

电子汽车衡选择柱式称重传感器的原因分析

□山东金钟科技集团股份有限公司 沈立人

【摘要】本文根据个人的经历，全面分析电子汽车衡用称重传感器从剪切式逐渐过渡到正应力式的原因。随着电子汽车衡称量值的不断提高，材料消耗的相对减少，数字技术的全面提高，柱式称重传感器逐渐被应用到电子汽车衡产品中。在大量使用过程中也出现了一些问题，正在被各个应用单位不断得到解决。

【关键词】电子汽车衡；正应力；柱式称重传感器；剪应力；桥式称重传感器

文献标识码：A

文章编号：1003-1870（2024）12-0005-07

引言

在上世纪八九十年代，我国制造的最大秤量100t之内的电子汽车衡，普遍选择的都是梁式剪应力原理设计的称重传感器，主要是单剪悬臂梁结构和双剪梁桥式结构。单剪梁称重传感器采用摇柱压头传递载荷，双剪梁称重传感器采用钢球传递载荷。但是随着用户对电子汽车衡称量范围需求增大，从100t到200t的扩大，剪应力结构的称重传感器已经不能满足市场需求。而柱式结构的称重传感器由于其独有的特点，被大多数电子汽车衡制造企业选中。

1 剪应力称重传感器特点

剪应力本身是不能测量的，但它所产生的与剪切梁中性轴成 45° 方向的主应力是可以测量的。这对拉、压成双的主应力，正是称重传感器组成惠斯通电桥所需要的。剪应力称重传感器应变梁的截面形状决定了应变区剪应力分布，主要有单剪应力—即悬臂梁结构，双剪应力—桥式结构。特别是双剪梁称重传感器由应变区为工字梁截面的应变梁、底座、双端固定螺钉、传递载荷的钢球压头等组成。为克服矩形截面剪切梁剪切应力分布梯度大的缺点，在矩形应变梁的中心加载点和两个支承点之间，沿梁的两个侧面分别对称的加工出四个盲孔，使应变梁的截面由矩形变成了工字型，在局部形成了工字梁，这样工字型截面的剪应力分布比矩形截面均匀得多。

1.1 优点分析

1.1.1 线性好

· 在承受拉伸和压缩载荷时，弹性元件的容积是相等的，即应变区截面积不发生变化，因此线性好。

· 受剪截面积不发生变化，固有线性好。

1.1.2 加载点影响小

· 剪力沿梁的长度方向为一常量，输出与弯矩无关，因此对加载点变化不敏感。曾经观察使用一年多的此类称重传感器的加载点，20t称重传感器钢球压痕长度有20mm左右，在后续检定时仍能保持良好的计量性能。

· 加载点与支承点自成平衡力系，由于桥式称重传感器自身和配置的底板重量，放置在基础上，不会受到汽车衡承载器晃动的影响而移动，安装方便。

1.1.3 压头

1.1.3.1 摇柱式压头

当时悬臂梁称重传感器主要选择的是摇柱式压头，这种压头是上下两端采用双球形结构，通过调整承载器的横向和纵向限位间隙，可以控制承载器的晃动幅度，这样使悬臂梁称重传感器在安全受控的范围内朝任何方向自由晃动，从而充分吸收由外力引起的纵向和横向侧力。由于是双球面结构，当受到纵向和横向侧力的作用时，通过双球面的滚动来追随作用点的变化，这样既保证了量值传递的准确性，又能充分缓冲和吸收承载器受冲击引起的横

向和纵向侧力，避免称重传感器的损坏（如图1）。

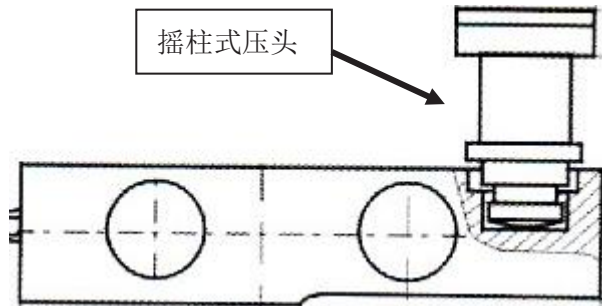


图1 悬臂梁称重传感器结构

1.1.3.2 钢球压头

钢球与球座为点接触，对中良好，钢球只感受轴向载荷，不传递侧向载荷，保证测量准确度。而且，桥式称重传感器的底部比较大，被安装在基础板上靠自身重量所产生的摩擦力是不会发生左右前后移动的，其主要是依靠钢球随着承载器的移动而滚动（如图2）。

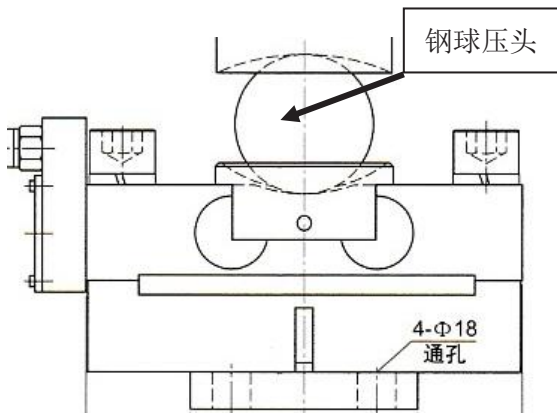


图2 桥式称重传感器结构

1.1.4 限位间隙

对于一台最大称量60t的电子汽车衡，承载器长度为18m，分为三段搭接而成，选择了8只最大称量为25t的称重传感器，在温度变化范围50℃的环境中使

$$\begin{aligned} \text{承载器长度变化} &= 18000\text{mm} \times 11.2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C} \times 50^{\circ}\text{C} \\ &= 10.08\text{mm} \end{aligned}$$

从这个公式的结果可以清楚地看出，当忽略承载器之间连接变化，为了保证使用中不发生限位卡阻现象，起码需要为两侧留出5mm左右的间隙，也就是说，承载器在使用过程中会在长度方向摆动。

桥式称重传感器的钢球压头可以在此范围内自由滚动，而剪应力沿应变梁长度方向为一个常量，应变计粘贴在最小寄生应力区，称重传感器输出与梁弯矩无关，只是与剪应力成比例，抗侧向和偏心载荷能力强，因而输出对加载点变化不敏感。

1.2 缺点分析

1.2.1 双剪梁称重传感器滞后误差分析

产生滞后误差的原因主要是双剪梁弹性元件与支承底座、托架、垫块的结构及所用材料的硬度、表面粗糙度等的影响，接触面的滑动是产生滞后误差的重要原因。在加、卸载过程中，双剪梁弹性元件与底座滑动方向相反，因此作用在弹性元件上的摩擦力方向也相反，正是此摩擦力造成应变区剪应力变化。接触面摩擦系数大，随着载荷的增加滞后的绝对值由小变大。

减少滞后误差的方法：

- (a) 尽量减小弹性元件与底座的摩擦系数；
- (b) 优化结构参数，使底摩擦力对应变区影响最小；
- (c) 预紧力应足够大，尽量约束弹性元件滑移。

1.2.2 称重传感器安装问题

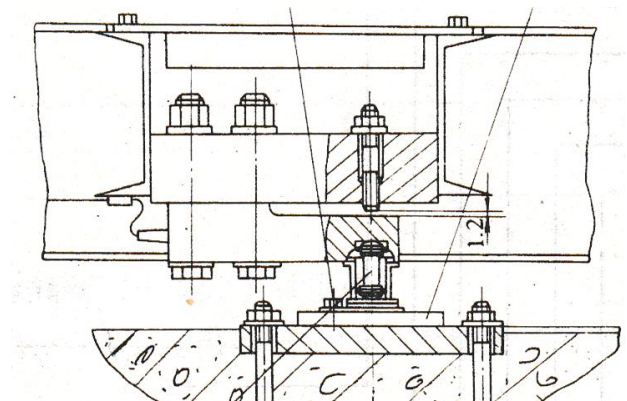


图3 悬臂梁式称重传感器安装示意图

1.2.2.1 如图3所示，悬臂梁式称重传感器必须通过两只高强度螺栓，采用一定的扭力矩固定在承载器上，才能保证衡器的正常使用。例如，最大称量为50t或60t的电子汽车衡，选择最大称量为20t的悬臂梁称重传感器，采用直径Φ33mm的高强度螺栓，需要1000多N·m扭紧力矩。

1.2.2.2 如图2所示，桥式称重传感器两侧采用两只M24的高强度螺栓，在企业内使用专用机械装

置用几百N·m 扭紧力矩作用下将弹性体固定在底座上。在现场只需要将其整体安装在承载器相应位置，无需再次连接紧固就可以使用。

1.2.2.3 可能出现的问题

(a) 由于没有使用高强度螺栓，或者由于安装拧紧力矩不足，在衡器使用过程中称重传感器出现松动，使得衡器的零点发生变化，从而影响到衡器的计量性能。

(b) 安装称重传感器的接触工作平面存在不平整问题，使得称重传感器无法与安装面紧密接触，同样影响到衡器的计量性能。

1.2.2.4 结构改变

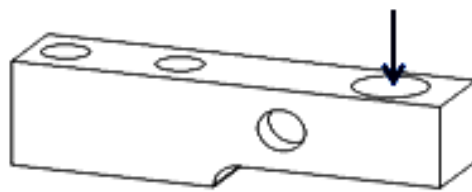


图4 悬臂梁称重传感器弹性体示意图

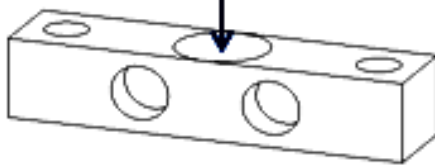


图5 桥式称重传感器弹性体示意图

按图4 示意图计算悬臂梁的挠度公式：

$$f_A = \frac{P \cdot l^3}{3E \cdot J}$$

按图5 示意图计算两端固定梁的挠度公式：

$$f_{\max} = \frac{P \cdot l^3}{192E \cdot J}$$

按图6 示意图计算柱式纵向变形公式：

$$\Delta l = \frac{P \cdot l}{E \cdot A}$$

从以上三个示意图和公式可以清楚地看出，悬臂梁结构的弹性体与桥式结构弹性体变形量与截面的轴惯性矩有关，而截面的轴惯性矩 $J_x = \frac{BH^3 - bh^3}{12}$ 。而柱式弹性体结构的变形量是最小的，与柱体的截面积有关，正所谓“立木顶千斤”。

尽量选用整体式结构，使弹性体与支承平面无接触问题，如整体剪切梁型等。而如图2 所示桥式称重传感器结构，也是从整体式结构演变来的，是为了节约优质合金工具钢，底部托架采用了普通碳钢。

1.2.3 注意问题

对于各种剪应力梁式称重传感器来讲，决定加载边界条件的因素，主要是支承底座、托架、垫块结构及所用材料的硬度、表面粗糙度等。支承方式即根部固定的合理性至关重要，应尽量使其形成固支，具有足够大的平衡力矩。

1.2.4 变形量问题



图6 柱式称重传感器弹性体示意图

2 正应力称重传感器特点

2.1 优点分析

2.1.1 结构特点

正应力柱式称重传感器结构紧凑，几何形状简单，设计与计算容易、安装轻便。抗过载能力强，能满足大吨位汽车衡使用。

2.1.2 加工工艺特点

机械加工、热处理、电阻应变片粘贴等工艺较容易，易于焊接密封和抽真空充氮工艺。

2.1.3 性能特点

(a) 刚性较大，固有频率高，动态响应频率快，回零快。采用圆柱形弹性元件的压式或拉式称重传感器，其应变区的有效长度L 和直径D 之比 L/D 是决定加载边界条件的主要参数。

对于50t 的柱式称重传感器，当L/D =3.7（远远

低于设计的纵向弯曲率)时,在试验中灵敏度变化小于0.005%,而当 $L/D=1$ 时,在试验中灵敏度变化大于1%。

(b) 桥式称重传感器体积大,耗费材料多。如果所用材料不符合设计要求,或组装时螺栓紧固力不足,会影响其回零慢,存在滞后现象。由于结构影响,无法制造适用于大吨位汽车衡使用的大容量产品。

(c) 柱式称重传感器采用焊接密封方式,相对密封性比胶密封效果好。

(d) 内部可装配电子陀螺仪检测倾斜状态;可装配温度传感器进行温度性能补偿;可装配压力传感器检测破坏密封的作弊。

(e) 为了提高称重传感器的整体性能,柱式称重传感器将过去的单层膜片密封,普遍改为双层膜片

焊接密封,提高了抗侧向载荷和偏心载荷能力。

2.2 缺点及解决方案

2.2.1 称重传感器高度影响

柱式称重传感器易受到承载器热胀冷缩的影响产生倾斜,从而影响汽车衡的计量性能。所以,柱式称重传感器的高度尺寸一定要设计的比较大,如某公司的高度为200多毫米,而另一家公司的数字式柱式称重传感器只有100多毫米。从以下数据可以清楚看出,对于高度为150mm的柱式称重传感器偏移13mm,倾斜角是 5° 。而对于高度260mm的柱式称重传感器偏移18mm,倾斜角只有 4° 。

在相同水平位移情况下,高度大的称重传感器偏移角度就小,高度小的称重传感器偏移角度就大,从而影响电子衡器的计量性能也会大。

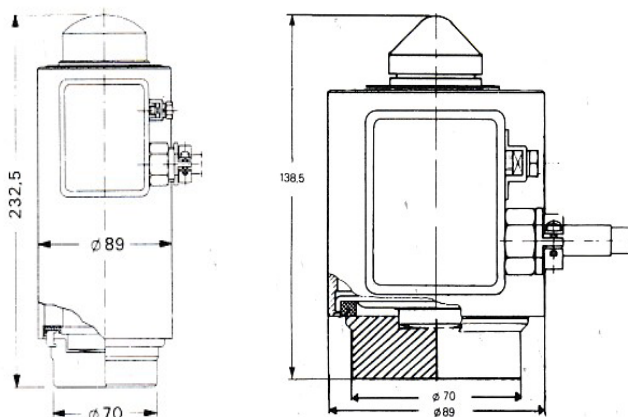


图7 两种不同高度柱式称重传感器示意图

2.2.2 单柱式结构的固有缺陷和解决方法

单柱式称重传感器使用中会受到偏心载荷、侧向载荷、沿圆柱中心轴方向的力矩作用,而使圆柱形弹性元件产生不规则变形,不仅降低准确度、缩短使用寿命,严重时还会造成称重传感器损坏。

单柱式称重传感器在衡器上的应用准确度较在力标准机上的检定准确度要低,这是因为承载器受载后的变形使称重传感器发生偏斜,不可避免地受到偏心和侧向载荷作用。

解决的方法是,弹性元件采用双球头式(也称摇柱式)结构,相当于拉长的钢球,其目的是使外载荷比较准确地作用于称重传感器的中心,并保证其

沿圆柱中心轴方向传递。

2.2.3 防旋转

2.2.3.1 短承载器结构

上世纪八十年代从国外引进的自动轨道衡使用的是柱式称重传感器,由于承载器长度在4m之内,并且是采用拉杆限位机构,可以防止承载器水平位移,所以很少发生称重传感器旋转的问题。

2.2.3.2 长承载器结构

进入2010年由于大量程电子汽车衡的使用,承压能力较大的柱式称重传感器得到广泛应用。由于汽车衡的承载器长度在6m以上,再因为是采用撞顶式限位,使用过程中承载器会前后左右水平移动,

迫使称重传感器产生旋转，时间较长后电缆线就会缠绕到称重传感器上，直至被拉断。所以，称重传感器防旋转问题成为此类产品的一项重要课题。

2.2.3.3 防旋转方法

传统的防旋转方法是在柱式称重传感器的弹性体下部焊接一个有缺口的圆盘，在底座上安装一根柱销，通过这根柱销卡阻称重传感器的转动（见图8）。

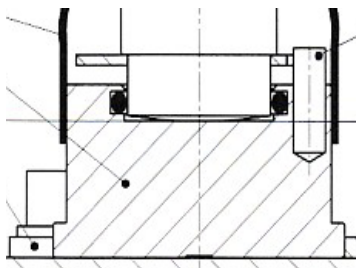


图8 柱销防旋转示意图

如前所述，柱式称重传感器使用在长承载器结构汽车衡产品后，由于承载器前后左右晃动比较大，柱式称重传感器旋转比较严重，防旋转的柱销经常被扭断，甚至两根柱销都不能阻挡得住。

这样，柱式称重传感器制造企业就发明了多种新型防旋转装置，将称重传感器底部加工成四边形或六边形，与之配套的底座也加工成四边形或六边形（见图9）。

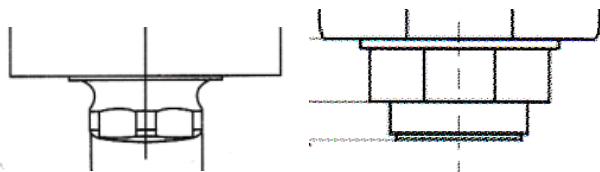


图9 多边形防旋转方法示意图

3 剪应力梁结构与正应力结构比较

3.1 材料消耗方面

3.1.1 悬臂梁结构

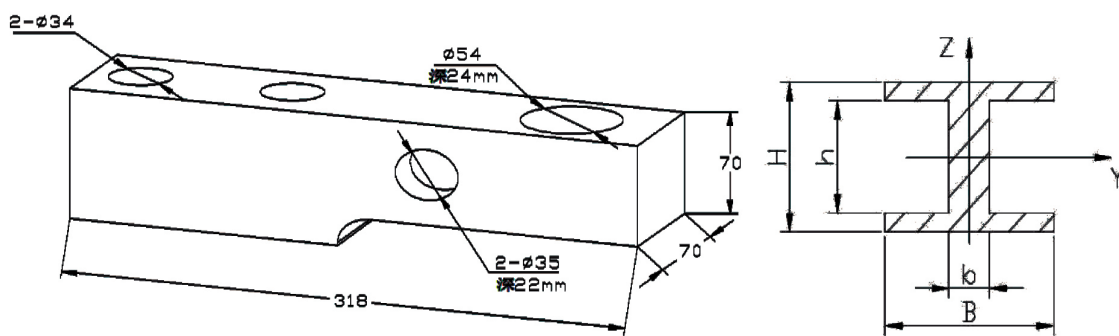


图10 悬臂梁结构示意图

根据图10 悬臂梁示意图中的尺寸计算，大约需要合金结构钢：

合金结构钢重量= 密度 × 长度 × 宽度 × 高度 = $7.85\text{g/cm}^3 \times 32\text{cm} \times 7\text{cm} \times 8\text{cm} = 14067\text{g} \approx 14\text{kg}$

3.1.2 双剪切梁结构

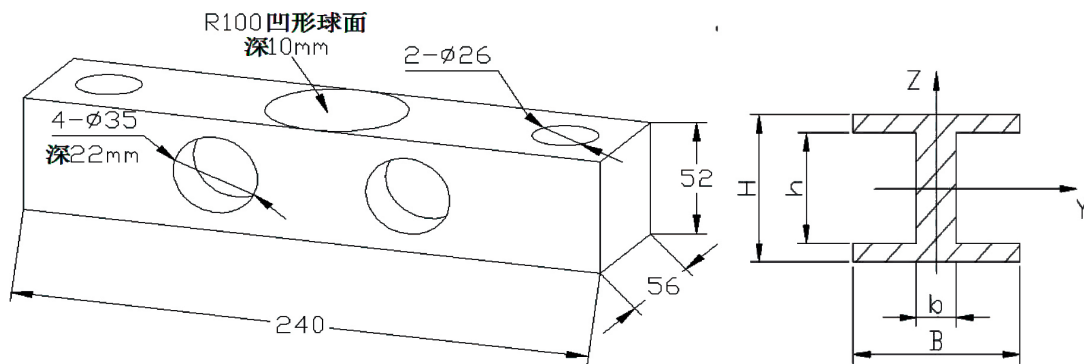


图11 双剪切梁结构示意图

额定载荷为 $P=20t$ 的双剪切梁型称重传感器,根据图11示意图中的尺寸计算,大约需要合金结构钢:

合金结构钢重量=密度 $\times$ 长度 $\times$ 宽度 $\times$ 高度
 $=7.85g/cm^3 \times 24cm \times 5.6cm \times 5.2cm=5486g \approx 5.5kg$

3.1.3 柱式结构

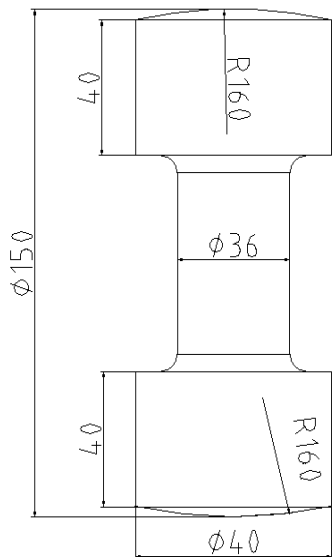


图12 柱式正应力结构示意图

额定量程为 $20t$ 的钢制柱式称重传感器,根据图12示意图中的尺寸计算,大约需要合金结构钢:

合金结构钢重量=密度 $\times$ (直径 $\div 2$) $^2 \pi \times$ 长度
 $=7.85g/cm^3 \times (4cm \div 2)^2 \pi \times 15cm=1479g \approx 1.5kg$

3.1.4 材料重量比较

悬臂梁结构(约 $14kg$) $>$ 双剪切梁结构(约 $5.5kg$) $>$ 柱式结构(约 $1.5kg$)。

说明:

(a) 以上材料消耗的量值都是按照产品实际尺寸计算,没有考虑产品的机械加工损耗。如果考虑机械加工损耗,柱式结构的实际材料使用量将是最小的。

(b) 这里只是计算了合金结构钢的消耗量,没有计算辅助的普通碳素钢的重量。

3.2 加工工艺方面

3.2.1 剪应力梁式称重传感器

正如图11所看到的桥式称重传感器的弹性体外形结构,其加工工序是:首先用铣床铣削六个平面,再加工两个螺孔、加工四个 $\Phi 35$ 的盲孔、加工凹形

球面和几个导线的通孔,然后进行热处理,使弹性体达到所需要的硬度,最后对上下两个平面进行磨削。而如图10所示的悬臂梁称重传感器弹性体外形结构,其加工工序与桥式称重传感器的弹性体基本大同小异,仅比桥式结构少了两个盲孔。

3.2.2 正应力柱式称重传感器

从柱式称重传感器的弹性体外形结构可以清楚地看出,加工此类圆柱形工件只需要一台通用车床就可以完成。首先进行粗加工形成基本外形结构,然后进行热处理,使弹性体达到所需要的硬度,最后进行精车加工。

3.2.3 加工工艺比较

从以上三种弹性体的加工工艺比较,我们可以清楚地看到柱式称重传感器弹性体加工工作量,比剪应力梁式称重传感器弹性体简单了许多,也就是经济效益好。

4 新技术的推动

4.1 数字技术的应用

根据不同结构弹性元件的特性,建立数学模型,利用数字处理技术对其线性、蠕变、温度特性等进行软件补偿,提高综合性能指标。

软件校正技术:采用模拟式称重传感器电路与数字处理电路一体化设计,零点和输出特性可以通过软件自动校正,确保输出特性的一致性。

数字化的信息传输技术:采用标准的数字信号传输技术,抗干扰能力强,传输距离远。理论上采用RS485通信,通信速率在100Kbps及以下时,RS485的最长传输距离可达1200m。

记忆功能:利用数字数据存储和记忆功能,使其既具有唯一的身份标记与特征参数以便单独寻址,又具有自适应、自校准、自诊断功能。

现场特性:当采用双向、多接口的全双工方式串行通信,在发送设备的发送方和接收设备的接收方之间采取点到点的连接,这意味着在全双工的传送方式下可以得到更高的数据传输速度,使数据采集与控制在现场得以实现。采用软件运算方法调整四角误差,并可进行无砝码校准。

4.2 补偿技术的应用

4.2.1 线性补偿技术

柱式结构的压式称重传感器由于受载后应变区

横截面发生变化,造成应力和应变小于比例增加,使输出小于线性值。传统的非线性补偿需要在弹性体上进行,实际上是在电桥电路中依靠改变电桥电路的供桥电压来实现。

数字式称重传感器将数字处理电路安装到壳体内,包括有放大、滤波、A/D 转换、微处理器等,利用微处理器芯片中存入的软件,实施各项数字补偿(线性、零点输出、滞后、蠕变、零点温度、灵敏度温度等)。

4.2.2 内装温度传感器

根据内装温度传感器检测的温度变化,内部可精确补偿温度特性,补偿精度高,效果好。零点和灵敏度均由CPU 数据处理完成,灵敏度一致性可达0.01%,一致性好,便于互换,有利维修。

4.2.3 内装电子陀螺仪

为了解决柱式称重传感器倾斜所影响的计量性能,在数字式称重传感器内部安装了电子陀螺仪,随时将称重传感器倾斜产生的误差反馈到内置芯片中,由预定的程序给予补偿修正。

4.2.4 内装压力传感器

为了预防称重传感器密封失效,外界潮湿气体侵入壳体内,影响到电子电路的正常工作。在数字式称重传感器内部安装了压力传感器,只要发现称重传感器内部干燥氮气压力改变,就在称重仪表上给予提示操作人员。当然,也可以防止作弊人员打开称重传感器壳体,嫁接作弊电路进行非法活动。

5 结语

5.1 划分出各种称重传感器的使用范围

从以上文章中对两种称重传感器的情况进行了分析,虽然柱式称重传感器从制造工艺上、材料消耗方面比剪切梁称重传感器有许多优势。但是,剪切梁称重传感器的结构,对汽车衡的安装、使用方面有特殊的优点,是柱式称重传感器不可替代的。所以,额定载荷小于30t 的电子汽车衡用称重传感器,最好不采用柱式弹性元件,而采用剪切梁桥式称重传感器。因为,这些结构的称重传感器不但有成熟的制造工艺,销售价格低廉,并且对端部加载条件变化不敏感。

5.2 对于称重传感器之外的影响不能忽视

为了防止焊接应力使汽车衡承载器变形,影响

柱式称重传感器安装质量,所以,在承载器焊接工艺结束之后及时进行时效处理,以减小承载器的焊接应力。

5.3 其他结构形式的称重传感器也应该重视

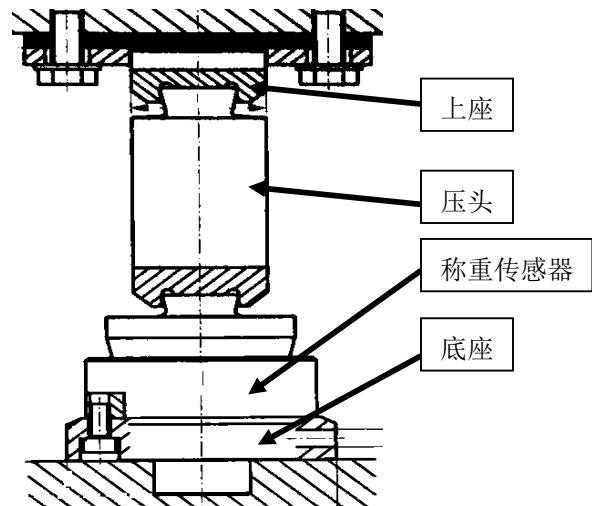


图13 轴对称扭环称重传感器结构示意图

5.3.1 轴对称扭环称重传感器具有柱式称重传感器的特点:结构紧凑,体积小,高度低,重量轻、固有线性好。而且受载后底环无变形或变形很小,几乎没有滞后(如图13)。

5.3.2 轴对称扭环称重传感器同样具有剪切梁称重传感器的特点:对于偏心载荷和侧向载荷不敏感。

参考文献

刘九卿编著.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)。

作者简介

沈立人,1947 年出生,高级工程师。现为中国衡器协会发展战略咨询委员会委员。