

基于 IGHS 的防空火力资源优化分配模型



史红权¹, 隆雨佟^{2*}, 曾黎²

(1. 大连舰艇学院作战软件与仿真研究所 大连 116018; 2. 电子科技大学计算机科学与工程学院 成都 611731)

【摘要】现代编队防空作战中, 不同武器平台携带防空资源更具多样化, 如何有效统筹分配现有作战资源, 使得编队级防空作战的总体效益最大化成为制胜关键。为此, 该文将各作战平台的所有作战资源建模为一个统一资源池, 面向多个目标同时拦截作战情景, 提出了一种编队级防空火力资源优化分配模型, 平衡了毁伤概率与资源消耗的关系; 同时提出了一种改进全局最优和声搜索算法, 并运用到该模型上, 实现了模型的高效求解。最后, 通过在简单数据规模和复杂数据规模两种情况下的仿真对比实验分析, 验证了该文方法的有效性。

关键词 毁伤概率; 编队防空; 改进全局最优和声搜索算法; 优化分配模型; 资源消耗
中图分类号 TP183 **文献标志码** A **doi**:10.12178/1001-0548.2021033

Optimal Allocation Model of Air Defense Firepower Resources Based on IGHS

SHI Hongquan¹, LONG Yutong^{2*}, and ZENG Li²

(1. Operation Software and Simulation Institute, Dalian Naval Academy Dalian 116018;

2. School of Computer Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731)

Abstract Given the increasingly diversified air defense resources in modern air defense operations, how to effectively allocate the existing combat resources to maximize the overall benefit is the key to win in air defense. Aiming at the problem, with all combat resources of each combat platform regarded as a resource pool, an optimal allocation model of air defense firepower resources is proposed in this paper to balance the relationship between damage probability and resource consumption. At the same time, an improved global best harmony search algorithm is proposed and applied to the model to realize the efficient solution of the model. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified by the simulation experiments in the case of simple data scale and complex one.

Key words damage probability; formation air defense; improved global best harmony search algorithm; optimal allocation model; resource consumption

面向多目标的编队级防空火力资源优化分配属于一种武器目标分配 (weapon target assignment, WTA) 问题, 随着同时面对的敌方目标规模和己方火力资源规模的扩大, 火力资源到目标的分配难度呈指数型增加, 成为研究的热点问题。

现有方法主要存在优化分配问题建模方法和模型求解方法两方面的不足。在建模方法方面, 文献 [1] 采用毁伤概率作为衡量模型效果的唯一标准, 在资源充足的情况下会造成资源浪费, 难以应对多轮次拦截任务。文献 [2] 将毁伤概率与目标威

胁度的乘积作为最终打击效益, 没有考虑资源消耗情况。文献 [3-4] 分别提出了综合火力优化分配模型和最小火力浪费分配模型, 二者都考虑了如何使得参与拦截的武器平台数量最小, 并没有考虑各平台中武器资源数量总消耗最小。文献 [5] 将完成拦截任务的效能和代价之差作为整体效能, 没有体现毁伤概率与消耗的主次关系。在实际作战中, 需要有效拦截来袭目标, 应使得毁伤概率达到一定阈值之后再考虑武器资源消耗这一次要优化目标。综上, 在建模方面, 现有模型在防空资源调度决策中

收稿日期: 2021-02-04; 修回日期: 2021-05-11

基金项目: 四川省科技厅重点研发基金 (2020YFG0328)

作者简介: 史红权 (1972-), 男, 博士, 研究员, 主要从事作战建模和辅助决策技术方面的研究。

*通信作者: 隆雨佟, E-mail: 403216817@qq.com

并不能很好地平衡拦截效率与资源成本之间的关系。

在模型求解方法方面, 常用的智能算法有遗传算法 (genetic algorithm, GA)^[6]、和声搜索 (harmony search, HS) 算法^[7]、粒子群算法^[8](particle swarm optimization, PSO) 等。其中, 遗传算法和粒子群算法应用得比较广泛。例如, 文献 [9] 使用改进的遗传算法求解联合防空目标分配问题, 通过使用改进的遗传算法自适应提高寻优能力以及收敛速度。文献 [10] 提出了一种改进鲶鱼效应的云自适应粒子群算法, 但由于增加了计算的复杂度反而大幅增加了计算时间。两者在处理大规模数据时仍易出现早熟收敛现象。求解防空火力分配问题时尽可能消耗更少的武器资源, 并在可行域中定位最优解集中的局部空间, 以快速求解。考虑上述原因, 遗传算法和粒子群算法均不能很好地求解防空火力分配问题。和声搜索算法由于实现简单、速度较快的特性使其成为求解 WTA 问题的一种新选择。目前和声搜索算法已有许多改进方法, 常见的有改进的和声搜索算法 (the improved harmony search algorithm, IHS)^[11], 自适应全局最优和声搜索算法 (the self-adaptive global best harmony search algorithm, SGHS)^[12], 全局最优和声搜索算法 (global best harmony search algorithm, GHS)^[13], 但这些算法仍有其局限性。对此, 本文提出了一种改进全局最优和声搜索算法 (improved global best harmony search algorithm, IGHS), 借鉴 IHS 的思路在 GHS 中引入自适应参数, 在搜索初期加强全局搜索能力, 在搜索后期加强局部搜索能力。

由此, 本文提出了一种新的编队级防空火力资源优化分配模型, 在约束中加入各火力单元的成本并将成本消耗作为模型的次要优化目标, 并利用改进全局最优和声搜索算法求解问题模型, 经过实验对比, 验证了本文方法的有效性。

1 本文方法

本文提出的编队级防空火力资源优化分配模型总体方案如图 1 所示。该方案中, 本文假设编队所有舰艇编队的防空火力单元统一存放在一个作战资源池中, 指挥舰可以随意分配调度这些资源。在此基础上, 通过对问题进行形式化描述, 并建立编队级防空火力资源优化分配模型。在实际作战过程中, 输入多个来袭目标态势信息, 并结合资源池信息, 利用求解方法, 快速求解编队级防空火力资源优化分配模型, 得到编队级火力资源优化分配方

案, 实现对多来袭目标的有效拦截。

在问题形式化定义和资源优化分配模型建模方面, 本文考虑了火力单元的类型、消耗成本、来袭目标的类型与数量, 以及不同类型的火力单元对不同类型来袭目标的单发毁伤概率, 通过增加基于实际情况的约束, 如火力资源库存、毁伤概率公式, 使本模型更加贴近现实, 解决了最终的毁伤概率与火力资源成本消耗的平衡问题。在模型求解方面, 本文利用改进全局最优和声搜索算法能快速并准确地找到近似全局最优解。

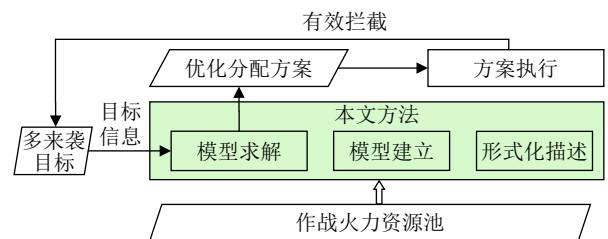


图 1 总体方案

1.1 问题形式化定义

资源池状态包括单枚毁伤概率矩阵、火力单元成本以及火力资源库存表。假设场景中共有 m 种火力单元, r 种来袭目标, 同时待拦截目标的有 l 个。由于弹药不同带来的火力与射程的差异, 且来袭目标也有速度与火力的差异, 因此每种火力单元对应不同的拦截目标都有独立的基本毁伤概率, 现假定实际作战时我军对己方火力单元与来袭目标的特性已有充分了解, 因此事先有一张单枚火力单元毁伤概率矩阵 $Q = (q_{ij})_{m \times r}$, 表示 i 类火力单元对 j 类来袭目标的毁伤概率。

$$Q = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & \cdots & q_{1r} \\ q_{21} & q_{22} & \cdots & q_{2r} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ q_{m1} & q_{m2} & \cdots & q_{mr} \end{bmatrix}$$

其次, 由于每种类型的火力单元造价不同, 装填时间与发射时间亦有差别, 所以不同种类的火力单元所消耗的成本也不同。但具体的量化函数不是本文的重点, 因此本文预定义了各类火力单元的成本, 以体现各类火力单元的差异。火力单元的成本如表 1 所示。

表 1 火力单元成本表

火力单元	火力单元1	火力单元2	...	火力单元 m
成本	c_1	c_2	...	c_m

资源池中火力单元的储备情况也是战前必须清楚的武器资源状态,因此定义一张火力资源库存表如表2所示。

表2 火力资源库存表

火力单元	火力单元1	火力单元2	...	火力单元 m
资源池库存	d_1	d_2	...	d_m

考虑到场景中一共有 l 个待拦截的目标,因此本模型的火力分配方案为一个矩阵 $\mathbf{A} \in \mathbb{C}^{m \times l}$, 其中元素 a_{ij} 表示第 i 种火力单元参与拦截第 j 个目标的数量,该矩阵的各行之和即为各种火力单元的消耗数量。而在众多参与拦截某一特定目标的火力单元中,只需要有一枚命中即代表拦截成功,即拦截成功的对立事件为所有参与拦截的火力单元全部拦截失败。而所有参与拦截的火力单元全部拦截失败即代表每一种火力单元都拦截失败,也表示所有参与该次拦截的同种单元全部失败。所以对来袭目标 j 的毁伤概率 P_j 为:

$$P_j = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - p_{ij}) \quad j = 1, 2, \dots, l \quad (1)$$

$$p_{ij} = 1 - (1 - q_{ij})^{a_{ij}} \quad i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, l \quad (2)$$

式中, p_{ij} 表示第 i 种火力单元对第 j 个来袭目标的毁伤概率。

为使总体收益最大化,还应该定义一个概率阈值,当一组解下的所有目标的平均毁伤概率高于该阈值时,便将此组解纳入候选解集,最终的最优解将从候选解集中消耗成本最少的解中选出。概率阈值在实际应用场景中可以人工设定。

1.2 编队级防空火力资源优化分配模型

该模型考虑多目标来袭时对每个目标分配多个火力单元进行拦截,同时假定所有平台的资源都集中在一个资源池里面,即选择资源时可以不考虑所在平台。拦截轨道如图2所示。

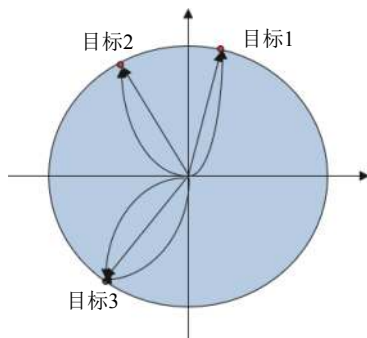


图2 编队级防空火力资源优化分配模型拦截轨道

如1.1节所述,定义参数如下:

d_i 为 i 类火力单元的火力资源库存, c_i 为 i 类火力单元的单位成本, a_{ij} 为分配 i 类火力单元拦截第 j 个目标的数量, q_{ij} 为无其他因素影响下 i 类单枚火力单元对 j 类目标的基本毁伤概率。

则本文模型的数学表达式为:

$$\max_k f(P^{(k)}) \quad (3)$$

$$\min_k \sum_{i=1}^m c_i \sum_{j=1}^l a_{ij}^{(k)} \quad (4)$$

s. t.

$$0 \leq a_{ij} \leq d_i - \sum_{t=1}^{i-1} a_{tj} \quad i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, l \quad (5)$$

$$0 \leq \sum_{j=1}^l a_{ij} \leq d_i \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^m a_{ij} \geq 1 \quad j = 1, 2, \dots, l \quad (7)$$

$$P_j^{(k)} = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - p_{ij}^{(k)}) \quad j = 1, 2, \dots, l \quad (8)$$

$$p_{ij}^{(k)} = 1 - (1 - q_{ij})^{a_{ij}^{(k)}} \quad i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, l \quad (9)$$

$$f(P^{(k)}) = \min \left\{ \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l P_i^{(k)}, P_{\text{thr}} \right\} P_{\text{thr}} = 0.95 \quad (10)$$

式中,上标 k 表示第 k 组解。主要目标为求解所有拦截目标的最大平均毁伤概率,次要目标为最小的成本消耗。约束1表示每次分配火力时数量都不得超过剩余库存量;约束2表示 i 类火力单元总消耗不得超过自身的总库存量;约束3表示每个拦截目标至少有一个火力单元参与拦截;约束4及约束5的定义见1.1节;约束6表示一组解下所有拦截目标的平均毁伤概率超过概率阈值时则不再关注毁伤概率,转而关注其成本消耗,以此达成总体收益最高。

1.3 基于改进全局最优和声搜索算法的模型求解

在编队级防空火力资源优化分配模型的基础上,为快速在巨大的可行域中搜索出全局最优解,本节提出了基于改进全局最优和声搜索算法的防空火力资源优化分配模型的求解方法。求解过程中,把一组解 $\mathbf{A} = (a_{ij})_{m \times l}$ 看作是一组乐器组合,组合中

的单个元素 a_{ij} 看作各乐器吹奏的音符, 多种乐器组合组成一个和声记忆库, 定义价值函数 $f(A^{(k)})$ 类比音乐效果。求解计算流程如图 3 所示。

具体过程描述如下:

1) 初始化基本参数

根据 1.2 节的模型, 目标函数 $f(X^{(k)})$ 可定义为:

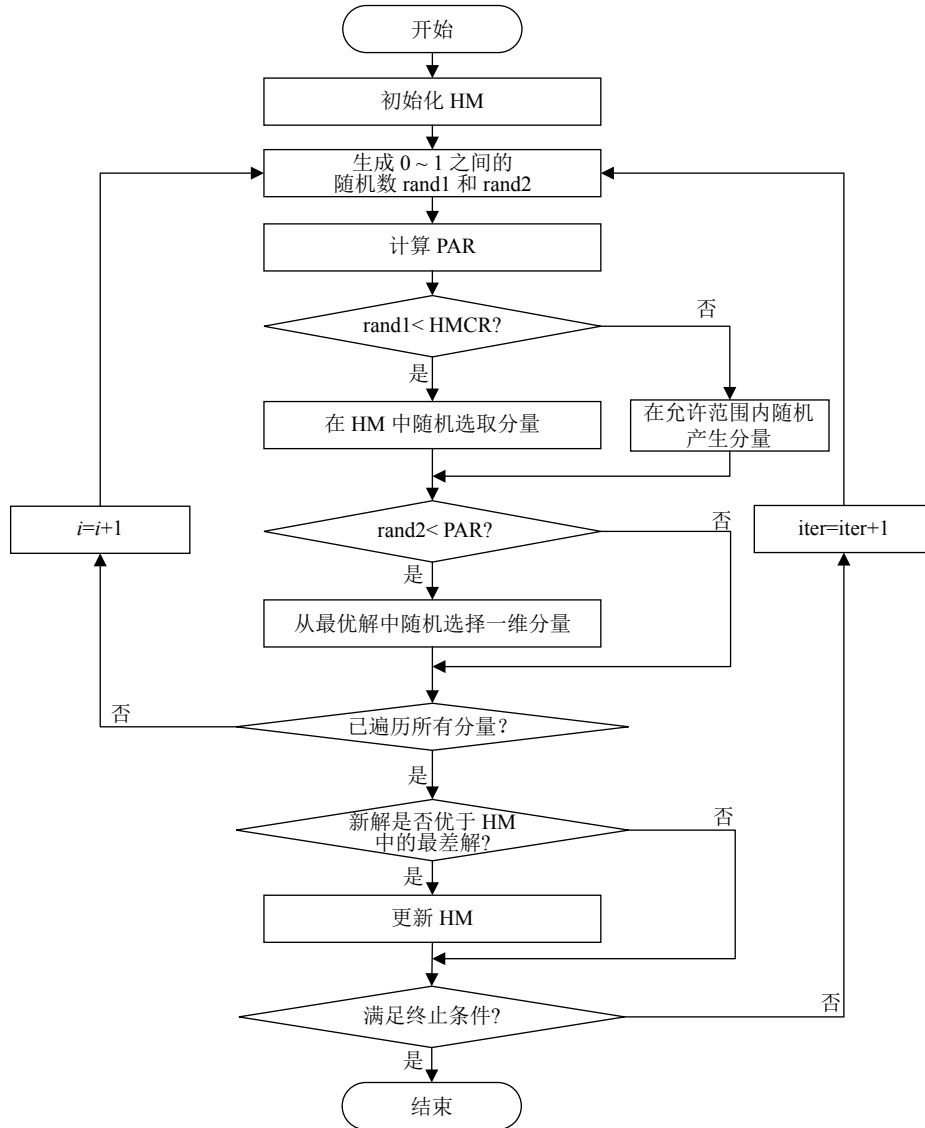


图 3 基于改进全局最优和声搜索算法的防空火力资源优化分配求解流程

$$f(A^{(k)}) = \begin{cases} P(A^{(k)}) & P(A^{(k)}) < P_{thr} \\ P_{thr} + e^{-\frac{\cos t(A^{(k)})}{\sigma}} & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

式中,

$$P(A^{(k)}) = 1/l \sum_{i=1}^l p_i^{(k)}; \quad \cos t(A^{(k)}) = \sum_{i=1}^m c_i \sum_{j=1}^l a_{ij}^{(k)};$$

$P_{thr} = 0.95; \sigma > 0$ 。体现了毁伤概率与成本消耗的主次关系。

定义和声记忆库大小 HM_size 、和声记忆率 (harmony memory considering rate, $HMCR$) 及音调调节率 (pitch adjusting rate, PAR) 上下限的大小。

HM_size 决定和声记忆库中保留的组合数量一般取值 $[3,10]$; $HMCR$ 决定新解从和声记忆库或全体可行域产生, 一般取值为 $[0.7, 0.95]$; PAR 决定新解的分量是否从当前最优解中选取, PAR 越高, 算法的全局搜索能力越强; 反之, 算法的局部搜索能力越强, 下限一般为 0.1 , 上限一般为 0.5 。

2) 初始化和声记忆库

在满足火力资源库存的约束下随机产生 10 组初始解放入和声记忆库 HM 中, 并根据价值函数降序排序:

$$\begin{bmatrix} a_1^{(1)} & a_2^{(1)} & \cdots & a_{m^*l}^{(1)} \\ a_1^{(2)} & a_2^{(2)} & \cdots & a_{m^*l}^{(2)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_1^{(L)} & a_2^{(L)} & \cdots & a_{m^*l}^{(L)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f(\mathbf{A}^{(1)}) \\ f(\mathbf{A}^{(2)}) \\ \vdots \\ f(\mathbf{A}^{(10)}) \end{bmatrix}$$

式中, $\mathbf{A}^{(j)}$ 为第 j 个解向量; $a_i^{(j)}$ 为第 j 个解向量的第 i 个分量; $f(\mathbf{A}^{(j)})$ 为第 j 个解向量的价值函数; 且 $f(\mathbf{A}^{(1)}) > f(\mathbf{A}^{(2)}) > \cdots > f(\mathbf{A}^{(L)})$ 。

3) 生成新解

首先生成两个 0~1 的随机数 rand1、rand2, 并计算 PAR, 公式如下:

$$\text{PAR} = \text{PAR_max} - (\text{PAR_max} - \text{PAR_min})n/N \quad (12)$$

式中, PAR_max 和 PAR_min 为 PAR 的上下限; n 为当前迭代轮次; N 为总迭代轮次。PAR 随着迭代次数自适应调整, 做到搜索初期放大大局搜索能力, 搜索后期放大大局局部搜索能力。

将 rand1 与 HMCR 比较, 若小于 HMCR, 则新解的分量 $a_i^{(\text{new})}$ 将从和声记忆库中的分量 $a_i^{(j)}$, ($j=1, 2, \dots, L$) 中选出; 反之, 则随机生成一个满足约束的分量。其次, 将 rand2 与 PAR 比较, 若小于 PAR, 则从当前最优解中随机选取一维解分量, 即 $a_i^{(\text{new})} = a_j^{(\text{best})}$, $j=1, 2, \dots, ml$ 。

遍历所有分量, 则会产生一个新解 $\mathbf{A}^{(\text{new})} = (a_1^{(\text{new})}, a_2^{(\text{new})}, \dots, a_{ml}^{(\text{new})})$ 。

4) 更新记忆库

计算新解的价值函数 $f(\mathbf{A}^{(\text{new})})$ 并将其加入到记忆库中重新降序排序, 取新序列中的前 10 个组合形成新的记忆库。

执行上述步骤, 重复步骤 3) 和步骤 4), 直到达到最大迭代次数或满足预先设定的停止准则就结束循环, 输出当前和声记忆库中最优的解向量作为火力分配方案。

2 实验与分析

本文实验使用了遗传算法、改进鲶鱼效应——云自适应粒子群算法、和声搜索算法、改进和声搜索算法、自适应全局最优和声搜索算法、局最优和声搜索算法以及改进全局最优和声搜索算法等 7 种不同的算法进行对比。同时根据数据规模不同设置两个对照组, 分别对比以上 7 种方法在处理不同规模数据上的表现。

2.1 实验环境与参数设置

本文实验的运行环境: CPU 为 AMD Ryzen7 4800H with Radeon Graphics 2.90 GHz; 内存为

16 GB; 操作系统为 Windows10 64 位; 编程语言为 Python 3.7, IDE 为 PyCharm 2020.2.1 (Professional Edition)。

基于 HS 的求解方法中, HM_size=3, HMCR=0.95, PAR=0.1, FW=1。基于 GHS 的方法参数与 HS 一致。基于 IHS 的求解方法中, PAR 的取值范围为 [0.1, 0.5], FW 的取值范围为 [0.5, 1.5]。基于 SGHS 的求解方法中, HMCR 服从期望为前百次均值, 标准差为 0.01 的正态分布, PAR 服从期望为前百次均值, 标准差为 0.05 的正态分布。基于 IGHS 的求解方法中, PAR 的取值范围为 [0.1, 0.5]。基于 GA 的求解方法中, 种群大小取 20, 突变概率取 0.01, 适应度函数为 HS 中的目标函数 (11)。基于 CE-CAPSO 的求解方法中, 惯性权重的取值范围为 [0.4, 0.9], 学习因子取 1。所有方法的初始解在可行范围内随机生成, 迭代次数均为 500 次。

2.2 实验结果与对比

2.2.1 简单数据规模下的结果

该组实验假定资源池中有 3 种类型的火力单元, 同时拦截目标也为 3 种类型, 每种类型来袭数量为 1 个, 一共 3 个, 其基本毁伤概率矩阵 \mathbf{Q} 为:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 0.47 & 0.44 & 0.51 \\ 0.46 & 0.52 & 0.54 \\ 0.52 & 0.53 & 0.52 \end{bmatrix}$$

各类型火力单元库存均为 10 枚, 单枚成本消耗矩阵 \mathbf{C} 为:

$$\mathbf{C} = [100 \quad 120 \quad 130]$$

单次实验的概率-消耗迭代图如图 4 所示, 黑色实线代表概率阈值, 取值为 0.95。

重复进行 100 次实验, 所有方法的平均结果如表 3 所示。

在该组实验中, 由于火力单元类型为 3 种, 来袭目标有 3 个, 因此单个解的规模为 $3 \times 3 = 9$ 维。此情况下 7 种方法均能一定程度上给出各自的最优解。首先观察图 4a, 发现所有折线的走向均是由高到底, 这是由于来袭目标数量只有 3 个, 而各类火力单元库存各有 10 枚, 此时资源充足, 而所有算法的初始解均是在满足约束条件的情况下随机生成, 因此大概率会消耗掉大量弹药, 即初始的平均毁伤概率很高。但由于超过了概率阈值, 所以所有方法均在后续的迭代中不断降低弹药的消耗, 后续的走向就会降低, 但仍然会出现上升的情况, 这是因为此时的优化目标已从毁伤概率转到成本消耗上, 如果搜索方法发现了一种解能降低成本消耗,

而此时该解的毁伤概率却比先前的解高, 如此便会出现毁伤概率折线上升的情况, 最终会收敛于概率阈值的上方。

再观察图 4b, 在毁伤概率超过概率阈值的情况下, 成本消耗才是衡量搜索方法性能的标准。首先观察基于改进 GE-GAPSO 的方法, 该方法更新频率最低, 且最终结果最差, 显然陷入了局部最优, 同时在表 3 中也可以看出该方法的成本消耗最高, 而且耗时也仅优于 GA, 大幅慢于 5 种和声搜索算法。在其余 6 种方法中, 成本消耗差别不大, 但 GA 的方法耗时最长, 5 种和声搜索算法在简单数据规模的情况下性能差距不大。

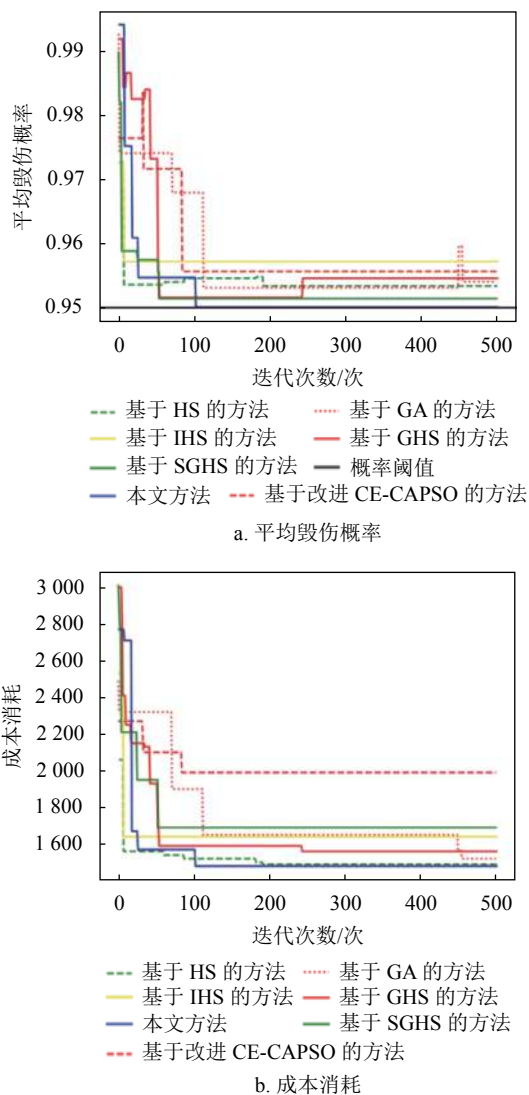


图 4 简单数据规模下的概率-消耗迭代图

2.2.2 复杂数据规模下的结果

该组实验假定资源池中有 5 种类型的火力单元, 同时拦截目标为 3 种类型, 第一种类型来袭数量为 3 个, 第二种类型来袭数量为两个, 第三种类

型来袭数量为两个, 一共 7 个, 其基本毁伤概率矩阵 Q 为:

$$Q = \begin{pmatrix} 0.47 & 0.44 & 0.51 \\ 0.46 & 0.52 & 0.54 \\ 0.52 & 0.53 & 0.52 \\ 0.48 & 0.51 & 0.54 \\ 0.49 & 0.51 & 0.53 \end{pmatrix}$$

各类型火力单元库存均为 30 枚, 单枚成本消耗矩阵 C 为:

$$C = [100 \quad 120 \quad 130 \quad 125 \quad 110]$$

单次实验的概率-消耗迭代图如图 5 所示, 黑色实线代表概率阈值, 取值为 0.95。

重复进行 100 次实验, 所有方法的平均结果如表 4 所示。

在该组实验中, 由于火力单元类型增加至 5 种, 来袭目标增加至 7 个, 因此单个解的规模为 $5 \times 7 = 35$ 维。此情况下 7 种方法性能的差距已经有所体现。首先观察图 5a, 由于此时解空间增大, 随机生成初始解的毁伤概率可能会低于概率阈值, 所以初始毁伤概率高于概率阈值的折线总体走势, 仍然朝概率阈值逼近, 而初始毁伤概率低于概率阈值的折线先上涨到超过概率阈值, 再朝着概率阈值逼近, 最终收敛于概率阈值上方, 符合模型的期望。但可以看到此时基于 GA 的方法和基于 CE-CAPSO 的方法已经失效, 因为数据复杂度的上升会进一步放大全局搜索能力不足的缺陷, 使得算法失去了跳出当前搜索区域的能力, 而且算法速度上的差异也被进一步扩大。

再观察图 5b, 此时 5 种和声算法仍然具备搜索能力, 但性能上也有差异。图中 5 种方法的折线不断在下降, 收敛速度方面, 本文方法与基于 GHS 的方法收敛速度明显快于其他方法, 基于 HS 的方法与基于 SGHS 的方法居中, 基于 IHS 的收敛速度最慢。搜索结果方面, 本文方法收敛点最低, 其次为基于 GHS 的方法, 另外 3 种方法收敛点则大幅高于前两者。所以, 本文选择的基于 IGHS 的方法不仅能最早进入收敛状态, 且最后的结果在所有方法中也是最优, 足以体现其寻优能力与效率。在表 4 中也可以清楚地观察到 HS、IHS、SGHS, GHS 以及 IGHS 平均成本消耗的优劣。

综上, 本文提出的 IGHS 能在短时间内计算出更好的答案, 且在复杂数据规模下的性能最优, 所以本文使用该算法作为求解编队级防空火力资源优化分配模型的方法。

表 3 简单数据规模下的实验结果

算法	平均毁伤概率/%	平均成本消耗	平均耗时/ms
GA	95.59	1616.2	797
改进CE-CAPSO	96.85	2390.6	670
HS	95.21	1520.8	145
IHS	95.21	1670.8	147
SGHS	95.29	1602.9	151
GHS	95.33	1590.5	145
IGHS	95.27	1545.4	145

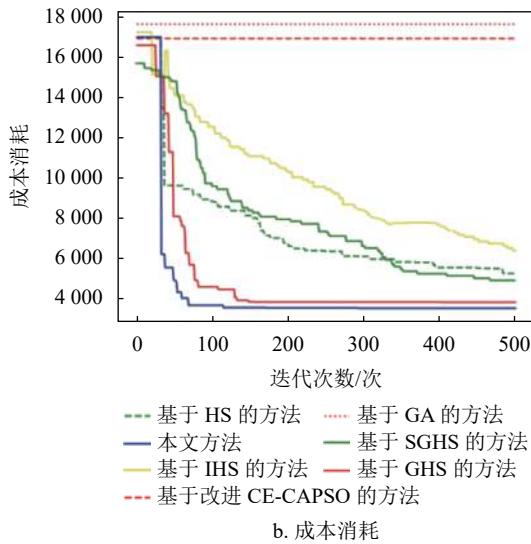
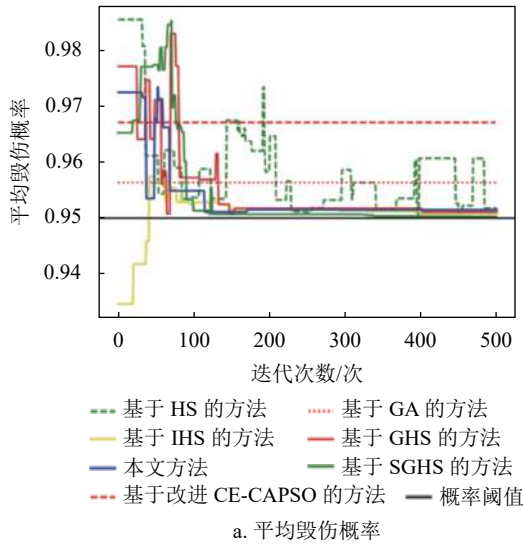


图 5 复杂数据规模下的概率-消耗迭代图

表 4 火力资源库存充足情况下的实验结果

算法	平均毁伤概率/%	平均成本消耗	平均耗时/ms
GA	96.06	16944.60	988
改进CE-CAPSO	95.92	17251.70	1592
HS	95.35	6307.40	237
IHS	95.15	5960.65	233
SGHS	95.21	4500.65	253
GHS	95.13	3858.70	233
IGHS	95.26	3752.55	236

3 结束语

相比于传统的基于毁伤期望的防空作战资源分配策略模型, 本文综合了毁伤概率与作战资源消耗提出了一种编队级防空火力资源优化分配模型, 在 GHS 的基础上引入自适应参数提出了 IGHS 并用其求解, 使得对来袭目标的平均毁伤概率尽可能增大, 在满足所给出的概率阈值后, 再降低作战资源消耗, 达到作战目标预期并实现总体收益最大化。经过仿真实验并与 GA、CE-CAPSO、HS、IHS、SGHS 及 GHS 进行了对比, 验证了本文提出的模型与本文算法的正确性和有效性, 能够在较短的时间内得到平均毁伤概率更大且武器资源消耗更小的解, 满足本文模型的要求。

后续可从算法和模型两方面改进。针对算法而言, 相比于其他算法, IGHS 有其优势也有其局限性, 后续的改进方向可以通过改进新解生成的规则增加算法的稳定性和收敛速度, 也可与其他智能算法相结合, 充分利用多种算法的长处以更好地寻求问题的解。针对模型而言, 后续可以考虑平台间的决策, 着重探究平台间的协同问题, 以更好利用和平衡各平台的作战资源, 形成一个较为稳定的能够兼顾各平台作战资源的巨大资源池。

参 考 文 献

- [1] 宋娜, 桑振群. 基于 PCA 多空袭目标威胁判别与火力分配的研究[J]. 中国储运, 2020(8): 156-158.
SONG N, SANG Z Q. Research on threat discrimination and fire distribution of multiple air raid targets based on PCA[J]. China Storage & Transport, 2020(8): 156-158.
- [2] 雷鸣, 谢斌. 基于云遗传算法的防空火力分配[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(9): 3533-3537.
LEI M, XIE B. Air defense fire distribution based on cloud-genetic algorithm[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(9): 3533-3537.
- [3] 孙海文, 谢晓方, 庞威, 等. 基于改进火力分配模型的综合防空火力智能优化分配[J]. 控制与决策, 2020, 35(5): 1102-1112.
SUN H W, XIE X F, PANG W, et al. Integrated air defense firepower intelligence optimal assignment based on improved firepower assignment model[J]. Control and Decision, 2020, 35(5): 1102-1112.
- [4] 张明双, 徐克虎. 基于最小火力浪费的火力优化分配[J]. 电光与控制, 2020, 27(9): 55-59.
ZHANG M S, XU K H. Optimal firepower distribution based on minimum firepower waste[J]. Electronics Optics & Control, 2020, 27(9): 55-59.
- [5] 郭智杰, 糜玉林, 肖阳, 等. 改进合同网协议在防空武器目标分配中的应用[J]. 现代防御技术, 2017, 45(4): 104-111.
GUO Z J, MI Y L, XIAO Y, et al. Application of improved

- contract net protocol on weapon target assignment of air defense combat[J]. *Modern Defence Technology*, 2017, 45(4): 104-111.
- [6] 姜青山, 郑保华, 郭利民. 遗传算法在舰艇编队防空火力分配中的应用[J]. *火力与指挥控制*, 2005(S1): 180-182.
JIANG Q S, ZHENG B H, GUO L M. The application of inheritance arithmetic to aerial defence fire distribution of ship formation[J]. *Fire Control and Command Control*, 2005(S1): 180-182.
- [7] 卓干兵. 蜂窝网络中 D2D 通信无线资源分配算法研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2020
ZHUO G B. Research on radio resource allocation algorithms for D2D communication in cellular networks[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2020.
- [8] 程杰, 李勇, 任伟. 改进粒子群算法在防空火力分配中的应用[J]. *兵工自动化*, 2008(4): 10-11.
CHENG J, LI Y, REN W. Application of enhanced particle swarm optimization algorithm in antiaircraft fire distribution[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2008(4): 10-11.
- [9] 许鹏程, 舒健生, 武健, 等. 基于改进遗传算法的联合防空目标分配优化[J]. *舰船电子工程*, 2020, 40(11): 30-33.
XU P C, SHU J S, WU J, et al. Optimization of joint air defense target allocation based on improved genetic algorithm[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2020, 40(11): 30-33.
- [10] 王力超, 乔勇军, 李永胜. 基于 CE-CAPSO 武器目标分配优化算法[J]. *火力与指挥控制*, 2020, 45(11): 82-87.
WANG L C, QIAO Y J, LI Y S. Optimization algorithm for weapon target assignment based on CE-CAPSO[J]. *Fire Control & Command Control*, 2020, 45(11): 82-87.
- [11] LI G J, WANG H Y. Improved harmony search algorithm for global optimization[C]//2018 Chinese Control And Decision Conference (CCDC). Shenyang: [s.n.], 2018: 864-867.
- [12] PAN Q K, SUGANTHAN P N, TASGETIREN M F. A self-adaptive global best harmony search algorithm for continuous optimization problems[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2010, 216(3): 830-848.
- [13] AWADALLAH M A, KHADER A T, AI-BETAR M A. Global best harmony search with a new pitch adjustment designed for nurse rostering[J]. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 2013, 25(2): 145-162.

编辑 税红