

水陆两栖飞机起落架水环境适应性验证 要求与方法

罗琳胤, 舒龙珍, 吕继航, 耿雷铭

(中航通飞华南飞机工业有限公司, 广东 珠海 519040)

摘要: 通过水浸润、水冲击、结冰、海洋腐蚀等水环境对起落架的影响及其损伤失效模式的分析研究, 提出了水陆两栖飞机起落架水环境验证要求。综合考虑环境适应性验证规范、标准的合理选用和剪裁, 建立了水陆两栖飞机起落架水环境试验验证方法, 涵盖静水密试验、连续水冲击试验、泥沙水试验、结冰试验以及海洋环境腐蚀试验的条件和方法, 以为水陆两栖飞机起落架的环境适应性设计与验证提供支持。

关键词: 水陆两栖飞机; 起落架; 水环境; 环境适应性

中图分类号: V240

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2023)01-0037-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.01.006

Requirements and Methods for Water Environment Adaptability Verification of Landing Gear of Amphibious Aircraft

LUO Lin-yin, SHU Long-zhen, LYU Ji-hang, GENG Lei-ming

(AVIC General Huanan Aircraft Industry Co., Ltd., Guangdong Zhuhai 519040, China)

ABSTRACT: The work aims to propose the verification requirements of water environment for amphibious aircraft landing gear by analyzing and studying the impact of water environment such as water immersion, water impact, icing and marine corrosion on landing gear and the corresponding damage failure mode. The verification specifications and standards of environment adaptability were reasonably selected and extracted to establish the verification method for water environment test of amphibious aircraft landing gear. This verification method covered the conditions and methods of hydrostatic watertight test, continuous water impact test, sediment water test, icing test and marine corrosion test, so as to provide support for the design and verification of environment adaptability of amphibious aircraft landing gear.

KEY WORDS: amphibious aircraft; landing gear; water environment; environment adaptability

水陆两栖飞机是既能在陆地起飞降落也能在水面起飞降落的飞机, 水陆两栖飞机的使用环境较陆基

飞机更为多样化^[1-2], 其服役所遭遇的地域和海域环境严酷、复杂。起落架是水陆两栖飞机最为关键的设

收稿日期: 2021-11-17; 修订日期: 2022-01-13

Received: 2021-11-17; Revised: 2022-01-13

基金项目: 工信部民机预研 (MJZ-2018-F-22)

Fund: Civil Aircraft Development Project of MIIT (MJZ-2018-F-22)

作者简介: 罗琳胤 (1966—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为飞机结构强度设计。

Biography: LUO Lin-yin (1966-), Male, Doctor, Researcher, Research focus: aircraft structural strength design.

引文格式: 罗琳胤, 舒龙珍, 吕继航, 等. 水陆两栖飞机起落架水环境适应性验证要求与方法[J]. 装备环境工程, 2023, 20(1): 037-042.

LUO Lin-yin, SHU Long-zhen, LYU Ji-hang, et al. Requirements and Methods for Water Environment Adaptability Verification of Landing Gear of Amphibious Aircraft[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(1): 037-042.

备,具有支撑水陆两栖飞机入水离水、滑行起飞、着陆等功能,水浸泡、水冲击以及结冰等水环境对起落架结构防护、设备功能都会产生较大的影响^[3-4],特别是飞机在海面使用时,海水腐蚀的影响更为突出。环境适应性是指结构、设备在其寿命期间内可能遇到的各种环境条件作用下能实现所有预定功能和性能而不被破坏的能力,是结构和设备的重要质量特性之一^[5-6]。环境适应性要求是描述研制装备应到达的环境适应性这一质量特性水平的一组定量和定性目标,也是设计用的最低环境条件^[7-9]。水陆两栖飞机起落架研制过程中,为确定其是否达到预期的水环境适应性指标,需要建立合理可行的水环境适应性验证要求和方法。

1 水环境对起落架的影响及损伤失效模式

水陆两栖飞机使用环境包括各种气候、力学和生物环境,与陆上飞机相比较,水陆两栖飞机使用环境的最大差异在于水环境^[10]。不同于传统意义上“自然界中水的形成、分布和转化所处空间的环境”的水环境定义,水陆两栖飞机起落架水环境是指预期使用的江河、湖泊、海洋等条件下,起落架装置涉水状态、湿润程度和水质情况。其中涉水状态包含滴水、溅水、浸水、结冰,湿润程度指干态、半湿态、饱和态,水质又分为淡水、泥沙水、海水等情况。水陆两栖飞机的水面飞行任务模式与陆基飞机类似,通过离岸下水、水面滑行、离水起飞、执行任务、下降、进近和着水、离水上岸等一系列的飞行阶段完成既定的飞行任务。

1.1 水浸润与水冲击环境

水陆两栖飞机通过起落架的滑行,由陆上进入水中或离水上岸,起落架结构和系统设备将完全浸没在水中,水渗入密封部位、沙粒堆积导致机械活动部件卡滞、复合材料刹车盘因饱和和吸湿引起刹车性能下降是水浸润环境下起落架损伤失效主要模式。水陆两栖飞机在起落架外伸状态下实施水面滑行以及上岸后进行喷水冲洗,水冲击将导致活动部件之间润滑脂稀释,结构和设备表面防护磨损,以及影响起落架指示、告警等传感器功能的正常发挥。

1.2 结冰环境

飞机从水面起飞离场后,每上升 1 000 m,温度下降约 6℃。在水面温度接近 0℃的情况下离水起飞,如起落架排水不畅,存留有水的起落架收放机构、刹车盘片以及机轮等部位会发生自由水结冰。在低温环境条件下,这些部位反复遭受飞机水面滑行引起的溅水时,有可能发生过冷水滴结冰。起落架结冰将导致结构损坏,以及起落架放不下、机轮拖胎、刹车失

效等影响飞行安全问题。

1.3 海洋腐蚀环境

水陆两栖飞机在海洋环境下使用时,起落架将处于干燥、海水浸泡、海洋浪花飞溅等循环交错状态,其腐蚀环境包括海水腐蚀和海洋大气腐蚀。海洋大气腐蚀是液膜下的电化学腐蚀,海水腐蚀是以阴极氧去极化控制为主的腐蚀。国内外长期海洋腐蚀研究结果表明^[11],海洋浪花飞溅区是钢结构腐蚀最严重的区域,在浪花飞溅区,材料表面受海水周期润湿,处于干湿交替状态,氧供应充分,腐蚀最为严重,同一种钢在飞溅区的腐蚀速率可比海水全浸区中高出 3~10 倍。起落架在水中使用时,处于吸湿饱和状态,但相对于飞机的整个寿命周期而言,起落架在水中的时间很短,整体环境属于海水干湿交替。此外,水陆两栖飞机还需考虑由机场设备工作散发的热量或排泄的废气所形成的诱发环境,基本因素包括腐蚀性气体、油雾以及爆炸性气体等。研究表明^[12],各种废气使飞机表面呈酸性环境,与高温、高湿和高盐雾等相结合,进一步加速起落架的腐蚀。

2 起落架水环境验证要求

水陆两栖飞机通常按照运输类适航标准要求开展设计与验证,运输类适航章程 CCAR25 部第 25.1309 条规定:“凡航空器适航标准对其功能有要求的设备、系统及安装,其设计必须保证在各种可预期的运行条件下能完成预定功能”。功能是指产品实现或产生规定动作或行为的能力,有功能并不能说明到达设计规范规定的指标,因此还要求其性能满足要求,只有功能、性能都满足要求,才能说明其在预期环境下能正常工作。通常而言,环境适应性验证首选试验验证,在无法或无条件开展试验验证的情况下,可以使用分析方法验证或在使用过程中验证。环境试验可分为自然环境试验、实验室环境试验和使用环境试验^[13],自然环境试验是将产品长期暴露于某种自然环境中,以确定该自然环境对产品的影响的试验;实验室环境是在实验室内按规定的的环境条件和负载条件进行的试验,可以是模拟实际环境条件,也可以是加速条件;使用环境试验是在规定的实际使用条件下评估装备环境适应性水平的试验。

民用飞机环境适应性验证的主要依据有 HB 6167《民用飞机设备环境条件和试验方法》、RTCA DO-160G《机载设备环境条件和试验程序》以及 GJB 150《军用设备环境试验方法》,其中与水环境相关的有:防水性试验、浸渍试验、淋雨试验、积冰/冻雨试验、盐雾试验以及沙尘试验^[14-16]。由于水陆两栖飞机起落架水环境适应性有其独特性,这些试验的要求不能完全覆盖,试验条件和参数也不全适用,其主要差异点见表 1。

表 1 水陆两栖飞机起落架水环境适应性验证需求与标准要求差异

Tab.1 Difference between the verification requirements and standard requirements for water environment adaptability test of landing gear of amphibious aircraft

序号	试验项目/标准	标准要求	水陆两栖起落架环境适应性验证需求
1	防水性试验 (DRTCA/DO-160G)	确定设备是否能经受住喷在或落在设备上的液态水或冷凝水的影响	起落架设备浸渍在水中时, 不仅要考虑水压对设备(传感器和管路接头、活动部件)密封性的影响, 还要考虑带泥沙的水流对设备冲击、磨损的特殊影响。C/C 和 C/SiC 复合材料刹车盘汲水饱和和后刹车性能会受到影响
2	浸渍试验 (GJB 150.14A)	确定设备浸渍在水中时, 防止水渗入壳体内部的能力	
3	淋雨试验 (GJB 150.8A)	确定设备在淋浴条件下其外壳防止雨水渗透的能力和遭到淋雨时或之后的工作效能	
4	积冰/冻雨试验 (GJB 150.22A)	确定设备耐受积冰/冻雨环境、工作性能以及除冰设备和技术的有效期	既要考虑起落架刹车装置、收放装置自由水结冰情况下, 结冰对刹车性能和收放功能的影响, 还需低温状态下飞机水上滑行时水飞溅引起的过冷水滴结冰
5	结冰试验 (DRTCA/DO-160G)	在温度、海拔和湿度发生快速变化结冰的情况, 确定设备暴露在结冰情况下时的性能特点	
6	盐雾试验 (DRTCA/DO-160G) (GJB 4.11) (GJB 150.11A)	确定设备材料保护层和装饰层在盐雾环境下的有效性, 测定盐的沉积物对设备物理和电性能的影响, 试验的主要参数盐溶液浓度、PH 值、试验持续时间、盐雾沉降率等	起落架在海洋环境下使用将遭受依次严酷的海水腐蚀、海洋大气腐蚀以及海洋浪花喷溅腐蚀。标准中的中性盐雾试验、试验持续时间、交替方式不适用于考核水陆两栖飞机起落架海洋环境下的盐雾环境适应性
7	沙尘试验 (GJB 150.12A) (DRTCA/DO-160G)	验证在吹砂条件下设备对小颗粒尘 ($\phi \leq 149 \mu\text{m}$) 可能堵塞开口、渗入缝隙、轴承和接头的抵御能力, 大颗粒 ($\phi=150\sim 850 \mu\text{m}$) 吹砂条件下的存贮和工作性能	起落架在泥沙水中滑行, 需验证在水流条件下细小的沙粒 ($\phi < 15 \mu\text{m}$) 对传感器设备、电缆/管路接头可能导致的堵塞和磨蚀, 大颗粒 ($\phi=45\sim 100 \mu\text{m}$) 对刹车装置、收放装置的卡滞

根据水陆两栖飞机使用的水浸润与水冲击、结冰和海洋腐蚀等水环境, 起落架水环境试验可归结为水防护综合试验、结冰试验和海洋环境腐蚀试验。

水防护综合试验包括起落架静水密试验、连续水冲击试验、泥沙水试验。静水密试验用于验证起落架在静水压作用下设备及其连接的密封性, 起落架在水中浸泡的深度、持续时间按使用限制情况并考虑一定裕度确定; 机轮要模拟实际滚动, 转速和持续转动时间按水中最严酷使用情况考虑。连续水冲击试验用于验证连续水流冲击对起落架指示、告警等传感器以及视频监控等设备功能和性能的影响, 以及评估润滑脂在水流冲击下的附着力与涂敷状态。起落架装置整体用作试验件, 则要具有足够的水压以保证设备每个面都能承受实际使用中的压力; 单个设备逐一进行试验验证, 则要确保设备安装方式与在起落架装置上的连接一致。不同于陆上飞机用吹砂试验验证设备对灰尘、沙尘的抵御能力, 泥沙水试验用于验证在水流作用下颗粒对起落架缓冲支柱、作动筒等运动机构和传感器设备的影响, 泥沙成分、泥沙颗粒大小、泥沙含量以及水流速度是泥沙水试验的关键参数。根据水陆两栖飞机预期的使用区域和场景, 开展不同淡水、海水水域的水质测量, 在测试数据统计分析基础上, 按高置信度(97%)确定试验用泥沙颗粒参数。

飞机在结冰气象条件下飞行时, 遇到过冷雨滴或者长时间穿越云层遇到云中过冷水滴而在起落架表面产生的冰层聚集归属于飞机结冰类, 通过飞机模型

冰风洞试验验证。起落架水环境试验主要针对起落架离水后留存的自由水结冰以及水面滑行水飞溅引起的过冷水滴结冰。起落架结冰试验要求包括结冰条件要求和起落架状态要求。结冰条件包含环境温度、水滴直径、结冰类型等, 环境温度和水滴直径对结冰过程、结冰类型和积冰的物理性能具有强烈的影响, 结冰类型分霜冰和明冰。从对起落架收放结构卡滞影响程度以及破冰结构设计需要, 起落架结冰类型应为明冰。结冰厚度是表征起落架结冰情况最直观的物理量, 它是控制结冰环境施加时间长短的主要参考量, 不同的结冰厚度代表不同的结冰严酷程度, 结冰厚度应根据飞机使用任务剖面 and 结冰条件仿真分析确定。起落架状态要求是对结冰试验中起落架功能或性能的要求, 包括起落架收起/放下状态下低温浸泡时间, 结冰状态下收放过程、收放次数、收放时间、锁机构功能等的要求, 具体数值在结冰试验方法中规定。

海洋环境腐蚀试验既要考虑海水浸没、浪花飞溅以及干燥等干-湿交替状态, 也要考虑废气等诱发环境引起的起落架酸性盐雾腐蚀。基于水陆两栖飞机起落架存在长时间海面使用场景, 需要加大试验持续时间。

3 起落架水环境试验验证方法

基于自然环境试验和使用环境试验周期长、成本高以及条件缺乏等因素, 型号研制中通常在实验室模拟 1 个或多个环境因素作用对产品进行环境适应性

验证^[17-20]。多环境模拟验证可以更真实地反应设备的环境符合性,但需要编制实验室环境谱。基于水陆两栖飞机起落架水环境实测数据和研究数据的缺乏,以及现有技术水平,仍采用现有通用的环境试验鉴定方法,即单一极值环境验证方法。在对环境试验通用标准进行合理选用和剪裁基础上,结合水陆两栖飞机水上使用任务剖面、水环境参数测试^[21-22]确定起落架水环境试验验证方法。

3.1 水防护综合性能试验

3.1.1 静水密试验

静水密试验用于确定起落架装置浸渍在水中时防止水渗入的能力。试验条件和方法:将构型完整的起落架装置浸没在温度 8~28 °C、1.5 倍起落架使用入水深度的水中,浸渍时间为 6 h。试验过程中要以不小于 5 r/min 的速度在水中转动机轮,转动时间为 10 min。为降低起落架入水深度,可采用加压水箱进行试验,且为便于确定或分析起落架装置漏水位置,可在试验水中加入荧光素等水溶性染料。

3.1.2 连续水冲击试验

连续水冲击试验用于确定起落架装置在水中收放或上岸冲洗操作期间遇到的集水射流强力作用对设备的影响。试验条件和方法:冲击水流出口压力保证通过一个直径为 6.4 mm 的喷嘴,产生至少 6 m 的垂直水流,设备应在 1~2 m 的距离受到该水流,每个面要冲洗至少 5 min,水为常温。

3.1.3 泥沙水试验

泥沙水试验用于确定起落架在泥沙水中使用时对水中颗粒堵塞开口、渗入活动缝隙以及接头抵御的能力,通过起落架在水池中的收放试验进行考核。将构型与装机使用一致的完整起落架浸泡在水深度为 1.2 倍起落架实际使用入水深度的水池中,水流速度(起落架收放速度与河流/海流速度之和)为 2 m/s,水流方向为起落架航向。泥沙成分为二氧化硅(质量分数为 97%~99%),泥沙颗粒大小 100 μm(颗粒分布 D97),泥沙的质量浓度为 256 mg/L,通过搅拌装置保持水质中泥沙颗粒均匀。试验中每持续冲击 30 min 进行一次起落架收放试验,检查收放功能有无异常,按水上使用任务剖面要求,试验 2 h 结束后,分解检查连接及活动部位有无磨损和泥沙颗粒存在。

3.2 结冰试验

起落架结冰试验包含起落架自由水结冰、起落架水面飞溅过冷水滴结冰和刹车装置自由水结冰。

3.2.1 起落架装置自由水结冰试验

起落架装置自由水结冰试验验证在聚集游离水情况下,起落架冷表面结冰对其收放功能和性能的影响,在仿真分析或使用情况统计分析确定了起落架结

冰厚度后,可参照 RTCA DO 160G 推荐的结冰试验方法(C类)进行试验验证。

3.2.2 起落架水面飞溅过冷水滴结冰

依据水陆两栖飞机起落架使用情况,参照 MIL-STD-810G 积冰/冻雨试验方法对水滴大小、降水速率、降水方法以及冰厚度要求,确定起落架水面飞溅过冷水滴结冰试验条件和方法如下所述。

1) 冰的形成与类型。溅沫和雾状的海水覆盖在冰冷的起落架上形成清澈透明、光滑、坚硬的雨冰。

2) 试验温度。试验箱的温度为-10~1 °C,细雾状的水温度为 0~3 °C。

3) 降水速率与降水方法。以 25 mm/h 降水速率将喷嘴水均匀喷洒在起落架上下、前后、四周,以保证产生纯净、均匀的雨冰层。

4) 水滴直径。水滴直径影响着结冰过程、结冰类型以及冰的物理特性,通过试验供气/供水压力调节,确保水滴直径在 1~1.5 mm。

5) 结冰厚度。结冰厚度按不同型号结冰条件下过冷水滴结冰仿真分析确定,或按 MIL-STD-810G 形成厚度为 6 mm 冰层。

6) 试验控制。起落架表面应清洗干净,并在结冰最大厚度位置安装适当尺寸的测深标尺,达到规定的冰层厚度后,进行起落架收放试验。

3.2.3 刹车装置自由水结冰试验

刹车装置自由水结冰试验验证带孔隙的 C/C 或 C/CSi 复合材料刹车盘在水中饱和吸湿后结冰对刹车装置功能的影响。刹车装置属移动部件的设备,结冰可能会阻碍或妨碍发生移动,甚至冰块的膨胀带来的力量可能会破坏结构或功能部件。参照 RTCA DO 160G 推荐的结冰试验方法(B类)进行,刹车装置自由水结冰试验试验过程和主要参数为:

1) 保持刹车装置轴线与地面平行状态,将刹车装置整体浸泡于淡水/海水中,浸泡时间不少于 2 倍飞机 1 次上下水过程中浸泡时长或 30 min,将刹车装置从水中取出,悬空放置 5 min。

2) 保持刹车装置轴线与地面平行,放入(高)低温试验箱,放置时刹车装置轴线与地面平行,将刹车装置温度稳定在-20 °C,并保持该温度最少 10 min。

3) 以不超过 3 °C/min 的速率升高试验箱温度,同时升高并保持(高)低温试验箱内的相对湿度不小于 95%。保持此条件足够的时间,以使所有的霜和冰融化或直到刹车装置表面温度达到 0~5 °C。

4) 重复 2)~3) 共 25 个循环,在最后一个试验循环结束,设备温度稳定在-20 °C 之后,取出刹车装置。

5) 检查机轮能否正常转动,动、静刹车盘盘脱开力矩是否小于飞机接地瞬间机轮最小地面结合力矩。

3.3 海洋环境腐蚀试验

水陆两栖飞机起落架海洋环境腐蚀试验采用废气与盐雾共同作用形成的酸性盐雾试验进行。HB 6167《民用飞机机载设备环境条件和试验方法》、DO-160G、GJB 150《军用装备实验室环境试验方法》中盐雾试验方法^[23-24]有连续喷雾、喷雾后干燥、喷雾后湿热贮存等,无论是连续喷雾还是喷雾后湿热贮存,试验件一直处于湿润状态,喷雾后再干燥则真实模拟了起落架使用干湿交替状态。GJB 150的酸性大气试验方法给出我国目前酸雨最严酷地区 pH 值为4.02,将原中性盐雾溶液 pH 值 6.5~7.2 调整为酸性盐雾 pH 值 4.02^[25-26]。参照 DO-160G 章 T 类适用于海边停放或使用的飞机上直接暴露于未经过滤的外界空气中的设备,水陆两栖飞机起落架海洋环境腐蚀试验试验条件和方法为:

1) 盐溶液及 pH 值。试验采用 5%±1%的 NaCl 溶液, pH 值为 4.02±0.5。

2) 温度。喷雾阶段的温度为(35±2)℃。

3) 盐雾沉降率在 80 cm²的水平收集区内的收集量为 1~3 mL/h 溶液。

4) 喷雾方式与试验持续时间。连续喷雾 48 h、干燥 24 h,循环 2 次,试验持续时间达 144 h。

试验结束后,评估起落架对盐雾腐蚀防护能力,检查盐沉积对起落架活动部分的堵塞和卡滞情况,以及电气设施的损坏情况。

4 结语

水陆两栖飞机起落架装置使用环境已由传统陆上飞机起落架的干态、湿热、盐雾使用环境拓展到淡水/泥沙水/海水浸泡、海浪喷溅和结冰等严酷水环境条件。在这些拓展的环境条件下,起落架装置的环境适应性设计要求、试验要求与验证方法储备少,研究基础差,水陆两栖飞机起落架装置环境适应性验证要求与方法还需开展深入研究。

参考文献:

[1] 黄领才,雍明培. 水陆两栖飞机的关键技术和产业应用前景[J]. 航空学报, 2019, 40(1): 522708.
HUANG Ling-cai, YONG Ming-pei. Key Technologies and Industrial Application Prospects of Amphibian Aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40(1): 522708.

[2] 申蒸洋,陈孝明,黄领才. 大型水陆两栖飞机特殊任务模式对总体设计的挑战[J]. 航空学报, 2019, 40(1): 522400.
SHEN Zheng-yang, CHEN Xiao-ming, HUANG Ling-cai. Challenges for Aircraft Design Due to Special Mission Models of Large-Scale Amphibious Aircraft[J]. Acta

Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40(1): 522400.

[3] 童明波,陈吉昌,李乐,等. 飞行器水载荷结构完整性数值模拟现状与展望-Part I: 水上迫降和水上漂浮[J]. 航空学报, 2021, 42(5): 524-530.
TONG Ming-bo, CHEN Ji-chang, LI Le, et al. State of the Art and Perspectives of Numerical Simulation of Aircraft Structural Integrity from Hydrodynamics-Part I: Ditching and Floating[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(5): 524-530.

[4] 吕继航,曾毅,杨荣. 大型水陆两栖飞机的动力学响应特性[J]. 航空制造技术, 2020, 63(20): 64-69.
LYU Ji-hang, ZENG Yi, YANG Rong. Dynamic Response Characteristics of Large Amphibious Aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(20): 64-69.

[5] CCAR-25-R4, 中国民用航空规章 第 25 部 运输类飞机适航标准[S].
CCAR-25-R4, China Civil Aviation Regulations, Part 25 Airworthiness Standards: Transport Category Airplanes[S].

[6] 《飞机设计手册》编委会. 飞机设计手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 2001.
Aircraft Design Manual Compilatory Committee. Aircraft Design Manual[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2001.

[7] 祝耀昌,王丹. 武器装备环境适应性要求探讨[J]. 航天器环境工程, 2008, 25(5): 416-422.
ZHU Yao-chang, WANG Dan. The Environmental Worthiness Requirements with Respect to Weapon Materials[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2008, 25(5): 416-422.

[8] DO-160G, Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment[S].

[9] FAA AC21-16G, Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment[S].

[10] 王朝琳,季茂陵,于四龙,等. 直升机主起落架海洋防腐技术研究[C]//第八届中国航空学会青年科技论坛论文集. 江门: 中国航空学会, 2018.
WANG Chao-lin, JI Mao-ling, YU Si-long, et al. Research on Marine Anti-Corrosion Technology of Helicopter Main Landing Gear [C]//Proceedings of the 8th Youth Science and Technology Forum of the Chinese Academy of Aeronautics. Jiangmen: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2018.

[11] 刘元海,张幸. 舰载机载设备腐蚀环境适应性要求的剪裁[J]. 装备环境工程, 2016, 13(5): 61-67.
LIU Yuan-hai, ZHANG Xing. Tailoring of Corrosion Environmental Adaptability Requirement for the Shipboard Airborne Equipments[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 13(5): 61-67.

[12] 骆晨,李明. 海洋大气环境中飞机的环境损伤和环境适应性[J]. 航空材料学报, 2016, 36(3): 101-107.
LUO Chen, LI Ming. Environmental Damage and Environmental Adaptability of the Aircraft in Marine Atmospheric[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2016, 36(3): 101-107.

- [13] 龚星宇. 考虑环境温度的起落架转弯机构可靠性分析与试验验证[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
GONG Xing-yu. Research on Reliability and Test Verification of Landing Gear Steering Mechanism Considering Environment Temperature[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.
- [14] 魏艳娟, 明志茂. 机载设备气候类环境试验标准分析[J]. 环境技术, 2017, 35(1): 55-61.
WEI Yan-juan, MING Zhi-mao. Standard Analysis on Climatic Environmental Test for Airborne Equipment[J]. Environmental Technology, 2017, 35(1): 55-61.
- [15] 张继源. 舰载雷达系统装备环境试验与可靠性技术应用[J]. 雷达与对抗, 2005, 25(4): 60-63.
ZHANG Ji-yuan. The Environmental Test and the Application of Reliability Technologies for Shipborne Radar Equipment[J]. Radar & Ecm, 2005, 25(4): 60-63.
- [16] 傅耘, 祝耀昌, 陈丹明. 装备环境要求及其确定方法[J]. 装备环境工程, 2008, 5(6): 46-51.
FU Yun, ZHU Yao-chang, CHEN Dan-ming. Materiel Environmental Requirements and Their Determination Method[J]. Equipment Environmental Engineering, 2008, 5(6): 46-51.
- [17] 孔叔钊, 胡湘洪. 基于适航的民机机载设备环境试验标准需求分析[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2019, 37(4): 83-88.
KONG Shu-fang, HU Xiang-hong. Requirement Analysis of Environmental Test Standards for Civil Aircraft Airborne Equipments Based on Airworthiness[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2019, 37(4): 83-88.
- [18] 张艳辉. 浅析舰载武器海洋环境适应性验证要求[J]. 装备环境工程, 2017, 14(5): 8-11.
ZHANG Yan-hui. Requirement on Suitability Verification of Shipborne Weapons in Marine Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(5): 8-11.
- [19] 朱红章. 航空装备环境试验方法应用[J]. 中国高新技术, 2021(1): 159-160.
ZHU Hong-zhang. Application of Environmental Test Method for Aviation Equipment[J]. China High and New Technology, 2021(1): 159-160.
- [20] 徐鑫. 简述综合环境试验的发展[J]. 电子质量, 2018(2): 43-46.
XU Xin. Describes the Development of Integrated Environmental Test[J]. Electronics Quality, 2018(2): 43-46.
- [21] 徐俊杰. 探究环境试验与可靠性试验技术的发展[J]. 科学大众, 2021(6): 183-184.
XU Jun-jie. Exploring the Development of Environmental Test and Reliability Test Technology[J]. Popular Science, 2021(6): 183-184.
- [22] 匡环, 李家怡. 环境试验设备中相对湿度的测量方法研究[J]. 电子质量, 2019(4): 70-72.
KUANG Huan, LI Jia-yi. The Study of Relative Humidity Measurement in Environmental Test Equipment[J]. Electronics Quality, 2019(4): 70-72.
- [23] 洪翔. 机载设备环境试验设计[J]. 科技创新导报, 2018, 15(11): 110-111.
HONG Xiang. Environmental Test Design of Airborne Equipment[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2018, 15(11): 110-111.
- [24] 骆晨, 李明, 孙志华, 等. 海洋大气环境中飞机的环境损伤和环境适应性[J]. 航空材料学报, 2016, 36(3): 101-107.
LUO Chen, LI Ming, SUN Zhi-hua, et al. Environmental Damage and Environmental Adaptability of the Aircraft in Marine Atmosphere[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2016, 36(3): 101-107.
- [25] 明志茂, 陈旗. 机载设备环境条件和试验程序[M]. 北京: 国防工业出版社, 2021.
MING Zhi-mao, CHEN Qi. Environmental Conditions and Test Procedures of Airborne Equipment[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2021.
- [26] GJB 6935—2009, 军用装备实验室环境试验方法 第28部分: 酸性大气试验[S].
GJB 6935—2009, Laboratory Environmental Test Methods for Military Materiel—Part 28: Acid Atmosphere Test[S].

责任编辑: 刘世忠