

近距离空中支援中无人机目标分配问题研究

吴立冬¹, 李宗璞¹, 彭岳松², 熊子涵³

(1. 空军工程大学装备管理与无人机工程学院, 西安, 710051; 2. 空军工程大学空管领航学院, 西安, 710051;
3. 空军工程大学防空反导学院, 西安, 710051)

摘要 利用无人机实施近距离空中支援作战是当前研究的重点, 需针对复杂战场环境对实行多目标火力打击的无人机进行路径优化与目标分配。综合考虑无人机飞行高度、不同武器挂载、目标类型及各项指标、威胁区威胁代价、作战时间代价等因素, 构建目标毁伤综合指标提高非对称打击效能, 设置威胁区安全阈值提高路径有效性分析, 采取自适应权重粒子群协同优化算法求解单无人机单目标航迹总代价, 采取0-1规划法求解多无人机对多目标的不平衡任务分配方案, 为近距离空中支援任务中多无人机对多目标的分配提供决策支撑。

关键词 近距离空中支援; 多无人机; 多目标; 目标分配; 自适应权重粒子群协同优化算法

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2024.03.013

中图分类号 V279;E91 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2024)03-0086-08

Research on Target Allocation of Multiple UAV in CAS

WU Lidong¹, LI Zongpu¹, PENG Yuesong², XIONG Zihan³

(1. Equipment Management and Unmanned Aerial Vehicle Engineering School,
Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;
2. Air Traffic Control and Navigation School, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;
3. Air Defense and Antimissile School, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract Operation utilized by air support of drones at a close range is currently a research focus. The path and target allocation of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for multi target firepower strikes require optimization under conditions of complex battlefield environments, and the following factors, such as UAV flight altitude, different weapon mounts, target types and various indicators, threat cost in threat zones, and operational time cost, should be taken into account. A comprehensive target damage index is constructed to improve asymmetric strike effectiveness, and a threat zone security threshold is set to improve path effectiveness analysis. The total cost of the optimal trajectory is planned by adopting the Adaptive Weighted Particle Swarm Collaborative Optimization (APSCO) algorithm for a single drone and a single target, and the imbalanced task allocation scheme is completed by adopting the 0-1 programming method for multiple drones against multiple targets, providing decision support for the allocation of multiple unmanned aerial vehicles to multiple targets at a close range in performing air support tasks.

Key words close air support; multiple drones; multiple targets; target allocation; APSCO

收稿日期: 2023-07-21

作者简介: 吴立冬(1990-), 男, 陕西西安人, 硕士生, 研究方向为装备作战运用。E-mail: 1090964740@qq.com

引用格式: 吴立冬, 李宗璞, 彭岳松, 等. 近距离空中支援中无人机目标分配问题研究[J]. 空军工程大学学报, 2024, 25(3): 86-93. WU Lidong, LI Zongpu, PENG Yuesong, et al. Research on Target Allocation of Multiple UAV in CAS[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2024, 25(3): 86-93.

近距空中支援是空中力量参与联合进攻作战的重要样式。随着防空技术的进一步发展,近距空中支援在环境日趋复杂、对抗日趋激烈的同时,对打击精度、时间等要求进一步提升,给传统有人平台提出了严峻挑战。无人机平台相对廉价,任务载荷多样且无直接人员伤亡,高度契合于近距空中支援作战,已在近年来的局部战争中广泛实践,是未来重要发展方向,深入研究多目标打击中的无人机路径优化与目标分配问题,具有重要的理论价值和实践意义。

近距空中支援已从早期由空中平台受召自主抵近目标实施打击,经历依托多种通信手段空地协同打击,发展为广泛利用空地一体化指挥信息系统和有人/无人协同、无人机和无人机集群实施快速精确打击的阶段。依托智能辅助,利用指挥信息系统,面向多目标和不同载荷无人机实施航迹规划和目标指派算法成为无人机实施近距空中支援的关键。

针对航迹规划问题,许多文献采用了各种算法,如A*法^[1]、杜鹃搜索算法^[2]、蜜獾算法^[3]、粒子群算法^[4-5]等。文献[6]研究了在规定时间内完成对多个目标侦察所需的最少无人机数量。文献[7]研究了在规定的时间内、侦察频次及时间间隔等约束条件下,多类型无人机协同完成对多类型目标侦察任务的路径规划。文献[8]研究了在多种威胁源环境中多无人机航迹规划问题,构建了威胁源威胁代价公式。实际作战中,打击目标并不唯一且类型多样,除考虑弹目匹配度、费效比外还需考虑与目标相关的多种因素^[9-10]。本文综合考虑战场环境中存在的禁飞区、威胁源、无人机飞行高度、作战时间代价等因素对航迹规划的影响,设置威胁区安全阈值,采取自适应权重粒子群协同优化(adaptive weighted particle swarm collaboration optimization, APSCO)算法对单无人机进行航迹规划。

就目标分配问题,文献[11]建立了多无人机协同侦察多目标的代价矩阵,但只提及相同数量的无人机与目标对应问题。文献[12]提出了一种改进遗传算法求解无人机多目标分配问题,没有涉及不同目标类型对无人机分配的影响。随着技术的发展,由多个无人机携带不同弹药针对不同目标实施精确打击,已成为近距空中支援必须考虑的现实问题。本文就以上不足,考虑多目标特点和无人机携带武器类型对作战效能的影响,构建目标毁伤综合指标,采用APSCO算法和0-1规划法联合求解多无人机近距空中支援任务下的最优费效比并给出合理的任务分配方案。

1 模型构建

根据多无人机火力打击任务需求,在任务想定中,设当前有 M 个目标、 N 架无人机,且 $N > M$ 。假设在任务作战环境中,存在的禁飞区和敌各类威胁源位置均已知,无人机位于空中作战平台上或临空盘旋,处于随时出动状态。

1.1 UAV模型

设无人机集合 $U = \{U_1, U_2, \dots, U_n\}$ 为临空待出动无人机。假设每架无人机均只能挂载一种武器弹药,设 z 为无人机挂载武器的种类, U_i 为每类武器挂载无人机的集合,则 $U = \sum_{i=1}^z U_i, i=1, 2, \dots, z$ 。

本文不考虑无人机的质量、大小、体积等因素影响,将每架无人机看作一个质点,无人机始终保持匀速飞行,不考虑转弯的加减速。无人机 U 的属性集合为 $\{p_{u_i}, v_i, t_i^{\max}, u_i\}$,其中 p_{u_i} 为无人机位置(包括无人机飞行高度), v_i 为无人机飞行速度, t_i^{\max} 为无人机最大作战时间, u_i 为无人机挂载武器类型。

1.2 环境模型

设目标集合 $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ 为多目标。本文不考虑目标的大小,目标 A 的属性集合为 $\{p_{a_j}, g_j, k_j, h_j, l_j\}$,其中 p_{a_j} 为目标点的位置, g_j 为目标的任務相关程度, k_j 为目标的态势影响程度, h_j 为目标的火力威胁程度, l_j 为目标的防御程度。

设集合 $O = \{O_1, O_2, \dots, O_z\}$ 为复杂战场环境中已知存在的禁飞区和威胁源。禁飞区的属性集合为 $\{p_{ojk}, c_{hk}, k_{uk}, g_{ak}\}$, p_{ojk} 为长方体底面中心点的位置坐标, c_{hk} 为长方体底面长度, k_{uk} 为长方体底面宽度, g_{ak} 为长方体高度。威胁源的属性集合为 $\{t_{owk}, p_{owk}, R_k^{\min}, R_k^{\max}\}$, t_{owk} 为威胁源类型, p_{owk} 为威胁源中心位置坐标, R_k^{\min} 为最小威胁半径, R_k^{\max} 为最大威胁半径。

2 航迹模型

本文采用三维立体坐标布局作战空间,无人机和目标均以空间中的一个坐标点表示。禁飞区是作战空间中自然环境或人为设置的一个禁飞区域,这个区域高度一般没有限制,俯视图中多为不规则形状,将俯视图划分为多个大小不一的长方形可有效降低禁飞区的复杂度,因此禁飞区用一个或多个长方体表示,其中长方体的高为作战空间的高度。威胁源主要是敌方对我无人机的威胁,威胁源区域形

状多为放射状,因此用一个半球区域表示。

从无人机到打击目标点的航迹如图 1 所示,考虑三维空间曲线曲率和扰率、保证轨迹的平滑性,采取三次样条拟合散点的方法,规划无人机航迹。整条航迹将威胁源与禁飞区作为规避条件,限制无人机进入禁飞区,设置威胁源对无人机航迹产生的约束条件,从而使得规划的航迹更加合理,同时尽可能消耗更短的时间。

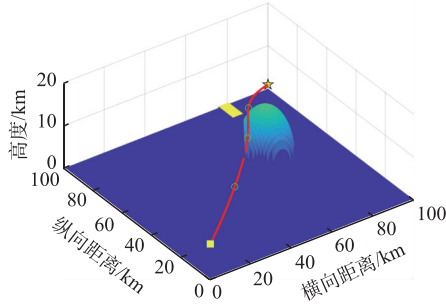


图 1 三次样条拟合航迹效果图

2.1 威胁代价

无人机在执行近距离空中支援任务过程中将面临各种威胁和限制条件,主要包括山体和恶劣天气带来的限制空域、敌方侦察雷达、攻击导弹、防空火炮等带来的威胁空间影响。这些威胁和限制有一定的覆盖范围,合理规划无人机飞行航迹,可以确保其在安全威胁内快速完成打击任务。

2.1.1 禁飞区威胁

禁飞区是战场环境中涉及到的山体、恶劣天气等以及一些禁止飞行区域,在执行任务过程中无人机无法从此处经过,相应的约束模型表示为 $\{p_i(t)\} \notin \Omega_o, i \in \{1, 2, \dots, n\}, t \in [0, +\infty)$ 。其中, p_i 为无人机 U_i 在时间 t 时的坐标, Ω_o 为禁飞区中所有点集合。

2.1.2 威胁源威胁

威胁源是敌方在作战区域内部署的雷达、导弹、防空火炮等可对空中目标造成威胁的武器装备。根据威胁源的功能特点,其威胁区可以看作是一个近似的半球形或空心球形。考虑到无人机飞行高度不同,威胁源相对于无人机水平位置的威胁代价不同,可以将威胁源威胁区域看作是一个半径为 R 的半球形状,如图 2 所示。

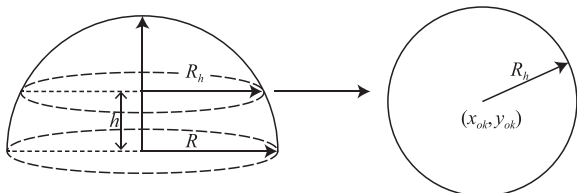


图 2 无人机飞行高度 h 时的威胁覆盖图

此时,假设该威胁覆盖的球体半径为 R ,无人机飞行高度为 h ,则在无人机飞行高度上,威胁覆盖面

的半径为 $R_h = \sqrt{R^2 - h^2}$ 。

侦察雷达搜索威胁公式:

$$Q_l = \begin{cases} 0, & R_l > R_l^{\max} \\ \frac{k_l R_l^{\min 4}}{R_l^4}, & R_l^{\min} < R_l < R_l^{\max} \\ 1, & R_l < R_l^{\min} \end{cases} \quad (1)$$

式中: Q_l 为侦察雷达威胁值; R_l^{\min} 和 R_l^{\max} 分别为雷达绝对探测距离和最大探测距离; R_l 为无人机到威胁源的距离; k_l 为雷达威胁系数^[8]。

攻击导弹威胁公式:

$$Q_g = \begin{cases} \frac{k_g (R_g - R_g^{\min})(R_g^{\max} - R_g)}{(R_g^{\max} - R_g^{\min})^2 / 4}, & R_g^{\min} \leq R_g \leq R_g^{\max} \\ 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: Q_g 为攻击导弹威胁值; R_g^{\max} 和 R_g^{\min} 分别为攻击导弹最大和最小攻击半径; R_g 为无人机到威胁源的距离; k_g 为攻击导弹威胁系数^[8]。

防空火炮威胁公式:

$$Q_f = \begin{cases} k_f \exp\left(-\frac{R_f^2}{R_f^{\max 2} / 9}\right), & R_f \leq R_f^{\max} \\ 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: Q_f 为防空火炮威胁值; R_f^{\max} 为防空火炮攻击半径; R_f 为无人机到威胁源的距离; k_f 为防空火炮威胁系数^[8]。

则在作战想定中无人机航迹路径的威胁代价公式为:

$$C_{ij}^1 = \sum_{k=1}^l \max Q_{lk} + \sum_{k=1}^g \max Q_{gk} + \sum_{k=1}^f \max Q_{fk} \quad (4)$$

$$\max Q_{lk} \leq \epsilon_l, \max Q_{gk} \leq \epsilon_g, \max Q_{fk} \leq \epsilon_f, \max C_{ij}^1 \leq \tau \quad (5)$$

式中: C_{ij}^1 为威胁源对无人机 U_i 到达目标 A_j 航迹的威胁代价总和, $\max Q_{lk}$ 、 $\max Q_{gk}$ 、 $\max Q_{fk}$ 为该航迹中各威胁源对无人机威胁最大的点所在的威胁值; l 、 g 、 f 分别为该航迹上经过的侦察雷达、攻击导弹、防空火炮威胁源的数量; ϵ_l 、 ϵ_g 、 ϵ_f 为该航迹中每类威胁源的安全阈值,表示每类威胁源对无人机的威胁不能超过该值; τ 为无人机在此航迹中面临所有威胁源安全阈值,表示所有威胁源对无人机的威胁值不能超过该值, ϵ_l 、 ϵ_g 、 ϵ_f 、 τ 皆可通过模糊综合评价法求得。

2.2 作战时间代价

无人机完成任务所需的时间越长,在近距离空中支援中受到威胁的概率就越大,无人机时间代价与飞过的航迹长度成正比。航迹长度的求算采用三阶样条插值法^[11],可以表示为:

$$\begin{cases} C_{ij}^2 = \frac{L_{ij}}{t_i^{\max} v_i} \\ L_{ij} = \sum_{k=1}^n \sqrt{(x_{k+1} - x_k)^2 + (y_{k+1} - y_k)^2 + (z_{k+1} - z_k)^2} \end{cases} \quad (6)$$

式中: C_{ij}^2 为无人机 U_i 到达目标 A_j 航迹上的作战时间代价, x_k, y_k, z_k 为第 k 个插值点的坐标, $x_{k+1}, y_{k+1}, z_{k+1}$ 为第 $k+1$ 个插值点的坐标, L_{ij} 为无人机 U_i 至目标 A_j 的航迹长度, n 为该航迹上的插值点个数。

2.3 航迹总代价

无人机 U_i 到达目标 A_j 的航迹总代价为其威胁代价与作战时间代价之和,求取该航迹最小总代价公式为:

$$\begin{aligned} C_{ij} &= \min(r_1 C_{ij}^1 + r_2 C_{ij}^2) \quad (7) \\ \text{s. t.} \\ r_1 + r_2 &= 1 \\ C_{ij}^1 &= \sum_{k=1}^l x_{ij} \epsilon_l + \sum_{k=1}^g x_{ij} \epsilon_g + \sum_{k=1}^f x_{ij} \epsilon_f \\ C_{ij}^1 &\leq \tau \\ C_{ij}^2 &= \frac{L_{ij}}{t_{\max} v_i} \\ L_{ij} &= \sum_{k=1}^n \sqrt{(x_{k+1} - x_k)^2 + (y_{k+1} - y_k)^2 + (z_{k+1} - z_k)^2} \\ x_{ij} &= 0 \text{ 或 } 1 \\ i &= 1, 2, \dots, n \\ j &= 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (8)$$

式中: x_{ij} 为无人机 U_i 到达目标 A_j 的航迹是否经过各威胁源威胁区域。

$x_{ij} = 1$ 取值判断条件为:

$$(x_i - x_{lk})^2 + (y_i - y_{lk})^2 + (z_i - z_{lk})^2 \leq \sqrt[4]{\frac{k_t R_{\min}^4}{\epsilon_{lk}}} \quad (9)$$

$$(x_i - x_{gk})^2 + (y_i - y_{gk})^2 + (z_i - z_{gk})^2 \leq \frac{1}{2} (R_{\max} + R_{\min} + \sqrt{(R_{\max} + R_{\min})^2 - 4(R_{\max} + R_{\min} + \frac{\epsilon_g (R_{\max} - R_{\min})}{4k_g})}) \quad (10)$$

$$(x_i - x_{fk})^2 + (y_i - y_{fk})^2 + (z_i - z_{fk})^2 \leq -\frac{R_{\max}^2}{9} \lg \frac{\epsilon_f}{k_f} \quad (11)$$

上述3个条件满足其中之一即可,否则 $x_{ij} = 0$ 。式中: x_i, y_i, z_i 为无人机航迹上的任意点; x_{lk}, y_{lk}, z_{lk} 为第 k 个雷达威胁源坐标; x_{gk}, y_{gk}, z_{gk} 为第

个攻击导弹威胁源坐标; x_{fk}, y_{fk}, z_{fk} 为第 k 个防空火炮威胁源坐标; r_1, r_2 为威胁代价与作战时间代价权重,可通过层次分析法求得。

2.4 基于APSCO算法航迹规划

粒子群优化算法比其他群体智能算法受到更多的关注,其核心组成部分被用在了一些新提出的群体智能算法上^[13]。因此,本文在粒子群优化算法的基础上融入自适应权重和遗传算法的杂交思想,算法局部最优解情况得到避免,全局搜索能力得到提高。

1)粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)是解决航迹规划问题的一种常见智能算法,其本质是基于群体智能的优化算法。该算法是通过建立一个种群粒子,对每个粒子用位置、速度和适应度值3项指标表示^[14]。在每次迭代后,得到每个粒子的个体极值和所有粒子的全局极值,对比当前粒子,从而更新每个粒子的速度和位置^[15],最终搜索到全局最优解。该算法能以较大的概率收敛于全局最优解,且对种群大小不十分敏感。其算法更新公式为:

$$\begin{cases} V_i^{(t+1)} = \omega V_i(t) + c_1 \text{rand}() (P_i(t) - X(t)) + \\ c_2 \text{rand}() (G_i(t) - X(t)) \\ X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t+1) \end{cases} \quad (12)$$

式中: $V_i(t), X_i(t)$ 为粒子当前的速度和位置; $V_i(t+1), X_i(t+1)$ 为粒子更新后的速度和位置; ω 为惯性权重; c_1 和 c_2 为学习因子; $\text{rand}()$ 为 $[0, 1]$ 范围内的均匀随机数; $P_i(t)$ 和 $G_i(t)$ 分别为粒子的个体极值和全局极值; t 为迭代次数。

2)针对PSO算法容易早熟及后期容易在全局最优解附近产生震荡现象,提出了自适应粒子群(adaptive particle swarm optimization, APSO)算法,采取动态惯性权重方法以避免陷入局部极值的问题。本文采取惯性权重值随迭代次数不断递减的更新方式,具体变化公式为:

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{t(\omega_{\max} - \omega_{\min})}{t_{\max}} \quad (13)$$

式中: ω_{\max} 为惯性权重最大值; ω_{\min} 为惯性权重最小值。本文中 $\omega_{\max} = 1.2, \omega_{\min} = 0.2, t$ 为迭代次数。

在此基础上,本文借鉴遗传算法中的交叉思想,在APSO算法的基础上引入交叉操作,即在每次迭代中,根据杂交率随机选取一定比例的粒子两两进行杂交,得到相同数量的子代粒子,用子代粒子代替父代粒子。这种方法可以提高粒子的多样性、避免陷入局部最优^[16],从而增强算法的全局搜索能力,提高搜索效率。其子代粒子位置计算公式为:

$$p_{nx} = ip_x(1) + (1-i)p_x(2) \quad (14)$$

式中: p_x 为父代粒子的位置; p_{nx} 为子代粒子的位置; i 为 0 到 1 之间的随机数。

子代粒子速度计算公式为:

$$p_{nv} = \frac{p_v(1) + p_v(2)}{|p_v(1) + p_v(2)|} |p_v| \quad (15)$$

式中: p_v 为父代粒子的速度; p_{nv} 为子代粒子的速度。

APSCO 算法是在粒子群算法的基础上, 增加

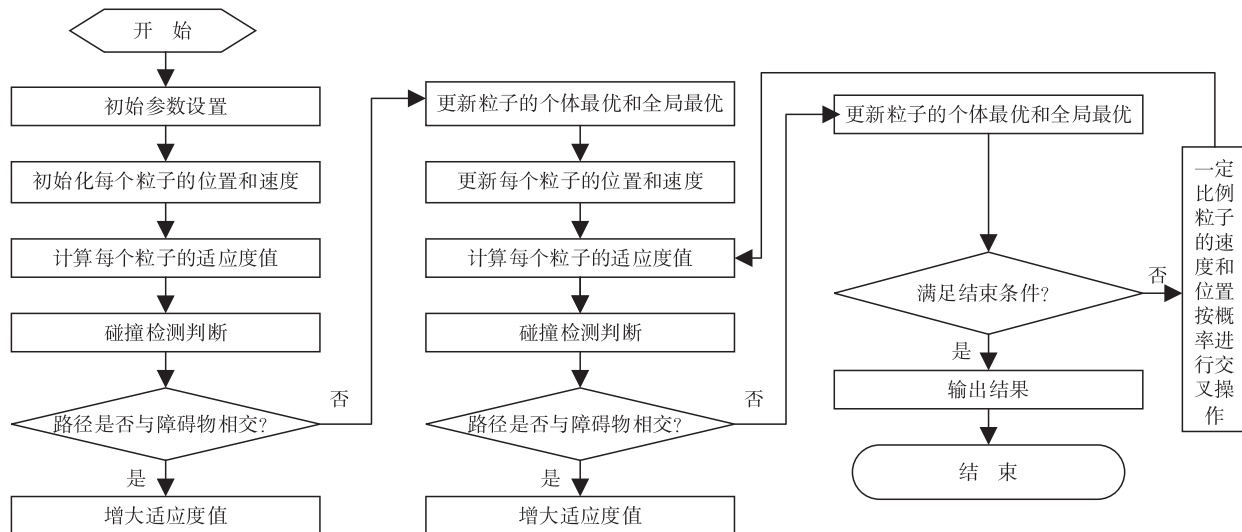


图 3 APSCO 算法流程图

3 多无人机目标任务分配

对于多无人机对多目标的任务分配方法, 是一个多因素的不平衡指派问题。一般的指派问题算术模型规定, 一个任务只能分配给一个人, 而本文的模型具有变化性, 即一个目标可以被多个无人机打击, 因此在考虑该问题时不能简单归为一个指派问题, 而应作为一种不平衡的 0-1 规划问题。

多无人机近距离空中支援任务分配主要从 2 个方面进行分析, 一是最小化单无人机单目标航迹总代价, 二是最大化多无人机对多目标的毁伤效能, 从整体上实现最优分配, 寻找任务最优效费比。

1) 利用 APSCO 混合算法求出每架无人机对所有目标的航迹总代价, 构造航迹总代价矩阵:

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \cdots & C_{1m} \\ C_{21} & C_{22} & \cdots & C_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{n1} & C_{n2} & \cdots & C_{nm} \end{bmatrix} \quad (16)$$

2) 确定目标各指标。目标任务相关程度 g_j 采用专家打分法, 取值为 0, 0.1, 0.2, ..., 1; 目标态势影响程度 k_j 由目标所处作战环节中发挥作用的单位数量 A 决定; 目标火力威胁程度 h_j 由目标火力

自适应权重, 混合其它算法的一种协同优化算法。其通过动态调整惯性权重, 使得粒子随迭代次数的增加, 其受初始速度影响越小, 从而避免陷入局部极值, 增强算法的全局搜索能力, 增加交叉操作可有效提高粒子的多样性, 从而提高算法的寻优能力。遗传算法虽然收敛性更强, 却更容易陷入局部最优。

威胁程度占比确定, 其值由武器射程 s 、射速 v 、火炮口径 d (机枪取 1) 相乘后取对数得到; 目标防御程度 l_j 赋值方法为自身防护指标和目标防空火力指标之差除以 2, 自身防护指标 f_h 根据抗毁伤能力和隐蔽性分为 6 档, 由强到弱取值为 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1, 目标防空火力指标 h_i 由目标单一防空武器射程 s_i 、射高 h_i 、命中率 p_i 相乘后取对数再求和得到, 目标防空武器的总和为 B 。赋值方法见表 1^[10]。

表 1 目标 j 指标赋值方法

指标	来源	赋值方法
任务相关程度	专家打分	0, 0.1, 0.2, ..., 1
态势影响程度	计算	$k_j = 1/A$
火力威胁程度	计算	$h_j = \ln(s \times v \times d)$
目标防御程度	计算和分档取分	$\begin{cases} l_j = \frac{f_h - h_i}{2} \\ f_h = 0, 0.2, 0.4, \dots, 1 \\ h_i = \sum_{i \in B} \ln(s_i \times h_i \times p_i) \end{cases}$

3) 计算目标毁伤综合指标。

$$v_j = \sum_{j=1}^4 z_j w_j, z_j \in \{g_j, k_j, h_j, l_j\} \quad (17)$$

式中: z_j 为目标的各项指标; w_j 为目标各指标的权重, 可通过比较判断矩阵获得^[10]; v_j 为目标的毁伤综合指标。

4) 构造目标毁伤系数矩阵。

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1m} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ d_{f1} & d_{f2} & \cdots & d_{fm} \end{bmatrix} \quad (18)$$

D 的每一行表示不同武器挂载对各目标的毁伤系数, d_{ij} 表示无人机 U_i 对目标 A_j 的毁伤系数。

5) 根据多无人机在某次近距空中支援任务中的航迹总代价、目标毁伤综合指标、目标毁伤系数构造目标函数, 采用 0-1 规划法求解任务最大效费比, 得到任务分配方案。

$$C_E = \max \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{x_{ij} d_{ij} v_j}{C_{ij}} \quad (19)$$

s. t.

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^m x_{ij} = 1, i = 1, 2, \dots, n \\ \sum_{i=1}^n x_{ij} \geq 1, j = 1, 2, \dots, m \\ \sum_{i=1}^n x_{ij} d_{ij} \leq 1, j = 1, 2, \dots, m \\ x_{ij} = 0 \text{ 或 } 1 \end{cases} \quad (20)$$

式中: C_E 为任务最大效费比; x_{ij} 为无人机 U_i 对目标 A_j 是否进行火力打击。

约束条件: 每架无人机只能分配给 1 个目标(式(20)中第 1 个子公式); 每个目标可以分配多个无人机, 且至少被 1 架无人机打击(式(20)中第 2 个子公式); 每个目标毁伤系数之和不能大于 1(式(20)中第 3 个子公式)。

4 仿真实验与分析

假设在某场战役中, 我方成功突破敌防御前沿, 实施纵深火力打击, 现接上级命令, 执行近距空中支援任务, 我方出动 20 架无人机对敌 8 个目标实施空中火力打击。根据当前情报信息, 已知在作战区域内有禁飞区 5 处, 敌雷达搜索威胁 Q_{lk} 3 个、攻击导弹威胁 Q_{gk} 2 个、防空火炮威胁 Q_{fk} 4 个, 具体信息见表 2~表 5。

表 2 无人机属性信息

编号	位置 p_a/km	速度 $v/(\text{m/s})$	最大作战时间 t_{\max}/min	挂载类型 u
$U_1 \sim U_5$	(1, 1, 8)	60	80	空地导弹
$U_6 \sim U_{10}$	(10, 3, 7)	50	80	反辐射导弹
$U_{11} \sim U_{15}$	(3, 10, 2)	40	70	航空炸弹
$U_{16} \sim U_{20}$	(10, 10, 5)	40	60	电视制导武器

表 3 目标属性信息

编号	位置 p_a/km	任务相关程度 g	态势影响程度 k	火力威胁程度 h	目标防御程度 l
A_1	(99, 99, 0)	1.0	0.150	0.40	-2.0
A_2	(60, 90, 0)	1.0	0.050	0.30	-1.5
A_3	(70, 95, 0)	0.8	0.125	0.17	-1.5
A_4	(80, 80, 0)	0.8	0.125	0.17	-1.2
A_5	(60, 10, 2)	0.6	0.100	0.40	-1.2
A_6	(95, 70, 0)	0.6	0.100	0.20	-1.0
A_7	(30, 90, 0)	0.5	0.075	0.20	-1.0
A_8	(30, 50, 10)	0.5	0.075	0.35	-0.8

表 4 禁飞区属性信息

编号	中心位置 p_{oj}/km	长 c_h/km	宽 k_u/km	高 g_a/km
O_1	(40, 40)	10	5	20
O_2	(80, 10)	8	8	20
O_3	(50, 10)	5	10	20
O_4	(10, 80)	10	5	20
O_5	(10, 50)	15	5	20

表 5 威胁区属性信息

编号	区域中心位置 p_{ow}/km	最小半径 R_{\min}/km	最大半径 R_{\max}/km	威胁类型 t_{ovk}
O_l	(90, 80)	10	15	雷达搜索威胁
	(90, 20)	10	15	索威胁
	(40, 80)	10	15	索威胁
O_g	(20, 50)	5	15	攻击导弹威胁
	(50, 40)	5	15	弹威胁
O_f	(90, 90)	0	4	防空火
	(60, 70)	0	11	防空火
	(50, 10)	0	7	炮威胁
	(10, 80)	0	7	炮威胁

通过 AHP, 建立判断矩阵, 可求得目标各毁伤指标的相对权重, 即 $W = [0.4 \ 0.2 \ 0.2 \ 0.2]$ 。

通过熵权法求得不同武器挂载对多目标的毁伤系数 d , 如表 6。

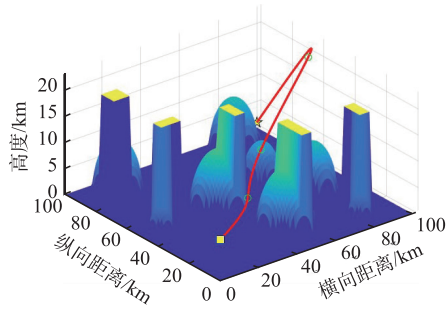
表 6 毁伤系数 d_{ij} 信息

	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8
$U_1 \sim U_5$	0.5	0.2	0.3	0.2	0.5	0.4	0.5	0.3
$U_6 \sim U_{10}$	0.3	0.3	0.4	0.1	0.3	0.25	0.2	0.2
$U_{11} \sim U_{15}$	0.2	0.4	0.2	0.15	0.2	0.3	0.25	0.2
$U_{16} \sim U_{20}$	0.1	0.15	0.5	0.1	0.1	0.2	0.3	0.1

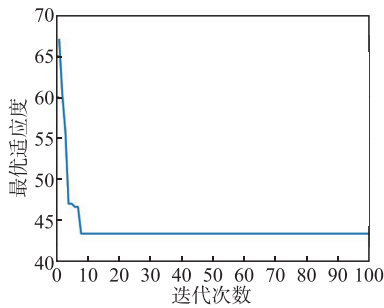
在建立威胁区模型时, 以无人机在各类威胁源安全阈值边界处对应的半径为作战环境中威胁区域的半径, 即可优化判断程序、提高计算效率, 也能准确的进行路径预测, 有效避免程序判断错误、出现无效路径的情况。

1) 求解单条航迹的最小总代价 C_{ij} 。通过 Mat-

lab 仿真软件对遗传算法(GA)、PSO 算法、APSCO 混合算法进行参数调优,多次仿真后取各算法较好的仿真结果。如图 4~图 6 和表 7 所示,通过航迹总代价数值和仿真示意图发现 GA 算法更容易陷入局部最优,仿真效果不理想;通过迭代趋势图发现 APSCO 混合算法较 PSO 算法和 GA 算法最优适应度值获得较晚,避免了早熟现象,从而得到更好的搜索路径,更加有效的提高全局搜索能力,寻找到更优的航迹。

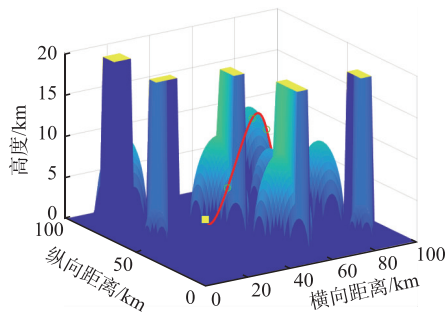


(a) 仿真示意

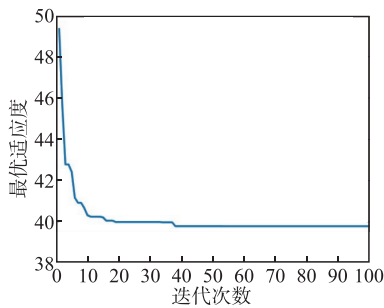


(b) 迭代效果

图 4 GA 算法仿真结果

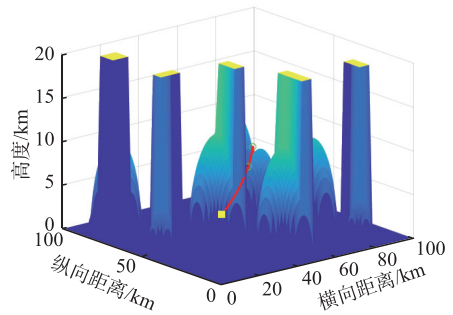


(a) 仿真示意

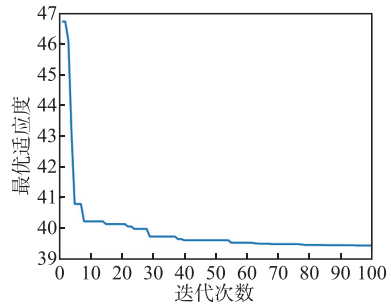


(b) 迭代效果

图 5 PSO 算法仿真结果



(a) 仿真示意



(b) 迭代效果

图 6 APSCO 混合算法仿真结果

表 7 2 种算法规划航迹总代价结果对比

算法	GA	PSO	APSCO
收敛迭代数	8	38	78
适应度值	43.44	39.73	39.45

采用 APSCO 混合算法求解最小航迹总代价,运算结果如表 8 所示。

表 8 各航迹最小总代价 C_{ij}

	$U_1 \sim U_5$	$U_6 \sim U_{10}$	$U_{11} \sim U_{15}$	$U_{16} \sim U_{20}$
A_1	39.23	42.42	54.49	59.08
A_2	23.71	26.26	34.43	38.23
A_3	25.47	28.23	37.59	41.92
A_4	29.58	31.91	41.91	44.72
A_5	15.54	15.57	23.26	28.81
A_6	25.30	27.60	37.77	41.20
A_7	21.38	23.68	30.33	33.74
A_8	15.21	15.66	19.56	20.63

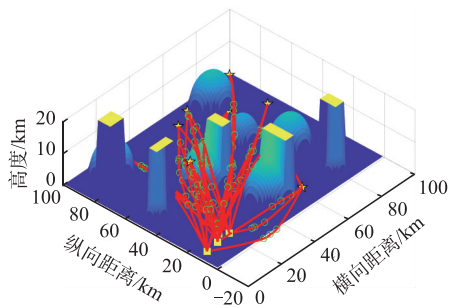


图 7 航迹最小总代价示意图

2)采用 0-1 规划法计算多无人机在此次近距空中支援任务中的最大效费比 CE,给出多无人机对多目标的任务分配方案。

算例分配结果为: $U_2、U_5$ 攻击 A_1 ; $U_8、U_{10}、U_{12}$ 攻击 A_2 ; $U_{16}、U_{18}$ 攻击 A_3 ; U_{20} 攻击 A_4 ; $U_1、U_4$ 攻击 A_5 ; $U_3、U_{14}、U_{15}$ 攻击 A_6 ; $U_{17}、U_{19}$ 攻击 A_7 ; $U_6、U_7、U_9、U_{11}、U_{13}$ 攻击 A_8 ,最大效费比为 3.80。

通过算例分析能够看出,APSCO 混合算法收敛速度快,可以快速求出最小的航迹总代价,0-1 规划法的线性公式可以准确的求出当前航迹下的最优效费比,从而能够快速解决多无人机对多目标的分配问题。

5 结语

本文围绕近距空中支援中无人机目标分配问题,综合考虑无人机飞行高度、不同武器挂载、目标类型及各项指标、威胁区威胁代价、作战时间代价等因素,构建目标毁伤综合指标和设置威胁区安全阈值,提出一种基于 APSCO 混合算法通过 0-1 规划法联合求解得到优化分配方案,结合仿真实验分析,在综合考虑无人机路径与多目标分配双重因素下的优化方案可提高无人机目标分配的效费比。

参考文献

- [1] LI J, LIAO C Y, ZHANG W J, et al. UAV Path Planning Model Based on R5DOS Model Improved A-Star Algorithm [J]. Applied Sciences, 2022, 12 (22):11338.
- [2] YONG H, MINGRAN W. An Improved Chaos Sparrow Search Algorithm for UAV Path Planning. [J]. Scientific reports, 2024, 14 (1): 366
- [3] LUAN T, TAN Z, YOU B, et al. Path Planning of Unmanned Surface Vehicle Based on Artificial Potential Field Approach Considering Virtual Target Points [J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2024, 46 (6): 1190-1202.
- [4] 甯洋,郑波,龙足腾,等. 基于 CMPSO 算法的无人机复杂三维路径规划 [J]. 电光与控制, 2024, 31 (4): 35-42.
- [5] HU C, DENG M J, ZHU D L. A Learning Vector Particle Swarm Algorithm Incorporating Sparrow for UAV Path Planning [J]. International Journal of Swarm Intelligence Research (IJSIR), 2022, 13 (1): 1-20.
- [6] 周林林,彭赐龙,林志辉,等. 无人机水上侦察任务规划研究[J]. 军事交通学报,2022,1(9):69-74.
- [7] 王静,王艳红,周玉鑫,等. 基于动态规划算法的多无人机多目标协同侦察路径规划[J]. 军事运筹与系统工程,2022,36(1):5-11.
- [8] 杨晨光. 多无人机航迹规划研究[D]. 西安:长安大学,2020.
- [9] 尹光辉,路鑫鑫. 基于云模型的坦克射击目标选择研究[J]. 火力与指挥控制,2016,41(10):126-129.
- [10] 董文洪,高宇,王宗波,等. 近距空中支援打击目标选择研究[J]. 兵器装备工程学报,2021,42(4):128-131.
- [11] 张富震,朱耀琴. 复杂环境中多无人机协同侦察的任务分配方法 [J]. 系统仿真学报, 2022, 34 (10): 2293-2302.
- [12] 王庆贺,万刚,柴峥,等. 基于改进遗传算法的多机协同多目标分配方法[J]. 计算机应用研究, 2018, 35 (9):2597-2601.
- [13] 张岳. 基于 OODA 闭环的有人/无人机编队快速杀伤链生成方法[D]. 西安:西北工业大学,2023.
- [14] 陈侠,胡乃宽. 基于 APSO-BP 神经网络的无人机空地作战效能评估研究[J]. 飞行力学,2018,36(1):88-92.
- [15] 赵大伟. 基于数字孪生体的液压系统知识模型及应用[D]. 贵阳:贵州师范大学,2022.
- [16] 李蒙蒙. 基于蚁狮优化的高维不平衡数据分类研究 [D]. 北京:军事科学院,2021.

(编辑:徐敏)