

热电计量技术在称重传感器精度提升中的应用研究

□吴翠 李佳静 王昆

(聊城市检验检测中心, 山东省聊城市 252000)

【摘要】为提升称重系统在多变环境下的测量精度与稳定性, 本文依托某智能仓储物流中心称重平台升级改造项目, 探索热电计量技术在称重传感器中的集成应用路径。研究构建热电电势辅助监测机制, 设计双通道信号采集系统与融合算法, 有效抑制因温度变化引发的信号漂移与输出波动。应用结果显示, 系统整体精度表现优于改造前, 具备良好的重复性和环境适应性。本研究为称重系统的智能化升级提供了新思路, 具有现实指导意义与工程推广价值。

【关键词】热电计量; 称重传感器; 精度提升; 信号融合

文献标识码: A

文章编号: 1003-1870 (2025) 06-0013-05

Research on Application of Thermoelectric Measurement Technology for Accuracy Improvement of Load Cells

【Abstract】In order to improve the measurement accuracy and stability of the weighing system in a changeable environment, this paper explores the integrated application path of the thermoelectric measurement technology in load cells based on the upgrading and transformation project of the weighing platform of an intelligent warehouse logistics center. A thermoelectric potential-assisted monitoring mechanism is studied and constructed, and a dual-channel signal acquisition system and fusion algorithm are designed to effectively suppress signal drift and output fluctuation caused by temperature changes. The application results show that the system is better in overall accuracy (compared with before the transformation), and has good repeatability and environmental adaptability. This study provides a new idea for the intelligent upgrading of weighing system, which has practical guiding significance and engineering promotion value.

【Keywords】thermoelectric measurement; load cell; accuracy improvement; signal fusion

1 项目背景

本研究基于某省级智能仓储物流中心在2023年启动的称重系统升级改造工程展开。该物流中心承担着大宗工业品与原材料的集中分拣、出入库计量与运输调度等多种功能, 其自动化立体仓储系统与轨道式分拣平台构成了核心作业区^[1]。原有称重系统采用电阻应变式称重传感器作为核心测量组件, 在日常运行中暴露出温度漂移响应迟滞、信号波动

不稳定、载荷变化下输出不一致等一系列问题, 该系统所处的智能仓储物流中心为半封闭式钢结构厂房, 部分称重模块位于室外装卸区, 工作环境温度范围广泛波动, 最低可达-20℃, 夏季高温时局部区域超过+50℃, 明显超出GB/T 7551-2008《称重传感器》标准所规定的-10℃~+40℃工作温度区间, 且受钢结构热辐射及设备自热影响, 局部温差变化剧烈, 形成高频温漂环境。因此, 常规电阻应变式传

传感器在此工况下的零点与灵敏度补偿难以维持长期稳定性。系统选用剪切梁式结构的双悬臂电阻应变称重传感器，型号为KELI QS-A，额定量程为5 t，具备较高防护等级（IP67），但仍难以抵御快速交变温度场对测量输出带来的瞬时扰动与误差累积。系统对环境温差与设备自热的响应能力不足，成为影响整体物流监控效率和数据准确性的瓶颈。针对上述问题，项目团队结合称重传感器系统的硬件特性和现场使用工况，引入热电计量技术作为补偿机制的技术核心，在称重模块中集成热电电势采集单元，实时感知称重传感器及其结构周边的温度梯度变化^[2]。同时建立应变输出与热电响应之间的双通道信号采集机制，配合分布式校准算法对两类数据进行融合修正。结合项目使用需求，系统精度需达到高动态负载下的稳定读取能力，并具备优良的抗干扰与温漂抑制性能。整套改造方案围绕称重传感器采集模块、电气控制单元、数据处理平台三个层级展开，强调电信号与应变信号在时间域与空间分布上的协同特征^[3]。本文围绕该改造工程中的技术关键点，深入分析热电计量机制在复杂称重环境下的适应性、可实施性与误差控制能力，从硬件集成、算法设计到系统输出表现三个层面展开研究，验证其对称重系统精度提升与稳定性改善的应用效果^[4]。

2 热电计量与称重信号融合机制研究

2.1 热电电势采集原理与关键器件参数匹配

热电计量在称重系统中的核心作用体现在对环境温差的高灵敏度响应及其电势输出的线性特性。热电电势的产生基于塞贝克效应，其数学表达为：

$$V_{th} = \int_{T_c}^{T_h} S(T) dT$$

其中， V_{th} 表示热电电势， T_h 和 T_c 分别为热端与冷端的温度， $S(T)$ 为塞贝克系数，其对温度函数具有非线性响应特征。为获得最优温差响应精度，热电偶材料选择以NiCr-NiSi为主，匹配的塞贝克系数应稳定在40100 Hz频段内具有一致性^[5]。

2.2 双信号通道同步采集系统设计

称重信号与热电信号的融合前提在于时域同步采集与幅度协同解码。项目系统采用基于STM32H7处理器构建的双模数据采集结构，主控芯片配置独立ADC通道，用于分别处理应变电桥与热电采集线

路。系统通过如下同步函数对两个数据通道进行配时校正：

$$\Delta t = \left| \frac{n_s}{f_{adc1}} - \frac{n_h}{f_{adc2}} \right| < \delta$$

其中， n_s 与 n_h 分别为每次采样周期中应变与热电通道的采样点数， f_{adc1} 、 f_{adc2} 为各通道ADC采样频率， δ 为最大同步误差限，工程实践中设为1 ms。控制系统利用时间戳缓存及滑动窗口比较算法，动态调整通道采样间隔，确保数据帧在分析前的时间一致性。

2.3 数据融合算法在称重信号稳定性提升中的应用

融合算法构建是本研究中实现精度提升的关键环节。在多通道异源信号环境下，融合模型需兼顾多尺度漂移建模与实时性优化。项目采用基于滑动窗口的改进型多维协同卡尔曼滤波器（MCKF）作为数据处理核心，其状态空间模型定义如下：

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_k + w_k, z_k = Hx_k + v_k$$

其中， x_k 为系统状态向量，包含应变应力估计、热漂移量级、噪声均值等参数； u_k 为热电输入信号； z_k 为观测输出（融合称重值）； A 、 B 、 H 为系统矩阵； w_k 、 v_k 为过程噪声与观测噪声，满足正态分布。算法采用在线递推校正方式，融合当前帧热电输入与应变反馈，并动态调整协方差矩阵，增强系统对外部温度突变的适应能力。应用测试中，系统采集三类算法输出结果进行对比分析。数据见图1。

从图1可见，采用热电融合算法后，系统在温漂抑制能力、信号稳定性和输出误差控制等指标上均表现出优越性能。相比传统滤波与单纯卡尔曼算法，热电融合方案在动态条件下可显著减少称量误差并提升数据平滑度，尤其在高频称量场景中表现稳定。输出信号经融合处理后其变化趋势更接近真实载荷响应曲线，避免了瞬时温升带来的误差峰值偏移。

3 应用效果测试与误差评估

3.1 改造前后称重数据稳定性对比

称重系统改造实施后，项目组在相同载荷与环境条件下对改造前后的输出信号进行对比试验。测试采用1000 kg标准砝码，重复加载10次，采集每次

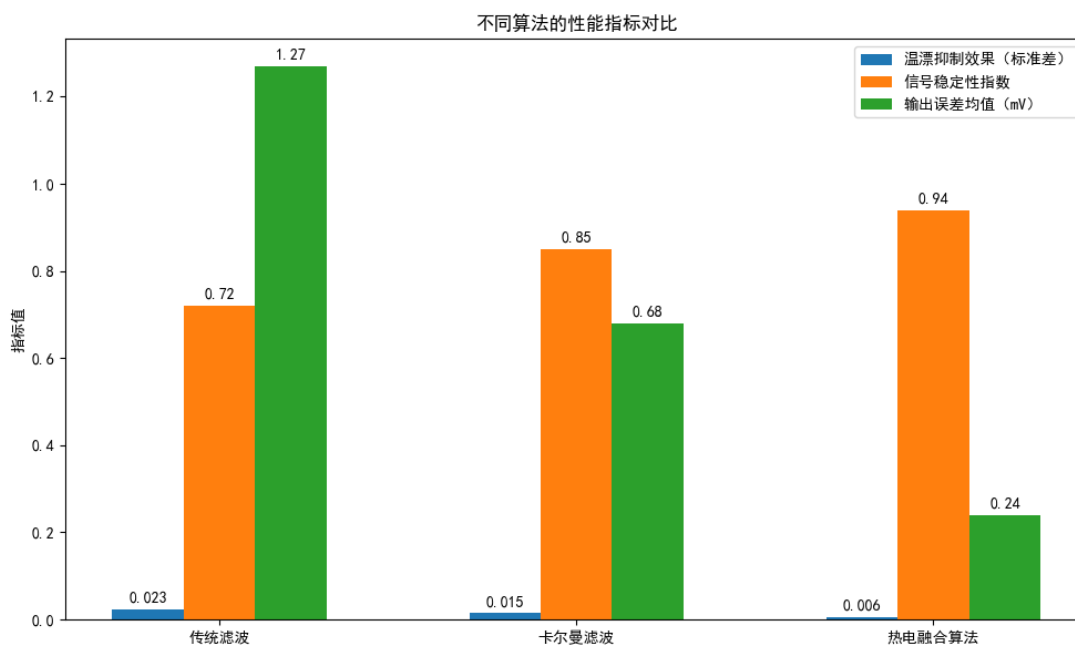


图1 数据融合算法性能对比

加载过程中称重曲线的最大波动值作为衡量稳定性的主要指标。在改造前，应变输出信号受环境温度变化、电源波动及机械噪声影响较为明显，表现出明显的高频抖动现象。热电补偿系统引入后，数据在波动性与抖动频率方面均得到显著改善。实验结

果显示，改造前最大波动值普遍高于2.0 kg，稳定性较差，而改造后所有测试数据波动范围基本控制在1.0 kg 以内，有效提升了系统输出的一致性与可重复识别能力。见图2 所示。

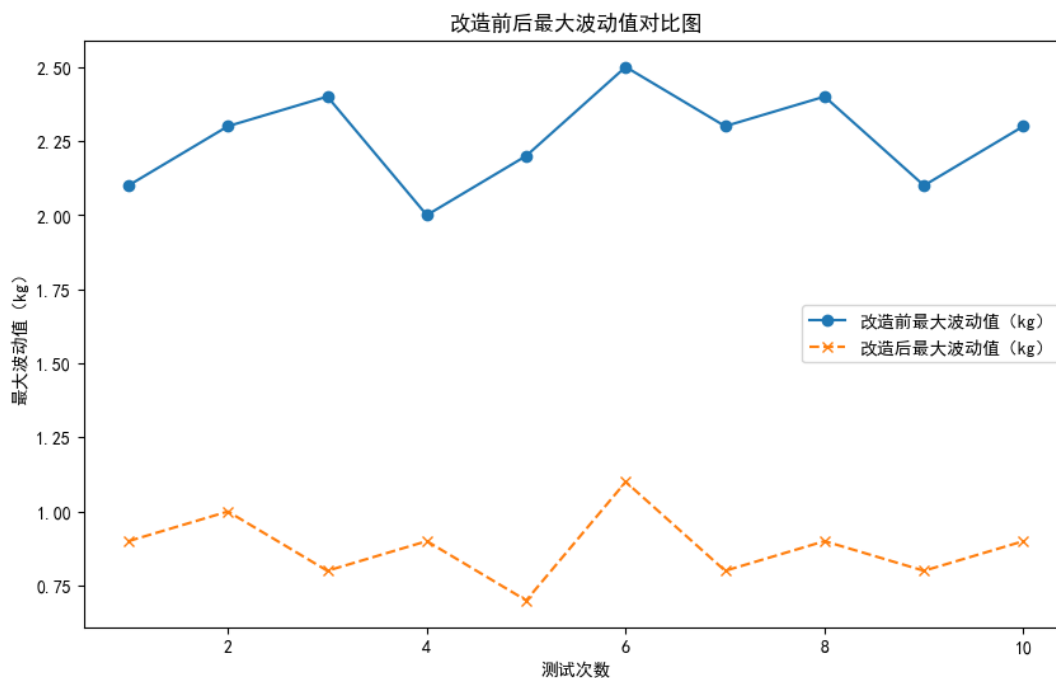


图2 改造前后称重数据稳定性对比

从数据变化趋势可以观察到，改造后系统对短时载荷扰动的响应更加平滑，曲线呈现良好的动态一致性，输出值更加接近真实载荷值，热电补偿模块对非机械性干扰具有良好过滤能力，为后续大宗物流实时称重提供了可靠支撑。

3.2 重复性测试与温漂抑制效果分析

为验证系统在不同环境温度下的重复性与抗温漂能力，项目组在恒温测试仓内设定5组温控环境，从10℃至50℃分别进行20次称重重复实验，记录同

一载荷在不同温度场下的输出偏差。改造前系统受金属材料膨胀系数变化与热致零点漂移影响明显，输出结果存在较大幅度非线性偏移。在极端温度条件下，如40℃以上，重复性误差偏差超过2 kg，且随着环境温度上升而呈现逐步放大趋势。融合热电计量机制后的系统，在全温区内输出波动保持稳定，偏移值控制在 ± 1.0 kg范围内，具有明显的温度自适应能力。图3总结了不同温度条件下系统输出误差的变化情况。

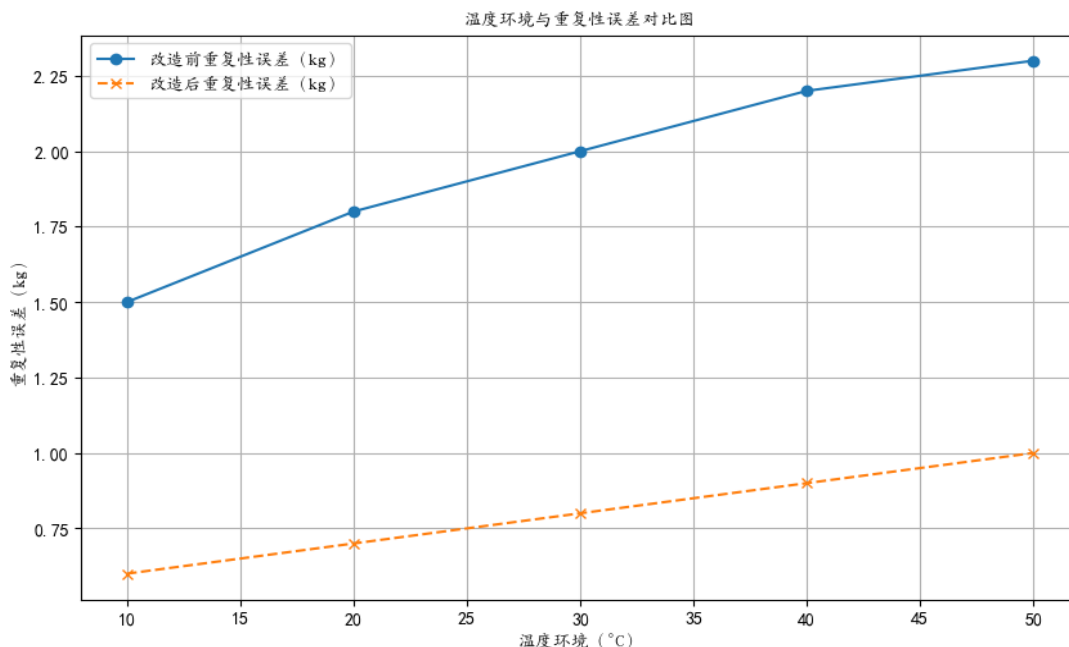


图3 重复性与温漂影响下测量偏差对比

从图3可知，改造后的误差曲线平缓，说明融合热电数据的信号校正机制在控制温度引起的系统响应漂移方面具有显著优势。在长期运行中，该种抑制能力将进一步降低热环境对称重模块带来的系统性误差，有利于维持精度输出的一致性和工艺适应性。

3.3 与行业标准检测报告结果对照分析

在系统调试完成后，项目组委托第三方计量机构进行系统性能检测，测试内容涵盖线性误差、回零误差、蠕变误差与温漂误差四类核心指标，并参照《JJG 539-2016 电子称重仪表检定规程》及《GB/T 7724-2008 称重传感器通用技术条件》标准进行对比分析。测试载荷范围为50 kg至1000 kg，选取等间

距梯度加载方式，使用检定等级砝码作为标准负载源。检测数据显示，各项指标均控制在国家标准限值以内，其中线性误差为0.35 kg，回零误差为0.28 kg，蠕变误差与温漂误差分别为0.40 kg与0.42 kg，具体数值见图4。

系统各项指标均满足行业检定要求，特别是在温漂误差控制方面优于传统应变电桥系统，表明热电辅助计量机制在复杂环境适应性与输出稳定性方面具有可验证的实际性能优势。评估结论表明，本系统完全可满足智能物流中心大宗货物在线动态称量及实时记录的精度需求，具有显著的工程实用价值。

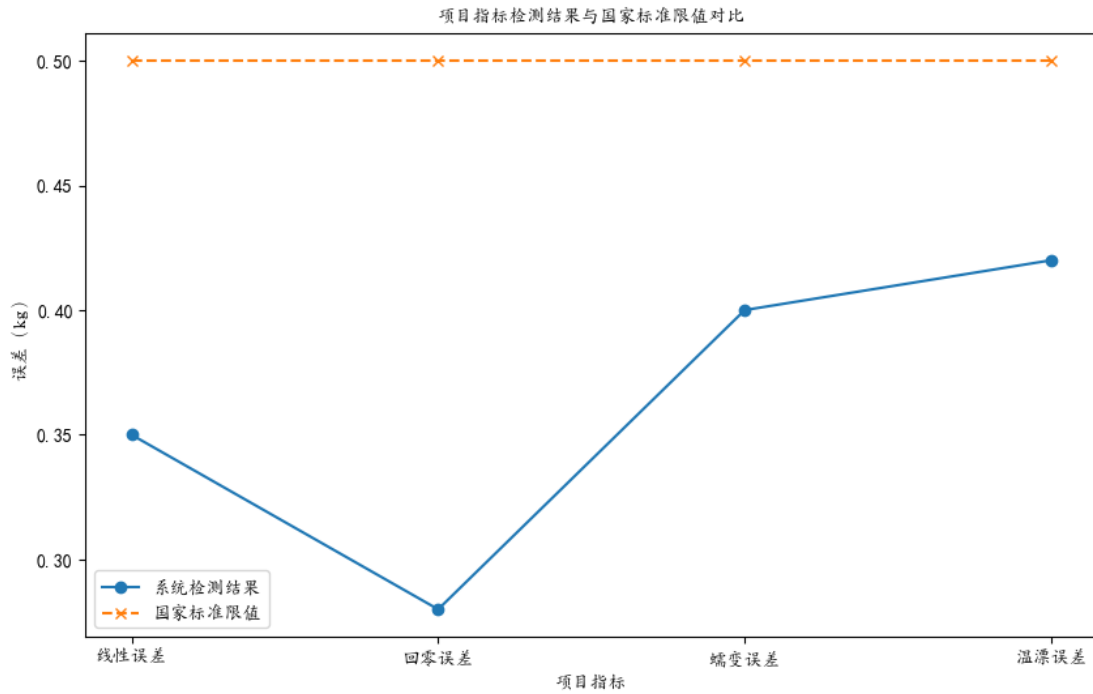


图4 系统输出误差与国家标准限值对照表

4 结语

本文围绕智能仓储物流场景下的称重精度提升需求，构建了融合热电计量机制的双通道称重系统，并完成了从信号采集到算法融合的全流程优化设计。实验结果表明，系统在动态负载条件下具有良好的稳定性与抗温漂能力，各项误差指标满足行业标准。研究成果为热电技术在高精度称重领域的集成应用提供了可行路径，具备推广至工业自动化与复杂环境计量场景的潜力。

参考文献

- [1] 陶强, 穆晓念, 张呈波等. 舰船环境下的有限元分析称重优化系统算法 [J]. 环境技术, 2025, 43 (01): 150–160.
- [2] 黄启辰. 基于卡尔曼滤波的养殖料塔精确称重系统研究[D]. 山东交通学院, 2024.
- [3] 张炜. 电子皮带秤称重传感器灵敏度对散货计量精度的影响 [J]. 衡器, 2024, 53 (01): 11–15.
- [4] 陈晶晶. 用于提高皮带秤称重精度的传感器吊挂组件. 山西万立科技有限公司, 2023–10–23.
- [5] 张信. 高精度阵列式电子皮带秤仪表研究与设

计[D]. 安徽工程大学, 2023.

作者简介

吴翠（1984—），女，山东省聊城市，助理工程师，国家二级注册计量师。研究方向: 温度计量。