

# 应变式称重传感器结构与边界设计的若干问题

中国运载火箭技术研究院第 702 研究所 刘九卿

【摘要】 本文分析了应变式称重传感器弹性元件应变程度与所施加载荷的关系，得出其基本特性与弹性元件金属材料的性能密不可分，应使弹性元件性能与金属材料性能合为一体，因此应变式称重传感器的设计就是弹性元件结构与边界设计和材料选择。完成这一任务的困难在于弹性元件结构与边界设计在计算上和某些经济上的限制，只有遵循研制、生产规律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应变式称重传感器。在此基础上，提出应变式称重传感器结构与边界设计原则；弹性元件结构及其附件设计的关键问题；弹性元件金属材料选择要点及尽量使其具有功能材料的特点等问题。

【关键词】 称重传感器；弹性元件；结构设计；应变程度；金属材料；长期稳定性；环境适应性

## 一、概述

应变式称重传感器（以下简称为称重传感器）是知识密集型、技术密集型和技巧密集型的高技术产品，具有多样性、边缘性、综合性和技艺性等特点，需要多学科、多技术和多种制造工艺配合。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  $\sigma = E \epsilon$ 。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构成其弹性元件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的金属材料选择，使弹性元件性能与金属材料性能合为一体。

## 二、称重传感器结构与边界设计原则

上述称重传感器定义的含义是假定在弹性元件的应变区内，应变程度与所施加载荷成线性关系。换句话说，理想称重传感器的特点应当是应变和载荷成较严格的线性关系，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与计算上和某些经济上的限制，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

器结构与边界的设计原则是：

(1) 弹性元件尽量设计成一个整体结构，因为连接件之间的摩擦和位移都可以引起非线性和离散性。不允许采用焊接结构的弹性元件，由于残余应力和焊接后效可能减少疲劳寿命，并助长微塑性变形。

(2) 由于称重传感器的电路输出取决于弹性元件应变区的应变程度，在整个电阻应变计敏感栅区域内的应变程度应该是均匀的，所以要求弹性元件应变区受力单一，应力分布均匀。

(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。因为称重传感器的非线性、滞后、蠕变误差和疲劳寿命等，都随弹性元件应变区的应变程度高低而变化，即随应变程度变低减至最小而获得改善。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。为满足灵敏度  $2\text{mV}/\text{V}$ ，一般应变量控制在  $1100 \times 10^{-6}$  左右。特别要处理好方框平行梁的根部和S形弹性元件辅助梁圆弧处的应力集中。

(4) 弹性元件边界条件是影响称重传感器性能的重要因素，支承区尽量形成刚性固定，安装力远离应变区，必要时采用柔性隔离技术，克服支撑区附加力的影响。

(5) 弹性元件载荷引入方式是影响称重传感器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。称重传感器抗侧向和偏心载荷的能力强，不仅保证加载轴线对好，而且有助于把非线性误差减至最小。

(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。采用焊接密封的称重传感器，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) 应变利用系数  $C = \varepsilon_{\text{Cp}}/\varepsilon_{\text{max}}$ （电阻应变计测量的平均应变与最大应变之比）越大越好。例如双孔平行梁结构孔的尺寸越小，应变敏感元件的尺寸越大，C就越小，因此应尽量增大孔的直径或设计成扁圆孔。剪切式弹性元件由于拉、压主应变相同且沿轴线不变化，C接近于 1，是理想的弹性元件结构。

(10) 在电子衡器和电子称重系统中，称重传感器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。

(11) 弹性元件与其边界承载压头、底垫、安装平台的设计应统一考虑，进行技术密集型组合，各部件结构形状、制造材料、加工方法、热处理工艺需要合理匹配。

(12) 连接、摩擦接触、紧固或任何非整体状态都成为潜在的问题，所以弹性元件、压头、压垫、外壳等设计应充分考虑散热问题。即弹性元件应有足够的热转换以防止电阻应变计自热，如果其温度比弹性元件高，那怕只差 0.1℃，就可能难以达到稳定的性能。在电阻应变计和补偿电阻面积上的任何温度梯度，都能引起零点温度漂移或标定结果的变化。

(13) 在弹性元件结构及边界设计的同时，应考虑制造工艺，特别是机械加工和热处理工艺，作到设计为可制造性服务。

(14) 在结构设计时，还应考虑称重传感器的可靠性。即明确称重传感器的可靠性设计，就是考虑可靠性的称重传感器设计，不存在独立于称重传感器设计之外的可靠性设计。

### 三、称重传感器结构与边界设计关键问题

称重传感器结构与理论计算是基于外载荷作用线与弹性元件加荷轴线一致的前提，且载荷是均匀的沿着轴线传递。事实上，称重传感器所承受的载荷，即不同轴也不是均匀传递，因此会产生干扰影响。对各种干扰和影响的敏感程度，取决于称重传感器弹性元件的结构；压头、压垫、底座等附件性能；电阻应变计的粘贴位置等。研究引入载荷的压头、承受载荷的底垫和安装平台的结构形状、金属材料、加工方法、热处理工艺及它们之间的匹配关系，才能从结构上保证称重传感器的性能波动最小。

称重传感器的测量信号必定与下列因素有关：

- (1) 相对于载荷轴线的倾斜位置；
- (2) 应变区的面积效应、泊松比效应；
- (3) 压头和压垫的表面形状及硬度；
- (4) 接触面大小和材料性质、接触表面粗糙度；
- (5) 接触面、接触线或接触点的变形；
- (6) 应变区的应变程度及变形大小；
- (7) 加载、承载边界条件；
- (8) 与力的产生、传递和测量有关的影响量。

加强上述干扰量、影响量等问题的研究，对于称重传感器的结构设计、理论计算至关重要，这也是生产出一贯符合国家标准的称重传感器的前提性条件。

#### 1. 面积效应对称重传感器固有线性的影响

圆柱式弹性元件在承受压向载荷时，截面积增加，使刚度和弹性模量均稍稍增大，输出小于线性值，呈递减的抛物线；在承受拉向载荷时，截面积减少，使刚度和弹性模量均稍稍减小，输出大于线性值，呈递增的抛物线，两者均产生较大的非线性误差。轴向应变每变化  $100\mu\epsilon$  时，截面积变化引起的非线性误差为 0.003%。剪切式和平行梁式称重传感器，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，因此固有线性好。可推导出圆柱、圆筒式称重

传感器因截面积变化引起的非线性误差为  $\delta_1 = \pm 0.56\varepsilon$ 。为使圆柱、圆筒式称重传感器具有较高的准确度等级，必须进行非线性补偿。

## 2. 泊松比效应影响

圆柱、圆筒式称重传感器弹性元件应变区利用的是轴向和径向应变，由于泊松比 $\mu$ 的影响，轴向与径向应变相差很大，为了提高输出灵敏度 $S$ ，必须加大轴向应变 $\varepsilon$ ，而增大 $\varepsilon$ 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。正如美国Vishay公司《测量集团技术评论》第TN - 507号“电桥非线性所引起的误差”一文指出“此误差乃是电桥内某一桥臂电阻的变化与相邻桥臂电阻的反向变化不匹配所引起的，即圆柱式弹性元件的泊松比效应。圆柱式弹性元件的轴向应变每变化 $100\mu\varepsilon$ 时，电桥的非线性约为0.007%”。可推导出圆柱、圆筒式称重传感器受泊松比效应影响，引起的非线性误差为  $\delta_2 = 0.72\varepsilon$ 。

## 3. 加载条件对应变区的影响

任何结构的称重传感器都有两个承受外载荷的接触面，在每一个接触面上载荷的分布取决于端部的加载条件。因此，这些加载条件的变化，将使弹性元件应变区的载荷分布发生变化。即使在称重传感器的两个接触面上，总的作用载荷保持不变，加载条件的变化，也将导致输出灵敏度发生变化，造成称重传感器不稳定。

对于应用压头、压垫的圆柱式压向称重传感器，端部加载条件的决定因素是：

与称重传感器加载、承载面相接触的压头、压垫的材料特性，如硬度、摩擦系数等；与称重传感器加载、承载面相接触的压头、压垫的表面形状特性，如平面、凹面、凸面、曲面曲率、接触圆大小等；加载后称重传感器接触表面的变形。圆柱、圆筒式称重传感器底垫的支承面积应与弹性元件的承载面积相当，否则将使外壳变形影响称重传感器的输出灵敏度。

对于应用螺纹接触面的拉式称重传感器，端部加载条件的决定因素是：弹性元件上、下螺纹的同心度及螺纹的加工精度（主要是严格控制螺纹中径）；拉式接头或关节轴承拉头与弹性元件上、下螺纹啮合面积的大小。

对于各种梁式称重传感器，端部加载条件的决定因素是：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；支承方式，即根部固定的合理性，应尽量使其形成固支，具有足够大的平衡力矩。

综上所述，加载、承载边界条件的影响是称重传感器弹性元件结构设计必须认真考虑的问题。从应用角度讲，称重传感器的边界条件选择及其附件设计更为关键。

## 4. 压头压垫表面形状和硬度影响

称重传感器上、下压垫的接触面，都影响载荷的引入和传递。上压头表面不平度和粗糙度都很高时，表面硬度影响可以忽略不计，上压头厚度影响也很小，因为接触仅发生在球面中心一个小接触圆上。一般要求上压头的硬度小于弹性元件的硬度，但不能太低，因为压头硬度越低、粗糙度越

大，在较小的载荷下会产生较大的变形，将使合力作用点发生变化，引起称重传感器灵敏度误差。

### 5. 接触表面粗糙度的影响

英国物理研究所用环氧树脂称重传感器模型，在不同表面粗糙度和不同材料制成的橡胶、环氧树脂和钢底座上进行试验，确定接触表面粗糙度的影响。试验要点是在环氧树脂弹性元件模型上粘贴电阻应变计，改变接触表面的粗糙度及弹性元件模型尺寸（高度 H 和直径 D），测量出其径向应变值。

(1) 在  $H/D=1.46$ ，载荷  $P=10\text{KN}$  条件下，其试验结果如下：

接触表面光滑有润滑时，最大径向应变  $1140\times 10^{-6}$ ；

接触表面光滑无润滑时，最大径向应变  $1100\times 10^{-6}$ 。

(2) 在  $H/D=1.88$ ，载荷  $P=10\text{KN}$  条件下，其试验结果如下：

接触表面为光滑的钢质压垫时，最大径向应变为  $1120\times 10^{-6}$ ；

接触表面为光滑的环氧树脂时，最大径向应变为  $1080\times 10^{-6}$ ；

接触表面为光滑的橡胶压垫时，最大径向应变为  $1030\times 10^{-6}$ 。

上述试验结果证明：接触表面越光洁，载荷传递性能越好，输出就越大，对称重传感器灵敏度无影响。

### 6. 无摩擦技术在称重传感器设计中的应用

称重传感器的摩擦分为外部摩擦和内部摩擦两大类：外部摩擦是指弹性元件上承载面与压头，下端与承压垫或基础之间的摩擦；内部摩擦是指弹性元件局部应力集中，造成晶格之间位错所产生的摩擦。

两种摩擦均使滞后和非线性误差显著增加，因此应进行无摩擦设计：

(1) 弹性元件下端为平面时，或选用低摩擦系数的材料作下压垫；或选用固定式三滚珠压垫；或选用由两组相互垂直交叉的滚柱组成的自由底座。

(2) 上压头、下压垫采用无摩擦设计（如球面结构），使加载、承载为点接触（实为接触圆）。

(3) 大量程的整体三柱、四柱结构可以加大承载部位球面半径，降低在大载荷和冲击载荷下承载球头的变形程度，减小摩擦影响改善称重传感器的静态和动态应用特性。

(4) 尽量选用整体式结构，使弹性元件与支承无接触问题，如 S 型，整体剪切梁型等。

(5) 采用柔性隔离方法，即用铰接方法把弹性元件和承载底座联接起来，利用铰接不传递力矩这一力学特性，将摩擦面与弹性元件隔离。

(6) 正确设计称重传感器的加载方式，是保证衡器在使用期限内“承载器受力分配系数”恒定不变的关键。以电子汽车衡为例，我国以桥式结构的双剪梁称重传感器为主，采用 3 英寸钢球传递载荷。尽管钢球只感受轴向载荷不传递弯矩和侧向载荷的特点明显，但其缺点也很突出，主要是电子秤重心高，承载器热胀冷缩时钢球不在中心点，需要安装纵向和横向限位装置。国外大多使用单

个双剪切梁弹性元件，利用组件化或模块化的马鞍或链环线接触方式引入载荷，其特点是重心低，不受承载器热胀冷缩影响，不需要安装纵向和横向限位装置。加拿大 MASS LOAD 公司的双剪切梁型称重传感器，采用线接触链环组件引入载荷。美国 RICE LAKE 公司销售的大型电子汽车衡，其双剪切梁型称重传感器均采用马鞍形线接触组件引入载荷。马鞍形和链环线接触引入载荷的特点是克服了钢球传递载荷使原始加载状态改变及由此产生的侧向力影响，保持“承载器受力分配系数”不变，保证电子衡器零点和灵敏度的稳定性。

(7) 弹性元件需要设计保护外壳时，应尽量减少组件、连接件、紧固件数量，把非整体状态外壳的紧固、摩擦、接触影响减至最小。

(8) 合理的应力分布。应力水平过高，将引起弹性元件晶格之间相对位移，产生内部摩擦，因此应力水平应控制在弹性极限的  $1/4 \sim 1/3$  左右。

**7. 如果必须采用面接触方式传递载荷时，称重传感器应具备：**允许局部区域有较大变形；输出对加载面位置变化不敏感；对局部应力集中不敏感。为此，必须增大应变均匀区，例如加大高度与直径比、采用加高的均压垫等，或将面接触通过过渡压垫转换成点接触或线接触。

#### **8. 应变区以外的部分应处于较低的应变水平**

电阻应变计应处于弹性元件应变区均匀的应力场，为弹性元件最高的应变区。非应变区应处于低应力水平，即应变区之外不能有高于应变区的应力场和应力集中处，以保证弹性元件有较大的刚性和较高的固有频率。

#### **9. 弹性元件挠度**

称重传感器利用的是小变形原理，必须使弹性元件产生有限的变形，一般控制在 0.2mm 左右。因为弹性元件任何几何形状的变化必然地伴随着出现一定程度的非线性响应。弹性元件的刚性不仅对提高固有频率有益，而且也有助于把几何形状变化引起的非线性减至最小。

#### **10. 防护密封结构的选择**

粘贴在弹性元件上的电阻应变计，以及所用的应变胶粘剂，都会受到空气中水份和氧气的影响，因为水能渗入几乎所有的聚合物，而产生增塑。如果防护与密封不良，电阻应变计和应变胶粘剂吸收空气中的水份，就会使胶粘剂层膨胀增塑，造成绝缘电阻、粘结强度和刚性下降，引起称重传感器性能波动。因此，必须重视防护密封结构设计，表面密封应有保护胶粘剂台阶；盲孔灌封应有粘接防护密封盖板的圆台；焊接密封的焊口、波纹膜片、焊线出线口等应设计合理，保证防护密封质量。

#### **11. 在额定载荷下应变区应有合适的应变水平**

在额定载荷作用下，弹性元件应变区的应变水平，对称重传感器的线性、滞后、蠕变和疲劳寿命都有较大影响。这里说的应变水平，实际上是保证应变稳定并与载荷成较严格线性关系的应变范围，它与弹性元件所用的材料密切相关。基于各种条件的综合限制，诸如材料  $P - \varepsilon$  曲线的线性度、

电阻应变计的疲劳寿命、称重仪表的性能等，一般应变水平以  $1000\mu\epsilon \sim 1100\mu\epsilon$  为最佳，保证称重传感器的灵敏度为  $2\text{mV} / \text{V}$ 。

## 12. 与力的产生、传递和测量有关的影响量

除了非轴向分力外还有一些分量作用在称重传感器上，它们称之为寄生分量。由于这些寄生分量是二阶的，对输出信号的影响一般小于非轴向分量的影响，它们起源于不同的方面。

(1) 标准测力机的类型，它的对中性、刚度和砝码体积大小的影响；

(2) 力传递装置，这与它们同称重传感器接触表面间的相互作用有关，这样的相互作用会使弹性元件内不同截面之间产生机械应力的变化；

(3) 力的测量装置，即与称重传感器连接的测量线路的类型和所用的测量仪表。

## 四、称重传感器结构与边界设计注意问题

在大多数情况下，理想的称重传感器应当只响应沿一个轴向的力，而对其它方向的输入力或外力不敏感，同时保证在规定范围内，力作用点的变化不影响其对输出的响应。这不仅涉及到弹性元件应变分析，而且也涉及到载荷引入和支撑装置等边界影响、电阻应变计的粘贴位置、防护密封结构设计、长期稳定性和环境适应性。

### 1. 弹性元件的应变分析

在弹性元件结构形式确定后，应首先进行应变计算和分析。目前的办法是先用材料力学公式进行初步计算，确定出应变区等相关尺寸，然后用有限元法进行全面的应变分析。其目的是：

(1) 确定在载荷作用下，最大应变的确切位置；

(2) 了解在有偏心、侧向载荷作用时，对输出灵敏度的影响；

(3) 根据分析得出的应变场数据，决定电阻应变计粘贴位置与方向，以消除偏心、侧向载荷引起的灵敏度误差；

(4) 分析电阻应变计定位误差和弹性元件尺寸误差，对输出灵敏度的影响。

### 2. 称重传感器的固有频率

通常弹性元件的固有频率应能达到它本身所能达到的最高频率，这就要求弹性元件尽量是一个整体结构，使固有频率尽量高。对于圆柱式弹性元件，固有振动频率 $f_0$ 为

$$f_0 = 0.159 \frac{\pi}{2L} \sqrt{\frac{EA}{m}}$$

式中：L—圆柱式弹性元件的长度(m)；

E—弹性元件材料的弹性模量( $\text{kg} / \text{mm}^2$ )；

A—弹性元件的横向截面积( $\text{m}^2$ )；

m—弹性元件单位长度的质量( $\text{kg} / \text{m}$ )

用弹性元件的质量和长度表示单位长度的质量，经进一步变换后，得

$$m=A\rho$$

式中  $\rho$  为弹性元件材料的密度。

从公式可看出：

(1) 固有频率与弹性元件结构及某些尺寸、材料的弹性模量  $E$  和密度  $\rho$  有关。 $E$  越大， $\rho$  越小， $f_0$  就越高；

(2) 在满足圣维南力的扩散原理前提下， $L$  越小， $f_0$  越高；

(3) 固有频率取决于弹性元件及其连接件运动部分的质量，因此设计时应尽量减少这些部件的质量；

(4) 在额定载荷下应变区应有合适的应力水平，不应取得太高。只有较低的应力水平，才能保证弹性元件有较大的刚性和较高的固有频率，也意味着对理想线性性能的偏差最小。

将  $m$  和  $\pi$  代入上式，得

$$f_0 = \frac{0.249}{L} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

例如：20t 圆柱结构压式称重传感器，弹性元件的高度  $L=100\text{mm}=0.1\text{m}$ ；弹性元件材料 40CrNiMoA 的弹性模量  $E=2.1 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2=2.1 \times 10^7 \text{ t/m}^2$ ；弹性元件材料的密度  $\rho=7.85 \text{ t/m}^3$ 。

固有频率为

$$\begin{aligned} f_0 &= \frac{0.249}{0.1} \sqrt{\frac{2.1 \times 10^7}{7.85}} = 2.49 \sqrt{2675159.235} \\ &= 2.49 \times 1635.591 = 4072.623 \text{ Hz} \end{aligned}$$

### 3. 长期稳定性问题

长期稳定性应包括老化、疲劳和环境三个因素。

(1) “老化”即时间影响；

(2) “疲劳”是指把时间影响模拟为固定次数的称重过程或固定小时的工作量。PTB (德国物理技术研究院) 规定用最大或至少  $1/2$  的载荷加荷 20 万次，实际上是一种持久试验；

(3) “环境因素”是把时间模拟为长期温度、湿度变化的影响，通过可靠性试验，包括寿命试验和环境试验，对其环境适应性进行验证。PTB 规定对不是焊接密封的“开放”型称重传感器要进行温度、湿度试验，因为其零点和特性随温度、湿度的变化较大。

准确度、稳定性和可靠性是称重传感器的重要质量指标，在设计 and 生产过程中必须考虑疲劳寿命和稳定性处理技术与工艺。



#### 4. 环境适应性问题

称重传感器用于比较恶劣的环境条件时，更要求它的环境适应性强，可靠性高，故障率低。环境适应性主要是：

- (1) 耐气候因素——温度、湿度、压力等的影响；
- (2) 电磁因素——电磁场或电磁辐射的干扰；
- (3) 特殊介质因素——盐水、化学腐蚀性气体、核辐射等影响的耐受能力。

例如德国对申请样机试验的新型称重传感器，要求对零件的耐磨性、老化及对干扰的敏感性进行试验和计量，保证称重传感器的计量性能不受电磁场、静电力、振动、气候条件、机械磨损等干扰量的影响。

由此不难得出，耐环境条件设计和防护密封技术是称重传感器设计与制造过程中的重要环节，是称重传感器耐受客观环境和感应环境影响能稳定可靠工作的根本保障。如果防护与密封不良，电阻应变计和胶粘剂吸收空气中的水份，就会使胶粘剂层膨胀增塑，造成绝缘电阻、粘结强度和刚性急剧下降，引起零点漂移和输出无规律变化，直至称重传感器失效。因此，必须作好耐环境条件设计，提高称重传感器的环境适应性。

#### 五、弹性元件的材料选择

国内外称重传感器专家的共同观点是必须把弹性元件作为任何一种称重传感器中最关键的机械部件看待，它的性能与金属材料性能合为一体。对金属材料的要求是：变形与载荷成较严格的线性关系、小的滞后（本质上是指增大或减小载荷值时其特性相同）、低的蠕变以及低的松弛。尽管用做弹性元件的金属材料实质上是结构材料，但是设计者要通过技术和工艺措施使其尽量达到功能材料的性能指标。这就是通过科学合理的热处理工艺，使其尽量具有功能材料的某些特点，即

- (1) 在性能上——对称重传感器的特性起举足轻重的作用；
- (2) 在应用上——制成弹性元件后，实际上是金属材料与弹性元件一体化；
- (3) 在对材料的评价上——是以弹性元件形式对其性能进行评价，称重传感器性能直接体现材料的优劣；
- (4) 在制造上——对锻造、淬火、回火工艺和机械加工要求严格，并尽量少产生残余应力。

提高弹性元件应变的稳定性是提高称重传感器整体稳定性的基础和关键。因此，金属材料不仅是结构材料而且还应具有功能材料的某些特点。

#### 1. 对弹性元件金属材料的要求

弹性元件金属材料对称重传感器的线性、滞后、长期稳定性等指标影响很大，具体要求如下：

- (1) 强度极限、弹性极限高，屈强比大；
- (2) 弹性模量温度系数小而稳定；
- (3) 弹性滞后、弹性后效（蠕变）小；

- (4) 组织均匀，各向同性，冷热加工后残余应力小；
- (5) 冲击韧性好，耐冲击、抗疲劳能力强；
- (6) 热膨胀系数小，热传导性能好；
- (7) 冷热加工的工艺性好；
- (8) 在满足上述要求的前提下，价格尽量低。

## 2. 高弹性模量材料

### (1) 材料的弹性模量

材料的弹性模量直接影响称重传感器的性能。

#### 弹性模量与应变之间的关系

要求弹性模量在称重传感器额定量程内保持不变，这样才能保证弹性元件的应变与载荷成比较严格的线性关系。通常，人们认为在金属材料比例极限以下，弹性模量就为常数，这是不严格的。实际上，仅仅在一定应变范围内弹性模量才接近常数。不同的热处理规范，弹性模量为常数的应变范围也不同。例如：

测量温度	500 回火	560 回火
20	2.12	2.08 ( $\times 10^{-4} \text{kg} / \text{mm}^2$ )
40	2.11	2.07 ( $\times 10^{-4} \text{kg} / \text{mm}^2$ )

#### 弹性模量与温度之间的关系

大部分材料的弹性模量都随着温度升高而降低。40CrNiMoA 钢采用 500 回火工艺，20 ~ 100 时，每度变化 0.02%，且随温度变化呈线性关系，有利于进行灵敏度温度补偿。

#### 弹性模量随时间的稳定性

要求弹性模量在称重传感器使用寿命期间内不发生变化。由于弹性元件在冷热加工后产生的残余应力，在加载过程中会出现局部屈服，造成弹性模量的改变和不稳定，因此应选择冷热加工后残余应力小的金属材料。试验表明：只要弹性元件材料淬火后的塑性好，它在机械加工和热处理后的残余应力就小。

### (2) 材料的比例极限和疲劳强度

弹性元件材料的比例极限高，其工作应变区也就大，相应的称重传感器输出信号也就大。由于称重传感器是多次反复使用的承载部件，要求使用寿命高，对此就要求材料的疲劳强度高。通常要求弹性元件在应变值为  $2000\mu\epsilon$  的脉动循环时，疲劳寿命大于  $1 \times 10^7$  次。

### (3) 材料的线膨胀系数

弹性元件材料的线膨胀系数要小。当外界温度变化时，弹性元件会产生变形，线膨胀系数越大，变形就越大。该变形将在弹性元件中产生内应力，引起称重传感器的温度漂移和使灵敏度变化。

#### (4) 材料的热传导性能

要求弹性元件材料的热传导性能(散热性)好。由于电阻应变计等元件在通电后要发热,其热量主要通过弹性元件散发,达到与周围环境的热平衡状态。弹性元件热传导性能好,热量散发的快,达到热平衡的时间就短。弹性元件的热传导特性,是决定准确度和稳定性的重要因素,因为弹性元件的温度梯度(特别是与电阻应变计粘贴区不对称的温度梯度)可能在输出中引起错误的与不能复现的干扰。在内外热源的联合作用下,弹性元件内的温度梯度均与材料的导热系数成反比。因此,导热系数是选取弹性元件材料时应予以注意的另一个重要性能。

### 3、低弹性模量材料

小量程称重传感器灵敏度和刚度的矛盾比较突出,使得弹性模量在金属材料选择过程中具有特别重要的作用。小量程称重传感器对弹性元件材料的冷热加工性能要求较高,主要是热处理后不变形。由于小量程称重传感器必须解决好灵敏度和刚度这一矛盾,因此多采用平行梁结构。为增大应变值电阻应变计粘贴处截面很薄,其影响是:

(1) 平行梁应变区粘贴电阻应变计处截面厚度越来越薄,电阻应变计基底和胶粘剂层占截面的比例越来越大,将参与截面的刚度,产生非线性误差;

(2) 由于粘贴电阻应变计处截面厚度越来越薄,电阻应变计基底和应变粘接剂层的厚度相对较大,使得敏感栅与梁表面的距离相对来说更远了,其结果是弹性元件的塑性增加刚性减弱,导致称重传感器的滞后和蠕变误差增大;

(3) 电阻应变计粘贴处截面厚度薄对热传导不利。因为,电阻应变计产生的大部分热量,是从敏感栅传到弹性元件表面,并由表面通过此截面流向质量较大的邻近截面。截面特别薄时,这种热流传导的阻力将会造成显著的温度梯度,使电阻应变计处于较高的温度状态,改变了局部应力场而产生输出灵敏度误差;

(4) 电阻应变计粘贴处截面厚度薄,冷热加工难度大,且易产生局部变形和较大的残余应力,直接影响称重传感器的零点和灵敏度的稳定性。

解决上述问题最有效的方法是采用低弹性模量材料,例如铝合金、钛合金、铍青铜等,最好热处理后进行机械加工。

## 六、结语

称重传感器传统的结构设计与计算方法,是材料力学、结构力学的古典计算方法加经验,为半理论、半经验设计。即以理论计算和经验公式、图表、设计手册等为设计依据,通过经验公式、近似系数或类比等方法进行设计,简单、实用、有效。但也存在弊端,主要是:

(1) 达不到最佳化设计,有些结构关键尺寸不尽完全合理,难以进行全面分析和综合各参数之间的相互影响;

(2) 对边界影响、支承刚度和应力集中等很难作出分析和判断,影响对结构及边界支承的正

确选择；

(3) 从开始研制到设计定型，设计和试验周期长，耗费人力、物力多，成本高。

处于国际称重传感器市场引导者地位的企业，早已采用现代设计方法。它是传统设计理论的延伸、思维方法的改变，多种设计技术、理论与方法的综合。其特点是设计手段精确化、计算机化和虚拟化。虚拟化是以虚拟实现的系统软件在计算机上进行仿真，实现三维建模，即采用三维数字设计与制造技术，使得设计过程并行化、最优化和智能化。实现了以设计、控制、管理为中心的称重传感器数字化制造技术。

近年来，称重传感器正处于由传统型向新型转型的发展阶段。新型称重传感器的特点是微型化、数字化、智能化、多功能化、系统化、无线化和网络化，它不仅促进了传统称重传感器产业的改造，而且可导致企业多元化发展。希望我国更多有条件的称重传感器制造企业，尽快采用数字化设计与制造技术，在批量生产情况下，控制称重传感器产品性能（特别是稳定性、可靠性），使之达到 R60 国际建议和称重传感器国家标准要求，提高我国称重传感器的总体技术水平，在参加国际称重传感器市场竞争方面走出新路子。

#### 参考文献

1. R.F.Jenkins (沈京译). 用于测力传递标准器的应变式测力传感器的一些限制因素 [M]. Weightech'2. P143 ~ 158.
2. 美国 Vishay 公司. 来华技术讲座与技术交流资料 [R]. 2006 年 5 月，杭州.
3. C. S. Bahra J. W. Evans. 应变式载荷传感器的设计与使用 [C], Transducer Tempcon Conference. 1993.

#### 作者简介

刘九卿，出生于 1937 年，男，汉族，辽宁省海城市人，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。

作者通讯地址：北京市丰台区桃源里小区 11 号楼 2 单元 6 号

邮政编码：100076