

圆柱圆筒式称重传感器非线性和旋转误差分析

中国运载火箭技术研究院第七 二研究所 刘九卿

【摘要】 圆柱、圆筒式称重传感器以其结构简单紧凑，刚度大，固有频率高，动态响应快等特点，广泛应用于大型电子衡器中，但其固有线性差，容易产生旋转误差等缺点也是非常致命的。为作好弹性元件结构设计、非线性补偿和控制旋转误差，本文分析了面积效应、泊松比效应、焊接密封膜片对非线性误差的影响，以及电阻应变计定位偏差等引起的非测量应变变量对旋转误差的影响。

【关键词】 称重传感器；非线性误差；旋转误差；面积效应；泊松比效应

一、概述

圆柱、圆筒式称重传感器以其结构简单紧凑，体积小，量程大，重量轻；弹性元件与保护外壳的几何形状为简单的圆柱、圆筒形，容易加工出较高的尺寸和形位精度；弹性元件刚度大，固有频率高，动态响应快；加载承载边界可设计成双平面、一平面一球面、双球面多种结构形式等特点，在各种结构的大型电子衡器中得到较为广泛的应用。具有相同截面积的圆筒式与圆柱式弹性元件，对于纯轴向载荷的刚度相同，但圆筒式结构的弹性元件有更大的惯性矩，所以它具有更好的抗弯曲能力，多应用于大型电子吊钩秤。

从称重传感器弹性元件设计原则分析，尽管圆柱、圆筒式弹性元件具有十分突出的特点，但其固有线性差，容易产生旋转误差等缺点也是非常致命的。因此必须作好弹性元件、保护外壳、压头底垫结构设计和非线性补偿，控制旋转误差，才能使其达到较高的准确度等级。圆柱、圆筒式称重传感器产生非线性误差的主要因素是：

(1) 面积效应影响。弹性元件承受拉向、压向载荷时，应变区截面积变化，导致 $P-\sigma$ 关系的非线性；

(2) 泊松比效应影响。即弹性元件轴向和环向应变相差较大，致使电桥内某一桥臂电阻的变化与相邻桥臂电阻的反向变化不匹配，所引起的电桥非线性误差；

(3) 材料性能影响。应力应变关系主要是弹性元件材料的误差，当应变程度较高时，其应力应变关系并非完全线性，且滞后、蠕变及弹性模量不是理想的常数，载荷增加时非线性也增加；

(4) 焊接密封膜片影响。主要是非线性的密封膜片对载荷的分路作用，即当环境温度变化时，由于焊接膜片与外壳组成超静定结构，因变形不协调而产生内应力，外壳尺寸改变导致密封腔内气体压力变化，引起称重传感器温度漂移。

圆柱、圆筒式弹性元件的旋转误差是附加的非测量应变量的函数，其影响因素是：

(1) 圆柱、圆筒式弹性元件、引入载荷的压头、承受载荷的底垫机械加工的形位误差影响，主要是同心度、对称度、平行度超差引起的各方位应变量不同；

(2) 电阻应变计工作特性和弹性元件上电阻应变计的定位误差，引起的附加应变量。

从前，对圆柱、圆筒式称重传感器的非线性误差，多以理论分析为主，其结论大致相同：称重传感器本身（包括弹性元件、电阻应变计、电桥电路）固有的非线性误差一般比较小，对准确度影响不大；弹性元件应变区的应变梯度和电阻应变计定位偏差对非线性影响甚大，减小此值可较大减少非线性误差；弹性元件、压头、底垫尺寸对应变区的应变梯度有影响，结构设计不合理将导致较大的非线性误差等等，没有跳出传统的理论分析模式。现代称重传感器结构与计算，应采用数学分析手段建立各项特性的数学模型，通过数学拟合公式对相关误差进行分析和推算，给非线性补偿技术奠定理论基础。为此必须掌握圆柱、圆筒式弹性元件结构特点，非理想加载（如偏心载荷、侧向载荷）物理变量（如温度、压力、振动）对非线性的影响。本文通过建立数学模型和数学分析方法，对圆柱、圆筒式弹性元件应变区面积效应产生的误差，金属材料泊松比引起的电桥电路非线性误差，焊接密封膜片对载荷分路作用造成的非线性误差和电阻应变计定位偏差产生的旋转加荷误差进行分析。

二、面积效应引起的非线性误差

由面积效应、电桥各桥臂及类似的几何参数变化而引起的高次影响，其典型值为：温度变化 60 时，影响量达 0.1 ~ 0.2%。然而，它们对称重传感器输出的影响，很难同温度引起的别的误差相区别，故必须对所有这些效应的综合作用所引起的输出随温度变化进行补偿。

通常，圆柱、圆筒式弹性元件的高度与直径比 $H/D=3 \sim 5$ 。由于圆柱、圆筒式结构还会受到非轴向分力引起的二次效应的影响，所以必须采取措施，把轴向载荷同非轴向分量所产生的输出分离开来。

受面积效应影响，承受压向载荷时弹性元件的刚度连续增大，而承受拉向载荷时则弹性元件的刚度连续减小。这一论点是基于弹性模量保持恒定并与同时发生的密度变化无关的假设。然而，实际上是承受压向载荷时弹性模量稍稍增大，承受拉向载荷时弹性模量稍稍减小，结果使得面积效应更加严重。虽然弹性模量的这种变化很小，以至在一般材料性能试验中难以检测出来，但从现代电阻应变式称重传感器的准确度等级来说，其影响仍然是显著的。即使不考虑弹性模量随应力的变化，我们至少可以估算出由于面积变化引起的非线性误差。当圆柱式弹性元件的轴向应变每变化 $100\mu\epsilon$ 时，面积变化所引起的非线性约为 0.003%，这是很可观的，绝对不能忽视。

与此相反，弯曲式和剪切式弹性元件，在承受等量拉伸和压缩应力时其容积一般是相等的，无面积效应影响，因此固有线性好。而圆柱、圆筒式弹性元件则固有线形很差，因此必须进行非线性补偿才能达到较高的准确度等级。

设圆柱式弹性元件的轴向应力 σ ，轴向应变 ϵ ，则初始截面积 A_0 与载荷 P 的关系为：

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad \varepsilon_0 = \frac{\sigma}{E}$$

则
$$\varepsilon_0 = \frac{P}{A_0 E} \quad (1)$$

式中 E 为弹性元件金属材料的弹性模量。当弹性元件承受拉向载荷作用时，环向变细，截面积不断减小，刚度连续降低，输出不断增加而产生非线性误差；当弹性元件承受压向载荷作用时，环向变粗，截面积不断增大，刚度连续升高，输出不断减少而产生非线性误差。现以承受压向载荷的圆柱式弹性元件为例分析非线性误差，设弹性元件应变区截面的半径为 r，因 r 的增加而使应变区截面积产生增量。

圆柱式弹性元件的环向应变 $\varepsilon_r = \mu \varepsilon_0$ 可视为半径 r 的增量，则

$$\Delta A = \pi(r + \mu \varepsilon_0)^2 - \pi r^2 = 2\pi r \mu \varepsilon_0 + \pi \mu^2 \varepsilon_0^2$$

略去高次项，得

$$\Delta A = 2\pi r \mu \varepsilon_0$$

弹性元件受载后的截面积为

$$A = A_0 + \Delta A = A_0 + 2\pi r \mu \varepsilon_0 \approx A_0 (1 + 2\mu \varepsilon_0) \quad (2)$$

此时，弹性元件的轴向应变为

$$\varepsilon = \frac{P}{EA} = \frac{P}{EA_0(1 + 2\mu \varepsilon_0)} = \frac{P(1 - 2\mu \varepsilon_0)}{EA_0[1 - (2\mu \varepsilon_0)^2]} \quad (3)$$

略去式 (3) 中的高次项，则

$$\varepsilon = \frac{P}{EA_0} (1 - 2\mu \varepsilon_0) \quad (4)$$

将式 (1) 代入式 (4) 得

$$\varepsilon = \varepsilon_0 (1 - 2\mu \varepsilon_0) \quad (5)$$

将式 (5) 变为

$$\varepsilon_0^2 - \frac{\varepsilon_0}{2\mu} + \frac{\varepsilon}{2\mu} = 0 \quad (6)$$

解式 (6) 方程，得

$$\varepsilon_0 = \varepsilon - 2\mu \varepsilon^2 \quad (7)$$

同理，对于承受拉向载荷，有

$$\varepsilon_0 = \varepsilon + 2\mu\varepsilon^2 \quad (8)$$

由此，可以计算出面积效应引起的弹性元件非线性误差：

对于拉向载荷

$$\Delta_1 = \frac{(\varepsilon + 2\mu\varepsilon^2) - \varepsilon}{\varepsilon} = 2\mu\varepsilon = 0.56\varepsilon \quad (9)$$

对于压向载荷

$$\Delta_1 = \frac{(\varepsilon - 2\mu\varepsilon^2) - \varepsilon}{\varepsilon} = -2\mu\varepsilon = -0.56\varepsilon \quad (10)$$

由式(9)和式(10)不难看出，圆柱、圆筒式弹性元件的应变程度越高，面积效应影响越大。这里说的应变程度，实际上是保证应变稳定并与载荷成较严格线性关系的应变范围，它是减少面积效应引起的非线性误差，提高称重传感器整体稳定性的基础和关键。因为圆柱、圆筒式弹性元件任何几何形状的改变，必然伴随出现一定程度的非线性影响，较低的应力、应变意味着对理想线性弹性性能的偏差最小，也意味着弹性元件有较大的刚度和较高的固有频率。

三、泊松比效应引起的电桥非线性误差

称重传感器惠斯通电桥四个桥臂作用不相等而引起的非线性误差，正如美国 VISHAY 测量集团公司《测量集团技术评论》第 TN - 507 号“电桥非线性所引起的误差”一文指出“此误差乃是电桥内某一桥臂电阻的变化与相邻桥臂电阻的反向变化不匹配所引起的，即圆柱式弹性元件的泊松比效应。圆柱式弹性元的轴向应变每变化 $100\mu\varepsilon$ 时，电桥的非线性约为 0.007%，此非线性误差的符号总是与面积效应引起的非线性误差相反。因此电桥的非线性不仅抵消了，而且过度补偿了几何尺寸变化引起的非线性。”由此不难得出，垂直于加荷轴线的平面的泊松面积变化，导致了 $P-\sigma$ 关系的非线性。其非线性误差对于压向称重传感器是正值；对于拉向称重传感器为负值。

研究分析圆柱、圆筒式称重传感器泊松比效应引起的电桥非线性误差，对完成线性补偿有一定的指导作用。仍以圆柱式弹性元件为例，其电阻应变计粘贴位置和电桥电路如图 1、图 2 所示。

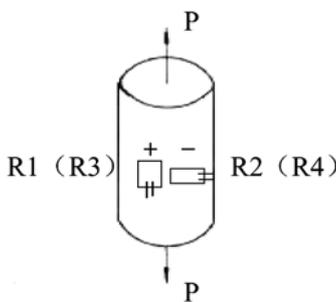


图 1 电阻应变计粘贴位置

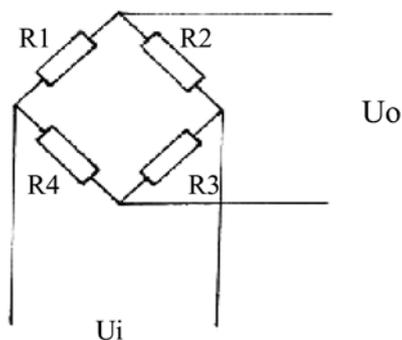


图2 电桥电路图

设电桥各桥臂的电阻值相等，即

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$$

当圆柱式弹性元件承受拉向载荷作用时，应变区产生轴向拉伸应力、环向压缩应力，使电桥各桥臂的电阻发生变化，即

$$\begin{aligned} R_1 = R_3 &= R(1 + \delta) \\ R_2 = R_4 &= R(1 - \mu\delta) \end{aligned} \quad (11)$$

式中 δ - 桥臂电阻的相对变化量；

μ - 弹性元件材料的泊松比。

将电桥分为两部分，在 ABC 半个电桥中，AC 间的电压降为 U_i ， R_2 上的电压降为

$$U_{BC} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_i$$

同理，在 ADC 半个电桥中， R_3 上的电压降为

$$U_{DC} = \frac{R_3}{R_3 + R_4} U_i$$

电桥输出电压 U_0 为

$$U_0 = U_{DC} - U_{BC} = \frac{R_3}{R_3 + R_4} U_i - \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_i \quad (12)$$

电桥的相对输出，即为称重传感器的灵敏度 S

$$S = \frac{U_0}{U_i} = \frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (13)$$

将式 (11) 代入式 (13)，得

$$S = \frac{U_0}{U_i} = \frac{R(1+\delta)}{R(1+\delta)+R(1-\mu\delta)} - \frac{R(1-\mu\delta)}{R(1+\delta)+R(1-\mu\delta)} = \frac{\delta(1+\mu)}{2+\delta(1-\mu)} \quad (14)$$

式中 δ —桥臂电阻的相对变化量；

$$\delta = \frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta L}{L} = K\varepsilon$$

μ —弹性元件材料的泊松比；

K —电阻应变计的灵敏系数。

设 $\mu = 0.28$, $K = 2$ 则式 (14) 变为

$$S = \frac{U_0}{U_i} = \frac{K\varepsilon(1+\mu)}{2+K\varepsilon(1-\mu)} = \frac{2\varepsilon(1+0.28)}{2+2\varepsilon(1-0.28)} = 1.28\varepsilon \frac{1}{1+0.72\varepsilon} \quad (15)$$

将式 (15) 用级数展开, 并略去高次项, 得

$$S = \frac{U_0}{U_i} = 1.28\varepsilon(1-0.72\varepsilon) \quad (16)$$

从式 (16) 可以看出, 输出灵敏度与应变之间是非线性关系, 只有在弹性元件的轴向应变 ε 足够小时, 它们之间才呈线性关系, 即

$$S = \frac{U_0}{U_i} = 1.28\varepsilon \quad (17)$$

比较 (16) 及 (17) 两式, 其非线性误差 Δ_2 为

$$\Delta_2 = \frac{1.28\varepsilon - 1.28\varepsilon(1-0.72\varepsilon)}{1.28\varepsilon} = 0.72\varepsilon \quad (18)$$

根据上述两项误差计算公式, 即可得出弹性元件非线性误差的量级, 可用于指导选取非线性补偿半导体应变计, 进行有效的线性补偿。美国专利 No3.034346 号介绍了圆柱式弹性元件的非线性补偿技术。其方法就是把一片附加的半导体电阻应变计粘贴在弹性元件上, 并与电桥电源相串连, 以这片半导体电阻应变计的输出作为反馈, 在非线性误差的反方向来调节电桥电压, 对单调变化的非线性误差加以补偿。

四、焊接密封膜片引起的非线性误差

圆柱、圆筒式结构的称重传感器, 通过环形平膜片或波纹膜片与弹性元件和外壳焊接实施密封。其焊接密封的关键是即要保证密封, 又要允许弹性元件与密封外壳之间有较小的相对运动, 此问题处理不好将产生非线性误差。因此, 必须对膜片的应用、性质和制造方法进行理论和应用研究。

圆柱、圆筒式称重传感器的外壳材料必须与弹性元件材料具有相同的线膨胀系数或采用与弹性元件相同的材料, 防止环境温度变化时, 由于超静定结构变形不协调而产生内应力。因为外壳尺寸

改变导致密封腔内气体压力变化，致使膜片承受的内外压力差改变，引起称重传感器的温度漂移。因此需要考虑温度补偿方法，主要是温度变化时，要求波纹膜片对内应力和外壳的内外压差有调节功能。

波纹膜片是一种压有同心折皱的圆形薄板，为便于和弹性元件、密封外壳焊接在一起，在膜片中央和外圆周边须留下一光滑部分，并弯成 $h=2\text{mm}$ 高的直角边，便于焊接密封，波纹膜片的结构如图 3 所示。

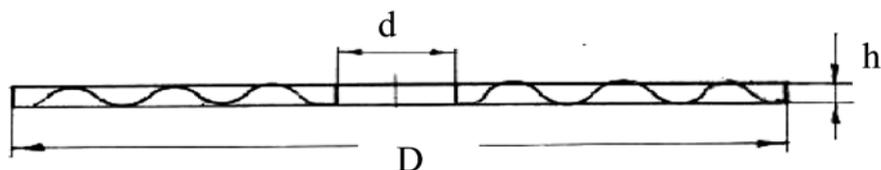


图 3 波纹膜片结构图

波纹膜片作为一种密封膜，在称重传感器弹性元件产生位移（一般为 $0.2 \sim 0.5\text{mm}$ ）时，其挠度可以补偿此位移，并基本保持固有的弹性性能。波纹膜片折皱的深度和形状，即膜片表面的波纹，可以设计成多种多样结构，有正弦波纹、圆形波纹、梯形波纹、锐角波纹等，其波纹形状如图 4 所示。

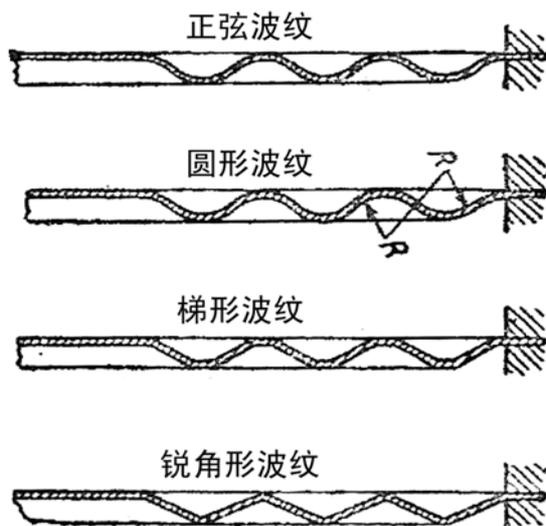


图 4 波纹膜片各种波纹示意图

如果波纹膜片沿中心和周界固定，而又在中心产生一定的位移时，根据此位移的数值就能确定作用力的大小。一般多根据位移或力与挠度之间的关系进行选择，但波纹小的膜片具有明显的非线性特征，且膜片的刚度随同其挠度的增大而增大。随着膜片波纹深度的减小，膜片的性质就接近于普通平簿板，完全没有波纹膜片刚度小、能过分弯曲的特征。与平板膜片相比，将波纹膜片周边弯

成 2mm 高的直角边，对波纹膜片的特性无明显影响，可保证其有足够的挠度适应称重传感器弹性元件的变形。波纹的波数、间距、从波纹部分到中心和周边光滑部分的过度方式等问题，尚无试验研究，总之尽量短小即可。

以圆柱式称重传感器上膜片为例进行简易计算：

弹性元件承受压向载荷作用时，产生轴向位移，此位移就是膜片的中心挠度 f_0 ，可用下式表示

$$f_0 = \frac{3(1-\mu^2)R^4}{16Eh^3}P \quad (19)$$

膜片中心所受力为

$$P = \frac{16Ef_0h^3}{3(1-\mu^2)R^4} \quad (20)$$

膜片的厚度为

$$h = \sqrt[3]{\frac{3P(1-\mu^2)R^4}{16Ef_0}} \quad (21)$$

利用此公式计算出膜片厚度只是理论值，必须经试验测试后才能确定是否满足补偿要求。

焊接膜片造成的非线性，是分路负荷及膜片非线性的函数。它取决于膜片的偏位（即与圆柱式弹性元件和外壳的同心度偏差），以及膜片中心固定处与周边固定处之间的高度差。若膜片的偏位为零，并且分路载荷较小，其综合非线性误差 e_c 近似为

$$e_c = \frac{P_{sh}}{P_L} e_d \quad (22)$$

式中： P_L —总载荷；

P_{sh} —膜片分掉的分路载荷；

e_d —膜片非线性。

调节膜片的偏位，可以补偿弹性元件的正或负非线性误差，但必须选择合适的膜片厚度。适宜的厚度和偏位，是优良的非线性补偿和低的分路载荷间的一种折衷方案。上述方程表明了此种折衷考虑，因为对于厚膜片非线性误差 e_d 小而膜片分掉的分路载荷 P_{sh} 大，对于薄面片正好相反是非线性误差 e_d 大，而膜片分掉的分路载荷 P_{sh} 小。

有些企业，圆柱、圆筒式称重传感器密封膜片的焊接作业，是在弹性元件非线性补偿工艺完成后进行，这对波纹膜片的设计和焊接工艺要求更高，必须保证焊接后密封波纹膜片不影响非线性补偿精度和输出灵敏度。

五、圆柱、圆筒式称重传感器的旋转（方位）误差

圆柱、圆筒式称重传感器的理想输出应与环绕其轴线旋转的水平方位角无关，但通常并非如此，因旋转而引起的误差可能是很显著的。这种误差，一般是由于弹性元件承受了不希望有的载荷分量（诸如侧向载荷及弯曲力矩）而造成的。此类旋转误差是电阻应变计本身及其在弹性元件上粘贴部位（定位误差）所产生的附加非测量应变量的函数。

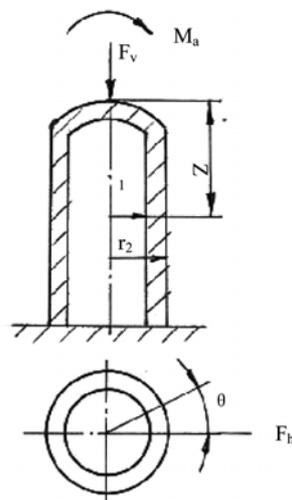


图5 圆筒式弹性元件力学模型

现以圆筒式称重传感器为例分析旋转误差，其力学模型如图5所示。

圆筒式弹性元件粘贴有两片轴向（ ε_1 、 ε_3 ）和两片环向（ ε_2 、 ε_4 ）电阻应变计，组成惠斯通全桥电路。

设轴向坐标为 Z ，周向转角为 θ ，则应力张量的形式为：

$$\begin{vmatrix} \sigma_{\theta\theta} & \sigma_{\theta Z} \\ \sigma_{\theta Z} & \sigma_{ZZ} \end{vmatrix} \quad (23)$$

这说明只存在周向应力 $\sigma_{\theta\theta}$ 、纵向应力 σ_{ZZ} 和剪应力 $\sigma_{\theta Z}$ 。在理想加载时，圆筒式称重传感器只承受均匀的压缩应力 σ_{ZZ} ，而周向应力 $\sigma_{\theta\theta}$ 和剪应力 $\sigma_{\theta Z}$ 则是由非轴向载荷和内压力产生的，其应变分布与以弹性模量 E 和泊松比 μ 计算的应力场有关，即：

$$\eta = \begin{vmatrix} \sigma_{\theta\theta} & \sigma_{\theta Z} \\ \sigma_{\theta Z} & \sigma_{ZZ} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{\sigma_{\theta\theta}}{E} - \mu \frac{\sigma_{ZZ}}{E} & \frac{1+\mu}{E} \sigma_{\theta Z} \\ \frac{1+\mu}{E} \sigma_{\theta Z} & \frac{\sigma_{ZZ}}{E} - \mu \frac{\sigma_{\theta\theta}}{E} \end{vmatrix} \quad (24)$$

圆筒式弹性元件外表面的轴向和环向应力计算公式如下：

轴向应力：

$$\sigma_{zz} = -\left(\frac{F_v}{\pi(r_2^2 - r_1^2)}\right) + \frac{Mr_2}{J} \cos\theta \quad (25)$$

式中：M—弯矩

$$M = M_a - F_h Z \quad (26)$$

J—惯性矩

$$J = \frac{\pi}{64}(r_2^4 - r_1^4)$$

环向应力：

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{2Pr_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \quad (27)$$

式中 P—内压力

以理想的方式对圆筒式弹性元件加荷时，施加在弹性元件上的载荷 F_v 等于轴向载荷 F ，即：

$$F_v = F \quad (28)$$

而侧向力 F_h 、弯矩 M_a 和内压力 P 均为零，则应变矩阵变为

$$\varepsilon = \begin{vmatrix} -\mu \frac{\sigma_{zz}}{E} & 0 \\ 0 & \frac{\sigma_{zz}}{E} \end{vmatrix} \quad (29)$$

式中：

$$\sigma_{zz} = \frac{4F}{\pi(r_2^2 - r_1^2)} \quad (30)$$

轴向电阻应变计测量的正应变（轴向应变） $-\frac{\sigma_{zz}}{E}$ ，横向电阻应变计测量的泊松应变（环向应

变） $\mu \frac{\sigma_{zz}}{E}$ ，其电桥输出灵敏度 S 为

$$S = \frac{U_0}{U_i} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \quad (31)$$

$$R_i = R_0 (1 + k\varepsilon_i) \quad (32)$$

式中：k—电阻应变计灵敏系数；

ε_i —第 i 片电阻应变计的应变变量；

R_0 —未发生应变时电阻应变计的电阻值；

R_i —第 i 片电阻应变计发生应变 ε_i 时的电阻值。

将方程 (31) 改写为

$$S = \frac{U_0}{U_i} = \frac{1+k\varepsilon_1}{2+k(\varepsilon_1+\varepsilon_2)} + \frac{1+k\varepsilon_4}{2+k(\varepsilon_{31}+\varepsilon_4)} \quad (33)$$

式中：

轴向应变为

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_3 = -\frac{\sigma_{1,3}}{E} \quad (34)$$

环向应变为

$$\varepsilon_4 = \varepsilon_2 = \frac{\mu\sigma_{4,2}}{E} \quad (35)$$

因而

$$\begin{aligned} S &= \frac{U_0}{U_i} = -\frac{1+k\left(-\frac{\mu\sigma_1}{E}\right)}{2+k\left(\frac{\sigma_1}{E}-\frac{\mu\sigma_2}{E}\right)} + \frac{1+k\left(\frac{\sigma_4}{E}\right)}{2+k\left(\frac{\sigma_3}{E}-\frac{\mu\sigma_4}{E}\right)} \\ &= -\frac{\frac{E}{k}-\mu\sigma_1}{\frac{2E}{k}+\sigma_1-\mu\sigma_2} + \frac{\frac{E}{k}+\sigma_4}{\frac{2E}{k}+\sigma_3-\mu\sigma_4} \end{aligned} \quad (36)$$

在理想情况下

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_4 = \frac{4F}{\pi(r_2^2 - r_1^2)} \equiv \sigma \quad (37)$$

则 (36) 式变为

$$S = \frac{U_0}{U_i} = \frac{(1+\mu)\sigma}{\frac{2E}{k}+(1-\mu)\sigma} \quad (38)$$

在这种理想的加荷条件下，称重传感器不发生旋转效应，但是对于圆柱、圆筒式弹性元件根本作不到这一点。当圆柱、圆筒式弹性元件的侧向力 F_h 、弯矩 M_a 不为零时，将产生旋转误差。如果

电阻应变计围绕圆柱、圆筒式弹性元件周围相隔 90° 粘贴且 Z 为常量, 各片电阻应变计的自身轴线与弹性元件的轴线和环线无偏转, 则称重传感器的旋转误差可以减至最小。此时由弯矩和侧向载荷产生的附加应力及相应的应变, 就可以通过合理的组桥加以有效的消除。

六、结语

本文已经阐明了圆柱、圆筒式弹性元件面积效应产生的非线性误差, 泊松比效应致使电桥内某一桥臂电阻的变化与相邻桥臂电阻的反向变化不匹配所引起的电桥非线性误差, 电阻应变计定位偏差造成的旋转误差。基于数学分析和数学模型的系统方法得出的计算公式, 能用来识别和定量的预测相关误差, 并可应用于高准确度称重传感器旋转加荷误差的计算, 电阻应变计定位误差控制, 指导圆柱、圆筒式弹性元件及加载压头、承载底垫设计, 以达到既确保能消除来自加力源头的不希望有的载荷及弯矩等影响, 又确保能通过电桥电路得到非线性补偿。

近年来, 称重传感器设计与计算的一个重要发展方向, 就是把数学分析和建立计算机模型, 应用于弹性元件及其附件设计中, 即在理论分析指导下进行结构设计, 在计算机动态仿真和试验测量基础上确定最佳设计。这就是传统设计理论的延伸、思维方法的改变, 多种设计技术、理论与方法的综合, 其特点是: 设计手段精确化、计算机化和虚拟化。

参考文献

1. VISHAY INTERTECHNOLOGY, INC. 电桥非线性所引起的误差 [R]. 测量集团技术评论, 第 TN - 507 号。
2. F. Abdullah, U. Erdem, M. K. Mirza, 王键、王志正译. 高精度力传感器的线性和加荷误差 [C]. IMEKO TC-3 测力与称重技术论文集, 1982 年, 166 ~ 169 页。
3. 刘九卿. 电阻应变式称重传感器 [M]. 中国衡器协会专业技术培训教材, 2006 年 12 月。
4. 费奥多谢夫著, 卢文达、熊大樟译. 精密仪器弹性元件的理论与计算 [M]. 科学出版社, 1963 年。

作者简介

刘九卿 (1936.01), 男 (汉族), 辽宁省海城, 研究员, 享受国家特殊津贴专家。在职期间从事各类型号运载火箭结构强度试验应力分析等工作, 现为中国衡器协会技术专家委员会顾问, 《衡器》杂志编委。

(作者通讯地址: 北京市丰台区桃源里小区 11 号楼 2 单元 6 号, 邮政编码: 100076, 电话: 010-68384219, Email: ht.liu0909@yahoo.com.cn)