

## 基于资源有限性的舰载机火力打击兵力分配优化研究

孙国磊, 李京

(海军航空工程学院, 山东 烟台 264001)

**摘要:** 作战资源的有限性是限制远海作战舰载航空兵空对地火力打击能力的一个重要因素。通过对舰载机火力打击兵力分配的研究,建立了舰载机空对面火力打击兵力分配模型,提出了在原有目标价值、攻击风险基础上,综合考虑打击力量本身资源的合理使用问题。算例分析表明,该方法可以在给定攻击目标和打击资源的条件下,对兵力分配方案进行一定的优化。

**关键词:** 兵力分配; 空对地火力打击; 资源调度; 舰载机

**中图分类号:** O224      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1671-637X(2015)12-0063-04

## Limited Resources Based Force Assignment Optimization for Shipboard Aircraft in Multi-target Attacking

SUN Guo-lei, LI Jing

(Naval University of Aeronautics and Astronautics, Yantai 264001, China)

**Abstract:** The limited combat resource is one of the important factors that restrict the capability of shipboard aircrafts in attacking the ground targets. The force assignment of shipboard aircraft is studied, based on which a new force assignment optimization model is built up for surface-target attacking. It is put forward that the reasonable usage of the combat resources should also be taken into consideration besides the original target value and attacking risk. Analysis of examples shows that; with given combat resources and targets for attacking, the method can optimize the force assignment scheme to certain degree.

**Key words:** force assignment; air-to-ground attack; resource scheduling; shipboard aircraft

### 0 引言

海上编队是现代海军强国的重要打击力量,而编队搭载的舰载机是空中打击力量的核心。与岸基航空兵不同,在海上执行作战任务的战斗群需要有强大的后勤保障,来维持它惊人的物资消耗。所以,在制定舰载机空中火力打击行动时,应该考虑编队自身的维持能力,在空中火力打击效果和作战保障能力之间寻找最佳的平衡点。但是,目前关于航空兵空对地的火力打击分配方法主要集中在线性规划、非线性规划、整数规划、随机规划、动态规划等方法上,以上这些方法更多地侧重于作战任务本身,比较适用于可以得到充分作战保障的岸基航空兵<sup>[1-6]</sup>,而舰载机的空对面火力打击需要考虑的因素更多,优化问题更为复杂。因此,

本文在考虑传统空对面火力打击分配方法的基础上,针对海上编队作战资源的有限性,提出基于资源有限性的兵力分配方法。

### 1 舰载机火力打击兵力分配问题描述

#### 1.1 问题的提出

舰载机的空对面火力打击兵力分配问题可以描述为:假设 $A_1, A_2, \dots, A_m$ 为编队的 $m$ 个空中火力打击力量,且共有 $r$ 种打击资源,第 $A_i$ 个火力打击力量的第 $p$ 种资源的可用量为 $x_i^{(p)}, i=1, 2, \dots, m, p=1, 2, \dots, r$ ;  $B_1, B_2, \dots, B_n$ 为空中火力打击目标,摧毁目标点 $B_j$ 对第 $p$ 种弹药需求量为 $y_j^{(p)}, j=1, 2, \dots, n$ 。舰载机火力打击兵力分配优化的目的就是在满足供求约束的条件下,给出一个兵力分配资源优化方案,使得武器装备损耗最小,且打击资源需求量最小。

参考相关文献<sup>[7]</sup>,空对面火力打击兵力分配模型可以利用3种基本的目标函数,根据需要可进行必要的增减,也可进行适当调整。这些目标函数可单独使

收稿日期:2015-01-21

修回日期:2015-02-23

基金项目:2012 全军军事类研究生资助课题(2012JY003-492)

作者简介:孙国磊(1979—),男,山东潍坊人,硕士,讲师,研究方向为作战指挥。

用,也可结合起来一并使用,包括最大化作战效果、最小化武器装备损耗,以及最小化的武器数量。

舰载机火力打击兵力分配决策过程需要考虑打击目标的优先度、武器装备的损耗及动用的武器数量这 3 个因素。

1) 最大化作战效果。在舰载机空对面火力打击研究中,最大化作战效果可以体现为打击目标的价值,目标价值越大,越能达成空中火力打击的作战目的。

2) 最小化武器装备损耗。对于飞机来讲,最小武器装备损耗可以定义为被击毁的飞机数量,它与打击目标的对空防御能力密切相关。

3) 最小化的武器数量。舰载机火力打击在不同时段内对不同目标种类进行打击的弹药类型不同,如果动用的舰载机火力打击单位数目越少则所需的人力物力也就越少,作战时间可以维持更长的时间。

## 1.2 模型定义

对于舰载机空对面火力打击兵力分配问题定义如下:任一兵力分配可行方案记为  $\varphi = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n\}$ , 其中,  $\varphi_j = \{(A_{d_{1j}}, x_{d_{1j}}^{(1)}, x_{d_{1j}}^{(2)}, \dots, x_{d_{1j}}^{(r)}), (A_{d_{2j}}, x_{d_{2j}}^{(1)}, x_{d_{2j}}^{(2)}, \dots, x_{d_{2j}}^{(r)}), \dots, (A_{d_{kj}}, x_{d_{kj}}^{(1)}, x_{d_{kj}}^{(2)}, \dots, x_{d_{kj}}^{(r)})\}$ ,  $j = 1, 2, \dots, n$ , 表示第  $j$  个打击目标一共需要  $k$  个空中打击力量,且第  $k$  个力量所运用的第  $r$  种打击武器的资源数量为  $x_{d_{kj}}^{(r)}$ ;  $d_1, d_2, \dots, d_k$  为数列  $1, 2, \dots, m$  子列的一个组合,称之为一个排列,且  $\sum_{i=1}^k x_{d_i}^{(p)} \geq y_j^{(p)} > \sum_{i=1}^{k-1} x_{d_i}^{(p)}, \sum_{j=1}^n x_{d_{ij}}^{(p)} = \sum_{j=1}^n y_j^{(p)}$ , 其中,  $i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n, p = 1, 2, \dots, r$ , 表示  $m$  个空中打击力量中挑选出  $d_1, d_2, \dots, d_k$  个力量向第  $j$  个目标实施火力打击。

**定义 1** 记火力打击第  $j$  个目标点可能造成的武器装备损耗为  $W(\varphi_j)$ , 需要出动的火力打击力量个数为  $Q(\varphi_j)$ ; 由上述定义得到  $W(\varphi_j) = \max\{w_{d_{ij}} | A_{d_{ij}} \in \varphi_j; \varphi_j \neq \emptyset, 1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n\}$  及  $Q(\varphi_j) = \max\{i | A_{d_{ij}} \in \varphi_j; \varphi_j \neq \emptyset, 1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n\}$ 。对任意的  $\varphi_j \in \varphi$ , 舰载机兵力分配模型表示为

$$\begin{cases} \min W(\varphi_j) \\ \min Q(\varphi_j) \end{cases} \quad (1)$$

s. t.  $\varphi_j \in \varphi$ 。

## 1.3 目标价值描述

在制定火力打击计划时,首先要考虑目标的作战价值  $V_j$ , 其值越大,表示目标在火力打击中的重要程度越高,毁伤相同的情况下,打击的效费比越高。参考相关文献,从目标与系统关系的角度,对目标价值的评判主要放在打乱敌方体系内部各子系统间联系以及相互作用方面,从而瘫痪敌方战争系统、削弱敌方抵抗能力和战争潜力。因此,通过对目标体系的网络拓扑结构

的分析,计算出目标节点在敌作战体系中的关联程度,通过定量计算可以将目标分为关键节点、重要节点和普通节点。具体的计算方法主要利用图论中网络图的基本理论,这里不做过多描述。

## 2 舰载机空对面火力打击兵力分配模型求解

### 2.1 模型求解

对第  $j$  个打击目标,设  $w_{1j} \leq w_{2j} \leq \dots \leq w_{mj}$ , 按武器装备损耗  $w_{ij}$  从小到大对  $A_i$  进行排列,  $A_{d_1}, A_{d_2}, \dots, A_{d_m}$ ,  $j = 1, 2, \dots, n$ 。

**定义 2** 对序列  $x_{d_1}, x_{d_2}, \dots, x_{d_m}, x_{d_i}$  不全为 0, 若存在  $k, 1 \leq k \leq m$ , 使得  $\sum_{i=1}^k x_{d_i} \geq y_j > \sum_{i=1}^{k-1} x_{d_i}, x_{d_i} > 0$ , 则称  $k$  为该序列相对于  $y_j$  的临界下标, 且集合  $E = \{d_i | \sum_{i=1}^k x_{d_i} \geq y_j > \sum_{i=1}^{k-1} x_{d_i}, x_{d_i} > 0\}$ 。

**定义 3** 若  $k$  是序列  $x_{d_1}, x_{d_2}, \dots, x_{d_m}$  相对于  $y_j$  的临界下标, 则把  $A_{d_1}, A_{d_2}, \dots, A_{d_k}, d_i \in E$  作为打击目标  $B_j$  点所需力量分配的可行方案, 并有  $\min W(\varphi_j) = \max(w_{ij}) = w_{d_{kj}}, i = d_1, d_2, \dots, d_k$ , 且  $\min Q(\varphi_j)$  为集合  $E$  中元素  $d_i$  的个数。

由定义 1 可知火力打击分配模型的目标函数; 定义 2 确定了临界下标  $k$ , 并使  $k$  个打击力量按照飞机可能损失量由小到大排列形成序列  $x_{d_i}$ ; 定义 3 在定义 2 的基础上计算出目标函数  $\min W(\varphi_j)$  和  $\min Q(\varphi_j)$ ; 对于方案  $\varphi_j$ , 显然  $\min W(\varphi_j)$  就是要求的解, 而且最优, 而  $\min Q(\varphi_j)$  却不一定最优。

这是因为存在这种情况: 针对某一目标制定的兵力分配方案  $\varphi_j$ , 若存在  $\sum_{i=1}^k x_{d_{ij}} - x_{d_{kj}} \geq y_j$ , 表明原方案中第  $i$  个空中火力打击力量是多余的, 该点可以从原方案中剔除, 从而进一步减少火力打击力量的个数。

**定理 1** 使用第  $p$  类弹药的任一火力打击方案  $\varphi_j^{(p)} = \{(A_{d_{1j}}, x_{d_{1j}}^{(p)}), (A_{d_{2j}}, x_{d_{2j}}^{(p)}), \dots, (A_{d_{kj}}, x_{d_{kj}}^{(p)}), [A_{d_{ij}}, y_j^{(p)} - \sum_{i=1}^{k-1} x_{d_{ij}}^{(p)}]\}$  最优的充分必要条件是对任意  $A_{d_{ij}}$ , 满足

$$x_{d_{ij}}^{(p)} > \sum_{i=1}^k x_{d_{ij}}^{(p)} - y_j^{(p)} \quad (2)$$

**证明** 必要性: 对  $\forall i \in \{1, 2, \dots, k-1\}$ , 如果存在  $x_{d_{ij}}^{(p)} \leq \sum_{i=1}^k x_{d_{ij}}^{(p)} - y_j^{(p)}$ , 则将  $A_{d_{ij}}$  从方案中剔除, 由  $A_{d_{ij}}$  点补充所需弹药量, 使得新的打击方案动用的打击力量个数少于原方案, 新方案最优。

充分性: 若  $\forall p \in \{1, 2, \dots, r\}$ , 式(2) 成立; 若存在另一最优方案  $\varphi_j^{(p)'} = \{(A_{d_{1j}}, x_{d_{1j}}^{(p)'}) , (A_{d_{2j}}, x_{d_{2j}}^{(p)'}) , \dots, (A_{d_{k'-j}}, x_{d_{k'-j}}^{(p)'}) , [A_{d_{ij}}, y_j^{(p)'} - \sum_{i=1}^{k'-1} x_{d_{ij}}^{(p)'}]\}$ , 且  $k' \neq k$ , 这与临

界下标的定义矛盾。所以只有  $k' = k$  成立,方案  $\varphi_j^{(p)}$  才最优。

2.2 算法设计

正如上文所说,舰载机的作战使用有其特殊性,应该考虑整个编队的作战维持力;在制定飞机的兵力分配方案时,作战力量和资源的有限性使得攻击方案应最大限度减少飞机损耗,其次考虑弹药的消耗。因此,算法设计思路在保证飞机损失最小的前提下,不同类型弹药消耗最少<sup>[8-10]</sup>。

本文设计的算法可以分为两阶段:第一个阶段计算每个目标需要不同类型弹药的兵力分配方案,该方案应使出动飞机风险最小、出动兵力个数最少;第二阶段是在前面计算结果的基础上综合考虑所有目标的兵力分配方案中飞机风险最小、出动兵力个数最少,使得每个  $\varphi_j$  最优,从而得到最优  $\varphi$ 。算法流程如图 1 所示。

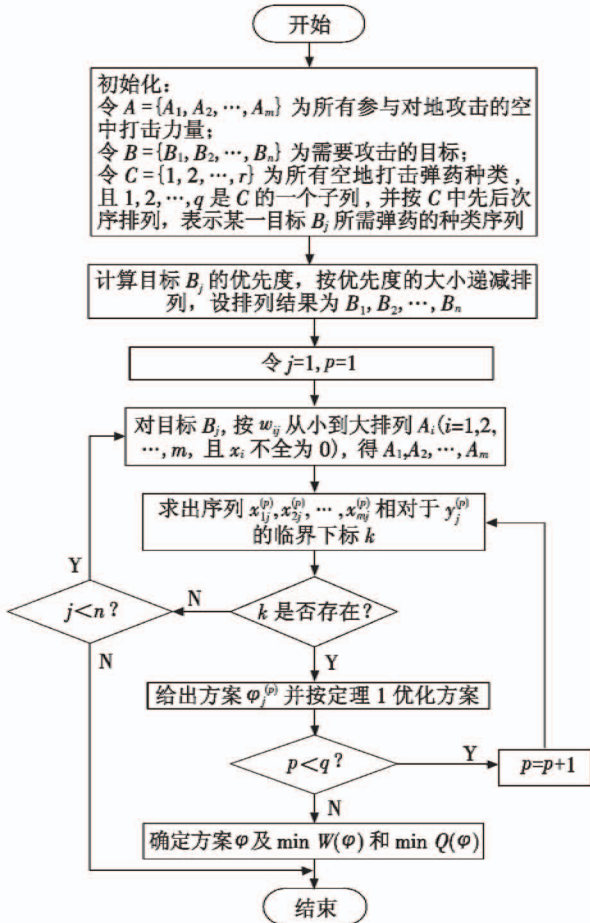


图 1 基于资源有限性的兵力分配流程图

Fig. 1 The flow chart of force assignment based on the resource limitation

具体步骤如下所述。

1) 设火力打击力量的集合为  $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ , 目标点的集合为  $B = \{B_1, B_2, \dots, B_n\}$ , 空地打击弹药种类集合为  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_r\}$ , 并根据目

标  $B_j$  对弹药种类的需求,从  $C$  中取出子列  $1, 2, \dots, q$ , 并按在  $C$  中的先后次序进行排列。

2) 计算目标  $B_j$  的目标价值,按照目标价值由大到小进行排列,结果为  $B_1, B_2, \dots, B_n$ 。

3) 令  $j=1, p=1$ 。

4) 根据目标序列  $B_j$ ,按飞机损失量  $w_{ij}$  由小到大排列打击力量  $A_i (i=1, 2, \dots, m, \text{且 } x_i \text{ 不全为 } 0)$ 。

5) 根据目标点  $B_j$  对第  $p$  种弹药的需求量  $y_j^{(p)}$ , 由定义 2 求出临界下标  $k$ ,并转步骤 6),若  $k$  不存在,且  $j < n, j=j+1$ ,转步骤 4),否则转步骤 8)。

6) 根据定义 3 形成目标点  $B_j$  的初始分配方案,并根据定理 1 优化初始方案,若  $p < q, p=p+1$ ,转步骤 5)计算下一种类弹药的分配方案。

7) 确定方案  $\varphi$  及  $\min W(\varphi)$  和  $\min Q(\varphi)$ 。

8) 结束计算。

3 案例分析

假设编队在执行某次对地攻击任务时共有 3 个目标,执行任务的舰载机共有 6 架,在此次任务中共需要 3 种类型的空对地弹药,兵力分配过程如下所述。

1) 计算目标价值,并进行排序。计算过程略,计算结果如表 1 所示。

表 1 目标价值排序

Table 1 The priority of targets value

目标点	$B_1$	$B_2$	$B_3$
目标价值	0.56	0.71	0.51

2) 6 架飞机空对地火力打击资源如表 2 所示。

表 2 空对地火力打击资源可用量

Table 2 The available quantity of air-strike tasks

舰载机	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$
弹药类型	I	I	III	II	III	I
可用数量	5	5	3	3	5	11
						5
						3
						12
						2
						8
						2
						2

3) 打击 3 个目标点的弹药需求量如表 3 所示。

表 3 目标点需求量

Table 3 The demand quantities of targets points

目标点	$B_1$	$B_2$	$B_3$
弹药类型	I	I	II
需求量	11	6	10
			22
			14

4) 打击 3 个目标时每个打击力量预期的归一化损失矩阵如表 4 所示。

表 4 攻击点的风险矩阵

Table 4 The risk matrix of attacking targets

目标点	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$
$B_1$	0.8	0.2	0.3	0.6	0.7	0.98
$B_2$	0.3	0.2	0.5	0.8	0.8	0.6
$B_3$	0.92	0.94	0.6	0.7	0.8	0.3



5)兵力分配方案的建立,如表5所示。

表5 兵力方案分配

Table 5 The optimization scheduling project of striking forces

目标	每种类型弹药的需 求量/个			对 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 按 $w_{ij}$ 升 序排列	$\varphi_j$	$W(\varphi_j)$	$Q(\varphi_j)$
	I	II	III				
$B_2$	8	$x_2, x_1, x_3$ $x_6, x_4, x_5$	初始方案	$(A_2, 3), (A_3, 5)$	0.5	2	
			优化方案	$(A_2, 3), (A_3, 5)$	0.5	2	
$B_1$	6 10	$x_2, x_3, x_4$ $x_5, x_1, x_6$	初始方案	$(A_2, 5), (A_3, 3), (A_4, 5), (A_5, 2)$	0.7	4	
			优化方案	$(A_4, 6), (A_3, 3), (A_4, 5), (A_5, 2)$	0.7	3	
$B_3$	22 12	$x_6, x_3, x_4$ $x_5, x_1, x_2$	初始方案	$(A_6, 8), (A_4, 5), (A_6, 2), (A_5, 3), (A_5, 10), (A_1, 5)$ 缺1	0.92	4	
			优化方案				

从表5的兵力分配方案可以看出,目标 $B_1$ 在最初的方案中计划使用4架飞机进行攻击,但是经过优化减少了1架飞机;目标 $B_2$ 的最初方案与优化方案一致;目标 $B_3$ 的方案由于编队作战力量资源的限制,还需要I型弹药的补充,或者利用其他武器进行打击。

#### 4 结束语

未来海上作战将是空、海一体的作战形式,传统的以岸基为主的空中打击模式将转变为以舰载航空兵为主。以往的空对地火力打击兵力分配以岸基航空兵为先决条件,突出的是火力打击的效果,而忽视了远海作战编队持续作战能力这个重要条件限制。因此,提出了在综合考虑打击效果和攻击风险的基础上,充分考虑编队资源有限性的问题,并提供了一种新的兵力分配方案制定的思路,保证在有限的时间内,合理分配打击资源,最大限度地利用舰载航空兵的攻击能力。

#### 参考文献

[1] 黎子芬,李相民,代进进,等.编队对地动态联合火力分配建模与仿真研究[J].系统仿真学报,2013,25(12):2900-2905. (LI Z F, LI X M, DAI J J, et al. Research of modeling and simulation on formation attack to ground dynamic joint fire distribution[J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(12):2900-2905.)

[2] 黄捷,陈谋,姜长生.无人机空对地多目标攻击的满意

分配决策技术[J].电光与控制,2014,21(7):10-13. (HUANG J, CHEN M, JIANG C S. Satisficing decision-making on task allocation for UAVs in air-to-ground attacking[J]. Electronics Optics & Control, 2014, 21(7):10-13.)

- [3] 张基哈,王玉文,孟凡计.多机空战目标威胁排序及打击分配[J].火力与指挥控制,2013,38(12):96-99. (ZHANG J H, WANG Y W, MENG F J. Target threat sequencing and allocation for multi-aircraft air combat[J]. Fire Control & Command Control, 2013, 38(12):96-99.)
- [4] 夏正洪,潘卫军.多救援直升机多目标分配与航迹规划研究[J].科学技术与工程,2013,34(13):10227-10232. (XIA Z H, PAN W J. Research on the multi-objective distribution of multi-helicopter and track planning [J]. Science Technology and Engineering, 2013, 34(13):10227-10232.)
- [5] 熊瑜.改进蚁群算法在武器目标分配中的应用研究[J].计算机与数字工程,2014,42(3):399-404. (XIONG Y. Application of improved ACO in WTA of air defense[J]. Computer & Digital Engineering, 2014, 42(3):399-404.)
- [6] 宁新建.机载多目标攻击作战飞行程序研究[J].航空计算技术,2008,38(2):66-69. (NING X J. Research in flight program for fighting while attacking aeroplane's several targets[J]. Aeronautical Computing Technique, 2008, 38(2):66-69.)
- [7] 朱延广,朱一凡.基于影响网络的联合火力打击目标选择方法研究[J].军事运筹与系统工程,2010,24(3):64-69. (ZHU Y G, ZHU Y F. Method of joint fire strike target selected based on influence nets[J]. Military Operations Research and Systems Engineering, 2010, 24(3):64-69.)
- [8] 曹继平,宋建社,朱昱,等.战场抢修多需求点多资源优化调度研究[J].兵工学报,2008,29(8):995-1000. (CAO J P, SONG J S, ZHU Y, et al. Research on battlefield maintenance optimization scheduling of multi-requirement-point and multi-resource[J]. Acta Armamentarii, 2008, 29(8):995-1000.)
- [9] 董鹏,罗朝晖,杨超.一类军械物资紧急调运的数学模型及算法研究[J].武汉理工大学学报:信息与管理工程版,2006,28(4):93-97. (DONG P, LUO Z H, YANG C. Mathematics model and arithmetic of a kind of ordnance's urgent transportation problem[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Information & Management Engineering, 2006, 28(4):93-97.)
- [10] 何鹏,张芳玉,于娜,等.战时装备维修器材分配方法研究[J].军械工程学院学报,2005,17(5):46-49. (HE P, ZHANG F Y, YU N, et al. Distribution strategy of maintenance material at wartime[J]. Journal of Ordnance Engineering College, 2005, 17(5):46-49.)