

文章编号: 2096-1618(2018)02-0205-07

# 利用气象雷达信息划设雷暴飞行限制区的方法研究

魏凡, 李超

(成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都 610225)

**摘要:**雷暴区域一直是飞行的禁区,为了飞行安全必须有效避开雷暴区域,因此雷暴区域的划设方法一直以来是研究的重点。为了科学合理地划设雷暴影响区域,以西安2017年5月2日的一次雷暴为例,利用多普勒天气雷达资料并结合GIS工具 ArcMap 强大的空间分析功能用最小凸多边形的方法划设雷暴影响区域,计算其几何中心,划设安全余度区域,最后得到飞行限制区,以此来指导飞行决策。这种方法比之前划设雷暴区的方法更简便直观,对分析雷暴的轨迹及其影响区域从而指导飞行决策具有重要意义。

**关键词:**气象学;应用气象;气象雷达;雷暴;飞行限制;GIS工具

**中图分类号:**P415.2

**文献标志码:**A

**doi:**10.16836/j.cnki.jcuit.2018.02.016

## 0 引言

随着全球经济一体化,世界各地的联系越来越紧密,作为重要交通枢纽的航空事业也在飞速发展,而航空事业的基础是飞行安全,其也愈来愈受到人们的关注。恶劣天气的发生不由人的意志转移,这些年来,由其导致的飞行事故频繁发生,是航空器飞行安全的首要威胁<sup>[1]</sup>。在所有恶劣天气中,强对流天气过程非常剧烈且破坏力较强,对飞行安全影响很大。雷暴属于强对流系统,因其发生时会有雷击和闪电,并可能造成湍流、暴雨、下击暴流等多种恶劣天气,所以也称雷暴为“天气制造工厂”<sup>[2]</sup>。由雷暴引起的这些天气现象都有可能在航空器飞行时引发飞行事故,因此雷暴对飞行安全极具威胁<sup>[3]</sup>,带来的危害如表1。

数据统计显示,在全世界各地平均每小时都会产生雷暴1800余次,且在发生的48起飞行事故当中,其中由雷暴引起的事故就占有23起,约占总事故的48%<sup>[4]</sup>。为了航空器的飞行安全,在飞行过程中如果遭遇雷暴,航空器不允许穿越该区域,因此需要对雷暴飞行限制区进行合理地划设,使航空器避开雷暴影响区域。

飞行限制区的划设方法是先划设好雷暴区域,再在这个基础上向外扩展增加飞行安全余度区域,这个区域即为飞行限制区。Bokadia等<sup>[5]</sup>提出了平移划设法,危险天气是一个动态移动的过程,不是静止的,

通过此方法对影响飞行的区域进行动态划设;高政等<sup>[6]</sup>提出近似椭圆划设法,通过椭圆的形状变化来模拟危险天气的影响区域;谢春生<sup>[7]</sup>提出了基于最小凸多边形划法,以此来确定最小飞行限制区,使得划设飞行限制区的精度更高;王兴隆等<sup>[8]</sup>根据外接多边形的不同分别提出了最小外接圆、最小面积椭圆和最小外接矩形这三种划设飞行受限区的方法,并通过数学的方法对其精确度进行了检验;蒋昕<sup>[9]</sup>对危险天气下的航空飞行特点进行分析,在精确划设出静态飞行限制区的基础上提出3种飞行限制区移动预测模型。

表1 雷暴天气对飞行的影响

由雷暴引发的现象	对飞行的威胁
颠簸	当飞机遭遇湍流现象时,使飞机产生颠簸,而颠簸使飞机抖动,这样不仅使飞机操作更加困难,甚至在严重的情况下出现飞机解体。
结冰	雷暴云中的湿度非常大,而达到一定海拔高度后温度很低,当飞机在温度低至0℃的高度飞行时,飞机表面的水滴可能凝结成冰,从而增加飞行操作难度。
暴雨	雨水可能进入发动机中导致熄火,尤其是在进行减速或者准备着陆时。
冰雹	具有一定质量快速下落的固体,会损坏机身,危及乘客安全。
雷击	雷击产生的瞬时电磁场会干扰飞机的电子仪器及其通讯系统,且有可能击中飞机,导致其损坏,危及人身安全。
下击暴流	具有非常强大的冲击力,会损坏机身,影响机场基础设施及设备。

收稿日期:2017-07-12

基金项目:中国民用航空局民航安全能力建设基金资助项目(2014020841);国家公益性(气象)行业科研专项资助项目(GYHY201306044)。

在中国空中管制机构中,需要对空域中的气象信息进行监控,一般由气象专家进行此项工作,并以此对空域情况进行评估与处理,得到危险天气区域边界。主要利用的是个人经验和知识,该方法虽然有效利用专家经验,但工作量较大,也容易产生误差。因此采用一定的算法对航空气象数据进行处理后得到受限区会更加科学合理<sup>[10]</sup>。由于天气的不断变化,飞行限制区可以分为静态和动态两种,静态飞行限制区就是指该限制区域的形状、大小和方向不随时间变化,而动态飞行限制区则相反<sup>[8]</sup>。

研究是对西安管制区内静态飞行限制区域的划设方法。对于西安飞行限制区的划设方法,赵凯<sup>[11]</sup>提出先利用气象部门的雷达回波图确定受影响的区域,再利用格雷厄姆算法确定凸多边形的飞行限制区,这个方法需要将雷达回波图通过图像处理技术得到所需要的回波强度值区域,再划设限制区,此过程比较复杂。蒋昕<sup>[9]</sup>也是通过此方法精确划设静态飞行限制区,这是目前比较大众的一种划设方法。而本文从天气雷达基数据出发,将反射率位置信息数值化,再利用 Arc-Map 的强大空间分析功能来直接确定雷暴区域,划设飞行限制区,相较而言更加简便直观。

## 1 西安飞行管制区概况及航路平面图制作

### 1.1 西安管制区概况

为有效利用有限的空域资源,避免浪费,必须创建一个科学的空域管理系统,在保证飞机飞行安全的前提下,提供高效的空中交通服务。航空器的活动空间根据其地理位置及高度被划分为不同的空域,在中国整个空域被划分为3个部分,其中包括飞行情报区、管制区、飞行警告区<sup>[12]</sup>。

高空管制区的范围是在6 km(含)至航空器能达到其巡航高度层上限的这部分空间,因其对应的地理范围不同被划分为若干个高空管制区,而近管制区是中低空管制空域与塔台管制空域之间的连接部分<sup>[13]</sup>。

航路的含义是指空域中具有20 km宽的空中飞行通道,航空器在其中畅行无阻,而航线指的是飞机的飞行轨迹,其包括始发、停靠点、终点及路线<sup>[14]</sup>。

当航空器即将进入的空域内有政治、军事、经济及科学研究等活动时,为了保证活动的顺利进行,此空域

需要对进入其中的飞行活动进行限制。限制的等级分为空中禁区、危险区和限制区这3种类型,其限制的条件说明如表2。

表2 飞行警告区域说明

类型	说明
空中禁区	无论在任何情况下,不得在指定的空中禁区内飞行。
危险区	在危险区有政治、军事、经济等活动期间,航空器不允许在危险区内飞行。
限制区	限制区内有许多飞行限制,航空器在其中飞行时必须遵守,确保飞行安全。

研究的区域为西安管制区,根据文献<sup>[15]</sup>的描述,西安管制区内航路信息分布如图1所示。

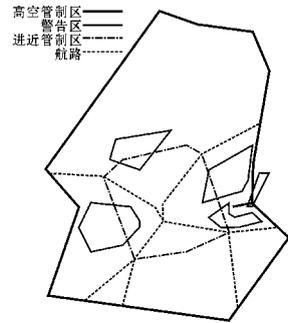


图1 西安管制区内高空航路信息平面分布图

在图1中,西安区域高空管制范围及西安区域进近管制范围如图实线所示,西安区域内危险区为编号为ZL(D) 301和ZL(D) 302,西安区域内限制区的编号为ZL(R) 306,ZL(R)307,ZL(R) 308和ZL(R) 309,西安高空管制区范围内有航路5条和航线27条。

### 1.2 西安管制区的航路平面图制作

由图1可知西安飞行管制区的分布信息,但是却并没有具体的位置信息,不利于之后与气象信息的融合分析应用。根据中国航行资料汇编中的记录,利用GIS工具将西安飞行管制区信息利用兰伯特圆锥投影进行数值化处理,得到具有具体位置信息的平面图。

在中国航行资料汇编中对西安高空管制区域、西安进近管制区域、西安管制区域内危险区与限制区的重要点和每条航路航线导航点都记录了其具体的位置信息(在lambert conformal conic的标准下),重要点和导航点不同,其是描述区域范围的边界点,将其用直线连接起来即表示该区域的范围。其中西安高空管制区内重要点的具体位置信息如表3所示。

确定西安管制区的方法是在ArcMap中加载中国省级行政区地图,并使用中国兰伯特圆锥投影坐标系,

将地理坐标系设定为 GCS\_WGS\_1984,这样就不需要再进行投影转换。然后利用 ArcMap 软件工具箱中的 Write Features To Text File 工具和 Create Features From Text File 工具将这些重要点的信息由点转换为线,再由线形成面,得到西安管制区的地理范围,确定西安管制区的范围。同理,对于西安管制进近区的范围、飞行限制区的范围和危险区的范围、航路和各航线都可以利用本方法在 ArcMap 中显示,制作出西安飞行管制区航路信息平面图,得到如图 2。

表 3 西安高空管制区重要点位置信息

NAME	LNG/°	LAT/°
NULL	109.0427778	39.11333333
刀兔	109.6833333	38.73333333
武家湾	110.6	38.36666667
吴堡	110.7333333	37.46666667
薛峰镇	110.3	35.53333333
潼关	110.25	34.53333333
灵口镇	110.4833333	34.08333333
商南	110.8666667	33.53333333
镇坪	109.5166667	31.9
广元	105.8166667	32.45
陇县	106.85	34.89166667
泾源	106.3333333	35.49

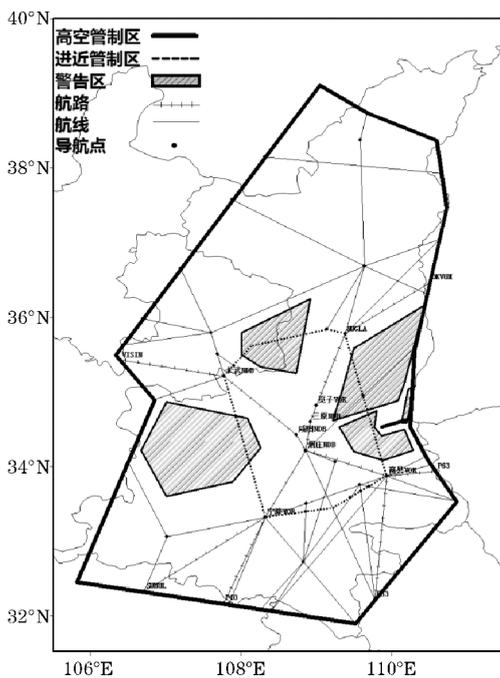


图 2 西安管制区航路信息平面图

## 2 基于雷达回波的雷暴飞行限制区划分

### 2.1 雷达回波图的分析

根据民航气象观测记录,在 2017 年 5 月 2 日,雷暴从 9:57 开始至 10:48 结束。此次雷暴过程持续 51 min,影响范围较大,导致多架次飞机延误,因此选取了这个时间段的雷暴天气过程进行研究。

资料来自西安多普勒天气雷达,包括基数据资料和混合反射率 37 号雷达产品资料。该雷达资料是每隔 6 min 的连续观测资料,根据 2017 年 5 月 2 日 9:54-10:51 的多普勒天气雷达产品混合反射率 CR(37 号)在 PUP 上的显示如图 3。

从雷达回波图 3 上看,混合反射率的大值区从 9:54 至 10:51 主要集中在西安西部,由此可以判断当雷达回波强度大于一定值时,该区域是雷暴区域,且在本次雷暴过程中于 9:59 分时回波强度大于 40 dBZ 的区域最多,因此判断此时的雷暴达到最强,选取此时刻的基数据为例进行应用分析。

在航空气象服务中,通常使用气象雷达回波图和短期预报确定危险天气的影响范围。危险天气的剧烈程度不同对飞行安全的影响也不同,为了更好地区分其影响,将不同的程度分为 7 个等级,并通过不同颜色对其进行区分,如表 4 所示<sup>[16]</sup>;研究表明,当雷达回波强度  $\geq 41$  dBZ 时也就是天气等级  $\geq 3$  级时,天气过程非常剧烈,会导致在其中飞行的航空器产生剧烈的颠簸,增加操作难度,会严重影响航空器的飞行安全<sup>[17]</sup>。因此在雷达回波强度  $\geq 41$  dBZ 的区域航空器不能直接穿越飞行,必需避开此区域以确保航空器的飞行安全。

表 4 美国气象服务中心雷达回波与飞行危险天气等级

天气等级	颜色	降水量/(mm/h)	回波强度/dBZ	影响程度
0 级	无色	<0.49	[0,18)	没有
1 级	淡绿色	0.49 ~ 2.7	[18,30)	轻度
2 级	深绿色	2.7 ~ 13.3	[30,41)	中度
3 级	黄色	13.3 ~ 27.3	[41,46)	重度
4 级	橙色	27.3 ~ 48.6	[46,50)	严重
5 级	淡红色	48.6 ~ 133.2	[50,57)	强烈
6 级	红色	>133.2	[57,100)	极度

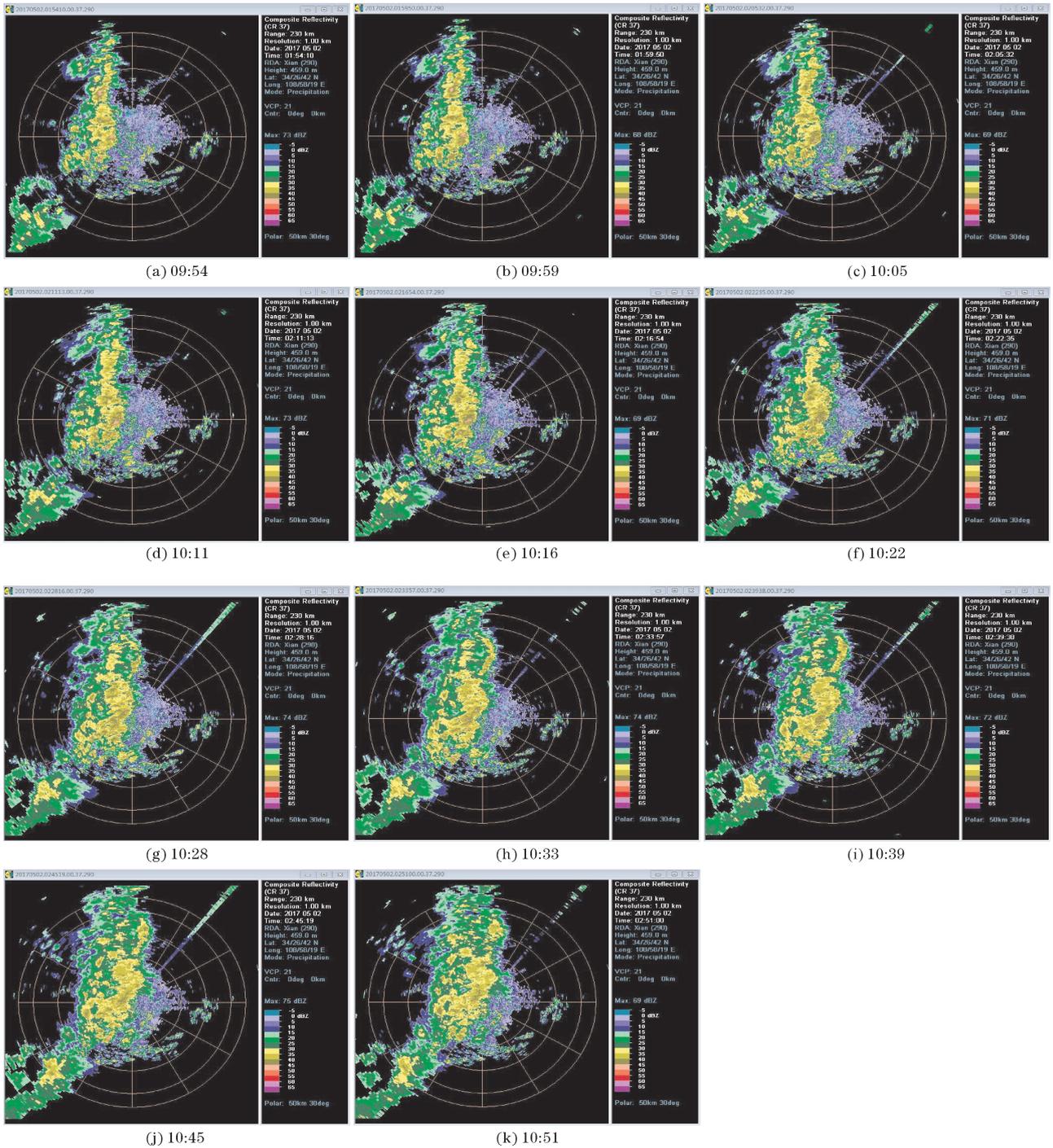


图3 2017年5月2日9:57-10:51西安多普勒天气雷达的混合反射率(CR)分布图

雷达回波反射率 $\geq 41$  dBZ的范围为雷暴影响区域,飞机不能穿越该雷暴区,把这部分雷暴区域看作初始飞行限制区<sup>[18]</sup>。

## 2.2 雷达回波信息在GIS中的叠加处理

地理信息系统(GIS)是一种可以对海量空间数据进行分析 and 处理的综合计算机系统,强大的空间分析能力是其核心功能,而在这么多的GIS平台软件中,ArcGIS软件因其有最全面的空间分析功能而使用最

广泛<sup>[19]</sup>。使用ArcGIS中的ArcMap软件对气象及雷达资料进行处理研究。

提取2017年5月2日9:59基数据的混合反射率CR(CINRAD CB格式),经过处理得到点数据并导入到ArcMap中。这些点数据有混合反射率的回波强度信息,将其按照回波强度的大小进行分类,范围0~65 dBZ,每5 dBZ为一个区间,及65 dBZ以上为一个区间,共计14类,得到图4。

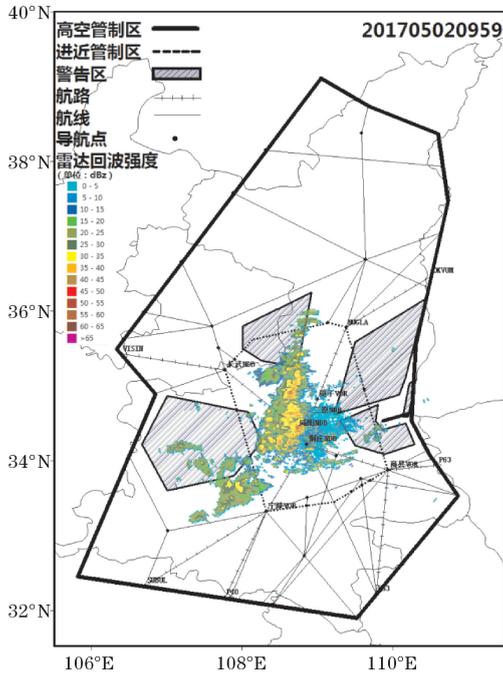


图 4 雷达信息和航路信息的融合

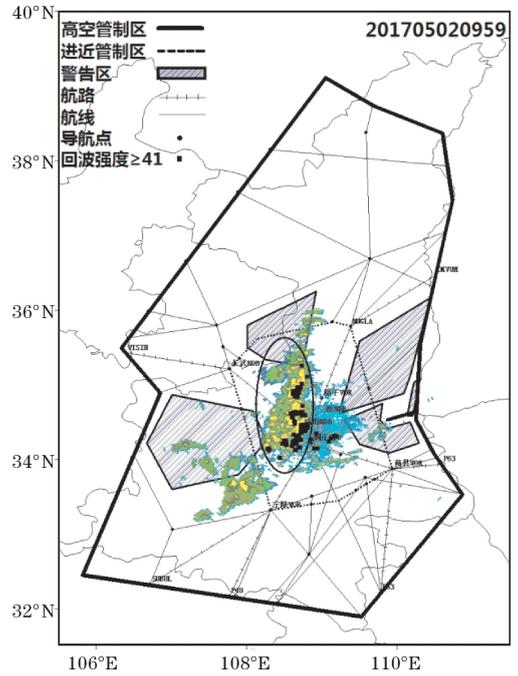


图 5 雷达信息和航路信息的融合 (反射率大于等于 41 dBZ 的区域)

### 2.3 雷暴限制区域的划设方法

在航班飞行时遇到雷暴天气,为了确保飞行安全,不能直接穿越雷暴区域,一般要求该航班从雷暴影响区域两侧绕过,从而避开影响航班飞行安全的区域。因此雷暴飞行受限区的划设忽略其高度的大小而以二维平面方式来显示<sup>[7]</sup>。一般利用简单多边形来表示雷暴飞行限制区边界,在各种简单多边形中最小外接凸多边形来表示雷暴飞行限制区边界的情况,可以使航班绕飞航程较短的同时有效避开雷暴飞行限制区。把雷暴区雷达回波强度 $\geq 41$  dBZ的这部分看作飞行限制区。

首先需要 ArcMap 中确定这个飞行限制区。在 ArcMap 中打开雷达数据的属性表,再通过属性  $V \geq 41$  dBZ 的条件将混合反射率进行筛选,只留下  $V \geq 41$  dBZ 的信息,其中选中的点有 279 个,筛选出的结果显示之后,再分析确定飞行限制区要素点的合理范围,如图 5 所示。

图 5 中在椭圆范围内回波强度大于等于 41 dBZ 的点为合理的雷暴要素点,已经筛选出雷暴要素点所在范围,再需要确定雷暴区域。在 ArcMap 中有进行最小边界几何计算的工具,此工具可以计算的最小边界几何有 5 个类型,分别为面积最小的外接矩形、宽度最小的外接矩形、最小外接凸面、最小外接圆形及包络外接矩形。利用第 3 种几何类型形成最小凸多边形得到雷暴区域,也就是图 6 中初始飞行限制区域 A。

雷暴是一个天气过程,是在不断发展变化的,为了追踪雷暴的移动轨迹,需要确定一个雷暴中心。现在确定了雷暴区域 A,利用 ArcMap 中的 Feature To Point 工具在图 6 中找到 A 区域的几何中心 X,再利用 Geometry Calculator 工具计算中心点 X 的地理坐标,得到  $X(108.603454, 34.528337)$ 。

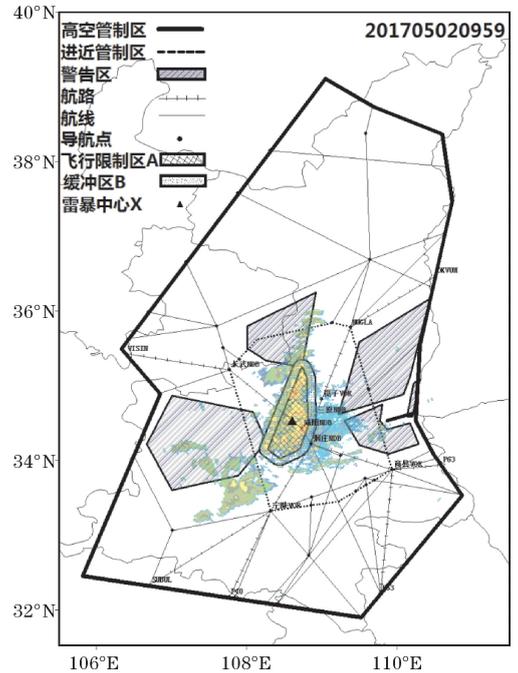


图 6 飞行限制区的制作示意图

当飞机遇到雷暴需要绕过雷暴云时,为了安全飞行安全,必须遵守一定的绕飞安全余度,与雷暴云保持

一定的安全距离,也就是指在初始飞行限制区域的边界上以一定的距离进行外推。航路宽20 km,将其平分为两部分,中心线到两边的距离各10 km,西安管制区域批准的区域管制雷达最低水平间隔必须为10 km<sup>[11]</sup>。因此在文中将雷暴飞行限制区的绕飞安全余度标准按照规定设置为10 km。初始限制区域是矢量数据,绕飞需要在确定雷暴云区域的前提下再得到安全余度区域,利用 ArcMap 的缓冲区分析方法来确定安全余度区域。

对于缓冲区的定义,是在一个给定空间对象或集合的邻域,是一种延伸和扩展,对于这个邻域大小的划设取决于该邻域的半径或创建这个邻域的条件,由于缓冲区的创建不同,缓冲区的形式也不同。因此文中在已经划设了初始飞行限制区 A 的前提下,它的缓冲区将之定义为

$$P = \{x | d(x, A) \leq r\} \quad (1)$$

公式(1)中, $d$ 是指与初始限制区域的距离大小, $r$ 是指缓冲区建立的条件, $r \leq 10$  km。利用 Toolbox 中的 Buffer Wizard 工具,在其中设置距离为线性单位,单位是 km,得到缓冲区 B。在图6中 A 与 B 合并得到最终飞行限制区 C。

得到最终飞行限制区 C 之后结合图6分析得知此时刻雷暴天气将影响两条航路,这两条航路分别为 H14(长武—咸阳—烟庄—商县)和 G212(冕子—三原—烟庄—宁陕),航空公司需要及时调整相应的航班或指挥飞机进行绕飞,以免发生安全事故。

### 3 结束语

随着民航事业的不断发展,飞行安全一直是重中之重,雷暴区域一直是飞行的禁区,如何预报雷暴,并划设雷暴区域,以此来指导飞行决策一直是众学者研究的重点。首先通过高空航路图的信息,将西安管制区内主要航空信息导入 ArcMap,建立高空航行信息的二维可视化地图,再通过多普雷天气雷达的基数据,将其数值化,转换为带有反射率的要素点后导入 ArcMap,对航路信息和气象雷达信息进行初步融合。再利用 ArcMap 强大的空间分析功能确定雷暴云影响区域、雷暴中心的移动轨迹和绕飞安全余度区域。这些可以很清晰地显示在 ArcMap 中,可以使管制人员非常形象直观地了解飞行限制区范围,受影响的航路航线,以此来飞行决策,避开雷暴影响区域,对

飞行安全提供极大的帮助。

在划设飞行限制区的过程中是在假设雷暴云在一段时间内属于相对静止的前提之下,但雷暴是一个天气过程,雷暴云也是在不断移动当中,其云团的形状也在不断变化。因此,在雷暴云动态移动的条件下如何有效划设飞行限制区有待深入研究,而且因航行汇编资料中的航路信息都是由点到线,由线到面,其只有二维平面的信息,为了更精确的针对在飞行过程中如何有效避开雷暴甚至危险区域,以后的研究将趋向于将航路信息和气象雷达信息在五维(时间、物理变量和三维空间)方面的融合,以提供更为精准的气息服务。

### 参考文献:

- [1] 孙帅,王兴隆.基于改航策略的空中交通流量管理方法研究[J].黑龙江科技信息,2011(21):89.
- [2] 张文字.雷暴对飞行的影响及其分析[J].成都航空职业技术学院学报,2010(3):47-49.
- [3] 徐达.雷暴天气分析及其对飞行的影响[J].科技风,2014(24):17.
- [4] 周线娅.西安咸阳机场强对流天气气象保障案例分析[J].空中交通,2015(5):40-43.
- [5] Bokadia S, Valasek J. Severe weather avoidance using informed heuristic search [C]. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Montreal, Canada, 2001:1-9.
- [6] 高政,胡明华.动态空域下的实时改航策略[C].青岛:第四届中国智能交通年会,2008:412-417.
- [7] 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(10):47-52.
- [8] 王兴隆,徐肖豪,李慧.改航策略中雷暴飞行受限区划设方法[J].科学技术与工程,2013(10):2906-2910.
- [9] 蒋昕.危险天气下的动态航班改航研究[D].南京:南京航空航天大学,2016.
- [10] 杨超.恶劣天气下终端区航迹智能优化[D].天津:中国民航大学,2014.
- [11] 赵凯.雷暴天气下西安管制区改航路径规划初探[D].广汉:中国民用航空飞行学院,2012.
- [12] 张丹丹.浅谈我国空域分类分析及建议[J].科学中国人,2015(17).

- [13] 董天罡. 场面监视雷达仿真系统的设计与实现 [D]. 成都: 四川大学, 2005.
- [14] 葛伟. 蛛网式航线网络结构研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
- [15] 民航局空管局航行情报服务中心. 中华人民共和国航行资料汇编 eAIP [EB/OL]. 2017.
- [16] 张兆宁, 王霞. 考虑危险天气的终端区动态容量评估 [J]. 中国民航大学学报, 2013, 31(6): 5-11.
- [17] Rhoda, D A, Pawlak, M L. The Thunderstorm Penetration/Deviation Decision in the Terminal Area [C]. 8th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology (ARAM), Dallas, TX, 1999.
- [18] Mark E Weber, James E Evans, William R Moser, et al. Air Traffic Management Decision Support During Convective Weather [J]. Lincoln Laboratory Journal, 2007, 16(2): 263.
- [19] 胡祎. 地理信息系统 (GIS) 发展史及前景展望 [D]. 北京: 中国地质大学, 2011.

## Study on the Method of Setting Up Limited Flying area of Thunderstorm by Using Weather Radar Information

WEI Fan, LI Chao

(College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

**Abstract:** The thunderstorm area has been a restricted area for flying and flight safety, the thunderstorm area must be effectively avoided. The setting method of thunderstorm area has been the focus of research. In order to scientifically and reasonably delimit the influence area of thunderstorm, this paper takes a thunderstorm at in Xi'an in May 2, 2017 as an example. Based on the Doppler weather radar data and the powerful spatial analysis function of GIS tool ArcMap, we calculated the influence area of thunderstorm by the minimum convex polygon method, calculated the geometric center, designated regional safety degree, and finally the flight restricted zone can be obtained in order to guide the flight decision. This method is simpler and more intuitive than the method of setting up a thunderstorm area before. It is very important to analyze the trajectory of thunderstorm and its influence area so as to guide the decision of flight.

**Keywords:** meteorology; applied Meteorology; weather radar; thunderstorms; flight restrictions; GIS tools