

DOI:10.16356/j.1005-2615.2023.01.015

## 连续下降运行中的飞行冲突预测与解脱算法

魏志强, 徐光钰

(中国民航大学空中交通管理学院, 天津 300300)

**摘要:** 针对连续下降运行(Continuous descent operation, CDO)中的航空器冲突预测与解脱策略问题, 构建了四维航迹(Four-dimensional trajectory, 4DT)预测模型, 实现飞行冲突的准确预测; 以燃油消耗量、冲突时长为优化目标, 以航空器在连续下降运行时的飞机速度、下降轨迹角(Descent path angle, DPA)为优化变量, 基于多目标遗传算法 NSGA-II 实现飞行冲突解脱。最后以某终端区内多机 CDO 飞行为例进行冲突预测和解脱, 分析了优化目标权重系数对空域内平均耗油量和优化变量影响。结果表明, 给出的解脱算法可以实现终端空域内的多机无冲突连续下降运行。与优化前相比, 20 架飞机的平均耗油节约了 11 kg/架, 空域内飞机之间的飞行冲突累积时间从 984 s 减少到 0, 即消除了飞行冲突。研究结果有助于实现空域内多机无冲突连续下降运行, 提高 CDO 在繁忙机场的实施率和运行效果。

**关键词:** 连续下降运行; 四维航迹; 冲突预测; 多目标遗传算法; 冲突解脱; 下降轨迹角

**中图分类号:** V355 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2023)01-0123-08

## A Flight Conflict Prediction and Resolution Algorithm in Continuous Descent Operation

WEI Zhiqiang, XU Guangyu

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

**Abstract:** Aiming at the problem of aircraft conflict prediction and resolution strategy in continuous descent operation (CDO), a four-dimensional trajectory (4DT) prediction model is constructed to realize the accurate prediction of flight conflicts. We take fuel consumption and conflict duration as the optimization objectives, and aircraft speed and descent path angle (DPA) as the optimization variables. Thus, flight conflict resolution is realized based on a multi-objective genetic algorithm, NSGA-II. Finally, a multi aircraft CDO flight in a terminal area is taken as an example for conflict prediction and resolution, and the influence of the optimization target weights on the average fuel consumption and the optimization variables in airspace is analyzed. The results show that the proposed algorithm can realize multi-aircraft conflict-free CDO in the terminal airspace. Compared with the values before optimization, the average fuel consumption of the 20 aircraft is saved by 11 kg/fight, and the cumulative flight conflict time between aircraft in airspace is reduced from 984 s to 0, which eliminates the flight conflict. The research results are helpful to realize multi-aircraft conflict-free CDO in airspace, and can improve the implementation rate and operation effect of CDO in busy airports.

**Key words:** continuous descent operation; four-dimensional trajectory; conflict prediction; multi-objective genetic algorithm; conflict release; descent path angle

收稿日期: 2022-03-27; 修订日期: 2022-06-23

通信作者: 徐光钰, 女, 硕士研究生, E-mail: 593140247@qq.com。

引用格式: 魏志强, 徐光钰. 连续下降运行中的飞行冲突预测与解脱算法[J]. 南京航空航天大学学报, 2023, 55(1): 123-130. WEI Zhiqiang, XU Guangyu. A flight conflict prediction and resolution algorithm in continuous descent operation[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023, 55(1): 123-130.

连续下降运行(Continuous decent operation, CDO)是指飞机在下降过程中持续保持慢车推力的一种下降方式<sup>[1]</sup>,与传统的梯级式下降相比,可以有效减少燃油消耗、降低噪声污染并减轻飞行员操作负荷<sup>[2]</sup>。然而实施CDO时的飞行冲突数量和强度会明显多于传统梯级下降模式,致使国内外多个机场尽管设计了CDO程序,但通常只用于凌晨时段的小流量情景下<sup>[3]</sup>。

在连续下降运行方面,Barmore等<sup>[4]</sup>研究了空客330在CDO过程中从初始下降高度下降到610 m的合理飞行间距。Lowther等<sup>[5]</sup>在研究中分析得出了CDO无法在空域繁忙时间段内推广应用的原因,即无法准确地预测航空器未来的航迹,特别是在复杂的空域内实施CDO程序有安全隐患。魏志强等<sup>[6]</sup>通过B737-800飞机性能软件,对影响下降的参数进行了数据拟合,得到了CDO性能参数计算模型。谷润平等<sup>[7]</sup>研究了飞机在进场过程中的飞行参数,得到了CDO模式下的飞行参数优化方法。上述研究基于航空器在CDO过程中的性能参数开展,没有给出能够有效预测航空器在CDO期间的四维航迹方法,并提供冲突预测和解脱策略。

在传统的飞行冲突预测与解脱方面,Netjasov<sup>[8-9]</sup>在设计框架下开发了评估冲突风险的模型,该模型假设当飞机对的水平或垂直间隔违反设定的最小值时,即可以认为飞机之间存在冲突。Alonso-Ayuso等<sup>[10]</sup>提出了一种被称为VTAC的混合整数非线性优化模型,来处理飞机冲突检测和解决问题。Dhief等<sup>[11]</sup>基于ADS-B建立了通过调节速度来解决冲突的优化模型。Hao等<sup>[12]</sup>基于四维航迹(Four-dimensional trajectory, 4DT)运行的航空器动力学模型预测航空器未来的地理位置,并根据5架航空器的时空棱柱是否相交进行冲突探测,通过仿真验证了该方法的有效性。Cai等<sup>[13]</sup>提出了一种的混合整数非线性规划(Mixed integer non-linear programming, MINLP)公式,即允许飞机改变速度和高度以保持分离来避免冲突问题。张思远等<sup>[14]</sup>提出航迹规划算法,通过将冲突区域网格化规划出全局最优的无冲突航迹。张启钱等<sup>[15]</sup>提出的低空多机冲突探测与解脱模型,具有更好的解脱效率和更高的解脱架次极限。Tang等<sup>[16]</sup>提出了一种基于调速和航向策略的多机冲突解决方案。Wang等<sup>[17]</sup>研究了空中交通网络物理系统(Cyber physical system, CPS)节点的影响和不确定性来保证飞行安全。Jiang等<sup>[18]</sup>设计了一种迭代启发式算法,同时协调和优化飞机的航线和调度来解决冲突。上述研究都是基于传统运行方式下的飞机开展的,没有考虑在CDO下的冲突预测与解脱策略。

针对上述问题,以空域内航空器的燃油消耗量、冲突时长为优化目标,运行速度和下降轨迹角为优化变量,基于多目标遗传算法建立了多目标优化模型对问题进行求解分析。然后以某终端空域内多机CDO为例进行仿真分析。

## 1 CDO中的冲突预测与解脱模型

首先建立航空器的飞行性能参数计算模型和面向CDO的4DT预测模型,然后建立多目标飞行冲突优化解脱模型。

### 1.1 飞行性能参数计算模型

CDO包括初始巡航段和下降段,参照BADA(Based of Aircraft Data)里的航空器气动模型、推力模型及油耗模型等,假定航空器是一个质点,构建巡航和下降阶段的航空器动力和运动学模型。

#### (1) 巡航阶段

正常巡航推力 $T_{cr}$ 按定义设置等于阻力 $D$ 。根据BADA手册,阻力计算公式为

$$D = \frac{1}{2} C_D \rho V_{TAS}^2 S_w \quad (1)$$

式中: $C_D$ 为阻力系数; $\rho$ 为空气密度; $V_{TAS}$ 为航空器真空速; $S_w$ 为机翼参考面积。

巡航阶段耗油量 $f_{cr}$ 计算公式为

$$f_{cr} = \eta \times T_{cr} \times C_{fcr} \quad (2)$$

式中: $\eta$ 为推力特定燃料消耗量; $C_{fcr}$ 为巡航燃料流量因子。

#### (2) 下降阶段

在下降阶段,航空器为等DPA下降状态,因此下降梯度 $\frac{dh}{dt}$ 可表示为

$$\frac{dh}{dt} = -(V_{TAS} \times \sin(DPA)) \quad (3)$$

下降推力 $T_{des}$ 可表示为

$$T_{des} = \frac{dh}{dt} \times \frac{mg}{f\{M\} \times V_{TAS}} + D \quad (4)$$

式中: $m$ 为航空器质量; $g = 9.80665$ 为重力加速度; $f\{M\}$ 为能量份额因子。

下降阶段耗油量 $f_{des}$ 计算公式为

$$f_{des} = \eta \times T_{des} \quad (5)$$

### 1.2 面向CDO的4DT预测模型

与传统梯级式下降方式不同,CDO从下降顶点开始实施下降,中间没有执行平飞段的操作,一直下降到最终进近定位点,飞机截获下滑道,完成整个连续下降过程。因此CDO垂直轨迹可以划分为两个航段,一个是航空器的巡航平飞航段,另一个是连续下降航段。水平飞行轨迹剖面采用直线连接前后两个航路点。根据CDO程序,可以把航

空器水平航迹的飞行过程分为多个航段,具体计算流程如图 1 所示。

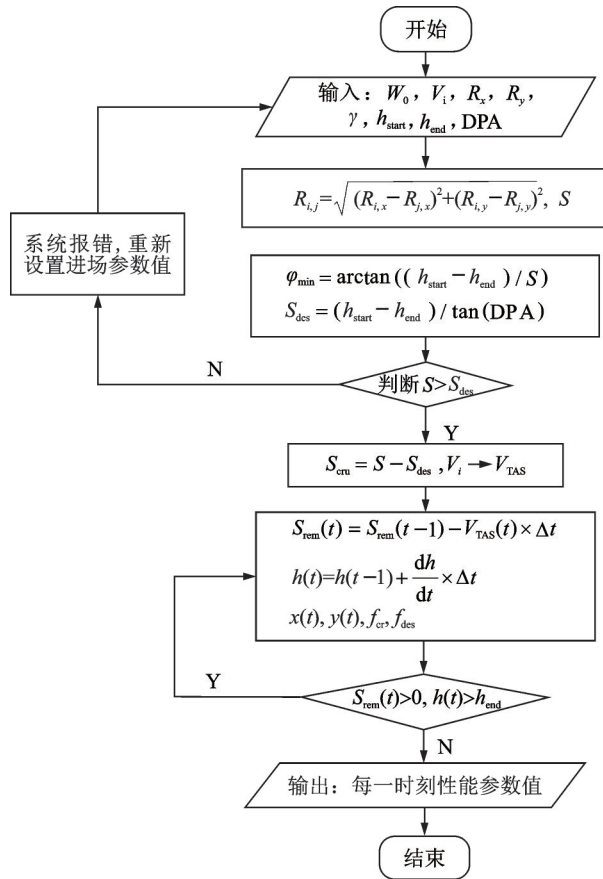


图 1 4DT 预测模型流程图

Fig.1 Flow chart of 4DT prediction model

根据图 1 确定的具体计算步骤如下:

(1) 输入机型参数和进场程序设置参数。首先输入飞机初始质量  $W_0$ 、飞机初始表速  $V_i$ 、航段起始横纵坐标值  $[R_x, R_y]$ 、每个航段对应的航迹角  $[\gamma]$ 、飞机初始高度  $h_{start}$ 、飞机结束高度  $h_{end}$ 、DPA;

(2) 计算每个航段距离  $R_{i,j}$  和航路总距离  $S$ 。通过航段起始横纵坐标值和计算每个航段距离,由此得到航路总距离。 $(R_{i,x}, R_{i,y})$  表示航段  $R_{i,j}$  起点的横纵坐标值,  $(R_{j,x}, R_{j,y})$  表示该航段终点的横纵坐标值。再结合每个航段对应的航迹角,计算飞机实际的航路点坐标。

(3) 计算下降距离  $S_{des}$  和飞机可调整的最小 DPA 值。首先利用反正切函数计算当巡航段为 0 时的下降角,此时的下降角即为飞机可调整的最小 DPA 角度值,定义为  $\varphi_{min}$ ;然后通过预设给出的 DPA 值和起始高度值,由三角公式可算出这个进场程序在该 DPA 值下对应的下降距离。

(4) 计算巡航距离  $S_{cru}$ 。在计算巡航距离前,需要先通过航路总距离和下降距离的差值来判断是否存在巡航距离,如果  $S > S_{des}$ ,那么两者的差值

即为所求。利用表速  $V_i$  与真空速  $V_{TAS}$  转换公式,将  $V_i$  转换成  $V_{TAS}$  进行后续计算。

(5) 计算飞机每一时刻的位置参数和性能参数。以  $\Delta t = 1\text{ s}$  为时间步长,飞机为等表速  $V_i$  运行和等 DPA 下降模式,通过 MATLAB 编码得出飞机每个时刻的性能参数值,如巡航段耗油量  $f_{cr}$  和下降段耗油量  $f_{des}$ ,飞行高度  $h(t)$  和剩余距离值  $S_{rem}(t)$  等。通过附加判断每一时刻飞机剩余距离的大小,来判断飞机此刻所在航段,从而能得到每一时刻飞机的横纵坐标值  $(x(t), y(t))$ 。反复循环,直至飞机完成该进场程序飞行。

### 1.3 多目标优化模型

首先,假设在给定空域内有  $n$  架航空器,预测得到每架航空器的四维航迹数据,以此来判断空域内任意两架航空器间的位置关系是否同时小于规定的垂直安全间隔和水平安全间隔,从而判断航空器对之间是否存在冲突情况。如果预测到航空器间存在冲突情况,预设给出每个航空器的 DPA 区间  $[DPA_{min}, DPA_{max}]$  和调速区间  $[V_{i_{min}}, V_{i_{max}}]$ ,通过同时改变 DPA 角度和航空器速度,来实现冲突解脱。并在满足冲突解脱的前提下,比较所有航空器在空域内的耗油量总和,找到最节油、最环保的 DPA 角度和速度值。

#### (1) 优化变量

航空器飞行的耗油量与表速和飞行状态有关,在 CDO 中改变航空器的 DPA 角度可以改变巡航距离和下降距离,因此选取的优化变量为每架航空器的 DPA 角度和表速值。

#### (2) 优化目标

本文默认短时冲突可以通过实际运行中的自主间隔保持系统或飞行员手工操作来规避,因此设置空域内的燃油消耗量和冲突时长为优化目标,目标函数为

$$\min \left[ \sum_{i=1}^n F_i(DPA_i, V_{i,i}), \sum_{i=1}^n t_{Ci}(DPA_i, V_{i,i}) \right] \quad (6)$$

式中:  $F_i$  为第  $i$  架航空器的耗油量,  $DPA_i$  为第  $i$  架航空器的下降轨迹角大小,  $V_{i,i}$  为第  $i$  架航空器的表速度,  $t_{Ci}$  为第  $i$  架航空器在空域内发生冲突的时长。

#### (3) 约束条件

设第  $i$  架航空器在  $t$  时刻的坐标为  $(x_i(t), y_i(t), h_i(t))$ , 第  $j$  架航空器在  $t$  时刻的坐标为  $(x_j(t), y_j(t), h_j(t))$ , 那么在  $t$  时刻这两架航空器的水平间隔  $s_{i,j}(t)$  为

$$s_{i,j}(t) = \sqrt{(x_i(t) - x_j(t))^2 + (y_i(t) - y_j(t))^2} \quad (7)$$

垂直间隔  $h_{i,j}(t)$  为

$$h_{i,j}(t) = |h_i(t) - h_j(t)| \quad (8)$$

因此,当某一时刻两架航空器的水平间隔和垂直间隔都不大于管制要求的安全间隔时,则判定此刻存在冲突情况。

同时,实际飞行中,为了乘客的舒适度,航空器下降轨迹角和表速大小都有着相应的区间值,并且航空器在进行连续下降运行前会有着一段巡航距离,因此对优化模型设置合理的约束为

$$\text{s.t.} \begin{cases} \text{DPA}_{\min} \leq \text{DPA}_i \leq \text{DPA}_{\max} \\ V_{i,\min} \leq V_{i,i} \leq V_{i,\max} \\ \Delta s < s_{i,j}(t) \\ \Delta h < h_{i,j}(t) \\ h_{i,\text{start}} \geq h_i(t) \geq h_{i,\text{end}} \\ S_{i,\text{cru}} > 0 \\ S_i \geq S_{i,\text{rem}}(t) \geq 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\text{DPA}_{\min}$ 为航空器限制可调整的最小DPA角度值, $\text{DPA}_{\max}$ 为航空器限制可调整的最大DPA角度值; $V_{i,\min}$ 为航空器限制可调整的最小表速度值, $V_{i,\max}$ 为航空器限制可调整的最大表速度值;第3和第4个约束条件为两架航空器在同一时刻的水平间隔和垂直间隔大小; $h_{i,\text{start}}$ 为第*i*架航空器的初始高度值, $h_{i,\text{end}}$ 为第*i*架航空器预设离开空域时的高度值; $S_{i,\text{cru}}$ 为第*i*架航空器的巡航距离; $S_i$ 为第*i*架航空器在空域内的总距离, $S_{i,\text{rem}}(t)$ 为第*i*架航空器当前的剩余距离。

从上述所述可以看出,这是一个多约束、多目标的非线性规划问题,对此将采用多目标遗传算法对该问题进行求解。

## 2 基于多目标遗传算法的优化模型求解

运用多目标遗传算法,可以简化该优化问题,并且快速地确定该问题的有效解。

### 2.1 决策变量的编码方法

如前所述,决策变量为 $\{\text{DPA}_i, V_{i,i}\}$ 。因为 $\text{DPA}_i$ 和 $V_{i,i}$ 允许改变的区间是确定的,所以对决策变量采用二进制编码, $\text{DPA}_i$ 编码长度为20位; $V_{i,i}$ 编码长度为20位。为了简化计算,将每个染色体对应的目标函数值即适应度函数值储存在染色体的最后一位的位置。简化后的染色体模型如图2所示。

### 2.2 适应度函数

CDO中的冲突预测与解脱策略研究问题中,

| DPA <sub>i</sub> |     |    | V <sub>i</sub> |     |    | 目标函数值f |
|------------------|-----|----|----------------|-----|----|--------|
| 1                | ... | 20 | 21             | ... | 40 | 41     |

图2 染色体模型

Fig.2 Chromosome model

优化目标为节油和解脱冲突,但由于每次改变航空器的表速度和DPA,航空器耗油量大小和在空域内的冲突情况也随着改变,因此每次得到新的染色体后,都重新调用CDO 4DT预测模型来重新预测空域内所有航空器的轨迹,计算航空器飞行期间的位置坐标和性能数据,进而判断是否有产生冲突的情况。将每次运算得到的总油耗和总冲突时间分别除以空域内的初始总油耗和初始冲突时长,再乘以对应的权重系数,然后相加,即为适应度函数*f*,计算公式为

$$f = q_1 \times \frac{\sum_{i=1}^n F_i(\text{DPA}_i, V_{i,i})}{\sum_{i=1}^n F_i^0(\text{DPA}_i^0, V_{i,i}^0)} + q_2 \times \frac{\sum_{i=1}^n t_i(\text{DPA}_i, V_{i,i})}{\sum_{i=1}^n t_i^0(\text{DPA}_i^0, V_{i,i}^0)} \quad (10)$$

式中: $q_1$ 为总油耗对应的权重系数, $q_2$ 为总冲突时长对应的权重系数,且 $q_1$ 和 $q_2$ 满足 $q_1 + q_2 = 1$ 。

$\sum_{i=1}^n F_i^0(\text{DPA}_i^0, V_{i,i}^0)$ 为初始状态下,空域内航空器总耗油量; $\text{DPA}_i^0$ 和 $V_{i,i}^0$ 分别为第*i*个航空器的初始下降轨迹角和初始表速度; $\sum_{i=1}^n t_i^0(\text{DPA}_i^0, V_{i,i}^0)$ 为初始状态下,空域内冲突时长总和。

### 2.3 算法模型的实现流程设计

模型运用多目标遗传算法NSGA-II对指定空域内的所有航空器决策变量集 $\{\text{DPA}_i, V_{i,i}\}$ 进行优化,优化模型运行流程如图3所示。首先输入航空器参数和航段点设置等,进行4DT仿真,同时计算每一时刻航空器的性能参数值,包括耗油量;然后根据仿真得到的轨迹来进行冲突预测。当预测到有冲突情况后,运用NSGA-II优化,最后得到节油的冲突解脱策略。NSGA-II优化过程采用精英保留策略,通过对染色体进行非支配排序和拥挤度计算,选出最优个体。

NSGA-II算法种群数量定义为20,最大进化代数数为100。NSGA-II算法初始化时,决策变量都在各自的约束区间内随机取值,随机取值完毕后,计算每个染色体的适应度函数值,保存到染色体最后一位。接着对染色体进行非支配排序和拥挤度计算,这就形成了第一代子种群。在种群内进行选择、交叉、变异,选择采用锦标赛选择法,每次随机从父代种群选择两个个体,优先选择排序等级高的个体,如果排序等级一样,优先选择拥挤度大的个体;交叉算法选择的是模拟二进制交叉,变异算法

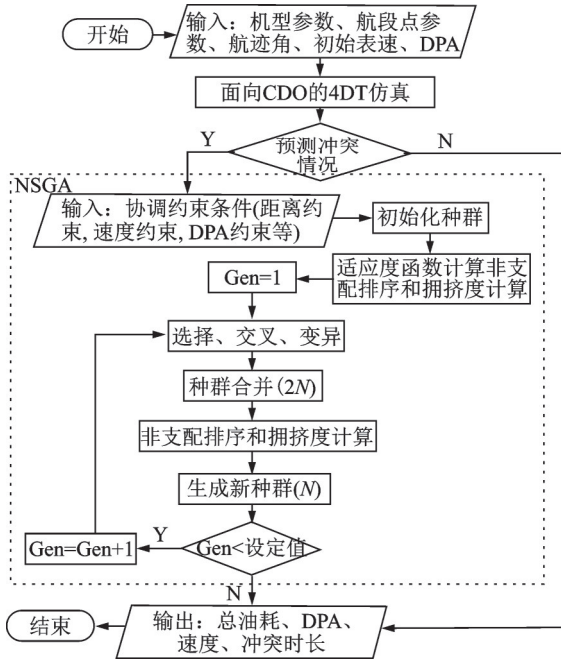


图 3 优化模型的实现流程

Fig.3 Implementation process of optimization model

选择的是多项式变异,由于变异算法借鉴了自然界的变异,因此变异的概率一般都比较小,交叉概率设置为0.9,变异概率为0.1。

### 3 算例分析

#### 3.1 面向CDO的单机4DT预测计算分析

为了验证优化模型和算法的可行性,以典型机型A320飞机为例,对所提的优化模型进行算例分析。设置飞机巡航初始质量为62 000 kg,温度偏差 $\Delta T=1^{\circ}\text{C}$ 。设置飞机初始巡航高度为8 100 m,飞机初始状态为等表速144 m/s运行,飞机固定下降轨迹角为 $2.9^{\circ}$ 。

图4所示为对应A320机型的CDO轨迹航段设置。依据1.1节的模型预测出飞机连续下降运行中性能参数如图5~7所示。

将1.2节模型预测到的每个时刻坐标数据全部绘制成图,即为飞机CDO的4DT,如图8所示。

由图8可以看出飞机在CDO中性能参数的变化情况。由于CDO程序的特殊性,飞机在巡航飞

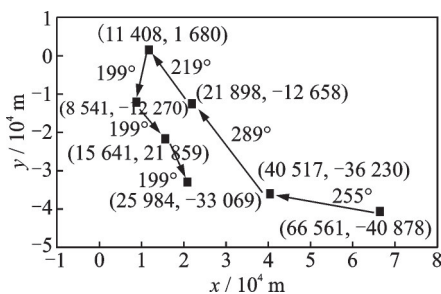


图 4 CDO 轨迹航段设置

Fig.4 CDO trajectory segment setting

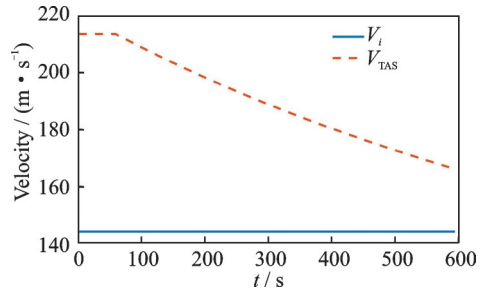


图 5 CDO 中的速度-时间图

Fig.5 Velocity-time diagram of CDO

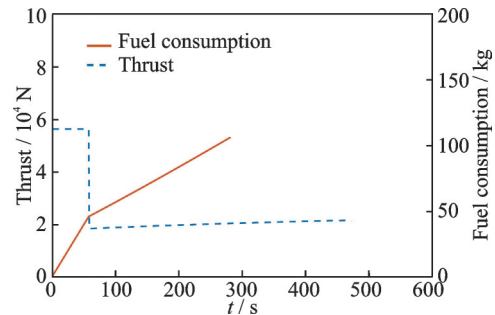


图 6 CDO 中的推力-时间和耗油量-时间图

Fig.6 Thrust-time and fuel consumption-time diagram of CDO

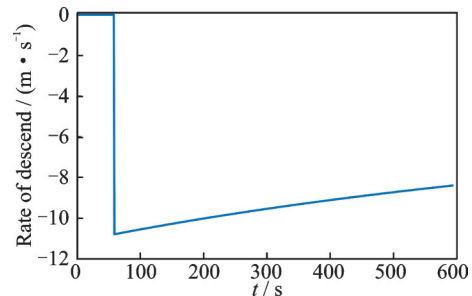


图 7 CDO 中的下降率-时间图

Fig.7 Rate of descent-time diagram of CDO

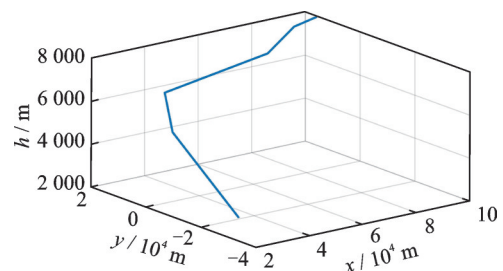


图 8 单机 CDO 四维航迹预测轨迹图

Fig.8 A320 CDO 4DT prediction diagram

行阶段,真空速和推力都处于稳定状态,当开始下降后,飞机开始使用慢车推力下降,因此推力会突然减少,然后随着真空速减小和下降率的增大,推力也随之增大,与式(4)对应。并且由于巡航推力比下降推力大,因此巡航阶段燃油消耗率也比下降阶段得快。

### 3.2 多机多目标优化模型计算分析

以某终端区实施CDO运行为例,建立进场程序模型和飞机初始条件,如图9所示。

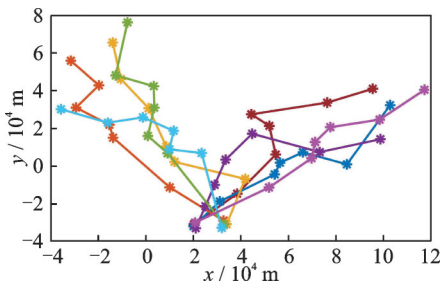


图9 进场程序水平剖面

Fig.9 Horizontal profile of approach procedure

飞机数量为20架,初始高度在8 100~8 900 m随机分布;进入空域时间在0~6 min随机分布;初始下降轨迹角在2°~4.5°;初始表速为128~180 m/s;飞机按照设定的进场程序飞行,结合1.3节中预测冲突的方法来分别预测8~20架飞机在空域内的冲突强度。计算表明,当空域中飞机数量增多时,空域内冲突也随之增加。通过冲突时长和冲突次数来反应空域内的冲突强度,如图10,11所示。

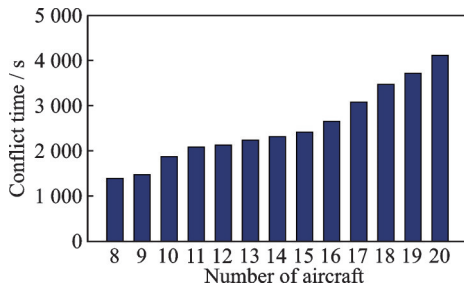


图10 CDO中的飞机架次-冲突时长图

Fig.10 Number of aircraft-conflict time diagram of CDO

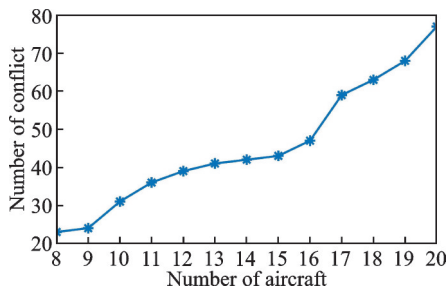


图11 CDO中的飞机架次-冲突次数图

Fig.11 Number of aircraft-number of conflict diagram of CDO

接下来,对优化模型设置合理的约束为

$$\begin{cases} [DPA_{min}, DPA_{max}] = [\varphi_{min}, 4.5] \\ [V_{i,min}, V_{i,max}] = [128, 185] \text{ m/s} \\ \Delta s = 6000 \text{ m} \\ \Delta h = 300 \text{ m} \end{cases} \quad (11)$$

首先利用1.2节模型对每架飞机的进场航迹

进行预测,从 $t=0$ 开始,当任意一架飞机完成设定的航迹飞行后,预测结束。当 $t$ 时刻预测到冲突时给当前时刻赋值为1,否则为0,记录冲突情况,如图12所示。

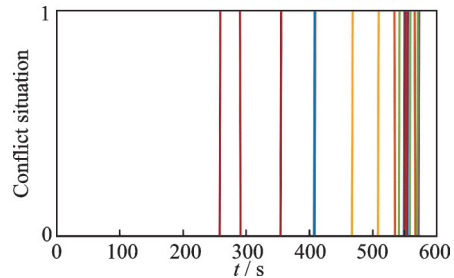


图12 优化前空域内的冲突情况

Fig.12 Conflict in airspace before optimization

预测冲突完毕后,优化模型调用多目标遗传算法对问题进行求解,设 $q_1=0.5, q_2=0.5$ 。图13为适应度函数值随遗传代数(Gen)变化的优化结果,图中纵坐标适应度函数值。从图13可以明显看出,经过算法求解后,最优的适应度函数值约为0.576。图14为在最优种群里,每个染色体与对应的适应度函数值关系,由于多目标遗传算法采用精英保留策略,因此越优的染色体排名越靠前。从图14中也可以看出,在最优种群中,排名第一的染色体适应度函数值最小,约为0.576 2,与图13的结果相呼应,验证了在CDO中实现飞行冲突预测并找到最节油的解脱策略优化模型的有效性。

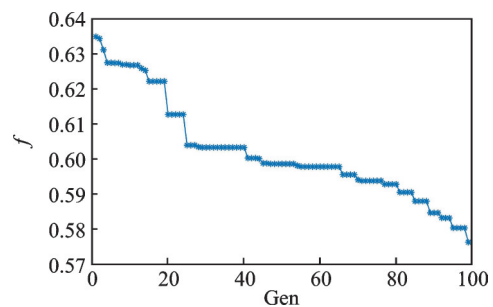


图13 优化模型运行结果

Fig.13 Operation results of optimization model

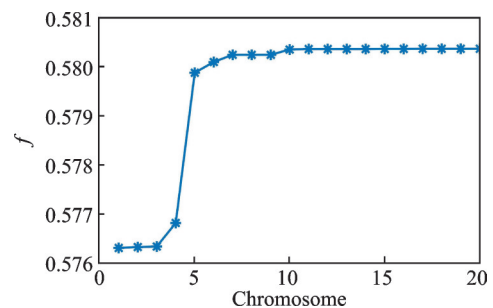


图14 染色体-适应度函数值图

Fig.14 Diagram of chromosome-fitness function

接下来进行结果分析。最优适应度值对应的每架飞机耗油量  $F$ 、DPA、表速  $V_i$ 、冲突时长  $t_c$  如表 1 所示。

表 1 最优适应度对应的飞机性能参数

Table 1 Aircraft performance parameters of optimal fitness

| 飞机 $i$ | DPA $_i$ /(°) | V $_{i,i}$ /(m·s $^{-1}$ ) | F $_i$ /kg | t $_{c_i}$ /s |
|--------|---------------|----------------------------|------------|---------------|
| 1      | 3.8           | 137.36                     | 181.19     | 0             |
| 2      | 3.2           | 146.10                     | 258.94     | 0             |
| 3      | 2.9           | 136.33                     | 199.68     | 0             |
| 4      | 3.4           | 154.85                     | 236.49     | 0             |
| 5      | 3.2           | 134.27                     | 229.29     | 0             |
| 6      | 3.7           | 180.57                     | 258.13     | 0             |
| 7      | 4.5           | 144.04                     | 166.66     | 0             |
| 8      | 4.3           | 138.39                     | 180.41     | 0             |
| 9      | 4.0           | 149.70                     | 193.71     | 0             |
| 10     | 4.3           | 156.39                     | 264.20     | 0             |
| 11     | 2.9           | 136.33                     | 199.68     | 0             |
| 12     | 4.4           | 184.69                     | 287.29     | 0             |
| 13     | 3.9           | 150.73                     | 239.95     | 0             |
| 14     | 3.5           | 149.19                     | 200.96     | 0             |
| 15     | 3.8           | 136.84                     | 165.40     | 0             |
| 16     | 4.2           | 148.67                     | 195.06     | 0             |
| 17     | 3.2           | 135.81                     | 186.64     | 0             |
| 18     | 3.0           | 159.48                     | 282.24     | 0             |
| 19     | 2.9           | 171.31                     | 253.77     | 0             |
| 20     | 4.3           | 165.14                     | 245.19     | 0             |

表 1 为在给定的权重系数下,经过优化模型得到的最优飞行方案的相关数据,从表 1 中可以看出,优化模型里的决策变量 {DPA $_i$ , V $_{i,i}$ } 和优化目标 t $_{c_i}$  均能满足设置的约束条件,由每架飞机的冲突时长 t $_{c_i}$  都为 0 可以说明空域内所有飞机均已实现冲突解脱,而图 13, 14 可以说明此时的冲突解脱策略为最节油的,再次验证了本文所提的优化模型有效性。

最后分析权重系数对 20 架飞机平均油耗、冲突时长的影响。图 15, 16 为不同权重系数下对应的空域内平均耗油量和总冲突时长关系。

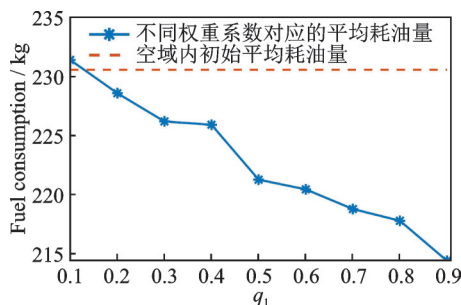


图 15 权重系数-平均耗油量图  
Fig.15 q $_1$ -average fuel consumption

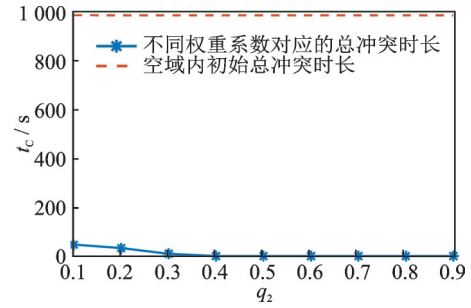


图 16 权重系数-冲突时长图  
Fig.16 q $_2$ -conflict time

从图 15, 16 可以看出,当耗油量的权重系数  $q_1 \geq 0.2$  时,均能实现空域内的节油飞行;并且当  $q_1 = 0.9$  时,空域内平均耗油量最少,但是此时冲突时长的权重系数  $q_2$  为 0.1,还存在较多冲突,因此不符合优化要求。当冲突时长的权重系数  $q_2 > 0.3$  时,空域内冲突时长为 0,说明已经实现了空域内的多机冲突解脱。因此  $q_1$  取值范围在 [0.2, 0.6],  $q_2$  取值范围在 [0.4, 0.8] 时,均能实现空域内多机节油的冲突解脱飞行。当  $q_1$  取 0.6,  $q_2$  取 0.4 时,能达到最优结果,与优化前相比,20 架飞机的平均耗油节约了 11 kg/架,空域内总冲突时长从 984 s 减少到 0。

## 4 结 论

航空器在连续下降运行时,耗油量随着推力的变化而变化,由于 CDO 程序的特殊性,飞机在下降过程的推力会比巡航过程的推力小很多,因此巡航段的耗油率会更大。为使中国民航客机在拥挤的终端区空域和飞行繁忙的时间段实施 CDO 技术,提出了一种有效的冲突预测与解脱策略。构建了 CDO 4DT 预测模型和多约束、多目标优化模型,并基于多目标遗传算法对模型进行求解。仿真结果证明,文中提出的优化模型能够实现多航空器在 CDO 过程中预测冲突并给出合理的节油解脱策略,与优化前相比,20 架飞机的平均耗油最多可节省 11 kg/架,空域内飞机之间的飞行冲突累积时间从 984 s 减少到 0,即消除了飞行冲突。求解得到的决策变量集 {DPA $_i$ , V $_{i,i}$ } 符合实际飞行情况。

未来研究工作的重点将放在把不确定因素考虑到航空器连续下降过程中的 4DT 预测,以及多机在不确定性影响下的冲突预测与解脱策略中。

### 参考文献:

[1] TORATANI D, WICKRAMASINGHE N K, WESTPHAL J, et al. Feasibility study on applying continuous descent operations in congested airspace

- with speed control functionality: Fixed flight-path angle descent[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2020, 107: 106-120.
- [2] ITOH E, WICKRAMASINGHE N K, HIRABAYASHI H, et al. Analyzing feasibility of continuous descent operation following fixed-flight path angle from oceanic route to Tokyo International Airport[C]//*Proceedings of AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference*. San Diego, USA: AIAA, 2015.
- [3] ITOH E, WICKRAMASINGHE N K, HIRABAYASHI H, et al. Feasibility study on fixed flight-path angle descent for wide-body passenger aircraft[J]. *CEAS Aeronautical Journal*, 2019, 10(2): 589-612.
- [4] BARMORE B, CAPRON W, ABBOTT T, et al. Simulation results for airborne precision spacing along continuous descent arrivals[C]//*Proceedings of the 26th Congress of ICAS and 8th AIAA ATIO*. Anchorage, USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2008.
- [5] LOWTHER M B. En route speed optimization for continuous descent arrival[D]. Atlanta, USA: Georgia Institute of Technology, 2008.
- [6] 魏志强, 温瑞英, 褚双磊. 连续下降运行中的飞行参数快速估算方法研究[J]. *飞行力学*, 2014, 32(6): 494-497.  
WEI Zhiqiang, WEN Ruiying, CHU Shuanglei. Research on methods of fast estimating flight parameters in continuous descent operation[J]. *Flight Dynamics*, 2014, 32(6): 494-497.
- [7] 谷润平, 袁婕, 魏志强. 基于遗传算法的 RTA 进场飞行参数优化[J]. *飞行力学*, 2018, 36(5): 20-24.  
GU Runding, YUAN Jie, WEI Zhiqiang. Optimization of approach flight parameter with RTA based on genetic algorithm[J]. *Flight Dynamics*, 2018, 36(5): 20-24.
- [8] NETJASOV F. Framework for airspace planning and design based on conflict risk assessment: Part 1: Conflict risk assessment model for airspace strategic planning[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2012, 24: 190-212.
- [9] NETJASOV F. Framework for airspace planning and design based on conflict risk assessment: Part 2: Conflict risk assessment model for airspace tactical planning[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2012, 24: 213-226.
- [10] ALONSO-AYUSO A, ESCUDERO L F, MARTÍN-CAMPO F J. An exact multi-objective mixed integer nonlinear optimization approach for aircraft conflict resolution[J]. *Top*, 2016, 24(2): 381-408.
- [11] DHIEF I, DOUGUI N H, DELAHAYE D, et al. Conflict resolution of North Atlantic air traffic with speed regulation[J]. *Transportation Research Proceedings*, 2017, 27: 1242-1249.
- [12] HAO S, ZHANG Y, CHENG S, et al. Probabilistic multi-aircraft conflict detection approach for trajectory-based operation[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2018, 95: 698-712.
- [13] CAI J, ZHANG N. Mixed integer nonlinear programming for aircraft conflict avoidance by applying velocity and altitude changes[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2019, 44(10): 8893-8903.
- [14] 张思远, 李仙颖, 沈笑云. 基于 ADS-BIN 的冲突预测与多机无冲突航迹规划[J]. *系统仿真学报*, 2019, 31(8): 1627-1635.  
ZHANG Siyuan, LI Xianying, SHEN Xiaoyun. ADS-BIN based conflict prediction and conflict-free trajectory planning for multi-aircraft[J]. *Journal of System Simulation*, 2019, 31(8): 1627-1635.
- [15] 张启钱, 王中叶, 张洪海, 等. 基于 SMILO-VTAC 模型的复杂低空多机冲突解脱方法[J]. *交通运输工程学报*, 2019, 19(6): 125-136.  
ZHANG Qiqian, WANG Zhongye, ZHANG Honghai, et al. SMILO-VTAC model based multi-aircraft conflict resolution method in complex low-altitude airspace[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2019, 19(6): 125-136.
- [16] TANG Xinmin, JI Xiaoqi, LI Teng. Key technology in multi-UAV conflict detection and resolution strategy[J]. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2020, 37(2): 175-186.
- [17] WANG Xinglong, HE Min. Influential node ranking and invulnerability of air traffic cyber physical system[J]. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2021, 38(2): 288-297.
- [18] JIANG Yu, HU Zhitao, LIU Zhenyu, et al. A bilevel programming approach for optimization of airport ground movement[J]. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2021, 38(5): 829-839.

(编辑:张蓓)