

“04. 12. 21”飞机积冰天气过程数值特征分析

刘开宇¹ 申红喜¹ 李秀连² 梁爱民¹

(1. 北京大学物理学院大气科学系, 100871; 2. 民航华北空管局气象中心)

提 要

通过对2004年12月21日发生在民航太原机场附近的飞机积冰过程分析认为: 华北地面高压和河套地区高空槽形成的“回流+倒槽”形势是此次积冰的天气背景, 在具备暖湿环境的条件下, 在冷暖空气交汇区域靠近冷空气一侧易发生积冰; 除去飞机动力增温影响后, 强积冰所需环境温度大致在 $-6\sim-10^{\circ}\text{C}$ 之间; 弱上升气流和冷平流已经侵入的区域内有利于积冰的形成; WAFS数值预报产品可较有效地描述天气系统发展的动力结构和机制, 具有较好的积冰形势预报能力, 而在国际民航组织向成员国推荐的积冰指数基础上重新构造的积冰指数可以更好地预报积冰天气的发生区域。

关键词: 飞机积冰 WAFS 数值预报 积冰指数

引 言

飞机积冰(以下有时简称积冰)是指飞机机身表面某些部位积聚冰层的现象, 它是由于云中的过冷水滴或降水中的过冷雨滴碰到机体后冻结而成的, 也可由水汽在机体表面直接凝华而成。在航行中, 飞机发生积冰能使飞机的空气动力学性能恶化, 升力减小, 阻力增大, 轻者影响飞机的稳定性和操作性, 重者能使飞机通讯中断, 仪表失灵, 甚至会导致机毁人亡的恶性事故。近年来, 随着航空技术的飞速发展, 飞行速度和飞行高度已有明显提高, 机身防冰除冰设备日趋完善, 积冰对飞行的影响不像过去那么严重。但是, 随着我国航空事业的快速发展, 民航运输量日益增加, 飞机遭遇积冰的机会必然会增多。另外, 高速飞机在低速飞行阶段仍可能发生积冰, 因此, 近几年来飞机积冰的研究仍引起了民航和军事部门的重视。

王新炜等^[1]利用美国国家环境预报中心(NCEP)和国家大气研究中心(NCAR)联合处理的全球大气40年(1958~1997)再分析

资料, 在SCEM指数的基础上, 构建一个新的积冰指数SCEM(VV), 即当温度在 $0\sim-15^{\circ}\text{C}$, $RH\geq 80\%$, $\omega\leq -0.2\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ 时有积冰发生, 并根据该积冰指数对我国积冰气候特征进行了分析。分析表明太原机场所处地区为积冰少发区, 全年积冰发生几率少于10%; 黄丽娟^[2]通过大量积冰实例, 统计发现形成华北地区积冰的主要天气形势为: 槽前型、槽后脊前和高压底部回流+倒槽型, 且同时指出, 华北地区12月份为积冰的相对高发期; 大量文献^[3,4]研究表明: 积冰温度一般在 $0\sim-15^{\circ}\text{C}$, 轻度积冰在 $0\sim-12^{\circ}\text{C}$ 出现最多, 中度积冰在 $-2\sim-12^{\circ}\text{C}$ 出现最多, 强积冰在 $-8\sim-10^{\circ}\text{C}$ 最多; 出现积冰的湿度一般要求 $(T-T_d)<7^{\circ}\text{C}$, 以 $<4^{\circ}\text{C}$ 出现几率最大; 金维明等^[5]研究指出, 飞机在下降阶段减速飞行时, 发生积冰的可能性更大。本文旨在通过2004年12月21日发生在民航太原机场附近的飞机积冰天气过程个例, 利用常规天气资料和WAFS数值预报资料, 探寻发生积冰时的大气温度、湿度及温度平流、垂直

速度等物理量的分布特征以及利用 WAFS 数值预报产品预报积冰天气发生区域的可用性。

2004年12月21日1320UTC左右,民航山西太原武宿机场接到北京至太原航班机长报告(机型为波音737),在飞行高度1500~3000m(海拔)之间(约相当于850hPa至700hPa之间),飞机遭遇强积冰,在短短2~3分钟内,飞机风挡玻璃前积聚了2~3cm厚的毛冰。按照赵树海^[4]介绍的积冰强度等级划分标准(单位时间内积冰强度 $\geq 2\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$),应属于极强积冰。当时飞机时速约为 $300\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$,飞机在快速下降通过积冰云层后于1347UTC安全降落。对此次积冰天气过程进行分析,意在探寻其发生规律,为以后积冰预报做参考。

1 资料选取和处理方法

本文使用的资料包括常规地面、高空资料和 WAFS 数值预报资料。其中客观分析方法采用 Cressman 逐步订正法,分析范围以太原机场所处位置(37.44°N 、 112.37°E)为中心,高空和地面 x 、 y 方向格点数取 51×41 ,格距取 80km。

本文所用数值预报资料是 WAFS (World Area Forecast System) 资料。WAFS 是国际民航组织和世界气象组织专为航空气象设计的一套航空气象服务系统,每6小时发布一次,预报时效间隔为6小时,预报时效分别为6、12、18、24、30和36小时。世界区域预报系统提供的 GRIB 资料编码方式,是专用的 Thinned GRIB 码。对变网格结构的数据,需先插值到规则网格上。为计算方便起见,将数据插值成 $1.25^{\circ}\times 1.25^{\circ}$ 的正方形网格,插值方法采用抛物线曲线拟合法。

2 积冰发生(时)前的大尺度环流背景

从2004年12月21日1200UTC地面图(图略)可见,蒙古地区有一明显的高压,冷空

气轴向自贝加尔湖以东向东南方向伸至渤海,冷空气在已影响华北平原并继续南下的同时,向偏西方向扩散并影响太原地区,民航太原机场从当日上午开始吹偏东风。与此同时河套地区在700hPa高空槽(见图1)的影响下,地面倒槽向偏东北方向发展,辐合抬升作用明显,其中在地面冷空气后部和700hPa西南气流重叠的区域,已有许多测站有零星降雪(雨),但降水量不大。太原机场在1330UTC出现降雪天气,之前维持满天层积云,云底高600m达十几小时之久。从图1还可看出,太原机场位于南北和东西向槽线辐合点附近,700hPa等温度线位于 $-8\sim -10^{\circ}\text{C}$ 之间,850hPa等温度线位于 $-6\sim -8^{\circ}\text{C}$ 之间(图略)。另外,仅从图1风速和风向的定性分析也可以发现,太原机场附近有较明显的风速和风向辐合,水汽通量散度计算表明,在700hPa,太原机场东南和西南方向各有一个水汽辐合中心,机场附近水汽通量散度值为 $-0.4\times 10^{-7}\text{g}\cdot(\text{s}\cdot\text{hPa}\cdot\text{cm}^2)^{-1}$ (图略)。这说明,丰富的水汽沿高空槽前的西南气流和切变线附近的偏东气流被输送到华北地区,在具备暖湿环境的条件下,积冰就发生在合适的温度高度层内,而华北地面高压和河套地区高空槽形成的“回流+倒槽”形

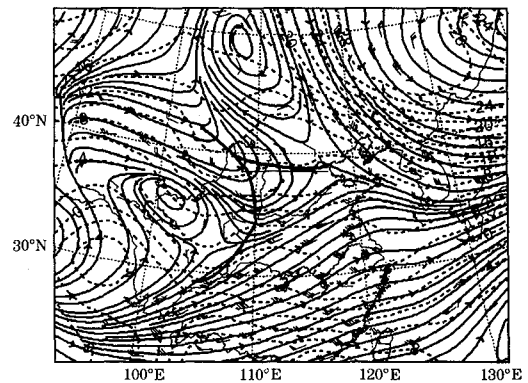


图1 2004年12月21日1200UTC 700hPa 流线、温度场和测站风合成图

虚线为等温线,单位: $^{\circ}\text{C}$,等值线间隔2;实线为流线;粗实线为高空槽线

势是此次积冰的天气背景。

3 物理量特征诊断分析

3.1 中低层温度、湿度和上升气流的垂直分布

为了得到积冰发生时(前)太原地区附近温度、湿度以及温度平流、垂直速度等物理量的分布特征,我们利用积冰发生前 1200UTC 常规天气资料,沿太原机场所处经度(113°E)分别做了温度、比湿剖面图(图 2)和温度平流、垂直速度 $\omega(\leq 0)$ 剖面图(图 3)。从图 2 可明显看出在 32~40°N 之间对流层低层有一明显冷舌向南伸展(箭头所指方向),其前端已经延伸到 32°N 附近,太原机场位于冷舌的中心控制区域,700hPa 的温度约为 -12°C,850hPa 的温度约为 -8°C,温差变化不大。考虑到飞机的动力增温作用(根据云中或降水中不同飞行速度下驻点增温的换算关系,当时飞机速度 $300\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$,驻点增温应为 2°C 左右^[4]),这样实际上环境温度相当于一在 -6~-10°C 之间,与形成强积冰所需合适温度相符。与温度冷舌相对应,比湿剖面显示,一高湿区则自南向北伸展并叠置在低层冷舌之上,高湿轴(见粗实线)随纬度增加而缓慢升高,在 38°N 附近最大比湿度高度出现在 700hPa 附近,约为 $2\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,说明随着冷空气的南侵,暖湿空气不断被迫抬升。分析图 3 可看出,38°N 附近并不是最大上升速度区,而是为弱上升速度控制,上升速度在 $0 \sim -1.0 \times 10^{-1} \text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,其原因可能是弱上升气流有利于微滴保持悬浮状态并不断增长,从而有利于积冰的形成;反之,较强的上升运动可能有利于降水产生,反而不利于积冰的积聚,这与有关文献^[6]的研究相一致。同时,温度平流分析发现,积冰发生时(前)太原机场处于较强冷平流的前沿,最强冷平流位于 45°N 附近,为 $-16 \times 10^{-5} \text{°C} \cdot \text{s}^{-1}$,太原机场上空 700hPa 以下已经为冷平流控制,其中最强冷平流位于 850~700hPa

之间,与出现积冰的高度层相一致。分析表明,此次积冰发生在冷暖平流交汇靠冷平流一侧,且冷平流已经侵入并伴有弱上升运动的区域内。

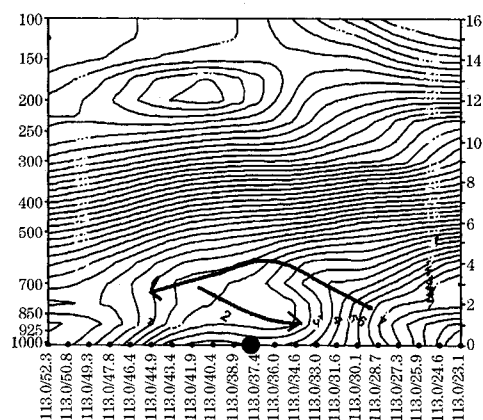


图 2 2004 年 12 月 21 日 1200UTC 沿 113°E 温度和比湿剖面图

细实线为等温线,单位:°C,等值线间隔 2;点线为比湿线,单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,等值线间隔 0.5,黑点表示太原机场的大致位置

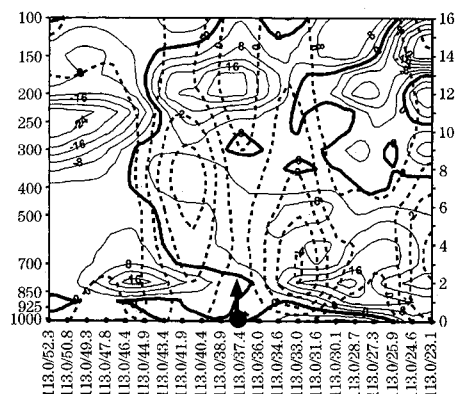


图 3 2004 年 12 月 21 日 1200UTC 沿 113°E 温度平流和垂直速度 (≤ 0) 剖面图

细实线为平流线,其中正值表示暖平流,负值表示冷平流,粗实线为零平流线,单位: $10^{-5} \text{°C} \cdot \text{s}^{-1}$,等值线间隔 4;粗点线为上升速度区,单位: $10^{-1} \text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$,等值线间隔 1,黑点表示太原机场的大致位置

3.2 利用 WAFS 积冰指数做积冰区域预报

鉴于积冰会对航空器的性能产生毁灭性的影响,而目前尚未有比较成熟的、可以业务化的采用非静力动力框架配合混合云模式的

数值预报模式,因此国际民航组织向成员国建议使用以下积冰指数来做积冰的趋势预报,积冰指数 $I_c = \{[(RH - 50) \times 2] \times [T \times (T + 14) / -49]\} / 10$,其中 RH 为相对湿度, T 为温度。指数为正,代表孤立的潜在积冰区,而最可能出现积冰的区域,积冰指数接近 10。积冰指数的前半部分表示水滴的数量、大小,随相对湿度由 50% 到 100%,积冰指数表现从 0 增长到 10,公式的后半部分用温度的二次方来表示水滴的增长率,该部分在 $T = -7^\circ\text{C}$ 时为最大值 1, $T = -14^\circ\text{C}$ 和 $T = 0^\circ\text{C}$ 取最小值 0,当 $0 \sim -14^\circ\text{C}$ 范围内,积冰指数为负数,不考虑发生积冰可能性。积冰强度判据为:当 $4 > I_c \geq 0$,预报有轻度积冰;当 $7 > I_c \geq 4$,预报有中度积冰;当 $I_c \geq 7$,预报有严重积冰。该指数与前文 SCEM(VV) 指数相比,优点在于考虑了温度和湿度的相对变化,而且可以预报积冰强度,但没有考虑到垂直上升速度。考虑到现在许多国家在积冰预报中都引进了垂直速度这一参数,如瑞典民航部门发展了一个新的积冰算法^[7],该算法直接或间接考虑到发生积冰的所有因素,包括温度、湿度和过冷却水滴尺度等,其中用垂直速度来代替过冷却水滴尺度。因此本文在国际民航组织向成员国推荐的积冰指数基础上,重新构造一个考虑上升运动的积冰指数(简称 I_α),即先计算弱上升速度区($-2.0\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1} \leq \omega < 0.0\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)的区域,然后再利用积冰指数 I_c 来进一步确定该区域是否存在积冰及其强度。

本文采用 2004 年 12 月 21 日 0000UTC 的资料作为初始场资料,12 小时预报场表示 12 月 21 日 1200UTC 预报场。图 4a 和图 4b 分别是根据国际民航组织推荐的积冰指数 I_c 和本文构造的 I_α 积冰指数计算出的有效时间为 1200UTC,700hPa 等压面上的积冰趋势预报图。从图中可看出,太原地区及其以南将有一次较大范围、强度较强的积冰天气

发生,但图 4a 积冰区范围较大。根据事后对青岛和西安两个机场气象台的询问,当晚两地有关部门并没有接到飞机积冰的报告,这在一定程度上可以说明,新构建的积冰指数 (I_α) 比国际民航组织推荐的积冰指数 (I_c) 在积冰区域预报方面更为合理些。另外,500hPa 等压面积冰趋势预报图(图略)显示上述区域并无积冰天气发生。从以上分析不难发现,WAFS 数值预报产品可较有效地描述天气系统发展的动力结构和机制,具有较好的积冰形势预报能力。

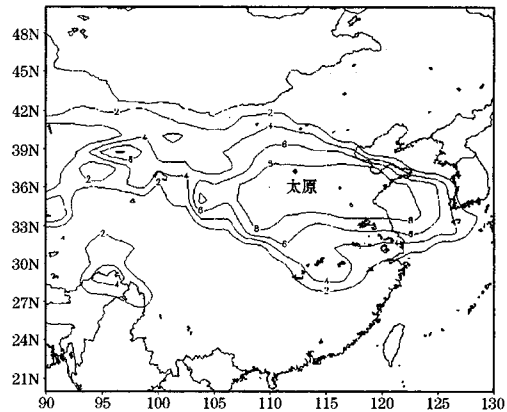


图 4a 2004 年 12 月 21 日 1200UTC 利用积冰指数 (I_c) 计算出的 700hPa 积冰预报图

数字越接近 10,表示积冰等级越强,黑点表示太原机场的位置

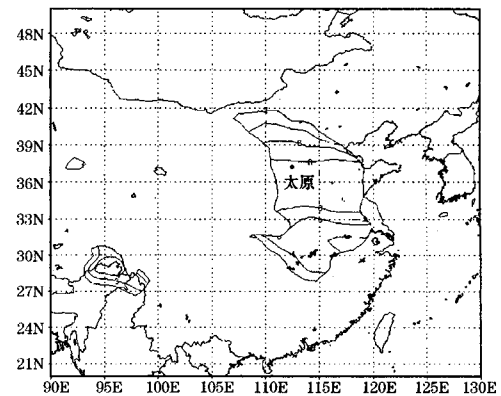


图 4b 2004 年 12 月 21 日 1200UTC 利用新构建的积冰指数 (I_α) 计算出的 700hPa 积冰预报图

数字越接近 10,表示积冰等级越强,黑点表示太原机场的位置

4 预报着眼点

由以上分析可知,2004年12月21日发生在民航太原机场附近的飞机积冰天气过程具有如下特征:

(1) 华北地面高压和河套地区高空槽形成的“回流+倒槽”是此次积冰的天气背景,大量水汽沿高空槽前的西南气流和切变线附近的偏东气流被输送到华北地区,在具备暖湿环境的条件下,积冰就发生在合适的温度高度层内;

(2) 在冷暖空气交汇区域靠近冷区一侧易发生积冰,扣除飞机动力增温影响后,强积冰所需环境相当温度约在 $-6\sim-10^{\circ}\text{C}$ 之间;

(3) 冷平流已经侵入且伴有弱上升运动的区域有利于积冰的形成;

(4) WAFS数值预报产品可较有效地描述天气系统发展的动力结构和机制,具有较好的积冰形势预报能力;在国际民航组织向成员国推荐的积冰指数基础上重新构造的积冰指数可以更好地预报积冰天气的发生区域。

5 结束语

以上结论只是通过对一次个例分析得到的,它对我们进一步理解和认识太原地区积冰发生的条件有一定的启发作用,然而这些

结论是否具有普遍性,还有待于作更多的实例来证实。鉴于积冰天气预报涉及到复杂的云微物理过程,目前还无法得到云中的过冷水滴含量和水滴大小等数据,加上飞机报告也很少,所以目前实际航空气象保障中,积冰预报大多是依据天气形势和云中温度和湿度情况,并结合数值预报产品综合考虑。

致谢: 本文得到了国家气象中心毕宝贵研究员和中国气象科学研究院吴宝俊研究员的热心指导,特表示感谢!

参考文献

- 1 王新炜,张军,王胜国. 中国飞机积冰的气候特征. 气象科学,2002,22(3):343~350.
- 2 黄丽娟. 中国北方地区飞机积冰的大气环境特征. 飞行实验,1997,(12):8~12.
- 3 李子良,潘微多. 飞机积冰预报应用软件. 气象,1996,22(12):17~19.
- 4 赵树海. 航空气象学. 北京:气象出版社,1994:190~192.
- 5 金维明. 飞机发动机积冰原因探讨. 气象,1997,23(12):11.
- 6 J Carriere. Statistical verification of forecast icing risk indices. Meteorol Appl,1997,(4):115~130.
- 7 Esbjörn Olsson. World area forecast system operations group second meeting. Bangkok, Thailand, 2005,(3):5~7.

Analysis of an Aircraft-icing Event in Taiyuan Airport

Liu Kaiyu¹ Shen Hongxi¹ Li Xiulian² Liang Aimin¹

(1. Department of Atmospheric Science, School of Physics college, Peking University, Beijing 100871;

2. Beijing Meteorological Center of CAAC)

Abstract

An analysis of the case of aircraft-icing occurred in Taiyuan airport of Shanxi Province 21 December, 2004 is made. It shows that the upper-trough in Hetao area and the high-pressure over the North China composed the background of this event. The equivalent temperature of environment lied between -6°C and -10°C was necessary for severe icing when the environment had plenty of moisture. The weak ascend velocity and cold advection are favourable to ice accumulation; WAFS NWP products can effectively describe the dynamics structure of synoptic system. A new icing index can better predict the icing event than the recommended icing-index by ICAO.

Key Words: aircraft icing WAFS numerical weather prediction icing index