

基于改进鸽群优化的直升机协同目标分配

周 凯^{1,2}, 姜文志², 陈邓安², 郭智杰²

(1.解放军 91917 部队, 北京 102100; 2.海军航空工程学院, 山东 烟台 264001)

摘要: 针对多直升机协同目标分配问题, 建立了基于敌我相对态势的对地打击多目标的分配模型。引入多 Agent 系统机制, 加快了有益信息在系统中的流动; 并借助雁群成员在飞行中借鉴雁群整体经验的操作, 来修正鸽群算法中地标算子的寻优方向, 进而提出了基于多 Agent 的改进鸽群优化的问题求解策略。最后, 以典型的直升机对地作战目标分配问题为背景, 仿真验证了模型及其求解算法的合理性和有效性。

关键词: 直升机, 空对地攻击, 目标分配, 多 Agent, 鸽群优化

中图分类号: V271.4; TP202

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1002-0640.2017.07.021

Research on Cooperative Target Assignment Based on Improve Pigeon-inspired Optimization

ZHOU Kai^{1,2}, JIANG Wen-zhi², CHEN Deng-an², GUO Zhi-jie²

(1. Unit 91917 of PLA, Beijing 102100, China; 2. Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: A battle target assignment model is put forward for multi-helicopter cooperation mission assignment. Method based on Multi-agent improve pigeon-inspired optimization is used in model solution. Analyzing flying geese pattern is getting the useful enlightenment for updating the searching direction of landmark operator in PIO. Adopting the Multi-agent Systems Architecture Model can enhance interactive between individual and superior individual at the same time, accelerate transmission of useful information in system. In the background of helicopter combating, rationality and effectiveness of model and algorithm proposed by article have proven by simulation result.

Key words: helicopter, air-to-ground attack, target assignment, multi-agent, pigeon-inspired optimization

0 引言

直升机因其具有攻击能力强、机动性好、低空隐蔽接近目标和生存力高等优势, 主要遂行对地攻击、护航和反舰任务, 多机协同作为主要作战方式, 将在整个作战过程发挥重要作用^[1-2]。

目标分配是直升机完成作战任务的重要保证, 本文主要考虑了多直升机多目标分配问题, 并结合直升机编队暴露在目标区域进行低空作战的特点, 考虑了每架直升机与每一目标的相对态势对毁伤能力的影响。对于求解直升机目标分配这类 NP 问题, 像遗传算法, 蚁群算法, 粒子群等大量的仿生智

能算法展现了很大优势^[3-5]。为适应现代战争快速、实时性的要求, 本文采用 Duan 等人提出的鸽群优化^[6](pigeon-inspired optimization)来解决此问题。根据实际问题需要, 对算法进行了改进, 并采用了离散矩阵二进制编码方式, 给出了适合离散编码的位置和速度更新公式^[7]。最后, 利用 MAPIO 算法求解直升机多目标分配数学模型, 仿真验证了模型及其求解算法的有效性。

1 直升机协同多目标分配数学模型

本文以直升机编队执行空对地打击任务为背景, 设我方共有 m 架直升机 $Z = \{Z_i, i=1, 2, \dots, m\}$

收稿日期: 2016-05-15

修回日期: 2016-07-28

作者简介: 周 凯(1990-), 男, 天津人, 硕士研究生。研究方向: 计算机应用。

(Z_i 表示第 i 架直升机), 敌方共有 n 个目标 $T = \{T_j, j=1,2,\dots,n\}$ (T_j 表示第 j 个目标)。 X_{ij} 为决策变量, 目标 T_j 分配给 Z_i 时, $X_{ij}=1$; 否则, $X_{ij}=0$ 。 m 架直升机各自的价值量所组成的价值矩阵为: $V_A = [v_{A1} \ v_{A2} \ \dots \ v_{Am}]$, n 个地面目标各自的价值量构成的矩阵为 $V_T = [v_{T1} \ v_{T2} \ \dots \ v_{Tn}]$ 。 直升机目标分配以对目标毁伤最大, 己方代价最小为目标, 而作战收益、作战代价以及相对态势是影响目标分配方案的主要因素。

1.1 收益函数

在编队对地攻击过程中, 直升机对地面目标的毁伤能力是收益函数考虑的主要因素。 而影响直升机对地毁伤的因素有直升机固有性能 C_{GU} 和机载武器性能 C_{WQ} 综合起来就可以得到作战直升机的杀伤指数, 即单机对地攻击效能^[8-9]。

①固有性能 C_{GU} 。 影响直升机作战效能的 6 个变量, 即机动性能 C_{JD} 、探测能力 C_{TC} 、隐蔽性能 C_{YB} 、装甲性能 C_{ZJ} 、航程性能 C_{HC} 、电子对抗能力 C_{DZ} 各性能数的权重利用层次分析法确定。 计算直升机固有性能采用下面的公式:

$$C_{GU} = K_1 \times C_{JD} + K_2 \times C_{TC} + K_3 \times C_{YB} + K_4 \times C_{ZJ} + K_5 \times C_{HC} + K_6 \times C_{DZ} \quad (1)$$

②机载武器性能 C_{WQ} 。 机载武器主要有航炮、火箭弹、导弹, 由于弹药装载方案的不同, 各型武器杀伤指数在机载武器性能所占比重也不同, 计算公式如下:

$$C_{WQ} = K_1 \times C_{炮} + K_2 \times C_{火} + K_3 \times C_{弹} \quad (2)$$

综上, 可以利用下式计算单机对地攻击效能:

$$E = C_{GU} \times C_{WQ} \quad (3)$$

则编队内第 i 架直升机对第 j 个目标毁伤效能表示为 e_{ij} , 打击后的收益值通过式(1)~式(4)获得, 从而构造收益矩阵 V 。

$$v_{ij} = e_{ij} \cdot v_{Tj} \quad (4)$$

1.2 代价函数

我方直升机进入目标区域时, 敌防空系统会对直升机进行拦截, 我方损失即作战代价, 故防空系统中高炮系统抗击直升机作战效能的大小表征了打击目标所付出的代价, 高炮系统的打击能力 P 为:

$$P = P_D P_S [1 - (1 - P_K)^n] \quad (5)$$

式中 P_D 为理想条件下对空中目标的发现概率; P_S 为高炮系统对连续目标的射击概率; $(1 - P_K)^n$ 为系统对目标的毁伤概率; P_K 为对目标实施一次点射的平均毁伤概率; n 为对目标的平均点射次数^[10]。

p_{ij} 是第 i 架直升机被第 j 个目标被击毁的概

率。 打击后的损失通过式(1)~式(6)获得, 从而构造代价矩阵 C 。

$$c_{ij} = P_{ij} \cdot v_{Ai} \quad (6)$$

1.3 态势因子

直升机编队在目标区域执行任务过程中, 成员会耗费自身资源的同时, 还会受到来自地面目标的攻击。 直升机能否成功打击目标不仅与编队成员的自身状态有关, 同时与每一架直升机的态势有关, 如位置、速度、与目标距离; 相对于打击目标的优势越好, 则成功摧毁目标而保存自己的可能性越大^[11-12]。 所以, 单纯给出毁伤值的累加是不实际的, 根据地面火炮的构造限制和直升机低空飞行 ($H < 200$ m) 运用特点, 提出距离优势 T_r 、速度优势 T_v 和高度优势 T_h 如下:

距离优势:

$$T_r = \begin{cases} 1 & , r_i < 300 \text{ m} \\ 0.5 - \frac{r_i}{rmt_i} & , 300 \text{ m} \leq r_i \leq \min(rmt_i, rm) \\ 1 - \frac{r_i}{rmt_i} & , rmt_i < r_i \leq rm \\ 0.1 & , r_i > \max(rmt_i, rm) \end{cases} \quad (7)$$

速度优势:

$$T_v = \begin{cases} 1 & , v_i > 1.5vt_i \\ \frac{v_i}{vt_i} - \frac{1}{2} & , 1.5vt_i > v_i \geq 0.6vt_i \\ 0.1 & , 0.6vt_i > v_i \end{cases} \quad (8)$$

高度优势:

$$T_h = \begin{cases} 1 & , h_i < ht_{i\downarrow}, h_i > ht_{i\uparrow} \\ 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(h_i - (ht_{i\uparrow} + ht_{i\downarrow})/2)^2}{2}} & , ht_{i\downarrow} < h_i < ht_{i\uparrow} \end{cases} \quad (9)$$

其中, r_i 为目标距离, rmt_i 为目标攻击距离, rm 为机载武器最大射程, v_i 为我机速度, vt_i 为目标最大瞄准速度, h_i 为直升机飞行高度, $ht_{i\uparrow}$ 与 $ht_{i\downarrow}$ 分别为高炮的射击高低界。

因此, 在模型中的态势因子 W 为:

$$W = T_r \times T_v \times T_h \quad (10)$$

1.4 总体目标函数

目标分配应当保证对地面目标毁伤最大的同时, 我方代价最小, 因此, 分配模型的总体目标函数可表示为:

$$F = \max(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (W_{ij} \cdot V_{ij} - C_{ij}) X_{ij}) \quad (11)$$

相应的约束条件:

目标分配时, 每个目标均须分配一架直升机对其进行打击, 即

$$\sum_{j=1}^m X_{ij} \geq 1 (j \in [1, m]) \quad (12)$$

对编队中的每一架直升机,至少给其分配一个地面目标,即

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} \geq 1 (i \in [1, m]) \quad (13)$$

由于每架直升机配置的武器数量有限,且为保证直升机在目标区域内滞留的时间不至于过长,要求每架直升机攻击的目标的个数不能超过某个值^[13],记各架直升机可攻击的目标的最大个数所组成的向量 $B = [b_1 \ b_2 \ \dots \ b_{n-1}]$,则有

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} \leq b_i \quad (i \in [1, m]) \quad (14)$$

2 多直升机协同目标分配的改进鸽群优化算法

2.1 基本鸽群优化

鸽群优化是 Duan 等人 2014 年提出的一种仿生智能优化算法 - 鸽群优化算法。PIO 算法中每个鸽子都对应一个可行解,具有位置和速度两个属性,分别表示当前鸽子在解空间的位置和移动速度,并通过适应度函数来评价鸽子的品质。PIO 算法采用指南针算子和地标算子来模仿不同飞行阶段的导航工具,并在两个独立的循环中完成进化和筛选操作,实现寻优。首先是地图和指南针算子^[6]:

$$\begin{cases} V_i(t) = V_i(t-1) \cdot e^{-R \cdot t} + \text{rand} \cdot (X_{gbest} - X_i(t-1)) \\ X_i(t) = X_i(t-1) + V_i(t) \end{cases} \quad (15)$$

鸽子通过上式更新自身状态, R 表示地图和指南针因数, t 表示当前的迭代次数, $X_i(t)$ 和 $V_i(t)$ 分别表示鸽子 i 在 t 代的位置和速度, X_{gbest} 表示在 $t-1$ 次迭代循环后通过比较所有鸽子的位置而得到的全局最好位置。rand 是 $[0, 1]$ 上的随机数。当满足循环迭代停止条件,地图和指南针算子的初始导航工作结束,并将 X_i 移交给地标算子。

地标算子^[6]是用来模仿鸽子靠近目的地飞行时,地标在鸽群个体对路线评估和修正中起到的作用。如果鸽子熟悉地标,那么可径直飞向目的地。反之,如果鸽子不熟悉地标并且远离目的地,它们会跟随熟悉地标的鸽子飞行从而到达目的地。在每次的迭代循环中,地标算子会将当前位置的适应值进行排序,将品质差(即不熟悉地标或远离目的地)的个体舍弃,每次操作鸽子的总数 N_p 减半,把余下鸽子的中心位置 $X_c(t)$ 当成地标作为飞行的参考方向。依据下式对鸽子的位置 X_i 进行更新:

$$N_p(t) = \frac{N_p(t-1)}{2}$$

$$X_c(t) = \frac{\sum X_i(t) \cdot \text{fitness}(X_i(t))}{N_p \sum \text{fitness}(X_i(t))} \quad (16)$$

$$X_i(t) = X_i(t-1) + \text{rand} \cdot (X_c(t) - X_i(t-1))$$

2.2 基于多 Agent 改进鸽群优化

2.2.1 竞争算子

多 Agent 系统是由若干个 Agent 组合而成的松散耦合的协作网络^[14]。Agent 能够感知环境,对自身信息进行更新,并通过与其他 Agent 间的竞争与合作来完成对实际复杂问题的求解,体现整个系统的智能性。把多 Agent 思想引入到鸽群优化。每一只鸽子(即代表单个 Agent)都将在定义的环境模型内与其他相邻鸽子,按照一定的算法规则进行信息通信、交互作用。为了不让鸽子限制在局部环境中,不采用文献[14]固定格子的结构,而是在初始化的个体空间中随机选取邻居,这样选取的交互个体在数目和选取范围上体现了优势。因而个体能快速获取更多有效信息,使整个系统更快收敛。

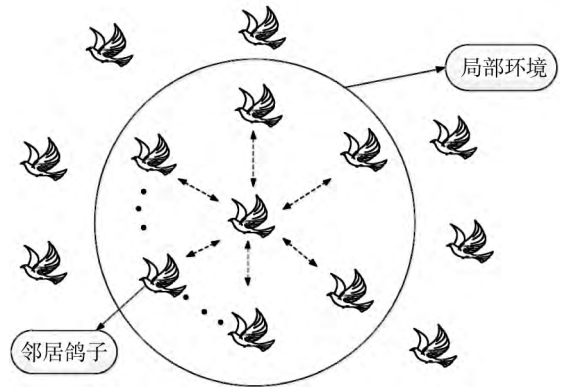


图 1 鸽子与邻居交互的示意图

把多 Agent 融入到 PIO 算法中,每个鸽子在更新自己的位置之前,要先与为其随机配置的邻居进行竞争与合作,所以每只鸽子要计算各自的适应值。在求解目标分配问题上,个体适应值函数由优化问题的目标函数 F 决定,则鸽子 a 的适应值

$$f(a) = F \quad (17)$$

假设鸽子 b 是 a 随机配置的邻居中品质最优的个体,若鸽子 a 满足:

$$f(X_a(t)) \geq f(X_b(t)) \quad (18)$$

则它是一个优质个体,否则为劣质个体。如果 a 是一个优质个体,保持不变。反之,个体 a 的位置根据下式进行调整

$$X'_a(t) = X_b(t) + \text{rand}(-1, 1)(X_b(t) - X_a(t)) \quad (19)$$

可以由式(2)~式(5)看出,即使个体 a 为劣质个体,它在竞争合作的过程中既吸收了周边最优个体的有用信息,同时保留部分自身的原有信息。式中, $\text{rand}(-1,1)$ 是 $(-1,1)$ 区间内的随机数。 x_{\max} 和 x_{\min} 是对可行解 $X'_a(t)$ 的上下界进行约束。

2.2.2 雁群机制

在自然界中,雁群飞行比孤雁飞行在效率和飞行距离上都体现了优势,其中头雁的作用不容忽视,雁群成员借助其飞行产生的气流省力飞行,所以要求头雁更为强壮。受到雁群飞行的启发,可以将大雁的强壮程度为鸽子品质的好坏,将最优个体选为头雁,其他个体根据适应值由高到低依次排列。根据雁群的飞行特性,雁群中的成员只跟随其前面的较优个体 P_{i-1} 而不再一直围绕全局极值个体变化。由此速度更新公式为:

$$V_i(t) = V_i(t-1) \cdot e^{-R \cdot t} + \text{rand} \cdot (P_i - X_i(t-1)) + \text{rand} \cdot (P_{i-1} - X_i(t-1)) \quad (20)$$

在飞行过程中,头雁一般凭借自身经验进行飞行决策,雁群成员依靠自身经验(个体极值)的同时,以成员个体极值 P_i (除头雁外)与适应值的加权平均作为吸收整体成员经验^[15],计算公式如下:

$$P_a = \frac{\sum_{i=1}^N P_i f(X_i(t))}{\sum_{i=1}^N f(X_i(t))} \quad (21)$$

最后通过导航过渡因子^[16] tr 将两个独立迭代循环,合并在一个迭代循环中,更新方式如下:

$$V_i(t) = V_i(t-1) \cdot e^{-R \cdot t} + \text{rand} \cdot tr \cdot (1 - \text{lg}_{\max}^t) (P_{i-1} - X_i(t-1)) + \text{rand} \cdot tr \cdot \text{lg}_{\max}^t (P_a(t-1) - X_i(t-1)) \quad (22)$$

$$X_i(t) = X_i(t-1) + V_i(t) \quad (23)$$

式中, t_{\max} 表示最大迭代次数。

2.2.3 编码方式

直升机协同目标分配属于离散问题,因此,本文对个体的编码进行了离散处理,构造 $m \times n$ 的二进制矩阵作为解空间中的个体,每个位置的分量只能取 0 或 1,作为直升机目标分配矩阵。对于离散型编码方式,如果仍然采取式(23)进行更新,则会产生大量不符合要求的解,严重降低了求解速度,因此,本文给出了一种适合二进制矩阵编码的 MAIPIO 个体更新策略,具体更新策略^[7]如下:

$$X_i(t) = G_5(P_a(t-1)) \otimes G_2(P_{i-1}) \otimes G_1(X_i(t-1)) \quad (24)$$

G_1 是速度部分,即个体在随机扰动作用下脱离

原来位置, G_2 是个体随其前面较优个体 P_{i-1} ,进行学习操作, G_3 是个体吸取吸收整体成员经验 $P_a(t-1)$ 。

2.3 算法描述

改进的鸽群优化算法可描述如下:①初始化环境参数,并产生二进制矩阵的初始种群;②为每个个体随机配置 4 个邻居,按照式(19),与邻居中优势个体竞争和合作,更新个体位置;③计算每个个体的适应度,并对其进行降序排列,重新对 X_i 排序,计算 P_a ;④根据式(24)更新个体位置,并计算个体适应值;⑤对全局最优值 X_p 以及 N_c 进行更新;⑥是否满足终止条件,若是输出最优结果,否则转到②。

算法的结构流程如图 2 所示。

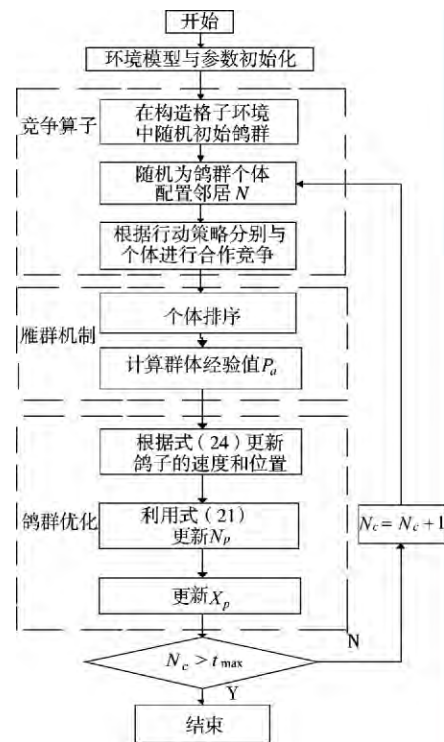


图 2 MAIPIO 算法流程图

3 仿真校验

假设直升机数量 $m=8$, 目标数量 $n=10$, 每架直升机最多可同时攻击两个目标, 每个目标只能分配给一架直升机, 收益矩阵、代价矩阵分别如下页式(25)、式(26)所示。

设初始种群均为 10, 迭代次数 50。分别采用 PIO, MAIPIO 以及 PSO 这 3 种算法对上述问题进行仿真, 并将各种算法的仿真结果进行对比。下页图 3 和图 4 分别为粒子群优化和改进鸽群优化在迭代 50 此过程中的最好解、平均解的变化曲线, 算法的比较结果如下页图 5 所示。通过对初始种群为 10 的粒子群优化和本文算法, 经过 50 次运算, 可分别得到两种算法的最优值。从图 6 中看出在 MAI-

$$C = \begin{bmatrix} 0.5133 & 0.5944 & 0.5684 & 0.4781 & 0.4379 & 0.5335 & 0.5881 & 0.4383 & 0.5302 & 0.4215 \\ 0.5802 & 0.552 & 0.5988 & 0.5949 & 0.529 & 0.4795 & 0.5951 & 0.5216 & 0.4754 & 0.4936 \\ 0.4019 & 0.4933 & 0.4702 & 0.4578 & 0.4711 & 0.5031 & 0.4436 & 0.4442 & 0.4323 & 0.4526 \\ 0.5219 & 0.5193 & 0.5605 & 0.5515 & 0.5253 & 0.5855 & 0.5373 & 0.4437 & 0.471 & 0.4237 \\ 0.422 & 0.5472 & 0.4978 & 0.5727 & 0.4251 & 0.4065 & 0.5814 & 0.5983 & 0.5882 & 0.4682 \\ 0.4238 & 0.5503 & 0.5969 & 0.5627 & 0.4483 & 0.4157 & 0.5451 & 0.4105 & 0.4372 & 0.528 \\ 0.4599 & 0.5713 & 0.4488 & 0.5124 & 0.5422 & 0.5445 & 0.4132 & 0.5416 & 0.4426 & 0.4348 \\ 0.5133 & 0.5944 & 0.5684 & 0.4781 & 0.4379 & 0.5335 & 0.5881 & 0.4383 & 0.5302 & 0.4215 \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$V = \begin{bmatrix} 0.8171 & 0.8475 & 0.9358 & 0.8197 & 0.8988 & 0.8061 & 0.9611 & 0.9957 & 0.9043 & 0.9946 \\ 0.8525 & 0.8918 & 0.8791 & 0.8524 & 0.9558 & 0.9488 & 0.9153 & 0.9425 & 0.8193 & 0.9298 \\ 0.9602 & 0.9926 & 0.8735 & 0.8671 & 0.943 & 0.9 & 0.8366 & 0.9001 & 0.9636 & 0.9601 \\ 0.8058 & 0.9094 & 0.9976 & 0.9359 & 0.9807 & 0.896 & 0.848 & 0.8942 & 0.9635 & 0.8908 \\ 0.9858 & 0.9042 & 0.8075 & 0.8273 & 0.9782 & 0.9809 & 0.9773 & 0.8119 & 0.9445 & 0.8865 \\ 0.9461 & 0.8463 & 0.977 & 0.9442 & 0.8668 & 0.922 & 0.8057 & 0.9364 & 0.83 & 0.9651 \\ 0.8977 & 0.8978 & 0.9827 & 0.8214 & 0.9397 & 0.9235 & 0.898 & 0.8085 & 0.9319 & 0.8167 \\ 0.8171 & 0.8475 & 0.9358 & 0.8197 & 0.8988 & 0.8061 & 0.9611 & 0.9957 & 0.9043 & 0.9946 \end{bmatrix} \quad (26)$$

PIO 算法的 50 次运算中,多数的运算能够有效地寻找到最优值,部分未能寻到最优值的情况下,运算获得的值与最优值的差值较少,寻优效果好。

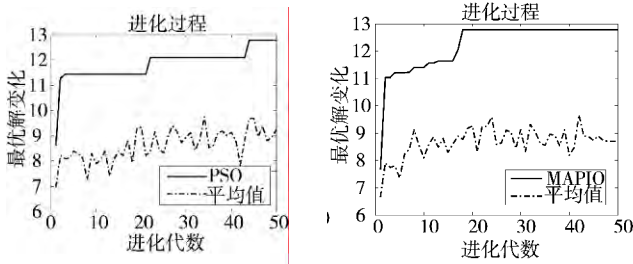


图3 粒子群优化的收敛曲线 图4 改进鸽群优化的收敛曲线

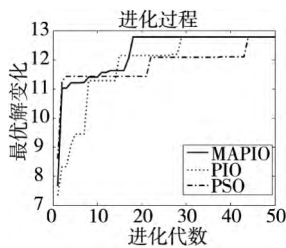


图5 算法性能比较

由图 3 可知,PSO 虽然收敛迅速,但算法的搜索过程是处于无规则状态,搜索后期粒子的局部搜索能力较弱容易陷入局部最优。PIO 在迭代 37 代才开始收敛,且容易陷入局部最优。MAPIO 收益变化曲线表明:能够以较快的速度收敛并脱离局部最优,找到全局最优解。

4 结论

本文在分析了直升机协同目标分配问题,针对 PIO 算法的不足,引入了竞争算子和雁群特征,提

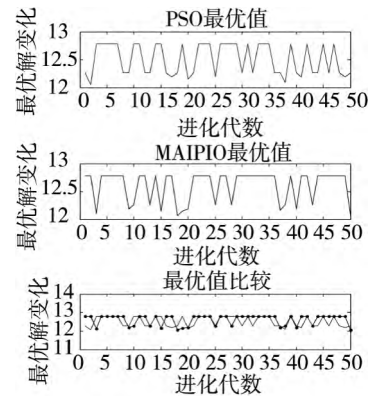


图6 粒子群优化与改进鸽群优化最优值比较

出了基于多 Agent 的改进鸽群优化算法;考虑直升机的价值、战斗力,目标价值,威胁度和战场态势对目标分配的影响,建立了多直升机多目标分配数学模型,并将 MAPIO 应用到协同目标分配问题中,给出算法具体流程与仿真实例。仿真结果表明,本文算法能够在小的迭代次数下得到满足需求的接近理想最优目标分配方案,具有较大的实用价值。

参考文献:

[1] 袁继昌, 黄克超, 胡国桥. 联合作战陆航协同问题研究 [M].北京:军事科学出版社,2011: 10-17.
 [2] 姜永虎, 石文雷. 联合作战中陆军航空兵作战运用浅析 [J].国防大学学报(战役研究),2008,22(10): 35-37.
 [3] 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.
 [4] 李凯,田双亮,耿丽君.基于免疫的蚁群算法[J].山东理工

(下转第 104 页)

(6) 计算综合评分结果

根据本文 3.1 节中的内容, 得到各因素的权值向量:

$$W=(0.085\ 9,0.034\ 8,0.211\ 8,0.118\ 4,0.075\ 6,0.089\ 9,0.243\ 8,0.003\ 5,0.104\ 7)$$

在已知权值向量和灰色关联矩阵后, 可以算得各个方向的量化值:

$$W \cdot A_i = \begin{pmatrix} 0.403 & 1 & 0.333 \\ 0.428 & 0.333 & 1 \\ 1 & 1 & 0.333 \\ 0.333 & 0.5 & 1 \\ 1 & 0.333 & 0.399 \\ 0.803 & 1 & 0.333 \\ 1 & 0.333 & 0.488 \\ 0.213 & 0.333 & 1 \\ 0.5 & 1 & 0.333 \end{pmatrix} = \quad (18)$$

(0.745 4, 0.670 6, 0.469 8)

3 个方向的量化值分别为:A=0.745 4;B=0.670 6;C=0.469 8,其可能来袭方向排序为:A>B>C,A 方向是最可能的来袭方向。

6 结论

本文运用模糊层次分析法和灰色关联理论建立了敌袭主攻方向的判断模型,旨在帮助防空作战指挥员判断敌机最可能的来袭方向,为后续的阵地部署或调整提供参考依据。这有助于指挥员在现代

防空战争中,快速反应、迅速决策,抢占战争先机;也有益于防空阵地的科学部署,从而发挥各个连队的特长,完成作战任务。

参考文献:

[1] 焦景波,王玉生,杨凯. 基于模糊层次分析法的防空兵作战指挥决策能力评估[J].船舶电子工程,2011,31(10): 22-24.

[2] 谢季坚,刘承平. 模糊数学方法及其应用[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2005.

[3] 姜华,贾春雨,袁文波. 基于模糊层次分析法的防空信息战作战效能评估[J]. 兵工自动化,2006,25(6):11-15.

[4] 杜栋,庞庆华,吴炎.现代综合评价方法与案例精选[M]. 北京:清华大学出版社,2015.

[5] 徐志伟,宁志敏,卫明,等. 基于层次分析法和灰色关联分析的目标威胁度评估[J].科技广场,2009(9):16-18.

[6] 李相民,刘立佳,颜骥,等. 要地防空阵地部署前空袭兵器进袭方向预先判断 [J]. 系统工程理论与实践,2014,34(5):1330-1338.

[7] 赵宗贵,曹可劲. 一种基于对抗效果的地面防空作战威胁估计方法 [J]. 中国电子科学研究院学报,2006,1(2): 114-122.

[8] 吴家明.地面防空武器系统混合部署方法研究[D]. 长沙:国防科技大学研究生院,2009.

[9] 谢季坚,刘承平. 模糊数学方法及其应用[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2005.

(上接第 98 页)

大学学报(自然科学版),2009,24(4): 100-103.

[5] MAHFOUF M, CHEN M Y, LINKENS D A. Adaptive weighted particle swarm optimization for multi-objective optimal design of alloy steels[EB/OL]. (2010-11-21).

[6] Duan H B, Qiao P X. Pigeon-inspired optimization: A new swarm intelligence optimizer for air robot path planning [J]. Int J Intell Comput Cybern, 2014(7):24-37.

[7] 王强,丁全心,张安,等.多机协同对地攻击目标分配算法 [J].系统工程与电子技术,2012,34(7): 1400-1405.

[8] 黄俊,向锦武,武哲,等.攻击直升机作战效能评估[J].南京航空航天大学学报,1999,31(6): 620-624.

[9] 刘晓荷,朱汉东,赵虹.利用指数法评估作战飞机的作战效能[J].军事运筹与系统工程,2004,18(2): 59-65.

[10] 寇新洲,杨兆民,高晓峰,等.高炮系统打击效能评估[J].舰船电子工程,2011,31(2): 27-30.

[11] 王加伟,马捷中,翟正军,等.直升机作战效能评估系统的态势估计方法研究[J].计算机工程与设计,2008,29(19): 5096-5098.

[12] 麻士东,龚光红.目标分配的蚁群_模拟退火算法及其改进[J].系统工程与电子技术,2011,33(5): 1183-1186.

[13] 曾国贵,姜长生.武装直升机空战关键技术问题研究[J].直升机技术,2002(3): 29-32.

[14] 唐贤伦,张衡,李进,等.基于多 Agent 粒子群优化算法的电力系统经济负荷分配 [J]. 电力系统保护与控制, 2012,40(10): 42-47.

[15] 张秀玲,臧佳音,樊红敏,等.改进万有引力算法[J].沈阳大学学报,2014,26(6): 468-472.

[16] 段海滨,邱华鑫,范彦铭.基于捕食逃逸鸽群优化的无人机紧密编队协同控制[J].中国科学:科学技术,2015,45(67):559-572.