

# 称重传感器的检测技术与执行标准

刘九卿 中国运载火箭技术研究院第七零二研究所

【摘要】研制和生产符合 OIML R60 国际建议和 GB/T7551—2008 国家标准要求的应变式称重传感器，国内外技术专家的共识概括起来就是“结构是基础，材料是关键，工艺是核心，检测是保障”。本文以应变式称重传感器制造工艺过程的检测技术与装备为切入点，介绍了电阻应变计工作特性检测与质量控制；零点温度、灵敏度温度补偿测试技术与测试装备；计量性能检测技术及其液压全自动叠加式力标准机、静重式力标准机；称重传感器技术性能执行标准的主要内容。

【关键词】称重传感器；电阻应变计；计量性能；检测技术；工艺装备；执行标准

## 一、概述

应变式称重传感器（以下简称为称重传感器）是知识密集、技术密集和技巧密集型高技术产品。研制和生产过程所涉及的内容多、离散大，技术密集程度高，边缘学科色彩浓，是多种学科相互交叉、相互渗透的结晶。批量生产称重传感器对工艺装备和检测手段要求高，制造工艺比较复杂，是支持工艺、基础工艺、核心工艺、特殊工艺的科学运用和集成。在称重传感器总体结构、弹性元件金属材料和热处理工艺、批量生产工艺流程都确定的条件下，各个制造工序的检测技术、检测装备以及检测结果处理就成为关键问题。检测技术的科学性和合理性，检测装备的适用性和精确性，是研制生产称重传感器一贯符合国家标准的根本保障。这就是国内外称重传感器专业人员所总结的“从工艺看水平，从装备看质量”的道理。

称重传感器的工作原理和制造工艺决定了其质量管理的特殊性，主要表现在以下几个方面：

1. 粘贴在弹性元件上的电阻应变计及其使用的应变胶粘剂，是直接影响称重传感器准确度、稳定性的核心部件，是产品质量控制的源头，必须对其电学、力学、化学特性进行严格的控制和精细的筛选。

并配备先进的粘贴电阻应变计装备，例如采用智能机器人粘贴电阻应变计或使用粘贴电阻应变计辅助系统。后者应用较多，该系统采用了高清晰液晶视频图像技术，可根据弹性元件结构、外形尺寸、电阻应变计定位尺寸，自主放大弹性元件粘贴区域，提供清晰适合贴片放大倍数的动态视频图像。只要将放大的电阻应变计定位标记，对准视频显示在弹性元件上的定位叉丝，就是正确的贴片位置。消除了操作者人工对位、定位造成的误差，提高了电阻应变计粘贴在弹性元件上的准确度和各个弹性元件电阻应变计粘贴位置的一致性。同时配备手动或自动安装电阻应变计加压夹具的工艺装备，以及控温精度高、工作段温度均匀性好的电阻应变计固化、后固化工艺装备（例如隧道式加温控温烘道）。保证粘贴在各个弹性元件上的电阻应变计完成固化、后固化工艺后应变胶粘剂层物理和机械性能的最佳性和一致性。

2. 电阻应变计组成的惠斯通电桥电路的零点温度和灵敏度温度补偿，是保证称重传感器具有较高计量性能的核心工艺，必须采用科学合理的补偿工艺和先进的高效智能温度测试与补偿系统。由于批量生产的每一个称重传感器都必须进行零点温度补偿测试，不在零点温度补偿误差范围内的一定数量的称重传感器需要进行零点温度补偿作业，即在惠斯通电桥电路温度系数小的桥臂，实施焊接零点温度补偿电阻作业，并进行二次零点温度补偿误差测试，直至零点温度误差合格为止。因此要求配备技术性能稳定的零点温度补偿工艺装备和科学合理的补偿软件系统，以提高零点温度补偿的精确度和成功率。

3. 粘贴在弹性元件上的电阻应变计，以及所用的应变胶粘剂，都会受到空气中水分和氧气的影响，因为水能渗入几乎所有的聚合物而产生增塑。如果防护与密封不良，电阻应变计和应变胶粘剂吸收空气中的水分，将会使电阻应变计胶粘剂层膨胀增塑，造成绝缘电阻、粘接强度和刚性急剧下降，引起零点漂移和输出无规律变化，直至称重传感器失效。为保证称重传感器能耐受客观环境和感应环境影响而能稳定可靠工作，必须实施有效的防护与密封工艺。

4. 批量生产的称重传感器经过粘贴电阻应变计、固化和后固化、零点和灵敏度温度补偿、灵敏度一致性调整、防护与密封、稳定性处理后，必须按国家标准要求进行性能检测。为保证批量生产的每一个称重传感器都能达到国家标准规定的各项性能要求，必须拥有先进的、高准确度的测试装备和试验手段，例如：高准确度大间距叠加式力标准机，进行有效的稳定性处理的工艺装备等。研制生产高准确度数字式称重传感器必须配备静重式力标准机，及其配套的高低温试验箱。

处于国际市场引导者地位的称重传感器制造企业，都有自己企业独特的制造工艺和自动化、智能化生产线。大多数工艺装备是结合本企业制造工艺特点自行设计制造，少数专业性强、难度大的工艺装备、

测试仪表则与专业制造企业合作完成。不仅保证了本企业制造工艺装备和检测手段的先进性、制造工艺流程的科学性和可重复性，而且提高了批量生产工艺流程的稳定性和工作效率，保证批量生产的每一个称重传感器都能满足 OIML R60 国际建议相应等级的要求。国外称重传感器制造企业对制造工艺装备和检测手段的重视、改进和创新，值得国内称重传感器制造企业认真研究和借鉴。

称重传感器的检测技术与企业质量管理体系的基本要求密不可分，即检测技术与装备应满足企业形成的系统化、文件化、法制化、规范化、智能化的质量管理体系，从而进一步提升管理有效性的效率，追求和建立卓越的现代管理模式。为此，必须了解称重传感器检测技术各个环节的测试要求、工艺装备、测试质量控制方法；执行标准及其改版背景、内容结构的变化等一系列新的要求。

## 二、称重传感器用电阻应变计工作特性检测与质量控制

电阻应变计具有优良的工作特性，且敏感栅尺寸符合弹性元件应变区的应力分布要求，是研制和生产称重传感器质量控制的源头。处于国际市场引导者地位的称重传感器制造企业，都有自己的电阻应变计研制生产部门或独立的研制生产企业，以便对大批量生产的不同结构弹性元件所需要的电阻应变计提供一些特殊服务。其目的是充分满足本企业称重传感器制造工艺特点与大批量生产工艺流程需要，保证批次与总体生产质量，使生产的每一个称重传感器都符合 OIML 国际建议和国家标准相应等级的要求。结合本企业称重传感器制造工艺特点和大批量生产线工艺装备情况，提出的特殊要求归纳起来主要有：

1. 对电阻应变计所用的应变电阻合金箔材成分、厚度、热处理工艺规范提出较严格的要求，即希望具有较大的应变灵敏系数、高而稳定的电阻率、分散度小的电阻温度系数等，这是电阻应变计质量控制的源头。其中应变电阻合金成分决定电阻应变计的电学性能，箔材厚度决定电阻应变计电阻值调整工艺的效率 and 电阻值的精确度与稳定性，热处理工艺规范决定电阻应变计的电学和力学性能。

2. 为保证电阻应变计具有优良的工作性能指标和批次生产质量的稳定性，要求在电阻应变计制造工艺中废弃传统的甩光刻胶工艺，实施先进的集成化制造工艺。即将预先制造的符合长度、宽度和厚度要求的电阻应变计基底材料与同样尺寸的电阻应变计合金箔材粘贴在一起，通过专用的加温加压的热压机使其固化为一个整体，然后再进行光刻、腐蚀等工艺作业。一般加温加压的热压机一次可以完成数百片箔材和基底的粘贴固化工艺，不但提高了工作效率，而且保证了电阻应变计基底厚度的均匀性。

3. 电阻应变计制造工艺流程中的敏感栅图形质量检查。用放大镜进行人工检查，生产效率低，质量水平受人工技能的影响，建议采用科学合理的智能图形识别技术与装备，按质量要求严格检查，使得每一片电阻应变计敏感栅图形都符合要求。为满足智能机器人或粘贴电阻应变计辅助系统粘贴电阻应变计的需要，必须采用敏感栅全密封工艺和激光剪切电阻应变计外形尺寸新工艺，保证外形尺寸的一致性。

4. 为保证本企业研制生产的称重传感器具有较高的准确度和稳定性，要求电阻应变计基底尺寸中敏感栅的头部至基底边缘的宽度（敏感栅的头部到基底端部边缘的距离）比一般电阻应变计该尺寸增加2mm，以增大电阻应变计基底剪应力传递区域的面积，降低弹性元件受外力作用时电阻应变计基底产生的剪应力。其原因是称重传感器弹性元件的变形是以剪切的形式依次传递到电阻应变计基底、敏感栅上，变形时电阻应变计基底两端的位移最大，所以剪应力最大，且两端剪应力符号相反，中间截面处位移为零，故剪应力为零。增大电阻应变计敏感栅头部至基底边缘的宽度，实际上就是增大电阻应变计基底剪应力传递区域的面积以降低剪应力，有利于提高称重传感器的准确度和稳定性。

5. 为满足较大批量生产称重传感器制造工艺的要求，提高生产效率，要求批量生产的电阻应变计温度系数偏差的分散度尽量小。生产实践证明，应用同一批应变电阻合金箔材制造的电阻应变计或温度系数偏差分散度小的电阻应变计制造的称重传感器，在零点温度误差试验测试中有70-80%的称重传感器符合零点温度误差要求，不用进行零点温度补偿作业，极大的提高了零点温度补偿工艺效率。

6. 为减轻称重传感器零点输出标准化调整的工作量，提高工作效率，降低生产成本，要求电阻应变计电阻值公差一律为负差。这样在称重传感器零点输出标准化调整工艺中，只需要焊接串联金属膜电阻即可，省略了较为复杂的焊接并联金属膜电阻作业，提高了工作效率。

如果称重传感器制造企业没有自己的电阻应变计生产部门，则应与电阻应变计供货企业商定，按上述技术要求中的一些条款进行生产并批量供货。如不能满足要求，就必须自备电阻应变计外观质量和工作特性检测装备。主要是光学投影仪和功能单一的高精度电阻表。

光学投影仪的光学原理是：光源发出的光线经聚焦镜照明被测物体，再由投影物镜把被照明物体放大的轮廓或表面像投射在屏幕上，以便进行轮廓尺寸坐标测量、对比测量以及表面状况观察，是综合性的精密度较高的光学量仪。在电阻应变计制造与应用企业，主要用于检查电阻应变计敏感栅尺寸和表面轮廓形状。由于电阻应变计敏感栅图形制版十分严格，采用蚀刻技术加工成形，因此图形尺寸不必测

量，只检查敏感栅蚀刻质量和电阻应变计基底、覆盖层、焊点及引线是否符合要求即可。检查时，将电阻应变计置于投影仪工作台上，在透射或反射照明下，由物镜成放大实像并经反射镜成像于投影屏磨砂面上，此时可用预先绘制好的标准放大图对其进行比较测量，或直接观看投影屏上的放大图形，根据对敏感栅、基底、覆盖层、焊点和引线的要求检查电阻应变计外观质量。制造电阻应变计时，由于所用应变电阻合金材料性能的分散，主要是电阻率的变化、尺寸公差、生产工艺条件不稳定和调阻工艺缺陷等使电阻值分散较大，对称重传感器温度性能有一定影响。因此用于高准确度称重传感器时应进行较严格的测试配组，把电阻值符合要求的电阻应变计，配成 4 片或 8 片为一组粘贴在同一个弹性元件上，不仅减小称重传感器的零点输出，而且还有利于制造过程中的各项电路补偿与调整。在电阻应变计电阻值检查和试验测量过程中，较多的使用功能单一的高精度电阻表，国产 HPRM3000 型高精度电阻表就是典型代表。该型高精度电阻表的特点是功能单一，可靠性高；准确度为Ⅲ级，非线性 $\leq 0.002\%F.S$ ；采样速率每秒 100 次；满量程温度系数 $\leq 10PPM/^{\circ}C$ ；6 位 LCD 显示，交直流两用。

### 三、称重传感器零点温度误差测试与补偿系统

称重传感器在无外载荷作用时的输出称为零点输出。零点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主要因素是：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，在环境温度发生变化时，都会产生不同程度的热胀冷缩，使电阻应变计敏感栅伸长或缩短引起电阻变化；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环境温度变化引起电阻值的改变，其结果是称重传感器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误差测试和补偿。

上述引起零点温度漂移的各个因素，都可以看成是电桥四个臂上电阻应变计的电阻温度系数不一致而造成的。如果能使电桥四个臂的电阻温度系数一致或非常接近，就可以消除或最大限度的减小零点温度漂移。根据这一理论，首先要找出电桥中电阻温度系数小的桥臂，并在其上串入一个电阻温度系数大的零点温度补偿电阻  $R_t$ ，以提高这个桥臂总的电阻温度系数，从而使惠斯通电桥四个桥臂的电阻温度系数一致或接近，就可起到抵消零点温度漂移影响，达到零点温度补偿的目的。

高效智能零点温度误差测试与补偿系统是代表称重传感器生产工艺水平的重要装备。一般硬件由接口单元、高低温试验箱及箱内的接线单元、高稳定度激励电源、数据采集单元、微机系统、打印机构成。每套系统可使用多组数据采集单元与多组激励电源、接线箱等组成数百个零点温度补偿测试点。如是多种类型称重传感器可以设置不同的系统编号，以便归档和数据查询。其特点是：

(1) 高低温试验箱的高温低温转换、多路数据采集、数据打印输出全部自动完成，补偿温度范围宽， $-20^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$ ；

(2) 系统校准简单、方便，只进行一次零点采集和数据比例输入即可完成；

(3) 可设定室温 - 高温 - 室温采集循环和室温 - 低温 - 高温 - 室温采集循环，并判别室温数据的重复性；

(4) 多路模拟转换开关，配合软件数据处理，采集数据稳定可靠，可同时进行几十路测试；

(5) 可以设定三组补偿、控制参数，能适应多品种称重传感器生产；

(6) 操作系统功能由中文菜单提示，操作简单、适用。

#### 四、称重传感器技术性能检测与灵敏度温度测试系统

##### 1. 对称重传感器技术性能检测与灵敏度温度补偿测试系统的要求

称重传感器技术性能考核的主要质量指标，对于C级和D级产品共有7项：称重传感器误差 ( $E_L$ )、重复性误差 ( $E_R$ )、温度对最小静载荷输出的影响 ( $C_M$ )、称重传感器蠕变误差 ( $C_C$ )、最小静载荷输出恢复值 ( $C_{MDLOR}$ )、称重传感器大气压力影响 ( $C_P$ )和称重传感器湿度影响 ( $C_{Hmin}$ )。其中称重传感器误差 ( $E_L$ )、重复性误差 ( $E_R$ )、温度对最小静载荷输出的影响 ( $C_M$ )、蠕变误差 ( $C_C$ )，需要在 $20^{\circ}\text{C} \rightarrow 40^{\circ}\text{C} \rightarrow -10^{\circ}\text{C} \rightarrow 20^{\circ}\text{C}$ 三个温度下进行四次试验才能求得，所以必须配备能很容易安装在力标准机测试平台上的高低温试验箱。

称重传感器的灵敏度温度误差是由于环境温度升高，弹性元件材料的弹性模量降低，灵敏度增大所

至。如果在称重传感器灵敏度增大的同时，使电桥电路实际提供给电桥的电压也与之成比例的减小，保持提供给电桥的电压与电桥的实际电压的比值不变，则灵敏度也就保持不变，这就是灵敏度温度补偿原理。根据这一补偿原理，在电桥电路提供电压的回路中，串联一个随环境温度变化而变化的灵敏度温度补偿电阻，当环境温度升高时，灵敏度温度补偿电阻也随之增大，尽管提供给电桥电路的电压保持不变，但由于电阻分压作用，使电桥电路的实际电压减小，从而导致称重传感器的输出信号不变，这就对因温度升高弹性模量降低，灵敏度增大起到补偿作用。灵敏度温度补偿工艺同样需要在 20°C → 40°C → -10°C → 20°C 三个温度下进行四次试验才能求得，所以也须配备力标准机测试平台上的高低温试验箱。

## 2. 称重传感器技术性能检测与灵敏度温度误差测试补偿装备

在称重传感器制造工艺流程中，当完成各项电路补偿与调整 and 全密封工艺后，进行各项技术性能检测时多采用液压式力标准机、液压全自动叠加式力标准机，较高准确度等级和数字式称重传感器的技术性能检测，多采用静重式力标准机。

静重式力标准机所施加的力  $F$  根据如下效应求出：加力砝码的质量  $m$ ，当地重力加速度  $g_{loc}$ ，加力砝码的浮力修正。设加力砝码的材料密度为  $\rho_m$ ，空气密度为  $\rho_a$ ，则施加的力值为：

$$F = m \times g_{loc} \left( 1 - \frac{\rho_a}{\rho_m} \right)$$

静重式力标准机的准确度可达  $1 \times 10^{-5}$ 。

液压式力标准机砝码所施加的力，是通过两个活塞和油缸系统进行传递，其传递比定义为两套油缸活塞系统的有效面积  $A_2$  与  $A_1$  之比，则施加的力值为：

$$F = m \times g_{loc} \left( 1 - \frac{\rho_a}{\rho_m} \right) \times \frac{A_2}{A_1}$$

液压式力标准机的准确度可达  $1 \times 10^{-4}$ 。

液压全自动叠加式力标准机的加力系统，是将力施加到串联配置的标准力传感器与被检测的称重传

传感器上，对其输出信号进行比较，确定被检测称重传感器的性能指标。其突出特点是加力速度快，工作效率高。液压全自动叠加式力标准机最高准确度可达  $5 \times 10^{-4}$ 。

由于称重传感器的灵敏度温度误差测试与补偿工艺，需要在  $20^{\circ}\text{C} \rightarrow 40^{\circ}\text{C} \rightarrow -10^{\circ}\text{C} \rightarrow 20^{\circ}\text{C}$  三个温度下，进行四次即加温又加载试验测试才能完成，所以液压全自动叠加式力标准机或静重式力标准机必须兼顾灵敏度温度误差测试功能。即选购或自行研制液压全自动叠加式力标准机时，要求承受载荷的立柱间距大、承载台面与标准测力传感器之间有较大行程，以便在力标准机内安放较大尺寸的高低温试验箱。一般高低温试验箱中间测试一个称重传感器，四个角各放置一个准备测试的称重传感器，目的是提高灵敏度误差测试效率。

生产批量大的小量程称重传感器的技术性能检测，多采用群控静重式力标准机系统。

#### (1) 液压全自动叠加式力标准机

液压全自动叠加式力标准机采用了先进的液压、自动控制和机械传动技术，是集多种科技成果于一身的高科技工艺装备。它具有自动化程度高，加载准确且稳定性好，液压系统无泄漏，工作噪音小等特点。通过计算机控制，能采集分析控制过程的所有状态，适时采集检测数据并加以分析处理和打印，还能对异常状态迅速做出响应，并具有多重保护功能。该力标准机还配备了手动功能，作为自动功能的备份和补充，对于处于研制过程中的称重传感器不需要编程的检测，可由手动完成。进行检测时，液压全自动叠加式力标准机上的标准测力传感器与被检称重传感器串联，当力源对标准测力传感器施加某一力值时，被检称重传感器也受同一力值作用，以达到比对、检测的目的。液压全自动叠加式力标准机的传力精度  $\pm 0.02\% \text{FS}$  (实测精度)；采样时稳定 0.4s，稳定精度  $\pm 0.001\% \text{FS}$ ；每 30 分或  $> 30$  分钟，稳定精度  $\pm 0.004\% \text{FS}$ ；力值的分辨率优于  $\pm 0.005\% \text{FS}$ 。

在进行称重传感器灵敏度温度补偿工艺时，需要在  $20^{\circ}\text{C}—40^{\circ}\text{C}—10^{\circ}\text{C}—20^{\circ}\text{C}$  四个温度循环下，保持各个温度级别进行多级加载并保持载荷测试，这就需要建立灵敏度温度补偿测试系统。该系统是在液压全自动叠加式力标准机内，安放高低温试验箱以及箱内的接线单元，并配有高稳定度激励电源、数据采集单元、微机系统、打印机等。为了提高灵敏度温度补偿工作效率，在对一个称重传感器进行加温、加载测试的同时，在高低温试验箱四个角还需要各放置一台同温度的称重传感器，这就加大了高低温

试验箱的尺寸。因此要求液压全自动叠加式力标准机具有较宽的立柱间距。

## (2) 静重式力标准机

众所周知，模拟式称重传感器并联组装电子秤利用的是平均值电路原理，要求灵敏度公差 $\pm 0.1\%$ ，输出电阻分散度 $\leq 0.29\%$ ，通过标准砝码现场标定，其最底层的溯源器是标准砝码。数字式称重传感器组装数字电子秤是通过灵敏度（mV / V）的转换，来测量被称物体的重量，它的最底层的溯源器不是标准砝码而是标准力源，因此对力标准机的力值准确度要求很高。其有关技术指标应优于被测数字式称重传感器相应技术指标的三倍，一般多采用 $5 \times 10^{-5}$ 准确度等级的静重式力标准机。国内称重传感器制造企业应用较多的是力值精度均高于 $5 \times 10^{-5}$ 的。50t 静重式力标准机，其特点是：

- ①标准砝码单独升降，并可以自由组合，量程适用范围宽，有利于检测多种规格的称重传感器；
- ②每块砝码可单独加载，也可几块砝码或全部砝码组合起来同时加载，即能够满足逐级加载测试要求，又能实现蠕变测试时组合砝码或全部砝码一同快速加载要求，不需另外设置蠕变加载装置；
- ③满负荷全部砝码的加载时间与一块砝码的加载时间几乎一致，加载时间短、测试工作效率高；
- ④每块砝码用一台电机驱动，与国内外同类设备每块砝码用三个电机升降的方式相比，砝码升降运动同步性好，砝码摆动小，加载平稳检测精度高，且所用电机少，工作可靠性高；
- ⑤自动化程度高，砝码升降电机和动横梁升降电机都采用了伺服电机，运动速度控制方便，运动性能等均有较大改善，进而提高了整机性能。

## (3) 群控静重式力标准机系统

为提高小、中量程称重传感器的生产效率，各称重传感器生产企业多在生产线上设置不同量程的群控静重式力标准机系统。该系统由多台具有拉伸、压缩双向加载功能的静重式力标准机、高低温试验箱和控制单元组成。所有被控设备（高低温试验箱、PLC、触摸屏等）都通过 RS232 接口与控制计算机相连接，同时 PLC、触摸屏、静重主机又自成一体，独立组成一个静重机控制系统。该控制系统按程序对砝码和动横梁通过光电传感器进行位置控制，由 PLC 可编程控制器和计算机通过软件完成整个控制

程序，实现对单台静重式力标准机单独控制和多台静重式力标准机同时控制，进行称重传感器误差 ( $E_L$ )、重复性误差 ( $E_R$ )、温度对最小静载荷输出影响 ( $C_M$ )、蠕变误差 ( $C_C$ ) 试验和灵敏度温度补偿测试。由于此种群控静重式力标准机具有活动横梁，在将砝码全部挂上后，通过动横梁可进行一次性的快速加载或卸载，满足快速三次预载试验和蠕变试验加载要求。

## 五、检测称重传感器时与力的产生、传递和测量的影响量分析

### 1. 与力的产生、传递和测量有关的影响因素

在称重传感器应用或检测时，除了非轴向分力的影响外，还有一些分量作用在称重传感器上，它们称之为寄生分量。由于这些寄生分量是二阶的，其对称重传感器输出信号的影响一般小于非轴向分量的影响，但是对研制生产的高准确度称重传感器来说是不能忽视的。这些寄生分量起源于不同的方面，归纳起来主要有以下几种类型：

(1) 检测称重传感器计量性能的标准测力机类型、承载立柱分布和刚度、固定方式，加载平台的不平度、对中性和刚度，用于施加载荷的砝码体积大小的影响等。

(2) 标准测力机的力传递装置影响，这与它们同称重传感器接触表面间的相互作用有关，有些不规范的相互作用会使弹性元件内不同截面之间产生机械应力的变化。事实上，在试验检测中，使力沿着预先给定的方向传递是较困难的，正如使外力作用在一个点上并沿着弹性元件均匀的传递一样也是困难的。

(3) 力的测量装置，即与称重传感器连接的测量线路的类型和所用的测量设备，包括接线单元、高稳定度激励电源、数据采集单元、微机系统等。

基于上述与力的产生、传递和测量有关的影响量，下面讨论所考虑的预先量的效应影响：

### (1) 标准测力机产生的寄生分量的影响

英国学者Anthony Bray (安东尼布雷) 利用安装在 100KN 静重式力标准机上的六分量测量装置，测量出各自独立的六个分量，即垂直方向分力 $Z$ ，互相垂直的两个水平方向分力 $X$ 、 $Y$  和 $Z$  方向力矩 $N$ ， $X$ 、

Y 方向力矩 L、M。测量结果证实：力标准机中固定的和可移动的部件沿着 X 方向的刚度比沿着 Y 方向的刚度低得多。因此，寄生分量 Y 和 L 分别大于 X 和 M，相应的 X 和 M 受力标准机刚度的影响更显著。

### (2) 力传递装置产生的寄生分量的影响

在两个相互作用的接触面上引入的综合应力的性能与接触表面的状态（几何形状、材料种类、硬度、表面粗糙度）有关。该应力可通过受应力分布影响的一些量而定量测定（例如弹性元件的应变）。

由于单一的确切接触表面的状态有一定困难，而且电阻应变计的位置和灵敏度只能被控制到一定的限度，因此测量信号和待测量的力之间的关系可能因一些不易确定的量而变化。尽管如此，这样的变化量对现今某些类型的称重传感器所达到的准确度而言虽不能忽略，但其影响是不显著的。

### (3) 标准传感器与被检测称重传感器及测力机相互作用的误差

在检测过程中进行力的传递时，力的引入条件及被检测称重传感器与测力机的相互作用，对测量的不确定度有较大影响。力的引入问题，在于弯曲力矩和非轴向力的出现。要求单分量标准传感器与被检测称重传感器仅在一个方向灵敏，是不可能完全满足的，因而弯曲力矩分量和横向力分量导致示值不准确。高准确度称重传感器检测要求在轴对称的多个不同方位来研究标准力传感器，一般对比测量七个不同方位，标准力传感器每  $60^\circ$  角旋转一次，在  $0^\circ$  角时有一次重叠。要求  $360^\circ$  和  $0^\circ$  位置的示值重复性好，相对旋转误差不超过  $\pm 2 \times 10^{-6}$ 。除了旋转误差外，若再注意到重复性误差，则可以得到该标准力传感器的相对测量不确定度不超过  $\pm 3 \times 10^{-6}$ 。

## 2. 与力的产生、传递和测量有关的影响量分析

### (1) 表面形状和硬度影响

试验结果表明上、下压垫的接触面都影响力的引入和传递。Jenkins（詹金斯）通过上压垫的试验发现，当上压垫表面平滑时，其表面硬度的影响可忽略不计。同样上压垫厚度的影响也可忽略不计，因为实际上接触仅发生在称重传感器的球面接近中心的一块很小的面积上。一般要求上压头的硬度小于弹性元

件的硬度，但不能太低，因为压头硬度越低、粗糙度越大，在较小的载荷下会产生较大的变形，将使合力作用点发生变化，引起称重传感器灵敏度变化。

用不同硬度的钢、铜、铝压头进行试验表明：表面粗糙度同为  $R_a = 6.3\mu\text{m}$ ，在相同载荷作用下其变形分别为  $2.2\mu\text{m}$ 、 $3.6\mu\text{m}$ 、 $5.4\mu\text{m}$ ；第二次加载时的变形分别为  $0.33\mu\text{m}$ 、 $0.38\mu\text{m}$ 、 $0.60\mu\text{m}$ 。试验结果还表明上压垫的形状（从平面到球面）对三个力矩分量的影响是显著的。通过对平面、凸面、凹面三种下压垫进行试验得出，下压垫形状的影响大于其硬度的影响约一个数量级，在最差的情况下，影响量为输出值的 0.3%。

### (2) 接触面大小、材料性质和表面粗糙度影响

用树脂称重传感器模型在橡胶、树脂和钢表面上进行试验，结果表明接触面压力低滞后误差小，接触面压力高滞后误差大。接触面剪应力的分布与压垫宽度及模型材料弹性模量 ( $E_m$ ) 和压垫材料弹性模量 ( $E_s$ ) 的不同有关。

当模型和下压垫材料相同（均为树脂）即  $E_m / E_s = 1$  时，接触面引起的局部影响或模型与下压垫对中不佳的影响不扩散，所以它不影响模型的变形。当负荷分布均匀时，这种局部影响将不会出现。

当模型与下压垫材料不同（模型为树脂、下压垫为钢）即  $E_s / E_m = 63.5$  时，在接触面上产生应力集中，由于应力不同而阻滞了弹性元件的横向变形，这种影响向弹性元件中心扩散，使输出有减小的趋势。

### (3) 接触表面的粗糙度

试验结果表明，表面越光滑，输出信号就越大。用环氧树脂弹性元件模型在不同粗糙度和不同材料压垫上进行试验，其要点是在所研究的弹性元件模型内粘贴电阻应变计，改变接触面的粗糙度及弹性元件模型尺寸（高度  $H$  和直径  $D$ ），测量出其应变值。试验结果如下：

在  $H / D = 1.46$ ，载荷  $P = 10\text{KN}$  条件下，接触表面光滑且有润滑时，最大应变为  $1140 \times 10^{-6}$ ；

接触表面光滑无润滑时，最大应变为  $1100 \times 10^{-6}$ ；采用十字头加载时，最大应变为  $1060 \times 10^{-6}$ 。

在  $H / D=1.88$  , 载荷  $P=10\text{KN}$  条件下, 接触表面为光滑的环氧树脂时, 最大径向应变  $1080 \times 10^{-6}$  ; 接触表面为光滑的钢质压垫时, 最大应变为  $1120 \times 10^{-6}$  ; 接触表面为光滑的橡胶压垫时, 最大径向应变为  $1130 \times 10^{-6}$  ; 接触表面为环氧树脂且采用十字头加载时, 最大径向应变为  $1020 \times 10^{-6}$  。

上述试验结果证明: 接触表面越光洁, 载荷传递性能越好, 输出就越大, 对称重传感器灵敏度无影响。

## 六、称重传感器的执行标准

称重传感器作为电子衡器的核心部件, 是国家强制管理的法制计量器具, 必须依据国家标准研制生产。由于我国是国际法制计量组织的成员国, 自然就应该参照 OIML·R60·国际建议制定称重传感器国家标准和国家检定规程。

### 1. OIML·R60·国际建议和称重传感器国家标准产生背景

20 世纪 80 年代初期, 随着科学技术的进步和电子称重技术的快速发展, 对负荷传感器提出许多新要求。传统的技术性能评定方法已不能满足电子衡器发展的需要, 急需与电子衡器准确度评定方法相适应的负荷传感器计量特性评定方法和检定规程。OIML (国际法制计量组织) 根据各成员国的意见, 决定由其下属的质量测量指导秘书处 (SP7) 下设的负荷传感器报告秘书处 (Sr8) , 负责起草与电子衡器误差评定方法相适应的计量规程。

由于 Sr8 报告秘书处由美国负责, 自然就由美国负责全部起草工作, 代号是 PR3 号报告, 名称为《称重传感器计量规程》。这是世界上首次将用于质量测量和力值测量的负荷传感器分开, 即将用于各种电子衡器进行质量测量的负荷传感器称为称重传感器, 将用于力值传递和测量的负荷传感器称为测力传感器。质量测量用的称重传感器彻底脱离了以单项指标中最大误差来确定准确度的概念和方法, 建立与电子衡器误差评定方法相对应的总误差带概念, 即最大允许误差包括由非线性、滞后引起的误差和在规定的温度范围内由于温度变化对灵敏度影响所引起的误差, 它对于递增和递减载荷均适用。此外在考核内容和指标、参比直线、试验载荷、蠕变试验等都有所不同。对电子衡器制造商和广大用户来说, 把主要单项误差都包括进去对诸项误差综合考虑才有实际意义。

PR3 号报告《称重传感器计量规程》定稿后，分别发给国际标准化组织、国际计量技术联合会、欧洲经济共同体和经互会等组织征求意见，修改后由 OIML 发到各成员国进行表决，并于 1983 年 4 月 30 日公布表决结果：21 国同意，2 国反对（前苏联和比利时），1 国弃权（加拿大）。在 1984 年 10 月第七届国际法制计量大会上，经过讨论正式批准了《称重传感器计量规程》，并于 1985 年以 OIML-R60 国际建议颁布发送到各成员国。

20 世纪 80 年代，我国衡器工业在“手动改自动，机械改电子”发展方针指引下，通过引进、消化、吸收国外称重传感器先进制造技术与工艺，从学习试制到自主设计与制造，我国称重传感器设计技术与制造工艺水平，产品的数量和质量都有很大提高。为使我国称重传感器技术和产品质量沿正确轨道健康发展，原机械工业部和航天工业部分别编写了《电阻应变式负荷传感器》部级标准。1985 年经国家标准局批准，原机械工业部负责组织全国有关部门的专家，在《电阻应变式负荷传感器》部级标准的基础上，经过讨论、修改和增补上升为国家标准。1988 年 5 月 16 日由国家标准局以 GB7551—87《电阻应变式称重传感器》国家标准发布全国，并于 1989 年 1 月 1 日实施。

我国于 1985 年 4 月 25 日正式成为 OIML 第 50 个成员国，同年 OIML-R60 国际建议《称重传感器计量规程》第一版发到我国。为适应国际称重传感器技术与产品的发展潮流，尽快与国际电子衡器市场融合，参与国际竞争，经国家技术监督局批准，按照等同采用 OIML-R60 国际建议《称重传感器计量规程》的原则，对 GB7551—87《电阻应变式称重传感器》国家标准进行了大幅度的修订，由国家技术监督局于 1997 年 6 月 3 日以 GB/T7551—1997《称重传感器》国家标准发布全国，并于 1998 年 5 月 1 日实施。

在各国多年等同或非等同执行 OIML-R60《称重传感器计量规程》过程中提出一些意见，OIML 质量和密度指导秘书处等机构根据这些意见又进行了几次修改，这就是 1991 年版 R60 国际建议《称重传感器计量规程》和 1993 年英文版 R60 国际建议附录 A《称重传感器型式评定试验报告格式》。

目前各成员国执行的是 OIML 质量和密度指导技术委员会（TC9）重新修订的 R60 国际建议 2000 年版，此版本在适应范围、分配系数、最大温度范围等方面的规定更合理可行。为使型式评价试验选取样件更科学合理，首次引入了称重传感器族和组的概念；针对带有电子组件的称重传感器，规定在型式

评价中除进行普通称重传感器的各项试验外，还应进行与影响量和干扰量有关的 7 项附加试验。

随着电子称重技术和称重传感器技术的发展，国际法制计量组织规定，各成员国所有称重传感器制造商申请 OIML 证书时，必须依据质量和密度技术委员会（TC9）修订的，经 2000 年国际法制计量大会讨论并批准的 OIML R60 国际建议 2000 版。为尽快适应这一新情况，促进我国称重传感器技术的发展，国际法制计量组织中国秘书处按此规定在国内组织开展这项工作，并报请国家标准化管理委员会批准，按照等同采用 R60 国际建议 2000 版的原则，由上海工业自动化仪表研究所负责，联合 8 个单位参加，对 GB/T7551—1997《称重传感器》国家标准进行较全面的修订，形成 GB/T7551—2008《称重传感器》国家标准。由国家质量监督检验检疫总局和国家标准化管理委员会于 2008 年 6 月 30 日发布全国，要求 2009 年 1 月 1 日开始实施。

## 2. GB/T7551—2008《称重传感器》国家标准的主要内容与特点

GB/T7551—2008《称重传感器》国家标准，是修改采用 OIML R60 国际建议 2000 版，在 GB/T7551—1997《称重传感器》国家标准基础上较大幅度修改、增补而成。GB/T7551—2008《称重传感器》国家标准具有如下特点：

(1) 明确规定了测量质量用称重传感器的术语和定义、基本参数和分类、技术要求、试验方法、检定规则以及标志、包装、运输、储存，与称重传感器配套使用并显示质量的仪表，其技术要求由其它相关标准做出规定。强调了标准只适用于测量静态质量的称重传感器，使执行者（称重传感器生产厂家）看起来一目了然。

(2) 将 OIML·R60 国际建议中的测量单位、测量标准分别写入第 4 章和第 8 章；将附录 A 试验程序改编成第 8 章“试验方法”；将附录 C、D 的内容合并为 B 试验结果计算方法，并在第 4、7、8 章增加了有关基本参数内容、浪涌和射频传导抗扰度试验、相关试验的参比大气条件和其它环境条件等，使执行者对标准内容的理解更加深刻，对各项试验方法和程序更加清楚。

(3) 为促进我国数字称重传感器的发展，便于我国称重传感器制造商申请 OIML 证书，在国家标准中增加了“第 6 章对带电子组件的称重传感器的要求”和“8.2.7 带电子组件的称重传感器的附加试

验方法”。除通讯协议外对数字称重传感器的其它技术性能和试验方法都做出明确规定，其中包括一般要求、耐用性、评判依据、功能要求、性能和稳定性试验、误差评定方法、附加试验程序等，使数字称重传感器的研究、设计、制造、应用有标准可寻。

应从以下几方面理解国家标准，引入称重传感器质量评定概念和评定方法。

#### (1) 质量评定概念

建立总误差带的质量评定概念，以分度数表示准确度分类，最大允许误差包括由非线性、滞后误差和温度对输出灵敏度的影响，未包括在上述误差限的其它误差将另行处理。型式评价试验的最大允许误差与分配系数  $P_{LC}$  有关，分配系数  $P_{LC}$  由制造厂选择和指明， $P_{LC}$  范围在 0.3 ~ 0.8 之间。如果制造厂未选择就认为  $P_{LC}=0.7$ ，最大允许误差为  $P_{LC}\times 0.5v$ 、 $P_{LC}\times 1v$ 、 $P_{LC}\times 1.5v$ 。

#### (2) 准确度等级考核的主要质量指标

对于C级和D级称重传感器，准确度等级考核的主要质量指标共有7项：称重传感器误差 ( $E_L$ )、重复性误差 ( $E_R$ )、温度对最小静载荷输出的影响 ( $C_M$ )、称重传感器蠕变误差 ( $C_C$ )、最小静载荷输出恢复值 ( $C_{MDLOR}$ )、称重传感器大气压力影响 ( $C_P$ ) 和称重传感器湿度影响 ( $C_{Hmin}$ )。其中称重传感器误差 ( $E_L$ )、重复性误差 ( $E_R$ )、温度对最小静载荷输出的影响 ( $C_M$ )，需要在  $20^{\circ}C \rightarrow 40^{\circ}C \rightarrow -10^{\circ}C \rightarrow 20^{\circ}C$  三个温度下进行四次试验才能求得，所以必须配备能很容易安装在力标准机内的移动式高低温试验箱。

#### (3) 误差评定与误差包络线

所有偏差之和应处于总误差带之内，与 OIML-R76《非自动秤检定规程》阶梯形允许误差带相对应。误差包络线以一条直线为基础，此直线是以  $20^{\circ}C$  时载荷试验中的两个输出确定，一个是最小试验载荷输出，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。此参比直线更接近最小二乘法，比较科学合理。

#### (4) 试验载荷

试验载荷即测量范围限值。若载荷发生系统允许，最小试验载荷  $D_{\min}$  应尽量接近最小静负荷  $E_{\min}$ ，但不能小于最小静负荷。最大试验载荷  $D_{\max}$  为  $90\%E_{\max}$ - $100\%E_{\max}$ ，但不大于  $E_{\max}$ 。可理解为最大测量范围从最小静负荷  $E_{\min}$  到最大秤量  $E_{\max}$ ； $D_{\min} \geq E_{\min}$ ， $D_{\max} = 90\% \sim 100\%E_{\max}$ 。

#### (5) 蠕变与蠕变恢复

蠕变 (CC)：以称重传感器最大称量的  $90\% \sim 100\%$  作为恒定载荷施加于该称重传感器，其初次读数和其后 30min 里所得到的任何一个读数之差，应不超过所施载荷下最大允许误差绝对值的 0.7 倍。在 20min 时得到的读数和 30min 时得到的读数之间的差值，则应不超过该最大允许误差绝对值的 0.15 倍。

最小静载荷输出恢复值 ( $C_{MDLOR}$ )：施加载荷前、后测得的最小静负荷下称重传感器输出读数之差，应不超过该称重传感器检定分度值的一半 ( $0.5v$ )。此时，施加载荷为称重传感器最大秤量的  $90\% \sim 100\%$  之间，施加时间为 30min。

#### (6) 试验和计算程序

国家标准为了高效的进行试验，严格的规定了试验程序，要求在全温度范围内进行载荷试验并按试验报告格式记录和计算试验结果。

#### 【参考文献】

【1】Anthos Bray .Experimental Mechanics,Janury1990.

【2】OIML R60 国际建议 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》。

【3】OIML R60 国际建议 2000 年版。

【4】GB/T 7551—2008 《称重传感器》国家标准。

【5】JJG669 - 2003《称重传感器》国家计量检定规程，国家质量监督检验检疫总局 2003 年 5 月 12 日发布，2003 年 11 月 12 日实施。

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 多篇。