

电阻应变式测力与称重传感器技术的回顾

——纪念电阻应变式测力与称重传感器诞生 70 周年

中国运载火箭技术研究院第七〇二研究所 尹福炎

【摘要】 上世纪 40 年代以前，在工程结构试验中外载荷或力的测量组件是各种机械式测力计。在电阻应变片出现以后，人们开始研制各种用于工程结构试验的测力传感器，通常也称载荷传感器或负荷传感器。在此同时，人们也试图把其用于衡器和称量系统。箔式应变片发明和发展，使负荷传感器的测量精度有了大幅度的提高，负荷传感器在称量系统的应用比原先测力范围更为广泛。测力与称重传感器的分立，称重传感器补偿电路的不断完善，及其结构从单纯的正应力设计，进而利用剪应力原理，不仅使传感器的结构尺寸大大减小，而且使称重传感器的测量精度也有大幅度提高，在衡器和自动称量系统获得了前所未有的发展，取得了极大的成功。随着电子技术的飞速发展，称重传感器也从模拟式发展到数字智能化，极大地丰富了称重传感器市场。本文，将就测力与称重传感器的发展过程作一简要的回顾，以供从事应变片和称重传感器研制的同仁们参考。

【关键词】 机械式测力计；测力与称重传感器；电阻应变片；衡器；自动称量系统；数字式智能称重传感器

一、前言

现代测力与称重技术的发展，离不开获取和转换力值与质量信号的传感器。总所周知，至今为止，测力与称重传感器的发展大体已经历了三代。第一代是机械式测力计。上世纪四十年代以前，在电阻应变片出现之前，人们测量工程结构部件的应变，一般采用机械式应变计，也称机械引伸计或光学引伸计等；而测量工程结构试验载荷的则是各种机械式测力计。第二代是电阻应变式测力与称重传感器。电阻应变片问世后，于上世纪四、五十年代，人们根据工程结构试验研究的需要而利用电阻应变片来开发各种传感器。当时，美国的航空工业部门，迫切需要各种用于测量工程结构试验的载荷（力）、扭矩及流体压力传感器，为了测量飞机结构静态试验的载荷而开发了负荷传感器；为了测量飞机在风洞中的作用力，开发了多分量力传感器等。在工程结构试验中测量外载荷或力的测量组件是各种机械式测力计。在电阻应变片出现以后，人们开始研制各种用于工程结构试验的测力传感器，通常也称载荷传感器或负荷传感器。在此同时，人们也试图开始把其用于衡器和称量系统。箔式应变片发明和发展，使测力传感器的测量精度有了大幅度的提高，传感器在称量系统的应用比原先测力范围更为广泛。第三代是数字化、智能型测力与称重传感器。随着测力与称重传感器的分立，传感器补偿电路的不断完善，传感器结构从单纯的正应力设计，进而利用剪应力原理，不仅使传感器的结构尺寸大大减小，而且使传感器的测量精度也有大幅度提高，在衡器和自动称量系统获得了前所未有的发展，取得了极大的成功。随着电子技术的飞速发展，称重传感器也从模拟式发展到数字智能化，极大地丰富了称重传感器市场。对于电阻应变式测力与称重传感器的国内外的

发展情况，很多专家、学者都已做过详细的介绍分析，本文在此主要就应变片、测力与称重传感器诞生 70 周年之际，就测力与称重传感器的发展过程作一简要的回顾，以供从事应变片和称重传感器研制的同仁们参考。

二、历史的回顾

1、机械式测力计与电阻应变式测力传感器

从所周知，测力与称重传感器与其它的力量学量传感器显著的不同，它是直接安装在整个载荷测量链中（图 1），所以传感器的强度和刚度必须满足系统的整体要求，才能保证系统的安全和测量精度。为此，通常测量力或重量的传感器与其它类型的传感器相比，其体积和重量都比较大。在电阻应变式测力传感器出现以前，在工程结构试验和材料试验机的测力计机构中，都是采用各种机械式测力计（如图 2、3）。当电阻丝式应变片发明以后，当时的负荷传感器的结构比较简单，常用的圆环式或圆棒式，在其变形比较大的部位粘贴 4 片（或 8 片）应变片，组成惠斯顿电桥（图 4），传感器的连线遵循了美国西部地区应变计委员会（Western regional strain gage committee）确定的布线规则（于 1960 年 5 月修订），该连线规则如图 5 所示。测力与称重传感器的轴是根据右手正交坐标系进行定义。符号“+”表明在力方向上可产生一个“+”信号电压，通常定义为张力。根据图 6 坐标系的定义，测力与称重传感器的主旋转轴或径对称轴为 Z 轴。

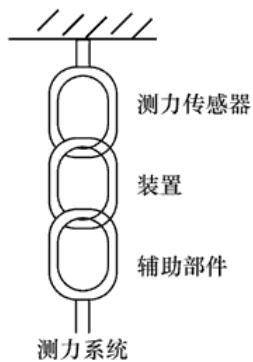


图 1 传统的测力系统



图 2 钢板拉力计

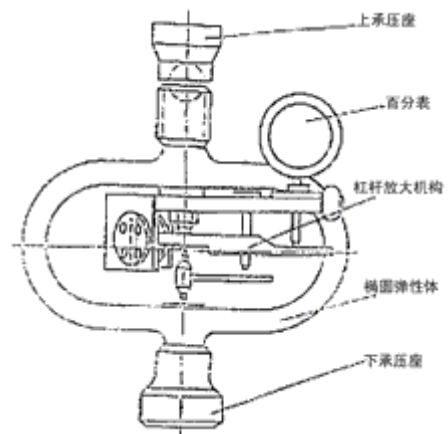


图 3 杠杆式三等标准测力计

当时的测力传感器一般采用石蜡或蜂蜡涂封防潮，人们常把其称为测力环或测力棒（如图 7 所示）。载荷的测量仪器一般采用静态电阻应变仪（如图 8 所示）。因而，当时的载荷测量精度比较低，一般在 5%-10%以内。

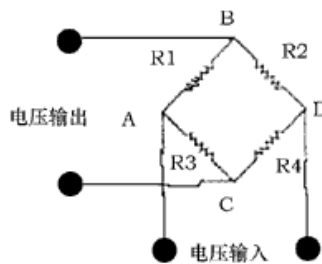


图 4 典型的惠斯顿电桥结构

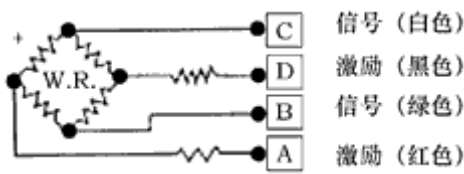


图 5 标准的电气连接颜色规则

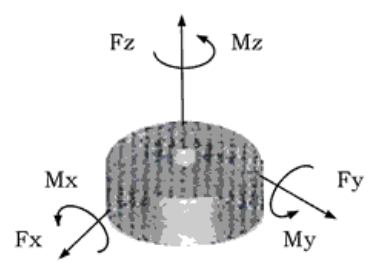
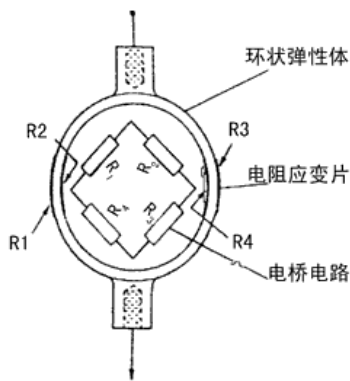


图 6 称重传感器轴的定义



(a) 环式测力计



(b) 柱式测力计

图7 粘贴式应变片制成的测力环和测力棒



图8 环状测力计与载荷测量仪
(静态电阻应变仪)

五十年代中期箔式应变片的出现，应用箔式应变片的负荷传感器的测量精度有了明显的提高，基于当时的条件，一般精度在 0.1% 左右。在此期间，人们也逐渐开始探索把电阻应变式负荷传感器用于衡器与自动称量领域。

2、应变片与应变片装置

众所周知，电阻应变片是一种能将被测试件应变的变化量转换成电阻变化量的检测组件。各种电阻应变式传感器 (Strain gauge based transducer/sensor)，其中包括电阻应变式测力与称重传感器 (Strain gauge based load cell)，它们都是借助于各种应变胶粘剂把应变片粘贴在弹性组件 (或称弹性体) 上，从而把弹性组件在外载荷作用下产生的应变传递到应变片的栅丝上，使其发生电阻变化。根据其电阻变化，可测知弹性体承受的外载荷的大小。由前述可知，应变片主要由基底、箔栅 (敏感栅)、胶粘剂、引出线及覆盖层等部分组成 (图 9)。基底材料是支撑敏感栅，使它保持一定的几何形状，并使敏感栅与被粘试件之间具有良好的电绝缘性；敏感栅是把弹性体应变转换为电阻变化；胶粘剂是把敏感栅与基底粘合在一起，形成一个整体；覆盖层是保护敏感栅免受外界的机械损伤，并防止环境温度、湿度及尘埃等的侵蚀；引出线则是连接敏感栅与测量仪器，把应变片的电信号送到测量仪器内。应变片的各个组成组件的性能都将直接影响应变片的各项工作特性。

电阻应变式测力与称重传感器，它是由弹性体、应变片、胶粘剂、防护涂层、补偿线路等部分组成的，其应变传递路径是：弹性体→胶粘剂→应变片敏感栅→覆盖层→防护涂层，构成一个有别于应变片本身的更复杂的系统。若把粘贴于弹性体上的应变片暂称为应变片装置 (strain gage installation)，其典型结构如图 10 所示。其应变传递关系将更为复杂，其中反映了物理学、力学、电学及化学等基本原理解，各组成单元的功能以及相互间的影响都将直接影响传感器的各项性能。在研究和讨论应变片装置及应变传递问题时，既要注意各个组成组件的本身特性，又要关注其相互间的内在联系，称重传感器的性能是应变片装置各组成组件性能的综合表现。

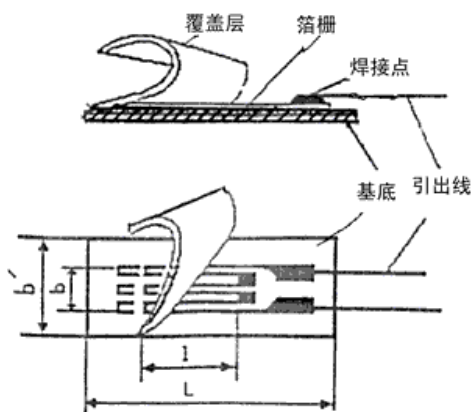


图9 箔式应变片结构简图

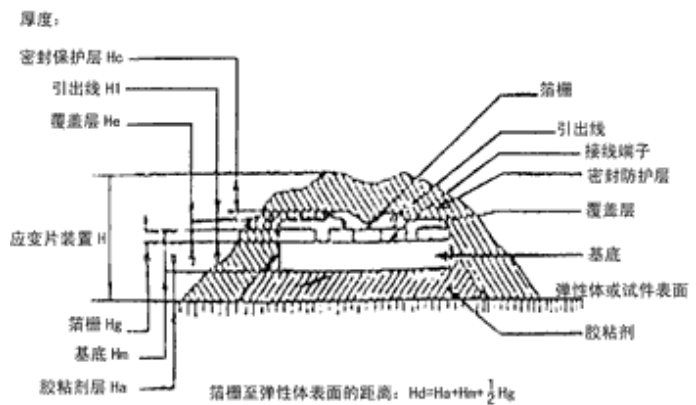


图10 典型的应变片装置的剖面图

3、正应力传感器与剪应力传感器

六十年代测力与称重传感器的弹性组件（俗称弹性体），已发展成柱式、筒式、环式及梁式等多种结构。随着箔式应变片本身工艺技术及应用技术和电子技术的进步，使负荷传感器的精度有了进一步的提高，在美国出现了具有0.1%称重准确度的电子秤，在七十年代中对70%的机械秤进行了机电结合式的电子化改造，使称重传感器作为称重传感组件，引起了人们的极大关注。

在电阻应变式测力与称重传感器发明、生产以来的二、三十年中，传感器的弹性体组件都是采用圆柱、圆筒、圆环、板环和各种梁式结构。在测量过程中都是利用拉伸、压缩和弯曲应力，即正应力的原理，因此统称这类传感器为正应力传感器。人们根据在长期使用正应力型传感器的实践中发现的问题，对其弹性组件的结构作了进一步的分析研究，找到了其固有的缺点。其主要缺点归纳起来有：加力点的变化会引起灵敏度的较大变化；进行拉、压循环加载时灵敏度的偏差比较大；抗偏心载荷和侧向载荷的能力差；需要较大的高度或宽度，故体积大；不能进行小载荷的测量等。这些问题影响了测力与称重传感器主要技术指标的提高。

为了克服正应力式测力与称重传感器的固有缺点，从六十年代中期，人们就开始从分析、研究弹性组件力学模型的基本原理入手，对弹性组件进行改进。研究表明，应变梁中的剪应力 τ 与梁的弯矩 M 无关，仅是剪力 Q 的函数。鉴于剪应力本身是不能测量的，但它能产生于中性轴呈 45° 方向的互相垂直的两个大小相等而且拉、压成双的主应力。因此，可以通过对平面应力状态下主应力平面上的主拉伸应力和主压缩应力分别产生的拉伸和压缩的测量，以达到测力与称重的目的。美国学者霍利斯特姆（Hollistem）于1973年提出了不利用弹性组件的正应力，而利用与弯矩无关的切应力原理来设计称重传感器弹性体的理论，并设计出圆截工字形截面悬臂剪切梁型传感器，这是称重传感器结构设计的重大突破，进一步提高了测量准确度，有力地推动了称重传感器的发展和应用范围的扩大。

随着数值计算方法和电子计算机技术的进步，1974年，美国学者斯坦因（Stein）和德国学者埃多姆（Edom）分别提出建立弹性体力学模型，利用有限元计算方法，分析弹性体的强度、刚度、应力场和位移场，以取得弹性体结构的最佳设计，为新型传感器设计提供了可靠的技术保证。

4、钢合金与铝合金弹性体

七十年代初，欧、美、日等国的衡器制造商，为了开发商业用电子计价秤，迫切需要量程在几公斤至几十公斤范围的各种称重传感器。但当时无论是正应力原理的传感器，还是剪应力原理的传感器，弹性体通常都是由合金钢或不锈钢制成的，因而不能实现此量程范围内的测量。为此美、日等国研制出测量弯曲应力的平行梁结构称重传感器，并用低弹性模量的铝合金作弹性体，采用多梁结构解决灵敏度和刚度之间的矛盾，设计出铝合金小量程的平行梁型称重传感器。

美国学者查特斯（K. Chatters）根据十七世纪出现的罗伯威尔（Roberval）秤的原理，基于平行梁不变弯矩原理，利用平行梁表示弯曲应力的正应力结构，并于 1980 年坦普科传感器会议上发表了“高精度、低容量、不变弯矩原理称重传感器的展望、性能及应用”的论文，为平行梁称重传感器的发展提供了理论依据。

从六十年代末至八十年代的十多年中，由于下述若干方面与传感器性能密切相关的技术所取得的突破性的进展，使电阻应变式称重传感器获得了前所未有的高速发展。

（1）采用有限元数值计算方法，使传感器弹性体的结构更趋合理。

（2）温度自补偿箔式应变片、传感器专用应变片以及多功能自补偿应变片品种的不断完善，产品性能不断提高。

（3）传感器电桥电路补偿、调整网络的不断完善，提高了稳定性。

（4）适用于传感器用的各种高性能新型材料不断出现，如高性能的应变胶粘剂、新型的弹性体材料，为传感器发展提供了物质基础。

（5）传感器的密封材料及密封技术得到了不断改进和广泛应用。

（6）传感器生产工艺的自动化程度不断提高，质量监控系统逐渐完善。

5、测力、称重传感器的分立

长期以来电子衡器（无论是自动衡器还是非自动衡器）及自动称量系统中应用最为广泛的是各种电阻应变式负荷传感器，为了确保衡器的产品质量，国际法制计量组织（OIML）制定了“非自动衡器计量规程”国家建议 NO. 3，并于 1968 年 10 月第三届国际法制计量大会通过。但是在衡器精度评定等方面长期与传感器不相同。

由于测力和称重所用的传感器，其原理、结构、材料、工艺以及计量都相同。因而两者一直没有加以区别，在国内统称为“负荷传感器”、“力传感器”。随着衡器与自动称量技术的发展，以及测力、称重两大技术领域对准确度要求等的不同，使人们逐渐认识到把用于质量测量的传感器和用于测力的传感器，在定义上、评价上、计量性能要求以及称谓上加以区分得必要性。并逐渐把前者称为称重传感器；后者称为“测力传感器”，文献中一般都用“Load cell”表示。为此，国际法制计量组织（OIML）Sr-8 秘书处负责起草《称重传感器计量规程》，在 1984 年 10 月第 7 届法制计量大会讨论通过，并于 1985 年以 OIML R60 国际建议颁布，正式确定了测力传感器和称重传感器的分立。并把称重传感器定义为：一种考虑到使用地点重力加速度和空气浮力影响的，通过把被测量（质量）转换为另一种被测量的力传感器。规程在多年执行中又做了一些修改，发表了 1991 年版、1993 年版 R60 附录 A 型“型式评定试验报告格式”等。目前各国执行的 R60 2000 年版。由于这种变迁，过去对负荷传感器的等级划分、技术性能、误差评定等都不适用了，而必须参照“称重传感器计量

规程”国际建议 R60，其基本思想与“非自动衡器计量规程”协调一致。

由应变片制成的电阻应变式测力或称重传感器都是用“strain gage based load cell”表示。现今若没有特别的说明，文献中“load cell”一般都是指电阻应变式传感器。只是在测力场合，可称为测力传感器；而在称重场合，则可称为称重传感器。

根据长期的实践表明，测力和称重传感器的主要区别在于：

(1) 使用场合不同。称重传感器是用于需要考虑使用地点重力加速度和空气浮力的场合。它广泛用于各种衡器和自动称量技术中，也可用于确定作为质量的函数和其它参数的测量；测力传感器主要用于工程结构试验和材料性能试验中力值（载荷）测量以及力值比较、传递。还可以用于测量多分量的力和力矩。此外，称重传感器通常使用在较恶劣的工业现场或环境较差的场合，而测力传感器通常应用于实验室环境。

(2) 采用的单位不同。由于力和质量是两个不同的物理量，称重传感器和测力传感器的测量对象分别是质量和力，质量的单位为千克（kg）或其倍量、分量；力的单位为牛（N）或其倍量、分量。根据牛顿第二定律 $F=mg$ ，在重力加速度相同的情况下，kg 和 N 在数值上是可以互为转换的，即在标准重力加速度时， $1\text{kg}\approx 9.80665\text{N}$ ； $1\text{N}\approx 0.10197162\text{kg}$ 。

(3) 评价方法不同。称重传感器是以分辨率（即标尺间隔或分度值d）的多少来评价其性能的，通常称重传感器的分辨率可以在 $500d\sim 6000d$ 之间，分辨率越高，其性能越好；测力传感器是以不确定度（即相对不准确度或相对准确度）来评定其性能的。通常测力传感器的不确定度可以在 $5\times 10^{-3}\sim 2\times 10^{-5}$ 之间。准确度级别为 2×10^{-5} 的测力传感器，通常适用于各国计量研究机构之间的力值比对或传递。

(4) 技术要求和测量结果的处理方法不同。对于称重传感器，要求其所有偏差之和应处于某一个允差带之内；而测力传感器则要求其各单项指标的数据保持在规定的偏差之内。称重传感器的总误差应根据国际法制计量组织的 R60 国际建议规定。

(5) 加载方式不同。称重传感器固定地安装在衡器上，力总是以相同方式引入，力引入时可能产生的误差已经在检定衡器时作了校正（如衡器的四角误差等）；而测力传感器则会受到与安装状态有关的不正确加载，从而受到侧向力与弯矩等的作用。

6、全密封应变片与全密封称重传感器

称重传感器决不是一个易损部件，无论用于衡器中还是各种自动称重系统中，都希望在使用期间具有很好的长期稳定性，使用期应该在几年，甚至 5 年、10 年。众所周知，环境条件的温度和湿度对应变片和传感器的长期稳定性影响最为明显，为此，引起人们的严重关注。为了解决这方面的问题，国内人士从上世纪六十年代至今，一直在这方面进行着各种努力。根据国外的经验，着重在选择应变片、胶粘剂、贴片工艺及工艺环境的控制、涂料及涂层工艺和传感器的整体的密封等。

称重传感器用应变片一般应选用玻璃纤维增强的环氧-酚醛基底或玻璃纤维增强的聚酰亚胺基底的全密封温度自补偿应变片，典型的全密封应变片如图 11 所示。应变片的敏感栅丝完全由覆盖层覆盖，又经加压固化处理，不仅使敏感栅丝得到很好的保护，而且使基底-敏感栅丝-覆盖层之间形成一个坚固的整体。应变片端头的镀铜，可有效地提高引出线与端头的焊接效果。

对于长期使用的应变片防潮，一般采用多种涂料分层涂覆的方法（如图 12）。由图可见，为了

防护涂料的返潮问题，在中间涂层间加置一铝箔层。一方面可避免加强效应，另一方面可阻断外层潮气得进入和内层涂层的返潮。对于有防护外壳的传感器，如柱式传感器等（图 13），除了在弹性体上的应变片，采用上述的措施外，在安装壳体后，可采用相应的焊接方法进行焊接密封，并在内中进行充氮保护等，以保证传感器在使用环境条件下的长期稳定性。

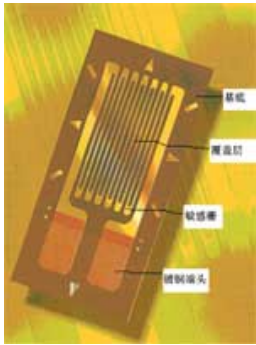


图 11 全密封应变片(M-M)

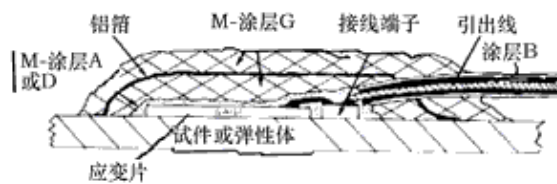


图 12 应变片防护涂层截面(M-M)



图 13 全密封称重传感器剖视图

7、温度自补偿应变片与桥路补偿网络

自从应变片诞生以后，人们一直致力于如何减小应变片的温度影响，尽管应变式传感器电桥电路（如图 4）具有固有的和差特性，上世纪五十年代初期，人们通过对合金丝材的合金成分的调整及控制热处理温度和时间等方法，制取了适用于各种试件材料上的温度自补偿应变片（self temperature compensation strain gauge, STC strain gauge）。箔式应变片诞生与发展，箔式自补偿应变片的发展，以及应变电桥的固有和差特性都仍不能满足称重传感器的实际需要。从六十年代至七十年代中期，人们逐渐完成对应变电桥线路的改造和完善。实现了①零点平衡调整；②零点温漂补偿；③传感器灵敏度调整；④灵敏度温漂补偿；⑤输出一致性调整；⑥补偿电阻非线性补偿等（如图 14），从而使称重传感器的测量精度有了明显的提高，极大地满足了衡器和自动称量技术发展的需要。

8、多功能应变片与桥路网络的简化

随着对应变片和称重传感器的深入研究，人们除了继续改进和提高各种温度自补偿性能外，还逐渐研制成功了弹性模量自补偿应变片、蠕变自补偿应变片。在此基础上，还有可能制成具有温度自补偿和蠕变自补偿或温度自补偿和弹性模量自补偿的双重功能的自补偿应变片，以及同时具有温度-蠕变-弹性模量自补偿三重功能自补偿应变片。若使用多功能自补偿应变片，将使传感器桥路大大简化（如图 15），这样不仅可以提高生产效率，而且也有利于提高传感器精度。

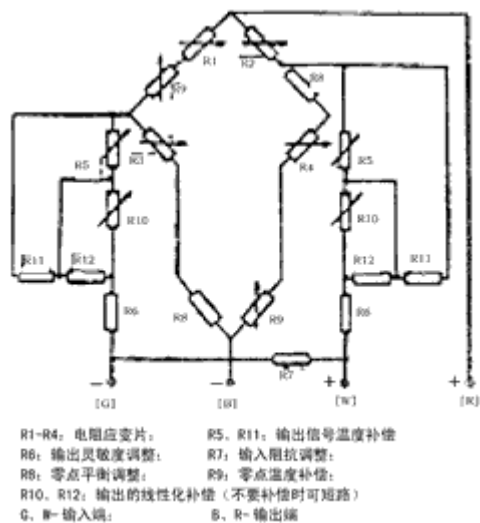


图 14 称重传感器桥路补偿网络图

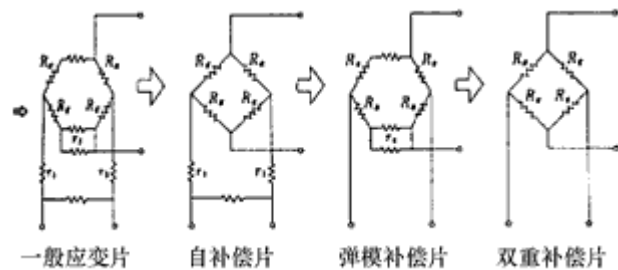


图 15 传感器桥路的简化

9、高温应变片与高温称重传感器

随着电子衡器和自动称量技术的发展，应用领域不断扩大，在我国钢铁等冶金部门对高温称重传感器的需求量越来越大。高温称重传感器过去长期需要国外进口，为了填补国内空白，国内有关单位在上世纪九十年代，采用玻璃纤维增强基底应变片研制成功了可用于 200℃和 250℃的高温称重传感器，并成功地用于钢铁冶金企业的高温环境下的自动称量。

10、称重传感器与秤体一体化、模块化、集成化

长期以来，传统的电子衡器都是由秤体、称重传感器、秤台、承力传力构件、定位限位装置等组装而成。由于由这些零部件组装式秤体结构，通常都比较高笨重、零部件多、安装调试时间长、活动环节多、稳定性可靠性差、生产效率低、成本较高等问题。二十世纪九十年代以来，随着科技的进步，工业自动化水平的提高，各行业对所用的电子衡器的功能、性能、结构等都提出了许多新的要求，其中最主要的要求之一是小型化，即体积小、高度低、重量轻。人们从改变传统由零部件组装式秤体结构的设计思路出发，经过多年的研究，研制出各种模块化、集成化或部分集成化的结构。先后出现了模块化汽车衡、集成化称重轨道动态电子轨道衡、集成化称重板动态公路车辆轴重秤等。在上述设计思想指导下，在电子吊钩秤领域开发出集成化称重钩、称重环型电子吊秤；电子平台秤领域出现了部分集成化的闭合截面薄壁型钢结构的轻便型电子平台秤、支承与称重传感器一体化的电子轴重秤、可折叠和台面可翻转的电子平台秤、薄型和超薄型滚动纸捆计量秤、码垛秤等。与此为新型结构衡器配套的称重传感器和称重模块等也都有了很大的发展。

11、模拟式称重传感器与数字型智能称重传感器

二十世纪九十年代以来，随着数字技术和信息技术的高速发展，也促进了电子衡器的数字化和智能化的进程。早在 1983 年美国 TOLEDO 公司引入“数字化”概念，并致力于研究采用微处理器技术、数字补偿技术与传统的电阻应变式称重传感器相结合，研究开发出摇柱型数字智能称重传感器。STS 公司也在 1988 年全美衡器展览会上，推出整体型数字式智能称重传感器。数字式智能称重传感器，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，成为数字式电子

衡器和自动称重计量与控制系统的重要部件。

传统的称重传感器都是模拟式称重传感器，长期以来，人们的研究重点一直都集中在传感器的硬件方面，例如，研发弹性体结构、选取弹性体材料、改进制造工艺、采用优质应变片和相应的粘贴工艺、完善桥路补偿和调整技术、实施防潮密封技术等。九十年代，称重传感器技术日臻完善。但是，由于模拟式传感器具有输出信号小、抗干扰能力差、传输距离短、称重显示仪表复杂以及组秤调试时间长等缺点，如何改善或克服这些缺点，始终是人们关心的问题。随着数字技术和集成电路技术的发展，美、德等国的衡器公司，先后研制出数字型智能称重传感器。所谓智能传感器，就是指能把具有一种或多种敏感功能，能够完成信号检测和处理、逻辑判断、双向通讯、自检、自校、自补偿、自诊断和计算等全部或部分功能的器件。数字型智能称重传感器的主要特点是：（1）输出信号大、抗干扰能力强、传输距离远、信噪比高；（2）通过数字补偿电路和数字补偿工艺，可以进行非线性、滞后、蠕变等补偿，有利于提高传感器性能；（3）输出信号规格化；（4）可内置温度传感器，并通过补偿软件可进行实时温度补偿，稳定性好；（5）各数字式智能称重传感器的地址可调，便于应用和互换。

目前，数字型智能称重传感器有两种结构形式：一种是所谓分离型；另一种是整体型。分离型数字称重传感器，是指将内置于整体型数字式称重传感器内部的 A/D 转换等数字电路，移置于一个外部的接线盒内，此接线盒通常称为数字接线盒。于是，只要把模拟式称重传感器接入数字接线盒后，其输出便以数字信号传输给与其配套的称重显示控制仪表。而整体型数字型称重传感器（如图 16 所示）就是在称重传感器内，内置放大、滤波、A/D 转换器、微处理器、温度传感器等敏感组件和数字处理电路，利用数字补偿技术和工艺实现各项自补偿、自校、自诊断、数据检测及数据处理等功能等。

目前，市场上出现的各种数字型智能称重传感器，这是传感器技术进步的象征，但是业内专家们也提醒我们，有些产品与真正意义上的数字型智能称重传感器的功能还有较大差距，这也是我们今后必须努力的动力。

三、结语

前面简要地回顾了电阻应变式测力与称重传感器的发展历程，介绍了各个不同阶段的突出成就，随着现代科技的日益发展，电阻应变式称重传感器的应用必将仍有广阔的前程。

由于接触的资料和了解情况比较少，以上有谬误之处，敬请批评指正。

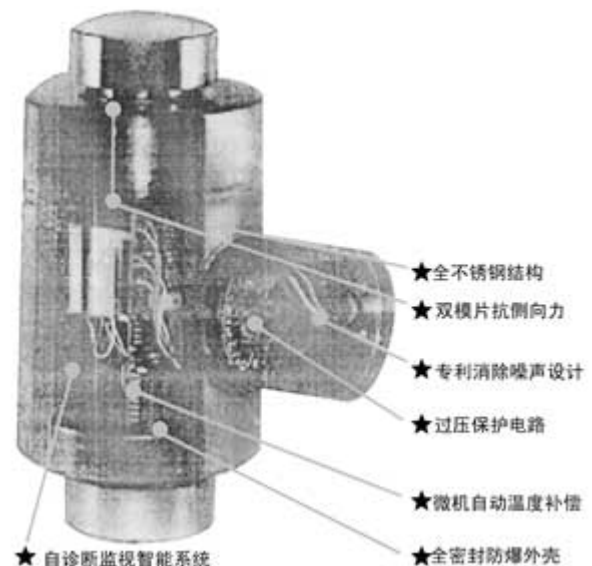


图 16 数字型智能称重传感器

参考文献

1. Perry. C. C. etc. The strain gage primer, 1955.
2. J. E. Starr, etc. 50 years of the bonded resistance strain gage—an American retrospective, Proceeding of the Western regional strain gage committee June 6-10 1988.
3. 刘九卿, 应变式称重传感器技术动向和发展趋势 《第五届全国称重技术研讨会论文集》, 2006。
4. 邬显义, 谈测力传感器与称重传感器的差别 《传感器应用技术》7-3, 1989. 9。
5. 施汉谦、宋文敏, 电子秤技术 北京, 中国计量出版社, 1991. 9。
6. 刘九卿, 电子衡器结构的新发展 《衡器》32-5, 2003. 9。
7. 张延温等, 浅谈数字称重传感器的技术现状与发展趋势 《衡器》33-1, 2004. 1。
8. 刘九卿, 数字智能称重传感器的发展与应用 《衡器》33-5, 2004. 9。
9. 陈日兴, 数字式称重传感器的智能化功能演变与发展综述 《第六届称重技术研讨会论文集》, 2007. 4。

作者联系方式

通信地址: 北京市丰台区东高地万源东里 87 栋 1 单元 3 号

邮政编码: 100076

电话: 010-68382986