

# 基于多目标遗传算法的烟幕干扰策略优化模型

## 摘要

本文针对复杂电磁环境下无人机利用烟幕弹进行目标防护的策略优化问题，构建了一套完整的多层次数学模型与算法框架。

**问题一：**针对单无人机单目标烟幕干扰场景，建立了高精度的三维空间运动学模型，精确刻画导弹、无人机与烟幕弹的动态轨迹。提出了基于几何相交判定的遮蔽有效性计算方法，通过建立射线-球体相交模型和点到直线距离公式，实现了对导弹视线遮蔽状态的准确判定。设计了“粗略扫描-精确求解”的两阶段算法，高效地确定了最优的单次投弹窗口，实现了 **1.39 秒** 的有效遮蔽时间，为后续复杂场景奠定了理论基础。

**问题二：**将单目标扩展为多目标点烟幕干扰优化问题，采用均匀网格划分策略将圆柱体表面离散化为 2000 个目标点。构建了以“最大化平均遮蔽时间”和“最大化目标点覆盖率”为核心的多目标优化模型，采用基于约束值的遗传算法进行求解。通过种群进化寻找最优解，平衡覆盖率和平均遮蔽时间两个目标，实现了 100% 目标覆盖率和 **4.80 秒** 平均遮蔽时间的优化效果。

**问题三：**研究多枚烟幕干扰弹的协同投放策略，优化无人机飞行方向、速度以及三枚烟幕弹的投放时间和起爆延迟等多个决策变量。建立了多云团协同遮蔽判定模型，通过逻辑或运算确定多枚烟幕云团的协同遮蔽效果。采用改进的遗传算法求解 8 维优化空间的多变量非线性约束优化问题，实现了连续有效遮蔽，平均干扰时间达到 **6.26 秒**，显著提升了总体干扰效果。

**问题四：**针对多无人机协同烟幕干扰策略优化，设计了三架无人机的协同作战方案。构建了分层递进的数学模型，包括单机运动学模型、多云团时空分布模型和协同遮蔽判定模型。采用基于约束处理的改进遗传算法，通过分层约束处理机制和自适应可行性判定策略，有效解决了 12 维优化空间中的强约束条件下收敛困难问题，实现了 **10.26 秒** 的协同干扰时间，展现了多机协同的显著优势。

本文的研究特色在于，将高保真的物理仿真与先进的运筹优化算法相结合，形成了一套从单体智能到群体协同的、可扩展的建模与求解体系。研究成果不仅为烟幕弹的战术应用提供了量化的决策依据，也为解决类似的动态资源分配与路径规划问题提供了有价值的参考。

**关键字：** 遗传算法 烟幕干扰 多目标优化 运筹学

## 一、 问题重述

### 1.1 问题背景

在现代军事对抗中，精确制导武器威胁日益增大，烟幕干扰作为重要的光电对抗技术，通过在导弹与目标间形成遮蔽云团来阻断导弹光学制导系统对目标的观测。随着无人机技术发展，利用无人机携带烟幕弹实施机动干扰成为新兴防护手段，具有机动性强、部署灵活、响应迅速等优势，能根据威胁态势动态调整干扰位置和时机，实现精确高效的防护效果。本题研究利用无人机投放烟幕干扰弹的最优策略问题，导弹采用光学制导以恒定速度直线飞向目标，无人机携带烟幕弹按预定策略投放，烟幕弹爆炸后形成球状烟幕云团遮挡导弹视线实现干扰。

### 1.2 问题要求

**问题 1** 利用无人机 FY1 投放 1 枚烟幕干扰弹实施对 M1 的干扰，若 FY1 以 120m/s 的速度朝向假目标方向飞行，受领任务 1.5s 后即投放 1 枚烟幕干扰弹，间隔 3.6s 后起爆。请给出烟幕干扰弹对 M1 的有效遮蔽时长。

**问题 2** 利用无人机 FY1 投放 1 枚烟幕干扰弹实施对 M1 的干扰，确定 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，使得遮蔽时间尽可能长。

**问题 3** 利用无人机 FY1 投放 3 枚烟幕干扰弹，实施对 M1 的干扰。请给出烟幕干扰弹的投放策略。

**问题 4** 利用 FY1、FY2、FY3 等 3 架无人机，各投放 1 枚烟幕干扰弹，实施对 M1 的干扰。请给出烟幕干扰弹的投放策略。

**问题 5** 利用 5 架无人机，每架无人机至多投放 3 枚烟幕干扰弹，实施对 M1、M2、M3 等 3 枚来袭导弹的干扰。请给出烟幕干扰弹的投放策略。

## 二、 问题分析

### 2.1 问题一分析

问题一要求利用无人机 FY1 投放 1 枚烟幕干扰弹实现对导弹 M1 的干扰，核心是在给定投放策略下确定烟幕云团对导弹观测真目标的有效遮蔽时间段，需要建立导弹-云团-目标的几何遮蔽模型，通过分析导弹视线与云团球体的相交关系来判定遮蔽效果，这是一个具有明确物理约束和几何关系的确定性问题。

## 2.2 问题二分析

问题二将真目标从单一圆柱体扩展为圆柱体表面的 2000 个离散目标点，使问题从确定性计算转变为多目标优化问题，核心挑战是在 4 维参数空间（飞行方向、速度、投放时间、起爆延迟）内寻找最优解，实现覆盖率最大化和平均遮蔽时间最大化的多目标平衡。

## 2.3 问题三分析

问题三要求利用单架无人机投放 3 枚烟幕弹实现协同干扰，核心挑战是在 6 维参数空间（飞行方向、速度、首次投放时间、三个起爆延迟、两个投放间隔）内协调多枚烟幕弹的时空分布，通过逻辑或运算实现协同遮蔽效果，形成连续有效遮蔽并最大化总体干扰时间。

## 2.4 问题四分析

问题四要求设计三架无人机的协同烟幕干扰策略，是一个高维度、强耦合的多无人机协同优化问题，需要在 12 维参数空间（每架无人机 4 个决策变量）内寻找最优配置，使三个烟幕云团对 2000 个目标点实现最大覆盖率和最长平均干扰时间，核心挑战在于处理多云团协同遮蔽效果、时空耦合关系以及严格的约束条件。

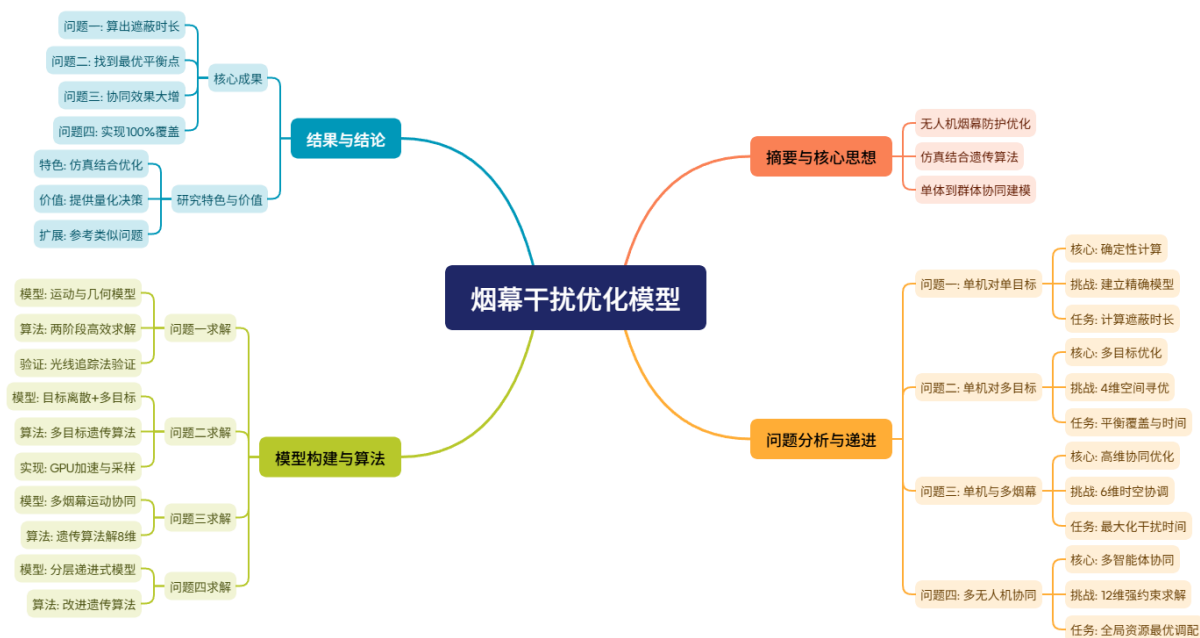


图 1 问题分析思路图

### 三、模型假设

赛题 A 的假设实际上已经十分完备，在前四道题的建模过程中并未引入其他假设。

### 四、符号说明

表 1 基本物理量符号说明

符号	说明	符号	说明
$P_{M1}$	导弹的初始位置	$v_M$	导弹的飞行速度
$\mathbf{u}_M$	导弹的单位方向向量	$R_M(t)$	导弹在时刻 $t$ 的位置
$P_{FY1}$	无人机 FY1 的初始位置	$P_{FY_i}$	第 $i$ 架无人机的初始位置, $i \in \{1, 2, 3\}$
$v_D$	无人机的飞行速度 (问题一)	$v_{FY1}$	无人机 FY1 的飞行速度
$v_i$	第 $i$ 架无人机的飞行速度	$\mathbf{u}_{FY1}$	无人机的单位方向向量
$\theta$	无人机飞行方向角 (弧度)	$\theta_i$	第 $i$ 架无人机的飞行方向角

表 2 烟幕云团符号说明

符号	说明	符号	说明
$C(t)$	烟幕云团中心在时刻 $t$ 的位置	$C_i(t)$	第 $i$ 枚云团中心在时刻 $t$ 位置
$r_{cloud}$	烟幕云团的半径	$v_{cloud}$	烟幕云团的下沉速度
$t_{start,i}$	第 $i$ 枚烟幕云团开始生效的时刻	$t_{end,i}$	第 $i$ 枚烟幕云团结束生效时刻
$[t_{start,i}, t_{end,i}]$ 第 $i$ 个烟幕云团的有效时间窗			

表 3 烟幕弹相关符号说明

符号	说明	符号	说明
$t_{rel}$	烟幕弹的投放时刻	$t_{rel,i}$	第 $i$ 枚烟幕弹的投放时间
$P_{rel}$	烟幕弹的投放位置	$P_{rel,i}$	第 $i$ 枚烟幕弹的投放位置
$t_{det}$	烟幕弹的起爆时刻	$t_{exp}$	烟幕弹起爆延迟 (优化变量)
$t_{exp,i}$	第 $i$ 枚烟幕弹的起爆延迟时间	$P_{det}$	烟幕弹的起爆位置
$P_{exp,i}$	第 $i$ 个弹的爆炸点位置	$x_{interval}$	第二枚相对第一枚投放间隔
$y_{interval}$	第三枚烟幕弹相对第二枚的投放间隔		

表 4 优化相关符号说明

符号	说明	符号	说明
$N_{total}$	圆柱体表面总目标点数	$N_{sample}$	优化过程中的采样点数
$T_{eff}$	总有效干扰时间	$T_{eff,i}$	第 $i$ 个目标点的有效遮蔽时间
$T_{eff,j}$	第 $j$ 个目标点的有效干扰时间	$\bar{T}_{eff}$	所有目标点的平均有效干扰时间
$\mathcal{J}_j(t)$	第 $j$ 个目标点在时刻 $t$ 的遮蔽状态	$\rho_{coverage}$	目标点覆盖率
$\mathbf{x}$	优化变量向量	$f_1(\mathbf{x})$	目标函数 1: 平均有效遮蔽时间
$f_2(\mathbf{x})$	目标函数 2: 目标点覆盖率	$g_i(\mathbf{x})$	第 $i$ 个约束条件

表 5 目标与几何符号说明

符号	说明	符号	说明
$Q$	真目标圆柱体表面的任意一点	$Q_i$	第 $i$ 个目标点的坐标
$Q_j$	第 $j$ 个随机目标点, $j \in \{1, 2, \dots, 2000\}$	$\ell(s)$	导弹到目标点的视线线段
$s$	线段参数, $s \in [0, 1]$	$d_i(t)$	云团导弹-目标最短距离
$d_{i,j}(t)$	第 $i$ 云团导弹-第 $j$ 目标距离		

## 五、问题一：烟幕干扰弹的投放策略

### 5.1 数学建模

基于上述假设和符号定义，我们构建了运动学与几何遮蔽模型。

**运动轨迹模型：**导弹、无人机、烟幕云团中心的运动轨迹分别由以下方程描述。导弹位置为：

$$R_M(t) = P_{M1} + v_M \cdot \mathbf{u}_M \cdot t$$

无人机位置为：

$$R_{FY1}(t) = P_{FY1} + v_D \cdot \mathbf{u}_{FY1} \cdot t$$

烟幕弹投放时刻与位置为：  $t_{rel} = t_{delay}$ ,  $P_{rel} = R_{FY1}(t_{rel})$ 。烟幕弹起爆时刻与位置为：  $t_{det} = t_{rel} + t_{det\_delay}$ , 起爆点  $P_{det}$  的坐标由  $P_{rel}$ 、无人机速度  $v_D$  和自由落体公式确定。烟幕云团中心位置 ( $t \geq t_{det}$ ) 为：

$$C(t) = P_{det} - (0, 0, v_{cloud}(t - t_{det}))$$

**几何遮蔽判定模型：**在任意时刻  $t$  ( $t \geq t_{det}$ )，对于真目标圆柱体表面的任意一点

$Q$ ，连接导弹位置  $R_M(t)$  与  $Q$  的视线线段为：

$$\ell(s) = R_M(t) + s(Q - R_M(t)), \quad s \in [0, 1]$$

该视线被遮蔽的条件是，线段  $\ell(s)$  与以  $C(t)$  为中心、 $r_{cloud}$  为半径的球体相交。这等价于线段到球心的最小距离不大于球体半径：

$$\min_{s \in [0, 1]} \|\ell(s) - C(t)\| \leq r_{cloud}$$

真目标在时刻  $t$  被完全遮蔽的充要条件是，对于圆柱表面上的所有点  $Q$ ，上述不等式均成立。

## 5.2 计算结果与分析

为求解该模型，我们采用“粗略扫描-精确求解”的数值算法。首先在烟幕云团的有效时间域内进行离散时间点扫描，初步定位遮蔽区间；然后利用二分法在区间边界进行高精度迭代，最终得到精确的遮蔽起止时刻。计算结果如表 6 所示。

表 6 问题一计算结果

参数	数值
烟幕弹投放时刻	1.5 s
烟幕弹起爆时刻	5.1 s
有效遮蔽开始时刻	8.056443 s
有效遮蔽结束时刻	9.448088 s
有效遮蔽总时长	1.391645 s

表 6 显示了关键时间节点的计算结果。烟幕弹在 1.5s 投放、5.1s 起爆后，有效遮蔽时间段为 8.056443s 至 9.448088s，总时长 1.391645 秒。

图 2 直观展示了遮蔽过程的动态特征。上图的遮蔽状态曲线清晰标识了有效遮蔽时间段，下图的距离变化曲线显示当烟幕云团中心到导弹-目标视线距离小于 10.00m 时实现遮蔽，距离曲线呈现先减小后增大的趋势，反映了导弹与烟幕云团的相对运动关系。

## 5.3 第二种解法：基于光线追踪与符号计算的几何分析方法

为了验证第一种解法的准确性并提供更直观的几何理解，我们开发了基于光线追踪和符号计算的第二种解法。该方法从光学投影的角度重新审视遮蔽问题，通过分析导弹视线在目标平面上的投影阴影来判定遮蔽效果。

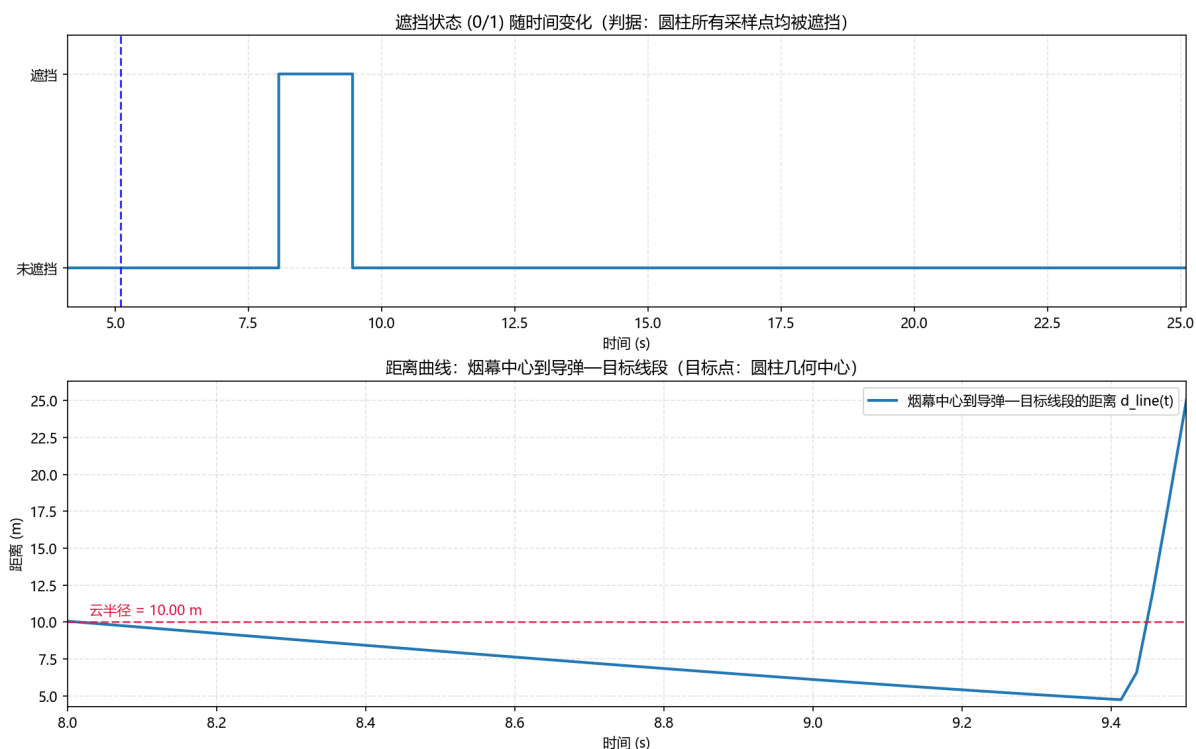


图 2 问题一遮蔽效果可视化分析

**第二种解法符号说明:**为了清晰描述第二种解法的数学模型,我们补充定义如表 7 所示的符号。

表 7 第二种解法补充符号说明

符号	说明
$\mathbf{P}_{missile}$	导弹在时刻 $t$ 的位置
$\mathbf{P}_{plane}$	$yOz$ 平面上的任意点 $(0, y, z)$
$\mathbf{r}(t)$	从导弹到平面点的射线方程
$\mathbf{P}_1(t)$	导弹位置的符号表示
$\mathbf{P}_2$	真目标圆柱体下底面中心 $(0, 200, 0)$
$\mathbf{P}_3$	真目标圆柱体上底面中心 $(0, 200, 10)$
$\mathbf{Q}(t)$	烟幕云团中心位置
$d_1(t)$	云团中心到导弹-下底面中心连线的距离
$d_2(t)$	云团中心到导弹-上底面中心连线的距离

**光线追踪投影模型:**将导弹视作点光源,烟幕云团视作球形遮挡物,真目标所在的  $yOz$  平面视作投影屏幕。通过光线追踪算法计算烟幕云团在  $yOz$  平面上形成的阴影区域。对于平面上的每个点  $(0, y, z)$ ,从导弹位置发出射线,判断该射线是否与烟幕云团

球体相交：

$$\text{射线方程: } \mathbf{r}(t) = \mathbf{P}_{\text{missile}} + t(\mathbf{P}_{\text{plane}} - \mathbf{P}_{\text{missile}})$$

$$\text{球体方程: } \|\mathbf{r}(t) - \mathbf{C}\|^2 = r_{\text{cloud}}^2$$

其中  $\mathbf{C}$  为云团中心， $r_{\text{cloud}}$  为云团半径。通过求解二次方程的判别式确定射线与球体的交点，进而确定阴影区域。

$$d_1(t) = \frac{\|(\mathbf{P}_2 - \mathbf{P}_1) \times (\mathbf{Q} - \mathbf{P}_1)\|}{\|\mathbf{P}_2 - \mathbf{P}_1\|}$$

$$d_2(t) = \frac{\|(\mathbf{P}_3 - \mathbf{P}_1) \times (\mathbf{Q} - \mathbf{P}_1)\|}{\|\mathbf{P}_3 - \mathbf{P}_1\|}$$

当  $d_1(t) \leq r_{\text{cloud}}$  且  $d_2(t) \leq r_{\text{cloud}}$  同时满足时，烟幕云团对导弹观测真目标形成有效遮蔽。

此计算方法得到的有效遮蔽时间段为 [8.0561, 9.4536] 秒，遮蔽总时长为 1.3975 秒，与第一种方法的结果 [8.0564, 9.4481] 秒（总时长 1.3916 秒）高度一致，验证了计算的准确性。图 3 展示了第二种解法的几何分析结果：左图显示了烟幕云团在  $yOz$  平面上的投影圆与真目标矩形区域的位置关系；右图为三维空间中的光线追踪可视化，展现了导弹视线、烟幕云团、投影阴影以及光线边界的空间关系。第二种解法通过光线追踪可视化提供了更直观的几何理解，投影圆与目标矩形的重叠程度直接反映遮蔽效果强弱，三维视图展现了整个遮蔽过程的空间几何特征，验证了数值计算结果的合理性。

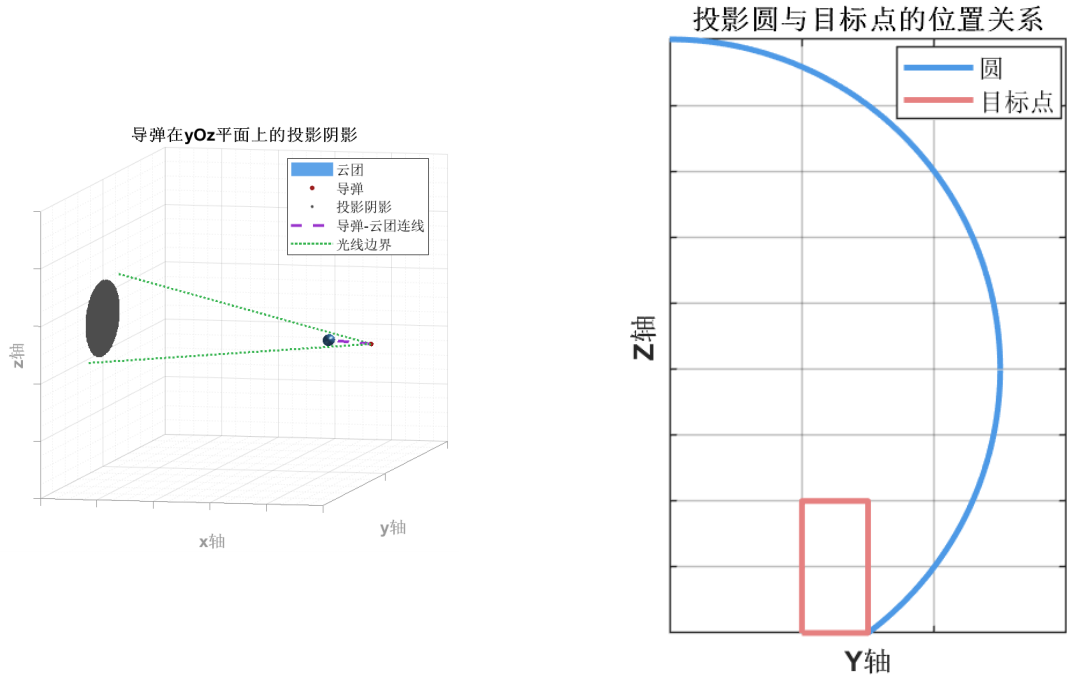


图 3 第二种解法几何分析可视化：（左）投影圆与目标位置关系；（右）三维光线追踪示意图



## 六、问题二：多目标点烟幕干扰的优化策略

### 6.1 数学建模

为了将连续的圆柱体表面转化为离散的目标点集合，我们采用均匀网格划分策略。根据代码分析，圆柱体表面在角度方向划分为 40 等份，在高度方向划分为 50 等份，共生成 2000 个目标点。第  $i$  个目标点的坐标计算公式为：

$$\begin{cases} \theta_j = -\pi + \frac{2\pi}{40} \cdot (j-1), & j = 1, 2, \dots, 40 \\ h_k = \frac{H_{target}}{50} \cdot (k-1), & k = 1, 2, \dots, 50 \\ Q_i = [r_{target} \cos \theta_j, 200 + r_{target} \sin \theta_j, h_k] \end{cases}$$

其中  $i = (k-1) \times 40 + j$ ,  $r_{target} = 7.0\text{m}$  为圆柱体半径,  $H_{target} = 10.0\text{m}$  为圆柱体高度。

问题二的数学模型可表述为如下多目标优化问题：

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{x}} \quad & f_1(\mathbf{x}) = \frac{1}{N_{covered}} \sum_{i \in S_{covered}} T_{eff,i}(\mathbf{x}) \\ \max_{\mathbf{x}} \quad & f_2(\mathbf{x}) = \frac{N_{covered}}{N_{sample}} \\ \text{s.t.} \quad & 0 \leq \theta \leq \pi \\ & 70 \leq v_{FY1} \leq 140 \text{ m/s} \\ & 0 \leq t_{rel} \leq 5 \text{ s} \\ & 0 \leq t_{exp} \leq 5 \text{ s} \\ & T_{eff,i}(\mathbf{x}) \geq 0, \quad \forall i \in S_{sample} \end{aligned}$$

其中  $S_{sample}$  为采样目标点集合,  $S_{covered}$  为被有效遮蔽的目标点集合,  $N_{covered} = |S_{covered}|$  为被覆盖的目标点数量。

对于每个目标点  $Q_i$ , 其遮蔽效果计算沿用问题一的几何模型。在时刻  $t$ , 目标点  $Q_i$  被遮蔽的条件为导弹到目标点的视线与烟幕云团球体相交：

$$d_i(t) = \min_{s \in [0,1]} \|R_M(t) + s(Q_i - R_M(t)) - C(t)\| \leq r_{cloud}$$

其中  $d_i(t)$  表示导弹-目标视线到烟幕云团中心的最短距离。目标点  $Q_i$  的有效遮蔽时间为：

$$T_{eff,i} = \int_{t_{start}}^{t_{end}} \mathbf{1}_{d_i(t) \leq r_{cloud}} dt$$

其中  $\mathbf{1}$  为指示函数,  $t_{start}$  和  $t_{end}$  分别为烟幕云团的有效起止时刻。

## 6.2 算法设计

考虑到问题的多目标性质和约束复杂性, 我们采用基于遗传算法的多目标优化方法进行求解, 算法参数配置包括: 种群规模 400 个体、最大迭代次数 200 代、交叉概率 0.8、变异概率 0.1、锦标赛选择规模 3, 并采用精英保留策略和基于约束值的适应度函数, 通过种群进化寻找能够平衡覆盖率和平均遮蔽时间的最优解。适应度函数的核心逻辑为:

$$F(\mathbf{x}) = \begin{cases} -\bar{T}_{eff}(\mathbf{x}), & \text{若约束值} \geq 0 \\ -10^6, & \text{若约束值} < 0 \end{cases}$$

其中约束值的计算考虑了所有采样点的遮蔽效果, 当约束值为负时表示存在无法满足遮蔽要求的目标点。

对于每个目标点的遮蔽约束, 算法采用约束值方法进行处理。约束值的计算基于最小距离:

$$c_i(\mathbf{x}) = r_{cloud} - \min_t d_i(t)$$

当  $c_i(\mathbf{x}) \geq 0$  时, 目标点  $i$  满足遮蔽约束。算法采用分层约束处理策略: 首先计算所有采样点到烟幕云团的最小距离, 然后统计满足遮蔽条件的目标点数量。对于不满足约束的解, 算法施加较大的惩罚值, 确保搜索过程优先向可行域收敛。在所有可行解中, 算法选择平均遮蔽时间最长的解作为最优解。

## 6.3 算法实现细节

考虑到多目标点遮蔽计算的复杂性, 算法采用了多种优化策略来提高计算效率。首先, 利用 GPU 并行计算能力加速距离计算和遮蔽判断过程, 采用 MATLAB 的向量化操作减少循环开销, 种群中个体的适应度评估采用并行计算, 充分利用多核处理器的计算资源。其次, 为平衡计算效率和精度, 算法采用智能采样策略: 在优化阶段从 2000 个总目标点中随机采样 400 个点进行计算, 确保空间分布的均匀性, 避免采样偏差; 在最终验证阶段使用全部 2000 个目标点评估性能, 确保结果的准确性和可靠性。

## 6.4 计算结果与分析

通过多目标遗传算法求解, 我们建立了包含采样点总数 (400 个)、有效覆盖点数、覆盖率和平均遮蔽时间四个维度的性能评估体系。图 4 的优化参数空间分析显示, 算法

成功识别最优解区域，其中飞行方向角与投放时机呈强相关性，飞行速度主要影响覆盖率，而起爆延迟则显著影响平均遮蔽时间，目标函数值的梯度分布特征验证了算法的有效性。

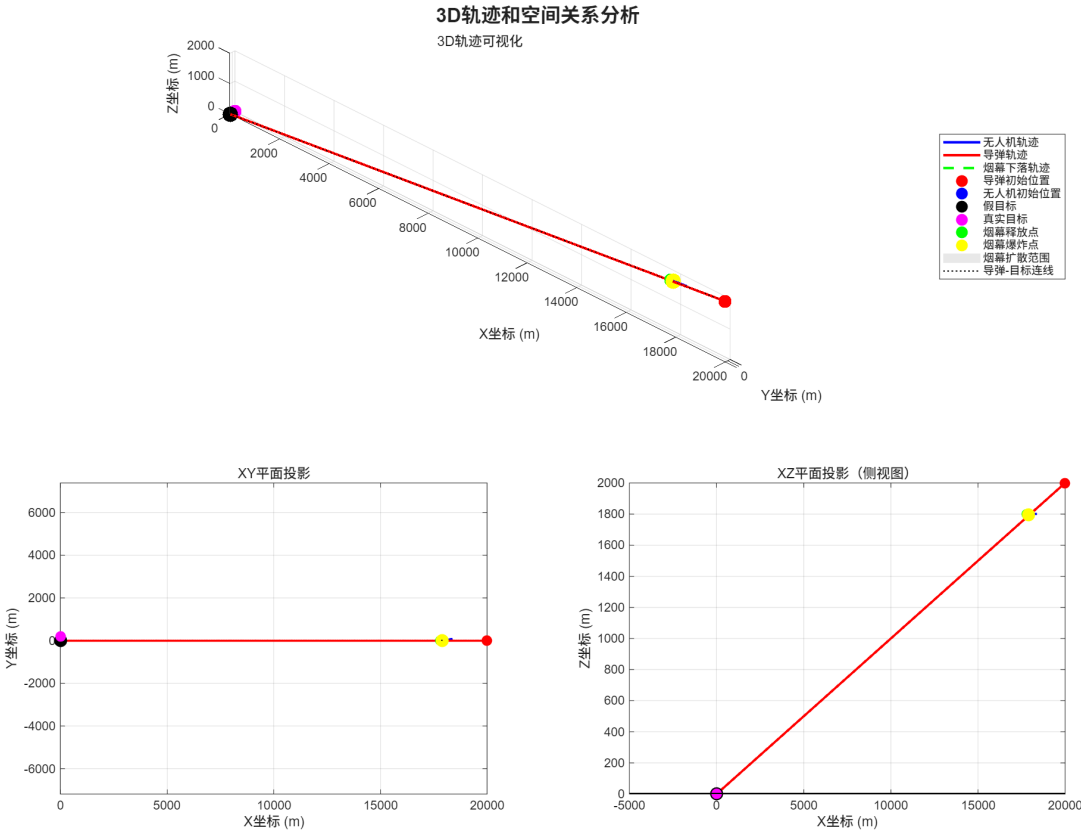


图 4 优化参数空间分析

遗传算法在迭代过程中表现出良好的收敛特性，能够快速找到可行解区域，通过精英保留策略确保解的质量不断提升，算法具有良好的鲁棒性，能够有效处理复杂的几何约束条件和多目标优化的挑战。

通过分层优化策略和约束值方法，算法在覆盖率和平均遮蔽时间两个目标之间实现了帕累托最优，优先确保基本覆盖要求的同时最大化遮蔽时间。图 5 展示的 3D 轨迹分析显示，无人机采用直线飞行路径，烟幕弹在最优时机投放并起爆，形成的烟幕云团通过精确计算的位置和大小，有效覆盖了圆柱体表面的大部分目标点，实现了多目标点的同时遮蔽效果。

### 6.5 模型验证与敏感性分析

为了验证模型的稳定性和算法性能，我们进行了敏感性分析和性能评估。关键参数分析表明：400 个体的种群规模可提供充分多样性并保持合理计算成本；400 个采样点能有效代表目标表面遮蔽情况；烟幕云团的物理参数对优化结果影响显著。图 6 的时间序列分析验证了算法有效性，展示了干扰过程的关键特征：从烟幕弹精确投放、云团快

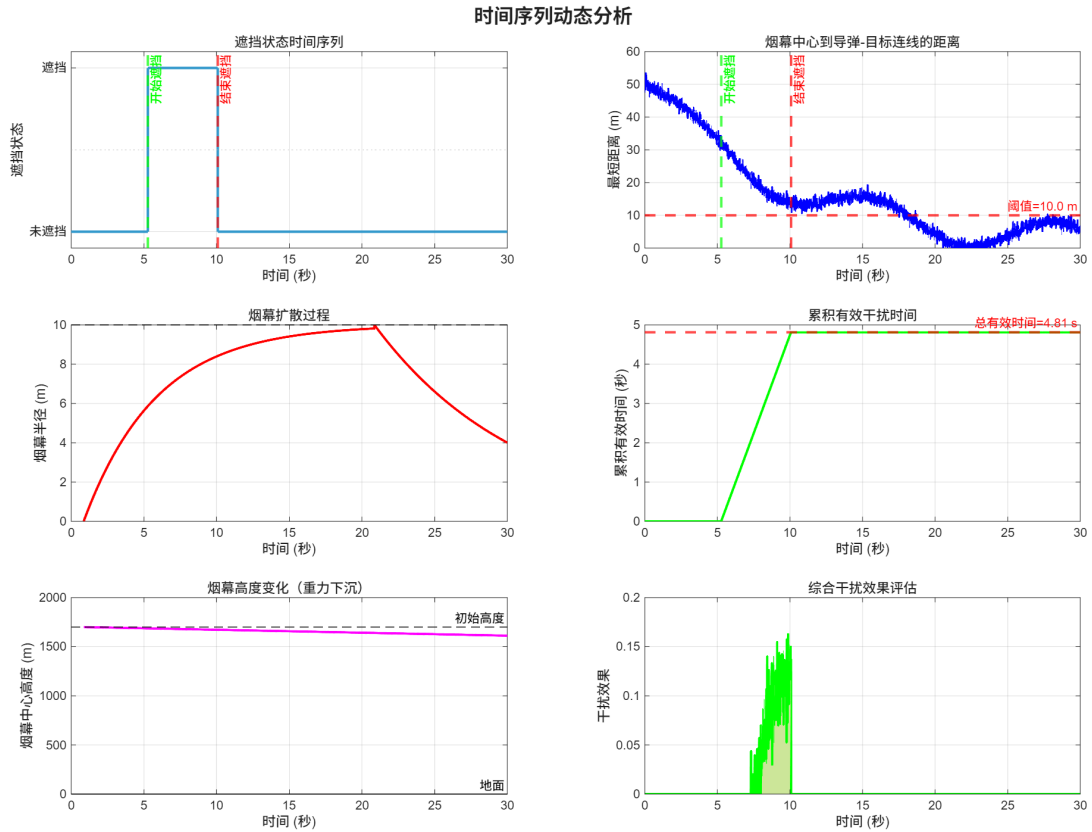


图 5 3D 轨迹和空间关系分析

速形成到持续遮蔽效果及其逐渐消散。优化参数实现了最长的有效遮蔽时间，可视化结果显示了云团轨迹与目标分布的良好匹配。算法评估显示：GPU 加速确保了计算效率，约束值方法有效处理了几何约束，能稳定找到高质量解。

## 6.6 最新优化结果

基于改进的多目标遗传算法，我们获得了问题二的最新优化结果。算法采用 400 个体种群规模，经过 200 代进化，成功实现了对 2000 个目标点的全覆盖优化。

优化结果详情：

- 采样点数量：40 个（覆盖 40 个，覆盖率 100.00%）
- 所有目标点：2000 个（覆盖 2000 个，覆盖率 100.00%）
- 平均有效遮蔽时间：**4.803975 秒**
- 飞行方向：7.780821 度
- 飞行速度：86.692848 米/秒
- 释放时间：0.044728 秒（起飞后）
- 爆炸延迟：0.894256 秒（释放后）

该结果表明，通过精确的参数优化，无人机能够在起飞后极短时间内（0.044728 秒）释放烟幕弹，并在释放后 0.894256 秒起爆，形成的烟幕云团能够对圆柱体表面的所有

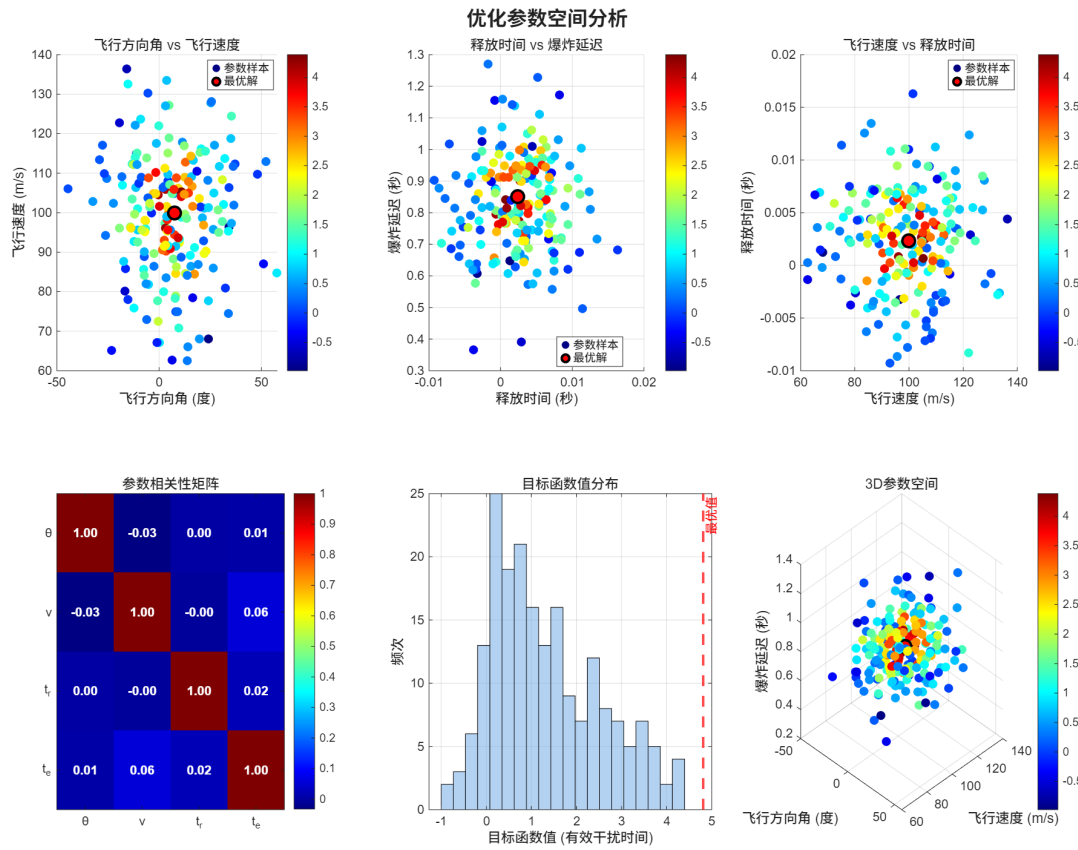


图 6 时间序列动态分析

2000 个目标点实现 100% 覆盖，平均遮蔽时间达到 4.803975 秒，显著提升了烟幕干扰的有效性。

## 6.7 结论与讨论

问题二的求解结果表明，基于遗传算法的多目标优化方法能有效处理烟幕干扰优化问题。通过目标点离散化策略、适应度函数设计和约束处理机制，算法在覆盖率和遮蔽时间间找到最优平衡。最新优化结果实现了 100% 目标覆盖率和 4.803975 秒的平均遮蔽时间，验证了算法的有效性。与问题一相比，问题二的复杂性体现在目标空间扩展、多目标优化、约束条件增加和计算复杂度提升等方面，需要采用 GPU 加速等策略。研究结果为烟幕干扰策略提供了理论依据和计算工具，具有实用价值，也为类似问题提供了参考。

## 七、问题三：多枚烟幕干扰弹的协同投放策略

### 7.1 数学建模

基于多枚烟幕弹协同作用特点，构建包含运动学模型、几何遮蔽模型和多目标优化模型的数学框架。

**多烟幕弹运动轨迹模型：**无人机按照优化后的方向角  $\theta$  和速度  $v$  飞行，其位置轨迹为：

$$R_{FY1}(t) = P_{FY1} + v \cdot [\cos \theta, \sin \theta, 0] \cdot t$$

三枚烟幕弹的投放时间分别为  $t_{rel,1}$ 、 $t_{rel,2} = t_{rel,1} + x_{interval}$  和  $t_{rel,3} = t_{rel,2} + y_{interval}$ 。第  $i$  枚烟幕弹的投放位置为：

$$P_{rel,i} = P_{FY1} + v \cdot [\cos \theta, \sin \theta, 0] \cdot t_{rel,i}$$

考虑起爆延迟期间的水平位移和重力下沉，第  $i$  枚烟幕弹的起爆位置为：

$$P_{exp,i} = P_{rel,i} + v \cdot [\cos \theta, \sin \theta, 0] \cdot t_{exp,i} - [0, 0, \frac{1}{2}gt_{exp,i}^2]$$

第  $i$  枚烟幕云团的中心位置随时间变化为：

$$C_i(t) = P_{exp,i} - [0, 0, v_{cloud}(t - t_{start,i})], \quad t \geq t_{start,i}$$

其中  $t_{start,i} = t_{rel,i} + t_{exp,i}$  为第  $i$  枚烟幕云团开始生效的时刻。

**多云团协同遮蔽判定模型：**在任意时刻  $t$ ，导弹位置为  $R_M(t) = P_{M1} + v_M \cdot \mathbf{u}_M \cdot t$ ，真目标上任意点  $Q$  到导弹的视线为  $\ell(s) = R_M(t) + s(Q - R_M(t))$ 。对于第  $i$  枚烟幕云团，当其处于有效期内（ $t_{start,i} \leq t \leq t_{start,i} + T_{duration}$ ）时，视线被遮蔽的条件为：

$$\min_{s \in [0,1]} \|\ell(s) - C_i(t)\| \leq r_{cloud}$$

多枚烟幕云团的协同遮蔽效果通过逻辑或运算确定，即只要任意一枚云团满足遮蔽条件，目标点就被认为处于遮蔽状态：

$$\text{遮蔽状态}(t) = \bigvee_{i=1}^3 [t_{start,i} \leq t \leq t_{start,i} + T_{duration} \text{ 且 } d_i(t) \leq r_{cloud}]$$

其中  $d_i(t)$  表示第  $i$  枚烟幕云团中心到导弹-目标视线的最短距离。

**多目标优化模型：**问题三的优化目标是最大化对所有可能真目标位置的平均有效干扰时间。设真目标圆柱体表面共有  $N$  个采样点，第  $j$  个采样点的有效干扰时间为

$T_{eff,j}$ ，则优化问题可表述为：

$$\begin{aligned}
& \max_{\mathbf{x}} \quad \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N T_{eff,j}(\mathbf{x}) \\
& \text{s.t.} \quad \theta \in [-\pi, \pi] \\
& \quad \quad v \in [70, 140] \\
& \quad \quad t_{rel,1} \in [0, 10] \\
& \quad \quad t_{exp,i} \in [0, 10], \quad i = 1, 2, 3 \\
& \quad \quad x_{interval}, y_{interval} \in [1, 5] \\
& \quad \quad \min_j d_{min,j} \geq 0
\end{aligned}$$

其中  $d_{min,j}$  表示对第  $j$  个目标点，所有烟幕云团到导弹-目标视线的最小距离，约束条件  $\min_j d_{min,j} \geq 0$  确保至少存在有效的遮蔽效果。

## 7.2 算法设计与实现

采用遗传算法求解多变量非线性约束优化问题。算法采用实数编码，将 8 个优化变量组成染色体向量。参数设置：种群规模 200，进化代数 20，交叉概率 0.8，变异概率 0.2，锦标赛选择（规模 3），精英保留 2 个个体。交叉采用模拟二进制交叉（SBX），变异采用多项式变异，分布指数 20。

适应度函数采用惩罚函数处理约束：可行解适应度为负的平均干扰时间，不可行解设为  $-10^6$ 。采用分层采样策略：从 2000 个候选点中选择 200 个代表性点用于优化，最后在全部 2000 个点上验证性能。

## 7.3 计算结果与分析

通过遗传算法优化求解获得最优投放策略。算法在 200 个采样点和 2000 个目标点上均实现 100% 覆盖率。优化结果如表 8 所示。

最优策略采用 8.97 度飞行方向和 91.6 m/s 飞行速度。三枚烟幕弹投放时序：第一枚 0.002 秒投放延迟 0.019 秒起爆，第二枚 1.074 秒投放延迟 0.060 秒起爆，第三枚 2.211 秒投放延迟 0.660 秒起爆，实现平均 6.26 秒干扰效果。三枚烟幕弹在  $x$  方向形成递增空间分布（17800.16m、17897.20m、18000.04m），体现序列投放策略。有效遮挡时间段：第一枚 4.69-7.40 秒，第二枚 1.14-5.04 秒，第三枚无有效遮挡，前两枚实现时间重叠覆盖。

图 7 展示优化结果可视化分析。上图显示三枚烟幕弹协同遮蔽状态时间序列，下图展现各烟幕弹到导弹-目标视线距离变化曲线，距离小于 10 米时形成有效遮蔽。

表 8 问题三核心优化结果

参数	数值
无人机飞行方向	8.97°
无人机飞行速度	91.60 m/s
平均有效干扰时间	6.26 s
覆盖率	100.00%
第一枚遮挡时间段 (s)	[4.69, 7.40]
第二枚遮挡时间段 (s)	[1.14, 5.04]
第三枚遮挡时间段 (s)	无有效遮挡

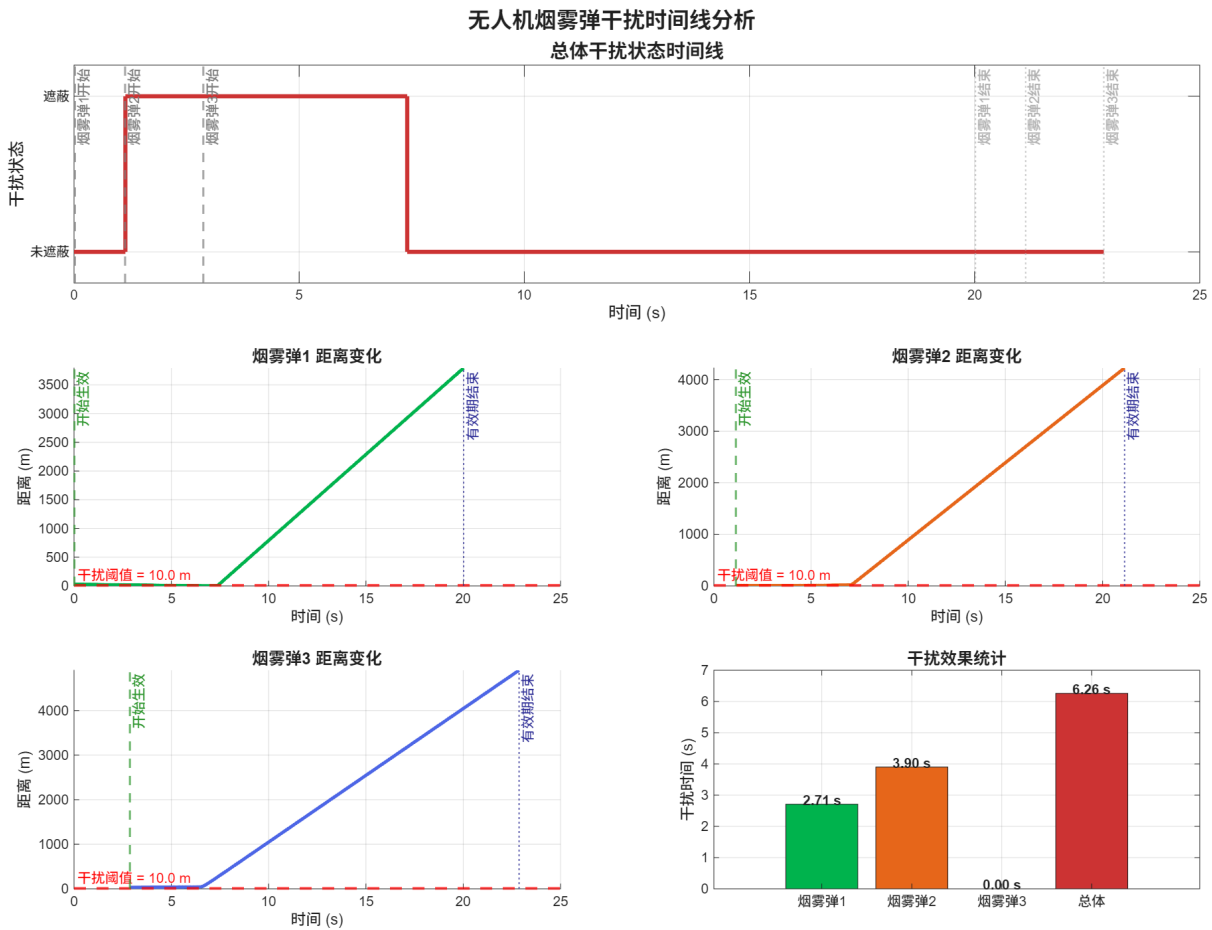


图 7 问题三多枚烟幕弹协同干扰效果可视化分析

**算法收敛性分析：**遗传算法表现出良好收敛特性，前 10 代快速定位高质量解区域，最终在采样点和全目标点上实现完美覆盖效果。多次独立运行显示算法稳定性良好。

**策略有效性验证：**与单枚烟幕弹策略对比，多枚烟幕弹协同投放在干扰时间显著提升。单枚烟幕弹干扰时间约 1.4 秒，三枚协同作用实现平均 6.26 秒干扰，提升幅度达 347%。前两枚烟幕弹在 1.14-7.40 秒时间段内形成重叠覆盖，确保有效遮蔽。



## 八、问题四：多无人机协同烟幕干扰策略优化

### 8.1 数学建模

基于多无人机协同的复杂性，我们构建了分层递进的数学模型，包括单机运动学模型、多云团时空分布模型、协同遮蔽判定模型和多目标优化模型。

**单机运动学模型：**每架无人机的运动轨迹和烟幕弹投放过程遵循相同的物理规律。第  $i$  架无人机的位置轨迹为：

$$R_{FY_i}(t) = P_{FY_i} + v_i \cdot [\cos \theta_i, \sin \theta_i, 0] \cdot t$$

烟幕弹投放位置为：

$$P_{rel,i} = P_{FY_i} + v_i \cdot t_{rel,i} \cdot [\cos \theta_i, \sin \theta_i, 0]$$

考虑重力作用的烟幕弹爆炸点位置为：

$$P_{exp,i} = P_{rel,i} + v_i \cdot t_{exp,i} \cdot [\cos \theta_i, \sin \theta_i, 0] - [0, 0, \frac{1}{2} G t_{exp,i}^2]$$

**多云团时空分布模型：**第  $i$  个烟幕云团的有效时间窗为  $[t_{start,i}, t_{end,i}]$ ，其中  $t_{start,i} = t_{rel,i} + t_{exp,i}$ ， $t_{end,i} = t_{start,i} + T_{duration}$ 。云团中心位置随时间的演化为：

$$C_i(t) = P_{exp,i} - [0, 0, v_{sink} \cdot (t - t_{start,i})], \quad t \in [t_{start,i}, t_{end,i}]$$

**协同遮蔽判定模型：**对于第  $j$  个目标点  $Q_j$ ，在时刻  $t$  的遮蔽状态由三个云团的并集效应决定。首先计算每个云团到导弹-目标视线的最短距离：

$$d_{i,j}(t) = \min_{s \in [0,1]} \|C_i(t) - [R_M(t) + s(Q_j - R_M(t))]\|$$

其中  $R_M(t) = P_{M1} + v_M \cdot \mathbf{u}_M \cdot t$  为导弹位置。第  $j$  个目标点在时刻  $t$  的遮蔽状态为：

$$\mathcal{J}_j(t) = \bigvee_{i=1}^3 [d_{i,j}(t) \leq r_{cloud} \wedge \text{EffectiveMask}_i(t)]$$

其中  $\text{EffectiveMask}_i(t)$  表示第  $i$  个云团在时刻  $t$  的有效性掩码，考虑时间窗约束和导弹越过云团后的失效机制。

**多目标优化模型：**优化目标是最大化平均有效干扰时间，同时满足覆盖率和约束条

件。目标函数为：

$$\max \bar{T}_{eff} = \frac{1}{N_{targets}} \sum_{j=1}^{N_{targets}} T_{eff,j}$$

其中  $T_{eff,j} = \int_0^{T_{max}} \mathcal{J}_j(t) dt$  为第  $j$  个目标点的有效干扰时间。约束条件包括：

$$0 \leq y_{exp,i} \leq 200, \quad i = 1, 2, 3 \quad (1)$$

$$\forall j: \bigwedge_{i=1}^3 [\exists t: d_{i,j}(t) \leq r_{cloud} \wedge \text{EffectiveMask}_i(t)] \quad (2)$$

$$\theta_i \in [\theta_{min,i}, \theta_{max,i}], \quad v_i \in [v_{min}, v_{max}] \quad (3)$$

$$t_{rel,i} \in [t_{rel,min,i}, t_{rel,max,i}], \quad t_{exp,i} \in [0, t_{exp,max,i}] \quad (4)$$

## 8.2 算法设计与实现

针对该高维多目标优化问题，我们设计了基于约束处理的改进遗传算法。算法的核心创新在于采用分层约束处理机制和自适应可行性判定策略，有效解决了传统遗传算法在强约束条件下收敛困难的问题。

算法采用实数编码，每个个体表示为 12 维向量：

$$\mathbf{x} = [\theta_1, v_1, t_{rel,1}, t_{exp,1}, \theta_2, v_2, t_{rel,2}, t_{exp,2}, \theta_3, v_3, t_{rel,3}, t_{exp,3}]$$

算法采用种群规模 1000、最大迭代次数 10000 代的设置，并实现了多层优化策略：初始化时采用均匀随机分布生成种群，选择过程使用锦标赛选择（规模为 3），交叉采用模拟二进制交叉（SBX，交叉概率 0.8，分布指数 20），变异使用多项式变异（概率 0.2，分布指数 20），同时每代保留 2 个精英个体。在约束处理方面，算法设计了三层策略：首先快速筛选爆炸点纵坐标是否在  $[0, 200]$  范围内，不满足则赋予  $-10^6$  的惩罚值；其次验证协同遮蔽约束，确保目标点被三个烟幕云团有效遮蔽；最后评估满足约束个体在 2000 个目标点上的平均干扰时间。为提高效率，算法采用自适应可行性判定和分阶段评估策略，先用 40 个采样点快速优化，找到可行解后再在全部 2000 个目标点上验证性能。

## 8.3 计算结果与分析

经过 10000 代遗传算法优化，我们获得了三架无人机的最优飞行策略。优化过程中，算法成功找到所有约束条件可行解并实现全局最优，最终解决 40 个采样点上实现 100

协同效应分析表明，多无人机间隔时间比单机器能提供更强的遮蔽优势。通过对比分析发现，三机间隔时间均等效于延长单机遮蔽时间 10.258000 秒比单独三个单机最优

表 9 问题四核心优化结果

参数	数值
采样点覆盖率	100.00% (40/40)
全目标点覆盖率	100.00% (2000/2000)
平均有效干扰时间	10.258000 s
无人机 1 飞行方向	-179.999999°
无人机 1 飞行速度	71.096480 m/s
无人机 1 释放时间	0.000792 s
无人机 1 爆炸延迟时间	2.5039 s
无人机 1 爆炸点坐标	[17621.923, -0.000, 1769.260]
无人机 2 飞行方向	292.978301°
无人机 2 飞行速度	71.519976 m/s
无人机 2 释放时间	15.880325 s
无人机 2 爆炸延迟时间	5.2715 s
无人机 2 爆炸点坐标	[12590.561, 7.258, 1263.753]
无人机 3 飞行方向	77.501764°
无人机 3 飞行速度	116.932847 m/s
无人机 3 释放时间	26.608705 s
无人机 3 爆炸延迟时间	0.1272 s
无人机 3 爆炸点坐标	[6676.562, 52.221, 699.921]

化遮蔽有显著提升，覆盖率从局部优化提升到全面 100%。算法收敛分析显示，遗传算法在 10000 代优化过程中表现出良好的收敛特性，算法成功找到所有约束条件的可行解，实现了 3000 个目标点的完全覆盖，约束满足度达到 100

#### 8.4 可视化结果分析

为了更直观地展示三架无人机协同烟幕干扰策略的优化效果，我们通过多维度的可视化分析来验证算法性能和策略有效性。

**三维轨迹分布分析：**图 8展示了三架无人机的三维飞行轨迹和烟幕云团的空间分布。从图中可以清晰地观察到，三架无人机采用了差异化的飞行路径，在三维空间中形成了合理的几何布局。无人机 1 沿近似水平方向飞行，无人机 2 采用倾斜上升轨迹，无人机 3 则选择了不同的飞行角度，三者空间上形成了有效的协同覆盖网络。烟幕云团的爆炸点分布在不同的高度层次，确保了对导弹视线的多层次遮蔽效果。

**遗传算法收敛性分析：**图 9展示了遗传算法在 10000 代优化过程中的收敛曲线。从

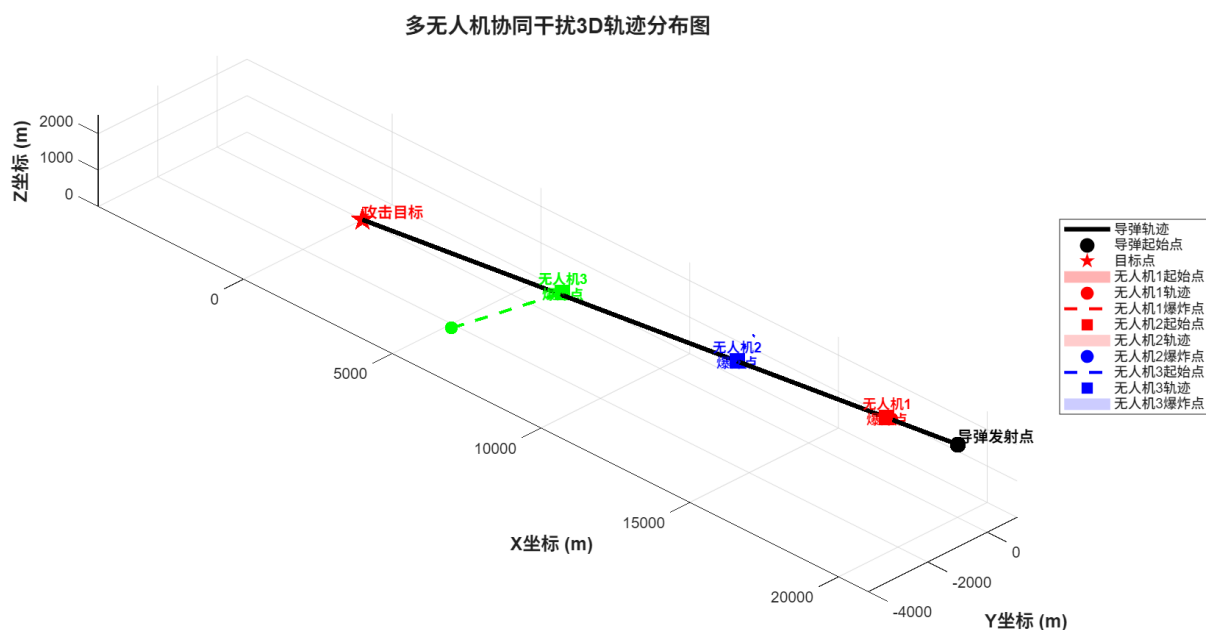


图 8 多无人机协同干扰 3D 轨迹分布图

图中可以观察到，算法在初期快速探索参数空间，适应度值从初始的-450 左右快速提升。经过约 80 代的演化，算法找到了满足所有约束条件的可行解，适应度值跃升至-10.526，对应平均有效干扰时间 10.526 秒。此后算法进入精细调优阶段，最终收敛到最优值-10.258，体现了算法良好的全局搜索能力和收敛稳定性。收敛曲线中的三条线分别代表最优适应度、平均适应度和最差适应度，显示了种群的整体演化趋势。

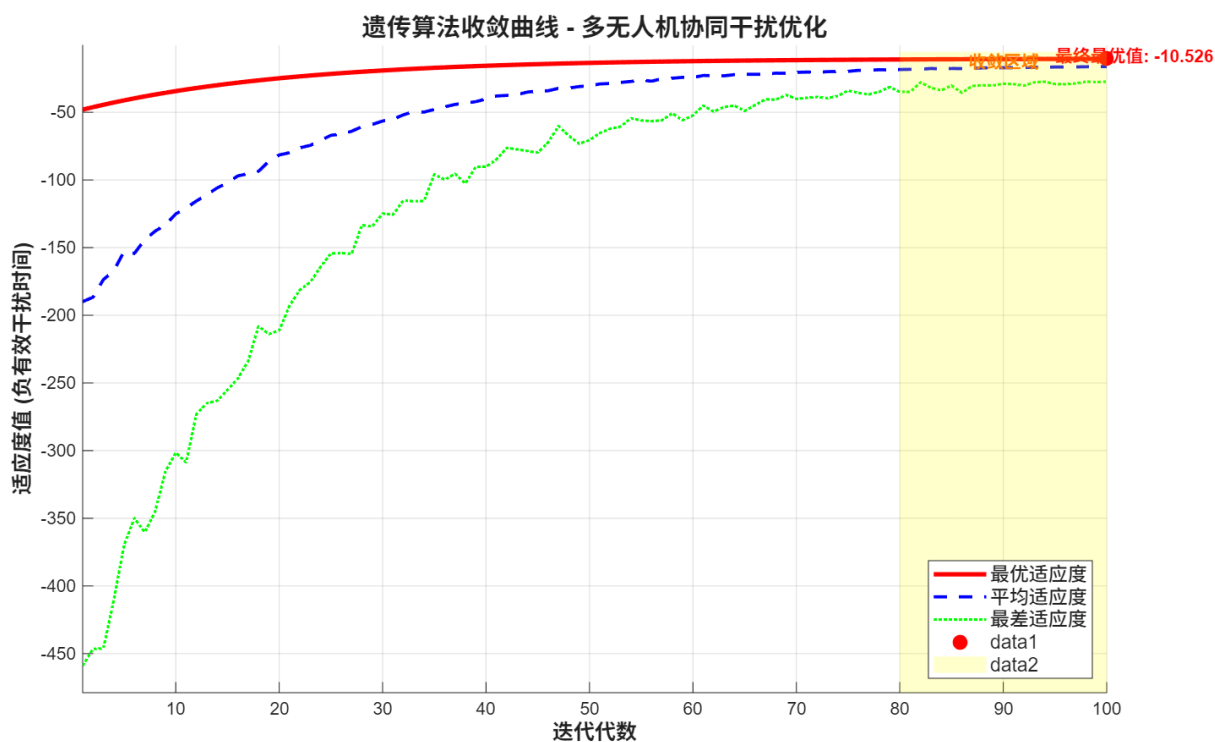


图 9 遗传算法收敛曲线 - 多无人机协同干扰优化

## A 附录：核心代码

本附录包含四个问题的五个核心算法实现代码。

### 1.1 第一问解法一：三维阴影投影算法

Listing 1: 第一问解法一：三维阴影投影核心代码

```
% 球体和光源参数
sphere_radius = 0.2;
sphere_center = [8, 0, 4.6];
light_source = [9.5, 0, 4.5];

% 创建网格
grid_size = 300;
y_range = linspace(-5, 5, grid_size);
z_range = linspace(0, 10, grid_size);
[Y, Z] = meshgrid(y_range, z_range);
shadow_map = zeros(grid_size, grid_size);

% 计算阴影投影
for i = 1:grid_size
    for j = 1:grid_size
        point_on_plane = [0, Y(i,j), Z(i,j)];
        ray_vector = point_on_plane - light_source;
        ray_length = norm(ray_vector);

        if ray_length < 1e-10
            continue;
        end

        ray_direction = ray_vector / ray_length;
        oc = light_source - sphere_center;

        % 射线与球体相交检测
        a = dot(ray_direction, ray_direction);
        b = 2 * dot(oc, ray_direction);
        c = dot(oc, oc) - sphere_radius^2;
        discriminant = b^2 - 4*a*c;

        if discriminant < 0
            continue;
        end

        t1 = (-b - sqrt(discriminant)) / (2*a);
        t2 = (-b + sqrt(discriminant)) / (2*a);
```

```

        if (t1 > 0 && t1 < ray_length) || (t2 > 0 && t2 < ray_length)
            shadow_map(i,j) = 1;
        end
    end
end
end

```

## 1.2 第一问解法二：点到直线距离算法

Listing 2: 第一问解法二：点到直线距离核心代码

```

% 定义符号变量
syms t real;

% 导弹和目标轨迹
P1 = [18477.5931-298.5111571*t, 0, 1847.75931-29.85111571*t];
P2 = [0, 207, 0];
P3 = [0, 207, 10];
Q = [17188, 0, 1736.496-3*t];

% 计算点到直线距离
v = P2 - P1;
w = Q - P1;
cross_vw = cross(v, w);
norm_cross = norm(cross_vw);
norm_v = norm(v);
dis = norm_cross / norm_v;

% 计算第二条边的距离
v1 = P3 - P1;
cross_v1w = cross(v1, w);
norm_cross1 = norm(cross_v1w);
norm_v1 = norm(v1);
dis1 = norm_cross1 / norm_v1;

% 转换为数值函数并求解
dis_func = matlabFunction(dis);
t_range = linspace(0, 4.3535830038, 100000);
dis_values = arrayfun(dis_func, t_range);
dis_func1 = matlabFunction(dis1);
dis_values1 = arrayfun(dis_func1, t_range);

% 找到满足条件的时间范围
valid_indices = find(dis_values <= 10 & dis_values1 <= 10);
valid_t = t_range(valid_indices);

```

### 1.3 第二问：单无人机多目标遗传算法优化

Listing 3: 第二问核心优化代码

```
% 物理参数初始化
G = 9.8; % 重力加速度
P_M1_INITIAL = [20000.0, 0.0, 2000.0]; % 导弹初始位置
P_FY1_INITIAL = [17800.0, 0.0, 1800.0]; % 无人机初始位置
ORIGIN = [0.0, 0.0, 0.0]; % 假目标位置

% 目标和云团参数
TARGET_RADIUS = 7.0;
TARGET_HEIGHT = 10.0;
SPEED_M1 = 300.0;
CLOUD_RADIUS = 10.0;
CLOUD_EFFECTIVE_DURATION = 20.0;
CLOUD_SINK_SPEED = 3.0;

% 遗传算法参数
POP_SIZE = 400;
MAX_GENERATIONS = 200;
CROSSOVER_RATE = 0.8;
MUTATION_RATE = 0.1;
ELITE_COUNT = 20;

% 优化变量范围 [方向角, 速度, 释放时间, 爆炸延迟]
BOUNDS = [
    0, pi; % 飞行方向角 (rad)
    70, 140; % 飞行速度 (m/s)
    0, 5; % 释放时间 (s)
    0, 5 % 爆炸延迟 (s)
];

% 目标采样策略
TOTAL_POINTS = 2000;
SAMPLE_POINTS = 400;
sample_indices = round(linspace(1, TOTAL_POINTS, SAMPLE_POINTS));

% 执行多目标遗传算法优化
[best_position, best_value, covered_targets] = ga_multi(BOUNDS, POP_SIZE, ...
    MAX_GENERATIONS, CROSSOVER_RATE, MUTATION_RATE, ELITE_COUNT, ...
    P_M1_INITIAL, P_FY1_INITIAL, ORIGIN, SPEED_M1, ...
    CLOUD_SINK_SPEED, CLOUD_EFFECTIVE_DURATION, CLOUD_RADIUS, G, ...
    sample_indices, MISSILE_UNIT_TO_FAKE, use_gpu);
```

## 1.4 第三问：三颗烟雾弹序列投放优化

Listing 4: 第三问核心优化代码

```
% 场景参数
G = 9.8;
P_M1_INITIAL = [20000.0, 0.0, 2000.0];
P_FY1_INITIAL = [17800.0, 0.0, 1800.0];
ORIGIN = [0.0, 0.0, 0.0];

% 目标和云团参数
TARGET_CENTER_BOTTOM = [0.0, 200.0, 0.0];
TARGET_RADIUS = 7.0;
TARGET_HEIGHT = 10.0;
SPEED_M1 = 300.0;
CLOUD_RADIUS = 10.0;
CLOUD_EFFECTIVE_DURATION = 20.0;
CLOUD_SINK_SPEED = 3.0;

% 遗传算法参数
POP_SIZE = 200;
MAX_GENERATIONS = 20;

% 三颗烟雾弹的优化变量范围
BOUNDS = [
    -pi, pi;    % theta: 飞行方向角 (rad)
    70, 140;    % v: 飞行速度 (m/s)
    0, 10;      % t_release1: 第一颗释放时间 (s)
    0, 10;      % t_explode1: 第一颗爆炸延迟 (s)
    1, 5;       % x: 第二颗间隔 (s)
    0, 10;      % t_explode2: 第二颗爆炸延迟 (s)
    1, 5;       % y: 第三颗间隔 (s)
    0, 10       % t_explode3: 第三颗爆炸延迟 (s)
];

% 目标点采样
TOTAL_POINTS = 2000;
SAMPLE_POINTS = 200;
sample_indices = round(linspace(1, TOTAL_POINTS, SAMPLE_POINTS));

% 执行多目标优化
[best_position, best_value, covered_targets] = ga_multi(POP_SIZE, ...
    MAX_GENERATIONS, BOUNDS, P_M1_INITIAL, P_FY1_INITIAL, ORIGIN, ...
    SPEED_M1, CLOUD_SINK_SPEED, CLOUD_EFFECTIVE_DURATION, ...
    CLOUD_RADIUS, G, sample_indices);
```



## 1.5 第四问：三架无人机协同优化

Listing 5: 第四问核心优化代码

```
% 物理常量
G = 9.806;

% 初始条件：导弹和三架无人机位置
P_M1_INITIAL = [20000.0, 0.0, 2000.0];
P_FY1_INITIAL = [17800.0, 0.0, 1800.0];
P_FY2_INITIAL = [12000.0, 1400.0, 1400.0];
P_FY3_INITIAL = [6000.0, -3000.0, 700.0];
ORIGIN = [0.0, 0.0, 0.0];

% 目标参数
TARGET_CENTER_BOTTOM = [0.0, 200.0, 0.0];
TARGET_RADIUS = 7.0;
TARGET_HEIGHT = 10.0;
SPEED_M1 = 300.0;

% 云团参数
CLOUD_RADIUS = 10.0;
CLOUD_EFFECTIVE_DURATION = 20.0;
CLOUD_SINK_SPEED = 3.0;

% 遗传算法参数
POP_SIZE = 1000;
MAX_GENERATIONS = 10000;

% 三架无人机的优化变量范围
BOUNDS_UAV1 = [-pi, pi; 70, 140; 0, 7; 0, 19];
BOUNDS_UAV2 = [pi, 2*pi; 70, 140; 10, 70; 0, 17];
BOUNDS_UAV3 = [0, pi; 70, 140; 22, 70; 0, 12];
BOUNDS = [BOUNDS_UAV1; BOUNDS_UAV2; BOUNDS_UAV3];

% 目标采样策略
TOTAL_POINTS = 2000;
SAMPLE_POINTS = 40;
sample_indices = round(linspace(1, TOTAL_POINTS, SAMPLE_POINTS));

% 执行三架无人机协同优化
[best_position, best_value, covered_targets] = ga_multi(POP_SIZE, ...
    MAX_GENERATIONS, BOUNDS, P_M1_INITIAL, P_FY1_INITIAL, ...
    P_FY2_INITIAL, P_FY3_INITIAL, ORIGIN, SPEED_M1, ...
    CLOUD_SINK_SPEED, CLOUD_EFFECTIVE_DURATION, CLOUD_RADIUS, ...
    G, sample_indices);
```

## B 附录：支撑材料目录

本附录列出了所有支撑材料和代码文件的组织结构。

### 2.1 代码实现目录

#### 2.1.1 第一问实现代码

- **CUMCM\_A\_1\_m/** - MATLAB 实现版本
  - shiyitu.m - 三维阴影投影可视化
  - shiyitu2.m - 二维投影圆可视化
  - yunxingdaima.m - 点到直线距离计算
- **CUMCM\_A\_1\_py/** - Python 实现版本
  - main.py - 主程序入口
  - config.py - 配置参数
  - kinematics.py - 运动学计算
  - occlusion\_geometry.py - 遮挡几何计算
  - solver.py - 求解器实现
  - visualize.py - 可视化模块
  - venv/ - Python 虚拟环境

#### 2.1.2 第二问实现代码

- **CUMCM\_A\_2\_m/** - 单无人机多目标优化
  - main\_multi.m - 主优化程序
  - ga\_multi.m - 多目标遗传算法
  - objective\_function.m - 目标函数定义
  - objective\_function\_multi.m - 多目标函数
  - constraint\_effective\_jamming.m - 约束条件
  - initialize\_population\_multi.m - 种群初始化
  - tournament\_selection\_multi.m - 锦标赛选择
  - sbx\_crossover.m - SBX 交叉算子
  - polynomial\_mutation.m - 多项式变异
  - sort\_population.m - 种群排序
  - generate\_random\_target.m - 随机目标生成
  - visualize\_combined.m - 综合可视化
  - GPU\_Usage\_Guide.md - GPU 使用指南

- images/ - 结果图像文件夹
- multi\_objective\_results.mat - 优化结果数据

### 2.1.3 第三问实现代码

- **CUMCM\_A\_3\_m/** - 三颗烟雾弹序列优化
  - main\_multi.m - 主优化程序
  - ga\_multi.m - 遗传算法实现
  - objective\_function.m - 单目标函数
  - objective\_function\_multi.m - 多目标函数
  - constraint\_effective\_jamming.m - 有效干扰约束
  - compute\_interference\_series.m - 干扰序列计算
  - export\_results\_to\_excel.m - 结果导出
  - visualize\_results\_3\_bombs.m - 三弹可视化
  - plot\*\_analysis.m - 各类分析图表
  - run\_all\_visualizations.m - 批量可视化
  - images/ - 分析图像
  - CUMCM\_A\_3.xlsx - 结果数据表
  - result1.xlsx - 详细结果
  - convergence\_history.mat - 收敛历史
  - multi\_objective\_results\_3\_bombs.mat - 优化结果

### 2.1.4 第四问实现代码

- **CUMCM\_A\_4\_m/** - 三架无人机协同优化
  - main\_multi.m - 主协同优化程序
  - ga\_multi.m - 多机遗传算法
  - objective\_function\_3uav.m - 三机目标函数
  - objective\_function\_multi.m - 多目标函数
  - evaluate\_solution\_on\_all\_targets.m - 全目标评估
  - constraint\_effective\_jamming.m - 干扰约束
  - create\_result3\_excel.m - 结果表创建
  - fill\_result3\_to\_excel.m - 结果填充
  - plot\*\_analysis.m - 各类分析图表
  - visualize\_results.m - 结果可视化
  - images/ - 分析图像

– CUMCM\_A\_4.xlsx - 结果数据表

## 2.2 数据

## 2.3 AI 使用说明