

环形梁称重传感器的力学特性与理论计算

□刘九卿

中国运载火箭技术研究院第七零二研究所

【摘要】多个应变梁串联配置的环形梁称重传感器，是在圆筒结构基础上通过力学变换形成的新型弹性元件。它是把产生正应力或切应力的应变梁串联式的相互连接起来，并沿着封闭的圆筒表面进行配置。外载荷以交错排列的多个支承施加于应变梁上，使得拉向、压向的输出灵敏度基本一致，适于进行拉向、压向对称循环载荷测量。本文重点介绍了矩形截面正应力和工字形截面切应力环形梁弹性元件的结构特点、受力分析与理论计算。给出了正应力、切应力环形梁弹性元件结构与计算范例，并简单介绍了较大量程垫圈式环形梁称重传感器的结构与力学特性。

【关键词】称重传感器；弹性元件；环形应变梁；边界条件；力学模型

文献标识码：A 文章编号：1003-1870 (2026) 01-0005-09

Mechanical Properties and Theoretical Calculation of Ring Beam Load Cells

【Abstract】 A ring beam load cell with multiple strain beams connected in series is a novel elastic element formed by mechanical transformation based on a cylindrical structure. It involves connecting strain beams that generate normal or shear stress in series and arranging them along the surface of an enclosed cylinder. External loads are applied to strain beams via multiple staggered supports, such that the output sensitivities in the tensile and compressive directions are basically the same, making it suitable for measuring symmetrical cyclic loads in the tensile and compressive directions. This paper focuses on the structural characteristics, stress analysis, and theoretical calculation of the ring beam elastic elements with rectangular cross-sections for normal stress and I-shaped cross-sections for shear stress; provides the examples of structural design and calculation for ring beam elastic elements with normal stress and shear stress; and briefly introduces the structure and mechanical properties of large-range washer-type ring beam load cells.

【Keywords】 load cell; elastic element; ring strain beam; boundary conditions; mechanical model

概述

圆柱、圆筒、悬臂梁、双端固支梁、平行梁是称重传感器常用的弹性元件结构，其中圆柱式弹性元件（如单圆柱式、单圆筒式）具有结构简单紧凑，制造工艺性好，额定量程大等特点。梁式弹性元件

（如悬臂剪切梁、双端固支剪切梁和轮辐式）具有高度低、线性好、抗偏心和侧向载荷能力强等特点。这些结构主要用于测量拉伸或压缩载荷，对于需要同时测量拉伸、压缩对称循环载荷时，由于拉向、压向灵敏度不对称或不能进行双向加载无法满足测

量要求。为解决拉向、压向对称循环载荷的测量问题，美国BLH公司等多家称重传感器制造企业，先后开发出采用多应变梁串联配置的拉、压式环形梁弹性元件。它是把产生正应力或切应力的应变梁串联式连接起来，并沿着封闭的圆筒表面进行配置，外载荷通过交错排列的支承施加于应变梁上，使得拉向、压向灵敏度基本一致，以满足同时测量拉向、压向对称循环载荷的需求，其中以环形剪切应变梁弹性元件特点突出应用较多。

外载荷施加于弹性元件上使其产生剪切应力有三种作用方式：

其一，将外载荷直接施加于产生剪切应力的弹性元件上，而且该弹性元件应变区几何形状应能获得较之弯曲变形更大的剪切应变，例如悬臂剪切梁、双端固支剪切梁等。

其二，利用承力支承产生的力矩使弹性元件产生扭转变形，在扭转弹性元件表面产生剪切变形，在其应变区产生剪切应力。

其三，在圆柱式弹性元件的两面，分别加工出对称的正方形盲孔，并使正方形盲孔的一个对角线与弹性元件的轴线方向一致，另一个对角线则与轴线方向垂直。当弹性元件受载后，在其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。由于剪应力作用使得正方形盲孔内腹板上的对角线产生大小相等方向相反的主应力、主应变，完全满足组成惠斯通电桥电路的需要，通常将此种产生切应力的方法称为叠加变形法。

根据剪切变形的产生方式不同，称重传感器剪切弹性元件可以分为三组：剪切梁式、扭转式和叠加变形式。切应力环形梁弹性元件的形成就属于剪切梁式，即环形梁是在圆筒中心通过机械加工形成的多个曲梁串联配置的应变梁，外载荷通过圆筒两端带有内螺纹的法兰盘使圆筒产生压缩变形，并通过对称交错排列的支承施加于环形应变梁上。根据应用需要可以形成利用正应力的环形应变梁，也可以形成利用切应力的环形应变梁。正应力环形梁弹性元件粘贴电阻应变计的应变区多为矩形截面，切应

力环形梁弹性元件应变区截面又有矩形和工字形之分。将用于测量正应力或切应力的电阻应变计粘贴在产生正应力或切应力的应变梁上，组成惠斯通电桥电路即可完成称重计量任务。

剪切梁弹性元件应变区剪应力的分布取决于截面的形状。当应变梁的形状为矩形截面时，剪应力是按抛物线规律分布，而且在剪切梁的中性面上出现最大剪应力超出平均剪应力的1.5倍，其缺点是在最大寄生应力区粘贴电阻应变计会增加非线性误差。比较合理的是采用工字形截面应变梁，电阻应变计粘贴在工字形截面腹板的两面，由于工字形截面腹板上的剪应力分布均匀，电阻应变计处于较小的寄生应力区，不仅提高了称重传感器的灵敏度，而且使电阻应变计在盲孔内得到了很好的保护。当矩形与工字形剪切梁弹性元件横截面的面积相同时，如果使其灵敏度也相同，则工字形截面抗弯曲和抗扭转力矩比矩形截面要大得多，因此减少了寄生应力和测量误差。

美国BLH公司研发的环形剪切梁弹性元件如图1所示，梁1和梁接头2刚性一样，从而减少了弹性元件的刚性，并且还会引起较大的弯曲寄生应力。为了消除此种缺陷，西门子（Siemens）公司所研发的弹性元件如图2所示，在平行于轴线上加工4个圆孔，从而把梁的变形部分分开，而且能把电阻应变计5的两端配置在载荷较小的区域内。由于这样的配置，减少了因为电阻应变计蠕变而产生的误差。匈牙利国家测量技术研究院研制的正方形截面圆筒剪切梁弹性元件如图3所示，也达到了类似的目的。

多个梁串联配置的环形梁称重传感器弹性元件的缺点是：外载荷P施加在承力法兰盘9较大面积上，会产生一定的偏心载荷，因而引起弯曲寄生应力，降低了称重传感器的测量准确度。承力法兰盘9与弹性元件不同，它是径向配置的，从而增加了弹性元件在垂直面上的外廓尺寸。为此，英斯特朗（Instron）公司设计出没有法兰盘的环形剪切梁称重传感器，如图4所示。其特点是，适当延长剪切应变区上、下两端的尺寸，既去掉了法兰盘简化了机械加工工艺，又保证了称重传感器的计量性能。

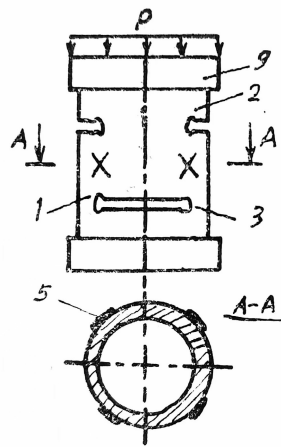


图1 美国BLH公司弹性元件

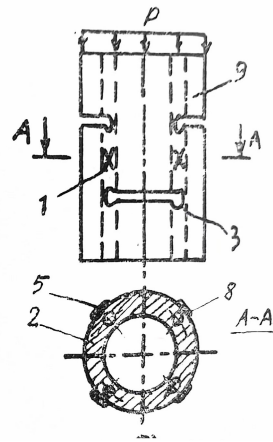


图2 西门子公司弹性元件

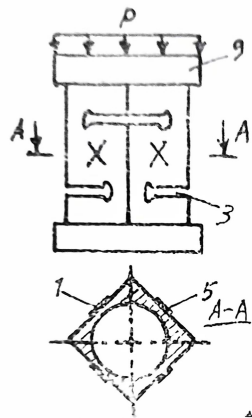


图3 匈牙利国家测量院弹性元件

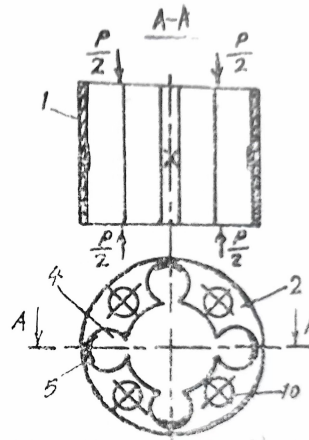


图4 英斯特朗公司弹性元件

基于以上特点与发展历程，多个应变梁串联配置的环形梁称重传感器弹性元件有多种结构形式，本文以正应力矩形截面环形梁和切应力工字形截面环形梁称重传感器为例，建立力学模型进行受力分析与理论计算，并给出设计示例，以便于工程应用参考。

1 正应力环形梁称重传感器

1.1 结构与特点

正应力环形梁称重传感器是在两端带有内螺纹的圆筒弹性元件中心处，通过铣削加工出沿直径方向对称的上、下各两个支承，圆筒的中间部分即形

成了4个矩形截面曲梁串联配置的环形应变梁。外载荷通过交错排列的互为根部承载和中心加载的支承施加于环形应变梁上，并在各应变梁的根部形成拉应力和压应力对称的应变区。由于曲梁效应的影响，应变梁切向弯曲应力是径向扭转应力的10~50倍，引起载荷漂移的只是这些很小的径向扭转应力，因此可在环形应变梁支承两侧的表面，粘贴一组或二组单轴电阻应变计，即可满足组成惠斯通电桥电路的要求。正应力环形梁弹性元件如图5所示，环形应变梁上单轴电阻应变计粘贴位置如图6所示。

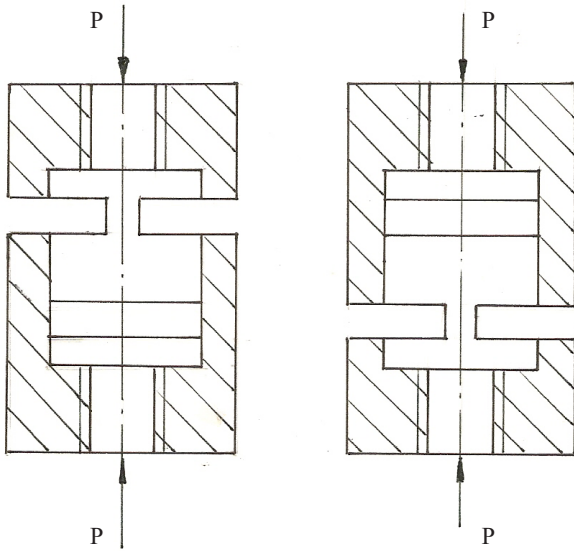


图5 正应力环形梁弹性元件

正应力环形梁结构具有以下特点：结构简单紧凑；几何外形为圆形，易加工出较高的尺寸精度和形位公差等级；拉向、压向变形基本相同，拉向、压向灵敏度一致性好；电阻应变计粘贴在环形应变梁的上表面，便于粘贴、组焊惠斯通电桥电路和防护密封作业。

1.2 受力分析与理论计算

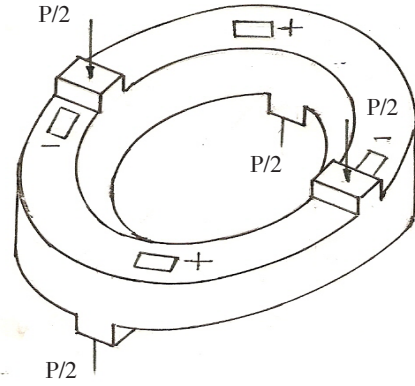


图6 环形应变梁与电阻应变计粘贴位置

环形应变梁为上、下各有两个互为根部支承和中心加载压头的对称结构，每个支承点均承受 $P/2$ 载荷。为便于研究和简化计算，取环形应变梁的 $1/4$ 进行分析，即截取矩形截面曲梁 AB ，轴线为 $1/4$ 圆弧，曲率半径为 R ，梁的 B 端为根部固定支承，且使曲梁 AB 保持平衡， A 端为引入载荷的加载点，作用 $P/4$ 铅垂载荷，其力学模型如图7 所示。

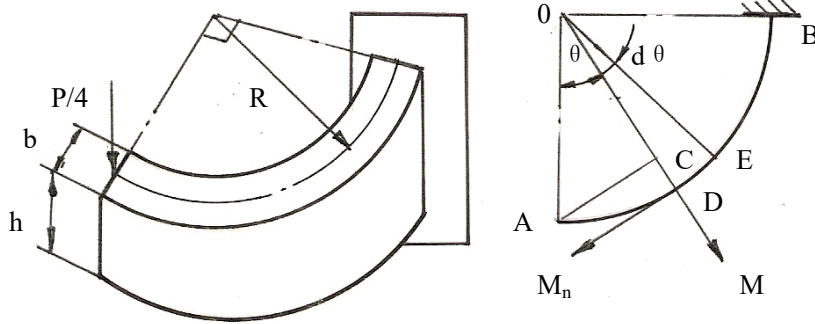


图7 力学模型

(1) 弯曲应力、应变计算

取与截面 OA 夹角为 θ 的任意截面 OD ，其内力分量为：

弯矩

$$M = \frac{P}{4} AC = \frac{P}{4} R \sin\theta$$

扭矩

$$T_n = \frac{P}{4} CD = \frac{P}{4} R (1 - \cos\theta)$$

弯矩和扭矩最大截面为 B ，即 $\theta = \frac{\pi}{2}$ ，则

$$M_{\max} = \frac{P}{4} R$$

$$M_{n\max} = \frac{P}{4} R$$

扭转引起的截面上的最大剪应力，发生在矩形截面的长边中点处，则

$$\tau_{\max} = \frac{M_n}{W_n} = \frac{M_n}{\alpha h b^2}$$

式中: α ——与比值 h/b 有关的系数;

$W_n = \alpha h b^2$ ——相当于梁的抗扭转截面模量。

短边上的最大剪应力, 发生在矩形截面的短边中点处, 为

$$\tau_1 = \gamma \tau_{\max}$$

式中: γ ——与比值 h/b 有关的系数。

相对扭转角

$$\phi = \frac{M_n l}{G J_n} = \frac{M_n l}{G \beta h b^3}$$

式中: β ——与比值 h/b 有关的系数;

$J_n = \beta h b^3$ ——相当于极惯性矩。

α 、 β 、 γ 可由强度计算手册或材料力学矩形截面杆扭转时的系数表查出。

由于在环形应变梁的上表面粘贴的是单轴电阻应变计, 其敏感栅长度主要感受弯曲应变, 敏感栅两端头的横栅感受扭转应变, 从而增大了实际测量值。设计时只计算弯曲应力、应变, 并根据实际测量值求出修正系数即可。环形应变梁根部的最大弯曲应力、应变为:

$$\sigma_{\max} = \phi \frac{M_{\max}}{W} = \phi \frac{3PR}{2bh^2}$$

$$\varepsilon_{\max} = \phi \frac{\sigma_{\max}}{E} = \phi \frac{3R}{2Ebh^2}$$

式中: ϕ ——与环形应变梁曲率和比值 h/b 有关的系数, 或称为修正系数, 由弹性元件样件经试验测量求得。

(2) 电桥输出电压计算

由直梁结构称重传感器输出电压计算公式的推导知:

$$\frac{U}{U_i} = \frac{\Delta R}{R}$$

$$\therefore \frac{\Delta R}{R} = K \varepsilon_{\pm 45^\circ}$$

$$\therefore U = K U_i \varepsilon_{\pm 45^\circ} \times 10^3 \text{ mV}$$

式中: U ——电桥输出电压;

U_i ——电桥输入电压;

K ——电阻应变计灵敏系数。

(3) 输出灵敏度计算

$$S = \frac{U}{U_i} = K \varepsilon_{\pm 45^\circ} \times 10^3 \text{ mV/V}$$

(4) A 点的挠度计算

取环形梁上任意一小段 $DE=ds$, 对应的夹角为 $d\theta$, DE 微段的弯曲和扭转变形均将在受载端A产生挠度, 此截面的内力分量为:

$$M = \frac{P}{4} R \sin \theta \quad M^0 = R \sin \theta$$

$$M_n = \frac{P}{4} R (1 - \cos \theta) \quad M_n^0 = R (1 - \cos \theta)$$

根据结构力学单位载荷法, 其弯曲和扭转变形为:

$$\delta_1 = \int_0^s \frac{1}{EJ} M M^0 ds$$

$$\delta_2 = \int_0^s \frac{1}{GJ_n} M_n M_n^0 ds$$

因为 $ds=Rd\theta$, 所以A点的总挠度为:

$$\delta_A = \delta_1 + \delta_2 = \int_0^s \frac{1}{EJ} M M^0 ds + \int_0^s \frac{1}{GJ_n} M_n M_n^0 ds$$

$$= \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{PR^3}{4EJ} \sin^2 \theta d\theta + \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{PR^3}{4GJ_n} (1 - \cos \theta)^2 d\theta$$

$$= \frac{PR^3}{4EJ} \left[\int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^2 \theta d\theta + \frac{E}{G} \cdot \frac{J}{J_n} \int_0^{\frac{\pi}{2}} (1 - \cos \theta)^2 d\theta \right]$$

$$= \frac{PR^3}{4EJ} \left[\int_0^{\frac{\pi}{2}} \left(\frac{1 - \cos^2 \theta}{2} \right) d\theta + \frac{E}{G} \cdot \frac{J}{J_n} \int_0^{\frac{\pi}{2}} (1 - 2\cos \theta + \cos^2 \theta) d\theta \right]$$

$$= \frac{PR^3}{4EJ} \left[\frac{\pi}{4} + \frac{E}{G} \cdot \frac{J}{J_n} \left(\frac{3\pi}{4} - 2 \right) \right]$$

$$\text{由于 } G = \frac{E}{2(1+\mu)}$$

$$\text{则 } \frac{E}{G} = 2(1+\mu)$$

矩形截面对形心轴的惯性矩:

$$J = \frac{bh^3}{12}$$

矩形截面扭转时的惯性矩(相当于极惯性矩 J_n):

$$J_n = \beta h b^3$$

$$\text{则 } \frac{J}{J_n} = \frac{bh^3}{12\beta h b^3} = \frac{h^2}{12\beta b^2}$$

代入上式得

$$\delta_A = \frac{3PR^3}{Ebh^3} \left[\frac{\pi}{4} + \frac{(1+\mu)h^2}{6\beta b^2} \left(\frac{3\pi}{4} - 2 \right) \right]$$

$$= \frac{3PR^3}{Ebh^3} \left[1 + \frac{(1+\mu)h^2}{6\beta b^2} \left(3 - \frac{8}{\pi} \right) \right]$$

2 切应力环形梁称重传感器

2.1 结构与特点

切应力环形梁称重传感器是在正应力环形梁弹性元件的基础上，将环形应变梁的矩形截面变为工字形截面。同样是将4个工字形截面曲梁串联式连接起来，并沿着封闭的圆柱表面进行配置。外载荷通过两端圆盘上内螺纹及其上互为根部承载和中心加载用交错排列的支承施加于环形应变梁上。它的特点是：结构简单紧凑；几何外形为圆形，易加工出较高的尺寸和形位公差等级；利用与弯矩无关的切应

力，对加载点的变化不敏感；抗偏心和侧向载荷能力强；拉向、压向变形基本相同，拉向、压向灵敏度一致性好；电阻应变计粘贴在环形应变梁的腹板上，处于最小寄生应力区，并得到较好的保护。

由于上、下支承与环形应变梁为刚性连接，即支承处的转角为零，但在切力、弯矩作用下支承处的挠度不为零，这就保证了环形工字梁的腹板为纯剪切状态，从而产生与弯矩无关的切应力。尽管切应力本身不能测量，但切应力产生的与环形应变梁中性轴成45°方向的主应力、主应变是可以测量的。此主应力、主应变的特点是拉压对称成双，因此将单剪切电阻应变计（与中性轴垂直定位）或单轴电阻应变计（与中性轴成45°方向定位）粘贴在上、下支承中间的环形应变梁腹板上，组成惠斯通电桥电路，即可完成称重计量任务。切应力环形梁弹性元件及电阻应变计粘贴位置如图8所示。

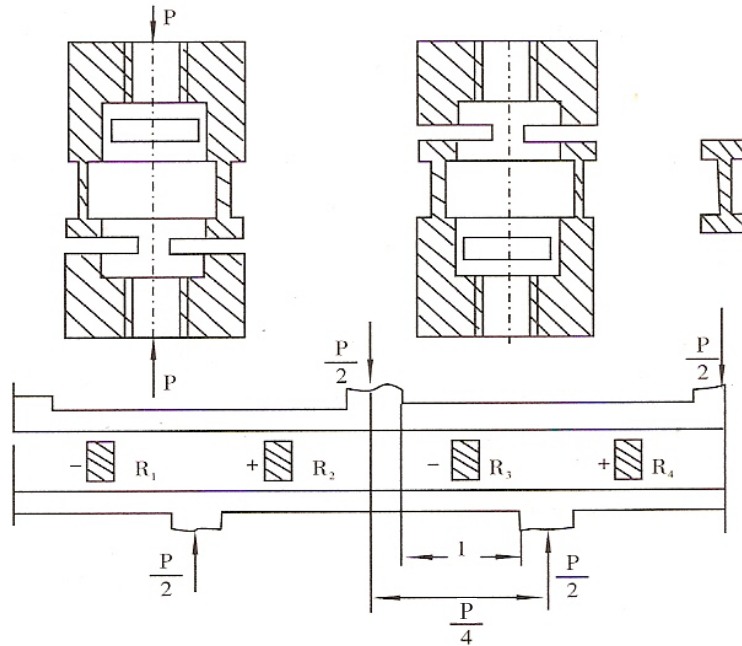


图8 切应力环形梁弹性元件及电阻应变计粘贴位置图

2.2 受力分析与理论计算

由图8可看出，互为根部承载和中心加载的上、下支承与环形工字梁为刚性连接，在外载荷作用下不产生明显的变形，即支承处的转角为零，但在切力、弯矩作用下支承处的挠度不为零。为便于分析

和简化计算，将环形工字梁展开视为串联的直梁，利用对称条件，再将串联的直梁简化为一端固支，另一端受一集中载荷P/4和一力偶的力矩为M_B作用的悬臂梁，其力学模型如图9所示，环形工字梁弹性元件的尺寸如图10所示。

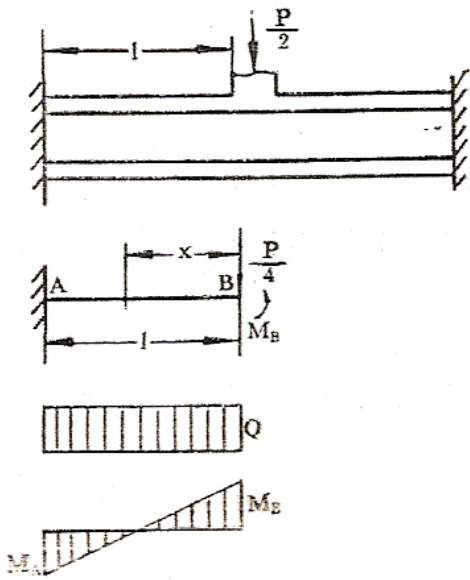


图9 力学模型

(1) 弯矩计算

在AB 梁上距B 点X 处截面上的弯矩为:

$$M_x = M_B - \frac{P}{4}X$$

在B 点处加一单位力偶, 在X 截面产生的弯矩为:

$$M_0 = +1$$

则

$$\begin{aligned} \theta_B &= \frac{1}{EJ} \int_0^l M_x M_0 dx = \frac{1}{EJ} \int_0^l \left(M_B - \frac{P}{4}X \right) (+1) dx \\ &= \frac{1}{EJ} \left[M_B X - \frac{P}{8}X^2 \right]_0^l = \frac{1}{EJ} \left(M_B l - \frac{P}{8}l^2 \right) \end{aligned}$$

$$\therefore \theta_B = 0, \quad \frac{1}{EJ} \neq 0$$

$$\therefore M_B l - \frac{P}{8}l^2 = 0$$

$$M_B = \frac{Pl}{8}$$

$$\text{则 } M_A = M_B - \frac{Pl}{4} = -\frac{Pl}{8}$$

(2) 弯曲应力、应变计算

工字梁上、下翼缘最大弯曲应力:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{J_y} \frac{H}{2} = \frac{M_{\max}}{W}$$

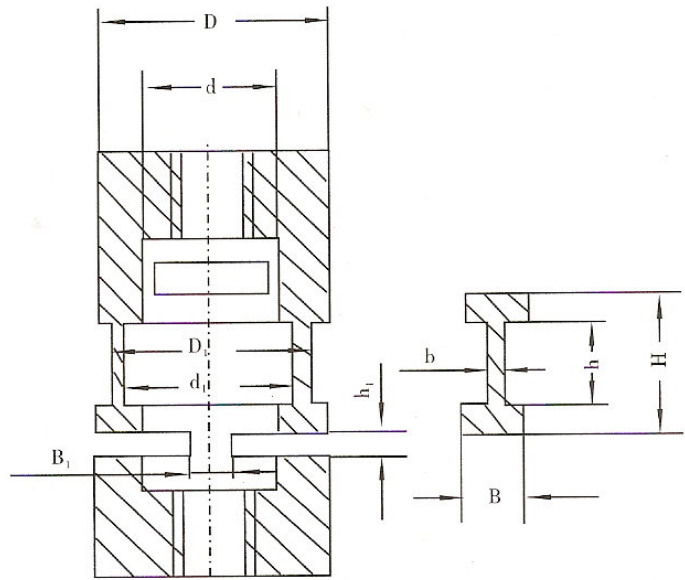


图10 环形工字梁弹性元件尺寸图

式中: M_{\max} ——最大弯矩

$$M_{\max} = \frac{Pl}{8}$$

J_y ——剪切截面对中性轴的惯性矩

$$J_y = \frac{B(H^3 - h^3) + bh^3}{12}$$

W ——抗弯矩截面模量

$$W = \frac{2J_y}{H} = \frac{B(H^3 - h^3) + bh^3}{6H}$$

代入上式, 得

$$\sigma_{\max} = \frac{3P}{4} \cdot \frac{Hl}{B(H^3 - h^3) + bh^3}$$

$$\varepsilon_{\max} = \frac{3P}{4E} \cdot \frac{Hl}{B(H^3 - h^3) + bh^3}$$

(3) 最大挠度计算

$$f_B = \frac{Pl^3}{12EJ}$$

(4) 剪应力、剪应变计算

根据茹拉夫斯基公式, 剪应力为:

$$\tau = \frac{QS}{J_y b}$$

式中: Q ——剪力

$$Q = \frac{P}{4}$$

S ——剪切截面对中性轴的静矩

$$S = \frac{B(H^2 - h^2) + bh^2}{8}$$

$$\text{则 } \tau_{\max} = \frac{3P}{8b} \cdot \frac{B(H^2 - h^2) + bh^2}{B(H^3 - h^3) + bh^3}$$

根据剪切虎克定律：

$$\tau = G\gamma \quad ; \quad \gamma = \frac{\tau}{G}$$

$$\therefore G = \frac{E}{2(1+\mu)}$$

$$\therefore \gamma_{\max} = \frac{\tau_{\max}}{G} = \frac{3P(1+\mu)}{4Eb} \cdot \frac{B(H^2 - h^2) + bh^2}{B(H^3 - h^3) + bh^3}$$

(5) 45° 方向主应力、主应变计算

由弹性力学知，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

$$\sigma_{\pm 45^\circ} = \pm \tau_{\max}$$

$$\varepsilon_{\pm 45^\circ} = \pm \frac{1}{2} \gamma_{\max}$$

(6) 电桥输出电压计算

$$U = KU_i \varepsilon_{\pm 45^\circ} \times 10^3 \text{ mV}$$

(7) 输出灵敏度计算

$$S = \frac{U}{U_i} = K \varepsilon_{\pm 45^\circ} \times 10^3 \text{ mV/V}$$

3 环形梁弹性元件的应用与创新

尽管正应力和切应力环形梁弹性元件具有结构紧凑，几何外形简单，制造工艺性好，拉向、压向灵敏度基本一致，适合计量拉向、压向对称循环载荷等特点，但上述两个支承的环形应变梁刚度偏小，特别是2000kg 矩形截面环形梁弹性元件最大挠度已达0.538mm，对固有线性影响较大，不适合制造较大量程的称重传感器。由于环形梁弹性元件是在圆筒中心形成的，必须通过圆筒两端承力面积较大的法兰盘施加外载荷。由此可见，在把外载荷施加到弹性元件上时，会产生较大的无法控制的偏心率，因而引起弯曲寄生应力，产生一定的测量误差，在进行弹性元件结构设计时一定要引起足够重视。为减少应变区弯曲寄生应力的影响和提高抗偏心载荷能力，必须增加正应力和切应力环形梁弹性元件应变区的刚度，解决办法是变环形应变梁的两

个支承为4个支承。一般都是采取沿圆筒的环向铣削长孔的方法，使环形应变梁具有相互为根部承载和中心加载的4个支承来改善双支承环形应变梁的承载和加载边界条件。国外一些称重传感器制造企业如BLH公司、英斯特朗(Instron)公司，就是采用此方法设计制造出具有4个互为根部支承和中心加载的环形梁弹性元件。4支承矩形截面切应力环形梁弹性元件的结构如图11所示；4支承工字形截面切应力环形梁弹性元件的结构如图12所示。为了能够直观的看出4个支承环形应变梁弹性元件产生的拉向、压向成双的主应力、主应变方向，在图11和图12中划出的是与中性轴成45° 方向粘贴的单轴电阻应变计，在实际应用中多粘贴单剪切或双剪切电阻应变计。

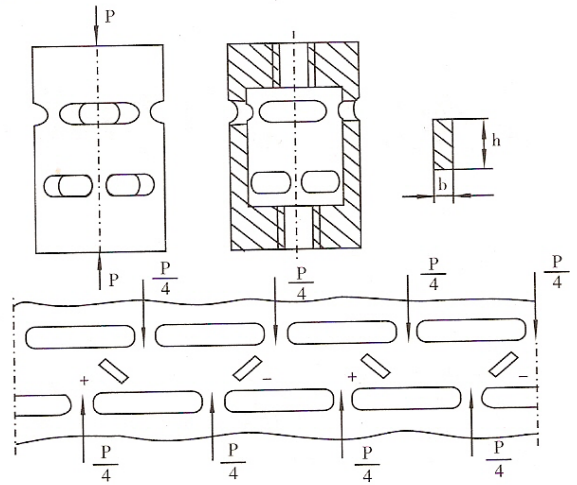


图11 4个支承矩形截面切应力环形梁弹性元件

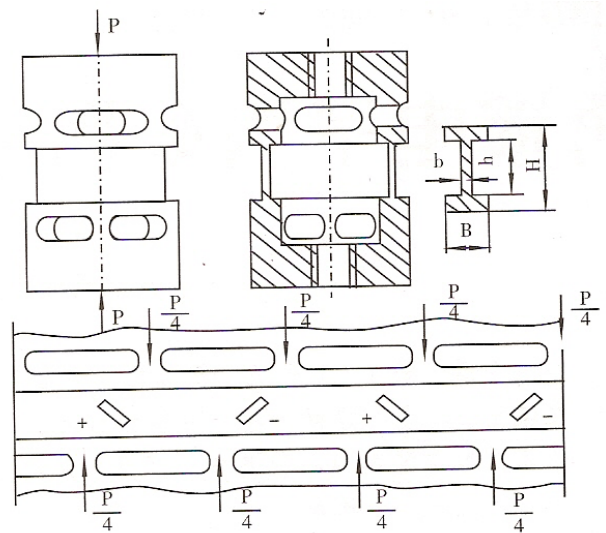


图12 4个支承工字形截面切应力环形梁弹性元件

以上两种环形梁结构弹性元件，由于变两个支承为4个支承，使环形应变梁结构对称、受力均匀，边界条件更加合理，通过两端刚度较大的法兰盘施加外载荷，提高了抗偏心载荷能力。由于缩短了应变梁的有效长度，其结果是增大了抗弯刚度，同时也减少了径向扭转应力的影响，提高了固有线性度。

当进行较大量程的称重计量时，由于对弹性元件高度要求较为严格，进行结构设计时可以舍弃通过弹性元件两端的法兰盘加载，改为对环形梁应变区直接加载，其弹性元件简图如图13所示。

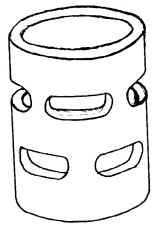


图13 矩形截面环形梁弹性元件结构简图

在进行超大量程称重计量时，多要求测量系统接触面较大、准确度高、稳定性好，一般都采用低外形的垫圈式结构。由于弹性元件的直径较大，环形应变梁上互为承力和加载支承的数量也必须成对增加，例如6个、8个、10个、12个等等。具有六个互为承力和加载支承的垫圈式工字形截面环形梁结构弹性元件如图14所示。为直观了解电阻应变计在工字形截面上的粘贴位置，仍以单轴电阻应变计为例进行说明，其电阻应变计粘贴位置见工字形截面环形梁弹性元件展开图15所示。从左至右1、3、5、7、9、11电阻应变计感受压向应变，2、4、6、8、10、12电阻应变计感受拉向应变。

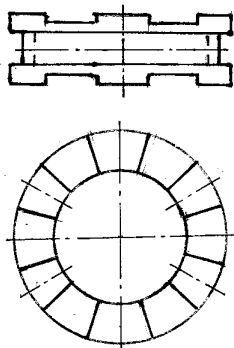


图14 垫圈式环形梁结构弹性元件

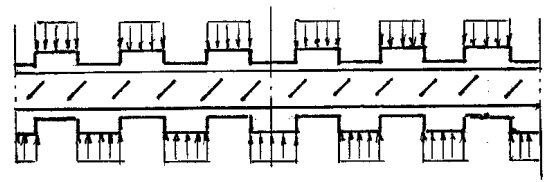


图15 工字形截面环形梁弹性元件展开图

工字形截面环形梁弹性元件的特点是，通过刚度较大的承力、受力凸台，将被称量载荷改变为图12所示的形态，即外力以交错排列的形式施加到环形梁的应变区，保证应变区产生纯剪切变形，提高了称量准确度，同时电阻应变计也得到了很好的保护。

参考文献

[1] Richard Frankln. Design calculations for strain gage load cells, Measurements and control[J], October, 1996.

[2] В.А.Годзиковский (前苏联) 著, 夏英德译. 应变式测力传感器剪切弹性元件结构的概述与分析[C]. 试验技术, 1997.2.

[3] 胡增强编. 材料力学[M]. 中国农业机械出版社, 1983.

作者简介

刘九卿(1937—)，男，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》。