

航路网络航路点布局的多目标优化设计

严 伟,王 瑛,孟祥飞,张文倩,亓 尧

(空军工程大学装备管理与安全工程学院,西安,710051)

摘要 航路网络中航路点布局问题(CWLP)是航路网络规划的核心。基于此,从航路网络经济性和安全性出发,考虑航路运行成本和潜在冲突系数 2 个因素,建立航路点布局多目标优化模型,求解时采用动态递变权重系数的蝙蝠算法以保证运行成本和潜在冲突系数能同时获得较优解。最后对北京飞行情报区进行仿真实验,将蝙蝠算法(BA)与其他多目标算法对比,得到 4 种算法的非支配解,证明多目标蝙蝠算法在求解航路点布局的大规模优化问题上,能够获得更优解。同时,考虑偏好经济性和偏好安全性 2 种情况选择 2 组权重,数据显示:与初始网络相比,这 2 种情况下网络运行成本和冲突系数减少比例分别为 9.99%、15.64%以及-3.97%、65.81%。实验结果表明,该方法能够在航路点布局规划上给决策者以多种优化方案。

关键词 航路网络;航路点布局;多目标优化;蝙蝠算法

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2017.06.004

中图分类号 V355;TP183 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2017)06-0020-07

A Multi-Objective Optimization Design for Crossing Waypoints Location in Air Route Network

YAN Wei, WANG Ying, MENG Xiangfei, ZHANG Wenqian, QI Yao

(Equipment Management and Security Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: Crossing waypoints location problem (CWLP) is a core of air route network planning. Based on the situation, a model of multi-objective optimization for CWLP is built, judged by the two factors of total airline cost and total flight conflict coefficient and proceed from the economic and safe aspects of air route network. During the solution, multi-objective bat algorithm based on dynamic gradient weight coefficient is adopted to make sure that the cost and flight conflict coefficient can obtain optimal solutions at the same time. In the end, this paper takes Beijing flight information area as a simulation and gains four kinds of non-dominated solution by comparing BA with other algorithms. The result indicates that the BA in solving the problem can get a more optimal solution. Meanwhile, in consideration of two groups of weight according to the preference of economy or the safety, the data show that the proportional reductions of the network operation cost and conflict coefficient in these two situations respectively are 9.99%, 15.64%, -3.97% and 65.81%, compared with the initial network. The conclusion of the simulation is that the method can provide various solutions for the decision makers in the design for crossing waypoints location.

收稿日期: 2016-12-29

基金项目: 国家自然科学基金(71171199)

作者简介: 严 伟(1993—),男,江苏盐城人,硕士生,主要从事系统工程研究. E-mail: lgtgyjw@163.com

引用格式: 严伟,王瑛,孟祥飞,等. 航路网络航路点布局的多目标优化设计[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2017, 18(6): 20-26.
YAN Wei, WANG Ying, MENG Xiangfei, et al. A Multi-Objective Optimization Design for Crossing Waypoints Location in Air Route Network [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2017, 18(6): 20-26.

Key words: air route network; crossing waypoints location; multi-objective optimization; bat algorithm

航路网络(Air Route Network, ARN)作为空中交通运输的载体,在空域环境中起到举足轻重的作用^[1]。空中交通能否安全高效运行以及成本是否经济合理主要取决于航路网络结构优劣。科学的航路网络设计能有效合理满足用户需求、增加运输能力和减少运输成本。航路点是连接航路网络中各个机场之间空中航路的衔接点,其空间布局很大程度上决定了航路网络结构和拓扑特性。其主要表现在以下2个方面:①航路点是多条航路交叉点,当有航空飞行器同时接近时,容易造成飞行冲突,影响飞行安全;②航路点的空间位置直接决定飞行航路的直线性,因此也就决定空中运行成本。正因如此,在航路网络规划中,为了保证空中运行的安全性和经济性,航路点的优化布局被视为其中最为核心的一项工作。

航路网络中航路点布局问题是在给定航路网络拓扑结构和初始航路点位置,满足相应约束条件(空域可用性)的前提下,确定优化目标,建立优化模型,设计优化算法动态调整航路点的空间地理位置,使得航路网络的各个属性达到最优。国外关于航路网络的研究较早,Siddiquee给出了用于航路网络优化的一系列数学模型,如航路网络节点的潜在冲突系数、节点交叉数、航路容量、航路距离等,但其工作没有给出航路网络设计的具体方法^[2]。2000年,Me-hadhebi第1次提出了较为完整的航路网络设计与优化方法。通过量化管制约束和航线经济性,建立单目标无约束优化模型,实现了航路网络优化^[3]。Riviere利用Floyd-Warshall算法寻找城市间的最短路径,利用模拟退火算法对航路网络进行优化^[4]。国内,辛正伟将航路交叉点冲突系数纳入到网络模型,建立了成本最小化的单目标约束模型^[5],但是将冲突系数作为约束条件,无法在航路网络设计中充分考虑经济性与安全性之间的关系。公言会利用元胞自动机模型进行航路网络规划,没有考虑冲突系数的约束,仅仅是作为性能指标进行评价^[6]。

基于以上学者的研究基础,本文将航路网络冲突系数加入目标函数,建立以成本最低、冲突系数最小为目标,以空域可用性和航路段交叉限制为约束条件的多目标优化模型,在解决安全性的同时考虑经济性。在算法求解方面,本文采用多目标蝙蝠算法,充分利用其易获得全局最优解的优势^[7],使得各目标能尽可能同时得到最优解。仿真结果表明,采用多目标蝙蝠算法对航路网络规划中的冲突系数和交通运输成本进行决策优化,求解效果以满足在保

证安全性的同时尽量做到经济性。

1 航路点布局优化模型

1.1 基本假设

为简化模型,根据实际网络性能,本文作如下假设:①虽然实际的ARN是三维结构,但本文研究的是航路网络同一平面间的关系,因此,将ARN网络视为二维平面,即不考虑航路高度层问题;②航路网络中各机场对之间的飞行路径都是单一的,即不考虑一条航线的分流问题;③所有航空器均沿航路中心线匀速直线飞行,不考虑体型、速度之间的差异。

1.2 基本定义

将航路网络表示为 $N(V, E, Q, D)$,其中: V 代表航路节点的集合。 $V = \{A, W, B\}$,其中: A 为机场点集合, W 为航路点集合, B 为边界点集合。在本文中,由于边界点既产生流量也接收流量,因此将边界点视作机场点进行处理。并且, $|A| + |B| = m$, $|W| = n$ 。因此,各个航路网络节点在二维平面坐标为:

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_m, \dots, v_{m+n}\} = \begin{Bmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_m & \dots & x_{m+n} \\ y_1 & y_2 & \dots & y_m & \dots & y_{m+n} \end{Bmatrix}$$

E 是航路网络邻接矩阵:

$$E = (e_{ij})_{(m+n) \times (m+n)}$$

其中: $e_{ij} = e_{ji} = \begin{cases} 1, & \text{节点 } i, j \text{ 相连} \\ 0, & \text{节点 } i, j \text{ 不相连} \end{cases}$,且当 $i = j$ 时 $e_{ij} = 0$ 。

Q 是航路网络中各节点对的流量分布矩阵:

$$Q = (q_{ij})_{(m+n) \times (m+n)} = \begin{Bmatrix} q_{11} & \dots & q_{1,m} & q_{1,m+1} & \dots & q_{1,m+n} \\ q_{21} & \dots & q_{2,m} & q_{2,m+1} & \dots & q_{2,m+n} \\ \vdots & & & & & \vdots \\ q_{m,1} & & \vdots & \vdots & & q_{m,m+n} \\ q_{m+1,1} & & & & & q_{m+1,m+n} \\ \vdots & & & & & \vdots \\ q_{m+n,1} & \dots & q_{m+n,m} & q_{m+n,m+1} & \dots & q_{m+n,m+n} \end{Bmatrix}$$

其中: q_{ij} 为 i, j 节点的航段流量;当 $e_{ij} = 0$ 时 $q_{ij} = 0$ 。

D 是航路网络中各节点间的距离矩阵:

$$D = (d_{ij})_{(m+n) \times (m+n)} = \begin{Bmatrix} d_{11} & \dots & d_{1,m+n} \\ \vdots & & \vdots \\ d_{m+n,1} & \dots & d_{m+n,m+n} \end{Bmatrix}$$

其中: $d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$ 且 $d_{ij} = d_{ji}$,当 i

$=j$ 时, $d_{ij}=0$; 当 $e_{ij}=0, i \neq j$ 时, $d_{ij}=\infty$ 。

1.3 优化目标

航路网络航路点优化设计目标主要包括安全性和经济性 2 个方面。

1) 经济性主要通过航路网络中航线运行成本 (Total Airline Cost, TAC) 表示, 而运行成本主要取决于飞行流量和航段长度, 将飞行流量与航段长度的乘积作为运行成本, 即: $TAC = \sum_{i=1}^{m+n} \sum_{j=1}^{m+n} q_{ij} d_{ij}$ 。所以, 关于经济性的目标函数表达式如下:

$$\min TAC = \sum_{i=1}^{m+n} \sum_{j=1}^{m+n} q_{ij} d_{ij} \quad (1)$$

2) 航路运行安全主要通过航路点处潜在冲突系数 (Total Flight Conflict Coefficient, TFCC) 来表示。航路点处的潜在冲突系数是指当有 2 条或 2 条以上的航段通过同一航路点时, 此航路点在单位小时内可能发生的飞行冲突的次数。定义在 i 航路点处的潜在冲突系数为 c_i , 则:

$$c_i = 2 \sum_{j=1}^s \sum_{k=j+1}^s \frac{q_{ji} q_{ki} T}{X \cos\left(\frac{\alpha_{jk}^i}{2}\right)} \quad (2)$$

式中: q_{ji} 、 q_{ki} 分别是航路段 (j, i) 、 (k, i) 的飞行流量; T 是水平管制间隔距离标准; X 是飞行器的平均飞行速度; α_{jk}^i 是航路段 (j, i) 、 (k, i) 在航路点 i 处的夹角; s 是在航路点 i 处相交的航路数量。航路网络中所有航路点的潜在冲突系数越小, 则网络的安全性越有保证。即, 此目标函数为:

$$\min TFCC = 2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^s \sum_{k=j+1}^s \frac{q_{ji} q_{ki} T}{X \cos\left(\frac{\alpha_{jk}^i}{2}\right)} \quad (3)$$

1.4 约束条件

本文的约束条件主要考虑到空域可用性约束和航路段的交叉约束。空域可用性约束是指所有待优化的航路点的变动范围不能是全局航路网络, 应约束在原航路点位置的附近二维区域, 即:

$$\begin{cases} x_{\min}^i \leq x_i \leq x_{\max}^i \\ y_{\min}^i \leq y_i \leq y_{\max}^i \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

式中: x_{\min}^i 和 y_{\min}^i 是航路点变动的最小边界值; x_{\max}^i 和 y_{\max}^i 是航路点变动的最大边界值。

航路段的交叉约束是指在航路点位置调整后, 不能因航路交叉而出现新的航路点, 也就是说, 所有航路段只允许在已有的航路点处交叉。即: 航路段 (a, b) 与航路段 (c, d) 之间没有交点。

1.5 航路点布局问题模型

航路点布局问题可描述为: 在已知航路节点集合 $V = \{A, W, B\}$, 航路网络的邻接矩阵 E , 航路网络中各节点之间的飞行流量分布矩阵 Q 的基础上,

调整 n 个航路点位置以满足航路网络经济性和安全性需求^[8-13]。由此, CWLP 优化模型可表示为:

$$\begin{cases} \min TFCC = 2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^s \sum_{k=j+1}^s \frac{q_{ji} q_{ki} T}{X \cos\left(\frac{\alpha_{jk}^i}{2}\right)} \\ \min TAC = \sum_{i=1}^{m+n} \sum_{j=1}^{m+n} q_{ij} d_{ij} \\ \begin{cases} x_{\min}^i \leq x_i \leq x_{\max}^i \\ y_{\min}^i \leq y_i \leq y_{\max}^i \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \\ (a, b) \cap (c, d) = \emptyset \end{cases} \quad (5)$$

2 航路点布局优化模型求解

分析模型发现, CWLP 问题是非线性、不可微的多目标优化问题, 难以用经典的数学规划算法进行求解, 同时算法求解过程中每一个航路点都与其他航路点有一定关系, 不能单独考虑, 必须与其他航路点联合作用, 找出最佳布局, 在整个过程中, 决策变量维度高 (二维横坐标和纵坐标), 计算复杂度大。因此, 在分析问题特点的基础上, 本文针对性地设计了多维多目标的蝙蝠算法进行求解。

2.1 多目标问题处理思路

解决多目标问题的难处在于大多数情况下, 多个目标函数之间可能是相互冲突的, 难以找到一个最优解, 能够使每一个目标函数达到最优, 因为在优化某一个或几个目标的同时会导致与之冲突的目标的性能下降。因此, 在对多目标优化问题求解时, 通常是得到一组最优解^[14]。

利用遗传算法进行求解多目标问题的方法主要包括权重系数法、并列选择法、排序选择法^[15]。本文使用的方法是基于递变权重系数的蝙蝠算法。在每一次迭代循环中给不同目标函数赋予不同的系数, 求解目标函数, 最后得到一组 Pareto 最优解。

2.2 蝙蝠算法 (Bat Algorithm, BA)

蝙蝠算法 (BA) 是由英国剑桥大学 Xin-She Yang 教授于 2010 年提出的启发式算法, 其对全局搜索和局部搜索进行了有效协调。在自然界中, 蝙蝠通过声波来探测和定位猎物^[16]。算法在搜索过程中, 通过调整搜索频率, 加快收敛速度。同时, 每个蝙蝠都能够通过调节声波脉冲速率和声波响度来协调算法的全局探索与局部挖掘, 因此算法具有较强的搜索能力和稳定性^[17]。并且, 对于航路网络规划这种大规模问题, 蝙蝠算法具有模型参数少, 结构简单, 具有潜在并行性特点, 能够更加容易获得问题的最优解。

蝙蝠算法中的重要参数包括: 声波的频率 f_i , 波长 λ_i , 脉冲速率 $R(i)$, 声波强度 $A(i)$, 飞行速度

v_i 。为了有效模拟蝙蝠探测猎物、避开障碍物,还需要有以下 3 条假设:①所有蝙蝠均可以利用声波回声来感知距离,并准确判断出猎物与障碍物;②蝙蝠可根据自身与猎物之间距离自动调整发射声波的波长或频率;③蝙蝠发出的声波响度具有最大和最小临界值^[18]。

2.2.1 蝙蝠速度与位置的更新规律

假设一个 d 维空间,在 t 时刻,蝙蝠 i 的所处的位置为 x_{ir}^t ,飞行速度为 v_i^t ,声波频率为 f_i ,那么在 $t+1$ 时刻,蝙蝠的位置 x_i^{t+1} 和速度 v_i^{t+1} 更新为:

$$f_i = f_{\min} + (f_{\max} - f_{\min})\mu \quad (7)$$

$$v_i^{t+1} = v_i^t + (x_i^t - x_b) f_i \quad (8)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^t \quad (9)$$

式中: f_{\max} 和 f_{\min} 分别表示声波频率的最大值和最小值; μ 是服从均匀分布,在 $[0,1]$ 间的随机数; x_b 是当前种群的全局最优解。同时,在已有最优解集后,随机选择其中一个解作为当前的最优解 x_p ,对其随机扰动,获得一个新的解 x_{new} ,更新的公式为:

$$x_{\text{new}}(i) = x_p + \boldsymbol{\varepsilon} A^t \quad (10)$$

式中: $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为 $[0,1]$ 的 d 维随机向量; A^t 为 t 时刻所有蝙蝠响度的平均值。

在本文的参量设计中,将蝙蝠的飞行速度 v_i^t 从原本的一维随机飞行转变为二维随机飞行,即将 v_i^t 分开记为 v_{ix}^t 和 v_{iy}^t ,同时对蝙蝠位置进行修正,将 x_i^t 分别记为 x_{ix}^t 和 x_{iy}^t 。则将式(9)变为:

$$x_{ix}^{t+1} = x_{ix}^t + v_{ix}^t \quad (11)$$

$$x_{iy}^{t+1} = x_{iy}^t + v_{iy}^t \quad (12)$$

2.2.2 声波响度和脉冲速率的更新

蝙蝠刚出发时,响度最大而脉冲速率最小,当蝙蝠探测到猎物之后,在飞向猎物的过程中,响度逐渐减小而脉冲发射率不断增大^[19]。在算法中,响度 $A(i)$ 和脉冲速率 $R(i)$ 会不断迭代更新,其规律为:

$$R^{t+1}(i) = R^0(i)[1 - \exp(-\gamma t)] \quad (13)$$

$$A^{t+1}(i) = \alpha A^t(i) \quad (14)$$

式中: $0 < \alpha < 1, \gamma > 0$ 是常数。当 $t \rightarrow \infty$ 时, $R^t(i) \rightarrow R^0(i), A^t(i) \rightarrow 0$ 。

2.2.3 蝙蝠算法的实施步骤及流程图

在搜寻猎物的过程当中,蝙蝠群体经历了一个从盲目搜索到有序前进的过程,所有的蝙蝠都通过逐渐调整声波频率、响度和脉冲速率来跟随当前适应度值最优的蝙蝠。基本流程见图 1。

算法的实施步骤为:

Step1 初始化参数:蝙蝠规模为 N ,最大声波强度 A ,最大脉冲发射频率 R^0 ,音波强度衰减速率 α ,脉冲发射速率增长速率 γ ,最低声波频率和最大声波频率 f_{\min} 和 f_{\max} ,最大迭代次数,搜索变量维度

以及独立运行次数;

Step2 初始化每只蝙蝠的位置 $x_i (i=1,2,\dots,N)$,速度为 v_i ,声波频率为 f_i ;

Step3 寻找当前最优解,计算其适应度值 $f(x_b)$;

Step4 主循环,按照 2.2.1 节中公式分别更新蝙蝠的当前位置和速度,如果 $\mu > R(i)$,则随机一个最优解加以扰动,进行局部搜索。如果获得的新解的适应度值 $f(x_{\text{new}}) < f(x_i), \mu < A(i)$,则接受这个新的解,蝙蝠更新飞行方向。

Step5 如果 $f(x_{\text{new}}) < f(x_b)$,则以此解替换之前最优解,同时按照 2.2.2 节中公式更新声波响度 $A(i)$ 和脉冲发射速率 $R(i)$;

Step6 重新评估找出最佳的蝙蝠个体所处的位置和速度;

Step7 如果达到算法终止条件则输出最优蝙蝠个体和全局最优解。否则,进入到 **Step4**,继续搜索。

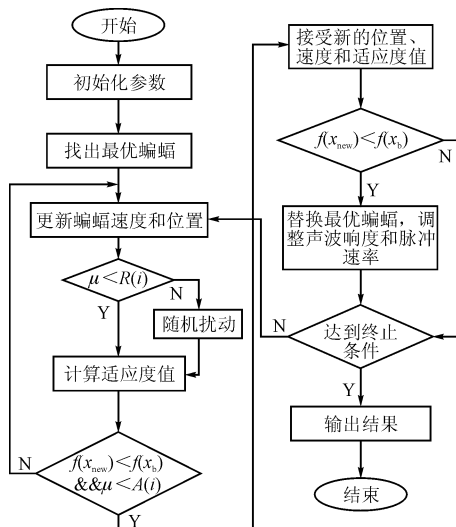


图 1 蝙蝠算法流程图

Fig. 1 Bat algorithm flow chart

3 实例验证

本文以北京飞行情报区内航路网络布局为例,其中包括 5 个机场点,6 个边界点和待优化的 20 个航路点,关于机场位置,航路连接关系以及航线流量均是在民航总局发布的资料文件中提取的真实数据。初始航路网络结构见图 2。

在仿真实验中,将 6 个边界点视作机场点进行处理,飞机在航段之间沿着航线中心匀速直线飞行。基本参数设计如下:①飞机航线飞行速度 X 设为 900 km/h;②雷达管制下的安全横向飞行间隔参数 T 为 20 km。③每个航路点被允许在以原位置为中心的二维空间内搜索变动,上下边界分别为 100 km

和-100 km。④节点对 (j, i) 和 (k, i) 在航路点 i 处的夹角为 α_{jk}^i ,经过计算,模型式(3)中 $\cos(\frac{\alpha_{jk}^i}{2}) =$

$$\sqrt{\frac{1+\cos\alpha_{jk}^i}{2}}, \text{其中 } \cos\alpha_{jk}^i = \frac{d_{ij}^2 + d_{ik}^2 - d_{jk}^2}{2d_{ij}d_{ik}}.$$

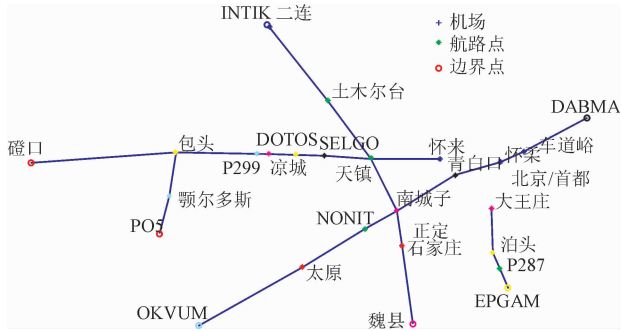


图2 北京飞行情报区航路网络结构(部分)

Fig. 2 The structure of air route network in Beijing flight information region (part)

CWLP问题的决策变量是各个航路点的坐标变量,将每个蝙蝠个体编码为一个包含所有航路点坐标信息的向量。实例中有20个待优化的航路点,首先将各网络节点的地理坐标化为二维平面坐标,然后编码,则每个蝙蝠个体就是一个如图3所示的40维向量。

x_1	y_1	x_{20}	y_{20}
-------	-------	-----	-----	----------	----------

图3 航路点坐标编码

Fig. 3 Code of the crossing waypoints

种群数量设置为25,最大迭代次数设置为500,算法的独立运行次数设置为10。在多目标问题处理方式上,使用递变权重系数法。递增改变目标函数TAC的系数 ω_1 ,即递减改变目标函数TFCC的系数 $\omega_2(\omega_1 + \omega_2 = 1)$ 。

同时为验证递变权重蝙蝠算法在求解此问题上的有效性,这里选取非支配排序遗传算法^[20](NSGA-II),多目标粒子群算法^[21](MOPSO)和进化算法^[22](EA)进行实验比较。这3种算法是被广泛应用的多目标优化算法,通过实验运行得到的非支配解分布结果见图4。

横坐标表示航路网络潜在冲突系数,纵坐标表示航路成本。从图4中可以看出,4种算法非支配解的分布曲线较为平滑,而EA算法得到的解是最差的,均能被其他3种算法得到的解所支配;MOPSO和NSGA算法相比较,NSGA算法大部分解被MOPSO算法的解所支配,收敛性也较差;BA算法的解基本能够支配其他算法所得到的解,可以说明此方法对航路点布局优化多目标问题求解的性能良

好,在总航路成本与航路网潜在冲突系数之间能够给航路规划者提供较好的决策支持。

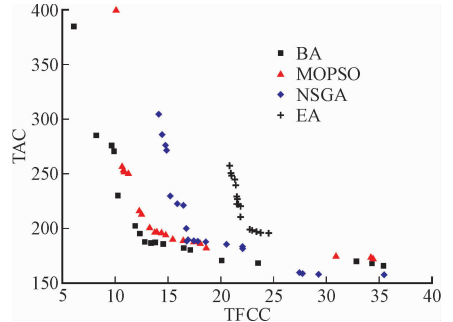


图4 4种对比算法求解得到的非支配解

Fig. 4 Four kinds of non-dominated solution by different algorithms

为进一步证明多目标蝙蝠算法在求解航路点布局上的有效性,在分别对TAC权重 ω_1 取0.7(TFCC权重 $\omega_2 = 0.3$)和 ω_1 取0.2(TFCC权重 $\omega_2 = 0.8$)的情况下,本文对比了现行北京飞行情报区网络和航路点布局优化后网络的性能指标,比如总航路网长度、总航线的运行成本、航路网络的非直线系数以及航路网络的潜在冲突数。其中,表中的非直线系数是衡量航路网络性能指标的一个因素,反映的是航路网络的便捷程度。网络非直线系数用 I 来表示:

$$I = \frac{\sum_{ij} I_{ij} q_{ij}}{q_{ij}} \quad (15)$$

式中: I_{ij} 为城市对间的非直线系数,是两点间航路距离与空间距离的比值。网路非直线系数越低,飞行成本越低,则对空域的利用率越高。

得到的结果见表1和表2。在此情况下,对航路点调整后,得到的航路网络示意图见图5。

表1 $\omega_1 = 0.7(\omega_2 = 0.3)$ 时航路网络性能指标对比表

Tab. 1 ARN performance metrics contrast in $\omega_1 = 0.7(\omega_2 = 0.3)$

网络结构	航路网络性能指标			
	总航路网长度	航路网运行成本	航路网冲突系数	非直线系数
初始网络	2 929.357	204.7857	32.943 3	1.065 3
优化网络	3 196.278	184.318	27.792 7	1.063 8
指标优化程度	9.11%	-9.99%	15.64%	0.14%

表2 $\omega_1 = 0.2(\omega_2 = 0.8)$ 时航路网络性能指标对比表

Tab. 2 ARN performance metrics contrast in $\omega_1 = 0.2(\omega_2 = 0.8)$

网络结构	航路网络性能指标			
	总航路网长度	航路网运行成本	航路网冲突系数	非直线系数
初始网络	2 929.357	204.785 7	32.943 3	1.065 3
优化网络	3 249.288	212.908 3	11.264 8	1.083 8
指标优化程度	10.92%	3.966%	-65.81%	1.73%

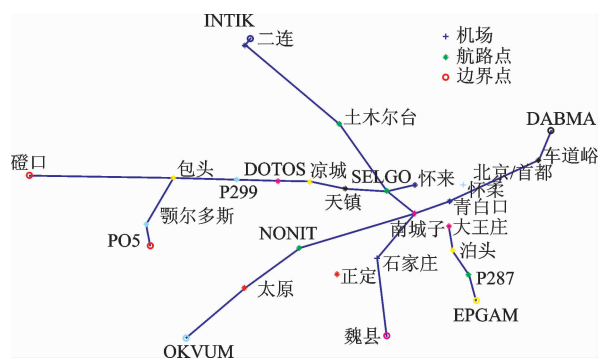


图5 优化后航路网络示意图

Fig. 5 The optimized air route network diagram

由表1和表2的数据显示,无论在不同的权重取值下,多目标蝙蝠算法至少会对TAC和TFCC的一方面有较大的改进。同时由于对两者的侧重程度不同,最终结果总会偏向于权重较大的一方。当规划者对TFCC更为重视时,就会牺牲掉部分TAC的值,以满足自身需求;当对TAC的标准更高时,就会相应降低对TFCC的要求。优化后的网络能在较大程度上减少非直线系数,提高空域的利用率。实验结果表明,多目标蝙蝠算法对航路网络规划的适用性较好,在进行航路网络规划,既可实现优化航路网络的目标,还可以给规划者以不同权重要求的方案。

4 结语

本文通过分析航路网络运行成本和航路网络冲突系数之间的关系,建立了航路网络中航路点布局的多目标优化模型,并利用动态递变权重系数的多目标蝙蝠算法进行求解,得到了较平滑均匀的非支配解曲线,在优化网络的同时,能够给以规划者多种决策方案。并且通过与NSGA、MOPSO和EA在求解上进行对比,发现BA算法求得的解的性能总体优于其他3种算法。但是,由于本文案例中航路网络规模还较小,而实际网络的复杂度会随节点数成指数增长,如何更好提高算法的计算效率和精度还有待进一步研究。

参考文献(References):

[1] TSEYTLINA T, BALASHOV V, SMIRNOV A. The Problem of Modelling a Trunk Air Route Network [J]. Aviation, 2013, 17(1): 1-8.

[2] SIDDIQUEE M W. Mathematical Aids in Air Route Network Design [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Decisions and Control. San Diego, CA: IEEE, 1973: 651-654.

[3] MEHADHEBI K. A Methodology for the Design of a Route Network [C] // Proceedings of the 3rd Air Traffic Management R&D Seminar. 2000: 1-8.

[4] RIVIERE T, BRISSET P. Shortest Path in Planar Graph And Air Route Network [C]//Proceedings of the 4th Eurocontrol Innovative Research Workshop and Exhibition. 2005: 1-10.

[5] 辛正伟. 航路网络规划技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.

XIN Z W. Research on Air Route Network Planning Technology [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013. (in Chinese)

[6] 公言会. 航路网络规划技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.

GONG Y H. Research on Air Route Network Planning Technology [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015. (in Chinese)

[7] YANG X S. Bat Algorithm For Multi-Objective Optimisation [J]. International Journal of Bio-Inspired Computation, 2011, 3(5): 267-274.

[8] WANG H Y, WEN R Y. Analysis of Air Traffic Network of China [C]//2012 24th Chinese Control and Decision Conference (CCDC). 2012: 2400-2403.

[9] CAI K Q, ZHANG J, DU W B, et al. Analysis of the Chinese Air Route Network as a Complex Network [J]. Chinese Physics B, 2012, 21(2): 596-602.

[10] ZHOU C, ZHANG X J, CAI K Q. Comprehensive Learning Multi-Objective Particle Swarm Optimizer for Crossing Waypoints Location in Air Route Network [J]. Chinese Journal of Electronics, 2011, 20(4): 533-538.

[11] 蔡开泉. 大规模复杂航路网络运行优化及应用研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2013.

CAI K Q. Research on the Operational Optimization for Large-Scale and Complex Air Route Network and its Application [D]. Beijing: Beihang University, 2013. (in Chinese)

[12] 张文倩, 王瑛, 张红梅. 基于变分贝叶斯的高维数据分类算法研究 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2017, 18(2): 89-94.

ZHANG W Q, WANG Y, ZHANG H M. The Study of High-Dimensional data classification Algorithm Based on Variational Bays [J]. Journal of Air Force Engineering University (National Science Edition), 2017, 18(2): 89-94 (in Chinese).

[13] 陈才龙. 基于复杂网络的航路汇聚点布局优化方法研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2011.

CHEN C L. Research on Optimization Method Based on Complex Network for Crossing Waypoints Location [D]. Hefei: University of Science and Technolo-

- gy of China, 2011. (in Chinese)
- [14] 李永宾, 张凤鸣, 李俊涛. 基于组合赋权方法的多目标威胁排序 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2007, 8(2):7-9.
LI Y B, ZHANG F M, LI J T. Multi-object Threat Sequencing Based on Combination Determining Weights [J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2007, 8(2):7-9. (in Chinese)
- [15] 刘思颖. 高维多目标进化算法中支配关系的改进研究 [D]. 湘潭:湘潭大学, 2014.
LIU S Y. The Improvement of Dominance Relations in High-dimensional Multi-Objective Evolutionary Algorithm [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2014. (in Chinese)
- [16] YANG X S. A New Metaheuristic Bat-Inspired Algorithm [J]. Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization (NICSO 2010) Studies in Computational Intelligence, 2010, 284: 65-74.
- [17] 薛菲. 基于蝙蝠算法的启发式智能优化研究与应用 [D]. 北京:北京工业大学, 2016.
XUE F. Research and Application of Heuristic Intelligent Optimization Based on Bat Algorithm [D]. Beijing University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [18] YANG X S, GANDOMI A H. Bat Algorithm: A Novel Approach for Global Engineering Optimization, Engineering Computations, 2012, 29(5): 464-483.
- [19] 李良良. 蝙蝠算法改进及其应用研究 [D]. 南宁:广西民族大学, 2015.
LI L L. Improvement and Application Research of Bat Algorithm [D]. Nanning: Guangxi University for Nationalities, 2015. (in Chinese)
- [20] HUANG R F, LUO X W, JI B, et al. Multi-Objective Optimization of A Mixed-flow Pump Impeller Using Modified NSGA-II Algorithm [J]. Science China (Technological Sciences), 2015 (12): 2122-2130.
- [21] LI L, WANG W L, LI W K, et al. A Novel Ranking-based Optimal Guides Selection Strategy in MOPSO [J]. Procedia Computer Science, 2016.
- [22] ZHU Q L, LIN Q Z, DU Z H, et al. A Novel Adaptive Hybrid Crossover Operator for Multiobjective Evolutionary Algorithm [J]. Information Sciences, 2016, 345(c):177-198.

(编辑:徐楠楠)