

文章编号: 1674-8190(2024)04-152-10

# 结冰气象探测飞行及数据符合性分析方法研究

丁军亮

(中国飞行试验研究院 科研管理部, 西安 710089)

**摘要:** 结冰气象捕获、最优气象条件选取准则、符合性数据处理方法等一直是飞机自然结冰试飞过程中亟待攻克的难题。通过分析CCAR25部附录C结冰气象标准的形成背景及其局限性,提出一种利用结冰试验研究机开展结冰探测的飞行方法,该方法包括试验研究机的选型、改装、探测目标区域确定、飞行操作策略、飞行安全管理、数据处理等。依据对探测数据的统计分析,确定民用运输机自然结冰试飞的气象条件选取准则,规范云隙、液态水含量、总水收集率、结冰速率、结冰厚度和冰脱落程度等一系列结冰气象的数据处理方法和符合性判据,校验国内结冰气象预测算法,探索自然结冰试飞的安全管控策略和风险降解措施。大量飞行实测表明:该方法通用性强,效果显著,已经成功应用于C919大型客机合格取证试飞工作,并有力支撑了国内结冰适航标准自主。

**关键词:** 自然结冰;飞行试验;结冰气象探测;液态水含量;中值水滴直径

**中图分类号:** V217; V321.2<sup>+</sup>29

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16615/j.cnki.1674-8190.2024.04.17

## Research on flight detection and data compliance analysis methods for ice meteorological

DING Junliang

(Research Management Department, China Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

**Abstract:** During the natural icing test flight of an aircraft, capturing icing weather conditions, selecting optimal meteorological conditions, and processing compliance data have been long-standing challenges. This article analyzes the background and limitations of the formation of the icing meteorological standard in Appendix C of CCAR25, and proposes a flight method for ice detection using an icing experimental research aircraft. This method includes the selection and modification of icing experimental research aircraft, detection target area determination, flight operation strategy, flight safety management, data processing, etc. Based on statistical analysis of detection data, the selection criteria for meteorological conditions for natural icing flight test of civil aircraft are determined. A series of data processing methods and compliance criteria for icing meteorology are standardized, including cloud gaps, liquid water content, total water collection rate, icing rate, icing thickness, and degree of ice shedding. Domestic icing meteorological prediction algorithms are calibrated and verified, and safety control strategies and risk degradation measures for natural icing flight test are explored. A large number of flight tests have shown that this method has strong versatility and significant effects. It has been successfully applied to the certification of C919 aircraft, and strongly supports the independent development of domestic icing airworthiness standards.

**Key words:** natural icing; flight test; ice meteorological detection; liquid water content; median water drop diameter

收稿日期: 2024-02-29; 修回日期: 2024-06-28

通信作者: 丁军亮(1982-), 男, 博士研究生, 型号试飞副总师。E-mail: dingjl@avic.com

引用格式: 丁军亮. 结冰气象探测飞行及数据符合性分析方法研究[J]. 航空工程进展, 2024, 15(4): 152-161.

DING Junliang. Research on flight detection and data compliance analysis methods for ice meteorological[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2024, 15(4): 152-161. (in Chinese)

## 0 引言

对于民用航空器的适航取证,适航规章规定必须在经测定的结冰气象条件下进行自然结冰飞行验证。自然结冰试飞是适航取证过程中必须开展的、唯一能完整验证全部规章要求的符合性方法,其成功与否直接关系到型号研制的成败<sup>[1-2]</sup>。

国外做了大量有关结冰气象资源的研究与探索工作。20世纪40年代,美国国家航空咨询委员会(National Advisory Committee for Aeronautics,简称NACA)利用探测飞机对北美地区开展了大量的结冰条件探测研究,形成了最早的结冰资源数据库,为制定适航规章附录C奠定了基础<sup>[3-6]</sup>。美国怀俄明大学利用国王200T飞机研究了不同季节不同区域的结冰环境特征<sup>[7]</sup>。1986—1987年,加拿大大气环境中心利用Convair-580飞机研究了大西洋地区结冰环境的微物理特征<sup>[8]</sup>。20世纪90年代,美国联邦航空管理局、美国国家航空航天局、美国大气研究中心和加拿大大气环境中心等机构针对过冷大水滴(Supercooled Large Dropets,简称SLD)结冰条件先后开展了SLD结冰飞行研究项目<sup>[9]</sup>、加拿大冻雨实验<sup>[10]</sup>、联盟结冰研究<sup>[11]</sup>和ICICLE<sup>[12]</sup>等外场试验。美国和加拿大研究机构对北美地区结冰气象条件的持续飞行探测研究,使其掌握了北美地区结冰气象条件的宏、微观分布特征<sup>[13]</sup>,并业务化运行了结冰气象条件预测系统<sup>[14-15]</sup>,结冰气象条件丰富的五大湖地区成为各大飞机制造商完成自然结冰试飞的首选地区<sup>[16]</sup>。

相较于欧美发达国家,我国研究机构缺乏结冰气象条件分布、预测的理论研究和飞行探测验证。20世纪80—90年代,运12飞机<sup>[17]</sup>和Y7-200A飞机<sup>[18]</sup>先后在新疆乌鲁木齐开展了少量的结冰环境验证飞行。2016年,中国商用飞机有限责任公司、中国气象科学研究院等机构在安庆地区开展了结冰条件飞行探测,仅获取了1架次有效数据<sup>[19]</sup>,其样本量太小,尚不足以支撑在国内开展自然结冰试飞。2018—2021年,中国飞行试验研究院先后在新疆、陕西地区开展了自然结冰的探测飞行,获取了特定天气系统影响下的结冰环境数

据<sup>[20-22]</sup>。此外,在人工影响天气飞行作业中,存在遭遇结冰的大量实践案例<sup>[23-27]</sup>,研究人员开展了相应的积冰环境云微物理初步分析,所用的云微物理探测设备与自然结冰试飞云环境探测设备一致<sup>[28]</sup>。

由于缺乏对飞行环境结冰气象资源的研究和探索,尤其是缺少利用试验研究机进行有针对性的飞行实测,在国内开展飞机的自然结冰取证试飞缺乏数据支撑。2010—2013年,国产民用支线客机ARJ21-700连续4年国内自然结冰试飞均没有捕捉到理想的自然结冰气象,不得已借助国外力量转场北美五大湖地区,方才成功完成试飞任务。

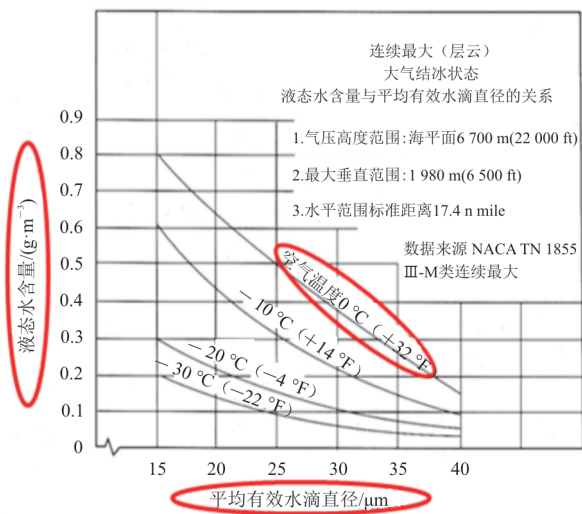
因此,针对航空规章CCAR25部附录C要求,亟需利用结冰探测试验研究机深入开展结冰试飞研究。本文探索国内自然结冰试飞资源,研究结冰探测飞行方法,掌握结冰云物理特性,确定自然结冰试飞气象条件选取准则和适航符合性数据分析方法,探索安全飞行管控措施,以支撑民用飞机研制和适航标准自主。

## 1 自然结冰试飞关键技术

结冰气象飞行探测是航空学与气象学的交叉学科,属于基础研究的一部分<sup>[29]</sup>,其主要目的是:1)掌握自然界结冰云层的出现规律、时空分布特征和云微物理特性<sup>[30-32]</sup>;2)基于气象环境、飞机飞行条件及几何构型,研究冰增长过程,开展飞机安全性设计及评估<sup>[33-36]</sup>;3)支撑自然结冰试飞条件选取和数据符合性确认,支撑适航标准优化完善<sup>[37-43]</sup>。

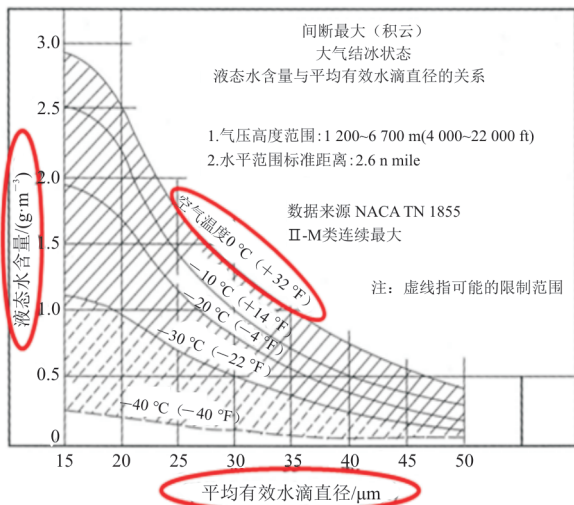
### 1.1 自然结冰试飞的气象条件选取准则

CCAR25部附录C中规定了申请人寻求结冰天气运营的连续最大和间断最大结冰条件,该结冰气象条件是根据NACA与气象专家在20世纪40年代大量的飞行实测结果制定的,申请在结冰环境下运行的飞机必须验证其在结冰设计包线—附录C内安全运行的能力,如图1所示(图中,1 n mile $\approx$ 1.852 km,1 ft $=$ 0.304 8 m)。



云层液态水含量: 0.2~0.8 g/m<sup>3</sup>  
周围空气温度: 0~-30°C  
云层水滴平均有效直径: 15~40 μm

(a) 层云 17.4 n mile



云层液态水含量: 0.2~3.0 g/m<sup>3</sup>  
周围空气温度: 0~-30°C  
云层水滴平均有效直径: 15~50 μm

(b) 积云 2.6 n mile

图1 CCAR25部附录C结冰气象条件<sup>[44]</sup>

Fig.1 CCAR25 appendix C ice meteorological conditions<sup>[44]</sup>

附录C是基于统计结果拟合出的结冰包线,涵盖了自然界中99.9%的结冰气象,给出了云中液态水含量(Liquid Water Content,简称LWC)、中值水滴直径(Mean Volume Diameter,简称MVD)、环境温度以及云层水平尺度等各种参数组合条件下的极值,能够为飞机防除冰系统设计及性能评估提供有力支撑,但是这些参数并不能包含结冰环

境的全部信息,不能直接指导自然结冰试飞。主要原因有:1)附录C未能给出自然界中不同水平尺度结冰云层的分布特征;2)附录C没有给出在结冰云层中发现特定液态水含量或中值水滴直径的概率;3)附录C未给出预期最大的液态水含量与海拔高度、云层厚度间的关系。以上未知因素是自然结冰气象条件选取的核心,均需通过结冰实测积累数据。

### 1.2 适航符合性数据处理方法

CCAR25部附录C中的液态水含量—中值体积直径包线图是基于固定距离(层云17.4 n mile和积云2.6 n mile)下的对应关系,但是在飞行过程中,结冰气象瞬息万变,云层各处过冷水含量差异很大,难以保持连续恒定。测量得到的结冰气象条件无法直接与附录C结冰气象包线进行对比分析并判断其符合性,主要难点包括:1)由于结冰云层的不连续,缺乏云层间隙的符合性判据,进而影响到基于水平尺度的液态水含量符合性数据分析;2)对于防冰系统的验证,缺少基于水平尺度的水收集率符合性数据分析方法;3)缺乏基于实测数据的附录C数据归纳及包线定义方法,难以将基于水平尺度的结冰气象数据转化为标准附录C结冰包线,进而判断结冰气象参数的有效性;4)研究不同飞行速率和结冰气象条件下的冰脱落情况,明确冰脱落可接受判据。

### 1.3 校准验证结冰气象预测算法

结冰气象条件与宏观地理环境密切相关,通过对国内结冰资源的时空分布特征研究,可以初步为自然结冰试飞试验区域和试验窗口期的选择提供决策依据。基于天气系统分析和数值气象预报,可以初步明确结冰潜势和中短期预报方法。国内的结冰预测算法大多是在国外结冰预测算法的基础上进行适应性改进,均未进行过飞行实测校准验证,存在时空分辨率低、精确度低、虚警率高等问题。同时,高分辨率的遥感产品监测识别结冰条件的算法模型,也需要进行飞行实测校验。



## 1.4 探索飞行安全管理方法

按照CCAR25部和FAR25-121修正案提出的自然结冰飞行试验符合性验证要求,民用客机结冰试验目标区需要有稳定持续、符合附录C要求的结冰条件,且能够保证冰云内的飞行时长合计达到约20~25 h<sup>[44]</sup>,方能完成包括失速、发动机风扇冰脱落、防除冰系统、驾驶舱视界、飞行控制、通讯导航等所有的试飞验证科目,试飞的风险性极高且持续时间长,飞行安全监控不可或缺。需要利用结冰研究机开展飞行实测,解决以下难点:1)探索并验证被试飞机翼型在一定速度和结冰条件下的结冰速率/积冰厚度计算方法,进而设计实时监控软件,精确定义风险指数;2)探索冰云混合相态下的数据处理及安全监测方案,重点关注过冷大水滴等极端危险气象对飞行安全的影响。

## 2 探测飞行方法

### 2.1 探测区域选择方法

探测目标区选址的技术步骤主要包括:1)收集多种结冰资料,包括再分析格点资料、常规气象观测资料、探空资料、雷达资料、气象卫星云图资料、民航飞机结冰报告等,建立历史气象数据集;2)统计分析历史气象数据,利用温度、湿度等要素信息反演结冰潜势的时空分布特征,综合结冰潜势空间分布、宏观地理特征等因素选择适宜的探测区域;3)综合考虑客观保障能力(空域管控及申请、安全监控及通讯可达性、备降机场保障性、飞机失速后的高度损失等),最终确定目标探测区域。研究表明,冬半年,四川北部、陕西中部、陕西南部、湖北北部、山西西部有较高的结冰潜势<sup>[45]</sup>。

### 2.2 探测飞机的选型及改装

探测飞机的选型,须具备以下基本条件:1)经认证可在已知的结冰环境下飞行;2)考虑结冰云层云顶高度,探测飞机飞行高度包线须在7 000 m以上,速度包线超过550 km/h;3)必须具备良好的失速及改出特性;4)防除冰系统具备优良的防除冰效率;5)结冰气象出现时可能导致能见度变差,要求飞机和机场均具备低能见度条件下(1 km)的起降能力;6)具备卫星通讯等远距通讯能力。

结冰探测飞机的改装,须包括:1)云粒子组合探头(Cloud Combination Probe,简称CCP),具体包括云粒子探头(Cloud Droplet Probe,简称CDP)、云粒子图像探头(Cloud Imaging Probe,简称CIP)和液态水含量探头(Hotwire Liquid Water Content Sensor,简称Hotwire LWC),其云滴测量范围 $2\ \mu\text{m}\sim 1.5\ \text{mm}$ ,液态水含量测量范围 $0.05\sim 3.00\ \text{g}/\text{m}^3$ ;2)综合气象要素测量系统(Aircraft-Integrated Meteorological Measurement System,简称AIMMS),其主要测量大气温度、湿度、风速、风向及飞机经纬度、高度信息;3)总水含量传感器,可直接测量液态水含量和总水含量;4)数据采集、存储及数据处理等其他系统。重点关注暴露在冰云中的探测设备,均要求具备加温除冰能力。选型比对并经过改装后的结冰探测试验研究机(国王350)如图2所示。



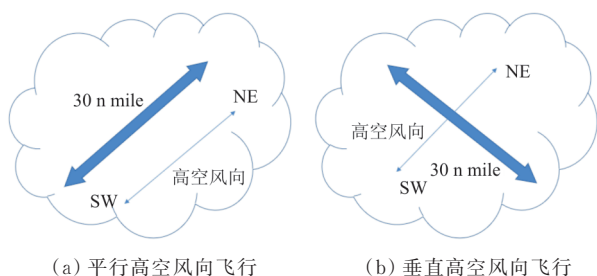
图2 国王350结冰探测试验研究机  
Fig. 2 King 350 ice detection experimental research machine

### 2.3 飞行操作方法

为获取结冰环境采样数据,探测方法和策略至关重要,必须要考虑到气象环境、飞机性能、空域管制、复杂地形等众多要素,设计多种探测飞行操作方法,并根据实际情况实时调整探测飞行计划。

#### 1) 水平飞行方法

水平飞行策略主要包括“直线飞行”和“区域飞行”。“直线飞行”是飞机沿着同一直线来回多次飞行,如图3所示,实现对高价值结冰云区的多次采样,在飞行中飞行方向与高空风平行或与高空风方向垂直,飞行的直线距离根据具体的气象条件来确定。“区域飞行”示意图如图4所示,飞机用一系列交错和平行的航线对一个地理区域进行观测采样,该飞行方法用于观测一个区域的变化,从而验证气象卫星、雷达、数值模型等其他数据源。



(a) 平行高空风向飞行 (b) 垂直高空风向飞行

图 3 直线飞行方法示意图

Fig. 3 Schematic diagram of straight flight method

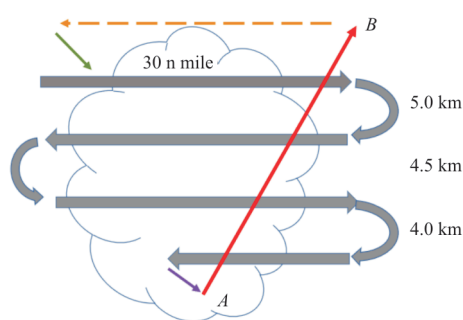


图 6 分层下降飞行示意图

Fig. 6 Layered descent flight diagram

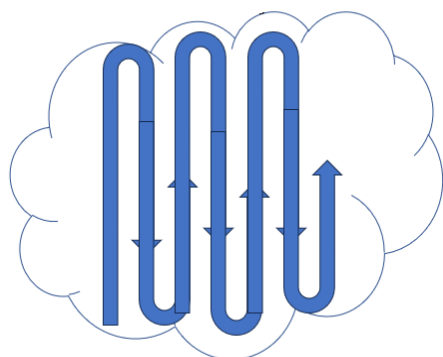


图 4 区域飞行方法示意图

Fig. 4 Schematic diagram of regional flight methods

2) 垂直飞行方法

垂直飞行方法主要有螺旋飞行和分层下降飞行。螺旋飞行示意图如图 5 所示,在一个较小区域,飞机进行螺旋式下降和上升,对区域内云层的垂直分布、气象要素垂直分布进行采样观测,采样结果可用于分析气象参数的垂直分布情况。

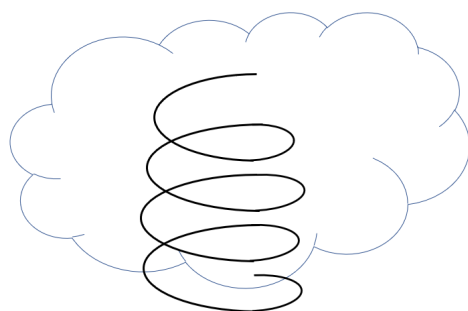


图 5 螺旋飞行示意图

Fig. 5 Spiral flight diagram

分层下降飞行示意图如图 6 所示,飞机从云顶部入云,先沿着云顶部进行水平飞行观测,接着下降高度层反方向进行水平飞行,直至到达云底部后,从云底部沿直线飞向云顶部。分层下降飞行可以对多个典型高度层进行观测采样,综合了垂直观测和水平观测。

螺旋飞行与分层下降飞行相结合的探测飞行方法如图 7 所示。

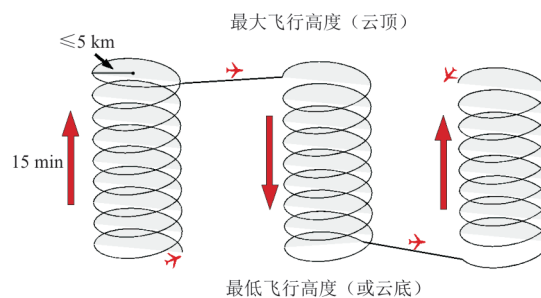


图 7 螺旋与分层飞行结合

Fig. 7 Combining spiral and layered flight

3 探测飞行数据分析

2021年2月、7—8月、10—12月,在甘肃东部、陕西关中和山西西南部地区,中国飞行试验研究院改装了国王 350 结冰探测研究机,对冬季层云、夏季层云开展了 21 架次的有效飞行探测,累计飞行 52 h03 min,累计穿云 85 次,冰云中飞行合计 1 820 km。一架次典型探测飞行的二维和三维航迹分别如图 8~图 9 所示,一次典型的探测飞行机翼结冰情况如图 10 所示。

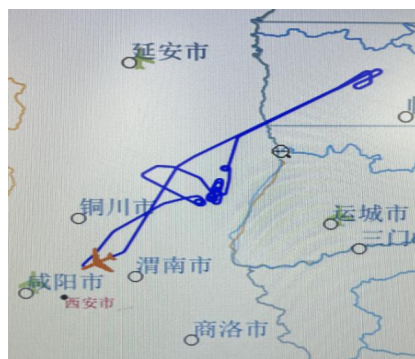


图 8 探测飞行二维航迹图(2021年2月24日)

Fig. 8 Detection of two-dimensional flight trajectory map (2021-02-24)

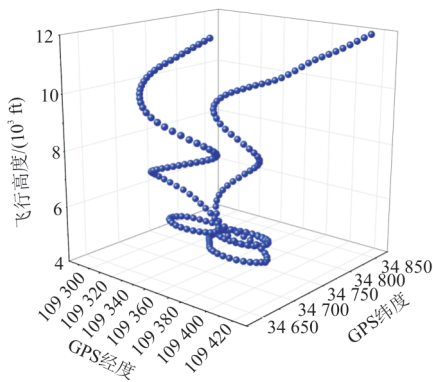


图 9 探测飞行三维航迹图(2021年2月24日)  
Fig. 9 Detection of three-dimensional flight trajectory map (2021-02-24)



图 10 探测飞行机翼结冰情况(2021年2月24日)  
Fig. 10 Detection of icing on flight wings (2021-02-24)

### 3.1 探测数据统计分析

#### 1) 结冰云层水平尺度

探测结果表明,随着云层水平分布距离(Horizontal Extension,简称HE)的增加,云中液态水含量逐渐降低。结冰探测冰云水平尺度分布统计如图 11 所示,可以看出:近 30% 的结冰云层尺度不足 2 n mile,大约 90% 的结冰云层长度小于 20 n mile,遭遇附录 C 标准距离 17.4 n mile 的概率大约只有 12%。根据探测结果,该空域范围内,在我国自然结冰飞行过程中寻找到满足附录 C 要求的标准尺度结冰云层难度较大。

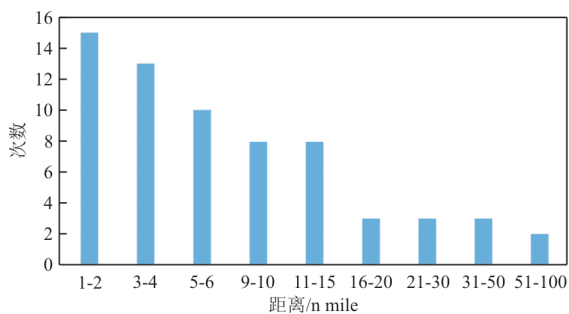


图 11 结冰探测冰云水平尺度分布统计  
Fig. 11 Statistical analysis of horizontal scale distribution of ice clouds during ice detection

#### 2) 液态水含量

结冰探测液态水含量分布统计如图 12 所示,可以看出:飞行探测到的自然结冰冰云中超过一半的液态水含量小于 0.2 g/m<sup>3</sup>,液态水含量超过 0.4 g/m<sup>3</sup> 的概率不足 10%,超过 50% 的冰云中液态水含量较小,水平尺度较短;满足自然结冰飞行试验要求的水平尺度超过 20 n mile 且液态水含量超过 0.4 g/m<sup>3</sup> 的自然分布概率不足 17%。因此,在该探测空域内,期望自然结冰试飞在层状云中遭遇非常大的液态水含量是不现实的,除非恰好找到少数合适条件的云系。

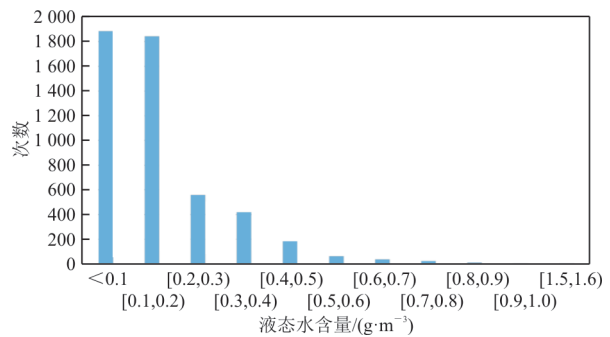


图 12 结冰探测液态水含量分布统计  
Fig. 12 Distribution statistics of liquid water content in ice detection

#### 3) 中值水滴直径

冰云中中值水滴直径的大小直接影响到水滴撞击的极限位置。结冰探测中值水滴直径分布统计如图 13 所示,可以看出:50% 层状冰云的中值水滴直径在 15~20 μm 左右,低于附录 C 规定的最小水滴直径;中值水滴直径超过 15 μm 后,随着水滴直径的增加,出现的概率越小;层状云的总平均中值水滴直径约为 15 μm,偏离 15 μm 是一种不稳定状态,只有当中值水滴直径接近 15 μm 时,才出现最大的可用液态水含量。

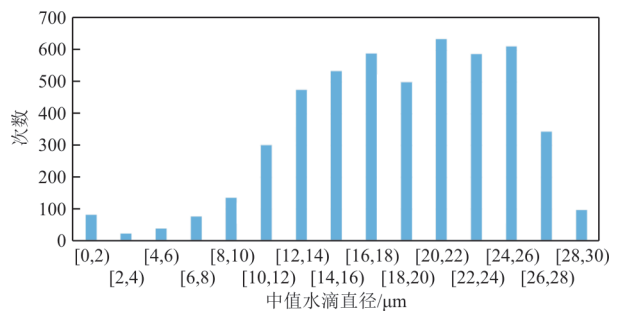


图 13 结冰探测中值水滴直径分布统计  
Fig. 13 Statistics of mean volume diameter distribution in ice detection

4) 结冰高度统计

根据探测结果,统计特定高度遇到的 99% 的液态水含量,随着冰云水平尺度的增加,液态水含量逐步降低,液态水含量上限随着冰云高度的增加而增加。液态水含量在接近云顶处出现最大值,因此 5 000~15 000 ft 范围内最易找到自然结冰试飞可用的液态水。

根据以上结冰探测研究结果,综合考虑试验验证要求、飞行安全等要素,可以得出自然结冰试飞结冰气象条件选取的基本准则:自然结冰试飞应选取在 5 000~15 000 ft,环境温度范围 0~-20 °C,中值水滴直径在 15 μm 左右,且可用的最大液态水含量。

3.2 结冰气象符合性数据分析

通过对结冰探测数据的持续归纳分析,结合对附录 C 的深入研究及数据反演,依据相关试飞科目的判断准则,最终明确结冰气象的符合性判据。

1) 云隙判据

通过冰云之间的间隙大小,判断云层的连续性。从云粒子组合探头测得的液态水含量  $L_{wc} \geq 0.05 \text{ g/m}^3$  开始计时,若  $L_{wc} < 0.05 \text{ g/m}^3$  且持续 30 s 以上,则认为穿云结束,否则,则认为是连续云层。

2) 基于水平尺度的液态水含量判据

将 CCAR25 部附录 C 结冰气象包线转化为飞行实测温度、实测中值水滴直径条件下的水平尺度—液态水含量时间历程曲线,进而对液态水含量参数有效性进行实时分析和适航符合性判断,如图 14 所示。

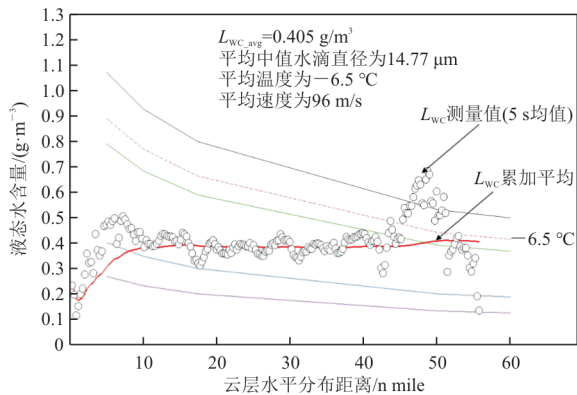


图 14 LWC 与 HE 关系曲线

Fig. 14 LWC and HE relationship curve

液态水含量移动平均值(5 s 均值)为

$$L_{wc\ m\_avg} = \frac{L_{wc\ i-4} + L_{wc\ i-3} + L_{wc\ i-2} + L_{wc\ i-1} + L_{wc\ i}}{5} \quad (1)$$

式中: $L_{wc\ i}$ 为*i*时刻液态水含量实测值。

液态水含量的累加平均值

$$L_{wc\ m\_avg} = \sum_{n=1}^i \frac{L_{wc\ 1} + L_{wc\ 2} + \dots + L_{wc\ i-1} + L_{wc\ i}}{i} \quad (2)$$

3) 总水收集率判据

飞机防除冰系统的试飞验证数据处理,需要将附录 C 结冰气象包线转化为基于冰云水平距离的水收集率(WCR)时间历程曲线,进而开展适航符合性数据分析,如图 15 所示。

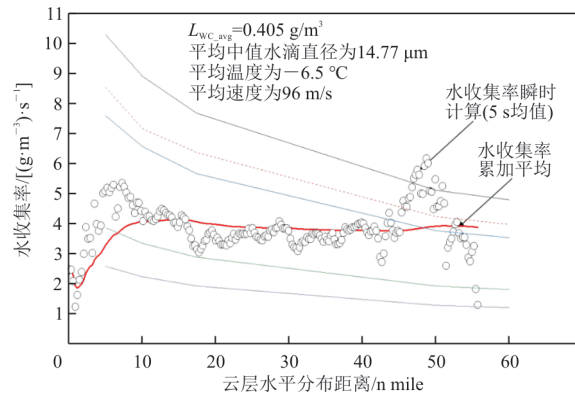


图 15 WCR 与 HE 关系曲线

Fig. 15 WCR and HE relationship curve

4) 积冰速率和积冰厚度

积冰速率  $R_{ice}$  (mm/min) 计算公式为

$$R_{ice} = \frac{dD}{dt} = A \times L_{wc\ i} \times \beta \times v_T \quad (3)$$

式中: $A$ 为试验机翼型的单位转换常数; $\beta$ 为不同气象条件和飞行条件下的水滴收集系数; $v_T$ 为真空速。

结冰厚度  $D_{ice}$  (in, 1 in=0.025 4 m) 计算公式为

$$D_{ice} = \sum_{i=1}^n \frac{R_{ice}}{60} \times \frac{1}{25.4} \times dt \quad (4)$$

式中: $dt$ 为采样率(1 s);60为时间转换常数(min转换为 s);25.4为单位转换常数(mm转换为 in)。

积冰速率和积冰厚度的实时安全监控和数据分析如图 16 所示。



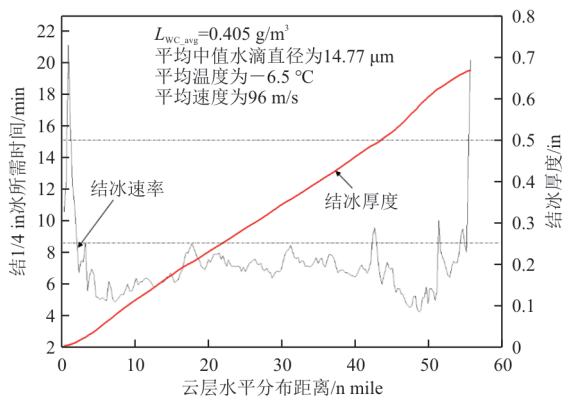


图16 结冰速率、结冰厚度与HE的关系曲线  
Fig. 16 The relationship curve between icing rate, icing thickness, and HE

#### 4) 冰脱落可接受判断

自然结冰性能试飞科目在做试验机动时,要求不能有太多的冰脱落,但发生局部冰脱落是可接受的。根据结冰探测结果,冰脱落可接受判断确定为:翼梢上有积冰,且机翼未防护区域和平尾前缘的积冰保留约2/3以上。

## 4 方法应用

以上结冰气象探测飞行及数据符合性分析方法研究成果,已经成功应用于C919大型客机的自然结冰试飞。应用情况包括:1) 结冰选取准则成功指导了C919自然结冰试飞快速高效地找到了满足条款要求的结冰气象;2) 探测飞行操作方法和安全管控措施,为自然结冰综合试飞策略奠定了安全基础;3) 确定的结冰气象符合性数据分析方法和判据,获得局方认可,形成了国内民用飞机型号自然结冰试飞的基础规范;4) C919飞机仅用了5架次飞行,便完成了15个科目、70个试验点的自然结冰试飞全部试飞科目,相较于国外同类型飞机的结冰试飞科目,试飞效率提高50%以上。

## 5 结论

结冰气象探测飞行及适航符合性验证方法研究,成功探索了国内典型区域的结冰气象资源,掌握了典型区域的结冰气象云微物理特性,掌握了冰云中飞行的安全策略和风险降解措施。通过对结冰实测的数据分析,形成了自然结冰试飞气象条件的选取准则和适航符合性数据分析方法标准规范,有力地支撑了民用飞机研制和适航标准

自主。

同时,也暴露出结冰探测传感器研制滞后、冰云混合相态数据处理方法缺失、对过冷大水滴的研究偏弱、冻雨等灾难结冰气象的实时监测水平还存在不足等问题。因此,还需要进一步开展结冰气象探测研究,助力自主适航标准制定,指导航空器防除冰技术研究的体系化进步,为飞机运行安全提供技术支撑。

## 参考文献

- [1] 丁军亮, 赵利利, 杨涛, 等. 自然结冰飞行试验技术综述[J]. 航空学报, 2023, 44(17): 45-60.  
DING Junliang, ZHAO Lili, YANG Tao, et al. Flight test technology of natural icing[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(17): 45-60. (in Chinese)
- [2] 高郭池, 张波, 全敬泽, 等. 正常类飞机自然结冰试飞适航审定技术[J]. 航空学报, 2024, 45(1): 195-216.  
GAO Guochi, ZHANG Bo, QUAN Jingze, et al. Airworthiness certification technology of normal aircraft natural icing flight test[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(1): 195-216. (in Chinese)
- [3] LEWIS W. A flight investigation of the meteorological conditions conducive to the formation of ice on airplanes: NACA-TN-1393[R]. Washington: NACA, 1947.
- [4] LEWIS W. Icing properties of noncyclonic winter stratus clouds: NACA-TN-1391[R]. Washington: NACA, 1947.
- [5] LEWIS W. Icing zones in a warm front system with general precipitation: NACA-TN-1392[R]. Washington: NACA, 1947.
- [6] KLINE D B. Investigation of meteorological conditions associated with aircraft icing in layer-type clouds for 1947-1948 winter: NACA-TN-1793[R]. Washington: NACA, 1949.
- [7] SAND W R, COOPER W A, POLITOVICH M K, et al. Icing conditions encountered by a research aircraft[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 1984, 23(10): 1427-1440.
- [8] COBER S G, ISAAC G A, STRAPP J W. Aircraft icing measurements in east coast winter storms[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 1995, 34(1): 88-100.
- [9] MILLER D, BERNSTEIN B, MCDONOUGH F, et al. NASA/FAA/NCAR supercooled large droplet icing flight research-summary of winter 96-97 flight operations[C]// 36th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, NV, USA: AIAA, 1998: 577-590.
- [10] ISAAC G, COBER S, KOROLEV A, et al. Canadian freezing drizzle experiment[C]// 37th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, NV, USA: AIAA, 1999: 492-503.
- [11] ISAAC G, AYERS J, BAILEY M, et al. First results from the alliance icing research study II [C]// 43rd AIAA



- Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, NV, USA: AIAA, 2005: 252-267.
- [12] SHAKIROVA A, NICHMAN L, BELACEL N, et al. Multivariable characterization of atmospheric environment with data collected in flight [J]. *Atmosphere*, 2022, 13(10): 1715-1723.
- [13] BERNSTEIN B C, WOLFF A, MCDONOUGH F. An inferred climatology of icing conditions aloft, including supercooled large drops (Part I): Canada and the continental United States [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2007, 46(11): 1857-1878.
- [14] BERNSTEIN B C, MCDONOUGH F, POLITOVICH M K, et al. Current icing potential: algorithm description and comparison with aircraft observations [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2005, 44(7): 969-986.
- [15] MCDONOUGH F, BERNSTEIN B C, POLITOVICH M K, et al. The forecast icing potential algorithm [C] // 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, NV, USA: AIAA, 2004: 231-245.
- [16] BERNSTEIN B C, CAMPO W, ALGODAL L, et al. The Embraer-170 and-190 natural icing flight campaigns: keys to success [C] // 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, NV, USA: AIAA, 2006: 264-280.
- [17] 陈跃, 马培民, 游来光. 飞机积冰环境下的液态水含量及滴谱个例分析 [J]. *气象*, 1989, 15(4): 24-28.  
CHEN Yue, MA Peimin, YOU Laiguang. A case study of droplet spectra and liquid water content measurements in aircraft icing environments [J]. *Meteorological Monthly*, 1989, 15(4): 24-28. (in Chinese)
- [18] 李勤红, 乔建军, 陈增江. Y7-200A 飞机自然结冰飞行试验 [J]. *飞行力学*, 1999, 17(2): 64-69.  
LI Qin hong, QIAO Jianjun, CHEN Zengjiang. Natural icing flight test for Y7-200A aircraft [J]. *Flight Dynamics*, 1999, 17(2): 64-69. (in Chinese)
- [19] 孙晶, 蔡森, 王飞, 等. 安庆地区一次飞机积冰的气象条件分析 [J]. *气象*, 2019, 45(10): 1341-1351.  
SUN Jing, CAI Miao, WANG Fei, et al. A case study of aircraft icing conditions in Anqing area [J]. *Meteorological Monthly*, 2019, 45(10): 1341-1351. (in Chinese)
- [20] 王泽林, 倪洪波, 裴昌春. 我国干旱地区一次直升机自然结冰试飞天气个例分析 [J]. *沙漠与绿洲气象*, 2020, 14(2): 68-74.  
WANG Zelin, NI Hongbo, PEI Changchun. Analysis of meteorological conditions on the domestic helicopter natural icing flight test [J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 2020, 14(2): 68-74. (in Chinese)
- [21] 倪洪波, 李佰平, 闫文辉, 等. 飞机试飞的自然结冰潜势预测及检验评估 [J]. *气象科技*, 2022, 50(2): 254-266.  
NI Hongbo, LI Baiping, YAN Wenhui, et al. Aircraft natural icing potential forecast and its evaluation in flight test [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2022, 50(2): 254-266. (in Chinese)
- [22] 王泽林, 周旭, 吴俊辉, 等. 一次飞机严重积冰的天气条件和云微物理特征 [J]. *应用气象学报*, 2022, 33(5): 555-567.  
WANG Zelin, ZHOU Xu, WU Junhui, et al. Weather conditions and cloud microphysical characteristics of an aircraft severe icing process [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2022, 33(5): 555-567. (in Chinese)
- [23] 庞朝云, 张逸轩. 甘肃中部地区飞机积冰的气象条件分析 [J]. *干旱气象*, 2008, 26(3): 53-56.  
PANG Chaoyun, ZHANG Yixuan. Weather conditions of aircraft icing in the middle part of Gansu Province [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2008, 26(3): 53-56. (in Chinese)
- [24] 王黎俊, 银燕, 李仑格, 等. 三江源地区秋季典型多层次状云系的飞机观测分析 [J]. *大气科学*, 2013, 37(5): 1038-1058.  
WANG Lijun, YIN Yan, LI Lunge, et al. Analyses on typical autumn multi-layer stratiform clouds over the Sanjiangyuan National Nature Reserve with airborne observations [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2013, 37(5): 1038-1058. (in Chinese)
- [25] 袁敏, 黄敏松, 段炼. 一次飞机积冰环境中的云微物理特征 [J]. *气象科技*, 2018, 46(1): 170-177.  
YUAN Min, HUANG Minsong, DUAN Lian. A case study of microphysical properties in aircraft icing environment [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2018, 46(1): 170-177. (in Chinese)
- [26] 蔡兆鑫, 蔡森, 李培仁, 等. 华北地区一次气溶胶与浅积云微物理特性的飞机观测研究 [J]. *大气科学*, 2021, 45(2): 393-406.  
CAI Zhaoxin, CAI Miao, LI Peiren, et al. An in-situ case study on micro physical properties of aerosol and shallow cumulus clouds in north China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2021, 45(2): 393-406. (in Chinese)
- [27] 彭冲, 宋灿, 蔡森. 河南一次罕见飞机积冰过程云系宏观特性的综合观测 [J]. *大气科学*, 2023, 47(6): 1757-1769.  
PENG Chong, SONG Can, CAI Miao. Comprehensive observation of the cloud macro- and microstructures of a rare aircraft icing case in Henan Province [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2023, 47(6): 1757-1769. (in Chinese)
- [28] 郭学良, 付丹红, 郭欣, 等. 我国云降水物理飞机观测研究进展 [J]. *应用气象学报*, 2021, 32(6): 641-652.  
GUO Xueliang, FU Danhong, Guo Xin, et al. Advances in aircraft measurements of clouds and precipitation in China [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2021, 32(6): 641-652. (in Chinese)
- [29] CAO Yihua, TAN Wenyuan, WU Zhenlong. Aircraft icing: an ongoing threat to aviation safety [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2018, 75: 353-385.
- [30] BACHALO W D, SIPPERLEY C, PAYNE G. Aircraft icing research: challenges in cloud simulation and characterization [C] // 23rd Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems. Ventura, CA: ILASS, 2011: 1-19.
- [31] JECK R. A workable, aircraft-specific icing severity scheme

- [C]// 36th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Washington, D. C. : AIAA, 1998: 94-117.
- [32] 张强, 范东方, 刘旭华. 自然结冰试飞成功的影响因素研究[J]. 航空科学技术, 2013(3): 43-45.  
ZHANG Qiang, FAN Dongfang, LIU Xuhua. A study on key factors to success of natural icing flight test[J]. Aeronautical Science and Technology, 2013(3): 43-45. (in Chinese)
- [33] WHALEN E, BRAGG M B. Aircraft characterization in icing using flight test data[J]. Journal of Aircraft, 2005, 42(3): 792-794.
- [34] POTAPCZUK M G. Aircraft icing research at NASA Glenn Research Center[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2013, 26(2): 260-276.
- [35] DEILER C. Comparison of flight characteristics of two different airplanes and ice configurations [J]. Journal of Aircraft, 2020, 57(5): 995-1000.
- [36] JORDAN J L, PLATZ S J, SCHINSTOCK W C. Flight test report of the NASA icing research airplane: performance, stability, and control after flight through natural icing conditions[R]. Cleveland, Ohio: NASA, 1986.
- [37] CATARELLA R A, PARKIN D C, ROGOWIC Z J. Icing flight tests in piper malibu N77DE [R]. USA: SAE, 1996.
- [38] BARTLETT C. Icing scaling considerations for aircraft engine testing[C]// 26th Aerospace Sciences Meeting. Reno, NV, USA: AIAA, 1988: 202-213.
- [39] RATVASKY T P, VANZANTE J F, SIM A. NASA/FAA tailplane icing program: flight test report [R]. Cleveland, Ohio: NASA, 2000.
- [40] SHAW R, RICHTER G. The UH-1H helicopter icing flight test program—an overview [C]// 23rd Aerospace Sciences Meeting. USA: AIAA, 1985: 338-342.
- [41] GRIFFITHS D. CH148 icing flight test performance data correlation [J]. SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility, 2019, 2(1): 216-226.
- [42] 杨新亮. ARJ21-700 飞机机翼防冰系统自然结冰试飞方法 [J]. 飞行力学, 2014(5): 460-463.  
YANG Xinliang. ARJ21-700 aircraft WAI natural icing flight test approach [J]. Flight Dynamics, 2014(5): 460-463. (in Chinese)
- [43] OLESKIW M M. A review of 65 years of aircraft in-flight icing research at NRC [J]. Canadian Aeronautics and Space Journal, 2001, 47(3): 259-268.
- [44] 中国民用航空局. 运输类飞机适航标准: CCAR-25-R4 [S]. 北京: 中国民用航空局, 2011.  
Civil Aviation Administration of China. Airworthiness standard of transport aircraft: CCAR-25-R4 [S]. Beijing: CAAC, 2011. (in Chinese)
- [45] 倪洪波, 李佰平, 李静, 等. 国内飞机自然结冰潜势的时空分布状况研究 [J]. 气动研究与试验, 2023(1): 89-101.  
NI Hongbo, LI Baiping, LI Jing, et al. Study on temporal and spatial distribution of aircraft natural icing potential in China [J]. Aerodynamic Research & Experiment, 2023(1): 89-101. (in Chinese)

(编辑:马文静)

(上接第129页)

- DONG Peng, WANG Yong. Research and establishing on design assurance system of civil aircraft [J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2016(5): 57-58. (in Chinese)
- [10] 中国民用航空局. 型号合格审定程序: AP-21-AA-2022-11 [S]. 北京: 中国民用航空局, 2022.  
CAAC. Type certificate procedure: AP-21-AA-2022-11 [S]. Beijing: CAAC, 2022. (in Chinese)
- [11] 中国民用航空适航审定中心. 设计保证系统审查模式的相关说明: CTN-21-004-R0 [R]. 北京: 中国民用航空适航审定中心, 2021.  
CAAC Airworthiness Certification Center. Explanation of the design assurance system review methods: CTN-21-004-R0 [R]. Beijing: CAAC Airworthiness Certification Center, 2021. (in Chinese)
- [12] 中国民用航空局. 民航局适航司关于改进通用航空适航审定政策的通知: 民航适发[2018]2号 [S]. 北京: 中国民用航空局, 2018.  
CAAC. Notice of the airworthiness department of the civil aviation administration of china on improving the airworthiness certificate policy for general aviation: AA[2018]No. 2 [S]. Beijing: CAAC, 2018. (in Chinese)
- [13] 张艳红. 民机设计保证系统内部监控管理 [J]. 科技创新导报, 2018(8): 183-184.  
ZHANG Yanhong. The internal monitoring and management of Civil aircraft design assurance system [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2018(8): 183-184. (in Chinese)
- [14] 贾少澎, 朱宁文, 谈心刚, 等. 设计保证体系建设和审查的若干专题研究之二: 设计保证体系建设研究 [J]. 民用飞机设计与研究, 2015(3): 3-6.  
JIA Shaopeng, ZHU Ningwen, TAN Xingang, et al. Design assurance system developing and audit: research on design assurance system construction [J]. Civil Aircraft Design & Research, 2015(3): 3-6. (in Chinese)
- [15] 符越, 郝莲, 李琳. 关于设计保证系统适航独立核查的思考 [J]. 民用飞机设计与研究, 2020(4): 1-5.  
FU Yue, HAO Lian, LI Lin. Thoughts on airworthiness independent verification of design assurance system [J]. Civil Aircraft Design & Research, 2020(4): 1-5. (in Chinese)

(编辑:丛艳娟)