

一种面向有人/无人直升机协同打击的地面目标任务分配方法



胡月¹, 丁萌¹, 姜欣言¹, 曹云峰², 禹科³, 张艳琳¹

1. 南京航空航天大学 民航学院, 江苏 南京 211106

2. 南京航空航天大学 航天学院, 江苏 南京 211106

3. 航空工业西安飞行自动控制研究所 飞行控制航空科技重点实验室 陕西 西安 710065

摘要: 针对有人/无人直升机协同打击地面目标任务分配问题, 依据有人/无人直升机协同集中式结构建立任务分配模型, 利用 Voronoi 图粗略估算航程, 并引入时敏特征函数和无人直升机最大航程限制作为任务分配模型的约束条件。采用模拟退火算法改进的粒子群算法(PSO), 实现对分配模型的解算。结果表明该算法合理, 具有良好的全局寻优性。

关键词: 有人/无人直升机编队; 协同任务分配; 粒子群; 模拟退火; 时敏目标

中图分类号: V275.1

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2019.10.010

无人直升机具有作战灵活、零伤亡和损失成本低的优点, 可代替有人机执行纵深、危险等高难度任务^[1], 且其与固定翼无人机相比, 起降场地小, 无须大规模、复杂的发射回收系统, 深受各国军方的青睐。此外, 在复杂战场中, 其具有在空中 360° 全方位机动的能力, 具有显著的军事价值及应用前景^[2]。受限于当前无人机的智能化程度, 在未来相当长时期内, 实现无人机群全自主协同作战难度较大, 有人机和无人机作战优势互补, 协同执行作战任务, 已发展成为当前国内外研究机构广泛关注的课题^[3]。

为此, 本文所研究的有人/无人直升机协同作战模式是指利用有人直升机作为指挥机, 直接通过无人直升机所携带的感知设备获取战场态势信息, 并进行任务分配。无人直升机执行有人直升机下达的指令, 避开敌防空火力威胁, 执行打击等任务。所以, 任务分配在这类模式的协同空战中具有基础性和全局性的影响^[4]。

无人机协同任务分配分为分布式方法和集中式方法两类^[5]。分布式求解方法包括市场调配算法、合同网算法、基于 MAS 方法等。分布式方法将问题分层递进求解, 即将复杂的大型任务分解, 模仿拍卖机制由无人机自主求解子问

题, 追求效率和整体收益最大。分布式方法计算灵活, 多架无人机并行处理大规模问题适合较复杂的目标分配问题的求解, 但是它往往对无人机的性能过度抽象, 对系统通信要求过高, 因此分配最优目标的误差较大^[6]。集中式求解方法注重将问题整体化, 转化为经典的组合优化模型, 如混合整数规划模型、车辆路线问题、旅行商问题等, 求解方法包括智能算法和确定性方法。确定性方法如动态规划方法、混合整数模型计算方法等。后者包括遗传算法、蛙跳算法、蚁群和粒子群算法等。集中式求解方法可以统一控制, 全局协调目标之间各种复杂的关系, 理论上能获得最优解, 但易出现局部最优问题^[7]。

本文针对有人/无人直升机编队打击时敏目标任务规划问题, 根据有人/无人机协同编队集中式架构, 先将无人直升机作战路径粗略简化到 Voronoi 图边^[8], 用 Dijkstra 算法估算单无人直升机作战的粗略路径代价, 结合时敏目标特征函数计算目标打击代价, 并引入直升机指定高度最大航程限制, 构建有人/无人直升机编队打击时敏目标任务分配计算模型。采用改进的粒子群优化方法进行仿真计算, 通过加入模拟退火结合的方法, 防止集中式方法易局部

收稿日期: 2019-07-26; 退修日期: 2019-09-10; 录用日期: 2019-10-03

基金项目: 航空科学基金(20170752008); 南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金(kfj20180702)

*通信作者. Tel.: 18851876085 E-mail: 244097161@qq.com

引用格式: Hu Yue, Ding Meng, Jiang Xinyan, et al. Ground target assignment of manned/unmanned helicopters for coordinated attack[J]. Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(10): 64-69. 胡月, 丁萌, 姜欣言, 等. 一种面向有人/无人直升机协同打击的地面目标任务分配方法[J]. 航空科学技术, 2019, 30(10): 64-69.

最优的缺陷。结果表明了提出的改进算法符合约束条件，并具有较强的全局寻优的能力。

1 有人/无人直升机编队任务规划系统

任务规划系统有软件系统、硬件配置和有人直升机控制台。软件系统主要负责任务规划系统的输入和输出、数据库、规划结果检验等。硬件配置包括规划台、任务推演子系统。每个有人直升机对1~4架无人直升机进行远程监视控制和管理。

规划台负责任务离线决策规划。任务推演系统采用交互仿真对规划出的任务进行仿真推演，便于指挥人员了解和评估计划效能。图1为有人/无人机协同作战编队任务规划结构图^[9]。

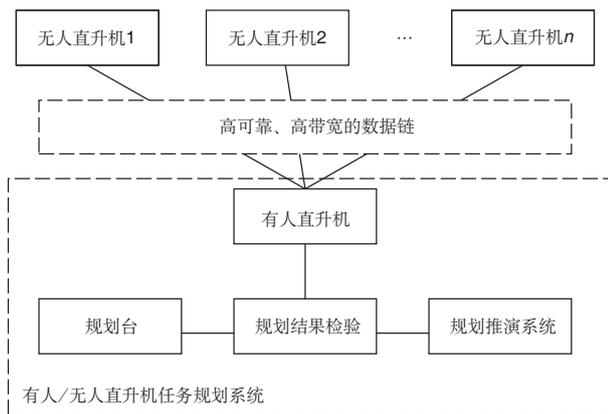


图1 有人/无人机协同作战编队任务规划结构图

Fig.1 Manned/unmanned helicopter cooperative combat formation task planning structure

任务分配是任务规划系统的核心，对任务规划系统具有基础性和全局性影响。有人/无人机协同作战任务分配流程为：有人直升机人机界面显示环境信息(战场地形、天气情况、威胁分布等参数)、无人机集合(我方无人机数量、位置、机动性能等参数、速度、载荷)、目标集合(敌方目标数量、属性、位置)等初始战场数据，有人直升机任务规划台规划技术自动进行任务分配，为指挥人员提供辅助决策，接着下发各无人机任务指令，无人直升机接收到指令之后立即展开任务。在任务过程中，无人直升机通过机载传感器感知战场态势，并传递给有人直升机，有人直升机驾驶员持续进行监督，根据情况进行任务调整，并下发指令。在整个过程中，有人/无人机协调控制始终贯穿^[10]。

2 有人/无人直升机协同任务分配模型

设对地攻击编队包括1架有人直升机和 m 架无人直升机，共发现的任务目标数量为 n 。决策变量设计如下：

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{目标 } t_j \text{ 由 } v_i \text{ 执行} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad i = 1, 2, 3, \dots, m; j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

2.1 任务分配目标函数

目标函数包含两方面的因素，即目标的打击价值和前往目标的航迹路径代价。

(1) 目标价值函数：

$$u_1 = x_{ij} R_j \quad (2)$$

$$R_j(a_k) = f_{ij}(a_k) R_j(a_0) \quad (3)$$

式中： $R_j(a_k)$ 是 a_k 时刻目标 j 的固有价值， $R_j(a_0)$ 是目标 j 的初始价值。目标的初始价值由有人直升机按照作战意图事先规定， $f_{ij}(a_k)$ 是时敏特性函数(见图2)，表示 a_k 时刻 v_i 打击 t_j 的收益影响函数。 $f_{ij}(a_k)$ 有平稳型、单调增长/下降型、折线型和二次曲线型^[11]。依据实际战场情况，目标有一个打击最佳时刻，本文采用折线型的时敏特征函数。在时间段 $[0, a_{\text{most}}]$ 中，收益是单调增长的，在时间段 $[a_{\text{most}}, a_{\text{fin}}]$ 中，收益是单调减少的，表示为：

$$f_{ij}(a_k) = \begin{cases} \mu a_k, & a_k \in [0, a_{\text{most}}], \mu > 0, t_j \text{ 由 } v_i \text{ 执行} \\ \mu(a_k - a_{\text{most}}), & a_k \in [a_{\text{most}}, a_{\text{fin}}], \mu < 0, t_j \text{ 由 } v_i \text{ 执行} \end{cases} \quad (4)$$

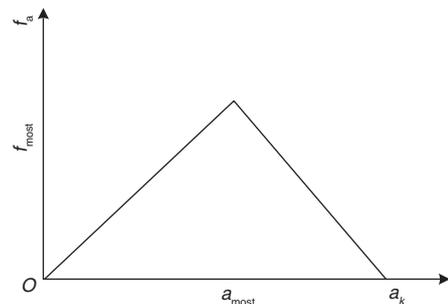


图2 折线型时敏特征函数

Fig.2 Polyline type time sensitive function

(2) 航迹代价函数

任务分配与航迹规划相互耦合，求解任务分配方案需要获取各无人直升机执行任务的航迹代价，而准确的航迹又依赖于任务分配的结果。无人直升机对目标执行任务的航程短，相应的飞行时间和油耗较小，则将该目标分配给这架无人直升机的可能性高。本文利用Voronoi图法来预估无人直升机到目标之间的粗略航程。

对于一个给定的无人直升机对地攻击任务的想定，Voronoi图如图3所示。

图3中威胁源的个数为 S_n ，从任务想定中的威胁源位置

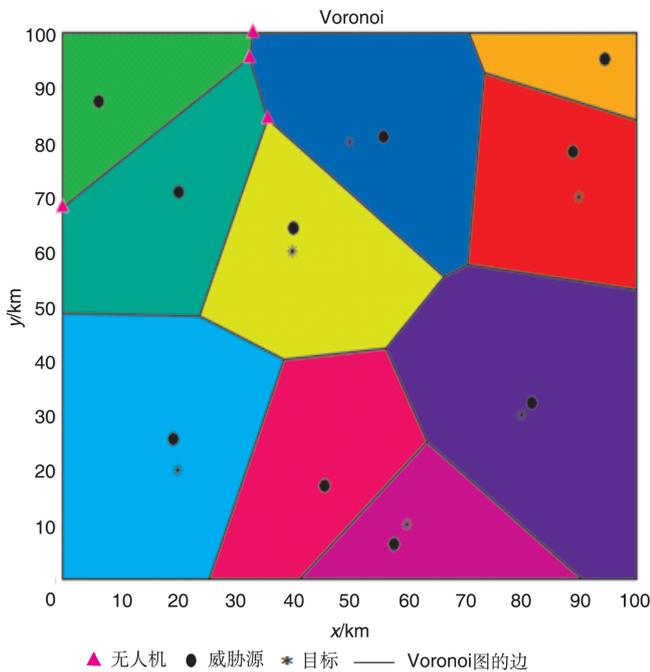


图3 威胁分布的Voronoi图

Fig.3 Vororoi diagram of threat distribution

出发,设定一个规划区域,用Voronoi图将该区域分为 S_n 个子区域,每个子区域包含一个威胁源,无人直升机沿着Voronoi图区域边界线飞行时候受到的威胁最小。航迹点之间的距离,用Dijkstra算法求得无人机与目标之间的最短航迹。

$$u_2 = \sum_{n=1}^{n_p} D(P_n) \quad (5)$$

式中: P_n 组成了Voronoi图生成的无人直升机到目标的航迹通过Dijkstra计算得出的粗略最优航迹 P 。 n_p 是组成 P 的航迹段的数目,满足:

$$P = \sum_{n=1}^{n_p} P_n \quad (6)$$

若一个目标分配方案表示为集合 $R = \{R_1, R_2, R_3, \dots, R_i, \dots, R_{NV}\}$,其中 $R_i = \{T_1^i, T_2^i, \dots, T_{N_i}^i\}$,表示无人直升机 i 按照次序攻击第 k 个打击的目标, T_k^i 为第 k 个打击目标,无人直升机 i 的目标代价为 J_i :

$$C_{UT}(U_i, T_j) = \alpha_1 u_1 - \alpha_2 u_2, \text{其中 } \alpha_1 + \alpha_2 = 1 \quad (7)$$

$$J_i = \sum_{k=1}^{N_i} C_{UT}(U_i, T_k^i) \quad (8)$$

式(8)为单架无人机的代价,问题目的是使所有无人机代价加权最小。即编队集群无人机目标函数为:

$$F = \operatorname{argmin} \sum_{i=1}^{NV} J_i \quad (9)$$

2.2 任务分配约束条件

(1) 无人直升机任务约束

对任务分配进行均匀约束,以提高任务的执行效率。

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^m S_{ij} \leq n_{\max} \\ \sum_{j=1}^n S_{ij} \leq m_{\max} \end{cases} \quad (10)$$

式中: m_{\max} 为给目标 t_j 最多分配的无人直升机数量, n_{\max} 为给无人直升机 V_i 分配的最多目标数。

(2) 单无人直升机最大航程

依据直升机动力学方程,直升机的最大航程与直升机动力参数有关。

$$L \leq L_{\max} \quad (11)$$

$$L_{\max} = \frac{\bar{\zeta} G_f}{C_e (\bar{N}_r / V)_{\min}} \quad (12)$$

式中: L_{\max} 是单架无人直升机最大航程, ζ 是功率利用系数, G_f 为燃油重量, C_e 为耗油率, N_r 为旋翼需用功率, V 为无人直升机速度。

(3) 打击目标协同不重复

$$\bigcup_{i=1}^{N_i} \theta_i = T \quad (13)$$

$$\theta_i \cap \theta_j = \emptyset \quad (14)$$

式中: θ_i 和 θ_j 是第 i 架与第 j 架无人直升机分配到的目标集合。

3 基于粒子群和模拟退火结合的分配算法

粒子群算法是群体智能算法的一种。原理如下:随机生成粒子群,每个粒子代表了函数的一个解,粒子会依据个体最优位置和群体最优位置更新当前的速度、位置,经过多次迭代寻优向问题最优解靠近。算法运行速度较快,缺点是搜索精度不高,易陷入早熟,局部最优、后期收敛较慢。

模拟退火算法从固体物质的退火过程中受到启发。给定初始温度,随温度下降,产生新的状态,以某一概率接受或弃除新状态,最终固体内粒子趋于有序,达到平衡。

模拟退火算法以一定概率暂时接受较差解,但标准粒子群算法中,即便粒子下一位置的函数值不更优,粒子依旧移动到该位置,这样粒子往往跳出最优解附近邻域。两算法结合能在一定程度上防止陷入局部最优,同时提高了搜索精度。

改进的粒子群算法流程如下^[12]:

(1) 设置种群中粒子的初始位置和初始速度,设置粒子数,粒子数 $N=20$ 。

(2) 计算各粒子的适应度,将当前各粒子 p_i 的位置和适应度记录在个体极值 p_i 中,将种群中适应度最优粒子的位置和适应度记录在种群最优值 p_g 中。

(3) 设定初始温度为:

$$t_0 = f(p_g) / \ln 5 \quad (15)$$

(4) 依照模拟退火程序,计算粒子接受概率,即当前各粒子替换种群最优值的概率:

$$TH(p_i) = \frac{e^{-(f(p_i) - f(p_g)) / t}}{\sum_{i=1}^N e^{-(f(p_i) - f(p_g)) / t}} \quad (16)$$

(5) 根据式(17)、式(18)更新各粒子的位置和速度:

$$v_i(t+1) = v_i(t) + c_1 \times \text{rand} \times [p_i - x_i(t)] + c_2 \times \text{rand} \times [p_g - x_i(t)] \quad (17)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_{i(t+1)} \quad (18)$$

$$c = c_1 + c_2 \quad (19)$$

(6) 更新各粒子的个体极值 p_i 和种群极值 p_g 。

(7) 模拟退火的退温,设定:

$$t_{k+1} = \lambda t_k \quad (20)$$

(8) 结束判定。设置最大迭代次数为200。符合条件,则搜索过程结束,输出最优结果。否则转到步骤(4)。

模拟退火改进的粒子群优化算法流程如图4所示。

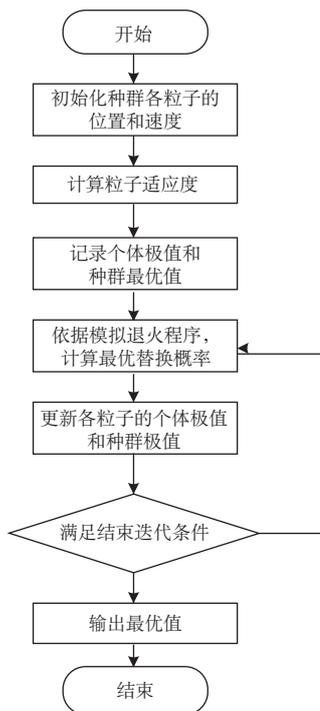


图4 模拟退火改进的粒子群优化算法流程图

Fig.4 Flow chart of improved PSO based on SA

4 仿真分析

假设在某次空战对抗中,任务想定在100km×100km的规划空间中,我机编队由一架有人直升机与4架无人直升机组成,协同打击6个任务目标。另地图中存在10个威胁源。功率利用系数 ζ 为95%,燃油重量(质量) G_f 为2.7,耗油率 C_e 为0.8,飞行高度为6km,打击范围为25km,打击时间为0.1h,无人直升机初始位置和目標位置见表1、表2。

表1 无人机初始位置

Table 1 Unmanned helicopter initial position

参数	无人机1	无人机2	无人机3	无人机4
x	35.7	0	33.15	32.54
y	84.24	68.03	100	95.36

表2 目标初始位置

Table 2 Target initial position

参数	目标1	目标2	目标3	目标4	目标5	目标6
x	50	60	80	40	20	90
y	80	10	30	60	20	70

算法参数设定为:初始种群个数为20,最大迭代次数为200,自我学习因子 C_1 为2,群体学习因子为 C_2 为2。经过混合算法的任务分配后得到的结果如图5所示。

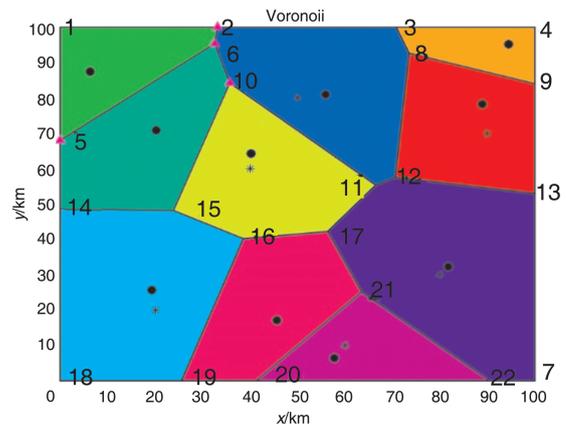


图5 任务分配结果示意图

Fig.5 Schematic diagram of task assignment results

每个目标均由相应的无人直升机去执行,且无人直升机分配目标不重复,达到了任务载荷平衡的要求(见表3)。航迹可飞,且单架无人直升机均未超过最大航程限制200.39,混合算法符合要求。

比较混合算法和粒子群算法的平均目标函数曲线,混合算法,随着迭代次数增多,种群内目标函数平均值稳定在

表3 任务分配表
Table 3 Task allocation table

无人机	目标序列(Voronoi路径)	单架无人机航迹代价
无人机1	目标6(Voronoi路径为10-11-12);目标3(Voronoi路径为12-11-17-21)	88.29
无人机2	目标5(Voronoi路径为5-14-18-19);目标2(Voronoi路径为19-20)	109.98
无人机3	目标4(Voronoi路径为2-6-10)	12.39
无人机4	目标1(Voronoi路径为6-6)	1.55
总代价:212.2107,总收益:191.9338,目标函数值:10.1385		

10.14。而粒子群算法,随着迭代次数增多,种群内目标函数平均值稳定在12.22。可以看出混合算法所有种群都达到了最优,而粒子群算法中,最后有的个体陷入了局部最优(见图6)。故提出的混合算法可较好地避免集中式任务分配方法易陷入局部最优的缺点。

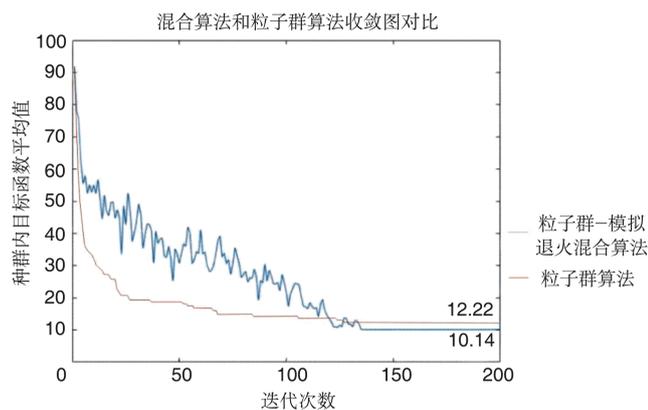


图6 粒子群-模拟退火混合算法和粒子群算法收敛图

Fig.6 PSO-SA algorithm convergence graph and PSO algorithm convergence graph

5 结论

通过分析,可以得到以下结论:

(1)协同任务分配是有人/无人机编队协同作战的关键技术之一,协同作战的成败很大程度上取决于任务分配的合理性。

(2)本文通过分析有人/无人直升机编队的作战过程,建立了编队系统的总体结构;引入Voronoi图评估航迹代价,以任务收益最大为评估指标建立了有人/无人直升机编队打击目标的任务分配模型;最后提出混合模拟退火算法的改进粒子群算法对任务分配模型进行求解,以抑制模拟退火算法计算时间过长、粒子群算法收敛精度较慢且易陷入局部振荡等缺点。

(3)仿真结果表明,本文所提算法能够很好地满足要求,合理有效。

AST

参考文献

- [1] 陈黎. 军用无人机技术的发展现状及未来趋势[J]. 航空科学技术, 2013(02):11-14.
Chen Li. Development and trend of military UAV technology [J]. Aeronautical Science & Technology, 2013(02): 11-14. (in Chinese)
- [2] 尹欣繁,张代兵,张纪阳,等. 微型无人直升机发展现状及关键技术[J]. 飞航导弹, 2018(05):33-37.
Yin Xinfan, Zhang Daibing, Zhang Jiyang, et, al. Development status and key technologies of miniature unmanned helicopters [J]. Aerodynamic Missile Journal, 2018(05):33-37. (in Chinese)
- [3] 钟赞,张杰勇,邓长来. 有人/无人机协同作战问题[J]. 指挥信息系统与技术, 2017,8(04):19-25.
Zhong Bin, Zhang Jieyong, Deng Changlai. Cooperative engagement problems about manned/unmanned aerial vehicles [J]. Command Information System and Technology, 2017, 8 (04):19-25. (in Chinese)
- [4] 樊洁茹,李东光. 有人机/无人机协同作战研究现状及关键技术浅析[J]. 无人系统技术, 2019,2(01):39-47.
Fan Jieru, Li Dongguang. Overview of MAV/UAV collaborative combat and its key technologies[J]. Unmanned Systems Technology, 2019,2(01):39-47. (in Chinese)
- [5] Meng W, He Z R, Su R, et al, Decentralized multi-UAV flight autonomy for moving convoys search and track[J]. IEEE Trans Contr Syst Technol, 2017,25:1480-1487.
- [6] 杨润洲. UCAV对地攻击协同任务分配与航迹规划方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2016.
Yang Runzhou. Research on cooperative task allocation and path planning method of UCAV air-to-ground attacking[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016. (in Chinese)
- [7] 陈侠,乔艳芝. 多无人机协同打击任务分配方法[J]. 电光与控制, 2018,25(06):20-24.
Chen Xia, Qiao Yanzhi. Task allocation method for multi-UAV cooperative combat[J]. Electronics Optics & Control, 2018,25 (06):20-24. (in Chinese)
- [8] 董世友,龙国庆. 攻击型无人机航路规划系统分析[J]. 航空科

- 学技术,2004(06):33-35.
- Dong Shiyu, Long Guoqing. The analysis of the attack UAV's path planning system[J]. Aeronautical Science & Technology, 2004(06):33-35. (in Chinese)
- [9] 陈昶昊, 陈学江, 胡小平, 等. 无人直升机任务规划系统研究与实践[J]. 导航与控制, 2016, 15(03):1-8.
- Chen Changhao, Chen Xuejiang, Hu Xiaoping, et al. Research and practice on mission planning system of pilotless helicopter [J]. Navigation and Control, 2016, 15(03):1-8. (in Chinese)
- [10] 王宇琦, 张安, 毕文豪. 有人/无人机编队打击时敏目标任务分配[J]. 电光与控制, 2018, 25(08):7-10.
- Wang Yuqi, Zhang An, Bi Wenhao. Mission planning of manned/unmanned aerial vehicle formation for time critical target attacking[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(08):7-10. (in Chinese)
- [11] 孟波波, 高晓光, 王云辉. 无人作战飞机打击时敏目标任务分配[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(26):5-7.
- Meng Bobo, Gao Xiaoguang, Wang Yunhui. Study on mission planning for UCAVs attacking time constrained targets[J]. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(26):5-7. (in Chinese)
- [12] 张瑞成, 何丹阳. 基于模拟退火粒子群算法的最大风能跟踪方法[J]. 工业控制计算机, 2018, 31(10):40-41.
- Zhang Ruicheng, He Danyang. Maximum Power point tracking algorithm based on simulated annealing particle swarm optimization for wind power system[J]. Industrial Control Computer, 2018, 31(10):40-41. (in Chinese)
- (责任编辑 王昕)
- 作者简介**
胡月(1995-)女, 硕士。主要研究方向: 无人机协同控制。
Tel: 18851876085 E-mail: 244097161@qq.com

Ground Target Assignment of Manned/Unmanned Helicopters for Coordinated Attack

Hu Yue¹, Ding Meng¹, Jiang Xinyan¹, Cao Yunfeng², Yu Ke³, Zhang Yanlin¹

1. School of Civil aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China

2. School of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

3. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Aircraft Control, AVIC Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710065, China

Abstract: In order to solve the problem of task assignment for coordinated attack of manned/unmanned helicopters, this paper firstly establishes a task allocation model based on the coordinated structure of manned/unmanned helicopters, and then uses the Vonoroi diagram to roughly estimate the voyages of manned/unmanned helicopters. Moreover, the time-sensitive characteristic function and the maximum range limit of the unmanned helicopter are introduced as constraints of task assignment model. Lastly, the Particle Swarm Optimization(PSO) algorithm improved by simulated annealing algorithm is used to solve the model of task assignment. The simulative calculation results show that the proposal algorithm is reasonable and has excellent global optimization.

Key Words: manned/unmanned helicopter formation; collaborative task assignment; PSO; SA; time-critical target

Received: 2019-07-26; **Revised:** 2019-09-10; **Accepted:** 2019-10-03

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China(20170752008); The Foundation of Graduate Innovation Center of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics(kfjj20180702)

*Corresponding author. Tel. : 18851876085 E-mail: 244097161@qq.com