

新形势下航天装备环境试验技术的 未来发展趋势

吴建国, 李海波, 冯国林, 姚艺豪

(北京强度环境研究所 可靠性与环境工程技术重点实验室, 北京 100076)

摘要: 从航天装备面临的实战化考核、数字化建设和低成本控制等新形势与新要求出发, 梳理了环境试验技术在航天装备试验鉴定中存在的实战化考核能力不足、全寿命周期环境效应考核不充分等技术难题, 结合航天装备环境试验的国内外发展现状, 系统分析了航天装备环境试验技术的未来发展趋势, 试验环境综合化、试验设计一体化、试验手段数字化在提升航天装备环境试验水平、缩短装备试验周期、降低试验成本方面具有显著优势, 也是航天装备环境试验未来发展的重要方向。

关键词: 环境试验; 实战化; 数字化; 一体化; 低成本

中图分类号: TJ86

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2024)05-0034-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.05.004

Future Development Trend of Environmental Testing Technology for Aerospace Equipment under New Circumstances

WU Jianguo, LI Haibo, FENG Guolin, YAO Yihao

(Key Laboratory of Reliability and Environmental Engineering Technology, Beijing Institute of Structure and
Environment Engineering, Beijing 100076, China)

ABSTRACT: According to the new situation and requirements of actual combat assessment, digital construction, and low-cost control faced by aerospace equipment, this article sorted out the technical difficulties of insufficient practical assessment ability and insufficient assessment of environmental effects throughout the entire life cycle of environmental testing technology in aerospace equipment testing and identification. Combined with the current development status of aerospace equipment environmental testing at home and abroad, the future development trend of aerospace equipment environmental testing technology was systematically analyzed. The comprehensive testing environment, integrated testing design, and digital testing methods have significant advantages in improving the level of aerospace equipment environmental testing, shortening equipment testing cycles, and reducing testing costs. It is also an important direction for the future development of aerospace equipment environmental testing.

KEY WORDS: environmental test; actual combat; digital; integrated; low-cost

装备试验鉴定是检验装备综合能力的重要手段和方法。航天装备的试验鉴定与一般武器装备相比,

收稿日期: 2024-04-19; 修订日期: 2024-05-11

Received: 2024-04-19; Revised: 2024-05-11

引文格式: 吴建国, 李海波, 冯国林, 等. 新形势下航天装备环境试验技术的未来发展趋势[J]. 装备环境工程, 2024, 21(5): 34-40.

WU Jianguo, LI Haibo, FENG Guolin, et al. Future Development Trend of Environmental Testing Technology for Aerospace Equipment under New Circumstances[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(5): 34-40.

具有试验子样少、试验成本高、试验环境限制性强等特点^[1]。这是由于航天装备技术先进、造价昂贵、装备量少等自身特点和其在服役中所经历的环境条件极端恶劣且复杂所导致的。这也使得试验鉴定时,对航天装备的环境适应性考核要求极其严格。环境适应性指装备在其寿命期预计可能遇到的各种环境的作用下能实现其所有预定功能和性能和(或)不被破坏的能力^[2],是装备与生俱来的固有属性,也是一种重要的通用质量特性。环境试验是考核装备对环境适应性要求符合性和评价装备环境适应性的重要手段,是将装备暴露于特定的环境中,确定环境对装备影响的过程,包括自然环境试验、使用环境试验和实验室环境试验。环境试验的目的是获取特定环境条件下装备的环境响应特性、耐环境能力极限及薄弱环节,将设计缺陷诱发为故障,为改进装备设计提供信息,并验证改进措施的有效性。环境试验是贯穿于装备全寿命周期的重要工作之一。如何通过环境试验验证航天装备的技战术指标、摸清装备的性能底数,一直以来都是装备环境试验技术的研究热点^[3-20]。进入新时代,伴随着航天装备研制技术的不断发展和军事变革的推陈出新,对装备的环境适应性设计、验证和评价工作提出了不断深化的新要求。新形势下的装备环境试验是面向装备研制全过程、全产品层级的考核与评价,是面向作战使用环境、全维度指标的考核与评价,是面向试验鉴定数字化、多样化手段的考核和评价^[21]。本文针对装备建设的新形势和新要求,着重探讨了航天装备环境试验技术的未来发展趋势。

1 航天装备环境试验面临的新形势与新要求

1.1 实战化考核

坚持作战需求牵引和实战化运用,是航天装备建设所遵循的基本原则。随着世界军事变革的迅猛发展,军队编制、作战方式和战场环境都在发生广泛而深刻的变化^[22]。信息化、智能化条件下的多域联合作战已成为未来战争的显著特征,未来战争的基本形态决定了装备的发展方向。随着战场环境的复杂化演变和装备的智能化发展,装备的自主感知和决策能力对环境的敏感度越来越强,战场环境对装备性能的影响也越来越大,这对装备环境试验鉴定与评估提出了更新、更高的要求。因此,新形势下的装备环境试验技术应立足于装备信息化、智能化发展趋势,着眼于装备实战化考核要求,构建“贴近实战、全面把关、摸清底数,全面覆盖考核、全过程评价,考核方式多样化”^[21]的环境试验技术新体系。以装备形成战斗力为标准,加强实战条件下的考核,加大在恶劣气候环境、复杂地理环境、电磁干扰环境和战术对抗背景下的试验考核力度,充分

暴露武器装备在设计、研制和使用中存在的问题,不断提高定型试验的考核效能和水平^[23]。

1.2 数字化建设

装备数字化建设是对装备实体、管理活动和外部空间进行数字化表达,在数字空间开展战略筹划、装备论证、研制生产、试验鉴定和运用保障等装备全寿命周期建设管理活动。装备实体数字化是指在装备建设的同时,建立起基于模型的系统工程(MBSE)研制模式,在装备研制过程中形成装备数字孪生体。管理活动数字化的要义是将管理活动的文本载体转变为模型。由于文本文档存在二义性,在管理活动中容易产生人因偏差,将文本文档转化标准化的模型语言,有利于消除管理活动中的人因偏差;同时,将基于文档驱动的管理活动转化为更加标准化、规范化的模型驱动。外部空间数字化则包括复杂战场环境的数字化和数字化智能化的装备研制体系,通过数字化建设,构造逼真、可靠、智能的平行战场环境和数字化智能化的军工研发环境。随着基于模型的系统工程在装备研制体系大规模推广应用,装备数字化建设给装备试验鉴定带来诸多新挑战。如装备实体数字化使得鉴定试验对象由“装备实体”扩充为“装备实体与数字样机”,试验模式由实物试验转变虚实融合验证方式。

1.3 低成本控制

现代高技术局部战争已经突破了工业时代的前沿作战模式,传统的“以消灭敌人有生力量为目的”的作战原则已经发生了根本变化。未来战争将在海、陆、空、天、信息5维战场同时展开,激烈的体系对抗、高价值目标打击等作战模式,已经成为高技术局部战争的基本手段。战争的空前激烈,要求高技术武器装备必须具备一定的规模与数量^[24]。大规模的装备建设则需要考虑装备的采购成本。高技术装备的研制费用在采购成本中占比相对较高,而试验费用又在研制总费用中占有相当高的比重。全力推动装备建设高质量、高效益、低成本、可持续发展,是新时代装备现代化建设转型的新要求之一,对航天装备研制提出“周期短、成本低、质量高”的新要求,也对装备环境试验提出高效率、低成本等新要求。

2 航天装备环境试验技术现状

航天装备全寿命周期内会经受各种自然、力学环境的单独、组合或综合作用。这些环境作用可能会引起装备的性能劣化和功能失常,导致装备发生故障,从而影响其作战效能发挥,致使军事行动失败。据统计,航空航天装备中因环境因素导致的设备故障高达50%以上,这些故障中由温度、振动、湿度等环境因

素引起的故障占环境因素诱发故障的 80%以上。部分美国航空航天装备中由环境因素引起的故障统计情况,以及各环境因素引起的故障比例统计结果见表 1^[25]。为了摸清这些环境作用对航天装备的影响特性,环境试验的作用至关重要。通常在装备研制阶段会根据其全寿命周期的任务剖面,梳理影响装备使用的主要环境因素,并根据相应的标准规范开展环境试验,验证和评价装备的环境适应能力。

表 1 美国航空航天装备环境因素引起的故障统计
Tab.1 Statistics on faults caused by environmental factors in aerospace equipment in the United States

各环境因素引起的故障占比/%	沿海基地装备	F/A-18 飞机
温度	40.0	40.0
振动	27.0	27.0
冲击	—	2.0
湿度	19.0	19.0
砂尘	14.0	6.0
盐雾	—	4.0
低气压	—	2.0
环境因素引起的故障在所有故障中的占比/%	52.0	51.0

2.1 环境模拟试验方法

以美俄为代表的军事发达国家广泛开展了多因素环境模拟试验技术研究,形成了相应的试验方法和试验标准,并将这些技术成果运用于航天装备的环境适应性评估。如美国编制了 MIL-HDBK-310《用于军用产品研制的全球气候数据》,规范装备环境试验的环境条件制定依据;颁布了环境试验标准 MIL-STD-810《环境工程考虑和实验室试验》,规范装备环境试验方法。MIL-STD-810 自 1962 年首次颁布起,几乎每 5 年更新 1 次,使其更具代表性、科学性和先进性。现行有效的美军武器装备环境工程标准为 2019 年 1 月 31 日颁布 MIL-STD-810H。MIL-STD-810H 首次将 MIL-STD-810G 中的“温度-振动-湿度-高度环境试验”修改为“综合环境试验”,在综合环境剖面中增加电应力的控制要求,更加注重考核装备全寿命周期内各环境剖面的综合环境适应性要求^[26]。

多因素综合模拟试验已经发展为美军武器装备定型和生产环节必须考核的环境试验项目。美国海军太平洋导弹试验中心为了降低导弹研制和发射成本,开发了全弹噪声-振动-温度综合环境试验,更加逼真地模拟导弹飞行时的综合环境条件。美国空军的戈达德空军基地飞行动力试验室、红石技术试验中心也建立了类似的模拟飞行试验装置,美国洛克希得马丁公司及海军武器试验室也采用这种技术对批产的导弹进行了实验室内全弹验收试验。俄罗斯也进行了类似

太平洋导弹试验中心的模飞试验,他们称之为“仿真”试验。俄罗斯“火炬”设计局用多个振动台同时激振导弹,以模拟导弹飞行时的振动分布。以色列在导弹的研制过程中,也开发了振动-噪声-温度综合环境试验方法,通过该技术发现了不少导弹故障,提高了导弹的环境适应性和可靠性,与飞行试验相比,有极高的效费比。

2.2 环境模拟试验设备

环境模拟试验技术经历了由单参数模拟到多参数模拟,从静态模拟到动态模拟,从单机试验到系统级产品综合环境试验的发展过程^[27]。与之相应的环境模拟设备也经历了 2 个阶段:

1) 第一阶段是环境模拟试验设备发展的初期,国内外陆续研制了能独立控制单一环境因素(如气压或温度)的极端环境模拟设备。该时期的环境模拟设备容积小,参数量值模拟范围窄,环境模拟因素数量以 1~2 个为主;环境模拟设备以单因素静态模拟为主,基本不具备环境动态变化的模拟能力。

2) 第二阶段是环境模拟试验设备的持续发展阶段。随着航天装备的服役环境越来越复杂,多因素综合的环境模拟设备应运而生。该时期环境模拟设备能够模拟的环境因素数量和环境参数范围都有了显著变化,环境因素数量增至 3~5 个,参数范围也向极端化发展,但是环境模拟多为特定的静态模拟环境。目前,国内外的环境模拟设备多数仍处于多参数的静态模拟阶段。环境模拟试验设备的未来发展方向是系统级多参数综合动态环境模拟设备,应用该类试验设备可进行系统级产品的多参数综合动态环境试验^[28]。

为了适应武器装备的快速发展,美欧等军事强国陆续研制了满足不同需求的各类环境模拟设备。如英国皇家陆军科学研究所的车辆环境试验室、维也纳国际车辆研究试验中心的车辆静动态环境试验设备;美国阿伯丁试验场兵器环境试验设备、波音公司的高空试验设备、NASA 约翰逊空间中心的大型空间环境模拟装置;日本筑波空间环境模拟装置;法国图鲁兹航空研究中心的高空模拟设备等。其中,英国皇家陆军科学研究所的车辆环境实验室具备 882.6 kW 坦克整车工作状态下的低气压、温度环境模拟能力,美国陆军阿伯丁靶场的兵器环境试验设备具备车辆在行驶道路条件下模拟低温、高温、湿热、低气压等单参数和多参数组合环境的模拟能力^[27]。美国海军太平洋导弹试验中心为了研究机载导弹飞行剖面综合环境适应性,建立了温度-高度-湿度-振动综合环境试验系统。

2.3 环境试验应用

朝鲜战场的极端低温环境、越南战场的热带雨林湿热环境,都曾导致美军武器装备爆发因环境效应而引发的结构腐蚀、光电设备长霉起雾等问题,进而导

致装备性能劣化、功能失常、故障率增高,严重影响美军作战装备的效能发挥。1950 年,美国曾派工作组去朝鲜战场调查,发现能够执行作战任务的装备只占 1/3,多数装备处于维修保障状态,用于装备的维修保障经费与购置经费之比为 4:1。20 世纪 80 年代,美国防部对陆、海、空三军库存的 380 万吨常规弹药进行质量调查,调查发现:仅陆军库存弹药因库存环境造成腐蚀和变质后,待维修和销毁的弹药已高达 11.1 万吨。美军阿帕奇直升机在“沙漠之狐”行动中,因螺旋桨转轴渗进沙粒导致无法执行任务。

总结装备在实战中的应用经验和教训,武器装备环境适应性的重要性愈发引起重视,为适应美军全球战略的需要,美国在海内外建立了 50 多个能满足各类装备需求的试验场,基本覆盖全球各类型自然环境条件,有力支撑了美军装备的环境试验鉴定工作。目前,环境试验已成为美军鉴定武器装备质量的重要手段,且规定武器装备未通过环境试验考核不准定型和生产。对于新定型的武器装备,首先要通过模拟环境试验,然后再分别运至北极、沙漠和热带等环境试验中心按相关规定进行环境试验鉴定,考核通过后可以定型生产。

2.4 存在的差距

经过近 70 年的发展,中国航天事业从无到有、由弱变强,走出一条独立自主、自力更生的发展道路。我国的航天装备环境试验技术也逐步形成了一套自己的技术体系,支撑了航天装备的跨越式发展,但与新形势下的装备发展新要求还存在一些差距。

1) 现行环境试验方法难以满足复杂服役环境下航天装备实战能力验证需求。我国航天装备环境试验参考的主要标准包括 GJB 4239A 和 GJB 150A 等。GJB 4239A《装备环境工程通用要求》规定了装备寿命期内开展环境适应性工作的一般要求和工作项目,为相关方开展环境适应性工作提供依据和指导^[2]。GJB 150A《军用装备实验室环境试验方法》用于指导装备实验室环境试验设计,确定装备环境试验项目、试验顺序、试验类别、试验条件和试验程序等具体要求^[29]。尽管 GJB 150A 中明确指出,综合环境试验可能比一系列连续的单个试验更能代表使用环境中的实际环境效应,使用环境中遇到多种环境因素综合作用时,鼓励进行综合环境试验。但 GJB 150A 的 27 个试验方法中,能称得上“综合环境”试验的只有 2 个:GJB 150.24A《温度-湿度-振动-高度试验》和 GJB 150.25A《振动-噪声-温度试验》。GJB 150.24A 在执行过程中,还经常受限于试验设备的能力,不得不剪裁成温度-湿度-高度试验。现行的航天装备环境鉴定试验仍多以单一环境试验验证为主,难以充分模拟复杂服役环境中多环境因素同时作用的综合环境效应,难以充分暴露复杂服役环境下航天装备的故障

模式,与新形势复杂服役环境下的实战能力验证要求相去甚远。

2) 装备全寿命周期服役环境效应考核不充分。在航天装备的定型/验收考核中,通常以 GJB 150A《军用装备实验室环境试验方法》规定的试验方法为依据,开展航天装备性能鉴定试验,评价和确定特定环境对装备的影响程度、装备的耐环境极限能力、特定环境下的装备安全性以及装备在全寿命周期环境作用下能否保持结构完好和正常工作等^[29]。按照定型/验收程序,通过一系列环境试验考核后,说明装备的各项性能指标满足设计指标要求,具备在实际战场环境下执行作战任务的能力。然而,在装备的实际使用过程中,仍存在故障频发的问题,有些问题是没有考虑复杂战场环境的综合环境效应,更多的问题是没有考虑全寿命周期内装备服役环境的累积效应。比如,非金属材料的老化、金属材料的疲劳都是环境和载荷的长期作用效果,且存在多种环境因素的耦合作用。造成上述问题的原因一方面是现有试验设备能力不足,难以模拟复杂战场综合环境效应,或者是某些环境因素的极值条件;另一方面则是没有覆盖装备全寿命周期内的环境剖面,未进行全寿命周期一体化的试验设计。

3 航天装备环境试验技术未来发展趋势

3.1 试验环境综合化

装备实战化考核要求试验鉴定贴近实战,鉴定试验环境因素覆盖复杂战场环境全要素,边界模拟与实际使用状态一致。复杂战场环境包括复杂电磁环境、复杂地理环境、复杂气象环境等影响装备性能的环境因素。根据表 1 中美国航空航天装备环境因素引起的故障统计分析,温度、湿度、振动是诱发装备故障的主要环境因素,也是装备服役过程中经历最多的环境因素,几乎所有装备的全寿命周期内都能经历 3 种环境同时作用的场景。在多数情况下,装备故障的发生也很难归咎于某一种环境因素的作用,而是 3 种因素的共同作用结果。如在岛礁或沿海地区服役的航天装备,在进行环境试验时,须考虑温度、湿度、盐雾和振动环境的综合作用;若在舰船上服役,由于舰船复杂的电磁环境,还需在温度、湿度、盐雾和振动环境的基础上考虑电磁环境的综合作用;在高原地区服役的装备,则须考虑温度、湿度、振动和低气压(高度)的综合作用;在热带地区则须考虑温度、湿度、振动、(酸)雨、雷电等环境因素的综合作用;在沙漠地区则须考虑温度、湿度、振动、风、沙尘等环境因素的综合作用。未来高技术战争中,信息化智能化装备面临强电磁对抗环境的干扰,全域多维复杂战场环境的

模拟应充分考虑环境与环境、装备与装备、环境与装备之间相互作用,真实地模拟装备的使用状态边界条件和极限使用环境,以充分验证装备的极限性能,掌握装备的性能底数。

3.2 试验设计一体化

早在20世纪90年代,美国空军阿诺德工程发展中心就提出综合性试验的概念,也称一体化试验,目标是实现试验信息和资源的共享及综合利用,以缩短研制周期,降低研制风险和费用,提高试验效率和效益。2001年,一体化试验概念被正式纳入美军最高采办文件 DoDD5000.01 中^[30]。伴随一体化联合作战、多域战等现代高技术战争模式和作战概念的变革,美军试验鉴定模式也逐步将传统试验模式转变为一一体化的试验模式,并固化形成 DoDI5000.89《试验鉴定》,以指南的形式对 DoDD5000.01 中有关一体化试验鉴定政策要求进行具体落实^[31]。随着一体化试验的应用实践逐步深入,其内涵逐渐扩展丰富,既包括研制阶段的一体化统筹,也包括试验内容的一体化设计。研制阶段一体化包括全寿命周期各阶段试验统筹、性能验证与性能鉴定试验统筹以及研制试验与作战使用试验统筹;试验内容的一体化包括虚拟/仿真试验、地面试验与飞行试验的综合,通用质量特性试验项目各专业综合,以及性能试验与复杂环境试验综合。

3.3 试验手段数字化

航天装备作为复杂的系统工程,为确保研制成功,将“一切通过地面试验”作为型号工作的基本原则,现行研制体系下,航天装备环境试验仍以实物试验为主。随着数字化试验技术成熟度的不断提升,航天装备地面试验验证模式也逐步由基于实物试验验证为主向基于模型与数据驱动的“数实融合”的方向发展。一方面可实现试验验证的自动化、智能化、标准化、精准化,提升试验效率、降低试验风险和试验成本;另一方面,支撑装备数字化建设,实现装备数字模型的试验鉴定。美国 NASA Langley 研究中心在数字化技术 2035 发展规划中,将数实融合技术确定为重点发展的核心技术^[32]。美国空军试验中心基于数字孪生技术,在装备数字模型创建后,快速启动试验鉴定工作,并在装备全寿命周期进行数字孪生模型的持续验证和迭代更新,将试验鉴定工作由现行的“大爆炸”模式转变为持续、渐进模式。德国 IABG 突破的装备全尺寸数字试验技术,通过数实融合技术实现多物理场全流程数字试验仿真,缩短全尺寸试验时间,降低成本,提高质量^[33]。采用数实融合的方法开展试验方案优化、边界阻抗等效模拟、极限工况外推、复杂环境适应性综合评价等工作,获得覆盖全面、准确可信、权威公正的考核结果,有利于提升航天装备试验鉴定的实战化考核程度。基于实物试验确认的数

字模型,或者基于海量实物试验测试数据,通过智能算法训练的数字模型,构建装备数字孪生模型,实现对装备全寿命周期的健康监测及故障预测,是数字化试验未来发展的主要趋势。

4 结语

本文从航天装备环境试验面临的实战化考核、数字化建设和低成本控制等新形势与新要求出发,梳理了航天装备环境试验技术现状中存在的实战化考核能力不足,全寿命周期环境效应考核不充分等难题,结合航天装备环境试验的国内外发展现状,系统分析了航天装备试验环境综合化、试验设计一体化、试验手段数字化等环境试验技术未来发展趋势。

我国航天装备环境试验技术经过近70年的发展,逐步形成了一套自己的技术体系,支撑了航天装备的跨越式发展,但与新形势下的装备发展新要求还存在一些差距。为了适应航天装备实战化考核、数字化建设、低成本控制的发展新形势和新要求,急需探索复杂战场环境的耦合作用机理,构建贴近实战的综合化的环境试验方法,实现装备在实战环境、极限边界、复杂条件下的鉴定考核。密切跟踪数字化技术发展,完善基于数据和模型驱动的数实融合环境试验技术,形成基于模型和数据的跨层级、跨专业、跨领域的信息一致性传递体系。将 MBSE、大数据模型、5G 与物联网、AR/VR/MR 等新技术与传统试验深度融合,推动实物试验与数字试验的“动态映射、双向交互、实时预测、全息可视”,实现航天装备环境试验的数字化、网络化、智能化。加强全寿命周期一体化试验方法研究和实践,构建装备全流程、全场景、全要素的环境试验考核体系,发展“研鉴结合、数实融合”的装备试验鉴定模式,缩短装备试验周期,降低试验成本,提升试验水平。

参考文献:

- [1] 杨春周,王曼曼. 航天装备一体化试验模式创新构想探讨[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(8): 238-244.
YANG C Z, WANG M M. Discussion on Innovative Conception of Space Equipment Integrated Test Mode[J]. Computer Measurement & Control, 2021, 29(8): 238-244.
- [2] GJB 4239A—2022, 装备环境工程通用要求[S].
GJB 4239A—2022, General Requirements for Materiel Environmental Engineering[S].
- [3] 张正平,王宇宏,朱曦全. 动力学综合环境试验技术现状和发展[J]. 装备环境工程, 2006, 3(4): 7-11.
ZHANG Z P, WANG Y H, ZHU X Q. Current State and Developing Trend of Combined Dynamic Environmental Test[J]. Equipment Environmental Engineering, 2006, 3(4): 7-11.

- [4] 赵保平, 孙建亮, 庞勇. 航天产品环境适应性问题研究[J]. 装备环境工程, 2011, 8(2): 51-57.
ZHAO B P, SUN J L, PANG Y. Research on Environmental Worthiness Problems of Aerospace Product[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(2): 51-57.
- [5] 吴建国, 李海波, 张琪, 等. 综合离心环境试验技术研究进展[J]. 强度与环境, 2014, 41(1): 1-9.
WU J G, LI H B, ZHANG Q, et al. Advances in Synthesis Centrifugal Environment Test[J]. Structure & Environment Engineering, 2014, 41(1): 1-9.
- [6] 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 C, LI M, SUN Z H, et al. Environmental Damage and Environmental Adaptability of the Aircraft in Marine Atmosphere[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2016, 36(3): 101-107.
- [7] 邹学锋, 郭定文, 潘凯, 等. 综合载荷环境下高超声速飞行器结构多场联合强度试验技术[J]. 航空学报, 2018, 39(12): 233-243.
ZOU X F, GUO D W, PAN K, et al. Test Technique for Multi-Load Combined Strength of Hypersonic Vehicle Structure under Complex Loading Environment[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(12): 233-243.
- [8] 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 Y, ZHANG H B, XUE H H, et al. Current Situations and Development Suggestions of Combined Environmental Test in China[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(5): 44-47.
- [9] 王俊峰, 韩增尧, 张玉梅, 等. 可重复使用航天器力学试验方法及试验条件设计综述[J]. 航天器环境工程, 2020, 37(5): 464-472.
WANG J F, HAN Z Y, ZHANG Y M, et al. Dynamic Test Method and Design of Test Specifications for Reusable Spacecraft[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2020, 37(5): 464-472.
- [10] 齐江龙, 张卫红, 陈雅曦, 等. 飞行器系统级噪声-振动-温度综合环境试验技术[J]. 导弹与航天运载技术, 2021(6): 56-59.
QI J L, ZHANG W H, CHEN Y X, et al. Thermo-Vibro-Acoustic Combined Environmental Testing Technology of System Level Vehicles[J]. Missiles and Space Vehicles, 2021(6): 56-59.
- [11] 苏波, 张高楠, 石先杰. 再入飞行振动环境试验等效性探讨[J]. 装备环境工程, 2021, 18(3): 86-91.
SU B, ZHANG G N, SHI X J. The Equivalence of re-Entry Flight Ground Vibration Test[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(3): 86-91.
- [12] 朱爱红, 孙亮, 李明, 等. 地空导弹武器装备环境适应性试验现状与未来发展[J]. 航天器环境工程, 2021, 38(5): 604-608.
ZHU A H, SUN L, LI M, et al. Environmental Adaptability Test for Ground-to-Air Missile Weapons and Equipment: Current State and Future Development[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2021, 38(5): 604-608.
- [13] 刘艳, 刘艺, 陈江攀, 等. 导弹自然环境适应性综合评价方法[J]. 现代防御技术, 2021, 49(3): 123-129.
LIU Y, LIU Y, CHEN J P, et al. Comprehensive Evaluation Method of Missile's Natural Environment Adaptability[J]. Modern Defence Technology, 2021, 49(3): 123-129.
- [14] 杨晓然, 赵方超, 杨小奎, 等. 多因素综合海洋气候环境模拟加速试验箱研制[J]. 装备环境工程, 2022, 19(10): 141-150.
YANG X R, ZHAO F C, YANG X K, et al. Development of Multifactor Integrated Marine Climate Simulation and Acceleration Test Chamber[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(10): 141-150.
- [15] 张仕念, 杨维忠, 夏克寒, 等. 一种基于综合环境剖面的导弹弹上设备加速贮存试验方法[J]. 装备环境工程, 2022, 19(12): 60-65.
ZHANG S N, YANG W Z, XIA K H, et al. Accelerated Storage Test Method for Missile Equipment Based on Comprehensive Environmental Profile[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(12): 60-65.
- [16] 李茜, 胡涛, 孙茂钧, 等. 海洋大气环境多因素组合/综合试验及方法现状分析[J]. 装备环境工程, 2023, 20(3): 84-90.
LI Q, HU T, SUN M J, et al. Analysis of Multi-Factor Combined/Comprehensive Test and Method in Marine Atmospheric Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(3): 84-90.
- [17] 王成章, 钟勇, 张薇, 等. 航空装备环境适应性试验鉴定工作展望[J]. 装备环境工程, 2023, 20(5): 6-11.
WANG C Z, ZHONG Y, ZHANG W, et al. Prospect of Environmental Adaptability Test and Appraisal of Aviation Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(5): 6-11.
- [18] 闫维亮, 杨丽, 周益春, 等. 热障涂层服役环境模拟试验方法的研究进展[J]. 航空制造技术, 2023, 66(17): 38-45.
YAN W L, YANG L, ZHOU Y C, et al. Research Progress of Service Environment Simulation Test Methods for Thermal Barrier Coatings[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(17): 38-45.
- [19] 张艳辉, 史明丽, 黄帅军. 空空导弹海洋大气自然环境试验研究[J]. 装备环境工程, 2024, 21(3): 11-15.
ZHANG Y H, SHI M L, HUANG S J. Marine Atmospheric Natural Environment Test for Air-to-Air Missiles[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(3): 11-15.
- [20] 杨晓宁. 新时期航天器环境工程面临的挑战与机遇[J]. 航天器环境工程, 2024, 41(1): 1-10.

- YANG X N. Challenges and Opportunities of Spacecraft Environment Engineering in the New Era[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2024, 41(1): 1-10.
- [21] 傅耘, 史左敏, 李敏伟. 新体制下装备环境适应性试验鉴定的思考[J]. 装备环境工程, 2023, 20(5): 1-5.
- FU Y, SHI Z M, LI M W. Thoughts on Materiel Environmental Worthiness Test and Evaluation in New System[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(5): 1-5.
- [22] 郭亚飞, 权晓伟, 刘力瑾, 等. 美军试验鉴定评估发展与启示[J]. 中国航天, 2021(9): 62-65.
- GUO Y F, QUAN X W, LIU L T, et al. Development and Enlightenment of U.S. Army Operational Test and Evaluation[J]. Aerospace China, 2021(9): 62-65.
- [23] 张梦. 武器装备环境试验及靶场条件建设研究[J]. 舰船电子工程, 2023, 43(3): 152-155.
- ZHANG M. Research on Environmental Test of Weapons and Range Construction of Conditions[J]. Ship Electronic Engineering, 2023, 43(3): 152-155.
- [24] 范金荣. 高技术武器装备的低成本发展[J]. 现代军事, 2007(8): 50-53.
- FAN J R. Low-Cost Development of High-Tech Weapons and Equipment[J]. Conmilit, 2007(8): 50-53.
- [25] 徐冠华. 动力学综合环境试验若干理论及技术问题的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- XU G H. Research on some Theoretical and Technical Problems of Dynamic Comprehensive Environmental Test[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [26] MIL-STD-810H-2019, Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests[S].
- [27] 王浚. 环境模拟技术——一门新的综合性工程技术[J]. 中国工程科学, 2003, 5(3): 1-5.
- WANG J. Environment Simulation Technology—A New Comprehensive Engineering Technique[J]. Engineering Science, 2003, 5(3): 1-5.
- [28] 王晓明. 军事极端环境模拟技术与设施发展趋势及建设策略[D]. 北京: 中国人民解放军军事医学科学院, 2017.
- WANG X M. Development Trend of Military Extreme Environmental Simulation Technology, Facilities and Construction Strategy[D]. Beijing: Academy of Military Medical Sciences, 2017.
- [29] GJB 150A—2009, 军用装备实验室环境试验方法[S]. GJB 150A—2009, Laboratory Environmental Test Methods for Military Materiel[S].
- [30] Department of Defense. DoDD 5000.01, the Defense Acquisition System[M]. Washington: Department of Defense, 2022.
- [31] Department of Defense. DoDI 5000. 89, Test and Evaluation[M]. Washington: Department of Defense, 2022.
- [32] MCLARNEY E, AMBUR M Y, YAGLE J, et al. Big Data Analytics and Machine Intelligence Capability Development at NASA Langley Research Center: Strategy, Roadmap, and Progress[R]. Hampton: NASA Langley Research Center, 2016.
- [33] HILFER G, TUSCH O, WU D S, et al. Changing the Philosophy of Full-Scale-Fatigue-Tests Derived from 50 Years of IABG Experience towards a Virtual Environment[C]// ICAF 2019-Structural Integrity in the Age of Additive Manufacturing. Krakow: [s. n.], 2019.