing: An introduction: Volume 1[M]. Third Edition. Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2020: 1-32.
- [2] MOON S H. Weapon effectiveness and the shapes of damage functions[J]. Defence Technology, 2021, 17(2): 617-632.
- [3] BAIK S. Optimal component layout for minimal vulnerability of weapon systems[M]. Raleigh, North Carolina: North Carolina State University, 2021: 15-28.
- [4] TAN C M M. Rapid estimation of building damage by conventional weapons[D]. Monterey, California: Naval Postgraduate School, 2014: 57-60.
- [5] CHUSILP P, CHARUBHUN W, KOANANTACHAI P. Monte Carlo simulations of weapon effectiveness using P_k matrix and Carleton damage function[J]. International Journal of Applied Physics and Mathematics, 2014, 4(4): 280-285.
- [6] ECKLER A R, BURR S A. Mathematical models of target coverage and missile allocation[M]. Alexandria, VA: Military Operations Research Society, 1972: 15-76.
- [7] AHNER D, MCCARTHY A L. Response surface modeling of precision-guided fragmentation munitions[J]. The Journal of Defense Modeling and Simulation, 2020, 17(1): 83-97.
- [8] 李向东, 杜忠华. 目标易损性[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2013: 1-11.
- [9] SEIHOON M, JOSHUA G. Exact solutions for

the effectiveness of multiple weapons against an imprecisely located point target[J]. Military Operations Research, 2022, 27: 27-61.

[10] WANG H Y, MOTEN C, DRIELS M, et al. Explicit exact solution of damage probability for multiple weapons against a unitary target[J]. American Journal of Operations Research, 2016, 6 (6): 450-467.

通信作者及其研究团队介绍

周兰伟, 男, 1988 年出生, 现任南京理工大学副教授, 硕士研究生导师, 主要研究方向为目标易损性分析、弹药毁伤效能评估。主持国家和军队 30 项科研项目的工作, 发表 SCI/EI 论文 10 余篇、软件著作权及发明专利多项。教学方面, 参与的“弹药概论”课程获批国家线上线下混合式一流本科课程、国家线上一流本科课程、江苏省线上一流本科课程、江苏省高等学校在线开放课程, 该课程目前已在中国大学生 MOOC 平台上开课 11 期, 约 6000 人参与了在线课程学习, 取得了良好的教学效果, 获南京理工大学教学成果二等奖一项。

所在团队为南京理工大学目标易损性及弹药毁伤效能评估课题组, 课题组长期从事弹药战斗部终点效应、目标易损性及毁伤机理、弹药效能评估等方面的科研和教学工作, 编写了《目标易损性》《目标易损性评估及应用》研究生教材 2 部, 在目标易损性及弹药毁伤效能评估方面具有丰富的技术储备和研究经验。

开展了目标易损性及战斗部毁伤效能评估技术研究, 研究了不同类型弹药对目标的毁伤评估方法, 基于理论、试验及数值仿真相结合的方法构建了破片、冲击波等典型毁伤元作用下易燃类、易爆类、复杂功能类、机械承力类等典型部件的毁伤准则, 开发了目标易损性及弹药毁伤效能评估系统, 如图 2 所示, 该评估系统可评估典型毁伤元作用下目标的易损性, 普通破片、定向、聚焦、离散杆战斗部对空中目标(如固定翼飞机、直升机、导弹、无人机等)的毁伤, 杀爆战斗部对地面人员、轻型装甲车辆、导弹阵地等目标的毁伤, 侵爆战斗部对舰船、建筑物、掩蔽库等目标的毁伤, 破甲、穿甲战斗部对坦克目标的毁伤, 实现弹药对目标毁伤效能快速计算。软件技术成熟度 8 级以上, 目前已服务于国内多家单位, 如中国北方车辆研究所、直升机设计研究所、西安现代控制技术研究所、西安北方华山机电有限公司等, 在高校的数字化教学, 装备的战场生存力评估、防护策略制定, 弹药威力评估、战斗部结构优化及引战配合设计, 武器的靶场验收、模拟训练, 战场指挥及火力规划等方面发挥了积极作用, 缩短了武器的设计周期, 减少了研制成本, 提高了武器的毁伤效果。



图 1 课题组编著的相关专业书籍



图 2 目标易损性及弹药毁伤效能评估系统界面