

高精度航天称重仪器误差来源及不确定度降低方法

□张晓娜

上海航天控制技术研究所

【摘要】高精度航天称重技术是确保航天器发射质量、重心定位及推进剂加注量精确控制的核心环节，其测量结果的可靠性直接关系到任务成败。本文系统分析了影响航天称重仪器精度的主要误差来源，涵盖环境因素、设备自身缺陷及人为操作等多个方面。在此基础上，详细阐述了测量不确定度的评定流程，并提出了针对性的不确定度降低技术措施，包括硬件优化、系统集成补偿及智能化数据处理算法。通过具体计算实例与数据对比，验证了所提方法的有效性，为实现亚毫米级甚至微米级的航天称重精度提供了明确的技术路径与实践方案。

【关键词】航天称重；误差分析；测量不确定度；精度补偿；传感器技术

文献标识码：A 文章编号：1003-1870（2026）01-0041-04

Sources of Error and Methods to Reduce Uncertainty in High-precision Aerospace Weighing Instruments

【Abstract】 High-precision aerospace weighing technology is a core link in ensuring the accurate control of spacecraft launch mass, center of gravity positioning, and propellant loading. The reliability of its measurement results is directly related to the success or failure of the mission. This paper systematically analyzes the main sources of error affecting the accuracy of aerospace weighing instruments, covering multiple aspects such as environmental factors, equipment defects, and human operation. On this basis, the evaluation process of measurement uncertainty is described in detail, and targeted uncertainty reduction techniques are proposed, including hardware optimization, system integration compensation, and intelligent data processing algorithms. The effectiveness of the proposed methods is verified through specific calculation examples and data comparisons, providing a clear technical path and practical solution for achieving sub-millimeter or even micrometer-level aerospace weighing accuracy.

【Keywords】 aerospace weighing; error analysis; measurement uncertainty; accuracy compensation; sensor technology

引言

航天称重是航天器总装、测试及发射前不可或缺的关键工序，其精度直接决定了航天器的质心位置、转动惯量等关键参数，对飞行姿态控制与轨道精度具有决定性影响。随着航天器朝着大型化、复杂化方向发展，以及对发射成本与成功率的极致追求，对地面称重系统的精度与可靠性提出了近乎苛刻的要求。因此，深入分析高精度航天称重系统中

的各类误差产生机理，并发展行之有效的不确定度抑制策略，已成为航天测控领域一项至关重要且极具挑战性的研究课题。

1 高精度航天称重系统概述

高精度航天称重系统通常并非单一的磅秤，而是一个集成了机械支承、多点多路力传感器、数据采集与处理单元的复杂测控系统。其核心原理是通过布置在航天器支撑点下方的多个高精度力传感

器，同步测量各支点所承受的载荷，再将各点测量值进行矢量合成，从而得到航天器的总质量及质心坐标。该系统通常工作在极端精密的实验室或总装测试厂房环境中，对地基的稳定性、环境的恒温恒湿性有极高要求。与普通工业称重相比，航天称重不仅追求绝对质量值的准确，更关注质量在三维空间中的分布，即质心位置的毫米级甚至微米级定位精度。整个系统的精度链条漫长，任何一个环节的微小偏差都可能在最终结果中被放大，因此必须采用系统工程的思维进行全面误差管控。

2 高精度航天称重仪器误差来源分析

2.1 环境因素引入的误差

环境因素是导致称重结果漂移和不确定度的首要外部原因。温度波动是最显著的影响源，它会导致力传感器弹性体的杨氏模量发生改变，进而引起灵敏度系数漂移，弹性体所用金属材料（如合金钢或不锈钢）的弹性模量 E 具有负温度系数 βE ，其典型值为 $-0.03\%/^{\circ}\text{C} \sim -0.05\%/^{\circ}\text{C}$ 。这意味着当环境温度升高时，弹性体材料的弹性模量 E 会降低，导致力传感器的灵敏度增大，由此产生的灵敏度温度误差可达 $(0.03 \sim 0.05)\%/^{\circ}\text{C}$ 。在实际应用中，若温度变化 10°C ，传感器灵敏度就可能产生 $0.3\% \sim 0.5\%$ 的显著变化，这是必须严格补偿的可观误差。同时，温度变化也会导致机械支撑结构产生热胀冷缩，改变力流路径，引入难以估量的侧向力或弯矩。例如，一个长度为 5m 的钢结构支承梁，在温度变化 3°C 时，其长度变化量可达 0.00018m ，足以引起测量结果的显著偏差。空气浮力是另一个不可忽视的系统误差，根据阿基米德原理，航天器在空气中会受到向上的浮力，其大小等于物体排开空气的重量，此修正量与当地大气压力、温度、湿度直接相关，若不进行精确补偿，将造成固定的负向偏差。此外，环境振动，如地面微振动、设备运行振动等，会作为噪声叠加在传感器信号上，影响测量的稳定性和重复性。空气流动产生的动压也会对大型航天器表面形成微小但不可忽略的力。

2.2 设备自身性能限制引入的误差

称重系统自身的性能局限是内在误差源。力传感器本身的非线性、滞后和蠕变是其主要误差。非

线性指力传感器输出与载荷不成严格比例；滞后指加载和卸载曲线不重合；蠕变指在恒定载荷下输出信号随时间缓慢漂移。数据采集系统的精度也至关重要，包括模拟放大器的噪声、零点漂移以及模数转换器的分辨力和量化误差。一个16位的ADC相对于一个24位的ADC，其理论分辨率差异巨大。机械结构方面，支承平台的刚度不足会导致受力后变形，改变力传感器受力状态。各支撑点的高度不一致、四角误差大，会导致载荷分配误差，如图1所示的平台倾斜效应，会引入额外的测量不确定度。力传感器与平台之间的连接件（如球铰、垫片）的配合间隙、摩擦力也会引入随机误差。

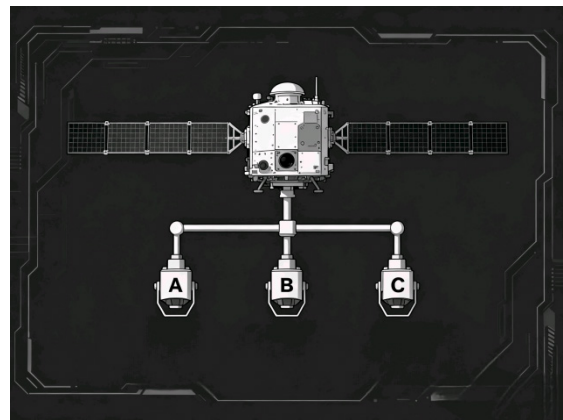


图1 平台倾斜对传感器受力影响示意图

如图所示，当称重平台发生倾斜，原本均匀分布在三个力传感器上的载荷会重新分配，导致各力传感器读数偏离真实值，引入误差。

2.3 安装与操作过程引入的误差

系统的安装与操作过程是人为误差的主要来源。安装基础的不平度、不水平度是常见的系统误差。如果多个力传感器的基础面不在同一水平面上，将导致航天器重量无法按设计比例分配。力传感器与支撑结构之间的连接如果存在预紧力、偏心载荷或侧向力，会严重恶化力传感器的性能，因为高精度力传感器通常对非轴向力极为敏感。在航天器吊装、放置过程中产生的冲击载荷，可能使力传感器进入非线性区甚至饱和。接线错误、接地环路引起的共模干扰、电缆拉力对力传感器输出的影响（对于某些敏感型号）等，都属于操作不当引入的误差。此外，测量流程，如稳定时间不足（未待读数完

全稳定即记录)、校准程序执行不严格(如使用标准砝码的等级不够或校准点选择不当),都会直接降

低测量结果的可靠性。表1列举了某次安装调试中发现的水平度偏差对力传感器初始零点的影响数据。

表1 平台水平度偏差与力传感器零点输出关系实测数据

力传感器编号	水平度偏差(弧秒)	零点输出偏移(mV/V)
S1	5	0.00012
S2	8	0.00025
S3	3	0.00008
S4	10	0.00031

如表1所示,平台水平度偏差与力传感器零点输出偏移量存在明显的正相关关系,安装时必须将水平度控制在极小的范围内。

2.4 信号处理与数据处理算法引入的误差

原始电信号转换为最终质量值的过程伴随着算法误差。模拟信号的滤波处理若截止频率或类型选择不当,可能滤除有效信号或保留过多干扰。数字采样时的采样率过低,可能导致混叠误差。数据处理的算法,例如在计算质心时,将航天器简化为刚体模型,而忽略了其内部液体燃料晃动、柔性结构变形等实际因素,会引入模型误差。在利用多个力传感器读数合成总重和质心时,采用的数学方法(如最小二乘法拟合)本身存在截断误差或舍入误差。对异常数据的辨识与剔除规则若设置不合理,可能误删有效数据或保留无效数据。此外,各类修正量的计算,如空气浮力修正,若所采用的环境参数(压力、温度、湿度)测量不准,则修正过程本身就会引入新的误差。

3 测量不确定度评定与降低方法

3.1 测量不确定度的评定方法与计算实例

测量不确定度是对测量结果可信程度的定量表征。评定过程遵循GUM标准,首先识别并量化所有重要的不确定度来源,分为A类评定(由测量列统计分析)和B类评定(由先验信息或证书获取)。以总质量测量为例,其主要不确定度分量包括:力传感器校准引入的标准不确定度 u_{cal} 、重复性测量引入的 u_{rep} 、环境温度影响引入的 u_{temp} 、空气浮力修正引入的 u_{buoy} 、数据采集系统引入的 u_{daq} 等。将这些分量(视为互不相关)合成,即得到合成标准不确定度 u_c ,再

乘以包含因子 k (通常取2,对应约95%置信水平),得到扩展不确定度 U 。

计算实例:某航天器质量 m 约为50000 kg,经分析各标准不确定度分量为: $u_{cal}=1.2$ kg(来自校准证书), $u_{rep}=0.8$ kg(10次重复测量标准差), $u_{temp}=0.5$ kg(温度波动估算), $u_{buoy}=0.3$ kg(环境参数测量误差估算), $u_{daq}=0.2$ kg(采集器说明书)。

合成标准不确定度 $u_c=\sqrt{1.2^2+0.8^2+0.5^2+0.3^2+0.2^2}$ kg= $\sqrt{1.44+0.64+0.25+0.09+0.04}$ kg= $\sqrt{2.46}$ kg ≈ 1.57 kg。

取 $k=2$,则扩展不确定度 $U=k \times u_c=2 \times 1.57$ kg=3.14 kg。

因此,该航天器的质量测量结果应报告为: $m=50000$ kg ± 3.14 kg($k=2$)。

3.2 通过硬件优化与系统设计降低不确定度

从硬件层面降低不确定度是根本途径。首要的是选用超高精度、低漂移、低蠕变、经过严格老化处理的高能力传感器。采用多个力多传感器并联冗余设计,并通过平均化处理抑制单个力传感器的随机误差。机械结构应进行有限元分析优化,确保极高的刚度和稳定性,使用热膨胀系数极低的材料(如因瓦合金)制造关键支承部件。为整个称重系统建立高稳定性的温控环境,如恒温实验室,或将力传感器及其附近结构进行主动温控。采用更高分辨率和更低噪声的数据采集系统,例如24位及以上 $\Sigma-\Delta$ 型ADC。为减少振动干扰,可配备主动或被动隔振基础。图2展示了某型号称重系统在加装主动温控装置前后,连续24小时测量的零点漂移情况对比,稳定性显著提升。

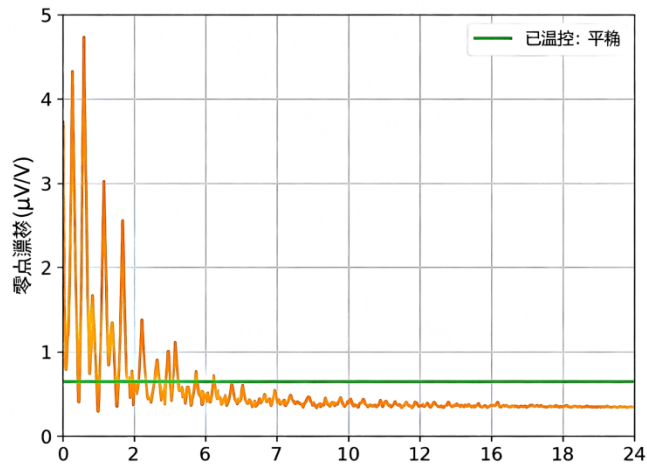


图2 加装主动温控前后力传感器零点漂移对比折线图

如图2所示，在加装主动温控系统后，力传感器零点输出的漂移范围从超过 $5\mu\text{V/V}$ 被抑制在 $1\mu\text{V/V}$ 以内，系统长期稳定性得到极大改善。

3.3 通过智能补偿与先进算法降低不确定度

软件算法补偿是提升精度的经济有效手段。建立温度误差模型，通过实时监测力传感器及其周边结构温度，对输出进行实时补偿。采用基于大量实验数据的神经网络或机器学习算法，对力传感器的非线性、滞后进行高精度建模和补偿。在数据处理上，实施更完善的数字滤波算法（如卡尔曼滤波），在抑制噪声的同时更好地保留信号特征。增加测量次数，通过统计平均降低随机不确定度。对空气浮力进行实时精确修正，需集成高精度的气压、温湿度传感器，并采用精确的空气密度公式计算。在质心计算中，考虑更复杂的模型，如将航天器划分为更小的单元或引入有限元模型进行耦合分析，以减少模型误差。严格规范操作流程，利用软件进行引导和监控，减少人为操作差错。通过定期、严格的校准，并将校准数据融入测量过程，实时更新系统参数。

4 结语

高精度航天称重仪器的误差来源具有多源性、耦合性及系统性特征，其不确定度的控制是一项贯穿设计、制造、安装、操作与数据处理全过程的系统工程。通过深入分析环境、设备、操作及算法等核心误差源，并据此采取针对性的硬件优化、系统

集成补偿与智能算法策略，能够有效识别、量化并抑制各类不确定度分量。实践表明，将精密的机械结构、稳定的环境控制、先进的力传感器技术与智能化的软件算法相结合，是持续提升航天称重系统测量精度与可靠性的必然路径，为现代航天事业的发展提供坚实的技术支撑。

参考文献

- [1] 陈珂芯, 胡彩娟. 一种自动检测火箭固体燃料的设备[J]. 农村青少年科学探究, 2022(04):15.
- [2] 周祖谦. 自动和非自动称重仪所共有的技术和要求[J]. 衡器, 2021, 50(09):46-51.
- [3] 周波. 衡器计量中的动态称重误差及其校准方法分析[J]. 仪器仪表标准化与计量, 2025(04):40-42.
- [4] 萧挺掙. 基于信息技术背景下的衡器计量检定研究[J]. 科技资讯, 2024, 22(20):62-64.
- [5] 刘九卿. 称重传感器灵敏系数的自补偿技术[J]. 衡器, 2025, 54(08):35-41.

作者简介

张晓娜（1987—）女，山东潍坊，工程师。研究方向：专用测试设备计量校准技术。