

• 机械工程 •

DOI:10.15961/j.jsuese.201900340



本刊网刊

基于灵敏度变化机理的双传感器称重系统在位标定方法

黄 劼¹, 林思建¹, 黄婉舟¹, 李俊国^{2*}

(1. 四川大学 机械工程学院, 四川 成都 610065; 2. 西南科技大学 信息工程学院, 四川 绵阳 621010)

摘 要: 称重系统传感器安装完成后, 会由于传感器安装面的形位误差使得传感器受力面不一定水平, 对于所承受的重力或出现偏载, 灵敏度系数安装前后不再相同, 一般需在位标定后方可使用。对于双传感器系统, 由于各传感器安装情况不同, 灵敏度系数不仅安装前后不同, 而且彼此也不相同; 另一方面, 由于标定时加载重心位置有一定随机性, 不能保证两传感器的平均受力, 因而加载重量未知。偏载和加载位置随机性相互作用, 使得双传感器系统灵敏度系数标定变得困难。目前, 常用方法是在处理电路上附加电位器等元件, 通过改变原信号放大倍数使各路灵敏度相同, 然后再加载标准重量完成标定。该方法需改变原电路, 可能带来未知的影响, 而且对于集成型的处理电路难以实现。针对上述问题, 建立了传感器受力模型, 通过受力分析明确偏载和重心位置变化对灵敏度系数的影响机理; 推导了灵敏度标定算法, 将双传感器系统灵敏度系数分解为耦合系数和转换系数两部分, 标定时用同一标准重物在不同位置加载两次, 即可完成在位标定, 解决了双传感器系统灵敏度系数的标定问题, 保证偏载情况下系统的测量精度。经实验验证, 该方法不改变原测量电路和机械结构, 标定后系统误差小于 0.03%。

关键词: 称重系统; 双传感器; 受力分析; 标定; 耦合系数

中图分类号: TP212.9; TP202.3

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2020)04-0213-05

In-situ Calibration Method for Dual-sensor Weighing System Based on Sensitivity Change Mechanism

HUANG Jie¹, LIN Sijian¹, HUANG Wanzhou¹, LI Junguo^{2*}

(1. School of Mechanical Eng., Sichuan Univ., Chengdu 610065, China; 2. School of Info. Sci. and Technol., Southwest Univ. of Sci. and Technol., Mianyang 621010, China)

Abstract: The sensitivity coefficient is no longer the same before and after the installation of weighing system sensor due to the unbalance loading resulting from the shape error of the sensor mounting surface. Thus, it need to be re-calibrated before use. For dual-sensor systems, due to the different installation conditions of each sensor, the sensitivity coefficient is not only different before and after installation, but also not the same as each other, on the other hand, due to the randomness of load center when calibrating, there is no guarantee that the two sensor bear the same force, so the load weight is unknown. The stochastic interaction between unbalance loading and randomness of loading position makes it difficult to calibrate the sensitivity coefficient of the dual-sensor system. At present, the common calibration method is to attach potentiometer and other components to the processing circuit to changing the magnification of the original signal to make the sensitivity of each path be the same, and then load standard weight to complete the calibration. This method needs to change the original circuit, which may bring unknown influence, and it's difficult to realize for integrated processing circuit. Aiming at the these problems the sensor force model was established, the influence mechanism of unbalance loading and gravity position on sensitivity coefficient was defined by force analysis, and the sensitivity calibration algorithm was deduced. The sensitivity coefficient of dual sensor system was decomposed into two parts, coupling coefficient and conversion coefficient, and calibration could be completed after loading two times in different positions with the same standard weight. This new calibration method could

收稿日期: 2019-04-17

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51704199)

作者简介: 黄 劼 (1966—), 男, 教授, 博士. 研究方向: 测试计量技术及仪器. E-mail: Tm_huang@163.com

* 通信联系人 E-mail: lj66happy@163.com

网络出版时间: 2020-06-16 20:21:14

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20200615.1128.001.html>

ensure the measurement accuracy of the system under unbalance loading. The experimental results showed that the new method did not change the original measuring circuit and mechanical structure, and the system error was less than 0.03%.

Key words: weighing system; dual-sensor; force analysis; calibration; coupling coefficient

在线称重技术在生产生活中有广泛应用, 相关技术也较为成熟, 但系统灵敏度标定问题因传感器应用方式、场景的多样性而方法各异^[1-2], 对系统灵敏度系数快速、准确标定是保证系统称重精度的关键环节^[3-4]。国内外学者针对系统灵敏度标定的相关问题有众多研究成果。李晖^[5]研究了环境噪声叠加到传感器的输出信号, 进而影响称重精度的机理及处理办法; Llusá等^[6]分析了环境振动对称重精度的影响及标定时应注意的问题; 孙茂泉等^[7]为提高灌装精度, 提出了分段灌装及相应的标定方法; 周伟^[8]、高小娇^[9]等针对传感器灵敏度非线性问题展开研究, 并提出相应的标定方法; 王志胜等^[10]针对被标定参数本身含有随机误差将会影响标定精度的问题, 提出了一种基于信息融合理论的参数最优估计算法, 并证明了该算法的有效性。类似的研究还有很多, 但大多针对单一传感器的标定问题, 由于应用环境或结构的要求, 称重系统往往会采用双传感器测量或多传感器方式实现。这种情况下, 由于存在随机性安装误差, 传感器灵敏度会因将偏载发生变化, 而加载位置也具有随机性, 使得各传感器受力也不尽相同, 因此标定方式和单传感器有较大差别。此外, 有关多传感器称重系统偏载情况下的标定方法的研究不多, 所介绍的方法十分相似, 李戎^[11]、赵晓宾^[12]等采用附加电位器的方式, 通过电压调节(调输入)或电流调节(调输出)来消除偏载影响进而完成系统灵敏度标定。但这种标定方式繁琐、工作量大, 非专业人员难以完成, 另一方面, 电位器位置在使用过程中可能改变, 系统灵敏度系数难以保证长期稳定性, 而且传感器本身的灵敏度改变后, 其他参数, 如线性度、温漂、蠕变等是否改变以及如何改变不得而知, 这都会给测量精度带来不利影响。贺瑞慷^[13]解释了多传感器并联使用时产生并联附加误差的原因, 仍然采用文献^[11-12]类似的方法进行灵敏度调节。季华锋等^[14]针对大型称重料斗灵敏度标定问题, 提出用水平仪测量传感器安装水平度, 用千斤顶等设备校准安装面后再标定的方法。冀书建等^[15]针对如何将信号输出特性存在差别的力传感器输出信号合成的问题, 采用数字量求和的方式进行在位标定, 得到了较好的结果, 但标定过程没有分析传感器安装误差对灵敏度的影响, 传感器受力情况发生变化后, 是否会影响测量精度有待深入分析。

多传感器系统灵敏度的准确标定对测量精度至

关重要, 但针对不同的应用场景难以有统一的标定方法。作者研究了双传感器系统安装误差对灵敏度的影响机理, 通过理论分析建立更为科学方便的在位标定方法, 较好地解决了偏载及加载重心变化对称重精度的影响。

1 双传感器系统灵敏度变化机理分析

图1为双传感器称重系统结构示意图。

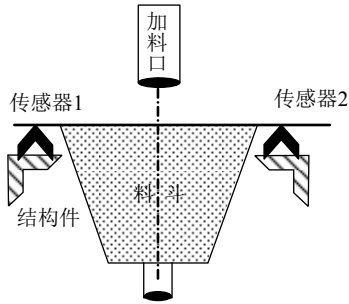


图 1 称重系统结构示意图

Fig. 1 Diagram of weighing system structure

两传感器对称安装于结构件上, 对料斗中物料进行称重。显然, 两传感器各承担一部分重量, 测量系统信号传递关系如图2所示。

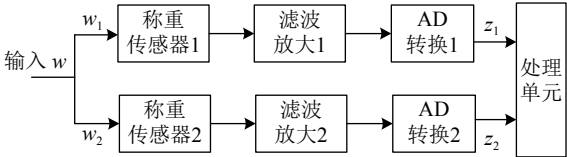


图 2 测量系统信号传递

Fig. 2 Signal transmission of measurement system

输入输出关系可表达为:

$$z_1 = s_1 w_1 \tag{1}$$

$$z_2 = s_2 w_2 \tag{2}$$

式中, s_1 、 s_2 为该测量支路的灵敏度系数, 令 $k_1=1/s_1$, $k_2=1/s_2$, 则有 $w_1=k_1 z_1$ 及 $w_2=k_2 z_2$, 理想情况下(如果传感器没有水平倾角), 可认为:

$$w = w_1 + w_2 \tag{3}$$

于是有:

$$w = k_1 z_1 + k_2 z_2 \tag{4}$$

两传感器安装完成后, 理想状态下可认为传感器灵敏度系数 s_1 、 s_2 和单独使用时一样, 理论上可根据式(4)通过称重系统的输出值求得被测值。但实际系统中, 传感器的受力情况将受多种因素的影响, 主要因素有以下几种:

1) 安装传感器的结构件平面度、平行度及相对于料斗中心线的对称度的影响。

2) 料斗装料后左右重量不一定均匀,或料斗重心不在中心线上,使两传感器对总重量的分担情况会随机变化。

受因素1的影响,传感器安装完成后不一定完全水平,假设传感器安装完成以后有一定水平倾斜角 α ,如图3所示。

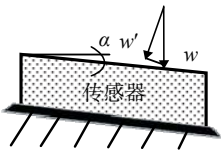


图3 传感器受力示意图

Fig. 3 Schematic diagram of sensor force

加载重量 w 后,传感器受力 w' 为:

$$w' = w \cdot \cos \alpha \quad (5)$$

即传感器处于偏载状态,所测得的值为重力在垂直于传感器方向的分量,对于双传感器系统,测量值之和不再等于总重量,式(3)、(4)不再成立。

另一方面,根据式(5),当对其加载重力 w 后,传感器输出值 $z = w' \cdot s = w \cdot s \cdot \cos \alpha$,可以认为安装完成后传感器的灵敏度系数由原来的 s 变成了 s' ,且 $s' = s \cdot \cos \alpha$ 。

基于上述原因,从系统灵敏度的角度考虑,可认为传感器安装完成后其灵敏度系数 s_1 、 s_2 与离线标定得到的灵敏度系数是不相同的,即 k_1 、 k_2 未知,无法用式(4)获得被测量的 w 。

受因素2的影响,料斗装料重心不一定在中心线上,每次加载后,重心可能有一定的随机变化,即两个传感器承担的重量也有一定的随机性。如果按传统方法在位标定,图2中 w 值虽然已知,但 w_1 、 w_2 却是未知的,即使可获取 z_1 、 z_2 ,也无法根据式(1)和(2)求出传感器安装后的 s_1 和 s_2 ,也就是说,两个测量支路的输入输出关系还将受加载物重心位置随机性的影响。因此,针对这类系统测量支路的灵敏度系数的标定,一方面,应在传感器安装完成后,即受力情况确定后进行;另一方面,还需要考虑两个传感器对总重量的分担情况。由于这两个因素的交互影响,测量支路的灵敏度系数的标定变得困难,不能用传统的单传感器标定方法完成。

2 在位标定的理论基础

假设图1所示系统传感器安装完后,由于水平倾角的影响,两支路灵敏度系数分别为 s'_1 和 s'_2 (与离线标定所得灵敏度系数不同),信号输入输出关系可表

示为: $z_1 = s'_1 \cdot w_1$ 及 $z_2 = s'_2 \cdot w_2$,令 $k_1 = 1/s'_1$; $k_2 = 1/s'_2$,则式(3)、(4)继续成立,对式(4)稍作变换,有:

$$w = k_1 \left(z_1 + \frac{k_2}{k_1} z_2 \right) \quad (6)$$

定义转换系数 $k = k_1$, $p = \frac{k_2}{k_1} = \frac{s'_1}{s'_2}$ 为耦合系数,则式(6)可表示为:

$$w = k(z_1 + pz_2) \quad (7)$$

通过偏载情况下传感器受力分析,进一步说明式(7)的正确性。

假设传感器安装完成后两传感器距离为 l ,两支路灵敏度系数受水平倾角影响分别为 s'_1 和 s'_2 ,加载重量 w 的重心随机地落在 O 点,重心距两传感器距离分别为 l_1 、 l_2 ,则称重系统受力情况如图4所示。

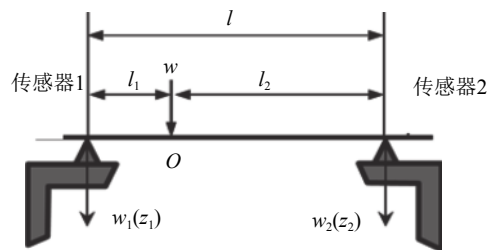


图4 双传感器受力示意图

Fig. 4 Schematic diagram of dual-sensor force

两传感器受力 w_1 、 w_2 大小为:

$$\begin{cases} w_1 = \frac{l_2}{l} \cdot w, \\ w_2 = \frac{l_1}{l} \cdot w \end{cases} \quad (8)$$

两传感器输出AD值分别为:

$$\begin{cases} z_1 = \frac{l_2}{l} \cdot s'_1 \cdot w, \\ z_2 = \frac{l_1}{l} \cdot s'_2 \cdot w \end{cases} \quad (9)$$

传感器安装完后,两支路灵敏度系数 s'_1 、 s'_2 为常数,可令 $s'_2 = n s'_1$ (n 为常数),于是有:

$$\begin{cases} z_1 = \frac{l_2}{l} \cdot s'_1 \cdot w, \\ \frac{1}{n} z_2 = \frac{l_1}{l} \cdot s'_1 \cdot w \end{cases} \quad (10)$$

式(10)中两式相加得:

$$z_1 + \frac{1}{n} z_2 = \frac{l_1 + l_2}{l} \cdot s'_1 \cdot w = s'_1 \cdot w \quad (11)$$

整理后得:

$$w = \frac{1}{s'_1} \left(z_1 + \frac{1}{n} z_2 \right) \quad (12)$$

令 $k = 1/s'_1$, $p = 1/n$ (即 $p = s'_1/s'_2$),式(12)可改写为:

$w = k(z_1 + pz_2)$ 。

式(7)得证。式(7)描述了双传感器系统中,传感器安装误差和偏载共同影响下,系统两支路的输出值和加载重量之间的关系。 k 值(即 $1/s'_1$)受传感器安装倾斜度的影响,耦合系数 p 受重心位置随机性的影响均不能直接标定出,因此,如何标定出 k 和 p 是保证系统准确称重的关键。

3 标定方法的具体实现

如果式(7)中 w 、 z_1 、 z_2 已知,即为一简单的二元一次方程,只需两个方程就可解出 k 和 p 。根据这一思路,可以在不附加元器件,改变原电路的情况下,采用纯软件方式进行系统转换系数和耦合系数标定。具体标定方法为:取一已知重量的标准重块,在不同位置加载两次(一次偏向1号传感器,另一次偏向2号传感器),记录测量支路输出值 z_{ij} ,其中, i 表示测量次数, j 表示传感器标号。

当系统两次加载同样重量时,应有 $k(z_{11} + pz_{12}) = k(z_{21} + pz_{22})$,由于安装完成后 $k = 1/s'_1$ 为常数,根据 $z_{11} + pz_{12} = z_{21} + pz_{22}$ 可求出 p 值,进一步地,代入已知重量 w ,根据式(7)可求得 k 值。

表1为耦合系数标定前后不同位置加载时的AD值及由两AD值得到的重量相对值。

表 1 耦合系数标定前后不同位置加载时AD输出值及重量相对值

Tab.1 AD values and weight values before and after coupling coefficient calibrating when loading at different position

加载次数	标定前			标定后		
	AD1	AD2	重量 相对值	AD1	AD2	重量 相对值
第1次(偏左)	6 012	2 877	8 889	6 051	2 839	8 743
第2次(偏右)	2 692	6 378	9 070	2 764	6 303	8 741
第3次(随机)	5 290	3 640	8 930	3 572	5 453	8 743
第4次(随机)	4 869	4 086	8 955	4 756	4 205	8 744
第5次(随机)	3 935	5 073	9 008	5 020	3 923	8 740
峰值偏差	—	—	181	—	—	4

左部数据为传感器耦合系数标定前同一重块在不同位置加载5次的AD输出值,显然 $z_{n1} + z_{n2} \neq z_{m1} + z_{m2}$,最大偏差达181 bit,这是由两只传感器的灵敏度不相同,各次测量时加载重心位置也不相同引起的。

根据式(7),应该有 $z_{n1} + pz_{n2} = z_{m1} + pz_{m2}$,代入第1、2次测得的AD值,求出耦合修正系数 $p = 0.948\ 3$ 。

表1右部数据为耦合系数求得后,重新进行5次称重得到的两传感器输出AD值及代入耦合系数按 $z_1 + 0.948\ 3z_2$ 计算所得重量值。

表1数据显示,经耦合系数 p 修正后,5次测量的

峰值偏差仅为4 bit(本系统AD为16 bit输出),该偏差为随机误差,远低于系统允许误差,可以认为系统经灵敏度系数修正后,被测量 w 与两测量支路的AD输出值之间的对应关系不再变化,即传感器偏载及加载重心位置变化带来的影响已被消除。已知标准重块为10 kg,根据式(7)求得 $k = 1.144$,系统标定完成。表2为耦合系数和转换系数标定完成后,根据两传感器AD值所得的测量值。

表 2 标定后不同位置加载测得的重量值

Tab.2 Weight values after calibrating when loading at different position

加载次数	AD1	AD2	$(k \cdot (AD1 + p \cdot AD2))/\text{kg}$
第1次(偏左)	6 051	2 839	10 002.25
第2次(偏右)	2 764	6 303	9 999.86
第3次(随机)	3 572	5 453	10 002.08
第4次(随机)	4 756	4 205	10 002.68
第5次(随机)	5 020	3 923	9 998.77

对于10 kg的被测物,最大误差2.68 g,小于0.03%。

4 结 论

通过建立传感器偏载受力模型,经受力情况分析,建立了加载重量与AD值之间的转换函数,据此提出了纯软件标定的方法。转换系数 k 和耦合系数 p 的标定均在传感器安装完成后进行,可将传感器安装误差、结构件制造误差等因素的影响全部考虑在内,是一种完全的在位标定。与传统方法相比,不会因附加电位器等元件对原信号处理电路带来不利影响;也不会因附加电位器在使用过程中参数改变而影响系统灵敏度。如果使用过程中传感器本身的灵敏度发生了改变,可由用户自行重新标定,简单方便,具有很好的实用性。

参考文献:

[1] Sun Renyun.Determination of sensors and system sensitivity in the motor vehicle ABS test-bed[J].[Journal of Sichuan University \(Engineering Science Edition\)](#),2001,41(3):85–88.[孙仁云.汽车ABS试验台传感器与系统灵敏度的确定[J].[四川大学学报\(工程科学版\)](#),2001,41(3):85–88.]

[2] Zhao Yanzhi,Zhao Tieshi,Cao Hucheng,et al.Measuring principle and calibration experiment of the overloaded self-calibration parallel four-dimensional force measuring platform[J].[Journal of Mechanical Engineering](#),2017,53(23): 53–61.[赵延治,赵铁石,曹虎成,等.自标定重载并联四维测力台测量机理与标定试验[J].[机械工程学报](#),2017,53(23): 53–61.]

[3] Podczeczek F.The development of an instrumented tamping capsule machine II [J].[European Journal of Pharma-](#)

- ceutical Sciences,2001,12(4):515–521.
- [4] Liu Jiuqing. Overview and research project of dynamic and numeral weighing technology[J]. *Industrial Measurement*, 2011,21(2):4–10.[刘九卿. 动态和数字称重技术发展概况与研究课题[J]. *工业计量*, 2011,21(2):4–10.]
- [5] Li Hui. The design of weighing control instrument for filling equipment[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2017.[李晖. 灌装设备称重控制仪表设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2017.]
- [6] Llusà M, Faulhammer E, Biserni S, et al. The effect of capsule-filling machine vibrations on average fill weight[J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2013,451(1):381–387.
- [7] Sun Maoquan, Yan Weiye. Control system of a gravimetric (weighting) fluid-filling machine[J]. *Light Industry Machinery*, 2007(3):94–96.[孙茂泉, 严伟跃. 称重式液料灌装机控制系统[J]. *轻工机械*, 2007(3):94–96.]
- [8] Zhou Wei, Bao Jiandong, Ding Lianghua. Nonlinear correction of sensor calibration[J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2013,27(4):358–361.[周伟, 包建东, 丁良华. 传感器标定的非线性校正研究[J]. *测试技术学报*, 2013,27(4):358–361.]
- [9] Gao Xiaojiao, Huang Jie, Liu Chenyuan. Study on nonlinear correction for drug filling line dynamic weighing system[J]. *Industrial Control Computer*, 2015,28(10):102–103.[高小娇, 黄劼, 刘臣园. 药品灌装线动态称重系统非线性校正的研究[J]. *工业控制计算机*, 2015,28(10):102–103.]
- [10] Wang Zhisheng, Wang Daobo, Cai Zongyan. Unified data processing method for sensor calibration[J]. *Journal of Transducer Technology*, 2004,23(3):46–48.[王志胜, 王道波, 蔡宗琰. 传感器标定的统一数据处理方法[J]. *传感器技术*, 2004,23(3):46–48.]
- [11] Li Rong, Yang Qingfeng. Analysis of partial load calibration method for electronic weighing[J]. *China Metrology*, 2009(5):90–91.[李戎, 杨青锋. 电子衡器偏载校准方法的分析[J]. *中国计量*, 2009(5):90–91.]
- [12] Zhao Xiaobin. The partial load analysis of weighing sensor used in electronic weighing[J]. *Silicon Valley*, 2011(16):180.[赵晓宾. 电子衡器应用中称重传感器的偏载校正分析[J]. *硅谷*, 2011(16):180.]
- [13] He Ruikang. Theoretical analysis of hopper scale sensor used in parallel model[J]. *China Metrology*, 2015(5):112–113.[贺瑞慷. 料斗秤传感器并联使用的理论分析[J]. *中国计量*, 2015(5):112–113.]
- [14] Ji Huafeng, Li Dejie. Application of calibration device in calibrating hopper scale[J]. *Construction Technology*, 2012,41(Supp1):445–448.[季华锋, 李德家. 一种料斗秤称装置及其方法的应用[J]. *施工技术*, 2012,41(增刊1):445–448.]
- [15] Ji Shujian, Zhu Chaofu, Wang Chunli. Research on technology of calibration in weighing system by multiple load cells[J]. *Sensor World*, 2007(2):23–25.[冀书建, 朱超甫, 王春利. 多传感器称重系统标定技术研究[J]. *传感器世界*, 2007(2):23–25.]

(编辑 黄小川)

引用格式: Huang Jie, Lin Sijian, Huang Wanzhou, et al. In-situ calibration method for dual-sensor weighing system based on sensitivity change mechanism[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2020,52(4):213–217.[黄劼, 林思建, 黄婉舟, 等. 基于灵敏度变化机理的双传感器称重系统在位标定方法[J]. *工程科学与技术*, 2020,52(4):213–217.]