

对皮带秤张力、在线检验和耐久性的讨论

中国计量科学研究院 周祖濂

【摘要】 本文对皮带张力、在线检验和耐久性进行了介绍和分析，对提高皮带秤性能的提高提出了一些看法。对带式输送机系统的设计标准做了简单的介绍。

【关键词】 有效张力；带式输送机系统标准；在线检验；耐久性

众所周知，由于皮带上的载荷造成下垂，对称重传感器产生一个附加力，其表示式如下：

$$F=2 \times \frac{d}{L} \cdot T$$

其中，d 为下垂距离，L 为托辊的间距，T 为皮带张力。由于各种因素的影响造成张力的不确定性。不少研究人员企图对此项附加力给出解析表示式。但均未成功。然而由此附加力造成的所谓“皮带效应”是造成皮带秤称量误差的主要原因。

为了对此项附加力做一些基本的描述。我们先观察初中物理书中描述的一个力学问题。在一平坦的地面上，拖一个布满均匀物料的皮带。众所周知，一旦克服皮带所受地面的静摩擦力，皮带就开始运动。若此时，牵引力始终保持不变，即等于地面的摩擦力，皮带将保持匀速运动。皮带秤的运动机理与此是相同的，只不过是减少了摩擦，支承皮带运行的是托辊。此时皮带所受的张力主要是托辊的阻力。

其实最早的带式输送机传送物料的过程与上述物理课本中的例子基本一致。最早的带式输送机是采用薄皮革和棉织物缝成无端输送带，绕在两端两个滚筒上。在十八世纪末制造了第一条带式输送机。该机的支承是个凹状槽，带子在槽上面滑动。到十九世纪初，才采用托辊作为带子的支承，并将输送带绕过两端的传动滚改为“改向滚筒”，依靠传动滚筒与输送带之间的摩擦力使输送带连续运动。被运物料依靠它与输送带之间的摩擦力随输送带运送到卸载地。带式输送机系统设计中，最主要的设计基础就是确定皮带的运行阻力，从而确定电动机的功率。所以合理计算皮带的张力，是正确选择输送机的前提。从另一角度看，设计合理的输送机也是保证皮带秤测量准确度的前提。

为了保证皮带输送机的质量以及能够满足日益发展的物料输送的要求。国内外都制定了有关带式输送机系统的设计标准，如国际标准 ISOSD48，美国标准 CEMA，德国标准 DIN22101，以及我国的 GB/T17119-1997。由于带式输送机系统发展很快，有关标准的更新也很快，例如 CEMA 标准于 1980 年颁布第一版，到 2005 年 4 月已发布第六版。这些标准间的差异主要体现在计算输送带张力方法上的不同。下面以 CEMA 标准为例，看一看输送带运行阻力，及输送机有效张力的计算公式，CEMA 标准给出的公式为：

$$T_e=LK_t+(K_x+K_yW_b+0.015W_b)+W_m(LK_y \pm H) \\ T_p+T_{am}+T_{ac} \quad (2)$$

式中： T_e ——有效张力，N；

L ——输送机长度，m；

K_t ——环境温度校正系统；

K_x ——用于计算托辊的摩擦阻力和输送带与托辊间的滑动阻力系数，N/m；

K_y ——用于计算输送带和负荷越过托辊时的综合挠曲阻力系数；

W_b ——单位长度输送带质量，kg/m；

W_m ——输送带上单位长度物料质量，kg/m；

H——物料提升高度，m；

T_p ——输送带绕在滚筒上的挠曲阻力和所有滚筒在轴承上转动阻力所产生的张力，N；

T_{am} ——当物料被加到输送带上时由于连续加速物料所产生的张力, N;

T_{ac} ——由输送机附属装置产生的总张力, N。

由式中可看出, 有效张力 T_e 基本上包括以下几项:

(1) 提升或下降物料的重力负荷;

(2) 输送机以额定输送能力运行时, 部件、驱动装置和所有附属装置的摩擦阻力;

(3) 输送过程中物料的摩擦阻力;

(4) 当物料由加料给料器供给输送机时, 连续加速物料所需的力。可以证明此项力的大小等于物料流量 (q kg/s) 乘以带速 (v m/s), 即 $T_{am} = q \cdot v$ 。

上面给出计算公式是所谓的“静态设计”公式。随着输送机向大型化方向发展, 宽带, 快速, 大运量和长距离运用。传统的设计方法难以满足实际需要。为此一些国家对输送带的纵向应力波传播特征及其对输送带张力的影响和起、制动等非稳定工况下驱动系统的特性及输送带张力等方面的研究, 提出所谓的“动态设计”的方案和依据。但就考虑张力对皮带秤测量准确度的影响, 考虑静态设计方案所给出的有效张力表达式基本上就能满足。因为我们所涉及的状态是输送机的稳定工作状态。而动态设计所研究的对向是输送机的非稳定工作状态和皮带的动态运动状态。在动态设计时不再将输送带视为刚体, 而是具有“粘弹特性”的粘弹性体, 其速度, 加速度和张力的在输送带各点均为时间的函数。

由以上的讲述, 主要说明作为影响皮带秤测量结果的皮带有效张力在皮带秤称重时不能完全确定的因素有关。也是造成皮带秤测量误差的主要原因。由(1)可知皮带下垂是造成传感器除被称物重量外的主要附加力。下垂量与皮带的张力、物料的重量有密切的关系。也是造成皮带秤量程非线性大的原因。根据我的经验为保证皮带秤的准确度。对皮带秤现场的校验应选择在该皮带秤实际使用的量程。这样可提高皮带秤的准确度, 降低非线性影响。

根据 CEMA 标准, 皮带相对于两托辊间的下垂距离(垂度), 可由下式来估计:

$$d = \frac{L^2 (W_b + W_m) g}{8T} \quad (3)$$

式中, d —垂度%; L —托辊间距 m ; T —输送带张力 N ; g —重力加速度 m/s^2 。对皮带下垂量根据经验, 当输送带在正常负荷运行时, 应保持垂度最大值不超过 3%, 当垂度大于此值时, 所输送的物料经常会撒出, 当输送带处于停机状态时, 应保持垂度的最大值不超过 4.5%。实际上垂度与托辊的槽角, 物料的粒度均有关。

我认为皮带秤的准确度和可靠性(耐久性), 主要取决于皮带输送机, 而不是称重架本身。因为皮带秤称重装置本身的耐久性是厂家可控的。据我所知, 国外皮带秤生产厂家, 均有一个调试皮带秤“静态”精度的调试台, 以保证称重架的计量和技术指标。

实际上对皮带秤的现场校验, 主要只有两项, 一项是空载的零点校验, 二是对该皮带秤的实物校验。而且考察皮带秤的稳定性或可靠性是通过检查这两项数据有无大的变化来确定该皮带秤能否继续使用。但是现场使用实物来校验皮带秤, 除非在建立皮带秤之前就按要求完成物料试验外。在皮带秤使用中要判断皮带秤是否能继续使用, 几乎都是采用各种模拟装置来校核。然而这些模拟装置均与皮带秤的实物校验间有无法克服的差异。所以试图建立一种替代皮带秤在物料校验的方法和装置始终是很多人的研究课题。

江苏赛摩(SAIMO)公司提出了“三桥自校准皮带秤”的方法。这与现有的挂码、链码及循环链砝的模拟方法相比, 是非常接近皮带实物校验, 具有全新概念的一种校准方法。我想对这种校验方法作初略的误差分析。赛摩公司所用的这种方法, 在计量学中是一种常用的方法。特别在力学测量中, 更是经常可见。例如使用杠捍原理, 用小质量来平衡大质量物体的重量; 使用液压原理, 用小质量生大的力值, 用来检定大力值传感器。但是在使用这种方法时, 需要满足两个条件。首先需

要通过某种物理“变换”将小的标准值“放大”到所需要的大量程值。然而由于这种“放大”作用原标准值的误差也被“放大”，再加上所用物理“变换”本身所带来的误差，例如上述例子中，杠杆比值，刀口摩擦力的误差；液压面积加大，面积比的误差。第二个条件就是需要提高标准值的精度级，使之能满足校准精度的要求。

赛摩“三桥自校准皮带秤”方法，使用的标准物料量为最大流量的 0.2%-0.5%。但是在此方法中无法使标准值的量进行“放大”，所以我认为在计量皮带秤中要将占 0.2%至 0.5%的物料值测到足够的精度，即 0.2%或 0.5%值的千分之一是极困难的。这相当用 2t 至 5t 的砝码来校准一台 1000T 的普通台秤，希望获得 0.1%的准确度是不太可能的。从另一角度讲，2%的物料流量为 800 累计分度数（这是以 0.5 级皮带秤为例）。而根据皮带秤重复性的允差的要求，即在同一载荷条件下，测得的任意两次结果的差值不得超过影响因子试验相应最大允许误差的绝对值。这也就是说若能满足赛摩公司自校方法的皮带秤，其累计分度值 d 和重复性，至少要比现有皮带秤要求的计量允差高一数量级才有可能得到较好的校准精度。所以我认为这种方法还有待进一步改进。

最后谈谈我对皮带秤“耐久性”或“可靠性”的看法。首先对皮带秤的“耐久性”或“可靠性”要先下一准确的定义，否则没有统一的想法，就无法讨论此问题。由于皮带秤“耐久性”不象非自动衡器和传感器耐久性的定义简单、直观。后者都是规定在若干次加载之后，仍能保持原有的计量技术指示。这样我们根据它的耐久性，来估计它的使用寿命。而对于皮带秤，由于与之相配皮带输送机质量，不可能由皮带秤生产厂家控制，因此很难估计一台皮带秤安装后的使用寿命，即在使用多长时间后，仍能保证它的计量准确性。即使我们能给出它的耐久性，在实际使用时，与非自动衡器等衡器一样，必须能根据耐久性，给出皮带秤的周期检定时间。更进一步还要求在周输期内，当对皮带秤的测量结果产生怀疑时，能够用较简单的方法，来判断该皮带秤能否继续使用。我们常用的模拟试验方法就是为此目的设计的。

为了提高皮带耐久性，需要研发出能够最大限度降低所谓“皮带效应”影响的皮带秤。为此我们再回过头来讨论“皮带效应”的影响。

由 CEMA 标准给出计算有效张力公式 (2) 不同于 DIN23101 和 ISO5048 等其它标准。它用三个系数 K_t 、 K_x 和 K_y 和三个附加张力 T_p 、 T_{am} 和 T_{ac} 表征对有效张力的影响。使得能比较清晰的描述有效张力的物理特征。 K_t 一般而言随温度的降低而增大，即输送在冷天运输时，托辊的转动阻力、输送带的挠曲阻力等将增大。 K_y 为皮带和负荷越过托辊时的挠曲阻力系数。可由下式估算：

$$K_y = A \times (W_b + W_m) \times 10^{-4} + B \times 10^{-2} \quad (4)$$

A 和 B 可根据皮带平均张力和托辊间距查表得到。 K_x 主要取决于托辊的摩擦阻力，影响托辊摩擦阻力的因素与辊的直径，轴承结构和密封条件等诸多因素有关。附加张力 T_p 是由皮带绕过各滚筒的挠曲阻力和各滚筒在其轴承上转动的阻力所引起。而 T_{ac} 由由输送机附属装置，如卸料车、堆料机、犁式卸料器、清扫装置和导料槽的阻碍所造成的附加张力。

需要提起读者注意的是，有效张力不等于输送带的张力，设 T_1 为拖动皮带转动动力滚筒趋入点的张力， T_2 为离开该滚筒的张力，则：

$$T_1 = T_e + T_2 \quad (5)$$

T_2 包括重力拉紧装置的外加恒定张力。还需注意，随着带式输送机向更快、更宽、更大型化发展，输送距离也越来越长。根据前面提过现代计算张力的观点，认为皮带式“粘弹特性”的粘弹性体。在输送机全长上输送带各点的速度、加速度和张力的动态特征均为时间的函数，在同一时刻各点在状态是不同的。最后还该注意，由于输送机驱动装置设立的状态不同，输送带的最大张力和最小张力的位置也不同。一般而言，对于无反馈驱动输送机，输送带承载段的最大工作张力，一般处于卸料点。对于反馈驱动的下行输送机最大张力一般出现在加料点。

但无论皮带张力的物理表述和影响因素如何复杂，通常都是用 (1) 式表示皮带张力产生的附加力。但是与实际皮带秤的工作情况比较，发现只用 (1) 式不能完全描述皮带秤的物理特性。因为 (1)

式没有考虑到皮带的刚性，特别是皮带因槽角弯曲后刚性将显著增加。当皮带运行不准直时，张力的弯曲刚度（ $I \cdot E$ ）的综合作用，会使皮带产生错误的负荷信号，其中 I 为皮带槽截面的惯性， E 为皮带的弹性模量。很多研究者在考虑到这种影响的情况，试图给出描述皮带秤工作原理的数学解析表达式。下面列出常引用的三个文献中的表达式：

美国 Thayer 衡器公司、F. Hyer 博士的式子

$$F-F_0 = n \cdot \bar{q} \cdot g \cdot \cos \theta + \frac{2dT}{L} + \frac{24EId}{L^3}$$

H • CoLijn 的式子

$$F-F_0 = n \cdot \bar{q} \cdot g \cdot \cos \theta \pm \frac{2dT}{L} \cdot K(x)$$

$$\text{式中：} K(x) = \frac{1}{1 - \frac{1}{x} \tanh x} ; X = \frac{L}{2} \cos \theta \sqrt{\frac{\cos \theta}{EI}}$$

以及 Scherck 公司，G Jost 给出的式子

$$F-F_0 = n \cdot \bar{q} \cdot g \cdot \cos \theta + \left[\frac{2T}{L} + \frac{24EL}{L^3 \cos^3 \theta} \cdot K^*(x) \right] \cdot d$$

$$\text{式中：} K^*x = \frac{1}{3} \cdot \frac{x^2 - \tanh x}{x - \tanh x} ; X = \frac{L}{2} \cos \theta \sqrt{\frac{T \cos \theta}{EI}}$$

从上述三个式子可以看出，在各类衡器的称重机理的解式表达式中，皮带秤的表达式是最复杂。遗憾的是，即使是如此复杂的表达式，其结果与实际称量相比仍有很大的差异。

然而从另一个角度来分析皮带秤的工作。若我们很好的保持被成物料流量的一致性。並假定此时皮带输送机 and 皮带称重秤的状态物保持不变。由（1）式引起的误差为：

$$\Delta F = \left[\frac{T}{L} \Delta d + \frac{d}{L} \Delta T \right] \quad (6)$$

由于此时物料流量很均匀，因此 Δd 和 ΔT 的变化应很小，可以估计 ΔF 的影响最多为 0.1% ~ 0.3% 左右。而且它的变化是随机的，皮带秤的称重结果是累计结果，即历程“平均”处理。按理讲此项误差，既使对 0.2 级皮带秤也不应造成严重的后果。然而应当指出，由此项附加力对皮带秤的量程的非线性影响是非常显著。解析式中第三项造成的附加力，均来源于弯曲刚度（ IE ），若根据上述假定，在称量过程中，这些系数保持不变，仍然只是物料流量和皮带张力的改变，由此造成的误差也很小。所以我们可以得出结论，皮带秤的主要误差是来自皮带输送机的影响。

为了提高皮带秤测量准确度，耐久性（可靠性）就需要设计出能抗“皮带效应”的皮带秤，这包括好的秤台结构和有效的信号处理。数字式的皮带秤也是提高性能的途径之一。

近年来国内一些皮带秤公司，建立实验室，通过自己的研究提高皮带秤的性能。这是我国由衡器生产大国，跨入衡器强国的必经之路。另外国内也建立了两个皮带秤试验、检定的基地，这也是值得庆贺的事，唯一感到不足的是，这两个基地的实验内容过于雷同。上世纪六十年代国外不少厂家都建立过皮带秤的实验装置，用来改进皮带秤的性能。起到了非常积极的促进作用。