

# 航空装备海洋大气综合环境试验方法研究

周阳红生<sup>1,2</sup>, 王春川<sup>1,3</sup>, 赵振峰<sup>4</sup>, 郭振华<sup>1</sup>

(1.工业和信息化部电子第五研究所, 广州 510610; 2.广东省电子信息产品可靠性技术重点实验室, 广州 510610; 3.电子信息产品可靠性分析与测试技术国家地方联合工程中心, 广州 510610; 4.空军装备部驻广州地区军事代表室, 广州 510000)

**摘要:** 为在海洋大气环境中使用的航空装备探索一种更高效的综合环境试验方法, 弥补常规组合环境试验方法对综合环境耦合效应模拟不足的问题。首先分析了国内外航空装备海洋大气综合环境试验现状, 指出了我国综合环境试验能力的不足与能力提升的迫切需求; 其次, 对航空装备在海洋大气环境下的主要影响因素和综合环境耦合效应进行了重点分析; 最后, 结合我国环境工程行业现状, 对航空装备海洋大气综合环境试验关键因素、基本要求与存在问题等进行了探索研究。

**关键词:** 航空装备; 海洋大气; 综合环境试验方法

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2020.02.015

**中图分类号:** TG172.5      **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2020)02-0086-05

## Comprehensive Environmental Test Method for Aviation Equipment in Marine Atmosphere

ZHOU Yang-hong-sheng<sup>1,2</sup>, WANG Chun-chuan<sup>1,3</sup>, ZHAO Zhen-feng<sup>4</sup>, GUO Zhen-hua<sup>1</sup>

(1.The Fifth Electronics Research Institute of MIIT, Guangzhou 510610, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Electronic Information Products Reliability Technology, Guangzhou 510610, China; 3. National Joint Engineering Research Center of Reliability Test and Analysis for Electronic Information Products, Guangzhou 510610, China; 4. Air Force Representative Office in Guangzhou, Guangzhou 510000, China)

**ABSTRACT:** This paper aims to explore a more efficient comprehensive environmental test method for aviation equipment used in marine atmospheric environment, and to remedy the deficiency of conventional combined environmental test in simulating comprehensive environmental coupling effect. Firstly, the paper analyzed the current situation of comprehensive environmental test for aviation equipment in marine atmospheric environment at home and abroad, and pointed out the shortage of comprehensive environmental test and the urgent need to improve it in China. Secondly, the main influencing factors and coupling effects of aviation equipment in marine atmospheric were emphatically analyzed. Finally, key factors, basic requirements and existing problems of comprehensive environmental test for aviation equipment in marine atmospheric were explored and studied based on the situation of China's environmental engineering industry.

**KEY WORDS:** aviation equipment; marine atmospheric; comprehensive environmental test method

收稿日期: 2019-08-01; 修订日期: 2019-09-14

Received: 2019-08-01; Revised: 2019-09-14

作者简介: 周阳红生(1985—), 男, 湖南永州人, 硕士研究生, 主要研究方向为装备环境可靠性技术。

**Biography:** ZHOU Yang-hong-sheng (1985-), Male, from Yongzhou Hunan, Master graduate student, Research focus: equipment environment reliability technology.

在海洋大气环境中使用的航空装备会经受海洋大气典型温度-湿度-盐雾-太阳辐射综合环境、高空典型低温-低气压-振动综合环境以及两种综合环境的转换过程影响，作用环境因素多，环境效应机理复杂。常规的组合环境试验难以全面覆盖到多因素综合环境耦合效应，在航空装备海洋大气环境适应性研究与考核方面都存在不足。基于任务剖面，对航空装备多因素综合环境试验进行探索，对环境试验能力提升意义显著。

## 1 背景分析

### 1.1 国外环境试验体系完善

美国是世界科技、军事的领军者，其环境试验体系对我们有借鉴作用。二次世界大战以后，装备环境适应性在美国备受重视，环境试验体系得到全面发展。实验室模拟环境试验方面，有世界最大的麦金利气候实验室、“一站式”试验与测试海军武器试验基地和覆盖各种典型极端环境的自然环境试验中心<sup>[1]</sup>。自然环境方面，美国材料试验协会、国家标准局、陆军和海军等均建立了自然环境试验站网，覆盖世界各种典型环境，累积了大量试验数据，为产品设计与试验验证提供支撑<sup>[2]</sup>。使用环境方面，借助于全球化的军事布局，美国庞大军队频繁地海上巡航、作战、运输与军演等，装备使用试验数据极其充分<sup>[3-4]</sup>。标准体系方面，美国军标 MIL-STD-810《环境工程考虑和实验室试验》和美国民航标准 RTCA-DO-160《机载设备的环境条件和测试程序》及其升级版标准一直被世界各国学习和借用。完善的环境试验体系，对确保美军航空装备全球环境适应性发挥了重要作用。

### 1.2 国内航空装备海洋大气综合环境试验能力不足

相比国外先进水平，我国航空装备海洋大气综合环境试验存在明显不足，试验能力有待提升，试验方法亟待突破。实验室模拟环境试验方面，国内航空装备普遍依据 GJB 150A《军用装备实验室环境试验方法》或 RTCA /DO-160《机载设备环境条件与测试规程》开展设备或系统级试验，主要为单因素或二因素综合环境试验，以及少量的多因素综合环境试验<sup>[5]</sup>。自然环境试验方面，我国开展的主要是静态自然环境试验，装备或材料长期直接暴露在真实海洋大气环境，但忽略了飞机平台应力（振动、冲击等）和工作应力（电力、作动等）等负载。使用环境试验方面，我国在装备数量、时间、覆盖气候范围等远低于国际先进水平。标准体系方面，我国已基本形成较完善的环境试验标准体系，但大多标准源于对国际先进标准的引进与消化吸收，目前正处于标准自主化的关键阶段。

### 1.3 国内航空装备海洋大气综合环境试验需求迫切

环境试验有两大目的：其一是寻找装备环境适应性薄弱环节，为设计改进提供信息支撑；其二是对装备环境适应性水平进行综合评价，确保服役装备的环境适应性水平。随着我国向海洋强国的推进，航空装备在海洋环境中服役时间、强度都有大幅提升，各种潜在环境适应性问题逐渐暴露出来<sup>[6-9]</sup>。我国亟需更贴近实战、更真实有效的综合环境试验手段来及早暴露航空装备环境适应性的薄弱环境，为航空装备进行高水平的环境适应性质量把关。

## 2 作用机理分析

相对于内陆大气环境，海洋大气环境具有高温、高湿、高盐雾、强太阳辐射等典型特征，舰载环境还会有 SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub> 等酸性废气，对装备及其材料有严重的腐蚀和老化作用。根据材料、工艺、结构的不同，不同航空装备的环境影响因素及作用机理会存在一定差异。一般情况而言，海洋大气环境主要影响因素包括湿度、温度、盐雾、污染物、太阳辐射，舰船环境还有机械振动与冲击等<sup>[10-11]</sup>。

不同环境因素会对装备产生不同的影响效应，多因素环境同时作用下还会产生新的耦合效应。有关单因素或少因素综合的环境效应，国内在相关标准<sup>[12]</sup>、著作<sup>[13-14]</sup>与文献<sup>[15-18]</sup>均有广泛研究，文中不再赘述。海洋大气多因素综合环境的耦合效应更为复杂，对装备环境适应性提出了更高要求。如湿度+盐雾+酸性大气污染物会形成腐蚀性极强的酸性盐雾，并在南海海洋长期的高温环境下进一步得到加强。一般金属会在表面产生一层致密的氧化物，减缓腐蚀的速率，然而舰船的振动环境可能造成金属构件表层的持续磨损而破坏，加速腐蚀的发生。

海洋大气环境中使用的航空装备则会经历海洋大气综合环境和高空平台综合环境这两种典型多因素综合环境。高空平台环境有典型的低气压-低温-振动综合环境，航空装备会在高空平台环境与海洋大气环境这两个典型的多因素综合环境中反复循环。在环境的转换过程中，腐蚀效应可能得到加强，比如盐雾在干燥与湿润的过程中腐蚀效应明显增强。

## 3 航空装备海洋大气综合环境试验方法研究

### 3.1 充分准备试验资源

试验资源是指制定综合环境试验方案和开展综合环境试验所需的基础条件，包括试验场地和设备、环境技术人员队伍、标准体系等。目前，我国已形成

较完善的环境试验体系,常规环境试验资源已基本完备,但是在海洋大气综合环境试验方面主要还存在两个方面的不足,限制着综合环境试验的应用与推广,应重点研究解决。

1) 环境数据资源整合利用不足。环境数据是制定环境试验方法的基础。现阶段,环境数据的测量、分析与采集已逐渐得到了各相关单位的重视,海洋自然环境数据、飞机平台数据、故障信息与分析数据等均有比较系统的记录。然而,我国环境数据的采集基本处于零散化,数据管理信息化程度较低,环境数据的知识产权保护不足,环境数据的交换利用率低<sup>[19]</sup>。航空装备海洋大气环境试验需要综合利用大量自然环境数据和平台环境数据,涉及多单位,必须加强不同单位环境数据资源的整合利用,才能为试验开展提供支撑。

2) 实验室环境试验能力不足。实验室环境试验需要在实验室有限的空间内快速模拟各种极限自然环境与平台环境,是对设备技术要求最高的一种环境试验方式。对于常规的气候类(温度、湿度、气压、太阳辐射等)试验与力学类(振动、冲击、加速度、噪声等)试验,我国已基本已实现设备研制自主化。对于先进的、多综合环境试验设备研制水平有待提高,如国产自主可控的温度-湿度-高度-振动综合试验设备、三综合六自由度振动试验设备、温度-湿度-盐雾-振动-太阳辐射-淋雨综合环境试验设备<sup>[20-21]</sup>等在国内并未推广形成服务能力,限制了多综合环境试验的实施应用。

## 3.2 科学制定试验方案

试验方案是试验开展的依据,决定了试验的可行性、有效性、经济性等,是航空装备海洋大气综合环境试验的核心工作。试验对象、试验方式与试验条件是制定综合环境试验方案的三大核心要素,需要重点研究确定。

1) 确定试验对象。航空装备海洋大气综合环境试验综合的环境因素多,技术成熟度低,试验难度大,成本高。在航空装备常规环境试验已全面普及的前提下,其试验对象应满足以下原则:其一,试验对象应该为经受严酷海洋大气环境或空中低气压振动综合环境的航空装备,处于空调舱、气密舱内的相关设备等不应参与;其二,试验对象应该为新研设备或外场故障率高的沿用/改型设备;其三,试验对象应该对多因素综合环境应力敏感的设备,如橡胶件对温度、辐照应力敏感,则不应单独进行试验。

2) 确定试验方式。航空装备海洋大气综合环境试验要实现海洋大气环境和空中低温-低气压-振动环境的模拟,试验实施难度大,试验方式的选择至关重要。试验方式包括自然环境试验、实验室模拟环境试验、使用环境试验或以上几种试验方式的组合,确定

试验方式前一定要对国内试验能力进行充分调研。自然环境试验真实可靠,但试验周期长,且不能模拟高空环境。实验室模拟环境高效、可重复,但是多综合环境试验设备仍有局限性,且模拟试验环境与真实环境存在一定差距。使用环境试验结果最真实可靠性,但周期长、成本高。对于研制和鉴定/定型阶段的航空装备,在试验条件允许的情况下,建议优先选用实验室环境试验。对于批生产交付使用的航空装备,建议采用使用环境试验,持续对航空装备环境适应性进行跟踪。

3) 确定试验条件。自然环境试验和使用环境试验均采用真实的环境,根据航空装备实际使用区域确定环境条件即可,试验条件确定难度低。实验室环境试验一般采用加速的方式进行,可按以下两步走:首先结合航空装备环境数据与装备结构特点等,确定装备任务剖面各阶段对应的敏感环境应力水平;其次在不改变环境作用机理的前提条件下,对敏感环境数据进行等效处理,制定一个具有加速效应的循环应力剖面。

## 3.3 系统评价试验结果

航空装备海洋大气综合环境试验是根据装备特性专门制定环境试验,具有一定的研究特性,不应该仅仅评价装备失效与否,还应该至少针对以下三个方面进行开展系统评价。

1) 航空装备性能退化规律评价。航空装备海洋大气综合环境试验是根据寿命期任务剖面制定的环境试验方案,试验模拟度高、周期长,应该突破常规环境试验仅评价合格与否的简单判决,应根据试验周期内定期的检测数据,给出装备性能退化规律,提供一个更科学的评价结果。

2) 航空装备故障对比分析评价。航空装备海洋大气综合环境试验是在实验室常规环境试验充分开展、具有一定外场故障数据的基础上开展的试验,对于综合环境试验发现的故障应该深入开展失效分析,深入对比分析不同场合出现的故障原因与差异,准确获取装备失效机理,为后续装备研制提供技术支撑。

3) 航空装备综合环境试验方案科学性评价。航空装备海洋大气环境试验方案是试验依据,也是评价对象。综合环境试验方案是有针对性制定的试验方案,而非成熟的标准化试验方案,可能存在试验方案不合理的问题。应根据试验过程中的故障情况、试验结果等反推试验方案的合理性,若发现装备失效机理明显不符合装备实际使用等问题,还需及时更正试验方案。

## 4 结语

文中基于国内环境试验技术体系、硬件资源基本

完善和对先进环境试验技术有更高需求的现状,对航空装备海洋大气综合环境试验关键因素、基本要求与存在问题等进行了理论性探索研究,对航空装备海洋大气综合环境试验的开展有一定的参考价值。更多具体性的试验资源要求、试验实施技术细节等,需要通过实践应用来逐步完善,最终形成相关标准、指南,促进行业的整体进步。

#### 参考文献:

- [1] 文邦伟. 美、日武器装备环境试验设施[J]. 装备环境工程, 2005, 2(1): 89-93.  
WEN Bang-wei. The Environmental Test Facilities of Equipment in America and Japan[J]. Equipment Environmental Engineering, 2005, 2(1): 89-93.
- [2] 闫杰, 刘丽红, 纪春阳, 等. 国内外自然大气环境试验的发展[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2009, 29(1): 69-75.  
YAN Jie, LIU Li-hong, JI Chun-yang, et al. Development of Natural Atmospheric Environmental Test in the World[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion And Protection, 2009, 29(1): 69-75.
- [3] 朱玉琴, 陈源, 张燕, 等. 国内外动态自然环境试验技术发展现状[J]. 装备环境工程, 2015, 12(6): 93-99.  
ZHU Yu-qin, CHEN Yuan, ZHANG Yan, et al. Current Status of Dynamic Natural Environmental Test Techniques at Home and Abroad[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(6): 93-99.
- [4] 李红军. 美国海军近期总体发展趋势[J]. 现代军事, 2017(9): 63-69.  
LI Hong-jun. The US Navy Recently Overall Development Trend[J]. Conmilit, 2017(9): 63-69.
- [5] 周阳红生, 张洪彬, 薛海红, 等. 我国综合环境试验现状与发展建议[J]. 装备环境工程, 2018, 15(5): 44-47.  
ZHOU Yang-hong-sheng, ZHANG Hong-bin, XUE Hai-hong, et al. Current Situations and Development Suggestions of Combined Environmental Test in China[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(5): 44-47.
- [6] 孙志华, 汤智慧, 李斌. 海洋环境服役飞机的全面腐蚀控制[J]. 装备环境工程, 2014, 11(6): 35-39.  
SUN Zhi-hua, TANG Zhi-hui, LI Bin. Comprehensive Corrosion Control of Naval Aircraft[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(6): 35-39.
- [7] 曾凡阳, 刘元海, 丁玉洁. 海洋环境下军用飞机腐蚀及其系统控制工程[J]. 装备环境工程, 2013, 10(6): 77-81.  
ZENG Fan-yang, LIU Yuan-hai, DING Yu-jie. Research on Corrosion and System Engineering Control Technology of Military Aircraft in Marine Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(6): 77-81.
- [8] 李东帆. 飞机结构的腐蚀与防护[J]. 装备环境工程, 2016, 13(1): 57-61.  
LI Dong-fan. Corrosion and Protection of Aircraft Structure[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 13(1): 57-61.
- [9] 穆志韬, 谭晓明, 刘志国. 海军现役飞机的腐蚀损伤失效分析及腐蚀防护[J]. 装备环境工程, 2009, 6(1): 43-48.  
MU Zhi-tao, TAN Xiao-ming, LIU Zhi-guo. Corrosion Damage Failure Law Analysis and Corrosion Control for Naval Aircraft in Servicing[J]. Equipment Environmental Engineering, 2009, 6(1): 43-48.
- [10] 曲晓燕, 邓力. 舰载武器海洋环境适应性分析[J]. 舰船电子工程, 2011, 31(4): 138-142.  
QU Xiao-yan, DENG Li. Analysis of the Environmental Worthiness of Shipborne Weapons in Marine Environment[J]. Ship Electronic Engineering, 2011, 31(4): 138-142.
- [11] 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.
- [12] GJB 150A, 军用装备实验室环境试验[S].  
GJB 150A, Laboratory Environmental Test Methods of Military Material[S].
- [13] 王树荣, 季凡渝. 环境试验技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2016.  
WANG Shu-rong, JI Fan-yu. Environmental Testing Technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2016.
- [14] 宣兆龙, 易建政. 装备环境工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.  
XUAN Zhao-long, YI Jian-zheng. Equipment Environmental Engineering[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011.
- [15] 黄涛. 耐候钢在南海海洋大气环境下的腐蚀行为研究[D]. 北京: 钢铁研究总院, 2018.  
HUANG Tao. Research on Weathering Steel Corrosion Behavior in the South China Sea Marine Atmospheric Environment[D]. Beijing: Central Iron & Steel Research Institute, 2018.
- [16] 阮金元, 阮新. 环境因素对装备影响机理分析[J]. 标准化报道, 1998, 19(5): 8-13.  
RUAN Jin-yuan, RUAN Xin. The Mechanism Analysis of Environmental Factors on the Equipment Influence[J]. Reporting of Standardization, 1998, 19(5): 8-13.
- [17] 王明刚, 毛英军, 魏立, 等. 环境因素对舰载卫生装备性能影响的研究[J]. 医疗卫生装备, 2014, 35(7): 85-87.  
WANG Ming-gang, MAO Ying-jun, WEI Li, et al. Influence of Environmental Factors on Shipborne Medical Equipment Performances[J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2014, 35(7): 85-87.
- [18] 祝耀昌. 谈谈综合试验及其应用[J]. 航天器环境工程, 2006, 23(6): 315-320.  
ZHU Yao-chang. Combined Test and Its Application[J].

- Spacecraft Environment Engineering, 2006, 23(6): 315-320.
- [19] 唐平, 黄晓霞. 环境试验数据共享与保护的现状及探索研究[J]. 装备环境工程, 2015, 12(1): 66-72.  
TANG Ping, HUANG Xiao-xia. Research on the Status and Exploration of Sharing and Protection of Environment Test Data[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(1): 66-72.
- [20] 李家柱, 欧阳汉文, 王家国, 等. CET2000 型综合环境试验机和试验方法[J]. 装备环境工程, 2004, 1(6): 52-58.  
LI Jia-zhu, OU-YANG Han-wen, WANG Jia-guo, et al. Model CET2000 Complex Environmental Tester and Testing Methods[J]. Equipment Environmental Engineering, 2004, 1(6): 52-58.
- [21] 明志茂, 龚旻, 杨静, 等. 综合环境试验系统: 中国, CN 106610369 A[P]. 2016-12-26.  
MING Zhi-mao, GONG Min, YANG Jing, et al. Integrated Environmental Testing Systems: China, CN 106610369 A[P]. 2016-12-26.