

doi: 10.7690/bgzd.2013.06.003

舰载战斗机空中巡逻部署空域优化研究

谷树山, 周晓光, 林亚军, 王江南
(海军航空兵学院模拟训练中心, 辽宁 葫芦岛 125001)

摘要: 为提升舰载战斗机执行航母防空作战任务的作战效能, 对舰载战斗机空中巡逻部署空域问题进行了研究。首先, 对舰载战斗机空中巡逻部署空域问题进行了描述, 定义相关的决策变量, 分析了变量之间的关系; 其次, 以最大化舰载战斗机在可实施拦截的条件下的拦截距离、防御面积和防御方向长度为目标, 设计一种基于多目标规划模型的舰载战斗机空中巡逻空域部署优化模型。根据舰载战斗机防空作战的实际情况, 给出了模型的约束条件, 并采用理想点法对模型求解获取模型的有效解。实例结果证明: 该模型综合考虑了所列出的单个目标函数优化需求, 达到了总体上的最优化, 具有一定的有效性与实用性。研究结果可为舰载战斗机执行空中巡逻部署作战任务提供量化参考和理论依据。

关键词: 舰载战斗机; 部署; 空中巡逻
中图分类号: TJ85 **文献标志码:** A

Optimal Research of Deployment of Shipborne Fighter Plane in Airspace Patrol

Gu Shushan, Zhou Xiaoguang, Lin Yajun, Wang Jiangnan
(Simulation & Training Center, Navy Air Force Academy, Huludao 125001, China)

Abstract: For improving combat efficiency of shipborne fighter plane executing air defense task, research on shipborne fighter plane in combat airspace patrol deployment. At first, describe airspace patrol deployment, define corresponding decision variables, analyze the relations among variables. At second, taking max interception distance, defense acreage, defense direction and length of shipborne fighter plane under interception conditions, design an airspace patrol deployment optimal model based on multi-target plan model. According to actual situation shipborne fighter plane, put forwards restriction condition of model, and adopt ideal point method to acquire model effectiveness resolution of model. The example result shows that based on single target function optimal requirement, the model acquires the optimization generally with effectiveness and practicability. The research results can provide fighter plane executing airspace patrol deployment with quantization reference and theory basis.

Key words: carrier-borne fighter; deployment; air patrol

0 前言

防空作战是航母编队作战的重要作战样式之一。航母编队的防空作战通常采用舰机结合、远近结合的方式, 构成了以航空母舰为核心的大纵深、多层次、阵位疏散、火力集中、立体多维和有重点地环形对空防御体系^[1]。舰载战斗机作为航母编队防空作战的首要兵力, 在航母防空作战中起着至关重要的作用, 其作战能力直接关乎航母防空作战效能^[2]。文献[3]对航母舰载机两种起飞方式对作战能力进行了对比分析, 文献[4]对舰载机航空导弹转运流程问题进行了研究, 文献[5]构架了基于 Agent 舰载机出航准备指挥决策系统, 文献[6]对巡逻机阵位进行了研究, 给出了空中巡逻机部署的一般原则。笔者在上述论文的基础上, 对舰载战斗机的空中巡逻部署空域进行优化研究。

1 问题描述

如图 1 所示, 在航母执行任务时, 舰载战斗机在巡逻部署空域巡航待命, 根据航母编队指挥所得情报信息, 执行指挥员的命令发射空空导弹拦截敌机。航母编队中舰载战斗机巡逻部署空域是航母编队作战应用中必须确定的一个战术要素, 包括舰载战斗机相对于航母的距离、方位、高度等。一架舰载战斗机在距航母空中巡逻半径的位置上执行空中巡逻任务, 舰载战斗机空中巡逻位置距航母的距离称为空中巡逻半径^[7]。一敌机以一定速度径直飞向航母进行攻击, 在航母预警系统发现敌机时, 执行空中巡逻任务的舰载战斗机与敌机和航母连线的成一定的夹角。舰载战斗机执行中远程防空任务, 近程防空由航母编队舰空导弹武器系统执行^[8]。因此, 执行空中巡逻任务的舰载战斗机必须在敌机进入进

收稿日期: 2012-12-12; 修回日期: 2013-01-11

基金项目: 国家 863 计划课题, 舰载战斗机作战样式及××××仿真(2011AA×××108)

作者简介: 谷树山(1972—), 男, 辽宁人, 硕士, 工程师, 从事飞行模拟仿真、航空兵作战仿真研究。

程舰空导弹武器系统射程内对其进行拦截。舰载战斗机执行空中巡逻任务涉及多方面的优化问题，在可实施拦截的条件下，要尽可能的最大化对空袭战斗机的拦截距离，最大化舰载战斗机防御面积，最大化舰载战斗机防御方向的长度等^[9]。

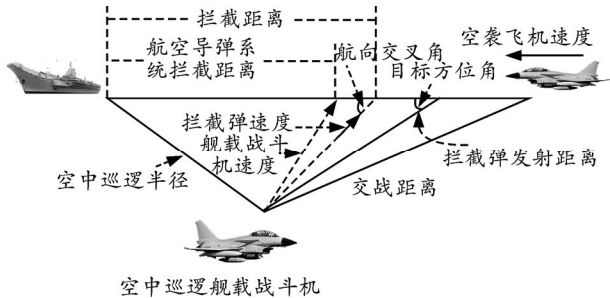


图 1 作战想定示意图

定义相关变量对图 1 所描述的作战想定进行描述，如图 2 所示。航母位于位置 O ，执行空中巡逻任务的舰载战斗机位于 S ，威胁空袭战斗机位于 T ， L 为舰载战斗机发射拦截点位置。 OS 的距离为 ρ_S ； OS 与 OT 的夹角为 α ；舰载战斗机的速度为 V_F ；威胁空袭战斗机的速度为 V_T ； T 为航母预警系统发

现空袭战斗机的位置； h 为航母预警系统发现目标后，进行识别判断的时间； t_F 为舰载战斗机在预警系统确认目标后拦截飞行时间； t_M 为拦截弹拦截飞行时间。 T_D 为航母发现威胁空袭战斗机距离； T_C 为舰载战斗机执行拦截任务时威胁空袭战斗机距航母位置； T_L 为舰载战斗机发射拦截弹时威胁空袭战斗机距航母距离； T_M 为拦截弹对威胁空袭战斗机实施拦截时威胁空袭战斗机距航母的距离。

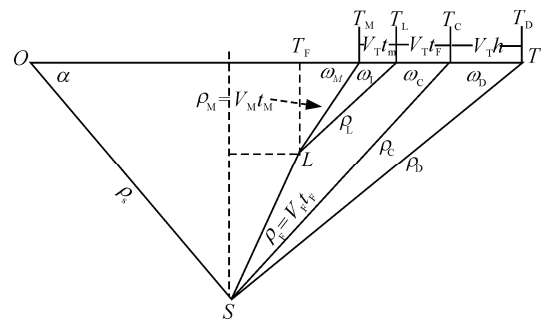


图 2 作战想定相关变量设定

根据以上变量的定义及其实际的意义，各种变量之间存在如表 1 中所描述的关系。

表 1 决策变量之间的关系

决策	变量
$\rho_D \sin \omega_D = \rho_S \sin \alpha$	$\rho_C \sin \omega_C = \rho_S \sin \alpha$
$\rho_L \sin \omega_L = \rho_M \sin \omega_M$	$\rho_F \sin \omega_F + \rho_L \sin \omega_L = \rho_S \sin \alpha$
$\rho_F \sin \omega_F + \rho_M \sin \omega_M = \rho_S \sin \alpha$	$\rho_D \cos \omega_D = T_D - \rho_S \cos \alpha$
$\rho_C \cos \omega_C = T_C - \rho_S \cos \alpha$	$\rho_L \sin \omega_L + \rho_F \sin \omega_F = T_L - \rho_S \sin \alpha$
$\rho_M \sin \omega_M + \rho_F \sin \omega_F = T_M - \rho_S \sin \alpha$	$\rho_F \sin \omega_F = T_F - \rho_S \sin \alpha$
$T_C = T_D - V_T h$	$T_L = T_C - V_T t_F$
$T_M = T_L - V_T t_M$	$T_F = T_M - \rho_M \cos \omega_D$
$\rho_F = V_F t_F$	$\rho_M = V_M t_M$

2 舰载战斗机执行防空任务空中巡逻空域优化模型

根据以上分析，构建舰载战斗机空中巡逻空域优化模型的目标函数如下：

第 1 个目标是最大化舰载战斗机防御的角度：

$$f_1 = \text{Maximize } \alpha \quad (1)$$

第 2 个目标是最大化舰载战斗机防御方向的长度：

$$f_2 = \text{Maximize } \rho_S \sin \alpha \quad (2)$$

第 3 个目标是最大化舰载战斗机防御方向的面积：

$$f_3 = \text{Maximize } \alpha \rho_S^2 \quad (3)$$

第 4 个目标是最大化舰载战斗机拦截威胁目标位置与航母的距离：

$$f_4 = \text{Maximize } T_M \quad (4)$$

根据作战想定，确定的约束条件如下：

1) 距离约束。

$$\begin{aligned} 0 \leq \rho_D \leq R_D; 0 \leq \rho_C \leq R_C; 0 \leq \rho_L \leq R_L; 0 \leq \rho_F \leq R_F \\ 0 \leq \rho_S \leq R_S; T_D \leq Y_D; T_C \leq Y_C; T_L \leq Y_L; T_M \leq Y_M; \\ T_M \geq Y_{ASM}; T_F \leq Y_F; h \geq H \end{aligned}$$

2) 角度约束。

$$\begin{aligned} \cos \omega_D \geq \cos \omega_{D0}; \cos \omega_C \geq \cos \omega_{C0}; \cos \omega_C \geq \cos \omega_{C0} \\ \cos \omega_L \geq \cos \omega_{L0}; \cos \omega_M \geq \cos \omega_{M0}; \cos \omega_F \geq \cos \omega_{F0} \\ 0^\circ \leq \omega_D \leq 180^\circ; 0^\circ \leq \omega_C \leq 180^\circ; 0^\circ \leq \omega_L \leq 180^\circ \\ 0^\circ \leq \omega_M \leq 180^\circ; 0^\circ \leq \omega_F \leq 180^\circ; 0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ \end{aligned}$$

其中： R_D 为航母预警探测系统发现目标时舰载

战斗机距敌目标最大距离; R_c 为航母预警探测系统目标识别估确认时舰载战斗机距敌目标最大距离; R_L 为拦截弹的最大拦截距离; R_M 为拦截弹的最大飞行距离; R_F 为舰载战斗机最大可飞行距离; R_S 为舰载战斗机最大空中巡逻半径。 Y_D, Y_C, Y_L, Y_M 为相应的目标距航母的最大距离。

定义目标函数向量 $\bar{f} = [f_1, f_2, f_3, f_4]$, 构建多目标规划模型如下:

Maximize \bar{f}

s.t.

$$\begin{aligned} \rho_D \sin \omega_D &= \rho_S \sin \alpha; \\ \rho_C \sin \omega_C &= \rho_S \sin \alpha; \\ \rho_L \sin \omega_L &= \rho_M \sin \omega_M; \\ \rho_D \cos \omega_D &= T_D - \rho_S \cos \alpha; \\ \rho_C \cos \omega_C &= T_C - \rho_S \cos \alpha; \\ \rho_L \sin \omega_L + \rho_F \sin \omega_F &= T_L - \rho_S \sin \alpha; \\ \rho_M \sin \omega_M + \rho_F \sin \omega_F &= T_M - \rho_S \sin \alpha; \\ T_C &= T_D - V_T h; \\ T_M &= T_L - V_T t_M; \\ \rho_F &= V_F t_F; \\ \rho_F \sin \omega_F &= T_F - \rho_S \sin \alpha; \\ T_L &= T_C - V_T t_F; \\ T_F &= T_M - \rho_M \cos \omega_D; \\ \rho_M &= V_M t_M; \end{aligned}$$

1) 距离约束。

$$\begin{aligned} 0 \leq \rho_D \leq R_D; 0 \leq \rho_C \leq R_C; 0 \leq \rho_L \leq R_L; 0 \leq \rho_F \leq R_F \\ 0 \leq \rho_S \leq R_S; T_D \leq Y_D; T_C \leq Y_C; T_L \leq Y_L; T_M \leq Y_M; \\ T_M \geq Y_{ASM}; T_F \leq Y_F; h \geq H \end{aligned}$$

2) 角度约束。

$$\begin{aligned} \cos \omega_D \geq \cos \omega_{D0}; \cos \omega_C \geq \cos \omega_{C0}; \cos \omega_C \geq \cos \omega_{C0} \\ \cos \omega_L \geq \cos \omega_{L0}; \cos \omega_M \geq \cos \omega_{M0}; \cos \omega_F \geq \cos \omega_{F0} \\ 0^\circ \leq \omega_D \leq 180^\circ; 0^\circ \leq \omega_C \leq 180^\circ; 0^\circ \leq \omega_L \leq 180^\circ \\ 0^\circ \leq \omega_M \leq 180^\circ; 0^\circ \leq \omega_F \leq 180^\circ; 0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ \end{aligned}$$

3 模型求解

对于多目标规划模型, 存在 3 种最优解集: 绝对最优解、有效解和弱有效解。许多工程优化设计中, 抽象出的多目标规划问题, 不存在绝对最优解^[10-11]; 因此笔者求解出多目标函数的有效解, 作为舰载战斗机空中巡逻部署空域优化模型的解。多

目标规划模型的有效解定义如下。

对于多目标规划问题:

$$\begin{cases} \min f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_p(x)) \\ x \in X = \left\{ x \mid \begin{aligned} g_i(x) \leq 0, i=1, 2, \dots, I \\ h_j(x) = 0, i=1, 2, \dots, J \end{aligned} \right\} \end{cases} \quad (5)$$

定义 1 (有效解) 设 $\bar{x} \in X$, 若不存在 $x \in X$ 使满足 $f(x) \leq f(\bar{x})$, 则称 $\bar{x} \in X$ 是上述多目标模型的有效解 (或称 pareto 解)。

深思多目标规划各种最优解集的定义, 可得到一些求解策略, 从工程实际中抽象出的多目标规划问题的绝对最优解, 一般情况下是不存在的, 因各个目标向自己的最优解靠近时, 必须会影响到其他一些目标向自己的最优解靠近, 因此只能求到一些点, 使其在这些点上各目标的函数值, 尽可能向自己的最优值靠近。笔者采用理想点法对多目标函数进行求解, 所谓理想点法, 要求构造一个单目标规划, 使其单目标规划的最优解 \bar{x} , 对应的各目标函数的值 $f_j(\bar{x}) (j=1, 2, \dots, p)$, 和他们的最优值 $f_j(x^*)$ 尽最大可能接近, 具体方法如下。

首先求出每一个单目标规划的最优值, 即:

$$\min_{x \in X} f_j(x) = f_j^* (j=1, 2, \dots, p) \quad (6)$$

取单目标规划的目标函数为:

$$h(f(x)) = h(f_1(x), f_2(x), \dots, f_p(x)) = \left(\sum_{j=1}^p (f_j(x) - f_j^*)^q \right)^{\frac{1}{q}} \quad (7)$$

其中, $q \geq 2$ 的自然数, 常取 $q = 2$, 再求单目标规划 $\min_{x \in X} h(f(x))$ 的最优解, 记为 \bar{x} 。

4 典型案例分析

假定敌机空袭速度为 $V_T=300$ km/h, 航母预警系统的探测距离为 $T_D=600$ km, 预警系统对目标识别判断的时间 $h = 5$ min, 舰载战斗机飞行速度为 $V_F=300$ km/h, 最大飞行时间为 25 min, 拦截弹的飞行速度为 $V_L=450$ km/h, 最大飞行时间为 10min, 舰空导弹射程为 $Y_{ASM}=120$ km。舰载战斗机空中巡逻部署半径最大距离为 450 km^[12-13]。

在Lingo内编程对模型求解, 根据以上作战想定, 最大化舰载战斗机防御的角度 $f_1 = \text{Maximize } \alpha$ 时, 最优值为 $\alpha = 1.089431$, 求取的关键参数值为

$\rho_s = 401.8577$, $\alpha = 1.089431$, $t_F = 0.5$,
 $\omega_F = 0.4813652$, $t_M = 0.1$, $\omega_M = 0.4813653$;

第 2 个目标是最大化舰载战斗机防御方向的长度 $f_2 = \text{Maximize } \rho_s \sin \alpha$ 时, 最优值为 390.0674, 求取的关键参数值为 $\rho_s = 450$, $\alpha = 1.0849383$, $t_F = 0.5$, $\omega_F = 0.7301916$, $t_M = 0.1$, $\omega_M = 0.7301916$;

第 3 个目标是最大化舰载战斗机防御方向的面积 $f_3 = \text{Maximize } \alpha \rho_s^2$ 时, 最优值为 23 611.12, 求取的关键参数值为 $\rho_s = 450$, $\alpha = 1.0849383$, $t_F = 0.5$, $\omega_F = 0.7301916$, $t_M = 0.1$, $\omega_M = 0.7301916$;

第 4 个目标是最大化舰载战斗机拦截威胁目标位置与航母的距离 $f_4 = \text{Maximize } T_m$ 时, 最优值为 582.5000, 求取的关键参数值为 $\rho_s = 450$, $\alpha = 0$, $t_F = 0.2916667$, $\omega_F = 0$, $t_M = 0.1$, $\omega_M = 0$ 。

从单个目标求解的结果可以看出, 目标函数 (2) 和 (3) 所求得的关键参数是一致的, 因此可以判断: 虽然目标函数 (2) 和 (3) 描述的方式不同, 但是所追求的最终目标是一致的, 因此可以用目标函数 (2) 替代目标函数 (3)。

根据以上单目标函数的最优值, 采用理想点方法对模型进行求解, 求解的函数最优值为 0.222 447 0, 关键参数值为 $\rho_s = 435.8483$, $\alpha = 1.067497$, $t_F = 0.5$, $\omega_F = 0.6564005$, $t_M = 0.1$, $\omega_M = 0.6564005$ 。

从仿真结果可以看出, 针对不同的目标函数, 决策变量的优化值是不同的。最终的多目标优化模型确定的决策变量值, 综合考虑了所列出的单个目标函数优化需求, 达到了总体上的最优化。

5 结论

为了满足航母防空作战中舰载战斗机巡逻空域部署优化决策需求, 笔者给出了一个基于多目标规

划模型的舰载战斗机空中巡逻空域部署优化模型。该模型考虑了多种优化需求, 并根据舰载机具体实际作战情况建立了诸多约束条件。计算结果表明: 该模型能够有效求解出航母防空作战中舰载战斗机空中巡逻部署空域的优化方案, 具有较好的实用性。但笔者仅对 1 对 1 防空问题进行了研究, 下一步将进一步拓展模型, 研究多舰载战斗机空中巡逻部署空域优化问题。

参考文献:

- [1] 尹文彬, 许腾. 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.
- [2] 陈岛. 美军航母战斗群防空作战[J]. 舰艇学术研究, 2005, 2(10): 23-26.
- [3] 童剑, 王云, 王治国. 航母舰载机两种起飞方式下出动能力对比分析[J]. 船舶工程研究, 2009(1): 36-39.
- [4] 马登武, 郭小威. 基于网络计划技术的舰载机航空导弹转运流程[J]. 兵工自动化, 2009, 29(9): 48-52.
- [5] 王平, 张立. 基于 Agent 的航母舰载机出航准备指挥决策系统建模[J]. 兵工自动化, 2007, 26(5): 33-36.
- [6] 徐圣良, 吴晓峰. 航母编队进入综合作战区后巡逻机阵位研究[J]. 舰船电子工程, 2008, 28(3): 43-46.
- [7] 尹卓. 美航母舰载机作战使用[J]. 舰船模拟, 2009, 18(12): 23-25.
- [8] 王宝坤. 中国发展航母的战略和军事作用[J]. 行业观察, 2011, 23(9): 19-23.
- [9] 张最良. 军事运筹学[M]. 北京: 军事科学出版社, 1993, 167-171.
- [10] 李鸣, 边涛, 吕杰. 国外舰载机技术发展[M]. 北京: 航空工业出版社, 2008: 21-25.
- [11] 张可村, 李换琴. 工程优化方法及其应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007: 197-209.
- [12] Ugue Ziya Yildirim. Extending the state-of-the-art for the COMAN/ATCAL methodology[D]. USA: Naval Postgraduate School, 1999: 258-260.
- [13] James M. Mathematical Modeling of Information Age Conflict[J]. Journal of Applied Mathematics and Decision Sciences, 2006(3): 1-15.