

基于微分进化算法的防空导弹火力分配

黄仁全, 李为民, 周晓光, 张琳

(空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800)

摘要:防空导弹火力分配是防空作战中的关键环节,优化分配方案、提高分配效率都将对提升防空作战效能产生重要影响。在分析防空导弹火力分配过程的基础上,建立了基于最大杀伤效能的防空导弹火力分配模型,并引入惩罚函数,改良了原有模型;在分析微分进化算法优缺点的基础上,结合防空导弹火力分配问题的特殊性,对标准微分进化算法进行了改进,使其适用于离散问题的求解,并将其应用于防空导弹火力分配问题;结合实例对基于微分进化算法的防空导弹火力分配模型进行仿真分析。仿真结果表明,采用微分进化算法解决防空导弹火力分配问题收敛速度快、鲁棒性强、执行效率高。

关键词:微分进化算法;防空导弹;惩罚函数法;火力分配

DOI:10.3969/j.issn.1009-3516.2009.05.009

中图分类号: O224 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2009)05-0041-04

防空导弹火力分配是指对上级分配的目标或在独立作战时自行搜索发现的目标,经判定为来袭飞行器且需要拦截的空中目标进行拦截排序、弹药分配和确定拦截方式的过程^[1]。火力分配模型优劣和模型求解效率,都将对防空作战效能产生重大影响。文献[1]提出的防空导弹火力分配模型求解方法,存在执行效率较低的缺点,影响作战效能。鉴于以上不足,本文以最大限度打击来袭目标对保卫要地构成的威胁为火力分配原则,建立了防空导弹火力分配模型;提出基于微分进化算法^[2-3]的模型求解方法。

1 防空导弹火力分配问题

在防空作战中,不同来袭目标对防空保卫要地构成的威胁不同,依据防空作战指控流程,对目标威胁评估后进行火力分配。因此,防空作战以最大限度打击来袭目标对保卫要地构成的威胁为火力分配原则,构建火力分配模型。

设在某防空区域中,有 M 个火力单元(目标通道数为 r 的防空火力单元,可认为是 r 个部署于同一位置的火力单元),第 i 个火力单元有同一型号导弹 m_i 枚;某批次来袭目标数量为 n ,第 j 个目标的威胁度为 ω_j ,第 i 种防空导弹对第 j 个目标的杀伤概率设为 P_{ij} ($i=1,2,\dots,m;j=1,2,\dots,n$)。第 i 个火力单元对第 j 个目标射击导弹的数量为 x_{ij} ,杀伤目标的数学期望函数为 $F(x)$,设每次射击均为独立的随机事件。依据杀伤目标期望最大原则^[4-5],火力分配最优化模型为:

$$\begin{aligned} \max F(x) &= \sum_{j=1}^n \omega_j \left[1 - \prod_{i=1}^m (1 - P_{ij})^{x_{ij}} \right] \\ \text{s.t.} \quad &\sum_{j=1}^n x_{ij} = m_i, i = 1, 2, \dots, m \\ &0 \leq x_{ij} \leq m_i, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n; x_{ij} \in \mathbf{Z} \end{aligned} \quad (1)$$

* 收稿日期:2008-10-06

基金项目:陕西省自然科学基金资助项目(SJ08F21)

作者简介:黄仁全(1983-),男,湖南郴州人,硕士生,主要从事防空作战建模与仿真研究;

E-mail:huangrenquan@126.com

李为民(1964-),男,甘肃民勤人,教授,博士生导师,主要从事防空反导作战运筹分析。

防空作战过程中,依据文献[4]可知,对某批确定数量的来袭目标,通过目标威胁评估来袭目标威胁度 ω_j 可确定,则 $\sum_{j=1}^n \omega_j = W$, W 为某一确定常数。基于上述分析,火力分配最优化模型等效为:

$$\begin{aligned} \min F'(x) &= \sum_{j=1}^n \omega_j \prod_{i=1}^m (1 - P_{ij})^{x_{ij}} \\ \text{s.t.} \quad &\sum_{j=1}^n x_{ij} = m_i, i = 1, 2, \dots, m \\ &0 \leq x_{ij} \leq m_i, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n; x_{ij} \in \mathbf{Z} \end{aligned} \quad (2)$$

2 微分进化算法在防空导弹火力分配中的应用

2.1 微分进化算法

进化算法是20世纪70年代初发展起来的一大类仿生随机算法,主要包括遗传算法(genetic algorithm)、进化规划(evolutionary programming)、进化策略(evolution strategy)、遗传程序设计(genetic programming)等。1995年Rainer Storn和Kenneth Price提出了一种更简单、更有效算法——微分进化算法(differential evolution,简称DE),巨大地推进了进化算法的发展^[6]。微分进化算法继承了“优胜劣汰”的思想,因此属于进化的一种。其基本思想是:对种群中的每个个体 i ,从当前种群中随机选择3个点,以其中的一个点为基础、另2个点为参照作一个扰动,所得点与个体 i 交叉后进行“自然选择”,保留较优者,实现种群的进化。

2.2 微分进化算法求解火力分配模型

防空导弹火力分配模型为带约束的非线性规划模型,引入惩罚函数对模型求解。因为 $\omega_j, P_{ij} \in [0, 1]$,则惩罚函数系数 α 取100可满足求解要求,那么式(2)可化为:

$$\begin{aligned} \min f(x) &= \sum_{j=1}^n \omega_j \prod_{i=1}^m (1 - P_{ij})^{x_{ij}} + 100 \left(\sum_{i=1}^m \left(\sum_{j=1}^n x_{ij} - m_i \right)^2 \right) \\ \text{s.t.} \quad &0 \leq x_{ij} \leq m_i; i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n; x_{ij} \in \mathbf{Z} \end{aligned} \quad (3)$$

通过上述分析,将防空导弹火力分配数学模型转化为式(3),其目标函数为 $\min f(x)$ 。采用微分进化算法求解防空导弹火力分配的流程为:

1)变量转化。采用微分进化算法求解火力分配问题,应将火力分配矩阵和目标易损矩阵转化为向量(火力分配向量,目标易损向量)表示。设 x_{ij} 为火力分配矩阵中的某元素,那么其在火力分配向量中对应元素为 $x'_{i \times n + j}$;目标易损矩阵同理有 P_{ij} 对应 $p'_{i \times n + j}$, n 为目标数量。

2)初始化。设种群规模为 L (通常取 $5k-10k$,个体数量较大时可取 k , k 为变量个数),交叉概率 P_c (通常取0.1),交叉因子 $F \in (0, 1)$ (通常取0.5);进化代数 $t=0$,自变量(火力分配情况)的下界 l 和 u ,随机生成初始种群 $\mathbf{X}(0) = \{X_1(0), X_2(0), \dots, X_N(0)\}$,其中 $\mathbf{X}_i(0) = \{x_1^i(0), x_2^i(0), \dots, x_n^i(0)\}$ 为火力分配向量。

3)个体评价。计算每个个体 $\mathbf{X}_i(t)$ 的目标适应度函数值 $f(\mathbf{X}_i(t))$,并记录。

4)繁殖。对于种群中的每个个体 $\mathbf{X}_i(t)$,随机生成3个互不相同的随机整数, $r_1, r_2, r_3 \in \{1, 2, \dots, L\}$ 和随机整数 $j_{\text{rand}} \in \{1, 2, \dots, L\}$ 。在防空导弹火力分配问题求解中,需对繁殖的后代取整数^[7]:

$$x_j^{(i)'}(t) = \begin{cases} \lfloor (x_j^{(r_1)}(t) + F(x_j^{(r_2)}(t) - x_j^{(r_3)}(t))) \rfloor, & \text{若 } \text{rand} < P_c \text{ 或 } j = j_{\text{rand}} \\ x_j^{(i)}(t), & \text{否则} \end{cases}$$

$$5) \text{选择。} \mathbf{X}_i(t+1) = \begin{cases} x_j^{(i)'}(t), & \text{若 } f(x_j^{(i)'}(t)) < f(x_j^{(i)}(t)) \\ x_j^{(i)}(t), & \text{否则} \end{cases}$$

6)终止检验。如果种群 $\mathbf{X}_i(t+1)$ 满足终止准则,则输出 $\mathbf{X}_i(t+1)$ 中就有最小目标值的个体作为最优解,否则,转2)。

3 算例分析

设某防空区域部署4个火力单元,每个火力单元有6枚型号相同导弹,空情显示有7批来袭目标。设目标的威胁特性与易损系数(单发导弹对目标的杀伤概率)^[8-9]分别见表1、表2。

表1 目标威胁系数

Tab.1 The threat of the targets

目标	01	02	03	04	05	06	07
威胁系数	0.8	0.5	0.8	0.7	0.9	0.7	0.9

表2 目标易损系数

Tab.2 The vulnerability of the targets

火力单元	目标						
	01	02	03	04	05	06	07
01	0.8	0.6	0.5	0.9	0.5	0.7	0.6
02	0.5	0.0	0.8	0.5	0.7	0.6	0.7
03	0.9	0.7	0.5	0.8	0.0	0.8	0.6
04	0.6	0.7	0.6	0.5	0.8	0.0	0.7

用 Matlab 编写微分进化算法程序 DEvolution(nofv,lb,ub,maxgen,popsize,scalfac,pc)。其中,nofv 为变量个数,在本例中取 28;lb 为变量下界,所有元素取值为 0;ub 为变量上界,所有元素取值为 6;maxgen 为最大进化代数,设初始值为 200;popsize 为种群规模,取 100;scalfac 为交叉因子,取 0.5;pc 为交叉概率,取 0.1。在 Matlab 中做出在以上条件下进化代数 n 和适应度函数值 $f(x)$ 之间的关系,见图 1。

由图 1 可知,约在第 60 代时已取得最优解。取 maxgen 为 80,程序运行时间为 0.437 1 s,适应度函数值

为 $f(x)_{80} = 5.724 8$,分配矩阵 $X(80) = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 3 & 0 & 0 & 1 & 2 \\ 1 & 2 & 0 & 1 & 0 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 3 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ 。

算法的时间效率是指算法运行的速度,是一个以算法输入规模为参数的函数^[10-11]。在本例中,火力分配向量长度小于种群规模,因此种群规模是影响算法效率的主要因素。取种群规模 popsize 从 30-140,最大进化代数 maxgen 为 80 时得到种群规模与运行时间关系图 2。由图 2 可知种群规模与运行时间为线性关系,即:随着种群增加,运行时间线性增长。依据文献[10-12],该算法具有高效性。因此,微分进化算法应用于防空导弹火力分配中,能高效解决防空作战火力分配问题,具有重要研究意义。

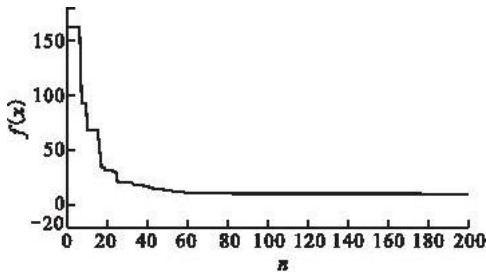


图1 进化代数 n 与适应度 $f(x)$ 关系
Fig.1 The generations and the fitness

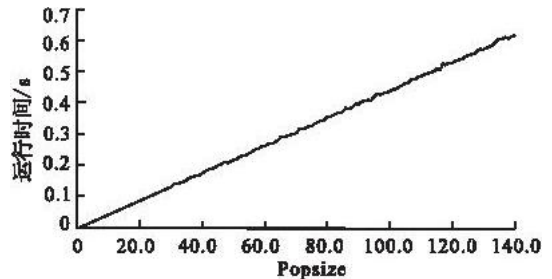


图2 种群规模 popsize 运行时间关系
Fig.2 The scale and the cost time

4 结束语

本文采用微分进化算法对防空导弹火力分配问题进行了研究,取得了较好的效果,还有很多工作要做:
① 引入导弹价值与目标价值等约束,进一步完善防空导弹火力分配模型;② 采用启发式算法,在达到较为满意火力分配方案时推出程序,以满足更高的时效性要求。

参考文献:

[1] 康英军,李为民,李续武. Hopfield 神经网络的防空火力最优分配问题[J]. 火力与指挥控制, 2003, 28(6): 35-37.
KANG Yingjun, LI Weimin, LI Xuwu. A Study of the Optimal Aerial Defense Firepower Distribution Based on HNN [J]. Fire Control and Command Control, 2003, 28(6): 35-37. (in Chinese)

- [2] Goldberg D E. Genetic Algorithms; in Search Optimization and Machine Learning[M]. New York; Addison Wesley Press, 1989.
- [3] Storn R, Price K. DE — A Simple and Efficient Adaptive Scheme for Global Optimization over Continuous Space[J]. Technical Report, 1995, 25(6):95—102.
- [4] 王 朔. 基于贝叶斯网络的舰艇导弹防御系统决策模型算法研究[D]. 长沙; 国防科技大学, 2005.
WANG Shuo. Research on Algorithm of Ship Missile—Defense System Decision Model Based on Bayesian Networks[D]. ChangSha; National University of Defense Technology, 2005. (in Chinese)
- [5] 刘春波, 申卯兴, 刘建仓. 防空战略区域综合评价模型[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2005, 6(3):33—36.
LIU Chunbo, SHEN Maoxing, LIU Jiancang. Model of Comprehensive Evaluation of Air Defense District[J]. Journal of Air Force Engineering University; Natural Science Edition, 2005, 6(3):33—36. (in Chinese)
- [6] 阳明盛, 罗长童. 最优化原理、方法及其求解软件[M]. 北京; 科学出版社, 2006.
YANG Mingsheng, LUO Changtong. The Theories, Methods and Dissolving Software of Optimization[M]. Beijing; Science Press, 2006. (in Chinese)
- [7] 余 兵, 贺时兴. 差分进化算法及其应用[D]. 西安; 西安工程大学, 2007.
YU Bing, HE Shixing. Differential Evolution Algorithm and Its Application[D]. Xi'an; Xi'an Engineering University, 2007. (in Chinese)
- [8] 刘 毅, 李凌鹏, 李为民. 空地协同方式优化方法研究[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2007, 8(4):80—83.
LIU Yi, LI Lingpeng, LI Weimin. Optimization Research on Air—ground Cooperative Engagement Pattern[J]. Journal of Air Force Engineering University; Natural Science Edition, 2007, 8(4):80—83. (in Chinese)
- [9] Menke T E. Air—to—Surface Virtual Simulation in Support of the Joint Strike Fighter's Joint Operational Requirements Document[C]//Proceedings of the AIAA Guidance and Control Conference. New York; United States Air Force/Aeronautical Systems Center, 2000; 4432—4490.
- [10] Anany Levitin. 算法设计与分析基础[M]. 北京; 清华大学出版社, 2007.
Anany Levitin. Introduction to the Design and Analysis of Algorithms [M]. Beijing; Tsinghua University Press, 2007. (in Chinese)
- [11] Adelson Velsky G M. An Algorithm for Organization of Information[M]. New York; Soviet Mathematics Doklady Press, 1962.
- [12] Adleman L M. Molecular Computation of Solutions to Combinatorial Problems[J]. Science, 1994, 266:1021—1024.

(编辑:田新华)

Research on Firepower Distribution Model of Surface to Air Missile Based on Differential Evolution Algorithm

HUANG Ren—quan, LI Wei—min, ZHOU Xiao—guang, ZHANG Lin

(Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan 713800, Shaanxi, China)

Abstract: Firepower distribution is a key link in the surface—air warfare. The fire distribution model and the efficiency of solving it all will affect the result of the air defense warfare directly. The fire distribution model is proposed based on the research of the air defense warfare. The penalty function algorithm is used to simplify the fire distribution model, and the differential evolution algorithm (DE) is introduced based on analyzing the strong point and weak point of it. According to the efficiency and the robustness of DE, it is meaningful to introduce DE into solving the model of fire distribution. An example is given to simulate and analyze the firepower distribution model of surface to air missile based on the differential evolution algorithm. The result shows that the algorithm is of fast convergence, strong robustness and high implementing efficiency in solving the problem of firepower distribution of surface to air missile. So DE is an effective method in solving the firepower distribution model of surface to air missile, and also it can be applied to other problems.

Key words: differential evolution algorithm; surface to air missile; penalty function algorithm; firepower

distribution