

基于 Memetic 算法的要地防空优化部署方法

陈杰^{1, 2} 陈晨^{1, 3} 张娟^{1, 2} 辛斌^{1, 2}

摘 要 火力单元优化部署问题是网络化防空火控系统的一个重要研究内容. 本文将要地防空优化部署作为组合优化问题, 优化目标为最大化部署方案对保护要地的防御贡献程度, 约束主要考虑了地理条件和火力资源. 利用网格离散化思想对防区进行划分, 对部署方案、火力覆盖能力、约束条件以及火力覆盖要求等条件进行了表征, 建立了问题的数学模型. 构造了一种基于 Memetic 算法的优化求解方法, 运用遗传算法和邻域搜索作为全局和局部搜索方法, 用解的构造方式和选择策略处理了约束条件, 比较了局部搜索使用不同邻域时算法的运行效率. 最后通过实验验证了本方法的合理性和有效性.

关键词 优化部署, 数学模型, Memetic 算法, 遗传算法, 领域搜索

DOI 10.3724/SP.J.1004.2010.00242

Deployment Optimization for Point Air Defense Based on Memetic Algorithm

CHEN Jie^{1, 2} CHEN Chen^{1, 3} ZHANG Juan^{1, 2} XIN Bin^{1, 2}

Abstract Firepower units deployment optimization is a key problem of networked air defense fire control system. As a combinatorial optimization problem, research on the point air defense deployment problem is performed. The optimization objective is to maximize the protective contribution to the protected place in the scheme of firepower deployment, and the constraints include geographical conditions and resources of the firepower units. Firstly, the protected area is divided into many grids to make continuous protected area be selected location points. Secondly, descriptions of the deployment scheme, firepower overlay capability, location restrictions, and firepower overlay requirements are given. Based on the quantitative descriptions, a mathematical model is established. An optimization method based on Memetic algorithm is constructed by genetic algorithm and neighborhood search. Generation of feasible solution and selection operation are employed to solve the constraint satisfaction problem. In the end, experiments show that the method is feasible and effective.

Key words Deployment optimization, mathematical model, Memetic algorithm, genetic algorithm, neighborhood search

在网络化控制技术^[1-2] 和信息技术对传统战争和军队组织结构的不断冲击下, 利用开放式的体系结构和统一的技术标准对现有的系统进行改进, 可以使原有的火控系统转变为以指挥控制为中心、可进行远程实时高速互操作的网络化防空火控系统^[3].

为了使火力单元能够协调地完成作战任务, 对来袭目标进行多次拦截, 高效的兵力部署策略成为成功作战的前提条件. 在复杂的战场环境下, 火力单元的部署受诸多因素影响和制约, 实际操作时往往依据一定准则选取经验部署形式, 目前尚未形成一套完善的理论体系^[4-5]. 由于传统的部署方法不能描述防区和火力单元的约束条件, 也没有对部署效

果进行精确度量, 因此得到的结果并不十分理想.

本文研究的优化部署问题是指: 在火力单元数量一定的条件下, 寻找一种合理有效的部署方案, 使得对重点保护对象和目标主要来袭方向的防御能力最大. 该问题可视为一种约束条件下的优化与决策问题.

区别于覆盖面积等单一的部署指标, 本文根据网络化火控系统要地防空部署的基本要求, 通过计算防御系统对不同方向来袭目标的总体毁歼概率, 建立了以对被保护要地防御贡献程度为目标函数的优化部署模型. 同时构造了一种基于 Memetic 算法的优化求解方法, 应用于问题求解并取得了良好的效果.

1 问题的数学描述

针对传统部署方法的不足, 本文提出了防区网格离散化的概念与方法, 同时对部署方案、火力覆盖能力、约束条件以及火力覆盖要求进行了数学描述, 继而建立了问题的数学模型.

1.1 防区的数学描述

实际的防区是连续分布的, 理论上只要满足部

收稿日期 2008-12-11 录用日期 2009-07-01
Manuscript received December 11, 2008; accepted July 1, 2009
国家杰出青年科学基金 (60925011) 资助
Supported by National Science Fund for Distinguished Young Scholars (60925011)

1. 北京理工大学自动化学院 北京 100081 2. 复杂系统智能控制与决策教育部重点实验室北京 100081 3. 清华大学自动化系 北京 100084

1. School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081 2. Key Laboratory of Complex System Intelligent Control and Decision, Ministry of Education, Beijing 100081 3. Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084

署约束条件的任何位置都可以成为火力单元的备选部署位置. 但是如果要进行定量的优化计算, 就必须先将备选部署位置进行量化处理.

本文提出了网格离散化的思想, 即用一定大小的网格对防区进行分割, 将网格的交叉点作为实际防区的备选部署位置采样点和评价点. 要地防空, 来袭目标具有明确的攻击位置或有限的攻击范围, 所以部署时通常采取扇面防御的形式^[6], 扇面的大小可根据战场实际情况调整.

离散化后的防区称为防区网格, 如图 1 所示.

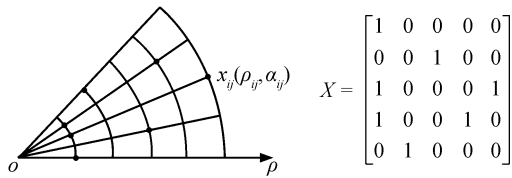


图 1 防区网格示意图

Fig. 1 Sketch map of protected area grids

假设防区是以被保护要地为原点的扇形区域, 在极坐标系下, 使用等极角的射线和等长度的极径对防区进行分割, 分割的网格大小依据防区的大小以及部署的需求而定. 显然, 网格越密、备选的部署位置越多, 越有可能达到实际最优的效果, 但是这必然带来计算量的增加和计算速度的降低. 所以应根据实际情况决定网格的大小, 在计算量和存储量允许的情况下, 还需要考虑火力单元展开的占地范围和安全射击范围, 备选位置之间的距离应大于各个火力单元的安全射击距离.

由图 1 可以看出, 越靠近被保护要地, 采样点越密集, 实际在要地防空, 越靠近被保护要地对防护的要求越强烈, 所以这样的网格划分与实际情况是相符合的. 在要地防空并不能准确掌握目标的来袭方向, 因此采用极坐标形式的防区离散化方法相比于其他优化部署模型, 更容易度量防御系统对不同方向来袭目标的总体毁歼概率.

1.2 部署方案的数学描述

为了方便数学模型的描述, 同时更直观地刻画整个防区的部署情况, 下面将通过矩阵的形式对部署方案进行表征. 首先建立一个与防区网格相对应的矩阵, 称为部署矩阵 X , 其中以被保护要地为原点, 不同极角对应的射线划分的网格对应矩阵的 m 行, 以原点为中心的不同极径划分的同心圆弧网格对应矩阵的 n 列. 矩阵中的每个元素对应于防区网格中相应的采样点. 矩阵中元素的值为对应的防区网格中该处火力单元的类型. 本文中火力单位指高炮连, 连内各高炮布局为某一既定模式. 火力单元的

部署位置为高炮连的中心位置.

定义 1. 部署矩阵 $X = [x_{ij}]_{m \times n}$, 元素 x_{ij} 的取值与防区网格第 i 行第 j 列的对应关系为:

$$x_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{没有部署火力单元} \\ 1, & \text{部署了类型为 1 的火力单元} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n$.

1.3 火力覆盖能力的数学描述

不同于传感器的部署, 在评价火力部署方案的优劣时, 不能简单地用覆盖面积等指标来衡量, 而是需要根据该部署方案对要地所能提供的防护程度来评价. 这里需要更精确的指标来描述不同部署方案对来袭目标的毁歼能力.

若已知目标来袭方向, 根据火力单元的迎头射击规律, 将火力射击范围描述为一个与目标来袭方向垂直的半圆形区域, 如图 2 所示.

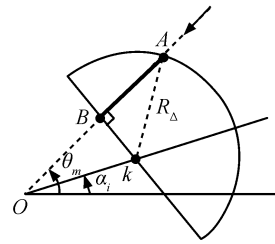


图 2 火力单元对单一方向拦截示意图

Fig. 2 Sketch map of shooting bound against one direction

引入火力覆盖能力来描述火力单元对经过的目标可能造成的毁歼程度. 假设被保护对象位于 O 点, 某火力单元位于 k 点, 当目标以极角 θ_m 方向来袭时, 经过该火力射击范围为 AB 段, 被攻击了 l 次, 每次攻击对目标的毁歼概率为 $P_i(\theta_m)$ ^[7], 则该火力单元在 AB 段对来袭目标总的毁歼概率为:

$$P_t(\theta_m) = 1 - \prod_{i=1}^l (1 - P_i(\theta_m)) \quad (2)$$

拦截次数 l 与目标飞行速度和射击间隔时间相关. AB 段的长度与火力射击半径和目标来袭角度的关系为:

$$d_{AB} = \sqrt{\rho_{\Delta}^2 - (\rho_{ij} \times \sin |\theta_m - \alpha_i|)^2} \quad (3)$$

其中, ρ_{Δ} 为该火力单元的火力射击半径.

定义 2. 火力覆盖能力向量为 $\mathbf{Y} = [y_{ij}]_{m \times 1}$, 元素 $y(\theta_m)$ 代表若目标以极角 θ_m 方向来袭时, 通过

所有可能的 v 个火力单元所遭受的总毁歼概率.

$$y(\theta_m) = 1 - \prod_{t=1}^v (1 - P_t(\theta_m)) \quad (4)$$

其中, $P_t(\theta_m)$ 为第 t 个火力单元对目标的毁歼概率.

由火力覆盖能力矩阵描述可以看出: 部署的火力单元越密集对目标的总毁歼概率越大, 这样在火力单元数量有限的情况下, 部署结果将集中在被保护对象附近. 然而在实际作战中, 总毁歼概率一定的条件下, 距被保护对象一定距离对来袭目标形成部分拦截相比于目标临近时集中拦截对防空作战更为有利.

拦截可能发生的地点距被保护对象的距离为交战距离. 为了避免火力过于集中在被保护对象周围, 使火力配置构成纵深梯次, 引入交战距离系数 Z 来描述交战距离对保护对象防护的贡献程度. 取 $Z = g(\bar{D})$, $Z \in (0, 1)$. 其中 \bar{D} 为来袭目标以某角度攻击时可能遭受所有拦截的平均交战距离, $\bar{D} \in [1, j]$. $g(\bar{D})$ 可以由多次作战模拟与统计相结合的方法得到, 也可以根据指挥员的经验制定.

这样, 火力覆盖能力在防御扇面的极角和极径两个维度上都得到了描述.

1.4 约束条件的数学描述

在实际情况下, 火力单元的部署受到诸多条件的限制, 不是防区内的所有采样点都适合部署. 本文主要考虑地理条件的限制, 例如湖泊、沼泽处不适合部署火力单元, 坡度过大或者地势过低的位置同样不适合部署火力单元.

同样地, 给出整个防区约束条件的定量描述. 建立一个和防区网格行列数相同的矩阵 C , 称为约束矩阵, 矩阵中的每个元素对应于防区网格中相应位置的约束情况.

定义 3. 约束矩阵为 $C = [c_{ij}]_{m \times n}$, 元素 c_{ij} 的取值与防区网格第 i 行第 j 列的对应关系为:

$$c_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{已部署了火力单元} \\ 0, & \text{不适合部署火力单元} \\ -1, & \text{适合部署火力单元} \end{cases} \quad (5)$$

其中, $i = 1, \dots, m$; $j = 1, \dots, n$.

1.5 火力覆盖要求的数学描述

在火力单元数量有限的情况下, 为了达到尽可能理想的部署效果, 决策者需要根据实际情况优先对重要方向进行部署. 这样部署方案应优先满足对重要方向的火力覆盖能力要求, 并在此基础上尽可能使每个角度都能达到一定的防护水平.

定义 4. 火力覆盖要求向量描述为 $\mathbf{E} =$

$[e_{ij}]_{m \times 1}$, 与防区网格的对应关系为:

$$e(\theta_m) = g(\theta_m) \quad (6)$$

其中, $g(\theta_m)$ 为极角 θ_m 方向需要达到的最小火力覆盖能力要求, $g(\theta_m) > 0$. 同时, 在满足了重点方向的火力覆盖能力要求外, 防区其他角度的火力覆盖能力应尽可能均匀, 故引入火力分布角度均匀度的概念, 即 $\text{std}(y(\theta'_m))$, θ'_m 为非重点方向, $\text{std}(\cdot)$ 为标准差.

1.6 数学模型

根据上述对部署方案、约束条件、火力覆盖能力和火力覆盖要求的定量描述, 将防御扇面用网格分割为 m 行 n 列, $X_{m \times n}$ 表示部署矩阵, $C_{m \times n}$ 表示约束矩阵, $\mathbf{Y}_{m \times 1}$ 表示火力覆盖能力向量, $\mathbf{E}_{m \times 1}$ 表示火力覆盖要求向量, 则优化部署问题可以用以下公式描述:

目标函数:

$$\max f = \frac{\sum_{m=0}^h y(\theta_m) \times Z}{\text{std}(y(\theta'_m))} \quad (7)$$

其中, h 表示防区不同度量方向极角的总数, $y(\theta_m)$ 为部署方案对极角 θ_m 方向目标的总毁歼概率, Z 为交战距离系数, $\text{std}(y(\theta'_m))$ 为火力分布角度均匀度.

等式约束条件:

$$\text{Sum}(X_{m \times n} \ominus C_{m \times n}) = 0 \quad (8)$$

Sum 函数表示对矩阵中所有对应元素的减法运算, \ominus 定义为: $A = X \ominus C$, 则 $A = [a_{ij}]_{m \times n}$ 中的元素 a_{ij} 为

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & c_{ij} \neq -1 \text{ 且 } x_{ij} \neq 0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

$$\text{Sum}(\mathbf{Y}_{m \times 1} \ominus \mathbf{E}_{m \times 1}) = 0 \quad (10)$$

同理, $\mathbf{B} = \mathbf{Y} \ominus \mathbf{E}$, 则 $\mathbf{B} = [b_{ij}]_{m \times 1}$ 中的元素 b_{ij} 为

$$b_{ij} = \begin{cases} 1, & y(\theta_m) < e(\theta_m) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

数学模型的建立, 将要地防空部署问题转化为约束条件下的优化与决策问题.

由于战场环境多变、火力单元数量大、约束条件复杂, 要求系统具有快速的布阵能力, 这就需要结合优化算法对数学模型进行求解.

2 优化求解

Memetic 算法^[8-9]是一种基于种群的全局搜索和基于个体的局部搜索的混合算法,可应用于广泛的问题领域并得到满意的结果.该算法实质上是一种框架,采用不同的搜索策略可以构成不同的算法.针对本文求解的具体问题,现分别采用遗传算法和邻域搜索算法作为全局搜索方法和局部搜索策略构成 Memetic 算法.

2.1 编码方式

根据节点部署问题的特点,将解表示为二进制字符串的形式.由数学模型可知,优化部署问题是一个约束优化问题,为了保证解的可行性,本文通过解的初始化和算子的合理设计,将其转化为无约束优化问题求解.

在编码时,约束条件(8)体现在解的表示形式中,即解的每一位字符代表了该采样点是否部署防空火力单元,解的长度为符合约束矩阵 C 的候选部署位置总数,解中“1”的数量等于本次部署所能提供的火力单元数量.

这种处理方式可以使解在满足地理约束条件的可行域内迭代,与使用罚函数法相比,避免了转化约束条件时罚系数选取困难的问题,有利于提高算法的搜索效率.

2.2 个体适应度函数

针对整个防御扇面,部署方案的评价准则是在满足约束条件的前提下,对目标每个可能的来袭角度的火力覆盖能力总和最大.这样,适应度函数选取为问题的目标函数,即

$$F = \frac{\sum_{m=0}^h y(\theta_m) \times Z}{\text{std}(y(\theta'_m))} \quad (12)$$

2.3 全局搜索操作

遗传算法是基于自然界中生物进化的搜索方式.其主要特点是全局优化能力强,搜索过程不依赖梯度信息,且对被优化对象的数学模型无先验要求,适用于处理传统搜索方法难于解决的复杂组合优化问题.

2.3.1 选择算子

选择操作采用了基于个体相对适应度设计的排序选择机制.首先按照适应值的大小对个体进行排序,然后对序号按非线性规则进行选择.序号为 s 的个体被选择的概率为:

$$p(s) = q(1-q)^{s-1} \quad (13)$$

其中, $q \in (0, 1)$ 为选择压力^[10],可根据种群规模而定.

执行选择操作时,首先要判断候选解是否满足火力覆盖要求 E .将可行解与不可行解按照适应度值分别排序.为了避免迭代初期淘汰过多不可行解而导致算法过早收敛或最终无法得到可行解,可保留一部分不可行解进入下一代,故在排序时将不可行解排在可行解后面同时参与选择.这些不可行解将随着迭代次数的增加而不断被淘汰.选择算子采取择优策略,即将本代最优解直接保留至下一代.

2.3.2 交叉算子

交叉操作用于组合出新的个体,在解空间中进行有效的搜索,同时降低对有效模式的破坏概率.

由于本文考虑的是火力单元数量一定的情况,为了保证解的可行性,故在交叉、变异时均采用 0-1 成对变化的方法.

具体操作为:

- 1) 按照交叉概率随机配对得到双亲;
- 2) 为保证交叉效率,需判断双亲的基因位,可通过异或操作得到取值不同的基因位;
- 3) 对取值不同的基因位,任取 0-1 对在双亲间进行交换,如图 3 所示;
- 4) 交叉操作可进行多次.

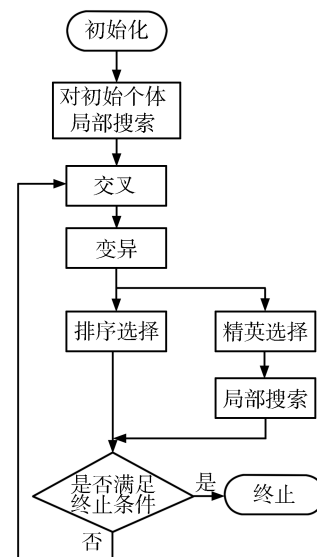


图 3 算法流程图

Fig. 3 Flow chart of the algorithm

2.3.3 变异算子

变异操作是产生新个体的另一种方法,变异个体的选择和变异位置的确定都采用随机方法产生.本文中变异算子定义为 0-1 基因位的随机交换.

为了探索新的模式空间、防止算法早熟收敛,变异时规定 0-1 基因位交换直到子代个体与父代个体

的距离达到预定数值为止. 个体间的距离定义为字符串对应位不同基因的数量, 即海明距离.

变异时可采取不同变异程度的适应性策略. 设 G_1 和 G_2 分别为二种不同的变异策略, 在对选中的变异个体进行操作时, G_1 和 G_2 在第 N 次迭代周期内被选中的概率分别为 $p(G_1(N))$ 和 $p(G_2(N))$. 若个体变异后的适应度值优于变异前, 则视为个体变异成功, 否则为失败. 这样, G_1 和 G_2 被选中的概率由上一迭代周期内两种策略的成功率决定.

设 G_1 和 G_2 在第 N 次迭代周期内的成功率分别为 $Q(G_1(N))$ 和 $Q(G_2(N))$.

$$Q(G_1(N)) = \frac{Nums_1(N)}{Nums_1(N) + Numf_1(N)}, N \geq 2 \quad (14)$$

$$Q(G_2(N)) = \frac{Nums_2(N)}{Nums_2(N) + Numf_2(N)}, N \geq 2 \quad (15)$$

其中, N 代表迭代次数, $Nums$ 和 $Numf$ 分别代表选择某种变异距离后, 成功个体和失败个体的总数. 不失一般性, 当 $N=1$ 时取 $p(G_1)=p(G_2)=0.5$, $N \geq 2$ 有

$$p(G_1(N+1)) = \frac{Q(G_1(N))}{Q(G_1(N)) + Q(G_2(N))} \quad (16)$$

$$p(G_2(N+1)) = \frac{Q(G_2(N))}{Q(G_1(N)) + Q(G_2(N))} \quad (17)$$

2.4 局部搜索操作

局部搜索算法的基本思想是通过一个 (组) 解来产生一个 (组) 新解^[11]. 它是基于贪婪思想利用邻域函数进行搜索的, 算法可以描述为: 从一个初始解 x 出发, 利用状态发生器持续地在解 x 的邻域中搜索比它更好的解. 若能找到如此的解, 就以之替代解 x 成为新的当前解, 然后重复上述过程; 否则结束搜索过程, 以当前解作为最终解.

本文中, 局部搜索操作针对每代全局搜索出的精英个体进行, 目的是在最优个体可能存在的局部区域向深度探索. 邻域可以根据不同算法实际选择. 一般地, 邻域选择越大, 算法越有可能在较少的迭代步数内收敛, 但算法运行时间也相应地较长. 所以, 邻域的选择需综合考虑算法的运行效率.

针对本文的模型, 选择了两种搜索邻域. 邻域 I 为与原始最优个体距离为 1 的集合. 即将全局搜索出的原始最优个体中基因位取值为“1”的位顺次与基因位取值为“0”的位分别做两两交换.

邻域 II 选取了邻域 I 的子集, 为随机选择原始最优个体中基因位取值为“1”的某一位, 将这位顺次与基因位取值为“0”的位分别做两两交换. 由于

邻域 II 中对交换基因位取值为“1”的选择是随机的, 为了提高算法效率, 当下一代全局搜索出的精英个体与上一代相同时, 再对该精英个体进行邻域搜索, 所选择交换的“1”位应避免与上一代所选择的“1”位相同.

搜索策略: 产生新个体的适应度值优于原始个体, 则替换新个体为本代的最优个体, 直至所有 0-1 位交换完毕.

2.5 算法流程

算法首先对初始群体进行一次局部搜索, 用初始个体邻域内更优的个体代替原始个体组成新的初始群体. 顺次进行交叉、变异、排序选择操作. 同时对于全局搜索出的精英个体进行局部搜索, 直至满足终止条件时算法结束.

3 实验与分析

在网络化指挥控制系统实验平台软件上, 态势显示区域以地理信息系统 (Geographic information system, GIS) 为背景, 划定被保护对象和防区. 约束条件可以利用地理信息系统的地形分析功能对防区进行预处理, 将实际防区中不可部署的位置与数学模型中的网格采样点相对应.

在典型军事想定下进行火力单元部署, 将防御扇面划分为 10×10 的网格, 不可部署点分别对应于防区网格的 x_{14} 、 x_{16} 和 x_{26} 点, 交战距离系数中 $g(\bar{D})$ 服从 $N(4, 1)$ 正态分布. 其他参数如表 1 所示.

表 1 火力单元参数表

Table 1 Parameters of firepower units

火力射击半径	防御扇面极角划分	防御扇面极径划分
1 km	3°	1 km

算法中的交叉概率和变异概率可以根据适应度值和进化代数来调节.

$$P_c = \begin{cases} P_{c_max} - \left(\frac{P_{c_max} - P_{c_min}}{N_{max}} \right) \times N_{er}, & f' > f_{avg} \\ P_{c_max}, & f' \leq f_{avg} \end{cases} \quad (18)$$

$$P_m = \begin{cases} P_{m_max} - \left(\frac{P_{m_max} - P_{m_min}}{N_{max}} \right) \times N_{er}, & f' > f_{avg} \\ P_{m_max}, & f' \leq f_{avg} \end{cases} \quad (19)$$

式中: P_c 表示交叉概率, P_{c_max} 表示最大交叉概率, P_{c_min} 表示最小交叉概率; P_m 表示变异概率, P_{m_max} 表示最大变异概率, P_{m_min} 表示最小变异概率; N_{max} 为最大迭代代数, N_{er} 为当前代数, f_{avg} 表示种群平均适应度值, f' 表示要交叉或变异的两个

个体中较大的适应度值, f 表示要变异的个体的适应度值. 算法运行参数如表 2 所示.

表 2 算法参数表
Table 2 Parameters of the algorithm

种群规模	P_{c_max}	P_{c_min}	P_{m_max}	P_{m_min}
30	0.8	0.1	0.2	0.01

下面针对第 1.6 节中的数学模型, 分别运用邻域 I 和邻域 II 作为算法的局部搜索邻域, 同时与不使用局部搜索策略的算法进行了对比.

由分析可知, 有局部搜索策略相比无局部搜索策略, 算法在相同迭代次数的条件下能够达到更优的目标函数值. 这是因为有局部搜索策略的算法在每一步迭代中搜索了更多的空间, 同时也付出了更大的时间代价.

在网络化防空火控系统的研究中, 节点部署结果主要为指挥员提供可行的火力单元参考配置方案, 起到辅助决策的作用. 高效的算法能够对战局瞬息万变的态势做出及时的反应, 适应于网络化指挥决策. 对于时效性的考量, 主要比较算法是否可以在有限时间内提供更优的结果. 为了比较算法效率, 选择算法运行时间为横轴, 取前 200s 的结果作为比较.

实验 1. 火力单元数为 8 个

由图 4 和图 5 可以看出, 当火力单元数量较小时, 采用邻域 I 作为局部搜索策略得到解的质量更高; 而随着火力单元数量的增加, 邻域 I 不断扩大, 导致算法效率有所下降, 采用邻域 II 作为局部搜索策略算法的收敛速度更快. 邻域的选取可针对具体问题在实验中权衡.

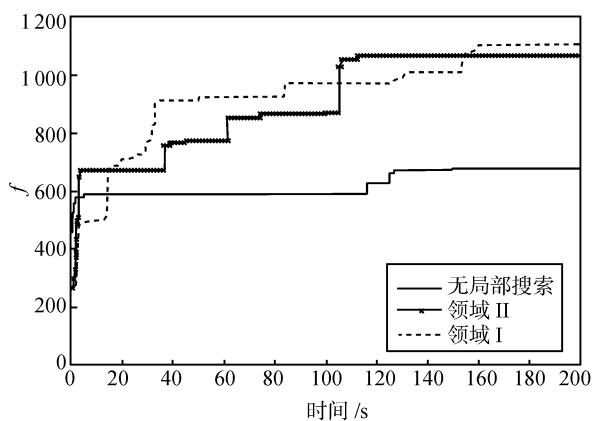


图 4 实验 1 的结果图

Fig. 4 Curves of Experiment 1

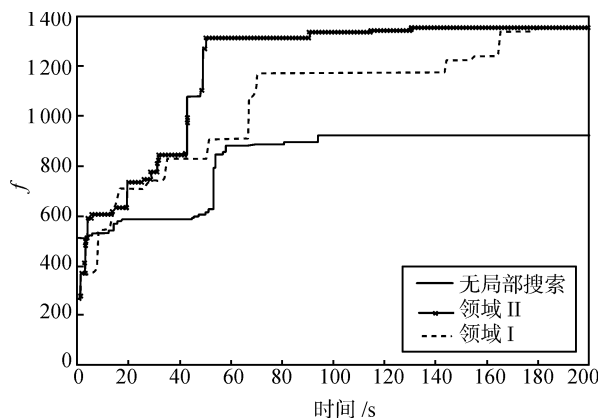


图 5 实验 2 的结果图

Fig. 5 Curves of Experiment 2

实验 2. 火力单元数为 15 个

图 6 和图 7 分别为算法局部搜索采用邻域 I 和邻域 II 的部署结果图示. 当火力单元数量较小时, 各火力单元集中在防御扇面内且相互有所错落; 火力单元数量较大时, 火力密集部分能提供较高的毁歼概率. 这样, 防区内任何方向的突防目标都能够受到火力单元的可靠射击, 保证了系统的整体作战效能.

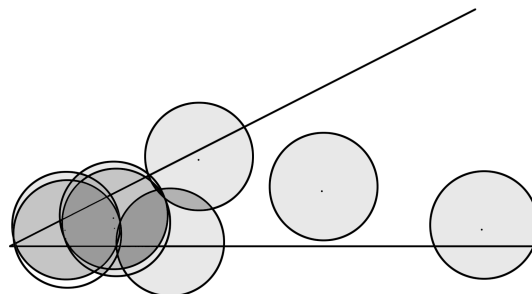


图 6 实验 1 的部署图示

Fig. 6 Results of lineup for Experiment 1

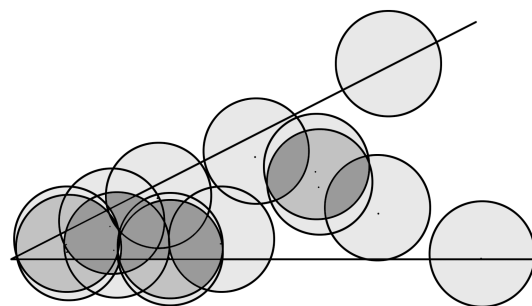


图 7 实验 2 的部署图示

Fig. 7 Results of lineup for Experiment 2

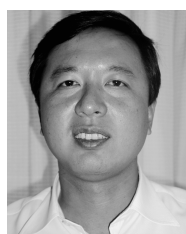
实验结果表明, 本文提出的节点部署数学模型和 Memetic 算法可以有效结合, 并能够很好地解决网络化防空火控系统优化布阵问题.

4 结论

本文对网络化防空火控系统火力单元部署问题进行了研究,提出了一种基于 Memetic 算法的要地防空优化部署算法。运用离散化思想将防御扇面划分为一定数量的网格,与防区网格相对应的矩阵和向量描述了部署方案、约束条件、火力覆盖能力等条件,提出了交战距离系数来平衡各火力单元间的部署距离,建立了优化部署问题的数学模型。同时构造了一种基于 Memetic 算法的优化算法,分别运用遗传算法和邻域搜索作为广度搜索和深度搜索策略。最后,根据具体防区和火力单元资源进行了实验,其结果验证了方法的有效性和可行性。本方法可以推广至不同型号火力单元的混合部署以及区域防空部署的研究中。

References

- 1 Ray A. Introduction to networking for integrated control systems. *IEEE Control Systems Magazine*, 1989, **9**(1): 76–79
- 2 Xia Y Q, Shang J Z, Chen J, Liu G P. Networked data fusion with packet losses and variable delays. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 2009, **39**(5): 1107–1120
- 3 Chen Chen, Chen Jie, Zhang Juan. Networked control system and its application in fire control system. In: Proceedings of the 26th Chinese Control Conference. Zhangjiajie, China: Beihang University Press, 2007. 561–564
(陈晨, 陈杰, 张娟. 网络化控制系统及其在火控系统中的应用研究. 第 26 届中国控制会议. 张家界, 中国: 北京航空航天大学出版社, 2007. 561–564)
- 4 Yan Ming-Liang, Liu Fa-Ming, Wang Kai, Guo Peng-Xiang. Research on optimal deployment of air-defense missile system based on SA. *Command Control and Simulation*, 2006, **28**(4): 49–52
(闫明亮, 刘法明, 王凯, 郭鹏翔. 基于模拟退火算法的防空导弹体系优化部署研究. 指挥控制与仿真, 2006, **28**(4): 49–52)
- 5 Xing Qing-Hua, Liu Fu-Xian. Modeling on area air defense optimization deployment system. *Systems Engineering and Electronics*, 2006, **28**(5): 712–715
(邢清华, 刘付显. 区域防空部署优化系统建模. 系统工程与电子技术, 2006, **28**(5): 712–715)
- 6 Zhang Su, Wang Ying-Long, Cao Ze-Yang. Evaluation model of ground to air defense tactical disposition assignment. *Fire Control and Command Control*, 2005, **30**(5): 15–18
(张肃, 王颖龙, 曹泽阳. 地面防空战斗部署方案评估模型. 火力与指挥控制, 2005, **30**(5): 15–18)
- 7 Dou Li-Hua, Wang Gao-Peng, Zhang Juan. Simulation of damage probability of anti-aircraft gun to intercept cruise missile. *Fire Control and Command Control*, 2007, **32**(12): 49–52
(窦丽华, 王高鹏, 张娟. 高炮对巡航导弹毁伤概率仿真. 火力与指挥控制, 2007, **32**(12): 49–52)
- 8 Moscato P. On Evolution, Search, Optimization, Genetic Algorithms and Martial Arts: Towards Memetic Algorithms, Technical Report Caltech Concurrent Computation Program 158-79, California Institute of Technology, Pasadena, USA, 1989
- 9 Nguyen Q H, Ong Y S, Krasnogor N. A study on the design issues of Memetic algorithm. In: Proceedings of IEEE Congress on Evolutionary Computation. Washington D. C., USA: IEEE, 2007. 2390–2397
- 10 Whitley D. The GENITOR algorithm and selective pressure: why rank-based allocation of reproductive trials is best. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Genetic Algorithms. San Mateo, USA: Morgan Kaufman, 1989. 116–121
- 11 Wang Ling. *Intelligent Optimization Algorithms with Applications*. Beijing: Tsinghua University Press, 2004
(王凌. 智能优化算法及其应用. 北京: 清华大学出版社, 2004)



陈杰 北京理工大学教授, 博士。主要研究方向为复杂系统多指标优化与多目标决策、智能控制、约束非线性控制。E-mail: chenjie@bit.edu.cn
(**CHEN Jie** Professor, Ph.D. at Beijing Institute of Technology. His research interest covers complicated system multi-object optimization and decision, intelligent control, constrained nonlinear control.)

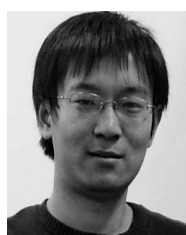


陈晨 清华大学博士后。主要研究方向为复杂系统多目标优化与决策、军用智能信息处理。本文通信作者。E-mail: chchen@mail.tsinghua.edu.cn
(**CHEN Chen** Postdoctor at Tsinghua University. Her research interest covers complicated system multi-object optimization and decision, and military

intelligent information processing. Corresponding author of this paper.)



张娟 北京理工大学自动化学院副教授, 博士。主要研究方向为约束非线性控制、分布式仿真。E-mail: zhjuan@bit.edu.cn
(**ZHANG Juan** Associate professor, Ph.D. at Beijing Institute of Technology. Her research interest covers constrained nonlinear control and distributed simulation.)



辛斌 北京理工大学自动化学院博士研究生。主要研究方向为优化与决策、进化计算、军事决策分析。E-mail: brucebin@bit.edu.cn
(**XIN Bin** Ph.D. candidate at Beijing Institute of Technology. His research interest covers optimization and decision, evolutionary computation, military decision analysis.)