

圆柱剪切式称重传感器

□中国运载火箭技术研究院第七零二研究所 刘九卿

【摘要】为克服圆柱式正应力称重传感器输出灵敏度低、固有线性差等缺点，美国学者奥蒙德根据在圆柱弹性元件上作用载荷时正应力和剪应力是相伴而生的原理，研制出在其外表面对称地加工出两个正方形盲孔，并使一个对角线与轴线平行，另一个对角线与轴线垂直，则正方形盲孔各边与圆柱轴线成 45° 。当承受轴向拉、压载荷时，在正方形盲孔的边缘相互垂直的两个平面上，产生大小相等方向相反的剪应力引起的主应力，即形成了圆柱剪切式称重传感器。本文介绍了这种新型结构的圆柱剪切式称重传感器的工作原理、结构特点、受力分析与理论计算。

【关键词】剪切式称重传感器；圆柱弹性元件；正方形盲孔；面积效应；泊松比效应

文献标识码：A

文章编号：1003-1870 (2025) 04-0034-05

Cylindrical Shear Load Cell

【Abstract】In order to overcome the shortcomings of low output sensitivity and poor inherent linearity of cylindrical normal stress load cells, American scholar Ormond symmetrically machined two square blind holes on their outer surfaces according to the principle that normal stress and shear stress are concomitant when loads are applied to cylindrical elastic elements, with one diagonal parallel to the axis, and the other diagonal perpendicular to the axis, so that each side of the square blind hole is 45° to the cylindrical axis. When subject to axial tensile and compressive loads, the principal stress caused by equal and opposite shear stresses is generated on the two planes perpendicular to each other at the edges of the square blind hole, thus forming the cylindrical shear load cell. In this paper, the working principle, structural characteristics, stress analysis and theoretical calculation of this new type of cylindrical shear load cell are introduced.

【Keywords】shear load cell; cylindrical elastic element; square blind hole; area effect; Poisson's ratio effect

概述

各种结构的应变式称重传感器，就其原理而言基本上可以分为正应力式和剪应力式两种类型。圆柱式结构的正应力称重传感器，利用的是圆柱弹性元件轴向拉伸或压缩应力。其特点是，结构简单紧凑、几何外形为圆形可以加工出较高的尺寸精度和较小的形位公差、容易实现焊接密封和抽真空充惰

性气体新工艺。但其缺点也很突出，主要是受面积效应和泊松比效应影响固有线性差、输出灵敏度较低。欲达到较高的准确度等级必须在称重传感器内部电桥电路或外部测量仪表上进行非线性补偿，制造工艺复杂且成本较高。

圆柱式正应力称重传感器产生非线性误差的主要因素是：

(1) 电桥电路的非线性误差

从圆柱式弹性元件灵敏度计算公式

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

可以看出：电桥的相对输出与应变 ε 为非线性关系，只有应变 ε 足够小时才呈线性关系，即 $S = \frac{U_0}{U_i} = 1.28\varepsilon$ 。

德国学者雷纳德的研究与试验证明：圆柱式弹性元件轴向应变每变化 $100\mu\varepsilon$ ，电桥产生的非线性约为 0.007% 。

(2) 面积效应引起的非线性误差

面积效应产生的非线性误差主要表现为：圆柱式弹性元件承受压向载荷时，截面积增大，同时弹性元件刚度连续增强，输出小于线性值，呈递减的抛物线。圆柱式弹性元件承受拉向载荷时，截面积减小，同时弹性元件刚度连续减弱，输出大于线性值，呈递增的抛物线。试验证明，圆柱式弹性元件的轴向应变值每变化 $100\mu\varepsilon$ ，面积变化所引起的非线性约为 0.003% 。

(3) 泊松比效应引起的非线性误差

由于金属材料泊松比 μ 的影响，圆柱式弹性元件承受外加载荷时，轴向与径向应变相差较大，对称重传感器输出值产生较大影响。为提高输出灵敏度 S ，必须加大轴向应变 ε ，而增大 ε 必然使 $P-\varepsilon$ 函数中产生非常量因子，因此加大了非线性误差。

为了提高圆柱式正应力称重传感器的固有线性度和输出灵敏度，美国学者奥蒙德根据在圆柱弹性元件上作用载荷时正应力和剪应力是相伴而生的原理，即圆柱式弹性元件除了可以用来检测在外载荷作用下弹性元件产生的正应力外，也可以用来测量剪应力引起的主应力、主应变而研制出圆柱剪切式称重传感器。其结构是，在圆柱形弹性元件的外表面对称地加工出两个正方形盲孔，并使盲孔的一个对角线与圆柱轴线平行，另一个对角线与圆柱轴线垂直，则正方形盲孔的各边就与圆柱轴线成 45° ，盲孔底部的腹板即为称重传感器的应变区。其力学原理是：圆柱弹性元件承受轴向拉伸、压缩载荷时，在正方形盲孔的边缘相互垂直的两个平面上，产生大小相等、方向相反的剪应力。正是由于此剪应力

的作用，才在正方形盲孔的腹板上产生纵向拉伸应力和横向压缩应力。此正方形盲孔的腹板正是称重传感器的应变区，在其腹板两面的轴向和环向分别粘贴两组电阻应变计，组成惠斯通电桥电路，即形成圆柱剪切式称重传感器。

如果圆柱形弹性元件外圆尺寸与两侧对称的正方形盲孔尺寸设计合理，在其腹板上可以产生比较接近的拉伸与压缩应变值，不仅完全满足组成惠斯通电桥电路的条件，而且还提高了称重传感器的输出灵敏度和线性度。

1 圆柱剪切式称重传感器的结构与特点

圆柱剪切式称重传感器是在圆柱或圆截柱弹性元件的中心，沿纵轴与横轴对称地加工出两个正方形盲孔，其方位是正方形盲孔的一个对角线与圆柱弹性元件载荷方向平行，另一个对角线与圆柱弹性元件载荷方向垂直，在两个正方形盲孔的底部即形成了正方形腹板。当圆柱或圆截柱弹性元件受到沿纵轴方向的载荷作用时，在正方形盲孔的边缘产生大小相等、方向共同趋向上、下加载点的最大剪应力，使正方形盲孔的腹板处于纯剪切应力状态。剪应力在腹板上产生的两个拉、压成双的主应力，即沿纵向对角线方向产生拉伸主应力和横向对角线方向产生压缩主应力。因此，在正方形盲孔内的腹板两侧对角线方向，分别粘贴两组单轴电阻应变计，感受正方形腹板对角线方向的拉伸和压缩应变。理论上由于正方形对角线的应变大小相等而符号相反，因而在腹板上产生纯剪切，粘贴在此应变区的电阻应变计感受的正是由纯剪切引起的拉压成双的主应变，这正是组成惠斯通电桥电路所需要的。圆柱、圆截柱剪切式称重传感器的结构及电阻应变计粘贴位置示意图，如图1、图2所示。

图1、图2所示圆柱、圆截柱剪切式称重传感器，由于不利用弹性元件的正应力，而是利用正方形盲孔四边的剪应力而产生在腹板上拉、压成双的主应力，从而改变了圆柱弹性元件应变区轴向与径向应力、应变的比例，较大地提高了固有线性度和输出灵敏度。正方形盲孔腹板的纯拉伸、压缩应力状态，克服了圆柱、圆截柱弹性元件的面积效应、泊松比效应和较高轴向应变值的影响。正方形盲孔内不但电阻应变计得到了很好的保护，而且特别有

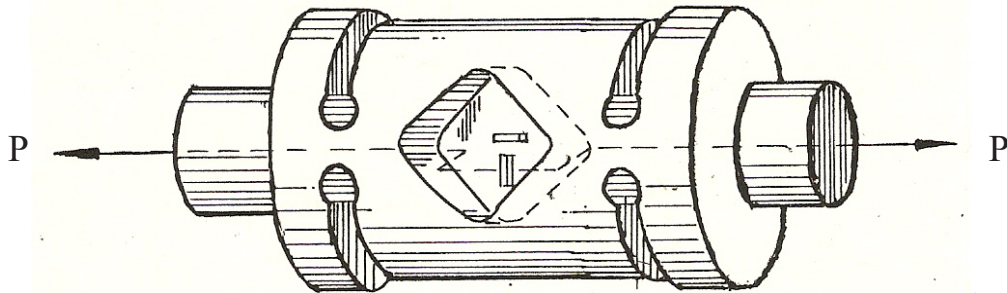


图1 圆柱剪切式称重传感器

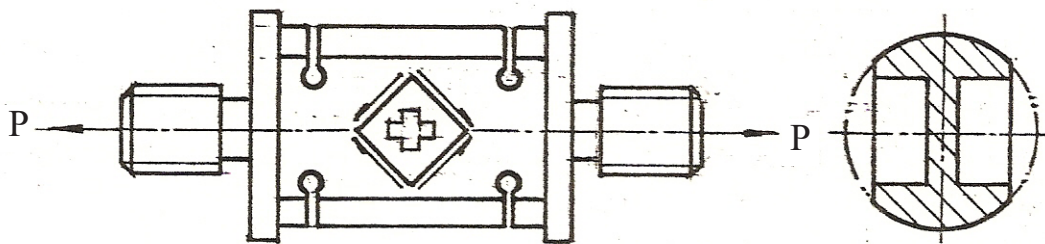


图2 圆截柱剪切式称重传感器

利于盲孔灌封，较容易达到IP68 防护密封等级。此种称重传感器弹性元件的独特结构，保证电阻应变计处于最小寄生应力区，较大地提高了称重传感器抗偏心载荷、侧向载荷和扭转载荷的能力。

2 圆柱剪切式称重传感器的受力分析与理论计算

以圆截柱剪切式称重传感器承受沿纵轴方向拉伸载荷为例，进行受力分析与理论计算。圆截柱剪切式称重传感器受载后，在弹性元件正方形盲孔边缘相互垂直的两个平面上，剪应力必然成对出现，两者大小相等，方向均垂直于该两平面的交线且共同趋向于此交线，如图1 所示。

众所周知，剪应力本身是无法测量的，但由剪应力引起的拉、压成双的主应力是可以测量的。为便于计算，沿圆截柱弹性元件正方形盲孔的加载轴线取一纯剪切单元体ABCD，过B 点做与BC 成 α 的斜截面，其上的正应力为 σ_α ，剪应力为 τ_α ，圆截柱弹性元件正方形盲孔纯剪切单元体如图3 所示。

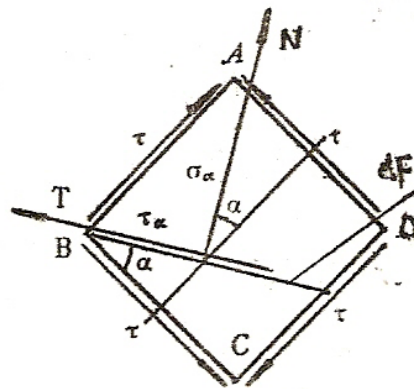


图3 纯剪切单元体

应用斜截面法由平衡条件 $\sum N = 0$ ，得：

$$\begin{aligned}\sigma_\alpha dF &= (\tau \sin \alpha) (dF \cos \alpha) + (\tau \cos \alpha) (dF \sin \alpha) \\ &= 2\tau \sin \alpha \cos \alpha dF\end{aligned}$$

$$\text{则} \quad \sigma_\alpha = \tau \sin 2\alpha$$

$$\sum T = 0$$

$$\begin{aligned}\tau_\alpha dF &= (\tau \cos \alpha) (dF \cos \alpha) - (\tau \sin \alpha) (dF \sin \alpha) \\ &= \tau (\cos 2\alpha - \sin 2\alpha) dF\end{aligned}$$

则 $\tau\alpha = \tau\cos 2\alpha$

最大、最小正应力:

由 $\frac{d\sigma_\alpha}{d\alpha} = 0$, 得最大、最小正应力的截面位置。

$$\frac{d\sigma_\alpha}{d\alpha} = -2\tau \cos 2\alpha = 0$$

因 $\alpha = \pm 45^\circ$

$$\alpha = 45^\circ \quad \sigma_{\max} = \tau \sin 90^\circ = \tau$$

$$\alpha = -45^\circ \quad \sigma_{\min} = \tau \sin(-90^\circ) = -\tau$$

在 $\alpha = \pm 45^\circ$ 截面上 $\tau_\alpha = 0$

由上述推导可知, $\sigma_{\max}$ 、 $\sigma_{\min}$ 的数值均等于剪应力 τ , 其作用面 AC、BD 与单元体分别成 45° , 且作用面上的剪应力为零。所以, AC、BD 就是主平面, 其上的应力、应变即为主应力、主应变。纯剪切单元体的主应力方向如图4所示。

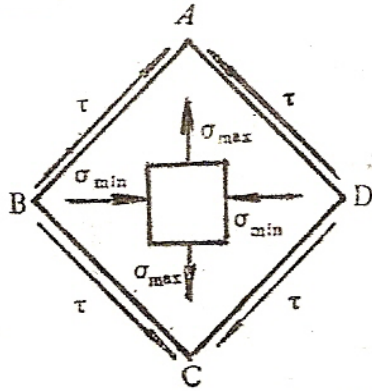


图4 最大、最小主应力方向

圆截柱正方形盲孔弹性元件在外载荷 P 作用下, 纯剪切单元体由正方形 ABCD 变为菱形 $A_1B_1C_1D_1$, $\angle BAD$ 由 $\frac{\pi}{2}$ 变为 $\frac{\pi}{2} - \gamma$, 式中 γ 为剪应变。设纯剪切单元体边长 a , 其变形示意图如图5所示。

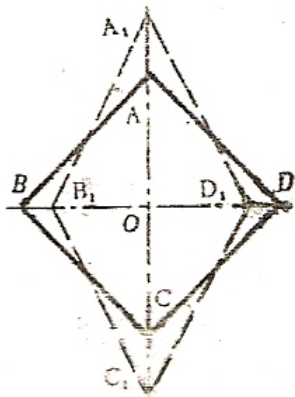


图5 纯剪切单元体变形示意图

对角线 AC 方向的主应变 ϵ_{AC} 为:

$$\epsilon_{AC} = \frac{OA_1 - OA}{OA} = \frac{a \cdot \cos\left(45^\circ - \frac{\gamma}{2}\right) - a \cdot \cos 45^\circ}{a \cdot \cos 45^\circ}$$

$$= \frac{\cos 45^\circ \cdot \cos \frac{\gamma}{2} + \sin 45^\circ \cdot \sin \frac{\gamma}{2} - \cos 45^\circ}{\cos 45^\circ}$$

因 γ 很小, 故

$$\cos \frac{\gamma}{2} \approx 1$$

$$\sin \frac{\gamma}{2} \approx \frac{\gamma}{2}$$

$$\therefore \epsilon_{AC} = \frac{\gamma}{2}$$

对角线 BD 方向的主应变 ϵ_{BD} 为:

$$\epsilon_{BD} = \frac{OB_1 - OB}{OB} = \frac{a \cdot \sin\left(45^\circ - \frac{\gamma}{2}\right) - a \cdot \sin 45^\circ}{a \cdot \sin 45^\circ}$$

$$= \frac{\sin 45^\circ \cos \frac{\gamma}{2} - \cos 45^\circ \sin \frac{\gamma}{2} - \sin 45^\circ}{\sin 45^\circ}$$

$$\therefore \epsilon_{BD} = -\frac{\gamma}{2}$$

根据弹性力学理论, 一个平面的应力状态为纯剪切时, 与中性轴成 45° 方向的互相垂直的主应力等于最大剪应力, 主应变等于最大剪应变的一半, 即

$$\sigma_{\max} = \tau$$

$$\epsilon_{\max} = \epsilon_{AC} = -\epsilon_{BD} = \frac{\gamma}{2}$$

$$\therefore \sigma_{\max} = \frac{P}{A} \quad G = \frac{E}{2(1+\mu)}$$

$$\text{则 } \gamma = \frac{\tau}{G} = \frac{2(1+\mu)P}{AE}$$

$$\therefore \epsilon_{AC} = -\epsilon_{BD} = \frac{\gamma}{2} = \frac{(1+\mu)P}{AE}$$

输出灵敏度为:

$$S = \frac{(1+\mu)KP}{AE} \times 10^3 \text{ mV/V}$$

式中：P——称重传感器的额定载荷；
K——电阻应变计的灵敏系数；
 μ ——弹性元件材料的泊松比；
E——弹性元件材料的弹性模量；
A——应变区横截面的面积。

3 结语

由于圆柱、圆截柱剪切式称重传感器的正方形盲孔腹板为应变区，当此称重传感器受载后，在正方形盲孔边缘相互垂直的两个平面上产生成对的剪应力，两者大小相等方向均垂直于该两平面的交线，且共同趋向于此交线，如图1所示。为了保证设计出的圆柱、圆截柱剪切式称重传感器具有较高的准确度和输出灵敏度，必须使粘贴在正方形盲孔腹板上的轴向和横向电阻应变计尽量产生相同的正、负应变值，即尽量做到 $\varepsilon_1 = \varepsilon_3 = -\varepsilon_2 = -\varepsilon_4$ 或比较接近，电阻应变计粘贴位置如图6所示。

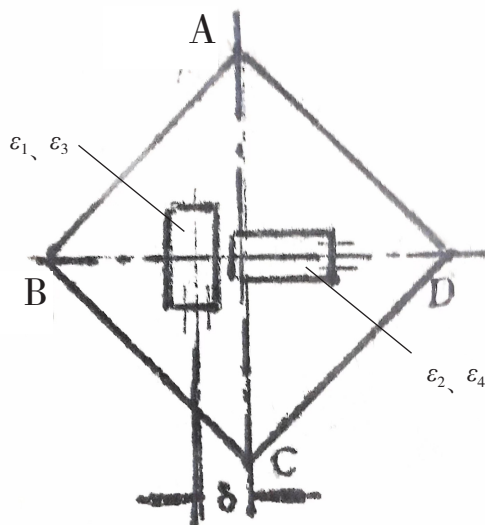


图6 电阻应变计粘贴位置图

根据圆柱、圆截柱剪切式称重传感器的理论计算公式设计的弹性元件，理论上正方形盲孔对角线上拉伸、压缩主应力的绝对值应当相等。由于正方形盲孔周边刚度等影响，在结构设计与计算时很难做到纵向与横向主应变相等或接近，经常是腹板纵向对角线的主应变大于理论计算值，而横向对角线的主应变小于理论计算值。因此，在腹板上粘贴单轴电阻应变计时，纵向电阻应变计的中轴线应向正方形盲孔的纵向对角线（即弹性元件中心线）的左侧

或右侧平移一定距离 δ 见图6。平移的目的是使电桥各桥臂的电阻应变计感受的应变值尽量接近，组成全桥式等臂电桥，以使电桥的工作桥臂系数 $n=4$ ，电桥的灵敏度最高，且等臂电桥的四个桥臂参数一致，各种干扰造成的影响容易相互抵消。

参考文献

- [1] A.N.Ormond (奥蒙德). RHOMBIC SHEAR PLATE GAGE LOAD ELEMENT (菱形剪切板载荷测量元件). USP 3680372.
- [2] 胡增强. 材料力学. 中国农业机械出版社, 1983年10月.
- [3] 刘九卿. 电阻应变式称重传感器. 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，辽宁省沈阳市，1960年毕业于吉林工业大学（现吉林大学）。中国航天科技集团有限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。现为中国衡器协会发展战略咨询委员会委员、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》，在相关计量技术杂志上共发表学术论文150多篇。