

称重技术的一些基本概念

中国计量科学研究院 周祖濂

【摘要】 本文讲述几点在衡器设计、制造、使用中最常遇到，但又往往被忽略或概念不清而造成的问题和困难。希望大家能重视这些基础性问题，并加强对衡器基本理论的研究。

【关键字】 力矩平衡、静不定、限位、动态称重、国际建议

在实际称重技术工作中，会发现由于违反了称重技术的基本概念，导致研制产品的失败和无法解决或不能理解工作中遇到的问题。遗憾的是往往一些衡器工作者不重视这些概念性的基本问题，特别是现在由于计算机技术的迅速发展，很多人企图通过计算机技术来解决由于违反基本原理所带来的困难，而实际上这是徒劳无益的。本文试图对一些基本概念做简要讲述供大家参考、讨论。

一、力矩平衡、静不定系统

重力式称重系统和最常用的衡器。除了吊秤等极少数衡器，被测物的重力与用来测力的器件，如传感器，它们的力互为平行力，而不是共点力，因此测力的数学方程是建立于力矩平衡的基础上。由于习惯的“直观”思维，例如对汽车衡之类的衡器，会直接把四只传感器测出力相加，就等于被称物的重量。这种习惯性的结果，就是在实际校准汽车衡时，不按规定调整偏载，甚至不调偏载，其结果是同样重量的物体，当重心处于承载器的不同位置，显示结果会有明显的差异，且示值超差。这种现象在调偏时，在四角放置检定砖码，通常均会发

生。这是为什么呢？因为此时的汽车衡是静不定系统。众所周知，超过三个以上支承测力点的系统，均为静不定系统，例如汽车衡，此时有四个支承传感器，而只能得到三个平衡方程，因此无法求得四个称重点受力的大小，即此时四支传感器的力值相加的合力大小，并不等于被称物的重力。

二、型式批准与检定

衡器是属于强制性管理的计量器具。对于新型产品和厂家初次生产的产品，必须经过法制计量部门对产品进行型式批准，通过后才能投产。对于新型产品，需对其衡器的原理、结构甚至某些特殊要求的材料进行审定。第二对是否有合理、可行的检验方法，并制定出试验文件才能进行型式批准。对于厂家初次生产已有的衡器，则只需要按照已有规程进行型式批准。由于我国厂家所生产的衡器，几乎都是已有的衡器，往往有的厂家在所生产的衡器增加与原产品不同的可能影响称重结果的部件，我们却没有对这些新加部分进行审定。而在国外对新型衡器的型式批准很严格，例如在德国早在 1775 年左右就有了定型的倾斜杠杆秤，但直到 1876 年才通过型式批准正式使用。由于计量法规的制约，影响了倾斜杠杆秤在德国的发展。另外应变式称重传感器的电子秤，直到传感器的不确定度小于千分之一时，在 1966 年才获得型式批准。

型式批准的目的，只在于确认一种新型衡器在原理、结构型式是合理的，对初次生产某种衡器的厂家还应确认它有生产这种衡器的能力才能投产。

为了保证计量器具在足够长的时间内（测量的稳定性），都可期望得到正确的测量结果（测量的正确性），这在计量法中被称为测量的确定性。为了保证计量器具的特性，需强制对使用的衡器进行检定。检定包括首次检定和随后检定。

首次检定的目的在于使计量器具得到法定计量部门的认可、准许使用。确认该衡器是否是型式批准型式的复制件，并可以审查该衡器是否安装和使用正确，具有法规所规定的功能。

随后检定，旨在查明计量器具上次检定经过一段时间使用后，其精度和性能能否还维持原法规的要求。计量部门在统计某种衡器随后检定数据，可以判断对该类衡器的检定周期是否规定合理，并可对厂家的衡器性能进行评定后提出改进意见。

三、限位

衡器或称重系统最基本的要求是载荷的作用力必须通过传感器的受力轴线，不能有横向力和力矩。并要求在整个使用过程称重结构的状态不能发生改变，例如承载器、称重支架。要求保持传感器的受力状态保持不变、称重系统或承载器的死载荷（由力矩平衡的空载受力状态）保持不变。在实际使用时，由于温度的变化引起支承件横向位移、风力引起的横向力，以及冲击造成横向力或阻力所作用，以及机械结构：如基础、结构架、承载器、容器罐等、在负载应力的作用下，都可能产生形变。这些因素均可影响测量精度。广义而言，传感器的加载部件（压头），也是为了消除横向干扰力的限位部件。而我们通常只将在承载器和基础或构架之间安装所消除横向力的装置称

为限位器。

为了防止水平力的限位装置有两种不同的形式：

约束（Constrainers）：约束是使用强制的手段消除水平力，不允许在约束方向，称重结构、承载器传感器之间有任何运动。在整个称重过程中都起作用。

制动（限位）（stop）：

起制动作用的限位装置，在称重过程中当承载器、称重机构受到外界干扰力、冲击力等的影响，使其发生位移，破坏了原来的称重状态。限位器的作用在于使横向位移限制在可控内，当外界扰动消失时，衡器或称重装置能恢复到原来的称重状态。为了避免在外力作用时，冲击力过大造成称重结构的损伤甚至损坏。所以对限位器的“间隙”调节是很临界的。

对于传感器的“限位”部件，通过包括球形压头、摆动支座、自动定位滚珠支承座，橡皮支件等。组件、马鞍形和链环等均属于限位和自复位限位部件。

碰撞螺栓限位，在我国几乎是所有汽车衡使用的限位装置。但这类限位存在的碰撞间隙，在运动期间存在压头造成变形和损坏。若间隙调得过小，在夏天往往使秤台与基础接触造成力的分流甚至卡死，引起测量误差。有的生产厂家，把碰撞型限位用于动态汽车衡更是非常不合理。除了此种简易的限位结构，碰撞型还有不同的结构。SCHENCK 公司曾介绍过其它的碰撞型限位器。

约束型限位器，通过使用拉杆限位。这是一种两端被固定（箝位）

的梁式跷曲板和园柱形杆的最普遍的约束件。更为复杂的这类限位器在两个固定端使用滚珠轴承或万向轴承或限位两端使用球面柱结构的更为复杂的约束限位。约束限位往往由于使用不当，反而引入明显的干扰力。甚至有人认为，两端固定的所谓刚性箝位拉杆约束限位是最差的限位方式。这主要原因是使用者调节不得要领所致。这类约束限位器要求非常精准的调节，才能避免垂直干扰力。即要求固定两端要精确保持在同一水平。拉杆之间不能有间隙，否则在受到冲击会造成秤体的永久形变，以至损坏。第二要注意，不是随使用一根杆就可达到好的限位效果。我们需要计算拉杆允许的垂直刚度和合适的跷度，下面给出一组推荐的数值。

拉杆长度 450mm

	拉杆 12	拉杆 15	拉杆 20	拉杆 30
螺母	M12	M16	M20×1.5	M30×2
垂直刚度 (N/mm)	18	61	173	893
非准直影响 (N/°)	141	479	1359	7014
毁坏载荷 (KN)	1.3	7	15	75
允许跷度	9	6	5	3
所用传感器量程	3×100kg	3×500kg	3×1T	3×5T

计算的原则要求在水平方向非常硬，有足够的刚度，在垂直方向相当柔软，拉杆弯曲不产生附加力。为了保证拉杆的准直在两固定端应使用球形环状垫圈。

箝位式拉杆类限位，不是越多越好。虽然物体有六个自由度，三个平移、三个转动。作为称重系统实际上只有五个自由度。超过需要的约束反而会产生不需要的轴向力。一般在水平方向有三个限位器就足够，再多不仅会产生不需要的水平力，甚至会卡死。因此只有认真设计、安装到位和精细调整，约束限位才能得到所要求的效果。

四、动态称重

根据“衡器术语”对动态称重的解释：“在称量期间，载荷相对于衡器存在相对运动的称量。动态称量可分为连续和非连续两种”。然而，在不同时期出版的“衡器术语”，对动态称重一词的解释有所差异。按照国际建议，除 R76 号之外的衡器均定义为自动衡器，并认为其中 R50、R61、R106 和 R134 属于动态称重（WIM），R51 可静态称重也可动态称重。而 R107 与 R76 属静态称重。从概率论和数理统计的观点，对静态称重的测量是通过测量结果的分布函数来描述，而动态称重的测量对象是一随机过程，它的统计特性不能从一个记录的统计特性来得到，而只能从一组记录求得。从物理的角度，R60、R51，R106 和 R134 的称重过程主要是属于随机振动过程，通常我们是通过“滤波”或其它数字信号处理的方法来求得被称物的实际重量。而 R61 由于下落物料是一随机过程，所以对它的数据处理也按随机过程方法来对待，动态称重系统与静态称重相比较，除了同样要求精度或准确度、重复性和可靠性外，还多一项要求，系统的快速响应（Fast response）。

对于一个称重系统，研究它的动态特性，作为一阶近似，即为有

阻尼简单弹性系统。该系统的运动方程式为：

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0$$

上式可改写为：

$$\ddot{x} + 2S\omega_0\dot{x} + \omega_0^2x = 0$$

式中

$$S = c/2\sqrt{mk} \quad \omega_0 = \sqrt{k/m}$$

S 为无量的量，称为粘性阻尼因子，在 $S < 1$ 的情况下，上述称重系统的解为：

$$X(t) = Ae^{-S\omega_0 t} \sin(\sqrt{1-S^2} \omega_0 t + \varphi)$$

$X(t)$ 为一振幅按指数 $Ae^{-S\omega_0 t}$ 衰减的其周期为 T_d 逐渐衰减的正弦振动。其周期为：

$$T_d = \frac{1}{\sqrt{1-S^2}} T_0$$

注意到 $1/\sqrt{1-S^2} > 1$ ，故周期 T_d 大于 T_0

当这样的系统在瞬时加载时，要经过一定时间才能达到“静平衡点”。达到“静平衡点”的时间称为“调定时间”通常用下式来计算“调定时间” t_s 。

$$t_s = \frac{1}{S\omega} \text{Log}_e \left(\frac{1}{E\sqrt{1-S^2}} \right)$$

其中 E 是系统达到平衡点的“预定速率”，它的数值与达到“静平衡点”的精度有关。它越小、在 t_s 时间达到最终“静平衡点”的时间越小。

调定时间 t_s 与固有频率 ω_0 成反比。所以为缩短调定时间 t_s ，就需要增大 K 值或减少 m 值。然而静平衡位置都会随着 K 值的增大而变

小，从而使秤的灵敏度减小。另一方面，秤的刚性通常会随着 m 值的减少而降低，从而使秤的准确度也随之降低。鉴于上述因素、固有频率 ω_0 在衡器的设计中是非常重要的。我们早年为上钢五厂设计的轨道衡，秤台的固有频率为 60HZ 左右，前置滤波器的下限频为 10HZ，以适应 10km/h 下的机车动态称重。

R61 是属于在称重过程中，被称物的质量是随时间改变。测量误差与物料下落的高度、流量、流速、颗粒度和物料的物理、几何特性有关。我曾写过一篇文章对这方面做了基础性的计算，在此就不累述。

至于皮带秤承载器的响应的计算，我在“皮带秤承载器响应特性曲线”文章中介绍过。此响应曲线对传输皮带秤的影响无多大意义。但对定量皮带秤即所谓配料皮带秤，确很重要，因为它的响应是处于配料秤自动控制的环路内，对秤的控制性能的控制精度，甚至稳定性都有明显影响。

五、校验

皮带秤这类常用大型衡器，在校验时往往由于校准物料过大。用来校验的标准物料大大小于检定规程要求的数量往往常使用环码、链码等模拟试验装置来替代皮带秤的实物校验。仅用一种物料校验的结果确定定量包装秤的精度级别，这些校验都是违背 OIML 国际建议和国内检定规程的规定。这些做法，有的是由于条件限制，然而不少情况则是由于对基本概念不清所致。例如在提出用环码替代皮带秤的实物校验，虽然一方面是环码生产厂家的意愿，而一些计量部门的人由于对实物校验的实质不了解，结果花了不少的人力、物力、也无法实

现用环码替代实物校验。违背规程要求对衡器校验，结果是对优良的衡器也不能使反映出到设计的准确度，甚至说不清测量误差有多大。实际上对衡器的首检，随后检定以及为了保证衡器在使用中的准确性，按照检定规程对衡器进行校验，是确保衡器正确使用所必须遵守底线。既使在条件不具备时，也应根据检定规程的基本计量要求和衡器特点，对被校验给出科学合理的不确定度以确定该衡器能认可的误差并应将所用的方法、原理记录在案。

六、结束语

本文对衡器所需的基本概念做了说明，首先强调我们常见的绝大多数衡器是建立在力矩平衡的基础上。第二，现公布的七个 OIML 国际建议包含了绝大多数衡器类别。建议中规定的技术要求和计量要求是各类衡器的基本要求，是设计和制造这些衡器的基本依据。如果所创造的衡器偏离了该建议的基本理念和要求，不太可能制造出优良的衡器。衡器的好坏只有经过检验才能鉴别，如何遵照国际建议检验衡器是在实际使用时确保计量公正性的基础。第三，广义的限位是保证正确使用传感器和衡器机械结构稳定性的基础，使能确保传感器受力合理，机械结构在使用过程中的稳定性和重复性。没有优良的限位实现高精度的衡器是不可能。最后，随着工业技术发展衡器已逐渐成为生产过程环节的一个组成部分，动态称重就显得越来越突出。因此不能再停留在静态称重的概念来设计和制造动态秤。只有将能描述动态称重的概念，如秤的传递函数、快速响应时间、传感器或称重结构的振动模态、富利叶变换、信号处理理念等引入动态称重衡器的设计，

才能使动态称重中遇到的问题得到解决，使动态称重得到发展。