

电子汽车衡承载器承力传力定位限位结构分析

中国运载火箭技术研究院第 702 研究所 刘九卿

【摘要】 汽车驶上电子汽车衡承载器后，承载器与汽车有共同的速度而产生一个水平力，此力使承载器产生纵向移动，因此需要对承载器采取定位限位措施抑制水平力的影响。本文根据国内外电子汽车衡承载器、称重传感器、水平力抑制方法、定位限位装置结构与特点，遵循在电子汽车衡使用期限内承载器受力分配系数恒定不变的原则，介绍了承载器与称重传感器的连接形式及水平力抑制方法，重点讨论了点接触的钢球、双球面摇柱支撑、自动定心称重传感器组件和线接触的链环、马鞍环承力传力定位限位结构的力学特性、工作特点和应用情况，以澄清最普通又极容易被误解的承载器水平力抑制装置设计、计算和应用中的一些问题。

【关键词】 电子汽车衡；承载器；称重传感器；承力传力；定位限位；受力分配系数；集成化设计

一、概述

汽车驶上电子汽车衡承载器后，承载器与汽车有共同的速度而产生一个较大的水平力，以最大秤量为 30 吨的电子汽车衡为例，其水平力可达 8000kgf 以上。此力使承载器产生较大的纵向运动和较小的横向移动，为使承载器尽快复位以保证称量的准确性，必须为承载器设计较理想的水平力抑制装置，对承载器进行定位、限位。国际上将电子汽车衡承载器的水平力抑制装置称其为水平力抑制器，国内称为定位限位装置。根据电子汽车衡的最大秤量、承载器的结构、称重传感器的承力传力方式有不同的结构形式。国内不论是单个承载器还是两个、三个、四个承载器组合的电子汽车衡，较多采用 3 英寸钢球传递载荷的双剪梁（桥式）型称重传感器，较少采用双球面摇柱型支撑或自动定心的圆柱式称重传感器组件，基本不采用线接触链环、马鞍环承力传力定位限位组件。双剪梁（桥式）型称重传感器为 3 英寸钢球承受并传递载荷，因钢球只感受轴向载荷，而对侧向和偏心载荷不敏感，即只传递轴向载荷不传递侧向载荷，并且安装调试极为方便，因而得到较为广泛的应用。但其缺点也很突出，主要是当承载器出现受载和温度变形时，对水平位移的调节能力差，致使钢球爬坡不在称重传感器球碗的中心，直接影响承载器复位和测量准确性。双球面摇柱支撑和自动定心称重传感器组件，使称重传感器本身具有承力传力和自动定心功能，只要摇柱或称重传感器的摆动量选择合理即可达到定位限位的目的，但其自动定心的摆动角和偏心量不能太大，因而存在应用的局限性。

查阅处于国际市场引导地位的电子汽车衡制造企业的产品样本和国际衡器技术交流资料，不难看出欧美等国家电子汽车衡的承载器，基本不采用钢球引入传递载荷的顶球式支撑，其原因是钢球传递载荷基本没有水平位移调整量，不能保证电子汽车衡在使用期限内承载器受力分配系数保持恒定不变。加拿大 MASS LOAD 公司设计的电子汽车衡，采用线接触链环组件引入载荷，即在中间支撑的双剪梁型称重传感器两端各悬挂一个链环，两个链环同时支撑承载器。美国 RICE LAKE 公司设计的电子汽车衡将承力传力、定位限位装置合二为一，集成为一个对双剪梁型称重传感器实施中间加载的马鞍环，承载器稳固的安放在马鞍环支撑上。两者的共同特点是变钢球的点接触为链环和马鞍环的线接触，形成集成化的悬挂式柔性结构称量组件，具有多维自由度和全方位位移性能，对承载器受载后的变形和温度变化引起的热胀冷缩变形，具有自动调整和适应能力，保证在使用期限内“承载器受力分配系数”恒定不变。现就上述电子汽车衡承载器和称重传感器承力传力定位限位装置的不同设计方案、结构特点、应用效果进行简要分析。

二、电子汽车衡承载器的水平抑制力

以最大秤量 $P_1=30000\text{kg}$ ，承载器自重 $P_2=8000\text{kg}$ 的电子汽车衡为例进行计算。
质量

$$m_1 = \frac{P_1}{g} = \frac{30000}{9.8} = 3061$$

(工程制质量单位)

$$m_2 = \frac{P_2}{g} = \frac{8000}{9.8} = 816$$

设汽车驶上承载器的速度 $V=5\text{km/h}=1.389\text{m/s}$ ，驶上后承载器与汽车有共同速度 V_1 ，根据能量守恒定律有

$$m_1 V = (m_1 + m_2) V_1$$

则

$$V_1 = \frac{m_1 V}{m_1 + m_2} = \frac{3061 \times 1.389}{3061 + 816} = 1.097\text{m/s}$$

汽车与承载器撞到纵向限位器前，钢球与球碗、压头产生滚动摩擦，一般撞击后 0.5 秒才能停止 $\Delta t=0.5\text{s}$ ，

根据动量定理

$$F \Delta t = (m_1 + m_2) V_2 - (m_1 + m_2) V_1$$

承载器与汽车的末速度 $V_2=0$ ，

则

$$F = -\frac{(m_1 + m_2) V_1}{\Delta t} = -\frac{(3061 + 816) \times 1.097}{0.5} = -8506\text{kgf}$$

负号表示纵向水平抑制力与承载器速度 V_1 的方向相反。一般在承载器一端安装两个水平力抑制器。

一个水平力抑制器的抑制力为

$$\frac{F}{2} = -4253\text{kgf}$$

能够抑制此水平力是选择承载器与称重传感器连接方法，决定定位限位装置结构的前提性条件。

三、电子汽车衡承载器的纵向摆动量

承载器的纵向摆动量对电子汽车衡的称量准确度、复位速度和零点稳定性均有影响，称重传感器与定位限位装置必须满足此摆动量要求。

电子汽车衡工作温度范围-20~40℃，温度差为 60℃。钢板和型钢的线膨胀系数 $\alpha = 11.4 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ，设承载器上称重传感器或定位限位装置的支撑点尺寸为 10000mm×3000mm，则环境温度变化引起的纵向、横向伸长量为：

$$\text{纵向} \quad 10000 \times 11.4 \times 10^{-6} \times 60 = 6.840\text{mm}$$

$$\text{横向} \quad 3000 \times 11.4 \times 10^{-6} \times 60 = 2.052\text{mm}$$

称重传感器在承载器纵向摆动量范围内，应保证称量准确度和工作稳定性，即保持“承载器受力分配系数”恒定不变。

四、承载器与称重传感器载荷引入定位限位误差分析

称重传感器作为电子汽车衡的基础部件，被安装于承力基础与承载器之间，由于外界加荷条件变化，称重传感器能否复现检定时准确度等级，主要取决于载荷引入传递方式和承载器定位限位装置是否合理。尽管电子汽车衡承载器和所用称重传感器的结构各异，它们的准确度等级和对环境条件的响应也各不相同，但造成称量误差的因素却基本上一致，归纳起来大致可分为：承载器与称重传感器的连接存在载荷分路因素，被称载荷未全部由称重传感器承受；被测载荷非垂直的施加在称重传感器上；存在力学干扰因素（如偏心载荷、横向载荷、弯曲和扭转力矩等）；称重传感器结构对环境因素敏感。

1. 载荷分路引入的误差

由于称重传感器在电子汽车衡称量系统中，存在并联分力构件，使被称量的总载荷按下式分配

$$P = P_L + P_S$$

式中：P—被称量的总载荷；

P_L —称重传感器检测的载荷；

P_S —并联分力构件承担的载荷。

此时电子汽车衡显示的只是称重传感器检测的外加载荷的一部分，因此产生测量误差：

$$\delta = \frac{P - P_L}{P} \times 100\%$$

引起电子汽车衡测量系统载荷分路的主要因素主要是称重传感器选择不当；承载器与称重传感器连接、固定不合理；载荷引入传递方式和定位限位装置不能保证“承载器受力分配系数”恒定不变。

2. 非轴向加载引入的误差

用于各种电子汽车衡的称重传感器，应设计成只感受垂直方向的载荷，而对力矩和侧向载荷不敏感，或把力矩和侧向载荷的影响限制在规定的误差范围内，保证称重传感器的输出仅仅取决于沿主轴方向施加载荷的大小。这就要求弹性组件具有较高的尺寸精度和很小的形位公差，同时保证电阻应变计粘贴位置的准确性和对称性。实际上弹性组件所能达到的形位精度和电阻应变计的定位精度与对称性是有一定限度的，并且在某种程度上，所有称重传感器对于迭加在主分量上的力矩和侧向载荷都是敏感的，其侧向灵敏度的大小和正负方向是不能预先知道的。所谓非轴向加载是指所施加的载荷与称重传感器加荷轴线有一个夹角 θ ，若 $\theta = 0$ 则称为同向加载。以受载荷 P 作用的圆柱式称重传感器为例，若加载轴线与圆柱弹性组件轴线存在夹角 θ ，此时对外载荷的影响为

$$P_{\theta} = P \cos \theta$$

其相对误差为

$$\delta = \frac{P - P_{\theta}}{P} \times 100 \% = \frac{P(1 - \cos \theta)}{P} \times 100 \% = (1 - \cos \theta) \times 100 \%$$

因此应从称重传感器结构设计和制造工艺中，严格要求限制侧向灵敏度影响，尽量作到：

(1) 从结构设计上保证称重传感器的输出仅仅取决于沿弹性组件主轴或与主轴平行方向上的载荷；

(2) 对于轴对称的称重传感器，例如圆柱式结构的弹性组件，主轴应垂直于下端面及下压垫，并且通过其中心；

(3) 对于悬臂梁型称重传感器，固定端的凸台平面决定主轴方向，为保证灵敏度不受端部加载条件的影响，载荷应通过弹性组件和根部凸台的中心；

(4) 称重传感器与承载器之间的载荷引入传递尽量采用无摩擦设计的点接触或线接触；

(5) 限制侧向灵敏度影响的措施，就是机械加工时保证弹性组件的形位公差；粘贴电阻应变计时保证位置和方向的准确度与对称性，尽量限制中性轴偏离中心线。

3. 横向灵敏度误差

称重传感器受到横向载荷作用时，不同结构的弹性组件其反映是不同的。悬臂剪切梁型、双剪切梁型称重传感器，对横向载荷基本没有反映，它只对轴向载荷敏感。横向载荷对其它结构类型称重传感器的影响，主要取决于弹性组件结构对横向载荷的敏感程度。国外有的称重传感器生产企业给出了横向灵敏度指标，国内称重传感器生产企业没有给出此参数，所以引入的横向灵敏度误差很难估计。因此，在确定承载器与称重传感器连接方案、载荷引入方式和设计定位限位结构时，应采取一切可能的措施，避免使承载器的横向载荷加到称重传感器上。

4. 承载器受力分配系数

绝大多数电子汽车衡的承载器均具有四个支撑点，在理想情况下，假定四个支撑点同处于一个水平面，且为点接触；承载器为矩形光滑理想平面，与支撑点的接触为无摩擦、无变形的理想刚性。为了确定四个支撑点的受力大小，从对力学模型的分析中可以得到两个力矩平衡方程式和一个四力合成等于总受力的方程式。由于具有四个未知力，而只有三个联立方程式，因此这是力学中称之为的静不定系统，只要支撑点稍微变动或存在微小干扰，均会改变原来的受力状态很难生存。在现实当中，承载器与支撑之间存在弹性变形，也存在摩擦力，因此可以证明承载器处于“稳定状态”，但仍属于“静不定”平衡。

这里所指“稳定状态”的定义为：一经承载器与承力传力定位限位支撑安装完毕后，四个支撑点的受力分配状态不再发生变化，无论将载荷放置在承载器的任何位置或卸除全部载荷后，承载器仍始终保持空载时的受力分配，这是电子汽车衡称量准确性和工作可靠性必要且充分的前提。由此引出了“承载器受力分配系数”，即在承载器的几何中心位置加载时，四个支撑点处受力大小的比值。在上述理想情况，四个支撑点受力相等，承载器受力分配系数均为 1，此时承载器的偏载误差为零。对于产生偏载误差的承载器，四个支撑点的受力不相等，其受力分配系数也不相等。

在实际应用中，为了使电子汽车衡达到“稳定状态”，首先是通过机械部分的调节，利用在称重传感器底座上加垫片使其受力尽量相等；之后再通过对称重传感器的桥压、输出电阻或灵敏度进行微调，达到四个称重传感器输出相等，即“承载器受力分配系数”相等（均为 1）达到“理想衡器”状态，并通过承力传力定位限位装置保持“承载器受力分配系数”保持不变。

假设电子汽车衡承载器四只称重传感器的受力分别为 F_A 、 F_B 、 F_C 、 F_D ，受力分配系数分别为 K_A 、 K_B 、 K_C 、 K_D 。在装配调试承载器时，使 $K_A=K_B=K_C=K_D=1$ ，此时由于承载器的受力分配系数相等，尽管总载荷施加于各称重传感器上的载荷分布不同，承载器对不同位置放置的被称物体总重量 W 的称量结果是相同的。即

$$F_A+F_B+F_C+F_D=K_A W_A+K_B W_B+K_C W_C+K_D W_D$$

虽然

$$W_A \neq W_B \neq W_C \neq W_D$$

但是

$$W_A+W_B+W_C+W_D=W$$

因为经过调整使

$$K_A=K_B=K_C=K_D=1$$

所以

$$F_A+F_B+F_C+F_D=1 \times W_A+1 \times W_B+1 \times W_C+1 \times W_D$$

$$= W_A+W_B+W_C+W_D$$

$$=W$$

五、承载器水平力抑制方法及定位限位结构分析

1. 采用钢球承力传力的水平力抑制方法

采用双剪梁型称重传感器顶球式支撑的承载器，其水平力抑制方法就是通过 3 英寸钢球引入传递外载荷，利用安装在承载器两端的纵向和横向限位装置的预调间隙，抑制承载器的纵向、横向运

动。此水平力抑制方法的优点是钢球与球座接触传递载荷，为点接触属于无摩擦设计；钢球只感受和传递垂直于承载器方向的载荷，而对横向载荷和横向力矩不敏感，即不传递横向载荷和横向力矩；承载器与称重传感器安装调试方便，只需要用千斤顶将称重传感器与钢球上端的承载器顶起落下，反复几次调整称重传感器位置，待钢球不动时即为承载器加力线与称重传感器承力轴线重合，固定称重传感器即完成了对中调试任务。此方案的缺点也非常突出，主要是双剪梁型称重传感器的弹性组件不是整体结构，为双剪切应变梁、底座、螺钉、钢球、压头等受力件组合的装配式受力结构，这些组合件制造和装配的不一致性，连接件之间的摩擦和位移都可以引起非线性和离散性；并联组秤的实际测试结果表明，在外载荷比较小时为正线性，当载荷较高时负线性增大很多，准确度很难达到Ⅲ级秤的要求；由于钢球传递载荷平移和旋转的自由度小，当承载器上称重传感器支撑点跨度较大时，承载器受载和热胀冷缩变形也较大，使钢球沿球碗爬坡，离开对中准确的中心点而产生称量误差，并影响承载器回零；钢球只具备引入和传递载荷功能，不能同时对承载器进行定位限位，因此必须另外设计纵向、横向限位装置，即增加了调试难度又提高了成本。基于上述原因欧美国家的电子汽车衡制造企业不采用此种方案。

2. 采用自动定心承力传力定位限位装置的水平力抑制方法

自动定心承力传力定位限位装置可视为将钢球拉长形成的一根双球面摇摆支柱组件，它由双球面摇柱 1，O 形橡胶密封圈 2，圆筒形底座 3，聚四氟乙烯板 4 组成。各部分的作用是：

双球面摇柱——一端与称重传感器弹性组件接触，另一端通过圆筒形底座与承载器接触，是自动定心承力传力定位限位装置的主要承力件，可在圆筒形底座内自由摆动。

O 形橡胶密封圈——使摇柱两端球面即保持较好的清洁度又不限制其自由摆动；同时还能起到缓冲作用，避免双球面摇柱与圆筒形底座直接碰撞，提高了摇柱工作的可靠性。

圆筒形底座——它与双球面摇柱和 O 形橡胶密封圈组成密封腔，主要作用是定位，同时把垂直力传递给称重传感器。

聚四氟乙烯板——主要作用是减小基础底板和承载器之间的摩擦系数，保证自动定心承力传力定位限位装置自动调位移动的灵活性。该板还具有优良的耐磨性、耐腐蚀性和绝缘性，从而也提高了工作可靠性和使用寿命。

双球面摇柱组件作为承力传力装置安装在称重传感器与承载器之间，通过合理选择球面半径 r 、双球面摇柱高度 h 与直径 d 等尺寸参数来控制承载器限位间隙量，达到抑制承载器水平力，限制承载器纵向、横向运动，使称重传感器正确传递载荷和承载器自动复位的目的。该装置的特点是：结构简单紧凑、摇柱和底座的几何形状为圆形，容易加工出较高的尺寸精度，保证具有良好的传力重复性；减少和缓冲水平冲击力向称重传感器的传递；对承载器限位间隙量调整要求较低，可提高电子汽车衡的长期稳定性；可实时调整环境温度变化使承载器变形对称量准确度的影响，提高系统的稳定性和可靠性；现场安装也比较方便。带底座的自动定心承力传力定位限位装置如图 1 所示。

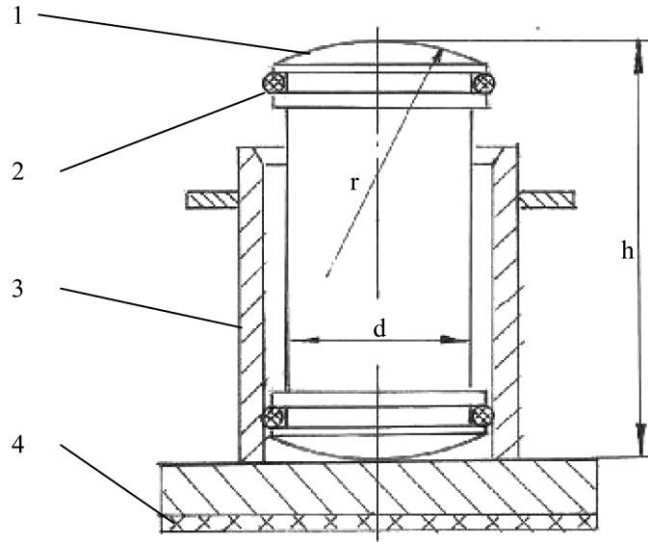


图 1 带底座的自动定心传力限位装置简图

自动定心承力传力定位限位装置的工作原理，可用浙江省传感器电子衡器研究所给出的四个数学关系式来描述：

$$r > \frac{h}{2} \quad (1)$$

$$d > \frac{2r\Delta}{h} \quad (2)$$

$$\omega = \frac{\sqrt{g(2r-h)}}{h^2} \quad (3)$$

$$\frac{\sin \frac{\Delta}{h}}{\frac{2r}{2r-h} - \cos \frac{\Delta}{h}} < f \quad (4)$$

式中：r—球面半径；

h—摇柱高度；

d—摇柱直径；

Δ —承载器限位间隙；

f—静摩擦系数；

g—重力加速度；

ω —球面端部摆动角频率。

以上四个数学关系式是从不同的角度推导出来的。只有满足式（1）的条件，承载器偏离平衡位置时，才能自动复位。当汽车驶上电子汽车衡承载器或在承载器上刹车时，承载器受到水平冲击力而发生纵向位移，双球面摇柱支撑的球面端发生摇动，球面半径 r 大于高度 h 时，则承载器位置升高位能增大，同时也增大了承载器的不稳定性。当承载器产生纵向位移过程消失时，根据能量转换定律必然产生一个使承载器恢复到原平衡位置的恢复力，而使整个系统恢复到原平衡位置。摇柱摆动恢复到原平衡位置的时间或速度，即自动定心承力传力限位装置的复位能力，可用式（3）摇

柱摆动频率 ω 来衡量。式中 g 为常量，故 ω 只与双球面摇柱的几何尺寸 (h 、 r) 有关。 r 越大于 $\frac{h}{2}$ ， ω 越大，反之 r 越小于 $\frac{h}{2}$ ， ω 越小。现以与 20t 称重传感器配套使用的自动定心承力传力限位装置为例进行说明，其主要几何尺寸为： $h=71\text{mm}$ ， $r=102\text{mm}$ ， $d=32\text{mm}$ 。将式 (2) 变换为 $\Delta < \frac{hd}{2r}$ ，代入 h 、 d 和 r 值得 $\Delta=11.137\text{mm}$ 。在实际安装时，承载器限位间隙 Δ 的规定值为 $3\sim 4\text{mm}$ ，完全符合理论计算要求，小于双球面摇柱摆动时偏离中心的最大距离。在使用过程中，当限位间隙 Δ 变大时，为防止双球面摇柱与圆筒形底座发生碰触，利用聚四氟乙烯板的耐磨性和其与光滑底板的低摩擦系数特性，此定位限位装置可以自由滑动，确保自动定心。

另一种结构的压柱式自动定心传力限位装置以德国 HBM 公司的产品最具代表性，图 2 为该公司 1、5、10t 和 15、50、100t 称重传感器的自动定心传力限位装。图中 (1) $\pm N$ 为容许的摆动间隙；(2) 为四个 M5 \times 12 固定螺钉，可承受 4Nm 力矩；(3) 为防止底部支撑转动的销钉孔或螺纹孔；(4) 为与基础连接方法及配合尺寸。德国 HBM 公司对这两种压柱式自动定心传力限位装置，经过试验测试给出了 1、5、10t 称重传感器水平摆动量 $N=\pm 3.5\text{mm}$ ，15、50、100t 称重传感器水平摆动量 N 分别为 $\pm 4\text{mm}$ 、 $\pm 6\text{mm}$ 、 $\pm 8\text{mm}$ 。

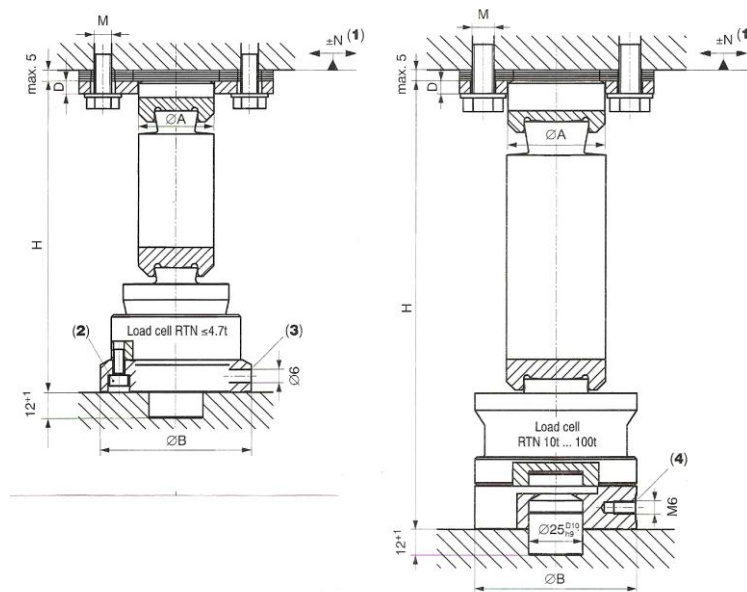


图 2 德国 HBM 公司压柱式自动定心传力限位装置

3. 弹性组件与摇柱一体化的自动定心承力传力限位装置

弹性组件与摇柱一体化的自动定心承力传力限位装置，就是将称重传感器的弹性组件与双球面摇柱合二为一，设计成为一个整体结构，即是称重传感器的敏感组件，又起到双球面摇柱自动定心承力传力限位作用。弹性组件与摇柱一体化的自动定心承力传力限位装置，以德国 HBM 公司

C16AC3 型圆柱式双球面结构最具代表性，其结构如图 3 所示。

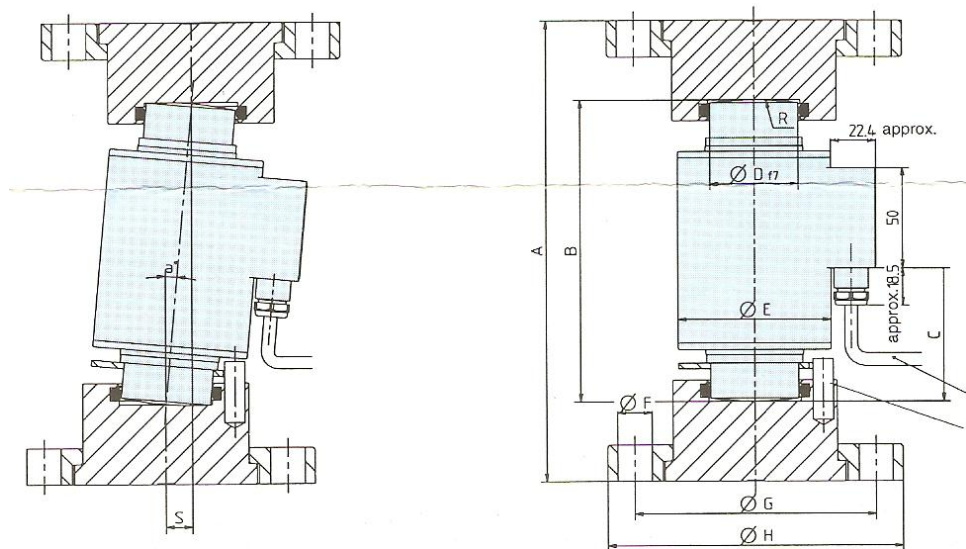


图 3 弹性组件与摇柱一体化的自动定心承力传力限位装置

弹性组件与摇柱一体化的自动定心承力传力限位装置的突出特点是：

(1) 称重传感器弹性组件与双球面摇柱为一个整体结构，降低了称重传感器及其连接件的高度，占用空间小，组装成电子汽车衡重心低、稳定性好；

(2) 弹性组件与摇柱一体化，实际上是增加了摇柱的高度，增大了自动定心承力传力限位装置的摆动角和偏心量，能满足较长尺寸承载器承力传力定位限位的需要；

(3) 称重传感器本身就是双球面摇柱，便于与定位限位组件组成新型称重模块，很方便的安装在承载器与基础之间，直接起到承力传力定位限位作用，此类结构以德国 Philips 公司双球面圆柱式称重传感器组成的称重模块最具代表性，其称重模块如图 4 所示；

(4) 弹性组件即双球面摇柱与下承载底座，一般都安装有防止其旋转的不锈钢销钉，保证称重传感器不转动，只在下安装板上自由摆动，这种“钟摆效应”可在一定程度上抵消热膨胀及安装间隙影响；

(5) 由于风、温度变化或承载器运动引起的水平力影响，也可以由此种承力传力定位限位装置加以抵消。

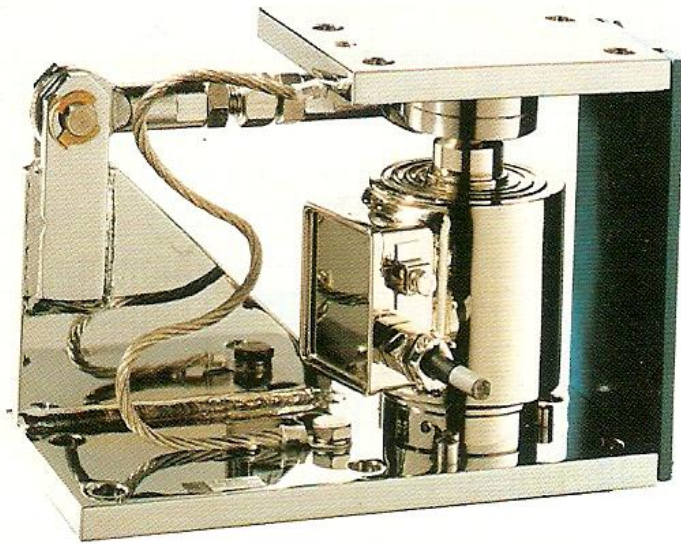


图 4 德国 Philips 公司双球面圆柱式称重传感器组成的称重模块

德国 HBM 公司 C16AC3 型圆柱式称重传感器组成的双球面摇柱自动定心承力传力限位装置，对承载器的水平力具有很强的平衡能力，其摆动角和偏心量如表 1 所示。

表 1 双球面摇柱自动定心承力传力限位装置特性

传感器	A	B	ϕD	摆动角	偏心量	S=1mm	Smax
t	mm	mm	mm	$\alpha \{ \circ \}$	S (mm)	%外载荷	%外载荷
12	160	120	32	6	12.5	0.56	6.4
30	229	150	44	5	13	0.76	9.9
60	289	210	44	3	11	0.52	5.7

我国东莞市华兰海电子有限公司，在分析了弹性组件与摇柱一体化的自动定心承力传力限位装置和双球面圆柱式称重传感器组成的称重模块的优缺点后，设计出将弹性组件、双球面摇柱、称重模块功能集成为一体，内置压头的新型柱式称重传感器，有模拟信号和数字信号两种规格，如图 5 所示。其特点是：

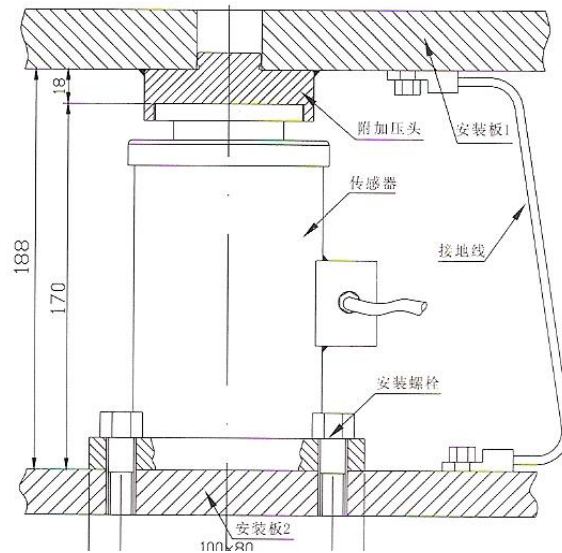


图5 内置压头的新型自动定心称重传感器

(1) 将称重传感器弹性组件、双球面摇柱、较大刚度的外壳集成为一体，结构简单紧凑，高度较小，承载器重心低、稳定性好；

(2) 合理的双球面接触，不但适应万向活动位移，而且还具有相当强的自动复位功能；

(3) 底座与外壳焊接为一体，有足够的强度和刚度，防止承载器受到过度冲击带来的称重传感器倾斜或颠覆，因此对限位装置和承载器刚度大小的要求不严格；

(4) 承力传力压头内置，经硫化的压头与壳体之间压紧密封，能承受六个大气压的气密性试验，真正意义上达到 IP68 密封等级，而且还有能使弹性组件在壳体内一定范围的万向自由活动；

(5) 如果在压头上稍加定位板，就可替代各种结构复杂的模块装配工装，大大降低了安装成本和难度。

4. 线接触链环组件承力传力定位限位装置

钢球、双球面摇柱支撑、弹性组件与摇柱一体化的自动定心承力传力限位装置，均属于无摩擦设计中的点接触引入和传递载荷方式。由于承载器所受的外载荷较高，钢球与球座、球面与底座之间的接触，是形状简单组件之间典型的接触问题，即古典接触问题。通常，在解古典接触问题时，只限于分析接触区的接触应力及接触变形。钢球与球座、球面与底座之间的接触，理论上为点接触，实际上是一个小接触圆的接触。随着外载荷的不断增大，钢球与球碗或双球面摇柱与底座的接触圆的面积将不断增大，即使在金属材料的弹性范围内，外载荷与接触圆半径 γ 、接触变形 δ 的关系也是非线性的。因此，采用钢球或双球面摇柱引入传递载荷，随着外载荷的增加接触面上最大压应力的增加较载荷的增加慢，不仅形成应力与载荷的非线性关系，而且很难保证电子汽车衡在使用过程中“承载器受力分配系数”恒定不变。基于上述原因，欧美一些处于国际电子衡器市场引导者地位的衡器制造公司，基本不采用钢球与球碗或双球面摇柱支撑与底座接触引入传递载荷的定位限位装置，而是采用线接触的链环组件或马鞍环组件引入传递载荷。链环和马鞍环组件均能有效地克服承

载器的水平力，实现自动平衡定位限位，保证电子汽车衡在使用过程中“承载器受力分配系数”恒定不变。线接触链环组件作为电子汽车衡承载器的承力传力定位限位装置，要求称重传感器中间固支两端为悬臂剪切梁式结构。两个线接触的链环分别悬挂在双悬臂剪切梁的两端，四只称重传感器八个链环共同支撑承载器，起到承力传力定位限位作用。采用线接触链环组件的电子汽车衡以加拿大 MASS LOAD 公司的结构与安装方式最具代表性，如图 6 所示。

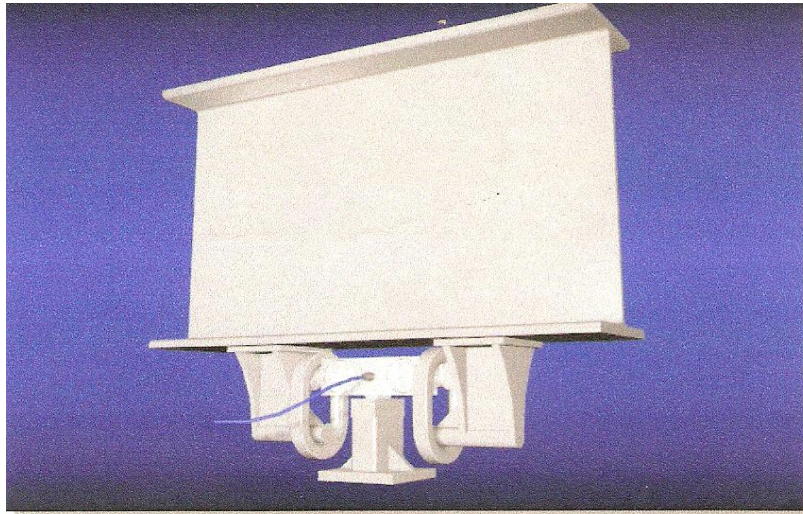


图 6 加拿大 MASS LOAD 公司线接触链环组件

线接触链环组件承力传力定位限位的优点是：

(1) 线接触链环为集成化设计的悬挂式柔性结构称量组件，将承载器与称重传感器之间的承力传力定位限位装置一体化，巧妙的集成为一个链环上，对承载器受载后的变形和温度变化引起的热胀冷缩变形，具有自动调整和适应能力；

(2) 结构简单紧凑，标准链环容易设计与计算，组装电子汽车衡重心低，稳定性好；

(3) 链环为线接触引入传递载荷方式，为无摩擦结构，与钢球和双球面摇柱传递载荷相比，具有全方位的平移和旋转自由度，是静态称重系统最先进、最合理的承力传力定位限位组件；

(4) 由于承载器的承力传力定位限位功能集成于链环一身，不需要另外配置专用的定位限位装置，即简化总体结构又降低系统成本。

5. 线接触马鞍环组件承力传力定位限位装置

线接触马鞍环组件承力传力定位限位装置，其应用功能和工作原理与线接触链环组件相同，只是与其配套的双剪梁型称重传感器的结构有所不同。线接触链环组件用称重传感器，采用中间固支两端为悬臂剪切梁结构。两个链环分别悬挂在剪切梁两端，双链环同时平移和旋转共同支撑承载器。线接触马鞍环组件用的双剪梁型称重传感器，两端为固定支撑，剪切梁中间悬挂一个线接触的马鞍环，并与承载器相连接起到承力传力定位限位作用，为单链环平移和旋转结构，不存在两个链环同

步问题。美国 RICE LAKE 公司销售的大型电子汽车衡，均采用线接触马鞍环组件引入传递载荷，同时对承载器实施定位限位，其具体结构如图 7 所示。

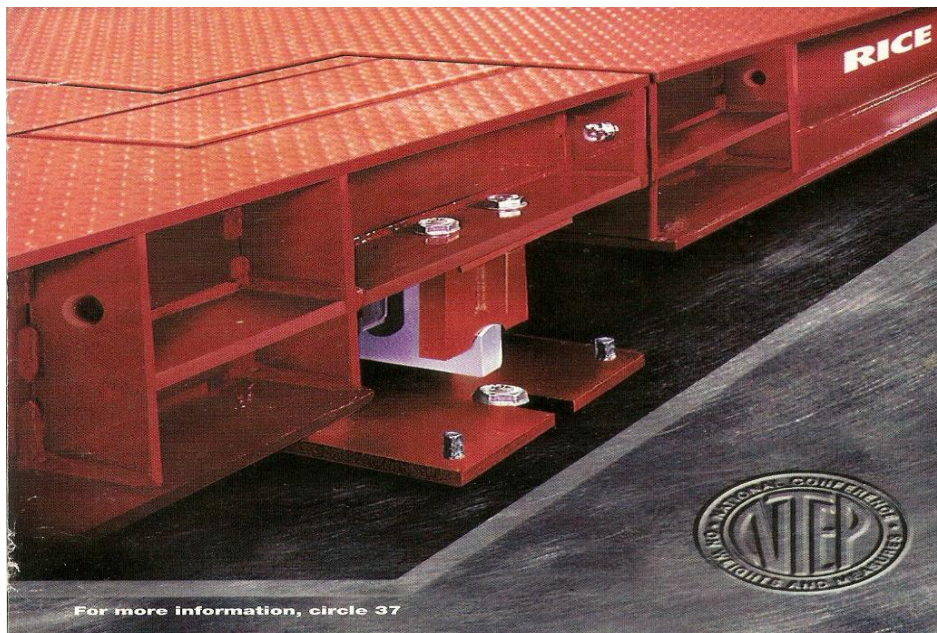


图 7 美国 RICE LAKE 公司线接触马鞍环形组件安装图

线接触马鞍环组件除具有线接触链环组件的全部优点外，还有其独有的特点：

- (1) 结构简单紧凑，马鞍环可采用铸钢件，冷热加工方便，成本低；
- (2) 线接触马鞍环为悬挂式柔性承力传力结构，能自动修正承载器受载变形和温度变形产生的误差
- (3) 与其配套的称重传感器为双端固支梁结构，中间加载点与两端的支撑点自成平衡力系，线接触马鞍环形组件中间加载时，承载器重心低、稳定性好；
- (4) 线接触马鞍环形组件在承力传力定位限位过程中，不存在两个线接触链环因机械加工和安装误差造成的同步问题，它具有多维自由度和全方位位移性能；
- (5) 线接触马鞍环形组件与承载器连接合理，特别适用于大量程的电子汽车衡和电子平台秤。

近年来，美国 Cardinal 衡器制造公司研制出与悬挂式线接触马鞍环承力传力定位限位组件功能基本相同的压环式不锈钢柔性支座，同样起到承力传力定位限位的作用。与双剪梁型称重传感器配套的压环式不锈钢柔性支座如图 8 所示。

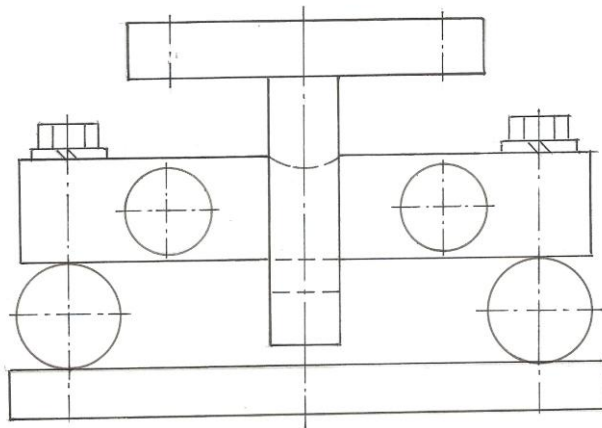


图8 线接触压环式不锈钢柔性支座

线接触压环式不锈钢柔性支座的特点是结构紧凑、体积小高度低；抗环境干扰能力强；具有自动定心定位功能；底座与基础直接用螺钉固定，安装调试方便。在各类型电子衡器中取得较好的应用效果。

六、结束语

从以上对钢球、双球面摇柱支撑、自动定心称重传感器组件与模块、线接触链环和马鞍环组件的承力传力定位限位结构分析中，不难得出：

(1) 钢球引入传递载荷，尽管具有只感受轴向力不传递侧向力和力矩的突出特点，但其顶球式支撑传力结构组件平移和旋转自由度小，对承载器受载和温度变形调节能力弱的缺点是不容忽视的；

(2) 采用自动定心双球面摇柱支撑水平力抑制方法，固然可以克服钢球引入传递载荷的缺点，但其结构复杂，组秤重心较高，设计时必须匹配不同材料的延伸率、热膨胀系数等，增加了设计制造难度，在一定程度上减小了应用范围；

(3) 弹性组件与摇柱一体化的自动定心承力传力限位装置，由于弹性组件本身就是双球面摇柱，实际上等于增加了摇柱的高度，增大了自动定心的摆动角和偏心量，在欧洲电子衡器市场的应用较为广泛；

(4) 线接触链环和马鞍环组件承力传力定位限位结构，为集成化设计的悬挂式柔性结构称量组件，具有多维自由度和全方位位移性能，对承载器受载后的变形和温度变化引起的热胀冷缩变形，具有自动调整和适应能力，在北美电子衡器市场得到广泛的应用。

我国电子汽车衡承载器与称重传感器的承力传力定位限位，仍以双剪梁型称重传感器顶球式支撑外加纵向、横向限位装置为主的结构，不完全符合国际大型电子衡器技术发展潮流。若要与国际电子衡器市场融合参与国际竞争，电子衡器产品除应具备国际水平的质量外，还要有适应国际市场需求的技术含量和结构形式。我国电子衡器和称重传感器制造企业，应尽快转变观念跟上国际电子

衡器技术发展潮流, 制造并推广适应线接触链环和马鞍环引入传递载荷的多层介质密封的双剪梁型称重传感器, 以及与其配套的悬挂式链环和马鞍环柔性结构称量组件, 为提高我国电子衡器技术与制造工艺水平作出新贡献。

参考文献

1. RICE LAKE (美国). Electronic Truck Scale. Weighing and Measurement. June 2002.
2. BLH (美国). Process Weighing Systems [EB / OL]. WWW. blh. com.
3. HBM (德国). Components for Weighing Technology. 2009.
4. HBM (德国). Pendulum Mounes for Load Cells RTN / 1...100t. 2009.
5. Mass Load (加拿大). ML 400 Truck Scale Assembly [EB / OL].
www.massload. com.
6. Sensortronics (美国). 悬挂式柔性结构称量组件——先进合理的静态称量系统传力结构. STS 样本资料, 2000 年。
7. 周祖濂. 偏载 [J]. 衡器工业通讯, 2011 年第 9 期。
8. 倪守忠. 浅谈秤的复位系统 [J]. 传感器应用技术. 1989 年第 2 期。

作者简介

刘九卿 (1937 ~), 男, 汉族, 辽宁省海城市, 中国运载火箭技术研究院第 702 研究所研究员, 享受国务院政府特殊津贴专家, 在职时从事各型号运载火箭结构强度试验应力分析等工作, 现为中国衡器协会技术顾问。