

基于人工免疫算法的航空机务维修器材保障点选址优化研究

马国岗^{1,*}, 王瑞成²

1. 河南省机场集团有限公司 机务工程部, 河南 郑州 541161

2. 海军蚌埠士官学校, 安徽 蚌埠 233012

摘要: 为了提高航空机务维修保障效率、降低保障成本以及更加科学合理、高效地进行航空机务维修保障, 有必要对保障点选址优化问题进行研究。通过明确其约束条件, 建立选址优化的复杂约束的非线性规划数学模型, 采用适当的编码方案和罚函数使种群个体编码满足约束条件, 利用免疫操作对该模型进行优化求解, 提出了基于人工免疫算法的航空机务维修器材保障点优化算法, 并进行了仿真。仿真结果表明, 该算法在航空机务维修器材保障点选址决策中具有很好的效果。

关键词: 航空机务维修; 选址; 人工免疫算法

中图分类号: TP202 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-5453 (2014) 02-12-5

在机务维修保障过程中, 保障点的任务就是根据各个用户的需求及时、准确和经济地配送航空备件。保障点的选址方式往往决定着维修成本和效率。另外, 维修保障点的位置一旦被确定, 难以再改变。因此, 研究维修保障点的选址具有重要的理论价值和现实意义。

一般而言, 维修保障点选址模型是一种复杂、多约束的非线性规划模型, 属于NP-难问题。随着计算机技术的发展和各种先进算法的出现, 在传统方法求解典型选址问题的基础上, 出现了很多方法求解此类问题, 例如神经网络^[1]、蚁群算法^[2,3]、遗传算法^[4-6]、粒子群算法^[7]、网络层次分析法(ANP)^[8]等。

本文利用改进的人工免疫算法优化飞机维修器材保障点的选址问题。其基本思想是首先通过建立选址数学模型, 明确其约束条件, 引入合适的编码方案, 通过免疫操作, 通过仿真分析实现优化选址问题。

1 数学模型

1.1 假设条件

给定某一地区所有需求点用户的地址集合, 要求从中

选出一定数目的地址建立配送中心, 从而建立一系列的配送区域, 实现各个需求点的配送, 使得在选出点建立的配送中心与各需求点形成的配送系统总配送费用最少。为了便于建立模型, 作一定假设, 假设系统满足如下一些条件:

- 1) 保障点的规模容量总可以满足需求点的需求, 并由其配送辐射范围内的需求量确定;
- 2) 一个需求点只由一个保障点进行保障;
- 3) 不考虑工厂到保障点的运输费用;
- 4) 维修器材保障点的能力是无限的, 即假设保障点能满足维修的需求;
- 5) 各需求点的需求量一定且为已知;
- 6) 各需求点需求的物品一次运输完成, 所有点间运输能力一样;
- 7) 不考虑固定的仓库建设费;
- 8) 运输费用与运输量成正比。

1.2 模型建立

基于以上假设建立如下选址/分配模型: 在满足距离上限的情况下, 需要从 m 个需求点中找出 p 个保障点并向各需

收稿日期: 2014-01-09; 录用日期: 2014-01-25

*通讯作者. Tel.: 13613832935 E-mail: 1253650732@qq.com

引用格式: MA Guogang, WANG Ruicheng. Research on support position location of aviation maintenance equipment based on artificial immune algorithm[J]. Aeronautical Science & Technology, 2014, 25(02): 12-16. 马国岗, 王瑞成. 基于人工免疫算法的航空机务维修器材保障点选址优化研究[J]. 航空科学技术, 2014, 25(02): 12-16.

求点配送物品,使得在选出点建立的保障点在满足保障需求的前提下,成本最低。

目标函数是各保障点到需求点的需求量和距离值的乘积之和最小,目标函数为

$$\min f(x) = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \omega_i d_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

其约束条件为:

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = 1, i \in I \quad (2)$$

$$x_{ij} \leq h_j, i \in I, j \in J \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^J h_j = p \quad (4)$$

$$x_{ij}, h_j \in \{0, 1\}, i \in I, j \in J \quad (5)$$

$$d_{ij} \leq s \quad (6)$$

其中, ω_i 表示需求点的需求量;

d_{ij} 表示从需求点到离它最近的保障点的距离;

x_{ij} 表示用户和保障点的服务需求分配关系,为0~1变量,当其值为1时,表示需求点*i*的需求量由保障点*j*供应,否则 $x_{ij}=0$;

h_j 是0~1变量,当其值为1时,表示点*j*被选为保障点;

s 是保障点与其服务的需求点的距离上限;

$I=\{1, 2, \dots, n\}$ 是所有需求点的序号集合; J 为到需求点*i*的距离小于*s*的备选保障点集合, $i \in I, j \in J$;

式(2)保证一个需求点只能由一个保障点服务;

式(3)确保需求点的需求量只能被设为保障点的点供应,即没有保障点的地点不会有用户;

式(4)规定了被选为配送中心的数量为*p*;

式(5)表示变量 x_{ij} 和 h_j 是0~1变量;

式(6)保证了需求点在保障点可达的范围内。

2 人工免疫算法的基本思想

人工免疫(Artificial Immune, AI)算法主要是借鉴生物免疫系统的信息处理机制发展出来的一种智能优化算法,它受生物免疫系统启发,模仿自然免疫系统功能,通过学习外界物质的自然防御机理的学习技术,提供了无教师学习、自组织、记忆等进化学习机理,结合了分类器、神经网络和机器推理等系统的一些优点,为解决复杂问题提供了一种新的思路和方法。在人工免疫系统中几个常用术语及其含义^[9-11]:

1) 抗原(Antigen, Ag):一般指问题及其约束,与进化算法中适应度函数类似。具体地,它是问题目标函数的函数,是

人工免疫系统算法的始动因子以及重要的度量标准。

2) 抗体(Antibody, Ab):一般指问题的候选解,与进化算法中的个体相似,抗体的集合称为抗体群。

3) 抗体——抗原亲和力:反映整分子抗体与抗原之间的总的结合力。一般指候选解所对应的目标函数值或候选解对问题的适应性度量。

4) 记忆单元:是由特定抗体组成的抗体群,用于保持种群的多样性,及求解过程中的最优解。

3 人工免疫算法求解选址问题

3.1 抗体群的初始化

用AI算法对选址问题进行求解时,根据求解问题的性质来采用恰当的编码方案,采用的编码方式不仅要求直观地表示问题的解,还应尽量满足约束条件。由于该问题为整数规划问题,基于上述考虑,故可采用符号编码。

若记忆库非空,则初始抗体群从记忆库中选择生成。否则,在可行解空间随机产生初始抗体群。每个选址方案可形成一个长度为*p*的抗体,*p*表示配送中心数,每个抗体代表被选为配送中心的需求点序列。例如,考虑包含*m*个需求点的问题。1, 2, ..., *m*代表需求点的序号。从中选出6个作为配送中心,抗体[1 3 5 7 9 11]代表一个可行解,它表示1, 3, 5, 7, 9, 11被选为配送中心,这种编码方式能够满足约束条件式(4)和式(5)。

3.2 罚函数法对约束条件的处理

为满足约束条件,采用罚函数的方法将模型改进为:

$$\min F(x) = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \omega_i d_{ij} x_{ij} + M \cdot \sum_{i=1}^m \left[\max \left\{ 0, \left(\sum_{j=1}^n x_{ij} \right) - 1 \right\} \right] \quad (7)$$

式中: M 是一个足够大的正数。当*x*为可行点时, $\max \left\{ 0, \left(\sum_{j=1}^n x_{ij} \right) - 1 \right\} = 0$; 当*x*为不可行点时, $\max \left\{ 0, \left(\sum_{j=1}^n x_{ij} \right) - 1 \right\} = \left(\sum_{j=1}^n x_{ij} \right) - 1$ 。

显然,式(7)的最优解必须使得 $\sum_{j=1}^n x_{ij}$ 等于1,否则,式(7)

的第二项将是很大的正数,现行点必不是极小点。

3.3 免疫操作

免疫操作包括:

1) 选择:按照轮盘赌选择机制进行选择操作,个体被选择的概率即为期望繁殖概率。

2) 交叉:采用单点交叉法进行交叉操作。

3) 变异:采用随机选择变异位进行变异。

3.4 算法步骤与流程

免疫算法具体实现步骤如下:

1) 分析问题。对问题及其解的特性进行分析,设计解的合适表达形式。

2) 抗体群初始化。随机产生 N 个个体并从记忆库中提取 m 个个体构成初始群体,其中 m 为记忆库中个体的数量。

3) 对上述群体中各个抗体进行评价。个体的评价以个体的期望繁殖率 ps 为标准。

4) 形成父代群体。将初始群体按期望繁殖率 ps 进行降序排列。并取前 N 个个体构成父代群体;同时取前 m 个个体存入记忆库中。

5) 判断是否满足结束条件,“是”则结束;“否”则继续下一步操作。

6)新群体的产生。基于步骤4)的计算结果对抗体群体进行选择、交叉、变异操作得到新群体,再从记忆库中取出记忆的个体,共同构成新一代群体。之后,转去执行步骤3)。

算法的基本流程如图1所示:

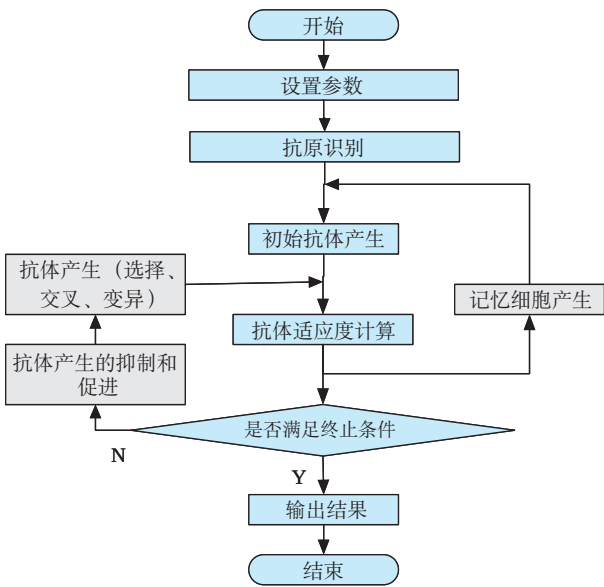


图1 AI算法求解选址优化问题流程图
Fig.1 The flow chart of solving location problems by AI

4 仿真分析

为了验证算法的可行性和有效性,采集了31个备选维修器材保障点及需求点的坐标,每个需求点的位置及其物资需求量由表1中给出,这里的航空器材备件需求量是经过规范化处理后的数值,并不代表实际值。从中选择6个作为维修器材保障点。

根据维修保障点选址模型,按照免疫算法步骤对算例进行求解,算法的参数设置为:种群规模为50,记忆库容量为10,迭代次数为100,交叉概率为0.7,变异概率为0.4,多样性评价参数设为0.95。

求得配送中心的选址方案为[29 9 2 24 22 5],具体保障方案为:保障点29对需求点3,4,27,28,29,30,31进行保障;保障点9对需求点9,10,11,12,13,14,15进行保障;保障点2对需求点1,2进行保障;保障点24对需求点23,24,25进行保障;保障点22对需求点7,18,19,20,21,22进行保障;保障点5对需求点5,6,8,16,17,26进行保障;

此方案下以各需求点需求量为权重的距离和为2358.6。

表1 用户的坐标及需求量
Tab. 1 The coordinates and requirements of users

序号	坐标	需求量
1	(114.16, 22.30)	20
2	(113.54, 22.20)	90
3	(121.51, 25.04)	90
4	(120.27, 22.62)	60
5	(115.89, 28.67)	70
6	(116.36, 27.99)	70
7	(114.37, 27.29)	40
8	(117.20, 29.29)	90
9	(113.65, 34.76)	90
10	(114.33, 34.79)	70
11	(114.32, 36.10)	60
12	(112.44, 34.68)	40
13	(113.85, 35.31)	40
14	(115.63, 34.44)	40
15	(111.18, 34.78)	20
16	(114.28, 30.57)	80
17	(115.08, 30.20)	90
18	(112.97, 28.20)	70
19	(112.61, 26.89)	100
20	(113.09, 29.38)	50
21	(113.15, 27.84)	50
22	(113.15, 27.84)	50
23	(117.27, 31.86)	80
24	(117.02, 32.66)	70
25	(117.36, 32.95)	80
26	(117.03, 30.50)	40
27	(120.16, 30.25)	40
28	(121.53, 29.87)	60
29	(120.64, 28.00)	70
30	(118.86, 28.97)	50
31	(120.09, 30.87)	30

得到的物流配送中心选址最优方案如图2所示。

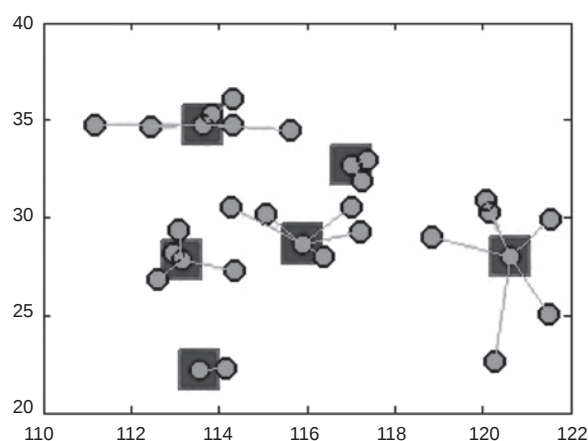


图2 最优保障点选址方案

Fig.2 The best position location of maintenance point

AI算法求解该选址问题的适应度收敛曲线如图3所示。

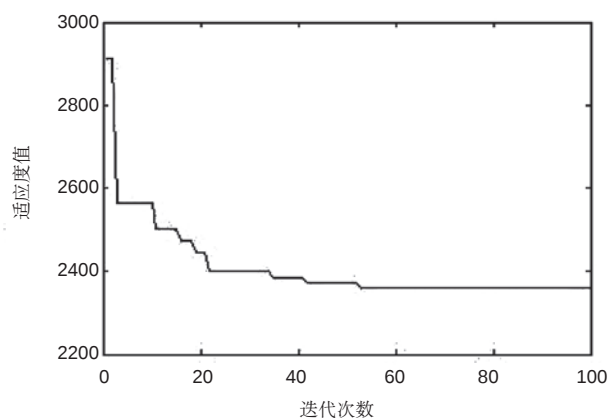


图3 AI求解选址问题适应度变化曲线

Fig.3 Fitness values of solving location problem by AI

5 结论

本文将人工免疫算法应用于航空维修器材保障点选址问题的优化求解中,通过仿真试验对该算法求解选址问题进行了验证,仿真结果证明了算法的有效性和可用性。本文算法具有收敛速度快,可避免陷入局部最优解,计算精度高等特点,为解决较复杂的或规模较大的选址问题提供了一条新的思路。

AST

参考文献

- [1] 董鹏,罗朝晖,伍洁,等. BP神经网络的遗传模拟退火算法动态选址仿真[J]. 火力与指挥控制. 2012, 37(12): 27–30.
DONG Peng , LUO Zhaohui , WU Jie , et al. Study on Dynamic Locating Simulation of Algorithm Based on BP Neural Network

in Genetic and Simulated Annealing[J]. Fire Control & Command Control. 2012, 37(12): 27–30.(in Chinese)

- [2] 秦固. 基于蚁群优化的多物流配送中心选址算法[J]. 系统工程理论与实践. 2006, 26(4): 120–124.

QIN Gu. Logistics Distribution Center Allocation Based on Ant Colony Optimization[J]. System Engineering Theory and Practice. 2006, 26(4): 120–124.(in Chinese)

- [3] 高军,刘晓蕾,冀松娅. 军事物流系统中定位–运输路线安排模型及算法[J]. 数学的实践与认识. 2012, 42(19): 152–159.

GAO Jun , LIU Xiaolei , JI Songya. Model and Algorithm for Location–Routing Problem of Military Logistics System[J]. Mathematics in Practice and Theory. 2012, 42(19): 152–159.(in Chinese)

- [4] 王成山,刘涛,谢莹华. 基于混合遗传算法的变电站选址定容[J]. 电力系统自动化. 2006, 30(6): 30–47.

WANG Chengshan , LIU Tao , XIE Yinghua. Substation Locating and Sizing Based on Hybrid Genetic Algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems. 2006, 30(6): 30–47.(in Chinese)

- [5] 马懿,卢昱,陈立云,等. 信息化作战装备保障力量配置问题研究[J]. 运筹与管理. 2012, 21(5): 182–186.

MA Yi , LU Yu , CHEN Liyun , et al. Research on Equipment Support Force Configuration Problem Under the Conditions of Informationization War[J]. Operations Research and Management Science. 2012, 21(5): 182–186.(in Chinese)

- [6] 董鹏,杨超,刘刚. 战区装备保障点动态选址仿真问题研究[J]. 计算机仿真. 2012, 29(9): 32–36.

DONG Peng , YANG Chao , LIU Gang. Research on Dynamic Locating Decision–making Model and Arithmetic of War Zone Equipments Support System[J]. Computer Simulation. 2012, 29(9): 32–36.(in Chinese)

- [7] 曾志芳,杜国明. 应用微粒群优化算法进行公共图书馆选址[J]. 图书情报工作. 2010, 54(5): 119–121.

ZENG Zhifang , DU Guoming. Location of Public Library Based on Particle Swarm Optimization[J]. Library and Information Service. 2010, 54(5): 119–121.(in Chinese)

- [8] 郭晓鹏,刘硕,卢海. 基于ANP方法的电力企业储配煤中心选址研究[J]. 华东电力. 2012, 40(07): 1120–1125.

GUO Xiaopeng , LIU Shuo , LU Hai. ANP based Location Evaluation of Coal Storage and Distribution Center for Electric Power Enterprises[J]. East China Electric Power. 2012, 40(07): 1120–1125.(in Chinese)

- [9] 戚玉涛, 焦李成, 刘芳. 基于并行人工免疫算法的大规模TSP问题求解[J]. 电子学报. 2008, 36(8): 1552–1558.
QI Yutao, JIAO Licheng, LIU Fang. Parallel Artificial Immune Algorithm for Large-Scale TSP[J]. Acta Electronica Sinica. 2008, 36(8): 1552–1558.(in Chinese)
- [10] 谢景新, 程春田, 仝磊光. 改进的免疫算法在函数优化中的应用[J]. 哈尔滨工业大学学报. 2009, 41(7): 135–139.
XIE Jingxin, CHENG Chuntian, TONG Leiguang. An improved artificial immune algorithm for multinodal optimization[J]. Journal of Harbin Institute of Technology. 2009, 41(7): 135–139.(in Chinese)
- [11] 胡选子, 谢存禧. 基于人工免疫网络的机器人局部路径规划[J]. 山东大学学报(理学版). 2010, 45(7): 122–126.
HU Xuanzi, XIE Cunxi. A robot local path plan based on an artificial immune network[J]. Journal of Shandong University (Natural Science). 2010, 45(7): 122–126.(in Chinese)

作者简介

马国岗(1971—) 男, 学士, 工程师。研究方向: 航空领域飞机的机务维修与保障体系。

Tel: 13613832935

E-mail: 1253650732@qq.com

Research on Support Position Location of Aviation Maintenance Equipment Based on Artificial Immune Algorithm

MA Guogang^{1,*}, WANG Ruicheng²

1. Engineering and Maintenance Department, Henan Province Airport Group Co. Ltd., Zhengzhou 541161, China

2. Naval Petty Officer Academy, Bengbu 233012, China

Abstract: In order to improve the efficiency, reduce the cost of aeronautical maintenance and ensure aeronautical maintenance tasks more scientific, reasonable and efficiently, it's necessary to study the problem of location optimization for supporting position. Through confirming the constraint conditions, the nonlinear programming mathematical model with complex constraints of position location optimization was established, and the population individual encoding was satisfied with the constraints by using appropriate coding scheme and penalty function, the model was optimized and solved by using immune operation. An optimization algorithm based on artificial immune algorithm for support position location of aviation maintenance equipment was put forward and simulated. It can achieve good effects in aeronautical maintenance position location decision-making.

Key Words: aeronautical maintenance; location; artificial immune algorithm

Received: 2014-01-09; Accepted: 2014-01-25

* Corresponding author. Tel.: 13613832935 E-mail: 1253650732@qq.com