

如何提高皮带秤的测量精度

中国计量科学院 周祖濂

一、回顾

上世纪七十年代末，电子皮带秤在我国得到较广泛的运用。对它的称重原理的研究也得到厂家和有关部门的关注。中国计量科学研究所也曾组织了两次出国考察，比较全面地对国外皮带秤的面貌有所了解。同时也有国外产品进入中国，使国内厂家有了具体可参照、模仿的实物。南京第二钢铁厂的张家玮和中国计量科学院的施昌彦在赴美考察后写了一篇题为“电子皮带秤的生产、应用和检测”文章。比较全面的介绍了皮带秤的机理、安装以及美国对皮带秤法制管理情况。是一篇介绍皮带秤的好文章。它所涉及的内容和理念现今仍有参考价值。而之后有不少文章实属该文的重复讲述无太多新意。有关皮带秤的 OIMLR50 国际建议是较早在我国推行的国际规程。这些因素都对我国皮带秤的发展起着良好的作用。然而多年国产皮带秤相当多的产品依赖引进或模仿，对皮带秤的研究和技术创新不足。一些厂家对皮带秤的机理可以说是知其然不知所以然。这种情况近年有了明显进步，不少厂家对皮带秤的机理进行较深入的研究，使产品质量有显著的进步。另外对国际建议也是由盲从和被动的照搬，到现今参与国际建议的修订工作。这种盲从性只有在本国皮带秤质量提高的情况下才能克服。最显著的例子，在上世纪九十年代，皮带秤的最高准确度等级为 0.25 级。这样高的准确度与现在欲写入新的 OIML R50 的 0.2 级相比，从指标上看相差很小，特别是从首检和后续检定的最大公差而言，一是为 0.125%，另一是 0.1%。而在当时国内大多数厂家的产品均能通过 0.25 级的检定。在后来最高准确度等级改为 0.5 级，也没有人感到有多大问题也无疑义。近年由于很多厂家产品质量显著提高，而且对皮带秤技术也有较深入的研究，在皮带秤是否能达到 0.2 级这个问题上，才会得到广泛的讨论，而且目前也有少数厂家的产品能达到 0.2 级。我认为只有创造更多的与国外的交流机会，走出去请进来才能更好推进我国衡器产业的发展 and 进步。

二、皮带秤的特点

皮带秤在诸类衡器中属于比较特殊的。它是由承载器（习惯上称为秤架）与皮带输送机结合在一起才能构成完整的称重系统。在实际运用中往往皮带输送机的性能是皮带秤厂家所不能控制，而皮带秤的称量准确度在很大程度上又取决于输送机的特征、安装条件和载荷情况。第二，至今未能得到能准确描述皮带秤称重原理的解析数学表述式。因此很难对其称重信号处理得到准确称重结果。第三，只有能溯源的物料试验是公认的皮带秤的校验方法，为目前各种模拟载荷试验不能替代。但是物料试验是非常费时、费力的过程，而且往往在设置皮带秤的安装时，同时就要考虑到校准装置的建立，如选择安置校验称重斗或便于称重校验物料的汽车衡、轨道衡的场所。特别是对几千吨、万吨级的皮带秤的校验更是非常麻烦困难。皮带秤的校准在各类衡器校验中属最为困难。

鉴于皮带秤的安装和维护对它的称重结果的准确性影响极大。很多厂家甚至官方均对如何安装皮带秤和皮带输送机需遵循的准则都做了具体的要求。例如美国的 44 号手册中的“用户要求”就对皮带秤的安装和维护这些至关重要的问题作了规定。然而即便满足这些要求，也不能很好的预测皮带输送机的影响。以下推荐一些我认为较有用的资料供参考。

Daniel · J · Cockrell :“ Bulk material weighing applications and problem solving ” Bulletin OIML N°104 -Septembre 1986 P3-P8

本文最值得参考的是，文中列出的十幅有关皮带秤正确安装图。至今仍为很多文章引用，张家玮和施昌产的文章也多处引用该文，特别是图例。该文首次提出若能非常谨慎的安装和维护，皮带秤的精度可达 $\pm 0.125\%$ 或者更好。

H.M.HUMPERT “ TESTING of CONVEYOR—BELT SCALES ” Bulletin OIML N°98 -Mars1985 P10-P18

文章对物料试验和模拟载荷试验的差异作了数字的分析，以及说明不同载荷是造成皮带秤量程非线性的主要原因。

N.R.Johnsos and R.A.Epperson “ Modular Belt Scale Technology and Nationcel Type Evaluation Program(NTEP) ” 1992 Annual Technical Confrence

in Nashville Tennessee P28-P34.

这是一篇较早介绍单辊模块式皮带秤的文章、现在国内大多介绍此类皮带秤的文章，严格说只能算产品介绍。本文对其模块式皮带秤的特点以及与悬浮式皮带秤的比较，作了较详细的讲述。

罗才生、邹炳易、张家玮合著，以及方原柏所著的书，也是目前国内仅有的有关皮带秤的专著。总的说来，在国内要找到有关衡器比较有实质内容的文章和书不多。但据我所知国外厂家内部培训资料和技术文件是有实实在在可参考价值。而不是产品性能介绍的资料。

三、影响皮带秤测量精度因素

本节我准备就我初步的认识谈谈影响皮带秤测量精度的一些因素，供大家参考和讨论。

3.1 承载器：皮带秤的承载器俗称为秤架，皮带秤承载器的一个主要特点是被称物料的重量比承载器的重量较轻，甚至轻很多。这就是为什么早期的皮带秤承载器都采用带有杠杆，用附加重量来补偿承载器的重量，以减轻“皮重”。现今的承载器多为不带平衡重的双杠杆式或悬浮式多托辊承载器和模块式承载器。曾有人用承载器的响应特性曲线几何折线形状来评定其性能的优劣。根据系统理论对响应曲线的物理意义来解读各种皮带秤承载器的物理意义，才是对承载器性能的正确评估。而用响应曲线的几何折线来评估承载器的优劣是一种误导。

学过“信号与系统”和“数字信号处理”都知道，响应特性是描述一个常系数线性系统的时域（动态）特性。定义为当系统输入一个单位脉冲时的输出特性，一般用 $h(t)$ 表示。只要我们知道某一系统的响应特性函数 $h(t)$ ，对任意的输入 $x(t)$ ，就可由下卷积（convolution）得到系统的输出 $y(t)$ ：

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) x(t-\tau) d\tau$$

根据付利叶变换，响应特性函数的付利叶变换为：

$$H(f) = \int_0^{\infty} h(\tau) e^{-j2\pi f \tau} d\tau$$

是该系统在频域的表式，即系统的频率响应，或频率特性（频谱）。若 $X(f)$ 为系统输入信号的频率响应， $y(f)$ 为系统的输出响应，则系统的频域的输出和

输入的关系由下式表示。

$$y(f) = H(f) X(f)$$

输出为系统的频率响应与输入信号频率响应的乘积。若从“滤波”的概念讲，这一过程相当一个频谱为 $X(f)$ 的信号，经一个频谱为 $H(f)$ 的滤波器滤波后得到频谱为 $y(f)$ 的信号。例如理想的低通滤波器的频率响应可表示为：

$$H(f) = \begin{cases} 1 & f \leq f_0 \\ 0 & f > f_0 \end{cases}$$

其中 f_0 ，即是该滤波器的截止频率。

对于皮带秤的称重过程而言，我们每一次取样所得的信号大小，相应于承载器上物料的“平均”重量。为什么说是平均重量呢，由于皮带秤称重的承载器的结构不同，相同重量的物料，处在承载器不同位置，对用来反映物料重量的传感器所受力大小是不同的，而响应曲线则是对此过程的描述。所以对承载器上所有物料的总的重量大小相当处理不同位置物料重量的“平均”值，由数学计算的角度而言，即是对不同位置的物料的“加权”平均。而这个“加权”函数就是我们从时域得到的响应曲线。从某种意义上讲对信号平均相当于进行低通滤波。所以通过对承载器响应曲线求其相应的付利叶变换，既可得到承载器的响应的低通滤波器的频响，从而可判断滤波器的效果。由此可知悬浮式的承载器的滤波（平均）效果要比双杠杆式好。

真正判断皮带秤承载器的优劣，还是要根据承载器的结构、力学特性来分析。例如对双杠杆式承载器，它实际上是一对镜像对称由一个交点和一个称重点的秤架组成，是两个矩形承载器的组成一个秤重架。这种承载器的主要特性取决支点的性能。现在多使用耳轴型橡胶密封支承，这种与簧片支承相比，具有恢复性能好并能有一定的减震性。但当橡胶老化或被污染都将使性能变坏。

3.2 受力分析：皮带秤的称重过程比较特殊，被称物料通过皮带输送机的皮带经过承载器（秤架）称出其累积量的重量。因此最终累积重量除要测量物料的重量，还需测量物料通过承载器的速率。

通常用下式表示皮带秤承载器上的作用力：

$$F = ngL \pm 2 \frac{d}{L} T$$

式中 g 为单位长的重量， L 为托辊的间距、 d 为托辊的不准直度和 T 为皮带的张力。上式是在假定皮带为柔软且不可伸张的理想情况， n 个托辊上所受的力。而实际皮带不仅有刚性而且可伸长。可视为由托辊支承的弹性梁。

上式的物理意义在于，说明皮带秤的受力，除了受被称物重力的作用力外，还受皮带张力的作用。而皮带张力的的大小与使用的皮带输送机的特性有着密切的关系。所以皮带秤承载器的受力情况远非上式表示那样简单。然而很多人都试图根据上式由张力的影响来修正或补偿承载器的受力来提高皮带秤的测量精度。下面准备对大家容易忽略的承载器所受的其它一些干扰力，谈谈我的看法。

首先我们往往只注意张力的垂直分力对称重托辊的影响，即对 $(\pm 2d/L \cdot T)$ 项的影响。其实张力水平方向的影响，也是不能忽略，这是因为我们忽略的水平方向的张力，远远大于垂直方向的分力，另外在实际测量时张力的大小是在改变。这个力通过托辊支架将产生一个力矩，作用于传感器。众所周知，多托辊双杠杆支架结构的伏点就在于水平分力对杠杆两个支点所产生的力矩方向相反，使得对称重结果的影响可减至很小。所以对于全悬浮式和模块式的结构就需注意水平分力所造成的误差。至于使用振弦传感器的测力的 INFLO 的皮带秤的承载器的结构就与常规的用应变式传感器的承载器的结构就有很大的差异，也能减小水平力的影响。

第二，由于皮带实际可视为由一系列托辊支承的连续弹性梁。而且是二维的结构。这样的力学结构实际为静不定结构或起静结构。所以即使在完全均匀加载的情况下，我们也不可能通过力矩平衡和力平衡的方程求出每个支撑托辊上的受力和传感器的真实受力值。若再考虑到皮带的跑偏等的影响，问题就更为复杂。因此为了减小这些因素的影响，皮带秤承载器的调偏载和准直就显得极其重要。另外皮带的品质也是不可忽视的因素。这就是为什么至今仍未得出皮带秤受力的数学解析表公式的原因。

第三，前面已讲过，承载器的响应曲线，是反映单位质量脉冲通过承载器时，传感器输出信号的响应曲线。由图 1 可看出单托辊和双杠杆式秤架的响应曲线基本上是三角形，悬浮式在称重托辊期间是平直的，而双杠杆式仅中心两称重托辊间一段为平直。从矩形响应和三角响应的对应频域曲线，可看出矩形响应的频谱主瓣的宽度要比三角响应的小一半，即它的低频截止频率要比三角响应的低一半左右，滤波特性更好。由上述响应曲线可明显看出三种皮带秤结构的受力情况，除悬浮式外，其余两种物料在不同位置传感器的受力是差异很大，在中心位置有最大值，所以当物料分布不均匀时，造成的误差大于悬浮式。

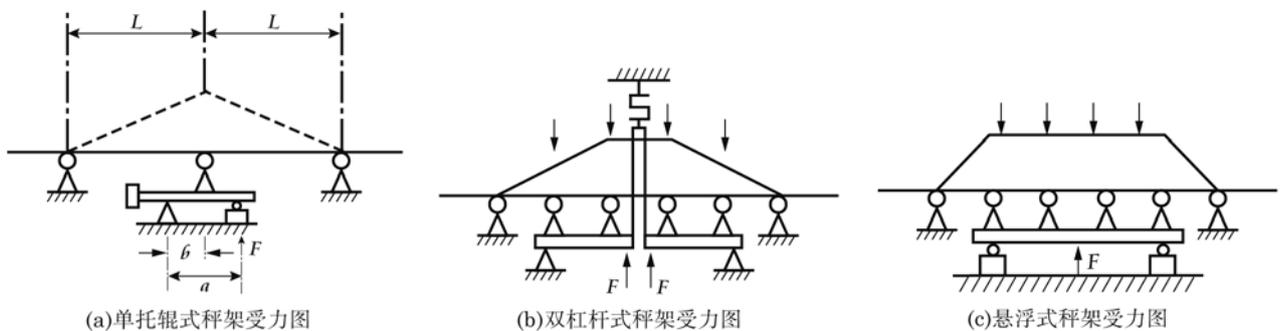


图 1 皮带秤秤架静力受力特性图

第四，输送机机架变形和振动的影响：由图 2 又可看出，由于机架变形和振动等的干扰对称量结果带来的影响是非常明显的。特别是由皮带刚性带来的附加力，不仅不能写出解析表达式，而且由皮带振动造成的随机干扰力也是不可预测和忽视的。即图 2 中 K_2 和 X_2 或 X_2 的影响。

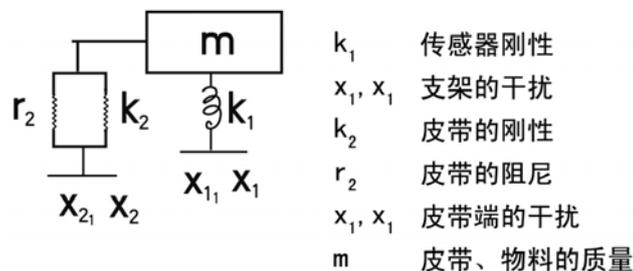


图 2

3.3 测速传感器：也称为位移传感器。由于皮带秤是用来称量通过输送机输送物料的累积总量，除了称重外，还需测量被称物料的速度。所以测速传感器的精确度和稳定性对皮带秤的准确度也是至关重要的，而且稳定性更为重要。但现

有大多数的测速传感器的精确度仅为千分之几。遗憾的是，很少有文章介绍位移传感器对皮带秤测量精度的影响。然而有的厂家对位移传感器技术指标的介绍，其精度让人难以相信，例如 INFLO 公司使用的安装在尾部滚筒处的转速计，滚筒的直径为 300mm，皮带长 200m，当皮带转一圈，滚筒转动 212 次，可产生 8.5 百万个脉冲，每个脉冲相当皮带长 0.023mm（23 微米）。但实际上由于张力、温度、湿度以及皮带的弹性引起皮带长度的变化远远超出该转速计的分辨力。

四、改进皮带秤性能的途径

为了提高皮带秤的测量精度，应当了解皮带秤的称重原理。特别是要走出一些长期以来的误区。首先由图 1 我们可以看到双杠式秤架和悬浮式秤架的响应特性曲线有很大不同。双杠式秤架、物料的重量，通过杠杆施加于传感器上。而且不论是称重托辊是四组还是六组或八组，只有中心一对托辊间的响应曲线是平直的。而悬浮式秤架，只要物料进入过渡托辊秤架就开始受力，且整个秤架区的响应曲线是平直的。可见即使皮带上的物料是均匀的，对不同的秤架皮带上各点对传感器的作用力是不同的。这对我们调整皮带秤的准直性是有实际指导意义，对于杠杆式秤架中心一对托辊的高差起主导作用，而秤架起始和终结的托辊的高差影响极小。而对悬浮式秤架而言，起始和终结托辊的高差影响最大，而对秤架内的托辊皮带的影响对秤台而言为内力，高差影响很小。

另外皮带秤的输送皮带是由一系列连续的托辊支承，由于皮带具有一定的强度，可视皮带为弹性梁。所以皮带与托辊的受力可视连续梁。这样的力学结构，即使皮带上的物料的重量是均匀的，托辊与皮带的接触是在同一水平面上。对每一个托辊上的受力是不可确定的，因为连续梁是结构力学中一种静不定结构。这只有从一维的角度来考虑，若从二维角度看秤台，除模块式皮带秤外，杠杆式和悬浮式皮带秤的秤台均为四点支承的秤台，也是属于静不定结构。再加上我们往往忽略秤台在运行时在水平方向要受到很大皮带张力作用，此力由于托辊支架的高度造成的力矩，对传感器的作用的干扰力是不可忽略。这些都说明在秤台的设计和调整方面对提高测量精度有很大的潜力。例如抗水平干扰双杠杆式要比悬浮式强。设计适合皮带秤用的传感器也是提高皮带秤精度的重要途径。例如模块式皮

带秤大多安装单点式传感器，这样可提高抗偏载能力。南京三埃公司使用的“二字式”传感器也是属于单点式。美国的 ARCH 公司所使用的皮带秤专用双端传感器 (dual-ended load cell)，据称这种传感器可将机架在平皮带运行方向固有的扭转倾向降至最低，使机架与相等的力施加于传感器向下一端和向上的另一端，消除托辊运动对调零的影响。

降低皮带振动和隔离支架来消除机架间振动的影响也是提高测量精度的重要途径。因为如果没有振动的影响，所谓的“皮带效应”的干扰力，可视为不变的系统误差，加予补偿修正。正是由于这种随机的振动通过皮带和机架造成的干扰力才是我们所说的产生“皮带效应”主要原因。例如由于皮带通过托辊时，因托辊不准直，将造成周期性的附加力，若托辊间距为 1.22m，带速为 2.8m/s，由此产生的周期性干扰力的频率为： $f = 2.8m/s \div 1.22m = 0.429HZ$ 。由机架造成的振动干扰频率更低。须足够长的时间或距离才能滤除。另外称重部分的固有频率由于干扰振动造成的共振等因素，对测量结果都会造成明显的影响。

传送皮带过长，也是影响测量精度的重要因素。国外厂家对皮带长度都有明确要求。这主要是因为皮带过长，无论用什么手段都很难保证皮带张力的稳定性。

总之，影响皮带秤精度的因素很多。然而从另一角度看，能改进皮带秤测量精度的方面也很多。

五、结束语

皮带秤、轨道衡和非连续累积秤都是称量大宗物料的衡器。其中称量值最大的数皮带秤。但就称量的物理过程而言皮带秤是最为复杂，至今没能给出称量过程的数学解析式，而且对信号的处理也无法象对轨道衡等动态秤，通过简单的数字滤波或其它信号处理方式将其干扰信号有效除去或减小，从而得到被称物的静止质量。而皮带秤由于所谓“皮带效应”的干扰主要来源于皮带输送机，而皮带输送机各不相同，就是同一台皮带输送机，也会因安装的条件和环境不同而其影响也不同，也会因输送的物料不同而不同，所以造成的影响也各不相同。因此从称重的原理而言，皮带秤值得研究和改进的空间很大。甚至可以说有全新革命性的测量方法，有待我们去努力。