

DOI:10.16356/j.1005-2615.2019.06.005

危险天气下航班等待与改航的实时集成优化

陈可嘉 陈琳琳

(福州大学经济与管理学院,福州,350116)

摘要: 为了提高航班准点率,降低危险天气对航班飞行的影响,同时考虑等待策略和改航策略,进行实时空中交通流量管理的研究。以改航起始点至改航结束点间的总航行时长最短为目标,安全可行性、技术可行性为约束,建立了数学模型,并设计了两阶段求解算法,先基于遗传算法优化等待时长和改航路径,再基于“化曲为直”和“二分法”的思想调整改航路径,得到了最佳等待时长和改航路径。仿真结果表明,该算法得到的实时优化结果优于几何切线法;相比静态改航,更能提高空域利用率;相比单独考虑等待策略,总航行时长降低了17.04%;相比单独考虑改航策略,总航行时长降低了3.98%;验证了危险天气下航班等待时长与改航路径实时集成优化在实时空中交通流量管理中的有效性。

关键词: 空中交通规划与管理;等待时长与改航路径;两阶段求解算法;集成优化;危险天气

中图分类号: V37 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2019)06-0763-09

Aircraft Holding and Rerouting Real-Time Integrated Optimization Under Adverse Weather

CHEN Kejia, CHEN Linlin

(School of Economics and Management, Fuzhou University, Fuzhou, 350116, China)

Abstract: To improve the punctuality rate of flights and reduce the impact of adverse weather on flights, the study of real-time air traffic flow management is carried out, considering holding strategy and rerouting strategy. A mathematical model which minimizes the total flight duration from the start point of the rerouting to the end point of the rerouting is established, and a two-stage algorithm is proposed to solve it. First, a genetic algorithm is applied to optimize the holding time and rerouting path. Then, the path is adjusted to be the best one based on the idea of “transformation from curl to straight” and “dichotomy”. The simulation results show that the proposed algorithm could find better solutions than the geometric tangent method; compared with static diversion, airspace utilization is improved; compared with the single holding strategy, the total flight duration is reduced by 17.04%; compared with the single rerouting strategy, the total flight duration is reduced by 3.98%. It verifies the effectiveness of aircraft holding time and rerouting path real-time integrated optimization under adverse weather in the real-time air traffic flow management.

Key words: air traffic planning and management; holding time and rerouting path; two-stage algorithm; integrated optimization; adverse weather

基金项目: 国家社会科学基金(18BGL003)资助项目。

收稿日期: 2018-10-29; **修订日期:** 2019-01-01

作者简介: 陈可嘉,男,教授,博士生导师,现任福州大学经济与管理学院副院长。主要研究方向:航空运输系统工程等。2010年入选首批“福建省高校杰出青年科研人才培养计划”;2011年入选“教育部新世纪优秀人才支持计划”。主持完成国家自然科学基金项目、国家社会科学基金项目、福建省社科基金重点项目等课题30余项;正式出版专著1部、教材1部,在国内外重要学术刊物和国际学术会议上发表学术论文90余篇(其中被SCI、Ei检索40余篇);获得省部级优秀成果奖1项,国际会议优秀论文奖4项。

通信作者: 陈可嘉, E-mail: kjchen@fzu.edu.com。

引用格式: 陈可嘉,陈琳琳. 危险天气下航班等待与改航的实时集成优化[J]. 南京航空航天大学学报,2019,51(6):763-771. CHEN Kejia, CHEN Linlin. Aircraft Holding and Rerouting Real-Time Integrated Optimization Under Adverse Weather[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019, 51(6): 763-771.

2017年2月15日,中国民航局发布《中国民用航空发展第十三个五年规划》,其中特别强调了航班准点率将从2015年的67%提高到2020年的80%。然而危险天气作为导致航班延误的首要原因^[1],仍然是提高航班准点率的难点之一。在面对危险天气构成的飞行受限区域时,国内传统的做法是让航班地面等待直至原航路恢复正常,而美国空管部门则提出了改航策略。

地面等待是等待策略中对未起飞的航班所采取的措施,对于已起飞的航班则采取空中等待,其本质都是顺延航班,直到原航路不受影响时,沿着原航路继续飞行。Jones等指出将终端区等待延迟转移到航路飞行阶段能够降低燃料消耗^[2];吴刚等通过优化地面等待策略中机场群航班时刻与频率,减少航班延误^[3];Tian等人通过到达定位分配问题制定多目标终端区域资源分配,最小化航空器在终端区的等待时间^[4];Ozgun和Cavcar提出空中交通流量管理的0-1整数规划模型,通过地面等待选择最佳起飞时间,以避免飞行冲突平衡机场容量和需求^[5];杨尚文提出了随机性协同时隙分配策略,与随机型地面等待经典模型相比,实现了时隙资源的有效分配^[6];王来军等考虑了地面等待的随机情形,对地面等待问题随机性的表示方法、发生机理及其处理方法进行了研究^[7];赵向领等设计了协同虚拟队列优化排序模型,实现了利用机位等待代替跑道起飞排队等待,减少航班延误损失^[8];Ng和Lee考虑机场终端区机载延迟和等待策略,提出了基于人工蜂群算法的启发式算法,用于解决航班着陆问题^[9]。

改航是指通过建立安全、高效的临时航线^[10],绕过危险天气飞行受限区域的一种策略^[11]。王飞和王红勇基于遗传算法,研究了单个航空器在静态危险区下的改航路径规划问题^[12];Savkin和Huang以最短飞行路径为目标,构建算法解决静态危险天气飞行受限区域下最优改航路径规划问题^[13];Mukherjee和Hansen验证了动态改航比起静态改航延误成本下降10%~15%,并提出了一个随机整数规划模型,用于重新规划受恶劣天气影响的飞行路线^[14];近年来,改航研究已逐渐从静态模型构建转为动态模型构建,Antony等人使用数据挖掘技术训练模型以自动预测改航路径^[15];Hauf等基于DIVMET模型和几何切线法对危险天气下航班动态改航进行了指导^[16-17];Zhang和Mahadevan构建了支持向量回归替代模型,考虑不确定变量下的动态改航^[18];张兆宁和魏中慧基于多重Morphin算法,提出终端区三维实时改航方法^[19];王莉莉和王鑫针对移动式收缩危险区,提出了基于启发式算法的改航策略^[20]。

综上,等待策略是从时间维度协同安排各航班等待时长;改航策略则是从空间维度重新规划航行路径。单独从时间维度考虑等待策略,在面对突发危险天气飞行受限区域时显得比较被动,不利于降低航班延误率;单独从空间维度考虑改航策略,虽能有效缓解航班延误,但是会产生较长的绕飞路线^[21]。因此,有必要将等待策略与改航策略进行集成优化,利用两者优势互补进行空中交通流量管理。已有学者提出从时间和空间两个维度综合考虑终端区航班起飞和着陆的延误优化问题,其研究表明重新安排时间和路线的实时集成优化可以进一步减少起飞和着陆延误传播^[22]。终端区的延误时长优化问题主要关注机场跑道等资源的有效利用,而危险天气下航班总延误时长优化问题则与危险天气的实际变化情况密切相关,因此,本文借鉴文献^[22]的集成优化思想,重点关注危险天气下航班等待与改航的集成优化问题。

现有文献已经验证了危险天气下动态模型所得结果优于静态模型^[14],且建立动态模型时应强调实时性以提高空域利用率^[23],基于此,本文构建危险天气下航班等待时长与改航路径的实时集成优化(Aircraft holding time and rerouting path real-time integrated optimization under adverse weather, AHTRPRIO-AW)模型,设计遗传算法求解该模型,并通过实例仿真验证其有效性。

1 模型构建

1.1 问题描述

考虑二维平面内的空中交通网络模型,整个网络模型由机场节点、导航台节点、扇区及航段组成,如图1所示。航班从起飞机场(节点1)经过导航台(节点8,9)和机场(节点12),最终到达目的机场(节点13),各节点间的连线构成航段,所经过的空域范围根据空中交通管制要求被划分为若干扇区。若航段9~12受危险天气影响,容量下降,则航班正常飞行也受到影响,只能选择等待或改航,航班延误由此产生。AHTRPRIO-AW研究的目的是降低航班总延误时长(即航班总航行时长最短):通过引入备选改航时点概念,结合天气雷达数据(更新周期6 min),实时描述航空器与危险天气飞行受限区域的位置关系,为航空器分配最佳的等待时长和改航路径,使航空器在最佳备选改航时点开始改航,绕过危险天气飞行受限区域后回到原航线。根据国内现行绕飞雷暴的规定,本文的危险天气飞行受限区域是由危险天气所在范围向外拓宽25 km的安全距离后确定的。

1.2 基本假设

(1)危险天气不影响改航起始点和结束点,且

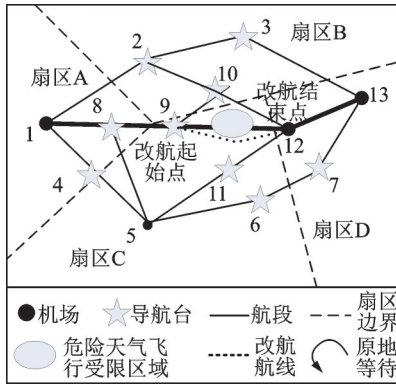


图 1 交通网络结构示意图

Fig. 1 Transportation network structure

未来短时间内危险天气飞行受限区域已知,可通过预测获得;

(2)改航航线不受空中交通管制影响;

(3)航空器改航速度不变,且不受其他航空器影响。

1.3 相关变量及符号说明

n 为空中交通网络中分配等待时长和改航路径的方案数; O_j 为方案编号, $j = 1, 2, \dots, n$; S 为雷达观测天气的时刻数; T 为观测时刻, $T = 0, 1, 2, \dots, S$, 每 6 min 为 1 个时刻; $Q(T)$ 为危险天气飞行受限区域在时刻 T 时的状态; T_{total} 为危险天气飞行受限区域影响原航线的总时长; Z_j 为方案 O_j 改航起始点至改航结束点间总航行时长; N_{w_j} 为方案 O_j 中等待时点数, N_{w_j} 取整数; T_{w_j} 为方案 O_j 中等待时长; N_{R_j} 为方案 O_j 中改航时点数, N_{R_j} 取整数; T_{R_j} 为方案 O_j 中改航时长; $a_{j,k}$ 为方案 O_j 中第 k 个备选改航时点, $k = 1, 2, \dots, N_{w_j}, \dots, (N_{w_j} + N_{R_j})$, 当 $k \leq N_{w_j}$ 时, $a_{j,k}$ 表示等待时点, 当 $N_{w_j} < k \leq N_{w_j} + N_{R_j}$ 时, $a_{j,k}$ 表示改航时点; $\beta_{j,k'}$ 为备选改航时点 $a_{j,k}$ 对应的转弯角, $k' = k - N_{w_j}$, $\beta_{j,k'}$ 为正表示沿逆时针方向改航, 为负表示沿顺时针方向改航; $S_{j,k'}$ 为方案 O_j 中前 k' 个转弯角累计值; $d_{N_{R_j}}$ 为方案 O_j 中航空器在最后一个改航时点所在位置到改航结束点的距离; v 为航空器飞行速度; l_{min} 为相邻改航时点航空器所在位置间的距离, 为满足最小航段要求, 令 $l_{min} = 7.4^{[16]}$; L 为原航线长度; $N_{R_{Max}}$ 为改航时点数上限; p 为改航点, $(p_{j,1}, p_{j,2}, \dots, p_{j,N_{R_j}})$ 为方案 O_j 中改航点序列; $l(p_{j,i}, p_{j,i+1})$ 为方案 O_j 中改航点间的航段, $i = 1, 2, \dots, N_{R_j} - 1$ 。

1.4 数学模型

以改航起始点至改航结束点间的总航行时长最短为目标建立 AHTRPRIO-AW 模型如式(1—10), 其中, 式(7—9)是根据航空器的飞行性能设置的约束条件, 可根据航空器实际允许的转弯角度调整约束值, 本文约束值取 90° 。

$$\text{obj. min} Z_j = \min(T_{w_j} + T_{R_j}) \quad \forall j \quad (1)$$

式中

$$T_{w_j} = a_{j,N_{w_j}} \quad \forall j \quad (2)$$

$$T_{R_j} = a_{j,(N_{R_j}+1)} + \frac{d_{N_{R_j}}}{v} \quad \forall j \quad (3)$$

$$\text{s.t. } T_{w_j} \in [0, T_{total}] \quad \forall j \quad (4)$$

$$l_{min} \times N_{R_j} \leq (1 + 30\%) \times L \quad \forall j \quad (5)$$

$$a_{j,k} = \frac{l_{min}}{v} \times (k - 1) \quad \forall j, k \quad (6)$$

$$|\beta_{j,k'}| < 90 \quad \forall j, k' \quad (7)$$

$$S_{j,k'} = \sum_{n=1}^{k'} \beta_{j,n} \quad \forall j, k' \quad (8)$$

$$|S_{j,k'}| < 90 \quad \forall j, k' \quad (9)$$

$$l(p_{j,i}, p_{j,i+1}) \cap Q(T) = \emptyset \quad \forall j, i \quad (10)$$

式(1)表示目标函数, 改航起始点至改航结束点间的总航行时长由等待时长与改航时长构成; 式(2)指等待时长即最后一个等待时点对应的的时间; 式(3)指改航时长由最后一个改航时点对应的的时间和最后一个改航时点航空器所在位置到改航结束点所需的飞行时长构成; 式(4)指等待时长不超过危险天气影响原航线的总时长; 式(5)限定改航时点数, 保证改航航线不超过原航线 L 的 30%^[24]; 式(6)表示 k 个备选改航时点对应的的时长; 式(7)指改航转弯角不超过 90° ; 式(8)定义累计转弯角和改航转弯角间的关系; 式(9)指累计转弯角不超过 90° ; 式(10)指危险天气飞行受限区域约束, 即任意航段不能穿越危险天气飞行受限区域。

2 算法设计

AHTRPRIO-AW 属于集成优化问题, 并且还要考虑危险天气的实时影响, 故传统的启发式算法在解决该问题上存在一定局限。遗传算法作为一种模拟自然进化寻找最优解的方法, 能够实现整个解空间上的分布式随机搜索, 适用于解决复杂优化问题。为此, 本文在遗传算法基础上设计了适用于 AHTRPRIO-AW 模型的两阶段求解算法(图 2): 初始等待时长和改航路径的生成及优化、改航路径调整。其中, 为得到符合实际飞行要求的解, 引入修复算子; 为保留最优个体的同时不失去种群丰富度, 引入诱导概率系数; 为最大程度减少绕飞距离, 引入路径调整模块。

2.1 初始方案生成及优化

2.1.1 染色体设置

由于 AHTRPRIO-AW 问题需同时优化等待时长和改航路径, 即方案 O_j 的航班等待时点数 N_{w_j} 和改航转弯角 $\beta_{j,k}$, 其中, N_{w_j} 又影响后续 $\beta_{j,k}$ 值选择, 故提出一种“分块式”染色体设置方法。染色体

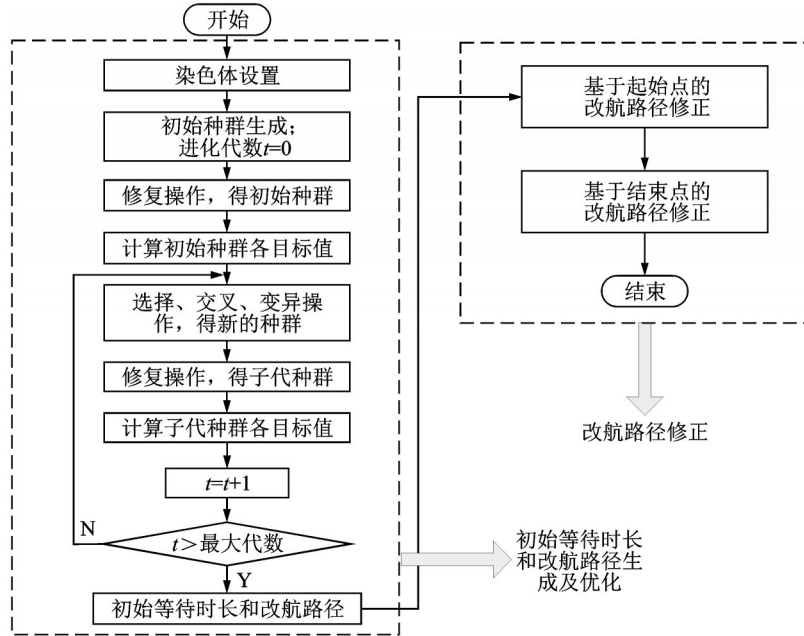


图2 算法流程

Fig. 2 Algorithm flow chart

j 对应方案 O_j ,以等待时点数 N_{wj} 和累计转弯角 $S_{j,k}$ 进行编码,染色体第一块为 N_{wj} 编码,第二块为 $S_{j,k}$ 编码,可表达为: $\{N_{wj}, S_{j,1}, S_{j,2}, S_{j,3}, \dots, S_{j,N_{Rj}}\}$,如图3。染色体采用二进制进行编码。

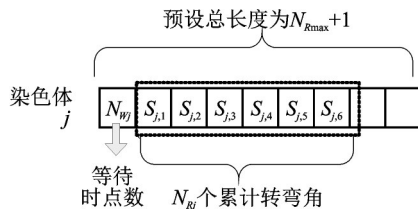


图3 种群染色体示意图

Fig. 3 Population chromosome schematic

2.1.2 随机种群生成

根据式(5)确定改航时点数上限 $N_{R\max}$,并据此预设染色体的总长度,再按照上述染色体设置方法,随机生成 n 个染色体,构成种群。

2.1.3 修复操作

为保证航线可行性,在遗传算法中引入修复算子。第1步:对生成的累计转弯角进行排序,从飞行受限区域左上方绕过则采用降序排序,从飞行受限区域右下方绕过则采用升序排序,保证航线不迂回;第2步:根据式(7—9)对排序后的转弯角进行调整,保证技术可行性;第3步:计算航空器在最后一个改航时点所在位置到改航结束点的距离 $d_{N_{Rj}}$,若 $d_{N_{Rj}} > 2 \times l_{\min}$ 且 $N_{Rj} < N_{R\max}$ 则继续分配改航时点,保证航空器最终回到改航结束点上,减少对其他航线的影响。基于上述3个步骤,返回修复后对

应的转弯角序列 $\{\beta'_{j,1}, \beta'_{j,2}, \dots, \beta'_{j,N_{Rj}}\}$ 和改航时点数 N'_{Rj} 。

2.1.4 适应度函数和罚函数计算

由遗传算法中染色体适应度越高被遗传到下一代概率越大,确定染色体 j 的适应度函数 $f(j)$ 如式(11)

$$f(j) = \frac{10\,000}{Z_j} \quad \forall j \quad (11)$$

为保证改航路径可行,引入罚函数如式(12),要求染色体 j 满足式(10)约束,若不满足则直接对目标函数赋值10 000,大幅降低适应度,减小遗传到下一代的概率

$$Z_j = \begin{cases} T_{wj} + T_{Rj} & l(p_{j,i}, p_{j,i+1}) \cap Q(T) = \emptyset \\ 10\,000 & l(p_{j,i}, p_{j,i+1}) \cap Q(T) \neq \emptyset \end{cases} \quad (12)$$

$$\forall j, i$$

2.1.5 选择、交叉和变异操作

从上一代种群中随机选取两个染色体 j_1, j_2 ($j_1, j_2 \in j$),作为交叉和变异的母代。由于交叉、变异概率过小不利于产生新个体,交叉、变异概率过大不利于优良个体保留^[25],因此引入诱导概率系数以达到降低较优染色体参与交叉、变异的概率,提高其遗传到下一代的概率,如式(13)。所选染色体 j_1 的适应度越高于种群平均水平,其诱导概率系数 $r(j_1)$ 越小,同理可得 $r(j_2)$ 。

$$r(j_1) = \frac{\max[f(j)] - f(j_1)}{\max[f(j)] - \text{mean}[f(j)]} \quad \forall j \quad (13)$$

根据诱导概率系数 $r(j_1)$ 和 $r(j_2)$,确定染色

体交叉概率 $p_{c,j}$ 和变异概率 $p_{m,j}$ 。所选染色体 j_1 和 j_2 的诱导概率系数都小于 1, 则大幅降低其交叉概率; 所选染色体 j_1 和 j_2 有且仅有一个的诱导概率系数小于 1, 则适当降低其交叉概率; 否则交叉概率等于初始分配值 p_c ; 如式(14—15)。所选染色体 j 的诱导概率系数越小, 其变异概率也越小, 反之则提高其变异概率, 以此达到“精英保留”的目的, 如式(16)

$$p_{c,j_1} = p_{c,j_2} = \begin{cases} p_{c_0} \times r_{\min}^2 & r_{\max} < 1 \\ p_{c_0} \times r_{\min} & r_{\min} < 1, r_{\max} \geq 1 \\ p_{c_0} & r_{\min} \geq 1 \end{cases} \quad (14)$$

式中

$$\begin{cases} r_{\min} = \min [r(j_1), r(j_2)] \\ r_{\max} = \max [r(j_1), r(j_2)] \end{cases} \quad (15)$$

$$p_{m,j} = \begin{cases} p_{m_0} \times r(j) & r(j) \leq 1 \\ p_{m_0} \times 8 \times \left(1 - \frac{1}{r(j)}\right) & r(j) > 1 \end{cases} \quad (16)$$

当发生交叉操作时, 在母代染色体 j_1, j_2 上随机选取一个点作为交叉点, 将两者交叉点之后的染色体片段进行互换, 形成新的染色体 j'_1 和 j'_2 。当发生变异操作时, 随机选取该染色体上的一个点作为变异点, 改变其对应的编码值, 得到新的染色体。

依此选择、交叉、变异规则, 重复操作, 直至产生的新染色体数目达到 n 个, 构成新种群。

2.2 改航路径调整

初始等待时长和改航路径的生成及优化能够较好地实现式(1)的目标及式(2—10)的约束, 但是由于该路径是由一系列的改航点构成的, 虽然较为平滑, 却仍存在多余的曲线, 因此需对上述初始优化结果中的改航路径进行“化曲为直”调整, 以更好的实现式(1)的目标。

记 2.1 节中得到的初始最优方案为 O_{j_0} , 对应初始改航点序列: $(p_{j_0,1}, p_{j_0,2}, \dots, p_{j_0,i_2}, \dots, p_{j_0,RN'_0})$ 。借鉴“化曲为直”^[12]和“二分法”思想调整路径, 包括基于起始点的路径调整和基于结束点的路径调整。先对 2.1 节中得到的改航结果进行基于起始点的路径调整, 若调整后的改航路径中改航点多于 2 个, 则再对其进行基于结束点的路径调整, 否则所得结果即为最终调整结果。两个模块都要用到“化曲为直”的思想, 而“二分法”则只应用于后者。

2.2.1 基于起始点的路径调整

“化曲为直”指的是在满足危险天气飞行受限区域约束的前提下, 化曲边航段为直边航段, 以此缩短改航路径的一种思想。

根据“化曲为直”的思想, 从改航起始点开始, 按

照由远及近的连接顺序, 依次搜索满足式(10)约束的直边航段以代替曲边航段, 直至所有航段连接生成的新路径将改航起始点与结束点相连, 输出基于起始点的改航点序列: $(p'_{j_0,1}, p'_{j_0,2}, \dots, p'_{j_0,i_1}, \dots, p'_{j_0,i_2})$ 。

2.2.2 基于结束点的路径调整

“二分法”指的是在某区间内通过取中点缩小搜索范围以得到最终解的一种思想。“二分法”在改航路径调整中的应用可描述为: 假设初始改航点序列中依次有三个改航点 p_A, p_B, p_C , 且航段 $l(p_A, p_C)$ 不满足约束, 航段 $l(p_B, p_C)$ 满足约束, 则取 p_A 和 p_B 的中点 $p_{(A+B)/2}$, 连接 $p_{(A+B)/2}$ 和 p_C ; 若航段 $l(p_{(A+B)/2}, p_C)$ 满足约束, 则后续取 $p_{(A+B)/2}$ 和 p_A 的中点, 若航段 $l(p_{(A+B)/2}, p_C)$ 不满足约束, 则后续取 $p_{(A+B)/2}$ 和 p_B 的中点, 以此类推, 寻找 $p_A p_B$ 之间新的改航点, 使其与 p_C 相连所得航段是满足约束下的最优结果。

基于结束点的路径调整与基于起始点的路径调整相反, 是从改航结束点开始, 根据“化曲为直”的思想依次寻找满足约束的新路径, 同时考虑用“二分法”寻找初始改航点序列以外的改航点, 以最大程度缩短改航路径, 最终输出调整后的改航点序列: $(p''_{j_0,1}, p''_{j_0,2}, \dots, p''_{j_0,i_1})$ 。

3 实例分析

3.1 实例验证

以文献[17]中香港天文台预报系统 SWIRLS 观测到的风暴信息为例(图 4), $T=1$ 时刻, 航空器从改航起始点(0, 0)向东北方向以 $v=16.8$ km/min 速度飞行, 改航结束点(109.9, 470.7)。读取各时刻危险天气飞行受限区域的边界点坐标, 如表 1 所示。

设置遗传算法参数: 初始种群大小 2 000, 种群代数 100, 交叉概率初始值 $p_{c_0}=0.8$, 变异概率初始

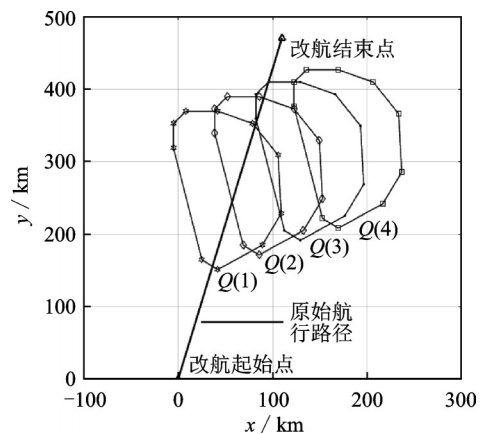


图 4 危险天气环境描述

Fig. 4 Description of adverse weather conditions

表1 危险天气飞行受限区域边界点坐标

Tab. 1 Boundary point coordinates of flight-forbidden area in adverse weather

边界点序号	Q(1)	Q(2)	Q(3)	Q(4)
1	(42, 151.2)	(85.7, 171.3)	(129.6, 191.5)	(169.7, 208.3)
2	(89.0, 184.8)	(132.7, 204.9)	(176.4, 225.1)	(216.7, 241.9)
3	(109.2, 228.5)	(152.9, 248.6)	(196.6, 268.8)	(236.9, 285.6)
4	(105.8, 309.1)	(149.5, 329.3)	(193.2, 349.4)	(233.5, 366.2)
5	(78.9, 352.8)	(122.6, 372.9)	(166.3, 393.1)	(206.6, 409.9)
6	(42, 369.6)	(85.7, 389.8)	(129.4, 409.9)	(169.7, 426.7)
7	(8.4, 369.6)	(52.1, 389.8)	(95.8, 409.9)	(136.1, 426.7)
8	(-5.04, 352.8)	(38.64, 372.9)	(82.3, 393.1)	(122.6, 409.9)
9	(-5.04, 319.2)	(38.64, 339.4)	(82.3, 359.5)	(122.6, 376.3)
10	(25.2, 164.6)	(69.9, 184.8)	(112.6, 204.9)	(152.9, 221.8)

值 $p_m=0.1$ 。得到 AHTRPRIO-AW 初始优化结果见图 5: 总航行时长 34.71 min, 其中等待时长为 0, 改航路径 573.72 km, 产生总延误时长 4 min。

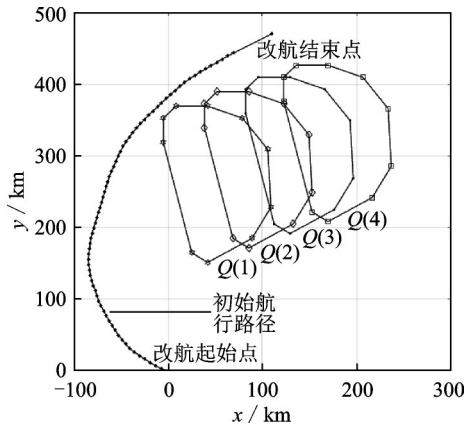


图5 初始优化改航路径

Fig. 5 Initial optimal rerouting path

从图 5 可知, AHTRPRIO-AW 初始优化结果满足技术可行性, 能够及时避开危险天气飞行受限区域, 保证飞行安全, 且路径较光滑, 但也存在多余的绕飞曲线, 改航转弯角较多, 因此, 有必要对初始优化改航路径进行调整。根据 2.2 节中介绍的改航路径调整方法, 得到调整后的改航路径如图 6 曲线 1, 对应改航路径为 $\{(0, 0), (109.96, 470.4)\}$ 。

由图 6 调整后的改航路径可知, 各时刻航空器所在位置与同时刻危险天气飞行受限区域没有交集, 也就是说, 在 AHTRPRIO-AW 策略下, 该情景无需改变原航线即可安全通过受危险天气影响的区域。因此, AHTRPRIO-AW 策略安全可行, 总航行时长 28.75 min, 其中等待时长 0 min, 改航路径 483.03 km, 此时不产生航班延误。形成这一结果的主要原因是: 航空器飞行的同时, 危险天气飞行受限区域也在移动。此结果说明了在某些情景下, 危险天气飞行受限区域虽然会暂时占用原航线

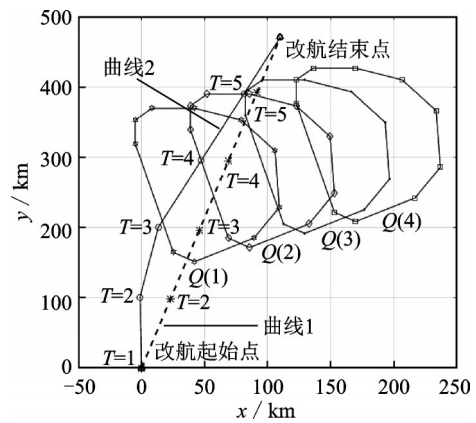


图6 调整后的改航路径

Fig. 6 Modified rerouting path

所在空域资源, 但不一定会影响航班正常飞行。而采用文献[17]中几何切线法得到的实时改航路径如图 6 曲线 2: 总航行时长 29.06 min, 改航路径 488.20 km, 总航行时长和改航路径都增加了 1.07%。因此本文的算法能够更好地降低航班延误率, 提高空域利用率。

3.2 对比分析

为了进一步说明 AHTRPRIO-AW 策略的实时优势和集成优势, 探讨不同情景下 AHTRPRIO-AW 策略的有效性, 本文通过改变环境参数, 形成不同情景进行算例仿真, 与静态改航、单独考虑等待策略和单独考虑改航策略进行对比, 结果如下。

(1) 根据文献[12]和[23]提供的实例信息, 绘制危险天气飞行受限区域如图 7(a) 所示, 危险天气飞行受限区域移动速度 0.67 km/min, 航空器从原点以 13.33 km/min 速度飞行, 改航结束点 (425, 126)。由于文献[12]是文献[23]的改进, 故本文直接与文献[12]进行对比分析。文献[12]是静态改航, 不关注天气的更新频率, 因此, 为和实际雷达更新频率对应, 本文更新频率仍然取 6 min/次。采用本文

AHTRPRIO-AW 策略,得到调整后的改航路径为 $\{(0,0),(124.42,24.46),(425,126)\}$,如图 7(a)曲线 1:总航行时长 33.31 min,其中等待时长为 0 min,改航路径 444.06 km。文献[12]的静态改航结果如图 7(a)曲线 2:总航行时长 33.37 min,改航路径 444.80 km。显然,该情景下本文方法得到的改航结果与文献[12]的静态改航结果较为接近,甚至更优。

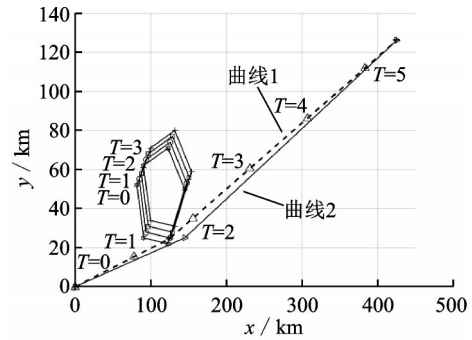
(2)若将文献[12]中危险天气飞行受限区域移动速度提高到 4 km/min,则此情景下本文方法得到的结果如图 7(b)曲线 1:总航行时长 33.26 min,其中等待时长 0 min,改航路径 443.44 km;而文献[12]方法得到的结果与情景(1)一致,如图 7(b)曲线 2。此时,本文的 AHTRPRIO-AW 策略明显优于文献[12]的静态改航策略。

(3)若将文献[12]中危险天气飞行受限区域移动速度提高到 9.43 km/min,并假设此情景下航空器从改航起始点(48,47)以 6.67 km/min 速度飞行,提高危险天气飞行受限区域相对航空器的移动速度,改航结束点(473,173),原航行路径 $\{(48,47),(109,87),(473,173)\}$ 。此时,本文得到的结果如图 7(c)曲线 1:总航行时长 65.57 min,其中等待时长 1.11 min,改航路径 429.95 km。若单独考虑等待策略,得到实时优化结果如图 7(c)曲线 2:总航行时长 79.04 min,其中等待时长 12 min,航行路径 447.17 km。依据文献[20]中单独考虑改航策略,得到实时优化结果如图 7(c)曲线 3:总航行时长 68.29 min,改航路径 455.53 km。对比上述结果可以发现,此情景下,采用本文 AHTRPRIO-AW 策略的总航行时长,相比单独考虑等待策略降低了 17.04%,相比单独考虑改航策略降低了 3.98%。因此本文 AHTRPRIO-AW 策略优于单独考虑等待策略和单独考虑改航策略的实时空中交通流量管理方法,并且,危险天气飞行受限区域相对航空器的移动速度越大,本文策略的优势越突出。

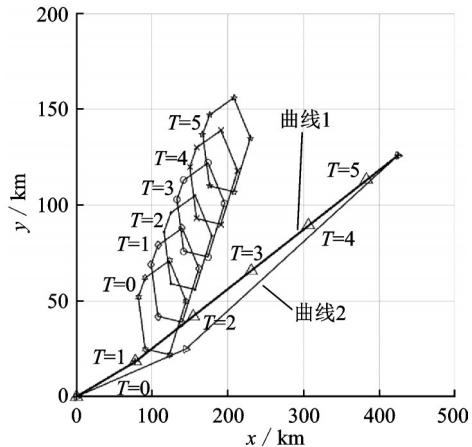
4 结 论

(1)针对危险天气下空中交通流量管理问题,综合考虑了等待策略和改航策略,建立了 AHTRPRIO-AW 模型。

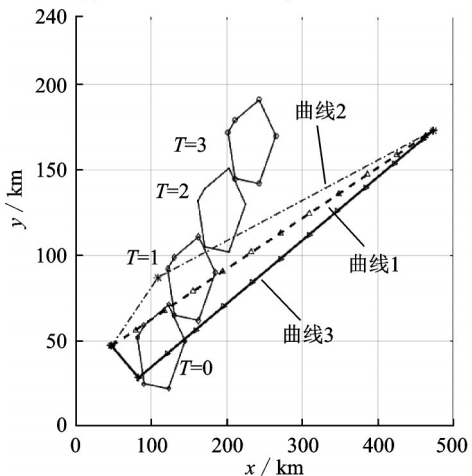
(2)基于遗传算法设计了 AHTRPRIO-AW 模型的两阶段求解算法:初始等待时长和改航路径的生成及优化、改航路径调整。通过“分块式”染色体设置方法,实现了集成问题的同步优化;引入修复算子,保证了生成解的可行性;借助诱导概率系数,既能保留种群最优个体,又能确保种群丰富度;基



(a) Diversion result comparison in scenario 1



(b) Diversion result comparison in scenario 2



(c) Diversion result comparison in scenario 3

图 7 文献[10]算例的改航结果对比

Fig. 7 Diversion result contrast of Ref. [10]'s example

于改航路径调整模块,尽可能减少了多余的绕飞路段。

(3)相比几何切线法,本文所得实时优化结果更理想;相比静态改航,本文 AHTRPRIO-AW 策略更能提高空域利用率;相比单独考虑等待策略,本文 AHTRPRIO-AW 策略主动性更强,更能降低延误时长;相比单独考虑改航策略,本文 AHTRPRIO-AW 策略又能进一步减少绕飞路段。

(4)后续将考虑空中交通管制和其他航空器影响等因素,进行航班等待与改航的集成优化研究。

参考文献:

- [1] 李雄, 徐肖豪, 赵焱飞, 等. 散点状分布危险天气区域下的航班改航路径规划[J]. 航空学报, 2009, 30(12): 2342-2347.
LI Xiong, XU Xiaohao, ZHAO Yifei, et al. Flight re-routing path planning in dispersedly distributed severe weather areas[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(12): 2342-2347.
- [2] JONES J C, LOVELL D J, BALL M O. Stochastic optimization models for transferring delay along flight trajectories to reduce fuel usage [J]. Transportation Science, 2018, 52: 134-149.
- [3] 吴刚, 夏洪山, 高强. 机场群运行方式下的航班时刻与频率优化模型[J]. 交通运输工程学报, 2013, 13(4): 79-86.
WU Gang, XIA Hongshan, GAO Qiang. Optimization model of flight time and frequency under operation mode of multi-airports system [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2013, 13(4): 79-86.
- [4] TIAN Yong, WAN Lili, HAN Ke, et al. Optimization of terminal airspace operation with environmental considerations[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2018, 63: 872-889.
- [5] OZGUR M, CAVCAR A. 0-1 integer programming model for procedural separation of aircraft by ground holding in ATFM[J]. Aerospace Science & Technology, 2014, 33(1): 1-8.
- [6] 杨尚文, 胡明华, 张洪海. 随机型协同时隙分配模型[J]. 系统工程理论与实践, 2014, 34(1): 153-157.
YANG Shangwen, HU Minghua, ZHANG Honghai. Stochastic collaborative slot allocation models[J]. System Engineering Theory and Practice, 2014, 34(1): 153-157.
- [7] 王来军, 胡大伟, 高扬, 等. 机场流量管理中地面等待问题优化模型[J]. 交通运输工程学报, 2014, 14(3): 95-104.
WANG Laijun, HU Dawei, GAO Yang, et al. Optimization model of ground-holding problem in airport flow management[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2014, 14(3): 95-104.
- [8] 赵向领, 唐建勋, 卢飞, 等. 基于改进离散差分算法的航班延迟推出策略分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2015, 15(6): 114-120.
ZHAO Xiangling, TANG Jianxun, LU Fei, et al. Strategy analysis for delayed flights pushback based on improved discrete differential algorithm [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2015, 15(6): 114-120.
- [9] NG K K H, LEE C K M. Aircraft scheduling considering discrete airborne delay and holding pattern in the near terminal area [C]//Proceedings of 2017 13th International Conference on Intelligent Computing. [S.l.]: Springer, 2017: 567-576.
- [10] 王莉莉, 周娟, 任杰. 交叉口汇聚航班的航线选择方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2015, 47(1): 83-87.
WANG Lili, ZHOU Juan, REN Jie. Route selection method of converging flight at intersection [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 47(1): 83-87.
- [11] WANG Chao, HE Chaonan. Three-dimensional planning of arrival and departure route network based on improved ant-colony algorithm [J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015 (6): 654-664.
- [12] 王飞, 王红勇. 基于 Maklink 图和遗传算法的改航路径规划方法研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2014, 14(5): 154-160.
WANG Fei, WANG Hongyong. A re-routing path planning method based on Maklink graph and GA algorithm [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2014, 14(5): 154-160.
- [13] SAVKIN A V, HUANG H. Optimal aircraft planar navigation in static threat environments [J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2017, 53(5): 2413-2426.
- [14] MUKHERJEE A, HANSEN M. A dynamic rerouting model for air traffic flow management [J]. Transportation Research Part B Methodological, 2009, 43(1): 159-171.
- [15] ANTONY D E, PAUL L, BANAVAR S. Predicting the operational acceptance of airborne flight reroute requests using data mining [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2018, 96: 270-289.
- [16] SAUER M, HAUF T, SAKIEW L, et al. On the identification of weather avoidance routes in the terminal maneuvering area of Hong Kong International Airport [J]. Journal of Zhejiang University—Science A (Applied Physics & Engineering), 2016, 17(3): 171-185.
- [17] HAUF T, PATRICK H, MANUELA S, et al. Aircraft route forecasting under adverse weather conditions [J]. Meteorologische Zeitschrift, 2017, 26(2): 189-206.
- [18] ZHANG X G, MAHADEVAN S. Aircraft re-routing optimization and performance assessment under

- uncertainty[J]. Decision Support Systems, 2017, 96: 67-82.
- [19] 张兆宁, 魏中慧. 危险天气下基于多重Morphin算法的终端区三维实时改航方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2015, 47(4): 467-473.
ZHANG Zhaoning, WEI Zhonghui. 3-D real-time deviation method for avoiding hazardous weather in terminal airspace based on morphin planning algorithm [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2015, 47(4): 467-473.
- [20] 王莉莉, 王鑫. 收缩型动态危险天气下改航模型和算法研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(5): 241-244.
WANG Lili, WANG Xin. Research on model and algorithm of rerouting under shrinkage dynamic severe weather [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(5): 241-244.
- [21] WANG Shijin, LI Qingyun, CAO Xi, et al. Optimization of air route network nodes to avoid "three areas" based on an adaptive ant colony algorithm [J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016 (4): 469-478.
- [22] D'ARIANO A, PISTELLI M, PACCIARELLI D. Aircraft retiming and rerouting in vicinity of airports [J]. IET Intelligent Transport Systems, 2012, 6(4): 433-443.
- [23] 徐肖豪, 李成功, 赵巍飞, 等. 基于人工势场算法的改航路径规划[J]. 交通运输工程学报, 2009, 9(6): 64-68.
XU Xiaohao, LI Chenggong, ZHAO Yifei, et al. Re-routing path planning based on artificial potential field algorithm [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009, 9(6): 64-68.
- [24] 田文, 胡明华. 多目标流量管理优化模型及算法研究[J]. 系统工程学报, 2011, 26(4): 442-450.
TIAN Wen, HU Minghua. Multi-objective flow management model and its algorithm [J]. Journal of Systems Engineering, 2011, 26(4): 442-450.
- [25] 徐艳艳, 黄炜, 曾永年. 基于自适应遗传算法的超平面分类及遥感应用[J]. 系统工程理论与实践, 2017, 37(3): 773-781.
XU Yanyan, HUANG Wei, ZENG Yongnian. Hyper plane-adaptive GA classification and its application in remotely-sensed images [J]. Systems Engineering Theory and Practice, 2017, 37(3): 773-781.

(编辑:张蓓)