

doi: 10.7690/bgzdh.2014.04.001

## 航母编队防空舰阵位配置优化研究

姜辉, 周晓光, 冯百胜, 谷树山

(海军航空兵学院飞行模拟训练系, 辽宁 葫芦岛 125001)

**摘要:** 针对航母编队防空舰阵位配置问题的复杂性和重要性, 提出一种航母编队防空舰阵位配置优化方法。根据防空舰部署距离、拦截扇区大小、拦截扇区内空袭目标概率函数, 构建描述防空舰防空作战能力的防护条件下航母可生存概率函数, 通过将防空舰配置问题转化为二维平面内防空扇区配置问题, 建立一个航母编队防空舰配置优化模型, 并通过仿真实验, 对不同作战目标情况下模型的可行性进行验证。仿真结果表明: 该模型具备有效性和可行性, 可为提升航母编队防空舰作战能力提供参考。

**关键词:** 航母编队; 防空舰; 兵力配置

**中图分类号:** TJ03 **文献标志码:** A

## Optimal Air Defense Ship Positions for Carrier in Anti-Air Warfare

Jiang Hui, Zhou Xiaoguang, Feng Baisheng, Gu Shushan

(Department of Flight Simulation & Training, Naval Flight Institute, Huludao 125001, China)

**Abstract:** The deployment of air defense is very complex and important, so presents an optimal method for deployment of air defense ship. Firstly, under protection conditions, a survival probability of the carrier, which is used for describe air defense ship combat capability, is established, according to air defense ship deployment distance, interception sector, and air strike target probability function in interception sector. Secondly, establish an air defense ship deployment optimal model by transforming air defense ship deployment problem in to air defense sector configuration problem in two-dimension. Finally, through simulation, verify model feasibility of different battle target. The simulation result shows that the model is useful and feasible, which can give reference for improving carrier operation capacity.

**Keywords:** carrier formation; air defense ship; deployment of forces

### 0 引言

防空舰是航母编队重要组成部分之一, 其阵位配置问题是航母编队作战运用的基础内容。优化防空舰阵位配置, 对于提升航母编队防空体系作战效能具有重要意义。国内在航母防空舰阵位配置问题方面做了大量的研究, 文献[1]分析了基本作战样式下航母编队兵力配置方法, 提出了航母编队兵力配置问题的思路; 文献[2]研究了近程警戒舰艇在航母编队防空作战中的兵力需求问题, 给出了近程警戒舰艇兵力需求模型; 文献[3]构建了航母编队航渡过程中防空哨戒舰阵位配置模型, 提出了航母编队航渡过程中防空哨戒舰阵位配置方法。在国外, 文献[4]对航母编队防空反潜舰的部署位置问题进行了优化研究, 给出了防空反潜舰的部署优化方法; 文献[5]构建了扇区内防空舰配置模型, 提出了一种防空扇区内防空舰配置方法; 文献[6]采用随机试验的方法确定了防空舰的防空能力, 在此基础上对航母编队防空舰部署问题进行了研究。

航母编队防空舰阵位配置问题的难点主要有 3 个: 一是如何度量防空舰的防御能力; 二是如何描

述空袭目标进攻策略; 三是如何衡量阵位配置的效果。针对以上 3 个问题, 笔者构建了度量防空舰的防御能力的概率函数, 采用威胁扇面内均匀分布描述空袭目标进攻策略, 并针对不同防御目标需求, 构建了不同的防空舰配优化模型, 提出了一种新的航母编队防空舰阵位配置优化方法。

### 1 防空舰防空能力建模

为对防空舰防空能力进行描述, 假定防空舰防空能力主要由防空舰对目标的最优拦截距离、防空舰部署距离、空袭目标分布概率函数决定。

#### 1.1 最优拦截距离

假定航母位于坐标原点, 防空舰  $i$  的位置为  $(x_i, y_i)$ , 空袭目标的接近方位角为  $\theta$ , 空袭目标与航母的距离为  $R$ , 防空舰与空袭目标的距离为  $d$ 。假定拦截距离  $d$  最小时, 拦截成功率最大, 设最优拦截距离为  $d^*$ 。根据图 1 所示, 防空舰与空袭目标的距离为  $d$  满足如下公式:

$$d^2 = (x_i - R \cos \theta)^2 + (y_i - R \sin \theta)^2 \quad (1)$$

最优拦截距离  $d^*$  满足条件  $\frac{d}{dR}[d_i] = 0$ , 则有:

收稿日期: 2013-11-12; 修回日期: 2013-12-11

基金项目: 国家社科基金(军事学)课题“舰载机作战运筹分析”(12HJ2D6-XXX)

作者简介: 姜辉(1967—), 男, 辽宁人, 高级工程师, 从事装备仿真研究。

$d^* = x_i \sin \theta - y_i \cos \theta$ 。如图 1 所示, 即防空舰与空袭目标的距离垂直于空袭目标进入目标航线。

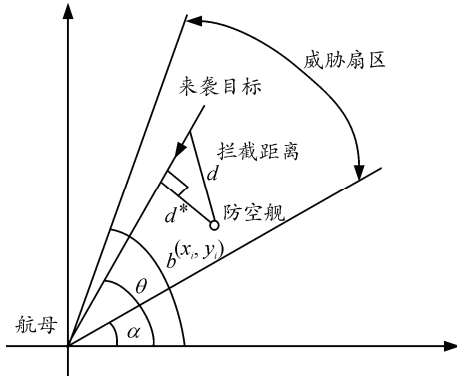


图 1 航母编队防空舰拦截空袭目标示意图

在模型中, 假定所有的防空舰均期望以最优拦截距离  $d^*$  实施拦截, 如果不考虑其他因素, 当  $d^* = 0$ , 即防空舰部署于原点位置时, 防空效果最好。而这与实际作战情况不符, 防空舰配置位置必须与航母保持一定距离, 以便在足够远的距离实施探测拦截任务。为考虑配置距离问题, 定义部署距离相关杀伤概率函数  $P_{A_i}^{r_i}$ , 描述防空舰杀伤目标概率与防空舰配置位置与航母距离之间的关系。

### 1.2 部署距离相关杀伤概率函数 $P_{A_i}^{r_i}$

定义 1 部署距离相关杀伤概率函数  $P_{A_i}^{r_i}$ 。

$$P_{A_i}^{r_i} = 1 - e^{-(k_{A_i} * r_i)} \quad (2)$$

其中:  $r_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2}$  描述防空舰与航母之间的距离;  $k_{A_i}$  是防空效能参数, 根据巡洋舰、驱逐舰作战能力而定。 $k_{A_i}$  的值直接影响配置阵位的选取结果,  $k_{A_i}$  值越小, 防空舰配置阵位与航母间的距离越大, 必须选取适当的  $k_{A_i}$  使防空舰配置阵位与航母之间的距离在 20~100 nm<sup>[7]</sup>。在描述驱逐舰毁伤目标时选取的  $k_{A_i}$  小于描述巡洋舰毁伤目标所选取的  $k_{A_i}$ 。

### 1.3 防空舰杀伤概率函数

综合最优拦截距离和部署距离相关杀伤概率函数, 定义防空舰杀伤概率:

$$P_{A_i} = P_{A_i}^{r_i} \exp\left(\frac{(d_i^*)^2}{\sum A_i}\right) \quad (3)$$

其中,  $P_{A_i}^{r_i} = 1 - e^{-(k_{A_i} * r_i)}$ ,  $k_{A_i} \geq 0$ ;  $d_i^* = x_i \sin \theta - y_i \cos \theta$ ;  $\sum A_i$  为防空舰与目标之间距离参数, 描述防空舰对目标的拦截能力,  $\sum A_i$  越大, 杀伤概率值越大。从公式中可以看出, 防空舰对空袭目标的杀伤概率是

$d_i^*$  的递减函数, 是  $r_i$  的递增函数。

### 1.4 空袭目标分布概率函数

假定空袭目标来袭角度为  $\theta$ , 且在给定威胁扇区内均匀分布, 空袭目标来袭角度  $\theta$  的概率密度函数  $f(\theta)$  定义为:

$$f(\theta) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & a \leq \theta \leq b \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

### 1.5 航母可生存概率函数

根据以上分析, 在扇区  $(a, b)$  内防空舰摧毁空袭目标事件的概率

$$P_{(a,b)}^i = \int_a^b f(\theta) P_{A_i} d\theta \quad (5)$$

$P_{(a,b)}^i$  也描述了航母的生存概率, 即航母的生存概率

$$P(\text{CarrierSurvive}) = \int_a^b f(\theta) P_{A_i} d\theta \quad (6)$$

在上述建模过程中, 威胁扇区位于同一坐标象限, 没有考虑拦截最优距离出现在过原点方向的特殊情况, 必须进一步修改模型, 将扇区分割为 2 个威胁扇区进行处理。假定防空舰配置阵位于  $(x_i, y_i)$ , 那么防空舰配置阵位角  $\phi_i = \text{actan}\left(\frac{y_i}{x_i}\right)$ 。威胁目标进攻角为  $\theta$ , 定义角  $\phi_1$  和  $\phi_2$  如公式 (7) 和图 2 所示。

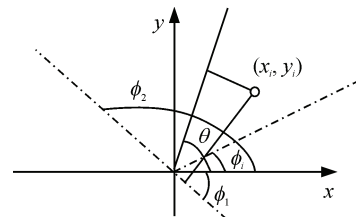


图 2 最优拦截距离修订图

$$\phi_1 = \theta - \frac{\pi}{2} \quad \phi_2 = \theta + \frac{\pi}{2} \quad (7)$$

对  $d_i^*$  进行如下修改:

$$d_i^* = \begin{cases} x_i \sin \theta - y_i \cos \theta & \phi_1 \leq \theta \leq \phi_2 \\ r_i & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

根据以上分析, 对于  $N$  艘防空舰, 1 个目标, 1 个威胁扇区的问题, 航母的可生存概率为

$$P(\text{CarrierSurvive}) = \int_a^b f(\theta) \left(1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_{A_i})\right) d\theta \quad (9)$$

对于  $N$  艘防空舰,  $M$  个目标, 1 个威胁扇区的问题, 航母的可生存概率为

$$P(\text{CarrierSurvive}) = \left[ \int_a^b f(\theta) \left( 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_{A_i}) \right) d\theta \right]^M \quad (10)$$

### 2 防空舰防空能力模型关键参数分析

$\sum A_i$ ,  $k_{A_i}$  是决定防空舰防空能力的关键参数, 根据实际作战部署经验可知, 防空舰部署距离一般为 20 nm 左右, 且受防护航母的生存概率大于 0.95, 根据以上分析, 在  $k_{A_i} = 0.2$  情况下, 变化  $\sum A_i$  的值, 仿真计算结果如表 1 所示; 在  $\sum A_i = 1000$  情况下, 变化  $k_{A_i}$  的值, 仿真计算结果如表 2 所示。

表 1 参数  $\sum A_i$  与受防护航母的生存概率关系

$\sum A_i$	$P(\text{CS})$	$R$	$\phi$
1 000	0.964	22.50	22.5
800	0.959	21.69	22.5
500	0.944	19.86	22.5
200	0.902	16.43	22.5
50	0.794	11.76	22.5

表 2 参数  $k_{A_i}$  与受防护航母的生存概率关系

$k_{A_i}$	$P(\text{CS})$	$R$	$\phi$
0.05	0.815	49.85	22.5
0.10	0.913	34.49	22.5
0.20	0.964	22.50	22.5
0.30	0.979	17.26	22.5
0.40	0.986	14.14	22.5

从表 1、表 2 中可以看出, 当  $\sum A_i = 1000$ ,  $k_{A_i} = 0.2$  时符合作战实际想定。在后续仿真试验中均假定  $\sum A_i = 1000$ ,  $k_{A_i} = 0.2$ 。

### 3 航母编队防空舰阵位配置优化模型

下面构建航母编队防空舰阵位配置优化模型, 首先确定威胁扇面, 如图 3 所示, 对扇面进行分割获取防御扇区。根据敌情分析和防空舰数量情况分别构建 2 个优化模型。

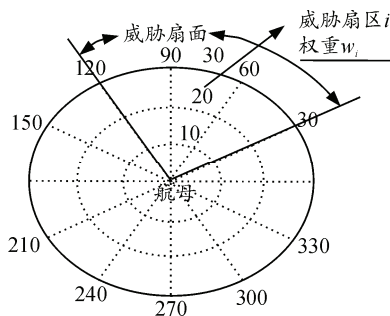


图 3 防空扇面与扇区

#### 3.1 确定防御扇面防空舰配置优化模型

该模型综合考虑防御扇面内防御作战任务, 在满足拦截目标概率的条件下, 使所有防空舰防御扇区的和不小于防御扇面。由于模型考虑满足部署距离和部署扇面的需求, 可能出现无解情况。

模型中变量定义如下:

$i$ : 防空舰索引 1,2,3,  $n$ ;

$P_{a_i, b_i, r_i}^i$ : 防空舰  $i$  部署距离  $r_i$ , 防御扇区为  $[a_i, b_i]$

条件下的航母可生存概率;

$\theta = [\underline{\theta}, \bar{\theta}]$  防御扇面;

确定防御扇面防空舰配置优化模型如下:

$$\max P_{a_i, b_i, r_i}^i \quad (11)$$

Subject to

$$r_i \geq R_i \quad \forall i = 1, 2, 3, n \quad (12)$$

$$P_{a_i, b_i, r_i}^i \geq P_i \quad \forall i = 1, 2, 3, n \quad (13)$$

$$b_i = a_{i+1}, \forall i \quad (14)$$

$$\sum_i (b_i - a_i) = \theta \quad (15)$$

目标函数(11)是最大化防御扇面的防御扇面内航母的可生存概率; 约束条件(12)确保防空舰部署距离大于部署最小距离; 约束条件(13)确保防空舰防御扇区能力的防御效果达到要求; 约束条件(14)确保每个防御扇区相接; 约束条件(15)确保防御扇区的总和为所需防御扇面。

#### 3.2 确定防御扇区防空舰配置优化模型

该模型适用于分别考虑不同防御扇区防御任务的情况。首先将防御扇面进行扇区化, 对不同的扇区进行防御重点区分, 在此基础上进行扇区防空舰配置优化。在配置模型中, 假定防空舰防御扇区不重复。

模型中变量定义如下:

$i$ : 防空舰索引 1,2,3,  $n$ ;

$P_{a_j, b_j, r_j}^i$ : 防空舰  $i$  部署距离  $r_j$ , 防御扇区为  $[a_j, b_j]$

条件下的航母可生存概率;

$X_{a_j, b_j, r_j}^i$ : 二元决策部署变量, 防空舰  $i$  是否部署与防御扇区  $[a_j, b_j]$  内的部署位置  $r_j$ 。

确定防御扇区防空舰配置优化模型如下:

$$\max \sum_i \sum_j X_{a_j, b_j, r_j}^i P_{a_j, b_j, r_j}^i \omega_j \quad (16)$$

$$\sum_j X_{a_j, b_j}^i = 1, \forall i \quad (17)$$

$$\sum_i \sum_j X_{a_j, b_j}^i = n \quad (18)$$

$$\sum_i X_{a_j, b_j}^i = 1, \forall j \quad (19)$$

$$r_j \geq R_j, \forall X_{a_j, b_j}^i = 1 \quad (20)$$

目标函数(16)是最大化部署防御扇区内航母的可生存概率; 约束条件(17)确保防空舰只部署一次;

约束条件(18)确保所有防空舰均被配置；约束条件(19)确保每个防空舰防御山区内配置一个防空舰；约束条件(20)确保防空舰部署距离大于规定值  $R$ 。

### 4 仿真案例分析

假定航母部署与原点，敌空袭目标的来袭扇区为  $[0^\circ, 150^\circ]$ ，根据防御需要以及敌情判断，将扇区分别划分为  $[0^\circ, 30^\circ]$ ， $[30^\circ, 60^\circ]$ ， $[60^\circ, 105^\circ]$ ， $[105^\circ, 150^\circ]$ ，防御权重分别为  $[0.8 \ 0.9 \ 0.8 \ 0.6]$ 。防空舰数量为 3，其作战参数  $\sum A_1 = 1000$ ， $k_{A1} = 0.2$ ， $\sum A_2 = 1200$ ， $k_{A2} = 0.18$ ， $\sum A_3 = 800$ ， $k_{A3} = 0.22$ 。

#### 4.1 模型 1 仿真验证

防空舰部署距离大于  $R=[30 \ 30 \ 30]$ ，航母可生存概率  $P=[0.90 \ 0.90 \ 0.90]$  情况下，求解确定防御扇面防空舰配置优化模型得：

$$[a_1, b_1] = [0, 52] \quad P_{[0, 52]}^1 = 0.9414$$

$$[a_2, b_2] = [52, 102] \quad P_{[52, 102]}^2 = 0.9517$$

$$[a_3, b_3] = [102, 150] \quad P_{[102, 150]}^3 = 0.9386$$

即防空舰 1 部署于  $(\rho, \theta) = (30, 26^\circ)$ ，防御扇区

$[0^\circ, 52^\circ]$ ；为防空舰 2 部署于  $(\rho, \theta) = (30, 77^\circ)$ ，防御扇区为  $[52^\circ, 102^\circ]$ ；防空舰 3 部署于  $(\rho, \theta) = (30, 126^\circ)$ ，防御扇区为  $[102^\circ, 150^\circ]$ 。阵位配置如图 4。

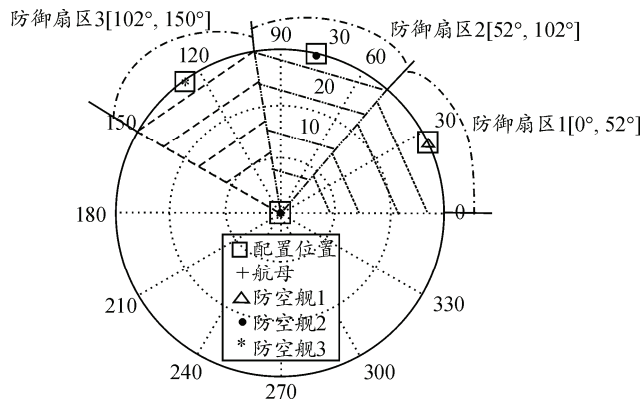


图 4 模型 1 航母编队防空舰阵位配置

#### 4.2 模型 2 仿真验证

根据防空效能评估函数，分别计算在部署距离大于 20 条件下防空舰对各个扇区的最优拦截概率和部署距离如表 3 所示。

表 3 最优拦截概率条件下防御概率与部署距离

防御扇区	防空舰 1		防空舰 2		防空舰 3	
	部署距离/nm	防御概率	部署距离/nm	防御概率	部署距离/nm	防御概率
$[0^\circ, 30^\circ]$	27	0.980 7	30	0.980 1	25	0.980 3
$[30^\circ, 60^\circ]$	27	0.980 7	30	0.980 1	25	0.980 3
$[60^\circ, 105^\circ]$	24	0.966 6	26	0.965 7	22	0.966 0
$[105^\circ, 150^\circ]$	24	0.966 6	26	0.965 7	22	0.966 0

将参数带入模型 2 中，求取部署方案为防空舰 1 配置于扇区  $[30^\circ, 60^\circ]$ ，防空舰 2 配置于扇区  $[0^\circ, 30^\circ]$ ，防空舰 3 配置于扇区  $[60^\circ, 105^\circ]$ ，航母可生存概率最大，最终的部署关系如图 5 所示。

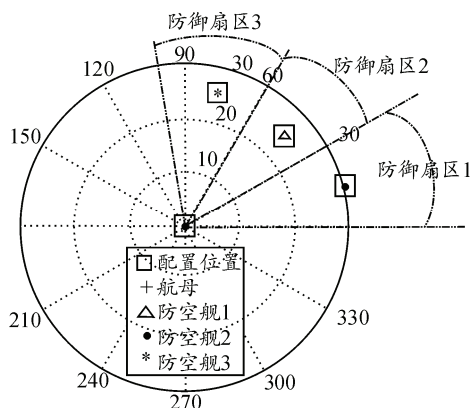


图 5 模型 2 航母编队防空舰阵位配置图

### 5 结论

笔者对航母编队防空舰阵位配置问题进行了系统分析，构建了一个航母编队防空舰配置优化模型，为航母编队防空舰配置提供了方法和途径。典型案例的应用结果验证了不同作战目标情况下模型的可

行性。仿真结果表明：为提升航母编队防空舰作战能力，必须合理配置，适当划分防御扇区。下一步的工作是进一步完善模型，研究防空舰协同作战条件下的阵位配置问题。

#### 参考文献：

- [1] 朴成日, 沈治河. 基本作战样式下航母编队兵力配置方法[J]. 指挥控制与仿真, 2013, 35(2): 58-63.
- [2] 张永生, 杨楠楠. 近程警戒舰艇在航母编队防空作战中的兵力需求[J]. 舰船科学技术, 2011, 33(7): 112-115.
- [3] 徐圣良, 王振波. 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.
- [4] Robin Cynthia. Optimal ship positions for naval battle group defense problems[D]. Department of the Navy Office of Naval Research. Arlington, VA 22217.
- [5] Donald D. Gabrielson. Battle group stationing algebraic modeling aystem: an anti-air warfare tactical decision aid methodology[D]. Naval postgraduate school, Monterey CA 93943-5000, March 1995.
- [6] Orhan Karasakal, Levent Kandiler. A Branch and Bound Algorithm for Sector Allocation of a Naval Task Group[J]. Naval Research Logistics, 2011, 58(33): 654-669.
- [7] 赵建军, 王毅, 杨利斌, 等. 舰艇编队协同防空射击次数[J]. 兵工自动化, 2012, 31(9): 15-17.