

doi: 10.7690/bgzd.2024.06.014

## 非饱和打击场景下考虑附带毁伤的火力分配方法

吴巍<sup>1</sup>, 任成坤<sup>2</sup>, 张成<sup>3</sup>, 李超<sup>3</sup>, 熊芬芬<sup>3</sup>, 姜浩舫<sup>3</sup>

(1. 陆军试验训练基地第一试验训练区总体所, 吉林 白城 137001; 2. 西南技术工程研究所, 重庆 400039;  
3. 北京理工大学宇航学院, 北京 100081)

**摘要:** 针对弹药资源不足的非饱和攻击存在或无法确保重要目标达到毁伤预期, 或效率过低不适合工程应用等问题, 提出一种考虑附带毁伤和毁伤约束的火力分配方法。建立集群目标分组策略从而考虑目标的附带毁伤, 提高毁伤概率计算的合理性; 为提高火力分配的求解效率, 将火力分配问题等价转换为 1 维整数规划。通过 2 个仿真算例验证的结果表明: 该方法具备有效性, 且随着问题规模的增加火力分配耗时增加缓慢, 可满足工程应用要求。

**关键词:** 集群目标; 火力分配; 多目标进化算法

**中图分类号:** TJ41 **文献标志码:** A

## Firepower Allocation Method Considering Collateral Damage in Unsaturated Strike Scenario

Wu Wei<sup>1</sup>, Ren Chengkun<sup>2</sup>, Zhang Cheng<sup>3</sup>, Li Chao<sup>3</sup>, Xiong Fenfen<sup>3</sup>, Jiang Haoge<sup>3</sup>

(1. General Office, of No. 1 Experimental Training Area, Army Experimental Training Base, Baicheng 137001, China; 2. Southwest Technology and Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China; 3. School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of non-saturation attack with insufficient ammunition resources, such as being unable to ensure that important targets achieve the expected damage, or being too inefficient to be applied in engineering, a firepower allocation method considering collateral damage and damage constraints is proposed. The grouping strategy of group targets is established to consider the collateral damage of targets and improve the rationality of damage probability calculation. In order to improve the efficiency of firepower allocation, the firepower allocation problem is equivalently transformed into one-dimensional integer programming. Through two simulation examples, the results show that the method is effective, and the time consumption increases slowly with the increase of the problem scale, which can meet the requirements of engineering application.

**Keywords:** group target; firepower assignment; multi-objective evolutionary algorithm

### 0 引言

寻找最有效的火炮武器打击方式, 即在有限的火力资源下尽可能对目标造成更大毁伤效果的同时减少我方弹药消耗, 意义重大。作为其中的关键环节, 武器火力分配也称为武器-目标分配, 是指在已知目标特性和我方杀伤力的情况下, 按照一定的算法将一种或多种导弹最优分配到一类或多类目标, 寻找最有效的打击方式。火力分配本质上为非线性多目标优化决策问题, 通过对打击效果准确评估和打击资源优化配置, 以充分发挥武器系统整体效能, 是提高武器打击效果最廉价的途径之一<sup>[1]</sup>。

早期的火力分配主要为考虑单个优化目标的火力规划, 存在资源浪费、与实际不相符的明显缺陷<sup>[2-3]</sup>, 无法满足现代战争的需求, 所以面向集群的多目标火力分配逐渐成为主流<sup>[4-6]</sup>。这些多目标火力

分配方法可有效权衡毁伤概率、毁伤价值、火力资源消耗等多个指标, 但均假设武器数量远大于目标数量, 也就是针对饱和打击情况建模和设计。现代战争中, 无人作战系统体型小且成本低, 对其实施饱和打击的耗费相对较大, 传统的多目标火力分配模型不再适用。

为此, “毁伤门限”约束被引入后续的火力分配算法中, 将敌方某些关键目标节点的生存概率压制于毁伤门限值以内, 限制其效能的发挥。张凯等<sup>[7]</sup>考虑毁伤门限、安全规避、偏好指派等作战约束, 提出了一种多约束多目标火力分配数学模型; Ma<sup>[8]</sup>提出了一种考虑区域目标、保护对象、毁伤半径、毁伤门限等的约束目标聚类模型。以上研究针对非饱和攻击下如何保证部分重要目标被优先打击做出了一定的探索, 但是导弹对非重要目标的附带毁伤, 以及如何从关键节点中选取更为重要的目标进

收稿日期: 2024-02-21; 修回日期: 2024-03-27

基金项目: 陆军 xxx 预研基金(202020201320-2)

第一作者: 吴巍(1978—), 女, 吉林人。

行打击，在保证其毁伤满足预期的同时，避免在非重要的目标上浪费弹药资源，基本都未考虑，可能会导致得出不合理的火力分配结果。

为解决以上问题，笔者面向陆军远程火箭弹，针对实际中常见的饱和或非饱和打击信息未知情况，提出一种考虑目标附带毁伤和毁伤概率约束的火力分配方法，构建考虑最大化集群目标毁伤概率、最小化目标毁伤概率偏差、最小化用弹量的多目标火力分配模型，并采用 NSGA-III 算法<sup>[9]</sup>进行优化求解。

## 1 多目标火力分配方法

### 1.1 集群目标分组策略

对于一组集群目标，其分布往往稀疏有别，分为稀疏型和密集型混合的集群目标。对于稀疏型集群目标，导弹对某目标的打击不会对其他目标产生影响；但对于密集型集群目标，导弹对集群中某目标的打击会对集群内其他目标带来附带毁伤，某些目标甚至无需对其分配导弹，仅依靠附带毁伤效应即可满足毁伤要求，因此需要在火力分配中考虑该效应。为此，笔者提出一种集群目标分组策略，同一个组内的目标构成一个密集型子集群，组与组之间不考虑对目标的附带毁伤以避免无谓的计算量浪费。通过分组，提高目标毁伤概率的估计精度和效率，为开展更加精确而合理的火力分配奠定基础。

首先，选取当前武器中的最小毁伤幅员作为目标分组判据，将目标按其打击决心从高到低排序，将位于第 1 的目标归入第 1 分组，逐一计算剩余目标与该目标的距离，若小于导弹的毁伤幅员，则该目标归入第 1 分组，记第 1 次分组为  $G_1$ 。然后，将剩余目标同样按其打击决心从高到低排序，将打击决心最高的目标分入第 2 分组，重复与之前相同的步骤，完成第 2 次分组，记为  $G_2$ 。重复上述过程，直至所有目标都已分组，得到  $k$  个分组  $G_1, G_2, \dots, G_k$ 。

### 1.2 火力分配优化建模

#### 1.2.1 设计变量

假设一共有  $m$  个打击目标、 $n$  枚可发射的导弹，则导弹与打击目标可形成如下组合：

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{1n} \\ z_{21} & z_{22} & \cdots & z_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ z_{m1} & z_{m2} & \cdots & z_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： $z_{ij}$  为导弹  $j$  打击目标  $i$  的组合 ( $i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n$ )，为火力分配的设计变量； $z_{ij} \in \{0, 1\}$ ， $z_{ij}=0$  为导弹  $j$  对目标  $i$  不实施打击， $z_{ij}=1$  为实施打击。

#### 1.2.2 目标函数

火力分配的目标函数为目标的整体毁伤概率尽可能大，用弹量尽可能少，同时使得目标实际毁伤概率和预期毁伤概率 (打击决心) 尽可能接近，避免过度毁伤；因此，笔者从最大化毁伤概率、最小化毁伤偏差和最小化武器消耗 3 方面构建目标函数。

##### 1) 最大化毁伤概率。

火力分配的目标函数之一为整体毁伤概率尽可能大：

$$f_1 = \sum_{a=1}^k E_a \quad (2)$$

式中  $E_a$  为分组  $G_a (a=1, 2, \dots, k)$  内所有目标的毁伤概率总成。

假设分组  $G_a$  中包含  $m_a$  个目标 ( $\sum_{a=1}^k m_a = m$ )，对

其分配  $n_a$  枚导弹 ( $\sum_{a=1}^k n_a \leq n$ )， $E_a$  计算如下：

$$E_a = \sum_{i=1}^{m_a} \omega_i P_i = \sum_{i=1}^{m_a} \omega_i \left[ 1 - \prod_j^{n_a} (1 - y_{ij}) \right] \quad (3)$$

式中： $P_i$  为对目标  $i$  的毁伤概率； $y_{ij}$  为导弹  $j$  对目标  $i$  的毁伤概率； $\omega_i$  为对目标  $i$  的打击决心。

若  $z_{ij}=1$ ，有：

$$y_{ij} = p_{ij} \cdot K_{ij} \cdot t_j \cdot r_j \cdot g_i \quad (4)$$

式中： $p_{ij}$  为导弹  $j$  对目标  $i$  的理想毁伤概率，由毁伤评估提前给出。

若  $z_{ij}=0$ ，且导弹  $j$  对分组  $G_a$  内目标  $q$  实施打击 ( $q=1, 2, \dots, i-1, i+1, \dots, m_a$ )，即  $z_{jq}=1$ ，则导弹  $j$  会对目标  $i$  带来附带毁伤，假设服从指数毁伤律，则有：

$$y_{ij} = p_{ij} e^{-|r_i - r_q|^d} \cdot K_{ij} \cdot t_j \cdot r_j \cdot g_i \quad (5)$$

式中： $|r_i - r_q|$  为目标  $i$  和目标  $q$  间的距离； $d$  为人为指定的衰减因子。

式(4)和(5)中： $t_j$  和  $r_j$  分别为导弹  $j$  的突防概率和可靠性； $g_i$  为目标  $i$  所处的地形地貌系数，对火炮的打击效果有很大影响，一般地貌分为高台、斜坡和平原 3 种，分别赋予不同的系数。 $t_j$ 、 $g_i$  和  $r_j$  的取值均会在火力分配前由毁伤评估给出。 $K_{ij}$  取值

由目标是否在导弹射程范围内决定，取值如下：

$$K_{ij} = \begin{cases} 1, & L_j^{\min} \leq L_{ij} \leq L_j^{\max} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

式中： $L_j^{\min}$  和  $L_j^{\max}$  分别为导弹  $j$  的最小和最大射程； $L_{ij}$  为导弹  $j$  所在的发射阵地与目标  $i$  之间的距离。

## 2) 最小化毁伤偏差。

火力分配需要在有限的导弹数量下，尽可能满足对目标打击决心的预期要求，且尽可能保证对毁伤决心高的目标实施打击。考虑如下目标函数：

$$f_2 = \sum_{i=1}^m d_i; \quad d_i = \begin{cases} |P_i - P_i^o|^2, & P_i < P_i^o \\ 0, & P_i \geq P_i^o \end{cases} \quad (7)$$

式中： $P_i$  为当前火力分配方案下对目标  $i$  的实际毁伤概率； $P_i^o$  为目标  $i$  的打击决心。

目标的毁伤概率随着用弹量的增加非线性变化，对于饱和攻击情况，增加一枚导弹，毁伤偏差可能会由略不满足毁伤决心变为明显超出毁伤决心。此时，简单考虑毁伤偏差最小化，优化算法会自动选择毁伤偏差小的分配方案，但此时某些目标的毁伤决心无法保证。式(7)中在最小化毁伤偏差时，仅考虑不满足打击决心时的毁伤偏差。对于非饱和攻击情况，毁伤决心的满足将通过 1.2.3 节中的动态毁伤概率约束进行决策和调整。

## 3) 最小化武器消耗数量。

某组瞄准点满足打击决心要求，但目标的实际毁伤可能远超打击决心；因此，为避免用弹量浪费，考虑如下目标函数：

$$f_3 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n z_{ij} (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

### 1.2.3 约束函数

#### 1) 导弹数量约束。

导弹数量之和不超过总用弹量，同时一枚导弹仅能对一个目标实施打击，则有：

$$\sum_{i=1}^m z_{ij} \leq 1 (j=1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

#### 2) 非饱和攻击下目标毁伤概率约束。

对于非饱和打击，现有方法为保证重要目标的毁伤满足预期，采用循环在依次放弃非重要目标的情况下重复进行火力分配，直至剩余所有目标满足打击决心。该方式涉及需要多次火力分配，计算量较大，无法满足工程应用快速性的需求。笔者提出在火力分配优化模型中动态调整目标的毁伤概率约

束，放弃部分不重要的目标，约束剩余目标使其实际毁伤概率满足打击决心要求。

基于式(3)，根据目标的预期打击决心估计目标  $i$  所需的最大用弹量  $k_i^{\max}$ ：

$$k_i^{\max} = \lg(1 - P_i^o) / \lg(1 - \hat{y}) \text{ (向上取整)} \quad (10)$$

式中  $\hat{y}$  可由式(4)计算得到，计算中  $p_{ij}$ 、 $t_j$  和  $r_j$  取所有导弹对应该目标的  $y_{ij}$  为最小时的值，从而保证  $k_i^{\max}$  枚导弹一定可达到对目标  $i$  的毁伤决心要求。

通过式(10)计算得到所有目标的最大所需用弹量  $K^{\max} = (k_1^{\max}, \dots, k_m^{\max})$ ，对于非饱和攻击显然有  $\sum_{i=1}^m k_i^{\max} > n$ 。对于非饱和攻击，则从打击决心最小的目标开始减少其对应的最大所需用弹量，若其用弹量清零后，仍有  $\sum_{i=1}^m k_i^{\text{new}} > n$  ( $k_i^{\text{new}}$  为目标  $i$  的最大所需用弹量更新后的值)，则继续从打击决心第 2 小的目标减少其最大所需用弹量，依此类推直至  $\sum_{i=1}^m k_i^{\text{new}} = n$ 。基于打击决心，建立目标的毁伤概率约束：

$$P_i \geq P_i^c (i=1, 2, \dots, m) \quad (11)$$

式中  $P_i^c$  计算如下：

$$P_i^c = \begin{cases} P_i^o, & k_i^{\text{new}} = k_i^{\max} \\ 0, & k_i^{\text{new}} < k_i^{\max} \end{cases} \quad (12)$$

通过上式中的约束，确保毁伤决心大的目标一定可以满足毁伤要求，而毁伤决心小的非重要目标则通过优化目标函数，在用弹量尽可能小的情况下尽可能靠近毁伤预期。

### 1.2.4 优化模型及高效求解

基于上述目标函数、约束函数，构建火力分配的优化模型如下：

$$\begin{cases} \text{Find } \mathbf{Z} \\ \text{Max } [-f_1, f_2, f_3] \\ \text{s.t. } (9), (11) \end{cases} \quad (13)$$

为保证全局最优解的获取，采用 PlatEMO 平台的 NSGA-III 算法求解式(13)所示的优化问题，得到火力分配的最佳方案。优化问题为典型的 0-1 整数规划问题，为保证优化效率，将设计变量转化为 1 维向量  $\mathbf{Q} = [q_1, \dots, q_j, \dots, q_n]$ ，其中  $0 \leq q_j \leq m$  且  $q_j \in \mathbb{Z}$  ( $q_j$  为正整数)，表示导弹  $j$  对目标  $q_j$  进行打击(即： $z_{q_j, j} = 1$ )；若  $q_j = 0$ ，则表示该导弹未使用。

通过上述转化，导弹每次只能打击一个目标或不参与打击，自然满足导弹数量的约束式(9)，更重要的是将设计变量的维度从  $m \cdot n$  降低到  $m$ ，且变换后的优化模型为整数规划，极大地提高了优化效率。

转换后的火力分配优化模型如下：

$$\left. \begin{array}{l} \text{Find } Q \\ \text{Max } [-f_1, f_2, f_3] \\ \text{s.t. (11)} \end{array} \right\} \quad (14)$$

### 1.3 火力规划流程

整个火力分配的流程如图 1 所示，首先默认火力分配为饱和式攻击，由于设计变量转化为 1 维向量，已满足了导弹数量约束；因此，先进行不考虑约束式(11)的多目标规划，规划后判断当前分配方案是否对各个目标的毁伤概率  $P_i$  已满足打击决心  $P_i^o$  的要求，即：

$$P_i > P_i^o \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (15)$$

若每个目标的打击决心都已满足，则火力分配完成，输出火力分配方案；若不满足，说明本次分配任务为非饱和式打击，基于式(14)再次进行多目标规划，最终得到火力分配方案。

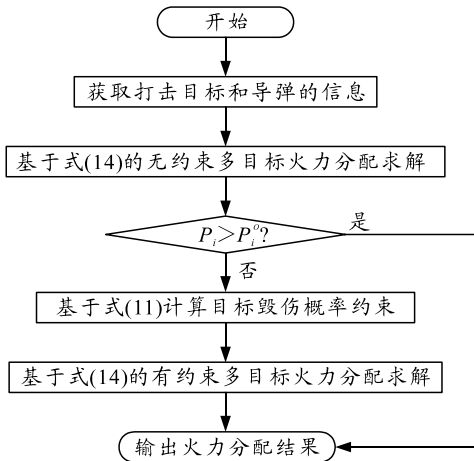


图 1 火力分配流程

## 2 仿真测试

为验证提出的火力分配方法的有效性，设计 2 组仿真测试。测试 1 为传统的饱和式打击，测试 2 为非饱和式打击。

### 2.1 测试算例 1

#### 2.1.1 仿真条件

作战想定如下：假设有 7 个待打击目标，为便于展示，在打击目标处构建直角坐标系  $xoy$ ，选取

所有打击目标的中心点坐标为  $xoy$  坐标系原点， $x$  轴指向正北方， $y$  轴指向正东方，将打击目标的经纬度转化到该直角坐标系中，表 1 展示了这些打击目标的打击决心及所处的地形地貌系数。图 2 为打击目标的分布示意。己方共有 3 个阵地，分别有 8、6 和 6 枚导弹，1—8 号表示阵地 1 中的 8 枚导弹，9—14 号表示阵地 2 中的 6 枚导弹，15—20 表示阵地 3 中的 6 枚导弹。每个阵地只装载一种类型的导弹，同样将阵地的经纬度坐标转化到  $xoy$  坐标系中的坐标，表 2 为导弹参数取值情况。

表 1 目标参数取值

编号	坐标/m	打击决心	地形地貌系数
1	(13.14, -27.38)	0.35	0.89
2	(-46.23, 2.33)	0.50	0.98
3	(-103.55, -20.26)	0.75	0.97
4	(-38.58, -36.19)	0.60	0.85
5	(85.0292, 41.91)	0.05	0.95
6	(80.07, 50.72)	0.65	0.88
7	(10.12, -11.13)	0.45	0.82

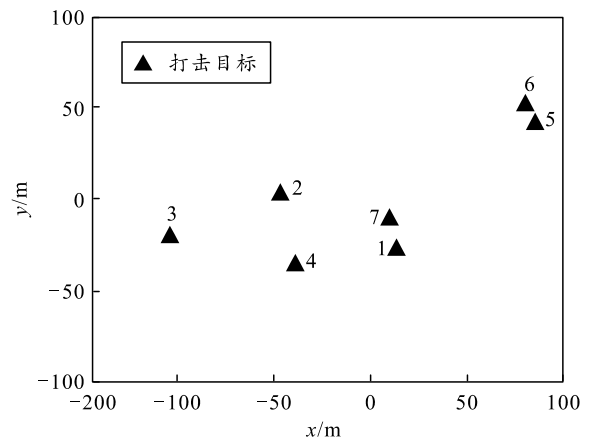


图 2 打击目标分布

#### 2.1.2 仿真结果

目标分组情况如图 3 所示，矩形内的目标表示被分为一组，虚线表示毁伤幅员，从图中可以看出被分到同一组内的目标都处于导弹毁伤幅员的覆盖范围内。表 3 展示了优化后的火力分配方案，导弹一栏表示导弹的编号，目标一栏的数字表示其上面的导弹所打击目标的编号，0 表示导弹不对目标实施打击。表 4 展示了目标的分组情况和该分配方案对每个目标的打击决心和实际毁伤概率以及当前用弹量。从表 3 和 4 可以发现，在总可用弹量为 20 枚的情况下，仅分配了其中的 15 枚导弹就达到了预期的毁伤概率，证明该分配方案在可用弹量充足的饱和攻击情况下的有效性。同时，可以发现并未对目标 3 分配导弹，由于分配给组内其他目标的导弹对目标 3 产生的附带毁伤已完全能满足其打击决

心。对目标 3 和 6 均使用了 3 枚导弹，但达到的毁伤概率却不同，原因是目标 3 分配了 12、14 和 20 号 3 枚导弹，其毁伤概率均为 0.4，而对于目标 6 分配了 1、9 和 18 号 3 枚导弹，其中 1 号导弹来自发射阵地 1，其对该目标的毁伤概率为 0.3。此外，

目标 4 分配了 4 枚导弹才能达到 0.679 1 的毁伤概率，这与分配了 3 枚弹的目标 6 的毁伤概率相近。一方面因为对目标 4 分配的导弹大部分毁伤概率较低(0.3)；另一方面因为目标 4 所处的地形地貌系数为 0.85，而目标 6 为 0.88。

表 2 导弹参数取值

阵地	发射坐标/km	射程/km	突防概率	可靠性	对目标的毁伤概率						
					1	2	3	4	5	6	7
1	(0, -70)	70	0.98	0.99	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
2	(50, -70)	280	0.99	0.99	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
3	(-70, -70)	280	0.99	0.99	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4

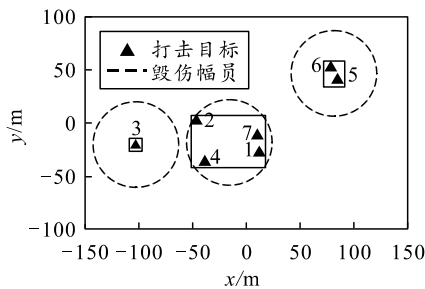


图 3 目标分组情况

表 3 火力分配方案

导弹	1	2	3	4	5	6	7
目标	6	4	0	4	0	0	4
导弹	8	9	10	11	12	13	14
目标	4	6	0	7	3	2	3
导弹	15	16	17	18	19	20	
目标	2	0	7	6	1	3	

表 5 导弹参数

阵地	发射坐标/km	射程/km	突防概率	可靠性	对目标的毁伤概率						
					1	2	3	4	5	6	7
1	(50, -70)	280	0.99	0.99	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
2	(-70, -70)	280	0.99	0.99	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4

2.2.2 仿真结果

表 6 展示了优化后的火力分配方案，表 7 展示了该分配方案对每个目标的期望和实际毁伤概率以及分配的用弹量。

表 6 火力分配方案

导弹	1	2	3	4	5	6
目标	6	3	6	3	4	4
导弹	7	8	9	10	11	
目标	3	2	4	2	6	

从表中可以发现，在非饱和打击情况下，笔者所提出的火力分配方案可有效保证打击决心高的目标的毁伤概率，如目标 2、3、4 和 6；而目标 1、5 和 7 则因为可用弹量不足且打击决心相对较低，火力分配的结果为放弃打击，其所受到的毁伤源于附

表 4 目标的实际毁伤概率和用弹量

分组	目标	打击决心	实际毁伤概率	用弹量
1	3	0.75	0.761 9	3
2	6	0.65	0.680 8	3
	5	0.05	0.066 8	0
3	4	0.60	0.679 1	4
	2	0.50	0.620 8	2
	7	0.45	0.544 8	2
	1	0.35	0.364 9	1

2.2 测试算例 2

2.2.1 仿真条件

选取与算例 1 中相同的打击目标，己方武器数量缩减到 13，考虑 2 个发射阵地，分别有 7 和 6 枚导弹，每个阵地只装载一种类型的导弹。同样将阵地的经纬度坐标转化到  $xoy$  地面直角坐标系。表 5 为导弹参数取值情况。

带毁伤。

表 7 目标的实际毁伤概率和用弹量

分组	目标	打击决心	实际毁伤概率	目标用弹量
1	3	0.75	0.762 0	3
2	6	0.65	0.719 0	3
	5	0.05	0.073 0	0
3	4	0.60	0.703 6	3
	2	0.50	0.620 7	2
	7	0.45	0.022 5	0
	1	0.35	0.023 6	0

2.3 优化效率验证

为验证该方法的求解效率，进一步测试优化求解耗时随着目标数量和导弹数量增加时的变化情况，每个算例的具体优化结果此处不做详细展示，其优化耗时情况如图 4 所示。本文中算例使用的电脑 CPU 为 i5-10400F，内存为 16 G。

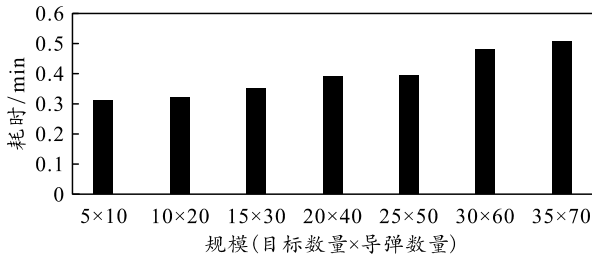


图 4 火力分配优化耗时

从上图可以看出，随着目标数量和导弹数量的增加，虽然设计变量维数显著增加，优化耗时的增长并不明显，进一步证明了所提火力分配方法在实际使用中的可行性。

### 3 结论

考虑导弹对目标的附带毁伤并确保重要目标被优先毁伤，笔者提出一种考虑附带毁伤和毁伤约束的火力分配方法，构建面向集群目标的多目标多约束火力分配模型，设计高效的整数规划求解算法，并通过仿真验证该方法的可靠性和高效性。该方法有如下优势：

- 1) 通过目标之间的距离和弹药毁伤幅员对目标进行分组，组内目标为密集型集群目标，考虑导弹对组内目标打击时对其他目标的附带毁伤，提高火力分配的合理性。
- 2) 针对非饱和和打击，建立动态毁伤概率约束，在保证火力分配效率的同时，优先确保对打击决心高的目标的毁伤概率。
- 3) 通过将火力分配问题等价转换为 1 维整数规划，极大地提高了火力分配的效率，随着计算规

\*\*\*\*\*

(上接第 41 页)

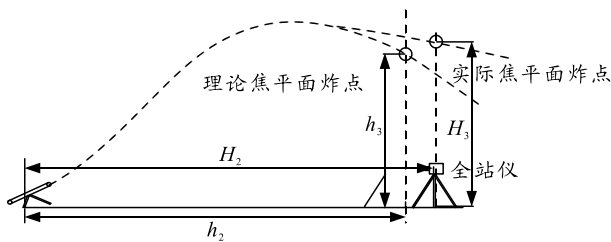


图 5 炸高误差

### 5 结论

笔者通过移轴镜头、景深、分辨率、高速摄影机架设位置之间的关系，结合时间继电器触发摄录得到一种稳定的测试方法。使用该方法可提高专业人员试验水平，测试结论可为相关类型弹药外弹道参数设计提供参考依据。

模的增加，火力规划耗时增长缓慢，可满足实际使用需求。

### 参考文献：

- [1] 刘丙杰, 杨继锋, 史文森. 弹道导弹多目标火力分配方法[J]. 弹箭与制导学报, 2020, 40(4): 37-40.
- [2] 阮旻智, 李庆民, 刘天华. 编队防空火力分配建模及其优化方法研究[J]. 兵工学报, 2010, 31(11): 1525-1529.
- [3] LIANG H T, KANG F J. Adaptive chaos parallel clonal selection algorithm for objective optimization in WTA application[J]. Optik International Journal for Light and Electron Optics, 2016, 127(6): 3459-3465.
- [4] LI Y, KOU Y, LI Z, et al. A modified pareto ant colony optimization approach to solve bi-objective weapon target assignment problem[J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2017: 1746124.
- [5] LI Y, KOU Y, LI Z. An improved nondominated sorting genetic algorithm III method for solving multiobjective weapon-target assignment part I: the value of fighter combat[J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2018(3): 8302324.
- [6] 褚晓庚, 马政伟, 陈行军. 面向多目标优化火力目标分配问题的前瞻式边际贪婪算法[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(10): 2252-2259.
- [7] 张凯, 周德云, 杨振, 等. 多约束集群目标下武器-目标分配问题[J]. 计算机应用, 2020, 40(3): 902-911.
- [8] MA J. Constrained target clustering for military targeting process[J]. Defense Science Journal, 2017, 67(5): 523-528.
- [9] TIAN Y, CHENG R, ZHANG X Y, et al. PlatEMO: A MATLAB Platform for Evolutionary Multi-Objective Optimization[J]. IEEE Computational Intelligence Magazine, 2017, 12(4): 73-87.

### 参考文献：

- [1] 张三喜. 弹道特征参数摄像测量[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 70-74.
- [2] 迟建男. 视觉测量技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 60-67.
- [3] 汤雪志, 王志军, 尹建平, 等. 弹丸速度测量的高速摄影试验研究[J]. 兵器装备工程学报, 2017(12): 167-170.
- [4] 刘华宁, 郑宇, 李文彬, 等. 基于高速摄影技术的速度测量方法[J]. 兵工自动化, 2014, 33(11): 71-74.
- [5] 张三喜, 姚敏, 孙卫平. 高速摄像及其应用技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 131-136.
- [6] 燕频. 摄影摄像基础[M]. 北京: 北京大学出版社, 2013: 87-88.
- [7] 赵嘉. 一本摄影书[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012: 20-24.