

控制与决策

Control and Decision

基于改进火力分配模型的综合防空火力智能优化分配

孙海文, 谢晓方, 庞威, 孙涛, 王诚成

引用本文:

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.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1019>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

考虑设施深度的过道布置问题及改进烟花算法求解方法

Improved fireworks algorithm for the corridor allocation problem with facility depth

控制与决策. 2020, 35(1): 45–54 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0720>

考虑需求响应的水火电优化调度改进型花朵授粉算法

An improved flower pollination algorithm for hydrothermal scheduling incorporating demand response

控制与决策. 2019, 34(8): 1645–1653 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0356>

基于数据解析的连退生产过程多因子操作优化

Multifactorial operation optimization for continuous annealing process based on data analytics

控制与决策. 2019, 34(12): 2713–2720 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1581>

求解带容量约束车辆路径问题的混合变邻域生物共栖搜索算法

Hybrid variable neighborhood symbiotic organisms search for capacitated vehicle routing problem

控制与决策. 2018, 33(7): 1190–1198 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.0346>

混合灰狼优化算法求解柔性作业车间调度问题

Flexible job shop scheduling problem with hybrid grey wolf optimization algorithm

控制与决策. 2018, 33(3): 503–508 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.0124>

基于人群搜索优化的无线传感器网络三点定位算法

Three points localization algorithm based on seeker optimization algorithm for wireless sensor networks

控制与决策. 2017, 32(8): 1518–1522 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2016.0781>

协调探索和开发能力的改进灰狼优化算法

Improved grey wolf optimization algorithm coordinating the ability of exploration and exploitation

控制与决策. 2017, 32(10): 1749–1757 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2016.1545>

基于高斯混沌变异和精英学习的自适应多目标粒子群算法

Adaptive multi-objective particle swarm optimization with Gaussian chaotic mutation and elite learning

控制与决策. 2016, 31(8): 1372–1378 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2015.0641>

基于改进火力分配模型的综合防空火力智能优化分配

孙海文¹, 谢晓方^{1†}, 庞威², 孙涛¹, 王诚成¹

(1. 海军航空大学 兵器科学与技术系, 山东 烟台 264001; 2. 31102 部队, 南京 210000)

摘要: 针对综合防空火力分配中,传统火力分配模型没有全面考虑火力通道射击效能因素,且在火力资源相对充足的情况下火力资源易浪费和易延误战机的问题,将射击有利度、飞临时间与威胁度等因素结合,构建一种新的综合防空火力分配模型.基于此模型,针对来袭目标、火力节点以及制导节点三者之间的火力优化匹配问题,提出一种基于深度优先搜索预处理的多种群并行布谷鸟搜索算法(PMPCSA).该方法采用Prolog智能规划语言构建目标-火力节点-制导节点匹配规则库,在规则库中利用深度优先搜索快速生成可行的目标-火力节点-制导节点的匹配预处理方案;采用多种群并行布谷鸟搜索算法,对得到的可行分配空间进行搜索,通过引入多种群并行优化搜索,不同种群赋予不同控制参数的思想,兼顾算法的全局探索和局部开发能力,可有效提高算法寻优效率.最后,通过仿真结果验证所建综合防空火力分配模型的优势性,同时表明,所提出的PMPCSA算法能有效地平衡全局探索与局部开发,在保证较高收敛速度的同时,提高全局探索能力.

关键词: 综合防空火力优化分配; 射击有利度; 飞临时间; Prolog智能规划; 深度优先搜索; 多种群并行布谷鸟搜索算法

中图分类号: N945.25; E920.8

文献标志码: A

Integrated air defense firepower intelligence optimal assignment based on improved firepower assignment model

SUN Hai-wen¹, XIE Xiao-fang^{1†}, PANG Wei², SUN Tao¹, WANG Cheng-cheng¹

(1. Department of Weapons Science and Technology, Naval Aeronautical University, Yantai 264001, China; 2. Unit 31102 of PLA, Nanjing 210000, China)

Abstract: In air defense firepower assignment, the traditional fire distribution model does not fully consider the firing efficiency factors of the fire channel, and under the condition of relatively sufficient fire resources, firepower resources are easy to waste and damage time could be delayed. By combining the fire advantage, flying time and threat degree, a new integrated air defense firepower assignment model is constructed. On this basis, a preprocessing multi group parallel cuckoo search algorithm (PMPCSA) is proposed for the optimal matching problem between the coming target, fire node and guidance nodes. The method uses Prolog intelligent planning language to build a target-fire node-guidance node matching rule library. In the rule library, the depth-first search is used to quickly generate a feasible matching pre-processing scheme of target-fire node-guidance nodes. Then, the multi group parallel cuckoo search algorithm is used to search the feasible allocation space. By introducing the idea of multi-population parallel optimization search and different populations given different control parameters, both the global exploration and the local development ability of the algorithm are taken into account, and the efficiency of algorithm optimization is effectively improved. Finally, the simulation results show the superiority of the integrated air defense firepower assignment model. At the same time, the results show that the proposed PMPCSA can effectively balance the global exploration and local development, which improves the global exploration ability while ensuring higher convergence speed.

Keywords: integrated air defense firepower intelligence optimal assignment; fire advantage; flying time; Prolog intelligent planning; depth first search; multi group parallel cuckoo search algorithm

0 引言

综合防空火力分配是现代防空作战中的重要组成部分.它在防空武器系统互联、互通、互操作的基

础上,根据敌我双方的作战力量,跨平台地综合分配多个(种)制导设备、多个(种)防空武器对空中多个(种)空中来袭目标进行灵活、有效地拦截^[1].

收稿日期: 2018-07-24; 修回日期: 2018-11-09.

基金项目: 中国博士后科学基金项目(2013T60923).

[†]通讯作者. E-mail: xiexiaof123@163.com.

目前,传统的防空火力分配^[2]模型主要采用毁伤概率越大越好的原则^[3-4].当处于火力资源相对充足的情况下,也存在很多的火力资源约束条件,文献[5]对拦截同一空中来袭目标的火力节点数量进行了限制,并以此对火力优化分配进行了约束;文献[6]定义一个毁伤概率均值的概念,即单位火力单元的毁伤概率,将其作为火力优化分配模型的原则,利用尽可能少地火力资源达到最大化的毁伤概率.这些火力优化分配模型由于火力资源的约束,往往在有限资源的条件下,用毁伤概率大的火力节点进行空中来袭目标分配,但这忽视了空中来袭目标进入火力节点发射区的时间,即飞临时间.当这些火力节点分配给更远空中来袭目标时,将会贻误战机.此外,大多数方法采用的毁伤概率因素不能较全面地反映火力节点的射击效能.

防空火力分配问题是一种整数型非线性多维组合优化决策问题,属于多项式复杂程度的非确定性(NP)问题.常用求解算法有:匈牙利算法^[7]、粒子群算法^[8-11]、蚁群算法^[12]以及遗传算法^[13]等.综合分析这些方法,主要存在以下两方面问题:一方面部分方法控制参数较多,较难调整出适合的控制参数来有效进行问题优化;另一方面不能有效地平衡全局探索和局部开发,往往顾此失彼,无法满足对实时性及准确度要求较高的优化问题.2009年剑桥大学的Yang等^[14]提出了一种新的生物启发算法,即布谷鸟搜索算法(CSA).该算法因具有结构简单、控制参数少和搜索能力强等优点,被广泛应用;文献[15]提出了基于初始交叉和变异的混合CSA,避免了过早收敛,该算法可应用于可靠性冗余分配问题;文献[16]讨论了种群规模对算法性能的影响,提出了采用正交化学习的布谷鸟算法,并对23个基准问题进行了算法测试,结果表明,基于正交化学习增强了CSA的探测能力和收敛性;文献[17]提出了离散布谷鸟算法,其有效地解决了旅行商问题;文献[18]提出了一种基于混沌的布谷鸟算法,有效地提高了CSA的全局探索能力;文献[19]提出了一种动态自适应布谷鸟算法,其引入Rechenberg的1/5法则和学习因子来调整控制参数,仿真结果表明,该方法动态适应性强,是一种高效简便的参数调整方法;文献[20]对基本布谷鸟算法和自适应步长布谷鸟算法提出了一种小规模多种群改进方法,其改进后的算法具有更快的收敛速度、更高的计算精度和收敛成功率;文献[21]将CSA引入到动态多种群粒子群算法中,并将其联合寻优算法与CSA以及其他改进PSO算法相比较,该算法在全局搜索

能力和算法效率上都有较好表现.从这些文献中可以得到两个结论:1)很少有文献充分利用种群的规模和数量来提高CSA的性能;2)大多数文献并没有考虑通过有效地预处理搜索空间来提高算法的寻优效率.对于实时性要求较高的防空火力资源分配问题,需要进一步提高算法的寻优效率.

综上所述,本文提出一种新的火力优化分配模型,即在传统模型上,引入射击有利度的概念,其综合考虑了空中来袭目标航路捷径的射击有利度、剩余火力节点的射击有利度、毁伤概率的射击有利度以及剩余弹数的射击有利度等,能较全面地反映火力节点的射击效能;同时,设置联合射击有利度门限,加入空中来袭目标飞临时间参数,在满足联合射击有利度门限的前提下,选择空中来袭目标威胁度大、飞临时间短、火力节点数量少的分配组合.在此基础上,提出一种基于深度优先搜索预处理的多种群并行布谷鸟搜索算法(PMPCSA).该算法的核心思想有两部分:1)引入多个种群同时对解空间进行协同搜索,通过移民算子进行信息交互,各种群采用不同的控制参数值.这种搜索模式可兼顾多种搜索模型参数的特点,降低对控制参数的依赖性,增强全局探索的能力,提高收敛速度.2)先采用Prolog智能语言描述空中来袭目标、火力节点及制导节点的匹配条件,并利用其深度优先搜索方法快速生成可行的分配方案;然后,将其作为多种群并行布谷鸟算法(MPCSA)的搜索空间,进行火力优化分配.这种思路能有效缩小搜索空间,提高寻优效率.最后通过多个仿真算例的比较分析验证本文提出的火力优化分配模型的优势性以及PMPCSA求解火力优化分配问题的有效性和优越性.

1 防空火力优化分配模型

1.1 模型优化准则

防空火力优化分配应遵循的主要原则:1)优先拦截威胁度大的空中来袭目标;2)充分利用不同火力节点对不同空中来袭目标的射击有利度,在满足联合射击有利度门限要求的条件下,用尽可能少的火力节点进行拦截;3)兼顾拦截时机,优先拦截飞临时间短的空中来袭目标.针对这些原则,本文在传统防空火力优化分配模型的基础上进行改进,具体改进内容如下.

1.2 射击有利度

射击有利度是衡量舰艇射击效能的综合性指标.它不仅与武器系统、空中来袭目标的状态、性能有关,还与武器系统对后续空中来袭目标的射击能

力有关.

1) 空中来袭目标航路捷径的射击有利度.

空中来袭目标航路捷径的射击有利度由空中来袭目标相对航空导弹武器系统的航路捷径决定. 通常而言, 空中来袭目标处于航空导弹的保险航路捷径之内时, 射击最有利. 空中来袭目标航路捷径的射击有利度 u_{ij}^L 可以表示为

$$u_{ij}^L = \begin{cases} 1, & 0 \leq L_{ij} < L_{\text{insurance}}; \\ \frac{L_{i \max} - L_{ij}}{L_{i \max} - L_{\text{insurance}}}, & L_{\text{insurance}} \leq L_{ij} \leq L_{i \max}; \\ 0, & L_{ij} > L_{i \max}. \end{cases} \quad (1)$$

其中: L_{ij} 表示第 i 个火力节点相对第 j 个空中来袭目标的航路捷径, $L_{i \max}$ 表示火力节点 i 的最大航路捷径, $L_{\text{insurance}}$ 表示火力节点 i 的保险航路捷径.

2) 剩余火力通道的射击有利度.

航空导弹剩余火力通道的数量在一定程度上反映了武器系统持续作战的能力. 按照空中来袭目标均匀分配的原则, 编队需要考虑各武器系统剩余火力通道的均衡性, 优先将空中来袭目标分配给剩余火力通道多的武器系统, 避免因武器系统火力通道被全部占用而导致空中来袭目标从该方向突防. 剩余火力通道的射击有利度 u_{ij}^{ch} 为

$$u_{ij}^{\text{ch}} = \frac{C_i}{\max\{C_k\}}, \quad k \in \{1, 2, \dots, d\}, \quad (2)$$

其中 C_k 表示第 k 种武器系统剩余火力通道数.

3) 毁伤概率的射击有利度.

武器系统对空中来袭目标的单发毁伤概率越高, 对空中来袭目标射击越有利. 毁伤概率的射击有利度 u_{ij}^{kill} 为

$$u_{ij}^{\text{kill}} = \frac{p_{ij}}{\max\{p_{kj}\}}, \quad k \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad (3)$$

其中 p_{kj} 表示火力节点 k 对空中来袭目标 j 的单发毁伤概率.

4) 剩余弹数的射击有利度.

剩余导弹数量是从资源消耗的角度反映了火力通道持续作战的能力. 当火力通道的载弹全部消耗完时, 该系统也就彻底丧失了作战能力. 为了保证航空导弹空中来袭目标分配的均衡性, 避免因某个火力通道将载弹过早消耗完而导致空中来袭目标从该方向突防, 编队应将空中来袭目标优先分配给剩余导弹数量多的火力通道. 火力通道剩余弹数的射击有利度 u_{ij}^{con} 为

$$u_{ij}^{\text{con}} = \frac{R_{ij}}{\max\{R_{hj}\}}, \quad h \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad (4)$$

其中 R_{hj} 表示火力节点 h 对空中来袭目标 j 的剩余导弹数量.

结合以上4种射击有利度, 通过线性加权得到火力节点 i 对空中来袭目标 j 的射击有利度

$$u_{ij} = a_1 u_{ij}^L + a_2 u_{ij}^{\text{ch}} + a_3 u_{ij}^{\text{kill}} + a_4 u_{ij}^{\text{con}}. \quad (5)$$

其权重通过专家打分法^[22]进行确定.

设 U_j 为所分配火力节点对第 j 个空中来袭目标的联合射击有利度, 则有

$$U_j = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_{ij})^{x_{ij} r_i}, \quad j = 1, 2, \dots, m. \quad (6)$$

其中: $x_{ij} r_i$ 表示第 i 个火力节点是否构成火力通道对空中来袭目标 j 进行拦截, 构成则为1, 否则为0.

1.3 综合防空火力优化分配模型的设计构建

假设某一次编队防空作战中: m 个空中来袭目标的编号为 T_j , $j = 1, 2, \dots, m$; n 个火力节点的编号为 F_i , $i = 1, 2, \dots, n$; k 个制导节点的编号为 G_k , $k = 1, 2, \dots, d$.

令 x_{ij} 为决策变量, 若第 i 个火力节点被分配拦截第 j 个空中来袭目标, 则 $x_{ij} = 1$, 否则 $x_{ij} = 0$.

令 r_{ki} 为制导节点与火力节点匹配变量, 第 k 个制导节点被分配给第 i 个火力节点, 则 $r_{ki} = 1$, 否则 $r_{ki} = 0$.

$r_i = \sum_{k=1}^d r_{ki}$ 表示与第 i 个火力节点相匹配的制

导节点的数量 (其中 $\sum_{k=1}^d r_{ki} \leq 1, i = 1, 2, \dots, n$). 若该火力节点构成火力通道, 则 $r_i = 1$, 否则 $r_i = 0$; 若该火力节点不需要制导节点, 则令 $r_i = 1$.

空中来袭目标 j 到拦截该空中来袭目标的火力节点的飞临时间之和为

$$\hat{t}_j(x_{ij} r_i) = \sum_{i=1}^n x_{ij} r_i t_{ij}, \quad (7)$$

其中 t_{ij} 为空中来袭目标 j 到火力节点 i 的飞临时间.

引入联合射击有利度的阈值和飞临时间的火力-目标分配模型为

$$V_{\max} = \max \sum_{j=1}^m \frac{W_j}{\hat{t}_j(x_{ij} r_i)}. \quad (8)$$

$$\text{s.t. } U_j \geq \bar{U}_{T_j}, \quad j = 1, 2, \dots, m; \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} r_{ki} \leq 1, \quad i = 1, 2, \dots, n, k = 1, 2, \dots, d; \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^m r_{ki} \leq C_{\max}, k = 1, 2, \dots, d; \quad (11)$$

$$\sum_{k=1}^d r_{ki} \leq 1, i = 1, 2, \dots, n. \quad (12)$$

其中: V_{\max} 表示目标函数; C_{\max} 表示制导设备最大引导导弹数量, 通常情况下制导节点最多引导两枚导弹; W_j 表示第 j 个空中来袭目标的威胁度; U_j 表示所分配火力对空中来袭目标 j 的联合杀伤概率; \bar{U}_{T_j} 表示空中来袭目标 j 的预期杀伤概率门限. 当 $\hat{t}_j(x_{ij}r_i) = 0$ 时, 令 $\frac{W_j}{\hat{t}_j(x_{ij}r_i)} = 0$.

从式(8)中发现目标函数 V_{\max} 与目标 j 的威胁度 W_j 成正相关, 而与 $\hat{t}_j(x_{ij})$ 成负相关. 这个模型表明火力分配在控制火力数量的情况下, 选择飞临时间之和小的火力节点, 分配给威胁度大的目标.

式(9)保证各来袭目标分配的火力节点联合射击有利度都达到预期射击有利度门限 \bar{U}_{T_j} . 如果火力-目标分配方案中 $U_j < \bar{U}_{T_j}$, 则该目标的分配无效.

式(10)表示一个火力通道最多只能分配给一个目标.

式(11)表示一个制导节点制导数量最大不超过最大制导容量, 通常制导容量为2.

式(12)表示若火力节点需要制导节点引导, 则一个火力节点只能有一个制导节点控制.

2 深度优先搜索预处理

programming in logic (Prolog)^[23-24] 是一种具有知识表达及逻辑推理能力的程序设计语言, 其具有模式匹配、递归、回溯、事实库和谓词库等强大功能, 在求解问题时, 只需描述问题中的对象和对象关系等已知的事实和规则, 计算机就能自动得出结果. 将其应用到空中来袭目标、火力节点以及制导节点匹配的问题上, 可快速有效地推理出可行的匹配方案.

建立空中来袭目标属性状态事实库、火力节点属性状态事实库以及制导节点属性状态事实库等. 建立空间匹配规则、目标-火力节点类型匹配规则、制导节点-火力节点类型匹配规则、速度匹配规则、火力节点与空中来袭目标匹配规则、制导节点与空中来袭目标匹配规则以及火力节点与制导节点匹配规则等. 通过比较分析空中来袭目标、火力节点、制导节点三者相互之间的匹配条件, 利用深度优先搜索找到所有适合的匹配方案.

1) 建立事实模型.

① 建立空中来袭目标属性事实库.

该事实库主要包括以下内容: 空中来袭目标批

号、空中来袭目标类型、空中来袭目标相对距离、方位、相对速度、航路捷径、高度等.

target: (string ID, string Type, integer Distance, integer Azimuth, integer Radial_velocity, integer Rout_shortcut, integer Height).

② 建立火力节点事实库.

该事实库主要包括: 火力节点编号、作战空中来袭目标类型、作战空域(近界、远界、高界、低界及方位)、最大航路捷径、系统反应时间、导弹速度、可拦截空中来袭目标速度范围等.

fire: (string ID, string Target_type, integer Min_distance, integer Max_distance integer Min_azimuth, integer Max_azimuth, integer Max_speed, integer Max_rout_shortcut, integer Min_height, integer Max_height, integer System_reaction_time).

③ 建立制导设备事实库.

该事实库主要包括: 制导设备编号、可制导火力类型、制导空域(近界、远界、高界、低界及方位)等.

guidance: (string ID, string Fire_type, integer Min_distance, integer Max_distance, integer Min_azimuth, integer Max_azimuth, integer min_height, integer max_height).

2) 谓词声明.

空间匹配: target_fire_space_match(target, fire)、target_guidance_space_match(target, guidance);

速度匹配: target_fire_speed_match(target, fire);

类型匹配: target_fire_type_match(target, fire)、guidance_fire_type_match(guidance, fire).

制导设备与空中来袭目标匹配: target_guidance_match(target, guidance);

火力节点与空中来袭目标匹配: target_fire_match(target, fire);

制导设备与火力节点匹配: guidance_fire_match(guidance, fire).

3) 建立规则模型.

if 空中来袭目标所处空域在火力节点作战空域内, then 空中来袭目标-火力节点空间匹配成功;

if 空中来袭目标类型属于火力节点拦截类型, then 空中来袭目标-火力节点类型匹配成功;

if 空中来袭目标速度满足火力节点拦截速度, then 空中来袭目标-火力节点速度匹配成功;

if 空中来袭目标所处空域在制导节点照射范围内, then 空中来袭目标-制导节点空间匹配成功;

if火力节点属于制导节点的制导类型,then火力-制导节点匹配成功;

if空中来袭目标-火力节点空间匹配成功, and空中来袭目标-火力节点类型匹配成功, and空中来袭目标-火力节点速度匹配成功, then火力节点-空中来袭目标匹配成功;

if空中来袭目标-制导节点空间匹配成功, then制导节点-空中来袭目标匹配成功;

if火力节点-空中来袭目标匹配成功, and火力-制导节点匹配成功, and制导节点-空中来袭目标匹配成功, then三者匹配成功(即可构成火力通道对该空中来袭目标进行拦截).

建立好事实库和规则库之后, Prolog利用推理机根据目标子句进行深度优先搜索, 并不断返回满足匹配条件的匹配结果.

3 多种群并行布谷鸟搜索算法

布谷鸟搜索算法^[25-26]利用发现概率融合了全局随机探索和局部随机开发. 布谷鸟全局探索采用 Lévy flights^[14,27]模型将有效地对解空间进行最优解的探索. 经全局探索得到更新解, 根据发现概率, 选取其中一部分进行局部开发. 全局探索与局部开发相结合将有效地提高算法的收敛速度. 在过去的几十年里, 优化问题的复杂性越来越高, 进化算法也日益增多. Wolpert等^[28]证明了没有哪种算法能适用于所

有的优化问题. 因此, 针对不同的问题, 需要设计不同的方法进行解决. 本文改进全局和局部搜索模式, 并引入多种群并行搜索的思想, 以此来提高布谷鸟算法的寻优能力. 多种群并行搜索, 即建立多个种群, 各种群分别采用不同的控制参数取值进行同步搜索, 通过移民算子进行种群间的相互交流. 这种搜索模式可兼顾多种搜索模型参数的特点, 降低对控制参数的依赖性, 增强全局探索的能力, 提高收敛速度.

影响布谷鸟搜索算法寻优能力的因素主要有下列2个方面:

1) 算法中存在控制参数, 例如步长控制因子 α 和缩放因子 b , 控制参数不同的取值将影响步长大小及变化尺度, 进而可能导致不同的计算结果. 至此, 许多学者对控制参数的改进进行了探索, 提出了自适应参数控制. 但是, 控制参数如何设定往往是根据实际问题试探性地给出的, 不恰当的设定将在很大程度上影响算法的性能.

2) 种群规模对算法寻优能力也存在较大影响. 当种群规模较小时, 群体多样性程度低, 个体间竞争性较弱, 随着迭代搜索的进行, 群体会很快趋于单一化, 并终止寻优; 当种群规模较大时, 将造成计算量的增加, 影响计算效率.

针对上述问题, 这里提出多种群并行寻优的思想, 如图1所示.

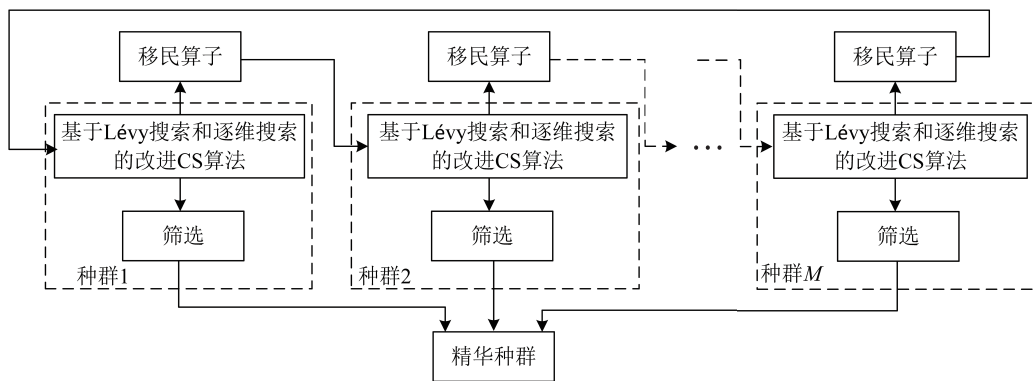


图1 MPCSA结构

该思想具体内容如下:

1) 突破了传统CSA仅靠单一种群和单一搜索模型进行寻优的框架, 引入多种群同时进行优化搜索; 为了增强算法的搜索能力, 不同的种群赋予不同的搜索模型以及不同的控制参数.

2) 各种群之间是相互独立的, 为了实现多种群并行寻优, 这里通过移民算子将各种群联系起来; 最优解的获取是多个种群并行寻优的综合结果. 移民算子将种群进化过程中的最优个体定期地引入到其他

种群中, 替换掉目标种群中的最差个体, 从而实现多种群之间的信息交换.

3) 设置精华种群. 在进化的每代中, 筛选出其他种群中的最优个体放入精华种群中进行保存, 为了防止破坏和丢失各种群产生的最优个体, 精华种群不进行搜索更新.

总体而言, 引入多个种群同时对解空间进行并行搜索, 可有效地降低算法控制参数设定不当对方案优化的影响, 抑制未成熟收敛的发生, 并兼顾算法的全

局探索和局部开发能力的均衡。

4 基于PMPCSA求解火力优化分配

综合上述分析, 基于PMPCSA求解防空火力优化分配的具体步骤如下。

step 1: 系统根据实际防空作战环境自动生成空中来袭目标属性状态事实库、火力节点属性状态事实库以及制导节点属性状态事实库, 利用Prolog中的匹配和回溯功能, 以深度优先搜索模式进行穷举搜索, 找到空中来袭目标、火力节点以及制导节点3者之间可行匹配方案, 其匹配方案用矩阵 F_i 表示:

$$F_i = [T_j \ G_k].$$

其中: 矩阵 F_i 表示第*i*个火力节点可匹配的所有空中来袭目标及相对应的制导节点; 列向量 T_j 表示可拦截第*j*个空中来袭目标; 列向量 G_k 相对应 T_j , 表示该空中来袭目标可匹配第*k*个制导节点。

step 2: 初始化种群, 同时生成*D*个种群。针对整数型火力优化分配问题, 这里所采用的编码可表示为

$$x = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n].$$

其中: x_i 中的*i*表示第*i*个火力节点, x_i 的取值为0到第*i*个火力单元可分配的空中来袭目标总数量之间的整数。 $x_i = j$ 表示第*i*个火力节点可与火力节点矩阵 F_i 中第*j*行上的空中来袭目标和制导节点进行匹配; $x_i = 0$ 表示第*i*个火力单元没有分配给任何一个空中来袭目标和制导节点。

step 3: 多种群同时进行全局探索。各种群根据不同的控制参数取值生成新的种群, 保留改善的解。

step 4: 多种群同时进行局部开发。根据发现概率和贪婪式逐维搜索模型生成新的种群, 更新保留改善的解。

step 5: 设置移民算子。找出进化过程中各种群的最优个体, 然后每隔一定的进化代数, 将目标种群中的最差个体替换为源种群的最优个体。

step 6: 将各种群的最优个体保存到精华种群中。

step 7: 提取精华种群中的最优个体, 判断是否满足终止条件: 若满足, 则算法终止; 若不满足, 则返回执行step 3~step 6。

5 仿真实验

为了验证本文提出的防空火力分配模型的优势以及PMPCSA求解该防空火力优化分配的有效性和优越性, 进行以下仿真实验比较分析。仿真实验环境为仿真设备: 联想Y550台式机; CPU: Intel(R) Core(TM) i5-6500@3.2 GHz, 内存8G; 操作系统Windows 7 64位。

5.1 综合防空火力优化分配模型比较分析

为了更直观和全面地分析本文提出的综合防空火力优化分配模型的优势性, 分别进行两种情况下的仿真实验, 并与已有分配模型以及多种分配算例进行比较分析。

1) 不考虑制导节点的情况下: 假设在防空作战中, 某一来袭目标进入我防区, 在敌空中来袭目标来袭方向上5个火力节点处于空闲状态。各火力节点对来袭目标的射击有利度 $[\mu_{11} \ \mu_{21} \ \mu_{31} \ \mu_{41} \ \mu_{51}]^T = [0.824 \ 0.782 \ 0.683 \ 0.810 \ 0.843]^T$, 来袭目标威胁度 $W_1 = 0.17$, 来袭目标到各火力节点发射区时间 $[t_{11} \ t_{21} \ t_{31} \ t_{41} \ t_{51}]^T = [10 \ 16 \ 11 \ 9 \ 13]^T$ s。

这里分别采用本文提出的防空火力优化分配模型 M_1 、射击有利度越大越好模型 M_2 以及文献[10]提出的带有火力资源约束的分配模型 M_3 进行火力优化分配。其中 M_1 和 M_3 中的射击有利度门限为0.9。3种模型的最优分配方案、联合射击有利度以及平均飞临时间如表1所示。

表1 3种模型的最优分配方案、联合射击有利度以及平均飞临时间

模型	$[F_1 \ F_2 \ F_3 \ F_4 \ F_5]$	联合射击有利度	平均飞临时间/s
M_1	[1 0 0 1 0]	0.967	9.5
M_2	[1 1 1 1 1]	0.999	11.8
M_3	[1 0 0 0 1]	0.972	11.5

从表1可知, 模型 M_2 采用4个火力节点拦截同一空中来袭目标, 目标的毁伤概率虽然最高, 但火力资源浪费最严重, 且毁伤概率提高幅度较小(数量级为 10^{-2}); 模型 M_3 采用射击有利度最高的两个火力节点拦截同一空中来袭目标, 在保持较高射击有利度的同时节省了火力资源, 但来袭目标到两个火力发射区的平均飞临时间较长, 因此会贻误战机; 本文提出的模型 M_1 在满足空中来袭目标期望射击有利度的条件下, 采用飞临时间最短的两个火力节点对空中来袭目标进行拦截, 极大节省了火力资源, 并且不会贻误战机。

进一步增加来袭目标数量, 假设来袭目标数量为3, 空闲火力节点数量为5。

各火力节点对来袭目标的射击有利度为

$$\begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \mu_{13} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \mu_{23} \\ \mu_{31} & \mu_{32} & \mu_{33} \\ \mu_{41} & \mu_{42} & \mu_{43} \\ \mu_{51} & \mu_{52} & \mu_{53} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.824 & 0.851 & 0.752 \\ 0.782 & 0.692 & 0.822 \\ 0.683 & 0.863 & 0.834 \\ 0.810 & 0.831 & 0.721 \\ 0.843 & 0.790 & 0.795 \end{bmatrix};$$

来袭目标威胁度为

$$[W_1 \ W_2 \ W_3] = [0.17 \ 0.51 \ 0.32];$$

来袭目标到各火力节点发射区时间为

$$\begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} \\ t_{41} & t_{42} & t_{43} \\ t_{51} & t_{52} & t_{53} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10 & 15 & 19 \\ 16 & 12 & 9 \\ 11 & 8 & 17 \\ 9 & 12 & 15 \\ 13 & 11 & 12 \end{bmatrix} \text{ s};$$

射击有利度门限为0.8. 分别采用模型 M_1 、 M_2 和 M_3 , 利用 MPCSA 求解火力优化分配, 各模型的最优分配结果如表2~表4所示.

表2 模型 M_1 的最优分配方案

火力	目标		
	T_1	T_2	T_3
F_1	0	0	0
F_2	0	0	1
F_3	0	1	0
F_4	1	0	0
F_5	0	0	0

表3 模型 M_2 的最优分配方案

火力	目标		
	T_1	T_2	T_3
F_1	1	0	0
F_2	0	0	1
F_3	0	1	0
F_4	1	0	0
F_5	0	0	1

表4 模型 M_3 的最优分配方案

火力	目标		
	T_1	T_2	T_3
F_1	0	1	0
F_2	0	0	0
F_3	0	0	1
F_4	0	0	0
F_5	1	0	0

从表2~表4可知: 模型 M_2 在满足一个火力节点一次只能拦截一个目标的条件下, 对空中来袭目标1和目标3各采用2个射击有利度较大的火力节点进行拦截, 目标3则选择射击有利度最大的火力节点进行拦截, 从而使得总的射击有利度达到最大, 得到最优分配方案, 但其容易造成资源浪费, 且没有考虑飞临时间, 容易贻误战机; 模型 M_3 采用射击有利度最高的火力节点对各来袭目标进行拦截, 虽然节省了火力资源, 但其不考虑飞临时间, 容易贻误战机; 模型 M_1 在满足空中来袭目标期望射击有利度的条件下, 采用飞临时间最短的火力节点对空中来袭目标进行拦截,

极大节省了火力资源的同时又不会贻误战机. 进一步验证了 M_1 的优势性, 此外, 还验证了本文提出的寻优算法的有效性.

2) 加入制导节点匹配约束的情况下: 假设在防空作战中, 某批来袭目标进入我防区. 首先, 通过 Prolog 智能规划对3个不同数量下的空中来袭目标-火力节点-制导节点算例(算例1: 5个火力节点-3个制导节点-3个空中来袭目标; 算例2: 10个火力节点-4个制导节点-8个空中来袭目标; 算例3: 12个火力节点-6个制导节点-10个空中来袭目标)进行深度优先搜索预分配, 其平均运算速度在0.02s左右, 可忽略不计; 然后, 进行优化分配, 其优化分配结果如表5~表7所示.

表5 算例1的最优分配方案

火力	目标		
	T_1	T_2	T_3
F_1	0	0	0
F_2	0	0	G_2
F_3	0	G_3	0
F_4	G_3	0	0
F_5	0	0	0

表6 算例2的最优分配方案

火力	目标							
	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8
F_1	-	-	-	-	-	-	-	-
F_2	-	-	G_2	-	-	-	-	-
F_3	-	G_3	-	-	-	-	-	-
F_4	G_3	-	-	-	-	-	-	-
F_5	-	-	-	-	-	-	-	-
F_6	-	-	-	-	-	-	-	G_2
F_7	-	-	-	-	-	-	G_1	-
F_8	-	-	-	-	G_4	-	-	-
F_9	-	-	-	-	-	G_4	-	-
F_{10}	-	-	-	G_1	-	-	-	-

表7 算例3的优化分配结果

火力	目标									
	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8	T_9	T_{10}
F_1	G_2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
F_2	-	-	G_6	-	-	-	-	-	-	-
F_3	-	G_3	-	-	-	-	-	-	-	-
F_4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
F_5	-	-	-	-	-	G_2	-	-	-	-
F_6	-	-	-	-	-	-	-	G_5	-	-
F_7	-	-	-	-	-	-	G_1	-	-	-
F_8	-	-	-	-	G_4	-	-	-	-	-
F_9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
F_{10}	-	-	-	G_1	-	-	-	-	-	-
F_{11}	-	-	-	-	-	-	-	-	G_6	-
F_{12}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	G_3

从表5~表7可见, 3个算例的分配方案都具备以下3个特点:

- ① 制导节点同时制导的火力节点数量均不超过

制导节点可制导的最大数量(这里设置最大制导数量为2);

② 各来袭目标分得的火力资源的联合射击有利度均满足联合射击有利度门限要求(这里设置联合射击有利度门限为0.8);

③ 在满足上述两个特点的条件下,3个方案都用尽可能少的火力资源优先对飞临时间短的来袭目标进行拦截。

上述3个算例进一步验证了本文提出的火力优化分配模型在满足联合射击有利度的前提下,可以合理有效地分配制导节点和火力节点资源,尽可能多地拦截来袭目标,在不同空中来袭目标和资源数量的情况下,该优化分配模型均表现出了较好的分配能力。

为了验证本文提出的方法的优越性,分别采用基于深度优先搜索预处理的遍历搜索及PMPCSA对上述3个算例进行优化分配,并记录下算法运算时间,如表8所示。

表8 3个算例下遍历搜索与PMPCSA搜索的运算时间

仿真算例	遍历搜索/s	MPCSA/s
5-3-3	0.06	0.65
10-4-8	22.78	3.98
12-6-10	367.34	4.03

分析表8:算例5-3-3遍历搜索的时间为0.06s,小于MPCSA的运算时间0.65s;算例10-4-8遍历搜索的时间为22.78s,大于MPCSA的运算时间3.98s;算例12-6-10遍历搜索的时间为367.34s,远大于MPCSA的运算时间4.03s。从而可知,在空中来袭目标和资源数量较少的情况下,可采用遍历搜索找到最优分配方案。但随着空中来袭目标和资源数量的增大,传统遍历搜索运算时间成指数型增加(纵向比较3个算例的遍历搜索时间分别为0.006s,22.78s,367.45s),已无法满足实时防空作战的需要,而PMPCSA能较好地满足实时性分配要求(纵向比较3个算例的MPCSA运算时间分别为0.65s,3.98s,4.03s)。

5.2 PMPCSA及MPCSA仿真分析

为了进一步验证本文提出的PMPCSA以及MPCSA算法的实用性和优越性,分别利用遍历搜索、改进遗传算法(IGA)^[4]、PSO、改进布谷鸟算法(ICSA)^[29]、多种群并行布谷鸟算法(MPCSA)以及PMPCSA对8个来袭目标、10个空闲火力节点及4个空闲制导设备进行火力优化分配仿真实验。IGA和PSO的种群规模均为200;ICSA的种群规模为30;PMPCSA以及MPCSA的种群规模为5,种群数量为6。迭代次数均为200次,分别进行100次仿真实验,得到如图2所示的5种算法的平均最优适应度与代数

之间的关系。

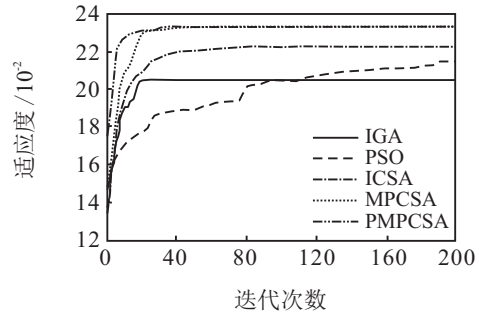


图2 基于IGA、PSO、ICSA、MPCSA以及PMPCSA的防空火力分配优化过程

图2中横坐标表示进化代数,纵坐标表示各代的适应度值。随着进化次数的增加,适应度值逐渐增大,这说明分配方案在不断优化调整。当达到某一定值时,适应度值趋于稳定,即收敛结束,找到较优的分配方案。分析图2可知:PSO算法很不稳定,而且在接近200代的时候仍然未稳定下来,说明最优解还有上升的可能性,其收敛速度较慢;IGA、ICSA、MPCSA以及PMPCSA的收敛速度均有较好表现(100代以内),具体收敛性能排序为:PMPCSA>MPCSA>ICSA>IGA。从全局搜索能力分析可知,IGA和ICSA易陷入局部搜索,而MPCSA和PMPCSA均表现出较好的全局搜索能力(MPCSA和PMPCSA均达到较高的适应度值)。

综上可得,本文提出的多种群并行布谷鸟算法(MPCSA)较ICSA、IGA以及PSO算法更能有效地平衡全局探索和局部开发,在保证较高收敛速度的同时,提高了全局探索能力。在此基础上,针对火力优化分配问题引入PMPCSA,无论是在全局搜索能力还是在收敛速度上均表现较好,其寻优效率进一步提升。

为了进一步检验本文提出的PMPCSA以及MPCSA的寻优性能,在保证较高寻优质量和较快运算时间的前提下,对IGA、PSO、ICSA、MPCSA以及PMPCSA分别进行100次仿真实验。各算法的仿真结果如图3~图7所示。图3~图7中横坐标表示实验仿真次数,纵坐标表示每次仿真实验结果的最优适应度值,适应度值越大,说明分配方案越优。

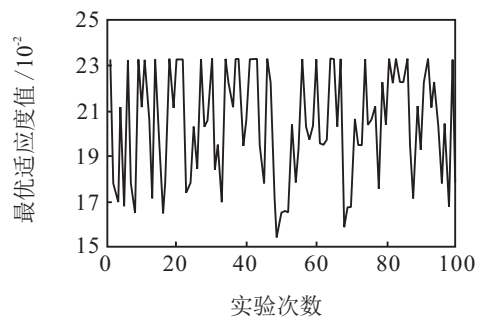


图3 IGA仿真结果

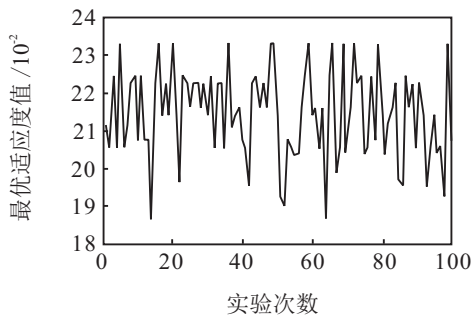


图4 PSO仿真结果

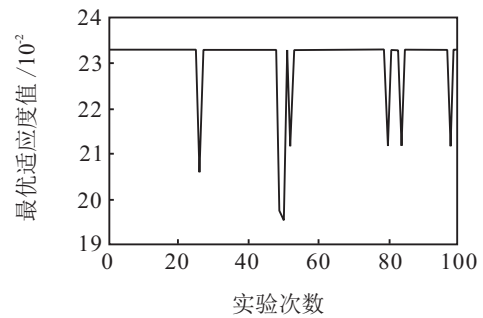


图7 PMPCSA仿真结果

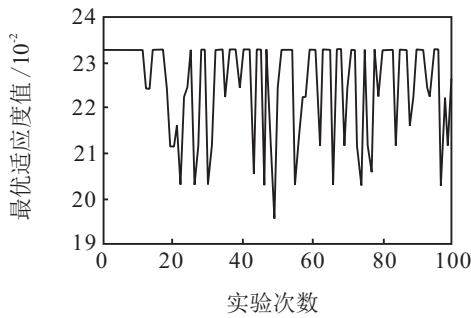


图5 ICSA仿真结果

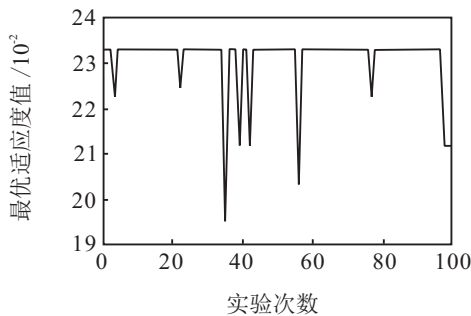


图6 MPCSA仿真结果

由图3~图7对比可知: 1) 5种算法每次仿真均能找到可行解,即在运算过程中不存在适应度值为0的情况; 2) 5种算法均无法保证每次都找到最优解,这是由于为保证算法具有较快的运行速度,各算法参数设置限制了算法找到最优解的能力; 3) PMPCSA以及MPCSA找到最优解的次数最多,寻优结果最稳定。

为了更加准确地比较各算法的性能,取5种算法关键性能指标的统计结果,如表9所示。由表9可知:在100次仿真实验中,PMPCSA以及MPCSA搜索到最优适应度值的概率均在90%以上,且较其他方法平均运行时间相对较短,尤其PMPCSA,其运算时间相比MPCSA缩短1s左右,这进一步说明了PMPCSA的寻优效率较高;此外,传统遍历搜索在较多数量空中来袭目标和资源的匹配中,其运算时间较长,满足不了实时性的需求,引入深度优先搜索预处理后,遍历搜索运算速度得到大幅提高。

表9 5种算法性能指标的统计结果

算法	最优适应度值	最差适应度值	均值	标准差	最优适应度值的次数/次	平均运行时间/s
IGA	0.2329	0.1544	0.2042	0.0244	29	6.57
PSO	0.2329	0.1867	0.2144	0.0116	12	6.25
ICSA	0.2329	0.1954	0.2252	0.0107	59	6.34
MPCSA	0.2329	0.1949	0.2308	0.0067	90	5.23
PMPCSA	0.2329	0.1954	0.2314	0.0070	93	4.13
基于深度优先搜索的遍历搜索	0.2329	—	—	—	—	22.78
遍历搜索	0.2329	—	—	—	—	>1800.00

综合上述分析可知: PSO虽然表现出较好的全局探索能力,但其收敛速度较慢(迭代次数达上千次); IGA、ICSA、MPCSA以及PMPCSA在收敛速度上均有较好的表现,但IGA、ICSA在全局探索中容易陷入局部极值; PMPCSA以及MPCSA能在迭代100次以内搜索到最优解,其收敛性较好。在100次仿真实验中,通过对6项指标进行分析可知,在满足较短运算时间的前提下,PMPCSA以及MPCSA能快速准确地搜索到最优解,易跳出局部极值,表现出优越的全

局探索能力,其中PMPCSA的寻优能力尤为出众。把深度优先搜索预处理应用到火力优化分配中,可有效地提高寻优能力。

6 结论

本文提出了一种结合射击有利度、飞临时间以及威胁度的火力分配优化模型,该模型综合考虑了各火力通道的射击效能,引入了射击有利度的概念,取代了传统火力分配中的毁伤概率;针对该模型的防空火力优化分配问题,提出了一种基于深度优先搜索

预处理的多种群并行布谷鸟搜索算法. 通过仿真实验得到以下结论:

1) 在火力资源相对充足的情况下, 本文提出的综合火力优化分配模型能在满足目标期望的射击有利度门限下, 结合飞临时间和空中来袭目标威胁度信息, 利用尽量少的火力节点, 尽早地拦截来袭目标. 在火力资源节约和把握战机两个方面, 其分配结果优于射击有利度越大越好模型和文献[10]提出的具有火力资源约束的分配模型; 此外, 针对不同算例, 采用该模型均能得到较好的分配效果, 进一步验证了模型的可行性及优势性.

2) 本文提出的PMPCSA以及MPCSA能有效地平衡全局探索和局部开发, 在保证较高收敛速度的同时, 提高了全局探索能力, 尤其PMPCSA在火力优化分配中, 其收敛速度和全局搜索能力均有较好的表现.

参考文献(References)

- [1] 唐苏妍, 朱一丹, 葛伟, 等. 网络化防空导弹体系集中式拦截联盟形成方法[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(2): 357-363.
(Tang S Y, Zhu Y F, Ge W, et al. Generalized interception coalition formation method in networked air defense missile systems[J]. System Engineering—Theory & Practice, 2011, 31(2): 357-363.)
- [2] Zhang Z L, Wu W D. Method of aptitudinally distributing firepower in aerial defence[J]. Fire Control and Command Control, 2006, 31(2): 75-77.
- [3] 阮旻智, 李庆民, 刘天华. 编队防空火力分配建模及其优化方法研究[J]. 兵工学报, 2010, 31(11): 1525-1529.
(Ruan M Z, Li Q M, Liu T H. Research on Modeling and optimization method of fire assignment in formation anti-aircraft[J]. Acta Armamentarii, 2010, 31(11): 1525-1529.)
- [4] 董朝阳, 路遥, 王青. 改进的遗传算法求解火力分配优化问题[J]. 兵工学报, 2016, 37(1): 97-102.
(Dong C Y, Lu Y, Wang Q. Improved genetic algorithm for solving firepower distribution[J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(1): 97-102.)
- [5] 杨飞, 王青, 侯砚泽. 基于整数域改进粒子群优化算法的多平台武器目标分配[J]. 兵工学报, 2011, 32(7): 906-912.
(Yang F, Wang Q, Hou Y Z. Weapon-target assignment in multi-launcher system based on improved integer fireld particle swarm optimization algorithm[J]. Acta Armamentarii, 2011, 32(7): 906-912.)
- [6] 李俨, 董玉娜. 基于SA-DPSO混合优化算法的协同空战火力分配[J]. 航空学报, 2010, 31(3): 626-631.
(Li Y, Dong Y N. Weapon-target assignment based on simulated annealing and discrete particle swarm optimization in cooperative air combat[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2010, 31(3): 626-631.)
- [7] Huang L W, Xu P G, Wang Q. Firepower distribution problems based on Hungarian method[J]. Fire Control and Command Control, 2007, 32(6): 25-28.
- [8] Wu X J, Yang Z Z, Zhao M. A uniform searching particle swarm optimization algorithm[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(6): 1261-1266.
- [9] Xie C W, Li K, Xu J, et al. An improved multi-objective particle swarm optimization algorithm MOPSO-II[J]. Journal of Wuhan University: Natural Science Edition, 2014, 60(2): 144-150.
- [10] 夏维, 刘新学, 范阳涛, 等. 基于改进型多目标粒子群优化算法的武器-目标分配[J]. 兵工学报, 2016, 37(11): 2085-2093.
(Xia W, Liu X X, Fan Y T, et al. Weapon-target assignment with an improved multi-objective particle swarm optimization algorithm[J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(11): 2085-2093.)
- [11] 徐浩, 刑清华, 王伟. 基于模糊多目标规划的防空反导火力分配[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 3(40): 563-570.
(Xu H, Xing Q H, Wang W. WTA for air and missile defense based on fuzzy multi-objective programming[J]. Systems Engineering and Electronics, 2018, 3(40): 563-570.)
- [12] Luo D L, Duan H B, Wu S X, et al. Research on air combat decision-making for cooperative multiple target attack using heuristic ant colony algorithm[J]. Acta Astronautica Sinica, 2006, 27(6): 1166-1170.
- [13] Xu J Z. Weapon-target assignment with fuzzy multi-objective ranking genetic algorithm[J]. Military Operation Research and System Engineering, 2010, 24(3): 70-74.
- [14] Yang X, Deb S. Cuckoo search via Lévy flights[C]. World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing. Piscataway: IEEE Publications, 2009: 210-214.
- [15] Kanagaraj G, Ponnambalam S G, Jawahar N. A hybrid cuckoo search and genetic algorithm for reliability-redundancy assignment problems[J]. Computers and Industrial Engineering, 2013, 66(4): 1115-1124.
- [16] Li X, Wang J, Yin M. Enhancing the performance of cuckoo search algorithm using orthogonal learning method[J]. Neural Computing and Applications, 2014, 24(6): 1233-1247.
- [17] Ouaarab A, Ahoid B, Yang X S. Discrete cuckoo search

- algorithm for the traveling salesman problem[J]. *Neural Computing and Applications*, 2014, 24(7): 1659-1669.
- [18] Huang L, Ding S, Yu S, et al. Chaos-enhanced cuckoo search optimization algorithms for algorithms for global optimization[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2016, 40(5): 3860-3875.
- [19] 张永韡, 汪镭, 吴启迪. 动态适应布谷鸟搜索算法[J]. *控制与决策*, 2014, 29(4): 617-622.
(Zhang Y W, Wang L, Wu Q D. Dynamic adaptation cuckoo search algorithm[J]. *Control and Decision*, 2014, 29(4): 617-622.)
- [20] 郑巧燕, 莫愿斌, 刘付永, 等. 一种小规模多种群布谷鸟算法[J]. *计算机应用与软件*, 2014, 31(10): 278-280.
(Zheng Q Y, Mo Y B, Liu F Y, et al. A small-scale and multi-population cuckoo search[J]. *Computer Applications and Software*, 2014, 31(10): 278-280.)
- [21] 高云龙, 闫鹏. 基于多种群粒子群算法和布谷鸟搜索的联合寻优算法[J]. *控制与决策*, 2016, 31(4): 601-608.
(Gao Y L, Yan P. Unified optimization based on multi-swarm PSO algorithm and cuckoo search algorithm[J]. *Control and Decision*, 2016, 31(4): 601-608.)
- [22] 刘琦, 武小悦, 张金槐. 小子样武器装备可靠性评估过程中专家信息的规范化描述[J]. *航空动力学报*, 2007, 22(1): 37-40.
(Liu Q, Wu X Y, Zhang J H. Standardization of description for expert's opinion during weapon reliability evaluation under small sampling test[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2007, 22(1): 37-40.)
- [23] Li Guoqi, Shao Yuanxun, Hong Sheng, et al. An IPC-based Prolog design pattern for integrating backward chaining inference into applications or embedded systems[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2014, 27(6): 1571-1577.
- [24] 陈鹤文, 周勇, 燕雪峰. 一种基于 Prolog 的时间约束业务流程验证方法[J]. *计算机科学*, 2016, 43(6): 173-178.
(Chen H W, Zhou Y, Yan X F. Prolog based approach to validate time constraints in business process[J]. *Computer Science*, 2016, 43(6): 173-178.)
- [25] Mohammad S, Ahamad T K, Mohammed A A. A survey on applications and variants of the cuckoo search algorithm[J]. *Applied Soft Computing*, 2017, 61(2): 1041-1059.
- [26] 刘勤, 孙志礼, 刘英, 等. 基于改进布谷鸟搜索算法的结构耐久性优化方法[J]. *兵工学报*, 2017, 38(12): 2438-2446.
(Liu Q, Sun Z L, Liu Y, et al. Structural durability optimization design method based on improved cuckoo search algorithm[J]. *Acta Armamentarii*, 2017, 38(12): 2438-2446.)
- [27] Yang X, Deb S. Multiobjective cuckoo search for design optimization[J]. *Computers and Operations Research*, 2013, 40(6): 1616-1624.
- [28] Wolpert D H, Macready W G. No free lunch theorems for optimization[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1997, 1(1): 67-82.
- [29] 张耀中, 胡波, 李寄玮, 等. 不确定环境下无人机多任务区侦察决策研究[J]. *西北工业大学学报*, 2016, 34(6): 1028-1033.
(Zhang Y Z, Hu B, Li J W, et al. UAV multi-mission reconnaissance decision-making under uncertainty environment[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2016, 34(6): 1028-1033.)

作者简介

孙海文(1990—), 男, 博士生, 从事武器系统建模与仿真、舰空导弹综合控制技术的研究, E-mail: 842904820@qq.com;

谢晓方(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 从事武器系统建模与仿真、火力指挥与控制等研究, E-mail: xiexiaof123@163.com;

庞威(1988—), 男, 工程师, 博士, 从事武器系统建模与仿真、火力指挥与控制的研究, E-mail: metrix_nj@163.com;

孙涛(1980—), 男, 讲师, 博士, 从事武器系统建模与仿真、火力指挥与控制的研究, E-mail: tgzydz@163.com;

王诚成(1985—), 男, 讲师, 博士, 从事武器系统建模与仿真、火力指挥与控制的研究, E-mail: 497990518@qq.com.

(责任编辑: 闫妍)