

基于改进拍卖算法灾后救援多无人机任务分配

许可^a,高宏宇^b,雷鸣^a,叶彩霞^b

(沈阳理工大学 a. 理学院, b. 自动化与电气工程学院, 沈阳 110159)

摘要: 为提高灾后无人机(UAV)救援的效率,本文研究多无人机灾后侦察任务分配问题。考虑无人机续航时间、灾区地形以及是否遇到飞行障碍等因素,以无人机执行任务总时间最小为优化目标建立多无人机侦察任务分配模型,设计了混合动态规划的改进拍卖算法(hybrid dynamic programming auction, HDP A)求解模型。首先将无人机执行任务所需时间价值化,以单无人机执行任务所获收益最大为优化目标,设计动态规划算法获得单无人机执行任务最优序列作为初始投标方案,以防止拍卖算法陷入局部最优、提高算法的收敛速度;其次设计价格更新机制,解决投标任务之间的冲突,最终获得多无人机侦察任务分配最佳方案。实验结果表明,各无人机执行任务较为均衡,完成任务的总时间与传统的拍卖算法、遗传算法、海洋捕食者算法(marine predators algorithm, MPA)相比平均缩短了3.5%、5.6%、4.75%。

关键词: 多无人机;任务分配;动态规划;拍卖算法

中图分类号: TP301 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1003-1251.2024.02.005

Multi-UAV Task Assignment for Post-disaster Rescue Based on Improved Auction Algorithm

XU Ke, GAO Hongyu, LEI Ming, YE Caixia

(Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

Abstract: In order to improve the efficiency of post-disaster UAV rescue, the distribution of multi-UAV post-disaster reconnaissance tasks is studied. Considering factors such as UAV life time, disaster area terrain, and presence of obstacles in flight, the optimized objective is to minimize total time spent on UAV missions to establish multi-UAV reconnaissance task assignment model. An improved auction algorithm (hybrid dynamic programming auction, HDP A) is proposed to solve the model. First, the time spent on UAVs' tasks is valued. Next, the optimized objective is to maximize the benefits from a single UAV's tasks. Finally, a dynamic programming algorithm is created to determine the best order in which a single UAV should perform tasks as the first bid strategy to prevent the auctions algorithm falling into the local optimum and accelerating convergence. After resolving conflicts between competing tasks with the price update process, the optimal option for allocating multi-UAV reconnaissance tasks is obtained. The experimental results show that the tasks performed by each UAV are relatively balanced. The total time spent completing the task is reduced by an average of 3.5%, 5.6%, and 4.75% compared with the traditional auction algorithm, genetic algorithm, and marine predator algorithm.

Key words: multi-UAV; task allocation; dynamic programming; auction algorithm

由于无人机体积小、成本低、机动性高等特点,可以有效代替人类深入灾区完成搜索侦察任务,以协助制定救援方案^[1]。在大型灾难救援中,如何制定一个合理的无人机侦察任务分配方案,对于减少灾害损失具有重要意义。

目前,针对多无人机灾后救援任务分配问题的研究越来越多。张祥银等^[2]考虑幸存者援助类型不同,以最小化平均等待时间为目标函数,建立多无人机协同任务分配模型。李松锐等^[3]以搜救费用、无人机使用数量、完成任务的均衡性为目标函数,建立多目标多无人机任务分配模型。张小孟等^[4]以最小化无人机总滞空时间及最大化救援总收益为优化函数,建立价值随时间变化的多无人机任务规划模型。Liu 等^[5]考虑无人机飞行距离、油耗等因素构造成本-收益函数,建立多无人机任务分配模型。综上,在多无人机灾后救援问题中主要考虑了飞行距离、时间、油耗及收益等因素,较少综合考虑灾区地形及飞往灾区途中是否遇到障碍物,事实上由于灾区地形不同、飞行途中遇到的障碍物不同,无人机执行任务的时间也有所不同,考虑上述因素对无人机的影响更加符合实际情况。

早期,学者常采用传统的组合优化算法解决无人机任务分配问题。刘典宏等^[6]构建侦察预警任务分配动态规划模型,通过递推方程求解得到侦察预警任务分配方案。李瑞阳等^[7]以最小化飞行成本为目标建立无人机任务分配模型,并应用列生成算法对分配方案进行优化选择。近来,学者将智能优化算法用于求解无人机任务分配问题。王树朋等^[8]针对多无人机协同任务分配问题,提出一种自适应遗传算法。Wu 等^[9]将无人机性能和任务特征作为评价函数,提出一种基于改进模拟退火的融合遗传算法。Alhaqbani 等^[10]在时间有限的搜索和救援任务中,提出一种基于鱼群的无人机任务分配算法。

动态规划在求解问题时可以将复杂问题拆分为多个子问题,在每个子问题中进行最优决策,从而得到全局最优解。宫华等^[11]针对批处理机生产与成批配送协调调度问题,设计了基于动态规划的生产调度优化方法。王小明等^[12]针对传统动态规划在求解大规模问题时面临的维数灾难问题,提出近似动态规划的求解方法。张玉敏等^[13]针对随机动态调度模型难以高效求解的问题,提

出一种并行多维近似动态规划算法。Agarwal 等^[14]提出了一种差分动态规划算法解决多周期最优功率流,并能扩展到包含储能设备的大型系统中。陆坚毅等^[15]针对电动汽车的充电调度问题,提出单亲遗传混合动态规划的两阶段充电调度算法。上述动态规划算法在调度领域有着广泛的应用,但鲜少应用在无人机任务分配中。

拍卖算法在求解任务分配问题时可以协同考虑各拍卖方对不同任务的需求,能较好地解决任务分配冲突问题。许可等^[16]设计了带共享存储中心的分布式拍卖算法,并结合最大一致性算法将共享存储中心移除。李鑫滨等^[17]针对异构多自主式水下航行器任务分配问题,提出一种分布式鲁棒拍卖算法。Otte 等^[18]针对多机器人资源和有限的通信范围,提出一种基于 G-Prim 改进的拍卖算法。Bai 等^[19]设计了基于分组的分布式拍卖算法解决多机器人任务分配问题。Zhang 等^[20]研究多无人机动态任务分配问题,提出一种基于混合市场机制的动态任务分配方法。王然然等^[21]针对无人机任务分配问题,提出一种分布式合同网拍卖算法。张梦颖等^[22]针对无人机群实时任务分配问题,提出改进合同网拍卖算法。王轩^[23]提出在发生无人机损毁情况下基于改进合同网拍卖机制对任务进行重分配。综上,拍卖算法在任务分配问题中得到广泛使用。但拍卖算法在获得分配方案时仅考虑单个任务的价值,忽视了无人机的整体收益,易陷入局部最优,而动态规划算法可在全局范围内考虑无人机的收益,得到每个无人机的最优任务序列,使无人机的分配更加合理。

1 无人机灾后救援问题研究

1.1 问题描述

某地区有 B 个无人机基地,基地 q_o ($o = 1, \dots, B$) 中有不同性能的无人机,无人机 $U = \{u_i | i = 1, \dots, n_o\}$,总数量为 n_o ,其续航时间 H_i 及飞行速度 V_i 不尽相同。灾难发生后无人机要前往 n_i 个灾区执行侦察任务 $M = \{m_j | j = 1, \dots, n_i\}$,不同地形的灾区无人机探测范围不同。无人机进入长 L_j 、宽 W_j 的灾区后,以 r_p ($p = 1, 2, 3$) 为探测半径沿 L_j 方向进行侦察,到达灾区边缘时转弯以反方向继续侦察,往复进行,直至整个灾区侦察结束。

无人机侦察灾区过程如图1所示。基地到灾区途中可能存在障碍物,无人机遇需要绕行。为保证灾难救援的及时性,要求无人机执行任务总时间最短。

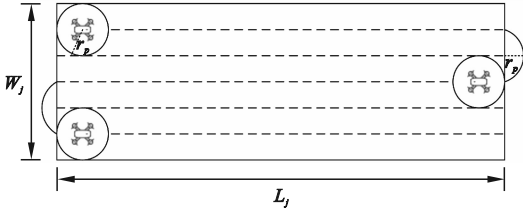


图1 无人机侦察灾区示意图

Fig.1 UAV reconnaissance disaster area diagram

为使求解问题方便,给出如下假设:

- 1) 将灾区近似为矩形,无人机以往复回旋的方式在灾区进行侦察;
- 2) 无人机转弯半径等于探测半径;
- 3) 无人机匀速飞行,自起飞后就保持最大巡航速度;
- 4) 对障碍物进行投影,将投影形状的外接圆弧线看作其绕过障碍物路线;
- 5) 无人机执行任务时不会出现故障或损毁。

1.2 参量描述

各参量符号及说明如表1所示。

表1 参量符号说明

Table 1 Parameter symbols description

符号	说明
r	无人机原始探测半径
Q	障碍物数量
$d_{ij}(i=1,2,\dots,n_u;j=1,2,\dots,n_t)$	无人机 u_i 到灾区 m_j 的距离
$T_{ij}(i=1,2,\dots,n_u;j=1,2,\dots,n_t)$	无人机 u_i 执行任务 m_j 总时间
$t_{ij}(i=1,2,\dots,n_u;j=1,2,\dots,n_t)$	无人机 u_i 在灾区 m_j 侦察时间
$L_j, W_j(j=1,2,\dots,n_t)$	灾区 m_j 的长度和宽度
$H_i(i=1,2,\dots,n_u)$	无人机 u_i 续航时间
$h_k^i(k=1,2,\dots,Q;i=1,2,\dots,n_u)$	无人机 u_i 躲避障碍 k 时花费时间
$R_k(k=1,2,\dots,Q)$	障碍 k 的近似半径
$V_i(i=1,2,\dots,n_u)$	无人机 u_i 巡航速度
$r_p(p=1,2,3)$	无人机实际探测半径($p=1$ 为平原; $p=2$ 为山地; $p=3$ 为森林)
$\zeta_p(p=1,2,3)$	不同地形对无人机原始探测半径的影响
$f_{ij}^k(i=1,2,\dots,n_u;j=1,2,\dots,n_t;k=1,2,\dots,Q)$	无人机 u_i 执行任务 m_j 是否会遇到障碍物 k
$x_{ij}(i=1,2,\dots,n_u;j=1,2,\dots,n_t)$	决策变量,无人机 u_i 是否执行任务 m_j

1.3 模型建立

将无人机执行任务时间分为无人机往返基地时间、无人机侦察灾区时间、无人机绕过障碍物时间。以最小化无人机执行任务时间和为目标函数

建立多无人机侦察任务分配模型为

$$\min \sum_{i=1}^{n_u} \sum_{j=1}^{n_t} T_{ij} \quad (1)$$

其中

$$T_{ij} = 2x_{ij} \frac{d_{ij}}{V_i} + x_{ij} t_{ij} + 2 \sum_{k=1}^Q h_k^i x_{ij} f_{ij}^k \quad (2)$$

无人机侦察灾区时间为

$$t_{ij} = \lceil \frac{W_j}{2r_p} \rceil \frac{L_j}{V_i} + \frac{\pi r_p (\lceil \frac{W_j}{2r_p} \rceil - 1)}{V_i} \quad (3)$$

不同地形无人机探测半径为

$$r_p = r \zeta_p (\zeta_p \text{ 随灾区地形变化而变化}) \quad (4)$$

无人机躲避障碍物时间为

$$h_k^i = \frac{\pi R_k - 2R_k}{V_i} \quad (5)$$

$$f_{ij}^k = \begin{cases} 1, & \text{无人机 } u_i \text{ 执行任务 } m_j \text{ 遇到障碍物 } k \\ 0, & \text{无人机 } u_i \text{ 执行任务 } m_j \text{ 未遇到障碍物 } k \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{s. t. } x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{无人机 } u_i \text{ 执行任务 } m_j \\ 0, & \text{无人机 } u_i \text{ 不执行任务 } m_j \end{cases} \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^{n_t} (2x_{ij} \frac{d_{ij}}{V_i} + x_{ij} t_{ij}) + \sum_{j=1}^{n_t} \sum_{k=1}^Q 2h_k^i x_{ij} f_{ij}^k \leq H_i \quad (8)$$

$(i = 1, 2, \dots, n_u)$

$$\sum_{i=1}^{n_u} x_{ij} = 1 (j = 1, \dots, n_t) \quad (9)$$

式(7)定义决策变量;式(8)约束无人机执行任务时间小于其续航时间;式(9)约束每个任务只能分配给一个无人机。

2 混合动态规划的改进拍卖算法

本文设计了基于混合动态规划的改进拍卖算法(hybrid dynamic programming auction, HDPA)求解多无人机灾后侦察任务分配问题。首先,采用动态规划算法求出每个无人机执行的最优任务集合,然后设计任务价格更新规则解决不同无人机之间的分配冲突问题,最终求得最佳分配方案。

2.1 拍卖算法的基本思想

拍卖算法本质上是投标者根据自身收益对商品进行投标,经过多轮投标迭代,最终得到使投标者满意的分配方案。

将无人机看作投标者,将任务看作商品,每个无人机根据执行任务所获收益进行投标。投标价格高的无人机即可执行该任务,若投标过程中无人机执行任务集产生冲突则根据价格更新规则给

出下轮投标出价,经多轮迭代,无人机间无冲突产生,即得到每个无人机执行任务集。将无人机执行任务所需时间进行价值化处理,即无人机 u_i 执行任务 m_j 所获得的价值为 c_{ij} ($c_{ij} = \frac{1}{T_{ij}}$)。在第 τ 轮投标迭代中,投标任务 m_j 的最高出价记为 $p_j(\tau)$,此时该任务对于 u_i 的收益为 $v_{ij}(\tau) = c_{ij} - p_j(\tau)$ 。 J_i^y 表示对于无人机 u_i 价值第 y 大的任务下标, $J_i^{n^*}$ 表示对于无人机 u_i 价值最大的前 n^* 个任务对应的下标集。

$$J_i^{n^*} = \{J_i^y | y = 1, \dots, n^*\} \quad (10)$$

$J_i^{n^*}$ 中任务只能分配给一个无人机且满足无人机续航时间约束。每个无人机 u_i 都希望分配到收益最大的任务集,即

$$J_i^* = \arg \max_{j \in J_i^{n^*}} \sum v_{ij}(\tau) \quad (11)$$

为避免不同无人机间的冲突导致算法无法进行求解,给定参数 $\varepsilon > 0$,若无人机 u_i 满足下式

$$\sum_{j \in J_i} (c_{ij} - p_j(\tau)) \geq \max_{j \in J_i^{n^*}} \sum v_{ij}(\tau) - \varepsilon \quad (12)$$

称无人机 u_i 得到较优的分配方案集合 J_i 。

2.2 基于动态规划的单无人机任务分配

为获得较优的无人机执行任务初始分配方案,将多无人机任务分配问题分解为单个无人机的优化问题,并采用动态规划算法对每个无人机需执行的任务进行初始分配。

单无人机任务分配问题如下:给定无人机 u_i 和 n_i 个任务, u_i 执行任务 m_j 的时间为 T_{ij} ,所获得的收益为 v_{ij} ,无人机 u_i 须在其续航时间 H_i 内执行多个任务使其获得的总收益最大,其数学描述为

$$\max \sum_{j=1}^{n_i} v_{ij} x_{ij} \quad (13)$$

$$\text{s. t. } \sum_{j=1}^{n_i} x_{ij} T_{ij} \leq H_i \quad (14)$$

采用动态规划算法求解上述问题时需证明其最优子结构性质。即若上述原问题的最优解为 $[x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in_i}]$,则子问题为

$$\max \sum_{j=1}^{n_i-1} v_{ij} x_{ij} \quad (15)$$

$$\text{s. t. } \sum_{j=1}^{n_i-1} x_{ij} T_{ij} \leq H_i - x_{in_i} T_{in_i} \quad (16)$$

其最优解为 $[x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in_i-1}]$ 。

假设 $[x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in_i-1}]$ 不是子问题的最优解,

那么子问题至少存在一个更好的解 $[x'_{i1}, x'_{i2}, \dots, x'_{in_i-1}]$,满足

$$\sum_{j=1}^{n_i-1} v_{ij} x'_{ij} > \sum_{j=1}^{n_i-1} v_{ij} x_{ij} \quad (17)$$

由此构造原问题的新解

$$\sum_{j=1}^{n_i-1} v_{ij} x'_{ij} + v_{in_i} x_{in_i} > \sum_{j=1}^{n_i-1} v_{ij} x_{ij} + v_{in_i} x_{in_i} \quad (18)$$

式(18)与原问题解矛盾,假设不成立,由此得证上述问题满足最优子结构性质,可递归定义问题的最优值。

设 $f[j][z]$ 为子问题的最优值,表示当无人机续航时间为 z 时,执行 $\{m_1, m_2, \dots, m_j\}$ 中任务所获得的收益最大值。对于当前任务 m_j 存在两种情况:

1)当前无人机续航时间 z 小于任务 m_j 执行时间,则放弃执行该任务,此时问题的最优值为 $f[j-1][z]$;

2)当前无人机续航时间 z 大于等于任务 m_j 执行时间时,若无人机 u_i 执行任务 m_j 所获得总收益大于 $f[j-1][z]$ 则执行任务 m_j ,否则不执行,递归式如下。

$$f[j][z] =$$

$$\begin{cases} \max\{f[j-1][z], f[j-1][z - T_{ij}] + v_{ij}\}, & z \geq T_{ij} \\ f[j-1][z], & 0 \leq z < T_{ij} \end{cases} \quad (19)$$

$$f[n_i][z] = \begin{cases} v_{in_i}, & z \geq T_{in_i} \\ 0, & 0 \leq z < T_{in_i} \end{cases} \quad (20)$$

由此设计单无人机任务分配动态规划算法执行过程如下。

算法1:动态规划(Dynam)

输入: v_{ij}, H_i, T_{ij}

输出: J_i //无人机 u_i 执行的任务集

//计算单无人机执行任务最优总价值

$f[0][z] = 0, \forall z = 1, \dots, T_i$

$f[j][0] = 0, \forall j = 1, \dots, n_i$

for $j = 1 : n_i$ do

for $z = 1 : H_i$ do

if $z \geq T_{ij}$ then

$f[j][z] = \max(f[j-1][z], f[j-1]$

$[z - T_{ij}] + v_{ij})$

else

$f[j][z] = f[j-1][z]$

end if

end for

```

end for
j = nt, z = Hi, Ji = ∅
// 追溯最优分配
while j > 0 do
if f[j][z] ≠ f[j-1][z] then
z = z - Tij
Ji = Ji ∪ {j}
end if
j = j - 1
end while

```

2.3 基于 HDPA 算法多无人机任务分配

通过动态规划算法得到单无人机执行任务集,但对多无人机进行分配时易发生任务之间的冲突问题。基于此设计价格更新规则如下。

$$p_j(\tau+1) = \begin{cases} p_j(\tau), & j \notin J_i \\ c_{ij}, & j \in J_i \end{cases} \quad (21)$$

当任务 m_j 在无人机 u_i 的当前任务序列 J_i 中, $p_j(\tau+1) = c_{ij}$, 否则, $p_j(\tau+1) = p_j(\tau)$ 。

利用价格更新规则对任务进行报价,根据无人机收益对单无人机任务集中进行重分配,以避免任务冲突问题。混合动态规划的改进拍卖算法执行过程如下。

算法 2: 混合动态规划的改进拍卖算法

输入: $c_{ij}, T_{ij}, p_j(\tau), H_i$

J'_i // 上一轮投标分配给 u_i 的任务集

$\{b'_j | j \in J'_i\}$ // 上一轮投标报价

输出: $p_j(\tau+1), J_i$

```

while  $\tau \leq C$  do
for  $i = 1 : n_u$  do
// 之前迭代中分配的任务价格重置为零
for  $j \in J'_i$  do
if  $p_j(\tau) = b'_j$  then
 $p_j(\tau) = 0$ 
 $p_j(\tau+1) = 0$ 
end if
end for
// 收集新的投标信息
 $v_{ij}(\tau) = c_{ij} - p_j(\tau)$ 
 $J_i = \text{Dynam}(v_{ij}(\tau), H_i, T_{ij})$ 
// 开始投标并更新价格信息
for  $j \in J_i$  do
 $b_j = c_{ij}, p_j(\tau+1) = b_j$ 
end for
for task  $j \notin J_i$  do
 $p_j(\tau+1) = p_j(\tau)$ 

```

```

end for
end for
end while

```

定理 1 HDPA 收敛到可行解。

证明: 在无人机 u_i 的每次迭代中, 算法 1 优化了无人机 u_i 的总收益, 价格更新规则保证了在任务分配过程中总分配收益不降低。此外, 无人机总分配收益受所有任务价值之和的限制。因此, 算法 2 收敛。算法 1 保证满足约束 (7) 和 (8)。任务价格更新规则保证了所有任务要么保持未分配状态, 要么从一个无人机切换到另一个无人机。所以约束 (9) 可满足, 可得出算法 2 收敛于一个可行解。

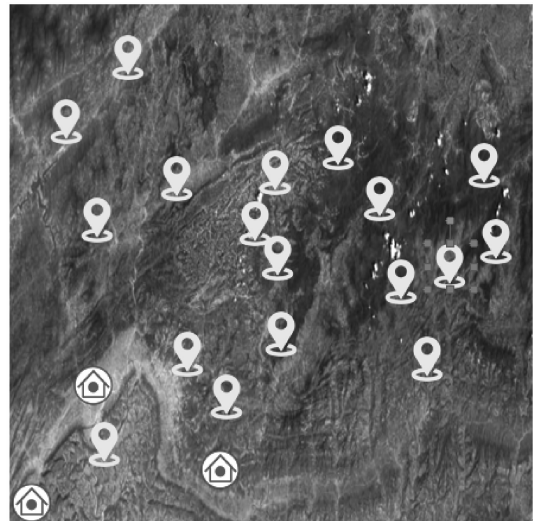
通过算法 1 中的两层 for 循环可知其时间复杂度为 $O(H_i n_t)$, 由于算法 1 内嵌到算法 2 中, 且算法 2 需对 n_u 个无人机执行的任务序列进行优化, 所以算法 2 的时间复杂度为 $O(\sum_{i=1}^{n_u} H_i n_t C)$, 其中 C 为 HDPA 的迭代次数。

3 实验分析

3.1 仿真环境及数据设定

实验采用 Intel (R) Core (TM) i5-8265U CPU @ 1.6 GHz 1.8 GHz 处理器, 8 G 运行内存, 500 G 硬盘, Matlab R2017b 编程软件实现。

为验证本文算法的有效性, 设计如下实例进行仿真实验。设任务区域为 800 km × 500 km 的矩形, 其卫星图如图 2 所示。将矩形区域进行坐



注: 图中  表示无人机基地,  表示灾区

图 2 任务区域地形图

Fig. 2 Topographic map of the task area

标化,把无人机基地及灾区中心视为坐标点,如图3所示。灾区分为平原、山地和森林3种地形,在平原中 $\zeta_1 = 1$,实际探测半径与原始探测半径同为7 km;在山地中 $\zeta_2 = 0.85$,实际探测半径为6 km;在森林中 $\zeta_3 = 0.71$,实际探测半径为5 km。无人机参数信息、任务属性与障碍物信息如表2、表3所示。

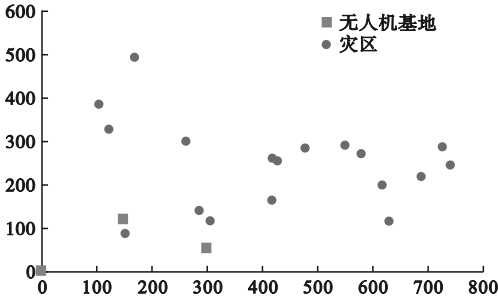


图3 无人机基地与灾区坐标图

Fig.3 Coordinate graph of UAV base and disaster area

表2 无人机参数信息

Table 2 UAV parameters information

基地编号	无人机	无人机速度 /(km·h ⁻¹)	续航时间 /h
q_1	u_1	150	32
q_1	u_2	200	30
q_1	u_3	300	28
q_2	u_4	150	32
q_2	u_5	200	30
q_2	u_6	300	28
q_3	u_7	150	32
q_3	u_8	200	30
q_3	u_9	300	28

表3 任务属性与障碍物信息

Table 3 Task property and obstacle information

灾区 m_j	灾区坐标	灾区长度 L/km	灾区宽度 W/km	障碍物半径 R_k/km	灾区地形
m_1	(549,292)	43	23	0	平原
m_2	(120,329)	42	32	10	山地
m_3	(169,496)	36	23	0	森林
m_4	(418,262)	46	40	0	平原
m_5	(627,117)	38	20	0	山地
m_6	(741,246)	42	25	0	森林
m_7	(261,302)	38	35	0	平原
m_8	(725,288)	44	31	10	山地
m_9	(152,87)	44	38	0	森林
m_{10}	(579,272)	47	27	0	平原
m_{11}	(477,284)	46	37	0	山地
m_{12}	(305,116)	42	21	0	森林
m_{13}	(427,255)	32	29	0	平原
m_{14}	(617,198)	40	22	0	山地
m_{15}	(416,164)	43	35	10	森林
m_{16}	(687,219)	43	32	0	平原
m_{17}	(104,386)	33	27	0	山地
m_{18}	(284,141)	48	24	0	森林

3.2 实验结果

应用上述实验数据,采用 HDPA 算法对问题进行求解,得到无人机任务分配结果,如表 4 所示。

表 4 无人机任务分配

Table 4 Task assignment of UAV

无人机	任务集	执行任务时间/h	无人机	任务集	执行任务时间/h
u_1	m_4	22.52	u_2	m_7	17.83
u_3	m_2, m_3	18.72	u_4	m_9, m_{11}	23.66
u_5	m_8, m_{15}	25.14	u_6	m_6, m_{14}, m_{17}	25.73
u_7	m_1, m_{13}	28.32	u_8	m_{10}, m_{12}, m_{18}	28.81
u_9	m_5, m_{16}	21.66			

根据表 4 知 18 项任务均已得到无人机分配,无人机执行任务总花费时间为 212.37 h。

图 4 为目标函数的迭代曲线图,从图 4 可以看出 HDPA 算法经 3 次迭代便可收敛,其收敛速度较快。

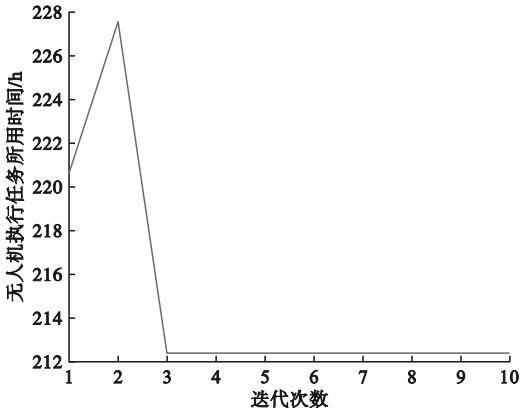


图 4 目标函数迭代曲线图

Fig. 4 Objective function iteration curve

3.3 实验对比

为验证算法的有效性,分别在 $n_u = 9, n_t = 18$ 实验规模下和 $n_u = 27, n_t = 55$ 实验规模下,采用传统的拍卖算法、遗传算法、海洋捕食者算法 (marine predators algorithm, MPA) 和 HDPA 对问题求解并进行对比分析。为增强实验说服力,将无人机参数信息进行相同设置,即无人机续航时间为 32、30、28 h,巡航速度为 150、200、300 km/h,并对算法独立运行 10 次,最终结果取其平均值。

在 $n_u = 9, n_t = 18$ 实验规模下算法对比结果如表 5、图 5 所示。

表 5 $n_u = 9, n_t = 18$ 无人机执行任务时间

Table 5 $n_u = 9, n_t = 18$ UAV task execution time

无人机	无人机执行任务集 J_i 花费时间/h			
	HDPA	拍卖算法	遗传算法	MAP
u_1	22.52	21.69	30.84	29.87
u_2	17.83	28.72	20.87	29.29
u_3	18.72	19.23	27.90	21.99
u_4	23.66	28.20	16.80	10.28
u_5	25.14	29.75	28.47	29.15
u_6	25.73	24.23	25.48	23.19
u_7	28.32	27.30	14.60	31.06
u_8	28.81	25.40	29.40	18.94
u_9	21.66	15.51	27.80	23.98

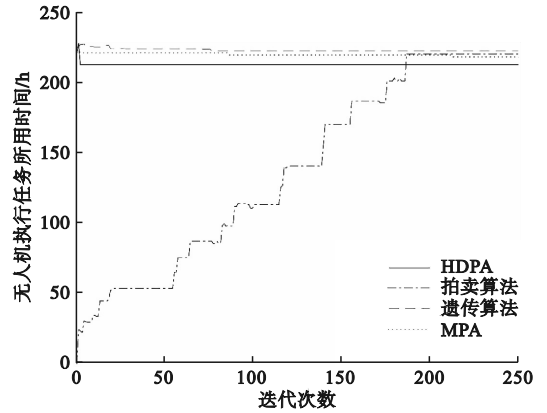


图 5 $n_u = 9, n_t = 18$ 规模下迭代对比图

Fig. 5 Iterative comparison chart under $n_u = 9, n_t = 18$ scale

由表 5 可知,采用 HDPA 算法对无人机侦察任务进行分配可以提高时间的利用率,相比拍卖算法总用时提高 3.5%,相比遗传算法提高 4.4%,相比 MPA 提高 2.5%。此方案充分考虑到大多数无人机对于不同任务的需求,使各无人机分配到较优的任务。由图 5 知,遗传算法达到较优解时的迭代次数比拍卖算法少,但所求的解差于拍卖算法,MPA 达到收敛代数多于遗传算法但少于拍卖算法,而 HDPA 算法仅经过 3 次迭代就能达到稳定值,且求得的解优于拍卖算法、遗传算法与 MPA。

在 $n_u = 27, n_t = 55$ 实验规模下算法对比结果如表 6、图 6 所示。

由表 6 可知,采用 HDPA 算法求得分配方案总用时为 621.14 h,相比于拍卖算法、遗传算法和 MPA 分别提高了 3.4%、6.8% 和 7.0%。由图 6 知,拍卖算法、遗传算法、MPA 经过多次迭代达到

稳定值,而 HDPA 仅经过 3 次迭代便能达到稳定值,其迭代次数有较大提升。

表 6 $n_u = 27, n_t = 55$ 无人机执行任务时间
Table 6 $n_u = 27, n_t = 55$ UAV task execution time

无人机	无人机执行任务集花费时间/h				无人机	无人机执行任务集花费时间/h			
	HDPA	拍卖算法	遗传算法	MPA		HDPA	拍卖算法	遗传算法	MPA
u_1	22.19	24.05	26.66	13.46	u_{15}	22.37	16.34	21.28	27.90
u_2	25.88	26.67	22.71	28.48	u_{16}	12.70	27.66	31.61	30.70
u_3	24.39	20.61	26.69	26.95	u_{17}	26.99	21.56	29.78	11.91
u_4	20.28	28.70	26.45	16.18	u_{18}	20.15	16.96	25.80	27.68
u_5	26.24	19.39	28.89	26.26	u_{19}	23.15	31.52	14.60	28.81
u_6	23.48	24.81	24.31	20.84	u_{20}	23.05	18.33	29.10	25.80
u_7	20.21	29.30	23.73	15.10	u_{21}	19.25	17.91	25.31	24.29
u_8	25.65	28.26	25.95	17.84	u_{22}	23.49	22.84	26.31	31.99
u_9	24.54	16.55	21.06	25.37	u_{23}	25.59	20.79	28.41	25.09
u_{10}	21.52	26.51	27.42	30.17	u_{24}	21.36	28.98	27.76	23.23
u_{11}	22.16	30.48	22.96	28.31	u_{25}	28.20	29.29	9.78	27.91
u_{12}	19.65	23.48	23.41	26.07	u_{26}	25.22	16.06	26.65	28.98
u_{13}	24.00	29.32	31.95	30.81	u_{27}	24.29	27.96	22.50	26.01
u_{14}	25.13	18.97	15.29	21.98					

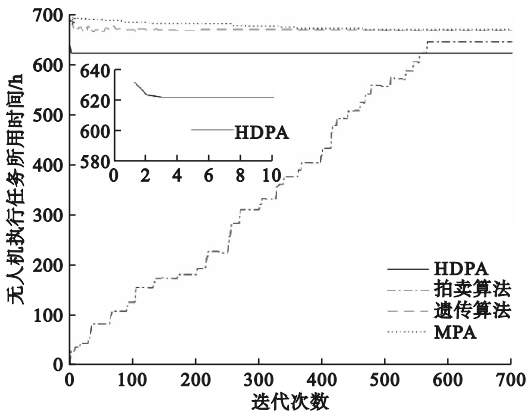


图 6 $n_u = 27, n_t = 55$ 规模下迭代对比图

Fig. 6 Iterative comparison chart under $n_u = 27, n_t = 55$ scale

为进一步对比算法,在不同规模下计算不同算法求解无人机执行任务的平均时间及方差。对比结果如表 7 所示。

由表 7 可以看出,在不同的实验规模下,HDPA 求得的无人机侦察任务分配方案平均耗时均优于其他算法,且相比拍卖算法、遗传算法和 MPA 方差缩小了 48.5%、56.7%、62.9%,表明 HDPA 实现了各无人机负载均衡,且相比其他算法所求得分配方案有较大提升。因此,本文算法在求解多无人机灾后侦察任务分配问题时具有更高的效率。

表 7 不同规模无人机执行任务平均时间及方差

Table 7 The average time and variance of different scale UAV performing task

规模	指标	HDPA	拍卖算法	遗传算法	MPA
$n_u = 9,$	平均值	23.60	24.45	24.69	24.19
$n_t = 18$	方差	14.81	23.03	34.19	44.63
$n_u = 27,$	平均值	23.01	23.83	24.68	24.75
$n_t = 55$	方差	9.75	25.47	25.65	30.29
$n_u = 56,$	平均值	22.89	23.60	24.32	24.16
$n_t = 120$	方差	12.31	23.72	25.36	26.89

4 结束语

本文在灾后救援环境下针对多无人机侦察任务分配问题进行研究。考虑无人机续航时间、灾区地形以及是否遇到飞行障碍等因素,以无人机执行任务时间最小为目标函数建立多无人机侦察任务分配模型。设计了 HDPA 算法对模型进行求解。在不同的实验规模下进行仿真分析与传统的拍卖算法、遗传算法、MPA 进行对比。结果表明,采用 HDPA 算法求解多无人机灾后侦察任务分配问题是可行的,且相较于传统的拍卖算法、遗传算法、MPA 效率更高。本文在研究多无人机灾

后侦察任务分配问题时并未考虑不同任务之间的路径,未来在灾后救援背景下,进一步研究基于航路规划的多无人机任务分配问题。

参考文献(References):

- [1] 高凯,耿娜,张馨月,等.基于PSO的载荷受限的灾后救援任务分配问题研究[J].重庆师范大学学报(自然科学版),2021,38(4):10-20.
GAO K, GENG N, ZHANG X Y, et al. Solving the task allocation problem of load-constrained after disaster based on PSO algorithm[J]. Journal of Chongqing Normal University(Natural Science), 2021, 38(4): 10-20. (in Chinese)
- [2] 张祥银,夏爽,张天.基于自适应遗传学习粒子群算法的多无人机协同任务分配[J/OL].控制与决策,2022;1-9(2022-07-24)[2023-03-02].<https://link.cnki.net/doi/10.13195/j.kzyjc.2022.0240>.
ZHANG X Y, XIA S, ZHANG T. Adaptive genetic learning particle swarm optimization based cooperative task allocation for multi-UAVs[J/OL]. Control and Decision, 2022; 1-9 (2022-07-24) [2022-03-02]. <https://link.cnki.net/doi/10.13195/j.kzyjc.2022.0240>. (in Chinese)
- [3] 李松锐,张明,王蒙蒙,等.考虑低空运行环境求解无人机任务分配问题的研究[J].航空工程进展,2022,13(4):57-64.
LI S R, ZHANG M, WANG M M, et al. Research on UAV mission assignment considering low-altitude operating environment[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(4): 57-64. (in Chinese)
- [4] 张小孟,胡永江,李文广,等.基于改进人工蜂群算法的多无人机灭火任务规划[J].中国惯性技术学报,2020,28(4):528-536.
ZHANG X M, HU Y J, LI W G, et al. Multi-UAV fire fighting mission planning based on improved artificial bee colony algorithm[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2020, 28(4): 528-536. (in Chinese)
- [5] LIU H T, GE J Y, WANG Y A, et al. Multi-UAV optimal mission assignment and path planning for disaster rescue using adaptive genetic algorithm and improved artificial bee colony method[J]. Actuators, 2021, 11(1):4.
- [6] 刘典宏,马政伟.基于动态规划的海上编队侦察预警任务分配[J].舰船电子工程,2020,40(7):24-26,54.
LIU D H, MA Z W. Reconnaissance and early warning task allocation of naval fleet based on dynamic programming method[J]. Ship Electronic Engineering, 2020, 40(7): 24-26, 54. (in Chinese)
- [7] 李瑞阳,王智学,何红悦,等.基于列生成算法的无人机任务分配[J].指挥与控制学报,2019,5(2):147-152.
LI R Y, WANG Z X, HE H Y, et al. Mission assignment of unmanned aerial vehicles based on column generation algorithm[J]. Journal of Command and Control, 2019, 5(2): 147-152. (in Chinese)
- [8] 王树朋,徐旺,刘湘德,等.基于自适应遗传算法的多无人机协同任务分配[J].电子信息对抗技术,2021,36(1):59-64.
WANG S P, XU W, LIU X D, et al. Cooperative task assignment for multi-UAV based on adaptive genetic algorithm[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2021, 36(1): 59-64. (in Chinese)
- [9] WU X L, YIN Y N, XU L, et al. Multi-UAV task allocation based on improved genetic algorithm[J]. IEEE Access, 2021, 9:100369-100379.
- [10] ALHAQBANI A, KURDI H, YOUCEF-TOUMI K. Fish-inspired task allocation algorithm for multiple unmanned aerial vehicles in search and rescue missions[J]. Remote Sensing, 2020, 13(1):27.
- [11] 官华,袁朴玉.批处理机生产与成批配送的协调调度研究[J].沈阳理工大学学报,2013,32(3):66-69,90.
GONG H, YUAN P Y. Study on coordinated scheduling of batching production and batching delivery[J]. Journal of Shenyang Ligong University, 2013, 32(3): 66-69, 90. (in Chinese)
- [12] 王小明,陈庆新,毛宁.基于近似动态规划的模具项目调度[J].计算机集成制造系统,2020,26(6):1691-1701.
WANG X M, CHEN Q X, MAO N. Mold project scheduling based on approximate dynamic programming[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26(6): 1691-1701. (in Chinese)
- [13] 张玉敏,孙鹏凯,吉兴全,等.基于并行多维近似动态规划的综合能源系统动态经济调度[J].电力系统自动化,2023,47(4):60-68.
ZHANG Y M, SUN P K, JI X Q, et al. Dynamic economic dispatch for integrated energy system based on parallel multi-dimensional approximate dynamic programming[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(4): 60-68. (in Chinese)
- [14] AGARWAL A, PILEGGI L. Large scale multi-period optimal power flow with energy storage systems using differential dynamic programming[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(3):1750-1759.
- [15] 陆坚毅,杨超,肖来元,等.基于单亲遗传算法混合动态规划的电动汽车充电调度优化策略[J].计算机工程与科学,2015,37(5):967-973.
LU J Y, YANG C, XIAO L Y, et al. An optimal charging schedule strategy of electric vehicles based on partheno-genetic algorithm and dynamic programming[J]. Computer Engineering & Science, 2015, 37(5): 967-973. (in Chinese)
- [16] 许可,官华,秦新立,等.基于分布式拍卖算法的多无人机组任务分配[J].信息与控制,2018,47(3):341-346.
XU K, GONG H, QIN X L, et al. Multi-UAV task assignment for grouped tasks based on distribution auction algorithm[J]. Information and Control, 2018, 47(3): 341-346. (in Chinese)
- [17] 李鑫滨,郭力争,韩松.一种分布式异构多AUV任务分配鲁棒拍卖算法[J].北京航空航天大学学报,2022,48(5):736-746.
LI X B, GUO L Z, HAN S. A robust auction algorithm for distributed heterogeneous multi-AUV task assignment[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(5): 736-746. (in Chinese)
- [18] OTTE M, KUHLMAN M J, SOFGE D. Auctions for multi-robot task allocation in communication limited environments[J]. Autonomous Robots, 2020, 44(3):547-584.
- [19] BAI X S, FIELBAUM A, KRONMÜLLER M, et al. Group-based distributed auction algorithms for multi-robot task assignment[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2023, 20(2):1292-1303.
- [20] ZHANG Z S, LIU H A, WU G H. A dynamic task scheduling method for multiple UAVs based on contract net protocol[J]. Sensors, 2022, 22(12):4486.