

组合秤称重传感器大变形致非线性误差分析

朱鹏飞, 黄松和, 梅菊
(西南交通大学, 成都 610031)

摘要:目的 称重传感器受弹性体本身结构特性的影响,其输入输出成非线性关系,从而影响了称重传感器的精度,就称重传感器弹性体大变形致非线性误差展开分析。方法 利用有限元方法对弹性体大变形致非线性误差进行了量化分析,得出了在0~3 kg量程内的弹性体大变形致非线性相对误差,并进行了相应的补偿。结论 随着称重物料质量的不断增加,其大变形致非线性误差相应增加,量程内相对误差最高达0.05%,利用该型传感器补偿函数可消除此非线性误差,进一步提高平行梁式称重传感器精度。

关键词: 平行梁式称重传感器; 大变形致非线性误差; 有限元方法

中图分类号: TB486 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2015)23-0103-04

Analysis of Nonlinear Error Caused by Large Deformation of Load Sensor for Combination Weigher

ZHU Peng-fei, HUANG Song-he, MEI Ju
(Southwest Jiao Tong University, Chengdu 610031, China)

ABSTRACT: There is nonlinear relation between the weighing sensor's output and input, which is caused by the structure characteristics of the elastomer, thus affecting the accuracy of the weighing sensor. This paper launched the analysis of the nonlinear error caused by the large deformation of elastomer. By using the finite element analysis method, this paper obtained the relative error caused by the large deformation of elastomer in the 0~3 kg range through quantitative analysis, and the corresponding compensation was made. The result showed that with the increase of weighing quality, the nonlinear error caused by the large deformation increased correspondingly, and the maximum value in the measuring range reached 0.05%. Using the nonlinear error compensation function, this paper eliminated this nonlinear error, and further improved the accuracy of the parallel girder load sensor.

KEY WORDS: parallel girder load sensor; nonlinear error caused by large deformation; finite element analysis

组合秤作为一种高速度、高精度的包装机械,已经广泛应用于食品、医药等行业,电阻应变式称重传感器是组合称重系统的一个关键部件,铝合金平行梁式称重传感器是其中一个典型的电阻应变式称重传感器,因其具有良好的线性度、抗偏载性能,被商业称重衡器的大量使用^[1-4]。随着称重衡器的发展,高精密度称重传感器成为未来的发展方向,平行梁式称重传感器在其应用中受电阻应变片、弹性体性能、惠

斯登电桥、偏载等边界条件的影响,称重传感器的输入与输出呈现非线性关系^[5-7]。大量实验表明,随着额定量程内的载荷增大,输出信号非线性误差逐渐增大。针对此非线性误差,现有研究主要有硬件补偿和软件补偿两种方法,硬件补偿主要针对温度应力、偏载应力对称重系统进行补偿^[8];软件补偿通过适当的数据处理方式对输出原始数据进行处理,减小非线性项^[9-10]。硬件补偿提高了电路设计成本且补偿效果

收稿日期: 2015-04-01

基金项目: 四川省科技支撑计划项目(2014GZ0024)

作者简介: 朱鹏飞(1993—),男,山西人,西南交通大学硕士生,主攻机电一体化、机械设计。

通讯作者: 黄松和(1960—),男,福建人,西南交通大学副教授、硕士生导师,主要研究方向为工程机械。

差;软件补偿是针对输出原始数据的处理方式,未对其非线性产生根本原因进行分析,补偿结果不可靠。文中利用弹性体大变形分析方法就平行梁式称重传感器大变形致非线性误差进行分析。

1 平行梁式称重传感器大变形致非线性误差产生机理

当称重传感器承受载荷时,弹性元件在被测力的作用下产生弹性变形,贴在弹性元件4个敏感部位的电阻应变片能将弹性元件的应变变化转换成电阻变化。应变片以电桥形式连接,受载时电桥产生一个与被测载荷成正比的电压信号。利用这一原理,便可测出载荷的大小,桥式测量电路^[11-13]见图1。

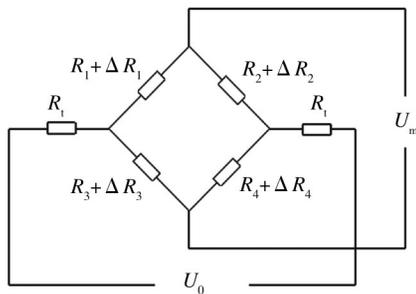


图1 桥式测量电路

Fig.1 Bridge measuring circuit

根据全等臂电桥的输出特性,可知:

$$\Delta U = \frac{U_0}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} - \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (1)$$

又因为 $\frac{\Delta R_i}{R_i} = S_0 \varepsilon_i$, 则:

$$\Delta U = \frac{U_0 S_0}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 - \varepsilon_3 + \varepsilon_4) \quad (2)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 - \varepsilon_3 + \varepsilon_4 \quad (2)$$

式中: S_0 为金属应变灵敏度; ε_i 为轴向应变; ε 为4个贴片区应变输出值的代数和,即输出应变。被测量电路不仅可以实现温度补偿,还能获得正比于应变的代数和的线性输出。

平行梁式称重传感器的结构见图2, $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$ 代表弹性体4个贴片区1,2,3,4的应变值。

在称重过程中,根据物料放置位置的不同,可将力简化为一个作用在弹性元件最右端的竖向载荷 F 和一个作用于对称平面内的弯矩 M ,等效受力图见图3。

其中:弹性体所受偏载转矩为 M ;弹性体端面与截面 a, b 之间的水平距离分别为 L_a, L_b ;梁截面惯性矩相等为 I ;中性轴距离弹性体上下表面距离为 d 。

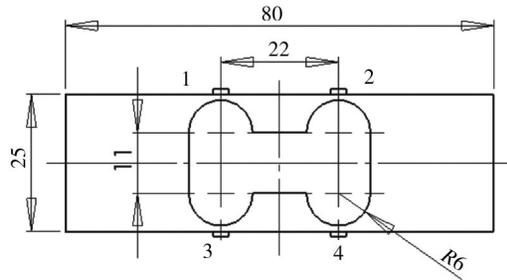
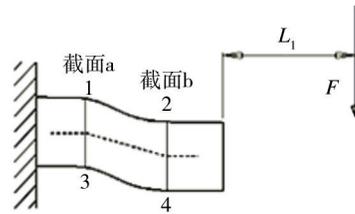
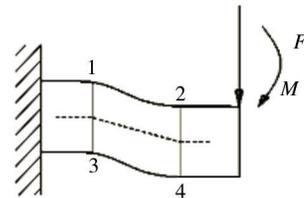


图2 平行梁式称重传感器结构

Fig.2 Structure of parallel girder load sensor



a 弹性元件偏载受力



b 弹性元件等效受力

图3 弹性体受力

Fig.3 Force applied on elastomer

$$M = F \times L_1 \quad (3)$$

贴片区1和3所在截面与2和4所在截面转矩分别为 M_a, M_b , 其中:

$$M_a = M + F(L_a + \Delta L_a), M_b = M + F(L_b + \Delta L_b) \quad (4)$$

贴片区应力为:

$$\delta_1 = \frac{M_a d}{I}, \delta_2 = \frac{M_b d}{I}, \delta_3 = -\frac{M_a d}{I}, \delta_4 = -\frac{M_b d}{I} \quad (5)$$

贴片区应变为:

$$\varepsilon_i = \frac{\delta_i}{E} \quad (6)$$

传感器输出应变代数和为:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 - \varepsilon_3 + \varepsilon_4 = \frac{2Fd}{IE} (L_a - L_b + \Delta L_a - \Delta L_b) \quad (7)$$

由于截面 a 和 b 之间距离确定,即 $L_a - L_b = L$, 设 $\Delta L_a - \Delta L_b = \Delta L$, 则式(7)为:

$$\varepsilon = \frac{2Ld}{IE} F + \frac{2\Delta L d}{IE} F = \varepsilon' + \Delta \varepsilon' \quad (8)$$

其中 ΔL 是 a 和 b 截面在水平方向上的变形值之差,随着垂向力 F 及轴向偏载距离 L_i 的增大而增大,因此传感器输出应变代数和 ε' 关于物料重力 F 的多项式函数产生非线性项 $\Delta\varepsilon'$,现有的传感器弹性体应变拟合函数均忽略了此非线性项,只保留了线性项,即

$$\varepsilon = \frac{2Ld}{IE}F = \varepsilon' \quad (9)$$

则由平行梁式称重传感器大变形所导致的非线性误差为:

$$e = \frac{\Delta\varepsilon'}{\varepsilon'} = \frac{\Delta L}{L} \quad (10)$$

2 称重传感器弹性体有限元分析

利用有限元分析软件 Ansys 进行实体建模,其材料选用 LY12 铝合金材料,其力学性能: $E=70 \text{ GPa}$, $\delta_s=325 \text{ MPa}$, $\mu=0.3$,密度为 2700 kg/m^3 。

- 1) 弹性体采用带大变形分析功能的 Solid92 实体单元。
- 2) 网格划分。采用自动网格划分,其模型见图 4。
- 3) 边界条件。在有限元建模时将左端面螺栓安装孔简化为固定端约束。
- 4) 载荷。在模型右端面加载垂向载荷 F 与偏载转矩 M 。

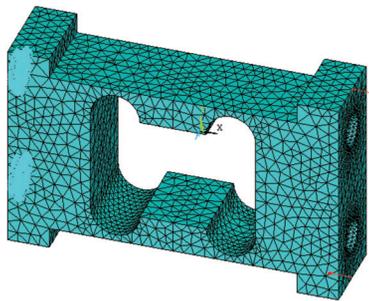


图4 平行梁式称重传感器有限元模型
Fig.4 Finite element model of parallel girder load sensor

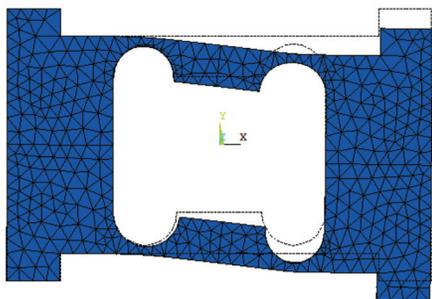


图5 称重传感器弹性体大变形
Fig.5 Large deformation of load sensor elastomer

3 有限元结果分析

称重传感器的量程为 $0.01\sim 3 \text{ kg}$,对称重传感器弹性体分别加载如表 1 所示载荷进行有限元分析计算,得出在忽略称重传感器弹性体大变形致非线性项时,各贴片区在不同载荷作用下的应变 ε_i 及输出应变代数和 ε' 。

表 1 各贴片区应变
Tab.1 Strain of different sensor patch ($\times 10^{-6}$)

| F/N | ε_1 | ε_2 | ε_3 | ε_4 | ε' |
|------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|
| 1e-6 | 0.214 88e-4 | -0.102 64e-4 | -0.122 36e-4 | 0.102 36e-4 | 0.452 24e-4 |
| 2 | 24.975 | -20.527 | -24.471 | 20.472 | 90.445 |
| 5 | 62.439 | -51.318 | -61.178 | 51.181 | 226.12 |
| 9.5 | 118.63 | -97.504 | -116.24 | 97.244 | 429.62 |
| 12.5 | 156.10 | -128.29 | -152.94 | 127.95 | 565.28 |
| 14 | 174.83 | -143.69 | -171.30 | 143.31 | 633.13 |
| 17.5 | 218.51 | -179.61 | -214.12 | 179.13 | 791.40 |
| 21.5 | 268.49 | -220.67 | -263.06 | 220.08 | 972.30 |
| 26 | 324.68 | -266.85 | -318.12 | 266.14 | 1175.79 |
| 30 | 374.63 | -307.91 | -367.07 | 307.09 | 1356.70 |

各贴片区在不同载荷作用下的轴向变形量 ΔL_i , 及截面 a 和 b 间轴向变形量 ΔL 见表 2。

表 2 各贴片区轴向变形量 ΔL
Tab.2 Axial deformation of different sensor patch

| F/N | ΔL_1 | ΔL_2 | ΔL_3 | ΔL_4 | ΔL |
|------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| 1e-6 | 0.148 15e-9 | 0.231 47e-9 | -0.148 58e-9 | -0.232 29e-9 | 0.380 05e-9 |
| 2 | 0.296 31e-3 | 0.462 94e-3 | -0.297 16e-3 | -0.464 58e-3 | 0.760 10e-3 |
| 5 | 0.740 77e-3 | 0.115 73e-2 | -0.742 89e-3 | -0.116 15e-2 | 0.190 02e-2 |
| 9.5 | 0.140 75e-2 | 0.219 89e-2 | -0.141 15e-2 | -0.220 68e-2 | 0.361 04e-2 |
| 12.5 | 0.185 19e-2 | 0.289 33e-2 | -0.185 72e-2 | -0.290 36e-2 | 0.475 05e-2 |
| 14 | 0.281 49e-2 | 0.324 05e-2 | -0.208 01e-2 | -0.325 21e-2 | 0.532 06e-2 |
| 17.5 | 0.259 27e-2 | 0.405 07e-2 | -0.260 01e-2 | -0.406 51e-2 | 0.665 08e-2 |
| 21.5 | 0.318 53e-2 | 0.497 66e-2 | -0.319 44e-2 | -0.499 43e-2 | 0.817 10e-2 |
| 26 | 0.385 20e-2 | 0.601 82e-2 | -0.386 30e-2 | -0.603 96e-2 | 0.988 12e-2 |
| 30 | 0.444 46e-2 | 0.694 40e-2 | -0.445 73e-2 | -0.696 87e-2 | 0.114 01e-1 |

当轴向偏载距离 $L=22 \text{ mm}$ 时,由式(10)可求得称重传感器弹性体贴片区输出应变和大变形致非线性项与加载重力的关系,见图 6,随着加载重量 F 的增大,非线性增加,由此导致的贴片区输出应变非线性误差也不断增加。

贴片区输出应变大变形致相对误差见图 7,随加

载质量的不断增加,非线性误差不断增大,在称量3 kg物料重量时,其相对误差达到0.05%,对于市售常规平行梁式称重传感器,其综合误差约为0.02,因而大变形致非线性误差不可忽略。

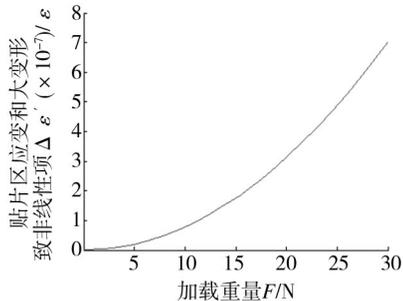


图6 贴片区输出应变大变形致非线性项

Fig.6 Nonlinear output strain caused by large deformation in sensor patch

4 大变形致非线性误差补偿

由图7可知,弹性体贴片区输出应变大变形致相对误差呈现良好的线性性质,因此可将其拟合为一个一次函数,将其补偿在弹性体贴片区输出应变上。利用最小二乘法在Matlab软件中拟合出,相对于此种型号称重传感器的大变形致非线性相对误差函数为^[14-15]:

$$e = 1.7275 \times 10^{-5}F - 1.0373 \times 10^{-9}$$

则补偿后的弹性体贴片区输出应变为:

$$\varepsilon = (1+e) \varepsilon'$$

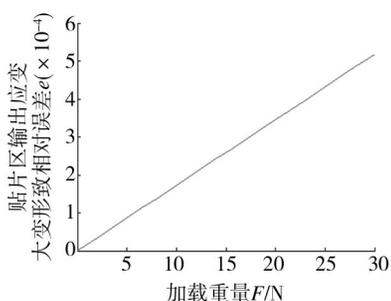


图7 贴片区输出应变大变形致相对误差e

Fig.7 The relative error caused by large deformation in sensor patch

补偿结果见图8,将称重传感器弹性体贴片区输出应变大变形致非线性误差进行补偿,在0~3 kg量程内,补偿了最高0.05%的相对误差,从弹性体结构致误差方向进一步减小了应变输出误差,提高了平行梁式称重传感器的精度。

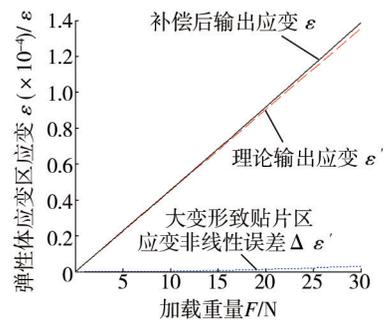


图8 称重传感器贴片区大变形致非线性误差补偿

Fig.8 Nonlinear error compensation for load sensor patch strain caused by large deformation

5 结语

称重传感器受组合秤安装位置的限制,产生了轴向偏载,结合弹性体本身结构特性的影响,其输入输出成非线性关系,从而影响了组合称重系统的精度。利用有限元方法对弹性体大变形致贴片区输出应变非线性误差进行了量化分析,得出了在0~3 kg量程内的弹性体大变形致贴片区非线性相对误差。结果表明随着称重物料质量的不断增加,其大变形致非线性误差相应增加,量程内相对误差最高达0.05%。结合误差曲线特性对弹性体贴片区输出应变进行补偿,得出了该型号的补偿结果公式,进一步提高了组合称重系统的精度。

参考文献:

- [1] 陈羽锋,吕浩杰,胡国清,等. 组合秤组合计算的研究与仿真[J]. 包装工程, 2009, 30(12): 74—76.
CHEN Yu-feng, LYU Hao-jie, HU Guo-qing, et al. Research and Simulation of Combinatorial Calculation of Combined Balance[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(12): 74—76.
- [2] 袁梦,刘萍,余勃,等. 组合秤包装生产线分布式监控系统的软件设计[J]. 包装工程, 2009, 30(11): 10—12.
YUAN Meng, LIU Ping, SHE Bo, et al. Software Design of Distributed Monitoring and Control System in Combination Balance Package Production Line[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(11): 10—12.
- [3] 蒋焕新,赵琳. 组合称量技术的研究[J]. 包装工程, 2005, 26(2): 66—67.
JIANG Huan-xin, ZHAO Lin. Research on the Combinatorial Weighing Technology[J]. Packaging Engineering, 2005, 26(2): 66—67.
- [4] 余勃,宋迎法. 组合秤包装机分布式控制系统的总体设计

(下转第115页)

- LIU Xiao-li. Ink Presetting Technology Based on TIFF File [D]. Nanchang: Nanchang University, 2011: 12—15.
- [9] MINU S, SHETTY Amba. A Comparative Study of Image Change Detection Algorithms in MATLAB[J]. Aquatic Procedia, 2015(4): 1366—1373.
- [10] 叶微微. JDF 数字化流程中油墨预置技术的研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2008: 31—39.
- YE Wei-wei. Research of Ink Presetting Based on JDF Digital Work Flow[J]. Xi' an: Xi' an University of Technology, 2008: 31—39.
- [11] 余节约, 田培娟. 包装印刷 1000 问[M]. 北京: 印刷工业出版社, 2007.
- YU Jie-yue, TIAN Pei-juan. Packaging and Printing 1000[M]. Beijing: Printing Industry Press, 2007.
- [12] 郑允, 吕新广, 宋兵. 包装印刷墨层厚度与密度的关系[J]. 包装工程, 2004, 25(3): 161—164.
- ZHENG Yun, LYU Xin-guang, SONG Bing. Study on the Relationship Between Printing Inking Thickness and Density [J]. Packaging Engineering, 2004, 25(3): 161—164.
- [13] 王学美, 唐万有, 陈婧. 墨层厚度与实地密度关系的研究[J]. 包装工程, 2009, 30(3): 93—95.
- WANG Xue-mei, TANG Wan-you, CHEN Jing. Study of the Relationship Between Printing Inking Thickness and Density [J]. Packaging Engineering, 2009, 30(3): 93—95.
- [14] 庞也驰, 欧阳芸. 平版胶印中墨层厚度与复频谱饱和度的关系[J]. 中国印刷与包装研究, 2014(6): 69—74.
- PANG Ye-chi, OUYANG Yun. Relationship between Ink Thickness and Complex Frequency Spectrum Saturation in Offset Printing[J]. China Printing and Packaging Study, 2014 (6): 69—74.
- [15] CAMACHO J, PREZ-VILLEGAS A, RODRIGUEZ-GMEZ R A, et al. Multivariate Exploratory Data Analysis (MEDA) Toolbox for Matlab[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2015, 143: 49—57.

(上接第 106 页)

- [J]. 包装工程, 2008, 25(6): 29—41.
- SHE Bo, SONG Ying-fa. Combination Weigher Packing Machine Overall Design of Distributed Control System[J]. Packaging Engineering, 2008, 25(6): 29—41.
- [5] 杨进宝, 汪鲁才. 称重传感器非线性误差的 RBFNN 补偿[J]. 仪表技术与传感器, 2010(6): 3—5.
- YANG Jin-bao, WANG Lu-cai. Nonlinear Error Compensation for Load Cell Based on RBFNN [J]. Instrument Technique and Sensor, 2010(6): 3—5.
- [6] 杨进宝, 汪鲁才. 称重传感器非线性误差自适应补偿方法[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(16): 242—245.
- YANG Jin-bao, WANG Lu-cai. Method for Adaptive Compensation of Load Cell's Nonlinear Error[J]. Computer Engineering and Application, 2011, 47(16): 242—245.
- [7] LAFFRANCHI M, TSAGARAKIS N, CALDWELL D G. A Variable Physical Damping Actuator (VPDA) for Compliant Robotic Joints[C]// 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Anchorage, 2010: 1668—1674.
- [8] 谢永华, 孟凡虎. 双孔平行梁式称重传感器非线性校正研究[J]. 现代科学仪器, 2010(6): 64—70.
- XIE Yong-hua, MENG Fan-hu. Nonlinear Correction Study of Double Parallel Beam Weighing Transducer[J]. Modern Scientific Instruments, 2010(6): 64—70.
- [9] TOVEY F M. Effects of Overload on Load Cell Performance [J]. Experimental Techniques, 1981, 5(3): 8—9.
- [10] 李巨韬, 郭伟, 王建. 平行梁式电容传感器极板耦合角位移计算和分析[J]. 传感技术学报, 2013, 26(4): 492—497.
- LI Ju-tao, GUO Wei, WANG Jian. Calculation and Analysis of Capacitive Sensor Plate Coupling Angular Displacement of Parallel Beam[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2013, 26(4): 492—497.
- [11] KIM Moojin, MOON Wonkyu. A New Linear Encoder-Like Capacitive Displacement Sensor[J]. Measurement, 2006(39): 481—489.
- [12] FRAGIACOMO G, ANSBAEK T, PEDERSEN T, et al. Analysis of Small Deflection Touch Mode Behavior in Capacitive Pressure Sensors[J]. Sensors and Actuators, 2010 (161): 114—119.
- [13] KIM M, MOON W. A New Linear Encoder-Like Capacitive Displacement Sensor[J]. Measurement, 2006(39): 481—489.
- [14] 钟俏林, 蒋智庆. 基于最小二乘支持向量机的矿用振弦式称重传感器非线性校正[J]. 矿山机械, 2010, 38(1): 52—54.
- ZHONG Qiao-lin, JIANG Zhi-qing. Nonlinear Correction of Mine-used Vibro-string Transducers for Dynamic Weighting Based on Least Square Support Vector Machine[J]. Mining Machinery, 2010, 38(1): 52—54.
- [15] 徐向艺, 陈秋红. 贝叶斯推理模型耦合非平稳边缘保持先验的图像模糊消除[J]. 包装工程, 2014, 35(19): 98—102.
- XU Xiang-yi, CHEN Qiu-hong. Image Deploring Based on Bayesian Model Integration with Non-Stationary Edge Preserving Priors[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(19): 98—102.