

王 俊,王 庆,龚佃利. 飞机增雨作业“8”字型航线设计探讨[J]. 干旱气象, 2018, 36(1): 136-140, [WANG Jun, WANG Qing, GONG Dianli. The “8” Font Flight Course Project of Precipitation Enhancement by Aircraft[J]. Journal of Arid Meteorology, 2018, 36(1): 136-140], DOI:10.11755/j. issn. 1006-7639(2018)-01-0136

飞机增雨作业“8”字型航线设计探讨

王 俊,王 庆,龚佃利

(山东省人民政府人工影响天气办公室, 山东 济南 250031)

摘 要:针对飞机增雨效果检验、水库增蓄水和森林防火等需求,在充分考虑云系移动、飞机性能等基础上,提出满足无缝隙催化要求的“8”字型飞行航线设计方法,给出“8”字型航线长度、宽度等特征值计算公式。在云系移动速度快、慢两种情况下,结合业务需要,分别设计向下、向上游漂移的移动“8”字型飞行航线。实际飞行试验表明,装有北斗等定位系统的飞机完全可以按照设计的航线进行增雨作业。

关键词:飞机增雨;航线设计;“8”字型航线

文章编号:1006-7639(2018)01-0136-05 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2018)-01-0136

中图分类号:P481

文献标志码:A

引 言

在飞机人工增雨作业中,需要尽量采用优化的作业方法,以争取得到尽可能好的增雨效果。而作业航线是飞机人工影响天气作业方案设计中的核心内容之一,合理的作业航线既能有效地对云系进行催化,也有利于云微物理结构的探测和地面作业效果检验。平行条航线、锯齿形航线、三角形航线和水平观测航线等基本航线已在我国飞机人工增雨作业或试验中得到广泛应用^[1-8]。袁正腾等^[9]在传统飞行航线设计方案基础上,提出了基于 ArcGIS Engine 的半圆弧过渡条播航线、“弓”字形和“之”字形条播航线 3 种层状云作业“穿云”航线的自动化设计算法。

飞机催化作业航线设计对于效果评估的物理检验有重要影响,余兴等^[10]利用数值模拟研究表明,浓度不小于 $10 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$ 的人工冰核有效扩展宽度不大于 3.0 km 。而卫星反演产品分析^[11-12]表明飞机播云后在云顶附近形成宽和深分别为 14.0 km 和 1.5 km 的云谷。可见飞机播撒的催化剂通过扩散在云中形成的催化区域宽度约为 10.0 km ,这样的尺度对于新一代多普勒雷达、静止气象卫星和机载仪器等观测设备,要检测出作业效果需要科学合理的方案设计。如新一代多普勒雷达基本反射率和组合反射率等大部

分产品的分辨率为 1.0 km ,在大片回波中跟踪分析 10.0 km 宽度回波的变化是不容易的。而 FY-2 系列静止气象卫星可见光资料的星下点分辨率是 1.25 km 、红外资料是 5.0 km ^[13],所以要检测一条 10 km 宽的催化剂扩散区,在红外产品上只有 $1 \sim 2$ 个点,可见光产品上也只有 10 个点左右。对于机载观测,目前“运-7”飞机巡航速度约 $420 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,垂直穿过 10.0 km 宽的目标云仅需要 86 s 。由于单线源的扩散宽度很窄,不利于观测设备进行追踪观测。因此,如果通过合理的飞机作业航线设计,使得催化剂的扩散区域能连接在一起,形成尺度较大的催化影响区,则有利于效果的检验和分析。数值研究表明,合适的间距还有利于线源间的合并,增加作业效果^[14-15]。

在考虑云系移动速度、飞机性能、催化航线间距等条件的基础上,分析“8”字型飞行航线设计方法,给出该型航线长度、宽度等特征值的计算方法。“8”字型飞行航线的催化剂经过平移和扩散后,可以形成成片的催化区域,有助于空中和地面作业效果的检验。

1 飞行航线设计方法

1.1 固定“8”字型飞行航线设计

如果云系静止,假设一定范围的云系具有催化

收稿日期:2017-08-15;改回日期:2017-11-28

基金项目:国家公益性行业(气象)科研专项经费项目(GYHY201406033-02)资助

作者简介:王俊(1966—),男,正研级高工,主要从事人工影响天气相关研究. E-mail:wangjun818@sohu.com.

潜力,则为了最大可能对云系进行催化,最佳催化航线选择平行条航线(图 1),每段航线长度一般在 50 ~ 100 km。当催化航线间距 d_{zj} 等于单条航线催化剂扩散宽度(一般为 5 ~ 10 km)时,人工冰核经扩散后,一定浓度的催化区域经过合并连接,可以产生成片的催化作业区域,这称之为无缝隙催化原则, d_{zj} 称为催化航线最佳间距。

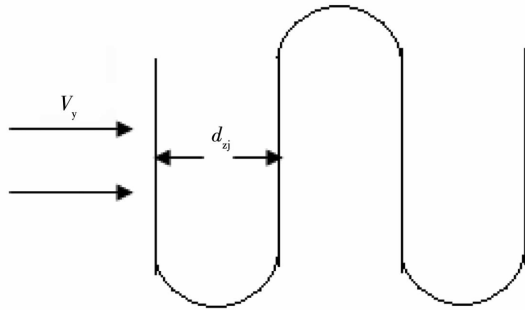


图 1 静止云系中平行条作业航线示意图
(V_y 为云系移动速度)
Fig. 1 The sketch map of parallel operation routes for static cloud system
(V_y for the cloud moving speed)

实际大气中云系是移动的,如果简单地采用图 1 所示的平行条航线进行增雨作业,由于受水平风场输送作用的影响,每段催化航线与设计的航线发生偏离,造成交叉或重合^[15]。因此,要使催化航线最终成为可以连成片的平行条状,即满足无缝隙催化原则,作业航线需要根据云系移动速度、方向和飞机性能等具体条件进行详细设计。

飞机催化作业的目标云一般为层状云或弱积层混合云,特点是范围大、持续时间长。但云中过冷水、冰晶等微物理量分布不均匀,云中可催化区域是不连续的^[16-20],为了简化分析,假设云中具有较大范围的连续可催化区域。

对于沿某个方向移动的云系,假设其移动速度为 V_y 、飞机飞行速度为 V_f (都是相对于地面)、飞机转弯时间为 t_z ,则采用图 2 所示的“8”字型飞行航线,可基本满足无缝隙催化原则。

图 2 中 A 点是飞机催化的起始点,催化航线为 $A \rightarrow B'$,飞机到达 B' 点时,催化点 A 对应云体向下风方平移距离 $d_1 = V_y \cdot \frac{L}{V_f}$, L 为飞机实际飞行航线长度,轨迹 $A \rightarrow B'$ 平移演变为 $A' \rightarrow B'$ 。飞机在 B' 向上风方转弯,转弯时间为 t_z ,其间,云体继续向下风方移动距离 $d_2 = V_y \cdot t_z$, $A' \rightarrow B'$ 演变成 $A'' \rightarrow B''$,飞机完成半个“8”字飞行。飞机从 $B' \rightarrow A'$, $A' \rightarrow A$,完成另外半个“8”字的飞行,催化航线 $B \rightarrow A'$ 演变成 $B'_0 \rightarrow A'_0$ 。两条催化航线 $A''B''$ 和 $B'_0A'_0$ 之间的距离为 $d = d_1 + d_2$,要实现无缝隙催化,需要 d 等于单条航线催化剂扩散宽度,则 $d = d_{zj}$, $d_{zj} = d_1 + d_2$,即: $d_{zj} = \frac{L_{zj} \cdot V_y}{V_f} + V_y \cdot t_z$ 。

据此可计算出满足无缝隙催化原则的 A、B' 两点间距 L_{zj} :

$$L_{zj} = \frac{d_{zj} \cdot V_f}{V_y} - V_f \cdot t_z$$

飞行方向与云系移动方向的夹角为 β , β 需满足: $\cos \beta = \frac{d_1}{L_{zj}}$ 。

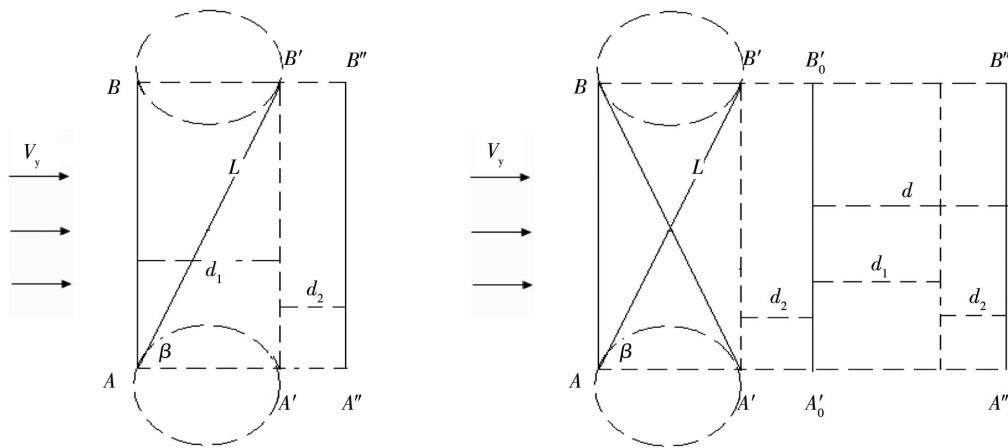


图 2 “8”字型飞行航线示意图
Fig. 2 The sketch diagram of “8” flight course

当 $L > L_{zj}$ 时,两相邻催化航线间距大于 d_{zj} ,云系未被完全催化,达不到无缝隙催化效果;当 $L < L_{zj}$ 时,两相邻催化航线间距小于 d_{zj} ,部分催化区域重叠,增加了催化作业时间;当 $L = L_{zj}$ 时,两相邻催化航线间距等于 d_{zj} ,则既可满足无缝隙催化要求,且催化作业时间最短。

对某一云系, V_y 可以根据雷达回波资料或探空资料计算得到, V_f, t_z 对于特定的机型也是常数,因此, L_{zj}, d_1 和 β 可以根据云系特征和飞机飞行参数求出。在实际催化作业中,根据给定的催化区域和云系的移动方向,首先计算出 L_{zj}, d_1 和 β 。然后根据 L_{zj}, d_1 和 β 选择催化起始点 A, B' 和 B, A' ,飞机在 A, B' 和 B, A' 四点之间做固定“8”字型飞行。

对于“运-7”或“安-26”飞机, V_f 一般为 $420 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,转弯半径 5 km ,转弯时间 2.5 min 左右, d_{zj} 取 $7 \sim 10 \text{ km}$,云系移动速度^[21]取 $10 \sim 80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,根据上述公式计算出的最佳 L_{zj} 和 d_1 见表 1。

从表 1 的计算结果来看,当云系移速为 $30 \sim 50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时, L_{zj} 的长度基本在 $50 \sim 100 \text{ km}$ 左右,作业航线能满足增雨需要;当云系移速大于 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时, L_{zj} 一般小于 45 km ,飞机作业航线太短,飞机需要频繁转弯,不能满足增雨业务需要;而当云系移速小于 $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时, L_{zj} 一般要超过 150 km ,飞机作业航线太长,由于受作业云系水平尺度和作业区域等因素的影响,催化作业条件不容易满足。因此,在云系移速过慢或过快的情况下,采用固定的“8”字型航线进行催化是不合适的,需要重新设计飞行航线。

上面的定量分析针对的是“运-7”或“安-26”飞机,对于飞行速度较慢的“运-12”($240 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$)和飞行速度较快的“运-8”飞机($550 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$),也可以给出类似表 1 的计算结果(略),从计算结果来看,“运-12”飞机催化 $40 \sim 100 \text{ km}$ 长的固定“8”字型航线对应的云系移速为 $20 \sim 40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,而“运-8”飞机催化 $50 \sim 150 \text{ km}$ 长的固定“8”字型航线对应的云系移速为 $30 \sim 60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

表 1 不同云系移速、航线间距时的“8”字长度和宽度

Tab. 1 The best line length L_{zj} and width d_1 of “8” flight course under different cloud movement speed V_y and width d_{zj} between seeding lines

d_{zj}/km	$V_y/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	长度 L_{zj}/km	宽度 d_1/km	d_{zj}/km	$V_y/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	长度 L_{zj}/km	宽度 d_1/km
7	10	276.5	6.6	9	10	360.5	8.6
	20	129.5	6.2		20	171.5	8.2
	30	80.5	5.8		30	108.5	7.8
	40	56.0	5.3		40	77.0	7.3
	50	41.3	4.9		50	58.3	7.0
	60	31.5	4.5		60	45.5	6.5
	70	24.5	4.1		70	36.5	6.1
	80	19.2	3.7		80	29.7	5.7
8	10	318.5	7.6	10	10	402.5	9.6
	20	150.5	7.2		20	192.5	9.2
	30	94.5	6.8		30	122.5	8.8
	40	66.5	6.3		40	87.5	8.3
	50	49.7	5.9		50	66.5	7.9
	60	38.5	5.5		60	52.5	7.5
	70	30.5	5.1		70	42.5	7.1
	80	24.5	4.7		80	35.0	6.7

1.2 向下游或向上游漂移的“8”字型飞行航线设计

当云系移速 V_y 比较大时, L_{zj} 太短不能满足要求,需要比 L_{zj} 长的催化作业航线,即图 3 中 AB_2 的长度 L 要大于 L_{zj} ,飞机从 A 点到达 B_2 点时, A 点的催化剂

向下游平移的距离 $d_3 = V_y \cdot \frac{L}{V_f}$, 则 $d_3 > V_y \cdot \frac{L_{zj}}{V_f}$ 。飞机在点 B_2 向上风方转弯,转弯时间为 t_z ,在此期间,云体继续向下风方移动,距离 $d_2 = V_y \cdot t_z$,则起

始点 A 向下游平移的距离 $d = d_2 + d_3, d > d_{zj}$ 。要实现无缝隙催化,飞机不能在 B 点转弯,而是需要在下游的 B_1 点转弯, $BB_1 = V_y \cdot t_z + V_y \cdot \frac{L}{V_f} - d_{zj}, B_2B_1 = d_{zj} - V_y \cdot t_z$, 然后飞机从 B_1 飞向另一侧的 A_2 点。

A_0 点与 B_1 点对称, 即 $AA_0 = BB_1 = V_y \cdot t_z + V_y \cdot \frac{L}{V_f} - d_{zj}, A_0A_2 = BB_2 = V_y \cdot \frac{L}{V_f}$ 。飞机在 A_1 点转弯, $A_0A_1 = BB_1$, 即飞机转弯点又向下游移动了 A_0A_1 距离。

因此,飞机催化作业不是采用固定的“8”字型航线,而是向下漂移的“8”字型航线,需要追云作业,即每一侧开始作业的点都向下游移动一段距离 $V_y \cdot t_z + V_y \cdot \frac{L}{V_f} - d_{zj}$,“8”字的宽度为 $d_{zj} - V_y \cdot t_z$, 飞行方向与云系移动方向的夹角 β 仍满足 $\cos \beta = \frac{d_1}{L}$ 。

云系移动速度取 $70 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}, d_{zj}$ 取 10 km , 催化航线长度取 70 km ,“运-7”飞机技术参数如上,则可以计算出“8”字的宽度约为 7.1 km , 每次转弯后作业点向下移动的距离约为 4.6 km 。

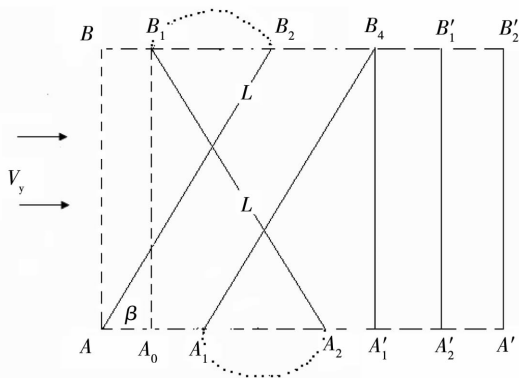


图 3 向下漂移的“8”字型飞行航线示意图

Fig. 3 The sketch diagram of “8” flight course drifting downstream

同理,当云系移速 V_y 较小时,飞机催化航线长度 L 要小于 L_{zj} , 因此飞机催化作业应采用向上漂移的“8”字型航线,即每一侧开始作业的点都向上游移动一段距离 $V_y \cdot t_z + V_y \cdot \frac{L}{V_f} - d_{zj}$,“8”字的宽度为 $d_{zj} + V_y \cdot t_z$ 。

对于“运-12”飞机,云系移动速度小于 $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 和大于 $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,需要分别采用向上和向下漂移的“8”字型航线,而“运-8”飞机向上和向下对应的云系移动速度分别小于 $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 和大于 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

2 业务应用试验个例

2009 年 5 月 14—15 日,受西风槽和西南暖湿气流影响,山东省大部地区出现一次降水过程,其中鲁南和半岛出现了中到大雨,其他地区小到中雨。根据作业天气条件,14、15 日开展了 2 架次的增雨作业,并对“8”字型航线设计、飞行技术要求等进行了试验检验。

根据河南濮阳和山东齐河多普勒雷达观测资料,计算出云系移动速度约为 $46 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 向东北方向(59°)移动。“运-7”飞机的飞行速度约为 $420 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 航线间距取 10.0 km , 转弯时间取值 2.5 min 。则可计算出“8”字型航线的长度约为 74.0 km , 宽度为 8.1 km , 飞行方向与云系移动方向的夹角为 83.7° 。考虑到第一次进行这样的试验飞行,并根据云系条件,选择在聊城的冠县和梁山县之间做“8”字型飞行。图 4 是实际作业航线,一共飞行了 2.5 个“8”字,作业时间 76 min , 一个“8”字约需要 30 min 。“8”字的长度约为 90.0 km , 宽度最大为 10.1 km , 比实际计算值都偏大一些。另外,从实际作业过程看,转弯时间一般不超过 130 s , 比计算时采用的值略小。

目前,尚无有效检测云中催化剂分布的技术手段,上述飞行试验只是检验了装有定位系统的飞机完全可以按照设计的航线进行飞行作业,而催化剂是否会形成平行条状分布还缺少有效的观测证据。



图 4 2009 年 5 月 14 日飞机增雨作业航线
Fig. 4 The flight course used in precipitation enhancement by aircraft on 14 May 2009

3 结 论

(1)提出了满足无缝隙催化要求的固定“8”字型飞行航线设计方法,给出了“8”字型航线长度、宽度等特征值计算公式。对“运-7”飞机,云系移速为 $30 \sim 50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,可以采用长度为 $50 \sim 100 \text{ km}$ 的固定“8”字型飞行航线。

(2)在云系移动速度快、慢两种情况下,分别设计了向下、向上游漂移的移动“8”字型飞行航线。对“运-7”飞机,云系移速小于 $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 和大于 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,需要分别采用向上和向下游漂移的“8”字型飞行航线。

(3)飞行试验表明,装有北斗等定位系统的飞机完全可以按照设计的航线进行增雨作业。

本文的分析包含了许多理想化假设,如将球面距离看成平面距离,催化剂的活化率为100%并且是瞬间活化等等。即使如此,要设计出满足理想要求的航线仍然非常困难,而实际业务中情况更是复杂,需要业务人员高度重视、认真对待,否则,由于地面^[22]、空中飞机作业方案本身就存在问题,后续的效果评估也就变得更加困难。

参考文献:

- [1] 黄美元. 我国人工降水亟待解决的问题和发展思路[J]. 气候与环境研究,2011,16(5):543-550.
- [2] 金凤岭,张晰莹,张云峰,等. 新一代飞机人工增雨作业指挥系统研制与应用[J]. 气象科技,2006,34(4):470-473.
- [3] 陈保国,雷恒池,郭强,等. 基于GPS技术的云物理综合探测航线设计[J]. 西北大学学报(自然科学版),2008,38(5):842-844.
- [4] 黄毅梅,周毓荃,刘金华,等. 人工增雨可播区域自动选择方法研究[J]. 气象,2008,34(7):108-113.
- [5] 张瑞波,刘丽君,钟小英,等. 利用新一代天气雷达资料分析飞

- 机人工增雨作业效果[J]. 气象,2010,36(2):70-75.
- [6] 黄彦彬,姚展予,游积平,等. 基于“.NET”的华南区域人工增雨效果统计检验共享平台的设计与实现[J]. 气象,2011,37(6):727-734.
- [7] 齐彦斌,陶玥,洪延超,等. 东北冷涡中尺度云系降水机制研究 I:观测分析[J]. 气候与环境研究,2012,17(6):683-692.
- [8] 金华,黄梦宇,于潇洵,等. 一次飞机播撒吸湿性焰剂试验的微生物探测浅析[J]. 气候与环境研究,2012,17(6):704-710.
- [9] 袁正腾,叶建元,李德俊,等. 基于 ArcGIS Engine 的飞机人工增雨航线自动化设计算法研究[J]. 测绘与空间地理信息,2012,35(1):111-115.
- [10] 余兴,樊鹏,王晓玲,等. 层状云中非垂直多条撒播线源催化剂扩散的数值模拟[J]. 气象学报,1998,56(6):708-723.
- [11] 余兴,戴进,雷恒池,等. NOAA 卫星云图反映的播云物理效应[J]. 科学通报,2005,50(1):77-83.
- [12] 戴进,余兴,ROSENFELD D,等. 一次过冷层状云催化云迹微物理特征的卫星遥感分析[J]. 气象学报,2006,64(5):622-630.
- [13] 杨军,许健民,董超华. 风云气象卫星40年:国际背景下的发展足迹[J]. 气象科技进展,2011,1(1):6-13.
- [14] 申亿铭,陈吉航. 飞机播撒催化剂的叠加效应[J]. 南京气象学院学报,1983,6(2):239-246.
- [15] 余兴,戴进. 层状云中飞机人工增雨作业间距的研究[J]. 大气科学,2005,29(3):465-474.
- [16] 王俊,张连云,陈金敏,等. 秋季层状云中高值过冷水区的微物理特征[J]. 气象,1999,25(12):24-27.
- [17] 于丽娟,姚展予. 一次层状云飞机播云试验的云微物理特征及响应分析[J]. 气象,2009,35(10):8-25.
- [18] 洪延超,李宏宇. 一次锋面层状云云系结构、降水机制及人工增雨条件研究[J]. 高原气象,2011,30(5):1308-1323.
- [19] 李德俊,唐仁茂,江鸿,等. 武汉一次对流云火箭人工增雨作业的综合观测分析[J]. 干旱气象,2016,34(2):362-369.
- [20] 王研峰,黄武斌,和翠英,等. 陇中黄土高原一次秋季层状云微物理结构及适播性分析[J]. 干旱气象,2017,35(1):64-72.
- [21] 王俊,龚佃利,周黎明,等. 山东降水回波移动特征分析[J]. 气象,2013,39(10):1344-1349.
- [22] 王以琳,王俊. 地面人工增雨随机试验方法的探讨[J]. 干旱气象,2015,33(5):756-760.

The “8” Font Flight Course Project of Precipitation Enhancement by Aircraft

WANG Jun, WANG Qing, GONG Dianli

(Shandong Weather Modification Office, Ji'nan 250031, China)

Abstract: For the demand of aircraft artificial precipitation enhancement effect tests, reservoir watershed, and forest fire prevention, on the basis of fully considering the cloud movement and plane performance, the “8” font flight course for seamless catalytic requirements was put forward. Further, the calculation formulas of the “8” font flight course length and width were given. Under the condition of cloud movement speed being faster or slower, and combined with the business requirements, the “8” font flight courses drifting either downstream or upstream were designed, respectively. Tests show that, according to the designed flight course, the aircraft equipped with GPS could completely operate the aircraft precipitation enhancement.

Key words: precipitation enhancement by aircraft; flight course project; “8” font flight course