•计算机科学与技术•

DOI:10.12454/j.jsuese.202600356

本刊网刊

无人机群烟幕协同遮蔽的分层优化算法

刘年瑾,郑秀娟*

(四川大学 电气工程学院,四川 成都 610065)

摘　要:针对无人机群烟幕协同遮蔽中目标分配、投放时序、连续飞行参数三者耦合的问题,建立协同遮蔽优化模型并提出分层求解方法。首先,构建无人机、烟幕弹、烟幕云团与来袭目标的运动学模型,基于目标等效投影轮廓和关键视线距离给出有效遮蔽判定,并通过远场近似误差估计验证判定模型的适用性;然后,以遮蔽区间并长度定义全局协同效能,避免多烟幕云团遮蔽区间重叠时对有效遮蔽时长的重复计入。在此基础上,设计集成平台级任务引导、逐弹时序协调和单节点连续参数优化的分层优化框架,上层根据几何可达性和时间裕度生成目标优先序,中层以区间边际增益调整逐弹服务目标,下层采用改进差分进化算法优化航向角、飞行速度、投放时刻和起爆延时。仿真实验结果表明,逐弹边际协调使目标的粗遮蔽区间并长度由21.96 s提高至33.71 s,提升了53.51%;连续参数优化后,标准差分进化算法和改进差分进化算法的总体协同效能分别为37.35 s和40.39 s。多场景扰动实验和耗时统计进一步表明,所提方法能够在风场扰动、导弹机动和云团参数变化条件下生成满足严格遮蔽判定的协同投放方案,具备实际应用潜力。

关键词:多无人机协同;烟幕遮蔽;分层优化;时序协调;差分进化算法;混合优化

中图分类号:TP301.6　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**2096-3246(2026)06-0385-12

烟幕干扰作为典型的软杀伤手段,能够通过燃烧、爆炸或气溶胶释放等方式形成具有散射、吸收和遮蔽作用的烟幕云团,在目标前方特定空域建立遮蔽区域,从而干扰来袭导弹对真实目标的探测、识别与稳定跟踪。相较于高成本硬拦截手段,烟幕干扰具有部署灵活、成本较低、适于快速防护等特点,因而在要地防护、重要目标掩护和多层防御体系中具有持续的工程价值。随着无人机平台在机动投送和协同部署方面的能力不断增强,利用无人机群协同投放烟幕弹,对来袭导弹实施时空协同干扰,已经成为一个具有应用潜力的研究方向。

无人机群烟幕协同干扰问题的相关研究大致可分为两类。第一类研究聚焦烟幕干扰机理、投放控制与遮蔽效能评估。在遮蔽机理方面,Zohdi[1]将颗粒遮蔽云团视为非均匀颗粒介质,建立了入射波作用下云团散射响应的计算模型,说明烟幕或气溶胶云团的遮蔽能力与颗粒分布、介质参数以及波传播过程都密切相关。在探测链路方面,Giles等[2]建立了含路径遮蔽物的激光雷达系统模型,烟幕环境实验表明,路径气溶胶会削弱目标探测性能。在效能评价方面,Tang等[3–4]基于红外热成像提出外场烟幕有效遮蔽面积计算方法,进一步利用灰度图像建立外场红外烟幕透过率计算方法,为烟幕遮蔽效能定量评价提供参考。国内研究则更多面向具体应用场景:丁佳麟等[5]等讨论了烟幕干扰效果评价指标及计算方法,指出烟幕效能应结合图像质量变化与干扰性能综合分析;管智超等[6]从多频谱干扰剂角度综述了典型材料的干扰机理及实现路径。近年来,红磷基烟剂的燃烧、遮蔽和红外辐射特性以及Janus颗粒遮蔽云团的非对称成像特性也受到关注[7–8]。总体来看,已有研究为烟幕遮蔽机理、投放控制和局部效能评估提供了基础,但研究重点仍主要集中在单次投放控制、局部遮蔽效果或材料性能评价,对多平台、多烟幕弹协同作用下的全局遮蔽时间优化等研究的涉及相对较少。

第二类研究聚焦多无人机协同任务分配与优化求解。Gerkey等[9]从多机器人系统角度给出了任务分

收稿日期:2026 – 05 – 08　　**修回日期:**2026 – 06 – 03　　**网络出版日期:**2026 – 06 – 17

基金项目:四川省科技项目(2026YFHZ0220);国家重点研发计划项目(2023YFF0615800)

作者简介:刘年瑾(2005—),女,本科生. 研究方向:优化算法. E-mail:nianjinliu@163.com

* **通信作者:**郑秀娟,副教授, E-mail:xiujuanzheng@scu.edu.cn

配问题的形式化分类框架，Zhang 等[10]系统梳理了多无人机协同任务分配的建模方法与关键挑战，Jia 等[11]研究了随机速度和时间窗约束下的异构无人机协同多任务分配问题。近期研究多关注搜索救援场景以及同时到达、资源约束下的多无人机协同任务分配问题[12−13]，并针对群体收益优化和复杂约束条件开展分布式协同任务分配研究[14−15]。此外，有限通信条件下的分布式任务分配也受到关注[16]。国内研究则围绕无人机集群任务分配技术综述及异构多任务协同优化展开[17−18]，并针对通信约束和多无人机协同分配问题提出相应优化算法[19−20]，进一步探索了不确定环境下的异构多无人机任务分配策略[21]。与此同时，时序耦合与分层求解已成为复杂协同任务的重要方向。王浩宇等[22]针对大规模时序任务分配中的跨队列影响与冲突问题，建立了考虑载荷、任务需求和时序约束的任务分配模型；邸伟承等[23]面向空地异构协同轮值任务，提出了“区域划分—任务分配”两级分层求解方法；王忠言等[24]在动态多目标任务分配中同时考虑资源约束、任务约束和时间窗口约束，构建了兼顾拦截成功率、拦截成本和协同时间误差的多目标优化模型。上述研究表明，当任务效能受到时间顺序、资源约束和局部决策联动影响时，分层建模与时序协调能够有效降低直接全局优化的求解难度。

尽管已有研究分别从烟幕效能评估、多无人机任务分配和时序耦合优化等方面开展探索，但对于多无人机、多烟幕弹协同遮蔽多来袭目标的任务，仍缺少同时刻画视线遮蔽、区间型收益、目标分配和连续投放参数的统一模型。现有烟幕研究多关注单次投放或局部遮蔽效能，多无人机分配研究则多以航程、时间窗、资源需求或一般任务收益为目标，难以直接反映由导弹视线、目标轮廓和烟幕云团运动共同决定的时变遮蔽收益。为此，本文构建包含离散分配变量和连续投放变量的混合优化模型，并提出面向遮蔽区间并集效能的分层求解方法。本文的主要创新点可从以下 3 个方面概括。

第一，建立多无人机烟幕协同遮蔽统一建模框架，将运动学关系、关键视线遮蔽判定和全局遮蔽效能纳入同一优化问题。

第二，提出基于遮蔽区间并长度的协同效能指标，通过区间并集运算避免多云团遮蔽区间重叠时的效能重复计入。

第三，设计以区间并集效能为主线的分层协同算法。不同于固定分配或独立单弹优化，本文在平台级任务引导后，引入基于新增并集长度的逐弹边际协调，使每一枚烟幕弹的服务目标调整直接服务于全局遮蔽时间增益；再通过节点级连续优化生成满足严格遮蔽判定的投放参数，从而实现对高维混合优化问题的结构化降维求解。

1 问题建模

1.1 场景设定与基础运动学关系

本文考虑 N_u 架无人机携带烟幕干扰弹，对 N_m 枚来袭导弹实施协同遮蔽。于是，设无人机集合为 $\mathcal{U}$，$\mathcal{U}=\{1,2,\cdots,N_u\}$，第 i 架无人机的初始位置为 $\boldsymbol{F}_i^0\in\mathbb{R}^3$，并设来袭导弹集合为 $\mathcal{M}$，$\mathcal{M}=\{1,2,\cdots,N_m\}$，第 k 枚导弹的初始位置为 $\boldsymbol{M}_k^0$，$\boldsymbol{M}_k^0\in\mathbb{R}^3$。若第 i 架无人机最多挂载 B_i 枚烟幕干扰弹，则其弹药索引集合记为 $\mathcal{B}_i$，$\mathcal{B}_i=\{1,2,\cdots,B_i\}$。假目标位于原点 $O=(0,0,0)$，真实目标抽象为位于 O 附近的固定圆柱体。

真实目标底面圆心为 $\boldsymbol{G}_{\mathrm{T}}$，半径与高度分别为 R_{T}、H_{T}。取竖直方向单位向量 $\boldsymbol{n}=(0,0,1)$，则真实目标的几何中心 $\boldsymbol{G}_{\mathrm{c}}$ 可表示为：

$$\boldsymbol{G}_{\mathrm{c}}=\boldsymbol{G}_{\mathrm{T}}+\frac{H_{\mathrm{T}}}{2}\boldsymbol{n} \tag{1}$$

为建立基础运动学模型，本文作如下基本假设：无人机受领任务后瞬时完成航向调整，之后保持等高度、匀速、直线飞行；烟幕干扰弹脱离无人机后继承其瞬时速度，起爆前仅受重力作用；起爆后瞬时形成球状烟幕云团，云团中心沿竖直方向匀速下沉；来袭导弹在基准场景中以恒定速度沿直线飞向假目标。为突出遮蔽几何关系与协同优化机制，本文首先建立无风、直线来袭条件下的基准模型，风场漂移、导弹机动、云团形态扰动等实际因素不直接参与基准模型求解，而是在后续扩展模型与敏感性实验中作为有界扰动进行检验。

设第 i 架无人机的航向角为 α_i，飞行方向单位向量为 $\boldsymbol{a}_i=(\cos\alpha_i,\sin\alpha_i,0)$，飞行速度大小为 v_i，其允许速度下限和上限分别为 $v_i^{\min}$ 和 $v_i^{\max}$；第 i 架无人机和第 j 枚烟幕弹的投放时刻和起爆延时分别记为 t_{ij}^{r} 和 τ_{ij}，起爆时刻 $t_{ij}^{\mathrm{b}}=t_{ij}^{\mathrm{r}}+\tau_{ij}$；第 k 枚导弹沿单位方向 $\boldsymbol{d}_k$ 飞向假目标，相应的基准运动学关系表达式如下：

$$\begin{cases}\boldsymbol{F}_i(t)=\boldsymbol{F}_i^0+v_i t\boldsymbol{a}_i,\ t\ge 0,\ v_i^{\min}\le v_i\le v_i^{\max};\\ \boldsymbol{P}_{ij}=\boldsymbol{F}_i(t_{ij}^{\mathrm{r}});\\ \boldsymbol{Q}_{ij}=\boldsymbol{P}_{ij}+v_i\tau_{ij}\boldsymbol{a}_i-\dfrac{1}{2}g\tau_{ij}^2\boldsymbol{n};\\ \boldsymbol{C}_{ij}(t)=\boldsymbol{Q}_{ij}-v_{\mathrm{c}}(t-t_{ij}^{\mathrm{b}})\boldsymbol{n},\ t\in[t_{ij}^{\mathrm{b}},t_{ij}^{\mathrm{b}}+T_{\mathrm{c}}];\\ \boldsymbol{d}_k=\dfrac{\boldsymbol{O}-\boldsymbol{M}_k^0}{\left\|\boldsymbol{O}-\boldsymbol{M}_k^0\right\|};\\ \boldsymbol{M}_k(t)=\boldsymbol{M}_k^0+v_{\mathrm{m}}t\boldsymbol{d}_k,\ t\ge 0\end{cases} \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{F}_i(t)$、$\boldsymbol{P}_{ij}$、$\boldsymbol{Q}_{ij}$、$\boldsymbol{C}_{ij}(t)$、$\boldsymbol{M}_k(t)$ 分别表示无人机位置、投放点、起爆点、云团中心和导弹位置；t 为任务开始后经过的时间；g、v_{c}、T_{c}、v_{m} 分别为重力加速度、云团下沉

速度、云团有效持续时间和导弹速度；$\|\cdot\|$为欧几里得范数。相邻两次投放还需满足最小时间间隔约束。

综上，本文问题归纳为，在运动学和投放约束下，优化无人机航向、速度、投放时刻和起爆延时，使烟幕云团对导弹视线形成尽可能长的有效遮蔽。

1.2　有效遮蔽判定模型

在基准运动学关系给定后，本文从导弹视点、烟幕云团中心与真实目标投影轮廓的相对位置出发，建立有效遮蔽判定模型。由于来袭导弹与真实目标之间的距离通常远大于目标尺度，本文采用远场平行投影近似，将真实目标在第k枚导弹视角下的可见轮廓近似为竖直投影矩形。

为说明该近似的适用范围，定义第k枚导弹到真实目标几何中心的距离$D_k(t)$为：

$$D_k(t)=\left\| \boldsymbol{M}_k(t)-\boldsymbol{G}_c \right\| \tag{3}$$

定义目标特征尺度a_{T}为：

$$a_{\mathrm{T}}=\sqrt{R_{\mathrm{T}}^2+(H_{\mathrm{T}}/2)^2} \tag{4}$$

对真实目标轮廓上任一点$\boldsymbol{p}$，有$\left\| \boldsymbol{p}-\boldsymbol{G}_{\mathrm{c}} \right\| \le a_{\mathrm{T}}$。当$D_k(t)\gg a_{\mathrm{T}}$时，由导弹视点指向目标不同边界点的中心投影与平行投影之间的边界偏差量级$\varepsilon_{\mathrm{ff},k}(t)$可估计为：

$$\varepsilon_{\mathrm{ff},k}(t)=O\left(\frac{a_{\mathrm{T}}^2}{D_k(t)}\right) \tag{5}$$

式中，$O(\cdot)$表示渐近上界，即在远场条件下，该偏差不超过$a_{\mathrm{T}}^2/D_k(t)$的常数倍。因此，当$\varepsilon_{\mathrm{ff},k}(t)$明显小于烟幕有效遮蔽半径$R_{\mathrm{c}}$时，远场平行投影近似对有效遮蔽判定的影响较小。后续仿真实验将统计最小视距$D_{\min,k}$、尺度比$a_{\mathrm{T}}/D_{\min,k}$和误差相对量$\varepsilon_{\mathrm{ff},k}/R_{\mathrm{c}}$，以验证该近似在所设场景下的合理性。

有效遮蔽判定的几何关系如图1所示。图1中，M表示导弹视点，$P_1\sim P_4$为真实目标表面选取的代表性边界点，黑色连线表示导弹视点与各边界点之间的视线。

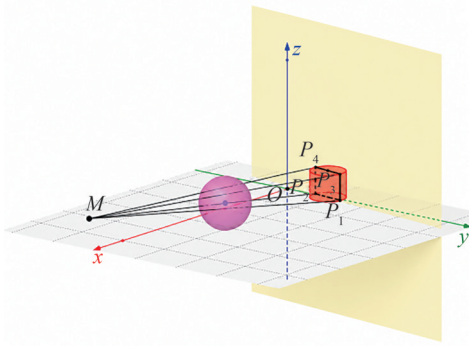


图1　有效遮蔽判定几何示意图

Fig. 1　Geometric illustration of the effective shielding criterion

由式(2)可知，第k枚导弹沿固定方向$\boldsymbol{d}_k$飞向假目标O，其飞行方向在水平面上的单位投影$\bar{\boldsymbol{d}}_k$为：

$$\bar{\boldsymbol{d}}_k=\frac{(d_{k,x},d_{k,y},0)}{\sqrt{d_{k,x}^2+d_{k,y}^2}} \tag{6}$$

式中，$d_{k,x}$和$d_{k,y}$分别表示导弹飞行方向向量$\boldsymbol{d}_k$在x轴和y轴上的分量。

在水平面内取与$\bar{\boldsymbol{d}}_k$正交的单位向量$\boldsymbol{e}_k$，表达式如下：

$$\boldsymbol{e}_k=(-\bar{d}_{k,y},\bar{d}_{k,x},0) \tag{7}$$

向量$\boldsymbol{e}_k$表示目标等效投影矩形的横向展开方向，而竖直方向仍取$\boldsymbol{n}=(0,0,1)$。在此基础上，真实目标在第k枚导弹视角下的等效投影矩形可由4个边界点统一表示为：

$$\begin{cases} \boldsymbol{p}_{k,1}=\boldsymbol{G}_{\mathrm{c}}-R_{\mathrm{T}}\boldsymbol{e}_k-\dfrac{H_{\mathrm{T}}}{2}\boldsymbol{n}, \\ \boldsymbol{p}_{k,2}=\boldsymbol{G}_{\mathrm{c}}+R_{\mathrm{T}}\boldsymbol{e}_k-\dfrac{H_{\mathrm{T}}}{2}\boldsymbol{n}, \\ \boldsymbol{p}_{k,3}=\boldsymbol{G}_{\mathrm{c}}-R_{\mathrm{T}}\boldsymbol{e}_k+\dfrac{H_{\mathrm{T}}}{2}\boldsymbol{n}, \\ \boldsymbol{p}_{k,4}=\boldsymbol{G}_{\mathrm{c}}+R_{\mathrm{T}}\boldsymbol{e}_k+\dfrac{H_{\mathrm{T}}}{2}\boldsymbol{n} \end{cases} \tag{8}$$

设第i架无人机第j枚烟幕干扰弹形成的云团中心在时刻t的位置为$\boldsymbol{C}_{ij}(t)$。定义其到导弹视点$\boldsymbol{M}_k(t)$与投影矩形顶点$\boldsymbol{p}_{k,n}$所确定线段的距离$d_{ijkn}(t)$为：

$$d_{ijkn}(t)=\mathrm{dist}\left(\boldsymbol{C}_{ij}(t),\overline{\boldsymbol{M}_k(t)\boldsymbol{p}_{k,n}}\right),n=1,2,3,4 \tag{9}$$

式中，$\overline{\boldsymbol{M}_k(t)\boldsymbol{p}_{k,n}}$为以$\boldsymbol{M}_k(t)$和$\boldsymbol{p}_{k,n}$为端点的线段，$\mathrm{dist}(\cdot)$为点到线段的最短欧氏距离，$n$为投影矩形顶点的编号。

当云团处于有效持续时间内，且其中心到4条关键视线的距离均不超过烟幕有效遮蔽半径R_{c}时，认为该时刻形成有效遮蔽。由此定义有效遮蔽指示函数$\chi_{ijk}(t)$为：

$$\chi_{ijk}(t)=\begin{cases} 1, d_{ijkn}(t)\le R_{\mathrm{c}}; \\ 0, \text{其他} \end{cases} \tag{10}$$

式中，$t\in[t_{ij}^{\mathrm{b}},t_{ij}^{\mathrm{b}}+T_{\mathrm{c}}]$，$T_{\mathrm{c}}$为云团有效持续时间。

根据式(10)，第i架无人机第j枚烟幕干扰弹对第k枚导弹的有效遮蔽区间可定义为：

$$\mathcal{I}_{ijk}=\left\{t\in[t_{ij}^{\mathrm{b}},t_{ij}^{\mathrm{b}}+T_c];\chi_{ijk}(t)=1\right\} \tag{11}$$

相应的有效遮蔽时长T_{ijk}记为：

$$T_{ijk}=|\mathcal{I}_{ijk}|=\int_{t_{ij}^{\mathrm{b}}}^{t_{ij}^{\mathrm{b}}+T_{\mathrm{c}}}\chi_{ijk}(t)\mathrm{d}t \tag{12}$$

T_{ijk}可用于量化第j枚烟幕干扰弹对第k枚来袭导弹的有效遮蔽贡献。

1.3　全局协同效能与统一优化模型

在无人机群多烟幕弹协同干扰场景下，同一来袭

目标可能同时受到多个烟幕云团作用。不同云团形成的遮蔽区间既可能相互接续，也可能发生重叠。若直接累加各烟幕弹的局部遮蔽时长，可能将重叠部分重复计入，导致高估整体协同效能。因此，本文以遮蔽区间并集长度定义目标级有效遮蔽时长，进一步构造全局协同效能指标。

设所有烟幕弹节点构成的集合$\mathcal{N}$为：

$$\mathcal{N}=\{(i,j):i\in\mathcal{U},j\in\mathcal{B}_i\} \tag{13}$$

给定某一分配方案，设分配给第k枚导弹的烟幕弹索引集合为$\mathcal{S}_k$，$\mathcal{S}_k\subseteq\mathcal{N}$。则将第$k$枚导弹对应的总有效遮蔽区间定义为：

$$\mathcal{I}_k=\bigcup_{(i,j)\in\mathcal{S}_k}\mathcal{I}_{ijk} \tag{14}$$

其总有效遮蔽时长T_k为：

$$T_k=|\mathcal{I}_k| \tag{15}$$

在此基础上，全局协同效能J定义为：

$$J=\sum_{k\in\mathcal{M}}w_kT_k \tag{16}$$

式中，w_k为第k枚导弹的威胁权重，$w_k\geq0$，当各来袭导弹重要性相同时，取$w_k=1$。该指标只统计各目标被有效遮蔽的时间并集，能够避免多个烟幕云团在同一时段重复作用时对遮蔽效能的重复计入。因此，本文后续主要采用目标级总有效遮蔽时长T_k和全局协同效能J评价协同遮蔽效果。

为建立统一优化模型，引入二元变量z_{ijk}($z_{ijk}\in\{0,1\}$)表示第i架无人机第j枚烟幕干扰弹是否分配给第k枚导弹：当$z_{ijk}=1$时，表示该弹服务于第k枚导弹；否则$z_{ijk}=0$。连续决策变量包括无人机飞行方向α_i、飞行速度v_i、烟幕干扰弹投放时刻t_{ij}^{r}和起爆延时τ_{ij}。

若$\mathcal{S}_k=\{(i,j):z_{ijk}=1\}$，则无人机群烟幕协同遮蔽问题可表述为：在满足运动学约束、速度约束、投放时序约束和起爆高度约束的条件下，最大化全局协同效能J。其优化目标可写为：

$$\max J=\sum_{k\in\mathcal{M}}w_k\left|\bigcup_{(i,j):z_{ijk}=1}I_{ijk}\right| \tag{17}$$

其主要约束包括：

$$\begin{cases}\displaystyle\sum_{k\in\mathcal{M}}z_{ijk}\leq1,\forall i\in\mathcal{U},j\in\mathcal{B}_i;\\ v_i^{\min}\leq v_i\leq v_i^{\max},\forall i\in\mathcal{U};\\ t_{ij}^{\mathrm{r}}\geq0,\quad\tau_{ij}\geq0,\forall i\in\mathcal{U},j\in\mathcal{B}_i;\\ t_{i,j+1}^{\mathrm{r}}-t_{ij}^{\mathrm{r}}\geq\Delta t_{\min},\forall i\in\mathcal{U},j=1,2,\cdots,B_i-1;\\ Q_{ij}^{(z)}\geq0,\forall i\in\mathcal{U},j\in\mathcal{B}_i\end{cases} \tag{18}$$

式(17)、(18)中，I_{ijk}为第i架无人机投放的第j枚烟幕弹对第k枚来袭导弹形成有效遮蔽时间集合，$Q_{ij}^{(z)}$为起爆点位置向量$\boldsymbol{Q}_{ij}$的竖直坐标，约束$Q_{ij}^{(z)}\geq0$用于保证烟幕弹在地面以上起爆。

当考虑风场漂移、导弹机动或云团参数扰动时，只需将云团中心位置、导弹位置或有效遮蔽半径替换为扰动后的对应量，遮蔽判定准则和区间并集效能定义保持不变。因此，该统一模型可作为基准场景和工程扰动场景下协同优化计算的共同框架。

2 分层优化求解方法

2.1 分层优化思想与总体框架

由上述推导可知，无人机群烟幕协同遮蔽问题同时包含目标分配、投放时序和连续参数优化，属于混合离散–连续优化问题。若直接对全部决策变量进行全局搜索，不仅计算量大，也难以处理多烟幕云团遮蔽区间的接续与重叠关系。

为此，本文围绕遮蔽区间并集效能构建分层优化框架，框架流程图如图2所示。上层依据几何可达性和时间裕度生成平台级目标优先序；中层以新增遮蔽区间并长度为边际收益，逐弹调整服务目标和作用顺序；下层在给定分配与粗时序结果的基础上，优化航向角、飞行速度、投放时刻和起爆延时，生成满足有效遮蔽判定的投放方案。每轮迭代完成后，更新全局协同效能。当满足预设收敛条件或达到最大迭代次数时，终止优化并输出协同投放方案，否则继续迭代方案。

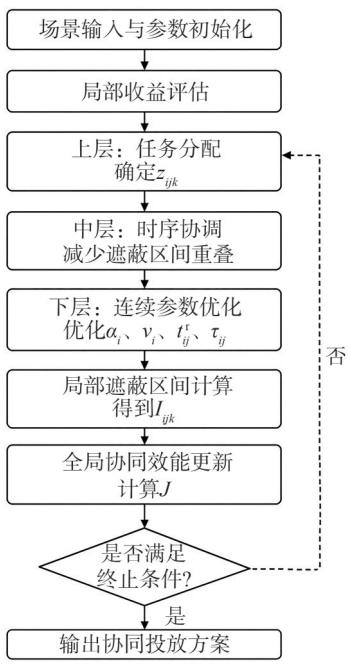


图2 分层协同优化求解框架流程图

Fig. 2 Flowchart of the hierarchical cooperative optimization framework

与固定分配或单弹独立优化不同，该框架将区间并集效能贯穿任务引导、时序协调和连续优化过程，从而在降低求解维度的同时改善遮蔽时间接续结构。

2.2　上层任务分配与收益预估

为降低统一模型的求解复杂度，本文首先在上层确定各无人机的主服务目标。由于同一架无人机挂载的多枚烟幕弹共享航向与速度，其服务能力主要受平台整体可达性和目标剩余时间约束，因此，上层采用几何可达性和时间裕度构造预估收益。

设d_{ik}为第i架无人机初始位置到第k枚导弹飞行轨迹射线的最小距离，$v_{\max}$为无人机最大飞行速度，$d_0(d_0>0)$为距离尺度参数，给出如下定义：

$$\begin{cases} t_{ik}^{\text{reach}}=\dfrac{d_{ik}}{v_{\max}}, \\ T_k^{\text{rem}}=\dfrac{\left\| M_k^0-O \right\|}{v_{\text{m}}}, \\ \rho_{ik}=\max\left\{0,1-\dfrac{t_{ik}^{\text{reach}}}{T_k^{\text{rem}}}\right\}, \\ \hat{S}_{ik}=\rho_{ik}\exp\left(-\dfrac{d_{ik}}{d_0}\right) \end{cases} \tag{19}$$

式中，t_{ik}^{reach}为无人机到达该导弹轨迹邻域的最短时间估计，T_k^{rem}为第k枚导弹到达假目标前的剩余飞行时间，ρ_{ik}为时间裕度因子，$\hat{S}_{ik}$为平台级预估收益。$\hat{S}_{ik}$越大，说明第i架无人机越适合优先服务第k枚导弹。

设二元变量$y_{ik}(y_{ik}\in\{0,1\})$表示第i架无人机是否主服务于第k枚导弹，则平台级任务分配模型为：

$$\begin{cases} \max \hat{J}=\sum\limits_{i\in\mathcal{U}}\sum\limits_{k\in\mathcal{M}}\hat{S}_{ik}y_{ik}; \\ \sum\limits_{k\in\mathcal{M}}y_{ik}=1,\forall i\in\mathcal{U}; \\ \sum\limits_{i\in\mathcal{U}}y_{ik}\geq 1,\forall k\in\mathcal{M} \end{cases} \tag{20}$$

式中，第1类约束（第2行式）表示每架无人机指定一个主服务目标，第2类约束（第3行式）表示每枚导弹至少分配一个主服务平台。求解后第k枚导弹的主服务平台集合表达为：

$$\mathcal{U}_k=\{i\in\mathcal{U}:y_{ik}=1\},k\in\mathcal{M} \tag{21}$$

同时，根据$\hat{S}_{ik}$的大小规律为每架无人机构造目标优先序：

$$\begin{cases} \pi_i=(k^{1i},k^{2i},\cdots,k^{N_mi}), \\ \hat{S}_{ik^{1i}}\geq\hat{S}_{ik^{2i}}\geq\cdots\geq\hat{S}_{ik^{N_mi}} \end{cases} \tag{22}$$

式中，π_i为第i架无人机对各目标的服务偏好顺序，k^{ri}为该偏好序列中排名第r位的导弹编号，$r=1,2,\cdots,N_m$。该结果不直接固定每枚烟幕弹的最终服务对象，而是作为后续逐弹时序协调的候选目标依据。

2.3　同目标多云团时序协调

上层任务分配给出了平台级目标优先序，但同一平台的多枚烟幕弹未必都应服务第一优先目标。为减少重复遮蔽并改善时间接续，本文在连续参数优化前引入逐弹时序协调，根据各节点对不同目标的新增遮蔽贡献调整服务对象。

设第i架无人机第j枚烟幕干扰弹为节点(i,j)。对候选目标k，先构造其粗粒度作用时间窗：

$$\begin{cases} \hat{c}_{ijk}=t_{ik}^{\text{reach}}+\tau_i+(j-1)\Delta t_{\min}, \\ \hat{T}_{ijk}=T_c\rho_{ik}, \\ \hat{I}_{ijk}=\left[\hat{c}_{ijk}-\dfrac{\hat{T}_{ijk}}{2},\ \hat{c}_{ijk}+\dfrac{\hat{T}_{ijk}}{2}\right] \end{cases} \tag{23}$$

式中，$\hat{c}_{ijk}$为粗粒度作用中心时刻，$\hat{T}_{ijk}$为粗粒度作用时长，$\hat{I}_{ijk}$为对应作用时间窗，$\Delta t_{\min}$为相邻两次烟幕弹投放的最小时间间隔。该时间窗仅用于时序协调，不代表最终投放时刻和起爆时刻。

记第r次决策前，第k枚导弹已形成的累计粗遮蔽区间为$\tilde{\mathcal{I}}_k^{(r-1)}$，初始化为：

$$\tilde{\mathcal{I}}_k^{(0)}=\varnothing,k\in\mathcal{M} \tag{24}$$

对当前节点(i,j)，若其分配给候选目标k，则边际增益定义为累计区间并长度的新增量$\Delta\hat{J}_{ijk}^{(r)}$：

$$\Delta\hat{J}_{ijk}^{(r)}=\left|\tilde{\mathcal{I}}_k^{(r-1)}\bigcup\hat{I}_{ijk}\right|-\left|\tilde{\mathcal{I}}_k^{(r-1)}\right| \tag{25}$$

式中，$|\cdot|$为时间区间集合总长度。$\Delta\hat{J}_{ijk}^{(r)}$越大，节点$(i,j)$对目标$k$带来的新增遮蔽时间越多；若其时间窗与已有区间高度重叠，则边际增益较小。于是，当前节点的服务目标选择为：

$$\hat{k}^{ij}=\arg\max_{k\in\mathcal{K}_i}\Delta\hat{J}_{ijk}^{(r)} \tag{26}$$

式中，$\mathcal{K}_i$为由平台目标优先序π_i给出的候选目标集合。确定$\hat{k}^{ij}$后，累计粗遮蔽区间更新为：

$$\tilde{\mathcal{I}}_k^{(r)}=\begin{cases} \tilde{\mathcal{I}}_k^{(r-1)}\bigcup\hat{I}_{ijk},k=\hat{k}^{ij}; \\ \tilde{\mathcal{I}}_k^{(r-1)},k\neq\hat{k}^{ij} \end{cases} \tag{27}$$

式中，$\tilde{\mathcal{I}}_k^{(r)}$和$\tilde{\mathcal{I}}_k^{(r-1)}$分别表示第$r$次决策后和决策前目标$k$的累计粗遮蔽时间集合。

实现时，所有节点按其第一优先目标的粗粒度作用中心时刻从小到大依次决策。可能较早起作用的节点优先进入累计区间，后续节点再依据已有覆盖结果计算边际增益。本小节输出每枚烟幕弹的粗粒度服务目标及作用顺序，作为下层连续参数优化初始依据。

2.4　下层连续参数优化

逐弹时序协调得到每枚烟幕弹的服务目标$\hat{k}^{ij}$及粗时间顺序后，下层进一步优化其连续投放参数。对节点(i,j)，记连续决策变量x_{ij}为：

$$x_{ij}=(\alpha_i,v_i,t_{ij}^r,\tau_{ij}) \tag{28}$$

节点级连续优化问题写为：

$$x_{ij}^{*}=\arg\max_{x_{ij}\in\Omega_{ij}} T_{ij\hat{k}^{ij}} \tag{29}$$

式中，$T_{ij\hat{k}^{ij}}$为节点(i,j)对目标$\hat{k}^{ij}$的精确有效遮蔽时长，Ω_{ij}表示由速度范围、投放时刻、起爆延时、最小投放间隔和起爆高度等约束构成的可行域。其主要约束为：

$$\begin{cases} v_i^{\min}\le v_i\le v_i^{\max};\\ t_{ij}^{\mathrm{r}}\ge 0,\tau_{ij}\ge 0;\\ t_{i,j+1}^{\mathrm{r}}-t_{ij}^{\mathrm{r}}\ge \Delta t_{\min};\\ Q_{ij}{}^{(z)}\ge 0 \end{cases} \tag{30}$$

由于$T_{ij\hat{k}^{ij}}$由轨迹计算和有效遮蔽判定共同决定，目标函数非线性、非光滑且难以直接求导，本文参考差分进化算法的相关研究[25–27]及其改进方法[28–30]，采用改进差分进化算法求解。对任一候选解，先由运动学模型计算无人机、烟幕弹、云团和导弹轨迹，再根据云团中心到4条关键视线的最大距离裕度构造软代理适应度，直接采用二值（0或1）遮蔽判定导致的适应度不连续问题；优化完成后，所有候选方案统一按严格有效遮蔽判定验收，得到最终遮蔽时长。

为提高搜索效率，本文在标准差分进化（DE）算法基础上引入3点改进：1）定向初始化，利用粗作用时间窗和目标视线方向生成部分初始个体，提高初始种群质量；2）自适应参数调整，随迭代阶段调整缩放因子和交叉概率，兼顾全局搜索与局部收敛；3）精英保留，每代保留当前最优个体，避免优良解在变异和交叉过程中丢失。优化完成后得到：

$$x_{ij}^{*}=(\alpha_i^{*},v_i^{*},t_{ij}^{\mathrm{r},*},\tau_{ij}^{*}) \tag{31}$$

据此计算该节点的精确遮蔽区间。对所有节点重复上述过程后，汇总得到各目标的总有效遮蔽区间、全局协同效能。

2.5 整体算法流程

综上，本文将无人机群烟幕协同遮蔽问题分解为平台级任务引导、逐弹时序协调和节点级连续优化。整体流程如下。

算法1 多无人机烟幕协同干扰分层优化流程

输入：无人机、导弹、真实目标和假目标初始参数；速度、投放间隔、烟幕云团半径和有效持续时间等约束参数。

输出：各烟幕弹服务目标、最优投放参数、目标级总遮蔽区间以及全局协同效能。

1）根据无人机与导弹轨迹的几何关系，计算平台级预估收益矩阵。

2）求解平台级任务分配模型，得到各无人机的主服务目标和目标优先序。

3）对每枚烟幕弹构造候选目标和粗粒度作用时间窗。

4）按照各节点在第一优先目标上的粗粒度作用中心时刻从小到大排序，并依次计算其对候选目标的边际增益。

5）选择边际增益最大的目标作为当前节点的粗粒度服务目标，并更新对应目标的累计粗遮蔽区间。

6）在给定服务目标和粗时序结果的基础上，采用改进DE求解各节点连续优化子问题。

7）汇总各节点精确遮蔽区间，计算目标级总遮蔽时长和全局协同效能。

该流程中，平台级任务引导、逐弹协调和连续优化分别通过目标优先序、粗作用时间窗和边际增益逐级衔接，从而避免直接在全部离散和连续变量上进行高维搜索。

2.6 分层算法性质分析

为说明所提分层算法的合理性，本文从效能指标、边际协调和求解结构3个方面进行分析。

首先，区间并集效能能够避免重复计数。对第k枚导弹，有：

$$\left|\bigcup_{(i,j)\in S_k} I_{ijk}\right|\le \sum_{(i,j)\in S_k}|I_{ijk}| \tag{32}$$

因此，以区间并长度定义T_k可避免多个烟幕云团在同一时段重复遮蔽造成的效能高估。

其次，逐弹边际协调具有单调性。由边际增益定义可知：

$$\Delta\hat{J}_{ijk}^{(r)}=\left|\tilde{\mathcal{I}}_k^{(r-1)}\bigcup\hat{I}_{ijk}\right|-\left|\tilde{\mathcal{I}}_k^{(r-1)}\right|\ge 0 \tag{33}$$

即每次更新不会缩短已有累计粗遮蔽区间。同时有：

$$0\le\Delta\hat{J}_{ijk}^{(r)}\le|\hat{I}_{ijk}| \tag{34}$$

说明单个节点的新增贡献受到其自身粗作用时间窗长度约束。该性质保证了逐弹协调过程能够稳定增加或保持目标累计粗遮蔽时间。

最后，分层求解降低了直接全局搜索难度。原问题同时包含离散分配变量和连续投放参数，若直接联合优化，搜索空间随无人机数、烟幕弹数和目标数快速扩大。本文先由平台级收益确定目标优先序，再用边际增益完成逐弹协调，最后仅在单节点可行域内优化连续参数，从而将高维混合优化问题分解为若干规模更小的子问题。

3 仿真实验结果与对比分析

3.1 场景设置与评价指标

为验证所提分层优化方法的有效性，本文设置包含3枚来袭导弹、5架无人机和15枚烟幕弹的协同遮

蔽场景。假目标位于坐标原点，真实目标为位于其附近的固定圆柱体；无人机、导弹、假目标和真实目标的初始部署如图 3 所示。图中，M_1～M_3 表示 3 枚来袭导弹，FY1～FY5 表示 5 架无人机，括号内为对应的初始空间坐标，单位为 m。

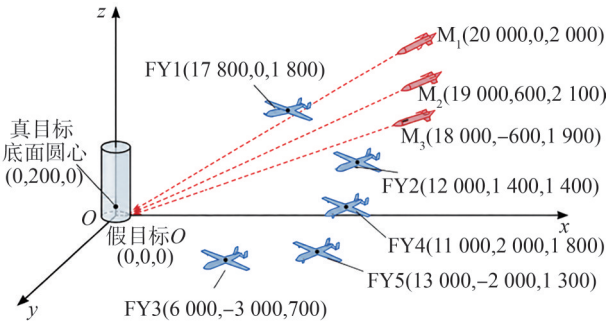


图 3　无人机群与来袭导弹初始空间部署示意图

Fig. 3　Initial spatial deployment of UAVs and incoming missiles

为保证不同策略之间具有可比性，后续实验均采用相同初始部署和物理参数，比较平台固定绑定、逐弹边际协调、标准 DE 连续优化和改进 DE 连续优化等策略。其中，平台固定绑定用于检验上层任务引导结果，逐弹边际协调用于检验区间边际增益机制，标准 DE 和改进 DE 用于比较连续参数优化效果。主要物理参数与约束参数见表 1。

表 1　仿真实验主要物理参数与约束参数

Tab. 1　Main physical and constraint parameters used in the numerical example

参数	含义	取值
O	假目标位置	(0, 0, 0)
真目标位置	圆柱体底面圆心	(0, 200, 0)
R_T/m	真目标半径	7
H_T/m	真目标高度	10
v_m/(m·s^{-1})	导弹飞行速度	300
v_i/(m·s^{-1})	无人机飞行速度范围	70～140
B_i	每架无人机烟幕弹数量	3 枚
R_c/m	云团有效遮蔽半径	10
T_c/s	云团有效持续时间	20
v_c/(m·s^{-1})	云团中心下沉速度	3
Δt_{min}/s	相邻两次投放最小时间间隔	1
g/(m·s^{-2})	重力加速度	9.8

评价指标包括各目标的总有效遮蔽时长 T_k 和全局协同效能 J。其中，T_k 衡量第 k 枚导弹的有效遮蔽时间，J 衡量系统总体遮蔽效能，J 越大说明整体遮蔽效能越强。

为验证第 1.2 节中远场平行投影近似的合理性，本文统计各来袭导弹在有效计算时段内的最小视距 $D_{\min,k}$、目标尺度比 $a_T/D_{\min,k}$ 和远场误差相对量 $\varepsilon_{\mathrm{ff},k}/R_c$，其中，目标特征尺度和远场误差估计分别为：

$$\begin{cases} a_T = \sqrt{R_T^2 + \left(\dfrac{H_T}{2}\right)^2} = 8.602\ \mathrm{m}, \\ \varepsilon_{\mathrm{ff},k} \approx \dfrac{a_T^2}{D_{\min,k}} \end{cases} \tag{35}$$

仿真实验结果见表 2。由表 2 可知，3 枚导弹对应的 $a_T/D_{\min,k}$ 均约为 4.3%，远场误差估计值约为 0.37 m，仅为烟幕有效遮蔽半径的 3.7%。因此，在该算例条件下，远场平行投影近似引入的边界偏差明显小于云团有效遮蔽半径，对有效遮蔽判定结果影响较小。

表 2　远场近似合理性验证

Tab. 2　Validation of the far-field approximation

目标	$D_{\min,k}$/m	$a_T \cdot D_{\min,k}^{-1}$	$\varepsilon_{\mathrm{ff},k}$/m	$\varepsilon_{\mathrm{ff},k} \cdot R_c^{-1}$
M_1	200.062	0.042 998	0.369 886	0.036 989
M_2	199.946	0.043 023	0.370 100	0.037 010
M_3	200.062	0.042 998	0.369 884	0.036 988

3.2　平台级任务引导结果

根据式(18)中平台级预估收益定义，计算各无人机对不同来袭导弹的粗粒度服务潜力，结果见式(36)。该矩阵仅用于生成主服务目标和目标优先序，不直接决定每枚烟幕弹的最终服务对象。

由图 4 可见，FY1 对 M_1 的预估收益最高，FY2 和 FY4 更适合优先服务 M_2，FY3 与 FY5 更偏向 M_3。因此，各平台的目标优先序为：对于 FY1，$M_1 \succ M_2 \succ M_3$（$\succ$ 表优先于）；对于 FY2 和 FY4，$M_2 \succ M_1 \succ M_3$；对于 FY3 和 FY5，$M_3 \succ M_1 \succ M_2$。进一步地，在平台级任务引导模型下，主服务结果可记为：$\mathcal{U}_1 = \{\mathrm{FY1}\}$，$\mathcal{U}_2 = \{\mathrm{FY2}, \mathrm{FY4}\}$，$\mathcal{U}_3 = \{\mathrm{FY3}, \mathrm{FY5}\}$。

	M_1	M_2	M_3
FY1	0.978 2	0.520 4	0.511 1
FY2	0.206 5	0.318 3	0.129 4
FY3	0.033 8	0.026 5	0.040 7
FY4	0.093 1	0.139 9	0.061 2
FY5	0.106 5	0.065 4	0.169 8

图 4　平台级预估收益矩阵

Fig. 4　Estimated platform-level service score matrix

3.3　逐弹时序协调结果及其对比分析

在平台级目标优先序基础上，依据第 2.3 节定义的边际增益计算各烟幕弹对候选目标的新增遮蔽贡献，并逐弹确定服务对象，结果见表 3，其中，FY1–1 表

表 3 基于边际增益的逐弹服务目标选择结果

Tab. 3 Shell-by-shell service target selection based on marginal gains

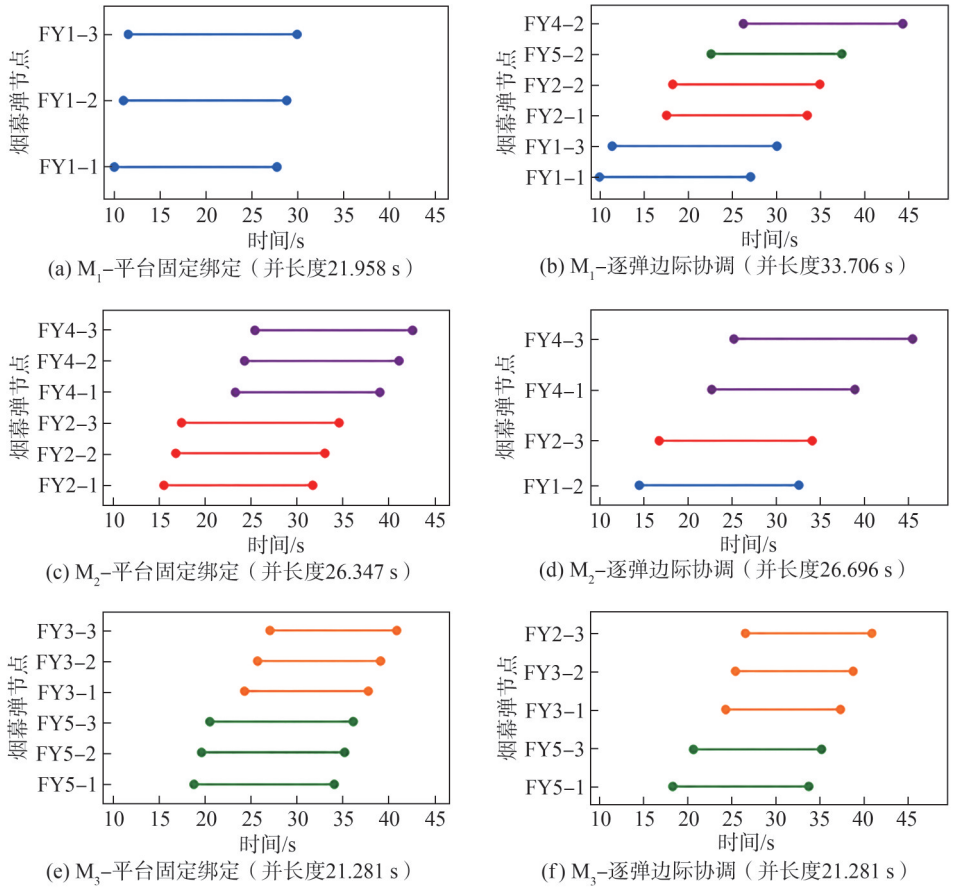
烟幕弹节点	边际增益比较	最终服务目标
FY1−1	19.958 0(M_1),18.688 0(M_2)	M_1
FY1−2*	1.000 0(M_1),18.688 0(M_2)	M_2
FY1−3	2.000 0(M_1),1.000 0(M_2)	M_1
FY2−1*	0(M_2),4.205 2(M_1)	M_1
FY2−2*	0.368 2(M_2),1.000 0(M_1)	M_1
FY2−3	1.368 2(M_2),1.000 0(M_1)	M_2
FY3−1	0.990 8(M_3),0.739 4(M_1)	M_3
FY3−2	1.000 0(M_3),0(M_1)	M_3
FY3−3	1.000 0(M_3),0(M_1)	M_3
FY4−1	4.639 6(M_2),2.598 7(M_1)	M_2
FY4−2*	1.000 0(M_2),3.598 7(M_1)	M_1
FY4−3	2.000 0(M_2),1.000 0(M_1)	M_2
FY5−1	16.290 0(M_3),1.944 5(M_1)	M_3
FY5−2*	1.000 0(M_3),2.944 5(M_1)	M_1
FY5−3	2.000 0(M_3),1.000 0(M_1)	M_3

示 FY1 无人机投放的第 1 枚烟幕弹，其对目标 M_1 和 M_2 的边际增益分别为 19.958 0 和 18.688 0，因此选择 M_1 作为最终服务目标。其余节点编号含义类似。标注“*”的节点表示其最终服务目标与所属无人机的平台级主服务目标不同。

图 5 为平台固定绑定与逐弹边际协调的粗时间覆盖结构对比。由图 5 可见，逐弹协调结果未机械沿用平台级第一优先目标，而是依据新增遮蔽贡献进行调整。发生改投的节点共有 5 个，分别为 FY1−2、FY2−1、FY2−2、FY4−2 和 FY5−2，说明边际增益机制能够根据已有累计遮蔽区间修正局部任务分配。

对 M_1 而言，平台固定绑定时仅由 FY1 的 3 枚烟幕干扰弹提供覆盖，其累计粗遮蔽区间为[9.303,31.261] s，并长度为 21.958 s；逐弹边际协调后，FY2−1、FY2−2、FY4−2 和 FY5−2 被重新分配至 M_1，使其累计粗遮蔽区间扩展为[9.300,43.010] s，并长度提高至 33.706 s。相比之下，M_2 仅小幅增长，而 M_3 保持不变。粗遮蔽时长对比如表 4 所示。

由表 4 可见，逐弹边际协调对 M_1 的改善最显著，粗遮蔽区间并长度由 21.958 s 提升至 33.706 s，提升 53.51%；M_2 的并长度由 26.347 s 小幅提升至 26.696 s，增加 0.349 s；M_3 的累计粗遮蔽区间并长度保持 21.281 s，未



(a) M_1−平台固定绑定（并长度21.958 s） (b) M_1−逐弹边际协调（并长度33.706 s）

(c) M_2−平台固定绑定（并长度26.347 s） (d) M_2−逐弹边际协调（并长度26.696 s）

(e) M_3−平台固定绑定（并长度21.281 s） (f) M_3−逐弹边际协调（并长度21.281 s）

图 5 平台固定绑定与逐弹边际协调的粗时间覆盖结构对比

Fig. 5 Comparison of coarse temporal coverage structures between platform-fixed binding and shell-by-shell marginal coordination

发生变化。该结果表明，逐弹协调的主要作用不是增加单个烟幕弹的局部时长，而是通过改投减少无效重叠、改善关键目标的时间接续结构。

表 4　平台固定绑定与逐弹边际协调的粗遮蔽时长对比

Tab. 4　Comparison of coarse shielding durations between platform-fixed binding and shell-by-shell marginal coordination

s

目标	平台固定绑定	逐弹边际协调	提升量
M_1	21.958	33.706	11.749
M_2	26.347	26.696	0.349
M_3	21.281	21.281	0

3.4　单节点连续优化结果对比

逐弹服务目标确定后，本文进一步对各节点的航向角、飞行速度、投放时刻和起爆延时进行连续优化，并统一采用严格有效遮蔽判定统计结果。

连续优化实验中，标准 DE 与改进 DE 采用相同种群规模、最大迭代代数和重启次数，以保证对比公平。本文设置种群规模为 56、最大迭代代数为 120，每个节点独立重启 4 次。标准 DE 取缩放因子 $F=0.70$、交叉概率 $C=0.90$；改进 DE 中 60% 的初始个体定向初始化，缩放因子 F 由 0.90 降至 0.40，交叉概率 C 由 0.55 升至 0.90。为检验连续优化作用，比较粗参数直接执行、标准 DE 和改进 DE 3 种策略，结果见表 5。改进 DE 得到的各烟幕弹节点最优投放参数见附录 A 表 A1。由表 5 可见，粗参数直接执行时未形成有效遮蔽，说明粗时间窗不能替代精确投放参数。连续优化后，标准 DE 和改进 DE 均获得可行遮蔽方案，其中，标准 DE 的总体协同效能为 37.35 s，改进 DE 将其提高至 40.39 s。虽然改进 DE 对目标 M_1 和 M_2 的协同效能略低于标准 DE，但其在 M_3 上提升明显，使总体效能提高 8.14%。

表 5　不同连续优化策略下目标级精确遮蔽结果比较

Tab. 5　Comparison of target-level exact shielding durations under different continuous optimization strategies

策略	精确遮蔽时长/s			J/s
	M_1	M_2	M_3	
粗参数直接执行	0	0	0	0
标准 DE	17.35	10.96	9.04	37.35
改进 DE	14.50	9.93	15.96	40.39

注：J 为 3 个目标累计精确遮蔽时长之和，即总体协同效能。

标准 DE 与改进 DE 的平均收敛曲线如图 6 所示。改进 DE 在迭代中前期收敛更快，最终平均软代理适应度更高，表明定向初始化、自适应参数调整和精英保留机制有助于改善搜索效果。需要说明的是，图 6 中，曲线仅反映搜索过程中软代理适应度的变化，最终有效遮蔽时长仍依据严格有效遮蔽判定计算。

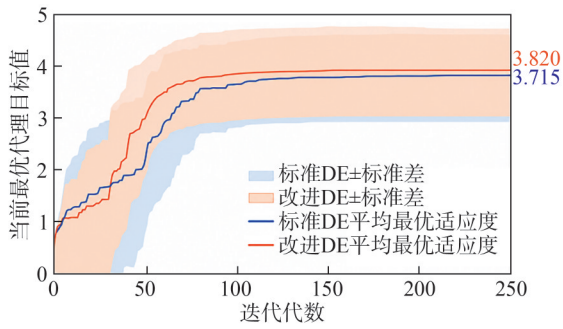


图 6　标准 DE 与改进 DE 的平均收敛曲线对比

Fig. 6　Comparison of average convergence curves between standard DE and improved DE

3.5　多场景与工程扰动敏感性分析

为检验方法在不同工程条件下的适用性，本文设置风场扰动、导弹机动和云团参数变化场景。各场景采用第 2 节分层流程，并按严格有效遮蔽判定统计全局协同效能 J。每个场景重复运行 5 次，结果见表 6。由表 6 可见，风场扰动、导弹机动和云团半径减小场景下，改进 DE 的平均 J 均高于标准 DE；在有效持续时间缩短场景下，两种算法结果接近。总体上，所提分层框架能够在不同扰动条件下完成协同优化，改进 DE 在多数场景下具有更好的搜索效果。

表 6　多场景重复实验下的优化结果比较

Tab. 6　Comparison of optimization results in repeated multi-scenario experiments

场景编号	扰动设置	总体协同效能 J/s		提升率/%
		标准 DE	改进 DE	
S1	横向风速 2 m/s	29.92±1.93	34.86±1.28	16.49
S2	导弹横向机动幅值 20 m	29.07±5.70	31.66±0.57	8.92
S3	云团有效半径 R_c=8 m	19.48±2.31	26.27±1.05	34.84
S4	云团有效持续时间 T_c=16 s	31.77±2.14	31.50±0.99	−0.85

注：表中结果为 5 次重复实验的均值±标准差。

进一步统计各模块平均耗时，结果见表 7。由表 7 可见，平台级任务引导和逐弹时序协调平均耗时均低于 0.01 s，主要耗时来自节点级连续优化。表 7 中，依次运行平台级任务引导、逐弹时序协调和改进 DE 的总耗时为 227.720 0 s，当采用改进 DE，单次完整方案生成主要耗时约为 227.720 0 s，可满足任务规划阶段的方案生成需求。

表 7　算法计算平均耗时统计

Tab. 7　Computational time of different algorithm modules

模块	平均耗时/s	占比/%
平台级任务引导（模块 1）	0.000 4	<0.01
逐弹时序协调（模块 2）	0.001 5	<0.01
改进 DE 连续优化（模块 3）	≈227.720 0	≈100.00
模块 1+模块 2+模块 3	227.720 0	100.00

4 结 论

本文针对无人机群烟幕协同遮蔽多来袭目标问题，建立了包含运动学关系、有效遮蔽判定和全局协同效能的优化模型，并提出“平台级任务引导—逐弹时序协调—节点级连续优化”的分层求解方法。模型以遮蔽区间并长度定义全局效能，避免重叠遮蔽时长的重复计入。

在求解过程中，平台级任务引导根据几何可达性和时间裕度生成目标优先序，逐弹时序协调以新增遮蔽区间并长度为边际增益修正服务目标，节点级连续优化采用改进DE求解航向角、飞行速度、投放时刻和起爆延时。该方法将高维混合离散—连续优化问题分解为多个结构更清晰的子问题。

仿真结果表明，逐弹边际协调能够改善关键目标的粗遮蔽时间接续结构；连续优化可生成满足严格遮蔽判定的投放方案，改进DE较标准DE具有更高的总体协同效能。远场近似验证、多场景扰动实验和平均耗时统计进一步说明，所提方法在风场扰动、导弹机动和云团参数变化条件下仍具有适用性，并可满足任务规划阶段的方案生成需求。

附录见本刊网络版，扫描标题旁的二维码可阅读网络全文。

参考文献：

[1] Zohdi T I. Modeling of the scattering response of particulate obscurant clouds[J]. International Journal of Engineering Science, 2015, 89: 75–85.

[2] Giles J W, Bankman I N, Sova R M, et al. Lidar system model for use with path obscurants and experimental validation[J]. Applied Optics, 2008, 47(22): 4085–4093.

[3] Tang Runze, Zhang Tonglai, Chen Yongpeng, et al. Infrared thermography approach for effective shielding area of field smoke based on background subtraction and transmittance interpolation[J]. Sensors, 2018, 18(5): 1450.

[4] Tang Runze, Zhang Tonglai, Wei Xuebin, et al. An efficient numerical approach for field infrared smoke transmittance based on grayscale images[J]. Applied Sciences, 2018, 8(1): 40.

[5] Ding Jialin, Chen Chunsheng, Li Qingwei, et al. Evaluation indexes and calculation methods of smoke interference effect[J]. Infrared, 2024, 45(3): 29–39. [丁佳麟, 陈春生, 李庆伟, 等. 烟幕干扰效果评估指标及计算方法[J]. 红外, 2024, 45(3): 29–39.]

[6] Guan Zhichao, Gao Xinbao, Li Tianpeng. Research progress of multi-spectrum jammers[J]. Modern Defence Technology, 2024, 52(5): 80–92. [管智超, 高欣宝, 李天鹏. 多频谱干扰剂研究进展[J]. 现代防御技术, 2024, 52(5): 80–92.]

[7] Thang P D, Nhan P D, Toan N T. Combustion, obscurant and infrared emission characteristics of smoke composition based on red phosphorus and Mg-Al alloys[J]. Journal of Military Science and Technology, 2024: 175–183.

[8] da Mota A F, Sadafi M M, Mosallaei H. Asymmetric imaging through engineered Janus particle obscurants using a Monte Carlo approach for highly asymmetric scattering media[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 3850.

[9] Gerkey B P, Matarić M J. A formal analysis and taxonomy of task allocation in multi-robot systems[J]. The International Journal of Robotics Research, 2004, 23(9): 939–954.

[10] Zhang Jun, Xing Jiahao. Cooperative task assignment of multi-UAV system[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 33(11): 2825–2827.

[11] Jia Zhenyue, Yu Jianqiao, Ai Xiaolin, et al. Cooperative multiple task assignment problem with stochastic velocities and time windows for heterogeneous unmanned aerial vehicles using a genetic algorithm[J]. Aerospace Science and Technology, 2018, 76: 112–125.

[12] Ghauri S A, Sarfraz M, Ali Qamar R, et al. A review of multi-UAV task allocation algorithms for a search and rescue scenario[J]. Journal of Sensor and Actuator Networks, 2024, 13(5): 47.

[13] Yan Fei, Chu Jing, Hu Jinwen, et al. Cooperative task allocation with simultaneous arrival and resource constraint for multi-UAV using a genetic algorithm[J]. Expert Systems with Applications, 2024, 245: 123023.

[14] Chen Yiting, Chen Runfeng, Huang Yuchong, et al. Distributed task allocation for multiple UAVs based on swarm benefit optimization[J]. Drones, 2024, 8(12): 766.

[15] Yue Wei, Zhang Xiaoyong, Liu Zhongchang. Distributed cooperative task allocation for heterogeneous UAV swarms under complex constraints[J]. Computer Communications, 2025, 231: 108043.

[16] Eşer M, Yılmaz A E. Distributed task allocation for UAV swarms with limited communication[J]. Sakarya University Journal of Computer and Information Sciences, 2024, 7(2): 187–202.

[17] Bi Wenhao, Zhang Mengqi, Gao Fei, et al. Review on UAV swarm task allocation technology[J]. Systems Engineering and Electronics, 2024, 46(3): 922–934. [毕文豪, 张梦琦, 高飞, 等. 无人机集群任务分配技术研究综述[J]. 系统工程与电子技术, 2024, 46(3): 922–934.]

[18] Wang Feng, Huang Zilu, Han Mengchen, et al. A knee point based coevolution multi-objective particle swarm optimization algorithm for heterogeneous UAV cooperative multi-task allocation[J]. Acta Automatica Sinica, 2023, 49(2): 399–

414.[王峰,黄子路,韩孟臣,等.基于KnCMPSO算法的异构无人机协同多任务分配[J].自动化学报,2023,49(2):399–414.

[19] Chen Pu, Yan Fei, Liu Zhao, et al. Communication-constrained task allocation of heterogeneous UAVs[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(8): 313–326. [陈璞, 严飞, 刘钊, 等. 通信约束下异构多无人机任务分配方法[J]. 航空学报, 2021, 42(8): 313–326.]

[20] Zhang Ruipeng, Feng Yanxiang, Yang Yikang. Hybrid particle swarm algorithm for multi-UAV cooperative task allocation [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(12): 418–433. [张瑞鹏, 冯彦翔, 杨宜康. 多无人机协同任务分配混合粒子群算法[J]. 航空学报, 2022, 43(12): 418–433.]

[21] Zhang An, Yang Mi, Bi Wenhao, et al. Task allocation of heterogeneous multi-UAVs in uncertain environment based on multi-strategy integrated GWO[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(8): 148–164. [张安, 杨咪, 毕文豪, 等. 基于多策略GWO算法的不确定环境下异构多无人机任务分配[J]. 航空学报, 2023, 44(8): 148–164.]

[22] Wang Haoyu, Zhang Zexu, Wen Shan, et al. Task allocation algorithm for UAV swarm based on temporal coupling analysis[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2026, 47(2): 212–227. [王浩宇, 张泽旭, 闻单, 等. 基于时序耦合分析的无人机集群任务分配方法[J]. 航空学报, 2026, 47(2): 212–227.]

[23] Di Weicheng, Xu Jinkui, Wei Zixing, et al. Aerial-ground heterogeneous cooperation based on multi-round task allocation method[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2025, 46(11): 328–348. [邸伟承, 许晋魁, 卫子兴, 等. 空地异构协同轮值任务分配方法[J]. 航空学报, 2025, 46(11): 328–348.]

[24] Wang Zhongyan, Wang Zheng, Ning Xin, et al. Dynamic multi-objective optimization of task assignment for space-based interceptor cluster[J]. Journal of Astronautics, 2025, 46(5): 1035–1046. [王忠言, 王铮, 宁昕, 等. 天基拦截弹群动态多目标优化任务分配方法[J]. 宇航学报, 2025, 46(5): 1035–1046.]

[25] Storn R, Price K. Differential evolution-A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces [J]. Journal of Global Optimization, 1997, 11(4): 341–359.

[26] Das S, Suganthan P N. Differential evolution: A survey of the state-of-the-art[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2011, 15(1): 4–31.

[27] Sun Yongjun, Wu Yinxia, Liu Zujun. An improved differential evolution with adaptive population allocation and mutation selection[J]. Expert Systems with Applications, 2024, 258: 125130.

[28] Zhou Mengchu, Cui Meiji, Xu Dian, et al. Evolutionary optimization methods for high-dimensional expensive problems: A survey[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2024, 11(5): 1092–1105.

[29] Wang Yong, Lin Jianqing, Liu Jiao, et al. Surrogate-assisted differential evolution with region division for expensive optimization problems with discontinuous responses[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2022, 26(4): 780–792.

[30] Zhang Jingqiao, Sanderson A C. JADE: Adaptive differential evolution with optional external archive[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2009, 13(5): 945–958.

Hierarchical Optimization Algorithm for Cooperative Smoke-screen Shielding by UAV Swarms

LIU Nianjin, *ZHENG Xiujuan*[*]

(School of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract:

Objective Cooperative smoke-screen shielding by unmanned aerial vehicle (UAV) swarms is a soft-kill protection problem in which multiple UAVs deploy smoke munitions to create obscurant regions between protected targets and incoming threats. This task combines target assignment, release sequence, detonation timing, cloud motion, line-of-sight geometry, and continuous flight parameters. Because shielding intervals generated by different clouds may overlap, summing local shielding durations directly can overestimate the system-level effect. In this study, we establish a unified optimization model and proposes a hierarchical algorithm for cooperative smoke-screen shielding by UAV swarms to address these challenges.

Methods A kinematic model is first constructed for UAVs, smoke munitions, smoke clouds, and incoming missiles. After task assignment, each UAV flies at a constant altitude, speed, and heading. Upon release, a smoke munition inherits the carrier's velocity and moves under gravity before detonation. After detonation, the smoke cloud is modeled as a spherical obscurant region the center of which descends vertically during its effective duration. This model expresses the release point, detonation point, smoke-cloud center, and missile position as functions of time.

An effective shielding criterion is then established based on the missile viewpoint, smoke-cloud center, and protected true target. The true target is modeled as a fixed cylinder near the false target. A far-field parallel projection approximation is used, and the visible target contour is represented by an equivalent projected rectangle. Four key line-of-sight segments connect the missile position to the rectangle's four vertices. A smoke cloud

is effective only during its valid period and when its center lies within the effective smoke radius from all four segments. In the numerical scenario, the minimum viewing distance is approximately 200 m, the target scale ratio is approximately 4.3%, and the estimated boundary error is approximately 0.37 m, or 3.7% of the effective smoke radius.

An interval-union-based effectiveness index is introduced. For each incoming missile, the total effective shielding duration is defined as the union length of all effective shielding intervals assigned to it. Global cooperative effectiveness is obtained by summing the weighted shielding durations of all missiles. This index counts only the actual effective shielding time, avoiding repeat counting of overlapping intervals. Based on this index, the cooperative shielding task is formulated as a mixed discrete-continuous optimization problem. The discrete variables determine each smoke munition's service target, and the continuous variables include UAV heading angle, flight speed, release time, and detonation delay.

To solve this high-dimensional, non-smooth problem, we design a three-level hierarchical framework. The upper level estimates UAV service potential based on geometric reachability and remaining time margin, and generates target priorities. The middle level performs shell-by-shell temporal coordination. For each smoke-munition node, it constructs a coarse action time window and defines marginal gain as the increase in the union length of the accumulated coarse shielding interval after adding that node. The lower level optimizes continuous parameters to generate executable deployment parameters that satisfy the strict shielding criterion.

We use an improved differential evolution (DE) algorithm for lower-level optimization. A smooth proxy fitness function, based on the distance margin between the smoke-cloud center and the four key line-of-sight segments, guides the search, whereas final shielding durations are evaluated by the strict criterion. Compared with the standard DE, the improved DE incorporates directed initialization, adaptive parameter adjustment, and elite preservation to improve search efficiency and stability.

Results and Discussions We conduct numerical experiments with 3 incoming missiles, 5 UAVs, and 15 smoke munitions. For target M_1, shell-by-shell marginal coordination increases the coarse shielding interval union length from 21.96 to 33.71 s, an improvement of 53.51%. After continuous optimization, standard DE and improved DE achieved total cooperative effectiveness values of 37.35 and 40.39 s, respectively. Additional scenarios involving crosswind disturbance, missile maneuver, reduced smoke radius, and shortened smoke duration show that the proposed framework remains applicable under representative engineering disturbances. Timing statistics show that platform guidance and shell coordination each require less than 0.01 s, whereas a complete scheme using improved DE is generated in approximately 227.72 s.

Conclusions Overall, the proposed method improves the temporal coverage of effective shielding and generates executable cooperative deployment schemes under strict shielding criteria. The results demonstrate that the interval-union-based effectiveness index avoids repeated counting of overlapping shielding intervals, while the hierarchical coordination strategy improves the utilization of available smoke munitions. The combination of marginal-gain-based temporal coordination and improved differential evolution further enhances the overall shielding effectiveness. Future work will focus on online cooperative optimization under dynamically changing threat conditions and more complex uncertainties.

Key words: UAV swarm; cooperative smoke-screen shielding; hierarchical optimization; temporal coordination; differential evolution; mixed discrete-continuous optimization

（编辑　吴芝明）

引用格式: Liu Nianjin,Zheng Xiujuan.Hierarchical optimization algorithm for cooperative smoke-screen shielding by UAV swarms[J].Advanced Engineering Sciences,2026,58(6):385–396.[刘年瑾,郑秀娟.无人机群烟幕协同遮蔽的分层优化算法[J].工程科学与技术,2026,58(6):385–396.]