

称重传感器灵敏度温度补偿原理与解析算法实现

□汤建华^{1,2}

1. 常州纺织服装职业技术学院智能制造学院

2. 江苏省碳纤维先进材料智能制造工程技术研究中心

【摘要】针对电阻应变式称重传感器在温度变化条件下，由灵敏度温度系数（STC）引发的输出漂移问题，基于惠斯顿电桥建立了STC硬件补偿模型，分析了采用的镍电阻及并联微调电阻的补偿机理。推导了高低温条件下的灵敏度表达式，并构建了补偿电阻 P 的数学求解模型，提出一种基于一元二次方程的精确计算方法。计算结果表明，该方法可有效降低灵敏度温度系数误差，提高称重传感器输出稳定性。所提方法具有计算精度高、实现简单及工程适配性强等特点，可为高精度称重传感器的温度补偿设计提供参考。

【关键词】称重传感器；灵敏度温度系数；惠斯顿电桥；温度补偿；镍电阻

文献标识码：A

文章编号：1003-1870（2026）04-0025-04

Principle and Analytical Algorithm Implementation of Sensitivity Temperature Compensation for Load Cells

【Abstract】 Addressing the output drift induced by the sensitivity temperature coefficient (STC) of resistance strain gauge load cells under varying temperature conditions, this paper establishes an STC hardware compensation model based on the Wheatstone bridge and analyzes the compensation mechanism utilizing nickel resistors and parallel trimming resistors. It derives the sensitivity expression under high and low temperature conditions, constructs a mathematical solution model for the compensation resistor P , and proposes a precise calculation method based on a quadratic equation in one variable. The calculation results show that this method can effectively reduce the error of the sensitivity temperature coefficient and improve the output stability of the load cells. The proposed method features high calculation accuracy, simple implementation, and strong engineering adaptability. It can serve as a reference for the temperature compensation design of high-precision load cells.

【Keywords】 load cell; sensitivity temperature coefficient; wheatstone bridge; temperature compensation; nickel resistor

引言

电阻应变式称重传感器广泛应用于工业称重、过程控制及智能制造领域，其核心结构通常基于惠斯顿电桥实现应变信号到电压信号的转换。然而，在实际工作过程中，环境温度的变化会引起弹性体

材料弹性模量的变化以及应变片灵敏系数的改变，导致称重传感器满量程输出随温度发生非线性漂移，即灵敏度温度系数（Span Temperature Coefficient, STC）误差。

针对STC误差，工程界与学术界主要采用硬件补

基金项目：江苏省产学研合作项目(BY20250516)；江苏省高校青蓝工程资助项目(2025JSQJGJCXTD059)。

偿与软件补偿两类方法^[1-2]。其中，硬件电路补偿因其可靠性高、不占用底层算力，在工业级传感器制造中最为普遍。其典型做法是在惠斯顿电桥激励回路中引入具有正温度系数的金属热敏电阻（如镍电阻）。当温度升高时，镍电阻阻值增大，分担更多的激励电压，从而降低电桥两端的实际供电电压，抵消灵敏度的增加。为了精准调节补偿量，实际工艺中会在镍电阻两端并联一个温度系数极低且阻值恒定的微调电阻（ P 电阻）。

然而，现有补偿方法多依赖经验选取或试验调整，缺乏明确的解析计算模型，导致设计效率较低且一致性难以保证。基于此，本文从惠斯顿电桥底层分压机理出发，建立了一种包含感温镍电阻及并联微调电阻的完整STC补偿网络数学模型，推导了高低温条件下的灵敏度表达式，并提出一种基于一元二次方程的 P 电阻精确计算方法，为称重传感器STC补偿提供一种可解析、可计算的设计路径。

1 称重传感器惠斯顿电桥与STC补偿电路结构

电阻应变式称重传感器通常采用全桥结构，由四个应变计构成惠斯顿电桥。应变计粘贴于弹性体关键受力位置，当外力作用引起弹性体产生微小形变时，应变计电阻发生变化，从而导致桥路输出电压发生变化，实现力—电转换。

在理想情况下，惠斯顿电桥输出电压可简化表示为：

$$V_o = \frac{\Delta R}{R} \cdot \frac{V_{ex}}{4} = K \cdot \varepsilon \cdot \frac{V_{ex}}{4} \quad (1)$$

其中， V_{ex} 为桥路激励电压， $\Delta R/R$ 为弹性体应变引起的应变计相对电阻变化， K 为应变计灵敏系数， ε 为外加载荷引起的弹性体应变。根据胡克定律，弹性体应变 $\varepsilon=\sigma/E$ ，其中 E 为弹性体的弹性模量， σ 为弹性体的应力。

由此可见，称重传感器灵敏度不仅与弹性体、应变计温度特性有关，还受到激励电压的影响。然而，在温度变化条件下，应变计电阻及弹性体性能均会发生变化，导致桥路灵敏度随温度发生漂移，即STC误差。造成该误差的主要物理机制包含三个层面：

（1）弹性模量 E 的温度软化效应（主导因素）：大多数金属弹性体（如铝合金、合金钢）的弹性模

量呈现负温度特性。当温度升高时，材料受热变“软”，导致在相同外力作用下产生的应变显著增大，这是导致称重传感器灵敏度升高的最主要原因。

（2）应变计灵敏系数 K 的温漂：常规康铜箔式应变计的灵敏系数通常随温度升高而微幅增加，进一步叠加放大了正向的灵敏度误差^[3]。

（3）弹性体尺寸热膨胀：温度升高导致弹性体敏感梁的截面积膨胀变大，使得内部应力略微下降，但该负向效应的量级远不足以抵消由弹性模量下降带来的正向影响。综合上述因素，未经补偿的称重传感器在温度升高时，整体输出满量程将显著增加。

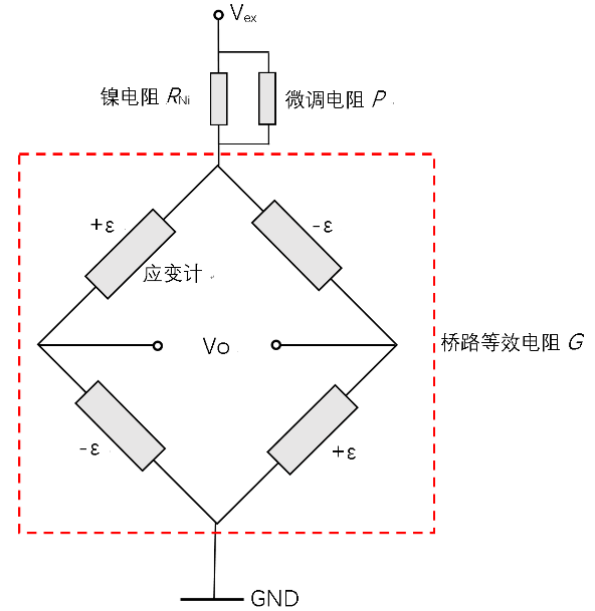


图1 称重传感器惠斯顿电桥及STC补偿电路结构示意图

为抑制该类误差，工程上通常在电桥激励供电回路中引入温度补偿网络。典型结构如图1所示，由激励电源 V_{ex} 、镍电阻 R_{Ni} 以及并联微调电阻 P 共同构成。其中，镍电阻作为正温度系数元件，其阻值随温度升高而增加，从而在温度升高时分担更多电压，使桥路实际激励电压降低。反之，在低温条件下，镍电阻阻值减小，桥路激励电压相应提高。为了实现更精细的补偿调节，在镍电阻两端并联一个温度系数接近于零的微调电阻 P 。该电阻主要用于调节补偿网络的等效电阻值，从而改变激励电压的温

度响应曲线，使桥路输出在不同温度点之间保持一致性。通过合理选择 P 电阻，可实现对STC的精确补偿。

从电路等效角度分析，镍电阻与 P 电阻构成并联网络，其等效电阻为：

$$R_{eq}(T) = \frac{R_{Ni}(T) \cdot P}{R_{Ni}(T) + P} \quad (2)$$

其中， $R_{Ni}(T)$ 为镍电阻的温度函数。该等效电阻与桥路内阻共同决定激励电压在温度变化下的分配关系，从而影响称重传感器输出灵敏度。

因此，STC补偿问题可归结为：在给定高温与低温工作点条件下，通过合理设计补偿电阻 P ，使桥路输出灵敏度在不同温度下保持一致。后续将基于上述电路结构，建立灵敏度表达式并推导补偿电阻的解析计算方法。

2 数学模型与 P 电阻求解

在传统的称重传感器制造工艺中，确定 P 电阻阻值通常依赖于经验公式和反复的高低温测试修磨，这种“试凑法”效率低下且难以保证批量一致性。本节基于惠斯顿电桥的分压模型，推导一种可直接求解 P 电阻目标值的一元二次方程解析算法。

2.1 温度补偿电路数学模型

镍电阻作为温度敏感元件，其阻值随温度变化可表示为二次多项式：

$$R_{Ni}(T) = R_{Ni0}(aT^2 + bT + c) \quad (3)$$

其中， R_{Ni0} 为基准温度下电阻值， a, b, c 为温度系数。

而由镍电阻与微调电阻 P 并联构成的补偿网络等效电阻（公式2）与桥路等效内阻 G 构成分压关系，从而得到与温度相关的有效激励电压。由于称重传感器输出与激励电压成正比，可将称重传感器输出灵敏度表示为：

$$S(T) \propto \frac{G + R_{eq}(T)}{G + R_{Ni}(T)} \quad (4)$$

2.2 初始 P 电阻物理影响的剥离

在实际生产线中标定称重传感器时，为了采集有效的高低温满量程数据，通常会在补偿电路中预先接入一个固定阻值的初始微调电阻 P_{init} 。在此初始状态下，记录高温和低温下的实测满量程输出，分别记为 S_H^0 和 S_C^0 。

由于后续建立的平衡方程需要基于纯感温网络（仅包含镍电阻）的基础灵敏度进行推导，首要步骤必须是从实测数据中“剥离”初始电阻 P_{init} 的物理影响。根据惠斯顿电桥分压原理，剥离初始电阻后的基准高温理论输出 S_H 和低温理论输出 S_C 计算如下：

$$S_H = S_H^0 \frac{G + \frac{R_{NiH} \cdot P_{init}}{R_{NiH} + P_{init}}}{G + R_{NiH}} \quad (5)$$

$$S_C = S_C^0 \frac{G + \frac{R_{NiC} \cdot P_{init}}{R_{NiC} + P_{init}}}{G + R_{NiC}} \quad (6)$$

其中， R_{NiC} 、 R_{NiH} 分别为镍电阻在高温与低温时的阻值， G 为桥路等效内阻。

2.3 STC补偿平衡等式的建立与求解

STC补偿的核心目标是：寻找一个全新的理想微调电阻 P_{new} ，使得替换初始电阻后，称重传感器的高低温输出完全相等。将未知的微调电阻 P_{new} 引入纯感温网络，高低温下的等效激励电压将发生改变。为实现STC补偿，需满足高低温灵敏度一致，即：

$$S_H \cdot \frac{G + R_{NiH}}{G + \frac{R_{NiH} \cdot P_{new}}{R_{NiH} + P_{new}}} = S_C \cdot \frac{G + R_{NiC}}{G + \frac{R_{NiC} \cdot P_{new}}{R_{NiC} + P_{new}}} \quad (7)$$

对上述方程（5）（6）（7）进行整理，可转化为关于补偿电阻 P 的一元二次方程：

$$K_1 P_{new}^2 + K_2 P_{new} + K_3 = 0 \quad (8)$$

其中，各系数通过中间变量表示为：

$$A_1 = S_H(G + R_{NiH})G - S_C(G + R_{NiC})G \quad (9)$$

$$A_2 = S_H(G + R_{NiH}) \quad (10)$$

$$A_3 = S_C(G + R_{NiC}) \quad (11)$$

则二次方程系数为：

$$K_1 = A_1 + A_2 R_{NiC} - A_3 R_{NiH} \quad (12)$$

$$K_2 = A_1(R_{NiH} + R_{NiC}) + (A_2 - A_3)R_{NiH}R_{NiC} \quad (13)$$

$$K_3 = A_1 R_{NiH} R_{NiC} \quad (14)$$

将以上系数代入二次方程（8）可得补偿电阻 P_{new} 的解析解：

$$P_{new} = \frac{-K_2 \pm \sqrt{K_2^2 - 4K_1 K_3}}{2K_1} \quad (15)$$

在实际应用中，应选取满足物理约束的解，即：

$P_{new} > 0$ ，且数值位于可实现阻值范围内（通常取两解中的正值解作为最终补偿电阻）。

3 算例与补偿效果分析

为了验证上一节中所推导的一元二次方程解析算法的准确性及其在实际工程中的可行性，本节提取了某型号电阻应变式称重传感器在生产线上的典型 STC 补偿标定程序数据进行计算复核。初始条件如下：惠斯顿电桥等效阻抗： $G=350\Omega$ ；镍电阻标称基准阻值： $R_{N0}=70\Omega$ ；初始接入的 P 电阻阻值： $P_{init}=400\Omega$ 。

将装配有上述初始电路的称重传感器置于高低温交变试验箱中。设定的标定温度点及测得的实测称重传感器灵敏度输出数据分别为：高温 40°C ，实测高温输出 $S_H^0 = 1.21664\text{mV/V}$ ；低温 -10°C ，实测低温输出 $S_C^0 = 1.21539\text{mV/V}$ 。计算得到补偿前灵敏度温度系数约为 $20.7\text{ ppm/FS/}^\circ\text{C}$ （取标称灵敏度为 1.21mV/V ）。

为了将实际温度转化为补偿网络中的电学参数，需要依据该批次镍丝材料的电阻—温度（ $R-T$ ）特性曲线进行拟合。已知该材料的阻温多项式特征常数为： $a=5.01 \times 10^{-6}$ ， $b=4.421 \times 10^{-3}$ ， $c=0.89239$ 。根据公式（2），可以计算出高低温下镍电阻的电阻值分别为： $R_{NiH}=75.41\Omega$ （在 40°C 时）， $R_{NiC}=59.41\Omega$ （在 -10°C 时）。

根据第3节建立的模型，将上述参数代入一元二次方程并求解，剔除无效负数根后，可得到补偿电阻： $P_{new}=459.9\Omega$ 。

利用上述计算结果，在该传感器的生产流程中，工程师无需再进行电阻试凑。只需选用阻值最接近 459.9Ω 的极低温度系数精密电阻（如锰铜丝电阻）替换原有的 400Ω 初始电阻，即可补偿该称重传感器在 $-10^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$ 温度区间内的满量程热漂移，使得高低温下的灵敏度达到一致。经过实测，再接入 460Ω 精密电阻后，灵敏度温度系数约为 $3.2\text{ ppm/FS/}^\circ\text{C}$ （取标称灵敏度为 1.21mV/V ）。

4 结语

本文针对电阻应变式称重传感器在温度变化条件下灵敏度温度系数（STC）引起的输出漂移问题，开展了基于惠斯顿电桥的硬件补偿方法研究，主要结论如下：

（1）从机理上分析了STC误差的主要来源，指出弹性体弹性模量随温度变化是引起灵敏度漂移的主导因素，并明确了通过调节电桥激励电压实现补偿的基本思路。

（2）建立了包含镍电阻及并联微调电阻的温度补偿电路模型，推导了高低温条件下的灵敏度表达式，将STC补偿问题转化为关于补偿电阻的数学求解问题。

（3）通过算例分析验证了所提方法的有效性，结果表明，补偿后高低温灵敏度趋于一致，STC误差显著降低，称重传感器输出稳定性得到提升。

综上所述，本文方法具有建模清晰、计算简便及工程适用性强等特点，可为高精度称重传感器的温度补偿设计提供参考。需要指出的是，本文基于两温点标定实现补偿，后续可结合多温点标定及非线性补偿方法，以进一步提升宽温区范围内的补偿精度。

参考文献

- [1] 刘九卿. 称重传感器电路补偿机理及补偿电阻计算[J]. 衡器, 2014, 43(1): 23-29.
- [2] 晏志鹏. 电阻应变式传感器零点温度补偿剖析[J]. 传感器技术与应用, 2019, 7(2): 39-49.
- [3] Micro-Measurements. Tech Note TN-504: Strain Gage Thermal Output and Gage Factor Variation with Temperature [R]. Raleigh: Vishay Precision Group, 2014.

作者简介

汤建华，男，江苏昆山市人，正高工，博士。主要从事称重测力传感器方面的研究与应用工作。