

文章编号:1005-0523(2020)02-0072-09

危险天气下的战术改航方法

毛利民,彭 瑛,贾子君

(南京航空航天大学民航学院,江苏 南京 210016)

摘要:战术阶段的天气变化实时地影响着管制决策,在无决策支持手段的情况下,飞行员不同的绕航偏好加深了对流天气下的管制负荷。针对战术阶段对流天气影响计划航路的情形,使用考虑了飞行员实际绕飞偏好的天气避让区产品,以准确反映对流天气对实际飞行的影响。进而以连续更新的天气避让区产品为基础,建立了多目标整数规划模型,设计了基于线性组合加权的遗传算法。以广州白云至上海虹桥的城市对航线为例,生成的改航路径完全避开实际连续更新的对流天气,可用于战术阶段对管制员的决策支持。

关键词:对流天气;战术改航;多目标优化;遗传算法

中图分类号:V355

文献标志码:A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2020.02.010

民航业整体规模和运输量的日益扩大,航空拥堵问题的日益凸显,加剧了传统粗放型的空中交通管理模式空域与交通之间的矛盾,伴随而来的是大面积航班延误,进而引发潜在的飞行安全问题。2018年,全国客运航班平均延误时间为24 min,同比增加8 min^[1]。对航班问题的投诉占比例最大,而天气原因占全部航空公司航班不正常原因的比例为51.28%。目前在战术阶段面对对流天气时,管制员和飞行员通过陆空通话协同航班的绕飞路径,这增加了管制通话负荷,同时由于不同的航空器对于同一天气避让区不同的绕飞选择也增大了交通流复杂度,最终体现在缩减的空域容量、较大的流控间隔和较长的航班延误上。因此战术改航方法的研究在减少对流天气下管制工作负荷,降低交通复杂度,进而增加空域容量减少航班延误上具有现实意义,同时也为管制员和飞行员在面对对流天气时提供了有力的绕飞指导。

2009年,Taylor等^[2]提出动态生成操作可接受性的改航路径方法,考虑了路径在实际飞行中的操作可接受性。2011年,Taylor等^[3]又提出使用网络优化改进动态生成操作可接受性改航航路的方法。2014年,Borchers等^[4]提出避免天气影响的改航方法系统评估方法。2018年,Taylor等^[5]提出为避免战术阶段的限制而自动生成改航路径的方法,并使用遗传算法进行求解验证。随着气象侦测技术的发展,我国近年来也有一些相关的研究,徐肖豪等^[6]在考虑空中交通管制程序和飞行性能的基础上,采用人工势场法对既定云团进行绕飞设计。王莉莉等^[7]针对影响范围较小的突发天气建立了天气威胁模型,采用MATLAB仿真方法对模型进行了验证。同年,王飞等^[8]在文献[6]的基础上设计了基于Maklink图和遗传算法的三阶段改航路径方法。2016年,王清琦等^[9]模拟了单体雷暴云及其发展趋势,建立了以多边形顶点运动代表的天气模型并进行了MATLAB仿真验证。

以上研究均是在假设危险天气避让区的情形下,进而限定天气的发展与变化趋势进行危险天气下的改航研究。随着民航精细化管理的发展,这些假设已经不能满足实际运行的需求,本文在前人研究的基础上,进一步对危险天气区域进行精确的划设,采用充分考虑飞行员绕飞偏好的天气避让区产品。以连续更新的历史气象产品为基础,建立了多目标改航路径规划数学模型,并采用遗传算法对模型进行求解,结果显示可

收稿日期:2019-09-04

基金项目:国家自然科学基金(61903187)

作者简介:毛利民(1991—),男,硕士研究生,研究方向为交通运输规划与管理。

通讯作者:彭瑛(1978—),女,讲师,博士,研究方向为空域容量评估、系统建模与仿真。

以为对流天气的战术改航提供一定指导。

1 天气避让区

天气避让区是航空器在飞行过程中需要规避的区域,这些区域中一般含有威胁飞行安全的对流活动、雷暴等危险天气。在实际飞行过程中,飞行员根据航空公司的相关规定、航空器的性能以及自身的飞行技术掌握,控制航空器与危险天气的距离。相关研究中这一过程通过天气避让区的划设来体现,因此,天气避让区划设的合理性将直接影响到航迹规划的可行性和在空中交通管理中的可参考性。

前人的研究^[10]中天气避让区大多基于美国国家气象局关于天气对飞行影响的研究而划设。将天气覆盖区域根据雷达基本反射率分为 7 个等级,不同的等级在雷达基本反射率产品上以不同的颜色体现,同时不同等级的回波强度对航空器的影响也有所差异,如表 1 所示。研究表明^[11],飞行员总体上会绕飞雷达基本反射率大于 40 dBz(NWS 等级大于等于 3)的区域。

表 1 不同回波强度天气对飞行的影响
Tab.1 Effects on flights under different weather

等级	回波反射率	颜色	对航空器的影响
0	$\text{dBz} < 18$	无	几乎无影响
1	$18 \leq \text{dBz} < 30$	浅绿	轻度颠簸
2	$30 \leq \text{dBz} < 41$	深绿	中度颠簸
3	$41 \leq \text{dBz} < 46$	黄	闪电、较大颠簸
4	$46 \leq \text{dBz} < 50$	橙	结冰
5	$50 \leq \text{dBz} < 57$	深橙	严重结冰
6	$57 \leq \text{dBz}$	红	严重颠簸、结构受损

为了更加准确的划设天气避让区,反映实际的飞行员绕飞偏好,本文采用了天气避让区(WAF, weather avoidance field)产品。该产品借鉴了 DELAURA 等^[12]关于飞行员绕航定量预测的研究方法,在美国气象局研究结果的基础上,结合了航班计划航迹和实际雷达航迹,同时使用雷达基本反射率、回波顶高和垂直累积液态含水量等气象数据,确定了针对于特定天气云团的飞行员绕飞行为。图 1 对比了同一时间研究空域内雷达基本反射率产品和天气避让区产品的差异,可以看出飞行员实际绕飞的区域比雷达回波 40 dBz 以上覆盖区域更广。

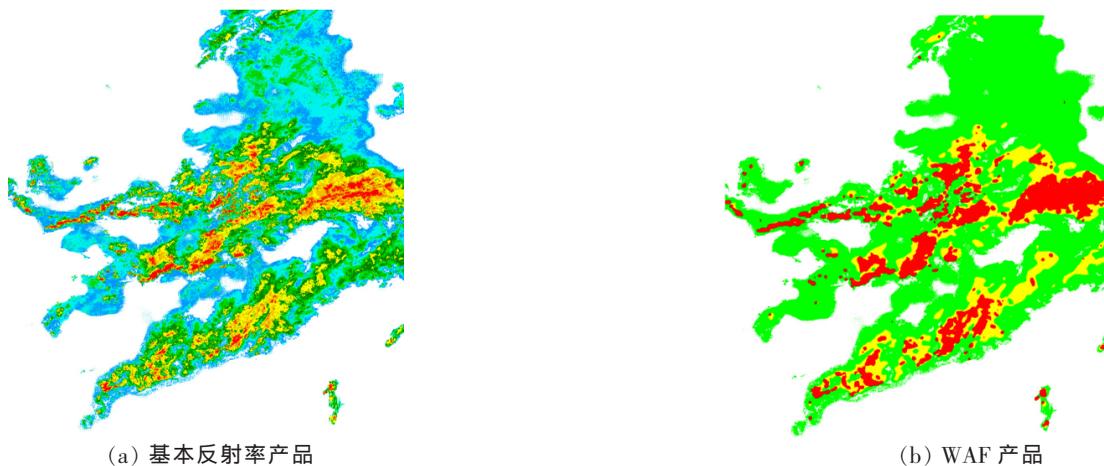


图 1 基本反射率产品与 WAF 产品对比图

2 动态改航模型

2.1 战术改航分析

目前,在实际飞行过程中,航空器对于天气的绕航通过飞行员和管制员的协同来完成。飞行员提前将绕飞意图通过甚高频通话告知管制员,管制员根据空域和交通的临时状况加以判断并提供引导建议,最终确定一个双方都能接受的飞行路径。由于航空器的飞行计算机中仅存储了几条城市对的计划飞行路径以便于自动驾驶,如果航空器绕飞偏离原航路过远,甚至完全脱离计划航路,这种情况需要管制员将之后的飞行路径以航路点的形式一一告诉飞行员,而如果飞行员找不到通报的航路点,管制员则需要实时的雷达引导直至航空器移交给下一个管制单元。这无疑增大了管制员的管制负荷、监控符合和协调符合,增加了安全隐患。因此,改航路径需要考虑与原航线的偏离程度,并且可以尽早加入原航路使航空器可以恢复自主领航。

另外,考虑到飞行油量问题,改航后的路径不宜太长。否则,航空器在航路阶段消耗了过多的燃油而在目的地机场面临空中等待,就可能导致油量紧张,甚至出现没有足够油量飞往备降机场而必须及时降落的问题。

综合前人的研究^[13],本文改行模型目标中考虑以下几个因素:

1) 改航后航线长度的变化。改航路径总航程可以相对于原航线增加或减少,一般选择减少总航程的改航路径。

2) 改航路径包含的转弯点个数。包含多个转弯点的改航路径更难以被飞行员和管制员接受,因为管制员可能面临更多的通话负荷和监控负荷,而飞行员则面临更多的操作负荷。

3) 改航路径相对于原航线的偏离程度。如果航班在到达目的地机场之前未返回原航线,则管制员需要进行额外的协调以确保航班能够顺利抵达目的地。

4) 改航路径转弯角度变化。考虑到航空器的性能要求,改航路径平均转弯角度变化越小,飞行员操作的工作负荷越小,实施的改行路径更易于接受。

考虑航空器在改航过程中危险天气的动态变化过程,即危险天气的飞行避让区的影响范围及边界形状随时间的变化而改变。气象雷达探测得到的气象数据每隔6分钟更新一次,天气的变化过程可以表示为一系列连续预测的天气图。为了实施动态改航路径规划,模型假设如下:

- 1) 在每个6 min时间间隔之内认为飞行避让区形状及大小不发生改变。
- 2) 航空器改航抽象成二维平面内路径规划问题,航空器视为运动的质点。
- 3) 航空器的飞行速度恒定且已知。
- 4) 天气避让区产品中值为3的区域为飞行避让区,航空器改航路径不可与飞行避让区有交点。

2.2 模型建立

2.2.1 参数及变量定义

I 表示图上格点横坐标集合, J 表示图上格点纵坐标集合。根据天气避让区产品对空域离散化的分辨率,将空域分成若干连续的空间格点,每一个格点都对应天气避让区产品的一个图上坐标。 $I=\{1, \dots, I_n\}$, $J=\{1, \dots, J_n\}$,其中 I_n, J_n 分别表示横纵坐标的最大取值。

T 表示航班飞行时间区间集合。根据天气避让区产品的更新频率,将航班的飞行时间离散为产品更新频率整数倍的若干连续时间片,每个时间片对应于一张天气避让区产品图。 $T=\{1, \dots, T_n\}$,其中 T_n 表示离散时间片的总数。

K 表示一个时间片内,依照假定航空器飞行速度和空域离散化分辨率,航空器可以飞过的格点数目集合。 $K=\{1, \dots, K_n\}$,其中 K_n 表示一个时间片内航空器可以飞过的格点总数。

$FCA_{ijt} = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases}$,其中 $FCA_{ijt}=1$ 表示第 i 行第 j 列空间格点在第 t 时间片内被天气覆盖。

$v_{ijmn} = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases}$ 其中 v_{ijmn} 表示第 i 行第 j 列空间格点与第 m 行第 n 列空间格点相邻

$r_{ij} = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases}$, 其中 $r_{ij}=1$ 表示第 i 行第 j 列空间格点在航空器的预计飞行航路上。

x^{Dep} 表示起飞机场所在图上位置的横坐标; x^{Arr} 表示目的地机场所在图上位置的横坐标; y^{Dep} 表示起飞机场所在图上位置的纵坐标; y^{Arr} 表示目的地机场所在图上位置的纵坐标; d^{Min} 表示一个时间片内航空器的最小飞行距离; d^{Max} 表示一个时间片内航空器的最大飞行距离。

决策变量: $\delta_{ijkt} = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases}$, 其中 δ_{ijkt} 表示第 t 时间片内航空器飞过的第 k 个空间格点位于第 i 行第 j 列。

x_{kt} 表示航空器第 t 时间片内飞过的第 k 个空间格点的横坐标; y_{kt} 表示航空器第 t 时间片内飞过的第 k 个空间格点的纵坐标; S_{kt} 表示航空器第 t 时间片内飞过的第 k 个空间格点的空间位置; X_{kt} 表示与航空器第 t 时间片内飞过的第 k 个空间格点的具有相同纵坐标的计划航路上参考点的横坐标; θ_t 表示航空器第 t 时间片的转弯角度; $\eta_t = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases}$, 其中 $\eta_t=1$ 表示航空器第 t 时间片末选择转弯。

图 2 为模型参数示意图。

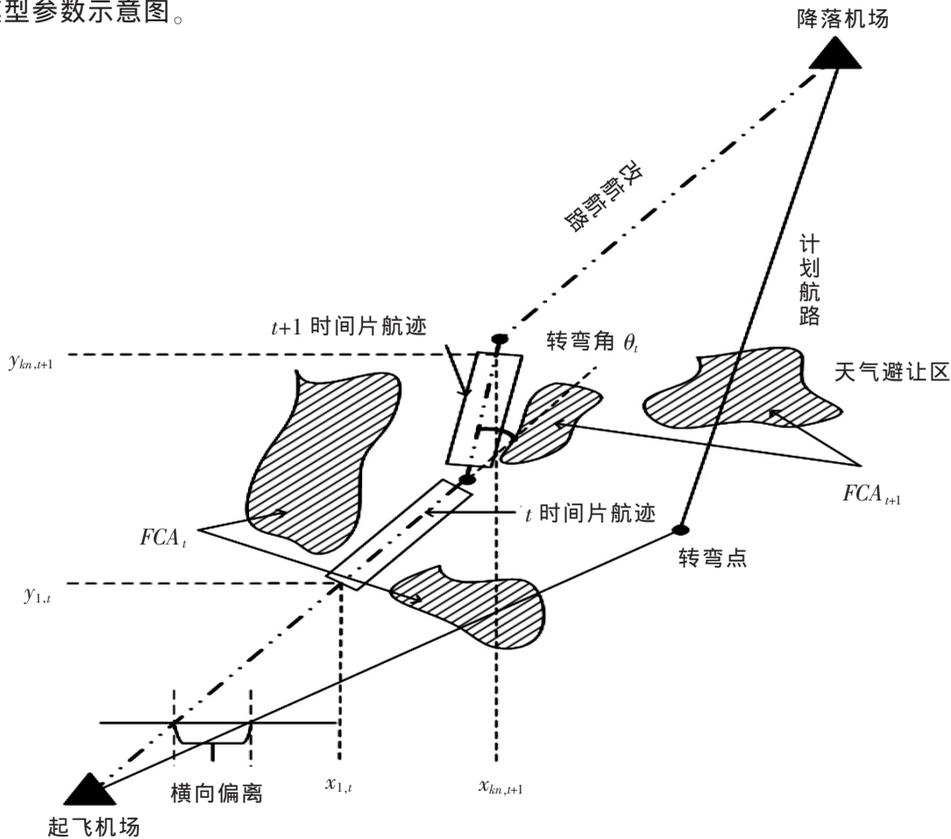


图 2 模型参数示意图

Fig.2 Model parameter diagram

2.2.2 约束条件

1) 航空器在一个时间片内飞过的每一个空间格点只能有一个确定的坐标

$$\sum_{j \in J} \delta_{ijkt} = 1 \quad \forall k \in K, t \in T \tag{1}$$

2) 航空器应当从起飞机场所在的坐标出发,在目的地机场所在的坐标降落

$$\delta_{x^{Dep}, y^{Arr}, 1, 1} = 1 \tag{2}$$

$$\delta_{x^{Arr}, y^{Dep}, K, T} = 1 \tag{3}$$

3) 航空器在一个时间片内的格点必须按顺序邻接

$$\delta_{ijkt} + \delta_{nm,k+1,t} \leq v_{ijmn} + 1 \quad \forall i, m \in I, j, n \in J, k \in \{1, \dots, K_n - 1\}, t \in T \quad (4)$$

4) 航空器下一个时间片的起点必须为上一个时间片的终点,以构成完整路径

$$\delta_{i,j,K_n,t} = \delta_{i,j,1,t+1} \quad \forall i \in I, j \in J, t \in \{1, \dots, T_n - 1\} \quad (5)$$

5) 航空器所经过格点应该没有对流天气覆盖

$$\delta_{ijkt} \leq 1 - FCA_{ijt} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \quad (6)$$

6) 航空器所选路径与其横纵坐标的关系

$$\text{if } \delta_{ijkt} = 1, \text{ then } x_{kt} = i, y_{kt} = j \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \quad (7)$$

7) 航空器转弯约束,如果转弯时转弯角度过大,飞机将会过早的提前转弯,出现偏航较大甚至误入限制区的情况。为了解决这个问题,管制员经常需要投入大量的精力对相关航班进行监控,因此为了减少此类情况发生同时减少管制员工作负荷,航班两段相邻飞行路径之间的转弯角不能大于 90° , 计算如下

$$\theta_t = \arccos \frac{\overrightarrow{S_{1,t} S_{K_n,t}} \cdot \overrightarrow{S_{1,t+1} S_{K_n,t+1}}}{|\overrightarrow{S_{1,t} S_{K_n,t}}| |\overrightarrow{S_{1,t+1} S_{K_n,t+1}}|} = \arccos \frac{(x_{k_n,t} - x_{1,t})(x_{k_n,t+1} - x_{1,t+1}) + (y_{k_n,t} - y_{1,t})(y_{k_n,t+1} - y_{1,t+1})}{\sqrt{(x_{k_n,t} - x_{1,t})^2 + (y_{k_n,t} - y_{1,t})^2} \sqrt{(x_{k_n,t+1} - x_{1,t+1})^2 + (y_{k_n,t+1} - y_{1,t+1})^2}} \quad (8)$$

$$\theta_t \leq \frac{\pi}{2} \eta_t \quad \forall t \in \{1, \dots, T_n - 1\} \quad (9)$$

8) 根据航空器的飞行速度,在一个额定时间片内的飞行距离应在一定范围之内

$$d^{\min} \leq d(S_{1,t}, S_{K_n,t}) = \sqrt{(x_{k_n,t} - x_{1,t})^2 + (y_{k_n,t} - y_{1,t})^2} \leq d^{\max}, \forall t \in T \quad (10)$$

9) 符号限制条件

$$\delta_{ijkt} = 0, 1; \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \quad (11)$$

$$x_{kt}, y_{kt} \in Z^+ \quad (12)$$

2.2.3 目标函数

根据前文所述,本文主要考虑航路长度、航路偏离度、转弯点个数和转弯角度等指标用于评价生成航路的性能,4种指标代价分别记为 C_1 、 C_2 、 C_3 和 C_4 。

1) 考虑航空器在一个时间片对应的天气情形中,为了节省飞行成本,总会将天气看做整体进而采取直线绕飞,因此在航程度量中计算一个时间片首尾两点的欧式距离作为该航段距离,计算如下

$$\min C_1 = \sum_{t \in T} d(S_{1,t}, S_{K_n,t}) = \sum_{t \in T} \sqrt{(x_{k_n,t} - x_{1,t})^2 + (y_{k_n,t} - y_{1,t})^2} \quad (13)$$

其中 $d(S_{1,t}, S_{K_n,t})$ 表示一个时间片内第一个空间格点到最后一个空间格点的欧氏距离。

2) 航路偏离度有众多的计算方式,本文采用横向偏离度度量生成航路相对于计划航路的偏离情况。横向偏离度即为航路点相对于计划航路上同纵坐标点的横向坐标偏差,计算如下

$$\min C_2 = \sum_{t \in T, x_{k,t} = x_{k,t}} |x_{k,t} - X_{k,t}| \quad (14)$$

3) 为了减少飞行员的操作负荷和管制员的监控负荷,航空器的转弯次数应尽量少,计算如下

$$\min C_3 = \sum_{t \in \{1, \dots, T_n - 1\}} \eta_t \quad (15)$$

4) 为了使航空器尽量按照预定路径飞行,航空器的转弯角度应尽量小,计算如下

$$\min C_4 = \sum_{t \in \{1, \dots, T_n - 1\}} \theta_t \quad (16)$$

多目标问题各个目标间的考虑角度往往不同,改航偏离度主要考虑到空域的限制,飞行路径长短考虑到航空公司的成本,转弯点个数与转弯角度的大小考虑到飞行员操作和管制员监视的负荷,这些目标间通

常相互制约不可能同时达到最优化,只能在其中做相对的取舍,即找到整个问题的非劣解。本文采用线性加权的方法将四个目标进行统一,由于目标的单位不同首先进行无量纲化处理,设第 $p \in \{1, \dots, 4\}$ 个目标的最大值记为 $\max_x C_p(x)$, 则第 p 个目标无量纲化的结果为 $f_p(x) = \frac{C_p(x)}{\max_x C_p(x)}$, 进而将无量纲的目标加权求和统一

为单目标问题,即 $\min F(x) = \sum_{p=1}^4 \omega_p f_p(x)$ 。

采用 Alpha 法确定每个目标的权系数 ω_p , 针对于每个单目标 $f_1(x), f_2(x), f_3(x), f_4(x)$ 分别解得最优解为 $x_{(1)}^*, x_{(2)}^*, x_{(3)}^*, x_{(4)}^*$, 记 $f_{ij} = f_i(x_{(j)}^*)$, Const 为不等 0 的任意常数, 令

$$\sum_{p=1}^4 \omega_p f_{ip} = \text{Const}, \forall i=1, \dots, 4 \tag{17}$$

解方程组(17)即得 $\omega_p = \text{Const} \times \frac{D_p}{D}, \forall p=1, \dots, 4$, 其中 $D = \begin{vmatrix} f_{11} & L & f_{14} \\ M & O & M \\ f_{41} & L & f_{44} \end{vmatrix}$, D_p 是把 D 中第 p 列换为 $(1, 1, 1, 1)^T$

的行列式。令 $\sum_{p=1}^4 \omega_p = 1$, 得 $\text{Const} = \frac{D}{\sum_{p=1}^4 D_p}$, 则 $\omega_p = \frac{D_p}{\sum_{p=1}^4 D_p}, \forall p=1, \dots, 4$ 。

最终改航模型如式(18)所示

$$\begin{aligned} & \begin{cases} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \delta_{ijkt} = 1 & \forall k \in K, t \in T \\ \delta_{x^{Dep}, y^{Dep}, K_n, T_n} = 1 \\ \delta_{x^{Arr}, y^{Arr}, 1, 1} = 1 \\ \delta_{ijkt} + \delta_{nm, k+1, t} \leq v_{ijnm} + 1 & \forall i, m \in I, j, n \in J, k \in \{1, \dots, K_n - 1\}, t \in T \\ \delta_{i, j, K_n, t} = \delta_{i, j, 1, t+1} & \forall i \in I, j \in J, t \in \{1, \dots, T_n - 1\} \\ \delta_{ijkt} \leq 1 - FCA_{ij} & \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \\ \text{if } \delta_{ijkt} = 1, \text{ then } x_{kt} = i, y_{kt} = j & \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \\ \theta_t = \arccos \frac{S_{1,t} \cdot S_{K_n,t} \cdot S_{1,t+1} \cdot S_{K_n,t+1}}{|S_{1,t} \cdot S_{K_n,t}| \cdot |S_{1,t+1} \cdot S_{K_n,t+1}|} = \arccos \frac{(x_{kn,t} - x_{1,t})(x_{kn,t+1} - x_{1,t+1}) + (y_{kn,t} - y_{1,t})(y_{kn,t+1} - y_{1,t+1})}{\sqrt{(x_{kn,t} - x_{1,t})^2 + (y_{kn,t} - y_{1,t})^2} \cdot \sqrt{(x_{kn,t+1} - x_{1,t+1})^2 + (y_{kn,t+1} - y_{1,t+1})^2}} \\ \theta_t \leq \frac{\pi}{2} \eta_t & \forall t \in \{1, \dots, T_n - 1\} \\ d^{\text{Min}} \leq d(S_{1,t}, S_{K_n,t}) = \sqrt{(x_{kn,t} - x_{1,t})^2 + (y_{kn,t} - y_{1,t})^2} \leq d^{\text{Max}} & \forall t \in T \\ \delta_{ijkt} = 0, 1 & \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \\ x_{kt}, y_{kt} \in Z^+ \end{cases} \end{aligned} \tag{18}$$

3 算法设计

3.1 危险天气网格化

上述模型虽然为整数规划模型,但是由于目标和约束条件中存在非线性运算,并不是基础的线性规划模型,可以采用遗传算法来求解。直接使用原始的天气图进行改航路径的搜索会导致搜索空间很大,运行效率低,因此本文先对天气图进行进一步网格化处理,再进行基于线性加权组合的遗传算法设计。根据原始天气的大小与分辨率,以及航空器假定飞行速度,将天气图裁剪成 50×50 的方格图,划分之后的网格被天气的覆盖情况如下:① 完全被天气避让区所填充;② 完全不包含任何天气;③ 包含部分天气避让区

根据 KROZEL 等人^[11]的研究结果,当空域内的天气危险指数接近 50%时,将会对空域飞行流量产生重大影响,因此新网格格点的避让规则如下:当网格中天气危险区的覆盖率不小于 50%时,认为不可通行,反之,可以通行。

3.2 遗传算法设置

1) 路径编码:改航路径在空间中是由一些空间点按一定顺序链接而成,为了方便后续操作而采用十进制编码,记第 t 时间片结束时航班位置为 (x_t, y_t) ,则所有时间片末航班位置按时间顺序构成的序列 $(x_1, y_1), \dots, (x_t, y_t)$ 即为一条改航路径。

2) 种群生成:根据航班的预计飞行时间确定飞行所需时间片数 T_n ,在没有对流天气覆盖的网格上随机选取 T_n-1 个空间点与起飞、降落机场首尾相连形成一条路径。为了使生成的个体满足模型中关于天气避让、航段距离和转弯的限制,将在适应度计算中对于穿过危险天气、航段飞行距离过长和转弯角度过大的个体进行“惩罚”。

3) 适应度计算:适应度表示个体对环境的适应程度,适应度较高的个体存活概率较大,对于最小化问题其寻优方向与基于适应度的种群选择方向相反,因此适应度函数 $Fit(x)$ 选取为

$$Fit(x) = \frac{1}{F(x) + \xi} \quad (19)$$

其中 $F(x)$ 为转换为单目标后的目标函数; ξ 为一个较小的正数以防止下溢。式(6)限制了改航路径与危险天气的关系,对于穿过危险天气的个体应施加惩罚因子;式(8)限制了航班的最大转弯角,对于转弯角大于 90 度的航班应施加惩罚因子;式(10)限制了航班一个时间片内的飞行距离,对于单个时间片飞行距离不在区间内的个体应当施加惩罚因子。设 $\hat{\theta}(x)$ 表示个体中穿过危险天气区域的航段数目总和, $\hat{d}(x)$ 表示个体单个时间片小于最小飞行距离或大于最大飞行距离部分的距离总和, $\hat{\varphi}(x)$ 表示个体转弯时转弯角度超过最大转弯角部分的角度总和, N 表示当前的迭代次数,则第 N 代个体的惩罚因子为 $\lambda_N(x) = 5N \left[\hat{\theta}^2(x) + \omega_1 \frac{\hat{d}^2(x)}{\max_x C_1(x)} + \omega_4 \frac{\hat{\varphi}^2(x)}{\max_x C_4(x)} \right]$ 。因此,含有惩罚因子的第 N 代个体的适应度函数为

$$Fit_N(x) = \frac{1}{F(x) + \lambda_N(x) + \xi} \quad (20)$$

4) 种群选择:采用轮盘赌的方法选择个体进行交叉和变异操作,个体选择概率与其适应度值相匹配,即高适应度值的个体具有更高被选择的概率;使用精英保留策略筛选每一代的个体,以确保每一代中的最优个体能够存活并遗传给下一代的个体。

5) 交叉操作:对于种群选择步骤中选择的父代进行交叉操作,随机选择单个基因位(即某个时间片的对应位置)进行单点交叉从而生成新个体。

6) 变异操作:随机选择变异基因位,根据该基因位前后两个基因的空间位置,确定整个空间中满足式(6)式(8)式(10)中关于天气避让、航段距离、转弯角度限制的空间点集,在该点集中随机选择一个空间点作为变异后基因,跟父代其他基因一起组成新个体。

4 实例验证

本文以广州白云—上海虹桥的城市对飞为例,结合历史的天气避让区产品,对有对流天气影响计划航线的时段内(2017年03月09日20时00分至22时06分)的航班进行改航实验。算法参数设定如下:初始种群设置为 50 个个体($N=50$);最大迭代次数为 200 代;交叉概率为 0.9,变异概率为 0.1。根据 3.2 节确定的代价系数为距离代价权重 $\omega_1=0.3$,航线偏离代价权重 $\omega_2=0.4$,转弯点个数代价权重 $\omega_3=0.1$,转弯角度代价权重 $\omega_4=0.2$;改航所得到的结果如图 3 和图 4 所示。

图 3 和图 4 展示了算法适应度曲线和部分详细改航的结果,同时图 4 展示了随天气更新的部分航迹,

其中黑色马赛克方格为一个时间片网格化后的天气避让区,☆—☆(实线星号线段)为航班原计划航路,+···+(虚线加号线段)为算法生成的改航航路,改航航路上的黑色粗实线表示航班沿改航后的航线在一个时间片内飞过的距离。

算法在第 125 代收敛,得到最优改航路径,距离代价:0.967 38,原计划航线总路程:1 356.138 6 km,优化后总路程:1 311.895 6 km,改航后航线总航程小于原计划航线总航程,各个目标的改航平均代价见表 2。

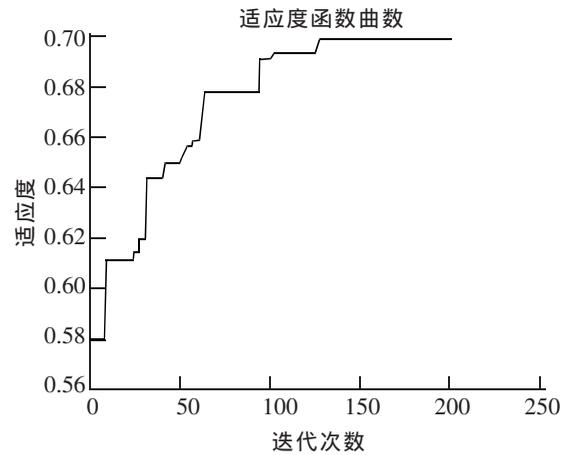


图 3 算法适应度曲线
Fig.3 Fitness curve

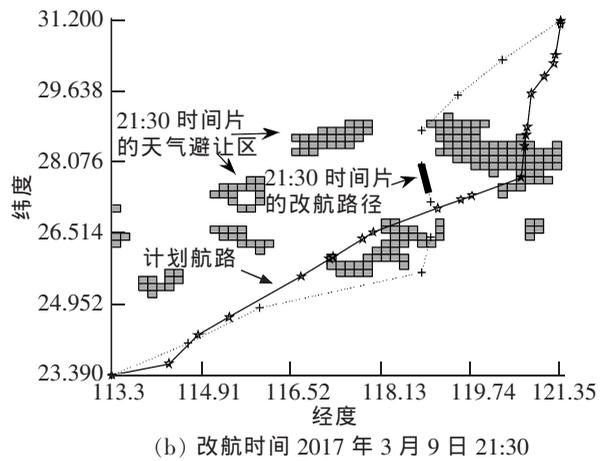
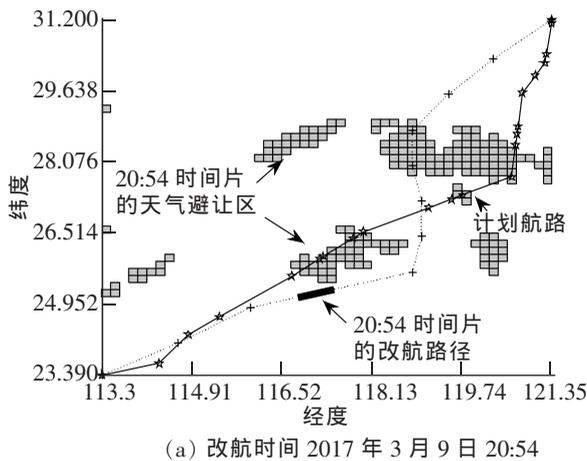


图 4 航迹随天气更新示意图

Fig.4 Tracks updated with different weather conditions over time

由实例验证的结果表明,结合网格化的天气避让区产品和遗传算法,能够生成完全避开连续更新天气的改航路径。因此,结合天气避让区预测产品即可为航空器绕飞提供有效的改航支持。

5 结束语

本文对于对流天气覆盖计划航路的情形进行改航,结合反映飞行员实际绕飞偏好的天气避让区产品,考虑天气的实时更新,建立了以总航程最短、偏离程度最小、转弯点个数最少、转弯角度变化最缓的多目标整数规划模型,采用了线性组合加权的遗传算法。使用广州白云—上海虹桥城市对航线上的历史天气对改航模型进行了实例验证,实例验证的结果验证了改航模型的可行性,证明了由模型求解生成的改航路径能够实现避开连续更新的天气避让区,且满足改航的优化目标,可以为航空器战术改航提供决策支持。

表 2 目标的平均代价
Tab.2 The average cost of different objectives

指标	代价
改航后距离	0.967
航线偏离	1.426
转弯点个数	0.444
转弯角度	1.164

参考文献:

- [1] 中国民用航空局. 2018年民航行业发展统计公报[EB/OL]. [2019-05-01]. <http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TJSJ/201905/t20190508196033.html>.
- [2] TAYLOR C, WANKE C. Dynamic generation of operationally acceptable reroutes[C]//9th AIAA Aviation Technology Integration and Operations Conference, 2009.
- [3] TAYLOR C, WANKE C. Improved dynamic generation of operationally-acceptable reroutes using network optimization[J]. Journal of Guidance Control and Dynamics, 2011, 34(4): 961-975.
- [4] BORCHERS P, ROACH K, MORGAN-RUSZKOWSKI L. Operational evaluation of a weather-avoidance rerouting system[C]//14th AIAA Aviation Technology Integration and Operations Conference, 2014.
- [5] TAYLOR C, COATES P, LARSEN D, et al. Adaptive Network Design for Dynamic Rerouting[C]//2018 Aviation Technology Integration and Operations Conference, 2018.
- [6] 徐肖豪, 李成功, 赵疑飞, 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.
- [7] 王莉莉, 周娟. 动态突发天气下同高度层改航模型和算法研究[J]. 武汉理工大学学报, 2014, 36(5): 86-90.
- [8] 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.
- [9] 王清琦, 张兆宁. 单体雷暴下的改航模型研究[J]. 航空计算技术, 2016, 46(1): 44-47.
- [10] 蒋昕, 胡明华, 张颖, 等. 基于飞行受限区划设的航班改航研究[J]. 华东交通大学学报, 2016, 33(3): 60-67.
- [11] KROZEL J, MITCHELL J, POLISHCHUK V, et al. Capacity estimation for airspaces with convective weather constraints[C]//AIAA Guidance Navigation and Control Conference and Exhibit, 2007.
- [12] DELAURA R, EVANS J. An exploratory study of modeling en-route pilot convective storm flight deviation behavior[R]. Lexington, Massachusetts: Lincoln Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, 2006.
- [13] DEARMON J, GREENBAUM D, KERNS K, et al. User evaluation of numeric attributes of automatically generated reroutes[C]//11th AIAA Aviation Technology, Integration and Operations Conference, 2011.

Tactical Rerouting in Severe Weather

Mao Limin, Peng Ying, Jia Zijun

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The Air Traffic Control (ATC) decision updates along with the convective weather conditions in real time. In the absence of decision-making support tools, the different rerouting preferences of the pilots deepen the controller workload in convective weather. In response to the convective weather covering the planned route in tactical stage, the Weather Avoidance Field (WAF) product considering the pilot's actual flight preference was used to accurately reflect the impact of convective weather during actual flight. Based on the continuously updated Weather Avoidance Field products, a multi-objective integer programming model was established and a genetic algorithm based on linear combination weighting was designed. Taking the city-pair -- Guangzhou Baiyun to Shanghai Hongqiao -- as an example, this study finds out that the generated diversion route completely avoids the actual continuously updated convective weather, which can be used for the decision support of the controller in the tactical stage.

Key words: convective weather; tactical reroute; multi-objective optimization; genetic algorithm