

民机试飞气象服务的挑战与实践

李佰平¹ 吴君婧¹ 蒋瑜² 徐继业¹ 孙敏¹ 孙俊颖² 戴建华¹ 韩昌¹

(1 上海中心气象台, 上海 200030; 2 中国商飞试飞中心, 上海 200230)

摘要: 最近几年, 国产客机的发展取得了显著进展, 与此同时也对国内的民机试飞气象服务提出了新的要求。试飞气象服务对于气象服务机构是一个全新的挑战。试飞气象服务保障在试飞安全和试飞效率两个重要方面起到关键性作用。根据民机适航标准, 对气象环境条件有具体要求的试验科目包括: 自然结冰、大侧风、高温高湿、高寒、高原、噪声试验等。适航标准对气象条件有着非常苛刻的要求, 试飞气象服务需要完成的工作包括: 对适航标准中相关气象条件的解读, 试飞气象的气候分布特征分析, 从中期到临近的预报服务, 明确的精细化预报结论等。这些工作将为决策提供支持, 而及时准确可靠的试飞气象保障服务可以显著提高试飞取证效率和企业经济效益。

关键词: 试飞, 气象服务, 飞机结冰, 侧风

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2017.06.015

Challenge and Practice of Weather Service for the Civil Aircraft Flight Test

Li Baiping¹, Wu Junjing¹, Jiang Yu², Xu Jiye¹, Sun Min¹, Sun Junyin², Dai Jianhua¹, Han Chang¹

(1 Shanghai Central Meteorological Observatory, Shanghai 200030

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

Abstract: China-made commercial aircraft has achieved significant development in recent years; and the new requirement to weather service for civil aircraft flight test is also raised. Flight test weather service is nearly a new challenge in meteorological department. Weather service plays an important role in flight test security and efficiency. According to the airworthiness standards, some test flight subjects have specific regulations on meteorological conditions, such as natural icing, crosswind, high temperature and high humidity, plateau, cold, noise and so on. Weather related subjects in airworthiness standards have high restrictions on meteorological conditions. Flight test weather service need to provide explanation to the weather condition in airworthiness standards, climatic analysis on flight test related weather, seamless forecast, and clear and refine prediction conclusion to support user's decision making. Flight test weather service, which must be timely, accurate and reliable, will improve flight test efficiency and raise business economic benefits significantly.

Keywords: flight test, weather service, aircraft icing, crosswind

0 引言

飞机试验飞行, 或简称为试飞, 是指在飞机交付使用之前, 对飞机进行飞行测试, 采集飞机飞行数据, 使飞机在交付之前处于最稳定的飞行状态, 保证飞机飞行结果的准确科学。飞机试飞中的气象保障工作分为特殊天气和常规气象保障^[1]。特殊天气就是指在相应要求的气象条件下完成的试飞科目, 例如大侧风、高温高湿、高寒、自然结冰等。常规气象保障是指, 在一些无特殊气象要求的试飞科目中, 气象工作人员要为试飞提供气象支持, 帮助试飞团队避开危

险天气, 保证试验科目的正常试飞。常规天气保障类似于一般民航运行中的航空气象服务, 但运行标准有较大差异。本文主要关注民机试飞中的特殊天气气象保障服务。

客机测试与民航客机在常规航班运行过程中尽量避开大侧风、结冰等特殊的气象条件不同, 是飞机在取得型号合格证前要寻找这些特殊天气, 并完成相关的试飞动作。而这些特殊天气具有极端性强, 出现频率低的特点, 对气象预报具有极高的挑战性。因此, 试飞气象技术虽是整个试飞领域中的一个很小分支, 但在整个试飞活动中起到了举足轻重的作用, 特别是在近年国内进行民用客机研制任务过程中, 对于国内试飞气象环境的探索、认知和把握, 越来越体现出气象技术对于试飞安全和试飞效率这两个重要方面起到

收稿日期: 2017年6月20日; 修回日期: 2017年10月25日

第一作者: 李佰平(1986—), Email: lbp1986@sohu.com

资助信息: 上海市科委科研项目(16dz1206103和15dz1207802)

的关键性作用。

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四年未取得重大突破，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，造成了不利的影 响，也耽误了后续机型的研发进程。2017年5月5日，我国国产首架大型客机C919在上海浦东机场成功完成首飞，后续的试飞试验即将陆续开展。因此，提高民机试飞的气象服务能力，在缩短适航取证周期方面具有十分重要的意义。

1 民机试飞气象服务概述

民机试飞科目繁多，根据中国商飞试飞中心对适航标准的解读，其中对气象环境条件有特殊要求的试验科目包括：自然结冰、大侧风、高温高湿、高寒、高原、噪声试验等。其中自然结冰和大侧风对气象条件有严格的限定和要求，准确预测适合的试飞时间和区域是试飞气象服务的关键。民机试飞气象服务具有如下一些特点。

1.1 特殊科目试飞对气象条件十分苛刻

以自然结冰试验为例，根据中国民用航空规章第25部运输类飞机适航标准[CCAR-25-R4]的条款规定，飞机必须而且能够在规定的连续最大（层云）和间断最大（积云）结冰状态下安全飞行，大气结冰状态的最大连续强度由云层液态水含量、云层水滴平均有效直径和周围空气温度三个变量决定。以周围空气温度 -10°C 为例，对于连续最大（层云）大气结冰状态，规定在一定的高度范围和水平范围内，探测到的有效水滴直径和液态水含量需要满足结冰限制包线，平均有效水滴直径越小，相应的液态水含量标准越高。当水滴直径在 $40\ \mu\text{m}$ 时，液态水含量至少要在 $0.16\ \text{g}/\text{m}^3$ 以上；当水滴直径在 $15\ \mu\text{m}$ 时，液态水含量至少要在 $0.60\ \text{g}/\text{m}^3$ 以上。

中国民用航空规章第25部附录C对自然结冰试验气象条件的规定与美国联邦航空条例FAR25部附录C的规定一致。美国联邦航空条例FAR25部附录C中的关于大气结冰条件的描述以及各物理量之间的多张相互关系图首次发布于1949年，并沿用至今，主要是基于1945—1950年冬天在美国上空20000 ft（6 km）处3000 n mile（5560 km）飞行距离范围内对过冷云层的探测研究。需要指出的是，附录C中规定的液态水含量（LWC）特指“可能最大值”，即在给定水平距离、大气温度、云中液滴尺度的情况下，所有探测数据中99%的LWC平均值均小于此值，表征的是结冰

“最严重”的状态。

在我国目前缺少对大气结冰条件的前置研究，试飞大纲中关于过冷云层云微物理参数的标准是否具有普适性，尚没有明确的结论。ARJ21飞机在国内历经了四年的试飞，但仅一个架次碰到了有效结冰气象条件。寻找原因，一方面固然有着在试飞气象保障服务方面经验欠缺的原因；另一方面，我国自然结冰大气环境是否与北美类似，即两地达到试飞大纲规定的大气结冰状态的频率是否具有相当的量级，也是一个值得深入研究的课题。

1.2 从气候到天气尺度的试飞气象服务

民机试飞是一项系统工程，牵扯到诸多方面，相对而言，工程因素占主导，但气象因素在实际操作中虽然靠后，却至关重要。从决策服务的角度出发，气象需要为试飞团队提供试飞气象条件可能出现的月份、区域和形态特征。因此需要针对相关试飞科目，结合试飞大纲对气象条件的具体标准，对国内试飞气象条件开展解释和研究，开展气候条件分析，给出试验窗口期及试验场所建议，提高试飞效率。同时，由于民机试飞牵扯到诸多方面，包括飞机转场、飞行计划申报、设备调试、人员进场等等，当确定试验时间窗口和区域之后，需要提前较长时间给出明确的试验决策建议。在试验临近时，需要根据现场试飞和天气情况，及时与试飞工程师和机组沟通，为现场保障提供决策支持。

1.3 精细化预报技术支持

当具体的试飞试验开展时，针对短期和临近时效，需要气象人员提供高时空分辨率的精细化预报，明确给出气象条件能否达到试验要求的预测，以及试飞气象条件出现的起止时间、空间分布。一般而言，机场的某些气象要素，如风速具有较强的局地性，与周边自动站观测存在着较大的差异。因此，一般的公众气象预报难以满足试飞要求。同时，在预报风力时，一般公众气象预报侧重于灾害性天气的预报，更关注极大风速，如西北风6级阵风7~8级，对平均风速的持续时间和稳定性则缺少关注，而在侧风试验中，只有一段时期的平均风速达到某个阈值，才能符合试飞大纲要求，仅仅阵风较大是无法满足需求的。

1.4 预报服务需要体现高命中率，对虚警的容忍度较低

试飞气象涉及气象和航空两个领域，气象保障贯穿于试验准备、试飞执行、航后分析各个环节。如果对试飞气象条件的预报不能做到准确及时有效，就会极大地降低试飞取证效率，影响经济效益。而且，试

飞取证多在外场进行，对资源的耗费较大，一次试验飞行的经济成本也是相当可观。目前多采用“等天气”的做法，如果预报的命中率较低，而虚警率却偏高，将极大地降低试飞取证效率，且造成资源的过度浪费。

上海市气象局积极服务国产大飞机国家战略，为了提高试飞气象保障水平，2015年6月，上海市气象局与中国商飞试飞中心正式签署战略合作协议，共同推进国产大飞机试飞特殊气象保障工作。2015年10月，上海市气象局与中国商飞试飞中心共建的“试飞气象工程研究中心”揭牌成立。提出重点研发国内试飞气象条件再分析、试飞气象数值预报、试飞气象定向观测和飞行试验气象数据反馈与分析技术等，实现国内气象先进技术成果的工程应用，提高试飞安全和试飞效率。

从2014年开始，上海市气象局开始逐步为中国商飞的试飞活动提供气象保障服务，针对科研和业务难题共同开展攻关。2016年3月上海市气象局、中国气象局人影中心、试飞中心等多家单位在安庆开展了自然结冰探测试验。2017年4月上海市气象局与中国商飞试飞中心气象台圆满完成ARJ21-700飞机地面大侧风扩展试验（锡林浩特机场）气象保障任务，成功抓获五次大风过程，抓风概率100%。据统计，此次飞机大侧风试验获取的地面正侧风值和试验效率皆已刷新了国内纪录。2017年2—5月为C919低滑、高滑和首飞提供气象保障服务，成功保障了C919首飞的顺利进行。目前上海市气象局与中国商飞试飞中心紧密合作，初步形成了一套完善的试飞气象保障服务体系，涵盖了试飞气候条件分析、天气过程预报、现场气象保障服务、决策服务支持、事后总结分析等。

2 自然结冰试飞

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。国产ARJ21-700飞机的试飞过程长达6 a，其中获得适航证前最关键的自然结冰试飞就在乌鲁木齐苦寻了4 a，直至远赴北美才完成，这直接影响了ARJ21-700飞机进入市场的时间表，也耽误了后续机型的研发进程。同样的试飞，巴西航空工业公司ERJ190飞机，美国波音777飞机的试飞效率均远高于国产ARJ客机。其中主要的原因就是在国内无法找到有效的结冰气象条件，致使多次试飞无功而返。

2014年3月，上海市气象局曾为中国商飞在宜昌和义乌的飞机自然结冰试验提供气象保障，并且与中国气象科学研究院、中国商飞试飞中心、中国飞行试验研究院等多家单位，就自然结冰试飞在气象技术研

发、保障模式、经验总结等多方面开展研讨。2016年3月联合中国气象局人影中心、试飞中心利用新舟60飞机在安庆开展了自然结冰探测试验。ARJ21-700飞机完整严格的民机试飞取证过程和陆续开展的科学探测试验，积累了宝贵的地面、高空、机载观测和飞行报告等资料，为验证结冰气象预报方法的有效性提供了重要的素材。

2.1 自然结冰试验观测设备

试飞时，需要安装结冰环境气象参数测量设备，一般采用美国粒子测量公司（Particle Measuring System Inc. PMS）的粒子测量系统，用于探测云微物理信息，如过冷水滴体积中值直径和云粒子浓度等^[2,3]。从气象研究角度，自然结冰探测试验是空天地一体的观测试验，需要地基、天基等观测设备提供支持。

以2016年3月的安庆自然结冰试验为例，该试验由上海市气象局、中国商飞试飞中心、中国气象局人工影响天气中心、安徽省气象局、池州机场、三星通航公司等单位共同参与，试验共计飞行两架次。该次试验是对自然结冰试飞气象保障模式的一次科学探索，并非民机适航取证试飞。使用的探测设备见表1。

表1 2016年3月安庆结冰探测试验时使用的观测设备
Table 1 Observational instruments used in aircraft icing experiment at Anqing, March 2016

探测设备	主要用途
安庆探空观测	6小时一次加密探空，获取大气垂直风温湿信息
安庆多普勒天气雷达	探测降水回波信息
X波段移动双偏振多普勒天气雷达	可垂直扫描，主要探测回波、垂直液态水含量和降水相态
MP-3000A微波辐射计	连续探测温度和水汽的垂直分布
“新舟60”飞机及机载气象探测设备（包括云凝结核计数器、被动腔式气溶胶粒子谱探头、云滴探头、后向散射云滴探头、云粒子图像探头、降水粒子图像探头和气象综合探头）	探测空中云粒子和降水粒子含量、飞行高度上各气象要素及结冰实况报告

在安庆试验的事后分析中发现，探空气球是直接获取大气温湿层结最有效的手段，试验区域上空温度和湿度的变化直接影响了飞机结冰的条件，因此试验时可以在空间和时间上适当加密。X波段移动双偏振多普勒天气雷达由于对于连续自然结冰试验的小直径、低浓度过冷水滴无法得到足够的后向散射，从而无法探测到清晰的回波，建议可以采用毫米波测云雷达替换，从而对高精度的云垂直结构信息进行实时监测。

2.2 自然结冰试飞潜势预报方法研究

目前国内业务上常用的飞机结冰诊断预报算法^[4-8]，如经典积冰指数Ic等，一般只考虑高空中的温度和湿度阈值等，判据较为简单，因此在时间和空间

分布上存在着较大的空报，在民航业务上作为规避潜在的积冰区域具有一定的适用性。而民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，常用的飞机结冰算法一般不能满足试飞的需求，需要构建适用于民用飞机自然结冰试飞需求的结冰潜势算法。

NCEP的结冰诊断预报方法有两种^[9]，一种是利用模式预报的温度、湿度和上升气流来诊断各飞行高度上的结冰条件，仍属于“是”和“否”的简单预报；另一种是采用NCAR发展的模糊逻辑预报方法，其方法是将与结冰有关的温度、湿度、云量、云水等与结冰的可能性相联系，做成曲线。Bernstein等^[10]开发的当前结冰潜势（CIP，Current Icing Potential）是基于快速更新同化模式输出，利用模糊逻辑方法加上雷达回波、飞行员报告、机场观测等信息诊断的结冰分析产品，在实际结冰试飞预报服务中，发现该预报方法具有较高的应用价值。上海中心气象台李佰平等基于Bernstein的CIP方法，利用探空观测和再分析资料的大气温湿层结信息，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，该方法流程见图1。利用26个飞机结冰试飞（飞行）报告，对该算法进行了检验和评估，发现该算法基本上能较好地反应多种天气形势下飞机在飞行中实际遭遇结冰的情况，其诊断的结冰高度和区域与飞行报告较为一致。通过对试飞个例的分析给出了达到适航标准需求的最大可能结冰气象条件阈值：最大结冰潜势接近100%，且有效结冰层厚度在1km以上。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分析，李佰平等的方法则仅利用大气温湿层结信息识别飞机结冰可能存在的区

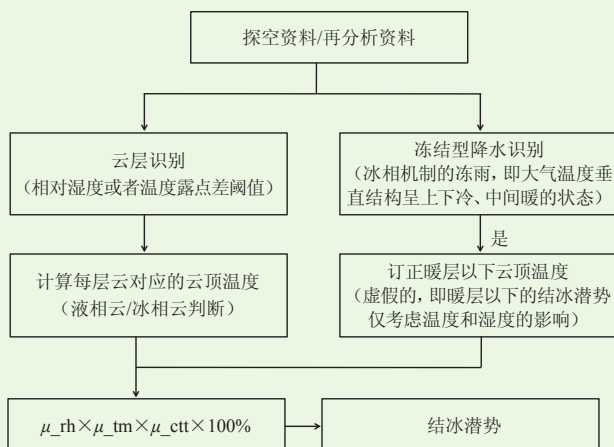


图1 基于大气温湿层结的自然结冰潜势诊断算法流程图
Fig. 1 Flowchart of the natural icing potential algorithm based on atmospheric temperature and humidity profile

域。在国内气象台站缺少天气现象观测，机场观测站点稀疏且共享程度差的背景下，基于大气温湿层结的结冰潜势算法具有较高的应用价值。如CIP方法中关于冻结降水的判断由机场观测报文获取，而新方法则通过对逆温层和融化层的判断给出冻结降水下的飞机结冰潜势。

该方法在安庆飞机自然结冰外场试验两架次飞行中得到了有效验证，而且结合探空数据和卫星资料等，可以准确诊断结冰层的高度，与飞机实际空中探测具有较高的吻合度，且能够有效地指示空中过冷水随时间的变化。从飞机飞行报告来看，安庆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8时47分至11时48分，在9时25分飞机报告3000米高度观测到2-4cm机体部分积冰，气温-5℃，平均液态含水量达0.2-0.3g/m³；第二架次的试验飞行时间段为3月9日16时10分至19时55分，其中，飞机报告3600米高度气温-3℃、3900米高度气温-4℃、4200米高度气温-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，利用安庆探空秒数据诊断的结冰潜势与实况非常吻合（图2），上午（08时）的结冰潜势接近100%且高度与飞机探测一致，下午（14时）整层结冰潜势均在20%以下，不利于飞机结冰。

3 大侧风试飞

3.1 试验需求及概况

大侧风试验是对气象条件要求较高的另一个试飞科目。该试验的难度主要在于：需要垂直于飞机（地面试验）或者跑道（空中试验）的侧风，同时对于某一个试验点而言，在试验期间的平均风速不能小于目标值，而一个试验点往往需要持续较长时间（如30 min）。ARJ21-700飞机于2010年至2013年间在甘肃鼎新机场和嘉峪关机场进行了多次地面和空中的大侧风试验，其中地面试验基本达到了最大侧风25节的要求，空中试验取得了侧风20节的数据。2016年底，为了扩展ARJ21-700的飞行包线，中国商飞试飞中心拟进一步开展地面大侧风试验，计划将目标风速由22节提升至27节。根据全国大风区域和锡林浩特机场气象自观系统数据分析，选定锡林浩特机场作为扩展ARJ21-700的飞行包线，开展地面大侧风试验的机场，确定春季（3-5月）为易出现满足试验条件大风的窗口期。

2017年4月中国商飞在锡林浩特开展ARJ21-700飞机大侧风地面试验。通过五次试验，于17日圆满完成试验，将ARJ21发动机、APU地面正侧风值皆提升至

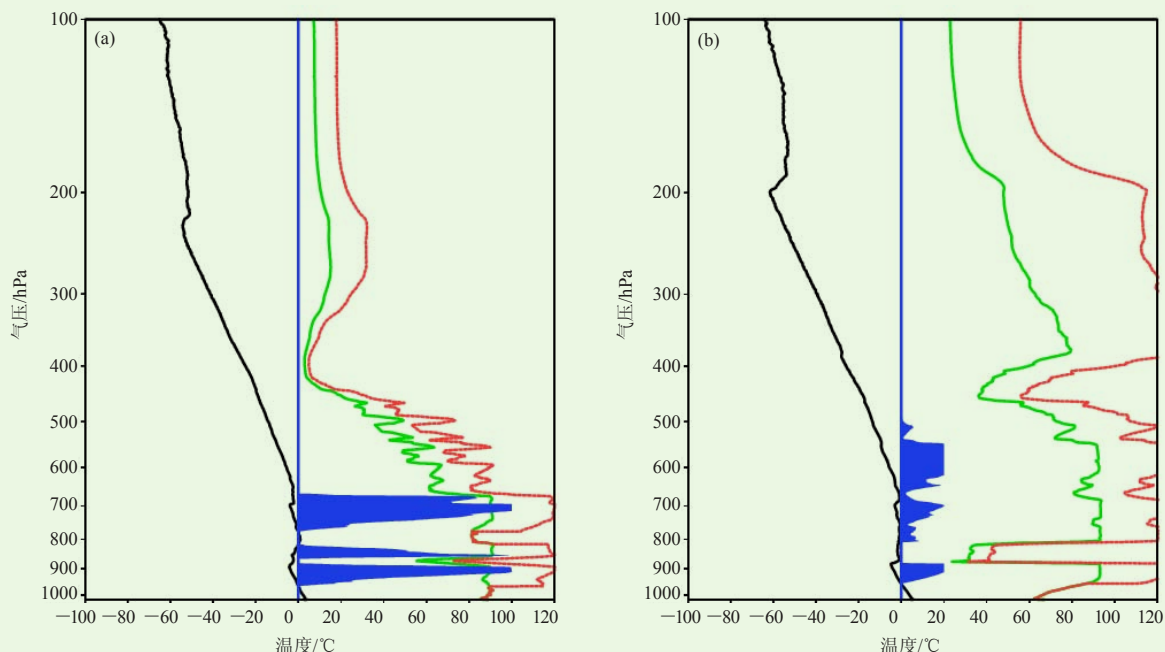


图2 安庆温度、相对湿度和结冰潜势垂直廓线：(a) 3月9日08时，(b) 3月9日14时（黑色实线为温度、绿色实线为水相相对湿度，红色实线为冰相相对湿度，蓝色色块区域为结冰潜势）

Fig. 2 The profiles of temperature, relative humidity and icing potential at Anqing (the black solid line denotes temperature, green solid line: relative humidity against water, and red solid line: relative humidity against ice, the blue shaded area: icing potential). (a) for 08:00 BT, 9 March, (b) for 14:00 BT, 9 March BTC

30节目标，超目标（27节）并圆满完成本次锡林浩特地面试验任务。

需要指出的是，此次侧风试验是地面试验，飞机在停机坪上可以根据实时以及未来数小时的风向预测调整方位，因此只要风向相对稳定，侧风的损耗较小。对于空中侧风试验，侧风需要换算为垂直跑道方向的分量，因此需要对全国机场的风速风向和跑道方位，做进一步的统计分析，以确定合适的机场和月份。从锡林浩特机场大风的初步分析来看，当地面气旋过境，机场位于气旋后方时，主导风向为偏北或者西北，则非常有利于出现垂直跑道的侧风，具有一定的空中侧风试验条件。

3.2 数值预报在侧风试验预报中的应用

由于风的局地性较强，不同站点的风速观测往往存在着较大的差异，而且机场所处环境一般地形比较开阔，风速往往会偏大。目前数值模式对天气系统（冷空气、气旋）的预报具有较高的技巧，能够在中期时段提供较为可靠的过程预测。天气系统影响时间和区域随预报临近则不断发展调整，具体到某一气象要素则存在着一定的偏差。需要根据历史大样本的实况数据，对模式的误差进行订正。

利用近2 a的观测资料（机场自观系统数据、机

场观测报文）对锡林浩特机场的大风开展统计分析发现，大于14 m/s风速（10 min平均）一般多出现在3—5月，且风向多为偏西和西南风。大风主导风向与当地机场跑道方向基本一致，配合的天气系统多为蒙古气旋或冷空气，因此多出现在春季^[1]。同时受高原地面加热作用影响，风的日变化显著，午后风速最

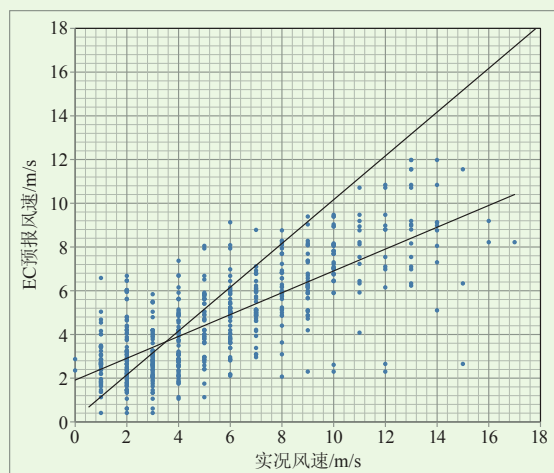


图3 EC MWF 10m风预报（前一天20时起报）与机场观测实况对比（2017年4月）

Fig. 3 Comparison of ECMWF for 10m wind forecast (initial time 20:00 BT one day before) with airport observation in April 2017

大，常是夜间的2倍左右。

在对数值模式预报的检验评估（图3），以2017年4月的风速检验为例，ECMWF模式对机场局地风速预报存在较大的偏差，尤其当风速较大时，多以低估为主，且模式预报的最大风速仅为12 m/s，与实况存在着较大的差距。在实际应用中，根据模式对天气系统的预报，考虑到高空动量下传以及风速的日变化，建立局地大风降尺度预报模型，可以显著提高机场大风的预报技巧。

以2017年4月16日的一次蒙古气旋天气过程（图4）为例，当日14时，受气旋和气温上升的影响，机场由西北风转西南风，风速由6 m/s迅速增大至14 m/s，且一直持续到傍晚，17时机场报文显示10分钟平均风速达到17 m/s，阵风22 m/s。在此期间风速、风向均稳定少变，是一次非常理想的侧风试验条件。从15日20时起报的ECMWF模式来看，数值预报对气旋影响时间（转风时间）预报与实况一致，风速增大和减小的时间段把握也较好，但预报最大平均风仅9 m/s，最大阵风18 m/s，与实况相比偏小。从模式预报的探空来看（图5），由于预报的温度递减率接近干绝热递减率，层结不稳定，有利于高空的动量下传，地面风速与700 hPa风速相当。因此如果基于数值模式对天气形势和探空廓线的预报，结合对大样本实况资料的分析，可以提供具有较高预报技巧的机场局地大风预报。

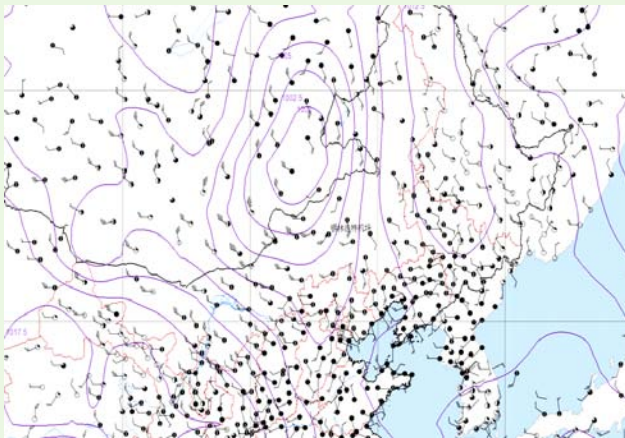


图4 2017年4月16日17时地面天气形势
Fig. 4 Surface weather chart at 17:00 BT 16, April, 2017

需要指出的是，本小节讨论的模式大风预报订正方法为针对锡林浩特机场的主观经验订正模型，并未考虑普适性的应用。由于风的局地性非常强，16日17时锡林浩特本站观测的风速仅为10 m/s，与模式风速预报的量级相当。机场与本站相距约15 km，两者的探空廓线并无太大差异，因此局地的地形以及观测环境差异可能是影响风速的主要因素。

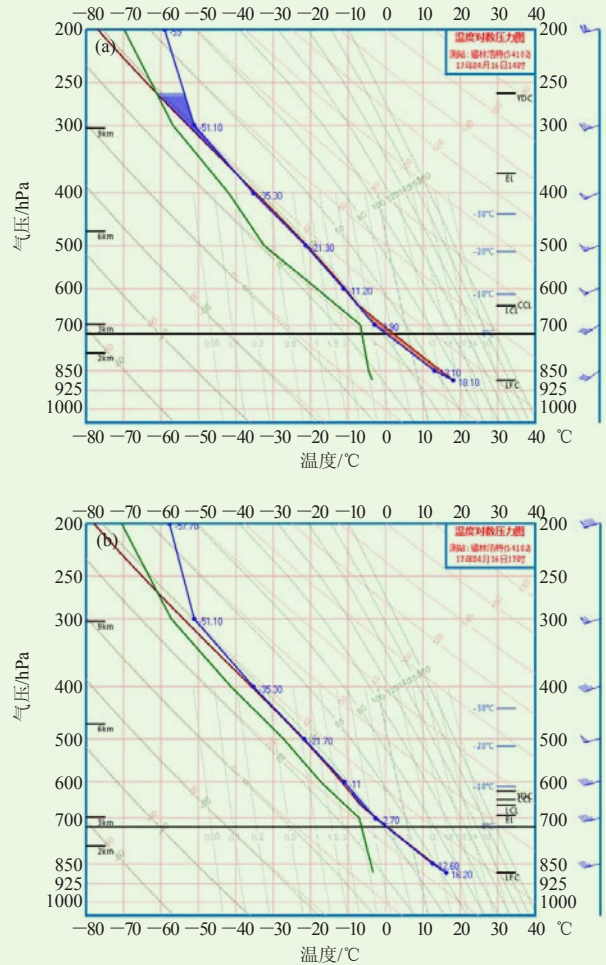


图5 ECMWF 16日14时 (a) 和17时 (b) 探空预报，起报时间15日20时。

Fig. 5 Skew T diagram at 14:00 pm and 17:00 pm 16th forecasted by ECMWF, initial time 20:00 pm 15th April

4 总结与讨论

试飞气象服务保障虽然只是整个试飞领域中的一个很小分支，但在整个试飞活动中起到了举足轻重的作用，尤其在试飞安全和试飞效率两个重要方面起到关键性作用。准确可靠的试飞气象保障服务可以显著提高试飞取证效率和企业经济效益。试飞气象服务需要完成对适航标准中相关气象条件的解读，试飞气象的气候分布特征分析，提供从中期到临近的无缝隙预报服务，以及明确的精细化预报结论为试飞决策提供支持。

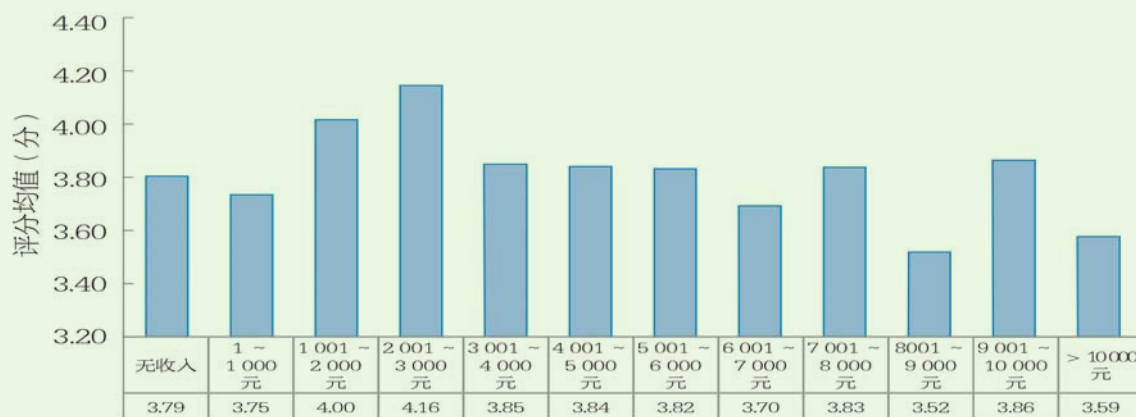
与民机制造行业一样，当前国内的民机试飞气象服务刚刚起步，在试飞气象前置研究、气候条件分析、预报方法和保障模式等诸多方面与国外先进水平均存在着较大的差距，是气象部门面临的一个全新课题。需要气象部门、科研院所、试飞部门以及客机制

造企业共同合作，协力攻关，在实践中提高试飞气象服务水平。最近几年，上海市气象局与中国商飞试飞中心通力合作，在自然结冰、侧风试验、C919首飞等方面均取得了可喜的进展。这既是试飞气象保障服务的有益探索，也是气象科技成果工程应用和气象现代化成果服务国家战略服务行业的有效实践。

参考文献

- [1] 何椿. 第56个世界气象日, 飞机和天气有啥关系试飞就是要寻找特殊气象. 大飞机报, 2016年3月23日第002版.
- [2] 李勤红, 乔建军, 陈增江. Y7-200A飞机自然结冰飞行试验. 飞行力学, 1999, 17(2): 64-69.
- [3] 王磊, 李成才, 赵增亮, 等. 飞机积冰云微物理特征分析及监测技术研究. 气象, 2014, 40(2): 196-205.
- [4] 刘旭光. 数值预报产品在航空气象预报中的应用. 四川气象, 2001, 78(4): 18-22.
- [5] 迟竹萍. 飞机空中积冰的气象条件分析及数值预报试验. 气象科技, 2007, 35(5): 714-718.
- [6] 刘凤林, 孙立潭, 李士君, 等. 飞机积冰诊断预报方法研究. 气象与环境科学, 2011, 34(4): 26-30.
- [7] 翟菁, 周后福, 申红喜, 等. 航空气象要素预报算法和个例研究. 气象研究与应用, 2010, 31(1): 31-34.
- [8] 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.
- [9] 周斌斌, 蒋乐, 杜钧, 等. 航空气象要素以及基于数值模式的低能见度雾的预报. 气象科技进展, 2016, 6(2): 29-41.
- [10] Bernstein B C, McDonough F, Politovich M K, et al. Current icing potential: algorithm description and comparison with aircraft observations. Journal of Applied Meteorology, 2005, 44: 969-986.
- [11] 符娇兰, 董林, 康志明. 影响我国北方冬半年气旋的气候特征及年际变率. 大气科学, 2013, 37(3): 679-690.

不同月收入受访者对天气预报内容丰富性的选择分布



(受访者对天气预报的丰富程度进行打分, 以1~5分分别代表“很不丰富” “不太丰富” “一般” “比较丰富” 和 “非常丰富”)

——摘自《迈向国际一流的大都市气象现代化体系》: 上海率先实现气象现代化第三方评估, 肖林, 陈振林 主编, 气象出版社, 2016年