

# 轴销剪切式称重传感器的结构特点与理论计算

□刘九卿

中国运载火箭技术研究院第七零二研究所

**【摘要】**电阻应变式称重传感器是各类电子衡器的核心基础部件，得到广泛应用的有圆柱、圆筒、圆环、圆板式，悬臂平行梁、剪切梁，双端固支弯曲梁、剪切梁式，低外形轮辐式等多种结构。本文探讨了一种虽然在电子衡器中很少采用，但在许多方面却非常适用的轴销剪切式称重传感器。介绍了它的结构与特点，通过建立力学模型，分析了轴销剪切式弹性元件的力学特性、直径效应、长度效应，给出了轴销剪切式弹性元件应变区剪切应力、剪切应变的理论计算公式，供结构设计与计算参考。

**【关键词】**轴销剪切式称重传感器；双剪切电阻应变计；力学模型；直径效应；长度效应

文献标识码：A 文章编号：1003-1870 (2026) 02-0005-08

## Structural Characteristics and Theoretical Calculation of Pin-Type Shear Load Cells

**【Abstract】** Resistance strain gauge load cells are the core basic components of various electronic weighing instruments, which are widely used in various structures such as cylindrical, tubular, annular, circular plate types, cantilever parallel beam, shear beam, double-end fixed bending beam, shear beam types, and low-profile spoke types. This paper explores a pin-type shear load cell that, while rarely used in electronic weighing instruments, is highly applicable in many respects. Its structure and characteristics are introduced, the mechanical properties, diameter effect and length effect of the pin-type shear elastic element are analyzed by establishing a mechanical model, and the theoretical calculation formulas for the shear stress and shear strain in the strain zone of the pin-type shear elastic element are given for reference in structural design and calculation.

**【Keywords】** pin-type shear load cell; double-shear resistance strain gauge; mechanical model; diameter effect; length effect

### 概述

轴销剪切式称重传感器尚未研制成功和实际应用之前，难以对承重轴上的载荷进行直接测量。这是由于作用在轴销表面的弯曲应力不但取决于施加载荷的大小，而且还取决于弯曲扭转力矩，相同的载荷在轴上的作用位置不同引起的弯曲应力也不同。所以那时解决此问题的方法是在各种行车、吊

车的吊钩上直接悬挂相应规格的电子吊钩秤，不但占用了起吊高度，而且还没有信号传输、超载报警等功能。为解决上述问题，可将行车、吊车定滑轮的承重轴按相同的外形尺寸设计成一个适用于外载荷测量的称重传感器，即轴销剪切式称重传感器。由于定滑轮承重轴的结构形状和尺寸不能改变，而且也不可能在其表面粘贴电阻应变计，因此需要通

过更换材料并在支撑滑轮与承载滑轮之间的轴段设置可形成剪切面的结构，使其满足称重传感器结构设计和制造工艺要求。一种可行的解决途径是，将定滑轮轴改制为称重传感器的弹性元件，使吊车的

定滑轮成为电子吊钩秤。现以30t吊车定滑轮组为例说明此问题，其结构如图1所示。图中1-支撑滑轮；2-承载滑轮；3-卡板；4-油管；5-定滑轮轴；6-梁；7-支撑板。

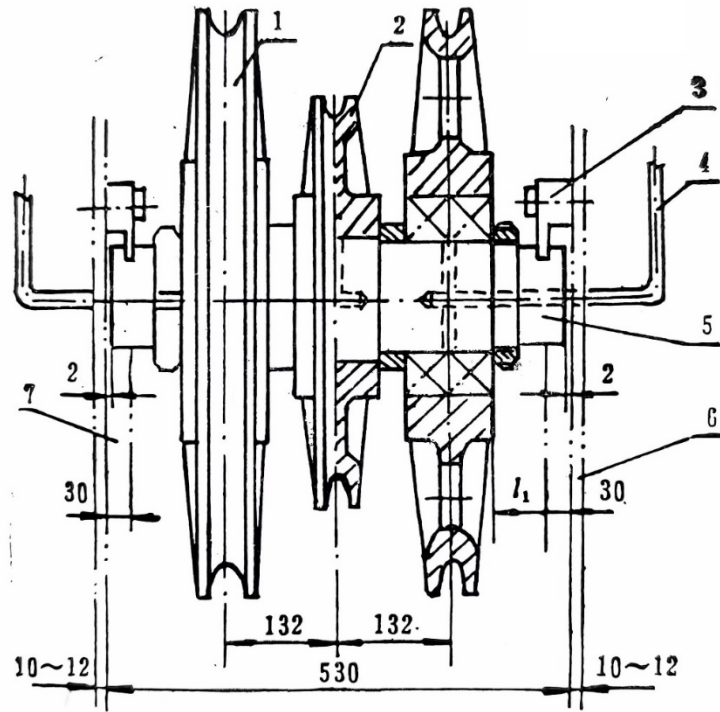


图1 30t吊车定滑轮组结构及尺寸图

在行车、吊车起吊重物时，从两个支承滑轮与中心承载滑轮对轴中心段和两个支承段的受力情况可以看出，轴销上两个支承之间的剪切面可以利用。由于轴销表面处于与支撑滑轮1和承载滑轮2安装配合状态，无法在其表面粘贴电阻应变计。只有将承载滑轮和两个支撑滑轮之间的间隙处加工成凹形槽，并在轴销中心加工出一个不贯通的圆孔，这样在吊车定滑轮轴卸载后，就在两个凹槽的内外表面形成了剪切应变区，将两组双剪切电阻应变计粘贴在轴销凹槽截面圆孔内180°对称处，组装成惠斯通电桥电路即成为轴销剪切式称重传感器。为了补偿在滑轮轴上加工凹形槽和在中心加工不贯通的圆孔带来的强度损失，将滑轮轴的材料更改为称重传感器通用的40CrNiMoA中碳合金结构钢，这样既补偿了轴销在强度上的损失，又符合对称重传感器弹性元件金属材料的要求。典型的轴销剪切式称重传感

器弹性元件结构及受力情况如图2所示。

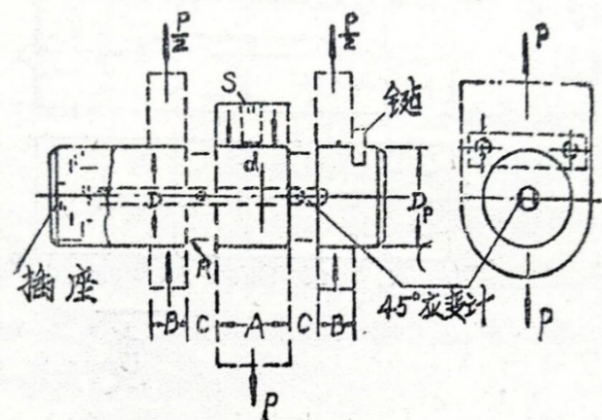


图2 轴销剪切式称重传感器结构及受力简图

被称量载荷P施加在轴销的中心A段，轴销的两端支撑在B段，电阻应变计粘贴在A、B间的未支撑

跨度C段的中性轴处。单轴电阻应变计与轴销中心轴线成45° 粘贴；双剪切电阻应变计与轴销中心轴线平行粘贴。此轴销粘贴电阻应变计的应变区，在外载荷作用下处于纯剪切作用的应力状态。由结构力学知，一个截面的应力状态为纯剪切时，剪应力沿轴的长度均匀分布，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：

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

为准确地粘贴电阻应变计，多选用双剪切电阻应变计粘贴在轴销弹性元件圆孔内应变区两侧（即0° 和180° 方向），在两端支承和中间吊钩作用下，定滑轮的承力轴销就成为轴销剪切式称重传感器弹性元件。具体应用时，将此轴销剪切式称重传感器替换在吊车定滑轮组上即可进行称重计量。

### 1 轴销剪切式称重传感器的结构原理与特点

轴销剪切式称重传感器是按照吊车定滑轮承力轴外形尺寸，更换金属材料按照称重传感器设计与

制造工艺要求而设计的一种专用结构，替换吊车定滑轮轴形成电子吊车秤而进行称重计量。由于受承力轴的结构和尺寸限制，将其转换为一个称重传感器还是有一些难度的。在保证外形尺寸不变的前提下，最合理有效的方法是变轴销的金属材料为高强度合金结构钢，在轴销一端加工一个不贯通的中心圆孔，形成空心截面圆筒结构，并在圆轴两端支承和中心承载部位的交界处加工出凹槽，这就形成了空心截面剪切应变梁的应变区，双剪切电阻应变计就粘贴在轴销孔内凹槽中心位置的两侧，在外载荷作用下产生剪切应力。众所周知，剪切应力是不能测量的，但它产生的拉、压成对的主应力、主应变是可以测量的。在此应变区粘贴感受正、负应变的电阻应变计，组成惠斯通电桥电路即可完成称重计量任务。有两种组成惠斯通电桥电路的方法，即两个凹槽处的双剪切电阻应变计共同组成惠斯通电桥电路，或分别组成惠斯通电桥电路后再并联形成电桥电路进行测量，轴销剪切式称重传感器的结构如图3 所示。

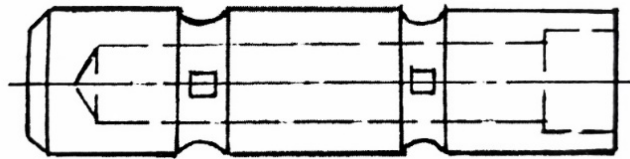


图3 轴销剪切式称重传感器结构简图

在将定滑轮轴置换为轴销剪切式称重传感器时，比较困难的问题是载荷敏感区总是受到限制，由于尺寸的制约而不能正确地设计比较理想的剪切应变区长度，对输出特性有一定影响，因此需要处理好剪切应变区的长度与弯曲应力的关系。尽管如此，轴销剪切式称重传感器已被证明是一种比较经济的称重手段。

轴销剪切式称重传感器同其他称重传感器一样，必须能承受来自三个方向的力和力矩而不至于损坏，弹性元件还必须只对测量方向上的载荷敏感，这就必须通过优化轴销弹性元件应变区设计和合理组成惠斯通电桥电路加以解决。具体组成惠斯通电桥电路的方法是：在轴销剪切式弹性元件应变区两侧对称地粘贴各一片双剪切电阻应变计。按组成惠斯通电桥电路的要求，相对桥臂电阻应变计的应变方向相同、相邻桥臂电阻应变计的应变方向相反

的原则，组装成惠斯通电桥电路如图4 所示。

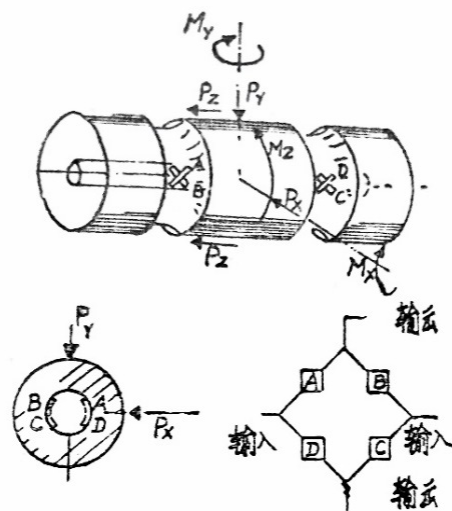


图4 轴销剪切式称重传感器电阻应变计粘贴位置及电桥电路

图4中给出了轴销剪切式称重传感器弹性元件代表三个外载荷和力矩坐标的 $P_x$ 、 $P_y$ 、 $P_z$ 和 $M_x$ 、 $M_y$ 、 $M_z$ 作用情况，由于组装惠斯通电桥电路科学合理，当吊车滑轮组起吊重物进行称重计量时，能够保证准确地测量出 $P_y$ 方向的载荷。在 $P_x$ 、 $P_z$ 、 $M_x$ 、 $M_y$ 的作用下，惠斯通电桥仍能保持平衡，只是单个电阻应变计的输出有微小差别。残余的力矩 $M_y$ 由于弯曲力矩的关系，可能会引起不平衡输出，但若电阻应变计粘贴在轴的圆孔内壁，这种影响可以忽略不计。

轴销剪切式称重传感器具有如下特点；

(1) 弹性元件为一整体空心截面圆轴，结构简单紧凑，几何外形为圆形、中心为圆孔，容易加工出较高的尺寸和形位精度。

(2) 空心截面轴销结构具有较强的抗扭转、抗弯曲能力，并且轴销中心轴处应力最大。

(3) 当空心截面轴销承受垂直和水平弯曲时，弯曲力矩为零的截面在同一截面。

(4) 当设计较大量程的轴销剪切式称重传感器时，中心孔也较大，双剪切电阻应变计可以粘贴在孔内，既可以得到很好的保护，又可以实施抽真空充惰性气体密封工艺。

(5) 与相关承力部件组装容易，使用方便。

## 2 轴销剪切式称重传感器制造工艺难点及解决方法

轴销剪切式称重传感器的主要应用形式是替换吊车的定滑轮轴，使其成为电子吊秤。根据不同吊车的起重量和安装条件，轴销剪切式称重传感器一般有两种结构形式。

其一是吊车起吊的载荷较小，轴销剪切式弹性元件的内孔较小或不能加工出内孔时，也可以选择轴销两个承载间隙处加工出弧形凹槽，使其成为纯剪切应变区，在弧形表面粘贴双剪切电阻应变计。但需要保证凹槽弧长是双剪切电阻应变计敏感栅长度的2倍。还需要在轴销中心加工一个不贯通的小圆孔，用于引出电阻应变计的导线并完成惠斯通电桥的组装。此方案的缺点是对轴销剪切式称重传感器电阻应变计的防护密封工艺要求较高，提高了制造工艺难度。

其二是吊车起吊载荷较大，可以在轴销弹性元

件上加工中心圆孔，由于轴销的外径尺寸限制，形成应变区的内孔无法加工得太大，给在轴销弹性元件孔内应变区粘贴双剪切电阻应变计带来很大困难，某些情况下难以通过常规工艺实现。国外称重传感器制造企业，在轴销剪切式称重传感器弹性元件内孔应变区，粘贴双剪切电阻应变计和组装惠斯通电桥电路的工艺方法是：

(1) 选择适合轴销内孔应变区尺寸的双剪切电阻应变计，在其焊点或引线处焊接较长且绝缘性好的引出线。

(2) 准备一张带有方格坐标的聚酯薄膜，作为电阻应变计在圆孔内应变区精确定位的临时底基，将需要粘贴的双剪切电阻应变计无底基的那一面，按照中心圆孔内电阻应变计对应的位置粘贴在聚酯薄膜上。

(3) 在双剪切电阻应变计基底及轴销孔内应变区涂覆应变粘接剂。

(4) 将带有双剪切电阻应变计的聚酯薄膜卷成圆筒形，插入轴销弹性元件的圆孔内，由于插入深度事先已在聚酯方格薄膜标注好，插入后保证双剪切电阻应变计定位准确。

(5) 利用聚酯方格薄膜将双剪切电阻应变计粘贴在轴销孔内后，将与轴销圆孔直径相同的高温橡胶压片放入粘贴双剪切电阻应变计处，再将一特制的高温承压软管放入圆孔内，对软管施加产生对双剪切电阻应变计足够压力的气压，使其进行加压并实施高温固化和后固化工艺。

(6) 高温固化和后固化工艺完成后取出高温承压软管、聚酯方格薄膜，在剪切电阻应变计上涂覆防护密封胶，对其进行表面防护密封处理。

(7) 将带有延长引线的双剪切电阻应变计组装成惠斯通电桥电路后，即可以按应变式称重传感器常规制造工艺进行各项工艺流程，直至形成合格产品。

## 3 轴销剪切式称重传感器的直径效应

将各种行车、吊车滑轮组的承重轴改进为轴销剪切式称重传感器，国外称重传感器制造企业的改进方法是：其一必须改变轴销的金属材料使其符合称重传感器弹性元件的冷热加工工艺要求；其二是必须使轴销剪切式称重传感器弹性元件受载后产生剪

切变形，因为剪切应力沿轴销长度方向均匀分布，符合称重传感器应变区的要求。国外轴销剪切式称

重传感器应变区通常有三种典型的横截面，如图5所示。

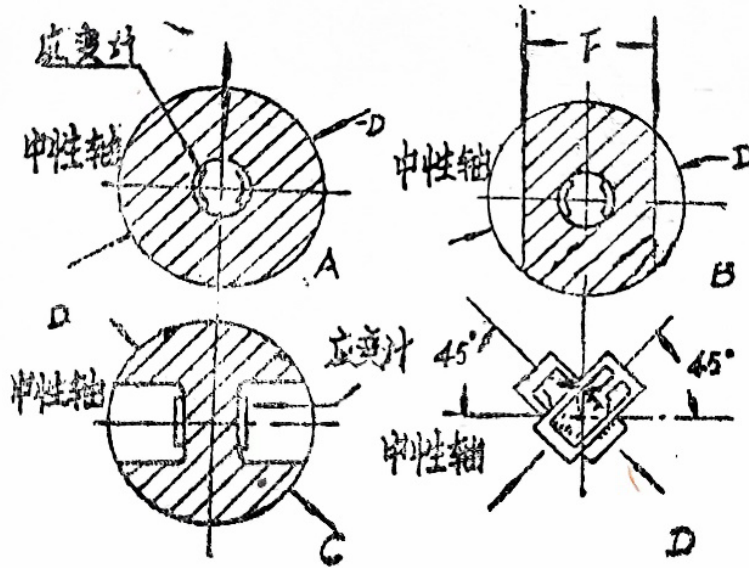


图5 轴销剪切式称重传感器的三种截面及电阻应变计粘贴方位

其一是圆孔截面，即在轴销中心加工出纵向不贯通圆孔，在圆孔内壁的应变区粘贴双剪切电阻应变计，如图5 A所示。其二是圆截长方形中心孔截面，即在有不贯通长圆孔轴销的两边对称地加工出一对平面，目的是增大剪切应力，提高灵敏度，如图5 B所示。其三是在轴销弹性元件两个承受剪切变形的应变区，对称地加工出圆或椭圆盲孔，局部形成工字形截面剪切梁，如图5 C所示。其剪切应力

方向与剪力平行，剪切应力的大小沿截面宽度均匀分布，沿截面高度呈抛物线变化，单轴电阻应变计粘贴位置如图5D所示。笔者认为，在圆截面工字形腹板上粘贴双剪切电阻应变计更合适。此种轴销剪切式弹性元件的弯曲应力与离开中性轴的距离成正比，其值在截面的上、下边缘处为最大，剪切应力与弯曲应力分布图如图6所示。

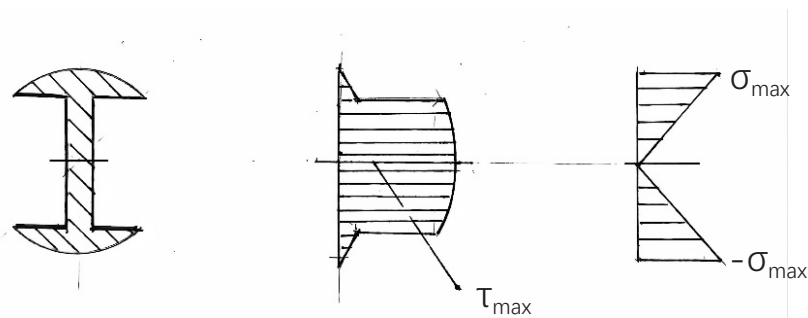


图6 圆截工字形截面剪切应力、弯曲应力分布图

在设计轴销剪切式称重传感器弹性元件应变区时，应合理权衡轴销截面面积的减小程度，使其在强度与灵敏度之间取得平衡。一般而言，应变区面积减小越多，灵敏度就越高。但面积的严重减小，将在轴销弹性元件内应变区产生较高的应力，从而降低了轴销的承载能力。在变实心轴销为空心轴销

时，内径足够大以便于粘贴电阻应变计，但仍必须确保剩余截面具有足够的强度，这样剪切式轴销称重传感器会有优良的线性和较小的滞后误差。

#### 4 轴销剪切式称重传感器的长度效应

轴销剪切式称重传感器的另一个关键设计因素是应变区长度C与轴销直径D的比值，因为轴销

弹性元件的截面积变化必然带来应变区圆角半径的改变, 致使最大剪切应力、剪切应变减少, 因而长度C 尽量增大才能提供一个近似为常数的剪切应变区, 这样才能确保应变区长度C 大于电阻应变计长度的2 倍, 以保证轴销剪切式称重传感器获得较好的线性度。但是增加应变区长度C 会使轴销的弯曲应力增大, 降低了轴销的强度。在实际应用中, 直径 $\phi 50\text{mm}$  以下的轴销弹性元件, 取 $\frac{C}{D} = 0.25\sim 0.50$ ; 直径大于 $\phi 50\text{mm}$  的轴销弹性元件, 取 $\frac{C}{D} = 0.12\sim 0.30$ 。尽管轴销剪切式称重传感器的设计取决于吊车滑轮轴的结构、尺寸, 但在使其改变为剪切式称重传感器弹性元件时仍具备一定的优化空间。

在对轴销剪切式称重传感器进行具体设计时, 较小载荷的轴销可以有较大的面积减小量, 以保证有较长的跨度(即应变敏感区)。对于较大载荷的

轴销, 则应设计成有较小面积的减少量和较短的跨度。对于轴销弹性元件的应变敏感段, 其最佳几何尺寸取决于轴销直径、施加的载荷大小、所用金属材料强度和、剪切电阻应变计尺寸、承载弹性元件的尺寸和强度, 以及所要求的计量性能等。

轴销剪切式称重传感器中性轴的载荷分布沿其长度在圆周方向都是变化的, 沿轴销长度载荷分布取决于轴销的弯曲刚度, 以及轴销加载与支承元件的刚度。为了使外载荷沿轴销长度方向的再分配减至最小, 通常采用中心和外沿在径向上削弱的轴销, 这样保证载荷作用靠近应变敏感段。

### 5 轴销剪切式称重传感器的理论计算

用于替代吊车定滑轮轴的剪切式轴销称重传感器, 其外形结构与受载形式决定了轴销称重传感器弹性元件的受力形式。为简化计算, 其轴销弹性元件可以简化为两端承力部分为简支, 中心受一集中载荷P 作用的圆形空心截面梁, 其力学模型如图7 所示。

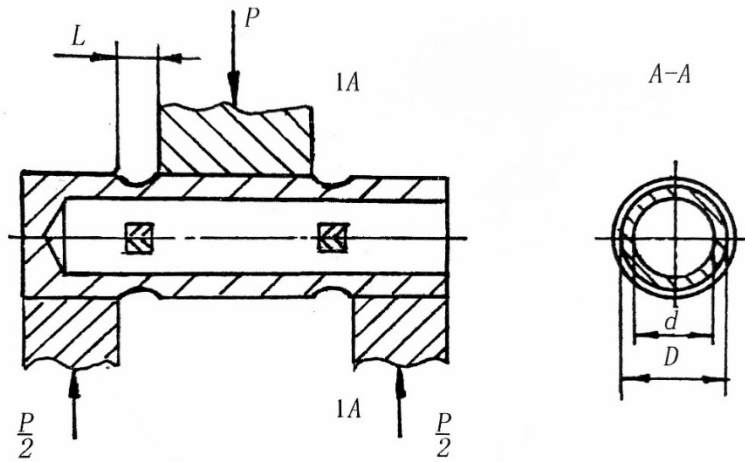


图7 轴销剪切式称重传感器的力学模型

轴销剪切式称重传感器弹性元件应变区为凹槽L 处的空心截面, 此截面中性层处的剪切应力最大, 其计算公式为:

$$\tau = \frac{QS_{max}}{J_y b} \quad (1)$$

式中:  $b=D-d$

剪力  $Q = \frac{P}{2}$

$$\text{静矩 } S_{max} = \frac{2D}{3\pi} \times \frac{\pi D^2}{8} - \frac{2d}{3\pi} \times \frac{\pi d^2}{8} = \frac{D^3-d^3}{12}$$

$$\text{惯性矩 } J_Y = \frac{\pi D^4}{64} - \frac{\pi d^4}{64} = \frac{\pi(D^4-d^4)}{64}$$

将上述各式代入式(1)即可得到空心截面弹性元件中心轴处的剪切应力, 即

$$\tau = \frac{\frac{P}{2} \times \frac{D^3-d^3}{12}}{(D-d) \frac{\pi(D^4-d^4)}{64}} = \frac{8P(D^2+Dd+d^2)}{3\pi(D^4-d^4)} \quad (2)$$

空心截面中性层处剪切应变为:

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

式中 $G$ 为剪切式轴销弹性元件金属材料的剪切弹性模量,

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

则

$$\gamma = \frac{16P(1+\mu)}{3\pi E} \times \frac{D^2+Dd+d^2}{D^4-d^4} \quad (3)$$

轴销弹性元件中性层处与轴线成 $45^\circ$ 方向的主应力、主应变为:

$$\sigma = \pm\tau = \pm \frac{8P}{3\pi} \times \frac{D^2+Dd+d^2}{D^4-d^4} \quad (4)$$

$$\varepsilon = \pm \frac{\gamma}{2} = \pm \frac{8P(1+\mu)}{3\pi E} \times \frac{D^2+Dd+d^2}{D^4-d^4} \quad (5)$$

轴销剪切式称重传感器的灵敏度为:

$$S = \pm \frac{8PK(1+\mu)}{3\pi E} \times \frac{D^2+Dd+d^2}{D^4-d^4} \times 10^3 \text{ mV/V} \quad (6)$$

式中 $K$ 为电阻应变计的灵敏系数。

轴销剪切式弹性元件空心截面中性层处的最大弯曲应力为:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{W}$$

$$\text{式中: } M_{max} = \frac{PL}{4}$$

$$W = \frac{\pi D^3}{32} \left[ 1 - \left( \frac{d}{D} \right)^4 \right]$$

则

$$\sigma_{max} = \frac{\frac{PL}{4}}{\frac{\pi D^3}{32} \left[ 1 - \left( \frac{d}{D} \right)^4 \right]} = \frac{8PL}{\pi D^3 \left[ 1 - \left( \frac{d}{D} \right)^4 \right]} \quad (7)$$

弯曲应变为:

$$\varepsilon_{max} = \frac{\sigma_{max}}{E} = \frac{8PL}{\pi D^3 E \left[ 1 - \left( \frac{d}{D} \right)^4 \right]} \quad (8)$$

轴销剪切式称重传感器应变区宽度 $L$ 的选取,应保证空心截面梁上中性层处剪切应力、应变为最大值,一般凹槽长度为电阻应变计敏感栅长度的2倍。轴销剪切式称重传感器的输出受很多因素影响,主要有轴销中心圆孔的直径 $d$ ,凹槽处的最小外径 $D$ ,轴销与支承之间的间隙,支承的硬度和剪切电阻应变计敏感栅的长度等。在对轴销剪切式弹性元件进行设计时应处理好相互关系,做到尺寸选择最佳化,以保证轴销剪切式称重传感器性能波动最小。

## 6 轴销剪切式称重传感器的误差来源

轴销剪切式称重传感器在具体应用中的误差来

源,归纳起来主要有:

(1) 为了具有最好的重复性和最小的滞后误差,轴销剪切式称重传感器的输出灵敏度不应设计太高,一般为 $1.00\text{mV/V}$ 。当轴销弹性元件受载时,不会因椭圆变形在轴销中引起较大的弯曲应力,这就增加了安全载荷和疲劳寿命。

(2) 轴销弹性元件的凹槽宽度必须是应变计敏感栅宽度的2倍。但是,如果凹槽过宽,当轴销剪切式称重传感器受载时就会产生较大的弯曲应力而引起误差,同时也降低了安全载荷。

(3) 轴销弹性元件与支承之间的间隙应尽量小一些,以减少弯曲变形。当轴销的直径为 $25\text{mm}$ 时,最大间隙为 $0.1\text{mm}$ ;当直径为 $100\text{mm}$ 时,最大间隙为 $0.18\text{mm}$ 。

(4) 轴销剪切式称重传感器的支承应具有足够的刚度来抵抗弯曲变形,测试与校准时,应该与实际安装使用时是同一个支承。

(5) 在使用寿命内,如果轴销剪切式称重传感器需要承受冲击载荷或许多循环载荷时,凹槽就需要有足够大的半径。如果要在很冷的天气( $0^\circ\text{C}$ 以下)工作并承受冲击载荷时,就不要选用较脆的钢种,可选用如 $0\text{Cr}17\text{Ni}4\text{Cu}4\text{Nb}$ 这类钢性较好的不锈钢来制造轴销。

## 7 结语

尽管轴销剪切式称重传感器在一定范围内得到应用,但在将定滑轮轴或动滑轮轴置换成轴销剪切式称重传感器时,各种影响因素较多,处理不好会引起较大的测量误差,应当注意的问题有:

(1) 实心或空心圆轴剪切弹性元件受载后会产生椭圆变形,产生较大的弯曲应力,使得重复性和滞后误差增大,同时也使安全过负荷和疲劳寿命指标下降,因此,轴销剪切式称重传感器的输出灵敏度不宜太高,一般以 $1.00\text{mV/V}$ 为好。

(2) 带有中心孔的轴销弹性元件外圆上凹槽处表面与内壁为粘贴电阻应变计的应变区,如果凹槽过宽,当轴销承受载时将承受较大的弯曲应力,引起测量误差,试验测试结果表明,凹槽的宽度应取双剪切电阻应变计敏感栅长度的2倍。

(3) 安装在定滑轮组上的轴销剪切式称重传感器在实际应用过程中,发现滑轮轴承的间隙直接

影响轴销的弯曲变形，因此间隙应尽可能减小，最好为紧密配合。当轴销直径为25mm时，最大间隙为0.1mm；当轴销直径为100mm时，最大间隙为0.18mm。

(4) 与安装轴销剪切式称重传感器配合的行车定滑轮、动滑轮支承，都应当具有足够的刚度来抵抗弯曲变形。实践证明，支承具有较大的刚度，是剪切式轴销称重传感器具有良好计量性能的重要条件。轴销剪切式称重传感器在实际应用中发现，如果行车、吊车起吊高度允许，可以在吊钩上直接安装带有轴销剪切式称重传感器的集成化电子吊钩秤进行称重计量，避免了将滑轮轴改换成轴销剪切式称重传感器的繁琐工作。集成化电子吊钩秤如图8所示。

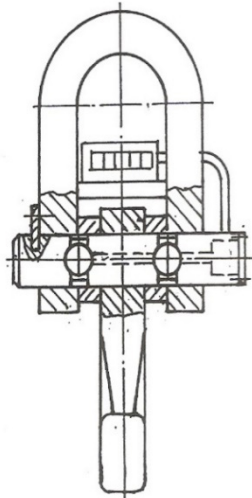


图8 集成化结构低外形电子吊钩秤

集成化结构电子吊钩秤的特点是，秤的主体与轴销剪切式称重传感器合二为一，即用制造工艺性好的圆截工字形轴销代替圆筒形轴销与吊环、吊钩组合成为秤体，形成电子吊秤称量系统，称重显示控制器和电池等安装在吊环上。其突出特点是：结构简单紧凑，零部件少，圆柱面接触配合，摩擦影响小，称量准确度高。秤体高度低，重量轻，便于运输安装调试，使用方便。由于采用圆截工字形截面剪切梁称重传感器，抗偏心、侧向载荷能力强。

#### 参考文献

[1] Yorgiadis, Alexander. The Shear Pin Force

Transducer, Instruments and Control Magazine, October 1996.

[2] A.U.Kutsay, "Strain Detecting Load Cell", U.S. Patent 3.695,096; October 3.

[3] Raymond J. Roark and Warren C. Young, Formulas for Stress and Strain, McGraw-HILL Book Co, 5th Edition.

[4] Richard Franklin. Design calculations for strain gage load cells, Measurements and control, October, 1996.

[5] 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，2007年6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》。