

# 新型轮辐式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】**新型轮辐式称重传感器是在克服了传统轮辐式称重传感器机械加工难度大、效率低；作为应变梁的轮辐根部应力集中系数大、滞后误差难以控制等缺点而发展起来的新型结构。本文在分析传统轮辐式称重传感器结构弱点的基础上，重点介绍了新型轮辐式称重传感器的结构与特点、力学分析与建立力学模型对弹性元件进行理论计算，并分析了作为整体结构弹性元件的轮箍、轮毂、轮辐之间的力学关系，给出了设计要点和尺寸选择原则。

**【关键词】**称重传感器；新型轮辐式结构；轮毂；轮辐；轮箍；弹性元件；力学模型

文献标识码：B 文章编号：1003-1870 (2024) 01-0005-06

## 概述

轮辐式称重传感器，顾名思义像一个车轮，轮辐在轮毂与轮箍之间成对的对称分布，以4个轮辐居多，量程大多为1t~100t。它具有高度低、稳定性好；抗偏心及侧向载荷能力强；线性和重复性好。弹性元件为一对称的整体结构，其热膨胀在各方向上基本相同且温度系数低。设计上下环形膜片，即可实现焊接密封，长期稳定性好。通过轮毂与支撑底面0.2mm左右的过载保护间隙，过载保护能力可达300%等特点。在20世纪70年代就受到各国电子衡器制造厂家的关注，也是选择比较多的一种结构类

型。由于传统轮辐式弹性元件在形成多对轮辐的机械加工过程中需要使用电火花线切割技术与装备，增加了工艺难度，生产效率低、成本高。另外，轮毂与轮箍的刚度设计不当，称重传感器的滞后误差较大且不好控制。

为了克服传统轮辐式称重传感器上述缺点，改进机械加工方法，提高制造工艺性，降低生产成本，美国interface公司对传统轮辐式弹性元件结构进行了力学分析，改进了轮辐应变区的形成方法，用精密钻孔工艺取代电火花线切割加工工艺形成轮辐，不仅提高了工作效率，而且较大地提高了轮辐

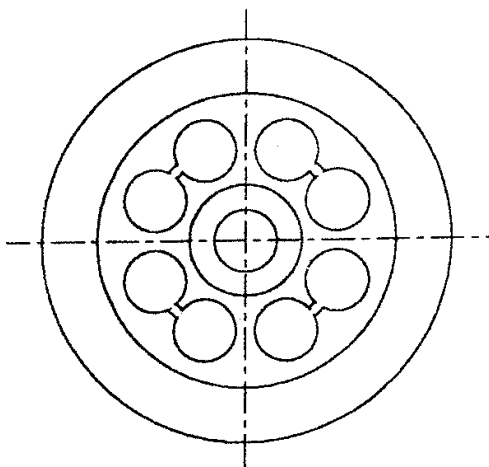


图1 双孔形成的轮辐式称重传感器

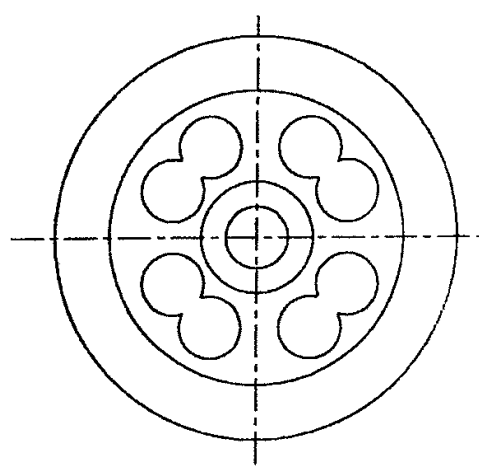


图2 双连孔形成的轮辐式称重传感器

尺寸精度和表面光洁度。实际测量结果证明，由于轮辐是由精密钻孔工艺形成的，不仅结构对称性高，而且增大了轮辐两端的刚度，提高了称重传感器的线性度，减少了滞后误差。在新型轮辐式称重传感器的机械加工工艺中，是在整体型弹性元件结构的同心圆上，采用精密钻孔对称加工出四对双孔或双连孔，使其形成四个轮辐（即两根应变梁）。此时粘贴单剪切电阻应变计的轮辐即成为变截面的应变梁，两端根部刚度大，保证中间应变区受载后为纯剪切应力状态，提高了应变区剪切应变的稳定性。如果是采用双孔形成的轮辐，还需要将双孔的孔壁切开使其成为双连孔。双孔和双连孔形成的新型轮辐式称重传感器，其轮辐形成示意图如图1、图2所示。

美国interface公司的上述几点改进，克服了传统轮辐式称重传感器的固有缺点。也可以说是通过精

密钻孔工艺形成的轮辐，变传统轮辐式弹性元件轮辐根部刚度较小的缺点为刚度较大的优点，从而提高了轮辐式称重传感器的综合性能指标。

### 1 新型轮辐式称重传感器的结构与特点

新型轮辐式称重传感器同传统轮辐式称重传感器一样，也是由轮毂、轮箍和轮辐组成。所不同的是，新型轮辐式称重传感器的轮辐是由4个对称的双连孔形成，为了增加轮辐根部刚度，将轮辐的上下表面加工出对称的圆弧形，使轮辐成为对称的变截面应变梁。由于增大了轮辐的根部刚度，提高了轮辐的应变稳定性，从而改善了力学性能和长期稳定性。为了提高新型轮辐式称重传感器的线性度和滞后性能，在轮箍上对称地加工出8个通孔，用8个螺丝钉将轮辐式弹性元件固定在与直径相同且有足够刚度的底板上。美国interface公司新型轮辐式称重传感器的结构如图3所示。

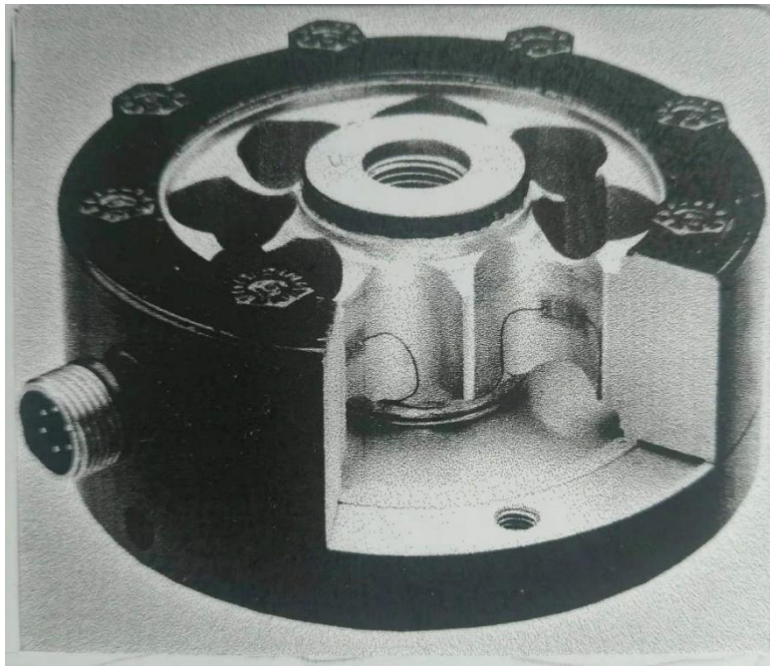


图3 新型轮辐式称重传感器结构图

新型轮辐式称重传感器具有如下特点：

- (1) 具有很好的工作特性；
- (2) 固有频率高；
- (3) 输出灵敏度较高；
- (4) 优越的结构对称性；
- (5) 抗偏心 and 侧向载荷能力强；

(6) 长期稳定性好；

(7) 蠕变误差小。

如果在加厚的底板中心加工出与轮毂螺纹孔同心、同尺寸的内螺纹，可以扩

大应用范围，实现拉向载荷测量或同时进行拉向、压向载荷的双向测量。

与传统轮辐式称重传感器结构相比，新型轮辐式称重传感器的最大改进点是：

(1) 改变了机械加工方法，利用钻、铣等切削加工工艺代替复杂费时的线切割加工工艺，不仅提高了工作效率，而且保证了尺寸和表面精度，为后续轮辐应变区的表面处理和粘贴剪切型电阻应变计提供了较好的工艺条件。

(2) 由于利用钻、铣等切削加工工艺，使得轮辐（实为两端固支应变梁）的根部上下、左右均为圆弧结构，增大了根部刚度，减少了滞后误差。因为在压向载荷作用下，轮毂下沉带动轮辐做近似平行四边形的变形，而使两对（四根）轮辐及与它连接的那部分轮箍向外突出变形，从而产生了向外移动的力矩。轮箍和轮毂的刚度越大，向外和向内变形的位移量越小，底部摩擦的作用时间就越短，阻滞轮辐恢复原始状态的时间就越短，滞后误差就越小。

(3) 从力学角度分析，由于增大了轮毂与轮箍根部的刚度，因此轮辐可以看成是嵌入轮毂与轮箍之中，在外载荷作用下不能自由转动即转角为零，但在剪力作用下轮辐产生变形，故其挠度不为零，为建立科学合理的力学模型创造了条件。

## 2 新型轮辐式称重传感器的力学模型与理论计算

新型轮辐式称重传感器由承受并传递载荷的轮毂、环向承受载荷的轮箍和两对或称为四根轮辐组成。轮毂受到外力作用后，在每根轮辐中央产生拉压成双的主应力、主应变，单剪切电阻应变计就粘贴在每根轮辐中心的两面，测量剪切应变，由于电阻应变计敏感栅粘贴方向不同而产生大小相等方向相反的应变值，完全符合组成惠斯通电桥电路的条件。其单剪切电阻应变计粘贴位置示意图如图4所示。

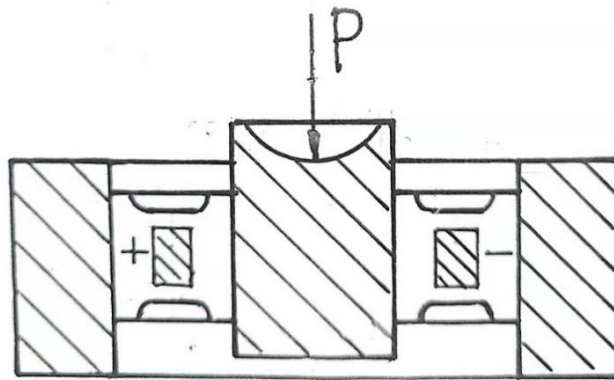


图4 新型轮辐式称重传感器单剪切电阻应变计粘贴位置图

为了使轮辐产生剪切应力，必须满足两个条件：

(1) 轮辐的长度 $L$ 与截面的高度 $h$ 之比应尽量小，一般为 $L/h \leq 1$ 。

(2) 轮毂与轮箍为刚性结构，受载后不产生明显的变形，因此轮辐可以看成是嵌入轮毂与轮箍之中，在外载荷作用下不能自由转动，即转角为零， $\theta_A = \theta_B = 0$ 。但在剪力作用下，轮辐产生变形，故其

挠度不为零， $f_B \neq 0$ 。

由于新型轮辐式弹性元件结构对称，分析一对轮辐的受力状态即可。为了计算方便，先将轮辐简化为中央受 $P/2$ 集中载荷作用的双端固支梁，之后再将其简化为A端固支，B端受集中载荷 $P/4$ 和力偶的力矩为 $M_B$ 作用的悬臂梁，且B处满足 $\theta_B = 0$ ，其力学模型如图5所示。

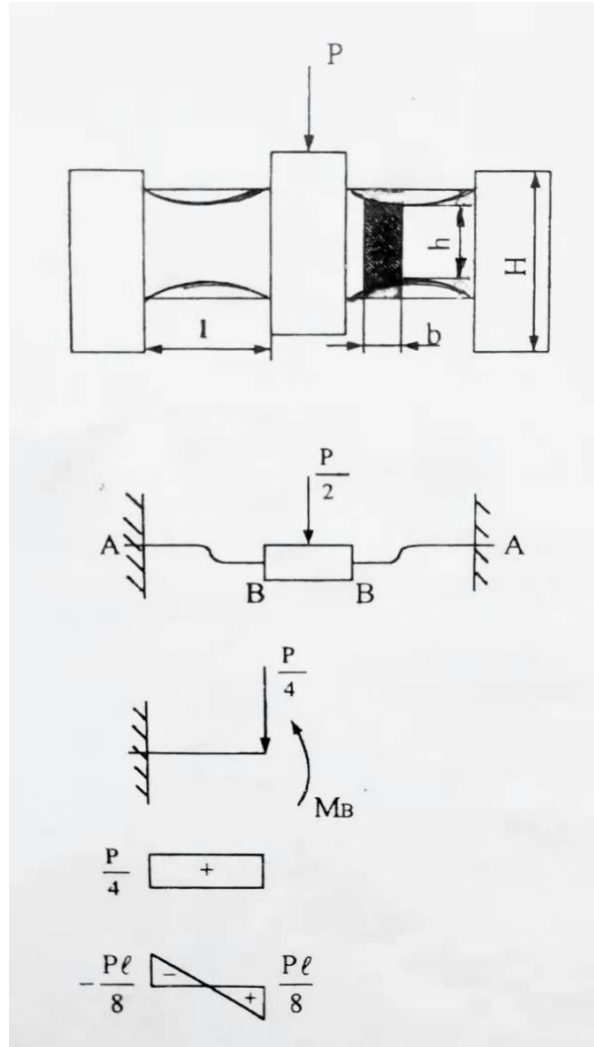


图5 新型轮辐式称重传感器的力学模型

## 2.1 弯矩计算

在距B端为X的任意截面上的弯矩 $M_x$ 为：

$$M_x = M_B - \frac{P}{4}X \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \theta_B &= \frac{1}{EJ} \int_0^l M_x M_0 dx = \frac{1}{EJ} \int_0^l \left( M_B - \frac{P}{4}X \right) (+1) dx = \frac{1}{EJ} \left( M_B X - \frac{P}{8} X^2 \right)_0^l \\ &= \frac{1}{EJ} \left( M_B L - \frac{P}{8} L^2 \right) \end{aligned}$$

因为  $\theta_0=0$  ,  $\frac{1}{EJ} \neq 0$

所以  $M_B L - \frac{P}{8} L^2 = 0$

$$M_B = \frac{PL}{8} \quad (2)$$

根据结构力学的单位载荷法，在B点加一单位力

偶，在X截面产生的弯矩为：

$M_0=1$ ，则

$$M_A = M_B - \frac{PL}{4} = -\frac{PL}{8} \quad (3)$$

## 2.2 弯曲应力、应变计算

A、B处弯矩最大，其最大弯曲应力、应变为：

$$\sigma_{\max} = \frac{M_B}{W} = \frac{\frac{PL}{8}}{\frac{bh^2}{6}} = \frac{3}{4} \cdot \frac{PL}{bh^2} \quad (4)$$

$$\varepsilon_{\max} = \frac{\sigma_{\max}}{E} = \frac{3}{4} \cdot \frac{PL}{bh^2E} \quad (5)$$

### 2.3 中心轮毂处的挠度计算

按双端固支单跨度梁进行计算，轮毂处的挠度为：

$$f_B = \frac{P(2L)^3}{192EJ} = \frac{PL^3}{4Eb^3h^3} \quad (6)$$

### 2.4 轮辐应变区的剪切应力、应变计算

轮辐上的剪力Q，沿轮辐长度为一常量，即：

$$Q = \frac{P}{4} \quad (7)$$

根据茹拉夫斯基公式，剪切应力为：

$$\tau = \frac{QS}{bj} \quad (8)$$

式中：S——轮辐中性轴以上面积的静矩，如沿截面高度的坐标为Y，则

$$S = \int_y^{\frac{h}{2}} b \cdot Y dy$$

J——轮辐截面的惯性矩， $J = \frac{bh^3}{12}$

将惯性矩、静矩代入(8)式，其剪应力为：

$$\tau = \frac{12Q}{bh^3} \int_y^{\frac{h}{2}} b \cdot Y dy = \frac{12Q}{bh^2} \left[ \frac{Y^2}{2} \right]_y^{\frac{h}{2}} = \frac{12Q}{bh^3} \left( \frac{h^2}{8} - \frac{Y^2}{2} \right) \quad (9)$$

在Y=0点，剪应力 $\tau$ 最大，即

$$\tau_{\max} = \frac{3}{2} \cdot \frac{Q}{bh} = \frac{3}{2} \tau_{\text{平均}} \quad (10)$$

将 $Q = \frac{P}{4}$ 代入上式，则

$$\tau_{\max} = \frac{3}{8} \cdot \frac{P}{bh} \quad (11)$$

$$\gamma_{\max} = \frac{\tau_{\max}}{G} = \frac{3}{4} \cdot \frac{(1+\mu)P}{bhE} \quad (12)$$

式中  $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$

### 2.5 轮辐应变区45°方向主应力、主应变计算

因为轮辐应变区的平面应力状态为纯剪切，由弹性力学知一个平面应力状态为纯剪切时，其45°方向主应力等于最大剪切应力，45°方向主应变等于1/2最大剪应变，即：

$$\sigma_{\pm 45^\circ} = \pm \tau_{\max} = \pm \frac{3}{8} \cdot \frac{P}{bh} \quad (13)$$

$$\varepsilon_{45^\circ} = \pm \frac{\gamma_{\max}}{2} = \pm \frac{3}{8} \cdot \frac{(1+\mu)P}{bhE} \quad (14)$$

### 2.6 输出灵敏度计算

一般都按照日本共和电业株式会社渡道理先生推导的公式进行计算，轮辐式称重传感器的输出电压为：

$$U_0 = \frac{3P}{16hbG} \left( 1 - \frac{L^2+W^2}{6h^2} \right) KU_i \quad (15)$$

式中：P——额定载荷；

b——轮辐宽度；

h——轮辐高度；

G——材料的剪切弹性模量；

K——电阻应变计灵敏系数；

L——电阻应变计敏感栅的基长；

W——电阻应变计敏感栅的基宽；

$U_i$ ——输入电压。

轮辐式称重传感器的输出灵敏度S为：

$$S = \frac{U_0}{U_i} = \frac{3PK}{16hbG} \left( 1 - \frac{L^2+W^2}{6h^2} \right) \quad (16)$$

由于新型轮辐式称重传感器的轮辐是通过精密加工的双孔或双连孔而形成的，实际上是变截面应变梁。为了简化计算，将其力学模型简化为等截面梁进行设计与计算，必然会产生一定的计算误差。此问题可以通过新型轮辐式弹性元件试验件的试验测试结果，求出修正系数再进行设计与计算，即可得到比较准确的计算结果。

### 3 新型轮辐式称重传感器的设计原则

电阻应变式称重传感器的主要设计原则是：应变区受力单一且应力分布均匀，不允许有高于应变区的其他应力点；承载边界及安装力不影响应变区应力分布；粘贴电阻应变计处应该尽量开敞，便于粘贴作业和防护密封；具有较好的抗偏心载荷和侧向载荷能力等等。新型轮辐式称重传感器除遵循上述设计原则外，还应该根据自身结构特点、设计载荷要求和工作条件，确定轮毂直径、轮箍内、外圆的直径和是否需要增加底部加强板，确保有较小的滞后误差。根据机械强度和灵敏度要求以及轮辐的最大挠度，确定轮辐截面尺寸和轮辐长度，特别要保证轮毂和轮箍具有足够大的刚度。因为轮辐式弹性元件在承受压向载荷时，轮毂下沉带动轮辐做近似平行四边形的变形，而使两对（四根）轮辐及与它连接的那部分轮箍向外突出变形，从而产生了向外

移动的力矩。与此同时，使每两根轮辐形成的90°夹角中间的轮箍向内凹陷变形，产生了向内的移动力矩。当外加载荷减小时，由于底部摩擦力的存在，轮箍向外和向内移动的力矩与移回时的力矩不同，阻滞了轮辐上应变的恢复而产生滞后。轮箍的刚度越差，向外和向内变形的位移量越大，底部摩擦的作用时间越长，阻滞轮辐式弹性元件恢复原始状态的时间就越长，滞后误差就越大，反之，滞后误差就越小。

由上述分析可知，轮箍变形的大小取决于轮箍的刚度。在相同的外载荷作用下，轮箍的刚度大，变形小，底部摩擦作用时间短，滞后误差就小。反之，轮箍的刚度小、变形大，底部摩擦作用时间长，滞后误差就大。因此，轮箍一定要有足够的刚度，对于较大容量的轮辐式称重传感器尤其重要。

轮辐的截面尺寸应该按照剪切强度条件进行计算，剪切应力的强度条件是：

$$\tau_{\max} \leq [\tau] \quad (17)$$

根据第四强度理论，有

$$[\tau] = 0.6[\sigma] \quad (18)$$

$$\text{取 } [\sigma] = \frac{1}{3}\sigma_s \quad (19)$$

将(11)(18)(19)式代入(17)式中，得

$$\frac{3}{8} \cdot \frac{P}{bh} \leq 0.6 \times \frac{1}{3}\sigma_s$$

$$\text{则 } bh \geq 1.875 \frac{P}{\sigma_s} \quad (20)$$

一般取  $h = (2.5 \sim 3)b$

若取  $h = 2.5b$

$$\text{则 } b \geq 0.866 \sqrt{\frac{P}{\sigma_s}} \quad (21)$$

轮辐的长度 $l$ ，在满足粘贴电阻应变计要求的前提下应尽量的小一些，以保证轮辐有足够的刚度和处于纯剪切应力状态。一般取 $\frac{l}{h} \leq 1$ 。

#### 4 结语

从优化称重传感器弹性元件结构，取得合理的力学性能和应变区比较理想的应力分布入手进行优化升级，是提高称重传感器测量准确度和长期稳定性的有效途径。新型轮辐式称重传感器克服了传统轮辐式称重传感器机械加工难度大、效率低，作

为应变梁的轮辐根部应力集中系数大、滞后误差难以控制等缺点的基础上发展起来的，实现了在保留传统式结构优点的基础上又增加了新特点的设计理念。改进后的新型轮辐式称重传感器，以其优越的结构对称性和较强的抗偏心载荷和侧向载荷能力，使其具有输出灵敏度和固有频率高，蠕变和滞后误差小，测量准确度高和长期稳定性好等特点。随着压头、底座或基板的改进和采用上下环形膜片焊接密封，正以其组装电子秤重心低，承载器稳定性好、复位快，测量准确度高，长期稳定性好等特点，为较大型电子平台秤、电子汽车衡、静动态电子轻轨衡和轨道衡所选用。

#### 参考文献

- [1] 美国Interface公司, All Low Profile Load Cells Are Not Created Equal.2012年产品样本资料.
- [2] The low profile load cell in weighing systems, F.L.Sohulte,<Advanoos in Instrumentation,Vol.26,Part4.
- [3] 渡道理. ひすみケ——シとその应用(改定版). 日刊工业新闻社, 1977年.
- [4] 北京钢铁学院压力加工教研室. 电阻应变式称重和测力传感器的新发展——车轮式传感器(切应力传感器), 应力应变测量计算交流会资料, 1988年.
- [5] H.M. 别辽耶夫. 材料力学(上册), 高等教育出版社, 1956年.
- [6] 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12月.

#### 作者简介

刘九卿(1937—), 男, 汉族, 1960年毕业于吉林工业大学。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140多篇。