

我们利用模拟退火算法求解上述单目标优化模型。使用模拟退火算法求解“有效遮蔽时间单目标优化模型”的核心思路是：通过模拟物理退火过程的随机搜索与概率接受机制，在决策变量的可行域内寻找使有效遮蔽时间 Δt 最大化的最优解。具体步骤如下：

步骤 1 初始化参数

- 初始解：在可行域内随机生成 $S_0 = (\alpha_0, v_{FY1,0})$ ，其中 $\alpha_0 \in [0, 2\pi]$ ， $v_{FY1,0} \in [70, 140]$ ；
- 算法参数：初始温度 $T_0 = 100$ ，降温系数 $k = 0.95$ ，终止温度 $T_{\text{end}} = 10^{-5}$ ，每轮迭代次数 $L = 50$ 。

步骤 2 目标函数 Δt 计算（核心）

对任意解 $S = (\alpha, v_{FY1})$ ，按以下流程计算 Δt ：

- 依据“无人机位置公式”，计算烟幕投放时刻 $t_{FYj,11}$ 的无人机坐标；
- 依据“烟幕弹起爆位置公式”（含重力下落项），计算起爆时刻 $t_{FYj,12}$ 的位置；
- 依据“烟幕云团运动公式”，计算 $t \in [t_{FYj,12}, t_{FYj,12} + \Delta t_0]$ 内的云团中心，结合球面方程确定有效区域；
- 在真目标圆柱面 $(x_1^2 + (y_1 - y_0)^2 = r_0^2, z_1 \in [0, h_0])$ 上采样关键点位，通过 $\sum_{j=1}^3 a_1^j$ 判定各时刻遮挡状态，累加有效时长得 Δt 。

步骤 3 邻域解生成

对当前解 $S = (\alpha, v_{FY1})$ 添加随机扰动：

- 方向角： $\alpha' = \alpha \pm 0.1$ （弧度），超出 $[0, 2\pi]$ 则取模调整；
- 速度： $v'_{FY1} = v_{FY1} \pm 5$ （m/s），超出 $[70, 140]$ 则截断至边界。

步骤 4 判断准则（接受新解）

计算目标函数差值 $\Delta E = \Delta t(S') - \Delta t(S)$ ：

- 若 $\Delta E > 0$ ：直接接受 S' 为当前解；
- 若 $\Delta E \leq 0$ ：以概率 $P = \exp(\Delta E/T)$ 接受 S' （ T 为当前温度，温度越高接受概率越大）。

步骤 5 降温迭代与终止

每完成 L 次迭代后，按 $T = k \cdot T$ 降温；重复“邻域搜索 → 接受准则 → 降温”，直至 $T \leq T_{\text{end}}$ ，输出最优解 $S^* = (\alpha^*, v_{FY1}^*)$ 及最大 Δt^* 。

表 1 问题 3 无人机投放策略

无人机运动方向	无人机运动速度	烟幕干扰弹编号	烟幕干扰弹投放点的 x 坐标	烟幕干扰弹投放点的 y 坐标
3.1356	140.00	1	17653.00	0.88
3.1356	140.00	2	17294.61	3.03
3.1356	140.00	3	17112.61	4.12

表 2 问题 3 无人机投放策略

干扰弹投放点的 z 坐标	干扰弹起爆点的 x 坐标	干扰弹起爆点的 y 坐标	干扰弹起爆点的 z 坐标	有效干扰时长
1800.00	17053.81	4.47	1710.23	4.1
1800.00	16554.02	7.47	1662.88	2.7
1800.00	16290.83	9.04	1631.16	1.7