

---

# 轮辐式称重传感器的滞后误差分析

中国运载火箭技术研究院第七零二研究所 刘九卿

**【摘要】** 本文介绍了轮辐式称重传感器的结构和应用特点、分析了由轮毂、轮箍和轮辐组成弹性元件的受力特点，推导出应力、应变等理论计算公式。在探讨影响称重传感器滞后误差各种因素的基础上，重点分析了轮辐式称重传感器滞后误差的产生原因和控制方法。

**【关键词】** 称重传感器；弹性元件；电阻应变计；轮辐；轮毂；轮箍；滞后误差

## 一、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称分布，多为 4、6、8 个。它具有高度低，稳定性好；抗偏心载荷、侧向载荷能力强；线性和重复性好；过载能力强，通过控制轮毂与支撑底面之间的间隙，过载能力可达 300%以上；弹性元件为一对称的整体结构，其各方向的热膨胀一致性好，温度系数低；弹性元件结构便于实现上、下圆膜片焊接密封，密封等级可达 IP68。轮辐式称重传感器的主要缺点是滞后误差较大，需要通过结构设计和制造工艺加以改善。轮辐式称重传感器弹性元件结构和单剪切电阻应变计粘贴位置如图 1 所示。

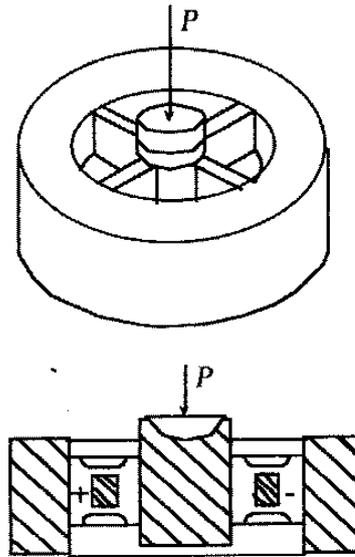


图 1 轮辐式弹性元件结构和电阻应变计粘贴位置

称重传感器的滞后误差通常定义为：对同一外载荷值，称重传感器进程（输入量增大）与回程（输入量减小）输出测量值之差。也就是说，对应同一大小的输入信号，称重传感器正、反行程的输出信号的大小却不相等，这就是滞后误差。大多数称重传感器的滞后误差回线通常为雪茄形，回线的宽度由所加载荷循环的幅度决定。测量滞后时，总是存在蠕变和蠕变恢复所产生的某些影响，因此要求滞后试验应在很短的时间内完成。

称重传感器滞后误差与弹性元件的结构和热处理工艺、电阻应变计基底和应变胶粘剂层的厚度有较大关系，归纳起来影响滞后误差的主要因素有：

(1) 弹性元件承载面与下压垫接触面设计不合理，主要是接触面积过大，下压垫材料摩擦系数大等。当弹性元件受载时，底面必然产生一个向外移动的力矩，在卸掉载荷时由于底面摩擦力矩存在，使底面向回移动的力矩小于变形时向外移动的力矩，阻滞了弹性元件变形的恢复而产生滞后误差。

(2) 弹性元件应变区与支承边界设计不合理，固有滞后大。例如双剪梁型弹性元件与底座接触面的滑动是产生滞后误差的重要原因。在加、卸载过程中，

---

双剪梁型弹性元件与底座滑动方向相反，因此作用在弹性元件上的摩擦力方向也相反，正是此摩擦力造成应变区剪应力变化。接触面摩擦系数大，随着载荷的增加滞后的绝对值由小变大。盲孔中心到弹性元件端面的距离太小，底摩擦力对应变区影响也较大。

(3) 机械加工形位公差的影响突出的表现在圆环式、板环式弹性元件上，当两端加载螺纹不同心时，真正通过弹性元件的载荷值与计量轴线偏 $\alpha$ 角度，随着载荷的增加， $\alpha$ 夹角逐渐变小，有效计量载荷不断加大，使输出呈递增的抛物线。卸载后各连接件未恢复到初始位置而产生滞后误差。

(4) 称重传感器弹性元件上的保护外壳、密封膜片设计不合理，有不正确接触或承受一定应力，都会产生阻滞弹性元件变形恢复的力或力矩，而产生滞后误差。

(5) 弹性元件金属材料或热处理工艺选择不当，致使金属材料本身的弹性滞后较大。例如应用最为广泛的中碳合金钢 40CrNiM0A，其弹性滞后与其微观组织有关，不同的回火温度得到不同的金相组织，有不同的弹性滞后，其值最大可达 0.11%。

(6) 应变式称重传感器的原理和制造工艺决定了其传感元件电阻应变计是用环氧树脂等应变胶粘剂粘贴在弹性元件上，尽管为了提高应变胶粘剂的剪切强度，胶粘剂层已经非常薄了，但是弹性元件受载后还会产生蠕变和滞后误差。其原因是弹性元件表面应变传递给应变胶粘剂胶层和电阻应变计基底时，产生较大剪应力，使其黏弹性减弱出现黏滞流动（电阻应变计基底与胶层之间发生滑动）效应，称为黏弹性后效的影响。

轮辐式称重传感器的滞后误差基本符合上述规律，由于独特的轮毂、轮辐、轮箍形成的弹性元件结构，滞后误差又有其特殊性，这就是本文讨论的主要问题。

## 二、轮辐式称重传感器力学分析及组成惠斯通电桥的方法

一般轮辐式称重传感器是由承受并传递载荷的轮毂、环向承载的轮箍和两对（或称为四根）轮辐组成。应变区为每根轮辐的中央，利用切应力产生的与中心轴成  $45^\circ$  方向拉、压成双的主应力、主应变，通过粘贴在其上的单剪切电阻应变计组成惠斯通电桥电路，完成称重计量任务。为了使轮辐产生切应力，必须满足两个条件：其一矩形截面轮辐的长度  $l$  与高度  $h$  之比应尽量小，一般  $l/h \leq 1$ ；其二轮毂与轮箍尽量设计为刚性结构，要求在外载荷的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， $f_B \neq 0$ 。

现从轮辐式称重传感器弹性元件中取一对轮辐分析其受力状态，每一对轮辐可简化为中央受一集中载荷  $P/2$  作用的双端固支梁。为了简化理论计算，再将其简化为 A 端固支，B 端受一集中载荷  $P/4$  和—力矩为  $M_B$  作用的悬臂梁，且悬臂梁的 B 处在受载后不能自由转动，即满足  $\theta_B = 0$ 。轮辐式称重传感器弹性元件，其中一对轮辐受载状态的力学模型如图 2 所示。

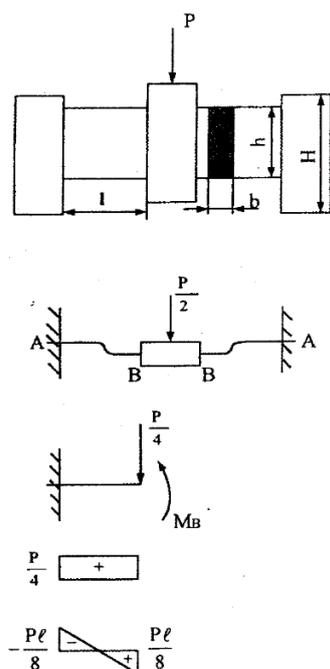


图 2 轮辐式称重传感器的力学模型

---

根据力学模型，经推导轮辐式称重传感器弹性元件各项计算公式如下：

1. 弯曲力矩

$$M_A = -\frac{PL}{8} M_B = \frac{PL}{8}$$

2. 弯曲应力、应变

$$\sigma_{max} = \frac{3PL}{4bh^2} \varepsilon_{max} = \frac{3PL}{4bh^2 E}$$

3. 中心轮毂处的挠度

按双端固支单跨度梁进行计算，轮毂处的挠度为：

$$f_B = \frac{\frac{P}{2}(2l)^3}{192EJ} = \frac{Pl^3}{48Ebh^3}$$

4. 轮辐应变区的剪应力、剪应变

$$\tau_{max} = \frac{3P}{8bh} \gamma_{max} = \frac{3(1+\mu)P}{4bhE}$$

5. 轮辐应变区  $45^\circ$  方向主应力、主应变

因为轮辐应变区的平面应力状态为纯剪切，由弹性力学知，其主应力、主应变与剪应力、剪应变有如下关系：

$$\sigma_{\pm 45^\circ} = \pm \tau_{max} = \pm \frac{3P}{8bh} \varepsilon_{45^\circ} = \pm \frac{\gamma_{max}}{2} = \frac{3(1+\mu)P}{8bhE}$$

6. 输出灵敏度

轮辐式称重传感器的输出电压为：

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

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—电阻应变计基长;

W—电阻应变计基宽;

$U_i$ —输入电压。

轮辐式称重传感器的输出灵敏度为:

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

因为弹性元件设计保证了轮辐上与中心轴成  $45^\circ$  方向的两个拉、压成双的主应力、主应变基本相同或接近,这就为组成灵敏度高,抗干扰能力强的等臂电桥创造了条件。根据使用方法不同,有两种组桥方法。

其一承受压向载荷的常规组桥法。单剪切电阻应变计粘贴位置及电桥电路简图如图 3 所示。图中 1、2、3……为粘贴在轮辐上的单剪切电阻应变计。为了消除偏心载荷、侧向载荷及温度对输出的影响,在每一对轮辐上感受拉伸主应力与压缩主应力的单剪切电阻应变计,应承反对称分布,并将测量拉伸与压缩应变的电阻应变计分别串联组成正、负桥臂。这就最大限度的减少了弯矩引起的力学干扰。

其二轮毂承受一定扭转力矩的组桥法。为了消除轮毂上扭转力矩对称重传感器输出的影响单剪切电阻应变计的粘贴,应保证在每对轮辐上承受拉伸和压缩主应力的电阻应变计各分布在轮辐的一侧,并将每一侧的拉伸、压缩电阻应变计各组成正负桥臂。其粘贴电阻应变计位置及电桥电路简图如图 4 所示

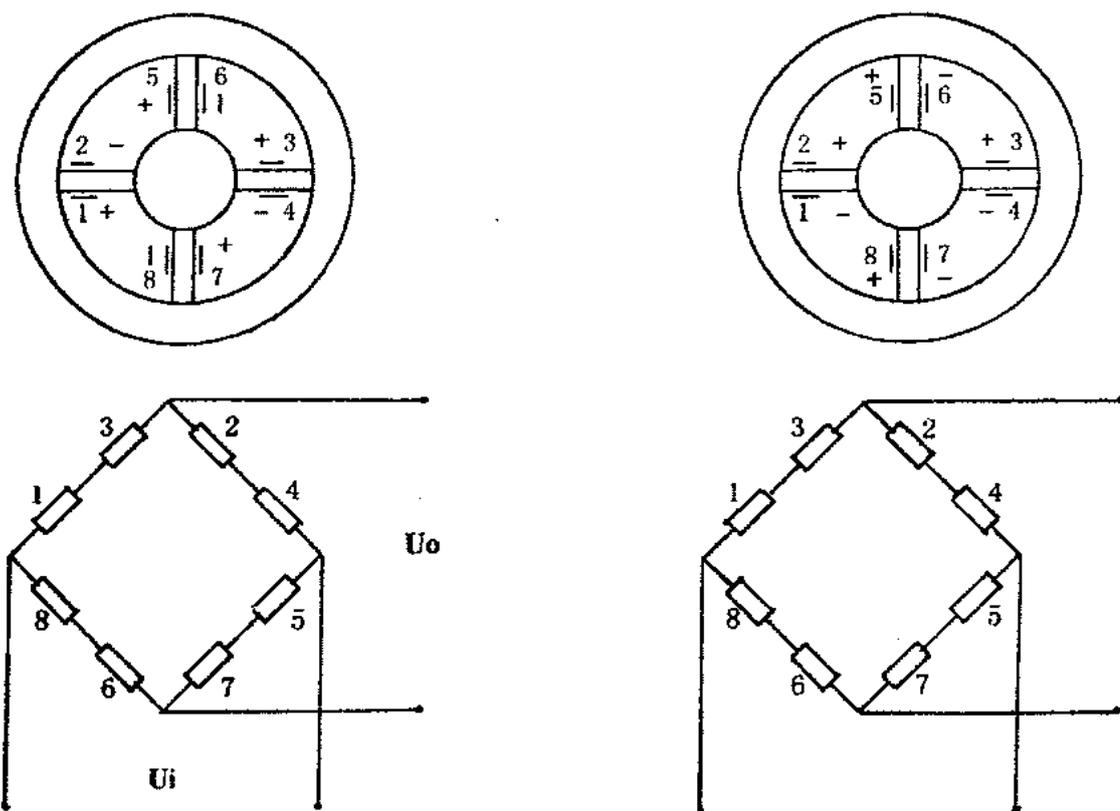


图 3 轮辐式称重传感器常规组桥法 图 4 轮辐式称重传感器消除扭矩组桥法

### 三、轮辐式称重传感器的滞后误差分析

轮辐式称重传感器的准确度等级，只要有效控制滞后误差均可以达到国家标准规定的 C3 级。轮辐式称重传感器的弹性元件结构决定了其固有滞后误差较大，一般为 0.05~0.10%FS。从上述分析可知，影响称重传感器滞后误差的因素很多：电阻应变计的机械滞后、热滞后影响；应变胶粘剂的质量及粘贴电阻应变计胶层厚度的影响；轮辐式弹性元件的热处理工艺水平，特别是回火工艺的硬度控制和材料本身弹性滞后的影响；轮箍的刚度及底部变形的影响等。在单剪切电阻应变计、应变胶粘剂质量；粘贴电阻应变计胶层厚度、固化和后固化工艺质量都得到有效控制的条件下，对轮辐式称重传感器滞后误差影响最大的因素是轮箍的刚度及轮箍的底部摩擦力矩。

当轮辐式称重传感器承受压向载荷时，轮毂下沉带动轮辐作近似平行四边形

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  $90^\circ$  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。轮辐式称重传感器受载后轮箍变形示意图如图 5 所示。

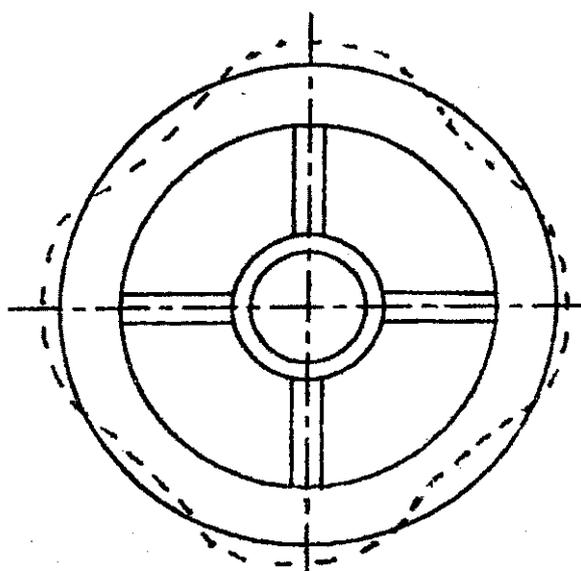


图 5 轮辐式弹性元件受载后轮箍变形示意图

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。

在加大轮箍刚度的同时，也应关注轮毂的刚度，因为轮毂是直接承受载荷并传递载荷关键部分，也应该具有与轮箍相适应的刚度。只有轮毂与轮箍的刚度足

---

够大，才能保证轮辐与轮毂和轮箍连接处的转角为零，使轮辐的应变区为纯剪切状态，产生与中心线成  $45^{\circ}$  方向的大小相等方向相反的两个主应力、主应变。

轮辐式称重传感器弹性元件材料的弹性滞后，对滞后误差的影响不可低估。当轮毂承受外载荷时，在轮箍的支撑下轮辐产生变形，材料的弹性滞后大可以使晶格滑移产生阻滞，直接影响滞后误差。弹性元件材料的弹性滞后大，称重传感器的滞后误差就大。金属材料的弹性滞后与其微观组织机构有关，主要取决于热处理后的回火温度，不同的回火温度得到不同的金相组织。以 40CrNiMoA 中碳合金钢为例， $560^{\circ}$  回火时弹性滞后最小为 0.11%。

设计轮辐式称重传感器时，为了保证轮辐的应变区处于纯剪切状态，必须增大轮毂与轮箍的刚度，这是可以理解的。如果轮箍的刚度过大时，底部面积也必然随着增大，而产生较大的底部摩擦力，阻滞轮箍变形恢复产生较大滞后误差。为了减少轮箍底部面积大而产生较大的底部摩擦力，降低阻滞轮箍恢复原始状态的力矩，可采取减少轮箍底面接触面积（即底面摩擦面积）的方法，对减少滞后误差十分有效。一般在轮箍底面加工出多个 0.5~1.0mm 深，能够减少 40~50% 轮箍底部面积的一定宽度的多个同心环形槽。由于环形槽内的面积不参与底部摩擦，实际上是在外载荷和轮箍刚度都不变的前提下，减少了底部摩擦力，即减少了阻滞轮箍变形后恢复的力矩，从而减少了滞后误差。采用此方法的轮辐式称重传感器的滞后误差可以达到 0.02%FS。

为了便于机械加工，提高轮辐式称重传感器的制造工艺性，降低成本，在结构设计上采用变截面轮辐代替等截面轮辐是一个新的发展潮流。此种结构的最大特点是：弹性元件轮辐的形成不用复杂的电火花线切割加工，而是用钻孔、铣孔简单的工艺加工完成。众所周知，圆孔是简单的几何形状，可以加工出较高的尺

寸、形位精度。例如利用四对完全相同直径的圆孔形成的四根轮辐，不仅具有较高的对称性，而且也增加了轮辐两端的刚度，保证轮辐应变区处于纯剪切状态，提高了轮辐式称重传感器的综合性能。采用四对双孔和双连孔形成的轮辐式称重传感器的弹性元件结构示意图如图 6、图 7 所示。

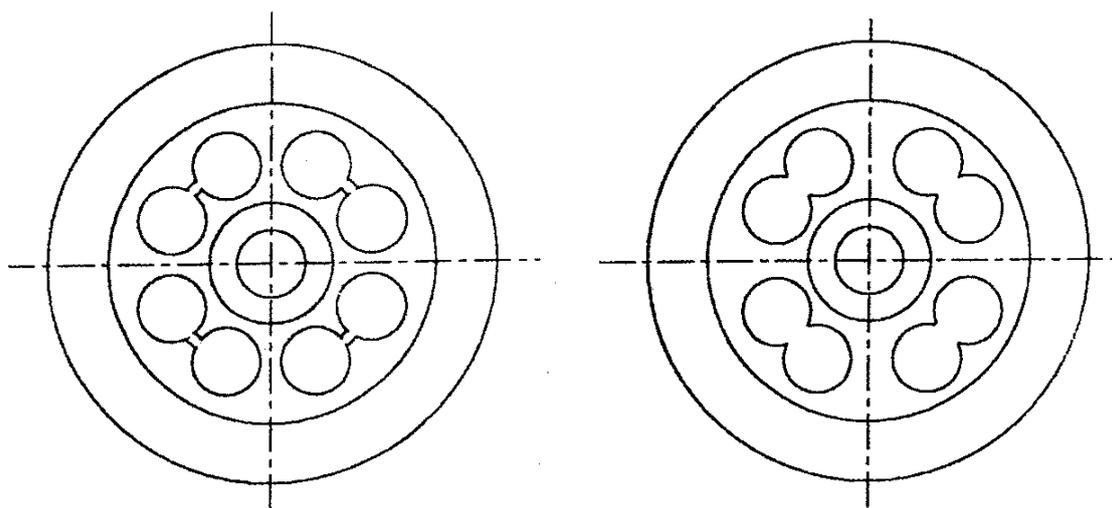


图 6 四对双孔形成的轮辐式弹性元件 图 7 四对双连孔形成的轮辐式弹性元件

四对双孔、双连孔形成的轮辐式弹性元件与传统的轮辐式弹性元件相比，其力学模型、受力分析、结构与计算均未改变，传统轮辐式弹性元件的各项计算公式依然可以使用，所不同的是轮辐结构由等截面变为变截面，理论计算误差偏大一些而已。

#### 参考文献

- 【1】 The low profile load cell in weighing systems, F.L.Sohulte,<Advanoos in Instrumentation,Vol.26,Part4.
- 【2】 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。
- 【3】 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。

【4】 H.M.别辽耶夫.材料力学（上册），高等教育出版社，1956 年。

【5】 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。