

基于粒子群算法的登陆破障效能优化方法

伍一峰, 屠义强

陆军工程大学野战工程学院, 江苏 南京

收稿日期: 2026年7月6日; 录用日期: 2026年7月30日; 发布日期: 2026年8月7日

摘要

针对登陆破障方案中多类型装备协同、多约束条件耦合、多工程实施目标权衡的决策难点, 提出了一种基于粒子群算法的登陆破障效能优化方法。基于ADC (Availability-Dependability-Capability) 效能评估框架, 构建了涵盖可用性、可信性和固有能力三个维度的登陆破障效能三级评价指标体系, 针对破障弹药类和无人机类装备分别设置了差异化的三级指标; 建立了以综合效能最大化为目标、包含时间约束、资源约束、毁伤效果约束、装备数量约束和安全约束在内的非线性约束优化模型; 采用粒子群算法对效能函数进行全局寻优, 设计了实数编码方案、动态罚函数适应度构造方法和自适应参数调整策略。仿真结果表明, 粒子群算法在收敛速度和求解质量方面均优于遗传算法, 验证了方法在处理登陆破障效能优化问题上的有效性。不同约束强度下的敏感性分析表明, 破障时限为60 min可兼顾效能与可行性。方法可为登陆破障方案的辅助决策提供有效支撑。

关键词

登陆破障, 效能评估, 粒子群算法, 约束优化, ADC模型

Optimization Method for Landing Obstacle Breaching Effectiveness Based on Particle Swarm Optimization

Yifeng Wu, Yiqiang Tu

College of Field Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing Jiangsu

Received: July 6, 2026; accepted: July 30, 2026; published: August 7, 2026

Abstract

To address the decision-making difficulties involving multi-type equipment coordination, multi-

constraint coupling, and multi-objective trade-offs in landing obstacle breaching plan formulation, this paper proposes an optimization method based on Particle Swarm Optimization (PSO). Based on the ADC (Availability-Dependability-Capability) effectiveness evaluation framework, a three-level evaluation index system for landing obstacle breaching effectiveness is constructed, covering three dimensions of availability, dependability, and capability, with differentiated tertiary indicators for breaching ammunition and UAV equipment. A nonlinear constrained optimization model is established with the objective of maximizing comprehensive effectiveness, incorporating time constraints, resource constraints, damage effect constraints, equipment quantity constraints, and safety constraints. The PSO algorithm is employed for global optimization of the effectiveness function, with a real-number encoding scheme, dynamic penalty function fitness construction method, and adaptive parameter adjustment strategy designed. Simulation results demonstrate that PSO outperforms Genetic Algorithm in both convergence speed and solution quality, verifying the effectiveness of the proposed method in solving the landing obstacle breaching effectiveness optimization problem. Sensitivity analysis under different constraint intensities indicates that setting the breaching time to 60 minutes can balance effectiveness and feasibility. The method can provide effective support for decision-making in landing obstacle breaching plan formulation.

Keywords

Landing Obstacle Breaching, Effectiveness Evaluation, Particle Swarm Optimization, Constrained Optimization, ADC Model

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

岸滩区域障碍清除任务中, 滩头障碍破除是通道构建的核心前提。防御方通常在水际滩头设置轨条砦、三角锥、地雷场、阻绝墙等多层次、多类型的障碍体系, 形成绵密的防御屏障。破障行动的成败直接关系到整个登陆行动的进程, 科学评估登陆破障效能并制定最优破障方案, 具有重要的理论价值和现实意义。

登陆破障效能评估涉及多类型装备、多约束条件和多工程实施目标之间的复杂权衡[1]。破障方案制定主要依赖于指挥员的经验判断和基于简单算术模型的静态计算, 难以全面反映破障过程中装备可用性、任务可靠性与固有作业能力之间的耦合关系[2]-[4], 也缺乏对资源配置、时序安排和安全约束等复杂因素的系统化处理。随着工程仿真技术和智能优化算法的发展[5], 为解决这一复杂决策问题提供了新的技术路径。

针对登陆破障效能优化问题, 构建了面向登陆破障任务的效能评价指标体系, 建立了考虑多约束条件的效能函数优化模型, 并通过粒子群算法实现破障方案参数的全局寻优[6]-[8], 可为登陆行动的多目标破障优化提供决策支撑。

2. 登陆破障效能模型

2.1. 登陆破障效能评价模型

登陆破障效能指特定滩岸工况下, 破障力量在限定时间内完成预定破障任务的能力度量[3]。基于ADC (Availability-Dependability-Capability)效能评估框架, 构建登陆破障效能的三级评价指标体系[4], 将

效能分解为可用性、可信性和固有能力三个维度[3]。可用性刻画装备在任务开始时刻处于正常工作状态的概率, 由装备的可靠性(MTBF)和维修性(MTTR)共同决定; 可信性反映装备在任务执行过程中状态保持或转移的概率特征; 固有能力则表征装备在正常工作状态下完成规定任务的性能水平[2]。

登陆破障综合效能的一级指标为 E , 二级指标为可用性 A 、可信性 D 、固有能力 C 三项, 三级指标根据不同破障装备类型差异化设置。指标量纲进行归一化处理后加权合成, 可用性 A 由 T_{MTBF} 和 T_{MTTR} 计算得到, 可信性 D 由任务可靠度 $R(t)$ 表征, 固有能力 C 由各类装备的三级指标加权合成。指标体系及条件变量如表 1 所示。

Table 1. Evaluation index system of landing obstacle breaching effectiveness

表 1. 登陆破障效能评价指标体系

一级指标	二级指标	三级指标
综合效能 E	可用性 A	平均故障间隔时间 T_{MTBF}
		平均故障修复时间 T_{MTTR}
	可信性 D	任务可靠度 $R(t)$
		毁伤半径 r_d
	固有能力 C (弹药类)	穿透深度 h_p
		毁伤概率 p_k
	固有能力 C (无人机类)	飞行能力 F_t
		导引能力 G_u
		破障能力 A_u
		生存能力 S_u

2.2. 综合效能函数

登陆破障通常为多装备协同作业。设共有 M 类破障装备参与任务, 第 i 类装备的单装效能 E_i 由可用性 A_i 、可信性 D_i 和固有能力 C_i 三部分构成。破障任务各环节呈串联关系, 任一阶段不达标将导致后续行动无法实施。多装备协同综合效能函数定义为各类装备单装效能的乘积:

$$E(x) = \prod_{i=1}^M E_i(x) = \prod_{i=1}^M [A_i(x) \cdot D_i(x) \cdot C_i(x)] \quad (1)$$

式中, x 为决策变量向量, 包括各型装备数量、弹药分配及时序安排。

(1) 可用性 A_i 由平均故障间隔时间 T_{MTBF} 和平均故障修复时间 T_{MTTR} 计算, 公式为:

$$A_i = \frac{T_{MTBF}}{T_{MTBF} + T_{MTTR}} \quad (2)$$

(2) 可信性 D_i 由任务可靠度表征, 设故障率为 λ_i , 任务持续时间为 $T_i(x)$, 计算公式为:

$$D_i = e^{-\lambda_i T_i(x)} \quad (3)$$

(3) 弹药类固有能力 C_i 由毁伤半径、穿透深度、毁伤概率加权合成, 计算公式为:

$$C_{mun} = w_r \bar{r}_d + w_h \bar{h}_p + w_p \bar{p}_k \quad (4)$$

(4) 无人机类固有能力 C_i 由飞行能力、导引能力、破障能力、生存能力加权合成, 计算公式为:

$$C_{uav} = \omega_F F_t + \omega_G G_u + \omega_A A_u + \omega_S S_u \quad (5)$$

2.3. 关键性能量化模型

为明确决策变量与破障性能指标的量化关系, 首先定义决策变量向量:

$$x = [n_1, n_2] \quad (6)$$

式中: n_1 为破障弹投入数量, n_2 为破障无人机投入数量, 均为正整数决策变量。

(1) 作业时间量化模型

设第 i 类装备的单装单位作业效率为 v_i (单位时间完成的破障工作量), 总破障任务量为 Q , 则第 i 类装备的单独作业时长为:

$$T_i = \frac{Q}{n_i \cdot v_i} \quad (7)$$

式中: v_i 为装备固有作业效率, 由装备性能决定, 为固定参数。

考虑多类装备并行协同作业, 总破障时间由耗时最长的作业环节决定, 即:

$$T = \max(T_1, T_2, \dots, T_k) \quad (8)$$

式中: k 为装备类型总数, 本文中 $k = 2$ 。

(2) 毁伤效果量化模型

设障碍区正面宽度为 W_0 , 纵深为 L_0 , 总面积为 $S_0 = W_0 \cdot L_0$ 。

a. 障碍清除率

单发破障弹的有效毁伤面积为 $S_d = \pi r_d^2$, 其中 r_d 为毁伤半径; 考虑弹药落点重叠, 引入重叠修正系数 η ($0 < \eta < 1$, 本文取 0.75), 则 n_1 发破障弹的总有效毁伤面积为:

$$S_{total} = n_1 \cdot S_d \cdot \eta \quad (9)$$

障碍清除率为总有效毁伤面积与障碍区总面积的比值:

$$P = \frac{S_{total}}{S_0} \times 100 \quad (10)$$

b. 通路宽度沿障碍区纵深方向连续布设弹药时, 通路宽度为沿正面方向的有效毁伤叠加宽度。设沿正面布设的弹药列数为 m , 则通路宽度为:

$$W = m \cdot 2r_d \cdot \eta \quad (11)$$

式中: 列数 m 与总弹药量 n_1 正相关, 由弹药分配方案决定。

2.4. 约束条件

登陆破障效能优化需在满足实际工程实施限制的前提下寻求最优方案, 须考虑以下多类约束条件。

(1) 时间约束

破障任务须在登陆发起前的规定时间窗口内完成。设第 i 类装备的作业时间为 $T_i(x)$, 整体破障时间 T_{breach} 由各工序总时长决定, 且应满足:

$$T_{breach}(x) \leq T_{max} \quad (12)$$

式中, $T_{breach}(x) \leq T_{max}$ 为工程实施计划允许的最大破障时间。

(2) 资源约束

各类破障弹药、燃油、备件等资源消耗量不得超过可用总量, 公式表示为:

$$\sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^K c_{ik} x_{ik} \leq C_{total} \quad (13)$$

式中, c_{ik} 为第 i 类装备使用第 k 种资源的单位消耗量, x_{ik} 为消耗数量, C_{total} 为资源总可用量。

(3) 毁伤效果约束

破障完成后须满足通路宽度和障碍清除率等工程指标要求, 公式表示为:

$$W_{path}(x) \geq W_{min}, R_{clear}(x) \geq R_{min} \quad (14)$$

式中, $W_{path}(x)$ 为实际开辟通路宽度, $R_{clear}(x)$ 为障碍清除率, W_{min} 和 R_{min} 分别为工程标准规定的最低要求。

(4) 装备数量约束

各类装备的可用数量受编制和装载条件限制, 公式表示为:

$$0 \leq n_i \leq n_{i,max}, \quad n_i \in \mathbb{Z} \quad (15)$$

式中, n_i 为第 i 类装备投入数量, $n_{i,max}$ 为第 i 类装备最大可用数量。

(5) 安全约束

破障行动产生的附带损伤不得超过规定阈值, 破障弹药的安全使用间距须满足安全标准, 不等式约束表示为:

$$S_{safe}(x) \geq S_{min} \quad (16)$$

式中, $S_{safe}(x)$ 为安全指标值, S_{min} 为安全阈值。

综上所述, 模型具有非线性目标函数、非线性约束和整数变量耦合的特征, 难以通过解析方法直接求解, 需借助智能优化算法进行数值寻优。

3. 基于粒子群算法的约束优化求解

3.1. 粒子群算法基本原理

粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)由 Kennedy 和 Eberhart 于 1995 年提出[6], 其基本思想源于对鸟群觅食行为的模拟[7]。在 PSO 算法中, 每个优化问题的候选解被抽象为搜索空间中的一个“粒子”, 每个粒子具有位置和速度两个属性, 分别代表当前解及其调整方向。所有粒子通过跟踪个体历史最优位置和群体全局最优位置, 在搜索空间中迭代更新自己的速度和位置, 逐步逼近最优解。算法的主要优势在于结构简单、收敛速度快、参数调整灵活, 可通过惯性权重和学习因子的调节平衡全局探索与局部开发能力, 适合于登陆破障效能优化这类目标函数非线性、约束条件复杂的优化问题求解。

3.2. 算法设计

(1) 编码方案

采用实数编码, 粒子位置向量直接映射为破障方案参数组合[8], 包括各型破障装备数量、弹药分配比例以及关键工序的时间分配。考虑到装备数量必须为整数, 对 PSO 算法优化后的实数值采用四舍五入取整处理, 确保解的可行性。

(2) 适应度函数

为处理破障的多类约束条件, 采用动态罚函数法将约束优化问题转化为无约束优化问题[9]。适应度函数由原目标函数减去各项约束违反量的惩罚项构成。当某一约束条件被违反时, 施加相应的惩罚, 当所有约束均满足时, 惩罚项为零[10]。

为增强算法在迭代前期的探索能力和后期的约束满足精度, 采用自适应惩罚策略, 迭代初期惩罚系数较小, 允许粒子充分探索不可行区域以寻找潜在优质解, 迭代后期惩罚系数逐渐增大, 引导粒子向可行域收敛。

(3) 速度和位置更新

粒子通过跟踪个体历史最优位置和群体全局最优位置来更新自身的速度和位置。惯性权重采用线性递减策略，从较大值逐步减小至较小值，以平衡算法的全局搜索和局部精化能力。当粒子位置超出可行域边界时，采用边界吸收策略进行修正。学习因子控制粒子向个体最优和全局最优学习的权重，通常取相等值。

3.3. 算法流程

基于粒子群算法的登陆破障效能优化流程如图 1 所示，具体步骤如下：

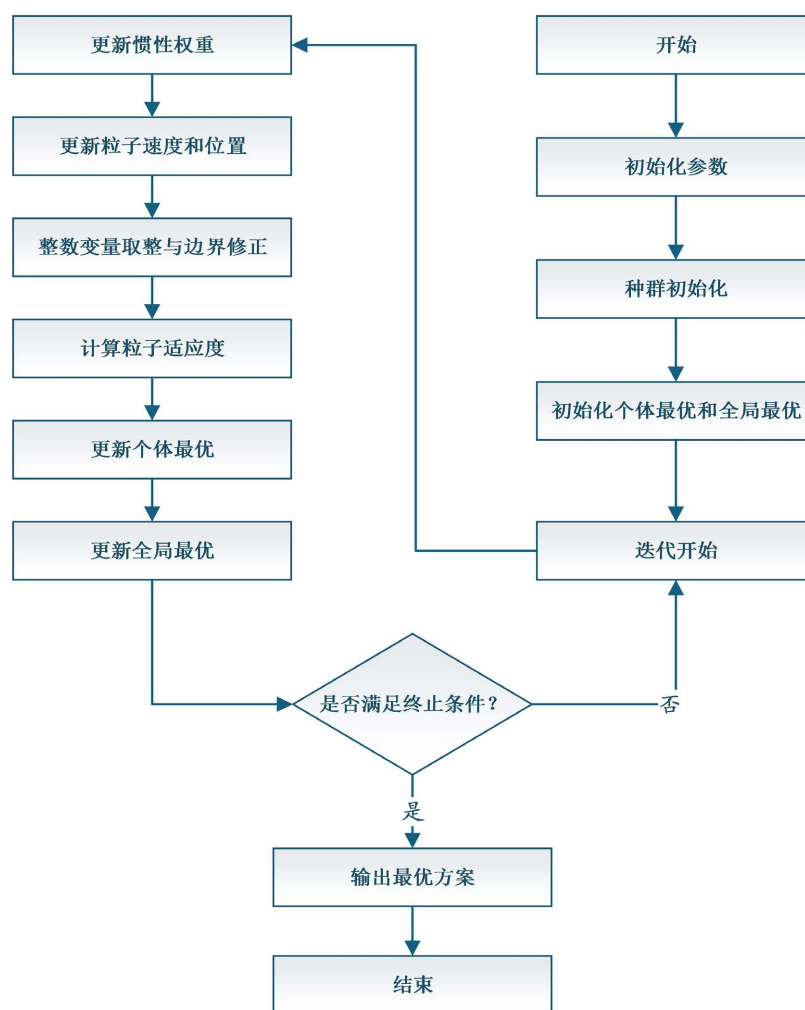


Figure 1. Flow chart of particle swarm optimization

图 1. 粒子群算法优化流程图

步骤 1：参数初始化。设定种群规模、最大迭代次数、学习因子、惯性权重上下界、惩罚系数初值及增长系数。

步骤 2：种群初始化。在决策变量可行域内随机生成所有粒子的位置和速度，对整数型变量进行取整处理。计算各粒子初始适应度值，初始化个体最优和全局最优。

步骤 3：迭代优化。重复执行以下操作直至满足终止条件：

- (a) 按线性递减公式计算当前惯性权重；
- (b) 按速度和位置更新公式更新各粒子；
- (c) 对整数型变量取整，对越界变量进行边界修正；
- (d) 计算各粒子的适应度值；
- (e) 更新个体最优位置；
- (f) 更新全局最优位置。

步骤 4：输出结果。输出全局最优位置及其对应的最优效能值。

4. 仿真实验与分析

4.1. 仿真实验设定

设定登陆正面岸滩障碍区宽度 100 m、纵深 50 m，障碍类型包括三角锥、轨条砦和雷场。要求破障总时间不超过 60 min，开辟通路宽度不小于 8 m，障碍清除率不低于 85%。破障装备包括破障弹和破障无人机两类。破障弹依托配套工程发射装置实施破障，射程 200 m、毁伤半径 2 m、单发毁伤概率 0.75；破障无人机携带破障弹药，载弹量 2 枚、航时 30 min。资源限制为破障弹总量 80 发、无人机 12 架。装备可靠性参数见表 2，其中 MTBF、MTTR 取值参考工程装备可靠性统计通用标准与同类破障装备公开文献的典型值[11]，故障率由公式 $\lambda = 1/\text{MTBF}$ 计算得到，符合工程装备可靠性基本规律。

Table 2. Equipment reliability parameters

表 2. 装备可靠性参数

装备类型	MTBF/h	MTTR/h	故障率/(h)
破障弹	50	1.5	0.02
破障无人机	30	2.0	0.033

固有能力权重系数采用层次分析法(AHP)确定[11][12]：邀请 5 名工程破障领域专家，依据各指标对破障效能的影响程度构造判断矩阵，经一致性检验($\text{CR} = 0.062 < 0.1$ ，满足一致性要求)后计算得到最终权重。其中弹药类权重取 $w_r = 0.30$ (毁伤半径)、 $w_h = 0.35$ (穿透深度)、 $w_p = 0.35$ (毁伤概率)；无人机类权重取 $\omega_F = 0.25$ (飞行能力)、 $\omega_G = 0.20$ (导引能力)、 $\omega_A = 0.35$ (破障能力)、 $\omega_S = 0.20$ (生存能力)。

4.2. 算法参数设置

粒子群算法参数设置如表 3 所示。

Table 3. Parameters of particle swarm optimization

表 3. 粒子群算法参数

参数	符号	取值
种群规模	N	50
最大迭代次数	T_{max}	200
学习因子	c_1, c_2	2.0, 2.0
惯性权重上界	ω_{max}	0.9
惯性权重下界	ω_{min}	0.4
惩罚系数初值	$\lambda_{i,0}$	100
惩罚增长系数	α	0.5

4.3. 仿真结果分析

(1) 优化结果

算法迭代在第 118 代趋于收敛，全局最优适应度值为 0.876。最优破障方案为破障弹 58 发、无人机 8 架，破障用时 52 min，通路宽度 9.2 m，障碍清除率 89.3%。

(2) 收敛性分析

适应度收敛曲线显示算法在前 50 代快速上升，第 50 代至第 118 代逐步逼近最优解，第 118 代以后适应度值保持稳定。算法在迭代过程中未出现明显的早熟收敛现象，自适应惯性权重策略有效维持了种群的多样性，使得算法能够持续搜索直至逼近全局最优解。算法迭代过程如图 2 所示。

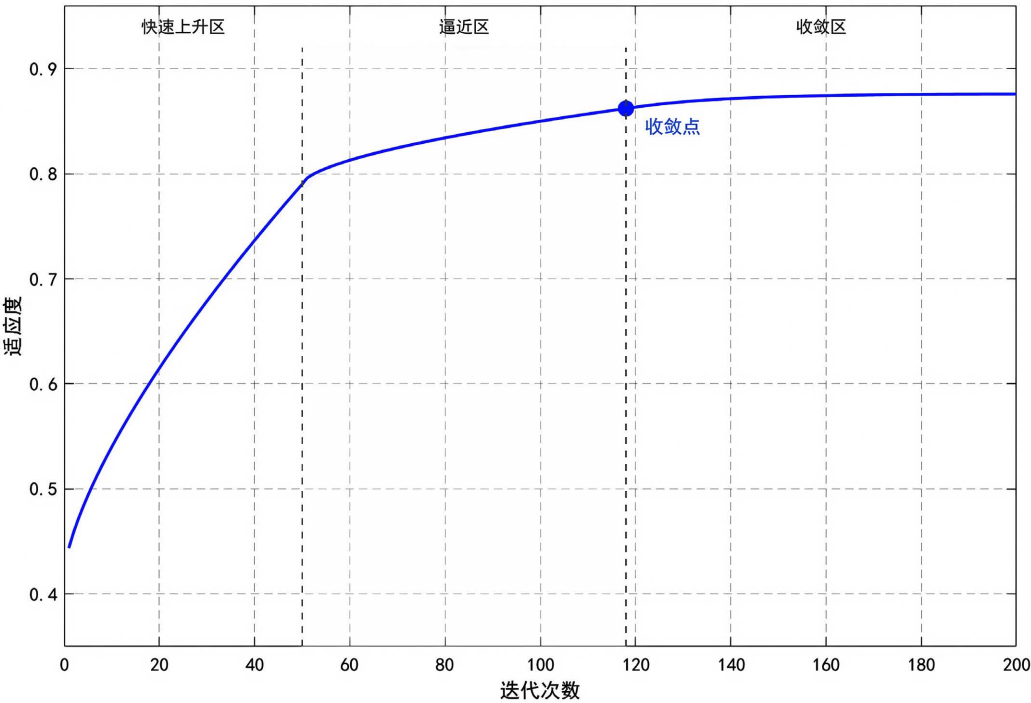


Figure 2. Convergence curve of fitness value
图 2. 适应度值收敛曲线

(3) 最优方案分析

为验证最优方案在各约束条件下的可行性，对最优方案进行约束满足性校验，结果如表 4 所示。

Table 4. Constraint satisfaction verification of optimal scheme
表 4. 最优方案约束满足性校验

约束类型	约束要求	实际值	是否满足
时间约束	≤ 60 min	52 min	满足
通路宽度约束	≥ 8 m	9.2 m	满足
清除率约束	$\geq 85\%$	89.3%	满足
破障弹资源约束	≤ 80 发	58 发	满足
无人机资源约束	≤ 12 架	8 架	满足
安全约束	$\geq$ 阈值	达标	满足

(4) 不同约束强度下的效能变化

当最大故障时间约束小于 50 min 时, 效能受时间约束主导, 随允许时间增加而显著上升。当时间约束放宽至 60 min 以上后, 效能增长趋于平缓, 此时资源约束和毁伤效果约束成为主导因素。在工程方案筹划中, 将故障时限设定 60 min 可兼顾效能与可行性, 进一步压缩时间将导致效能快速下降。最优综合效能的变化趋势如图 3 所示。

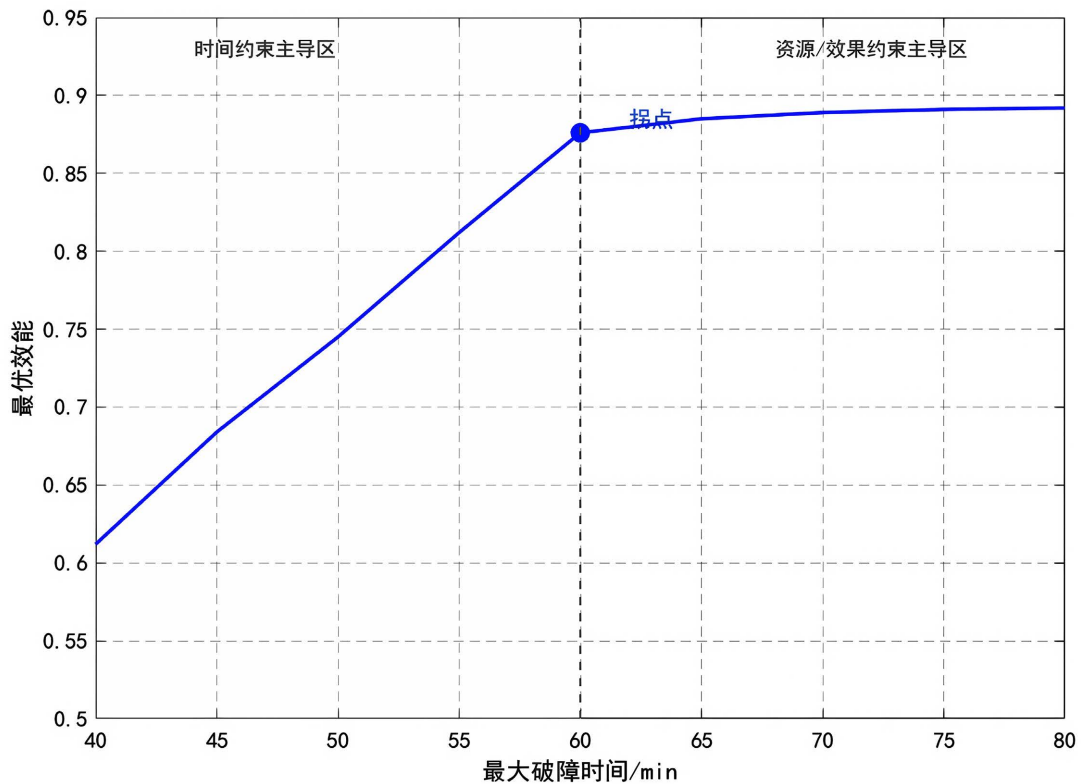


Figure 3. Optimal effectiveness under different time constraints

图 3. 不同时间约束下的最优效能

4.4. 算法性能对比

为验证粒子群算法在登陆破障效能优化问题的适用性, 将其与遗传算法(GA)进行性能对比[13][14]。两种算法采用相同的种群规模 50、最大迭代次数 200 和适应度函数, 遗传算法的交叉概率设为 0.8, 变异概率设为 0.1。PSO 算法在收敛速度和求解质量两方面均优于遗传算法, 表明粒子群算法通过群体信息共享机制能够更高效地搜索可行域, 在登陆破障效能优化问题上具有良好的适用性。对比结果如表 5 所示。

Table 5. Performance comparison between PSO and GA

表 5. PSO 与 GA 算法性能对比

对比指标	PSO	GA
最优适应度	0.876	0.851
收敛代数	118	176
平均运行时间/s	3.2	4.5

4.5. 关键参数敏感性分析

为验证模型对关键参数变化的鲁棒性，选取对破障效能影响最显著的三类参数(破障弹 MTBF、单发毁伤概率、毁伤能力权重)，在基准值 $\pm 20\%$ 范围内进行敏感性测试，其他参数保持不变，得到不同参数波动下的最优综合效能，结果如表 6 所示。

Table 6. Results of the sensitivity analysis for key parameters
表 6. 关键参数敏感性分析结果

参数类型	参数变化幅度	最优综合效能	效能相对变化率
破障弹 MTBF	-20%	0.852	-2.74%
	-10%	0.864	-1.37%
	基准值	0.876	0
	10%	0.885	1.03%
	20%	0.893	1.94%
单发毁伤概率	-20%	0.821	-6.28%
	-10%	0.849	-3.08%
	基准值	0.876	0
	10%	0.898	2.51%
	20%	0.915	4.45%
毁伤能力权重	-20%	0.861	-1.71%
	-10%	0.869	-0.80%
	基准值	0.876	0
	10%	0.882	0.68%
	20%	0.888	1.37%

由表 6 可知：

- (1) 三类关键参数在 $\pm 20\%$ 合理范围内波动时，最优综合效能的变化率均小于 7%，整体波动幅度较小，说明模型对参数变化的鲁棒性较好，仿真结果具备可靠性；
- (2) 三类参数中，单发毁伤概率对综合效能的影响程度最大，破障弹 MTBF 的影响程度最小，说明提升弹药毁伤精度是优化破障效能的最有效途径。

5. 结论

针对登陆破障方案的效能优化问题，构建了登陆破障效能评价指标体系，建立了含多约束条件的效能函数优化模型，并采用粒子群算法实现了效能函数的全局寻优，主要结论如下：

- (1) 构建了基于 ADC 模型的登陆破障效能评价指标体系[15]。将登陆破障效能分解为可用性、可信性和固有能力的三个维度，针对破障弹药类和无人机类装备分别设置了差异化的三级指标，为多类型破障装备的效能量化评估提供了统一框架。
- (2) 建立了含多约束条件的效能函数优化模型。综合考虑破障时间、资源消耗、毁伤效果、装备数量和安全保障等五类约束，将登陆破障方案优选归结为带整数变量的非线性约束优化问题，全面反映了实际任务中的复杂约束关系。

(3) 提出了基于粒子群算法的效能函数寻优方法。设计了适用于破障方案优化的实数编码方案、动态罚函数适应度构造方法和自适应参数调整策略。仿真结果表明, PSO 算法在收敛速度和求解质量方面均优于遗传算法, 验证了该方法在处理登陆破障效能优化问题上的有效性和优越性。

参考文献

- [1] 屈高敏, 董彦非, 李继广, 等. 基于效能和时间的多旋翼破障无人机能力分析[J]. 电光与控制, 2024, 31(1): 110-116.
- [2] 王威, 涂建刚, 傅香如, 等. 阻绝墙爆破弹毁伤效能仿真研究[J]. 指挥控制与仿真, 2026, 48(1): 142-145.
- [3] 张鑫, 潘进, 张静, 等. 基于 ADC 模型的水下异构平台效能评估[J]. 水下无人系统学报, 2024, 32(5): 931-939.
- [4] 冯冬青, 马书磊, 郭艳. 光电对抗系统作战效能智能分析方法研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2008, 29(3): 23-26.
- [5] 徐婧, 唐川. 人工智能在国防领域的应用与进展[J]. 飞航导弹, 2021(3): 87-92.
- [6] Kennedy, J. and Eberhart, R. (1995) Particle Swarm Optimization. *Proceedings of ICNN'95—International Conference on Neural Networks*, Perth, 27 November-1 December 1995, 1942-1948. <https://doi.org/10.1109/icnn.1995.488968>
- [7] 粒子群优化算法在工程优化问题中的应用[J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(18): 74-76.
- [8] 胡一波. 求解约束优化问题的几种智能算法[D]: [博士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
- [9] 张蓉, 刘成龙, 邵红伟, 等. 基于改进粒子群算法的多约束随船备件配置优化[J]. 舰船电子工程, 2023, 43(11): 102-108.
- [10] Liu, C.-A. (2007) New Multiobjective PSO Algorithm for Nonlinear Constrained Programming Problems. In: Wang, R.B., et al., Eds., *Advances in Cognitive Neurodynamics*, Springer, 955-962. <https://doi.org/10.2991/iske.2007.15>
- [11] 陈东林, 徐宗昌. 基于 ADC 法的武器装备系统效能评估[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(2): 235-238.
- [12] 张宏军, 黄炎焱. 基于效能评估的装备体系优化方法研究[J]. 系统工程理论与实践, 2018, 38(5): 1278-1286.
- [13] 徐爽. 面向多任务的作战体系结构智能构建技术研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.
- [14] 黄圣杰, 罗琦, 佟金颖. 解多目标约束问题的改进 MaxMin-PSO 算法[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(15): 48-50, 60.
- [15] 张超越, 余积宝, 王紫阳, 等. 基于 ADC 模型的计算机集群工作效能评估[J]. 科技创新导报, 2019, 16(36): 136-139.