

文章编号:1674-8190(2019)05-619-09

基于二进制粒子群算法的战时航空网络规划研究

叶泽龙^{1,2}, 吴明功^{1,2}, 朱德山³, 温祥西^{1,2}

(1. 空军工程大学 空管领航学院, 西安 710051)

(2. 空军工程大学 国家空管防相撞技术重点实验室, 西安 710051)

(3. 中国人民解放军 93220 部队, 哈尔滨 150046)

摘要: 领空作为国家资源的一部分, 其使用、调配关系到国家的安全与发展, 在战时, 将更多的空中资源调配给军航使用, 有利于保障军事行动的顺利进行。基于此, 提出一种基于二进制粒子群算法(BPSO)的战时航空网络规划方法。首先, 对航空网络建模, 收集航班数据; 其次, 建立航空网络性能评价体系; 然后, 以使用尽可能少的民航机场维持预期网络性能为目标, 以作战意图和战场环境为约束条件, 通过 BPSO 算法进行求解; 最后, 进行仿真分析。结果表明: 该方法能够结合作战意图、反映战场环境、合理调配航空资源, 为战时航空管制工作提供决策依据。

关键词: 战时航空管制; 二进制粒子群算法; 航空网络; 网络性能评估; 网络规划

中图分类号: V355.1

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2019.05.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Study on Wartime Aviation Network Planning Based on Binary Particle Swarm Optimization(BPSO) Algorithm

Ye Zelong^{1,2}, Wu Mingong^{1,2}, Zhu Deshan³, Wen Xiangxi^{1,2}

(1. College of Air Traffic Control and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

(2. National Key Laboratory of Air Traffic Collision Prevention, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

(3. The Chinese People's Liberation Army 93220 Troops, Harbin 150046, China)

Abstract: Air space is an important national resource. Its use and deployment affect the security and development of the country. In wartime, more air resources will be allocated to military flights, which will help guarantee military operations. Therefore, a wartime aviation network planning method based on binary particle swarm optimization algorithm is proposed. Firstly, the aviation network is modeled and the flight data are collected. Secondly, an evaluation system of aviation network performance is established. Then, BPSO algorithm is used to solve the problem. The goal of the solution is to maintain the expected network performance with as few civil airports as possible. The constraint conditions for the solution are operational intent and battlefield environment. Finally, the simulation analysis is carried out. The results show that the method can combine the combat intention, reflect the battlefield environment and reasonably allocate the aviation resources, and provide decision-making basis for the wartime aviation control work.

Key words: wartime air traffic control; binary particle swarm optimization; aviation network; network performance evaluation; network planning

收稿日期:2018-11-15; 修回日期:2019-01-07

基金项目:国家自然科学基金(71801221)

通信作者:温祥西, wxxajy@163.com

引用格式:叶泽龙, 吴明功, 朱德山, 等. 基于二进制粒子群算法的战时航空网络规划研究[J]. 航空工程进展, 2019, 10(5): 619-627.

Ye Zelong, Wu Mingong, Zhu Deshan, et al. Study on wartime aviation network planning based on binary particle swarm optimization(BPSO) algorithm[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(5): 619-627. (in Chinese)

0 引言

在战时,空域用户多,各类航空器活动频率高,空域环境复杂多变,为军航活动提供更为有利的保障,关乎战事走向和国家安全;同时,经济因素也是影响战争潜力的重要因素,战时民航运输关系到国计民生。在优先保障军航的前提下,兼顾民航效益,尽可能避免航空资源的浪费,做好战时航空管制工作,很有必要。战时航空管制,是指在战争期间,航空管制机构通过组织和协调我方航空器的飞行活动,以及对作战空域连续监视和控制,从而保障我方对空域使用的安全性、有序性和灵活性,提高作战效能的一种战场调控活动^[1]。

国内外已围绕战时航空管制问题展开了大量研究。1973年,美国建立了全国空军战区空域管制条令,是世界上第一个发布战时航空管制条令的国家^[2];1995年,美军参谋长联席会议颁发了第JP 3-56号联合出版物《联合空中作战指挥与控制》^[3];2000年和2003年相继发布了《一体化空战场管制程序》和《联合空中交通管制程序》,标志着战时航空管制理论成体系化发展,渐趋成熟。2014年,美军颁布了JP 3-52号联合出版物《联合空域管制》,使其战时航空管制发展更加趋于完善。在系统建设上,研发了JASMAD等系统,用于排解战斗空间内的飞行冲突,提供动态管理能力^[4-5]。在军事实践方面,在伊拉克战争、“奥赛德黎明”等军事行动中,美军的战时航空管制理论、法规条令、系统,经受住了战争检验,帮助美军牢牢掌握了战区内的空域管制权,使得指挥控制顺畅自如^[6]。国内关于战时航空管制问题的研究,主要是从法理角度进行探索,例如,刘宝新等^[7]分析了民航租赁飞机战时国防动员的法理依据并提出了动员风险规避对策。也有相关文献应用航空网络对中国民航网络进行定量分析^[8-9],例如闫玲玲等^[10]、隋东等^[11]分析了航空网络抗毁性在不同攻击策略下的变化情况;张豫翔等^[12]分析了一定修复成本约束下的航空网络的修复问题。但这些研究主要是针对民航网络损伤后的修复问题,没有从服务作战的角度对战时航空网络进行宏观规划。

上述研究主要是从法理角度,规范战时空中秩序,以定性分析为主,主要成果也都是相关法令法规,定量分析还比较少。本文借鉴航空网络理论,

提出一种基于二进制粒子群算法(BPSO)的战时航空网络规划策略,从宏观上对战时航空活动进行规划,在保障军事行动的同时,兼顾民航效益。

1 航空网络规划问题描述

机场是一种重要的航空资源,在经济上可以带动区域经济,吸纳和集聚生产力的各种能量和要素,在战时也有重要的军事作用,例如可以用于保障军航飞机起降,缓解作战飞机的保障压力。在战时,临时征用部分民航机场必将导致民航网络整体性能的下降。民航网络性能下降的幅度取决于战争的规模。在局部作战中,军航活动需要使用的航空资源较少,民航网络性能需要下降的幅度较小;若进入全面战争状态,民航资源可能会被大量征用,民航网络性能则会大幅下降。据此,本文用民航网络性能维持在怎样的程度 PE (百分比)作为征用民航机场的一个限制条件, PE 大小与战争规模成反比。战时航空网络规划还要考虑战场环境和作战意图,例如战争爆发在哪一区域、战争要达到怎样的目的等。基于此,可以生成禁止征用/必须征用的机场清单,禁止征用清单内的机场,通常承担交通枢纽等作用,在战时不可征用;必须征用清单内的机场,通常在战事中起到重要的军事意义。综上,其规划流程如图1所示。

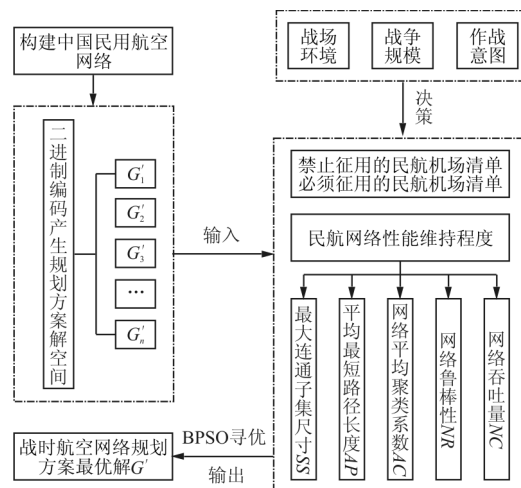


图 1 战时航空网络规划流程

Fig. 1 Air network planning process in wartime

第一步,依据实际数据构建中国民航航空网络 G ;第二步,分析战场环境、战争规模、作战意图,决定民航网络维持程度 PE ,并产生禁止征用/必须

征用的机场清单;第三步,对机场序列进行编码,随机产生大量粒子,对应全部战时航空网络规划方案的解空间 $\{G'_1, G'_2, \dots, G'_n\}$;第四步,运用 BPSO 寻优,得到最优策略。

1.1 航空网络模型建立

航空网络是以民航机场为节点,以机场之间的航班为连边构成的网络,是一种典型的复杂网络,其结构可表示为 $G = \{V, E, W\}$ 。其中, $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, 代表航空网络中节点的集合,本文选取民航机场作为节点; $E = \{e_1, e_2, \dots, e_l\}$, 是网络中连边的集合,若机场之间有固定航班,则认为两点之间有连边; $W = \{w_1, w_2, \dots, w_m\}$, 代表航空网络中的边权,本文选取各航线上一定周期内的航班数量为航空网络赋权^[13]。

为了简化模型,做出如下假设:

①航空网络中,两个节点间采取双向航空运输,不同方向的运输除了存在飞行高度层等差异,其路径基本一致、往来流量接近对等,因此将其视为无向网络;

②同一城市若存在多个民航机场,予以合并,以城市名称命名(例如上海虹桥机场与浦东机场合并为上海机场);

③经停航线拆分为多段直飞航线,例如长春—太原—西安航线,拆分为长春—太原、太原—西安两段航线;

④战时不开辟新的航线,也不增加新的机场。

本文选取国内 199 个民航机场及其航班数据构建中国航空网络模型,数据来源于 <http://www.qunar.com>。对 199 个机场之间一月内航班数进行统计,部分数据如下:

$$\begin{bmatrix} 0 & 639 & 461 & 258 & 0 & 470 \\ 639 & 0 & 397 & 508 & 716 & 541 \\ 461 & 397 & 0 & 413 & 549 & 400 \\ 258 & 508 & 413 & 0 & 252 & 316 \\ 0 & 716 & 549 & 252 & 0 & 610 \\ 470 & 541 & 400 & 316 & 610 & 0 \end{bmatrix}$$

此邻接矩阵反映了成都、深圳、昆明、西安、重庆、杭州等六个城市之间的航行情况。

1.2 航空网络性能测度指标

航空网络性能的评估是战时航空网络规划的

重要工作,准确评估网络性能是合理规划战时航空网络的关键。网络性能一般可以从网络总体运输能力、连通性能、抗毁性、运行效率以及网络结构是否健康等五个方面进行评估。据此提出以下五个测度指标。

(1) 最大连通子图尺寸 SS 。在网络中,连通性的判据一般为任意两点之间是否存在通路。若网络中所有节点之间都是连通的,则称该网络为完全连通;当网络为不完全连通时,该网络便可划分成若干个连通的子图,称其为连通子图^[14]。连通子图中节点的个数称为规模,规模最大的连通子图即为最大连通子图。 SS 越大,网络连通性越好^[15]。

(2) 网络平均最短路径 AP 。其定义为网络中任意两点之间最短路径之和占网络中可能存在的最多边数的比重:

$$AP = \frac{\sum_{i \neq j} (d_{ij})}{n \times (n - 1)} \quad (1)$$

AP 可以描述网络的脆弱性和抗毁能力。在复杂网络中, AP 越小,说明任意两个节点之间的传输越快,连通性越好,风险值也越小^[16]。在航线网络中, AP 越小,意味着航空器在机场节点之间运输所需的中转次数越少,中转成本越低,业务往来更加迅捷。例如,一个航线网络的 $AP = 2.4531$,表示从该网络中任意一个机场出发,到达另一个机场,平均需要中转 1.4531 次。

(3) 网络平均聚类系数 AC 。点的集群系数是用来描述节点之间聚集成团程度的系数。加权集群系数^[17]的计算公式为

$$c(i) = \frac{1}{s_i(k_i - 1)} \sum_{j,k} \frac{(w_{ij} + w_{ik})}{2} a_{ij} a_{jk} a_{ki} \quad (2)$$

式中: s_i 为节点权; k_i 为度值; 节点 j, k 为节点 i 的两个相邻节点; a_{ij} 为节点的连接状态,当节点 i, j 互连, $a_{ij} = 1$, 否则 $a_{ij} = 0$ 。

$$AC = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c(i) \quad (3)$$

AC 表示整个网络的聚集程度。

(4) 网络鲁棒性 NR 。网络鲁棒性反映了网络点权分布的均匀程度。

$$NR = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^n [(s_i - \bar{s})^2 / K]} \quad (4)$$

式中: \bar{s} 为网络平均点权; K 为节点邻边数。

网络的 NR 越大, 流量分布越均匀, 其鲁棒性能也就越好, 可作为航空网络运输能力的度量。

(5) 网络吞吐量 NC 。 NC 表示所有航线上一段时间内的航班量总数, 可作为网络运输能力的一个度量。

$$NC = \sum_{j,k \in G} \tau \omega_{jk} \quad (5)$$

2 基于 AHP 的航空网络性能评估

为了评估民航网络的整体性能, 需要综合各个指标进行评判。本文选择层次分析法(AHP)对各指标的权重进行计算。AHP 是一种将与决策相关元素分解成多个层次, 以此为基础进行定性和定量分析的决策方法^[18]。应用 1-9 标度表对五个指标的重要程度进行排序。 a_{ij} 为因素 i 与因素 j 比较后产生的结果, 用 1-9 标度法可以反映因素 i 与因素 j 相比的重要程度。标度及说明如表 1 所示。

表 1 标度及说明

Table 1 Scale and explanation

因素 i 与因素 j 相比	标度 a_{ij}
同等重要	1
略为重要	3
较为重要	5
非常重要	7
极为重要	9

应用 AHP 方法处理前, 应对各指标进行归一化处理, 计算 $\{G'\}$ 中各指标的最值, 如表 2 所示。

表 2 各指标最值

Table 2 The maximum value of each index

指标	max	min
NC	269 496	0
SS	199	0
AP	8.576 3	1
AC	1	0
NR	1	0

比较本文选取的航空网络的五项指标。 NC 反映民航的航班规模, 最为直接地反映经济效益, 在五个指标中最为重要; SS 描述网络中相互可达机场的规模, 既可反映网络的连通性, 也可反映网络的稳健性^[19], 认为其重要性仅次于 NC ; AP 可

以反映网络损坏后, 选取备份航线的成本高低, AP 越短的航空网络在部分航线损坏后通过其他机场中转带来的成本相对较小, 认为 AP 是第三重要的; AC 通常用于判断集团化水平, 认为其重要度与 AP 大致相当; NR 反映网络中流量分布的均匀程度和网络的鲁棒性, 被认为是最次要的指标。综上, 五个指标的重要度排序为 $NC > SS > AP = AC > NR$ 。前两个指标分别反映网络的运输能力和互通机场规模, 后三个指标则衡量网络的抗毁性和健康程度。矩阵 A 描述了 NC 、 SS 、 AP 、 AC 、 NR 五个指标之间的比较结果。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 & 5 & 7 \\ 1/3 & 1 & 3 & 3 & 5 \\ 1/5 & 1/3 & 1 & 1 & 3 \\ 1/5 & 1/3 & 1 & 1 & 3 \\ 1/7 & 1/5 & 1/3 & 1/3 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

计算矩阵 A 的最大特征根, 及其相应的特征向量, 并进行归一化处理, 得到权重向量 W :

$$W_i = \frac{\sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}}{\sum_{i=1}^n \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}} \quad (7)$$

$$W = [W_1 \ W_2 \ W_3 \ W_4 \ W_5] \\ = [0.501 \ 0 \ 0.246 \ 1 \ 0.103 \ 8 \ 0.103 \ 8 \ 0.045 \ 3]$$

而后进行一致性检验, 计算最大特征值 λ_{\max} :

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} W_j}{W_i} = 5.126 \ 24$$

一致性指标 CI 为

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = 0.031 \ 56$$

一致性比重 CR 为

$$CR = \frac{(\lambda_{\max} - n)/(n - 1)}{RI} = 0.028 \ 18$$

其中, RI 为随机一致性指标, 当 $n=5$ 时, RI 取 1.12。 $CR < 1$, 因此判断矩阵满足一致性检验, 各指标权重为: $W_{NC} = 0.501 \ 0$, $W_{SS} = 0.264 \ 1$, $W_{AP} = 0.103 \ 8$, $W_{AC} = 0.103 \ 8$, $W_{NR} = 0.045 \ 3$ 。

由于各数据数量级的差异, 对指标进行归一化处理, 得到归一化处理后的指标 NC_i , SS_i , AP_i , AC_i , NR_i 。

综上所述, 5 个复杂指标的加权和, 即综合重要度值 W_i :

$$W_i = 0.5010 \times NC_i + 0.2461 \times SS_i + 0.1038 \times AP_i + 0.1038 \times AC_i + 0.0453 \times NR_i \quad (8)$$

根据式(8)及指标归一化后的结果,计算原网络 G (含 199 个机场) 的初始网络性能 $W_G = 0.8335$ 。

在此基础上,进行战时航空网络规划:首先结合战争规模,判断民航网络应当维持在某种程度(PE),而后结合作战意图、战场环境等因素生成禁止征用/必须征用机场清单,以使用尽可能少的民航机场维持预期网络性能为优化目标,最终通过 BPSO 算法求解。具体为

$$\min n' \quad (9)$$

$$\text{s. t. } [0.5010 \times NC_G + 0.2461 \times SS_G + 0.1038 \times AP_G + 0.1038 \times AC_G + 0.0453 \times NR_G] \geq W_G \times PE \quad (10)$$

$$\text{s. t. } i, j, \dots, k \in N' \quad (11)$$

$$\text{s. t. } p, q, \dots, l \notin N' \quad (12)$$

$$N' \in N \quad (13)$$

式中: $N = \{1, 2, \dots, n\}$, 为原网络 G 中民航机场的编号; N' 为规划后网络 G' 中机场的编号; n' 为机场数目。

式(9)为优化目标,即民航机场数目;式(10)为约束条件,即 G' 的网络性能必须维持在期望程度上, $NC_{N'}$, $SS_{N'}$, $AP_{N'}$, $AC_{N'}$ 以及 $NR_{N'}$ 分别为 G' 的测度指标,PE 为百分比;式(11)为必须征用的机场清单;式(12)为禁止征用的机场清单。

3 基于 BPSO 的战时航空网络规划

采用若干 199 维的 0、1 值构成的二进制串描述随机组合的战时航空网络规划方案。为“0”的位置表示机场不在方案内;为“1”的位置对应此机场在规划方案中,其编码方式如图 2 所示。

1	2	3			197	198	199
1	0	1	0	1	1	

图 2 编码示意图

Fig. 2 Schematic diagram of coding

本文是一个典型的 0-1 规划问题,使用 BPSO 算法可以准确快速地对问题进行求解。

3.1 BPSO 基本原理

BPSO 算法是一种由 PSO 算法发展而来的可

以快速寻优的算法,且位置和速度更新均为离散值^[20]。本文提出的战时航空网络规划方案在描述上是离散形式的,使用 BPSO 算法可以在随机产生的大量规划方案集合中快速寻出符合条件的规划方案。

PSO 算法的粒子初始位置、更新速度都是连续函数^[21-22],与之相对应,BPSO 均为离散形式,其速度更新公式为

$$V_{id} = \omega \cdot v_{id} + c_1 \cdot \text{rand}() \cdot (p_{id} - x_{id}) + c_2 \cdot \text{rand}() \cdot (p_{id} - x_{id}) \quad (14)$$

式中: ω 为权重,通过改变 ω 可以调整粒子的搜索速度; c_1 、 c_2 为学习因子,分别调节局部最好粒子和全局最好粒子的更新。

式(13)产生速度,速度的值是为了描述二进制串的位置 x_{id} 变为“1”值的概率, $V_{id} \in [V_{\min}, V_{\max}]$ 。为了将速度映射到 $[0, 1]$ 之内,还须采用 sigmoid 函数:

$$s(v_{id}) = \frac{1}{1 + \exp(-v_{id})} \quad (15)$$

式中: $s(v_{id})$ 为粒子中某位 x_{id} 取“1”的概率。

$$x_{id} = \begin{cases} 1 & \text{if } \text{rand}() \leq s(v_{id}) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

粒子通过公式(15)改变 x_{id} 位置上的“0”、“1”位值。 V_{\max} 用于限制 V_{id} 的范围,防止 $s(v_{id})$ 过于接近“0”或“1”。通过 sigmoid 函数,保证粒子的位置不是“0”即为“1”。

3.2 算法步骤

算法的步骤如图 3 所示,具体如下:

Step 1: 初始化。随机产生一组粒子,维度为 199,用其“0”、“1”编码情况描述战时航空网络规划方案,根据禁止征用清单/必须征用清单对粒子的特殊位置置“0”或“1”。

Step 2: 计算每个粒子的适应度(方案 G' 中机场数目),根据编码信息计算 G' 的网络性能 $W_{G'}$,并判断其是否符合约束条件。

Step 3: 更新粒子的位置速度。

Step 4: 将各方案的机场数目与当前符合约束条件的最小机场数目进行比较,更新群的最优方案。

Step 5: 判断迭代次数是否满足条件。若不满足返回 **Step 2**。若满足,输出最优方案及对应网络

性能的值。

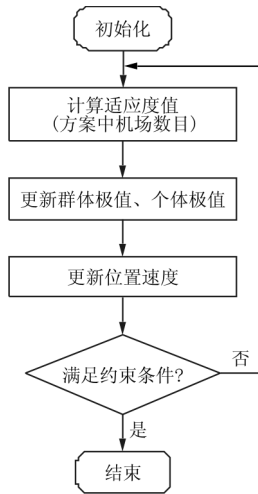


图 3 算法步骤

Fig. 3 Algorithm steps

4 仿真分析

以 $PE=50\%$, $PE=70\%$, $PE=80\%$ 为约束条件进行仿真, 模拟大、中、小规模战争下的战时航空网络规划。大规模战争中, 大量民航资源被征用, 民航网络性能只能维持在较低水平, PE 取 50% ; 中等规模战争下, PE 取 70% ; 小规模战争中 PE

取 80% 。设置 BPSO 的参数: $\omega=0.5$, $c_1=0.5$, $c_2=4$, 分别得到最优解 G'_1 、 G'_2 、 G'_3 , 如图 4 所示, 图中三条曲线由上至下依次为 $PE=80\%$, $PE=70\%$, $PE=50\%$ 的收敛情况, 曲线分别收敛于 46、37 和 23, PE 越小时最优方案的民航机场数目越小, 与实际相符。相应规划方案如表 3 所示。

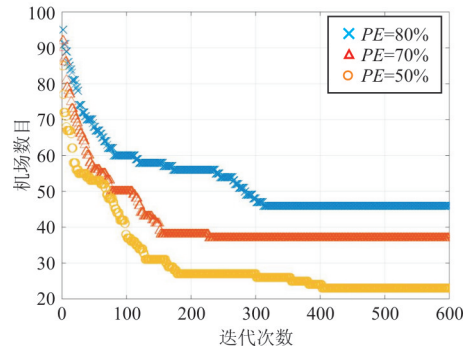


图 4 不同 PE 下收敛曲线图

Fig. 4 Convergence curves under different PE

一份中国民航机场的重要度排名如表 4 所示, 该排名与机场总容量排名并不完全一致, 但该排名前五十的机场其月航班数基本在 1 000 次以上, 排名前十的月航班数更是基本超过 10 000 次, 据此定义该排名中重要度前五位的为较重要机场、前十位的为重要机场。

表 3 不同 PE 下的战时航空网络规划方案

Table 3 Wartime aviation network planning under different PE

PE 取值	战时航空网络规划方案内的民航机场
50%	北京 上海 成都 深圳 昆明 西安 重庆 杭州 厦门 乌鲁木齐 郑州 大连 沈阳 长春 兰州 合肥 北海 库车 唐山 秦皇岛 黎平 梧州
70%	北京 上海 广州 成都 深圳 昆明 西安 重庆 杭州 厦门 南京 武汉 长沙 乌鲁木齐 青岛 郑州 三亚 天津 大连 哈尔滨 沈阳 南宁 济南 太原 长春 兰州 呼和浩特 丽江 银川 烟台 库尔勒 通辽 大同 齐齐哈尔 库车 吕梁 文山
80%	北京 上海 广州 成都 深圳 昆明 西安 重庆 杭州 厦门 南京 武汉 长沙 乌鲁木齐 青岛 郑州 三亚 海口 天津 大连 哈尔滨 贵阳 沈阳 福州 南宁 济南 太原 兰州 南昌 呼和浩特 温州 合肥 银川 无锡 泉州 拉萨 宜昌 阿克苏 柳州 库车 克拉玛依 博乐 二连浩特 朝阳

表 4 民航机场重要度排名

Table 4 Civil aviation airport importance ranking

排名	节点	排名	节点	排名	节点	排名	节点	排名	节点	排名	节点
1	北京	10	厦门	19	贵阳	28	济南	37	温州	46	海拉尔
2	上海	11	哈尔滨	20	郑州	29	西宁	38	南昌	47	西双版纳
3	广州	12	天津	21	南京	30	长春	39	丽江	48	绵阳
4	西安	13	大连	22	武汉	31	太原	40	合肥	49	包头
5	成都	14	乌鲁木齐	23	兰州	32	银川	41	烟台	50	南通
6	重庆	15	沈阳	24	南宁	33	石家庄	42	拉萨	51	鄂尔多斯
7	昆明	16	青岛	25	呼和浩特	34	桂林	43	泉州	52	北海
8	深圳	17	长沙	26	福州	35	宁波	44	揭阳	53	榆林
9	杭州	18	海口	27	三亚	36	珠海	45	无锡	54	常州

通过与表 4 进行对比分析,发现 G'_3 的 46 个机场中有 36 个较重要机场,10 个重要机场; G'_2 的 37 个机场中有 27 个较重要机场,10 个重要机场; G'_1 的 23 个机场中有 14 个较重要机场,9 个重要机场。仿真结果与表 4 中的重要度排名比较,可以发现战时航空网络规划策略产生的方案基本上以重要度较高的机场为主体,这一结果与中国航空网络实际相契合。另一方面,也反映一旦这些高重要度机场被摧毁后,中国民航网络在战时将难以维持较高的网络性能和效益。在战时,重点防护这些高重要度民航机场,有利于维持战时航空网络的总体性能。

实际的战时航空网络规划还必须考虑战场环境和作战意图。假定在渤海方向爆发小规模战争,根据战争规模判断,本次作战对民用航空影响较小,战时航空管制部门做出决策,全国战时航空网络性能至少维持在原网络性能的百分之八十以上

($PE \geq 80\%$),避免航空资源浪费。同时,考虑北京距离前线较近,处在敌机作战半径之内,亟需加大防空力量保卫首都防空。为了临时增大北京地区的军航航空器起降容量、布置地面防空设施及其他军事用途,临时征用北京机场;为了形成防线、巩固首都防空体系,征用编号为 37、131、144 的石家庄、唐山、张家口机场;为了保障全国交通运输、防止出现区域性交通瘫痪,禁止征用编号为 7、8、9、13、15、17、24 的昆明、西安、沈阳、武汉、乌鲁木齐、郑州、沈阳等地区性枢纽机场;为了适应上述战场环境、贯彻作战意图,可对粒子群进行处理,将所有粒子编号为 1、37、131、144 的位置“置 0”;将编号为 7、8、9、13、15、17、24 的机场对应的粒子位置“置 1”,以 $PE=80\%$ 为约束条件,运用 BPSO 寻优,得到最优解 G'_4 ,包含 57 个民航机场,具体如表 5 所示,其迭代收敛曲线如图 5 所示。

表 5 指定作战条件下 $PE=80\%$ 的规划方案

Table 5 Planning scheme of $PE=80\%$ under given operational conditions

PE 取值	战时航空网络规划方案内的民航机场
80%	上海 广州 成都 深圳 昆明 西安 重庆 杭州 厦门 南京 武汉 长沙 乌鲁木齐 青岛 郑州 三亚 海口 天津 大连 哈尔滨 贵阳 沈阳 福州 南宁 济南 太原 长春 兰州 南昌 呼和浩特 温州 宁波 合肥 桂林 银川 无锡 烟台 西双版纳 西宁 泉州 拉萨 海拉尔 常州 喀什 芒市 泸州 舟山 台州 毕节 井冈山 乌海 安庆 金昌 张掖 九江 沂州

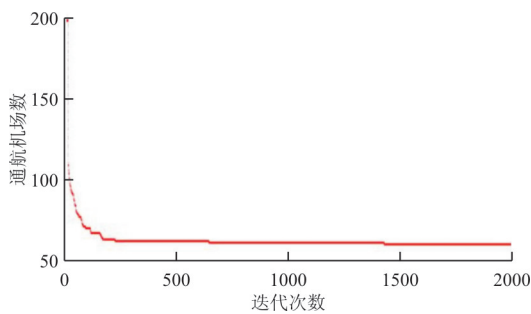


图 5 给定作战条件下 $PE=80\%$ 收敛曲线图

Fig. 5 The convergent curve of $PE=80\%$ under given operational conditions

对比考虑作战条件和不考虑作战条件时 $PE=80\%$ 的规划方案,二者在不同约束条件下,规划出了两种战时航空网络。对比两种战时航空网络,可以发现重要度高的机场,除去被强制征用的,其余均仍为战时航空网络的主干,而在对重要度降低的机场的选择上,差异较大,这与航空网络性能评价指标体系以及航空网络的拓扑结构有关。这表

明,在本方法中,对高重要度的机场征用应当较为慎重,这些起到骨干作用的机场的变化,将对其他机场的选取和战时航空网络结构产生重要影响。

从防御角度上,可以得到一点启示:战时,高重要度机场在大多数情况下,都应当做重点防御;而对其他机场的防御,不是一成不变的,应当结合实际,因时制宜。考虑作战条件后,最少机场个数增加了 11 个,表明规划结果受作战意图及战场环境的影响较大;另一方面,也反映出战时航空网络规划问题具有较强的主观能动性,更好的掌握战场环境、掌握上级意图,可以提高规划的科学性,降低对航空资源的浪费。

5 结 论

(1) 本文所提战时航空网络规划方法,能够结合作战意图、战场环境,应用航空网络思维调配战时航空资源,该方法可以为战时航空管制工作提供理论参考。

(2) 二进制粒子群算法适用于战时对机场这一航空资源的分配。

今后将在此研究的基础上,探索更精确的战时航空网络规划方法以及更高效的求解算法,进一步探索航路等航空资源的分配问题。

参考文献

- [1] 徐维如, 黄志平, 崔浩林. 我国航空管制法规体系建设和发展初探[J]. 西安政治学院学报, 2008(2): 61-66.
Xu Weiru, Huang Zhiping, Cui Haolin. Preliminary study on the construction and development of China's aviation control law system[J]. Journal of Xi'an University of Political Science, 2008(2): 61-66. (in Chinese)
- [2] 罗竹. 我国航空仲裁制度的发展研究[J]. 法制与社会, 2017(2): 40-41.
Luo Zhu. Research on the development of China's aviation arbitration system[J]. Legal System and Society, 2017(2): 40-41. (in Chinese)
- [3] 程季程, 程健. 国外空战场管制理论与实践[J]. 中国民航飞行学院学报, 2013, 24(3): 5-7, 12.
Cheng Jizeng, Cheng Jian. Theory and practice of air combat field control in foreign countries[J]. Journal of Civil Aviation Flight University of China, 2013, 24(3): 5-7, 12. (in Chinese)
- [4] Low-cost, ultra high temperature zero-erosion ceramic matrix composite for SM-3 TDACS divert valve pintles, phase II [EB/OL]. (2015-02-26) [2018-11-15]. <http://www.sbir.gov/sbirsearch/detail/341403>, 2015-02-26.
- [5] Donald I W, Mcmillan P W. Ceramic-matrix composites [J]. Journal of Materials Science, 1976, 11(5): 949-972.
- [6] 冯程, 王犇, 满青珊. 美军战区空域管制发展研究[J]. 飞航导弹, 2015(7): 50-54, 70.
Feng Cheng, Wang Ben, Man Qingshan. Research on the development of airspace control in the US military theater [J]. Flying Missile, 2015(7): 50-54, 70. (in Chinese)
- [7] 刘宝新, 孔洪涛, 宋凯, 等. 民航租赁飞机战时国防动员问题研究[J]. 军事交通学院学报, 2011, 13(1): 1-3.
Liu Baoxin, Kong Hongtao, Song Kai, et al. Research on national defense mobilization of civil aviation leasing aircraft in wartime[J]. Journal of Military Transportation College, 2011, 13(1): 1-3. (in Chinese)
- [8] 刘宏鲲, 周涛. 中国城市航空网络的实证研究与分析[J]. 物理学报, 2007(1): 106-112.
Liu Hongkun, Zhou Tao. Empirical research and analysis of urban aviation networks in China[J]. Acta Physica Sinica, 2007(1): 106-112. (in Chinese)
- [9] 曾小舟, 唐笑笑, 江可申. 基于复杂网络理论的中国航空网络结构实证研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2011, 11(6): 175-181.
Zeng Xiaozhou, Tang Xiaoxiao, Jiang Keshen. Empirical study of Chinese airline network structure based on complex network theory[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information, 2011, 11(6): 175-181. (in Chinese)
- [10] 闫玲玲, 陈增强, 张青. 基于度和聚类系数的中国航空网络重要性节点分析[J]. 智能系统学报, 2016, 11(5): 586-593.
Yan Lingling, Chen Zengqiang, Zhang Qing. Analysis of importance nodes of China aviation network based on degree and clustering coefficient[J]. Journal of Intelligent Systems, 2016, 11(5): 586-593. (in Chinese)
- [11] 隋东, 康金霞. 基于复杂网络理论的中国航路网络抗毁性分析[J]. 哈尔滨商业大学学报:自然科学版, 2016, 32(3): 295-302.
Sui Dong, Kang Jinxia. Analysis of the invulnerability of China's air route network based on complex network theory [J]. Journal of Harbin University of Commerce: Natural Science Edition, 2016, 32(3): 295-302. (in Chinese)
- [12] 张豫翔, 吴明功, 王肖戎, 等. 航空运输网络失效修复优化策略研究[J]. 计算机仿真, 2017, 34(9): 88-93.
Zhang Yuxiang, Wu Minggong, Wang Xiaorong, et al. Research on optimization strategy of failure repair of air transportation network[J]. Computer Simulation, 2017, 34(9): 88-93. (in Chinese)
- [13] 姚红光, 朱丽萍. 基于仿真分析的中国航空网络鲁棒性研究[J]. 武汉理工大学学报:交通科学与工程版, 2012, 36(1): 42-46.
Yao Hongguang, Zhu Liping. Research on robustness of China aviation network based on simulation analysis [J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science and Engineering, 2012, 36(1): 42-46. (in Chinese)
- [14] 汪小帆, 李翔, 陈关荣. 复杂网络理论及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
Wang Xiaofan, Li Xiang, Chen Guanrong. Complex network theory and its application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006. (in Chinese)
- [15] Albert R, Jeong H, Barabasi A L. Error and attack tolerance of complex networks [J]. Nature, 2000, 406: 378-381.
- [16] 党亚茹, 李雪娇. 七大空管区域复杂网络特征对比与抗毁性分析[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2015, 12(3): 19-26.
Dang Yaru, Li Xuejiao. Analysis of complex network characteristics and invulnerability analysis in seven air traffic control areas [J]. Journal of Complex Systems and Complexity, 2015, 12(3): 19-26. (in Chinese)
- [17] Zhu C, Wang Z, Gao D. New design goal of a classifier: global and local structural risk minimization [J]. Knowledge-Based Systems, 2016, 100: 25-49.
- [18] 汪应洛. 系统工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
Wang Yingluo. Systems engineering[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2003. (in Chinese)
- [19] Maslov S. Specificity and stability in topology of protein networks [J]. Science, 2002, 296: 910-913.

- [20] 刘建华, 杨荣华, 孙水华. 离散二进制粒子群算法分析[J]. 南京大学学报: 自然科学版, 2011, 47(5): 504-514.
Liu Jianhua, Yang Ronghua, Sun Shuihua. Analysis of discrete binary particle swarm optimization algorithm [J]. Journal of Nanjing University: Natural Science Edition, 2011, 47(5): 504-514. (in Chinese)
- [21] Eberhart R, Kennedy J. A new optimizer using particle swarm theory[C]// Mhs95 Sixth International Symposium on Micro Machine & Human Science, 2002.
- [22] Kennedy J. Particle swarm optimization[C]. IEEE International Conference on Neural Networks, Perth, Australia, 1995.

作者简介:

叶泽龙(1995—),男,硕士研究生。主要研究方向:空域规划与安全管理。

吴明功(1966—),男,硕士,教授。主要研究方向:空域规划与安全管理。

朱德山(1987—),男,学士,专业技术十级。主要研究方向:管制调配与指挥。

温祥西(1984—),男,博士,讲师。主要研究方向:空域规划与安全管理。

(编辑:马文静)

(上接第 592 页)

- [13] Sacks J, Welch W J, Mitchell T J, et al. Design and analysis of computer experiments[J]. Statistical Science, 1989, 4(4): 409-435.
- [14] Søren N Lophaven, Hans Bruun Nielsen, Jacob Søndergaard. DACE-A MATLAB Kriging toolbox (Version 2.0) [R]. Technical Report IMM-TR-2002-12, Copenhagen: Technical University of Denmark, 2002.
- [15] Norazila Othman, Masahiro Kanazaki. Efficient flight simulation using Kriging surrogate model based aerodynamic database[C]. Kissimmee: 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2015.
- [16] James A Tancred, Markus P Rumpfkeil. Aerodynamic response quantification of complex hypersonic configurations using variable-fidelity surrogate modeling[C]. Kissimmee: 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2015.
- [17] Mark Carpenter, Roy Hartfield, John Burkhalter. A comprehensive approach to cataloging missile aerodynamic performance using surrogate modeling techniques and statistical learning[C]. Honolulu: 29th AIAA Applied Aerodynamics Conference, 2011.
- [18] Anthony A Giunta. Overview of modern design of experiments methods for computational simulations[C]. Reno:

41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2003.

- [19] 马洋. 基于代理模型和 MOEA/D 的飞行器气动外形优化设计研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.

Ma Yang. Research on the aerodynamic shape optimization of vehicle based on surrogate model and MOEA/D [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014. (in Chinese)

- [20] Keane A J. Wing optimization using design of experiment, response surface, and data fusion methods[J]. Journal of Aircraft, 2003, 40(4): 741-750.

作者简介:

张碧辉(1986—),男,硕士,工程师。主要研究方向:飞行器优化设计。

岳良明(1982—),男,硕士,工程师。主要研究方向:空气动力学。

王军(1983—),男,博士,高级工程师。主要研究方向:飞行器结构设计。

(编辑:马文静)

(上接第 600 页)

- [20] 赵群. 复合材料翼面结构布局优化设计方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
Zhao Qun. Research on the layout optimization design method of composite wing structures[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2010. (in Chinese)
- [21] 吴莉莉, 姚卫星. 复合材料加筋板结构的二级协同优化设计方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2011, 43(5): 645-649.
Wu Lili, Yao Weixing. Two-level collaborative optimum design method for composite stiffened panel[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2011, 43(5): 645-649. (in Chinese)

作者简介:

王毅(1988—),男,博士研究生。主要研究方向:结构优化设计。

姚卫星(1957—),男,博士,教授。主要研究方向:结构优化设计、结构疲劳。

刘梦(1993—),女,硕士,助理工程师。主要研究方向:结构振动疲劳。

(编辑:丛艳娟)