

基于简化人工蜂群算法的 地面防空火力拦截设备部署方法

刘涛¹, 刘宇畅², 赵桂毅³, 卿朝进³, 宋建军¹

(1. 93142 部队, 成都, 610041; 2. 中国电子科技集团公司第二十九研究所, 成都, 610036;
3. 西华大学电气与电子信息学院, 成都, 610039)

摘要 针对地面防空火力拦截设备部署问题中部署方案产生速度慢、不符合战场实际环境问题, 提出了一种基于简化人工蜂群算法的地面防空火力拦截设备部署方法。本方法在地面防空火力拦截设备部署方案制定过程中, 将人工蜂群算法分为初始化阶段和优化阶段。从专家知识辅助的视角出发, 初始化阶段利用专家知识对可部署位置进行了寻优处理并结合随机初始化, 优化阶段利用简化型邻域优化对初始化阶段产生的方案进行优化。2个阶段均对产生的部署方案进行校验, 若方案达到给定突防概率指标则直接保存输出, 大大提高了收敛速度, 且产生的部署方案符合实际。仿真结果表明: 提出的方法相比于传统蜂群算法在收敛速度方面具有明显优势。

关键词 人工蜂群算法; 火力拦截设备部署; 地面防空; 突防概率

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2024.01.008

中图分类号 TP182 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2024)01-0052-07

A Deployment Method of Ground-Based Air Defense Intercept Systems by Using Simplified Artificial Bee Colony Algorithm

LIU Tao¹, LIU Yuchang², ZHAO Guiyi³, QING Chaojin³, SONG Jianjun¹

(1. Unit 93142, Chengdu 610041, China;

2. Southwest China Research Institute of Electronic Equipment, Chengdu 610036, China;

3. School of Electrical Engineering & Electronic Information, Xihua University, Chengdu 610039, China)

Abstract Aimed at the problems that the deployment of ground-based anti-aircraft fire interception equipment is slow at speed and the deployment scheme does not conform to the actual environment of the battlefield, a deployment method of ground-based air defense intercept systems by using simplified artificial bee colony algorithm is proposed. In this method, in the process of formulating the deployment scheme of ground-based anti-aircraft fire interception equipment, the artificial bee colony algorithm is divided into an initialization stage and an optimization stage. In perspective of expert knowledge assistance, the initialization stage is intended to utilize the expert knowledge for optimizing the deployable location in combination with random initialization, and the optimization stage is intended to utilize the simplified neighborhood optimization for optimizing the scheme generated in the initialization stage. The resulting deployment scheme

收稿日期: 2023-06-30

基金项目: 四川省科技计划(2023YFG0316); 中国高校产学研创新基金(2021ITA10016); 西华大学校重点项目(Z1320929); 四川省产业发展专项基金(ZYF-2018-056)

作者简介: 刘涛(1977-), 男, 重庆人, 正高级工程师, 研究方向为电子信息工程。E-mail: 335411899@qq.com

引用格式: 刘涛, 刘宇畅, 赵桂毅, 等. 基于简化人工蜂群算法的地面防空火力拦截设备部署方法[J]. 空军工程大学学报, 2024, 25(1): 52-58. LIU Tao, LIU Yuchang, ZHAO Guiyi, et al. A Deployment Method of Ground-Based Air Defense Intercept Systems by Using Simplified Artificial Bee Colony Algorithm[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2024, 25(1): 52-58.

is verified in both stages, and the output is directly saved if the scheme reaches the given penetration probability index, greatly improving the convergence speed, and the resulted deployment scheme is realistic. The simulation results show that the proposed method has obvious advantages over the traditional bee colony algorithm at convergence speed, and can conform well to the battlefield environment.

Key words artificial bee colony (ABC) algorithm; fire interception equipment deployment; ground-based air defense; penetration probability

地面防空火力拦截设备部署方案是对地面防空火力拦截设备的有效利用,部署方案的好坏将直接影响整个作战结果的成败^[1]。如何制定一个高效的部署方案是防空作战研究中的重点与难点^[2]。针对地面防空火力拦截设备部署,目前已经取得一定的研究成果。基于模拟退火算法,文献[3]将防空导弹体系的组合优化问题与统计力学中的热平衡问题相类比,通过分析各能态的变化,形成防空导弹体系部署方案。文献[4]从进攻方的角度,提出改进型蚁群算法的防空部署方法和效能评估模型,为决策者提供了一种新的思考方向。为解决信息利用不足、不能宏观统筹部署等问题,文献[5]针对地面分队防御作战兵力部署,提出了基于 Jackson 网络的地面分队防御作战兵力部署方法。尽管文献[3~5]为防空设备部署提供了较好的解决方案,但在进行多种大规模设备部署时,仍面临收敛速度慢,优化时间长的问题,难以满足现代战场中防空设备的快速部署要求。相比于上述优化方法(如:模拟退火算法^[1]、遗传算法^[6]等),人工蜂群(artificial bee colony, ABC)算法参数设置少、收敛速度快,具有一定的避免算法早熟的特点(具有一定的跳出局部最优解的能力),是近年来的研究热点与关注点所在^[7-8]。文献[9]利用 ABC 算法,针对实战中坦克的对抗特性,建立火力对抗模型,一定程度上改善了算法收敛速度和精度。文献[10]利用改进遗传蜂群算法建立武器系统优化部署模型,对每个子突防概率进行加权分析,对重点保卫目标区域进行武器部署。与传统人工蜂群算法相比,文献[10]算法具有更好的收敛性和优化性能(如更小的突防概率)。然而,根据文献[7],ABC 算法的性能与种群初始化与优化速度密切相关。尽管文献[9]和文献[10]一定程度上加快了 ABC 算法的收敛速度,改善了 ABC 算法的优化性能,但初始化优化和专家知识并未得以充分利用。

为此,本文针对大规模、多种类设备的超大规模防空场景,提出一种基于简化人工蜂群算法的地面防空火力拦截设备部署方法。首先,在初始化阶段,从更接近最优部署方案的视角出发,借助专家知识进行 ABC 算法的初始化,从而加快算法的收敛速度,减少算法的优化时间。然后,基于专家知识并结

合实际的防空场景,对雇佣蜂和跟随蜂阶段的邻域优化进行离散化优化处理,将繁杂的整体任务进行类似模块化处理的简化。最后,通过实验仿真,从收敛性和突防概率 2 个方面进行验证,从而展现相比于传统的 ABC 算法可获得更快的收敛速度和更低的突防概率。

1 简化型 ABC 算法的部署模型

防空设备部署是指在特定区域或地域内,如何合理地安排和部署各种防空设备,以有效地防御来袭的敌方飞机、导弹或其他空中威胁^[11],其主要影响因素是部署的设备和位置信息^[12]。部署的实质是将防空设备按一定顺序与可部署位置一一对应以构成一个部署方案,达到敌方突防概率最小的效果^[11]。一般来说,防空设备的部署方案会对以下几个方面产生影响^[13]:

1)协调性:防空设备的部署方案可以确保部署过程中设备之间的协调性。按照合理的方案逐一部署设备,可以避免设备之间的冲突,减少部署和调试过程中的问题。

2)可用性:防空设备的部署方案可以确保在部署过程中已经部署好的设备可以立即投入使用,而不受尚未部署的设备影响。

3)部署进度:防空设备的部署方案可以影响部署进度和时间利用效率。合理的方案可以使部署过程更加顺畅和高效,在时间和资源有限的情况下,能够更快地完成设备的部署。

与原始 ABC 算法类似,本文提出的简化型 ABC 算法在地面防空火力拦截设备部署的应用中同样包含 4 个阶段:种群初始化阶段、雇佣蜂阶段、跟随蜂阶段和侦察蜂阶段。其中,种群初始化阶段利用专家知识产生一个基于专家知识的初始部署方案,随机产生多个可行的部署方案并计算对应方案突防概率值,同时保存最优部署方案及突防概率值;雇佣蜂阶段、跟随蜂阶段和侦察蜂阶段执行不同的方案优化过程;最后,进行全局优化,保存当前迭代次数下的最优部署方案及对应的突防概率值。

简化型 ABC 算法与传统 ABC 算法不同之处在于:

1) 引入专家知识的初始化。在初始化阶段, 利用专家知识形成基于专家知识的地面防空火力拦截设备部署的初始化方案。该初始化在一定程度上改善了地面防空火力拦截设备的位置优选过程。

2) 具有适应性的邻域优化。在经典的人工蜂群算法的邻域优化基础上, 本文提出采用更具适应性的邻域优化过程: 将连续的邻域优化过程^[14]离散化, 以便地面防空火力拦截设备部署时设备可与部署位置一一对应。

1.1 专家知识辅助的初始化

设备种类多、数量大、部署面积广、部署位置多, 以及环境恶劣导致某些设备不能正常运行等因素对防空设备部署工作产生深刻影响, 使 ABC 算法处理过程复杂, 迭代时间久。

根据文献^[13], 涉及地面防空设备部署问题时, 有很多可以在部署前收集到的先验信息, 如地理信息、路网信息、气候信息、通信信息、目标分布信息等。为此, 本文将这些信息视为专家知识, 并利用这些信息辅助 ABC 算法的初始化。例如, 将提前获得的地形特征、地质条件视为专家知识, 可在部署方案设计时判断出某些特定地理位置非常适合或不适合部署某类防空设备。

因此, 我们在初始化阶段参考这些专家先验知识, 根据专家先验知识构成的数据库获取一种初始化方案, 而不完全依赖于传统蜂群算法的随机初始化。一方面, 该初始化方案因引入了专家知识, 可以被视为一种已优化的部署方案; 另一方面, 该初始化方案可以加速解的收敛速度, 减少迭代时间。

不同于传统蜂群算法的初始化, 本文的部署研究假设 N_L 个可部署设备的位置已在前期工作中完成, 部署方案只需要在各个部署位置部署适合的且某种效益最优(本文考虑突防概率最小化)的设备。在专家知识已产生的一种方案的情况下, 本文随机产生 $N_S - 1$ 种初始化部署方案, 共同形成 N_S 个部署方案, 表示为:

$$\dot{\mathbf{X}} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_1 \\ \mathbf{X}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{X}_{N_S} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{2,1} & \cdots & x_{N_S,1} \\ x_{1,2} & x_{2,2} & \cdots & x_{N_S,2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{1,N_L} & x_{2,N_L} & \cdots & x_{N_S,N_L} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $\dot{\mathbf{X}}$ 代表部署方案集合; $\mathbf{X}_i, i = 1, 2, \dots, N_S$ 代表一种部署方案; $x_{i,j}$ 表示方案 i 的第 j 个位置上部署的设备种类(多类设备中的一种, 这里假设了每类设备性能相当)。不失一般性, 假设 \mathbf{X}_1 为基于专家知识的部署方案。

由于需要部署设备众多, 初始化方案 \mathbf{X}_1 可能不能完全根据专家知识产生其所有元素。因此, 其部

分元素也可能是随机产生的。

1.2 雇佣蜂阶段

原始蜂群算法邻域优化过程是连续的, 不能很好地应用到地面防空火力拦截设备部署的简化中^[17]。为此, 本文提出了简化型 ABC 算法: 在邻域优化时, 将原来的连续型邻域优化改为离散型邻域优化, 使优化过程更符合实际部署需要。

雇佣蜂阶段需要对部署方案初始化阶段所产生的 N_S 个方案均进行优化, 则共计需要执行 N_S 次优化。其中, 某一次优化的处理流程如下。

1.2.1 改进型邻域优化

结合本方案特点, 邻域优化可表示为:

$$\begin{cases} y_{i,j} = \{x_{i,j} \leftrightarrow x_{i,k}\} \\ k = f_r(N_L) \\ j \neq k \end{cases} \quad (2)$$

式中: $x_{i,j} \leftrightarrow x_{i,k}$ 表示对方案 i 的第 j 个位置上的设备与第 k 个位置上的设备进行互换; $f_r(N_L)$ 表示随机产生一个在 $[1, N_L]$ 区间上的正整数。提出该方法不同于传统蜂群算法, 由于本文离散化了邻域优化过程, 且在前期利用专家知识完成了可部署位置的寻优处理, 从而将繁杂的整体任务进行了类似分模块处理的简化。

1.2.2 计算适宜度

在对 N_S 个方案进行邻域优化后, 需要计算每个方案的适宜度, 从而判断是否获得了更优的方案。一般来说, 通过专家知识初始化产生的部署方案适宜度值应该较大多数方案的适宜度值更优。方案 i 的适宜度为:

$$\text{fitness}_i = \frac{1}{1 + P_i}, (P_i \geq 0) \quad (3)$$

式中: P_i 表示第 i 个部署方案的突防概率值, 通过下述的 1)~3) 计算步骤获得。

1) 杀伤概率

在防空作战中, 导弹制导误差指导弹偏离了预定的目标轨迹路径。它是导弹制导系统的不确定性因素之一, 受到制导系统精度和环境因素的影响。导弹制导误差越大, 导弹偏离目标的可能性就越高^[15]。根据文献^[16], 地面防空火力拦截设备杀伤概率的计算表达式可表示为:

$$P_E = K \left(1 - \left(\frac{1}{2} \right)^{\delta^2 / \sigma^2} \right) \quad (4)$$

式中: K 为地面防空火力拦截设备可靠率; δ 为导弹破坏半径; σ 为制导误差。制导误差分布的概率密度^[19]为:

$$f(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \quad (5)$$

式中: r 为导弹的脱靶量。根据上述表达式计算杀

伤概率,这样就能够估计地面防空火力拦截设备对导弹的拦截效果,进一步分析系统的性能和提供决策依据^[15]。

2)第 t 层防线的效能值

第 t 层防线的效能值计算式为:

$$P_F(t) = \sum_{l=1}^{L_t} (\omega_{t,l} P_{t,l}) \quad (6)$$

式中: l 为该层防线的设备位置索引; L_t 为第 t 层防线需要部署的位置总数; $\omega_{t,l}$ 为第 t 层防线位置 l 的重要性加权系数(此参数由专家知识获得),满足 $\omega_{t,1} + \omega_{t,2} + \dots + \omega_{t,L_t} = 1$; $P_{t,l}$ 为第 t 层防线位置 l 部署设备的杀伤概率(由式(4)可得)。由式(6)可以看出,受到位置重要性加权系数 $\omega_{t,l}$ 的影响,相同类型的武器(即武器杀伤概率相同)在不同的位置上,产生的效能值会不同。

3)部署方案的突防概率值

第 i 次部署方案的突防概率计算式为:

$$P_i = \prod_{t=1}^{L_F} (1 - P_F(t)) \quad (7)$$

式中: L_F 为防线的层数。

优化的突防概率则可表示为:

$$P = \min \left\{ \prod_{t=1}^{L_F} \left(1 - \sum_{l=1}^{L_t} (\omega_{t,l} P_{t,l}) \right) \right\} \text{ s. t. } \begin{cases} \sum_l \omega_{t,l} = 1 \\ t = 1, 2, \dots, L_F \end{cases} \quad (8)$$

优化后总方案集合可用矩阵表示为:

$$\hat{\mathbf{Y}} = \begin{pmatrix} \mathbf{Y}_1 \\ \mathbf{Y}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{Y}_{N_S} \end{pmatrix}^T = \begin{bmatrix} y_{1,1} & y_{2,1} & \cdots & y_{N_S,1} \\ y_{1,2} & y_{2,2} & \cdots & y_{N_S,2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y_{1,N_L} & y_{2,N_L} & \cdots & y_{N_S,N_L} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: $\hat{\mathbf{Y}}$ 为优化后部署方案集合; $\mathbf{Y}_i, i=1, 2, \dots, N_S$ 为优化后的方案 i ; \mathbf{Y}_{ij} 为方案 i 的第 j 个位置上部署的设备种类(多类设备中的一种,这里假设了每类设备性能相当)。

1.2.3 贪婪比较

在邻域优化及适宜度计算完成之后,雇佣蜂将进行贪婪比较,即比较原始部署方案 \mathbf{x}_i 和优化后的部署方案 \mathbf{y}_i 的适宜度。比较操作如下:

1)如果原始部署方案 \mathbf{X}_i 的适宜度(由式(3)求得)更高(即:突防概率值更低),则保留原始部署方案 \mathbf{X}_i ,并对原始部署方案 \mathbf{X}_i 的优化计数(α)加1,即 $\alpha_i = \alpha_i + 1$ 。

2)如果优化后的部署方案 \mathbf{Y}_i 的适宜度更高,则用优化后的部署方案 \mathbf{Y}_i 替换原始部署方案 \mathbf{X}_i ,并将优化后的部署方案 \mathbf{Y}_i 的优化计数置0,即 $\alpha_i = 0$ 。

1.3 跟随蜂阶段

由于需要部署设备众多,第1.1节中专家知识

得到的部署方案部分元素也是随机产生的。因此,在通过轮盘赌方法选择跟随蜂时,再次利用专家知识,通过专家知识,选择可能最容易进行优化的部署方案进行 N_T 次跟随蜂优化。其中,某一次优化如下:

1)以轮盘赌方式选择部署方案

由专家知识,根据轮盘赌方式,跟随蜂选定一个部署方案。假设选中的方案为方案 i ,也即是 \mathbf{Y}_i 。

2)邻域优化及计算适宜度

将选定的部署方案按照式(2)进行邻域优化产生一个新的部署方案 $\mathbf{Z}_i, i=1, 2, \dots, N_S$,并根据式(3)计算新部署方案 \mathbf{Z}_i 的适宜度值。

3)贪婪比较

跟随蜂阶段与雇佣蜂阶段中的贪婪比较相同,均为比较原始部署方案 \mathbf{Y}_i 和优化后的部署方案 \mathbf{Z}_i 的适宜度。

1.4 侦察蜂阶段

根据最大尝试次数 β ,部署方案中优化计数 $\{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{N_S}\}$,查找超过最大尝试次数 β 的部署方案,并对其进行重新初始化(即各个位置进行设备重新初始化部署),具体操作如下:

查找尝试次数 $\beta_i, i=1, 2, \dots, N_S$ 超过最大尝试次数 β 的部署方案。

将部署方案中优化计数 $\beta_i, i=1, 2, \dots, N_S$ 超过最大尝试次数的部署方案舍去,并按照式(1)进行重新初始化。

如果无法找到符合条件的部署方案,该步骤直接跳过。

上述处理流程均完成以后,算法将更新、保存并输出本次迭代的全局最优部署方案及对应的突防概率,完成本次迭代的种群更新。

2 应用实例

根据文献[16],给出地面防空火力拦截设备参数如表1所示。对150个设备在不同的地理位置进行设备部署(需要说明的是,本文方法可部署更多的设备,这里为便于文章展现,采用了150个设备的部署作为示例),采用3层防线,每层防线可布防的设备数分别为60个、40个和50个。

表1 设备参数

设备类型	可靠率	导弹破坏半径/m	导弹制导误差/m	个数
A	0.30	80	10	40
B	0.45	100	15	50
C	0.60	120	20	40
D	0.70	140	25	20

表 2 第 1 层防线(共 60 个位置)

0.028 2	0.007 2	0.014 6	0.027 5	0.017 5	0.026 2
C	A	B	C	B	C
0.019 6	0.021 5	0.014 8	0.029 3	0.023 1	0.026 3
B	B	B	C	C	C
0.019 5	0.020 5	0.008 8	0.019 0	0.001 3	0.031 2
B	B	A	B	A	C
0.012 0	0.008 4	0.002 2	0.017 6	0.000 4	0.011 1
B	A	A	B	A	A
0.001 8	0.003 8	0.030 9	0.030 1	0.009 6	0.029 4
A	A	C	C	A	C
0.025 8	0.011 5	0.028 0	0.015 1	0.024 4	0.006 6
C	B	C	B	C	A
0.018 3	0.005 1	0.012 9	0.002 5	0.006 6	0.017 4
B	A	B	A	A	B
0.021 1	0.013 6	0.029 2	0.030 5	0.029 2	0.028 4
B	B	C	C	C	C
0.018 4	0.012 5	0.024 2	0.016 9	0.014 7	0.030 0
B	B	C	B	B	C
0.013 5	0.021 1	0.001 9	0.005 1	0.000 4	0.001 7
B	B	A	A	A	A

假设位置顺序给定,将现有的设备部署在指定位置,即设备的部署顺序与位置是一一对应的关系。由式(4)求得 4 类设备的杀伤概率分别为:0.30,0.45,0.60,0.70。结合求得的杀伤概率和阵地权重,利用式(6)和式(7),根据第 1 节 4 个阶段,在求解得到对方的最低突防概率情况下,地面防空火力拦截设备的部署顺序及其对应的阵地权重(因便于展示,所以此处小数点后保留 4 位有效数字)如表 2、表 3、表 4 所示。数字为阵地权重,字母为设备类型。

表 3 第 2 层防线(共 40 个位置)

0.032 7	0.007 2	0.028 4	0.032 8	0.020 7
C	A	C	C	B
0.031 4	0.050 3	0.014 1	0.021 8	0.009 6
C	D	B	B	A
0.016 0	0.023 1	0.044 9	0.039 1	0.008 2
B	C	D	D	A
0.007 2	0.003 1	0.029 3	0.014 9	0.002 1
A	A	C	B	A
0.050 7	0.047 1	0.018 0	0.050 3	0.023 0
D	D	B	D	C
0.022 8	0.038 0	0.027 5	0.016 7	0.034 3
C	D	C	B	C
0.003 8	0.001 9	0.003 8	0.050 1	0.011 9
A	A	A	D	B
0.051 8	0.045 9	0.016 3	0.048 2	0.001 0
D	D	B	D	A

表 4 第 3 层防线(共 50 个位置)

0.041 4	0.014 3	0.002 1	0.026 5	0.012 0
D	B	A	C	B
0.012 3	0.040 6	0.000 1	0.016 5	0.039 6
B	D	A	B	D
0.002 6	0.025 3	0.015 9	0.015 7	0.041 1
A	C	B	B	D
0.004 8	0.003 1	0.025 0	0.036 8	0.021 6
A	A	C	D	B
0.020 2	0.034 4	0.040 3	0.030 9	0.015 7
B	D	D	C	B
0.012 9	0.028 2	0.022 1	0.040 9	0.000 3
B	C	B	D	A
0.005 4	0.022 4	0.032 8	0.028 8	0.015 5
A	B	C	C	B
0.022 4	0.024 6	0.026 3	0.012 3	0.004 3
B	C	C	B	A
0.012 8	0.022 0	0.005 8	0.012 5	0.040 1
B	B	A	B	D
0.001 2	0.028 5	0.030 0	0.000 5	0.008 7
A	C	C	A	A

2.1 有效性分析

在本示例中,本文算法将 30 个位置利用专家知识进行初始化(即有 30 个设备根据专家知识部署在对应的 30 个位置上)。对方突防概率与迭代次数的关系曲线如图 1 所示。

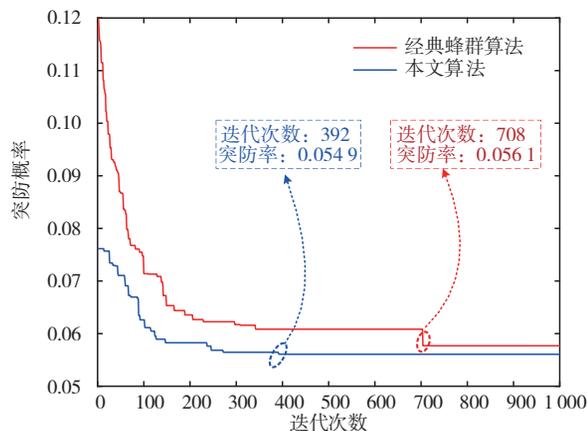


图 1 提出方法与经典蜂群算法的突防概率与收敛性能

从图 1 的突防概率与迭代次数可以看出:

1)相对于经典的蜂群算法,本文方法显著降低了收敛次数。该实例中,新方法通过引入的专家知识进行初始化、分开离散化的邻域优化处理,所需迭代次数为 392 次,经典蜂群算法迭代次数为 708 次。

2)相比于经典的蜂群算法,本方法降低了对对方突防概率,该实例中,新方法通过引入专家知识进行初始化,诱导寻优过程更加靠近最优部署解,对方突防概率为 0.054 9,而经典蜂群算法对方突防概率

为 0.056 1。

2.2 专家知识影响分析

专家知识对突防概率与迭代次数有较大的影响,图 2 给出了相应的仿真验证。在图 1 仿真的基础上,我们改变了专家知识的数目,即分别考虑 10 个位置,20 个位置,30 个位置和 40 个位置利用专家知识进行初始化。

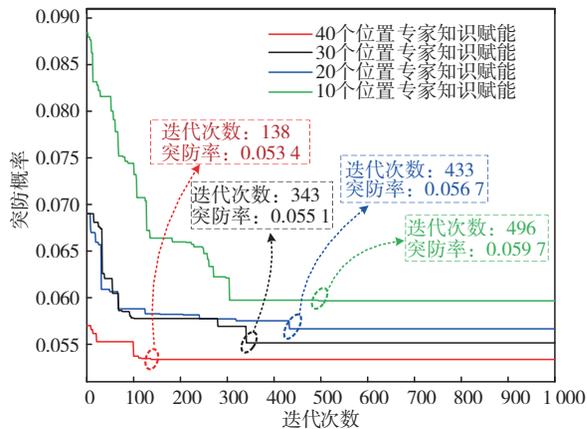


图 2 不同专家知识对突防概率与迭代次数的影响

从图 2 的突防概率与迭代次数可以看出:

1)更多专家知识,可以获得更低的对方突防概率。例如,40 个位置利用专家知识进行初始化时,对方突防概率为 0.053 4;而 10 个位置利用专家知识进行初始化时,对方突防概率上升至 0.059 7。专家知识的增多,降低了对方突防概率值。

2)更多专家知识,将显著地减小算法收敛所需的迭代次数。20 个位置利用专家知识进行初始化时,收敛所需的迭代次数约 433 次;而 10 个位置利用专家知识进行初始化时,收敛所需的迭代次数约 496 次。

由此可见,充分开发专家知识,根据专家知识赋能地面防空火力拦截设备类型的部署极具吸引力。

2.3 地面防空火力拦截设备性能影响分析

另一方面,更优异性能的设备会显著地降低对方突防概率值,仿真验证如图 3 所示。其中,考虑了 40 个位置利用专家知识进行初始化;假设 ABCD 4 类设备的杀伤概率分别为:

第 1 组(ABCD):0.10、0.25、0.40、0.60

第 2 组(ABCD):0.30、0.45、0.60、0.70

第 3 组(ABCD):0.40、0.50、0.60、0.70

从图 3 的突防概率与迭代次数可以看出:

1)更高的杀伤概率的地面防空火力拦截设备,将使对方突防概率更低。第 1 组地面防空火力拦截设备的杀伤概率小于第 2 组和第 3 组。因此,进攻方面对第 1 组地面防空火力拦截设备的突防概率显著高于第 2 组和第 3 组。

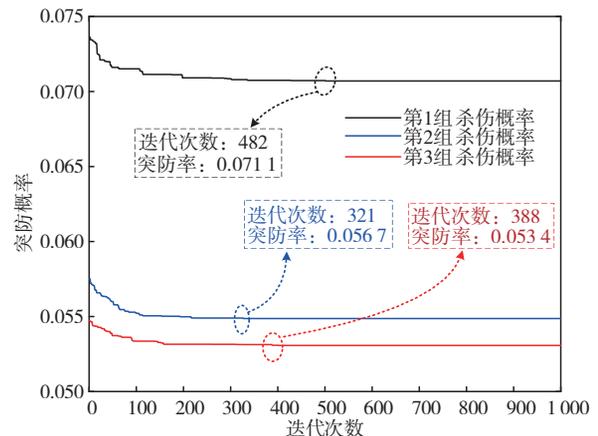


图 3 不同杀伤概率的迭代结果

2)在算法收敛所需的迭代次数上,杀伤概率差异影响并不规律。第 1 组地面防空火力拦截设备的杀伤概率小于第 2 组和第 3 组;第 1 组地面防空火力拦截设备优化收敛所需的迭代次数最大,达到了 482 次。然而,尽管第 2 组地面防空火力拦截设备的杀伤概率小于第 3 组,第 3 组地面防空火力拦截设备优化收敛所需的迭代次数却大于第 2 组。

由此可见,更高的杀伤概率的地面防空火力拦截设备可显著降低突防概率,但对算法优化所需的迭代次数影响不大。因此,要改善迭代次数,专家知识的深度挖掘势在必行。

3 结语

本文基于人工蜂群算法,从地面防空火力拦截设备部署视角出发,通过在初始化阶段充分利用专家知识进行优化,在邻域优化过程中进行分块离散化处理,一定程度上诱导寻优过程更快靠近最优部署解,极大降低了收敛所需的迭代次数。同时,由于专家知识的辅助,相对于经典蜂群算法,新方法在一定程度上降低了对对方突防概率值。本文研究为地面防空火力拦截设备部署提供了一种改善收敛速度和突防概率的有效方法。

参考文献

- [1] 刘文涛,单兆春,李红涛,等. 弹炮结合目标防空部署方案优化评估[J]. 火力与指挥控制, 2006,31(1): 58-61.
- [2] 刘振,徐学文,李静. 考虑协同制导的编队一体化防空问题分析与求解[J]. 指挥与控制学报, 2018,4(3): 213-219.
- [3] 闫明亮,刘法明,王凯,等. 基于模拟退火算法的防空导弹体系优化部署研究[J]. 指挥控制与仿真, 2006,28(4): 49-52.
- [4] 陈西成,刘曙,肖涛鑫,等. 基于改进蚁群算法的防

- 空部署效能评估模型[C]//第六届中国指挥控制大会论文集(下册).北京:电子工业出版社,2018:6.
- [5] 褚凯轩,常天庆,孔德鹏.基于 Jackson 网络的地面分队防御作战兵力部署方法[J].控制与决策,2023,38(1):219-227.
- [6] 于威,侯学隆.要地区域防空兵力优化部署问题研究[J].舰船电子工程,2022,42(12):37-39.
- [7] KARABOGA D. An Idea Based on Honey Bee Swarm for Numerical Optimization[R]. Turkey:Erciyes University,2005.
- [8] XUE B, ZHANG Y W, ZHANG X Y, et al. An Improved Artificial Bee Colony Algorithm Based on Faster Convergence[C]//2021 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Computer Applications(ICAICA). Dalian:IEEE, 2021:776-779.
- [9] 褚凯轩,常天庆,孔德鹏,等.基于蜂群算法的坦克阵地部署与火力分配模型[J].系统工程与电子技术,2022,44(2):546-556.
- [10] 岳韶华,何晟,王刚,等.基于改进遗传蜂群算法的武器系统优化部署问题研究[J].兵器装备工程学报,2022,43(8):80-86.
- [11] 邢清华,刘付显.区域防空部署优化系统建模[J].系统工程与电子技术,2006,28(5):712-715.
- [12] ZHANG H F, LIU X M, LIU Q, et al. Simulation Design of Air Defense Forces Operation Action Supported by Space Information[C]//2018 5th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE). Zhengzhou: IEEE, 2018:1249-1252.
- [13] 武文军.防空兵部队战术[M].北京:军事科学出版社,2001.
- [14] WU A, CHEN H W, WANG C Z, et al. Study on Dynamic Equilibrium Factor based on Gauss-Cauchy Distribution in Artificial Bee Colony Algorithm[C]//2021 16th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE). Lancaster: IEEE, 2021: 607-611.
- [15] 王军,谷良贤,王博,等.毫米波制导导弹系统误差及捕获概率研究[J].航空计算技术,2012,42(5):25-27,32.
- [16] 李维.察打无人机对地作战的自主决策方法与仿真平台设计[D].南京:南京航空航天大学,2020.
- [17] 魏红凯.人工蜂群算法及其应用研究[D].北京:北京工业大学,2012.
- [18] 郭建国,周凤岐,周军.基于零脱靶量设计的变结构末制导律[J].宇航学报,2005,26(2):152-155,216.
- [19] 马拴柱,刘飞.地空导弹射击学[M].西安:西北工业大学出版社,2012.

(编辑:刘勇)