

重点目标防空作战中多预警机协同探测空域配置*

祁 炜, 蒋 伟, 武 文, 程东升

(空军预警学院 防空预警装备系, 湖北 武汉 430019)

摘要:针对重点目标防空作战中预警机空域配置问题,构建了多预警机阵位选择和架数优化配置模型。通过分析重点目标预警线划分,确定预警机防空作战具体任务,从而构建其阵位选择量化模型,并以此为基础,提出了一种在确保自身安全且充分发挥预警机固有探测威力前提下的多预警机并立航线和串接航线空域配置量化模型。实例运算结果表明,该模型能够对比分析关键参数对多预警机协同探测空域配置、出动兵力和航线样式选择的影响,可为预警机作战部队任务规划提供理论依据。

关键词:预警机;优化配置;出动兵力;航线样式

中图分类号:TN95 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2022)01-179-08

Airspace configuration of cooperative detection of multiple early warning aircraft in air defense operations of key targets

QI Wei, JIANG Wei, WU Wen, CHENG Dongsheng

(Air-Defense Early Warning Equipment Department, Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China)

Abstract: In order to solve the problem of early warning aircraft's airspace configuration in key target air defense operations, a model of multiple early warning aircraft's array selection and optimal configuration of aircraft number is constructed. The specific tasks of the early warning aircraft's air defense operations were determined by analyzing the division of early warning lines for the key targets, and the quantitative model of array selection was constructed. A quantitative model of airspace configuration for parallel and tandem routes of multiple early warning aircraft was proposed on the premise of ensuring its own safety and giving full play to the inherent detection power of early warning aircraft. The example operation results show that the model can compare and analyze the effects of key parameters from the cooperative detection of multiple early warning aircraft in airspace configuration, deployment forces and route pattern selection, which can provide theoretical basis for mission planning of early warning aircraft's combat troops.

Keywords: early warning aircraft; optimal configuration; deployment forces; route pattern

针对重点目标进行防空作战时,多预警机协同探测可提供充足的对空抗击作战组织时间和引导战机对敌实施空中拦截^[1-6],而预警机属于较为稀缺的重要作战力量,因此如何在有效遂行防空作战任务的前提下,合理筹划空域配置和出动兵力已成为急需解决的预警机任务规划核心问题。

相关文献对预警机的探测性能进行研究,如文献[7]分析了单架预警机在不同巡逻航线下的探测性能参数,并针对不同环境条件的特点,给出了预警机巡逻航线的建议,但未涉及预警机与重点目标之间的位置关系;文献[8]以某岛礁要地作战为仿真背景,构建了多预警机最大和最小前出距离的仿真模型,为预警机前出距离的选择提

供理论依据,但无法满足威胁角较大时多预警机如何协同的问题;文献[9]从战术层面,构建了一套预警机巡逻策略制定系统,为指挥员在遇到上级任务命令时,制定巡逻策略提供案例依据,但未给出预警机在巡逻空域的量化估算模型。文献[10]从动态和静态两个层面,构建了多预警机雷达效能评估模型,为战时任务规划提供指导依据。上述文献均未涉及多预警机协同探测时并立航线和串接航线如何转换,最少出动兵力如何确定等问题。

本文首先明确了重点目标预警线划分方法,根据预警机防空作战的具体任务,构建其阵位选择量化模型,并以此为基础在确保自身安全且充分发挥预警机固有探测威力的前提下,提出了一

* 收稿日期:2020-07-08

基金项目:国家部委基金资助项目(KJ20172A03122)

作者简介:祁炜(1981—),男,湖北武汉人,讲师,博士,E-mail:bluewind19810328@163.com;

蒋伟(通信作者),男,讲师,博士,E-mail:514293712@qq.com

种多预警机并立航线和串接航线空域配置量化模型,可为预警机作战部队日常训练、演习演练和防空抗击作战提供空域配置的理论依据。

1 问题描述

1.1 预警线划分

预警机在进行空域作战时,可以以重点目标为圆心,以相对应的防空预警线为半径画圆弧,三条圆弧可设定为三条防空预警线,三条预警线之间以及预警线与直径围成的区域分别为相应的内层防空预警区、中层防空预警区和外层防空预警区^[11-13],防空预警区域划分如图 1 所示。

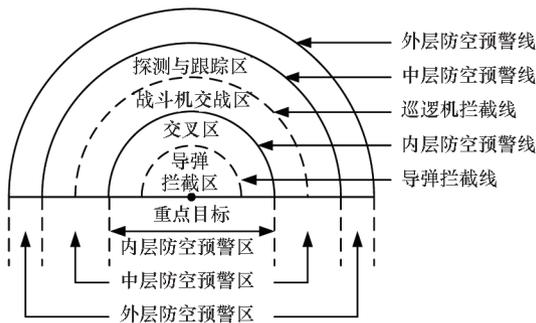


图 1 防空预警区域划分图

Fig. 1 Division of air defense early warning area

内层防空预警区是指内层防空预警线与直径组成的区域,其主要由导弹拦截区和交叉区组成,该区的主要任务是由各种导弹发射平台在我方各类侦察设备的指引下对敌方导弹进行拦截;中层防空预警区是指内层防空预警线与中层防空预警线之间的区域,其主要由探测跟踪区与战斗机交战区组成,主要任务是由我方预警机对敌方装备进行探测与跟踪,并指引我方战斗机进行空中拦截与交战;外层防空预警区是指中层防空预警线与外层防空预警线之间的区域,该区主要依靠卫星等其他传感器进行情报协同^[14-16]。

1.2 中层预警线计算模型

由于中层防空预警区的空情保障任务主要由预警机执行,因此确定预警机阵位,就要首先估算中层防空预警线与重点目标之间的距离 D_{zx} 。图 2 为威胁角防空区域图,由图 2 可知, D_{zx} 的估算公式为:

$$D_{zx} = D_{zx} + d_{yx} + d_{lg} \quad (1)$$

式中: D_{zx} 是重点目标到一次拦截近界的距离; d_{yx} 是巡逻机拦截线和一次拦截近界的距离; d_{lg} 是中层防空预警线和巡航机拦截线的距离。为了提供尽可能多的预警时间, D_{zx} 取最大前置距离:

$$D_{zx} = V(t_{sh} - t_{cb} - t_{xs})/2 \quad (2)$$

式中: V 是战斗机巡逻速度; t_{sh} 是战斗机平均续航时间; t_{cb} 是战斗机准备时间; t_{xs} 是指挥机构要求的战斗机巡逻飞行时间。

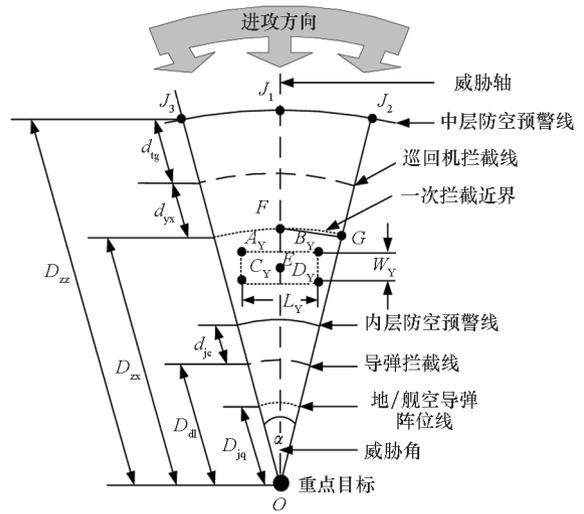


图 2 威胁角防空区域图

Fig. 2 Threat angle of air defense area

在敌战斗机进入内层防空预警线前,上级指挥机构要求战斗机必须进行一次以上的空中拦截,因此 D_{zx} 必须满足如式(3)所示的约束条件。

$$\begin{cases} D_{zx} \geq D_{nc} \\ D_{nc} = D_{d1} + d_{jc} \\ D_{d1} = \begin{cases} D_{j1} + \sqrt{d_{jk}^2 - h^2}, D_{d1} > d_{kd} \\ d_{kd}, D_{d1} \leq d_{kd} \end{cases} \\ d_{jc} = V_T \sum_{i=1}^7 t_i \end{cases} \quad (3)$$

其中: D_{nc} 是内层防空预警线距离; D_{d1} 是导弹拦截线距离; d_{jc} 是交叉区覆盖距离; D_{j1} 是导弹防御线半径; d_{jk} 是导弹最大射程; d_{kd} 是敌方战斗机最大攻击距离; t_1 是预警机与己方远程警戒雷达目标探测交接时间; t_2 是远程警戒雷达与目标指示雷达目标探测交接时间; t_3 是目标指示雷达与制导雷达之间的交接时间; t_4 是制导雷达捕获、跟踪目标所需时间; t_5 是面对空导弹发射准备时间; t_6 是导弹空中飞行时间; $t_6 = d_{jk}/v_{jk}$, v_{jk} 是导弹平均飞行速度; t_7 是误入交叉区的战斗机撤出时间。

为有效引导己方战斗机对敌战斗机进行拦截,上级要求己方预警机必须具有一定的提前预警距离,即

$$d_{lg} = V_T \sum_{i=8}^9 t_i \quad (4)$$

式中: V_T 是敌方战斗机巡航速度; t_8 是目标从探测到跟踪所需时间; t_9 是上级下达己方战斗机进

行空中拦截所需时间。

将式(2)、式(4)代入式(1)可得:

$$D_{zz} = \frac{V(t_{xh} - t_{cb} - t_{xs})}{2} + V_T \sum_{i=8}^9 t_i + d_{yx} \quad (5)$$

2 阵位线选择

预警机在阵位选择时应遵循的基本原则是:在确保自身安全的前提下,充分发挥其最大探测性能。因此,预警机必须处于敌战斗机最大射程区域之外。假设敌战斗机最大攻击距离为 d_{jkk} ,预警机接到命令撤回到 $D_{dl} - d_{jkk}$ 所需间隔距离为 d_{gl} ,则预警机阵位 D'_{zy} 可由下式确定:

$$D'_{zy} = D_{zx} - d_{gl} - \frac{W_Y}{2} \quad (6)$$

所需间隔距离 d_{gl} 应以可能遇到的最极端情况进行考虑,即当预警机直飞航线与威胁轴处于重合时,敌战斗机通过一次拦截近界, d_{gl} 可用估算公式表示为:

$$d_{gl} = \frac{V_T - V_a}{V_T} (D_{zx} - D_{dl}) + d_{jkk} + V_a \frac{\pi W_Y}{4V_{ra}} - \frac{W_Y}{2} \quad (7)$$

式中, W_Y 定义为转弯直径。

$$W_Y = \frac{2V_{ra}^2}{g \cdot \tan\beta_Y} \quad (8)$$

式中, β_Y 是预警机最大转弯角度, g 是重力加速度。

将式(7)和式(8)代入式(6)可得:

$$D'_{zy} = \frac{D_{zx} V_a}{V_T} + \frac{(V_T - V_a) D_{dl}}{V_T} - d_{jkk} - \frac{V_a V_{ra} \pi}{2g \cdot \tan\beta_Y} \quad (9)$$

预警机实际阵位 D_{zy} 最终可表示为:

$$D_{zy} = \begin{cases} D_{zx}, D'_{zy} \geq D_{zx} \\ D'_{zy}, D_{zx} > D'_{zy} > D_{dl} - d_{jkk} \\ D_{dl} - d_{jkk}, D'_{zy} \leq D_{dl} - d_{jkk} \end{cases} \quad (10)$$

3 兵力估算与部署间隔

3.1 并立航线

预警机在采用双平行线形或横 8 形巡逻航线样式时,实时探测覆盖范围相同^[17]。因此,本节以双平行线形为例,构建数学模型,所建模型可应用于横 8 形巡逻航线样式。

多预警机拱形任务线协同覆盖情况如图 3 所示,不失一般性,令多预警机协同遂行预警探测任务,第 i 架预警机巡逻直飞航线四个端点分别为 A_{Yi} 、 B_{Yi} 、 C_{Yi} 和 D_{Yi} ,且直飞航线长度 $|A_{Yi}B_{Yi}| =$

$|C_{Yi}D_{Yi}| = L_{Yi} = 2a_i$ 、转弯直径 $|A_{Yi}C_{Yi}| = |B_{Yi}D_{Yi}| = W_{Yi} = 2b_i$ 。当多预警机采用并立航线对任务扇面角 α_{ix} 遂行协同预警探测任务时,均以 E_{i-1} 为坐标系原点,且 Y 轴垂直于预警机巡逻直飞航线,而构建 $XE_{i-1}Y$ 直角坐标系。

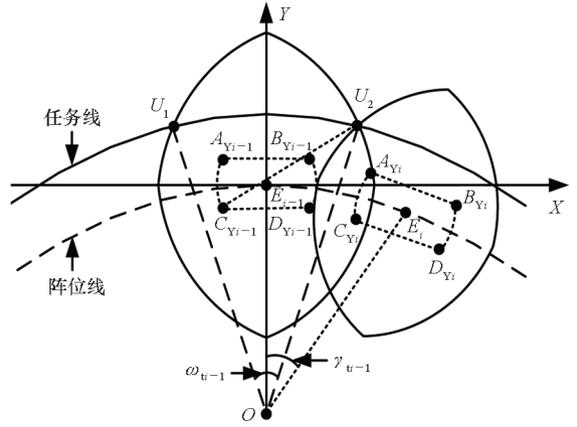


图 3 多预警机拱形任务线协同覆盖示意图

Fig. 3 Cooperative coverage diagram of arched mission lines of multiple early warning aircraft

多预警机协同空域配置态势如图 3 所示, U_1 是以 $D_{Y(i-1)}$ 为圆心、以 $R_{\max(i-1)}$ 为半径的实时探测边界和任务线的交点, U_2 是分别以 $C_{Y(i-1)}$ 和 D_{Yi} 为圆心、以 $R_{\max(i-1)}$ 和 R_{\max} 为半径的实时探测边界交点,且与任务线重合,则 $\angle U_1OU_2 = \omega_{i(i-1)}$, $\angle E_{i-1}OE_i = \gamma_{i(i-1)}$,显然 $|OU_1| = |OU_2| = R_{ix}$ 、 $|OE_{i-1}| = |OE_i| = d_{ix}$,联立方程组:

$$\begin{cases} (x_{U_2} + a_{i-1})^2 + (y_{U_2} + b_{i-1})^2 = R_{\max(i-1)}^2, \\ x_{U_2} \in (0, \sqrt{R_{\max(i-1)}^2 - b_{i-1}^2} - a_{i-1}), y_{U_2} > 0 \\ x_{U_2}^2 + (y_{U_2} + d_{ix})^2 = R_{ix}^2 \\ R_{ix} - d_{ix} < \sqrt{R_{\max(i-1)}^2 - a_{i-1}^2} - b_{i-1} \end{cases} \quad (11)$$

可求得 U_2 点坐标 (x_{U_2}, y_{U_2}) ,则第 $i-1$ 架预警机单独覆盖任务线对应 O 点角度 $\omega_{i(i-1)}$ 和第 $i-1$ 与 i 架预警机之间空域配置角 $\gamma_{i(i-1)}$ 为:

$$\begin{cases} \omega_{i(i-1)} = 2\arctan\left(\frac{x_{U_2}}{y_{U_2} + d_{ix}}\right) \\ \gamma_{i(i-1)} = \frac{\omega_{i(i-1)} + \omega_{ii}}{2} \end{cases} \quad (12)$$

因此,当任务扇面角为 α_{ix} 时,所需预警机同时出动架数 n 的约束条件为:

$$\sum_{i=1}^n \omega_{i(i-1)} < \alpha_{ix} \leq \sum_{i=1}^n \omega_{ii} \quad (13)$$

3.2 串接航线

当重点目标威胁角过大或全方位受到威胁

时,预警机可根据具体情况选择圆形串接巡逻航线样式遂行情报保障任务。当预警机与目标接近时,由于要立马回撤,需要较大的转弯半径,会造成转弯盲区;当预警机与目标之间的距离较远时,单架预警机无法完成指定任务,需要在航线上部署多架预警机进行系统探测^[18]。单架预警机防空区域如图 4 所示,不失一般性,令作战性能相同的多架预警机协同遂行防空作战任务,其相同高度层探测距离均为 R_{\max} 。以重点目标 O 为圆心,预警机阵位线到重点目标距离为 D_{zy} 。以重点目标 O 为坐标系圆点,令某一时刻第一架预警机阵位 A_1 与坐标圆点连线为 X 轴,过 O 点垂直于 X 轴的坐标轴为 Y 轴,建立 XOY 直角坐标系。

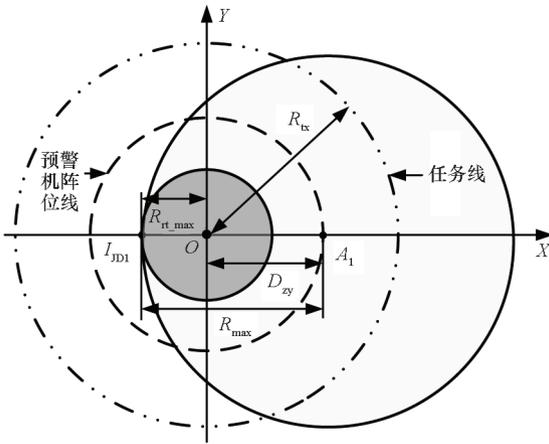


图 4 单架预警机防空区域图
Fig. 4 Air defense area diagram of single early warning aircraft

令预警机阵位线上有 N 架预警机同时遂行防空作战任务,则实时探测区外边界和内边界到 O 点距离分别为 R_{rt_max} 和 R_{rt_min} ,其估算模型可分为 $N=1$ 和 $N \neq 1$ 两种情况进行讨论。

对实时探测区外边界 R_{rt_max} 进行讨论:单架预警机 ($N=1$) 遂行防空作战任务时,如图 4 所示, R_{rt_max} 为:

$$R_{rt_max} = \begin{cases} 0, & R_{\max} < R \\ R_{\max} - R, & R_{\max} \geq R \end{cases} \quad (14)$$

多架预警机 ($N \neq 1$) 协同作战时的防空区域如图 5 所示。为获得最大实时探测区域,令 N 架预警机两两相邻等间隔部署在预警机阵位线上,则相邻预警机与 O 点连线的夹角为:

$$\beta = 2\pi/N \quad (15)$$

不妨令第一架预警机阵位点坐标为 $(D_{zy}, 0)$, 则第二架预警机阵位点坐标为 $(D_{zy} \cos\beta, D_{zy} \sin\beta)$ 。多预警机串接协同探测时,令以 A_1 为

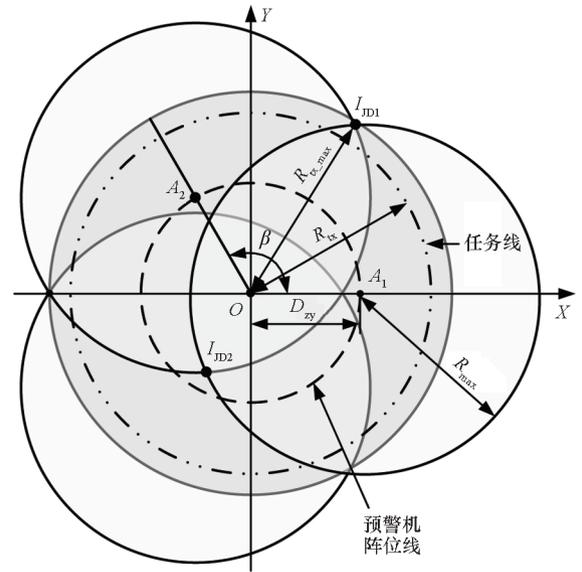


图 5 多预警机协同防空区域图
Fig. 5 Cooperative air defense area diagram of multiple early warning aircraft

圆心、以 R_{\max} 为半径的第一架预警机探测范围与以 A_2 为圆心、以 R_{\max} 为半径的第二架预警机探测范围交于 (x, y) 。则可得方程组:

$$\begin{cases} (x - D_{zy})^2 + y^2 = R_{\max}^2 \\ (x - D_{zy} \cos\beta)^2 + (y - D_{zy} \sin\beta)^2 = R_{\max}^2 \end{cases} \quad (16)$$

相邻两预警机存在实时探测区的约束条件为:

$$\begin{cases} [1 + \tan^2(\beta/2)]^2 - 4 \times [1 + \tan^2(\beta/2)](D_{zy}^2 - R_{\max}^2) \geq 0 \\ R_{\max} > D_{zy} \sin(\beta/2) \end{cases} \quad (17)$$

通过式 (16) 可解得 $I_{JD1}(x_1, y_1), I_{JD2}(x_2, y_2)$ 交点坐标为:

$$\begin{cases} x_1 = \frac{-2D_{zy} + \sqrt{4D_{zy}^2 - 4 \times [1 + \tan^2(\beta/2)](D_{zy}^2 - R_{\max}^2)}}{2 \times [1 + \tan^2(\beta/2)]} \\ y_1 = x_1 \tan(\beta/2) \\ x_2 = \frac{-2D_{zy} - \sqrt{4D_{zy}^2 - 4 \times [1 + \tan^2(\beta/2)](D_{zy}^2 - R_{\max}^2)}}{2 \times [1 + \tan^2(\beta/2)]} \\ y_2 = x_2 \tan(\beta/2) \end{cases} \quad (18)$$

则 N 架预警机协同的实时探测区外边界 R_{rt_max} 为:

$$R_{rt_max} = \sqrt{x_1^2 + y_1^2} \quad (19)$$

而实时探测区内边界 R_{rt_min} 需进一步讨论。如图 5 所示,显然,当预警机架数 $N=1, 2$ 且 $D_{zy} > R_{\max}$ 时,不存在实时探测区内边界,只存在无实时探测区的情况;当 $N \geq 3$ 时,由于预警机阵位距离

重点目标较远,使得 I_{JD2} 处于预警机阵位与重点目标之间,致使重点近距离存在半径为 R_{rt_min} 的圆形实时探测盲区。

$$R_{rt_min} = \sqrt{x_2^2 + y_2^2}, N \geq 3 \wedge D_{zy} > R_{max} \geq D_{zy} \sin \frac{\beta}{2} \quad (20)$$

此时需通过其他情报感知力量对以 O 点为圆心, R_{rt_min} 为半径的圆形区域进行协同补盲,以确保有效遂行任务线内空域的空情保障任务。

综合式(14)、式(17)~(20)可得:

$$R_{rt_max} = \begin{cases} \sqrt{x_1^2 + y_1^2}, [1 + \tan^2(\beta/2)]^2 - 4 \times [1 + \tan^2(\beta/2)](D_{zy}^2 - R_{max}^2) \geq 0, \\ R_{max} \geq D_{zy} \sin(\beta/2), N \neq 1 \\ R_{max} - D_{zy}, R_{max} > D_{zy}, N = 1 \end{cases} \quad (21)$$

$$R_{rt_min} = \sqrt{x_2^2 + y_2^2}, D_{zy} > R_{max} \geq D_{zy} \sin(\beta/2), N \geq 3 \quad (22)$$

因此,当预警机遂行任务线半径为 R_{ix} 的空情保障任务时,至少需要同时出动 N 架预警机的约束条件为:

$$R_{rt_max_{N-1}} < R_{ix} \leq R_{rt_max_N} \quad (23)$$

4 仿真分析

本节主要从预警机阵位对比和架数选择两个方面进行分析,合理设定攻防双方具体参数的前提下,分别对第 2 节与第 3 节得出的重要结论进行仿真验证。

攻防双方参战飞机及其配属装备、导弹性能参数和各作战流程消耗时间等如表 1 所示^[19]。

表 1 重点目标防空作战相关参数设置

Tab. 1 Parameter setting of air defense operation for key targets

参数	数值	参数	数值
d_{jk}/km	120	t_{cb}/h	0.2
$v_{jk}/(\text{km}/\text{h})$	4 000	t_{sh}/h	3
d_{kd}/km	250	t_{ss}/h	2
h_T/km	9	t_2/h	0.01
d_{jkk}/km	100	t_3/h	0.01
$V_{sl}/(\text{km}/\text{h})$	1 200	t_4/h	0.01
$V_{ra}/(\text{km}/\text{h})$	500	t_5/h	0.01
$\beta_V/(\circ)$	11.13	t_6/h	0.001
D_{jq}/km	150	t_7/h	0.003
R_{max1}/km	370	t_8/h	0.01
R_{max2}/km	450	t_9/h	0.02

4.1 阵位对比分析

根据国外几种典型预警机的相关数据,令 $V_a = \{500, 700, 900\} \text{ km/h}$, 且设敌战斗机飞行速度 $V_T \in [1, 10\ 000] \text{ km/h}$, 则可得图 6 所示的 V_T 与 D_{zy} 之间的关系曲线。由图 6 可得以下结论:

1) $V_T \leq \{322, 443, 559\} \text{ km/h}$ 时, $D_{zy} = D_{zx} = 480 \text{ km}$, 即此时预警机阵位可前伸至巡逻战斗机的阵位, 且 V_a 越大预警机实际阵位开始后置于巡逻战斗机阵位时的 V_T 越大;

2) $169.7 \text{ km} < D_{zy} < 480 \text{ km}$ 时, 当 V_a 不变, V_T 越大 D_{zy} 越小, 即预警机平飞速度恒定时, 敌战斗机飞行速度越大, 预警机实际阵位前伸距离越近; 当 V_T 不变, V_a 越大 D_{zy} 越大, 即敌战斗机飞行速度恒定时, 预警机平飞速度越大, 其实际阵位前伸距离越远;

3) $V_T \geq \{6\ 655, 6\ 666, 6\ 672\} \text{ km/h}$ 时, $D_{zy} = D_{dl} - d_{jkk} = 169.7 \text{ km}$, 即此时按式(2)~(4)计算预警机阵位已处于 $D_{dl} - d_{jkk}$ 之内, 为了充分发挥实时探测区的效能, 预警机可停留在 $D_{dl} - d_{jkk}$ 处, 从而 D_{zy} 达到最小值。

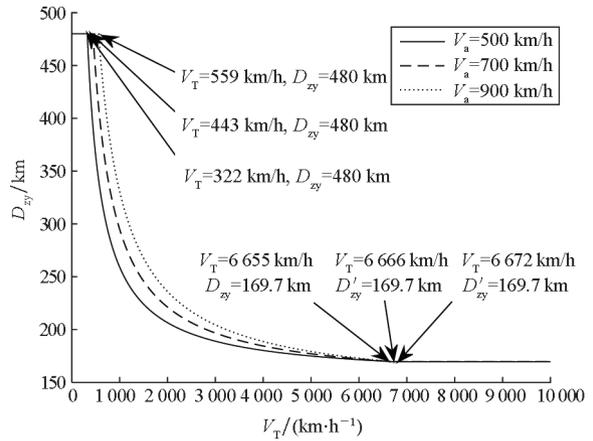


图 6 V_T 与 D_{zy} 关系曲线

Fig. 6 Relation of V_T and D_{zy}

4.2 部署架数对比分析

假设某 1 型和 2 型预警机相关参数如表 2 所示, 其余参数同表 1。

表 2 1 型和 2 型预警机参数

Tab. 2 Parameters of type 1 and type 2 early warning aircraft

型号	$V_a/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	R_{max1}/km	R_{max2}/km
1 型	750	400	450
2 型	550	400	450

其中, R_{max1} 、 R_{max2} 分别是预警机正常模式与增程模式时的探测距离。两型预警机 V_T 与 D_{zy} 关系

曲线如图 7 所示,当敌机飞行速度 $V_T = 1\ 000\ \text{km/h}$ 时,两型预警机的阵位距离分别为 $303.8\ \text{km}$ 和 $268.1\ \text{km}$ 。

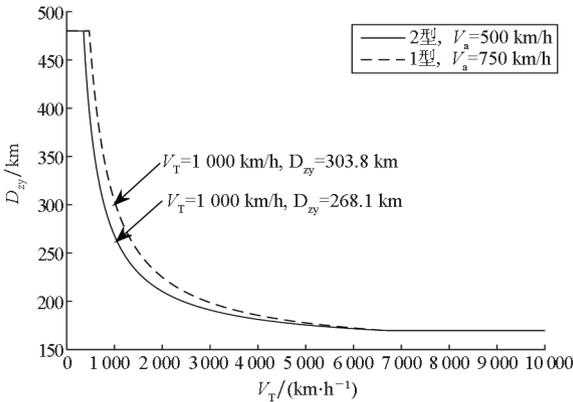


图 7 两型预警机 V_T 与 D_{zy} 关系曲线

Fig. 7 Relation of V_T and D_{zy} of two early warning aircrafts

4.2.1 并立巡逻航线架数分析

令 $D_{zy} = 268.1\ \text{km}$, $R_{ix} \in \{400, 500, 600\}\ \text{km}$ 、威胁角 $\alpha \in [0^\circ, 360^\circ]$, 且环境因素、预警机的探测能力以及预警机航线样式均保持与上述相同, 则完成指定探测任务所需的预警机架数 N 与威胁角 α 的关系如图 8 所示。

分析图 8 可知:

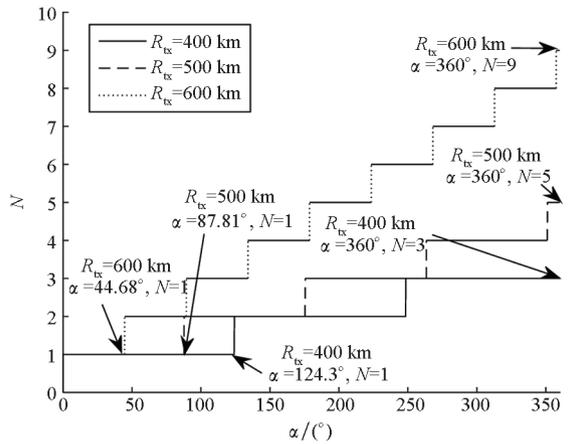
1) 当任务线 $R_{ix} = 500\ \text{km}$ 时, 单架预警机在正常模式和增程模式覆盖 α 角度分别为 87.81° 和 109.8° 。这说明在相应工作模式下当 $\alpha \leq 87.81^\circ$ 和 $\alpha \leq 109.8^\circ$ 时, 单架预警机就可独立完成空域探测任务, 无须和其他预警机进行协同; 预警机使用增程模式覆盖 α 角度远大于正常模式。因此, 在预警机资源紧张且威胁角 α 较大时, 正常模式中单架预警机无法有效完成作战任务, 可改变工作模式。

2) 当任务线 $R_{ix} = 600\ \text{km}$ 且覆盖角度 $\alpha = 360^\circ$ 时, 正常模式需要 9 架预警机, 而增程模式只需要 6 架, 可比前者节约 3 架预警机资源。但使用增程模式将导致数据率降低, 增加预警机跟踪探测敌机的时间, 此时指挥员需权衡探测距离与跟踪探测时间对作战任务的影响。

3) 分析图 8(a) 可知, 正常模式中当 $R_{ix} = \{400, 500, 600\}\ \text{km}$ 时, 部署架数 $N = \{3, 5, 9\}$; 同时分析图 8(b) 可知, 增程模式中当 $R_{ix} = \{400, 500, 600\}\ \text{km}$ 时, 部署架数 $N = \{3, 4, 6\}$ 。对比两种工作模式所需预警机架数, 随着任务线 R_{ix} 增大, 增程模式比正常模式节约预警机资源的效果越明显。

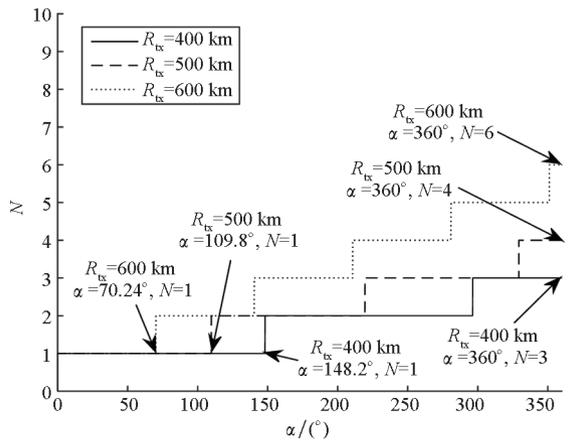
4) 由 8(a) 可知, 当任务线 $R_{ix} = 500\ \text{km}$ 且威

胁角在 $351.3^\circ < \alpha \leq 360^\circ$ 时, 第 5 架预警机与第 1 架预警机之间已可通过相互协同有效遂行作战任务; 当任务线变化时, 协同作用仍然成立。



(a) 正常模式 α 与 N 的关系

(a) Relation of α and N under the normal mode



(b) 增程模式 α 与 N 的关系

(b) Relation of α and N under the extended mode

图 8 α 与 N 的关系

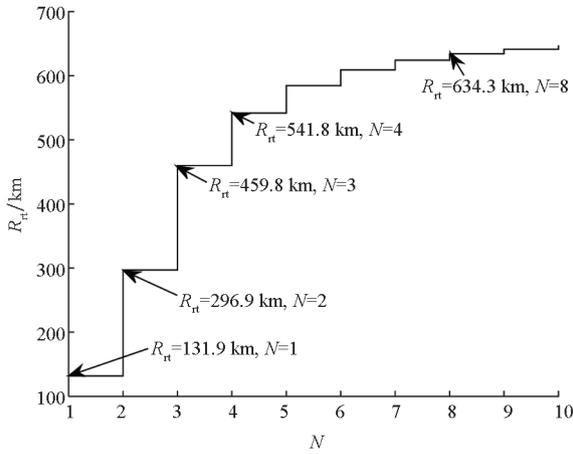
Fig. 8 Relation of α and N

4.2.2 串联巡逻航线架数分析

令 $R_{\text{max}} = 400\ \text{km}$, $D_{zy} = 268.1\ \text{km}$, $\Delta R_{\text{rt_add}} = R_{\text{rt_max}_i} - R_{\text{rt_max}_{i-1}}$, $\Delta R_{\text{rt_add}}$ 是多增加一架预警机获得实时探测区外边界的增加距离值, 可用于评估多增加一架预警机所获得的收益。且环境因素、预警机的探测能力以及预警机航线样式均保持与上述相同, 则预警机实时探测距离 R_{rt} 的关系对比如图 9 所示。

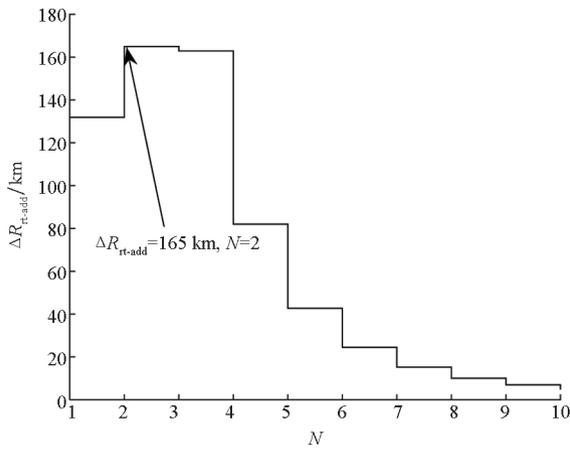
根据仿真结果可以得出以下几点结论:

1) 分析图 9(a) 可知, 当 1 架、2 架、3 架、4 架预警机遂行作战任务时, 以重点目标为圆心, 预警机构筑的实时探测预警圈半径分别为 $R_{\text{rt}1} = 131.9\ \text{km}$, $R_{\text{rt}2} = 296.9\ \text{km}$, $R_{\text{rt}3} = 459.8\ \text{km}$, $R_{\text{rt}4} = 541.8\ \text{km}$; 此时令敌方战斗机飞行速度为 $1\ 000\ \text{km/h}$, 则为我方提供的防空作战准备时间



(a) N 与 R_{rt} 关系曲线

(a) Relation of N and R_{rt}



(b) N 与 ΔR_{rt-add} 关系曲线

(b) Relation of N and ΔR_{rt-add}

图 9 串接巡逻航线 R_{rt} 关系对比

Fig. 9 Contrast relation of R_{rt} in tandem patrol route

分别为 7.91 min、17.81 min、27.58 min、32.5 min，因为预警机是防空作战中重要的稀缺资源，所以在有效遂行防空作战任务的前提下，尽量减少预警机同时升空架数，可有效保存守方预警机力量。因此，进一步加强地面人员之间的配合程度或提升武器装备性能、缩短反应时间，是一个行之有效的方法。

2) 分析图 9(b) 可知，预警机架数 N 与实时探测距离 R_{rt} 的关系呈先递增后递减的趋势。当预警机架数为 2 时，此时实时探测距离增值取得最大值，即 $\Delta R_{rt-add,max} = 165$ km，此时增加预警机架数的收益最大。

3) 综合图 9(a)、(b) 可知，随着任务线 R_{rt} 增加，所需预警机架数呈指数上升趋势，此时采用串接巡逻航线对预警机资源占用巨大，当预警机架数超过 4 时所获得的收益非常小。

4) 比较图 8(a) 和图 9(a) 可知，以预警半径

为 500 km 时为例，当威胁角 $263.4^\circ \leq \alpha \leq 351.2^\circ$ 时，采用并立航线所需的预警机架数为 4，当威胁角 $351.2^\circ < \alpha \leq 360^\circ$ 时，采用并立航线所需的预警机架数为 5；而采用串接航线时，它是 360° 全覆盖的，所需的预警机架数为 4。因此当威胁角 $\alpha \geq 263.4^\circ$ 时，采用串接航线。以预警半径为 500 km 时为例，当威胁角 $\alpha < 263.4^\circ$ 时，采用并立航线所需的预警机架数 ≤ 3 ；而采用串接航线时，它是 360° 全覆盖的，所需的预警机架数为 4。因此当威胁角 $\alpha < 263.4^\circ$ 时，采用并立航线。

5 结论

本文构建了预警机阵位选择量化模型，在此基础上，提出了预警机不同巡逻航线样式的空域配置量化决策模型，所得结论主要有以下几点：

1) 当威胁角大于等于某一角度时，并立航线与圆形串接同时升空预警机架数相同，此时应选择圆形串接航线，以获得更加良好的战场适应性；当威胁角小于这一角度时，采用圆形串接航线所消耗的预警机资源大于并立航线，因此在该情况下应选择并立航线进行协同探测。

2) 当守方空中预警机资源有限，且预警线距离重点目标较远时，可将预警机工作模式切换到增程对空探测模式，但也会导致预警机数据率降低。

3) 当采用圆形串接航线时，预警机实时探测距离随着预警机数量增加而增加，但当预警机数量增加到一定数量时，此时所获得的实时探测距离增益越来越小。因此，在对预警机架数进行选择时，应充分考虑每增加一架预警机所获得的收益。

参考文献 (References)

[1] 刘浩, 罗木生, 王宗杰. 岸舰导弹对海突击作战中预警机的阵位配置[J]. 指挥控制与仿真, 2017, 39(4): 12-15.
LIU H, LUO M S, WANG Z J. Position deploying of early warning aircraft of mobile coast-ship missile in battle on the sea[J]. Command Control & Simulation, 2017, 39(4): 12-15. (in Chinese)

[2] 戴瑜, 汪先超, 张袁鹏, 等. 基于探测区域的多预警机协同探测部署方法[J]. 现代雷达, 2017, 39(2): 1-6.
DAI Y, WANG X C, ZHANG Y P, et al. Deployment method of multi-AWACS cooperation detection based on detection area[J]. Modern Radar, 2017, 39(2): 1-6. (in Chinese)

[3] 黄国辉, 刘晓东, 郑昌. 预警机距敌战斗机待战空域安全距离解析[J]. 火力与指挥控制, 2017, 42(10): 79-81, 86.
HUANG G H, LIU X D, ZHENG C. Analyze of safe distance

- between alert airspace of fighters and early warning aircraft[J]. *Fire Control & Command Control*, 2017, 42(10): 79–81, 86. (in Chinese)
- [4] 叶海军, 冯博. 预警机生存力评估模型[J]. *火力与指挥控制*, 2017, 42(1): 40–44.
YE H J, FENG B. Evaluation modeling on survivability of AWACS [J]. *Fire Control & Command Control*, 2017, 42(1): 40–44. (in Chinese)
- [5] 乔永杰, 曹敬瑜, 范强, 等. 预警机武器控制发展设想[J]. *中国电子科学研究院学报*, 2017, 12(4): 337–342.
QIAO Y J, CAO J Y, FAN Q, et al. The envisagement about development of weapon control in early warning aircraft[J]. *Journal of China Academy of Electronics and Information Technology*, 2017, 12(4): 337–342. (in Chinese)
- [6] YUE K Z, GAO Y, LI G X, et al. Conceptual design and RCS performance research of shipborne early warning aircraft[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2014, 25(6): 968–976.
- [7] 单博楠, 傅宇龙, 叶海军, 等. 预警机典型巡逻航线下探测性能分析及评估[J]. *中国电子科学研究院学报*, 2019, 14(6): 625–633.
SHAN B N, FU Y L, YE H J, et al. Analysis and modeling for typical patrol routes of early warning aircraft[J]. *Journal of China Academy of Electronics and Information Technology*, 2019, 14(6): 625–633. (in Chinese)
- [8] 翟海清, 吴福初, 刘卫东. 岛礁要地防空作战中预警机前出距离计算模型[J]. *舰船电子工程*, 2019, 39(2): 11–14, 76.
ZHAI H Q, WU F C, LIU W D. Setting of AEW patrol airspace in antiair warfare of the important reefs[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2019, 39(2): 11–14, 76. (in Chinese)
- [9] 段晓稳, 李琳, 郭良. 舰载预警机防空警戒巡逻策略规划系统设计[J]. *现代导航*, 2019, 10(1): 24–27.
DUAN X W, LI L, GUO L. Design of air defense warning patrol strategy planning system for ship-borne early warning aircraft[J]. *Modern Navigation*, 2019, 10(1): 24–27. (in Chinese)
- [10] 段蕾, 诸四海. 面向全过程的机载预警雷达效能评估技术研究[J]. *中国电子科学研究院学报*, 2019, 14(7): 756–762.
DUAN L, ZHU S H. Research on whole-process oriented effectiveness evaluation of AEW radar[J]. *Journal of China Academy of Electronics and Information Technology*, 2019, 14(7): 756–762. (in Chinese)
- [11] 徐圣良, 王振波, 吴晓锋, 等. 航母编队航渡过程中防空哨戒舰阵位确定方法研究[J]. *指挥控制与仿真*, 2007, 29(4): 54–58.
XU S L, WANG Z B, WU X F, et al. Research on the position of air-defense-guard ship for carrier formation during navigation [J]. *Command Control & Simulation*, 2007, 29(4): 54–58. (in Chinese)
- [12] 郭辉, 徐浩军, 刘凌. 基于区间数的预警机作战效能评估[J]. *系统工程与电子技术*, 2010, 32(5): 1007–1010.
GUO H, XU H J, LIU L. Measurement of combat effectiveness of early-warning aircraft based on interval number[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2010, 32(5): 1007–1010. (in Chinese)
- [13] 何苹, 杨建军, 左文博. 预警机红外辐射特性研究[J]. *装备指挥技术学院学报*, 2009, 20(6): 114–116.
HE P, YANG J J, ZUO W B. Study on infrared radiation feature of early-warning aircraft[J]. *Journal of the Academy of Equipment Command & Technology*, 2009, 20(6): 114–116. (in Chinese)
- [14] 尹文彬, 许腾, 盖世昌, 等. 美航母编队舰载战斗机防空作战出动能力分析[J]. *兵工自动化*, 2011, 30(1): 8–11.
YIN W B, XU T, GAI S C, et al. Analysis of takeoff capability of shipborne fighter plane in carrier fleet air defense[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2011, 30(1): 8–11. (in Chinese)
- [15] 祁炜, 李侠, 蔡万勇, 等. 防御作战中预警机阵位选择及航线规划[J]. *现代防御技术*, 2016, 44(5): 13–19.
QI W, LI X, CAI W Y, et al. AEW location selection and course programming in air defense combat [J]. *Modern Defence Technology*, 2016, 44(5): 13–19. (in Chinese)
- [16] 祁炜, 李侠, 周启明, 等. 预警机协同探测拱形任务线阵位配置[J]. *雷达科学与技术*, 2016, 14(6): 619–624, 629.
QI W, LI X, ZHOU Q M, et al. Position allocation of AEW cooperative detection with arch task line[J]. *Radar Science and Technology*, 2016, 14(6): 619–624, 629. (in Chinese)
- [17] 祁炜, 武文, 郝延彪, 等. 预警机巡逻航线样式规划模型及仿真分析[J]. *空军预警学院学报*, 2019, 33(2): 98–101.
QI W, WU W, HAO Y B, et al. AEW aircraft cruise route pattern planning model and simulation analysis[J]. *Journal of Air Force Early Warning Academy*, 2019, 33(2): 98–101. (in Chinese)
- [18] 刘波, 沈齐, 李文清. 空基预警探测系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
LIU B, SHEN Q, LI W Q. Air borne early warning system[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012. (in Chinese)
- [19] 中国船舶重工集团公司第七二三研究所. 世界航母雷达与电子战系统手册[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011. No. 723 Research Institute of China Shipbuilding Industry Corporation. Handbook of world carrier radar & electronic warfare system[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011. (in Chinese)