

新颖有效的皮带秤误差分解控制方法

南京三埃工控有限公司 盛伯湛

【摘要】三埃公司提出了一个不同于经典理论的误差分析式：把电子皮带秤的总体误差分解为一般电子衡器所共有的误差和皮带秤所特有的误差两大块。前者源于承载器构造与测量电路；后者来自于“皮带效应”，并进一步按所处位置再分成两部分。从而可对各部分的误差采取不同的专门措施，以“分割包围、各个击破”的手段，获得了明显的实效。

【关键词】高性能电子皮带秤；误差分析；误差控制；皮带秤误差分解控制方法

1. 问题的提出

1.1 陷入尴尬的经典误差分析式

皮带秤自从二十世纪初问世以来，一直因其高效、便捷成为散料连续自动称重的首选设备。然而，由于皮带秤不同于一般的非自动衡器，“皮带效应”的影响巨大，又难以捉摸。因此，皮带秤的称量误差不易受到控制，尤其难以胜任贸易结算和其他有高准确度计量需求的重要场所。

要提升皮带秤的性能，关键在于厘清其误差，并有效管控各个误差因素。而要有效实现这一目的，我们需要有适用于在工程技术条件下能切实发挥作用的误差分析式作为理论基础。下面是目前皮带秤业界人士惯常采用的误差分析式^[1]：

$$E_R = \pm 2\kappa dT/nql^2$$

式中：

E_R —相对误差， κ —皮带刚度系数， d —在物料荷重的作用下称重托辊的垂直位移，

T —皮带张力， n —称重辊组数， q —单位长度皮带上的料重， l —托辊间距

其中系数 κ 是一个与皮带的弹性、垂度、横截面和槽型，环境气候，以及本表达式中的 l 、 T 等另几个变量等多重因素相关的复杂多元函数，皮带秤载荷与工作状态是动态随机变化的，因此皮带的刚度系数不是一成不变的，受皮带刚度影响的皮带张力也会随之不断地变化，形成皮带秤特有的所谓“皮带效应”。同时，皮带作为多支承的梁又是静不定的，无法构建解析式，目前也没有公认的经验公式，通常的系数补偿法不能适用。而且由此表达式可见，想要减小误差 E_R ，就得减小 κ 、 d 、 T ，增加 n 、 q 、 l ，但却陷入了相互矛盾、进退维谷的尴尬境地。对此，笔者曾撰文剖析过^[2]。

正因为传统皮带秤误差理论的不完善，皮带秤的误差始终不能得到有的放矢地控制，皮带秤的性能也就无法在技术上取得实质性的突破。

1.2 实践对于皮带秤误差分析式的要求

自上世纪八十年代后期始，尤其是本世纪以来，我国的一些皮带秤企业在高性能皮带秤的研发方面进行了

不懈的探索。鉴于皮带秤易受环境、工况的影响，许多标榜准确度 0.5 级皮带秤的实际误差往往达 2% ~ 5% 甚至更大，需要靠频繁的调整与维护才能勉强维持正常工作。最近几年，“在线校准和在线故障诊断”技术特别受到青睐，试图能让皮带秤的准确度、稳定性和耐久性等性能取得实质性的改善，然而大多数实例都未能实现这个愿望。下面把有关典型略作分析：

所谓“在线校准”大多是模仿非自动衡器的校验方法，采用模拟载荷装置对皮带秤传递量值。通常是先在输送机皮带无物料时校零点，再在承载器上加载棒形码，以模拟载荷的固定质量替代实物校量程；或者先对铺有物料的皮带调零点，接着对铺有调零点物料的承载器加载棒形码，将棒码质量叠加到物料质量上校量程。然而由于皮带秤迥异于非自动秤的特性，棒码的性状、质量密度分布与加载位置又都与实际被称物料大相径庭，无论是单纯采用棒码，还是采用部分物料参与校验过程，都无法模拟真实的、随机变动的“皮带效应”，实际效果并不理想。

典型的“在线故障诊断”是“双秤架”技术或由此发展而来的类似方案，通常是在同一台皮带输送机上配置 2 套或更多套的称重单元（各称重单元不连续排布，相互之间装有过渡的输送托辊用于隔离），其中 1 个称重单元装有供校验的标准棒码装置。该类技术的出发点认为，若这几个称重单元都已经过校零，并对额定载荷运行下的示值调整成一致，那么这几个称重单元对所通过物料同时测到的量值也应该一致，倘若互差超出预设范围，就故障报警。该技术的纰漏首先在于，把“同一时刻”的测量值误作为对“同一载荷”的测量值了，忽视了实际工作中载荷流量的波动及同一载荷经过不同位置称重单元的时间差，其数据处理结果的准确性就会打折扣。其次，该技术在故障报警之后的修复调整过程也欠严谨，在未能证明用模拟载荷校验同实物校验结果一致程度的前提下就用来替代实物校验（倘使不用模拟载荷而用实物校验，那么就又达不到其想要方便快捷的初衷了）。

我们认为，传统的皮带秤误差控制方法之所以不能取得明显的成效，是因为皮带秤的总体误差不仅包含类似非自动衡器那种主要由承载器构造与测量电路引起的误差（为行文方便以下简称之为 A 类误差），还包含其特有的由于“皮带效应”引起的误差（以下简称之为 B 类误差），两者性质迥异，却又交叉重叠在一起，不把它们厘清，控制起来就难免顾此失彼，事倍功半。因此，真正能在实践中起到有效作用的皮带秤误差分析式，必须把两类不同性质的误差分离开来，以“分割包围、各个击破”的解决思路，分别采取针对性的办法，方能有效地控制皮带秤的总体误差。

2. 新颖的皮带秤误差分解分析式

经过对电子皮带秤数十年的悉心研究，南京三埃工控有限公司的工程技术人员摸索创立了下列皮带秤误差分析式（相应专利：皮带秤误差分解控制方法及其系统组成，公布号：CN105823534A）：

$$\Delta = \Delta_A + \Delta_B \quad (式 1)$$

式中：

Δ — 皮带秤的总体误差

Δ_A — 承载器构造与测量电路引起的误差（A 类误差，该误差与一般的非自动衡器类似）

Δ_B — 皮带效应引起的误差（B 类误差，该误差是皮带秤所特有的）

2.1 A类误差的细化分析

考虑到环境气候等因素对于误差的影响，上述式1中的 Δ_A 可细化为：

$$\Delta_A = k_A \delta_A \quad (\text{式 A1})$$

式中：

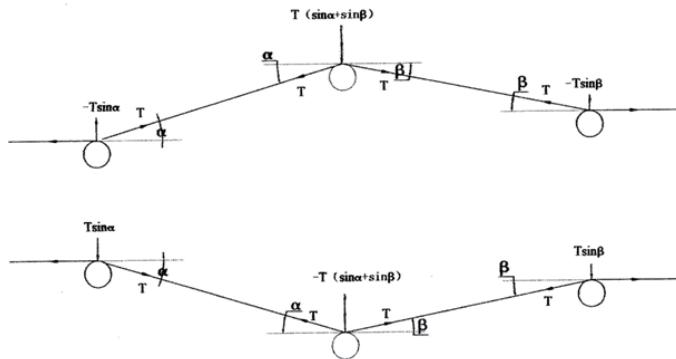
δ_A —称重传感器及其通道在参考条件下的A类误差

k_A —称重传感器及其通道A类误差的影响因子参量

鉴于称重传感器的温漂是影响衡器静态性能不稳定的最重要原因之一，只有对环境温度变化进行恰当的补偿才有可能造出高性能的皮带秤。在工程实践中我们可以把影响因子 k_A 简要地视为称重传感器的温度特性参量。

2.2 B类误差的细化分析

由于皮带会在自重和载荷的作用下产生垂度，而且皮带秤各组托辊的周面母线也不可能完全装配在同一个水平面之内（即存在所谓的“准直性”误差），使皮带与水平面形成夹角（参见下图），使原本沿皮带伸展方向的张力会在竖直方向产生分量。当皮带张力的竖直分力作用于输送托辊时，对计量没有影响；而作用于称重托辊时，就会改变称重传感器输入信号的大小，从而干扰称重计量。这一干扰历来被称重业专家们认为是皮带秤误差的重要来源^[3]。



如图所示，当某一托辊高于或者低于相邻托辊时，该托辊就会在承受载荷重力的基础上附加皮带张力的竖直分量；同时按相应的托辊高度差，在其前后相邻托辊上分别形成大小相等、方向相反的附加力；而该托辊所承受的附加力等于其前后两相邻托辊附加力之和的相反值。

南京三埃公司发明的阵列皮带秤[®]具有多个连续不间断排布的独立称重单元，除了阵列首末端两个称重单元的某一侧是直接装在输送机架上的输送托辊，其余称重单元相邻的前后托辊都与称重传感器相关联，因此全部非首末端称重单元所受张力的代数和为零。也就是说，由多个称重单元构成的阵列皮带秤具有抵消阵列内部张力竖直分量影响的自补偿机制。或者说，阵列皮带秤[®]部分类似于输送机式承载器型皮带秤，可以把位于非首末端称重托辊处的皮带张力转化为测重系统的内力（这就是阵列皮带秤的“内力理论”，笔者曾撰文分析说明，详见去年的《衡器》杂志^[4]）。不过，阵列首末端两个称重单元只有一侧的反作用力作用于称重传感器，因此能抵消的张力分量只能是其中的一部分。

因而，根据阵列皮带秤[®]具有上述两类所处位置不同的称重单元，可对式1中的 Δ_B 进一步细化为：

$$\Delta_B = \Delta_{BM} + \Delta_{BE} \quad (\text{式 B1})$$

而根据上述分析 $\Delta_{BM} = 0$ ，于是有：

$$\Delta_B = \Delta_{BE} = \kappa_B \delta_{BE} \quad (\text{式 B2})$$

式中：

δ_{BE} — 参考条件下称重托辊与相邻输送托辊之间的皮带效应误差

κ_B — 皮带效应误差的影响因子(温度影响)参量

3. 在误差分解控制方法指导下设计的皮带秤系统

皮带秤误差分解方法启示我们，要针对不同种类的误差项分别采取适用的办法，在系统结构组成上配置能有效管控相应误差项的专门部件，使皮带秤的性能提升到极致。下面将简要阐述能有效消除或降低相应类别误差的对应措施。

3.1 在每个称重单元上都配备挂码机构以消除 A 类误差并分离出 B 类误差

我们知道，非自动衡器是可以用标准质量块来校准的。要是对皮带秤的称重单元配备了挂码校准装置，在没有皮带的状态下(即排除了皮带效应的影响)用挂码予以校准，就有可能把该称重单元的A类误差消除掉。

当一台皮带秤具有多个称重单元时，本文介绍的新技术将对每一个称重单元及其相连的测量电路通道全都予以校准(而不是像当前大多数“在线校准”技术那样，仅对其中一个称重单元配备标码校准装置)。通过对这些称重单元逐一施加标准载荷，把它们的输入-输出曲线调整得一致(这时各称重单元的相应通道输出相等的“理想值”)，就能够将 Δ_A 消除掉。此时若各单元通道还同“理想值”存在少许不一致程度，还可以将此偏差值 $k_{Aj} \delta_{Aj}$ 存入累计指示器在称重过程的数据处理中予以补偿抵消。

在皮带秤正常投入运行之后，皮带效应的影响量就会叠加到 Δ_A 之上，这时不同位置的称重单元的检测结果往往并不相同，此时测量结果与经用 Δ_A 修正之后“理想值”的差值则可认为是由“皮带效应”引起的，从而也可得知相应单元的 Δ_B ，从而把“A类误差” Δ_A 与“B类误差” Δ_B 有效甄别开来。

倘若仅对多个称重单元中的一个单元配备挂码，就不能方便地对每一称重单元进行静态校准，它们的输入-输出曲线也无法调整得一致，也就无法分离不同来源的误差。

3.2 事先测定每一个称重传感器的温度系数以实现个性化补偿

实践经验告诉我们，对多个称重传感器用同一个“校正系数”实行所谓的温度补偿往往并不能收效，有时甚至还会越“补偿”结果越差。实测数据表明，即使同型号、同规格、同批次的称重传感器，它们的温度特性参量差别也不容忽视。温度补偿系数不具有普适性，每一支称重传感器都有其特有的性能曲线，然而称重传感器制造厂通常对其产品的温度系数仅标注最大允许值，并不逐支提供实际值。对于一般的称重传感器，例如市场占有量较大的C3级产品，如不能逐一加以个性化的补偿，就会难以满足0.5级皮带秤的长期性能要求，更

不用说 0.2 级了。因此，预先对于高性能衡器所用的每支称重传感器温度特性曲线逐一测试、记录，求出各个称重传感器独自对应的温度补偿系数，是十分必要的。

为了把温度影响管控住，南京三埃公司研制了专用的工艺装备，对所生产高等级皮带秤使用的每一支称重传感器的温度系数事先测定，实现一对一的补偿。相应的专利技术有：多称重传感器温度特性测试装置（2010202838970）、称重传感器温度性能自动测试系统（2010102470978）、皮带秤整机动态温度试验方法及试验设施（201310367066X）等。

3.3 配置温度传感器以实现按环境状况实时补偿

一般的皮带秤仅配置了称重传感器与位移（速度）传感器，个别还配置了位置传感器或带形检测装置，但大多没有配置温度传感器。然而，环境温度对于称重传感器的输出特性及跟皮带张力关系密切的输送带刚性等诸多因素有着举足轻重的影响，温度补偿对于高性能衡器的重要性是不容忽视的。

南京三埃公司还利用 ZLNET™ 物联网技术（相关专利：皮带秤远程支持系统及远程支持方法（201310068563X））对在用皮带秤的状态与环境温度的对应关系进行长期监视，寻求相应的关系函数并将其用于数据处理，对不同温度下的测量值予以补偿修正；那么就能使皮带秤总体误差的成分，无论是来源于承载器构造与测量电路的，还是来源于“皮带效应”的，都将受到有效的控制。

3.4 用多称重单元阵列来抵消称量段内部的 B 类误差并分离出首末端的 B 类误差

如前文 2.2 节所述，对于多称重单元阵列的 B 类误差 Δ_B ，阵列内中间部分的 Δ_{BM} 可以被抵消，仅剩阵列首尾的 Δ_{BE} ，即 $\Delta_B = \Delta_{BE}$ 。从而使对于 B 类误差的数据处理得以简化（参见下文 3.5 节）。

一般地说，阵列的称重单元数量越多，称量长度越长时，在整个 Δ_B 中， Δ_{BE} 所占的比例也就越少，消除 Δ_{BM} 的作用也就越显著。但结合现场条件和成本等因素综合考虑，对于 0.2 级皮带秤，其阵列的称重单元数以 7~10 个为宜。

3.5 用物联网与大数据技术降低称量段首末端的 B 类误差

在有效控制住 Δ_A 和 Δ_{BM} 之后，对皮带秤总体误差的控制就可归结为对 Δ_{BE} 的控制了。这就需要对于实测时所获得的量值之中， Δ_{BE} 与（约定）真值究竟各占有多大的份额予以恰如其分的估计。

为此，我们首先须得知各个称重单元对于同一物料的测量值。我们知道，皮带秤在工作状态中，物料的运行速度决定了该物料的任意一个指定质点通过相邻称重单元的时间差。如果把这一时间差测出来，就能按此测得各个称重单元相对于同一物料真值 X 的一系列测量值 $x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, x_n$ ，其中 x_1 和 x_n 为阵列前后两端出入口的首末两个称重单元的测量值， x_2, \dots, x_{n-1} 为位于阵列中部的其他称重单元的测量值，第 j 个称重单元的误差应为： $(\Delta_A + \Delta_B)j = x_j - X$ 。

由于采取了上述 3.1 ~ 3.3 节的措施，可使 $\Delta_A \approx 0$ ，故：

$$X = x_1 - \Delta_{B1} = x_2 - \Delta_{B2} = x_3 - \Delta_{B3} = \dots = x_{n-2} - \Delta_{Bn-2} = x_{n-1} - \Delta_{Bn-1} = x_n - \Delta_{Bn}$$

于是可得：

$$\begin{aligned} (n-2)X &= (x_2 - \Delta_{B2}) + (x_3 - \Delta_{B3}) + \dots + (x_{n-2} - \Delta_{Bn-2}) + (x_{n-1} - \Delta_{Bn-1}) \\ &= (x_2 + x_3 + \dots + x_{n-2} + x_{n-1}) - (\Delta_{B2} + \Delta_{B3} + \dots + \Delta_{Bn-2} + \Delta_{Bn-1}) \end{aligned}$$

又由于采取了上述 3.4 节的措施，除首末两个称重单元之外处的皮带张力影响能相互抵消，因此可以认为：

$$\sum \Delta_{BM} = \Delta_{B2} + \Delta_{B3} + \dots + \Delta_{Bn-2} + \Delta_{Bn-1} = 0$$

又由于多次测量的平均值近似于真值，故而：

$$\bar{x} = \frac{x_2 + \dots + x_{n-1}}{n-2} \approx X \quad (\text{式 2})$$

从而可推算出阵列首末称重单元的皮带影响误差：

$$\Delta_{B1} = x_1 - \bar{x} \quad (\text{式 B3a})$$

$$\text{及 } \Delta_{Bn} = x_n - \bar{x} \quad (\text{式 B3b})$$

又由式 B2 可知： $\Delta_{B1} = k_{B1} \delta_{B1}$, $\Delta_{Bn} = k_{Bn} \delta_{Bn}$

虽然由于“皮带效应”的影响因素十分复杂，至今业界尚未完全掌握影响因子 k_{B1} 、 k_{Bn} 的机理，也没有找到普适于全部皮带秤的经验系数；但是我们可以对于一台台的在用皮带秤的工作状态，搜集其状态信息（目前主要为由温度传感器探知的现场环境温度，今后还将进一步拓展信息的种类），进行统计分析归纳，摸索针对某一台皮带秤的统计规律，就有可能寻找到适用于某一台具体皮带秤的 k_{B1} 和 k_{Bn} ，也就能求得 δ_{B1} 和 δ_{Bn} ，从而给出修正值。

由于样本的选择及规模量对统计规律的置信度有着重要影响，收集相当数量的皮带秤运行状态数据就显得十分重要。南京三埃公司利用 ZLNET™ 物联网和云计算技术对运行中包括称重和环境数据在内的信息长期监测和积累，并运用大数据统计分析处理的方法找到 k_B ，并随数据量的不断积累，对 k_B 不断验证和逐步修正以趋向最佳，达到了有效降低 δ_{BE} 的目标。

4. 结束语

三埃人以“做世界上最好的皮带秤”为己任，把精益求精作为贯穿于长期的皮带秤生产、研发实践过程的指导思想，不仅善于吸收他人的经验和教训，还敢于突破旧理论的束缚。南京三埃公司发明的阵列皮带秤®使皮带秤的准确度、稳定性和耐久性都获得了大幅度的提升，达到了原先许多人认为不可能实现的 0.2 级水平，推向市场后深得用户的好评，并获得了全世界第一张 OIML 认证的 0.2 级皮带秤证书。本文介绍的皮带秤误差分解控制方法，是三埃的又一重大理论与实践创新。该方法把皮带秤系统的总体误差分解成若干不同来源的误差分量，然后根据各误差分量的不同性质分别采取专门的消除或抑制措施，从而使皮带秤的总体误差处于可控状态。虽然就纯理论角度看还不够完善，限于现场条件，对于影响因素信息种类的采集和管控还不十分全面，系统中动态响应特性的影响还与其它诸因素混杂在一起，尚未明确分离出来单独控制。但由于抓住了主要矛盾，对误差的消除抑制起到了明显的作用，切实解决了用户与制造商梦寐已久的实际问题，有其技术合理性和工程可行性。工程技术毕竟与纯粹的科研不相同，更关注的是实用、有效，而不是片面追求理论的十全十美。该方法的成功应用又使阵列皮带秤®的性能更上一层楼，为让全世界皮带秤用户爱上中国造奠定了扎实的品质基础。

【参考文献】

- [1] [英] K. E. Norden 著, 陆伯勤 等 译: 工业过程用电子秤 [M] 北京: 冶金工业出版社, 1991: 212~213
- [2] 盛伯湛: 试论科学思维方式与行为方式对发明阵列式皮带秤的作用 [C] 称重科技——第十二届称重技术研讨会论文集, 2013: 112 ~ 119
- [3] [德] Manfred Kochsieck . 称重手册 [M]. 邹炳易 施昌彦 译. 中国计量出版社, 1992: 354 ~ 356
- [4] 盛伯湛: 阵列皮带秤内力理论浅释 [J] 衡器, 2016, 08: 14 ~ 20

作者简介

作者: 盛伯湛 (1946 ~), 男, 冶金自动化专业, 高级工程师, 中国计量测试学会会员, 四十年前起涉足电子衡器在钢铁企业中的推广应用, 近二十五年在皮带秤开发生产单位从事产品的测评和改进工作。近年曾担任国家衡器职业资格培训系列教程编审委员会委员, 《衡器整机装配调试工》连续累计自动衡器篇章主笔, 并在各类期刊和研讨会论文集上发表论文数十篇, 所发明的国家专利已有多项通过了授权审核。

联系地址: 南京市 浦口区 明发滨江新城 134 栋 903 号 (邮码 210031)

移动电话: 15805169562

电子邮箱: 15805169562@163.com