

称重传感器用电阻应变计的自补偿技术

□中国运载火箭技术研究院第七零二研究所 刘九卿

【摘要】电阻应变计是应变式称重传感器的核心部件，其工作特性和各项自补偿功能直接影响应变式称重传感器的准确度和稳定性，是应变式称重传感器质量控制的源头。为科学合理地选择应变式称重传感器用电阻应变计，了解电阻应变计的各项自补偿功能和应用原则，本文介绍了温度自补偿电阻应变计，蠕变自补偿电阻应变计，模量自补偿电阻应变计的工作原理、工艺特点、补偿性能、选用原则，并简要地介绍了温度互补型电阻应变计的补偿原理及应用技术。

【关键词】电阻应变计；称重传感器；温度自补偿、蠕变自补偿；模量自补偿；温度互补型应变计

文献标识码：B

文章编号：1003-1870（2023）02-0005-09

概述

应变式称重传感器（以下简称为称重传感器）的工作原理和制造工艺，决定了其所用的电阻应变计应具有最佳的工作特性和与弹性元件结构的匹配性。电阻应变计工作时传递应变的量级非常小，以敏感栅长度 $L=5\text{mm}$ ，满量程时变形为 $1000\mu\varepsilon$ 的电阻应变计为例。如果分辨率为 10^{-5} ，则 $\Delta L=5\times 10^{-5}\text{mm}$ ，也就是说弹性元件要反映出 5mm 长度上变化一个原子大小的距离，这个要求的确很高。同时也说明了电阻应变计感受和传递弹性元件应变的准确性对称重传感器获得较高准确度的决定性作用。由此不难得出，电阻应变计是称重传感器的核心部件，其制造工艺水平、工作特性和各项自补偿功能，直接影响称重传感器的准确度和稳定性，是称重传感器质量控制的源头。国际上处于市场引导者地位的称重传感器制造公司，都有属于本公司的电阻应变计制造部门或独立的制造公司，其目的是生产满足本公司研发的各类型称重传感器用电阻应变计，特别是为满足本公司称重传感器制造工艺要求，以及对电阻应变计结构和工作特性的一些特殊要求。例如，为提高电阻应变计两端抗剪切应力能力，确保应变传递的精确性，要求适度加大敏感栅端头到基

底边缘的距离。为简化称重传感器制造工艺规程对应变计电阻标称值误差方向的特定要求；对温度自补偿、蠕变自补偿、弹性模量自补偿功能的特殊要求等。

电阻应变计的工作原理、制造工艺和使用的应变电阻合金箔材，决定了它必然产生某些力学、电学性能方面的缺陷。由于应变电阻合金箔材是由铸锭经过粗加工轧制成带材，再由森吉米尔20型高速轧机经过多次轧制、碾压的精加工过程才能形成合格的产品。在其粗、精加工的工艺过程中，应变电阻合金的晶格产生位错、滑移、空位、破裂等缺陷，其附近的原子处于热力学上的不稳定状态，是电阻应变计电学性能不稳定的重要原因。为保证电阻应变计的电学和力学性能，必须进行稳定性处理，即退火处理。在达到退火温度时，这些原子吸收热能产生扩散，使晶格缺陷迁移和消失，电阻率和电阻温度系数趋于稳定，保证了应变电阻合金具有优良的工作性能。为满足称重传感器用电阻应变计对工作特性、补偿特性和长期稳定性的特殊要求，电阻应变计除具有国家标准要求的A级工作特性外，还应分别具有温度、蠕变、弹性模量自补偿功能或温度、蠕变，温度、弹性模量复合自补偿功

能。

1 电阻应变计的温度自补偿技术

1.1 温度自补偿电阻应变计的工作原理

粘贴在某种材料制造的弹性元件上的电阻应变计，在一定的温度变化范围内工作时，能够达到温度自补偿效果的称为温度自补偿电阻应变计。粘贴在弹性元件上的电阻应变计的电阻变化，不仅是机械应变 ε 的函数，而且也是环境温度 T 的函数，即

$$R = f(\varepsilon, T) \quad (1)$$

当弹性元件同时产生机械应变和温度变化时，电阻应变计的电阻变化可用下式表示：

$$\Delta R = \left(\frac{\partial R}{\partial T}\right)_{\varepsilon} \Delta T + \left(\frac{\partial R}{\partial \varepsilon}\right)_{T} \Delta \varepsilon \quad (2)$$

电阻变化率为：

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\left(\frac{\partial R}{\partial T}\right)_{\varepsilon} \Delta T}{R} + \frac{\left(\frac{\partial R}{\partial \varepsilon}\right)_{T} \Delta \varepsilon}{R} \quad (3)$$

令

$$\frac{\left(\frac{\partial R}{\partial T}\right)_{\varepsilon}}{R} = \alpha \quad \frac{\left(\frac{\partial R}{\partial \varepsilon}\right)_{T}}{R} = K$$

则式 (3) 为：

$$\frac{\Delta R}{R} = \alpha \Delta T + K \Delta \varepsilon \quad (4)$$

式中： α ——电阻应变计敏感栅的电阻温度系数；

K ——电阻应变计的灵敏系数；

ΔT ——温度变化；

$\Delta \varepsilon$ ——电阻应变计感受的应变变化。

因电阻应变计粘贴在弹性元件上，与弹性元件材料和电阻应变计敏感栅材料的线膨胀系数有下列关系：

$$\Delta \varepsilon = (\beta_m - \beta_g) \Delta T + \varepsilon_{\sigma} \quad (5)$$

式中： β_m ——弹性元件材料的线膨胀系数；

β_g ——电阻应变计敏感栅的线膨胀系数；

ε_{σ} ——外载荷引起的真实应变值。

将式 (5) 代入式 (4) 得：

$$\frac{\Delta R}{R} = \alpha \Delta T + K [(\beta_m - \beta_g) \Delta T + \varepsilon_{\sigma}] \quad (6)$$

因 $\frac{\Delta R}{R} = K \varepsilon$ 为外载荷与温度变化引起的总应变

变值，则式 (6) 变为：

$$\varepsilon = \frac{\alpha}{K} \Delta T + (\beta_m - \beta_g) \Delta T + \varepsilon_{\sigma} \quad (7)$$

令式 (7) 中的前两项为 ε_t ，即

$$\varepsilon_t = \frac{\alpha}{K} \Delta T + (\beta_m - \beta_g) \Delta T = \frac{\Delta T}{K} [\alpha + K(\beta_m - \beta_g)] \quad (8)$$

$$\text{则} \quad \varepsilon = \varepsilon_{\sigma} + \varepsilon_t \quad (9)$$

ε_t 与弹性元件的真实应变无关，通常称为视应变或虚假应变，它是电阻应变计因温度变化而引起的热输出，是造成测量误差的根源。

从式 (8) 可以看出视应变 ε_t 不仅与电阻应变计敏感栅的电阻温度系数 α 有关，而且与弹性元件材料的线膨胀系数 β_m 和电阻应变计敏感栅材料的线膨胀系数 β_g 之差以及电阻应变计的灵敏系数 K 有关。若使视应变即热输出为零，必须满足：

$$\alpha + K(\beta_m - \beta_g) = 0$$

$$\text{即} \quad \alpha = -K(\beta_m - \beta_g) = K(\beta_g - \beta_m) \quad (10)$$

由以上分析不难得出，在制造温度自补偿电阻应变计时，使敏感栅材料的电阻温度系数 α 、线膨胀系数 β_g 和弹性元件材料的线膨胀系数 β_m 满足 (10) 式的条件，即可实现温度自补偿。

1.2 引起电阻应变计热输出的因素

弹性元件材料的线膨胀系数 β_m ，在常温范围内可看作常数，即

合金钢 $\beta_m = 11 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ；

铍青铜 $\beta_m = 16 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ；

铝合金 $\beta_m = 23 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。

电阻应变计敏感栅材料康铜的线膨胀系数 β_g ，在 $0 \sim 400^\circ\text{C}$ 范围为一常数 $\beta_g = 15 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。康铜箔电阻应变计灵敏系数 K ，在 $-50 \sim +180^\circ\text{C}$ 范围以 $2.2\% / 100^\circ\text{C}$ 的比例变化。

电阻应变计的电阻温度系数为 α ，一般电阻元件因温度引起的电阻变化由下式表示：

$$R = R_0 (1 + C_1 dt + C_2 dt^2 + C_3 dt^3 + \dots)$$

式中： R —— $t_0 + dt$ 时的电阻值；

R_0 —— t_0 时的电阻值；

C_1 、 C_2 、 C_3 ——常数。

电阻温度系数一般定义为：

$$\alpha_R = \frac{R - R_0}{R_0} \cdot \frac{1}{dt} = C_1 + C_2 dt^2 + C_3 dt^3 + \dots \quad (11)$$

通常在规定的温度范围内，一般只考虑一次项的影响，而在温度范围比较宽场合，则必须考虑二次项以上的影响因素。

上述四个系数都是温度的函数，对于称重传感器用电阻应变计而言，其热输出的分散度比热输出值的大小更为重要，因为热输出值可以在电桥电路中互相抵消。

1.3 温度自补偿电阻应变计的工艺方法

当敏感栅材料和称重传感器弹性元件材料一定时，敏感栅的电阻温度系数 α 满足公式(10)的条件，即可实现温度自补偿。有些应变电阻合金材料，例如康铜合金、卡玛合金、伊文合金等，通过改变其化学成分、改变加工的冷硬化程度或经过不同的热处理工艺，就可以改变和控制它的电阻温度系数 α ，使其满足公式(10)的条件。通常采用对敏感栅箔材实施不同的热处理工艺，来改变它的电阻温度系数 α ，以达到由于温度变化产生的热输出为零或减至最小的目的。

1.4 温度自补偿电阻应变计的不足之处

合金的电阻温度系数只能通过改变合金成分或不同热处理制度来调节，很难满足公式(10)的要求，只能给出大致范围，因此，对电阻应变计温度补偿效果有一定影响。在每批电阻应变计中，其温度系数总有一些差异，进一步提高自补偿精度有较大难度，一般分散范围 $\leq \pm 1.8 \mu \epsilon / ^\circ\text{C}$ 。每一批电阻应变计只适用于相应线膨胀系数的弹性元件材料，否则达不到温度自补偿效果，给使用带来不便。由于电阻应变计的温度系数的非线性，其温度补偿功能只能限制在一定的温度范围内，一般为 80°C 以下。应变电阻合金箔材需要经过严格的粗轧、精轧和反复处理才能得到适用的温度系数。工艺难度大，生产成本低。

1.5 电阻应变计热输出和灵敏系数随温度变化曲线

目前，电阻合金的冶炼、加工技术尚无法将 α 和 β_E 值控制在某一特定值，只能控制在某一范围内，所以每批温度自补偿电阻应变计都存在温度系数的离散性。对批量供货的电阻应变计应进行严格的抽样测试，给出视应变 ϵ_{app} （即热输出）和灵敏系数 K 随温度变化的数据。经抽样测试的试验曲线，如图1所示，以供用户推算误差和温度补偿参考。

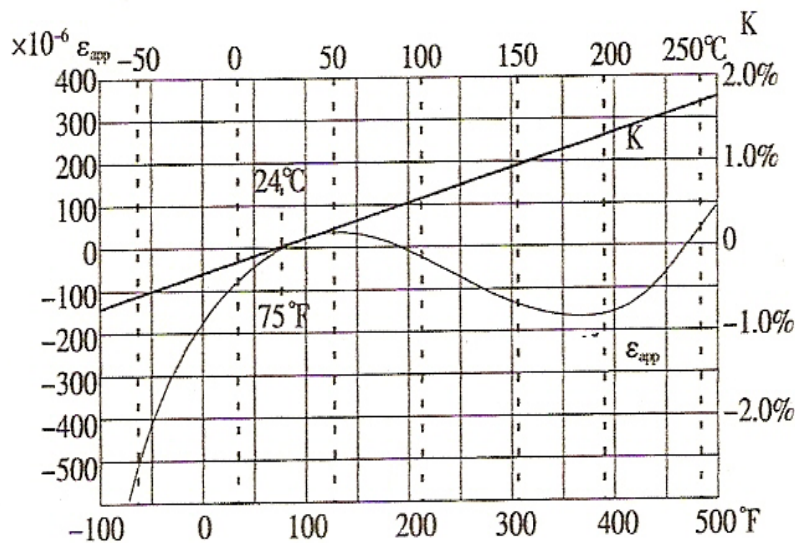


图1 电阻应变计热输出和灵敏系数随温度变化曲线

根据试验绘制的弹性元件材料线膨胀系数 β_m 与电阻应变计敏感栅电阻温度系数 α 的关系曲线, 如

图2所示, 可以得出康铜、卡玛电阻合金的 α 值对某种弹性元件材料为定值。

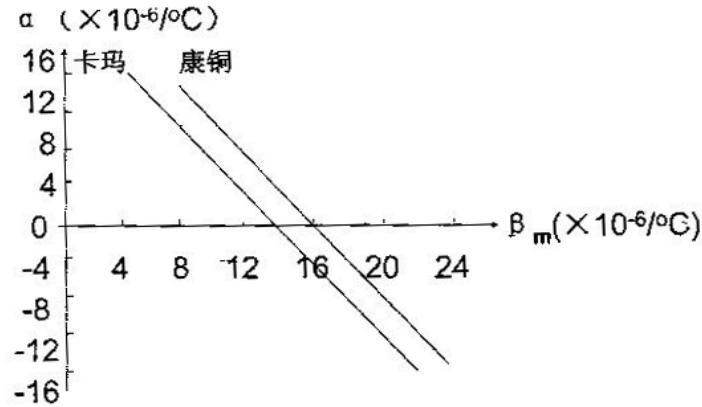


图2 材料线膨胀系数 β_m 与卡玛、康铜电阻温度系数 α 的关系曲线

电阻应变计的热输出和灵敏系数随温度变化曲线是在严格控制生产工艺的基础上对生产出来的电阻应变计采用抽样测试法得出。测试方法是将抽取的电阻应变计, 粘贴于所使用弹性元件材料的试件上, 在升温、降温过程中测定它们的热输出值。称重传感器生产企业可参照此测试方法对批量进货的温度自补偿电阻应变计抽样粘贴在与弹性元件金属材料相同的试件上, 测试出平均热输出及标准误差, 以确定其自补偿精度。

1.6 电阻应变计热输出的测量方法

测定热输出的试件尺寸 $100\text{mm} \times 50\text{mm} \times 2 \pm 1\text{mm}$ (长 \times 宽 \times 厚)。要求试件无内应力, 安装在测

试位置时试件能自由膨胀, 不产生附加力。高温试验箱的温度波动不大于 $\pm 1^\circ\text{C}$, 温度不均匀度不大于 $\pm 2^\circ\text{C}$ 。试件表面温度测量误差应不大于 0.5% 或 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。测量电阻应变计的指示应变用精度不低于 0.5% 的电阻应变计或惠斯通电桥。

电阻应变计与测量仪器的连接采用“三线制”接线法, 以消除导线热输出的影响。连接导线的电阻 $R_x/2$ 分别处于电桥相邻的两个桥臂中, 当电阻因温度变化而变化时, 不会产生输出电压。导线 R_{x1} 处于电桥之外, 其电阻变化不影响电桥的输出。此时完全消除了连接导线的温度误差, 保证温度自补偿电阻应变计测量的准确度。

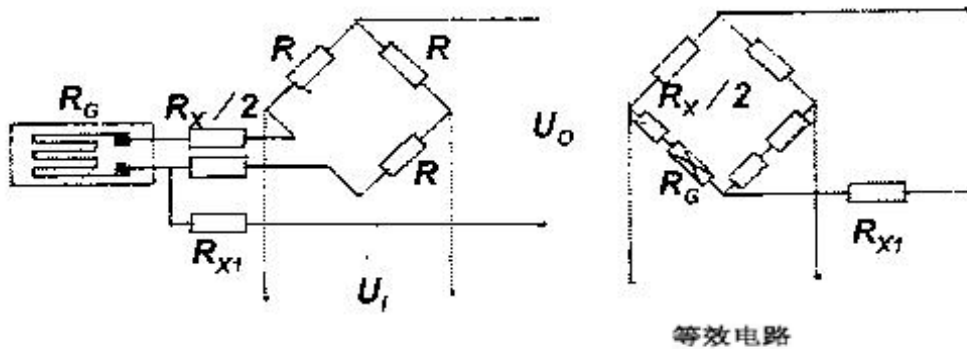


图3 电阻应变计热输出测量电路

一般情况下，热输出的测试只在升温过程中进行，并且只测试一个温度循环。测试时，在室温下调整测量仪器的零点，然后以3~5℃/min的速率逐级升温，每到一个温度时保温10~15min后测量各电阻应变计的应变值 ε_{t_i} ，并用该温度下的灵敏系数 K_t 进行修正，即得各电阻应变计的实际热输出值：

$$\varepsilon_t = \frac{K_{t_i}}{K_t} \varepsilon_{t_i} \quad (12)$$

式中 K_{t_i} 为电阻应变计 K 值旋钮所置灵敏系数，一般设置 $K_{t_i}=2.00$ 。然后计算每一个温度级别的平均热输出 $\varepsilon_{t_{\text{平}}}$ 。

$$\varepsilon_{t_{\text{平}}} = \frac{1}{n} (\varepsilon_{t_1} + \varepsilon_{t_2} + \dots + \varepsilon_{t_n}) \quad (13)$$

1.7 电阻应变计结构与热输出分散度的关系

单轴结构的电阻应变计是称重传感器弹性元件选用量最大的一种，以电阻值相同或接近的4片或8片为一组，粘贴在弹性元件应变区内，由于粘贴的各片电阻应变计分别位于不同部位，因而热输出分散度比较大。

双轴结构电阻应变计粘贴在称重传感器弹性元件应变区时，由于两个敏感栅都在所用应变电阻合金箔材的同一区域，因而成分和热处理不均匀的影响比较小，其热输出分散度也比较小。

全桥结构电阻应变计粘贴在称重传感器弹性元件应变区时，因为形成全桥的四个敏感栅都配置在应变电阻合金箔材相对小的区域内，合金组分和热处理性能的均一性好，所以热输出的分散度较小。因此，在称重传感器弹性元件结构允许的条件下尽量选用半桥、全桥电阻应变计。

2 电阻应变计的蠕变自补偿技术

2.1 称重传感器的蠕变误差

由于电阻应变计是用应变胶粘剂将其粘贴在弹性元件上，尽管应变胶粘剂层已经很薄，但称重传感器受载时还会产生蠕变误差。弹性元件金属材料为正蠕变，即在某一载荷作用下产生的变形有随着时间的增加而增大的趋势。应变胶粘剂层有使电阻应变计敏感栅的变形随着时间增加而减小的趋势，这种应力松弛产生负蠕变。称重传感器的蠕变误差基本上是这两种蠕变效应的叠加，总蠕变值取决于

两个蠕变分量的大小，若两个蠕变效应方向一致，则总蠕变效应为一叠加值，蠕变误差较大。

2.2 蠕变自补偿电阻应变计的工作原理

称重传感器弹性元件随时间变化而产生的误差与其金属材料的弹性不完善（滞后、蠕变等）密不可分，例如电子计价秤用铝合金平行梁称重传感器，由于铝合金材料及热处理工艺等原因，其滞后、蠕变误差较大，无法满足电子计价秤用称重传感器的要求。为解决此类称重传感器蠕变误差较大和难以控制问题，前苏联学者Н.Л.К л о к о в а（科洛考娃）经过理论分析和试验测试，提出称重传感器的蠕变误差可以通过粘贴在其上的电阻应变计进行补偿，这种电阻应变计的蠕变值与弹性元件材质缺陷引起的蠕变值的绝对值相等而符号相反。经过试验研究得出电阻应变计的几何尺寸与其所确定的蠕变值 θ 之间的依赖关系，从理论上确定了变形的传递系数（相当于蠕变）的关系式，即：

$$\theta = \frac{K_{n(\tau)} - K_n}{K_n} \quad (14)$$

式中： K_n ——将被测参数（力、压力等）施加到弹性元件后立即测定的传递系数；

$K_{n(\tau)}$ ——延时以后测定的传递系数。

任何电阻应变计的传递系数都可以用下式表达：

$$K_n = 1 - \frac{2}{b_1} \left\{ 1 - B_1 [1 - \exp(-\rho b_1 L_1)] - \frac{B_2 \exp(-\rho b_1 L_1)}{2} [1 - \exp(-\rho b_1 L_1)] \right\} \quad (15)$$

式中 b 、 b_1 、 b_2 、 B_1 、 B_2 由电阻应变计的几何尺寸和弹性参数确定。下图4所示箔式电阻应变计，它的敏感栅的尺寸为：箔材厚度 h 、敏感栅长度 L 、栅条宽度 a ，端部横栅长度 L_1 、宽度 a_2 ，引线端子长度 L_2 、宽度 a_2 。

上述相关参数为：

$$b = \sqrt{\frac{GC}{Ean}} \quad b_1 = \sqrt{\frac{GC}{Ea_1h}} \quad b_2 = \sqrt{\frac{GC}{Ea_2h}}$$

$$B_1 = \frac{a_1(a+h)}{(a_1+h)a} \quad B_2 = \frac{a_2(a+h)}{(a_2+h)a} \quad (16)$$

式中： E ——敏感栅箔材的弹性模量；

G ——应变胶粘剂的剪切模量（在计算 K_n 时用瞬时模量，而计算 $K_{(\tau)}$ 时用松弛模量 G_T ）；

C ——应变胶粘剂层厚度的影响系数，设胶粘剂层厚度为 h_b ，则：

$$C = 2\pi \cdot \frac{L_n 4h_b}{h} \quad (17)$$

在用 $G=15 \times 10^8 \text{N/m}^2$ 和 $G_T=14 \times 10^8 \text{N/m}^2$ 进行计算表明，传递系数明显超过 L 的箔式电阻应变计，其1min蠕变是正值。随着 K_n 的减小，蠕变 θ 的指标越过零点，逐步变成负值，且绝对值逐步增大。蠕变 θ 值及符号的变化，基本上取决于电阻应变计的几何参数 a 和 L_1 的变化。减小 a 和增大 L_1 导致“负蠕变”绝对值减小，甚至变成正值。因此改变 L_1 是制造蠕变自补偿电阻应变计最方便的工艺方法。 L_1 的变化只有零点几毫米，既不影响应变计的电阻值，又未改变敏感栅的外形尺寸，却使蠕变值有明显变

化。

通过理论分析和实测验证不难得出，若要在同一尺寸规格的电阻应变计上获得预定的蠕变值，改变敏感栅的栅条宽度 a 和横栅长度 L_1 的比例，可制成蠕变由负值到正值的系列蠕变自补偿电阻应变计。在制造工艺的实践中得出，改变 L_1 是制造蠕变自补偿电阻应变计最方便的工艺方法。因为 L_1 的变化不影响电阻应变计的电阻值； L_1 值的变化范围只有零点几毫米，不改变电阻应变计的外形尺寸就使蠕变值有明显变化。只要选取与称重传感器弹性元件的固有蠕变绝对值相等、蠕变方向相反的电阻应变计，即可实现称重传感器的蠕变自补偿。蠕变自补偿型电阻应变计的结构图，如图4所示。图中 a 为电阻应变计敏感栅的栅条宽度； L_1 为敏感栅的横栅尺寸。

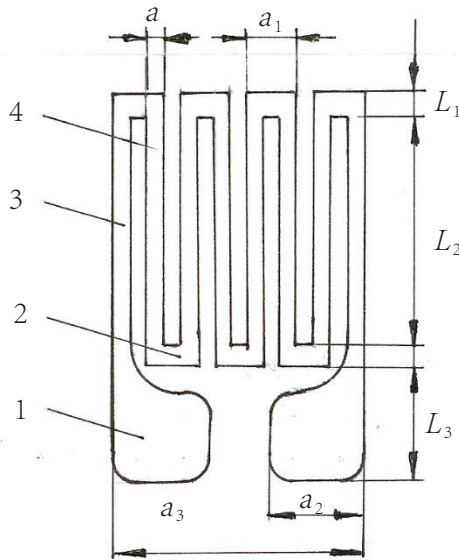


图4 蠕变自补偿电阻应变计

以基长为3mm、电阻值400Ω的箔式电阻应变计为例，计算敏感栅端头长度 L_1 与蠕变 θ 的关系。取
 $a=0.034\text{mm}$ $a_1=0.067\text{mm}$ $a_2=1.184\text{mm}$
 $G=15 \times 10^8 \text{N/m}^2$ $G_T=14 \times 10^8 \text{N/m}^2$

$h=0.006\text{mm}$ $h_b=0.03\text{mm}$

蠕变 θ 与敏感栅端头长度 L_1 的关系曲线如图5所示。

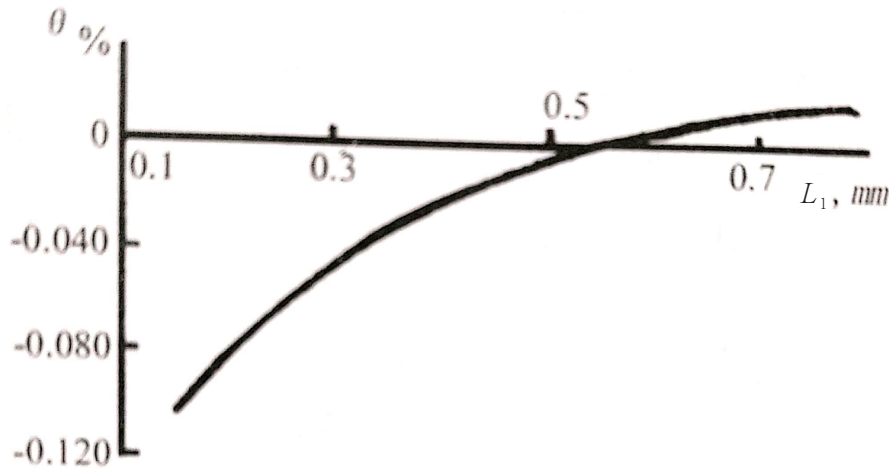


图5 蠕变 θ 与敏感栅端头长度 L_1 的关系曲线

2.3 蠕变自补偿电阻应变计的选用方法

蠕变自补偿范围由负值到正值共20余种规格，相邻蠕变标号之间相差0.01 ~ 0.015 %FS/30min，选择原则如下：

(1) 首次选用时，取两种蠕变相差较大的应变计，粘贴在三只结构、尺寸、材料、额定载荷完全相同的弹性元件上，根据实测的蠕变大小和方向，确定蠕变标号。

(2) 对于结构、金属材料完全相同的弹性元件，额定量程越小，正蠕变量越大，应选用负蠕变量大标号的蠕变自补偿电阻应变计。

(3) 不同材料具有不同的蠕变特性，相同结构和量程的合金钢弹性元件的正蠕变小，而铝合金弹性元件的正蠕变大，应选用负蠕变量大标号的蠕变自补偿电阻应变计。

3 电阻应变计的弹性模量自补偿技术

3.1 弹性模量自补偿电阻应变计工作原理

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 β_E 表示，它使称重传感器的输出值随温度升高而增大，即产生灵敏度温

度误差。称重传感器输出电压 U_0 与温度的关系可用下式表示：

$$U_0 = C \frac{K}{E} \cdot W \quad (18)$$

式中： K ——电阻应变计灵敏系数；
 E ——弹性元件材料的弹性模量；
 C ——换算系数；
 W ——被称重量。

通过对灵敏度温度误差分析，可推导出不同结构称重传感器补偿前的灵敏度温度系数，以灵敏度的增量与灵敏度之比表示。

对于圆柱式结构：

$$\frac{\Delta S}{S} = \gamma - \beta_E \quad (19)$$

对于悬臂梁式结构：

$$\frac{\Delta S}{S} = \gamma - 2\alpha_L - \beta_E \quad (20)$$

对于轮辐式结构：

$$\frac{\Delta S}{S} = 0.23\phi + \gamma - 2\alpha_L - \beta_E \quad (21)$$

由式 (19) (20) (21) 可以得出灵敏度的温度误差是系统性的误差，如分别令式 (19) (20) (21)

中的

$$\gamma = \beta_E$$

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

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

则

$$\frac{\Delta S}{S} = 0 \quad (22)$$

通过上述分析不难得出弹性模量自补偿原理：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，产生灵敏度温度误差。由于粘贴在弹性元件应变区的应变计敏感栅材料是卡玛合金，当环境温度升高时，它的灵敏系数降低，使称重传感器的输出减小，两者相互抵消达到弹性模量自补偿的目的。电阻应变计敏感栅材料卡玛合金的控制方法为：通过改变合金成分和结合不同的退火温度，将电阻应变计灵敏系数K调整到设定值，使其与弹性模量E随温度变化的影响相互抵消，保持称重传感器输出灵敏度稳定不变。

3.2 弹性模量自补偿电阻应变计敏感栅材料

除了康铜（铜镍合金），其他敏感栅电阻合金材料的灵敏系数都具有负的温度系数，但除了卡玛和伊文合金之外，其他敏感栅合金材料的另外一些性能都不适合制作电阻应变计。因此，国内外都选用卡玛和伊文合金制作不同精度等级的弹性模量自补偿电阻应变计。美国V-MM公司利用卡玛合金经过多年的研究与试验开发出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，就可以实现称重传感器灵敏系数的自补偿。在很多情况下这种补偿效果可优于 $\pm 0.0008\%/^{\circ}\text{F}$ （ $\pm 0.014\%/^{\circ}\text{C}$ ）。

3.3 弹性模量自补偿电阻应变计的规格

美国V-MM公司卡玛合金的EMC（有效模量补偿）系列电阻应变计，共有4种类型：

(1) 灵敏系数随温度变化 $-1.50\%/100^{\circ}\text{F}$ （ $-2.70\%/100^{\circ}\text{C}$ ）适用于不锈钢；

(2) 灵敏系数随温度变化 $-2.35\%/100^{\circ}\text{F}$ （ $-4.23\%/100^{\circ}\text{C}$ ）适用于铝合金；

(3) 灵敏系数随温度变化 $-1.25\%/100^{\circ}\text{F}$

（ $-2.25\%/100^{\circ}\text{C}$ ）适用于工具钢；

(4) 灵敏系数随温度变化 $-1.35\%/100^{\circ}\text{F}$ （ $-2.43\%/100^{\circ}\text{C}$ ）适用于(1)(3)和之间的“中间区域”（不锈钢与工具钢之间）的补偿。

3.4 弹性模量自补偿电阻应变计选用方法

(1) 必须选择与弹性元件材料线膨胀系数相匹配的弹性模量自补偿电阻应变计才能取得比较满意的补偿效果，在进行5只称重传感器测试后，最终确定。

(2) 弹性模量自补偿电阻应变计对于大多数材料不具有温度自补偿能力，热输出系数比一般温度自补偿电阻应变计略大，但热输出分散度较小，最好用于内部温度梯度小的称重传感器。

(3) 焊接性能比普通电阻应变计差，应选用与其配套的助焊剂。

4 温度互补型电阻应变计

粘贴在称重传感器弹性元件应变区的电阻应变计，作为传感元件它将弹性元件表面的应变转换为电阻的相对变化。此电阻变化除了与弹性元件的应变有关外，还受环境温度变影响，即

$$R=f(\varepsilon, T) \quad (23)$$

则

$$\frac{\Delta R}{R} = \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_j + \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_t \quad (24)$$

根据惠斯通电桥原理，电桥输出电压为：

$$U_0 = \frac{U_i K}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (25)$$

则有 $\varepsilon = (\varepsilon_{j1} - \varepsilon_{j2} + \varepsilon_{j3} - \varepsilon_{j4}) + (\varepsilon_{t1} - \varepsilon_{t2} + \varepsilon_{t3} - \varepsilon_{t4})$ (26)

式中： ε ——指示应变；

ε_j ——机械应变；

ε_t ——热应变。

若 $\varepsilon_{t1} = \varepsilon_{t2} = \varepsilon_{t3} = \varepsilon_{t4}$ 或 $\varepsilon_{t1} = \varepsilon_{t2}$ 及 $\varepsilon_{t3} = \varepsilon_{t4}$ 时，

则 $\varepsilon = \varepsilon_{j1} - \varepsilon_{j2} + \varepsilon_{j3} - \varepsilon_{j4}$ 此时热应变已消除。

如能设法将 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 制成温度系数一致，或将 R_1 、 R_2 及 R_3 、 R_4 制成温度系数一致，就可达到温度完全补偿的目的。

温度互补型电阻应变计的优点是：

(1) 具有极强的抗温度漂移性能，平均热输出

系数小于温度自补偿型电阻应变计；

(2) 具有广泛的材料适应性；

(3) 温度补偿范围大，它只受电阻应变计的使用温度限制，最高可达180℃；

(4) 由于不要求严格的特定的温度系数，可以简化材料及制造工艺流程中的工序。

5 结束语

从上述温度自补偿型、蠕变自补偿型、弹性模量自补偿型电阻应变计制造工艺的特点与难点可以得出，对生产企业的技术与工艺水平要求较高。电阻应变计制造企业应具备下列条件：具有较高的理论分析和结构设计水平(例如应变计结构有限元分析、框状端头及椭圆端环优化设计等)。具有先进而完善的工艺装备和检测手段，特别是应配备较先进的箔材热处理设备。采用热压机将箔材与胶膜粘结为一体的新工艺；采用无应力调阻或自动调阻工艺；采用先进的密封栅平面工艺技术；具有完善的工作特性试验与检测装置；采用科学的质量控制与管理方法。

由于电阻应变计试验测试后不能二次使用，只能测量出实验室环境条件下的工作特性和疲劳寿命，这给研究、选用带来较大困难。目前，多围绕敏感栅材料和结构形式、基底和覆盖层材料、制造工艺水平等筛选电阻应变计。实际上，在外载荷作用下弹性元件的变形经过应变胶粘剂和电阻应变计基底把极其微小的变形传递到敏感栅上，传递的变形非常微小，所以对电阻应变计和应变胶粘剂的工作特性要求很高，主要是应变传递线性好；滞后、蠕变小；温度和时间漂移小；电绝缘性能好，不吸潮。生产实践证明，在相同结构的称重传感器上粘贴不同结构的电阻应变计，其蠕变指标、达到同一准确度等级的合格率和疲劳寿命有明显差异。这是因为，对敏感栅的结构、基长、基宽、基底材料、厚度和自补偿功能选择不当所致。可见称重传感器

用电阻应变计各项自补偿功能的选择对称重传感器达到较高准确度和稳定性至关重要，一定要科学合理选用，以期达到事半功倍的效果。

目前，国内外对电阻应变计的力学、电学性能都有专业解释或国家标准，但对于电阻应变计的几何形状、基底、覆盖层、引出线等质量评定尚没有明确的规定，这是用户与生产企业出现分歧的主要原因，此问题应引起生产企业和计量部门重视，希望逐步研究解决。

参考文献

[1] B.I.Wilson and G.Borkowski.Temperature Coefficients for ProPving Rings.1946.NBS Special Publications 300.V01.8.

[2] James Dorsey.Linearization of Transducer Compesation .Proceedings of the 23rd International Instrumentarion Symposium.1977.

[3] 渡辺理、ひずみゲージとその応用、日刊工業新聞社.1977年.

[4] 克劳科娃著，张智敏译.电阻应变式测量元件瞬态误差的补偿，传感器应用技术.1987年第1期.

[5] 沈观林，马良埕.电阻应变计及其应用，清华大学出版社，1983年7月.

作者简介

刘九卿(1937-)，男(汉族)，1960年毕业于吉林工业大学。中国航天科技集团公司下属中国运载火箭技术研究院第七零二研究所研究员，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140多篇。