

德国微型测力与称重传感器研究课题简介

中国运载火箭技术研究院第 702 研究所 刘九卿

【摘要】本文介绍了德国学者 C. Rohrbach 和 J. Lexow 微型测力与称重传感器研究课题概况,及其有代表性的薄形弯曲梁式弹性元件的理论分析及试验测试成果。在介绍电阻应变计及应变胶粘剂对薄形弯曲梁式弹性元件的影响;温度、相对湿度、弹性元件几何形状与零点漂移的关系;蠕变、内外压力和供电电压对测量误差的影响等问题时,结合国内研制情况进行了分析与说明。

【关键词】微型;测力与称重传感器;电阻应变计;温度效应;零点漂移

一、概述

微型测力与称重传感器,因其量程微小又要使它具有足够大的输出灵敏度,弹性元件应变区会很薄,其刚度必然很差造成非线性、重复性和蠕变误差增大,很难达到所需要的准确度级别。尽管采用低弹性模量的铝合金、镁合金、铍青铜材料做弹性元件,以增加应变区的刚度,但仍不能彻底解决问题。为使微型测力与称重传感器达到较高的准确度级别,在薄形弯曲梁式弹性元件结构已确定的情况下,还必须处理好灵敏度和刚度这对矛盾,因此设计时应对应灵敏度和刚度取折衷方案。德国学者 C. Rohrbach 和 J. Lexow 微型测力与称重传感器研究课题中的薄形弯曲梁式弹性元件的理论分析及试验测试成果,很好的说明了这个问题,值得我国称重传感器研制企业借鉴。他们用一个薄形悬臂弯曲梁式弹性元件来说明微型测力与称重传感器的一些根本性的问题。电阻应变计粘贴在薄形悬臂弯曲梁弹性元件的根部,并涂抹很薄的一层液态防护密封面胶。

弹性元件的厚度 d 可以小到 0.05mm , 而电阻应变计和防护涂层的厚度 h 却保持不变,一般为 $h=0.02 \sim 0.03\text{mm}$ 。因此,弹性元件的特性几乎完全取决于电阻应变计基底、应变胶粘剂和防护涂层材料的特性。由于电阻应变计基底、覆盖层和胶粘剂均由酚醛或环氧树脂构成,它们的物理性能在很大程度上与温度密切相关随温度而定。例如,弹性模量随着温度的升高而降低,使输出灵敏度增大;由于弹性元件很薄,刚度必然小,随着温度和湿度的变化,其初始应变值变化很大,致使弹性元件变形而引起零点漂移。上述各种效应的影响,可通过专用装置进行试验测量求得。

二、弹性模量的温度效应

弹性元件材料的弹性模量随着温度的升高而降低,直接影响称重传感器的灵敏度而产生测量误差。薄形悬臂弯曲梁式弹性元件表面的应变值,可由下式计算:

$$\varepsilon_0 = \frac{\frac{M}{b}}{\frac{1}{2}(E_G h^2 - E_S d^2) - \frac{2}{3} \cdot \frac{E_G h^3 + E_S d^3}{E_G h^2 - E_S d^2} (E_G h + E_S d)} \quad (1)$$

式中: M —弹性应变梁的弯矩;

b —弹性应变梁的宽度;

E_G —电阻应变计敏感栅的弹性模量;

E_S —弹性元件材料的弹性模量;

h —电阻应变计的厚度;

d—弹性应变梁的厚度。

在薄形弹性应变梁表面的上方，高度为 $h\zeta$ (这里 $0 \leq \zeta \leq 1$) 处的应变为：

$$\varepsilon_A = \varepsilon_0 \left(1 - 2h\zeta \frac{E_G h + E_S d}{E_G h^2 - E_S d^2} \right) \quad (2)$$

考虑到电阻应变计不是完全的覆盖弹性元件，即传递的应变与弹性元件应变不完全吻合，引入概算值 ζ 进行计算，取 $\zeta=0.5$ 。

称重传感器的输出电压 U_0 为：

$$U_0 = K\varepsilon_A U_i \quad (3)$$

称重传感器的输出灵敏度 S 为：

$$S = \frac{U_0}{U_i} = K\varepsilon_A \times 10^3 \quad (\text{mV/V}) \quad (4)$$

由式 (4) 可知，输出灵敏度为温度的函数。通过对不锈钢 17-4PH 相当我国的 0Cr17Ni4Cu4Nb (20 时 $E=20.9 \times 10^4 \text{N/mm}^2$) 和铍青铜 QBe2 (20 时 $E=11.1 \times 10^4 \text{N/mm}^2$) 制成的不同厚度的弹性元件进行试验，温度从 20 到 60 弹性模量变化如下：

不锈钢为 $-21 \times 10^{-5} /$ ；铍青铜为 $-35 \times 10^{-5} /$ 。

电阻应变计的基底在 20 时的弹性模量为 $0.37 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ ，在 20~60 内弹性模量的变化为 -0.20%。

而 80、100 和 120 时，不锈钢、铍青铜、电阻应变计基底的弹性模量分别为 20 时的 86%、66% 和 26%。

从上述试验结果可以看出，微型测力与称重传感器弹性元件材料选择低弹性模量的铍青铜、铝合金 (未有试验数据) 比较合适，但在高温时偏差都较大，应采用热敏电阻进行温度补偿。

三、薄形弯曲梁式弹性元件上的温度效应

称重传感器在没有外载荷作用时的输出称为零点输出，它受环境温度影响，随着温度的变化而变化称为零点温度漂移。薄形悬臂弯曲梁式弹性元件，因其结构原因比其它类型称重传感器的温度效应更明显，零点温度漂移量更大。

电阻应变计的线膨胀系数 α_G 约为 $60 \times 10^{-6} /$ ，弹性元件金属材料的线膨胀系数比它小得多，合金钢 $\alpha = 11 \times 10^{-6} /$ 、铍青铜 $\alpha = 16.6 \times 10^{-6} /$ 、铝合金 $\alpha = 23 \times 10^{-6} /$ 。因此，粘贴电阻应变计的薄形 (金属薄片) 弹性元件在温度发生变化时，就象双金属弹簧片一样的弯曲而引起附加的零点温度漂移，其应变可用下式计算：

$$\varepsilon_0 = \frac{\left[1 + 3 \frac{E_S}{E_G} \left(\frac{d}{h} \right)^2 + 4 \frac{E_S}{E_G} \left(\frac{d}{h} \right)^3 \right] \alpha_G}{\left[1 - \frac{E_S}{E_G} \left(\frac{d}{h} \right)^2 \right]^2 + 4 \frac{E_S}{E_G} \cdot \frac{d}{h} \left(1 + \frac{d}{h} \right)^2} \Delta t + \frac{\frac{E_S}{E_G} \cdot \frac{d}{h} \left[4 + 3 \frac{d}{h} + \frac{E_S}{E_G} \left(\frac{d}{h} \right)^3 \right] \alpha_S}{\left[1 - \frac{E_S}{E_G} \left(\frac{d}{h} \right)^2 \right]^2 + 4 \frac{E_S}{E_G} \cdot \frac{d}{h} \left(1 + \frac{d}{h} \right)^2} \Delta t \quad (5)$$

式中： E_S —弹性元件材料的弹性模量；

E_G —电阻应变计敏感栅的弹性模量；

α_S —弹性元件材料的线膨胀系数；

α_G —电阻应变计敏感栅材料的线膨胀系数；

d—弹性元件应变区的厚度；

h—电阻应变计的厚度；

t—温度变化量， $t=t_2 - t_1$ 。

相对高度 ζ 为 $0 \leq \zeta \leq 1$ 处的应变为：

$$\varepsilon_A = \varepsilon_0 + \zeta \cdot \frac{6 \frac{E_S}{E_G} \cdot \frac{d}{h} \left(1 + \frac{d}{h}\right)}{\left[1 - \frac{E_S}{E_G} \left(\frac{d}{h}\right)^2\right]^2 + 4 \frac{E_S}{E_G} \cdot \frac{d}{h} \left(1 + \frac{d}{h}\right)^2} \Delta t \quad (6)$$

一个厚度 $d=0.055\text{mm}$ 的钢制薄形悬臂梁式弹性元件，其上粘贴厚度 $h=0.02\text{mm}$ 的电阻应变计，利用 (6) 式计算它的零点温度漂移量，之后再在专用的装置内进行加温试验测量。其理论计算值与试验测量值如下：

40 时：理论计算值 $\varepsilon_A=50\mu\varepsilon$ ，试验测量值 $\varepsilon_A=39\mu\varepsilon$ ；

60 时：理论计算值 $\varepsilon_A=100\mu\varepsilon$ ，试验测量值 $\varepsilon_A=78\mu\varepsilon$ ；

80 时：理论计算值 $\varepsilon_A=160\mu\varepsilon$ ，试验测量值 $\varepsilon_A=105\mu\varepsilon$ 。

这种零点温度漂移，可以通过在电桥的桥臂上串联零点温度补偿铜电阻得到补偿。

四、压力效应

作用在微型测力与称重传感器上的空气，将在薄形悬臂梁式弹性元件表面引起等量的表面应力，此压力效应与称重传感器的大小无关，即与普通称重传感器受到的作用是一样的。因此，用于其它称重传感器的压力补偿技术与工艺，也能用于微型测力与称重传感器上。

在密封的微型测力与称重传感器内，绝对温度由 T_1 变为 T_2 时，其内部的气压由 p_1 变为 p_2 ，则

$$p_2 = p_1 \cdot \frac{T_2}{T_1} \quad (7)$$

抽空微型测力与称重传感器内的空气即可消除这一效应的影响，或者采用普通称重传感器的零点温度补偿技术来解决。

五、电桥电压影响

微型测力与称重传感器电桥电压的增加，将导致输出灵敏度变化，蠕变和零点温度漂移增大。所以供桥电压不能太高，主要是通过控制电阻应变计的工作电流，来选择最佳供桥电压。电阻应变计通过工作电流后，温度升高而产生自热效应，一是使输出不稳定，二是在胶粘剂层或丝栅的缺陷处引起热斑效应，从而降低电阻应变计的质量并产生附加应变。对于全等臂电桥，其最大桥压为：

$$U_{i(\max)} = 2RI_{\max} \quad (8)$$

式中 R —电桥的单臂电阻，即电阻应变计电阻；

I_{\max} —电阻应变计的最大工作电流。

例如：电桥的桥臂电阻 $R=350\Omega$ ，如果最大工作电流 $I_{\max}=14\text{mA}$ ，则电桥最大电压为：

$$U_{i(\max)} = 2 \times 350 \times 0.014 = 9.8\text{V} \approx 10\text{V}$$

所以，微型测力与称重传感器电桥桥臂电阻应变计的工作电流，控制在 15mA 左右为最佳，最大不能超过 20mA 。

也可以通过敏感栅上的功率密度进行控制，不同的敏感栅允许有不同的功率密度，以箔式电阻应变计为例，一个 $0.01\text{W}/\text{mm}^2$ 的功率密度可使它的温度上升 1.5°C 。其功率密度 P_ρ 按下式计算：

$$P_\rho = \frac{U_i^2}{4RA} \quad (9)$$

式中： U_i —电桥供桥电压；

R —电阻应变计名义电阻值；

A —电阻应变计敏感栅面积（长×宽）。

微型测力与称重传感器的供桥电压以 10V 为最佳。

六、弹性元件的结构与材料选择

就机械性能而言，微型测力与称重传感器弹性元件所用的金属材料与普通称重传感器完全相同，合金钢、不锈钢、铍青铜、铝合金均可使用。但因其量程小，为使弹性元件的应变区更厚些，即得到较高的刚度，多采用低弹性模量的铍青铜和铝合金。由于结构尺寸小，选择较高级别的金属材料几乎不影响输出成本，从全面性能来看，铍青铜是最好的低弹性模量材料。

微型测力与称重传感器的结构，很容易的从普通称重传感器成功的结构中用相似定理推出。在泊松比不变的情况下，微型测力与称重传感器的特征长度 L_2 与普通称重传感器的特征长度 L_1 ，有如下关系：

$$\frac{L_2}{L_1} = \sqrt{\frac{\varepsilon_1 E_1 F_2}{\varepsilon_2 E_2 F_1}} \quad (10)$$

式中： ε_1 和 ε_2 —普通和微型称重传感器的应变值；

E_1 和 E_2 —普通和微型弹性元件金属材料的弹性模量；

F_1 和 F_2 —普通和微型称重传感器被测量的载荷值。

如果 $\varepsilon_2 = \varepsilon_1$ ，为获得最高的灵敏度，当 $E_2 = E_1$ 时，可以导出：

$$\frac{L_2}{L_1} = \sqrt{\frac{F_2}{F_1}} \quad (11)$$

由式(11)可知，微型测力与称重传感器除了尺寸小这一特点外，还可以测量特别小（成平方关系）的力值。

微型测力与称重传感器的弹性元件，选用热处理后的金属板材，经冲压制造出来的悬臂弯曲梁或两端固支弯曲梁结构，采用胶粘、螺丝固定或焊接的方法将其安装在刚性的环体上。弯曲梁式弹性元件与环体一定要连接牢固，保证边界条件为固支，否则将产生较大的测量误差。

对于薄形弯曲梁式弹性元件应变区的厚度一定要测量准确，一个 0.2mm 厚的弯曲梁若减薄 0.01mm，就能使灵敏度增加 10%。

七、结语

微型测力与称重传感器的弹性元件，只要厚度不小于十分之几个毫米，其工作特性就与普通称重传感器一样。当弹性元件厚度薄于十分之几个毫米以下时，其测量误差增大，应对微型测力与称重传感器进行一定程度的补偿。

微型测力与称重传感器的特点是：结构紧凑尺寸小；测量力值小；固有频率高。缺点是冷热加工精密度高，制造工艺难度大。

参考文献

[1] C. Rohrbach、J. Lexow（德国）著，邹炳易译．小型应变计式力传感器[R]．第十届国际计量技术联合会力与质量计量会议论文选，1986年。

[2] 张功铭、赵复真．新型传感器及传感器检测新技术[M]．中国计量出版社，2006年10月。