

DOI:10.16356/j.1005-2615.2023.01.013

基于粒子群优化的多导弹动态武器目标分配算法

刘攀¹, 徐胜利², 张迪², 甄子洋¹

(1. 南京航空航天大学自动化学院, 南京 211106; 2. 上海机电工程研究所, 上海 201109)

摘要: 针对复杂多变的未来战场环境, 对空防御系统需要对多个目标进行武器分配。由于传统静态武器目标分配 (Static weapon target assignment, SWTA) 模型受到很多因素的限制, 无法适应战场态势的快速变化。为了解决多导弹的动态武器目标分配 (Dynamic weapon target assignment, DWTA) 问题, 将对空防御过程离散为多个阶段, 并根据战场实时态势数据构建了 DWTA 的数学模型, 提出了一种改进的粒子群优化算法, 引入了武器转火时间窗等约束条件, 在算法中考虑拦截概率和导弹耗费等多个指标。最后通过大量仿真实验, 验证了粒子群算法进行多导弹目标分配的合理性和有效性。

关键词: 粒子群算法; 态势评估; 空战对抗; 武器目标分配; 动态分配

中图分类号: E91 文献标志码: A 文章编号: 1005-2615(2023)01-0108-08

Multi-missile Dynamic Weapon Target Assignment Algorithm Based on Particle Swarm Optimization

LIU Pan¹, XU Shengli², ZHANG Di², ZHEN Ziyang¹

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211106, China;
2. Shanghai Electro-Mechanical Engineering Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: In view of the complex and changeable future battlefield environment, the air defense system needs to realize the assignment of weapons to multiple targets. Because the traditional static weapon target assignment (SWTA) model is restricted by many factors, it cannot adapt to the rapid changes in the battlefield situation. In order to solve the problem of multi-missile dynamic weapon target assignment (DWTA), the air defense process is discretized into multiple stages, and a mathematical model of DWTA is constructed based on the real-time situation data of the battlefield, and an improved particle swarm optimization algorithm is proposed. Constraints such as the time window for the weapon to fire are considered, and multiple indicators such as interception probability and missile cost are considered in the algorithm. Finally, through a large number of simulation experiments, the rationality and effectiveness of particle swarm algorithm for multi-missile target assignment are verified.

Key words: particle swarm algorithm; situation assessment; air combat confrontation; weapon target assignment (WTA); dynamic assignment

多导弹动态分配作为一种动态武器目标分配式, 有广泛的应用需求。武器目标分配 (Weapon target assignment, WTA) 是根据目标威胁的大小

基金项目: 国家自然科学基金(61973158); 南京航空航天大学前瞻布局科研专项基金(1003-ILA22064); 国防基础科研项目(JCKY2018203C020)。

收稿日期: 2022-01-24; **修订日期:** 2022-11-18

通信作者: 甄子洋, 男, 教授, 博士生导师, E-mail: zhenziyang@nuaa.edu.cn。

引用格式: 刘攀, 徐胜利, 张迪, 等. 基于粒子群优化的多导弹动态武器目标分配算法[J]. 南京航空航天大学学报, 2023, 55(1): 108-115. LIU Pan, XU Shengli, ZHANG Di, et al. Multi-missile dynamic weapon target assignment algorithm based on particle swarm optimization[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023, 55(1): 108-115.

和运动状态,按照期望目标(如最小化对防御资源毁伤概率或最大化对目标拦截概率)进而确定武器-目标之间的分配关系,形成对目标的分配策略^[1]。

目前的研究主要集中在与 DWTA 问题相对应的静态武器目标分配(Static weapon target assignment, SWTA)问题上^[2-3]。由于 SWTA 与时间的作用无关,因此目标的数量等信息可视为已知信息。相较于 DWTA 问题而言,由于 SWTA 问题考虑因素较少,因此实现上也较简单,但其模型仍具有一定的局限性,如无法实现新目标的分配以及确定何时分配等问题。而 DWTA 问题在任何时候都要考虑目标运动情况和武器转火时间等约束,并结合前期的交战结果进行实时在线决策,对 DWTA 问题的研究可为实际空战决策提供积极帮助^[4]。

Lloyd 证明了 WTA 问题是 NP(Non-deterministic polynomial) 完全问题。20 世纪 80 年代, Hosein 提出了 SWTA 与 DWTA 的概念,但没有建立真正意义上的 DWTA 模型;1989 年, Hosein 与 Athans 较为系统地研究了普遍性的 WTA 问题。国内研究人员主要针对地空防御这一特定领域构建 WTA 问题的模型,考虑的因素也相对较为简单,多数是解决一些 SWTA 问题^[5-9]。在对空防御系统中,态势评估往往是武器目标分配前的关键一步,目前主要采用非参量法计算态势评估数据,非参量法是基于空战双方的几何信息进行评估,具有简单、实用和计算方便等特点,广泛应用于很多实际案例^[10-11]。

本文首先对态势评估模型进行改进,选取能够较为全方位体现战场态势情况的评估因子;然后构建多导弹的 DWTA 问题基本模型和求解策略,着重解决武器平台和目标同时移动时的分配难题,并设计适应动态-多阶段 WTA 问题的改进粒子群算法;最后在典型的对空防御场景下进行仿真分析。

1 多导弹目标分配数学模型

1.1 态势评估建模

本文构建了一种直接对抗式的多导弹目标分配典型战场环境,其中进攻方战机组成战斗编队,对防御方战机造成实质性威胁;防御方战机作为空中移动武器发射平台,其每架战机均携带有数量一定的空空导弹,可以对进攻方战机进行拦截。针对 DWTA 问题对实时性要求较高的特点,在目标分配之前需要对作战双方进行态势评估,通过建立一套科学合理的评判标准,实时反映双方的威胁和优

势信息。

下文以威胁指数的计算为例进行说明。考虑的动态威胁因子主要包括相对角度、飞行速度、相对高度、相对距离和隐身因素等信息,图 1 为进攻方战机 R_j 和防御方战机 B_i 的态势示意图^[12]。

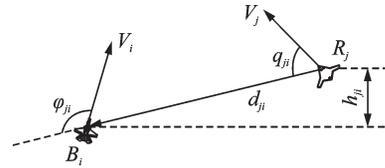


图 1 空战态势示意图

Fig.1 Schematic diagram of air combat confrontation

图 1 中 d_{ji} 为两机的距离; h_{ji} 表示两机的高度差; q_{ji} 为战机 R_j 的进入角, φ_{ji} 为战机 B_i 的位置角。

分别用 Ta_{ji} 、 Tv_{ji} 、 Th_{ji} 、 Tr_{ji} 、 Tin_{ji} 表示战机 R_j 对 B_i 的角度、速度、高度、距离和隐身性能威胁因子,各威胁因子计算公式如下^[13]。

(1) 角度威胁因子

角度威胁因子指的是空战过程中进攻方战飞机头指向对防御方战机可能造成攻击威胁,角度威胁值计算方法如下

$$Ta_{ji} = \begin{cases} 1 & |q_{ji}| \leq |\Theta| \\ 1 - \frac{|q_{ji}| - |\Theta|}{180^\circ - |\Theta|} & |q_{ji}| > |\Theta| \end{cases} \quad (1)$$

式中: q_{ji} 为进攻方战机速度方向和目标线夹角; Θ 为进攻方机载雷达探测角度范围的一半。

(2) 速度威胁因子

$$Tv_{ji} = \begin{cases} 0.1 & V_j < 0.6V_i \\ -0.5 + V_j/V_i & 0.6V_i \leq V_j \leq 1.5V_i \\ 1.0 & V_j > 1.5V_i \end{cases} \quad (2)$$

式中: V_i 表示防御方战机速度; V_j 表示进攻方战机速度。

(3) 高度威胁因子^[12]

$$Th_{ji} = \begin{cases} 1 & h_{ji} < -5 \text{ km} \\ 0.5 - 0.1h_{ji} & -5 \text{ km} \leq h_{ji} < 5 \text{ km} \\ 0.1 & h_{ji} \geq 5 \text{ km} \end{cases} \quad (3)$$

式中: h_i 为防御方战机高度; h_j 为进攻方战机高度。

(4) 距离威胁因子

已知两机距离为 d_{ji} , 防御方和进攻方战机的攻击范围分别为 $[0, d_{Bm}]$, $[0, d_{Rm}]$, 防御方和进攻方战机雷达的探测范围分别为 $[0, d_{Br}]$, $[0, d_{Rr}]$ 。考虑进攻方战机综合性能较强的情况, 即 $d_{Rr} \geq d_{Br}$, $d_{Rm} \geq d_{Bm}$, 则距离威胁因子的计算如下

$$\text{Tr}_{ji} = \begin{cases} 0 & d_{ji} \geq d_{Rr} \\ 0.4 - 0.4 \frac{d_{ji} - d_{Br}}{d_{Rr} - d_{Br}} & d_{Br} \leq d_{ji} < d_{Rr} \\ 1 - 0.6 \frac{d_{ji} - d_{Rm}}{d_{Br} - d_{Rm}} & d_{Rm} \leq d_{ji} < d_{Br} \\ 0.5 + 0.5 \frac{d_{ji} - d_{Bm}}{d_{Rm} - d_{Bm}} & d_{Bm} \leq d_{ji} < d_{Rm} \\ 0.5 + 0.3 \frac{d_{Bm} - d_{ji}}{d_{Bm}} & d_{ji} < d_{Bm} \end{cases} \quad (4)$$

(5) 隐身性能威胁因子

$$\text{Tin}_{ji} = \begin{cases} 1 & \text{in}_B - \text{in}_R > \text{in}_0 \\ 0.5 + \frac{\text{in}_B - \text{in}_R}{2\text{in}_0} & |\text{in}_B - \text{in}_R| \leq \text{in}_0 \\ 0.1 & \text{in}_B - \text{in}_R < -\text{in}_0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: in_B 为防御方战机的雷达散射截面积(Radar cross section, RCS)值; in_R 为进攻方战机的 RCS 值; in_0 为 RCS 门限值。用战机的 RCS 的大小来衡量战机的隐身性能, 一般而言, 隐性能越好, 其 RCS 值也越小。

各威胁因子在空战综合威胁评估决策中的作用不尽相同, 采用结合了定性和定量两种手段的层次分析法 (Analytic hierarchy process, AHP) 对各威胁因子的作用进行评估。层次分析法中各威胁因子权重向量满足下式要求

$$\sum_{i=1}^5 w_i = 1 \quad w_i > 0 \quad (6)$$

式中 w_i 为层次分析法确定的各威胁因子权值。

最终得到的威胁指数 T_{ji} 为

$$T_{ji} = w_1 \cdot \text{Ta}_{ji} + w_2 \cdot \text{Tv}_{ji} + w_3 \cdot \text{Th}_{ji} + w_4 \cdot \text{Tr}_{ji} + w_5 \cdot \text{Tin}_{ji} \quad (7)$$

1.2 目标分配建模

在 DWTA 的初始阶段中, 防御方战机分配部分导弹拦截进攻方战机。在第 2 次分配时, 又将上次分配结果 (进攻方生存情况、防御方的武器信息) 作为新阶段的已知参数, 防御方再次对当前目标重新分配。循环往复, 每次分配都是为了尽可能减少进攻方战机的总生存期望值。

由于双方的距离时刻变化, 必须在满足目标时间窗的约束条件才能分配, 主要有打击时间窗约束和转火时间窗约束^[14]。

(1) 打击时间窗约束

假设第 j 架进攻方战机在时间 t_{ij} 被第 i 架防御方战机拦截, 打击时间约束如下

$$\text{time}_{\text{in}} \leq t_{ij} \leq \text{time}_{\text{out}} \quad (8)$$

式中: time_{in} 为第 j 架进攻方战机抵达防御方第 i 架战机射程最远处时间; time_{out} 为第 j 架进攻方战机飞离防御方第 i 架战机最大射程的时间。防御

方战机对进攻方战机拦截时间应满足这一约束条件。

(2) 转火时间窗约束

防御方对一个目标的打击只占据整个空战的部分时间。而防御方战机在发射一次导弹后需经过一定的时间以完成武器转火, 之后才能参与下一次分配, 定义转火时间窗约束为 $t_{ij}(t)$, 其中 $t \in (t_s, t_e)$, t_s 表示防御方战机 B_i 开始拦截进攻方战机 R_j 的时间, t_e 表示防御方战机可以分配给下一个目标的最早时间, 则该战机的武器转火时间为 $t_e - t_s$ 。

为简化模型, 给出 DWTA 问题的一般假设。

假设 1 初始时刻, 双方位置等空战信息已知, 除双方位置和导弹数量变化外, 战机的其他性能信息不变, 且无新的进攻方战机出现。

假设 2 防御方战机 B_i 只能选择其攻击范围内的进攻方战机。

假设 3 第 i 架防御方战机带弹 L_i 枚, 且每架战机可携带的导弹数至少为 1 枚, 最多为 4 枚, 则防御方战机携带的导弹总数 Z 可表示为

$$Z = \sum_{i=1}^I L_i \quad 1 \leq L_i \leq 4 \quad (9)$$

假设 4 防御方战机的武器转火时间均为 Δt , 因此除第 1 次分配外, 后续开始分配的时间为上一次分配时间加上 Δt 。

假设 5 第 k 次分配时防御方战机 B_i 对进攻方战机 R_j 的优势指数 S_{ij}^k 等同于对进攻方战机 R_j 的毁伤概率, 则第 k 次分配到下次分配前, 进攻方战机的生存概率为

$$A_j^k = \prod_{i=1}^{I^k} (1 - S_{ij}^k) X_{ij}^k \quad (10)$$

式中: I^k 表示第 k 阶段防御方可参与目标分配的战机总数, X_{ij}^k 为布尔值。当防御方战机 B_i 攻击进攻方战机 R_j 时, $X_{ij}^k = 1$; 当防御方战机 B_i 不攻击进攻方战机 R_j 时, $X_{ij}^k = 0$ 。每次目标分配完成后进行战场评估, 计算进攻方战机的累计生存概率, 若大于生存阈值, 则判定该战机被击中; 否则仍将其作为待拦截目标。

综合上述条件, 每次都以进攻方战机生存概率最小的原则进行防御方战机导弹的分配, 则第 k 次分配中目标优化函数为

$$E^k(\pi) =$$

$$\arg \min_{\pi \in \Omega^k} \sum_{j=1}^{J^k} \sum_{i=1}^{I^k} \left\{ T_{ji}^k \cdot \left[\prod_{i=1}^{I^k} (1 - S_{ij}^k) X_{ij}^k \right] \right\} \quad (11)$$

式中: Ω^k 为当前所有满足约束条件的防御方战机-进攻方战机分配方案构成的集合; T_{ji}^k 和 S_{ji}^k 分别为

战机 B_i 和 R_j 之间的威胁和优势指数; I^k 和 J^k 分别为每次分配时防御方和进攻方战机的总数。

当进攻方战机剩余数量为零或防御方战机剩余导弹数为零时,不再进行武器目标分配决策,空战结束。

2 基于改进 PSO 的 DWTA 求解

1995 年, Kennedy 与 Eberhart 在模拟鸟群觅食的过程的基础上提出了粒子群优化算法。由于粒子群优化算法的结构简单,容易编程实现,且算法的收敛速度也较快,因此该算法在优化领域得到了广泛应用,被用于解决非线性优化问题。

为解决多导弹的目标分配问题,基于空战初始时刻态势评估得到的威胁矩阵 T 和优势矩阵 S ,对粒子群算法做出适应性改进:将粒子群中的每个粒子的位置视为一个导弹-进攻方战机的目标分配方案;粒子适应度值视为该目标分配方案下进攻方战机对防御方战机的期望剩余威胁;以某个粒子在目前迭代中的最小期望值作为局部最优解;所有粒子的最小值作为全局最优解。经过多次迭代后,适应度值最小粒子的位置即为粒子群算法优化得到的目标分配方案。粒子群优化算法实现多导弹目标分配决策的步骤如下:

步骤 1 初始化粒子群。设置粒子群的粒子个数为 m ,粒子的空间维数为 Z 。第 i 个粒子的位置向量 X_i 、速度向量 V_i 可以分别表示为

$$\begin{cases} X_i = (x_{i1}, \dots, x_{ir}, \dots, x_{iz}) \\ V_i = (v_{i1}, \dots, v_{ir}, \dots, v_{iz}) \end{cases} \quad (12)$$

式中:位置向量 X_i 与多导弹目标分配方案对应,位置向量中具体数值 x_{ir} 为 $1 \sim J$ 的正整数,即为第 r 枚导弹分配的进攻方战机编号, Z 为导弹总数; $i \in (1, 2, \dots, m)$, $r \in (1, 2, \dots, Z)$ 。

步骤 2 更新粒子的速度和位置。

根据局部最优解 P_i 和全局最优解 P_g 以及每次迭代的速度向量、位置向量,可以更新得到下一代的速度值

$$\begin{aligned} V_i(t+1) &= \omega V(t) + c_1 \cdot \text{rand}_1() [P_i(t) - X_i(t)] \\ &+ c_2 \cdot \text{rand}_2() [P_g(t) - X_i(t)] \end{aligned} \quad (13)$$

式中: ω 为惯性因子; c_1 和 c_2 为学习因子; $\text{rand}_1()$ 和 $\text{rand}_2()$ 为取值为 $[0, 1]$ 的随机数。粒子速度要限制在一定范围之内,即满足 $V_{\min} < V_i < V_{\max}$ 。

粒子位置可表示为

$$X_i(t+1) = V_i(t+1) + X_i(t) \quad (14)$$

由式(13)可知速度向量 V_i 的值不是正整数,

但位置向量 X_i 的取值不仅需满足 $1 \sim J$ 整数的条件,还需符合空战中实际约束,即可能出现部分导弹因攻击范围的限制,无法对某些进攻方战机进行有效拦截。假设经过态势评估后,防御方战机攻击范围内的进攻方战机编号为集合 Mat^i ,其最大值为 mat_{\max}^i ,最小值为 mat_{\min}^i ;第 r 枚导弹分配的进攻方战机编号 x_{ir} 应限制在集合 Mat^i 内

$$x_{ir}(t+1) = \begin{cases} \text{mat}_{\max}^i & x_{ir}(t+1) > \text{mat}_{\max}^i \\ \text{mat}_{\min}^i & x_{ir}(t+1) < \text{mat}_{\min}^i \\ \lfloor x_{ir}(t+1) \rfloor & \lfloor x_{ir}(t+1) \rfloor \in \text{Mat}^i \end{cases} \quad (15)$$

式中:若更新后的 $x_{ir}(t+1)$ 大于 mat_{\max}^i ,则取攻击范围内的进攻方战机编号最大值;若其值小于 mat_{\min}^i ,则取攻击范围内的进攻方战机编号最小值,若其值向下取整后在集合 Mat^i 之中,则保留该值不变。

步骤 3 由式(11)计算出导弹-进攻方战机的目标分配方案的期望剩余威胁,即粒子的适应度值,并以此更新局部最优解和全局最优解。

步骤 4 若当前迭代次数大于最大迭代次数,则输出优化后的导弹-进攻方战机的分配方案,否则转至步骤 2。

图 2 为利用粒子群算法求解多导弹目标分配问题的整体流程。

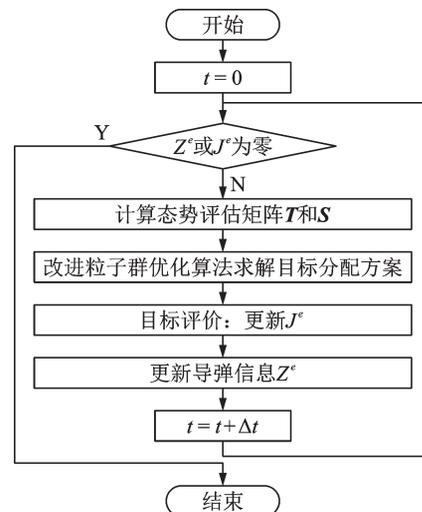


图 2 动态目标分配问题决策流程

Fig.2 Dynamic target allocation problem decision process

在每次分配完成后更新进攻方战机数量 J^e 和防御方导弹数量 Z^e ,每次分配都需要基于战场实时环境计算态势评估矩阵 T 和 S ,再由改进粒子群优化算法求解出优化后的目标分配方案,最后,当 J^e 和 Z^e 为零时,不再进行武器目标分配决策,空战结束。

3 仿真验证与分析

3.1 实验参数设置

为了验证粒子群算法求解DWTA问题的寻优能力,以问题描述中的空战环境为背景,分别设置防御方优势、进攻方优势和双方均势等空战情景。假设双方为同一类型的战机,即双方战机的战技性能相同。表1为简化后的战机性能和导弹性能参数。表2为双方战机数目及防御方战机携带的导弹数量。

表1 战机空战技能数据

| 性能参数 | 数值 |
|---------------------------|------|
| 飞行速度/(m·s ⁻¹) | 536 |
| 雷达探测距离/km | 96 |
| 雷达探测范围/(°) | ±60 |
| 最小雷达反射面积/m ² | 0.01 |
| 导弹射程/km | 72 |

表2 实验测试分组

| 测试分组 | 战机数量 B~R | 导弹数量 Z |
|-------|----------|--------|
| 防御方优势 | 20~10 | 48 |
| 进攻方优势 | 6~20 | 24 |
| 双方均势 | 20~20 | 48 |

实验参数设置如下:战场大小设置为50 km×70 km的矩形区域,双方战机在各自初始区域分别按表1中设定的数量随机生成,并朝对方的方向按平均飞行速度匀速移动。进攻方战机R_j对防御方战机B_i的威胁指数T_{ji}以及防御方战机B_i对进攻方战机R_j的优势指数S_{ij}将基于双方初始位置、移动速度及方向,通过态势评估模型实时计算得到。设置进攻方对防御方的威胁阈值大小为0.9;隐身性能指数为0.01;进攻方战机受导弹攻击后的生存概率阈值大小为0.2;防御方的武器转火时间为5 s。

粒子群算法相关参数设置如表3所示。将进攻方对防御方的平均威胁值作为评判指标,计算公

表3 粒子群算法相关参数

| 算法参数 | 数值 |
|--------------------------------------|----------|
| 学习因子 c ₁ , c ₂ | 2 |
| 迭代次数 n _{max} | 100 |
| 粒子个数 m | 50 |
| 粒子维数 | 导弹数量 Z 枚 |
| 权重系数 ω | 0.375 |

式如下

$$\bar{T} = \left(\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J T_{ji} \right) / (J \times I) \quad (16)$$

式中: \bar{T} 表示防御方战机受到进攻方战机威胁的平均值;I和J为空战中双方战机总数。

3.2 实验结果分析

下面以防御方优势、进攻方优势和双方均势3种情况对实验结果进行分析。

(1) 防御方优势

图3为目标分配示意图和算法收敛曲线,图中蓝色为防御方战机,红色为进攻方战机,图4为多导弹分配策略,图中包含防御方的导弹分配策略、剩余导弹和目标数量信息。

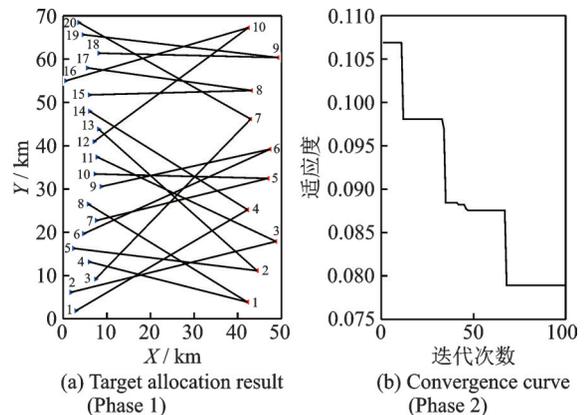


图3 防御方优势时的分配示意图及算法收敛曲线

Fig.3 Distribution diagram and algorithm convergence curve (Defensive advance)

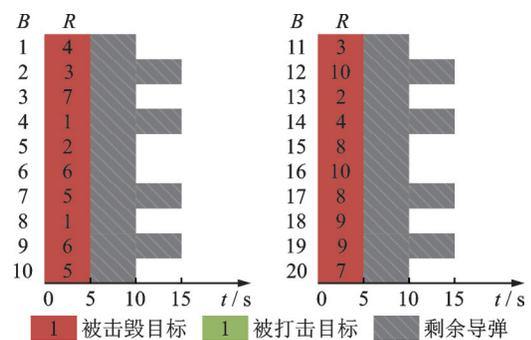


图4 防御方优势时的多导弹分配策略

Fig.4 Multi-missile allocation strategy (Defensive advantage)

结合图3和图4可知,由于此时是防御方20架战机拦截进攻方10架战机,算法只进行了一次目标分配即可完成对进攻方所有目标的拦截,分配完成后期望剩余威胁值为0.079,最终防御方还有导弹剩余。

(2) 进攻方优势

图5为目标分配示意图,图6为当前测试分组下的多导弹分配策略。当防御方仅有6架战机拦

截进攻方的 20 架战机时,算法一共进行 4 次目标分配,最终以防御方导弹耗尽,而进攻方仍有战机存活,存活的进攻方战机编号为[4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 14, 16, 17]。

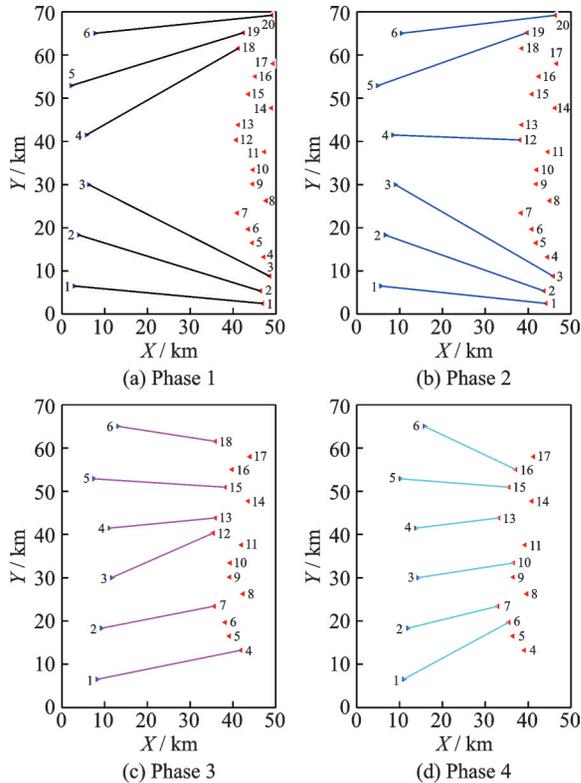


图 5 进攻方优势时的分配示意图

Fig.5 Distribution diagram (Offensive advantage)

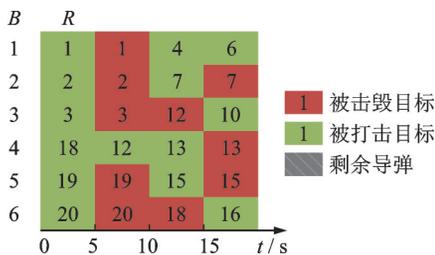


图 6 进攻方优势时的多导弹分配策略

Fig.6 Multi-missile allocation strategy (Offensive advantage)

图 7 为算法收敛曲线。结合图 6 可知,第 1 次目标分配之后,并未对进攻方战机造成实质性损伤,即防御方在处于劣势情况下,一次目标分配无法有效降低进攻方对己方的威胁值,但随着分配次数积累,如进攻方战机[1, 2, 3, 19, 20]在连续两次被防御方的导弹攻击后,由于其生存概率低于设定的阈值,因而被判断为被击毁。因此,第 3 次分配算法收敛曲线的适应度值(威胁值)相比于前两次分配有了明显下降,但由于有大量的进攻方战机未被成功拦截,最终的期望剩余威胁值为 0.465,防御方仍然处于较高威胁状态。

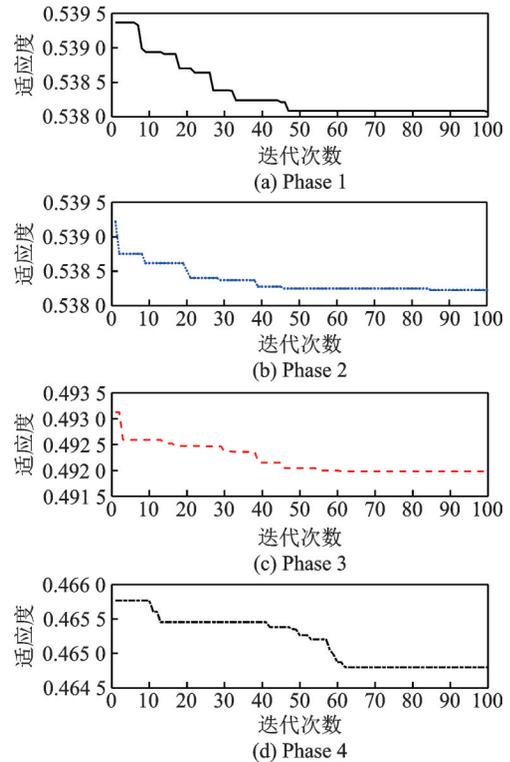


图 7 进攻方优势时的算法收敛曲线

Fig.7 Algorithm convergence curve (Offensive advantage)

(3) 双方均势

图 8 为多导弹分配策略。图 9 为目标分配示意图。当防御方和进攻方的战机同为 20 架时,算法共进行了 3 次目标分配,最终所有进攻方战机均被拦截,防御方无剩余导弹。

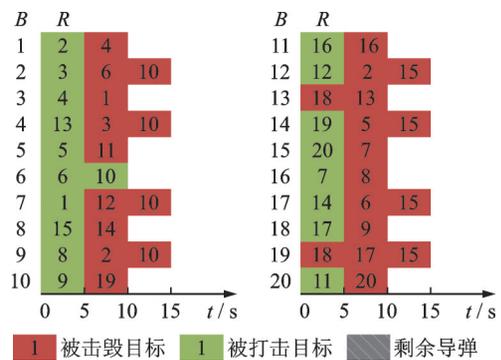


图 8 双方均势时的多导弹分配策略

Fig.8 Multi-missile allocation strategy (Balance of power)

双方均势时的算法收敛曲线如图 10 所示。第 1 次分配仅完成了对进攻方 18 号战机的拦截,因此前两次算法收敛时的适应度值差别不大,均在 0.240 左右,第 3 次分配实现对进攻方 10 和 15 号战机的拦截后,算法收敛的适应度值降为了 0.008。

针对上述 3 种情况,分别计算每次目标分配时粒子群算法的平均寻优时间及分配方案中双方最大距离,如表 4 所示。在迭代次数设置为 100 次时,该算法的平均迭代时间主要由参与分配的防御方

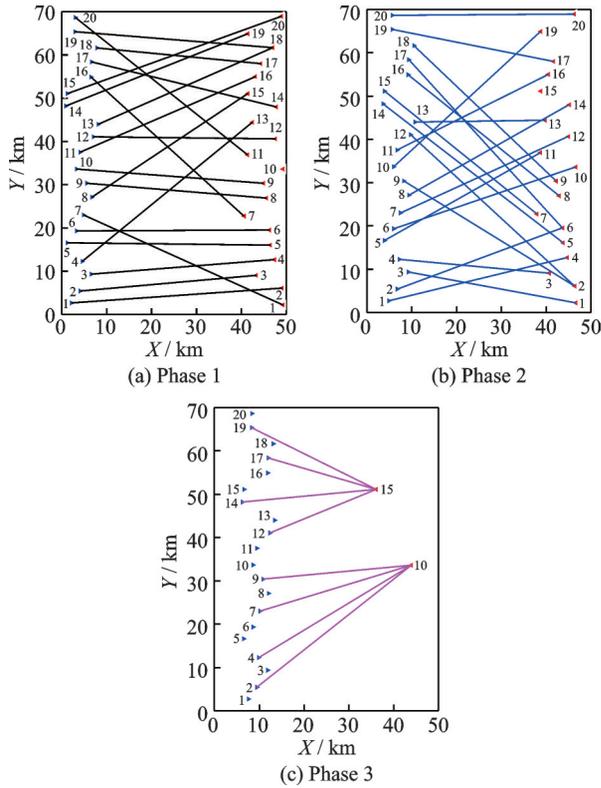


图9 双方均势时的分配示意图

Fig.9 Distribution diagram (Balance of power)

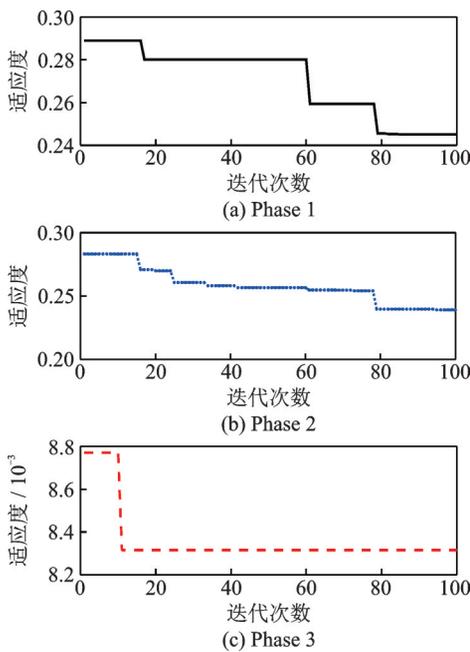


图10 双方均势时的算法收敛曲线

Fig.10 Algorithm convergence curve (Balance of power)

战机数量决定。

表4中防御方优势下的第1次分配和双方均势下的第1、2次分配的算法迭代时间在1 s左右,此时参与分配的战机达到了20架;双方均势下的第3次分配,有8架战机进行目标分配,其算法迭代时间大致为0.41 s;而在进攻方优势下每次只有6架战机可以参与分配,问题规模减小的同时其算法迭

表4 算法平均迭代时间及分配最大距离

Table 4 Average iteration time and maximum distance of algorithm

| 测试分组 | 算法平均迭代时间/s | | | | 分配最大距离/km |
|-------|------------|---------|---------|---------|-----------|
| | Phase 1 | Phase 2 | Phase 3 | Phase 4 | |
| 防御方优势 | 0.98 | — | — | — | 51.12 |
| 进攻方优势 | 0.29 | 0.30 | 0.30 | 0.28 | 49.46 |
| 双方均势 | 1.01 | 0.99 | 0.41 | — | 51.26 |

代时间也减小到0.29 s左右。实际的空战过程中,防御方战机对敌打击的间隔时间必须要大于其武器转火时间,因此,只要在武器转火时间内完成目标分配都不会影响下一次对敌打击任务,而仿真中涉及到的3种情况,算法平均迭代时间均小于战机的武器转火时间,因此该算法在这种规模的空战对抗下是能够满足动态分配的要求。粒子群算法得到的分配方案中双方战机的最大距离也符合导弹射程约束,说明提出的适用于多导弹目标分配的粒子群算法分配策略合理,具有一定有效性。

4 结 论

为了实现动态武器目标分配,本文针对空战中的多导弹目标分配问题。首先对战场环境进行了实时态势评估建模,接着考虑交战双方空间位置变化及武器转火时间等因素,将整个空战过程分成和武器转火时间相匹配的几个阶段,在每个阶段均采用粒子群算法求解最佳分配策略。最后通过3组对比实验,测试了粒子群算法求解动态武器目标分配问题的性能,实验结果说明了在不同态势情况下,算法均能快速得到合理的分配策略。因此,以粒子群算法为代表的智能优化算法用于解决多导弹动态目标分配问题具有很大的发展潜力。但本文未考虑防御方战机被进攻方战机击毁的情况,因此,在后续的研究中,可以对算法进行改进,以解决攻防对抗下的动态武器目标分配问题。

参考文献:

[1] 张青,曾庆华,张宗宇,等.基于海洋捕食者算法的武器-目标分配问题研究[J].兵器装备工程学报,2022,43(8):158-163.
ZHANG Qing, ZENG Qinghua, ZHANG Zongyu, et al. Research on weapon target assignment problem based on marine predator algorithm[J]. Journal of Weapon Equipment Engineering, 2022, 43(8): 158-163.

[2] ALEXANDER G K, DARRYL K A, BRIAN J L. A heuristic and metaheuristic approach to the static weapon target assignment problem [J]. Journal of Global Optimization, 2020(78): 791-812.

- [3] LI Y, KOU Y X, LI Z W, et al. A modified pareto ant colony optimization approach to solve biobjective weapon-target assignment problem[J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2017(1): 1-14.
- [4] KONG L R, WANG J Z, ZHAO P. Solving the dynamic weapon target assignment problem by an improved multiobjective particle swarm optimization algorithm[J]. Applied Sciences, 2021, 11(19): 9254-9260.
- [5] XU W Q, CHEN C, DING S X, et al. A bi-objective dynamic collaborative task assignment under uncertainty using modified MOEA/D with heuristic initialization [J]. Expert Systems with Applications, 2020, 140: 112844.1-112844.24.
- [6] 邱少明, 冯江惠, 杜秀丽, 等. 基于改进多目标 HQPSOGA 求解武器目标分配问题[J]. 计算机应用与软件, 2021, 38(11): 255-262.
- QIU Shaoming, FENG Jianghui, DU Xiuli, et al. Solving weapon target assignment problem based on improved multi-objective HQPSOGA[J]. Computer Application and Software, 2021, 38(11): 255-262.
- [7] LI J, XIN B, PARDALOS P M, et al. Solving bi-objective uncertain stochastic resource allocation problems by the CVaR-based risk measure and decomposition-based multi-objective evolutionary algorithms[J]. Annals of Operations Research, 2021, 296(1/2): 639-666.
- [8] 孙海文, 谢晓方, 孙涛, 等. 改进型布谷鸟搜索算法的防空火力优化分配模型求解[J]. 兵工学报, 2019, 40(1): 189-197.
- SUN Haiwen, XIE Xiaofang, SUN Tao, et al. Improved cuckoo search algorithm for solving antiaircraft weapon-target optimal assignment model[J]. Acta Armamentarii, 2019, 40(1): 189-197.
- [9] 邱少明, 刘良成, 张学翠, 等. 基于改进鲸鱼优化算法的武器目标分配[J]. 火力与指挥控制, 2021, 46(7): 27-31.
- QIU Shaoming, LIU Liangcheng, ZHANG Xuecui, et al. Research on weapon target assignment based on improved whale optimization algorithm [J]. Fire Control and Command Control, 2021, 46(7): 27-31.
- [10] 吴傲, 杨任农, 梁晓龙, 等. 基于模糊推理的无人战斗机视距空战机动决策[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(6): 898-908.
- WU Ao, YANG Rennong, LIANG Xiaolong, et al. UAV visual range air combat maneuver decision based on fuzzy inference[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2021, 53(6): 898-908.
- [11] 黄岩毅, 陈国栋. 电子对抗条件下空战综合优势评估模型[J]. 火力与指挥控制, 2021, 46(11): 118-123, 129.
- HUANG Yanyi, CHEN Guodong. Evaluation model of air combat comprehensive advantage under electronic countermeasures[J]. Firepower and Command and Control, 2021, 46(11): 118-123, 129.
- [12] ZHANG P, JIANG J, XU H Y, et al. Coordinated air combat target assignment with risk decision-making based on genetic algorithm[J]. Communications in Information Science and Management Engineering, 2012, 2(10): 1-5.
- [13] 宋遐淦, 江驹, 徐海燕. 改进模拟退火遗传算法在协同空战中的应用[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017, 38(11): 1762-1768.
- SONG Xiagan, JIANG Ju, XU Haiyan. Application of improved simulated annealing genetic algorithm in cooperative air combat[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2017, 38(11): 1762-1768.
- [14] 邵诗佳. 基于智能算法的武器目标分配问题研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
- SHAO Shijia. Research on weapon target assignment based on intelligent algorithm[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019.

(编辑:刘彦东)