

# 中心剪切梁称重传感器的结构特点与理论计算

□中国运载火箭技术研究院第七零二研究所 刘九卿

【摘要】本文介绍了单个称重传感器组装较大台面电子平台秤时应用较多的中心剪切梁称重传感器的工作原理、结构特点，重点探讨了如何建立等截面和变截面中心剪切梁弹性元件的力学模型，利用结构力学刚架理论中的“强梁弱柱”分析方法对其进行受力分析与理论计算，推导出弹性元件中心剪切梁应变区的应力、应变计算公式，便于进行各种量程中心剪切梁称重传感器的设计与计算。

【关键词】中心剪切梁；称重传感器；电子平台秤；力学模型；受力分析；理论计算

文献标识码：A 文章编号：1003-1870（2024）07-0005-06

## 概述

为了克服多个称重传感器组装工业与商业电子平台秤时称重传感器数量多、秤的本体机械结构复杂、活动环节多容易磨损、不便于过载保护、总体成本较高等缺点，电子衡器与称重传感器制造企业合作，先后研制出利用一个中心剪切梁称重传感器支撑整个承载器的电子平台秤。其特点是，结构简单、紧凑、坚固，活动环节少，无磨损部位，便于过载保护，准确度高，成本低。因此在工业与商业电子平台秤领域得到迅速发展，许多称重传感器制造企业都拥有此种结构、各种规格的中心剪切梁称重传感器参与市场竞争，可以说中心剪切梁称重传

感器是在深入研究分析了各种平行梁弹性元件结构特点及弱点的基础上，为提高准确度和稳定性将两个平行梁弹性元件叠加，既保证了输出灵敏度，又增大了总体刚度，形成了一个新的品种——中心剪切梁称重传感器。例如日本久保田铁工株式会社（KUBOTA）最大称量为150kg的k II—A型及最大称量为600kg的k II—B型电子平台秤，其台面尺寸分别为505mm×355mm及700mm×550mm，就是采用单个箱式中心剪切梁称重传感器，中准确度等级3000分度，其箱式中心剪切梁称重传感器的结构简图，如图1所示。

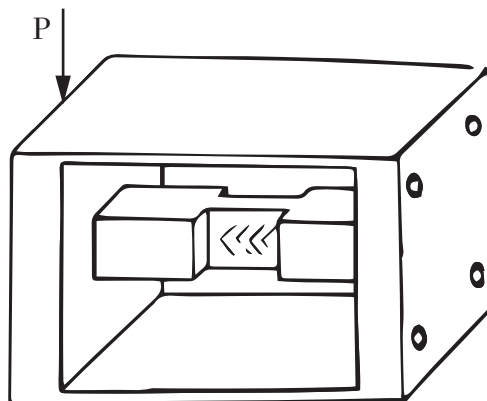


图1 箱式中心剪切梁称重传感器结构简图

国内外普通型或箱式结构的中心剪切梁称重传感器有100, 200, 300, 500, 600, 1000, 2000kg等多种规格。根据称量不同, 称重传感器的弹性元件可以采用高弹性模量的合金结构钢, 也可以采用低弹性模量的硬铝合金。本文重点介绍了中心剪切梁称重传感器的结构特点、工作原理, 建立力学模型对弹性元件进行受力分析与理论计算, 给出弹性元件应变区的应力、应变计算公式, 便于进行此类称重传感器的结构设计理论与计算。

### 1 中心剪切梁称重传感器的结构特点与工作原理

中心剪切梁称重传感器弹性元件是在中心梁结构的基础上形成的。为了提高平行梁称重传感器抗弯曲、抗扭转载荷的能力, 满足单个称重传感器组装较大台面电子平台秤的需要, 将其平行梁结构弹性元件粘贴电阻应变计的上、下平行梁, 变为柔

性梁, 增加一个平行的中心应变梁。此时上、下平行梁只起增加纵向、横向刚度的作用, 在载荷引入方向非常柔软, 不影响输出灵敏度, 而在横向和纵向却非常刚硬, 保证中心应变梁承受外载荷的稳定性。为满足单个称重传感器组装较大电子秤台面尺寸的需求, 再将中心平行梁结构弹性元件的上、下平行柔性梁增大宽度, 以提高抗扭转、抗弯曲能力。为保证单个电子平台秤的测量准确度和工作稳定性, 应尽量提高中心剪切梁称重传感器的抗扭转及抗弯曲刚度, 提高固有频率。为此, 必须改变中心平行梁的受力模式, 即变利用中心梁的弯曲应力为利用剪切应力, 这就形成了一个新型的中心剪切梁称重传感器。等截面、变截面中心剪切梁称重传感器的结构如图2、图3所示。

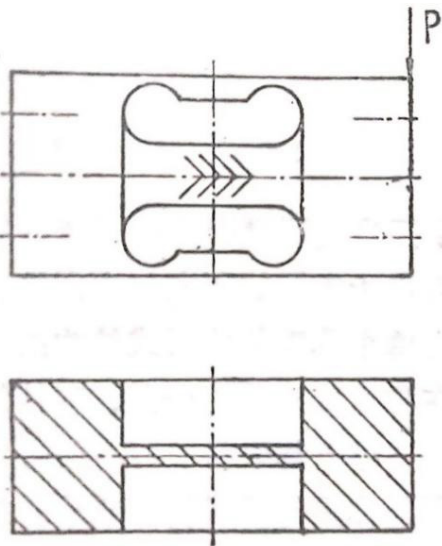


图2 等截面中心剪切梁称重传感器结构图

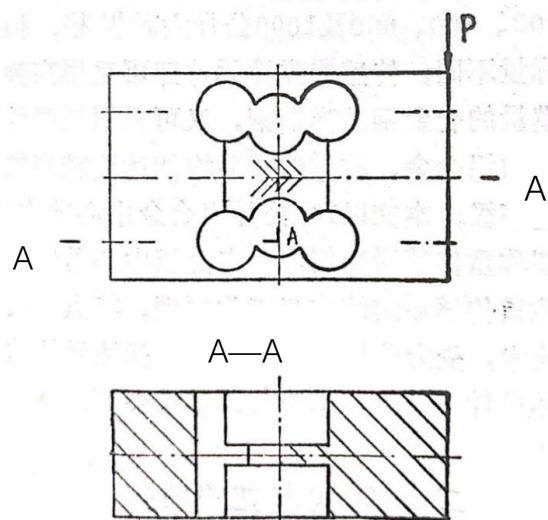


图3 变截面中心剪切梁称重传感器结构图

中心剪切梁称重传感器组装电子平台秤时, 分别与底座上的支撑和承载的台面支架相连接。当被称量物体放置在平台秤的台面时, 中心梁产生剪切应力。众所周知, 剪切应力是测量不出来的, 但它所产生的与中心梁轴线成 $45^\circ$ 方向相互垂直拉伸与压缩成双的主应力和主应变是可以测量的, 这正是组成惠斯通电桥电路所需要的。

中心剪切梁称重传感器具有如下特点:

(1) 由于电阻应变计粘贴在刚度较大的中心

剪切梁上, 受载后中心剪切梁的横截面不改变, 剪力沿着梁的长度方向均匀分布。所以电桥四个工作臂产生基本相同的电阻变化, 致使中心剪切梁称重传感器固有线性好, 滞后也小, 容易达到较高的准确度等级。而且动态响应快, 上升时间为千分之一秒。

(2) 因为增加了上、下平行梁的宽度, 使中心剪切梁得到最大限度的保护, 来自电子秤平台上任何方向的弯曲和扭转载荷, 都由上下平行柔性梁承

担而不传递给中心剪切梁，保证中心剪切梁只感受电子秤台面上的垂直载荷，确保测量的准确性。

(3) 与弯曲型同等量程的称重传感器相比，由于不利用中心梁的弯曲应力，而是利用中心梁的剪切应力，所以便于调整因为弯曲、扭转附加应力产生的误差。用比较小的中心剪切梁称重传感器，却能组装较大尺寸的电子平台秤，使其结构简单、紧凑、成本低，准确度和可靠性都有较大提高。

(4) 中心剪切梁称重传感器的内部空间较大，便于安装印刷电路板，有利于布线、组焊电桥、电路补偿、调整四角误差。

(5) 可以采用在中心剪切梁上直接涂覆防护密封涂层的新工艺，对粘贴在其上的电阻应变计进行

有效密封，不需要设计专用的保护外壳。此项防护密封措施不仅简化了防护密封工艺、降低了制造成本，而且使中心剪切梁弹性元件因为温度变化引起的膨胀或收缩率一致，降低了温度梯度误差。

中心剪切梁称重传感器与电子平台秤的秤架和台面装配时，首先是两端的安装力不能传递给中心剪切梁，其次是对称重传感器必须有超载保护措施，即必须设置一个或几个对电子秤任何位置所承受的冲击载荷，都能够起到有效保护作用的过载保护器，通过试验测试调整合适的过载保护间隙，以达到过载保护的目。中心剪切梁称重传感器组装电子平台秤过载保护装置结构简图，如图4所示。

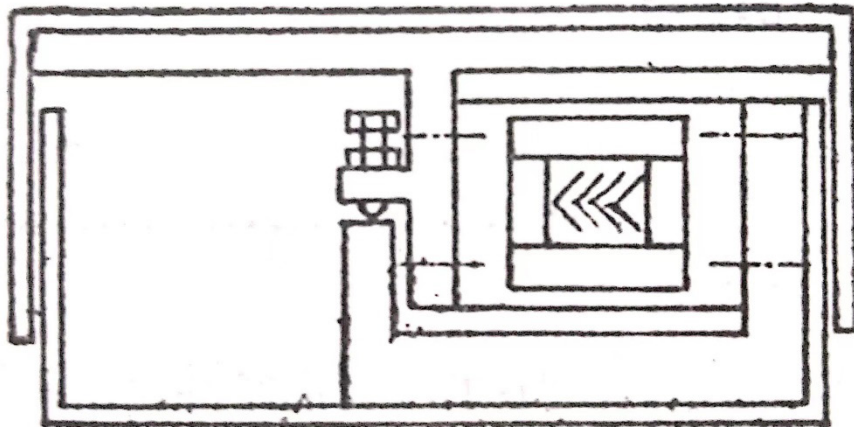


图4 中心剪切梁称重传感器过载保护器结构简图

## 2 中心剪切梁称重传感器的受力分析与理论计算

### 2.1 中心剪切梁弹性元件的力学模型

从中心梁结构称重传感器弹性元件的受力变形不难看出，它相当于两个平行梁结构弹性元件的组合，上、下平行梁为柔性梁，既增加弹性元件的横向、纵向刚度，又不影响承载方向的变形。中心梁为粘贴电阻应变计的应变梁，可以是承受弯曲应力的中心平行梁，也可以是承受剪切应力的中心剪切梁。

中心剪切梁称重传感器弹性元件由于两端垂直梁的刚度远远大于上、下平行梁和中心剪切应变梁的刚度，两个平行梁弹性元件如果一端固定，另一端作用一集中力，就与“结构力学”刚架理论中的“强梁弱柱”情况基本一致。因此，中心剪切梁弹性元件就可以简化为一端垂直梁固支，另一端垂直梁作用一个集中力 $P$ 的双跨度超静定刚架。中心剪切梁弹性元件结构简图，如图5所示，其力学模型如图6所示。

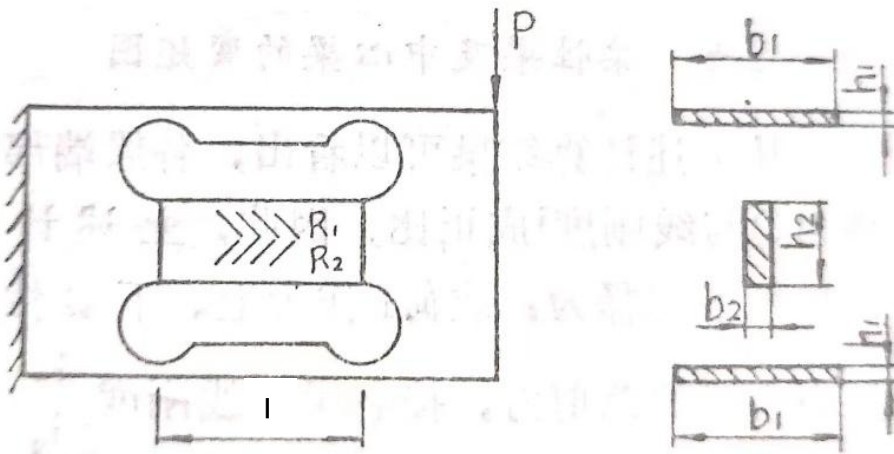


图5 中心剪切梁弹性元件结构简图

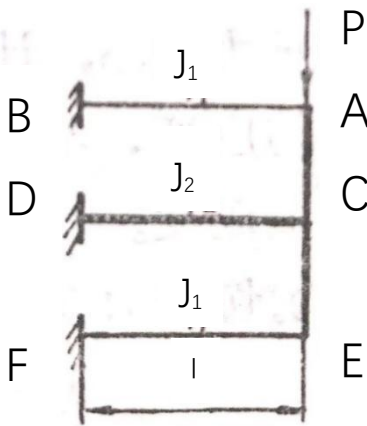


图6 中心剪切梁弹性元件力学模型图

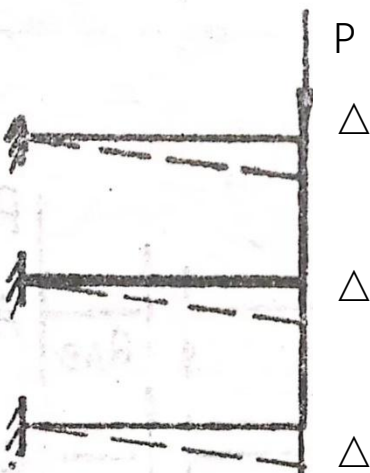


图7 基本未知量线位移简图

由结构力学知，在刚架计算中，为便于分析和简化计算，通常忽略轴力对变形的影响，即梁变形前的直线长度与变形后的曲线长度可以认为相等。在图6中，由于垂直梁ACE的刚度很大，水平柔性梁AB、EF及中心剪切梁CD互相平行，所以变形时垂直梁ACE只有移动。水平柔性梁AB、EF及中心剪切梁CD的垂直位移相等，只有一个独立线位移 $\Delta$ ，如图7所示。

## 2.2 上、下柔性梁和中心剪切梁的梁端弯矩和剪力计算

弹性元件各平行梁的线刚度为：

$$\text{上、下柔性梁 } i_1 = \frac{EJ_1}{l}$$

$$\text{中心剪切梁 } i_2 = \frac{EJ_2}{l} \quad (1)$$

式中： $E$ ——弹性元件金属材料的弹性模量；

$l$ ——上、下柔性梁、中心剪切梁的长度；

$J_1$ ——上、下柔性梁截面对中心轴的惯矩；

$J_2$ ——中心剪切梁截面对中心轴的惯矩。

弹性元件各平行梁的梁端弯矩为：

$$\text{上、下柔性梁 } M_{BA} = M_{FE} = -3i_1 \frac{\Delta}{l}$$

$$\text{中心剪切梁 } M_{DC} = -3i_2 \frac{\Delta}{l} \quad (2)$$

由每个平行梁的平衡求得梁端剪力为：

$$Q_{AB} = Q_{EF} = 3i_1 \frac{\Delta}{l^2}$$

$$Q_{CD} = 3i_2 \frac{\Delta}{l^2} \quad (3)$$

取弹性元件垂直梁ACE为隔离体，求位移法方程，如图8所示。

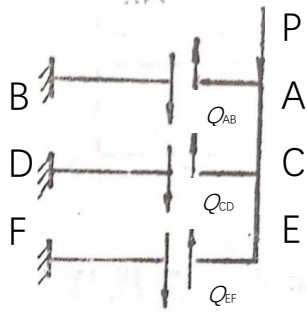


图8 中心剪切梁弹性元件垂直梁隔离体受力简图

由垂直方向的平衡条件 $\sum Y=0$ ，得：

$$P = (Q_{AB} + Q_{CD} + Q_{EF}) = 0 \quad (4)$$

将式(3)代入式(4)得：

$$P - \frac{3\Delta}{l^2}(2i_1 + i_2) = 0$$

$$\Delta = \frac{Pl^2}{3(2i_1 + i_2)} \quad (5)$$

将式(1)(5)代入式(2)得：

$$M_{BA} = M_{FE} = -3i_1 \frac{Pl^2}{3(2i_1 + i_2)} = -\frac{1}{\frac{i_2}{i_1} + 2} \cdot Pl$$

$$\text{令 } \frac{i_2}{i_1} = K,$$

$$\text{则 } M_{BA} = M_{FE} = -\frac{1}{K+2} \cdot Pl \quad (6)$$

$$M_{DC} = -3i_2 \frac{Pl^2}{3(2i_1 + i_2)} = -\frac{1}{1+2\frac{i_1}{i_2}} \cdot Pl = -\frac{K}{K+2} \cdot Pl \quad (7)$$

将式(1)(5)代入式(3)得：

$$Q_{AB} = Q_{EF} = 3i_1 \frac{Pl^2}{3(2i_1 + i_2)} = \frac{1}{K+2} P \quad (8)$$

$$Q_{CD} = 3i_2 \frac{Pl^2}{3(2i_1 + i_2)} = \frac{K}{K+2} P \quad (9)$$

上述各式中，中心剪切梁与上、下柔性平行梁的线刚度之比为：

$$K = \frac{i_2}{i_1} = \frac{EJ_2}{EJ_1} = \frac{J_2}{J_1} \quad (10)$$

根据平行梁端部弯矩或剪力可以画出上、下柔性平行梁及中心剪切梁的弯矩图，如图9所示。

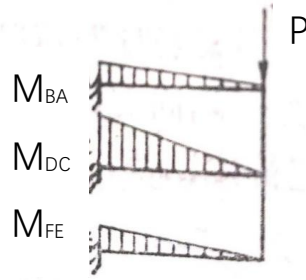


图9 上、下柔性平行梁及中心剪切梁的弯矩图

从上述计算结果可以得出，上、下柔性平行梁端部的剪力 $Q$ 与线刚度 $i$ 成正比。因此，上述计算结论可以解释为：载荷 $P$ 作用上、下柔性平行梁及中心剪切梁的总剪力，按梁的线刚度 $\frac{i_2}{i_1}$ 或截面刚度 $\frac{EJ_2}{EJ_1}$ 的比例分配给各梁。所以可根据中心剪切梁承受的剪力 $Q_{CD}$ ，计算出中心剪切梁的剪切应力及剪切应变以及与中心轴成 $45^\circ$ 方向的主应力及主应变。

### 2.3 中心剪切梁的剪切应力、应变及主应力、主应变计算

中心剪切梁多为矩形截面，其力学模型如图10所示。

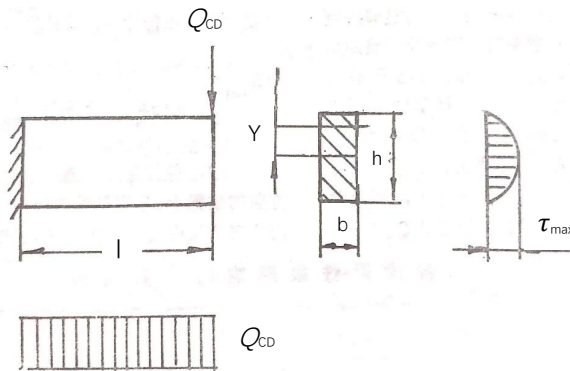


图10 中心剪切梁的力学模型图

剪切应力沿中心梁矩形截面高度上的分布是不均匀的，呈抛物线形变化。根据茹拉夫斯基剪应力理论，中心剪切梁的剪切应力为：

$$\tau = \frac{Q_{CD}S}{Jb} = \frac{Q}{2J} \left( \frac{h^2}{4} - Y^2 \right) \quad (11)$$

式中： $Q_{CD}$ ——中心剪切梁中性层CD的剪力；

$S$ ——中心剪切梁对中心轴的静矩；

$J$ ——中心剪切梁对中心轴的惯矩， $J = \frac{bh^3}{12}$ 。

当 $Y = \pm \frac{h}{2}$ 时，中心剪切梁上、下面的剪切应力等于零。

当 $Y=0$ 时，在中心剪切梁的中性面上剪切应力最大（正应力等于零），即

$$\tau_{max} = \frac{3Q_{CD}}{2bh} \quad (12)$$

根据剪切胡克定律 $\tau = G\gamma$ ，则最大剪切应变为：

$$\gamma_{max} = \frac{\tau_{max}}{G} = \frac{3(1+\mu)Q_{CD}}{bhE} \quad (13)$$

由弹性力学知，一个平面的应力状态为纯剪切时，与中心轴成 $45^\circ$ 方向上的相互垂直的主应力等于最大剪切应力，与主应力相对应的主应变等于最大剪切应变的1/2，即

$$\begin{aligned} \tau_1 \\ \tau_2 \end{aligned} = \pm \sigma_{45^\circ} = \tau_{max} = \frac{3Q_{CD}}{2bh} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \end{aligned} = \pm \varepsilon_{45^\circ} = \frac{1}{2} \gamma_{max} = \frac{3(1+\mu)Q_{CD}}{2bhE} \quad (15)$$

为了简化计算，也可以忽略上、下柔性梁对中心剪切应变梁受载的影响，即认为总剪力全部作用在中心剪切梁上，则式（14）（15）变为：

$$\sigma_{45^\circ} = \pm \frac{3P}{2bh} \quad (16)$$

$$\varepsilon_{45^\circ} = \pm \frac{3(1+\mu)P}{2bhE} \quad (17)$$

对于变截面中心剪切梁，其剪切截面的高度取剪切电阻应变计基长范围内的平均高度即可。

### 3 结语

普通中心剪切梁和箱式中心剪切梁称重传感器均具有结构简单、合理，机械加工及粘贴电阻应变计、组焊惠斯通电桥电路工艺性好，有利于组装各种电子平台秤，其准确度均可以达到中准确度等级3000分度。由于中心剪切梁与上、下柔性梁的线刚

度之比 $K$ 值较大，一般 $K \geq 50$ ，有的可大于1000。因此，按双跨度超静定钢架进行理论计算比较合理，弹性元件的总剪力（即外载荷 $P$ ）按上、下柔性梁与中心剪切梁的刚度比分配各梁。如果上、下柔性梁的刚度设计合理，只能影响3%左右的总剪力，因此可以忽略上、下柔性梁对中心应变剪切梁的影响，直接用总剪力代替中心剪切梁的剪力，进行理论计算即可，其计算精度为6%左右。对于变截面中心剪切梁弹性元件（图3），利用上述公式进行设计与计算时，剪切截面高度，取剪切电阻应变计基长范围内的平均高度即可，其计算精度在5%左右。因此，本文给出的各项公式对中心剪切梁称重传感器的设计与计算有一定的参考价值。

### 参考文献

- [1] Rob Woodwatd, Strain Gage Technology Moves Forward-1, Digital Load Cell Gain Acceptance, Weighing and Measurement, August 01.
- [2] 龙驭球. 结构力学——基本教程. 高等教育出版社, 2006年12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, 2006年.

### 作者简介

刘九卿（1937—），男，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。