

# 基于差分进化算法的港口封控兵力规划方法

刘成哲,王冰切,张麒麟

(空军预警学院,湖北 武汉 430019)

**摘要:**针对传统港口封控兵力规划人力作业耗时长、效率低、难寻优等问题,提出了无人机群对海识别查证条件下,运用差分进化算法进行飞行航路智能寻优和兵力优化的方法。该方法具有兵力规划快速可靠、精准高效、行动要素覆盖全面等特点。

**关键词:**港口封控;差分进化算法;兵力规划;无人机

中图分类号:TP18;TN97

文献标识码:A

文章编号:CN32-1413(2022)01-0037-05

DOI:10.16426/j.cnki.jcdzdk.2022.01.008

## Force Planning Method for Port Blockade Based on Differential Evolution Algorithm

LIU Cheng-zhe, WANG Bing-qie, ZHANG Qi-lin

(Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of long time-consuming, low efficiency, hard to optimizing, etc. of human operation for force planning used for traditional port blockade, this paper proposes the methods to perform intelligent optimization for flight routes and force optimization by using differential evolution algorithm under the conditions of unmanned aerial vehicle (UAV) swarm identifying and verifying to the sea. This method has the characteristics of rapid, reliable, accurate, efficient force planning, and with comprehensive coverage of action elements.

**Key words:** port blockade; differential evolution algorithm; force planning; unmanned aerial vehicle

### 0 引 言

港口是水陆联运的关键节点,具有重要的战略属性。港口封控用以控制敌人海上运输线、生命线,使其无法获得外来战争援助和资源,从而削弱其战争实力和潜力,对作战进程有着重要影响,甚至具有决定性作用。传统的港口海面封控主要由水面舰船实施,兵力规划依靠人力和经验进行图上标绘作业。由于进港船舶数量多,军民商属性杂,海上分布范围广,航行动态差异大,识别查证时间长,拦截过程特情多等,使得传统的港口封控兵力规划难以周全,准度不高,效率低下,急需研究采用新的识别查证方式和智能化兵力规划方法。

本文提出采用无人机群实施对海识别查证的条

件下,运用差分进化算法对港口封控实现智能化的兵力规划,快速自动生成港口封控兵力规划方案,具有快速可靠、精准高效、行动要素覆盖全面等特点。

### 1 港口封控任务要求

为实现港口封控,可以以敌港口为圆心,在距离港口一定距离(敌火力控制区域)外划定拦截处置区,该区域覆盖进港航线,区域形状不一。封控行动包括识别查证和拦截处置。识别查证主要完成对拟进港船只进行军民商属性判断和分类,并将结果实时通报行动中心,为海面拦截处置提供情报保障。识别查证需在船只进入拦截处置区前完成。

拦截处置是对进入该区的敌对船只必须进行拦截处置,对进入该区的非友好船只尽可能进行拦截

收稿日期:2021-03-20

处置。采用无人机群对进港船只进行识别查证,用时长短与无人机数量选取和航线规划密切相关。水面舰船开展拦截处置的时间也由任务舰船数量、航线规划和特情处置时间等决定。为确保在有限时间内完成港口封控任务,需要快速可靠地对任务兵力和航线进行大数据约束优化,以找到最佳兵力规划方案。

## 2 差分进化兵力规划方法

差分进化算法用于自适应多维空间整体优化,擅长解决约束条件下的最优化问题,且具有结构简单、易于实现、快速收敛、鲁棒性强等特点<sup>[1-4]</sup>。可采用差分进化算法,通过模拟港口封控过程中群体里个体合作与竞争的过程,将封控兵力优化模型转化为任务兵力选取目标的规则,对模型结果进行持续优化,从而得到最优解。

### 2.1 识别查证

把无人机路径选取的规则作为限制条件<sup>[5-7]</sup>,将使用的无人机数量最小值作为目标函数,任意可行路径的选择作为决策变量,建立多批次无人机动态航线规划模型,通过对模型结果进行寻优从而得到最优解。

#### 2.1.1 识别查证约束

进港船只航向均指向港口,航线为其当前位置与港口的连线。设进港船只总数为 $n$ ,出动的无人机架数为 $m$ ,无人机对每艘进港船只的查证耗时为 $T_0$ 。进港船只的集合为 $V$ ,每架无人机识别的船只数目分别记为 $N_1, N_2, \dots, N_m$ ,每架无人机识别的进港船只集合分别记作 $H_1, H_2, \dots, H_m$ 。将每艘进港船只视作一个动点,无人机对任一船只查证结束位置到下一船只识别开始位置的路径长度,即为两点间的时间权重 $t_{ij}$ ,设决策变量:

$$d_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{若有无人机从船只 } i \text{ 飞往船只 } j \\ 0, & \text{没有无人机从船只 } i \text{ 飞往船只 } j \end{cases}$$

无人机群同时识别查证,应要求每架无人机识别的进港船只互不交叠,且无船只遗漏,即:

$$\begin{cases} \forall V_i \cap V_j = \emptyset, i, j = 1, 2, \dots, m, \text{ 且 } i \neq j \\ H_1 \cup H_2 \cup \dots \cup H_m = H \end{cases} \quad (1)$$

若以港口为原点建立直角坐标系,第 $i$ 个进港船只当前坐标为 $(x_{i0}, y_{i0})$ ,航速为 $v_i$ ,进港船只任意时刻的位置为:

$$\begin{cases} x = x_{i0} - \frac{v_i \times \Delta t}{\sqrt{1 + \left(\frac{y_{i0}}{x_{i0}}\right)^2}} \\ y = y_{i0} - \frac{v_i \times \Delta t}{\sqrt{1 + \left(\frac{y_{i0}}{x_{i0}}\right)^2}} \end{cases} \quad (2)$$

第 $i$ 个进港船只在到达拦截处置区边界时的坐标为 $(x_{ic}, y_{ic})$ ,由此可以计算每艘船只到达拦截处置区边界线所需的时间,其中的最短时间为识别查证处最大约束时限 $T_{IV\max}$ 。若:

$$T_{IV\max} = \min \left\{ \frac{\sqrt{x_{10}^2 + y_{10}^2} - \sqrt{x_{1c}^2 + y_{1c}^2}}{v_1}, \frac{\sqrt{x_{20}^2 + y_{20}^2} - \sqrt{x_{2c}^2 + y_{2c}^2}}{v_2}, \dots, \frac{\sqrt{x_{n0}^2 + y_{n0}^2} - \sqrt{x_{nc}^2 + y_{nc}^2}}{v_n} \right\} \quad (3)$$

识别查证兵力规划要求必须在时限 $T_{IV\max}$ 内完成对所有进港船只的识别。总耗时包括无人机在被查证船只之间的飞行耗时(包括识别耗时)和对船只进行的查证耗时,多架无人机同时工作时,取最长的无人机耗时作为总耗时,要求:

$$\max \left\{ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} t_{ij} + N_k T_0 \right\} \leq T_{IV\max} \quad (4)$$

式中: $i, j \in H_k, k = 1, 2, \dots, m$ 。

对无人机识别查证兵力规划,就是在保证式(4)成立的情况下,优化每架无人机识别查证的船只、顺序和航路,使出动无人机的数量尽可能少。

为保证不产生循环航路,每架无人机识别查证的航路不产生回路,且每艘进港船只仅被识别查证一次,则:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n d_{ij} \leq 1 \\ \sum_{j=1}^n d_{ij} \leq 1 \\ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} = N_k - 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $i, j \in H_k, k = 1, 2, \dots, m$ 。

#### 2.1.2 无人机规划优化

识别查证可转化为固定架数的无人机分别从不同起点出发,不重复地遍历所有进港船只,若总耗时小于任务时限 $T_{IV\max}$ 即为可行解。

优化求解过程中,设定无人机在结束一次识别查证后,对下一识别船只的选取规则如下:

(1) 船只未被识别,且不是其他无人机选定的查证目标。

(2) 优先级评分=无人机与待查证目标船只最短相遇距离 $\times$ 权重 $w_1$ +参考点到待查证目标船只当前坐标距离 $\times$ 权重 $w_2$ 。

(3) 每次选取优先级评分最小的船只作为下一个待识别查处目标船只。

当出动无人机架数为 $m$ 时,设2个权重 $w_1, w_2$ 和 $m$ 个参考点坐标为决策变量,以识别所有进港船只总耗时最小为目标函数,其为非线性不可微空间的全局搜索优化问题,可以采用差分进化算法解决,具体步骤是:

(1) 确定参数向量。确定差分进化变异算子、种群数量、终止条件、交叉算子最大进化代数等控制参数及其所采用的具体策略。构建 $N_p$ 个 $D$ 维的实数参数向量,每个个体表示为 $X_{ij,G}$  ( $i=1,2,\dots,N_p; j=1,2,\dots,D$ ) ( $i$ 为个体在种群中的序列, $G$ 为进化代数),设置参数界限为 $X_{ij}^L \leq X_{ij} \leq X_{ij}^U$ 。

(2) 随机产生初始种群。进化代数置1。所有随机初始化种群均符合均匀概率分布:

$$X_{ij,G} = X_{ij}^L + \text{rand}[0,1] \times (X_{ij}^U - X_{ij}^L) \quad (6)$$

式中: $i=1,2,\dots,N_p; j=1,2,\dots,D$ 。

(3) 对初始种群进行评价。即计算初始种群中每个个体的目标函数值。

(4) 用式(4)进行约束评价。判断是否达到终止条件或进化代数。若是,终止进化;否则,继续进化。

(5) 进行变异和交叉,产生新的种群。在当前族群中随机选择父代向量,通过差分策略实现个体变异,产生新的族群。变异算子为:

$$V_{i,G+1} = X_{r_1,G} + F(X_{r_2,G} - X_{r_3,G}) \quad (7)$$

式中: $r_1, r_2, r_3$ 是从 $i=1,2,\dots,N_p$ 中随机选择互不相同的整数;变异算子 $F$ 为常数,取值范围为 $[0,1]$ ,主要影响全局寻优能力。

$F$ 值小,搜索能力好; $F$ 值大,容易跳出局部极值点,但收敛慢。

为了保证解的有效性,需判断变异向量是否满足边界条件。如果不满足,重新生成:

$$V_{i,G+1} = \begin{cases} \min\{X_{ij}^U, 2X_{ij}^L - V_{i,G}\}, & V_{i,G+1} < X_{ij}^L \\ \max\{X_{ij}^L, 2X_{ij}^U - V_{i,G}\}, & V_{i,G+1} > X_{ij}^U \end{cases} \quad (8)$$

为提高种群的多样性,还可采用基准向量和变异向量的交叉进化,二项式交叉向量为:

$$u_{ij,G+1} = \begin{cases} V_{ij,G+1}, & \text{rand}[0,1] < C_r \text{ 或 } j = j_{\text{rand}} \\ X_{ij,G}, & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $j \in (1,2,\dots,D)$ ;  $j_{\text{rand}}$ 为 $[1,D]$ 区间的随机整数; $C_r \in [0,1]$ 为交叉算子。

(6) 选择操作。采用贪婪搜索策略,经过变异与交叉操作后产生的试验个体 $u_{ij,G+1}$ 与 $X_{ij,G}$ 进行竞争,引入适应度函数进行计算,选取适应度更优的进入下一代:

$$X_{ij,G+1} = \begin{cases} u_{ij,G+1}, & f(u_{ij,G+1}) < f(X_{ij,G}) \\ X_{ij,G}, & f(u_{ij,G+1}) \geq f(X_{ij,G}) \end{cases} \quad (10)$$

式中: $f$ 为适应度函数,这里视为最小值优化问题。

(7) 进化代数,转为步骤(4)。

## 2.2 拦截处置

将进港船只拦截率最大作为目标函数,将是否拦截作为决策变量,建立拦截处置优化模型。将拦截处置优化模型转化为担负拦截任务的军警舰船选取目标的规则,通过差分进化对模型进行寻优从而得到最优解。

### 2.2.1 拦截处置约束

对任意一艘进港船只,拦截过程为:军警舰船提前转向完毕,向预定拦截点方向出发;军警舰船到达拦截点附近开始转向,转至与被拦截船只航向相同,此时军警舰船与进港船只相遇,进入处置程序;军警舰船与进港船只同行,经过一定处置时间(不同目标类别,其处置时间不同),到达拦截结束点;被拦截处置船只转向返航,军警舰船根据下一目标船只开始转向。

船舶行驶过程中无法原地转向,其转向能力表征为旋回性能,担负拦截任务的军警舰船不同,其转向半径、转向时间均不同<sup>[8-9]</sup>。

若经识别查证,进港船只分为3类:Ⅰ类为无害商船,可不予拦截处置;Ⅱ类为潜在威胁船只 $p$ 艘,尽可能被护卫舰或海警船拦截,每艘处置时间为 $T_2$ ;Ⅲ类为敌对船只 $q$ 艘,必须由护卫舰拦截,每艘处置时间为 $T_3$ 。参与拦截任务的军警船中,护卫舰 $m$ 艘,海警船 $n$ 艘。设决策变量:

$$d_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{进港船只 } i \text{ 被军警船 } j \text{ 拦截} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

为使进港船只尽可能多地被拦截,设立目标函数:

$$\max Z = \sum_{i=1}^{p+q} \sum_{j=1}^{m+n} d_{ij} \quad (11)$$

Ⅲ类进港船只必须被拦截,且只能由护卫舰拦截,应满足:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^m d_{ij} = 1, i \text{ 为 Ⅲ 类 船 只} \\ \sum_{j=m+1}^{m+n} d_{ij} = 0, i \text{ 为 Ⅲ 类 船 只} \end{cases} \quad (12)$$

对任意时刻,同一艘军警舰只能拦截一艘进港船只,且每艘进港船只最多只被拦截一次,即:

$$\sum_{i=1}^{p+q} \sum_{j=1}^{m+n} d_{ij} \leq m+n \quad (13)$$

## 2.2.2 拦截兵力规划优化

每艘军警船对下一拦截目标的选择规则如下:

(1) 将处于或待进入拦截处置区域内的前  $k$  个可拦截目标设为可选项滑窗。待拦截船只在可选项滑窗内,且本军警船能够在被拦截船只突破拦截处置区前完成拦截,且此船只非其他军警船选定的拦截目标。

(2) 优先级评分 = (船只突破防线的剩余时间  $\times$  权重  $w_1$  + 追击及拦截船只总耗时  $\times$  权重  $w_2$  + 拦截完成后军警船回到拦截处置区边界线的耗时  $\times$  权重  $w_3$ )  $\times$  被拦截船只威胁权重  $w_4$ 。

(3) 每次选取优先级评分最小的船只作为下一拦截目标船只。任意一艘Ⅲ类船只未被拦截,则拦截率为 0。

(4) 以权重  $w_1, w_2, w_3, w_4$  和滑窗内目标数量  $k$  为决策变量,以进港船只拦截率最大为目标函数,用差分进化算法进行寻优,可以得到近似最优解。

表 1 最优目标向量

出动无人机架数	3	4	5
$w_1, w_2$	0.72, 0.28	0.69, 0.31	0.65, 0.35
参考点坐标/km	(182.976 6, 88.123 6) (79.241 8, 211.186 6) (118.893 2, 327.531 5)	(167.966 4, 76.680 3) (221.619 4, 185.361 4) (301.987 7, 146.158 5) (117.730 6, 387.860 8)	(69.987 8, 359.878 4) (172.966 8, 271.230 3) (337.400 1, 128.794 6) (279.400 1, 125.994 6) (327.029 2, 120.424 2)
总耗时/min	630	470	410
耗时约束/min	490	490	490
是否为可行解	否	是	是

4 架无人机航迹全览如图 2 所示。

采用 4 架无人机识别查证时,根据拦截兵力规划优化方法,可以求解出拦截处置最优决策变量,如表 2 所示。

## 3 兵力规划实例分析

以被封控港口为圆心,方位正北方向顺时针夹角  $18^\circ \sim 66^\circ$  之间的扇形区域内,距港口 118 km 外划设拦截处置区(封控区 ABCD, AB 长 110 km, AD、BC 长 35 km),如图 1 所示。封控行动方案是:利用少量无人机对即将进入拦截处置区(CD 线)的 3 类 84 艘船只(每艘船只坐标航速已知, I 类 35 艘, II 类 30 艘, III 类 10 艘)进行识别查证;然后由 2 艘护卫舰和 3 艘海警舰执行拦截任务,在敌火力控制区(梯形 ABCD)内处置完成。无人机查证时间 8 min,对 II、III 类船只的处置时间分别为 30 min 和 50 min。

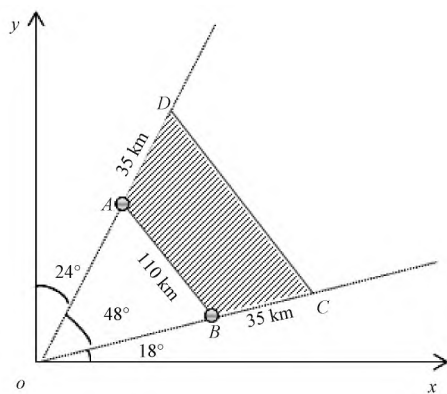


图 1 封控区示意图

根据无人机规划优化方法,可以分别求出出动无人机架数为 3、4、5 时的最优差分进化目标向量,如表 1 所示。出动 4 架无人机即可完成识别查证任务。

5 艘军警船拦截处置航迹全览如图 3 所示。

## 4 结束语

本文采用差分进化算法解决港口封控兵力规划

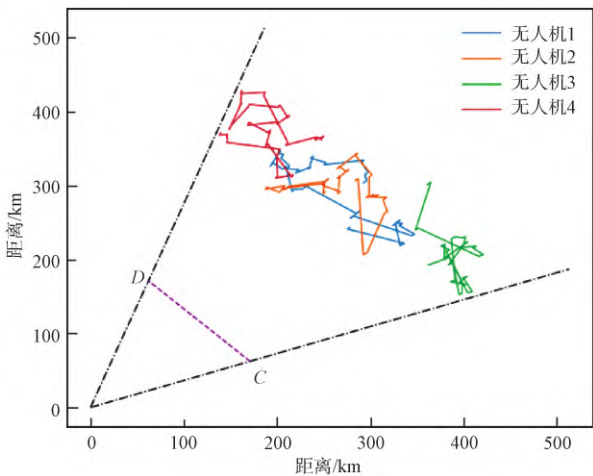


图 2 4 架无人机识别查证航迹全览

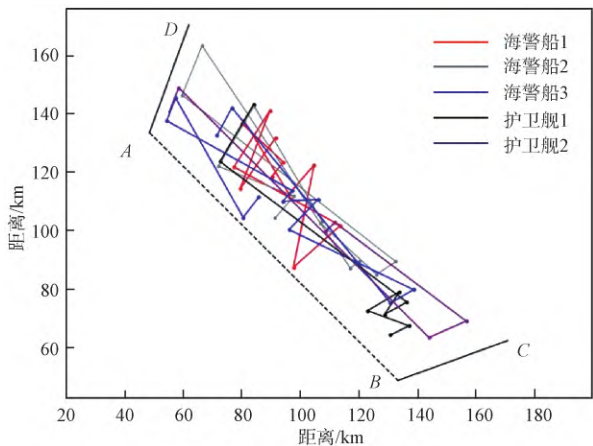


图 3 5 艘军警船拦截处置航迹全览

表 2 拦截处置兵力规划决策变量参数表

决策变量	参数值
$w_1$	0.431 2
$w_2$	0.057 9
$w_3$	0.510 9
$w_4$	0.009 1
滑窗内目标数量 $k$	4
最终拦截率	55%

问题,充分发挥其收敛速度快、全局寻优能力强、操作简单等优点,实现了最少兵力、最优航路的选取。

在使用遗传算法对文中实例进行兵力规划时,仿真结果显示最大拦截率只能达到 52.5%,且优化用时较长。相比之下,差分进化算法在港口封控兵力规划寻优中则用时较短、优化更充分。由于本文在处理港口封控兵力规划问题时对许多细节问题进行了近似处理,如将无人机识别过程仅当作坐标点重合的伴飞过程,将拦截处置舰船的转向过程简化为原地转向加位移过程,未考虑实际中可能存在的碰撞问题等,对规划结果产生一定影响,进一步提升计算的精细度能够使得兵力规划更精准可靠。

参考文献

[1] 刘若辰,焦李成,马亚娟. 一种差分多目标优化算法[J]. 模式识别与人工智能,2011(6):748-755.

[2] 周辉仁,唐万生,王海龙. 基于差分进化算法的多旅行商问题优化[J]. 系统工程理论与实践,2010,30(8):1471-1476.

[3] 黄湘鹏,黄晓钢. 一种基于深度学习的无人机识别方法[J]. 雷达与对抗,2020,40(2):20-25.

[4] 刘志成,严建钢. 基于图论的防空兵力优化配置研究[J]. 大学数学,2013,29(1):52-55.

[5] 田启华,董群梅,杜义贤,等. 基于动态规划算法的二阶段迭代模型任务分布方案的寻优[J]. 机械设计与研究,2016,32(3):85-88.

[6] 张天佳. 基于群体智能优化的无人机路径规划研究[D]. 上海:上海交通大学,2019.

[7] 于静楠. 无人机路径智能规划算法研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2019.

[8] 夏国忠,史国友. 超大型船舶旋回性能的探讨[J]. 大连海事大学学报,2000,26(3):48-50.

[9] 周华美. 基于 IACO-GA 的船舶动态航线规划算法的研究与实现[D]. 武汉:武汉理工大学,2019.