

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2413570

微磁力称重传感器动态温度补偿方法*

王喜阳, 肖福礼, 李 毅, 刘文佳, 程云飞
(陕西省计量科学研究院 西安 710199)

摘 要:微磁力称重传感器机械结构的热胀冷缩、电路元器件的温漂以及永磁体磁感应强度的变化均会导致示值漂移, 硬件引入漂移的作用机制、合理的温度试验与温度补偿方法都是解决温漂问题的关键所在。以量程为 200 g, 分度值为 0.1 mg 的传感器为对象, 在硬件引入漂移的作用机制研究中, 采用数学建模的方法分析了机械杠杆传力比、驱动电路的电压基准、采集电阻以及永磁体的温度漂移模型, 得到了影响传感器温度漂移最主要因素, 确定温度补偿传感器的安装位置; 设计了线性升温温度试验, 每隔 10℃ 采集示值漂移并记录当前参考点试验温度, 通过二次拟合得出温度漂移补偿函数; 最后提出了零基准点、半量基准点按比例跟随最大称量基准点补偿的区间温度补偿方法, 使机械与电路部分的漂移量同时对零基准点和最大称量基准点产生影响, 而不会影响量程区间的长度。同时提出了动态补偿灵敏度的概念, 补偿灵敏度实时按照补偿后的区间长度与分度数的比值进行更新, 以解决在不同量程区间下温度补偿量与传感器分度值不对称的问题, 提升补偿精度。实验结果表明, 本研究方法能够实现最大称量为 200 g、分度值为 0.1 mg 的传感器在 5℃ ~ 35℃ 范围内的动态温度补偿, 补偿误差绝对值 < 0.5 mg, 增强了传感器在温度波动较大环境中的适应性。

关键词: 微磁力称重传感器; 温度漂移; 区间补偿; 动态补偿

中图分类号: TH715.1+16 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.40

A dynamic temperature compensation method for micro electromagnetic force load cell

Wang Xiyang, Xiao Fuli, Li Yi, Liu Wenjia, Cheng Yunfei
(Shaanxi Institute of Metrology Science, Xi'an 710199, China)

Abstract: The thermal expansion and contraction of the mechanical structure, temperature drift of circuit components, and variations in the magnetic induction intensity of the permanent magnet all contribute to indication drift in micro electromagnetic force weighing sensors. Investigating the mechanisms of hardware-induced drift, conducting appropriate temperature tests, and implementing effective temperature compensation methods are crucial for mitigating temperature-related drift issues. For a sensor with a range of 200 g and a resolution of 0.1 mg, this study employs mathematical modeling to analyze key factors including the mechanical lever force transmission ratio, voltage reference of the driving circuit, acquisition resistor, and the temperature drift model of the permanent magnet. This analysis identifies the primary contributors to temperature drift and determines the optimal installation position for the temperature-compensated sensor. A linear temperature rise test is conducted, collecting and recording indication drift data at each 10℃ interval. Quadratic fitting is then applied to derive the temperature drift compensation function. The study proposes an interval temperature compensation method where the zero reference point and half-scale reference point proportionally follow the maximum scale reference point. This approach compensates for both mechanical and circuit drifts without altering the length of the scale range interval. Additionally, the concept of dynamic compensation sensitivity is introduced, updating the compensation sensitivity in real time based on the ratio of the compensated interval length to the graduation number. This addresses asymmetry issues in temperature compensation amounts across different scale intervals and enhances compensation accuracy. Experimental results show that the proposed method achieves dynamic temperature compensation for a 200 g sensor with a resolution of 0.1 mg within the 5℃ ~ 35℃ range, with a

收稿日期: 2024-12-06 Received Date: 2024-12-06

* 基金项目: 陕西省科学技术厅重点研发计划 (2023-YBGY-101, 2024GX-YBXM-200) 项目资助

compensation error absolute value less than 0.5 mg, thereby improving the sensor's adaptability in environments with significant temperature fluctuations.

Keywords: micro-electromagnetic force weighing sensor; temperature drift; interval compensation; dynamic compensation

1 引言

科技发展对精密称重的需求不断加大,微电磁力称重传感器以其高精度、高灵敏度等优势逐步代替了应变式传感器,成为精密称重系统中的重要组成部分^[1-3]。然而在生产应用中该传感器的温度敏感性较强,传感器机械结构的热胀冷缩、电路元器件的温漂以及永磁体磁感应强度的温度特性均会产生温漂,其是一种必须依托温度补偿后才能正常使用的特殊传感器。

国外对该传感器的研究始于上世纪初,经过分体式结构到单体模块式结构的多次升级,称重技术处于引领地位,如赛多利斯研发的单模块超微量称重传感器分辨力达到 10^{-7} g^[4-6];为消除硬件的温度漂移,梅特勒托利多采用双绕组式传感器,温度对两个绕组产生同方向的漂移影响,采用求差的方式抵消机械的温度漂移,稳定性和灵敏度得到了很大提升。国产微电磁力称重传感器的研究起步较晚,对传感器的材料、加工工艺、驱动电路、软件处理与温度补偿等方面的研究较少,导致高精度传感器的关键技术并未实现^[7]。随着国内对先进制造技术的不断重视,近年来国内涌现出了一批专门从事微电磁力称重传感器相关的人员。为解决微电磁力称重传感器的温漂问题实现高精度测量要求,刘亚坤等^[8]建立永磁体、线圈、环境温度的支持向量机温度漂移补偿模型,测量精度可达到 0.3 mg,但该方法采用双温度测量点,回归计算较为复杂;张会玲^[9]提出的基于位置敏感器件(position sensitive device, PSD)光杠杆传感器,在机械、电路上做了改进降低了温度补偿的难度,但实验室条件下 2 h 内的零点最大漂移量为 0.001 4 g, 100 g 载荷点最大漂移量为 100.001 6 g,漂移超过了允差要求;熊一凡^[10]提出的使用正负温度系数采集电阻的补偿方法可以在温度变化时补偿电路的漂移,但无法实现机械与永磁体的漂移补偿;陈年等^[11]提出的前馈 PID (proportional integral derivative) 算法,能够提升电路的稳定性,但只针对 200 g 载荷点开展了研究,补偿后传感器的线性研究不全面;任亚奇^[12]提出了模糊自适应算法,通过调节电路稳定性以解决传感器温度漂移问题,在 20℃ 附近对各载荷点进行测试,误差为 0.000 3 g,但存在计算量大、试验温度区间较小的局限;王徽^[13]提出采用磁悬浮原理利用上拉式与排斥式双磁路式的补偿方法,能够在 0~15 g 范围内实现精确补偿,但该方法量程较小。现有温度补偿方法取得了较好的成果,但仍存在补偿方法计算量大、漂移补偿

的机理研究不系统、补偿方法无法同时兼顾机械、电路与永磁体 3 个方面等问题,缺少对传感器各组成部分漂移的定量分析。

为解决微电磁力称重传感器的温漂问题,将分析机械传力杠杆、精密驱动电路与永磁体部分的漂移机理,确定影响传感器温度漂移的主要来源,针对 3 个主要方面共同影响下的温度漂移,提出了基于区间的动态温度补偿方法。该方法首先补偿了永磁体温漂,补偿后的区间作为一个整体,机械与电路部分的漂移同时影响零点与最大秤量,对量程起始位置产生作用,不影响区间长度,因此,只需要对永磁体部分进行补偿,就可以同时兼顾机械与电路漂移。

2 微电磁力称重传感器

2.1 传感器结构

微电磁力称重传感器的结构由簧片(耦合簧片、支点簧片、承载簧片)、承载器、承力梁(横梁、竖梁)、配重块、磁缸(导磁柱、永磁体、磁轭、绕组)、光电位置传感器(红外发射器、对称硅光电池)及温度传感器等部分组成,传感器结构如图 1 所示。

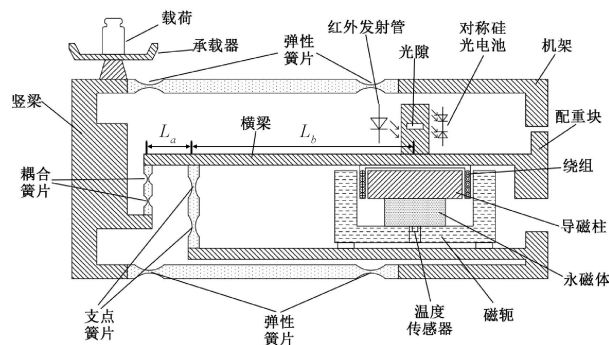


图 1 传感器结构

Fig. 1 Sensor structure

传感器的机架固定在机壳上,整体形成了一种悬臂梁结构,载荷施加到承载器时,力由竖梁传递到耦合簧片,耦合簧片在支点簧片的支撑下使横梁尾部产生竖直方向的位移趋势^[14],光电位置传感器检测到平衡被破坏,电磁力驱动横梁回归平衡位置。当横梁受热不均时,会造成传感器杠杆比发生变化;磁钢中永磁体是温敏材料,温度变化影响其磁场强度,以上部分的温度特性都会对传感器输出产生影响。

2.2 传感器硬件电路

微电磁力称重传感器的硬件电路主要由红外发光二极管、对称硅光电池、 I/V 转换电路、PID 调整电路、恒流驱动电路、绕组及采样电阻组成,如图 2 所示。

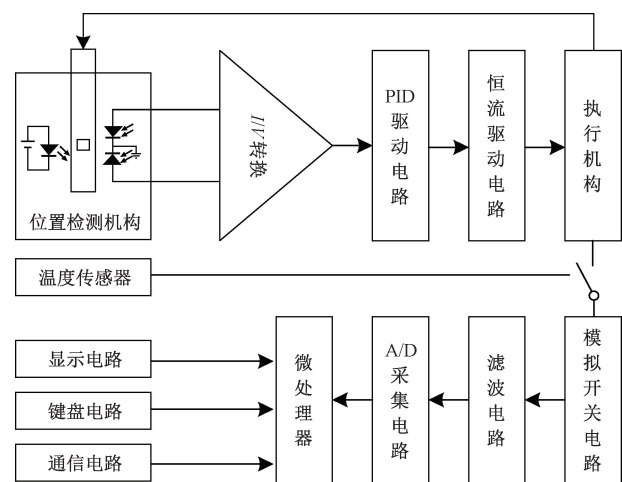


图 2 传感器电路原理

Fig. 2 Sensor circuit principle

电路中光电位置传感器是由硅基半导体组成的,是传感器平衡位置的监测单元,当平衡位置发生改变时,位置检测机构输出电流不为 0,经过 I/V 转换、PID、恒流驱动电路使执行结构重归平衡,通过模拟开关选择采集电阻或温度传感器电压信号,经滤波后进行模数转换,最后输出称重数据。其中光电器件、ADC (analog-to-digital converter) 的基准电压芯片、采集电阻均为关键温度敏感器件,温度变化都会导致输出产生漂移。

2.3 传感器的平衡模型

传感器所承载荷与电磁力通过比例杠杆实现平衡,机械上的传力比也称作杠杆比 $k^{[15]}$,是指绕组中心点到支点簧片水平距离(图 1 中 L_b)与耦合簧片到支点簧片水平距离(图 1 中 L_a)的比值,即:

$$k = \frac{L_b}{L_a} \quad (1)$$

传感器动态响应速度受载荷输入与平衡电磁力的比例关系影响,当杠杆比较大时,横梁的摆动线速度变大,系统响应速度较快,但绕组的驱动电流较小,容易受到外界干扰,传感器输出稳定性较差;相反系统响应速度变慢,稳定性提高。为了兼顾传感器的动态响应速度与稳定性两个技术指标,将传感器的杠杆比设计为 5,即 $L_b = 40 \text{ mm}$, $L_a = 8 \text{ mm}$ 。

由式(1)可知被测物体质量 m 所受重力 G 与平衡电磁力 F 之间的关系同样为 k ,根据电磁感应定律,电磁力等于流经绕组的电流 I 、绕组导线长度 L 与永磁体磁感

应强度 B 三者的乘积,因此质量与电磁力的关系表达式可表示为:

$$G = mg = kF = kBIL \quad (2)$$

$$m = \frac{kBIL}{g} = \frac{L_b BIL}{gL_a} \quad (3)$$

由式(3)可知,杠杆比 k 、重力加速度 g 为常数,在温度恒定的情况下,磁感应强度、线圈长度保持恒定,在此情况下 $m \propto I$,ADC 直接采集采样电阻 R 的电压值即可换算出电压内码值对应的质量值。该研究采用 32 位 ADC 芯片,参考电压 V_{ref} 为 2.5 V,增益 PGA 为 1,则质量值 m 的称重输出 $W(m)$ 可表示为:

$$W(m) = W_a \frac{IR}{V_{ref}} \times (2^N - 1) + W_{zs} - W_l \quad (4)$$

$$W_a = \frac{W_{fs}}{C_{fs} - C_{zs}} \quad (5)$$

$$W_{zs} = -W_a \times C_{zs} \quad (6)$$

式中: W_a 为校准常数; N 为 ADC 位数; W_{fs} 为校准载荷的质量值; C_{fs} 为基准载荷校准时的 ADC 内码值; C_{zs} 为零点校准时的 ADC 内码值; W_{zs} 为零位初值; W_l 为除皮量。

当环境温度发生改变时,机械杠杆比 k 、电路元器件电学性能、磁感应强度 B 、线圈长度 L 的变化都会对传感器的输出产生影响,需要定量分析每个部分的影响量^[16-17]。

3 温度漂移理论分析

3.1 机械漂移

物体的质量是用其所受重力表征的,与重力相反的支持力由簧片和承力梁传递至绕组连接点,其受力方向是竖直的,当传感器材料受温度变化,在竖直方向上的变形量几乎不对传感器的杠杆比产生影响^[18],水平尺度上的横梁受热不均则会影响杠杆比。

以支点簧片为横梁杠杆的支点,设横梁上短臂作用端 L_a 比长臂端 L_b 的温度高 ΔT ,短臂作用端的伸长量 ΔL_a 为:

$$\Delta L_a = L_{aT} \rho_b \Delta T \quad (7)$$

其中, L_{aT} 为短臂作用端在温度为 T 时的长度; ρ_b 为 2 系铝合金的线膨胀系数,约为 $23 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。

根据式(3)横梁两臂温度差为 ΔT 时引起的质量变化示为:

$$m(T + \Delta T) = I_{T+\Delta T} = \frac{mgL_a(1 + \rho_b \Delta T)}{L_b BL} \quad (8)$$

根据式(4)当系统初始化后,零位初值 W_{zs} 和除皮量 W_l 为 0 时,质量值输出的相对变化值为:

$$W(m_{\Delta T}) = \frac{W(m_{T+\Delta T}) - W(m_T)}{W(m_T)} =$$

$$\frac{W_a[mgL_a(1+\rho_b\Delta T)R]\times(2^N-1)}{L_bBLV_{ref}} - \frac{W_a[mgL_aR]\times(2^N-1)}{L_bBLV_{ref}} = \frac{W_a[mgL_aR]\times(2^N-1)}{L_bBLV_{ref}} = \frac{W_a \times \frac{mgL_aR}{L_bBLV_{ref}}(2^N-1)}{\frac{mgL_a}{L_bBLV_{ref}}(2^N-1)} = \rho_b\Delta T \tag{9}$$

式(9)表明横梁受热不均会引起横梁杠杆比变化,从而使输出发生漂移。假设温度变化1℃时,横梁两端温度通常<0.1℃,该传感器由横梁受热不均产生的最大相对变化量<2.3×10⁻⁶,变化值约为0.46 mg。

3.2 驱动电路漂移

电路元件温漂对传感器产生输出影响的方面主要来自位置检测机构、ADC 基准电压电路与采样电路部分。光电位置检测电路的对称硅光电池采用零位电压偏置,当温度升高时,对称的硅光电池暗电流同时增加,其电流方向相反,在元器件性能接近时可以抵消温度对元器件漂移的影响,因此可以忽略此部分的影响。

ADC 基准电压源采用的是 MAX6225ACSA+,参考电压 V_{ref} 为+2.5 V,通过查询芯片手册其温度系数指标为 2 ppm/℃,即芯片的电压温度系数 $\rho_v = \pm 2 \times 10^{-6}$ V/℃,当温度变化 ΔT ,相对的输出变化量可表示为:

$$W(\Delta V) = \rho_v \Delta T \times 100\% = \pm 2 \times 10^{-6} \Delta T \tag{10}$$

采样电阻采用 UPR 电阻,其温度漂移指数为 C11,对应的温度漂移指数 ρ_a 为 ± 1 ppm,当温度变化 ΔT 时,由采样电阻引入的输出相对变化量 $W(\Delta R)$ 可表示为:

$$W(\Delta R) = \rho_a \Delta T \times 100\% = \pm 1 \times 10^{-6} \Delta T \tag{11}$$

由式(10)、(11)可知,当温度变化1℃时,电路部分引入的输出相对变化量的最大绝对值为3×10⁻⁶,变化值约为0.6 mg。

3.3 永磁体漂移

传感器永磁体使用的材料为钕铁硼永磁体(NdFeB),永磁体温度性能通常指剩余磁感应强度 B_r ,矫顽力 H_c 和最大磁能积 BH_{max} 参数随温度发生的变化。由于该传感器是利用永磁体的剩余磁感应强度与线圈电流的相互作用产生平衡力,工作温度一般不超过40℃,达不到永磁体最大磁能积 BH_{max} 诱变温度,且钕铁硼永磁体在中低温范围内的矫顽力 H_c 比较稳定,因此该研究仅分析剩余磁感应强度 B_r 的温度特性。

钕铁硼永磁体的温度系数一般为-0.1%/℃,温度系数 ρ_{Br} 是指磁场强度 B_r 受温度变化的百分率,可表示为:

$$\rho_{Br} = \frac{B_{T+\Delta T} - B_T}{B_T} \times \frac{1}{\Delta T} \times 100\% \tag{12}$$

式中; $B_T, B_{T+\Delta T}$ 分别为永磁体在温度为 T 和 $T+\Delta T$ 时的磁感应强度,由式(12)所示,当温度为0℃的参考磁感应强度为 B_0 时,磁感应强度在温度为 T 时的温漂传递函数可表示为:

$$f(B_r) = (B_0 + B_0 \rho_{Br} T) IL \tag{13}$$

根据上述传递函数,在温度为 T 的基础上变化 ΔT ,传感器的相对输出变化量 $W(\Delta B)$ 为:

$$W(\Delta B) = \frac{f(B_{r_{T+\Delta T}}) - f(B_{r_T})}{f(B_{r_T})} = \frac{B_{T+\Delta T} IL - B_T IL}{B_T IL} = \frac{B_0 + B_0 \rho_{Br}(T+\Delta T) - (B_0 + B_0 \rho_{Br} T)}{B_0 + B_0 \rho_{Br} T} = \frac{\rho_{Br} \Delta T}{1 + \rho_{Br} T} \tag{14}$$

由式(14)可知,当变化1℃时相对变化量约为-9.95×10⁻⁴,变化值199 mg。

经过以上分析,温度上升1℃,机械、电路与永磁体3部分温度引起的相对变化量与变化值如表1所示。

表1 相对变化量与变化值
Table 1 Relative change and change value

漂移来源	相对变化量	变化值/mg
$W(m\Delta T)$	2.3×10^{-6}	0.46
$W(\Delta V + \Delta R)$	3.0×10^{-6}	0.60
$W(\Delta B)$	-9.95×10^{-4}	199

由表1可知,温度对机械杠杆受热不均与驱动电路偏移的影响较小,主要漂移来自永磁体的温度特性,永磁体的漂移占总漂移的99.5%,因此温度传感器安装在永磁体上,能够补偿绝大部分温度漂移。

4 基于区间的动态温度补偿方法

4.1 温度试验设计

为了建立温度与漂移量的数学关系,选择没有任何补偿的传感器,在5℃~35℃的温度区间中作恒湿线性升温实验,实验时间24 h,采用的试验载荷质量为200 g,以定点采集的方式进行试验数据采集。

4.2 温度试验程序

- 1)将传感器置于5℃、50% RH 恒温恒湿环境试验箱中静置4 h;
- 2)设定线性升温程序,设定从5℃~35℃温度区间内升温20 h;
- 3)如图3所示,图中S为达到稳定温度,P为预加载,W为校准作业,D为进行称量测试,R为等待传感器恢复,Z为读取零点示值。

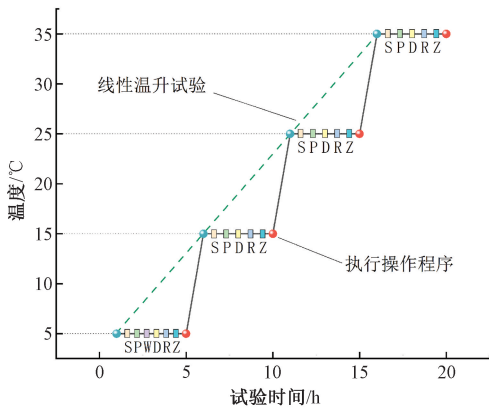


图3 温度试验程序

Fig. 3 Temperature test procedure

开始升温时,达到稳定温度 5℃,执行操作程序 S、P、W、D、R、Z,采集该温度下的称重结果 I_{m1} 与零点示值 I_{01} ,采集当前温度对应温度传感器的 ADC 内码值 x_1 ;线性升温至 15℃,执行操作程序 S、P、D、R、Z,采集该温度下的称重结果 I_{m2} 与零点示值 I_{02} ,采集当前温度对应温度传感器的 ADC 内码值 x_2 ;以此类推采集完成 25℃、35℃的称重结果、零点示值与对应的温度值内码值。

4.3 试验结果处理

通过温度试验,可以得到 4 个温度点的漂移数据记为 $C_i(x_i, y_i)$, $i=1,2,3,4$, x 为当前的试验温度,单位为℃; y 为示值漂移量,等于称量测试数据 I_{mi} 减去回零数据 I_{0i} 与最大秤量 Max 之差。即:

$$y_i = I_{mi} - I_{0i} - \text{Max} \quad (15)$$

由于传感器的温度漂移曲线并非理想的线性,将这 4 点数据利用二次函数拟合的方式进行逼近求解。

给定一个二次函数形式 $y = ax^2 + bx + c$ 和 4 个点 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), (x_4, y_4)$, 带入方程并构建函数矩阵:

$$\begin{pmatrix} x_1^2 & x_1 & 1 \\ x_2^2 & x_2 & 1 \\ x_3^2 & x_3 & 1 \\ x_4^2 & x_4 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{pmatrix} \quad (16)$$

矩阵方程利用最小二乘法求解。矩阵的形态是 $A \cdot \theta = Y$, 即:

$$A = \begin{pmatrix} x_1^2 & x_1 & 1 \\ x_2^2 & x_2 & 1 \\ x_3^2 & x_3 & 1 \\ x_4^2 & x_4 & 1 \end{pmatrix}, \theta = \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix}, Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{pmatrix} \quad (17)$$

求解系数矩阵 $\theta = (A^T A)^{-1} A^T Y$ 即可得到系数 a, b, c , 完成温度漂移补偿函数的计算。

4.4 动态温度补偿计算

传感器的输出为采样电阻电压数模转换的称重输出与温度漂移补偿函数补偿值的标量之和。不同载荷值在相同温度变化量下的漂移数据存在差异,然而在整个传感器量程区间内,漂移所具有的比例相对恒定^[19-20]。基于上述传感器的特性,提出了基于区间的温度补偿方法以及动态温度漂移灵敏度这一概念。

区间的温度补偿是将最大秤量的漂移量 D_1 作为基准补偿值,其他线性基准点按照比例系数 $s[i]$ ($i=0,1$) 跟随该基准点进行补偿的方法。在进行线性校准时分别对零基准点、半量基准点、最大秤量基准点进行校准得到 3 点对应 ADC 内码值 $Cal_0, Cal_{0.5}, Cal_1$, 比例系数为零基准点、半量基准点分别与最大秤量基准点内码值的比值,可表示为:

$$s[i] = \begin{cases} s[0] = \frac{Cal_0}{Cal_1}, & i=0 \\ s[1] = \frac{Cal_{0.5}}{Cal_1}, & i=1 \end{cases} \quad (18)$$

因此可以通过最大秤量的漂移量 D_1 计算零基准点漂移量 D_0 、半量基准点漂移量 $D_{0.5}$ 的漂移量为:

$$D_0 = s[0] \times D_1 = \frac{Cal_0}{Cal_1} D_1 \quad (19)$$

$$D_{0.5} = s[1] \times D_1 = \frac{Cal_{0.5}}{Cal_1} D_1 \quad (20)$$

由于温度漂移对应的是该温度点的示值变化,经过补偿后的传感器工作区间长度发生改变,分度数保持不变,因此补偿的灵敏度是动态变化的,可以通过补偿后的传感器工作区间长度与传感器的分度数 n 的比值进行动态修正,动态补偿灵敏度系数 K_d 可表示为:

$$K_d = \frac{(Cal_1 + D_1 - (Cal_0 + s[0] \times D_1))}{n} \quad (21)$$

因此得到补偿后零基准点 Cal'_0 、半量基准点 $Cal'_{0.5}$ 、最大秤量基准点 Cal'_1 的值可表示为:

$$Cal'_0 = Cal_0 + D_0 \times K_d \quad (22)$$

$$Cal'_{0.5} = Cal_{0.5} + D_{0.5} \times K_d \quad (23)$$

$$Cal'_1 = Cal_1 + D_1 \times K_d \quad (24)$$

经过补偿后的 3 个基准值可以运用分段线性插值法^[21]建立两个直线方程,根据式(5)和(6),可以在这两个直线方程的不同区间范围内得到 2 个校准系数 w_a 与 2 个零位初值 w_w ,当 ADC 内码值处于不同区间段时,选择对应的校准系数与零位初值系数,即可通过式(4)换算出补偿后的称重值。

5 实验结果分析

5.1 现场验证实验

为验证该方法的有效性,首先选择 2 台自研的量程为 200 g、分度值为 0.1 mg 传感器,其中一台采用本研究基于区间的动态温度补偿方法进行了补偿,另一台采用硬件补偿方法进行补偿,测试动态温度补偿与硬件补偿的性能;然后选择一台赛多利斯 BS224 型传感器作为参照对象,测试本研究动态温度补偿方法在抵消机械、电路漂移方面与商用成熟传感器的性能差异。

依据 GB/T 26497—2022《电子天平》^[22] 要求,将 3 台传感器置于温度为 5℃ 湿度为 50% RH 的环境下恒温 4 h,到达恒温时间后线性校准(零基准点、半量基准点、最大称量基准点)传感器;然后设置 10 h 线性升温至 35℃,在线性升温过程中,当温度分别到达 5℃、10℃、15℃、20℃、25℃、30℃、35℃ 时对传感器的 0、50、100、150、200 g 5 个载荷点进行一组示值误差测定,到达 35℃ 后恒温 2 h,再做一组示值误差测定,测量 5 个载荷点示值结果。为了便于数据处理,开启零点跟踪装置。实验现场环境如图 4 所示。

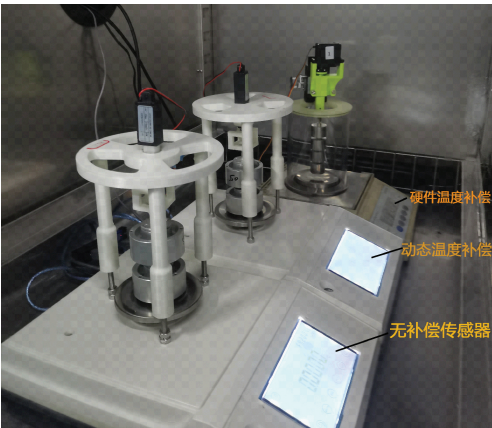


图 4 实验现场环境

Fig. 4 Experimental site environment

5.2 实验数据与分析

实验验证结果分布图如图 5 所示,本研究提出的基于区间的动态温度补偿方法在线性升温过程中的补偿效果优于硬件补偿与参照对象的结果。本研究方法最大测量误差出现在 50、100 和 200 g 载荷点,误差值为 -0.0004 g ,其他载荷点在不同温度下的误差值如图 6 所示,所有误差值都处于最大允许误差区间范围内,因此测量结果满足 GB/T 26497—2022《电子天平》对 I 级天平传感器示值误差的要求。

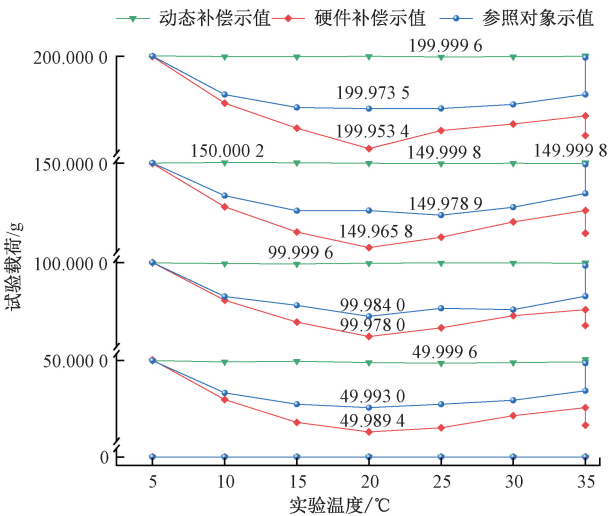


图 5 验证结果分布

Fig. 5 Verification result distribution chart

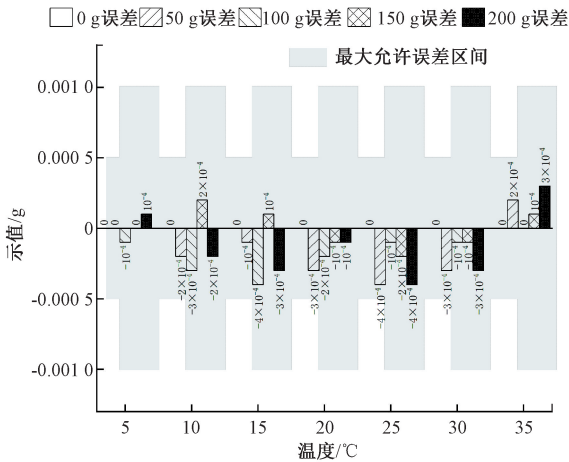


图 6 动态补偿各载荷点误差

Fig. 6 Dynamic compensation of each load point error diagram

硬件补偿传感器与参照对象的最大误差点都在 200 g 点,分别为 -0.0466 g 和 -0.0265 g ,如图 7、8 所示,载荷点越大其误差值越大,远超国标最大允许误差的要求。因机械、电路与永磁体升降温速率不同步导致上述 2 台传感器在线性升温过程中不同温度点的示值误差都呈现先迅速减小后缓慢增加的现象。当环境温度升高时,机械与电路部分首先升温,由于温度传感器在永磁体内部,没有及时感知温度变化,因此机械与电路部分的漂移无法进行补偿。到升温一定时间时,传感器 3 个部分都在整体升温,温度传感器参与温度补偿,偏差有所减小。因此变化的温度环境中,存在机械、电路与永磁体产生不对称的温度漂移现象。

当实验温度到达 35℃ 并恒定 2 h 后,机械、电路与永磁体的温度基本恒定且相等,参照对象的示值误差 50 g

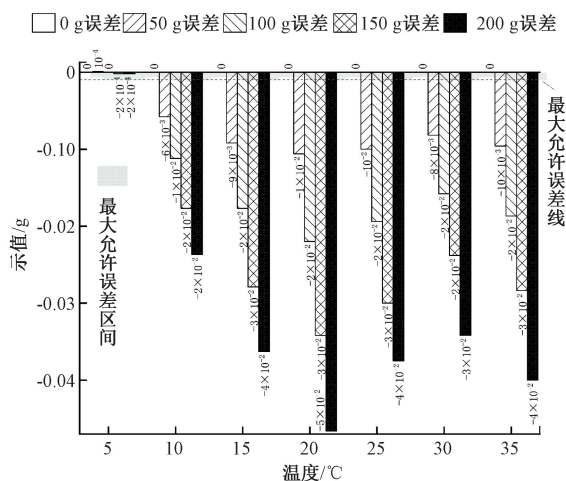


图7 硬件补偿各载荷点误差

Fig. 7 Hardware compensation for each load point error diagram

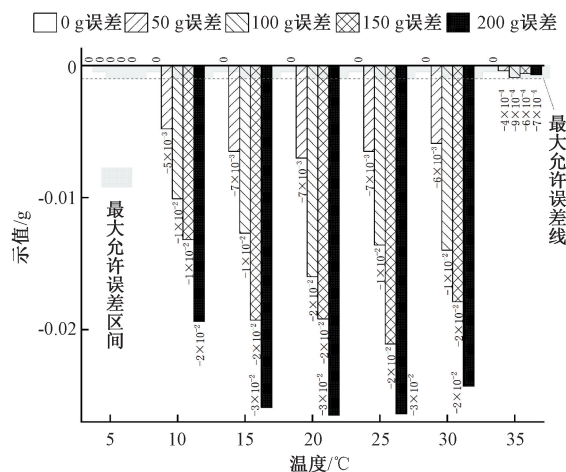


图8 参照对象各载荷点误差

Fig. 8 Refer to the error diagram of each load point of the object

载荷点为 -0.0004 g ; 50 g 以上载荷点的最大误差为 -0.0009 g ,符合国标要求,说明该参照对象在温度变化速率不大的情况下具有较好的补偿效果。具有硬件补偿的传感器在温度接近恒定前,误差具有变大趋势,一方面是由于三极管PN结温度特性具有非线性,非线性误差造成补偿精度较低,另一方面是温度接近恒定时,机械与电路漂移基本不变,永磁体的升温过程滞后造成的补偿偏差。

机械与电路元器件的漂移同时影响各基准点,基于区间的动态温度补偿方法将3个基准点建立补偿比例关系,漂移同时作用在零点与最大称量点,从而漂移不影响传感器量程区间长度,只影响零点的起始位置,可以相互抵消机械、电路与永磁体温度变化不均匀对传感器产生的补偿不对称性。

6 结 论

本研究分析了微电磁力称重传感器的工作原理,研究了机械部分受热不均、电路元器件漂移及永磁体剩余磁场强度的温度漂移机理,得到影响温度漂移的主要因素并进行温度传感器的位置布置。设计了针对该传感器的线性温度试验方法,研究并提出了基于区间的动态温度补偿方法,通过实验验证,该方法可以在变化的温度环境或传感器内部温度场分布不均匀的情况下实现高精度补偿。但由于零基准点、半量基准点与最大称量基准点的漂移速率与实际漂移并非一致,此方法存在零点漂移偏大的问题,需要进行零点跟踪。

参考文献

- [1] HOU G F, LI R, TIAN M ZH, et al. Improving efficiency: Automatic intelligent weighing system as a replacement for manual pig weighing [J]. Animals, 2024, 14 (11): 1614.
- [2] 脱东红. 电子天平计量性能检定研究[J]. 中国仪器仪表, 2024(8): 64-67.
TUO D H. Research on measurement performance verification of electronic balance[J]. Chinese Instrument & Meter, 2024(8): 64-67.
- [3] 黄强, 滕召胜, 唐享, 等. 电子分析天平温度漂移补偿算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(9): 1987-1995.
HUANG Q, TENG ZH SH, TANG X, et al. Research on temperature drift compensation algorithm of electronic analytical balance [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(9): 1987-1995.
- [4] YANG X, LOU G. Application of common fitting methods in electronic balance indication measurement[J]. Metrology and Measurement Technique, 2022, 49(5): 58-63.
- [5] 陈良柱. 精密电子分析天平关键技术研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
CHEN L ZH. Research on key technologies of precision electronic analytical balance [D]. Changsha: Hunan University, 2013.
- [6] 褚文敏, 周蒯, 滕利臣. 基于分布式三维力传感器的装配接触力测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(11): 30-41.
CHU W M, ZHOU K, TENG L CH. Assembly contact force measurement method based on distributed 3D force sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,

- 2024,45(11):30-41.
- [7] 李寒雷,李东岳,李迪. 基于 RBF 神经网络的电子天平温漂补偿研究[J]. 衡器,2024,53(12):45-47.
LI H L, LI D Y, LI D. Research on temperature drift compensation of electronic balance based on RBF neural network[J]. Weighing Instrument, 2024, 53(12): 45-47.
- [8] 刘亚坤,黄强,李建闽,等. 基于 SVM 的电子分析天平温度漂移补偿方法[J]. 计量学报,2018,39(6):826-831.
LIU Y K, HUANG Q, LI J M, et al. Temperature drift compensation method for electronic analytical balance based on SVM[J]. Journal of Metrology, 2018, 39(6): 826-831.
- [9] 张会玲. 基于 PSD 与光杠杆自平衡精密电子分析天平的设计[D]. 镇江:江苏大学,2019.
ZHANG H L. Design of precision electronic analytical balance based on PSD and optical lever self-balancing[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019.
- [10] 熊一凡. 电子天平的磁路设计及温度补偿[J]. 仪器仪表标准化与计量,1997(3):41-43.
XIONG Y F. Magnetic circuit design and temperature compensation of electronic balance[J]. Instrumentation and Measurement Standardization and Metrology, 1997(3): 41-43.
- [11] 陈年,季华,单鹏飞,等. 电子天平前馈 PID 平衡调节方法研究[J]. 衡器,2018,47(6):25-26,45.
CHEN N, JI H, SHAN P F, et al. Research on feedforward PID balance regulation method of electronic balance[J]. Weighing Instrument, 2018,47(6):25-26, 45.
- [12] 任亚奇. 电子分析天平的智能 PID 调节技术研究[D]. 长沙:湖南大学,2015.
REN Y Q. Research on intelligent PID regulation technology of electronic analytical balance[D]. Changsha: Hunan University, 2015.
- [13] 王徽. 基于磁悬浮原理的电子天平设计与研究[D]. 镇江:江苏大学,2022.
WANG H. Design and research of electronic balance based on magnetic levitation principle[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2022.
- [14] 陈星燎,刘通,刘艺柱,等. 电子分析天平双闭环测量方法[J]. 电子测量与仪器学报,2022,36(9):208-216.
CHEN X L, LIU T, LIU Y ZH, et al. Electronic analytical balance double closed-loop measurement method[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022,36(9):208-216.
- [15] REHAN R, ABBASI S Z. Balancing the scale: Reconsidering the overemphasis on electronic scaling in dentistry[J]. Journal of the College of Physicians and Surgeons-Pakistan, 2024, 34(3):373.
- [16] ZHUANG SH D, YANG W, ZHOU Y X, et al. Temperature field analysis and compensation improvement of load cell[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 26213.
- [17] LI Y, ZHANG L L, XIE H ZH. Verification, calibration and application of electronic balances[C]. 2022 International Seminar on Computer Science and Engineering Technology, 2022:398-400.
- [18] KIM J, 김지훈, KIM C, et al. F-T sensor compensation and sensor data acquire system of motor grader simulator[J]. 한국정밀공학회 학술발표대회 논문집, 2024:339-339.
- [19] 蒋金玲,张晶,朱欣华,等. 硅微谐振式加速度计温度补偿方法研究综述[J]. 仪器仪表学报,2023,44(1):1-15.
JIANG J L, ZHANG J, ZHU X H, et al. Research review of temperature compensation methods for silicon micro-resonant accelerometers[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023,44(1):1-15.
- [20] 王希鑫,赵勇,吕日清,等. 具有温度补偿的拱形增敏微纳光纤磁场传感器[J]. 仪器仪表学报,2022,43(4):199-205.
WANG X X, ZHAO Y, LYU R Q, et al. Arched sensitized micro/Nano fiber magnetic field sensor with temperature compensation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022,43(4):199-205.
- [21] 张福斌,王凯,廖伟飞,等. 激光雷达/MEMS IMU/里程计紧组合导航算法[J]. 仪器仪表学报,2022,43(7):139-148.
ZHANG F B, WANG K, LIAO W F, et al. LiDAR/MEMS IMU/odometer compact integrated navigation algorithm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022,43(7):139-148.
- [22] 国家市场监督管理总局. 电子天平:GB/T 26497—2022[S]. 北京:中国质检出版社,2022.
State Administration for Market Regulation. Electronic balance: GB/T 26497—2022[S]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2022.

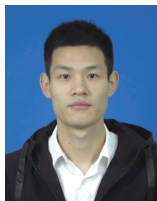
作者简介



王喜阳,2003年于西安科技大学获得学士学位,2016年于西安电子科技大学获得硕士学位,现为陕西省计量科学研究院高级工程师,主要研究方向为力学计量。

E-mail:wxy19812003@qq.com

Wang Xiyang received B. Sc. degree from Xi'an University of Science and Technology in 2003 and M. Sc. degree from XIDIAN University in 2016. She is currently a senior engineer at Shaanxi Institute of Metrology Science. Her main research direction is mechanical metrology.



肖福礼(通信作者),2017年于西安工程大学获得学士学位,2020年于西安工程大学获得硕士学位,现为陕西省计量科学研究院工程师,主要研究方向为工业传感器与系统。

E-mail:1194298184@qq.com

Xiao Fuli(Corresponding author) received B. Sc. and M. Sc. degrees both from Xi'an Polytechnic University in 2017 and 2020, respectively. He is currently an engineer at Shaanxi Institute of Metrology Science. His main research interests are industrial sensors and systems.



李毅,2018年于西安工程大学获得学士学位,2021年于西安工程大学获得硕士学位,现为陕西省计量科学研究院工程师,主要研究方向为机器视觉与数据预处理技术。

E-mail:liyi960822@163.com

Li Yi received B. Sc. and M. Sc. degrees

both from Xi'an Polytechnic University in 2018 and 2021, respectively. He is currently is an engineer at Shaanxi Institute of Metrology Science. His main research interests include machine vision and data preprocessing technology.



刘文佳,2016年于西安工业大学获得学士学位,2019年于长安大学获得硕士学位,现为陕西省计量科学研究院工程师,主要研究方向为材料科学与工程。

E-mail:371932120@qq.com

Liu Wenjia received B. Sc. degree from Xi'an Technological University in 2016 and M. Sc. degree from Chang'an University in 2019. He is currently an engineer at Shaanxi Institute of Metrology Science. His main research interests include materials science and engineering.



程云飞,2015年于陕西理工大学获得学士学位,2020年于西安工程大学获得硕士学位,现为陕西省计量科学研究院助理工程师,主要研究方向为力学计量量值传递与测量技术研究。

E-mail:1149631125@qq.com

Cheng Yunfei received B. Sc. degree from Shaanxi University of Technology in 2015 and M. Sc. degree from Xi'an Polytechnic University in 2020. He is currently an assistant engineer at Shaanxi Institute of Metrology Science. His main research interests include the transfer of mechanical metrology and measurement technology.