

文章编号:1674-8190(2022)02-150-09

# 雷暴天气下的仪表进近航段航线规划研究

鲁力,刘晨宇

(中国民用航空飞行学院 空中交通管理学院, 广汉 618307)

**摘要:** 雷暴天气会对飞机运行安全产生严重影响,在进近航段中若遭遇雷暴天气会导致改航不经济、实时性差、效率低等问题,采用改进的动态窗口算法(DWA)对雷暴天气下的进近航线进行仿真规划。算法前期通过建立DWA下的飞机运动模型及人为设定的雷暴轨迹进行模拟仿真,验证算法躲避雷暴改航仿真的功能性;通过对案例中的雷暴位移坐标进行时间相关的拟合,得到雷暴预测移动轨迹,并带入算法进行仿真;将实际改航航迹和仿真改航航迹进行图像的余弦相似度及经济性、实用性分析。结果表明:该算法能够对进近航段上的雷暴进行有效规避,并且轨迹光滑,经济可行,结合新航线技术具有较强的实用性。

**关键词:** 雷暴天气;多项式拟合;动态窗口算法;余弦相似性

中图分类号: V355

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2022.02.22

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

## Research on Instrument Approach Segment Path Planning under Thunderstorm Weather

LU Li, LIU Chenyu

(College of Air Traffic Management, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

**Abstract:** Thunderstorm weather has a serious impact on the safety of aircraft operation. During approach segment, thunderstorm weather can result in uneconomical route changing, poor real-time performance and low efficiency etc. To solve these problems, the advanced dynamic window algorithm (DWA) is adopted to simulate the approach trajectory under thunderstorm weather. In the early stage of the algorithm, the aircraft motion model under DWA is established and the thunderstorm trajectory is artificially set for simulation to verify the functionality of the algorithm to avoid thunderstorm diversion simulation. Then, by fitting the thunderstorm displacement coordinates in the case with time correlation, the thunderstorm predicted movement trajectory is obtained and brought into the algorithm for simulation. Finally, the cosine similarity, economy and practicability of the actual and simulation diversion track are analyzed. The results show that the algorithm can effectively avoid thunderstorms in the approach segment, and the trajectory is more smooth, economical and feasible. Combined with the new route technology, it is of strong practicability.

**Key words:** thunderstorm weather; polynomial fitting; dynamic window algorithm; cosine similarity

收稿日期: 2021-06-06; 修回日期: 2021-11-06

基金项目: 中国民用航空飞行学院青年基金(Q2020-118)

通信作者: 鲁力, 421361599@qq.com

引用格式: 鲁力, 刘晨宇. 雷暴天气下的仪表进近航段航线规划研究[J]. 航空工程进展, 2022, 13(2): 150-158.

LU Li, LIU Chenyu. Research on instrument approach segment path planning under thunderstorm weather[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(2): 150-158. (in Chinese)

## 0 引言

近年来随着我国经济的快速发展,民航旅客人数大幅上涨,如何安全高效地进行商载运行成为当前民航业发展的关键。飞机进近过程中,高度降低,容易遭受雷暴的威胁<sup>[1]</sup>。雷暴会产生剧烈的上升气流与下降气流,飞入其中会对飞机结构造成严重破坏;雷暴内部含有大量过冷水,会造成飞机积冰进而影响飞机着陆;气流碰撞产生电击,会对机身突出部位和电子设备造成损坏。因此对进近航段的雷暴天气航线规划具有重要意义。

近年来,将路径规划用于民用航空方面的研究主要有:疏利生等<sup>[2]</sup>在Tkinter场面仿真的基础上,采用Q-learning算法进行静态路径规划;侯盼盼等<sup>[3]</sup>通过分时段滑行冲突预测,为路径规划提供依据;陈亚青等<sup>[4]</sup>采用配对进近模式进行路径规划,提高了机场的运行效率;刘鹏飞<sup>[5]</sup>针对飞行规则及限制建立非线性规划模型,并通过求解模型进行无人机的路径规划。以上研究多以静态环境进行路径规划。

而在雷暴天气下的民用航空器航线规划属于动态环境路径规划,目前该领域的研究主要有:向征等<sup>[6]</sup>针对雷暴天气下的多航空器之间的冲突避让问题,首次提出以人工势场法为基础的蚁群算法进行路径规划;吕宗平等<sup>[7]</sup>针对超级单体雷暴建立了飞行限制区,并根据其各个顶点的移动建立了危险天气模型,采用目标规划进行了改航路径的规划;J. Pannequin等<sup>[8]</sup>针对强对流天气下航空器的冲突问题,提出了一种基于非线性的模型来规划航迹的方法。以上研究大多将雷暴天气视为静态障碍物,缺乏时效性及实用性,或者针对雷暴天气建立了动态环境,但求解过于复杂。

本文在上述研究的基础上,将改进的动态窗口算法(DWA)<sup>[9]</sup>用于动态的雷暴天气中,对进近飞机的航迹进行仿真与规划,并结合实例,验证该算法的可靠性与实用性。

## 1 模型的建立与仿真

### 1.1 飞机运动模型的建立

#### 1.1.1 飞机运动方程

飞机在进近航段,飞机高度上调不便于沿最佳下滑梯度进近,高度下调有接地风险。由于调配高度要求较为严格,飞机在进近航段多采用绕飞措施规避雷暴。

因此飞机在进近航段运动轨迹可描述为

$$V_t = (v_t, \omega_t) \quad (1)$$

式中: $V_t$ 为 $t$ 时刻飞机轨迹集合; $v_t$ 为 $t$ 时刻飞机速度; $\omega_t$ 为飞机角速度。

描述飞机轨迹时,飞机飞行模型如图1所示。

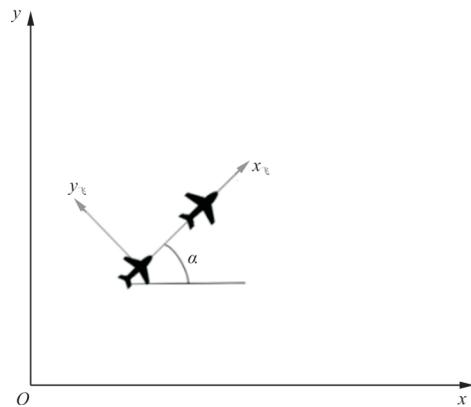


图1 飞机飞行模型图

Fig. 1 Aircraft flight model diagram

两个相邻时刻间距足够小时,可将该段运动轨迹视为直线飞行,投影在坐标系中可以表达为

$$\begin{cases} \Delta x = v_t \Delta t \cos(\alpha_t) \\ \Delta y = v_t \Delta t \sin(\alpha_t) \end{cases} \quad (2)$$

因此,飞机某时刻坐标及飞机偏航角可表示为

$$\begin{cases} x_{t+1} = x_t + v_t \Delta t \cos(\alpha_t) \\ y_{t+1} = y_t + v_t \Delta t \sin(\alpha_t) \\ \alpha_{t+1} = \alpha_t + \omega_t \Delta t \end{cases} \quad (3)$$

#### 1.1.2 飞机运动参数

由于在二维空间中存在无穷多组速度,而现实中由于飞机自身因素及雷暴的影响,可以通过

以下限制,对速度进行一定约束。

(1) 保证自身性能下的速度限制:

$$V_t \{ (v, \omega) | v \in [v_{t-1} - v_a \Delta t, v_{t-1} + v_b \Delta t] \cap \omega \in [\omega_{t-1} - \omega_a \Delta t, \omega_{t-1} + \omega_b \Delta t] \} \quad (5)$$

式中: $v_a, \omega_a$ 为飞机在  $t-1$ 时刻所能提供的最大制动线加速度与角加速度; $v_b, \omega_b$ 为飞机在  $t-1$ 时刻所能提供的最大驱动线加速度与角加速度。

$$\begin{cases} V_t^2 = \{ (v^2, \omega^2) [v^2 \leq 2v_a D(v_{t-1}, \omega_{t-1}) \cap \omega^2 \leq 2\omega_a D(v_{t-1}, \omega_{t-1})] \} \\ V_t \geq 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $D$ 为  $t-1$ 时刻飞机距雷暴的最小距离<sup>[10]</sup>。

### 1.1.3 飞机速度评价函数

(1) 评价函数指标的建立

飞机的速度评价指标主要由三个指标决定如表 1 所示。

表 1 飞行速度评价指标表  
Table 1 Flight speed evaluation index table

参数	数值
航向角	$A(v, \omega) = \pi - \theta$ ( $\theta$ 为飞机当前航向与目标方向的夹角)
距离雷暴距离	$D(v, \omega)$
速度	$V(v, \omega)$

(2) 指标的归一化处理

由于三个指标是不同量纲,因此对其进行归一化处理,公式<sup>[11]</sup>如下:

$$x(i) = \frac{x(i)}{\sum_{i=1}^k x(i)} \quad (7)$$

式中: $x(i)$ 为当前动态窗口算法<sup>[12]</sup>下  $i$ 轨迹的  $x$  指标; $k$ 为当前动态窗下所有轨迹。

(3) 速度评价函数

在已有的评价指标基础上设定比重建立综合评价函数:

$$H(v, \omega) = \beta A + \gamma D + \epsilon V \quad (8)$$

式中: $\beta, \gamma, \epsilon$ 分别为航向角、安全距离、速度比例系数,考虑本文主要以与雷暴云安全距离为主要评价指标<sup>[13]</sup>,因此设定  $\beta = 0.3, \gamma = 0.4, \epsilon = 0.3$ 。

## 1.2 Matlab 模型仿真

根据所建立的飞机运动模型,利用 Matlab 进行仿真模拟,观测飞机为躲避雷暴规划路线是否合理。关于雷暴的形状设定为圆团状雷暴(即在仿真过程中以相邻四点组成移动障碍物),其轨迹

$$V_t = \{ v \in [v_{\min}, v_{\max}], \omega \in [\omega_{\min}, \omega_{\max}] \} \quad (4)$$

(2) 飞机受自身发动机性能的限制:

(3) 基于飞机与雷暴之间的距离限制:

为了避免遇到即将出现在航线上的雷暴,飞机将以最大制动加速度减速,即

设定为圆形轨迹。具体算法流程如图 2 所示,参数如表 2 所示。

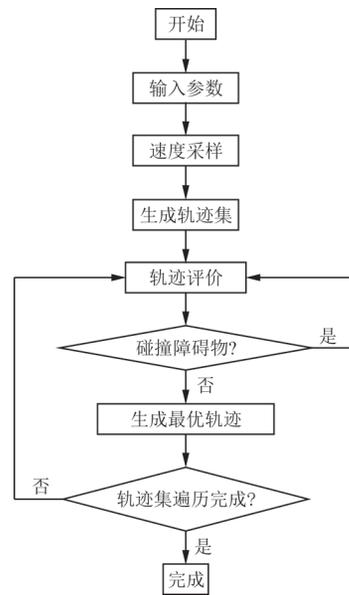


图 2 动态窗口算法流程图  
Fig. 2 Flow chart of dynamic window algorithm

表 2 初始仿真参数表  
Table 2 Initial simulation parameter table

参数	数值
飞机初始位置/(50 km)	(0, 0)
飞机初始偏航角/rad	$\pi/4$
飞机初始速度/(km·s <sup>-1</sup> )	0
目标位置/(50 km)	(9, 9)
最高速度/(km·s <sup>-1</sup> )	0.23
最高偏航速度/(rad·s <sup>-1</sup> )	20.0
加速度/(km·s <sup>-2</sup> )	0.001
旋转加速度/(rad·s <sup>-2</sup> )	1
雷暴轨迹/km	$(y = \cos t + 2.5, x = \sin t + 1)$
雷暴形状/(50 km)	$(x, y)(x + 1, y)$ $(x, y + 1)(x + 1, y + 1)$
距离雷暴云最小距离/(50 km)	0.25

模拟结果如图 3 所示。

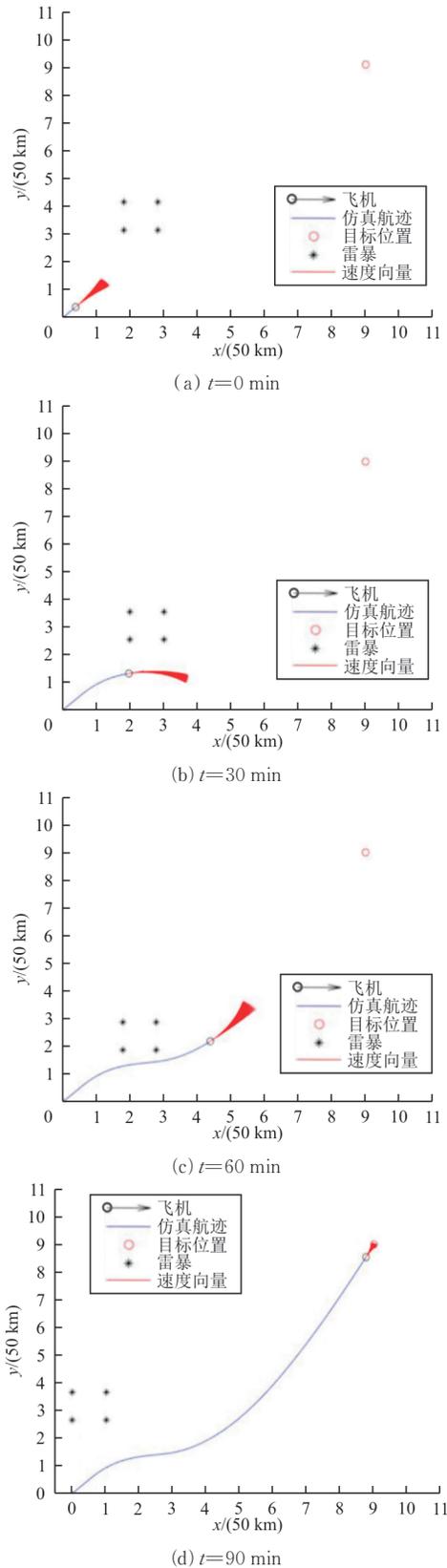


图 3 飞机躲避雷暴改航路线模拟仿真

Fig. 3 Simulation of flight diversion route for aircraft avoiding thunderstorm

从图 3 可以看出:该模型中雷暴中心以 (2,2.5) 为圆心,100 km 为半径的圆形区域范围内运动。飞机以初始航行角  $\pi/4$  进行飞行,飞行过程中成功避开运动的雷暴。

## 2 航班实例验证

本文以 2021 年 1 月 20 日 CZ6428 航班在执行武汉—合肥—临沂飞行任务为例。

CZ6428 航班在经过合肥经停前执行进近程序,原计划飞行路线会与雷暴相遇。因此,通过该案例,生成其雷暴与时间相关的位移参数方程结合 DWA 模型进行进近航段雷暴天气下航线规划仿真。

### 2.1 雷暴位移参数方程的建立

通过对不同时间合肥新桥机场上空气象雷达回波图(雷达回波图中,雷暴云呈红色显示)的观测(如图 4 所示),雷暴由西南方向向合肥新桥机场上空移动,通过图形软件对 90 min 内气象雷达显示的雷暴位移图片进行叠加,得到雷暴位移轨迹如图 5 所示。

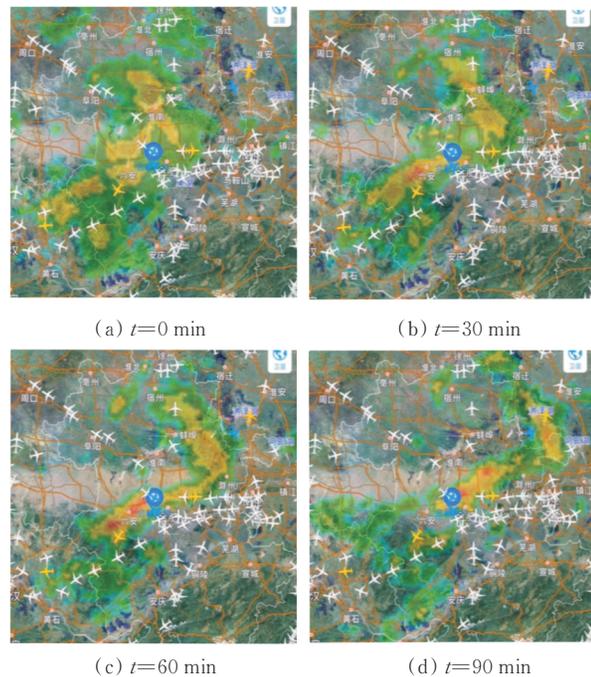


图 4 雷暴各时间点位置图(红色区域)

Fig. 4 Location map of thunderstorm at each time point (red area)



图 5 雷暴运动轨迹图  
Fig. 5 Thunderstorm trajectory

为拟合雷暴运动轨迹方程,本文以武汉天河机场为原点,正东方向为  $x$  轴,正北方向为  $y$  轴建立直角坐标系得到雷暴位移模型如图 6 所示。

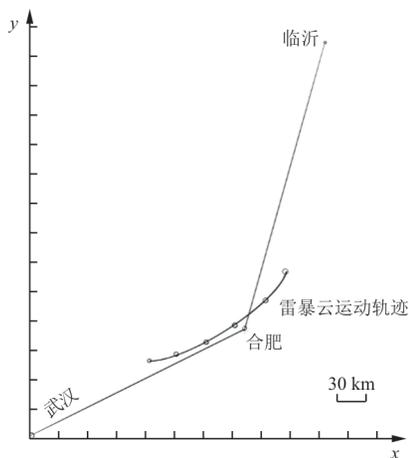


图 6 飞行模型图  
Fig. 6 Flight movement model diagram

通过模型图对雷暴运动轨迹图可发现雷暴运动轨迹是一条曲线,采用多项式回归拟合来获得雷暴运动轨迹参数方程,各时刻雷暴坐标如表 3 所示。

表 3 雷暴时刻坐标表  
Table 3 Thunderstorm time table

$t/\text{min}$	坐标	
	$x/(30\text{ km})$	$y/(30\text{ km})$
15	4.132	2.701
30	5.241	3.124
45	6.017	3.609
60	7.120	4.103
75	8.213	4.902
90	8.806	6.021

对以上数据进行多项式回归拟合<sup>[14]</sup>,拟合公式为

$$\begin{cases} x = a_n t^n + a_{n-1} t^{n-1} + \dots + a_1 t + a_0 \\ y = a_n t^n + a_{n-1} t^{n-1} + \dots + a_1 t + a_0 \end{cases} \quad (9)$$

拟合结果如图 7~图 8 所示。

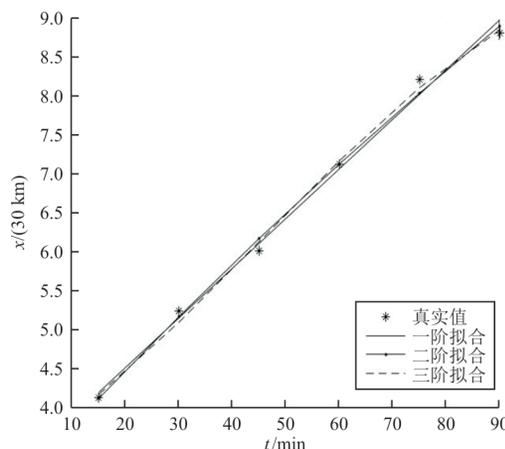


图 7 雷暴  $x$  坐标 1 到 3 阶拟合图  
Fig. 7 Thunderstorm  $x$ -coordinate 1~3 order fitting diagram

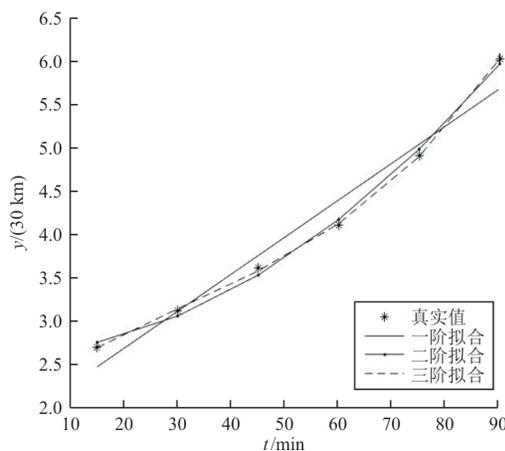


图 8 雷暴  $y$  坐标 1 到 3 阶拟合图  
Fig. 8 Thunderstorm  $y$ -coordinate 1~3 order fitting diagram

通过拟合效果对比为避免过拟合现象, $x$  坐标采用二阶多项式拟合, $y$  坐标采用三阶多项式拟合作为雷暴的位移轨迹参数方程,参数方程为

$$\begin{cases} x = -0.0179t^2 + 1.0964t + 2.9 \\ y = 0.0176t^3 - 0.1008t^2 + 0.6102t + 2.1667 \end{cases} \quad (10)$$

## 2.2 模拟仿真

将各参数及雷暴形状及位移方程带入模型通过 Matlab 进行仿真,各仿真数据如表 4 所示。

表4 案例仿真参数  
Table 4 Case simulation parameters

参数	数值
飞机初始位置/km	(0,0)
飞机初始偏航角/rad	$\pi/4$
飞机初始速度/(km·s <sup>-1</sup> )	0
第一航程目标位置/(30 km)	(7.5,3.9)
第二航程目标位置/(30 km)	(10.0,13.3)
最高速度/(km·s <sup>-1</sup> )	0.23
最高偏航速度/(rad·s <sup>-1</sup> )	20.0
加速度/(km·s <sup>-2</sup> )	0.001
旋转加速度/(rad·s <sup>-2</sup> )	1
雷暴x轴轨迹/(30 km)	$x = -0.017 9t^2 + 1.096 4t + 2.9$
雷暴y轴轨迹/(30 km)	$y = 0.017 6t^3 - 0.100 8t^2 + 0.610 2t + 2.166 7$
雷暴形状/(30 km)	(x, y)、(x + 3, y + 1)、 (x + 1, y + 1)、(x + 3, y + 2)、 (x + 3, y + 3)
距雷暴云最小距离/(30 km)	0.25

模拟雷暴位置与飞机位置如表5所示,仿真结果如图9所示,运行时间如图10所示。

表5 模拟雷暴与飞机位置数据  
Table 5 The position of thunderstorm simulation and aircraft parameters

t/min	位置数据/(30 km)			
	X <sub>云</sub>	Y <sub>云</sub>	X <sub>飞</sub>	Y <sub>飞</sub>
15	4.47	3.73	2.32	1.37
30	5.07	3.95	4.22	2.33
45	5.81	4.23	6.63	4.72
60	6.59	4.55	8.04	8.10
75	7.01	4.74	9.35	10.11
90	7.67	5.11	10.00	13.00

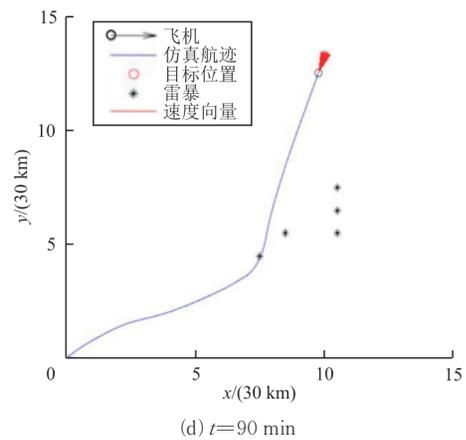
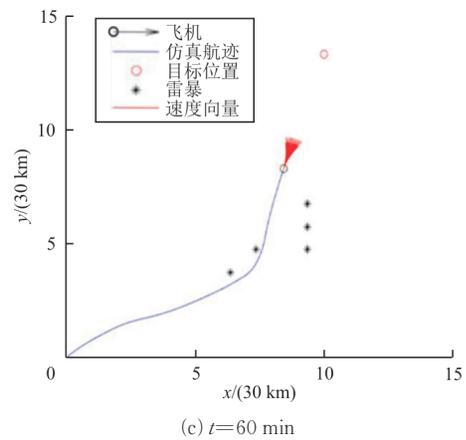
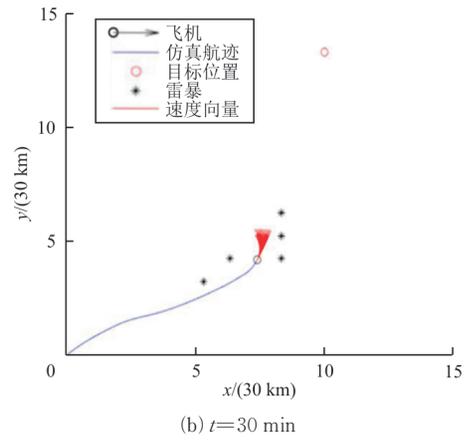
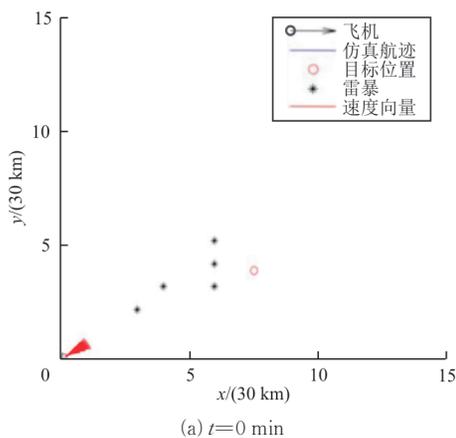


图9 CZ6428航班避开雷暴轨迹仿真动态图  
Fig. 9 Dynamic simulation of flight cz6428 avoiding thunderstorm

Arrive Goal!!  
时间已过 41.437876 秒。  
>>

图10 仿真程序执行时间  
Fig. 10 Execution time of simulation program

从图 9 可以看出：飞机从武汉至合肥经停，后从合肥至临沂的过程仿真中，生成安全且高效的航线，仿真改航航迹与实际改航航迹如图 11 所示（紫色为实际运动轨迹，蓝色为仿真轨迹）。

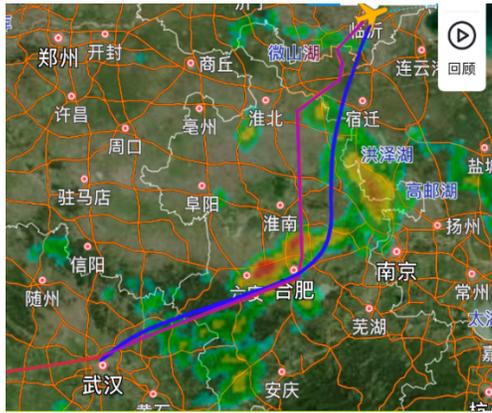


图 11 仿真航线与实际航线对比图  
Fig. 11 Comparison chart of simulated route and actual route

### 2.3 模型可靠性验证

#### (1) 可靠性验证

为验证模型仿真结果的可靠性，本文采取对两轨迹图通过 Plot\_digitizer 提取轨迹点数据进行余弦相似系数分析，轨迹图如图 12 所示，轨迹点数据如表 6 所示。

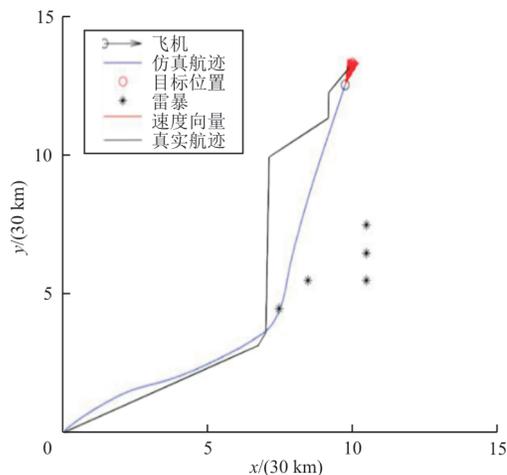


图 12 仿真与实际轨迹相似度计算图  
Fig. 12 Simulation and actual trajectory similarity calculation chart

表 6 模拟航线与真实航线轨迹点  
Table 6 The position data of simulated route and actual route

X/(50 km)	Y <sub>拟</sub> /(30 km)	Y <sub>实</sub> /(30 km)
0.500 502	0.321 338	0.247 684
1.021 680	0.618 392	0.469 474
1.500 920	0.841 830	0.663 540
2.001 070	1.089 860	0.937 118
2.501 100	1.313 450	1.159 520
3.001 490	1.610 350	1.406 590
3.501 290	1.785 070	1.627 770
4.001 090	1.959 780	1.876 070
4.500 890	2.134 500	2.096 030
5.000 920	2.358 090	2.343 710
5.500 950	2.581 680	2.591 390
6.021 660	2.780 990	2.811 960
6.500 780	2.979 990	3.034 360
7.001 750	3.399 070	3.281 440
7.503 190	3.915 910	4.097 570
7.999 200	7.633 830	10.689 900
8.507 210	9.519 130	11.144 700
8.991 260	10.744 500	11.521 300
9.494 810	11.701 200	12.622 800
9.999 530	12.902 300	12.910 700

余弦相似系数公式为

$$S = \cos \mu = \frac{\sum_{i=1}^n A_i B_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n A_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n B_i^2}} \quad (11)$$

式中： $\mu$ 为坐标点向量夹角； $A_i$ 为模拟轨迹数据向量； $B_i$ 为实际飞行轨迹点数据，实际飞行数据来自于管制人员对飞机在遭遇雷暴前做的决策引导； $0 \leq S \leq 1$ ， $S$ 值越接近 1 说明两个轨迹拟合度越高。

通过计算得出最终结果  $S=0.994 7$ ， $\mu = 5.89^\circ$ 。

根据计算出的  $S$  和  $\mu$  数值，验证仿真轨迹与实

际轨迹具有较高相似性,从而说明当雷暴天气下飞机在进近过程中可以采取本文算法提前给飞机做引导<sup>[15]</sup>,进而也验证了本文所采用的算法模型具有可靠性。

### (2) 经济性验证

根据表6数据对模拟航线进行多项式拟合,公式为

$$y = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_1 x + a_0 \quad (12)$$

拟合结果  $a_n$  如下:

$$a_n = \begin{pmatrix} -0.000\ 75 \\ 0.019\ 524 \\ -0.183\ 93 \\ 0.786\ 948 \\ -1.579\ 92 \\ 1.857\ 12 \\ -0.284\ 95 \end{pmatrix}$$

对其进行积分求长度,公式如下:

$$L = \int_a^b \sqrt{1 + [f'(x)]^2} dx \quad (13)$$

根据以上公式对模拟航线距离进行计算可得模拟航线飞行距离较实际航程节省了52.1256 km,节省了运行时间。

采用本文案例机型,即空客A380为例,每架飞机的油耗为2.9 L/(100 km),因此该模拟航线可以节省1091.82 L燃油,体现了该模型所带来的经济性。

### (3) 实用性分析

近年来,新航线系统不断完善,其主要包括的卫星导航、通信技术、监视技术和全球一体化的空中交通管理均为该模型提供了实用性的价值,该模型可以通过卫星导航实时精确定位飞机位置,通过通信技术以监视技术,随时进行信息的传递与反馈,通过全球一体化空中交通管理进一步协调雷暴天气下的多航路调整问题。

## 3 结 论

(1) 根据进近航段飞行器高度限制要求,结合DWA算法本身特点快速、高效的进行飞行仿真,选择最优路径。由于DWA算法是通过不同时刻最优速度的选择进行路径规划,通过时间与雷暴位置坐标拟合,使传统DWA方法的固定障碍物路

径规划,优化为动态障碍物路径规划。

(2) 通过对雷暴位移轨迹坐标与时间建立参数方程,预测雷暴位移轨迹,预先进行进近航段雷暴天气下航线规划,结合新航行系统提高实时性。

(3) DWA算法与传统路径规划算法相比,它是一个动态选择的过程,实时选择当下最优速度,从而得出最优轨迹,有效解决了全局寻优与运算速度的矛盾。

下一步将研究如何通过建立三维空间下的DWA仿真模型,对全航段进行航线规划。

## 参 考 文 献

- [1] 魏凡. 雷暴对航空飞行的影响研究[D]. 成都: 成都信息工程大学, 2018.  
WEI Fan. Research on the influence of thunderstorm on aviation flight[D]. Chengdu: Chengdu University of Information Technology, 2018. (in Chinese)
- [2] 疏利生, 李桂芳, 嵇胜. 基于强化学习的航空器机场智能静态路径规划[J]. 航空工程进展, 2021, 12(3): 65-70.  
SHU Lisheng, LI Guifang, JI Sheng. Aircrafts AI static path planning on airport ground based on reinforcement learning[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(3): 65-70. (in Chinese)
- [3] 侯盼盼, 王梓旭. 基于分时段与概率分布的滑行冲突预测研究[J]. 航空工程进展, 2020, 11(6): 803-810.  
HOU Panpan, WANG Zixu. Research on taxi conflict prediction based on time division and probability distribution[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(6): 803-810. (in Chinese)
- [4] 陈亚青, 马义龙, 何昕. 配对进近模式分析及研究进展[J]. 航空工程进展, 2020, 11(6): 767-773.  
CHEN Yaqing, MA Yilong, HE Xin. Analysis and research progress of paired approach mode[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(6): 767-773. (in Chinese)
- [5] 刘鹏飞. 飞机进近过程的航迹规划与飞行控制的模拟仿真[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2019.  
LIU Pengfei. Simulation of flight path planning and flight control during aircraft approach[D]. Shenyang: Shenyang University of Aeronautics and Astronautics, 2019. (in Chinese)
- [6] 向征, 张文奇, 张文军. 雷暴天气下基于多航空器冲突避让的路径规划[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(8): 151-156.  
XIANG Zheng, ZHANG Wenqi, ZHANG Wenjun. Path planning based on multi aircraft collision avoidance in thun-

- derstorm weather[J]. Chinese Journal of Safety Sciences, 2019, 29(8): 151-156. (in Chinese)
- [7] 吕宗平, 王清琦, 靳宇波, 等. 超级单体雷暴下的改航模型研究[J]. 飞行力学, 2017, 35(2): 88-91, 96.  
LYU Zongping, WANG Qingqi, JIN Yubo, et al. Research on rerouting model under supercell thunderstorm [J]. Flight Mechanics, 2017, 35(2): 88-91, 96. (in Chinese)
- [8] PANNEQUIN J, BAYEN A, MITCHELL I, et al. Multiple aircraft deconflicted path planning with weather avoidance constraints[C]// AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit. Hilton Head, South Carolina: AIAA, 2007: 65-88.
- [9] 刘鑫, 闫换换. 基于动态窗口法的一发失效应急路径规划方法[J]. 中国民航飞行学院学报, 2021, 32(1): 17-21.  
LIU Xin, YAN Huanhuan. Emergency path planning method for one engine failure based on dynamic window algorithm [J]. Journal of Civil Aviation Flight College of China, 2021, 32(1): 17-21. (in Chinese)
- [10] 何光勤, 鲁力, 胡敬玉, 等. 基于最小二乘法的雷暴天气下飞行改航决策研究[J]. 安全与环境工程, 2019, 26(4): 171-176.  
HE Guangqin, LU Li, HU Jingyu, et al. Study on flight diversion decision under thunderstorm weather based on least square method [J]. Safety and Environmental Engineering, 2019, 26(4): 171-176. (in Chinese)
- [11] 马秀麟, 姚自明, 邬彤, 等. 数据分析方法及应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2015: 7-15.  
MA Xiulin, YAO Ziming, WU Tong, et al. Data analysis method and application [M]. Beijing: People's Posts and Telecommunications Press, 2015: 7-15. (in Chinese)
- [12] CHANG Lu, SHAN Lian, JIANG Chao, et al. Reinforcement based mobile robot path planning with improved dynamic window approach in unknown environment [J]. Autonomous Robots, 2021, 45: 51-76.
- [13] 薛宇敬阳, 傅贵. 通用航空飞行事故不安全动作原因作用路径的统计分析[J]. 安全与环境工程, 2018, 25(2): 131-138.  
XUE Yujingyang, FU Gui. Statistical analysis of the action path of unsafe act causes in general aviation accidents [J]. Safety and Environmental Engineering, 2018, 25(2): 131-138. (in Chinese)
- [14] 夏正亚, 洪亮. 基于多项式拟合插值函数的码垛机器人轨迹规划[J]. 山东科学, 2016, 29(5): 117-123.  
XIA Zhengya, HONG Liang. Trajectory planning of palletizing robot based on polynomial fitting interpolation function [J]. Shandong Science, 2016, 29(5): 117-123. (in Chinese)
- [15] 杨任农, 岳龙飞, 宋敏, 等. 基于Bi-LSTM的无人机轨迹预测模型及仿真[J]. 航空工程进展, 2020, 11(1): 77-84.  
YANG Rennong, YUE Longfei, SONG Min, et al. UVA trajectory prediction model and simulation based on Bi-LSTM [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(1): 77-84. (in Chinese)

#### 作者简介:

鲁力(1989-),男,硕士,助教。主要研究方向:交通运输规划与管理,空中交通管理,通信导航与雷达监视,航空电子信息工程等。

刘晨宇(1999-),男,本科生。主要研究方向:机场环境,机场净空,机场运输经济等。

(编辑:马文静)