

# 应变式称重传感器技术发展概况

中国运载火箭技术研究院第七〇二研究所 刘九卿

摘要：20世纪90年代以来，在电子称重技术与电子衡器产品快速发展的强力牵引下，应变式称重传感器进入了大发展时期，设计与制造技术取得了令世人瞩目的进步。本文从产品研发、强化企业竞争力和参与国际竞争的角度，介绍了应变式称重传感器、电阻应变计技术发展概况，重点是设计与制造的新技术、新工艺、新产品，科技攻关的新特点以及大批量生产的统计制程管理。结合电子称重技术的新要求，展望了称重传感器技术的发展趋势。

关键词：称重传感器 电阻应变计 结构设计 制造工艺 虚拟化 柔性化 网络化 统计制程管理

## 一、应变式称重传感器的发展与技术创新

1938年美国加利福尼亚理工学院教授 E.Simmons(西蒙斯)和麻省理工学院教授 A.Ruge(鲁奇)分别同时研制出纸基丝绕式电阻应变计，以他们名字的字头和各有二位助手命名为 SR-4 型，由美国 BLH 公司专利生产。为研制应变式负荷传感器奠定了理论和物质基础。

1940年美国 BLH 公司和 Revere 公司总工程师 A.Thurston(瑟斯顿)利用 SR-4 型电阻应变计研制出圆柱结构的应变式负荷传感器，用于工程测力和称重计量，成为应变式负荷传感器的创始者。1942年在美国应变式负荷传感器已经大量生产，至今已有 60 多年的历史。

前 30 多年，是利用正应力(拉伸、压缩、弯曲应力)的柱、筒、环、梁式结构负荷传感器的一统天下。在此时期内，英国学者杰克逊研制出金属箔式电阻应变计，为负荷传感器提供了较理想的转换元件，并创造了用热固胶粘贴电阻应变计的新工艺。美国 BLH 公司和 Revere 公司经过多年实践创造了负荷传感器电路补偿与调整工艺，提高了负荷传感器的准确度和稳定性，使准确度由 40 年代的百分之几量级提高到 70 年代初的 0.05 量级。但在应用过程中出现的问题也很突出，主要是：加力点变化会引起比较大的灵敏度变化；同时进行拉、压循环加载时灵敏度偏差大；抗偏心 and 侧向载荷能力差；不能进行小载荷测量，这些缺点严重制约了负荷传感器的发展。

后 30 多年，经历了 70 年代的切应力负荷传感器和铝合金小量程负荷传感器两大技术突破；80 年代称重传感器与测力传感器彻底分离，制定 R60 国际建议和研发出数字式智能称重传感器两项重大变革；90 年代在结构设计和制造工艺中不断纳入高新技术迎接新挑战，加速了称重传感器技术的发展。

1973 年美国学者霍格斯特姆为克服正应力负荷传感器的固有缺点，提出不利用正应力，而利用与弯矩无关的切应力设计负荷传感器的理论，并设计出圆截工字形截面悬臂剪切梁型负荷传感器。打破了正应力负荷传感器的一统天下，形成了新的发展潮流。这是负荷传感器结构设计的重大突破。

1974 年前后美国学者斯坦因和德国学者埃多姆分别提出建立弹性体较为复杂的力学模

型，利用有限单元计算方法，分析弹性体的强度、刚度，应力场和位移场，求得最佳化设计。为利用现代分析手段和计算方法设计与计算负荷传感器开辟了新途径。

70 年代初中期，美、日等国的衡器制造公司开始研发商业用电子计价秤，急需小量程负荷传感器。传统的正应力和新研制的切应力负荷传感器都不能实现几公斤至几十公斤量程范围内的测量。美国学者查特斯提出用低弹性模量的铝合金做弹性体，采用多梁结构解决灵敏度与刚度这对矛盾。设计出小量程铝合金平行梁型负荷传感器，同时指出平行梁负荷传感器是基于不变弯矩原理，使利用平行梁表面弯曲应力的正应力结构，具有切应力负荷传感器的特点，为平行梁结构负荷传感器的设计与计算奠定了理论基础，形成了又一个发展潮流。

蠕变是电阻应变计和铝合金负荷传感器经常遇到和必需解决的关键问题。前苏联学者 Н.Л.Клокова（科洛考娃）通过对一维力学模型和应变传递系数的分析，提出控制电阻应变计敏感栅的栅头宽度与栅丝宽度的比例，可以制造出不同蠕变值电阻应变计的理论，并成功的研制出系列蠕变补偿电阻应变计。对低容量铝合金负荷传感器减小蠕变误差，提高准确度起到至关重要的作用，使电子计价秤用铝合金负荷传感器多品种、大批量生产成为可能。

由于电子称重技术的迅速发展，负荷传感器性能的评定方法，已不能满足采用阶梯公差带评定准确度等级电子衡器的需要，急需与电子衡器准确度评定方法相适应的计量规程。80 年代初，国际法制计量组织（OIML）质量测量指导秘书处决定将用于电子称重的传感器与用于测力的传感器彻底分离，由美国负责的第 8 报告秘书处起草《称重传感器计量规程》。经过 OIML 成员国书面表决后，在 1984 年 10 月第 7 届法制计量大会上正式批准，并于 1985 年以 OIML R60 国际建议颁布，下发到各成员国。目前各国正在执行的是 R60 的 2000 年版。可以说 R60《称重传感器计量规程》是各国称重传感器进入国际市场的“通行证”。

随着数字技术和信息技术的发展，各行业对数字化电子衡器的需求愈来愈多，提出用数字称重系统突破模拟称重系统局限性的要求，对此模拟式称重传感器就无能为力了。因为在此之前，称重传感器的研究都集中在硬件方面，例如：创新弹性体结构，改进制造工艺，完善电路补偿与调整等。模拟式称重传感器的输出信号小，抗干扰能力差，传输距离短，称重显示控制仪表复杂，组秤调试周期长等缺点依然如故。为满足数字化电子衡器的需求，美国 TOLEDO、STS 和 CARDINA 公司，德国 HBM 公司等先后研制出整体型和分离型数字式智能称重传感器，并以其输出信号大，抗干扰能力强，信号传输距离远，易实现智能控制等特点，成为数字化电子衡器和自动称重计量与控制系统的必选产品，形成一个开发热点。

90 年代，由于称重传感器的设计与计算等基本技术趋于成熟，称重传感器的发展侧重于工艺研究和应用研究，在产品标准化、系列化、工程化设计和规模化生产工艺等方面都有很大进步，主要是：在结构与工艺设计中引入计算机拟实技术和虚拟技术；在弹性体加工中纳入柔性制造技术；在生产工艺中采用计算机网络技术；在稳定处理中移植了振动时效、共振时效新工艺；在测试检定中创造了自动快速检测和动态比对方法。

应用技术研究也有突破性进展，在传统称重模块的基础上，研制出新式称重模块，这是应用新技术面对新挑战的典型产品。其特点是组件化设计，具有“即插即用”功能，可减少由于偏重、热效应影响，偶然超载等引起的称重误差，并可承受由于振动、冲击、搅拌或其它

外力引起的偏重。总之，70年代两项技术突破，80年代两个重大变革，90年代纳入高新技术面对新挑战的研发理念，极大地促进了称重传感器技术的发展。

## 二、国外应变式称重传感器技术现状及发展特点

应变式称重传感器的设计与制造技术，产品的种类和市场占有率，美、德等工业发达国家的著名制造公司处于国际市场引导者的领先地位，我国具有一定规模的称重传感器制造公司处于市场挑战者地位，大多数生产企业是处于市场追随者地位。家庭电子秤用称重传感器的研发和生产中心在中国，在深圳，制造技术、工艺水平、产品质量和年产量逐年提高。

当今国际市场称重传感器技术的竞争，集中表现在产品的准确度、稳定性和可靠性的竞争；制造技术与制造工艺的竞争；应用高新技术研发新产品和自主知识产权产品的竞争。各称重传感器制造企业都在努力培植自己的核心竞争技术和打造核心竞争产品。

从近几年国际衡器工业展览会上展出的产品和对多家处于市场引导者地位的企业产品的分析可以得出这些企业的共同追求是：弹性元件材质更精良；电阻应变计、补偿元器件的技术要求和环境应力筛选更严格；制造工艺更精细；电路补偿与调整工艺更完善；外观质量更完美。

称重传感器的准确度、稳定性和可靠性是重要的质量指标，同时也是用户最关心的问题。对此，国外一些企业在结构设计、制造工艺、电路补偿与调整和稳定性处理等方面进行许多研究与试验工作，取得较大进展，主要成果有：

(1) 在结构设计与计算过程中，引入计算机拟实技术进行动态仿真，动力学分析；在工艺设计过程中引入计算机虚拟技术，对弹性体生产工艺进行模拟和检验；

(2) 在弹性体加工中，纳入先进制造技术，变刚性制造为柔性制造。普遍采用加工中心、柔性制造单元和柔性制造系统；

(3) 在生产全过程中，尽量减少手工操作、人为控制，增加半自动与自动控制、自动检验工序，并在生产工艺中采用计算机网络技术；

(4) 改进、创新工艺装备，实现高效智能电路补偿，建立全自动快速检测系统，提高C3级产品成功率 and 大批量生产产品的抽检合格率；

(5) 移植先进的稳定处理技术与装备，实施振动时效或共振时效新工艺，提高称重传感器的长期稳定性和工作可靠性；

(6) 应用高新技术开发新产品和自主知识产权产品，增强核心竞争力。处于国际市场引导地位的企业都有自己的核心竞争技术、工艺和产品，例如：正负蠕变电桥的“O 蠕变”称重传感器；铍青铜动态称重传感器；整体型和分离型数字式智能称重传感器；高准确度不锈钢3柱、4柱高温称重传感器；组件化设计的“即插即用”型新式称重模块等。

国外称重传感器技术发展特点：

(1) 重视基础技术、基础工艺和共性关键技术的研究，作到基础研究与预先研究并行；共性关键技术研究与应用技术研究并行；典型产品开发与产品工程化并行。保证基础技术与基础工艺（电阻应变计、应变粘结剂、补偿元器件、防护与密封材料等）一直处于世界领先

地位。

(2) 重视基础设施建设和制造技术、制造工艺的研究与应用。配置优良的工艺装备和检测仪器，特别是智能化工艺设备，作到工艺装备最先进；

(3) 描准世界称重传感器技术的发展潮流和战略前沿，确定研究课题和产品开发方向。重视新产品和自主知识产权产品的开发，增强核心竞争力。其技术创新和新产品开发的标准是：具有较高的技术先导性，工艺先进性，市场扩散性，效益增殖性。使技术与工艺始终处于世界领先地位。

(4) 重视称重传感器的可靠性设计、控制与管理，严格设计符合性控制和工艺可靠性控制，努力使工艺兑现率达到百分之百。

(5) 重视市场竞争，加强市场调查与分析，快速响应市场。21 世纪的市场竞争，是以市场响应速度为焦点，以改进和创新产品为基础。

(6) 重视相关法规和规程的学习，全面理解并认真执行，保证生产的每一个产品都符合要求。

正因为如此，国外的称重传感器品种繁多，规格齐全，合金钢、铝合金、不锈钢、铍青铜制品应有尽有；水下、钻井下测量，耐压防爆、抗辐射、耐腐蚀产品；微小和超大量程；多称量与动态称量；集成化与模块化结构任用户选购。并作到产品的内在与外观质量并重，近几年外观质量的改进与提高十分明显，基本没有喷漆产品，几乎全部是亮光或亚光化学镀镍、镀铬，烤漆，喷塑，瓷质阳极化和不锈钢产品，个别产品的外形已融入人性化设计。

### 三、电阻应变计制造工艺技术的发展概况

电阻应变计是应变式称重传感器的核心器件，其敏感栅结构、基底与覆盖层材料、热输出、机械滞后、蠕变、灵敏系数稳定性等工作特性直接影晌应变式称重传感器的准确度和稳定性。国内外许多企业都把电阻应变计的生产列入应变式称重传感器的基础工艺，稳定批量生产质量都是从电阻应变计这一源头抓起。或建立与本公司产品配套的电阻应变计生产部门，或经过严格考察确定长期供货的电阻应变计生产企业。20 世纪 90 年代以来，以美国 HPM 公司、V—MM 公司为代表的应变电阻合金箔材轧制企业和以美国 V—MM、BLH、JP 公司，德国 HBM 公司为代表的电阻应变计设计与制造企业，在应变电阻合金研究、箔材轧制与热处理、电阻应变计设计技术与制造工艺、生产线的工艺装备研制与应用上都取得一些突破性进展，主要技术与工艺成果简介如下：

#### (1) 在学术领域形成了应变电阻合金学术分科

研制满足各种类型电阻应变计工作特性要求的应变电阻合金材料，并从合金熔炼、锻造，箔材轧制、碾压、热处理开始控制电阻应变计的质量。

箔材粗轧工艺：合金的熔炼、电渣重熔保证合金成份不变，锻造、冷轧、碾压等工艺为精轧作准备。

箔材精轧工艺：在洁净度较高的环境条件下，利用高速轧机进行冷轧，采用轧机自动厚度控制系统控制带材厚度，保证均匀一致。

碾压精度要求：厚度为 0.0001~0.0002 英寸（2.5~5 $\mu\text{m}$ ）的带材，厚度变化小于 0.0001 英寸（0.25 $\mu\text{m}$ ）。

## （2）研制先进的应变电阻合金箔材热处理设备

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。为此研制出智能真空热处理设备，北京紫微浩阳科技有限公司研制生产的 BSE-1088 型真空热处理炉具有一定的代表性。它能在极高的真空条件下，精确的按照设定的热处理工艺曲线，对应变电阻合金箔材进行热处理，并采用正压氢气体保护技术，保证金属箔材不被氧化和化学成分不变，在此前提下调整其热输出性能。

## （3）采用三维有限单元法设计电阻应变计

处于国际市场引导地位的企业普遍采用一维、二维和三维有限单元法，建立相应的力学模型，分析电阻应变计的应变传递系数，提出敏感栅结构设计原则。美国 V-MM 公司建立三维有限单元六面体力学模型，取一万多个节点，在大容量电子计算机上进行计算，其目的是研究电阻应变计结构，解决敏感栅结构的力学效应，覆盖层的力学效果，基底、敏感栅、覆盖层厚度对机械滞后的影响，敏感栅结构与蠕变自补偿问题。保证电阻应变计敏感栅结构形状、几何尺寸、基底与覆盖层厚度最合理。

## （4）电阻应变计制造工艺及工艺装备的新发展

### 1) 精密刮胶技术与装备

刮胶棒间隙可调，传送台采用高精度伺服电机，控制性能极佳，胶膜均匀，厚度偏差小。

### 2) 基底与箔材一体化的压膜技术

通过专用设备将箔材与基底薄膜压合成为一个整体，箔材与基底粘结牢固，厚度均匀，符合基底薄（20~25 $\mu\text{m}$ ）的要求。

### 3) 采用带基底的箔材制造电阻应变计

在专用的加压加温设备上，将热处理后清洗干净的箔材与已制成 20~25 $\mu\text{m}$  胶膜的基底材料，通过胶粘剂粘贴、固化使两者成为一个整体，供制造电阻应变计使用。其特点是：将箔材处理、清洗、涂基底胶、固化成膜等工序合并为一体，即简化了工艺流程，又提高了电阻应变计的均一性和稳定性。

### 4) 离子束投影光刻技术（IPL）与光刻装备

被称为新一代光刻技术，其光刻工艺为：

离子源→离子束→掩膜片→静电透镜系统→参考平面→步进扫描承片台。

特点：分辨率高，能达到 50nm 的特征尺寸；光线均匀，曝光快速、准确。

#### 5) 漫射光光刻技术与光刻装备

紫外曝光灯, 其光谱能量集中分布在 365~435nm, 曝光更加快速、准确; 真空吸附式曝光, 箔材与光刻板接触紧密。

#### 6) 电子计算机控制的智能化匀胶工艺装备

匀胶机采用计算机控制的永磁直流稀土电机, 控制性能好, 实时监控加速度、匀胶速度、减速度, 可获得较高的胶膜均匀性。

#### 7) 电子计算机控制的智能化蚀刻工艺装备

智能蚀刻机为全密封结构, 保证蚀刻液成分不变, 采用扇形摆动喷淋面与垂直方式承片台动态配合, 有效的控制每版应变计电阻值的误差。

#### 8) 调阻新工艺

##### ① 电化学调阻工艺

是利用金属在电解液中受到电化学阳极溶解使其尺寸改变的原理。对细腐蚀后的应变计, 通过耐腐蚀材料制成的阴极和它喷出的电解液, 逐片对敏感栅进行电解加工调整电阻值。其特点是不产生予应力, 敏感栅厚度均匀, 阻值和温度系数分散小且稳定性好, 调阻精度和效率高。目前已研制出智能电化学调阻工艺装备。

##### ② 激光化学调阻工艺

激光化学调阻工艺是近年来工艺研究的新成果。对细蚀刻后的整版应变计均匀涂上一层蚀刻液, 以一定波长的激光束扫过敏感栅上的蚀刻液, 进行光化学调阻, 直到自动测量系统发出电阻值达到标准时为止。不产生予应力和温度特性变差, 电阻标称值精度高, 阻值分散小, 稳定性好, 特别适合作高准确度的称重传感器。

从上述两种电阻应变计电阻值精密调整的新工艺中, 可以得出均可实现电子计算机控制的自动化调阻, 较大的克服了人为因素对产品质量的影响, 是今后电阻应变计生产工艺中精密调整电阻值的新途径。

#### 9) 自动图形识别蚀刻质量检查

电子计算机控制的图形识别蚀刻质量检查系统, 对敏感栅及栅头蚀刻质量的检查严格、科学、合理, 保证产品批次质量的稳定性和均一性。

#### 10) 新型全密封覆盖层技术与工艺

蚀刻、调阻后, 全版加封一整张覆盖层, 加压加温固化后电火花加工露出焊点, 形成真正的全密封结构。

#### 11) 激光自动剪片新工艺:

效率高, 基底尺寸一致性好, 从敏感栅中心线到其边缘公差均为 $\pm 0.005$  英寸( $\pm 0.13\text{mm}$ ),

可利用基底外形作为贴片定位基准。

#### 12) 应变计自动性能检测与灵敏系数测定装备

在自动加载的标准梁上,通过多路自动扫描测量仪和电子计算机控制进行测量与数据处理。

#### 13) 灵敏系数温度自补偿电阻应变计

美国 V—MM 公司利用卡玛合金,开发出 EMC (有效模量补偿) 系列电阻应变计,将它与弹性元件材料适当匹配,就可以实现称重传感器灵敏系数的温度自补偿。在很多情况下这种补偿效果可优于 $\pm 0.0014\%/^{\circ}\text{C}$ 。根据不同弹性元件材料 EMC 系列电阻应变计有 4 种类型:

M1 灵敏系数随温度变化 $-2.70\%/100^{\circ}\text{C}$ 用于不锈钢;

M2 灵敏系数随温度变化 $-4.23\%/100^{\circ}\text{C}$ 用于铝合金;

M3 灵敏系数随温度变化 $-2.25\%/100^{\circ}\text{C}$ 用于工具钢;

M4 灵敏系数随温度变化 $-2.43\%/100^{\circ}\text{C}$ 适用于和之间的“中间区域”(不锈钢与工具钢之间)的补偿。

#### 14) 高温电阻应变计兼有灵敏度温度自补偿功能。

#### 15) 电阻应变计的疲劳寿命有较大提高

从过去承受  $1000\mu\epsilon$  时的 107~108 次,提高到现在承受  $1500\mu\epsilon$  时的 108 次。

#### 16) 新型灵敏度温度补偿电阻材料的研制

近些年来,加强了用 Balco (巴尔科) 合金代替镍电阻的研究, Ni 的电阻温度系数在  $10\sim 65^{\circ}\text{C}$  时为  $0.59\%/^{\circ}\text{C}$ , Balco 合金为  $0.43\%/^{\circ}\text{C}$ , 且电阻率高, 比较容易获得高电阻值。两者的缺点是电阻值相对温度变化不是线性函数。为此, 德国学者在研究用钽或铌代替镍作为灵敏度温度补偿电阻。

尚未解决问题: 目前国内外对电阻应变计的力学、电学性能都有专业或国家标准, 但对于电阻应变计的几何形状、基底、覆盖层、引出线等质量评定, 尚没有明确的规定, 这是用户与生产企业出现分歧的主要原因。

### 四、应变式称重传感器技术的发展概况

#### 1. 研究方向和特点

变式称重传感器技术的发展动向是, 把称重传感器的准确度、稳定性和可靠性作为极其重要的质量指标, 以制造技术和制造工艺为核心竞争力, 紧紧抓住称重传感器的特性问题、生产问题 and 应用问题进行基础研究、工艺研究和应用研究, 其研究方向和特点是:

(1) 在产品结构设计与制造工艺中, 吸取了工程化产品设计中的计算机拟实技术和虚拟技术, 加快开发速度, 减少开发风险。

(2) 在弹性元件加工中，从单元加工技术发展集成化加工技术；从刚性制造发展到柔性制造；从简单化经验判断发展到智能化定量分析，普遍采用柔性制造单元和柔性制造系统。

(3) 生产工艺已不是传统观念中的“作坊手艺”，而是技术与管理相结合的一项系统工程。为适应多品种、大批量生产，保证产品技术性能的均一性，生产工艺必须向尽量减少手工操作、人为控制，增加半自动化和自动化工序方向发展，例如：采用计算机控制，人机一体化工艺系统和测试技术网络化信息系统等。

(4) 与稳定性和可靠性有关的稳定处理工艺在高温处理，低温深冷，脉动疲劳，超载静压等方法的基础上，又研究出振动时效、共振时效新工艺，共振 10 分钟，可消除绝大部分残余应力。

## 2. 重视加载、承载边界条件影响的研究

通常一台称重传感器有两个承受载荷的接触面，即引入载荷的接触面和传递载荷的接触面。对于承受压向载荷的称重传感器，两个承受载荷的接触面为弹性元件的上球面和下底面；对于承受拉向载荷的称重传感器，两个承受载荷的接触面为上、下螺纹的啮合面；对于平行梁式称重传感器，两个承受载荷的接触面均为弹性元件的一部分；对于一些剪切梁式称重传感器，一个接触面为弹性元件的一部分，另一个接触面与弹性元件分离，因为它有一个固定的连接底座。

在上述加载、承载边界条件中的每一个接触面上，载荷的分布取决于接触面上的加载条件。因此这些加载条件的变化将引起接触面上载荷分布的变化，即使在接触面上总的作用载荷保持不变，也将导致称重传感器的灵敏度变化。

对于应用上压头、下压垫的压式称重传感器，决定加载边界条件的因素有：

- (1) 与弹性元件加载面相接触材料的特性，如摩擦系数、硬度等；
- (2) 与加载表面相接触压头的表面形状，如平面、曲面曲率、接触圆大小等；
- (3) 加载后，接触面的变形。

对于应用螺纹接触面引入载荷的拉式称重传感器，决定加载边界条件的因素有：

- (1) 螺纹加工精度（即螺纹中径的尺寸精度）；
- (2) 拉式接头或关节轴承拉头与弹性元件螺纹的啮合面积的大小。

对于各种梁式称重传感器，决定加载边界条件的因素，主要是支承底座、托架、垫块的结构及所用材料的硬度、表面粗糙度等。因此支承方式即弹性元件根部固定的合理性至关重要，应具有足够大的平衡力矩，尽量使其为固支。

英国物理实验室测力研究室，对 500KN 标准测力传感器，通过一个钢质平垫和两个半径为 1/1000 的钢质凸、凹球面垫进行加载试验，在最大载荷值时，用平垫和球垫测得称重传感器的灵敏度不同，它们之间的最大差别为 0.2%。

有些结构的称重传感器，加载、承载边界条件的改变会使灵敏度产生较大的变化，在用滞后、蠕变和灵敏度温度误差都很小的压式称重传感器进行的压垫试验得到了证实，压垫设计合理灵敏度相差 0.05%，压垫设计不合理灵敏度相差 0.3%。

采用圆柱形弹性元件的压式或拉式称重传感器，应变区的有效长度  $L$  和直径  $D$  之比  $L/D$  是决定加载边界条件的主要参数。对于 50t 的压式称重传感器，当  $L/D=3.7$  时，在压垫试验中灵敏度变化小于 0.005%，而当  $L/D=1$  时，其灵敏度变化大于 1%。综上所述，加载、承载边界条件的影响可归纳为如下几点：

#### 1) 表面形状和硬度影响

称重传感器的上压头、下压垫的接触面都影响载荷的引入和传递。上压头表面不平度和粗糙度都很高时，表面硬度影响可以忽略不计，上压头厚度影响也很小，因为接触仅发生在球面中心一个小接触圆上。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，表面粗糙度同为  $Ra=6.3\mu m$ ，在相同载荷作用下其变形分别为  $2.2\mu m$ 、 $3.6\mu m$ 、 $5.4\mu m$ ；第二次加载时的变形分别为  $0.33\mu m$ 、 $0.38\mu m$ 、 $0.60\mu m$ 。

压头的形状(从平面到球面)对三个力矩分量的影响是显著的。其最大特点是在接触区出现相当高的应力，由于接触点处于三向受压的应力状态，因此能承受这样高的应力而不破坏。

#### 2) 加载承载面的大小、材料特性的影响

接触面压力低时，滞后小；压力高时，滞后大。大量程弹性元件的承载球面半径应尽量大些，例如德国 Philips 公司 PR6201 型 50t 弹性元件，承载部分的直径和球面半径分别为 54mm 和 35mm，100t 分别为 76mm 和 50mm，200t 分别为 108mm 和 70mm。

剪应力大小和在压垫上分布，与弹性元件底面直径  $d$ 、所用材料弹性模量  $E_m$  和压垫直径  $D$ 、所用材料弹性模量  $E_s$  的不同有关。

当  $D>d$ 、 $E_m=E_s$  时，在接触面上只产生局部影响，这种影响不扩散，不影响弹性元件应变区的应变值。

当  $D=d$ 、 $E_m>E_s$  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) 接触面粗糙度的影响

英国物理实验室测力研究室，用环氧树脂模型进行接触面粗糙度影响试验得出：接触面越光洁，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。

### 3. 力矩和侧向载荷的灵敏度影响

用于各种电子秤的应变式称重传感器，应设计成只感受垂直方向的载荷，而对力矩和侧

向载荷不敏感，或把力矩和侧向载荷的影响限制在规定的误差范围内。这样的称重传感器其输出仅仅取决于沿主轴或与主轴平行的载荷的大小，这就要求弹性元件具有较高的尺寸精度和很小的形位公差，同时保证电阻应变计粘贴位置的准确性和对称性。实际上弹性元件所能达到的形位精度和电阻应变计的定位精度与对称性是有一定限度的，并且在某种程度上，所有称重传感器对于迭加在主分量上的力矩和侧向载荷都是敏感的，其侧向灵敏度的大小和正负方向是不能预先知道的。即使结构类型相同而量程不同的称重传感器，侧向灵敏度也不同。但是对于弹性元件的结构和额定载荷已确定的称重传感器，其侧向灵敏度将受到弹性元件的形位公差和电阻应变计的定位误差所限制。例如，一圆柱形弹性元件在侧向载荷作用下将产生一弯矩，按理此弯矩应由对称的粘贴在弹性元件上的电阻应变计加以补偿，但由于电阻应变计灵敏系数有小的散布，粘贴位置和方向都有误差等原因未能得到补偿。试验证明，若有额定载荷 5% 的侧向载荷存在，对于高准确度的称重传感器，则会出现满量程  $\pm 0.1\%$  的误差；对于一般准确度的称重传感器，此误差可达  $\pm 0.6\%$ 。又例如，一承受压向载荷的圆筒式称重传感器，已知额定载荷和圆筒外径尺寸，其内径越大，对弯矩就越敏感，这是筒式弹性元件的内圆和外圆同心度的绝对公差，导致中性轴偏离加载中心的缘故。因此应从称重传感器的结构设计和制造工艺中，严格要求限制侧向灵敏度影响，尽量作到：

(1) 从结构设计上保证称重传感器的输出仅仅取决于沿弹性元件主轴或与主轴平行方向上的载荷；

(2) 对于轴对称的称重传感器，例如圆柱式结构的弹性元件，主轴应垂直于下端面及下压垫，并且通过其中心；

(3) 对于悬臂梁型称重传感器，固定端的凸台平面决定主轴方向，为保证灵敏度不受端部加载条件的影响，载荷应通过弹性元件和根部凸台的中心；

(4) 限制侧向灵敏度影响的措施，就是机械加工时，保证弹性元件的形位公差特别是对称性，粘贴电阻应变计时，保证位置和方向的准确度与对称性，尽量限制中性轴偏离中心线。

#### 4. 弹性元件应变程度的影响

在额定载荷作用下，弹性元件应变区的应变程度，对称重传感器的线性、滞后、蠕变和疲劳寿命都有较大影响。这里说的应变程度，实际上是保证应变稳定并与载荷成较严格线性关系的应变范围，它与弹性元件所用的材料密切相关。弹性元件应变的稳定性与所用金属材料的关系可用下式表达：

$$\frac{\Delta R}{R} = R_c = CK\varepsilon$$

式中： $R\varepsilon$ —应变计电阻的相对变化；

$C$ —应变利用系数；

$K$ —应变计灵敏系数；

$\varepsilon$ —弹性元件的弹性应变。

由此可见，提高弹性元件应变的稳定性是提高称重传感器整体稳定性的基础和关键。因此，弹性元件材料不仅是结构材料而且是功能材料。

在产生应变的弹性元件材料所要求的各种性能中，最重要的性能是滞后和蠕变。实际上综合性能再好的弹性元件材料，也存在弹性滞后和弹性后效（蠕变），提高线性、减小滞后和蠕变最有效的方法，就是把弹性元件应变区的应变程度限制在一个较低的范围，一般高准确度的称重传感器的应变程度都较低，其最大应力仅为材料弹性极限的  $1/4 \sim 1/3$  范围内。实际上称重传感器的线性、滞后、蠕变和疲劳寿命都随弹性元件应变区应变程度减至最小而获得改进，较低的应力、应变意味着对理想线性弹性性能的偏差最小，也意味着弹性元件有较大的刚度和较高的固有频率。

弹性元件任何几何形状的改变，必然伴随出现一定程度的非线性影响，弹性元件应变区应变程度低，不仅变形小，刚度大，固有频率高，而且有助于把弹性元件几何形状变化引起的非线性误差减至最小。

#### 5. 从结构上减小滞后误差

称重传感器的弹性元件在外载荷作用下产生变形时，应该是加载后立即变形，卸载后立即恢复，应力与应变同步进行，与时间无关。但实际上弹性元件在弹性变形时，加载线与卸载线并不重合，应变落后于应力，经过一段时间才能达到完全弹性变形或完全消除弹性变形，这种现象称为弹性滞后，弹性元件所用金属材料和结构形式是产生滞后的主要因素。通过合理的热处理工艺对金属材料的弹性滞后加以控制后，弹性元件的结构就成为产生滞后的重要因素。

现以轮辐式称重传感器为例，分析结构因素引起的滞后误差。

##### 1) 轮毂、轮箍刚度与滞后的关系

轮箍变形位移量与其刚度密切相关，刚度大，变形位移小，底摩擦作用时间短，轮辐应变恢复快，滞后小；反之滞后大。因此，轮毂、轮箍刚度应足够大，确保轮辐与轮毂、轮箍连接处转角为零。

##### 2) 轮辐刚度与滞后的关系

轮辐是应变敏感部分，其变形量与轮辐长度  $L$  成正比，与轮辐截面积  $A$  成反比。因此轮辐长度  $L$  小，截面积  $A$  大，变形量小，应变恢复快，滞后小。

##### 3) 轮辐高厚比 ( $h/b$ )与滞后的关系

在其它条件相同的情况下，改变轮辐高度  $h$  与厚度  $b$  的比值  $h/b$ ，剪应力  $\tau$  和弯曲应力  $\sigma$  均改变，对滞后有一定影响。所以在轮箍刚度足够大时，增加轮辐的剪应变，降低弯曲应变，可减小滞后。

对于圆柱结构的压式称重传感器，在加载后卸掉载荷时，由于底部接触面上的摩擦力，阻滞其环向变形的恢复而产生滞后。

对于双剪梁型称重传感器，弹性元件与底座接触面的滑动是产生滞后误差的重要原因。在加、卸载过程中，双剪梁弹性元件与底座滑动方向相反，因此作用在弹性元件上的摩擦力方向也相反，正是此摩擦力造成应变区剪应力变化。接触面摩擦系数大，随着载荷的增加滞后的绝对值由小变大。盲孔中心到弹性元件端面的距离太小，底摩擦力对应变区的影响也较大。

为减少称重传感器的滞后误差，首先在结构设计上保证滞后最小，最好采用无摩擦设计。称重传感器的摩擦分为外部摩擦和内部摩擦两大类，外部摩擦是指弹性元件承载球面与压头，底面与压垫或基础之间的摩擦；内部摩擦是指弹性元件局部应力集中，造成晶格之间位错所产生的摩擦。这两种摩擦均使滞后和非线性误差显著增加，因此只要结构允许应尽量采用无摩擦设计。

1) 弹性元件的底面必须为平面时，应设计成刚度大，接触面积小的平面，且选用低摩擦系数的压垫或设计自由底座；

2) 称重传感器的上压头、下压垫应采用无摩擦设计，例如球面结构，使加载、承载面为点接触（实为接触圆）；

3) 称重传感器弹性元件的设计尽量选用整体式结构，使载荷的引入和传递无接触问题，如 S 型，整体剪切型弹性元件；

4) 采用柔性隔离方法，即用铰接方法把弹性元件和承载底座联接起来，利用铰接不传递力矩这一力学特性，将摩擦面与弹性元件隔离；

5) 合理的应力分布。应力水平过高，将引起弹性元件晶格之间相对位移，产生内部摩擦，因此应力水平应控制在弹性极限的  $1/3 \sim 1/4$  范围内。

#### 6. 机械加工方法对弹性元件残余应力的影响

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  $900\text{N/mm}^2$ , 因此热处理后弹性元件的精加工尽量不采用磨削。

在上述设计与制造技术支持下, 称重传感器的品种和结构又有创新, 技术功能和应用范围不断扩大, 主要成果有:

1) 美国 Revere 公司研制出 PUS 型具有大气压力补偿功能的拉压两用的称重传感器, 用于高准确度检验平台, 称重平台, 准确度可达 5000d;

2) 德国 HBM 公司研制成功 C2A、C16A 两种不同结构的 1-100t 具有“耐压外壳”保护的防爆称重传感器, 其防爆性能符合欧洲 EN50014 和 EN50018“d”级标准;

3) 美国斯凯梅公司研制出新一代高准确度不锈钢 F60X 系列 5-5000kg 称重传感器, 准确度 6000d。用于湿度大, 腐蚀性强的环境中, 而且防水;

4) 德国塞特内尔公司研制出以铍青铜为弹性体材料, 快速称重用 200 型称重传感器。其特点是线性好, 固有频率高, 动态响应快。独创油阻尼装置与过载保护装置一体化, 保证称量时速度快, 工作寿命长。组装 3-30kg 电子平台秤, 准确度可达 4000d;

5) 美国 THI 公司研制的 1410 型 5-30kg 铝合金称重传感器, 准确度等级优于 C3 级, 可承受离心力和机械振动, 内装特制的粘性阻尼器, 保证称量时有较快的稳定时间, 一般低于 50ms;

6) 美国 V-BLH 公司开发出新式称重模块, 具有合理的组件化功能和极高的称重效率, 出厂后“即插即用”, 可自动调节位置, 不受搅拌, 偏心和振动影响。

仅以上几例, 足以代表了新产品的开发方向, 体现了技术的先导性, 工艺的先进性。就技术含量而言, 有高准确度 (4000d-6000d) 称重传感器制造技术; 大气压力补偿技术; 用于快速、动态测量称重传感器的粘性阻尼器快速稳定技术; 隔爆型耐压外壳的设计与制造技术; 组件化新式模块设计技术等。

## 五、称重传感器技术的发展趋势

应变式称重传感器的发展趋势, 可用“四化”来概括, 即设计技术虚拟化, 制造技术柔性化, 工艺流程网络化, 企业管理信息化。

设计技术虚拟化: 包括弹性体结构设计的拟实技术和工艺设计的虚拟技术。

结构设计的拟实技术: 是指面向弹性体的结构和性能分析技术, 包括动态仿真、动力学分析、强度和刚度有限单元法计算、敏感区应变大小与分布等, 以达到优化设计的目的。

工艺设计的虚拟技术: 是指面向弹性体生产过程的模拟和试验, 检验弹性体的可加工性, 加工方法和工艺的合理性, 保证制造工艺最佳化。

设计技术虚拟化的核心是有限单元计算和计算机动态仿真。通过仿真软件来模拟真实受载情况, 发现并及时处理设计和工艺缺陷或错误, 以确保结构设计和生产工艺的合理性。

制造技术柔性化: 是指在多品种、大批量生产的弹性体加工中, 纳入先进的制造技术:

柔性制造单元（FMC）、柔性制造系统（FMS）和计算机集成制造系统。它是计算机技术、信息技术、自动控制技术等与传统的制造技术相结合形成的全新的制造系统。

工艺流程网络化：是指在生产工艺流程中，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。与传统的“作坊手艺”生产工艺相比，大大的减少了手工操作，最大限度的排除了人为因素对产品质量的影响。

企业管理信息化：是指按计算机处理的要求，依据结构化系统分析和设计方法，建立企业信息系统，实现企业管理全面现代化。包括 CAD、CAM 系统，生产管理系统，商务决策系统和经营管理系统等。

为适应电子称重技术从静态称重向动态称重发展；计量方法从模拟测量向数字测量发展；测量特点从单参数测量向多参数测量发展，以及电子衡器对称重传感器的新要求，以下课题将是今后一个时期的研发重点：

- （1）动态质量测量法及动态电子秤研究；
- （2）数字式称重传感器的研制及其数字补偿技术与补偿工艺；
- （3）数字模块、数字接线盒的研制及其应用；
- （4）快速、低速动态、动态称重传感器研制及其阻尼技术与阻尼装置；
- （5）称重传感器的动态特性及动态误差；
- （6）高准确度称重传感器的研制，例如银行点钞高档电子计数秤用称重传感器等；
- （7）集成化称重传感器的研制，例如称重板、称重轨、称重钩、称重叉、称重梁等；
- （8）微小量程、超大量程称重传感器的研制；
- （9）高温、低温、防爆、耐压、耐腐蚀等特种称重传感器的研制；
- （10）新型称重模块的研制及其应用；
- （11）多功能、多分量等复合型称重传感器的研制及其测试方法；
- （12）偏心载荷测量及车载秤用称重传感器的研制；
- （13）大阻值低功耗高精度电阻应变计研制等；
- （14）新型灵敏度温度补偿电阻材料的研究；
- （15）各种非标准、特殊用途称重传感器的研制。

分析近年来电子衡器对称重传感器的新要求，不难得出小型化，集成化，多功能化和智能化将是称重传感器的重要特点和发展趋势。

小型化：是指称重传感器总体结构体积小、高度低、重量轻，即小、薄、轻。例如：30t、60t 弯曲环式结构，其外形尺寸分别为外径 120mm 和 150mm，高度只有 50mm 和 60mm。

集成化：有结构集成和功能集成两种形式。结构集成是指弹性体与秤体合二为一的新型结构，例如：称重板、称重轨、称重钩、称重环等。功能集成是指将重量信息采集、放大、变换、传输、处理和显示都集于一体的称重传感器，例如：将敏感元件（弹性体）、转换元件（电阻应变计）、信号处理电路和称重显示控制都集于体的轮辐式称重传感器内，其数字

显示位置就在传统轮辐式称重传感器的接线盒处，通常称为轮辐式称重仪。

**多功能化：**是指称重传感器本身除具有检测重量信息的功能外，还能同时检测其它信息。例如：电子吊秤用称重传感器在检测重量信息的同时还可检测加速度信息；汽车检测平台用称重传感器，可同时检测垂直方向的重量信息和水平方向的侧向载荷，即多分力测量。

**智能化：**应变式称重传感器的原理决定了其本身不能产生带有数字特征的输出信号，而且还存在着输出的模拟信号小，传输距离短，抗干扰能力差，称重显示控制仪表复杂，安装调试不方便等固有缺陷。应用此类称重传感器组装的各种模拟式电子衡器，也必然具有与其相同的局限性和无法克服的一些缺陷，主要是多个模拟式称重传感器的信号，经过接线盒并联后成为一路信号，每个称重传感器的信号就不再是可独立辨别的，称重显示控制仪表无法在线发现问题，进行故障定位很难满足连续生产中高可靠性的要求，根本不适应数字式智能电子衡器的发展。称重传感器的智能化就是研制新型的整体型或分离型数字式智能称重传感器。

## 六、称重传感器大批量生产的统计制程管理

在 OIML R60《称重传感器计量规程》国际建议和 GB/T7551-1997《称重传感器》国家标准中，规定的称重传感器各项技术性能指标及其测试与试验方法，适用大批量生产的每一个称重传感器，即企业生产的所有称重传感器都应符合国家标准规定的各项要求。但在生产工艺流程中，不是每一个产品都按国家标准中规定的型式评定试验方法进行试验和检测。这就需要找出一种即适合大批量生产，又能确保每一个产品都符合国家标准的质量控制、管理方法。

早在 1988 年 6 月美国 TOLEDO 公司称重传感器工程部经理 Stephen Patoray（斯蒂芬帕托），在美国波特兰纪念电阻应变计 50 周年大会上的发言，就讲到了称重传感器大批量生产的管理问题。他在发言中介绍了 TOLEDO 公司把数理统计方法应用于生产各方面，包括统计过程控制，全面预防、及时调整，保证制程稳定，使所有产品都符合要求。并提出两个基本概念，其一是不做任何对最终产品不增加价值的事，其二是在生产过程中尽可能早的找出潜在的问题，并使其只对极少数产品产生影响。这就是应用统计学原理对大批量生产的称重传感器，进行统计过程控制的最初模式。

20 世纪 90 年代统计制程管理（Statistical Process Control）简称 SPC，在国际上处于称重传感器市场引导地位的企业已得到普遍应用。SPC 理论就是利用统计学原理对大批量生产的称重传感器，在生产工艺的全过程中的质量进行控制和管理，以达到尽可能第一次就符合国家标准的要求。具体的说就是在生产工艺流程的全过程或生产工艺流程网络化管理中，利用统计学原理对产品进行科学、合理的抽样试验与测试方法，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，快速分析制程出现问题的能力和迅速采取措施的能力，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：

（1）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；

(2) 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。

(3) 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；

(4) 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。

## 七、结语

国际称重传感器企业普遍认为，市场竞争是以技术实力为基础，以技术创新和自主知识产权产品为焦点。经济竞争归根结底是技术竞争、人才竞争。谁的技术发展快，对新产品投入多，开发的产品技术含量高，质量好，适应性强，谁就能适应市场的发展，并在激烈的市场竞争中立于不败之地。因此，足够的技术投入和高素质的技术人才是两大主要支柱。

为使称重传感器从结构设计、制造工艺到稳定处理、性能测试不断纳入新技术、新工艺，适应日趋国际化的市场竞争，处于国际市场竞争引导地位的企业，除把称重传感器的准确度、稳定性和可靠性作为极其重要的质量指标外，都把规模化、多品种、大批量生产必须解决的产品工程化研究作为突破口，工程化研究主要解决称重传感器的全型设计、制造技术、制造工艺、质量保证、稳定性和可靠性考核等多品种大批量生产的技术与工艺，只有这样企业才能逐步实现产业化。

我国称重传感器的年需求量很大，家用电子秤用称重传感器约为 1.2 亿只，工业与商业电子秤用称重传感器约为 300 多万只。随着国内一些称重传感器制造企业多个系列产品通过 OIML 认证和美国 NTEP 认证，国际一些电子衡器制造商和经销商，已认可我国称重传感器的产品质量，或直销或贴牌加工，近几年每年都有几千万美元的销售额（不含独资企业）。尽管这只是我国称重传感器迈向国际市场的第一步，已经是不小的进步了。面对如此巨大的国内外市场，可以说是我国称重传感器企业的机遇和挑战。希望我国具有一定生产规模的称重传感器企业，尽快与国际市场融合，参与国际竞争。为了扩大国际市场的占有率，必须适度加大投入，抓紧产业技术改造和产品工程化研究，多品种大批量生产工艺研究，紧紧依靠技术进步，提高企业的产业化程度，尽快培育出年产 40、60 万只产品的大型企业。

20 世纪 90 年代以来，在电子称重技术和工业、商业、家用电子秤快速发展的强力牵引下，称重传感器的设计技术、制造技术和工艺技术都有很大提高，取得了许多令人瞩目的成果。总结工业发达国家特别是美、德、日称重传感器技术与产品的发展、创新经验，概括起来就是设计技术虚拟化，制造技术柔性化，工艺流程网络化，企业管理信息化。为满足电子称重技术及电子衡器产品的新需求和适应电子衡器市场竞争日益国际化的新形势，称重传感器正向着小型化、集成化、多功能化和智能化的方向发展。他山之石，可以攻玉。工业发达国家称重传感器技术与产品快速发展的经验，是值得我国称重传感器研究单位和生产企业认真研究和吸取的。

## 参考资料

[1] 国际称重与测量协会 (ISWM), 2002 年美国奥兰多国际称重与计量设备展览会资料, 2002。

[2] 王文革译, 第 27 届德国杜塞尔多夫工业自动化展览会资料, 2003。

[3] 日本计量机器工业联合会, 2004/2005 东京计量计测机器工业展览会总览, 2004。

[4] R. F. Jenkins (沈京译), 用于测力传递标准器的应变式测力传感器的一些限制因素, Weigtech' 2, P143~158。

[5] 美国 Vishay 公司, 来华技术讲座与技术交流资料, 国防科委情报研究所, 技术资料汇编, 1980 年。

[6] 刘九卿, 应变式称重传感器技术现状和发展趋势, 首届中国衡器行业合作与发展高层研讨会, 中国衡器信息网 WWW.WEIGHMENT.COM,

[7] 北京紫微浩阳科技有限公司, 应变计、传感器专用生产设备选型样本资料, 2007 年。

作者简介: 刘九卿 (1937—), 男, 1960 年毕业于吉林工业大学。中国航天科技集团公司下属中国运载火箭技术研究院第七〇二研究所研究员, 享受国家特殊津贴专家。现为中国衡器协会技术专家委员会、职业教育委员会顾问, 《衡器》杂志编委。编著《电阻应变式称重传感器》, 在有关杂志上共发表学术论文 80 多篇。

(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)