

doi: 10.7690/bgzd.2025.03.001

基于 BPSO 的联合火力打击武器目标分配优化

刘 学¹, 王 俊², 张 伟¹, 张跃飞¹

(1. 空军指挥学院研究生大队, 北京 100097; 2. 空军指挥学院作战指挥系, 北京 100097)

摘要: 针对联合火力打击作战筹划的核心内容, 对联合火力打击武器—目标分配 (weapon-target assignment, WTA) 优化问题进行研究。综合考虑武器平台的毁伤能力、数量以及目标的特性等约束性因素, 以最大化打击预期价值收益和最小化打击成本费用为优化目标, 建立武器—目标分配多目标约束优化模型; 采用离散二进制粒子群 (binary particle swarm optimization, BPSO) 算法进行求解, 得到较为理想的联合火力打击武器—目标分配优化方案。结果表明, 该研究可为构建更合理的武器—目标分配优化模型及设计更高效的智能算法提供参考。

关键词: 离散二进制粒子群; 联合火力打击; 武器目标分配; 仿真实验

中图分类号: TJ04 **文献标志码:** A

Joint Fire Strike Weapon Target Assignment Optimization Based on BPSO

Liu Xue¹, Wang Jun², Zhang Wei¹, Zhang Yuefei²

(1. Brigade of Graduate Student, Air Force Command College, Beijing 100097, China;

2. Department of Operation Command, Air Force Command College, Beijing 100097, China)

Abstract: Weapon-target assignment (WTA) is the core content of joint fire strike operational planning, so the optimization of weapon-target distribution of joint fire strike is studied. A multi-objective constrained optimization model of weapon-target allocation is established, in which the constraint factors such as the damage capability and number of weapon platforms and the characteristics of targets are comprehensively considered, and the maximization of the expected strike value income and the minimization of the strike cost are taken as the optimization objectives; The discrete binary particle swarm optimization (BPSO) algorithm is used to solve the problem, and the ideal optimization scheme of weapon-target assignment for joint fire strike is obtained. The results show that the research can provide a reference for building a more reasonable optimization model of weapon-target assignment and designing a more efficient intelligent algorithm.

Keywords: BPSO; joint fire strike; WTA; simulation experiment

0 引言

联合火力打击是联合作战的一种重要作战样式。武器—目标分配 (WTA) 问题是进行作战筹划的核心内容^[1-5]。WTA 问题又称为火力分配问题, 是依据一定的原则, 对多个武器平台和多个目标进行合理匹配, 使得打击效果最佳或者打击成本最低。根据优化目标函数的数量, 又可分为单目标武器—目标分配优化和多目标武器—目标分配优化。现阶段, 多目标武器—目标分配优化更符合实际军事背景, 是军事领域需要重点研究的问题。构建合理、有效的联合火力打击武器—目标优化分配模型以及设计高效的智能算法进行模型求解, 是十分困难和复杂的^[2]。

在联合火力打击中, 潜在打击目标数量较多, 每类目标的性质一般都不相同, 不同类型的武器平台对同一目标进行打击时的毁伤能力也不同; 因此,

在进行目标分配时, 既要考虑目标的特性又要考虑武器平台的毁伤能力和数量等限制性因素。文献[4]综合打击顺序、毁伤等级、威胁、效费比、战损等因素, 考虑目标毁伤状态和火力资源等约束条件, 建立了联合火力打击目标分配问题的多目标优化模型。文献[6]以失败概率最小和使用武器最少为优化原则, 考虑火力平台配置的武器数量为约束条件, 建立了武器—目标分配多目标优化模型。文献[7]以最大化期望毁伤收益和最小化打击成本为目标, 考虑潜在目标是否被列为打击目标和武器平台数量约束, 采用加权法将多目标优化模型转换为单目标全局约束优化模型进行求解。上述文献在建立联合火力打击武器—目标分配优化模型时, 均未将武器平台与打击目标的匹配限制因素作为约束条件, 与实际军事背景有一定的差异。笔者在前述研究的基础上, 将武器平台的数量和毁伤能力以及目标的特性等因素进行综合考虑并作为约束条件, 对联合火力

收稿日期: 2024-07-10; 修回日期: 2024-08-13

基金项目: 全军事类研究生资助课题 (JY2022C167)

第一作者: 刘 学 (1991—), 男, 湖北人, 博士。

打击武器—目标分配优化问题进行研究。

1 联合火力打击武器—目标分配模型构建

1.1 问题描述

在联合火力打击背景^[8]下,我方有 m 类武器平台,第 $i(i=1, 2, \dots, m)$ 类武器平台数量为 m_i ,分布在战场上不同位置,坐标为 (mx_i, my_i) ,毁伤能力以最大杀伤距离 d_i 表示,命中概率为 p_i ,进行一次打击时的平均成本为 c_i 。有 n 个潜在打击目标被列入打击目标清单,同样分布在战场上不同位置,坐标为 $(tx_j, ty_j)(j=1, 2, \dots, n)$,毁伤第 j 个目标的预期价值为 v_j 。需要对武器平台和打击目标进行合理分配,使联合火力打击的预期价值收益最大且平均打击成本最低。

1.2 模型建立

假设对所有目标都要进行打击, $x_{ij}=1$ 表示用第 i 类武器平台对第 j 个目标实施打击,否则 $x_{ij}=0$ 。这样,对第 j 个目标进行打击时,其综合毁伤概率为:

$$P_j = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - p_i x_{ij})。 \quad (1)$$

对 n 个目标都进行打击时的预期价值收益为:

$$V(x) = \sum_{j=1}^n v_j [1 - \prod_{i=1}^m (1 - p_i x_{ij})]。 \quad (2)$$

对第 j 个目标进行打击的第 i 类武器平台数量为:

$$M_i = \sum_{j=1}^n x_{ij}。 \quad (3)$$

对所有目标进行一次打击所需的平均成本为:

$$C(x) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_i x_{ij}。 \quad (4)$$

需要考虑的约束条件:

1) 武器平台的毁伤能力限制,即武器平台与目标之间的距离不能超过其最大杀伤距离。

$$\text{dist}(i, j) \leq d_i \quad (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n); \quad (5)$$

$$\text{dist}(i, j) = \sqrt{(wx_i - tx_j)^2 + (wy_i - ty_j)^2}。 \quad (6)$$

2) 武器平台数量约束,即为目标分配的武器平台数量不能超过其现有数量。

$$M_i = \sum_{j=1}^n x_{ij} \leq m_i \quad (i=1, 2, \dots, m)。 \quad (7)$$

3) 所有目标均要遭受打击,即每个目标至少被分配一个武器平台进行打击。

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} \geq 1 \quad (j=1, 2, \dots, n)。 \quad (8)$$

根据问题描述,建立联合火力打击武器—目标分配多目标约束优化模型:

$$\left. \begin{array}{l} \max V(x) \\ \min C(x) \\ \text{s.t.} \\ \text{dist}(i, j) \leq d_i \quad (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n) \\ \sum_{j=1}^n x_{ij} \leq m_i \quad (i=1, 2, \dots, m) \\ \sum_{i=1}^m x_{ij} \geq 1 \quad (j=1, 2, \dots, n) \end{array} \right\}。 \quad (9)$$

2 离散二进制粒子群(BPSO)算法

上述建立的多目标约束优化模型属于离散组合优化问题^[9],一般形式的粒子群算法无法对其进行求解,因此需要对算法进行改进。BPSO 算法是 J.Kennedy 和 R.C.Eberhart 于 1997 年设计的,旨在解决离散二进制空间组合优化问题,进一步扩展了粒子群算法的应用范围^[10-11]。

BPSO 算法的速度更新公式与一般形式的 PSO 算法没有区别。对每个粒子进行二进制编码,利用速度更新公式对下一代粒子的速度进行更新。

$$v(t+1) = w \cdot v(t) + c_1 \cdot \text{rand}(1) \cdot [pbest(t) - x(t)] + c_2 \cdot \text{rand}(1) \cdot [gbest(t) - x(t)]。 \quad (10)$$

式中: w 为惯性权重; c_1 、 c_2 为学习因子; $v(t)$ 、 $x(t)$ 为粒子在 t 代时的速度和位置; $pbest(t)$ 、 $gbest(t)$ 为粒子在 t 代时寻找到的个体最优位置与全局最优位置。

为将粒子的位置与速度进行关联且只能在 $0 \sim 1$ 进行变化,必须将速度值映射到 $[0, 1]$ 区间,一般选用 sigmoid 函数:

$$s(v_t) = 1 / (1 + \exp^{-v_t})。 \quad (11)$$

式中 $s(v_t)$ 为 $x(t)$ 取 1 时的概率,粒子位置具体赋值公式如下:

$$x(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } \text{rand}(1) \leq s(v_t) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}。 \quad (12)$$

为避免粒子的位置过于靠近 0 或者 1,需要对粒子的速度进行限制,一般设置粒子的最大速度值为 $v_{\max}$,粒子的速度变化区间为 $[-v_{\max}, v_{\max}]$ 。这样粒子位置改变的概率较为均匀,从而增加了粒子寻优的概率。

3 仿真案例分析

假设在一次联合火力打击中，我方有 6 类武器平台，敌方有 5 个潜在打击目标，武器平台和潜在打击目标的相关信息数据(相关数据只为演示用)如表 1 和 2 所示。

表 1 武器平台相关数据

编号	X 坐标/ km	Y 坐标/ km	数量	最大杀 伤距离/ km	命中 概率	平均消 耗成本/ 百万
1	1	10	4	20	0.7	3
2	2	4	6	10	0.9	5
3	5	5	10	11	0.6	4
4	2	1	2	16	0.8	5
5	4	2	5	15	0.9	7
6	5	7	7	13	0.8	6

表 2 打击目标相关数据

目标编号	X 坐标/km	Y 坐标/km	预期价值/百万
1	10	4	1
2	12	3	2
3	14	6	4
4	16	8	5
5	18	2	3

BPSO 算法参数设置：惯性权重 $w=0.9$ ，学习因子 $c_1=2.1$ ， $c_2=2.1$ ，粒子最大速度 $v_{\max}=1.5$ ，粒子数量为 4 000，迭代次数为 100。利用 Matlab 编程实现 BPSO 算法，通过仿真得到 Pareto 前沿解集以及武器平台与目标匹配关系，如图 1 和 2 所示。

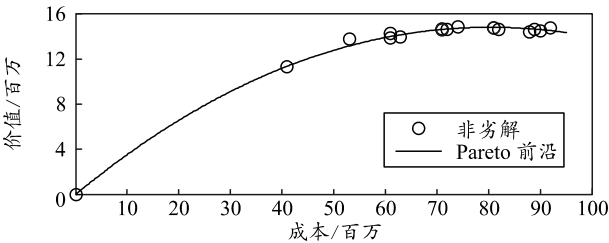


图 1 联合火力打击价值收益与打击成本关系

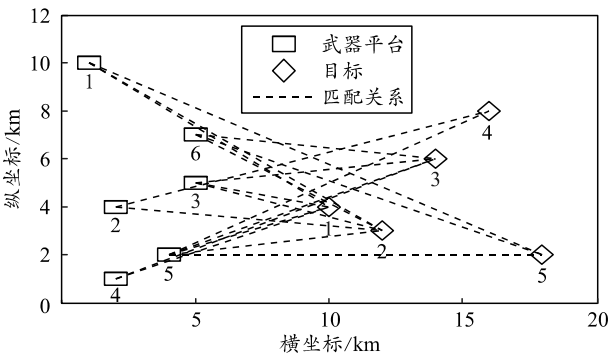


图 2 武器平台与打击目标优化后的匹配关系

由上图 1 和 2 可以看出：通过对传统 PSO 算法进行改进后的 BPSO 算法，可以有效地解决联合火力打击武器—目标分配优化问题。

4 结束语

通过考虑武器平台的毁伤能力、数量及目标的特性等约束性因素，以最大化打击预期价值收益和最小化打击成本为优化目标，建立了联合火力打击武器—目标分配优化模型，并采用 BPSO 算法进行求解，最终得到了较为理想的武器—目标分配方案。笔者考虑的限制因素相对于实战背景还比较简单，下一步需要对构建更加合理的武器—目标分配优化模型以及设计更加高效的智能算法进行深入研究。

参考文献：

[1] 王振宇. 联合火力打击火力分配优化方法研究[J]. 军事运筹与系统工程, 2005, 19(2): 12-17.

[2] 欧阳才超. 联合火力打击目标分配[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2009, 10(3): 50-54.

[3] 倪霄汉. 求解多波次联合火力打击武器—目标分配方案算法研究[J]. 计算机技术与应用, 2017(22): 163-165.

[4] 陈晖. 基于多级协同 MOEA/D 的联合火力打击目标分配方法[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(8): 2942-2949.

[5] 向勇. 联合火力打击中目标分配问题优化模型计算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.

[6] 陈曼. 改进 MOPSO 的联合火力打击目标分配[J]. 火力与指挥控制, 2019, 44(9): 125-130.

[7] 宣贺军. 联合火力打击中武器目标分配问题的多目标优化模型及算法[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2019, 32(4): 664-669.

[8] 田伟. 基于随机时间影响网络的联合火力打击动态武器目标分配问题研究[J]. 指挥控制与仿真, 2020, 42(6): 32-40.

[9] 张勇涛. 基于改进粒子群算法的联合火力打击目标分配研究[J]. 指挥控制与仿真, 2010, 32(1): 41-44.

[10] 贺毅朝. 一种始于求解离散问题的二进制粒子群优化算法[J]. 计算机应用与软件, 2007, 24(1): 157-159.

[11] 刘建华. 离散二进制粒子群算法分析[J]. 南京大学学报(自然科学), 2011, 47(5): 504-514.