通过模拟物理退火过程的随机搜索与概率接受机制，在多无人机、多烟幕弹的决策变量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

- **初始解生成**：在决策变量可行域内随机生成初始解 $S_0 = \{\alpha_j, v_{\mathrm{FYj}}, t_{\mathrm{FYj},i1}, t_{\mathrm{FYj},i2}\}$（$j = 1,2,...,5$ 为无人机编号，$i = 1,2,3$ 为烟幕弹编号），确保满足时间约束（如 $t_{\mathrm{FYj},(i+1)1} \geq t_{\mathrm{FYj},i1} + 1$、$t_{\mathrm{FYj},i2} \geq t_{\mathrm{FYj},i1}$）；
- **初始温度** T_0：设定较高的初始温度（如 $T_0 = 100$），确保算法初期能接受较差解，扩大对多变量组合的搜索范围；
- **降温系数** k：设定降温速率（如 $k = 0.95$），控制温度随迭代逐步降低，平衡全局探索与局部精细搜索；
- **终止温度** $T_{\mathbf{end}}$：设定停止阈值（如 $T_{\mathrm{end}} = 10^{-5}$），当温度低于此值时，算法收敛，终止迭代；
- **迭代次数** L：设定每轮温度下的迭代步数（如 $L = 100$），确保在当前温度下对邻域解进行充分搜索，避免遗漏较优解。

步骤 2 目标函数计算（核心步骤）

对任意解 $S = \{\alpha_j, v_{\mathrm{FYj}}, t_{\mathrm{FYj},i1}, t_{\mathrm{FYj},i2}\}$，计算其对应的有效遮蔽时间 Δt，步骤如下：

- **多轨迹同步模拟**：
  导弹 Mk 轨迹：按位置公式计算任意时刻 t 的坐标 $(x_{\mathrm{Mk},t}, y_{\mathrm{Mk},t}, z_{\mathrm{Mk},t})$，即沿指向假目标的直线飞行；
  无人机 FYj 轨迹：根据 α_j 和 v_{FYj}，计算投放时刻 $t_{\mathrm{FYj},i1}$ 的位置 $(x_{\mathrm{FYj},t_{\mathrm{FYj},i1}}, y_{\mathrm{FYj},t_{\mathrm{FYj},i1}}, z_{\mathrm{FYj},t_{\mathrm{FYj},i1}})$，保持 z 轴高度不变；
  烟幕弹起爆轨迹：基于 $t_{\mathrm{FYj},i2}-t_{\mathrm{FYj},i1}$ 的时间差，计算起爆位置 $(x_{\mathrm{FYji},t_{\mathrm{FYj},i2}}, y_{\mathrm{FYji},t_{\mathrm{FYj},i2}}, z_{\mathrm{FYji},t_{\mathrm{FYj},i2}})$，$x, y$ 方向随无人机惯性运动，z 方向受重力下落；
  烟幕云团轨迹：对 $t \in [t_{\mathrm{FYj},i2}, t_{\mathrm{FYj},i2} + \Delta t_0]$（$\Delta t_0$ 为烟幕有效时长），计算云团中心坐标 $(x_{\mathrm{FYji},t}, y_{\mathrm{FYji},t}, z_{\mathrm{FYji},t})$，$x, y$ 坐标恒定，z 方向以 v_1 匀速下沉；
- **真目标采样**：在真目标圆柱面（$x_1^2 + (y_1 - y_0)^2 = r_0^2$，$z_1 \in [0, h_0]$）上均匀采样（如 10 个角度 ×5 个高度，共 50 个采样点），覆盖目标所有关键区域；
- **遮挡时间判定**：对每个采样点和每个时间 t，判断是否被任一烟幕云团球体（$O_{\mathrm{FYji},t}$: $(x - x_{\mathrm{FYji},t})^2 + (y - y_{\mathrm{FYji},t})^2 + (z - z_{\mathrm{FYji},t})^2 = r^2$）遮挡，若满足 $\sum_{j=1}^{5}\sum_{i=1}^{3} a_i^j \neq 0$（$a_i^j$ 为遮挡标识，1 表示遮挡，0 表示未遮挡），则记录 t 为遮挡时刻；
- **有效时长统计**：合并所有连续的遮挡时间区间，计算总时长，即为该解对应的 Δt。

步骤 3 邻域解生成

为当前解 $S = \{\alpha_j, v_{\mathrm{FYj}}, t_{\mathrm{FYj},i1}, t_{\mathrm{FYj},i2}\}$ 生成邻域解 S'，确保新解满足所有约束条件：

- 方向角 α'_j：$\alpha'_j = \alpha_j + \Delta\alpha$，其中 $\Delta\alpha$ 为 $[-0.1, 0.1]$ 弧度的随机扰动，若 α'_j 超出 $[0, 2\pi]$，

则通过取模（$\alpha_j' = \alpha_j' \mod 2\pi$）调整至可行域；

- 飞行速度 v'_{FYj}：$v'_{\text{FYj}} = v_{\text{FYj}} + \Delta v$，其中 Δv 为 $[-3,3]$ m/s 的随机扰动，若 v'_{FYj} 超出 $[70,140]$ m/s，则截断至边界（小于 70 取 70，大于 140 取 140）；
- 投放时刻 $t'_{\text{FYj},i1}$：$t'_{\text{FYj},i1} = t_{\text{FYj},i1} + \Delta t$，其中 Δt 为 $[-0.3,0.3]$ s 的随机扰动，调整后需满足 $t'_{\text{FYj},(i+1)1} \geq t'_{\text{FYj},i1} + 1$ 及 $t'_{\text{FYj},i1} \in [0, d_{\text{mk},0}/v_0]$（$d_{\text{mk},0}$ 为导弹初始距离假目标的距离）；
- 起爆时刻 $t'_{\text{FYj},i2}$：$t'_{\text{FYj},i2} = t_{\text{FYj},i2} + \Delta t$，其中 Δt 为 $[-0.3,0.3]$ s 的随机扰动，调整后需满足 $t'_{\text{FYj},i2} \geq t'_{\text{FYj},i1}$ 及 $t'_{\text{FYj},i2} \in [t'_{\text{FYj},i1}, d_{\text{mk},0}/v_0]$。

步骤 4 判断准则（接受/拒绝新解）

- 计算目标函数差值：$\Delta E = \Delta t(S') - \Delta t(S)$，其中 $\Delta t(S')$ 为邻域解的有效遮蔽时间，$\Delta t(S)$ 为当前解的有效遮蔽时间；
- 若 $\Delta E > 0$（新解更优）：直接接受 S' 作为当前解，更新当前解的参数与 Δt；
- 若 $\Delta E \leq 0$（新解较差）：以概率 $P = \exp\left(\dfrac{\Delta E}{T}\right)$ 接受 S'（T 为当前温度），通过生成 $[0,1]$ 区间的随机数 $rand$，若 $rand < P$，则接受 S'，否则保留原解。温度越高，P 越大，越容易接受较差解，利于跳出局部最优。

步骤 5 降温与迭代

- 每完成 L 次迭代（即对当前温度下的 L 个邻域解完成接受/拒绝判断）后，按 $T = k \cdot T$ 降低温度，逐步减小对较差解的接受概率；
- 重复“邻域解生成 → 接受/拒绝判断 → 降温”的循环过程，直至当前温度 $T \leq T_{\text{end}}$，停止迭代。

步骤 6 终止与最优解输出

迭代终止后，从所有历史解中筛选出有效遮蔽时间 Δt 最大的解，作为最优解 $S^* = \{\alpha_j^*, v_{\text{FYj}}^*, t_{\text{FYj},i1}^*, t_{\text{FYj},i2}^*\}$，并输出 S^* 的所有参数及对应的最大有效遮蔽时间 Δt^*。

表 **1** 标准三线表格

D(in)	P_u(lbs)	u_u(in)	β	G_f(psi.in)
5	269.8	0.000674	1.79	0.04089
10	421.0	0.001035	3.59	0.04089
20	640.2	0.001565	7.18	0.04089