

称重传感器误差概述与分析

中国运载火箭技术研究院第 702 研究所 刘九卿

【摘要】为适应物联网、“中国制造 2025”和人工智能技术发展战略的需要，应变式称重传感器正处于由传统型向全新型转型发展阶段，其技术发展将呈现出微型化、数字化、多功能化、智能化和网络化等趋势，确保准确度、稳定性和可靠性依然是首要任务。为此本文分析了对计量性能影响较大的非线性、滞后、蠕变等单项误差和零点温度、灵敏度温度误差，分析了组装电子衡器需要的最大允许误差与误差包络线。通过建立称重传感器温度特性的数学模型和温度视应变数学拟合公式，分析电阻应变计热输出、灵敏系数 K 对称重传感器温度性能及其非线性误差的影响。

【关键词】称重传感器；弹性元件；电阻应变计；温度误差；最大允许误差；误差包络线

一、概述

传感器技术的最大特点是不断纳入新技术、新材料和新工艺，开发新品种、扩展新功能。在我国物联网 + 产业和人工智能技术的强力牵引下，传感器技术已经进入由传统型向全新型转型发展的关键阶段，未来传感器技术发展将呈现出微型化、数字化、多功能化、智能化和网络化等趋势，传感器行业将迎来黄金发展期。

为适应物联网、“中国制造 2025”和人工智能技术对称重传感器的新要求，国内外处于市场引导者地位的称重传感器制造企业，纷纷进行结构设计模式创新、制造工艺模式创新、形成数字化称重传感器技术体系和基础工艺支撑体系，满足一部分产品转型升级的需要。称重传感器由传统型向全新型的转型发展，从本质上来讲，它是基于市场理念的一场体制和机制改革，也是参与市场竞争的必然选择。今后国内外称重传感器制造企业，在市场上比拼的重点将是提升称重传感器的技术含量，扩大应用范围，降低生产成本，满足物联网、“中国制造 2025”和人工智能技术的需求。为此，必须深入研究和分析称重传感器的有关特性所产生的各项误差，并准确分析出一些限制因素，找出能够减小这些特性产生误差的各种方法。

二、称重传感器主要单项误差分析

1. 非线性误差

称重传感器最重要的机械部分是弹性元件，其功能是对作用载荷的反作用，同时把载荷的作用集中于一个独立的、最好是均匀的应变场内，以便粘贴电阻应变计。理想弹性元件的特点应当是载荷 P 和应变 ε 成较严格的线性关系，实现此目标的困难在于结构设计与计算上和一些经济上的限制。

严格的说，称重传感器承受的载荷 P 与弹性元件应变 ε 的转换关系是非线性的，引起非线性的因素很多，诸如弹性元件材料的非线性；弹性元件与引入载荷的压头、承受载荷的底垫之间不稳定的摩擦力；局部应力集中干扰应变区，以及弹性元件在载荷作用下几何尺寸改变和受力点、受力臂变化等。前者可以通过正确选择弹性元件材料，合理选用热处理工艺，以及对引入载荷的压头、承受载荷的底垫采用无摩擦设计，避免弹性元件应变区以外有最高应力点和应力集中等加以解决；后者为弹性元件面积效应和泊松比效应影响，弹性元件受载后几何尺寸改变或受力点、受力臂变化引起可逆的有规律的非线性误差，必须通过线性补偿加以解决。为此必须研究各种结构弹性元件的固有非线性误差，现以柱式、悬臂梁式称重传感器为例进行分析。

可以推导出承受拉向负荷的圆柱式称重传感器的固有非线性误差为：

$$\eta(\varepsilon) = \frac{\varepsilon_z - \varepsilon_0}{\varepsilon_0} = \frac{(\varepsilon_0 + 2\mu\varepsilon_0^2) - \varepsilon_0}{\varepsilon_0} = 2\mu\varepsilon_0 = 0.56\varepsilon \quad (1)$$

承受压向负荷的圆柱式称重传感器的固有非线性误差为：

$$\eta(\varepsilon) = \frac{\varepsilon_z - \varepsilon_0}{\varepsilon_0} = \frac{(\varepsilon_0 - 2\mu\varepsilon_0^2) - \varepsilon_0}{\varepsilon_0} = -2\mu\varepsilon_0 = -0.56\varepsilon \quad (2)$$

悬臂梁式称重传感器的固有非线性误差为：

$$\eta(\varepsilon) = \frac{\varepsilon_z - \varepsilon_0}{\varepsilon_0} = -\frac{48P^2L^5}{5E^2b^2h^6} \quad (3)$$

式中： ε_z —横向或环向应变值；

ε_0 —轴向应变值；

μ —弹性元件材料泊松比；

P —弹性元件所承载荷；

L —弹性元件支撑部位与应变片粘贴部位的距离；

E —弹性元件材料的弹性模量；

b —悬臂梁宽度；

h —悬臂梁高度。

计算证明，圆柱式称重传感器受面积效应影响固有非线性误差较大，悬臂梁式称重传感器由于没有端部效应影响固有非线性误差很小。因此圆柱式称重传感器必须进行非线性补偿。

为减小非线性误差，确保弹性元件应变稳定性至关重要，应变的稳定性可用电阻应变计电阻值的相对变化来表述，即

$$\frac{\Delta R}{R} = \varepsilon_R = CK\varepsilon \quad (4)$$

式中： ε_R 应变计电阻的相对变化；

C —应变利用系数；

K —应变计灵敏系数；

ε —弹性元件的弹性应变。

由式（4）可见，弹性元件应变稳定性与其所用金属材料密切相关，只有选择良好的金属材料 and 合理的热处理工艺，才能提高弹性元件应变的稳定性，这是减小称重传感器非线性误差的基础和关键。

影响称重传感器非线性误差的主要因素：

（1）弹性元件结构设计不合理，应变区的应变程度过高，应变区以外还有最大应力点或应力集中处，因而导致变形大，必然伴随出现一定程度的非线性影响；

（2）弹性元件应变区的设计与计算不符合圣文南力的扩散原理，应力分布不均匀，有接触应力影响；

（3）整体型或集成化结构弹性元件，支承区域刚性差或柔性隔离设计不合理，造成固有线性差；

（4）弹性元件承载、加载边界条件的影响，主要是底部支承面积、根部固定刚性，压垫、压头的表面形状、硬度和摩擦系数，螺纹传递载荷时的螺纹加工精度和螺纹啮合面积等设计、选择不合理，引入了附加载荷和偏心载荷；

（5）弹性元件金属材料与热处理工艺规范选择不当，使应变区的硬度过高或过低，材料未能达到设计的弹性性能，材料综合性能未达到相当于功能材料的有关要求；

（6）关键制造工艺流程中存在某些细节差错，例如粘贴电阻应变计胶粘剂层较厚，影响弹性元件应变有效传递；应变胶粘剂固化和后固化温度和保温时间有误，应变胶粘剂未能充分固化使其弹性模量达不到预定要求；

（7）小量程弹性元件表面防护与密封材料质量差或涂敷工艺不合理，过厚、过硬参与刚度，直接影响应变梁变形；

（8）圆柱式弹性元件的线性补偿精度偏低，半导体线性补偿电阻应变计温度系数大或线性补偿微调电阻精度低、温度系数大；

（9）双剪梁型（桥式）弹性元件两端紧固螺栓变形或松动，垫圈变形，底座刚度偏小等，均可产生非线性误差；

（10）对于焊接密封结构，焊接膜片的材料、形状、厚度和焊接工艺影响，使膜片分流的灵敏度偏大且与载荷不呈线性关系。

2. 滞后误差

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，回线的宽度由加荷循环的幅度决定。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，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，比较典型的结构就是轮辐式称重传感器。轮箍变形位移量与其刚度密切相关，刚度大，变形位移小，底摩擦作用时间短，轮辐应变恢复快，滞后小，反之滞后大。因此，轮毂、轮箍刚度应足够大，确保轮辐与轮毂、轮箍连接处转角为零。

(3) 双剪梁型称重传感器边界条件对滞后的影响较大，其双剪梁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支撑端面的距离太小，摩擦力对应变区影响也较大。

(4) 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 α 角度，随着载荷的增加， α 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。

(5) 称重传感器弹性元件上的保护外壳、密封膜片应设计合理尽量不影响灵敏度。若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。

(6) 合理选择弹性元件金属材料的热处理工艺，减小材料本身的弹性滞后。例如应用最为广泛的合金钢 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%。

3. 重复性误差

重复性误差是指在相同的负荷和相同的环境下，对同一被测量进行连续多次试验所得输出读数之间的差值。各条特性曲线越靠近，重复性就越好。重复性的好坏与许多随机因素有关，如环境温度、大气压力变化等。

4. 蠕变误差

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。大量试验和测试结果表明称重传感器的蠕变和滞后误差的大小和方向是不可预测的，弹性元件金属材料表现为正蠕变，即在某一种负荷作用下产生的变形有随着时间增大的趋势；而应变胶粘剂的胶层有使电阻应变计敏感栅的变形随着时间减小的趋势，这种应力松弛产生的是负蠕变。称重传感器的蠕变误差，基本上就是这两种蠕变效应的叠加。概括起来，称重传感器的蠕变误差就是若干个依赖于时间效应的综合。主要是以下几种效应产生蠕变误差：

(1) 弹性元件金属材料中，支配弹性后效（蠕变）因素的综合，其因素主要是材料的组织结构、热处理工艺过程、稳定处理工艺、最大工作应力等的影响。

(2) 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，即黏弹性后效的影响。

(3) 电阻应变计敏感栅材料由于扩散而引起原子重新分布，使蠕变抗力减小。

(4) 弹性元件绝热温度变化的热弹性效应影响。圆柱式弹性元件在正应力作用下产生单位体积变化，承受拉应力使体积增大，承受压应力使体积减小。如果加载迅速，没有热量流进、流出，纯拉伸作用在弹性元件内产生绝热降温，纯压缩作用在弹性元件内产生绝热升温。两者均产生绝热应变，它和等温应变之差与几何形状无关，而仅仅取决于材料的不同，对于圆柱式称重传感器要达到热平衡大约需要 20 分钟。

综合国内外称重传感器制造企业对蠕变效应的研究结果得出：敏感栅长的电阻应变计比短的更适用；热固型应变胶粘剂比冷固型好；在保证绝缘电阻的前提下胶粘剂层越薄蠕变和滞后误差越小，一般胶粘剂层的厚度以 $5\ \mu\text{m}$ 为好；对粘贴在弹性元件上的电阻应变计进行老化处理比不进行处理蠕变小。对固有蠕变较大的弹性元件多采用蠕变自补偿电阻应变计。

5. 最大允许误差与误差包络线

称重传感器在组装各种电子衡器时，必须与该电子衡器的国家标准相匹配，其原则是：当称重传感器的性能特征与允许误差带相拟合时，该称重传感器的各项误差必须综合考虑。这就是说，称重传感器可能具有小的非线性误差和滞后误差，而具有适中的温度误差；或者相反，可能具有小的温度误差，而且具有适中的非线性误差和滞后误差。因此必须给出称重传感器的最大允许误差与误差包络线来作为限制因素。使用了误差包络线这个概念后，就允许人们对构成测量总误差的各个分量进行平衡，从而获得所期望的最终结果。按照国际法制计量组织（OIML）R60 国际建议和 GB / T7551—2008《称重传感器》国家标准规定，称重传感器的最大允许误差限与误差包络线有关，即所有偏差之和应处于总误差带之内，称重传感器的误差和误差带如图 1 所示。

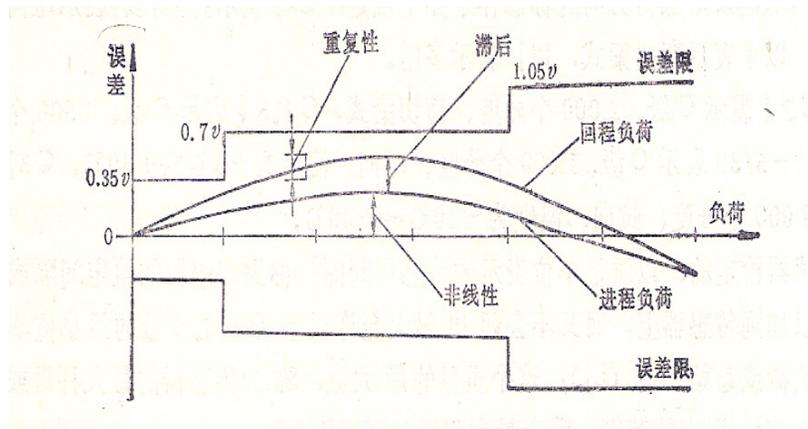


图 1 称重传感器的误差和误差带

对于称重传感器的误差包络线，国际法制计量组织（OIML）R60 国际建议和 GB / T7551—2008《称重传感器》国家标准的定义为：“误差包络线以一条直线为基准，此直线是以 20℃ 时载荷试验中的两个输出确定的，一个是最小载荷输出，另一个是递增加载时取得的量程的 75% 载荷时称重传感器的输出”。求 75% 载荷输出与最小载荷输出拟合直线的方法，通常称为 75% 载荷点连线法，即在称重传感器的 n 个测试点中，将最小载荷输出点与 75% 载荷输出点连为直线，以此直线作为最佳拟合直线求得各载荷点参比值，用以计算称重传感器误差。此误差包络线包括非线性、滞后引起的误差，以及在规定误差范围由于温度对称重传感器灵敏度的影响所引起的误差。可见减小称重传感器的非线性、滞后误差和零点、灵敏度温度误差对控制称重传感器最大允许误差的重要性。

三、称重传感器温度误差分析

1. 零点温度误差分析

称重传感器在无外载荷作用时的输出称为零点输出，此输出受环境温度影响，随温度变化而变化称为零点温度漂移。影响零点温度漂移的因素很多，归纳起来主要有：

- (1) 弹性元件、电阻应变计、应变胶粘剂的线膨胀系数不同，弹性元件的纵向和横向膨胀率不同，当环境温度发生变化时，都会产生不同程度的热胀或冷缩，引起电阻变化。
- (2) 电阻应变计敏感栅材料的电阻温度系数不为零，各电阻应变计之间又有一定的分散度，而敏感栅材料的电阻率也随着环境温度而变化，这都会引起电阻值的改变。
- (3) 由于各电阻应变计的引出线及连接导线长度不同，温度发生变化可引起电桥电路导线的电阻变化。
- (4) 在将电阻应变计组焊成电桥电路时，所用不同材料（如康铜丝、锰铜丝、镍丝等）焊点之间存在着较小的热电势，而引起电阻变化。
- (5) 弹性元件与保护外壳材料的温度系数不同，弹性元件曲率的影响，大气压力波动等虽然影

响较小，也会使电阻值发生微小变化。

上述各因素随温度变化直接影响称重传感器的输出，产生较大的零点温度漂移。就是采用温度自补偿电阻应变计，由于其特性的分散以及粘贴、加压、固化等工艺影响，仍不能全部抵消引起零点温度漂移的各因素。减小零点温度漂移最有效的方法，就是对称重传感器逐个进行零点温度补偿。

2. 灵敏度温度误差分析

早在 20 世纪 40 年代中期，美国和前苏联学者就注意到了温度对测力指示仪器示值的影响，正确的分析了引起机械测力环温度误差的原因，并准确测量出其修正系数为 $0.027\% / ^\circ\text{C}$ ，时至今日还在继续为各国所使用。同样以金属材料为弹性元件组成的称重传感器，其温度误差与之非常相似，只是影响因素更复杂一些，因为除弹性元件外还有电阻应变计、补偿电阻、测量电路的影响。

荷兰 TNO 机械院推导出的称重传感器灵敏度温度误差表达式为：

$$\frac{\Delta S_l}{S} = \gamma - 2\alpha_L - \beta_E \quad (5)$$

式中： γ —电阻应变计灵敏系数的温度系数；

α_L —弹性元件材料的线膨胀系数；

β_E —弹性模量的温度系数。

不论是利用正应力还是利用切应力的称重传感器，其灵敏度温度误差是一个系统误差，起主要影响的因素是弹性模量 E 的温度系数 β_E 。因 β_E 为负值，所以环境温度升高，弹性元件材料的弹性模量 E 降低，称重传感器的灵敏度增大，而产生灵敏度温度误差。 γ 的影响主要取决于电阻应变计敏感栅的电阻合金材料，在一定程度上取决于应变粘接剂、固化工艺规范及敏感栅的几何形状。如果弹性元件材料，电阻应变计敏感栅和基底材料以及制造工艺都一样，圆环式结构比圆柱式和剪切梁式结构的灵敏度温度误差要小一些，大约小 6% 左右。这说明称重传感器灵敏度温度误差的影响因素，主要是弹性元件材料的弹性模量 E ，其次是电阻应变计灵敏系数和制造工艺，在相当小的程度上与称重传感器弹性元件的结构有关。

四、建立数学模型分析称重传感器的温度误差

应用现代科学技术和分析手段，采用三维数字设计技术是称重传感器结构设计的发展方向。运用网络技术改造生产工艺，实现生产工序和控制系统测试数据自动采集、智能补偿等生产线模式是生产工艺创新的主要方向。面对设计、工艺技术的进步，传统的、就事论事的误差分析方法，已跟不上称重传感器技术发展的需要。必须学习和掌握现代误差分析手段，建立称重传感器各种特性的数学模型，通过计算机预测和推算各类温度误差。

国内外各制造企业对称重传感器温度误差的控制，都是采用智能温度补偿方法。即为了减小零点温度误差对批量生产的称重传感器逐个进行零点温度补偿；为了控制灵敏度温度误差，在弹性元

件材料、热处理工艺、电阻应变计、生产工艺流程都保持不变的前提下，采用抽样测试得出补偿电阻值，进行统一补偿的方法。国内外称重传感器制造企业多年的实践经验告诉我们，上述两种温度补偿方法是比较科学合理、简便可行的。

零点温度、灵敏度温度补偿技术的一个重要前提是：输出与温度变化成线性关系，即补偿精度取决于补偿前的输出随温度变化的非线性程度。通过分析称重传感器的测试数据，来确定各个零点温度漂移影响因素所起到的作用，以及它们之间的相互关系是非常困难的。因为各个影响因素同时作用而产生单一的称重传感器输出，若将此输出分解成诸多项，每项分别表示某一因素的作用是不可能的。解决此问题的有效方法是建立称重传感器温度特性的数学模型，用数学公式表示各种影响因素，推导出理论输出值。若理论输出与实际输出比较一致，就可以在计算机上进行试验，预判各单一因素的影响。

现以粘贴四片电阻应变计的称重传感器为例，建立温度特性的数学模型，其惠斯通电桥电路如图 2 所示。

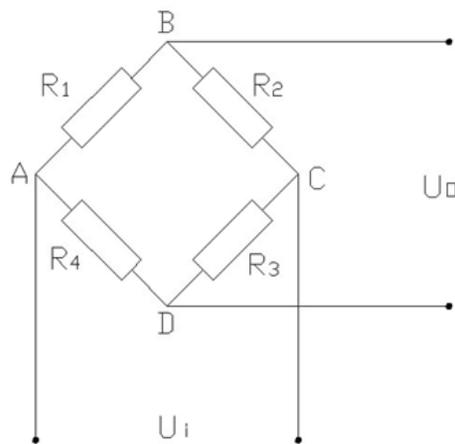


图 2 惠斯通电桥电路

设每片电阻应变计的标准电阻值均为 R ，因电阻应变计敏感栅长度变化、温度变化的影响和调阻误差大等造成的各种偏差之和为 r_i ，则

$$R_i = R + r_i \quad (6)$$

电桥输出电压为：

$$U_0 = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \cdot U_i \quad (7)$$

将式 (6) 代入式 (7) 得

$$U_0 = \frac{(R+r_1)(R+r_3) - (R+r_2)(R+r_4)}{(2R+r_1+r_2)(2R+r_3+r_4)} \cdot U_i$$

对上式进行计算、整理得：

$$U_0 = \frac{\frac{R^2 r_1}{R} + \frac{R^2 r_3}{R} + r_1 r_3 - \frac{R^2 r_2}{R} - \frac{R^2 r_4}{R} - r_2 r_4}{4R^2 + 2R(r_1 + r_2 + r_3 + r_4) + (r_1 + r_2)(r_3 + r_4)} \cdot U_i \quad (8)$$

令

$$r'_1 = \frac{r_1}{R} \quad r'_2 = \frac{r_2}{R} \quad r'_3 = \frac{r_3}{R} \quad r'_4 = \frac{r_4}{R}$$

$$\alpha_1 = r_1 r_3 - r_2 r_4$$

$$\alpha_2 = (r_1 + r_2)(r_3 + r_4)$$

$$r_{sum} = r_1 + r_2 + r_3 + r_4$$

则

$$U_0 = \frac{R^2 (r'_1 + r'_3 - r'_2 - r'_4) + \alpha_1}{4R^2 + 2Rr_{sum} + \alpha_2} \cdot U_i \quad (9)$$

式(9)即为称重传感器温度特性的数学模型，不难看出称重传感器的输出，随环境温度变化引起的各种偏差之和而变化。若预测出称重传感器性能指标允许的偏差值，就可推算出理论输出值。如果理论输出值与实际输出值一致或接近，就可以在计算机上分析和预判各种单一误差因素的影响。

1. 温度视应变的数学拟合公式

在理想情况下，粘贴在弹性元件上的电阻应变计，只响应外载荷作用时产生的应变值，而不响应环境温度变化引起的应变值。但在应用过程中，环境温度变化会改变应变计的电阻值，这一纯粹由温度变化引起的应变，会被测量仪器当作弹性元件的真实“应变”值而被测量出来，实际为虚假应变，故称其为视应变，或热输出。

称重传感器弹性元件产生视应变主要有二个原因：

- (1) 电阻应变计的电阻率随温度变化；
- (2) 弹性元件与电阻应变计敏感栅的热膨胀系数不同。

弹性元件视应变的数学表达式为：

$$\varepsilon_{app} = \left[\frac{\alpha_R}{K_0} + (\alpha_m - \alpha_g) \right] \Delta T \quad (10)$$

式中：

ε_{app} —视应变；

α_R —应变计敏感栅的电阻温度系数；

K_0 —应变计灵敏系数；

α_m —弹性元件材料的线膨胀系数；

α_g —应变计敏感栅材料的线膨胀系数；

ΔT —温度变化, $\Delta T=t_2 - t_1$ 。

对批量供货的电阻应变计, 应进行严格的抽样测试, 给出视应变 ε_{app} 和灵敏系数 K 随温度变化的数据和试验曲线, 供推算误差参考。电阻应变计的视应变和灵敏系数 K 随温度变化曲线如图 3 所示 (两个纵坐标分别为视应变和灵敏系数变化的百分比)。

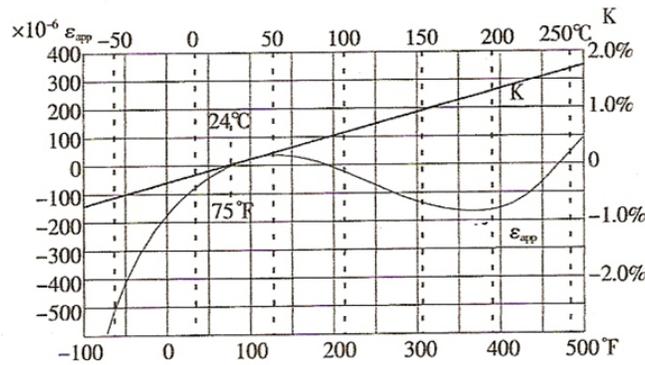


图 3 电阻应变计的视应变和灵敏系数 K 随温度变化曲线

各应变计制造公司给出的视应变 ε_{app} 和灵敏系数 K 随温度变化的试验曲线基本相似, 其视应变 ε_{app} 曲线可以用一正弦函数来拟合, 即

$$d_{1r}(T) = A(B + b) \quad (11)$$

$$B = \left(\frac{T - T_C}{T_r} \right) \pi$$

式中:

$d_{1r}(T)$ —视应变对式 (9) 中 r_i 的贡献量;

T 、 T_C —温度变化的高温和低温;

T_r —温度范围;

A —参变量, 调整曲线的高度;

b —参变量, 调整曲线的起始点。

不同电阻应变计的视应变, 可依据不同的 A 、 b 值来表达。

2. 灵敏系数 K 随温度变化的数学表达式

从应变计制造公司给出的视应变 ε_{app} 和灵敏系数 K 随温度变化试验曲线, 可以看出灵敏系数 K 随温度变化成线性关系, 因此可用一线性函数表达。

$$d_{2r}(T) = mT + k \quad (12)$$

式中:

$d_{2r}(T)$ —应变计灵敏系数变化对式 (9) 中 r_i 的贡献率;

m — 直线的斜率；

k — T=0 时的函数值。

利用温度效应的拟合公式（10）、（11）和温度特性的数学模型公式（9），在计算机上编程，就可以计算各种情况下，电桥输出随温度变化的关系。

例如，计算温度视应变的影响，可以分为下列几种情况进行：

- （1）单片应变计有相位变化，无大小变化，即公式（5）中的四片应变计的参变量 A 均一致，只有一片的参变量 b 不同。
- （2）两片应变计有相位变化，无大小变化。
- （3）单片应变计有大小变化，无相位变化。
- （4）两片应变计有大小变化，无相位变化。
- （5）两片应变计有大小变化，同时有相位变化。

从计算和绘图结果得出，后三种情况中称重传感器的输出随温度变化呈现出严重的非线性特征。此时采用热敏电阻对称重传感器进行常规的温度补偿将无能为力，同时也将影响灵敏度温度特性。这是由于在弹性元件受载时，应变计感受应变的情况下，式（10）依然发生作用。因此必须选择热输出小而稳定的电阻应变计，并进行电阻值和热输出匹配后使用，以提高称重传感器零点温度补偿的成功率和性能稳定性。

3. 电阻应变计温度误差引起的非线性误差

设各桥臂的初始电阻

$$R_1=R_2=R_3=R_4=R$$

电桥工作时，4 个桥臂电阻分别变为：

$$\begin{aligned} R_1 + \Delta R_1, R_2 - \Delta R_2 \\ R_3 + \Delta R_3, R_4 - \Delta R_4 \end{aligned} \quad (13)$$

将式（13）代入输出电压公式，得：

$$\begin{aligned} U_0 &= \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \cdot U_i \\ &= \frac{(R + \Delta R_1)(R + \Delta R_3) - (R - \Delta R_2)(R - \Delta R_4)}{(2R + \Delta R_1 - \Delta R_2)(2R + \Delta R_3 - \Delta R_4)} \cdot U_i \end{aligned}$$

将上式改写为：

$$U_0 = \frac{U_i}{4} \cdot \frac{\frac{\Delta R_1}{R} + \frac{\Delta R_2}{R} + \frac{\Delta R_3}{R} + \frac{\Delta R_4}{R}}{1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta R_1}{R} - \frac{\Delta R_2}{R} + \frac{\Delta R_3}{R} - \frac{\Delta R_4}{R} \right)} \quad (14)$$

由于结构对称并采用相同型号、规格的应变计，因此各桥臂电阻变化量满足：

$$\Delta R_1 = \Delta R_2 = \Delta R_3 = \Delta R_4 = \Delta R \quad (15)$$

将式 (15) 代入式 (14) 得：

$$U_0 = \frac{\Delta R}{R} U_i \quad (16)$$

式 (16) 表明，当以恒压源方式供电时， U_0 与 $\frac{\Delta R}{R}$ 呈线性关系，无非线性误差。

称重传感器在实际应用过程中存在着温度影响，电阻应变计的阻值随温度变化的关系为：

$$R_t = R_0 (1 + \alpha_0 \Delta t) \quad (17)$$

式中： R_t —温度为 t 时的电阻值；

R_0 —温度为 t_0 时的电阻值；

α_0 —温度为 t_0 时应变计的电阻温度系数；

Δt —温度变化值， $\Delta t = t - t_0$ 。

当温度变化时，应变计电阻的变化为：

$$\Delta R_t = R_t - R_0 = R_0 (1 + \alpha_0 \Delta t) - R_0 = R_0 \alpha_0 \Delta t \quad (18)$$

考虑温度影响，通过各桥臂的电流相等、产生相同的热效应，其阻值的变化分别为：

$$\begin{aligned} R_1 &= \Delta R_1 + \Delta R_t & R_2 &= \Delta R_2 + \Delta R_t \\ R_3 &= \Delta R_3 + \Delta R_t & R_4 &= \Delta R_4 + \Delta R_t \end{aligned} \quad (19)$$

将式 (18)、(19) 代入电桥输出电压公式得：

$$U_0 = \frac{(\Delta R_1 + \Delta R_t)(\Delta R_3 + \Delta R_t) - (\Delta R_2 + \Delta R_t)(\Delta R_4 + \Delta R_t)}{(\Delta R_1 + \Delta R_2 + 2\Delta R_t)(\Delta R_3 + \Delta R_4 + 2\Delta R_t)} \cdot U_i$$

经整理得

$$U_0 = \frac{\Delta R}{R + \Delta R_t} \cdot U_i \quad (20)$$

由于温度影响，输出电压与电阻应变计的电阻变化不再保持线性关系，存在着非线性误差。

4. 称重传感器灵敏系数的温度误差

正应力圆柱式称重传感器的灵敏系数 S 为：

$$S = \frac{e}{U} = \frac{1 + \mu}{2} \cdot \frac{K}{EA} \cdot P \quad (\text{mV} / \text{V}) \quad (21)$$

式中： μ —弹性元件材料泊松比， $\mu \approx 0.3$ ；

K —应变计的灵敏系数， $K \approx 2.1$ ；

E —弹性元件材料的弹性模量，对于合金钢 $E \approx 2.1 \times 10^4 \text{ kg} / \text{mm}^2$ ；

A—圆柱式弹性元件的横截面面积

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

P—所计量的力或质量值。

切应力轮辐式称重传感器的灵敏系数 S 为：

$$S = \frac{3}{16} \cdot \frac{K}{bhG} \cdot P = \frac{3(1+\mu)}{8} \cdot \frac{K}{bhE} \cdot P \quad (\text{mV} / \text{V}) \quad (22)$$

为求出温度对称重传感器灵敏系数的影响，首先对式（21）两端取对数并化成微分形式。

$$\begin{aligned} \frac{\Delta St}{S} &= \frac{\Delta \mu t}{1+\mu} + \frac{\Delta K t}{K} - \frac{\Delta E t}{E} - \frac{\Delta A t}{A} \\ &= \frac{\phi \mu \Delta t}{1+\mu} + \frac{\gamma K \Delta t}{K} - \frac{\beta_E E \Delta t}{E} - 2\alpha_L \Delta t \\ &= 0.23\phi \Delta t + \gamma \Delta t - \beta_E \Delta t - 2\alpha_L \Delta t \end{aligned} \quad (23)$$

令式（23）中 $\Delta t = 1^\circ\text{C}$ ，

则

$$\frac{\Delta S}{S} = 0.23\phi + \gamma - \beta_E - 2\alpha_L \quad (24)$$

式中： ϕ —弹性元件材料泊松比的温度系数，对于合金钢 $\phi \approx 1 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ ；

γ —应变计温度系数，对于康铜箔应变计 $\gamma \approx 0.5 \sim 0.8 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ ；

β_E —弹性元件材料弹性模量 E 的温度系数，对于合金钢

$$\beta_E = (-2.7 \sim -3) \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}；$$

α_L —弹性元件材料的线膨胀系数，对于合金结构钢

$$\alpha_L = (11 \sim 12) \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}。$$

式（24）就是补偿前称重传感器灵敏系数的温度系数。

由于以合金钢为弹性元件材料的圆柱式结构，其 $0.23\phi \approx 2\alpha_L$ ，则灵敏系数的温度系数计算公式为：

$$\frac{\Delta S}{S} = \gamma - \beta_E \quad (25)$$

采用同样的方法可以推导出悬臂梁结构，灵敏系数的温度系数计算公式为：

$$\frac{\Delta S}{S} = \gamma - \beta_E - 2\alpha_L \quad (26)$$

轮辐式结构灵敏系数的温度系数计算公式为：

$$\frac{\Delta S}{S} = 0.23\phi + \gamma - \beta_E - 2\alpha_L \quad (27)$$

从公式可以看出,灵敏系数的温度误差是一个系统性的误差,即当环境温度升高时,弹性元件的弹性模量降低,灵敏系数变大,通常为 $3.5 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ 。对同一种弹性元件和电阻应变计来说,圆环、板环式结构要比圆柱式、剪切梁式结构的灵敏系数温度误差小一些,大约小6~7%。灵敏系数温度误差主要取决于弹性元件材料和电阻应变计材料及制造工艺,在较小程度上与弹性元件的结构有关。大量试验证明,对于同类型称重传感器来说,灵敏系数温度误差的分散度一般均小于10%,主要是制造工艺引起的,这就为批量进行称重传感器灵敏度温度补偿创造了条件。

五、结束语

称重传感器结构设计先进性和合理性的一个重要标志,就是尽量减小弹性元件固有的非线性误差,使其在工作中性能波动减至最小,同时还应该通过有效的电路补偿与调整减小各种温度效应引入的误差,提高称重传感器的准确度、稳定性和可靠性。利用数学模型对引起称重传感器非线性、滞后、蠕变等单项误差和零点、灵敏度温度误差的诸因素进行分析和推算,已成为现代称重传感器设计和误差分析的重要手段。本文通过建立称重传感器温度特性的数学模型和利用数学公式对电阻应变计温度视应变、温度对灵敏系数的影响进行分析得出:应用各种温度效应的数学模型和拟合公式,可以在计算机上编程计算出各种情况下电桥输出随温度变化的关系,找出减小温度误差的有效方法,提高称重传感器的设计和制造水平。

[参考文献]

- 【1】VISHAY.Micro-Measurements Division: Strain Gages Temperature Elect Tech Nnote,1998.
- 【2】BLH.Electronics: Practical Strain Gage Measurements Application Note,1993.
- 【3】孙富强.称重传感器温度特性分析[C].太原称重技术研讨会论文.1990。
- 【4】赵才国.电阻应变计蠕变特性设计[C].第三届全国电阻应变计及其应用技术会议论文集.1993。
- 【5】OIML R60 国际建议《称重传感器计量规程》1991年版和1993年英文版附录A《称重传感器型式评定试验报告格式》。
- 【6】国际建议 OIML R60-1 2017 (E-cn) 《称重传感器计量要求》。

作者简介:刘九卿(1937—),男、汉族,辽宁省海城市。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。现为中国衡器协会技术顾问,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》,在有关杂志上共发表学术论文130余篇。