



引用格式: 付博雯, 王 鹏, 邱若海, 等. 针对多空中威胁目标的联合火力协同分配打击策略[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(24): 9963-9969
Fu Bowen, Wang Peng, Di Ruohai, et al. Joint fire coordinated distribution strike strategy for multiple aerial threats[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(24): 9963-9969

针对多空中威胁目标的联合火力协同分配打击策略

付博雯, 王 鹏*, 邱若海, 李晓艳, 李嘉伦

(1. 西安工业大学兵器科学与技术学院, 西安 710021; 2. 西安工业大学电子信息工程学院, 西安 710021)

摘 要 威胁评估及火力分配打击是打击决策中的重要环节, 战场环境因素的复杂性、不确定性, 使得现有的威胁评估算法在进行威胁度计算时考虑的因素不够全面, 难以有效支撑火力打击决策环节。因此, 提出一种考虑飞行高度、空中运行姿态、行进速度、携弹数量的多空中威胁因素问题模型, 基于此模型获取火力协同打击策略。利用本文方法解算出在某一任意环境下, 火力系统的最优协同打击策略。通过仿真对比经典粒子群优化算法, 本文算法能够更快收敛, 验证了本文方法的有效性和可靠性。

关键词 目标-武器分配问题建模; 威胁评估; 优化算法; 协同打击; 火力分配; 最优解
中图分类号 TP391.1; **文献标志码** A

Joint Fire Coordinated Distribution Strike Strategy for Multiple Aerial Threats

FU Bo-wen, WANG Peng*, DI Ruo-hai, LI Xiao-yan, LI Jia-lun

(1. Ordnance Science and Technology College, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China;
2. Electronic Information Engineering College, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

[Abstract] Threat assessment and firepower distribution strikes are important links in the decision-making process. The complexity and uncertainty of battlefield environmental factors make existing threat assessment algorithms not comprehensive enough to consider the threat degree calculations, which is difficult to effectively support firepower strike decision Link. Therefore, a multi-air threat factor model was proposed. Factors as flight altitude, air attitude, travel speed and number of carried bombs were taken into consideration. Based on this model, a firepower coordinated strike strategy was obtained. The method was used to calculate the optimal coordinated strike strategy of the firepower system in an arbitrary environment. Compared with the classical particle swarm optimization algorithm through simulation, the algorithm can converge faster, which verifies the effectiveness and reliability of the method.

[Key words] weapon-target allocation problem modeling; threat assessment; optimization algorithm; coordinated strike; firepower allocation; optimal solution

由于世界各国智能化发展迅速, 导致现代战争作战空间具有多维性, 作战单元分布具有复杂性, 使得武器目标分配(weapon-target assignment, WTA)问题成为一个分析战场环境, 进行决策打击必须关注的一个重要问题, 联合作战火力分配打击策略成为现代战争必不可少的重要研究方向。该策略需要准确地对威胁来源目标的属性、威胁环境态势进行分析, 以及合理地对我方防空阵列的打击武器进行分配。WTA 问题分为静态问题和动态问题两种形式, 静态 WTA 问题可以理解为对目标进行单批次的打击, 将武器一次性分配给目标; 动态 WTA 问题可以理解为对目标进行多批次的打击, 下一次的打击方式与上一次打击效果有关^[1-4]。基于此, 针

对静态 WTA 问题进行研究。

20 世纪 80 年代前, 对静态 WTA 问题的求解局限于传统算法, 主要包括隐枚举法、分支定界法、割平面法及动态规划法等。这些算法原理较为简单, 但在程序运行时会耗费大量内存, 并且当目标数量为大数据时, 很难收敛, 一般不用于大型 WTA 问题。20 世纪 80 年代以来, 随着科学技术的发展, 电子计算机行业的进步, 出现了很多启发式搜索的算法, 如人工神经网络、混沌、遗传算法、禁忌搜索及其混合优化策略等, 通过模拟或提示某些自然现象或过程而得到发展, 为解决复杂问题提供了新的思路 and 手段。因为粒子群优化算法的收敛效率以及算法复杂度都对 WTA 有很好的支持, 所以目前

收稿日期: 2020-01-13; 修订日期: 2020-04-08

基金项目: 国家自然科学基金(61671362); 陕西省科技厅重点研发计划(2019GY-022); CEMEE 国家重点实验室基金(CEMEE2020Z0202B)

第一作者: 付博雯(1996—), 男, 汉族, 山西临汾人, 硕士研究生。研究方向: 机器学习及目标分配。E-mail: 313838996@qq.com。

* 通信作者: 王 鹏(1978—), 男, 汉族, 山东泰安人, 博士, 教授。研究方向: 计算机视觉及嵌入式系统。E-mail: wp_xatu@163.com。

投稿网址: www.stae.com.cn

WTA 问题的求解大多是使用粒子群优化 (PSO) 算法^[5-8]。

文献[9]对目标分配问题使用粒子群优化算法,初步探索了将粒子群优化算法使用在 WTA 问题的可行性,但是对 WTA 问题建模中给出的约束条件并不够完全贴合实际,并且算法效率较低;文献[10]采用二进制编码的方法解决了建模中约束条件的漏洞,但是同样没有考虑到敌方威胁目标的威胁程度差异性;文献[11]中利用一位浮点数的个位以及十分位表示武器分配的结果,虽然解决了 WTA 问题收敛的问题,但是速度更新公式并没有一个较好的记忆能力,并且也没有考虑到不同威胁目标的威胁程度差异性。

针对以上问题,对各种影响威胁程度的因素进行分析,对 WTA 问题重新建立模型,将威胁程度作为主要研究方向,使得模型对威胁差异性有更好的描述;同时对各防空阵列对目标的打击概率设立评判标准,分别确定不同情况下不同防空阵列对不同威胁目标的毁伤概率,将以往火力分配算法以及威胁评估标准存在的问题进行改进。

1 武器目标分配问题

1.1 问题描述

为了更加直观地描述 WTA 问题,构建一个假想战场环境,存在空中威胁目标集合 A :

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\} \quad (1)$$

式(1)中:共有威胁目标 n 个; a_j 表示第 j 个($j=1, 2, \dots, n$) 威胁目标(以下简称目标)。

对于威胁目标群,其威胁程度会受到距离我方防空阵列距离、空中运行姿态、行进速度、目标类型的影响,因此对于目标集合内的各个目标,威胁程度并不相同。给定一个威胁程度集合 W :

$$W = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\} \quad (2)$$

式(2)中: ω_j 表示第 j 个威胁目标的威胁程度($j=1, 2, \dots, n$);集合 W 中的元素 ω_j 与威胁目标集合 A 中的元素 a_j 存在映射关系。

除了目标集合外,战场环境中还存在我方防空阵列,防空阵列集合 D :

$$D = \{d_1, d_2, \dots, d_m\} \quad (3)$$

防空阵列中共拥有 m 个火力打击设备,式(3)中 d_i 表示防空阵列中第 i ($i=1, 2, \dots, m$) 个火力打击设备(以下简称设备)。

我方防空阵列中的设备由于距离目标的距离不同、设备的种类不同等因素的影响,用不同的设备对目标的打击效果也不同。可以用概率矩阵 P

表示不同设备对目标的毁伤概率。

$$P = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ p_{m1} & p_{m2} & \cdots & p_{mn} \end{pmatrix} \quad (4)$$

式(4)中: p_{ij} 表示使用 d_i 设备对 a_j 目标进行打击时 a_j 目标的毁伤概率。

对 WTA 问题进行数学描述后,要解决 WTA 问题,实际上就是求目标函数的最优解过程,以打击后的最小生存概率为目标函数,目标函数构建过程如下。

1.2 目标函数建模

用 x_{ij} 表示使用 d_i 设备对 a_j 目标进行打击的状态:

$$x_{ij} = \begin{cases} 0, & d_i \text{ 对 } a_j \text{ 实施打击} \\ 1, & d_i \text{ 不对 } a_j \text{ 实施打击} \end{cases} \quad (5)$$

则矩阵 X 可以表示当前场景我方设备对目标的打击情况:

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{pmatrix} \quad (6)$$

同一时间我方设备最多可以对一个目标实施打击,即矩阵 X 按行求和的每一行的值满足以下条件:

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

任意目标 a_j 被多个设备 d_i 打击后的存活概率为

$$\prod_{i=1}^m (1 - x_{ij} p_{ij}) \quad (8)$$

全体威胁目标在经过我方防空阵列火力打击后的威胁程度为

$$\sum_{j=1}^n \omega_j \left[\prod_{i=1}^m (1 - x_{ij} p_{ij}) \right] \quad (9)$$

最小生存率问题可以归结为:对我方防空阵列进行火力分配使得敌方威胁目标威胁程度最小,即计算式(9)的最小值:

$$\min \left\{ \sum_{j=1}^n \omega_j \left[\prod_{i=1}^m (1 - x_{ij} p_{ij}) \right] \right\} \quad (10)$$

模型的成立条件有以下约束条件。

集合 D 中的设备最大只可对一个 A 中的目标进行火力打击,即式(7)。

上述在约束条件下的数学模型就是要构建的目标函数。

$$\left\{ \min \left\{ \sum_{j=1}^n \omega_j \left[\prod_{i=1}^m (1 - x_{ij} p_{ij}) \right] \right\} \right. \\ \left. \sum_{j=1}^n x_{ij} \leq 1, i = 1, 2, \dots, m \right. \quad (11)$$

2 目标函数各参数确定

在构建出目标函数后,显然威胁程度 ω_j 、毁伤概率 p_{ij} 2个参数是随着场景的改变而变化的,所以以下对这2个参数的取值规则进行设定。

2.1 威胁程度参数设置准则

目标威胁程度即集合 W 中的各元素取值,受到目标类型、飞行高度 H 、空中运行姿态、行进速度 v 、携弹数量 ε 等因素的变化而变化。

其中目标的类型可根据雷达散射截面 RCS (radar cross-section) 参数作为评估标准,RCS 越小表明目标的隐身性能越好,越不容易被我方预警设备发现,目标的突然性就越大,其威胁程度相应的也会越大。以 m^2 为单位时,RCS 对该目标威胁程度 ω_j 评估的影响因子 $k_R = 1 + RCS^{-1.3}$ 。

高度增加,一方面我方预警设备对其目标姿态检测准确率会相应降低,导致目标威胁线性增加,但另一方面敌方目标的高度越高,也会导致敌方造成毁伤的概率降低,导致目标威胁相应降低,据经验值给出准确度衰减模型 $e^{-0.2H}$ 。综上所述,高度 H 对目标影响威胁程度的关系是 $k_H = He^{-0.2H}$ 。

敌方目标飞行速度越大,其到达我方阵地时间也就越短,造成毁伤的可能性也就越大,所以在速度 v 以 km/s 为单位时,威胁程度受到速度影响的关系为 $k_v = 100v^2$ 。

弹体的威胁程度可认为与目标携弹数量 ε 成正比,所以威胁程度受到携弹数量影响的关系为 $k_\varepsilon = \varepsilon$ 。

而对于敌方目标的运行姿态分析,主要是判断敌机的俯角 α ,示意图如图1所示。

若敌方目标俯角 $0^\circ < \alpha < 90^\circ$,目标处于俯冲状态,即可认为目标目前处于进攻姿态,对我方威胁程度较大;若敌方目标处于平稳飞行状态或者是直升状态 $\alpha \leq 0^\circ$,则认为目标当前威胁程度较小。所以威胁程度受到携弹数量影响的关系为

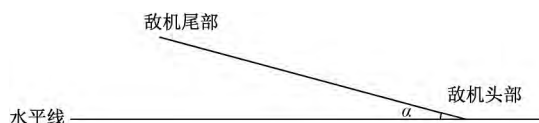


图1 敌方目标俯角示意图

Fig. 1 Enemy target depression angle diagram

$$k_\alpha = \begin{cases} 1, & \alpha \leq 0 \\ 1.2, & \alpha > 0 \end{cases} \quad (12)$$

相乘不用做归一化处理吗?

威胁程度的计算是由以上部分共同组成,可用式(13)计算:

$$\omega_j = k_{c_j} k_R k_H k_v k_\varepsilon k_\alpha \quad (13)$$

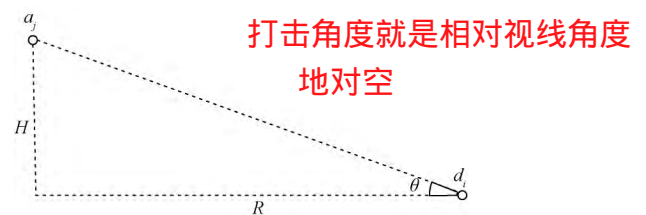
即

$$\omega_j = 100 k_{c_j} \varepsilon k_R H v^2 e^{-0.2H} (1 + RCS^{-1.3}) \quad (14)$$

式中: k_{c_j} 为常数。

2.2 毁伤概率参数设置准则

不同设备对不同目标进行打击的毁伤概率受到设备的打击角度 θ 、目标飞行高度 H 、目标与设备的径向距离 R 等因素的变化而变化。打击示意图如图2所示。



打击角度就是相对视线角度
地对空

图2 防空设备对威胁目标打击示意

Fig. 2 Air defense equipment against threat targets

为了对 P 有一个合理描述,确定 P 取值准则如下。

2.2.1 打击角度影响

通过查阅文献已知防空设备最优打击角度 θ 为 40° ,并且打击效果与打击角度的函数曲线关系满足均值为40,标准差为40的正态曲线,所以各角度的毁伤概率影响度为

$$P_\theta = \frac{96}{\sqrt{2\pi}40} \exp \left[-\frac{(\theta - 40)^2}{240^2} \right] \quad (15)$$

2.2.2 径向距离影响

设备打击目标的概率随着目标与设备之间径向距离 R 的增加而减少,通过经验可知其衰减模型为

$$P_R = \exp(-0.1R) \quad (16)$$

由于 $R = H \cot \theta$,所以此处径向距离 R 用 H 的表达式来计算。

综上所述,设备对目标的毁伤概率为

$$P_{ij} = \lambda_{\theta ij} P_{\theta ij} + \lambda_{R ij} P_{R ij} \quad (17)$$

即

$$P_{ij} = \lambda_{\theta ij} \frac{96}{\sqrt{2\pi}40} \exp \left[-\frac{(\theta - 40)^2}{2 \times 40^2} \right] + \lambda_{R ij} \exp(-0.1H \cot \theta) \quad (18)$$

式中: $\lambda_{\theta ij}$ 、 $\lambda_{R ij}$ 分别为打击角度与径向距离的影响权重,存在约束条件 $\lambda_{\theta ij} + \lambda_{R ij} = 1$ 。

3 利用改进的粒子群优化算法进行寻优计算分析

经过以上建模及准则确定过程后,求解目标函数的过程实际上就是求最优解的过程。利用优化算法即可完成上述求解过程。目前广泛使用的优化算法(如遗传算法、鱼群算法、粒子群优化算法)大部分都是对连续函数进行求解。但是 WTA 问题时非线性组合优化问题,属于多项式复杂程度的非确定性问题(non-deterministic polynomial complete, NP)经典算法不能直接用来求解该问题,所以在粒子群优化的算法基础上,提出一种改进的离散混沌粒子群优化算法(DCPSO)。

3.1 经典粒子群优化算法

粒子群算法是由 Eberhart 和 Kennedy 在 1995 年提出的一种优化算法,它来源于鸟类觅食的行为,它的基本原理是:每个优化问题的可能解都可以想象成搜索空间上的一个点,称为粒子,所有的粒子都可以代入目标函数求解出适应度值,每个粒子还会通过运动来寻优,这个运动过程中决定它们运动方向和距离的量较作速度,然后粒子们就追随当前的最优粒子在解空间中搜索。算法的运行流程如图 3 所示。

粒子速度位置更新可用式(20)、式(21)表示。

速度更新:

$$V_{id}^{k+1} = \omega V_{id}^k + C_1 \text{rand}(0,1) (P_{id}^k - X_{id}^k) + C_2 \text{rand}(0,1) (P_{gd}^k - X_{id}^k) \quad (19)$$

位置更新:

$$X_{id}^{k+1} = X_{id}^k + V_{id}^{k+1} \quad (20)$$

式中: ω 为保持原来速度的系数,称为惯性权重; C_1 为粒子跟踪自己历史最优值的权重系数,它表示粒子自身的认识,所以被答为认知; C_2 为粒子跟踪群体最优值的权重系数,它表示粒子对整个群体知识的认识,所以被称为社会知识,经常社会; X_{id}^k 为粒

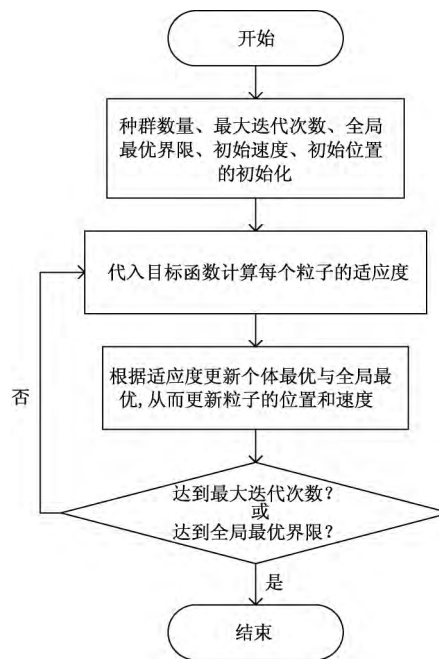


图3 粒子群优化算法流程图

Fig. 3 Particle swarm optimization algorithm flowchart

子第 k 次迭代的位置; P_{id}^k 为粒子第 k 次迭代后的个体最优解所在的位置; P_{gd}^k 为粒子第 k 次迭代后的群体最优解所在的位置。

3.2 改进的离散混沌粒子群优化算法

由于 WTA 问题的解为矩阵 X ,而全局最优解所在位置 P_{gd}^k 与局部最优解所在位置 P_{id}^k 与当前位置 X_{id}^k 做差运算可能会造成矩阵 X 的某行同时出现多个值为 1 的情况,不满足模型中约束条件 $\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq 1 (i = 1, 2, \dots, m)$ 。因此提出一种改进的离散混沌粒子群优化算法(DCPSO),其中针对有约束的矩阵速度、位置更新过程如图 4 所示。

由于最优解 X 为矩阵,显然对每一个粒子来说,运动速度 V 也是矩阵,利用以下步骤求解速度

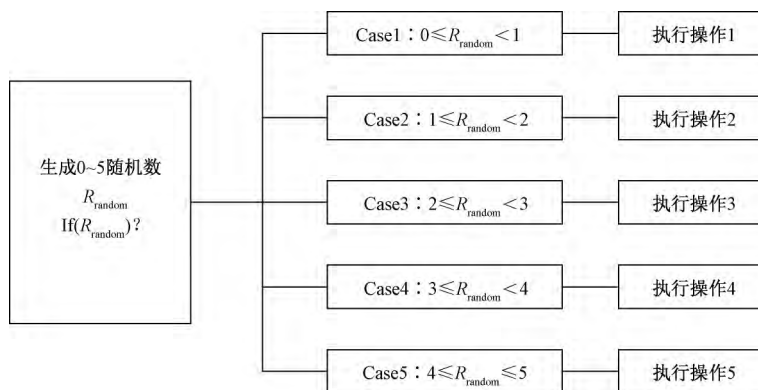


图4 速度、位置更新方式

Fig. 4 Speed and position update method

矩阵 V 。

Step 1 生成随机数 R_{random} 。

每次循环生成一个取值在 $0 \sim 5$ 的随机数 R_{random} 。

Step 2 对 R_{random} 进行判断。

将区间 $[0, 5]$ 分为 5 个部分: Case 1: $[0, 1)$; Case 2: $[1, 2)$; Case 3: $[2, 3)$; Case 4: $[3, 4)$; Case 5: $[4, 5]$ 。并判断 R_{random} 所处的区间。

Step 3 对不同区间进行不同操作。

寻找当前种群各粒子位置 $X^n\{k\}$ 中 $x_{ij} = 1$ 的位置(假设存在位置 $i = a, j = b$, 使 $x_{ab} = 1$); 用 v_{ab} 表示在 $i = a, j = b$ 处的粒子速度更新步长。对每一行分别进行以下操作。

Case 1 $0 \leq R_{\text{random}} < 1, v_{ab} = -1, v_{a, b-2} = 1$, 其他元素全部取 0。

Case 2 $1 \leq R_{\text{random}} < 2, v_{ab} = -1, v_{a, b-1} = 1$, 其他元素全部取 0。

Case 3 $2 \leq R_{\text{random}} < 3$, 矩阵所有元素全部取 0, 即 $v_{ij} = 0$ 。

Case 4 $3 \leq R_{\text{random}} < 4, v_{ab} = -1, v_{a, b+1} = 1$, 其他元素全部取 0。

Case 5 $4 \leq R_{\text{random}} \leq 5, v_{ab} = -1, v_{a, b+2} = 1$, 其他元素全部取 0。

Step 4 对错误矩阵进行处理。

在上述过程中,可能会出现 $b-2, b-1, b+1, b+2$ 列超出矩阵索引的情况,所以对这些列进行剪枝操作,把可能超出矩阵索引的列的速度更新公式进行重新改写,避免可能出现的超维问题。

经过以上 4 个步骤,即可得到速度更新矩阵 V^{k+1} 中的全部元素。

Step 5 更新位置。

利用位置更新公式 $X^{k+1} = X^k + V^{k+1}$ 更新下一代粒子的位置,然后按照经典粒子群优化算法计算对应适应度并且更新局部最优解与全局最优解,再经过经典算法中的判断条件,不满足跳出条件继续重复上述步骤直至满足跳出条件为止。

4 实验与分析

4.1 实验环境介绍

为了测试算法可行性及性能,本文算法在实验平台进行仿真运行。实验平台采用操作系统: Windows 10 教育版; CPU: Intel (R) Core (TM) i7-8750H CPU @ 2.20 GHz; 运行内存 (RAM): 8.00 GB; GPU: NVIDIA GTX 1050Ti; 仿真软件: MATLAB R2016a。在以上环境中运行代码。为了验证算法的可行性,假定了一个战场环境进行

仿真实验。

4.2 虚拟仿真环境构建

假设战场环境存在敌方空中威胁目标集合 A :

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_9\} \quad (21)$$

在集合内共有威胁目标 9 个,由于其型号、位置、状态的不同导致威胁目标的威胁程度不同,在计算威胁程度之前,先给定威胁目标的状态如表 1 所示。

由式(15)计算得到不同敌方威胁目标的威胁程度如表 2 所示。

此外还存在我方防御阵列集合 D :

$$D = \{d_1, d_2, \dots, d_{10}\} \quad (22)$$

共有火力打击设备 10 个,各个打击设备对各个威胁目标的打击角度 θ 如表 3 所示。

由式(19)计算得到的毁伤概率如表 4 所示。

表 1 威胁目标状态

Table 1 Threat target status					
威胁目标	k_R	H/km	$v/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	RCS/m^2	ε
a_1	1	13.45	0.302	10	1
a_2	1.2	12.11	0.241	13	2
a_3	1.2	10.87	0.203	25	3
a_4	1	14.26	0.268	20	2
a_5	1	9.77	0.310	36	4
a_6	1.2	4.58	0.287	17	2
a_7	1	7.96	0.307	22	4
a_8	1	15.27	0.278	10	1
a_9	1.2	6.33	0.292	15	2

表 2 敌方威胁目标威胁程度

Table 2 Enemy threat target threat level					
威胁目标	威胁程度	威胁目标	威胁程度	威胁目标	威胁程度
a_1	8.74	a_4	12.07	a_7	62.17
a_2	15.51	a_5	53.72	a_8	5.85
a_3	18.62	a_6	37.14	a_9	37.60

表 3 打击设备对各威胁目标打击角度

Table 3 Angle of attack equipment against each threat target									
防御	$\theta /(^{\circ})$								
	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9
d_1	23	45	56	13	56	41	45	36	39
d_2	41	23	25	31	23	35	64	45	35
d_3	38	43	34	43	31	39	18	26	18
d_4	62	12	46	13	36	27	43	36	31
d_5	14	63	40	39	45	43	23	31	41
d_6	18	33	40	27	64	64	24	56	43
d_7	36	64	47	18	36	30	36	39	45
d_8	35	25	56	23	35	64	24	64	50
d_9	33	53	36	24	18	39	56	35	56
d_{10}	42	45	56	39	13	45	23	64	17

表4 火力打击设备对敌方威胁目标毁伤概率
Table 4 Probability of damage to enemy targets by fire strike equipment

防御	设备对目标的毁伤概率 P								
	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9
d_1	0.46	0.62	0.68	0.38	0.70	0.77	0.70	0.54	0.71
d_2	0.58	0.47	0.49	0.51	0.49	0.73	0.74	0.58	0.68
d_3	0.57	0.61	0.57	0.59	0.57	0.76	0.45	0.47	0.48
d_4	0.66	0.38	0.65	0.38	0.61	0.66	0.69	0.54	0.64
d_5	0.39	0.68	0.62	0.56	0.66	0.78	0.51	0.51	0.72
d_6	0.42	0.55	0.62	0.48	0.71	0.80	0.53	0.62	0.73
d_7	0.55	0.68	0.65	0.42	0.61	0.69	0.64	0.55	0.74
d_8	0.55	0.48	0.68	0.45	0.60	0.80	0.53	0.64	0.76
d_9	0.53	0.65	0.59	0.46	0.44	0.76	0.73	0.53	0.77
d_{10}	0.59	0.62	0.68	0.56	0.39	0.79	0.51	0.64	0.47

4.3 仿真结果

将目标函数数学表达式输入仿真平台,再分别用改进型离散粒子群算法(IDPSO) 与提出的DCPSO 算法对目标函数进行最优求解; 得到全局最优解与迭代次数的关系如图5 所示。

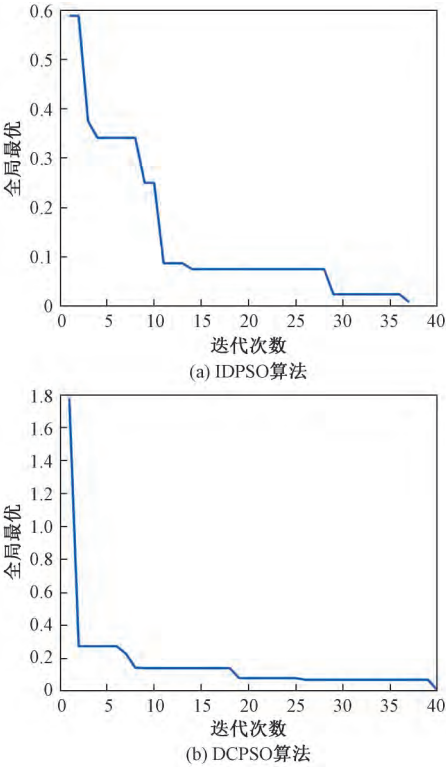


图5 两算法全局最优解与迭代次数关系

Fig. 5 The relationship between the each algorithm's global optimal solution and the number of iterations

算法运行得到待优化最优解 X :

$$X = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (23)$$

根据图5、式(23) 可以看出, 2 种算法都可以收敛在同一个解, 但是 IDPSO 算法的寻优过程用了120 代, 而使用改进的 DCPSO 算法寻优过程用了60 代左右, 算法的效率比之前算法提升了50% 。

5 结论

提出了一种针对空中威胁目标的联合火力分配打击问题的策略, 从数学模型入手, 构建目标函数, 经过改进的离散混沌粒子群优化算法(DCPSO) 对目标函数进行优化。通过仿真可以看出, 优化的效果可以满足求解 WTA 问题。该方法为以离散矩阵作为目标函数解的问题提供了一种行之有效的办法, 补足了粒子群算法在离散领域的空缺, 对火力分配算法以及威胁评估标准存在的问题进行了改进, 具有很大的实用价值。但是算法目前还存在内存占用率高的问题需要解决。

参 考 文 献

1 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.
Chu Xiaogeng, Ma Zhengwei, Chen Xingjun. Prospective marginal greedy algorithm for multi-objective optimization firepower target assignment problem[J]. System Engineering and Electronic Technology, 2019, 41(10) : 2252-2259.
2 Shalunov V, Shima T. Weapon-target-allocation strategies in multi-agent target-missile-defender engagement [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2017, 40(10) : 2452-2464.
3 Kline A G, Ahner D K, Lunday B J. Realtime heuristic algorithms for the static weapon target assignment problem[J]. Journal of Heuristics, 2019, 25(3) : 377-397.
4 Kalyanam K, Rathinam S, Casbeer D, et al. Optimal threshold policy for sequential weapon target assignment [J]. IFAC Papers on Line, 2016, 49(17) : 7-10.
5 夏 维, 刘新学, 范阳涛, 等. 基于改进型多目标粒子群优化算法的武器-目标分配[J]. 兵工学报, 2016, 37(11) : 2085-2093.
Xia Wei, Liu Xinxue, Fan Yangtao, et al. Weapon-target assignment based on improved multi-objective particle swarm optimization algorithm [J]. Journal of Ordnance Engineering, 2016, 37(11) :

- 2085-2093.
- 6 李欣然,樊永生. 求解武器目标分配问题的改进粒子群算法[J]. 火力与指挥控制, 2014, 39(12): 58-61.
Li Xinran, Fan Yongsheng. Improved particle swarm optimization algorithm for solving weapon target assignment problem[J]. Firepower and Command Control, 2014, 39(12): 58-61.
 - 7 王 邑,孙金标,肖明清,等. 基于类型2 区间模糊 K 近邻分类器的动态武器-目标分配方法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(6): 1314-1319.
Wang Yi, Sun Jinbiao, Xiao Mingqing, et al. Research on dynamic weapon-target assignment method based on type 2 interval fuzzy K -nearest neighbor classifier[J]. System Engineering and Electronic Technology, 2016, 38(6): 1314-1319.
 - 8 Kline A G, Ahner D K, Lunday B J. Realtime heuristic algorithms for the static weapon target assignment problem[J]. Journal of Heuristics, 2019, 25(3): 377-397.
 - 9 高 尚,杨静宇. 武器-目标分配问题的粒子群优化算法[J]. 系统工程与电子技术, 2005(7): 1250-1252, 1259.
Gao Shang, Yang Jingyu. Particle swarm optimization algorithm for weapon-target assignment problem[J]. System Engineering and Electronic Technology, 2005(7): 1250-1252, 1259.
 - 10 王小艺,刘载文,侯朝桢,等. 防空武器多目标优化分配建模与决策[J]. 兵工学报, 2007(2): 228-231.
Wang Xiaoyi, Liu Zaiwen, Hou Chaozhen, et al. Modeling and decision-making of multi-objective optimal allocation of air defense weapons [J]. Journal of Ordnance Engineering, 2007 (2): 228-231.
 - 11 范成礼,邢清华,郑明发,等. 基于 IDPSO 的武器目标分配优化算法[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(2): 336-342.
Fan Chengli, Xing Qinghua, Zheng Mingfa, et al. IDPSO-based weapon target allocation optimization algorithm [J]. System Engineering and Electronic Technology, 2015, 37(2): 336-342.