

DOI: 10.20189/j.cnki.CN/61-1527/E.202506007

基于多维评估模型的智能决策方法

熊婧伊¹, 秦伟伟^{1*}, 冯倩¹, 呼卫军², 马先龙²

(1. 火箭军工程大学, 西安 710025;

2. 西北工业大学 航天学院, 西安 710072)

摘要: 为解决高超声速导弹协同作战效能评估优化问题, 提出基于多维评估模型的多波次智能决策方法。首先, 构建了将导弹毁伤概率、防御拦截概率、攻防效能优势、空间态势优势 4 个维度相结合的复合评估体系; 其次, 面向反舰作战需求, 建立了以目标毁伤概率、威胁度为优化目标的任务决策模型, 采用适用于单波次和多波次协同打击的遗传粒子混合算法 (genetic algorithm-based particle swarm optimization, GAPSO) 实现火力分配优化, 通过动态威胁评估、自适应权重调整、全局最优解保护策略等改善传统算法性能; 最后, 以典型海战场景为例进行算法验证。结果表明: GAPSO 能够显著降低目标威胁度, 其中单波次打击威胁度最大下降 56.92%, 相较传统 PSO 方法提升 40.63%, 验证了复合评估体系对复杂战场态势的适用性; 多波次打击中威胁度下降倍数逐步提高, 单位迭代效能提升 3.9 倍; 在分散态势下求解质量较 PSO 算法提升 15.12%, 展现出良好的适应能力和抗环境退化的自适应机制; 三波次总威胁下降率达 87.47%, 单位导弹效能提升 41.08%, 且单波次决策耗时不超过 1.55 s, 满足实时性需求。验证了智能决策方法在高超声速导弹协同作战中的有效性。

关键词: 集群智能决策; 作战效能评估; 启发式融合算法; 高超声速巡航弹; 多波次攻击

中图分类号: V249; TP273 **文献标志码:** A **开放科学标识码(OSID):**
文章编号: 2097-2741(2025)06-0064-11



听语音
与作者互动
聊科研

Intelligent Decision-Making Methods Based on a Multidimensional Evaluation Model

XIONG Jingyi¹, QIN Weiwei^{1*}, FENG Qian¹,
HU Weijun², MA Xianlong²

(1. Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China;

2. School of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

ABSTRACT: To solve the optimization problems in evaluating cooperative combat effectiveness of hypersonic missiles, a multi-wave intelligent decision-making method based on a multidimen-

收稿日期: 2025-04-25

修回日期: 2025-07-12

录用日期: 2025-10-18

基金项目: 国家自然科学基金 (62125305)

第一作者: 熊婧伊 (2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事集群智能决策、控制与突防研究。E-mail: 934572086@qq.com

***通信作者:** 秦伟伟 (1982—), 男, 教授, 主要从事导弹控制与突防研究。E-mail: qww-1982@163.com

引用格式: 熊婧伊, 秦伟伟, 冯倩, 等. 基于多维评估模型的智能决策方法[J]. 火箭军工程大学学报, 2025, 39 (6): 64-74.
XIONG Jingyi, QIN Weiwei, FENG Qian, et al. Intelligent decision-making methods based on a multidimensional evaluation model[J].
Journal of Rocket Force University of Engineering, 2025, 39 (6): 64-74.

sional evaluation model was proposed. First, a composite evaluation system that incorporated four dimensions, namely missile damage probability, defense and interception probability, offensive and defensive efficiency advantages, and space situation advantages, was constructed. Second, in response to the requirements of anti-ship operations, a mission decision-making model was established with the target damage probability and threat degree as optimization goals. The genetic algorithm-based particle swarm optimization (GAPSO), which was suitable for single-wave and multi-wave coordinated strikes, was used to optimize firepower allocation. The performance of traditional algorithms was improved through dynamic threat assessment, adaptive weight adjustment, and a global optimal solution protection strategy. Finally, the algorithm was validated using a typical naval battlefield scenario as an example. The results show that GAPSO significantly reduces the target threat degree, with a maximum reduction of 56.92% for single waves—40.63% higher than that of traditional methods, demonstrating the applicability of the composite evaluation system in complex battlefield situations. In multi-wave attacks, the threat degree reduction multiple gradually increases, and the unit iterative efficiency increases by 3.9 times. The solution quality increases by 15.12% in dispersed situations, indicating good adaptability and resilience mechanism to environmental degradation. Across three waves, the total threat reduction rate reaches 87.47%, unit missile efficiency increases by 41.08%, and the decision-making time of a single wave is not more than 1.55 s, meeting real-time requirements. The effectiveness of the intelligent decision-making method for hypersonic missile collaborative operations is validated.

KEYWORDS: cluster intelligent decision-making; combat effectiveness evaluation; heuristic fusion algorithm; hypersonic cruise missile; multiple wave attack

现代战争对高超声速武器的需求日益迫切,传统导弹突防能力在先进防空系统的压制下面临严峻挑战^[1]。高超声速巡航导弹凭借多平台发射、高速突防和强机动性等特点,可有效突破现代防御体系,实现对时敏目标的精确打击^[2]。然而,复杂战场环境下的高超声速导弹作战仍存在诸多关键技术瓶颈,比如精确的效能评估体系构建、复杂战场环境中的决策机制设计^[3]以及实时决策能力。

近年来,对智能技术如协同控制决策和强化学习的研究取得了显著进步,并在军事领域,如态势感知、指挥控制以及辅助决策等多个方面得到广泛应用^[4]。多弹协同任务决策的核心在于构建高精度的作战效能评估模型。党晨光等^[5]提出基于层次分析法的陆空无人集群效能评估方法,综合考虑影响作战效能的多种因素,构建了陆空无人集群协同效能评估模型;孙鹏耀等^[6]针对不确定态势下的无人集群作战效能评估问题,提出基于作战过程仿真的无人集群作战效能评估方法;针对电子对抗、舰空导弹以及舰炮武器3类武器作战效能构成要素,刘艳平^[7]建立了以反导拦截概率为核心的武器系统作战效能评估指标体系。以

上研究较为全面地对无人集群进行了效能评估,但是缺少对目标的评估和几何作战态势的考虑。方伟等^[8]基于空战双方几何态势、战机能力及威胁事件等因素,构建了超视距空战态势评估模型;李永丰等^[9]综合考量几何态势、飞行器机动性、导弹性能及环境因素,建立了空战优势函数模型。以上研究建立模型虽详细考虑了战场的几何态势情况,但未考虑目标威胁和战场多要素评估指标。综上所述,现有研究在将效能评估与战场多维态势进行系统融合方面仍存在明显不足。一是传统模型主要依靠大量固有数据进行评估,未能建立复杂战场动态环境的效能与威胁度关系;二是现有方法偏重几何态势分析,缺乏与传统模型固有数据的有机结合和关联评估。因此,本文在传统框架上进行扩展,构建融合毁伤概率、防御拦截概率、攻防效能优势及空间态势优势的多维复合指标体系;引入关联度分析算法,揭示威胁要素间的关联性,实现多维战场因素的量化评估,为复杂战场精确效能评估提供新理论框架与方法支撑。

传统空空导弹效能评估框架为飞行器作战效能评估提供了基础范式,具有普适性,但高超声速反舰作战在目标特性、作战环境、威胁模式及

高速突防特性等方面具有一定差异。本研究继承了该框架并突破了其局限,重点强化突防能力精细化建模、构建敌方目标评估体系、融合战场几何态势进行威胁评估,以弥补传统模型对动态战场态势与目标作战效能考量不足的缺陷,克服传统模型对敌方目标特性建模薄弱的问题,构建出更适用于高超声速反舰作战复杂对抗环境的效能评估体系。

1 导弹三自由度模型的建立

导弹物理模型的核心是动力学方程,描述导弹在重力、推力及气动力作用下的运动,构成高度复杂的非线性系统。针对任务决策等高层问题,若采用包含姿态变化的六自由度模型分析多弹协同,则会由于动力学系统的复杂性导致计算维度过高。为此,进行合理简化,有如下假设。

- 1) 将导弹看作质点,忽略导弹姿态变化;
- 2) 速度恒定为 V ;
- 3) 通信环境理想,无干扰延迟。

基于上述假设及牛顿第二定律,建立运动学模型为

$$\begin{cases} \dot{x}_i = v_i \cos \theta_i \cos \varphi_i \\ \dot{y}_i = v_i \cos \theta_i \sin \varphi_i \\ \dot{z}_i = v_i \sin \theta_i \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\dot{x}_i$ 、 $\dot{y}_i$ 、 $\dot{z}_i$ 为第 i 枚导弹在三维坐标系下的位置坐标; v_i 为第 i 枚导弹的恒定武器速度; θ_i 为第 i 枚导弹的航迹倾角; φ_i 为第 i 枚导弹的航向角。

2 对海协同作战效能评估体系

根据文献[10-12]中基于几何态势关系的威胁评估方法,对文献[13]中的多飞行器作战基础模型进行改进与拓展,构建导弹协同对海目标打击的作战效能评估体系。

2.1 导弹作战效能评估

主要考虑导弹的火力打击、信息支持、机动以及突防等核心能力^[14],结合数据链信息对态势感知的增强作用,采用如式(2)所示的效能评估模型^[15],权重系数主要依据参考文献[14]的方法,根据专家经验和作战原理,采用层次分析法确定,下文中的权值取值方法皆相同。

$$C = I \cdot (F \cdot k_1 + M \cdot k_2 + P \cdot k_3) \quad (2)$$

式中: I 为信息支持能力; F 为导弹的火力打击效能; M 为导弹的机动性; P 为导弹的突防概率; k_1 、 k_2 、 k_3 为权重系数。

I 的计算表达式为^[16]

$$I = a_1 \cdot S + a_2 \cdot Q \quad (3)$$

式中: S 为数据链信息支持能力,具体表示为数据链的更新频率、传输延迟、带宽或通过数据链获取的目标信息精度; Q 为导弹固有探测能力,指导弹自身导引头(如雷达、红外)的探测距离、分辨率及抗干扰能力等参数的综合体现; a_1 、 a_2 为权重系数。

S 的计算表达式为

$$S = b_1 \cdot w + b_2 \cdot V + b_3 \cdot T \quad (4)$$

式中: w 为敌方实际数量的预估与实际的相差程度,可量化为预估目标数量与真实目标数量的差值与真实目标数量的比值; V 为敌方目标特征的预估与实际的相差程度吻合程度,可基于目标类型识别的准确率来量化; T 为目标出现时刻的预估与实际相差程度; b_1 、 b_2 、 b_3 为权重系数。

M 的具体算法可表示为

$$M = \varepsilon \cdot B \quad (5)$$

式中: ε 为操纵性能系数; B 为导弹的机动性参数,可表示为

$$B = d_1 \cdot \omega + d_2 \cdot n_y + d_3 \cdot T_g + d_4 \cdot V_m + d_5 \cdot S_{ep} \quad (6)$$

式中: ω 为导弹的最大瞬时转弯角速度; n_y 为最大稳定盘旋过载; T_g 为推重比; V_m 为最大飞行马赫数; S_{ep} 为最大单位质量剩余功率; $d_1 \sim d_5$ 均为权重系数。其中,综合指数模型数据均来源于参考文献[14]。

2.2 导弹突防能力评估

为精确表征高超声速导弹对抗舰载防空系统特性^[17],构建突防概率模型^[18]为

$$P = P_m \cdot (1 - P_d) \quad (7)$$

式中: P_m 为导弹命中精度概率; P_d 为防御系统命中精度概率。

P_m 可表示为

$$P_m = w_1 \cdot C_f + w_2 \cdot G_a + w_3 \cdot D_a \quad (8)$$

式中: C_f 为导弹燃料消耗率; G_a 为导弹制导精度; D_a 为数据准确性,可量化为目标定位误差的倒数。

P_d 可表示为

$$P_d = w_4 \cdot W_c + w_5 \cdot I_a \quad (9)$$

式中: W_c 为防御系统武器能力,对应敌方防空导弹的射程、射高、速度等性能指数; I_a 为防御系统

拦截精度, 对应火控雷达的跟踪精度、响应时间; $w_1 \sim w_5$ 为权重系数。

2.3 舰船作战效能评估

参考文献[19-20]的水面舰艇综合作战能力评估体系, 提出水面舰船的综合作战能力 C_w 主要包括舰船的总体性能和舰船对空作战能力 2 个方面, 可表示为

$$C_w = F_w \cdot B_z \quad (10)$$

式中: F_w 为舰船对空作战能力; B_z 为舰船总体性能。

F_w 可表示为

$$F_w = R_k \cdot E \cdot H \cdot (D_k + P_k) \quad (11)$$

式中: R_k 为舰载雷达对空探测能力指数, 综合了雷达的探测距离、多目标处理能力以及抗杂波能力; E 为电子战能力指数, 综合了电子支援、电子对抗等系统的性能; H 为系统能力指数; D_k 为防空导弹作战能力指数, 综合了舰空导弹的射程、射高、多目标接战能力等; P_k 为火炮对空作战能力指数, 综合了近防炮的射速、反应时间等。

B_z 可表示为

$$B_z = X \cdot h_1 + K \cdot h_2 + W \cdot h_3 \quad (12)$$

式中: X 为舰船的操纵性能力, 如回转直径、舵效等; K 为舰船的快速性, 指舰船的最大航速、巡航速度等; W 为舰船的稳定性, 指在风浪中的稳性, 直接影响武器在航行中的使用条件; h_1 、 h_2 、 h_3 为分配权重。综合指数模型数据均来源于文献[20]。

2.4 导弹舰船威胁度评估

所设计的导弹集群决策打击算法的核心是基于灰色关联分析法构建动态威胁评估模型, 通过量化目标作战优势指标和计算加权关联系数矩阵, 实现高威胁目标优先打击的智能火力分配^[13]。导弹作战的几何示意如图 1 所示。其中, B_i 为我方导弹; R_j 为敌方舰船; V_{B_i} 和 V_{R_j} 分别为 B_i 和舰船目标 R_j 预测出的速度矢量; D_{ij} 为 B_i 和舰船目标 R_j 预测出的轨迹距离大小; ε_{ij} 为敌方舰船 R_j 与我方导弹 B_i 之间连线和弹体方向的夹角; ε_{ji} 为我方导弹 B_i 与敌方舰船 R_j 之间连线和舰体方向的夹角。

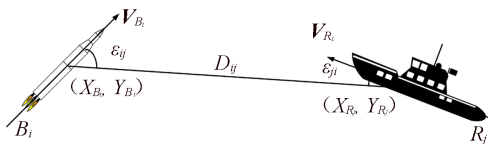


图 1 作战几何态势

Fig. 1 Combat geometry state

设 $R_{ji}^{D_{ij}}$ 、 $R_{ji}^{\varepsilon_{ij}}$ 、 $R_{ji}^{V_{ij}}$ 、 $R_{ji}^{C_{ij}}$ 分别为目标对导弹的距离优势、角度优势、速度优势和作战效能优势, $R_{ji}^{D_{ij}}$ 可表示为

$$R_{ji}^{D_{ij}} = \begin{cases} 1, & D_{ji} \leq R_{aR} \\ 1 - \frac{D_{ji} - R_{aR}}{T_{rR} - R_{aR}}, & R_{aR} < D_{ji} \leq T_{rR} \\ 0, & D_{ji} > T_{rR} \end{cases} \quad (13)$$

式中: R_{aR} 为导弹的有效作用距离; T_{rR} 为目标的最大作用距离。

目标对导弹的角度优势函数 $R_{ji}^{\varepsilon_{ij}}$ 可表示为

$$R_{ji}^{\varepsilon_{ij}} = e^{-\lambda_1 \cdot (\pi \cdot \varepsilon_{ji} / 180)} \lambda_2 \quad (14)$$

式中: ε_{ji} 为目标 j 和我方第 i 枚导弹的速度矢量与其目视线夹角角度差; λ_1 、 λ_2 为权重系数, λ_1 控制衰减速率, λ_2 控制函数形态。

由于敌方舰船目标速度较小, 与我方导弹速度相比差距较大, 因此, 可定义目标对导弹的速度优势 $R_{ji}^{V_{ij}}$ 为

$$R_{ji}^{V_{ij}} = \begin{cases} \frac{0.9}{1 + e^{30(|V_{B_i}| - 5.936) - 1.7}} + 0.1, & |V_{B_i}| < 6 \text{ Ma} \\ 1 - \frac{3|V_{B_i}|}{40 \text{ Ma}}, & 6 \text{ Ma} \leq |V_{B_i}| \leq 12 \text{ Ma} \\ 0.1, & |V_{B_i}| > 12 \text{ Ma} \end{cases} \quad (15)$$

目标对导弹的速度优势函数图像如图 2 所示。

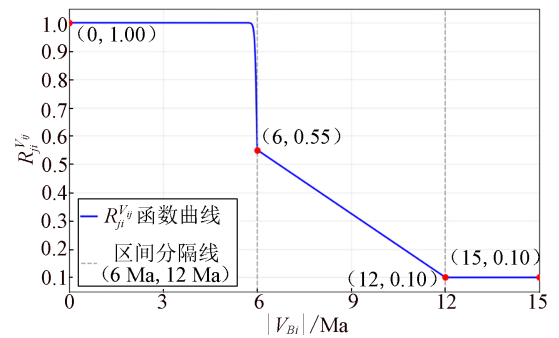


图 2 目标对导弹的速度优势函数

Fig. 2 Function of the target's speed advantage over the missile

目标对导弹的作战效能优势 $R_{ji}^{C_{ij}}$ 可表示为

$$R_{ji}^{C_{ij}} = \begin{cases} 0, & C_{wj}/C_i < 0.3 \\ 0.25, & 0.3 \leq C_{wj}/C_i < 1 \\ 0.5, & C_{wj}/C_i = 1 \\ 0.75, & 1 < C_{wj}/C_i < 1.5 \\ 1.0, & 1.5 \leq C_{wj}/C_i \end{cases} \quad (16)$$

构建导弹对目标的威胁评估矩阵 R_j 为

$$R_j = [R_{ji}^{(k)}]_{M \times 4} = \begin{bmatrix} R_{j1}^{D_1} & R_{j1}^{E_1} & R_{j1}^{V_1} & R_{j1}^{C_1} \\ R_{j2}^{D_2} & R_{j2}^{E_2} & R_{j2}^{V_2} & R_{j2}^{C_2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ R_{jM}^{D_M} & R_{jM}^{E_M} & R_{jM}^{V_M} & R_{jM}^{C_M} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$k = \{1, 2, 3, 4\}, i = \{1, 2, \dots, M\}$$

基于灰色关联理论计算目标威胁的方法步骤如下。

Step1 计算导弹威胁度矩阵

$$R_j^* = [R_{ji}^{*(k)}]_{1 \times 4} = [R_{ji}^{*(1)} R_{ji}^{*(2)} R_{ji}^{*(3)} R_{ji}^{*(4)}] \quad (19)$$

式中: $R_{ji}^{*(1)}$ 为目标距离优势; $R_{ji}^{*(2)}$ 为目标 R_j 的最大角度优势; $R_{ji}^{*(3)}$ 为目标 R_j 的最大速度优势; $R_{ji}^{*(4)}$ 为目标的最大作战效能优势。以 $R_{ji}^{*(4)}$ 为例, 即 $R_{ji}^{*(4)} = \max \{R_{ji}^{C_j}, i = 1, 2, \dots, M\}$ 。

Step2 计算关联度矩阵

在进行关联度分析时, 对于第 j 个目标的第 k 个威胁指标与第 k 个最优指标之间的关联程度 $w_{ji}^{(k)}$, 可表示为

$$w_{ji}^{(k)} = \frac{\min_{i,j} |R_{ji}^{(k)} - R_j^*| + \max_{i,j} |R_{ji}^{(k)} - R_j^*|}{|R_{ji}^{(k)} - R_j^*| + \max_{i,j} |R_{ji}^{(k)} - R_j^*|} \quad (19)$$

关联度矩阵 $w_{ji} = [w_{ji}^{(k)}]_{M \times 4}$ 。

Step3 目标的威胁度

在获得第 j 个目标的关联矩阵 w_{ji} 后, 根据得到的分配权重, 计算出目标 R_j 对我方导弹的威胁度。假设分配权重 $L = [l_1 \ l_2 \ l_3 \ l_4]$, 则目标 $R_{ji} = l_1 R_{ji}^{(1)} + l_2 R_{ji}^{(2)} + l_3 R_{ji}^{(3)} + l_4 R_{ji}^{(4)}$ 。

3 算法设计与仿真

3.1 导弹集群协同攻击决策场景构建

假设我方导弹为红方, 敌方目标舰群为蓝方, 战场中有 M 枚红方导弹协同攻击 N 个蓝方目标。记红方导弹为 $B = \{B_i, i = 1, 2, \dots, M\}$, B_i 表示第 i 枚导弹, 蓝方目标为 $R = \{R_j, j = 1, 2, \dots, N\}$, R_j 表示第 j 艘舰船。 B_{ji}^h 为作战过程中 B_i 对 R_j 的威胁度, R_{ji}^h 为 R_j 对 B_i 的威胁度。 $R_{ji}^h \cdot \prod_{i=1}^Z (1 - B_{ji}^h)^{X_{ij}}$ 表示一次协同攻击后 B_i 对 R_j 的预期剩余威胁。 Ω 表示所有可能的分配方案, π 表示其中一种具体的导弹-目标分配方案, $E(\pi)$ 表示在该种分配方案下舰船目标对我方导弹的威胁度。所构建的导弹目标函数旨在通过优化分配方案, 使敌方目标对

我方造成的综合威胁度降至最低, 即

$$E(\pi) = \min_{\pi \in \Omega} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N R_{ji}^h \cdot \prod_{i=1}^Z (1 - B_{ji}^h)^{X_{ij}} \quad (20)$$

式中: X_{ij} 为布尔值, 其取值为

$$X_{ij} = \begin{cases} 1, & B_i \text{ 攻击 } R_j \\ 0, & B_i \text{ 未攻击 } R_j \end{cases} \quad (21)$$

3.2 多波次导弹集群攻击决策算法设计

遗传粒子混合算法 (genetic algorithm-based particle swarm optimization, GAPSO) 结合 GA 全局搜索与 PSO 位置更新优势, 其核心在于基于种群平均粒子距离动态调整惯性权重。这一自适应机制能够有效弥补传统 PSO 静态参数的不足, 实现全局探索与局部收敛的优化平衡, 显著提升算法性能。其表达式为

$$D(t) = \frac{1}{mL} \sqrt{\sum_{d=1}^n (x_{id} - \bar{x}_d)^2} \quad (22)$$

式中: L 为整个搜索空间的对角线最大长度; $\bar{x}_d$ 为所有粒子在第 d 维坐标值的平均值; m 、 n 分别为粒子群的大小和纬度; x_{id} 为第 i 个粒子在第 d 维坐标的数值。由式 (22) 可知, 当种群分散或收敛时, 偏移量 0.5 可以始终使得权重 w 处于高效区间 $[0.5, 1]$ 之间, 文献 [21-24] 表明, 当 PSO 权重小于 0.4 时易早熟, 大于 1.2 时易振荡, 惯性权重 w 更新公式为

$$w = D(t) + 0.5 \quad (23)$$

单波次打击算法虽可输出最优协同方案, 但存在毁伤不足与威胁反弹等局限。为适应战场动态性及毁伤累积效应, 需采用多波次攻击模式确保威胁消除。根据文献 [25] 中的航空母舰的毁伤爆炸模型可知舰群的残存概率比较接近, 因此, 简化舰群的残存概率为 0.9 进行计算。单波次打击后, 目标作战效能更新为

$$C'_{wj} = C_{wj} \times (P_{st})^{n_j} \times P_m \quad (24)$$

式中: C'_{wj} 为更新后的第 j 个敌方目标的作战效能; P_{st} 为残存概率; n_j 为第 j 个目标上一波次受到的我方导弹打击数量。

本算法通过动态更新战场态势与目标效能矩阵, 支持多波次协同方案的迭代优化 [26], 融合毁伤累积效应与实时决策机制 [27], 其决策流程如图 3 所示。可以看出, 多波次导弹协同攻击决策算法与单波次相似。构建作战效能矩阵与时空参数的动态更新模块, 通过实时数据融合优化导弹-目标

匹配。算法基于威胁度矩阵初始化粒子状态, 并在迭代中持续更新导弹-舰群态势及作战效能 C'_{ij} , 实现多波次协同优化。

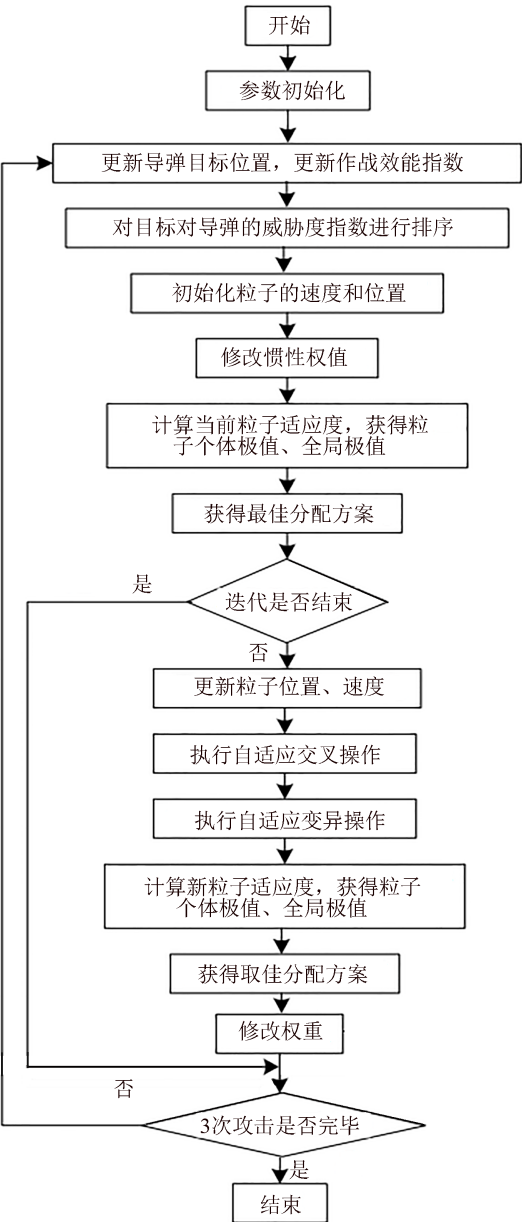


图3 多波次算法流程

Fig. 3 Flowchart of the multi-wave algorithm

3.3 对海协同作战决策算法仿真

3.3.1 单波次打击算法仿真

针对集中分布与分散分布2种打击态势, 使用多种算法对导弹单波次打击协同决策进行仿真。将GAPSO算法与2种求解导弹协同决策的传统算法GA与PSO进行对比。导弹的速度取值为8~10 Ma, 航向角取值为0~60°, 火力打击能力取值为8~10, 信息支持能力取值为8~10, 机动能力取值为4~6, 突防概率取值为0.5~1。目标速度为30

节左右, 目标航向角分别取-110°、-30°、135°。各种算法的参数设置情况如表1所示。

表1 算法参数设置

参数设置	GA	PSO	GAPSO
个体数	30	60	40
交叉概率	90%	—	—
变异概率	—	—	—
惯性因子	—	0.8	0.8
速度因子	—	1.494 45	—
学习因子	—	—	1.494 45

鉴于算法收敛较快, 图4与图5展示了3种算法100次迭代过程中前70次的迭代结果。由图4(b)与图5(b)可以看出, 无论是在集中分布还是分散分布态势下, GAPSO算法均能够有效求解并获得剩余威胁度最小的最优决策。图4(c)与5(c)展示了GAPSO算法在集中分布与分散分布2种典型态势下的武器-目标分配结果。仿真分析显示, 当导弹集中分布时, 算法生成协同饱和攻击方案, 目标1、2、3分别由导弹{2, 3, 7}、{4, 5, 9, 10}、{1, 6, 8}实施打击; 在导弹分散分布态势下, 分配结果具有空间关联特性, 目标1、2、3分别由导弹{3, 5, 6}、{1, 2, 4, 7}、{8, 9, 10}进行不同区域打击。仿真结果验证了算法在不同初始态势下的动态适应性与合理性。

2种不同态势导弹打击前后剩余威胁度变化及协同攻击算法统计数据分别如表2与表3所示。

表2 2种不同态势导弹打击前后剩余威胁度变化

Table 2 Changes in residual threat degree pre- and post-missile strikes in two different states		算法		
导弹分布	变化	GA	PSO	GAPSO
集中分布	打击前威胁度	6.69	6.73	6.37
	打击后威胁度	6.47	5.96	5.77
	威胁度下降率/%	3.30	11.44	9.42
分散分布	打击前威胁度	6.37	5.99	6.09
	打击后威胁度	5.22	5.62	4.77
	威胁度下降率/%	18.05	6.18	21.67

可以看出, GAPSO算法显著提升了解的质量。在集中分布下, 打击后威胁度较PSO和GA算法分别降低3.19%与10.82%; 分散分布下打击后威胁度较PSO和GA算法分别降低15.12%与

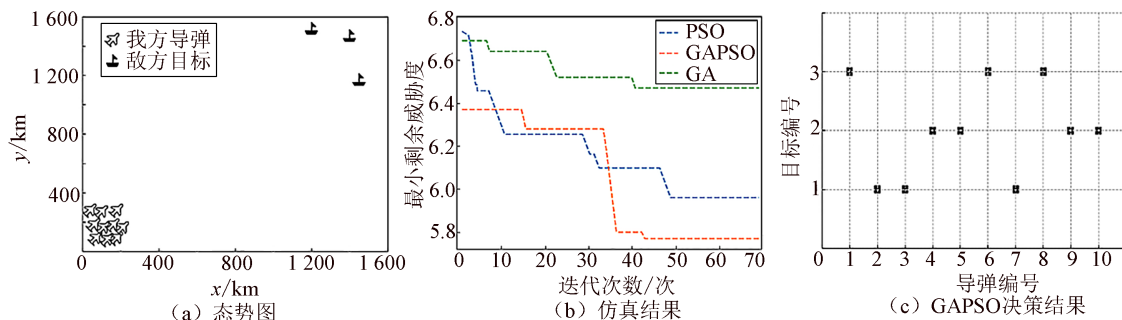


图 4 多弹集中分布仿真

Fig. 4 Simulation diagram of the centralized distribution of multiple missiles

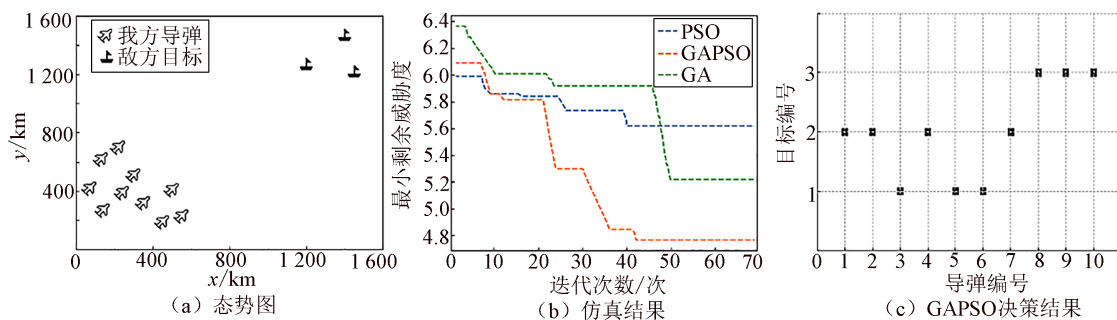


图 5 多弹分散分布仿真

Fig. 5 Simulation of dispersion distribution of multiple missiles

表 3 导弹协同攻击算法统计数据

Table 3 Statistics on missile coordinated attack algorithms

参数	最小剩余威胁度			有效更新次数/次			计算时间/s		
	GA	PSO	GAPSO	GA	PSO	GAPSO	GA	PSO	GAPSO
导弹集中分布	6.47	5.96	5.77	3	5	3	0.89	0.97	1.42
导弹分散分布	5.22	5.62	4.77	3	4	5	0.95	1.33	1.69

8.62%。该算法在集中分布下仅需 3 次迭代，与 GA 算法持平，较 PSO 算法减少 40%；分散分布时虽迭代次数略增，但以适度时间代价能够换取解质量的有效提升，说明算法能够在求解精度与效率间做到有效权衡。

GAPSO 算法结合了 GA 算法的全局交叉变异和 PSO 算法的个体经验学习，在迭代初通过种群多样性避免陷入早熟并加快了收敛速度。PSO 因惯性权重固定，分散分布下易陷局部最优导致解质量波动；GA 算法仅采用选择-交叉-变异的方式进行定向学习，难以在复杂解空间上快速获取优质解。因此，集中分布时，GAPSO 与 GA 算法解的群体协同性效果较好，PSO 局部搜索不足；分散分布下，GAPSO 通过自适应权重平衡探索与开发，在 21.67% 的威胁降幅下保持稳定收敛，而 PSO 性能退化，GA 则难以逼近最优解。GAPSO 算法在 2 种态势下均保持最优或接近最优的收敛速度与解质量，凸显了其强鲁棒性。

3.3.2 多波次打击算法仿真

设定第一个波次使用 10 枚导弹对目标进行打击，第二个波次使用 9 枚导弹，第三个波次使用 7 枚导弹，打击情况如图 6~8 所示。可以看出，所提算法在不同攻击波次下均能有效求解，并获得剩余威胁度最小的最优决策。对比分析显示，GAPSO 算法性能最优，其搜索所得的最小剩余威胁度在各波次中均为最低。随着打击波次的增加，目标剩余威胁度呈持续下降趋势，经过 3 个波次打击后，其值降至 1.09，验证了算法在多波次协同打击中的有效性与优越性。

3 个波次打击前后的剩余威胁度变化如表 4 所示，可以看出，3 种算法在 2 种态势下均能显著降低威胁度，其中，GAPSO 算法的 3 个波次总威胁下降率达 87.47%，相较于 PSO 算法提升 41.08%，且其动态权重随战场变化自适应调节，能够引导粒子群搜索高价值目标，实现第三波次威胁度下降 56.92%，相较于 PSO 算法提升 40.62%。

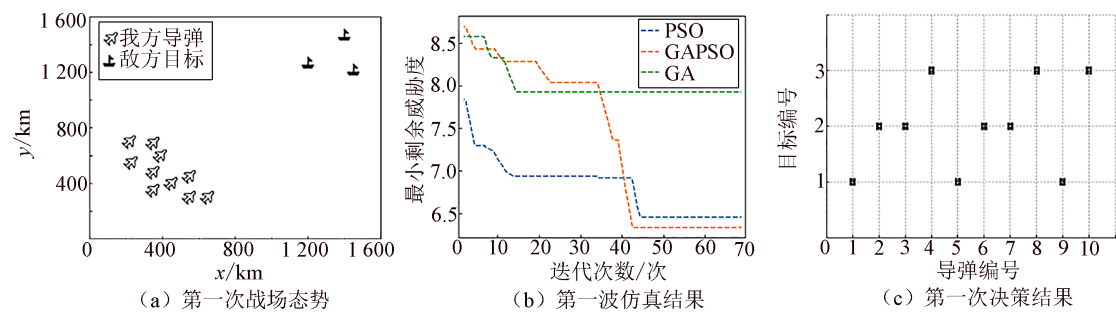


图 6 第一波次打击情况
Fig. 6 First wave of strikes

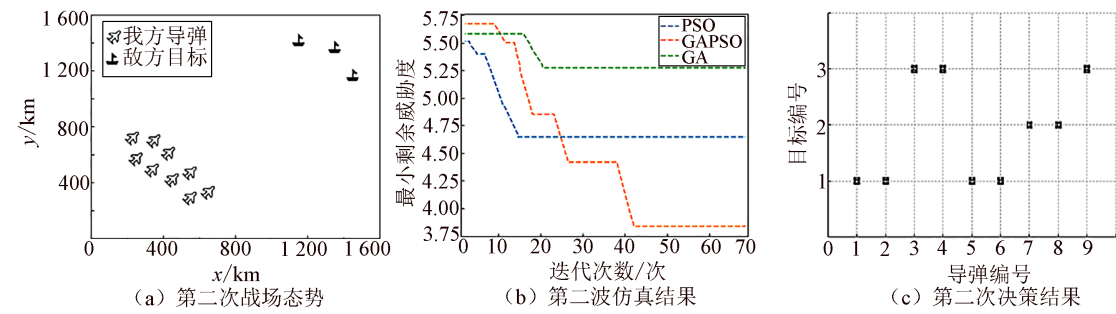


图 7 第二波次打击情况
Fig. 7 Second wave of strikes

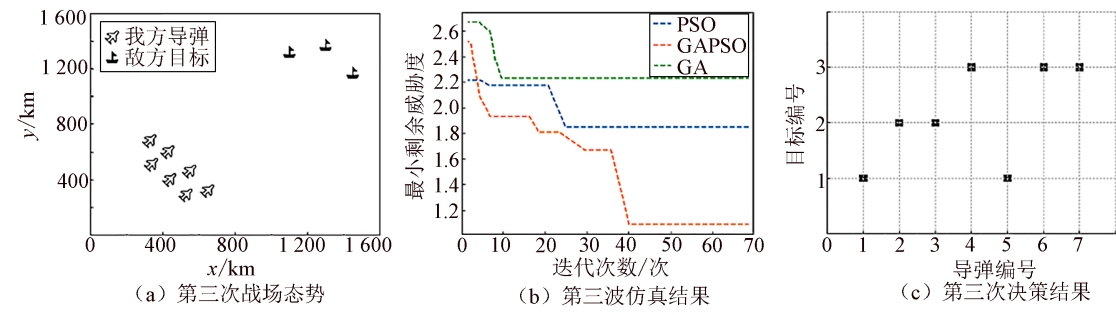


图 8 第三波次打击情况
Fig. 8 Third wave of strikes

表 4 3 个波次打击前后剩余威胁度变化

Table 4 Changes in residual threat degree pre- and post-three waves of strikes

打击波次	威胁度变化情况	算法		
		GA	PSO	GAPSO
第一波次	打击前	8.58	7.86	8.70
	打击后	7.93	6.46	6.34
	下降率/%	7.58	17.81	27.13
第二波次	打击前	5.58	5.51	5.67
	打击后	5.27	4.65	3.84
	下降率/%	5.56	15.61	32.28
第三波次	打击前	2.67	2.21	2.53
	打击后	2.23	1.85	1.09
	下降率/%	16.48	16.29	56.92

表 5 导弹协同攻击算法统计数据
Table 5 Statistics on missiles coordinated attack algorithms

参数	最小剩余威胁			有效更新次数/次			计算时间/s		
	GA	PSO	GAPSO	GA	PSO	GAPSO	GA	PSO	GAPSO
第一波次	7.93	6.46	6.34	2	3	5	0.91	1.48	1.55
第二波次	5.27	4.65	3.84	1	2	4	1.04	1.21	1.42
第三波次	2.23	1.85	1.09	2	2	5	0.77	0.92	1.19

导弹协同攻击算法统计数据如表 5 所示,可以看出,相较于 GA 算法,尽管 GAPSO 算法迭代次数更多,但结合表 4 可以看出,其单位迭代的效能提高了 3.9 倍,且耗时维持在秒级,能够满足战场的实时性要求。GA 算法随机变异难以匹配战场形势的动态变化,导致不同波次得到的结果质量不稳定; PSO 算法固定惯性权重不能适应不同威胁程度下的作战任务要求,在低威胁条件下的搜索过程依旧保持保守搜索模式,导致并未体现出明显的效率增长。所提的基于 GAPSO 的多波次协同决策算法通过递进式打击能够显著提升目标毁伤效能,在削弱敌方威胁和增强导弹生存能力方面展现出显著优势。

4 结论

面向复杂战场多弹多波次火力分配决策需求,构建了融合多维评估模型的智能决策框架,主要结论如下。

1) 所提出的融合毁伤概率、防御拦截概率、攻防效能优势及空间态势优势的多维复合评估体系,突破了传统空空导弹效能评估框架的局限,为高超声速导弹集群作战效能评估提供了新的理论框架。

2) 使用遗传粒子混合算法进行仿真,引入自适应变异算子及全局最优解保护策略,并增加动态惯性权重的自适应变异算子,在提高算法全局搜索能力和鲁棒性的同时,能更好地解决早熟收敛和陷入局部最优解的问题,算法优化效率得到大幅提升。

3) 所提出的基于多层次战场态势驱动多波次决策模型,在作战收益、实时性等关键指标上,相较于传统多目标规划方法具有显著优越性。

参考文献

[1] 罗轸柳, 张娟, 李辉. 无人机集群基于多目标的速度

决策与任务分配[J]. 火力与指挥控制, 2024, 49(9): 25-31.

LUO Z L, ZHANG J, LI H. Velocity decision-making and task allocation of UAV swarm based on multi-objective optimization[J]. Fire Control & Command Control, 2024, 49(9): 25-31.

[2] 郝晓雪, 王忠, 韩光松. 高超声速飞行器作战运用探要[J]. 舰船电子工程, 2021, 41(7): 12-16.

HAO X X, WANG Z, HAN G S. Discussion on the operational applications of hypersonic vehicles [J]. Ship Electronic Engineering, 2021, 41(7): 12-16.

[3] 朱学耕, 刘家路. 多属性决策方法在战场目标威胁评估中的研究与应用现状[J/OL]. 现代防御技术, (2023-08-17) [2025-07-02]. <https://link.cnki.net/urlid/11.3019.TJ.20230817.1418.012>.

ZHU X G, LIU J L. Research and application status of multiple attributive decision-making methods in battlefield target threat assessment[J/OL]. Modern Defence Technology, (2023-08-17) [2025-07-02]. <https://link.cnki.net/urlid/11.3019.TJ.20230817.1418.012>.

[4] 蒲志强, 易建强, 刘振, 等. 知识和数据协同驱动的群体智能决策方法研究综述[J]. 自动化学报, 2022, 48(3): 627-643.

PU Z Q, YI J Q, LIU Z, et al. Knowledge-based and data-driven integrating methodologies for collective intelligence decision making: a survey[J]. Acta Automatica Sinica, 2022, 48(3): 627-643.

[5] 党晨光, 李超, 封慧勇, 等. 陆空无人集群协同作战效能评估[J]. 兵器装备工程学报, 2025, 46(8): 53-59.

DANG C G, LI C, FENG H Y, et al. Evaluation of the effectiveness of air-ground unmanned swarm cooperative operations[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2025, 46(8): 53-59.

[6] 孙鹏耀, 黄炎焱, 王凯生, 等. 不确定态势下无人机群协同作战效能评估[J]. 指挥控制与仿真, 2025, 47(1): 10-22.

SUN P Y, HUANG Y Y, WANG K S, et al.

- Evaluation of combat effectiveness of unmanned aerial vehicle group in uncertain situations[J]. Command Control & Simulation, 2025, 47(1): 10-22.
- [7] 刘艳平. 单舰防空反导综合作战效能评估[J]. 海军航空大学学报, 2022, 37(2): 224-230.
- LIU Y P. Single ship anti-air and anti-missile integrated operational effectiveness[J]. Journal of Naval Aviation University, 2022, 37(2): 224-230.
- [8] 方伟, 方君, 徐涛, 等. 超视距空战仿真中的态势评估方法[J]. 计算机仿真, 2019, 36(10): 29-33, 74.
- FANG W, FANG J, XU T, et al. Method of situation assessment in beyond visual range air combat simulation[J]. Computer Simulation, 2019, 36(10): 29-33, 74.
- [9] 李永丰, 吕永玺, 史静平, 等. 深度确定性策略梯度和预测相结合的无人机空战决策研究[J]. 西北工业大学学报, 2023, 41(1): 56-64.
- LI Y F, LYU Y X, SHI J P, et al. UAV's air combat decision-making based on deep deterministic policy gradient and prediction[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2023, 41(1): 56-64.
- [10] 徐振森, 王建军, 赵桑佳, 等. 基于粒子群算法的空战决策问题研究[J]. 火力与指挥控制, 2023, 48(7): 66-73.
- XU Z S, WANG J J, ZHAO S J, et al. Research on air combat decision-making problems based on particle swarm optimization algorithm[J]. Fire Control & Command Control, 2023, 48(7): 66-73.
- [11] 沈越, 范国梁, 李丽娟. 基于A-HPSO算法的无人机集群协同目标分配[J]. 计算机仿真, 2024, 41(9): 18-25.
- SHEN Y, FAN G L, LI L J. Collaborative target allocation of UAV cluster based on A-HPSO algorithm[J]. Computer Simulation, 2024, 41(9): 18-25.
- [12] 姜龙亭, 寇雅楠, 王栋, 等. 动态变权重的近距空战态势评估方法[J]. 电光与控制, 2019, 26(4): 1-5.
- JIANG L T, KOU Y N, WANG D, et al. A dynamic variable weight method for situation assessment in close-range air combat[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(4): 1-5.
- [13] 罗德林, 段海滨, 吴顺详, 等. 基于启发式蚁群算法的协同多目标攻击空战决策研究[J]. 航空学报, 2006, 27(6): 1166-1170.
- LUO D L, DUAN H B, WU S X, et al. Research on air combat decision-making for cooperative multiple target attack using heuristic ant colony algorithm[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 27(6): 1166-1170.
- [14] 董彦非, 王礼沅, 张恒喜. 战斗机空战效能评估的综合指数模型[J]. 航空学报, 2006, 27(6): 1084-1087.
- DONG Y F, WANG L Y, ZHANG H X. Synthesized index model for fighter plane air combat effectiveness assessment[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 27(6): 1084-1087.
- [15] 金亚. 反舰导弹作战效能模型与算法分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021: 47-60.
- JIN Y. Model and algorithm analysis of anti-ship missiles combat effectiveness[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021: 47-60.
- [16] 卜晓东, 张军. 基于OODA循环的反舰导弹作战效能评估研究[J]. 现代防御技术, 2021, 49(2): 13-19.
- BU X D, ZHANG J. Research on operational effectiveness evaluation of antiship missile based on OODA cycle[J]. Modern Defence Technology, 2021, 49(2): 13-19.
- [17] 符拯, 涂震飏. 导弹武器系统作战效能评估模型研究[J]. 新技术新工艺, 2017(7): 35-38.
- FU Z, TU Z B. Research on evaluation model of operational effectiveness for missile weapon systems[J]. New Technology & New Process, 2017(7): 35-38.
- [18] DOU J H, YU J X, WU S. A new operational effectiveness evaluation methodology for ship-to-air missile weapon system[J]. Journal of Computational Intelligence and Electronic Systems, 2013, 2(2): 122-127.
- [19] 张恒, 朱军. 计及风浪环境影响的水面舰船作战能力评估方法[J]. 中国舰船研究, 2017, 12(3): 36-42.
- ZHANG H, ZHU J. Combat capability evaluation method of surface warship considering impact of wind and waves[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2017, 12(3): 36-42.
- [20] 吕建伟, 李积源, 张鑫. 舰船作战能力评估的效用函数方法研究[J]. 船舶工程, 1999(4): 58-61, 64.
- LYU J W, LI J Y, ZHANG X. Application of utility function method for warship combat capability evaluation[J]. Ship Engineering, 1999(4): 58-61, 64.
- [21] 张欣, 郑松, 郑小青, 等. 带有非线性惯性权重和 t 分布扰动的粒子群优化算法[J]. 杭州电子科技大学学报(自然科学版), 2025, 45(2): 13-19, 27.

- ZHANG X, ZHENG S, ZHENG X Q, et al. Particle swarm optimization algorithm with non-linear inertia weight and t -distribution mutation[J]. Journal of Hangzhou Dianzi University (Natural Sciences), 2025, 45(2): 13-19, 27.
- [22] 房波, 姬翔, 王梓帆, 等. 基于改进惯性权重的 PSO 算法[J]. 电子制作, 2024, 32(15): 71-74.
- [23] 石博博, 朱嘉晟, 杨天慈, 等. 改进粒子群权重的水下机器人路径规划[J]. 舰船科学技术, 2025, 47(5): 159-165.
- SHI B B, ZHU J S, YANG T C, et al. Path planning of underwater vehicle based on improved particle swarm weight[J]. Ship Science and Technology, 2025, 47(5): 159-165.
- [24] 朱润泽, 赵静, 蒋国平, 等. 基于改进粒子群算法的无人机三维路径规划[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2024, 44(6): 120-127.
- ZHU R Z, ZHAO J, JIANG G P, et al. UAV 3D path planning based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2024, 44(6): 120-127.
- [25] 张凯, 胡玉龙, 熊治国, 等. 基于改进的接触爆炸毁伤模型的航空母舰不沉性评估[J]. 中国舰船研究, 2014, 9(3): 1-7.
- ZHANG K, HU Y L, XIONG Z G, et al. The floodability assessment of aircraft carriers based on a modified contact explosion damage model[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2014, 9(3): 1-7.
- [26] 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.
- ZHOU L W, WANG J, LI X D. Estimation of ammunition damage effectiveness with consideration of cumulative effect[J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2024, 38(3): 18-25.
- [27] 罗俊豪, 张克钊, 王硕, 等. 线列式破片战斗部对导弹目标毁伤效能分析[J]. 火箭军工程大学学报, 2024, 38(3): 26-37.
- LUO J H, ZHANG K F, WANG S, et al. Damage effectiveness analysis of linear warhead to missile target[J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2024, 38(3): 26-37.

(编辑: 于福兴)