

危险天气下的实时动态改航策略研究

杨昌其, 付熙文, 蔡子牛, 邹德龙

(中国民用航空飞行学院 空中交通管理学院, 四川 广汉 618307)

摘要:为提高危险天气下的飞行安全性,降低管制员雷达引导绕飞危险天气区域的工作负荷,优化航空器在危险天气下的改航路径,首先构建编码空域信息矩阵,用栅格化的方法表示危险天气区域,定义危险天气区域的移动方向和速度,明确区域内危险天气区域对航路航线的安全威胁;进而针对移动的危险天气区域对空域内航路航线的影响,提出基于改进人工势场法的实时动态改航策略,让航班能够尽快绕过动态危险天气区域,从而提高空域的利用率。结果表明:基于改进人工势场法的实时动态改航策略,能够完成在动态环境下的最优路径选取的任务,快速高效地规划并选出一条路径,并随环境的变化相应地改变,具有一定的稳定性和较强的适应能力。

关键词:危险天气;改进人工势场法;动态环境;改航策略

中图分类号:U8 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2022)04-0394-05

近年来随着民航业的发展,航路航线上的危险天气等气象要素对航空运输的影响越来越显著,飞行过程中的危险天气区域是影响航班正点率的主要原因。而目前针对该问题的处理方式仍为人工判别,自动化程度较低,这不仅增加了空中交通管制员的工作负荷,还给民用航空运输业带来了不便。不仅如此,由于天气预报的不确定性,空中交通管制员通常会选择较为保守的距离绕过天气活动。天气预报也并不总是将当前条件与计划航路的进展相匹配,并且由于空中交通管制员在天气事件中特别繁忙,因此他们可能会错过围绕恶劣天气的更有效的路线的可行机会^[1]。

危险天气区域的直接影响就是导致空域容量的减小,当前常见的应对方法主要包括地面等待措施、空中等待措施和改航措施^[2]。前两者在实际运行中相对容易实现,但是燃油和时间的成本大大增加;虽然空域容量减小,但是在空域流量未达到容量时,实施改航措施是最有效也是最经济的办法。另外由于危险天气的位置是随着时间不断变化的,当飞机临近存在危险天气区域的空域时,仅采用起飞前所规划的静态航路并不能满足实际的应用,因此有必要进行实时路径规划^[3]。

目前,国内外已经有很多学者研究了在危险天

气下的改航策略问题。Dixon 等最早于 1993 年研究了危险天气影响下的改航路径规划问题^[4]。Taylor 等利用模拟退火方法确定受天气影响的航班在运行上可接受的备选航线^[5]。在国内,李雄等在二维平面内利用几何算法进行恶劣天气下的该路径规划^[6]。赵元棣等利用 A* 算法构建了静态和动态条件下的改航路径快速规划模型,提出了动态危险天气下的快速改航规划的方法^[7]。张兆宁等分别在 2015 年和 2016 年提出危险天气下基于多重 Morphin 算法的终端区三维实时改航方法和散点状分布危险天气下的终端区动态改航方法^[8]。杜实等也在 2020 年通过构建实时动态环境模型,并利用目标粒子群算法对改航路径进行动态规划^[9]。

1 危险天气区的划分

危险天气主要是指雷暴、湍流、飓风、强对流和风切变等中小规模天气系统。危险天气区域根据其分布差异分为块状区域、带状区域和散点状区域。

当对航路进行的动态规划时,可以将需要改航的空域看作是二维的空间,利用栅格化地方式描述当前空域的信息。其中,空域栅格的状态分别为 1 或 0,0 表示为自由的空域栅格,1 为有天气的空域限制区域。由于危险天气在实际情况中是不断的移动的,因此可以将已知的危险天气区域用栅格法

收稿日期:2021-12-06

作者简介:杨昌其(1974—),男,贵州思南人,中国民用航空飞行学院,空管安全研究所所长,教授,交通运输工程硕士,研究方向为安全管理体系、民航数据挖掘。

在空域中表示出来,如图 1 所示。

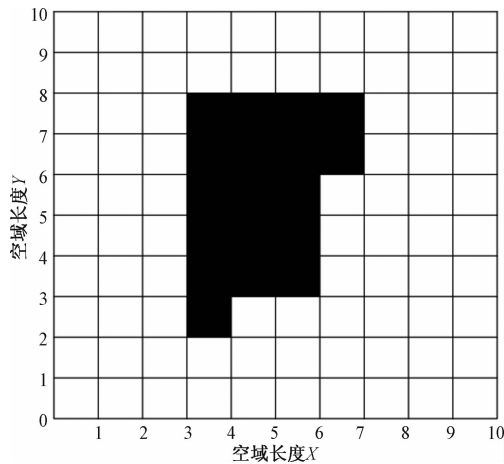


图 1 危险天气区域运行环境栅格

按照以下方法来模拟危险天气区域的移动:

1)空域栅格的初始状态为 0,所有的空域栅格都是可以通过的,将已知的危险天气的范围与位置在空域的相应位置划设出来。

2)已知危险天气区域的栅格按照一定的速度及方向进行移动。

设在 t 时刻,一个有天气的空域限制栅格 i 的位置为 $[X_i(t), Y_i(t)]$,移动速度为 $V_i(t)$,则在 $t+1$ 时刻的该空域限制栅格的位置更新为

$$X_i(t+1) = X_i(t) + kV_i(t) \tag{1}$$

$$Y_i(t+1) = Y_i(t) + kV_i(t) \tag{2}$$

式中: k 为根据已知移动方向所设置的参数,取值为 1 或 -1 。

2 改进人工势场法的改航策略

人工势场法是由 Khatib 最早在 1986 年提出的,基本原理为:将起点、终点、限制区、航空器抽象为一个人造的势场,航空器的运动因此也可以解释为两种具有不同符号的电子势场中的运动粒子^[10]。例如,航空器和限制区粒子带正电,目标位置带负电,则限制区产生的斥力势场与目标位置产生的引力势场的合作用力会使航空器自发地避开限制区,向目标位置移动。

现阶段,最常用的人工势场法的引力势场函数为

$$U_{att}(X) = \frac{1}{2}\lambda_1 d^2(X) \tag{3}$$

式中: λ_1 为重力函数, $\lambda_1 > 0$; $d(X)$ 为航空器当前的位置和目标点之间的距离。

常用的斥力势场函数为

$$\left\{ \begin{aligned} U_R^i(X) &= \begin{cases} \frac{1}{2}\lambda_2 \left(\frac{1}{d_i(X)} - \frac{1}{d_i^0} \right)^2, & d(X) \leq d_i^0 \\ 0, & d(X) > d_i^0 \end{cases} \\ d_i(X) &= \min_{X' \in X_i^0} \|X - X'\| \end{aligned} \right. \tag{4}$$

式中: λ_2 为斥力常数, $\lambda_2 > 0$; d_i^0 为限制区 i 的影响距离; $d_i(X)$ 为当前航空器的位置和限制区 i 之间的最短距离; X_i^0 表示的是限制区 i 的位置坐标。斥力势场定义为在障碍物影响范围之外为 0,在影响范围之内为正,距离障碍物越近则斥力势场越大。

势场力为势场函数的负梯度,则势场引力与势场斥力分别为

$$f_{att}(X) = -\nabla U_{att}(X) = \lambda_1(X - X_i) \tag{5}$$

$$\begin{aligned} f_R^i(X) &= -\nabla U_R^i(X) = \\ &\begin{cases} \lambda_2 \frac{(X - X_i^0)}{d_i(X)^3} \left(\frac{1}{d_i(X)} - \frac{1}{d_i^0} \right), & d(X) \leq d_i^0 \\ 0, & d(X) > d_i^0 \end{cases} \end{aligned} \tag{6}$$

则航空器收到的合作用力应为

$$F(X) = f_{att}(X) + f_R^i(X) \tag{7}$$

但是传统的人工势场法存在两个主要问题:

- ①目标不可达问题。当目标位置附近有限制区时,目标点周围存在势场高点。由于梯度下降算法的作用,航空器无法越过势场高点到达目标位置。
- ②局部极小值问题。当航空器和目标位置共线,且其收到的吸引力和排斥力合作用力为 0 时,在该点处合作用力方向是“震荡”的,即导致航空器减速甚至停止或者航向剧烈“震荡”,进而导致航空器无法向着目标点继续前进。

这两个问题在现实情况中是不可能发生的,因此针对以上两个问题,对传统的人工势场法进行改进。

1)针对目标不可达问题,在限制区的势场作用范围内,考虑航空器和目标之间的相对距离,将排斥势乘以航空器当前位置与目标之间的距离加入斥力函数中,具体的表达式分别为

$$U_R^i(X) = \begin{cases} \frac{1}{2}\lambda_2 d(X) \left(\frac{1}{d_i(X)} - \frac{1}{d_i^0} \right)^2, & d(X) \leq d_i^0 \\ 0, & d(X) > d_i^0 \end{cases} \tag{8}$$

$$\begin{aligned} f_R^i(X) &= -\nabla U_R^i(X) = \\ &\begin{cases} f_{Rreqx}^i(X) + f_{Rreqy}^i(X), & d(X) \leq d_i^0 \\ 0, & d(X) > d_i^0 \end{cases} \end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{cases} f_{\text{Reqx}}^i(X) = \lambda_2 \left(\frac{1}{d_i(X)} - \frac{1}{X_i^0} \right) \frac{d(X)}{d_i^2(X)} \cdot \frac{\alpha d_i(X)}{\alpha X} \\ f_{\text{Requ}}^i(X) = \frac{1}{2} \lambda_2 \left(\frac{1}{d_i(X)} - \frac{1}{X_i^0} \right)^2 \frac{\alpha d_i(X)}{\alpha X} \end{cases}$$

(10)

式中： $f_{\text{Reqx}}^i(X)$ 为航空器自身指向限制区的相反方向； $f_{\text{Requ}}^i(X)$ 为航空器自身指向目标位置的方向。

2) 针对局部最小值的问题, 采用模拟退火算法, 当航空器陷入局部最小值时, 在航空器当前位置附近随机选择一个点, 并利用公式计算出局部最小点和附近随机点的势场大小, 若附近随机点的势能小, 则将随机点作为航空器下一个航向点; 反之, 以一定概率 P 接受附近点为下一个航向点, 且 T 以一定方式衰减, 具体形式为

$$\begin{cases} P = \exp(-\Delta/T) \\ \Delta = U(S_1) - U(S) \\ T(t) = \alpha T(t-1) \end{cases}$$

(11)

式中： S 为局部最下点； S_1 为附近随机点。改进人工势场法改航策略的基本流程如图 2 所示。

3 动态改航策略仿真

改航路径在能够绕飞危险天气区域并保证飞行安全的同时, 不影响空域利用率且兼顾运行的效率, 因此在建立优化模型前, 提出合理的假设, 假设条件如下。

1) 假设航空器为一个质点, 沿航路的中心线以相同的速度匀速飞行, 且不考虑航空器个体差异例如速度、机型等。

2) 航路网络作为二维的平面网络, 不考虑航空器上升下降, 且将所有航空器置于同一高度层。

3) 由于存在危险天气的限制空域内部是不可以穿越的, 对其边界分别经过扩展处理后, 属于安全区。

4) 由于危险天气区域的移动速度远远小于航空器的飞行速度, 因此假设航空器在绕飞危险天气区域时, 危险天气区域的移动速度为 0。

算法通过 MATLAB 语言编程进行仿真工作。整个路径仿真的空域运行环境在 25×25 的栅格中进行动态改航策略仿真, 栅格化的网格边长 $a = 20 \text{ km}$ 。

使用 MATLAB 软件对初始危险天气区域边界点坐标进行定位。同时将预测后的危险天气区域与中国气象数据网实时雷达数据图像进行对比, 拟合度较高, 如图 3 所示, 可以为动态环境模型构建提

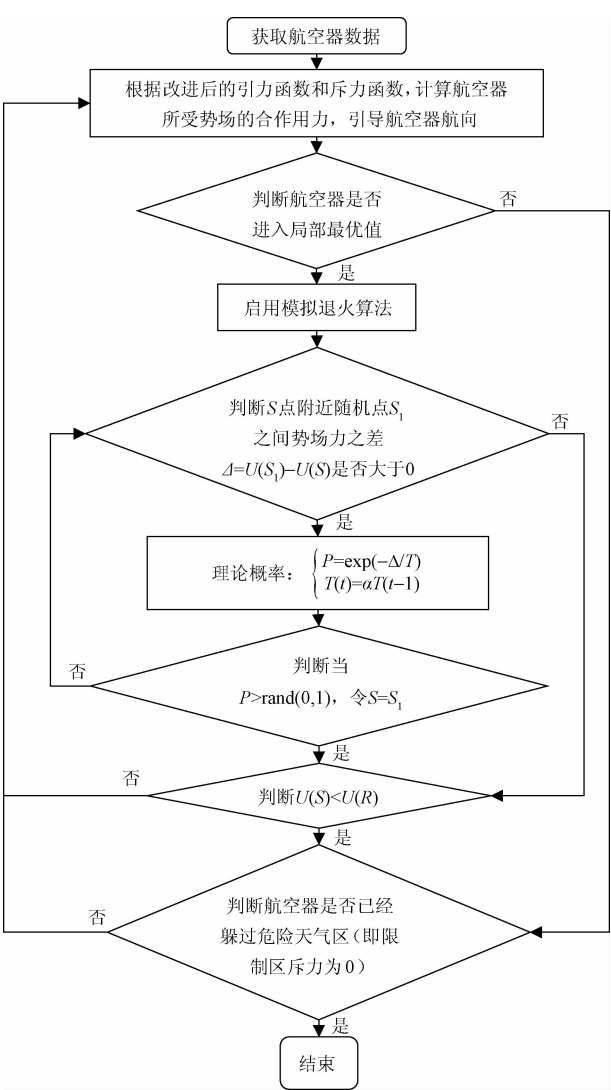


图 2 改进人工势场算法的基本流程

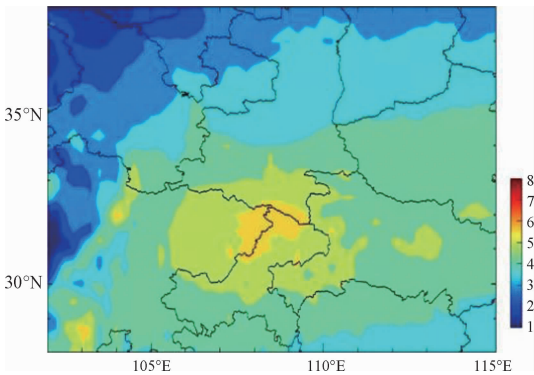


图 3 中国气象数据网实时雷达数据图

供参考。随着危险天气区域的不断移动, 分析在危险天气情况下的基于改进人工势场算法的动态改航策略。危险天气区的基于改进人工势场算法的动态改航路径如图 4 所示。

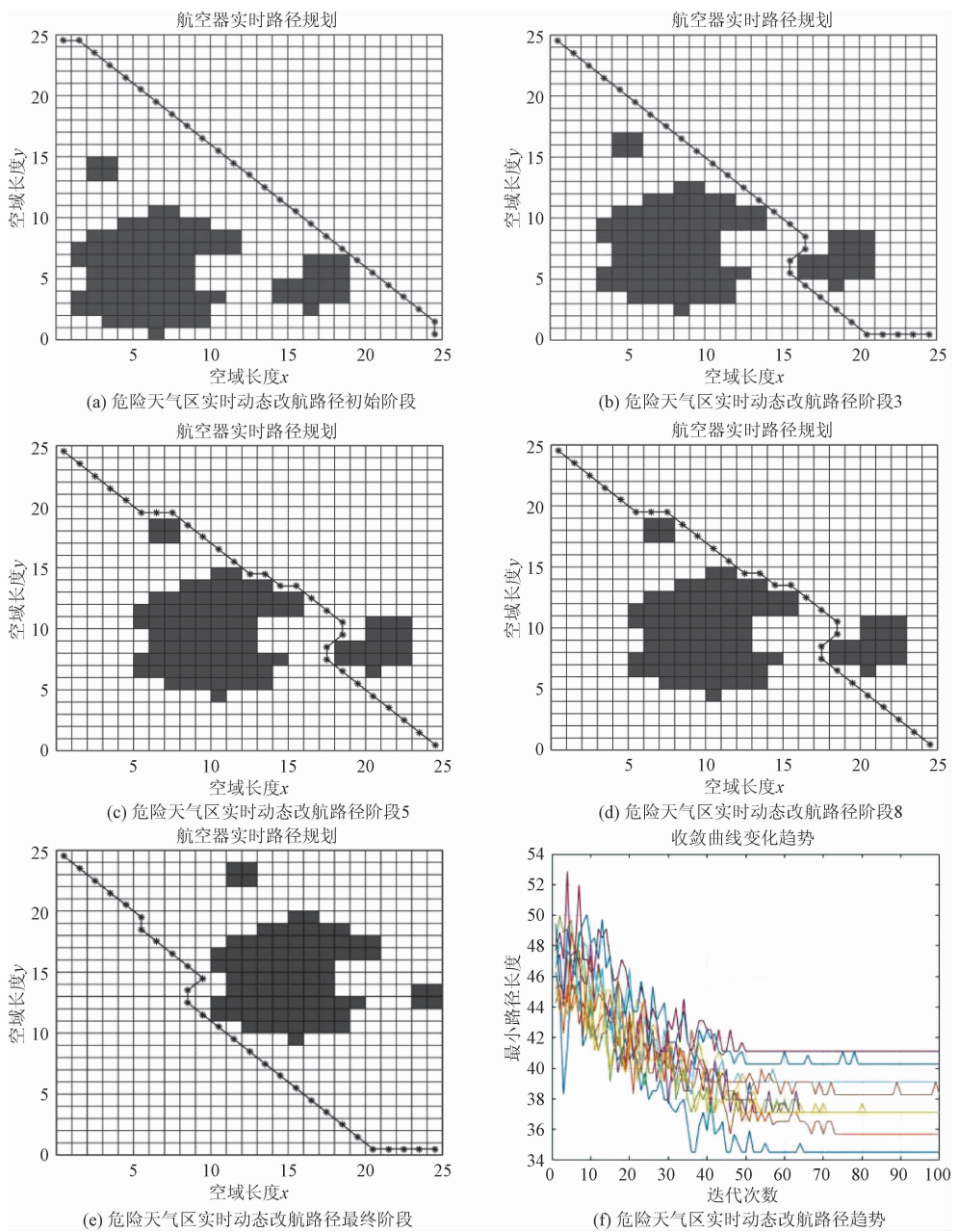


图 4 危险天气区实时动态改航路径

分析上述的仿真结果可以得知:在危险天气区域对空域航线造成影响场景下,随着危险天气区域的移动,进行实时的动态改航策略,可以有效地规划出一条航路,保证航班安全的规避危险天气的同时,提升航路的容量,减小飞行的成本。在多次反复实验中,路径规划的长度以及所消耗的时间(包括危险天气区域移动、改航路径规划)见表 1。

4 结论

1)将中南地区某空域利用栅格化表示,对该空域内已知危险天气区的边界及运动趋势进行预测

及环境模型的构建,针对不断移动的危险天气区域,提出基于改进人工势场算法的实时动态改航策略研究,并确定了约束条件。

2)对传统人工势场算法中存在的两个主要问题进行改进,并利用 MATLAB 仿真实验验证了算法的可靠性。仿真结果表明,运用该算法能够针对动态的危险天气区域,得到实时动态改航策略,具有一定的稳定性和较强的适应性。

3)方法仅考虑单架航空器在二维的改航策略研究,未涉及多架航空器或多条航路的空域,该问题将是下一阶段的研究方向。

表 1 3 种天气下的最优路径长度及耗时结果

序号	变量	阶段 1	阶段 2	阶段 3	阶段 4	阶段 5	阶段 6	阶段 7	阶段 8	阶段 9	阶段 10
1	时间/s	18.477	17.555	18.041	17.697	18.201	18.289	18.596	17.919	17.426	18.001
	路径长度/单元胞长度	34.53	35.88	37.11	37.58	37.19	39.11	41.63	40.28	38.50	37.11
2	时间/s	17.247	17.262	17.364	18.207	17.860	17.754	17.700	17.349	17.822	17.601
	路径长度/单元胞长度	34.53	35.7	37.11	37.11	37.11	39.11	41.11	40.28	38.28	37.11
3	时间/s	17.265	17.922	17.258	17.852	17.545	17.158	17.546	18.123	17.135	17.844
	路径长度/单元胞长度	34.53	35.7	37.41	37.46	37.89	39.66	41.58	40.45	38.49	37.11
4	时间/s	17.651	18.201	17.466	18.106	17.456	17.468	17.864	17.645	17.164	17.455
	路径长度/单元胞长度	34.65	34.98	37.11	37.49	37.33	39.46	41.11	40.28	38.28	37.49
5	时间/s	17.215	17.645	18.325	17.707	17.346	17.645	17.561	17.678	18.120	17.645
	路径长度/单元胞长度	34.53	35.7	37.41	37.27	37.11	40.02	41.11	40.65	38.31	37.67
6	时间/s	17.654	17.644	17.642	18.587	18.624	18.754	18.765	17.684	17.245	17.256
	路径长度/单元胞长度	34.63	35.7	37.11	37.67	37.19	39.11	41.11	40.65	38.28	37.53
7	时间	17.354	17.346	17.364	18.320	17.688	18.165	17.964	17.681	17.648	17.645
	路径长度/单元胞长度	34.59	35.76	37.11	37.11	37.33	40.02	42.03	40.28	38.38	37.49
8	时间/s	17.623	17.365	17.648	17.658	17.367	17.965	17.689	17.685	17.648	17.624
	路径长度/单元胞长度	34.53	35.7	37.69	37.11	37.11	39.66	41.11	40.28	38.49	37.11
9	时间/s	17.344	17.132	17.621	17.987	18.165	17.654	18.163	17.697	17.364	17.864
	路径长度/单元胞长度	34.59	35.7	37.69	37.46	37.11	39.11	41.11	40.45	38.28	37.49
10	时间/s	17.649	17.156	17.345	18.265	17.369	17.985	17.624	17.648	17.348	18.132
	路径长度/单元胞长度	34.53	35.7	37.11	37.11	37.19	39.11	41.63	40.28	38.34	37.11

参考文献

[1] EVANS A D, SRIDHAR B, MCNALLY D. Improving operational acceptability of dynamic weather routes through analysis of commonly use routings [C]//Aiaa Aviation Technology, Integration, & Operations Conference, 2016.

[2] 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): 155-160.

[3] 王永忠, 徐天羿, 李佳骏, 等. 基于多层路径规划的自动布线优化研究[J]. 科技和产业, 2021, 21(10): 169-174.

[4] DIXON M, WEINER G. Automated aircraft routing through weather-impacted airspace [C]//Vienna, VA: Fifth International Conference on Aviation Weather Sys-tema, 1993: 295-298.

[5] TAYLOR C, WANKE C. Dynamically generating operationally acceptable route alternatives using simulated annealing[J]. Air Traffic Control Quarterly, 2016, 20(1): 97-121.

[6] 李雄, 徐肖豪, 朱承元. 基于几何算法的空中交通改航路径规划[J]. 系统工程, 2008(8): 37-40.

[7] 赵元棣, 李瑞东, 吴佳馨. 动态危险天气下改航路径快速规划方法[J]. 中国科技论文, 2020, 15(6): 678-681, 689.

[8] 张兆宁, 魏中慧. 散点状分布危险天气下的终端区动态改航方法[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(1): 40-44.

[9] 杜实, 王俊凯, 任景瑞. 基于改进多目标粒子群算法的航空器改航研究[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(1): 177-185.

[10] 徐肖豪, 李成功, 赵巍飞. 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.

Research on Real-time Dynamic Rerouting Strategy in Dangerous Weather

YANG Changqi, FU Xiwen, CAI Ziniu, ZOU Delong

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

Abstract: In order to improve flight safety in dangerous weather, reduce the workload of the controller’s radar guidance around the dangerous weather area, and optimize the aircraft’s diversion path in dangerous weather, a coded airspace information matrix was built and a rasterized method was used to represent the danger Weather area, define the moving direction and speed of the dangerous weather area, and clarify the safety threat of the dangerous weather area in the area to the air route; and then, for the impact of the moving dangerous weather area on the air route in the airspace, a real-time method based on the improved artificial potential field method is proposed. The dynamic diversion strategy allows flights to bypass the dynamic dangerous weather area as soon as possible, thereby ensuring the utilization rate in the airspace. The results show that the real-time dynamic diversion strategy based on the improved artificial potential field method can complete the task of selecting the optimal route in a dynamic environment, plan and select a route quickly and efficiently, and change accordingly with the change of the environment, with certain stability and strong adaptability.

Keywords: dangerous weather; improved artificial potential field algorithm; dynamic environment; rerouting strategy