

机载传感器计量性能的自然环境试验方法探讨

施春英*, 张毅翔, 胡莞鑫, 邢润家

(中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要:为了准确评价机载传感器在自然环境长期、缓慢、综合累积作用下的计量性能,从机载传感器和自然环境的特性出发,对前期准备、试验方案、试验实施、结果分析和试验总结等方面的重要环节进行技术探讨,形成了一套相对通用的自然环境试验方法。通过自然环境试验,积累传感器计量指标变化的基础数据,为后续开展机载传感器计量性能的退化研究和计量周期研究提供支撑。

关键词:机载传感器; 计量性能; 自然环境试验; 试验流程; 综合效应; 有效性前提; 退化失效; 计量周期

中图分类号: TB9; TP212; V216 文献标志码: A 文章编号: 1674-5795 (2025) 06-0128-13

Study on natural environmental test methods for metrological performance of airborne sensors

SHI Chunying*, ZHANG Yixiang, HU Wanxin, XING Runjia

(AVIC Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: To accurately evaluate the metrological performance of airborne sensors under the prolonged, gradual, and cumulative influence of the natural environment, this study examines key technical aspects of the testing process — including preliminary preparations, test design, execution, result analysis, and reporting — based on the characteristics of both airborne sensors and natural environments. This exploration has resulted in the development of a relatively universal methodology for conducting natural environmental tests. These tests generate fundamental data on the changes in sensor metrological indicators, providing essential support for subsequent research on the performance degradation and the calibration cycle of airborne sensors.

Key words: airborne sensor; metrological performance; natural environment test; test procedure; comprehensive effect; premise of effectiveness; degradation failure; measurement cycle

0 引言

机载传感器作为飞机的“感官系统”,其性能

直接决定飞机飞行安全与任务执行效能。据统计,直升机的地面停放时间约占总使用时间的 96%^[1],这意味着机载传感器随飞机在机场贮存的时间远

收稿日期: 2025-07-14; 修回日期: 2025-09-26

基金项目: 国家“十四五”技术基础科研项目(JSJT2022xxxA002)

引用格式: 施春英, 张毅翔, 胡莞鑫, 等. 机载传感器计量性能的自然环境试验方法探讨[J]. 计测技术, 2025, 45(6):128-140.

Citation: SHI C Y, ZHANG Y X, HU W X, et al. Study on natural environmental test methods for metrological performance of airborne sensors [J]. Metrology & Measurement Technology, 2025, 45 (6) : 128-140.



超过实际作战和训练的时间。机场的自然环境是导致机载传感器在停放过程中出现腐蚀损伤的重要因素^[2]。然而，机载传感器经长期自然环境暴露后，其使用可靠性(即计量性能是否仍满足实际使用要求)尚未得到充分验证，因此亟须开展自然环境或实际工作环境下机载传感器计量性能评价的相关研究^[3-4]。

环境试验主要包括自然环境试验、实验室环境试验和使用环境试验3大类^[5]。其中，自然环境试验直接利用真实自然环境条件，可以真实反映各种自然环境因素的综合作用对产品的影响^[6]。而实验室环境试验是将产品置于人造环境试验条件下进行模拟试验，往往难以实现真实环境的综合模拟，导致试验结果与实际应用场景存在偏差^[7]。为准确评价机载传感器在复杂自然环境的长期、缓慢且综合累积作用下的计量性能，在试验条件允许的情况下，应优先开展自然环境试验。自然环境试验可广泛应用于机载传感器的前期方案论证、工程研制、鉴定定型、批量生产和实际使用等全寿命周期阶段^[8]。

目前，国内外的自然环境试验研究主要集中在武器装备、导弹、材料构件等领域，尚未有针

对机载传感器计量性能的自然环境试验方法。基于此，本文结合装备自然环境试验管理流程^[9]、工作流程^[10]，以及自然环境试验的剪裁程序、剪裁依据和剪裁原则^[11-12]，系统阐述了机载传感器计量性能的自然环境试验各环节的选择或确定要点，旨在规范并指导机载传感器自然环境试验工作的开展，进而提升试验效率和试验效果。

1 试验目的

机载传感器计量性能的自然环境试验属于典型的研究性试验，主要研究思路为：基于机载传感器的固有特性和全寿命周期经历的自然环境，利用真实的自然环境条件开展试验，获取不同自然环境效应下机载传感器的计量数据，为开展自然环境作用下机载传感器计量性能的退化规律研究提供数据支撑，最终用于指导机载传感器的计量周期。

2 试验流程

机载传感器计量性能的自然环境试验流程如图1所示，主要包括前期准备、试验方案、试验实施、试验结果分析、试验总结等工作内容。

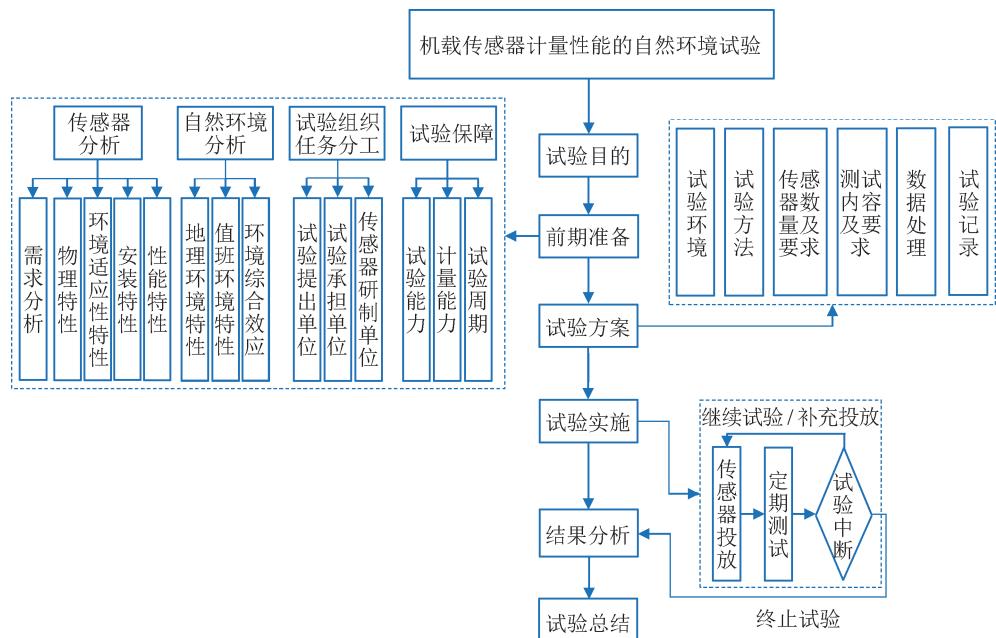


图1 机载传感器计量性能的自然环境试验流程图

Fig.1 Flow chart of natural environment test for metrological performance of airborne sensors

3 前期准备

开展机载传感器计量性能的自然环境试验前，需要系统完成传感器分析和自然环境分析，综合二者的分析结果来确定试验方案。

3.1 传感器分析

为明确自然环境试验的核心内容与实施重点，需针对机载传感器的设计特性和工程特性进行分析。具体分析内容如下：

1) 需求分析

明确开展机载传感器计量性能的自然环境试验的试验需求，根据不同的试验目的制定不同的试验方案。试验需求主要分为2个阶段：①研制阶段，旨在验证新研制的机载传感器对寿命期自然环境应力的适应性是否满足主机所的长期使用需求，核心关注稳定性、重复性、准确度等计量性能；②服役阶段，针对已经投入使用且故障频次相对较高的机载传感器，重点验证自然环境应力与故障参数相关的计量性能之间的关系。

2) 物理特性分析

物理特性分析主要针对机载传感器的敏感元器件、材料特性、结构特性等。

3) 环境适应性特性分析

环境适应性特性分析主要包括环境适应性设计要求、实验室环境试验结果、实际服役过程中的历史数据、相似传感器的环境适应性资料等。

基于机载传感器的物理特性和环境适应性特性，通过理论分析和试验验证的方法，明确机载传感器的敏感环境应力及应力水平、受影响的性能指标(与计量性能直接或间接相关的性能指标)及变化情况等。

4) 安装特性分析

明确实际使用时机载传感器的安装和连接方式，用于后续指导自然环境试验时机载传感器的现场试验工装设计。

5) 性能特性分析

梳理与试验需求相关的性能指标，包括物理机械性能、静态性能、动态性能等，并依据重要性进行排序，用于后续指导自然环境试验的计量指标确定。

3.2 自然环境分析

自然环境的主要特征体现为多种自然环境因素随机、动态性交替作用或同时出现。根据GJB 4239A-2022《装备环境工程通用要求》中工作项目101的规范要求，可明确机载传感器自然环境试验的相关信息^[13]，具体分析内容如下：

1) 地理环境特性分析

根据机载传感器搭载的飞机所停放的地理位置，分析当地的历年气候环境数据，包括自然环境因素类型、各类环境因素的时间占比和特征值，如均值、极值、总值等。

2) 值班环境特性分析

根据机载传感器所搭载的飞机的执行任务、传感器集成位置等工况信息，分析其在值班过程中所经历的自然环境因素，包括自然环境类型及出现的持续时间、频度、次数，以及可能遭遇的极值环境、特定环境因素类型(如大气、海水、诱发环境、大气污染物等)。

不同自然环境因素之间存在复杂的交互关系，既可能呈现耦合关联(如彼此加强或削弱)，也可能表现为相互独立。不同环境因素的综合效应见表1。

通过整合地理环境特性和值班环境特性的分析结果，确定机载传感器全寿命周期的自然环境剖面，结合传感器分析结果、不同自然环境应力的交互作用，筛选出对传感器性能有影响的所有自然环境因素。根据影响程度对自然环境因素进行排序，最终确定机载传感器计量性能的自然环境试验的主要环境因素。

3.3 试验组织任务分工

机载传感器计量性能的自然环境试验需要在预期可能遇到的各种类型的自然环境条件下进行试验，该试验需要多方单位协作完成。为了保证试验工作的顺利开展，可在试验前成立试验工作小组。试验工作小组的组成及任务分工可参照图2所示的组织架构图设立。

3.4 试验保障

为确保试验方案切实可行、最大限度获取真实的试验结果，需结合现有的试验能力、计量能力、试验周期等情况，进行试验保障。

表1 自然环境应力的综合效应
Tab.1 Comprehensive effects of natural environmental stresses

自然环境因素		综合应力效应	
潮湿	低气压	高温可加速水汽渗透过程；在高温高湿组合环境中，表面离子的活性增强，湿度相关的化学腐蚀和电化学效应会被高温增强。	
	盐雾	压力降低或温度升高，均会促进材料中各种成分的放气。二者形成相互增强效应。	
	太阳辐射	高温可加速盐雾的腐蚀速率。	
	霉菌	太阳辐射本身可诱发局部高温，该综合环境会加速有机材料退化。	
	沙尘	较高的温度可加速霉菌生长，但当温度超过71 °C时，霉菌和微生物将无法生长。	
		沙尘	高温可加速沙的侵蚀速率，但同时也会限制沙尘的穿透能力。
低温	低气压	温度降低会降低环境中的饱和水汽含量，导致湿度降低；但低温同时会引发水汽凝结，甚至结霜、结冰。	
	盐雾	二者的组合可加速密封腔体的泄漏(橡胶密封材料性能劣化)。	
	太阳辐射	低温会抑制盐雾的腐蚀速率。	
	霉菌	二者彼此抑制。	
	沙尘	低温会抑制霉菌的生长，当温度低于0 °C时，霉菌将进入休眠状态。	
		沙尘	低温会增强沙尘的穿透能力。
潮湿	低气压	潮湿会增强低气压的效应，尤其对于电子和电器设备。二者组合的实际效力受温度的影响非常大。	
	盐雾	高湿度可能稀释盐雾的浓度，对盐雾的腐蚀作用无影响。	
	太阳辐射	潮湿会增强太阳辐射引起的有机材料的退化。	
	霉菌	湿度有助于霉菌和微生物的生长，但不会增强霉菌自身的作用效力。	
	沙尘	沙尘对水具有亲和作用，可促进相关的退化机理(如电化学腐蚀和迁移等)。	
		盐雾	预计不会出现。
低气压	太阳辐射	高海拔地区的紫外线辐射更强。	
	霉菌	不会增大二者自身的影响。	
	沙尘	仅出现在极端的风暴气候。	
		霉菌	二者组合影响通常可忽略。
盐雾	沙尘	二者组合的腐蚀效果大于潮湿和沙尘的组合效果。	
		太阳辐射	一方面，太阳辐射的加热作用可诱发高温，二者组合可能产生与高温和霉菌相同的综合效果；另一方面，太阳辐射中的紫外线对霉菌有强杀灭效果。
	霉菌	沙尘	沙尘的吸附和堆积会影响散热，导致二者的组合可能产生高温。

1) 试验能力

试验应在能满足预期的自然环境类型和环境指标需求的自然环境试验站开展。当自然环境试验无法满足预期的试验条件要求时，可根据机载传感器的敏感环境应力及应力水平，选择具备相关自然环境加速试验条件的自然环境试验站。

自然环境试验站应具备环境因素监测场(点)，实现大气环境数据的自动采集与记录。同时，试验站应根据所在地的自然环境特征和传感器的安装方式，为机载传感器设计合理、专用的夹具或

安装支架，以模拟实际安装状态(如螺栓固定、线缆连接形式)。

试验人员应经过专业培训，熟练掌握机载传感器性能测试的方法。

2) 计量能力

机载传感器的计量工作必须由经过专业培训并取得相应专业资质的计量人员承担；计量设备均应在计量有效期内且可溯源。

对于投放在同一个自然环境试验站的机载传感器，在整个试验周期内，应尽可能由同一计量

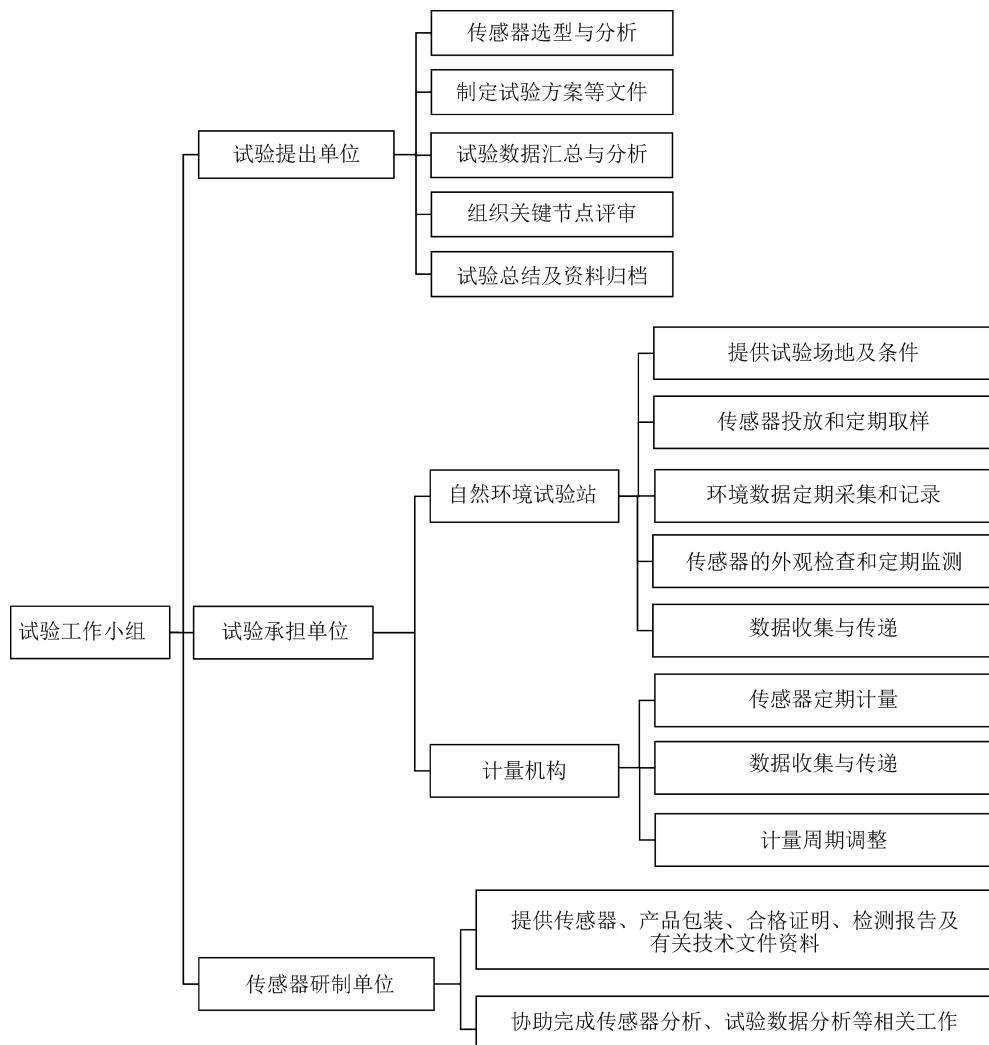


图2 试验工作小组组织架构图

Fig.2 Organizational structure diagram of the test work team

人员使用相同的计量方法、计量设备进行计量，以减少误差。

3) 试验周期

自然环境试验因需覆盖多类环境工况，一般需要在不同试验站进行，导致整体试验时间较长。为了尽可能缩短试验周期，应在不同的试验站同时投样开展试验。

为了减少交通运输等非试验状态的时间消耗，应首选满足机载传感器计量需求的当地或距离最近的计量机构开展计量工作。

4 试验方案

试验方案作为后续试验实施的总要求和输入，主要规定了试验环境、试验方法、传感器数量及

要求、测试内容及要求、数据处理、试验记录等方面的内容。

4.1 试验环境

结合 GB/T 4797. 1-2005《电工电子产品自然环境条件》的环境温度湿度极值^[14]、大气组分和地理特征分类法，我国的自然环境类型可以按表2进行分类，对应的环境特征详见 GJB 8893. 1-2017《装备自然环境试验》附录C的相关内容^[15]。

针对上述自然环境类型，国内以国防科技工业自然环境试验研究中心和中国兵器工业试验测试研究院为主要依托单位，分别建立了11个自然环境试验站和4个自然环境试验区（具体见表3），其覆盖范围涵盖了我国7个气候区域和3个海域的环境特征^[16]，可满足绝大多数机载传感器自然环

表2 我国自然环境类型
Tab.2 Types of natural environments in China

自然环境	具体分类
大气自然环境	湿热海洋环境、湿热雨林环境、亚湿热工业环境、暖温高原环境、暖温半乡村环境、干热沙漠环境、寒冷乡村环境
	热带海水环境、亚热带海水环境、温带海水环境

境试验的需求。

试验站的选择需基于试验需求，优先选择符合传感器预期或实际寿命期的自然环境剖面特征、能够覆盖其敏感环境应力类型的自然环境试验站。

若需选择多个自然环境试验站开展试验，可按以下2种模式实施：① 分别在选定的试验站同时投样试验，旨在研究机载传感器在预期经历的主要自然环境参数组合作用下的计量性能变化趋势；② 条件允许的情况下，依据机载传感器寿命期的自然环境剖面，依次在不同的试验站开展试

验，以研究机载传感器在预期经历的完整自然环境应力作用下的计量性能变化趋势。

4.2 试验方法

根据GJB 8893-2017《装备自然环境试验》的有关规定，机载传感器的自然环境试验方法可采用户外大气自然环境试验、棚下大气自然环境试验、库内大气自然环境试验3种经典试验方法。

3种经典试验方法的适用对象为：① 户外大气自然环境试验适用于直接外露在大气中使用的机载传感器；② 棚下大气自然环境试验适用于不直接暴露在太阳辐射、雨水等环境，但与外界大气环境相通的机载传感器；③ 库内大气自然环境试验适用于与外界大气环境隔离，在机身内部区域使用的机载传感器。

若经典的自然环境试验无法满足试验条件要求，可通过配置特殊的试验装置，强化机载传感器预期经历的主要环境因素及量值(环境应力的频率、幅度、持续时间等)，实现户外自然环境试验

表3 自然环境试验站及其特点
Tab.3 Natural environment test stations and their characteristics

试验站名称	自然环境类型	环境特征
漠河站	寒冷乡村环境	高寒、温差大；最低温度可达-52.3 °C，全年-40 °C的天气持续2个月以上。
敦煌站	干热沙漠环境	约昼夜温差巨大、光照时间长、太阳辐射强烈、沙尘暴频发等；年平均温度10.8 °C，最高温度45.6 °C，最低温度-29.5 °C。
拉萨站	暖温高原环境	空气稀薄、氧气含量少、气压低、昼夜温差大、太阳辐射强等；是我国太阳辐射高值中心区。
江津站	亚湿热工业环境	高温、高湿、多雨、光照较少、水汽凝结时间长，存在酸雨、雾霾等现象。是大气环境腐蚀试验的重要站点之一。
万宁站	湿热海洋环境	高温、高湿、高盐雾、强辐射。
北京站	温带亚湿润环境	季节性明显，温差较大，气候干燥。
西双版纳站	热带雨林环境	降雨多、雨量充沛、高湿高热。
永兴岛	湿热海洋环境	高温、高湿、高盐雾、强太阳辐射。
青岛站	暖温半乡村环境	环境温差小，海水温度低。
厦门站	亚热带海洋环境	盐度低、潮差宽、流速高、水温适中、海洋生物资源丰富。
三亚站	热带海水环境	热带海洋环境。
华阴试验区	温带大陆性气候	夏季炎热，平均温度13.5 °C，年降雨量为710 mm，日照时间2 130 h。
阿拉善试验区	温带荒漠气候	风沙大、干旱少雨、太阳辐射强，平均温度7.2 °C，年降雨量80 mm，日照时间3 316 h。
格尔木试验区	大陆高原气候	海拔高、气压低、太阳辐射强，平均温度6 °C，年降雨量41.5 mm，年日照时间3 358 h。
南昌试验区	亚热带湿润季风气候	湿热多雨，平均温度17 °C，年降雨量1 600 mm，年日照时间1 800 h。

的加速开展。

目前比较成熟的自然环境加速试验方法包括跟踪太阳暴露试验、玻璃框下暴露试验、黑箱暴露试验、户外应力腐蚀试验、周期喷淋户外暴露试验。

4.3 传感器数量及要求

每个自然环境试验站的机载传感器数量应满足试验目的、试验周期、取回分析等要求，一般每组至少选3支传感器，具体可参考GB/T 8054—2008《计量标准型一次抽样检验程序及表》、GB/T 14165—2008《金属和合金大气腐蚀试验现场试验的一般要求》等有关国家标准和行业标准^[17-18]。

机载传感器的表面状态和技术状态应与实际使用状态保持一致或者高度接近，同一批次的传感器应具有相同的表面状态和技术状态，且无明显缺陷。

4.4 测试内容及要求

4.4.1 环境参数

环境参数主要分为自然环境参数和微环境参数。其中，微环境参数指机载传感器实际布置位置局部区域的自然环境，用于修正局部环境效应引起的数据偏差。

1) 自然环境参数

参照GJB 8894.1—2017《自然环境因素测定方法》的相关规定执行，由自然环境试验站的环境监测场(点)自动采集并进行报表统计，主要记录试验地点的大气环境因素和大气腐蚀因素。

2) 微环境参数

采用自动采集装置，监测机载传感器的敏感环境因素及与其存在交互作用的关联环境因素。微环境参数的测试周期与自然环境参数的采集周期保持一致。

为保障测试数据的准确性和可靠性，微环境监测装置所搭载的传感器需要定期计量校准，且具有较好的稳定性。

4.4.2 计量参数及取样周期

利用主观赋权法、客观赋权法或组合赋权法等方法，确定机载传感器各计量指标的权重，根据试验需求，选择与传感器实际需求强相关的主要计量指标作为研究对象。计量指标包括静态特

性指标(如零点漂移、灵敏度、线性度、重复性、准确度等)、动态特性指标(如频率响应等)及稳定性指标。

自然环境的综合效应需要长时间才能体现出来，在试验前期，传感器的计量指标通常无显著变化；当自然环境效应累积到某一阈值后，传感器的计量指标会呈现较为明显的变化趋势。因此，取样周期应遵循“先密后疏”、“先疏后密”、“先密后疏再密”等原则进行确定。

4.4.3 其他参数

为跟踪机载传感器在不同自然环境条件下的状态变化，需在自然环境试验站对传感器的外观和其他性能进行实时监测。

通常每3个月或6个月进行1次外观检查，主要检查内容包括：外表面漆层、涂层、镀层、非金属件、电连接器针/孔、可变形尺寸、连接处等。

根据机载传感器预期或实际使用过程中的测试数据，结合机载传感器计量时的原始数据，确定监测的性能指标(如零点输出、绝缘电阻等)。

依据机载传感器的相关技术文件和测试需求，确定性能指标的测试方法和测试周期。

4.5 数据处理

试验期间，由试验承担单位分别建立各类数据的原始数据日志，每次测试完成后及时迭代数据日志。

环境数据由自然环境试验站根据试验提出单位的数据分析需求，对原始数据进行处理，主要采用统计学方法对采集的数据进行预处理(异常值剔除、标准化等)，统计得到主要自然环境参数的特征值，如均值、极大值、极小值、占比等。

计量数据由计量机构严格依据相关检定规程、校准规范内规定的方法进行数据处理。

其他参数的数据处理由试验提出单位根据有关技术文件规定的方法进行处理。涉及的技术文件包括传感器研制单位的测试文件、用户的运维日志等。

4.6 试验记录

试验期间需记录自然环境参数、微环境参数、传感器监测数据和传感器计量数据，具体记录内容如下：

1) 自然环境参数

试验站地点、自然环境试验方法、采集日期、自然环境类型(温度、湿度、气压、太阳辐照、氯离子、pH、降雨等)及统计值等(极高值、极低值、平均值、年总值、时间占比等)。

2) 微环境参数

试验站地点、采集日期、传感器周围的微环境类型(重点关注敏感环境应力和具有交互作用的其他自然环境应力)及统计值等。

3) 实验室计量数据

传感器的型号、编号、投样日期、投样地点、自然环境试验方法、计量单位、计量人员、计量日期、计量参数及结果等。

4) 现场监测数据

传感器的型号、编号、投样日期、投样地点、自然环境试验方法、测试单位、测试人员、测试周期、测试参数及结果等。

5 试验实施

5.1 传感器投放

试验开始前,需对每件传感器试验样品进行唯一编号标识,并建立传感器台账。标识的内容包括:试验环境、试验场地、试验方法,传感器的名称、型号、编号。制作专门的标牌悬挂于传感器上,并保证试验过程中标识始终保持清晰可辨。

投放前,由试验提出单位和计量机构对其初始技术状态进行核验,包括外观完好性、初始计量性能状态、其他性能指标符合性等。状态核验合格后,由试验提出单位将传感器交接至自然环境试验站现场,双方完成开箱清点及最终状态确认。

自然环境试验站根据试验方法、参数测试方法、传感器安装和连接形式,完成试验现场的相关布置。

5.2 定期测试

试验期间,由试验承担单位定期开展各类参数的测试工作,并及时将测试数据收集汇总后传递给试验提出单位。

自然环境试验站需按照测试周期定期进行测试,同时依据取样周期定期取样;并将传感器交给计量机构,记录交接信息(包括交接日期、交接人员、传感器清单等)。

计量机构接收到传感器后,确认传感器的技术状态,确认无误后即开展计量工作。计量时间应尽可能缩短,计量完成后,及时将传感器交还自然环境试验站,并由试验站及时恢复自然环境试验状态。

所用的测试设备和仪器均应在计量有效期内。每次计量和测试完成后,均应形成相应的原始记录,并及时传递给试验提出单位。

试验期间,禁止对机载传感器进行预防性维修或调整。每次计量或现场测试结束后,计量机构和试验站需要及时对原始数据进行复核,确保数据准确性。

5.3 试验中断

试验过程中若出现中断情况,需按中断类型采取针对性处理措施,具体处理方法如下:

1) 自然灾害中断

由于自然灾害等不可抗力导致试验中断,待试验场地条件正常后,应及时恢复试验。中断时间不计入试验持续时间,相关情况需在试验报告中注明。

2) 故障中断

由于现场测试系统故障、断电、过压等原因导致试验中断,应尽快修复,同时分析对传感器的影响。根据评估结果决定是否继续试验,或是采用新的传感器重新试验。

3) 试验终止条件

当出现下列条件之一时,试验应终止:①传感器计量参数分析结果已达到预期试验目的;②传感器出现结构性损坏,导致计量性能测试无法开展;③试验过程中出现安全隐患,或发生危及人员、设备安全的突发情况。

6 试验结果分析

由试验提出单位对试验数据进行周期性迭代分析,及时把控试验进度与有效性。

6.1 试验有效性前提

试验有效性的前提是试验数据需满足完整性、可靠性和关联性的要求。

1) 数据完整性

检查试验期间的关键数据是否存在缺失,若

存在缺失(如采集设备故障导致数据未采集)，需通过插值法、补充试验等手段弥补，确保数据完整覆盖试验周期。

2) 数据可靠性

若试验数据存在异常波动，需要结合试验日志判断是否为短期随机干扰，并通过数据平滑处理(如移动平均法)提取趋势性数据，确保最终结果反映自然环境的“长期累积效应”而非短期随机波动。当试验的早期数据出现明显异常时，由试验承担单位进行数据复查并采取补救措施。当试验的中后期数据出现异常时，由试验提出单位、试验承担单位和传感器研制单位共同对数据进行分析，确定后续试验方案，避免因方案设计缺陷导致试验无效。

3) 数据关联性

在确保试验数据的完整性和准确性后，对“自然环境因素-计量性能”的关联性进行统计检验，采用方差分析法(Analysis of Variance, ANOVA)、相关性分析法(如Pearson相关系数)等数学方法，判断不同自然环境因素对传感器计量指标的影响程度或相关程度。

6.2 试验结果分析方法

基于数据关联性结果，进一步对自然环境参数和计量指标进行定性分析和定量分析。

1) 定性分析

定性分析适用于传感器的自然环境适应性设计与验证需求，主要采用以下2种方法：①图表法，绘制自然环境条件与计量指标、其他性能参数等的图表，直观描述机载传感器的计量指标随自然环境条件的周期性变化趋势、计量指标与其他性能参数在时间域的关系等；②两两比对法，当需要对多个自然环境试验站的同一个计量参数或其他性能参数进行分析时，参考Santy的1-9标度法，分析不同自然环境因素对传感器计量指标的影响程度。

2) 定量分析

自然环境应力具有多元性、随机性、动态性等特征，传感器的计量参数随时间变化的退变量存在一定的不确定性，需根据失效规律采用针对性分析方法。

若计量参数呈现退化型失效规律，可采用基于统计和随机过程的退化模型构建方法，构建包含自然环境参数与传感器计量参数的退化模型。构建模型时，一般需通过主成分分析法、层次分析法(Aalytic Hierarchy Process, AHP)等数学方法对自然环境参数进行剪裁，确定各参数的权重。根据构建的退化模型，基于“失效标准”确定失效时间。

若计量参数呈现突发型失效规律，则构建计量参数与时间的数学关系，确定在特定自然环境条件下计量参数的失效时间。

当需要进一步剖析引起传感器计量参数退化的失效机理时，可联合传感器研制单位开展失效分析试验。

6.3 符合性验证

根据定性分析和定量分析结果，基于传感器结构材料相关的科学原理、真实使用数据等，开展作用机制一致性、失效趋势一致性分析，验证自然环境试验的有效性。

7 试验总结

全部试验完成后，试验工作小组需对完整的试验过程及结果汇总分析，形成试验总结报告，报告应涵盖以下内容：①试验依据及目的：列出试验的任务来源文件，并说明试验预期达到的目的；②试验安排及任务分工：汇总试验项目名称、进度安排、试验组织单位、参试单位、任务分工、试验地点等信息；③试验条件：概括试验环境、采用的仪器设备及其技术状态、传感器的技术状态等条件；④试验内容及试验记录：依据试验方案，逐条描述试验过程，汇总试验的各项结果；⑤试验故障及处理方法：描述试验中出现的故障或异常现象，说明故障分析过程和采取的解决措施；⑥试验结果分析：阐述环境数据、传感器监测数据、计量数据的处理过程和分析方法，并对分析结果进行评价；⑦试验结论：明确不同自然环境的长期效应与机载传感器的计量性能变化的关系，总结现有试验的不足之处，为后续的研究工作提出改进意见。

8 应用范围

本文提出的自然环境试验方法适用于多种类型的机载传感器，具有较好的普适性。

通过自然环境试验的长期数据积累，可以获取自然环境数据、传感器固有特性、试验方法、计量性能数据、计量性能退化模型、退化时间等信息，构建专用的机载传感器计量性能自然环境试验数据库。

该数据库可为新时代机载传感器的环境适应性分析与设计、环境试验方法、不同自然环境下的使用建议等提供坚实的数据支撑，进一步推动传感器技术的快速发展^[19]。

9 应用案例

9.1 试验目的

以某型飞机上使用的典型温度、压力和振动(加速度)传感器作为研究对象，研究其计量性能在长期自然环境作用下的变化规律。

9.2 试验方案

9.2.1 试验环境

根据环境应力在传感器性能失效中的权重分析，确定温度、湿度、盐雾、太阳辐照、低气压

这5种环境参数的影响较大。通过分析传感器服役环境特征，并基于自然环境复杂性、覆盖性、综合性的要求，选择拉萨站、万宁站、漠河站分别开展高原低气压气候、湿热海洋气候、低温寒冷气候下的自然环境试验。3个地区的环境类型及基本环境参数见表4。

9.2.2 试验方法

结合飞机备战状态(机场备战、机库备战)，参照GJB 8893.2-2017《军用装备自然环境试验方法》第2部分：户外大气暴露试验和GJB 8893.4-2017《军用装备自然环境试验方法》第4部分：库内大气暴露试验，分别开展户外大气暴露试验和库内大气暴露试验。

户外大气暴露试验是将非包装状态下的传感器直接暴露于户外大气环境条件下的自然环境试验；库内大气暴露试验是将非包装状态下的传感器直接暴露于不可控气候参数的库房内，不接受太阳辐射和雨淋的作用。

试验期间，为了模拟飞机值班过程中传感器受到的疲劳损伤效应，需定期施加振动应力。

9.2.3 传感器数量

3个试验站在2种试验方法下投放的3类机载传感器的数量见表5。

表4 试验站环境类型及基本参数

Tab.4 Environmental types and basic parameters of test stations

试验 站点	年均气温/℃	年均相对 湿度/%	年日照 时数/h	年总辐射量 /(MJ/m ²)	年降雨量 /mm	雨水pH值	空气中氯离子 /[mg/100(cm ² ·d)]
拉萨站	4.5	55	3 100	7 500	581	7.1	
万宁站	26.0	83	2 618	6 410	2 199		5.2
漠河站	-1.8	66	1 942	3 400	491	7.1	

表5 传感器数量

Tab.5 Number of sensors

传感器类型	拉萨试验站				万宁试验站				漠河试验站			
	HJ组	HD组	KJ组	KD组	HJ组	HD组	KJ组	KD组	HJ组	HD组	KJ组	KD组
温度传感器	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2
压力传感器	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2
加速度传感器	0	0	5	0	0	0	5	0	0	0	5	0

注：H为户外暴露；K为库内暴露；J为静态暴露（不通电）；D为通电暴露。

表6 传感器计量指标及校准间隔

Tab.6 Sensor metrological indicators and calibration intervals

序号	传感器类型	计量指标	暴露试验计量校准间隔/月
1	温度传感器	允差	1, 2, 3, 6, 9, 12, 15
		基本误差	1, 2, 3, 6, 9, 12, 15
		重复性	1, 2, 3, 6, 9, 12, 15
		迟滞	1, 2, 3, 6, 9, 12, 15
		线性度	1, 2, 3, 6, 9, 12, 15
2	压力传感器	零点漂移	1, 2, 3, 6, 9, 12, 15
		灵敏度	1, 2, 3, 6, 9, 12, 15
		灵敏度幅值	1, 2, 3, 6, 9, 12, 15
		频率响应	1, 2, 3, 6, 9, 12, 15
		幅值线性度	1, 2, 3, 6, 9, 12, 15
3	加速度传感器		

9.2.4 计量参数及取样周期

根据用户测试需求和检定规程规定,本次试验重点关注传感器的静态计量指标。传感器的取样周期和计量指标见表6。

9.3 试验结果分析

基于为期15个月的自然环境试验数据进行分析,结合各类型传感器对应的计量检定规程,系统分析温度、压力、加速度3类传感器计量性能随复杂自然环境的变化规律。

依据JJG 229-2010《工业铂、铜热电阻检定规程》,B级Pt100的铂电阻温度传感器在-50、0、100、250 °C温度点下,允差的计量要求分别为±0.55、±0.3、±0.8、±1.55 °C。不同自然环境条件的计量指标的变化规律见表7。通过定性分析可知:太阳辐射、高温高湿和温度循环的组合应力对铂电阻的允差影响较大。

表7 温度传感器计量指标与复杂自然环境的关系

Tab.7 Relationship between metrological indicators of temperature sensors and complex natural environment

试验站	试验方式	自然环境效应	计量指标变化规律			
			-50 °C	0 °C	100 °C	250 °C
拉萨站	户外大气暴露	昼夜温差大、低湿、低气压、强辐射(日照长)	偶发超差	偶发超差	偶发超差	偶发超差
	库内大气暴露	昼夜温差大、低湿、低气压	均未超差	均未超差	均未超差	均未超差
万宁站	户外大气暴露	高温、高湿、酸性盐雾、强辐射	偶发超差	偶发超差	偶发超差	偶发超差
	库内大气暴露	高温、高湿、酸性盐雾	均未超差	均未超差	均未超差	均未超差
漠河站	户外大气暴露	低温低湿与高温高湿交变	偶发超差	偶发超差	均未超差	均未超差
	库内大气暴露	低温低湿与高温高湿交变	均未超差	均未超差	均未超差	均未超差

表8 压力传感器计量指标与复杂自然环境的关系

Tab.8 Relationship between metrological indicators of pressure sensors and complex natural environment

试验站	试验方式	自然环境效应	计量指标变化规律				
			基本误差限	零点漂移	重复性	迟滞	线性
拉萨站	户外大气暴露	昼夜温差大、低湿、低气压、强辐射(日照长)	均未超差	均未超差	均未超差	均未超差	缓慢下降
			均未超差	均未超差	均未超差	均未超差	缓慢下降
万宁站	户外大气暴露	高温、高湿、酸性盐雾、强辐射	偶发超差	均未超差	均未超差	偶发超差	缓慢下降
			均未超差	均未超差	均未超差	均未超差	缓慢下降
漠河站	户外大气暴露	低温低湿与高温高湿交变	均未超差	均未超差	均未超差	均未超差	缓慢下降
			均未超差	均未超差	均未超差	均未超差	缓慢下降

依据JJG 860-2015《压力传感器(静态)检定规程》，对于准确度等级0.01的压力传感器，其基本误差限、零点漂移、重复性、迟滞和线性的计量要求均为1‰。不同自然环境条件的计量指标变化规律见表8。通过定性分析可知：高温-高湿-高盐-太阳辐射的综合效应对压电式压力传感器的允差影响较大，在各项环境因素中，温度对

传感器灵敏度的影响最为显著。

依据JJG 223-2008《压电加速度计检定规程》，加速度传感器频率响应和幅值线性度的计量要求分别为±5%和±3%。不同自然环境条件的计量指标变化规律见表9。通过定性分析可知：高温高湿对压电式加速度传感器的频率响应影响较大。

表9 加速度传感器计量指标与复杂自然环境的关系

Tab.9 Relationship between metrological indicators of acceleration sensors and complex natural environment

试验站	试验方式	自然环境效应	计量指标变化规律		
			灵敏度	频率响应	幅值线性度
拉萨站	库内大气暴露	昼夜温差大、低湿、低气压	相对平稳	偶发超差	均未超差
万宁站	库内大气暴露	高温、高湿、酸性盐雾	相对平稳	偶发超差	均未超差
漠河站	库内大气暴露	低温低湿与高温高湿交变	相对平稳	偶发超差	均未超差

10 结束语

本文针对复杂自然环境下机载传感器计量性能评价的需求，提出了一套通用的自然环境试验方法，从机载传感器的固有特性和经历自然环境剖面出发，探讨了机载传感器计量性能的自然环境试验各环节的技术或管理重点。

利用该试验方法，可以积累不同自然环境作用下机载传感器的各项计量参数变化的真实数据，作为开展不同计量性能的退化(失效)研究的基础，最终用于重新评价不同类型机载传感器的计量周期。

参考文献

- [1] 吴云章, 沈军, 钟勇, 等. 内陆湿热地区机场环境谱编制[J]. 装备环境工程, 2020, 17(6): 101-106.
WU Y Z, SHEN J, ZHONG Y, et al. Compilation of airport environmental spectrum in hot and humid inland areas [J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17 (6): 101-106. (in Chinese)
- [2] 牛犇, 刘溅洪. 高原地区机场自然环境谱编制研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(4): 122-127.
NIU B, LIU J H. Compilation of natural environment spectrum of airport in plateau Area [J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(4): 122-127. (in Chinese)
- [3] 施春英, 李程. 复杂环境下传感器性能校准的现状及发展趋势[J]. 计测技术, 2019, 39(4): 73-79.
SHI C Y, LI C. Current situation and development trend of sensor performance calibration in complex environment [J]. Metrology & Measurement Technology, 2019, 39 (4): 73-79. (in Chinese)
- [4] 海樱, 李程, 商一奇. 航空传感器性能评价研究现状及发展趋势[J]. 计测技术, 2020, 40(2): 1-6.
HAI Y, LI C, SHANG Y Q. Research situation and development trend of aeronautic sensor performance evaluation [J]. Metrology & Measurement Technology, 2020, 40 (2): 1-6. (in Chinese)
- [5] 周堃, 吴护林, 吴德权, 等. 环境试验与装备环境工程发展历程及相关标准[J]. 装备环境工程, 2025, 22 (3): 146-151.
ZHOU K, WU H L, WU D Q, et al. Development process and related standards of environmental testing and equipment environmental engineering [J]. Equipment Environmental Engineering, 2025, 22 (3): 146-151. (in Chinese)
- [6] 祝耀昌, 王建刚. 各种环境试验的特点及其应用分析[J]. 航空标准化与质量, 2005(1): 38-42.
ZHU Y C, WANG J G. Characteristics of different types of environmental tests and an analysis of their application [J]. Aeronautic Standardization & Quality, 2005 (1): 38-42. (in Chinese)
- [7] 康志萍. 环境试验特点及其发展方向[J]. 环境技术, 2012, 30(4): 15-18, 35.
KANG Z P. The characteristic and development direction

- of environmental test [J]. Environmental Technology, 2012, 30(4): 15–18, 35. (in Chinese)
- [8] 孙成, 孙灏, 陈中青, 等. 浅析军用装备自然环境试验与实验室环境试验的关系[J]. 环境技术, 2021(4): 53–55.
- SUN C, SUN H, CHEN Z Q, et al. Analysis on the relationship between natural environmental test of military equipment and laboratory Environmental test[J]. Environmental Technology, 2021 (4): 53–55. (in Chinese)
- [9] 苏艳, 舒德学, 杨晓然. 装备全寿命期自然环境试验工作的管理[J]. 装备环境工程, 2004, 1(3):13–17.
- SU Y, SHU D X, YANG X R. Management of natural environmental testing work throughout the equipment's full life cycle [J]. Equipment Environmental Engineering, 2004, 1(3):13–17. (in Chinese)
- [10] 赵朋飞, 张生鹏, 翟疆, 等. 航天导弹装备自然环境试验方法探讨[J]. 装备环境工程. 2017(11): 37–43.
- ZHAO P F, ZHANG S P, ZHAI J, et al. Testing methods for space missile materiel in natural - environment [J]. Equipment Environmental Engineering, 2017 (11) 37–43. (in Chinese)
- [11] 秦晓洲, 李颖. 军用装备自然环境试验方法剪裁探讨 [J]. 装备环境工程, 2011, 8(3): 54–57, 69.
- QIN X Z, LI Y. On tailoring of natural environmental test methods of materiel[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(3): 54–57, 69. (in Chinese)
- [12] 苏艳, 张伦武, 朱玉琴. 自然环境试验剪裁技术探讨 [J]. 标准科学, 2014(4): 47–50.
- SU Y, ZHANG L W, ZHU Y Q. Study on natural environmental test tailoring technology [J]. Standard Science, 2014(4): 47–50. (in Chinese)
- [13] 中央军委装备发展部. 装备环境工程通用要求: GJB 4239A–2022[S]. 国家军用标准出版发行部, 2022.
- Equipment Development Department of People's Republic of China Central Military Commission. General requirements for materiel environmental engineering: GJB 4239A–2022 [S]. National Military Standard Publication and Distribution Department, 2022. (in Chinese)
- [14] 国家市场监督管理总局. 环境条件分类 自然环境条件 温度和湿度: GB/T 4797. 1–2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- State Administration for Market Regulation. Classification of environment conditions — environment conditions appearing in nature — temperature and humidity: GB/ T 4797. 1–2018 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008. (in Chinese)
- [15] 中央军委装备发展部. 军用装备自然环境试验方法: GJB 8893–2017[S]. 国家军用标准出版发行部, 2017.
- Equipment Development Department of People's Republic of China Central Military Commission. Natural environmental test methods for military materiel: GJB 8893–2017 [S]. National Military Standard Publication and Distribution Department, 2017. (in Chinese)
- [16] 胡杰, 曹鹏, 马营, 等. 武器装备环境试验现状和思考 [J]. 装备环境工程, 2024, 21(6): 16–22.
- HU J, CAO P, MA Y, et al. Current situation and thinking of environmental test of weapons and equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21 (6) : 16–22. (in Chinese)
- [17] 国家质量监督检验检疫总局. 金属和合金大气腐蚀试验现场试验的一般要求: GB/T 14165–2008[S]. 北京: 中国质检出版社, 2008.
- State Administration for Market Regulation. Corrosion of metal and alloys — atmospheric corrosion testing — general requirement for field tests: GB/ T 14165–2008 [S]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2008. (in Chinese)
- [18] 国家质量监督检验检疫总局. 计量标准型一次抽样检验程序及表: GB/T 8054–2008[S]. 北京: 中国质检出版社, 2008.
- State Administration for Market Regulation. Single sampling procedures and tables for inspection having desired operating characteristics by variables: GB/ T 8054–2008 [S]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2008. (in Chinese)
- [19] 秦晓洲, 常文君. 自然环境试验与武器装备发展[J]. 装备环境工程, 2005, 2(1): 7–10.
- QIN X Z, CHANG W J. Natural environmental test and the development of material[J]. Equipment Environmental Engineering, 2005, 2(1): 7–10. (in Chinese)

(本文编辑: 刘宇轩)



第一/通信作者: 施春英(1991—), 女, 工程师, 主要研究方向为传感器计量性能综合评价技术、测试仪器性能综合评价技术和通用装备性能及环境可靠性试验评价技术。