

称重传感器制造工艺的作用及其发展趋势

中国运载火箭技术研究院第 702 研究所 刘九卿

【摘要】 从应变式称重传感器研发、强化企业竞争力和参与国际市场竞争等角度，认识制造工业的地位和作用，得出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，当今应变式称重传感器的竞争主要是制造工艺的竞争。制造工艺不仅是应变式称重传感器研制生产过程中一般称之为的共性基础技术，而且已成为起关键作用的专业技术。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；应变式称重传感器主要制造工艺及其机理；应变式称重传感器制造工艺发展趋势等方面阐述这一理念。

【关键词】 称重传感器；制造技术；制造工艺；基础技术；基础工艺；系统工程；市场竞争

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的活跃内涵，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（以下简称称重传感器）技术与产品也不例外，从 20 世纪 40 年代问世至今完全是以制造技术、制造工艺为基础，并依赖于制造技术、制造工艺而发展起来的。

20 世纪 90 年代以来，世界上工业发达国家处于国际市场引导者地位的称重传感器制造企业，通过分析、研究几乎均不约而同的将科研发展重心转移到制造技术、制造工艺研究与应用领域，有许多新认识、新体会，创造和应用了一些有成效的新工艺及其新型工艺装备，均取得了较好的应用效果。这些称重传感器制造企业的体会是：称重传感器制造技术、制造工艺绝对不是一些人观念中的“作坊手艺”，而是一个集机械、电子、信息、材料和管理为一体的综合技术。再加上高新技术、现代管理技术的纳入和推动，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工艺技术相结合，技术与管理相结合形成新型的现代制造工艺系统。上述认识，越来越被国内称重传感器制造企业所接受，制造工艺的发展与应用越来越为技术人员所重视和关注。近年来一些企业针对重传感器大批量生产线，开展了制造工艺及其工艺装备的改进、创新，研发出高效智能温度补偿系统；液压全自动叠加式力标准机自动快速检测系统；每块砝码可单独加载、几块砝码或全部砝码组合起来一同快速加载的 50t 静重式力标准机；桥式称重传感器无缝链接自动检测生产线等新型工艺装备和制造工艺均取得了较好的应用效果。

二、制造工艺在称重传感器研制生产中的地位和作用

众所周知，称重传感器在研制、生产过程中有四大关键问题，即结构、材料、工艺、检测。其中制造技术、制造工艺对称重传感器的准确度、稳定性和可靠性影响极大，可以说制造工艺水平直接影响称重传感器技术水平、质量水平。不断改进和提高制造技术、科学合理的选择和集成行之有效的制造工艺，称重传感器技术水平和产品质量才能不断提高。反之，称重传感器技术与应用水平的提高，又促进制造技术和制造工艺的创新发展。因此，制造技术、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。哪个企业重视制造技术、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技术、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、可靠性具佳的高准确度产品，就是以先进的制造技术和制造工艺为基础。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，具有多样性、边缘性、综合性和技艺性等特点，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、稳定性和可重复性的严格考验。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。

称重传感器制造技术、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。有些企业称重传感器产品设计迁就工艺，工艺设计迁就设备，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，是不重视技术改造的后果。其原因是制造技术、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，辛勤专研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技术、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，结构设计技术和制造工艺技术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。现代化的先进设计技术是实现高质量称重传感器的主导性因素，而科学合理、可重复的制造工艺技术是实现高质量称重传感器的基础性保障，此两大基础不可分割，必须并重。就称重传感器产品而言，轻视制造工艺技术就是放松产品质量，只有重视并抓好工艺技术，才

能将大量隐患消灭在萌芽状态。抓产品质量无可厚非，不抓生产工艺永无宁日。20 世纪 80 年代末期，美国为克服一些企业经营战略思想适应市场变化慢，设计的产品可制造性差、开发周期较长、忽视不断改进产品性能和提高制造工艺水平等问题，提出设计和工艺要平行作业，联合工作，开展：“同时工程“（Concurrent Engineering），确定了同时、制约、协调、一致四原则。即在相同的时间框架内设计与工艺进行平行作业，不同程度的缩短了产品开发周期。当然在目前 CAD/CAM/CAE 技术和三维数字设计与制造技术迅速发展和广泛应用的条件下，“同时工程”又有了新的内涵，它可以通过网络把 CAD/CAM/CAE 和数据库连接起来，共享信息和资源，在计算机屏幕上进行结合，在相同的时间框架内进行平行作业，紧密协调选取在成本、质量、交货周期等要求上的最佳结合。这样将工艺的制约条件要作为称重传感器产品设计的制约条件考虑，工作效率更高。在当前称重传感器技术与产品竞争日趋激烈，市场日趋国际化的情况下，制造技术、制造工艺正起着更为重要的作用。

三、称重传感器主要制造工艺及其机理分析

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，它不象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。为保护粘贴好的电阻应变计使其保持位置准确，应与高温橡胶板隔离。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，厚度约为 0.07mm，美国贴片工艺为 0.003 英寸（0.0762mm），日本贴片工艺为 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. 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 5 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 20 ~ 30 ，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。

3 . 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 1 所示，其作用是将电阻变化转换成电压输出。

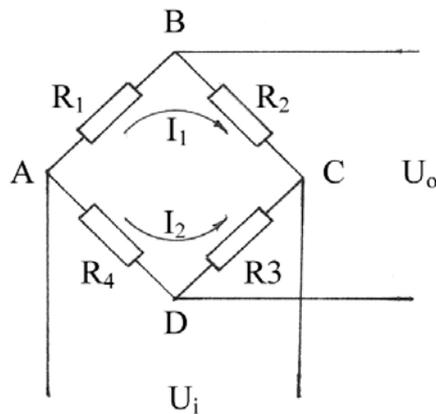


图 1 惠斯通电桥电路

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。

惠斯通电桥用于应变式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 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 1 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。

4. 灵敏度温度补偿工艺机理

早在 20 世纪 40 年代初期，也就是应变式负荷传感器问世之时，人们就注意到温度对合金钢制成的机械式标准测力环指示值的影响。美国和前苏联学者经过反复试验分析，指出温度误差主要是测力环金属材料的弹性模量随温度的升高而降低所致，并测量出影响量的大小，给出较为准确的修正系数 0.027%/。美国学者威尔逊 1946 年发表的论文“标准测力环的温度系数”就是这些成果的典

型代表。人们很自然的想到同为合金钢制成的应变式测力与称重传感器也必然产生此种温度误差，而且其影响因素比标准测力环更多、更复杂。除称重传感器弹性元件金属材料的弹性模量具有负温度系数的影响外，还有电阻应变计灵敏系数的温度系数影响。主要是弹性模量温度系数影响，其影响量即称重传感器的灵敏度温度误差可达 $(0.03 \sim 0.05) \%$ 。称重传感器在使用过程中，温度每变化 10°C 灵敏度就变化 $0.3\% \sim 0.5\%$ ，这是非常可观的误差，因此必须进行灵敏度温度补偿。

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。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。

国内外称重传感器制造企业大量的试验测量数据证明，对同一种弹性元件结构而言，只要弹性元件的金属材料、电阻应变计和制造工艺不变，灵敏度温度误差的分散度比较小，一般小于 10% ，这主要是制造和补偿工艺引起的。

既然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，灵敏度增大所致，如果在称重传感器灵敏度增大的同时，使电桥电路的实际供桥电压也与之成比例的减小，保持供桥电压与实际供桥电压的比值不变，则灵敏度也就保持不变，这就是灵敏度温度补偿原理。根据这一原理，在电桥的供桥回路中，串联一个随环境温度变化而变化的灵敏度温度补偿电阻 R_{Mt} ，当环境温度升高时， R_{Mt} 随之增大，尽管供桥电压 U_i 保持不变，但由于电阻分压作用，使电桥的实际供桥电压 U_{AC} 减小，从而导致灵敏度减小，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。灵敏度温度补偿电路如图 2 所示。

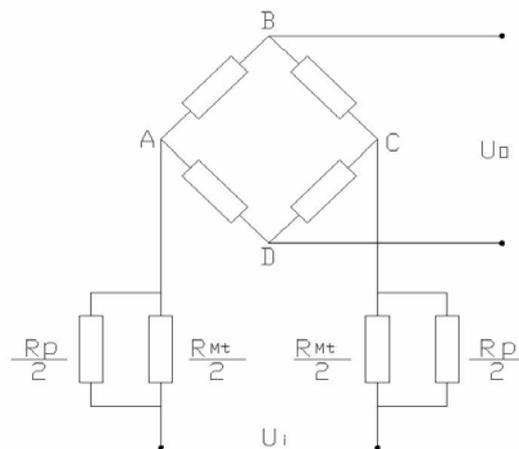


图 2 灵敏度温度补偿电路

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，都会受到空气中水份和氧气的影响，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份，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H₂O，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、盲孔灌封和焊接密封三种方法。

6. 铝合金弹性元件转变时效状态处理工艺机理

在研制小量程称重传感器时，灵敏度与刚度应同时考虑，即在规定的灵敏度条件下，称重传感器尽可能的具有较大的刚度。为了满足这一要求，就必须选用弹性模量 E 与比密度 ρ 的乘积 Eρ 最小的材料。变形铝合金的 Eρ 值只有中碳合金钢的九分之一，且屈服比高、比强度大、塑性好、耐腐蚀性强，并具有较好的低温性能和优良的冷热加工性能，是理想的制造小量程称重传感器材料。国内外应用较多的是铝 - 铜 - 镁系的硬铝合金，我国牌号 2A12 (原牌号 LY12)，美国、日本牌号 2024。淬火工艺规范按 QJ / Z127—84 规定，淬火温度为 490 ~ 503 ，淬火保温时间按下式计算：

$$T=20 + (1.5 \sim 2) t$$

式中 T——淬火保温时间 (min)；

t——板材厚度 (mm)。

考虑到 2A12 铝合金淬火过烧温度为 507 ，淬火温度选择偏下限 495 ，保温时间选择偏上限 T=20 + 2t 为好，淬火水温控制在 20 ~ 30 。淬火后自然时效 96 小时为热处理自然时效状态，代号 T4 (原代号 CZ)。自然时效状态的 2A12—T4 铝合金不适合制造高准确度称重传感器，无法保证弹性元件尺寸稳定性，直接影响称重传感器的零点和灵敏度。分析其原因主要是：

(1) 2A12 铝合金淬火后存在较大的内应力，经自然时效不能得到有效的消除。此淬火内应力是由于各部位冷却速度不同而产生的热应力，其表层为压应力，心部为拉应力。当进行切削加工时，内应力的平衡状态受到破坏而导致变形或歪曲，加工成弹性元件后，还会因为应力松弛继续发生变形。

(2) 2A12—T4 铝合金，相和组织状态也不稳定。虽然经过 96 小时自然时效，第二项（名义成分为 CuAl_2 ）从过饱和固溶体中沉淀析出，但仍有不少铜原子未完成从过饱和 α 固溶体中脱溶的过程，在使用中还会继续进行沉淀项的脱溶过程，引起弹性元件尺寸变化。

(3) 在机械加工过程中，由于切削力的作用，使弹性元件本身产生一定的内应力，并在其表层形成很不稳定的加工硬化层。有一部分能量会积存在弹性元件的表层中，其材料的组织因被变形而处于不稳定状态，残余内应力也较大。随着使用时间的延长，被变形的组织会发生变化，内应力不断松弛，也将导致弹性元件尺寸变化。

基于上述原因，高精度称重传感器必须采用热处理人工时效状态 T6（原状态代号 CS）2A12 铝合金。热处理人工时效工艺为：时效加热温度 185~195℃，保温时间 6~12 小时，空冷。

如果采购了热处理自然时效状态的 2A12—T4 铝合金，为确保称重传感器的零点和灵敏度稳定性，对粗加工后处于自然时效状态的弹性元件，必须进行一次转变热处理状态的人工时效处理，即变 2A12 铝合金的自然时效状态（T4）为人工时效状态（T6）。为了不降低 2A12 铝合金的强度，保证弹性元件具有一定的刚度，可选用在 180℃ 温度下，保温 24 小时的人工时效转变状态处理工艺。此工艺的效果非常明显，不仅使 2A12 铝合金弹性元件由自然时效状态转变为人工时效状态，稳定了组织，而且还达到了消除粗加工产生的残余应力的目的。

四、称重传感器制造技术与制造工艺发展趋势

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，称重传感器制造技术、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。发展制造技术、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际市场参与国际竞争的需要。

制造技术总是不断发展，没有永恒的先进制造技术。随着科学技术的进步，工业自动化水平的提高，不断赋予制造技术新的内涵，制造技术的进步应促使整体效率和效益的提高。较长时间以来，称重传感器弹性元件及其附件制造技术的进步，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。为实现规模生产，必须从称重传感器及其附件生产的全局上分析研究，改进制造技术，提高整体效率。目前，我国绝大多数企业弹性元件及其附件的加工，是采用普通机床加专用夹具或者采用专用机床，尽管生产效率有较大提高，但仍然满足不了大批量生产的需求。只有少数企业弹性元件及其附件的冷热加工自动化程度较高，但也只是处于单机自动化、刚性自动化阶段。处于国际市场引导者地位的称重传感器制造企业，已经将电子计算机技术、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，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。我国传统称重传感器产业的改造也必须倚赖先进制造技术和先进制造装备，这是实现技术升级，跟上国际称重传感器技术发展步伐的有力举措。

随着称重传感器技术的发展，应用范围的不断扩大，制造工艺及生产工艺流程不再被认为是毫无技术含量的作坊手艺式的手工劳动，而是一个集机械、电子、材料、热处理、信息和管理为一体的综合技术。众所周知，电子称重技术和电子衡器产品的需要是称重传感器永恒的技术课题，因此制造工艺受称重传感器结构更新、边界变化、性能提高、应用领域扩大等新要求而同步改进和发展。其中，基础工艺和核心工艺的改进、提高及其发展趋势最具代表性。

为适应物联网和无线传感器网络发展的需要，一部分测力与称重传感器正由传统型向全新型的小型化、多功能、低功耗、低成本方向发展，其技术难度之一是要求基础工艺提供微型化、高阻值电阻应变计。为研制大阻值，低功耗电阻应变计，美国 V-MM 公司研究轧制出 0.00006 ~ 0.00008 英寸（1.5 ~ 2 μ m）厚的应变电阻合金箔材，并应用此箔材研制出微型高阻单轴和全桥电阻应变计。微型高阻单轴电阻应变计的特点是：采用带有温度自补偿性能的卡玛合金制造敏感栅，基底材料与普通尺寸应变计相同；敏感栅的总体尺寸很小，可以做到 1 × 1mm 和 0.5 × 0.5mm，而且仍能手工焊接；应变计电阻值可达 5k Ω ，误差 0.2%。微型高阻全桥电阻应变计的特点是：采用带温度自补偿性能的卡玛合金制造敏感栅，基底材料与标准尺寸应变计相同；也有用于剪应力测量的敏感栅为 45° 方向的全桥电阻应变计；基底尺寸是 3.8mm × 4.0mm，电阻值为 5000 Ω ± 0.2%。

称重传感器核心制造工艺中最重要的一环，是将电阻应变计牢固的粘贴在弹性元件上，尽管创造各种条件使其固化非常完全，但在工作时也会出现性能波动。美国 MS 公司创造了在高温下，将半导体电阻应变计与无机玻璃熔于小型弹性元件上，制成低成本新型称重传感器。这种无机玻璃粘贴电阻应变计的新技术与新工艺，消除了传统的用环氧树脂和酚醛环氧树脂粘贴电阻应变计所带来的不稳定性，极大的提高了称重传感器的长期稳定性和工作可靠性，经过一千万周期以上的测试，其寿命基本是无限的。

称重传感器的原理和制造工艺决定了，在其生产工艺流程中必然产生一些缺陷，因为许多工序为人工操作、手动控制，人为的因素对产品质量影响较大。为了使生产的每一个产品都符合国家标准的要求，保证大批量生产称重传感器的质量，最大限度的排除人为的因素对产品质量影响。称重传感器制造工艺的发展趋势是：在生产工艺流程中尽量增加以计算机控制为主的半自动化或自动化工序。并将网络信息化技术应用于称重传感器的生产工艺流程中，实现工艺流程的网络化。即通过通讯线路和设备把各生产工序具有独立操作和控制功能的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。进入 21 世纪以来，威世精密切集团北京特迪亚公司、中航电测仪器股份有限公司、宁波柯力传感技术股份有限公司等，都将网络信息化技术应用于称重传感器生产工艺流程中，基本实现了工艺流程的网络化。

在以计算机控制为中心的网络化生产工艺流程中，单道工序的半自动化和自动化是生产工艺流程网络化的基础。20 世纪 90 年代以来，称重传感器制造工艺中，单道工序的半自动化和自动化改造成果主要有：超声波水洗技术与工艺；全自动机器人粘贴电阻应变计和辅助粘贴电阻应变计系统；固化、后固化工艺的隧道式加温控温烘道，控温精度高、工作段温度均匀性好，固化、后固

化完成后应变胶粘剂物理和机械性能的均一性好；高效智能零点、灵敏度温度补偿测试系统；快速全自动在线检测工艺和多台叠加式力标准机同时工作的无缝链接自动检测称重传感器生产线；将卤素引入高聚物中或用硅氧键嵌入高聚物中的高度防潮耐水密封胶密封新工艺，以及采用含氟聚酰亚胺、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的新防护密封工艺；全自动稳定性处理工艺；动态称重传感器的机械阻尼、油阻尼、电子振荡阻尼工艺；高温称重传感器的高温电路补偿及高温密封新工艺等。

大批量生产称重传感器，多对生产工艺流程采取统计制程管理。即利用统计学原理，对生产工艺全过程中的产品质量进行控制和管理，以达到尽可能第一次就使产品符合国家标准和国家检定制程要求的目的。统计制程管理的核心是科学、合理的进行抽样试验与测试；把生产工艺流程、产品质量控制、工艺装备利用联系在一起，提高生产过程控制能力；快速分析制程出现的问题和迅速采取措施保证制程稳定，最大限度的减小产品的不合格率。统计制程管理的特点是：

经济性：采用抽样检验法，产品参与检测、试验的项目和次数科学合理，使生产工艺流程稳定，最大限度的减少产品的不合格率；

预警性：一旦生产工艺流程出现异常趋势，可立即采取对策，预防批量不合格。一般都是根据工艺理论和实践经验提供控制资料。

科学性：把工艺过程、质量控制、装备利用联系在一起，提高生产过程控制能力和快速分辨共同和特殊原因的评估能力；

高效性：统计制程控制，解决了长期困扰的大批量生产的质量检验问题，改善了评估方法，减少了报表和数据分析，保证了成本、质量和交货期。

在称重传感器生产工艺流程中，实现整个生产过程信息、通信、自动化技术的横向与纵向真正的无缝一体化，是大批量生产工艺流程发展的必然趋势。

五、结语

世界上工业发达国家对制造技术、制造工艺的保密是非常严格的。从国外论文集、技术刊物、相关文献中，可以找到关于系统、原理、结构等方面的参考资料，然而很难找到关于制造技术、制造工艺资料。称重传感器技术领域也不例外，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，希望能引起足够的重视。

国产称重传感器与工业发达国家同类产品相比，主要差距在制造工艺上，具体的讲就是基础工艺和核心工艺相对落后。其中基础工艺、技术装备、检测手段落后，工序半自动化和自动化程度低，制程稳定性差，技术与管理相结合不够等问题，早已引起各研制、生产单位以及有关领导部门关注和重视。但深入研究，统筹规划、采取措施，解决问题不够，使得称重传感器制造技术、制造工艺

进步不大。为适应电子衡器技术的发展和满足称重传感器市场的新需求，希望一些称重传感器制造企业，尽快从采用较低技术、传统的手工作坊式劳动密集型生产方式中解放出来，从观念上、技术上和管理上迎头赶上，瞄准先进，迎接挑战。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工艺提高到一个新水平，为发展我国民族衡器工业作出新贡献。

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. 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。

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