

悬臂剪切梁型称重传感器抗侧向载荷能力分析

中国运载火箭技术研究院第 702 研究所 刘九卿

【摘要】 悬臂剪切梁型称重传感器以其结构简单紧凑、高度小重心低、无端部效应影响、抗侧向载荷能力强、安装调试方便等特点，成为电子衡器的重要基础部件。本文介绍了方截和圆截悬臂剪切工字梁型称重传感器的力学特性、应变区剪切应力、应变和主应力、应变计算；抗侧向载荷能力评定、抗侧向载荷能力计算与分析。并简要介绍了产生侧向载荷影响的诸多因素，以帮助应用者进一步了解此类称重传感器的计量性能和应用特点。

【关键词】 称重传感器；剪切梁；侧向载荷；抗侧向载荷能力；侧向载荷承载率
一、悬臂剪切梁型称重传感器的力学特性

悬臂剪切梁型称重传感器按剪切梁的横截面形状分为方截面工字梁和圆截面工字梁两种结构型式，其弹性元件结构简图与力学模型如图 1 和图 2 所示。

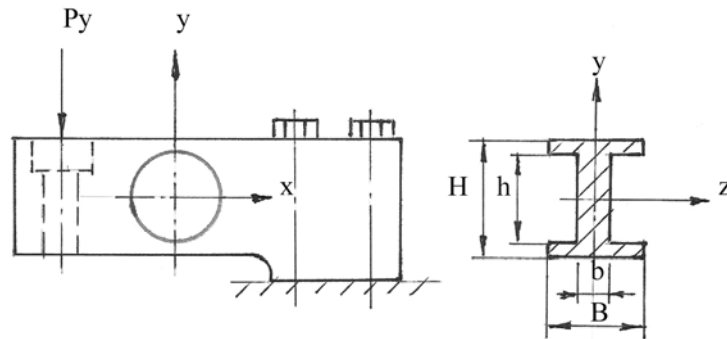


图 1 方截工字梁型弹性元件与力学模型

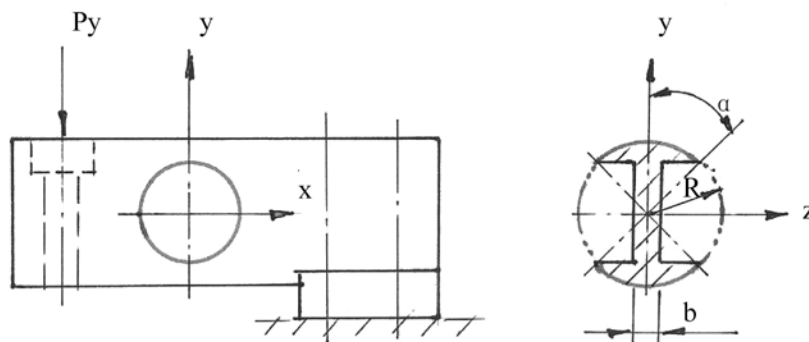


图 2 圆截工字梁型弹性元件与力学模型

通常悬臂剪切梁型称重传感器的额定量程为 100kg ~ 30t。圆截面工字梁结构，多用于小量程称重传感器，采用盲孔灌封和波纹管焊接双重密封；方截面工字梁结构用于较大量程称重传感器，采用盲孔灌封和圆膜片焊接双重密封。两种结构均在盲孔内工字梁的腹板中心线上，反对称的粘贴两片双剪切型电阻应变计。由弹性力学知粘贴在腹板上的电阻应变计处于二向应力状态，其应力张量可用矩阵形式表示：

$$\begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} \\ \tau_{yx} & \sigma_y \end{vmatrix} \quad (1)$$

式中： σ_x —x 方向的正应力；

σ_y —y 方向的正应力；

τ_{xy} —横截面上的剪应力，x 代表 τ_{xy} 的作用平面垂直于 x 轴，y 代表 τ_{xy}

沿 y 轴方向；

τ_{yx} —横截面上的剪应力，y 代表 τ_{yx} 的作用平面垂直于 y 轴，x 代表 τ_{yx}

沿 x 轴方向。

弹性应变梁的工字型截面可看成由几个长方形组成，利用茹拉夫斯基公式，有

$$\tau_{xy} = \frac{Q_{xy} S_z}{J_z b} \quad (2)$$

当 $y=0$ 时，剪应力 τ_{xy} 最大，则

$$\tau_{xy(max)} = \frac{Q_{xy} S_{z(max)}}{J_z b} \quad (3)$$

式中： Q_{xy} —垂直于 y 轴的任意截面上的剪力；

S_z —横截面上距中性轴 z 为 y 的横线以外部分对中性轴 z 的静矩；

J_x —横截面对中性轴的惯性矩；

b—工字梁腹板的宽度。

与上述应力场相对应的应变场为：

$$\begin{vmatrix} \varepsilon_x & \gamma_{xy} \\ \gamma_{xy} & \varepsilon_y \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{\sigma_x}{E} & \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{xy} \\ \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{xy} & -\frac{\mu\sigma_x}{E} \end{vmatrix} \quad (4)$$

式中： ε_x 、 ε_y —正应变；

γ_{xy} —剪应变；

E —工字梁金属材料的弹性模量；

μ —工字梁金属材料的泊松比。

在对平面应力状态下受纯剪切作用的工字梁腹板的受力状态进行剖析后，可以得出沿梁的中性轴成 45° 方向产生的长度变化，正是纯剪切应力状态下的主应力方向，其主应力等于最大剪应力；主应变等于最大剪应变的一半，即

$$\sigma = \pm \tau_{xy} \quad \varepsilon = \pm \frac{\gamma_{xy}}{2}$$

由材料力学知，各向同性的金属材料的剪切弹性模量为：

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

则剪应变为：

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G} = \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{xy}$$

由上式可得出与中性轴成 45° 方向的主应变为：

$$\varepsilon_{\pm 45^\circ} = \pm \frac{\gamma_{xy}}{2} = \pm \frac{1+\mu}{E} \tau_{xy} \quad (5)$$

将四片电阻应变计按相对桥臂应变方向相同，相邻桥臂应变方向相反的原则，组成惠斯通电桥电路并进行精确的电路补偿与调整，即可完成称重计量任务。

二、正向载荷下的应力与应变计算

1. 方截工字形截面弹性元件

弹性元件工字形截面及尺寸参数见如图 1，它由三个长方形组成，为求得剪应力、剪应变首先计算截面的静矩和惯性矩。

剪力 Q 沿梁的长度方向为一常数，即 $Q=P_y$ 。

横截面上距中性轴 z 为 y 的横线以外部分对中性轴 z 的静矩为：

$$S_z = B \frac{H-h}{2} \left(\frac{h}{2} + \frac{H-h}{4} \right) + b \frac{h}{2} \frac{h}{4} = \frac{B(H^2 - h^2) + bh^2}{8}$$

横截面对中性轴的惯性矩为：

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

将剪力、静矩、惯性矩代入式(2)即可得到工字梁腹板上的剪应力和剪应变

$$\tau_{xy\max} = \frac{QS_z}{J_z b} = \frac{3P_y}{2b} \cdot \frac{B(H^2 - h^2) + bh^2}{B(H^3 - h^3) + bh^3} \quad (6)$$

$$\gamma_{xy\max} = \frac{\tau_{xy\max}}{G} = \frac{3(1+\mu)P_y}{bE} \cdot \frac{B(H^2 - h^2) + bh^2}{B(H^3 - h^3) + bh^3} \quad (7)$$

与中性轴成 45° 方向的主应变为：

$$\varepsilon_{\max} = \pm \frac{\gamma_{xy\max}}{2} = \pm \frac{3(1+\mu)P_y}{2bE} \cdot \frac{B(H^2 - h^2) + bh^2}{B(H^3 - h^3) + bh^3} \quad (8)$$

2. 圆截工字形截面弹性元件

弹性元件圆截工字形截面及尺寸参数见图2，它由上下两个弓形和中间一个矩形组成，其静矩和惯性矩为两种形状三个截面静矩和惯性矩之和。通过圆心与 z 轴成 45° 方向两条直线形成的圆弓形截面，可利弓高、弦长、弧长计算面积、形心求得静矩和惯性矩。经计算得：

圆截工字形截面静矩：

$$S_z = \frac{\sqrt{2}R^3}{6} + \frac{bR^2}{4}$$

圆截工字形截面的惯性矩：

$$J_z = \frac{\pi R^4}{8} + \frac{\sqrt{2}bR^3}{6}$$

剪力 Q 沿梁的长度方向为一常数，即 $Q=P_y$ 。

将剪力、静矩、惯性矩代入式(2)即可得到圆截工字梁腹板上的剪应力并求得剪应变：

$$\tau_{xy\max} = \frac{QS_z}{J_z b} = \frac{2P_y}{3\pi R + 4\sqrt{2}b} \left(\frac{2\sqrt{2}}{b} + \frac{3}{R} \right) \quad (9)$$

$$\gamma_{xy\max} = \frac{\tau_{xy\max}}{G} = \frac{4(1+\mu)P_y}{(3\pi R + 4\sqrt{2}b)E} \left(\frac{2\sqrt{2}}{b} + \frac{3}{R} \right) \quad (10)$$

与中性轴成 45° 方向的主应变为：

$$\varepsilon_{45^\circ} = \pm \frac{\gamma_{xy\max}}{2} = \pm \frac{2(1+\mu)P_y}{(3\pi R + 4\sqrt{2}b)E} \left(\frac{2\sqrt{2}}{b} + \frac{3}{R} \right) \quad (11)$$

三、悬臂剪切梁型称重传感器抗侧向载荷能力评定

应变式称重传感器作为电子衡器的重要基础部件，它所受到的各向载荷归结起来由六个力及力矩分量组成，即三个方向的力为 P_x 、 P_y 、 P_z ，三个方向的力矩为 M_x 、 M_y 、 M_z ，其弹性元件受力情况如图 3 所示。

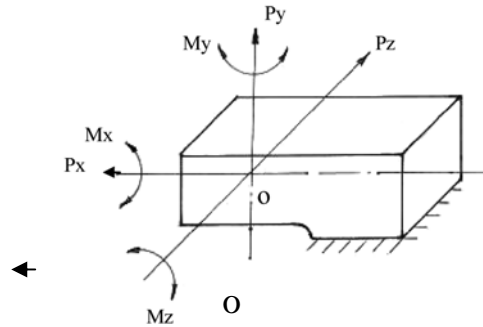


图 3 悬臂剪切梁弹性元件受力简图

对于称重传感器而言，除了需要测量的正向载荷外，其余各分量均可看作是侧向载荷。悬臂剪切梁型称重传感器的正向载荷为 P_y ，其余分量 P_x 、 P_z 、 M_x 、 M_y 、 M_z 均为侧向载荷。在侧向载荷中，讨论 P_z 、 P_x 的影响最具有实际意义，因为 z 向和 x 向侧向载荷是悬臂剪切梁型称重传感器最主要的力学干扰量。20 世纪 80 年代，中国计量科学研究院原传感器研究室经过试验研究，提出用侧向载荷承载率对悬臂剪切梁型称重传感器抗侧向载荷的能力进行评定。所谓侧向载荷承载率，就是在一定值的侧向载荷作用下，当弹性元件的一特定截面上的最大应力值等于在正向额定载荷作用下的各对应最大应力值时，该侧向载荷值与正向额定载荷值之比就称之为该称重传感器的侧向载荷承载率。它反映了在侧向载荷作用下，称重传感器的应力—应变值与正向载荷作用下的应力—应变值之间的差别。它描述了称重传感器在正常（不过载）、安全（不破坏）的情况下，所能够承受的侧向载荷大小的能力。

四、悬臂剪切梁型称重传感器抗侧向载荷能力分析

1. 方截工字梁型称重传感器

(1) z 向载荷 P_z 承载率

悬臂剪切梁型称重传感器在 z 向载荷 P_z 作用下，弹性应变梁产生横向弯曲。为使抗侧向载荷能力评定尽量准确，取弹性应变梁中的C、B、A三个截面进行计算。弹性元件各特定截面位置如图4所示，在 z 向载荷 P_z 作用下的力学模型如图5所示。

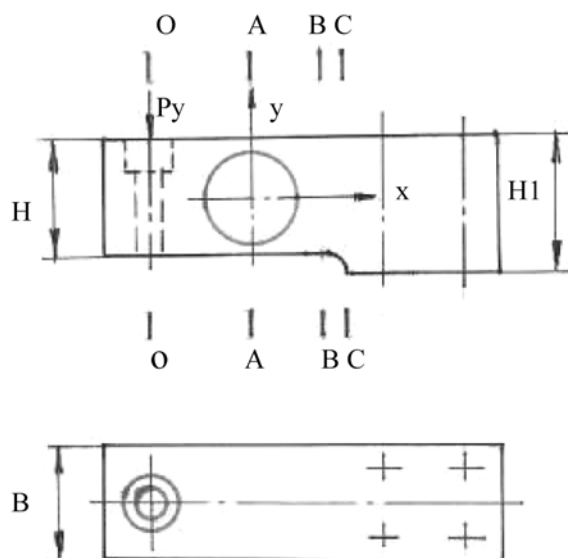


图4 方截工字梁弹性元件上的特定截面

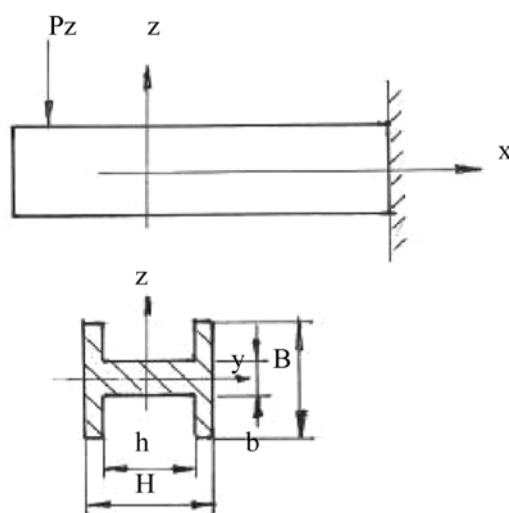


图5 z 向载荷作用下方截工字梁的力学模型

悬臂剪切梁固定端 C—C 截面

在 P_z 作用下截面C—C上的最大弯曲应力为：

$$\sigma_{cz \max} = \frac{P_z \cdot OC}{W_{cy}} \quad (12)$$

式中： W_{cy} —截面C—C对于y轴的抗弯截面模量；

OC—截面O—O与截面C—C间的距离。

同理，在载荷 P_y 作用下，截面C—C上的最大弯曲应力为：

$$\sigma_{cy\max} = \frac{P_y \cdot OC}{W_{cz}} \quad (13)$$

令 $\sigma_{cz\max} = \sigma_{cy\max}$ ，即可得到按特定截面C—C计算的z向载荷 P_z 承载率：

$$\frac{P_z}{P_y} = \frac{W_{cy}}{W_{cz}} = \frac{B}{H_1} \quad (14)$$

弹性应变梁与固定端附近的过度段B—B截面

用与C—C截面同样方法，可得到

$$\frac{P_z}{P_y} = \frac{B}{H} \quad (15)$$

弹性应变梁应变区A—A截面

首先利用式(2)计算最大剪应力

$$\tau_{xz\max} = \frac{Q_{xz} S_{y\max}}{J_y (H-h)} \quad (16)$$

由图5方截工字梁弹性元件在 P_z 载荷作用下的力学模型，可求得截面静矩和惯性矩

$$S_{y\max} = \frac{(H-h)B^2 + hb^2}{8}$$

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

将截面静矩和惯性矩代入式(16)，得

$$\tau_{xy\max} = \frac{3}{2} \cdot \frac{Q_{xz}}{H-h} \cdot \frac{(H-h)B^2 + hb^2}{(H-h)B^3 + hb^3} \quad (17)$$

联立式(6)式(17)，并令 $\tau_{xz\max} = \tau_{xy\max}$ 得

$$\frac{P_z}{P_y} = \frac{Q_{xz}}{Q_{xy}} = \frac{H-h}{B} \cdot \frac{(H-h)B^3 + hb^3}{BH^3 - (B-b)h^3} \cdot \frac{B(H^2 - h^2) + bh^2}{(H-h)B^2 + hb^2} \quad (18)$$

应变区的最大主应力

$$\sigma_{Az \max} = \frac{P_z \cdot OA}{\frac{J_y}{\frac{B}{2}}} = \frac{6P_z \cdot OA \cdot B}{(H-h)B^3 + hb^3} \quad (19)$$

同样有

$$\sigma_{Ay \max} = \frac{P_y \cdot OA}{\frac{J_z}{\frac{H}{2}}} = \frac{6P_y \cdot OA \cdot H}{BH^3 - (B-b)h^3} \quad (20)$$

联立式 (19) (20), 并令 $\sigma_{Az \max} = \sigma_{Ay \max}$ 得

$$\frac{P_z}{P_y} = \frac{H}{B} \cdot \frac{(H-h)B^3 + hb^3}{BH^3 - (B-b)h^3} \quad (21)$$

(2) x向载荷 P_x 承载率

在x向载荷 P_x 作用下, 应变剪切梁的力学模型如图 6 所示。

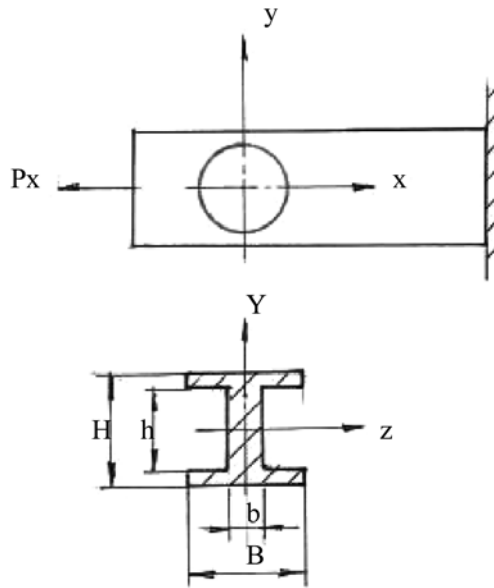


图 6 x 向载荷作用下方截工字梁的力学模型

在 P_z 作用下, 应变梁产生轴向拉伸或压缩变形, 只需要计算拉伸、压缩正应力即可。应变区截面上的正应力为:

$$\sigma_{Az} = \frac{P_x}{bh + B(H-h)} \quad (22)$$

可以通过正向载荷 P_y 作用下给出的工字梁腹板上的平均剪应力的估算值, 与式 (22) 进行比较的方法求得x向载荷 P_x 承载率。由于剪力沿应变梁长度方向为

一常量 剪应力基本上是均匀分布的 ,并且截面上的剪应力 95% 以上由腹板承担 ,因此可以很容易得到腹板上的平均剪应力估算值 ,即

$$\bar{\tau}_{xy} = \frac{Q_{xy}}{bh} = \frac{P_y}{bh} \quad (23)$$

因为弹性元件材料的拉伸许用应力 [] 与剪切许用应力 [] 存在下列近似关系 ,即

$$[\] = f [\] \quad (24)$$

式中 $f = 0.6 \sim 0.8$ 。

联立式 (22) (23) (24) , 并令 $f\sigma_{Ax} = \bar{\tau}_{xy}$, 得

$$\frac{P_x}{P_y} = \frac{1}{f} \left[1 + \frac{B(H-h)}{bh} \right] \quad (25)$$

利用式 (25) 即可计算出方截工字梁称重传感器侧向载荷承载率。

2. 圆截工字梁型称重传感器

(1) z 向载荷 P_z 承载率

由于圆截工字梁称重传感器固定端的截面与应变区截面为同一个圆形弹性元件 ,所以在载荷 P_x 与 P_y 作用下 ,固定端截面上的应力状态是等效的 ,因此无需采用上述方截工字梁选取三个特定截面进行计算。显然 ,其 z 向载荷承载率为 100%。

对于应变区中心处的横截面而言 ,由于弯矩为零 ,因此无需计算截面上的正应力 ,只计算最大剪应力即可。圆截工字梁弹性元件在 z 向载荷 P_z 作用下的力学模型如图 7 所示。

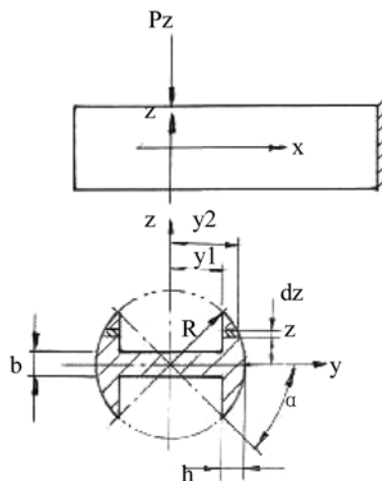


图 7 z 向载荷作用下圆截工字梁的力学模型

同样利用式 (2), 有

$$\tau_{xz \max} = \frac{Q_{xz} \cdot S_{y \max}}{J_y \cdot 2h} \quad (26)$$

截面对 y 轴的静矩为 :

$$S_{y \max} = 2 \int_0^{R \sin \alpha} z(y_2 - y_1) dz + \frac{Rb^2}{4} \cos \alpha$$

代入 $\alpha = 45^\circ$, 经计算得

$$S_{y \max} = \frac{8R^3(2 - \sqrt{2}) + 3\sqrt{2}Rb^2}{24}$$

截面对 y 轴的惯性矩为 :

$$J_x = 4 \int_0^{R \sin \alpha} z^2 (\sqrt{R^2 - z^2} - R \cos \alpha) dz + \frac{Rb^3}{6} \cos \alpha$$

代入 $\alpha = 45^\circ$, 经计算得

$$J_y = \frac{3\pi R^4 - 8R^4 + 2\sqrt{2}b^3}{24}$$

截面两端弓形的宽度为

$$h = R(1 - \cos \alpha) = \frac{R(2 - \sqrt{2})}{2}$$

因剪 $Q_{xz} = P_z$, 将静矩、惯性矩、弓形宽度代入式 (26), 经计算得

$$\tau_{xz \max} = \frac{P_z [8R^3(2 - \sqrt{2}) + 3\sqrt{2}Rb^2]}{(3\pi R^4 - 8R^4 + 2\sqrt{2}b^3) [R(2 - \sqrt{2})]} \quad (27)$$

联立式 (9) 式 (27), 并令 $\tau_{xy \max} = \tau_{xz \max}$ 经过计算得 :

$$\frac{P_x}{P_y} = \frac{2(3\pi R^4 - 8R^4 + 2\sqrt{2}b^3) [R(2 - \sqrt{2})]}{[8R^3(2 - \sqrt{2}) + 3\sqrt{2}Rb^2] (3\pi R + 4\sqrt{2}b)} \cdot \left(\frac{2\sqrt{2}}{b} + \frac{3}{R} \right) \quad (28)$$

(2) x向载荷 P_x 承载率

在载荷 P_x 作用下, 圆截工字梁受轴向拉伸、压缩变形, 因此只需要计算正应力, 其力学模型如图 8 所示。

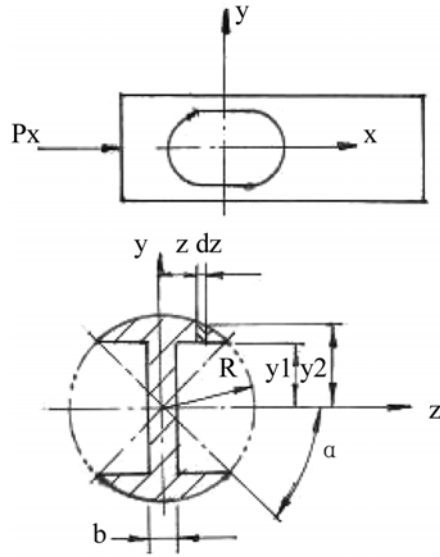


图 8 x 向载荷作用下圆截工字梁的力学模型

应变区截面上的正应力为：

$$\sigma_{Ax} = \frac{P_x}{A}$$

式中 A 为圆截工字梁面积，即

$$A = 4 \int_0^{R \sin \alpha} (y_2 - y_1) dz + 2bR \cos \alpha = 4 \int_0^{R \sin \alpha} (\sqrt{R^2 - z^2} - R \cos \alpha) dz + 2bR \cos \alpha$$

代入 $\alpha = 45^\circ$ ，经计算得：

$$A = R^2 \left(\frac{\pi}{2} - 1 \right) + \sqrt{2} b R$$

$$\text{则 } \sigma_{Ax} = \frac{P_x}{R^2 \left(\frac{\pi}{2} - 1 \right) + \sqrt{2} b R} \quad (29)$$

因圆截工字梁腹板为矩形截面，其截面积为

$$A_1 = 2bR \cos \alpha = \sqrt{2} b R$$

则腹板的剪应力为

$$\bar{\tau}_{xy} = \frac{Q_{xy}}{\sqrt{2} b R} = \frac{P_y}{\sqrt{2} b R} \quad (30)$$

联立式 (24)、(29)、(30)，得

$$\frac{P_x}{P_y} = \frac{1}{f} \cdot \left[1 + \frac{\left(\frac{\pi}{2} - 1\right) R^2}{\sqrt{2bR}} \right] \quad (31)$$

3. z向 P_z 和x向 P_x 载荷承载率计算

现以量程为 5000kg、10000kg的方截工字梁和量程为 2000kg的圆截工字梁称重传感器为例，进行z向 P_z 和x向 P_x 载荷承载率计算。

(1) 5000kg 方截工字梁称重传感器

额定量程为 5000kg 的方形截面悬臂剪切梁弹性元件，应变区工字梁截面尺寸参数为：

$$P_y=5000\text{kg} \quad H=40\text{mm} \quad h=30\text{mm} \quad B=48\text{mm} \quad b=9\text{mm}$$

将上述工字形截面尺寸参数代入式(6)、(7)、(8)，得

$$xy_{\max}=17.211\text{kg} / \text{mm}^2 \quad xy_{\max}=2131 \times 10^{-6} \quad 45^\circ_{\max}=\pm 1065 \times 10^{-6}$$

z向 P_z 载荷承载率：

将工字形截面尺寸参数代入式(21)，得

$$\frac{P_z}{P_y} = \frac{H}{B} \cdot \frac{(H-h)B^3 + hb^3}{BH^3 - (B-b)h^3} = \frac{40}{48} \cdot \frac{(40-30)48^3 + 30 \times 9^3}{48 \times 40^3 - (48-9)30^3} = 0.466 \approx \frac{1}{2}$$

x向 P_x 载荷承载率：

将工字形截面尺寸参数代入式(25)，并取 $f=0.7$ ，得

$$\frac{P_x}{P_y} = \frac{1}{f} \left[1 + \frac{B(H-h)}{bh} \right] = \frac{1}{0.7} \left[\frac{48(40-30)}{9 \times 30} \right] = 3.969 \approx 4$$

(2) 10000kg 方截工字梁称重传感器

额定量程为 10000kg 的方形截面悬臂剪切梁弹性元件，应变区工字梁截面尺寸参数为：

$$P_y=10000\text{kg} \quad H=60\text{mm} \quad h=44\text{mm} \quad B=70\text{mm} \quad b=12\text{mm}$$

将上述工字形截面尺寸参数代入式(6)、(7)、(8)，得

$$xy_{\max}=17.156\text{kg} / \text{mm}^2 \quad xy_{\max}=2124 \times 10^{-6} \quad 45^\circ_{\max}=\pm 1062 \times 10^{-6}$$

z向 P_z 载荷承载率：

将工字形截面尺寸参数代入式(21)，得

$$\frac{P_z}{P_y} = \frac{H}{B} \cdot \frac{(H-h)B^3 + hb^3}{BH^3 - (B-b)h^3} = \frac{60}{70} \cdot \frac{(60-44)70^3 + 44 \times 12^3}{70 \times 60^3 - (70-12)44^3} = 0.469 \approx \frac{1}{2}$$

x向 P_x 载荷承载率：

将工字形截面尺寸参数代入式 (25)，并取 $f=0.7$ ，得

$$\frac{P_x}{P_y} = \frac{1}{f} \left[1 + \frac{B(H-h)}{bh} \right] = \frac{1}{0.7} \left[\frac{70(60-44)}{12 \times 44} \right] = 4.458 \approx 4.5$$

(3) 2000kg 圆截工字梁称重传感器

额定量程为 2000kg 的圆形截面悬臂剪切梁弹性元件，应变区工字梁截面尺寸参数为：

$$P_y=2000\text{kg} \quad R=16\text{mm} \quad b=5\text{mm}$$

将上述工字形截面尺寸参数代入式 (9)、(10)、(11)，得

$$x_{y\max}=16.842\text{kg} / \text{mm}^2 \quad x_{y\max}=2085 \times 10^{-6} \quad 45^\circ \max = \pm 1043 \times 10^{-6}$$

z向 P_z 载荷承载率：

将工字形截面尺寸参数代入式 (28)，得

$$\begin{aligned} \frac{P_x}{P_y} &= \frac{2(3\pi R^4 - 8R^4 + 2\sqrt{2}b^3) \left[R(2 - \sqrt{2}) \right]}{\left[8R^3(2 - \sqrt{2}) + 3\sqrt{2}Rb^2 \right] (3\pi R + 4\sqrt{2}b)} \cdot \left(\frac{2\sqrt{2}}{b} + \frac{3}{R} \right) \\ &= \frac{2(3\pi 16^4 - 8 \times 16^4 + 2\sqrt{2} \times 5^3) \left[16(2 - \sqrt{2}) \right]}{\left[8 \times 16^3(2 - \sqrt{2}) + 3\sqrt{2} \times 16 \times 5^2 \right] (3\pi 16 + 4\sqrt{2} \times 5)} \cdot \left(\frac{2\sqrt{2}}{5} + \frac{3}{16} \right) = 0.353 \approx \frac{2}{5} \end{aligned}$$

x向 P_x 载荷承载率：

将工字形截面尺寸参数代入式 (31)，并取 $f=0.7$ ，得

$$\begin{aligned} \frac{P_x}{P_y} &= \frac{1}{f} \cdot \left[1 + \frac{\left(\frac{\pi}{2} - 1 \right) R^2}{\sqrt{2}bR} \right] \frac{P_x}{P_y} = \frac{1}{f} \cdot \left[1 + \frac{\left(\frac{\pi}{2} - 1 \right) R^2}{\sqrt{2}bR} \right] \\ &= \frac{1}{0.7} \cdot \left[1 + \frac{\left(\frac{\pi}{2} - 1 \right) 16^2}{\sqrt{2} \times 5 \times 16} \right] = 3.275 \approx 3 \end{aligned}$$

通过理论计算和试验测量证明，方形截面悬臂剪切工字梁型称重传感器的侧向载荷承载率可高达：z 向 50% ~ 100%；x 向 400% ~ 600%；圆形截面悬臂剪切工字梁型称重传感器的侧向载荷承载率较低些：z 向 40% ~ 60%；x 向 300% ~

500%。抗侧向载荷能力明显优于其它结构的称重传感器，而不必采取任何侧向载荷抑制措施。值得注意的是必须严格保证悬臂剪切梁型称重传感器根部的安装刚度。具体要求是：紧固螺钉应有足够的强度，并垂直压住悬臂剪切梁称重传感器，使其尽量形成刚性固定；采用多个螺钉紧固时，必须应用均压垫消除局部应力影响，或逐个调节各个螺钉的预紧力使其尽量一致；根部固定装置应有防止悬臂剪切梁发生横向位移或转动的功能；安装完毕的悬臂剪切梁称重传感器必须保证其正向载荷与加载轴线重合。

五、悬臂剪切梁型称重传感器侧向载荷影响因素分析

由于双剪切电阻应变计沿工字梁腹板中性轴对称粘贴，且敏感栅与中性轴成 45° ，工字梁腹板两侧感知正、负应变的电阻应变计分别为惠斯通电桥的相对臂，理想条件下称重传感器在侧向载荷作用下，电桥输出为零。

在 z 向载荷 P_z 作用下，工字梁腹板两侧感知正负应变值的电阻应变计，一侧受到拉伸应力作用，一侧受到压缩应力作用。由于受到的拉伸与压缩应力幅度相同，所以电桥输出无变化。

在 x 向载荷 P_x 作用下，工字梁腹板两侧感知正负应变值的电阻应变计，同时受到拉伸或压缩应力作用，各片电阻应变计受到的正或负应变相同，电桥输出也无变化。

实际上，在悬臂剪切梁型称重传感器制造和应用过程中，均存在一定程度的偏差和各种因素的影响，当悬臂剪切梁型称重传感器受到侧向载荷作用时，仍然会有较小的输出信号，其值可通过标定得出。这些偏差和影响因素概括起来主要有：弹性元件尺寸和形位公差；弹性元件材料的不均匀性；热处理工艺的不均匀性；弹性元件及其附件的连接、摩擦接触、紧固或任何非整体状态影响；弹性元件受横向弯曲时的实际中性面与理想中性面之间的偏离；各电阻应变计电阻值的分散度和粘贴方位偏差；电阻应变计或各项电路补偿与调整电阻器面积上的温度梯度影响；应变粘接剂固化和后固化状态的不一致性等。

六、结束语

从上述计算与分析不难得出，悬臂剪切梁型称重传感器应变区的工字形截面腹板处于平面应力状态下，其剪应力为零的主应力平面与主应力为零的最大剪应力平面互相乘 45° 角。为提高悬臂剪切梁型称重传感器抗侧向载荷的能力，保

证电阻应变计定位准确度,应尽量采用双剪切型电阻应变计,确保敏感栅与弹性元件中性轴成较严格的 45° 。文中按纯弯曲理论导出的工字形截面剪切梁的剪应力和主应力、主应变计算公式与弹性力学精确解基本一致,可在实际设计中应用。中国计量科学研究院原传感器研究室提出的,用侧向载荷承载率评定悬臂剪切梁型称重传感器抗侧向载荷能力是可行的,对于称重传感器设计与计算和抗侧向载荷能力评定均有参考作用。

参考文献

1. 朱鼎铭. 剪切悬臂梁型力传感器抗侧向负荷能力评定与计算 [C]. 第二届全国测力与称重技术研讨会资料. 中国计量科学研究院, 1988 年 9 月。
2. (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. James Dorsey (美国) 著、朱鼎铭译. 应变式力传感器的误差 [C]. 国际计量联合会测力与称重技术论文选. 中国计量出版社, 1982 年 8 月。
4. F. Abdullah/U. Erdem (英国). 林自强译. 剪切式测力传感器的数学模型和设计 [J]. 试验技术, 1988 年第 3 期。