

doi: 10.7690/bgzdh.2016.08.011

多型反舰导弹混合攻击异型舰艇编队多目标整数规划火力分配模型

谭乐祖¹, 张 峰², 孙仲元²

(1. 海军航空工程学院指挥系, 山东 烟台 264001; 2. 海军航空工程学院研究生管理大队, 山东 烟台 264001)

摘要: 为了满足反舰导弹突击海上目标时多种效能指标优化需求, 在分析多目标规划模型的约束条件和目标函数基础上, 建立多目标整数规划模型, 并对最小弹药消耗量、最大毁伤效能和单枚导弹最大平均毁伤效能进行算例分析。分析结果表明: 该模型既能体现多种效能指标及其相互关系, 又能充分考虑各种约束条件, 充分体现了通用性和灵活性, 能够有效解决该类型火力分配问题。

关键词: 反舰导弹; 火力分配; 作战模型

中图分类号: TJ761.1⁺4 **文献标志码:** A

Multi-object Integer Programming Fire Allocation Model of Multi-type Anti-ship Missiles Attacking Multi-type Formation

Tan Lezu¹, Zhang Zheng², Sun Zhongyuan²

(1. Department of Command, Naval Aeronautical Engineering Academy, Yantai 264001, China;

2. Administrant Brigade of Postgraduate, Naval Aeronautical Engineering Academy, Yantai 264001, China)

Abstract: Based on the analysis of constraints of multi-target planning model and objective function, a multi-target integral planning model is established to meet the demand of multiple efficiency indexes optimization for anti-ship missile. According to the model, the minimum consumption of ammunition, the maximum destruction effect and the maximum average destruction effect of a missile is demonstrated through examples. The result shows that the model can represent multiple efficiency indexes and their mutual relationship, and can solve this kind of the firepower distribution problem effectively. The universality and flexibility is illustrated by considering all constraints of the model.

Keywords: anti-ship missile; fire allocation; combat model

0 引言

反舰导弹攻击的传统模式是以一种型号多枚反舰导弹从一个或多个方向突击敌海上目标。该模式的导弹攻击具有组织指挥简单、便于协同的特点。构造导弹火力分配优化模型时, 考虑的是该型导弹对敌异型舰艇编队中不同目标攻击时的不同毁伤概率和以此毁伤概率为依据计算出的毁伤目标期望数和导弹需求数量。此时的火力分配是一个一维优化问题。

导弹的攻防对抗是一个此消彼长的过程。从对反舰导弹防御的角度看, 舰空导弹与末端小口径速射火炮是目前火力抗击的主要手段, CEC 模式^[1]是其主要的发展方向; 有源干扰和舷外无源干扰是反舰导弹防御中主要的电子对抗手段, 主/被动智能化协同模式是其主要的发展方向。从导弹攻击的角度看^[2-3], 速度、弹道和制导模式的多样化是其主要的技术发展途径。亚音速与超音速结合, 高弹道灌顶攻击与掠海突防结合, 主/被动雷达与光电制导结合, 极大地丰富了导弹攻击手段, 提升了导弹攻击

效能, 同时也对多型导弹混合攻击异型舰艇编队导弹火力分配问题提出了新的需求。

火力分配^[4]的目的是多方面的, 通常用各种效能指标来描述, 如突防概率、毁伤效果、毁伤目标数量等越大越好型正向指标, 出动兵力、导弹消耗量、指挥协同难度、协同作战的兵种数量、兵力损失等越小越好型逆向链接指标; 因此, 通常用多目标规划方法^[5-10]优化火力分配问题。

1 多型导弹混合攻击多目标规划模型

1.1 问题描述

以编队形式遂行作战任务是水面舰艇常态化行动模式。通常情况下, 编队编成中应包含不同战术技术性能特点的舰艇^[3]。敌方编队由 n 艘不同类型舰艇组成, 每艘舰艇的价值系数为 $v_j(j=1,2,\dots,n)$ 。我方突击兵力有 m 类不同型号的反舰导弹, 反舰导弹的总数量为 M , 每种型号反舰导弹数量为 $M_i(i=1,2,\dots,m)$ 。我方突击兵力发射的所有型号反舰导弹可突击敌编队中的任何目标。由于反舰导弹的速度、高度、制导体制、战斗部威力等因素的差异

收稿日期: 2016-04-12; 修回日期: 2016-05-30

基金项目: 2012 全军军事类研究生资助课题(2012JY003-492)

作者简介: 谭乐祖(1965—), 男, 山东人, 教授, 博士, 硕士研究生导师, 从事作战运筹分析研究。

和敌方编队中不同类型的舰艇对各种型号反舰导弹的抗击效能的差异, 对不同类型目标突击时, 不同型号反舰导弹对不同类型目标的毁伤概率必然不同。第 i 类反舰导弹对第 j 个目标突击时的平均单发毁伤概率为 $p_{ij}(i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n)$ 。

1.2 多目标规划模型的约束条件

设分配给第 j 艘水面舰艇的第 i 类反舰导弹数量为 $x_{ij}(i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n)$, 则火力分配矩阵为

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{i1} & x_{i2} & x_{ij} & x_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

对于火力分配矩阵式 (1), 依据作战意图、战术目的、兵力构成与数量、战场态势等, 可以构建不同目的与功能的火力分配模型, 满足各种火力分配与优化需求。

1) 毁伤目标选择。全部予以毁伤或有选择地打击敌编队中的部分目标, 是战术筹划必须考虑的主要内容之一。具有目标选择能力是火力分配模型应具备的基本功能。若第 j 个目标必须予以毁伤, 则其约束条件为

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} \geq 1, j=1,2,\dots,n, \quad (2)$$

若避免毁伤第 j 个目标, 即不给第 j 个目标分配火力, 则式 (2) 的约束为 0。

2) 毁伤程度约束。毁伤程度约束的主要目的有 2 个: 一是保证对目标毁伤的可靠性, 二是避免弹药的低效率过度消耗。根据一次实验中小概率事件不会发生的原理, 进行作战筹划时, 应规定对目标的最低毁伤值, 即毁伤下限, 使对目标的毁伤具有一定的可靠性。对第 j 个目标的毁伤下限用 $L_j(j=1,2,\dots,n)$ 表示。根据指数函数的变化规律, 为

充分发挥每枚导弹的作战效能而又不至于造成一次作战中弹药的过分消耗, 亦应规定对目标的毁伤上限。对第 j 个目标的毁伤上限用 $U_j(j=1,2,\dots,n)$ 表示, 为此, 可规定对第 j 个目标的毁伤区间为 $[L_j, U_j]$, 则毁伤程度约束为非线性模型:

$$L_j \leq 1 - \prod_{i=1}^m (1 - p_{ij})^{x_{ij}} \leq U_j, j=1,2,\dots,n. \quad (3)$$

经过线性化处理, 式 (3) 可等价变换为:

$$\ln(1 - U_j) \leq \sum_{i=1}^m x_{ij} \ln(1 - p_{ij}) \leq \ln(1 - L_j), \quad j=1,2,\dots,n. \quad (4)$$

3) 导弹的资源约束。设第 i 种导弹的数量为 M_i , 则导弹的资源约束为

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq M_i, i=1,2,\dots,m. \quad (5)$$

1.3 多目标规划模型的目标函数

1) 毁伤目标数量。毁伤目标数量为一个越大越好型正向指标, 其非线性模型为

$$f_1(x) = \max \sum_{j=1}^n \left[1 - \prod_{i=1}^m (1 - p_{ij})^{x_{ij}} \right]. \quad (6)$$

2) 毁伤价值最大。通常情况下, 总的毁伤价值与毁伤目标数量是 2 个不同的效能指标。异型舰艇编队中各目标的价值通常是不同的。总的毁伤价值模型为

$$f_2(x) = \max \sum_{j=1}^n v_j \left[1 - \prod_{i=1}^m (1 - p_{ij})^{x_{ij}} \right]. \quad (7)$$

3) 导弹消耗总数最小。其模型为

$$f_3(x) = \min \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m x_{ij}. \quad (8)$$

1.4 多目标整数规划模型

$$F(x) = \underset{x \in D}{opt} \{f_1(x), f_2(x), f_3(x)\} \quad (9)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} \sum_{j=1}^n x_{ij} \leq M_i, i=1,2,\dots,m \\ \sum_{i=1}^m x_{ij} \geq 1, j=1,2,\dots,n \\ \ln(1 - U_j) \leq \sum_{i=1}^m x_{ij} \ln(1 - p_{ij}) \leq \ln(1 - L_j), j=1,2,\dots,n \\ x_{ij} \in N, i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n \end{cases}$$

2 算例分析

假设我方有 4 种不同型号的反舰导弹，突击敌由 3 种型号的舰艇编成的战斗舰艇编队。各类反舰导弹数量、目标价值系数、目标毁伤下限和上限，以及目标毁伤概率如表 1、表 2 所示。

表 1 反舰导弹火力分配仿真参数

反舰导弹		目标编号		
类型	数量	1	2	3
A	16	0.10	0.08	0.05
B	10	0.13	0.09	0.07
C	12	0.09	0.07	0.05
D	8	0.12	0.1	0.06

表 2 战斗舰艇编队仿真参数

目标编号	价值指数 v	毁伤下限 L	毁伤上限 U
1	0.4	0.5	0.95
2	0.7	0.5	0.95
3	0.9	0.5	0.95

多目标规划模型有多种解法。无论哪一种解法，其核心思想都是有效解所体现的各个目标函数的满意程度。修改各目标函数的满意程度，则解的结果也会随之变化。对于式 (9) 所体现的多目标规划模型，可体现多种作战意图。

1) 最小弹药消耗量。

最小弹药消耗量的优化，应在毁伤区间约束与各种型号导弹数量约束下进行。由于式 (9) 为整数规划模型，若毁伤区间过小，则可能求不出满足约束条件的整数解。故选择毁伤上、下限时，应考虑整数解的特殊性，不应过于接近。

在表 1 所示参数条件下，以弹药消耗量最小为主要目标函数，其最优值为 23，最优解却有多组；为此，加入“单枚导弹毁伤目标期望数最大”为筛选条件，得到最优解为

$$\begin{bmatrix} 0 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & 9 \\ 2 & 0 & 0 \\ 3 & 5 & 0 \end{bmatrix}。$$

此时，对各目标的毁伤概率分别为： $p=[0.509\ 0, 0.500\ 2, 0.505\ 6]$ ；毁伤期望数为 1.514 9，导弹消耗量为 23。

从计算结果看，最优解基本接近毁伤下限。由于是整数规划，所以比毁伤下限高一点的最小弹药消耗量是可以接受的。

2) 最大毁伤效能。

显然，最大毁伤效能与弹药消耗量是相互矛盾的 2 个目标函数。可在 2 种情况下计算最大毁伤效

能：一是每种导弹均有数量约束，如第 i 种导弹的消耗量不应超过某一数值；二是限定每种导弹的消耗量，只限定导弹消耗总量。对目标的最大毁伤效能也可分为 2 种情况：一是毁伤目标的期望数最大，二是毁伤目标的总价值最大。各型导弹数量不超过其各自总数，但总消耗量不超过 40 枚导弹，以毁伤目标期望数最大为目标函数，最优解为

$$\begin{bmatrix} 11 & 5 & 0 \\ 2 & 0 & 8 \\ 0 & 0 & 6 \\ 0 & 8 & 0 \end{bmatrix}。$$

此时，对各目标的毁伤概率分别为： $p=[0.762\ 5, 0.716\ 3, 0.588\ 7]$ 。

毁伤期望数为 2.067 4。

同样条件下，若以毁伤目标价值最大为主要目标函数，最优解为

$$\begin{bmatrix} 9 & 6 & 1 \\ 0 & 0 & 10 \\ 0 & 0 & 6 \\ 0 & 8 & 0 \end{bmatrix} \text{ 或 } \begin{bmatrix} 9 & 6 & 0 \\ 0 & 0 & 10 \\ 0 & 0 & 7 \\ 0 & 8 & 0 \end{bmatrix}。$$

此时，对各目标的毁伤概率分别为： $p=[0.612\ 6, 0.739\ 0, 0.662\ 0]$ 。

毁伤期望数为 2.013 6。

从计算结果看，导弹消耗量均达到了约束条件上限。以毁伤期望数为主要指标时，消耗同样数量的导弹，对各目标的毁伤期望总数要大于以毁伤价值为主的目标函数，且导弹的火力分配方案也不相同。可见，2 个目标函数不仅意义上不同，实际毁伤效果也不一样，导弹火力分配时，会向价值高的目标倾斜。

3) 在导弹数量和毁伤区间双重约束条件下，以单枚导弹平均毁伤效能最大为主要目标函数。根据毁伤效能指标是毁伤期望数还是最大毁伤价值，单枚导弹最大平均毁伤效能也有 2 种计算标准。以毁伤目标期望数与导弹消耗量的比值为效能指标时，最优解为

$$\begin{bmatrix} 2 & 2 & 0 \\ 2 & 0 & 8 \\ 0 & 0 & 1 \\ 2 & 5 & 1 \end{bmatrix}。$$

此时，对各目标的毁伤概率分别为： $p=[0.525\ 2, 0.500\ 2, 0.500\ 3]$ 。

毁伤期望数为 1.525 7，导弹消耗量为 23。