

# 称重传感器灵敏系数的自补偿技术

中国运载火箭技术研究院第 702 研究所 刘九卿

**【摘要】** 电路补偿与调整是应变式称重传感器的关键技术和核心制造工艺。本文在分析称重传感器灵敏系数温度误差产生原因和误差性质的基础上，推导出圆柱式、板环式和轮辐式弹性元件灵敏系数的温度误差计算公式，介绍了经典的灵敏系数温度补偿方法和利用卡玛合金为敏感栅的电阻应变计实施的灵敏系数温度误差自补偿技术。

**【关键词】** 称重传感器；弹性元件；弹性模量；灵敏系数；温度系数；温度补偿

## 一、概述

自从 20 世纪 40 年代初，美国 BLH 公司和 REVERE 公司分别发明了应变式负荷传感器以来，经过 70 多年的种种改进与发展，其计量准确度、工作可靠性、长期稳定性和环境适应能力均有重大改进和提高，应用范围不断扩大，已渗透到国民经济各个部门，成为工业、商业、家庭里与称重计量的主要手段。现今，我国应变式称重传感器生产企业已超过 160 家，形成了量程从几公斤到上千吨的系列产品。绝大多数产品的准确度达到了 C3 级，有些企业的个别产品准确度高达 C4、C5 级。如此高准确度的称重传感器用于温度不断变化的环境中，必须要有非常精确的灵敏系数温度补偿。为使称重传感器达到较高的准确度等级，各企业在进行灵敏系数温度补偿时，按惯例都设置较为严格的内控指标，对较高准确度级别的称重传感器，其灵敏系数温度误差的内控指标为 $\pm 0.01\% / 10^{\circ}\text{C}$ ，这就需要有科学、合理和可重复的灵敏系数温度补偿工艺。

## 二、称重传感器灵敏系数的温度误差

早在应变式负荷传感器问世之时，人们就注意到温度对合金钢制成的机械式标准测力环指示值的影响。前苏联学者经过反复试验分析，指出标准测力环指示值温度误差主要是测力环金属材料的弹性模量随温度升高而降低所致，并测量出影响量的大小，给出较为准确的修正系数  $0.027\% / ^{\circ}\text{C}$ 。美国学者威尔逊在 1946 年发表的论文“标准测力环的温度系数”中，给出了同样量级的弹性模量温度影

响修正系数。人们很自然的想到同为合金钢制成的应变式称重传感器也必然产生此种温度误差，而且其影响因素比标准测力环更多、更复杂。除称重传感器弹性元件金属材料的弹性模量具有负温度系数的影响外，还有电阻应变计灵敏系数的温度系数影响。由此不难得出温度对弹性元件的影响主要产生两个物理现象：其一是温度升高弹性元件产生热膨胀，用金属材料的热膨胀系数 $\alpha_L$ 表示，它使称重传感器产生零点温度漂移；其二是温度升高弹性元件材料的弹性模量 $E$ 降低，用弹性模量 $E$ 的温度系数 $\beta_E$ 表示，它使称重传感器的输出随温度升高而增大，产生灵敏系数温度误差。试验证明在 $0\sim 50^\circ\text{C}$ 范围内，优质铬—镍钢的弹性模量变化为 $-0.025\%/^\circ\text{C}$ ，其影响量即称重传感器的灵敏系数温度误差可达 $(0.03\sim 0.05)\%/^\circ\text{C}$ 。称重传感器在使用过程中，温度每变化 $10^\circ\text{C}$ 灵敏系数就变化 $0.3\%\sim 0.5\%$ ，这是非常可观的误差，因此必须进行灵敏系数温度补偿。

目前，应用较为广泛的称重传感器的弹性元件，大致可分为正应力的柱式(圆柱、方柱、菱柱)、圆筒式、弯曲梁式、平行梁式、中心梁式和切应力的悬臂梁式、双端固支梁式、轮辐式等。而每一大类的具体结构又有许多种，甚至几十种之多。为便于分析和简化计算，仅列出柱式、板环式和轮辐式三种弹性元件进行分析和计算。柱式弹性元件如图1所示，板环式弹性元件如图2所示，轮辐式弹性元件如图3所示。

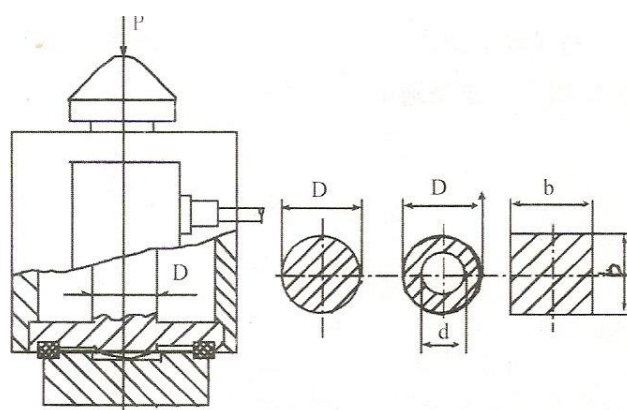


图1 柱式弹性元件

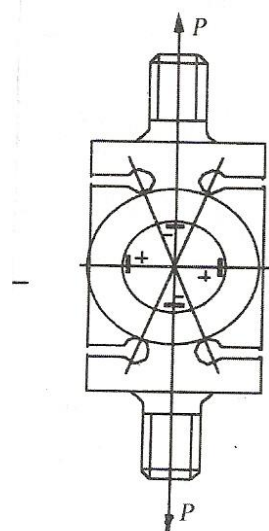


图2 板环式弹性元件

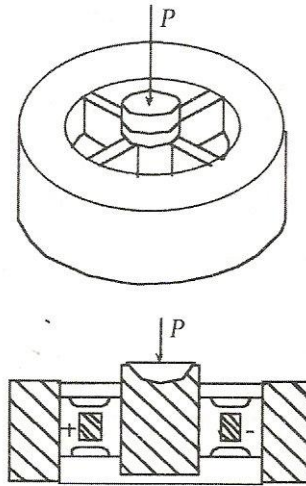


图3 轮辐式弹性元件

正应力圆柱式弹性元件（图1）的灵敏系数  $S$  为电桥输出与供桥电压之比，  
即

$$S = \frac{e}{U} = \frac{1+\mu}{2} \cdot \frac{K}{EA} \cdot P \quad (\text{mV/V}) \quad (1)$$

式中： $\mu$ —弹性元件材料的泊松比， $\mu \approx 0.3$ ；

$K$ —电阻应变计的灵敏系数， $K \approx 2.1$ ；

$E$ —弹性元件材料的弹性模量，对于合金钢  $E \approx 2.1 \times 10^4 \text{kg/mm}^2$ ；

$A$ —圆柱式弹性元件的横截面面积， $A = \frac{\pi D^2}{4}$ ；

$P$ —所计量的力或质量值。

正应力板环式弹性元件（图2）的灵敏系数为：

$$S = \frac{3}{2} \cdot \frac{KR_0}{bh^2E} \cdot P \quad (\text{mV/V}) \quad (2)$$

式中： $K$ —电阻应变计的灵敏系数；

$R_0$ —板环的中径；

$b$ —板环的宽度；

$h$ —板环的厚度

$E$ —弹性元件材料的弹性模量；

$P$ —所计量的力或质量值。

切应力轮辐式弹性元件（图3）的灵敏系数为：

$$S = \frac{3}{16} \cdot \frac{K}{bhG} \cdot P = \frac{3(1+\mu)}{8} \cdot \frac{K}{bhE} \cdot P \quad (\text{mV/V}) \quad (3)$$

式中： $\mu$ —弹性元件材料的泊松比；  
 $K$ —电阻应变计的灵敏系数；  
 $G$ —弹性元件材料的剪切弹性模量；  
 $E$ —弹性元件材料的弹性模量  
 $b$ —轮辐的宽度；  
 $h$ —轮辐的高度；  
 $P$ —所计量的力或质量值。

为求出温度对称重传感器灵敏系数的影响，首先对式（1）两端取对数，并化成微分形式。

$$\begin{aligned}\frac{\Delta St}{S} &= \frac{\Delta \mu t}{1+\mu} + \frac{\Delta K t}{K} - \frac{\Delta E t}{E} - \frac{\Delta A t}{A} \\ &= \frac{\phi \mu \Delta t}{1+\mu} + \frac{\gamma K \Delta t}{K} - \frac{\beta_E E \Delta t}{E} - 2\alpha_L \Delta t \\ &= 0.23\phi \Delta t + \gamma \Delta t - \beta_E \Delta t - 2\alpha_L \Delta t\end{aligned}\quad (4)$$

令式（4）中 $\Delta t=1^\circ\text{C}$ ，则

$$\frac{\Delta S}{S} = 0.23\phi + \gamma - \beta_E - 2\alpha_L \quad (5)$$

式中： $\phi$ —弹性元件材料泊松比的温度系数，对于合金钢 $\phi \approx 1 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ ；

$\gamma$ —电阻应变计的温度系数，对于康铜箔式电阻应变计

$$\gamma \approx 0.5 \sim 0.8 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}；$$

$\beta_E$ —弹性元件材料弹性模量 $E$ 的温度系数，对于合金钢

$$\beta_E = -2.7 \sim -3 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}；$$

$\alpha_L$ —弹性元件材料的线膨胀系数，对于合金结构钢

$$\alpha_L = 11 \sim 12 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}。$$

式（5）就是补偿前力与称重传感器灵敏系数的温度系数。

由于以合金钢为弹性元件材料的圆柱式结构，其 $0.23\phi \approx 2\alpha_L$ ，则灵敏系数温度系数的计算公式为：

$$\frac{\Delta S}{S} = \gamma - \beta_E \quad (6)$$

采用同样的方法可以推导出悬臂梁结构灵敏系数的温度系数计算公式为：

$$\frac{\Delta S}{S} = \gamma - \beta_E - 2\alpha_L \quad (7)$$

轮辐式结构灵敏系数的温度系数计算公式为：

$$\frac{\Delta S}{S} = 0.23\phi + \gamma - \beta_E - 2\alpha_L \quad (8)$$

从上述分析和计算可以看出，称重传感器灵敏系数的温度误差是一个系统性的误差，即当环境温度升高时，弹性元件材料的弹性模量降低，称重传感器的灵敏系数变大，通常为  $3.5 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ 。对同一种弹性元件材料和电阻应变计来说，圆环、板环式结构要比圆柱式、剪切梁式结构的灵敏系数温度误差小一些，大约小 6~7%。灵敏系数温度误差主要取决于弹性元件材料、电阻应变计敏感栅材料及制造工艺，在较小程度上与弹性元件的结构有关。大量试验证明，对于同类力与称重传感器来说，灵敏系数温度误差的分散度一般均小于 10%，主要是制造工艺引起的。这就大大的简化了称重传感器的灵敏系数温度补偿工艺，在弹性元件材料、电阻应变计、制造工艺都不变的情况下，每一批产品只取 3~5 只进行灵敏系数温度补偿测试，求出灵敏系数温度补偿电阻的平均值，即可对全批量产品进行灵敏系数温度补偿。

### 三、经典的称重传感器灵敏系数温度补偿方法

从上述分析中可以得出两点结论：其一在环境温度升高时，弹性元件材料的弹性模量降低，使称重传感器的输出超比例增加，而产生灵敏系数温度误差；其二灵敏系数温度误差是一个系统性的误差，对于同类型称重传感器该项误差的分散度一般小于 10%。如果在称重传感器灵敏系数增大的同时，使电桥电路的实际供桥电压与之成比例的减小，保持供桥电压与实际供桥电压的比值不变，则灵敏系数也就保持不变，这就是经典的灵敏系数温度补偿原理与补偿方法。根据这一方法，在电桥的供桥回路中，串联一个随环境温度变化而变化的灵敏系数温度补偿电阻  $R_{Mt}$ ，当环境温度升高时， $R_{Mt}$  随之增大，尽管供桥电压  $U_i$  保持不变，但由于电阻分压作用，使电桥的实际供桥电压  $U_{AC}$  减小，从而导致灵敏系数减小，这就对因温度升高弹性模量降低灵敏系数增大起到补偿作用。灵敏系数温度补偿电路如图 4 所示。因为在力与称重传感器的灵敏系数温度误差中，弹性模量  $E$  的温度系数  $\beta_E$  起主导作用，故国外常把这种补偿称为弹性模量补偿。

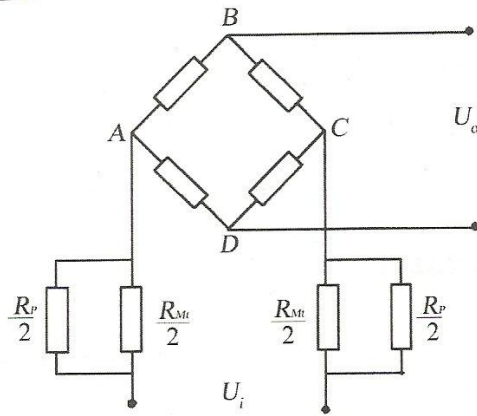


图 4 经典的灵敏系数温度补偿电路

为了获得较好的补偿效果，在选取灵敏系数温度补偿电阻  $R_{Mt}$  时，一般都尽量减小其电阻值，选用电阻温度系数较大的镍电阻或铜电阻。纯镍具有很好的热敏特性，它的电阻温度系数是纯铜的 1.5 倍（镍的电阻温度系数  $\alpha_M=0.0061/^\circ\text{C}$ ，铜的电阻温度系数  $\alpha_M=0.0039/^\circ\text{C}$ ），电阻率是纯铜的 4.3 倍（镍的电阻率  $\rho=0.069\times 10^{-6}\Omega\text{mm}^2/\text{M}/^\circ\text{C}$ 、铜的电阻率  $\rho=0.016\times 10^{-6}\Omega\text{mm}^2/\text{M}/^\circ\text{C}$ ）。对于同样的补偿量，镍电阻  $R_{Mt}$  的电阻值较小，消耗称重传感器的灵敏系数也小，因此灵敏系数温度补偿电阻  $R_{Mt}$  多选用镍电阻。也可以用铜电阻进行补偿，但补偿电阻  $R_{Mt}$  较大，消耗称重传感器的灵敏系数较大。灵敏系数温度补偿电阻  $R_{Mt}$  值可按下列公式计算：

对于圆柱式、轮辐式结构：

$$R_{Mt} = \frac{0.23\phi + \gamma - \beta_E - 2\alpha_L}{\delta_M - \delta_G - (0.23\phi + \gamma - \beta_E - 2\alpha_L)} \cdot R \quad (9)$$

对于环式、梁式结构：

$$R_{Mt} = \frac{\gamma - \beta_E - 2\alpha_L}{\delta_M - \delta_R - (\gamma - \beta_E - 2\alpha_L)} \cdot R \quad (10)$$

对于以合金钢为弹性元件材料的称重传感器也可以用下式计算：

$$R_{Mt} = \frac{\gamma - \beta_E}{\delta_M - \delta_R - (\gamma - \beta_E)} \cdot R \quad (11)$$

式中： $R$ —电桥桥臂的电阻值；

$\gamma$ —电阻应变计灵敏系数  $K$  的温度系数，对于康铜箔电阻应变计

$\gamma=0.00009/^\circ\text{C}$ ，卡玛箔电阻应变计  $\gamma=-0.0082/^\circ\text{C}$ ；

$\beta_E$ —弹性模量  $E$  的温度系数，对于合金钢  $\beta_E = -0.00036/^\circ\text{C}$ ，

铝合金  $\beta_E = -0.00054/^\circ\text{C}$ ；

$\alpha_L$ —弹性元件材料的线膨胀系数；

$\delta_M$ —灵敏系数温度补偿电阻的温度系数，对于镍电阻  $\delta_M = 0.0059/^\circ\text{C}$ ；

$\delta_R$ —电阻应变计的电阻温度系数，对于康铜箔电阻应变计

$\delta_R = 0.00002/^\circ\text{C}$ 。

利用式 (9)、式 (10) 可以计算出，由四片名义电阻值为  $350\Omega$  的电阻应变计，组成的惠斯通电桥电路的灵敏系数温度补偿电阻值。对于圆柱式和轮辐式结构  $R_{Mt} \approx 22\Omega$ ；对于环式和梁式结构  $R_{Mt} \approx 20\Omega$ 。当灵敏系数温度补偿精度要求高于  $\pm 0.02\% / 10^\circ\text{C}$  时，式 (9)、式 (10) 的计算值已不能满足要求，必须将  $R_{Mt}$  增大 10% 左右形成过补偿，并在过补偿电阻上并联一个精确调整电阻  $R_p$ （见图 4），其最终补偿电阻值通过在低温、室温和高温三个温度下施加额定载荷值，经过保温、保载实际测量得出。由于镍电阻与温度并不成严格的线性关系，并联精确调整电阻  $R_p$  同时也起到了灵敏系数温度补偿镍电阻的线性化调整作用。

为简化计算，可采用经大量试验得出的以合金钢、不锈钢、铍青铜、铝合金为弹性元件材料，分别选用镍、铜和巴尔科合金为补偿电阻的灵敏系数温度补偿电阻经验值计算方法。尽管此计算值是灵敏系数温度补偿电阻的大致数值，但在实际应用中比较有效。灵敏系数温度补偿电阻的经验计算方法列于表 1 中。表中的  $R$  为称重传感器惠斯通电桥电路桥臂电阻值。

表 1 灵敏系数温度补偿电阻  $R_{Mt}$  的经验值

补偿电阻材料	合金钢	不锈钢	铍青铜	锡磷青铜
铜	$R/9.3$	$R/8.3$	$R/8$	$R/6$
镍	$R/13.3$	$R/12$	$R/11.8$	$R/9$
巴尔科合金	$R/10.5$	$R/9.5$	$R/9$	$R/7$

从上述分析可以看出，这种灵敏系数温度补偿法主要有两个缺点：其一是要做到精确补偿，必须具备带高、低温试验箱的力标准机，对称重传感器同时加温、加载，即费工又费时。特别是大量程称重传感器，补偿一只一般需要 10 多个小时以上的时间，而且每次只能补偿一只，其费用可使称重传感器的成本高出 20% 以上。其二是这样补偿的称重传感器只适合在均匀（空间上）而稳定（时间上）

的温度环境下工作，例如德国 Phillips 公司规定环境温度变化不得高于 5℃ / 小时。

#### 四、称重传感器的灵敏系数自补偿技术

温度对称重传感器的影响主要产生两个物理现象：其一是温度升高弹性元件产生热膨胀，它使称重传感器产生零点温度漂移；其二是温度升高弹性元件材料的弹性模量 E 降低，它使称重传感器的输出随温度升高而增大，导致灵敏系数变化。后者是产生称重传感器灵敏系数温度误差的主要因素，自然就是补偿的重点。

从称重传感器灵敏系数温度系数的计算公式 (6)、(7)、(8) 可以看出，若令

$$\gamma = \beta_E$$

$$\gamma = \beta_E + 2\alpha_L$$

$$\gamma = \beta_E + 2\alpha_L - 0.23\phi$$

则  $\frac{\Delta S}{S} = 0$ ，即称重传感器的灵敏系数温度误差为零。

由此不难得出，称重传感器灵敏系数的温度误差，可以通过调整粘贴在弹性元件上的电阻应变计灵敏系数 K 的温度系数  $\gamma$  值加以控制。只要选取合适的  $\gamma$  值，就可以抵消弹性元件材料弹性模量 E 的温度系数  $\beta_E$  的影响。一般都选取负温度系数的应变电阻合金材料，制造电阻应变计的敏感栅来完成灵敏系数的自动温度补偿，国外把这种补偿技术称为弹性模量自补偿，相应的电阻应变计称为弹性模量自补偿电阻应变计。其弹性模量自补偿原理是：在环境温度升高，弹性元件材料的弹性模量 E 降低，使称重传感器的输出增加，而产生灵敏系数温度误差之时，由于粘贴在弹性元件上的电阻应变计敏感栅材料是具有负温度系数的卡玛或伊文合金，当温度升高时其灵敏系数 K 降低，使称重传感器的输出减小，输出的增加和减小相互抵消，就达到了弹性模量自补偿的目的。虽然除了康铜（铜镍合金）之外，其它别的应变电阻合金材料均具有负的温度系数，但除了卡玛和伊文合金之外，其它应变电阻合金材料均不适合于称重传感器灵敏系数温度自补偿要求。卡玛和伊文合金是在镍铬合金中添加少量其它元素，改善合金性能而形成的应变电阻合金材料。即在镍铬合金中加入铝和铁形成卡玛合金(Ni 74、Cr 20、Al 3、Fe 3)；在镍铬合金中加入铝和铜形成伊文合金 (Ni 75、Cr 20、Al 3、Cu 2)，其共同特点是：灵敏系数较大  $K=2.4\sim 2.6$ ，电阻率高  $\rho =1.24\sim 1.42 \Omega \text{ mm}^2/\text{M}$ ，



是康铜材料的 2.7 倍，特别是该合金的电阻温度系数可以通过改变合金成分和热处理制度来调节和控制，即合金的电阻温度系数随着铝含量的增加而下降，并向负方向移动具有负的温度系数，非常适合用来制造弹性模量自补偿电阻应变计。

20 世纪 80 年代，美国 BLH 公司突破了弹性模量自补偿的关键技术与工艺，通过改变卡玛合金的化学成分和结合不同的热处理退火温度，研制出五种不同补偿量的弹性模量自补偿电阻应变计。应用此种电阻应变计制成的称重传感器，不需要再进行专门的灵敏系数温度补偿，即可以使灵敏系数温度误差保持在  $\pm 0.03\% / 10^\circ\text{C}$  以内。

美国 VISHAY 公司利用卡玛合金，开发出 EMC（有效模量补偿）系列电阻应变计，将它与弹性元件材料适当匹配，就可以实现灵敏系数的温度自补偿。在很多情况下这种补偿效果可优于  $\pm 0.014\% / 10^\circ\text{C}$ 。根据不同弹性元件材料 EMC 系列电阻应变计有 4 种类型：

M1 灵敏系数随温度变化  $-2.70\% / 100^\circ\text{C}$  用于不锈钢；

M2 灵敏系数随温度变化  $-4.23\% / 100^\circ\text{C}$  用于铝合金；

M3 灵敏系数随温度变化  $-2.25\% / 100^\circ\text{C}$  用于工具钢；

M4 灵敏系数随温度变化  $-2.43\% / 100^\circ\text{C}$  适用于和之间的“中间区域”（不锈钢与工具钢之间）的补偿。

此项灵敏系数自补偿技术问世之初，主要用于一般准确度级别的称重传感器，对降低制造成本，提高计量准确度起到了积极作用。近年来，国外称重传感器制造企业，突破了一些工艺瓶颈研制出多种灵敏系数自补偿电阻应变计和灵敏系数与温度自补偿电阻应变计，开始用于较高准确度等级的称重传感器的灵敏系数温度补偿中，取得了较好的测试结果。灵敏系数温度自补偿的突出特点是电桥电路没有外加灵敏系数补偿电阻，称重传感器的长期稳定性好，疲劳寿命高。

#### 参考文献

【1】B. I. Wilson and G. Borkowski. Temperature Coefficients for Proving Rings. 1946. NBS Special Publications 300. Vol. 8.

【2】James Dorsey. Linearization of Transducer Compensation. Proceedings of the 23rd International Instrumentation Symposium. 1977.

【3】林自强. 国外高精度应变测力传感器技术的分析与探讨 [J]. 计量技术,

专辑第二期，1978 年。

作者简介：刘九卿（1937—），男、汉族，辽宁省海城市。中国运载火箭技术研究院第七〇二研究所研究员，享受国务院政府特殊津贴专家。现为中国衡器协会技术顾问，衡器技术专家委员会顾问，《衡器》杂志编委。编著《电阻应变式称重传感器》、《国家职业资格培训教程—称重传感器装配调试工》，在有关杂志上共发表学术论文 110 多篇。