

## 基于 TS-NGA 的多作战智能体制导 - 攻击匹配优化

万路军, 姚佩阳, 贾方超, 马方方  
(空军工程大学信息与导航学院, 西安 710077)

**摘要:** 空中制导-攻击匹配(GAM)旨在确定武器单元、制导单元以及目标三者之间的最优匹配关系,以使多作战智能体任务联盟整体作战效能最大。分析了基于混合通信方式的多作战智能体制导-攻击匹配过程,建立制导攻击匹配约束优化问题模型,设计了一种禁忌策略的嵌套遗传算法(TS-NGA)对模型进行求解,算法的外层循环寻求武器单元和制导单元的最优配对,内层循环寻求武器单元和目标的最优配对。针对 GAM 问题特点,制定了编码与解码策略、交叉、变异规则以及选择、禁忌策略。仿真实验结果表明所设计求解算法能较好地解决三维变量的 GAM 问题模型。

**关键词:** 协同空战; 作战智能体; 协同制导; 嵌套遗传算法; 匹配优化

**中图分类号:** V271.4      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1671-637X(2013)10-0001-06

## An Optimized Guidance-Attack Aerial Matching Method for Multiple Combat Agents Based on TS-NGA

WAN Lujun, YAO Peiyang, JIA Fangchao, MA Fangfang  
(College of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** The aerial Guidance-Attack Matching (GAM) focuses on the allocating of weapon units, guidance units and targets in order to maximize the effectiveness of the multiple combat agents' task coalition. The guidance-attack matching process of multiple combat agents based on integrated communication mode was analyzed, a constrained optimization model was proposed for the problem and the nested genetic algorithm based on tabu policy was designed to solve the model. The outer-loop of GA was used to search for the optimum weapon-guidance matching and the inner-loop of GA used to search for the optimum weapon-target allocation. Considering the discrete characteristics of the problem, the coding rules, crossover operators, mutation operators and tabu policy were designed. The experimental results show that the proposed algorithm can solve the three-dimensional variable GAM problem effectively.

**Key words:** cooperative air combat; combat agent; cooperative guidance; nested genetic algorithm; matching optimization

### 0 引言

未来分布式网络化作战时,有人作战智能体(Manned Combat Agent, MCA)和无人作战智能体(Unmanned Combat Agent, UCA)混合编组执行任务将成为一种新颖的作战应用模式,通过二者优势互补可以发挥多作战智能体任务联盟最佳的综合作战效能<sup>[1-4]</sup>。MCA 和 UCA 协同作战的目标可以是空中目

标,也可以是地面目标。随着空中传感器性能的日益提升,协同制导将成为提高空中战场生存率的重要战术措施之一。未来 MCA/UCA 协同执行空中任务时,为保证 MCA 的安全, MCA 发射武器后可以由 UCA 提供武器接力制导,这样就形成了单个目标、单个 MCA 和单个 UCA 的临时作战组合,即空中制导攻击匹配(Guidance Attack Matching, GAM)组合。空中高对抗环境下,在态势信息一致性基础上,要求各作战智能体间能快速一致达成决策,而各智能体基于分布式通信协商寻求一致决策方案的方式往往因智能体认知能力的不足和协商机制的缺陷,难以满足决策高时效性的需求。因此,有必要设立空中负责编组战术决策的协调中心,立足空中统一战场态势,从多作战智能体编组的整体利

收稿日期:2012-11-22      修回日期:2013-01-16

基金项目:国家自然科学基金(70771157);2011年度和2012年度全军军事学研究生课题;空军工程大学博士创新基金(KGD2011-002)

作者简介:万路军(1986—),男,江苏连云港人,博士生,研究方向为多机协同作战指挥控制等。

益出发,构建一个决策时间片内的集中式 GAM 方案,解决如何将合适的目标分配给合适的 MCA,同时确定该 MCA 和负责接力制导的 UCA 的协作关系,以使得敌方损失最大或己方损失最小,实现最优攻击效益。本质上,看,GAM 问题属于任务分配范畴的问题,该类型问题的一般研究思路为先建模而后对模型进行优化求解。本文在分析多作战智能体制导-攻击匹配流程的基础上,建立小时间尺度下的集中式 GAM 约束优化问题模型,根据模型特点和求解实时性要求,设计一种启发式双层嵌套遗传算法对所建模型进行求解。

## 1 多作战智能体制导-攻击匹配过程

MCA/UCA 协同空中作战时,根据角色分工不同,从目标探测、搜索、跟踪、瞄准、武器发射、武器制导全程进行密切协作。行动过程中,MCA 保持雷达静默居后,UCA 突前侦察,UCA 将获取的态势信息传至 MCA,MCA 将收到的目标信息经过坐标转换、滤波、误差处理后进行火控解算武器发射条件,并实施武器攻击<sup>[5]</sup>。后续制导由 UCA 完成,UCA 通过实时更新目标位置信息,对发射的武器采用直接交接的方式进行接力制导。实施多作战智能体协同攻击计划,必须首先确定武器发射平台 MCA 与制导平台 UCA 的匹配关系,这主要由空中战术决策协调中心事先根据态势和作战综合收益确定。

空中多智能体之间实现信息共享,需要采用合适的通信交互方式。多作战智能体匹配-攻击过程中,既要求战术决策中心能与各智能体进行直接交互,又不能致使构建的智能体间信息链路关系过于复杂。目前,黑板和点对点是两种常用的通信方式<sup>[6]</sup>,黑板可作为各智能体交换信息、数据和知识的公共存储区,每个智能体均能向公共存储区发送信息,也可向该区读取信息。点对点则基于消息传递方式,一个智能体可以向一个或多个智能体直接发送消息。MCA 与 UCA 之间需要既包含黑板通信方式,又要包含点对点通信方式,可称之为混合通信方式,战术决策协调中心与其他 MCA/UCA 采用点对点方式传递指令、方案信息,实现匹配的 MCA 与 UCA 之间也采用点对点直接发送指令和协作信息,MCA/UCA 之间以及 MCA/UCA 与战术决策协调中心之间采用黑板通信方式共享状态、态势信息。

为便于 GAM 优化问题的数学建模,需要将模型的建立设定在一定的假设条件基础之上。

假设1 MCA 在发射武器后,与 UCA 制导有一个平滑衔接过程,假设平滑衔接的成功率为 100%。

假设2 全空域内的作战态势可以实现按需共享,各智能体间构建的指挥控制信息交互结构可实现敌目

标信息、我决策信息高效的点对点通信,承担不同功能的智能体的计算能力能够满足文中方法的应用需求。

假设3 作战进程的时间轴可划分为多个决策时间窗口,单一决策时间窗口内(小时间尺度),MCA 和 UCA 分别满足发射和制导要求,且在达到窗口下界之前,认定目标信息是相对静态的,相关初始化数据可利用窗口的平均参数值解算获得。

假设4 MCA 武器的射程和 UCA 制导设备的保障范围均能有效覆盖目标,且 MCA 与 UCA 获取的态势信息为认知一致的信息。

综上,MCA 与 UCA 实现无缝协同制导匹配需要战术决策协调中心统一调度,则二者基于混合通信方式的多作战智能体制导-攻击匹配过程如图 1 所示。

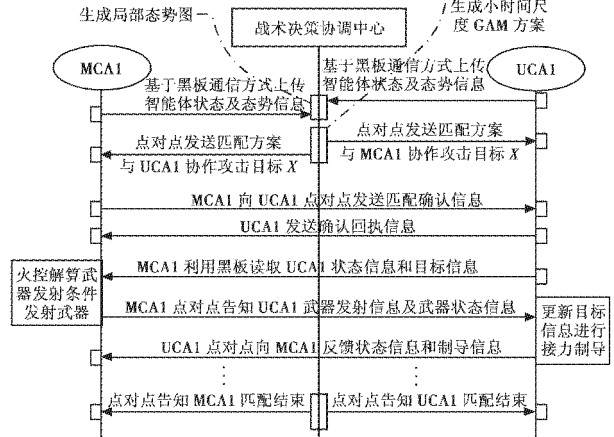


图 1 多作战智能体制导-攻击匹配过程

Fig. 1 Guidance-attack matching process of multiple combat agents

## 2 GAM 约束优化问题模型

假设  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_{N_T}\}$  为敌执行拦截任务的目标集合,  $M = \{m_1, m_2, \dots, m_{N_M}\}$  和  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_{N_A}\}$  为武器发射 MCA 集合和制导 UCA 集合。根据目标序号对 GAM 进行编号,则第  $i$  个匹配组合  $G_i$  可表示为一个三元组  $\langle t_i, m_j, a_k \rangle$ 。其中:  $1 \leq i \leq N_T, 1 \leq j \leq N_M, 1 \leq k \leq N_A$ , 即 MCA  $m_j$  负责攻击目标  $t_i$ ,UCA  $a_k$  负责对  $m_j$  发射的武器提供制导控制。图 2 给出多智能体空中对抗几何态势关系示意。

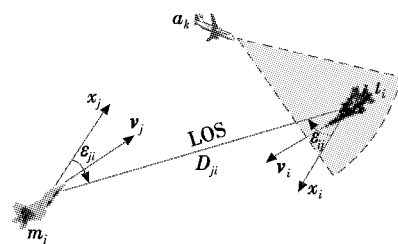


图 2 作战智能体空中对抗几何态势示意

Fig. 2 Opposition situation of air combat agents

## 2.1 目标函数

图 2 中: LOS 为目标线;  $D_{ji}$  为 MCA  $m_j$  相对于目标  $t_i$  的距离;  $x_j$  和  $v_j$  分别为  $m_j$  的轴线和速度矢量;  $\varepsilon_{ji}$  为  $t_i$  相对于  $m_j$  的离轴发射角。假设  $P_{\text{thr}_y}$  为目标  $t_i$  对 MCA  $m_j$  的威胁度, 则  $P_{\text{thr}_y}$  定义为

$$P_{\text{thr}_y} = (\omega_1 P_{ij}^D P_{ij}^e + \omega_2 P_{ij}^v + \omega_3 P_{ij}^c) \cdot \xi_{ij} \quad (1)$$

式中:  $\omega_1, \omega_2$  和  $\omega_3$  为权重系数,  $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1$ ;  $P_{ij}^D \in [0, 1]$  为距离威胁;  $P_{ij}^e \in [0, 1]$  为角度威胁;  $P_{ij}^v \in [0, 1]$  为速度威胁;  $P_{ij}^c \in [0, 1]$  为空战能力威胁;  $\xi_{ij}$  为目标  $t_i$  对  $m_j$  的拦截意图概率。

制导 UCA 对 MCA 的影响可归结为单个武器对单个目标的杀伤概率和武器发射数量两方面。对于  $G_i = \langle t_i, m_j, a_k \rangle$ , 假设发射第  $N$  个武器杀伤  $t_i$  的独立概率为  $p_{ijk}(N)$ , 若同时发射武器的数量为 3 个, 则交战过程中,  $t_i$  被  $m_j$  和  $a_k$  组合成功毁伤的概率  $p_{s_{ijk}}$  计算式为

$$p_{s_{ijk}} = [1 - (1 - p_{ijk}(1)) \times p_{ijk}(2)] \times p_{ijk}(3) \quad (2)$$

GAM 分配的目的是使整个任务联盟作战效能最佳, 即敌方损失最大, 则建立目标函数式

$$\max J = \sum_{i,j} \{P_{\text{thr}_y} \times [1 - \prod_{k=1}^{N_A} \prod_{j=1}^{N_M} (1 - p_{s_{ijk}})^{x_{ijk}}]\} \quad (3)$$

式中: 决策变量  $x_{ijk} \in \{0, 1\}$ ,  $x_{ijk} = 1$  表示  $t_i, m_j, a_k$  三者构成临时的  $G_i$ , 否则三者不构成  $G_i$ 。

## 2.2 约束条件

1) 每个目标须分配一个 MCA, 如式(4)所示。

$$\sum_{k=1}^{N_A} \sum_{j=1}^{N_M} x_{ijk} = 1 \quad (4)$$

2) 对  $\forall t_i \in T$ , 若 MCA  $m_j \in G_i$ , 则须为  $t_i, m_j$  分配一个制导 UCA 进行协作, 即保证式(5)成立。

$$\sum_{k=1}^{N_A} x_{ijk} = 1 \quad (5)$$

3) 对于 MCA  $m_j$ , 被分配的目标总数应满足不大于其挂载武器数量  $N_w$  的约束, 如式(6)所示。

$$\sum_{k=1}^{N_T} x_{ijk} \leq N_w \quad (6)$$

4) 每个制导 UCA 可以为多个武器同时提供制导, 这些武器可能由同一个 MCA 发射, 也可能由多个不同的 MCA 发射。因此, 对于 UCA  $a_k$ , 同时制导的武器数量应不大于其最大制导容量  $N_F$  的限制, 则约束条件如式(7)所示。

$$\sum_{i=1}^{N_T} \sum_{j=1}^{N_M} x_{ijk} \leq N_F \quad (7)$$

5) 模型中假设 UCA 的制导总容量满足为每一个 MCA 的武器提供协同制导的要求。

$$N_M \cdot N_w \leq N_A \cdot N_F \quad (8)$$

## 2.3 问题的数学模型

以敌方损失最大为目标, 考虑问题的各方面约束

条件, 可以得到 GAM 约束优化问题的优化模型为

$$\max J = \sum_{i,j} \left\{ P_{\text{thr}_y} \times \left[ 1 - \prod_{k=1}^{N_A} \prod_{j=1}^{N_M} (1 - p_{s_{ijk}})^{x_{ijk}} \right] \right\} \quad (9)$$

$$\text{s. t. } x_{ijk} \in \{0, 1\}; \sum_{k=1}^{N_A} \sum_{j=1}^{N_M} x_{ijk} = 1; \sum_{k=1}^{N_A} x_{ijk} = 1; \sum_{k=1}^{N_T} x_{ijk} \leq N_w; \sum_{i=1}^{N_T} \sum_{j=1}^{N_M} x_{ijk} \leq N_F; N_M \cdot N_w \leq N_A \cdot N_F。$$

## 3 匹配优化算法设计

### 3.1 模型求解思路

模型(9)是决策变量为三维的非线性整数规划模型, 模型的求解是典型的 NP 完全问题, 由于模型解空间维数随问题模型的增大而呈指数性增长, 真正的最优解只有通过枚举法才能找到。在现代空战中, 根据战场态势动态实时地求解 GAM 约束优化问题是不现实的, 但是可控的变量规模内, 可以在规定的时间内求得满意解或次优解<sup>[7]</sup>。遗传算法以其简单、稳定、通用性强的特点, 能以极大概率找到全局最优, 具备并行运算的潜质, 但存在局部寻优能力不足、产生精度不高的问题; 禁忌策略对初始解依赖性强、全局寻优能力差, 但局部选优能力快, 两者互补性较强。对于三维变量整数规划模型, 直接的解决方法就是将其分为两个子问题分别优化, 但所建模型中无论是 MCA 对目标的分配还是 MCA 与 UCA 的匹配的目标函数均相同, 不能分解模型分别予以求解。因此, 针对模型三维决策变量及其 NP-hard 问题的特点, 提出一种禁忌策略嵌套遗传算法 (Tabu Strategy Nested Genetic Algorithms, TS-NGA) 对模型进行求解。嵌套遗传算法由外循环 (Outer-Loop GA, OLG) 和内循环 (Inner-Loop GA, ILG) 两层循环组成<sup>[8]</sup>, 外层循环寻找最优的  $m_j$  和  $a_k$  配对, 内层循环结合禁忌策略寻找最优的  $m_j$  和  $t_i$  的分配。具体的方法步骤如下:

1) 初始化所有 MCA、UCA 上传的参数, 得到所有目标威胁度矩阵、MCA 与 UCA 匹配组合下的毁伤概率矩阵;

2) 采用扩展自然数编码的方式, 分别生成满足约束条件的外循环 (OLG) 初始种群  $Y$  和内循环 (ILG) 初始种群  $X$ , 并根据 MCA 对目标的分配意图设定禁忌表  $H_T$ ;

3) 种群  $Y, X$  进行算术交叉、非均匀变异操作后, 利用列表标识策略进行解码;

4) 计算种群  $Y, X$  的适应度值, 根据适应度值大小进行排序, 保留精英个体, 并对剩余种群进行选择操作, 产生新一代种群, 判断新种群对应对象禁忌属性, 更新禁忌表  $H_T$ ;

5) 判断是否满足最大迭代次数, 若不满足, 需继续

进行优化,否则停止优化,输出当前最优的匹配方案。

### 3.2 嵌套遗传算法设计

#### 3.2.1 染色体的编码

针对模型特点,OLG的编码采用一种满足约束条件的染色体编码格式,染色体编码 $C_j$ 采用十进制数表示,编码长度 $N_M \times N_w$ 位, $i=1,2,\dots,N_M,j=1,2,\dots,N_w$ ,初始化产生 $\text{pop\_size}$ 个种群,单一位置编码 $C_j$ 随机取1到 $N_A$ 之间的自然数,如图3a所示。

ILG采用类似的扩展自然数编码,编码长度为 $N_M \times N_w$ 位,单一位置编码 $C'_j$ 随机取1到 $N_T$ 之间的自然数,如图3b所示。

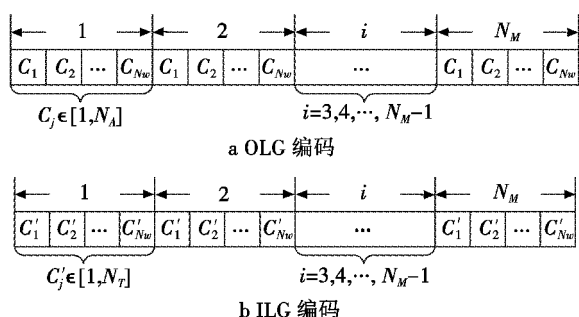


图3 NGA的染色体编码结构

Fig.3 The chromosome coding configuration of NGA algorithm

#### 3.2.2 解码策略与适应度值计算

为获取编码的原象以计算适应度值,需要对染色体进行有效解码<sup>[7]</sup>。利用列表标记法对染色体进行解码,步骤如下所述。

1) 建立一个编码标识链表 $\text{list}$ ,按照从上至下的顺序分别对应整数1到 $N_A$ 的标识,初始化赋值均为0。

2) 随机轮询 $\text{pop\_size}$ 个染色体,识读每个染色体的编码,编码的数字出现一次,其对应的 $\text{list}$ 标识数值 $\text{list\_num}(k)+1$ ;判别该标识数值是否大于 $N_F$ ,若 $\text{list\_num}(k) \geq N_F$ ,则寻找 $\text{list}$ 中的最小并与该标识位置海明距离最短的 $\text{list\_num}(k)$ ,用该标识位置对应的编码代替原编码;若 $\text{list\_num}(k) < N_F$ ,则识读下一位置编码。

3) 重复以上步骤,直到所有染色体完成解码。

OLG和ILG采用相同的解码策略,适应度值可通过式(10)的函数计算。

$$f_{\text{fitness}}(x) = \sum_{i,j} \left\{ P_{\text{thr}_{ij}} \times \left[ 1 - \prod_{k=1}^{N_A} \prod_{j=1}^{N_w} (1 - P_{s_{jk}})^{x_{jk}} \right] \right\} \quad (10)$$

#### 3.2.3 交叉与变异策略

针对染色体编码结构特点,遗传交叉采用单点随机定位的多点算术交叉运算,遗传变异采用非均匀随机变异运算。

1) 算术交叉运算。

设 $0 \leq a \leq 1$ , $C^i(1)$ 和 $C^i(2)$ 是被随机确定的第 $i$

代的两个交叉父代个体, $C^{i+1}(1)$ 和 $C^{i+1}(2)$ 是交叉产生的子代个体,设 $\kappa$ 为第 $i$ 代的一个染色体交叉位区间的任意点,其染色体编码值为 $C_{\kappa}^i(1)$ 和 $C_{\kappa}^i(2)$ ,则算术交叉运算后得到的两个新染色体编码值分别为

$$C_{\kappa}^{i+1}(1) = \begin{cases} \lceil aC_{\kappa}^i(1) + bC_{\kappa}^i(2) \rceil, & C_{\kappa}^i(1) > C_{\kappa}^i(2) \\ \lfloor aC_{\kappa}^i(1) + bC_{\kappa}^i(2) \rfloor, & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

$$C_{\kappa}^{i+1}(2) = \begin{cases} \lceil bC_{\kappa}^i(1) + aC_{\kappa}^i(2) \rceil, & C_{\kappa}^i(1) > C_{\kappa}^i(2) \\ \lfloor bC_{\kappa}^i(1) + aC_{\kappa}^i(2) \rfloor, & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $b=1-a$ ; $\lceil x \rceil$ 表示对 $x$ 向上取整运算; $\lfloor x \rfloor$ 表示对 $x$ 向下取整运算。

按照上述方法,对染色体的随机多个交叉位进行算术交叉运算。

2) 非均匀变异运算。

为加强算法对重点区域的局部搜索能力,随机确定第 $i$ 代的个体 $C_i(l)$ 的一个变异位 $B_{ik}(l)$ ,取 $(u_1, u_2)$ 之间的随机数来代替 $B_{ik}(l)$ ,则新的变异位编码值 $B'_{ik}(l)$ 为

$$B'_{ik}(l) = \begin{cases} \lceil B_{ik}(l) + (u_2 - B_{ik}(l))f(G) \rceil, & r_1 < 0.5 \\ \lfloor B_{ik}(l) - (u_1 + B_{ik}(l))f(G) \rfloor, & r_1 \geq 0.5 \end{cases} \quad (13)$$

式中, $f(G) = (r_2 \cdot (1 - G/G_{\text{max}}))^s$ , $r_1$ 和 $r_2$ 为 $[0,1]$ 之间随机数, $G$ 为当前迭代代数, $G_{\text{max}}$ 为总迭代代数, $s$ 为形状系数。

#### 3.2.4 选择策略

选择策略采用精英策略和均匀排序策略相结合的方法<sup>[8]</sup>,即对群体中所有个体按其适应度大小进行排序,适应度最高的个体不参加交叉运算和变异运算,直接复制进入下一代,剩下的染色体根据一定概率和排序产生。

$$P(r) = \frac{q}{1 - (1 - q)^{\text{pop\_size}}} \cdot (1 - q)^{r-1} \quad (14)$$

式中: $q$ 是剩下最大适应度值染色体的选择概率; $r$ 是个体的排序; $\text{pop\_size}$ 是种群数。

#### 3.2.5 禁忌设计与停止准则

禁忌表设定是围绕内层循环中MCA与目标分配关系而设计的,在内层分配中,在认知到目标拦截意图概率的基础上,MCA倾向于攻击对自身威胁最大的目标,因此在任务方案的搜索过程中,将对MCA个体威胁值低的方案作为禁忌对象,为每个MCA设置 $N_{\text{tabu}}$ 个禁忌对象,满足 $N_{\text{tabu}} \leq N_T$ ,禁忌表随搜索过程进行不断更新。当所有可行解都处于禁忌状态,或必然存在禁忌解好于当前最优解,就打破禁忌表约束,释放部分种群,以增加种群的多样性和延续性。

停止准则采用最大迭代数判断法,即判断迭代的

代数是否为要求的代数,若达到判决条件,停止进化,选择最优的染色个体作为模型的优化解输出。

### 4 仿真分析

本文算法用 Matlab 语言编程实现,并在 Inter(R) Pentium(R) 4 CPU 3.00 GHz 计算机上进行仿真验证。假设执行火力打击的 MCA 和负责制导的 UCA 数量分别为  $N_M=4, N_A=5$ ,敌目标的数量为  $N_T=6$ ,MCA 的武器挂载数  $N_W=2$ ,禁忌长度  $N_{tabu}=6$ ,UCA 最大的制导容量  $N_F=2$ ,罚因子取值皆为 2,设目标威胁度矩阵为

$$P_{thr} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.35 & 0.24 \\ 0.15 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0.32 & 0.16 & 0 & 0 \\ 0.18 & 0 & 0 & 0.25 \\ 0 & 0.27 & 0.08 & 0 \\ 0.25 & 0.12 & 0.24 & 0 \end{bmatrix}$$

对于  $t_i$ ,不同的 MCA 和 UCA 的组合对其拦截概率矩阵值  $P_s(t_i)$  如下所示。

$$P_s(t_1) = \begin{bmatrix} 0.3 & 0.4 & 0.7 & 0.8 \\ 0.7 & 0.0 & 0.2 & 0.5 \\ 0.2 & 0.9 & 0.8 & 0.1 \\ 0.2 & 0.9 & 0.1 & 0.9 \\ 0.4 & 0.1 & 0.0 & 0.8 \end{bmatrix}, P_s(t_2) = \begin{bmatrix} 0.7 & 0.5 & 0.1 & 0.4 \\ 0.1 & 0.9 & 0.3 & 0.6 \\ 0.3 & 0.5 & 0.7 & 0.8 \\ 0.9 & 0.2 & 0.0 & 0.6 \\ 0.8 & 0.7 & 0.4 & 0.0 \end{bmatrix},$$

$$P_s(t_3) = \begin{bmatrix} 0.9 & 0.8 & 0.0 & 0.1 \\ 0.9 & 0.0 & 0.4 & 0.8 \\ 0.5 & 0.6 & 0.0 & 0.7 \\ 0.2 & 0.3 & 0.8 & 0.9 \\ 0.3 & 0.9 & 0.8 & 0.1 \end{bmatrix}, P_s(t_4) = \begin{bmatrix} 0.6 & 0.5 & 0.0 & 0.7 \\ 0.2 & 0.0 & 0.8 & 0.9 \\ 0.1 & 0.9 & 0.6 & 0.7 \\ 0.9 & 0.1 & 0.5 & 0.3 \\ 0.7 & 0.8 & 0.0 & 0.6 \end{bmatrix},$$

$$P_s(t_5) = \begin{bmatrix} 0.3 & 0.1 & 0.2 & 0.6 \\ 0.7 & 0.6 & 0.5 & 0.4 \\ 0.6 & 0.0 & 0.7 & 0.8 \\ 0.1 & 0.9 & 0.4 & 0.8 \\ 0.2 & 0.9 & 0.7 & 0.5 \end{bmatrix}, P_s(t_6) = \begin{bmatrix} 0.8 & 0.0 & 0.4 & 0.3 \\ 0.9 & 0.0 & 0.6 & 0.7 \\ 0.4 & 0.2 & 0.9 & 0.1 \\ 0.6 & 0.4 & 0.9 & 0.6 \\ 0.1 & 0.9 & 0.8 & 0.7 \end{bmatrix}.$$

采用上述编码、交叉、变异及解码策略,运行 TS-NGA 算法和文献[8]中的 NGA 算法,最大迭代次数 50 次,得到最优适应值对应的分配方案见表 1,基于 TS-NGA 和 NGA 的求解过程进化曲线如图 4 所示。

表 1 TS-NGA 求解得到的匹配优化方案  
Table 1 The matching optimization result calculated by TS-NGA

MCA	1	2	3	4
挂载	1	2	1	2
目标 T	3	6	2	5
UCA	1	1	2	5
适应度值	0.9024			

按照一定的目标攻击序列,形成的 MCA/UCA 制导攻击匹配优化组合为:

- GAM1: < MCA3, UCA3, T1 >, < MCA4, UCA4, T1 >;
- GAM2: < MCA2, UCA2, T2 >;
- GAM3: < MCA1, UCA1, T3 >;
- GAM4: < MCA4, UCA2, T4 >;
- GAM5: < MCA2, UCA5, T5 >;
- GAM6: < MCA1, UCA1, T6 >, < MCA3, UCA3, T6 >。

此时,MCA/UCA 协同执行空空拦截任务的整体效益最高。在某一时间尺度内,某一 MCA 会根据任务需要与不同的 UCA 协作,对不同的目标同时实施攻击,但对各目标的行动过程并不一定同步进行,这需要各作战智能体在制导 - 攻击匹配过程基于混合通信方式方面达成行动协调一致。

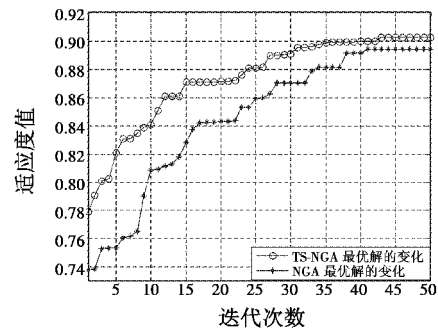


图 4 算法求解的适应度值

Fig. 4 The fitness of TS-NGA and NGA algorithms

从迭代次数上看,在内循环中考虑设置禁忌策略的 TS-NGA 算法在求解规模一般的 GAM 模型时,比 NGA 算法求解该模型具有更好的收敛性能和寻最优解能力。算法经过 40 次左右的迭代就能找到最优解,能够满足中小规模多智能体空中制导 - 攻击匹配的快速决策需求。从算法时间复杂度上看,假设 OLG 种群规模为  $n_1$ ,ILG 种群规模为  $n_2$ ,迭代次数为  $m$ ,NGA 算法求解  $(N_M \times N_W) \times N_T \times (N_A \times N_F)$  规模的 GAM 问题模型时,最差的可能时间复杂度为  $O(n_1 \cdot N_T \cdot (N_M \times N_W)^2)$  或  $O(n_2 \cdot (N_A \times N_F) \cdot (N_M \times N_W)^2)$  数量级,即算法的复杂度为问题规模的三次方阶,算法的执行时间并不会随问题规模的增加而呈指数倍增长。

### 5 结论

本文以未来 MCA/UCA 协同作战中 MCA 负责武器发射、UCA 进行协同制导的作战模式为研究背景,提出了多作战智能体空中制导 - 攻击匹配 (GAM) 的概念,并建立了 GAM 的约束优化问题模型。针对模型特点,提出了一种基于禁忌策略的嵌套遗传算法,通过设计满足约束条件的染色体编码方式及相应的交叉、变异和禁忌策略,有效降低了算法的时间复杂度,从而

能在较少迭代次数内收敛到最优解。实际的空空武器对目标发射过程中, MCA 与制导 UCA 的配对还需要考虑空间约束问题, 即制导 UCA 与 MCA 的位置距离、最大作用距离、天线阵面朝向、方位角和俯仰角, 要适合 MCA 发射的武器及其预打击的目标。本文所建 GAM 的约束优化问题模型建立在对 UCA 具备全空域制导能力的假设前提之下, 而下一步的研究将考虑在 GAM 的问题建模中引入 UCA 制导的空间约束限制。

### 参 考 文 献

- [1] VALENTI M, SCHOUWENAARS T, KUWATA Y, et al. Implementation of a manned vehicle-UAV mission system [R]. AIAA 2004-5142, 2004.
- [2] 傅裕松, 黄长强, 轩永波, 等. 有人机控制无人机空战多目标分配 [J]. 电光与控制, 2011, 18(8): 6-10, 16.
- [3] 刘跃峰, 张安. 有人机/无人机编队协同任务分配方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(3): 584-588.
- [4] SCHOUWENAARS T, VALENTI M, FERON E, et al. Linear programming and language processing for human/unmanned aerial vehicle team missions [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2006, 29(2): 303-313.
- [5] 马向玲, 雷宇曜, 孙永芹, 等. 有人/无人机协同空地作战关键技术综述 [J]. 电光与控制, 2011, 18(3): 56-60.
- [6] 贾利民, 刘刚, 秦勇. 基于智能 Agent 的动态协作任务求解 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [7] 王玮, 程树昌, 张玉芝. 基于遗传算法的一类武器目标分配方法研究 [J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(9): 1708-1711.
- [8] YU Feili, TU Fang, PATTIPATI K R. A novel congruent organizational design methodology using group technology and a nested genetic algorithm [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part A: Systems and Human, 2006, 36(1): 5-18.

## 声 明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、北京万方数据股份有限公司、重庆维普资讯有限公司等在其网络平台 and 系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文, 著作权使用费与本刊稿酬一并支付。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意我部上述声明。

## 下 期 要 目

空天地态势实时可视化展示系统设计与实现  
 基于合作目标的动态舰载平台综合系统误差设计  
 基于增量动态逆的高超声速飞行器控制律设计  
 利用显著边界点的图像自动分割算法  
 机载双基地 MIMO 雷达对隐身目标探测范围研究  
 时间自动机流量特性的硬件模拟

自适应滑模控制在变形翼飞行器上的应用  
 目标飞行高度和速度对红外探测的影响  
 AFDX 网络虚拟链路时延抖动测试研究  
 具有类反斜线回滞的 NSV 滑模控制  
 转台对天线阵列角模拟精度的影响  
 基于渐近平稳过程的修正扩展卡尔曼滤波算法