

基于模拟退火算法对烟幕干扰弹投放策略的研究

曾巧, 宋富源, 陈文杰, 刘志伟, 董晓旭

西华大学理学院, 四川 成都

收稿日期: 2026年5月14日; 录用日期: 2026年6月23日; 发布日期: 2026年7月24日

摘要

本文针对多架无人机投放多枚干扰弹遮蔽多枚导弹的复杂情形安排投放策略。分析每个物体的运动状态, 建立物理运动学模型, 以最大化有效遮蔽时间和最小化干扰弹投放数量为目标函数建立双目标非线性规划, 使用模拟退火算法搜寻全局最优解, 通过MATLAB求解, 得到最优投放策略。

关键词

烟幕干扰, 物理运动学模型, 优化模型, 模拟退火算法

Research on the Deployment Strategy of Smoke Screen Interference Bombs Based on Simulated Annealing Algorithm

Qiao Zeng, Fuyuan Song, Wenjie Chen, Zhiwei Liu, Xiaoxu Dong

School of Science, Xihua University, Chengdu Sichuan

Received: May 14, 2026; accepted: June 23, 2026; published: July 24, 2026

Abstract

This paper focuses on the deployment strategy of smoke screen interference bombs released by multiple unmanned aerial vehicles (UAVs) for shielding multiple incoming missiles. By systematically analyzing the motion states of all relevant objects (including UAVs, smoke screen interference bombs, and missiles) and establishing a precise physical kinematic model, a bi-objective nonlinear programming model is constructed. The objectives of this model are to maximize the effective

文章引用: 曾巧, 宋富源, 陈文杰, 刘志伟, 董晓旭. 基于模拟退火算法对烟幕干扰弹投放策略的研究[J]. 理论数学, 2026, 16(7): 34-44. DOI: 10.12677/pm.2026.167171

shielding time of missiles and minimize the number of deployed interference bombs. To solve this model and obtain the global optimal solution, the simulated annealing algorithm is adopted, and the optimal deployment strategy is finally determined through MATLAB simulation and verification.

Keywords

Smoke Screen Interference, Physical Kinematic Model, Optimization Model, Simulated Annealing Algorithm

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

随着科技的快速发展,烟幕干扰弹具有快速响应、效费比高、多谱兼容等优点,是相关研究领域的热点话题。通过无人机搭载烟幕干扰弹实现精确投放,干扰探测使其无法获得真实目标的准确信息,从而达到保护对象的目的,这一技术在现代军事防御体系中具有重要的应用价值。合理的烟幕干扰弹投放策略,能有效提升作战效率。

对于干扰弹投放策略的研究,此前已有平殿发[1]等基于质心干扰分析机载自卫箔条干扰弹的各项投放参数;陈书恒[2]等通过研究飞机红外辐射强度和辐射面积,讨论了不同作战方式下合适的红外干扰弹投放方式;卿朝进[3]等以发现概率为评估指标,以最小化时隙特定的箔条干扰弹数量为目标,求解得到每个时隙下的最优投放策略;以及朱卓[4]等基于遗传算法,结合红外干扰弹建立自主决策模型。

本研究基于烟幕云团对导弹雷达探测的有效遮蔽,全面考虑实际作战中多无人机、多干扰弹、多导弹等情况,寻找最优投放策略,规划无人机飞行参数以及烟幕干扰弹精确投放参数。本文使用的模拟退火算法[5]能克服局部最优解困难、适配不同复杂问题,因此在烟幕干扰弹投放策略的研究中具有应用潜力。

2. 问题提出

每架无人机投放两枚烟幕干扰弹至少间隔 t_0 秒。烟幕干扰弹脱离无人机后,在重力作用下运动。烟幕干扰弹起爆后瞬间形成球状烟幕云团,且以 v_0 的速度匀速下沉。据试验数据知,云团中心 r 米范围内的烟幕浓度在起爆 t_x 秒内可为目标提供有效遮蔽。

现已知共有 n_1 枚导弹,位置信息分别为 $M_i(x_i, y_i, z_i) (i=1, 2, \dots, n_1)$,导弹的运行速度为 v_M ,飞行方向直指一个为掩护固定目标(假设为圆柱体)而专门设置的假目标;无人机共有 n_2 架,位置信息分别为 $FYk(x_k, y_k, z_k) (k=1, 2, \dots, n_2)$,第 k 架无人机的飞行速度为 v_{FYk} ,且飞行速度不大于 $v_{\max}$,不小于 $v_{\min}$ 。无人机受领任务后,可根据需要瞬时调整飞行方向,然后等高度匀速直线飞行,在每架无人机至多投放 n_3 枚烟幕干扰弹的情形下,给出包括无人机飞行方向、速度,烟幕干扰弹投放点、起爆点以及有效干扰时长等信息的投放策略。

针对上述题目,本文做出了如下合理假设:烟幕干扰弹起爆形成云团的时间忽略不计,发现导弹到给无人机指派任务的时间忽略不计,无人机接受任务到完成方向调整的时间忽略不计。将云团形状视为理想球体,导弹视为一个质点。

3. 运动过程分析以及模型建立

3.1. 整体运动过程分析

首先明确不同物体的运动过程, 导弹以 V_M 的速度朝假目标(即原点)飞行, 无人机 FYk 以 V_{FYK} 的速度平飞, 烟幕干扰弹投放后受无人机初始速度影响作平抛运动, 起爆后形成云团并以 V_0 的速度匀速下沉。

分析云团的遮挡效果, 导弹通过雷达产生电磁波探测目标位置, 而烟幕干扰弹起爆后可通过释放箔片、气溶胶微粒等改变电磁波传输特性[6], 使导弹雷达难以探测目标位置。具体示意图如下, 将导弹作为顶点, 球状云团最大圆(半径为 r)为底面作圆锥并无限延伸, 若真实目标完全位于无限延伸的大圆锥内, 则我们认为此时遮蔽有效(图 1)。

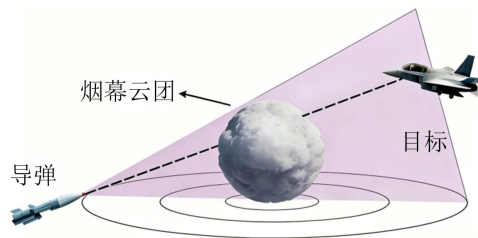


Figure 1. Cloud cover effect diagram
图 1. 云团遮蔽效果图

计算云团有效遮蔽时长, 首先使用运动学公式表示出烟幕干扰弹起爆位置以及此时导弹位置坐标, 并将该时刻作为时间起始点, 将时间离散化[7], 通过搜索法寻找真目标圆柱体中无数多个点是否在圆锥体内判断每个时刻是否形成有效遮蔽, 若真目标在有效遮蔽范围内的时间步长进行累加, 反之则赋值为 0, 限制时间在云团固定有效遮蔽时间以及导弹击中假目标时间内。

全面考虑使用多架无人机投放多枚烟幕干扰弹对多枚导弹进行遮蔽的情形, 建立数学双目标非线性规划模型, 为避免重复计算不同干扰弹在同一时间段形成的遮蔽时长, 以最大化各云团遮蔽时间段的并区间长度作为目标函数, 限制每架无人机投放烟幕干扰弹的数量和间隔时间, 使用模拟退火算法结合物理运动学模型求得合理的投放策略。

3.2. 干扰弹投放策略模型建立

为了便于表示, 我们将假目标定义为三维笛卡尔坐标系的原点, 则假目标坐标为 $p_{fake} = (0, 0, 0)$, 无人机 FYk 的初始位置为 $FYK(x_k, y_k, z_k) (K=1, 2, \dots, n_2)$, 导弹 M_i 初始位置为 $M_i(x_i, y_i, z_i) (i=1, 2, \dots, n_1)$, 基于此坐标系, 建立下列模型。

1) 无人机运动模型

针对无人机的运动过程, 建立如下无人机运动模型:

无人机受领任务后做等高度匀速直线运动, 由无人机 FYk 的初始位置和假目标 p_{fake} 空间关系可得无人机运动方程:

$$\begin{cases} x_k(t_1) = x_k + v_k \cdot t_1 \cdot \cos(seta), \\ y_k(t_1) = y_k + v_k \cdot t_1 \cdot \sin(seta), \\ z_k(t_1) = z_k, \end{cases}$$

其中, $seta$ 为无人机飞行方向角, t_1 为无人机接受任务到投放第一枚干扰弹的飞行时间。故无人机飞行 t_1 秒后的坐标为:

$$P_k(t_1) = (x_k + v_k \cdot t_1 \cdot \cos(\text{seta}), y_k + v_k \cdot t_1 \cdot \sin(\text{seta}), z_k).$$

2) 烟幕干扰弹运动模型

针对干扰弹运动过程, 建立如下烟幕干扰弹运动模型:

烟幕干扰弹在脱离无人机后, 受无人机初速度以及重力加速度影响, 做平抛运动, 由此可得烟幕平抛运动的运动方程:

$$\begin{cases} x_{\text{delay}}(t_1, t_2) = x_k(t_1) + v_k \cdot t_2 \cdot \cos \alpha, \\ y_{\text{delay}}(t_1, t_2) = y_k(t_1), \\ z_{\text{delay}}(t_1, t_2) = z_k(t_1) - \frac{1}{2} \cdot g \cdot t_2^2, \end{cases}$$

其中, t_2 为烟幕干扰弹起爆时间, α 为圆锥体半顶角度。故烟幕干扰弹飞行 t_2 秒后的坐标为:

$$p_{\text{delay}}(t_1, t_2) = \left(x_k(t_1) + v_k \cdot t_2 \cdot \cos \alpha, y_k(t_1), z_k(t_1) - \frac{1}{2} \cdot g \cdot t_2^2 \right).$$

3) 云团运动模型

针对云团运动过程, 建立如下云团运动模型:

烟幕干扰弹在起爆后烟幕云团匀速向下运动, 由此建立云团中心运动模型:

$$\begin{cases} x_{\text{yun}}(t_1, t_2, t_{\text{yun}}) = x_{\text{delay}}(t_1, t_2), \\ y_{\text{yun}}(t_1, t_2, t_{\text{yun}}) = y_{\text{delay}}(t_1, t_2), \\ z_{\text{yun}}(t_1, t_2, t_{\text{yun}}) = z_{\text{delay}}(t_1, t_2) - v_0 \cdot t_{\text{yun}}, \end{cases}$$

其中 t_{yun} 为云团运动时间, v_0 为云团匀速下沉速度, 故云团中心坐标为:

$$p_{\text{yun}}(t_1, t_2, t_{\text{yun}}) = (x_{\text{delay}}(t_1, t_2), y_{\text{delay}}(t_1, t_2), z_{\text{delay}}(t_1, t_2) - v_0 \cdot t_{\text{yun}}).$$

4) 导弹运动模型

针对导弹运动过程, 建立如下导弹运动模型:

导弹 M_i 初始位置为 $M_i(x_i, y_i, z_i)$, 沿假目标即原点方向飞行, 方向固定, 故导弹 M_i 运动方程为:

导弹到原点的距离随时间变化:

$$d_i(t) = \sqrt{x_i(t)^2 + y_i(t)^2 + z_i(t)^2}.$$

导弹运动方向的单位向量(从当前位置指向原点):

$$\mathbf{u} = \left(-\frac{x_i(t)}{d_i(t)}, -\frac{y_i(t)}{d_i(t)}, -\frac{z_i(t)}{d_i(t)} \right).$$

任意时刻 t 的坐标递推公式(其中 Δt 为时间步长):

$$\begin{cases} x_i(t + \Delta t) = x_i(t) + v_m \cdot \left(-\frac{x_i(t)}{d_i(t)} \right) \cdot \Delta t, \\ y_i(t + \Delta t) = y_i(t) + v_m \cdot \left(-\frac{y_i(t)}{d_i(t)} \right) \cdot \Delta t, \\ z_i(t + \Delta t) = z_i(t) + v_m \cdot \left(-\frac{z_i(t)}{d_i(t)} \right) \cdot \Delta t, \end{cases}$$

其中 v_M 为导弹的运行速度, $(x_i(t), y_i(t), z_i(t))$ 为导弹在时刻 t 的坐标。故导弹运行坐标为:

$$p_{Mi}(t + \Delta t) = (x_i(t + \Delta t), y_i(t + \Delta t), z_i(t + \Delta t)).$$

5) 遮蔽判断模型[8]

基于遮蔽条件, 建立如下双重遮蔽判断模型:

a) 第一重判断: 当导弹不在烟幕云团内且未穿过云团时, 需判断真目标是否完全被烟幕遮蔽, 即真目标的所有点是否位于导弹视线与云团形成的圆锥体内以及云团下沉时间在 t_x 秒内以导弹位置 $p_{Mi}(t + \Delta t)$ 为顶点, 云团中心与导弹的连线为轴线, 半顶角记为 α 。在圆柱体表面取有限多个样本点, 记任意一点 p 与顶点 p_{Mi} 的连线和圆锥体轴线的夹角为 θ , 故有效遮蔽的充要条件为:

$$\theta \leq \alpha \text{ 且 } v \leq v_{\max}.$$

又 $\cos \theta$ 在 $\left[0, \frac{\pi}{2}\right]$ 上单调递减, 故 $\theta \leq \alpha$ 等价于:

$$\cos \theta \leq \cos \alpha \text{ 且 } v \leq v_{\max}.$$

半顶角余弦值 $\cos \alpha = \frac{d_{AB}}{\sqrt{d_{AB}^2 - r^2}}$, d_{AB} 为导弹到烟幕中心的距离, r 为云团半径

$$P_{M1} = (x_i - x_i(t + \Delta t), y_i - y_i(t + \Delta t), z_i - z_i(t + \Delta t)).$$

$$P_K = (x_k(t_{yun}) - x_i(t + \Delta t), y_k(t_{yun}) - y_i(t + \Delta t), z_k(t_{yun}) - z_i(t + \Delta t)).$$

故真实目标是否在遮蔽体内的判断条件为

$$\cos \theta = \frac{|P_{M1} \cdot P_{FY1}|}{|P_{M1}| \cdot |P_{FY1}|} \geq \cos \alpha \text{ 且 } v \leq v_{\max}.$$

上述云团对导弹的遮蔽效果判断通过图 2 和图 3 进行展示:

三维立体图: 云团、真目标、和导弹

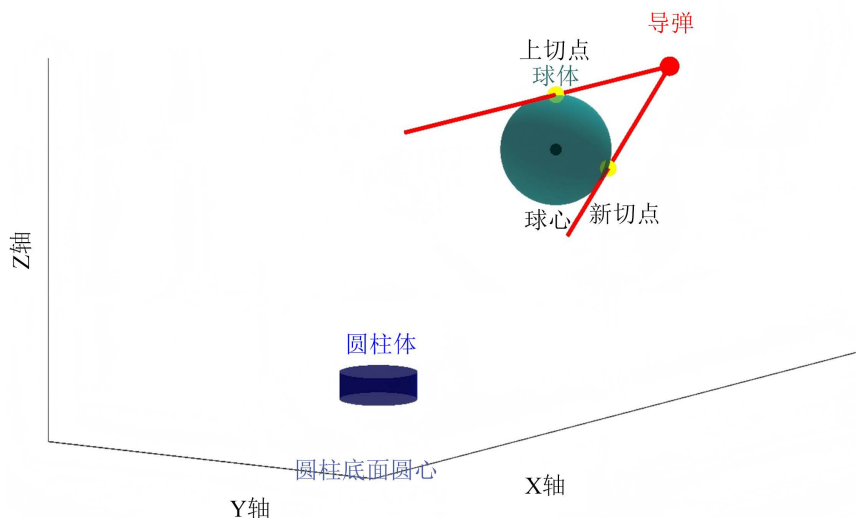


Figure 2. Effective cloud cover effect
图 2. 云团有效遮蔽效果图

三维立体图：云团、真目标、和导弹

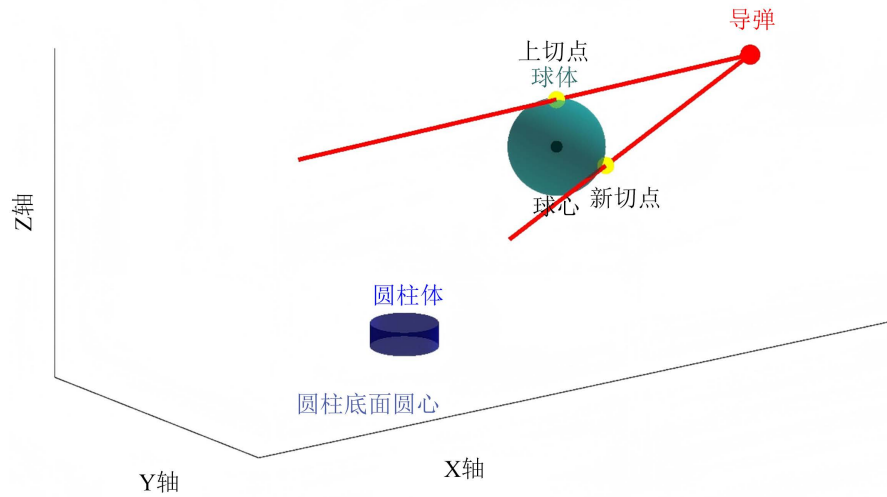


Figure 3. Ineffective cloud cover effect
图 3. 云团无效遮蔽效果图

图 2 为真目标位于导弹视线与云团形成的圆锥体内，此时导弹雷达无法探测真目标位置，则烟幕云团遮蔽有效；图 3 真目标位于导弹视线与云团形成的圆锥体之外，此时云团遮蔽无效。

b) 第二重判断：当导弹与烟幕云团中心的距离 $\leq r$ 时，即导弹被云团包裹，此时可直接判定为有效遮蔽。表达式为：

$$d_{AB} \leq r.$$

6) 有效遮蔽时长计算函数

基于对遮蔽效果的分析，建立有效遮蔽时长函数表达式：

$$F(V, seta, T, t_1, t_2) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t \leq t_1 + t_2, \\ T_2 - T_1 + T_3 & t_1 + t_2 \leq t \leq t_1 + t_2 + t_x, \\ 0 & t \geq t_1 + t_2 + t_x, \end{cases}$$

其中 T_1 为导弹未进入云团时的开始遮蔽时刻； T_2 为遮蔽结束时刻； T_3 为导弹在云团内部时间， t_{start} 、 t_{end} 分别为导弹进入云团时刻与穿出云团时刻，数值上等于方程

$\sqrt{[x_i(t + \Delta t) - x_{yun}]^2 + [y_i(t + \Delta t) - y_{yun}]^2 + [z_i(t + \Delta t) - z_{yun}]^2} = r$ 的解，则 $T_3 = |t_{end} - t_{start}|$ 。

7) 双目标非线性规划

针对有效遮蔽时间最长以及使用无人机数量最少的投放策略安排，建立如下双目标非线性规划模型：

a) 决策变量

- i) 无人机 FYK 的飞行速度 V_{FYK}
- ii) 无人机飞行方向 $seta(k)$
- iii) 第 k 架无人机投放第一枚干扰弹飞行时间 t_{1k}
- iv) 第 k 架无人机投放的第 d 枚干扰弹与第 $d-1$ 枚干扰弹间隔时长 Δt_{dk}
- v) 第 k 架无人机投放的第 d 枚干扰弹飞行时间 $t_2^{(dk)}$

b) 目标函数

对于 n_1 枚导弹, 不同无人机投放的 d 枚干扰弹产生的烟幕云团可能会同时形成有效遮蔽, 故以最大化各烟幕云团遮蔽时间区间并集的总长度为目标函数, 其数学表达式如下:

$$\max \sum_{i=1}^{n_1} \left| \bigcup_{k=1}^{n_2} \bigcup_{d=1}^{n_{k,3}} F_{0,d}^{(k)} \left(v_{FYK}, seta(k), T, t_{1k} + \sum_{d=1}^{n_{k,3}-1} \Delta t_{dk}, t_2^{(dk)} \right) \right|$$

其中 $d=1, \dots, n_{k,3}; i=1, \dots, k; k=1, \dots, n_2$ 。

对于第 k 架无人机投放的烟幕干扰弹数量, 为避免资源浪费, 以最小化干扰弹投放数量为目标函数:

$$\min \sum_{k=1}^{n_2} n_{k,3}.$$

c) 约束条件

i) 每架无人机飞行速度 V_{FYK} 均满足:

$$V_{\max} \leq V_{FYK} \leq V_{\min}.$$

ii) 每架无人机飞行角度 $seta(k)$ 均满足:

$$0^\circ \leq seta(k) \leq 360^\circ.$$

iii) 每架无人机投放相邻两枚烟幕干扰弹间隔时长至少为 t_0 秒:

$$\Delta t_{dk} \leq t_0.$$

iv) 每架无人机投放烟幕干扰弹数量不超过 n_3 枚:

$$n_{k,3} \leq n_3.$$

v) 考虑多架无人机同时飞行, 要求任意两架无人机不相撞, 即二者距离应大于 0:

$$d(P_{FYk}(t_1), P_{FYf}(t_1)) \geq 0, k \neq f.$$

vi) 无人机飞行时间和干扰弹飞行时间均需要在合理范围内, 即二者最大时间不超过导弹击中假目标所需时间:

$$0 \leq t_{1k}, \Delta t_{dk}, t_2^{(dk)} \leq \frac{\sqrt{x_{Mi}^2 + y_{Mi}^2 + z_{Mi}^2}}{v_M}.$$

综上所述, 建立的双目标非线性规划模型为:

$$\begin{cases} \max \sum_{i=1}^{n_1} \left| \bigcup_{k=1}^{n_2} \bigcup_{d=1}^{n_{k,3}} F_{0,d}^{(k)} \left(v_{FYK}, seta(k), T, t_{1k} + \sum_{d=1}^{n_{k,3}-1} \Delta t_{dk}, t_2^{(dk)} \right) \right|, \\ \min \sum_{k=1}^{n_2} n_{k,3}, \\ \text{s.t.} \begin{cases} V_{\max} \leq V_{FYK} \leq V_{\min}, \\ 0^\circ \leq seta(k) \leq 360^\circ, \\ \Delta t_{dk} \leq t_0, \\ n_{k,3} \leq n_3, \\ d(P_{FYk}(t_1), P_{FYf}(t_1)) \geq 0, k \neq f, \\ 0 \leq t_{1k}, \Delta t_{dk}, t_2^{(dk)} \leq \frac{\sqrt{x_{Mi}^2 + y_{Mi}^2 + z_{Mi}^2}}{v_M}, \end{cases} \quad \forall k=1, \dots, n_2. \end{cases}$$

4. 干扰弹投放策略模型求解

基于模拟退火算法，求解烟幕干扰弹投放策略模型。使用的模拟退火算法[9]源于物理学中模拟固体物质退火过程，首先设定初始温度、冷却速度和终止温度，随机生成一个可行解后，在该解领域内寻找其他解，若该解使得目标函数结果更优则接受，否则根据 Metropolis 接受准则以一定的概率接受较差解，防止陷入局部最优解陷阱，逐渐减少接受较差解的概率，在迭代过程中，温度逐渐降低，当温度低于终止温度后迭代结束。该算法能够在解空间内高效地搜索全局最优解。

1) Metropolis 接受准则[10]

Metropolis 接受准则为使可行解跳出局部最优解的关键。通过该准则确定的概率不是固定的，而是根据不同状态间的差异来确定。假设前一状态点为 P ，寻找到下一状态点为 Q ，对应求得各自的目标函数值为 $F(P)$ 和 $F(Q)$ ，定义 P_r 为接受较差解的概率。

$$P_r = \begin{cases} 1 & F(Q) < F(P), \\ \exp\left(\frac{F(Q) - F(P)}{K \cdot T_{process}}\right) & F(Q) \geq F(P), \end{cases}$$

其中 K 为系数， $T_{process}$ 为当前温度。

2) 退火过程[11]

如何进行退火是模拟退火算法的关键步骤，在搜寻稳定的最优解过程中起到至关重要的作用，具体退火步骤见下表 1：

Table 1. Annealing process table

表 1. 退火流程表

Step 1	设定初始温度 T_{start} 、冷却速度 b 、终止温度 T_{end} 以及迭代最高迭代次数，其中初始温度应设置较高，以便在所有解空间内搜索。
Step 2	内循环：随机生成可行解，并以其为起点开始迭代，结合 Metropolis 准则接受并生成新解。
Step 3	外循环：当当前温度 $T_{process}$ 大于终止温度 T_{end} 时，执行内循环，一次内循环执行完成后根据冷却速度降低温度，再次进入内循环。
Step 4	重复上述步骤，设置步长，当前温度低于设定的终止温度或有收敛解时得出最优结果，认为此解为全局最优解。

其中 T_{start} 为模拟退火初始温度， T_{end} 为模拟退火终止温度， $T_{process}$ 为模拟退火过程中温度，即当前温度， b 为冷却速度， s 为算法步长。

5. 实例应用[12]

假设现共有 5 架无人机，位置信息分别为 FY1 (17,800, 0, 1800)、FY2 (12,000, 1400, 1400)、FY3 (6000, -3000, 700)、FY4 (11,000, 2000, 1800)、FY5 (1300, -2000, 1300)。某类型导弹飞行速度 300 m/s，导弹的飞行方向直指一个为掩护某半径 7 m、高 10 m 的圆柱形固定目标而专门设置的假目标。真目标下底面圆心为 (0, 200, 0)。雷达发现来袭导弹时，3 枚导弹 M1、M2、M3 分别位于 (20,000, 0, 2000)、(19,000, 600, 2100)、(18,000, -600, 1900) 处。每架无人机投放两枚烟幕干扰弹至少间隔 1 s。烟幕干扰弹脱离无人机后，在重力作用下运动。烟幕干扰弹起爆后瞬时形成球状烟幕云团，由于采用特定技术，该烟幕云团以 3 m/s 的速度匀速下沉。据试验数据可知，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。现规定每架无人机至多投放 3 枚烟幕干扰弹，给出投放策略。

采用 MATLAB 软件求解问题得出以下结果：

表 2 为第一架无人机 FY1 的烟幕弹投放策略，且求得 FY1 的飞行速度为 77.51 m/s，飞行角度为 103.01°，共投放 3 枚烟幕干扰弹。

Table 2. Drone deployment strategy for FY1

表 2. 无人机 FY1 投放策略

烟幕弹编号	投放点坐标	投放时间(s)	起爆点坐标	起爆时间(s)
1	(17,707, 401, 1800)	5.31 s	(17,707, 401, 1693)	9.97 s
2	(17,677, 532, 1800)	7.04 s	(17,677, 532, 1799)	7.54 s
3	(17,638, 701, 1800)	9.29 s	(17,638, 701, 1411)	18.19 s

表 3 为第二架无人机 FY2 的烟幕弹投放策略，且求得 FY2 的飞行速度为 84.81 m/s，飞行角度为 353.08°，共投放 2 枚烟幕干扰弹。

Table 3. Drone deployment strategy for FY2

表 3. 无人机 FY2 投放策略

烟幕弹编号	投放点坐标	投放时间(s)	起爆点坐标	起爆时间(s)
1	(15,520, 927, 1400)	41.81 s	(15,520, 927, 951)	51.39 s
2	(15,637, 958, 1400)	43.20 s	(15,637, 958, 936)	52.93 s

表 4 为第三架无人机 FY3 的烟幕弹投放策略，且求得 FY3 的飞行速度为 81.19 m/s，飞行角度为 265.68°，共投放 3 枚烟幕干扰弹。

Table 4. Drone deployment strategy for FY3

表 4. 无人机 FY3 投放策略

烟幕弹编号	投放点坐标	投放时间(s)	起爆点坐标	起爆时间(s)
1	(5790, -5779, 700)	34.33 s	(5790, -5779, 560)	39.66 s
2	(5779, -5920, 700)	36.07 s	(5779, -5920, 424)	43.58 s
3	(5772, -6021, 700)	37.31 s	(5772, -6021, 681)	39.29 s

表 5 为第四架无人机 FY4 的烟幕弹投放策略，且求得 FY4 的飞行速度为 113.64 m/s，飞行角度为 228.38°，共投放 2 枚烟幕干扰弹。

Table 5. Drone deployment strategy for FY4

表 5. 无人机 FY4 投放策略

烟幕弹编号	投放点坐标	投放时间(s)	起爆点坐标	起爆时间(s)
1	(9425, 227, 1800)	20.86 s	(9425, 227, 1170)	32.21 s
2	(9354, 147, 1800)	21.82 s	(9354, 147, 1741)	25.27 s

表 6 为第五架无人机 FY5 的烟幕弹投放策略，且求得 FY5 的飞行速度为 98.51 m/s，飞行角度为 227.15°，共投放 3 枚烟幕干扰弹。

Table 6. Drone deployment strategy for FY5**表 6.** 无人机 FY5 投放策略

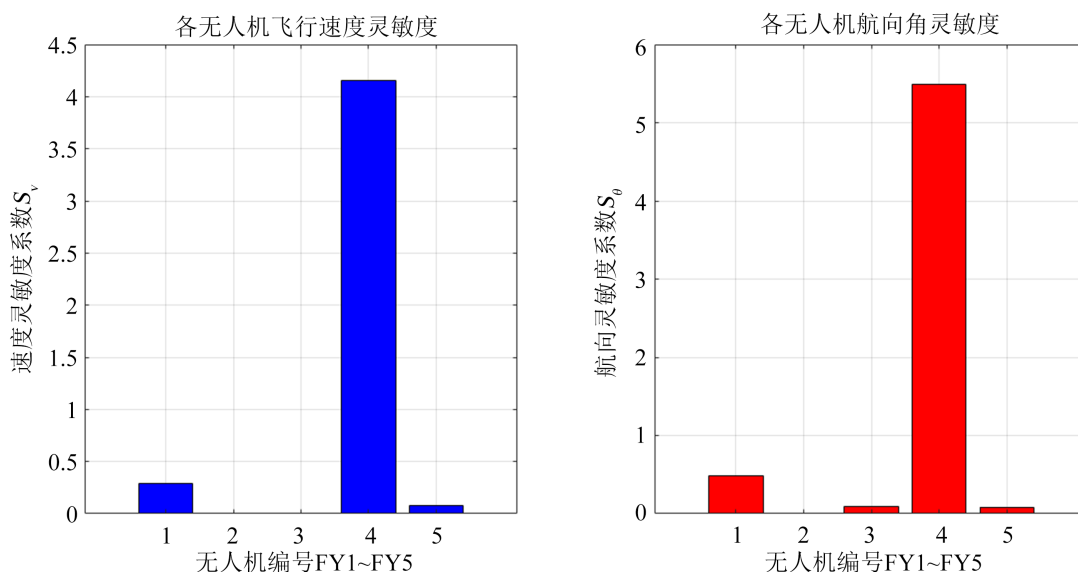
烟幕弹编号	投放点坐标	投放时间(s)	起爆点坐标	起爆时间(s)
1	(10,100, -5127, 1300)	43.29 s	(10,100, -5127, 1174)	48.36 s
2	(10,014, -5219, 1300)	44.58 s	(10,014, -5219, 1021)	52.12 s
3	(9985, -5250, 1300)	45.00 s	(9985, -5250, 956)	53.38 s

综上, 求解得出上述最优投放策略, 部分干扰弹投放后未对导弹进行有效遮蔽, 故最优烟幕弹投放总量为 13 枚, 用遮蔽时长刻画对导弹的遮蔽效果, 得出最大总有效遮蔽时长为 24.77 s。

6. 灵敏度分析

烟幕干扰弹的遮蔽效果与无人机飞行速度、飞行角度、云团遮蔽半径等多个参数密切相关。不同参数的变化情况对干扰弹有效遮蔽时长的影响存在显著差异, 通过对参数进行灵敏度分析, 量化分析不同参数变动下干扰弹遮蔽时长的变化规律, 分析关键参数的敏感程度与影响权重。现分别对 5 架无人机的飞行速度、航向角施加 $\pm 5\%$ 的微小相对扰动, 得各无人机速度、航向角灵敏度结果如下:

如图 4 通过灵敏度分析可得, 影响干扰弹遮蔽效果的关键参数为第四架无人机 FY4 的飞行速度和航向角, 其次是第一架无人机 FY1 的飞行速度和航向角, 故在实战中要精确控制无人机 FY4 的飞行参数。该分析为优化无人机参数配置、作战方案制定以及仿真模型校准提供可靠的理论支撑, 展现出较强的适应性与鲁棒性。

**Figure 4.** Bar charts showing the flight speed and heading angle sensitivity of various UAVs**图 4.** 各无人机飞行速度、航向角灵敏度柱状图

7. 总结

该模型适用于情况复杂的多架无人机投放多枚干扰弹对多个导弹进行遮蔽, 符合实际不同规模的作战情形, 具有较强的实用性。且使用的模拟退火算法对比传统算法能有效避免陷入局部最优解陷阱, 且全局搜索能力较强, 得出的解可信度高。

但该模型未考虑气流、空气阻力、导弹的质量体积等因素,仅看作理想的运动学模型,但在实际作战中因综合考虑各影响因素,提升投放精确度。使用模拟退火算法进行求解,对参数依赖度高,且需进行大量调试才能求得最佳解,自适应能力低。

可以使用更加精确的物理模型,比如对各物体的飞行轨道进行风力修正[13]等,确保烟幕干扰弹都能被投放到理想位置,发挥其最大遮蔽效果。

参考文献

- [1] 平殿发, 张伟, 张韞. 机载自卫箔条干扰弹投放策略研究[J]. 现代防御技术, 2015, 43(1): 1-6.
- [2] 陈书恒, 朱倪瑶, 陈宁, 等. 飞机红外辐射特性测试及红外干扰弹投放方式研究[J]. 红外技术, 2021, 43(10): 949-953.
- [3] 卿朝进, 何林锶, 王子龙, 等. 基于发现概率的箔条干扰弹投放策略研究[J]. 雷达科学与技术, 2024, 22(6): 672-680+688.
- [4] 朱卓, 刘琦妍, 张策. 基于遗传算法的自主干扰决策方法[J]. 中国民航大学学报, 2023, 41(4): 58-64.
- [5] 陈映津, 胡永华, 莫志瑜. 基于模拟退火算法与 A*算法融合求解路径规划[J]. 物联网技术, 2026, 16(1): 129-131+134.
- [6] 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.
- [7] 何声瑞, 平兆武, 张宏伟. 基于离散时间神经网络方法的高超声速飞行器跟踪控制[J]. 控制理论与应用, 2026, 43(1): 52-60.
- [8] 艾盼, 罗威, 钱欢. 烟幕弹发射参数对遮蔽效应影响的研究[J]. 光电技术应用, 2021, 36(3): 62-64+76.
- [9] 于豪, 张伦铨, 林益晟, 等. 基于混合预测与多目标模拟退火算法的电商仓库品类分仓规划研究[J]. 中国设备工程, 2025(4): 247-250.
- [10] 蒋惠波, 刘彬, 袁卫华. 基于 Metropolis 准则的自适应随机搜索算法研究[J]. 中国西部科技, 2015, 14(3): 17-19.
- [11] 马瑞, 罗俊杰. 基于模拟退火算法的混流装配车间车辆路径优化研究[J]. 青海交通科技, 2025, 37(1): 186-193.
- [12] 2025 年高教社杯全国大学生数学建模竞赛赛题[EB/OL]. https://www.mcm.edu.cn/html_cn/node/03c91a444e62eee81a3740fa97a461a6.html, 2025-09-04.
- [13] 罗瑞耀, 王得霖, 罗威, 等. 烟幕弹应对察打一体无人机的投放策略研究[J]. 光电技术应用, 2022, 37(6): 90-98.