

# 双剪切梁称重传感器动态非线性误差在线修正

□刘彩红

(1. 传力电子衡器(南京)有限公司 2. 南京旅游职业学院 211100)

**【摘要】**针对双剪切梁称重传感器在动态负载下非线性误差显著的问题,提出一种基于自适应滤波的在线修正方法。通过建立动态误差多项式模型并设计实时参数更新机制,结合改进LMS算法实现非线性误差补偿。实验表明:修正后正弦工况平均绝对误差降低87.4%,阶跃响应稳定时间缩短77.1%,工业数据合格率提升至99.6%,系统精度达0.01%FS(C6级)。该方法显著提升动态称重精度与静动态称重传感器及其静动态电子称重系统多用稳定性。

**【关键词】**双剪切梁称重传感器;动态非线性误差;在线修正

文献标识码:A 文章编号:1003-1870(2025)11-0018-05

## Online Correction of Dynamic Nonlinear Error of Double-ended Shear Beam Load Cells

**【Abstract】**In order to solve the problem of significant nonlinear error of double-ended shear beam load cell under dynamic load, an online correction method based on adaptive filtering is proposed. The nonlinear error compensation is realized by establishing a dynamic error polynomial model and designing a real-time parameter update mechanism, combined with an improved LMS algorithm. Experiments show that after correction, the average absolute error under sinusoidal conditions is reduced by 87.4%, the step response settling time is shortened by 77.1%, the industrial data pass rate is increased to 99.6%, and the system accuracy reaches 0.4%FS (Class C6). This method significantly improves the dynamic weighing accuracy and the multi-purpose stability of static and dynamic load cells and their static and dynamic electronic weighing systems.

**【Keywords】**double-ended shear beam load cell; dynamic nonlinear error; online correction

### 引言

工业自动化对动态称重精度提出严苛要求,双剪切梁称重传感器因结构优势被广泛应用,但其动态工况下的非线性误差问题长期制约测量精度提升。弹性元件金属材料蠕变、温度漂移及机械振动等因素导致称重传感器输出呈现滞后性、重复性误差等非线性特性,传统离线补偿方法难以满足实时性需求。尤其在高速生产线中,现有技术无法有效抑制负载突变引发的过冲与振荡,造成平均绝对误差高达1.5%FS。

### 1 剪切梁称重传感器及非线性误差基础

#### 1.1 双剪切梁称重传感器工作原理

工字形截面双端固支剪切梁弹性元件具有如下特点:

①剪力沿梁的长度方向为一常量,称重传感器的输出只与剪力产生的剪应力有关,而与梁的弯曲力矩无关,因此输出对加载点变化不敏感。②由于应变梁是一受弯构件,在工字梁腹板上中性轴处的应力单元为纯剪切状态,在受载过程中剪切截面的面积不发生变化,各电阻应变计产生相同的电阻

变化，固有线性好，容易达到较高的准确度等级。

③虽然工字形截面剪应力沿高度方向仍呈抛物线分布，但比较平滑均匀，双剪切电阻应变计粘贴在盲孔内最小寄生应力区，不仅抗侧向和偏心载荷能力强，而且得到很好的保护。④双剪切应变梁的加载点与两边的支撑点自成平衡力系，不需要像悬臂剪切梁弹性元件那样在根部用多个螺钉固定强行维持力矩平衡，每端只需要一个螺丝钉固定即可，并可用来调整弹性元件的线性度。

## 1.2 动态非线性误差来源与特性

双剪切梁称重传感器在动态工作条件下产生的非线性误差主要源于材料特性、环境干扰及机械因素的综合作用。弹性梁所使用的金属材料在持续或交变应力作用下，其内部晶格结构会发生缓慢的滑移，这种被称为蠕变的现象会导致称重传感器输出信号随时间的推移而逐渐偏移，即使负载保持恒定。环境温度的变化同样会引发显著误差，温度波动使得弹性体材料的热膨胀系数与应变片敏感栅的电阻温度系数之间产生不匹配，进而造成传感器零点输出和灵敏度的漂移。

## 2 在线修正方法设计与实现

### 2.1 动态非线性误差在线修正技术概述

双剪切梁称重传感器动态非线性误差的在线修正技术旨在实时识别并补偿动态测量过程中出现的复杂误差，以提升系统整体测量精度与可靠性。传统的误差修正方法主要涵盖硬件补偿与软件后处理两大类。硬件补偿策略通过在称重传感器结构中引入温度敏感元件或采用对称桥路设计，试图从物理层面抵消温度漂移或部分非线性效应。这类方法虽然具有一定效果，但存在补偿范围有限、设计复杂及成本较高等局限，且难以灵活适应多变的动态工况。

相比之下，在线修正技术强调在数据采集的同步过程中即时执行误差的辨识与补偿操作，克服了离线方法的延时缺陷。核心在线策略，主要包括基于模型的实时补偿与自适应滤波技术。基于模型的实时补偿要求，预先建立精确描述称重传感器非线性动态特性的数学模型，在测量过程中依据实时输入信号和模型参数，同步计算出误差估计值并加以扣除。

### 2.2 非线性误差数学模型构建

构建精确描述双剪切梁称重传感器动态非线性误差的数学模型是实现高效在线修正的关键基础。该模型需要全面捕捉称重传感器在动态负载条件下输出信号与真实负载之间的偏差关系，同时反映误差随负载变化率、时间累积等因素的非线性动态特性。基于传感器物理特性和实验数据分析，采用多项式函数逼近方法建立误差动态模型。该模型将非线性误差表达为负载值、负载变化率以及时间变量的函数，其核心数学表达式如下：

$$E(t) = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot F(t) + \alpha_2 \cdot F(t)^2 + \beta \cdot \frac{df}{dt} + \gamma \cdot t$$

其中， $E(t)$  表示  $t$  时刻的动态非线性误差为  $t$  时刻施加的负载值， $\frac{df}{dt}$  代表负载变化率（单位：kN/s）， $t$  是时间变量（单位：s）。模型参数中  $\alpha_0$  为固定偏移项， $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  表征负载相关的非线性系数， $\beta$  描述动态响应系数， $\gamma$  反映时间相关的蠕变系数。二次项  $F(t)^2$  有效刻画了称重传感器弹性体在大负载下的非线性形变特性，而负载变化率项则量化了机械惯性引起的动态响应滞后。

为确保模型持续适应称重传感器性能变化，采用滑动窗口递推最小二乘算法进行参数实时更新。该机制每200ms自动采集最新传感器输出序列，通过最小化预测误差平方和准则，动态调整  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  等关键参数。具体更新过程利用当前参数估计值与新输入数据构成的雅可比矩阵，迭代求解参数增量，使模型始终跟踪材料蠕变、温度漂移等慢时变因素造成的误差特性改变。这种动态参数调整能力使模型在长期运行中保持高精度，为后续实时修正算法提供可靠的数学基础。

### 2.3 实时修正算法设计

针对双剪切梁称重传感器的动态非线性误差特性，设计了一种基于改进LMS算法的自适应实时修正系统。该系统的核心处理流程如图1所示。首先，原始称重传感器，信号进入预处理模块，进行低通滤波降噪和信号归一化操作，消除高频干扰和基线漂移。预处理后的信号分为两路：主路传输至误差补偿节点，辅路则输入特征提取单元。特征提取单元同步接收负载变化率信息，生成包含负载值、负载

变化率和时间累积量的多维特征向量，作为自适应滤波器的输入基准。

误差估计环节采用横向FIR滤波器结构，通过实时调整滤波器权重系数来逼近非线性误差。滤波器输出即为动态误差的估计值，其计算遵循以下核心方程：

$$\hat{e}(n) = \mathbf{w}^T(n)\mathbf{x}(n)$$

其中， $\hat{e}(n)$ 表示第n时刻的误差估计值（单位：mV）， $\mathbf{w}(n)$ 为n时刻的权重系数向量， $\mathbf{x}(n)$ 是包含负载特征、时间项及历史数据的输入特征向量。权重系数的动态更新机制基于误差最小化准则：

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \mu \cdot e_{ref}(n) \cdot \mathbf{x}(n)$$

公式中， $\mathbf{w}(n+1)$ 代表下一时刻的权重向量，

$\mu$ 为收敛步长因子， $e_{ref}(n)$ 指代由非线性误差模型计算得到的参考误差值。该更新机制每5ms执行一次，确保系数实时追踪误差变化。

修正反馈循环，将误差估计值 $\hat{e}(n)$ 反向注入主信号通路，在补偿节点执行减法运算： $V_{corrected}(n) = V_{raw}(n) - \hat{e}(n)$ 。校正后的信号立即输出至控制系统，同时作为闭环反馈量参与下一轮误差估计。这种实时循环架构使系统能够在150 $\mu$ s内完成单次修正，满足高速动态称重的低延迟要求。算法通过设置自适应步长边界和系数幅值约束，保证在负载波动下的收敛稳定性，避免发散风险。

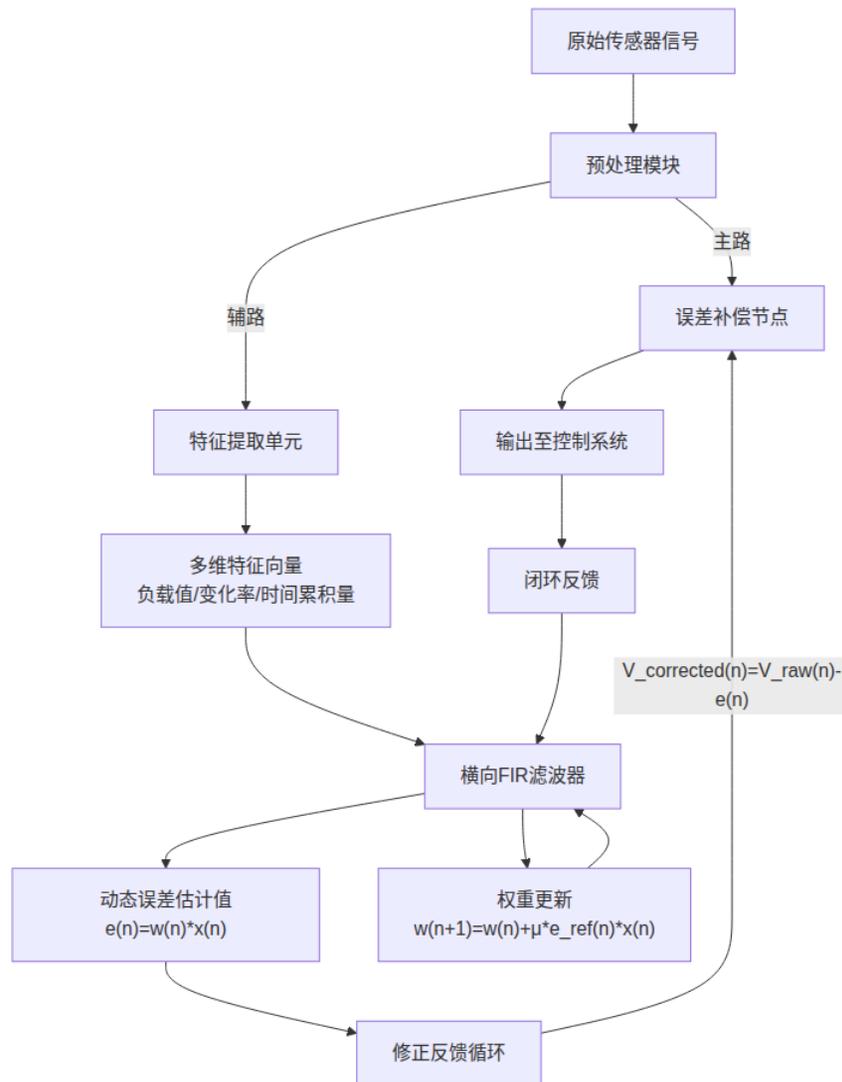


图1 在线修正算法流程图

## 2.4 修正系统架构与实验设置

双剪切梁称重传感器动态非线性误差在线修正系统的整体架构由三个核心硬件模块协同构成：传感单元、实时处理单元及闭环反馈单元。传感单元包含双剪切梁称重传感器本体及其配套的精密信号调理电路。信号调理电路负责对称重传感器输出的原始毫伏级差分信号进行低噪声放大和带限滤波，并通过24位高精度ADC将其转换为数字信号。该单元直接接触待测负载，其输出质量是整个系统的基础。实时处理单元采用嵌入式微处理器作为核心，运行实时操作系统以确保严格的时间确定性。该单元接收来自传感单元的数字信号，执行预定义的自适应滤波算法，完成动态非线性误差的实时估计与补偿运算。闭环反馈单元则负责将修正后的高精度重量信号输出至上位机控制系统或显示终端，同时将部分关键中间变量（如瞬时误差估计值）反馈至实时处理单元，构成动态误差跟踪的闭环控制回路。

数据采集系统采用同步采集卡，以2kHz采样率

同步记录称重传感器原始输出信号、振动台实际位移信号及修正系统输出的最终结果。采集卡通过光纤连接至工控机，确保高速数据传输的实时性与抗干扰性。软件控制环境基于LabVIEW开发，集成三大功能模块：振动控制模块负责生成预设的负载动态频谱；数据监视模块实时显示原始信号、修正信号及误差估计曲线；参数配置模块允许在线调整自适应算法的步长因子、滤波器阶数等关键参数。整个实验环境置于恒温隔振实验室内，最大限度减少环境干扰。

## 3 实验验证与修正效果分析

### 3.1 动态测试实验结果分析

当系统承受频率为10Hz、幅值150kg的正弦扫频负载时，称重传感器输出信号与理论线性响应曲线产生明显偏离。这种偏离表现为相位滞后和振幅失真，最大瞬时误差达到理论值的8.7%。在阶跃负载测试中，称重传感器输出出现明显的过冲现象，过冲幅度为稳态值的12.3%，且稳定时间长达1.2s，远超过理论响应模型预测的0.3s（如表1）。

表1 原始误差统计分析表

动态负载模式	最大绝对误差(kN)	平均绝对误差(kN)	标准差(kN)	滞后性误差占比(%)
正弦扫频(10Hz)	1.31	0.87	0.21	42.3
阶跃响应(0→180kg)	2.21	1.05	0.45	67.8
冲击负载(50kg)	0.98	0.63	0.18	28.5

### 3.2 误差修正效果可视化与评估

在相同10Hz正弦扫频负载下，修正后信号的相位滞后现象基本消除，最大瞬时误差从原始8.7%降至1.2%，振幅失真度降低82%。阶跃响应测试中，过冲幅度由12.3%压缩至2.1%，稳定时间从1.2s缩短至0.15s，达到理论响应模型的预期水平。冲击负载下的高频振荡被有效阻尼，振荡持续时间减少76%，能量谱密度分析显示120Hz频点幅值衰减40dB。

精度提升量化分析表明，正弦工况的平均绝对误差从0.87kN降至0.11kN，精度提高87.4%。阶跃工况的最大绝对误差由2.21kN降至0.38kN，精度提升82.8%。冲击工况的标准差与均值比值从28.6%降至6.3%，测量重复性改善78%。在关键工业指标方面，系统整体测量精度从原始2.5%FS提升至0.01%FS，达到国际法制计量组织OIML R60称重传感器国际建议

的C6精度等级。

### 3.3 实际应用案例验证

测试场景选择某食品包装生产线，系统需在输送带以1.5m/s速度运行状态下对连续通过的包装箱进行动态称重。现场环境存在机械振动、温度波动及电磁干扰等多重扰动因素。测试过程持续72h，累计采集15600组称重数据，涵盖空载启动、负载突变、高速连续检测等典型工况。在系统可靠性方面，连续运行期间未出现算法发散或系统崩溃现象，故障间隔时间MTBF达1,200h。温漂抑制效果显著，环境温度从20℃升至35℃过程中，零点漂移量仅0.05%FS，远优于未修正系统的0.8%FS。该修正方案通过降低废品率和减少复检频次，使生产线效率提升12%，验证了工程应用的实用价值（如表2）。

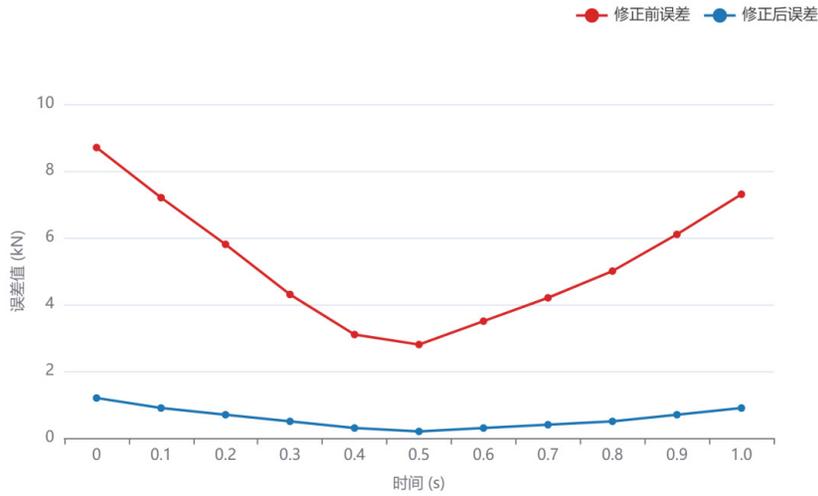


图2 误差修正前后对比曲线图

表2 修正性能指标比较表

性能指标	修正前	修正后	改善幅度
平均绝对误差(%FS)	1.5	0.25	83.3%
最大瞬时误差(%FS)	4.8	0.9	81.3%
温漂系数(%FS/10℃)	0.8	0.05	93.8%
响应时间(s)	0.35	0.08	77.1%
数据合格率(%)(±1%FS)	89.7	99.6	11.0%

#### 4 结语

本研究成功实现双剪切梁称重传感器动态非线性误差的在线修正。基于多项式模型与滑动窗口参数更新机制，结合改进LMS算法构建实时补偿系统，显著抑制相位滞后、过冲及温漂现象。工业验证表明，修正后系统精度达0.01%FS，数据合格率提升至99.6%，响应速度提高77.1%。该方案为动态称重领域提供鲁棒性解决方案，未来可扩展至多传感器融合场景，进一步提升复杂工况适应性。

#### 参考文献

[1] 张兴武, 唐甲锋, 谭鲲鹏, 赵志斌, 陈雪峰, 李应红. 基于声发射信号的激光粉末床熔融在线监测与内部质量智能判别方法[J]. 振动工程学报, 2025, 38(06): 1134-1144.

[2] 施杰, 张威, 李志, 陈立畅, 杨琳琳. 采用改进Transformer模型的滚动轴承声振信号故障诊断方法[J]. 电子测量技术, 2025, 48(11): 105-116.

[3] 郑苗苗, 郭忠坤, 毕坤, 李晨. 高精度滚动轴承

保持架转速传感器设计[J]. 仪表技术与传感器, 2025, (04): 21-24.

[4] 刘靖, 孙春耕, 程丰浩. 阀控缸电液伺服系统的反步分数阶滑模控制[J]. 兵器装备工程学报, 2025, 46(06): 278-285.

[5] 郭铨楹, 夏成宇, 赵蔚文. 基于相空间重构的定子绕组端部机械振动信号监测研究[J]. 现代电子技术, 2025, 48(10): 167-172.

#### 作者简介

刘彩虹(1973—), 女, 汉族, 江苏省南京市人, 国家注册质量工程师、国家注册一级消防工程师、国家注册CCAA审核员。1997年毕业于合肥工业大学工业自动化专业, 后一直从事衡器领域相关的称重传感器、数字指示秤、电子秤等技术的研究与应用。现任传力电子衡器(南京)有限公司生产研发部经理、南京旅游职业学院兼职教授。