

内力理论在阵列式皮带秤中的应用

□袁延强

【摘要】阵列式皮带秤以长期保持称重准确度 $\leq 0.2\%$ ，日常使用免维护的优异性能，在厂矿和港口等要求高准确度称量的场合得到广泛应用。本文对该技术主要基础理论之一的“内力理论”进行讨论，供皮带秤同行参考。

【关键词】皮带称重原理；高精度皮带秤；阵列式皮带秤

文献标识码：A 文章编号：1003-1870（2025）12-0005-06

Application of Internal Force Theory in Array Belt Scales

【Abstract】The array belt scale, with its outstanding performance of maintaining weighing accuracy of $\leq 0.2\%$ over a long period and requiring no maintenance during daily use, has been widely applied in factories, mines, ports and other places where high-accuracy weighing is required. This paper discusses the "internal force theory," one of the main fundamental theories of this technology, for reference by peers in the belt scale industry.

【Keywords】belt weighing principle; high-precision belt scale; array-type belt scale

引言

自2015年获得OIML的世界第一张0.2级皮带秤证书以来，阵列式皮带秤以其长期称重准确度 $\leq 0.2\%$ ，以及日常使用免维护的优异性能，在各个

行业中得到广泛应用，尤其是在厂、矿的进出口计量以及港口大宗散状物料计量中，成为高准确度计量的优先选择（如图1所示）。



图1 阵列式皮带秤的称重单元

相较于传统皮带秤，阵列式皮带秤在基本原理上有很多创新，其中“内力理论”和“弹力波理论”尤为重要，是阵列式皮带秤技术的基础理论。本文对“内力理论”进行探讨。

1 称重单元

阵列式皮带秤将多个（常见最多8个）称重单元连续安装而组成的特点如下：

(1) 每个单元安装两组称重托辊，称重托辊可选用原皮带机用托辊组。

(2) 称重横梁固定于皮带机架上，横梁中部安装一只“平行梁式称重传感器”。

(3) 上部“Π”型秤架紧固于传感器上部，两根托翼安装两组称重托辊。

(4) 传感器与下部横梁及上部“Π”型秤架间都采用紧固连接，无相对运动。

(5) 整个称重单元上部秤架与传感器一点紧固连接，故称为“单点称重单元”。

这种称重单元因为其“单点称重”的特点，而消除了由于秤架机械变形导致对传感器产生的附加误差

影响，而传统的皮带秤架，因杠杆和支点（橡胶轴承、十字簧片等）而带来的机械变形常常成为长期稳定性的重要误差来源。

需要指出的是，这种“单点支承”的结构往往给人一种“单薄”的感觉，与传统皮带秤所追求的“高刚度”背道而驰，因而有的企业采用与本称重单元相似的机构，即采用两只传感器，追求稳定的感觉。这种方式使传感器的数量增加了一倍，同时带来了两只传感器配对的麻烦，更可能因为两只传感器之间相互“拉扯”造成附近误差，尤其在长期现场环境下，热胀冷缩及机械变形都会产生不利影响。

实践证明，采用“单点支承”的称重单元，在皮带宽度2.4m，皮带速度5m/s，流量10000t/h的环境中仍然保持了优异的稳定性和准确度，数以千计的阵列式皮带秤的稳定运行也证实了这一点。在我看来，一个称重单元采用两只传感器显得没有必要，似有画蛇添足的味道。

2 称重单元受力分析^[1]

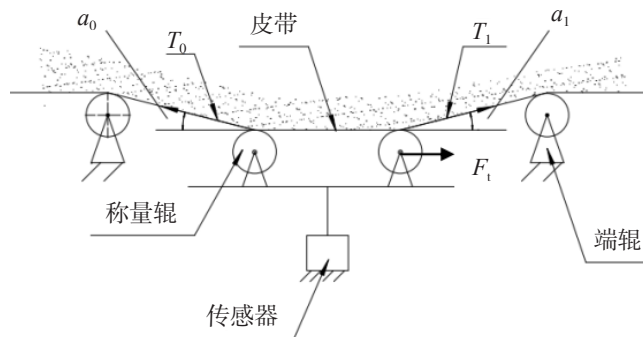


图2 单点称重单元受力示意图

如图2所示，设物料均匀分布：

设： P_L ——物料重力（等效作用于称重单元的料重）； P_C ——传感器作用力；

T_0 ——皮带张力（后皮带张力）； T_1 ——皮带张力（前皮带张力）；

α_0 ——后张力作用角； α_1 ——前张力作用角；

F_t ——水平作用力（物料作用在托辊上产生的水平力）。

在这个分析中，对垂直力方向作力平衡方程：

$$T_0 \sin \alpha_0 + T_1 \sin \alpha_1 + P_C = P_L \quad (1)$$

$$\text{误差: } \delta = P_L - P_C = T_0 \sin \alpha_0 + T_1 \sin \alpha_1 \quad (2)$$

对水平力作力平衡方程：

$$T_0 \cos \alpha_0 + T_1 \cos \alpha_1 + F_t = F_C \quad (3)$$

在水平力的方程中， F_t 为因物料拖动产生的水平作用力， F_C 为传感器受到的水平力，这个 F_t 的数值随物料多少而不同。但是，由于采用了平行梁式称重传感器，这种传感器可以消除水平力的影响，故水平力 F_C 对称重影响为零。

综上所述，“单点称重单元”有两大优点：

(1) 单点称重取消了传统的杠杆和支点的存在，也消除了多传感器之间相互“拉扯”的影响，所有机械结构对称重地影响得以消除，称重单元的稳

定性只取决于传感器本身和皮带对其的影响。

(2) 采用“平行梁式称重传感器”，可以消除水平方向的作用力对称重地影响，在正确的安装平面上，水平力的影响可以完全消除。即使安装平面和水平力作用平面存在少量误差，也由于各单元倾斜角度的互补，以及水平力与载荷之间大致的对应关系，使得这种影响可以基本忽略。

3 称重阵列分析

单点式称重单元分析表明，这是一种新的皮带

秤架设计思路，具有很多优点，但其基本的误差为 $\delta = T_0 \sin \alpha_0 + T_1 \sin \alpha_1$ ，称重依旧受到皮带张力的影响。

如果将多个单点式称重单元连续安装在一起的时候将发生什么情况呢？为了分析方便，将单点称重单元简化成为单托辊支承在一只传感器上，并且规定，当皮带张力作用向下时为正，反之为负，以图3所示的三个单元为例进行分析。

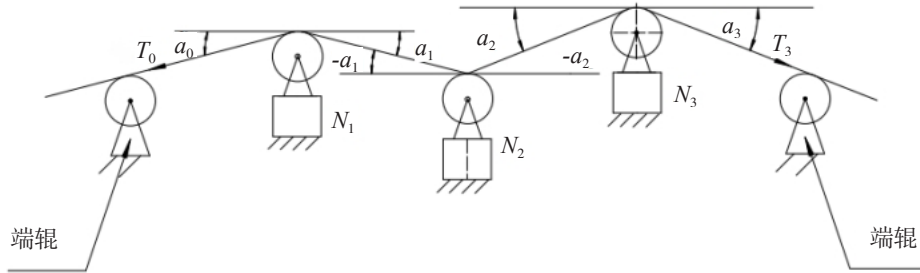


图3 三个单元分析图

$$\text{单元 } N_1 \text{ 的误差: } \delta_1 = T_0 \sin \alpha_0 + T_1 \sin \alpha_1 \quad (4)$$

$$\text{单元 } N_2 \text{ 的误差: } \delta_2 = -T_1 \sin \alpha_1 - T_2 \sin \alpha_2 \quad (5)$$

$$\text{单元 } N_3 \text{ 的误差: } \delta_3 = T_2 \sin \alpha_2 + T_3 \sin \alpha_3 \quad (6)$$

三个单元总的误差:

$$\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 = T_0 \sin \alpha_0 + T_3 \sin \alpha_3 \quad (7)$$

从计算结果来看，单元 N_2 的误差分别和单元 N_1 和单元 N_3 相抵消，最后的综合误差实际上相当于 $1/2$ 的 N_1 误差和 $1/2$ 的 N_3 误差之和。

由以上分析发现，张力 T 是同时作用于相邻的两个单元之上，大小相等，作用方向相反，这个影响

在误差汇总时将相互抵消。这种在系统内部可以相互抵消的力，可称为“内力”。三个单元汇总的结果，误差为第一单元和第三单元来自端辊的皮带张力影响。因端辊并不是称重托辊，所以皮带张力的影响无法抵消。

同时，还可以发现一个有趣的现象，如果 α_0 和 α_3 的角度方向相反的话，这个影响还可以相互抵消，甚至可能等于零。

这个分析还可以扩展到更多的单元，如图4和图5所示。

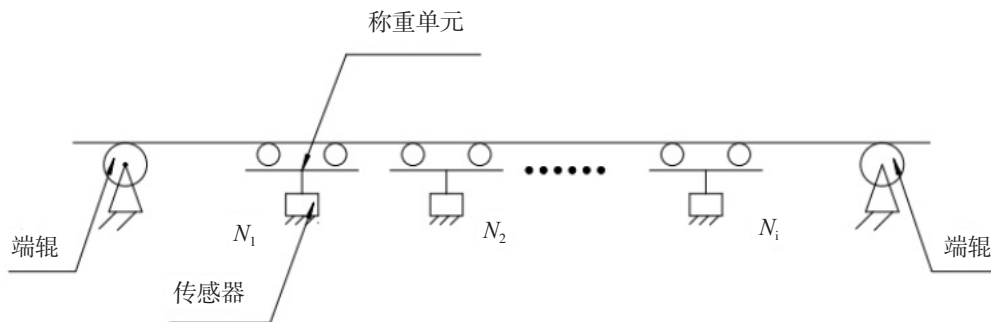


图4 阵列式称重单元示意图

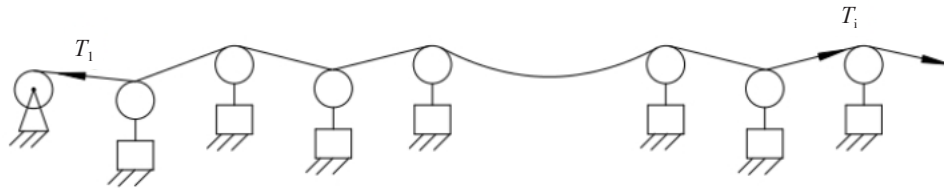


图5 阵列式皮带秤简化模型图

由前分析，一个称重单元受皮带张力影响造成的误差为 $T_0 \sin\alpha_0 + T_1 \sin\alpha_1$ ，以此为基础，对阵列式各单元进行误差分析如下：

假设皮带上物料载荷均匀分布，奇数单元低于基准水平线，偶数单元高于基准水平线，可得本称重阵列的误差为：

$$\text{单元}N_1\text{的误差: } \delta_1 = -T_0 \sin\alpha_0 - T_1 \sin\alpha_1 \quad (8)$$

$$\text{单元}N_2\text{的误差: } \delta_2 = T_1 \sin\alpha_1 + T_2 \sin\alpha_2 \quad (9)$$

.....

$$\text{单元}N_i\text{的误差: } \delta_i = T_{i-1} \sin\alpha_{i-1} + T_i \sin\alpha_i \quad (10)$$

系统综合误差：

$$\begin{aligned} \delta_z &= (-T_0 \sin\alpha_0 - T_1 \sin\alpha_1) + (T_1 \sin\alpha_1 + T_2 \sin\alpha_2) \\ &\dots\dots + (T_{i-1} \sin\alpha_{i-1} + T_i \sin\alpha_i) \\ &= -T_0 \sin\alpha_0 + T_i \sin\alpha_i \quad (11) \end{aligned}$$

以上假设奇数单元托辊低于基准，偶数单元高于基准，是为了使表达式容易看清楚。可以证明，无论称重单元的个数多少，相对于水平基准线的高低，张力作用角 α 为正或为负，公式(11)都能够成立。

由此可见，无论称重阵列内部称重单元数为多少，综合误差项均为固定的数值，即最外侧单元的外侧皮带张力影响。而随着单元数的增加，整个阵

列称重的物料总重量增加，而误差项数值不变，整个系统的相对误差将随之变小。

通过公式(11)我们得到了阵列式皮带秤在皮带张力 T 作用下引起的系统误差之和。通过这个公式，可以得到以下“内力理论”的定义：

在一个由 N 个单点称重单元连续安装所组成的称重阵列内部，皮带张力对称重的影响相互抵消，皮带张力的影响仅存在阵列两端单元的外侧。

4 内力理论的应用

4.1 相关试验

为了证明内力理论，我们进行了相关的试验。在《QPS 皮带秤试验中心》的4#皮带机（带宽1200mm，带速2.2m/s，流量最大1000t/h，皮带秤倾角 6° ）上，首先对已经安装的8个单元阵列式皮带秤进行托辊平直度精细调整，将整个称量段托辊的共面性差异调整到 $\leq 1\text{mm}$ 的范围，并进行数次实物校验，使称重误差稳定在 $\leq 0.2\%$ 的范围。

然后，人为地将5#单元托辊提高10mm，其余托辊高度不变。此时空带情况下，相邻的4#和6#托辊也都悬空，整条皮带可以明显看到皮带的凸起。保持其他条件不变，进行实物校验，比较托辊提高前后的变化，试验数据如下表：

表 5#单元托辊整体提高的实物试验

标定时间	托辊高度	理论重量 kg	标定重量 kg	等效流量 t/h	误差%	AD1	AD2	AD3	AD4	AD5	AD6	AD7	AD8
2013/5/21 12:34	基准状态	27275	27246	206	-0.11	722375	728974	748441	714050	744876	732928	735776	709561
2013/5/21 12:47		27234	27216	401	-0.07	720270	723899	747156	710962	746638	734597	738068	715314
2013/5/21 12:57		27074	27068	567	-0.02	720682	721792	745274	710344	744795	736035	737447	720373
2013/5/21 16:40	5#单元加高10mm	27469	27437	204	-0.12	719797	728493	765198	644288	875124	638717	759013	705746
2013/5/21 16:47		27092	27078	404	-0.05	717962	722750	764009	644962	862578	655062	758462	710751
2013/5/21 16:52		26670	26673	564	0.01	719016	720333	759613	655429	841653	670605	754423	715446
	基准状态：所有托辊仔细调整，共面性达到 $\leq 1\text{mm}$			基准200t/h比值	0.9809	0.9853	1.0116	0.9651	1.0068	0.9907	0.9945	0.9591	
				基准400t/h比值	0.9780	0.9785	1.0099	0.9610	1.0092	0.9929	0.9976	0.9669	
				基准560t/h比值	0.9786	0.9757	1.0074	0.9602	1.0068	0.9949	0.9968	0.9738	
	在基准状态基础上，将5#单元整体提高10mm，保持其他不变			5#提高200t/h比值	0.9774	0.9847	1.0343	0.8709	1.1829	0.8633	1.0259	0.9539	
				5#提高400t/h比值	0.9750	0.9770	1.0328	0.8719	1.1661	0.8855	1.0253	0.9608	
				5#提高560t/h比值	0.9765	0.9739	1.0271	0.8862	1.1380	0.9067	1.0200	0.9673	

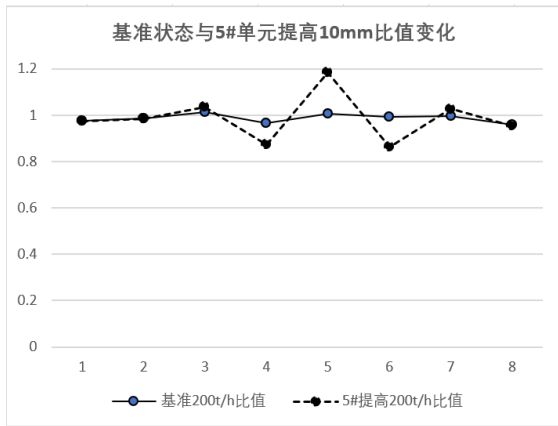


图6 200t/h流量比值变化比较

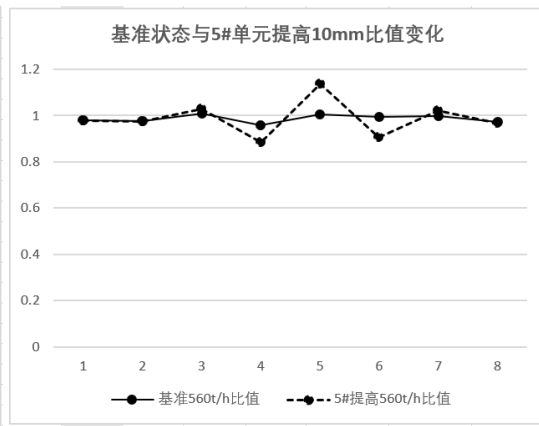


图7 560t/h流量比值变化比较

上述数据：等效流量——整个试验的平均流量；AD_x——各称重单元本次标定的平均净重AD值；比值——每个单元本次试验AD均值与8个单元本次试验AD总均值的比值，反映本单元在阵列中实际承载状态，是阵列式皮带秤的主要分析变量之一。

本试验如图6、图7所示，5#单元提高10mm导致了5号单元的比值明显提高，4#和6#单元的比值明显下降，不同流量比值变化的幅度也不同，但总体的标定误差几乎没有变化。这就是内力理论所揭示的现象，即“阵列内部，皮带张力的影响可以相互抵消”。

4.2 内力理论的意义

传统皮带秤的称重结构无论是全悬浮或是双杠杆，都可以视为一个单独的称重单元，皮带张力变化对其的影响都符合 $\delta = T_0 \sin \alpha_0 + T_1 \sin \alpha_1$ 的规律，所以，传统皮带秤尤其强调称重托辊的共面性调整，其指标有时达到了苛刻的地步。即使这样，也无法抗拒皮带状态的改变、机械结构的变形等影响导致了皮带秤长期稳定性差的痼疾。如果要改变这种情况，只有增大称重单元的有效称量长度，在全悬浮或双杠杆的结构中，大幅度增加称重托辊的数量，这样才能减少皮带张力的影响。但是这种增加是不现实的，不仅带来成本的大幅增加，更因为过于大而笨重的秤架结构，完全不具备实用性和经济性。

反观阵列式皮带秤，采用多个相同的独立单元，连续安装，形成了一个具有很长称量段的等效称重单元，而这些独立单元之间并不需要苛刻的共面性要求。由于内力理论缘故，安装共面性差

异带来的影响已经在阵列内部彼此抵消，从而实现了等效于一台具有很长长度的全悬浮称重单元的效果。

从结果上来看，阵列式皮带秤以分散等效集中的方法，实现了制造成本的降低，安装、调整难度的降低，使得制造一台具有很长称量段的皮带秤成为可能。从理论上来说，这种组合方式可以实现任意长度的皮带秤，将皮带张力的影响降低到完全可以忽略的程度，而实现这一目标所需成本却是有限的。

需要注意到，上述对称重单元和称重阵列的受力分析，将皮带张力描述为一种简单的力，皮带视为完全的柔性体。而实际上，皮带运输机的皮带工作时被施加了巨大的张力，这种张力可能多达数十吨之多。皮带的形状也因托辊组的槽型而呈现U型，从而皮带呈现出明显的刚度，而这种刚度可能从称量段外部发挥作用，将已经进入称量段内部的物料“撬起”，脱离称重托辊，从而使称重产生误差。我将这种现象称之为“弹力波”。

从大量的试验和现场的情况观察，这种“弹力波”才是皮带秤称重的主要误差来源。“弹力波”具有很强的波动性特点，形成因素也很复杂，要从设备制造或皮带机调整的角度来加以消除几乎是不可能的。

在采用单点独立称重单元组成的阵列式皮带秤中，相对于一种基本状态（各组托辊相对共面性固定不变），各个单元的称重结果仍然可能发生变化，这种变化就是由“弹力波”的影响导致的。此时，

检测各单元相对的变化，和基准状态进行比对，就可以找到“弹力波”影响的踪迹，采用相应的称重模型，就可以减小甚至消除“弹力波”造成的影响，从而从根本上消除皮带称重的误差。

4.3 内力理论带来的变化

(1) 制造简化。传统皮带秤架制造的首要原则是追求刚度，保证在物料重力作用下，秤架变形很小，使皮带张力的影响减小，因而传统皮带秤的秤架都很笨重。在阵列式皮带秤中，由于内力理论缘故，称重单元的刚度要求大为降低，单元都用薄钢板折弯制作，整个单元重量不重。以 $B=1200\text{mm}$ 的阵列式皮带秤为例，8个称重单元总重量不超过800kg，与传统4托辊皮带秤的重量接近，而其有效称量段长度则达到16m，远超传统4托辊的4m长度。

(2) 安装方便。以上述 $B=1200\text{mm}$ 为例，阵列式8个单元的总重量和传统4托辊皮带秤相近，每个称重单元重量不足100kg，现场可以二人合力轻松搬运和安装，无须借助机械的帮助。即使 $B=2400\text{mm}$ 的称重单元，现场仍然可以使用人力进行搬运和安装，极大地方便了皮带秤的现场安装工作。

安装完成后的现场调整也相对轻松很多，在阵列内部的托辊共面性要求可以大为降低，仅首、尾单元的安装需要相对仔细的调整。

(3) 维护方便。传统皮带秤对于日常维修提出了严格的要求，特别是经常性地需要对称量段托辊进行共面性调整。由于皮带运输机架属于简单钢结构支撑，秤架也是钢结构件组成，热胀冷缩和机械震动都会明显影响到称量段托辊的共面性，故这种经常性的调整和维护就非常重要，也成为使用者的沉重负担。

阵列式皮带秤的单点称重单元只有一个称重连接点，没有例如轴承、簧片等的运动机件，秤架机械机构的热胀冷缩和结构变形，对称重没有影响。内力理论也指出阵列内部的托辊共面性要求不高，所以，阵列式皮带秤的日常是免维护的。大量实践证明，阵列式皮带秤可以在免维护的情况下长期保持 $\leq 0.2\%$ 的称重准确度，这也是阵列式皮带秤受到用户欢迎的重要原因之一。

“内力理论”是阵列式皮带秤技术的基础理论之一，其揭示了用分散组合的称重单元替代整体称

重单元的可行性。也提出了一种全新的皮带称重装置的组合模式，开辟了一种新的皮带秤类型。结合阵列式皮带秤的“弹力波”理论和模型的应用，阵列式皮带秤实现了免维护长期保持称重准确度 $\leq 0.2\%$ 的指标，为中国的称重技术领先全世界做出了重要的贡献。

参考文献

[1] 袁延强. 阵列式皮带秤[M]. 北京：化学工业出版社，2023.2.

作者简介

袁延强，男，高级工程师。从事皮带秤研究30多年，阵列式皮带秤发明专利发明人，《阵列式皮带秤》一书的作者。