

小量程梁式称重传感器的受力分析与理论计算

□中国运载火箭技术研究院第七零二研究所 刘九卿

【摘要】为使小量程称重传感器具有较高的灵敏度和刚度，选择弹性元件的结构形式和金属材料至关重要，为满足体积小、高度低、重量轻等小型化要求，多选择梁式结构。本文介绍了双端固支梁、悬臂梁、薄壁梁式小量程称重传感器弹性元件的结构与特点，受力分析与理论计算，弹性模量效应及电阻应变计基底材料影响，并给出结构与计算实例。

【关键词】称重传感器；小量程；灵敏度；刚度；受力分析；理论计算

文献标识码：B 文章编号：1003-1870（2023）05-0005-07

概述

小量程称重传感器因其量程小而又要使其具有较高的灵敏度和刚度，如按常规设计原则选择弹性元件结构，其刚度必然小，这就导致称重传感器的非线性、重复性、滞后和蠕变等性能指标变坏，达不到较高准确度等级的要求。因此，正确解决灵敏度和刚度这对矛盾，是小量程称重传感器具有优良综合性能指标的重要前提。

为了有效地解决小量程称重传感器灵敏度和刚度这对矛盾，一般设计者都习惯性地采用平行梁结构，在选择弹性元件材料时，多采用比重小，屈服比高，比强度大，弹性模量低的硬铝合金或铍青铜。但对那些要求弹性元件必须具备体积小、高度低、重量轻、冷热加工性能好、稳定性高等条件时，硬铝合金、铍青铜等材料就无能为力了。为适应小量程电子秤结构的新发展，本文介绍几种以合

金钢为弹性元件材料的低外形小量程梁式称重传感器。

1 小量程双端固支梁和悬臂梁称重传感器

小量程集成化圆板式双端固支梁和悬臂梁弹性元件，顾名思义即在一块圆形的平板上加工出薄形应变梁、环形支撑和载荷引入辅助梁或压头，形成集成化整体结构的双端固支梁或悬臂梁型称重传感器。当外载荷施加于双端固支梁或悬臂梁的载荷引入压头或辅助梁时，应变梁产生弯曲变形，其结果便在双端固支梁或悬臂梁应变区的上下表面产生最大拉应力和最大压应力，利用此应力即可完成称重计量任务。平板式环形支撑双端固支梁弹性元件及电阻应变计粘贴位置如图1所示；平板式环形支撑悬臂梁弹性元件如图2所示；平板式半环形支撑悬臂梁弹性元件如图3所示。

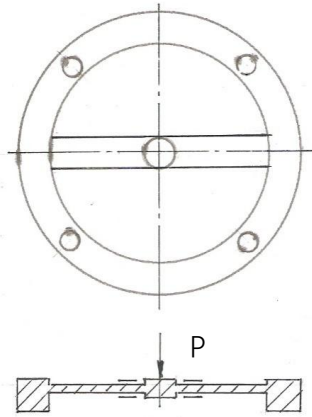


图1 平板式双端固支梁弹性元件及电阻应变计粘贴位置图

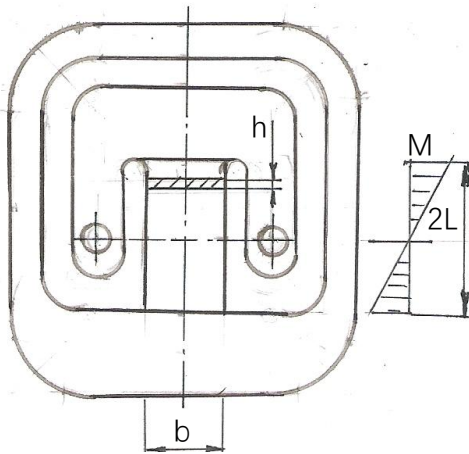


图2 平板式环形支撑悬臂梁弹性元件图

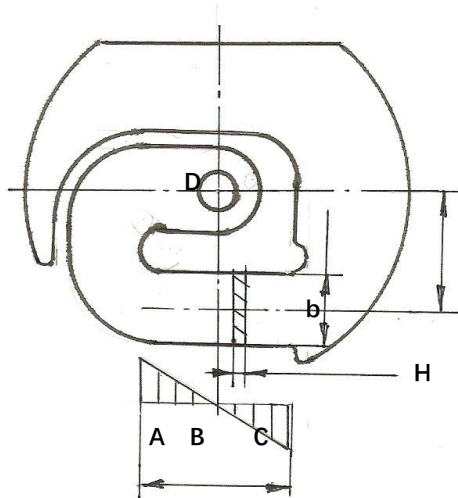


图3 平板式半环形支撑悬臂梁弹性元件图

小量程圆板式双端固支梁和悬臂梁称重传感器具有如下特点：

(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, 适合组装各种薄形电子秤。

(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, 既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, 工作稳定性高。

(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 小量程圆板式双端固支梁称重传感器

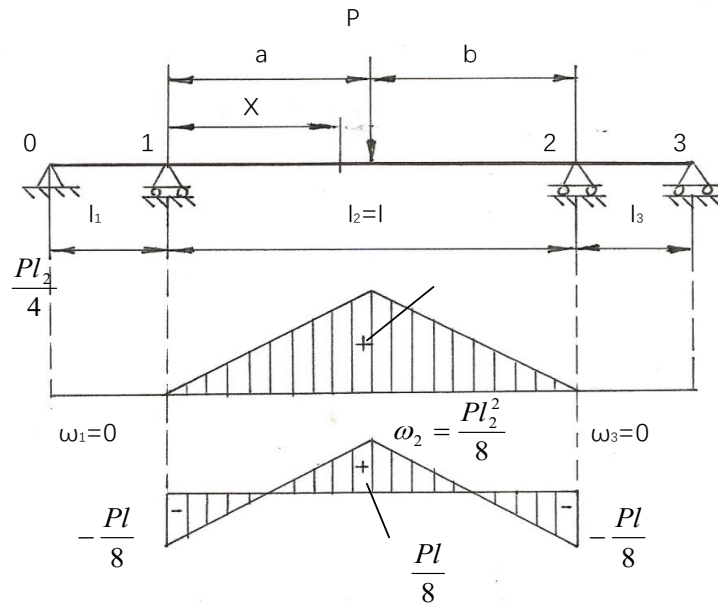
2.1 弹性元件的受力分析与理论计算

由图1可以看出, 圆板式双端固支梁弹性元件的中间应变梁与环形支撑为同一块圆形合金钢板加工形成的整体结构, 无活动连接环节和端部效应影响。在外载荷作用下中间应变梁与环形支撑的变形方向相反, 其根部可视为刚性连接, 既不能自由转动, 又不阻碍中间应变梁的纵向变形。

因圆板式双端固支梁弹性元件中间应变梁与环形支撑梁在外载荷作用下变形方向相反, 其根部可视为刚性连接, 既不能自由转动, 又不影响中间应变梁的纵向变形。为便于分析和理论计算, 在中间应变梁的两端各加一跨度为 l_1 、 l_3 的梁, 以代替中间应变梁两端的环形支撑, 则中间应变梁即成为三跨度梁。其计算模型、载荷面积 ω 图和弯矩 M 图如图4所示。

图4 中心应变梁力学模型、载荷面积图和弯矩图

根据克拉贝朗三弯矩方程式:



$$M_{n-1}l_n + 2M_n(l_n + l_{n+1}) + M_{n+1}l_{n+1} = -6 \left(\frac{\omega_n a_n}{l_n} + \frac{\omega_{n+1} b_n}{l_{n+1}} \right) \quad (1)$$

式中: M_n ——支点弯矩;

l_n ——支点间跨度;

ω_n ——载荷面积;

a_n ——载荷面积中心到左支座的距离;

b_n ——载荷面积中心到右支座的距离。

对支座1 ($n=1$) 立三弯矩方程的数据为:

$$M_{n+1}=M_0=0; \omega_n=\omega_1=0$$

$$\omega_{n+1}=\omega_2=\frac{1}{2} \cdot \frac{Pl_2}{4} l_2 = \frac{Pl_2^2}{8}$$

$$b_{n+1} = b_2 = \frac{l_2}{2}$$

三弯矩方程为:

$$\begin{aligned} M_0 l_1 + 2M_1(l_1 + l_2) + M_2 l_2 &= -6 \left\{ \frac{\omega_1 a_1}{l_1} + \frac{Pl_2^2 l_2}{2 \times 8 l_2} \right\} 2M_1(l_1 + l_2) + M_2 l_2 \\ &= -\frac{3}{8} Pl_2^2 \end{aligned} \quad (2)$$

对支座2 ($n=2$) 立三弯矩方程的数据为:

$$M_{n+1}=M_3=0; \omega_n=\omega_2=\frac{1}{2} \cdot \frac{Pl_2}{4} l_2 = \frac{Pl_2^2}{8}$$

$$\omega_{n+1}=\omega_3=0 \quad a_n = a_2 = \frac{l_2}{2}$$

三弯矩方程为:

$$\begin{aligned} M_1 l_2 + M_2(l_2 + l_3) + M_3 l_3 &= -6 \left\{ \frac{Pl_2^2 l_2}{2 \times 8 l_2} - \frac{\omega_3 b_3}{l_3} \right\} M_1 l_2 + M_2(l_2 + l_3) \\ &= -\frac{3}{8} Pl_2^2 \end{aligned} \quad (3)$$

在式(2)、式(3)中, 因 $l_1 = l_3 = 0, l_2 = 1$ 则得联立方程:

$$2M_1 l + M_2 l = -\frac{3}{8} Pl^2$$

$$M_1 l + 2M_2 l = -\frac{3}{8} Pl^2$$

解此联立方程得:

$$\begin{aligned} M_1 &= \frac{-\frac{3}{8} Pl^2 \cdot 2l + \frac{3}{8} Pl^2 \cdot l}{4l^2 - l^2} = -\frac{\frac{3}{8} Pl^3}{3l^2} = -\frac{Pl}{8} \\ M_2 &= \frac{-2l \cdot \frac{3}{8} Pl^2 + l \cdot \frac{3}{8} Pl^2}{4l^2 - l^2} = -\frac{\frac{3}{8} Pl^3}{3l^2} = -\frac{Pl}{8} \end{aligned} \quad (4)$$

当 $X = \frac{l}{2}$ 时, 中间受载点的弯矩为:

$$M = \frac{P}{2} \cdot \frac{l}{2} + \frac{M_1 b}{l} + \frac{M_2 a}{l} = \frac{Pl}{4} - \frac{Pl}{2 \times 8} - \frac{Pl}{2 \times 8} = \frac{Pl}{4} - \frac{Pl}{8} - \frac{Pl}{8} \quad (5)$$

从式(4)、(5)可以看出, 应变梁中点弯矩 M 与环形支座两端弯矩 M_1 、 M_2 大小相等, 方向相反, 其过渡弯曲点为 $\frac{l}{4}$ 、 $\frac{3l}{4}$, 因此在设计与计算时, 只计算其中一个弯矩即可。

设单轴电阻应变计在应变梁的粘贴截面与梁根部的距离为 X 。

当 $X < \frac{l}{2}$ 时

$$M_x = \frac{P}{2} X + \frac{M_1 b}{l} + \frac{M_2 a}{l} = \frac{PX}{2} - \frac{Pl}{16} - \frac{Pl}{16} = \frac{P}{8} (4X - l) \quad (6)$$

当 $X > \frac{l}{2}$ 时

$$\begin{aligned} M_x &= \frac{P}{2} X - P(X - a) + \frac{M_1 b}{l} + \frac{M_2 a}{l} = \frac{PX}{2} - PX + \frac{Pl}{2} - \frac{Pl}{16} - \frac{Pl}{16} \\ &= \frac{3Pl}{8} - \frac{PX}{2} = \frac{P}{8} (3l - 4X) \end{aligned} \quad (7)$$

电阻应变计粘贴截面的弯曲应力、应变为:

$$\sigma = \pm \frac{M_x}{W} = \pm \frac{3P(4X-l)}{4bh^2} \quad (8)$$

$$\varepsilon = \pm \frac{\sigma}{E} = \pm \frac{3P(4X-l)}{4Ebh^2} \quad (9)$$

输出灵敏度为:

$$S = \frac{3KP(4X-l)}{4Ebh^2} \times 10^3 \text{ mV/V} \quad (10)$$

应变梁的最大挠度为:

$$f_{\max} = \frac{Pl^3}{192EJ} = \frac{Pl^3}{16Ebh^3} \quad (11)$$

在进行小量程圆板式双端固支梁称重传感器结

构设计时, 额定载荷 P , 输出灵敏度 S , 电阻应变计灵敏系数 K 为已知量。根据电子秤的要求和结构设计需要选定应变梁长度 l , 宽度 b , 粘贴电阻应变计截面的距离 X , 则应变梁的厚度为:

$$h = \sqrt{\frac{3KP(4X-l) \times 10^3}{4bES}} \quad (12)$$

此种结构适合几公斤至几百公斤的称重传感器, 当额定载荷比较小时, 为了减少应变梁支座的影响, 可在支座的上下两面沿垂直方向开一槽, 以提高称重传感器的灵敏度, 此时的应变梁已成为简支梁, 开槽位置及方向如图5所示。

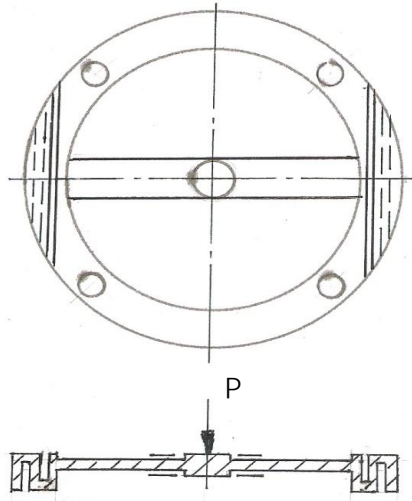


图5 应变梁支座开槽位置及方向图

2.2 小量程圆板式双端固支梁称重传感器设计与计算实例

以50kg小量程圆板式双端固支梁称重传感器为例进行理论计算, 其外载荷、输出灵敏度与尺寸参数为: 额定载荷 $P=50\text{kg}$; 输出灵敏度 $S=2.0\text{mV/V}$; 应变梁长度 $l=60\text{mm}$ 、宽度 $b=10\text{mm}$; 电阻应变计灵敏系数 $K=2$; 电阻应变计粘贴截面距离 $X=25\text{mm}$ 。

弹性元件材料与许用应力:

中碳合金钢 40CrNiMoA $\sigma_b=132\text{kg/mm}^2$

$\sigma_s=126\text{kg/mm}^2$

取 $[\sigma]=\frac{1}{3}\sigma_s=42\text{kg/mm}^2$

根据式(12)计算应变梁的高度 h 为:

$$h = \sqrt{\frac{3KP(4X-l) \times 10^3}{4bES}} = \sqrt{\frac{3 \times 2 \times 50(4 \times 25 - 60) \times 10^3}{4 \times 10 \times 2.1 \times 10^4 \times 2.0}} = 2.673\text{mm}$$

取 $h=2.6\text{mm}$

粘贴电阻应变计截面弯矩为:

$$M_{X=30} = \frac{P(4X-l)}{8} = \frac{50(4 \times 25 - 60)}{8} = 250\text{kg/mm}$$

粘贴电阻应变计截面弯曲应力、应变为:

$$\sigma = \frac{M_{X=30}}{W} = \frac{6M_{X=30}}{bh^2} = \frac{6 \times 250}{10 \times 2.6^2} = 22.189\text{kg/mm}^2$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{22.189}{2.1 \times 10^4} = 1057 \times 10^{-6}$$

输出灵敏度为:

$$S = K \varepsilon \times 10^3 = 2 \times 1057 \times 10^{-6} \times 10^3 = 2.114 \text{ mV/V}$$

应变梁最大弯矩、弯曲应力为:

$$M_{\max} = \frac{P\left(4 \times \frac{l}{2} - l\right)}{8} = \frac{50(4 \times 30 - 60)}{8} = 375 \text{ kg/mm}$$

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W} = \frac{6M_{\max}}{bh^2} = \frac{6 \times 375}{10 \times 2.6^2} = 33.284 \text{ kg/mm}^2 < [\sigma] = 42 \text{ kg/mm}^2$$

应变梁的最大挠度为：

$$f_{\max} = \frac{Pl^3}{192EJ} = \frac{Pl^3}{16Ebh^3} = \frac{50 \times 60^3}{16 \times 2.1 \times 10^4 \times 10 \times 2.6^3} = 0.183 \text{ mm}$$

3 小量程集成化圆板式悬臂梁称重传感器

小量程集成化圆板式悬臂梁称重传感器是将悬臂梁、支撑和加载点或加载梁集成在一块圆形板上，形成整体式结构。有两种结构形式，其一为在一块圆形合金钢或弹簧钢薄板上，冲压出环形支撑、中心悬臂应变梁、U形辅助加载梁构成的称重传感器（见图2）。其二为在一块圆形合金钢或弹簧钢薄板上，冲压出半环形支撑、悬臂应变梁、辅助加载梁构成的称重传感器（见图3）。

现以半环形支撑悬臂梁式称重传感器为例进行受力分析与理论计算，其结构及尺寸参数如图3所示。

水平辅助梁的作用是为了实现对悬臂应变梁的支撑和中心加载，同时改变悬臂应变梁端部应变方向。悬臂应变梁中心线两侧应变大小相等、方向相反，非常适合粘贴全桥电阻应变计，既优化制造工艺、提高工作效率，又保证称重传感器计量性能的均一性。

3.1 弹性元件受力分析与理论计算

在中心D点作用载荷P，最大应力发生在A、C截面，B截面产生扭转力矩。

对于B截面其内力分量为：

$$M_B = 0 \quad (M_n)_B = PH$$

截面上的应力分量为：

$$\sigma_w = 0$$

$$\tau_n = \frac{(M_n)_B}{W_{nB}} = \frac{PH}{\alpha bh^2}$$

故主应力为：

$$\sigma = \pm \tau_n = \pm \frac{(M_n)_B}{W_{nB}} = \pm \frac{PH}{\alpha bh^2}$$

对于A和C截面其内力分量为：

$$M_C = -M_A = PL \quad (M_n)_{A, C} = PH$$

A、C截面的应力分量为：

$$\sigma_{wC} = \frac{M_C}{W_C} = \frac{6PL}{bh^2}$$

$$\sigma_{wA} = -\frac{M_A}{W_A} = -\frac{6PL}{bh^2}$$

A、C截面的应变分量为：

$$\varepsilon_C = -\varepsilon_A = \frac{\sigma_C}{E} = \frac{6KPL}{Ebh^2}$$

输出灵敏度为：

$$S = K\varepsilon_C \times 10^3 = \frac{6KPL}{Ebh^2} \times 10^3$$

弹性元件截面上的最大剪应力，发生在b边中点处，其计算公式为：

$$\tau_{\max} = \frac{M_n}{W_n} = \frac{PH}{\alpha bh^2}$$

h边上最大剪切应力，也发生在中点处，其值为：

$$\tau_1 = \nu \tau_{\max}$$

弹性元件相对扭转角为：

$$\varphi = \frac{M_n L}{GJ_n} = \frac{PHL}{G\beta bh^2}$$

式中： α 、 β 、 γ ——与b/h有关的系数（查表）；

$W_n = \alpha bh^2$ ——相当于截面抗扭模量；

$J_n = \beta bh^2$ ——相当于极惯性矩。

3.2 设计与计算实例

以额定量程为50kg的半环形支撑悬臂梁称重传感器为例，进行受力分析与理论计算。弹性元件的载荷与尺寸参数为：

$$P=50 \text{ kg} \quad b=10 \text{ mm} \quad h=2.5 \text{ mm} \quad 2L=10 \text{ mm} \quad H=7 \text{ mm}$$

弯曲应力:

$$\sigma_C = -\sigma_A = \frac{M_C}{W_C} = \frac{6PL}{bh^2} = \frac{6 \times 50 \times 5}{10 \times 2.5^2} = 24.000 \text{ kg} / \text{mm}^2$$

弯曲应变:

$$\varepsilon_{A/C} = \pm \frac{\sigma_C}{E} = \pm \frac{24.000}{2.1 \times 10^4} = \pm 1143 \times 10^{-6}$$

灵敏度:

$$S = K\varepsilon_{A/C} \times 10^3 = 2 \times 1143 \times 10^{-6} \times 10^3 = 2.286 \text{ mV} / \text{V}$$

b 边中点处最大剪应力:

$$\tau_{\max} = \frac{M_n}{W_n} = \frac{PH}{abh^2} = \frac{50 \times 7}{0.282 \times 10 \times 2.5^2} = 19.858 \text{ kg} / \text{mm}^2$$

h 边中点处最大剪应力:

$$\tau_1 = \nu\tau_{\max} = 0.745 \times 19.858 = 14.794 \text{ kg} / \text{mm}^2$$

弹性应变梁相对转角:

$$\varphi = \frac{M_n L}{GJ_n} = \frac{PHL}{G\beta bh^2} = \frac{50 \times 7 \times 5}{0.808 \times 10^4 \times 0.281 \times 10 \times 2.5^3} = 0.005$$

4 小量程薄壁悬臂梁称重传感器

当小量程称重传感器的额定载荷在3kg以内时,圆板式冲压加工的弹性元件结构已无法满足灵敏度和刚度要求,必须采用既平直又很薄的悬臂梁弹性元件,但悬臂梁的厚度不能无限制地减薄。如果悬臂梁的厚度为0.1mm,而电阻应变计的厚度为0.025mm,此时弹性元件的特性就与电阻应变计基底材料有关。电阻应变计的基底材料通常由环氧、酚醛、聚酰亚胺等合成树脂制成,其弹性模量随着环境温度的升高而急剧减小,使称重传感器的灵敏度增大而产生非线性误差,同时还会出现较大的零点温度漂移,零点温度补偿较困难。因此,制造薄壁悬臂梁称重传感器时,必须考虑电阻应变计基底材料和厚度的影响,即电阻应变计弹性模量的影响。一般薄壁悬臂梁弹性元件的应变值可按下列公式计算:

$$\varepsilon = \frac{\frac{M}{b}}{\frac{1}{2}(E_G h^2 - E_S H^2) - \frac{2}{3} \cdot \frac{E_G h^3 + E_S H^3}{E_G h^2 - E_S H^2} (E_G h + E_S H)}$$

式中: M ——薄壁悬臂梁粘贴电阻应变计处的弯矩;

b ——薄壁悬臂梁的宽度;

E_G ——电阻应变计的弹性模量;

E_S ——薄壁悬臂梁的弹性模量;

h ——电阻应变计的厚度;

H ——薄壁悬臂梁的厚度。

5 结语

尽管小量程圆板式双端固支梁、悬臂梁式称重传感器具有结构简单紧凑,外形低;应变梁与环形支承、加载点一体化,无端部效应影响;灵敏度与刚度结合好等特点。但其弹性应变梁窄而薄产生的弹性模量效应、温度效应和压力效应影响是必须解决的首要问题。其次平板式弹性元件结构本身也决定了电阻应变计粘贴位置不集中,给组桥走线、电路补偿与调整带来一定困难,特别是对防护密封技术与工艺要求很高。只有解决了防护与密封问题,小量程称重传感器才能稳定可靠的工作。

参考文献

- [1] ブリヂストンメツワ株式会社. 超薄型マルチフオースセンサ(超薄型多种量程称重传感器). 样本资料, 1992年.
- [2] 美国Reliance 电子公司. 与电子秤一体化的称重传感器. 样本资料, 1986年.
- [3] C. Rohrbach、J. Lexow(德国)著, 邹炳易译. 小型应变计式力传感器[R]. 第十届国际计量技术联合会力与质量计量会议论文选, 1986年.
- [4] 张功铭, 赵复真. 新型传感器及传感器检测新技术[M]. 中国计量出版社, 2006年10月.

作者简介

刘九卿(1937—),男,汉族,辽宁省海城市。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》。