

应变式称重传感器的稳定性及其处理工艺

中国运载火箭技术研究院第七〇二研究所 刘九卿

【摘要】 本文探讨了作为称重传感器重要质量指标的长期稳定性及其评定方法，在分析影响称重传感器稳定性各种因素的基础上，得出提高稳定性的有效途径就是采取各种技术措施与工艺手段，使称重传感器在生产过程中基本渡过初始不稳定期，把性能波动减至最小。并简要介绍了几种常用的稳定性处理工艺。

【关键词】 称重传感器 准确度 稳定性 可靠性 制造工艺 残余应力 稳定性处理 性能波动

一、概述

准确度、稳定性和可靠性是称重传感器的重要质量指标，是广大用户最关心的三大问题，同时也是我国称重传感器与工业发达国家同类产品相比较的主要差距。其中稳定性是基础，没有稳定性谈何称量准确度和工作可靠性。业内人士有一个共同体会，即在目前条件下研制一个高准确度的称重传感器并不困难，但研制一个长期稳定性好的称重传感器却十分困难；小批量生产称重传感器的质量尚可控制，大批量生产却难以控制。近些年来，国家质量监督检验检疫总局委托国家传感器质量监督检验中心，对称重传感器产品质量的多次国家监督抽查结果充分说明了这一点。

称重传感器的稳定性分为三个时期，即初始不稳定期、稳定期和疲劳不稳定期。在初始不稳定期内称重传感器的性能波动较大，主要表现在零点和灵敏度的不稳定。这是因为弹性元件经过毛坯锻造、机械加工、热处理、表面处理、表面打磨、电阻应变计粘贴和加压固化等工艺过程，在其内部和胶层之中产生残余应力，随着时间的增加残余应力逐渐释放，造成称重传感器在使用早期性能不稳定。一般都是在称重传感器出厂前，通过各种技术措施与工艺手段模拟使用条件，进行各种稳定性处理（也称人工老炼试验）使其在生产过程中基本渡过初始不稳定期，把性能波动减至最小，流通到用户组秤调试时已进入稳定工作时期。

二、称重传感器的稳定性

称重传感器的稳定性对于各类电子衡器和电子称重系统是至关重要的，它决定了整个产品和系统的稳定性。目前国内外对称重传感器的稳定性尚无统一的评定标准和测试方法，世界各国的称重传感器生产企业都承认稳定性是称重传感器的重要质量指标，但在产品样本和使用说明书中却很少给出稳定性指标。许多企业因称重传感器是采用焊接密封抽真空充氮工艺，就注明防护密封等级为 IP68；采用聚氨酯等灌封胶实施盲孔灌封，就注明防护密封等级为 IP67，以此来提示用户本称重传

感器可以较长时期工作。只有极少数企业给出了在半年或一年内，称重传感器灵敏度变化的最大允许误差。不给出稳定性指标不等于稳定性不重要，事实上各国的称重传感器生产企业，都在设计和制造的全过程中，采取各种技术措施和工艺手段不断提高称重传感器的稳定性。那么究竟如何认识和理解称重传感器的稳定性呢？就是在一定时间内和相同条件下其特性变化的程度，主要是零点和灵敏度的变化程度，也可以说是零点和灵敏度的稳定性。

所谓零点的稳定性，就是称重传感器在一定时间内和相同条件下，零点输出的最大变化量。零点输出稳定性 Z_w 用%FS/三个月，%FS/半年，%FS/年等表示，可用下式计算：

$$Z_w = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_0} \times 100\%$$

式中： Z_2 —在规定时间内零点输出的最大值；

Z_1 —在规定时间内零点输出的最小值；

Z_0 —零点输出的标称值

所谓灵敏度的稳定性，就是称重传感器在一定时间内和相同条件下，灵敏度的最大相对变化量。灵敏度稳定性 S_w 用%/三个月，%/半年，%/年等表示，可用下式计算

$$S_w = \frac{S_2 - S_1}{\frac{1}{2}(S_2 + S_1)} \times 100\%$$

式中： S_2 —在规定时间内灵敏度最大值；

S_1 —在规定时间内灵敏度最小值。

测试零点和灵敏度稳定性时，在规定的测试时间内，至少应有时间间隔基本相等的 10 次以上测试数据，然后再取其中的最大值和最小值进行计算。若每次测试时温度无法保持相同，允许根据实测的零点和灵敏度温度系数进行计算修正。

在实际应用中，称重传感器灵敏度稳定性的最大允许误差，可根据用途、使用环境、准确度等级及其它条件进行规定，一般在半年或一年使用时间内，灵敏度变化不超过该称重传感器准确度等级的最大允许误差最为理想，但这是比较困难的。通常要求在半年或一年使用时间内，灵敏度变化不超过该称重传感器准确度最大允许误差的 2 倍，就是稳定性比较好的称重传感器。

三、影响称重传感器稳定性的因素

影响称重传感器稳定性的因素较多，归纳起来主要有：

1. 称重传感器的结构

称重传感器的弹性元件、外壳、膜片及上压头、下压垫的设计，都必须保证受载后在结构上不产生性能波动，或性能波动很小。为此在称重传感器设计时，应尽量作到应变区受力单一，应力均匀一致；贴片部位最好为平面；在结构上保证具有一定的抗偏心载荷和侧向载荷的能力；安装力远

离应变区，测量时应避免载荷支承点的位移。尽管称重传感器属于装配制造产品，但为了保证具有最佳技术性能和长期稳定性，尽可能将它设计成一个整体结构。

2. 弹性元件的金属材料

弹性元件的金属材料对称重传感器的综合性能和长期稳定性起关键作用。应选择强度极限和弹性极限高，弹性模量的时间、温度稳定性好，弹性滞后小，机械加工和热处理产生的残余应力小的材料。有资料表明：只要材料淬火后的塑性好，它在机械加工和热处理后的残余应力就小。还要特别重视弹性模量随时间的稳定性，要求在称重传感器使用寿命期间内材料的弹性模量不发生变化。

3. 机械加工与热处理工艺

弹性元件在机械加工过程中，由于表面变形的不均匀产生较大的残余应力，切削用量越大，残余应力就越大，磨削加工产生的残余应力最大。因此应制订合理的加工工艺和规定适当的切削用量。弹性元件在热处理过程中，由于冷却温度不均匀和金属材料相变等原因，在芯部和表层产生方向不同的残余应力，其芯部为拉应力，表层为压应力。必须通过回火处理工艺，在其内部产生方向相反的应力，与残余应力相互抵消，减少残余应力的影响。

4. 电阻应变计与应变粘结剂

电阻应变计应具有最佳性能，要求灵敏系数稳定性好，热输出小，机械滞后和蠕变小，应变量为 1000×10^{-6} 时疲劳寿命可达 10^8 ，电阻值偏差小，批次质量均一性好等。

应变粘结剂应具有粘结强度大，抗剪强度高；弹性模量较大且稳定；电绝缘性能好；具有与弹性元件相同或相近的热膨胀系数；蠕变和滞后小；固化时胶层体积收缩小等。粘贴电阻应变计时一定要严格控制胶层厚度，因为粘结强度随胶层厚度的增加而降低。这是由于薄的胶层需要更大的应力才能变形，不易产生流动和蠕变，界面上的内应力很小，产生气泡和缺陷的几率也比较小，应变传递性能好，只要防护密封合理就可达到较高的稳定性水平。

5. 制造工艺流程

应变式称重传感器的工作原理和总体结构决定了，在生产工艺流程中有些工序必须手工操作，人为的因素对称重传感器的质量影响较大。因此必须制订科学合理并可重复的制造工艺流程，并在其中增加电子计算机控制的自动化或半自动化工序，尽量减少人为因素对产品质量的影响。

6. 电路补偿与调整

应变式称重传感器属于装配制造，贴片组桥后就形成了产品，由于内部不可避免的产生一些缺陷和外界环境条件的影响，称重传感器的某些性能指标达不到设计要求，因此必须进行各项电路补偿与调整，提高称重传感器本身的稳定性和对外部环境条件的稳定性。完善而精细的电路补偿工艺，是提高称重传感器稳定性的重要环节。

7. 防护与密封

防护与密封是称重传感器制造工艺流程中的要害工序，是称重传感器耐受客观环境和感应环境影响而能稳定可靠工作的根本保障。如果防护密封不良，粘贴在弹性元件上的电阻应变计及应变粘

结剂胶层，都会吸收空气中的水分而产生增塑，造成粘结强度和刚度下降，引起零点漂移和输出无规律变化，直至称重传感器失效。因此有效的防护密封是称重传感器长期稳定工作的根本保证，否则将使各项工艺成果前功尽弃。

8. 稳定性处理（人工老炼试验）

提高称重传感器的稳定性除处理好上述各种因素的影响外，最重要的途径就是采取各种技术措施和工艺手段，模拟使用条件进行有效的人工老炼试验，尽量多的释放残余应力使其性能波动减至最小。

四、称重传感器的稳定性处理工艺

由于弹性元件在毛坯锻造、机械加工、热处理、表面打磨、电阻应变计粘贴和加压固化等工艺过程中产生各种残余应力，随着时间和使用条件的变化不断松弛释放，而造成称重传感器的性能波动，主要表现在零点和灵敏度不稳定。为使称重传感器在生产过程中渡过初始不稳定期，采用工艺手段模拟各种使用条件进行试验，使其尽快稳定的工艺称为稳定性处理，也称人工老炼试验。

称重传感器释放残余应力的稳定性处理方法，除制造工艺流程中常用的温度老化和电老化处理外，主要有两种方法，即热处理法和机械法。

1. 热处理法

多应用于铝合金称重传感器，在毛坯加工成弹性元件后进行，主要有反淬火法、冷热循环法和恒温时效法。

（1）反淬火法

国内也称深冷急热法。将铝合金弹性元件置于 -196°C 的液氮中，保温 12 小时后，迅速用新生的高速蒸汽喷射或放入沸水之中。因深冷与急热产生的应力方向相反而相互抵消，达到释放残余应力的目的。试验表明，采用液氮——高速蒸汽法可降低残余应力 84%，采用液氮——沸水法可降低残余应力 50%。

（2）冷热循环法

冷热循环稳定性处理工艺为 $-196^{\circ}\text{C} \times 4$ 小时/ $190^{\circ}\text{C} \times 4$ 小时，循环 3 次，可使残余应力下降 90% 左右，并且组织结构稳定，微量塑性变形抗力高，尺寸稳定性好。释放残余应力的效果如此明显，一是因为加热时原子热运动能量增加，点阵畸变减小或消失，内应力下降，上限温度越高，原子热运动越大塑性越好，越有利于残余应力释放。二是因为冷热温度梯度产生的热应力与残余应力相互作用，使其重新分布而获得残余应力下降的效果。

（3）恒温时效法

恒温时效即可消除机械加工产生的残余应力，又能消除热处理引入的残余应力。LY12 硬铝合金在 200°C 高温下恒温时效时，残余应力释放与时效时间关系表明，保温 24 小时，可使残余应力下降 50% 左右。

2. 机械法

机械法稳定性处理，多在称重传感器电路补偿与调整和防护密封后，基本形成产品时进行。主要工艺有脉动疲劳法、超载静压法和振动时效法。

(1) 脉动疲劳法

将称重传感器安装在低频疲劳试验机上，施加下限为 $(1/5\sim 1/3)$ 额定载荷，上限为额定载荷或120%额定载荷，以每秒3~5次的频率进行5000~10000次的循环。可有效的释放弹性元件、电阻应变计、应变粘结剂胶层的残余应力，提高零点和灵敏度稳定性的效果极为明显。

(2) 超载静压法

理论上适用于各种量程，但在实际生产中以铝合金小量程称重传感器应用较多。其工艺是：在专用的标准砝码加载装置中或简易的机械螺旋加载设备上，对称重传感器施加125%额定载荷，保持4~8小时，或施加110%额定载荷，保持24小时，两种工艺都可以达到释放残余应力，提高零点和灵敏度稳定性的目的。由于超载静压工艺所用设备简单，成本低，效果好，为铝合金称重传感器制造企业广泛采用。

(3) 振动时效 (Vibratory Stress Relieving) 法

将称重传感器安装在额定正弦推力满足振动时效要求的振动台上，根据称重传感器的额定量程估算频率，来决定施加的振动载荷、工作频率和振动时间。共振时效比振动时效释放残余应力的效果更好，但必须测量出称重传感器的固有频率。振动时效和共振时效工艺的特点是：能耗低，周期短，效果好，不损坏弹性元件表面，而且操作简单。

振动时效的机理，目前尚无定论。国外专家提出的理论和观点有：塑性变形理论、疲劳理论、晶格错位滑移理论、能量观点及材料力学观点等。只是作出了不同程度的解释，但都没有充分的、有说服力的、权威性的试验证明。这些理论和观点往往是相互交叉的，所以可认为振动时效的机理是一个复杂的过程。

经过振动时效的试验研究，有些专家倾向于用材料力学的重复应力过载的观点，解释振动时效的机理。即作用在弹性元件上的振动应力与其内部的残余应力相互作用，使残余应力松弛并释放。

五、结语

1. 称重传感器的稳定性主要是灵敏度的稳定性，即在一定时间内和相同条件下灵敏度的最大相对变化量。

2. 提高称重传感器稳定性的重要途径，就是采取各种技术措施和工艺手段，模拟使用条件进行试验，使其在生产过程中基本渡过初始不稳定期，把性能波动减至最小。

3. 称重传感器的稳定性在一定程度上反映了制造工艺流程、电路补偿技术和稳定性处理工艺水平。确保称重传感器本身的稳定性和对外界环境条件的稳定性，必须在原材料、元器件的环境应力筛选，可重复的工艺流程和完善精细的电路补偿等方面下功夫。

4. 称重传感器稳定性问题的研究方向，应主要放在工艺实施过程中如何防止或少产生残余应

力上，其次才是如何释放和消除残余应力。

5. 对于大批量生产的称重传感器必须严格进料、进片标准，稳定工艺流程和生产过程的质量控制。做到弹性元件材料、机械加工、热处理、关键制造工艺、补偿原材料元器件的一致性。

6. 根据称重传感器弹性元件的结构、金属材料、冷热加工情况，有选择的应用上述稳定性处理工艺，并不是应用的工艺越多越好，而是释放残余应力效率高，处理工艺越简单越好。