



DOI: 10.12382/bgxb.2023.0566

# 基于 AGE-MOEA 的杀伤链建模与优化方法

万斯来<sup>1</sup>, 王国新<sup>1</sup>, 明振军<sup>1\*</sup>, 李传浩<sup>1</sup>, 阎艳<sup>1</sup>, 丁伟<sup>1</sup>, 袁珂<sup>1</sup>, 王玉茜<sup>2</sup>

(1. 北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081; 2. 江南机电设计研究所, 贵州 贵阳 550009)

**摘要:** 针对武器装备体系的杀伤链设计问题, 提出一种基于自适应几何估计多目标进化算法 (Adaptive Geometry Estimation based Multi-Objective Evolutionary Algorithm, AGE-MOEA) 的杀伤链建模与优化方法。围绕杀伤链闭合的设计思路, 结合 OODA 循环理论, 以传统火力分配模型为基础, 综合考虑侦察、指控、打击 3 类武器装备, 建立以打击效能最大、武器消耗最小和损毁威胁最小为目标函数, 以装备使用约束、杀伤链关系约束和毁伤门限约束为约束条件的杀伤链设计多目标优化数学模型, 实现对杀伤链设计问题数学表征; 提出基于 AGE-MOEA 的杀伤链优化设计方法流程, 用于求解杀伤链设计多目标优化数学模型。进行数值仿真实验和防空反导作战场景下的杀伤链设计实验。研究表明: 杀伤链建模与优化方法能够保证所有目标杀伤链闭合的前提下, 同时追求打击效能、武器消耗和损毁威胁最优, 求解得到杀伤链方案, 形成分布式杀伤力; 验证了杀伤链设计多目标优化数学模型的科学性, AGE-MOEA 求解杀伤链设计问题的有效性, 以及杀伤链设计方法在实际军事作战问题的可行性。

**关键词:** 杀伤链; 杀伤网; OODA 循环; 多目标优化

**中图分类号:** E917 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1093(2024)08-2617-12

## Modeling and Optimization Method of Kill Chains Based on AGE-MOEA

WAN Silai<sup>1</sup>, WANG Guoxin<sup>1</sup>, MING Zhenjun<sup>1\*</sup>, LI Chuanhao<sup>1</sup>, YAN Yan<sup>1</sup>, DING Wei<sup>1</sup>,  
YUAN Ke<sup>1</sup>, WANG Yuqian<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Jiangnan Electromechanical Design Institute, Guiyang 550009, Guizhou, China)

**Abstract:** A modeling and optimization method of kill chains based on adaptive geometry estimation-based multi-objective evolutionary algorithm (AGE-MOEA) is proposed for the kill-chains design. Based on the idea of kill chain closure, the OODA cycle theory and the traditional weapon target assignment model, a multi-objective optimization mathematical model of kill chains design is constructed to realize the mathematical representation of kill chains design problem. The proposed model comprehensively considers three kinds of equipment, which are used for reconnaissance, command and attack, respectively, and takes the maximum attack efficiency, minimum weapon consumption and minimum damage threat as the objective functions, and takes the equipment use constraints, kill chain relation constraints and damage threshold constraints as constraint conditions. The algorithm flow of kill chains optimization design based on AGE-MOEA is proposed to solve the multi-objective optimization

收稿日期: 2023-06-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(51805033)

\* 通信作者邮箱: zhenjun.ming@bit.edu.cn

mathematical model of kill chains design. Through the numerical experiments and the kill chain design experiments in air defense and anti-missile combat scenarios, the results show that the proposed method can simultaneously pursue the optimization of attack efficiency, weapon consumption and damage threat on the premise of ensuring that all kill chains of each target are closed, and obtain a kill chain solution, which can form a distributed lethality. The scientificity of multi-objective optimization mathematical model of kill chains design, the effectiveness of AGE-MOEA algorithm in solving kill chains design problems and the feasibility of kill chain design method in practical military operations are verified.

**Keywords:** kill chain; kill web; OODA loop; multi-objective optimization

## 0 引言

武器装备体系是指面向作战需求而由功能上相互联系、相互作用的各种武器装备系统构成的更高层次的整体<sup>[1-3]</sup>。随着信息技术和军事技术的发展,现代战争作战样式逐渐转变为武器装备体系之间的对抗。武器装备体系具有装备数量多、类型广、交互关系复杂等特点,如何将大规模跨域多能异构装备组织起来发挥体系层级作战效能显得十分重要。

1996年美国空军罗纳德将军首次提出杀伤链的概念,将打击目标的作战过程分为发现、定位、跟踪、瞄准、交战和评估6个阶段<sup>[4]</sup>。2018年,美国国防部高级研究计划局进一步提出杀伤网的概念,强调各作战域指挥与控制、情报获取以及武器的统合,超越了静态的杀伤链结构,形成多个装备节点构成的网状结构,凸显武器装备体系的跨域协同性<sup>[5]</sup>。杀伤链和杀伤网概念的提出,为武器装备体系层级作战筹划提供一条有效途径。通过构建杀伤链/网,能够合理地配置战场可用武器资源,建立武器装备与目标之间的杀伤链通道,将跨域多能异构武器装备灵活组合成效能网,充分发挥武器装备体系作战效能<sup>[6]</sup>。

2021年,美空军举行了“橙旗”、“翠旗”、“黑旗”联合试验,集成空中、地面作战资源,构建跨域远程杀伤链/网,美军已经在杀伤链/网概念的落地应用上取得重要突破<sup>[7]</sup>。我军有必要加速研究面向作战任务的武器装备体系的杀伤链/网设计,这将是未来战争的制胜关键,对我军作战概念发展与应用落地也具有重要意义。

围绕武器装备体系的杀伤链/网设计问题,领域内已有不少学者开展了相关研究。在杀伤链设计方面,文献[8]基于超网络构建了作战体系网络模型和任务链路网络模型,提出一种基于可执行架构的

杀伤链设计与分析优化方法。文献[9]针对机群联合作战场景,使用立体分层网络模型构建杀伤链架构,提出一种基于改进遗传算法的多杀伤链规划方法。文献[10]针对马赛克战体系中杀伤链重构问题,基于犹豫模糊理论和筹划-准备-执行-评估循环构建了作战模块评估模型,提出一种杀伤链作战模块应急重构自主决策方法。文献[11]针对时敏目标高动态作战场景,构建了有人无人协同闭合杀伤链引擎,开发了一套集成作战资源临机决策、杀伤快速构建和作战进程监控的指挥信息系统。

在杀伤网设计方面,文献[12]针对陆战场构建了包含侦察网、通信网、指控网和打击网四要素的多层陆战场体系作战杀伤网模型,提出一个杀伤网资源池优化流程框架。文献[13]针对杀伤网中的装备组合优化问题,基于多层网络模型提出杀伤网的网络化描述方法,使用冗余性、风险性和敏捷性3个评估指标构建了装备组合规划模型,并提出了基于启发式算法的装备组合多目标优化方法。文献[14]基于OODA循环理论构建了任务-能力-装备多层级杀伤网本体模型和杀伤网设计规则库,实现杀伤网设计知识建模,并提出一种基于知识推理的杀伤网设计方法。文献[15]针对海上区域防空问题,建立了基于事件图的区域防空杀伤网模型,将作战行为的连续动态过程转化为由关键事件组成的离散动态过程,从而基于优化算法确定最优编组方案。文献[16]基于复杂网络理论构建杀伤网模型,并结合多目标优化和前景理论,将智能决策与人类决策相结合,辅助杀伤网设计决策。

然而,上述研究大都侧重于杀伤链/网的网络模型表征和网络架构描述,却缺少杀伤链/网设计问题的数学建模与优化方法,即在保证杀伤链闭合性的基础上,追求尽可能大作战效能的同时,使用尽可能少的作战资源,针对每一个敌方目标设计一条或者多条完整的闭合杀伤链,从而产生综合杀伤力,辅助

指挥员作战决策。

针对上述问题,本文首先围绕杀伤链闭合的设计思路,结合 OODA 循环理论,综合考虑侦察、指控、打击3类武器装备,建立以打击效能最大、武器消耗最小和损毁威胁最小为目标函数的杀伤链设计多目标优化数学模型;然后,提出基于自适应几何估计多目标进化算法(Adaptive Geometry Estimation based Multi-Objective Evolutionary Algorithm, AGE-MOEA)的杀伤链优化设计算法流程;最后,分别通过数值实验和防空反导作战实验,验证杀伤链设计优化模型的科学性,AGE-MOEA 求解杀伤链设计问题的有效性,以及杀伤网设计方法在实际军事作战问题的可行性。

## 1 杀伤链优化设计数学模型

OODA 循环理论<sup>[17]</sup>是杀伤链概念背后的理论支撑。OODA 循环指的是作战过程中的4个阶段或活动,即观察(Observe)、判断(Orient)、决策(Decide)和行动(Act)。其中,Observe 指利用各类侦测装备观察感知战场信息,进行态势感知;Orient 指融合处理侦测装备收集的各种信息,进行态势评估;Decide 指依据态势形成作战构想,进行作战决策;Act 指各类作战力量、武器平台针对性打击作战目标。4种活动次第循环进行,形成闭合环路,可以描述作战活动的典型流程。本文杀伤链的基本装备要素同时考虑侦察装备、指控装备和打击装备3类装备节点,分别对应执行 OODA 循环中的观察和判断、决策、行动活动,杀伤链示意图如图1所示。

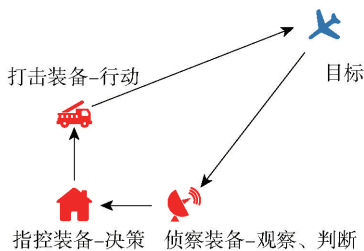


图1 杀伤链示意图

Fig.1 Schematic diagram of kill chain

杀伤链是作战过程中打击敌方目标的最小体系单元,只有形成闭合的杀伤链才能对敌方目标形成杀伤力。因此,采取杀伤链闭合的设计思路,针对每个敌方目标设计一条或者多条完整的闭合杀伤链,并考虑杀伤链之间的协同效能,将杀伤链聚合形成杀伤网,从而产生综合杀伤力。

火力分配是指根据作战目的、战场态势和武器性能等因素,将一定类型和数量的火力单元以某种准则进行分配,攻击一定数量敌方目标的过程<sup>[18]</sup>。火力分配问题已经广泛应用于地面作战<sup>[19-20]</sup>、海上区域防空<sup>[21-22]</sup>和反集群作战<sup>[23-24]</sup>等联合作战场景。本文以火力分配模型为基础,综合考虑侦察、指控和打击3类武器单元的分配,并且同时考虑装备之间的通信指控关系,杀伤链之间的协同关系,在追求尽可能大作战效能的同时,使用尽可能少的作战资源,构建如下杀伤链优化设计数学模型。

### 1.1 杀伤链设计模型假设

假设在某次作战中,有  $m_1$  个侦察单元、 $m_2$  个指控单元、 $m_3$  个打击单元共  $m$  个装备单元参与作战,协同打击  $n$  个敌方目标。侦察单元集合为  $O = \{o_1, o_2, \dots, o_{m_1}\}$ , 指控单元集合为  $D = \{d_1, d_2, \dots, d_{m_2}\}$ , 打击单元集合为  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_{m_3}\}$ , 目标集合为  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ 。

侦察单元和指控单元的通信矩阵为  $R$ ,

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m_2} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m_2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m_11} & r_{m_12} & \cdots & r_{m_1m_2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $r_{i'}$  = 1 表示第  $i$  个侦察单元和第  $i'$  个指控单元存在通讯关系,否则  $r_{i'} = 0$ 。

指控单元和打击单元之间的指控矩阵  $C$ ,

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1m_3} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2m_3} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{m_21} & c_{m_22} & \cdots & c_{m_2m_3} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $c_{i''}$  = 1 表示第  $i'$  个指控单元和第  $i''$  个打击单元存在指控关系,否则  $c_{i''} = 0$ 。

决策矩阵  $X$  由侦察单元决策矩阵  $X_o$ 、指控单元决策矩阵  $X_d$  和打击单元决策矩阵  $X_a$  组成。其中,以侦察单元决策矩阵  $X_o$  为例, $x_{oj}$  表示第  $i$  个侦察单元是否参与打击第  $j$  个目标,若参与,则  $x_{oj} = 1$ , 否则  $x_{oj} = 0$ 。指控单元决策矩阵  $X_d$  和打击单元决策矩阵  $X_a$  同理。决策矩阵分别为

$$X_o = \begin{bmatrix} x_{o11} & x_{o12} & \cdots & x_{o1n} \\ x_{o21} & x_{o22} & \cdots & x_{o2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{om_11} & x_{om_12} & \cdots & x_{om_1n} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{X}_d = \begin{bmatrix} x_{d11} & x_{d12} & \cdots & x_{d1n} \\ x_{d21} & x_{d22} & \cdots & x_{d2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{dm_21} & x_{dm_22} & \cdots & x_{dm_2n} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{X}_a = \begin{bmatrix} x_{a11} & x_{a12} & \cdots & x_{a1n} \\ x_{a21} & x_{a22} & \cdots & x_{a2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{am_31} & x_{am_32} & \cdots & x_{am_3n} \end{bmatrix} \quad (5)$$

假设侦察-指控-火力-目标表示一条闭合杀伤链。对于同一目标特定  $t_j$ , 如果存在  $x_{oij} = x_{di'j} = x_{ai''j} = 1$  和  $r_{ii'} = c_{i'i''} = 1$ , 即侦察单元  $o_i$ 、指控单元  $d_{i'}$  和打击单元  $a_{i''}$  共同参与打击目标  $t_j$ , 且它们之间存在通信指挥关系, 那么式(6)表示打击目标  $t_j$  的一条闭合杀伤链:

$$K_{\text{kill\_chain}} = \{o_i, x_{oij}, r_{ii'}, d_{i'}, x_{di'j}, c_{i'i''}, a_{i''}, x_{ai''j}, t_j\} \quad (6)$$

所有杀伤链聚合形成的杀伤网如式(7)所示:

$$K_{\text{kill\_web}} = \{O, \mathbf{X}_o, \mathbf{R}, \mathbf{D}, \mathbf{X}_d, \mathbf{C}, \mathbf{A}, \mathbf{X}_a, \mathbf{T}\} \quad (7)$$

## 1.2 杀伤链设计目标函数

### 1.2.1 打击效能

假设  $p_{oij}$  为第  $i$  个侦察单元对第  $j$  个目标的探测精度,  $p_{di'j}$  为第  $i'$  个指控单元对第  $j$  个目标的指控精度,  $p_{ai''j}$  为第  $i''$  个打击单元对第  $j$  个目标的打击精度。则对第  $j$  个目标的联合毁伤概率  $p_j$  为

$$p_j = \left[ 1 - \prod_{i=1}^{m_1} (1 - p_{oij})^{x_{oij}} \right] \cdot \prod_{i'=1}^{m_2} p_{di'j}^{x_{di'j}} \left[ 1 - \prod_{i''=1}^{m_3} (1 - p_{ai''j})^{x_{ai''j}} \right] \quad (8)$$

假设  $v_j$  为第  $j$  个目标的价值系数。打击效能的目标函数  $y_E$  可以描述为

$$y_E = \max \sum_{j=1}^n v_j \left[ 1 - \prod_{i=1}^{m_1} (1 - p_{oij})^{x_{oij}} \right] \cdot \prod_{i'=1}^{m_2} p_{di'j}^{x_{di'j}} \left[ 1 - \prod_{i''=1}^{m_3} (1 - p_{ai''j})^{x_{ai''j}} \right] \quad (9)$$

打击效能越大越好。

### 1.2.2 弹药损耗

假设  $\mathbf{V}_a = [v_{a1}, v_{a2}, \dots, v_{am_3}]$  为打击单元的弹药成本向量。则弹药损耗的目标函数  $y_C$  可以描述为

$$y_C = \min \sum_{j=1}^n \sum_{i''=1}^{m_3} v_{ai''j} x_{ai''j} \quad (10)$$

弹药损耗越小越好。

### 1.2.3 损毁威胁

在进行杀伤链设计时, 如果武器装备作为杀伤链的一环, 武器单元的位置和战略意图会暴露在敌方视野中, 面临被敌方目标损毁的威胁。假设  $w_{oi}$  为敌方目标对第  $i$  个侦察单元的威胁度,  $w_{di'}$  为敌方目标对第  $i'$  个指控单元的威胁度。损毁威胁的目标函数  $y_L$  可以描述为

$$y_L = \min \left[ \sum_{i=1}^{m_1} w_{oi} v_{oi} u \left( \sum_{j=1}^n x_{oij} \right) + \sum_{i'=1}^{m_2} w_{di'} v_{di'} u \left( \sum_{j=1}^n x_{di'j} \right) \right] \quad (11)$$

$$u(x) = \begin{cases} 0, & x = 0 \\ 1, & x \geq 1 \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $v_{oi}$  为第  $i$  个侦察单元的成本;  $v_{di'}$  为第  $i'$  个指控单元的成本。打击单元为一次性消耗武器, 一旦使用一定会产生成本, 已经在弹药损耗成本目标考虑, 本目标不再考虑。期望损毁威胁越小越好。

## 1.3 杀伤链设计约束条件

### 1.3.1 侦察约束

一个侦察单元可以同时侦察多个目标, 但不能超过其多目标能力  $k_{oi}$ , 一个目标只需要一个侦察单元:

$$\sum_{j=1}^n x_{oij} \leq k_{oi} \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^{m_1} x_{oij} = 1 \quad (14)$$

### 1.3.2 指控约束

一个指控单元可以同时指挥控制打击多个目标, 但不能超过其多目标能力  $k_{di'}$ , 一个目标只需要一个指控单元:

$$\sum_{j=1}^n x_{di'j} \leq k_{di'} \quad (15)$$

$$\sum_{i'=1}^{m_2} x_{di'j} = 1 \quad (16)$$

### 1.3.3 打击约束

一个打击单元最多只能攻击一个目标。一个目标可以同时被多个打击单元联合攻击。

$$\sum_{j=1}^n x_{ai''j} \leq 1 \quad (17)$$

### 1.3.4 武器资源数量约束和 0-1 整数约束:

参与杀伤链的武器单元数量不能超过可用的武器单元总数, 且只存在参与和未参与两种状态:

$$x_{oij} \in \{0, 1\} \quad (18)$$

$$x_{di'j} \in \{0, 1\} \quad (19)$$

$$x_{ar'j} \in \{0, 1\} \quad (20)$$

### 1.3.5 杀伤链关系约束

杀伤链闭合不仅仅需要考虑装备-目标的配对关系,还需要考虑装备之间的通信指控关系,即是否能够形成侦察-指控-打击-目标闭合杀伤链。参与打击同一目标的杀伤链上的侦查单元和指控单元之间必须存在通信关系,指控单元和打击单元之间必须存在指控关系,这样侦查单元、指控单元和打击单元才能构成闭合的杀伤链,形成有效杀伤力:

1) 侦查单元-指控单元通信关系约束:

$$x_{oj}x_{di'j} \leq r_{ii'} \quad (21)$$

侦查单元-指控单元通信关系约束如式(21)所示,式中,若  $r_{ii'} = 0$ ,即第  $i$  个侦察单元与第  $i'$  个指控单元没有通讯关系,  $x_{oj}x_{di'j} = 0$ ,  $x_{oj}$  和  $x_{di'j}$  至少有一个为零,即第  $i$  个侦察单元和第  $i'$  个指控单元不能同时参与打击第  $j$  个目标形成杀伤链路。若  $r_{ii'} = 1$ ,即表示第  $i$  个侦察单元与第  $i'$  个指控单元存在通讯关系,  $x_{oj}x_{di'j} \leq 1$ ,  $x_{oj}$  和  $x_{di'j}$  可以同时为 1,即允许第  $i$  个侦察单元和第  $i'$  个指控单元同时参与打击第  $j$  个目标形成杀伤链路。

2) 指控单元-打击单元通信关系约束:

$$x_{di'j}x_{ar'j} \leq c_{i'r'} \quad (22)$$

指控单元-打击单元通信关系约束如式(22)所示,式中,若  $c_{i'r'} = 0$ ,即第  $i'$  个指控单元与第  $i''$  个打击单元没有指控关系,  $x_{di'j}x_{ar'j} = 0$ ,  $x_{di'j}$  和  $x_{ar'j}$  至少有一个为零,即第  $i'$  个指控单元和第  $i''$  个打击单元不能同时参与打击第  $j$  个目标形成杀伤链路。若  $c_{i'r'} = 1$ ,即表示第  $i'$  个指控单元与第  $i''$  个打击单元存在指控关系,  $x_{di'j}x_{ar'j} \leq 1$ ,  $x_{di'j}$  和  $x_{ar'j}$  可以同时为 1,即允许第  $i'$  个指控单元和第  $i''$  个打击单元同时参与打击第  $j$  个目标形成杀伤链路。

### 1.3.6 毁伤门限约束

为了限制敌方某些关键目标的效能发挥,需要将其生存概率压制于设定毁伤门限之内,用式(23)进行描述:

$$p_j = \left[ 1 - \prod_{i=1}^{m_1} (1 - p_{oj})^{x_{oj}} \right] \prod_{i'=1}^{m_2} p_{di'j}^{x_{di'j}} \left[ 1 - \prod_{i''=1}^{m_3} (1 - p_{ar'j})^{x_{ar'j}} \right] \geq \bar{p}_j \quad (23)$$

式中:  $\bar{p}_j$  表示第  $j$  个目标的毁伤门限。  $p_j \geq \bar{p}_j$  表示对每个目标的联合毁伤概率应大于预设的毁伤概率门限。

## 1.4 杀伤链设计多目标优化数学模型

综上,建立杀伤链设计多目标优化数学模型为

$$\left\{ \begin{array}{l} \min(-y_E, y_C, y_L) \\ \text{s. t.} \quad \sum_{j=1}^n x_{oj} \leq k_{oi} \\ \sum_{i=1}^{m_1} x_{oj} = 1 \\ \sum_{j=1}^n x_{di'j} \leq k_{di'} \\ \sum_{i'=1}^{m_2} x_{di'j} = 1 \\ \sum_{j=1}^n x_{ar'j} \leq 1 \\ x_{oj} \in \{0, 1\}; x_{di'j} \in \{0, 1\}; x_{ar'j} \in \{0, 1\} \\ x_{oj}x_{di'j} \leq r_{ii'} \\ x_{di'j}x_{ar'j} \leq c_{i'r'} \\ p_j = \left[ 1 - \prod_{i=1}^{m_1} (1 - p_{oj})^{x_{oj}} \right] \\ \prod_{i'=1}^{m_2} p_{di'j}^{x_{di'j}} \left[ 1 - \prod_{i''=1}^{m_3} (1 - p_{ar'j})^{x_{ar'j}} \right] \geq \bar{p}_j \end{array} \right. \quad (24)$$

## 2 基于 AGE-MOEA 的杀伤链优化设计算法流程

杀伤链设计多目标优化数学模型的设计维度为  $(m_1 + m_2 + m_3)n$ ,设计空间大小为  $2^{(m_1 + m_2 + m_3)n}$ ,目标数量为 3,约束数量为  $m_1 + m_2 + m_3 + 3n + (m_1 + m_3)m_2n + 3$ ,是一个典型的大空间、高维度、多目标、多约束优化问题。多目标进化算法是求解该类问题的有效算法,特别是非支配排序遗传算法系列<sup>[24]</sup>。文献[25]于 2021 年在 NSGA-II<sup>[26]</sup>的总体框架的基础上提出 AGE-MOEA,它通过对种群中的个体进行非支配排序,并使用一个综合考虑非支配前沿多样性和邻近性的生存评分代替拥挤距离评估非支配解,找到 Pareto 前沿上的解,解决多目标优化问题。该方法在解决目标数目较多的高维多目标优化问题中具有很好的效果,而且解具有更好的多样性和收敛性<sup>[27]</sup>。

### 2.1 杀伤链优化设计算法流程

AGE-MOEA 的流程(见图 2)如下:

1) 首先根据优化变量确定编码方式,随机生成规模为  $N$  的初始种群。由于杀伤链设计优化变量是一个 0-1 离散变量,故采用二元编码方式。

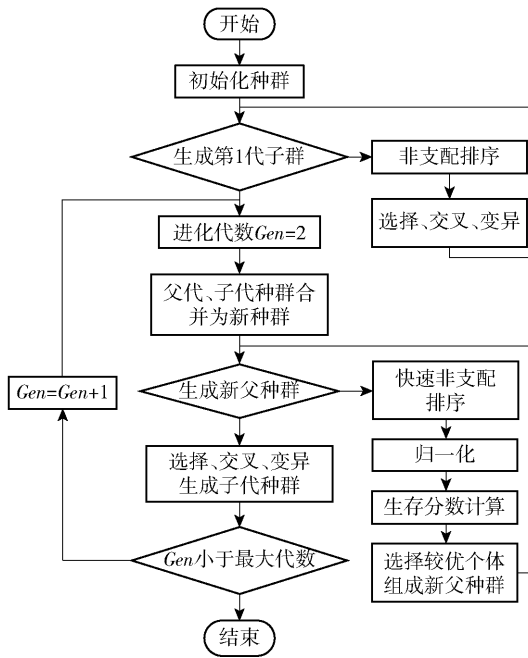


图 2 AGE-MOEA 流程

Fig. 2 Flowchart of AGE-MOEA

2) 通过交叉和变异生成子种群  $Q$ 。由于是离散变量优化问题,采用两点交叉算子和位变异算子<sup>[28-29]</sup>。

两点交叉算子的具体操作过程如下:首先,随机选择两个父代个体作为交叉操作的对象;其次,随机选择两个交叉点,确定基因片段的范围。然后,将两个父代个体在交叉点之间的基因片段进行交换。最后,重复以上步骤,直到生成所需数量的子代个体。

位变异算子的具体操作如下:首先,根据概率  $p_1$  选择一个个体作为变异对象;其次,对个体的每一个基因点,以概率  $p_2$  指定其为变异点;然后,将该位点上的基因值进行翻转操作,由 0 变为 1,或由 1 变为 0;最后,得到变异后的新个体。

3) 后代群体  $Q$  与当前群体  $P$  结合,形成大小为  $2 \times N$  的新群体  $Q-P$ 。使用非支配排序算法对新种群进行快速非支配排序,将所得种群划分为非支配层。

非支配排序具体操作如下:首先求出种群中支配个体  $i$  的其他个体的数量  $n_i$ ,以及个体  $i$  支配的其他个体的集合  $S_i$ ;其次,找到种群中所有  $n_i = 0$  的个体,作为第一非支配层,存入解集  $\mathbb{F}_1$ ;然后,将  $\mathbb{F}_1$  所支配的个体集  $S_j$  中每个个体  $k$  的  $n_k$  减 1,如果  $n_k = 0$ ,则将其存入解集  $\mathbb{F}_2$  中;最后,重复上述分级操作,直到所有个体的均完成分级。

4) 使用 NSGA-III<sup>[30]</sup> 归一化方法对非支配前沿

进行归一化处理,通过将前沿上所有解的目标值在  $[0, 1]$  范围内缩放进行归一化:

$$f_i^n(S) = [f_i(S) - z_i^{\min}] / a_i, \quad \forall S \in \mathbb{F}_1 \quad (25)$$

式中:  $f_i(S)$  表示解  $S$  的目标  $f_i$ ;  $z_i^{\min}$  表示前沿面  $\mathbb{F}_1$  上所有解的第  $i$  个目标的最小值;  $a_i$  是  $m$  维超平面与目标轴  $f_i$  的截距,  $m$  为目标个数。  $m$  维超平面由极端向量公式(26)组成:

$$z_i^{\max} = \max_{S \in \mathbb{F}_1} (f_i(S) - z_i^{\min}) \quad (26)$$

这些向量表示在向原点平移之后,前沿面  $\mathbb{F}_1$  中的最大目标值。

5) 生存评分计算。综合考虑多样性和邻近性,使用  $L_p$  范数计算第一非支配前沿中的解的生存评分。

AGE-MOEA 首先使用一个中心点计算近似帕累托前沿的曲率  $p$ , 公式如下:

$$p = \frac{\lg G}{\lg G - \lg \left( \sum_{i=1}^G CP_i \right)} \quad (27)$$

式中:  $G$  是目标的数量;  $CP$  是靠近非支配前沿中心点的非支配解的目标向量。

然后基于  $L_p$  范数<sup>[31]</sup>式(28),使用式(29)通过计算第一非支配前沿面  $\mathbb{F}_1$  上每个个体与理想点之间的距离来计算邻近度得分,使用式(30)通过计算  $\mathbb{F}_1$  上每个个体与其他解的最小距离来计算多样性得分,最后使用式(31)将邻近度得分和多样性得分结合起来计算生存得分,用于下一代种群的选择。

$$\|v\|_p = (v_1^p + \dots + v_M^p)^{1/p} \quad (28)$$

$$s_{\text{proximity}}(S) = \|f^n(S) - Z^{\min}\|_p = \|f^n(S)\|_p \quad (29)$$

$$s_{\text{diversity}}(S, \mathbb{F}_1) = \min_{T \neq S \in \mathbb{F}_1} \|f^n(S) - f(T)\|_p \quad (30)$$

$$s_{\text{survival}}(S) = \frac{s_{\text{diversity}}(S, \mathbb{F}_1)}{s_{\text{proximity}}(S)} \quad (31)$$

6) 重复步骤 2 ~ 步骤 5 直到满足终止条件。

## 2.2 多目标优化算法性能指标

收敛性和均匀性是评估多目标优化优化问题解集性能的重要指标。收敛性表示解集与真实帕累托前沿面之间的距离,解集与帕累托前沿面的距离越近,解集的收敛性越好,反之则越差。均匀性表示解集中个体分布的均匀程度,解集在帕累托前沿上分布的越均匀,解集的均匀性越好。

Hypervolume 指标<sup>[32]</sup>表示由解集中的个体与参考点在目标空间中所围成的超立方体的体积。Hypervolume 越大,表示获得的解集性能越好。Hypervolume 的公式如下:

$$HV = \delta \left( \bigcup_{i=1}^{|\text{SI}|} v_i \right) \quad (32)$$

式中:  $\delta$  表示 Lebesgue 测度, 用于计算体积;  $|\text{SI}|$  表示非支配解集的数量;  $v_i$  表示参照点与解集中第  $i$  个解构成的超体积。

Hypervolume 能够对解集收敛性、均匀性以及广泛性同时进行评价, 给出解集的综合评价结果。由于杀伤链设计问题是帕累托前沿未知问题, 而 Hypervolume 评估指标无需知道优化问题的真实帕累托前沿面, 因此本文选取 Hypervolume 指标度量杀伤链设计多目标优化问题解集的性能。

### 3 杀伤链设计案例验证和结果分析

为验证本文所提出的杀伤链优化设计模型的科学性, AGE-MOEA 求解杀伤链优化设计问题的有效性, 以及方法的实战应用潜力, 分别从理论和实际作战场景两个角度进行实验验证。

杀伤链方案求解采用 python 编程语言和 Pymoo 工具箱<sup>[33]</sup>。优化算法的种群数量和迭代次数设置为 300 个和 1 200 代。

#### 3.1 杀伤链设计数值实验

##### 3.1.1 数值实验想定设置

假设在某次作战中, 我方编队有 25 个侦察单元, 4 个指控单元和 30 个打击单元可用, 需要设计杀伤链打击 20 个敌方目标。

我方装备的装备精度矩阵、弹药成本向量、装备成本向量、装备多目标能力向量、通信矩阵、指控矩阵和敌方目标的目标价值向量、目标威胁度向量、毁伤门限向量的参数设置如表 1 所示。

表 1 装备参数取值表  
Table 1 Equipment parameters

装备阵营	参数	取值
我方	装备精度	[0.8, 0.9] 中取随机数
	弹药成本	[100, 200] 中取随机数
	装备成本	[400, 600] 中取随机数
	多目标能力	侦察: 2; 指控: 8
	通信矩阵	[0, 1] 中取随机数
	指控矩阵	[0, 1] 中取随机数
敌方	目标价值	[600, 800] 中取随机数
	威胁度	[0.8, 0.9] 中取随机数
	毁伤门限	[0.4, 0.6] 中取随机数

##### 3.1.2 数值实验结果分析

使用 AGE-MOEA 求解杀伤链优化设计模型,

AGE-MOEA 运行过程中求解得到的非支配解集动态演变过程如图 3 所示。图 3 中每一张子图坐标系中的点为杀伤链优化设计模型求解得到的非支配解, 即杀伤链方案。由图 3 可以看出, 随着优化的进程, 在图 3(a) ~ 图 3(c) 中非支配解集中解的个数逐渐增加, 而且在图 3(d) ~ 图 3(i) 中解集分布持续优化, 分布越来越均匀, 最终在图 3(i) 第 1 200 代形成最终解集。

在图 3(i) 的最终解集中的所有点均为打击效能、弹药损耗和损毁威胁 3 个目标取不同偏好权重组合时的最优方案。如图 3(i) 中红色实心点 A、B、C 和 D 分别对应打击效能、弹药损耗和损毁威胁偏好权重组合设置为 [1, 0, 0]、[0, 1, 0]、[0, 0, 1]、[1/3, 1/3, 1/3] 的最优方案, 即打击效能最优、弹药消耗最优、损毁威胁最优和综合性能最优的杀伤链方案。这表明 AGE-MOEA 能够有效地求解杀伤链优化设计问题。

作为对比, 进一步引入 AGE-MOEA 同类型的 NSGA-II 和 NSGA-III 对杀伤链优化设计模型进行求解。如图 4 所示为 AGE-MOEA、NSGA-II 和 NSGA-III 求解得到的解集组合分布图。由图 4 可以看出, 3 个解集都均匀分布在坐标系内, 共同组成一个帕累托前沿面, 表示 AGE-MOEA、NSGA-II 和 NSGA-III 都能够有效求解杀伤链优化设计模型。

进一步对比算法的性能: 首先, 如图 5(a) ~ 图 5(c) 所示分别单独展示了 3 个算法求解的解集, 可以看出, AGE-MOEA 的解集分布的最广泛而且均匀。图 6 为各算法 Hypervolume 指标的动态演进过程, 从图中可以看出在 800 代左右, 3 个算法的 Hypervolume 指标趋近一致, 但是 800 代后 AGE-MOEA 的 Hypervolume 指标继续增长, 并且最终远大于 NSGA-II 和 NSGA-III。最后如表 2 所示, 3 个算法求解结果的 3 个目标的最优值, 可以看出 AGE-MOEA 的 3 个目标的最优值均大于 NSGA-II 和 NSGA-III。上述结果表示 AGE-MOEA 对于求解杀伤链优化设计问题的具有更好的综合性能。

#### 3.2 防空反导作战杀伤链设计实验

##### 3.2.1 防空反导作战想定设置

防空反导作战是指综合运用预警追踪系统、指挥控制系统、火力拦截系统和作战通信系统等多种武器装备, 承担现代战争中拦截敌方入侵飞行目标的作战场景。本文以防空反导作战为例, 在某通用体系对抗仿真平台建立如图 7 所示想定。想定分为红蓝两方, 在某海域, 随着红蓝两军矛盾激化, 蓝军

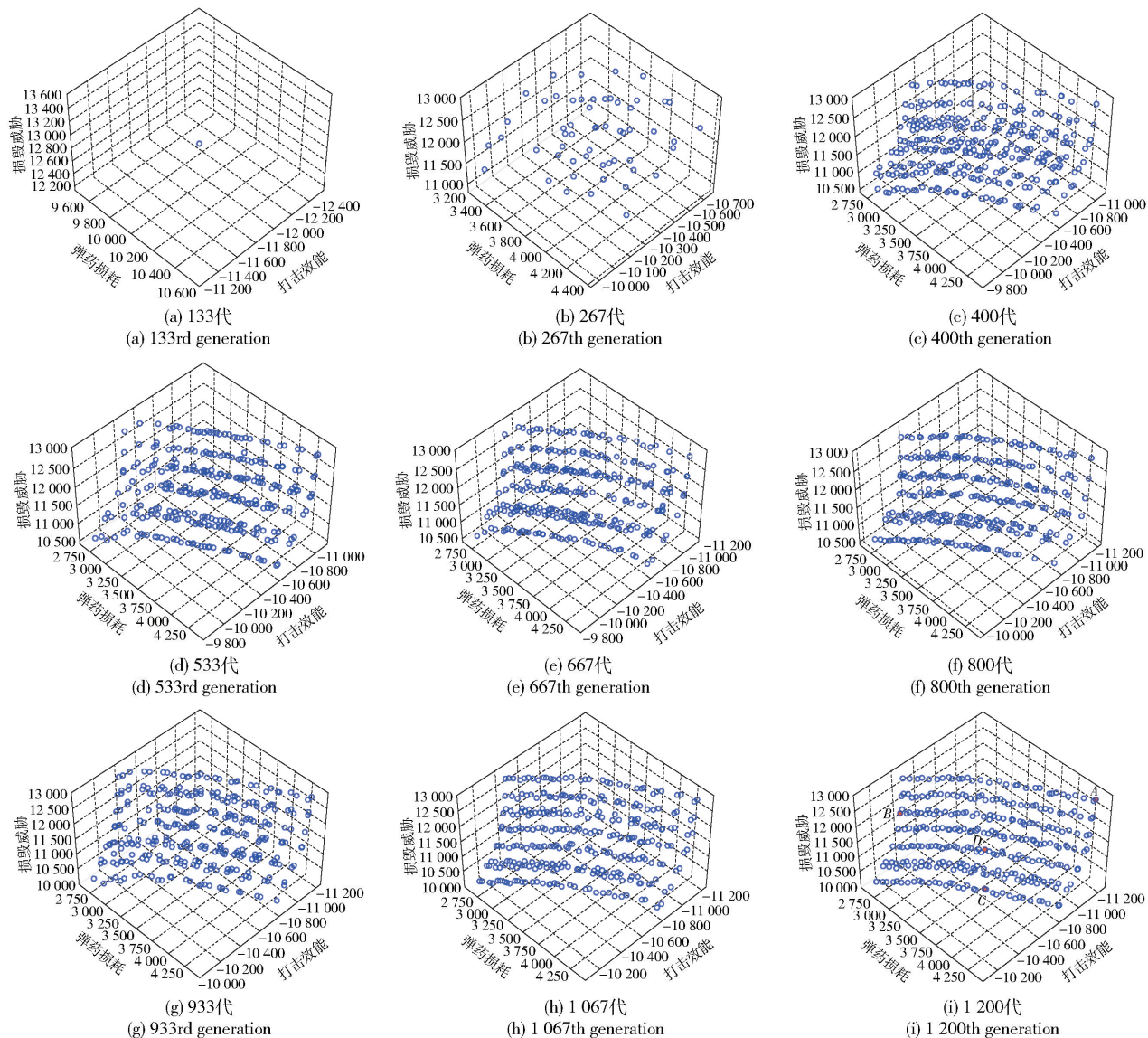


图 3 AGE-MOEA 求解动态演进过程

Fig. 3 Dynamic evolution of AGE-MOEA results

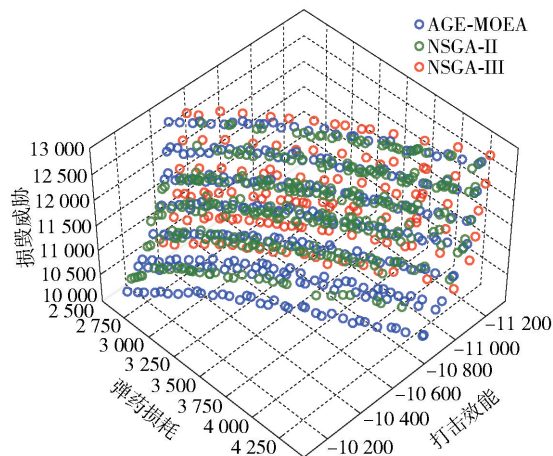


图 4 解集组合分布

Fig. 4 Distribution of solution sets

集结 A 型多功能战斗机 (装备编号 Fight\_A) 2 架、B 型多功能战斗机 (装备编号 Fight\_B) 2 架和无人机 (装备编号 UAV) 8 架组成的飞行编队,对红军重要军事设施进行攻击。红军防空反导体系包括 2 套防空反导系统 SAM 和 2 架多功能战斗机,需要站在红军视角,使用红军防空反导体系现有的作战资源,帮助红军设计合理的杀伤链,拦截蓝军入侵目标。红蓝两军兵力构成分别如表 3 和表 4 所示。

### 3. 2. 2 防空反导作战杀伤链设计结果分析

构建并求解防空反导杀伤链优化设计数学模型,以帕累托解集中的打击效能、弹药损耗和毁毁威胁 3 个目标权重组合为  $[1/3, 1/3, 1/3]$  的方案为例,详细展示综合性能最优的杀伤链方案。如表 5 所示为该方案包含的杀伤链列表,表格分为目标、侦

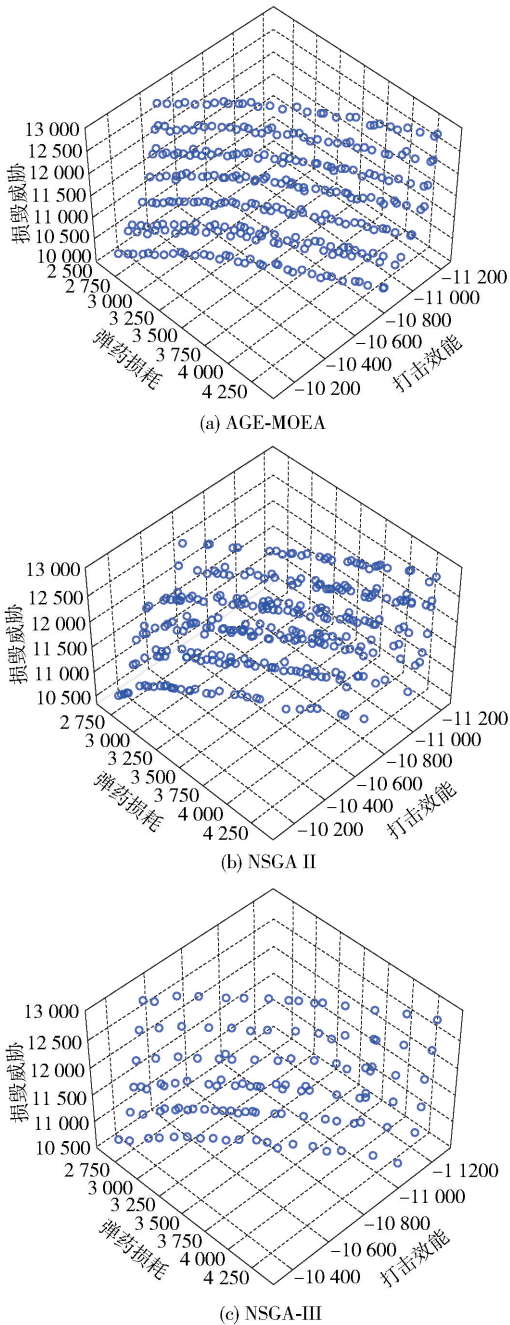


图 5 AGE-MOEA、NSGA-II、NSGA-III 解集分布

Fig. 5 Solution set distribution of AGE-MOEA, NSGA-II and NGA-III

察单元、指控单元和打击单元 4 列, 每一行表示针对该蓝军目标一条闭合杀伤链, 方案共包括 12 个目标 27 条杀伤链。如图 8 所示为所有杀伤链聚合在一起形成的杀伤网。在图 8 中, 为了表示杀伤链的闭合性, 第 1 列和最后一列节点均为相同的敌方目标, 第 2、3、4 列节点分别对应的是侦察单元、指控单元和打击单元, 所有节点通过连线组合为杀伤网络, 其中每一条目标-侦察单元-指控单元-打击单元-

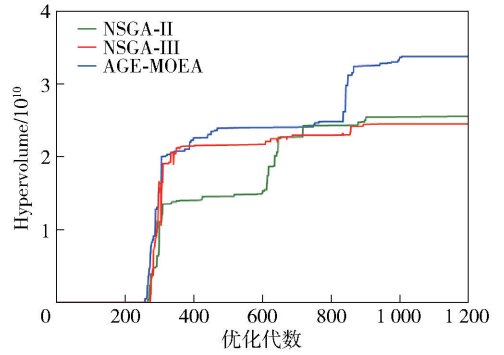


图 6 各算法 Hypervolume 指标动态演进过程  
Fig. 6 Dynamic evolution of Hypervolume indicators of each algorithm

表 2 各算法求解结果各目标的最优值

Table 2 Optimal value of each object of each algorithm's solution

算法	打击效能目标	弹药消耗目标	毁伤威胁目标
AGE-MOEA	11 193	2 655	10 141
SGA-II	11 182	2 709	10 499
NSGA-III	11 187	2 703	10 165



图 7 防空反导作战想定

Fig. 7 Scenario of air defense and anti-missile operations

目标表示一条针对该目标的闭合杀伤链。这验证了杀伤链优化设计模型的有效性, 以及在实际作战问题的军事价值。

## 4 结论

本文针对武器装备体系的杀伤链设计问题, 提出一种基于 AGE-MOEA 的杀伤链建模与优化方法。结合 OODA 循环理论, 建立了杀伤链设计多目标优

表3 红军兵力构成

Table 3 Composition of red forces

装备类型	装备编号	数量	单元编号	装备精度	弹药成本/美元	装备成本/美元	多目标能力
侦察装备	Radar_A(SAM)	2	Radar_A_1、Radar_A_2	0.92		4 000	4
	Radar_B(SAM)	2	Radar_B_1、Radar_B_2	0.94		6 000	6
指控装备	指控中心(SAM)	2	指控中心_1、指控中心_2	0.95		9 000	8
打击装备	Missile_A(SAM)	12	Missile_A_1 ~ Missile_A_12	0.88	300		
	Missile_B(SAM)	12	Missile_B_1 ~ Missile_B_12	0.95	500		
	Missile_C(Fighter)	8	Missile_B_1 ~ Missile_B_8	0.9	400		

表4 蓝军兵力构成

Table 4 Composition of blue forces

装备编号	数量	单元编号	目标价值/美元	威胁度	毁伤门限
Fighter_A	2	Fighter_A_1、Fighter_A_2	7 800	1.0	0.8
Fighter_B	2	Fighter_B_1、Fighter_B_2	6 500	0.8	0.8
UAV	8	UAV_1 ~ UAV_8	1 590	0.4	0.6

表5 杀伤链列表

Table 5 Kill chains list

目标	侦察单元	指控单元	打击单元	目标	侦察单元	指控单元	打击单元
Fighter_A_1	Radar_B_1	指控中心_1	Missile_B_2	UAV_2	Radar_A_1	指控中心_1	Missile_A_8
Fighter_A_1	Radar_B_1	指控中心_1	Missile_C_5	UAV_3	Radar_B_1	指控中心_2	Missile_A_9
Fighter_A_2	Radar_B_2	指控中心_1	Missile_A_4	UAV_3	Radar_B_1	指控中心_2	Missile_C_1
Fighter_A_2	Radar_B_2	指控中心_1	Missile_A_10	UAV_4	Radar_B_1	指控中心_1	Missile_A_12
Fighter_A_2	Radar_B_2	指控中心_1	Missile_B_12	UAV_4	Radar_B_1	指控中心_1	Missile_C_2
Fighter_B_1	Radar_B_1	指控中心_2	Missile_B_1	UAV_5	Radar_B_2	指控中心_2	Missile_C_3
Fighter_B_1	Radar_B_1	指控中心_2	Missile_C_6	UAV_5	Radar_B_2	指控中心_2	Missile_C_8
Fighter_B_1	Radar_B_1	指控中心_2	Missile_C_7	UAV_6	Radar_B_1	指控中心_2	Missile_B_4
Fighter_B_2	Radar_B_2	指控中心_2	Missile_A_2	UAV_6	Radar_B_1	指控中心_2	Missile_C_4
Fighter_B_2	Radar_B_2	指控中心_2	Missile_A_5	UAV_7	Radar_B_2	指控中心_2	Missile_A_1
Fighter_B_2	Radar_B_2	指控中心_2	Missile_A_7	UAV_7	Radar_B_2	指控中心_2	Missile_B_9
UAV_1	Radar_A_1	指控中心_1	Missile_A_6	UAV_8	Radar_B_1	指控中心_1	Missile_A_11
UAV_1	Radar_A_1	指控中心_1	Missile_B_7	UAV_8	Radar_B_1	指控中心_1	Missile_B_11
UAV_2	Radar_A_1	指控中心_1	Missile_A_3				

化数学模型,并提出基于 AGE-MOEA 杀伤链优化算法流程框架。得到以下主要结论:

1) 杀伤链多目标优化模型综合考虑了侦察、指控和打击装备 3 类武器装备,包括打击效能最大、武器消耗最小和损毁威胁最小 3 个目标函数,以及装备使用约束、武器资源数量约束和 0-1 整数约束、杀伤链关系约束、毁伤门限多个约束条件。实验结果表明,该模型能够在保证所有目标杀伤链闭合的前提下,同时追求打击效能、武器消耗和损毁威胁最

优,求解得到杀伤链方案,形成分布式杀伤力,提升战场体系化作战能力。

2) AGE-MOEA 能够有效求解杀伤链优化设计模型,并且相比 NSGA-II、NSGA-III,求解的非支配解集在均匀性和收敛性具有更好的综合性能。

在交战过程中,既有的杀伤链方案可能会因为装备损毁、既有目标击毁、突现新目标等不确定性情况打乱,需要杀伤链具备动态重构的能力。相比于静态杀伤链设计,杀伤动链态重构需要考虑的装备

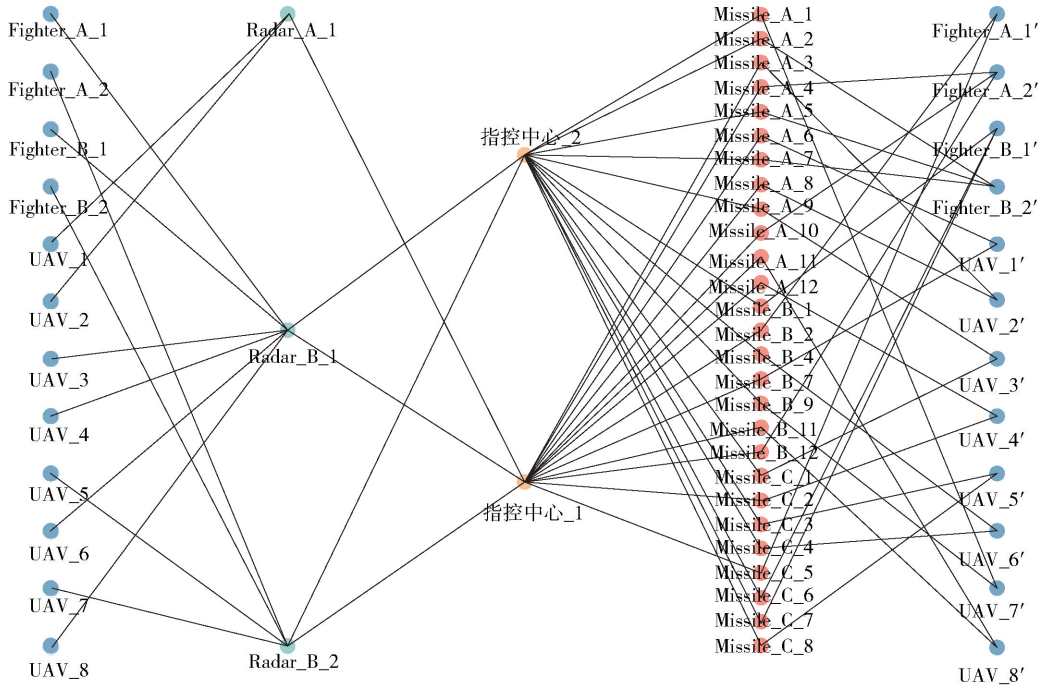


图8 杀伤网方案

Fig. 8 Kill web solution

类型更多、作战约束更多,面对的不确定性情况也更加复杂,后续研究将深入探索杀伤链的动态重构问题,进一步提升杀伤链的动态自适应能力。

### 参考文献 (References)

- [1] 罗鹏程, 傅攀峰, 周经伦. 武器装备体系作战能力评估框架[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(1): 72-75.  
LUO P C, FU P F, ZHOU J L. Combat capability evaluation framework of weapon system of system[J]. Systems Engineering and Electronics, 2005, 27(1): 72-75. (in Chinese)
- [2] 陈启宏, 赵青松, 邱薇, 等. 基于动态博弈的武器装备体系发展规划论证方法[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(10): 3124-3133.  
CHEN Q H, ZHAO Q S, QU W, et al. Planning and demonstration method of weapon system of system based on dynamic game[J]. Systems Engineering and Electronics, 2022, 44(10): 3124-3133. (in Chinese)
- [3] SHIH C, KOONG C, HSIUNG P. Billiard combat modeling and simulation based on optimal cue placement control and strategic planning[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2012, 67(1): 25-41.
- [4] SMITH R M. Using kill-chain analysis to develop surface ship CONOPs to defend against anti-ship cruise missiles [D]. Monterey, CA, US: Naval Postgraduate School, 2010.
- [5] 陈登, 陈楚湘, 周春华. 基于“OODA环”的杀伤网节点重要性评估[J]. 兵工学报, 2024, 45(2): 363-372.  
CHEN D, CHEN C X, ZHOU C H. Importance evaluation of kill web nodes based on OODA Ring[J]. Acta Armamentarii, 2024, 45(2): 363-372. (in Chinese)
- [6] 高保慧, 胡海. 天空海一体对海打击动态杀伤网作战概念研究[J]. 舰船电子工程, 2023, 43(1): 28-31.  
GAO B H, HU H. Research on the operational concept of sky and sea to sea strike dynamic kill web [J]. Ship Electronic Engineering, 2023, 43(1): 28-31. (in Chinese)
- [7] 王玉茜, 曹亚杰, 余晓琼, 等. 美军杀伤网概念研究及对我防空作战装备体系的启示[J]. 现代防御技术, 2023, 51(6): 1-8.  
WANG Y Q, CAO Y J, SHE X Q, et al. Research on the concept of kill-web of American army and its enlightenment to our air defense combat equipment system [J]. Modern Defence Technology, 2023, 51(6): 1-8. (in Chinese)
- [8] 王梦, 杨松, 李小波, 等. 基于可执行架构的杀伤链设计与分析优化方法[J]. 系统仿真技术, 2021, 17(3): 169-174.  
WANG M, YANG S, LI X B, et al. Kill chain design and analysis optimization method based on executable architecture [J]. System Simulation Technology, 2021, 17(3): 169-174. (in Chinese)
- [9] 刘畅, 张雪松. 基于立体网络模型的机群杀伤链架构与规划研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2021, 16(5): 468-479.  
LIU C, ZHANG X S. Research on architecture and planning of aircraft group kill chain based on stereoscopic network model [J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2021, 16(5): 468-479. (in Chinese)
- [10] 向南, 豆亚杰, 姜江, 等. 马赛克战概念下作战模块应急重构自主决策[J]. 指挥与控制学报, 2020, 6(3): 223-228.  
XIANG N, DOU Y J, JIANG J, et al. Operational module emergency reconstruction autonomous decision based on mosaic warfare concept [J]. Journal of Command and Control, 2020, 6(3): 223-228. (in Chinese)

- [11] 钱丰, 赵红. 有无人协同杀伤链引擎设计与实现[J]. 信息化研究, 2023, 49(2): 41–47.  
QIAN F, ZHAO H. Design and implementation of man-unmanned coordinated kill chain engine [J]. Informatization Research, 2023, 49(2): 41–47. (in Chinese)
- [12] 杨争争, 白浩, 侯勇. 陆战场杀伤网模型与资源优化初探[J]. 火炮发射与控制学报, 2022, 43(5): 49–53.  
YANG Z Z, BAI H, HOU Y. Preliminary study on kill net model and resource optimization of land battlefields[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2022, 43(5): 49–53. (in Chinese)
- [13] 夏博远, 杨克巍, 杨志伟, 等. 基于杀伤网评估的装备组合多目标优化[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(2): 399–409.  
XIA B Y, YANG K W, YANG Z W, et al. Multi-objective optimization of equipment combination based on kill-web evaluation [J]. Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(2): 399–409. (in Chinese)
- [14] 万斯来, 王国新, 明振军, 等. 基于知识推理的杀伤网智能设计方法[J]. 兵工学报, 2024, 45(4): 1025–1037.  
WAN S L, WANG G X, MING Z J, et al. Knowledge reasoning-based intelligent design method of kill-web [J]. Acta Armamentarii, 2024, 45(4): 1025–1037. (in Chinese)
- [15] SHI H Q, HE B, LIANG J, et al. Modeling technology of naval formation area anti-aircraft kill web based on event graph [C] // Proceedings of the 2022 9th International Conference on Dependable Systems and Their Applications. Urumqi, China; IEEE, 2022: 353–359.
- [16] WANG L Y, CHEN L B, YANG Z W, et al. A prospect-theory-based operation loop decision-making method for kill web [J]. Mathematics, 2022, 10(19): 3486.
- [17] RICHARDS C. Boyd's OODA loop[J]. Necesse, 2020, 5(1): 142–165.
- [18] 智洪欣, 赵鹏, 李中, 等. 基于可射击概率约束的防空作战火力优化分配[J]. 兵工学报, 2022, 43(4): 952–959.  
ZHI H X, ZHAO P, LI Z, et al. Optimal fire allocation for air defense operations based on the shot probability constraint [J]. Acta Armamentarii, 2022, 43(4): 952–959. (in Chinese)
- [19] WANG T, FU L Y, WEI Z X, et al. Unmanned ground weapon target assignment based on deep Q-learning network with an improved multi-objective artificial bee colony algorithm [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2023, 117: 105612.
- [20] 褚凯轩, 常天庆, 张雷. 基于改进人工蜂群算法的地面作战武器-目标分配[J]. 兵工学报, 2023, 44(7): 2171–2183.  
CHU K X, CHANG T Q, ZHANG L. Ground combat weapon-target allocation based on improved artificial bee colony algorithm [J]. Acta Armamentarii, 2023, 44(7): 2171–2183. (in Chinese)
- [21] ZHI P F, LIANG Z Z, ZHU W L, et al. Weapon target assignment strategy for shipboard power system considering high power pulse loads integration [J]. Energy Reports, 2023, 9(S8): 32–40.
- [22] 王葵, 赵云飞, 滕克难, 等. 不确定因素下海上要地防空动态火力分配模型[J]. 兵工学报, 2022, 43(11): 2885–2896.  
WANG Y, ZHAO W F, TENG K N, et al. Dynamic fire distribution model for air defense at key points on sea under uncertain factors [J]. Acta Armamentarii, 2022, 43(11): 2885–2896. (in Chinese)
- [23] KIM J, LEE C, YI M Y. New weapon target assignment algorithms for multiple targets using a rotational strategy and clustering approach [J]. IEEE Access, 2022, 10: 43738–43750.
- [24] 聂俊峰, 陈行军, 苏琦. 基于NSGA-III算法的集群目标袭火力分配建模与优化[J]. 兵工学报, 2021, 42(8): 1771–1779.  
NIE J F, CHEN X J, SU Q. Clustering target incoming fire distribution modeling and optimization based on NSGA-III algorithm [J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(8): 1771–1779. (in Chinese)
- [25] PANICHELLA A. An adaptive evolutionary algorithm based on non-euclidean geometry for many-objective optimization [C] // Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference. New York, NY, US: Association for Computing Machinery, 2019: 595–603.
- [26] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182–197.
- [27] SHARMA S, KUMAR V A. Comprehensive review on multi-objective optimization techniques: past, present and future [J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2022, 29(7): 5605–5633.
- [28] DEB K, JAIN H. An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point-based nondominated sorting approach, Part I: solving problems with box constraints [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2013, 18(4): 577–601.
- [29] JAIN H, DEB K. An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point based nondominated sorting approach, Part II: handling constraints and extending to an adaptive approach [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation. 2013, 18(4): 602–622.
- [30] BLANK J, DEB K, ROY P C. Investigating the normalization procedure of NSGA-III [C] // Evolutionary Multi-Criterion Optimization: 10th International Conference. East Lansing, MI, US: Springer, 2019: 229–240.
- [31] THOMPSON A C, THOMPSON A C. Minkowski geometry [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1996.
- [32] FONSECA C M, PAQUETE L, LÓPEZ-IBÁÑEZ M. An improved dimension-sweep algorithm for the hypervolume indicator [C] // Proceedings of 2006 IEEE international conference on evolutionary computation. Vancouver, BC, Canada: IEEE, 2006: 1157–1163.
- [33] BLANK J, DEB K. Pymoo: multi-objective optimization in python [J]. IEEE Access, 2020, 8: 89497–89509.