

称重传感器弹性元件制造与稳定性处理工艺机理分析

□中国运载火箭技术研究院第七零二研究所 刘九卿

【摘要】国内外应变式称重传感器（以下简称为称重传感器）的研发与批量生产都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，世界各国在称重传感器技术竞争中制造工艺占有较大的比例。制造工艺不仅是称重传感器研制生产过程中一般称之的共性基础技术，而且已成为起关键作用的专业技术。本文论述了制造工艺在称重传感器研制生产中的地位与作用；分析了称重传感器制造工艺中弹性元件准备工艺的重要性；重点介绍和分析了弹性元件金属材料选择和锻造、机械加工、热处理、稳定性处理工艺机理。

【关键词】称重传感器；弹性元件；金属材料；制造工艺；热处理；稳定性处理

文献标识码：B

文章编号：1003-1870（2024）02-0005-07

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。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，完全是以制造工艺为基础，并依赖于制造工艺而发展起来的。尽管称重传感器弹性元件因利用的应力不同有各种结构形式，但其制造工艺基本相同。在称重传感器研制与发展过程中，世界上处于市场引导者地位的称重传感器制造企业，通过分析、研究，几乎均不约而同地将称重传感器发展重心转移到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。其中以美国BLH公司研究实施的称重传感器灵敏度温度补偿技术与工艺；美国VISHAY公司研究实施的利用半导体应

变计对称重传感器进行线性补偿的技术与工艺（美国专利No3. 034346号）；德国PHILIPS公司研究实施的利用镍箔应变计对称重传感器进行线性补偿同时兼顾灵敏度温度补偿的技术与工艺；法国专利No1204850利用非线性的盘状膜片进行线性补偿同时兼作横向力补偿技术与工艺最具代表性。在世界各国，称重传感器制造企业均取得了很好的应用效果。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。再加上人工智能技术、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数字智能制造工艺技术相结合，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

越被从事称重传感器研究生产的技术人员所重视和关注。

1 制造工艺在称重传感器研制生产中的地位与作用

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。其中制造工艺及其工艺装备对称重传感器的准确度、稳定性和可靠性影响极大。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，又促进制造工艺的创新发展。因此，制造工艺与称重传感器技术是相辅相成的促进与带动作用，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地加以改进和创新。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。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。

在我国，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。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，并要反复地进行制造工艺方面的试验，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工艺密切相关，企业必须重视它。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，不抓制造工艺永无宁日。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，不同程度地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，或采用三维数字设计技术共享信息和资源，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，分析各种制约条件，紧密协调选取在成本、质量、交货周期等要求上的最佳结合。这样将制造工艺的条件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，称重传感器市场日趋国际化的情况下，制造工艺正起着更为重要的作用。

2 称重传感器弹性元件冷热加工工艺及其机理分析

称重传感器制造工艺流程是，从电阻应变计、弹性元件准备开始，到全部制造工序完成为止。其中选择比较理想的弹性元件金属材料，消除弹性元

件在锻造、机械加工、热处理等冷热加工中产生的残余应力；选择电阻应变计、应变胶粘剂，应具有最佳工作特性和与弹性元件最好的匹配性；可重复的精密而科学的生产工艺流程；高精确度的试验、检测装备；有效的质量控制程序，即利用可跟踪的测量设备来控制 and 保障制造工艺流程的稳定至关重要。在称重传感器制造工艺流程中，处于国际市场引导者地位的称重传感器制造企业，不惜制造成本，特别重视弹性元件准备工艺，这一理念值得我国称重传感器制造企业借鉴。

2.1 弹性元件锻造、机械加工和热处理工艺机理分析

称重传感器弹性元件使用的钢材种类较多，但主要是以综合机械性能优良的高强度中碳合金结构钢为主，马氏体沉淀硬化不锈钢为辅。中碳合金结构钢以美国的AISI 4340，德国的30CrNi8，英国的En26，俄罗斯的35X r CA 和我国的40CrNiMoA（GB3077—1999）最具有代表性。沉淀硬化不锈钢以美国的17-4PH、15-5PH，英国的630/631，日本SUS630 和我国的0Cr17Ni4Cu4Nb 应用较多。其中我国的40CrNiMoA 钢在适当的工艺制度下具有较高的强度、塑韧性和淬透性，得到普遍的应用。

称重传感器弹性元件的冷热加工工艺，应对残余应力进行严格控制和测试，特别要对弹性元件应变区精加工带来的表面残余应力利用X 光衍射仪进行测试，以达到控制和减少应变区表面残余应力的目的。

中、大型称重传感器弹性元件必须经过锻造工艺处理，使毛坯反复锻钹，以砸碎粗大的晶粒，使其细化均匀、组织致密。同时要求毛坯的金属纤维方向与弹性元件受力方向一致，不允许有交叉、重叠等现象，这是提高称重传感器准确度和稳定性最重要的环节。因此在锻造过程中尽量做到只伸展、不锻粗，并防止过烧与粗晶。弹性元件锻造后必须进行退火处理，使其金相组织为：珠光体+ 铁素体+ 碳化物。

对称重传感器弹性元件进行机械加工时，无论

采用刨、铣、车、磨之中的哪一种制造技术或者是先进的加工中心，都会在弹性元件上产生残余应力。这主要是在切削过程中，切削方向产生压缩变形，而垂直于已加工表面方向产生拉伸塑变（塑性凸出效应）导致表面产生残余拉应力。此外，刀具接触点的挤光效应和切削时的热效应也分别产生残余压应力和残余拉应力。因此，机械加工产生的残余应力是刀具接触点前方区域的塑性凸出效应、刀具接触点下方区的挤光效应和切削时的热效应等影响的叠加。为了使弹性元件在机械加工过程中少产生残余应力，应尽量减少精加工的切削用量，最好不采用磨削加工工艺，因为弹性元件应变区最后一道工序采用磨削加工时可产生 $60\text{kgf}/\text{mm}^2$ 以上的压应力。尽管从弹性元件总体来看，由于机械加工产生的残余应力只出现在其表面 $300\mu\text{m}$ 左右的薄层部分，而电阻应变计就粘贴在这一应力分布不均匀且有较大磨削应力的表面上，随着时间、温度、外力的作用，会使弹性元件金属材料组织中产生滑移线而不断地释放残余应力。由于残余应力是一种保持在变形晶体内的能量，这种能量表现为把原子推到了不稳定的位置，使原子间距发生变化而释放能量。在释放残余应力的过程中，同时会产生微小的永久性变形，直接影响称重传感器零点和灵敏度的稳定性。

称重传感器弹性元件经过锻造和退火工艺处理后，还必须进行淬火与回火工艺处理，以使弹性元件材料具有较高的比例极限和良好的综合性能。确定科学合理的热处理工艺规范并严格执行，可以保证称重传感器具有优良的力学性能和较高的疲劳寿命。40CrNiMoA 合金钢的通用淬火工艺为：淬火温度 $840\sim 860^\circ\text{C}$ ，保温时间 $10\sim 30$ 分钟（由弹性元件大小决定）油冷，淬火后的金相组织为淬火马氏体。回火工艺为：回火温度 $200\sim 560^\circ\text{C}$ ，保温2 小时，空冷。对于中小型弹性元件多选用 500°C 的回火制度，此时的金相组织为索氏体，但仍保留了马氏体方向。硬度HRC39 左右，强度极限 $1250\text{N}/\text{mm}^2$ ，屈服极限 $1130\text{N}/\text{mm}^2$ ，平均弹性滞后为 0.024% 。

国外有些称重传感器制造企业在弹性元件机械加工和热处理后，实施二次真空回火工艺，即提高回火温度或延长回火时间，可使弹性元件组织均匀，提高称重传感器弹性元件的稳定性。但回火温度高会较大地降低硬度和耐磨性，因此多用增加回火时间的方法来消除残余应力。真空回火工艺为：“经过480℃回火后的弹性元件，再进行一次460℃×2小时的二次回火；经过500℃回火后的弹性元件，再进行一次460℃×4小时的二次回火。真空回火工艺的真空度均为 10^{-5} 托（1托=1/760标准大气压）。

综上所述，弹性元件中的残余应力，主要来自原材料在轧制或拉制等工艺成型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40~80μm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20~40μm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100μm之间，数值较大。

（2）残余应力衰减很快，在深度为200μm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60kgf/mm²，因此热处理后弹性元件的精加工尽量不采用磨削。

2.2 弹性元件冷热加工后人工时效工艺机理

分析

为消除称重传感器弹性元件冷热加工产生的残余应力，美、德等国的称重传感器制造企业多增加一道人工时效处理工艺，也称为“老练处理”。其目的是消除弹性元件在锻造、机械加工、热处理工艺过程中产生的残余应力。仍以40CrNiMoA中碳合金钢制造的弹性元件为例，为了提高称重传感器的稳定性，必须使弹性元件材料中的残余奥氏体尽量少，也就是在回火过程中使残余奥氏体尽可能的分解。因为残余奥氏体会逐渐地变为马氏体，即由面心立方结构转变为体心立方结构，这样多余的碳原子会使晶格歪扭，使得体积胀大，造成尺寸变化，直接影响称重传感器的零点和灵敏度的稳定性。一般多采用增加回火时间或进行二次回火处理来减少残余奥氏体，提高弹性元件的尺寸稳定性。

对弹性元件在实施粘贴电阻应变计工艺前进行人工时效处理，主要采用真空回火、高温时效和低温深冷三种工艺方法。

（1）真空回火处理工艺

真空回火温度比热处理时的回火温度稍低，以不引起组织和其他性能变化，真空度为 10^{-6} 托。试验表明，真空回火能大幅度消除弹性元件表面的残余应力，其值可减少80%左右的应力值，并使应力分布均匀化。

（2）高温时效处理工艺

对于钢制称重传感器弹性元件多采用在200℃高温油煮工艺方法，即将完成机械加工和热处理工艺处理的弹性元件放入200℃油槽内，进行高温油煮处理，油煮时间根据弹性元件大小确定，一般为24小时。此种高温油煮工艺方法的特点是，既消除了弹性元件中的残余应力，又保护了弹性元件表面处理质量。

（3）低温深冷处理工艺

铝合金弹性元件多采用低温深冷的稳定性处理方法，即将铝合金弹性元件放置在液氮密封容器内，根据弹性元件尺寸大小确定时间，一般为24小时。个别钢制弹性元件，也可以采取先实施高温油

煮工艺，再实施低温深冷工艺进行稳定性处理，消除残余应力的效果更好。

2.3 铝合金称重传感器弹性元件材料热处理状态选择

在研制电子计价秤用小量程高准确度称重传感器时，要求弹性元件既有较高的机械强度又要有较大的刚度，而灵敏度和刚度两者之间是相互影响和相互制约的关系。如何处理这对矛盾，是小量程称重传感器设计制造必须首先面对的问题。为了解决灵敏度与刚度这对矛盾，保证小量程称重传感器在规定的灵敏度条件下具有较高的刚度，就必须选择弹性模量 E 和比密度 ρ 的乘积 $E\rho$ 最小的材料。此类材料主要有铝合金、钛合金、铍青铜等，以铝合金应用最为广泛。变形铝合金的 $E\rho$ 值只有中碳合金钢的九分之一，且比重小、屈强比高、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，是理想的小量程称重传感器弹性元件材料。国内外应用较多的是以下三种可热处理强化的变形铝合金：

(1) 锻铝合金

我国牌号2A14（原牌号LD10），美国、日本牌号2014。属于铝-铜-镁-硅系，因具有良好的锻造性，故称为锻铝合金。

(2) 硬铝合金

我国牌号2A12（原牌号LY12），美国、日本牌号2024，属于铝-铜-镁系，因其强度高，耐热性好，故称为硬铝合金。

(3) 超硬铝合金

我国牌号为7A04（原牌号LC4），美国、日本牌号为7075，属于铝-锌-镁-铜系，由于强度高于硬铝，故称为超硬铝合金。

由于2A14强度偏低，7A04时效温度低，所以应用较少。国内外应用最多的是硬铝合金，我国牌号2A12，美国、日本牌号2024，属于铝-铜-镁系，因其强度高，耐热性好，故称为硬铝合金。

2A12硬铝合金用于称重传感器弹性元件时，必须选用热处理人工时效状态，即2A12-T₆、2024-T₆。

由于2A12、2024硬铝合金热处理后存在较大的内应力，这种内应力经过自然时效后不可能得到有效的消除。因为铝合金热处理产生的内应力是由于弹性元件毛坯各部位冷却速度不同而产生的热应力，表层为压应力，心部为拉应力。无论热处理产生的应力如何分布，当进行机械加工时，弹性元件内应力的平衡状态受到破坏而导致变形或歪曲。如果形成产品后仍有残余应力，弹性元件也会因为松弛而导致变形。同时自然时效状态的2A12铝合金的相和组织状态也不稳定，虽然经过96小时的自然时效，第二相（CuAl₂）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，使得称重传感器在使用过程中还会继续进行沉淀相的脱溶过程而引起弹性元件的尺寸变化，影响称重传感器的稳定性。因此，必须选用热处理人工时效状态的2A12-T₆铝合金。也可以选用自然时效状态经过再时效处理的2024-T₈₁和经过特殊调质处理的2024-T₃₅₁。若无热处理人工时效状态而选用自然时效状态的2A12-T₄时，最好在加工弹性元件前实施改变状态的再时效处理，即变T₄状态为T₆状态。由于2A12-T₄的组织稳定性很差，这对弹性元件尺寸稳定很不利，直接影响称重传感器的稳定性。因此，必须对毛坯或粗加工后处于T₄状态的半成品进行一次人工时效处理。为了不降低材料强度，保证加工后弹性元件有足够刚度，通常采用在190℃下长时间保温的再时效处理工艺，变T₄状态为T₆状态。再时效处理工艺：190℃×24h或连续升温110℃、150℃、190℃，保温6、6、12小时（时间连续计算）。2A12-T₄铝合金弹性元件的再时效处理，不仅改变了状态、稳定了组织，而且还达到了消除热处理和粗加工产生的残余应力的目的。由铝合金生产厂进行热处理时，要求人工时效状态（2A12-T₆）的硬度为：各类型称重传感器HB130~135；集成化称重板传感器HB140~145。

3 称重传感器稳定性处理工艺机理分析

称重传感器稳定性处理的目的是使称重传感器能用于较恶劣的环境条件，以及用于生产过程

控制元件时的环境适应性强，只有这样才能保证长期稳定性好，工作可靠性高，故障率低。称重传感器环境适应性主要是耐受下列因素的能力：气候因素——温度、湿度、压力等的影响；电磁因素——电磁场或电磁辐射的干扰；特殊介质因素——盐水、化学腐蚀性气体、核辐射等影响。德国对申请样机试验的新型称重传感器要求，对零件的耐磨性、老化及对干扰的敏感性进行试验和计量，保证称重传感器的计量性能不受电磁场、静电力、振动、气候条件、机械磨损等干扰量的影响。称重传感器稳定性的评定方法对于各类电子衡器和电子称重系统是至关重要的，它决定整个产品和系统的稳定性。

目前，国内外对称重传感器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制造企业都承认稳定性是重要的质量指标，但在产品样本和使用说明书中却很少给出稳定性指标。究竟如何认识称重传感器的稳定性呢？世界各国称重传感器制造企业的共识是：在一定时间内和相同条件下，称重传感器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。因此在美国、德国、日本有些称重传感器制造企业的制造工艺中，都有稳定性处理工艺和各自的稳定性处理和试验方法。

称重传感器稳定性试验方法包括老化、疲劳和环境三个因素。“老化”即时间影响；“疲劳”是指把时间影响模拟为固定次数的称重过程或固定小时的工作量（德国PTB规定用最大秤量或至少 $1/2$ 秤量加载20万次，实际上是耐久试验）；“环境因素”则是把时间模拟为长期的温度、湿度变化的影响。德国PTB规定对无密封“开放”型称重传感器要进行温度、湿度试验，因为这种称重传感器的零点和特性随温度、湿度的变化较大。

处于国际市场引导者地位的称重传感器制造企业，在高准确度称重传感器制造工艺中，都有稳定性处理工艺流程。其稳定性处理工艺多分为两次进行，其一是在金属材料经过锻造、机械加工、热处理加工成弹性元件后进行，目的是消除机械加工和热处理产生的残余应力，称为第一次稳定性处理。

其二是在完成粘贴电阻应变计、组成惠斯通电桥电路、实施各项电路补偿与调整和防护密封后进行，称为第二次稳定性处理。国内称重传感器生产企业的制造工艺，多采用第二次稳定性处理方法。以温度循环老化稳定性处理工艺为主，实际上是“环境应力筛选”的一种方法，将其移植到称重传感器稳定性处理工艺中十分有效，在称重传感器稳定性处理工艺中将其称之为温度循环。主要参数为，高温和低温的极限值、停留时间、温度变化率、一次循环总时间和温度循环次数。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°C 停留4小时，随试验温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°C ，直到第五天的 140°C ，停留4小时，随试验温箱自然降低至室温，此为一个温度循环，共进行十天两个温度循环老化即可。国内外应用较多的称重传感器第二次稳定性处理工艺方法有：

（1）脉动疲劳法

脉动疲劳工艺方法是在交变应力作用下，经过上万次的拉伸、压缩对称循环载荷作用，在较短的时间内完成较长时间的自然时效作用，把残余应力降低到一定水平。它的机理是通过反复加载或机械振动，促使晶体内原子加速振动，而释放残余应力。可有效地释放弹性元件、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

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，至少保持24小时，也可以保持数日。如果能够在此状态下进行温度循环，则效果更好。

（3）振动时效法

振动时效工艺方法是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。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。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。

脉动疲劳即振动时效，将弹性元件安装在振动台上，根据弹性元件的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。

4 结语

世界各国对产品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，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。本文只是从称重传感器弹性元件准备工艺这一环节，即弹性元件材料选择及锻造、机械加工、热处理及稳定性处理工艺在称重传感器研制生产中所起的关键作用，说明制造工艺的重要性，希望能引起称重传感器生产厂家对制造工艺研究、创新的足够重视。

随着数字化网络和智能化技术的快速发展，万物通过相互连接进行相互协作，数字化已成为各行业、企业必须面对的课题。数字化设计与生产、人工智能等已成为衡器行业的新机遇，可以说数字化服务越来越成为各行业称重计量的时代所需。互联网+、两化融合、人工智能显示出数字经济的力量，也为衡器工业转型发展提供了良好的推动力。诸如

称重传感器设计生产模式转型的数字化改造；称重传感器弹性元件机械加工、全部生产工艺流程的数字化、智能化生产线等等，都是称重传感器制造企业比较长一段时间内需要投入和攻关的方向。

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.

作者简介

刘九卿 (1937—)，男、汉族，1960年毕业于吉林工业大学。中国航天科技集团有限公司下属中国运载火箭技术研究院第七零二研究所研究员，享受国务院政府特殊津贴专家。现为中国衡器协会发展战略咨询委员会委员、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》，在相关计量技术杂志上共发表学术论文150多篇。