

DOI: 10.20189/j.cnki.CN/61-1527/E.202602008

基于毁伤域仿真的发射车抗破片能力评估

王冬¹, 都亮¹, 李向阳², 刘志浩², 陶举兴¹, 吴济民¹

(1. 火箭军某部队, 红河 661100;

2. 火箭军工程大学, 西安 710025)

摘要: 针对发射车战场环境下抗毁伤能力评估需求, 提出一种基于毁伤域表征的发射车抗破片能力评估方法。首先, 构建破片威力场与车辆毁伤准则; 其次, 利用边界交替采样与支持向量机快速界定毁伤域边界, 并通过自适应网格积分计算毁伤域面积、面积比及毁伤概率, 多维表征发射车抗破片能力; 最后, 综合考虑发射车各部件抗破片强度、作战地形、机动速度和攻击武器精度等因素, 对发射车抗破片能力进行仿真计算。结果表明: 单部件强度提升对整车抗毁能力影响程度不同, 在发射筒、驾驶室、舱室、轮胎4个部件强度分别增大1倍后, 整车毁伤域分别减少19.3%、9.5%、4.1%、0.1%; 作战地形对整车抗毁能力影响显著, 相对于水平地形, 发射车周边坡度为 -40° 和 40° 时, 整车毁伤域变化率分别为-66.9%和213%; 发射车机动速度对抗破片能力影响有限, 但在攻击弹药瞄准到惯性命中时间差为0.8 s时, 发射车保持72 m/s机动速度, 能够使毁伤概率降低47.3%。仿真算例验证了方法的有效性, 实现了从部件性能到整车抗毁的量化评估, 进而为发射车结构优化及作战运用提供决策参考。

关键词: 发射车; 毁伤域; 抗破片能力; 评估方法

中图分类号: E92

文献标志码: A

文章编号: 2097-2741(2026)02-0084-10

武器装备的抗毁伤能力是相对于攻击武器的毁伤效应而言的, 是指武器装备受到攻击而损伤/损毁的难易程度, 与易损性、脆弱性相似^[1]。自二十世纪六十年代开始, 美军便围绕地面目标的抗毁伤能力展开了相关研究^[2], 早期主要采用单破片“平行射线”、弹目几何描述和“爆点”等分析方法。经过近70年的发展, 美军在武器装备抗毁伤能力领域已形成较为完善的研究机构、体制和模式, 相关研究及应用也日趋广泛。目前, 通过各种武器装备的易损性数据, 美军已能够针对不同作战环境开展装备抗毁伤能力系统评估^[3-8]。

相比之下, 我国的战场环境下武器装备抗毁伤能力研究起步较晚, 尚未形成系统、统一的研究体系。这些研究在评估对象上主要集中于飞机、舰艇和部件材料, 例如, 郭超^[9]针对破片式高炮弹药对典型武装直升机的毁伤进行了研究; 王小强等^[10]围绕空地导弹对装甲目标的毁伤提出静动爆

关联试验评估方法; 毕广剑^[11]则重点探讨了无人机蜂窝夹层机体结构的抗毁伤性能。在评估方法上, 除了以权数理论为主的传统评估方法外, 神经网络、数字仿真和博弈论等现代理论方法也得到了应用。例如, 李彦彬等和余丽山等^[12-13]分别采用相邻优属度熵权法和BP神经网络对飞机的抗毁伤能力进行了评估; 罗泽峰等^[14]基于博弈论中的均衡思想, 提出了蛙人运载器抗毁伤分析方法; 张睿文等^[15]则采用蒙特卡洛仿真方法对预警机的抗毁伤性能进行了研究; 王鑫^[16]、宋业^[17]分别构建了装甲车辆和飞机的易损性模型和数据库。

目前, 以装甲车辆为主的地面装备抗毁伤性能研究仍较少。仲红亮^[18]和梁振刚等^[19]分别就典型坦克和装甲车辆的被打毁伤评估方法和易损性快速建模技术进行了研究。但对于机动发射车而言, 由于其射程远、纵深作战的原因, 在相关的生存性研究中主要侧重于伪装防护, 遵循“发现

收稿日期: 2025-10-27

修回日期: 2026-01-05

录用日期: 2026-03-25

第一作者: 王冬 (1985—), 男, 工程师, 主要从事武器装备与作战能力仿真研究。E-mail: dong.2021201@163.com

引用格式: 王冬, 都亮, 李向阳, 等. 基于毁伤域仿真的发射车抗破片能力评估[J]. 火箭军工程大学学报, 2026, 40 (2): 84-93.
WANG Dong, DU Liang, LI Xiangyang, et al. Damage domain simulation-based evaluation of anti-fragmentation capability of launch vehicles [J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2026, 40 (2): 84-93.

即摧毁”的思路。然而,从2024-2025年俄乌、伊以、印巴等几场局部冲突可以看出,高价值战略武器的隐蔽伪装越来越难,遭受打击可能性大幅提升,机动发射车抗毁伤能力的研究也因此逐步得到重视。代海峰等^[20]通过解析仿真方法对机动发射车的抗精确制导武器毁伤能力进行了评估;张启瑞等^[21]构建了基于参数统计的破片战斗部地面威力场及人员毁伤矩阵模型;黄通等^[22]提出了基于复杂网络表征的发射车抗毁伤拓扑结构,展开整车的抗毁伤能力评估。但是,当前机动发射车从部件到整体的抗毁伤能力评估还未形成统一的方法标准。为满足实战化需求,在后续评估中需充分考虑战场环境影响,同时解决从单部件、单场景的易损性和抗毁性评估到整车动态评估的过渡问题,以适应发射车的集成化、脆弱性特点。

基于此,结合机动发射车作战特点和作战评估需求,本文提出基于毁伤域表征的发射车抗破片能力评估方法。针对破片攻击,首先采用爆点投影高斯积分法,建立从迎爆面到部件再到整车的毁伤判据,继而构建发射车抗破片毁伤仿真判定模型;其次,采用简便的边界自适应采样法和基于高斯核的支持向量机(support vector machine, SVM)网络训练生成毁伤域快速判定模型,并通过对毁伤域的自适应网格划分和三种形式的积分计算发射车的毁伤域面积、毁伤域面积比和毁伤概率;最后,综合考虑战场环境下发射车部件结构抗破片冲击能力、作战地形、机动速度和攻击武器精度等因素,对发射车的抗破片毁伤能力进行评估分析。

1 发射车抗破片毁伤仿真模型

1.1 发射车几何模型

本文以一体化机动发射车为研究对象,根据发射车结构和部件材料,抗破片毁伤主要包括驾驶室、设备舱、轮胎和发射筒4个部分,依此建立发射车的抗破片毁伤几何模型。几何模型基于面描述法建立,用矩形或平面四边形近似各部件的表面,用长方体近似舱室,用各结构平面上的节点坐标描述相应部件。

1.2 破片战斗部地面静爆威力场模型

发射车遭受破片战斗部打击,多为地面静爆模式^[23]。模型假设战斗部所有破片自爆点直线射出,绕地面法向向四周分散,破片战斗部威力场及破片散布如图1所示。 A_{ey} 为爆点 O 经迎爆面向

$xO'y$ 平面的投影区域, P_A 为爆点 O 击穿迎爆面的破片占比。破片在距离地面法向 d 的平面上的散布,近似服从二维高斯分布;在 x 、 y 两方向独立同分布,且均服从 $N(\mu, \sigma)$ 的正态分布,其中均值 $\mu=0$,标准差 σ 与距离 d 和散射角 Ω 有关。按照在飞散角范围 $[90^\circ - \Omega, 90^\circ + \Omega]$ 内包含90%的破片计算,标准差 $\sigma = d/1.645 \tan \Omega$ 。

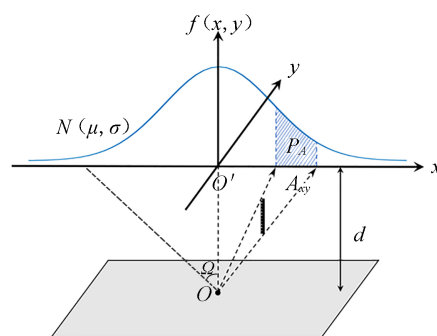


图1 破片战斗部威力场及破片散布

Fig. 1 Power field and fragmentation distribution of the fragmentation warhead

1.3 发射车毁伤判据

1.3.1 击穿迎爆面破片数计算

1) 迎爆面可击穿范围

破片威力场中,破片自爆点沿直线散射,假设破片质量大小均匀,破片速度遵循公式^[24]为

$$v = v_0 \exp(-\alpha d_1) \quad (1)$$

式中: v_0 为破片初速度; α 为速度衰减系数,与空气湿度温度、破片质量尺寸有关; d_1 为破片与爆心的距离。

各迎爆面的最远击穿距离 $d_{\max}$ 可表示为

$$v_{\lim} = v_0 \exp(-\alpha d_{\max}) \quad (2)$$

式中: $v_{\lim}$ 为不同部件迎爆面材料临界击穿速度。当破片法向入射速度分量大于临界击穿速度 $v_{\lim}$ 时,视为迎爆面被击穿。当迎爆面距爆点垂直距离 d_0 小于最远击穿距离 $d_{\max}$ 时,破片对迎爆面的可击穿范围是半径为 $R_{\max}$ 的圆域,可由式(3)联立求得。

$$\begin{cases} v_1 = v_0 \exp(-\alpha d_0 / \cos \theta) \\ v_1 = v_{\lim} / \sin \theta \\ \tan \theta = d_0 / R_{\max} \end{cases} \quad (3)$$

式中: θ 为破片入射方向与水平方向的夹角。

当部件迎爆面位于击穿圆域内时,认为破片能够到达并击穿该面。破片对迎爆面击穿范围判定如图2所示。

2) 迎爆面可击穿破片数计算

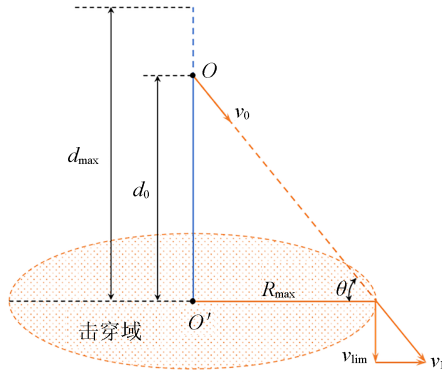


图 2 破片对迎爆面击穿范围判定

Fig. 2 Determination of the penetrating range of the fragmentation on the blast face

爆点 O 所形成的破片威力场，在垂直距离 d 的平面上散布，服从二维高斯分布，有 $\mu_x = \mu_y = 0$ ， $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$ ，分布概率密度函数为

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}} \quad (4)$$

以 x 方向为例，爆点投影高斯积分如图 1 所示。 P_A 即为投影区域 A_{xy} 在二维高斯分布概率密度函数 $f(x, y)$ 上的积分，可表示为

$$P_A = \iint_{A_{xy}} f(x, y) dx dy \quad (5)$$

若爆点产生的总破片数为 N ，则击穿迎爆面的破片数量为

$$N_A = NP_A \quad (6)$$

1.3.2 迎爆面允许最低击穿破片数

发射车的 4 个部件中，发射筒和轮胎属于功能性部件，其本身完整性、气密性尤为重要，一旦击穿意味着关键功能丧失。因此，二者的迎爆面最低击穿破片数为 1。对于设备舱和驾驶室，主要功能是遮挡和承载，单次的击穿并不一定造成内部设备和乘员的损毁。对于这两类部件，本文采用迎爆面背后核心设备面积与迎爆面面积之比 β 计算其最低击穿破片数。 n 个破片击穿迎爆面后命中核心设备的概率为

$$p_n = 1 - (1 - \beta)^n \quad (7)$$

根据式 (7)，设定概率阈值，对计算结果 n 取整，即可得各迎爆面允许最低击穿破片数。

1.3.3 发射车毁伤判定

本文构建迎爆面-部件-整车三级毁伤判定关系。当部件任一迎爆面实际击穿破片数大于等于最低击穿破片数时，判定该部件损毁。对于具备缺胎行驶能力的多轴机动发射车系统，当轮胎的毁伤数大于其最大缺胎行驶数时，判定轮胎部件

损毁。发射车 4 个主要部件相对于系统的毁伤为“或”的关系，任一部件损毁，判定发射车损毁，整车发射功能丧失。

2 毁伤域计算与表征

2.1 边界交替采样及发射车毁伤域确定

2.1.1 发射车毁伤域

根据毁伤程度的不同，划分落点范围，构成发射车四级毁伤域^[25]： S_0 为未命中发射车区域； S_1 为造成损伤但不影响任务执行区域； S_2 为造成损伤但通过快速抢修后可继续执行任务区域； S_3 为发射车损毁区域。本文仅将发射车无法执行后续任务的第 4 级区域视为毁伤域，其面积越小，发射车抗毁能力越强。

2.1.2 边界交替采样

边界交替采样法是在一定精度范围内，仅查找毁伤域分界线邻域内贡献率较大的样本点作为机器学习的训练集，进而生成样本毁伤判定模型。样本点坐标采用以发射车中心为原点的极坐标表示，第 i 个样本点 $p(i)$ 可表示为 (θ_i, L_i) ，其中， θ_i 为第 i 个样本点的方位角， L_i 为第 i 个样本点到发射车的距离。初始的两个样本点人工指定，选择发射车 0° 方向间隔为一个步长 ΔL 的两点，根据仿真计算前两个样本点的毁伤判定结果，选择下一个样本点位置，边界交替采样点选取的 4 种方法如图 3 所示。红色虚线为毁伤域边界，蓝点为未毁伤样本点，橙点为毁伤样本点，空心点为新样本点。算法沿毁伤域边界逆时针交替采样，样本点绕车辆一周完成采样。

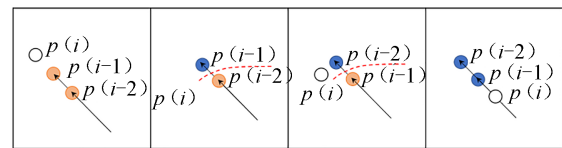


图 3 边界交替采样法新样本点生成

Fig. 3 Generation of new sample points using alternating boundary sampling method

2.1.3 SVM 训练生成毁伤域边界判定模型

发射车毁伤仿真判定是以落点坐标位置为输入变量，毁伤结果为输出变量的二分类问题。以边界交替采样法生成一定数量的训练数据，采用 SVM 进行毁伤预测模型训练，使用径向基高斯核函数 (radial basis function, RBF) 进行落点非线性分类。

2.2 发射车战场抗破片能力表征

2.2.1 毁伤域积分形式

为了全面反映发射车的抗毁能力, 满足不同发射车型号和各类战场环境评价需求, 将发射车基于毁伤域的抗毁能力 E 定义为二维函数 $f(x, y)$ 在毁伤域 S_3 上的积分, 即

$$E = \iint_{S_3} f(x, y) dx dy \quad (8)$$

采用以下3种方法进行发射车抗破片能力 E 的量化评估。

1) 毁伤域面积 A 。此时 $f(x, y) = 1$, 毁伤域面积计算公式为

$$A = \iint_{S_3} 1 dx dy \quad (9)$$

2) 毁伤面积比 γ 。发射车毁伤域的面积 A 与发射车地面投影面积 A_s 之比, 可表示为

$$\gamma = \frac{A}{A_s} \quad (10)$$

3) 毁伤概率 P 。引入参数战斗部打击圆概率偏差 (circular error probable, CEP)。毁伤概率密度函数是以瞄准点为中心, 概率密度函数是均值为0、标准差 $\sigma_2 = C_{ep}/1.746$ 的二维高斯函数, 可表示为

$$P = \iint_{S_3} \frac{1}{2\pi\sigma_2^2} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma_2^2}} dx dy \quad (11)$$

2.2.2 毁伤域自适应网格积分

在不规则毁伤域上积分, 需要先对毁伤域进行自适应矩形网格划分, 而后逐区积分累加求解。

$$E = \sum_i \iint_{\Delta S_i} f(x, y) dx dy \quad (12)$$

式中: i 为毁伤域划分网格数; ΔS_i 为对应的网格区域。根据毁伤域在纵横坐标的最大值和最小值, 设定首层划分网格的矩形区域, 3×3 均分形成9个次级矩形网格, 而后根据次级网格与毁伤域的相对关系, 域内网格记为待积分区域; 域外网格不进行操作; 若网格与区域边界相交, 则作为下层待划分网格, 继续进行划分判定, 逐层细分, 直至网格面积小于阈值。此时, 各层记录的待积分区域集合, 即为毁伤域积分范围。

2.2.3 评估方法

综上所述, 发射车毁伤域自适应网格积分的抗破片能力评估方法步骤如图4所示。

Step1 构建发射车几何结构模型和爆点破片威力场模型;

Step2 试验验证各部件材料的临界击穿速度, 生成各部件及发射车的毁伤判据, 构建毁伤判定解析模型;

Step3 采用自适应边界采样法, 依次判定各样本点毁伤结果, 直至样本点方位角不小于 360° , 绕发射车取样一周, 取样结束, 生成毁伤数据训练集;

Step4 采用 RBF-SVM 进行训练, 生成发射车毁伤快速判定模型和毁伤域边界;

Step5 对毁伤域进行自适应网格划分, 根据评估需求选定抗破片能力评估方法, 进行抗破片毁伤性能评估。

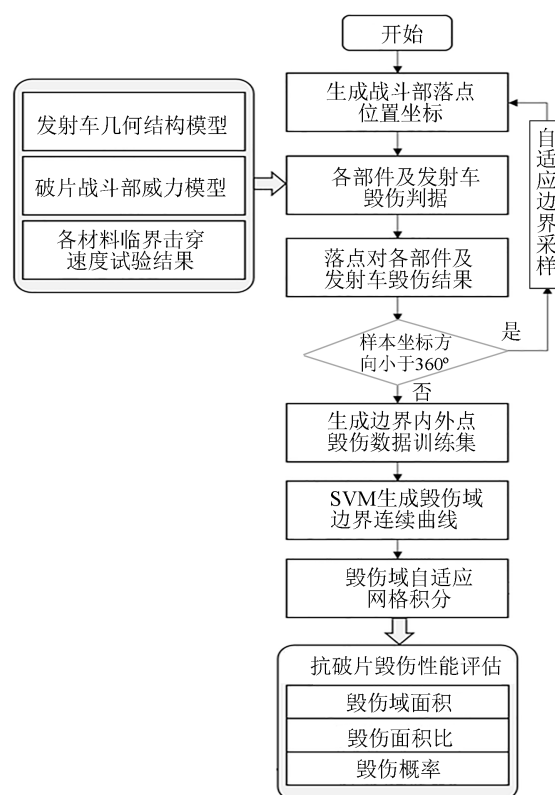


图4 毁伤域表征的发射车抗破片能力评估方法

Fig. 4 Evaluation method of anti-fragmentation capability of the launch vehicle based on damage domain

3 仿真算例

本文以某型发射车为例, 通过有限元仿真、材料等效冲击实验和威力场材料破坏实验, 得到发射车各部件的威力场毁伤仿真数据, 如表1所示。考虑到各部件迎爆面远小于战斗部爆炸威力场域, 仿真计算时不考虑战斗部母线在小迎爆面区域的正态散射效应, 将到达迎爆面破片初速统一设定。仿真实验设置破片初速度为 $1\,713\text{ m/s}$;

速度衰减系数为 0.02；破片数为 1 350 个。

表 1 战斗部威力场仿真数据

Table 1 Simulation data of warhead power field

部件	最低破片击穿速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
驾驶室	700
设备舱	800
轮胎	500
筒壁	1 350
筒底	300

边界交替采样生成样本点。设置采样步长 $\Delta L = 0.2 \text{ m}$ ，初始采样点极坐标 $p(1) = (\pi/2, 12)$ ，考虑到发射车左右对称性，仅在 $(90^\circ, 180^\circ)$ 范围内采样生成 345 组样本点。为保证后续机器训练的鲁棒性，在交替采样范围内，增加均匀采样点 100 个，共 445 组毁伤域分类训练数据。

首先，训练 SVM 生成毁伤域边界。由于毁伤域边界的非线性，训练 SVM 时使用 RBF。输入 445 组数据，采用自动超参数优化方法训练生成毁伤域判定模型，对分类器模型交叉验证，计算得模型样本内准确率为 99.8%。模型分类边界如图 5 所示，橙色区域为发射车毁伤域。

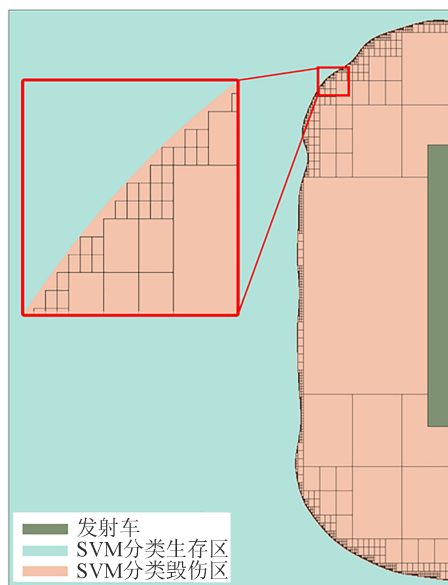


图 5 毁伤域及其自适应网格划分

Fig. 5 Damage domain and its adaptive grid division

然后，对毁伤域进行自适应网格划分。设置不同的最小面积阈值对毁伤域进行网格划分，网格划分和积分计算结果如表 2 所示。随着最小划分面积的减小，分割层数和网格数逐步增大，网格也越来越趋近于毁伤域边界，积分结果逐步收敛，

当分割层数达到第 8 层，毁伤域面积、毁伤面积比和毁伤概率的变化趋于稳定，计算量增加 201.2%，计算费效比降低。因此为确保精度和计算效率，将毁伤域划分网格最小阈值确定为 0.001。

表 2 不同网格划分下的抗破片能力评估值

Table 2 Evaluation value of anti-fragmentation capability under different grid divisions

网格面积/ m^2	1	0.1	0.01	0.001	0.000 1
分割层数	4	5	6	7	8
计算网格数	143	536	1 722	5 260	15 845
毁伤域面积/ m^2	411.40	422.05	425.62	426.80	427.20
毁伤面积比	6.23	6.39	6.45	6.47	6.47
毁伤概率 ($C_{ep}=10$)	0.528	0.538	0.539	0.539	0.540

4 评估方法应用分析

4.1 各部件对整车抗破片能力影响

在计算模型中，按比例调节发射车各部件的最低破片击穿速度，从毁伤域面积大小进行各部件结构强度对整车抗毁性的影响分析。不同强度下发射车毁伤域如图 6 所示。发射车在起竖和水平两个状态下，毁伤域随部件破片抗毁伤强度的整体提升而逐步缩小。图 7 为水平状态不同抗破片强度下发射车毁伤域面积。可以看出，当整车抗破片强度提升 1 倍后，毁伤域面积由 514.2 m^2 下降至 143.1 m^2 ，下降率为 72.2%。在其他部件强度不变的情况下，单部件强度提升对整车抗毁性提升影响程度由大到小依次为发射筒、驾驶室、舱室、轮胎，其中发射筒强度提升 15%，整车毁伤域面积降低 19.2%；对应的部件强度提升至 1 倍时，整车毁伤域分别降低 19.3%、9.5%、4.1%、0.1%。发射车的集成化设计本质上是一个脆弱的串联系统，单一部件或部分部件强度的增强难以大幅提升整车抗毁伤能力，4 个部件强度同时增强 20%、70%、100% 时，整车毁伤域分别大幅降低 22.7%、55.7%、72.2%。

图 8 所示为单部件强度变化对整车毁伤域面积的敏感度分析。毁伤域对驾驶室、舱室、轮胎系统强度提升均不太敏感，平均敏感度和最大敏感度均不大于 0.1。但是对发射筒的强度提升较为敏感，发射筒强度提升 20%，即发射筒最低抗破片击穿速度由 $1 350 \text{ m/s}$ 提升至 $1 620 \text{ m/s}$ ，最大敏

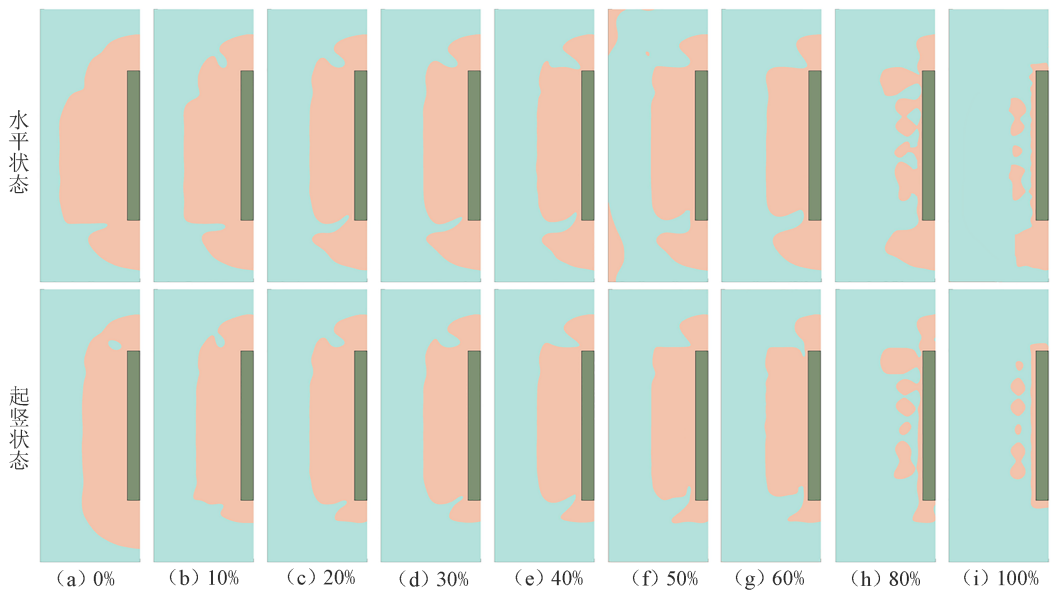


图 6 不同抗破片冲击强度增幅下发射车毁伤域

Fig. 6 Damage domain of the launch vehicle under different anti-fragmentation strength amplification

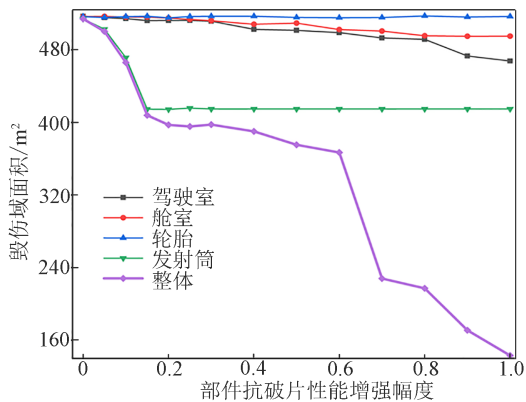


图 7 各部件抗破片强度对毁伤域面积的影响

Fig. 7 Influence of anti-fragmentation strengths of different components on damage domain areas

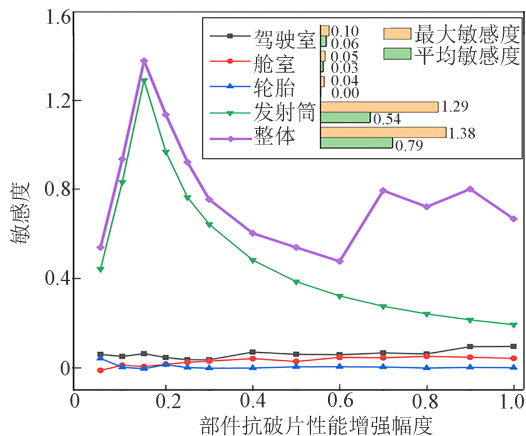


图 8 各部件抗破片强度对整车抗毁能力的敏感度

Fig. 8 Sensitivity of anti-fragmentation strengths of different components on overall survivability

感度达到了1.29, 强度提升1倍后, 平均敏感度达到了0.54。这与直观感受一致, 由于发射筒在仿

真计算中面积相对较大, 且认为其任何一点受损即意味着内部核心产品失能, 必然对整车抗毁性影响较大。

4.2 作战地形对抗破片能力影响

发射车作战地形主要有坡度为 0° 的平地、双侧坡度大于 0° 的上斜坡、双侧坡度小于 0° 的下斜坡、三侧坡度大于 0° 的上斜坡(洼地)、三侧坡度小于 0° 的下斜坡(凸台)等地形。发射车垂直状态位于不同坡度下的毁伤域如图9所示, 计算结果如图10。随着坡度的增加, 双侧斜坡和三侧斜坡毁伤域面积均呈现增大的趋势, 三侧斜坡增大趋势更加明显。上斜坡相较下斜坡变化更为明显, 双侧坡度由 0° 向下至 -40° , 其毁伤域面积由 425.6 m^2 减少至 140.9 m^2 , 变化率为 -66.9% ; 但坡度增加至 40° , 毁伤域面积增加至 $1\,580.3\text{ m}^2$, 变化率为 213% 。

4.3 机动速度对抗破片能力影响

为了考察机动速度对破片毁伤的影响, 仿真中为发射车增加了向前的速度矢量。机动速度对毁伤能力的影响主要反映在两个方面: 一是速度矢量与破片到达迎爆面的速度矢量合成的最终入射速度矢量, 其会影响破片对迎爆面的击穿效果, 从而导致毁伤域面积的变化; 二是敌攻击武器最后瞄准时刻与惯性攻击到达时刻的时间差, 会使以一定机动速度运动的发射车产生位移, 进而生成攻击误差, 影响敌武器的毁伤概率。不同机动速度下, 毁伤域面积及毁伤概率计算结果如图11所示。可以看出, 随着机动速度的提升, 发射车

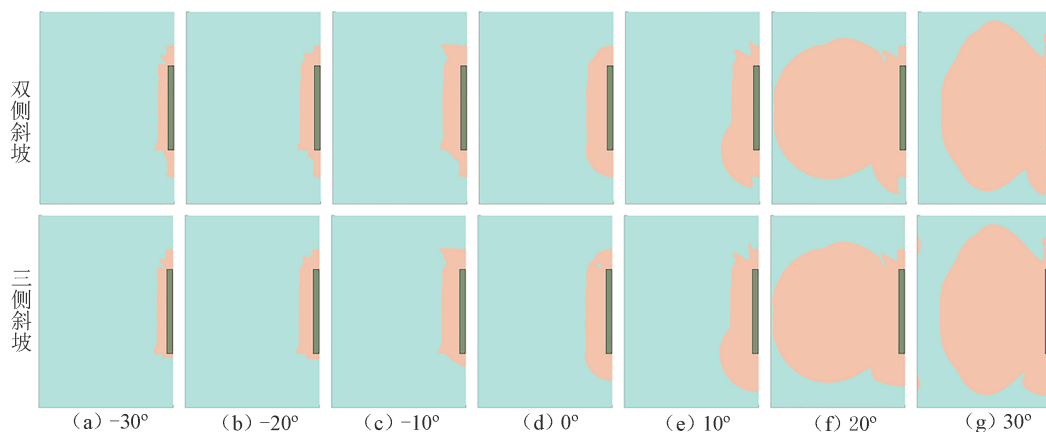


图 9 不同地形坡度下发射车毁伤域

Fig. 9 Damage domains of the launch vehicle under different terrains

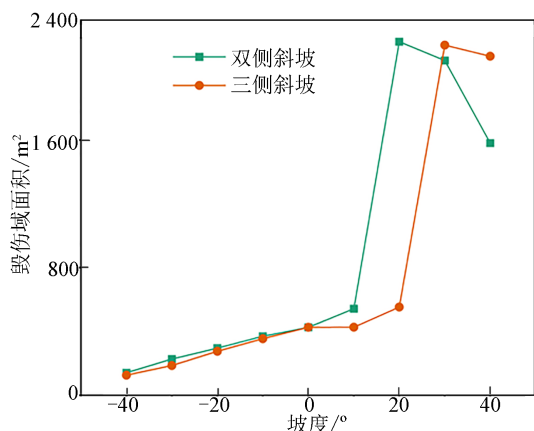


图 10 不同地形对毁伤域面积的影响

Fig. 10 Influence of different terrains on damage domain areas

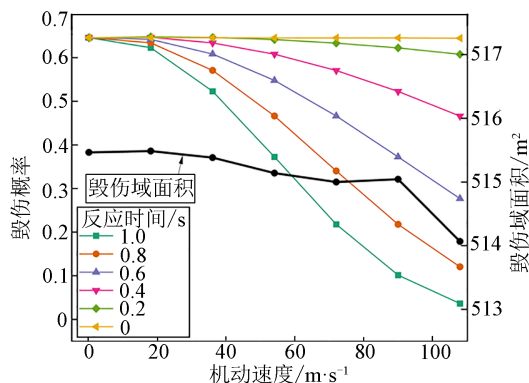


图 11 机动速度对抗破片能力的影响

Fig. 11 Influence of vehicle speed on anti-fragmentation capability

的毁伤域变化并不明显。这是因为相对于速度为 1 700 m/s 左右的破片速度, 发射车机动速度较小, 能够对破片入射速度产生的影响微乎其微。即便发射车机动速度提升至 108 m/s, 其毁伤域面积也仅降低 0.3%。这说明机动速度对毁伤域面积的影响有限。但是, 若在机动状态下, 敌攻击武

器最后瞄准时刻到命中时刻存在时间差, 则毁伤概率会出现较大的变化。以 C_{ep} 为 10 m 的攻击武器打击为例, 随着机动速度和时间差的增加, 毁伤概率呈较大幅度下降。在机动速度为 72 m/s, 攻击武器瞄准到惯性命中时间差为 0.8 s 的情况下, 发射车的毁伤概率由 0.645 降低为 0.340, 降低了 47.3%。

5 结论

本文提出一种基于毁伤域表征的发射车抗破片能力评估方法, 通过某型发射车的仿真实验, 验证了方法的可行性和应用性, 主要结论如下。

1) 提出发射车毁伤域的概念, 通过对毁伤域不同形式的积分, 计算毁伤域面积、毁伤面积比和毁伤概率 3 种指标, 能够从不同角度对发射车的抗破片能力进行量化评估。

2) 针对算例中某型发射车, 提高发射筒的抗破片毁伤强度, 相对于其他部件能够有效提升整车的抗破片能力, 发射筒强度提升 15%, 整车毁伤域面积降低 19.2%; 由于发射车是脆弱的串联系统, 要大幅提升整车的抗破片能力需同步提升所有部件抗破片强度, 部件强度同时增强 20%、70%、100% 时, 整车毁伤域分别降低 22.7%、55.7%、72.2%。从作战地形上看, 双侧和三侧下斜坡地形 (凸台) 也能够有效降低发射车的抗破片毁伤域面积。机动速度对发射车抗破片毁伤域面积的影响较小, 但在一定的反应时间差下, 高机动速度能够有效降低精确武器的毁伤概率。

3) 计算分析表明, 本文方法能够为发射车的抗毁性设计、作战运用和规避防护提出量化的决策建议, 具有一定的实践应用意义。

参考文献

- [1] National Research Council. Vulnerability Assessment of Aircraft: A Review of the Department of Defense Live Fire Test and Evaluation Program[M]. Washington, D.C., USA: The National Academies Press, 1993: 14-15.
- [2] 张克钊, 卢芳云. 美军目标易损性研究发展历程分析[J]. 国防科技, 2022, 43(2): 66-74.
Zhang Kefan, Lu Fangyun. Development of target vulnerability research by the U.S. military[J]. National Defense Technology, 2022, 43(2): 66-74.
- [3] Lomazzi L, Cadini F, Giglio M, et al. Vulnerability assessment to projectiles: approach definition and application to helicopter platforms[J]. Defence Technology, 2022, 18(9): 1523-1537.
- [4] Konokman H E, Kayran A, Kaya M. Aircraft vulnerability assessment against fragmentation warhead[J]. Aerospace Science and Technology, 2017, 67: 215-227.
- [5] Han Lu, Han Qing, Ge Yuxue, et al. Vulnerability assessment of combat aircraft to blast loading[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2019, 233(2): 604-615.
- [6] Pei Yang, Chen Zhiwei, Wei Yuhao, et al. Method for assessing combat survivability for aircraft with wing damage[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2017, 231(5): 877-886.
- [7] Yao Xiongliang, Feng Linhan, Zhang Aman. Vulnerability assessment of aircraft guarantee system based on improved FPN[C]//2009 Chinese Control and Decision Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 5892-5897.
- [8] Brownlow L C, Goodrum C J, Sypniewski M J, et al. A multilayer network approach to vulnerability assessment for early-stage naval ship design programs[J]. Ocean Engineering, 2021, 225: 108731.
- [9] 郭超. 破片式高炮弹药对武装直升机的毁伤评估研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017: 44-52.
Guo Chao. A study to assess the damage of anti-aircraft cartridge against the armed helicopter[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2017: 44-52.
- [10] 王小强, 王琳, 闫振纲, 等. 直升机空地导弹对典型装甲目标毁伤评估方法[J]. 弹箭与制导学报, 2020, 40(5): 134-137.
Wang Xiaoqiang, Wang Lin, Yan Zhengang, et al. Evaluation method of damage helicopter field missile against typical armored target[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2020, 40(5): 134-137.
- [11] 毕广剑. 无人机复合蜂窝夹层机体结构抗毁伤性能研究[D]. 太原: 中北大学, 2022: 37-59.
Bi Guangjian. Research on the anti-damage performance of UAV composite honeycomb sandwich airframe structure[D]. Taiyuan: North University of China, 2022: 37-59.
- [12] 李彦彬, 余丽山, 赵永龙, 等. 基于相邻优属度熵权的飞机抗毁伤能力评估[J]. 航空工程进展, 2017, 8(3): 262-267.
Li Yanbin, Yu Lishan, Zhao Yonglong, et al. Assessment of aircraft anti-damage capability based on adjacent important degree with entropy weight[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2017, 8(3): 262-267.
- [13] 余丽山, 李彦彬, 赵永龙, 等. 基于BP神经网络的飞机抗毁伤能力评估[J]. 弹箭与制导学报, 2018, 38(1): 23-26.
Yu Lishan, Li Yanbin, Zhao Yonglong, et al. Assessment of aircraft anti damage capability based on BP neural network[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2018, 38(1): 23-26.
- [14] 罗泽峰, 单广超. 基于博弈均衡的蛙人运载器抗毁伤性的效能分析研究[J]. 计算机与数字工程, 2018, 46(4): 694-698.
Luo Zefeng, Shan Guangchao. Anti destruction efficiency analysis of frogman carrier based on game equilibrium[J]. Computer & Digital Engineering, 2018, 46(4): 694-698.
- [15] 张睿文, 裴扬, 侯鹏, 等. 破片式战斗部对预警机毁伤评估研究[J]. 北京理工大学学报, 2022, 42(4): 347-358.
Zhang Ruiwen, Pei Yang, Hou Peng, et al. Research on damage evaluation of fragmentation warheads against early-warning aircraft[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2022, 42(4): 347-358.
- [16] 王鑫. 装甲车辆目标易损性及数据库系统技术研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2020: 31-43.
Wang Xin. Research on target vulnerability and database system technology of armored vehicle[D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2020: 31-43.
- [17] 宋业. 典型飞机目标易损性模型及数据库系统设计[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2022: 22-41.
Song Ye. Vulnerability model and database system design for typical aircraft target[D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2022: 22-41.

- [18] 仲红亮. 典型坦克被打击毁伤评估方法研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2021: 51-61.
Zhong Hongliang. Research on evaluation method of typical tank damaged by hit[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2021: 51-61.
- [19] 梁振刚, 王鑫, 赵书超, 等. 装甲车辆目标易损性模型快速建模技术[J]. 弹箭与制导学报, 2020, 40(1): 105-109.
Liang Zhengang, Wang Xin, Zhao Shuchao, et al. Rapid modeling technique for target vulnerability model of armored vehicle[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2020, 40(1): 105-109.
- [20] 代海峰, 毕义明, 张欧亚, 等. 精导武器对导弹发射车的毁伤能力建模与仿真[J]. 军事运筹与系统工程, 2018, 32(4): 39-44.
Dai Haifeng, Bi Yiming, Zhang Ouya, et al. Damage ability modeling and simulation for precision-guided weapon to missile launcher[J]. Military Operations Research and Systems Engineering, 2018, 32(4): 39-44.
- [21] 张启瑞, 彭永. 基于参数统计的破片战斗部地面威力场及人员毁伤矩阵模型[J]. 火箭军工程大学学报, 2024, 38(4): 14-23.
Zhang Qirui, Peng Yong. Fragment warhead ground power field and personnel damage matrix model based on parameter statistics[J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2024, 38(4): 14-23.
- [22] 黄通, 高钦和, 刘志浩, 等. 基于复杂网络理论的发射平台抗毁伤网络拓扑性质研究[J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45(10): 3157-3164.
Huang Tong, Gao Qinhe, Liu Zhihao, et al. Topological properties of launch platform anti-damage network based on complex network theory[J]. Systems Engineering and Electronics, 2023, 45(10): 3157-3164.
- [23] 王树山, 韩旭光, 王新颖. 杀伤爆破弹综合威力评估方法与应用研究[J]. 兵工学报, 2017, 38(7): 1249-1254.
Wang Shushan, Han Xuguang, Wang Xinying. Research on evaluation method of comprehensive power of high explosive warhead and its application[J]. Acta Armamentarii, 2017, 38(7): 1249-1254.
- [24] 赵宇哲. 爆炸载荷作用下结构展开机理及毁伤效应研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2017: 20-21.
Zhao Yuzhe. Investigation on deployment mechanism and damage effects of structure under explosion loading[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2017: 20-21.
- [25] 黄通, 高钦和, 刘志浩, 等. 多轴特种车辆轮胎系统抗毁伤能力等毁线表征方法[J]. 国防科技大学学报, 2023, 45(2): 208-214.
Huang Tong, Gao Qinhe, Liu Zhihao, et al. Iso-damage curves characterization methods of anti-damage capability for multi-axle special vehicle tire system[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2023, 45(2): 208-214.

Damage Domain Simulation-Based Evaluation of Anti-Fragmentation Capability of Launch Vehicles

WANG Dong¹, DU Liang¹, LI Xiangyang², LIU Zhihao²,
TAO Juxing¹, WU Jimin¹

(1. A Troop of PLA Rocket Force, Honghe 661100, China;

2. Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

ABSTRACT: To address the evaluation need for anti-fragmentation capability of launch vehicles in battle-field environments, an evaluation method for anti-fragmentation capability based on damage domain characterization was proposed. First, the method constructed a fragmentation power field and vehicle damage criteria. Consequently, the damage-domain boundary was rapidly delineated using alternating boundary sampling and support vector machines. The damage area, area ratio, and damage probability were calculated using adaptive grid integration, thereby providing a multidimensional characterization of the anti-fragmentation capability of the vehicle. Finally, factors including the anti-fragmentation strength of key components, operational terrain, vehicle speed, and weapon attack accuracy were comprehensively considered in the

simulation of the anti-fragmentation capability of launch vehicles. The results show that enhancing the strength of the individual components differentially affects the overall survivability. When the strengths of the launch tube, cabin, compartment, and tires are doubled, the overall damage areas decrease by 19.3%, 9.5%, 4.1%, and 0.1%, respectively. Operational terrain significantly impacts the survivability of the vehicle, compared to flat ground, slopes of -40° and 40° around the vehicle lead to changes in the damage domains of -66.9% and 213% , respectively. The vehicle speed has a limited yet meaningful influence. At a speed of 72 m/s with a 0.8 s delay between aiming and impact, the damage probability can be reduced by 47.3%. The simulation case verifies the effectiveness of the proposed method, enabling a quantitative evaluation of the component performance for overall survivability, thereby providing decision-making recommendations for the structural optimization and operational deployment of launch vehicles.

KEYWORDS: launch vehicle; damage domain; anti-fragmentation capability; evaluation method

(编辑: 吴文冬)