

皮带秤误差理论与耐久性讨论

南京三埃工控股份有限公司 袁延强

【摘要】 以传统误差理论为基础进行讨论，仔细推导皮带张力的各种变化因素，最终推导出新的误差理论。新理论中明确提出了“皮带效应”的概念，但只作定性分析，不进行作用机理的探讨和数学模型的分析，只是介绍“皮带效应”这一概念及对皮带秤耐久性能的影响。

【关键词】 皮带秤误差理论；皮带效应；皮带特性系数

皮带秤自上世纪八十年代以来，经历了初期的快速发展，得到了普遍的应用。但与其它衡器如：汽车衡、轨道衡等相比，在准确度上仍存在明显的差距；更重要的是皮带秤的耐久性能存在明显的缺陷，而这一缺陷正是制约皮带秤进一步发展的最大障碍。本文拟从基本误差理论分析入手，结合笔者大量的试验结果，分析造成皮带秤准确度误差与耐久性缺失的根本原因。

一、传统的误差理论

传统的皮带秤误差公式如下式：

$$E_{\text{相}} = \pm 2KdT/qa^2 \quad \text{—单托辊误差公式}$$

$$E_{\text{相}} = \pm 2KdT/nqa^2 \quad \text{—多托辊误差公式}$$

式中： $E_{\text{相}}$ — 相对误差；

K — 皮带特性系数；

d — 荷重下称重托辊的垂直位移；

T — 作用于称量段的皮带张力；

q — 皮带单位长度上的物料荷重；

a — 托辊间距；

n — 称重托辊组数

为简化起见，取托辊间距 $a = 1\text{m}$ ，将上述单托辊误差公式作如下简化：

$$E_{\text{相}} = \pm 2KdT/q = \quad /q \quad \text{公式中：}$$

$$= \pm 2KdT$$

作单托辊皮带秤的受力分析图如图 1。

从受力分析图中可见，误差的原因是皮带张力 T 向上托起（或向下压）物料，因此产生的托起（下压）力即为误差，数值为 $2T\sin\alpha$ ，而由图 1 明显可见：

通过对误差公式中的几个影响因子进行分析,可对皮带秤基本误差理论得出以下几点结论:

(1) 皮带张力 T 是一个重要因素, T 值大小直接决定了误差的大小。由于皮带张力是皮带运输的基本属性, T 的存在不可回避。 T 值即使稳定不变, 其对误差的影响仍存在, 而 T 值的大小变化则可能引起皮带秤误差的变化, 这一现象影响皮带秤的耐久性。

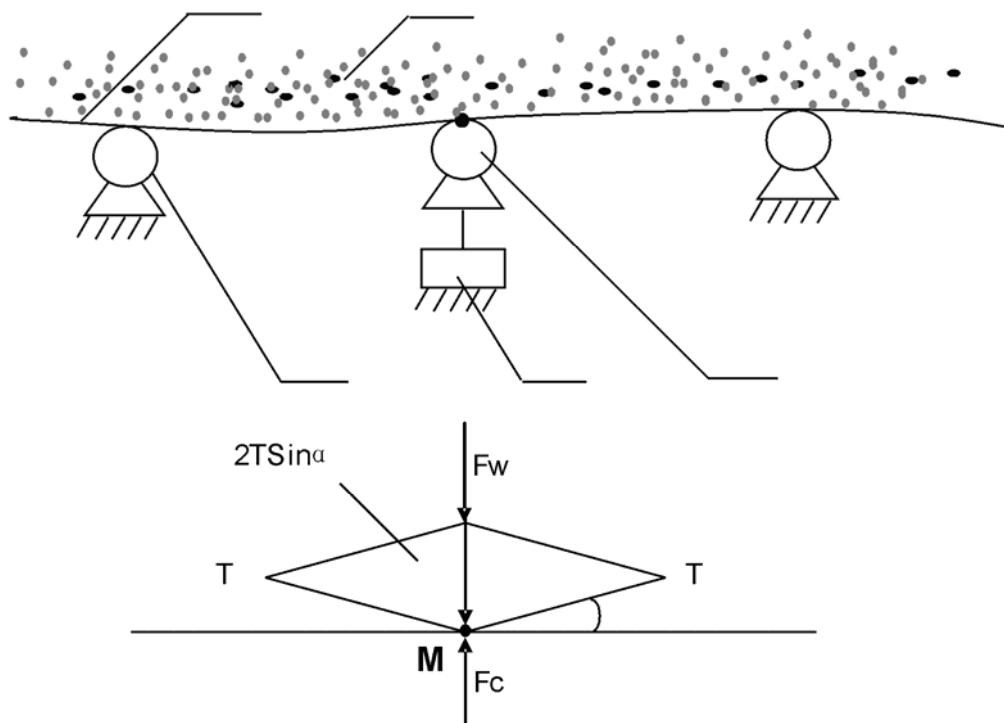


图 1

(2) d 是称重托辊荷重下沉值, 从上图可见: $d/T = \sin\alpha$ 。

造成 d 值变化的因素有传感器荷重下沉, 秤体的荷重变形等。显然这是皮带秤设备本身所造成的, 也是皮带秤制造厂能加以改进的主要方向。

问题是这一变形是和物料载荷相对应的、多数情况下有着较好的重复性, 显然与皮带秤耐久性差, 误差变化很大的现象并不吻合, 显然不是造成皮带秤耐久性差的主要原因。

(3) K 为皮带特性系数, 是一个与“托辊间距、皮带弹性、皮带截面形状和皮带张力相关的函数, K 值大, 皮带的刚度就越大”。这是一个颇为神秘的函数、难以捉摸。一直以来为大家公认、但无法量化的神秘变量。迄今为止, 尚无对它的定性描述, 更不用说消除它的影响了。

在上述背景下, 多年以来, 人们解决皮带秤耐久性能差、提高皮带秤准确度只能在以下二个方向作出努力:

(1) 提高秤体与称重传感器的刚度, 降低其在荷重时的下沉量。因而, 皮带秤秤架的刚度历来是皮带秤制造厂最为重视的方向。追求皮带秤架刚度的结果, 使得皮带秤十分笨重, 给制造、安装与维护带来了极大的麻烦、也带来了新的误差。

(2) 提高称重托辊的制造、安装精细度。如托辊的径向跳动指标由 0.2mm 提高到 0.1mm，称量段安装的共面性要求提高到 0.5mm 或更高，因而出现了采用进口轴承制造、安装调试时使用激光准直仪或光学瞄准镜进行校准的措施，以图解决皮带秤的准确度问题。

几十年来，皮带秤厂家在上述方面的可谓殚精竭虑，可皮带秤的准确度仍停滞不前、耐久性能上更是问题多多。原因何在？在经历了长达几十年的努力而成效甚微的情况下，该是仔细分析和反思皮带秤基本技术方向的时候了。

二、皮带秤误差影响因素分析

1、称量段荷重下沉是耐久性影响因素吗？

在前述皮带秤误差理论分析三个影响因素中：皮带张力 T 是皮带机的基本属性，我们无法改变；皮带特性系数 K 又不可知，当然也谈不上消除其影响；人们能做的只有在称量段荷重下沉上做文章了，所以一直以来提高皮带秤精度和耐久性能的措施只能是围绕它进行。

笔者设计过各种型式的皮带秤秤架，在刚度方面考虑得十分仔细。从理论计算到实测的数据看，大部分秤体的中心点荷重下沉量均 $\leq 0.5\text{mm}$ ，按照前述的误差公式计算，这一变形量对于皮带秤误差的影响量 $\leq 0.02\%$ ，基本可以忽略。而且，经过一段时间得运行后，重新测量，这一下沉量值基本不变。因此可以确定：在排除了结构明显缺陷后，秤体的荷重下沉量是基本稳定的、其造成的误差理也是很小的。而皮带秤的耐久性误差常常高达 1% 以上，显然荷重下沉不是皮带秤产生误差的主要因素。

2、皮带张力的影响有多大？

皮带张力在皮带秤称重时产生影响分力： $2T\sin\alpha$ ，是导致称重误差的重要因素。这一论点为所有研究与使用皮带秤的人们所熟知，并视之为皮带秤耐久性最大的影响因素。

下面我们来重点分析皮带张力的组成与影响机理。

(1) 皮带张力的检测

如果皮带张力对称重造成的影响确实是很大，那么检测皮带张力的数值并进行修正就十分有必要了。

我们设计了如图 2 的皮带张力检测方法。

图中，将二托辊间物料重量的 1/2 等效为 M ，测量在此等效重量下的皮带中心点下沉量 $H = H_2 - H_1$ ，并按上图中公式求出皮带张力 F_p ，则：

$$F_p = 2M/\tan\alpha$$

笔者在南京三埃工控股份有限公司的“QPS 皮带秤试验中心”进行过多次皮带张力检测试验，通

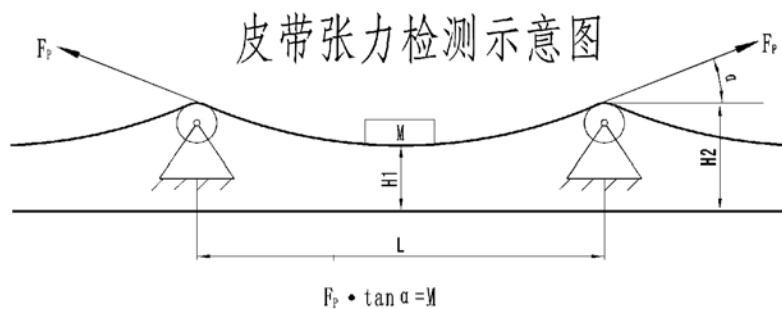


图 2

过改变皮带的张紧力大小来检测该试验装置的准确性，同时对此时的皮带秤的称重误差进行观察，发现以下几点现象：

a) 该测试方法基本准确。在一点检测皮带张力，当改变皮带张紧力后（通过施加于皮带机张紧重锤的水箱重量改变），所测得的张力亦变化，其变化量与水箱重量的变化基本相当，说明了这种方法的基本原理是正确的。

b) 在两次重复试验中，皮带张力的数值及变化量基本相同。也就是说，皮带张力的状态与变化是重复的。

c) 在相同的皮带张力作用下，两次相同的试验，误差可能不同，存在不同步现象。

在上述皮带张力可以准确测得的情况下，怎么应用这一皮带张力、在基本误差公式中如何处理？显然，到目前为止尚没有明确的用法。

(2) 皮带张力的构成

作用于称量段的皮带张力由以下几部分力组成：

a) 皮带张紧力

这部分力就是张紧装置产生的力，在重锤式张紧皮带机中为重锤的重量值，这个力是固定的、可知的。

b) 皮带机系统的阻力

这部分力由皮带机系统摩擦力组成，主要由各托辊的转动阻力形成。相对较小且较稳定，在一段时间内，这一数值也基本稳定，但测量这部分力有困难。

c) 物料形成的阻力

由于皮带在物料作用下产生下垂，所以在皮带向前运动时，会产生一定的阻力，这部分力随物料多少而变化，是影响皮带张力恒定的主要因素。同时由于物料对托辊的压力导致轴承的阻力增加；皮带机有向上倾角时物料提升所需的张力就大等因素，使得此时的皮带张力变化较大。当皮带秤安装靠近头轮时，这一影响会更大。

为了测试这一阻力数值，我们采用了如图 3 所示的测试方法：

物料导致的托辊阻力变化示意图

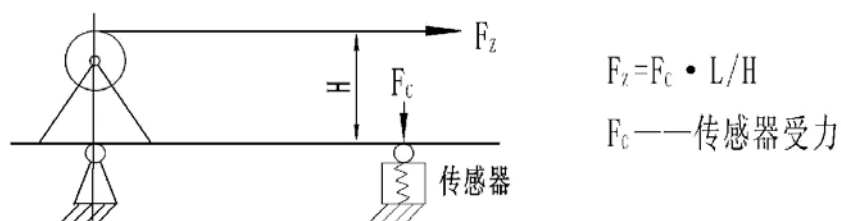


图 3

该方法将一组托辊安装在一转轴上，安装一传感器检测物料运行时产生的旋转力矩，从而推算出该组托辊运行方向上产生的阻力。表 1 为笔者在“QPS 皮带秤试验中心”4 号皮带机上试验的数据：

表 1 物料运行托辊阻力测试数据

尾轮前第 9 组托辊		尾轮前第 25 组托辊	
流量 t/h	水平力 kg	流量 t/h	水平力 kg
0	0-0.5	0	0-0.2
200	4.69	200	3.94
500	16.03	500	12.83
1000	31.59	1000	25.12

通过以上装置与试验数据表明：

A. 托辊组的阻力与流量大致成线性关系，即流量大，阻力同步增大。

B. 处于皮带机前部的托辊组水平阻力较小，这与该处皮带张力较大，皮带垂度较小，物料运行时产生的水平阻力也较小有关。

C. 同样结构的托辊组测试，二此测试的数据会有一些差距。其中有可能是试验的精确度影响，也有可能是该二组托辊本身差异所致。

显然，上述每一组托辊都会产生新增的阻力，而任一点皮带的张力数值是其后面所有托辊新增阻力之和，所以，皮带秤越往前装，皮带张力的影响就越大。

在对上述皮带张力影响分析后我们发现：张力构成中，前二种基本固定，物料产生的阻力则与流量大致成正比，即也是相对固定的、其对皮带秤耐久性的影响也就很小。因此我们可以认为：皮带张力也并不是皮带秤耐久性差的主要影响因素。

3、皮带状态的影响

在流量大致接近的两次检定中，皮带张力的变化其实是很小的。前面分析过，称量段的荷重下沉量也可以认为基本不变，但标定结果则可能变化较大，尤其是这二次标定是在一定时间间隔后进行时，这种变化尤为明显。因此可以确定，另外还存在着影响皮带秤耐久性的重要因素。

在此我们重点研究第三个影响因素：皮带特性系数 K。

(1) 二组试验数据的启示，见图 4、图 5。

4号皮带秤温度变化误差曲线

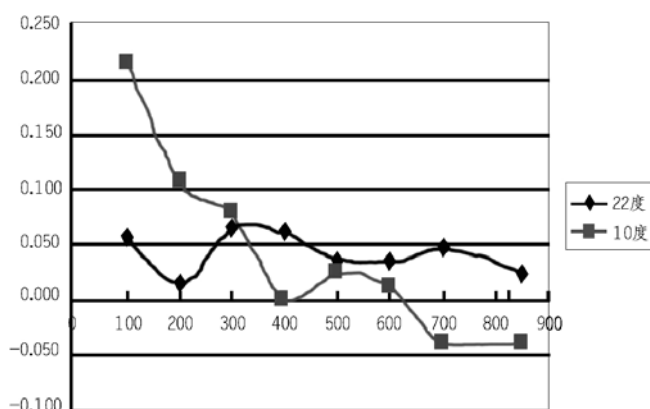


图 4

表中：横坐标为流量 (t/h)、纵坐标为误差 (%)

上述试验是在南京三埃工控股份有限公司“QPS 皮带秤试验中心”进行试验测得的。无论从试验顺序、流量及料量都十分接近，可以认为是两组完全一样的实物测试。

第一组试验的第一次在 2011 年 11 月 18 日进行，环境温度为摄氏 22 ；第二次试验在 2011 年 11 月 21 日进行，恰逢降温、环境温度为摄氏 10 。从两次试验的误差情况看，总体误差水平接近，但降温后误差呈现小流量正向增大，大流量负向减小的趋势。

4号皮带秤3月和6月试验

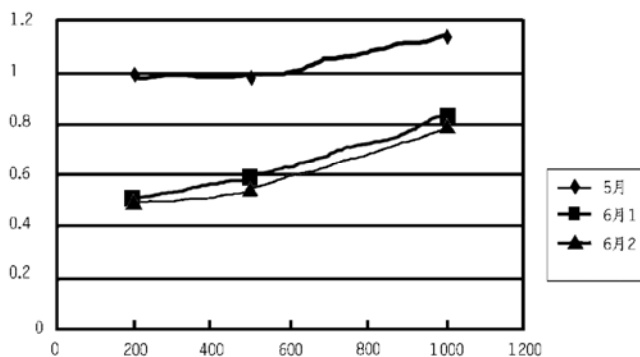


图 5

第二组试验分别在 2011 年 3 月和 6 月两次进行，也在“QPS 皮带秤试验中心”进行。在三个月完全没有任何机械、电气调整的情况下，检定的流量、物料料量、流程均十分接近的情况下，误差明显变大、出现了系统漂移。

上述二组试验数据有以下几个特点：

- a) 试验条件十分相近：试验流量、试验物料量、操作环节等基本相同；
- b) 被试皮带秤和皮带机均未进行人为的机械、电气调整，不存在称量段荷重下沉量不同、也

不存在皮带张力变化，可以排除这二个因素的影响。

c) 对比试验的时间不同、温度不一样，其影响的只能是皮带状态的变化。

以上二个试验说明：皮带状态的变化，我们称之为：皮带效应，明显地影响皮带秤称重的数据稳定性、即皮带秤的耐久性。虽然皮带效应，目前还没有定量的分析公式，甚至是没有准确的文字表述，但它确实存在、并且是影响皮带秤耐久性能的重要的、甚至是主要的因素！

(2) 皮带效应对皮带秤线性度的影响

检定规程规定：皮带秤进行实物检定时，应在 20 - 100% 的流量范围内均能满足允许误差要求，这是一个颇艰巨的任务，尤其是高精度皮带秤，往往是难以完成的任务。为此，很多皮带秤常通过软件修正来实现。

笔者经过大量的试验发现：皮带秤的量程线性度曲线并不是一个不变的曲线，而是一个随着时间变化的曲线，即使在一天中的上午和下午，线性度也会发生变化。对于低精度要求的皮带秤而言，这一变化的影响并不大，但对于高精度皮带秤而言，这个变化是致命的。即使采用通常的软件来修正，也不能保证线性度误差不超标。

下面我们从以下几个方面来探讨分析产生这一现象的原因：

a) 是称量段荷重下沉引起的吗？

我们通过静态加载试验发现，皮带秤秤架荷重下沉量呈现出很好的线性。这是因为称重传感器本身是一个线性变形元件，而秤架多为刚性很好的钢结构件。在弹性范围内，严格遵守“虎克”定律，不会产生非线性现象。因此，称量段荷重下沉不是产生线性度误差的原因。

b) 是皮带张力变化造成的吗？

不同的流量下皮带张力当然是不同的。但前面我们已经介绍过，皮带力的增加基本与流量成正比，两次相同的试验情况下，皮带张力的数值基本是相同的。因此我们认为：“皮带张力的变化造成线性度变化”是说不通的。一台秤重新安装一次或者重新调整称重托辊上表面的平面度，就会造成线性度的明显变化：原本上凸的误差曲线，会变成下凹曲线。类似的现象在我们的试验中经常碰到，充分说明非线性误差并非是由于皮带张力变化所引起。

上述分析表明：皮带秤的误差发生的各种变化与称量段的荷重下沉无关、也与皮带张力变化无关，因此可以把其归结于皮带状态造成的影响这种变化，这个现象正是皮带秤耐久性能差的典型表现。

三、新的皮带秤误差公式

在本文开头提到的皮带秤误差公式：

$$E_{\text{秤}} = \pm 2KdT/qa^2 \quad \text{— 单托辊皮带秤误差公式}$$

$$E_{\text{秤}} = \pm 2KdT/nqa^2 \quad \text{— 多托辊皮带秤误差公式}$$

公式包括了上面分析的三个因素：d、T、K

公式中 d 和 T 是变量、K 是一个固定的系数，只有 d 和 T 发生变化时、才会产生误差。而在我

们上述的分析中，很多时候 d 和 T 并没有发生变化、误差却发生了变化。这就无法用上述公式来解释皮带秤产生误差的原因了，这一矛盾说明 K 不是一个衡量、它的影响在上述公式中并没有表述清楚。

我们试用下述新的误差公式来分析皮带秤的误差：

$$E_{\text{相}} = \pm (2dT + Kq) / nqa^2$$

在新的误差公式中，我们将 K 和 q （物料流量）的乘积作为另一个变量进行分析。

公式中皮带特性系数 K 是一个独立的变量，是一个随着流量变化的函数，它和 d 和 T 不存在对应的关系， K 的影响是单独存在的。

四、新的误差公式的意义

在老的误差理论公式指导下，皮带秤技术发展了几十年，鲜有大的突破，特别是耐久性差的问题始终不能解决。说明原有的理论已经不能准确地解释皮带秤误差产生的原因，难以推动皮带秤技术的进步了。

新的误差公式把皮带特性系数作为单独的一个误差项列出，表达了除已知的张力 T 和 d 两个影响因素外，还存在着另外一个独立的影响因素—皮带效应。

因此提高皮带秤的精度和耐久性指标不能仅依据传统的理论在制造和安装上追求更精、更高、更极致，而应认真地进行探索皮带效应所造成的影响、寻找新的出路。

根据我们多年来的试验结果，笔者认为皮带特性系数具有以下特性：

- 1、其与皮带自身特性，如皮带厚度、硬度、材质等紧密相关；
- 2、与皮带在皮带机上截面形状有密切关系，如皮带 U 型的弯曲程度、托辊组的槽型角度；
- 3、与温度紧密相关，包括环境温度和皮带运行后的温升；
- 4、与皮带机托辊的状态紧密相关，不仅仅是皮带秤秤架托辊的状态，还包括两端延伸相当距离的皮带机上托辊组的状态；
- 5、该系数不是一个固定值，是一个随上述因素变化的复杂函数。无法定量描述并消除其影响，也难以通过采集上述各影响因素推导计算出该函数值；

6、对于某一条皮带机而言，当其各项参数都已确定后，在温度和工作状况发生变化时，该函数会在一定范围内随之变化。也就是说，每一条皮带机都有一个自己的特定的特性系数、各不相同。

通过上述描述可以看出，皮带特性系数是一个蒙着神秘面纱的、尚未被人们充分认识的影响因素。如何破解这一难题、彻底解决皮带秤的耐久性问题是我们亟待进行的任务。笔者认为：首先要打破旧的误差理论的束缚、正确地认识皮带效应及其影响；然后通过一定的实物试验、找出其变化及影响规律，编制相应的软件进行量化分析、处理、建立每一台皮带秤的特定的特性函数和修正公式，进行相应的补偿和修正，才能真正的解决皮带秤耐久性问题。

这一工作受皮带秤工作条件、标定手段等限制，存在相当大的困难。一些理论上可行的方法，在实践中难以实现，使得探寻之路会更为艰辛。

皮带秤耐久性问题作为动态衡器中的老大难问题，许多人为此付出了汗水和艰辛，探索各种理论和解决方法。我们身为其中一员，目标是在不久的将来，彻底解决皮带秤耐久性问题，使皮带秤真正成为：使用免维护、并能长期地保持 0.2% 的称重准确度的“终极皮带秤”！在追寻这个目标的道路上，我们已取得了可喜的进展，我们还将继续努力！

参考文献

1. 《电子皮带秤》 作者：方原柏

作者简介

袁延强，男，1954 年生，汉族，江苏南京人，南京三埃工控股份有限公司董事长、总经理，南京大学 EMBA 硕士毕业，长期从事皮带秤的研发工作、阵列式皮带秤发明人。