

基于动态规划-遗传算法的防空部署优化模型

颜培远, 刘 曙, 王 君

(空军工程大学防空反导学院, 陕西 西安 710051)

摘 要: 随着高新武器的研制和投入使用, 战场环境变得越来越复杂, 正确有效地进行防空部署成为防空作战的难点问题。从进攻方的角度分析影响要地防空部署的主要因素, 提出将动态规划算法用于求解攻击最小危险航线, 并将其融入遗传算法的适应度函数, 得到一种基于动态规划-遗传算法的防空部署优化模型。该模型可对要地防空部署进行优化, 能够得到基于进攻方的最优部署方案。实验结果表明, 该模型是有效可行的, 为防空作战中指挥人员实施战前部署提供参考和借鉴。

关键词: 防空部署优化; 动态规划算法; 遗传算法

中图分类号: E 956, TP 391.9

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1001-506X.2018.10.14

Optimization model of air defense disposition based on dynamic programming and genetic algorithm

YAN Peiyuan, LIU Shu, WANG Jun

(Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: With the development and application of high-tech weapons, the battlefield environment becomes more and more complex. Deploying the air defense correctly and effectively becomes a difficult problem in air defense operations. In this paper, it is analyzed from the point of the attacker about the main factors which affect the air defense disposition, then the dynamic programming algorithm is proposed to solve the minimum dangerous attack route, besides, it is integrated into the fitness function of the genetic algorithm. Consequently, an optimization model of air defense deployment based on dynamic programming and the genetic algorithm is obtained. This model can optimize the air defense deployment and can obtain the best deployment plan based on the attacker. The experimental results show that the model is effective and feasible and provides reference for commanders about deploying in air defense operation.

Keywords: air defense disposition optimization; dynamic programming algorithm; genetic algorithm

0 引 言

在防空作战领域, 防空部署方案优化问题是现代防空研究的热点之一。防空部署方案的优劣直接决定作战效能的高低。目前, 国内的研究多是把部署优化问题变成非线性优化问题。文献[1]建立了以掩护价值为目标函数的区域防空优化部署模型, 提出一种启发式方法解决部署优化问题; 文献[2]提出了一种基于风险决策的区域防空部署方案优选方法, 适于快速进行决策的场合; 文献[3]将改进的模糊层次分析法应用于弹炮混编防空群机动部署方案的优化与评估, 但使用中还需考虑更实际的因素; 文献[4]建立了混编群兵力部署优化模型, 提出了一种改进的粒子群算法, 但还需要提高优化精度; 文献[5]提出使用并行改进遗传

算法求解组合优化问题, 克服了编码时的缺点, 提高了搜索速度和解的质量。

以上文献都是在防御方的角度考虑部署优化问题。但是单纯地从防御方的角度考虑部署优化问题, 而完全忽略进攻方可能采取的进袭航线, 未必是防空问题研究的理想模式。在进攻方实施空袭的过程中, 由于兵器性能、防御方雷达主动搜索等客观条件限制, 通常会“智能”地选择受雷达照射最少的路径, 即选择防御方部署方案中薄弱环节最少的方案。因此, 部署优化问题中, 充分考虑进攻方的影响是有必要的。本文从进攻方的角度对影响要地防空部署的主要因素^[6-9]进行分析, 假设进攻方是智能的, 能够选择危险最小的航线进攻。由于遗传算法能够较好地解决组合优化问题^[10-12], 本文提出一种将动态规划算法^[13]与遗传算法

收稿日期: 2017-05-19; 修回日期: 2017-12-18; 网络优先出版日期: 2018-07-23。

网络优先出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2422.TN.20180723.1422.006.html>

基金项目: 国家自然科学基金(61402517, 61503408)资助课题

相结合的防空部署优化模型,将智能算法与非智能算法相结合,对要地防空部署进行优化,取得了较理想的结果。

1 影响要地防空部署的主要因素

1.1 防空武器的类型、数量和性能

防空武器的作战效能主要受雷达的覆盖范围、导弹杀伤区和单发杀伤概率的影响^[14]。雷达的覆盖范围越大,越有利于探测和跟踪空袭兵器。防空武器的杀伤区远界和近界是一条闭合的曲线,杀伤区越大,空袭兵器的拦截范围越大,掩护同样区域,需要的防空武器数量就越少。同时,杀伤区还与空袭兵器的类型和飞行特性、雷达散射面积、干扰性能等有关。图 1 所示为某型飞机以某一固定速度接近某型防空武器时杀伤概率分布情况。当杀伤区域重叠时,同一区域重叠杀伤区域数目越高,目标杀伤概率越高,防空效果越好。

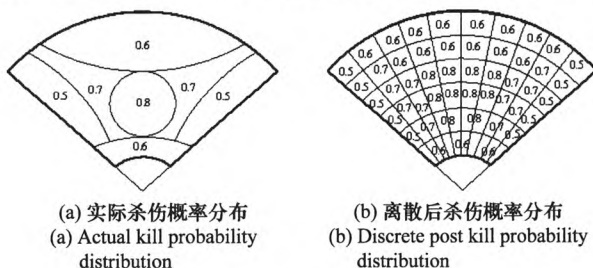


图 1 地空导弹杀伤区杀伤概率分布

Fig. 1 Probability distribution of killing zone of ground to air missile

1.2 地理特征

地理特征有地形地貌、水系、地物等^[15]。防空武器的部署受地形起伏的影响。首先,高山等地形可以遮蔽雷达的“视线”,使雷达不能探测、跟踪遮蔽高度以下的空袭兵器;其次,防空武器阵地应尽量平坦,而且避开湖泊、林地、居民区等。

地形对雷达视线的遮蔽如下所示:以海平面为基准面,设雷达天线高于地面,由图 2 可见,雷达能探测(跟踪)的目标最小高度 h_{\min} 为

$$h_{\min} = (O'T' \tan \varepsilon_v + h_R) - h_a \quad (1)$$

式中, $O'T'$ 表示雷达与空袭兵器的水平距离; h_R 表示雷达天线的海拔高度; h_a 表示空袭兵器在地面投影点的海拔高度; ε_v 表示雷达对空袭兵器观测角。

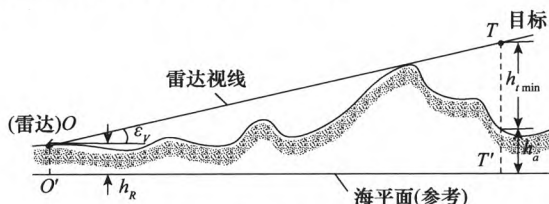


图 2 地形对雷达视线遮蔽情况示意图

Fig. 2 Sketch map of the terrain to the radar line of sight

为有效地探测和拦截空袭兵器,雷达都需要在一定范围内规定最小的遮蔽角 $\varepsilon_{v\min}$, 确定部署点时,雷达对目标观测角必须满足:

$$\varepsilon_v < \varepsilon_{v\min}$$

(2)

1.3 被掩护对象的性质和面积

在空袭时,进攻方总会选择具有较高作战价值的关键目标进行打击,如重要的交通枢纽、指挥中心和防空阵地。因此,要重点针对这些关键目标进行防空武器部署,防止兵力分散,降低防御效能。

按照目前世界防空学说,一般将被掩护对象分为 3 类:战略性、作战性和战术性被掩护对象。确定被掩护对象的边界线时,要对被掩护对象的性质、面积、形状等综合分析,对被掩护对象的重要度进行量化。当保卫多个相邻掩护对象时,根据上级意图和被掩护对象的具体情况划定边界线。只有科学合理地确定被掩护对象的范围,才能集中力量确保其不受损失或减少损失,以满足高技术条件下空袭的特点,提高防御效能。

2 要地防空部署优化模型

2.1 基本概念描述

根据影响防空部署诸多因素,要地防空部署优化模型的建模思路是:先确定若干个武器的部署区域(由上级确定),然后在每个区域内选择一个适合部署的阵地进行武器部署,从而形成一套部署方案^[16]。由于每个武器部署区域都有很多阵地,可供选择,因此会产生多套部署方案。优化时,假设进攻方足够“智能”,能够知悉防御方武器配置,可以选择一条最优的进攻路径,即使用动态规划-遗传算法可以找到部署方案防守最薄弱的一条路径,继而找到最优部署方案,如图 3 所示。

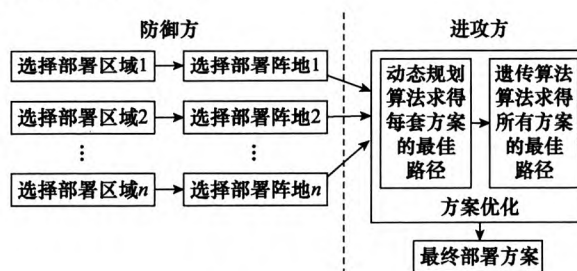


图 3 建模思路示意图

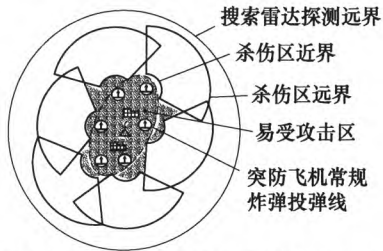
Fig. 3 Sketch map of modeling ideas

可以看出,这是一个求防空武器和部署阵地之间组合的优化问题。本文将遗传算法与动态规划算法相结合,从大量部署形式中选出最优方案,从而确定防空武器的数量和最佳部署形式。

定义 1 易受攻击区(vulnerable zone, VZ):空袭兵器投弹或发射空地导弹时,距要地的可能最远位置线,称为空袭兵器的投弹线。这条投弹线是一条闭合曲线,为保证要地的安全,应将空袭兵器在投弹前或发射空地导弹前杀伤。空袭兵器的投弹线以及其内部区域共同构成 VZ,其中,空袭兵器的投弹线是 VZ 的边界。如图 4 所示。

定义 2 危险区(danger zone, DZ):空袭兵器在飞向 VZ 过程中,可被远程预警雷达(CSR)或跟踪制导雷达可发

现并跟踪的区域,远程预警雷达和所有跟踪制导雷达所覆盖区域的边界称为 DZ 边界。如图 4 所示。



△：指挥中心搜索雷达；⊙：地空导弹部署点；⊖：要地。

图 4 防空武器系统的不同区域

Fig. 4 Different areas of air defense weapon system

定义 3 杀伤区(kill zone, KZ):由所有防空武器的 KZ 组合而成的区域。如图 4 所示,在一个防空系统中,KZ 边界是一条闭合曲线。防空武器的 KZ 应处于 DZ(雷达的探测跟踪区域)之内,VZ 应处于 KZ 之内。

2.2 部署优化模型建立

定义 4 设空袭兵器选择从 DZ 边界到 VZ 边界的进袭航线中,将面临防空武器的拦截危险,地域特征、防空武器杀伤概率分布、空袭兵器的飞行时间等都将影响航线上所面临危险的大小。每种部署方案必有一条或多条航线,使空袭兵器遇到的危险最小,这个最小危险值可用来确定部署形式的防空效能,即防御方需要找到一种部署形式,使防御的整体有效性最大。为此,将航线上空袭兵器面临的危险在一定条件下进行量化,该量化在二维空间中展开,用水平线和垂直线构成一系列一定大小的方格^[17-18],如图 5 所示,方格的大小由地形的粒度决定。这样,空袭兵器从 DZ 边界到 VZ 边界,其航线要经过一系列小方格,每一个小方格与一个经验危险值相关,称之为防空系统对目标所造成的危险指数(danger index, DI),防空系统对空袭兵器航线上产生的危险指数总和,称为累积危险指数(cumulative danger index, CDI),它由航线经过的所有小方格的危险指数相加得到。

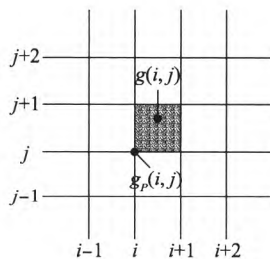


图 5 方格标识

Fig. 5 Square identification

部署形式的集合记为 P , 给定一种部署形式 $p(p \in P)$ 下, 目标某一行航线记为 r , 可行航线集合记为 $R(p)$, 则目标函数可表示为

$$\text{Max}_{p \in P} \text{Min}_{r \in R(p)} \text{CDI}(r) \quad (3)$$

认为空袭兵器从 DZ 边界上某点处进袭, 从此点向前,

有多条到达 VZ 边界的航线可供选择^[19], 每条航线都有累积危险指数, 累积危险指数最小的航线即为最优航线, 称为局部最小累积危险指数(local minimum cumulative danger index, LMCDI), 它与组成 DZ 边界的每一个方格相关。所有的局部最小累积危险指数中, 最小的称为全局最小累积危险指数(global minimum cumulative danger index, GMCDI)。这样, 目标函数可表示为

$$\text{GMCDI}(p) = \text{Min}_{r \in R(p)} \text{CDI}(r) \quad (4)$$

对于给定的部署形式 $p \in P$, 如果 DZ 边界内全部小方格集合为 $G(p)$, 则

$$R(p) = \bigcup_{g \in G(p)} R_0(g) \quad (5)$$

式中, $R_0(g)$ 是一个给定 DZ 边界上的方格 $g(g \in G(p))$, 空袭兵器所有可能飞行航线的集合。以这种方式, 全局最小累积危险指数也表示为

$$\text{GMCDI}(p) = \text{Min}_{g \in G(p)} \text{Min}_{r_0 \in R_0(g)} \text{CDI}(r_0) \quad (6)$$

局部最小累积危险指数也表示为

$$\text{LMCDI}(g) = \text{Min}_{r_0 \in R_0(g)} \text{CDI}(r_0) \quad (7)$$

定义 5 对图 5 中的小方格 $g(i, j)$, 给一个可见值 $V_{ij}(V_{ij} \in [0, 1])$, 它表示了雷达探测和跟踪此方格内空袭兵器的能力。如果此方格不在雷达的探测跟踪范围内或完全被地形遮蔽, 则 $V_{ij} = 0$; 如果雷达可以探测到该方格上任意飞行高度的空袭兵器, 则 $V_{ij} = 1$ 。如果该方格位于至少一个 KZ 内, 则分配相应的杀伤概率; 如果该方格不被 KZ 覆盖, 相应的杀伤概率为零。杀伤概率表示为 K_{ij} , 概率分布如图 1 所示。对某方格 $g(i, j)$ 的危险指数 D_{ij} 表示为

$$D_{ij} = V_{ij}(1 + K_{ij}) \quad (8)$$

对位于 DZ 内的空袭兵器, 虽然 $K_{ij} = 0$, 但 $V_{ij} \neq 0$, 则 $D_{ij} \neq 0$ 。如果一个方格位于两个 KZ 的重叠部分, 当重叠区内只有一个防空武器(例如, 危险指数值最大的防空武器)被分配了射击目标的任务时, 较大的一个危险指数可作为与此方格相关联的危险指数; 当两个防空武器都指定射击方格内的目标, 则此方格的 D_{ij} 值按下式计算:

$$D_{ij} = [V_{ij1} + V_{ij2}(1 - V_{ij1})][1 + K_{ij1} + K_{ij2}(1 - K_{ij1})] \quad (9)$$

式中, V_{ij1} 、 V_{ij2} 分别为防空武器 1、2 雷达对方格 $g(i, j)$ 内目标的可见度; K_{ij1} 、 K_{ij2} 分别为防空武器 1、2 对方格 $g(i, j)$ 内目标的杀伤概率。

设飞机飞行的最高高度 h_{\max} , 则方格 $g(i, j)$ 的可见值为

$$V_{ij} = \text{Max}\{0, 1 - [h_{\min} / (h_{\max} - h_a)]\} \quad (10)$$

将全部方格 $g(i, j)$ 的高度存于计算机数据库中, 该高度由 $g(i, j)$ 方格 4 个顶点的高度加权平均得到。

3 要地防空部署优化算法设计

3.1 动态规划算法求解单个方案的最小危险航线

算法的基本思路是, 已知部署地区的海拔信息和杀伤概率的分布情况, 从进攻方的角度出发, 对被掩护对象攻击时必然选择危险性最小的航线。将部署方案中每个方格

$g(i, j)$ 的危险指数记为 D_{ij} , 所有二维方格的危险指数矩阵记为 D 。局部最小累积危险指数矩阵记为 L , 从方格 $g(i, j)$ 到 VZ 边界的局部最小累积危险指数记为 L_{ij} 。动态规划算法的目标是获得矩阵 L , 其中优化的初始区域是 DZ 内的方格的集合, 结束区域是 VZ 边界内的方格的集合。初始化时, VZ 内方格的 L_{ij} 赋值为 0, 其他方格的 L_{ij} 赋值为相应的 K 值。矩阵 D, L 都是 $p \times q$ 维。每一个方格 (i, j) 都有一层方格将其包围, 该包围方格层记为 E_{ij} , 即

$$E_{ij} = \{(K, L); (i-1) \leq k \leq (i+1), (j-1) \leq l \leq (j+1), 1 \leq k \leq p, 1 \leq l \leq q, (k, l) \neq (i, j)\} \quad (11)$$

显然, 对于一个方格, 包围方格层中最多只有 8 个方格, 如果 $(k, l) \in E_{ij}$, 则 $(i, j) \in E_{kl}$ 。

记 T_{ij}^u 为空袭兵器从方格 $g(k, l)$ 飞到方格 $g(i, j)$ 的危险指数增量, 则

$$T_{ij}^u = \tau(D_{kl} + D_{ij})/2 \quad (12)$$

式中

$$\tau = \begin{cases} \sqrt{2}, & k \neq i, l \neq j \\ 1, & \text{其他情况} \end{cases} \quad (13)$$

当执行到第 n 步时, 在确定此步一个方格的局部最小累积危险指数前, 必须先确定哪些方格属于第 n 步。这里为了缩小计算时间, 对动态规划算法进行改进, 认为第 n 步一般是形成第 $(n-1)$ 步中方格集合的外层包围方格集合。记第 n 步的方格集合由 S_n 给出, 则动态规划算法的主要步骤如图 6 所示。

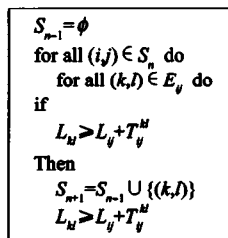


图 6 动态规划算法流程

Fig. 6 Dynamic programming algorithm flow

上述步骤结束时, S_{n+1} 将包括第 $(n+1)$ 步中的方格。第 $(n+1)$ 步中相应局部最小累积危险指数值, 将储存于矩阵 L 的适当位置。下一步将重复此过程, 直到 S_{n+1} 状态为空时, 即 $L_{kl} \geq L_{ij} + T_{ij}^u$ 时, 程序中止。

在生成最佳飞行航线时, 还需引入航线矩阵 P , 如图 7 所示, 设空袭兵器位于方格 (k, l) , 其周围的方格集合记为 E_{kl} , 以 1~8 来标记。设一个初值为 0 的 $p \times q$ 维矩阵 P , P_{kl} 为与方格 (k, l) 对应的矩阵 P 中的元素。当动态规划算法流程中不等式 $L_{kl} \geq L_{ij} + T_{ij}^u$ 成立时, 就给 P_{kl} 及方格分配一个相应数值, 例如步骤 S_n 中的一个方格 (i, j) 位于图 7 中 6 的位置, 则 $P_{kl} = 6$ 。通过这种方法, 更新并储存航线矩阵 P 。

3.2 遗传算法求解单个方案的最小危险航线

3.2.1 遗传算法求解最优部署方案

要地防空部署优化问题的可行解是一组部署方案, 包

括防空武器类型及确定的精确部署阵地位置^[20]。假设要对 m 套防空武器进行部署 (针对单一武器类型), 现有 m 个武器部署的大概地点, 每个大概地点附近有 n 个精确部署阵地, 且每个大概地点附近仅选择一个精确部署阵地进行部署, 每个阵地仅支持部署一套防空武器。由于武器数目和精确地点数目均为整数, 所以采用整数进行编码较为合理。

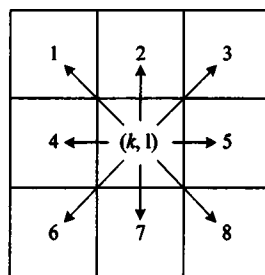


图 7 生成最佳航线

Fig. 7 Generating the best route

编码时, 染色体的长度为 m , 染色体的每一个基因与解的每一维变量相同。优化问题的一个有效解为 $X = (x_1, x_2, \dots, x_k, \dots, x_m)$, 其中 k 为 $1 \sim m$ 的整数, 表示武器部署大概地点的标号, x_k 为 $1 \sim n$ 之间的整数, 表示武器部署精确地点的标号, $x_k = 1$ 表示防空武器部署在第 k 个大概地点附近的标号为 1 的精确地点。

3.2.2 种群初始化

在遗传算法用于种群进化之前, 需要建立初始种群。初始种群的选取将直接影响算法搜索全局最优解的能力。这里针对 m 套防空武器和 n 个精确部署阵地位置产生初始种群, 初始种群的规模应适应于问题的难度^[21], 假设规模为 N 。

3.2.3 适应度评价

遗传算法中以适应度函数评价每条染色体的适应度值, 区分每个个体的优劣程度, 这里将 $\text{MaxMin CDI}(r)$ 直接作为遗传算法的适应度函数, 并计算染色体 i 的适应度值 f_i 。

3.2.4 选择算子

这里采用轮盘赌选择算法对种群进行选择, 这种算法基于概率的随机选择。首先计算种群适应度值总和 $\sum_{i=1}^N f_i$, 再分别计算每条染色体适应度值占种群适应度值总和是比例 P_i , 即 $P_i = f_i / \sum_{i=1}^N f_i$ 。然后将 P 值大的染色体复制, 将 P 值小的染色体淘汰。由于这种算法具有随机性, 不能保证每次选择都能选择 P 值大的染色体, 因此也会留下一些 P 值较小的染色体, 但种群规模不变。

3.2.5 交叉算子

在种群交配时, 指定一个交配概率 (P_c , 一般取 0.4~0.99) 决定每条染色体是否能进行交配。对于每条染色体产生 $[0, 1]$ 的随机数 (用 A 表示), 若 A 小于 P_c , 则该染色体进行交配, 否则不参与交配, 并将其直接复制到新种群中。将 P_c 选择出来的每两条染色体的部分基因交换, 产生两个子代染色体。染色体的交配位置是随机产生的, 交换的基

因为该位置后的所有基因。新种群规模仍为 N 。

3.2.6 变异算子

染色体的变异作用于基因上,变异时指定一个变异概率(P_m ,一般取 $0.001 \sim 0.1$)决定种群中染色体的每一位基因是否进行变异。对于染色体的每一位基因产生 $[0,1]$ 的随机数(用 B 表示),若 B 小于 P_m ,则该基因进行变异,否则该基因不发生变异。根据染色体的编码,变异的取值为 $1 \sim n$ 之间的整数。

3.2.7 求解步骤

运行过程如下:

步骤 1 根据问题确定初始种群的规模 N ,当前进化代数 $G=0$;

步骤 2 用适应度函数评价全部染色体,计算各染色体的适应度值,并保存适应度值最大的染色体 $Best$;

步骤 3 按照轮盘赌选择算法对种群进行选择;

步骤 4 根据交配概率 P_c 从种群中选择染色体进行交配操作;

步骤 5 根据变异概率 P_m 从种群中选择染色体进行交配操作;

步骤 6 产生的新种群取代原有种群,并计算新种群中各染色体的适应度值。如果新种群的最大适应度值大于 $Best$ 的适应度值,则更新 $Best$,用新种群中的最大适应度值对应的染色体代替 $Best$,否则不更新;

步骤 7 当前进化代数 G 加 1。算法结束条件为 $Best$ 达到规定要求或 G 超过最大进化代数,若不满足结束条件,则返回步骤 3。

4 算例仿真及分析

4.1 算例

如图 8 所示,假设根据上级意图(已确定进攻方的空袭兵器)在保卫要地周围确定 5 个武器部署的大概地点(1、2、3、4、5),每个大概地点附近规定范围内有 5 个精确地点可供武器部署,求解针对单一武器类型时的最佳部署形式。

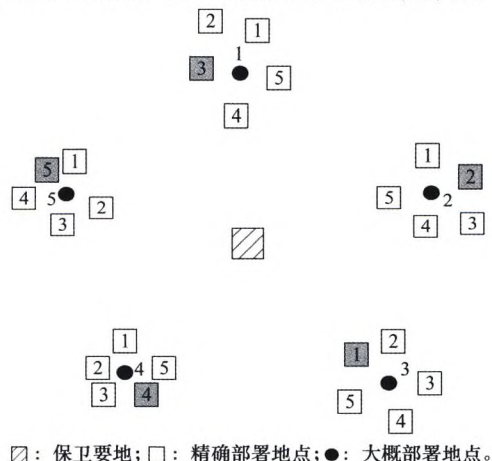


图 8 算例示意图

Fig. 8 Example diagram

4.2 仿真实验及结果分析

仿真实验使用 Matlab2013 软件进行,遗传算法中相关参数设置如下:种群规模为 $N=100$,最大进化代数为 1 000,交配概率 $P_c=0.95$,变异概率 $P_m=0.1$ 。

根据算例对染色体进行编码,有效解为 $X=(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$,其中 $x_i=1, 2, 3, 4, 5 (i=1, 2, 3, 4, 5)$ 。然后生成初始种群,计算每条染色体的适应度值,如表 1 所示。

表 1 初始种群及适应度值

Table 1 Initial population and fitness value

| 标号 | 初始种群 | 适应度值 |
|-----|-----------|----------|
| 1 | 3,2,1,4,5 | 24.650 0 |
| 2 | 1,1,5,2,3 | 24.852 1 |
| 3 | 2,1,3,5,4 | 25.658 9 |
| 4 | 2,2,3,1,4 | 25.457 4 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| 99 | 5,2,1,2,4 | 26.589 6 |
| 100 | 4,2,1,3,3 | 24.796 1 |

仿真实验的目标是求出适应度值最大的种群,下面仅对 1 号染色体(3,2,1,4,5;如图 8 中阴影所示)的适应度值求解过程进行说明,其余染色体适应度值的求解与 1 号染色体相同。根据定义 1~7 及部署方案,假定将整个区域离散成 50×50 的二维方格,每个方格的边长为 10 km。确定 DZ、KZ、VZ 以及相应高程的数据,经计算得到如图 9 所示的危险指数矩阵 $D(50 \times 50)$,图中用颜色区分危险指数的不同。

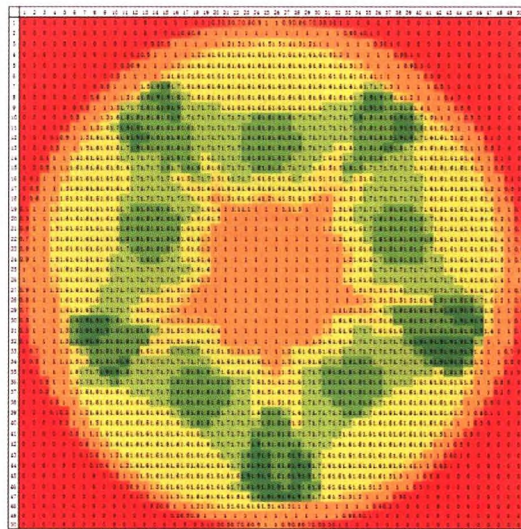


图 9 危险指数矩阵 D

Fig. 9 Risk index matrix D

将矩阵 D 代入动态规划算法程序中运行,得到局部最小累积危险指数矩阵 L ,如图 10 所示,图中用颜色区分局部最小累积危险指数的不同。最后得到全局最小累积危险指数为 $L_{29,1}=22.650 0$,即适应度值为 22.650 0。同时,也得到了航线矩阵 P ,如图 11 所示,图中方格内的数字表示下一步前进的方向。最终该适应度值对应的航线为(29,1)

→(29,2)→(29,3)→(29,4)→(29,5)→(29,6)→(29,7)→
(29,8)→(29,9)→(29,10)→(29,11)→(29,12)→(29,13)
→(29,14)→(29,15)→(29,16)→(29,17)→(29,18)→
(29,19),如图 11 中黑框所示。

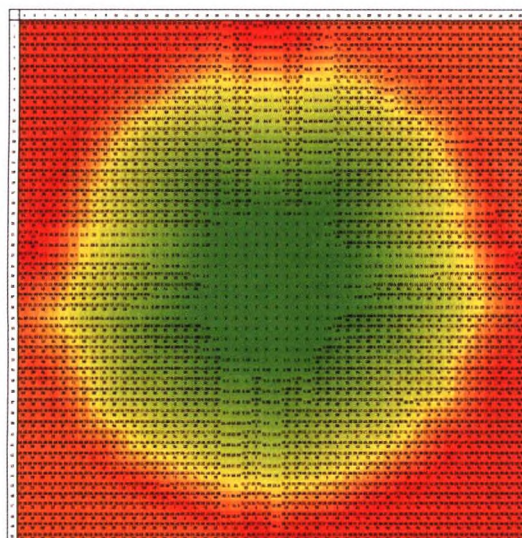


图 10 局部最小累积危险指数矩阵 L

Fig. 10 Local minimum cumulative hazard index matrix L

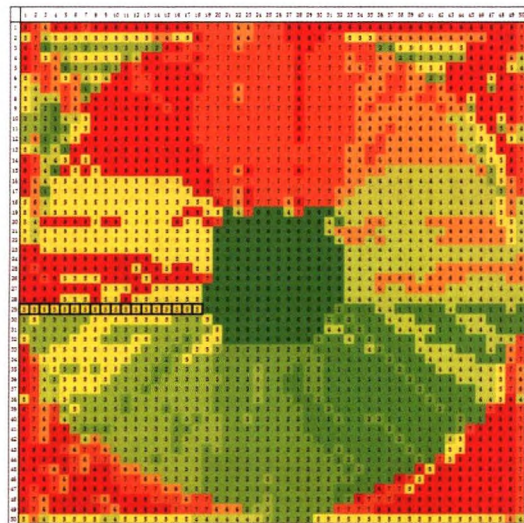


图 11 航线矩阵 P

Fig. 11 Route matrix P

初始种群确定后,运行程序,通过选择、交配、变异,得到 $Best$ 适应度值为 26.731 8, $Best$ 适应度值与进化代数的关系如图 12 所示,进化代数在 0~100 代时, $Best$ 适应度值变化明显,但随着进化代数的增加,适应度逐渐收敛到一个固定值。

最终 $Best$ 适应度值对应的染色体(5、3、2、1、4)即为最佳部署方案,其对应的最佳航线为(5,39)→(6,39)→(7,39)→(8,38)→(9,37)→(10,36)→(11,35)→(12,34)→(13,33)→(14,32)→(15,32)→(16,31)→(17,31)→(18,31)→(19,30),其中方块(5,39)在 DZ 边界上,从正方形边

界到方块(5,39)的航线,只需保证其经过的每一个方块的危险指数为 0 即可。通过对算例的仿真实验可以看出,本文所设计的优化模型能够得到基于进攻方的最优部署方案,为指挥人员进行防空武器部署提供参考和决策依据。

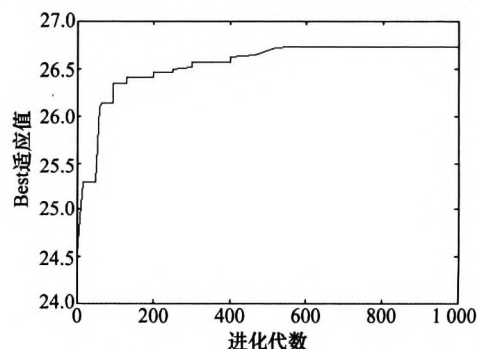


图 12 $Best$ 适应度值的收敛过程

Fig. 12 Convergence process of the fitness value of $Best$

5 结束语

本文以“智能敌人”在进攻时航线上累计危险指数为指标,将动态规划算法与遗传算法相结合,提出的一种基于动态规划-遗传算法的模型,很好地解决了防空部署优化问题。然而,将本文的模型运用于工程实践,还需要考虑更多的影响因素和具体参数设定。由于抗击空袭兵器饱和进攻、电子战设备以及抗击隐身目标等典型作战想定并不是仅仅通过改变部署方式就可以解决的,所以本文并没有提及,下一步会将其重点研究。为了精确地进行防空部署,将二维平面拓展至三维空间将会是下一步的研究方向。

参考文献:

- [1] 邢清华,刘付显.区域防空部署优化系统建模[J].系统工程与电子技术,2006,28(5):712-715.
XING Q H, LIU F X. Modeling on area air defense optimization deployment system[J]. Systems Engineering and Electronics, 2006, 28(5): 712-715.
- [2] 阳林,刘付显,张搏.基于风险决策的区域防空部署方案优选方法[J].空军工程大学学报(自然科学版),2013,14(6):34-37.
YANG L, LIU F X, ZHANG B. Optimum of disposition schemes for area air-defense operation based on risk decision[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural science Edition), 2013, 14(6): 34-37.
- [3] 曹毅,李宏,朱雪平.弹炮混编防空群机动部署方案优选与评估[J].现代防御技术,2004,32(3):4-7.
CAO Y, LI H, ZHU X P. Opti-select and assessments of the lines of flexible deployment of hybrid anti-aircraft group of missile and artillery[J]. Modern Defense Technology, 2004, 32(3): 4-7.
- [4] 王玉冰,王锦江,王颖龙.基于粒子群算法的混编群兵力部署优化研究[J].战术导弹技术,2009(3):44-47.
WANG Y B, WANG J J, WANG Y L. Study of hybrid force disposition based on particle swarm optimization[J]. Tactical Missile Technology, 2009(3): 44-47.

- [5] 耿振余, 毕义明. 并行基因组合型遗传算法求解防空部署优化问题研究[J]. 现代防御技术, 2007, 35(3): 21-24.
GENG Z Y, BI Y M. Study on optimization of air defense deployment based on parallel gene combination genetic algorithm[J]. Modern Defense Technology, 2007, 35(3): 21-24.
- [6] CHEN C, CHEN J, ZHANG C M. Deployment optimization for air defense base on artificial potential field[C]//Proc. of the 8th Asian Control Conference, 2011: 812-816.
- [7] CHEN C, CHEN J, XIN B. Hybrid optimization of dynamic deployment for networked fire control system[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2013, 24(6): 954-961.
- [8] HAN S C, WANG X G. Optimization for combat configuration of air-defense weapon systems[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2000, 17(1): 48-52.
- [9] DARILEK R E, NICHIPORUK B, GORDON J, et al. Measures of effectiveness for the information-age army[D]. Rand, 2001.
- [10] TONELLA P, SUSI A, PALMA F. Interactive requirements prioritization using a genetic algorithm[J]. Information and Software Technology, 2013, 55(1): 173-187.
- [11] MA Y, CUI X. Solving the fuel transportation problem based on the improved genetic algorithm[C]//Proc. of the 10th International Conference on Natural Computation, 2001: 584-588.
- [12] TORRES J, GUARDADO J L, RIVAS-DÁVALOS F, et al. A genetic algorithm based on the edge window decoder technique to optimize power distribution systems reconfiguration[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013, 45(1): 28-34.
- [13] GHOSE D, PRASAD U R, GURUPRASAD K. Missile battery placement for air defense: a dynamic programming approach[J]. Applied Mathematical Modelling, 1993, 17(9): 450-458.
- [14] 张肃, 王颖龙, 曹泽阳. 地面防空战斗部署方案评估模型[J]. 火力与指挥控制, 2005, 30(5): 15-18.
ZHANG S, WANG Y L, CAO Z Y. Evaluation model of ground to air defense tactical disposition assignment[J]. Fire Control and Command Control, 2005, 30(5): 15-18.
- [15] 吕伟, 李洪平, 高志勇, 等. 基于空域分割的防空部署效率评估模型[J]. 指挥控制与仿真, 2010, 32(1): 45-48.
LÜ W, LI H P, GAO Z Y, et al. Evaluation model of air-defense disposition efficiency based on airspace division[J]. Command Control & Simulation, 2010, 32(1): 45-48.
- [16] RFZF Z F, NASRIN A, NOOSHIN H, et al. Covering problems in facility location: a review[J]. Computers & Industrial Engineering, 2012, 62(1): 368-407.
- [17] KARASAKAL O, KANDILLER L, ÖZDEMIREL N E. A branch and bound algorithm for sector allocation of a naval task group[J]. Naval Research Logistics, 2011, 58(7): 655-669.
- [18] LIU L J, LI X M, LIU R, et al. Mathematic model of key-point anti-air position ring deployment and optimization[C]//Proc. of the 2nd International Conference on Computer Science and Network Technology, 2012: 166-171.
- [19] TANERGÜCLÜ T, MARAS H, GENCER C, et al. A decision support system for locating weapon and radar positions in stationary point air defense[J]. Information Systems Frontiers, 2012, 14(2): 423-444.
- [20] YOUNGHOL, HANIF D S, IKHYUN K, et al. A new reformulation approach for the generalized partial covering problem[J]. Naval Research Logistics, 2006, 53(2): 170-179.
- [21] HARIK G, PAZ E C, MILLER B. The Gambler's ruin problem, genetic algorithms, and the sizing of populations[C]//Proc. of the 5th International Conference on Evolution Computation, 1997: 7-12.

作者简介:

颜培远(1992-),男,硕士研究生,主要研究方向为网络信息系统、软件工程。

E-mail:museguixiang@163.com

刘 曙(1971-),男,副教授,硕士研究生导师,主要研究方向为智能信息处理、软件工程。

E-mail:494230722@126.com

王 君(1975-),男,副教授,硕士研究生导师,主要研究方向为防空反导武器总体技术、防空反导作战指挥控制技术。

E-mail:wangjun197618@126.com