

# 电阻应变计粘贴在弹性元件上的定位误差分析

中国运载火箭技术研究院第 702 研究所 刘九卿

**【摘要】**本文分析了电阻应变计粘贴在称重传感器弹性元件上，由于各种原因定位不准确，造成对称或反对称粘贴的电阻应变计所感受的应变变量有较大差异，引起电桥输出的非线性误差。为确定和控制此类误差，以轮辐式弹性元件上粘帖单剪切电阻应变计为例，通过建立数学模型分析了电阻应变计的定位误差影响，推导出电桥输出非线性误差计算公式。其结论是电阻应变计在弹性元件上的定位误差，应以电阻应变计的应变变量变化不大于 5% 为条件。

**【关键词】**称重传感器；弹性元件；数学模型；电阻应变计；应变变量；定位误差

## 一、概述

任何种类的电阻应变计都有一定的敏感栅和基底尺寸，所以电阻应变计粘帖（定位）在称重传感器弹性元件应变区设定的位置，例如应变梁的中点、应变区盲孔腹板的中心等仅仅是一种假设。因此，一定尺寸的电阻应变计粘帖在弹性元件上，必须定量的知道应变区内的定位误差。此误差的主要影响是各电阻应变计感受的应变变量不完全相等，甚至产生较大的差异。这种感受应变变量的差异，反应到称重传感器电桥电路，即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，而引起电桥输出的非线性误差。特别是双孔平行梁称重传感器，对电阻应变计的定位公差要求十分严格，如出现电阻应变计沿平行梁中心线偏转、平移或两者兼而有之，不但产生非线性误差而且还产生较大的偏载误差，因此必须严格控制电阻应变计的定位误差。

## 二、电阻应变计定位误差分析

现以在轮辐式弹性元件上粘帖单剪切电阻应变计为例，分析定位误差影响。一定尺寸敏感栅长度、宽度的电阻应变计粘帖在弹性元件应变区上，必须定量的知道：

- (1) 电阻应变计能够感受到多大百分比的理论最大应变值？
- (2) 电阻应变计允许多大的定位公差？

轮辐式称重传感器弹性元件结构和单剪切电阻应变计粘帖位置如图 1 所示。

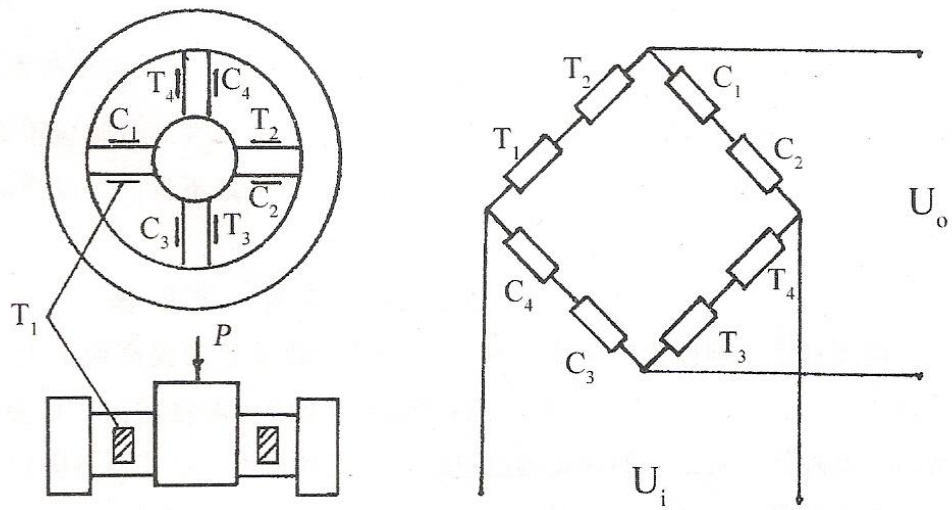


图 1 轮辐式弹性元件电阻应变计粘贴位置

图 1 中  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 、 $T_4$  为测量正应变的单剪切电阻应变计； $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 、 $C_4$  为测量负应变的单剪切电阻应变计。将应变方向相同的两片电阻应变计串联共组成四个桥臂，即

$$\begin{aligned}
 R_1 &= T_1 + T_2 \\
 R_2 &= C_1 + C_2 \\
 R_3 &= T_3 + T_4 \\
 R_4 &= C_3 + C_4
 \end{aligned} \tag{1}$$

在求电桥的输出电压时，由于输出端是与直流放大器连接，而直流放大器的输入端电阻  $R_0$  比电桥电阻大得多。为此可将电桥的输出端看成是开路情况，即  $R_0 = \infty$ ，这种电桥称为电压输出桥。利用欧姆定律和克希霍夫定律，得

$$U_0 = I_1 R_1 - I_2 R_4$$

因为

$$I_1 = \frac{U_i}{R_1 + R_2} \quad I_2 = \frac{U_i}{R_3 + R_4}$$

所以

$$U_0 = I_1 R_1 - I_2 R_4 = \frac{R_1 U_i}{R_1 + R_2} - \frac{R_4 U_i}{R_3 + R_4}$$

则电桥的相对输出为

$$\frac{U_0}{U_i} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \tag{2}$$

将式 (1) 代入式 (2), 得

$$\frac{U_0}{U_i} = \frac{T_1 + T_2}{T_1 + T_2 + C_1 + C_2} - \frac{C_3 + C_4}{T_3 + T_4 + C_3 + C_4} \quad (3)$$

设各电阻应变计具有相同的电阻值  $R$ , 相同的灵敏系数  $K$ , 在外载荷作用下轮辐产生变形, 电阻  $R$  变化了  $\Delta R$ 。

$$\text{因} \quad K = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta L}{L}} = \frac{\Delta R}{\varepsilon R} = \frac{\Delta R}{\varepsilon R}$$

$$\Delta R = KR\varepsilon$$

$$\text{则} \quad T_i = R + \Delta R = R(1 + K\varepsilon_{Ti}) \quad (4)$$

$$C_i = R - \Delta R = R(1 - K\varepsilon_{Ci}) \quad (5)$$

式中  $\varepsilon_{Ti}$ ,  $\varepsilon_{Ci}$  为各电阻应变计 ( $i=1, 2, 3, 4$ ) 的应变值。将式 (4)、(5) 代入式 (3), 得

$$\frac{U_0}{U_i} = \frac{2 + K(\varepsilon_{T1} + \varepsilon_{T2})}{4 + K(\varepsilon_{T1} + \varepsilon_{T2} - \varepsilon_{C1} - \varepsilon_{C2})} - \frac{2 - K(\varepsilon_{C3} + \varepsilon_{C4})}{4 + K(\varepsilon_{T3} + \varepsilon_{T4} - \varepsilon_{C3} - \varepsilon_{C4})} \quad (6)$$

当电桥电路中各电阻应变计的应变值绝对值均相等时, 即

$$\varepsilon_{Ti} = \varepsilon_{Ci} = \varepsilon$$

则式 (6) 变为

$$\frac{U_0}{U_i} = \frac{2 + 2K\varepsilon}{4} - \frac{2 - 2K\varepsilon}{4} = K\varepsilon \quad (7)$$

由于作用在轮辐式弹性元件上的载荷与各电阻应变计的应变值成正比, 从式 (16) 可以看出称重传感器无非线性误差。

当组成电桥各桥臂的电阻应变计, 因搭配不当或出现较大的定位误差造成应变值不同时, 就会产生非线性误差。此时应变值的绝对值为:

$$T_i = C_i = \varepsilon (1 \pm \delta) \quad (8)$$

式中  $\delta$  为各电阻应变计应变值的偏差, 设其为一小于 1 的变量, 并假定是出现所有误差都叠加起来的最坏情况。

将式 (8) 代入式 (3), 得

$$\begin{aligned} \frac{U_0}{U_i} &= \frac{2+2K\varepsilon(1\pm\delta)}{4\pm 4K\varepsilon\delta} - \frac{2-2K\varepsilon(1\pm\delta)}{4\pm 4K\varepsilon\delta} \\ &= \frac{4K\varepsilon(1\pm\delta)}{4\pm 4K\varepsilon\delta} = \frac{K\varepsilon(1\pm\delta)}{1\pm K\varepsilon\delta} \end{aligned} \quad (9)$$

将式 (9) 分子、分母同乘以  $(1\pm K\varepsilon\delta)$ ，则

$$\frac{U_0}{U_i} = \frac{K\varepsilon(1\pm\delta)(1\pm K\varepsilon\delta)}{(1\pm K\varepsilon\delta)(1\pm K\varepsilon\delta)} = \frac{K\varepsilon(1\pm K\varepsilon\delta\pm\delta\pm K\varepsilon\delta^2)}{1-(K\varepsilon\delta)^2}$$

略去  $\delta^2$  项和高次项，得

$$\frac{U_0}{U_i} = K\varepsilon(1\pm\delta\pm K\varepsilon\delta) \quad (10)$$

采用端点连线法拟合的非线性误差为：

$$\frac{\Delta U_c}{U_0} = \pm K\varepsilon\delta \quad (11)$$

采用最佳拟合直线（相当 75% 载荷点连线）法的非线性误差为：

$$\frac{\Delta U_s}{U_0} = \pm \frac{K\varepsilon\delta}{2} \quad (12)$$

式中： $\Delta U_c$ —端点连线法拟合的最大偏差；

$\Delta U_s$ —最佳拟合直线（相当 75% 载荷点连线）法的最大偏差；

$U_0$ —额定输出。

### 三、电阻应变计定位误差结论

利用采取最佳拟合直线（相当 75% 载荷点连线）法得到的称重传感器非线性误差计算公式，分析电阻应变计在弹性元件上的定位误差。如果电阻应变计定位偏差使其感受的应变量为 5%，即  $\delta = 0.05$ ，以灵敏度为 2mv/v 的称重传感器为例，其最大应变量为  $\varepsilon = 1000 \times 10^{-6} = 10^{-3}$ ，电阻应变计灵敏系数  $K=2.0$  时，电桥输出的非线性误差为：

$$\frac{\Delta U_s}{U_0} = \pm \frac{K\varepsilon\delta}{2} = \pm \frac{2 \times 10^{-3} \times 0.05}{2} = \pm 5 \times 10^{-5} = \pm 0.005\%$$

由于各种原因使电阻应变计感受的应变量为 5% 的偏差，这应该是可能产生的最大偏差。它对称重传感器非线性误差的影响量为 0.005%。由此不难看出结论：粘贴在弹性元件应变区设定位置的电阻应变计，其定位偏差应以感受的应

变量变化不大于 5%为条件。

#### 参考文献

【1】F. Abdullah, U. Erdem (英国):. Mathematical Modelling and Design of a Shear Force Load Cell Transducer [M]. VDI—Berichte Nr312, 1987。

【2】В . А . Годзиковский (前苏联)、夏德英译. 应变式测力传感器剪切弹性元件结构的概述与分析 [J]. 试验技术, 1989 年第 2 期。

【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, 2007 年。