

# 直升机极寒环境适应性试飞的挑战与思考

艾剑波, 吴建国, 崔腾飞, 宋健

(中国直升机设计研究所 标准材料部, 江西 景德镇 333000)

**摘要:** 通过分析全球高寒地区冲突态势以及引发的军备竞争, 指出直升机在高寒地区部署服役的迫切需求。分析了包括温度、降雪、大风、高纬度等极寒环境因素对直升机的影响, 以及开展极寒环境适应性验证的必要性, 总结了高寒环境适应性试飞场地的各自的优缺点。在此基础上, 系统地阐述了直升机高寒环境适应性试飞的科目、影响、意义, 以及在直升机高寒试飞中的多发故障。最后, 对当前直升机与极寒环境使用需求存在的差距进行了思考和分析, 指出目前极寒环境适应性试飞存在的不足, 提出了借用气候环境实验室、无人机、仿真等技术在高寒试飞中的应用, 对有效开展直升机极寒环境适应性设计和验证工作具有一定指导意义。

**关键词:** 直升机; 极寒环境; 环境损伤; 高寒试飞; 试飞保障

**中图分类号:** V216

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2025)02-0031-09

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2025.02.004

## Challenges and Reflections on Helicopters Test Flights in Extremely Cold Environments

AI Jianbo, WU Jianguo, CUI Tengfei, SONG jian

(Integrated Technology Research Department, China Helicopter Research and Development Institute, Jiangxi Jingdezhen 333000, China)

**ABSTRACT:** By analyzing the global conflict situation in high-altitude regions and the resulting arms competition, it is pointed out that there is an urgent need for helicopters to be deployed and put into service in high-altitude regions. The impact of extreme cold environmental factors such as temperature, snowfall, strong winds, and high latitudes on helicopters, as well as the necessity of conducting adaptability verification in extreme cold environments were analyzed. The respective advantages and disadvantages of high-altitude environment adaptability test flight sites were summarized. On this basis, the subjects, impacts, significance, and multiple failures of helicopter high-altitude environment adaptability test flights were elaborated systematically. Finally, the gap between the current demand for helicopters and extreme cold environments was considered and analyzed, and the shortcomings of adaptive test flights in extreme cold environments were pointed out. The application of climate environment laboratory, unmanned aerial vehicles (UAV), simulation and other technologies in extreme cold test flights was proposed. The study has certain guiding significance for effectively carrying out helicopter extreme cold environment adaptive design and verification work.

**KEY WORDS:** helicopter; extreme cold environment; environmental damage; high-altitude test flight; test flight guarantee

收稿日期: 2024-09-17; 修订日期: 2024-11-07

Received: 2024-09-17; Revised: 2024-11-07

引文格式: 艾剑波, 吴建国, 崔腾飞, 等. 直升机极寒环境适应性试飞的挑战与思考[J]. 装备环境工程, 2025, 22(2): 31-39.

AI Jianbo, WU Jianguo, CUI Tengfei, et al. Challenges and Reflections on Helicopters Test Flights in Extremely Cold Environments[J]. Equipment Environmental Engineering, 2025, 22(2): 31-39.

南北极是地球最极端的地区,长期处在世界经济的边缘地带。近几十年来,全球气候变暖,导致夏季冰层减少,北极开始具备独特的开发价值,吸引了许多国家争相投入开发。有领土或领海在北极圈以北的国家称为北极国家,即加拿大、丹麦、芬兰、冰岛、挪威、瑞典、美国和俄罗斯。从2014年乌克兰危机到2022年俄乌冲突,国际地缘政治和经济发生了巨大变化,北极开发对俄罗斯具有了特别的战略意义<sup>[1]</sup>。从地缘经济角度看,2013年中国提出的“一带一路”国际合作倡议与俄罗斯北极开发有直接关联,在日益复杂的国际政治、经济和军事环境下,这种关联显得尤为重要。俄罗斯是中国重要的北极开发合作伙伴,了解新形势下俄罗斯的北极政策对未来中俄共同制定北极战略至关重要<sup>[2-3]</sup>。

直升机由于使用其使用特点,如无起降场地限制、可悬停、航速低,尤其是低空飞行时间长等,在应急救援、人员/装备运输、警用搜索、巡逻、灭火、医疗救护等众多领域均发挥着重要的作用<sup>[4-6]</sup>。再加上我国幅员辽阔,利益攸关区涵盖了海洋、内陆、沙漠、高原、极寒等各种气候特征,尤其是随着科考活动日益频繁,直升机每次都会随科考船到南极、北极执行任务,主要保障人员物资运输,使其每年大概有近1/3时间在极地低温环境下,而极地的极寒环境下直升机的安全运行是极大的挑战<sup>[7]</sup>。随着热点冲突地区的北移,直升机作为重要的航空装备,是保障我国地区利益的重要手段,其环境适应性能力更是保证所有活动安全运行的前提<sup>[8-9]</sup>。

各国军队和民航局组织也毫不动摇地把飞行安

全放在首位,因为“安全”是影响航空装备任务完成的头等大事<sup>[10]</sup>。在一型直升机设计时,会针对其可能遭遇的环境展开针对性设计,而如何有效验证所设计结果,证明其具备抵御恶劣环境影响的能力,进而保证长期的飞行安全,是直升机整个研制阶段必须要经历的过程<sup>[11-13]</sup>。一架直升机设计完成后,需要经过严格的试飞,才能证明其已具备规定的各项能力<sup>[14-16]</sup>。

本文从直升机极寒地区使用需求为出发点,分析了极寒环境条件对直升机的影响以及试飞的意义。在此基础上,进一步阐述了极寒试飞的必要性,继而从试飞场地、试飞科目、试飞保障等角度出发,介绍了极寒试飞的总体规划,并以某型直升机在极寒环境试飞为例,分析了出现的故障。最终,指出了目前直升机极寒环境试飞的困难,并提出了针对性的解决方法。

## 1 直升机极寒环境试飞的意义

### 1.1 使用背景

目前,世界各国对于南北极越来越关注。为争夺极地资源,世界上各大国在极地地区纷纷部署军事力量,如俄罗斯的米-8AMTsh-VA 极地直升机,美国的CH-47、MH-60等直升机,如图1所示。随着我国积极参与极地科考活动,直升机作为重要的保障装备,也承担了越来越重要的角色,在船-船、船-站、站-站间的人员/货物运输中发挥着重要的作用,如图2所示。后续为了继续维护我国在极地活动的安全和利



图1 米-8 AMTsh-VA 极地直升机和直-9 直升机  
Fig.1 Mi-AMTSH VA polar helicopter and Z-9 helicopter



图2 直升机极地科考活动任务  
Fig.2 Polar scientific expedition tasks of helicopters: a) ship to ship transportation; b) ship to station transportation

益,也为了应对全球化的挑战,需要直升机能适应更加恶劣的气候条件,能满足各种极端环境的使用需求。这就对直升机的环境适应性也提出了更高的要求,以保证直升机在严酷环境中保持其飞行和任务使命,并在服役期内具有持续稳定的环境适应性,保持优良的出勤率和任务效能。

## 1.2 极寒地区环境对直升机的影响

2020年2月14日,俄罗斯亚马尔-涅涅茨自治区紧急情况总局发布公告说,当天俄罗斯的一架米-8直升机在该自治区境内实施硬着陆,导致机上2名机组人员当场死亡。2011年12月9日,极地科考任务随舰配备的“雪鹰”号卡-32型直升机在执行任务空载返回“雪龙”号途中,在南极冰山间的海冰区上空突然失控,迫降未成功,该直升机坠落海冰上损毁,幸运的是机上2名机组人员安全脱险,并被及时营救回“雪龙”船,其中一名有轻度擦伤。可见,极寒环境会对直升机产生很多不利的影响,引发很多故障,甚至导致安全事故<sup>[17]</sup>。经多型直升机极寒环境试飞总结发现,寒冷环境对直升机的影响主要体现在以下几个方面。

1) 低温。低温环境条件对直升机的影响主要集中在润滑系统和蓄电池起动系统性能下降,如随着温度的降低,液压油的运动黏度增加越快,使得液压系统的压力损失增大,液压泵的吸油容易产生气穴现象,影响液压泵的使用寿命。液压油黏度过大会影响系统输出流量,降低系统效率,造成动力与传动系统磨损严重、使用寿命下降<sup>[18]</sup>。蓄电池在低温条件下容量减小,影响机上供电和发动机启动,经常导致直升机起动失败的情况,严重影响直升机在这种气温环境下执行飞行任务的能力<sup>[19]</sup>。另外,低温的另一个重要影响体现在对材料性能以及可靠性和耐久性的影响,环境损伤会显著降低结构材料的疲劳性能,缩短其使用寿命<sup>[20]</sup>。对某些橡胶件,如弹性轴承、密封圈、隔振垫等,在极寒环境下,弹性受温度因素影响较大,低温时橡胶材料变“硬”,弹性逐步降低,影响橡胶密的压缩变形能力<sup>[21-22]</sup>。

2) 冰雪。极寒地区往经常出现大量的降雪和结冰,当冰雪附着在桨叶上时,对既是直升机的操纵面也是直升机的升力面的旋翼系统影响十分巨大,会改变桨叶原有的翼型剖面,破坏旋翼的空气动力特性,使旋翼桨叶的气动特性降低,加剧直升机的振动,危及飞行安全<sup>[23]</sup>。有些坚硬的冰颗粒,还可能在起降过程中卷起地面的积雪或积冰,打伤机体。冰雪颗粒还会影响发动机性能,如大颗粒会造成叶片损伤,在发动机进气道、压气机等部位结冰,造成进气量减少和有效推力降低等。冰雪天气不仅会影响直升机本身,对其场地、人员也有较大影响。如在风雪天气中在起降时,跑道可能会结冰,使直升机轮胎与地面的摩擦

力减小,影响直升机起降和停放<sup>[24]</sup>。还会严重影响飞行员的视野,尤其是编队飞行时,不良目视条件还可能影响编队飞行安全。

3) 大风。在极寒地区,除了低温/冰雪以外,往往还伴随着大风天气。直升机在飞行过程中如遭遇大风,将会将稳定的气流扰乱,使气流的方向及速度发生快速变化,严重影响其飞行的稳定性,降低飞行安全<sup>[25-26]</sup>。在大风天气中,对直升机安全停放也有着很大的影响,尤其是在临时起降场,由于没有机库等保障条件而选择露天停放时,大风条件会影响停放安全,严重时可能造成直升机倾倒。

4) 高纬度。当直升机在高纬度使用时,容易受到极地地区磁场分布不等、天文和气象异常的影响,使得利用几何位置确定方法的导航手段,在高纬度区域无法正常工作。因此,在极地地区恶劣的气象条件(例如风、能见度和气温等)、太阳风暴以及地理环境等因素的影响下,使得不易受环境因素影响的惯性导航系统成为各类运载体实现极区航行优先选项<sup>[27]</sup>。在高纬度区域,尤其是要到达极点附近时,经线快速汇聚,并最终在两极点处集合,使得以地理北方向为参考航向的导航方式建立航向变得更加困难,甚至没有意义,同时利用常规的经纬度表示极区地理位置信息也会存在计算误差<sup>[28]</sup>。

## 1.3 主要考核内容

为了保证直升机在极寒地区的安全使用,会开展一系列的设计。设计并生产后,需要对直升机的性能进行考核评价,而评价直升机极寒环境适应性最直接、最有效的手段,是直接到寒区进行试飞验证。积极开展寒区环境试飞,及时解决极寒环境试飞过程中发现的问题,摸清装备性能底数,是保证直升机极寒环境使用能力的重要一环,也是应对极地军备竞争的必要手段,更是保证直升机能拉得出、飞得起、打得赢的必要保证。总体来看,极寒环境试飞主要包括2个方面:

1) 地面试验。地面试验主要考核的是直升机地面启动能力,以及环控加温、导航对准等功能,是验证直升机低温环境适应性能力的重要环节。

2) 空中试验。空中试验主要考核的是直升机在寒冷环境下的飞行性能、品质等,以及燃油、液压、滑油、任务等系统工作是否正常。最重要的是考核防除冰、环控系统的低温能力,是考核直升机低温环境适应性的关键步骤。

## 2 直升机极寒环境试飞的规划

### 2.1 试飞场地的选择

在美国 MIL-810 标准中,其根据温度高低,将全球低温区域分为3个类型,即基本冷区、冷区、寒冷

区<sup>[29]</sup>。我国未临近南极和北极地区，也没有严格意义上的寒冷区，大部分地区被热带、亚热带、温带季风气候、大陆季风气候和高山高原气候所覆盖，极端气候少，总体气候较为温和<sup>[30]</sup>。这给极寒试飞场地的选择带来了困难，如何既尽可能贴近极寒区环境特征，

又能实现空域、机组、人员、设备、备件、场站的有效保障，就需要综合决策。

在以往直升机极寒环境试飞时，会依托根河、漠河、海拉尔等三地，选择某一处来作为试飞场地。根河、漠河、海拉尔气候特点和机场保障情况见表1。

表1 寒区试飞场地特点  
Tab.1 Characteristics of test flight sites in cold regions

	地理位置	气候特点	保障条件
根河	地处大兴安岭北段西坡，极寒温度低，有“中国冷极”之称。根河机场为一座通用机场，可起降中小型通用飞机，场站本身保证能力齐全	年平均气温-5.3℃，极端低温-58℃，气温年较差47.4℃，年封冻期210d以上	进出港航班很少，对试飞影响小。但是远离市区，地处偏僻、交通不便，人员、备件等资源保障有一定困难
漠河	地处黑龙江省北部，寒温带大陆性季风气候，低温时间长。漠河古莲机场为一座4C级机场，可起降中型客机，场站本身保证能力齐全	平均气温在-5.5℃，最低气温-53℃。8个月平均气温0℃以下，气温年较差49.3℃，平均无霜期只有86.2d	进出港航班较少，对试飞影响较小。离市区较近，虽然漠河地处偏僻，但是资源保障也较为方便
海拉尔	位于内蒙古自治区东北部，中温带半湿润半干旱大陆性季风气候。呼伦贝尔东山机场为4D级国际支线机场，可起降大中型客机，场站本身保证能力齐全	冬季严寒漫长，地面积雪时间长	进出港航班较多，对试飞影响较大。离市区较近，交通便捷，在三座机场中资源保障也最为方便

在以往直升机极寒环境试飞过程中，2023年AR-500C直升机试飞在根河地区开展过低温试飞，天气预报记录当年最低温度达到-53℃。2020年，AC311A直升机在漠河地区开展过低温环境试飞，天气预报记录有当年最低温度达到-44.3℃。2010年，AC313直升机在海拉尔开展过低温环境试飞，

天气预报记录有当年最低温度达到-43℃。虽然直升机所经历的最低温度，与飞行时段、飞行时间、飞行区域、飞行地点均有一定关系，并不完全与天气预报的温度一致，不过从在这些地区的试飞的结果来看，取得的成果基本令人满意。直升机低温试飞情况如图3所示。



a AR-500C 无人机根河试飞



b AC-311A 漠河试飞

图3 直升机低温试飞

Fig.3 Helicopter low-temperature test flight: a) AR-500C UAV test flight in Genhe; b) AC311A test flight in Mohe

## 2.2 试飞科目的选择

一般来讲，一架飞机的诞生，要经过论证、设计、试制和试飞4个周期，而试飞在所有环节中周期最长、要求最多、风险最大。试飞是在真实条件下进行试验的过程，在新机试飞前，没有任何飞行测试数据，几乎是一张白纸。试飞就是摸清新机的极限在哪里，为新机填上各项性能数据。但是，并不是所有指标均需要在寒区完成验证，考虑到各方面综合因素，真正在寒区开展试飞验证的只有一部分受寒区环境影响

大的科目。主要包括：在地面上开展APU启动试验、蓄电池供电试验、环控加温试验、全机冷浸透启动试验、导航对准试验和防除冰系统试验。主要是考虑直升机在寒区的启动能力，因为经历低温环境后，直升机能否正常启动，具体见表2。

在空中开展飞行性能、飞行品质、动力系统、航电系统、燃油系统、液压/滑油系统、防除冰系统试验，除了考虑晴朗天气飞行外，还要考虑中雪、扬雪条件。这主要是考虑直升机在寒区的能否正常飞行、

表 2 各项地面试验目的及意义  
Tab.2 Objectives and significance of various ground tests

序号	试验项目	试验目的/意义
1	APU 启动试验	APU 主要用来为向直升机提供独立地供电和压缩空气, 从而推动主发动机启动。而 APU 启动试验, 则是为了验证 APU 低温环境下起动的可靠性。是验证直升机在低温环境启动能力的重要环节
2	APU 启动过程中蓄电池供电功能试验	蓄电池主要用来保证外电源断开的情况下, APU 启动和机上供电正常。而 APU 启动试验, 则是为了验证低温环境下, 蓄电池在 APU 启动过程中的供电是否稳定、机上用电设备工作是否稳定
3	蓄电池应急供电试验	主要是考核蓄电池应急供电能力。在仅有蓄电池应急供电时, 保证机上允许工作的用电设备工作正常。是验证蓄电池在低温环境下的供电能力重要步骤
4	环控加温地面试验	主要是考核加温系统在高寒环境下在地面的加温性能。主要是 APU 启动后, 从 APU 引入热空气, 为驾驶舱提供热风, 是保证驾驶员能够完成后续启动/驾驶操作重要步骤
5	发动机冷浸透启动试验	考核发动机在高寒冷浸透条件下的启动能力。直升机在寒冷天气长时间停放后, 能否直接启动发动机, 是关系到直升机实际作战的重要能力
6	组合导航系统陆基对准试验	考核组合导航系统的正常罗经对准、快速对准功能。组合导航是否准确, 不仅关系到直升机后续执行任务能否准确到位实施, 更是影响飞行安全的重要功能

正常执行任务, 具体见表 3。由于遭遇自认结冰环境条件极为苛刻, 因此直升机往往还借助喷洒塔, 开展防除冰试验。喷洒塔可以人工模拟结冰环境, 直升机悬停在喷洒范围内, 通过上部安装的水雾喷雾阵列喷出水雾模拟结冰云, 为直升机营造结冰环境, 考核直升机旋翼系统的防除冰能力。直升机寒区环境试飞过程中暴露的问题主要集中在低温启动可靠性有所降低, 电气设备可靠性有所降低, 少部分非金属构件性能有所降低等。

## 2.3 试飞保障的要求

试飞保障, 是为了保障新机试飞工作顺利开展而做的各项工作。通常来说, 试飞保障报考人员、物资、备件、场站、机上改装等组成。需要随机到场的保障设备主要包括: 电源车、加热车、工作梯/工作车、维修安全带、吊具、千斤顶、牵引杆、布罩、轮挡、系留装置、各设备的设备检测仪、传感器、控制器、油气填充设备、拆胎器、起落架伸缩限制器等, 还有

表 3 各项空中试验目的及意义  
Tab.3 Objectives and significance of various aerial tests

序号	试验项目	试验目的/意义
1	飞行性能试飞	主要为了考核直升机在寒冷天气下的飞行性能。在寒冷天气中, 能否保持飞行速度、高度、操纵等能力, 保证飞行平稳、性能降低不降低
2	飞行品质试飞	主要为了考核直升机高寒环境下的悬停低速平衡特性。在寒冷天气中, 飞过程中是否能准确、稳定地控制直升机, 飞行品质满足等级要求
3	动力系统寒冷环境试飞	主要为了考核直升机动力装置在高寒环境下能否正常工作。在寒冷天气中, 飞过程中动力系统在直升机悬停、平飞、爬升及机动过程中能否为直升机提供所需的动力, 是保证直升机飞行安全的重要能力
4	燃油系统寒冷环境试飞	主要为了考核直升机燃油系统在高寒环境下能否正常工作。在寒冷天气中, 飞过程中动力系统在直升机悬停、平飞、爬升及机动过程中能否为直升机动力提供所需的燃料, 供油泵、增压泵正常工作, 油路是否漏油, 是保证直升机飞行安全的重要能力
5	液压、滑油系统寒冷环境试飞	主要为了考核直升机液压、滑油系统在高寒环境下能否正常工作。在寒冷天气中, 直升机悬停、平飞、爬升及机动过程中液压系统能向飞行控制系统主舵机提供操纵动力源。传动、动力滑油系统工作正常, 无泄漏、超温。是保证直升机操纵和运转的重要能力
6	风挡防冰功能、环控加温试飞	主要为了考核直升机防冰功能能否正常。结冰环境下风挡玻璃不出现结冰, 保证飞行员视野。直升机通风加温系统的加温性能是否满足要求。在寒冷环境下, 通过 APU 引气加温、发动机引气加温, 为座舱加温, 保证驾驶舱和客舱温度
7	防除冰系统干冷空气、喷洒塔试飞	主要为了考核直升机旋翼、尾桨、发动机进气道、风挡防除冰系统功能是否正常, 全机各系统工作是否正常, 振动振动是否变化。是保证直升机在结冰环境下安全飞行的重要能力
8	中雪、扬雪环境试飞	主要为了考核直升机在中雪、扬雪环境下能否正常工作。降雪会对座舱视野有一定影响, 会在进气道、旋翼、尾桨、风挡或其他排气孔积雪, 影响飞行性能

必要的备件,以便保证直升机正常。还有机场本身的保障准备,如地勤、空管、气象、电/气/油料等,因此在试飞场地选择时,保障是否方便,也是一项重要的考虑因素。

### 3 直升机极寒环境试飞的思考

从直升机前期高寒试飞情况来看,取得了一定的成果,也暴露出一些问题。其中最大的问题有2个方面:一方面是相比于极寒地区,国内地区温度相对较高,极端天气少。例如一般极寒地区低温在 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,而在国内试飞场等地大部分时间仅有 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,存在一定的差距。国内试飞场在低温条件下强烈的风切变较少,而极寒地区的风切变更为剧烈。在极寒地区,直升机的起降场地一般是积雪地面,甚至是冰面,而在国内试飞场均为铺装的机场跑道。另一方面,试飞期间天气不可控,遭遇什么样的天气是随

机的,可能在直升机飞行时,所遭遇的环境不是预期的;或者因为各种原因,试飞准备时间延长而错过窗口时间;或者突然的气候变化,导致偏离本来的设定等。

#### 3.1 借助大型气候实验室

为了实现复杂气候环境的考核,1947年美军主导建立了麦金利气候实验室,用以对大型装备进行模拟气象条件试验,验证装备的环境适应性能力,该实验室位于佛罗里达州格林空军基地,也是目前全球最大的飞机气候实验室<sup>[31]</sup>。从试验室建立以来,包括B-29、C-5A、F-16、F-18、F-22、HH-60、V-22在内的400余架飞机、70多个导弹系统、2600多种军事装备在其中开展过环境适应性考核<sup>[32]</sup>。介美军在大型气候试验考核方面其取得的良好效果,英国、瑞士、法国、德国、韩国等先后建立了大型气候环境实验室,如图4所示。



a F-22



b HH-60

图4 F22和HH60在实验室开展覆雪和结冰试验  
Fig.4 Snow and icing tests conducted on F22 and HH60 in laboratory

目前国内也建立了不同类型的大型气候实验室,针对极寒试飞目前存在的低温温度不够等问题,可考虑借助气候环境试验室进行试验考核<sup>[33-34]</sup>。通过试验室制造低温、覆雪、结冰等条件,模拟直升机在遭遇气候环境后可能的飞行状态,难度相对较低,试验结果也基本可靠。

#### 3.2 借助大型无人机

针对某些国内条件确实无法满足要求的项目,如高纬度导航等试验项目,可考虑借助大型无人机平台安装相关设备,到极寒真实环境下开展试验,如跟随科考船一同进行极地科考活动等。目前有多型大型无人直升机,如航景创新研制的FWH3000型无人机、中航志研制的TD550型无人机,最大起飞质量都在2t以上,可以携带更多的测试设备,也能减少保障资源配置,可在有限的保障条件下,实现更多的考核科目。

#### 3.3 借助数字化试验技术

数字化验证技术是将可能遭遇的各项因素转化

为数字化的边界条件,以数据的形式建立恰当的模型,通过计算机对模型进行体系化处理,最终得到所需的结果。随着数字化技术的进步,直升机设计也向着综合一体化方向发展,国外航空强国大多是已开展了数字化试飞技术的研究工作,用以减少飞行试验的架次、缩短研制周期<sup>[35-37]</sup>。一般情况下,国外的飞行器设计机构在面对一架飞机的研制时,会在设计过程中根据设计数据进行大量的半实物仿真和飞机系统的综合测试与虚拟试飞,在地面测试完成后,再进行空中的飞行验证,利用飞行数据检验仿真模型的正确性和完整性,为系统设计改进提供依据<sup>[38]</sup>。美国NASA和空军、海军的试验机构在试飞的过程中引入了虚拟试飞的方法,以便飞行试验模拟的逼真度更为接近飞行试验。一旦模拟试验的逼真度在实际飞行试验条件下得到验证,围绕该点区域内的飞行品质评定则可由模拟试验或虚拟飞行试验来完成。例如在20世纪90年代,美国NASA推力矢量研究机X29-A的研制过程中,利用ITF综合试验系统以及全新的试验方法,节省了2/3的试飞时间<sup>[39]</sup>。欧洲CAE仿真公

司通过对飞行试验动作进行特殊设计,从典型试飞数据中提取相关信息,对其进行修正,以提高地基模拟器的逼真度。飞行仿真技术在我国三代电传飞机的试飞过程中也得到了应用<sup>[40]</sup>。借助数字化试验技术,对低温环境进行模拟试验,建立适当的边界条件,对直升机的低温性能进行数字化验证。之后结合部分试飞结果,综合验证直升机低温环境适应性能力。

## 4 结论

1) 直升机极寒环境适应性验证对直升机安全使用影响很大。通过合理的手段验证直升机设计结果,不仅可以保证直升机各部件的使用寿命,还能暴露问题,为后续设计改进、维护维修、人员工作提供基础。

2) 极寒环境对直升机的影响主要体现在低温、冰雪、大风、高纬度,极端气候会对直升机使用安全造成影响,需要对直升机开展极寒环境地面试验和空中试飞。

3) 目前直升机试飞场地一般选择根河、漠河、海拉尔地区,3处试飞场地各有优缺点,在试飞选择时要综合权衡考虑。

4) 针对目前试飞场地存在的限制,后续可通过大型气候实验室、无人机极地试飞、数字化验证技术等技术予以补充验证。

### 参考文献:

- [1] 朱燕,王树春.新版俄罗斯北极政策:变化、原因及特点[J].中国海洋大学学报(社会科学版),2021(5):46-57.  
ZHU Y, WANG S C. Russian New Arctic Strategy: Changes, Reasons, and Features[J]. Journal of Ocean University of China (Social Sciences), 2021(5): 46-57.
- [2] 谢晓光,程新波.俄罗斯北极政策调整背景下的“冰上丝绸之路”建设[J].辽宁大学学报(哲学社会科学版),2019,47(1):184-192.  
XIE X G, CHENG X B. The Construction of China-Russia “Ice Silk Road” under the Influence of Russian Arctic Policy's Adjustment[J]. Journal of Liaoning University (Philosophy and Social Sciences Edition), 2019, 47(1): 184-192.
- [3] 杨婧,詹月玫,洪彬.世界军用直升机装备现状及发展规划[J].直升机技术,2020(3):68-72.  
YANG J, ZHAN Y M, HONG B. Development Status and Plans of World Military Helicopter Industry[J]. Helicopter Technique, 2020(3): 68-72.
- [4] 沈军,魏荣俊,边英杰,等.直升机在海洋气候环境下的腐蚀防护对策研究[J].装备环境工程,2017,14(3):71-74.  
SHEN J, WEI R J, BIAN Y J, et al. Corrosion Control of Helicopter in Environment of Marine Climate[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(3): 71-74.
- [5] 刘艳,陈经纬. C919 民用飞机飞控系统鉴定试验环境设计[J].航空工程进展,2021,12(6):153-160.  
LIU Y, CHEN J W. Environment Design of Qualification Test of C919 Civil Aircraft Flight Control System[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(6): 153-160.
- [6] 祝耀昌,彭丽,常海娟.航空产品环境鉴定试验有效性评价方法探讨[J].航天器环境工程,2013,30(4):346-351.  
ZHU Y C, PENG L, CHANG H J. The Validity Evaluation Method in Environmental Evaluation Tests for Aerial Product Set[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2013, 30(4): 346-351.
- [7] 蔡良续,龙德中,宋小燕,等.温度环境试验及其标准综述(一)温度对装备的影响及温度试验的重要性[J].环境技术,2014,32(4):93-96.  
CAI L X, LONG D Z, SONG X Y, et al. Review of Temperature Tests and Relevant Standards(Part One) Influence of Temperature on Equipment and Importance of Temperature Tests[J]. Environmental Technology, 2014, 32(4): 93-96.
- [8] 吴希明,牟晓伟.直升机关键技术及未来发展与设想[J].空气动力学学报,2021,39(3):1-10.  
WU X M, MU X W. A Perspective of the Future Development of Key Helicopter Technologies[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2021, 39(3): 1-10.
- [9] 艾剑波,徐璐,杨艳歌,等.适用于极区环境的直升机研制关键技术与未来发展[J].船舶,2023,34(1):80-86.  
AI J B, XU L, YANG Y G, et al. Key Technology and Future Development of Helicopter Suitable for Polar Environment[J]. Ship & Boat, 2023, 34(1): 80-86.
- [10] 张惠,吴敬涛.极端气候环境条件下民用飞机典型飞行事故研究[J].科技与创新,2019(15):132-134.  
ZHANG H, WU J T. Study on Typical Flight Accidents of Civil Aircraft under Extreme Climatic Conditions[J]. Science and Technology & Innovation, 2019(15): 132-134.
- [11] 柳文林,穆志韬,段成美.现役直升机结构腐蚀原因及控制[J].腐蚀科学与防护技术,2005,17(5):358-359.  
LIU W L, MU Z T, DUAN C M. Corrosion Control and Causation Analysis for Helicopter Structures in Service[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2005, 17(5): 358-359.
- [12] 袁红刚,黄明其,彭先敏,等.直升机旋翼模型结冰风洞试验技术[J].实验流体力学,2021,35(4):60-66.  
YUAN H G, HUANG M Q, PENG X M, et al. Research on Icing Wind Tunnel Test Technology of Helicopter Rotor Model[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2021, 35(4): 60-66.
- [13] 李国知,曹义华.旋翼结冰对直升机飞行动力学特性的影响[J].航空学报,2011,32(2):187-194.  
LI G Z, CAO Y H. Effect of Rotor Icing on Helicopter Flight Dynamic Characteristics[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(2): 187-194.

- [14] 朱光明, 刘福华, 段刚. 直升机试飞试验管理和数据处理软件系统架构探讨[J]. 测控技术, 2007, 26(4): 16-17.  
ZHU G M, LIU F H, DUAN G. An Architecture for Helicopter Flight Test Engineering Management System[J]. Measurement & Control Technology, 2007, 26(4): 16-17.
- [15] 虞汉文, 顾文标, 黄磊, 等. 基于参数化的直升机试飞任务管理系统设计与实现[J]. 直升机技术, 2019(4): 16-22.  
YU H W, GU W B, HUANG L, et al. Design and Implementation of the Helicopter Flight Test Management System Based on Parametric[J]. Helicopter Technique, 2019(4): 16-22.
- [16] 王泽峰, 谢强. 直升机不可逾越速度下降转弯试飞研究[J]. 航空科学技术, 2018, 29(2): 20-24.  
WANG Z F, XIE Q. Flight Test Research on Never-Exceed Speed in Helicopter Descending and Turning[J]. Aeronautical Science & Technology, 2018, 29(2): 20-24.
- [17] 崔中雨, 葛峰, 王昕. 几种苛刻海洋大气环境下的海工材料腐蚀机制[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2022, 42(3): 403-409.  
CUI Z Y, GE F, WANG X. Corrosion Mechanism of Materials in Three Typical Harsh Marine Atmospheric Environments[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2022, 42(3): 403-409.
- [18] 刘奕. 基于米-17 直升机低温起动困难的自加热系统研究[J]. 航空工程进展, 2019, 10(S2): 244-248.  
LIU Y. Research on Self-Heating System Based on Difficulty of Cold-Starting of Mi-17 Helicopter[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(S2): 244-248.
- [19] 温育明, 张晓娟, 何泳. 飞机液压系统低温研究[J]. 机床与液压, 2018, 46(2): 91-93.  
WEN Y M, ZHANG X J, HE Y. Research on Low Temperature of Aircraft Hydraulic System[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2018, 46(2): 91-93.
- [20] 徐玉貌, 吕少杰, 曹义华, 等. 旋翼桨叶结冰对直升机飞行性能的影响[J]. 航空动力学报, 2016, 31(2): 399-404.  
XU Y M, LYU S J, CAO Y H, et al. Effects of Rotor Blade Icing on Helicopter Flight Performance[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(2): 399-404.
- [21] 苏正涛, 黄艳华, 王鹏. 氟硅橡胶的低温拉伸性能研究[J]. 航空材料学报, 2011, 31(z1): 240-243.  
SU Z T, HUANG Y H, WANG P. Study on Lower Temperature Tensile Properties of Fluorosilicone Rubber[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2011, 31(z1): 240-243.
- [22] 丁智平, 穆龙海, 卜继玲, 等. 橡胶弹性元件低温刚度预测[J]. 振动与冲击, 2017, 36(14): 66-70.  
DING Z P, MU L H, BU J L, et al. Stiffness Prediction of Rubber Springs at Lower Temperature[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(14): 66-70.
- [23] 刘国强, 董明明. 直升机旋翼桨叶结冰气动特性分析[J]. 航空科学技术, 2016, 27(8): 7-11.  
LIU G Q, DONG M M. The Analysis of Helicopter Blade Icing Aerodynamic Characteristics[J]. Aeronautical Science & Technology, 2016, 27(8): 7-11.
- [24] 龙海斌, 吴裕平. 无人直升机系留气动载荷 CFD 计算分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47(9): 1765-1773.  
LONG H B, WU Y P. CFD Calculation and Analysis of Unmanned Helicopter Tie-down Aerodynamic Load[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 47(9): 1765-1773.
- [25] 徐广, 胡国才, 王允良. 舰载直升机在复杂流场环境中的着舰策略[J]. 南京航空航天大学学报, 2016, 48(2): 194-199.  
XU G, HU G C, WANG Y L. Landing Strategy of Shipborne Helicopter in Complicated Airflow Environment[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2016, 48(2): 194-199.
- 徐广, 胡国才, 王允良. 舰载直升机在复杂流场环境中的着舰策略[J]. 南京航空航天大学学报, 2016, 48(2): 194-199.  
XU G, HU G C, WANG Y L. Landing Strategy of Shipborne Helicopter in Complicated Airflow Environment[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2016, 48(2): 194-199.
- [26] 刘通, 戴玉婷, 洪冠新. 变化风场中直升机阵风载荷分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(2): 173-178.  
LIU T, DAI Y T, HONG G X. Analysis of Gust Load for Helicopters in Variable Wind Field[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(2): 173-178.
- [27] 朱启举, 秦永元, 周琪. 极区航空导航综述[J]. 测控技术, 2014, 33(10): 5-8.  
ZHU Q J, QIN Y Y, ZHOU Q. Summary of Polar Air Navigation[J]. Measurement & Control Technology, 2014, 33(10): 5-8.
- [28] ANDERSON E W. I—Navigation in Polar Regions[J]. Journal of Navigation, 1957, 10(2): 156-161.
- [29] DoD. Environment Engineering Considerations and Laboratory Tests: MIL-810G[S]. Washington: DoD, 2008.
- [30] 中国气象局. 地面气象观测规范[M]. 北京: 气象出版社, 2003.  
China Meteorological Administration. Specification for Ground Meteorological Observation[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2003.
- [31] 唐虎, 李喜明. 飞机气候试验[J]. 装备环境工程, 2012, 9(1): 60-65.  
TANG H, LI X M. Climatic Test of Aircraft[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(1): 60-65.
- [32] 张昭, 唐虎, 成竹. 军用飞机实验室气候环境试验项目分析[J]. 装备环境工程, 2017, 14(10): 87-91.  
ZHANG Z, TANG H, CHENG Z. Laboratory Climatic Test Items of Military Aircraft[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(10): 87-91.
- [33] 吴敬涛. 军用飞机气候环境适应性试验剖面研究[J]. 环境技术, 2022, 40(2): 29-33.  
WU J T. Research on Climate Environment Adaptability

- Test Profile of Military Aircraft[J]. *Environmental Technology*, 2022, 40(2): 29-33.
- [34] 王涛, 米毅. 大型客机气候实验室试验研究[J]. *民用飞机设计与研究*, 2017(4): 117-120.  
WANG T, MI Y. Research on Airliner Climatic Laboratory Test[J]. *Civil Aircraft Design & Research*, 2017(4): 117-120.
- [35] BUI-THANH T, DAMODARAN M, WILLCOX K. Aerodynamic Data Reconstruction and Inverse Design Using Proper Orthogonal Decomposition[J]. *AIAA Journal*, 2004, 42(8): 1505-1516.
- [36] 贾荣珍, 王行仁. 飞行仿真系统的建模与验证[J]. *飞行力学*, 1996, 14(1): 80-84.  
JIA R Z, WANG X R. Modelling and Model Validation of Flight Simulation Systems[J]. *Flight Dynamics*, 1996, 14(1): 80-84.
- [37] 赵涛. 大迎角失速/尾旋及反尾旋伞仿真计算研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2001.
- ZHAO T. Study on Simulation Calculation of Stall/Spin and Anti-Spin Parachute at High Angle of Attack[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2001.
- [38] 解亚军, 叶正寅, 高永卫. 半模机翼振动的风洞实验技术研究[J]. *航空工程进展*, 2012, 3(1): 39-43.  
XIE Y J, YE Z Y, GAO Y W. Experiment Technology Investigation for Vibration of a Half Model Wing in Wind Tunnel[J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2012, 3(1): 39-43.
- [39] JOHN P S, LAW J S, CHARLES A W. Simulation at Dryden Flight Research Facility from 1957 to 1982[R]. Washington: NASA, 1989.
- [40] 饶秋磊, 崔益华, 韩意新. 飞行品质仿真计算与试飞数据对比分析[J]. *航空工程进展*, 2014, 5(4): 521-528.  
RAO Q L, CUI Y H, HAN Y X. Comparison and Analysis of Flying Quality Simulation and Flight Test Data[J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2014, 5(4): 521-528.