

综合作战区同构舰载预警机巡逻策略 分段滚动规划方法研究

段晓稳,高晓光,李 波

(西北工业大学电子信息学院,陕西西安 710129)

摘 要: 为了研究在综合作战区内当航母编队面临多来源威胁时,指挥员应如何针对单/多架同构且所属于相同/相异舰艇平台的预警机制定拟定警戒时间限定下的防空警戒巡逻策略问题,首先通过对舰载预警机巡逻策略的规划机制进行分析,提出了一种基于时间分段的单/多架同构舰载预警机巡逻策略滚动规划模型,并紧随其后详细介绍了模型的实现过程.针对模型的求解,提出了一种多主单从结构的多种群并行自适应-禁忌遗传算法进行求解.在仿真部分,分别通过对警戒时间限定下的单/多架同构预警机巡逻策略规划以及仿真对比,证明了所建立模型的有效性及其优越性.

关键词: 航母编队; 预警机; 同构; 分段优化; 并行遗传算法

中图分类号: E837 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2017)06-1301-10

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.06.004

Research on Patrol Strategy Subsection Rolling Planning of Isomorphic EWAs Within Synthesis Combat Area

DUAN Xiao-wen, GAO Xiao-guang, LI Bo

(School of Electronic and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710129, China)

Abstract: The patrol strategy of single or multiple EWAs (Early Warning Aircraft) that belongs to the same or different owner assigned by carrier formation aiming at multi-target air defense alert within synthesis combat area under warning time restriction is investigated. Firstly, the patrol strategy planning mechanism of EWA is analyzed, and that a patrol strategy rolling planning model aims at single or multiple isomorphic EWAs based on time subsection is presented; secondly, the realization process of the model is described; thirdly, aiming at the model solving, a parallel adaptive and tabu genetic algorithm of multi-master-single-slave structure is presented. Experiments show that the established model can realize the corresponding function of patrol strategy planning, and the proposed algorithm can solve the corresponding model efficiently. The validity of the model and algorithm is demonstrated.

Key words: carrier formation; early warning aircraft; isomorphic; subsection optimization; parallel genetic algorithm (PGA)

1 引言

航母编队综合作战区,是为了保障航母编队顺利对敌岸实施打击、封锁和局部地区海空域控制而设置的综合防护区^[1].在综合作战区,航母编队将受到较大的空中威胁,故而应该加强航母编队的对空防御力量^[2].早期空中预警作为航母编队对空防御力量的前端,预警效果的有效与否对空中防御是否有效具有重

大影响.执行航母编队的空中预警主要依赖于装备在不同舰艇平台上舰载固定翼预警机和舰载预警直升机,航母编队一方可能需要进行较长时间的空中预警^[3,4],所以针对所辖预警机制定警戒时间限定下的可行并高效的巡逻策略具有重要意义.

针对舰载预警机的巡逻策略生成方法,仅有少量文献进行了研究.按研究对象可以分为两大类:(1)单架预警机的单个巡逻周期巡逻策略规划.此处预警机

巡逻周期是从预警机起飞时刻开始,经过最大工作时间的巡逻之后,返回所属舰艇并完成燃料补给等休整环节为止的整个阶段的耗时.如文献[1]的参考文献中[2,6~8],均是针对单架预警机(固定翼或旋翼)的单个巡逻周期巡逻策略规划.而实际上,航母编队通常面临多个方向的持续威胁,所以必定需要多架预警机协同执行多个巡逻周期的巡逻任务^[5]; (2) 多架同构/异构预警机的多个巡逻周期巡逻策略规划.如文献[1]提出了三种巡逻策略规划模型.分析可知,所辖各架预警机被分配以批次形式前出执行巡逻任务,同一批次的预警机同时出发并同时返航.思路的不足在于:①对于同一批次内的同构预警机,由于各架预警机可能从属于不同的舰艇且在不同区域执行巡逻任务,所以在对应巡逻区域具有不同的可行警戒时间,同时返航将导致部分具有相对较长可行警戒时间的预警机提前返航,导致巡逻能力的浪费;②对于同一批次内的异构预警机,由于通常固定翼预警机的可行警戒时间远大于预警直升机,同时返航将导致固定翼预警机过早返航而大幅浪费其巡逻能力.

舰载预警机是一种移动传感器,多架舰载预警机协同预警构成一个传感器网络.故本文的研究有助于对无线传感器网络配置^[6]、多无人机或多机器人协同执行巡逻任务时^[7]的决策问题等的研究.

鉴于现有研究中存在的不足,本文以拟定警戒时间限定下的单/多架同构且所属于相同/相异舰艇平台的预警机的巡逻策略规划问题为研究内容,采用如文献[1]中图1所示的舰载预警机巡逻策略生成流程,并以流程为主线,通过分析巡逻策略的规划机制并考虑到整段单次规划所面临的问题,提出了基于时间分段的同构舰载预警机巡逻策略滚动规划模型^[8,9],并详细介绍了模型的建立及求解过程,仿真结果证明了模型的有效性及其优越性.

下面对提出的巡逻策略规划机制进行介绍.

2 巡逻策略规划机制

本文中针对巡逻策略规划机制的研究将以同构固定翼预警机和同构预警直升机为对象展开^[10].

2.1 单巡逻周期、起飞时间范围和所需巡逻周期数

2.1.1 单巡逻周期分析

假设指挥员拟派出 n_E 架固定翼预警机或预警直升机执行空中巡逻任务,预警机集合 $E = \{E_i | 0 \leq i < n_E\}$, E_i 表示编号为 i 的预警机.

本文以 D_T (min) 为默认时间单位, TD_T 表示秒向 D_T 的转换单位,则依引言中分析,预警机的单个巡逻周期 T_E 可根据式(1)来估算:

$$T_E = \frac{W_V - S_V}{P_V} \cdot TD_T + T_{Pr} \quad (1)$$

W_V 、 S_V 和 P_V 分别表示预警机的有效航程、安全航程和巡逻速度, T_{Pr} 表示预警机进行燃料补给等休整环节所耗费的时间.

2.1.2 起飞时间范围分析

设指挥员根据实际需求,需要对所辖预警机制定警戒时间为 t_{WN} 的巡逻方案.由于固定翼预警机仅能装备在航空母舰上,其起飞时间范围 $[t_{fE1}, t_{fLa}]$ 可通过式(2)和式(3)得到:

$$t_{fE1} = -d_1 \cdot TD_T / P_V \quad (2)$$

$$t_{fLa} = t_{WN} - d_2 \cdot TD_T / P_V \quad (3)$$

$$d_1 = P_H / \sin(C_\theta) + TD_{\max} - P_H / \tan(C_\theta) \quad (4)$$

$$d_2 = P_H / \sin(C_\theta) + TD_{\min} - P_H / \tan(C_\theta) \quad (5)$$

预警直升机可装备于不同舰艇上,其起飞时间范围 $[t_{fE1}, t_{fLa}]$ 可分别通过式(6)、(7)得到:

$$t_{fE1} = -\max(Mt_{fE1}(i)) \quad (6)$$

$$t_{fLa} = t_{WN} - \min(Mt_{fLa}(i)) \quad (7)$$

$Mt_{fE1}(i)$ 和 $Mt_{fLa}(i)$ 可分别通过式(8)和式(9)得到:

$$Mt_{fE1}(i) = d_3 \cdot TD_T / P_V \quad (8)$$

$$Mt_{fLa}(i) = d_4 \cdot TD_T / P_V \quad (9)$$

$$d_3 = P_H / \sin(C_\theta) + TD_{\max} - |SR(i)| \quad (10)$$

$$d_4 = P_H / \sin(C_\theta) + TD_{\min} - |SR(i)| \quad (11)$$

2.1.3 所需巡逻周期数分析

将 t_{WN} 表示为相对时间区间 $[0, t_{WN}]$, 预警机因为巡逻能力约束可能需要多个巡逻周期才能覆盖 $[0, t_{WN}]$, 所需巡逻周期数 N_T 可通过式(12)得到:

$$N_T = \lceil (t_{fLa} - t_{fE1}) / T_E \rceil \quad (12)$$

2.2 巡逻策略形式分析

单架预警机在单个巡逻周期的巡逻策略由两个因素组成:(1)起飞时间.即预警机何时起飞前往指定区域巡逻;(2)巡逻区域信息.借鉴文献[1],巡逻区域信息可表示为 $\langle \varphi, \theta, d \rangle$.故 E_i 在第 j 个巡逻周期的巡逻策略 $X_{i,j}$ 可采用四元组 $\langle t_{i,j}, \varphi_{i,j}, \theta_{i,j}, d_{i,j} \rangle$ 来表示,四项分别表示 $X_{i,j}$ 的起飞时间、巡逻区域方位角、巡逻区域偏转角和巡逻区域中心与航母平台之间的距离.

确定 $X_{i,j}$ 之后,引入巡逻策略集合的概念,用以囊括所有 n_E 架预警机对应的巡逻策略,即 $X_E = \{X_{i,j} | i = 0, \dots, n_E - 1; j = 0, \dots, N_T - 1\}$, X_E 的二维矩阵形式 X_E 如式(3)所示:

$$X_E = \begin{bmatrix} X_{0,0} & \cdots & X_{0,N_T-1} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ X_{(n_E-1),0} & \cdots & X_{(n_E-1),N_T-1} \end{bmatrix} \quad (13)$$

2.3 巡逻策略求解思路分析

确定巡逻策略的形式之后,下面的工作便是研究

采用整段单次规划还是分段滚动多次求解所有预警机的巡逻策略集合. 经分析,采用整段单次规划将至少面临如下两个方面不能克服的难题:

(1) 仅仅是生成可行解,即一组有效的 X_E ,也具有一定的时间复杂度.

X_E 必须是可供所有预警机的一组有效巡逻策略集合,故 X_E 必须至少满足 E 中任意两架预警机的巡逻区域在巡逻过程中任意时刻互不干涉,由于 t_{WN} 可能由多巡逻周期构成,而 $X_{i,j}$ 根据 $\langle t_{i,j}, \varphi_{i,j}, \theta_{i,j}, d_{i,j} \rangle$ 确定,所以生成可行解 X_E 也具有一定时间复杂度.

(2) 生成较优的 X_E 具有更高的时间复杂度,寻优过程中将不可避免地存在耗费大量时间计算较劣巡逻策略集合所对应价值的情况.

X_E 应该在 $[0, t_{WN}]$ 内的任意时刻均具有较高的价值,故 $X_{i,j}$ 均应为相对较优策略. 而任一 $X_{i,j}$ 均对应很大的搜索空间, X_E 将导致组合爆炸. 寻优时的大部分策略集合仅能确保在 $[0, t_{WN}]$ 内的部分时间段具有较高的价值,而计算任一组有效的 X_E 均具有一定的时间复杂度,将不可避免地耗费大量时间计算较劣 X_E 所对应价值.

鉴于整段单次规划存在的难题,本文提出基于时间分段的同构舰载预警机巡逻策略滚动规划方法^[7-9],其组成及分段结果如图 1 所示.

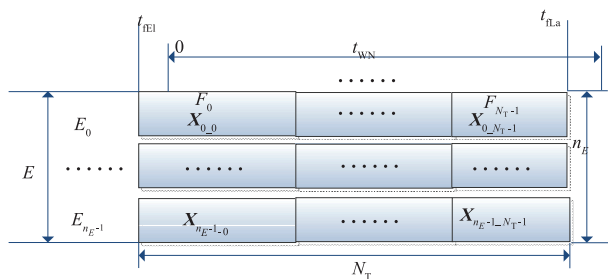


图1 巡逻策略滚动规划方法的组成及分段结果示意图

可以看出,所提出方法通过 N_T 阶段实现,整个规划过程按照阶段索引从小到大的顺序逐一完成. 前文已假定所辖预警机是同构的,所以所有 n_E 行预警机的单个巡逻周期均相同. 根据式(12)可以看出, t_{WN} 可能并非 T_E 的整数倍,故前 $N_T - 1$ 列采用等宽度矩形方框表示,第 N_T 列采用稍窄的矩形方框表示.

2.4 各个阶段对应时间范围和预警机起飞时间范围

2.4.1 各个阶段对应时间范围

第 j 阶段所对应时间范围 $[T_{PS}(j), T_{PE}(j)]$ 可分别通过式(14) ~ (16)得到:

$$T_{PS}(j) = T_E \cdot j + t_{FEI} \quad (14)$$

当 $t_{WN} \geq (j+1) \cdot T_E + t_{FEI}$ 时:

$$T_{PE}(j) = (j+1) \cdot T_E + t_{FEI} \quad (15)$$

否则

$$T_{PE}(j) = t_{WN} \quad (16)$$

2.4.2 各个阶段所对应预警机起飞时间范围

预警机结束上一阶段任务返航并完成燃料补给等环节后才能执行下一阶段任务. 令 $t_{i,j-1}$ 和 $t_{i,j}$ 分别表示 E_i 在第 $j-1$ 和 j 阶段的起飞时间, $bE_{i,j}$ 表示 $X_{i,j}$ 是否时间有效,则 $bE_{i,j}$ 可根据式(17)计算:

$$bE_{i,j} = \begin{cases} 1, & \begin{cases} j=0 \\ \text{or} \\ t_{i,j} - t_{i,j-1} \geq T_E + T_{Pr} \text{ 且 } j \geq 1 \end{cases} \\ 0, & t_{i,j} - t_{i,j-1} < T_E + T_{Pr} \text{ 且 } j \geq 1 \end{cases} \quad (17)$$

对于 E_i 来说,第 j 阶段对应起飞时间范围 $[T_{PS,i}(j), T_{PE,i}(j)]$ 可通过式(18) ~ (21)得到:

当 $j=0$ 时:

$$T_{PS,i}(j) = t_{FEI} \quad (18)$$

$$T_{PE,i}(j) = \min(T_{PS,i}(j) + T_E, t_{FLA}) \quad (19)$$

当 $j>0$ 时:如果 $t_{i,j-1} + T_E > t_{FLA}$, 则

$$\begin{cases} T_{PS,i}(j) = U_{Ab} \\ T_{PE,i}(j) = U_{Ab} \end{cases} \quad (20)$$

否则

$$\begin{cases} T_{PS,i}(j) = t_{i,j-1} + T_E \\ T_{PE,i}(j) = \min(T_{PS,i}(j) + T_E, t_{FLA}) \end{cases} \quad (21)$$

其中 U_{Ab} 表示 $X_{i,j-1}$ 所对应巡逻策略已覆盖 t_{WN} ,故无需继续确定 $X_{i,j}$.

3 巡逻策略规划问题建模

3.1 基准信息计算

S_{WE} 和 S_{WT} 分别取所有机场-航母平台确定的预警效果和预警威胁的最大值^[11],计算步骤如下:

步骤1 初始化. 包括航母平台、护卫舰艇、预警机及机场信息,同时令 $S_{WE} = S_{WT} = 0$;

步骤2 确定基准预警机 E_B . 从预警机集合中任选一架作为 E_B 即可;

步骤3 从机场0开始遍历,当超过 $m-1$ (m 为机场数量)时,执行步骤8;否则,执行步骤4;

步骤4 以 $Apt[k]_{\varphi}$ 表示编号为 k 的机场的方位角, WD_{max} 表示拟定的最远预警距离, E_{BDeR} 表示 E_B 的预警雷达探测半径,令 $\varphi_1 = Apt[k]_{\varphi}$, $\theta_1 = \varphi_1 - \pi/2$ 且 $d_1 = WD_{max} - E_{Br} - E_{BDeR}$,巡逻区域中心为 $O_1(G(\varphi_1, d_1))$,参照文献[1]中式(22)计算 $O_1(G(\varphi_1, d_1))$ 所对应区域的预警效果 S_{WE0} ;

步骤5 以 TD_{max} 表示拟定的最远巡逻距离, E_{Br} 表示 E_B 的巡逻区域圆周段半径,令 $\varphi_2 = Apt[k]_{\varphi}$, $\theta_2 = \varphi_2 - \pi/2$ 且 $d_2 = TD_{max} - 2 \cdot E_{Br}$,巡逻区域中心为 $O_2(G(\varphi_2, d_2))$,参照文献[1]中式(23)计算 $O_2(G(\varphi_2, d_2))$ 所对应的预警威胁 S_{WT0} ;

步骤 6 更新基准信息. 将 S_{WE} 更新为当前 S_{WE} 与 S_{WEO} 的较大者, 将 S_{WT} 更新为当前 S_{WT} 与 S_{WTO} 的较大者;

步骤 7 转步骤 3;

步骤 8 返回基准信息 S_{WE} 和 S_{WT} .

3.2 巡逻策略规划过程

预警机巡逻策略规划示意图如图 2 所示.

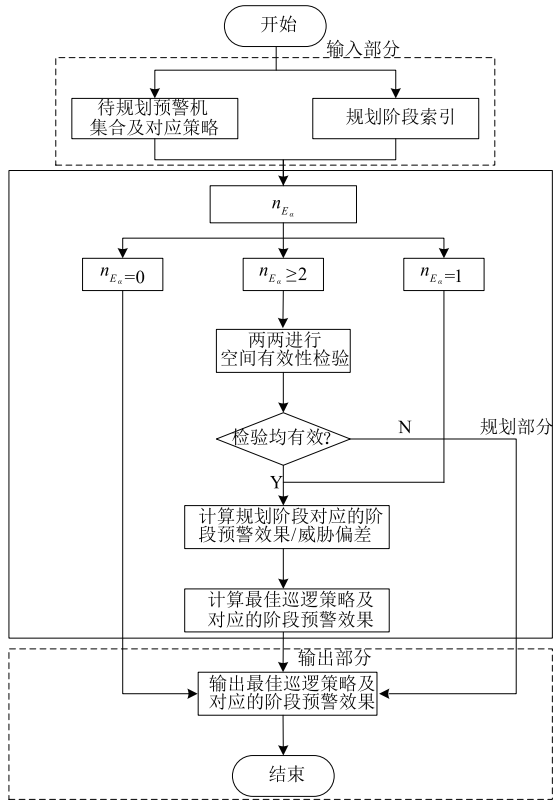


图2 预警机巡逻策略规划示意图

下面将分别通过输入部分、规划部分和输出部分三个部分对规划过程展开阐述.

3.2.1 输入部分

在输入部分,“待规划预警机集合及对应策略”中“待规划预警机集合”(简称 W_α) 根据 E 确定但不一定完全囊括 E , 对于第 j 阶段来说, E 中单架预警机 E_i 是否属于 E_α 的判断方法是:

结合式(18)~(21), 如果

$$T_{PS,i}(j) = T_{PE,i}(j) = U_{Ab} \quad (22)$$

成立, 则 E_i 不属于 E_α ; 否则, E_i 属于 E_α . 记 E_α 容量为 n_{E_α} , 则 $n_{E_\alpha} \leq n_E$. 当 $n_{E_\alpha} = n_E$ 时, $E = E_\alpha$; 当 $n_{E_\alpha} < n_E$ 时, $E \neq E_\alpha$.

3.2.2 规划部分

根据图 2 可以看出, 三个核心环节分别是“空间有效性检验”(“检验均有效?”是“空间有效性检验”的结果)、“规划阶段对应的阶段预警效果/威胁偏差”和“巡逻策略目标规划”, 下面通过“空间有效性检验”、“规划

阶段对应的阶段预警效果/威胁偏差计算”和“巡逻策略目标规划”对应展开研究.

3.2.2.1 空间有效性检验

空间有效性检验, 即是为了检验预警机集合中任意两架预警机的巡逻策略是否均满足航线之间互不干扰. 假设预警机集合中两架预警机 E_a 和 E_b 在第 j 阶段的巡逻策略分别为 $\mathbf{X}_{a,j} = \langle t_{a,j}, \varphi_{a,j}, \theta_{a,j}, d_{a,j} \rangle$ 和 $\mathbf{X}_{b,j} = \langle t_{b,j}, \varphi_{b,j}, \theta_{b,j}, d_{b,j} \rangle$, 则巡逻航线相互干扰满足以下两个条件:

条件 1 警戒时间存在交叉. 交叉时航线才可能干扰. 故需要确定巡逻策略对应巡逻区域中心及警戒时间区间, 以 $\mathbf{X}_{a,j}$ 为例, 过程如式(23)~(29)所示:

$$T_{PS}(\mathbf{X}_{a,j}) = t_{a,j} + \frac{D_{TS}}{P_V} \cdot TD_T \quad (23)$$

$$T_{PE}(\mathbf{X}_{a,j}) = t_{a,j} + T_E - T_{Pr} - \frac{D_{TS}}{P_V} \cdot TD_T \quad (24)$$

$$TP(\mathbf{X}_{a,j}) = [T_{PS}(\mathbf{X}_{a,j}), T_{PE}(\mathbf{X}_{a,j})] \quad (25)$$

$$TP(\mathbf{X}_{a,j_2}) = TP(\mathbf{X}_{a,j}) \cap TP(j_2) \quad (26)$$

$$D_{TS} = |C| + |P - C| \quad (27)$$

$$C = \left(P_H \cdot \frac{\cos(C_\theta)}{\tan(S_\theta)}, P_H \cdot \frac{\sin(C_\theta)}{\tan(S_\theta)} \right) \quad (28)$$

$$P = (d_{a,j} \cdot \cos(\varphi_{a,j}), d_{a,j} \cdot \sin(\varphi_{a,j})) \quad (29)$$

其中 D_{TS} 表示 $\mathbf{X}_{a,j}$ 对应区域中心与航母之间的距离, $TP(\mathbf{X}_{a,j})$ 、 $T_{PS}(\mathbf{X}_{a,j})$ 和 $T_{PE}(\mathbf{X}_{a,j})$ 分别表示 $\mathbf{X}_{a,j}$ 对应区域覆盖时间段、起始时刻和终止时刻, $TP(\mathbf{X}_{a,j_2})$ 表示 $TP(\mathbf{X}_{a,j})$ 在第 j_2 阶段内的时间段, $C(\mathbf{X}_{a,j})$ 表示 E_a 从航母爬升到 P_H 后的坐标, $P(\mathbf{X}_{a,j})$ 表示 $\mathbf{X}_{a,j}$ 对应区域中心的坐标, S_θ 表示航母轴线相对所选坐标系 X 轴的方位角. 同时, 以 $I(\mathbf{X}_{a,j})$ 表示 $C(\mathbf{X}_{a,j})$ 与 $P(\mathbf{X}_{a,j})$ 的连线和以航母为中心的半径为 TD_{min} 的圆的交点.

确定了 $\mathbf{X}_{a,j}$ 和 $\mathbf{X}_{b,j}$ 所对应区域中心位置及警戒时间段之后, 便可确定 E_a 和 E_b 在第 j 阶段内是否存在警戒时间段交叉:

当 $j=0$ 时:

$$b(I(E_a, E_b, j)) = b(TP(\mathbf{X}_{a,j}) \cap TP(\mathbf{X}_{b,j})) \quad (30)$$

当 $j \geq 1$ 时:

$$b(I(E_a, E_b, j)) = b(b1 \cup b2 \cup b3 \cup b4) \quad (31)$$

其中

$$b1 = b(TP(\mathbf{X}_{a,j-1,j}) \cap TP(\mathbf{X}_{b,j-1,j})) \quad (32)$$

$$b2 = b(TP(\mathbf{X}_{a,j-1,j}) \cap TP(\mathbf{X}_{b,j,j})) \quad (33)$$

$$b3 = b(TP(\mathbf{X}_{a,j,j}) \cap TP(\mathbf{X}_{b,j-1,j})) \quad (34)$$

$$b4 = b(TP(\mathbf{X}_{a,j,j}) \cap TP(\mathbf{X}_{b,j,j})) \quad (35)$$

如果 $b(I(E_a, E_b, j))$ 为假, 则 $\mathbf{X}_{a,j}$ 和 $\mathbf{X}_{b,j}$ 对应警戒时间无交叉, 进而对应的巡逻区域不存干扰; 否则, 警戒时间存在交叉, 需要进一步通过条件 2 来确定 $\mathbf{X}_{a,j}$ 和 $\mathbf{X}_{b,j}$ 对应巡逻区域是否存在干扰.

条件 2 E_a 和 E_b 在第 j 阶段内的巡逻区域是否存在干扰的检验方法如下:

当 $j=0$ 时:

$$bS(I(E_a, E_b, j)) = b(I(E_a, E_b, j)) \cdot SC(X_{a_j}, X_{b_j}) \quad (36)$$

当 $j \geq 1$ 时:

$$bS(I(E_a, E_b, j)) = B1 \cup B2 \cup B3 \cup B4 \quad (37)$$

其中

$$B1 = b1 \cdot SC(X_{a_{j-1}}, X_{b_{j-1}}) \quad (38)$$

$$B2 = b2 \cdot SC(X_{a_{j-1}}, X_{b_j}) \quad (39)$$

$$B3 = b3 \cdot SC(X_{a_j}, X_{b_{j-1}}) \quad (40)$$

$$B4 = b4 \cdot SC(X_{a_j}, X_{b_j}) \quad (41)$$

$SC(X_{a_j}, X_{b_j})$ 用于检验 X_{a_j} 和 X_{b_j} 对应的巡逻区域是否存在干扰, 检验过程如式(42):

$$SC(X_{a_j}, X_{b_j}) = \begin{cases} 1, & D \leq DM \\ 0, & D > DM \end{cases} \quad (42)$$

其中

$$D = |P(X_{a_j}) - P(X_{b_j})|$$

$$DM = E_{a,l} + E_{a,r} + E_{b,l} + E_{b,r} + SD$$

至此, 可以通过 $bS(I(E_a, E_b, j))$ 判断 E_a 和 E_b 在第 j 阶段内的巡逻区域是否存在干扰. 如果存在, 则 X_{a_j} 和 X_{b_j} 是无效的, 直接否定该方案; 如果不存在, 则 X_{a_j} 和 X_{b_j} 是有效的.

在条件 1 和条件 2 中, 以 E_a 和 E_b 为例研究了对两架预警机进行空间有效性检验的方法, 对于 E_a 来说, 从图 2 可以看出:

当 $n_{E_a} = 0$ 时, 无需对该阶段进行规划;

当 $n_{E_a} = 1$ 时, 无需进行空间有效性检验, 且巡逻策略是有效的;

当 $n_{E_a} \geq 2$ 时, 对 E_a 中所有预警机进行两两空间有效性检验. 如果均是有效的, 则整体巡逻方案是有效的; 否则, 整体巡逻方案是无效的.

如果有效, 则需要继续计算第 j 阶段对应阶段预警效果/威胁偏差以及确定规划的目标函数.

3.2.2.2 规划阶段对应的阶段预警效果/威胁偏差

结合式(23) ~ (29) 可以得到预警机在 $[TD_{\min}, TD_{\max}]$ (即允许的巡逻区域范围 Z_{Ad}) 之内各时刻的位置 $G(X_{a_j}, t_0)$, Z_{Ad} 之外各时刻的位置假设恒为 \bar{G} (区域之外无需考虑). 设 A_C 为战机可能飞行椭圆区域构成的栅格集合中处于 $[WD_{\min}, WD_{\max}]$ 的栅格集合, A_C 中所有栅格对应的价值构成集合 A_{CV} , 以 $WE(X_{E_j}, t_0)$ 和 $WT(X_{E_j}, t_0)$ 分别表示 X_E 在第 j 阶段内的 t_0 时刻的预警效果和预警威胁, 对应计算方法如下:

$WE(X_{E_j}, t_0)$ 的计算可通过两步实现:

步骤 1 将 t_0 时刻所有预警机的巡逻位置中不等于 \bar{G} 的有效巡逻位置存入有效位置集合 A_{PC} ;

步骤 2 遍历 A_C 中每一栅格, 如果栅格处于 A_{PC} 中任一位置对应探测范围之内, 则栅格被覆盖. 如栅格被 A_{PC} 中多个位置对应探测范围覆盖, 仅计入一次. 将所有被覆盖栅格的价值求和并归一化 (即求和结果除以 $S_{WE} \cdot n_E$) 便得到 $WE(X_{E_j}, t_0)$.

$WT(X_{E_j}, t_0)$ 的计算可通过两步实现:

步骤 1 与 $WE(X_{E_j}, t_0)$ 中步骤 1 相同;

步骤 2 计算 A_{PC} 中每一巡逻位置对应的威胁程度, 将所有威胁程度求和并归一化 (即求和结果除以 $S_{WT} \cdot n_E$) 便得到 $WT(X_{E_j}, t_0)$.

阶段预警效果的确定方法是:

第 j 阶段对应时间范围 $[t_1, t_2]$ 通过式(43) 计算:

$$\begin{cases} t_1 = T_{PS}(j) \\ t_2 = T_{PE}(j) \end{cases} \quad (43)$$

其中 $T_{PS}(j)$ 和 $T_{PE}(j)$ 分别根据式(14) ~ (16) 计算得到, 进而可以计算 X_{E_j} 在 $[t_1, t_2]$ 内对应的预警效果之和 $WE(X_{E_j}, [t_1, t_2])$, 如式(44) 所示:

$$WE(X_{E_j}, [t_1, t_2]) = \sum_{i=0}^{t_2-t_1} WE(X_{E_j}, t_1 + i) \quad (44)$$

对应均值和平均偏差可分别通过式(45)、(46) 得到:

$$E(WE(X_{E_j}, [t_1, t_2])) = \frac{WE(X_{E_j}, [t_1, t_2])}{t_2 - t_1 + 1} \quad (45)$$

$$DE(WE(X_{E_j}, [t_1, t_2])) = \frac{\sum_{i=0}^{t_2-t_1} |WE(X_{E_j}, t_1 + i) - E(WE(X_{E_j}, [t_1, t_2]))|}{t_2 - t_1 + 1} \quad (46)$$

确定最终巡逻策略时, 不仅希望在 $[t_1, t_2]$ 内 $E(WE(X_{E_j}, [t_1, t_2]))$ 尽量大, 同时也希望在 $[t_1, t_2]$ 内 $WE(X_{E_j}, t_0)$ 尽量均匀^[12], 以获取在各时刻尽量稳定的预警效果, 以 $W(X_{E_j}, [t_1, t_2])$ 表示 X_{E_j} 在 $[t_1, t_2]$ 内所对应的阶段预警效果, 则:

$$W(X_{E_j}, [t_1, t_2]) = \chi \cdot E(WE(X_{E_j}, [t_1, t_2])) - \xi \cdot DE(WE(X_{E_j}, [t_1, t_2])) \quad (47)$$

其中 χ 和 ξ 分别表示指挥员认定的均值和平均偏差在阶段预警效果中所占的比重. $\chi, \xi \geq 0$ 且 $\chi + \xi = 1$, 在本文中取 $\chi = 0.8, \xi = 0.2$.

阶段威胁偏差的确定方法是: 设 α 表示指挥员所期望的最终巡逻策略对应的预警威胁占最大预警威胁的比例, 以 $DWT(X_{E_j}, [t_1, t_2])$ 表示 X_{E_j} 在 $[t_1, t_2]$ 内所对应的阶段威胁偏差, 则其可根据式(48) 来确定:

$$DWT(X_{E_j}, [t_1, t_2]) = \sum_{i=0}^{t_2-t_1} |WT(X_{E_j}, t_1 + i) - \alpha| \quad (48)$$

3.2.2.3 巡逻策略目标规划

巡逻策略规划的目标是求解使得阶段威胁偏差最

小化的前提下同时实现阶段预警效果最大化的一组最佳巡逻策略 $X_{E_j}^*$, 如式(49)、(50)所示:

$$\begin{aligned} X_{E_j}^* &= \arg \max_{X_{E_j}} W(X_{E_j}^*, [t_1, t_2]) \quad (49) \\ \text{s. t. } &\begin{cases} X_{E_j}^* = \arg \min_{X_{E_j}} \text{DWT}(X_{E_j}^*, [t_1, t_2]) \\ T_{\text{PS}}(j) \leq X_{i,j}(t_{i,j}) \leq T_{\text{PE}}(j) \\ \text{TD}_{\min} \leq X_{i,j}(d_{i,j}) \leq \text{TD}_{\max} \\ 0 \leq X_{i,j}(\theta_{i,j}) \leq \pi \\ \text{Azi}_{\min} \leq X_{i,j}(\varphi_{i,j}) \leq \text{Azi}_{\max} \\ 0 \leq i \leq n_E - 1 \\ 0 \leq j \leq N_T - 1 \end{cases} \quad (50) \end{aligned}$$

其中 $T_{\text{PS}}(j)$ 和 $T_{\text{PE}}(j)$ 根据式(18)~(21)得到。

对于上述问题,选择首先确定满足 $\text{DWT}(X_{E_j}^*, [t_1, t_2])$ 最小化的解集,然后基于解集确定实现阶段预警效果最大化的巡逻策略的两步走思路。

在第1步,其目标函数为:

$$\min_{X_{E_j}} \text{DWT}(X_{E_j}^*, [t_1, t_2])$$

采用 MM-SS_PATGA 方法,具体的编码解码方法参见第4部分,求解过程中保存每一代的最优解。

在第2步,首先剔除第一步中所有保存的解的重复项,然后在剩余解集中选择偏离当前最优阶段威胁偏差百分比在 β 内的阶段预警效果最大的解作为最终解,在本文中取 $\beta = 0.2$ 。

设剩余解集 $\{X_i | i = 1, \dots, N\}$, 则 X_i 对应的偏离当前最优阶段威胁偏差百分比 β_i 根据式(51)计算:

$$\beta_i = \frac{\max_{i=1 \dots N} \text{DWT}(X_i, [t_1, t_2]) - \text{DWT}(X_i, [t_1, t_2])}{\max_{i=1 \dots N} \text{DWT}(X_i, [t_1, t_2])} \quad (51)$$

3.2.3 输出部分

第 j 阶段输出部分的内容可以分为以下3类:

(1) 当 $n_{E_j} = 0$ 时,表示 $X_{E_{j-1}}$ 所对应的巡逻周期均已覆盖 t_{na} , 故 X_{E_j} 均为空. 输出内容包括五部分: ① WE(X_{E_j}, t_0); ② E(WE($X_{E_j}, [t_1, t_2]$)); ③ DE(WE($X_{E_j}, [t_1, t_2]$)); ④ W($X_{E_j}, [t_1, t_2]$); ⑤ DWT($X_{E_j}, [t_1, t_2]$);

(2) 当 $n_{E_j} = 1$ 时,表示 E 中仅存在1架预警机在第 $j-1$ 阶段的巡逻策略所对应巡逻周期未覆盖 t_{na} , 设编号为 i , 故仅需求解 $X_{i,j}$. 输出内容不仅包括 $X_{i,j}$ 及 i , 还包括类(1)中五项输出内容;

(3) 当 $n_{E_j} \geq 2$ 时,表示 E 中存在至少2架预警机在第 $j-1$ 阶段的巡逻策略所对应巡逻周期未覆盖 t_{na} , 故需要继续求解这 n_{E_j} 架预警机在第 j 阶段的巡逻策略. 输出内容不仅包括所求解出的这 n_{E_j} 架预警机在第 j 阶段的巡逻策略及对应的预警机编号, 还包括类(1)中五项输出内容。

4 巡逻策略规划模型求解

针对所提出规划目标,对文献[1]算法(多主单从结构的多种群并行遗传算法)进行改进,提出一种多主单从结构的多种群并行自适应-禁忌遗传算法^[13,14]. 针对遗传算法的编码、解码和最大连续未进化代数 UnIprvGntMax(以 U_{ICM} 表示)的确定方法也与文献[1]不同,下面分别进行说明:

(1) 编码方案设计

针对如式(47)的模型,需要根据待求解预警机信息确定具体的编码方案. 本文仍采用二进制编码方式,下面根据不同的 n_{E_j} 确定相应的编码方案:

当 $n_{E_j} = 0$ 时,表示无需继续求解任一预警机在第 j 阶段的巡逻策略,故无需设计编码方案,编码方案的长度 $n_{\text{Code}} = 0$;

当 $n_{E_j} = 1$ 时,表示需要继续求解单架预警机 E_i 在第 j 阶段的巡逻策略 $X_{i,j}$. 设 $X_{i,j}$ 可通过染色体 $\bar{X}_{i,j} = (\tau_{i1} \dots \tau_{iI}; a_{i1} \dots a_{iM}; b_{i1} \dots b_{iN}; c_{i1} \dots c_{iP})$ 来表示,其中 $I = \lceil \log_2^{(t_2 - t_1 + 1)} \rceil$ 表示 $[t_1, t_2]$ 对应的编码长度, M 、 N 和 P 的含义可参见文献[1], 编码方案的长度 $n_{\text{Code}} = I + M + N + P$, 染色体的交叉操作通过对对应行信息的单点交叉实现;

当 $n_{E_j} \geq 2$ 时,表示需要继续求解至少2架预警机在第 j 阶段的巡逻策略,设预警机编号分别为 $i_k, k = 0, \dots, n_{E_j} - 1$, E_{i_k} 对应的巡逻策略分别为 $X_{i_k,j}$, $X_{i_k,j}$ 可通过染色体 $\bar{X}_{i_k,j} = (\tau_{i_k1} \dots \tau_{i_kI}; a_{i_k1} \dots a_{i_kM}; b_{i_k1} \dots b_{i_kN}; c_{i_k1} \dots c_{i_kP})$ 来表示. 其中, $I_{i_k} = \lceil \log_2^{(t_2 - t_1 + 1)} \rceil$ 表示 E_{i_k} 在第 j 阶段的起飞时间范围 $[t_2^{i_k}, t_1^{i_k}]$ 对应的编码长度, $X_{i_k,j}$ 的编码方案长度 $n_{\text{Code}_{i_k}} = I_{i_k} + M + N + P$, 所有 $X_{i_k,j}$ 构成策略集合 $\{X_{i_k,j}\}$, 其编码长度 n_{Code} 通过式(52)得到:

$$n_{\text{Code}} = \sum_{k=0}^{n_{E_j}-1} n_{\text{Code}_{i_k}} \quad (52)$$

(2) 解码方案设计

同样地,根据 n_{E_j} 确定相应的解码方案:

当 $n_{E_j} = 0$ 时,无需设计解码方案;

当 $n_{E_j} = 1$ 时, $X_{i,j}$ 通过式(53)得到:

$$\begin{cases} t_{i,j} = t_1 + (t_2 - t_1) \sum_{j=1}^I \tau_{ij} 2^{j-1} / (2^I - 1) \\ \varphi_{i,j} = -\pi + 2\pi \sum_{j=1}^M a_{ij} 2^{j-1} / (2^M - 1) \\ \theta_{i,j} = -\pi/2 + \pi \sum_{j=1}^N b_{ij} 2^{j-1} / (2^N - 1) \\ d_{i,j} = \text{TD}_{\min} + \frac{(\text{TD}_{\max} - \text{TD}_{\min}) \sum_{j=1}^P c_{ij} 2^{j-1}}{2^P - 1} \end{cases} \quad (53)$$

当 $n_{E_j} \geq 2$ 时, $\{X_{i_k,j}\}$ 通过式(54)计算得到:

$$\begin{cases} t_{i,j} = t_1^{i_i} + (t_2^{i_i} - t_1^{i_i}) \sum_{j=PSl_i+1}^{PSl_i+T_i} \tau_{ij} 2^{j-1} / (2^{T_i-1}) \\ \varphi_{i,j} = -\pi + 2\pi \sum_{j=PSl_i+T_i+1}^{PSl_i+T_i+M} a_{ij} 2^{j-1} / (2^M - 1) \\ \theta_{i,j} = -\pi/2 + \pi \sum_{j=PSl_i+T_i+M+1}^{PSl_i+T_i+M+N} b_{ij} 2^{j-1} / (2^N - 1) \\ d_{i,j} = TD_{\min} + \sum_{j=PSl_i+T_i+M+N+1}^{PSl_i+T_i+M+N+P} \frac{c_{ij} 2^{j-1} (TD_{\max} - TD_{\min})}{2^P - 1} \\ PSt_k = \sum_{m=0}^{k-1} n_{Code.i_m} \end{cases} \quad (54)$$

(3) U_{IGM} 的计算方法

在文献[1]中, U_{IGM} 直接以定值形式给出,而在本文中,由于 n_{E_n} 在各个规划阶段可能不等,故根据 n_{E_n} 确定 U_{IGM} 更为合适,提出确定方法如下:

当 $n_{E_n} = 0$ 时,无需寻优,故无需确定 U_{IGM} ;

当 $n_{E_n} = 1$ 时, $U_{IGM} = G_{\min}$;

当 $n_{E_n} \geq 2$ 时, U_{IGM} 可根据式(55)得到:

$$U_{IGM} = \begin{cases} G_{\min}, & n_{E_n} \cdot G \leq G_{\min} \\ G_{\max}, & n_{E_n} \cdot G \geq G_{\max} \\ n_{E_n} \cdot G, & \text{else} \end{cases} \quad (55)$$

G_{\min} 和 G_{\max} 分别为设定的 U_{IGM} 的最小值和最大值, G 为单架预警机对应的单位进化代数. 在本文中,分别取 $G_{\min} = 20, G_{\max} = 50$ 和 $G = 10$.

5 实验分析

为了对所提出规划方法进行实验分析,以表 1 ~ 表 4 和文献[1]中表 8 ~ 表 9 及图 6 构建实验想定.

表 1 EType1 型预警机参数列表

参数	取值	参数	取值	参数	取值
R/km	200	l/km	30	$P_V / (\text{km/s})$	0.2
W_V/km	3 000	r/km	20	Tx_{P_r}/D_T	4
S_V/km	150	D_T/min	5		

表 2 攻击机参数列表

型号	CA	FR (km)	SR (km)	MR (km)	AvgV (km/s)	T_{Cbt} (s)
F1	1	4 500	200	100	0.4	300
F2	0.6	4 000	200	90	0.35	300

表 3 航母编队指控中心决策参数列表

参数(km)	WD_{\max}	WD_{\min}	TD_{\max}	TD_{\min}	SD
取值	1 000	300	600	300	10

表 4 决策权重列表

参数	α	χ	ξ
取值	0.8	0.8	0.2

结合表 1 和式(1)可以得到, EType1 型预警机的单个巡逻周期 $T_E = 51D_T$.

依前文所述,所提出规划模型应能实现对单架/多架同构预警机在限定警戒时间下的策略规划,则:

(1)为了测试模型能否实现对单架预警机的单巡逻周期巡逻策略规划并验证文献[1]算法与本文算法的性能优劣,取 $t_{WN} = T_E$ 且所属舰艇 1 的单架预警机,分别基于两种算法进行规划,结果如表 5 所示.

表 5 基于两种算法的规划结果

	巡逻策略	阶段预警效果
文献[1] 算法	$\langle 2, 0.525, -0.474, 535 \rangle$	14.3630
	进化代数	运行时间(s)
	94	203
本文 算法	$\langle 2, 0.548, -1.521, 535 \rangle$	14.7860
	进化代数	运行时间(s)
	83	98

可以看出,本文算法通过自适应策略和禁忌表的引入,避免了巡逻策略的冗余计算,极大地提升了寻优效率,并且获得了相对于文献[1]算法更高的阶段预警效果.证明了本文算法相对于文献[1]算法的优越性.后续实验均采用本文算法进行.巡逻策略对应的巡逻区域及探测区域示意图如图 3 所示.

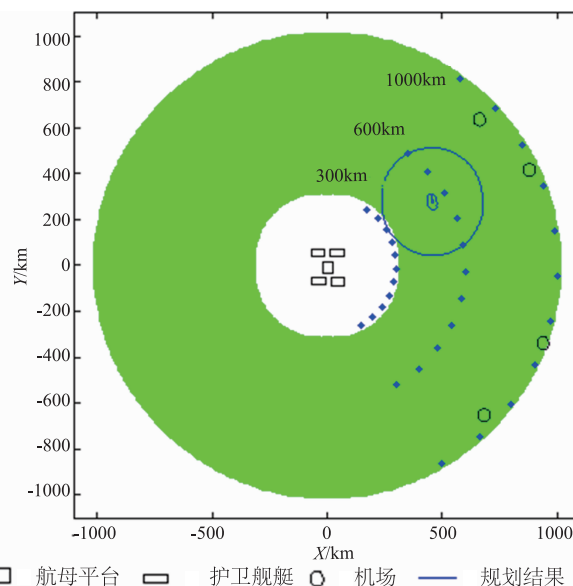


图 3 巡逻区域及探测区域示意图

图 4 给出了预警机在 T_E 内的预警效果曲线图.

综上所述可以看出,所提出模型支持对单架预警机的单巡周期巡逻策略规划,且所指派单架预警机并未能实现对 T_E 的完整覆盖.可见,对 T_E 的覆盖效果不仅与巡逻策略有关,还与所指派的架数相关,单架预警机因为部分航迹必然处于 TD_{min} 和所属舰艇之间,导致无法实现完整覆盖.

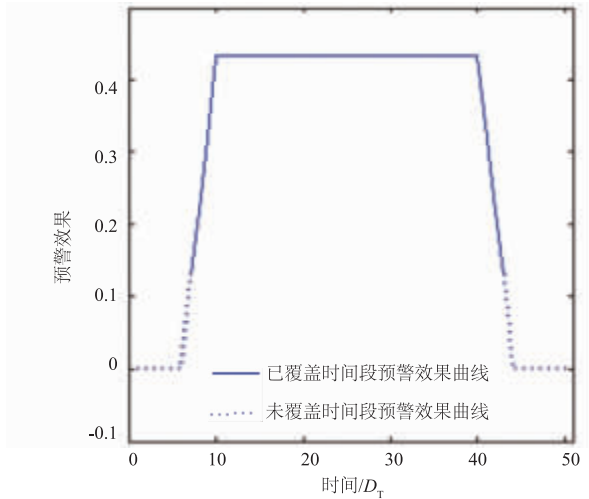


图4 拟定预警时间段内的预警效果曲线图

(2)为了测试模型能否实现对预警机的多巡周期巡逻策略规划,取 $t_{WN} = 80D_T$ 且所属舰艇 1 的单架预警机,结果如表 6 所示。

表 6 基于两种算法的规划结果

	巡逻策略	阶段预警效果
阶段 1	$\langle 2, 0.548, -1.521, 535 \rangle$	14.7860
	进化代数 83	运行时间(s) 102
阶段 2	$\langle 55, 0.548, 0.574, 535 \rangle$	8.4780
	进化代数 85	运行时间(s) 107

两个巡逻周期的巡逻策略对应的巡逻区域及探测区域示意图分别如图 5 和图 6 所示。

图 7 给出预警机在 T_E 内的预警效果曲线图。

综合图 5 至图 7 可以看出,所提出模型支持对预警机的多巡周期巡逻策略规划。

(3)为了测试模型能否实现对多架预警机的巡逻策略规划,取 $n_E = 3$ 和 $t_{WN} = 51D_T$,其中编号为 0 和 1 的预警机从舰艇 1 派出,编号为 2 的预警机从舰艇 2 派出,结果如表 7 所示。

巡逻区域及探测区域示意图如图 8 所示。

图 9 给出预警机在 T_E 内的预警效果曲线图。

结合表 7 ~ 图 9 可以看出,所提出模型支持对多架预警机的巡逻策略规划,三架预警机通过起飞时间和

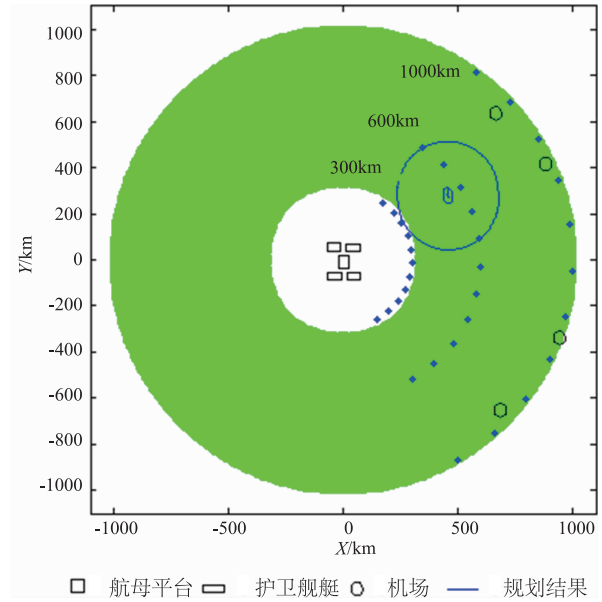


图5 周期1-巡逻区域及探测区域示意图

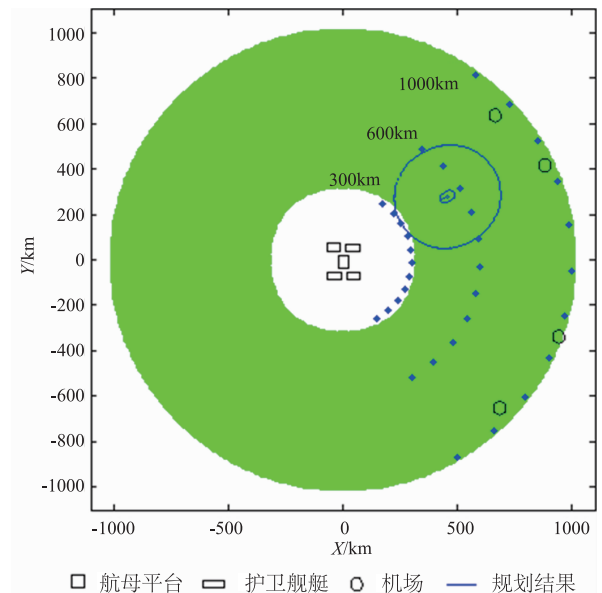


图6 周期2-巡逻区域及探测区域示意图

巡逻区域的协同,实现了对 T_E 的完整覆盖.并且,探测区域协同覆盖了机场战机对航母编队实施打击的主要进攻方向,证明了模型的合理性。

表 7 巡逻策略集合表

巡逻策略编号	巡逻策略	阶段预警效果
X_{0_0}	$\langle -6, 0.894, -0.274, 540 \rangle$	14.6840
X_{1_0}	$\langle 0, 0.112, -1.321, 575 \rangle$	
X_{2_0}	$\langle 12, -0.753, -0.374, 525 \rangle$	

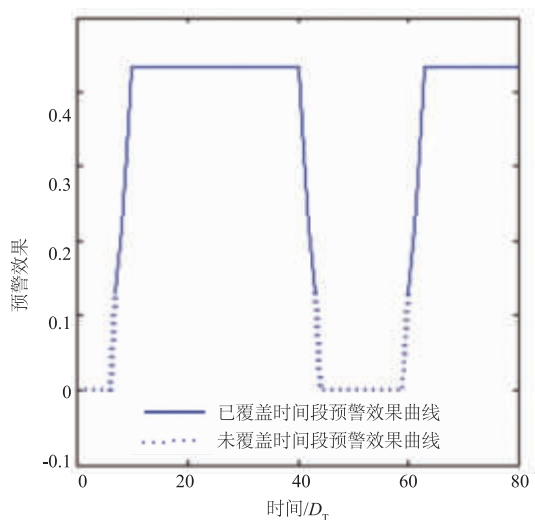


图7 拟定预警时间段内的预警效果曲线图

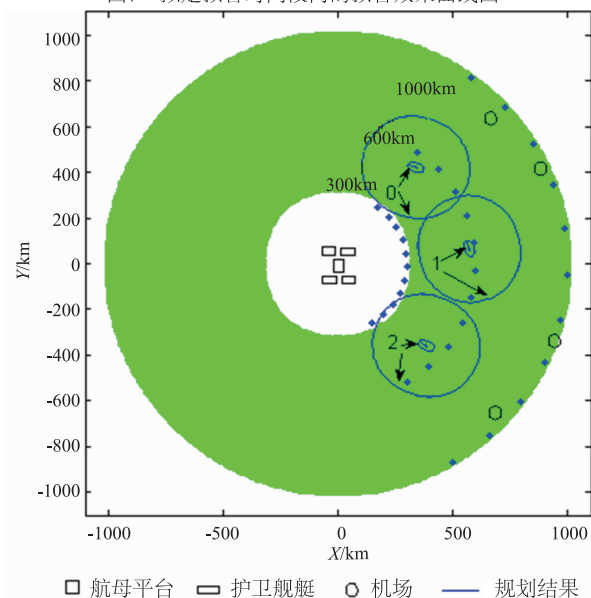


图8 巡逻区域及探测区域示意图

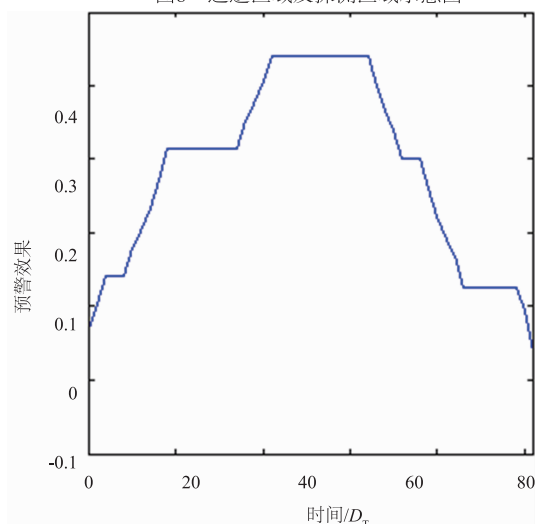


图9 拟定预警时间段内的预警效果曲线图

6 结论

本文首先通过对现有关于舰载预警机防空警戒巡逻策略规划问题的研究现状进行分析,结合实际的防空警戒需求,提出了以“多威胁机场—单/多架同构且同/异所属舰载预警机—限定警戒时间”为背景的防空警戒巡逻策略规划研究目标.通过对舰载预警机巡逻策略规划机制的分析,提出了一种基于时间分段的单/多架同构舰载预警机巡逻策略滚动规划模型,并详细介绍了模型的实现及求解过程.仿真结果证明了模型的有效性及其优越性.

参考文献

- [1] 段晓稳,高晓光,李波.综合作战区舰载预警机防空警戒控制策略研究[J].系统工程与电子技术,2015,37(9):2035-2045.
Duan Xiaowen, Gao Xiaoguang, Li Bo. Research on control strategy of EWA air defense alert within synthesis[J]. Systems Engineering and Electronics, 2015, 37(9): 2035-2045. (in Chinese)
- [2] Hopkins J. The cooperative engagement capability[J]. APL Technical Digest, 1995, 16(4): 9-12.
- [3] Wikipedia. 2003 invasion of Iraq [EB/OL]. https://en.wikipedia.org/wiki/2003_invasion_of_Iraq.html, 2015-10-15.
- [4] Wikipedia. Gulf War [EB/OL]. https://en.wikipedia.org/wiki/Gulf_War.html, 2015-10-15.
- [5] 王国师,李强,代科学,等.基于防空警戒任务的多预警机协同补盲[J].系统工程与电子技术,2012,34(5):941-946.
Wang Guoshi, Li Qiang, Dai Kexue, et al. Blind compensation for multi-AWACS cooperation based on aerial defence and warning [J]. Systems Engineering and Electronics, 2012, 34(5): 941-946. (in Chinese)
- [6] 孙泽宇,伍卫国,王换招,等.无线传感器网络基于参数可调增强型覆盖控制算法[J].电子学报,2015,43(3):467-475.
Sun Zeyu, Wu Weiguo, Wang Huan Zhao, et al. An enhanced coverage control algorithm for wireless sensors networks based on adjustable parameters [J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43(3): 467-475. (in Chinese)
- [7] Oleg Burdakov, Patrick Doherty, Jonas Kvarnstrom. Optimal scheduling for replacing perimeter guarding unmanned aerial vehicles[R]. Linköping; Linköping University, 2014.
- [8] Lu Zhi, Gustavo Carneiro, Andrew P Bradley. An improved joint optimization of multiple level set functions for the segmentation of overlapping cervical cells [J]. IEEE Trans on Image Processing, 2015, 24(4): 1261-1272.

- [9] Li Miqing, Yang Shengxiang. Evolutionary algorithms with segment-Based search for multiobjective optimization problems[J]. IEEE Trans on Cybernetics, 2014, 44(8): 1295 - 1313.
- [10] 胡威标. 航空母舰舰载机百问[M]. 北京:海潮出版社, 2011. 83 - 85.
Hu Weibiao. The Aircraft Carrier Series[M]. Beijing: Hai Chao Press, 2011. 83 - 85. (in Chinese)
- [11] Pingmin Hsu, Lin Chunliang, Yang Mengyao. On the complete coverage path planning for mobile robots[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2014, 74(3): 945 - 963.
- [12] 黎志涛, 沙志仁, 伍洪俊. 警车配置及巡逻方案研究[J]. 数学的实践与认识, 2010, 40(15): 194 - 200.
Li Zhitao, Sha Zhiren, Wu Hongjun. Study of police car allocation and patrol strategy[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2010, 40(15): 194 - 200. (in Chinese)
- [13] 张昊, 陶然, 李志勇, 等. 基于自适应模拟退火遗传算法的特征选择方法[J]. 兵工学报, 2009, 30(1): 81 - 85.
Zhang Hao, Tao Ran, Li Zhiyong, et al. A feature selection method based on adaptive simulated annealing genetic algorithm[J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(1): 81 - 85. (in Chinese)
- [14] 钱洁, 郑建国. 引入逆学习的量子自适应禁忌搜索算法[J]. 电子学报, 2013, 41(6): 1069 - 1075.
Qian Jie, Zheng Jianguo. A quantum-inspired adaptive tabu search algorithm with inverse learning[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(6): 1069 - 1075. (in Chinese)

作者简介



段晓稳 男, 1987 出生, 陕西咸阳人, 西北工业大学在读博士研究生, 主要研究方向为航空火力控制、编队作战指挥控制。
E-mail: xwduan2008@163.com



高晓光(通信作者) 女, 1957 年出生, 辽宁鞍山人, 西北工业大学教授, 博导, 主要研究方向为航空电子系统、复杂系统效能评估等。
E-mail: cxg2012@nwpu.edu.cn



李波 男, 1978 年出生, 山东泰安人, 西北工业大学副教授, 硕导, 主要研究方向为决策理论、航空武器系统作战效能分析。
E-mail: b0boo.lee@gmail.com