

新型双扭转环称重传感器力学分析与理论计算

刘九卿 中国运载火箭技术研究院第 702 研究所

【摘要】传统的扭转环称重传感器的弹性元件，主要有六边形截面扭转环和矩形截面扭转环两种结构形式，均为在扭转环的上、下表面粘贴螺旋形或单轴形电阻应变计。为增大扭转环弹性元件的受载面积、降低高度，实现大质量测量，德国 Schenck（申克）公司研制出 WDI 系列的双扭转环弹性元件。本文在分析该弹性元件结构与特点的基础上，通过建立力学模型探讨了双扭转环应变区的理论计算，并简要介绍了电阻应变计选择及粘贴工艺等问题。

【关键词】称重传感器；弹性元件；扭转环；力学模型；螺旋电阻应变计

一、概述

传统的扭转环型弹性元件为轴对称六边形截面环和轴对称长方形截面环两种结构形式，均利用弹性元件受载后应变环的扭转变形，使环的上表面向内收缩和下表面向外扩张变形而产生的负、正应变，完成载荷测量任务。轴对称六边形截面扭环型弹性元件如图 1 所示；轴对称矩形截面扭转环型弹性元件如图 2 所示。

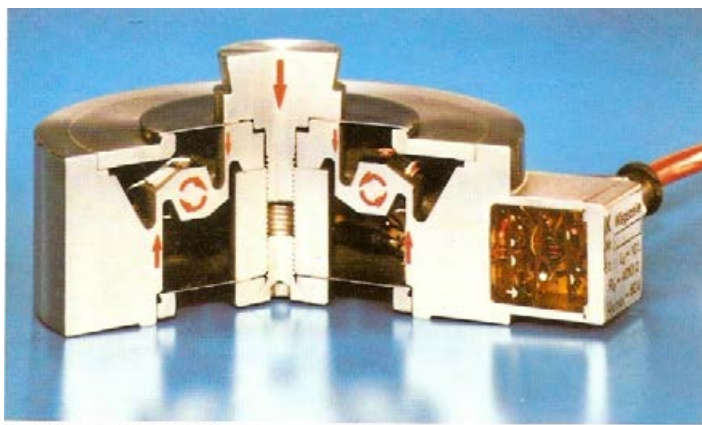


图 1 轴对称六方形截面扭转环型弹性元件



图 2 轴对称矩形截面扭转环型弹性元件

上述两种轴对称扭转环式弹性元件均由引入载荷的顶环、中间六边形截面（或矩形截面）应变环和周边支撑底环三部分组成整体结构。当有外载荷作用时，它就象盘形弹簧一样变形，顶环可以相对底环平行移动，即在顶环和底环的作用下六边形（或矩形）截面应变环，承环状回转体向中心方向做类似于滚动的运动而产生扭转变形。六边形（或矩形）环的扭转变形，使上表面向着半径减小方向移动，下表面向着半径增大方向移动而产生环向负、正应变，这正是组成惠斯通电桥电路所需要的。尽管轴对称扭转环式弹性元件具有结构紧凑、固有线性好、受载后底环无变形或变形很小

几乎没有滞后、对于偏心载荷和侧向载荷不敏感等特点，但由于两种扭转环式弹性元件结构的受载面积较小，要实现较大量程还应该做一些改进。为此，德国 Schenck（申克）公司研制出受载面积大、外形低的 WDI 系列双扭转环式弹性元件，其量程从 25t,50t,100t 至 200t。本文在学习该弹性元件设计理念的基础上，分析了结构特点、力学特性，通过建立数学模型对双扭转环应变区进行了力学分析和理论计算。

二、双扭转环型称重传感器弹性元件的结构特点

双扭转环型称重传感器由低外形轴对称双扭转环弹性元件、上部压头和下部焊接密封膜片等组成，其弹性元件结构简图如图 3 所示。

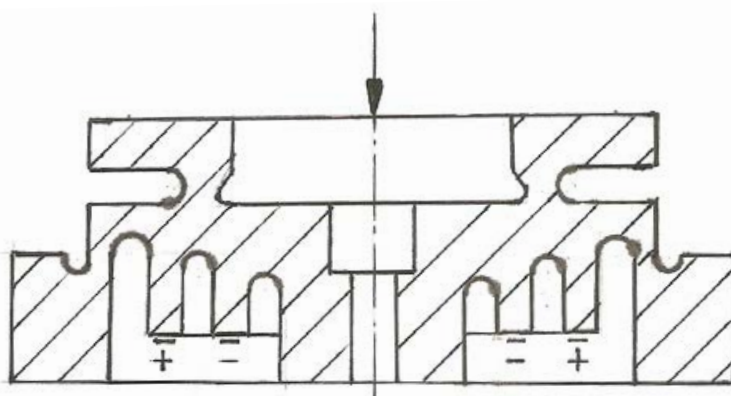


图 3 轴对称双扭转环弹性元件结构简图

当外载荷 P 通过较大面积压头作用在弹性元件的上表面加载区域时，弹性元件就像盘形弹簧一样产生变形，由于结构的独特性，两个粘贴有电阻应变计的内、外应变环在外载荷作用下，作类似于滚动的运动而产生扭转变形，使外环的下表面向着半径增大方向移动，而产生环向正应变；内环的下表面向着半径减小方向移动而产生环向负应变，这正是组成惠斯通电桥电路所需要的。轴对称矩形截面双扭转环弹性元件具有如下特点：

1. 结构紧凑，外形低，受载面积大，稳定性好，特别适合百吨以上级别的大量程称重传感器，200t 量程的弹性元件直径 $D=350\text{mm}$ ，高度 $h=112\text{mm}$ ，上部环形承载面外径 263mm，内径 140mm；
2. 双扭转环弹性元件为一整体轴对称结构，几何形状比较简单，有利于机械加工和热处理，可达到较高的尺寸和形位精度，从结构上保证了称重传感器的性能波动最小；
3. 受载时内、外扭转环应变区截面积不发生变化，固有线性好，准确度高，（最高可达 OIML C 级 6000d）；
4. 由于双扭转环弹性元件的中心圆柱支撑和外缘环向支撑刚度大，承受外载荷后几乎没有变形，滞后误差较小，是其他结构弹性元件无法比拟的；
5. 独特的双扭转环轴对称结构，不仅外形低刚度大，而且刚度对称，抗偏心载荷和侧向载荷能

力强；

6. 在双扭转环弹性元件的下部，通过环形膜片与中心圆柱支撑和外缘环形支撑实施焊接密封，便于采用抽真空充惰性气体密封新工艺，提高了称重传感器的工作可靠性和长期稳定性；

7. 由于弹性元件内、外扭转环下表面应变区有较大的工作面积，且十分开敞，便于粘贴电阻应变计和布线组焊惠斯通电桥电路，保证粘贴电阻应变计质量；

8. 由于可以粘贴大阻值的螺旋形电阻应变计，即无有普通电阻应变计的横栅效应影响，又可以加大供桥电压，较大的提高了称重传感器的输出信号。

三、双扭转环称重传感器弹性元件的力学分析与理论计算

众所周知，电阻应变式称重传感器的供桥电压是有一定限制的，其原因是电阻应变计中流过的电流不能过大，否则因发热会影响它的工作特性和稳定性，甚至损坏失效。最佳供桥电压由下式计算：

$$U_0 = 2\sqrt{R_i A_g P_g} \quad (1)$$

式中： U_0 —最佳供桥电压（V）；

R_i —称重传感器输入电阻（ Ω ）；

A_g —电阻应变计敏感栅的工作面积（ mm^2 ）；

P_g —电阻应变计敏感栅的功率密度（ W/mm^2 ）。

由上式不难看出，若要提高称重传感器的供桥电压，必须增大电阻应变计的电阻值和敏感栅的工作面积。双扭转环弹性元件应变区粘贴电阻应变计的表面面积大而开敞，为大面积、大电阻值螺旋形电阻应变计的粘贴创造了条件，一般可以粘贴 3500Ω 超大阻值螺旋形电阻应变计，供桥电压可高达 100V，比普通称重传感器输出信号提高近十倍。

为求得矩形截面内、外扭转环下表面粘贴的螺旋形电阻应变计所感受的应力、应变，现取外应变环下表面的一段进行分析计算，其表面径向力 $\sigma_r \Delta F$ 、切向力 $\sigma_t \Delta F$ ，外应变环下表面径向力、切向力分布图如图 4 所示。

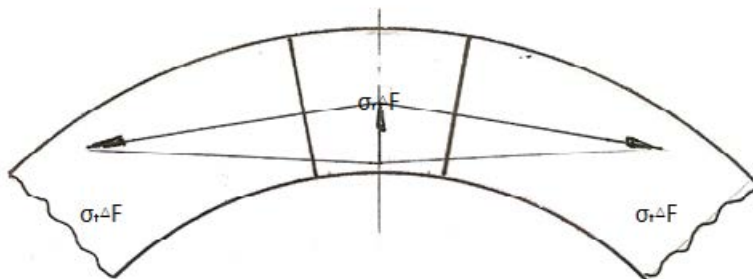


图 4 外扭转环下表面径向力、切向力分布图

尽管粘贴在外扭转应变环下表面上的螺旋形电阻应变计，也测得一个径向力 $\sigma_r \Delta F$ ，但反应总测量值的是切向力 $\sigma_t \Delta F$ ，因为曲杆效应影响切向力 $\sigma_t \Delta F$ 是径向力 $\sigma_r \Delta F$ 的 10 ~ 50 倍。引起载荷漂移的只是这些很小的径向应力，对切向力几乎没有影响，这一力学特性可通过下列计算得到证实。

为便于分析，设外、内扭转应变环变形后的扭转角分别为 θ 、 θ_1 （见图 5）。

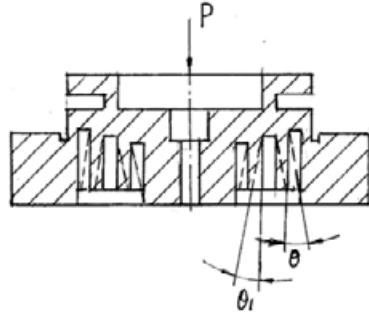


图 5 弹性元件外、内扭转应变环扭转变形示意图

在外载荷 P 作用下外扭转应变环下表面半径增加 ΔR ，即 .

$$\Delta R = h \times \sin \theta \quad (2)$$

其周长增加 ΔL ，即

$$\Delta L = 2\pi (R + h \times \sin \theta) \quad (3)$$

外应变环下表面内边缘产生的切向拉应变为：

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta L}{L} = \frac{2\pi(R + h \sin \theta)}{2\pi R} = 1 + \frac{h}{R} \cdot \sin \theta \quad (4)$$

在外载荷 P 作用下内扭转应变环下表面半径减少 Δr ，即 .

$$\Delta r = h_1 \times \sin \theta_1 \quad (5)$$

其周长减少 ΔL_1 ，即

$$\Delta L_1 = 2\pi (r - h_1 \times \sin \theta_1) \quad (6)$$

内应变环下表面内边缘产生的切向压应变为：

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta L_1}{L_1} = \frac{2\pi(r - h_1 \sin \theta_1)}{2\pi r} = 1 - \frac{h_1}{r} \cdot \sin \theta_1 \quad (7)$$

上式说明，螺旋形电阻应变计测得的主要是外应变环下表面的切向拉伸应变，内应变环下表面的切向压缩应变。由此可以得出，如果不具备制造螺旋形电阻应变计条件，也可以使用普通单轴电阻应变计，即在内、外应变圆环的下表面分别同心、对称的粘贴 4 片单轴电阻应变计，将应变方向相同的两片电阻应变计串联为一组，按相对桥臂应变方向相同，相邻桥臂应变方向相反的原则，组成惠斯通电桥电路，同样可以得到较好的测试结果。

四、双扭转环称重传感器弹性元件的简易计算

在对轴对称结构双扭转环弹性元件进行设计与计算时，也可以采用简易计算方法。假设在上端面圆形加载处将内、外矩形截面应变环分开，则外应变环相当于周边支撑，在中心圆区内受集中载荷作用的圆厚板；内应变环相当于中心区域被支撑，周边受外载荷作用的圆厚板，这样就可以利用材料力学圆板的相关应力计算公式进行应力计算。双扭转环弹性元件内、外应变环的尺寸示意图如图 6 所示。实际上双弯曲环弹性元件内、外应变环的高度相差无几，为方便标注图中内、外环尺寸，特意增大了高度差。

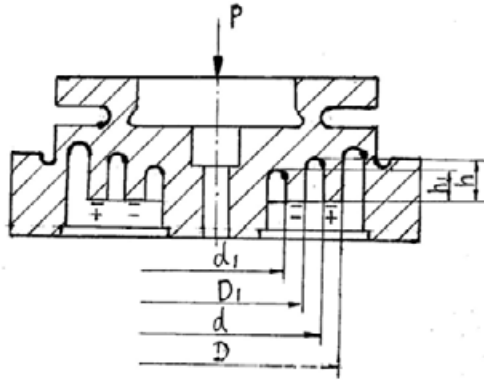


图 6 双扭转环弹性元件内外应变环尺寸示意图

外应变环相当于周边支撑，在中心圆区内受集中载荷作用的圆厚板，由材料力学圆板弯曲理论知，其下表面因外应变环扭转产生的拉应力 σ_1 的近似解为：

$$\sigma_1 = \frac{3}{\pi} \mu \left(1 - \frac{3}{2} \cdot \frac{r_0}{r} \right) \frac{P}{t^2} \quad (8)$$

式中：P—外载荷；

r—圆板外径；

r_0 —圆板内径；

t—圆板厚度；

μ —修正系数，受集中载荷 $\mu=1.5$ 、受均布载荷 $\mu=1.2$ 。

将外应变环尺寸与近似解的应力计算公式(8)中的尺寸相对应，得： $r = \frac{D}{2}$ ， $r_0 = \frac{d}{2}$ ， $t=h$ 代入式(8)，则外应变环下表面的拉应力为：

$$\sigma_1 = \frac{3}{\pi} \mu \left(1 - \frac{3}{2} \cdot \frac{d}{D} \right) \frac{P}{2h^2} \quad (9)$$

内应变环相当于中心区域被支撑, 周边受外载荷 $\frac{P}{2}$ 作用的圆厚板, 由材料力学圆板弯曲理论知, 其下表面因内应变环扭转产生的压应力 σ_2 的近似解为:

$$\sigma_2 = -2\mu \left(1 - \frac{r_0}{r} \right) \left(\frac{r}{t} \right)^2 P \quad (10)$$

将内应变环尺寸与近似解的应力计算公式 (10) 中的尺寸相对应, 得: $r = \frac{D_1}{2} r_0 = \frac{d_1}{2}$ $t=h_1$ 代入式 (10), 则内应变环下表面的压应力为:

$$\sigma_2 = -2\mu \left(1 - \frac{d_1}{d} \right) \frac{d^2}{4h^2} \quad (11)$$

考虑到称重传感器灵敏度温度补偿抵消的应变值, 将外、内应变环的拉伸、压缩应变变量控制在 1100×10^{-6} , 即可使称重传感器的灵敏度达到 2mv/v 。由于以上进行的是简易计算, 在进行弹性元件结构设计时, 最好先设计一个试验件, 在进行试验测试求得准确的修正系数后, 再进行正式设计与计算。

五、结束语

无论是传统的轴对称六方形截面扭转环、长方形截面扭转环弹性元件, 还是新型轴对称双扭转环弹性元件, 都不像圆柱、圆筒、圆环、工字形截面悬臂剪切梁和双端固支剪切梁弹性元件那样, 有比较成熟的力学模型和应力、应变计算公式。为对双扭转环弹性元件的力学特性、边界条件进行分析和理论计算, 只能通过简化力学模型, 采用近似的应力、应变计算方法设计出样件, 经过样件试验测试求得应力、应变计算公式的修正系数后, 再进行设计与制造。有条件的企业可以采用有限元法和先进的三维数字设计与制造技术进行结构设计、计算和生产。

【参考文献】

【1】Martin Brachat, Dr. Helmut Gabmann, Neue, hochauflösende Biegering-Wagezellen, + dosieren4/1990.

【2】德国 SCHENCK (申克) 公司, 轴对称称重传感器样本资料, 1995 年。

【3】德国 EHP 公司, BR 系列弯曲环型称重传感器样本资料, 1998 年。

【4】德国 SCHENCK (申克) 公司, WDI 系列称重传感器样本资料, 2010 年。

【5】刘九卿, 轴对称扭环型称重传感器的结构与计算, 电阻应变式称重传感器专业技术培训讲义, 2008 年。