高精度衡器误差成因及不确定度控制方法

□王欣

华测检测认证集团（山东）有限公司

【摘　要】高精度衡器测量的准确性直接关系到工业计量与贸易结算可靠性。称重传感器非线性、机械结构的偏载以及环境干扰是造成衡器测量误差的三类主要成因，各误差源之间存在着明显的非线性耦合效应，借助单因素及多因素耦合试验对各误差源开展定量评估，依照GUM 框架构建合成不确定度模型并提出分层误差控制策略。实验结果显示，经系统性控制后扩展不确定度从0.116%F.S. 缩小到0.034%F.S.，为高精度衡器的设计优化与检定校准提供技术支撑。

【关键词】高精度衡器；测量误差；不确定度评定；误差补偿；传感器非线性

文献标识码：A　　**文章编号：**1003-1870（2026）07-0045-04

Causes of Error and Uncertainty Control Methods for High-precision Weighing Instruments

【Abstract】The measurement accuracy of high-precision weighing instruments is directly related to the reliability of industrial metrology and trade settlement. Sensor nonlinearity, mechanical structure eccentric loading, and environmental interference are the three main causes of weighing instrument measurement error. Given the significant nonlinear coupling effects between these error sources, quantitative assessments are conducted using single-factor and multi-factor coupling experiments in this study, constructing a combined uncertainty model based on the GUM framework, and proposing a hierarchical error control strategy. Experimental results demonstrate that, following systematic control, the expanded uncertainty is reduced from 0.116% F.S. to 0.034% F.S., providing a technical basis for the design optimization, verification and calibration of high-precision weighing instruments.

【Keywords】high-precision weighing instrument; measurement error; evaluation of uncertainty; error compensation; sensor nonlinearity

引言

衡器作为质量量值传递的核心工具，其计量性能直接影响产品质量控制和贸易公平[1]。随着制造业精密化程度持续提升，工业现场对衡器准确度等级的要求也在不断提高，高精度衡器的误差控制问题已经成为计量技术领域的重要研究方向[2]。现有研究在单一误差源分析方面积累了一定成果，不过多因素耦合条件下的系统性研究仍显不足。为此，以高精度电子衡器作为研究对象，通过受控实验量化各误差源的贡献量级，构建不确定度合成模型并系统提出面向工程应用的误差控制方法。

1　高精度衡器误差成因分析

1.1　传感器非线性误差特性

电阻应变式称重传感器理想输出应和载荷严格线性对应，但在实际应用中由于弹性体材料的蠕变特性、应变片粘贴工艺不完善以及惠斯通电桥失衡等因素，都会让输出信号偏离理想线性基准。当弹性体承受循环载荷时其内部金属晶格位错密度会逐渐累积，导致应力－应变响应曲线出现迟滞特性，加载与卸载过程并非完全重合，进而产生回程

误差。此外，应变片灵敏系数随温度会发生漂移，使得零点输出和满量程灵敏度都出现和温度相关的偏移，从而加剧了称重传感器的非线性程度，这种非线性误差没办法通过简单单一的量程校准有效消除，必须采用多项式拟合方法来进行补偿与修正。

1.2　机械结构偏载效应

承载机构具备几何对称性是保证各向均匀受力的基本前提条件，加工公差、装配间隙以及支撑点刚度差异共同致使载荷在传递路径上发生偏移情况。当被测物体重心偏离承载台中心位置时，各支撑角点的载荷分量随偏心距呈线性变化，传感器的合成输出也会因此偏离理论值，对于多传感器并联结构而言，各传感器额定灵敏度的离散性及导线电阻差异，会破坏信号叠加的一致性，这会使偏载误差进一步被放大。承载结构弯曲刚度不足时，台面在偏心载荷作用下会产生挠曲变形，这会改变传感器受力方向并引入附加横向分力，造成输出信号失真。

1.3　环境干扰诱发的测量误差

温度起伏、地面振动和电磁干扰这三类外部因素主要影响衡器测量准确性，其影响方式不同且相互有关联。温度变化借助热弹性作用改变弹性体刚度，各部件因热膨胀系数差异产生热应力，在传感器安装处形成附加力混入称量信号，形成难以分离的温度误差。地面振动通过支撑结构传递到称重平台，当振动频率接近设备固有频率时，共振效应会显著放大振动幅度，导致静态称量结果出现不稳定波动。电磁干扰通过感应耦合进入信号处理电路，在毫伏级应变信号上叠加共模干扰电压，降低数模转换的精度。这三类干扰的综合影响在高精度称量条件下尤为明显，仅依靠硬件滤波难以实现全频段抑制，需要结合信号处理算法进行综合调控。

2　误差定量实验

2.1　单因素误差定量测试

实验以量程500kg、分度值0.01kg 的I 级精密电子衡器为测试载体，配备高精度恒温箱、电动偏载调节装置以及可调振动台，所有测试参数都通过标准器具溯源到国家基准，采用单因素变量法开展测试来独立评估各误差源影响程度[3]。温度测试在–10~50℃范围内按5℃梯度递增，记录各个温度点下零点漂移与灵敏度变化数据。结果显示，在测试温度范围内误差随温度呈近似线性变化趋势（见图1），温度每上升10℃，传感器灵敏度降低约0.03%F.S.，零点漂移量达0.02%F.S.。偏载测试分别在额定载荷20%、50%、80% 三个等级下进行四角加载，最大四角误差为0.06%F.S.（补偿前原始值，绝对误差300g），误差大小和偏心距呈明显线性关系。振动测试在5 ~ 50 Hz 频率范围内每隔5Hz 设置一个测试点，共10 个频率点，每点重复采集20 次信号取均值。结果显示，在承载结构固有频率附近噪声幅值均值为

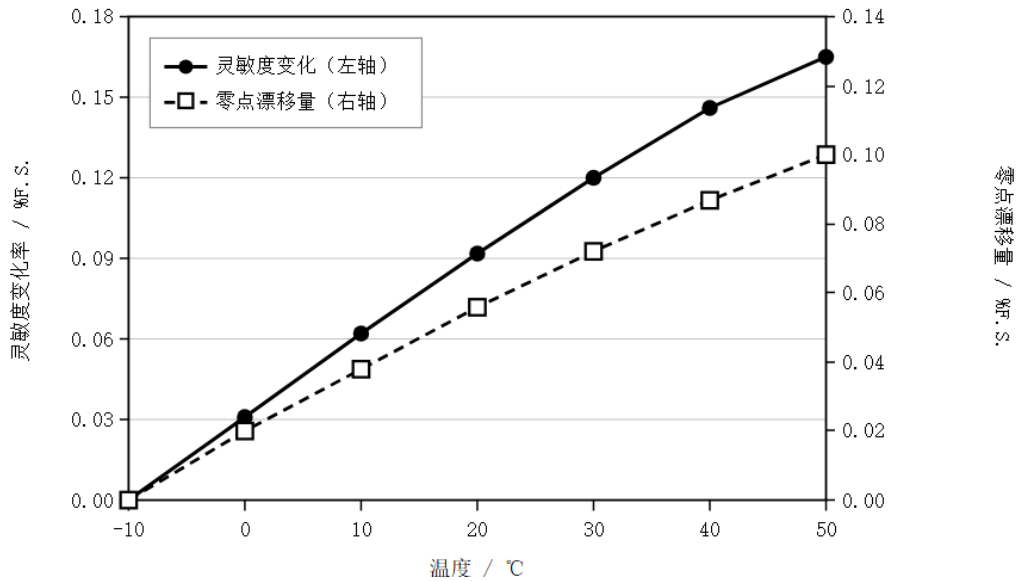


图1　温度误差测试结果曲线

平稳频段的3.2 倍（标准差0.15 倍），使有效分辨率降至标称值的60%。

2.2　多因素耦合误差验证

单因素测试能揭示各误差源独立影响，可实际称量多种干扰因素并存，误差分量间有复杂非线性关联，简单线性叠加不能准确预估综合误差。为此，研究构建温度—偏载、温度—振动、偏载—振动双因素交互场景，以及三因素协同激励场景，系统分析耦合状态下误差分布规律。实验显示，温度与偏载耦合时，综合误差超单因素线性叠加值约 12%，原因是温度变化使承载结构热变形，加剧支撑点刚度差异，放大偏载影响。温度与振动耦合时，高温环境下传感器信号调理电路热噪声功率谱密度上升，让振动干扰信噪比恶化程度比常温增加约 18%。三因素共同作用下衡器综合误差峰值达0.21%F.S.，远高于单因素误差叠加预测值 0.17%F.S.（见图2），该试验验证多因素交互作用，对高精度称量有显著影响，为后续不确定度分量合成评价提供重要试验支撑。

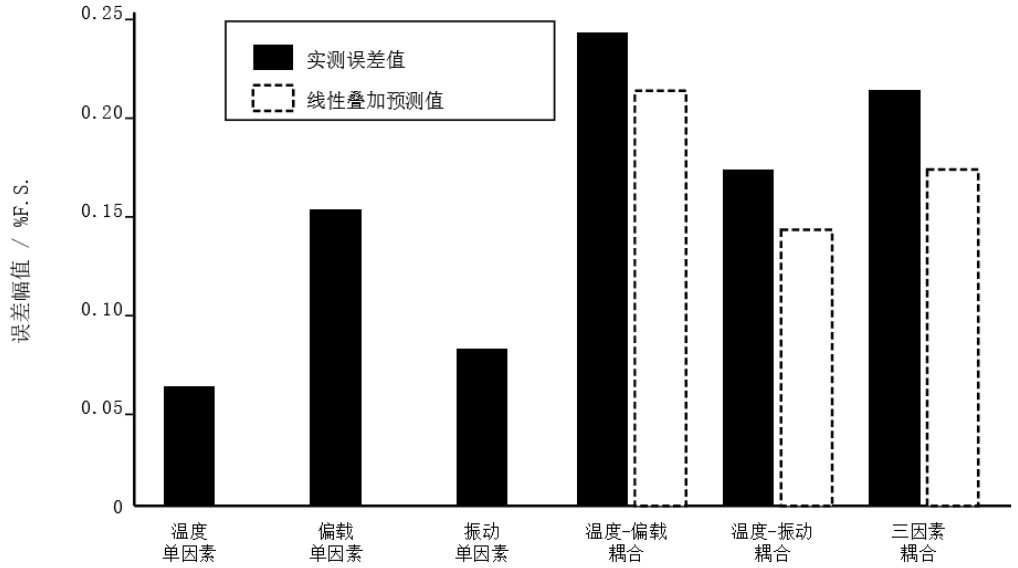


图2　单因素与多因素耦合误差对比

3　不确定度评定导向的误差控制方法

3.1　不确定度分量量化

按GUM 指南，不确定度评定分成A 类和B 类，A 类是基于测量数据的统计分析并用实验标准差表示，B 类是通过技术资料、校准报告等非统计途径来评估。传感器非线性误差对应的标准不确定度u_1 是0.021%F.S.，温度漂移误差的u_2 为0.012%F.S.，偏载误差的u_3为0.035%F.S.，振动干扰的u_4为0.018%F.S.。这些分量都是根据第二部分单因素实验数据得出，采用标准不确定度形式统一呈现，以此保证合成计算时量纲的一致性（见表1）。

表1　各不确定度分量汇总表

分量编号	误差来源	评定类别	标准不确定度（%F.S.）
u_1	传感器非线性误差	A 类	0.021
u_2	温度漂移误差	B 类	0.012
u_3	偏载误差	B 类	0.035
u_4	振动干扰	A 类	0.018
u_c	合成标准不确定度	—	0.086

3.2　合成不确定度模型构建

在各个不确定度分量都独立完成量化的基础上，按照误差传播律构建适用于高精度衡器的合成不确定度模型。当各分量相互独立且不存在显著相

关性时，合成标准不确定度由各分量的方和根法计算得出：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2}$$

式中：u_c 为合成标准不确定度，单位为kg；u_1、u_2、u_3、u_4 分别为传感器非线性、温度漂移、偏载误差、振动干扰对应的标准不确定度分量，单位均为kg。多因素耦合实验已经证实温度和偏载之间存在非线性耦合效应，需要引入协方差项对模型进行修正，修正之后合成不确定度比方和根结果偏大约8%~12%。扩展不确定度选取包含因子 $k = 2$，对应大约95% 的置信水平，为衡器计量性能的规范化表达提供依据。

3.3　误差控制策略验证

依据合成不确定度模型来分析各分量的影响程度，针对主要误差来源实施分级控制方案。对于传感器非线性误差，借助分段多项式补偿算法开展实时校正工作，使非线性度从0.05%F.S. 优化到0.01%F.S. 以内，针对温度漂移问题，构建基于多点NTC 热敏电阻阵列的自适应温度补偿网络，结合分段线性化拟合算法实现全温区实时动态校正，让零点温度系数由2×10^{-5}/℃优化至5×10^{-6}/℃。对于偏载误差，利用四角标定数据构建空间插值补偿矩阵，对全台面各处系统偏差实施统一修正，将四角最大误差从0.15%F.S. 降至0.04%F.S，面对振动干扰，采用自适应陷波滤波器定向滤除固有频率附近的窄带噪声，让信号信噪比提高大约8dB，各类误差控制前后的量化对比结果见表2。综合应用上述措施之后，扩展不确定度（k=2）从0.116%F.S. 优化至0.034%F.S.，证明了该控制方法具备实用价值[4-5]。

表2　误差控制前后对比表

误差类型	控制措施	控制前（%F.S.）	控制后（%F.S.）
传感器非线性误差	分段多项式补偿算法	0.05	0.01
温度漂移误差	NTC 热敏电阻网络补偿	0.02/10℃	0.005/10℃
偏载误差	空间插值补偿矩阵	0.06	0.04
振动干扰	自适应陷波滤波器	SNR 基准值	提升8dB
扩展不确定度（k=2）	综合控制策略	0.116	0.034

4　结语

高精度衡器测量误差受传感器非线性特性、机械结构不均匀受力以及外界环境扰动等多重因素综合影响，并且各误差源之间存在着显著交互作用。测试数据显示，当三个因素同时作用时，系统总误差峰值达到0.21%F.S.，较单因素线性叠加预测值0.17%F.S. 偏高约24%，该结论基于多工况、多重复次数的受控实验数据统计得出，具有较好的代表性与可重复性。基于GUM 理论构建的合成不确定度模型，成功实现了各误差分量的统一量化，为系统化评估衡器计量性能提供了可靠的理论支撑，采用分层控制技术后，测量结果的扩展不确定度从0.116%F.S. 降低到0.034%F.S.，充分验证了该技术在工程应用方面的价值，未来研究可以重点关注动态称重过程中不确定度的传递机制。

参考文献

[1] 陈锦光. 自动分检衡器在物流行业的应用[J]. 数字技术与应用,2024,42(10):163-165.

[2] 薛磊. 信息技术驱动下智能化衡器的发展趋势研究[J]. 科技资讯,2025,23(22):90-92.

[3] 杨云川. 动态公路车辆自动衡器检定分析[J]. 中国品牌与防伪,2024,(11):157-158.

[4] 姚凌萍. 衡器集控技术与管理探析[J]. 工业计量,2022,32(06):65-66+69.

[5] 曹巍, 王少奇. 一种通信传输路由幅度均衡器的设计与实现[J]. 中国宽带,2024,20(04):112-114.

作者简介

王欣（1990—），女，汉族，籍贯，山东省潍坊市。研究方向：仪器计量操作。