

doi: 10.7690/bgzdh.2021.08.018

两栖作战中的火力协同规划模型

刘 林, 黄炎焱, 陈天德, 孙鹏耀
(南京理工大学自动化学院, 南京 210094)

摘要: 针对两栖作战过程中多火力装备协同作战时火力与目标的分配效能问题, 根据对每种火力装备的毁伤效果评估, 通过战场信息评估待打击目标的威胁程度, 建立以最大化毁伤收益为目标函数的数学模型, 阐明火力协同规划问题的基本目标函数及其约束条件, 采用模拟退火算法对该模型进行求解, 对模拟退火算法产生新解的过程进行改进, 并通过案例进行 Matlab 仿真分析。结果表明, 该模型具有较好的可行性和有效性。

关键词: 火力协同规划; 目标分配; 改进模拟退火算法

中图分类号: TJ02 **文献标志码:** A

Firepower Cooperative Planning Model in Amphibious Operations

Liu Lin, Huang Yanyan, Chen Tiande, Sun Pengyao

(School of Automation, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Aiming at the problem of firepower and target distribution efficiency in the cooperative operation of multiple firepower equipment in the process of amphibious operations, according to the damage effect evaluation of each firepower equipment, the threat degree of the target to be hit is evaluated by battlefield information. A mathematical model with the objective function of maximizing damage income is established. The basic objective function and constraint conditions of the firepower collaborative planning problem are expounded, the simulated annealing algorithm is used to solve the model, the process of generating a new solution of the simulated annealing algorithm is improved, and the Matlab simulation analysis is carried out through a case. The results show that the model is feasible and effective.

Keywords: firepower collaborative planning; target allocation; improved simulated annealing algorithm

0 引言

现代两栖抢滩登陆作战前, 需要对登陆滩头火力点目标进行压制性打击。考虑到打击的目标多样, 重要性不一, 要有效均衡地形成先期打击, 需要火力支援部队采用多种武器装备进行协同打击, 为此需要开展火力协同规划, 确保最大化的发挥各武器的作战效能, 以减小我方伤亡。

关于两栖作战火力协同规划的研究, A. B. Goderstad 等^[1]针对一体化协同作战过程中作战任务优先级的的问题, 运用质量功能展开法进行研究, 得出了作战任务的优先级与火力装备需求之间的函数关系; 杨华东等^[2]针对海上协同作战问题, 提出了兵力行动计划和火力机动方案等规划要素的设计方法, 设计了火力规划系统框架及其工作流程; 蒋里强等^[3]针对防空兵兵力分区问题, 建立了一个消灭敌空袭兵器数量的数学期望的线性规划模型, 并用 Lingo 软件求解, 得到防空兵兵力分区的最佳方案; 欧建军等^[4]针对协同空战中的目标分配问题, 引入了偏好规划理论, 建立协同空战的目标分配模

型, 并得到了较好的仿真结果; 董树军等^[5]针对一体化联合作战问题, 建立了机会约束兵力规划模型, 并基于随机模拟遗传算法求解模型, 不足之处是没有考虑到武器的毁伤效能问题; 孔祥宇等^[6]引入博弈论的思想, 对防空兵力的部署问题建立博弈模型, 并利用粒子群算法求解模型的纳什均衡点, 求解出作战双方的混合策略; 向勇^[7]针对联合火力打击中目标分配问题, 建立模型并采用双种群协同进化遗传算法进行求解, 得到了较好的分配方案; 聂魏岳等^[8]针对联合火力打击的效能问题, 构建了联合火力打击作战信息保障效能评估指标体系, 并提出了提高联合火力打击作战信息保障能力的措施。

尽管关于火力协同规划的问题已有多年的研究历程, 但从目前已有的研究成果来看, 仍存在一些问題, 例如火力分配问题的求解困难, 模型不能反映战场实际态势等。笔者在前人研究的基础上, 对每种火力装备的毁伤效能进行量化分析, 通过多种衡量指标对打击目标进行威胁性评估, 模拟实际战场的态势分析, 建立客观且反映战场实际的数学模

收稿日期: 2021-04-22; 修回日期: 2021-05-21

基金项目: 装备预研重点实验室基金(6142101200109)

作者简介: 刘 林(1997—), 男, 江西人, 硕士, 从事系统仿真与建模研究。E-mail: 1689477380@qq.com。

型,并通过仿真实验验证该模型的可行性与有效性。

1 问题建模

以两栖登陆作战阶段的火力协同规划为背景,协同作战火力装备类型众多,包括陆军火力、空军火力、海军火力、火箭军火力,其中陆军火力体系分析可分为突击火力、压制火力、反坦克火力、防空火力、保障火力等。敌方目标体系同样纷繁复杂,按性质可分为车辆类目标、有生力量和工事障碍类目标;按形状可分为点状目标、线状目标和面积目标等。如图 1 所示,假设有两栖作战火力装备列表为 $N = \{N_1, N_2, N_3, \dots, N_n\}$, 假定待打击的目标为 $A = \{A_1, A_2, A_3, \dots, A_n\}$ 。

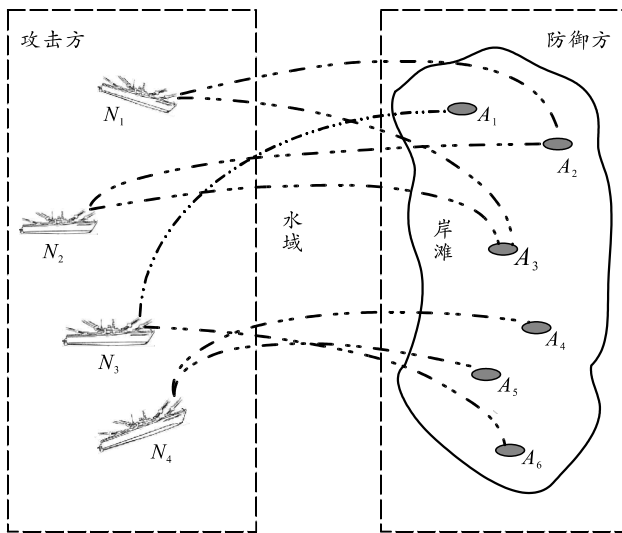


图 1 两栖抢滩阶段作战

结合武器的毁伤以及目标的威胁程度建立火力协同规划模型, 总体模型框架如图 2 所示。

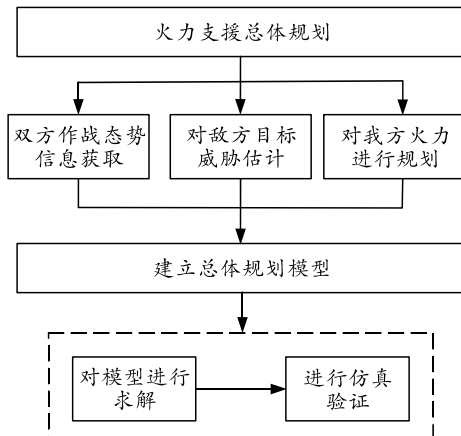


图 2 总体模型框架

1.1 火力毁伤模型

假设火力装备 N_i 的可射击次数为 M_i , 当火力装备 N_i 攻击目标 A_j 时, 命中的概率为 p_{ij} 。由于一

次射击只能瞄准一个目标, 引入变量 x_{ij}^k , 用于描述火力装备的攻击目标, 当火力装备 N_i 的第 k 次射击的目标为 A_j 时, $x_{ij}^k = 1$, 否则 $x_{ij}^k = 0$ 。通过以上背景描述, 可以根据联合概率分布计算出单个目标受到单一火力装备攻击的概率。

当使用任意单一火力装备 N_i , 其射击次数为 M_i 时, 某个目标 A_j 被命中概率为:

$$P_{ij} = 1 - \prod_{k=1}^{M_i} (1 - x_{ij}^k p_{ij}) \quad (1)$$

式中, 只有当 $x_{ij}^k = 1$, 即在某次射击必须满足的目标为 A_j 才有可能命中。

根据式(1)的结论, 可以得到目标 A_j 被命中的概率, 而在实际作战中, 被不同的弹药命中所带来的毁伤效果是不同的; 因此, 必须知道每个火力装备弹药的毁伤效果。常见的毁伤方式有弹道爆炸产生的冲击波、弹药碎片和瞬间释放的热量等。

在两栖登陆作战环境下, 即黏土或沙土地面, 弹药冲击波的压强计算公式^[9]为:

$$S_C = \frac{1.02}{R} + \frac{3.99}{R^2} + \frac{12.6}{R^3} \quad (2)$$

式中

$$R = r / \sqrt[3]{Q} \quad (3)$$

式中: Q 为弹药的 TNT 当量, kg; r 为目标距离爆炸中心的距离, m; 计算结果 S_C 的单位为 Pa。

弹药爆炸时产生的热量常用热辐射通量衡量, 即单位时间、单位面积发射的热能, 其计算公式为

$$S_Q = 1.253 \times 10^{-7} T^4 / [1 + 0.0324(T^{1/3}r/Q^{1/3})^2] \quad (4)$$

式中: T 为爆炸时温度, 常取 2 300~3 000 K; r , Q 的含义及单位同上; 计算结果 S_Q 的单位为 W/m^2 。

对于弹药碎片的毁伤效果常用碎片的动能来衡量, 其计算公式为

$$S_E = mv^2/2 \quad (5)$$

式中: m 为碎片平均质量, kg; v 为碎片平均初速度, m/s; 计算结果 S_E 的单位为 J。

结合式(3)~(5), 可以形成毁伤效果矢量 $S' = (S'_C, S'_Q, S'_E)$, 其中两栖作战火力装备 N_i 的毁伤效果矢量为 S'_i , 对矢量 S'_i 进行如下归一化操作:

$$S_{Ci} = \frac{S'_{Ci}}{\sum_{i=1}^N S'_{Ci}}, S_{Qi} = \frac{S'_{Qi}}{\sum_{i=1}^N S'_{Qi}}, S_{Ei} = \frac{S'_{Ei}}{\sum_{i=1}^N S'_{Ei}} \quad (6)$$

再对每个维度进行累加:

$$S_i = S_{Ci} + S_{Qi} + S_{Ei} \quad (7)$$

式(7)得到的标量 S_i 即最终量化后的相对毁伤效果, 结合式(1)计算出的目标命中概率, 可得出在任意单一火力装备 N_i 的 M_i 次射击下, 对目标 A_j 的摧毁程度为

$$L_{ij} = M_i P_{ij} S_i = M_i (1 - \prod_{k=1}^{M_i} (1 - x_{ij}^k p_{ij})) S_i \quad (8)$$

式中, 由于 P_{ij} 是火力装备 N_i 的 M_i 次射击下的联合概率, 所以计算摧毁程度时的射击次数是 M_i , 即射击总数, 而不是只考虑瞄准该目标或是命中的次数。

在式(8)的结果上, 再计算所有类型火力装备 N 都参与打击, 目标 A_j 受到攻击的摧毁程度时, 只需对火力装备这一维度进行累加即可:

$$L_j = \sum_{i=1}^N L_{ij} = \sum_{i=1}^N M_i (1 - \prod_{k=1}^{M_i} (1 - x_{ij}^k p_{ij})) S_i \quad (9)$$

至此, 式(9)已经计算出所有火力装备完全参与时, 目标 A_j 受到攻击的摧毁程度。目标受到的攻击概率越大, 表明受打击次数越多, 被摧毁得越严重; 但对目标的摧毁程度并不能直接作为我方收益, 还需要考量目标对我方的威胁程度, 不同的目标对我方的威胁程度不同, 威胁程度大的目标被打击的优先级应该更高, 因此需要对目标的威胁程度建立一个评估模型。

1.2 目标威胁程度评估模型

对敌方目标进行威胁程度评估是对战场态势分析及火力分配的重要依托手段, 其评估结果是多火力装备对目标分配的重要依据。在协同作战的条件下, 目标威胁程度还要结合当时敌我双方的态势、地形等因素而定。为准确评估目标威胁程度, 需要分析主要影响因子:

1) 目标火力支撑点。目标火力支撑点的类型主要有坦克、岸炮和碉堡等, 火力支撑点的不同对我方威胁程度也不同。

2) 目标杀伤能力。从火力射程的角度看, 目标杀伤能力有远程火力、中程火力和近程火力 3 种, 其中远程火力具有战略防御能力, 对我方威胁程度最高。同时, 火力布势不同, 威胁程度也不一样, 火力点离海岸线越近, 威胁度越大。再者, 制导方式也会影响威胁程度, 目前已知的有激光制导、雷达制导、红外制导以及复合制导等普遍采用的制导方式, 它们的威胁程度也各不相同, 其中复合制导结合了前几种的特点, 威胁度最高。

3) 抗毁伤能力。目标的抗毁伤能力主要由目标的火力拦截能力、抗干扰能力以及构筑物的坚固性

决定。火力拦截能力越强, 对我方威胁度越高。抗干扰能力主要体现在战场通信方面, 若我方可以切断敌方火力点与指挥部通信, 那目标威胁度将会降低很多。构筑物越坚固, 我方越难快速攻克。

总结以上几点, 可建立目标威胁评估指标体系如图 3 所示。

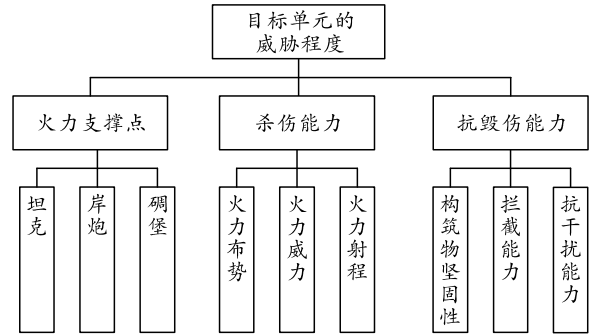


图 3 目标威胁程度评估指标体系

假设有 m 个威胁评估指标 $U = (U_1, U_2, \dots, U_m)$, 其权重分别为 $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m)$, 且 $\sum_{i=1}^m \omega_i = 1$, 则 n 个待打击目标的威胁程度评估可用如下矩阵表示:

$$D = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中 a_{ij} 表示第 j 个待打击目标 A_j 的第 i 个威胁评估指标 U_i 的值, 该值的大小可由我方侦察设备或战场情报资料获取。

对于确定型指标, 可以根据指标特性分为效益性、成本型以及区间型, 并分别进行归一化处理。

效益型:

$$e_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{j=1}^m a_{ij}}; \quad (11)$$

成本型:

$$e_{ij} = 1 - \frac{a_{ij}}{\sum_{j=1}^m a_{ij}}; \quad (12)$$

区间型:

$$e_{ij} = \begin{cases} 1 & (a_i^l \leq a_{ij} \leq a_i^h) \\ \frac{a_i^l - a_{ij}}{a_i^l} & (a_{ij} \leq a_i^l) \\ \frac{a_{ij} - a_i^h}{a_i^h} & (a_{ij} \geq a_i^h) \end{cases} \quad (13)$$

对于不确定型指标, 参考文献[10]中的直觉模

糊集理论，将黄金分割感知系数“0.618”作为目标威胁程度划分最佳度的“普通常数”，建立目标威胁等级如下：

一级威胁： $g_1 = [g_1^+, g_1^-] = [0.618, 1]$ ，表示威胁度“最高”等级，上界为 1，下界为 0.618(0.618¹)。

二级威胁： $g_2 = [g_2^+, g_2^-] = [0.382, 0.618]$ ，表示威胁度“较高”等级，上界为 0.618，下界为 0.382(0.618²)。

三级威胁： $g_3 = [g_3^+, g_3^-] = [0.236, 0.382]$ ，表示威胁度“中”等级，上界为 0.382，下界为 0.236(0.618³)。

四级威胁： $g_4 = [g_4^+, g_4^-] = [0.146, 0.236]$ ，表示威胁度“较低”等级，上界为 0.236，下界为 0.146(0.618⁴)。

五级威胁： $g_5 = [g_5^+, g_5^-] = [0, 0.146]$ ，表示威胁度“最低”等级，上界为 0.146，下界为 0。

根据确定性指标及不确定性指标的计算结果，可以得出对于目标 A_j 的威胁评估计算公式：

$$T_j = \sum_{i=1}^m \omega_i e_{ij} \quad (14)$$

1.3 总毁伤收益模型

目标 A_j 的摧毁程度可由式(9)计算出来，结合目标 A_j 的威胁度评估结果，即可得到当所有类型火力装备都参与打击，目标 A_j 的毁伤收益为

$$W_j = L_j T_j \quad (15)$$

对所有目标的毁伤收益进行累加，即可得到总的毁伤收益

$$W = \sum_{j=1}^A W_j = \sum_{j=1}^A L_j T_j \quad (16)$$

在实际作战过程中，还需要考虑以下约束条件：

1) 使用某类型火力装备进行攻击的次数必须不超过所拥有的该火力装备数量：

$$\sum_{j=1}^A \sum_{k=1}^{M_i} x_{ij}^k \leq M_i \quad (17)$$

2) 每次射击只能对一个目标进行一次攻击

$$\sum_{j=1}^A x_{ij}^k \leq 1 \quad (18)$$

3) 整个作战过程所消耗的成本应当尽可能地少，假设当火力装备 N_i 攻击目标 A_j 时，所消耗的成本为 c_i ，

$$C = \sum_{j=1}^A \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^{M_i} c_i x_{ij}^k \quad (19)$$

至此，可以得出以下数学模型：

$$\max W - C$$

s.t.

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^A \sum_{k=1}^{M_i} x_{ij}^k \leq M_i \\ \sum_{j=1}^A x_{ij}^k \leq 1 \\ C = \sum_{j=1}^A \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^{M_i} c_i x_{ij}^k \\ x_{ij}^k \in \{0, 1\} \end{cases} \quad (20)$$

观察该模型可知，问题的解空间是确定的，可以用一个 3 维矩阵来表示，其中每一维分别表示火力编号、射击次数和打击目标。该模型的优化目标要在这个解空间中找到使得函数值最大的解，即全局最优解。对于这种以个体为单位需要大量搜寻最后得到全局最优解的问题，模拟退火算法在精度和速度方面都具有一定优势；因此，采用模拟退火算法对模型进行求解。

2 基于改进模拟退火算法求解模型

模拟退火算法是基于固体的退火原理，当固体温度升温到一定程度再降温到初始时，其内部粒子会经历一个由有序到无序再趋于有序的过程，相应的能逐渐增大到某个值再慢慢减小到初始状态。当出现局部最优解时，模拟退火算法会以一定的概率跳出，避免陷入局部最优解。

模拟退火算法的一般步骤：

1) 参数初始化。设定一个充分大的数 T 作为初始温度，以及一个充分小的正数 ε 作为算法停止温度。设定迭代次数阈值 K ，温度衰减系数 α ，根据衰减函数 $T = \alpha T$ 进行降温，当温度低于 ε 时算法终止。

2) 确定初始解。问题的解空间可以用 N 个矩阵描述，每个矩阵表示一种类型的火力装备对应的解，每个矩阵的列数相同，即目标的个数、行数为对应火力装备射击次数。所有矩阵只由 0、1 两个元素构成，表示该火力装备是否对相应目标进行攻击。初始解可选定为上半部分行满秩的单位阵，下半部分为随机选择某个目标。

3) 解的更新策略。每次更新时，产生 N 组随机数，每组 2 个数字，数的大小在 $1 \sim A$ 之间，这 2 个数字分别对应当前解的两列，交换这两列，得到新解。而这个解是否被接受，取决于 Metropolis 准则，即

$$r = \begin{cases} 1 & \Delta f > 0 \\ \exp(-\frac{\Delta f}{t}) & \Delta f \leq 0 \end{cases} \quad (21)$$

其中： Δf 为新解与当前解代入目标函数的差值； t 为控制参数。当 $\Delta f > 0$ 时，表明新解的效果比当前解更好，接受新解；如果 $\Delta f \leq 0$ ，则以 r 的概率接受新解，具体做法是随机生成一个(0,1)之间的随机值，如果这个随机值大于 r 则不接受新解，否则接受，其中 r 的大小可由 t 来调控，一定程度上避免了陷入局部最优解。

4) 判断迭代次数是否达到预先设置的迭代阈值 K ，若是则停止迭代，进入步骤 5)；否则进入步骤 3)继续进行当前退火温度下的迭代寻优。

5) 判断当前退火温度 T 是否低于终止温度 ϵ ，若是，则终止退火进程，将当前解输出；否则，继续对退火过程进行降温，降温系数为 α ，即将当前退火温度 T 更新为 $T = \alpha T$ ，并重新初始化迭代次数变量为 1，然后进入步骤 3)进行迭代寻优。

模拟退火算法求解的精度和速度的决定因素有初始温度 T_0 、退火降温的系数 α 和终止温度 ϵ 等参数，以及生成新解的方式，其中合适的参数值需要经过多次仿真调参才能确定；因此，笔者主要对生成新解的方式进行改进。

在火力协同规划模型求解过程中，参考遗传算法中的交叉变异思想，将经典的模拟退火算法的完全随机产生新解的方法，改成随机选择一个待打击

目标序号，然后进行交叉循环操作，产生一组新解。这样产生的解必定是可行解，而且能保证是与当前解不同的新解。由于局部的随机性，可以确保解空间在理论上的完全遍历。例如：以 3 种火力装备，打击 4 个目标，每种火力装备可打击次数为 3，其中一组可行解为：

$$x_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, x_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, x_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}。$$

在该可行解的基础上，生成一个[1,3]之间的随机整数，例如生成的随机数为 1，则将 x_1, x_2, x_3 的第一行元素进行循环交叉，得到的新解如下：

$$x_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, x_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, x_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}。$$

通过改进的模拟退火算法对模型解不断地进行优化，最终得到全局最优解，即我方收益的最大值时的解矩阵分布。该分布是我方火力协同规划的最佳方案。

3 案例仿真分析

结合上述作战问题假定，两栖登陆作战阶段的火力协同规划情况为：有 5 类火力装备 $N = \{N_1, N_2, N_3, N_4, N_5\}$ ，假定待打击目标为 $A = \{A_1, A_2, A_3, A_4, A_5\}$ 。每个火力装备的各项参数如表 1 所示，每个待打击目标的具体信息如表 2 所示。

表 1 火力装备各项参数

编号	可射击次数	当量/kg	爆炸温度/K	爆炸碎片平均初速度/(m/s)	弹片平均质量/kg	装备命中率/%	爆源与目标距离/m	弹药成本/(万元/颗)
N_1	5	80	2 800	1 000	0.20	88	5	10
N_2	5	40	2 500	600	0.10	76	2	5
N_3	5	30	2 300	400	0.15	80	2	4
N_4	5	100	3 000	1 200	0.30	85	4	15
N_5	5	70	2 600	800	0.25	86	3	10

表 2 待打击目标的具体信息

编号	火力点个数	火力属性	制导方式	装甲等级	火力拦截方式
A_1	2	远程	复合式	复合式	无人机
A_2	1	中程	激光	钢制	激光武器
A_3	5	近程	雷达	钢制	防空导弹
A_4	2	远程	激光	电磁	无人机
A_5	2	近程	无	电热	无人机

将表 1 中火力装备各项参数代入毁伤效果模型，可计算出每种装备的相对毁伤效果；根据前文的目标威胁度评估模型，结合表 2 的信息可以得到每个目标的威胁度值；运用改进的模拟退火算法对

毁伤收益模型进行求解。

设置初始温度 $T = 10^{10} \text{ }^\circ\text{C}$ ，终止温度 $\epsilon = 10^{-10} \text{ }^\circ\text{C}$ ，衰减系数 $\alpha = 0.9$ ，Mapkob 链的长度 $Z_{\max} = 10$ 。代入以上各项参数进行 Matlab 仿真。

图 4 为毁伤收益值随迭代次数的变化过程，随着迭代次数的增加，目标函数值逐步增大，约迭代 180 次时收敛到一个稳定值，该值即在设定的想定下，我方毁伤收益的最大值。图 5 为最优解 X^* 的具体分布，即每件火力装备每次打击的最佳方案，该方案如表 3 所示。

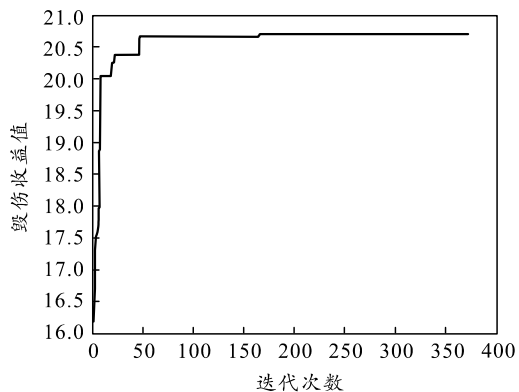


图 4 毁伤收益优化过程

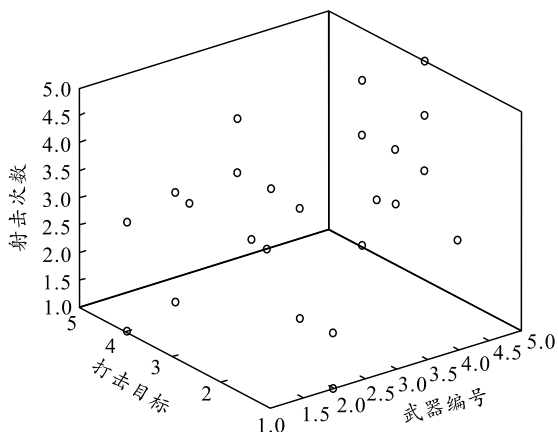


图 5 最优解 X^* 的分布

表 3 火力分配方案

火力编号	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
N_1	M_5		$M_2 M_4$	$M_1 M_3$	
N_2	$M_1 M_2$		$M_4 M_5$	M_3	
N_3	$M_4 M_5$	M_1	M_3	M_2	
N_4	M_3		$M_2 M_4 M_5$		M_1
N_5	M_1		$M_3 M_4 M_5$	M_2	

从上表可知，对于目标 A_2 与 A_5 ，前者只有一个火力点，后者火力没有制导，都属于威胁度较低的目标，因此仿真结果只对这 2 个目标分配了一次火力打击；而对于目标 A_3 ，具有较强的防守反击能力，属于高威胁度目标，因此仿真结果对其进行集中式火力打击，由此也证明了模型的合理性。

4 结束语

笔者就两栖作战中的兵力分配问题，研究了多个火力装备打击多个目标的问题，并以最大化毁伤收益为目标函数建立数学模型。笔者考虑目标威胁程度、不同火力装备的毁伤效果等因素，使模型更具有一般性意义，可为两栖登陆作战火力协同规划问题提供参考。根据模型特性，采用改进的模拟退火算法进行求解并仿真。仿真结果表明：该模型具有较好的可行性，特别是对于火力支援、火力远程精确打击规划方面的研究具有较重要的参考意义。

参考文献：

- [1] GODERSTAD A B, HASKINS C. Understanding mission objectives and priorities with QFD[J]. INCOSE International Symposium, 2016, 26(1): 283-299.
- [2] 杨华东, 邱志明. 海上编队多兵力对海火力规划技术研究[J]. 战术导弹技术, 2018(1): 73-77.
- [3] 蒋里强, 王桂花, 王纯, 等. 基于规划方法的防空兵力区分问题建模[J]. 火力与指挥控制, 2014, 39(4): 100-105.
- [4] 欧建军, 张安. 不确定环境下协同空战目标分配模型[J]. 火力与指挥控制, 2020, 45(5): 115-118.
- [5] 董树军, 伍文峰, 杜雷, 等. 一体化联合作战的机会约束兵力规划模型[J]. 兵工自动化, 2007, 26(3): 1-2, 5.
- [6] 孔祥宇, 李德华. 基于粒子群算法的防空兵力部署决策研究[J]. 计算机与数字工程, 2016, 44(12): 2320-2323.
- [7] 向勇. 联合火力打击中目标分配问题优化模型及算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018: 5-6.
- [8] 聂魏岳, 曾金明, 周义力. 联合火力打击作战信息保障效能评估研究[J]. 舰船电子工程, 2019, 39(6): 31-33.
- [9] 刘雅琼. 多重毁伤效应综合评价方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009: 6-7.
- [10] 缪旭东, 王永春. 舰艇编队协同防空任务规划理论及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 144-145.