

# 称重传感器非线性误差及其线性补偿技术

中国运载火箭技术研究院第 702 研究所 刘九卿

【摘要】任何电阻应变式称重传感器，最重要的机械部分通常是弹性元件，其功能是对作用载荷的反作用，同时把载荷的作用集中于一个均匀的应变场内，使载荷  $P$  和应变  $\varepsilon$  成线性关系。但有些弹性元件结构并非如此，需要得非线性误差进行线性补偿。本文推算了固有线性较差的方柱式、圆柱式、小量程悬臂梁式弹性元件的非线性误差。介绍了在称重传感器内部，采用半导体应变计、镍箔电阻应变计和专用集成电路模块进行的线性补偿方法。简要分析了在称重传感器外部，利用弹性元件本身结构和安装状态实施的线性补偿方法。

【关键词】称重传感器；弹性元件；悬臂梁；固有线性；非线性误差；线性补偿

## 一、概述

电阻应变式称重传感器（以下简称为称重传感器）的弹性元件结构设计是否科学合理，将直接影响非线性、滞后、蠕变等主要技术性能指标以及应用过程中的稳定性和可靠性。称重传感器最重要的机械部分是弹性元件，一般的说，弹性元件的功能是对作用载荷的反作用，同时把载荷的作用集中于一个独立的、均匀的应变场内即应变区，以便粘贴电阻应变计进行应变——电阻转换。理想称重传感器的特点应当是载荷  $P$  和应变  $\varepsilon$  成较严格的线性关系，达到此种目标正是所有称重传感器弹性元件设计的中心所在。完成这一任务的困难在于结构与计算上和一些经济上的限制，只有遵循称重传感器研制、生产规律和弹性元件结构及边界设计原则，才能同时解决上述限制，克服各种因素的综合影响，设计出技术性能好且波动最小的弹性元件。

设计实践证明，对于普通准确度等级的称重传感器，可以简单的认为载荷  $P$  与弹性元件应变区的应变  $\varepsilon$  成线性关系，因此用材料力学、结构力学的一般计算方法，就可以求得比较精确的计算结果。但是对于较高准确度等级的称重传感器，运用同样的设计与计算方法就不一定满足要求。严格的说，称重传感器承受的载荷  $P$  与弹性元件应变区的应变  $\varepsilon$  的转换关系也是非线性的。引起非线性的因素很多，诸如弹性元件材料的非线性；弹性元件与引入载荷的压头、承受载荷的底垫之间不稳定的摩擦力；局部应力集中干扰应变区；弹性元件在载荷作用下几何尺寸改变和受力点、力臂变化等。前者可以通过正确选择弹性元件的金属材料，合理选用热处理工艺，引入载荷的压头、承受载荷的底垫采用无摩擦设计，避免弹性元件应变区以外有最高应力点和减少应力集中等加以解决。后者为弹性元件面积效应和泊松比效应影响，弹性元件受载后几何尺寸改变或受力点、力臂变化引起可逆的有规律的非线性误差，必须通过线性补偿加以解决。称重传感器的线性补偿除在其内部利用半导体或镍箔应变计进行补偿外，还可以在其外部利用弹性元件自身结构和安装状态进行补偿。

## 二、柱式、悬臂梁式弹性元件的非线性误差

### 1. 柱式弹性元件的非线性误差

柱式弹性元件以方柱、圆柱最具代表性，在载荷  $P$  作用下，应变区轴向应变  $\varepsilon_0$  的简易计算公式为：

$$\text{方柱} \quad \varepsilon_0 = \frac{P}{a^2 E}, \quad \text{圆柱} \quad \varepsilon_0 = \frac{P}{\pi r^2 E} \quad (1)$$

式中：a—方柱弹性元件应变区截面边长；

r—圆柱弹性元件应变区半径；

E—弹性元件材料的弹性模量。

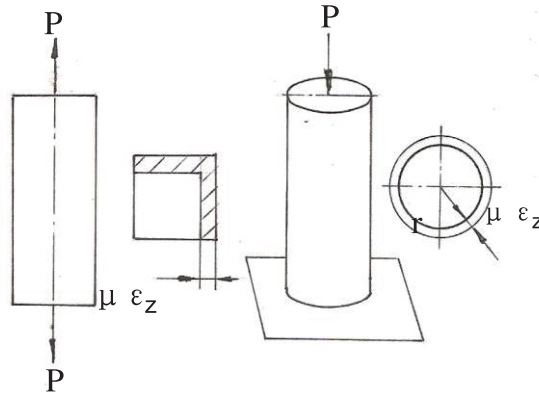


图 1 方柱、圆柱式弹性元件横截面变化图

#### (1) 方柱式弹性元件的非线性误差

对方柱式弹性元件进行精确计算时，必须考虑弹性元件材料泊松比  $\mu$  对横截面的影响。设方柱式弹性元件在承受拉向载荷  $P$  时，横截面边长减少  $\mu \varepsilon_z$ ，卸载后横截面变化如图 1 所示。其横截面的面积变化  $\Delta A$  为：

$$\Delta A = a^2 - (a - \mu \varepsilon_z)^2 = 2a\mu \varepsilon_z - \mu^2 \varepsilon_z^2$$

略去高次项，得 
$$\Delta A = 2a\mu \varepsilon_z$$

卸载后的截面积为：

$$A = A_0 - \Delta A = a^2 - 2a\mu \varepsilon_z \approx a^2 (1 - 2\mu \varepsilon_z)$$

因为 
$$A = \frac{P}{\varepsilon_z E}$$

所以 
$$\frac{P}{\varepsilon_z E} = a^2 (1 - 2\mu \varepsilon_z)$$

则 
$$P = \varepsilon_z E a^2 (1 - 2\mu \varepsilon_z) \quad (2)$$

将式 (1) 代入式 (2) 得

$$a^2 E \varepsilon_0 = \varepsilon_z E a^2 (1 - 2\mu \varepsilon_z)$$

经计算整理

$$\varepsilon_z^2 - \frac{\varepsilon_z}{2\mu} + \frac{\varepsilon_0}{2\mu} = 0 \quad (3)$$

解方程式 (3), 得

$$\varepsilon_z = \frac{1}{4\mu} \pm \sqrt{\frac{1}{16\mu^2} - \frac{\varepsilon_0}{2\mu}} \approx \varepsilon_0 + 2\mu\varepsilon_0^2 \quad (4)$$

非线性度为:

$$\eta(\varepsilon) = \frac{\varepsilon_z - \varepsilon_0}{\varepsilon_0} = \frac{(\varepsilon_0 + 2\mu\varepsilon_0^2) - \varepsilon_0}{\varepsilon_0} = 2\mu\varepsilon_0 \quad (5)$$

## (2) 圆柱式弹性元件的非线性误差

同样, 圆柱式弹性元件精确计算时, 也需要考虑金属材料泊松比  $\mu$  对横截面的影响, 其应变区截面积变化如图 1 所示。若圆柱式弹性元件承受压向载荷  $P$ , 因半径的增加而使应变区截面积产生增量, 其径向应变  $\varepsilon_r = \mu \varepsilon_z$  可视为半径  $r$  的增量, 则

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

略去高次项, 得  $\Delta A = 2\pi r \mu \varepsilon_z$

受载后的截面积为:

$$A = A_0 + \Delta A = \pi r^2 + 2\pi r \mu \varepsilon_z \approx \pi r^2 (1 + 2\mu\varepsilon_z)$$

因为  $A = \frac{P}{\varepsilon_z E}$

所以  $\frac{P}{\varepsilon_z E} = \pi r^2 (1 + 2\mu\varepsilon_z)$

则  $P = \varepsilon_z E \pi r^2 (1 + 2\mu\varepsilon_z) \quad (6)$

将式 (1) 代入式 (6) 得

$$\pi r^2 E \varepsilon_0 = \varepsilon_z E \pi r^2 (1 + 2\mu\varepsilon_z)$$

经计算整理

$$\varepsilon_z^2 + \frac{\varepsilon_z}{2\mu} - \frac{\varepsilon_0}{2\mu} = 0 \quad (7)$$

解方程式 (7), 得

$$\varepsilon_z \approx \varepsilon_0 - 2\mu\varepsilon_0^2 \quad (8)$$

非线性度为:

$$\eta(\varepsilon) = \frac{\varepsilon_z - \varepsilon_0}{\varepsilon_0} = \frac{(\varepsilon_0 - 2\mu\varepsilon_0^2) - \varepsilon_0}{\varepsilon_0} = -2\mu\varepsilon_0 \quad (9)$$

式 (9) 证明, 圆柱式弹性元件的非线性度与方柱相同, 同为  $2\mu\varepsilon_0$ , 只是承受拉伸和压缩载荷时符号相反。

## 2. 悬臂梁弹性元件的非线性误差

利用弯曲应力的悬臂梁弹性元件, 适合小量程称重传感器, 其弯曲应变  $\varepsilon_0$  为:

$$\varepsilon_0 = \frac{6PL}{Ebh^2} \quad (10)$$

端部挠度  $f_B$  为:

$$f_B = \frac{4PL^3}{Ebh^3} \quad (11)$$

端截面转角  $\theta_B$ :

$$\theta_B = \frac{6PL^2}{Ebh^3} \quad (12)$$

式中: P—悬臂梁弹性元件承受的载荷;

L—悬臂梁弹性元件长度;

b—悬臂梁弹性元件宽度;

h—悬臂梁弹性元件高度。

E—悬臂梁弹性元件材料的弹性模量。

当需要进行精确计算时, 必须考虑悬臂梁弹性元件受载后力臂 L 的增量  $\Delta L$ , 它是引起悬臂梁弹性元件非线性误差的主要原因。悬臂梁弹性元件受载后的变形如图 2 所示。

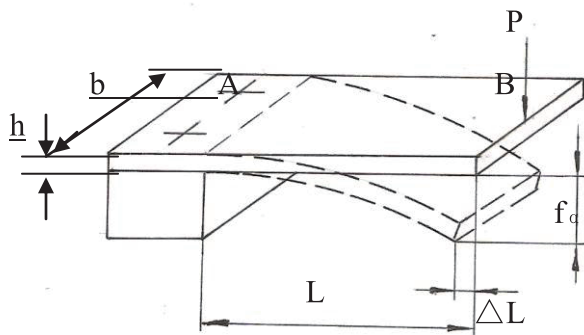


图 2 悬臂梁弹性元件受载变形简图

假定悬臂梁弹性元件中心轴在受载后长度不变，悬臂端受载后的挠度，即梁的水平位移 $\Delta L$ 为

$$\Delta L = \int_0^L Y'^2 dX$$

悬臂梁弹性元件挠曲方程为：

$$Y = \frac{-PL^3}{6EJ} \left( 3 \times \frac{X^2}{L^2} - \frac{X^3}{L^3} \right) \quad (13)$$

式(13)的导数为：

$$Y' = \frac{-PL^3}{6EJ} \left( 6 \times \frac{X}{L^2} - \frac{3X^2}{L^3} \right) = \frac{-PL}{EJ} \left( X - \frac{X^2}{2L} \right)$$

则

$$\Delta L = \frac{1}{2} \left( \frac{-PL}{EJ} \right)^2 \int_0^L \left( X - \frac{X^2}{2L} \right)^2 dX = \frac{3}{5L} \left( \frac{PL^3}{3EJ} \right)^2 = \frac{3}{5} \cdot \frac{f_B^2}{L} \quad (14)$$

悬臂梁弹性元件力臂变化后，应变区的应变值为：

$$\varepsilon_z = \frac{6PL}{Ebh^2} \left( 1 - \frac{3f_B^2}{5L} \right) = \frac{6PL}{Ebh^2} \left( 1 - \frac{48}{5} \cdot \frac{P^2 L^5}{E^2 b^2 h^6} \right) \quad (15)$$

悬臂梁弹性元件的非线性误差为：

$$\eta(\varepsilon) = \frac{\varepsilon_z - \varepsilon_0}{\varepsilon_0} = -\frac{48P^2 L^5}{5E^2 b^2 h^6} \quad (16)$$

### 三、在称重传感器内部进行线性补偿

#### 1. 利用半导体应变计的线性补偿

在圆柱式弹性元件应变区内位于电阻应变计的上方，沿轴线方向对称的粘贴2片线性补偿半导体应变计RL，并将其串联在电桥的供桥电路中。线性补偿半导体应变计的粘贴位置如图6所示，线性补偿电路如图7所示。

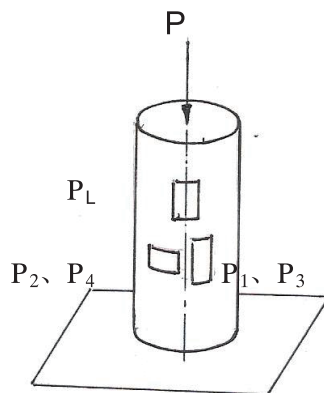


图6 线性补偿半导体应变计粘贴位置

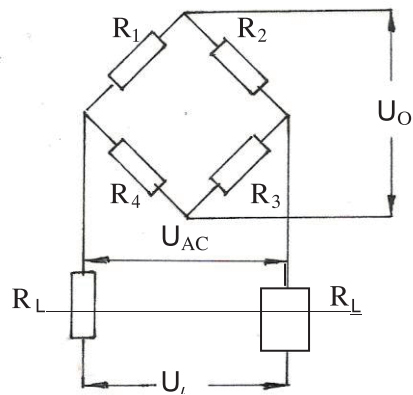


图 7 线性补偿电路图

当圆柱式弹性元件承受压向载荷时，线性补偿半导体应变计因承受压向应变而使电阻值减小。电桥的供桥电压  $U_i$  恒定不变，根据电阻分压原理，补偿电阻  $R_L$  减小，使得电桥的实际供桥电压  $U_{AC}$  增大。随着外载荷逐渐增大，补偿电阻  $R_L$  不断减小，实际供桥电压  $U_{AC}$  不断增加，使电桥输出呈递增的抛物线。由前面的分析知，圆柱式称重传感器的非线性误差是递减的抛物线。线性补偿后，电桥输出的递减和递增互补，而使实际输出近似为直线，达到线性补偿的目的。

从理论上讲，任何电阻应变计都可以用做线性补偿，但一般电阻应变计的灵敏系数太小，线性补偿作用极不明显。荷兰 TNO 机械科学研究院在对称重传感器进行线性补偿时，发现线性补偿电阻  $R_L$  与其灵敏系数  $K_L$  存在下列关系：

$$R_L = \frac{R}{0.26K_L - 1} \quad (17)$$

式中  $R$  为桥臂电阻值。从式 (17) 可以看出，为了得到尽量小的线性补偿电阻  $R_L$ ，就必须选择尽量大的灵敏系数  $K_L$ 。大灵敏系数并能用于称重传感器线性补偿的只有半导体应变计，其灵敏系数为 67 ~ 177，这就是选择半导体应变计作为线性补偿电阻的原因。

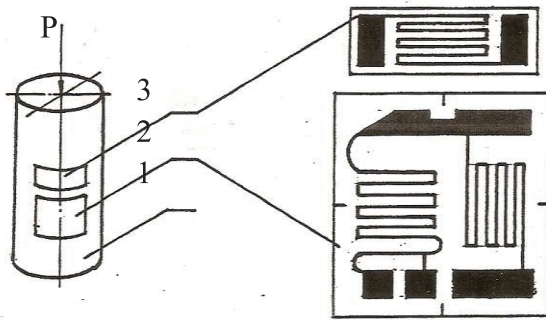
为了提高圆柱式称重传感器的线性补偿精度，在线性补偿电阻  $R_L$  上并联一个线性补偿精调电阻  $R'_L$ ，其电阻值大小由线性补偿试验测量决定，多采用精度高、温度系数小的金属膜电阻。为使电桥电路对称，提高抗干扰能力，线性补偿电阻应变计  $R_L$  及其并联精调电阻 均应一分为二，对称的焊入电桥供桥回路的两侧。

半导体应变计线性补偿的特点是补偿电阻值小，补偿范围广，补偿精度高。但半导体应变计电阻温度系数较大，其灵敏系数  $K_L$  的温度系数  $\rho = -0.33\% / ^\circ\text{C}$ ，电阻温度系数为  $\phi = 0.2\% / ^\circ\text{C}$ ，故线性化程度也是温度的函数。因此，必须通过选取不同的半导体应变计加以防止或降低它的影响。经过计算得出，克服半导体应变计温度影响必须满足系列条件：

$$\rho - \frac{\phi}{2} = 0 \quad (18)$$

## 2. 利用镍箔电阻应变计的线性补偿

为了克服半导体应变计温度性能差对线性补偿的影响，也可以选用镍箔电阻应变计作为线性补偿电阻  $R_L$ 。由于镍箔电阻应变计的灵敏系数为负值  $K_L = -12 \sim -20$ ，为了达到与半导体应变计相同的线性补偿效果，即圆柱式弹性元件在压向载荷增加时，镍箔电阻应变计的电阻值减小。对于负灵敏系数的镍箔电阻应变计，只有承受拉伸变形电阻值才减小，因此沿圆柱式弹性元件的环向对称粘贴，并将镍箔线性补偿电阻应变计  $R_L$  焊入电桥的供桥电路中。圆柱式称重传感器通常采用特制的组合式电阻应变计，其电阻值  $R = 600\Omega$ ，20t、50t、100t 圆柱式弹性元件线性补偿电阻  $R_L$  在  $78\Omega \sim 82\Omega$  之间。线性补偿镍箔电阻应变计及组合式工作电阻应变计粘贴位置如图 8 所示。



1—弹性元件 2—工作电阻应变计 3—线性补偿镍箔电阻应变计

图 8 镍箔线性补偿电阻应变计及工作电阻应变计粘贴位置图

当圆柱式弹性元件受压向载荷作用时，应变区截面积增加，环向拉伸应力使镍箔电阻应变计的电阻值减小，由于电阻分压作用，实际供桥电压  $U_{AC}$  增大，导致电桥输出呈递增趋势，与非线性补偿前电桥输出呈递减趋势互补，使电桥输出近似为直线，达到线性补偿的目的。

通过对镍箔电阻应变计电阻与弹性元件应变关系曲线 ( $\Delta R - \varepsilon$  曲线) 的研究，发现在  $\pm 600\mu\varepsilon$  之间镍箔电阻应变计电阻的变化近似为直线，在  $\pm 600\mu\varepsilon$  之外  $\Delta R - \varepsilon$  曲线趋于平缓，几乎没有线性补偿效果。因此镍箔电阻应变计线性补偿，只适用于灵敏度为  $1mV/V$  的称重传感器。由于镍箔电阻应变计的灵敏系数远远小于半导体应变计，使得线性补偿电阻  $R_L$  较大，一般  $R_L$  在  $80\Omega$  左右，此电阻值正好与灵敏度温度补偿电阻  $R_M$  值相当，因此可以同时兼顾灵敏度温度补偿。

镍箔电阻应变计线性补偿方法的特点是简单易行，成本低，稳定性好；线性补偿与灵敏度温度补偿一次完成，提高了电路补偿效率。不足之处是线性补偿范围小，补偿精度与半导体应变计相比偏低，常规线性补偿精度在  $0.5\% \sim 0.3\%FS$ ，镍箔电阻应变计参与应变对称传感器的重复性、滞后和温度特性有一定影响。

## 3. 利用集成电路模块的线性补偿

在称重传感器内部安置一个专用集成电路线性补偿模块，根据实际测量的非线性误差，编写线性补偿软件，通过函数拟合的方法来有效的减小称重传感器输出信号中的非线性误差，达到提高线性度的目的。美国 STS 公司 65088 系列整体多柱型称重传感器，就是采用此种方法进行线性补偿。其特点是线性补偿范围广，精度高，稳定性好，使用寿命长，对称重传感器的重复性、滞后和温度特性影响极小，但补偿技术复杂且成本较高。

## 四、在称重传感器外部进行线性补偿

### 1. 利用柱、筒式弹性元件自身结构的线性补偿

上述分析计算说明，方柱、圆柱弹性元件在外载荷作用下，应变区横截面尺寸发生改变使得固有线性很差，必须进行线性补偿。除在传感器内部进行线性补偿外，还可以利用弹性元件自身结构进行线性补偿。其补偿方法是在称重传感器结构设计时，采用同时承受拉伸和压缩载荷的两个弹性元件，它们各有等量而且符号相反的非线性度特性。也就是说，弹性元件由拉伸、压缩两部分弹性体组成，其拉伸、压缩非线性度则由组合桥路得到补偿，两者的非线性误差相互抵消。由式（5）和式（9）可以看出承受拉伸和承受压缩载荷的弹性元件非线性误差大小相等、方向相反，两个弹性元件组合后其误差为零，即

$$\begin{aligned}\eta(\varepsilon)_{\text{组合}} &= \eta(\varepsilon)_{\text{压缩}} + \eta(\varepsilon)_{\text{拉伸}} \\ &= -2\mu\varepsilon_0 + 2\mu\varepsilon_0 = 0\end{aligned}$$

此类称重传感器的灵敏度比方柱、圆柱、圆筒式结构提高 1.54 倍。典型的结构是在正方形截面长方体的毛坯上，加工出相互对称的四个承受拉伸载荷的正方形截面应变柱和四个承受压缩载荷的正方形截面应变柱，形成同时承受拉伸和压缩载荷的整体式弹性元件，如图 9 所示。不难看出，此集成化整体结构弹性元件四个角上的正方形应变柱承受拉伸应变，四个边中心上的正方形应变柱承受压缩应变。在额定载荷作用下两者具有相同应变程度，且应变方向相反，符合组成灵敏度高的全等臂电桥，即电桥的输出为单电阻应变计测量时的 4 倍，而且还实现了温度补偿。圆柱、圆筒式压缩和拉伸两个弹性元件的称重传感器结构如图 10 所示，通常称为组合式弹性元件。内圆筒通过其上圆环压在外圆筒上部的内圆环上，在额定载荷作用下内外圆筒分别承受轴向拉伸和轴向压缩应变。在设计时，通过调整内外圆筒的壁厚使其在额定载荷作用下拉伸和压缩应变相等，由于内外圆筒均利用轴向应变，不利用受泊松比效应影响的横向应变，因此提高了称重传感器的固有线性度，与上述整体结构集成化四方柱弹性元件相同，也可以组成灵敏度高的全等臂电桥，实现了在应变式称重传感器外部进行线性补偿。

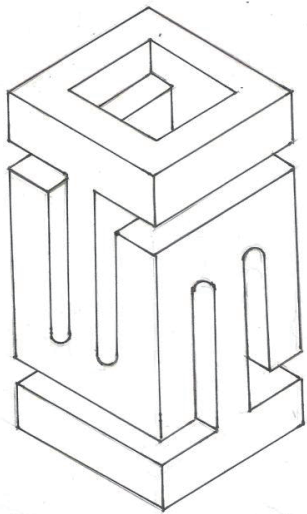


图 9 方柱式拉伸和压缩两个弹性元件示意图

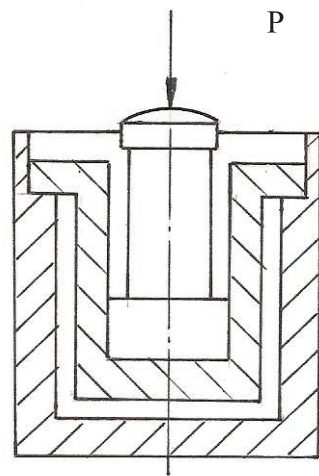


图 10 圆柱、圆筒式拉伸和压缩两个弹性元件示意图



图 10 所示两个圆筒式弹性元件，因粘贴电阻应变计需要不能设计成一个整体结构。又因为两个弹性元件的直径互不相同，故其高度与直径之比  $H/D$  差异甚大，尤其是圆筒式弹性元件的  $H/D$  值最低，这就降低了对偏心和侧向载荷的补偿能力，进行结构设计时一定要充分考虑此项影响因素。对圆柱式弹性元件一般  $H/D \geq 2 \sim 2.5$ ，弹性元件应变区的工作应力  $\sigma$  与屈服应力  $\sigma_s$  的关系为  $\sigma \leq \frac{1}{3}\sigma_s$ 。若称重传感器的量程较大时，最好在弹性元件应变区粘贴 4 组电阻应变计，从电桥电路上消除偏心和侧向载荷影响。

## 2. 利用悬臂梁弹性元件预旋转角的线性补偿

从上述分析计算不难得出，小量程悬臂梁弹性元件产生非线性误差的主要原因，就是受载后悬臂梁的长度变化引起应变区测量点的应变值变化。如果将悬臂梁弹性元件预先旋转一个与载荷作用方向相反的角度  $\alpha$ ，随着载荷的增加悬臂梁弹性元件长度的改变量越来越小，直至为零。此时悬臂梁弹性元件应变区电阻应变计测得的只是弯曲应变，没有因角度变化而产生的附加应变，使载荷  $P$  与应变  $\varepsilon$  基本呈线性关系，达到线性补偿的目的。

悬臂梁弹性元件线性补偿需要的预旋转角  $\alpha$ ，可以通过理论计算求得，经过实际试验测量确定后，按此预旋转角在称重传感器基础上安装牢固即可。值得注意的是悬臂梁弹性元件根部，一定要保证有足够的固紧力。预旋转角悬臂梁弹性元件变形示意图如图 11 所示。

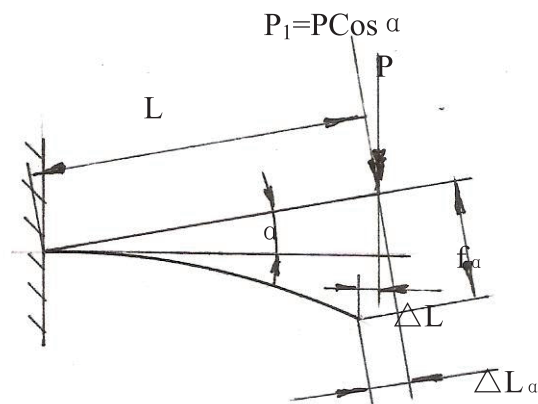


图 11 预旋转角悬臂梁弹性元件变形示意图

悬臂梁弹性元件预先旋转与载荷作用方向相反的  $\alpha$  角度后，载荷  $P$  与悬臂梁的垂直加载方向也成  $\alpha$  角。此时施加到悬臂梁弹性元件上的载荷为：

$$P_1 = P \cos \alpha$$

应变区的应变量为：

$$\varepsilon = \frac{6P_1L}{Eb^3h^2} = \frac{6PL}{Eb^3h^2} \cos \alpha$$

沿  $P_1$  方向的挠度为:

$$f_{\alpha} = \frac{4P_1L^3}{Eb^3} = \frac{4PL^3}{Eb^3} \cos \alpha$$

悬臂梁弹性元件长度变化  $\Delta L_{\alpha}$  为:

$$\Delta L_{\alpha} = \frac{3}{5} \cdot \frac{f_{\alpha}^2}{L} = \frac{48P^2L^5}{5E^2b^2h^6}$$

P 方向长度的改变量  $\Delta L$  为:

$$\begin{aligned} \Delta L &= f_{\alpha} \sin \alpha - \Delta L_{\alpha} \cos \alpha = \frac{4PL^3}{Eb^3} \cos \alpha \cdot \sin \alpha - \frac{48P^2L^5}{5E^2b^2h^6} \cos \alpha \\ &= \frac{4\varepsilon L^2}{6h} \left( \sin \alpha - \frac{2\varepsilon L}{5h \cdot \cos \alpha} \right) \end{aligned} \quad (17)$$

若使在载荷 P 作用下悬臂梁弹性元件的长度改变量为零, 即  $\Delta L=0$  就可利用式 (17) 求得预旋转角  $\alpha$ 。

$$\Delta L = 0 = \frac{4\varepsilon L^2}{6h} \left( \sin \alpha - \frac{2\varepsilon L}{5h \cdot \cos \alpha} \right)$$

则

$$\sin 2\alpha = \frac{4\varepsilon L}{5h} \quad (18)$$

采用此种线性补偿方案, 在 P 方向长度 L 的改变量  $\Delta L$ , 一般比不作预旋转角度悬臂梁弹性元件小 1 / 4, 因此非线性也降低 1 / 4。

## 五、结束语

从上述力学分析和理论计算不难得出, 方柱、圆柱、圆筒式弹性元件, 在承受外载荷作用时, 应变区截面尺寸发生变化是产生非线性误差的主要原因。即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而使  $P-\varepsilon$  不成线性关系。可以估算出由于截面尺寸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  $100 \mu \varepsilon$  时, 截面尺寸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。小量程悬臂梁弹性元件受载后, 梁的长度变化引起应变区测量点的应变值变化是产生非线性误差的主要原因。方柱、圆柱、圆筒式弹性元件和小量程悬臂梁弹性元件都属于固有线性差的机构, 高准确度称重传感器采用此类弹性元件结构时, 务必采用线性补偿措施。除在称重传感器内部进行线性补偿外, 还可以在称重传感器外部通过科学合理的设计弹性元件结构或调整安装状态达到线性补偿目的。

**【参考资料】**

**【1】** James Dorsey. Linearization Of Transducer Compensation. Proceedings Of the 23rd International Instrumentation Symposium. 1977.

**【2】** L. Tegelaar 、 H. Wieringa (林自强译). 荷兰 TNO 机械院对称重用载荷传感器的某些改进 [J]. 试验技术, 1979.

**【3】** 薛家麟. 电阻应变式负荷传感器弹性元件非线性分析及补偿 [J]. 传感器应用技术, 1984.

**【4】** 美国 SENSORTRONICSTS 公司. 65088 整体多柱型称重传感器特性与应用——柱式称重传感器设计、制造和补偿技术的飞跃. 中国国际衡器展览会 STS 资料, 2003 年.

**【5】** 刘九卿. 电阻应变计式称重传感器 [M]. 中国衡器协会专业技术培训教材, 2006 年 12 月.

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。现为中国衡器协会顾问, 中国衡器协会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。

( 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 )