

MP-GWO 算法在多 UCAV 协同航迹规划中的应用

周 瑞,黄长强[✉],魏政磊,赵克新

(空军工程大学航空航天工程学院,西安,710038)

摘要 多无人作战飞机(UCAV)协同航迹规划是多 UCAV 协同作战的重要组成部分,对协同作战的结果有很多的指引作用。多 UCAV 协同航迹规划属于多峰值优化函数求解问题,其求解稳定性比较差。为解决多 UCAV 协同航迹规划求解稳定性较差的问题,首先在对影响多机协同约束条件研究分析的基础上,结合单机航迹规划求解中的核心指标,建立了多 UCAV 协同航迹优化函数;其次利用多种群灰狼算法(MP-GWO)在求解多峰值优化函数问题上比较稳定的特点进行求解,最后将 MP-GWO 分别与 GWO 算法、EA 算法和在新增威胁环境下的求解结果相比较来验证算法的优越可行性。仿真结果表明,MP-GWO 算法对多峰值问题具有求解稳定性,能够适应突发威胁环境下的求解。

关键词 多无人作战飞机;协同航迹规划;多种群灰狼算法;多峰值优化函数;

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2017.05.005

中图分类号 V279 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2017)05-0024-06

Application of MP-GWO Algorithm in Multiple Cooperating UCAV Path Planning

ZHOU Rui, HUANG Changqiang[✉], WEI Zhenglei, ZHAO Kexin

(Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: Multi UCAV Cooperative Path Planning is an important part of multi UCAV cooperative combat, and the results of collaborative operations have many guiding roles. Multi UCAV cooperative path planning belongs to multi peak function optimization problem, and the solution stability is relatively poor. In order to solve this problem, first, on the basis of analysis under condition of multi Aircraft Cooperative limitations, and combined with the core index of single track planning, the paper builds up multi UCAV cooperative route optimization function. Then, the paper utilizes the characteristics of stability of multi swarm algorithm with the gray wolf Lee(MP-GWO) in solving multi peak optimization problems on the function to solve it. Finally, the paper compares the MP-GWO with the GWO algorithm, EA algorithm and solution in the new threat environment superior to verify the feasibility of the algorithm. The simulation results show that the MP-GWO algorithm has the stability of the multi peak problem in solving environment, and adapts to unexpected threat circumstances.

Key words: multiple UCAV; cooperative path planning; MP-GWO; multiple peak optimization function

收稿日期: 2017-05-09

基金项目: 国家自然科学基金(61601505);航空科学基金(20155196022);陕西省自然科学基金(2016JQ6050)

作者简介: 周 瑞(1992—),男,安徽蚌埠人,硕士生,主要从事无人机航迹规划研究. E-mail:17791706338@163.com

作者简介: 黄长强(1961—),男,江苏南通人,教授,博士生导师,主要从事无人飞行器作战系统与技术研究. E-mail:kgdhecq001@126.com

引用格式: 周瑞,黄长强,魏政磊,等. MP-GWO 算法在多 UCAV 协同航迹规划中的应用[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2017, 18(5): 24-29. ZHOU Rui, HUANG Changqiang, WEI Zhenglei, et al. Application of MP-GWO Algorithm in Multiple Cooperating UCAV Path Planning [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2017, 18(5): 24-29.

在高新技术军事斗争的强烈需求和UCAV自主空战理论快速发展的牵引下,世界各军事强国已将目光都聚焦于多UCAV协同作战技术的研究上。多UCAV协同航迹规划是多UCAV协同作战的子集,是多UCAV协同作战的关键环节^[1]。

近几年,国内外针对UCAV航迹规划问题开展了广泛的研究。文献[2]针对多UCAV协同航迹规划的时间协同问题,采用一种分解策略,通过连续局部最优的博弈法得到接近理想最优值的解;文献[3]针对具有时间约束的多UCAV协同航迹规划,提出了利用增加或者减少航迹长度来对飞行时间进行控制的方法;文献[4]提出了稀疏A*算法以解决飞行器的航迹生成问题,通过对搜索空间进行离散化采样,缩小了问题求解的复杂度;文献[5]针对无人机航路规划,采用了改进的蚁群算法,设计了自适应状态转换规则和自适应信息激素更新规则,提高了无人机的作战效率和生存概率。目前对多UCAV协同航迹规划问题的求解过程中,采用的求解算法时常使函数陷入局部最优中,求解的稳定性较差。

1 协同航迹规划问题描述

设 $V = \{V_i, i = 1, 2, \dots, N_v\}$ 为执行任务的UCAV集合, $T = \{T_i, i = 1, 2, \dots, N_v\}$ 为与各UCAV相对应的目标所构成的集合, $M = \{M_j, j = 1, 2, \dots, N_M\}$ 为敌方威胁集合,任务区 E 为 N_r 行 N_c 列的栅格环境。对单个UCAV来说,从初始状态(起始点)到最终状态(目标点)是由一系列航迹点组成,按规则连接起始点至目标点之间的所有航迹点即得航迹。设 V_i 最大航程为 $L_{\max}^{(i)}$,最大转弯角为 $\theta_{\max}^{(i)}$,速度范围为 $[v_{\min}^{(i)}, v_{\max}^{(i)}]$,任务起点为 S_i ,目标点为 G_i ,航迹节点为 $P_{i-k} (k=1, 2, \dots, n-1)$,所以 V_i 的航迹可表示为 $S_i \xrightarrow{\Gamma(q)} P_{i-1} \dots P_{i-(n-1)} \xrightarrow{\Gamma(q)} G_i$,其中 $\Gamma(q)$ 表示约束条件,表示 q 航迹约束参数。

1.1 协同约束分析

协同约束是指为了保证航迹在满足单机航迹约束条件的同时,使整个UCAV编队中各个无人机能够顺利完成任务。

1.1.1 空间协同约束

空间协同约束又叫无碰撞约束^[6],要求UCAV之间的最小距离不小于最小安全飞行距离,即:

$$d_{i-j} \geq d_s \quad (1)$$

式中: d_{i-j} 为飞行过程中第 i 个UCAV与第 j 个UCAV的航迹点之间最小的距离; d_s 为UCAV之间最小安全飞行距离。

1.1.2 时间协同约束

文献[7~8]中对时间协同约束条件的定义方法的求解运算量比较大,不利于协同航迹规划的实时性。因此,文中采用步骤较少、计算量较少的一种方法,即设置了UCAV到达终点的指令时间和求解其到达目标终点的时间范围,通过判断二者的关系,来确定时间代价函数。

设UCAV到达目标终点的指令时间为 t_c ,通过指令时间约束保证UCAV在时间上协同;根据UCAV的速度范围与航迹长度可以求得UCAV到达目标终点的实际时间范围 $[t_{\min}^i, t_{\max}^i]$,则:

$$t_{\min}^i = \frac{L_i}{v_{\max}^i}, t_{\max}^i = \frac{L_i}{v_{\min}^i} \quad (2)$$

式中: v_{\max}^i 与 v_{\min}^i 分别为UCAV最大速度和最小速度; L_i 为第 i 个UCAV的航迹长度。

若 $t_{\min}^i \leq t_c \leq t_{\max}^i$,则第 i 个UCAV能按照规定的时间完成任务;否则不能完成任务,没有达到编队的协同性,需要对时间代价值进行计算,具体计算方法后面将会给出。

1.2 单机航迹评价函数

无人机航迹代价函数一般也可以作为航迹评价的指标函数,主要包括燃油代价、高度代价和威胁代价^[9-12]。航迹代价的计算采用如下的简化公式:

$$J = \sum_{i=1}^n (\omega_1 f_O(l_i) + \omega_2 f_H(h_i) + \omega_3 f_{T-i}) \quad (3)$$

式中: l_i 表示第 i 段航迹的长度; h_i 为第 i 段航迹的海拔高度; f_O 表示关于航迹长度的燃油代价函数; f_H 为关于航段高度的高度代价; f_{T-i} 为第 i 段航迹受到的威胁代价,其主要取决于UCAV是否处于威胁区域或在威胁区域的什么位置; ω_1 、 ω_2 和 ω_3 为权系数,且 $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1$ 。

1.3 多机协同航迹评价函数

多UCAV协同航迹评价函数主要在单机基础上结合多机在时域与空域上的协同,主要考虑时间和空间代价。因此,协同航迹评价函数的计算。公式如下:

$$J = \sum_{i=1}^m (\omega_1 f_{O-i} + \omega_2 f_{H-i} + \omega_3 f_{T-i} + \omega_4 f_{m-i} + \omega_5 f_{C-i}) \quad (4)$$

式中: m 为UCAV的数量; f_{O-i} 、 f_{H-i} 、 f_{T-i} 、 f_{m-i} 和 f_{C-i} 表示第 i 个UCAV的燃油、高度、威胁、时间和碰撞代价; ω_i 为各个代价的权重。

通过1.1.2节中时间协同约束的分析,时间代价可用式(5)表示:

$$f_{m-i} = \begin{cases} 0 & , t_{\min}^i \leq t_c \leq t_{\max}^i \\ |t_i - t_c| & , t_{\min}^i > t_c \text{ or } t_{\max}^i < t_c \end{cases} \quad (5)$$

式中: t_i 为第 i 个UCAV达到目标终点实际时间。

对于碰撞代价计算,以第 i 个UCAV为例,首先计算该UCAV在各个航迹点上当前时间与前 $i-1$ 个UCAV的距离,如果该距离小于最小安全飞行距离,则记1次碰撞,依次对整条航迹的所有航迹点进行碰撞计数,并求和得到该UCAV航迹的总碰撞次数。计算公式为:

$$f_{C-i} = \begin{cases} 1 & ;d_{i-j} < d_s \\ 0 & ;d_{i-j} \geq d_s \end{cases} \quad (6)$$

式中: $j \leq i-1$,指第 i 个UCAV与前 $i-1$ 比较。

2 GWO算法的改进设计

灰狼算法(GWO)在规划领域中得到了广泛应用,取得的结果比较好^[13-14]。现有的GWO算法相对简单,对于多峰值问题处理并不理想。为更好地解决在多机协同航迹目标规求解中不稳定的问题,在原有GWO算法的基础上,结合多种群思想^[15],设计了多种群GWO算法,即MP-GWO算法。

2.1 多指标条件下最小值聚类策略

在协同航迹规划中,首先得对UCAV的初始航迹种群进行聚类分析。多指标条件下最小值聚类策略主要思想是:①把多个指标分开考虑,分别对航迹种群进行航迹评价;②筛选子种群中好的基因,并将剩余的个体组成一个新预留种群,用来存储各个子种群好的个体。

2.2 多种群并行GWO算法

2.2.1 变长度编码方式

由于传统二进制编码方式无法准确对高维、多约束的协同航迹规划问题进行编码^[17],所以采用变长度编码方式来对其进行编码。用变长度编码方式的实值染色体来表示多架UCAV的协同航迹,减少了GWO算法的搜索运算量,提高了寻优效率。设编队有 M 架UCAV,则一条染色体中包含 $M+1$ 段基因,见图1。

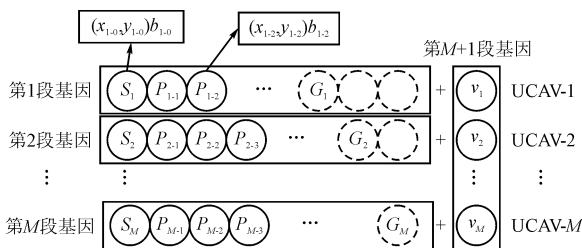


图1 协同航迹染色体编码方式

Fig. 1 Collaborative track chromosome encoding

图中,染色体中的前 M 段基因表示编队 M 架

UCAV的协同飞行航迹,第 i 条航迹包括起点 S_i 、航迹点 $P_{i-1} \cdots P_{i-n}$ 和目标终点 G_i ,基因段上的航迹点除了记录其空间坐标 (x_i, y_i) 外,还包括状态变量 b_i ,其中状态变量主要记录如下信息:①当前节点是否可行,也就是否满足协同航迹约束条件;②当前节点与下一个节点之间的连接是否可行。第 $M+1$ 段基因表示编队 M 个UCAV的飞行速度。

2.2.2 初始化与更新方法

1)种群初始化。利用随机均匀分布函数 U 生成灰狼种群 X :

$$X_{i,j} \sim U(lb_j, ub_j) \quad (7)$$

式中: $i \in [1, 2, \dots, N]$, $j \in [1, 2, \dots, D]$,搜索区间为 $[lb, ub]$ 。

2)种群搜索公式。通过式(8)和(9)的多次迭代进行种群搜索。

$$D = C \cdot X_p(t) - X(t) \quad (8)$$

$$X(t+1) = X_p(t) - A \cdot D \quad (9)$$

式中: D 为灰狼距猎物的方位; X_p 和 X 分别为猎物位置和灰狼位置向量; A 和 C 是随机生成的系数。

3)种群位置更新。根据种群搜索公式进行种群位置更新,得到最优解 α 、优解 β 和次优解 δ ,如式(12)、(13)和(14)。在新群体产生后,对种群中的元素进行边界控制,完成一次迭代。重复上述过程,直到满足循环终止条件,最后输出最优解。

$$\begin{cases} D_\alpha = C_1 \cdot X_\alpha - X \\ D_\beta = C_2 \cdot X_\beta - X \\ D_\delta = C_3 \cdot X_\delta - X \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} X_1 = X_\alpha - A_1 \cdot (D_\alpha) \\ X_2 = X_\beta - A_2 \cdot (D_\beta) \\ X_3 = X_\delta - A_3 \cdot (D_\delta) \end{cases} \quad (13)$$

$$X(t+1) = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3} \quad (14)$$

3 基于MP-GWO算法的协同航迹规划

3.1 建立适应度函数模型

多UCAV协同航迹规划的综合评价函数为MP-GWO算法中适应度函数,其实质变量是各个UCAV航迹点组成的协同航迹染色体。但在计算协同航迹评价函数时,由于与每个指标相关联的直接变量是不同的,因此需要将实质变量转化为直接变量。如图2,根据协同航迹评价与变量之间的关系可将适应度值函数 $J(p)$ 表示为:

$$J(p) = \min \sum_{i=1}^m (\omega_1 f_{O-i}(l) + \omega_2 f_{H-i}(h) +$$

$$\omega_3 f_{T-i}(p) + \omega_4 f_{m-i}(t) + \omega_5 f_{C-i}(X) \quad (15)$$

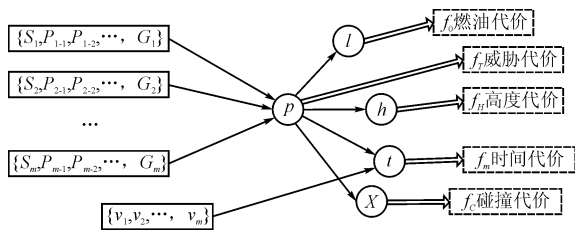


图2 协同航迹评价与变量之间的关系

Fig. 2 The relationship between the path evaluation and the variable

3.2 协同航迹规划步骤

Step1 初始化满足约束的灰狼种群,根据航迹初始化策略,随机生成 N_{agent} 个基于变长度编码的协同航迹染色体。

Step2 初始化 a , 初始化 p_α 、 p_β 和 p_δ 。

Step3 根据评价函数的指标,对所有协同航迹染色体进行聚类。

Step4 根据式(15),计算各个子种群的每个协同航迹染色体的适应度值。

Step5 比较各个子种群里染色体的适应度值与 p_α 、 p_β 和 p_δ 的适应度值,确定当前迭代期间的各个子种群的最优解 p_α 、次优解 p_β 和次次优解 p_δ 。

Step6 2 计算各子种群 3 个最优解的 a 、 A 和 C 。

Step7 根据跟新公式更新各个子种群内染色体的位置。

Step8 对位置更新后的协同航迹染色体进行约束处理。①舍弃染色体中不满足约束条件或者在威胁禁忌区的航迹点;②分段生成航迹片段,经过舍弃而剩下的航迹点可以作为用来分段的航迹点,以此生成航迹片段,最后生成整个协同航迹染色体;

Step9 合并所有子种群位置更新后经过处理的染色体,计算每个染色体的适应度值,与原来种群作比较,得到最优染色体,即最优解。

Step10 当迭代过程进行到预先给定的最大次数,或者最优解的适应度值不变时,则输出最有协同航迹染色体和最优值;否则转到 **Step3** 继续寻找。

4 仿真验证

4.1 仿真环境设置

实验假设 3 架 UCAV 对 3 个地面目标进行攻击,其中 3 架 UCAV 的起点坐标和 3 个目标坐标见表 1, UCAV 最大航迹总长度 L_{max} 为起始点和目标点之间直线距离的 1.5 倍,最小航迹段长度 $l_{\text{min}} = 2$ km,最低飞行高度 $H_{\text{min}} = 20$ m,飞行速度的范围为 $[0.3 Ma, 0.7 Ma]$,最大拐弯角 $\phi = 60^\circ$,最大爬升/

俯冲角 $\theta = 45^\circ$;UCAV 到达目标终点的指令到达时间 $t_c = 6\ 850$ s;各 UCAV 之间的安全距离 $d_s = 25$ km。威胁的参数具体设置如仿真图所示。协同航迹规划评价函数的燃油代价权重 ω_1 、高度代价 ω_2 、威胁代价 ω_3 、时间代价 ω_4 、碰撞代价 ω_5 分别为 0.05、0.05、0.1、0.7、0.1。(作战环境设置)

表 1 UCAV 和目标坐标

Tab. 1 The UCAV and target coordinates

无人机	UCAV1	UCAV2	UCAV3	Target1	Target2	Target3
坐标/km	(0,0)	(0,100)	(300,0)	(875,875)	(800,875)	(875,800)

MP-GWO 算法和 GWO 算法种群数大小设置为 60,迭代次数为 45 次,控制参数值的最大值 a_{max} 、最小值 a_{min} 分别取值为 2 和 0,惯性权重 $\omega = 0.8$;对于 MP-GWO 算法,由于本文协同航迹规划共有 5 个评价指标,所以设定子种群的数量为 $6^{[16]}$ 。对于 EA 算法,其算法参数设置与文献[18]相同,便于参考比较。本文采用 Matlab 2014a 仿真,运行环境为 Inter(R)Core(TM)i5-3470 处理器,3.46 G 内存。

4.2 实验结果分析

4.2.1 验证 MP-GWO 算法的有效性

设定实验运行次数为 30 次,仿真结果见图 3 和表 2。

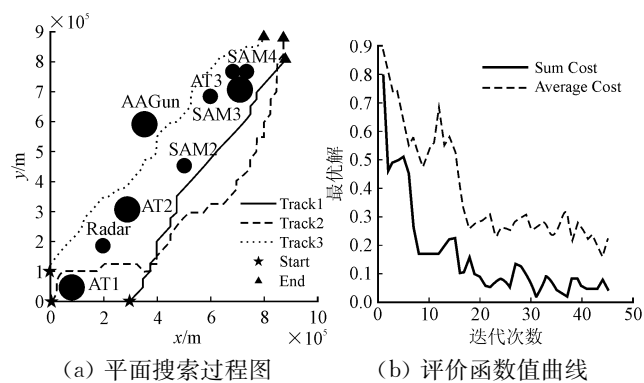


图3 仿真结果

Fig. 3 Simulation results

图 3(a) 表示基于 MP-GWO 算法的 3 架 UCAV 协同航迹规划在二维平面内的搜索过程图,图中蓝色区域表示气象威胁区域,红色区域分别表示雷达威胁区域、防空导弹威胁区域、防空炮威胁区域。由图可知,3 架 UCAV 都能够有效避开威胁区域,到达目标终点。图 3(b) 表示评价函数随着迭代次数增加的优化结果曲线。由图可以看出实验平均总代价值和种群平均代价值随迭代次数的增加而变小,最后趋于定值,验证了基于 MP-GWO 算法的协同航迹规划的有效性。表 2 各个 UCAV 在协同航迹规划中的时间、速度与碰撞仿真结果,从中可知规

划出的各个航迹的飞行时间与指令时间的误差均在1%以内,各UCAV之间没有碰撞。

表2 UCAV的仿真结果

Tab. 2 Simulation results of UCAV

仿真结果	UCAV-1	UCAV-2	UCAV-3
与指令时间差值/s	-25.975 4	8.437 1	19.990 3
时间相对误差/%	0.38	0.12	0.29
飞行速度/Ma	0.662 19	0.524 46	0.449 55
碰撞次数	0	0	0

4.2.2 验证 MP-GWO 算法的求解质量

将分别基于 MP-GWO、GWO 和 EA 算法三者的协同航迹规划仿真实验,就优化时间消耗、最优函数值以及达到最优的迭代次数 3 个方面进行比较分析。实验对每种算法的协同航迹规划运行 30 次,得到如下的仿真结果。

表 3 是不同规模的不同算法仿真结果对比。不同规模采用 MP-GWO 算法能在适当的迭代次数达到最优函数值,收敛速度比 EA 算法快,收敛精度比 GWO、EA 算法好,而 GWO 算法收敛速度快,但是容易陷入局部最优,达不到理想的结果;由于 MP-GWO 算法的改进步骤增加,导致优化时间消耗较高于 GWO 算法,但是仍好于 EA 算法。

表3 不同算法的仿真结果

Tab. 3 Simulation results based on different algorithms

算法	优化时间/s	最优函数值	最优代数
MP-GWO	85.6977	0.0196	31
GWO	80.7014	0.0514	25
EA	90.2683	0.0701	39

图 4 表示采用不同算法所得到的函数曲线,从图中可以看出,GWO 算法容易陷入局部最优,MP-GWO 算法比 GWO 算法优化精度好,比 EA 算法的精度和速度都好。

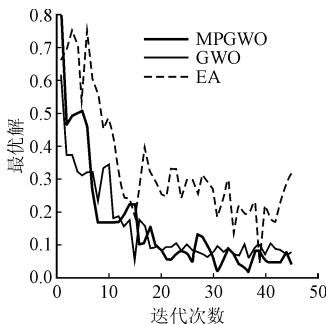


图4 不同算法的优化函数值

Fig. 4 The optimal function value of different algorithms

4.2.3 验证 MP-GWO 算法的求解稳定性

通过增加新威胁来模拟更加逼真的一种实战情况,验证 MP-GWO 算法在(动态)航迹规划问题上的求解稳定性。新增的威胁各项参数设置直接标记于仿真图上。仿真结果见图 5 和表 4。图 5(a)表示新威胁环境下的协同航迹规划在二维平面内的搜索过程。由图可知,当威胁数量增加时,UCAV 编队仍然可以搜索到代价小的航迹,尽量避开气象、雷达、AAGun 和 SAM 威胁区域。图 5(b)表示新威胁环境下的协同航迹规划评价函数值随迭代次数增加而变化的曲线,当威胁变化时,基于 MP-GWO 算法的协同航迹规划优化函数值随着迭代次数增加而逐渐减少,在 27 次迭代左右找到最小值,说明算法找到了最优或者近似最优的解。表 4 为新威胁环境下的各个 UCAV 时间、速度与碰撞仿真结果,各 UCAV 航迹时间误差均在 1%以内,各个 UCAV 之间无碰撞。

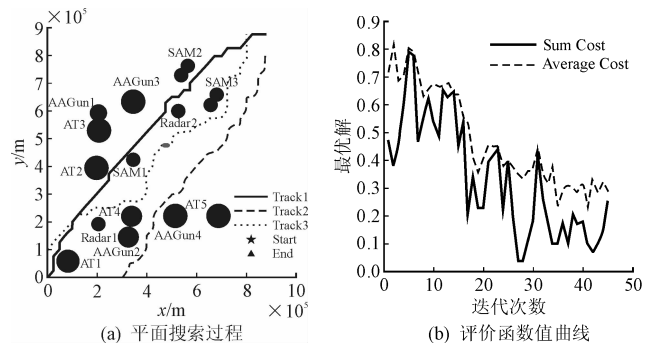


图5 新威胁环境下仿真结果

Fig. 5 The simulation results under the new threat environment

表4 新威胁环境下的UCAV仿真结果

Tab. 4 The UCAV simulation results of the new threat environment

仿真参数	UCAV-1	UCAV-2	UCAV-3
与指令时间差值/s	28.439 9	-11.180 5	20.720 4
时间相对误差/%	0.41	0.32	0.30
飞行速度/Ma	0.572 95	0.643 23	0.476 02
碰撞次数	0	0	0

5 结语

本文采用 MP-GWO 对多 UCAV 协同航迹规划问题中的多峰值优化函数的求解稳定性进行验证,实验证明了 MP-GWO 优化算法对解决多峰值优化函数问题具有一定优越性,能够适应对不同环境下的航迹进行求解。本文在影响多机协同因素方

面考虑到并不全面,下一步将进一步完善优化模型再以达到更贴近实战化。

参考文献(References):

- [1] 苏菲, 彭辉, 沈林成. 基于协进化多子群蚁群的多无人作战飞机协同航迹规划研究 [J]. 兵工学报, 2009, 30(11): 1562-1568.
SU F, PENG H, SHEN L C. Based on the Collaborative Flight Path Planning of Multiple Unmanned Combat Aircraft Based on the Co-evolution Multiple Subgroup [J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(11): 1562-1568. (in Chinese)
- [2] GOKHAM I, DUSAN M S, CLAIRE J T. Decentralized Optimization with Application to Multiple Aircraft Coordination [C]//In the Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control, Las Vegas, NV, 2002.
- [3] MCLAIN T, BEARD R. Cooperative Rendezvous of Multiple Unmanned Air Vehicles [C]//Proceedings of Guidance, Navigation and Control Conference, AIAA, Denver, CO, 2000, 4369: 2309-2314.
- [4] SZCZERBA R J, GALKOWSKI P, GLICKTEIN I S. Robust Algorithm for Real-time Route Planning [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2001, 5(3): 169-191.
- [5] 焦振江, 王正平. 基于改进蚁群算法的无人机航路规划 [J]. 航空计算技术, 2006, 36(4): 112-118.
JIAO Z J, WANG Z P. Path Planning for UAV Based on Improved Ant Colony Algorithm [J]. Aeronautical Computing Technique, 2006, 36(4): 112-118. (in Chinese)
- [6] 周欢, 赵辉, 韩统, 等. 基于规则的无人机集群飞行与规避协同控制 [J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(6): 1374-1381.
ZHOU H, ZHAO H, HAN T, et al. Cooperative Control of Flight and Avoidance Based on Rules for UAV [J]. System Engineering and Electronic Technology, 2016, 38(6): 1374-1381. (in Chinese)
- [7] 王健. 多架无人机攻击多目标的协同航迹规划算法研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2004.
WANG J. Study on Cooperative Trajectory Planning Algorithm for Multiple UAV Attacking Multiple Target [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2004. (in Chinese)
- [8] JOHN B, MICHAEL T, ANHUR R. Multiple Task Allocation and Path Planning for Cooperating UAVs, Cooperative Control: Models, Applications and Algorithms at the Conference on Coordination, Control and Optimization, November, 2001.
- [9] 胡中华, 赵敏, 姚敏, 等. 一种基于改进蚂蚁算法的无人机多目标三维航迹规划 [J]. 沈阳工业大学学报 (自然科学版), 2011, 33(5): 570-575.
HU Z H, ZHAO M, YAO M, et al. A Multiple Objective 3D Trajectory Planning for UAV Based on Improved Ant Colony Algorithm [J]. Journal of Shenyang University of Technology (Natural Science Edition), 2011, 33(5): 570-575. (in Chinese)
- [10] SWARTZENTRUBER L, FOO J L, WINER E H. Multiple Objective UAV Path Planning with Refined Reconnaissance and Threat Formulations [C]//The Proceedings of AIAA Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Orlando, 2010: 1-14.
- [11] 史金富. 基于贝叶斯网络的UCAV编队对地攻击智能决策研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2007.
SHI J F. Research on Intelligent Decision Making of UCAV Formation to Ground Attack Based on Bayesian Network [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007. (in Chinese)
- [12] 徐正军, 唐硕. 基于改进遗传算法的飞行轨迹规划 [J]. 宇航学报, 2008, 29(5): 1540-1545.
XU Z J, TANG S. Flight Path Planning Based on Improved Genetic Algorithm [J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(5): 1540-1545. (in Chinese)
- [13] SEYEDAIL M, SEYED M M, ANDREW L. Grey Wolf Optimizer [J]. Advances in Engineering Software, 2014, 69: 46-61.
- [14] ZHU A J, XU C P. Hybridizing Grey Wolf Optimization with Differential Evolution for Global Optimization and Test Scheduling for 3D Stacked SoC [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2015, 26(2): 317-328.
- [15] JIA D, VAGNERS J. Parallel Evolutionary Algorithms for UAV Path Planning [C]//AIAA 1st Intelligent Systems Technical Conference, and Materials Conference, Chicago, Illinois, 2004, 9: 20-22.
- [16] 梁焯炜. K-均值聚类算法的改进及其应用 [D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
LIANG Y W. K-Mean Clustering Algorithm and Its Application [D]. Changsha: Hunan University, 2012. (in Chinese)
- [17] 高颖慧, 沈振康. 角度编码染色体量子遗传算法 [J]. 计算机工程与科学, 2009, 31(3): 75-79.
GAO Y H, SHEN Z K. Quantum Genetic Algorithm Based on Angle Coding Chromosome [J]. Computer Engineering and Science, 2009, 31(3): 75-79. (in Chinese)
- [18] 黄长强, 丁达理, 黄汉桥. 无人机作战自主攻击技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
HUANG C Q, DING D L, HUANG H Q. UAV Autonomous Attack Technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014. (in Chinese)