

称重传感器典型弹性元件结构与力学分析

中国运载火箭技术研究院第 702 研究所 刘九卿

【摘要】应变式称重传感器由弹性元件（承受外载荷的弹性体）、应变电阻转换元件（各型号电阻应变计）和变换电路（惠斯通电桥电路）组成。其中弹性元件结构的先进性、合理性是应变式称重传感器达到高准确度、高稳定性的关键。本文在总结理论研究与实际应用经验的基础上，对圆柱、圆环、板环、扭转与弯曲环、直梁、曲梁、平行梁等典型正应力弹性元件和利用矩形、工字形、圆截工字形、矩形空心截面剪切梁等典型剪应力弹性元件的结构形式、力学特性、设计要点进行了介绍与分析。

【关键词】称重传感器；电阻应变计；弹性元件；力学特性；正应力；剪应力；应力分布

一、概述

应变式称重传感器（以下简称为称重传感器）是技术密集型和技巧密集型的高技术产品，“高”就高在它的设计与制造技术具有多样性、边缘性、综合性和技艺性等特点，是多个学科、多项技术和多种制造工艺的科学运用和集成。称重传感器按其外界信息和变换效应它属于物理型传感器类别中的物性型传感器，是利用物理学中的物质定律——虎克定律构成的。该定律是表示金属材料客观性质的法则，即 $\sigma = E \varepsilon$ 。任何称重传感器最重要的机械部分通常是弹性元件，其功能是对作用载荷的反作用，同时把载荷的作用集中于一个独立的、最好是均匀的应变场内，便于电阻应变计测量。称重传感器的基本特性与其弹性元件的结构形式及使用金属材料的性能密不可分，即利用金属材料的固有特性通过应变转换元件电阻应变计来实现对重量信息的检测。所以，称重传感器的设计主要是弹性元件的结构与边界设计和弹性元件所用金属材料的选择，其主要任务是使任何结构的弹性元件性能与金属材料性能合为一体。这就是业内普遍认知的“结构是基础，材料是关键，工艺是核心，检测是保障”的道理。称重传感器按其利用应力的不同，分为正应力和剪应力弹性元件两种类型。本文仅就国内外应用较为广泛的正应力和剪应力典型弹性元件结构和力学特性进行介绍与分析。

二、正应力、剪应力弹性元件结构与边界设计原则

理想的正应力、剪应力弹性元件应变区内的应变程度与所施加的外载荷应成较为严格的线性关系，达到此种目标正是所有称重传感器弹性元件设计的中心所在。完成这一任务的困难在于结构设计与计算上和—些经济上的限制，只有遵循称重传感器研制、生产规律和弹性元件结构设计与边界选择原则，才能同时解决上述限制，克服各种因素的综合影响，生产出性能波动最小的称重传感器。归纳起来，称重传感器弹性元件结构与边界的设计原则是：

(1) 弹性元件应设计成一个整体结构, 尽量避免装配式和焊接式结构, 因为任何组装结构其连接件之间的摩擦和位移都可以引起非线性和离散性。

(2) 弹性元件应变区(即电阻应变计粘贴区域)受力单一, 应力分布均匀, 柱、筒式弹性元件应遵循圣维南力的扩散原理。

(3) 弹性元件应变区的应变程度不应太高, 应变区以外不得有最高应力分布区和应力集中点。因为弹性元件的非线性、滞后、蠕变误差和疲劳寿命等, 都随应变区的应变程度高低而变化。应变区较低的应力、应变意味着对理想线性弹性性能的偏差最小, 也意味着弹性元件有较大的刚度和较高的固有频率。

(4) 弹性元件边界条件是影响计量性能的重要因素, 支承部分尽量形成刚性固定, 安装力远离应变区。

(5) 弹性元件载荷引入方式是影响计量性能的一个重要因素, 加载、承载的压头、压垫设计, 应使加载线与弹性元件中心线重合, 保证加载点稳定不变。

(6) 弹性元件的结构和外壳设计, 应尽量消除或减少力学干扰因素(横向载荷、弯矩、扭矩)的影响, 把性能波动减至最小。因为, 弹性元件受到任何附加载荷的影响, 必然伴随出现一定程度的非线性误差。

(7) 充分考虑电阻应变计粘贴的方便性和经济性, 要求弹性元件应变区贴片表面尽量为平面, 保证划线精度(采用高清晰液晶视频图像技术定位时, 应保证定位叉丝精确度)和容易安装加压夹具。

(8) 弹性元件粘贴电阻应变计处, 应便于防护、密封作业。对弹性元件采用焊接密封时, 要求焊接膜片的结构、刚度及焊接坡口设计合理, 不影响或少影响灵敏度, 保证焊接密封质量。

(9) 弹性元件的应变利用系数 $C = \varepsilon_{cp} / \varepsilon_{max}$ (电阻应变计测量的平均应变与最大应变之比) 越大越好。

(10) 在电子衡器和电子称重系统中, 弹性元件失效最常见的原因是过载。若弹性元件结构及附件条件允许, 尽量采取过载保护措施, 提高称重传感器工作的安全可靠。

三、正应力弹性元件结构与力学分析

1. 柱、筒型弹性元件结构与力学分析

正应力柱、筒型弹性元件分为单柱型、单筒型和多柱型、多筒型两种类型。单柱型、单筒型以圆柱、圆筒、圆截柱、圆截筒结构为主, 特殊要求也可以采用方柱、方筒、棱柱、棱筒等结构。多柱型、多筒型主要以三、四方柱和三、四方筒结构为主。

(1) 单柱、单筒型弹性元件结构与力学分析

正应力单柱、单筒型弹性元件组成的称重传感器总体结构如图 1 所示。

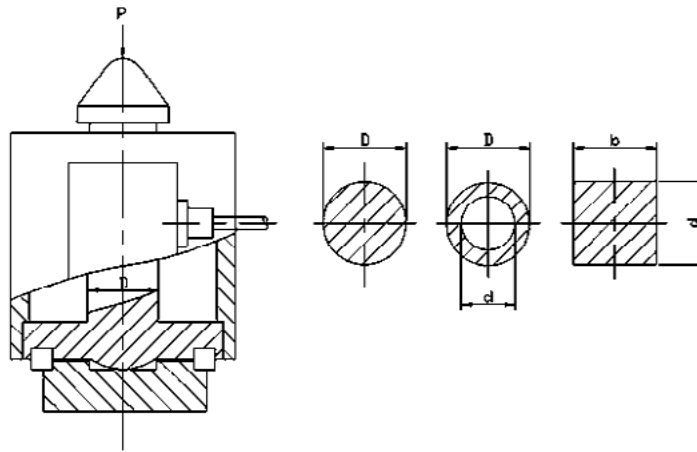


图 1 正应力单柱、单筒型弹性元件

正应力单柱、单筒型弹性元件具有结构简单紧凑；外形为圆柱、圆筒、方柱、方筒十分规矩的几何形状，容易加工出较高的尺寸和形位精度；弹性元件刚度大，固有频率高，动态响应快；可实现弹性元件与摇柱一体化设计，即将弹性元件与双球面摇柱合二为一，设计成为一个整体结构，其弹性元件同时起到双球面摇柱自动定心、自动限位作用，降低承载器高度，提高稳定性。其缺点是固有线性度较差，引起非线性误差的原因归纳起来主要是：

①电桥电路的非线性误差

可推导出圆柱式弹性元件输出与应变的关系式：

$$S = \frac{U_0}{U_i} = 1.28\varepsilon(1 - 0.72\varepsilon)$$

不难看出，输出与应变成非线性关系，只有 ε 足够小时，输出与应变才成为线性关系，即

$$S = \frac{U_0}{U_i} = 1.28\varepsilon$$

德国传感器学者雷纳德进行的试验证明：圆柱型弹性元件的轴向应变每变化 $100\mu\varepsilon$ ，电桥产生的非线性误差约为 0.007%。

②截面积变化引起的非线性误差

弹性元件受载后截面积变化，产生泊松比效应和弹性模量效应的影响。

泊松比效应影响：当圆柱型弹性元件承受压向载荷时，截面积增大，同时刚度连续增强，输出小于线性值，呈递减的抛物线；当圆柱型弹性元件承受拉向载荷时，截面积减小，同时刚度连续减弱，输出大于线性值，呈递增的抛物线。

弹性模量效应影响：当圆柱型弹性元件承受压向载荷时，弹性模量 E 值稍稍增大，使输出呈递

减趋势，加重了面积效应影响；当圆柱型弹性元件承受拉向载荷时，弹性模量 E 值稍稍减小，使输出呈递增趋势，同样加重了面积效应影响。 $\varepsilon_r = \mu\varepsilon_0$

由于泊松比 μ 的影响，轴向与径向应变相差较大，对输出值产生较大影响。为提高输出灵敏度 S ，必须加大轴向应变 ε ，而增大 ε 必然使 $P - \varepsilon$ 函数中产生非常量因子，因此加大了非线性误差。可推导出截面积变化引起的非线性误差为：

$$\text{承受拉向载荷 } \Delta_2 = +0.56\varepsilon$$

$$\text{承受压向载荷 } \Delta_2 = -0.56\varepsilon$$

试验证明：圆柱型弹性元件轴向应变每变化 $100\mu\varepsilon$ ，面积变化所引起的非线性误差约为 0.003%。

③电阻应变计的非线性误差

电阻应变计电阻的相对变化 $\frac{\Delta R}{R}$ 与应变 ε 只是在一定的应变范围内呈线性关系，可求出非线性误差

$$\Delta_3 = \frac{K-1}{2!} \varepsilon$$

若将 Δ_3 控制在 0.05% 以内，则

$$\varepsilon = \frac{2\Delta_3}{K-1} = \frac{2 \times 0.0005}{2-1} = 0.001 = 1000 \times 10^{-6}$$

为充分发挥柱、筒式弹性元件的特点，又能保证其具有较高的准确度等级，必须进行线性补偿。

由以上分析不难看出，单柱型弹性元件结构的固有缺陷比较突出，在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。单柱型称重传感器在衡器上的应用精度较在力标准机上的检定精度要低，这是因为秤体受载后的变形使称重传感器发生偏斜，不可避免的受到偏心和侧向载荷作用。解决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的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。实践证明，解决此固有缺陷的有效途径是采用多柱式弹性元件。

（2）多柱型弹性元件结构与力学分析

多柱型弹性元件分为整体多柱和组装多柱两种类型。以整体三柱、四柱型弹性元件应用较多。它是将锻造时只许拉伸不许墩粗的一段圆柱形毛坯，在数控加工中心上一次加工成形的整体结构。三柱、四柱型的每根柱均沿弹性元件圆形底座的对称轴均匀分布，柱体多为正方形截面。在顶板的中

心加工出球面或球碗，用来引入外载荷。美国学者认为多柱型弹性元件是柱式称重传感器设计、制造、补偿（集成电路线性补偿）技术的飞跃。整体三柱、四柱弹性元件结构如图 2 所示。

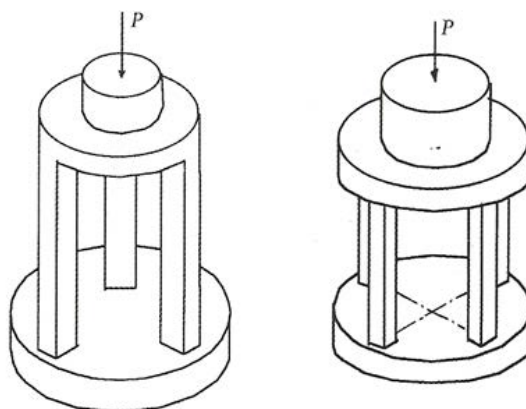


图 2 正应力整体三柱、四柱弹性元件

整体三柱、四柱弹性元件结构不仅弥补单柱弹性元件结构抗偏心、抗侧向载荷能力弱的致命缺陷，而且还使称重传感器的输出灵敏度、计量准确度和应用特性有了本质的提高。由于整体三柱、四柱弹性元件结构可以加大承载部位球面半径，明显的减少了在大载荷和冲击载荷下承载球头的变形程度，改善了称重传感器的静态和动态应用特性。整体三柱、四柱弹性元件结构在受到偏心载荷和侧向载荷作用时，每根柱的受力大小不同，用以抵消偏心载荷和侧向载荷所产生的力矩，明显的减少了弹性元件的不规则变形量。

① 整体三柱、四柱弹性元件的特点

整体三柱、四柱弹性元件的结构特点是：适合大力值，低外形；提高了抗侧向和偏心载荷的能力，单柱结构抗侧向载荷的能力只有额定载荷的 5% 左右，而整体三柱结构可达 30%，整体四柱结构高达 50%；加大了承载压头半径，减小了压头变形，改善了在大载荷和冲击载荷下的静态、动态工作特性；不用设计复杂的保护外壳，可采用在柱间粘接或焊接密封平膜片的方法进行密封；结构设计比较减单，只需按最大偏心时的承载量计算单柱承受的载荷，并满足输出灵敏度要求即可。

② 整体四柱弹性件抗偏心载荷特性分析

整体四柱弹性元件承受偏心载荷 P 作用示意图如图 3 所示。

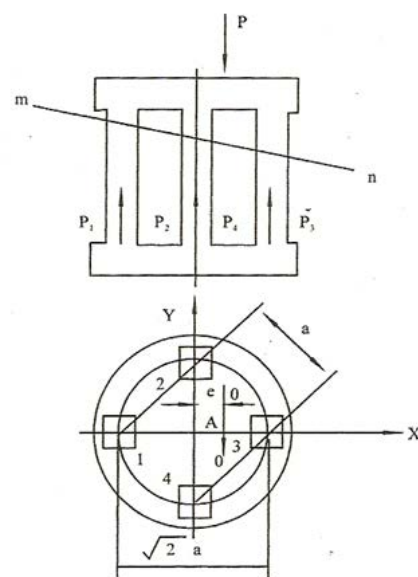


图 3 整体四柱弹性元件承受偏心载荷 P 作用图

设 P 沿 X 轴的偏心距离为 e ，变形后弹性元件的刚性顶板在线 $m - n$ 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

$$P_2 = P_4$$

$$2P_2 = P_1 + P_3 \quad (1)$$

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

由式 (1) 和式 (2) 得：

$$2P_2 = P_1 + P_3 = \frac{P}{2} \quad (3)$$

过 A 点取与 Y 轴平行的 $O - O$ 轴，对该轴的力矩为：

$$P_1(\sqrt{2}a + e) + 2P_2e = P_3(\sqrt{2}a - e) \quad (4)$$

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

由式 (3) 和式 (4) 得：

$$P_1 = P\left(\frac{1}{4} - \frac{e}{\sqrt{2}}\right)$$

$$P_2 = \frac{P}{4} \quad (5)$$

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

现以 $P = 20000\text{kg}$ ，底半径 $R_1 = 40\text{mm}$ ，各柱中心圆半径 $R = 27.5\text{mm}$ 的正方形截面（边长 $b = 18\text{mm}$ ，柱长 $L = 80\text{mm}$ ）的四柱型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 $a = 39\text{mm}$ ，如果载荷 P 沿 X 轴的偏心距离 $e = 3\text{mm}$ ，

则

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

由计算结果可知，第三柱超载 1088kg，是额定载荷 5000kg 的 21.8%。

若偏心距离 $e = 4\text{mm}$

则

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

第三柱超载 1450kg，是额定载荷 5000kg 的 29%。实际上整体四柱型称重传感器可以超载 50%，即 $P_3 = 7500\text{kg}$ ，此时的压应力 $\sigma = 23.1\text{kg}/\text{mm}^2$ 。

(3) 小量程单柱型弹性元件结构

0.5 ~ 10t 单柱型弹性元件，因量程小，直径必然小，不仅刚度差易失稳，而且不适合粘贴电阻应变计，因此采用盲孔压缩型结构。即在圆柱形弹性元件中心位置的两边向内对称的加工出两个盲孔，通过对水平截面孔壁尺寸的控制，尽量使盲孔腹板上的轴向应力和横向应力接近，以提高固有线性度。小量程单柱型弹性元件组成的称重传感器如图 4 所示。

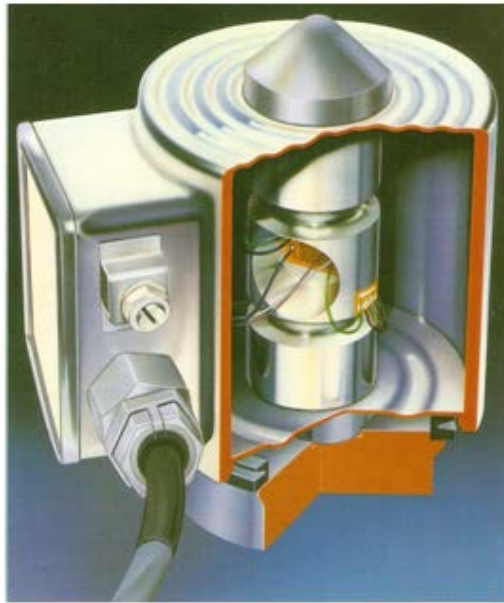


图 4 小量程单柱型弹性元件组成的称重传感器

2. 正应力环型弹性元件结构与力学分析

正应力环型弹性元件多为带上下螺柱的整体圆环结构或带上下螺孔的整体板环结构。承受压向载荷时多采用弹性圆环与附加压头、底垫的装配式结构。电子吊钩秤等特殊要求也可以采用长方环弹性元件，为提高机械加工的工艺性，长方环的内环可以通过加工一个大中心孔和两个小边孔的三连孔方法形成，长方环弹性元件的上下加载部位可以是螺柱也可以是通过轴销连接的拉耳。带上下螺柱的整体圆环结构和带上下螺孔的整体板环结构如图 5 所示。

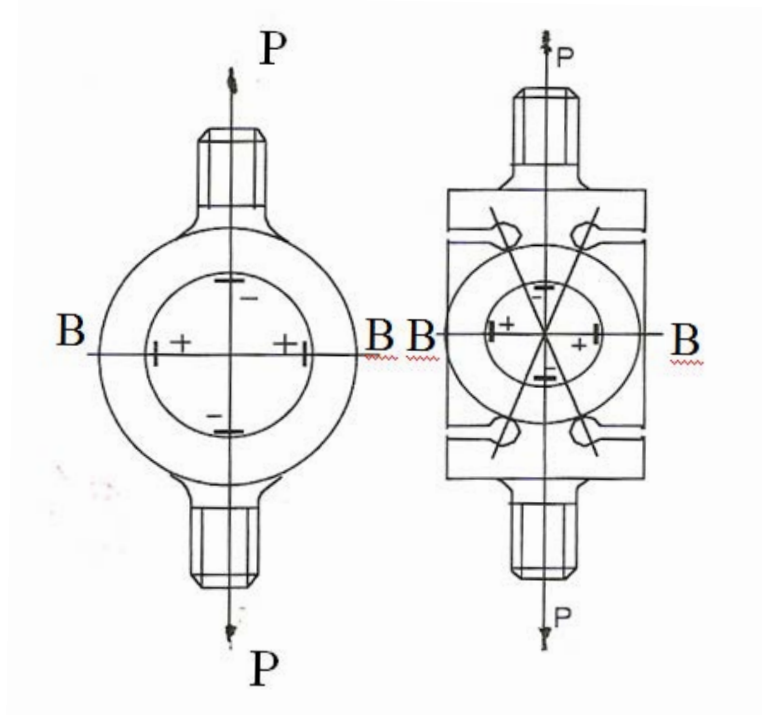


图 5 带上下螺柱的整体圆环和带上下螺孔的整体板环结构图

(1) 带上下螺柱的整体圆环结构与力学分析

带上下螺柱的整体圆环结构利用的是圆环的弯曲应力，具有应变利用系数大、输出灵敏度高；线性好、滞后小；上下螺柱可以实现拉、压载荷双向加载；电阻应变计粘贴在圆环的内孔得到很好的保护等特点，特别适合用于电子吊钩秤等拉向载荷的检测。缺点是机械加工、热处理和防护密封难度较大。

圆环主要利用的是 B-B 截面和加载轴线截面的弯曲应力，因为 B-B 截面在受载变形中的转角为零，故把 B-B 截面视为固定端，通过理论计算可以得到 B 点的应力、应变和圆环式弹性元件的灵敏度。

B 点的弯矩为

$$MB = 0.182PR$$

B 点的轴力为

$$N = \frac{P}{2}$$

MB 产生的弯曲应力

$$\sigma_1 = \frac{M_B \frac{h}{2}}{J} = \frac{6M_B}{bh^2}$$

N 产生均布正应力

$$\sigma_2 = \frac{N}{A} = \frac{N}{bh} = \frac{P}{2bh}$$

根据力的叠加原理，B 点的应力、应变为：

$$\sigma_B = \sigma_1 + \sigma_2 = \frac{6M_B}{bh^2} + \frac{P}{2bh}$$

$$\varepsilon_B = \frac{6M_B}{bh^2 E} + \frac{P}{2bhE}$$

弹性元件的灵敏度为：

$$S = \left(\frac{6M_B K}{bh^2 E} + \frac{PK}{2bhE} \right) \times 10^3 \text{ mv/v}$$

(2) 带上下螺孔的整体板环结构与力学分析

为克服带上下螺柱的整体圆环结构弹性元件的缺点，采用带上下螺孔的整体板环结构。其特点是变外环的局部圆形结构为几何形状简单的长方形结构，通过加工四个小通孔和开通孔的边缘形成板环以达到圆环的效果。不仅提高了机械加工和热处理的工艺性，而且减少了因尺寸和形位公差造成的性能波动，使弹性元件的准确度和稳定性都优于整体圆环式结构。板环式弹性元件结构如图 5 所示。

板环通常简化为圆环进行计算，因其计算结果误差较大，多采用通过实际测量求得修正系数的方法进行计算。

设板环的平均半径 R_0 ，内孔半径 R_1 ，外环半径 R_2 ，宽度 h 。

平均半径

$$R_0 = \frac{R_1 + R_2}{2}$$

根据平均半径与宽度比 $\frac{R_0}{h}$ 的比值，查出求出修正系数 G ，其灵敏度计算公式为

$$S = G \frac{3KR_0 P}{2bh^2 E} \times 10^3$$

例：P = 10000kg 板环式弹性元件，结构尺寸为内圆半径 $R_1 = 25\text{mm}$ 、外圆半径 $R_2 = 50\text{mm}$ 、水平截面壁厚 $b = 45\text{mm}$ 。

因

$$R_0 = \frac{R_1 + R_2}{2} = \frac{25 + 50}{2} = 37.5mm$$

$$h = R_2 - R_1 = 50 - 25 = 25mm$$

则

$$\frac{37.5}{25} = 1.5$$

通过修正系数曲线查得 $G = 0.9$ ，则 10000kg 板环式弹性元件的灵敏度为

$$S = 0.9 \times \frac{3 \times 2.1 \times 37.5 \times 10000}{2 \times 45 \times 25^2 \times 2.1 \times 10^4} \times 10^3 = 1.8mv/v$$

3. 正应力轴对称扭环、弯曲环型弹性元件结构与力学分析

轴对称扭环型弹性元件主要有轴对称六方形截面扭环（也称六面环）和轴对称矩形截面扭环（也称弯曲环）两种结构形式。轴对称六方形截面扭环型弹性元件如图 6 所示；轴对称矩形截面扭环型弹性元件如图 7 所示。

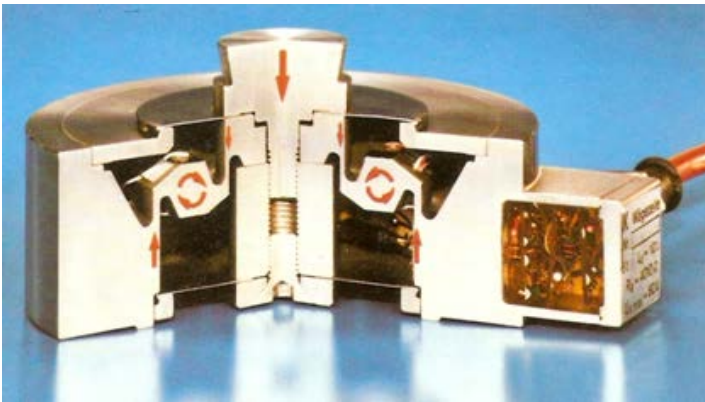


图 6 轴对称六方形截面扭环型弹性元件

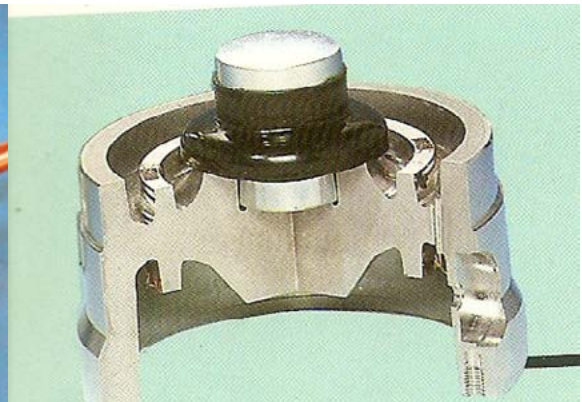


图 7 轴对称矩形截面扭环型弹性元件

轴对称扭环型弹性元件是由顶环、中间六面环（或矩形截面环）和底环三部分组成的一个整体结构。当有外载荷作用时，它就象盘形弹簧一样变形，由于结构独特，顶环可以相对底环平行移动，即在顶环和底环的作用下六边形截面（或矩形截面）环状回转体向中心方向做类似于滚动的运动而产生扭转变形。六边形截面环（或矩形截面环）的扭转变形，使下表面向着半径增大方向移动，上表面向着半径减小方向移动而产生环向正、负应变，这正是惠斯通电桥所需要的。最好在上、下表面粘贴大阻值螺旋电阻应变计，如果无此条件也可粘贴普通单轴电阻应变计。轴对称扭环（或弯曲环）型弹性元件具有如下特点：

① 结构紧凑，体积小，高度低，重量轻（30t 额定量程的称重传感器，外形尺寸仅为 $\phi = 120\text{mm}$ 、 $h = 50\text{mm}$ ）；

② 固有线性好，准确度高；

③ 受载后底环无变形或变形很小，几乎没有滞后；

④ 对于偏心载荷和侧向载荷不敏感；

⑤ 合理设计顶环与底板结构，可具有较高的过载保护能力；

⑥ 容易焊接密封，实现抽真空充惰性气体新工艺；

⑦ 由于敏感栅工作面积大，可制成 3500Ω 超大阻值的螺旋电阻应变计且无横向效应，供桥电压可高达 100V ，比普通称重传感器输出信号提高近十倍。

在进行结构设计与计算时，可将六边形、矩形截面的应变环视为与周边铰支，内边自由受集中载荷作用的等厚度圆环板，其上、下表面最大压缩、拉伸应力为

$$\sigma_{\max} = \pm K \frac{P}{h^2}$$

式中： h — 六面环的厚度；

K — 取决于 D/d 和实际边界条件的系数， $K = 1.003 \sim 0.955$ 。

取 $K = 0.955$ ，则六面环的厚度为

$$h = \sqrt{\frac{0.955P}{\sigma_{\max}}}$$

当 D/d 较大时，可取大的 K 值及较小的结构尺寸，一般 $D/d = 2.0 \sim 2.2$ 。

轴对称弯曲环型弹性元件也可以设计成双弯曲环结构，通过上法兰盘加载，承载面积大，适合大量程称重传感器。例如，德国 Schenck（申克）公司 WDI 25 ~ 200t 弯曲环型称重传感器就采用此种结构，如图 8 所示。

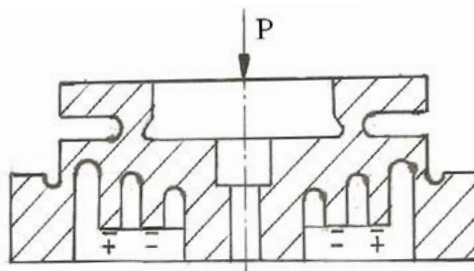


图 8 轴对称矩形截面双弯曲环型弹性元件

轴对称矩形截面双弯曲环型弹性元件除了具有单弯曲环弹性元件结构的特点外，还有如下特点：

- ① 弹性元件的内圆柱和外圆环形成弯曲环式应变梁的支撑，刚度大，线性好；
- ② 两个应变环在轴对称圆柱形弹性元件一侧形成，便于机械加工出较高的尺寸和形位精度；
- ③ 应变区为同在一侧的内外两个应变环，便于布线组桥和防护密封；
- ④ 上下法兰盘引入和承受载荷，高度低，稳定性好，适合大量程结构。

4. 正应力梁型弹性元件结构与力学分析

(1) 正应力单梁型弹性元件结构与力学分析

正应力单梁式弹性元件利用的是应变梁的弯曲应力，为提高应变梁根部固定刚度，多采用在圆形板或方形板上加工出悬臂梁或双端固支梁形成应变梁，适合制造低外形、小量程称重传感器。其结构示意图如图 9、10、11、12 所示。

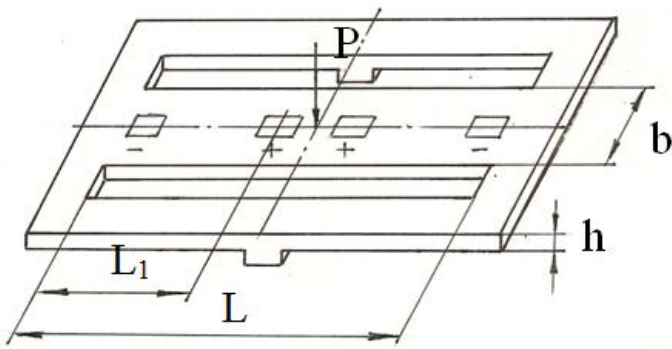


图 9 方形板形成的双端固支梁弹性元件

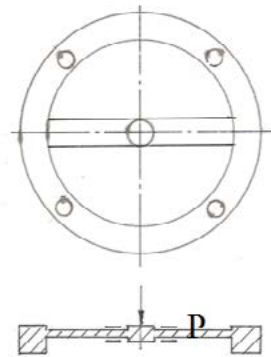


图 10 圆形板形成的双端固支梁弹性元件

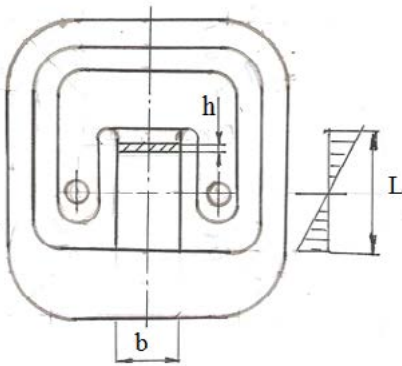


图 11 方形板形成的悬臂梁弹性元件

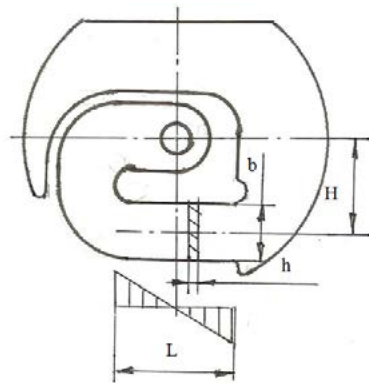


图 12 圆形板形成的悬臂梁弹性元件

圆板、方板形成的双端固支梁和悬臂梁弹性元件具有如下特点：

- ① 结构简单紧凑，体积小、高度低、重量轻，较小的载荷就可以产生较大的应变值，灵敏度较高，适合组装薄形电子衡器；
- ② 几何形状简单，冷热加工的工艺性好，容易达到较高的形位和尺寸精度；
- ③ 圆板式悬臂梁结构便于实现冲压加工，即保证弹性元件及承力支撑的均一性，又提高了工作效率；

④弹性应变梁、环形承力支撑、引入载荷的压头为一集成化的整体结构，无活动环节，固有线性好，稳定性高；

⑤应变梁与承力支撑连接为一体，无端部效应和底部摩擦影响，滞后和蠕变误差较小；

⑥单轴电阻应变计粘贴在应变梁的表面，工作面开敞，有利于粘贴作业和电阻应变计的防护与密封。

(2) 正应力平行梁型弹性元件结构与力学分析

20 世纪 80 年代初期，为了解决商用电子计价秤的称重传感器量程小、刚度大、准确度高的矛盾，弹性元件采用低外形多梁结构，所用材料选择比重小， $E\rho$ 乘积小，屈强比高，比强度大，塑性好，耐腐蚀，低温性能好，并具有优良的机械加工性能的低弹性模量的 2A12 铝合金。先后研制出铝合金平行梁、中心梁、中心环等多种结构类型的小量程称重传感器。其力学特点是利用弹性元件上应变梁与柔性梁结合产生的弯曲应力（即正应力）。虽然利用的是弯曲应力，由于多个平行梁的力学特点，使其具有剪应力弹性元件加载点变化对输出灵敏度不敏感的特点，即弯曲应力的结构具有剪切应力结构的特点，因此在电子计价秤、电子台案秤中得到广泛的应用，同剪应力弹性元件一样，形成了又一个新的正应力平行梁弹性元件发展潮流。各种平行梁结构弹性元件如图 13 所示。

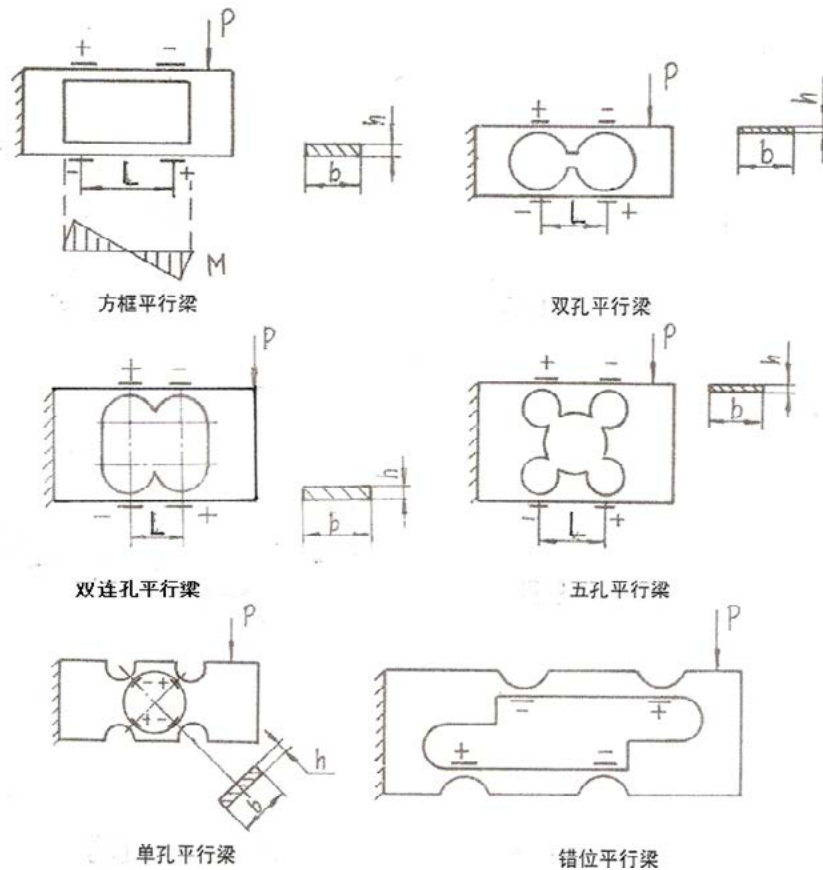


图 13 各结构种类型的平行梁弹性元件

1) 平行梁弹性元件的力学特性

平行梁型弹性元件是由两个平行梁和两个垂直梁组成的整体结构，平行梁可以通过加工单孔、双孔、双连孔、五连孔、长方形孔等多种加工方法形成。要求两个垂直梁要有较大的刚度，保证平行梁受载后根部扭转角为零，使平行梁产生平行四边形变形，应变区出现拉伸、压缩成双的弯曲应力、应变，满足惠斯通电桥电路需要。平行梁型弹性元件受载后的变形示意图如图 14 所示。单轴电阻应变计粘贴在每个圆孔的上下平行梁表面。在外载荷 P 作用下，电阻应变计 T_1 、 T_2 测量的是正弯曲应变；电阻应变计 C_1 、 C_2 测量的是负弯曲应变。

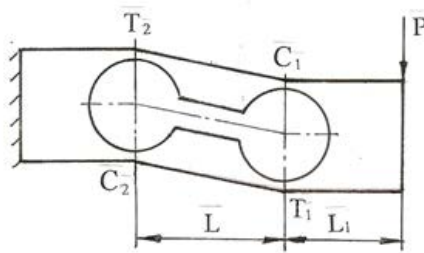


图 14 平行梁型弹性元件受载变形示意图

电阻应变计 T_1 、 C_1 测得的应变计值，正比于载荷 P 在此截面引起的弯矩 M_1 ，即

$$M_1 = L_1 P$$

同理，电阻应变计 T_2 、 C_2 测得的应变计值，正比于载荷 P 在此截面引起的弯矩 M_2 ，即

$$M_2 = (L_1 + L) P$$

两个应变截面的弯矩差为

$$M_2 - M_1 = (L_1 + L) P - L_1 P = LP$$

上述公式即为平行梁弹性元件的力学特性，也称之为不变弯矩原理，其意义是：

① 由于 I、II 截面的弯矩差为 LP ，说明平行梁弹性元件的输出与 L_1 无关，即输出对加载点的变化不敏感，只与两个应变截面的距离 L 有关；

② 当平行梁弹性元件的垂直梁与平行梁刚度比大于 50 时，载荷 P 处只发生垂直位移，即加载点所在平面受载后平行下移，四个电阻应变计所在应变区呈平行四边形变化。

③ 两个应变截面的距离 L ，是弹性元件四片电阻应变计组成惠斯通电桥输出的放大系数，即 L 大电桥输出值高。

④ 平行梁弹性元件同时承受拉伸、压缩载荷先后作用时，输出灵敏度一致性好，具有剪应力弹性元件的特点。

2) 平行梁弹性元件的结构特点

由于平行梁弹性元件的应变区是通过精密加工的单孔、双孔、双连孔、五连孔形成的变截面应变

梁，打破了必须在均匀应力场粘贴电阻应变计的传统概念，而是将电阻应变计粘贴在应力集中处。平行梁弹性元件结构的最大特点是：应变利用系数（平行梁应变区的平均应变与最大应变之比） $C = \varepsilon_{cp} / \varepsilon_{max}$ 大，这是因为双孔应变区应力集中造成的，因此在结构设计中应尽量增大孔的直径或设计成扁圆孔。

铝合金小量程和合金钢中等量程的平行梁弹性元件，主要用于商用电子计价秤和电子台案秤，因此要求具有较强的抗端面力 P_1 、横向力 P_2 和扭力矩 M_3 的能力，为此在进行结构设计时，应保证垂直梁与平行梁的刚度比大于 50，并使应变梁有足够的宽度以增大横向刚度。平行梁弹性元件受端面力 P_1 、横向力 P_2 和扭力矩 M_3 力学量干扰如图 15 所示。

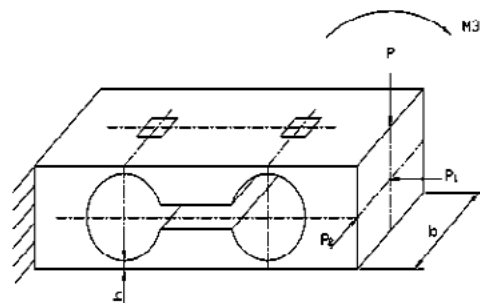


图 15 平行梁弹性元件受端面力 P_1 、横向力 P_2 和扭力矩 M_3 等作用图

当有端面力 P_1 作用时，平行梁上四片电阻应变计全部产生压缩应变，电桥输出无变化。

当有横向力 P_2 作用时，由于四片电阻应变计均粘贴在平行梁的中心轴线上，横向刚度较大，各应变值无任何明显变化，即使产生微小变化，上下平行梁上的正、负电阻应变计变化相同，对电桥输出仍无影响。

当有扭转力矩 M_3 施加在平行梁弹性元件时，电阻应变计所在截面将发生均匀的扭转剪切变形，正负电阻应变计产生相同的应变值，电桥输出无变化。说明平行梁弹性元件抗各种力学量干扰能力强。

3) 平行梁弹性元件最佳孔距选择

平行梁弹性元件应变区双孔的应力峰值并不相等，这是由于轴力的影响，轴力使 R_A 应变计的压应变减小， R_B 应变计的拉应变增大。不同 L 值，应力峰值位置也不同，随着孔距 L 的增大，总应力水平的提高，轴力影响相对减小。平行梁弹性元件双孔应力峰值位置如图 16 所示。

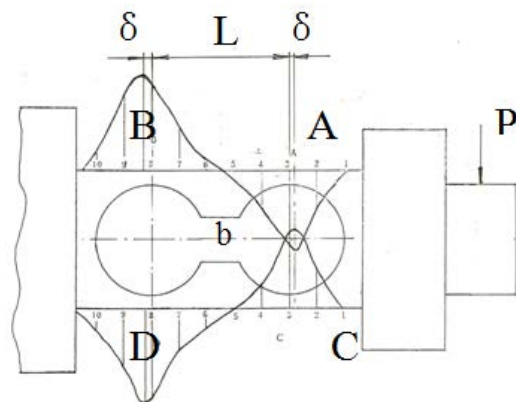


图 16 平行梁弹性元件双孔应力峰值位置图

经过试验测试得出：

① 应力峰值点不在孔的中心线上，一般均向外偏移，偏移量 δ 与孔距 L 有关。 δ 随 L 的增大而减小，在孔距 $L = 30\text{mm}$ 时， δ 已很小，应力峰值靠近孔的中心线。

② 理论上应力峰值向外偏移量 δ 最小的 L 值，为最佳孔距，但在设计时可灵活处理，不影响称重传感器性能。

根据上述结论，在进行平行梁弹性元件设计时，建议增大双连孔中间槽宽度 b ，可以在孔距 L 不变的情况下，提高平行梁与垂直梁的刚度比，改善梁的应力分布。为了增大孔的曲率，可将双连孔改为四连孔，这样可改变长宽比，使应力峰值点更靠近孔的中心点，可进一步提高灵敏度。

在对平行梁弹性元件进行结构设计与理论计算时，可将其简化为一个单跨超静刚架。因为刚架计算通常忽略轴力对变形的影响，所以可进一步简化为受反对称载荷作用的刚架，利用结构力学刚架计算方法进行计算即可。

(3) 正应力中心梁型弹性元件结构与力学分析

中心梁弹性元件也称三平行梁结构，它是由上、下柔性梁和中心应变梁构成的一个整体结构。因中心应变梁的结构不同，可分为中心直梁型、中心悬臂梁型和中心环型弹性元件结构。分别如图 17、图 18 和图 19 所示

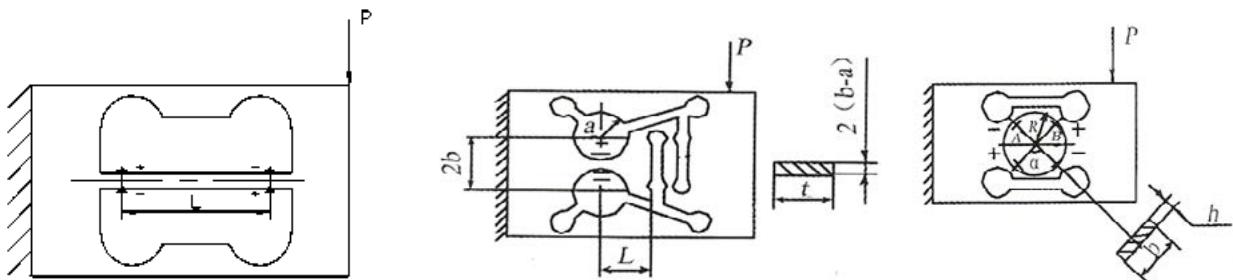


图 17 中心直梁型弹性元件

图 18 中心悬臂梁型弹性元件

图 19 中心环型弹性元件

中心直梁、中心悬臂梁、中心环弹性元件结构具有如下力学特点：

① 上、下柔性梁在承载方向非常柔软，而在非受载方向却很刚硬，抗偏心 and 侧向附加载荷能力强，使中心应变梁、应变环得到很好的保护；

② 不论是中心直梁、中心悬臂梁、中心环弹性元件形成的应变区，均具有较大的刚度，灵敏度高且固有线性好；

③ 理论计算可简化成双跨超静定刚架，沿中心梁中线切开即成为单跨超静定刚架，经理论计算得出平行梁弹性元件单根梁的弯矩是三平行梁弹性元件单根梁弯矩的一倍；

④ 经过试验测试得出，中心梁型弹性元件的上、下柔性梁，在承受外载荷方向的变形(柔软程度)，以吃掉中心直梁、中心悬臂梁、中心环输出灵敏度的 3% 左右为好。

5. 正应力圆板型弹性元件结构与力学分析

正应力圆板型弹性元件测量的是圆平板的弯曲应力，可设计成拉式、压式和薄形碟式结构。拉伸型圆板弹性元件如图 20 所示，薄型圆板弹性元件如图 21 所示。

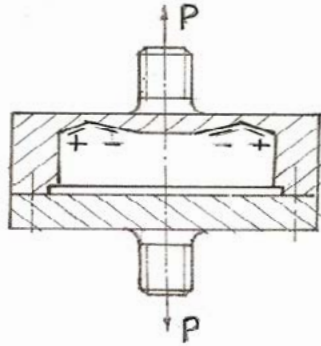


图 20 拉伸型圆板弹性元件

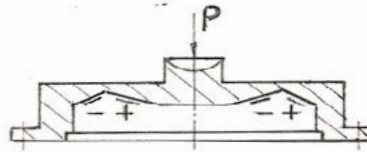


图 21 薄型圆板弹性元件

正应力圆板型弹性元件结构与受力特点是：

- ① 结构简单紧凑，体积小，高度低，重量轻；
- ② 几何外形为圆形，容易加工出较高的尺寸和形位精度；
- ③ 横向刚度大，抗偏心和侧向载荷能力强；
- ④ 结构为一整体圆形板且对称，热膨胀各方向一致，温度系数低。

⑤ 理论计算比较简单，在外载荷作用下，最大挠度 W 远远小于圆板厚度 h ，故适用于薄板小挠度弯曲理论。可以简化为周边固支，中心凸台受集中力 P 的圆平板。利用 Lobo（洛博）公式：

$$\text{最大应力 } \sigma_{\max} = K \frac{P}{h^2} \quad \text{最大挠度 } W_{\max} = K_1 \frac{PR^2}{h^3 E}$$

式中 K 和 K_1 分别为应力和挠度计算系数，可根据圆板弹性元件支撑边缘半径 b 与中心加载凸台的半径 a 的比值 b/a ，查出中心有凸台圆板应力及挠度计算系数 K 、 K_1 即可。

四、剪应力弹性元件结构与力学分析

为克服圆柱、圆筒、悬臂梁等正应力弹性元件加载点变化造成较大的灵敏度变化；抗偏心、侧向、扭转载荷能力差；同时承受拉伸和压缩载荷时灵敏度不对称；弹性元件高度大组装电子秤重心高等缺点，20 世纪 70 年代初世界各国先后研制出不利用拉伸、压缩、弯曲应力而利用剪切应力的新型弹性元件，被称为剪应力称重传感器。众所周知，剪应力是不能测量的，但它能产生与剪切弹性元件中性轴成 45° 方向的拉伸、压缩成双的主应力，这正是称重传感器组成惠斯通电桥电路所需要的。由于剪应力弹性元件具有剪力沿着剪切应变梁中性轴方向均匀分布，加载点变化对输出灵敏度无影响；双剪切电阻应变计粘贴在工字形截面梁的腹板上，对偏心、侧向、扭转载荷不敏感；同时承受拉伸和压缩载荷时灵敏度对称性好；剪切梁型弹性元件高度小组装电子秤重心低等特点，完全克服了圆柱、

圆筒、悬臂梁等正应力弹性元件的固有缺点，每年都有多种结构的剪应力弹性元件研发成功并应用于各类电子衡器，开创了应变式称重传感器发展的一个新潮流。

1. 剪应力弹性元件的力学基础

剪应力弹性元件的应变区是受纯剪切的平面应力状态，主应力平面（剪应力为零的截面）与最大主剪应力平面（法向应力为零的截面）相互成 45° 夹角，从而才能确认在与中性轴成 45° 方向粘贴的电阻应变计，可以测量出由剪应力产生的拉伸压缩成双的两个主应变。通过力学分析可以得出在剪应力弹性元件中，主应力的方向是沿着应变梁的高度而变化，只有在中性轴处的应力单元是纯剪切应力状态，法向应力为零，主剪应力最大且等于与中性轴成 45° 方向的主应力。现分析需要测量的主应变与剪应变的关系。

为求得剪应力弹性元件的主应变 ε 与剪应变 γ 之间的关系，应对平面应力状态下的纯剪切应力的正方形单元体进行剖析。纯剪应力单元体及剪应力方向如图 22 所示。

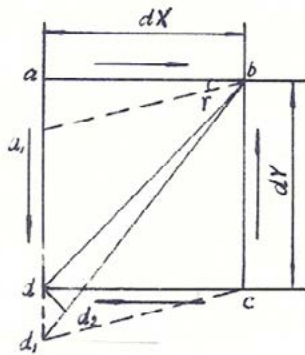


图 22 纯剪应力正方形单元体及剪应力方向图

正方形单元体的边长 $dX=dY$ ，作用在单元体上的剪应力为 τ ，剪应力产生的剪应变为 γ 。

使单元体 $abcd$ 变成 a_1bcd_1 ，单元体 ab 和 cd 边变形前后的夹角为 γ ，即剪应变。单元体的对角线 bd 变成了 bd_1 ，其伸长量为： $d_1d_2=bd_1 - bd$

对角线 bd 的应变量为：

$$\varepsilon_{bd} = \frac{bd_1 - bd}{bd} = \frac{d_1d_2}{bd}$$

由几何关系知：

$$bd = \frac{dX}{\cos 45^\circ}$$

在变形很小的情况下，可视 $\angle dd_1d_2=45^\circ$ ，因此 $d_1d_2=dd_1\cos 45^\circ$ 。在 $\triangle dcd_1$ 中，当剪切应变 γ 较小时， $\tan \gamma = \gamma$ ，故 $dd_1=dX \cdot \gamma$ 。因此

$$\varepsilon_{bd} = \frac{d_1d_2}{bd} = \frac{dd_1 \cos 45^\circ}{\frac{dX}{\cos 45^\circ}} = \frac{dX \cdot \gamma \cdot \frac{\sqrt{2}}{2}}{dX \cdot \frac{2}{\sqrt{2}}} = \frac{\gamma}{2}$$

由此公式可以得出：正方形单元体沿对角线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，其主应变 ε 与剪切应变 γ 存在下列关系，即

$$\varepsilon = \frac{\gamma}{2}$$

由材料力学知，各向同性弹性材料的剪切弹性模量为：

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

则剪应变为：

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

与剪切弹性元件中性轴呈 45° 方向的主应变为：

$$\varepsilon = \pm \frac{\lambda}{2} = \pm \frac{1+\mu}{E} \cdot \tau$$

由以上分析可以得出：

① 在平面应力状态下，主应力平面与最大剪应力平面互相呈 45° 夹角，而最大剪应力方向与中性轴一致，所以主应力方向与中性轴呈 45° 角，且拉伸、压缩应力成双，即大小相等、方向相反。

② 在纯剪切应力状态下，与中性轴成 45° 方向的拉压成双的主应力等于最大剪应力，主应变等于最大剪应变的一半，只有中性轴处的应力单元是纯剪切状态才有此关系，即

$$\sigma_{45^\circ} = \pm \tau_{\max} \quad \varepsilon_{45^\circ} = \pm \frac{\gamma_{\max}}{2}$$

③ 由于剪切应力本身是不能测量的，它产生的主应力是可以通过主应变进行测量的，这正是剪应力弹性元件贴片组桥所需要的。

④ 设计与计算时，应以中性轴处的最大剪应力计算公式来求解，茹拉夫斯基剪应力计算公式为：

$$\tau_{\max} = \frac{QS}{J_y b}$$

⑤ 剪力 Q 、截面宽度 b 、惯性矩 J_y 对某一个截面来说是常量，而静矩 S 则是随剪应力的位置不同而变化的量，即剪应力是随其与中性轴的距离不同而变化的量，可求出不同形状截面剪切梁的剪应力分布规律，对于不同截面形状其剪应力的求解公式也不同。

2. 剪应力弹性元件的结构与力学分析

剪应力弹性元件均为承受弯曲载荷的直梁或曲梁结构，在纯剪切应变区产生与中性轴成 45° 方向的拉伸、压缩成双的主应力。应变梁的受剪截面有矩形、工字形、圆截工字形、正方空心形、长方空心形截面等多种形状。

(1) 矩形截面轮辐、孔辐式剪应力弹性元件结构与力学分析

矩形截面剪应力弹性元件最具代表性的是轮辐式、孔辐式结构，因其整体结构象一个车轮，在轮毂与轮箍之间形成了多条互相对称分布的轮辐，因此称其为轮辐式称重传感器。外载荷作用在轮毂的上端面，轮毂、轮辐与轮箍组成多条两端固支剪切梁。轮辐式弹性元件如图 23 所示；孔辐式弹性元件如图 24 所示。

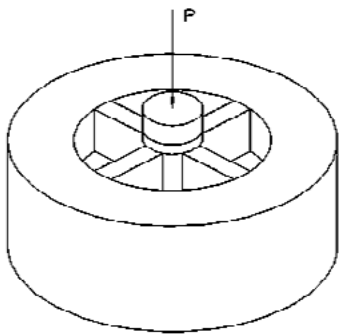


图 23 轮辐式剪应力弹性元件

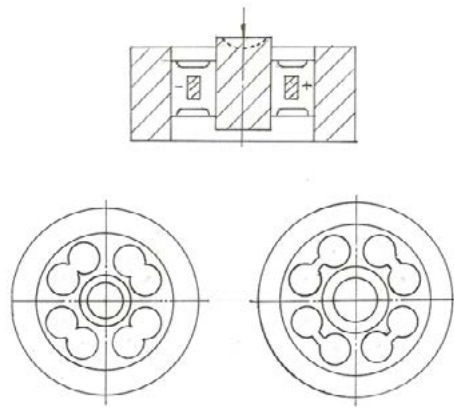


图 24 孔辐式剪应力弹性元件结构

轮辐式剪应力弹性元件具有外形低，稳定性好；轮辐对弯矩不敏感，线性较好；横向刚度大，抗侧向和偏心载荷能力强；整体结构对称，各方向热膨胀一致，温度系数小；轮毂与支承面间隙设计合理可实现过载保护，其过载能力可达 300%；容易实现焊接密封、抽真空充氮工艺，防护密封等级可达 IP68。同时也存在一些设计制造难点，主要是轮箍及其底面设计不好，滞后误差大；机械加工难度大，需用电火花线切割技术与装备。

根据对轮辐式弹性元件的力学分析，在进行结构设计时，应尽量做到轮毂和轮箍的刚度足够大，保证根部转角为零；矩形截面的轮辐，长度与高度比尽量小，一般为 $\frac{l}{h} < 1$ ，以保证轮辐承受纯剪切作用；轮辐位于轮箍高度中点偏上的位置，与轮箍的表面和底面距离之比为 1 : 2；在保证轮箍具有足够刚度前提下，采取措施减少底面与支承接触面积，降低底部摩擦力矩；轮辐的高度与厚度比，一般为 $\frac{h}{b} = 2.5 \sim 3$ 。

为克服轮辐式弹性元件结构加工困难，辐板纵向刚度偏小，辐板与轮毂和轮箍的链接处（即剪切梁的根部）应力集中较大等缺点，而采用孔辐式弹性元件结构，其特点是轮辐的形成不用复杂的线切割加工方法，而采用简单的钻孔工艺实现；轮辐为变截面剪切梁根部刚度大、应力集中小保证应

变区为纯剪切应力状态，使电阻应变计粘贴位置更合理；形成剪切应变梁的孔多更易于获得适合粘贴电阻应变计的较理想的应力场。

（2）工字形截面悬臂剪切梁弹性元件结构与力学分析

工字形截面悬臂剪切梁弹性元件主要有两种结构形式，一种是根部用螺钉固定的悬臂剪切梁结构，一种是加载端和根部带反对称辅助梁的整体 S 形结构，两者在电子衡器中的应用都很广泛。现以 S 形整体结构工字形截面剪应力弹性元件为例进行分析。

S 形剪应力弹性元件是在工字形截面剪切梁两端增加反对称的辅助梁形成的整体结构。实际上是通过线切割加工出反对称的长开口形成上下辅助梁和中间剪切梁，再在中间梁的两侧对称的加工出圆盲孔即形成了工字形截面剪切应变梁，通过上下辅助梁中心的螺孔实现中心加载。在上下辅助梁上加工出与称重传感器量程相匹配的间隙，即可实现过载保护。带过载保护的 S 形剪应力弹性元件如图 25 所示。

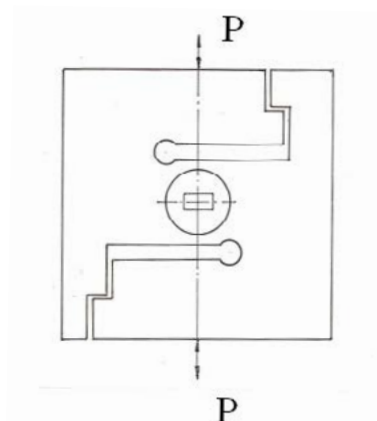


图 25 带过载保护的 S 形剪应力弹性元件

S 形剪应力弹性元件具有如下特点：

- ① 弹性元件、载荷引入梁、支撑梁集成为一体，结构简单紧凑，体积小，重量轻，反对称辅助梁可实现中间加载；
- ② 电阻应变计粘贴在盲孔内的最小寄生应力区，并得到很好的保护，因此不用设计保护外壳；
- ③ 剪力沿梁的长度方向为一常量，输出对加载点变化不敏感，抗偏心 and 侧向载荷能力强；
- ④ 应变区剪应力等于主应力，由此而产生的拉、压成双的主应变无面积效应影响，弹性元件固有线性好；
- ⑤ 利用反对称的辅助梁上的间隙可实现过载保护。

（3）工字形截面双端固支剪切梁弹性元件结构与力学分析

工字形截面双端固支剪切梁弹性元件一般有整体剪切型和零部件组装型两种结构形式，以零部件组装型应用较多，其工字形截面剪切梁弹性元件及组装的称重传感器如图 26 所示。

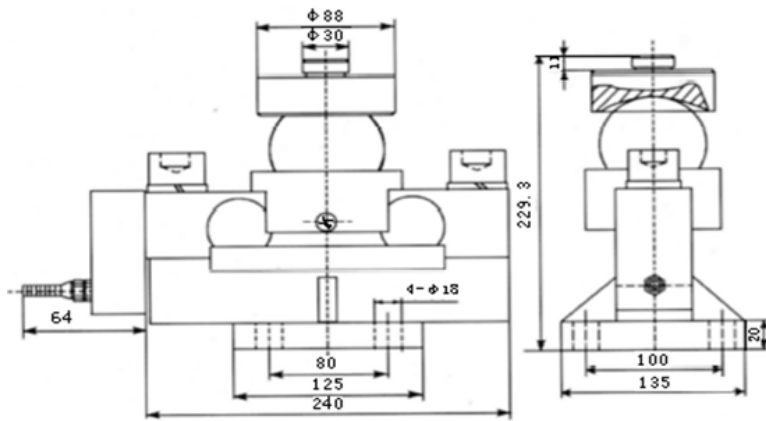


图 26 工字形截面双端固支剪切梁弹性元件及总体结构图

工字形截面双端固支剪切梁弹性元件具有如下特点：

① 剪力沿梁的长度方向为一常量，称重传感器的输出只与剪力产生的剪应力有关，而与梁的弯曲力矩无关，因此输出对加载点变化不敏感；

② 由于应变梁是一受弯构件，在工字梁腹板上中性轴处的应力单元为纯剪切状态，在受载过程中剪切截面的面积不发生变化，各电阻应变计产生相同的电阻变化，固有线性好，容易达到较高的准确度等级；

③ 虽然工字形截面剪应力沿高度方向仍呈抛物线分布但比较平滑均匀，双剪切电阻应变计粘贴在盲孔内最小寄生应力区，不仅抗侧向和偏心载荷能力强，而且得到很好的保护；

④ 双剪切应变梁的加载点与两边的支撑点自成平衡力系，不需要象悬臂剪切梁弹性元件那样在根部用多个螺钉固定强行维持力矩平衡，每端只需要一个螺丝钉固定即可，并可用来调整弹性元件的线性度；

⑤ 钢球与球座为点接触传递载荷，对中良好安装方便，钢球只感受轴向载荷，不传递侧向载荷和侧向扭矩，保证电子衡器快速准确复位。

进行结构设计时应保证腹板承受 97% 左右的剪力，尽量减小翼缘的高度，增加腹板的厚度；工字形截面的宽度与高度比 $\frac{B}{H} > 1$ ，保证应变区为纯剪切应力状态；承载球面半径不应太大，使钢球复位快。以 $\phi 76.2\text{mm}$ 钢球为例，弹性元件上球碗半径为 $SR=76\text{mm}$ ，在 25t 载荷作用下钢球压痕的接触圆半径为 10mm 左右。

（4）圆截工字型截面悬臂剪切梁弹性元件结构与力学分析

剪应力称重传感器发展之初，多以矩形截面悬臂剪切梁弹性元件为主，其突出缺点是冷热加工的工艺性差；矩形截面剪应力沿高度方向分布的梯度大。为提高机械制造的工艺性，得到较高的尺寸和形位精度，改善悬臂剪切梁剪应力分布状态，而研发出圆截工字型截面悬臂剪切梁弹性元件。它

是在正应力圆柱式悬臂梁弹性元件的基础上发展起来的，即在圆柱式悬臂梁的两边沿母线长度方向对称铣出两个椭圆形盲孔，变圆形截面为圆截工字形截面，因此称其为圆截工字型截面悬臂剪切梁弹性元件。此种结构的弹性元件多与根部支撑块和端部加载钢球或关节轴承配套使用。圆截工字型截面悬臂剪切梁弹性元件结构如图 27 所示。

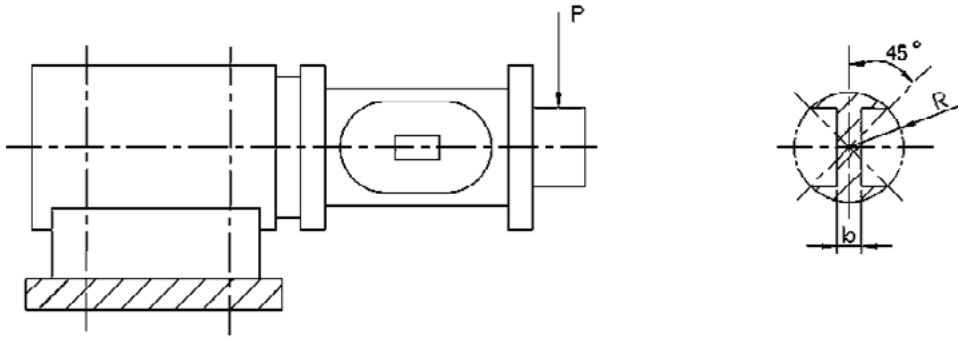


图 27 圆截工字型截面悬臂剪切梁弹性元件结构简图

圆截工字型截面悬臂剪切梁弹性元件具有如下特点：

- ① 总体结构简单紧凑，尺寸小，外形低，重量轻；
- ② 剪应力弹性元件为圆柱形直梁结构，几何外形简单，易加工出较高的尺寸和形位精度；
- ③ 弹性元件根部固定牢固，无端部效应影响，剪力沿梁的长度方向为一常量，应变区受力单一，固有线性好，滞后小；
- ④ 双剪切电阻应变计粘贴在纯剪切应力状态下的最小寄生应力区，抗侧向和偏心载荷能力强；
- ⑤ 防护密封方便，即可盲孔灌封，又可通过波纹管焊接密封；
- ⑥ 对称循环加载时，输出灵敏度一致性好。

在进行结构设计时，要求上、下翼缘端部反对称连线与 Z 轴成 45° 形成盲孔；翼缘平均厚度应小于腹板厚度，保证圆截工字梁腹板为纯剪切状态。

(5) 正方形、矩形空心截面剪切梁弹性元件结构与力学分析

正方形、矩形空心截面剪切梁弹性元件，是用整块钢材加工出来的两端固支中心承受集中载荷的整体结构，中间加载点及两端支承的刚度都很大，保证正方形、矩形空心截面弹性元件应变区为纯剪切应力状态。现以电子吊钩秤用带保险杆的矩形空心截面剪切弹性元件为例进行分析，其结构及过载保险杆如图 28 所示。弹性元件上面的螺纹孔安装吊环，下面的螺纹孔安装吊钩。中心加载点与两边支撑的两段矩形空心截面梁为受剪应力作用的应变区工作段 L。电子吊钩秤用称重传感器要求绝对安全，为此在剪切梁下部分设计有保险杆，一旦出现严重超负荷至使应变区工作段断裂，保险杆即起到保险作用，不会使被吊重物垂落而造成事故。

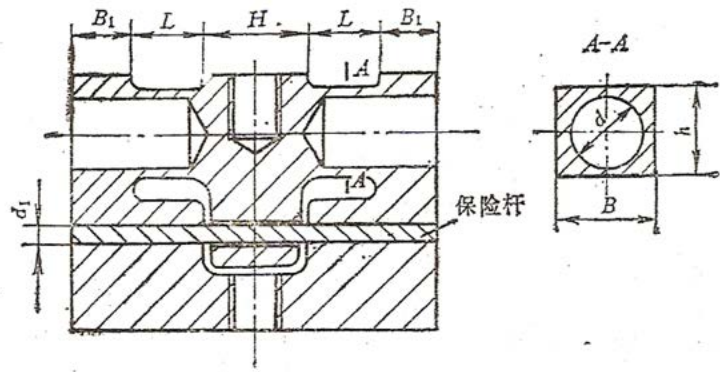


图 28 电子吊钩秤用矩形空心截面剪切梁弹性元件结构图

矩形空心截面剪切梁弹性元件具有如下特点：

- ① 与工字形截面特性相似，矩形空心截面同样具有抗弯能力强，中性轴处剪切应力大的力学特性；
- ② 利用同心圆孔形成剪切梁应变区，冷热加工的工艺性好，容易得到较高的尺寸和形位精度；
- ③ 空心截面抗扭能力强；
- ④ 垂直和水平弯曲时，弯矩为零的截面在同一截面；
- ⑤ 额定量程较大时，可在孔内贴片，有利于焊接密封。

(6) 轴销剪应力弹性元件结构与力学分析

20 世纪 90 年代以来，国内外电子衡器的总体设计开始脱离传统的零部件组装式结构，向着多样化、个性化方向发展，其中一个主要发展趋势就是承载器与称重传感器合二为一的集成化结构，轴销剪切式弹性元件组成的电子吊钩秤是典型的应用实例。该弹性元件结构实际上就是一根承受剪力作用的空心截面圆轴，双剪切电阻应变计粘贴在中心孔内凹槽中心的位置上，有两种组桥测量方式，即两个凹槽处的双剪型电阻应变计共同组成一个惠斯通电桥，或分别组成惠斯通电桥再并联进行测量。轴销剪切式弹性元件结构及与电子吊钩秤连接的边界支撑如图 29 所示。

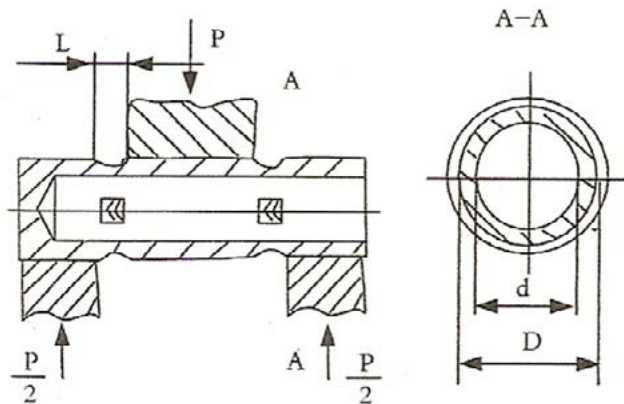


图 29 轴销剪切式弹性元件及边界支撑简图

轴销剪切式弹性元件具有如下特点：

- ① 弹性元件为一整体空心截面圆轴，结构紧凑，几何外形简单，容易加工出很高的尺寸和形位精度；
- ② 空心截面具有很强的抗扭转、抗弯曲能力，并且轴销中性轴处的应力最大；
- ③ 当空心截面轴销承受垂直和水平弯曲时，弯矩为零的截面在同一截面；
- ④ 当设计较大容量的轴销式称重传感器时，中心孔也较大，双剪型电阻应变计可以粘贴在孔内，即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。

轴销剪切式弹性元件的缺点是生产工艺难度大，需要较多的专用工具与装备，电阻应变计粘贴在孔内时，需要采用特制的胶囊进行加压、固化和后固化。

五、结束语

本文在总结称重传感器理论研究与实际应用经验的基础上，借鉴处于国际市场引导者地位企业具有代表性产品的研发经验，对圆柱、圆环、板环、扭转与弯曲环、直梁、曲梁、平行梁等典型正应力弹性元件和利用矩形、工字形、圆截工字形、矩形空心截面剪切梁形成的典型剪应力弹性元件的结构形式、力学特性、设计要点进行了介绍与分析，目的是促进称重传感器行业总体设计、制造水平的提高，以适应物联网、“工业 4.0”、“中国制造 2025”对称重传感器技术的新要求，这是全行业必须面对、必须参与的新课题。

传感器与互联网、传感器与“工业 4.0”、传感器与“中国制造 2025”就是相互协同创新发展的促进与带动关系。传感器是物联网、“工业 4.0”、“中国制造 2025”整个链条需求总量最大和最基础的环节，当然包括称重传感器、力传感器、力矩传感器的研发与应用。物联网产业已进入市场导入期，“中国制造 2025”正进入实施期，传感器行业将迎来黄金发展期。服务物联网，落实“工业 4.0”、“中国制造 2025”体系，首先应发展各种各样功能的传感器。物联网和无线传感器网络技术的迅速发展，落实“工业 4.0”、“中国制造 2025”发展战略，对处于信息感知层的各类传感器提出了许多新要求，概括起来就是便携、节能、环保，同时具有微型化、智能化、非接触测量和低外形、低功耗、低成本等特点，这将是传感器的一个新的研发方向。它不仅促进传统传感器产业的加速改造，而且可导致建立新型多元化的传感器企业模式，将是一个新的经济增长点。为适应物联网和无线传感器网络技术要求，传感器技术的发展方向是一部分产品应由传统型向全新型转型发展，同时研发新结构、新敏感机理的传感器，对此国内称重传感器制造企业应给与足够的重视。

【参考文献】

- 【1】Richard Frankln ,Desing calculations for strain gage load cells,Measurements and Control,October,1996.
- 【2】K.E.Chatters, The Development, performance and application of high accuracy low capacity fixed moment load celle,Transducer/Tepmcon' 80 Conference.
- 【3】小島之夫、ゼーム形ロードセルの偏置荷重誤差、日本機械学会論文集（C編）Vol51,No471.
- 【4】陶宝祺、王妮，电阻应变式传感器 [M]，国防工业出版社，1993 年。
- 【5】周旭，现代传感器技术 [M]，国防工业出版社，2007 年 1 月。
- 【6】刘九卿. 柱式称重传感器的非线性误差及其线性补偿 [J]. 衡器，2004 年第 2 期。
- 【7】刘九卿. 平行梁称重传感器的力学特性 [J]. 衡器，2009 年第 6 期。
- 【8】刘九卿. 剪切式力与称重传感器的力学基础 [J]. 衡器，1997 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七〇二研究所研究员，享受国务院政府特殊津贴专家。现为中国衡器协会技术顾问，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》，在有关杂志上共发表学术论文 120 多篇。