

低空领域智能传感设备计量溯源体系构建研究

王胜超

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 100000

摘要: 随着低空经济的蓬勃发展,以无人机、电动垂直起降飞行器(eVTOL)等为代表的低空航空器在物流配送、城市治理、应急救援、农林植保等领域得到广泛应用。作为其感知、决策与控制核心的智能传感设备,其测量数据的准确性、可靠性和一致性直接关乎飞行安全、空域秩序乃至公共安全。然而,低空环境的复杂性、传感器的高度集成化与微型化、以及应用场景的动态多变性,给传统计量溯源体系带来了前所未有的挑战。当前,低空智能传感设备普遍面临量值传递链条断裂、校准方法缺失、标准物质匮乏等系统性难题,导致“测不准、不可信、难比对”的困境。本文旨在系统剖析低空领域智能传感设备计量溯源所面临的特殊性与核心瓶颈,并从顶层设计、技术路径、标准规范和运行机制四个维度,提出一套覆盖“全参数、全寿命、全产业链”的新型计量溯源体系构建方案。研究表明,必须打破传统计量的思维定式,通过融合原位校准、在线监测、数字孪生、区块链等新兴技术,构建一个动态、可信、可追溯的量值保障网络,为低空经济的安全、健康、高质量发展筑牢技术基石。

关键词: 低空经济;智能传感设备;计量溯源;量值传递;可信测量

引言

低空空域(通常指真高1000米以下)正成为继陆地、海洋之后的重要战略空间,国家密集出台政策推动低空经济产业化、规模化发展。作为低空智能装备核心的各类传感器——如IMU、GNSS接收机、激光雷达、毫米波雷达、视觉与大气数据传感器等,其性能直接决定飞行器的态势感知、自主导航精度与控制稳定性。计量作为确保量值准确统一的基础,是保障低空安全运行、提升效率的技术前提,也是构建公平市场、促进技术创新的制度支撑。然而,传统“送检-校准-发证”的离线计量模式,主要适用于静态、单一、实验室环境下的仪器,难以应对低空传感设备“动态、集成、嵌入式、多参数融合”的特性。在复杂气象、电磁干扰和高速机动等严苛工况下,传感器性能易发生漂移;而高度集成的结构又使拆卸送检成本高、易破坏原有标定关系,导致校准失真。因此,亟需构建一套科学、高效、适应动态与嵌入式特点的新型计量溯源体系,实现测量结果向国家或国际基准的有效溯源,以支撑低空经济安全、可靠、高质量发展。

1 低空领域智能传感设备计量溯源的特殊性与挑战

1.1 应用场景的极端复杂性与动态性

低空飞行环境迥异于地面实验室的受控环境。智能传感设备需在剧烈变化的温度、湿度、气压、振动、冲击以及复杂的电磁频谱环境中持续工作。例如,大气数据传感器需要在高速气流中精确测量微小的静压和动压差;GNSS接收机在城市峡谷或高压线附近易受多路径效

应和射频干扰影响;IMU在高机动飞行中会经历远超常规的角速度和加速度。这些严苛的外部条件会显著影响传感器的灵敏度、线性度、零偏和噪声水平,使得在标准实验室环境下获得的校准数据,在实际飞行中可能严重偏离。传统的、静态的校准方法无法有效表征和修正这种动态环境下的测量偏差。

1.2 设备的高度集成化与微型化

现代低空航空器追求轻量化和高集成度,智能传感设备往往不再是独立的单元,而是以微机电系统(MEMS)芯片或系统级封装(SiP)的形式,深度嵌入到飞控计算机、导航模块等核心部件中。这种高度集成化带来了两大溯源难题:一是物理上难以分离。将传感器从整机中无损拆卸进行单独校准几乎不可能,强行拆卸会破坏其精密的机械和电气连接,甚至导致永久性损坏^[1]。二是功能上的耦合性。许多智能传感器的输出并非原始物理量,而是经过内部算法处理后的融合信息(如姿态角、位置坐标)。这种“黑箱”特性使得溯源对象变得模糊,难以确定是对底层物理敏感元件溯源,还是对上层算法输出的结果溯源。

1.3 多源异构数据的融合与可信度评估

低空航空器的可靠运行依赖于多传感器信息的深度融合。单一传感器的数据可能存在噪声、偏差甚至失效,只有通过卡尔曼滤波、粒子滤波等先进算法对来自IMU、GNSS、视觉、雷达等多源异构数据进行时空对齐、冗余校验和最优估计,才能获得高置信度的综合态势感知结果。这给计量溯源提出了更高维度的要求:不

仅要保证每个单一传感器的量值准确，更要确保整个感知系统的融合算法是公正、透明、可验证的。如何对这种复杂的、非线性的、实时的融合过程进行计量评价和溯源，是传统计量学未曾面对的全新课题。

1.4 现有溯源体系的结构性缺失

目前，我国乃至全球范围内，针对低空智能传感设备的专用计量标准、校准规范和标准物质严重匮乏。国家计量基准和标准大多集中在基础物理量（如长度、质量、时间），而面向低空特定应用场景（如动态角速度、微小气压差、复杂电磁环境下的定位精度）的次级标准和传递标准建设滞后。同时，缺乏覆盖设备全寿命周期（从研发、生产、装机到在役运行）的、连续的量值保障方案。这种结构性缺失，导致产业链上下游缺乏统一的“度量衡”，产品质量参差不齐，互操作性差，严重制约了行业的规范化发展。

2 构建低空智能传感设备计量溯源体系的核心原则

面对上述挑战，构建新型计量溯源体系必须遵循以下核心原则：

2.1 全生命周期覆盖原则

溯源体系的设计必须贯穿智能传感设备从概念设计、原型开发、批量生产、整机集成、在役运行到退役报废的全过程。在不同阶段，溯源的目标、方法和深度应有所侧重。例如，在研发阶段，侧重于高精度的基础参数表征；在生产阶段，侧重于快速、高效的批量一致性检验；在在役阶段，则侧重于非侵入式的健康状态监测与性能衰退预警。

2.2 动态与原位校准导向原则

必须突破传统离线校准的局限，大力发展适用于低空场景的动态校准和原位（In-situ）校准技术。动态校准旨在模拟真实飞行中的动态激励（如角运动、线加速度、气流扰动），以评估传感器在动态条件下的性能^[2]。原位校准则是在不拆卸设备的前提下，利用内置自检（BIT）功能、交叉比对（Cross-calibration）或引入已知参考信号等方式，在设备实际安装位置进行校准，从而最大程度地保留其真实的系统级性能。

2.3 数据驱动与智能化原则

充分利用大数据、人工智能和数字孪生等技术，将计量溯源从以硬件为中心转向以数据为中心。通过在设备运行过程中持续采集海量的状态数据和环境数据，利用机器学习模型建立传感器性能退化与外部应力之间的关联，实现预测性维护和自适应校准。数字孪生技术可以为物理传感器创建一个高保真的虚拟映射，用于在虚拟空间中进行各种极限工况下的性能仿真和校准策略

验证。

2.4 可信与可追溯性原则

在万物互联的时代，数据的可信度至关重要。溯源体系必须确保从传感器原始数据到最终应用信息的整个链条都是可审计、不可篡改的。区块链技术因其去中心化、防篡改、可追溯的特性，可被用于记录每一次校准、每一次数据交互的完整历史，为测量结果的真实性提供强有力的背书，构建一个基于密码学的信任机制。

3 低空智能传感设备计量溯源体系的构建路径

3.1 顶层设计：构建“三位一体”的溯源架构

应构建一个由“国家计量基准-产业计量测试中心-企业自校准能力”构成的“三位一体”溯源架构。（1）顶层（国家计量基准）：由国家级计量机构牵头，重点建设面向低空经济的新型国家计量基准和标准。例如，建设高动态角速度/加速度标准装置、复杂电磁环境模拟与测试平台、高精度大气参数复现系统等，为全行业提供最高级别的量值源头。（2）中层（产业计量测试中心）：依托地方或行业优势资源，建设一批国家级或省级低空飞行装备产业计量测试中心。这些中心作为承上启下的关键节点，负责将国家基标准的量值传递到产业一线，开发面向具体产品（如特定型号的IMU、激光雷达）的专用校准方法、标准装置和标准物质，并为企业提供技术咨询和人员培训。（3）底层（企业自校准能力）：引导和扶持低空装备制造商建立完善的内部计量保证体系。鼓励企业研发和部署具备自校准、自诊断功能的智能传感模块，并利用数字孪生、边缘计算等技术，在生产线上和产品服役期间实现快速、便捷的量值核查与调整。



图1：“三位一体”的溯源架构图

3.2 技术路径：融合创新，发展新型校准与监测方法

(1) 发展高保真度的动态模拟与校准技术：研制能够精确复现低空飞行典型动态剖面（如起飞、降落、盘旋、急转）的六自由度运动模拟平台，并结合风洞、电磁兼容暗室等设施，构建多物理场耦合的综合校准环境，实现对传感器动态性能的精准评估。(2) 推广基于交叉比对与参考源的原位校准：在飞行器上配置高稳定性的参考传感器（如光纤陀螺作为MEMS IMU的参考），或利用外部已知的、高精度的参考信息源（如差分GNSS基站、已知坐标的地面特征点），通过算法实现对主用传感器的在线交叉校准，有效抑制长期漂移^[3]。

(3) 构建基于数字孪生的虚拟校准与预测维护系统：为关键智能传感设备建立数字孪生体，实时同步其物理状态。在虚拟空间中，可以安全地进行各种压力测试和故障注入实验，优化校准策略；同时，通过分析孪生体的历史数据，可以预测其未来的性能衰退趋势，提前安排维护，变被动响应为主动预防。

3.3 标准规范：建立健全的标准体系

标准是溯源体系落地的“法律”保障。应加快制定和完善覆盖低空智能传感设备全链条的标准体系：(1) 基础通用标准：明确低空领域关键物理量的定义、单位及测量不确定度评定方法。(2) 设备性能与测试方法标准：针对不同类型的智能传感器（IMU、GNSS、LiDAR等），制定统一的性能指标要求和标准化的动态、静态测试方法。(3) 校准规范与溯源指南：发布详细的校准操作规程、校准周期建议以及量值溯源路径图，指导各级计量机构和企业开展规范化的校准活动。(4) 数据格式与接口标准：统一传感器数据输出、校准证书、健康状态报告等信息的数据格式和通信接口，为信息共享和互操作奠定基础。

3.4 运行机制：打造可信、开放的协同生态

(1) 建立权威的公共信息服务平台：由政府主导，建设一个集设备备案、校准信息查询、信用评价、标准发布于一体的低空智能传感设备计量公共服务平台。所有接入该平台的设备和校准机构都需经过严格认证，其关键信息（如校准日期、有效期、不确定度）对授权用户公开，增强市场透明度。(2) 引入区块链赋能的信任

机制：利用区块链技术记录设备从出厂到报废的全生命周期关键事件，包括每次校准的哈希值、执行机构、环境参数等。任何试图篡改历史记录的行为都将被立即发现，从而建立起一个不可抵赖的信任链条^[4]。(3) 强化监管与激励并重的政策引导：市场监管部门应将计量性能纳入低空航空器的市场准入和适航审定要求。同时，对在计量体系建设方面表现突出的企业和机构给予政策倾斜和资金支持，形成正向激励，共同营造“重计量、讲诚信”的行业文化。

4 结语

低空领域的崛起对计量科技提出了全新的、更高的要求。智能传感设备作为低空系统的“感官”，其量值的准确与可信是整个产业大厦的根基。面对低空环境的复杂性、设备的高度集成化以及多源数据融合带来的挑战，传统的计量溯源模式已显乏力。本文提出的构建路径，强调以全生命周期覆盖为框架，以动态原位校准为方向，以数据驱动和智能化为手段，以可信可追溯为目标，通过顶层设计、技术创新、标准引领和机制保障四位一体的系统性工程，旨在打造一个能够适应未来低空经济发展需求的现代化计量溯源体系。这一体系的成功构建，将有效解决当前“测不准、不可信”的痛点，为低空飞行器的安全运行提供坚实的技术保障，为低空市场的公平竞争营造良好的秩序环境，并最终为我国抢占全球低空经济制高点、培育和发展新质生产力注入强大的计量动能。这不仅是计量科学自身的一次深刻变革，更是服务国家重大战略需求的必然选择。

参考文献

- [1]郭姝辰.物联网智能传感设备计量数据溯源与精度优化研究[J].中国品牌与防伪,2026,(03):48-50.
- [2]王宇明,张丽华.建设低空产业标准化体系,大力发展低空经济[J].质量与市场,2024(11):10-13.
- [3]山东省计量科学研究院.多方协作攻坚无人机航测计量,我院为低空经济注入计量动能[EB/OL].(2026-05-07).
- [4]市场监管总局,工业和信息化部.计量支撑产业新质生产力发展行动方案(2025—2030年)[EB/OL].(2025-07-09).