

基于干扰弹最优投放策略的自适应参数优化研究

李梦瑶*, 张佳悦, 尤涌泉, 郭 许, 王羽昂

河南科技大学数学与统计学院, 河南 洛阳

收稿日期: 2026年2月16日; 录用日期: 2026年3月9日; 发布日期: 2026年3月18日

摘 要

烟幕干扰弹的作用是在目标前方特定空域形成遮蔽, 干扰敌方导弹。随着烟幕干扰技术的不断发展, 现已有多种投放方式完成烟幕干扰弹的定点精确投放, 精确控制烟幕干扰弹到达预定位置, 通过时间引信时序控制起爆时间。为提升无人机烟幕干扰弹对导弹的遮蔽干扰效能, 解决无人机烟幕干扰弹投放策略优化问题, 本文围绕无人机FY1与导弹M1的烟幕干扰效果开展系列研究。针对不同场景制定无人机的投放策略优化参数, 实现有效遮蔽时长最大。首先分析单架无人机FY1投放1枚烟幕干扰弹的场景, 建立导弹M1与无人机FY1的“一投一”单约束空间运动模型, 研究并求解烟幕干扰弹对导弹M1的最大有效遮蔽时长。在此基础上, 以烟幕干扰有效遮蔽时长最大化为目标, 针对无人机FY1的飞行方向、飞行速度、投弹点及起爆点等关键参数, 构建“一投一”多约束单目标优化模型, 用自适应的粒子群优化算法确定最优飞行及投弹参数组合。本文通过刻画无人机、烟幕干扰弹、导弹的运动轨迹, 结合遮蔽条件的几何判定与投放策略的优化模拟, 确保各场景下策略的稳定性, 为无人机烟幕干扰系统的实际应用提供理论支撑, 在军事领域、消防领域等场景下有巨大实用价值。

关键词

空间运动, 自适应, 粒子群算法, 参数优化

Research on Adaptive Parameter Optimization Based on the Optimal Release Strategy of Jamming Projectiles

Mengyao Li*, Jiayue Zhang, Yongquan You, Xu Guo, Yu'ang Wang

School of Mathematics and Statistics, Henan University of Science and Technology, Luoyang Henan

*通讯作者。

文章引用: 李梦瑶, 张佳悦, 尤涌泉, 郭许, 王羽昂. 基于干扰弹最优投放策略的自适应参数优化研究[J]. 应用数学进展, 2026, 15(3): 328-337. DOI: 10.12677/aam.2026.153109

Abstract

Smoke screen jamming projectiles' function is to form a shield in a specific airspace in front of the target and jam enemy missiles. With the continuous development of smoke screen jamming technology, a variety of release methods have been developed to achieve fixed-point precise release of smoke screen jamming Projectiles, which enables accurate control of the Projectiles to reach the predetermined position and regulation of the detonation time in a time sequence via time fuzes. To improve the shielding and jamming efficiency of unmanned aerial vehicle (UAV)-borne smoke screen jamming Projectiles against missiles and solve the problem of optimizing the release strategy of UAV-borne smoke screen jamming Projectiles, this paper carries out a series of studies on the smoke screen jamming effect between UAV FY1 and Missile M1. Optimization parameters for the UAV's release strategy are formulated for different scenarios to maximize the duration of effective shielding. First, the scenario where a single UAV FY1 releases one smoke screen jamming projectile is analyzed, and the single-constraint spatial motion model of "one projectile released against one missile" for Missile M1 and UAV FY1 is established. On this basis, the maximum effective shielding duration of the smoke screen jamming projectile against Missile M1 is studied and solved. Furthermore, with the maximization of the effective shielding duration of the smoke screen jamming as the objective, a multi-constraint single-objective optimization model of "one projectile released against one missile" is constructed for the key parameters of UAV FY1, including flight direction, flight speed, projectile release point and detonation point. The adaptive particle swarm optimization (APSO) algorithm is adopted to determine the optimal combination of flight and projectile release parameters. By depicting the motion trajectories of the UAV, smoke screen jamming Projectiles and missiles, and combining the geometric judgment of shielding conditions with the optimization simulation of release strategies, this paper ensures the stability of the proposed strategies under various scenarios, which provides theoretical support for the practical application of the UAV-borne smoke screen jamming system and possesses great practical value in such fields as the military and fire protection.

Keywords

Spatial Motion, Adaptive, Particle Swarm Optimization Algorithm, Parameter Optimization

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. 绪论

1.1. 研究背景

烟幕干扰弹[1]是一种性价比高的防御干扰弹,通过爆炸扩散形成烟幕或气溶胶云团来遮蔽目标。随着干扰技术的发展,当今已有多种投放方式实现烟幕干扰弹的精确投放,通过引信时长控制起爆时间。为实现有效遮蔽时长最大,需要给出烟幕干扰弹的最优投放策略,使得对真目标的有效遮蔽时长尽可能长。

本文基于无人机干扰投放场景开展研究,无人机挂载干扰弹巡飞,接受任务后需在来袭导弹与保护目标间形成遮蔽,无人机投放干扰弹,干扰弹脱离无人机后受重力运动,起爆后形成球状烟幕云团,以3 m/s 匀速下沉,其中心10 m 范围内20 s 内可实现有效遮蔽。来袭空地导弹飞行速度300 m/s,直指假目标(原点),需掩护的真目标为圆柱形(半径7 m、高10 m),其下底面圆心为(0, 200, 0);警戒雷达发现目标

时, 导弹与无人机初始坐标分别为 M1 (20000, 0, 2000), FY1 (17800, 0, 1800), 无人机受领任务后可瞬时调整飞行方向, 以 70~140 m/s 等高度匀速直线飞行, 航向与速度确定后不再调整。

1.2. 问题分析

问题一: 无人机 FY1 以 120 m/s 的速度向假目标飞行, 1.5 s 后投放 1 枚烟幕干扰弹, 间隔 3.6 s 后起爆实现对导弹 M1 的干扰。求解 1 枚烟幕干扰弹对 M1 的有效遮蔽时长[2]。

问题二: 无人机 FY1 的飞行方向、飞行速度、投弹点和起爆点未知, 无人机 FY1 投放 1 枚烟幕干扰弹对导弹 M1 进行干扰, 实现对 M1 有效遮蔽时长最大, 求出最优投放策略。

1.3. 模型假设

- 1) 假设无人机等高度飞行过程中不受空气阻力, 气流扰动等外部因素的影响, 水平速度保持不变。
- 2) 假设烟幕干扰弹在起爆前的平抛过程中水平速度与无人机保持一致, 竖直做自由落体运动, 忽略空气阻力影响。
- 3) 假设不考虑云团扩散对半径的影响, 云团的形状规则饱满, 匀速下沉。
- 4) 假设无人机的投放烟幕干扰弹瞬时爆炸无时间误差, 无延时。

2. 建立空间运动模型并求解

2.1. “一投一”单目标优化

“一投一”单目标优化即无人机 FY1 投放 1 枚烟幕干扰弹实施对导弹 M1 的干扰, 求最大有效遮蔽时长。导弹 M1 的飞行方向直指假目标, 飞行速度为 300 m/s。给定无人机 FY1 的速度为 120 m/s, 飞行方向朝向假目标且等高度匀速直线飞行, 飞行 1.5 s 后投放烟幕弹。间隔 3.6 s 烟幕弹起爆形成云团, 云团以 3 m/s 速度匀速下沉。

2.1.1. “一投一”单目标优化模型的建立

1) 确定投弹点、起爆点坐标

设定无人机 FY1 接到任务时为初始时刻 $t = 0$, 从此刻起无人机 FY1 朝向假目标飞行, 给定无人机 FY1 的飞行速度 $v_1 = 120$ m/s, 由于无人机等高飞行, 其 z 坐标不变; 且无人机朝向假目标 (0,0,0) 运动, 在 Y 轴方向上没有运动, 其 y 坐标也不变。故无人机 FY1 接到任务飞行 $\Delta t_1 = 1.5$ s 后, 有:

$$x_A = 17800 - v_1 \Delta t_1 \quad (1)$$

即烟幕弹在投放时坐标为 $A(17620, 0, 1800)$ 。

此时无人机会提供给烟幕弹一个水平方向的初速度, 在重力作用下烟幕弹将作平抛运动, 间隔 $\Delta t_2 = 3.6$ s 后起爆形成云团。在接到飞行任务 5.1 s 烟幕弹起爆, 这个过程 Y 坐标恒为 0, 烟幕弹起爆时坐标分量为:

$$\begin{cases} x_B = x_A - v_1 \Delta t_2 \\ z_B = z_A - \frac{1}{2} g (\Delta t_2)^2 \end{cases} \quad (2)$$

即烟幕弹在起爆时坐标为 $B(17188, 0, 1736.496)$ 。

2) “一投一”的平面运动轨迹

根据上述分析, 绘制 ZOX 平面上的运动轨迹示意图, 如图 1, 烟幕干扰弹从脱离无人机到起爆做平抛运动。

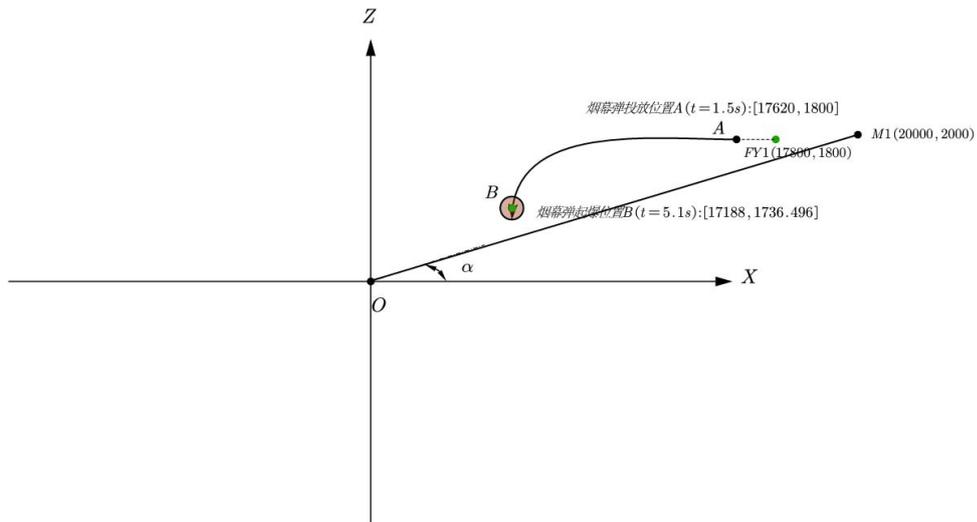


Figure 1. Planar motion trajectory of smoke screen jamming projectile
图 1. 烟幕干扰弹平面运动轨迹

3) “一投一”的图形说明

如图 2，导弹 M1 是直指假目标飞行的，但烟幕干扰弹是为了对真目标进行遮蔽，只要烟幕干扰弹起爆后形成的云团阻挡了导弹观测真目标圆柱体的视线(图 2 中红线)，我们就理解为有效遮蔽，由于导弹的位置不断变动，真目标的位置是静态的，所以我们用导弹在飞行中某一时刻与真目标圆柱体连线穿过云团中心 10 m 范围内作为有效遮蔽的条件。

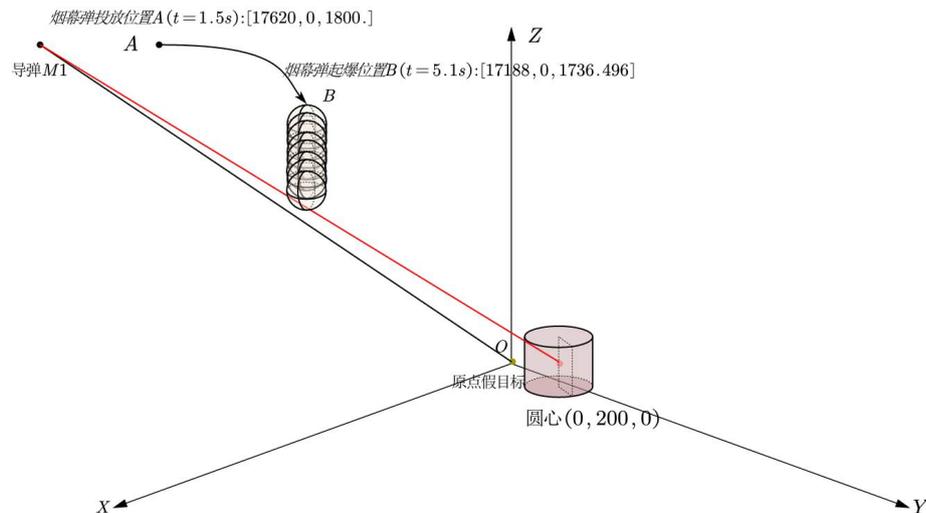


Figure 2. Motion schematic and coordinate distribution
图 2. 运动示意与坐标分布

4) 确定导弹、云团中心坐标

导弹 M1 初始坐标(20000, 0, 2000)，以 $v_d = 300$ m/s 的飞行速度直指假目标(0, 0, 0)，经过时间 t 的运动后，其 Y 坐标也不发生变化。导弹运动可以在 X 轴、Z 轴进行分解，其中导弹飞行轨迹与 X 轴夹角为 α ， $\tan \alpha = 0.1$ ，在 t 时刻，导弹此时坐标分量为：

$$\begin{cases} x_D = 20000 - v_d \cos \alpha \cdot t \\ z_D = 2000 - v_d \sin \alpha \cdot t \end{cases} \quad (3)$$

起爆形成云团后以 3 m/s 的速度匀速下沉，只有 z 坐标发生变化，由起爆点 B 得到云团中心 Y_t ，t 时刻坐标分量为：

$$z_{Y_t} = z_B - 3t \quad (4)$$

5) “遮蔽”的公式定义

简化问题：选取圆柱体上具有代表性的特殊点，求解云团中心到特殊点——导弹实时位置所成线段的距离在遮蔽范围内所持续的时长。

由于云团中心 10 m 范围内的烟幕浓度在起爆 20 s 内可为目标提供有效遮蔽，故只考虑烟幕干扰弹起爆到起爆后 20 s 这一时间段，以圆柱中心 M (0, 200, 5) 为例。

由空间直线两点式方程：

$$\frac{x - x_M}{x_D - x_M} = \frac{y - y_M}{y_D - y_M} = \frac{z - z_M}{z_D - z_M} \quad (5)$$

得到圆柱中心 M 与导弹 D 所成直线 l_1 。

由空间点到直线距离公式：

$$d = \frac{|M l_1 M \times M Y_t|}{|M l_1 M|} \quad (6)$$

当 $d \leq 10$ m 时，云团有效遮蔽导弹视线。

2.1.2. “一投一”单目标优化模型的求解

构建一个遍历算法，在 $t \in [5.1 \text{ s}, 25.1 \text{ s}]$ 范围，给定步长为 0.001 s，搜索符合有效遮蔽的起始时间 $t_{初}$ 和终止时间 $t_{末}$ ，进而得到有效遮蔽时长 $t = t_{末} - t_{初}$ 。

通过运行算法，对圆柱上不同的特殊点进行有效遮蔽时长的模拟，得到不同特殊点的有效遮蔽时长以及平均值，绘制一个时长分布柱状图，如图 3：

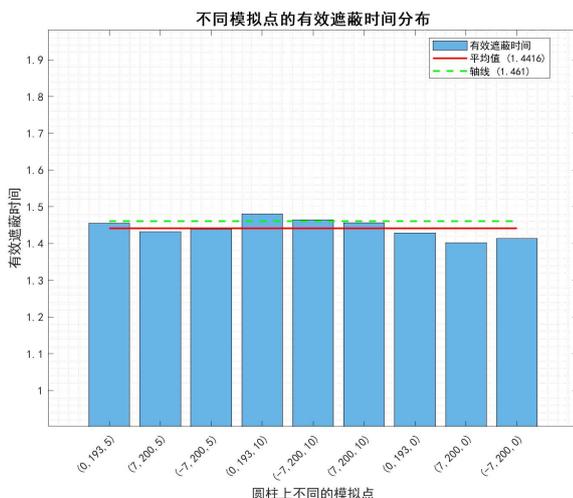


Figure 3. Distribution of masking time corresponding to different simulation points
图 3. 不同模拟点对应的遮蔽时间分布

选取圆柱上不同的特殊点通过遍历算法进行求解, 得到了不同的有效遮蔽时长均在[1.4, 1.5]之间且平均遮蔽时长是 1.44 s。

由柱状图知: 不同模拟点的时长分布均匀, 模拟点(0, 193, 0)的时长最长, 模拟点(7, 200, 0)的时长最短。由于圆柱形(高 10 m, 半径 7 m)目标的形状不可忽略, 所以选取圆柱垂直于 y 轴的中轴线上所有点通过遍历算法进行求解得到图 3 中的绿色虚线(遮蔽时长为 1.461 s), 与平均遮蔽时长相近。

“一投一”单目标优化模型的求解方法为接下来“一投一”多目标优化模型投放策略的建立奠定模型基础。

2.2. “一投一”多约束单目标优化

“一投一”多约束单目标优化指需要确定无人机 FY1 的飞行方向、飞行速度、烟幕干扰弹投放点、烟幕干扰弹起爆点, 对导弹 M1 进行遮蔽, 求最大有效遮蔽时长。

2.2.1. “一投一”多约束单目标优化模型的建立

1) 确定投弹点、起爆点的坐标

问题二需要确定无人机 FY1 的飞行方向, 在等高飞行条件下, 无人机 FY1 在 XOY 平面飞行, 只有 Z 轴坐标保持不变。无人机 FY1 接收任务到飞行 Δt_1 s 后, 得到无人机 FY1 投弹点 S 的坐标分量为

$$\begin{cases} x_S = 17800 + v_2 \cos \beta \cdot \Delta t_1 \\ y_S = v_2 \sin \beta \cdot \Delta t_1 \end{cases} \quad (7)$$

无人机 FY1 投放烟幕干扰弹后, 烟幕干扰弹作平抛运动, 间隔 Δt_2 s 后干扰弹起爆点 B_2 的坐标分量为

$$\begin{cases} x_C = 17800 + v_2 \cos \beta \cdot (\Delta t_1 + \Delta t_2) \\ y_C = v_2 \sin \beta \cdot (\Delta t_1 + \Delta t_2) \\ z_C = 1800 - 0.5g(\Delta t_2)^2 \end{cases} \quad (8)$$

2) “遮蔽”的公式定义

烟幕干扰弹起爆形成云团后, 云团中心点 Y_2 匀速下降时的坐标分量为

$$\begin{cases} x_{Y_2} = 17800 + v_2 \cos \beta \cdot (\Delta t_1 + \Delta t_2) \\ y_{Y_2} = v_2 \sin \beta \cdot (\Delta t_1 + \Delta t_2) \\ z_{Y_2} = 1800 - 0.5g(\Delta t_2)^2 - 3t \end{cases} \quad (9)$$

其中, $t \in [0, 20]$ 是云团的运动时间。

导弹 M1 在云团运动 t s 时位置点 $M1_t$ 的坐标分量为

$$\begin{cases} x_{M1_t} = 20000 - v_d \cos \alpha \cdot (\Delta t_1 + \Delta t_2 + t) \\ z_{M1_t} = 2000 - v_d \sin \alpha \cdot (\Delta t_1 + \Delta t_2 + t) \end{cases} \quad (10)$$

真目标圆柱表面参数方程为

$$\begin{cases} x = 0 + r \cos \theta \\ y = 200 + r \sin \theta \\ z = z \end{cases} \quad (11)$$

其中, $\theta \in [0, 2\pi]$ 为圆柱横截面上某点与 X 轴正方向的夹角, $r = 7$, $z \in [0, 10]$ 。圆柱体高 10 m, 依据圆

柱体高度进行分层, 在每层选取随机采样点, 则遮蔽有效时长的定义过程如下。

先得到形成云团后的每个时刻圆柱体表面采样点与导弹 M1 所成线段 l_2 。

再计算云团中心到线段 l_2 的距离 d , 当 $d \leq 10$ m 时判定为有效遮蔽。

求出有效遮蔽的起始时间和终止时间, 得到有效遮蔽时长。

3) Δt_1 、 Δt_2 的实际约束

因初始时刻无人机 FY1 与导弹 M1 的距离接近, 导弹直指假目标飞行, 导弹的水平速度大于无人机所能达到的最大速度, 若无人机飞行时间过长, 投放的烟幕干扰弹起爆所形成的云团不在导弹与真目标之间, 云团不能对真目标起到遮蔽作用, 结合物理计算, 我们选定无人机从接受任务到投放烟幕干扰弹时间 $\Delta t_1 \in [0, 2.6]$, 确保云团能遮蔽导弹视野。

同时烟幕干扰弹的起爆间隔时间过长也会导致云团不在导弹与真目标之间, 为避免出现此情况, 给定烟幕干扰弹投放到起爆时的间隔时间 $\Delta t_2 \in [0, 6]$ 。

决策变量有四个, 分别为: 无人机 FY1 的飞行速度 v_2 、无人机 FY1 的飞行航向角 β 、无人机从接受任务到投放烟幕干扰弹时间 Δt_1 、烟幕干扰弹投放到起爆时的间隔时间 Δt_2 。

目标函数: 有效遮蔽时间最长。

约束条件:

无人机 FY1 的飞行速度: $70 \leq v_2 \leq 140$;

无人机 FY1 的飞行航向角: $0 \leq \beta \leq 2\pi$ (以 x 轴为正向, 逆时针方向为正);

最长遮蔽时长: $0 \leq t_{\max} \leq 20$;

无人机从接受任务到投放烟幕干扰弹时间: $0 \leq \Delta t_1 \leq 2.6$;

烟幕干扰弹投放到起爆时的间隔时间: $0 \leq \Delta t_2 \leq 6$ 。

即:

$$\begin{aligned} & \max \{t = t_{\text{末}} - t_{\text{初}}\} \\ & s.t. \begin{cases} 70 \leq v_2 \leq 140 \\ 0 \leq \beta \leq 2\pi \\ 0 \leq t_{\max} \leq 20 \\ 0 \leq \Delta t_1 \leq 2.6 \\ 0 \leq \Delta t_2 \leq 6 \end{cases} \end{aligned} \quad (12)$$

2.2.2. “一投一”多约束单目标优化模型的求解

该问题属于非线性连续型空间优化类问题, 并且涉及到的参量较多, 用传统算法进行求解的精度达不到理想预期, 所以我们采用自适应[3]粒子群算法进行求解。

1) 设定粒子群算法参数

粒子数量: 28, 个体认知权重(c1): 1.7, 群体社会权重(c2): 1.7, 最大迭代次数: 30, 惯性权重[4]: 0.85~0.4。

其中为了算法在求解过程中同时实现前期搜索和后期收敛, 惯性权重的参数值运用自适应方法调整。具体表现为前期惯性权重为 0.85, 惯性较强, 粒子在相同时间内能够进行大范围搜索, 拓宽了算法的搜索广度; 迭代过程中惯性权重以步长 0.015 递减, 迭代 30 次后惯性权重降至 0.4, 后期惯性较弱, 粒子能够收敛到最优解, 提高了算法的收敛精度。

相较于惯性权重不变的传统方法, 自适应粒子群优化算法的粒子收敛更稳定、精确度更高, 更适合解决多约束的优化问题。

2) 结果分析

利用粒子群算法经过 python 程序运行得到结果，并将所得结果在图 4 中展现：

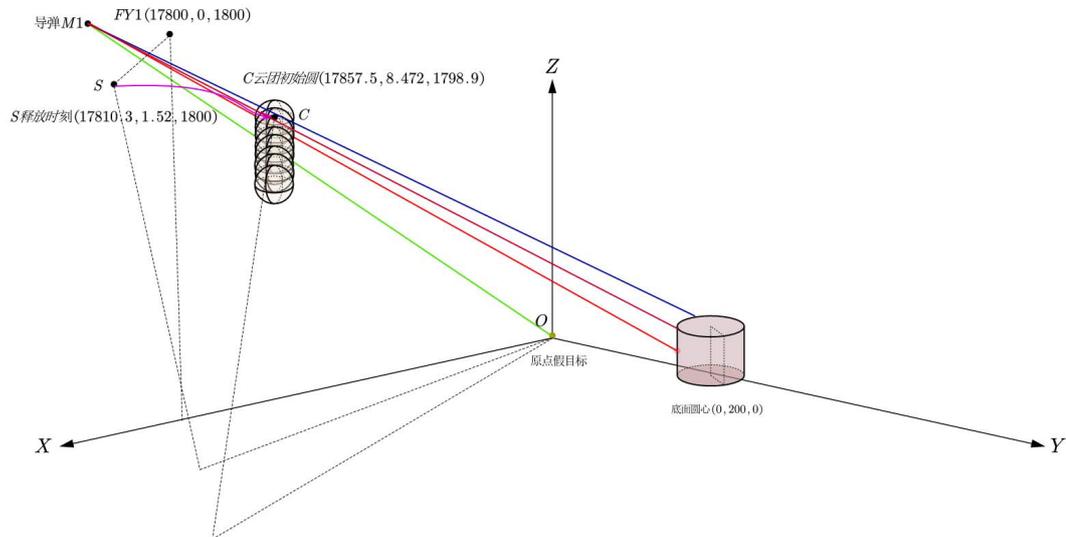


Figure 4. Whole process of obscuration by smoke screen jamming projectile in problem 2
图 4. 问题二烟幕干扰弹遮蔽全过程

当无人机飞行速度为 104.237 m/s，飞行航向角为 8.384°，释放烟幕干扰弹的时间为 0.1 s，烟幕干扰弹投放到起爆时间间隔为 0.457 s，烟幕干扰弹的起爆时刻为 0.557 s 时，烟幕干扰弹对导弹 M1 的最大遮蔽时长为 4.86 s，此时投弹点的坐标为 S (17810.3, 1.52, 1800)，起爆点的坐标为 C (17857.5, 8.472, 1798)。同时得到粒子群算法的收敛过程，如图 5：

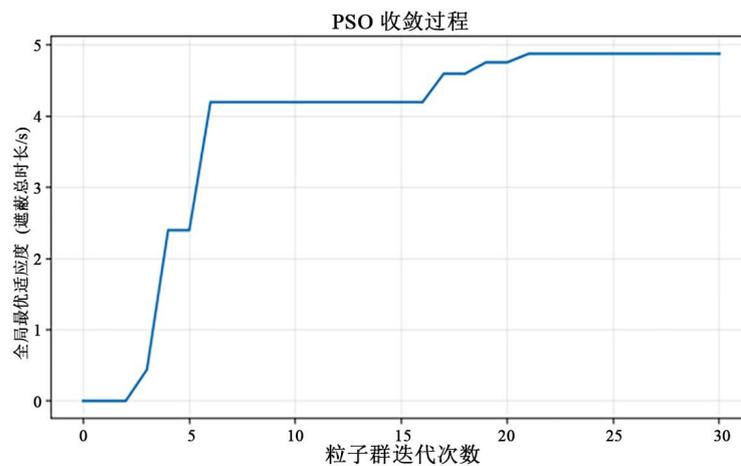


Figure 5. Convergence process of adaptive particle swarm optimization
图 5. 自适应粒子群算法的收敛过程

根据上面粒子群迭代次数与遮蔽总时长的关系图，发现当迭代次数 $0 \leq i \leq 6$ 时，遮蔽总时长随迭代次数的增加而快速增长，当迭代次数 $6 \leq i \leq 16$ 时，遮蔽总时长无增长，当迭代次数 $16 \leq i \leq 21$ 时，遮蔽总时长随迭代次数增加而缓慢增长最后趋于稳定保持不变，从而得到最长遮蔽时长为 4.86 s。

3. 自适应粒子群算法的灵敏度分析

为了验证模型对输入变量的敏感程度即输入变量发生一定程度的变化时，模型输出结果相应变化的幅度，我们对自适应粒子群优化算法进行灵敏度分析，验证模型的鲁棒性[5]。

灵敏度系数：

$$G = \frac{\Delta J / J_0}{\Delta F / F_0} \quad (13)$$

其中， ΔJ 为参数变化后遮蔽时长的变化， J_0 为理想参数下的有效遮蔽时长， ΔF 为参数变化量， F_0 为理想参数值。

当 $|G| > 1$ 时，参数敏感，参数变化对有效遮蔽时长的影响大；

当 $0.1 \leq |G| \leq 1$ 时，参数较敏感，参数变化对有效遮蔽时长的影响较大；

当 $|G| < 0.1$ 时，参数不敏感，参数变化对有效遮蔽时长的影响可忽略。

分析结果如下：

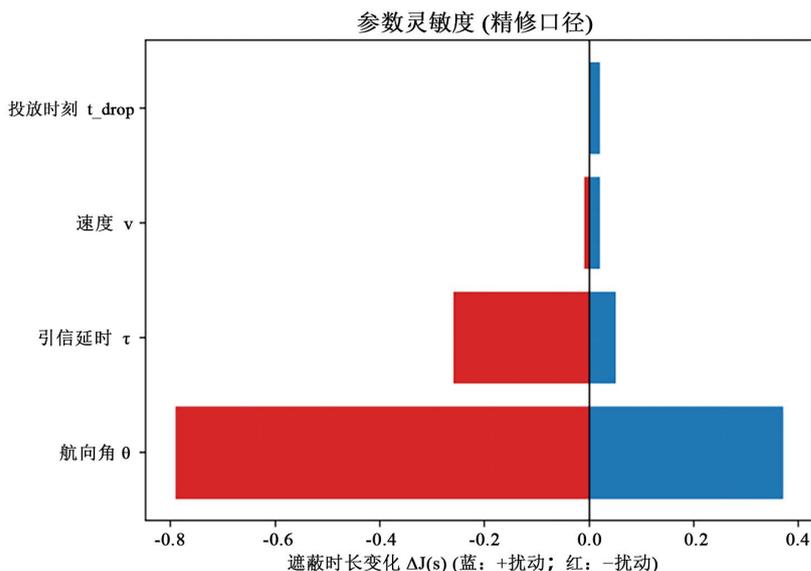


Figure 6. Sensitivity analysis of particle swarm optimization for problem 2
图 6. 问题二粒子群算法的灵敏度分析

根据图 6，有效遮蔽时长对航向角最敏感，航向角的正负波动会让有效遮蔽时长在 $[-0.79, 0.38]$ 范围内变化，对引信时长较为敏感，其正负波动会让有效遮蔽时长在 $[-0.26, 0.05]$ 范围内变化，对比之下，速度与投放时刻的灵敏度较低，二者对有效遮蔽时长的影响较小可以忽略。故在实际应用中，要确保航向角与引信时长的精准度，而投放时刻速度与可适当降低关注。

4. 模型的评价与推广

4.1. 模型的优点

- 1) 模型与参数的适配度高，考虑了多种约束细节，综合性强。
- 2) 采用自适应的粒子群优化算法，在多种约束条件下，搜索的精确度高、收敛性强，易得到最优解。
- 3) 模型的适应性强，能够适配不同的情境，不同的约束条件下的烟幕干扰弹投放策略的设计。

4.2. 模型的缺点

- 1) 模型过于理想化, 未忽略空气阻力, 空气气流等外部环境因素的影响, 可能存在误差。
- 2) 涉及多种参量, 多种约束条件, 计算复杂度高。

4.3. 模型的推广

本研究涉及的模型能够解决参数众多, 约束条件复杂的最优解求解问题。该模型设计的烟幕干扰弹投放策略, 在军事上、民事上有着广泛的应用, 在军事领域能够提高对敌人导弹的精准定位, 干扰其攻打目标从而维护国家安全; 在民事领域能够在消防救援中设计精准的消防物品投放, 快速灭火, 保护人民安全。

基金项目

河南科技大学大学生创新创业训练计划项目(项目编号: 2025230)。

参考文献

- [1] Zhao, F., Liu, S.X., Jiang, H.H., *et al.* (2023) Comparative Study on Effectiveness of Image Features in Assessing Smokescreen Interference. *Laser & Infrared*, **53**, 919-926. (In Chinese)
- [2] 陈浩, 高欣宝, 李天鹏, 等. 国外烟幕干扰弹发展及关键技术研究[J]. *飞航导弹*, 2017(12): 71-74.
- [3] He, J.K., Bao, Z.Y., Li, H.X., *et al.* (2023) Implementation of an Adaptive Trapezoidal Shaping Method Based on FFT. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, **70**, 2234-2239. <https://doi.org/10.1109/TNS.2023.3307475>
- [4] Moazen, H., Molaei, S., Farzinvas, L., *et al.* (2023) PSO-ELPM: PSO with Elite Learning, Enhanced Parameter Updating, and Exponential Mutation Operator. *Information Sciences*, **628**, 70-91. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2023.01.103>
- [5] 俞昊东, 廖立志, 孙捷. 求解含非离散分布的分布鲁棒多阶段线性随机规划的 Benders 分解-动态逼近方法[J]. *中国科学: 数学*, 2025, 55(2): 361-384.