

# 称重传感器制造工艺机理及其发展趋势

中国运载火箭技术研究院第 702 研究所 刘九卿

**【摘要】**应变式称重传感器是以制造工艺为基础，并依赖于制造工艺而发展起来的技艺性产品。制造工艺不仅是共性基础技术，而且是起关键作用的专业技术。“从工艺看水平，从装备看质量”的理念，已成为国内外称重传感器制造企业的共识。本文从制造工艺在应变式称重传感器研制生产中的地位和作用；组成制造工艺的支持工艺、基础工艺、核心工艺、特殊工艺的机理；面对信息技术与制造技术深度融合实现数字化、网络化、智能化设计与制造的新要求，以及制造工艺的创新发展趋势等方面阐述了上述理念。

**【关键词】**称重传感器；制造工艺机理；支持工艺；基础工艺；核心工艺；特殊工艺

## 一、概述

在人类文明社会起始之时，就认识到制造技术、制造工艺的地位和作用。劳动创造世界，制造技术，制造工艺从来就是生产力活跃的内涵，是工程技术物化过程中最积极的因素，是科研成果转化为商品的桥梁。应变式称重传感器（以下简称为称重传感器）技术与产品也不例外，从 20 世纪 40 年代初问世至今，完全是以制造工艺为基础，并倚赖于制造工艺不断的进步而发展起来的。

称重传感器的结构原理和生产工艺流程决定了手工操作工序较多，人为的因素对产品质量影响较大，制约了称重传感器技术发展。随着科学技术的进步，工业生产自动化、数字化、智能化水平的提高，国外处于电子衡器市场引导者地位的称重传感器制造企业普遍共识是：称重传感器制造工艺绝对不是一些人观念中的“作坊手艺”，制造工艺不仅是研制生产过程中的共性基础技术，而且是起关键作用的专业技术，是集机械、电子、信息、材料和管理为一体的综合技术。制造工艺的概念及内涵不断的扩展，由狭义到广义、由局部到整体、由单项到系统，使传统的称重传感器制造工艺与现代制造工艺相结合，信息技术与制造技术深度融合实现数字化、网络化、智能化设计与制造，形成新型的现代设计与制造工艺系统。这些理念越来越被国内称重传感器制造企业所接受，制造工艺的发展与创新越来越为国内技术人员所关注和重视。

国际电子衡器市场称重传感器的竞争，主要是制造工艺的竞争，应用高新技术研发新产品和自主知识产权产品的竞争，最终体现在称重传感器准确度、稳定性和可靠性的竞争。处于国际市场引导地位的称重传感器制造企业的共同追求是：称重传感器的结构更合理；弹性元件的材质更精良；元器件的环境应力筛选更严格；支持工艺、基础工艺、核心工艺、特殊工艺的运用和集成更科学合理和具有可重复性；电路补偿与调整装备和补偿工艺更完善；高准确度称重传感器的应用更广泛，

以增强企业的核心竞争力。这也应该成为我国称重传感器制造企业的共同追求，特别应该重视改进和提高与国外企业差距较大的制造工艺及工艺装备；认识组成制造工艺的支持工艺、基础工艺、核心工艺、特殊工艺的机理和创新发展趋势。

## 二、制造工艺在称重传感器研制生产中的地位和作用

分析称重传感器的结构原理和制造工艺，不难得出在研制、生产过程中有四大关键问题，即弹性元件结构、弹性元件金属材料、全流程制造工艺和检测装备与手段。其中制造工艺的科学性、合理性和可重复性是保证生产的每一个称重传感器都符合国家标准要求的根本保证，因此，制造工艺是研制生产过程中起关键作用的核心专业技术。制造工艺与称重传感器技术是相辅相成的促进与带动关系，制造工艺流程的合理性、稳定性和可重复性促进了称重传感器技术发展，反过来称重传感器计量水平的提高，又要求制造工艺向自动化、智能化、高稳定性方向发展。可以说制造工艺是称重传感器制造企业强化竞争能力、提高经济效益的重要手段。哪个企业重视制造工艺的研究与应用，哪个企业就受益多、进步快。称重传感器制造企业要在当今激烈而近乎残酷的市场竞争中能生存、发展并取得经济效益，必须依靠产品品种多样、质量精良、成本低廉和交货及时，才能占领市场。这些综合优势的取得，主要的手段是靠产品开发，科学合理的选用制造工艺并不断的加以改进和创新。德国衡器工业以制造高、精、尖技术产品而享誉世界衡器市场，在称重科技领域具有很高的专业技术水平。特别是在称重传感器研究、制造、应用上，有一批诸如 HBM 电子测量技术有限公司、巴鲁夫传感器有限公司等称重传感器方面的制造专家，能制造出稳定性、可靠性俱佳的高准确度产品，就是以先进的制造工艺为基础。德国工程物理研究院高级顾问曼弗雷德·科赫西科博士认为，这主要归功于德国衡器制造业日益增强的技术与工艺革新能力和永不满足的创新精神。

称重传感器是知识密集型、技术密集型和技巧密集型的高技术产品，需要多学科、多技术和多种制造工艺的配合与集成。所谓高技术产品，“高”就高在技术的含量和制造工艺的难度上，特别是在中、大批量生产时，是对制造工艺及其工艺流程的科学性、合理性、稳定性的严格考验。正如国际制造专业专家的评价：“如果产品开发要花十倍努力的话，那么批量生产技术的开发就要花百倍的努力。”美国、欧洲一些工业发达国家的称重传感器制造企业，正是他们在开发批量生产技术中用了百倍的努力，才在国际称重传感器技术和市场竞争中处于引导者地位，并保持至今。

称重传感器制造工艺在研制生产中的重要作用往往不被人们所认识，未能给予足够的重视。我国有些企业在称重传感器产品设计阶段就迁就制造工艺，制造工艺设计时又迁就工艺设备，这是长期以来称重传感器技术与制造工艺滞后的根本原因，也是不重视技术改造的后果。究其原因制造工艺本身的研究工作比较艰辛，需要一定的试验设备，并要反复的进行制造工艺方面的实践，需要积累多年的实践经验，辛勤钻研、试验若干年后才能攻克某些技术与工艺难关。因此，难以在较短

时期内出成果、出人才、出效益。但是，称重传感器的质量和成本都与制造工艺密切相关，企业必须重视它。称重传感器产品开发实践证明，优化结构设计和制造工艺是保证批量生产的每一个产品，都符合国家标准的主要环节。就称重传感器产品而言，轻视制造工艺就是放松产品质量，只有重视并抓好制造工艺，才能将生产过程中的大量隐患消灭在萌芽状态。抓产品质量无可厚非，不抓制造工艺永无宁日，这也从另一个侧面反映出制造工艺在称重传感器研制生产中的地位和重要性。

当前称重传感器行业如何落实“中国制造 2025”发展战略，如何将信息技术与制造技术深度融合实现数字化、网络化、智能化设计与制造，是行业内较大型企业必须面对的课题。近年来，三维数字化设计制造能力已经成为国内外企业竞争的核心，是实现企业研制能力变革的支点和突破口，这一具有风向标性质的变化应引起称重传感器企业高度重视。尽管称重传感器的原理和制造工艺决定了它不能像机器零部件那样在自动化、智能化无缝连接生产线上大批量生产，但也应该用互联网思维升级称重传感器的结构设计与制造工艺，使其尽量接近数字化、智能化或部分数字化、智能化生产，跟上国际称重传感器制造企业的发展步伐。

### 三、称重传感器关键制造工艺及其机理分析

称重传感器的结构与工作原理决定了它的生产过程是以制造工艺为基础的技艺性产品。制造工艺的科学性、合理性和可重复性，制造工艺装备的先进性和自动化、智能化水平，是生产出符合国家标准要求产品的根本保证。根据称重传感器结构原理与制造工艺特点，其制造工艺可分为支持工艺、基础工艺、核心工艺和特殊工艺。

#### 1. 支持工艺及其机理分析

称重传感器生产过程的支持工艺主要是弹性元件毛坯的锻造加工、机械加工、热处理、表面处理。其中锻造加工质量、机械加工尺寸和形位公差、热处理的综合性能、表面处理质量，直接影响称重传感器的准确度、稳定性、可靠性和外观质量。

##### (1) 锻造工艺应使弹性元件具有最佳力学性能

弹性元件毛坯进行锻造加工的目的是砸碎粗大晶粒，使其细化均匀、组织致密，同时要求金属材料流线方向与称重传感器受力方向一致，不允许有交叉、重叠等现象。因此在锻造过程中只允许弹性元件毛坯伸展，不允许墩粗，以使弹性元件具有最佳力学性能，这对提高称重传感器的计量性能，特别是长期稳定性至关重要。

对于国内常用的 40 CrNiMoA 中碳合金钢材料，锻造加热温度 1180℃，加热时间 3 ~ 4 小时，保温时间 ≥ 30 分钟，开锻温度 1140 ~ 1160℃，终锻温度 ≥ 850℃，空冷。退火工艺为：加热温度 860℃，保温 1.5 小时，炉冷。锻造后若缓冷，则不必进行退火处理，可以直接进行弹性元件加工。锻造加工后弹性元件毛坯的金相组织属于索氏体及回火 α 相（10% HNO<sub>3</sub> 酒精溶液腐蚀），硬度

HRC30。近些年来，从几百吨至上千吨的大量程称重传感器已有应用，弹性元件毛坯尺寸较大，锻造加工后应注意缓冷。

### (2) 冷热加工工艺应使弹性元件尽量少产生残余应力

由于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均匀的应变场内。因此要求弹性元件的毛坯在锻造过程中，只能拉伸不能墩粗，金属流线方向应与弹性元件受力方向一致；在机械加工、热处理、表面处理过程中，从制造工艺上保证尽量少的产生残余应力。

弹性元件中残余应力的来源主要是：材料在轧制或拉制等工艺成形过程中产生的残余应力；在热处理过程中，由于冷却温度不均匀和相变而产生的残余应力；在机械加工过程中，因切削力作用而产生的残余应力。后者在弹性元件表面形成变质层，使其组织处于不稳定状态，随着时间的变化内应力松弛，而导致尺寸变化。刨、铣、车、磨等机械加工，使弹性元件表面变形不均匀，而产生较大的残余应力，切削用量越大，表面的残余应力就越大。车削加工时，不同进刀量轴向和周向的残余应力也不相同，在弹性元件表面为最大残余拉应力，距表面  $40 \sim 80 \mu\text{m}$  处为最大残余压应力。磨削加工时，产生的残余应力最大，磨削深度越大，产生的残余应力就越大，其最大残余应力位于距表面  $20 \sim 40 \mu\text{m}$  处。综合刨、铣、车、磨四种机械加工方法产生的残余应力，可总结出：

- ① 最大残余应力位于弹性元件表面至深度为  $100 \mu\text{m}$  之间，数值较大；
- ② 残余应力衰减很快，在深度为  $200 \mu\text{m}$  处已很小；
- ③ 切削用量越大，残余应力就越大；
- ④ 弹性元件精加工为磨削时，残余应力最大，其值可达  $900\text{N}/\text{mm}^2$ 。

因此要求热处理后弹性元件的精加工尽量不采用磨削，接近应变区尺寸时切削用量尽量小。

### (3) 消除冷热加工残余应力的稳定性处理工艺

消除弹性元件冷热加工残余应力的稳定性处理，主要有冷热循环工艺、二次真空回火工艺、高温油煮工艺。

冷热循环工艺——热处理后的弹性元件，芯部为拉应力，表层为压应力，在冷热循环处理中，由于冷热温度不同，产生相反方向的热应力与残余应力相互抵消。其工艺规范为： $-196^\circ\text{C} \times 4\text{h} / +190^\circ\text{C} \times 4\text{h}$ ，循环三次。

二次真空回火工艺——使弹性元件中的残余奥氏体转变为马氏体。对于中碳合金钢 40CrNiMoA 弹性元件，经  $480^\circ\text{C}$  回火后，再进行一次真空回火处理，消除冷热加工残余应力的效果更好，其工艺规范为： $460^\circ\text{C} \times 2\text{h}$ ，真空度 10-5 托。

高温油煮工艺——对于冷热加工合格并已进行完表面处理的钢制弹性元件，为消除其冷热加工

残余应力，也可实施在 250℃高温油槽中进行 2-4 小时的高温油煮工艺。

## 2. 基础工艺及其机理分析

称重传感器的核心部件电阻应变计及其应变胶粘剂，电路补偿与调整工艺用原材料、元器件，封装用各种防护与密封材料都属于基础工艺范畴，它们是称重传感器制造工艺的基础，是生产出一贯符合称重传感器国家标准中准确度和稳定性要求产品的前提性条件。为节省篇幅，本文只分析称重传感器的核心部件电阻应变计制造工艺及其应变传递原理。

称重传感器用电阻应变计，应具有最佳工作特性和与弹性元件的匹配性。电阻应变计传递应变的量级非常小，以敏感栅长度  $L=5\text{mm}$ ，满量程时变形  $1000\ \mu\epsilon$  的电阻应变计为例，若分辨率为  $10^{-5}$ ，则  $\Delta L=5\times 10^{-8}\text{mm}$ ，也就是说弹性元件要反映出 5mm 长度上变化一个原子大小的距离，这个要求的确很高。电阻应变计的工作特性、稳定性和可靠性在很大程度上决定称重传感器的准确度、稳定性和可靠性。由于应变计试验测试后不能二次使用，只能测量出实验室环境条件下的工作特性和疲劳寿命，这给研究、选用带来较大困难。目前，多围绕敏感栅材料和结构形式、基底和覆盖层材料、制造工艺及工艺装备水平选择电阻应变计。

为了选择满足称重传感器弹性元件计量性能要求的电阻应变计，就必须了解电阻应变计粘贴在弹性元件上的应变传递原理。在外载荷作用下，弹性元件极其微小的变形，经过应变胶粘剂和电阻应变计基底将其传递到敏感栅上，由于传递的变形非常微小，所以对电阻应变计和应变胶粘剂的工作特性要求很高。归纳起来主要是：应变传递线性好；滞后、蠕变小；温度和时间漂移小；电绝缘性能好，不吸潮。生产实践证明，在相同结构的称重传感器上，粘贴不同结构的电阻应变计，其蠕变指标、达到同一准确度等级的合格率和疲劳寿命有明显差异，这是因为对敏感栅的结构、基长、基宽等选择不当所致。电阻应变计粘贴在称重传感器弹性元件上的示意图如图 1 所示。

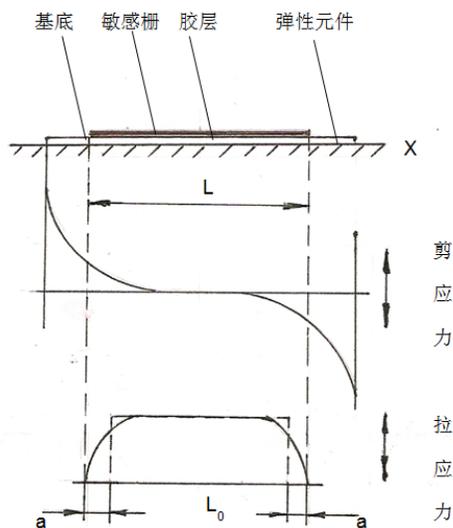


图 1 电阻应变计粘贴在弹性元件上示意图

称重传感器弹性元件应变区表面、电阻应变计基底、应变胶粘剂之间都是面接触，故变形能有效传递。其弹性元件变形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，中间截面处位移为零，故剪应力为零，两端剪应力符号相反， $L_0$  为等效长度。

电阻应变计敏感栅所受的轴向力沿  $x$  轴分布，两端力为零，并以指数曲线上升至一定值。在等效长度  $L_0$  内应变均匀分布，但参加变形的长度减小了  $2a$ ，造成  $\Delta R$  减小，而  $R$  不变，故  $\Delta R/R$  变小，使得感受弹性元件应变的灵敏度降低了，这就是电阻应变计的端部效应。分析应变传递得出：

① 通过剪应力的传递作用，拉、压电阻应变计敏感栅实现应变传递，即敏感栅中心剪应力为零，两端呈指数曲线上升至最大值，称为剪应力传递区。

② 弹性元件的应变经电阻应变计基底传递到敏感栅中，其大部分区域是单向应力状态，传递的应变基本等于弹性元件应变，故称为应变正常传递区。

③ 对应于剪应力传递区电阻应变计的敏感栅部分，应变  $\varepsilon$  随  $x$  增大而减少，端部为零，应变传递在此区域滞后。

为减小端部效应影响，电阻应变计和胶粘剂的选择原则是：

- ① 尽量选择框状端头的电阻应变计；
- ② 基底边缘至端头要有足够距离，以增大剪应力传递区的面积；
- ③ 选择敏感栅或敏感丝时应越薄或越细越好，要求基底厚度  $25\mu\text{m}$ ，以保证应变有效传递；
- ④ 胶粘剂层越薄越好，胶粘剂弹性模量和剪切弹性模量越大越好，有利于减小称重传感器的滞后和蠕变误差。

### 3. 核心工艺及其机理分析

称重传感器的核心制造工艺，即从电阻应变计，弹性元件，电路补偿原材料、元器件准备开始到称重传感器全部制造工序完成为止的生产工艺流程全过程。其中电阻应变计粘贴与固化处理、组焊惠斯通电桥电路、电路补偿与调整、防护与密封为核心工艺中的要害工序。

#### (1) 电阻应变计粘贴工艺机理

将电阻应变计粘贴在弹性元件应变区的表面属于物理结合，利用的是金属材料表面的附着力和分子之间的引力，它不像化学结合那样由分子键聚合而十分牢固。因此，为使电阻应变计致密的、牢靠的粘贴在弹性元件上，必须创造非常好的粘贴条件，这就是对弹性元件粘贴表面进行打磨或喷砂处理。其作用是：

- ① 除去弹性元件贴片表面的氧化层，净化表面，活化表面分子，为增加表面的附着力创造条件；
- ② 增大有效粘贴面积，提高粘结强度，特别是抗剪强度；

③使应变胶粘剂更好的浸润与渗透到弹性元件表层，保证粘贴质量。

粘贴电阻应变计是称重传感器制造工艺流程中的关键工序，应严格按工艺技术要求操作。为使粘贴在弹性元件上的电阻应变计保持位置准确，应与施加压力的高温橡胶板隔离。即在电阻应变计和高温橡胶板之间隔垫一层聚四氟乙烯薄膜，保证施加压力时电阻应变计不会平移、转动。我国粘贴电阻应变计工艺用的聚四氟乙烯薄膜的厚度约为 0.07mm，美国工艺为 0.003 英寸（0.0762mm），日本工艺为 0.025mm ~ 0.075mm。由于聚四氟乙烯薄膜的摩擦系数低，所以作为一个滑动膜位于电阻应变计和高温橡胶板之间，允许高温橡胶板和其上的压块或压板有自行活动的余地，而又不影响电阻应变计粘贴位置的准确性。实际上是在已粘贴电阻应变计和高温橡胶板两者之间，提供一个非吸附性界面，为正确安装加压夹具，保证电阻应变计位置准确创造条件。

### （2）电阻应变计粘贴在弹性元件上的定位误差

根据称重传感器弹性元件结构选用任何型号的电应变计，都有一定的敏感栅和基底尺寸，把它粘贴（定位）在弹性元件应变区设定的位置上，例如应变梁的中点、应变区盲孔腹板的中心等仅仅是一种假设。因为不论粘贴工艺要求多么严格，都会出现一定量的定位误差。此误差的主要影响是各电阻应变计感受的应变量不完全相等，甚至产生较大的差异。这种感受应变量的差异，反应到称重传感器电桥电路，即是电桥内某一桥臂电阻的变化与相邻桥臂电阻的反向变化不匹配，而引起电桥输出的非线性误差。特别是双孔平行梁结构的称重传感器，对电阻应变计的定位公差要求十分严格，如出现电阻应变计沿平行梁中心线偏转、平移或两者兼而有之，不但产生非线性误差而且还产生较大的偏载误差，因此必须严格控制电阻应变计的定位误差。

试验研究得出，如果粘贴在弹性元件上电阻应变计的定位偏差，使其感受的应变量误差为 5%，即  $\delta = 0.05$ ，以灵敏度为 2mv/v 的称重传感器为例，其最大应变量为  $\epsilon = 1000 \times 10^{-6} = 10^{-3}$ ，电阻应变计灵敏系数  $K=2.0$  时，电桥输出的非线性误差  $\delta$  为：

$$\delta = \frac{\Delta U_s}{U_0} = \pm \frac{K\epsilon\delta}{2} = \pm \frac{2 \times 10^{-3} \times 0.05}{2} = \pm 5 \times 10^{-5} = \pm 0.005\%$$

由于各种原因使电阻应变计感受的应变量产生 5% 的偏差，这应该是可能产生的最大偏差。它对称重传感器非线性误差的影响量为 0.005%，在允许误差范围内是可以接受的。由此不难得出结论：粘贴在弹性元件应变区设定位置的电阻应变计，其定位偏差应以感受的应变量变化不大于 5% 为条件。

为满足电阻应变计粘贴在弹性元件上的定位误差要求，在粘贴电阻应变计的关键工艺中，尽量避免人工操作，最好采用计算机辅助粘贴电阻应变计设备和智能机器人粘贴电阻应变计系统。

### （3）应变胶粘剂固化、后固化工艺机理

固化就是在规定的温度下、一定的时间内应变胶粘剂本身交联，以及它和弹性元件之间产生附着作用而牢固结合的过程。固化是否充分、完全，直接影响应变胶粘剂的物理和机械性能，主要是

关系到影响应变传递性能的粘结强度，特别是剪切强度达不到技术要求，造成弹性元件的应变不能同步准确的传递给电阻应变计的敏感栅。固化工艺的关键问题是固化温度、保温时间、升温速率，因此必须严格按应变胶粘剂的固化工艺要求进行，要特别保证温度的准确性和均匀性。严格说来，应变胶粘剂固化后并不完全是均匀体，其交联密度甚至化学成份都随部位不同而异，所以升温速率和保温时间对应变胶粘剂的微观结构有较大影响。升温速率以每分钟 50C 左右为宜，并给予足够的保温时间，使应变胶粘剂的一些成份依次挥发而固化。胶粘剂固化不充分、不完全时，由于其分子键聚合不牢固，在承受变形时会产生小分子，增加蠕滑效应，从而增大了蠕变值，并使称重传感器的零点不稳定，因此应尽量作到固化充分，并在固化后进行后固化处理。

后固化是保证应变胶粘剂达到最佳综合性能和进入稳定状态的工序，其目的是使应变胶粘剂固化更完全，并消除一次固化时因加压、加温胶粘剂中水分子逸出、胶层收缩等原因产生的残余应力。也可以说是在短时间内，通过加温模拟长时间应变胶粘剂胶层的自然固化。后固化的最高温度应比固化温度高 200C ~ 300C，保温 2 ~ 3 小时，随加温设备降温。

后固化的作用：

- ① 扩大了电阻应变计与弹性元件粘结层的温度极限；
- ② 增加了粘结层的弹性模量；
- ③ 释放残余应力，使粘结层的应力均匀进入稳定的工作状态。

#### (4) . 组焊惠斯通电桥工艺机理

由四个电阻  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$  连成四边形组成的电路称为惠斯通电桥电路，如图 2 所示，其作用是将电阻变化转换成电压输出。

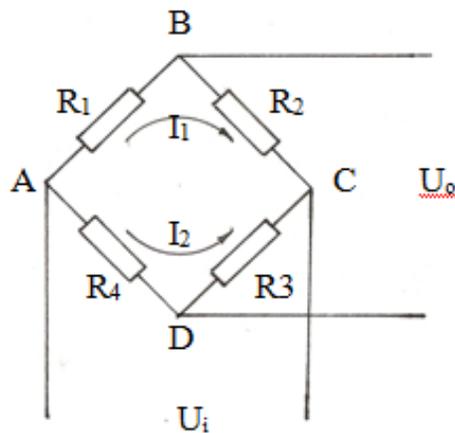


图 2 惠斯通电桥电路

四个电阻称为电桥的四个臂，四边形的 BD 对角线连有测量仪表称为电桥的输出端，四边形的 AC 对角线连接电源称为电桥的供桥端。在供桥端 AC 施加供桥电压  $U_i$  后，便在输出端 BD 有一个初始电压  $U_0$ ，若桥臂的电阻发生变化，则输出电压也相应变化为  $U_0 + \Delta U_0$ 。

给供桥端接通电源时，电桥电路中各支路均有电流通过，当 BD 两点之间的电位不相等时，桥路中便产生不平衡输出，而当 BD 两点之间的电位相等时，桥路中 BD 之间的电流为零，这时称电桥处于平衡状态，有：

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3}$$

即：

$$R_1 R_3 = R_2 R_4$$

上式说明，电桥平衡时电桥相对臂电阻的乘积相等，这就是电桥的平衡条件。

工作时，只有一个桥臂电阻发生变化的称为单臂式电桥；两个相邻桥臂电阻发生变化的称为半桥式电桥；四个桥臂电阻均发生变化的称为全桥式电桥。

惠斯通电桥用于称重传感器时有如下特点：

① 起始状态（桥臂电阻未发生变化）时，输出电压  $U_0$  可以为零。工作时，以输出电压从零开始的变化量  $\Delta U$  反映电阻的变化量，可以达到较高的分辨率，对放大、显示、记录十分有利；

② 温度变化等影响通过全桥连接可以相互抵消；

③ 如果电阻应变计粘贴位置、方向和组桥合理，可以消除或减少偏心载荷、侧向载荷的影响；

④ 容易进行各项电路补偿与调整。

称重传感器的电桥输出端多与直流放大器连接，直流放大器的输入端电阻  $R_0$  比电桥电阻大得多。因此可以将电桥输出端看成是开路，即  $R_0 = \infty$ ，通常将这种电桥称为“电压输出桥”，其电桥电路如图 2 所示。

利用欧姆定律和克希霍夫定律，可推导出电桥输出电压公式：

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

或

$$U_0 = \frac{U_i K}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$$

以上两式说明，电阻变化率或应变与输出电压之间近似为线性关系。

#### （5）防护与密封工艺机理

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。粘贴在称重传感器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，就会使胶粘剂层膨胀增塑，造成绝缘电阻、粘结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。在某

些试验场合，称重传感器还会受到水的直接喷射和浸泡，潮气的渗入都会使应变胶粘剂的粘结强度和绝缘电阻下降，因为潮气并不完全是水，通常是许多复杂的水溶液，它能渗入各种聚合物，使其增塑而改变性能。盐雾是一种气溶胶状体，主要成份是氯化钙、氯化镁和其它杂质，对弹性元件、电阻应变计和应变胶粘剂有较强的腐蚀作用。此时称重传感器的制造工艺再精湛、技术性能指标再优良也无法发挥作用，所以稳定性和可靠性是称重传感器的前提性技术指标。确保此项指标必须进行有效的防护与密封，提高称重传感器防潮、防水、防盐雾性能和抗振动、冲击的能力。这是称重传感器防护与密封的重点，如果防护与密封不良，将使此前各项工艺成果前功尽弃，可见防护与密封的重要性。

目前，称重传感器多采用表面密封、盲孔灌封和膜片焊接密封三种方法。

#### 4. 特殊工艺及其机理分析

从非常成熟的相关产品制造工艺中移植过来的，对提高称重传感器技术性能有奇效的制造工艺称为特殊工艺。例如为了消除弹性元件的残余应力，提高尺寸稳定性，引进的航天产品零部件稳定处理工艺，主要有反淬火法、冷热循环法和恒温时效法。为了提高称重传感器的稳定性和可靠性，引进的振动时效工艺等。

##### (1) 温度循环老化工艺

实际上是航天飞行器零部件“环境应力筛选”的一种方法，移植到称重传感器生产工艺中十分有效。温度循环的主要参数为高温和低温的极限值、停留时间、温度变化率、一次温度循环总时间和循环次数。根据称重传感器所用电阻应变计、应变胶粘剂和制造工艺特点，多采用室温到高温并逐步提高温度的循环老化方法，即第一天升温至 60℃ 停留 4 小时，随试验箱自然降低温度至室温，从第二天开始，最高温度每天增加 20℃，直到第五天的 140℃，停留 4 小时，随试验箱自然降低温度至室温，此为一个温度循环。共进行十天两个温度循环老化即可。

##### (2) 热处理法稳定性处理工艺

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

将铝合金弹性元件置于 -196℃ 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

冷热循环工艺为 -196℃ × 4 小时 / 190℃ × 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。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℃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。

### (3) 机械法稳定性处理工艺

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。其超载静压工艺是：在专用的标准砝码加载装置中或简易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。对于小量程平行梁称重传感器，在频率 30Hz、振动加速度 10g 时，振动 15 分钟即可获得较好的效果。采用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。试验前后，可用 X 射线仪测量电阻应变计粘贴处及附近的应力值。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主要有：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。

#### 四、称重传感器制造工艺的发展与创新

在电子衡器市场日益国际化和制造技术、制造工艺日益商品化的今天，称重传感器制造工艺的发展，必然以电子衡器市场竞争的需要为导向，受新技术、新材料、新工艺的强力牵引。发展制造工艺本身不是目的，而是用以保证称重传感器在品种、规格、数量、质量、价格等方面均能满足国内外电子衡器市场需求的一种手段，是用以达到企业能尽快融入国内外市场，参与国际竞争的需要。

##### 1. 支持工艺的发展与创新

称重传感器制造工艺总是不断发展，没有永恒的先进制造工艺。随着科学技术的进步，工业自动化、数字化、智能化水平的提高，不断赋予制造工艺新的内涵，制造工艺的进步应促使产品质量和整体效率、效益的提高。

较长时间以来，称重传感器弹性元件及其附件制造工艺的进步，只局限在单台机床、单道工序、单个工具的生产效率提高，不适应批量生产和个性化定制生产。为实现规模生产和个性化定制生产，必须从称重传感器设计与制造全过程进行分析研究，用物联网 + 思维和智能制造带来的机遇，升级称重传感器制造工艺和工艺流程。

进入新世纪以来，处于国际市场引导者地位的称重传感器制造企业，已经将信息技术、自动化技术与传统的制造技术相结合，普遍采用数控机床、加工中心、柔性制造单元，实现了柔性自动化生产。近些年又发展为数字生产线，达到兼容多品种生产，稳定质量，提高效率，降低成本的综合目的。

针对称重传感器“多品种、小批量”的产品特点，以及“产品研制与批量生产并存”的制造模式，没有现成的经验可以借鉴。近年来，国内一些企业为适应大批量生产和个性化定制生产的需要，运用互联网 + 思维和智能制造带来的新机遇，升级批量生产的弹性元件冷热加工生产线，将信息化与工业化相结合，完成了弹性元件机械加工生产线技术改造，建立了弹性元件冷热加工自动化、智能化生产线。这是实现自动化智能化技术升级，跟上国际称重传感器技术发展步伐的有力举措。

##### 2. 基础工艺的发展与创新

近些年来，电阻应变计、应变胶粘剂、防护与密封材料等称重传感器的支持工艺有许多改进与创新，其中电阻应变计制造工艺的改进与创新，对提高称重传感器的准确度、稳定性起到了至关重要的作用。

###### (1) 应变电阻合金箔材的自动化智能化稳定性处理工艺

制作电阻应变计的应变电阻合金箔材的电阻率变化以及温度性能，均与冷热加工的工艺有关，这是由于应变电阻合金箔材塑性变形所产生的晶格缺陷而造成的。这些缺陷在缓慢升温时的迁移，

是使应变电阻合金箔材电学和力学特性不稳定的原因，所以必须进行有效的稳定性处理。

应变电阻合金箔材一般是由直径为 14 英寸、重量达 1 吨的电阻合金铸锭，经冷轧、热轧、碾压等粗轧工艺制成厚度为 1/16 英寸的大卷带材，再经过精轧工艺即在森吉米尔 20 型高速轧机上通过冷轧、退火处理、碾压等工序将其碾压至厚度为 0.0001 ~ 0.0002 英寸 (2.5 ~ 5  $\mu\text{m}$ )，厚度变化小于 0.00001 英寸 (0.2  $\mu\text{m}$ ) 的带材，然后进行清洗并剪切到所需要的宽度。应变电阻合金箔材在多次轧制、碾压过程中，晶格产生位错、滑移、空位、破裂等缺陷，其附近的原子处于热力学上的不稳定状态，是电阻应变计电学性能不稳定的重要原因。因此必须进行稳定性处理，即退火处理。在达到退火温度时这些原子吸收热能产生扩散，使晶格缺陷迁移和消失，电阻率和电阻温度系数趋于稳定。退火温度、保温时间、循环次数是稳定性处理的三要素。为提高稳定性处理工艺水平，处于国际电阻应变计市场引导者地位的企业，或自行研制或委托研制智能真空热处理炉对电阻合金箔材进行热处理。智能化真空热处理炉的特点是在极高真空条件下或高还原性氢气体保护状态下，精确的按热处理工艺曲线进行热处理，由于是自动化、智能化设置和控制各项热处理要素，保证了热处理的均一性，改善和稳定了热输出性能，保证了电阻应变计的电阻率和电阻温度系数的稳定性，为研制生产高精度称重传感器提供了理论和物质基础。

### (2) 电阻应变计基底制造工艺的集成化

为从生产制造源头控制电阻应变计的质量，突破电阻应变计基底制造瓶颈，近些年来，国内外一些电阻应变计制造企业纷纷突破传统制造工艺的束缚，将制造基底的多道工序统一考虑，使其集成为一道工序，即将选择好的基底胶预先制造成要求厚度 (例如 25  $\mu\text{m}$ ) 的带材，再将其裁剪成光刻版所需要的尺寸，经起毛和均温处理后，再与裁剪、清洗好的应变电阻合金箔材通过应变胶粘剂粘合在一起，利用同时加温、加压的智能化控制的层压机进行固化。这就是被称之为电阻应变计基底制造集成化的新工艺，其突出特点是基底制造工艺简单、规范，适合自动化、智能化生产；由于胶膜是预先制作厚度均匀，误差小，克服了手工操作、人为控制向电阻合金箔材上甩胶粘剂造成的误差；层压机可以同时加温、加压数十版，基底制作效率高、电阻应变计工作特性的均一性好。

### (3) 采用新型电阻应变计基底材料

突破了传统的酚醛—缩醛、环氧—酚醛、聚酰亚胺等基底材料的一统天下，采用新型基底材料—聚醚醚酮 (PEEK) 制作电阻应变计。聚醚醚酮是在主链结构中含有一个酮键和两个醚键的重复单元所构成的高聚物，属于特种高分子材料，其特点是：

- ① 耐高温、耐化学腐蚀等物理化学性能好；
- ② 可用作高温结构材料和电绝缘材料；
- ③ 可与玻璃纤维或碳纤维复合制备增强材料；

- ④ 熔点、软化点高，抗拉强度大（熔点 334℃、软化点 168℃，拉伸强度 132 ~ 148MPa）；
- ⑤ 具有较好的刚性和柔性，在交变应力下的抗疲劳性能非常突出，可与合金材料相媲美；
- ⑥ 工艺性好，可制成 25 μm、12.5 μm 厚的薄膜。

基底是箔式电阻应变计的重要组成部分，它的特性不仅取决于基底材料本身性能，而且其厚度及热处理条件也将对电阻应变计质量起重要影响。聚醚醚酮高分子材料的特性和制造工艺实践说明它是较理想的电阻应变计基底材料，此种类型的电阻应变计特别适合用于高准确度称重传感器。

#### （4）电阻应变计全密封覆盖层新工艺

为保证电阻应变计的长期稳定性和防止外部机械损伤，理想的制造工艺是在调整电阻值合格后，在裸栅表面涂上一层保护膜即敏感栅的覆盖层，形成全密封电阻应变计结构。我国传统工艺中的单排敏感栅贴膜法，虽然解决了各片电阻应变计覆盖层厚度的均一性问题，但只是敏感栅部分得到了密封，焊点周围的栅丝并未得到密封，实际上这种电阻应变计并不是全密封结构。近年来，国内一些企业通过改进工艺装备，解决了贴膜厚度的均匀性，普遍采用整版贴膜法新工艺制造的电阻应变计，由于敏感栅和两个焊点周围的栅丝完全被胶膜所覆盖，固化后电阻应变计才是真正的全密封结构。整版贴膜法的工艺是将调阻合格的这版应变计，用无水乙醇清洗干净并烘干，然后整版粘贴预先制备好的胶膜，按要求在加温加压的层压机上进行固化。最后将基底、敏感栅、覆盖层已成为一体的整版电阻应变计置于激光机上，用激光束打穿焊点处的胶膜露出全部焊点，即完成了电阻应变计的全密封工艺。

#### （5）智能激光自动剪片工艺

传统的剪片方法为人工使用剪刀对整版电阻应变计的横行、竖列进行裁剪，用工多、效率低、基底尺寸偏差大。采用智能激光剪片设备进行剪片，工作效率高，电阻应变计基底尺寸一致性好，从敏感栅中心线到其边缘公差均为  $\pm 0.13\text{mm}$ ，可利用电阻应变计基底外形作为贴片定位基准。

### 3. 核心工艺的发展与创新

#### （1）重视电阻应变计和数字模块的安装环境

在弹性元件应变区粘贴电阻应变计是核心制造工艺中的要害工序，其工作环境、粘贴质量直接影响称重传感器的计量特性。过去有些企业对此重视不够，有些净化间和净化工作台不完全符合要求，粘贴电阻应变计作业很不规范。经过认证、取证和国际交流，各企业普遍认识到粘贴电阻应变计工作环境对粘贴质量的影响，或购置净化间、净化工作台，或自建温度、湿度、洁净度、照明和防静电措施都符合要求的净化间，保证了模拟和数字称重传感器电阻应变计粘贴、数字模块安装质量。

#### （2）采用视频图像辅助粘贴电阻应变计和智能机器人粘贴电阻应变计系统

视频图像辅助粘贴电阻应变计系统如图 4 所示。



图 4 视频图像辅助粘贴电阻应变计系统

视频图像辅助粘贴电阻应变计系统，是在分析粘贴电阻应变计传统工艺优缺点的基础上，为保证电阻应变计定位准确度和各弹性元件粘贴位置的一致性，提高粘贴效率而进行的半自动化改造。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，自主放大粘贴区域，提供了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，对准视频显示的弹性元件上的定位叉丝，就是正确的贴片位置。消除了用肉眼对位、定位造成的误差，提高了电阻应变计定位准确度和粘贴位置的一致性。其结构特点是采用了 PC 操作系统控制，软件功能强大，操作方便，界面直观实用。主视频区主要提供实时弹性元件粘贴区域视频的预览，采用软件定位叉丝替代在弹性元件上划线，消除了对弹性元件表面因划线带来的物理伤害。

为保证粘贴电阻应变计的定位误差，提高粘贴质量和工作效率，最好采用智能机器人粘贴电阻应变计系统。

### （3）实施弹性元件贴片组桥后整体清洗新工艺

称重传感器的故障 80% 是工艺问题，而在工艺问题中绝大部分是电阻应变计焊点引出线、内外引线的焊接和清洗问题。国内电阻应变计生产设备制造企业，正在研制触点温度在  $+260^{\circ}\text{C} \sim +425^{\circ}\text{C}$  范围内可调的电阻应变计引线焊接设备，以保证电阻应变计引线的焊接质量。称重传感器焊线组桥后，彻底清洗焊点及其周围是保证其稳定、可靠工作的前提性条件。国际著名称重传感器制造企业，普遍采用弹性元件贴片焊线组桥后整体清洗工艺，清除焊点及其周围的焊剂和污物，然后涂防护面胶确保在生产过程中不受潮。

### （4）电阻应变计面胶及高度防潮耐水密封胶涂覆工艺的新发展

在焊线组桥后经过整体清洗的弹性元件表面，对电阻应变计涂覆保护面胶，是称重传感器生产

工艺流程中的重要工序，通常称之为第一次防护密封处理。其目的是保护电阻应变计在生产作业过程中不遭受伤害、不受潮，并为最后防护密封打下优良基础。过去涂覆面胶工艺规定覆盖住电阻应变计即可，其周围的焊点和打磨过的金属表面并不在防护之列，埋下稳定性、可靠性隐患。改进后的涂覆面胶新工艺，要求覆盖面积大，不仅是电阻应变计表面还必须覆盖住所有焊点和打磨过的弹性元件表面。

高度防潮耐水密封胶，是将卤素引入高聚物中或用硅氧键嵌入高聚物中，都可达到提高抗水耐湿的目的。国外已采用含氟聚酰亚胺、含氟环氧树脂、含氟丙烯酸酯，硅氧/亚酰胺共聚物、苯基有机硅和硅化苯乙烯为基础材料制作密封胶，均取得非常好的应用效果。

## 五、称重传感器制造工艺发展趋势

为落实“中国制造 2025”发展战略，将信息技术与制造技术深度融合，实现数字化、网络化、智能化设计与制造，称重传感器制造工艺的发展趋势是逐步改造升级现有生产线，实现数字化、智能化生产线和数字化工厂。

### 1. 称重传感器生产模式发展趋势

打破传统的称重传感器制造方式，实施制造工艺流程与弹性元件及其附件批量生产线的自动化、智能化改造与创新，是称重传感器生产模式发展的必由之路。改变原有图纸分发模式，基于电子分发流程，实现从设计到制造三维模型直接到生产线。与传统二维图纸分发相比，即提高了工作效率，又缩短了工艺准备周期。由于全面采用了结构化、三维可视化手段，有利于实现三维工艺设计与检验，保证了弹性元件具有较高的尺寸、形位精度和产品的均一性。为此，就要对关键制造工序推进数字化、智能化改造。

处于国际市场引导者地位的称重传感器制造企业的经验是：对关键制造工序推进自动化、智能化改造，首先将对称重传感器质量影响大的要害制造工序自动化、智能化。其次是将具有独立操作和控制功能的自动化、智能化工序，通过网络和计算机系统相互连接起来，在网络软件管理下，实现信息的收集、存储和处理。通过多媒体视频等多种方式进行工艺信息表达，例如实时显示各工艺流程生产状况、质量状况（如电阻应变计固化、后固化控温情况；零点温度、灵敏度温度补偿成功率；性能测试与检定合格率等），以便对产品质量和流程运行进行控制和管理。

### 2. 称重传感器技术体系和制造工艺支撑体系的发展趋势

称重传感器结构设计与制造工艺形成数字化、智能化技术体系的标准是：

#### （1）统一的产品研制流程

在称重传感器总体结构与工艺流程设计中，既要吸收国内外最佳实践流程设计，又必须具有本公司的特点。

## （2）统一的标准规范

建立本企业称重传感器数字化研制标准规范，覆盖设计、制造、工艺、检测平台建设等方面。

## （3）统一的基础工艺

称重传感器因用途不同，其弹性元件结构各异，利用的应力也不同，但其基础制造工艺是基本相同的。必须制定共性的、科学合理的、可重复的生产工艺流程。

## （4）统一的基础数据库

建立称重传感器用电阻应变计、应变粘接剂、电路补偿原材料、元器件库，通用标准件库、原材料库、元器件库等基础共性数据库，录用实际数据。

## （5）统一的软件工具

称重传感器结构与工艺的三维设计，全部采用企业统一的设计工具，以提升设计效率。但需要解决：

- ① 产品三维标注方法；
- ② 二维图样信息向三维模型信息转换技术；
- ③ 建立有效建模及标注方法，使三维数字样件成为产品设计、制造的依据。

## 3. 质量管理模式的发展趋势

改变原有称重传感器设计制造的组织模式和质量管理方式，建立符合数字化设计制造的规章制度，以三维数字样件及产品为核心，将设计、工艺、检验融为一体，通过实践尽快形成一系列数字化设计制造模式下的质量管理思路和方法。

## 六、结束语

世界上工业发达国家对称重传感器制造工艺的保密是非常严格的，从称重传感器国际学术会议、论文集、技术刊物、相关文献中，可以找到关于工作原理、结构设计、应用实例等方面的参考资料，然而很难找到关于制造工艺机理、制造工艺流程、制造工艺装备等资料。国内称重传感器制造领域也不例外，其有关资料和论著都是讲起结构原理滔滔不绝，讲起制造工艺守口如瓶。对制造工艺的另一种偏见，就是认为制造工艺的理论性不强，只是一种实际经验与技艺而已。实际并非如此，而是对制造工艺探索得太少，对其机理与规律研究、揭示和掌握的很不够。本文只是从制造工艺在称重传感器研制生产中所起的关键作用这一侧面，说明制造工艺的重要性，探讨关键制造工艺的机理和发展趋势，希望能引起国内称重传感器制造企业的足够重视，在企业转型发展中，纳入先进的制造工艺、有效的管理手段、切合实际的市场开拓方式，把称重传感器技术与制造工艺提高到一个新水平。

## 【参考文献】

【1】VISHAY PRECISION GROUP (美国). New Miniature Strain Gages from Micro-Measurements. May-2011.

【2】VISHAY PRECISION GROUP (美国). TRANSDUCER-CLASS STRAIN GAGES . Revision:30-May-2005.

【3】VISHAY PRECISION GROUP (美国). LOAD CELLS AND INDICATORS. Revision:28-Nov-2007.

【4】霍廷格尔 巴尔德温 (Hottinger Baldwin) 测量技术有限公司 (德国). 采用电子振荡阻尼的新式 FIT 称重传感器. 样本资料, 2011 年 4 月。

【5】VISHAY PRECISION GROUP (美国威势精密集团). New Strain Gages from Micro-Measurements (微测量事业部的新型电阻应变计). 第十届上海中国国际衡器展览会资料. 2011 年 4 月。

【6】美国 BLH 公司. 过程称重系统. 第六届上海中国国际衡器展览会资料. 2007 年 4 月。

【7】日本计量机器工业联合会, 2006/2007 东京计量计测机器工业展览会总览, 2007。

【8】刘九卿. 国家职业资格培训教程——称重传感器装配调试工 [M]. 中国劳动社会保障出版社, 2010 年 4 月。

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 702 研究所研究员, 享受国务院政府特殊津贴专家。在职时从事各型号运载火箭结构强度试验应力分析等工作。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。

(作者通讯地址: 北京市丰台区桃源里小区 11 号楼 2 单元 6 号。

邮政编码: 100076)