

多柱式称重传感器的结构特点与力学分析

□中国运载火箭技术研究院第七零二研究所 刘九卿

【摘要】多柱式称重传感器是在分析测试单柱式称重传感器结构抗侧向载荷和偏心载荷能力差而研发的新型结构，是柱式称重传感器结构设计、制造工艺和非线性补偿技术的一次飞跃。本文是在分析单柱式称重传感器弹性元件结构、受力特点的基础上，介绍了整体型、组合型多柱式称重传感器结构与力学特性；通过建立数学模型分析，计算了应用较多的整体三柱式、整体四柱式弹性元件抗偏心载荷，侧向载荷的能力；给出了几种组合式多柱称重传感器的各种分离弹性元件组合方案。

【关键词】称重传感器；弹性元件；力学特性；单柱；整体多柱；组合多柱；偏心载荷

文献标识码：A 文章编号：1003-1870 (2024) 05-0005-07

概述

在世界各国研制的称重传感器中，圆柱式、圆筒式是选用较多的弹性元件结构。根据理论分析和大量的试验测试数据表明，为了保证圆柱式、圆筒式称重传感器具有较好的计量性能，必须满足以下几个主要技术条件，即

对于实心圆柱式弹性元件，其高度 H 与外径 D 之比应满足如下要求：

$$\frac{H}{D} \geq 2 \sim 2.5$$

对于圆筒式弹性元件，其高度 H 、外径 D 与圆筒壁厚 b 之间应符合下列关系：

$$\frac{H}{D} \geq \frac{1}{2} \sim \frac{1}{3}$$

$$\frac{H}{b} \geq 2 \sim 2.5$$

弹性元件应变区的应力 σ (kg/mm^2) 与弹性元件所用金属材料的屈服极限 σ_s (kg/mm^2) 应满足如下条件：

$$\sigma \leq \frac{1}{3} \sigma_s$$

对于圆柱式弹性元件而言，当称重传感器的外

载荷 P 确定后，其应变区的直径 D 也就确定了，即

$$D = \frac{\sqrt{4P}}{\frac{1}{3}\sigma_s\pi}$$

同时圆柱式弹性元件的高度 H 也就可以确定了，即

$$H \geq (2 \sim 2.5) D$$

从上述分析不难看出，尽管圆柱、圆筒式弹性元件具有结构简单、紧凑，几何外形为圆形，容易加工出较高的尺寸精度和形位公差等级。量程范围广，可以从几吨到几百吨，特别是在大量程称重传感器中应用较多，相对其他结构类型制造成本较低等特点。但它的缺点也很突出，主要是纵向应变与横向应变相差较大。横向应变约为纵向应变的0.3倍，因而输出灵敏度较低，通常在1.5mV/V以下。在承受压向或拉向载荷时，应变区受泊松比效应影响较大，即分别承受压向或拉向载荷时，其应变区截面积增大或减小因此固有线性差，其非线性误差通常为(0.1 ~ 0.3)%FS。必须设计较为复杂的保护外壳、焊接密封膜片和与其配套的压头、压垫。用于大型电子衡器时，对承载器设计、载荷引入方式、定位限位装置等要求较为苛刻。抗偏心载

荷和侧向载荷能力差，这是单柱式弹性元件致命缺陷。因为在实际应用中受到的力学干扰量分别是偏心载荷、侧向载荷和沿圆柱中心轴线方向的力矩，单柱式弹性元件的结构，决定了它无法抵抗和克服这些力学干扰。

固有线性差，可以通过粘贴在弹性元件上、串联在惠斯通电桥回路中的半导体应变计或镍箔应变计进行非线性补偿。而抗偏心载荷和侧向载荷能力差，是单柱式结构的固有缺陷，必须通过改变称重传感器弹性元件的结构形式来克服。设计双层膜片外壳或采用双球面自动对中结构，只能在一定程度上提高抗偏心载荷和侧向载荷的能力，不能从弹性元件自身结构上克服此问题。

20世纪90年代，美国Sensortronics公司为彻底克服单柱式称重传感器结构抗偏心载荷和侧向载荷能力差的致命缺陷，研制出整体结构的三柱式、四柱式称重传感器，并在全美第十届称重与测量技术展览会上展出。美国业内人士认为，整体多柱式称重传感器是柱式称重传感器结构设计、制造工艺和非线性补偿技术的一次飞跃，为柱式称重传感器的发展开辟了一条新路。

为提高多柱式称重传感器的制造工艺性，降低生产成本，也可以采用由若干个尺寸相同的圆柱、圆筒、方柱等分立柱弹性元件，按照不同的方法组合成一个多柱式称重传感器。即多个承载分立柱在圆形底座、圆盘压头间同一圆周上有规律分布，形成组合式一体的多柱弹性元件，通常称之为组合式多柱称重传感器。既具有整体多柱弹性元件结构的特点，又降低了整体多柱结构制造工艺的难度。

1 整体三柱式、四柱式称重传感器的结构特点

整体三柱式、四柱式称重传感器弹性元件是将锻造加工时只许拉伸不许墩粗的一段圆形合金钢毛坯在精密数控加工中心上一次加工成型的整体结构。三柱式、四柱式结构的每根柱均沿弹性元件圆形底座上的同心圆均匀分布，为了方便粘贴电阻应变计，各个分柱体多为正方形截面。在弹性元件顶板的中心加工出球头或球碗，用来引入外载荷。整体三柱式、四柱式称重传感器弹性元件的结构示意图，如图1、图2所示。

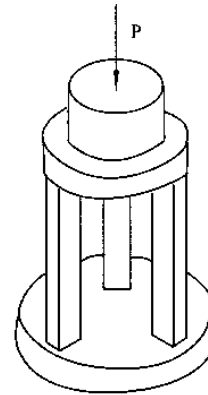


图1 整体三柱式弹性元件结构图

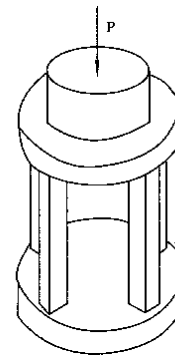


图2 整体四柱式弹性元件结构图

整体三柱式、四柱式称重传感器的结构特点归纳起来主要有：

(1) 整体三柱式、四柱式称重传感器弹性元件是用一块合金钢材，由加工中心一次性加工成型的整体结构，承载球头大、结构外形低、受载稳定性好。

(2) 当承受垂直于弹性元件中心的外载荷时，载荷在弹性元件结构的三柱、四柱上均匀分布。当受到附加载荷或力矩作用时，每根柱的承受载荷的大小不同，用以抵消各种力学干扰所产生的附加载荷或力矩，明显减少了弹性元件的不规则变形量。

(3) 由于弹性元件为整体三柱式、四柱式结构，极大地提高了抗偏心载荷和侧向载荷的能力。据美国STS公司资料介绍，整体三柱式结构抗偏心载荷和抗水平侧向载荷的能力可达到额定载荷的30%，整体四柱式结构可达50%。

(4) 为克服单柱式弹性元件小锥度球头承受大载荷易变形的弱点，加大整体三柱式、四柱式弹性元件的承载球面半径，明显减小了在大载荷或冲击载荷下球面的变形，改善了称重传感器的静态和动

态性能。

(5) 不采用单柱式结构半导体应变计非线性补偿和弹性模量补偿用镍箔应变计参与非线性补偿的方法, 而是采用适合三柱式、四柱式弹性元件结构特点的专用集成电路非线性补偿方法。补偿精度高, 稳定性好, 使用寿命长, 对重复性误差、滞后误差和温度特性影响极小, 使称重传感器的计量准确度和应用特性有本质性提高。

2 整体三柱式、四柱式称重传感器抗偏心载荷特性分析

2.1 整体三柱式弹性元件抗偏心载荷特性分析

整体三柱式弹性元件受偏心载荷 P 作用的力学模型如图3所示。

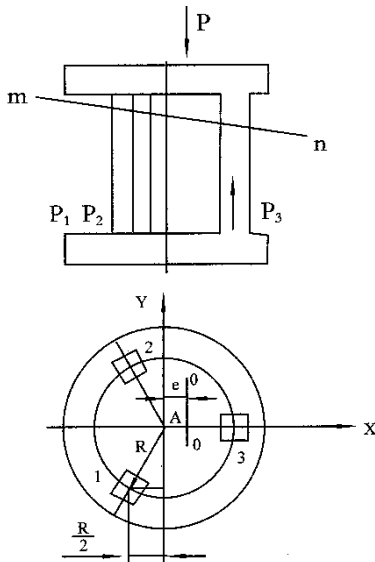


图3 整体三柱式弹性元件承受偏心载荷力学模型

设载荷 P 沿 X 轴的偏心距离为 e , 变形后弹性元件的刚性承载部分在线 $m-n$ 位置, 故1、2柱所承受的载荷相等, 即

$$P_1 = P_2 \quad (1)$$

$$P_1 + P_2 + P_3 = P \quad (2)$$

由式(1)和式(2)得:

$$2P_1 + P_3 = P$$

$$\text{则} \quad 2P_1 = P - P_3 \quad (3)$$

过 A 点取与 Y 轴平行的 $O-O$ 轴, 求各立柱对该轴的力矩, 即

$$P_1\left(\frac{R}{2} + e\right) + P_2\left(\frac{R}{2} + e\right) = P_3(R - e)$$

$$2P_1\left(\frac{R}{2} + e\right) = P_3(R - e) \quad (4)$$

由式(3)和式(4)得:

$$(P - P_3)\left(\frac{R}{2} + e\right) = P_3(R - e)$$

$$P\left(\frac{R}{2} + e\right) = P_3\left(R + \frac{R}{2}\right) = P_3 \cdot \frac{3}{2}R$$

$$P_3 = \frac{P}{3}\left(1 + \frac{2e}{R}\right) \quad (5)$$

将式(5)代入式(3)得:

$$2P_1 = P - P_3 = P - \frac{P}{3}\left(1 + \frac{2e}{R}\right)$$

$$2P_1 = \frac{P}{3} \cdot 2\left(1 - \frac{e}{R}\right)$$

$$P_1 = \frac{P}{3}\left(1 - \frac{e}{R}\right)$$

$$\therefore P_2 = \frac{P}{3}\left(1 - \frac{e}{R}\right) \quad (6)$$

现以额定载荷 $P = 20000\text{kg}$, 底半径 $R_1 = 40\text{mm}$, 各应变立柱中心所在圆半径 $R = 27.5\text{mm}$, 柱为正方形截面, 其边长 $b = 20\text{mm}$, 柱长 $L = 80\text{mm}$ 的三柱形称重传感器为例, 进行抗偏心载荷能力计算。

如果载荷 P 沿 X 轴偏心的距离 $e = 2\text{mm}$ 时,

$$\text{则} \quad P_3 = \frac{P}{3}\left(1 + \frac{2e}{R}\right) = \frac{20000}{3}\left(1 + \frac{2 \times 2}{27.5}\right) = 7633\text{kg}$$

每个立柱的平均受载为:

$$\frac{20000}{3} = 6667\text{kg}$$

结果第3柱超载为 $7633 - 6667 = 966\text{kg}$, 其超载量是额定载荷 6667kg 的 14.58% 。

若偏心距 $e = 3\text{mm}$

$$\text{则} \quad P_3 = \frac{P}{3}\left(1 + \frac{2e}{R}\right) = \frac{20000}{3}\left(1 + \frac{2 \times 3}{27.5}\right) = 8121\text{kg}$$

第3柱超载 1455kg , 是额定载荷 6667kg 的 21.8% 。

实际上整体三柱式结构可以超载 30% , 即 $P_3 = 8666\text{kg}$, 此时的压应力为 $\sigma = 21.7\text{kg/mm}^2$ 。

2.2 整体四柱式弹性元件抗偏心载荷特性分析

整体四柱式弹性元件受偏心载荷 P 作用的力学模型如图4所示。

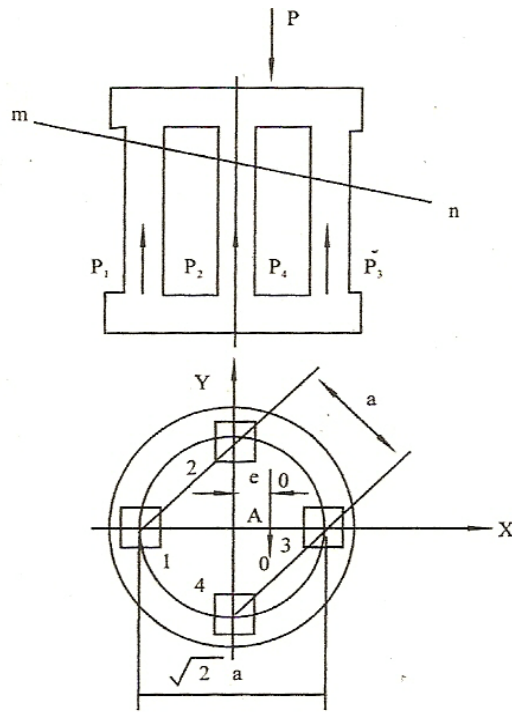


图4 整体四柱结构承受偏心载荷力学模型

设载荷P沿X轴的偏心距离为e，变形后弹性元件的刚性承载部分在线m-n位置，故2、4柱承受的载荷等于1、3柱承受载荷的平均值，即

$$P_2 = P_4 \quad (7)$$

$$2P_2 + P_1 + P_3 = P \quad (8)$$

由式(7)和式(8)得：

$$2P_2 = P_1 + P_3 = \frac{P}{2} \quad (9)$$

过A点取与Y轴平行的0-0轴，求各立柱受力对该轴的力矩为：

$$P_1(\sqrt{2}a + e) + 2P_2 \cdot e = P_3(\sqrt{2}a - e)$$

$$P_1\left(\frac{\sqrt{2}}{2}a + e\right) + \frac{P}{2}e = P_3\left(\frac{\sqrt{2}}{2}a - e\right) \quad (10)$$

由式(9)和式(10)得： $P_1 = P\left(\frac{1}{4} - \frac{e}{\sqrt{2}}\right)$

$$P_2 = \frac{P}{4}$$

$$P_3 = P\left(\frac{1}{4} + \frac{e}{\sqrt{2}}\right) \quad (11)$$

现以额定载荷P=20000kg，底半径R₁=40mm，各立柱中心所在圆半径R=27.5mm，柱为正方形截面，

其边长b=18mm，柱长L=80mm的四柱式称重传感器为例，进行抗偏心载荷能力计算。

经计算两根柱之间的距离a=39mm，如果载荷P沿X轴的偏心距离e=3mm，

$$P_3 = P\left(\frac{1}{4} + \frac{e}{\sqrt{2}a}\right) = 20000\left(\frac{1}{4} + \frac{3}{\sqrt{2} \times 39}\right) = 6088\text{kg}$$

由计算结果可知，第3柱超载1088kg，是额定载荷5000kg的21.8%。

若偏心距离e=4mm

$$P_3 = P\left(\frac{1}{4} + \frac{e}{\sqrt{2}a}\right) = 20000\left(\frac{1}{4} + \frac{4}{\sqrt{2} \times 39}\right) = 6450\text{kg}$$

第3柱超载1450kg，是额定载荷5000kg的29%。

实际上整体四柱式结构可以超载50%，即P₃ = 7500kg，此时的压应力σ = 23.1kg/mm²。

3 整体四柱式弹性元件抗侧向载荷特性分析

整体四柱式称重传感器的柱体也可以设计成矩形截面，现以此种结构分析抗侧向载荷的能力。为方便分析和计算，把本属于空间框架的整体四柱弹性元件简化成平面框架来处理，同时可认为只要方柱的惯性矩足够大，当悬臂框架的自由端受到集

中载荷作用时，只发生平移不发生转动，这样就可以把四柱弹性元件看作一端固支，一端自由的悬臂

梁，其尺寸和力学模型如图5所示。

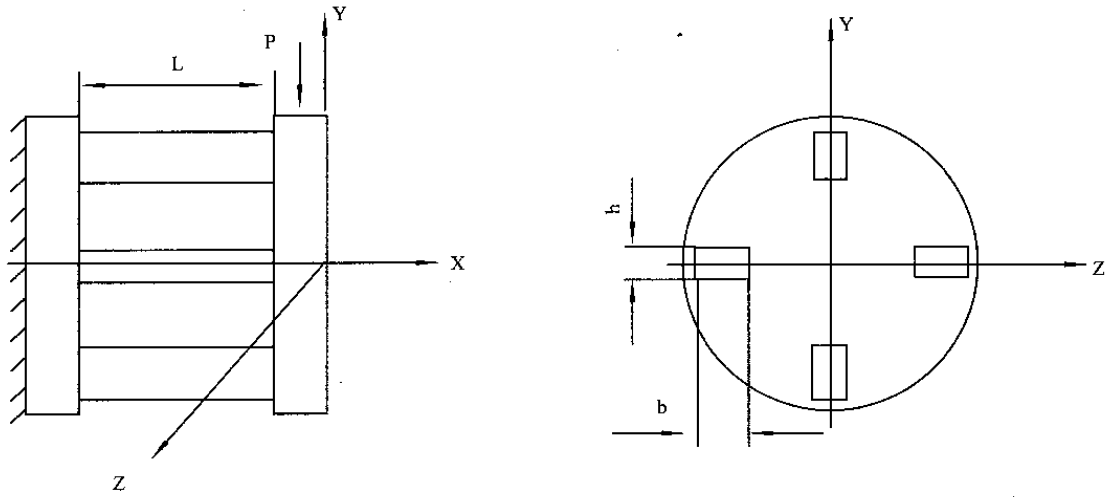


图5 受侧向载荷作用弹性元件的力学模型

根据莫尔定律，框架自由端的转角为：

$$\theta = \frac{1}{EJ} \int_0^L (-PX)(-1)dx = \frac{PL^2}{2EJ} \quad (12)$$

要使 $\theta = 0$ ，必须在自由端加一个反力矩M，即

$$M = \frac{PL^2}{2} \quad (13)$$

这样框架各柱弯矩的分布为：

$$M_{(x)} = -PX + \frac{PL^2}{2} \quad (14)$$

挠度方程为：

$$Y_{(x)} = \frac{1}{EJ} \left(-\frac{PX^3}{6} + \frac{PLX^2}{4} + \frac{PL^3}{12} \right) \quad (15)$$

在侧向载荷P作用下，柱1与柱3，柱2与柱4所

受载荷相同，即

$$\begin{aligned} P_1 = P_3 &= \frac{PJ_1}{2J_1 + 2J_2} = \frac{P}{2} \cdot \frac{J_1}{J_1 + J_2} \\ P_2 = P_4 &= \frac{PJ_2}{2J_1 + 2J_2} = \frac{P}{2} \cdot \frac{J_2}{J_1 + J_2} \end{aligned} \quad (16)$$

当X=L时，柱上弯矩分布为：

$$M_i = -P_i L + \frac{PL^2}{2} = -\frac{P_i L}{2} \quad (17)$$

各柱的弯曲应力为：

$$\sigma_i = \frac{M_i e}{J_i} \quad (18)$$

式中e为距离柱的中性面的大小。

$$\begin{aligned} \sigma_{1\max} = \sigma_{3\max} &= -\frac{M_1}{J_1} \cdot \frac{h}{2} = -\frac{PLJ_1}{4J_1(J_1 + J_2)} \cdot \frac{h}{2} = \frac{3PLh}{2(bh^3 + b^3h)} \\ \sigma_{2\max} = \sigma_{4\max} &= -\frac{M_2}{J_2} \cdot \frac{b}{2} = -\frac{PLJ_2}{4J_2(J_1 + J_2)} \cdot \frac{b}{2} = \frac{3PLb}{2(bh^3 + b^3h)} \end{aligned} \quad (19)$$

利用上述公式，对额定载荷为20000kg，柱截面尺寸b=20mm，h=16mm，柱长L=80mm的整体四柱弹性元件进行抗侧向载荷能力计算。得出的结果证明，只能抗额定载荷30%，即6000kg的侧向载荷抗50%额定载荷，即10000kg的侧向载荷时，整体四柱弹性元件结构不会被破坏，但弯曲应力已非常

高。

4 组合式多柱称重传感器的结构与特点

为改善整体多柱式称重传感器的制造工艺性，降低生产成本，适应超大量程弹性元件结构需要，国外一些称重传感器制造企业，均采用变整体式多柱结构为分立柱组合式多柱结构的方法解决此问

题。即采用由若干个尺寸相同的圆柱、圆筒、方柱等分立柱弹性元件，按照不同的方法组合成一个多柱式称重传感器。多个承载分立柱在直径相同的圆形底座、上压头间的同一圆周上有规律分布，或按对称的几何形状分布，形成组合式多柱弹性元件结构，通常称之为组合式多柱称重传感器。

分立柱弹性元件以圆柱、圆筒、正方形立柱应用较多，按照不同方法组合成一个大型的测力或称重传感器。根据使用条件、量程要求有多种组合形式，应用较多的是由三个分立柱、四个分立柱、五个分立柱和九个分立柱组成的一个圆形称重传感器，其结构示意图如图6所示。

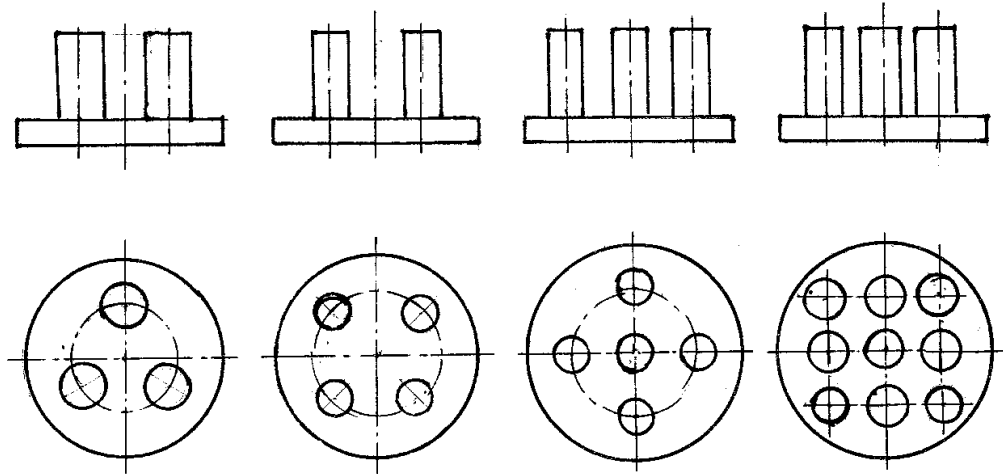


图6 组合式多柱型称重传感器结构示意图

组合式称重传感器结构的突出特点是：

(1) 由于是多个分立柱弹性元件组合式结构，极大地改善了接触应力的分布，提高了抗偏心载荷和侧向载荷能力。

(2) 弹性元件由大变小，降低了制造工艺难度，有利于下料、机械加工、热处理、粘贴电阻应变计、防护密封等。

(3) 可以对各个分力弹性元件进行单独检测标定，方便检测、调试和质量控制。

(4) 具有灵活多变的独立和混合组成惠斯通电桥电路方式，根据需要可以采用各分力弹性元件并联、混联组合。

(5) 适合承载面较大的大量程称重传感器。

组合式多柱称重传感器多采用独立组成和混合组成惠斯通电桥两种方案。各分力弹性元件独立组成惠斯通电桥的特点是：不与其他分力弹性元件发生组成惠斯通电桥联系，可以单独进行测试标定，降

低了标准测力机的吨位。可以测量出各分力弹性元件承受载荷的不均匀分布情况，当某一个分弹性元件出现故障时，不影响其他分弹性元件工作。对于载荷分布不均匀具有良好的补偿作用，当载荷相互转移时均可以获得较好的测量准确度。

各分力弹性元件混合组成惠斯通电桥的特点是：将各分力弹性元件应变区粘贴的电阻应变计按照一定的规则相互连接，组成惠斯通电桥电路。其特点是测量电路简单，故障率降低。但当某一个分力弹性元件发生故障时，整个组合式称重传感器亦能正常工作。

除上述多圆柱、圆筒、方柱组合方式外，也可以采用由不同直径的圆筒弹性元件一个套一个组合成一个大型称重传感器，每个分圆筒就是一个分弹性元件，分别在其上粘贴单轴或组合电阻应变计，其结构示意图如图7所示。

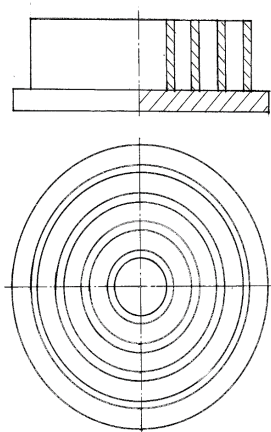


图7 不同直径圆环组成的称重传感器结构示意图

由于图7所示结构各分力弹性元件的直径互不相同，其高度与直径之比（ H/b ）差异较大，尤其是最外层圆环的 H/b 值最低，这就降低了对偏心载荷的补偿能力。准确度要求较高的大量程称重传感器，不宜采用此种结构。

上述两种类型多柱组合式称重传感器，由于各个分力弹性元件是单独加工，然后安装在承载底座和传力压头之间，其优点是，各个分弹性元件应变区开阔，便于粘贴电阻应变计和防护密封作业。每个分弹性元件可以单独进行测试、标定，降低了对标准测力机量程的要求。但缺点是，由于各分立柱是单独进行加工制造，会产生一定的装配误差。特别是各分立柱的高度很难做到一致，容易产生各分力弹性元件承受载荷的不均匀性误差。如果分弹性元件长度误差控制严格，此项误差不影响总体计量性能。就弹性元件的几何形状而言，以圆环体为最佳，其次是圆柱体、方柱体。

5 结语

整体三柱式、四柱式称重传感器的突出特点是：从弹性元件结构上克服了单柱式称重传感器抗偏心载荷和侧向载荷能力差的致命缺陷，开创了柱式弹性元件结构设计的新途径。

整体三柱式称重传感器的量程范围是0.5t~150t，采用金属外壳焊接密封，符合IP68密封标准。集成电路非线性补偿，准确度等级可达C3级，并适合制成防爆、高温型称重传感器。

整体四柱式称重传感器的量程范围为25t~500t，因无保护外壳，应采用多层密封工艺，最外层为胶

粘膜片密封。配用上具有限位结构的称重模块，可有效地保证所安装承载器的稳定性，有利于静态和动态称重计量。

组合式多柱称重传感器，是为了改善整体多柱式称重传感器的制造工艺、降低生产成本而开发的新结构，适合较大量程称重传感器。分力弹性元件以圆环体为最佳，其次是圆柱体、方柱体。

参考文献

- [1] 美国Sensortronics公司. 整体多柱称重传感器，中文英文样本资料，2000年.
- [2] 日本计量机器工业联合会. 计量计测机器总览，2006年.
- [3] 朱文蔚、谢国权. 应变式三分力测力传感器的设计与制造，上海交通大学，1982年.
- [4] 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，2006年12月.

作者简介

刘九卿（1937—），男，辽宁沈阳，1960年毕业于吉林工业大学。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》，在相关计量技术杂志上共发表学术论文150多篇。