

几种称重传感器技术特性及应用分析

宁波控泰电气有限公司 杨青锋
宁波市新兰电器有限公司

【摘要】 称重传感器被称为电子衡器中的核心部件。本文主要阐述了电阻应变式、电磁力式、光电式、电容式、液压式、振动式、磁极变形式、陀螺仪式、光纤光栅式 9 大类称重传感器。分别对其进行的介绍和分析，有利于称重测力传感技术工作者进一步了解和掌握相关知识。

【关键词】 称重传感器；电阻应变式；电磁力；电容式传感器；光纤光栅

现代信息技术的三大基础是信息的采集、传输和处理技术，即传感技术、通信技术和计算机技术，它们分别构成了信息技术系统的“感官”、“神经”和“大脑”。信息采集系统的首要部件是传感器，且置于系统的最前端。在一个现代自动检测系统中，如果没有传感器，就无法监测与控制表征生产过程中各个环节的各种参量，也就无法实现自动控制。在现代技术中，传感器实际上是现代测试技术和自动化技术的基础。

称重传感器被称为电子衡器中的核心部件。科学技术的飞速发展，由称重传感器组装的电子衡器也已广泛地应用到各行各业，实现了对物料的快速、准确称量。特别是随着微处理机的出现，工业生产过程自动化程度不断提高，称重传感器已成为某些过程控制中的一种必需的部件，目前，称重传感器几乎运用到了各行各业。

称重传感器按转换方法通常分为电阻应变式、电磁力式、光电式、电容式、液压式、振动式、磁极变形式、陀螺仪式、光纤光栅式 9 大类，以电阻应变式使用最广。下面是几种常用的称重传感器的工作原理、特性及优劣比较。

一、电阻应变式称重传感器

以金属材料为转换组件的电阻应变计，其转换原理是基于金属电阻丝的电阻——应变效应。所谓应变效应是指金属导体（电阻丝）的电阻值随变形（伸长或缩短）而发生改变的一种物理现象（图 1）。

金属导体的电阻值可用下式表示： $R = \rho \Delta L / \Delta S$

式中： ρ ——金属导体的电阻率（ $\Omega \cdot \text{cm}^2 / \text{m}$ ）

S ——导体的截面积（ cm^2 ）

L ——导体的长度（ m ）

电阻应变片式称重传感器是基于这样一个原理：

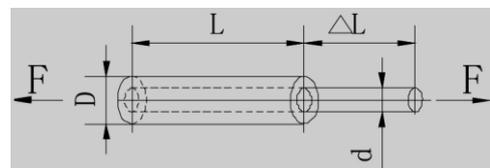


图 1

弹性体（弹性组件）在外力作用下产生弹性变形，使粘贴在其表面的电阻应变片（图 2）也随同产生变形，电阻应变片变形后，它的阻值将发生变化（增大或减小），再经过惠斯通电桥（图 3）把这一电阻变化转换为电信号（电压或电流），从而完成了将外力变换为电信号的过程。

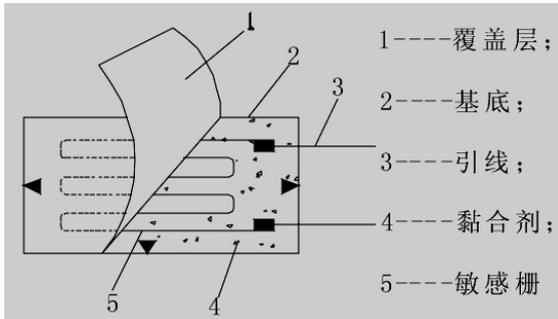


图 2

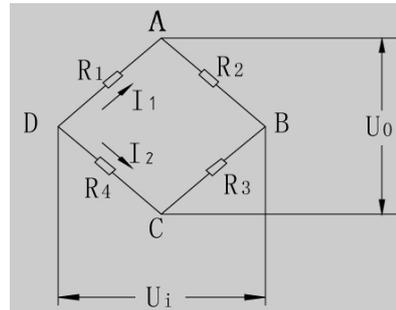


图 3

电阻应变式称重传感器的称量范围为几十克至数千吨，计量准确度达 1/1000~1/10000，以其结构简单，安装方便，工作可靠，为大部分电子衡器所使用。电阻应变式传感器的优点是准确度高，测量范围广，寿命长，结构简单，频响特性好，能在恶劣条件下工作，易于实现小型化、整体化和品种多样化等。它的缺点是存在机械滞后、蠕变和零漂、应变极限，对于大应变有较大的非线性、输出信号较弱，但是可通过一定措施改进。电阻应变式称重传感器是称重传感器中应用的最广泛的一种，对其特性研究也是最多的。

二、电磁力平衡称重传感器

电磁力平衡传感器的称重过程基于安培力实现。通电导线在磁场中受到的作用力如图 4 所示。在导线上加上秤盘，秤盘及导线本身具备的重力方向朝下，而通电导线受到向上的电磁力，当通过导线的电流值达到某一值时，这两个力互相平衡，此时传感器就处于平衡状态即可确定被测物重量。电磁力平衡传感器依靠载流线圈在恒定直流磁场中产生的电磁力与被测质量的重力平衡，实现被测质量的电信号转换。

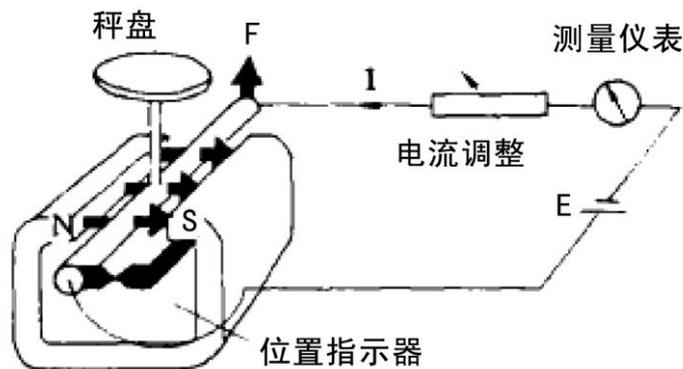


图 4

电磁力平衡称重传感器是一种高精度传感器，精度可达 $1/2000\sim 1/60000$ ，但称量范围仅在几十毫克至十千克之间，广泛用于电子分析天平，是精密质量称量的常用传感器。由于测量分辨率高、灵敏可靠、价格适宜，在精密质量称量、化学反应监测、加速度测量、水分检测等领域获得了越来越多的应用。为减小传感器的体积，简化传感器的制造工艺，降低制造成本，电磁力平衡传感器的恒定直流磁场采用永久磁铁。永久磁铁作为电磁力平衡传感器的永磁体，其磁性能的稳定性直接影响电磁力平衡传感器的精度。

电磁力平衡式传感器是一项相对成熟的专利技术，对传感器的生产条件要求较高。目前，世界上只有为数不多的几家大厂掌握这种技术。这种高精度的电子称重装置由于其独特的工作原理和工艺水平，精度非常高，主要用于高端市场。例如用高强度航空铝合金材料通过高精度电火花切割加工而成的单模块传感器，瑞士梅特勒-托利多集团和德国赛托利斯都有该项专利技术，它将传统的电磁力平衡式传感器中的杠杆、上下导杆、底座以及簧片等多个零部件融为一体。由于内部无连接螺丝，从而大大提高其可靠性，同时高效的机械传输性能和扭力保护，提高了其使用寿命。

三、电容式称重传感器

电容式称重传感器是一种把被测的机械量，如位移、压力等转换为电容量变化的传感器。它的敏感部分就是具有可变参数的电容器，其最常用的形式是由两个平行电极组成、极间以空气为介质的电容器（图 5）。它利用电容器振荡电路的振荡频率 f 与极板间距 δ 的正比例关系工作。若忽略边缘效应，平板电容器的电容为

$$C=\varepsilon A/\delta$$

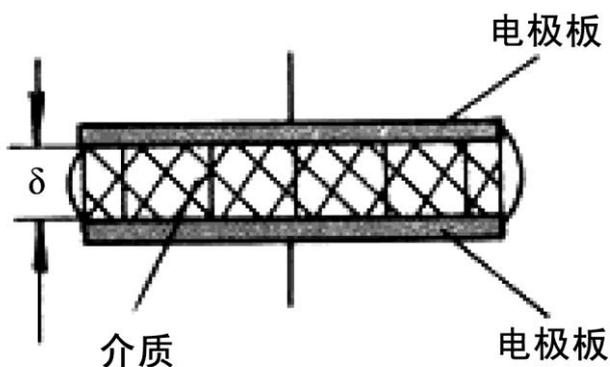


图 5

式中 ε 为极间介质的介电常数， A 为两电极互相覆盖的有效面积， δ 为两电极之间的距离。 δ 、 A 、 ε 三个参数中任一个的变化都将引起电容量变化，并可用于测量。因此电容式传感器可分为极距变化型、面积变化型、介质变化型三类。极距变化型一般用来测量微小的线位移或由于力、压力、振动等引起的极距变化。

电容式称重传感器的优点是结构简单，价格便宜，灵敏度高，过载能力强，耗电量少，造价低，

准确度一般为 1/200~1/500，动态响应特性好、对高温、辐射、强振等恶劣条件的适应性强等。缺点是输出有非线性，寄生电容和分布电容对灵敏度和测量精度的影响较大等。由于电阻应变式称重传感器无法做成超高温或在超高温环境故障率非常高，所以在许多超高温环境对称量精度要求不高或只为起到安全过载保护的作用时通常使用电容式称重传感器具有一定优势，譬如炼钢厂所使用的部分高温吊钩秤。此类传感器目前应用非常稀少。

四、光电式称重传感器

光电式传感器包括光栅式和码盘式两种。

光栅式传感器的工作原理是将光栅形成的莫尔条纹角位移转换成光电信号。光栅有两块，一个光栅装在表盘轴上可移动，另一块光栅固定。加载后，传力杠杆带动使表盘轴旋转从而带动移动光栅转动，莫尔条纹也随之移动。利用光电管、转换电路和显示仪表，计算移过的莫尔条纹数量，测出光栅转动角的大小，从而确定和读出被测物质量。

码盘式传感器的码盘（符号板）是一块装在表盘轴上的透明玻璃，上面带有按一定编码方法编定的黑白相间的代码。加载后，通过杠杆使表盘轴旋转，码盘也转过一定角度。光电管透过码盘接受光信号并转换成电信号，由电路进行处理并得到测量结果。

光电式传感器曾主要用在机电结合秤上，具有稳定工作、抗干扰能力强的优点，可用于煤矿等恶劣的工业环境，但是运行速度低，不能满足高速称重的要求。近年来由于电阻应变式称重传感器的技术日趋成熟，此类传感器已基本没有在应用，作为曾经的一个过渡产品已经完成其使命，几乎退出市场。

五、液压式称重传感器

液压式称重传感器是指承受被测物重力时，液压油压力增大，增大的程度与物体重力成正比，测出压力的增大值，就可得到被测物的质量。液压式传感器结构简单而牢固，测量范围大，但准确度一般不到 1/1000，有时甚至连 1/100 也不到。目前主要应用在对称量要求精度不高或安全过载保护方面的称重测力场合，譬如装载机秤。

六、磁极变形式称重传感器

磁极变形式称重传感器铁磁组件在被测物重力作用下发生机械变形时，内部产生应力并引起磁率变化，使绕在铁磁组件（磁极）两侧的次级线圈的感应电压也随之变化。测量出电压的变化量即可求出加到磁极上的力，进而确定被测物的质量。磁极变形式传感器的准确度不高，一般为 1/100，适用于大吨位称量工作。几乎在整个称重传感器市场没有实际的应用。

七、振动式称重传感器

弹性组件受力后，其固有振动频率与作用力的平方根成正比。测出固有频率的变化，即可求出被测物作用在弹性组件上的力，进而求出其质量。振动式传感器有振弦式和音叉式两种。

振弦式传感器的弹性组件是弦丝。当承重台上加有被测物时，V 形弦丝的交点被拉向下，且左弦的拉力增大，右弦的拉力减小。两根弦的固有频率发生不同的变化。求出两根弦的频率之差，即可求出被测物的质量。振弦式传感器的准确度较高，可达 1/1000~1/10000，称量范围为 100 克至

几百千克，但结构复杂，加工难度大，造价高。

音叉式传感器的弹性组件是音叉。音叉端部固定有压电组件，它以音叉的固有频率振荡，并可测出振荡频率。当承重台上加有被测物时，音叉拉伸方向受力而固有频率增加，增加的程度与施加力的平方根成正比。测出固有频率的变化，即可求出重物施加于音叉上的力，进而求出重物质量。音叉式传感器耗电量小，计量准确度高达 $1/10000 \sim 1/200000$ ，称量范围为 $500\text{g} \sim 10\text{kg}$ 。

八、陀螺仪式称重传感器

从力学的观点近似的分析陀螺的运动时，可以把它看成是一个刚体，刚体上有一个方向支点，而陀螺可以绕着这个支点作三个自由度的转动，所以陀螺的运动是属于刚体绕一个定点的转动运动。更确切地说，一个绕对称轴高速旋转的飞轮转子叫陀螺。将陀螺安装在框架装置上，使陀螺的自转轴有角转动的自由度，这种装置的总体叫做陀螺仪。

陀螺仪的基本部件有：

(1) 陀螺转子（常采用同步电机、磁滞电机、三相交流电机等拖动方法来使陀螺转子绕自转轴高速旋转，其转速近似为常值）；

(2) 内、外框架（或称内、外环，它是使陀螺自转轴获得所需角转动自由度的结构）；

(3) 附件（是指力矩马达、信号传感器等）。

如图所示，转子装在内框架中，以角速度 ω 绕 X 轴稳定旋转。内框架经轴承与外框架联接，并可绕水平轴 Y 倾斜转动。外框架经万向联轴节与机座联接，并可绕垂直轴 Z 旋转。转子轴（X 轴）在未受外力作用时保持水平状态。转子轴的一端在受到外力（ $P/2$ ）作用时，产生倾斜而绕垂直轴 Z 转动（进动）。进动角速度 ω 与外力 $P/2$ 成正比，通过检测频率的方法测出 ω ，即可求出外力大小，进而求出产生此外力的被测物的质量。

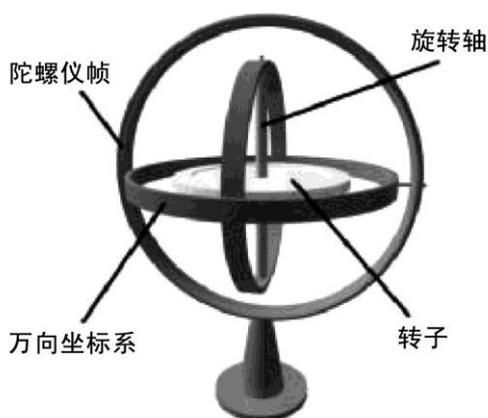


图 6

陀螺仪式传感器响应速度快（5 秒），无滞后现象，温度特性好（3ppm），振动影响小，频率测量准确高，故可得到高的分辨率（ $1/100000$ ）和高的计量准确度（ $1/30000 \sim 1/60000$ ）。

九、光纤光栅式称重传感器

光纤光栅传感器（Fiber Grating Sensor）属于光纤传感器的一种，基于光纤光栅的传感过程是通过外界物理参量对光纤布拉格（Bragg）波长的调制来获取传感信息，是一种波长调制型光纤传感器，光纤光栅传感器可以实现对温度、应变等物理量的直接测量。由于光纤光栅波长对温度与应变同时敏感，即温度与应变同时引起光纤光栅耦合波长移动，使得通过测量光纤光栅耦合波长移动无法对温度与应变加以区分。因此，解决交叉敏感问题，实现温度和应力的区分测量是传感器实用化的前提。通过一定的技术来测定应力和温度变化来实现对温度和应力区分测量。这些技术的基本原理都是利用两根或者两段具有不同温度和应变响应灵敏度的光纤光栅构成双光栅温度与应变传感器，通过确定 2 个光纤光栅的温度与应变响应灵敏度系数，利用 2 个二元一次方程解出温度与应变。

实验中所使用的光纤光栅均为 Bragg 光纤光栅，其折射率调制周期是均匀的，故满足 Bragg 条件，即 $\lambda_B = 2n_{\text{eff}} \cdot \Lambda$ 。式中： λ_B 为 Bragg 波长； n_{eff} 为光栅有效折射率（折射率调制幅度大小的平均效应）； Λ 为光栅周期（折射率调制的空间周期）。

当作用于光纤光栅的被测物理量（如温度、应力等）发生变化时，将引起 n_{eff} 和 Λ 的相应改变，从而导致 λ_B 的漂移。反过来，通过检测 λ_B 的漂移，即可得知被测物理量的信息。光纤 Bragg 光栅传感器的研究工作主要集中在温度和应力的准分布式测量上。温度和应力的变化所引起的 λ_B 的漂移可表示为

$$\Delta\lambda_B = 2n\Lambda \left(\left\{ 1 - \left(\frac{n^2}{2} \right) [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})] \right\} \varepsilon + \left[\alpha + \frac{\left(\frac{d_n}{d_T} \right)}{n} \right] \Delta T \right) = \lambda_B (K_T \Delta T + K_\varepsilon \varepsilon)$$

式中 ε 为应力， P_{ij} 为光压系数； ν 为横向变型系数（泊松比）， α 为热胀系数， ΔT 为温度的变化量；由上式可知，在排除或者忽略温度变化影响的时候，光纤光栅 Bragg 波长的变化仅与应力的变化相关，且是成正比的，根据这一原理即可利用光纤光栅来测量力的变化。

光纤光栅式称重传感器具有以下优点：

(1) 抗电磁干扰能力强，一般电磁辐射的频率比光波低许多，所以在光纤中传输的光信号不受电磁干扰的影响。

(2) 电绝缘性能好，安全可靠，光纤本身是由电介质构成的，而且无需电源驱动，因此适宜于在易燃易爆的油、气、化工生产中使用。

(3) 耐腐蚀，化学性能稳定，由于制作光纤的材料—石英具有极高的化学稳定性，因此光纤传感器适宜于在较恶劣环境中使用。

(4) 体积小、重量轻，几何形状可塑。

(5) 传输损耗小，可实现远距离遥控监测。

(6) 传输容量大，可实现多点分布式测量。

(7) 测量范围广，可测量温度、压强、应变、应力、流量、流速、电流、电压、液位等。

就目前而言，光纤光栅式称重传感器大多还处于研究和实验阶段，国内外在这方面都有报道，德国 HBM 公司已经拥有基于光纤光栅的光学应变计，且成功应用在 DB Minden 公司铁路车辆测试中。

参考文献

1. 翟玉锋, 张龙, 朱灵, 等. 光纤光栅称重传感器研究[J]. 发光学报. 2007,28 (3)
2. 罗建花, 开桂云, 刘波, 等. 轮辐式光纤光栅压力传感器的设计与实现[J]. 光子学报, 2006,35 (1)
3. 马卫东, 施伟, 付浩军, 等. 光纤光栅传感器的工作原理及研究进展. 光通信研究, 2001, (4)
4. 刘云启, 郭转运, 刘志国, 等. 光纤光栅的压力传感特性研究. 光子学报, 1999,28 (5)

作者简介

杨青锋 (1979-), 男, 大学本科, 工程师, 现为中国衡器协会技术专家委员会委员; 中国力学学会高级会员; 中国衡器协会职业教育工作委员会委员; 《衡器》期刊编委; 陕西工业职业技术学院客座教授; 《宁波科普》作家协会会员; 现担任宁波控泰电气有限公司、宁波市新兰电器有限公司总工程师及技术顾问; 长期致力于称重测力传感技术和电子称重系统工程的研究和开发, 在《中国计量》、《计量技术》、《衡器》、《衡器工业通讯》等期刊发表论文数篇。

现任宁波市新兰电器有限公司、宁波控泰电气有限公司总工程师

邮箱: nbuyqf@163.com 手机: 13958209734

通讯地址: 浙江省宁波市镇海区金达路 588 号 (315200)