

李佰平,戴建华,孙敏,等,2018.一种改进的飞机自然结冰潜势算法研究[J].气象,44(11):1377-1390.

一种改进的飞机自然结冰潜势算法研究^{*}

李佰平^{1,6} 戴建华¹ 孙 敏¹ 史月琴² 孙俊颖³ 杨 涛⁴ 黄可蔚⁵ 韩 昌¹

1 上海中心气象台,上海 200030

2 中国气象科学研究院,中国气象局人工影响天气中心,北京 100081

3 中国商飞试飞中心,上海 200230

4 中国飞行试验研究院,西安 710089

5 四川航空股份有限公司,成都 601202

6 上海市气象服务中心,上海 200030

提 要: 飞机结冰严重危害飞行安全,随着国产大飞机计划的推进以及自然结冰试飞试验的开展,飞机结冰研究越来越引起了民航和气象等诸多部门的重视。本文介绍了一个改进的飞机自然结冰潜势算法,该算法直接基于大气温湿层结给出结冰潜势,可以识别多种天气条件下(包括冻雨)的飞机结冰可能,具有命中率高、虚警率低、应用简便、实用性强的特点。用 26 个飞机结冰试飞(飞行)报告对该算法进行了检验和评估,发现该算法能较好地估测多种天气条件下飞机在飞行中实际遭遇结冰的情况,且能给出结冰的区域和大致高度。同时,在安庆的一次飞机自然结冰外场试验中对该方法进行了应用,发现结合地面观测、探空秒数据和卫星资料等,该结冰潜势诊断方法可以准确诊断结冰层的高度和随时间的变化,与飞机实际空中探测具有较高的符合度。

关键词: 飞机自然结冰,民机试飞,温湿层结,过冷却水,飞机积冰

中图分类号: P412,P426

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.11.001

An Improved Aircraft Natural Icing Potential Algorithm

LI Baiping^{1,6} DAI Jianhua¹ SUN Min¹ SHI Yueqin² SUN Junying³

YANG Tao⁴ HUANG Kewei⁵ HAN Chang¹

1 Shanghai Central Meteorological Observatory, Shanghai 200030

2 Weather Modification Center of CMA, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

3 Flight Test Center, Commercial Aircraft Corporation of China Ltd., Shanghai 200230

4 Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089

5 Sichuan Airlines Co., Ltd., Chengdu 601202

6 Shanghai Meteorological Service Centre, Shanghai 200030

Abstract: With the progress of China-made large aircraft and natural icing flight test in recent years, aircraft icing which is dangerous for flight safety, catches more and more attentions from both aviation and meteorology sectors now. Based on atmospheric temperature and humidity stratification profile, an improved icing potential algorithm with high probability of detection (POD), low false alarms ratio (FAR), easy application and practicability, is introduced in this article. The algorithm is verified and evaluated against 26 flight test/pilot reports. It is found that the diagnosed icing potential has high accordance with aircraft observation, and can give the approximate icing height and area in multiple weather conditions. By combing surface observation, radiosonde and satellite data, the algorithm is also verified in an aircraft

^{*} 上海市科委科研计划项目(16dz1206100)、中国气象局预报员专项(CMAYBY2018-025)及上海市气象局强对流科技创新团队共同资助

2017 年 9 月 1 日收稿; 2018 年 1 月 25 日收修定稿

第一作者:李佰平,主要从事数值天气预报应用研究. Email:lbp1986@sohu.com

natural icing observation experiment in Anqing, and the result shows that the algorithm can diagnose the particular height of icing level as well as the production and consumption of supercooled water, which has high consistency with aircraft sounding.

Key words: aircraft natural icing, flight test, temperature and humidity stratification, supercooled water, aircraft icing

引言

飞机结冰(积冰)是指飞机机身表面一些部位产生冰层聚积的现象,主要是由飞机在云中或降水飞行时,过冷却水滴或者雨滴碰撞机身产生冻结而形成,也可由水汽直接在飞机外表面上凝华而形成。飞机结冰会使其空气动力学性能恶化,表现为升力减小,阻力增大,影响飞机的安定性和操纵性。飞机结冰是一种航空危险天气,因此民用飞机在交付使用前,需要经过一系列严格的试验试飞。因此提高飞机结冰诊断和预报水平对航空安全运行以及国产大飞机试飞均有重要意义。

特殊天气试飞风险系数高、技术难度大,对气象条件有着极为严格苛刻的规定与限制。其中自然结冰试飞科目是所有科目中对气象条件要求最高,也是最难完成的科目之一。美国联邦航空管理局(FAA)利用飞机探测资料制定了适航标准第25部附录C^①,该附录利用云层液态水含量、云层水滴平均有效直径和周围空气温度提供了飞机结冰环境的基本描述,其中平均有效直径近似于中值体积直径。中值体积直径是指云滴尺度上液态水含量分布的中值,该值经常用于描述飞机结冰环境(Cober and Isaac, 2006; 王磊等, 2014)。中国民用航空规章(CCAR)第25部运输类飞机适航标准中关于大气结冰条件的描述与FAA类似^②。

目前,基于多源探测资料和(或)数值模式的飞机结冰诊断(预报)较多,如建立基于温度和湿度阈值的数值模式飞机结冰预报产品,及结合垂直热力结构信息对结冰区域预报识别。在国内应用比较广泛的经典积冰指数(I_c)由相对湿度和温度构成(刘旭光, 2001; 迟竹萍, 2007; 刘凤林等, 2011):

$$I_c = 2(RH - 50)[T(T + 14)/(-49)] \quad (1)$$

式中, RH 为相对湿度(单位:%), T 为温度(单位:℃)。翟菁等(2010)利用MM5中尺度模式在 I_c 指数的基础上,增加了垂直速度的判据($\omega \leq -0.2 \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$, p 坐标下),对两种积冰指数进行了对比。王新炜等(2002)综合考虑温度、湿度、垂直速度阈值,利用NCEP全球大气再分析资料分析了中国飞机积冰的气候特征。王洪芳等(2003)试验对比了多种积冰算法,并采用MM5中尺度数值模式和预报产品,建立了飞机积冰预报模型。刘凤林等(2011)利用物理量场模拟数据,结合3种积冰算法,进行诊断预报试验。NCEP的结冰诊断预报有两种方法(周斌斌等, 2016),一种是利用模式预报的温度、湿度和上升运动来诊断各飞行高度上的结冰条件;另一种是采用NCAR发展的模糊逻辑预报方法(Bernstein et al, 2005),其方法是将和结冰有关的温度、湿度、云量、云水等与结冰的可能性相联系,做成曲线,找出各种情况下结冰可能性和结冰强度,该方法又被称为当前结冰潜势分析(current icing potential, CIP)。王磊等(2014)参照CIP方法,建立了基于卫星、数值模式输出和地面观测资料的飞机积冰潜势监测算法,并利用飞机积冰报告实例对该算法进行了验证。Bernstein et al (2007)、Bernstein and Le Bot (2009)在CIP方法的基础上,结合地面观测和探空资料计算了加拿大、美国、欧洲、亚洲和全球的结冰以及大过冷却水滴的气候分布。

飞机遭遇结冰是因为大气中过冷却水的存在,因而也有部分结冰算法直接利用大气中的相对湿度或过冷却水含量来表征飞机结冰的强度或可能性。其中一种结冰指数算法是,当大气温度在 $-20 \sim 0^\circ\text{C}$ 时,将大气的相对湿度直接定义为结冰指数(icing index, II) (Schultz and Politovich, 1992)。目前英

①Federal Aviation Administration, 2016. US code of Federal Regulations Title 14—Aeronautics and Space, Chapter I—Federal Aviation Administration, Department of Transportation, Subchapter C—Aircraft, Part 25—Airworthiness Standards: Transport Category Airplanes, Appendix C to Part 25. <http://federal.elaws.us/cfr/title14.chapteri.subchapterc.part25.appc>.

②中国民用航空局, 2011. 中国民用航空规章第25部运输类飞机适航标准[CCAR-25-R4]附录C. <http://www.caac.gov.cn/website/old/B1/B6/201112/P020111209503321901800.pdf>.

国气象局/伦敦全球航空预报中心(WAFC)业务运行的结冰预报产品正是基于此算法。基于数值模式的进步,在 II 的基础上又发展了多种结冰算法,如利用云量或水物质含量等要素表征结冰的强度(概率),结合次网格尺度水物质分布特征表征局地结冰强度等,并利用气候模式和实际观测比较了不同方法的优劣^③。

目前国内业务上常用的飞机结冰诊断预报算法,如 I_c 等,一般只考虑高空中的温度和湿度阈值等,判据较为简单,实际业务应用中发现在时间和空间分布上存在着较大的空报,作为规避潜在的积冰区域具有一定的适用性。而民用飞机自然结冰试飞的需求则反其道而行之,需要寻找符合条件的结冰云层和过冷水。因此,需要构建既适用于民用飞机自然结冰试飞需求又能满足航空安全运行的结冰潜势算法。

从实际业务发展需求角度,试飞气象也已成为严重制约国产大飞机的研制和交付使用的一个重要方面,如 ARJ21-700 自然结冰取证试飞过程中 4 年未取得重大突破,直至远赴北美才完成,长达数年的试飞过程使 ARJ21-700 的交付日期一再延迟,也耽误了后续机型的研发进程。因此,提高飞机自然结冰试飞气象的预报和探测能力,缩短适航取证的周期,具有十分重要的意义。

Bernstein et al(2005)提出的 CIP 方法综合利用了机场观测、雷达回波、飞行员报告等信息进行当前结冰潜势分析。CIP 方法由于观测资料来源的多样化,在国内直接应用具有一定的局限性,如国内气象台站缺少天气现象人工观测、民航机场观测稀疏、飞行员报告共享程度低等。本文在 Bernstein et al(2005)提出的 CIP 方法基础上,研发了一个改进的飞机自然结冰潜势算法,利用大气温湿层结资料,结

合云微物理基本概念,建立了综合温度、湿度、云顶温度等要素的结冰潜势模糊逻辑诊断方法。利用中国飞行试验研究院、中国商飞等单位近年来的飞机自然结冰试飞报告和见诸于文献的其他飞机结冰实例进行检验和评估,并进一步利用 2016 年 3 月的一次飞机自然结冰探测试验,结合飞机探测、卫星、探空、地面观测等多源资料对该算法进行评估和验证,利用数值预报输出开展预报试验。

1 数据和设备

1.1 所用数据

由于飞机结冰探测的个例来源多元化(表 1),因此针对不同的个例,本文所用的数据相应地有所差异。所用数据包括:

(1) NCEP 再分析资料:空间分辨率 $1^\circ \times 1^\circ$,垂直方向共 26 层。应用于 2014 年 4 月北美结冰潜势分析;

(2) 探空资料:包括宜昌、乌鲁木齐、温江、北京等站,应用于国内试飞(飞机结冰)个例分析;

(3) 地面观测资料:提供地面降水和天气现象等信息,包括中国宜昌、乌鲁木齐、温江、北京、安庆等站和北美区域;

(4) 安庆探空秒数据:来源于安徽安庆站 L 波段高空探测;

(5) FY-2G 卫星云顶亮温资料:来源于国家卫星气象中心,应用于安庆个例验证分析;

(6) 高分辨率 ECMWF 模式数据:空间分辨率 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,垂直方向共 10 层,应用于安庆个例预报试验。

表 1 飞机结冰试飞(飞行)报告简介
Table 1 A brief introduction to aircraft icing flight test (pilot) reports

时间	区域	试飞(飞行) 报告个数	来源
2014 年 4 月	北美	5	中国飞行试验研究院、中国商飞试飞中心
2014 年 3 月	中国湖北宜昌	6	中国商飞试飞中心
2012—2014 年	中国乌鲁木齐	12	中国飞行试验研究院、中国商飞试飞中心
2010 年 10 月 26 日 03:18—04:50 UTC	中国四川广汉	1	王磊等, 2014
2004 年 12 月 21 日 13:20 UTC	民航北京—太原航班	1	翟菁等, 2010
2003 年 2 月 15 日 21:00 UTC	美国西弗吉尼亚州	1	Bernstein et al, 2005

③Morcrette C J, Bernstein B C, Wells H, 2014. Frequency biases in predictions of aviation icing occurrence: What can we learn from climatologies? http://www.metoffice.gov.uk/media/pdf/c/8/FRTR_588.pdf.

1.2 所用设备

安庆自然结冰探测外场试验所用飞机为中国气象局人工影响天气中心新舟 60 飞机,携带有云粒子测量系统,包括后向散射云滴探头(BCP)和云粒子图像探头(CIP)等,可以探测云中过冷水的直径和含量。BCP 的测量范围为 $7\sim 75\ \mu\text{m}$,CIP 的测量范围为 $25\sim 1550\ \mu\text{m}$ 。

2 结冰潜势诊断算法

由于飞机结冰与空中温度、湿度等参数之间存在着联系,使得利用大气环境场参数确定飞机结冰潜势成为可能。参照 Bernstein et al(2005)提出的 CIP 方法,利用大气层结资料,基于云微物理基本概念,建立了综合温度、湿度、云顶温度等要素的结冰潜势模糊逻辑诊断方法。图 1 给出了温度、相对湿度、云顶温度与飞机结冰潜势的相关关系图,这种定量的相关关系是基于云微物理概念、飞机结冰试验的经验参数和飞机报告分析得到的(Bernstein et al,2005;2007)。本文基于实际试飞报告的分析,对相关参数有细微的调整。

2.1 云量、降水对结冰的影响

Bernstein et al(1997;2005)的研究指出,飞机结冰发生时,云量基本上是多云(BKN)或者阴天(OVC)。Bernstein et al(2005)的研究还指出,降水及其相态对飞机结冰有重要影响,主要是考虑云层以下的过冷水降水会带来较强的结冰。因此,当飞行中遇到含有过冷却水滴的降水(冻雨、冻毛毛雨、冻雾)时,飞机也有可能结冰。另一方面,当有较强的稳定性降水发生时,高空的云层由于发展旺盛,云中以冰粒子为主,也不利于飞机结冰。

考虑到云量和降水的观测局地性较强,且两者对飞机结冰的影响可以由大气温湿层结表征,因此本文在飞机结冰潜势诊断算法构建中并没有引入,仅作为参考和验证。

2.2 相对湿度与结冰的关系

一般来说,湿度越大,越有利于空中过冷却水的存在,也有利于飞机结冰的形成。根据 Bernstein et al(2005)的研究,北美地区飞机结冰报告和数值模式相对湿度相匹配的结果表明,结冰发生频率高时,其相对湿度也很高,约 75% 的飞机结冰报告发生在相对湿度 $>70\%$ 的情况。在实际应用中,考虑到模式在相对湿度预报上的偏差,当相对湿度在 $30\%\sim 70\%$ 仍给予一定的结冰几率;在利用探空或者再分析资料开展个例验证和气候统计时,这种偏差一般不再考虑,因此当相对湿度 $<70\%$ 时,影响因子即设定为 0(Bernstein et al,2007)。考虑到探空观测在时间上的偏离和空间上的漂移(漆梁波,2012),区别于 Bernstein et al(2007)的相对湿度相关曲线,当相对湿度达到 90% 时,即将影响因子设定为 1(图 1a)。

2.3 温度与结冰的相关关系

温度与结冰潜势的相关关系用来指示过冷却水导致飞机结冰的可能性。飞机观测和基本的物理学观点认为过冷却水通常存在 $-25\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$,随着温度的降低过冷水存在的可能性逐渐减小;除了深对流,在低于 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境中,过冷水则很少存在(Bernstein et al,2005)。在 $-3\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$,由于飞行时的空气压缩加热,随着温度的升高,结冰的潜势也相对较低。因此结冰主要发生在 $-15\sim -3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Bernstein et al,2005;王磊等,2014)。

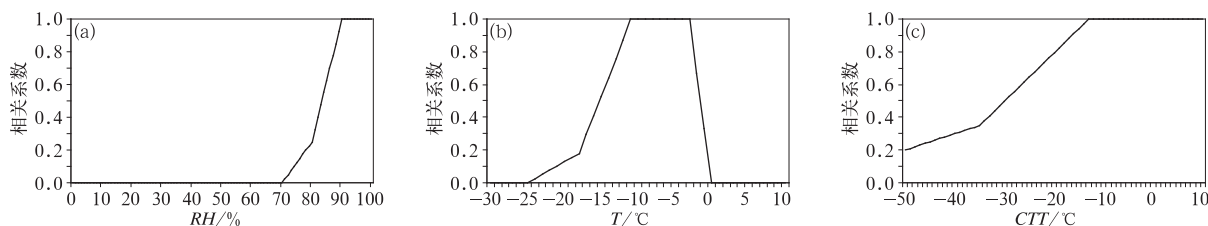


图 1 相对湿度(a)、温度(b)、云顶温度(c)与飞机结冰潜势的相关关系

Fig. 1 Correlations between relative humidity (a), temperature (b), cloud top temperature (c) and aircraft icing potential

2.4 云顶温度与结冰的相关关系

云顶温度与结冰潜势的相关关系用来估计云中是否包含液态水。云顶温度相对较高的云层主要由液态水组成;当云顶温度下降到足够产生冰粒子时,由于同温度下冰面饱和水汽压低于水面饱和水汽压,按照贝吉龙机制,冰晶胚胎出现后,在过饱和状态下不断吸收水汽,于是水滴不断蒸发,而冰晶不断长大;过程终了时,水汽处于冰面饱和,此时冰晶长到最大,水滴消失,因此导致整层云可能均会冰相化(盛裴轩等,2013)。研究指出(Bernstein et al, 2005;王磊等,2014),当云顶温度 $> -12^{\circ}\text{C}$ 时,这样的云系主要由过冷却水组成,并且过冷却水含量随着云顶温度的下降而逐渐降低;根据单层云飞机结冰报告生成时云顶温度的情况,可发现结冰频率的峰值位于 -12°C 附近。随着云顶温度的降低,结冰的可能性降低。

2.5 冻结降水对结冰的影响

当地面有冻雨、冻毛毛雨和冻雾等天气现象时,在此类天气条件下飞行,也可能会使飞机机身表面形成积冰,影响飞机性能。冻雨、冻毛毛雨和冻雾可以统称为冻结降水(李杰等,2015)。Bernstein et al (2005;2007)的研究采用地面天气观测现象指示冻结降水,当有冻结降水发生时,暖层以下仅考虑温度对结冰潜势的影响。目前数值模式的分辨率正在逐步提高,模式(再分析资料)对大气的温湿层结有较好的刻画,因此基于冻雨产生的物理机制,可以利用垂直温度和湿度推断冻雨对飞机结冰的可能影响。

国内外的研究(Huffman and Norman,1988;欧建军等,2011;漆梁波和张瑛,2012;漆梁波,2012)指出,冻雨发生的机制有两种,一种是冰相机理,即大气温度垂直结构呈上下冷、中间暖的状态,自上而下分别为冰晶层、暖层和冷层;另一种为暖雨机制,即大气垂直结构没有大于 0°C 的暖层,整层小于 0°C ,雨滴以过冷却水形式降落到地面冻结。暖雨机制的冻雨,云顶高度普遍不高,没有冰相机理参与,因此与云顶温度的关系(图 1c)仍然适用。对于冰相机理的冻雨,一般云顶高度较高,冰晶在暖层融化之后以过冷却水形态落入冷层,当计算冷层的结冰潜势时,直接采用云顶温度将存在显著的低估,无法正确表征冷层的云微物理属性,需要被修正。因此当存在逆温层且逆温层中最高温度大于 0°C 时,则暖层

以下的云顶温度修正为逆温层中最高温度,即 $\mu_{\text{ett}}=1$ 。暖层以下的结冰潜势仅考虑温度和湿度的影响。产生冻毛毛雨和冻雾的环境场条件与冻雨有所差异,如有些研究结果表明,冻毛毛雨是缺少暖层的情况下,碰并凝结而成(Huffman and Norman, 1988;李杰等,2015)。此类情况下,云顶发展的高度一般不高,因此该方法对其他冻结降水仍有一定的适用性。

2.6 云层的判断

在计算云顶温度时,需要先对云层进行判断。由于 NCEP 再分析资料输出相对湿度,因此云层的判断采用相对湿度阈值法(Bernstein et al,2007;周毓荃和欧建军,2010),即当某层相对湿度大于 84% 时,认定为云。国内的个例采用探空资料计算,探空资料原始输出露点,因此云层的判别采用温度露点差阈值法(Poore et al,1995;周毓荃和欧建军,2010)。具体如下:温度 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 时,温度露点差 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ 认为是云层;当温度 $< 0^{\circ}\text{C}$ 且 $\geq -20^{\circ}\text{C}$ 时,温度露点差 $\leq 4^{\circ}\text{C}$ 认为是云层;当温度 $< -20^{\circ}\text{C}$ 时,温度露点差 $\leq 6^{\circ}\text{C}$ 认为是云层。在云层的判断中,当出现两层及其以上的云时,云顶温度分别计算,即每一层云顶所在高度的大气温度。

考虑到判断云层时,相对湿度或者温度露点差阈值是一个非 0 即 1 的判断。在实际运用时,可能出现较大的偏差,如两层之间的相对湿度较高,但不满足云层的判断阈值,在这种情况下,上一层云的水凝物仍可能下落到下一层云中,当上层云为冰相云时,将会使下一层加速冰相化,并消耗云层中的过冷水。因此需要在初始的云层判断基础上,计算两层云之间干层的厚度(Bernstein et al,2007)。考虑到干层需要足够深厚和干燥,因此定义干燥度(单位: $\text{K} \cdot \text{m}$)为从上层云底开始,计算两层之间的高度差乘以两层平均的温度露点差,并向下累加。参考 Bernstein et al (2007)和国内试飞经验,阈值设为 $3000 \text{ K} \cdot \text{m}$,即两层云之间的干燥度如果小于 $3000 \text{ K} \cdot \text{m}$,则云顶温度取较高一层云顶的温度。当利用相对湿度计算时,干层的判据为相对湿度 $< 50\%$ 且厚度 $> 75 \text{ hPa}$ 。

2.7 改进的结冰潜势算法

按照前文所述的相对湿度、温度、云顶温度对结冰潜势的影响,最终的结冰潜势由式(2)获得:

$$Ice_{pot} = \mu_{rh}\mu_{tm}\mu_{ctt} \times 100\% \quad (2)$$

式中, Ice_{pot} 为结冰潜势, μ_{rh} 为相对湿度相关关系, μ_{tm} 为温度相关关系, μ_{ctt} 为云顶温度相关关系。其中, 相对湿度越大, 越有利于空中过冷水的存在; 温度相关关系指示适宜过冷水存在的温度范围; 云顶温度相关关系指示云粒子的相态, 即估计云中包含过冷水的可能性。最终的结冰潜势是指飞机结冰发生的潜在程度, 可以理解为结冰可能出现的概率和强度。

3 历史个例检验分析

选取中国商飞试飞中心、中国飞行试验研究院积累的 23 个飞机自然结冰试飞个例和 3 个见于文献的飞机结冰实例(表 1), 利用探空资料和 NCEP 再分析资料对飞机结冰潜势进行回算。

需要指出的是, 由于试飞个例的来源复杂, 其中对于结冰详细情况(区域、强度、高度等)的描述不具有统一的形式, 因此飞行报告的内容表述也并不一致, 如对于试飞报告中“未遇到有效气象条件”的表述, 不能完全排除没有(轻度)结冰的可能, 只能理解为未探测到符合中国民用航空规章(CCAR)要求的空中过冷水。

在本小节的计算中, 北美的个例采用 NCEP 再分析资料计算, 国内的个例则采用探空资料计算。

3.1 历史个例总体检验

Bernstein et al(2007)的研究指出, 结冰潜势 $>15\%$ 时, 表示至少有机会结冰; $>40\%$ 时, 则比较有利于结冰。考虑到民用飞机自然结冰试飞的应用, 因此采用改进的自然结冰潜势算法时, 结冰阈值选择为 40% 。在计算结冰层厚度时, 考虑结冰潜势 $>40\%$ 所在的层次。从 26 个个例的诊断分析来看, 结冰潜势算法基本上能较好地反映飞机在飞行中实际结冰的情况, 且对于飞机结冰的高度也能够较好地模拟。

在 23 个结冰试飞个例中(表 1 中北美、中国宜昌、乌鲁木齐), 有 5 例遇到符合试飞大纲要求的有效气象条件(北美 4 例, 乌鲁木齐 1 例), 事后诊断的最大结冰潜势均达到 100% , $>40\%$ 的结冰层厚度均超过 1 km 。如果以整层云最大结冰潜势 100% 作为有效气象条件的阈值, 建立二分类列联表(Brown et al, 1997)可以看到(表 2), 改进的结冰潜

势诊断的命中率(POD) = 1, 虚警率(FAR) = 0.44, $TS = 5/(5+4) = 0.56$ 。如果加上结冰层厚度($>1\text{ km}$)的限制, 则能排除掉 4 个虚警个例, $TS = 1$, 诊断分析的结果与实际试飞结果完全符合。

表 2 有效结冰气象诊断检验的二分类列联表

Table 2 Contingency table for effective icing

		有效结冰气象	
		YES	NO
最大结冰潜势 = 100%	YES	5	4
	NO	0	14

所有 26 个个例中, 最大结冰潜势达到 100% 的一共有 11 例, 其中遇到有效气象条件 5 例, 飞机报告有严重结冰(非民航试飞个例, 是否满足有效气象条件未知)的 2 例, 不满足试飞大纲要求但结冰情况不明的 2 例, 不满足试飞需求但明确有轻微结冰的 2 例。从飞机结冰的有利条件(增加严重积冰个例)诊断来看, 命中率在 $0.64(7/11)$ 以上。

对于不满足试飞需求但结冰情况不明的 2 例来看, 由于飞机报告只给出了未遇到有效气象条件, 并不能排除飞机遭遇一定程度结冰的可能。从事后分析来看, 此两次过程诊断的结冰层厚度均偏浅薄。2014 年 4 月 2 日加拿大温莎机场以北结冰层在 $1000\sim 900\text{ hPa}$, 约 $0.2\sim 1.0\text{ km}$ 高度; 2014 年 2 月 23 日乌鲁木齐的结冰层在 $1.0\sim 1.3\text{ km}$, 其中乌鲁木齐站的海拔在 919 m 。因此 2 例的结冰层均比较浅薄且高度偏低, 这可能是造成结冰试飞失败的原因之一。

2 个不满足试飞需求但明确有轻微结冰的个例均发生在中国宜昌。宜昌试验采用运 12 飞机, 非增压机舱, 一方面巡航高度偏低; 另一方面受限于飞机性能, 探测结冰云层效率偏低。其中 2014 年 3 月 24 日, 诊断的结冰云层在 $5.0\sim 5.6\text{ km}$ 高度, 飞机报告则在 $3.9\sim 4.5\text{ km}$ 有轻微结冰发生。查看当日 20 时宜昌站的探空可知, 0°C 层高度在 3.4 km , 飞机当日的最高探测高度在 4.5 km , 并未到达最大可能的结冰层所在高度, 在 $3.9\sim 4.5\text{ km}$ 发生轻微结冰也与事后诊断结果相符合。2014 年 3 月 12 日飞机报告在 3600 m 高度遇到结冰云层, 机翼前缘和斜撑杆处出现明显积冰, 可能是由于结冰层过于浅薄, 导致探测到的过冷水未能达到试飞大纲的要求。同时注意到, 航后报告显示“飞机在 3000 m 处飞行时机上人员已经可以看到地面, 在 3600 m 处飞行时飞机有时候已经在云层上边, 整个云层厚度不超过

600 m”,这与事后空中云层的诊断高度一致。

因此,对于结冰试飞来说,合适的结冰气象条件不仅需要整层大气的最大结冰潜势达到 100%,且结冰层的发展也需要足够深厚。只有如此,飞机才有足够的空间、时间和气象条件完成相关的试飞操作。

3.2 2014 年 4 月 1 日北美试飞过程分析

2014 年 4 月 1 日,根据试飞报告,当天在美国密歇根州西北部的结冰条件非常理想,成功探测到了符合附录 C 要求的有效结冰气象。从利用 NCEP 再分析资料诊断的结冰潜势分布来看(图 2),在温莎机场以西,密歇根州北部存在着范围较广的结冰概率大值区(均在 100%)。尤其是密歇根湖附近上空结冰条件最好,结冰云层的发展从 925 hPa 一直延伸至 650 hPa,非常有利于自然结冰试飞。

以 44°N、87°W 为例,给出了密歇根州西北密西根湖上空的典型探空(图 3a)。从探空图来看,为单层云,云顶高度约在 4 km,云顶温度-12.2℃,云中

缺少自然冰晶,云中水滴基本维持过冷水状态。0℃层偏低,在近地面层。在 850~700 hPa 存在逆温层。云层中相对湿度接近饱和,过冷水含量丰沛。根据试飞报告,本次试验捕捉到了非常好的结冰气象,飞机累积在结冰云区中飞行超过 90 min,完成多个试验点。

3.3 2012 年 3 月 19 日乌鲁木齐试飞过程分析

2012 年 3 月 19 日,乌鲁木齐飞行试验成功捕捉到有效结冰气象。从 20 时的探空分析来看(图 4a),为多层云情况下的结冰。其中高层云在 500~400 hPa,云顶温度-30℃。低层云在 639 hPa 以下,云顶温度-10℃。本站天气为小雨夹雪。高层云由于云顶温度较低,以冰相云为主;低层云以液相云为主。由于中间存在足够的干层,因此高层的冰粒子没有使低层云冰相化,仍然具有非常理想的结冰条件。从该个例可以看到,简单的利用整层云的云顶高度(如利用卫星探测资料)计算结冰潜势将无法诊断多层云的情况。

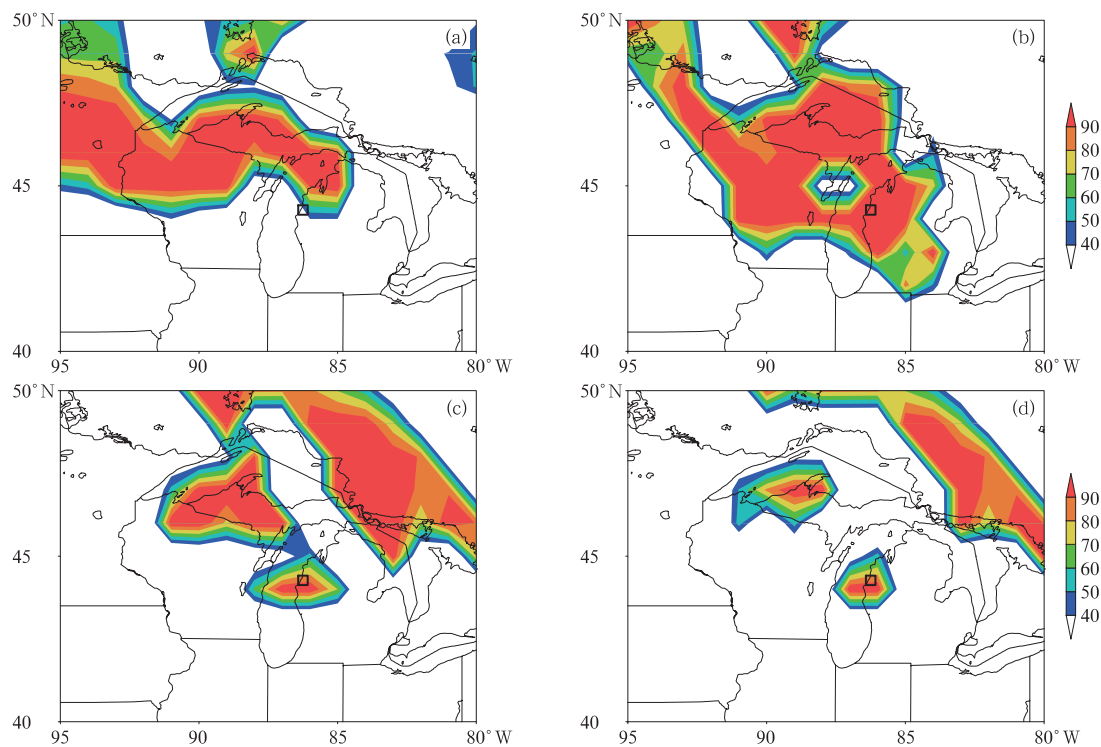


图 2 2014 年 4 月 1 日 18 UTC 利用 NCEP 再分析资料诊断的北美五大湖地区各层结冰潜势分布
(黑色矩形为试飞时经过的某一机场,ICAO 代码:KMBL;单位:%)
(a)925 hPa,(b)850 hPa,(c)700 hPa,(d)650 hPa

Fig. 2 The icing potential at 925 hPa (a), 850 hPa (b), 700 hPa (c), 650 hPa (d) in Great Lakes, North America, diagnosed from NCEP reanalysis data of the flight route at 18:00 UTC 1 April 2014
(Black solid rectangle indicates one passing airport, ICAO KMBL; unit: %)

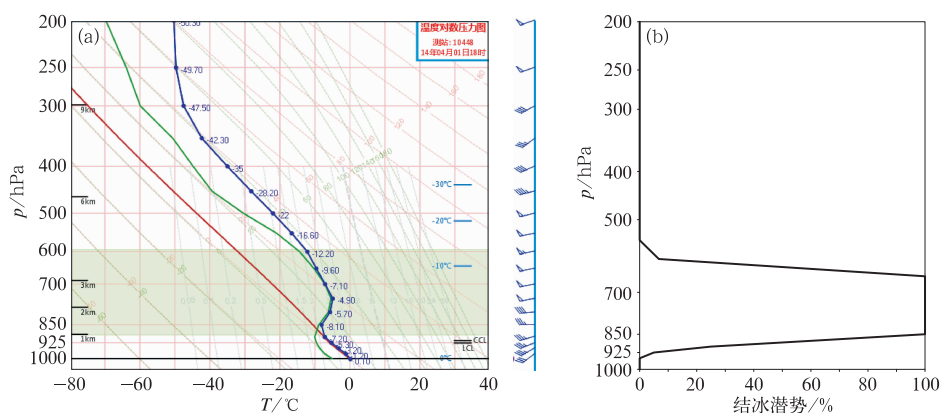


图3 2014年4月1日18 UTC 密歇根州西北部(44°N、87°W)

探空(a)(绿色区域为相对湿度 $\geq 80\%$,下同)和结冰潜势(b)

Fig. 3 Skew T-diagram (a) (green shaded area; relative humidity $\geq 80\%$, the same below) and icing potential profile (b) for 44°N, 87°W in northwestern Michigan USA at 18:00 UTC 1 April 2014

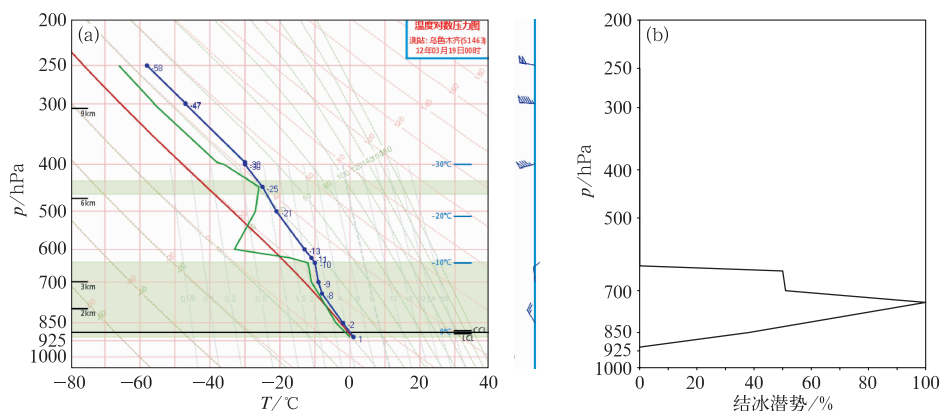


图4 2012年3月19日20时乌鲁木齐探空(a)和结冰潜势(b)

Fig. 4 Skew T-diagram (a) and icing potential profile (b) for Urumqi, China at 20:00 BT 19 March 2012

3.4 2012年3月20日乌鲁木齐试飞过程

2012年3月20日上午,乌鲁木齐结冰探测试飞继续开展,本次过程未能捕捉到符合试飞大纲要求的结冰气象。与前一日相比,此时高空逐渐增湿,温度进一步下降,云层继续发展,本站的天气转为小雪。从探空的分析来看(图5a),中空的干层正在减弱,低层云被冰相化,过冷水正在消耗。如果简单以温度露点差阈值判断云层,则高空存在三层云,高云在438~250 hPa,中云在549~531 hPa,低云从地面到600 hPa,因此低层云的云顶在600 hPa,云顶温度为 -16°C ;600~549 hPa存在浅薄的云夹层

(563 hPa,温度露点差 5°C);加入干层的限制之后,由于云夹层的干燥度不够,低云的云顶高度订正为531 hPa,云顶温度为 -18°C ,相应地调低了结冰概率。最终计算的最大结冰概率为85%,大于40%的结冰层位于0.9~1.5 km和2.8 km。需要注意的是,相对于前一天下午,本次过程未能捕捉到符合试飞大纲要求的结冰气象,一方面是此时最大结冰概率已经下降到85%,另一方面从天气过程演变的判断来看,随着中空的湿度增加,低层云正在快速地冰相化,飞机探测时可能正处于云中过冷水被快速消耗的过程中。

3.5 2003 年 2 月 15 日美国西弗吉尼亚州冻雨层结下的飞机结冰过程

2003 年 2 月 15 日 21 时(UTC),一架 DHC-6 轻型通用飞机在美国西弗吉尼亚飞行中遭遇中度到重度结冰,飞行高度 0.8~1.1 km(Bernstein et al, 2005)。地面观测有冻雨。从探空分析来看,为典型冰相机制下的冻雨层结(Huffman and Norman, 1988; 欧建军等, 2011)。云顶高度在 200 hPa, -57°C , 为冰相云。在 925~750 hPa 存在较为深厚的逆温层, 850~750 hPa 温度在 0°C 以上。上层下落的冰粒子经过融化层之后, 转变为过冷却水。因此当飞机位于暖层之下, 在合适的温度和湿度条件下极有可能发生结冰。从单站结冰潜势分布(图 6)来看, 从 900 hPa 到近地面, 均有较高的结冰潜势,

最大结冰潜势超过 90%, 但未达到 100%, 考虑到飞机结冰强度与过冷水滴大小有关, 冻雨条件下更有利于结冰, 所以仍然造成了中度到重度结冰。该架次飞机是从美国路易斯维尔飞往华盛顿, 航线位于 $38^{\circ}\sim 39^{\circ}\text{N}$ 。利用再分析资料, 从沿 39°N 剖面的飞机结冰潜势分布(图 7)来看, 飞机结冰潜势与飞行报告一致, 与 Bernstein et al(2005)结合快速更新同化模式(RUC)、地面观测和卫星资料计算的当前结冰潜势(CIP)也基本一致。表明基于大气温湿结构诊断的飞机结冰潜势由于考虑了冻雨层结的特征, 能较好地反映冻结降水下的飞机结冰。鉴于再分析资料分辨率较 RUC 模式粗、卫星反演云顶温度和相对湿度反演云顶温度的差异、对融化层以下结冰潜势的不同处理方法等原因, 图 7 的结冰潜势在细微结构上与 Bernstein et al(2005)的分析仍有差异。

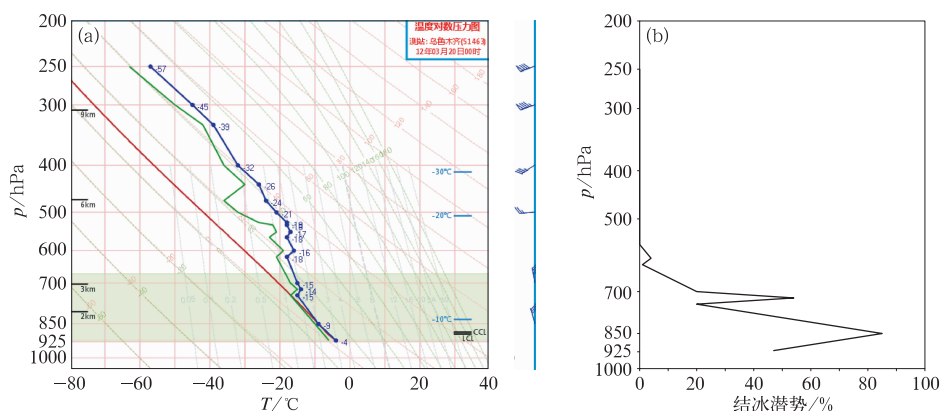


图 5 同图 4, 但为 2012 年 3 月 20 日 08 时

Fig. 5 Same as Fig. 4, but for 08:00 BT 20 March 2012

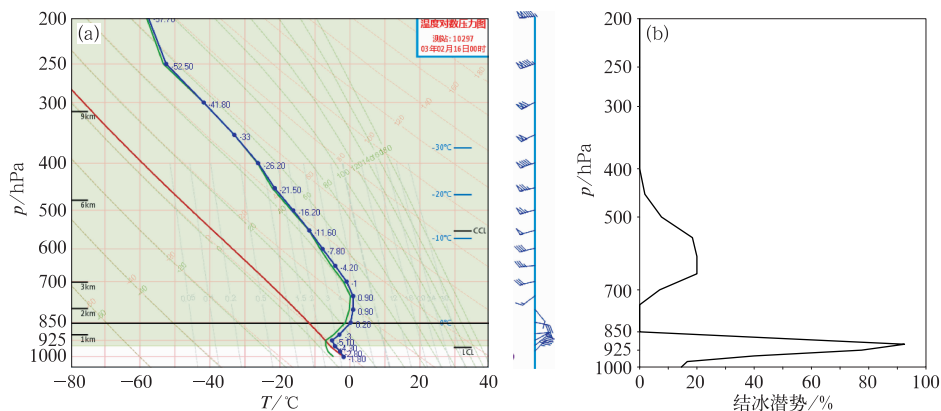


图 6 2003 年 2 月 16 日 00 UTC 美国西弗吉尼亚州 (39°N , 83°W)

冻雨天气时的探空(a)和结冰潜势(b)

Fig. 6 Skew T-log P diagram (a) and icing potential profile (b) for 39°N , 83°W in West Virginia USA during frozen rain at 00:00 UTC 16 February 2003

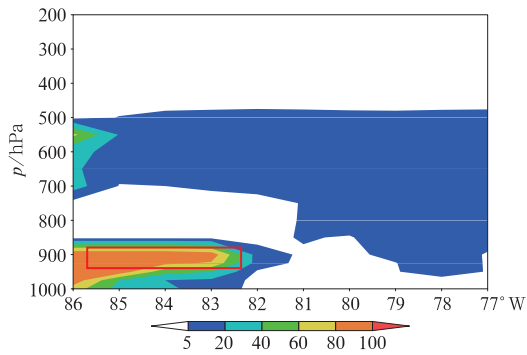


图 7 2003 年 2 月 16 日 00 UTC 沿 39°N 的结冰
潜势剖面(86°~77°W,单位:%)
(红色矩形为飞机遭遇结冰的飞行高度和路线)
Fig. 7 The icing potential cross section
(86°-77°W, unit: %) along 39°N at
00:00 UTC 16 February 2003
(Red rectangle indicates the flight route
when aircraft encountered icing)

4 安庆飞机自然结冰外场探测试验分析

4.1 试验概况

2016 年 3 月 8—9 日,上海市气象局、中国商飞试飞中心、中国气象局人工影响天气中心等多家单位在安徽省安庆市联合开展了飞机自然结冰探测试验,并于 9 日上午和下午各执行了一个架次的试验飞行,在 9 日上午观测到 2~4 cm 飞机机体部分结冰现象。

4.2 结冰潜势算法验证

利用前文所述的结冰潜势算法,综合安庆 6 h 加密探空、风云二号卫星云顶温度反演资料(表 3)计算了 3 月 8 日 08 时至 9 日 20 时安庆上空的结冰潜势。其中云顶温度的计算采用安庆探空站周围 4 个格点的平均值。

图 8 给出了安庆上空的逐 6 h 结冰潜势。8 日随着低涡切变线发展,安庆上空受西南暖湿气流控制,为暖区对流性降水,并伴有雷电,降水效率高。安庆上空云顶温度较低,气层偏暖,结冰潜势偏低,均在 60% 以下,结冰层在 500~700 hPa。9 日 02 时,随着东路冷空气扩散南下,安庆转受冷高压控制,降水出现间歇,云系减弱,高层云逐渐消散,云顶温度升高。在 950~850 hPa 出现了逆温层,温度在 0℃ 上。受温度垂直结构的影响,结冰潜势大值区分为两段,分别位于 700~500 hPa,潜势在 40%~100%;975~800 hPa,潜势在 0~80%。根据结冰潜势推测,此时云中过冷水含量丰沛,有利于飞机结冰试验的开展。9 日 08 时随着冷空气的继续南下,高层温度和湿度进一步下降,中层的结冰潜势大值区消失,但由于中低层逆温层结的维持,700、900 hPa 高度分别有两个浅薄的有利结冰层,结冰潜势接近 100%,其中下层的结冰层由于相对湿度的变化,在垂直方向上出现断裂。9 日 14 时,高层又有一次增湿的过程,逐渐转为层云降水。回波垂直发展旺盛,回波顶高超过 8 km,为深厚的冷层云,云顶温度显著下降,云中自然冰晶丰沛,通过贝吉龙过程快速消耗过冷水,下落过程中尺度增大,引发地面降水。整层结冰概率均在 20% 以下,不利于飞机结冰。到 20 时,云顶温度有所上升,整层结冰潜势在 60%。

从飞机飞行报告来看,本次试验共执行了两架次飞行,其中第一架次的试验飞行时间段为 3 月 9 日 08:47—11:48,在 09:25 飞机报告 3000 m 高度观测到部分积冰,气温为 -5℃,并观测到了 2~4 cm 飞机机体部分结冰现象;第二架次的试验飞行时间段为 3 月 9 日 16:10—19:55,其中,飞机报告 3600 m 高度气温为 -3℃、3900 m 高度气温为 -4℃、4200 m 高度气温为 -6℃,均未出现明显的积冰现象,飞机上发现有冰晶碰撞机窗。从两架次的飞行报告来看,结冰潜势的诊断与实况非常吻合。

表 3 2016 年 3 月 8 日 08 时至 9 日 20 时安庆的观测实录

Table 3 Observation at Anqing from 08:00 BT 8 to 20:00 BT 9 March 2016

时间/BT	总云量	6 h 降水/mm	云顶温度/℃	天气
8 日 08 时	10 成	6.0	-60.4	小阵雨
8 日 14 时	10 成	15.0	-27.7	间歇性小雨
8 日 20 时	10 成	15.0	-39.2	间歇性中雨
9 日 02 时	不明	2.0	-10.2	间歇性小雨
9 日 08 时	10 成	0.01	-8.2	阴天
9 日 14 时	9~10 成	0	-51.2	阴天
9 日 20 时	10 成	0.7	-24.4	间歇性小雨

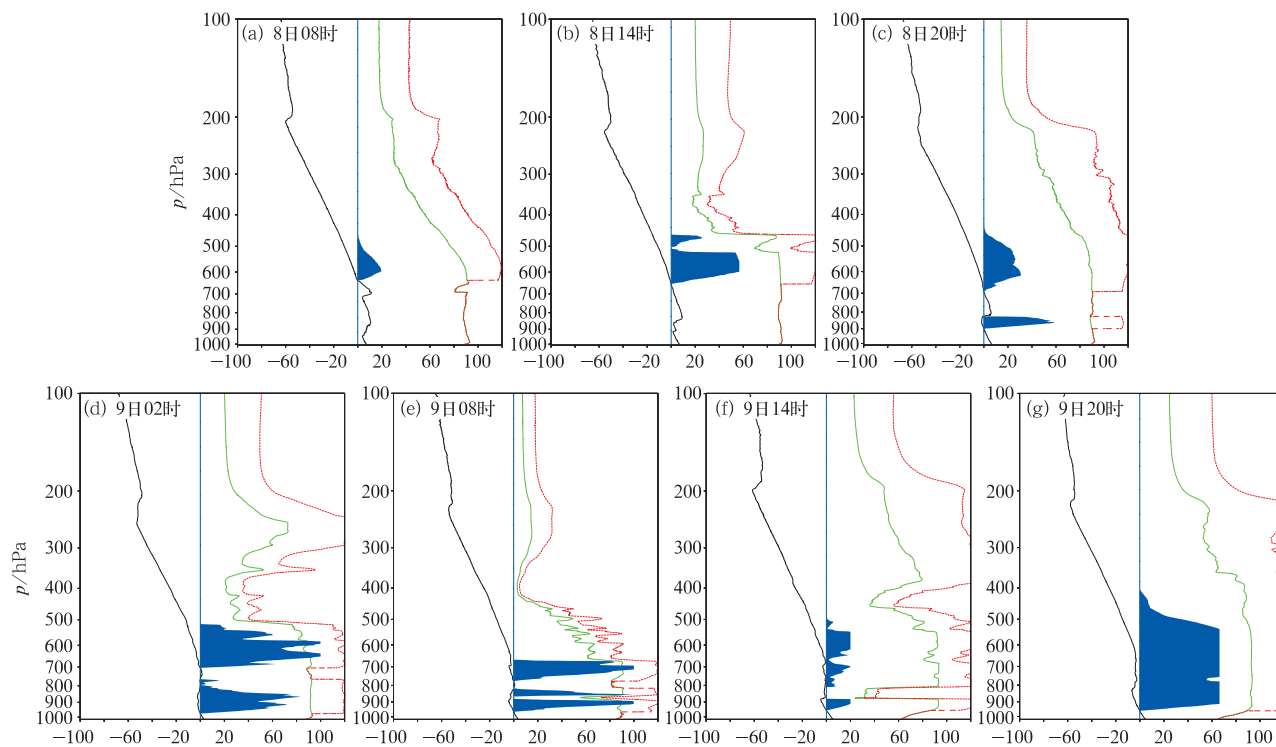


图 8 2016 年 3 月 8 日 08 时至 9 日 20 时安庆逐 6 h 温度、相对湿度和结冰潜势垂直廓线
(黑色实线为温度,单位: $^{\circ}\text{C}$;绿色、红色实线分别为水相、冰相相对湿度,单位: $\%$;蓝色色块区域为结冰潜势,单位: $\%$)

Fig. 8 The temperature, relative humidity and icing potential profiles at
Anqing from 08:00 BT 8 to 20:00 BT 9 March 2016

(Black solid line for temperature, unit: $^{\circ}\text{C}$; green and red solid lines for relative humidity against water and ice, respectively, unit: $\%$; and the blue shaded area for icing potential, unit: $\%$)

图 9 给出了第一架次试验飞行时机载气象探测的情况。可以看到,液态水含量较高的时间段在 09:30—10:00,此次对应的温度在 $-5\sim 0^{\circ}\text{C}$,飞行高度在 3000 m 左右。在 11:40 前后,飞机下降时,再次碰到液态水含量高值区,此时对应的温度在 -3°C 左右,飞行高度在 1000 m 左右。从 09:30 前后的机载探测来看,BCP 液态含水量约 $0.12\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$,CIP 液态含水量约 $0.4\sim 0.5\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。BCP 测量的粒子谱分布显示,直径 $\leq 22\text{ }\mu\text{m}$ 的小粒子占较大比重且浓度 $> 40\text{ 个}\cdot\text{cm}^{-3}$,在二维图像上显示为椭圆形,可以认为是过冷却水。从 CIP 测量的粒子谱分布来看,第一通道(直径 $\leq 25\text{ }\mu\text{m}$)占较大比重,但国内外的研究(王黎俊等,2013;Korolev et al, 1998)指出,该探头对较小粒子有尺寸高估或低估和浓度计数漏测的现象,代表性较差。仅考虑 BCP 的测量结果,过冷水含量大值区高度与 08 时结冰潜势大值区垂直高度的对应一致。因此结合探空秒数据计算的

结冰潜势可以反映安庆上空的过冷水分布的垂直精细结构。

9 日下午第二架次的试验飞行时间段为 16:10—19:55,飞机探测显示云中多为固态粒子,含水量较少,飞机无积冰。结合探空分析可以看到,9 日下午云层正处于增厚增湿的过程。14 时安庆上空为多层云结构,低云云底高约 500 m,2~6 km 和 7~12 km 分别有深厚的中云和高云。此时 1.5~2 km 和 6~7 km 的两个云夹层较浅薄,干燥度未达到阈值,计算低云和中云的结冰潜势时,均采用高云云顶温度(卫星反演云顶温度),因此结冰潜势均在 20% 左右,这与稍后的飞机探测结果相吻合。

与第 3 节的个例诊断不同的是,安庆试验的初始云顶温度来自于风云卫星反演资料。在与探空数据的对比中可以发现,卫星反演的云顶温度与利用探空资料采用相对湿度阈值判断的云顶温度虽然具有相同的变化趋势,但并不严格一致。这可能与

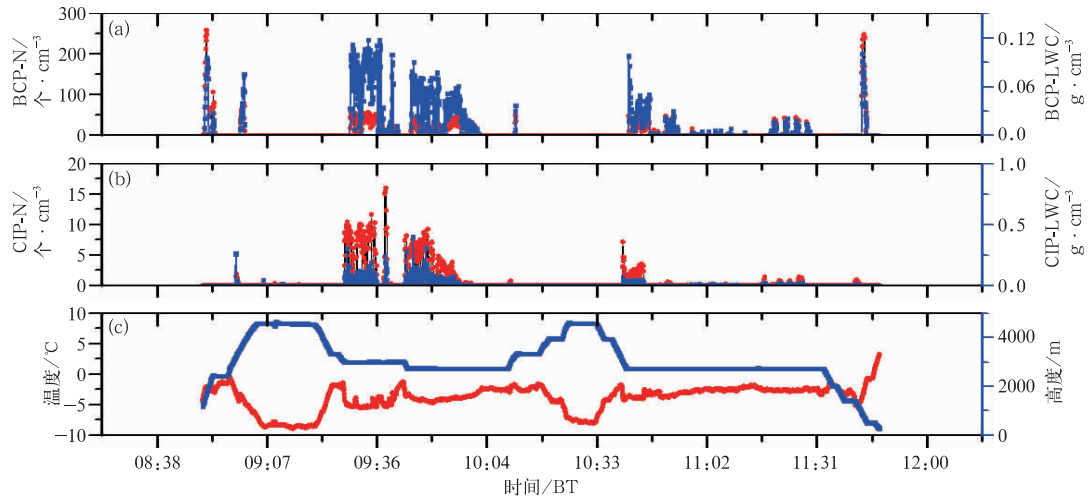


图 9 2016 年 3 月 9 日“新舟 60”飞机第一架次试验飞行时机载气象探测
 (a) 云滴 ($7 \sim 75 \mu\text{m}$) 粒子数浓度 (BCP-N, 红线) 和液态水含量 (BCP-LWC, 蓝线),
 (b) 云粒子 ($25 \sim 1550 \mu\text{m}$) 粒子数浓度 (CIP-N, 红线) 和液态水含量 (CIP-LWC, 蓝线),
 (c) 温度 (红线) 和高度 (蓝线)
 (中国气象局人工影响天气中心提供)

Fig. 9 Aircraft observation from “Xinzhou 60” during the first flight on 9 March 2016

(a) particle number concentration of cloud droplet (BCP-N, red) and liquid water content (BCP-LWC, blue),
 (b) particle number concentration of cloud particles (CIP-N, red) and liquid water content (CIP-LWC, blue),
 (c) temperature (red) and height (blue)
 (provided by Weather Modification Centre of CMA)

云层的厚度、探空资料无法判定云量等因素有关。尤其是 9 日 20 时卫星反演云顶温度在 -24.4°C , 显著高于探空资料诊断的云顶温度 (-54.4°C), 因此 20 时的结冰潜势在 60%, 可能较实际偏高。利用探空资料诊断云顶温度计算的结冰潜势仅为 20%。

需要指出的是, 9 日上午探测的平均液态水含量并没有达到中国民航局适航标准第 25 部附录 C 的标准。因此从试飞角度, 本次试验也未能获得有效气象条件。根据 9 日 08 时探空秒数据分析的结冰潜势较理想的结冰层位于 745~672 hPa, 约在 2.5~3.3 km, 厚度不足 1 km, 且从 02—14 时的变化来看, 云层正处于增厚, 云顶温度下降的过程中, 飞机探测时的结冰条件应该低于 08 时。这与第 3 节通过历史结冰试飞个例所得的结论“对于结冰试飞来说, 合适的结冰气象条件不仅需要整层大气的最大结冰潜势达到 100%, 且结冰层的发展也需要足够深厚”一致。

4.3 基于数值预报输出的结冰潜势算法及其应用

与依赖多源观测资料的 CIP 方法相比, 改进后的飞机结冰算法的输入参数仅有相对湿度、温度和云顶温度, 其中前两项由模式直接输出, 云顶温度可

以通过相对湿度诊断, 因此该方法能直接采用数值预报模式输出进行处理。

图 10 给出了 3 月 8 日 20 时起报的基于高分辨率 ECMWF 模式的安庆上空结冰潜势高度-时间剖面

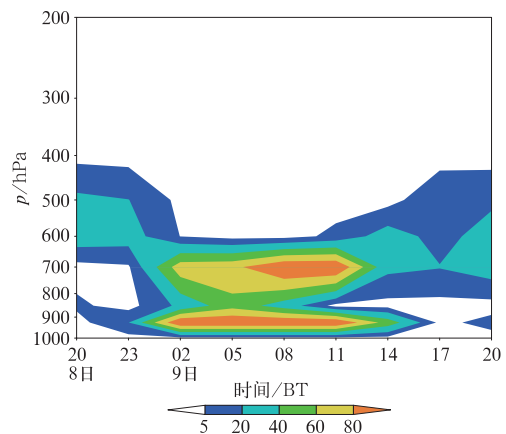


图 10 2016 年 3 月 8—9 日安庆上空预报
 结冰潜势时间-高度剖面 (单位: %)
 (起报时间为 2016 年 3 月 8 日 20 时,
 预报时效 24 h, 逐 3 h 间隔)

Fig. 10 Time-altitude cross section of icing potential forecasted by ECMWF at Anqing (unit: %)
 (The forecast start time was at 20:00 BT 8 March 2016, the forecast lead time was 24 h with 3 h time interval)

面,较好地刻画了 3 月 9 日安庆上空结冰条件的变化。有利的结冰潜势出现在 8 月夜间至 9 日上午,9 日下午则转差,这与飞机实际观测和利用探空资料诊断的结冰潜势(可以认定为实况)变化相符。且预报结冰潜势大值区在垂直方向上断裂为两层,分别位于 925、700 hPa,与实况一致。目前数值模式在短期内可以提供较为可靠的形势预报,因此直接基于模式大气温湿层结预报的飞机结冰潜势能够较好地反映 3 月 9 日安庆上空结冰的变化。在安庆试验中,该方法提前数天成功预测了结冰潜势的变化,在试验气象保障中发挥了重要作用。

5 结论与讨论

针对民机自然结冰试飞的需求,本文借鉴 Bernstein 的当前结冰潜势方法,提出了一种改进的基于大气温湿层结资料的飞机自然结冰潜势诊断方法,利用 26 份试飞(飞行)报告对该方法进行了检验和评估,并在一次飞机自然结冰探测外场试验进行了应用。结果表明:

(1) 利用探空资料和 NCEP 再分析资料回算了 26 个飞机结冰(试飞)个例,发现该结冰潜势算法基本上能较好地揭示多种天气条件下飞机在飞行中实际遭遇结冰的情况,且对于自然结冰的区域和高度也能够较好的刻画,具有较高的实用价值。

(2) 考虑到民机自然结冰试飞对于过冷水含量和直径的要求,通过个例分析得到如下的初步结论:该改进结冰潜势算法得到的最大结冰潜势越接近 100%,且有效结冰层厚度在 1 km 以上时,越有可能达到试飞大纲的需求。

(3) 在安庆的一次飞机自然结冰探测试验中,结合探空秒数据和卫星资料等,该结冰潜势诊断方法可以准确揭示飞机结冰强度和结冰层高度及其变化,与飞机实际空中探测具有较高的符合度,能有效地标识出空中过冷水的分布和变化。

(4) 相对于 CIP 方法对多源观测资料的依赖,本文在此基础上改进的飞机自然结冰潜势算法,仅利用大气温湿层结资料诊断多种天气条件下(包括冻雨)的飞机结冰,其识别技巧与 CIP 方法相当。且本文改进方法排除了对地面观测等实况资料的依赖,仅采用大气温湿层结资料,可以直接应用于数值模式产品输出,具有较高的实用价值。

需要指出的是,本文并没有讨论深对流情况下

的飞机结冰潜势。一般认为,由于强的上升运动,对流云中含有大量的过冷水,且极易出现大过冷水滴。因此在考虑深对流下的飞机结冰潜势时,一般认为在 $-30\sim 0^{\circ}\text{C}$ 情况下均有可能,温度影响曲线与非对流情况(图 1b)不同,且不考虑云顶温度的影响(Bernstein et al, 2005),相应的结冰潜势公式也需要调整。本文由于主要讨论针对民机试飞需求的自然结冰潜势算法,一般不进入对流云,结冰潜势并没有修正。2016 年 3 月 8 日安庆个例的降水为暖区对流性质,并伴有雷电,实际的结冰潜势应高于图 9a 和 9b。

需要注意的是,本文所有个例涉及的飞机机型并不统一,由于航速、外形、涂料等要素的影响,不同飞机的结冰气象条件是有所差异的,此处并未讨论。如由于不同类型飞机会有不同程度的动力增温(高速飞行的动力增温,使机身表面温度高于大气温度,发生结冰的气温与飞行速度有关),实际应用时温度的相关曲线需要根据机型和航速作相应的微调。虽然该算法目前只考虑到环境场气象条件的影响,但适用于民航运行中大部分的客机。而对于通航飞机,一般机型小、航速低,适宜结冰的温度要更高一些,温度相关关系曲线(图 1b)中影响因子为 1 时的温度右区间要相应的右移。

考虑到当前数值模式已经对环境场具有较好的预报能力,因此利用该算法开展结冰潜势中短期预报亦具有相当高的实用价值。同时,针对民机试飞的需求,还需要给出空中过冷却水的含量和直径等信息。因此需要更多的空地探测试验,如利用雷达、卫星等反演的水物质信息指示空中过冷却水的分布和尺度。模式对空中水物质含量的诊断预报在飞机结冰预测中也具有较高的参考价值,但还需要做更加深入的应用和评估。

致谢:感谢中国飞行试验研究院、中国商飞试飞中心提供飞机自然结冰试飞报告。感谢中国商飞试飞中心、中国气象局人工影响天气中心、安庆市气象局等单位提供 2016 年 3 月安庆飞机自然结冰探测试验的相关资料。

参考文献

- 迟竹萍, 2007. 飞机空中积冰的气象条件分析及数值预报试验[J]. 气象科技, 35(5): 714-718.
- 李杰, 郭学良, 周晓宁, 等, 2015. 2011~2013 年中国冻雨、冻毛毛雨和冻雾的特征分析[J]. 大气科学, 39(5): 1038-1048.
- 刘凤林, 孙立潭, 李士君, 等, 2011. 飞机积冰诊断预报方法研究[J]. 气象与环境科学, 34(4): 26-30.

- 刘旭光,2001.数值预报产品在航空气象预报中的应用[J].四川气象,(4):18-22.
- 欧建军,周毓荃,杨棋,等,2011.我国冻雨时空分布及温湿结构特征分析[J].高原气象,30(3):692-699.
- 漆梁波,2012.我国冬季冻雨和冰粒天气的形成机制及预报着眼点[J].气象,38(7):769-778.
- 漆梁波,张瑛,2012.中国东部地区冬季降水相态的识别判据研究[J].气象,38(1):96-102.
- 盛裴轩,毛节泰,李建国,等,2013.大气物理学:第2版[M].北京:北京大学出版社:334-336.
- 王洪芳,刘健文,纪飞,等,2003.飞机积冰业务预报技术研究[J].气象科技,31(3):140-146.
- 王磊,李成才,赵增亮,等,2014.飞机积冰云微物理特征分析及监测技术研究[J].气象,40(2):196-205.
- 王黎俊,银燕,李仑格,等,2013.三江源地区秋季典型多层层状云系的飞机观测分析[J].大气科学,37(5):1038-1058.
- 王新炜,张军,王胜国,2002.中国飞机积冰的气候特征[J].气象科学,22(3):343-350.
- 翟菁,周后福,申红喜,等,2010.航空气象要素预报算法和个例研究[J].气象研究与应用,31(1):31-34.
- 周斌斌,蒋乐,杜钧,2016.航空气象要素以及基于数值模式的低能见度和雾的预报[J].气象科技进展,6(2):29-41.
- 周毓荃,欧建军,2010.利用探空数据分析云垂直结构的方法及其应用研究[J].气象,36(11):50-58.
- Bernstein B C, Le Bot C, 2009. An inferred climatology of icing conditions aloft, including supercooled large drops. Part II: Europe, Asia, and the Globe[J]. J Appl Meteor Climatol, 48(8): 1503-1526.
- Bernstein B C, McDonough F, Politovich M K, et al, 2005. Current icing potential: algorithm description and comparison with aircraft observations[J]. J Appl Meteor, 44(7): 969-986.
- Bernstein B C, Omeron T A, McDonough F, et al, 1997. The relationship between aircraft icing and synoptic-scale weather conditions [J]. Wea Forecasting, 12(4): 742-762.
- Bernstein B C, Wolff C A, McDonough F, 2007. An inferred climatology of icing conditions aloft, including supercooled large drops. Part I: Canada and the continental United States [J]. J Appl Meteor Climatol, 46(11): 1857-1878.
- Brown B G, Thompson G, Bruintjes R T, et al, 1997. Intercomparison of in-flight icing algorithms. Part II: statistical verification results [J]. Wea Forecasting, 12(4): 890-914.
- Cober S G, Isaac G A, 2006. Estimating maximum aircraft icing environments using a large database of in-situ observations [C] // Proceedings of the 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevada, AIAA.
- Huffman G J, Norman G A Jr, 1988. The supercooled warm rain process and the specification of freezing precipitation [J]. Mon Wea Rev, 116(11): 2172-2182.
- Korolev A V, Strapp J W, Isaac G A, 1998. Evaluation of the accuracy of PMS optical array probes [J]. J Atmos Oceanic Technol, 15(3): 708-720.
- Poore K D, Wang Junhong, Rossow W B, 1995. Cloud layer thicknesses from a combination of surface and upper-air observations [J]. J Climate, 8(3): 550-568.
- Schultz P, Politovich M K, 1992. Toward the improvement of aircraft-icing forecasts for the continental United States [J]. Wea Forecasting, 7(3): 491-500.