

文章编号: 1005-0523(2023)02-0079-08

基于雷达数据的飞行受限区形变及方位预测

樊立艳¹, 赵鹤宇¹, 常锦才^{1,3}, 李印凤²

(1. 华北理工大学理学院, 河北 唐山 063210; 2. 华北理工大学建筑工程学院, 河北 唐山 063210;
3. 华北理工大学河北省数据科学与应用重点实验室, 河北 唐山 063210)

摘要: 强对流天气是影响飞机飞行的重要原因之一。为了有效减少飞机改航的经济浪费, 同时降低遇到危险的概率, 需要准确划定飞行受限区并进行预测。首先提取出影响飞机飞行的雷雨点数据, 采用 Graham 算法划定静态飞行限制区的初始多边形, 提出距离均值方法对飞行限制区的几何形状变化进行预测。然后引入 Markov 思想通过类状态转移矩阵预测飞行限制区的中心点位置变化, 提出角度增量的方法预测飞行限制区中心点角度变化。实例结果表明, 对于时间分辨率较低的雷达气象数据, 该方法预测精确度较高且偏差度较低, 并且可以实时更新预测区域。在静态飞行限制区的基础上实现了动态预测, 使预测结果更贴近实际变化情况。

关键词: 飞行受限区; Graham 算法; Markov 理论; 动态预测

中图分类号: U244

文献标志码: A

本文引用格式: 樊立艳, 赵鹤宇, 常锦才, 等. 基于雷达数据的飞行受限区形变及方位预测[J]. 华东交通大学学报, 2023, 40(2): 79-85.

Prediction of the Deformation and Orientation of Flight Restricted Areas Based on Radar Data

Fan Liyan¹, Zhao Heyu¹, Chang Jincai^{1,3}, Li Yinfeng²

(1. College of Science, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China;
2. College of Civil and Architectural Engineering, Tangshan 063210, China; 3. Hebei Key Laboratory of Science and Application,
North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China)

Abstract: Severe convective weather is one of the important factors affecting aircraft flight. In order to reduce the economic waste of diverting aircrafts and the probability of encountering hazards, it is necessary to accurately delineate and predict the restricted areas. The first step is to extract the data on the thunderstorm points that affect aircraft flight. The initial polygon of the static flight restricted area is delineated using Graham's algorithm. The change in geometry of the flight restricted area is predicted using the distance-mean method. Markov theory is introduced to predict the change of the center point position of the flight restricted area through the class state transfer matrix. The angular increment method is proposed to predict the angular change of the center point of the flight restricted area. The results show that the prediction accuracy is high and the deviation is low for radar weather data with low temporal resolution, and the prediction area can be updated in real time. The dynamic

收稿日期: 2022-09-02

基金项目: 面向四维航迹的航班过点时隙网络化分配技术(HBKG202002)

prediction is achieved on the basis of the static flight restriction zone, which makes the prediction results closer to the actual change.

Key words: flight restricted area;Graham algorithm;Markov theory;dynamic prediction

Citation format:FAN L Y,ZHAO H Y,CHANG J C,et al. Prediction of the deformation and orientation of flight restricted areas based on radar data[J]. Journal of East China Jiaotong University,2023,40(2):79–85.

随着科技的发展和人民生活水平的提升,人们使用航空器的次数及货物运输的频率也在日益增多,同时空域资源也越来越紧张,一旦出现不良气象或是重大事件,空域资源的利用率将会急剧下降,进而造成飞机晚点、乘客滞留甚至航班取消,这不但会造成巨大的经济损失,也会形成很大的安全隐患^[1]。强对流天气对航班飞行的影响是制约中国民航运输持续发展的主要原因之一,据民航局公布的数据显示,构成航班延误的各类因素中天气原因占比最高为 56.8%^[2]。

飞行限制区的划设方法主要分为静态和动态,由于气象是不断变化的,所以目前在航空领域的气象预测主要以动态预测为主^[3-4]。Krozel 等在对不良气候影响下的飞行受限区进行划设时,给出了采用多边形对飞行受限区进行划设的方式^[5]。Bokadia 等提出用平移划设法来预测强对流天气中的飞行受限区^[6]。Nilim 等^[7]通过马尔可夫预测模型对恶劣天气进行预测,将受恶劣天气影响的扇区分为各个小区域,并通过预测雷暴的范围来对飞行限制区进行动态划设。谢春生等^[8]提出了基于 Graham 算法的初始飞行受限区划设方法,得到了一种不规则的多边形限制区,在划设受限区时加入了动态因素例如雷雨的移动、雷雨大小的变化以及军事活动等,将静态划设方法扩展到动态。杨惠东等^[9]结合雷达回波特征,将气象数据进行“比较赋值”运算,对处理后的数据图进行灰度化、二

值化以便进行飞行受限区的边缘探测,运用 Graham 算法将由上述边缘探测得到的边界点围成凸多边形,在气象预报的基础上提出了动态飞行受限区的划设方法。陈可嘉等^[10]通过对影响飞机飞行的气象属性进行研究并且找到最关键的因素,之后在 Graham 算法的基础上结合灰色关联度分析的预测模型对飞行受限区进行动态划设。蒋昕等^[11]通过使用线性回归的预测方法对飞行受限区域的边界进行实时预测。陈金良等^[12]通过分析飞机对空间的利用时长和范围,利用平移法对原有的飞行限制区预测,再根据外推法得出动态飞行限制区,使用数学模型来描述飞行限制区的边界变动情形。由于气象变化是随机的且没有固定的变化规律,所以采用常规的预测方法对动态飞行限制区进行预测会产生较大的误差,且该难点较难克服,因此本文是在现有方法的基础上综合了雷暴的实时变化对飞行限制区进行动态预测。

1 动态飞行限制区的预测

1.1 静态飞行限制区的划设

据反射率因子的大小可以确定雷达的回波等级,并依此将空中区域划分为不同的范围。依据反射率信息可以将雷达回波分为 7 个等级,并给出在对应回波等级下航空器的飞行状态信息^[14],如表 1 所示。

首先对数据进行预处理,表 2 为收集到的部分原始雷达数据。

表 1 雷达回波等级表
Tab.1 Diagram of radar echoes

Grade	The value of dBz	Color	The size of the impact
0	dBz<18	Blue	Almost no impact
1	18<dBz<35	Light Blue	Mild bumps
2	35<dBz<41	Green	Moderate bumps
3	41<dBz<46	Dark green	Lightning
4	46<dBz<50	Yellow	Ice accumulation
5	50<dBz<57	Orange	Severe ice buildup
6	57<dBz	Red	Structural damage

表 2 部分原始雷达数据
Tab.2 Partial primary radar data

Latitude/°	Longitude/°											
	117.22	117.23	117.24	117.25	117.26	117.27	117.28	117.29	117.30	117.31	117.32	117.33
38.14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
38.15	7	0	5	5	0	0	0	6	6	0	0	0
38.16	7	5	8	8	6	6	6	5	5	5	0	5
38.17	8	8	8	8	6	6	8	7	7	7	6	6
38.18	10	10	7	7	7	8	9	9	8	8	10	10
38.19	10	10	9	9	9	11	11	11	8	8	10	7

提取大于等于 41 dBz 的回波强度,并对提取出的数据用 Graham 算法划设出静态飞行限制区的初始多边形。Graham 扫描法是用来寻找多边形比较普遍且方便高效的一个方法,它的原理是先找到多边形上的一个点,然后将其他点与该点进行极角排序,按逆时针方向去找多边形上的每一个点,符合条件的就存在多边形点集里,否则就舍弃,具体的算法步骤如下:

输入:平面直角坐标系中散乱的点集;

输出:点集构成的凸包;

Step 1 将点集内的所有点放在平面直角坐标系中,找到最左下方的点,即横纵坐标最小的点,由几何知识可知该点一定是多边形上的点,如图 3 中的红色点即为最左下方的点;

Step 2 然后以这点为极点,计算出其他所有点与这点的极角并从小到大进行排序,如果出现多个点与该点的极角相同则根据其他点到该点的距离进行排序,距离近的排在前面;

Step 3 由几何知识可知点 1 在多边形上,将其加入多边形的集合中,此时多边形集合中有 0 和 1 两点,接下来找第三点,此时点 2 称为当前点,连接点 1 和当前点得到直线 L ,若点 3 在直线 L 的左侧则保留当前点到多边形集合中,若在右侧则当前点不在多边形集合中,该点集中的点 2 在多边形集合内;

Step 4 接下来找第四个点,此时点 3 为当前点,连接点 2 和当前点得到直线 M ,因为点 4 在直线 M 的右侧所以当前点不在多边形集合中,所以连接点 2 和点 4 得到直线 N ,此时点 4 为当前点,因为点 5 在直线 N 的左侧,所以当前点在多边形集合内,又因为点 6 在直线 N 的右侧,所以当前点不

在多边形集合内,点 6 在多边形集合内,依次对各个点进行判断;

Step 5 依次对每个点进行判断,直到点集中的最后一个点时,连接点 0 与最后一个点;

Step 6 将以上多边形集里的点依次连接即可得到该点集所对应的凸包,如图 1 为平面直角坐标系中一些散乱的点构成的凸包。

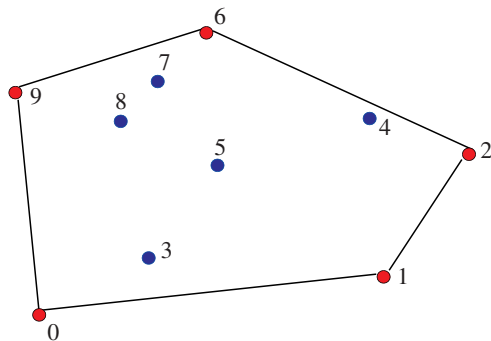


图 1 以上点集构成的凸包

Fig.1 Convex package composed of the above point set

1.2 动态飞行限制区的预测

在对飞行限制区进行划设时,除了考虑雷暴中心的移动趋势,雷暴本身的变化也是影响飞机飞行的重要因素,研究雷暴变化的过程中,反射因子的值为 35 时表明该天气状况需要引起注意,且在值为 41 时已经严重影响航空交通,本文通过对历史数据进行分析,找到了飞行受限区划设区域反射率因子 dBz 的值为 41 与 35 之间的多边形形变关系,并基于此给出了一种对飞行限制区进行动态预测的方法即距离均值的方法。

首先通过 Graham 算法分别画出当前时刻反射率因子 dBz 值大于等于 41 和 35 时的飞行限制区

初始多边形,假设图2为当前时刻 dBz 值大于等于 41 和 35 时的多边形 $ABCDE$ 和 $A'B'C'D'E'F'$,计算出多边形的中心点 O ,由历史气象数据可得到下一时刻 dBz 大于等于 41 时画出的多边形形状与当前时刻 dBz 大于等于 35 时画出的多边形形状的关系,分别计算出当前时刻 dBz 大于等于 41 与 35 时多边形上各顶点与中心点的距离之和即:

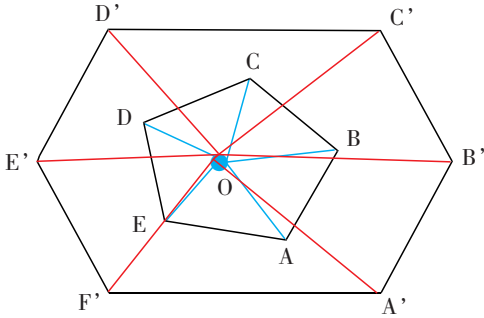


图2 飞行受限区同一时刻不同范围 dBz 示意图

Fig.2 Schematic diagram of different ranges of dBz in flight restricted areas at the same time

$$d_{41}=l_{OA}+l_{OB}+l_{OC}+l_{OD}+l_{OE}$$

和

$$d_{35}=l_{OA'}+l_{OB'}+l_{OC'}+l_{OD'}+l_{OE'}+l_{OF'}$$

并令 $l_1=\frac{d_{41}}{n_1}$ 、 $l_2=\frac{d_{35}}{n_2}$ (n_1 、 n_2 分别为各多边形的顶点个数), 令 $d_{\Delta}=l_2-l_1$ 为下一时刻多边形形变的增量值, 在确定多边形的位置后对其利用增量值进行扩大即可得到下一时刻形变后的预测多边形, 因为强对流单体云团可能膨胀也可能收缩, 所以 d_{Δ} 可分为正值与负值, 当强对流单体云团处于膨胀阶段时则其为正值, 反之则为负值。

气象变化是随机的没有固定的变化规律, 所以认为其下一时刻的气象状况只与上一时刻的气象状况有关, 而与之之前更早的状况无关, 即符合 Markov 的无后效性, 要对整个飞行受限区进行动态预测则需要找到符合变化规律的类 Markov 状态转移矩阵。令两个中心点分别为 $A(x_1, y_1)$ 与 $B(x_2, y_2)$, 且 Markov 类状态转移矩阵为 P , 则可得:

$$A \times P = B$$

对中心点进行预测时将每个点分为横向预测和纵向预测, 如图3的点A, 在横向可以向前即M点移动, 也可以向后即N点移动, 纵向可以向上即D点移动, 也可以向下即E点移动。

在基于距离均值雷暴形变预测的基础上考虑

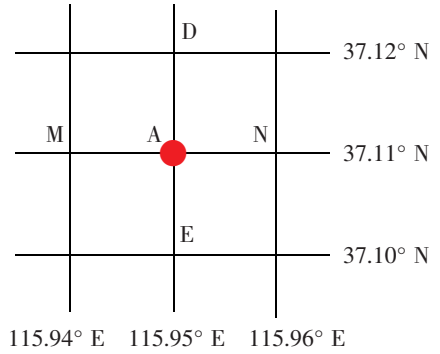


图3 飞行限制区中心点位移示意图

Fig.3 Schematic diagram of the displacement of the center point of the flight restriction zone

了雷暴运动的角度变化, 由前一时刻的中心点与当前时刻的中心点的角度变化来确定整个飞行受限区移动的角度, 在计算时找一个飞行限制区多边形以外的点 $O(x_0, y_0)$ 作为参考点。

找到当前时刻和前一时刻 dBz 值大于等于 41 时多边形的中心点分别为 $A(x_1, y_1)$ 和 $B(x_2, y_2)$, 分别计算出两个中心点与参考点的夹角为 α 和 β , 两个夹角的差为 $\varphi = \beta - \alpha$, 在进行下一时刻飞行限制区预测时将多边形上每个顶点与参考点的夹角都加上 $\frac{\varphi}{2}$ 即得到角度转换后的飞行限制区的经纬度位置坐标, 如图4所示。

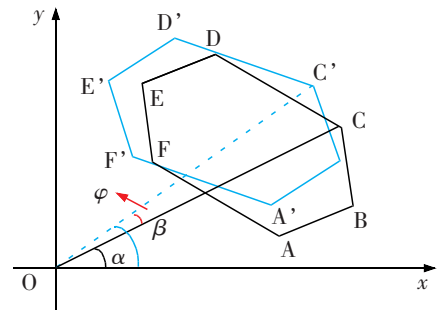


图4 飞行受限区角度变化示意图

Fig.4 Schematic diagram of the change in the angle of the flight restricted area

2 实例验证

记当前时刻为 t_1 , 上一时刻为 t_0 , 下一时刻为 t_2 , 则第 n 时刻为 t_{n-1} , 首先提取出 t_1 时刻 dBz 大于等于 41 和 35 的数据, 根据航空规定危险天气分布之间大于 20 千米时, 可以将飞行受限区划分为多个更小的区域, 所以在划设静态飞行限制区时对原始数据画出的静态飞行限制区进行修改, 画出 t_1 时刻的

初始多边形。

由此可以得到静态飞行限制区的初始形状,根据规定我国航路宽度为 20 km,即航路中心线两侧各 10 km,所以最终的飞行受限区应将多边形的边界向外扩 10 km。接下来要求出多边形的几何中心点,而是否增加向外扩的部分对几何中心点都没有影响,因此在不考虑外扩的情况下对静态飞行限制区进行动态预测。

计算出 t_0, t_1 时刻反射率因子大于等于 41 dBz 时多边形的几何中心点,中心点的计算公式如下

$$(X_A, Y_A) = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n X_i, \sum_{i=1}^n Y_i \right)$$

$$(X_B, Y_B) = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n X_i, \sum_{i=1}^n Y_i \right)$$

可得到 t_0 时刻和 t_1 时刻多边形的中心坐标。

由以上步骤计算出的 t_1 时刻反射率因子大于等于 41 dBz 和 35 dBz 时多边形顶点坐标以及 t_1 时刻反射率因子大于等于 41 dBz 时多边形的中心点坐标,计算出中心点到两个多边形各个顶点的距离,令反射率因子大于等于 41 时中心点到多边形各顶点的距离和为

$$d_{\min} = \sum_{i=1}^n d_i \quad (i=0, 1, 2, \dots, n)$$

其中, n 为多边形顶点个数,反射率因子大于等于 35 时中心点到多边形各顶点的距离和为

$$d_{\max} = \sum_{k=1}^m d_k \quad (k=0, 1, 2, \dots, m)$$

其中, m 为多边形顶点个数,则下一时刻多边形形变的参考数值为

$$d_{\Delta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i - \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m d_k = 0.582527$$

增加距离后 t_1 时刻反射率因子大于等于 41 dBz 时多边形顶点坐标各多边形顶点的经纬度坐标。

气象变化是随机的没有固定的变化规律,所以认为其下一时刻的气象状况只与上一时刻的气象状况有关,而与之之前更早的状况无关,即符合 Markov 的无后效性,要对整个飞行限制区进行动态预测则需要找到符合变化规律的类 Markov 状态转移矩阵。令两个中心点分别为 $A(x_1, y_1)$ 与 $B(x_2, y_2)$,且 Markov 类状态转移矩阵为 P ,则

可得

$$A \times P = B$$

即

$$\begin{cases} A_x P_x = B_x \\ A_y P_y = B_y \end{cases}$$

其中

$$A_x = (a_1, a_2, a_3), B_x = (b_1, b_2, b_3), P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} \end{bmatrix}$$

则由 $A_x P_x = B_x$ 可得

$$(a_1, a_2, a_3) \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} \end{bmatrix} = (b_1, b_2, b_3)$$

即

$$\begin{cases} a_1 p_{11} + a_2 p_{21} + a_3 p_{31} = b_1 \\ a_1 p_{12} + a_2 p_{22} + a_3 p_{32} = b_2 \\ a_1 p_{13} + a_2 p_{23} + a_3 p_{33} = b_3 \end{cases}$$

代入数值可得

$$\begin{cases} 36.6 \ 236p_{11} + 36.6 \ 336p_{21} + 36.6 \ 436p_{31} = 36.4 \ 906 \\ 36.6 \ 236p_{12} + 36.6 \ 336p_{22} + 36.6 \ 436p_{32} = 36.5 \ 006 \\ 36.6 \ 236p_{13} + 36.6 \ 336p_{23} + 36.6 \ 436p_{33} = 36.5 \ 106 \end{cases}$$

由于该方程组没有唯一解,所以由广义逆矩阵计算即取其解为

$$P_x = A_x^T (A_x A_x^T)^{-1} B_x$$

则可以解得

$$P_x = \begin{bmatrix} 0.3 \ 319 & 0.3 \ 320 & 0.3 \ 325 \\ 0.3 \ 320 & 0.3 \ 321 & 0.3 \ 326 \\ 0.3 \ 321 & 0.3 \ 322 & 0.3 \ 327 \end{bmatrix}$$

同理由 $A_y P_y = B_y$ 可以解得

$$P_y = \begin{bmatrix} 0.3 \ 352 & 0.3 \ 352 & 0.3 \ 353 \\ 0.3 \ 352 & 0.3 \ 353 & 0.3 \ 353 \\ 0.3 \ 353 & 0.3 \ 353 & 0.3 \ 353 \end{bmatrix}$$

则可得

$$P_y = \frac{P_x + P_y}{2} = \begin{bmatrix} 0.3 \ 335 & 0.3 \ 336 & 0.3 \ 339 \\ 0.3 \ 336 & 0.3 \ 337 & 0.3 \ 339 \\ 0.3 \ 337 & 0.3 \ 326 & 0.3 \ 340 \end{bmatrix}$$

用类状态转移矩阵对多边形上的每个点都进行位置预测,可以得到预测 t_2 时刻反射率因子大于等于 41 dBz 时多边形各顶点经纬度坐标。

通过观察 t_0, t_1 时刻以及之后更多时刻反射率因子大于等于 41 和 35 dBz 时多边形顶点坐标,选取了 $O(x_0, y_0)$ 点作为本次预测的参考点,令 t_0, t_1 时

刻反射率因子大于等于 41 dBz 时两个多边形中心点分别为 $A(x_1, y_1)$ 与 $B(x_2, y_2)$, 则点 A 与点 B 之间的夹角分别为 α 和 β , 其中

$$\begin{cases} x_1 = \rho \cos \alpha \\ y_1 = \rho \sin \alpha \\ x_2 = \rho \cos \beta \\ y_2 = \rho \sin \beta \\ \rho = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2} \end{cases}$$

则两个夹角的差为

$$\varphi = \beta - \alpha = \arctan \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} - \arctan \frac{y_2 - y_0}{x_2 - x_0}$$

表 3 飞行受限区多边形顶点坐标对比

Tab.3 Vertice coordinate comparison of flight restricted area polygons

The vertex coordinates of the polygon at t_1 moment	Latitude/ $^{\circ}$	37.10	37.14	37.17	...	35.94	35.96	36.85
	Longitude/ $^{\circ}$	116.92	116.92	116.93	...	117.27	117.25	116.93
Predict the polygon vertex of the t_2 moment	Latitude/ $^{\circ}$	37.03	37.39	37.44	...	35.09	35.09	35.30
	Longitude/ $^{\circ}$	116.80	116.91	116.93	...	118.06	117.99	117.19
The vertex coordinates of the polygon at t_2 moment	Latitude/ $^{\circ}$	36.83	36.84	37.06	...	36.63	35.53	35.68
	Longitude/ $^{\circ}$	116.69	116.69	116.71	...	118.93	118.69	117.41

画出 t_2 时刻反射率因子大于等于 41dBz 时实时飞行限制区的多边形以及预测多边形进行对比, 如图 5 所示。

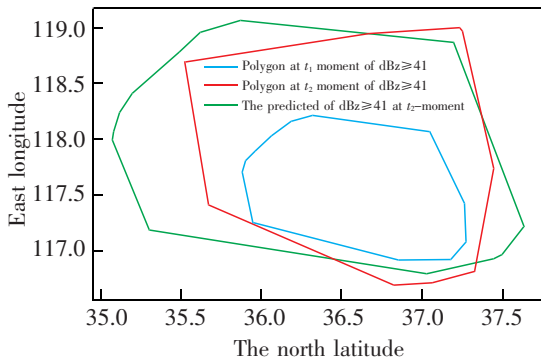


图 5 t_2 时刻飞行限制区动态预测对比图

Fig.5 Comparison chart of dynamic predictions in flight restriction zones at t_2 moments

采用以上提出的方法对另一组气象数据进行预测并得到预测结果如图 6 所示。

由图 5 和图 6 可以看出划设的动态飞行限制区几乎覆盖了 t_2 时刻反射率因子大于等于 41 dBz 时飞行限制区。通过精确度和偏离率对危险天气飞行限制区的动态预测作出评价^[16], 精确度主要

则在进行下一时刻飞行限制区预测时将多边形上每个顶点与参考点的夹角都加上 $\frac{\varphi}{2}$ 即得到角度转换后的飞行限制区的经纬度位置坐标。

3 实验结果

由上文飞行限制区的动态预测步骤可以得到 t_1 时刻反射率因子大于等于 41 dBz 时飞行限制区的预测多边形, 将其与 t_2 时刻反射率因子大于等于 41 dBz 时实时的飞行限制区进行对比, 如表 3 所示。

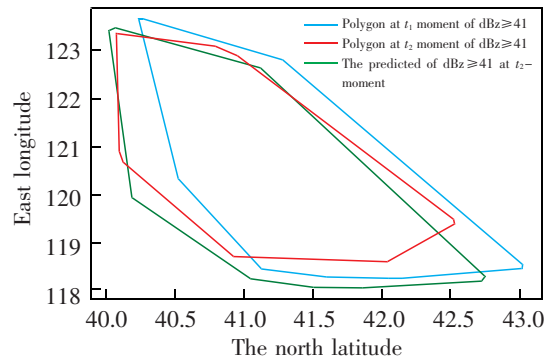


图 6 t_2 时刻飞行限制区动态预测对比图

Fig.6 Comparison chart of dynamic predictions in flight restriction zones at t_2 moments

用来评估所划设动态飞越限制区的准确率, 即实际飞行限制区与所划设的动态飞行限制区重叠部分的比率, 精确度越高则说明预测的飞行限制区越准确, 用 D_a 表示; 偏差率表示在动态飞行限制区域漏划面积和实际飞越限制区域面积之间的比率, 偏差率越小则说明划设的动态飞行限制区覆盖的实际飞行限制区的区域越大, 则对飞机飞行越有安全保障, 用 D_b 表示, 其中 D_a 与 D_b 的计算公式如下:

$$D_a = \frac{S_{AFRA} \cap S_{DFRA}}{S_{AFRA} \cup S_{DFRA}} \times 100\%$$

$$D_b = \frac{S_{DFRA} - (S_{AFRA} \cap S_{DFRA})}{S_{DFRA}} \times 100\%$$

其中 S_{AFRA} 为实际飞行受限区面积, S_{DFRA} 为划设的动态飞行限制区的面积, 本文实验得到的结果如表 4。

表 4 预测结果对比

Tab.4 Comparison of prediction results

Experiment	Accuracy	Deviation rate
Experiment one	71.82%	4.34%
Experiment two	77.63%	15.88%
The mean of the result	74.72%	10.11%
The mean of the literature results ^[11]	69.41%	24%

通过参考文献所提供的预测方法并与之对比, 例如文献 11 中的一元线性回归预测方法所给出的结果, 其精确度均值为 69.41%, 偏差度均值为 24%, 而本文精确度为 74.72%, 偏差度为 10.11%, 可知本文所提出的方法精确度较高, 偏差度较低, 有较大的应用价值与发展前景。

4 结论

1) 本文所提出的预测方法在预测时间精度较低的气象数据时精确度较高, 能有效覆盖实际的飞行限制区, 偏差率较低, 预测的误差较小, 对于气象预测以及航空安全方面有较大的应用价值。

2) 本文所提出的预测方法在对气象进行预测时不仅考虑了雷暴中心点的位置移动情况, 而且也对雷暴本身的形变进行了预测, 使得预测结果更贴近实际情况。

3) 本文所提出的预测方法在对气象进行预测时可以做到实时更新预测区域, 具有实际且广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 杨波. 论雷雨天气对民航航班的影响[J]. 空运商务, 2018(7): 59-60.
YANG B. On the impact of thunderstorms on civil aviation flights[J]. Air Transport Business, 2018(7): 59-60.
[2] 刘咨仪. 雷雨天气对飞行的影响及空中飞行安全[J]. 中国

科技信息, 2019(16): 42-43.

- LIU Z Y. The impact of thunderstorm on flight and air flight safety[J]. China Science and Technology Information, 2019(16): 42-43.
[3] 王清琦, 张兆宁. 基于马尔科夫链的单体雷暴飞行受限区模型[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(30): 312-318.
WANG Q Q, ZHANG Z N. A Markov chain-based model for the flight restricted area of a single thunder-storm[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(30): 312-318.
[4] 周雄飞. 恶劣天气影响下扇区动态容量预测[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
ZHOU X F. Prediction of sector dynamic capacity under the influence of severe weather[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
[5] KROJEL J, WEIDNER T, HUNTER G. Terminal area guidance incorporating heavy weather[C]. Guidance, Navigation, & Control Conference, 1997.
[6] BOKADIA S, VALASEK J. Severe weather avoidance using in-formed heuristic search[J]. AIAA Paper, 2001, 4232.
[7] NILIM A, EL GHAOU L, HANSEN M. Trajectory-based air traffic management(TB-ATM) under weather uncertainty[C]. Proces of the Fourth International Air Traffic Management R&D Seminar ATM, 2001.
[8] 谢春生, 李雄. 危险天气影响航路飞行区域的划设及评估[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(10): 47-52.
XIE C S, LI X. Delineation and evaluation of flight zones for hazardous weather affecting flight paths[J]. Chinese Journal of Safety Science, 2010, 20(10): 47-52.
[9] 杨惠东, 王莉莉. 基于数值气象预报的飞行受限区自动划设[J]. 航空计算技术, 2012, 42(4): 101-103.
YANG H D, WANG L L. Automatic design of flight restricted areas based on numerical weather prediction [J]. Aviation Computing Technology, 2012, 42(4): 101-103.
[10] 陈可嘉, 陈琳琳. 危险天气飞行受限区域的划设与预测[J]. 南京航空航天大学学报(社会科学版), 2017, 19(4): 59-64.
CHEN K J, CHEN L L. The designation and prediction of hazardous weather flight restricted areas[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics (Social Science Edition), 2017, 19(4): 59-64.
[11] 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.
JIANG X, HU M H, ZHANG Y, et al. Research on flight diversion based on flight restricted area designation[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2016, 33(3): 60-67.

- [12] 陈金良, 郭方月. 非战争军事行动下飞行受限区的划设方法[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(6): 2283-2287.
CHEN J L, GUO F Y. A methodology for the designation of flight restricted areas under non-war military operations [J]. Journal of Safety and Environment, 2017, 17(6): 2283-2287.
- [13] 高义梅. 大数据在气象服务中的应用价值研究[J]. 价值工程, 2022, 41(15): 153-155.
GAO Y M. Research on the application value of big data in meteorological services [J]. Value Engineering, 2022, 41(15): 153-155.
- [14] 魏凡, 李超. 利用气象雷达信息划设雷暴飞行限制区的方法研究[J]. 成都信息工程大学学报, 2018, 33(2): 205-211.
WEI F, LI C. Research on the method of using meteorological radar information to delineate thunderstorm flight restriction areas [J]. Journal of Chengdu University of Information Technology, 2018, 33(2): 205-211.
- [15] 谢春生, 李雄. 危险天气影响航路飞行区域的划设及评估[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(10): 47-52.
XIE C S, LI X. Delineation and evaluation of flight zones for hazardous weather affecting flight paths [J]. Chinese Journal of Safety Science, 2010, 20(10): 47-52.



第一作者: 樊立艳(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为航迹与气象数据融合算法。E-mail: flyfly0525@163.com。



通信作者: 常锦才(1973—), 男, 教授, 博士, 硕士生导师, 中国工业与应用数学学会几何设计与计算专委会委员, 河北省数据科学与应用重点实验室副主任, 研究方向为计算几何、工业与应用数学模型、自适应数据分析、医学影像 3D 建模。E-mail: jincai@ncst.edu.cn。

(责任编辑: 熊玲玲)