

DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2018.01.013

人工模拟结冰飞行试验技术研究

Research on Artificial Icing Flight Test Technology

闫鹏庆 牛亚宏 / YAN Pengqing NIU Yahong

(中国飞行试验研究院试验机设计改装研究部, 西安 710089)

(Experimental Aircraft Design and Modification Institute of CFTE, Xi'an 710089, China)

摘要:

介绍了国内外人工模拟结冰飞行试验技术概况,基于对 FAA 民航适航条例关于结冰条件运行的要求及咨询通告推荐的符合性方法的全面了解,分析了人工模拟结冰飞行试验技术在飞机设计与验证中的应用需求,总结了人工模拟结冰飞行试验体系构建需要解决的关键技术,结合运-8 结冰喷水机的研制探讨了人工模拟结冰飞行试验的技术内涵。

关键词:人工模拟结冰;飞行试验;关键技术;技术内涵

中图分类号:V217

文献标识码:A

[Abstract] The artificial icing flight test technology at home and abroad was introduced. Based on comprehensive understanding of operating on icing conditions required in FAA airworthiness regulation and means recommended in advisory circular, requirements of artificial icing flight test technology were analyzed. Key technologies required to establish the structure of artificial icing flight test were summarized. The technology connotation of artificial icing flight test were studied by developing Y-8 airborne icing tanker.

[Keywords] artificial icing; flight test; key technology; technology connotation

0 引言

飞机发生结冰后,会影响其气动特性,导致飞行性能下降,飞行包线严重缩小,甚至酿成飞行事故^[1-3]。国外早在上世纪二三十年代就已针对飞机结冰开展了大量的研究工作,美国、加拿大、法国、前苏联等国家都开展了飞机结冰方面的研究,形成了关于结冰大气条件的明确要求,制定了相应的适航条例。针对结冰条件运行安全性的研究需求,建立了以模拟仿真计算、冰风洞试验及结冰飞行试验三位一体共同支撑的研究体系。

在国产大型运输机和大型客机项目的牵引下,国内高校和科研院所在飞机结冰数值计算与模拟分析方面开展了一些研究工作,冰风洞试验的研究也正在开展^[4-8]。但在结冰飞行试验领域,我们的能力严重不足,仅能依靠自然结冰飞行试验进行适航要求的符合性演示,ARJ21 飞机为了适航取证不得不远赴北美进行自然结冰试验。因此,开展人工

模拟结冰飞行试验技术研究,对于发展结冰飞行试验技术,提升我国军民机防/除冰设计和结冰环境适航验证能力具有现实意义。

1 应用需求

1.1 资料研究

1.1.1 适航条例中的防冰飞行验证要求

中国民用航空规章第 25 部运输类飞机适航标准中第 1419 条规定:“如果申请结冰条件下的飞行验证,飞机必须能在附录 C 确定的连续和间断的最大结冰状态下安全运行”^[9]。为了验证防冰分析结果,检验各种结冰异常情况,演示防冰系统及其部件的有效性,必须对飞机或其部件在各种运行形态和经测定的自然大气结冰条件下进行飞行试验,必要时应采用下列一种或几种方法进行验证:

- 1) 对部件或部件的模型进行实验室干燥空气试验或人工模拟结冰试验,或两者的组合;
- 2) 对整个防冰系统或单独对系统部件在干燥

空气中进行飞行试验;

3) 对飞机或飞机部件在测定的人工模拟结冰条件下进行飞行试验。

1.1.2 咨询通报 AC20-73A 的推荐方法

AC20-73A 系 FAA 咨询通报,描述了 14 CFR 23 部、25 部、27 部、29 部、33 部、35 部中有关防冰要求的符合性验证手段。内容包括防冰要求、验证程序、验证分析方法、验证试验方法等,给出了大量背景知识与成功经验等信息,以指导飞机、发动机、螺旋桨等型号合格申请人在产品防冰方面寻求局方认可。关于结冰适航条例的符合性验证试验,在 AC20-73A 之 8.2 节中给出了四种方法,分别是:干空气飞行试验、自然结冰飞行试验、人工模拟结冰飞行试验和冰风洞试验。针对人工模拟结冰飞行试验,文中指出^[10]:

1) 可以使用喷水机或试验机自带喷雾装置产生过冷水滴来模拟结冰条件,以验证结冰冲击范围、验证结冰冰型、测量表面换热系数、观察冰脱落影响等;

2) 试验前必须通过测试校准冰云水含量、均匀性及水滴直径分布;也可以用与冰云相关的喷雾系统参数(水/气压力、水流量、水温等)代替;

3) 固定翼飞机需满足在到达机场上空的最大连续结冰环境中安全等待 45 min;

4) 人工模拟结冰与自然结冰的水滴捕捉特性和冰型存在差异,试验应采用保守原则。

1.2 人工模拟结冰飞行试验及其在国外的应用

人工模拟结冰飞行试验可用于飞行结冰动力学研究,民机适航审定和军机型号合格鉴定中有关结冰条例及规范的符合性验证,包括:确定机翼、尾翼等表面的结冰撞击范围;研究冰脱落轨迹,评价冰脱落对试验飞行器的危害;验证有防护表面冰型计算预测分析结果;确定无防护表面、复杂流场区域的结冰情况;验证热防冰表面温度分析计算结果;评价防/除冰系统改进效果;评价空速管、风挡、进气口、螺旋桨桨叶等的热防冰能力等。

人工模拟结冰飞行试验的优点是:人工冰云环境不受地域、气候等因素限制,便于飞行试验的组织实施;冰云环境参数可控,便于通过试验设计进行课题研究;可重复进行试验,试验结论更可信;只在重点研究部位结冰,试验风险较小。

结冰喷水机或试验机喷雾装置是人工模拟结

冰飞行试验的必要平台。美国军方在 1958 年前后将一架 KC-135A 加油机改装成结冰喷水机 Airborne Icing Tanker(AIT),对 40 多个型号的军用飞机和民用飞机进行了人工模拟结冰飞行试验^[11],此后,美国还发展了 C-130、CH-47D 等平台作为结冰喷水机。德国、俄罗斯等国家也都拥有自己的人工喷水结冰试验能力。许多飞机制造商也改装了不同的喷水试验机开展相关试验并提供出租服务。

1.3 国内应用需求分析

14 CFR Part 25 Appendix C 的结冰包线是上世纪 40 年代在美国东北部海岸经过 28 000 n mile 的结冰气象环境飞行测量得出的结果,涵盖了 99% 的自然结冰情况,经现代测量验证其与自然界真实结冰条件具有很好的符合性,适航规范虽经多次修订,但结冰包线始终没有大变化。而在我国适合飞行包线要求的结冰飞行试验自然气象条件可遇不可求,因此处在民航业国际化与全球化的历史背景下,结冰环境的符合性验证是我国民机适航取证无法回避的技术壁垒。鉴于自然结冰试飞易受自然条件限制,应加强人工模拟结冰飞行试验技术研究,以此为手段,拓展研究飞机结冰大气物理规律,掌握结冰大气参数测量技术,促进飞机结冰数值模拟计算技术,掌握飞机防冰及除冰设计与验证技术。

2 人工模拟结冰飞行试验关键技术

2.1 试验平台方案

较为常见的人工模拟结冰飞行试验,一种是利用现有飞机或直升机作为平台,通过改装水/气系统、喷雾系统、控制系统及其它配套系统作为结冰喷水机;在空中低温环境下,喷水机喷出的水雾迅速形成过冷水滴为其后方编队飞行的结冰试验机提供人工冰云试验环境。另一种是在试验机上改装喷雾装置,为自身特定部位提供人工冰云试验环境,其缺点是喷出的水雾可能来不及形成过冷水滴。

本文中的人工模拟结冰飞行试验,采用结冰喷水机为后方编队人工制造冰云的方案。试验过程中,结冰喷水机上的操作员可以实时控制,从而实现冰云参数调节和冰云的精确定位;结冰试验机应加装结冰气象参数测试设备以校准冰云参数。

2.2 人造冰云技术

适航规范规定的结冰包线要求液态水含量(LWC)的典型范围为 $0.1 \text{ g/m}^3 \sim 2.5 \text{ g/m}^3$,平均水

滴直径(MVD)一般在 $15\ \mu\text{m} \sim 50\ \mu\text{m}$ 之间,超过 $100\ \mu\text{m}$ 的水滴大多会沉降下来,特殊情况下,也会形成过冷大水滴悬浮在空中。为得到符合规定的人造冰云,需利用飞机或直升机平台载运液态水升空,通过喷水雾化系统增加后方空气中的液态水含量并满足水滴直径要求,水雾在高空低温环境下形成过冷水滴。人造冰云物理参数应能覆盖14 CFR Part 25 Appendix C 结冰包线,同时要考虑过冷大水滴(SLD)情况;喷头阵面尺寸应足够大,所产生的冰云尺寸应满足特定试验对象的覆盖要求;载水量足够大,以提高试验效率;气水系统容量充足,流量、压力可调。

喷水机人造冰云的液态水含量与飞行速度直接相关,喷水系统水流量不变,飞行速度越大,冰云液态水含量越小。因此,采用比最小机动速度略高的速度飞行,有利于满足适航审定要求的保守试验条件;而为了验证冰云最大撞击范围,还必须兼顾高速大水滴试验情况。

2.3 冰云测试技术

结冰飞行试验必须测试冰云液态水含量(LWC)和平均水滴直径(MVD)等物理参数,需要高精度的结冰气象参数测试传感器。国内没有满足自然结冰适航验证要求的测试设备,不得不采用进口测试系统进行试验,在传感器使用维护、校准等方面存在较多技术问题,系统引进和使用成本很高。为建立人工模拟结冰试验技术的完整体系,建议开展国产结冰气象参数测试系统研制,利用喷水机人造冰云环境开展传感器校准和系统鉴定,全面提升模拟结冰飞行试验能力。

2.4 编队试验技术

人工模拟结冰飞行试验需要结冰试验机紧跟在结冰喷水机后方的冰云尾流中长时间编队飞行,结冰试验机与喷头之间的距离在 $50\ \text{m}$ 左右,以保证水滴过冷形成冰云,并具有较高的液态水含量。相对于空中加油,人工模拟结冰飞行试验双机编队难度较低。为了保证编队飞行安全,喷水机机尾应加装激光测距装置并设置目视参考图案,配备机间/机内通话系统;在飞行组织上应制定任务编队飞行策略,确保指挥协调一致,任务飞行安全高效。

3 人工模拟结冰飞行试验初探

3.1 运8 结冰喷水机研制

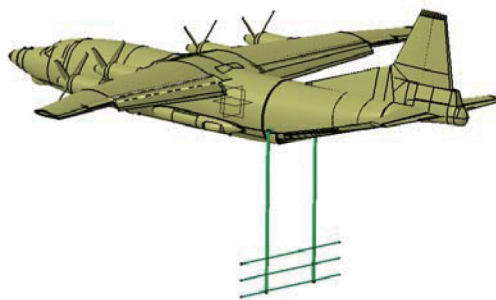
运8 结冰喷水机的改装设计借鉴了美国军方以

KC-135 加油机为平台改装的AIT(Airborne Icing Tanker)的飞桁方案,在机身尾部设置可收放的单自由度桁杆,桁杆后端加装 $1.3\ \text{m} \times 1.1\ \text{m}$ 的栅状喷头,并设置操纵小翼配合绞车实现桁杆收放。供水系统总储水量 $2\ 400\ \text{kg}$,经电动泵增压供给喷头上的喷嘴,同时从二号发动机引出的增压空气经压力与温度调节后供给喷头加温和喷嘴雾化。通过总体方案设计、桁杆系统与气水系统研制、喷水任务系统机上集成改装、地面试验、空中检飞试验等,完成了国内首架结冰喷水机的研制。

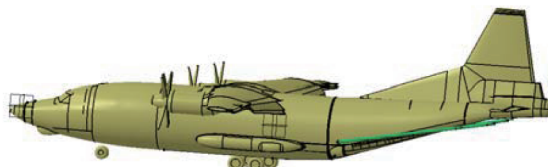
2015年12月28日,运8 结冰喷水机进行了空中演示试验,全面检查并验证喷水任务系统功能、环境适应性和可靠性。试验中利用小翼气动力使桁杆下放到 50° ,气水系统喷水正常,在飞机后下方形成人造冰云尾流。试验结果和数据分析表明,运8 结冰喷水机总体设计合理,桁杆气动与结构/机构、控制部分协调工作,基本功能/性能符合设计要求;气水系统压力流量可调、工作可靠。

3.2 结冰喷水机改进建议

运-8 结冰喷水机验证了机尾单自由度喷水桁杆方案和气水系统改装方案,但因喷头尺寸仅 $1.3\ \text{m} \times 1.1\ \text{m}$,人造冰云范围较小,开展试验局限性较大且效率不高。为此提出改进的总体设计方案,采用如图2所示的龙门架式喷水桁杆装置。机身



a) 龙门架式喷水桁杆放下时



b) 龙门架式喷水桁杆收起时

图2 运-8 结冰喷水机改进设计方案

内部设置扭力管,龙门架与扭力管连接并用液压缸驱动;龙门架收起时两侧框架位于后机身两侧,喷头紧贴后机身下壁板;龙门架放下时喷头远离机身。应急情况可通过爆炸装置切断并抛弃龙门架。采用龙门架方案,喷头尺寸可达到 $10\text{ m} \times 2\text{ m}$,冰云范围可以满足小型飞机全机结冰试验要求。

3.3 技术内涵

通过对国外相关技术的研究,结合运 8 结冰喷水机平台建设实践,归纳总结了人工模拟结冰飞行试验与试验条件建设的设计准则和技术要点,为进一步开展人工模拟结冰试验奠定基础。

3.3.1 喷水机平台选型

国外结冰喷水机最早采用 KC-135 硬式加油机改装龙桁式喷水装置的方案,后来发展了众多通用飞机平台改装的固定式外置喷水装置,为扩大人造冰云范围又发展了直升机平台可收放龙门架式喷水机。结合国内的应用需求和平台资源条件,平台选型应考虑以下要求:

- 1) 喷水机平台宜选用成熟通用飞行平台,如运 8、运 7、ARJ21 等;
- 2) 平台飞行包线适宜喷水结冰试验编队飞行,高度 $0 \sim 7\ 000\text{ m}$,速度包线范围大;
- 3) 平台载水量及燃油量满足连续最大结冰条件下的有效试验时间不小于 45 min ;
- 4) 平台经喷水系统改装后具有安全的操稳特性和适宜的使用维护性能。

3.3.2 人造冰云参数

- 1) 人造冰云范围大、能较好覆盖试验对象目标区域;
- 2) 人造冰云均匀性好,较好模拟自然冰云;
- 3) 人造冰云参数可调,能覆盖适航条例规定的结冰包线,并兼顾 SLD 情况;
- 4) 能够实时测量人造冰云参数,或根据喷水机气水系统参数与冰云参数的关系校准试验条件。

3.3.3 试验安全性

- 1) 引取发动机增压热空气防止喷头结冰危及后方试验机,同时可用于喷嘴雾化;
- 2) 水消耗不应引起载机重心急剧变化和超限;进行喷水装置气动优化设计,减小对平台的气动特性影响;
- 3) 收放式喷水装置应采取故障安全模式保证可靠收起,以免危及平台飞行安全;
- 4) 设置试验操作员,负责系统使用、状态监控

和应急情况处理;

5) 完善编队飞行软硬件设计,如危险接近告警、进入与退出程序等,以确保编队飞行安全;

6) 按照 GJB900A 开展安全性管理,确定项目安全性设计要求,进行安全性设计分析与验证评估。

4 结论

结冰适航要求是国产大飞机翱翔蓝天必须跨越的技术门槛,国内无论是结冰试验条件还是适航符合性验证技术均与航空发达国家差距较大。通过对人造冰云技术、结冰大气参数测量技术和编队飞行试验技术等三项关键技术的全面研究,构建功能完善、技术先进、可靠安全的人工模拟结冰飞行试验体系,是摆脱结冰试飞靠天吃饭的被动局面的必由之路。

参考文献:

- [1] 李哲,徐浩军,薛源,王小龙. 结冰对飞机飞行安全的影响机理与防护研究[J]. 飞行力学, 2016, 34(4): 10-14.
- [2] CEBECI T, KAFYEKE F. Aircraft Icing[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2003, 34:11-21.
- [3] 吴玉梅. 机翼积冰对飞行安全的影响[D]. 南京:南京航空航天大学, 2012: 2-4.
- [4] 李雅静,贾晓鹏,焦岗. 结冰对飞行特性的影响及仿真研究[J]. 计算机仿真, 2013, 30(12):40-44.
- [5] 周莉,徐浩军,闵桂龙,林敏. 结冰对飞机动态响应特性的影响[J]. 飞行力学, 2011, 29(4):32-36.
- [6] 白峰,徐超军,张强. 民机飞行结冰参数的模拟与校准[J]. 民用飞机设计与研究, 2015, (4):73-78.
- [7] 张雪苹. 飞机结冰适航审定与冰风洞试验方法[D]. 南京:南京航空航天大学, 2010: 30-49.
- [8] 易贤,朱国林,王开春,桂业伟. 结冰风洞试验水滴直径选取方法[J]. 航空学报, 2010, 31(5):817-822.
- [9] 中国民用航空局. CCAR-25-R4 运输类飞机适航标准[S]. 北京:中国民用航空局, 2011.
- [10] FAA. AC-73A, Airplane Ice Protection[S]. Washington: Federal Aviation Administration, 2006.
- [11] SAE. ARP5904, Airborne Icing Tankers[S]. Washington: Society of Automotive Engineers, 2007.

作者简介

闫鹏庆 男,硕士,助理工程师。主要研究方向:试验机改装设计; E-mail: ypq901001@163.com

牛亚宏 男,本科,研究员。主要研究方向:试验机改装设计; E-mail: niuyahong@yeah.net