

DOI:10.16356/j.2097-6771.2026.02.017

基于空中交通复杂性及航空器排放的航迹优化

王红勇, 兰雯

(中国民航大学空中交通管理学院, 天津 300300)

摘要:为解决现有航迹优化研究中在空域效率与环境效益协同优化方面存在的模型耦合不足、缺乏动态响应机制以及多污染物协同减排考虑不完善等问题,提出一种基于空域复杂度的动态航迹调整方法及污染物排放协同优化方法。首先,构建一个时空交互驱动的空中交通复杂度计算模型。其次,整合 SAGE(System for assessing aviation's global emissions)模型和改进指标模型,建立巡航阶段的多污染物排放计算体系,并设计一种改进的模拟退火遗传算法(Simulated annealing genetic algorithm, SAGA)。基于2023年6月某日数据的模拟实验表明,在不考虑空域限制及其他约束的理想情况下,通过调整26.18%的飞行高度,所提出的方法将 NO_x , CO, CO_2 , SO_2 和HC的排放量分别减少0.75%、0.14%、0.47%、0.48%和0.33%,并且每个时段的平均复杂度平均降低了19.82%。全天的总体平均复杂度也得以下降。该方法通过高度层的动态调整实现多目标协同,在保证飞行安全的同时显著提升了环境效益,为空中交通管制系统的绿色转型提供了技术支持。

关键词:航空运输;大规模航迹优化;巡航污染物计算;模拟退火遗传算法;空中交通复杂度
中图分类号:V355;U8 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2026)02-0412-13

Flight Path Optimization Based on Air Traffic Complexity and Aircraft Emissions

WANG Hongyong, LAN Wen

(College of Air Traffic Management, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract:In order to solve the problems of insufficient model coupling, lack of dynamic response mechanism and imperfect consideration of multi-pollutant collaborative emission reduction in the co-optimization of airspace efficiency and environmental benefits in the existing research on trajectory optimization, this paper proposes a dynamic trajectory adjustment method based on airspace complexity and collaborative optimization of pollutant emissions. Firstly, a spatio-temporal interaction-driven air traffic complexity calculation model is constructed. Secondly, the system for assessing aviation's global emissions (SAGE) and modified index models are integrated to establish a multi-pollutant emission calculation system during the cruising phase. Finally, an improved simulated annealing genetic algorithm (SAGA) is designed to solve the multi-objective optimization problem. Simulation experiments based on navigation data on a certain day in June 2023 show that under the ideal situation of not considering airspace restrictions and other constraints, by adjusting 26.18% of the flight altitude, the proposed method reduces emissions of NO_x , CO, CO_2 , SO_2 , HC by 0.75%, 0.14%, 0.47%, 0.48%, 0.33%, respectively, and the average complexity of each time period is reduced by 19.82% on average. The overall average complexity of the whole day is also reduced. This method realizes multi-objective collaboration through dynamic adjustment of the height layer, which significantly improves the environmental benefits while ensuring operational safety, and provides technical

收稿日期:2025-06-03;修订日期:2025-09-29

通信作者:王红勇,男,教授,13920819396@163.com。

引用格式:王红勇,兰雯.基于空中交通复杂性及航空器排放的航迹优化[J].南京航空航天大学学报(自然科学版),2026,58(2):412-424. WANG Hongyong, LAN Wen. Flight path optimization based on air traffic complexity and aircraft emissions[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics (Natural Science Edition), 2026, 58(2): 412-424.

support for the green transformation of the air traffic control system.

Key words: air transportation; air large-scale trajectory optimization; cruising pollutant calculations; simulated annealing genetic algorithm (SAGA); air traffic complexity

随着全球航空运输量持续增长^[1],空域资源紧张与环境保护需求形成双重挑战:一方面,传统空管系统面临动态复杂度激增问题,高峰时段战术调整频次上升导致管制员工作负荷逼近安全阈值;另一方面,现行LTO(Landing-takeoff cycle)循环评估体系主要针对3 000 ft(915 m)以下的滑行、起飞、进近和着陆阶段,适用于局地排放核算,难以覆盖占飞行时长约80%、燃油消耗最为集中的巡航阶段^[2]。因此,本文聚焦于巡航排放的定量计算与复杂度协同优化,在模型边界上不纳入LTO部分,而是通过构建巡航阶段污染物计算模型与时空交互复杂度评估框架,提出模拟退火变体遗传算法的优化方法。该研究定位于解决巡航排放与航迹复杂度的协同优化问题,为提升大规模航迹规划的安全性与绿色效益提供方法支撑。

当前,基于民航可持续发展的战略要求,航迹规划兼顾经济性的同时,也针对航空器绿色目标进行优化。例如,Yokoyama等^[3]提出了一种改进的遗传算法,用于大规模航迹规划中飞行时间和燃油消耗的协同优化。Zhang等^[4]利用多目标粒子群优化算法,解决了航迹规划中的安全、燃油和环境排放的多目标权衡问题。Schumann等^[2]通过巡航高度层的优化来减少航空污染物排放对环境的影响。Hamdan等^[5]提出的基于排放政策的空中交通流量管理方法,分析了可持续航空燃料和不同碳价格对空中交通流量的影响。该研究采用了复杂的数学模型和仿真方法,评估了不同碳价格政策对航班调度和空中交通管理效率的影响,能够有效指导政策制定和航空业的绿色转型。

对于航迹战略规划问题,20世纪80年代,人们在对机器人研究的相关问题中总结了路径规划的模式算法^[6],而现在更多地采用智能算法解决。Xue等^[7]成功对终端区进离场航线的二维航迹进行优化,达到了减少消耗燃油的目标。Dougui等^[8]参考光的传播建立模型算法,在处理终端区冲突的基础上得出飞行器进场航迹规划。Soler-Arnedo等^[9]将飞机视作质点动力学模型,将路径化为由一些航迹点和空域水平结构构成的序列,建立0-1二元变量的四维轨迹规划问题,通过对高度层的分配,求解找到燃油消耗、污染排放和凝结尾形成最少的优化目标。Sidiroopoulos等^[10]提出了进近航线动态优化的方法,并以此分析了伦敦多个机场的终端区航线网络。Pierre等^[11]运用遗传算法和图形

学给出了解决终端区有障碍物的二维航迹规划思路。Zhou等^[12]在飞行程序的基础上基于模拟退火算法对终端区航线网络进行优化。随后Zhou等^[13]结合机场环境、航线约束和飞行器约束等条件,基于分支定界的思想对三维航迹进行规划。Xu等^[14]在考虑风不确定性下建立了双层规划模型,上层构建飞行时间最小的航迹集,下层通过冲突探测技术构建无冲突4D航迹。Zhou等^[15]进行了多航空器协作的自主航空器规划,以偏离偏好轨迹的程度和复杂度作为优化目标。

针对污染物排放计算问题,魏志强等^[16]依据建立的排放指数修正模型,对各个飞行阶段的污染物排放量进行了估算。吴金栋等^[17]基于机载快速数据记录仪(Quick access recorder, QAR)采集的飞行数据,按照假定的排放指数计算巡航阶段污染物排放量,没有考虑飞行速度、高度、温度和排放指数等问题。

针对大规模航迹优化问题,近年来的研究逐步从单机优化扩展到多机协作优化。Soler-Arnedo等^[18]将飞机视作质点动力学模型,将路径化为由一些航迹点和空域水平结构构成的序列,建立0-1二元变量的四维轨迹规划问题,通过对高度层的分配,求解找到燃油消耗、污染排放和凝结尾形成最少的优化目标。Zhou等^[19]在飞行程序的基础上基于模拟退火算法对终端区航线网络进行优化。程凝怡等^[20]结合机场环境、航线约束和飞行器约束等条件,基于分支定界的思想对三维航迹进行规划。王中风燕^[21]的研究中详细阐明了排放因素对环境的影响,不仅针对单条航迹进行优化,也对区域扇区进行了优化建模。但是该研究重点聚焦于环境影响,在经济、延误等方面还有深入研究空间,另外该研究给出了优化的高度策略,对于优化路径轨迹还有扩展空间。Guo等^[22]提出改进的遗传算法,通过引入快速探索随机树、删除算子并以其其他无人机轨迹为约束,优化路径规划。Antonio等^[23]提出一种协同进化框架,采用可扩展决策变量数量的ZDT(Zitzler-Deb-Thiele)测试套件,能够优化大规模多目标优化问题。Zheng等^[24]提出基于分布式模型预测控制框架的分布式实时搜索路径规划方法,设计点交叉算子,引入局部搜索框架存储全局最优解。

针对上述问题,本文提出了一种面向大规模空中交通的时空交互复杂度计算方法,量化航路点间

的航班冲突强度对空域复杂度的动态影响;同时,结合发动机工况参数与大气环境数据,构建全国范围巡航阶段污染物排放的高精度估算模型。通过将复杂度与排放纳入统一优化框架,提出改进的模拟退火遗传算法的航迹优化策略,实现飞行高度层最优调整。本研究不仅可降低空域运行风险与管制负荷,还能通过航迹优化减少燃油消耗与污染物排放,为基于航迹运行(Trajectory based operation, TBO)的下一代空管系统提供“安全-效率-环保”的理论支撑与技术实现路径,同时弥补现有研究在动态复杂度评估与巡航排放精准测算方面的不足。

1 空中交通复杂度计算

在航空运输网络运行中,高密度航班流量与有限空域资源之间的矛盾日益凸显。当多架航空器的时空轨迹发生重叠时,其交互关系不仅取决于经过航路点的时间,还受到高度分配的影响。已有研究表明,航班对空域资源的竞争使用会引发显著的时空耦合效应:时间维度表现为航班过点时刻重叠,空间维度体现为飞行高度层分配冲突。传统空中交通管理方法通常将这两方面割裂开来,采用二维或三维的独立分析模式。这种处理方式难以全面捕捉航班之间的耦合关系,导致在冲突预测和航路优化方面存在明显局限。为突破这一不足,本文在文献[25]提出的大规模空域复杂度计算框架的基础上,引入时间交互强度与空间交互强度的双因子量化方法。

首先,以航线网络 $G^R=(V, E^R)$ 表征航路点—航路关系;进行时间窗与高度窗内构建航空器交互网络计算,以三维欧氏距离 $d_{ij}(t)=\|p_i(t)-p_j(t)\|_2$ 定义空间相似度,形成交互强度

$$S_{ij}(t)=\exp\left(-\frac{d_{ij}(t)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

得到加权邻接矩阵 $W_t=[\omega_{ij}(t)]$ 。为反映节点在拥挤传播中的作用,分别计算度中心性 C_D 、接近中心性 C_C 、介数中心性 C_B

$$C_D(i)=\frac{k(i)}{N-1} \quad (2)$$

$$C_C(i)=\frac{N-1}{\sum_{j \neq i} d_G(i, j)} \quad (3)$$

$$C_B(i)=\sum_{j \neq i \neq k} \frac{\sigma_{jk}(i)}{\sigma_{jk}} \quad (4)$$

三项指标经归一化为 $C_{WS}=\{C'_D, C'_C, C'_B\}$ 。对航班间的潜在交互进行先验筛选与软加权,并与空间相似度 S_{ij} 共同形成边权 ω_{ij} , 构成加权邻接矩阵

W_t , 经层次分析法 (Analytic hierarchy process, AHP) 合成为节点综合权重 C_{WS} 。时间交互强度定义为两航班在航路点时空重叠量与其飞行持续时间较小值之比,数学形式为

$$\Gamma_t=\frac{T_{\text{overlap}}}{\min(T_j, T_g)} \quad (5)$$

进一步地,为全面刻画航班交互,本文提出将航班通过时间窗口与高度窗口融合,构建四维时空向量表征方式。设航班 i 在航路点的通过时间区间为 $[t_{\text{start}}^i, t_{\text{end}}^i]$, 高度区间 $[h_{\text{min}}^i, h_{\text{max}}^i]$, 则其四维时空向量可表示为

$$T_i=[t_{\text{start}}^i, t_{\text{end}}^i, h_{\text{max}}^i, h_{\text{min}}^i] \quad (6)$$

如图1所示,通过该向量表征方式可以直观展示两航班在时间与高度上的交互关系。若两个窗口在时间和高度上均发生重叠,则可认为存在潜在冲突。

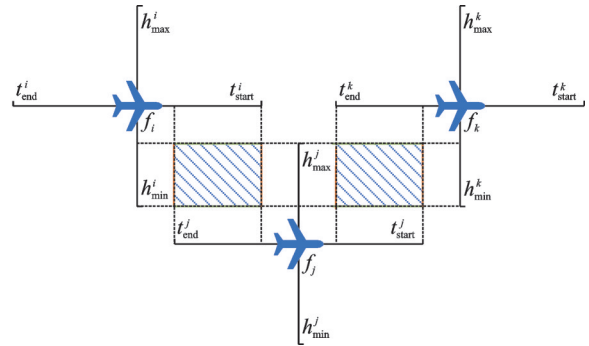


图1 航班交互关系图

Fig.1 Flight interaction diagram

在此基础上,分别定义时间交互关系与空间交互关系的计算公式

$$\begin{cases} \Gamma_h(i, j)=1-\frac{|h_{\text{min}}^i-h_{\text{min}}^j|+|h_{\text{max}}^i-h_{\text{max}}^j|}{\max(\Delta h^i, \Delta h^j)} \\ \Delta h=h_{\text{max}}-h_{\text{min}} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \Gamma_t(i, j)=1-\frac{|t_{\text{start}}^i-t_{\text{start}}^j|+|t_{\text{end}}^i-t_{\text{end}}^j|}{\max(\Delta t^i, \Delta t^j)} \\ \Delta t=t_{\text{end}}-t_{\text{start}} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\max(\Delta h^i, \Delta h^j)$ 和 $\max(\Delta t^i, \Delta t^j)$ 分别为两航班在高度与时间维度上的最大差值。根据形成边的交互强度(式(9)),得到 $\Gamma_h(i, j)$ 与 $\Gamma_t(i, j)$ 空间与时间表征。

$$\omega_{ij}(t)=\delta_{ij}\Phi(\Gamma_t(i, j), \Gamma_h(i, j))S_{ij}(t) \quad (9)$$

交互压力向宏观态势的传递同时取决于节点在网络中的承载与传播能力,因此本文在节点层计算度中心性、接近中心性与介数中心性,经过 AHP 与一致性检验得到权重后合成为节点综合指标 C_{WS} , 得到复杂度

$$C_s(t)=\frac{1}{Z_s}\sum_{i \in V_s} C_{WS}(i) \sum_{j \in N_s(i)} \omega_{ij}(t) \quad (10)$$

2 排放计算

2.1 发动机基准排放数

航空发动机是航空器污染物排放的主要来源,其排放量通常由燃油消耗量和排放指数共同决定。对于巡航阶段而言,燃油消耗主要受飞行距离、巡航高度、速度、飞机质量以及外界温度偏差等因素影响;而排放指数则取决于污染物种类、大气环境条件以及发动机的推力设置。

然而,巡航阶段作为飞行时间最长、燃油消耗最集中的阶段,缺乏统一而精确的排放估算方法。为此,本文在采用SAGE(System for assessing aviation's global emissions)框架进行排放计算的基础上,结合发动机制造商提供的试飞数据,引入在国际标准大气(International atmosphere model standard, ISAM)条件下的基准排放指数。基准数据覆盖了常用机型及其典型发动机型号,并考虑起飞与爬升模式下的燃油消耗率,以便为后续巡航阶段的修正计算提供参考。

表1来自BADA(Base of aircraft data)数据库给出了典型运输类机型的发动机型号及燃油消耗率对照。可以看出,不同机型因发动机型号及推力特性差异,在起飞与爬升阶段的燃油消耗率存在显著差别,这为后续排放计算中的参数修正提供了基础数据。

表1 机型发动机型号及燃油消耗率对照

Table 1 Comparison of engine models and fuel consumption rates

常见机型	发动机型号	发动机数量	燃油消耗率/(kg·s ⁻¹)	
			起飞模式	爬升模式
A320	V2527-A5	2	1.053 0	0.880 0
B737-X	CFM56-7B22	2	1.021 0	0.844 0
A321	CFM56-5B3/3	2	1.462 0	1.153 0
A319	CFM56-5B7/P	2	1.132 0	0.953 0
B787	GENx-1B	2	1.878 0	1.553 0
A330	CF6-80EI	2	2.702 0	2.199 0
ERJ-190	CF34-10E5	2	0.789 0	0.650 0
ARJ21	CF34-10A	2	0.765 0	0.632 0
B737MAX	LEAP-1B28	2	1.061 0	0.864 0
A350	Trent XWB-75	2	2.411 0	1.980 0
CRJ-X	CF34-8C5	2	0.648 1	0.529 7

2.2 排放计算模型

SAGE系统由美国联邦航空局(Federal Aviation Administration, FAA)开发,广泛用于航空排放清单的编制与政策评估。该系统以国际民用航空组织(International Civil Aviation Organization, ICAO)发动机数据库为基础,假设飞行条件符合

国际标准大气(International standard atmosphere, ISA)环境,并通过燃油消耗量与排放指数的组合计算不同飞行阶段的排放强度。

然而,实际巡航阶段的运行状态往往与标准假设存在差异。飞行高度、温度廓线、湿度及推力设置等因素会显著影响燃油流量与排放指数。如果不加修正,容易造成对巡航排放水平的低估或高估。为此,本文在引入SAGE模型的同时,进一步建立了大气环境修正因子与发动机工况修正机制,以动态调整燃油流率和排放指数,实现从“标准状态”到“真实飞行状态”的转化,从而提高估算结果的准确性,也确保排放结果能够与空域复杂度模型有效耦合。

在该模型中,航空器巡航阶段空气污染物排放强度 Q 的计算公式为

$$Q = nEF \quad (11)$$

式中: n 为发动机数量; F 为修正后燃油流量; E 为修正后污染物排放指数。

根据ICAO的BM2模型,在燃油消耗量一定的情况下,CO₂的排放指数与外界环境参数无关,因此无需修正;而其他污染物的排放指数则需要结合巡航参数进行调整。首先,需要将飞机的实际燃油流量换算为标准大气条件下的修正燃油流量 F 。同时,对污染物排放指数进行修正,得到与真实巡航状态相符的 E 。

因为巡航阶段的排放指数和燃油流量研究较少,难以找到参数直接利用。因此首先利用ICAO发动机排放数据库中的数据,得到地面上不同工况下发动机的燃油流量、排放指数等参数,通过计算点的环境压力、温度、湿度、马赫数等参数得到修正的巡航阶段的发动机燃油流量、排放指数等参数,进而得到排放强度。

$$F^2 = \frac{F_g}{\phi} \phi^{3.8} e^{0.2Ma^2} \quad (12)$$

$$F_g = F_i^s(\text{ACT}_f, H, m) \cdot t_j \quad (13)$$

式中: F_g 为修正前巡航位置的燃油流量; s 为巡航阶段的飞行状态; t_j 为一架该类航空器在 s 运行阶段的时长(s); ACT_f 为该航班机型; H 为高度序列; m 为处于该航段时的质量状态。由于在巡航过程中,飞机的质量会随燃油消耗而减少,为了判断飞行器的质量状态为高/中/低,采用数值积分的方式,选取航程积分步长(本文选取10 km)由此判断飞行器的质量状态,评判标准来源于BADA手册。巡航阶段航空器飞行状态可分为上升、平飞、下降,由于推力和运行时长的差异,各状态燃油流量有所不同。 ϕ 为计算点温度与标准大气温度的比值;

Ma 为计算点处的马赫数; φ 为计算点的压力与标准大气压的比值。

2.3 污染物修正模型

计算点处的污染物修正排放指数 E 为

$$E = E_g e^{H_c} \left(\frac{\varphi^{1.02}}{\phi^{3.3}} \right)^{0.5} \quad (14)$$

式中: E_g 为修正前巡航位置污染物的排放指数; H_c 为计算点相对湿度和饱和蒸汽压力有关的参数。由计算点的相对湿度、饱和蒸汽压力、计算点大气压、计算点温度 T 得到。

$$\varphi(H) = \left(1 - \frac{L \cdot H}{T(H)} \right)^{\frac{g}{RL}} \quad (15)$$

式中 $T(H)$ 由当前高度温度计算。

$$F(H) \propto \frac{F_g(H)}{\varphi(H)} \cdot \phi(H)^{3.8} \cdot e^{0.2Ma^2} \quad (16)$$

得到燃油流率后, 根据大规模历史经验数据对污染物排放指数与燃油流量数据的分段线性拟合, 计算各污染物的基准排放指数, 再依据式(17)将基准排放指数转换为实际排放指数

$$E_j = \begin{cases} E_{j0} \frac{\theta^{3.3}}{\delta^{1.02}} \\ E_{j0} \frac{\delta^{0.51}}{\theta^{1.65}} \exp \left[19 \cdot \left(0.0063 - \frac{0.622 \varphi_H P_v}{P - \varphi_H P_v} \right) \right] \end{cases} \quad (17)$$

式中: j 为污染物类型; E_j 为污染物 j 的实际排放指数; E_{j0} 为基准排放指数; φ_H 为大气湿度; P_v 为饱和蒸汽压, 按照 Goff-Gratch 公式根据外界温度计算得出 $\lg P_v = k_1(1 - T_1)/T - k_2 \lg(T/T_1) + k_3[1 - 10^{(k_4(1 - T_1/T))}] + k_5[10^{(k_6(1 - T_1/T))}] + k_7$ (18)

3 路径优化建模

3.1 模型建立

本文考虑了确定整个国家空域系统中飞机的最佳起飞时间、路线、速度和延误等条件, 从绿色视角下基于全国空中复杂度态势特点, 拟议的最优高度从运营数据中提取某日 0 时至次日 2 时真实航迹数据进行实验, 总计 251 364 条数据。根据绿色视角进行节能减排, 通过控制航空器飞行高度的变化对航迹进行优化, 以此减小航班的潜在交互关系, 减小航班污染物排放, 优化空域环境, 减少管制压力等。本文基于以下假设构建基于绿色视角的空中交通复杂度的大规模航迹优化模型:

(1) 航班计划是确定的, 包括数量和过点时间以及高度;

(2) 管制员仅调控航空器的高度;

(3) 不考虑气象等因素影响的航空器飞行问题;

(4) 不考虑航班延误等其他因素对航空器路径的影响。

建立一个航班位置笛卡尔坐标网络模型, 便于进行优化航路规划。空域可描述为三维空间中的一个封闭区域 $S \in \mathbf{R}^3$ 。空域按飞行高度层划分为多个水平层。在每一高度层内, 其水平结构可表示为一个有向图 $G(P, E)$, 其中节点集合 P 代表航路点, 弧集合 E 表示航路连接的总集。其中 $[\alpha, \beta, \gamma, \dots] \in E$, 目前航班计划选取的路径为 α , 如果后续要改变路径, 可调用其他解集进入全局进行优化计算。航空器依据航路点的位置实现航迹导航。通过将航空器航迹在地球表面的投影映射至预定义的网格系统, 实现航路的模拟与优化。首先将地理信息从测地坐标系转换为笛卡尔坐标系, 以实现精确的坐标映射。

对于航班 i , 其在空域范围的飞行轨迹 P_i 可以由高度和笛卡尔坐标形成的四维空间表示

$$P_i^\alpha = \{ (P_1, D_{P_1}, H_{P_1}^i, t_{P_1}), (P_2, D_{P_2}, H_{P_2}^i, t_{P_2}), \dots (P_n, D_{P_n}, H_{P_n}^i, t_{P_n}) \} \quad (P_1, P_2, \dots, P_n) \in \alpha \quad (19)$$

式中: P_n 为航班 n 在 α 航班计划下经过的第 1 个航路点; D_{P_n} 为该航路点的笛卡尔坐标; $H_{P_n}^i$ 为航班 i 在 P_n 点的高度; t_{P_n} 代表航班 i 过航路点 P_n 的过点时间。

3.2 目标函数

本文将一天按小时划分为 24 个时段, 精准测算目标函数。两个目标函数为复杂度与 5 种污染物排放的帕累托解最优值。

对于目标函数权重而言, 紧密衔接国际环境政策《巴黎协定》碳减排目标、《蒙特利尔议定书》以及臭氧保护条款、与大气垂直分层的物理化学机制; 对高危害污染物 (SO_2 、 NO_x) 的权重设置优先考虑大气圈上部的化学反应强度大的物质, 且 NO_x 权重在 3 000~14 400 m 随平流层臭氧损耗风险呈线性上升的趋势, 反映高空化学动力学的强化效应。 CO_2 权重体现其百年尺度的辐射强迫累积, 随对流层顶温度梯度而变化, 并与 IPCC AR6 中 CO_2 垂直辐射强迫特性一致。HC 和 CO 因近地面健康风险赋予中等权重, 且通过 Monin-Obukhov 相似性原理量化了大气混合层高度对其浓度的稀释效应, 权重随高度呈指数衰减。

$$C_{\text{overall}} = \sum_{n \in N} \sum_{t=1}^{24} \sum_{i,j=1}^M \left(\omega_c \cdot C_{\text{Total}}^{n,t}(i,j) + \sum_{\text{pollution}} \omega_{\text{pollution}} \cdot E_{\text{pollution}}^{n,t}(i,j) \right) \quad (20)$$

$$\text{Min} Z = C_{\text{overall}} \quad (21)$$

3.3 权重敏感性分析

在复杂度-排放的双目标优化建模中,权重参数 λ 会直接影响解的取舍。为验证所提出优化方法在不同运行环境下的适用性,本文选取多个典型运行日期的航班运行数据构建不同实验场景。每个场景对应某一典型日期的航班运行情况,通过对不同日期的航班运行数据进行优化计算,对算法性能及优化效果进行综合分析。将敏感性归一化值 λ 在 $(0, 1]$ 区间按 0.01 递增,得到离散的 100 个场景,在每一场景下独立运行改进的模拟退火遗传算法 (Simulated annealing genetic algorithm, SAGA) 算法,对全国范围航班样本的复杂度降低率及 5 类典型污染物削减率进行统计。据此绘制图 2 复杂度敏感性、图 3 污染物敏感性与图 4 类帕累托前沿,以刻画不同权重下的收益-代价权衡关系及拐点位置。

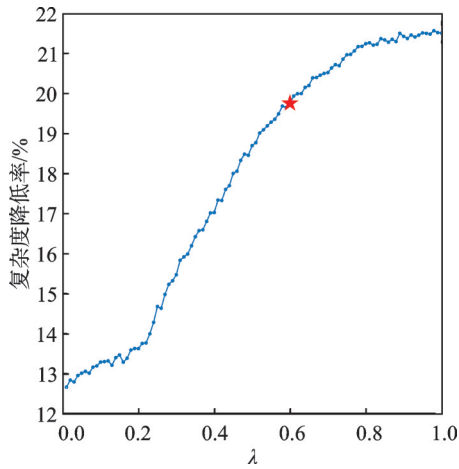


图 2 复杂度敏感性

Fig.2 Complexity sensitivity

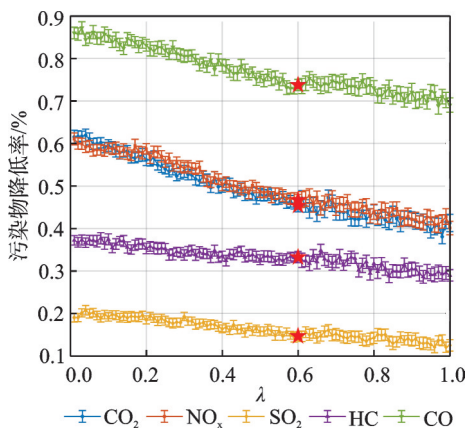


图 3 污染物排放敏感性

Fig.3 Sensitivity of pollutant emissions

实验结果表明,随 λ 增大,在更强调复杂度的占比的情况下,全国范围的复杂度平均降低率由约 13.6% 提升至 21.2%,呈现显著改善;但与此同时,污染物的削减幅度有所减弱,CO₂ 与 NO_x 的下降

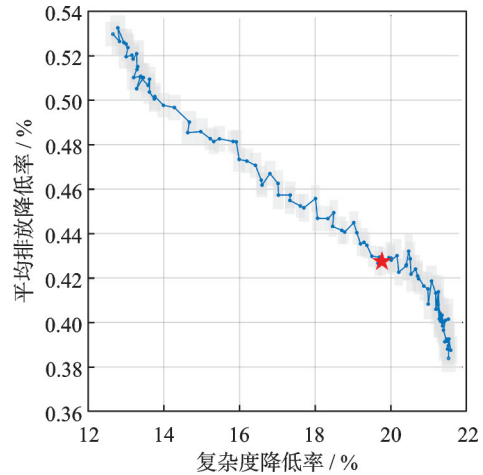


图 4 类帕累托前沿

Fig.4 Pareto-like frontier

率从约 0.55% 降至 0.43% 左右,SO₂、HC 与 CO 亦表现出相同趋势。类帕累托前沿分析进一步显示, λ 在 0.4~0.6 区间时能够同时保证复杂度降低 18%~20% 与排放减少 0.3%~0.5% 的平衡,能体现出最优的综合效益。

3.4 约束条件

在大规模航迹优化问题中,需将航空器性能、管约束、飞行高度层调配要求以及自身特征等视为约束要求,建立约束条件为

$$d_{AB} \geq \text{LTLS} \quad (22)$$

$$FL_{\text{type}} = \begin{cases} FL_{\text{singular}} & 0^\circ \leq TCS < 180^\circ \\ FL_{\text{plural}} & 180^\circ \leq TCS < 360^\circ \end{cases} \quad (23)$$

$$|FL_{P_{k+1}}^f - FL_{P_k}^f| \leq 2 \quad \forall k \in \{1, 2, \dots, N-1\} \quad (24)$$

$$\sum_{k=1}^{N-1} |FL_{P_{k+1}}^f - FL_{P_k}^f| \leq \frac{N-1}{2} \quad (25)$$

$$t_{f,j+1}^{\text{start}} \geq t_{f,j}^{\text{end}} + \frac{D(p_{j+1}, p_j)}{V_f^{\text{max}}} \quad \forall f \in \mathcal{F}, \forall j \in \{1, 2, \dots, n-1\} \quad (26)$$

$$\alpha_f(p_j) \leq \alpha_{\text{stall}} \quad \forall f \in \mathcal{F}, \forall j \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (27)$$

$$\sum_{j=1}^n \|p_j^{\text{opt}} - p_j^{\text{orig}}\| \leq \Delta_{\text{max}} \quad (28)$$

式中:LTLS 为标准安全间隔;TCS 为真航线角。约束(22)是根据国际民航组织空中交通管理文件 (ICAO Doc 4444) 中关于空中相撞安全目标等级的规定,设置的航空器水平间隔的约束,根据碰撞概率 $CR = 5 \times 10^{-9}$ 为安全阈值,其对应的水平间隔值被定义为最低水平间隔标准。约束(23)根据《中国民用航空飞行规则》(CCAR-93)规定,飞行高度层的设置应遵循“东单西双”原则。具体而言,飞行高度层类型(FL_{singular} 与 FL_{plural})需根据航空器的真航线角进行划分,以确保飞行高度层的合理分

配和空域资源的高效利用。约束(24)高度层改变次数限制,基于实际运行情况,飞机高度层变化次数不应超过本身次数,否则会加大空域管理压力,以及增加碰撞风险。式(24)中 $FL_{P_k}^f$ 为航班 f 在航路点 P_k 的飞行高度层; N 为航班 f 经过的航路点总数; k 为航段序号, FL_{P_k} 为第 k 个航段的飞行高度层; j 为航班编号; n_j 为第 j 个航班的航段数。约束(25)为飞行高度层变化的总约束次数。约束(26)考虑民航客机安全性和舒适性,约束飞机真空速,限制飞机速度,不可过大超过民航客机速度阈值。 V_f^{\max} 为航班 f 对应机型 ACT_f 的最大巡航速度(基于飞行性能手册确定)。约束(27)为飞行器迎角约束。为防止优化路径飞机迎角过大导致失速,本文约束条件中加入迎角约束。约束(28)为航空器航迹偏移约束, p_j^{opt} 为优化后的航路点坐标, p_j^{orig} 为原计划航路点坐标;根据管制规则设定, Δ_{\max} 为允许的最大总偏离量。

4 算法设计

本研究采用基于 SAGA 的随机优化方法求解总成本最小化问题。

4.1 模拟退火遗传算法

针对航迹大规模优化问题存在的高度层离散化、多目标异构性及强约束耦合等问题,本文所设计的 SAGA 从并发式视角将全局搜索和退火机制相互嵌套,使算法获得算法架构上的突破:运用了遗传算法(Genetic algorithm, GA)的种群进化优势,在解空间前端生成高维离散决策变量的广域分布。并提出 4 项协同机制即全局最优解归档机制:基于搜索停滞检测的自适应重启策略,面向航迹物理约束的定向扰动算子和双层决策框架。其中前两个协同机制是为了解决经典模拟退火(Simulated annealing, SA)算法逃逸不出局部最优点的问题,后者两个协同机制主要是解决在约束下穿越无差异帕累托前沿,从保证搜索到帕累托最优解集合入手,防止陷入局部最优,影响整个算法的正确性。此种混合架构将 GA 的全局探索能力与 SA 的邻域精深搜索结合起来,极大地提高了了解的质量、解收敛鲁棒性和计算效率,相较传统的 SA 算法有着极高的提升,是高维约束航迹优化问题中更好的求解算法。

4.2 算法步骤

算法利用混合编码策略构建三元组染色体结构 $\mathbf{X}=[H, \theta, Z] \in \mathbf{R}^3$, H 为离散高度层序列, θ 含巡航马赫数与质量状态, Z 为存档最优解集,并由拉丁超立方采样生成均匀分布的初始种群。设置

分层约束处理机制:(1)硬约束,通过解修复算子强制执行;(2)动态惩罚函数,量化管制负荷;(3)渐进惩罚函数处理舒适性约束。结合定向扰动策略与自适应二元接受准则:(1)燃油效率导向的 Metropolis 准则以概率接受劣解;(2)集成高度变更惩罚项。SAGA 算法流程图如图 5 所示。

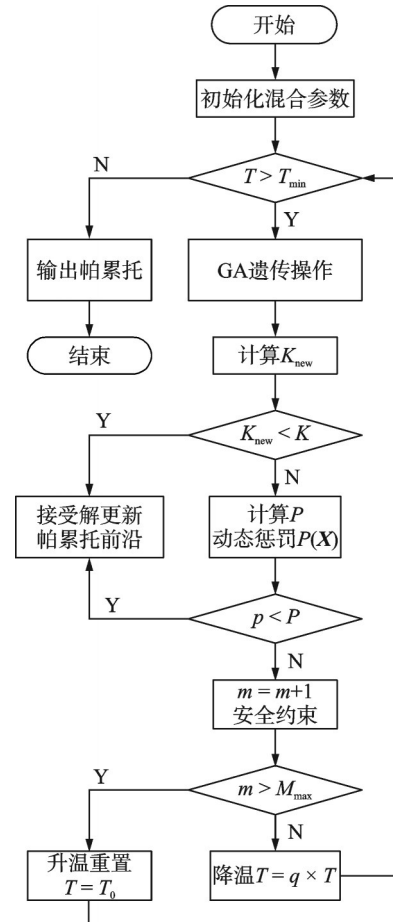


图 5 SAGA 流程图

Fig.5 SAGA flowchart

通过动态罚函数处理高度层约束

$$P(\mathbf{X}) = \sum_{k=1}^7 \omega_k(t) \cdot \Psi(g_k(\mathbf{X})) \quad (29)$$

(1) ω_1 设置为极大值

$$g_1(\mathbf{X}) = \max(0, \text{LTLS} - d_{ij}) \quad (30)$$

(2)管理类约束,动态权重, ω_2 设置为动态权重

$$g_2(\mathbf{X}) = \begin{cases} 0 & \text{若 } \text{FL} \in \{\text{东单西双}\} \\ 1 & \text{否则} \end{cases} \quad (31)$$

$$g_4(\mathbf{X}) = \max\left(0, \sum_{k=1}^{n_j-1} |\text{FL}_{k+1} - \text{FL}_k| - \Delta \text{FL}_{\max}\right) \quad (32)$$

(3)舒适性约束,软约束, ω_3 设置为渐进惩罚

$$g_3(\mathbf{X}) = \max(0, N_{\text{change}} - N_{\max}) \quad (33)$$

$$g_k(\mathbf{X}) = \max(0, |v - v_{\max}|) \quad (34)$$

$$\max(0, \alpha - \alpha_{\max}) \quad (35)$$

$$\max(0, \|\Delta p\| - \Delta_{\max}) \quad (36)$$

选择航段 k ,按照固定步长调整高度层。其马赫数服从高斯扰动 $\Delta Ma \sim \mathcal{N}(0, \sigma_r)$,质量状态按照航行积分形式计算并判断其质量状态,初始温度为 T_0 。

4.3 混合邻域扰动策略

4.3.1 解空间的生成

生成候选高度,如果高度超出[FL290,FL410],则取反向调整。马赫数采用基于高斯分布的变异算子,变异强度 σ 随迭代次数动态衰减

$$\sigma(t) = \sigma_{\max} - (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) \cdot \frac{t}{\tau} \quad (37)$$

对当前马赫数实施 $N(0, \sigma^2)$ 扰动后,通过截断处理确保结果在[0.78, 0.85]的典型巡航区间。

设计融合燃油消耗 R 和飞行时间 τ 的创新型评价函数

$$\Phi = a \cdot \exp\left(-\frac{R}{R_{\text{ref}}}\right) + b \cdot \ln\left(\frac{\tau_{\text{ref}}}{\tau}\right) \quad (38)$$

式中 a, b 为自适应权重系数。采用改进的 ϵ 支配准则,当 $\Delta\Phi > 0$ 时接受新解,否则以概率 P_{accept} 接受劣解

$$P_{\text{accept}} = \exp\left(-\frac{\Delta\Phi}{\text{Temp}}\right), \Delta\Phi = \Phi_{\text{new}} - \Phi_{\text{current}} \quad (39)$$

4.3.2 SA 调度机制

(1)升温处理($t \leq 0.3T$)

$$\text{Temp}(t) = \text{Temp}_0 \cdot e^{-\lambda_1 t} \quad (40)$$

$$\lambda_1 = \frac{\ln(\text{Temp}_0 / \text{Temp}_{\text{mid}})}{0.3T} \quad (41)$$

(2)降温处理($0.3T < t \leq 0.8T$)

$$\text{Temp}(t) = \text{Temp}_{\text{mid}} \cdot \left(1 - \frac{t - 0.3T}{0.5T}\right)^{0.5} \quad (42)$$

5 实例分析

5.1 全国复杂度

本节选取国家空管系统 2023 年 6 月某日真实航行数据作为研究案例,对所提出的航迹优化模型进行验证。其中包含约 25.9 万条航班四维轨迹信息。经去噪处理后得到 263 个全国机场点、2 200 余个航路点分布图,如图 6 所示。

求解时以现行航迹为初始解,运用本文模型算法,最终得到优化后的航线。以编号 284 号航班为例,该航班由英国航空公司执飞,由中国香港飞往英国伦敦,图 7 为其原航迹以及优化后航迹对比图。

图 8,9 展示优化前后全国空域复杂度。优化后主热点收敛、次级斑块削弱,等值线更稀疏且外缘回缩;高等级区域面积与梯度均下降,表明高度



图 6 中国机场点与航路点分布图

Fig.6 Distribution of airports and airway points in China

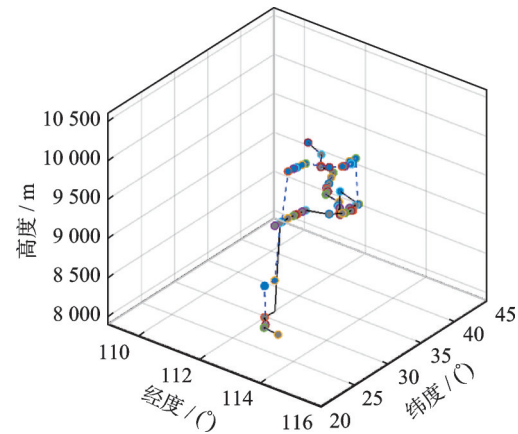


图 7 284 号航班优化前后航迹对比图

Fig.7 Comparison of flight 284's route before and after optimization

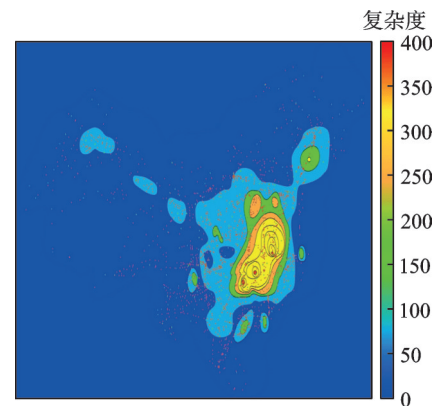


图 8 优化前全国范围复杂度热力图

Fig.8 Nationwide complexity heatmap before optimization

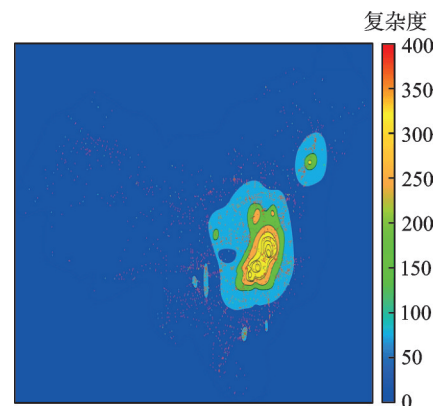


图 9 优化后全国范围复杂度热力图

Fig.9 Nationwide complexity heatmap after optimization

层分配有效减少同窗时空重叠与潜在冲突,全国复杂度整体回落。图 10 展示了全国范围平均复杂度的优化前后分布,优化后各时段值普遍低于基线,尤其 10~20 时高峰段降幅较明显。图 11 为所提取的某高峰时间段经纬度-高度-时间四维复杂度图,颜色由蓝至红表示时间先后,航迹主要聚集于若干固定高度层且在东部区域密集,纵向离散度有限。

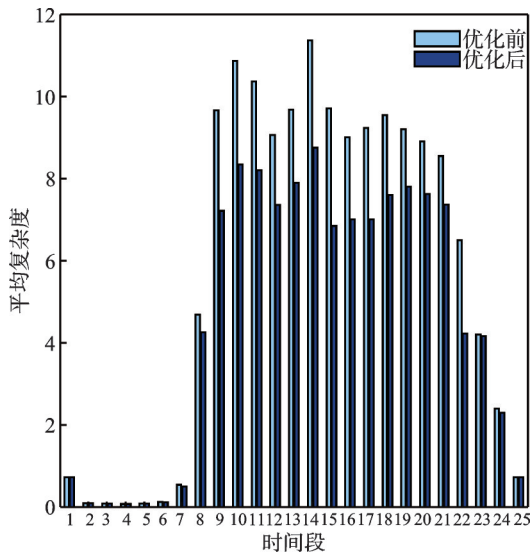


图 10 全国范围平均复杂度的优化前后分布

Fig.10 Distribution of average complexity nationwide before and after optimization

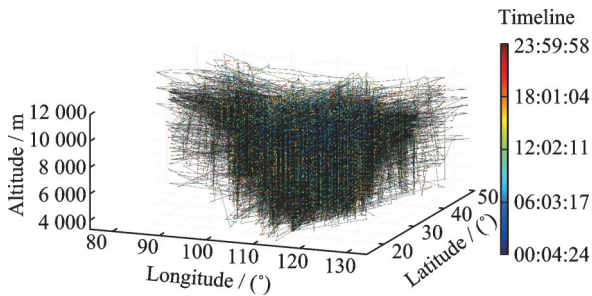


图 11 某高峰时间段经纬度-高度-时间四维复杂度图

Fig.11 Four-dimensional complexity diagram of latitude-longitude-altitude-time during a certain peak period

对比各航空器的实际运行路径数据和优化后所得路径数据的全国范围复杂度来看,其复杂度平均值减小了 19.82%,大幅度地减小了空中交通的复杂度状况,很大程度地减小了拥挤程度。

图 12 统计了优化前后各区间段的复杂度区域分布数量:本文将复杂度划分为 6 个等级(I~VI,由低到高)。对比可见,优化后高等级区域占比显著下降,极高等级斑块明显收缩;低等级区域占比上升,表明高度层的优化有效削弱了高拥挤区的聚集度并扩展了低复杂度覆盖面,空域态势较优化前呈现出明显缓和。

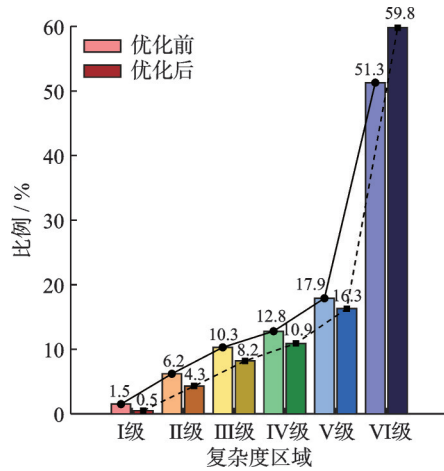


图 12 优化前后各区间段的复杂度区域分布数量图

Fig.12 Number of complexity distribution regions in each segment before and after optimization

5.2 排放分析

本文针对全国飞机巡航阶段污染物排放情况开展分析,聚类得到 11 类主流机型,并获得航班在航路点之间的优化前 5 种污染物的排放量如图 13 所示。

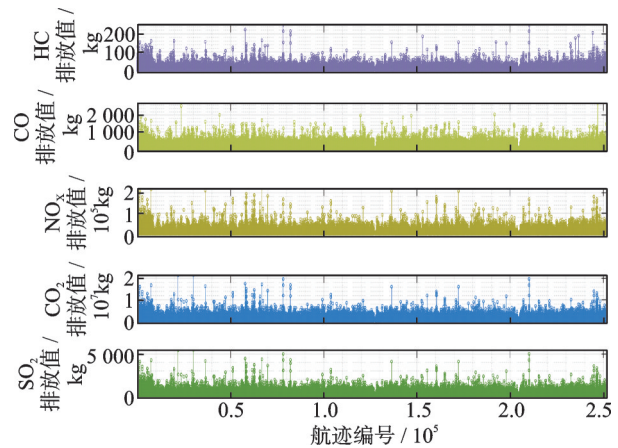


图 13 5 种污染物排放计算结果

Fig.13 Calculation results of five pollutant emissions

通过对航迹优化前后航班运行数据进行比对分析,航迹优化对飞行器巡航阶段的污染物排放谱系产生差异性影响。优化后的飞行高度更接近于理论最佳巡航高度,使得发动机在更高效的工况区间运行,提升了燃油燃烧效率。在降低关键污染物排放强度方面,NO_x 排放强度降低最为显著,达到 0.75%;CO 排放强度下降 0.146%,该降幅主要归因于燃烧室工作温度的降低。此外,CO₂ 和 SO₂ 的排放强度分别减少了 0.473% 和 0.484%,而 HC 排放则降低了 0.33%。由此可以看出,在降负荷的过程中燃烧趋近于更完全、更充分的燃烧状态。但是含氯化合物的排放变化处于测量误差范围之内,表明航迹优化并没有引起其含量明显变化。

由于航迹优化可以提高燃油效率,因此对第一类污染物的影响大一些,NO_x和CO的排放水平主要受控于燃烧过程的完全程度;而SO₂及HC的生成则更易受到燃料固有杂质含量及燃烧温度分布的影响。航迹优化通过改善燃烧效率,对前一类污染物(NO_x,CO)的影响尤为突出,因此不同污染物对飞行工况优化的响应呈现明显分化。图14给出各污染物的高度分布剖面:排放占比随高度呈多峰变化,中高空贡献占优、低空次之,峰值位置随时段略有迁移。图15为优化前后高度-时段排放热力图:可见高强度条带亮色面积整体收缩、低高度层显著降温,主峰时段位置基本保持不变。

实验结果显示了机型高度匹配对于控制污染物排放的系统影响。运用机型匹配最优高度方案

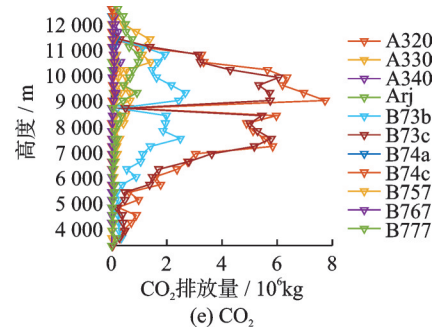


图14 各污染物的高度分布剖面

Fig.14 Vertical distribution profiles of various pollutants

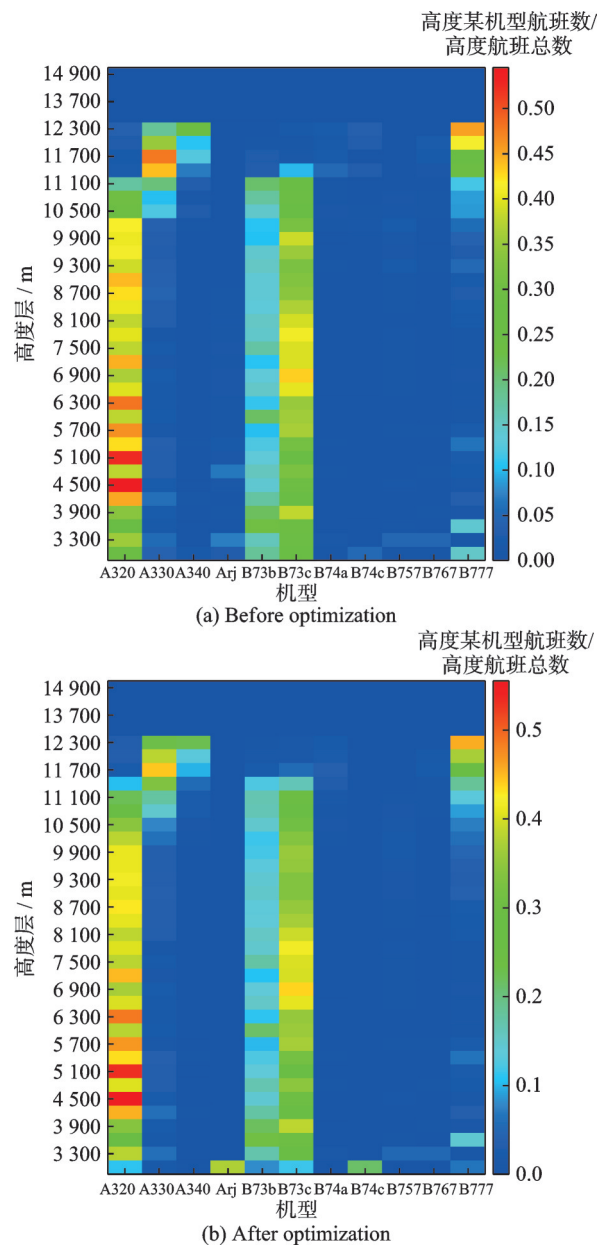
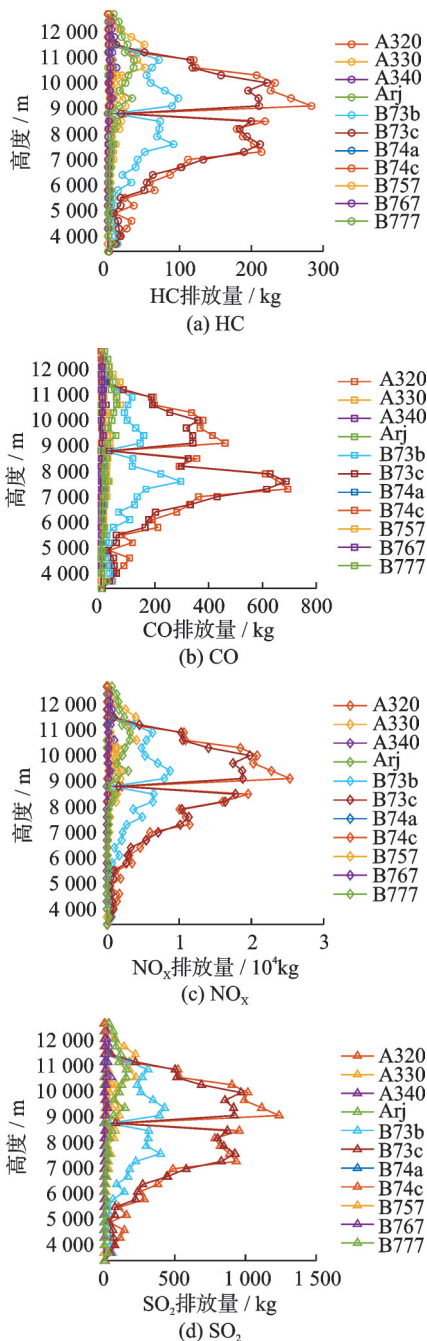


图15 优化前后高度-时段排放热力图

Fig.15 Heatmap of emissions by height and time period before and after optimization

后总体排放实现了协同下降。进一步看,优化后整体高度分布更为集中,明显收拢了各类机型排放高值区,并大幅削减了巡航阶段高度指令下发次数,

降低空中调配复杂程度,这反映了高度优化可以使得航空器动力参数(推力、迎角、总压等)得到大幅提升。航线上的客机基本处于临近最佳气动效率状态,有助于客机降低航程中的燃油消耗。位于优化层位飞机相对应的高度范围区域内的温度场环境较好地抑制某类温度敏感型污染物的形成。宽体客机在优化后的高层巡航包线内的动力性能更佳,即对应的燃烧组织和燃烧过程更加稳定高效。不同污染物对高度的优化响应各具差异性,反映了污染物的源生成机制不同:气动性能峰值高度和关键污染物的排放低谷对应高度具有空间契合性;高空低温大气有效抑制高温反应型污染物的生成;对于完全燃烧的污染物而言,随着飞行高度层环境稳定性水平的提升,污染物质的排放水平也呈现了系统性的负相关变化规律。从机型匹配角度考虑,则属于多污染物的多重来源空间协同控制。

根据优化前后各机型在各高度占比的热力图所示,各机型在各自最优经济高度进行调配。优化后,各机型在对应的最优经济高度区间的分布更趋近预期的最优范围。机型在适配高度的占比增加,各机型在最优经济高度占比扩大,长期来看,可以累计降低运营成本。

5.3 计算效率与收敛特性

为评估在仅巡航阶段实施高度优化时的求解效率与收敛特性,选取全国规模的航迹样本(共 251 364 条)开展对比实验。考虑到污染物削减幅度显著小于复杂度降低幅度,本节以复杂度降低率作为目标函数相对改进的代表量展开分析。权重设置与前文一致,默认 $\lambda = 0.6$,本节实验与前文实验保持一致。

5.3.1 统一设置与评价指标

4 种启发式算法采用统一规模与常用超参数。(1)GA:种群 $N = 200$,交叉率 $p_c = 0.75$,变异率 $p_m = 0.18$,精英保留 10%;(2)粒子群优化(Particle swarm optimization, PSO):粒子数 $N = 200$,惯性权重 ω 由 0.95 非线性递减至 0.20, $c_1 = 1.0$, $c_2 = 2.0$;(3)SA:初始温度 $T_0 = 100$,降温系数 $\alpha = 0.985$,马尔可夫链长度 $L = 100$;(4)SAGA:在 GA 框架上对当代精英解施加自适应温度的退火邻域搜索(其余与 GA 保持一致)。其中运行环境与记录方式使用单机、单线程 Python;时间窗 8 h,采样步长 60 s;每种算法独立重复 $R = 24$ 次,用于统计均值与 95% 置信区间。为便于统计,并设置早停判断:若连续 30 min 改进小于 0.1%,记为达到稳定平台。

5.3.2 迭代次数实验

如图 16 所示目标函数在“高度-复杂度”解空间中的宽谷形地貌,以及 4 种算法目标函数的比较。4 条迭代曲线总体单调下降并逐步平台化,其中 SAGA 前期依托交叉与自适应变异实现并行化全局探索,复杂度自约 140 在 80~120 代内迅速降至 80 左右,随后在基于 Metropolis 准则的温度自适应邻域搜索作用下维持渐进改进,最终稳定于 70 附近,呈现“快速下降-稳定收敛/逼近”的二阶段收敛特性,从而有效缓解高维非线性约束、多峰目标带来的早期陷入与后期停滞问题。对比之下,GA 受群体多样性衰减与选择压力影响,中后期易在邻域发生振荡与滞留,在终端区航班流时空耦合优化背景下,迭代末期“解振荡”发生率较基线实验约增加 15%,且中期常徘徊于 90 ± 5 的区间。PSO 由于速度惯性与群体认知项耦合,易在 90~100 区间形成缓慢波动与平稳,并呈现明显的规模敏感性,致使航路网络流量分配效率下降约 37.2%。SA 因采用单一邻域搜索,虽能在前 100 代较快降至 100 以

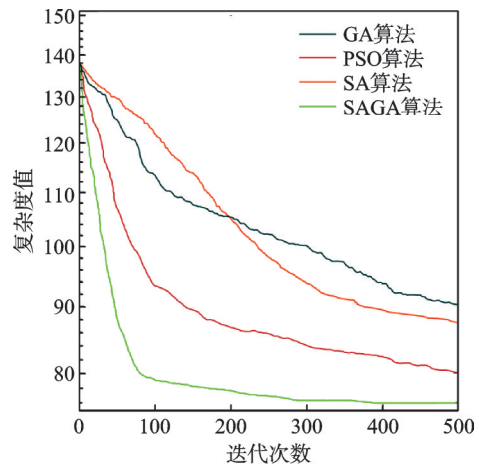
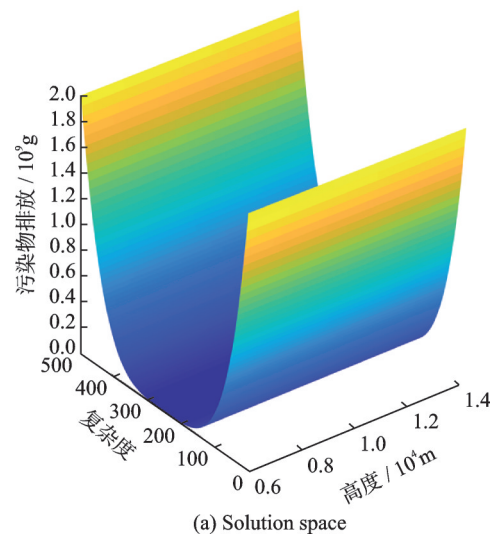


图 16 解空间与算法目标函数比较

Fig.16 Solution space and comparison of the four algorithms

下,但随温度衰减其局部开发能力明显下降,后期改进趋缓,最终收敛水平显著低于SAGA。SAGA的性能优势主要源于:遗传算子与耦合退火配合并以步长自适应机制调节搜索节奏,突破高维多峰约束下的全局寻优难点;前期遗传的广域探索,后期退火的深度开发形成闭环式渐进收敛;温度自适应与劣解接受控制显著抑制优化波动并提升瞬态响应,使优化波动幅度约为GA的一半。在相同实验口径下,SAGA在收敛速度与最终收敛质量上均占优,GA/PSO次之、SA相对较弱;该混合范式能够在空域复杂度时空调控任务中同时满足精度、稳定性与算时效率的工程需求,并为面向多目标强耦合的空管应用提供可行的优化模型基础。

5.3.3 时间实验

图17显示各算法迭代过程的复杂度降低率均值及置信带,在8h时域内,记录4种算法的Any-time曲线 $\Delta J(t)$ 的均值与95%置信区间如图17所示,并用 t_{90} 与里程碑时间量化比较。为覆盖大规模、单线程场景的真实用时,采用如下速度标定: t_{90} (SAGA, GA, PSO, SA) \approx (130, 180, 210, 300) min; t_{95} (SAGA, GA, PSO, SA) \approx (169, 234, 273, 390) min。在相同时间预算下,达到阈值的先后顺序为SAGA \rightarrow GA/PSO \rightarrow SA。

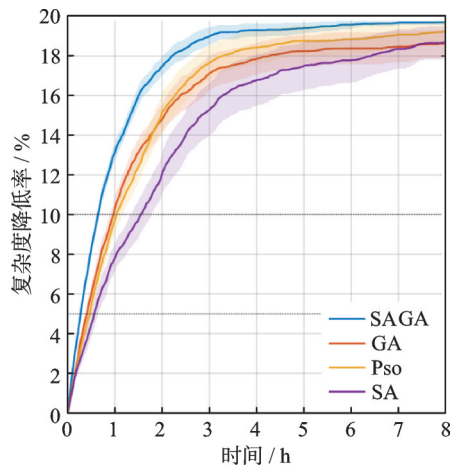


图17 算法迭代过程的复杂度降低率均值及置信区间
Fig.17 Average complexity reduction rate and confidence interval of the four algorithms' iteration processes

6 结 论

本文通过对民航运行绿色研究的学习理解,从全国范围大规模巡航阶段的航迹优化入手,研究飞机性能、飞行数据、环境模型等特征,确定油耗模型。在此基础上以提高大规模巡航阶段的环境友好度为目标,建立航行四维模型。利用模拟退火遗传算法求解,将得到巡航阶段的航空器绿色优化航迹与现行航迹进行对比研究。结果表明该模型能

同时有效减少排放、降低空中交通复杂度,优化后航迹的排放较优化前全天总体平均空中交通复杂度降低了19.82%;同时污染物排放总量呈现多维度显著减少,其中HC排放降低0.33%,CO排放降低0.14%,NO_x排放降低0.75%,SO₂排放降低0.48%,CO₂排放降低0.47%,这有利于绿色航空的发展。

目前本研究是基于航空器无故障等相对稳定状态下的优化,对于实际运行中航班的不确定性,如气象条件变化、航空器突发故障等对复杂度和污染物排放的动态影响,还需结合更多实际因素进行深入研究,以进一步完善优化模型,提升其在复杂真实场景中的适用性。

参考文献:

- [1] International Civil Aviation Organization (ICAO). Annual Report 2024: The World of Air Transport in 2024[R]. Montreal, Canada: International Civil Aviation Organization, 2024.
- [2] SCHUMANN U, GRAF K, MANNSTEIN H. Potential to reduce the climate impact of aviation by flight level changes[C]//Proceedings of 3rd AIAA Atmospheric Space Environments Conference. Honolulu, USA: AIAA, 2011: 3376.
- [3] YOKOYAMA N, SUZUKI S. Modified genetic algorithm for constrained trajectory optimization[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2005, 28(1): 139-144.
- [4] ZHANG X Y, XIA S, LI X Z, et al. Multi-objective particle swarm optimization with multi-mode collaboration based on reinforcement learning for path planning of unmanned air vehicles[J]. Knowledge-Based Systems, 2022, 250: 109075.
- [5] HAMDAN S, JOUINI O, CHEAITOU A, et al. Air traffic flow management under emission policies: Analyzing the impact of sustainable aviation fuel and different carbon prices[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2022, 166: 14-40.
- [6] GALLINA P, GASPARETTO A. A technique to analytically formulate and to solve the 2-dimensional constrained trajectory planning problem for a mobile robot [J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2000, 27(3): 237-262.
- [7] XUE M, ATKINS E. Terminal area trajectory optimization using simulated annealing[C]//Proceedings of the 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, USA: AIAA, 2006: 1437.
- [8] DOUGUI N, DELAHAYE D, PUECHMOREL S, et al. A light-propagation model for aircraft trajectory planning[J]. Journal of Global Optimization, 2013, 56

- (3): 873-895.
- [9] SOLER-ARNEDO M, HANSEN M, ZOU B. Con-trail sensitive 4D trajectory planning with flight level allocation using multiphase mixed-integer optimal control [C]//Proceedings of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Boston, USA: AIAA, 2013:5179.
- [10] SIDIROPOULOS S, MAJUMDAR A, HAN K, et al. A framework for the classification and prioritization of arrival and departure routes in multi-airport systems terminal maneuvering areas [C]//Proceedings of the 15th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Dallas, USA: AIAA, 2015: 3031.
- [11] PIERRE S, DELAHAYE D, CAFIERI S. Aircraft trajectory planning by artificial evolution and convex hull generations [M]// Air Traffic Management and Systems II. Electronic Navigation Research Inst. Tokyo, Japan: Springer, 2017: 49-67.
- [12] ZHOU J, CAFIERI S, DELAHAYE D, et al. Optimal design of SIDs/STARs in TMA using simulated annealing [C]//Proceedings of IEEE/AIAA 35th Digital Avionics Systems Conference. Sacramento, USA: IEEE, 2016: 7778099.
- [13] ZHOU J, CAFIERI S, DELAHAYE D, et al. Optimization-based design of departure and arrival routes in terminal maneuvering area[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2017, 40(11): 2889-2904.
- [14] XU M, HU M H, ZHOU Y, et al. Multi-aircraft cooperative strategic trajectory-planning method considering wind forecast uncertainty[J]. Sustainability, 2022, 14(17): 10811.
- [15] ZHOU Y, HU M H, YANG L, et al. Autonomous and collaborative trajectory planning for traffic complexity management[J]. IET Intelligent Transport Systems, 2023, 17(5): 992-1008.
- [16] 魏志强, 王超. 航班飞行各阶段污染物排放量估算方法[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(6): 48-52.
WEI Zhiqiang, WANG Chao. Estimating method of pollution emissions for scheduled flight in different phases[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(6): 48-52.
- [17] 吴金栋, 魏志强. 航空器巡航状态下污染物排放量的计算[J]. 交通信息与安全, 2011, 29(5): 50-52.
WU Jindong, WEI Zhiqiang. Calculation of pollution emission standard for aircraft cruising[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2011, 29(5): 50-52.
- [18] SOLER-ARNEDO M. Fundamentals of aerospace engineering[M]. 2nd ed. Madrid, Spain: Universidad Carlos III de Madrid, 2023.
- [19] ZHOU J, CAFIERI S, DELAHAYE D, et al. Optimal design of SIDs/STARs in TMA using simulated annealing[C]//Proceedings of 2016 IEEE/AIAA 35th Digital Avionics Systems Conference. Sacramento, USA: IEEE, 2016: 1-8.
- [20] 程凝怡, 刘志乾, 李昱奇. 一种基于Dijkstra的多约束条件下智能飞行器航迹规划算法[J]. 西北工业大学学报, 2020, 38(6): 1284-1290.
CHENG Ningyi, LIU Zhiqian, LI Yuqi. Path planning algorithm of dijkstra-based intelligent aircraft under multiple constraints[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2020, 38(6): 1284-1290.
- [21] 王中凤燕. 航空器绿色轨迹优化研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
WANG Zhongfengyan. Aircraft trajectory optimization based on environmental impact[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.
- [22] GUO P F, XU W P, ZHU Y C, et al. Multi-UAV collaborative path planning based on improved genetic algorithm[C]//Proceedings of 2021 International Conference on Autonomous Unmanned Systems (ICAUS 2021). Singapore: Springer, 2022: 2648-2657.
- [23] ANTONIO L M, COELLO C A C. Use of cooperative coevolution for solving large scale multiobjective optimization problems[C]//Proceedings of 2013 IEEE Congress on Evolutionary Computation. Cancun, Mexico. IEEE, 2013: 2758-2765.
- [24] ZHENG J B, DING M H, SUN L, et al. Distributed stochastic algorithm based on enhanced genetic algorithm for path planning of multi-UAV cooperative area search[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2023, 24(8): 8290-8303.
- [25] 王红勇, 黄佳文, 姜高扬, 等. 基于空中交通复杂度的大规模航迹优化[J/OL]. 北京航空航天大学学报, 2024. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0069>.
WANG Hongyong, HUANG Jiawen, JIANG Gaoyang, et al. Large-scale trajectory optimization based on air traffic complexity[J/OL]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0069>.

(编辑:张蓓)