

基于双层遗传算法的静态防空反导杀伤网构建方法

付昱龙¹, 张海宾¹, 郭相科², 戚玉涛¹

(1. 西安电子科技大学网络与信息安全学院, 西安, 710126; 2. 空军工程大学防空反导学院, 西安, 710051)

摘要 在防空反导作战中, 构建高效的杀伤网是确保反导任务成功的关键环节, 然而杀伤网构建问题的优化建模和求解是一个难题。从组合优化的角度出发, 对静态的杀伤网构建问题进行优化建模并提出高效求解方案; 针对杀伤网构建问题的特点, 建立了混合整数规划模型, 并使用一种基于双层规划的优化建模方案进行简化, 通过任务分配和冲突消解的主从问题协同降低求解难度, 随后设计一种基于双层遗传算法的求解框架进行优化实验。在 4 组不同规模的环境实验测试中, 算法能够快速找到较优解, 并且对较大规模问题能保持良好的求解能力以及良好的可解释性。为防空反导领域的静态的杀伤网自主智能构建提供思路, 可作为动态杀伤网调整的研究基础。

关键词 混合整数规划; 杀伤网; 遗传算法; 防空反导

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2025.01.008

中图分类号 TP183; E919 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2025)01-0059-08

Static Air Defense and Antimissile Kill-Net Construction Method Based on Double-Layer Genetic Algorithm

FU Yulong¹, ZHANG Haibin¹, GUO Xiangke², QI Yutao¹

(1. School of Cyber Engineering, Xidian University, Xi'an 710126, China;
2. Air Defense and Antimissile School, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract In air defense and antimissile operations, constructing an efficient kill-net is a key part to ensuring the success of air defense tasks, while it is tricky to model and to optimize such problems. This paper aims to model the construction of static kill-net from the perspective of combinatorial optimization and propose efficient optimization methods. Considering the characteristics of the kill-net construction problem, this paper establishes a mixed-integer programming model and uses a bilevel optimization modeling scheme for simplification. By the cooperation of the leader problem of tasks assignment and the follower problem of resolving conflicts, the optimization difficulty is reduced. Subsequently, a solution framework based on a bilevel genetic algorithm is designed. In experimental tests on 4 sets of different-scale environments, the algorithm is able to get a fine result quickly, with great interpretability and a good capabilities for solving larger-scale problem. This work provides insights for the autonomous intelligent construction of static kill-net in the field of air defense and could serve as the basis for research focusing on dynamic kill-net adjustment.

收稿日期: 2024-03-31

基金项目: 国家自然科学基金(61772392)

作者简介: 付昱龙(2000—), 男, 山西临汾人, 硕士生, 研究方向为强化学习与群智能决策理论。E-mail:fyl1532@163.com

引用格式: 付昱龙, 张海宾, 郭相科, 等. 基于双层遗传算法的静态防空反导杀伤网构建方法[J]. 空军工程大学学报, 2025, 26(1): 59-66. FU Yulong, ZHANG Haibin, GUO Xiangke, et al. Static Air Defense and Antimissile Kill-Net Construction Method Based on Double-Layer Genetic Algorithm[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2025, 26(1): 59-66.

Key words mixed integer programming; kill-net; genetic algorithm; air defense and antimissile

近年来,防空反导智能化研究逐渐成为热点方向,而杀伤网的构建是该领域的研究重点^[1-3]。杀伤网的概念于 20 世纪 90 年代由美国空军部门提出,被描述为一系列杀伤链的集合,每一个杀伤链可被描述为“发现一定位—跟踪—制导—打击—评估”6 个阶段,是 OODA 循环理论在防空反导领域的一种应用和拓展^[4-5]。文献[6~10]主要基于多层网络理论对杀伤网进行建模和求解,然后对杀伤网质量的评估指标进行了详细论述。文献[11~12]主要从马尔可夫决策的视角,关注动态过程中杀伤网的调整。当前的研究在使用多层网络理论建模杀伤网的构建问题时,主要注重评估而非构建方法,且对敌我装备型号的能力边界、参数信息依赖性强,算法扩展性受限;而在防空反导场景的杀伤网构建问题中,基于强化学习的杀伤网构建在一定程度上缺乏可解释性,并且与场景耦合性强,而面对非确定场景下的通用优化建模、降低求解难度是一个难题^[13]。为解决这些问题,本文从组合优化的角度出发,对杀伤网构建问题进行优化建模,并提出一种基于双层遗传算法的杀伤网构建优化求解算法,对其求解质量和扩展性进行了探讨。

1 杀伤网构建优化建模

在杀伤网构建问题中,对于每一个来袭目标,都需要建立一条完整的杀伤链,且对于杀伤链上的步骤必须按顺序进行,每一步骤需要的执行时间与选择的单位等信息有关。一个完整的杀伤网构建问题的解,应当能够清晰地描述对于所有来袭目标的每一个步骤,分别由哪一个资源在哪一个时间段处理。为了简化问题,本文作如下假设:①红方单位对来袭目标的各个处理步骤的期望时间可以估计;②可将红方的每个多功能多通道单位,视作多个单功能单通道单位,使得同一时刻每个单位只能进行一项操作;③对于所有蓝方来袭目标,可以对其进行造成威胁时刻进行估计。

基于上述假设,一个面向未来要素解耦之后的通用防空反导杀伤网构建场景可以描述为:红方拟围绕保卫要地进行防空作战,其拥有一系列单位 $U=\{U_1, U_2, \dots, U_i, \dots, U_m\}$, 蓝方发射了一系列来袭目标 $T=\{T_1, T_2, \dots, T_j, \dots, T_n\}$, 红方预估蓝方单位造成危害的时刻分别为 $D=\{D_1, D_2, \dots, D_j, \dots,$

$D_n\}$, 拟对蓝方来袭目标进行高效拦截。每一个对来袭目标的拦截过程都构成一条杀伤链,该链包括一系列处理流程,即 $O=\{O_1, O_2, \dots, O_{h_m}\}$, 比如“发现一定位—跟踪—制导—打击—评估”,并且该链可以进行自由扩展或精炼,但要求步骤之间存在逻辑先后顺序,且步骤之间不能有等待时间。其中,根据假设 2, U_i 代表一个同一时刻只能处理某特定步骤的等效解耦合红方单位。

基于上述场景,优化模型的构建细节如下。

对于每一批次的来袭目标,假设给定分配方案下的期望拦截率为 η , 则防空反导方的优化目标为:

$$\max \eta = \frac{|T_s|}{|T|} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)的含义是:在防空反导杀伤网构建问题中,优化目标是尽可能多地拦截来袭目标。若给定分配方案下,来袭目标 T_j 的处理终止时刻早于其预估造成危害的时刻,可认定为成功拦截; T_s 为被成功拦截的来袭目标的集合。

在后续形式化描述中, $i=1, 2, \dots, m$, 表示红方单位的序号; $j=1, 2, \dots, n$, 表示来袭目标的编号; $h=1, 2, \dots, h_m$, 表示每个来袭目标需要处理的步骤; $k=1, 2, \dots, k_i$, 表示红方单位 i 的任务列表中的第 k 个操作; 来袭目标 j 与其待处理步骤 h 的组合记作 $o_{j,h}$; $\text{available}_{i,h}$ 表示第 h 个步骤能否交由第 i 个红方单位处理; $p_{i,j,h}$ 表示蓝方来袭目标 j , 其第 h 步骤在红方单位 i 上预期需要的最短处理时间。

为了完整描述一个杀伤网构建问题的解,本文引入决策变量 x 和 tm , 其每一个分量为:

$$x_{i,j,h,k} = \begin{cases} 1, & \text{若 } o_{j,h} \text{ 在 } i \text{ 上第 } k \text{ 顺位执行} \\ 0, & \text{其他情况} \end{cases} \quad (2)$$

$$tm_{i,k} \geq 0 \quad (3)$$

式(2)中 $x_{i,j,h,k}$ 表示对于一个来袭目标的某个步骤 $o_{j,h}$, 是否交由红方单位 i 处理, 且位于 i 工作序列的第 k 位。式(3)中, $tm_{i,k}$ 表示红方单位 i 的工作序列中, 第 k 个任务的开始时刻。根据这 2 个决策变量, 实际可以将所有来袭目标的所有步骤的执行单位、执行次序和开始时刻都计算出来。为了方便表示, 继续引入下列变量, 它们可以从式(2)和式(3)中的决策变量, 结合一些已知参数求解:

$$y_{i,j,h} = \begin{cases} 1, & \text{若 } o_{j,h} \text{ 在 } i \text{ 上执行} \\ 0, & \text{其他情况} \end{cases} \quad (4)$$

$$t_{j,h} \geq 0 \quad (5)$$

$$ot_{j,h} \geq p_{i,j,h} \quad (6)$$

$$k_i \geq 0 \quad (7)$$

式(4)表示一个来袭目标的某个步骤 $o_{j,h}$ 是否被分配给红方单位 i 处理。式(5)中, $t_{j,h}$ 为 $o_{j,h}$ 的开始时间。式(6)中, $ot_{j,h}$ 为 $o_{j,h}$ 实际处理使用的时间长度, 它不小于 $o_{j,h}$ 在红方单位 i 上需要操作的最长时间。式(7)中, k_i 为红方单位 i 上分配的操作数量。

根据上述参数和决策变量, 可描述约束条件如下:

$$\text{s. t. } t_{j,h} + ot_{j,h} = t_{j,h+1} \quad (8)$$

$$tm_{i,k} + ot_{j,h}x_{i,j,h,k} \leq tm_{i,k+1} (h \neq h_m) \quad (9)$$

$$tm_{i,k} \leq t_{j,h} + (1 - x_{i,j,h,k})L \quad (10)$$

$$tm_{i,k} + (1 - x_{i,j,h,k})L \geq t_{j,h} \quad (11)$$

$$y_{i,j,h} \leq \text{available}_{i,h} \quad (12)$$

$$\sum_j \sum_h x_{i,j,h,k} = 1 \quad (13)$$

$$\sum_i y_{i,j,h} = 1 \quad (14)$$

$$t_{T_{s'},h_m} \leq D_{s'} \quad \text{if } T_{s'} \in T_s \quad (15)$$

约束(8)保证的是来袭目标被拦截时, 必须按照步骤的指定顺序进展, 并且过程不能中断, 比如在定义的“侦察—通信—制导—打击”的链路中, “侦察”步骤结束后必须立刻执行“通信”步骤, 而不能跳过或者等待, 否则意味着杀伤链的建立失败; 约束(9)限制了红方单位在某一时刻同时处理多个来袭目标的情况, 这与前文中将红方单位进行逻辑拆解的假设相违; 约束(10)和约束(11)共同确保 $o_{j,h}$ 这个步骤, 选择的红方单位可用, 且上一个步骤 $o_{j,h-1}$ 已经完成, 此处 L 是一个很大的数字, 若 $x_{i,j,h,k}$ 为 1, 则 $tm_{i,k}$ 和 $t_{j,h}$ 应该是相等的。约束(12)意味着 $o_{j,h}$ 必须安排给在能力范围内的红方单位, 比如“通信”步骤不能交给无通信能力的单位; 约束(13), 约束(14)明确了所有来袭目标的所有步骤都必须被分配; 约束(15)表明, 成功拦截的条件是, 在规划方案中, 拦截时刻不晚于预期造成危害时刻。

至此, 可以将防空反导中的杀伤网构建问题转化为如上描述的混合整数规划问题(mixed integer programming, MIP)。由于决策变量的数量庞大, 约束条件复杂, 对基于经典算法的优化求解器的建模能力和求解能力提出了挑战。事实上, 在上述建模方案下, 可以将防空反导中的杀伤网构建问题视作一种无等待约束的流水柔性车间调度问题, 而后者已经被证明是 NP-hard 问题^[14-15]。为了适应实战中可能遇到的大规模场景, 本文用一个双层规划的思路来对问题进一步建模。

双层规划问题是一个分层的优化问题, 其中一个优化问题(上层问题)嵌套了另一个优化问题(下层问题), 上层问题的解依赖于下层问题的解决方案, 下层问题的解又受到上层决策变量的影响^[16-17]。结合前文构建的 MIP 模型, 可按如下思路将问题拆分为 2 个子问题: 作为领导者的上层问题是针对来袭目标的每一个步骤的处理者分配问题, 也就是说, 为每一个来袭目标的每一个关键步骤分配一个红方单位。作为跟随者的下层问题, 以上层问题的解, 也就是一个分配方案作为约束条件, 去解决步骤的排序和时间规划问题。

基于上述思路, 双层规划模型的形式化描述如下:

$$\min_{y,t} \eta = \frac{|T_s|}{|T|} \times 100\% \quad (16)$$

$$\text{s. t. } \sum_i y_{i,j,h} = 1 \quad (17)$$

$$y_{i,j,h} \leq \text{available}_{i,h} \quad (18)$$

$$t \in \arg\min \{\eta | g_j(t, y) \leq 0\} \quad (19)$$

式中: y 为上层问题的决策变量, 由 $y_{i,j,h}$ 组成; t 为下层问题的决策变量, 由 $t_{j,h}$ 组成; g_j 为下层问题的约束, 由前文 MIP 模型中的约束(8)、(9)、(10)、(11)、(13)组成, 此处不重复描述。

在这个双层规划模型中, 上层问题实际上想要解决将每一个来袭目标的每一个待处理步骤, 都合理分配给红方单位的任务。然后下层问题将这个分配方案作为参数, 通过安排下层的 $t_{j,h}$, 也就是每一个任务的开始时间, 来满足约束条件并计算目标函数值, 并将这个值回传给上层问题, 作为下一步迭代优化的参考, 因为上下层的优化目标是一致的。至此, 便完成了基于双层规划的优化建模。

2 求解算法设计

为了解决上述双层规划问题, 本文提出一种基于 2 层遗传算法的求解框架。遗传算法(genetic algorithms, GA)是一类模仿生物进化过程的搜索和优化算法, 其基本思想源自达尔文的自然选择理论, 即适者生存, 不适者淘汰^[18]。在遗传算法中, 潜在的解被看作是种群中的个体, 每个个体都有一组特征(基因的某一种排序), 这些特征以某种方式决定了个体的“适应度”。算法的目标是找到使适应度最大化(或最小化, 取决于问题)的解。

在此基础上结合问题的特点, 考虑到约束(8), 一个满足要求的杀伤网应该能够保证, 对于任意来袭目标, 其下一步骤的开始时间等于上一步骤的结

束时间。这实际意味着决策空间可以被大幅简化，本文对下层的决策变量进行进一步调整，以 $P(n)$ 作为下层的一个解，其代表着对 n 个来袭目标的一个全排列。这个全排列的实际意义是对每个来袭目标第一个步骤被处理的开始时刻的排序。基于实际处理时间等于最小要求处理时间的贪心策略，令 $ot_{j,h} = p_{i,j,h}$ ，并通过上层问题的解告知的每个待处理步骤与红方单位的分配关系，结合 $P(n)$ 和简单的冲突消解，就可以在很低的时间复杂度内求解所有步骤的开始、结束时间，完成一轮迭代。

基于上述思路，算法的整体框架如图 1 所示。第 1 步是通过整数编码初始化主种群，然后需要将主种群中的每一个染色体，都作为一个参数，假设主种群的种群规模为 l ，则相当于创造了 l 个子问题。对于每一个子问题，都需要经过编码、初始化种群、选择、交叉、变异、适应度评估的求解过程。每一个子问题结束迭代后，将适应度值回传给主问题，作为对应染色体的适应度。最后，在主问题不断迭代，直至终止，得到的历史种群适应度最优的染色体对应的子问题的解即为最佳方案。接下来本文将对一些关键步骤进行详细解释。

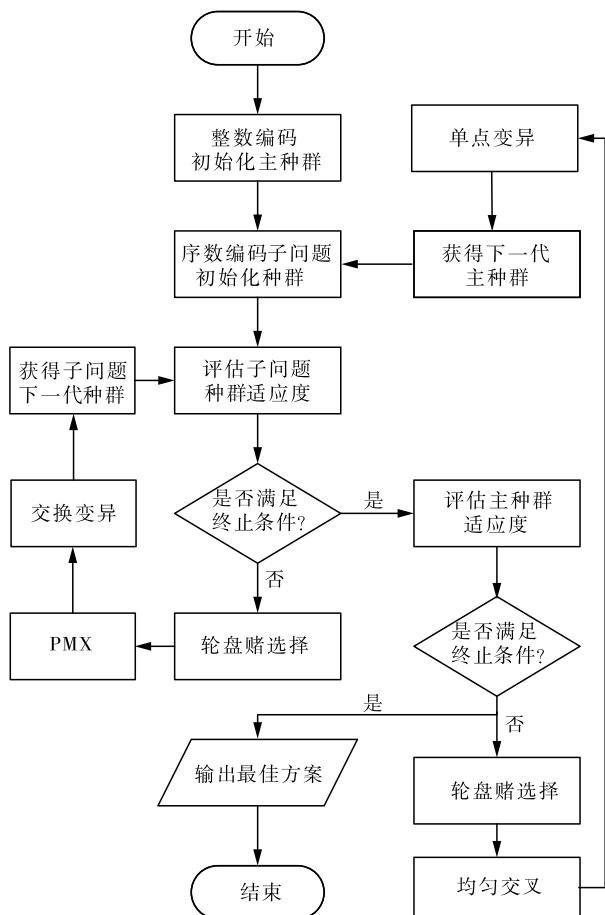


图 1 基于 GA 的双层求解算法

Fig. 1 Double-layer optimization algorithm based on GA

首先，对于问题的编码，在上层问题部分本文采取整数编码。因为在杀伤网构建过程中，来袭目标当前所处的步骤直接决定了红方单位对其的可用性，所以令染色体由 h_m 部分组成，每个部分的基因片段长度为 n ，这使得染色体上的每一个基因位置都代表一个来袭目标的某一个步骤，并且基因的值实际映射为一个可用的红方单位的序号。实际上通过这种方式产生的染色体，初始状态必然满足约束(17)、(18)。通过随机生成数个染色体，构成了初始化的种群。

而对于下层问题，本文采取序数编码，即以对 n 个来袭目标序号的一个排列作为染色体。其特点是不重复，表示这 n 个来袭目标的开始处理时间的排序。2 种编码的对比如图 2 所示。

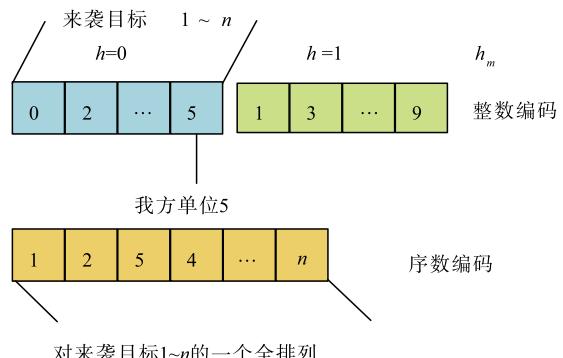


图 2 染色体编码方案

Fig. 2 Chromosome coding method

其次，上层和下层问题中都涉及适应度评估的过程。由于两层问题的目标函数一致，所以实际上主问题的适应度评估依赖于子问题的最优解求解，将子优化问题找到的最好解的目标函数值回传给主问题作为这个染色体的适应度。

理论上红方单位对来袭目标的某个步骤的处理时间不小于最小时长即可，此处本文基于贪心策略，令处理时间严格等于最小时长，据此可根据下层的解，即对来袭目标的处理顺序排列，在满足红方单位不并行处理的约束下依次确定各个来袭目标各个步骤的起始和终止时间。此处本文并没有直接将拦截比例作为适应度，而是采用了目标平均延迟时间(ave_tardiness)，它表示的是在给定方案中，每个目标从预计造成危害时刻到被拦截时刻的差值的平均值，若某来袭目标能够按时拦截，则其贡献的延迟时间为 0。给定方案计算所得目标平均延迟时间即为对应上层问题染色体的适应度。

最后是 2 个遗传算法中涉及到的遗传算子设计问题。遗传算法中主要需要设计的算子包括：选择、交叉、变异等。对于选择部分，本文统一采取轮盘赌

选择算子,令个体被选中的概率预期适应度函数值的大小成反比。

选择操作结束后,对于2层问题,均需要对选出的种群进行交叉、变异操作。对于上层问题,由于采取整数编码,本文使用均匀交叉(uniform crossover)的方式。均匀交叉从2个父代染色体中,按位随机选取其中某一位的基因值,并将其继承给子代。采取均匀交叉的好处是不会破坏上层问题编码的隐藏约束,即不能将某来袭目标的一个步骤分配给无对应能力的红方单位,同时能够较好地保持父代个体的优良基因片段。

对于下层问题,由于采用的是序数编码,本文使用部分映射交叉(partially mapped crossover, PMX)^[19]。PMX过程首先从2个父代个体随机选择一个子序列作为映射区域,然后在区域内通过相同位置的基因值互换得到2个临时子代,接着对映射区域外的基因,视其基因值在是否在映射区域内,对其进行临时子代交换或者保留。选择PMX算子的原因是其对序数编码的高适应性,不会因交换破坏子代的序数性质,如图3所示。

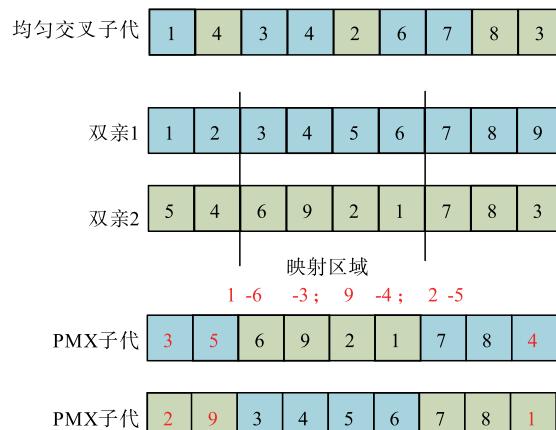


图3 均匀交叉与部分映射交叉算子对比

Fig. 3 Comparison between PMX and uniform crossover

最后是变异算子,对于上层问题,本文采取单点变异的方式,随机选取变异位置,并将其基因值随机替换成其他能力范围内的单位序号。对于下层问题,本文采取交换变异的方式,随机选取2个位置,并将序号对换。这2种变异方式不会破坏各自编码的约束满足性,并且能提供一定的跳出局部最优的探索能力。

3 实验与结果分析

本文所述实验均在一台配置了Intel(R) Core(TM) i7-10700 CPU @ 2.90 GHz 内存,Window

11 操作系统的主机进行,算法在 Python3.9 环境运行。

本文设计了4组对比场景,如表1所示,用于探索和验证算法在不同规模的问题上的表现。这些场景的规模从小到大逐渐扩展,旨在模拟算法在实际应用中可能遇到的各种规模的复杂场景。

表1中规模用 $n \times h_m \times m$ 表示,代表n个来袭目标, h_m 个必经步骤以及m个红方单位。平均危害时刻代表来袭目标平均造成危害的时刻,其中每个来袭目标的实际造成危害时刻基于该值随机生成,扰动幅度为±50%。CPU时间代表算法每迭代一次所需的CPU时间,而实际运行时间是上层迭代次数与下层迭代次数与CPU时间的乘积。其中,每个步骤对应红方单位所需最小持续时间基于给定的平均时长随机生成,扰动幅度为±50%。最后,步骤可用单位数决定了每一个步骤可用的单位数量。

表1 不同场景实验信息表

Tab. 1 Experiment information table for different scenarios

场景	规模	步骤平均时长/s	平均危害时刻/s	步骤可用单位数	CPU时间/s
S ₁	3×3×3	15,20,50		1,1,1	0.016
S ₂	12×4×7	15,20,50,20		2,1,2,2	0.044
S ₃	20×4×12	15,20,50,20		3,3,3,3	0.068
S ₄	25×5×30	15,20,30,40,10		6,6,4,5,9	0.105

在每个场景中,本文运行算法5次,并取每次运行的平均值,绘制各场景的收敛曲线如下。

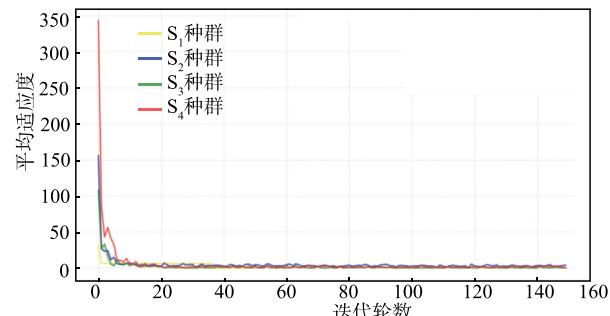


图4 各场景种群平均适应度收敛曲线

Fig. 4 Convergence curve of average fitness of populations in various scenarios

如图4在S₁~S₄4个场景中,算法在20次迭代附近收敛至最优水平,且随规模扩大,平均收敛轮数增长有限。这意味着在所设置场景中,算法能够快速寻找到来袭目标全部拦截的分配方案;接下来本文将进行扩展实验,在保证全部拦截的基础上,通过将优化目标函数和适应度函数替换为全部拦截时刻,将分配方案进一步进行优化。以下是扩展实验结

果,其中 Fitness 表示全部拦截时刻,且保证能够全部拦截,各场景的实验收敛曲线如图 5~图 8 所示。

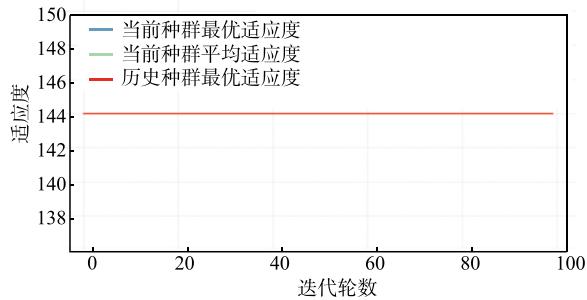


图 5 S_1 场景收敛曲线

Fig. 5 S_1 scene convergence curve

在 $3 \times 3 \times 3$ 的场景中,算法在第 1 轮就已经完全收敛,这是因为这个场景上层问题只有唯一的一个合法解,而下层问题的复杂度也非常低。

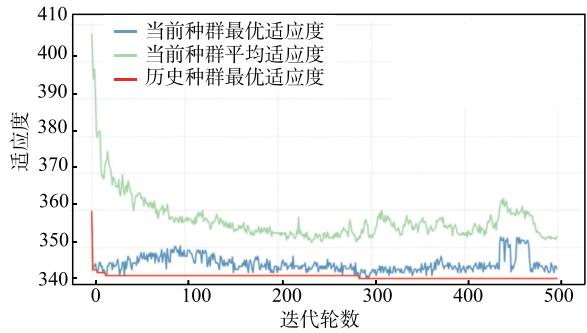


图 6 S_2 场景收敛曲线

Fig. 6 S_2 scene convergence curve

在 S_2 场景中,由于场景规模相对较小,算法快速找到了较优解,并且种群的平均适应度持续改进,在 300 轮迭代前后将较优解进一步改进。

在 S_3 场景中,来袭目标和红方单位的数量都增加,上层决策对下层的影响更大,因此当前种群最优适应度的突变较为明显。可以看到种群的最优适应度变化比较激烈。

最后在 S_4 场景中,通过机器数量更大幅度地增

加缓解了这种情况,使得整体略微平缓。

在扩展实验中,随着问题规模扩大,找到第 1 个稳定的次优解的迭代次数会增加,每一轮迭代本身消耗的 CPU 时间也会增加。

可以用甘特图直观地展示规划结果。甘特图是一种条形图,用于描述多个作业处理的时间安排关系。在本场景中,同一种颜色表示同一来袭目标,横轴表示时间,纵轴表示红方单位。不同的步骤都标注在图中,为了方便展示,此处特意将序号较小的步骤安排在序号较小单位的能力范围内。

随着规模的扩大,规划所得的甘特图的复杂度也会上升,几个场景的甘特图如图 9、图 10、图 11 所示。

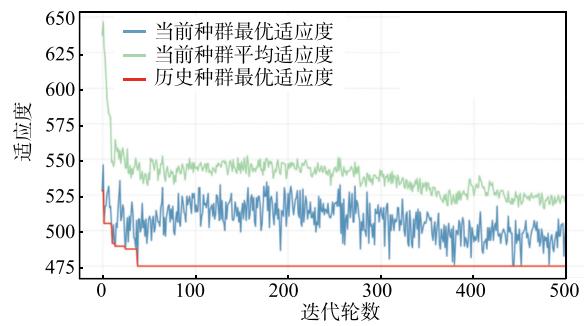


图 7 S_3 场景收敛曲线

Fig. 7 S_3 scene convergence curve

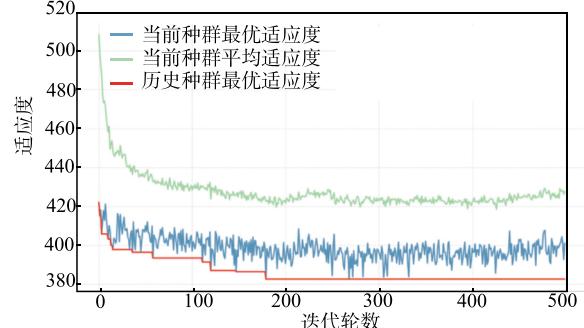


图 8 S_4 场景收敛曲线

Fig. 8 S_4 scene convergence curve

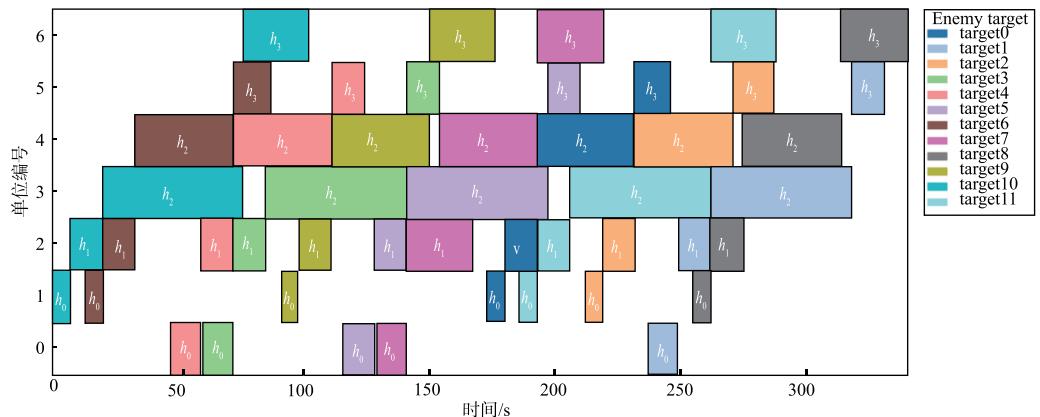
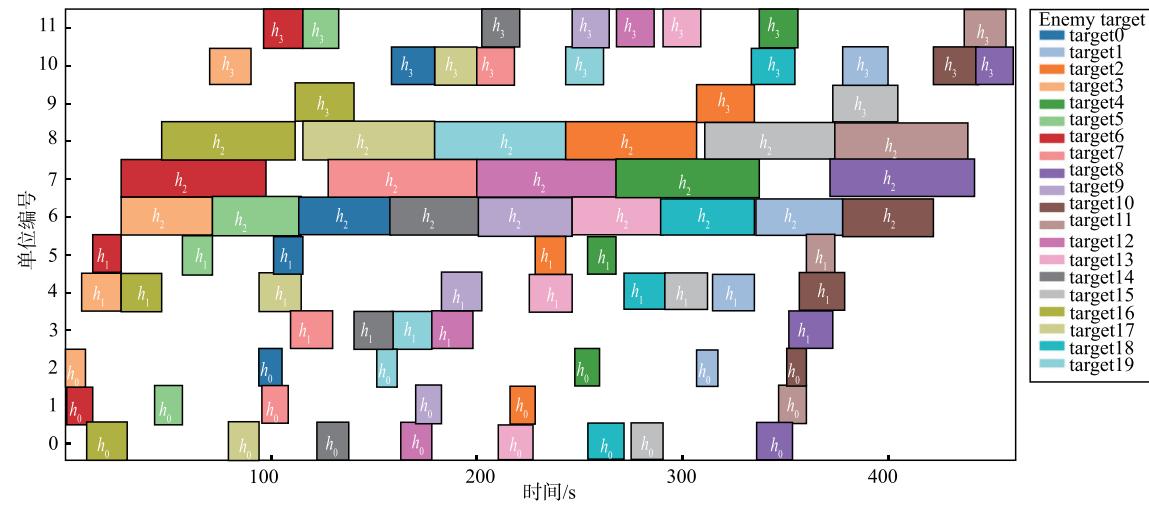
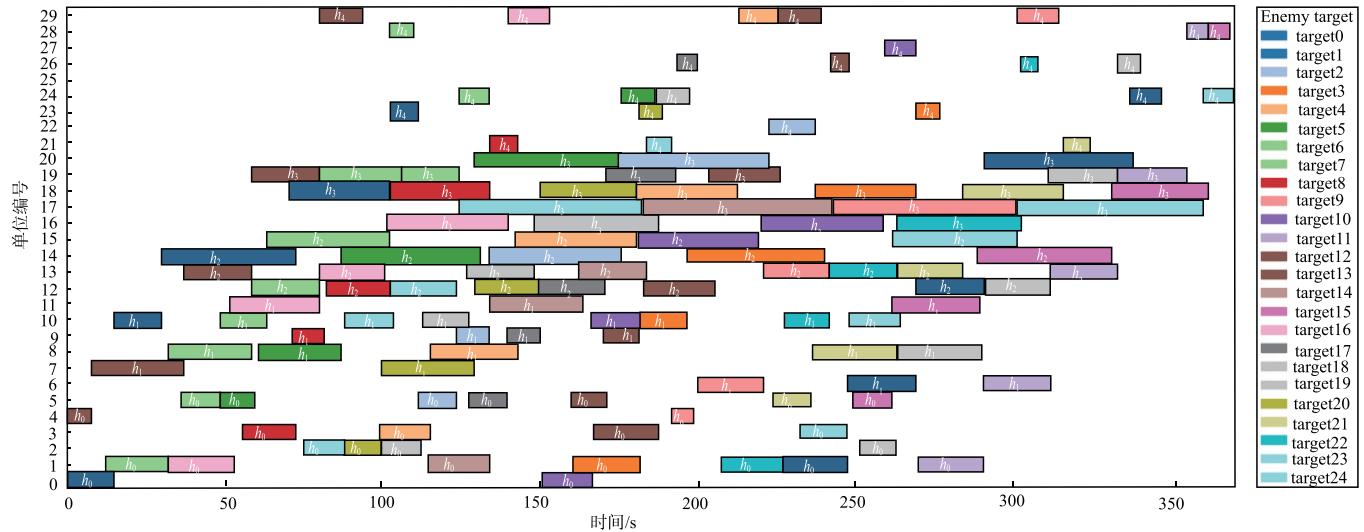


图 9 S_2 场景规划结果甘特图

Fig. 9 Gantt chart of S_2 scenario planning results

图 10 S₃ 场景规划结果甘特图Fig. 10 Gantt chart of S₃ scenario planning results图 11 S₄ 场景规划结果甘特图Fig. 11 Gantt chart of S₄ scenario planning results

在甘特图中,可以明确地看到几个特点:①所有来袭目标的处理步骤均按顺序且连续完成;②在时间轴上任务安排更为稠密的机器,其所代表的步骤处理能力更为受迫,这既有可能产生于该步骤的较高的时间开销,也可能源于该步骤的处理单位资源较少;③不同单位所代表的不同反导步骤的疏密程度中,可以看出哪些步骤有较高的容错率,并且可以对防空反导场景中单位的紧缺程度等进行分析。

综上所述,本文的实验部分在原始实验中,能够首先快速地找到最优分配方案以满足最大拦截率优化准则,然后在扩展实验中,在满足全部拦截的基础上,探讨了最小化全部拦截时刻的优化问题,通过尽早拦截进一步增强容错率,最终通过甘特图的方式呈现分配方案,并以此为依据为防空反导中的杀伤网构建问题提供参考依据。

4 结语

防空反导中的杀伤网构建是一个复杂的优化问题,本文通过双层规划视角的建模方案,给出了形似任务分配一冲突消解的两阶段优化模型,大大降低了求解难度。本方案对双方的参数依赖性相对不强,对来袭目标只需明确数量和预计到达时刻,而对红方单位只需明确能力、数量和每个必要步骤的操作时长;并且场景规模、杀伤链的步骤可以自由设计。基于组合优化的理论,方案具有一定可解释性,且场景变换对计算的影响不大。在实验中,通过不同场景的测试,证明了算法具有良好的可扩展性,随着规模扩展每轮迭代运行时间代价增加可以接受,并且通常能够快速得到较优解,并随迭代次数增加将解不断改进。本文工作为防空反导领域的静态杀伤网自主智能构建提供了思路。

参考文献

- [1] COOK M L, BROSE C. The Kill Chain: Defending America in the Future of High-Tech Warfare[J]. Naval War College Review, 2020, 73(4): 11-16.
- [2] MAGNUSON S. DARPA Pushes ‘Mosaic Warfare’ Concept[J]. National Defense, 2018, 103 (780): 18-19.
- [3] YUYAN T, FANGFAGN L. Analysis of Kill Chain and Kill Net Inside the US Ballistic Missile Defense System[J]. Modern Defense Technology, 2023, 51 (1): 1-8.
- [4] 孙立健, 周鋆, 张小可, 等. 杀伤链支撑的C2组织结构分析与评估[J]. 指挥与控制学报, 2022, 8(4): 460-470.
- SUN L J, ZHOU Y, ZHANG X K, et al. Analysis and Evaluation of C2 Organizational Structure Supported by Kill Chain[J]. Journal of Command and Control, 2022, 8(4): 460-470. (in Chinese)
- [5] 黄松平, 同晶晶, 张维明, 等. 从重心到边缘: 指挥控制的历史及进程[J]. 指挥与控制学报, 2020, 6(4): 341-348.
- HUANG S P, YAN J J, ZHANG W M, et al. From Center of Gravity to Edge: History and Process of Command and Control[J]. Journal of Command and Control, 2020, 6(4): 341-348. (in Chinese)
- [6] 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 Portfolio Based on Kill-Web Evaluation[J]. Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(2): 399-409. (in Chinese)
- [7] 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): 3486-3492.
- [8] 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, 71.
- YANG Z Z, BAI H, HOU Y. Preliminary Exploration on a Land Battlefield Kill Web Model and Resource Optimization[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2022, 43(5): 49-53, 71. (in Chinese)
- [9] 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. Method of Design and Analysis Optimization of Kill Chain Based on Executable Architecture[J]. System Simulation Technology, 2021, 17(3): 169-174. (in Chinese)
- [10] 葛冰峰, 李际超, 赵丹玲, 等. 基于元路径的武器装备体系作战网络链路预测方法[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(5): 1028-1033.
- GE B F, LI J C, ZHAO D L, et al. Meta-Path Based Link Prediction Approach for Weapon System-of-Systems Combat Networks[J]. Systems Engineering and Electronics, 2019, 41(5): 1028-1033. (in Chinese)
- [11] 吴克宇, 冯旸赫, 黄金才, 等. 面向随机并发任务的杀伤网建模与最优控制方法[J]. 指挥与控制学报, 2023, 9(4): 487-494.
- WU K Y, FENG Y H, HUANG J C, et al. Modeling and Optimal Control of a Kill Web for Stochastic-Oriented Concurrent Tasks[J]. Journal of Command and Control, 2023, 9(4): 487-494. (in Chinese)
- [12] 夏博远. 马赛克战中面向杀伤网的作战环推荐方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2021.
- XIA B Y. Research on Ecommendation Method of Combat Ring for Kill Net in Mosaic Warfare[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2021. (in Chinese)
- [13] 刘家义, 王刚, 夏智权, 等. 基于深度强化学习的防空反导智能任务分配[J]. 火力与指挥控制, 2024, 49 (1): 43-48, 55.
- LIU J Y, WANG G, XIA Z Q, et al. Intelligent Task Assignment Research for Air Defense and Anti-Missiles Based on Deep Reinforcement Learning[J]. Fire Control & Command Control, 2024, 49(1): 43-48, 55. (in Chinese)
- [14] XIE J, GAO L. Review on Flexible Job Shop Scheduling[J]. IET Collaborative Intelligent Manufacturing, 2019, 1(3): 67-77.
- [15] GAO K, CAO Z. A Review on Swarm Intelligence and Evolutionary Algorithms for Solving Flexible Job Shop Scheduling Problems[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2019, 6(4): 904-916.
- [16] SINHA A, MALO P, DEB K. A Review on Bilevel Optimization: From Classical to Evolutionary Approaches and Applications[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2018, 22(2): 276-295.
- [17] BEN YOUNES H, AZZOUZ A, ENNIGROU M. Solving Flexible Job Shop Scheduling Problem Using Hybrid Bilevel Optimization Model[C]// Hybrid Intelligent Systems: 18th International Conference on Hybrid Intelligent Systems (HIS 2018) Held. Porto, Portugal: Springer International Publishing, 2020: 340-349.
- [18] SIVANANDAM S N. Introduction to Genetic Algorithms [M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2008: 15-37.
- [19] POON P W, CARTER J N. Genetic Algorithm Crossover Operators for Ordering Applications[J]. Computers & Operations Research, 1995, 22 (1): 135-147.

(编辑:刘勇)