

# 烟幕干扰弹的投放策略

陈玉容, 闫雨欣, 宋荣荣\*

西南民族大学数学学院, 四川 成都

收稿日期: 2026年1月21日; 录用日期: 2026年3月24日; 发布日期: 2026年4月1日

## 摘要

在现代信息化战争中, 为了保护“真目标”, 可通过无人机投放烟幕干扰弹实施对来袭导弹的干扰, 从而避免其发现真目标, 针对2025年高教社杯全国大学生数学建模竞赛 A 题中的场景, 主要是在特定策略下求解单架无人机投放单枚烟幕干扰弹对单枚导弹的有效遮蔽时长。对此, 首先依据运动学方程分步骤建立相关运动轨迹模型; 由于真目标结构特征, 采用蒙特卡洛采样方法进行采样, 并根据目标各表面实际面积加权分配采样点, 同时对采样点数量进行收敛性分析; 在此基础上规定有效遮蔽的判定条件: 若烟幕云团对所选取的采样点实现90%遮蔽, 则为有效遮蔽。此外, 对关键参数进行灵敏度分析, 评估研究得出的投放策略在实战环境下的鲁棒性。基于上述构建有效遮蔽时长计算模型, 通过Python实现数值求解, 最终得到有效遮蔽时长为1.40 s。研究结果可为在实战中投放烟幕干扰弹干扰敌方导弹提供量化参考, 也验证了数学建模在复杂攻防场景中的应用价值。

## 关键词

烟幕干扰弹, 特定策略, 有效遮蔽时长, 运动学方程, 蒙特卡洛采样方法, 收敛性分析, 灵敏度分析

# Smoke Jamming Bomb Delivery Strategy

Yurong Chen, Yuxin Yan, Rongrong Song\*

School of Mathematics, Southwest Minzu University, Chengdu Sichuan

Received: January 21, 2026; accepted: March 24, 2026; published: April 1, 2026

## Abstract

In modern information warfare, to protect “real targets,” smoke screen interference munitions can be deployed by drones to disrupt incoming missiles, thereby preventing their detection. This study addresses Scenario A of the 2025 Higher Education Press Cup National College Students Mathematical Modeling Competition, focusing on determining the effective shielding duration of a single drone’s smoke screen munition against a missile under specific strategies. The approach involves establishing a step-by-step trajectory model based on kinematic equations. Given the structural characteristics of

\*通讯作者。

real targets, a Monte Carlo sampling method is employed to allocate sampling points according to the actual surface areas of each target, while simultaneously convergence analysis was performed on the number of sampling points, establishing the effective concealment criterion: a smoke cloud cluster is deemed effective if it achieves 90% concealment of the selected sampling points. Furthermore, sensitivity analysis of key parameters was conducted to evaluate the robustness of the proposed deployment strategy in real-world scenarios. By developing a computational model for effective concealment duration and implementing it through Python, the study determined the effective duration to be 1.40 seconds. These findings provide a quantitative reference for deploying smoke interference munitions to disrupt enemy missiles in combat, while also demonstrating the practical value of mathematical modeling in complex offensive and defensive scenarios.

## Keywords

Smoke Jamming Bomb, Specific Strategy, Effective Cover Duration, Kinematic Equation, Monte Carlo Sampling Method, Convergence Analysis, Sensitivity Analysis

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

烟幕干扰弹的核心原理是通过化学燃烧或爆炸分散物质进而形成烟幕或气溶胶云团,其具有成本低、效费比高等优点。同时,烟幕干扰能够实时对抗敌方光电侦察和武器的攻击,尤其是对光电制导威胁作出快速反应,有效降低其命中率[1]-[3]。所以因其较高的效费比以及在对抗光电制导武器方面具有显著成效,受到了各国军队的普遍重视[4][5]。在第一次世界大战中烟幕弹被首次应用于战场,接着二战时大举投入,形成战役规模[6]。而空地导弹是机载对地攻击的主要武器系统,其制导精度的高低直接关系到作战效能[7],它作为GPS制导武器的重要类型,对现代信息化战争产生了深远影响。值得注意的是,GPS技术是美国开发的一系列技术中最为成功的一项,它不仅推动了武器系统向前发展,更促使精确制导精度得到进一步提升[8]。

随着精确制导技术的快速发展,精确制导系统逐步实现智能化,其跟踪方式和计算模型不断优化,采取多种融合方式对目标进行跟踪,精确制导技术的智能化和抗干扰能力的不断提高已经对现有的烟幕提出了严峻的挑战[9]。因此,与之对应的烟幕干扰技术也在不断发展,烟幕弹也得到了进一步的应用,在空气中施放烟幕,可吸收、散射目标红外辐射信号,阻隔目标和导引头之间的红外辐射路径,降低红外成像导引头的探测能力,进而可使导弹脱靶[10],此作用可用于在军事中遮蔽重要目标,干扰敌方导弹。其遮蔽目标的原理为:烟幕自身的辐射使得导引头无法对目标成像,从而降低导引头探测目标的概率;其核心效能取决于“投放-起爆-遮蔽”的时间匹配精度。虽然烟幕弹干扰是对抗精确制导武器的一种有效方式,但烟幕弹的威力却极难直观地进行表达,于是高志扬等为形象表达烟幕弹的威力范围,提出了烟幕有效遮蔽区域的概念,建立有效遮蔽区域的计算模型并进行实例仿真,最终得出单发烟幕弹的最大遮蔽方向在目标与烟幕弹连线方向等一系列结论[11],该结论可为后续建立有效遮蔽判断模型提供一定的方向指导。此外,烟幕遮蔽还具有操作方便、反应速度快、形成时间短、散布面积大、留空时间长、遮蔽波段宽等突出特点[12]。目前烟幕弹的定点精准抛撒已能通过多种投放方式实现,关键在于精确控制烟幕弹在抛撒前抵达预定位置,再利用时间引信时序对起爆时间进行控制。

而2025年高教社杯全国大学生数学建模竞赛A题考虑的是运用无人机完成烟幕干扰弹的投放策略

问题,因为无人机具有长续航能力和灵活特性,在定点自动投放方面表现出了良好的性能,其自动投放成功率高、投放位置偏差小[13],并且随着科学与通信技术的发展,无人机载重能力得到了提升,技术也愈发成熟,其在各个领域的应用日益广泛[14]。此外,对于无人机投放的问题国内有不少专家学者对其进行研究与试验。浦强松等通过采用三因素三水平正交试验对卵球投放高度、无人机飞行速度及卵球初始投放速度等投放精度相关指标进行分析,结果表明:无人机飞行速度对于卵球漂移率的影响最大,其次是高度[15];唐彭晨等通过研究无人机定点投放问题,找出影响无人机定点投放命中精度的因素,发现其不仅与无人机自身的飞行高度、飞行速度等有关,还受其他外部因素的影响[14];胡盈等为了更好地描述无人机投放物资过程中的运动状态,将三维空间模型转化为二维平面模型,最终得出无人机投放距离与无人机飞行高度、飞行速度、空气阻力等之间的关系[16]。通过以上文献的研究可以知道无人机的飞行速度和飞行方向对于投放问题的重要性,在此基础上,对于无人机完成烟幕弹投放过程中还需考虑烟幕弹的投放点和起爆点的位置等。

本文仅针对竞赛题目中单架无人机精准投放单枚烟幕弹干扰单枚导弹的场景进行讨论,对于此过程的投放效能分析是多弹协同、多目标对抗等复杂场景的基础。在实际使用中,烟幕干扰对制导武器的干扰是一个高度动态的过程,在这一动态过程中,影响干扰效果的因素非常复杂,所以干扰效果有很大的随机性[17],而如何通过数学建模来量化这一动态过程,是现在军事运筹学和应用数学领域相结合的研究热点。

## 2. 问题分析

为了保护真目标,利用无人机  $FY1$  投放单枚烟幕弹实施对导弹  $M1$  的干扰,本题已经给出了特定的烟幕干扰弹投放策略,在此策略下分步骤建立导弹  $M1$ 、烟幕干扰弹、烟幕云团的运动轨迹模型,因真目标是一个圆柱体,并非是一个确定的点,需采用蒙特卡洛采样方法,并根据圆柱侧面、上顶面和下底面的实际面积加权分配采样点,同时对采样点数量进行收敛性分析,确保采样方法的科学性和准确性;因有效遮蔽的判定是烟幕干扰效果评估的核心指标,所以规定有效遮蔽的判定条件:当烟幕云团通过导弹  $M1$  与采样点的连线且云团中心到此线段的距离  $d \leq 10 \text{ m}$  时,就可看作云团成功遮蔽导弹;当在某一固定时刻时,烟幕云团能够对所选取的采样点实现 90% 遮蔽,就可看作云团对导弹的有效遮蔽。基于上述判定条件建立有效遮蔽的判断模型。

此外,在实战环境中,烟幕下沉速度、无人机定位误差、导弹飞行速度等关键参数容易受到环境和设备的影响,从而产生细微波动,因此需对这些关键参数做灵敏度分析,以此可以观察参数变化对有效遮蔽时长的影响,并判断投放策略在实战环境中的鲁棒性。

最后通过数值计算和几何分析,累加在全过程中的有效遮蔽时间,最终结果就是本题中所要求的有效遮蔽时长。

## 3. 符号说明

为了清晰表述模型中各物理量的含义与单位,便于后续的建模和求解,现将本文所涉及的核心符号、物理意义及其对应单位统一说明如表 1 所示(坐标类单位省略,以国际单位制为准):

Table 1. Symbol description

表 1. 符号说明

| 符号                  | 说明           | 单位 |
|---------------------|--------------|----|
| $\overline{P_{m0}}$ | $M1$ 初始位置坐标  | /  |
| $\overline{P_{n0}}$ | $FY1$ 初始位置坐标 | /  |

续表

|                           |                    |     |
|---------------------------|--------------------|-----|
| $\overline{P_m(t)}$       | $M1$ 在 $t$ 时刻的位置坐标 | /   |
| $\overline{P_c(t)}$       | 烟幕云团在 $t$ 时刻的位置坐标  | /   |
| $\overline{P_{launch}}$   | $FY1$ 投放烟幕干扰弹的位置坐标 | /   |
| $\overline{P_{detonate}}$ | 烟幕干扰弹起爆的位置坐标       | /   |
| $\overline{v_m}$          | $M1$ 的飞行速度向量       | m/s |
| $\overline{v_n}$          | $FY1$ 的飞行速度向量      | m/s |
| $\overline{v_c}$          | 烟幕云团的下沉速度向量        | m/s |
| $t_m$                     | $M1$ 到达假目标的时间      | s   |
| $t_{launch}$              | $FY1$ 投放烟幕干扰弹的时间   | s   |
| $t_{interval}$            | 烟幕弹投放到起爆的间隔时间      | s   |
| $t_{detonate}$            | 烟幕干扰弹起爆时间          | s   |
| $d_m$                     | $M1$ 到假目标的距离       | m   |

## 4. 模型建立与求解

### 4.1. 模型准备

1. 建立坐标系：以假目标(0,0,0)为原点  $O$ ，水平面为  $xoy$  面，竖直方向为  $z$  轴，真目标下底面的圆心坐标为(0,200,0)。

2. 固定参数

(1) 导弹  $M1$  的初始位置坐标：(20000,0,2000)，飞行速度：300 m/s，飞行方向直指假目标即沿着  $x$  轴的负方向运动；

(2) 无人机  $FY1$  的初始位置坐标：(17800,0,1800)，飞行速度：120 m/s，飞行方向朝向假目标即沿着  $x$  轴的负方向运动，高度始终保持不变；

(3) 烟幕干扰弹在无人机受领任务 1.5 s 后被投放，间隔 3.6 s 后起爆，瞬时形成半径为 10 m 的球状烟幕云团，在起爆 20 s 内为目标提供有效遮蔽，烟幕云团匀速下沉速度：3 m/s。

3. 关键模型建立：根据运动学方程分步骤建立导弹  $M1$ 、烟幕干扰弹、烟幕云团的运动轨迹模型，同时对采样点数量进行收敛性分析，构建判断是否为有效遮蔽以及计算有效遮蔽时长的模型，最后对烟幕下沉速度、无人机定位误差、导弹飞行速度等关键参数进行灵敏度分析。

### 4.2. 模型假设

1. 假设控制中心与无人机之间的通讯无延迟；

2. 假设导弹  $M1$  的飞行方向直指假目标，未被烟幕干扰前不改变其飞行轨迹，始终以 300 m/s 的恒定速度飞行；

3. 假设烟幕干扰弹投放后的运动只受重力作用影响，忽略其他外力影响；

4. 假设烟幕干扰弹起爆后瞬时形成半径为 10 m 的球状烟幕云团；

5. 假设在烟幕云团下降过程中不考虑风力干扰、云团扩散等因素；

6. 假设在烟幕弹起爆后 20 s 一到立刻失去遮蔽能力，没有任何过渡时段；

7. 假设烟幕云团与导弹  $M1$  到真目标采样点的线段相交, 即为遮蔽; 当某一固定时刻, 云团对采样点实现 90% 遮蔽, 即为有效遮蔽;
8. 假设蒙特卡洛采样点在各表面内均匀分布, 各表面采样权重与实际面积成正比;
9. 假设各参数的扰动相互独立。

### 4.3. 模型建立

#### 1. $M1$ 运动轨迹模型

根据  $M1$  的飞行速度和运动方向可知,  $M1$  在飞向假目标的过程中位置向量随时间的变化:

$$\overline{P_m(t)} = \overline{P_{m0}} + \overline{v_m} \cdot t \quad (1)$$

其中,  $\overline{P_{m0}} = (20000, 0, 2000)$ 。

$M1$  到假目标的距离为:

$$d_m = \sqrt{20000^2 + 2000^2} \approx 20100 \text{ m} \quad (2)$$

进而可计算出  $M1$  到达假目标的时间为:

$$t_m = \frac{d_m}{v_m} \quad (3)$$

其中,  $v_m = 300 \text{ m/s}$ 。

$M1$  飞向假目标的过程中, 在  $x$  轴上的水平距离为  $d_{mx} = 20000 \text{ m}$ , 在  $z$  轴上的竖直距离为  $d_{mz} = 2000 \text{ m}$ , 因此得到  $M1$  在  $x$  轴和  $z$  轴上的分速度:

$$v_{mx} = \frac{d_{mx}}{t_m} \quad (4)$$

$$v_{mz} = \frac{d_{mz}}{t_m} \quad (5)$$

从而得到  $M1$  的速度向量  $\overline{v_m}$  的坐标表示:

$$\overline{v_m} = (-v_{mx}, 0, -v_{mz}) \quad (6)$$

#### 2. 烟幕云团运动轨迹模型

FY1 投放烟幕干扰弹的位置坐标:

$$\overline{P_{launch}} = \overline{P_{n0}} + \overline{v_n} \cdot t_{launch} \quad (7)$$

其中,  $\overline{P_{n0}} = (17800, 0, 1800)$ ,  $\overline{v_n} = (-120, 0, 0)$ ,  $t_{launch} = 1.5 \text{ s}$ 。

烟幕干扰弹的起爆点位置坐标:

$$\overline{P_{detonate}} = \left( x_{launch} + v_{nx} \cdot t_{interval}, y_{launch} + v_{ny} \cdot t_{interval}, z_{launch} - \frac{1}{2} \cdot g \cdot t_{interval}^2 \right) \quad (8)$$

其中,  $x_{launch}, y_{launch}, z_{launch}$  分别为烟幕干扰弹投放点位置  $\overline{P_{launch}}$  的横坐标、纵坐标、竖坐标,  $v_{nx} = -120 \text{ m/s}$ ,  $v_{ny} = 0 \text{ m/s}$ ,  $t_{interval} = 3.6 \text{ s}$ ,  $g$  取  $9.8 \text{ m/s}^2$ 。

烟幕云团运动轨迹方程:

$$\overline{P_c(t)} = \overline{P_{detonate}} + \overline{v_c} \cdot (t - t_{detonate}), t \in [t_{detonate}, t_{detonate} + 20] \quad (9)$$

其中,  $\overline{v_c} = (0, 0, -3)$ ,  $t_{detonate} = t_{launch} + t_{interval} = 5.1 \text{ s}$ 。

### 3. 蒙特卡洛采样方法

#### (1) 圆柱的各表面面积计算与采样权重分配

其目标为半径  $r = 7 \text{ m}$ 、高度  $h = 10 \text{ m}$  的圆柱体，各表面面积计算如下：

##### a) 侧面面积

$$S_{\text{侧}} = 2\pi rh = 140\pi \approx 439.82 \text{ m}^2$$

##### b) 上顶面/下底面面积

$$S_{\text{顶}} = S_{\text{底}} = \pi r^2 = 49\pi \approx 153.94 \text{ m}^2$$

##### c) 总面积

$$S_{\text{总}} = S_{\text{侧}} + S_{\text{顶}} + S_{\text{底}} = 238\pi \approx 747.70 \text{ m}^2$$

根据面积占比分配各表面采样权重，分别为：

##### d) 侧面权重

$$w_1 = \frac{S_{\text{侧}}}{S_{\text{总}}} \approx 60\%$$

##### e) 上顶面权重

$$w_2 = \frac{S_{\text{顶}}}{S_{\text{总}}} \approx 20\%$$

##### f) 下底面权重

$$w_3 = \frac{S_{\text{底}}}{S_{\text{总}}} \approx 20\%$$

综上，侧面采样点占总采样点数的 60%，上顶面和下底面各占总采样点数的 20%。

#### (2) 加权采样点生成

##### a) 圆柱体侧面采样点(60%)

$$(x, y, z) = (0 + 7 \cos \alpha, 200 + 7 \sin \alpha, z), \alpha \in [0, 2\pi], z \in [0, 10] \quad (10)$$

##### b) 圆柱体上顶面和下底面采样点(各 20%)

径向均匀分布： $r = 7\sqrt{a}, a \in [0, 1]$ ；

上顶面： $(0 + r \cos \alpha, 200 + r \sin \alpha, 10), \alpha \in [0, 2\pi]$ ；

下底面： $(0 + r \cos \alpha, 200 + r \sin \alpha, 0), r \in [0, 7]$ 。

#### (3) 采样点数量收敛性分析

收敛性判定指标：

##### a) 有效遮蔽时长相对变化率

$$\eta_k = \left| \frac{t_{\text{effective}}(N_k) - t_{\text{effective}}(N_{k-1})}{t_{\text{effective}}(N_{k-1})} \right| \times 100\% \quad (11)$$

##### b) 收敛判定条件： $\eta_k \leq \varepsilon$

其中， $N_k (k = 1, 2, \dots, n)$  为采样点数量梯度序列， $t_{\text{effective}}(N_k)$  为对应有效遮蔽时长， $\varepsilon$  为收敛阈值。

#### 4. 有效遮蔽判断模型

根据烟幕云团中心点  $C$  是否与  $M1$  到采样点  $N_i$  的线段  $MN_i$  相交来判断。

## (1) 遮蔽判断模型

首先有:

$M1$ 指向烟幕云团中心点  $C$  的向量为:  $\overline{MC} = \overline{OC} - \overline{OM}$ ;

$M1$ 指向采样点  $N_i$  的向量为:  $\overline{MN}_i = \overline{ON}_i - \overline{OM}, i = 1, 2, \dots, 1000$ ;

为确保云团中心到  $M1$  与采样点  $N_i$  连线上的投影点  $D$  在线段  $MN_i$  上, 有:

$$\overline{OD} = \overline{OM} + \max(0, \min(s_i, 1)) \cdot \overline{MN}_i, i = 1, 2, \dots, 1000$$

其中, 投影点  $D$  是在线段  $MN_i$  上烟幕云团中心到  $MN_i$  最近距离的点,  $s_i$  表示烟幕云团中心  $C$  在  $\overline{MN}_i$  上的投影点位置所占比例:

$$s_i = \frac{\overline{MC} \cdot \overline{MN}_i}{\|\overline{MN}_i\|^2}, i = 1, 2, \dots, 1000 \quad (12)$$

判断遮蔽的条件为: 烟幕云团中心点  $C$  到线段  $MN_i$  的最近距离小于等于烟幕云团半径  $R$ , 即:  $\|\overline{OC} - \overline{OD}\| \leq 10$ 。

## (2) 有效遮蔽判断模型

$$\text{遮蔽比例} = \frac{\text{被遮蔽采样点数}}{\text{总采样点数}} \geq 90\% \quad (13)$$

## 5. 有效遮蔽时长的计算

显然有: 步长  $dt = 0.1 \text{ s}$ 。

易知, 有效遮蔽时长为在全过程中有效遮蔽时刻之和, 所以有效遮蔽时长为:

$$T = \sum_{t \in [t_{\text{detonate}}, t_{\text{detonate}} + 20], \text{遮蔽比例} \geq 90\%} dt \quad (14)$$

## 6. 关键参数灵敏度分析

## (1) 烟幕下沉速度扰动分析:

$$v'_c = v_c \pm \Delta v_c \quad (15)$$

(2) 无人机定位误差扰动分析(仅考虑飞行方向  $x$  轴的误差):

$$P'_{n0} = P_{n0} + \Delta P \quad (16)$$

## (3) 导弹飞行速度扰动分析:

$$\frac{v'_m}{v_m} = \frac{v_m \pm \Delta v_m}{v_m} \quad (17)$$

## (4) 鲁棒性量化指标:

## a) 有效遮蔽时长绝对变化量:

$$\Delta t_{\text{effective}} = t_{\text{effective}, \Delta t} - T \quad (18)$$

## b) 有效遮蔽时长相对变化率:

$$\xi = \frac{|\Delta t_{\text{effective}}|}{T} \times 100\% \quad (19)$$

其中,  $T$  为关键参数在基准下的有效遮蔽时长,  $t_{\text{effective}, \Delta t}$  为参数扰动后的有效遮蔽时长。

c) 鲁棒性等级判定:

当  $\xi \leq 10\%$  时, 参数扰动对有效遮蔽时长几乎无影响, 遮蔽效果对参数变化不敏感, 表现为强鲁棒性;

当  $10\% < \xi \leq 25\%$  时, 参数扰动对有效遮蔽时长影响较小, 遮蔽效果对参数变化中等敏感, 表现为鲁棒性较好;

当  $25\% < \xi \leq 50\%$  时, 参数扰动对有效遮蔽时长影响较大, 遮蔽效果对参数变化较敏感, 表现为临界鲁棒性;

当  $\xi > 50\%$  时, 参数扰动对有效遮蔽时长影响很大, 遮蔽效果对参数变化非常敏感, 表现为弱鲁棒性。

#### 4.4. 模型求解

根据 Python 代码对模型进行求解:

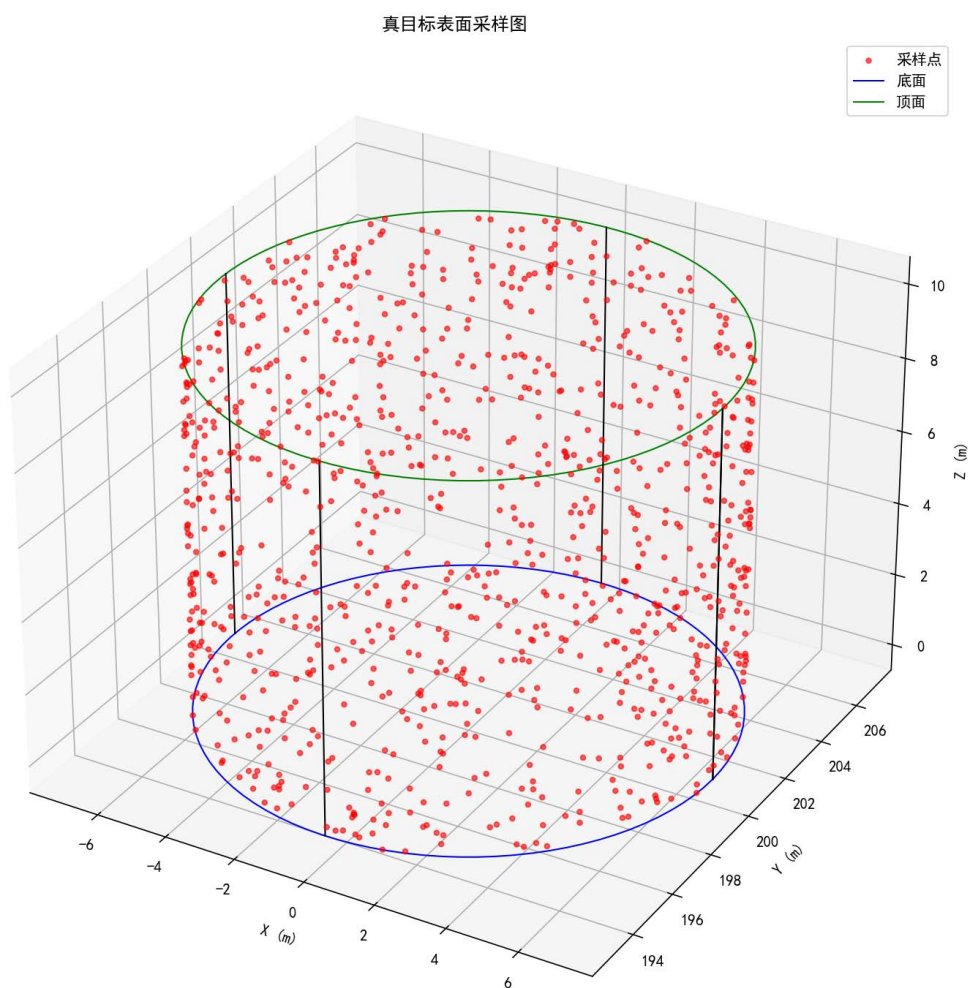


Figure 1. Real target weighted sampling points

图 1. 真目标加权采样点

根据以上模型, 通过 Python 代码得到真目标加权采样点(见图 1), 接着分步骤求解得到烟幕干扰弹投放点的位置坐标(见图 2)为: (17620.0,0.0,1800.0), 起爆点的位置坐标为: (17188.0,0.0,1736.5), 从而得出烟幕干扰弹对 M1 的有效遮蔽时长(见图 3)为: 1.40 s。

导弹、云团和真目标运动轨迹

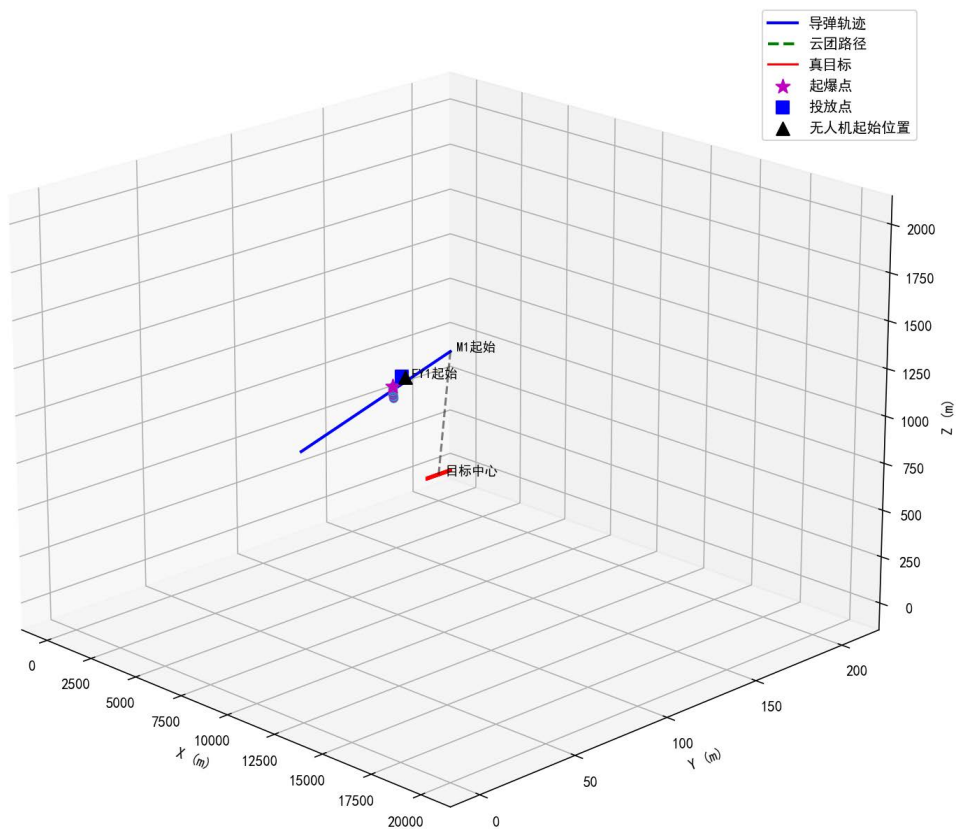


Figure 2. Trajectory of missile, cloud and real target  
图 2. 导弹、云团和真目标运动轨迹图

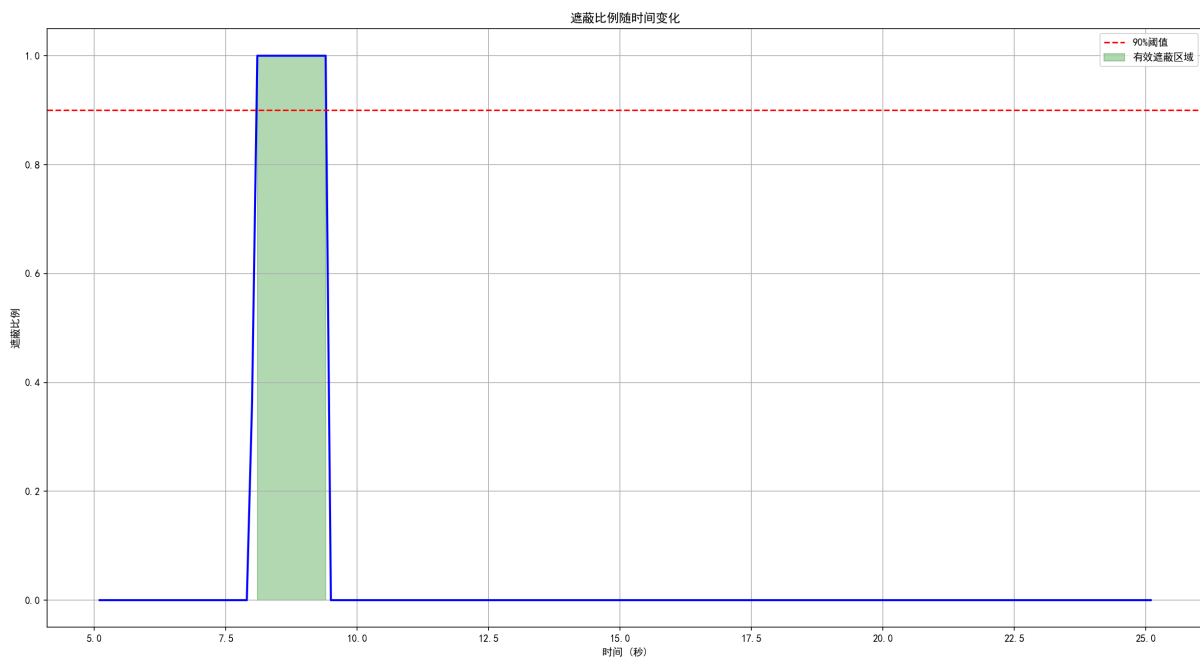


Figure 3. Time-dependent change in occlusion ratio  
图 3. 遮蔽比例随时间变化图

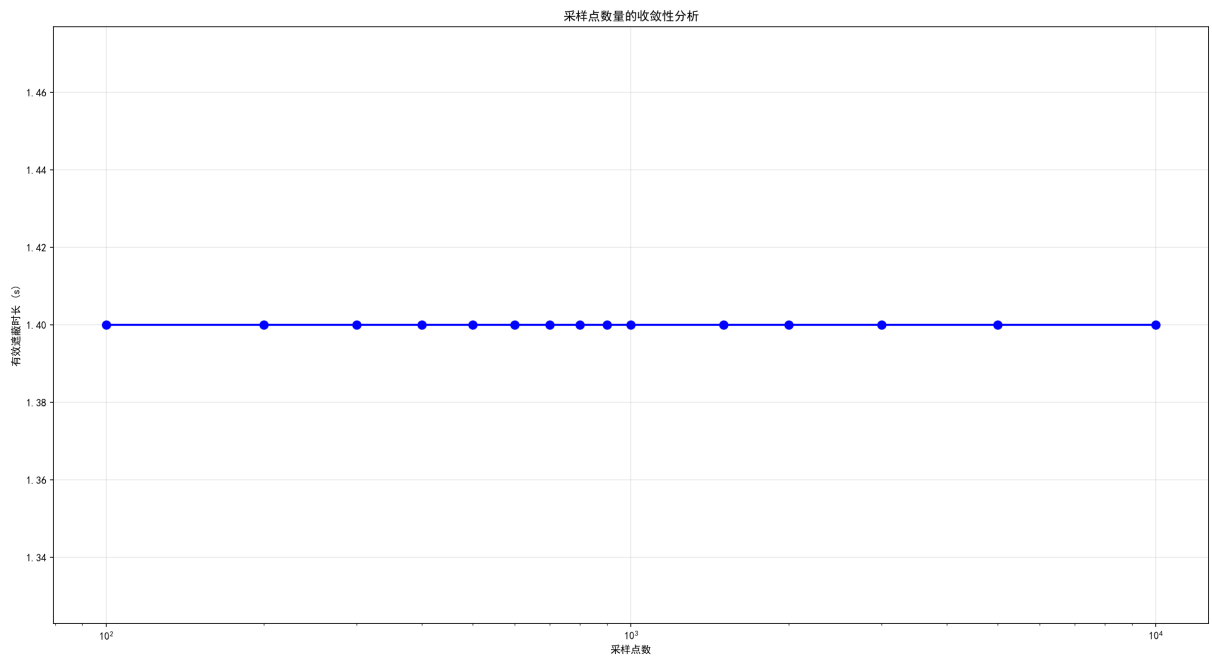
## 4.5. 模型分析

### 1. 蒙特卡洛采样方法收敛性分析结果

**Table 2.** Convergence analysis of the number of sampling points

**表 2.** 采样点数量的收敛性分析

| 采样点数量      | 有效遮蔽时长(s) | 最大遮蔽比例(%) |
|------------|-----------|-----------|
| <b>100</b> | 1.40      | 100.00    |
| 200        | 1.40      | 99.50     |
| 300        | 1.40      | 100.00    |
| 400        | 1.40      | 99.75     |
| 500        | 1.40      | 100.00    |
| 600        | 1.40      | 100.00    |
| 700        | 1.40      | 99.86     |
| 800        | 1.40      | 100.00    |
| 900        | 1.40      | 99.89     |
| 1000       | 1.40      | 100.00    |
| 1500       | 1.40      | 100.00    |
| 2000       | 1.40      | 100.00    |
| 3000       | 1.40      | 100.00    |
| 5000       | 1.40      | 99.98     |
| 10,000     | 1.40      | 100.00    |



**Figure 4.** Convergence analysis of the number of sampling points

**图 4.** 采样点数量的收敛性分析

根据以上结果(见表 2 和图 4), 在采样点数量从 100 增加到 10,000 的全过程中明确显示, 有效遮蔽时长始终保持在 1.40 s, 几乎没有波动; 同时最大遮蔽比例在 99.50% ~ 100% 之间小幅度波动, 当采样点数量  $\geq 1000$  时, 结果已趋于稳定, 说明采样点数量达到 1000 后, 采样精度与计算效率已达到平衡, 继续增加采样点数量不会显著提升结果可靠性。

综上, 蒙特卡洛采样方法在本题中的收敛性极好, 1000 个采样点已足够保证结果的准确性与稳定性。

## 2. 关键参数的灵敏度分析结果

**Table 3.** Analysis of smoke screen sinking velocity disturbance

**表 3.** 烟幕下沉速度扰动分析

| 下沉速度     | 有效遮蔽时长 | 变化      |
|----------|--------|---------|
| -2.5 m/s | 1.00 s | -0.40 s |
| -3.0 m/s | 1.40 s | +0.00 s |
| -3.5 m/s | 1.70 s | +0.30 s |

由表 3 可知, 对于烟幕下沉速度扰动分析: 当速度为 -2.5 m/s 时, 有效遮蔽时长缩短至 1.00 s (减少 0.40 s); 当速度为 -3.5 m/s 时, 有效遮蔽时长延长至 1.70 s (增加 0.30 s)。说明烟幕下沉速度对有效遮蔽时长影响较为显著, 下沉越快, 有效遮蔽时长越长; 变化  $\pm 0.5$  m/s 导致有效遮蔽时长约 25% 的变化, 遮蔽效果对此参数有一定敏感性但不是极端敏感, 其鲁棒性较好。

**Table 4.** UAV positioning error analysis

**表 4.** 无人机定位误差分析

| 定位误差   | 有效遮蔽时长 | 变化      |
|--------|--------|---------|
| +0 m   | 1.40 s | +0.00 s |
| +50 m  | 2.20 s | +0.80 s |
| +100 m | 2.70 s | +1.30 s |

从表 4 中可以观察到, 对于无人机定位误差分析: 当定位误差 +50 m 时, 有效遮蔽时长增至 2.20 s (增加 0.80 s); 当定位误差 +100 m 时, 有效遮蔽时长增至 2.70 s (增加 1.30 s)。说明无人机定位误差对有效遮蔽时长影响非常大, 误差越大, 有效遮蔽时长越长; 变化  $\pm 50$  m 导致有效遮蔽时长约 57% 的变化, 是遮蔽效果最敏感的参数, 其鲁棒性较弱。

**Table 5.** Analysis of missile flight speed disturbances

**表 5.** 导弹飞行速度扰动分析

| 速度变化    | 有效遮蔽时长 | 变化      |
|---------|--------|---------|
| -10 m/s | 1.60 s | +0.20 s |
| +0 m/s  | 1.40 s | +0.00 s |
| +10 m/s | 1.20 s | -0.20 s |

根据表 5 中的信息, 对于导弹飞行速度扰动分析: 当飞行速度下降 10 m/s 时, 有效遮蔽时长增至 1.60 s (增加 0.20 s); 当飞行速度增加 10 m/s 时, 有效遮蔽时长减至 1.20 s (减少 0.20 s)。说明导弹飞行速度对有效遮蔽时长有一定影响, 速度越快, 有效遮蔽时长越短; 变化  $\pm 10$  m/s 导致有效遮蔽时长约 14%

的变化, 遮蔽效果对此参数有一定敏感性但不是极端敏感, 其鲁棒性较好。

## 5. 结论

本文主要是在特定投放策略下求解单架无人机精准投放单枚烟幕干扰弹对单枚导弹的有效遮蔽时长, 首先, 依据运动学方程分步骤建立导弹  $M1$ 、烟幕干扰弹、烟幕云团的运动轨迹、判断是否为有效遮蔽以及计算有效遮蔽时长的耦合模型; 其次, 根据圆柱各表面积加权分配采样点, 并对采样点数量进行收敛性分析, 发现蒙特卡洛采样方法在本题中的收敛性极好, 1000 个采样点已足够保证结果的准确性与稳定性; 同时对烟幕下沉速度、无人机定位误差、导弹飞行速度等关键参数进行灵敏度分析, 明确了各参数对有效遮蔽时长的影响程度及其鲁棒性(对烟幕下沉速度表现为较好鲁棒性, 对无人机定位误差表现为弱鲁棒性, 对导弹飞行速度表现为较好鲁棒性)。最后通过数值计算与几何分析, 精确求出烟幕干扰弹投放点和起爆点的位置坐标, 最终求解得到烟幕干扰弹对  $M1$  的有效遮蔽时长为: 1.40 s。

通过以上分析, 在研究已明确的投放策略且针对单机单干扰单导问题这一简单场景的基础上, 考虑没有给出明确的投放策略且从单机单干扰单导问题延伸到单机多干扰单导、多机单干扰单导、多机多干扰多导等复杂问题场景时, 可借助在特定投放策略下单机单干扰单导问题的简单场景帮助理解无人机投放烟幕弹以及烟幕遮蔽导弹的核心原理, 为后续的复杂场景设计最优的投放策略奠定基础。

研究验证了数学建模在设计烟幕干扰弹投放策略中起到关键作用, 通过定量分析各运动体的位置关系, 精确评估烟幕弹干扰导弹的有效遮蔽效果, 为后续的参数优化提供了依据, 本文的研究结果可为在实战中投放烟幕干扰弹干扰敌方导弹提供量化参考, 也验证了数学建模在复杂攻防场景中的应用价值。

## 参考文献

- [1] 葛强胜, 张立军, 葛强林. 烟幕干扰激光制导武器空袭的机理[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2005(2): 149-152.
- [2] 李永, 郭宝录, 李朝荣, 等. 机载光电干扰技术的发展动向与分析[J]. 舰船电子工程, 2014, 34(8): 14-17+24.
- [3] 侯品. 反舰导弹防御对抗技术探讨[J]. 电子世界, 2014(13): 101-102.
- [4] 徐路程, 郝雪颖, 肖凯涛, 等. 爆炸型烟幕弹遮蔽效能仿真研究[J]. 兵工学报, 2020, 41(7): 1299-1306.
- [5] 徐路程, 肖凯涛, 宋伟伟, 等. 稳定、中性条件风速标准差对烟幕扩散的影响[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(17): 7002-7007.
- [6] 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.
- [7] 符文星, 朱苏朋, 陈士槽. 空地导弹制导精度分析及仿真[J]. 弹箭与制导学报, 2005(SD): 833-835.
- [8] 方有培, 董尔令. 对 GPS 制导导弹的有效干扰途径分析[J]. 航天电子对抗, 2001(2): 35-39.
- [9] 郭爱强, 高欣宝, 李天鹏. 烟幕弹对制导弹药的干扰效能评估现状[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(12): 64-71.
- [10] 李楠. 烟幕干扰对红外成像导引头命中概率影响[J]. 激光与红外, 2021, 51(3): 358-362.
- [11] 高志扬, 祝利, 韩书键. 烟幕弹对毫米波末制导雷达的有效遮蔽区域研究[J]. 弹箭与制导学报, 2015, 35(6): 62-64+69.
- [12] 顾文慧, 高红杰. 烟幕投放控制分析与设计[J]. 光电技术应用, 2014, 29(2): 87-89.
- [13] 杨争望, 祝秋香, 刘鹏梅, 等. 基于四旋翼无人机的物资定点自动投放系统设计[J]. 自动化与仪表, 2025, 40(1): 49-53.
- [14] 唐彭晨, 葛城羽, 陆连兴. 基于优化模型的无人机定点投放问题的研究[J]. 长江信息通信, 2024, 37(4): 25-28.
- [15] 浦强松, 刘伟, 顾鑫. 无人机精准投放赤眼蜂防治水稻二化螟关键指标的探讨[J]. 山东农业工程学院学报, 2025, 42(2): 23-29.
- [16] 胡盈, 李涵, 付丽娜. 无人机定点投放问题探讨[J]. 科技视界, 2024, 14(11): 51-54.
- [17] 高卫. 烟幕干扰效果评估方法研究[J]. 兵工学报, 2006(4): 681-684.