

称重传感器技术在非衡器工业领域的应用

中国运载火箭技术研究院第 702 研究所 刘九卿

【摘 要】应变式称重传感器以其高技术性、高技巧性、高综合性和高渗透性等特点，除在衡器工业领域得到广泛的应用之外，还不断的向相关学科和非衡器工业领域扩散，国内外有许多在非衡器工业领域成功应用的案例。本文重点介绍了应变式称重传感器技术在大流量测量，动态称重法液体流量测量及校验，高铁列车车轮踏面在线检测，飞行器、旋转物体重心测量，铁路和公路隧道施工与验收安全性检测评定，输电铁塔风载监测和带状产品纵向拉力在线测量等领域的应用概况，并就工作原理、装备构成、检测方法、测量误差等问题进行了简要分析。

【关键词】称重传感器；动态称重法；在线检测；流量计量；重心测量；生物力学

一、概述

应变式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、综合性和技术性等特点，是支持工艺、基础工艺、核心工艺和特殊工艺的合理运用与集成。应变式称重传感器技术包括敏感传感机理、结构设计与计算、弹性元件金属材料、制造工艺及设备、电路补偿与调整、防护与密封、稳定性处理、计量测试等方面，约有 20 余种技术。随着科学技术的发展和工业计量水平的提高，各行业对电子衡器和在线称重计量的需求越来越大，促进了应变式称重传感器及其应用技术的发展。当前，应变式称重传感器技术的发展主要有三个方向：

- ①称重传感器本身的研究开发；
- ②与计算机相连接的称重传感器系统的研究开发；
- ③称重传感器技术向其它领域渗透的应用技术研究开发。

概括起来，称重传感器的研发方向就是“加强基础，扩大应用”，即加强结构设计技术、制造工艺技术、测试检定技术基础，向相关学科和非衡器工业领域渗透扩大应用范围。20世纪 90 年代以来，应变式称重传感器结构设计与制造工艺不断纳入新技术、新工艺，计量准确度、长期稳定性和工作可靠性均有较大提高，为应变式称重传感器技术向相关学科和非衡器工业领域渗透打下理论和物质基础，解决了诸如大流量测量，动态称重法液体流量测量及校验，高铁列车车轮踏面在线检测，飞行器、旋转物体重心测量、输电铁塔风载监测，铁路和公路隧道施工与验收安全性检测评定，带状产品张力在线测量，生物力学等领域的一些较难解决的问题。

二、称重传感器技术用于大流量测量

大流量的准确测量是贸易结算和工业控制中的一个重要环节。流量测量通常分为体积流量和质量流量两种计量方法，由于流体的体积是流体的温度、压力和密度的函数，大流量体积流量测量装置结构复杂、技术与工艺难度大、成本高、很难达到较高的准确度等级，因此工业发达国家大流量测量多采用以质量为单位的流量计量。质量流量计除具备结构简单、技术与工艺难度较小、成本低外，最突出的特点是准确度和稳定性高，直接测量出流量值。避免了传统体积流量测量方法因为受到温度、压力、黏度、密度等因素的影响而难以达到标称

的测量准确度，改变了传统高准确度流量计依靠机械转动和传动来实现流量传递的方法。所以质量流量计在以质量为单位的油品贸易结算、石油、石化企业内部油品的输转计量核算等方面得到广泛应用。

质量流量计的测量方法可分为间接和直接测量两类。间接式测量方法通过测量体积流量和体积密度经过计算得出质量流量。直接式测量方法则由检测元件直接测量出流体的质量流量。直接式质量流量计的输出信号直接反映质量流量，主要有标准容积法和标准质量法两种形式。

标准容积法：液体流量标准装置由水源、流量稳压装置、试验管道、切换机构和标准计量容器等组成。标准计量容器经过精确标定，其容器精度可达万分之几，有各种不同的容器可根据流量范围需要选用。

标准质量法：液体流量标准装置是以电子秤代替标准容器作为标准器，用称量一定时间内流入容器的流体总量的方法，来求出被测流体的流量。电子秤的准确度较高，标准质量法的流量测量准确度可达 $\pm 0.1\%$ 。质量流量法可用下式表示：

$$q_m = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta M}{\Delta t} = \frac{dM}{dt} \quad (\text{kg / s})$$

式中：M—质量；

t—时间。

工业发达国家大流量测量多采用质量流量法，只要将大型液罐置于三个称重传感器组成的环型电子秤上（实为大型液罐电子秤），准确测量出其质量和时间，即可求得流量。

三、称重传感器技术用于动态称重法液体流量测量及校验装置

动态称重法液体流量测量及校验装置，即利用应变式称重传感器采用动态称重法的液体流量测量方法及流量测量与校验标准装置。国内外通常将流量测量及校验标准装置分为容积型和称重型两大类。

根据美国标准局（NBS）、英国工程研究所（NEL）和国际标准化组织（ISO）的权威性见解，称重法是精度最高的流量标准装置。称重法的特点是：直接提供质量流量值，还可给出产品计价；不受介质、环境温度变化以及介质黏附容器壁面的影响，具有较高的保持使用精度的能力。美国标准局四套液体流量的主标准设备（水和碳化氢各两套）全部采用称重法，其中大流量采用静态称重法，中、小流量采用动态称重法。

动态称重法液体流量测量及校验装置，具有测量速度快、准确度高、直接提供质量流量、自动控制、操作简便等特点。对各种使用介质（包括大黏度、易挥发、腐蚀性强、有毒、高温、低温等）的流量计进行标定和现场校验，短时间工作时也可以直接作为流量测量用。流量范围 $0.5 \sim 20\text{kg / s}$ ，校验最短时间为40s，准确度 $\pm 0.1\%$ （对常温介质）。此类装置还可以作为液体定量分装和配料之用，分装准确度 $\pm 0.1\%$ ，有效分装时间小于1分钟。从发展方向看，容积型向称重型过渡是一种发展趋势。

提高流量计量精度对经济发展具有重要意义，特别是在能源日益紧缺的当今世界更是如此。为了满足各种各样的要求，人们研制出各种流量计，有的已具备较高的计量性能，但几乎所有流量计都要经过标定才能提供

准确的计量性能数据，而出厂标定通常都是以水作为介质。在现场使用时，由于管道内流场和介质物理性能（特别是黏度、密度）的变化，其标定特性将发生变化，影响流量测量准确度。因此对重要的、要求测量准确度高的场合，必须用高准确度的标准流量计或校准装置对流量计逐个进行现场校准，以消除粗大的系统误差。没有这种现场（在线）实液校验，即使要取得 $\pm 2\%$ 的计量准确度也不是轻而易举的。用称重法现场校准容积型、速度型流量计，不会因为质量流量换算容积流量时，需要除以密度而带来附加误差，恰恰相反，是抵消了密度测量的绝对误差，因为与前者用同一密度计测量密度。上述所指的重要场合，主要是：

- ①火箭发动机、飞机发动机试车台及燃料加注系统；
- ②较大口径输油管线；
- ③石油钻井场、原油集中处理站；
- ④其它重要液体流量测量系统等。

动态称重法液体流量测量装置既不是采用传统的静态称重法，也不是普通的绝对动态称重法，而是计量原理更为先进的动态边界法。其独特之处是用应变式称重传感器作为称重元件，鉴幅器（比较器）——计时系统为测量装置。该流量测量装置由支架、称重传感器、储存容器、标准砝码、电磁阀、手动阀、被校流量计等组成，其动态称重法液体流量测量标准装置示意图如图 1 所示。

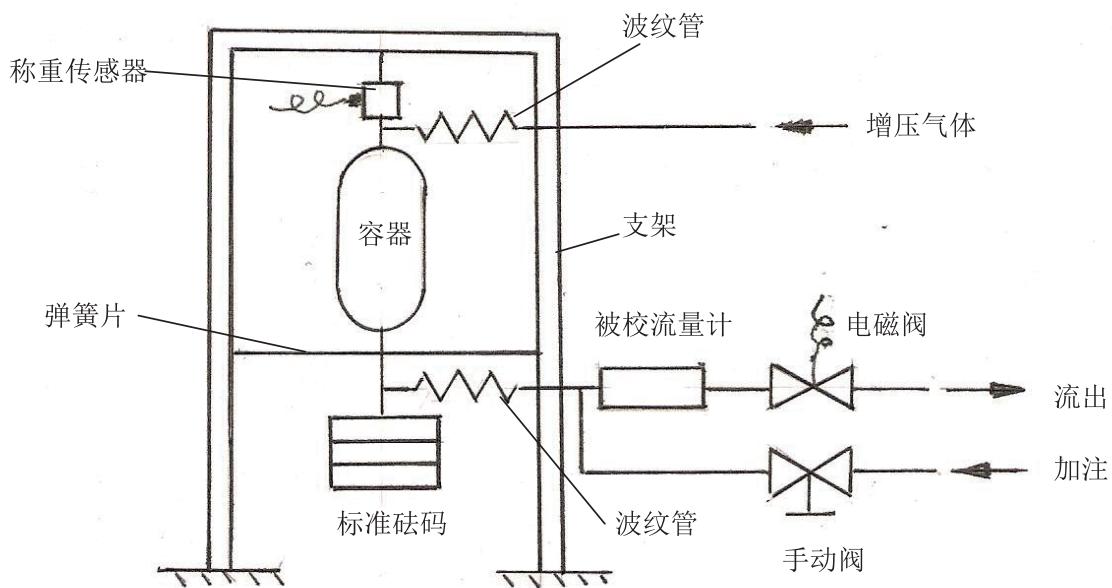


图 1 动态称重法液体流量测量标准装置

储存容器通过应变式称重传感器悬吊在支架下，容器下部配备一组标准砝码，砝码的加卸由气缸完成。校验时通过给容器增加压力，多用空气或氮气而使液体从容器中流出，并流经被校验流量计。容器通过底部的三根弹簧片（实为水平力抑制器）定位于铅直位置，不至于因外界影响而发生摇摆。在主管道上装有波纹管、被校流量计和阀门。动态称重法液体流量测量及校验装置的工作原理如图 2 所示。

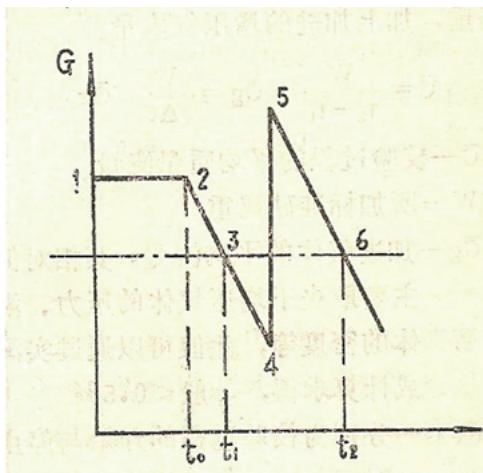


图 2 动态称重法液体流量测量装置工作原理

校验前, 向容器内加注介质并存放一段时间, 相当于图 2 中的 1—2, 从 2 开始打开阀门, 液体开始流出(对应的时间为 t_0), 增压气体不断补充。由于前几秒钟流场通常不稳定, 不能作为校验之用, 当容器及液体重量下降到一定的预设值时, 即图 2 中的第 3 点(对应时间为 t_1), 鉴幅器动作, 自动起动计时系统, 校验过程开始, 记录被校流量计示值。在其后的某一时刻(图 2 中第 4 点), 排掉气缸内的气体, 标准砝码自动加载, 称重传感器感受的重量急剧增加, 即图 2 中的 4—5, 之后由于液体不断流出容器的重量重新下降, 当再一次下降到预设值时, 鉴幅器再次动作, 停止记时(对应时间为 t_2), 记录被校流量计的示值。可以很容易证明从 t_1 — t_2 时问流出的液体重量正好等于所施加的标准砝码重量, 再加上注入到容器内的增压气体量, 校验过程的平均重量流量为:

$$\bar{G} = \frac{W}{t_2 - t_1} + \bar{G}_g = \frac{W}{\Delta t} + \bar{G}_g$$

式中: \bar{G}

G —校验过程的平均重量流量;

W —所施加的标准砝码重量;

\bar{G}_g —加进容器内气体的平均流量;

t_1 、 t_2 —分别为校验过程的开始与停止时间。

对应于 Δt 时间间隔内, 流量计输出信号的平均值为:

$$X = \frac{N}{\Delta t}$$

式中 N 为 Δt 时间间隔内流量计输出信号的累计值。将 G 同 X 进行比较, X 即可完成对被校流量计的校验。

这样对于既定的标准砝码, 流量测量问题基本上就变成了时间测量问题。众所周知, 标准砝码的准确度标定得很高($\pm 5 \times 10^{-5}$), 时间测量更可以达到很高的准确度, 因此动态称重法液体流量测量及校验装置的准确度可以达到很高的等级。

四、称重传感器技术用于高铁列车车轮踏面在线检测

随着我国客运、货运列车不断提速, 车辆运行的安全问题已成为广大旅客和各级铁路营运主管部门最关心

的问题，其中车辆运行中的安全检测问题尤为突出。火车高速行驶中的突然刹车，会使车轮的某一柱面因滑行而磨损，产生多处“平坦”部位，运行中就容易在“平坦”部位再次引起滑行和对钢轨反复冲击，不但产生振动噪声使乘客感觉不舒服，而且影响车辆使用寿命。近年来，铁路车辆采用自动控制技术高速行驶后，车轮产生扁平现象对车辆运行安全影响更大，已成为铁路车辆高速运行的一大难题，所以必须对运行列车的所有车轮进行监测，把不符合运行要求的车轮更换下来，以保证高速运行列车的安全性。

车轮在钢轨上面滚动，与轨面接触的部位称为车轮踏面。列车在高速行驶过程中，车轮不断的与钢轨面摩擦造成车轮踏面磨损，使车轮直径减小；在转弯与刹车时，车轮与钢轨面的相对滑动等因素造成的擦伤，将对车轮产生许多不良影响。因为轮缘形状对车辆运行稳定性与乘客舒适度影响极大，当带有踏面擦伤的车辆在线路上运行时，会产生附加的轮轨冲击力，其大小随擦伤长度、深度、列车行驶速度不同而变化，最大可以达到车轮静载荷的几倍到几十倍，并随着车轮的滚动周期性的作用于轨道和车辆系统，是引起轮轴、钢轨和轨枕断裂不可忽视的重要因素，严重影响列车与轨道设施的安全和使用寿命。

对车轮的轮缘各部位尺寸进行测量是保证列车运行安全的重要手段，其中轮缘几何尺寸（轮缘的高度、宽度）在线自动检测系统，是自动安全检测项目的一个重要组成部分。轮缘几何尺寸的基准值铁道部有明确规定，并要求定期下线检测。因此，轮缘几何尺寸在线检测系统对提高测量检修效率和检测准确度、延长运行周期、实现列车安全检测自动化至关重要。由于踏面损伤的车轮，其轮缘踏面的几何曲线对标准曲线而言有所改变。因此可以通过检测车轮几何参数或踏面断面形状来了解踏面的损伤程度。车轮踏面损伤检测技术主要有静态和动态检测两种方法。

静态检测法：是指在列车静止（如检修）时进行检测。其特点是轮缘几何尺寸测量精度高，但测量过程复杂，劳动强度较大且占用车辆周转时间。静态检测法多是通过传感器探头沿车轮宽度方向扫描来获得踏面数据，或是通过激光扫描踏面而获得踏面断面曲线，利用摄像技术获取数据。

动态检测法：是指在列车运行中进行检测。其特点是自动化程度高，不占用车辆周转时间，检测效率高。一般多采用车载式和地面式两种检测方法。车载式检测法是通过检测车轴振动的加速度来间接获得踏面形状参数，需要在每一根车轴上安装传感器，测量技术复杂且成本高，因此应用较少。地面式测试法是在线路上安装车轮外形检测系统，以检测运行中的机车车辆。动态检测多通过称重轨、低通滤波器、记录器、示波器等自动记录各车轮的轮重波形和不圆度状态。具体检测方法有利用称重轨测量车轮形态（不圆状态）的检测装置；或直接在线路钢轨上粘贴剪切型电阻应变计形成多段称重轨，对火车车轮形态的自动在线检测系统。

车轮形态自动在线检测系统，是采用剪切式称重轨的原理，将剪切式电阻应变计粘贴在钢轨的腹板上，利用的是车轮压在钢轨上产生的剪应力。众所周知，剪应力是不能测量的，但剪应力产生的相互成 45° 方向的正负主应力是可以测量的。通常在一条25米长的轨道中央部分，在车轮一周的区间内（约3米左右）粘贴4组剪切型电阻应变计，共设置3段这样的称重轨道。通过测量仪表检测车轮使钢轨产生的 45° 方向上的拉、压主应变。当车轮通过钢轨的检测段时，钢轨产生剪切变形，利用称重轨动态称重法求轮重，把轮重波形通过低通滤波器与车轮平坦冲击波形分离，从重迭于轮重波形的冲击成分判断车轮不圆度状态，发现有异状车轮的车辆，并打印出车轮异常的程度，为车轮的更换提供依据。只要仪表检测系统配备相应的磁带记录器和电磁示波器，

则当高速列车通过钢轨检测段时，就会自动记录各车轮的轮重波形。其高速列车车轮形态在线检测系统如图 3 所示。

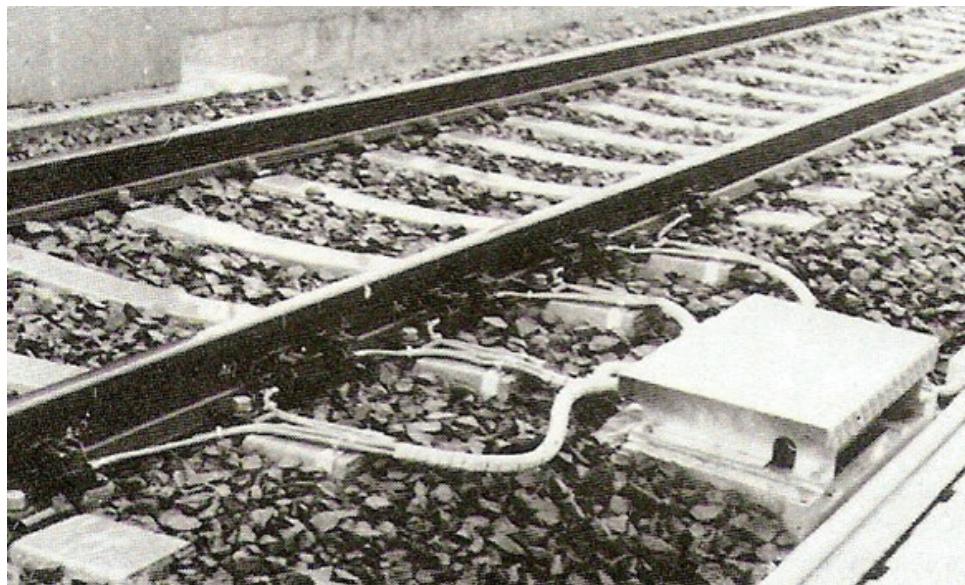


图 3 车轮形态自动在线检测系统

车轮形态自动在线检测系统，在一条钢轨上连续设置三个测量段的目的是提高车轮形态检测精度，为车轮更换提供准确可靠的依据。其车轮形态自动在线检测系统方案示意图，如图 4 所示。

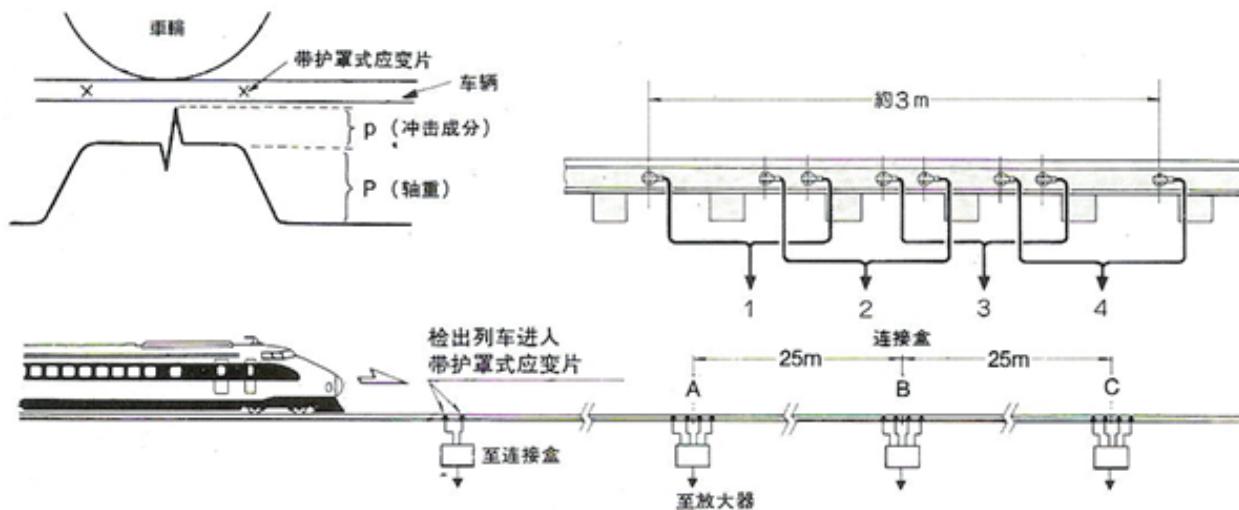


图 4 车轮形态自动在线检测系统方案示意图

五、称重传感器技术用于飞行器、旋转物体重心测量

为保证飞行安全，运载火箭、宇宙飞船、各型飞机都必须进行称重计量和重心测量。工业领域的旋转物体，为使其旋转稳定必须对其纵向、横向重心进行测量，以利配重，消除其附加转矩或力矩影响。国内外均根据称重法力矩平衡原理来测量物体的重心，多采用等边三角形、等腰三角形设置称重传感器测量点。

1. 物体测量重心的方法

测量物体重心时，称重传感器可按等边三角形或等腰三角形三点安装，主要有两种方法：

吊挂式：采用拉向称重传感器，通过拉杆和关节轴承接头将被测量物体吊挂于刚度较大的钢架上，多用于测量小型物体的重心。

承压式：采用压向称重传感器，为使每个测量点都有足够的支撑物体的面积，多将称重传感器并联共同支撑一个承载平台，三个测量点实为三台电子平台秤，多用于测量中、大型物体的重心。

2. 物体测量重心的要点

由于测量重心的物体大小不等形状各异，正确选择吊挂或支撑点的位置、采用科学合理的吊挂或支撑方式，对保证重心测量准确度至关重要。为此，应尽量保证以下各项要求：

①物体测量重心用的称重传感器，其技术性能应达到 GB / T7551—2008《称重传感器》国家标准中 C3 级各项计量性能的要求。

②测量中、大型物体重心选用三个平台式支撑时，其每个平台支撑实为一台电子平台秤，其最大允许误差应符合 JJG555—1996 非自动秤通用检定规程Ⅲ级的要求。

③无论是采用吊挂或支撑方式，称重传感器的位置应符合测量精度要求，使得在引起误差的主要因素中，排除称重传感器平面分布影响。

④以被测量重心物体产生的作用力 P₁、P₂、P₃ 的连线 YP 和 XP 轴，作为重量和重心平面轴，即称重传感器系统中被测物体的表观重心。

⑤被测量重心的物体轴线（Z 轴）与称重传感器等边三角形（或等腰三角形）的形心重合。被测物体坐标定义为 X、Y。

物体重心测量原理及称重传感器位置分布，如图 5 所示。

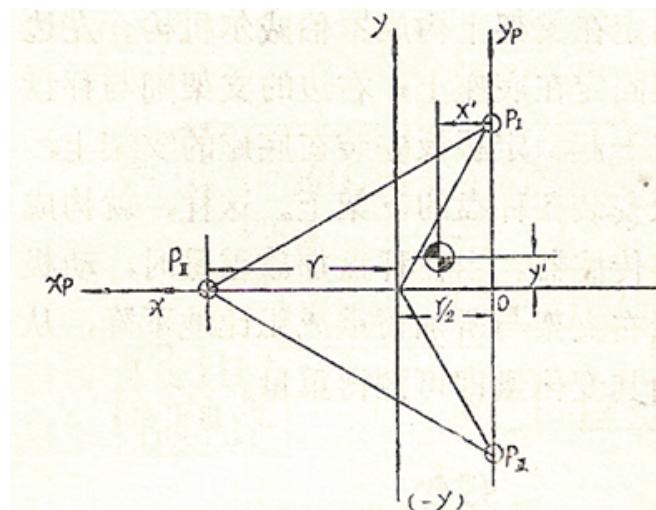


图 5 物体重心测量原理及称重传感器位置分布图

3. 物体测量重心原理及计算方法

设被测物体的 0° 和 180° 位置的重心坐标分别为 X'_P / Y'_P 和 X''_P / Y''_P

根据力矩平衡原理对 y_P 轴求矩

$$\Sigma M_y = 0$$

$$X'_P = \frac{3}{2} \cdot \frac{P_2}{W'} \cdot r$$

同理，对 x_P 轴求矩

$$\Sigma M_x = 0$$

$$Y'_P = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{(P_1 - P_3)}{W'} \cdot r$$

物体的重量为：

$$W' = P'_1 + P'_2 + P'_3$$

考虑消除吊挂系统和支撑底座的倾斜误差，将物体旋转 180° 再进行测量，

同样可求得：

$$X''_P = \frac{3}{2} \cdot \frac{P''_2}{W''} \cdot r$$

$$Y''_P = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{(P''_1 - P''_3)}{W''} \cdot r$$

如果吊挂系统和支撑底座安装合理，其倾斜误差很小， 0° 和 180° 的坐标 X 、 Y 测量数据相差很小。

物体的重量为：

$$W'' = P''_1 + P''_2 + P''_3$$

被测物体两次测量的平均重量为：

$$W = \frac{W' + W''}{2}$$

六、称重传感器技术用于冷轧机轧制钢带的拉力在线测量

国内某钢铁公司带钢厂在对100t冷轧机进行技术改造时，提出了采用应变式测力传感器测量钢带在轧制过程中的纵向拉力。通过对冷轧机轧制钢带的力学分析，钢带在轧制过程中主要受到三个力的作用，一对是冷轧机上下轧辊施加的横向压力，即轧制力；一个是由卷筒旋转产生的纵向拉力。此拉力的大小不仅是影响钢带

轧制质量的主要因素，而且是冷轧机安全生产的关键环节，需要在钢带轧制过程中严格控制与监测。钢带在轧制过程中的受力简图如图 6 所示。

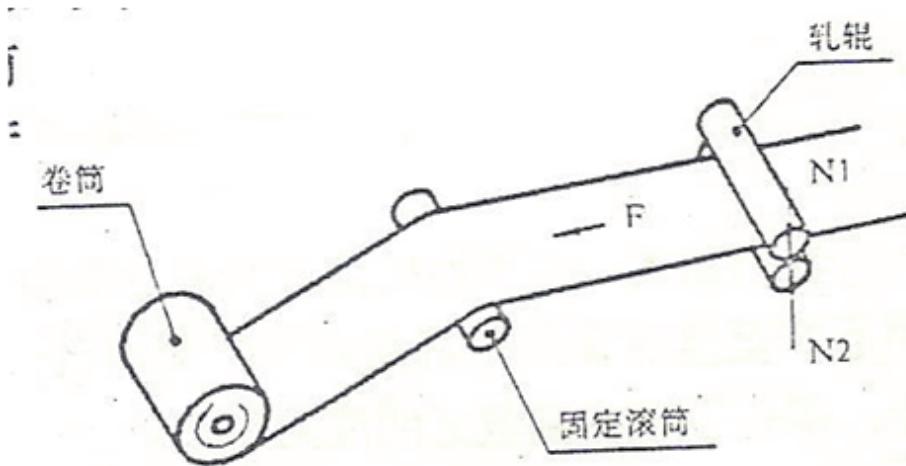


图 6 钢带在轧制过程中的受力简图，

由图 7 可以看出，卷筒的旋转使钢带在拉力作用下，经过上下轧辊被轧制成一定的厚度。由于钢带轧制过程是连续的，所以钢带上的拉力无法直接测量。通过对卷筒的受力分析不难看出，由于卷筒和固定滚筒之间的距离较远，可以认为固定滚筒所受钢带压力的合力 Q 的方向是不变的。再把合力 Q 分解成垂直分力 Q1 和水平分力 Q2，通过测量垂直分力 Q1 的力值，并经过一定的换算就可以计算出钢带的拉力 F。钢带受力简图如图 7 所示。

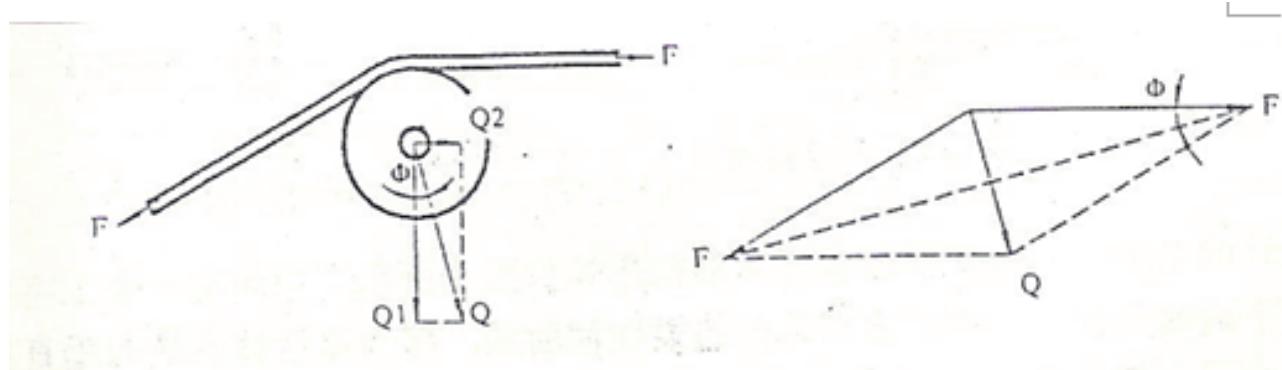


图 7 钢带受力简图

$$\text{因为 } \frac{Q}{F} = \sin \phi \quad \text{所以} \quad F = \frac{Q}{2 \sin \phi}$$

$$\text{又因 } Q = \frac{Q_1}{\cos \phi} \quad \text{所以} \quad F = \frac{Q_1}{2 \sin \phi \cdot \cos \phi} = \frac{Q_1}{\sin 2\phi}$$

$$\text{设} \quad K = \frac{1}{\sin 2\phi} \quad \text{则} \quad F = K \cdot Q_1$$

F 即为冷轧机在轧制过程中钢带所受的纵向拉力，由于是现场测试，力值测量准确度要求不高，1% 左右的近似值是允许的。

为尽量减少钢带纵向拉力的测量误差，可以利用准确度较高的悬臂剪切梁测力传感器，并在两侧加工出柔性梁形成整体箱式弹性元件结构，两个柔性梁在固定滚筒承力方向非常刚硬，而在钢带承受拉力方向又非常柔软，不限制剪切应变梁水平变形，将其安装在轴承座上即可测量钢带拉力的大小。与正常使用的悬臂梁称重传感器边界固定方式不同，根部固定在面积较大的承载面上，尽量接近刚性固定，保证弹性元件应变区为纯剪切应力状态。这种弹性元件的特点是：结构简单紧凑、外形低稳定性好；剪切应变梁在两个柔性梁之间得到很好的保护，抗侧向力、弯曲力矩和扭转力矩能力强；应变梁承受剪应力受载后应变区无面积变化，固有线性好；便于安装过载保护装置等。因此，这种测力传感器的计量性能非常优秀，灵敏度为 $2mv / v$ ；非线性、滞后、重复性误差均优于 0.02%FS；蠕变 0.02%FS / 30min；零点漂移 0.02%FS / 2h。经过对此种结构测力传感器进行中心和一侧加载的侧向力试验，对输出的影响只有 0.4%，说明具有良好的抗侧向力能力。其钢带纵向拉力测量用剪切式测力传感器如图 8 所示，与轴承座安装示意图如图 9 所示。

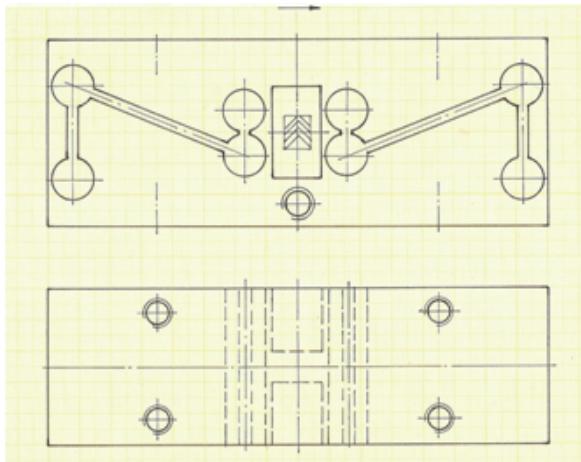


图 8 钢带拉力测量用剪切式测力传感器结构示意图

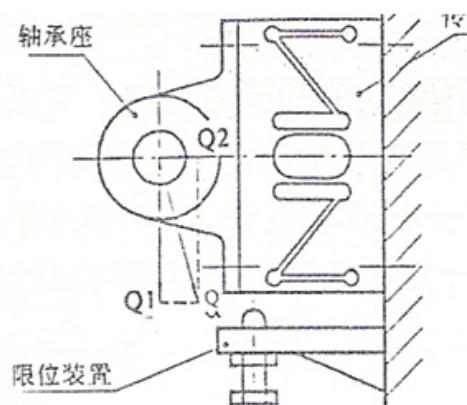


图 9 钢带拉力测量力传感器与轴承座安装示意图

七、称重传感器技术用于铁路公路隧道施工与验收安全性检测评定

1. 称重传感器技术用于地铁施工安全监测

地铁施工通过地面道路、建筑物时，除了事先必须制定周密的施工方案外，还必须应用各种传感器和检测仪表监控地下施工过程中可能产生的影响，以保证地下施工和地面道路与建筑物的安全。

地铁施工的监控方法和手段是：在地面的廊柱或建筑物顶部，安装应变式倾斜传感器，以检测地下施工对地面建筑物的影响。地铁隧道在施工过程中崩塌会直接威胁施工人员的生命和地面道路和建筑物的安全，为此必须在隧道拱墙的拱顶部上，用长锚螺栓与地层紧固，锚螺栓头部安装一只 50 ~ 100t 载荷传感器，一般多采用 8 只锚螺栓即安装 8 只载荷传感器，以检测施工土层的压力，随时掌握土层的压力变化状态，保证地下施工和地面道路与建筑物的安全。

2. 称重传感器技术用于铁路公路隧道施工与验收安全性检测评定

铁路、公路建设离不开隧道施工，有的隧道长达几公里甚至十几公里，施工规模大，地质条件复杂，工作环境恶劣，加之庞大的地压力，使其成为最困难的工程。铁路、公路隧道施工过程中的安全监测，施工后的安全性验收、评估，长期使用中的地压力监测是保证隧道牢固可靠、车辆畅通无阻至关重要的一环。

国际上工业发达国家提供的资料表明，隧道在施工和使用过程中，沿隧道长度方向一定距离的2个横截面上，进行测试和监测，可以收到较好的测量结果。其检测项目为：将电阻应变计粘贴在钢制拱架上测量拱的支持应力；用钢筋应力计和土压计测量混凝土的应力；将应变式载荷传感器安装在拱架两端测量拱的支反力；用地中位移计测量山体的位移；用断面位移计测量山体断面位移。

上述测量点合计180个左右，可以对地层的状态和动向得到清楚的解析。一般，在粘贴各种电阻应变计和安装各种传感器初期，每日测量两次即可；工程全部完成后，每日测量1次即可；其后每2两天测量1次，共计测量180天。其电阻应变计、载荷传感器安装位置如图10所示。

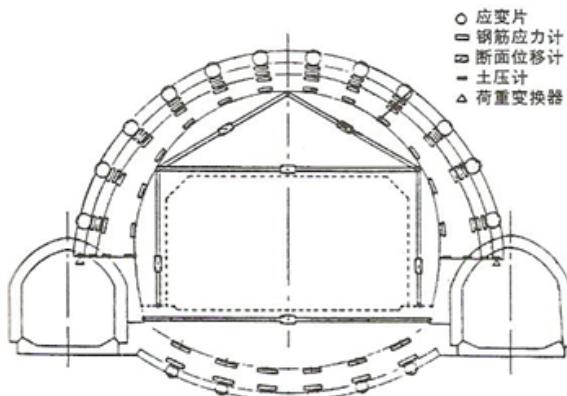


图10 电阻应变计、载荷传感器安装位置图

八、称重传感器技术在土建工程领域的应用

土建工程状态复杂，土压力、土载荷测量是土建工程试验研究的一个基本环节，是工程测试中的重要内容。除在特定条件下可以通过测量土体支撑结构的变形来换算土压力外，一般多采用土压传感器直接测量。通过对土压力的长期观测，了解和评价结构物的工作状态；验证应力分布理论；检算假设前提和计算公式的可靠程度，以提供设计依据。

土压力、土载荷传感器的研制和使用，在国内已有几十年历史，应用范围不断扩大，主要有：公路路基、挡土墙检测与监测；地铁工程地下结构测试，隧道地层压力检测、崩塌监测。在隧道拱墙的拱顶上，用多个安装有测力传感器的长锚螺栓与地层紧固，检测土层的压力变化。土压力、土载荷传感器与应变式称重传感器的原理相同，制造工艺相通，主要应用范围有：大型水坝的监测，分层埋设温度和混凝土收缩应力传感器；山体滑坡监测，在山坡下埋设多个土压力、角位移和液位传感器；大型建筑物、高层楼房地基监测，沿直线以一定距离埋设土压力和位移传感器。

土压力、土载荷传感器的结构与圆板式、碟式、箱式称重传感器极其相似，但由于土层条件复杂，影响因素较多，有一定研发难度。设计土压力、土载荷传感器，必须将土木工程技术与称重传感器技术相结合。进行结构设计与制造时，应尽量做到：

- ①土压力传感器尽量接近土介质的变形特性；
- ②弹性元件结构形状和尺寸力求科学合理；
- ③传感器承压表面的变形尽量做到均匀；
- ④通过试验找到最佳埋设方法。

设计应变式土压力、土载荷传感器的理论依据，主要是俄罗斯学者巴拉诺夫建立的土压力传感器设计理论，采取如下假设：

- ①土介质是线性变形体，不能承受拉伸应力；
- ②传感器是圆柱形，在压力作用下工作面假定为平面平行移动；
- ③传感器变形与其尺寸相比极小；
- ④由于传感器通常比土坚硬，因此弹性元件变形是由其自由的受压产生的；
- ⑤讨论一个无限大的土体，在它上面作用均匀分布的压力，传感器工作面与此压力作用面相平行。

九、称重传感器技术用于输电铁塔和大型钢制桁架风压、风载监测

随着我国电力部门输电电压的不断升高，输电铁塔日趋大型化，这就为输电铁塔的设计和建设提出了如何保证在强风作用时的安全性问题。特别是沿海地区已有多次在台风作用下输电铁塔损坏事故。为此必须对输电铁塔受风载作用时的风压、风速、变形以及风压—应变曲线进行测量，以便为输电铁塔设计与建设提供依据。高层楼房建设用的塔式吊车也属于钢制桁架结构，为保证施工安全其起吊的臂长与安全载荷和受风载作用产生的变形都应及时进行监测。

传统的测量方法是用风速计进行监测，由于风速计机械上固有的惯性，不能及时响应，且风压与风速不成简单的线性关系，测量误差较大，埋藏着事故隐患。

国际上多用微压传感器测量铁塔和钢制桁架上部的实际风压；在铁塔和钢制桁架的上方粘贴电阻应变计，测量各部件的应变以监控应力变化情况；或在铁塔和钢制桁架上点焊薄片式载荷传感器，监测风载影响。

尽管风压力传感器与称重传感器的结构不同，但是原理和制造工艺相通。风压力直接作用在传感器的膜片上，膜片产生与风压力成正比的微位移，使粘贴在膜片上的电阻应变计的电阻发生变化，利用惠斯通电桥电路测量这一输出变化，并将此输出转换为对应这一风压的标准信号，这是应变式称重传感器技术完全可以实现的。

十、称重传感器技术在生物力学中的应用

目前，应变式称重传感器主要应用于医院的病床秤、轮椅秤，生物力学应用的测力与称重传感器与其有较大差别，主要特点是结构外形小且复杂、制造工艺难度较大，应用范围广，销售价格高。目前，生物力学测力与称重传感器的主要应用方向是：

- ①脊柱侧凸临床治疗矫正器拉、压力测量；
- ②中医推拿三分量测力仪；
- ③假肢的力学参数测量，要求在行走过程中进行测试，必须采用无线测力传感器。
- ④牙齿咬合力测量，多用小梯形结构的弹性元件。

十一、称重传感器技术在其它领域的应用实例

1. 汽车检测领域用的特殊力传感器主要有：换挡推拉手柄力传感器；车窗调节力传感器；叠加安装在汽车踏脚板上的力传感器；手刹车操作力传感器；座椅变位控制杆操作力传感器；活塞环拉力传感器等。
2. 带云梯救火车最大伸出长度的最大负荷测量和倾翻力矩测量用载荷传感器；喷水反力测量和最大喷水时的弯曲应力测量用力传感器；云梯最大载重监测用载荷传感器等。
3. 轮船船锚、海岸边平台拴住力测量，多用焊接密封的大量程圆筒式测力传感器。
4. 船侧向撞击力测量，实为侧向安装的电子平台秤，应用焊接密封的大量程圆柱式称重传感器。
5. 大型水坝受力状况监控用钢筋力传感器、裂纹检测用位移传感器等。
6. 车辆智能管理系统，主要是测量轮重、轮组重、整车重、车型识别、车流量等，应用长条形结构整体剪切梁式称重传感器。
7. 大跨度桥梁斜拉钢索拉力检测与监测，应用焊接密封的圆筒型拉式测力传感器，要求进行 6 个月长期稳定性测试。
8. 汽车检测线二分力测量台，实为测量汽车轴载荷和水平载荷的二分力称重板。
9. 各种电子车载秤用称重传感器、多采用双剪切梁型弹性元件、应变式挠度型弹性元件。
10. 高层楼房建筑地基打桩机的打桩冲击力测量，应用低外形垫圈式测力传感器。
11. 小轿车立体停车场车辆管理、监控用拉式或压式称重传感器。
12. 机器人内部关节的位置、运行速度和力觉检测用电阻应变式力传感器和位移传感器。
13. 混凝土搅拌机和配料系统的物料控制与称重计量用焊接密封圆板式称重传感器。
14. 材料试验机的静态、动态力测量，采用拉伸、压缩两用测力传感器，要求长期稳定性好。
15. 石油钻井转盘扭矩测量、大钩负荷钻压向力测量、大钳扭矩测量、下井仪器电缆张力测量等，应用各种测力传感器。
16. 组合件生产加力过程中力值测量，例如压力加工中的轴承、轴套、轴销等加压力测量。
17. 搅拌器的转动力矩测量，采用测量驱动马达的反作用扭矩的方法，替代测量转动力矩。
18. 高层楼房电梯超负荷测量、监控、报警用称重传感器，主要有带减震垫的压向称重传感器、安装在钢丝绳或钢带上测量拉力的两端固支的剪切梁型称重传感器等。

十二、结束语 .

自从 20 世纪 40 年代初期，电阻应变式负荷传感器（20 世纪 80 年代中期分为用于质量测量的称重传感器和用于力值计量的测力传感器）问世以来，经过种种改进和创新，目前结构设计、制造工艺、性能检测和应用技术都达到了较高的水平，今后称重传感器技术将向着“加强基础、扩大应用”两个方向发展。其一是随着物联网和无线传感器网络技术的迅速发展和“工业 4.0”、“中国制造 2025”发展战略的实施，对处于信息感知层的称重传感器提出了便携、节能、环保，同时具有微型化、智能化、非接触测量和低外形、低功耗、低成本等新要求，这将促使一部分称重传感器产品由传统型向全新型转型发展。它不仅促进传统称重传感器产业的加速改造，而且可导致建立新型多元化的称重传感器企业模式，将是一个新的经济增长点。其二是随着科学技术

的发展和工业自动化、智能化水平的提高，各工矿企业智能制造和数字化工厂的需求，为称重传感器技术向相关领域扩散创造了条件。可以预期称重传感器技术在非衡器工业领域的应用将更加广泛、更加深入，一定会取得新的应用成果。称重传感器技术向非衡器工业领域渗透的发展方向，值得国内称重传感器研究与制造企业给予高度重视。

【参考文献】

- 【1】美国 Vishay Micro Measurements. Photostress—应力分析测试中的全域解决方案. 1999 年。
- 【2】德国 HBM 公司. HBM 测量系统的应用. 2005 年。
- 【3】日本共和电业株式会社. 共和电业产品应用例集. 2000 年。
- 【4】林自强. 动态称重法液体流量测量及校验装置. 传感器应用技术. 1985 年第 2 期。
- 【5】何宝东. 新型中心剪切梁传感器. 全国第三届称重与测力技术学术研讨会论文集. 1996 年上海。

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七〇二研究所研究员，享受国务院政府特殊津贴专家。现为中国衡器协会技术顾问，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》，在有关杂志上共发表学术论文 110 多篇。