

6-4-2020

Artillery Company Firepower Assignment Model and Algorithm

Xuezhi Lü

1. Department of Information Operation & Command Training, National Defense University, Beijing 100091, China;;2. Artillery Training Base of General Staff, Xuanhua 075100, China;

Lisheng Chang

1. Department of Information Operation & Command Training, National Defense University, Beijing 100091, China;;

Xianwen Wang

1. Department of Information Operation & Command Training, National Defense University, Beijing 100091, China;;

Xinhui Zhao

1. Department of Information Operation & Command Training, National Defense University, Beijing 100091, China;;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Artillery Company Firepower Assignment Model and Algorithm

Abstract

Abstract: In view of deficiency of traditional firepower assignment method and characteristics of modern artillery, the model and algorithm of firepower assignment of artillery company were studied. *The firepower assignment problem of artillery company was described, and the resolving concept was discussed. Three firepower assignment modes based on resolving concept were introduced. The idea of getting optimal solution of firepower assignment with Monte Carlo simulation and golden section search were analyzed.* The model and algorithm were validated with an example.

Keywords

artillery, firepower assignment, Monte Carlo simulation, golden section search

Recommended Citation

Lü Xuezhi, Chang Lisheng, Wang Xianwen, Zhao Xinhui. Artillery Company Firepower Assignment Model and Algorithm[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(10): 2276-2281.

炮兵连火力分配模型与算法

吕学志^{1,2}, 常利胜¹, 王宪文¹, 赵新会¹

(1. 国防大学信息作战与指挥训练教研部, 北京 100091; 2. 炮兵训练基地模拟训练中心, 河北 宣化 075100)

摘要: 针对传统火力分配方法存在的不足以及现代火炮的特点, 研究了炮兵连火力分配的模型与算法。描述了火炮连火力分配模型, 探讨了求解思路。在求解思路基础上, 介绍了 3 种火力分配模式。分析了利用蒙特卡洛仿真方法和黄金分割法搜索得到火炮最优的火力分配方案的算法。结合实例验证了模型和算法的正确性。

关键词: 炮兵; 火力分配; 蒙特卡洛仿真; 黄金分割法搜索

中图分类号: E92

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2017) 10-2276-06

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201710007

Artillery Company Firepower Assignment Model and Algorithm

Lü Xuezhi^{1,2}, Chang Lisheng¹, Wang Xianwen¹, Zhao Xinhui¹

(1. Department of Information Operation & Command Training, National Defense University, Beijing 100091, China;

2. Artillery Training Base of General Staff, Xuanhua 075100, China)

Abstract: In view of deficiency of traditional firepower assignment method and characteristics of modern artillery, the model and algorithm of firepower assignment of artillery company were studied. The firepower assignment problem of artillery company was described, and the resolving concept was discussed. Three firepower assignment modes based on resolving concept were introduced. The idea of getting optimal solution of firepower assignment with Monte Carlo simulation and golden section search were analyzed. The model and algorithm were validated with an example.

Keywords: artillery; firepower assignment; Monte Carlo simulation; golden section search

引言

信息化战争条件下的现代战争形势, 给炮兵这一传统火力单位的火力运用方面提出了新的要求和挑战。在新的历史时期, 炮兵日益朝着火炮自行化、打击精确化、弹药多样化、指挥自动化和保障现代化的方向发展。这既为炮兵射击理论的发展提出了客观要求, 又为炮兵射击理论的发展提供了机遇^[1]。

最优火力分配问题是炮兵射击学中的一个重

要问题, 对于合理运用炮兵火力至关重要。对目标射击可以使用集火射击, 也可使用分火射击, 并且集火射击是分火射击的特例。分火射击有一个优化问题: 就是如何将效力射诸元调整 n 个射击诸元, 并把总的发射弹数 N 分配于各射击诸元上, 以便使射击效果获最大值。解决分火射击的优化问题称为最优火力分配, 其本质是得到最优的射向间隔和距离差。当目标性质和地段幅员、诸元误差和散布的表征一定时, 如发射完一定的弹数即停止射击, 则采用最优火力分配方案条件下毁伤程度就是最大的毁伤程度, 如要求达到一定的毁伤程度, 则采用最优火力分配方法条件下所需的弹药消耗量就是最少的弹药消耗量^[2]。该问题有别于武器-目标



收稿日期: 2017-05-20 修回日期: 2017-07-27;
基金项目: 国家自然科学基金(61174156, 61273189, 61174035, 61374179, 61403400, 61403401, 61703412), 军民共用重大研究计划联合基金(U1435218), 中国博士后科学基金(2017M613360);
作者简介: 吕学志(1979-), 男, 河北宣化, 博士, 研究方向为运筹分析与军事智能决策。

<http://www.china-simulation.com>

• 2276 •

分配(WTA)问题,前者属于炮兵射击学领域,考虑的因素有诸元散布、炮弹散布、目标分布、弹药量,优化目标是最大化毁伤概率,得到的是射向间隔和距离差;后者属于军事运筹学领域,考虑的是目标对武器毁伤概率,优化目标是最大化毁伤概率,得到的是武器-目标分配方案,通常可以用规划模型描述,对后者的详细探讨见文献[3]。不过值得注意的是,有许多学者研究了炮兵的武器-目标分配(WTA)问题^[4-5],并将其称为火力分配,这与本文研究的炮兵火力分配是不同的。

传统的最有火力分配问题使用数学解析法,其存在一定不足,具体表现为作了一些不符合实际情况的假设,数学模型较为简单,推导进行了简化,得到的结果存在一定的误差。例如,传统求取最优火力分配的模型是以均匀分布法评定射击效率的数学模型为基础的;最优的射向隔和距离差有时为负数开根号,这显然得不到计算结果,不符合实际情况^[6-9]。此外,现代火炮具有较强的自主作战能力,不再需要组织营、群规模的射击,通常以连为单位进行射击;具有较强的机动能力,可以对装甲步兵部(分)队进行随伴支援;精确打击能力逐步提高,更适于射击小幅员目标。所以,本文将针对现代火炮的特点以及传统炮兵火力分配的不足,探讨如何利用蒙特卡洛仿真方法和黄金分割搜索方法得到炮兵连最优的火力分配方案。

1 问题描述

假设火炮连有 6 门火炮,其射击任务需要最大化覆盖圆形目标区域。该目标区域可以用以原点为圆心 R 为半径的圆描述:

$$T=\{(x, y) | x^2+y^2 \leq R^2\} \quad (1)$$

我们假设炮兵连位于 Y 的负半轴,与目标区域距离较远。第 i 门炮的瞄准点为 $a_i=(x_i^a, y_i^a)$, $i=1, 2, \dots, 6$ 。

假设第 i 门炮发射的一发炮弹的弹着点为 $f_i=(x_i, y_i)$ 。炮弹的毁伤幅员是一个圆心位于 (x_i, y_i) 半径为 b 的圆,即

$$D_i=\{(x, y) | (x-x_i)^2+(y-y_i)^2 \leq b^2\} \quad (2)$$

为了方便,我们运用下以下标记。令集合 S 表示闭合圆形区域, $\langle S \rangle$ 表示区域 S 的面积。例如, $\langle D_i \rangle = \pi b^2$, $\langle T \rangle = \pi R^2$ 。因此,对于给定的一次齐射, $f=(f_1, f_2, \dots, f_6)$, 使用瞄准点 $a=(a_1, a_2, \dots, a_6)$, 我们定义覆盖面积为

$$\Gamma(a, f) = \langle (D_1 \cup D_2 \cup \dots \cup D_6) \cap T \rangle \quad (3)$$

覆盖面积是炮弹毁伤幅员的交集。如图 1 所示。覆盖面积是阴影面积。将上式中的 $\Gamma(a, f)$ 中的 f 去掉,我们定义平均覆盖面积为:

$$\Gamma(a) = E[\Gamma(a, f)] \quad (4)$$

式中: E 是期望符号。

火炮连连火力分配问题是找到一组瞄准点 $a=(a_1, a_2, \dots, a_6)$, 以最大化平均覆盖面积 $\Gamma(a)$, 或者说得到 $\max \Gamma(a)$ 。

我们称其为 Opt1, 令 $a^*=(a_1^*, a_2^*, \dots, a_6^*)$ 为该优化问题的解。我们知道这个问题很难求解。因此,为了求解该问题,我们对瞄准点向量增加一个约束条件 Ω 。因此,假设 a 要从集合 Ω 中选择。那么火炮连火力分配问题(Opt2)为

$$\max_{a \in \Omega} \Gamma(a) \quad (5)$$

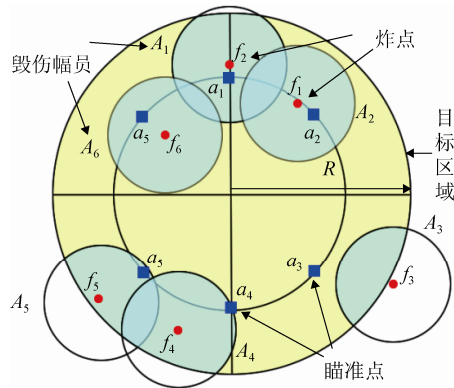
令 a_Ω^* 为问题 Opt2 的解。按照该定义,我们得到

$$\Gamma(a^*) \geq \Gamma(a_\Omega^*) \quad (6)$$

也就是说,使用 Opt2 得到的最大覆盖面积不会超过 Opt1 得到的解。特殊情况下 $a^* \in \Omega$ 。

Opt2 是我们优化的问题。如果我们规定 6 门火炮瞄准点距离相等,且位于一个以目标圆心为圆心、 r 为半径的圆上,那么我们需要找到可能产生最大平均覆盖面积的圆的半径 r^* 。因此,圆的半径 r 是我们选择的参数。受到约束的优化问题会极大地缩小搜索空间。对于 Opt1 问题,优化空间达到了 12 维(共 6 个瞄准点,每个瞄准点有 2 个坐标)。对于 Opt2 问题,需要我们找到一个参数,因此搜索空间由 12 维缩小为 1 维。所以,描述火炮连火力分配问题 Opt2 的公式(2)又可以写为下式:

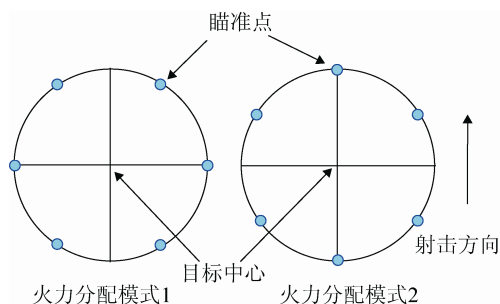
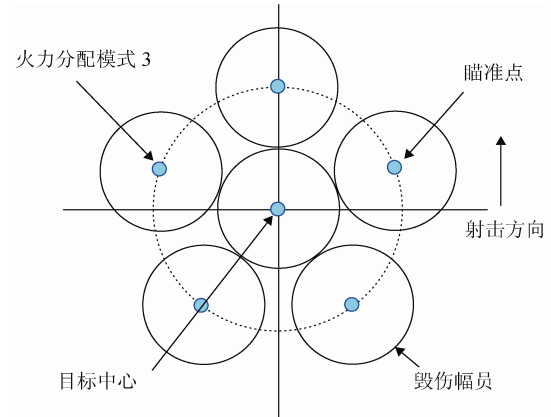
$$\max \Gamma_0(r) \quad (7)$$

图1 覆盖区域示意图
Fig. 1 Coverage area

2 火力分配模式

正如我们前面的讨论, 我们设定的条件 Ω 是假设 6 门火炮瞄准点距离相等, 且位于一个以目标圆心为圆心、 r' 为半径的圆上, 那么必将存在一个最优的圆半径 r^* , 使得覆盖面积最大化。在此约束条件基础上, 我们设计了 3 种不同的火力分配模式, 分别命名为火力分配模式 1、火力分配模式 2、火力分配模式 3。

火力分配模式 1 与火力分配模式 2 是指 6 门炮瞄准点距离相等, 且位于一个圆上的情况, 如图 2 所示。设计这两种模式, 是因为我们认为射击方向可能对火力分配有影响, 火力分配模式 1 旋转 90° 正好与火力分配模式 2 是一样的。为了更好地使炮弹覆盖目标, 我们设计了火力分配模式 3, 这种模式是指 1 门炮瞄准点位于目标区域中心, 其他 5 门炮瞄准点距离相等, 且位于一个圆上的情况, 如图 3 所示。这几种火力分配模式的特点是由一个参数控制, 即圆的半径。我们称这种分配为单参数分配。

图2 火力分配模式1与火力分配模式2示意图
Fig. 2 Firepower assignment pattern 1 and 2图3 火力分配模式3示意图
Fig. 3 Firepower assignment pattern 3

3 求解算法

3.1 黄金分割法搜索

为了得到最优的半径值 r^* , 我们运用黄金分割法搜索作为整个算法的框架。黄金分割法的主要步骤:

- (1) 给定初始点 r_0 、步长 h 和收敛精度 ε 。
 - (2) 用进退法确定函数 $\hat{\Gamma}_0(r)$ 的极小点的一个搜索区间 $[c, d]$ 。
 - (3) 计算 $r_1 = d - \alpha(d - c)$; $r_2 = c + \alpha(d - c)$, 其中 $\alpha = (-1 + \sqrt{5})/2$ 。
 - (4) 比较 $\hat{\Gamma}_0(r_1)$ 和 $\hat{\Gamma}_0(r_2)$ 。
 - (5) 若 $\hat{\Gamma}_0(r_1) \leq \hat{\Gamma}_0(r_2)$ 置 $d = r_2$, $r_2 = r_1$, 求新搜索区间的插入点 $r_1 = d - \alpha(d - c)$, 转到步骤(6); 若 $\hat{\Gamma}_0(r_1) > \hat{\Gamma}_0(r_2)$, 置 $c = r_1$, $r_1 = r_2$, 求新搜索区间的插入点 $r_2 = c + \alpha(d - c)$ 。
 - (6) $d - c < \varepsilon$, 置 $r^* = (c + d)/2$, 转到步骤(7); 否则, 转到步骤(4)。
 - (7) 打印 r^* 和 $\hat{\Gamma}_0(r^*)$, 停止程序执行。
- 黄金分割法程序框图如图 4 所示^[10-11]。

3.2 蒙特卡罗仿真得到平均覆盖面积 $\hat{\Gamma}_0(r)$

6 门炮分别对不同瞄准点进行射击, 射击误差主要分为平均弹着点误差与散布误差。平均弹着点误差主要是由于气象误差、目标位置误差、测地误差、弹道准备误差、技术准备误差以及其他误差组成。散布误差是火炮、弹药、操作和气象等几方面

因素的微小差异影响的综合结果。平均弹着点误差与散布误差都服从二维正态分布。所以, 我们使用了蒙特卡洛仿真方法。

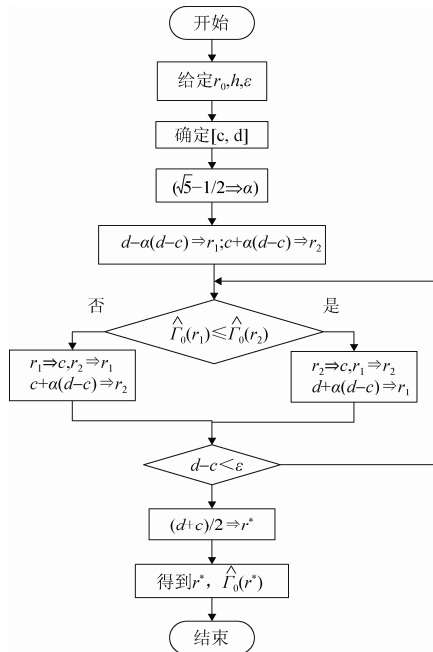


图 4 黄金分割法搜索框图

Fig. 4 Gold section search block diagram

半径为 r 时平均覆盖区域的函数是 $\Gamma_0(r)$ 。为了得到 $\Gamma_0(r)$ 的预测值, 有如下两个步骤:

步骤 1: 随机生成 6 门火炮的弹着点。第 i 门火炮发射炮弹的弹着点坐标 (x_i, y_i) 计算如式(8)。

$$\begin{aligned} x_i &= x_i^a + \delta_D \cdot w_1 + \sigma_D \cdot w_3 \\ y_i &= y_i^a + \delta_R \cdot w_2 + \sigma_R \cdot w_4 \end{aligned} \quad (8)$$

式中: (x_i^a, y_i^a) 是第 i 门火炮的瞄准点坐标, δ_D 与 δ_R 分别是平均弹着点误差的射程标准偏差与方向标准偏差, σ_D 与 σ_R 分别是散布误差的射程标准偏差与方向标准偏差, w_1 与 w_2 分别是正交、相互独立的标准正态分布随机数, 同样, w_3 与 w_4 也分别是正交、相互独立的标准正态分布随机数^[12]。

根据图 2, 对于火力分配模式 1, 1-6 门炮瞄准点 (x_i^a, y_i^a) ($i=1, 2, \dots, 6$) 分别为 $(r, 0)$ 、 $(r \cos(\pi/3), r \sin(\pi/3))$ 、 $(r \cos(2\pi/3), r \sin(2\pi/3))$ 、 $(-r, 0)$ 、 $(r \cos(4\pi/3), r \sin(4\pi/3))$ 、 $(r \cos(5\pi/3), r \sin(5\pi/3))$ 。对于火力分配模式 2, 1-6 门炮瞄准点分别为 $(r \cos(\pi/6), r \sin(\pi/6))$ 、 $(0, r)$ 、 $(r \cos(5\pi/6), r \sin(5\pi/6))$ 、 $(r \sin(7\pi/6), r \cos(7\pi/6))$ 、 $(0, -r)$ 、 $(r \sin(11\pi/6), r \cos(11\pi/6))$ 。

根据图 3, 对于火力分配模式 3, 1-6 门炮瞄准点分别为 $(0, 0)$ 、 $(r \cos(\pi/10), r \sin(\pi/10))$ 、 $(0, r)$ 、 $(r \cos(9\pi/10), r \sin(9\pi/10))$ 、 $(r \sin(13\pi/10), r \cos(13\pi/10))$ 、 $(r \sin(17\pi/10), r \cos(17\pi/10))$ 。

步骤 2: 给定弹着点 $f_1, f_2, \dots, f_6$, 计算第 m 次仿真的观测值 $\Gamma_0^m(r)$ 。由于炮弹毁伤幅员可能重合, 这里我们采用一种虚拟目标法来统计平均覆盖面积。这种方法与像素法仿真很相似^[13]。假设虚拟目标的坐标为 $e_j = (x_i^e, y_i^e)$, $x_i^e \in \{-kp, -(k-1)p, \dots, 0, \dots, (k-1)p, kp\}$, $y_i^e \in \{-kp, -(k-1)p, \dots, 0, \dots, (k-1)p, kp\}$, k 为整数, $kp=R$ 。根据公式(1)和公式(2), 可以判断任何虚拟目标 $e_j = (x_i^e, y_i^e)$ 是否属于 $\cup(D_1 D_2 \cup \dots \cup D_6) \cap T$ 。

$$\Phi(e_j) = \begin{cases} 1, & e_j \in (D_1 \cup D_2 \cup \dots \cup D_6) \cap T \\ 0, & e_j \notin (D_1 \cup D_2 \cup \dots \cup D_6) \cap T \end{cases} \quad (9)$$

$$\Gamma_0^m(r) = \frac{\sum_j \Phi(e_j)}{(2 \cdot k + 1)^2} \quad (10)$$

步骤 3: 转步骤 1, 重复仿真 M 次仿真。

M 次重复仿真之后, 我们可以观察到结果: $\Gamma_0^1(r), \Gamma_0^2(r), \dots, \Gamma_0^m(r), \dots, \Gamma_0^M(r)$ 。我们推测 $\Gamma_0(r)$ 的值为仿真结果的平均值

$$\hat{\Gamma}_0(r) = \frac{\sum_m \Gamma_0^m(r)}{M} \quad (11)$$

4 结果分析

输入数据。炮兵连火炮有 6 门, 某种炮弹在不同射程的平均弹着点误差、散布误差参数如表 1 所示, 对立姿步兵、卧姿步兵和堑壕步兵的杀伤半径分别为 15.6 m, 9.6 m 和 2.5 m。

表 1 误差参数

Tab. 1 Error parameter

参数射程	δ_D	δ_F	σ_D	σ_F
2 000	180.704 5	22.613 9	15.270 8	1.037 8
4 000	78.603 9	23.761 1	20.459 9	2.520 4
6 000	53.341 5	25.678 4	27.279 9	4.447 8
8 000	41.821 1	28.387 4	36.472 0	6.968 2

输出数据。表 2~4 是通过蒙特卡洛仿真和黄金分割法搜索, 得到了某弹种对立姿步兵、卧姿步兵和堑壕步兵的最优火力分配方案。例如表 2 中, 给出了不同目标半径、不同射程条件下, 不同火力分

配方案对应的最优半径值 r ，以及覆盖率比 p (它是实际毁伤幅员与最大毁伤幅员的比，例如目标半径为 50，炮弹毁伤半径为 10，那么 6 门炮的最大毁伤幅员应该为 $6 \times 100 \times \pi$)。

表 2 对立式步兵射击火力分配数据

Tab. 2 Data on the firepower assignment of Standing infantry

目标半径	射程	火力分配模式 1		火力分配模式 2		火力分配模式 3	
		$r(m)$	$p(\%)$	$r(m)$	$p(\%)$	$r(m)$	$p(\%)$
50	2 000	2.80	14.50	2.80	14.60	2.80	14.50
	4 000	2.80	26.50	7.30	26.60	7.30	26.60
	6 000	2.80	31.70	2.80	31.80	4.50	31.90
	8 000	1.70	32.20	2.80	32.20	2.80	32.20
75	2 000	2.60	25.40	2.60	25.40	2.60	25.50
	4 000	2.60	45.40	21.90	45.90	21.90	46.60
	6 000	2.60	53.50	15.10	53.80	15.10	54.10
	8 000	1.60	55.50	2.60	55.60	2.60	55.60
100	2 000	2.10	35.80	3.40	35.80	11.10	35.90
	4 000	32.60	61.70	34.80	62.60	32.60	62.20
	6 000	29.20	69	32.60	69.50	27.10	69.40
	8 000	27.10	69.90	25.70	70.50	29.20	71.50

表 3 对卧姿步兵射击火力分配数据

Tab. 3 Data on the firepower assignment of lying infantry

目标半径	射程	火力分配模式 1		火力分配模式 2		火力分配模式 3	
		$r(m)$	$p(\%)$	$r(m)$	$p(\%)$	$r(m)$	$p(\%)$
50	2 000	1.70	16.20	1.70	16.20	2.80	16.20
	4 000	1.10	33.70	1.10	33.70	1.70	33.70
	6 000	1.70	41.80	2.80	41.90	2.80	41.90
	8 000	1.10	42.20	1.70	42.20	1.70	42.20
75	2 000	1.60	28.40	1.60	28.40	2.60	28.40
	4 000	2.60	54.40	2.60	54.60	9.30	55.10
	6 000	6.80	65.60	13.50	65.90	13.50	65.90
	8 000	0.60	68	1.60	68	2.60	68
100	2 000	20.20	38.30	25.70	38.60	2.10	39.10
	4 000	20.20	70.30	29.20	70.70	9	70.70
	6 000	12.50	80.50	18	80.80	12.50	80.50
	8 000	1.30	83.30	3.40	83.30	9	83.40

表 4 对堑壕步兵射击火力分配数据

Tab. 4 Data on the firepower assignment of infantry in trenches

目标半径	射程	火力分配模式 1		火力分配模式 2		火力分配模式 3	
		$r(m)$	$p(\%)$	$r(m)$	$p(\%)$	$r(m)$	$p(\%)$
50	2 000	1.70	17.50	7.30	17.60	2.80	17.60
	4 000	4.50	39.30	5.60	39.30	6.20	39.50
	6 000	1.70	50.50	2.80	50.40	1.70	50.60
	8 000	10.10	48.80	12.90	48.60	2.80	48.70
75	2 000	2.60	30.50	2.60	30.50	4.20	30.40
	4 000	1.60	61.50	6.80	62	6.80	62.30
	6 000	1.60	75	6.80	75.20	4.80	75.50
	8 000	1	76.30	1.60	76.30	4.20	76.20
100	2 000	23.60	41.20	29.20	40.80	3.40	41.40
	4 000	5.60	79	9	78.70	9	78.80
	6 000	1.30	90.60	2.90	90.60	14.60	89.60
	8 000	11.10	92.60	3.40	92.90	5.60	92.90

5 结论

传统的最有火力分配问题使用数学解析法, 其存在一定不足, 具体表现为作了一些不符合实际情况的假设, 数学模型较为简单, 推导进行了简化, 得到的结果存在一定的误差。例如, 传统求取最优火力分配的模型是以均匀分布法评定射击效率的数学模型为基础的; 最优的射向隔和距离差有时为负数开根号, 这显然得不到计算结果, 不符合实际情况。此外, 传统的火力分配主要针对营或群射击的情况, 而现代自行火炮主要是以连为单位进行自主射击, 对装甲步兵部(分)对进行随伴火力支援, 精确打击能力更强。所以, 本文对火炮连火力分配问题进行了研究。首先, 描述了问题, 探讨了求解思路, 在此基础上给出了 3 种火力分配模式。然后, 利用蒙特卡洛仿真方法和黄金分割搜索法搜索得到火炮最优的火力分配方案。最后, 结合实例计算验证了模型和算法的正确性和有效性。本文提出的方法, 不仅编程实现简单, 而且得到的最优解便于炮兵连实际操作, 既具有一定理论价值, 又具有一定实践价值。今后, 还可以进一步针对其他类型的目标, 火力分配模式, 弹药毁伤幅员随射距离发生变化等情况进行研究内容的拓展, 也可以使用其他智能算法进行研究方法的拓展。

参考文献:

- [1] 赵新生, 刘玉文, 许梅生, 等. 新弹种弹道与射击效率评定 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 2000. (Zhao Xinsheng, Liu Yuwen, Xu Meisheng, et al. Evaluation of Trajectory and Firing Efficiency of New Bombs [M]. Beijing, China: Ordnance Industry Press, 2000.)
- [2] 程云门. 评定射击效率原理 [M]. 北京: 解放军出版社, 1986. (Cheng Yunmen. Principle of Firing Efficiency Evaluation [M]. Beijing, China: People's Liberation Army Press, 1986.)
- [3] 蔡怀平, 陈英武. 武器-目标分配(WTA)问题研究进展 [J]. 火力与指挥控制, 2006, 31(12): 11-15. (Cai Huaiping, Chen Yingwu. The Development of the Research on Weapon-Target Assignment (WTA) Problem [J]. Fire Control and Command Control, 2006, 31(12): 11-15.)
- [4] 李元左, 杨晓段. 炮兵火力分配建模及优化方法 [J]. 指挥控制与仿真, 2015, 37(2): 48-52. (Li Yuanzuo, Yang Xiaoduan. Optimal Assignment Model of Artillery Firepower [J]. Command Control & Simulation, 2015, 37(2): 48-52.)
- [5] 刘琪琳, 张占亮, 马福明. 炮兵火力分配优化方法探析 [J]. 射击学报, 2008, 20(3): 25-26. (Liu Qilin, Zhang Zhanliang, Ma Fuming. Discussion on Optimization Method of Artillery Firepower Allocation [J]. Journal of Firing Society, 2008, 20(3): 25-26.)
- [6] 张平乐, 柳建民, 刘冰, 等. 炮兵射击效率评定(试用) [M]. 宣化: 炮兵指挥学院, 2006. (Zhang Pingle, Liu Jianmin, Liu Bing, et al. Artillery firing efficiency assessment (trial) [M]. Xuanhua, China: Artillery Command College, 2006.)
- [7] 钟宜兴, 刘怡昕. 炮兵射击学 [M]. 南京: 炮兵学院南京分院, 2004. (Zhong YiXing, Liu Yixin. Artillery Shooting [M]. Nanjing, China: Nanjing Branch of Artillery Academy, 2004.)
- [8] 江华, 许梅生, 邱超凡, 等. 炮兵射击基本理论分析[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2004. (Jiang Hua, Xu Meisheng, Qiu Chaofan, et al. Analysis of the basic theory of artillery firing [M]. Beijing, China: Ordnance Industry Press, 2004.)
- [9] 黄建伟. 炮兵火力分配研究及其应用 [D]. 南京: 南京理工大学, 2001. (Huang Jianwei. Study and application of artillery firepower distribution [D]. Nanjing, China: Nanjing University of Science and Technology, 2001.)
- [10] 马昌凤. 最优化方法及其 Matlab 程序设计 [M]. 北京: 科学出版社, 2010. (Ma Changfeng. Optimization method and its Matlab programming [M]. Beijing, China: Science Press, 2010.)
- [11] 罗中华. 最优化方法及其在机械行业中的应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2008. (Luo Zhonghua. Optimization method and its application in the machinery industry [M]. Beijing, China: Electronic Industry Press, 2008.)
- [12] 路航, 石全, 胡起伟, 等. 炮兵营射击的弹着点模拟及射击误差分析 [J]. 指挥控制与仿真, 2011, 33(3): 110-112. (Lu Hang, Shi Quan, Hu Qiwei, et al. Analysis of Firing Error and Simulation of Impact Position of Artillery Battalion [J]. Command Control & Simulation, 2011, 33(3): 110-112.)
- [13] 李秀亮, 张成礼, 王德群, 等. 子母弹射弹散布仿真及其射击效率计算 [J]. 计算机仿真, 2010, 27(1): 9-12. (Li Xiuliang, Zhang Chengli, Wang Dequn, et al. Simulation of Cluster Warhead Projectile Dispersion and Its Firing Efficiency Calculation [J]. Computer Simulation, 2010, 27(1): 9-12.)