

圆截工字形截面悬臂剪切梁称重传感器

□中国运载火箭技术研究院第七零二研究所 刘九卿

【摘要】本文介绍了连续累计自动衡器等经常采用的圆截工字形截面悬臂剪切梁称重传感器的结构特点、受力分析、力学模型与理论计算，通过对样件的试验测试，得出此理论计算方法，可以在同类产品结构设计中应用。

【关键词】称重传感器；弹性元件；圆截工字形截面；悬臂剪切梁；力学模型；理论计算

文献标识码：A 文章编号：1003-1870 (2025) 06-0041-06

Circular I-section Cantilever Shear Beam Load Cell

【Abstract】 This paper introduces the structural characteristics, stress analysis, mechanical model and theoretical calculation of the circular I-section cantilever shear beam load cell often used in continuous totalizing automatic weighing instruments, etc. Through the test of samples, it is concluded that this theoretical calculation method can be applied in the structural design of similar products.

【Keywords】 load cell; elastic element; circular I-section; cantilever shear beam; mechanical model; theoretical calculation

概述

随着数字化网络和智能化技术的快速发展，万物通过相互连接进行相互协作，数字化已成为各行业、企业必须面对的课题。数字化设计与生产、人工智能等已成为衡器行业的新机遇，可以说数字化服务越来越成为各行业称重计量的时代所需。近些年来，各工矿企业、物流公司、商贸部门为进一步提高工业自动化和管理现代化水平，都积极选用或扩大应用各种电子衡器及其配套产品。其中，国内应用较多的连续累计自动衡器（各种电子皮带秤等）、非连续累计自动衡器（通过料斗称重累计总重量）发展较快，需求量不断增加。这类电子衡器

多采用以下三种结构的悬臂梁称重传感器。其一是双孔平行结构如图1所示，为使称重传感器总体结构小巧、紧凑，一般都采用 $\phi 14\text{mm}$ 左右的圆孔，孔心距为16mm；其二是圆柱悬臂梁结构（也称为挠性棒结构）如图2所示，其特点是结构简单紧凑、刚度较大、容易加工出较高的尺寸和表面精度；其三是圆截工字形截面悬臂剪切梁结构，如图3所示。此种结构是在圆柱悬臂梁结构的基础上，在两边延母线长度方向对称地加工出两个长圆形盲孔，使其弹性元件的截面为圆截工字形，因而称其为圆截工字形截面悬臂剪切梁称重传感器。

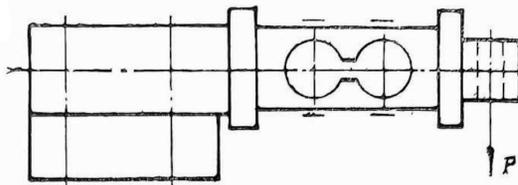


图1 双孔平行梁称重传感器

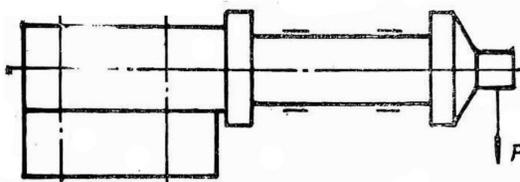


图2 圆柱悬臂梁称重传感器

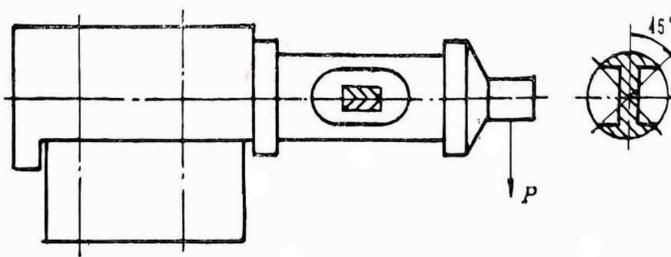


图3 圆截工字形截面悬臂剪切梁称重传感器

由图1、图2可以看出，这两种结构均为利用弯曲应力的正应力称重传感器，因为利用弯曲应力，由于两个粘贴电阻应变计截面的弯曲力矩不同，因而应变值也不相同，需要通过特殊工艺方法才能达到较高的准确度等级。图3所示，圆截工字形截面悬臂剪切梁结构的弹性元件，因为不利用沿梁长度变化的弯曲应力，而是利用工字形截面腹板上与中心轴成 45° 方向上的拉伸、压缩成双大小相等的主应力、主应变，不受弯曲力矩影响，因而不用采取特殊工艺就可以达到较高的准确度等级。其结构特点是，粘贴电阻应变计的应变区对端部载荷、侧向载荷、扭转载荷不敏感，可以达到较高的准确度等级，并可采用波纹管焊接密封及抽真空充氮气新工艺，工作可靠性高、长期稳定性好。特别适用于连续累计、较快速称重计量的电子衡器。

1 圆截工字形截面悬臂剪切梁称重传感器的结构与特点

圆截工字形截面悬臂剪切梁称重传感器通常与支撑块、悬臂端部关节轴承等配套使用，其安装承

载如图4所示。

圆截工字形截面悬臂剪切梁称重传感器的弹性元件是在圆柱悬臂梁的两侧，沿母线方向对称地加工出两个长圆盲孔，就形成了圆截工字梁称重传感器的应变区。结构简单紧凑、体积小重量轻，采用不锈钢波纹管焊接密封，长期稳定性好。根据圆截工字梁 $1/2$ 翼缘所对应的圆心角 α 不同，有 $\alpha=40^\circ$ 、 $\alpha=45^\circ$ 及 $\alpha=60^\circ$ 三种结构，目前国内外称重传感器制造企业采用较多的是 $\alpha=45^\circ$ 。两片双剪切电阻应变计对称地粘贴在圆截工字梁腹板两侧的中心轴线上，便可以测量出由剪切应力而产生的一对拉伸、压缩成双的主应力、主应变，这正是组成惠斯通电桥电路所需要的。此种结构的特点是：剪力沿悬臂梁的长度方向为一常量，使得弹性元件应变区受力单一，电阻应变计粘贴在应力分布比较均匀的应变区内，提高了固有线性抗偏心、侧向载荷能力。在此称重传感器的根部，根据悬臂部分承受力矩的大小，用一定数量的螺钉将称重传感器连同支撑块固定在承载底板或底座上。被称重量通过

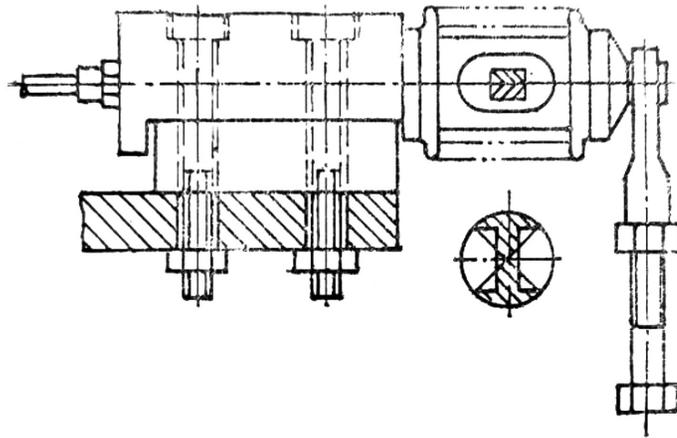


图4 圆截工字形截面悬臂剪切梁称重传感器安装承载图

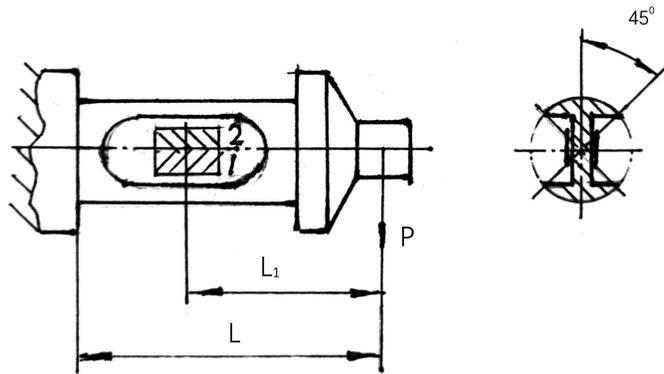


图5 圆截工字形截面悬臂剪切梁称重传感器力学模型

称重传感器端部连接的带有关节轴承的拉杆施加到弹性元件上。端部杆件关节轴承的特点是，强度高耐磨性好，防腐蚀润滑性能好，工作可靠，使用维护方便，可以承受颈向载荷和一定量的轴向载荷，其加力轴线可以左右偏摆 4° ，不影响称量结果，传递力矩准确，称重传感器准确度高、稳定性好。

2 圆截工字形截面悬臂剪切梁称重传感器的力学特性与理论计算

圆截工字形截面悬臂剪切梁称重传感器是典型的悬臂梁结构，在固定端除反力 N 外，还有平衡弯矩 PL 的固定端力矩 M_0 ，这是有两个未知量 P 和 M_0 的静定问题，其力学模型如图5所示。

现取 $1/2$ 翼缘弧长所对应的圆心角 $\alpha=45^\circ$ 的圆截工字梁进行计算，为求出应变区（粘贴双剪切电阻应变计的圆截工字梁腹板）的剪应力、剪应变、主应力、主应变，首先需要求出圆截工字形截面的

静矩和惯性矩。圆截工字形截面悬臂剪切梁弹性元件，其圆截工字形截面可以看成是由两个圆弓形翼缘和一个矩形截面腹板组成，其圆弓形翼缘截面及尺寸如图6所示，粘贴双剪切电阻应变计的矩形截面腹板及尺寸如图7所示。

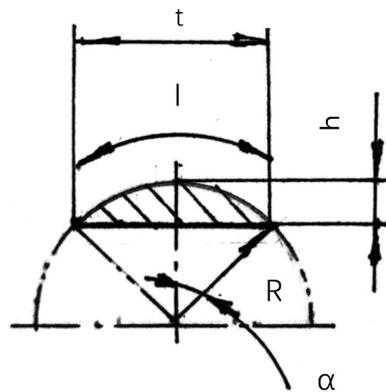


图6 圆截工字形截面翼缘尺寸图

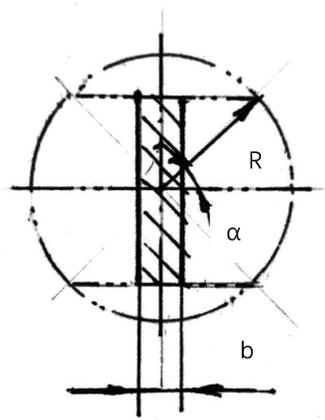


图7 圆截工字形截面腹板尺寸图

2.1 圆截工字形截面基本参数计算

(1) 圆弓形翼缘截面 (见图6) :

弓高 $h = R - R\cos\alpha = R\left(1 - \frac{\sqrt{2}}{2}\right)$

弦长 $t = 2 \cdot R\sin\alpha = \sqrt{2}R$

弧长 $l = \pi \frac{R}{2}$

面积 $A_1 = \frac{Rl - t(R-h)}{2}$

形心 $Z_1 = \frac{t^3}{12A} = \frac{t^3}{6[Rl - t(R-h)]}$

静矩 $S_1 = A_1 \cdot Z_1 = \frac{t^3}{12} = \frac{\sqrt{2}R^3}{6}$

惯性矩 $J_1 = \frac{\pi R^4}{8}$

(2) 矩形截面腹板 (见图7) :

面积 $A_2 = b \cdot R\cos\alpha = \frac{\sqrt{2}bR}{2}$

形心 $Z_2 = \frac{R\cos\alpha}{2} = \frac{bR^2}{4}$

惯性矩 $J_2 = \frac{b(2R\cos\alpha)^3}{12} = \frac{\sqrt{2}bR^3}{6}$

(3) 圆截工字形截面 (图5) :

静矩 $S = S_1 + S_2 = \frac{\sqrt{2}R^3}{6} + \frac{bR^3}{4}$

惯性矩 $J = J_1 + J_2 = \frac{\pi R^4}{8} + \frac{\sqrt{2}bR^3}{6}$

2.2 圆截工字形截面最大剪切应力、剪切应变及主应力、主应变计算

最大剪切应力、剪切应变:

$$\tau_{\max} = \frac{QS}{bj} = \frac{P\left(\frac{\sqrt{2}R^3}{6} + \frac{bR^2}{4}\right)}{b\left(\frac{2bR^3}{6} + \frac{\pi R^4}{8}\right)} = \frac{2P}{4\sqrt{2}b + 3\pi R} \left(\frac{2\sqrt{2}}{6} + \frac{3}{R}\right)$$

$$Y_{\max} = \frac{\tau_{\max}}{G} = \frac{4(1+\mu)P}{E(4\sqrt{2}b + 3\pi R)} \left(\frac{2\sqrt{2}}{b} + \frac{3}{R}\right)$$

与中性轴成45° 方向的最大主应力、主应变:

$$\sigma_{45^\circ} = \pm \tau_{\max} = \pm \frac{2P}{4\sqrt{2}b + 3\pi R} \left(\frac{2\sqrt{2}}{6} + \frac{3}{R}\right)$$

$$\varepsilon_{45^\circ} = \pm \frac{Y_{\max}}{2} = \pm \frac{2(1+\mu)P}{E(4\sqrt{2}b + 3\pi R)} \left(\frac{2\sqrt{2}}{b} + \frac{3}{R}\right)$$

称重传感器的输出灵敏度为:

$$S = \frac{2K(1+\mu)P}{E(4\sqrt{2}b + 3\pi R)} \left(\frac{2\sqrt{2}}{b} + \frac{3}{R}\right) \times 10^3 (\text{mV/V})$$

式中, K 为电阻应变计的灵敏系数。

2.3 圆截工字形截面的最大弯曲应力、弯曲应变计算

由材料力学知, 弯曲应力的大小与该点至中性轴的垂直距离成正比, 中性轴的上侧为拉应力、下侧为压应力。因为圆截工字形截面的中心轴为对称轴, 所以 $+\sigma_{\max} = -\sigma_{\max}$ 即:

$$\sigma_{\max} = \pm \frac{RM_1}{J} = \pm \frac{RPL}{J} = \pm \frac{24PL}{3\pi R^3 + 4\sqrt{2}bR^2}$$

圆截工字形截面剪切应力方向与剪力平行, 其大小沿截面宽度均匀分布, 沿截面高度呈抛物线变化。弯曲应力与离开中性轴的距离成正比, 其值在截面的上下边缘处为最大, 剪切应力与弯曲应力分布如图8所示。

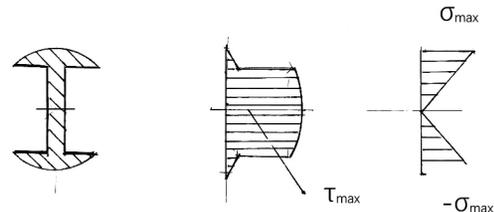


图8 圆截工字形截面剪切应力、弯曲应力分布图

2.4 圆截工字形截面悬臂剪切梁称重传感器固定端强度校核

由于圆截工字形截面悬臂剪切梁称重传感器的根部固定处为圆形截面, 此截面上同高度各点的剪应力汇交于一点, 其垂直分量沿截面宽度均匀分布, 沿截面高度按抛物线规律变化。其值为:

$$\tau_{\max} = \frac{4P}{3\pi R^2}$$

因为圆截工字形截面悬臂剪切梁称重传感器根部的最大剪切应力比应变区的最大剪切应力小很多, 所以只对根部的最大正应力进行强度校核即

可。最大正应力发生在称重传感器根部圆形截面的上、下边缘，其强度条件为：

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{w} = \frac{32PL}{\pi D^3} \leq [\sigma]$$

3 2000kg 圆截工字形截面悬臂剪切梁称重传感器理论计算与测试结果

现以P=2000kg 圆截工字形截面悬臂剪切梁称重传感器为例进行理论计算，其弹性元件（见图5）所用金属材料参数及圆截工字形截面尺寸如下：

（1）弹性元件金属材料：

中碳合金钢40CrNiMoA；强度极限 $\sigma_b=125\text{kg/mm}^2$ 屈服极限 $\sigma_s=113\text{kg/mm}^2$ ；弹性模量 $E=2.1 \times 10^4$

（2）弹性元件尺寸参数：

弹性元件半径 $R=17\text{mm}$ ；圆截工字形截面腹板厚度 $b=4\text{mm}$ ；1/2 翼缘弧长对应圆心角 $\alpha=45^\circ$ ；弹性元件根部到加载点距离 $L=65\text{mm}$ ；粘贴在应变区的双剪切电阻应变计到加载点的距离 $L_1=45\text{mm}$ 。

最大载荷 $P=2000\text{kg}$ 。

（3）剪切应力、剪切应变：

$$\tau_{\max} = \frac{2P}{4\sqrt{2}b + 3\pi R} \left(\frac{2\sqrt{2}}{6} + \frac{3}{R} \right) = \frac{2 \times 2000}{4\sqrt{2} \times 4 + 3\pi \times 17} \left(\frac{2\sqrt{2}}{6} + \frac{3}{17} \right) = 19.317\text{kg/mm}^2$$

$$\gamma_{\max} = \frac{\tau_{\max}}{G} = \frac{2(1+\mu)\tau_{\max}}{E} = \frac{2(1+0.3) \times 19.317}{2.1 \times 10^4} = 2392 \times 10^{-6}$$

（4）应变区 45° 方向主应力、主应变：

$$\sigma_{45^\circ} = \pm \tau_{\max} = \pm 19.317\text{kg/mm}^2$$

$$\varepsilon_{45^\circ} = \pm \frac{\gamma_{\max}}{2} = \pm \frac{2391 \times 10^{-6}}{2} = \pm 1196 \times 10^{-6}$$

（5）最大弯曲应力：

$$\sigma_{\max} = \pm \frac{24PL}{3\pi R^3 + 4\sqrt{2}bR^2} = \frac{24 \times 2000 \times 45}{3\pi \times 17^3 + 4\sqrt{2} \times 4 \times 17^2} = 40.876\text{kg/mm}^2$$

（6）根部最大剪切应力、弯曲应力：

$$\tau_{\max} = \frac{4P}{3\pi R^2} = \frac{4 \times 2000}{3\pi \times 17^2} = 2.937\text{kg/mm}^2$$

$$\sigma_{\max} = \frac{32PL}{\pi D^3} = \frac{32 \times 2000 \times 65}{\pi 34^3} = 33.690\text{kg/mm}^2$$

为了减小附加弯矩引起的力学干扰，两片双剪切电阻应变计应当反对称地粘贴在圆截工字形应变

梁腹板的两侧，并使双剪切电阻应变计中心线尽量与圆截工字梁的中性轴重合，双剪切电阻应变计粘贴位置如图5所示。样件试验测量得到的各片电阻应变计的应变值如下：

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= -1227 \times 10^{-6} & \varepsilon_4 &= -1324 \times 10^{-6} \\ \varepsilon_2 &= 1260 \times 10^{-6} & \varepsilon_3 &= 1318 \times 10^{-6} \end{aligned}$$

四片电阻应变计绝对值的平均值为： $\varepsilon_{\text{平均}}=1282 \times 10^{-6}$ ，理论计算与实际测量值的误差为：

$$\Delta = \frac{1282 \times 10^{-6} - 1196 \times 10^{-6}}{1282 \times 10^{-6}} \times 100\% = 6.7\%$$

实际测量绝对值的平均值 1282×10^{-6} 比理论计算值 $\varepsilon_{45^\circ} = 1196 \times 10^{-6}$ 大6.7%。由此不难看出，上述推导的理论计算公式是可以在同类称重传感器弹性元件结构设计与计算中应用。

4 圆截工字形截面悬臂剪切梁称重传感器在检测和使用中应注意的问题

圆截工字形截面悬臂剪切梁称重传感器在标准测力机上进行检测时，应当配备带有螺杆和游动砝码的承载底座，砝码可以沿螺杆左右移动。检测前首先要调整游动砝码的位置，使其与称重传感器固定端、支撑块、承力底板和固定螺钉等绕加载点产生的力矩相平衡，以保证获得较好的检测结果。称重传感器与检测承载底板及螺杆游动砝码安装、调整平衡如图9所示。

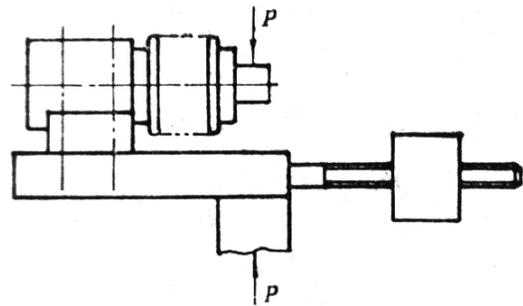


图9 称重传感器与检测承载底板及螺杆游动砝码安装图

根据电子秤的不同要求，圆截工字形截面悬臂剪切梁称重传感器的悬臂自由端可以设计成不同的结构形式。带有一个加载孔的自由端，有较大的灵活性，称重传感器可以承受拉向和压向载荷。当承受拉向载荷时，应在加载孔内安装一个关节轴承。当承受压向载荷时，就需要在加载孔安装一个球

座，通过钢球和压头施加载荷，其拉杠和压头结构示意图如图10所示。

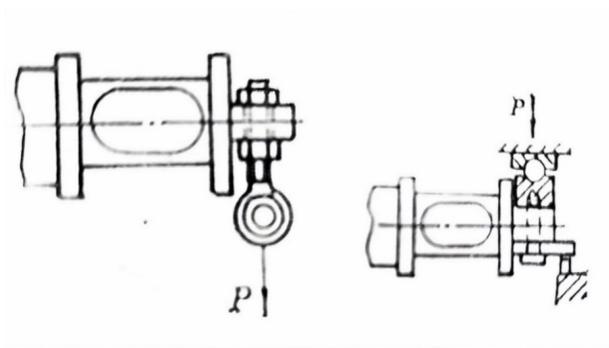


图10 称重传感器加载拉杠和压头结构示意图

当加荷拉杠较长或多个称重传感器并联组成称重系统时，为保证外加载荷通过称重传感器的加荷轴线，并消除横向力的影响，称重传感器的自由端可以设计成圆柱形，与安装在其上的关节轴承配套使用。关节轴承在称重传感器受载过程中可以自动调心对中，保证外加载荷通过称重传感器的加载轴线。试验测试表明，只要称重传感器加载线偏转不超过 4° ，就不会影响测量准确度。承载端带有关节轴承的圆截工字形截面悬臂剪切梁称重传感器正安装、反安装使用的示意图，如图11、图12所示。

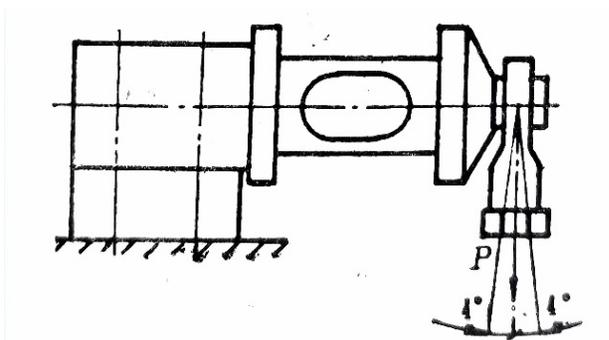


图11 圆截工字形截面悬臂剪切梁称重传感器正安装图

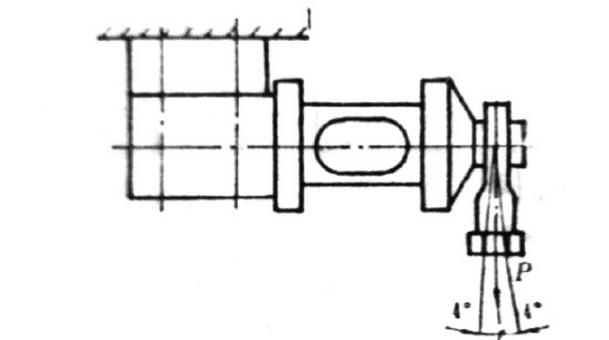


图12 圆截工字形截面悬臂剪切梁称重传感器反安装图

5 结语

圆截工字形截面悬臂剪切梁称重传感器是悬臂梁结构中比较常见的一种结构，其最大特点是结构简单、紧凑，悬臂梁结构无端部效应影响，准确度高，弹性元件几何形状为圆形，工艺性好，容易加工出较高的尺寸和形位精度。剪力沿梁长度均匀分布，双剪切电阻应变计粘贴在圆截工字形截面腹板上，只感受剪切应力、应变，同时得到很好的保护。可以正安装也可以反安装，可以应用钢球、球碗，也可以采用带关节轴承的拉杠施加外载荷，保证加力线对中良好，加载准确可靠。本文通过对圆截工字形截面悬臂剪切梁弹性元件的力学分析，建立力学模型和进行理论计算得出的计算公式是完全可行的，不仅保证了计算精度，而且也适用于相同结构各种规格的称重传感器。

参考文献

- [1] Rob Woodwatd, Strain Gage Technology Moves Forward-1, Digital Load Cell Gain Acceptance, Weighing and Measurement, Auaustr 01.
- [2] 胡增强. 材料力学, 中国农业机械出版社, 1983年10月.
- [3] 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, 2007年6月.

作者简介

刘九卿(1937—), 男、汉族、辽宁省沈阳市, 1960年毕业于吉林工业大学(现吉林大学)。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。